

R-02-31

Bestämning av grundvattenflödet med utspädningsteknik

Modifiering av utrustning och kompletterande fältmätningar

Erik Gustafsson, Geosigma AB

December 2002

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

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

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



Bestämning av grundvattenflödet med utspädningsteknik

Modifiering av utrustning och kompletterande fältmätningar

Erik Gustafsson, Geosigma AB

December 2002

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

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

Förord

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har under lång tid utvecklat utspädningstekniken för bestämning av grundvattenflöde i kristallint berg, företrädesvis i sprickor och sprickzoner. Utrustningar har tagits fram för mätningar i borrhål borrade från markytan och i borrhål från tunnlar, och i båda fallen ner till stort djup. I syfte att lyfta arbetsmaterial om utspädningstekniken till en rapportnivå som är refererbar har föreliggande rapport, som tidigare tryckts som en arbetsrapport (SKB Arbetsrapport AR-86-21), kvalitetsgranskats och därefter uppdaterats till en rapport i SKB:s R-serie.

Mansueto Morosini
Svensk Kärnbränslehantering AB

Anm: Division Ingenjörsgologi hos Sveriges Geologiska AB, som gjort den ursprungliga rapporten ingår sedan 1991 i Geosigma AB.

Sammanfattning

Syftet med föreliggande arbete har huvudsakligen varit att inom ramen för SKB-programmet modifiera och förbättra en utrustning för in-situ bestämning av grundvattenflödet med utspädningsteknik i borrhål. Den så kallade utspädningssonden är en prototyp som utvecklats vid Sveriges Geologiska AB (SGAB) och den har testats i fem utspädningsmätningar i hammarborrhål inom Finnsjöns undersökningsområde.

I rapporten presenteras den modifierade sondens prestanda avseende bl a mätgränser och mättider samt dess funktion och möjligheter till ytterligare förbättringar. Resultaten av fältmätningarna och en jämförelse med hydraultester redovisas också.

Data över utrustningen och de viktigaste resultaten och slutsatserna av föreliggande arbete kan sammanfattas i följande punkter:

- Vid ett bestämt grundvattenflöde är utspädningshastigheten omvänt proportionell mot vattenvolymen i mätsektionen. Denna volym har därför minimerats med dummykroppar för att minska den nödvändiga tiden för en korrekt mätning av utspädningen.
- Med utbytbara manschetter och dummykroppar är utspädningssonden konstruerad för mätningar ned till ett djup motsvarande 500 m vattenpelare i borrhål med 76 mm diameter och större.
- Mätsektionens längd bestäms av dummykropparna och är valfri inom intervallet 0,30–20,00 m.
- De manschetter och dummykroppar som tillverkades för fältmätningarna är avsedda för borrhål med 95–125 mm diameter.
- Minsta mätbara flödes hastigheten bestäms av förhållandet (kvoten) mellan molekylär diffusion av spårämnet in i sprickorna och advektion (grundvattentransport) samt kravet på noggrannhet i mätningen.
- Beroende på om felet önskas försumbart, dvs mindre än 1 % eller om ett fel på 10 % accepteras är det minsta mätbara flödet 100 eller 10 gånger högre än den molekylära diffusions hastigheten ut från mätsektionen. Om ett fel på upp till 10 % accepteras är den minsta mätbara flödes hastigheten i storleksordningen $4 \text{ E-11} - 6 \text{ E-12} \text{ m/s}$ i sprickig granit.
- Den nödvändiga tiden för att mäta utspädningen ökar med minskande grundvattenflöde. Mätning av låga grundvattenflöden är därför tidskrävande. Det faktum att mätdata lagras i ett datoriserat system innebär att det endast krävs personal vid etablering och avveckling samt viss tillsyn och det gör att metoden ändå är ekonomisk. Att mäta grundvattenflödet genom en mätsektion med hydrauliska konduktiviteten $K = 1 \text{ E-8}$ vid hydrauliska gradienten $I = 0,01$ tar 30–50 dygn i anspråk i ett 110 mm diameter borrhål. I ett 56 mm diameter borrhål är mättiden hälften.
- Vid konverteringen av det uppmätta grundvattenflödet genom mätsektionen till grundvattenflödet i sprickzonen måste ett antagande göras om storleken på kontraktionsfaktorn, α , som anger till vilken grad grundvattenflödet konvergerar och divergerar i närheten av borrhålet. I det ideala fallet är $\alpha = 2$. På grund av störningar kommer α att variera inom uppskattningsvis $\alpha = 2 \pm 1,5$, vilket ger en noggrannhet i bestämningen av det ostörda grundvattenflödet med $\pm 75 \%$.

- Den optiska mätningen in-situ av spårämneskoncentrationen i mätsektionen störs, speciellt den första tiden efter etableringen av sedimenterbara partiklar som lossnat från borrhålsväggen vid nedsänkningen av sonden. Bakgrundstransmissionen, T_b , är ett mått på mängden störande partiklar i mätsektionen och ingår som en konstant i transmissionsmätarens kalibreringsekvation. Genom att vänta med spårämnesinjiceringen till dess ändringen i T_b understiger 7,5 E-3 % per timme blir störningen från sedimenterbara partiklar försumbar.
- Utöver utspädningen av spårämne och borrhålsdiametern i mätsektionen mäts omgivningsfaktorerna piezometriskt tryck, temperatur och turbiditet i mätsektionen. Utrustningen inkluderar också en anordning för vatteninjektion i mätsektionen, vilket gör det möjligt att före eller efter en utspädningsmätning mäta/kontrollera hydrauliska konduktiviteten i mätsektionen utan att behöva flytta utrustningen.
- Fältmätningarna genomfördes med lyckat resultat och utan större problem i 2 m mätsektioner med hydrauliska konduktiviteten i området $K = E-7 - E-8$ m/s. De uppmätta flödes hastigheterna låg inom intervallet 1 E-8 till 1 E-9 m/s. God korrelation erhöles mellan ändringar i grundvattenflöde och uppmätta ändringar i den hydrauliska gradienten inom försöksområdet. Indirekta jämförelser med hydraultester uppvisar också små differenser mellan metoderna och inom metodernas felmarginaler.
- De goda resultaten från fältmätningarna och utrustningens mätnoggrannhet visar att utspädningsmetoden är en väl användbar teknik för in-situ bestämning av grundvattenflöden under naturlig gradient och i den naturliga gradientens riktning.

Innehåll

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Inledning | 9 |
| 2 | Modifiering av utrustningen | 11 |
| 2.1 | Allmänt, konstruktion och funktion | 11 |
| 2.1.1 | Borrhålsenheter | 12 |
| 2.1.2 | Markenheter | 12 |
| 2.1.3 | Mätning av kompletterande parametrar | 12 |
| 2.2 | Manöverenhet | 13 |
| 2.3 | Cirkulationsenhet | 14 |
| 2.3.1 | Funktionsprincip | 14 |
| 2.3.2 | Modifieringar | 16 |
| 2.4 | Transmissionsmätare | 17 |
| 2.4.1 | Funktionsprincip | 18 |
| 2.4.2 | Modifieringar | 19 |
| 2.5 | Manschettsystem | 20 |
| 3 | Teori | 23 |
| 3.1 | Grundläggande ekvationer, flöde-hastighet | 23 |
| 3.2 | Mätgränser | 27 |
| 3.2.1 | Minsta mätbara flöde | 27 |
| 3.2.2 | Mättid | 29 |
| 4 | Fältförsök | 31 |
| 4.1 | Försöksområde | 31 |
| 4.1.1 | Allmän beskrivning, geologi och topografi | 31 |
| 4.1.2 | Geohydrologi | 33 |
| 4.2 | Borrhål och mätsektioner | 34 |
| 4.3 | Utspädningsmätningar i borrhålen G8 och G9 | 36 |
| 4.3.1 | Utspädningsmätning 1 | 38 |
| 4.3.2 | Utspädningsmätning 2 | 39 |
| 4.3.3 | Utspädningsmätning 3 | 39 |
| 4.3.4 | Utspädningsmätning 3B | 40 |
| 4.3.5 | Utspädningsmätning 4 | 40 |
| 4.4 | Utvärdering och resultat | 40 |
| 4.4.1 | Jämförelse mellan utspädningsmätningar och hydraultester | 41 |
| 5 | Feldiskussion | 43 |
| 5.1 | Allmänt | 43 |
| 5.2 | Känslighetsanalys av olika faktorer | 43 |

| | | |
|----------|--|----|
| 6 | Diskussion och slutsatser | 49 |
| 6.1 | Utrustning | 49 |
| 6.1.1 | Manschettssystem | 49 |
| 6.1.2 | Transmissionsmätare och cirkulationsenhet | 50 |
| 6.2 | Utvärdering | 50 |
| 6.2.1 | Utrustning och spårämne | 50 |
| 6.2.2 | Mätteknik | 51 |
| 6.2.3 | Konvertering av uppmätt flöde till grundvattenflöde i sprickzonen | 51 |
| | Använda beteckningar | 53 |
| | Referenser | 55 |
| | Appendix 1 Instrumentspecifikation | 57 |
| | Appendix 2 Beräkning av kontraktionsfaktorn | 61 |

1 Inledning

I kristallin berggrund är grundvattenflödet genom det intakta berget mycket lågt. Grundvattenflödet är huvudsakligen beroende av och koncentrerat till förekommande spricksystem och således representerar sprickor och sprickzoner de primära flödesvägarna för ämnen lösta i grundvattnet. Kvantifiering av grundvattenflödet i sprickzoner är därför av stor vikt för beräkning av radionuklidens möjlighet att transporteras från ett avfallslager till biosfären.

Utspädningstekniken utgör en möjlighet att direkt bestämma grundvattenflödet lokalt i en sprickzon under naturlig hydraulisk gradient och i den naturliga gradientens riktning. Metoden bygger på att ett spårämne injiceras i en borrhålssektion, som avtätats med manschetter och som innesluter en sprickzon. I borrhålssektionen är spårämnet alltid fullständigt omblandat och koncentrationen mäts som en funktion av tid. Spårämnet utspäds då grundvatten från sprickzonen flödar genom borrhålet. Denna utspädning är proportionell mot vattenflödet genom borrhålssektionen och således även mot grundvattenflödet i sprickzonen.

I ett tidigare arbete /Gustafsson, 1983/ studerades den teoretiska möjligheten att beräkna grundvattenflödet i sprickzoner med utspädningsteknik i borrhål. En utrustning för detta ändamål, s k utspädningssond, konstruerades och testades under kontrollerade förhållanden i laboratorie- och fältförsök. Försöken visade att utspädningstekniken gav en god bestämning av grundvattenflödet. Föreliggande arbete utgör en fortsättning i utvecklingen av utspädningsteknik i borrhål och har huvudsakligen bestått i modifiering och förbättring av utspädningssonden samt kompletterande fältmätningar och utveckling av förfinad utvärderingsmetodik.

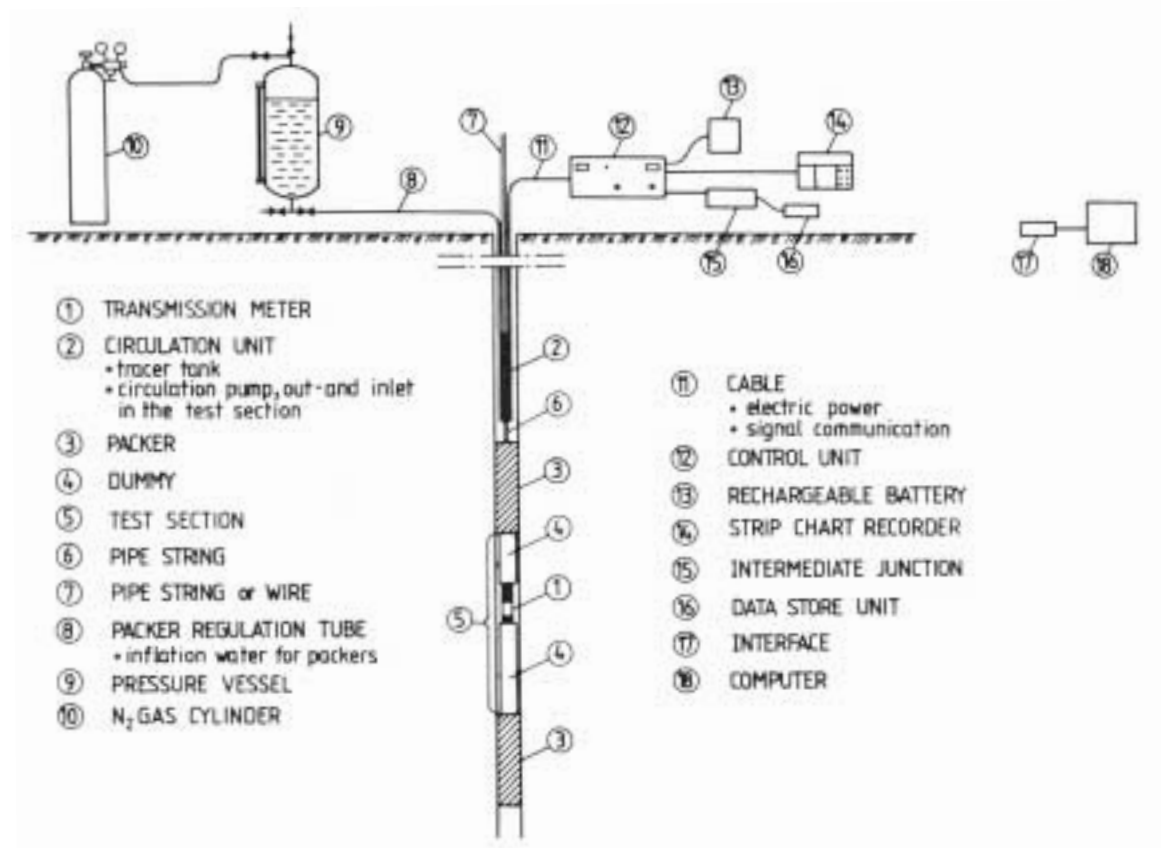
2 Modifiering av utrustningen

2.1 Allmänt, konstruktion och funktion

Erfarenheterna från metodstudien och de tidigare fältförsöken visade att utspädningssonden kunde förbättras på en rad punkter som alla kan sammanföras i två huvudmål:

- Minskning av den totala tiden för genomförande av en utspädningsmätning.
- Förenklat handhavande och ökad driftsäkerhet.

I avsnitten 2.2–2.5 beskrivs modifieringsåtgärderna i varje delenhets av utspädningssonden. Inledningsvis ges här en sammanfattande beskrivning av enheternas inbördes placering samt funktion och konstruktion. Siffror inom parentes hänför sig till figur 2-1. För en utförligare beskrivning och instrumentspecifikation se appendix 1.



Figur 2-1. Översiktsskiss, utspädningssond.

2.1.1 Borrhålsenheter

Mellan manschetter (3), som omsluter den sprickzon som grundvattenflödet skall mätas i, sitter en transmissionsmätare (1) som optiskt mäter koncentrationen av ett färgspårämne. Ovanför övre manschetten är en cirkulationsenhet (2) monterad i ett ytterrör. Ytterröret ersätter motsvarande längd av rörgång eller wire. Cirkulationsenheten innehåller en behållare för spårämneslösning och en cirkulationspump. Pumpens intag och utlopp leds vidare i rör genom övre manschetten och mynnar i mätsektionen (5) mellan manschetterna. Från behållaren injiceras spårämneslösningen utan övertryck in i mätsektionen via en shunt på cirkulationspumpens utloppsrör. Behållaren rymmer tillräckligt med spårämneslösning för att genomföra 3 å 4 utspädningsförsök. Cirkulationspumpen håller spårämnet fullständigt ombländat i mätsektionen, dvs ingen koncentrationsgradient förekommer i mätsektionen. Cirkulationspumpens kapacitet och injicering av spårämne styrs från markytan med manöverenheten (12).

Vid ett bestämt grundvattenflöde är utspädningshastigheten omvänt proportionell mot vattenvolymen i mätsektionen. Därför minimeras denna volym med dummykroppar (4) för att minska den nödvändiga tiden för en korrekt mätning av utspädningen.

2.1.2 Markenheter

Utspädningsenheten styrs med manöverenheten (12) som har följande funktioner:

- strömförsörjning till borrhålsenheterna,
- generering av styripulser till transmissionsmätaren, cirkulationspumpen och spårämnesinjiceringen,
- dataöverföring till extern datalagringsenhet och/eller en skrivare,
- visning av transmissionen, dvs spårämneskoncentrationen, på en display.

Transmission som funktion av tid registreras kontinuerligt med skrivare (14) och/eller punktvis med ett IC-minne (16). IC-minnet har en lagringskapacitet av 500 mätvärden som 16-bit dataord.

Avläsningsintervallet, från 7,5 minuter till 8 timmar, väljs med en omkopplare på mellankopplingen (15).

Utvärderingen av mätdata görs på kontoret med en standard mikrodator av typ ABC-800 (18). IC-minnet kopplas från mellankopplingen (där ett annat IC-minne kan anslutas), tas till kontoret och kopplas till datorn via ett interface (17).

Utspädningsutrustningen drivs med nätspänning 220/240 V AC eller ett uppladdningsbart batteri 24 V DC, 18 Ah. Med det uppladdningsbara batteriet och digital datalagring är drifttiden ca 300 timmar.

2.1.3 Mätning av kompletterande parametrar

För att bestämma grundvattenflödet måste man förutom transmissionen, dvs spårämneskoncentrationen, även veta vattenvolymen i mätsektionen. Speciellt i hammarborrhål kan detta orsaka problem på grund av borrhsteknik och osäkra diameteruppgifter i borrhloggen. Genom att mäta den volym vatten-sprit blandning som åtgår för att expandera manschetterna till ett bestämt arbetstryck är det möjligt att bestämma borrhålsdiametern och därmed vattenvolymen i mätsektionen med stor noggrannhet.

Utöver utspädningen av spårämne och vattenvolymer i mätsektionen mäts följande omgivningsfaktorer i mätsektionen:

- piezometriskt tryck,
- temperatur,
- turbiditet.

Piezometriska trycket i mätsektionen registreras under hela utspädningsförsöket, eftersom en ändring i trycket i sprickigt medium normalt är en indikation på att hydrauliska gradienten, och således grundvattenflödet, har ändrats.

Temperaturgivaren är monterad på transmissionsmätaren (figur 2-5) och har flera användningsområden. Ett är temperaturloggning av borrhålen, där hydrauliskt aktiva sprickzoner eller skikt för utspädningsmätningar kan lokaliseras som temperaturmätning av vattnet i mätsektionen, vilket är nödvändigt om hänsyn skall tas till viskositeten ifall uppmätta grundvattenflöden skall omräknas till hydraulisk konduktivitet. Detta gäller främst vid låga hydrauliska konduktiviteter.

Turbiditeten är ett mått på vattnets grumlighet. När utrustningen sänks i borrhålen kommer suspenderade partiklar, såsom borrhax och utfällningar etc, att höja turbiditeten och störa den optiska mätningen av spårämneskoncentrationen. Spårämnes-cirkulationen under mätningen aktiverar ej sedimenterade partiklar. Därför injiceras spårämnet först när de suspenderade partiklarna har sedimenterat vilket, förutom hög transmission, motsvaras av ett konstant lågt värde på turbiditeten. Detektorn för turbiditetsmätning är inbyggd i transmissionsmätaren, se figur 2-5.

Utspädningsutrustningen inkluderar också ventiler och rör för vatteninjektion vilket gör det möjligt att mäta/kontrollera hydrauliska konduktiviteten i mätsektionen med standardmässig vatteninjektionstest. Testen kan utföras före och/eller efter det att utspädningsmätningen har genomförts och utan att utrustningen behöver tas upp ur borrhålet för exempelvis komplettering.

2.2 Manöverenhet

Cirkulationsenheten och transmissionsmätaren får sin strömförsörjning från manöverenheten som i sin tur drivs med nätspänning 220/240 volt 6A. Då grundidén med utspädningssonden är att skapa en lätt och portabel utrustning för automatiska mätningar är det ett naturligt steg i utvecklingen att göra den oberoende av nätspänning och göra det möjligt med strömförsörjning från batterier.

I den ombyggda manöverenheten är en automatisk batteriladdare inbyggd, vilket innebär att sonden kan matas antingen med batterier eller med nätspänning. Om batterierna är inkopplade vid nätdrift underhållsladdas de från nätströmmen och vid nätavbrott fungerar batterierna som reservkraft. När det åter är spänning i nätet uppladdas batterierna och ställs automatiskt på underhållsladdning när de är fulladdade.

Med två seriekopplade laddningsbara blybatterier av geltyp (12 V, 18 Ah), vikt 7 kg styck, är utspädningsutrustningens driftstid ca 300 timmar om mätdata lagras digitalt.

Modifiering av cirkulationsenhet och transmissionssond har krävt ett ökat antal ledare i signalkabeln. Den har därför bytts från en 7-ledare till en 20-ledare, med plats över för kommande behov av utökad antal funktioner.



Figur 2-2. Cirkulationsenhet med ytterrör.

2.3 Cirkulationsenhet

Cirkulationsenheten är inbyggd i en stålcylander som innehåller en cirkulationspump, spårämnesbehållare och ventiler för spårämnesinjicering, se figur 2-2. Cyindern har yttermåttens längd 650 mm och diameter 70 mm. Den har demonterbara ändstycken och är ihopgängad på mitten för enkel service. Stålcyindern ligger i ett ytterrör, med längd 900 mm och diameter 73,7 mm. Ytterröret ersätter motsvarande längd av rörgång eller wire.

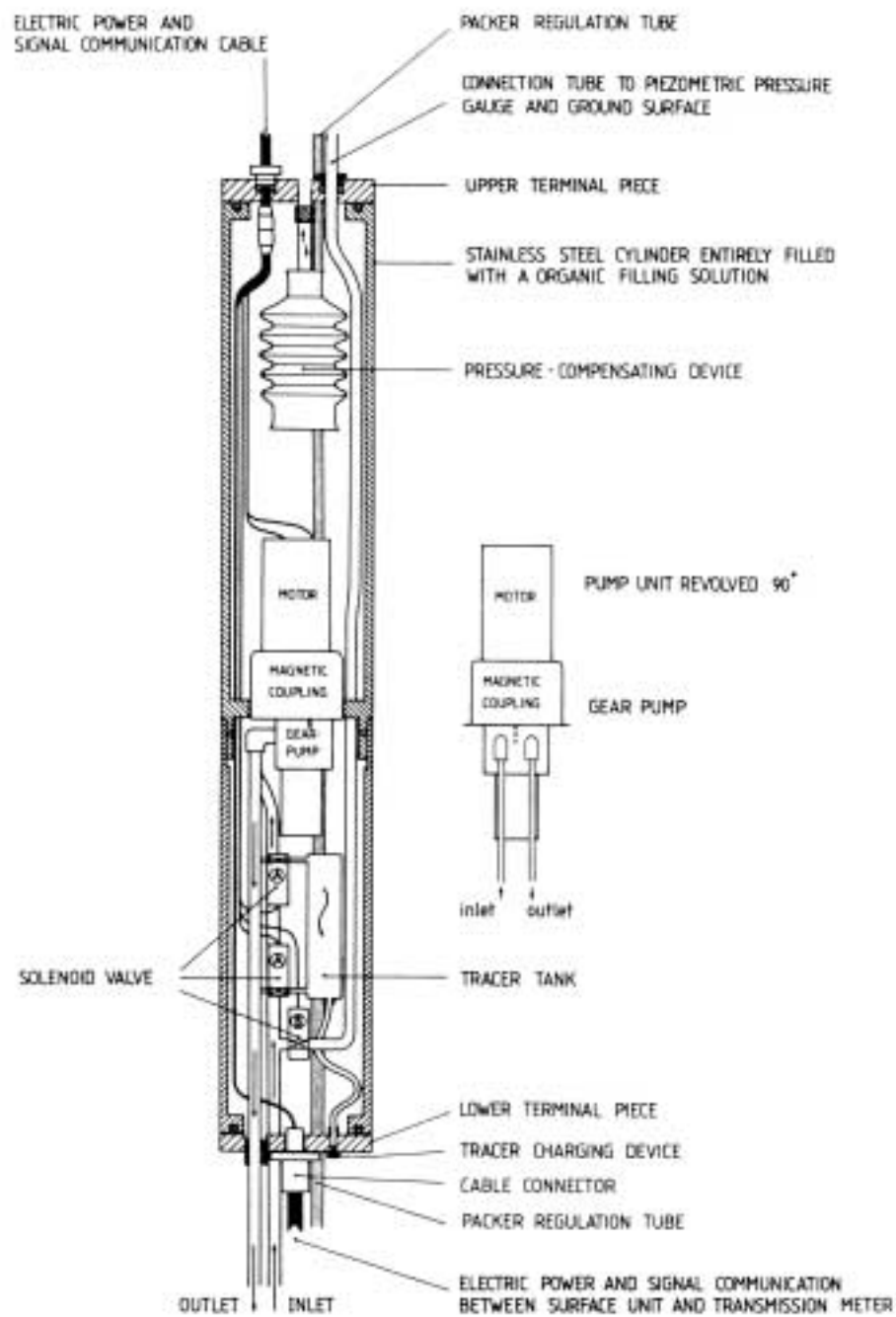
2.3.1 Funktionsprincip

I cylindern finns en magnetdriven cirkulationspump, vars huvudsakliga funktion är att i varje ögonblick hålla homogen spårämneskoncentration i mätsektionen. Pumpens intags- och utloppsrör går igenom nedre ändstycket i vattentäta genomföringar. Intag och utlopp leds vidare i plaströr genom övre manschetten och mynnar i mätsektionen, mellan manschetterna.

Pumpkapaciteten styrs med manöverenheten och kan väljas steglöst mellan 0 och 1 350 ml per minut. Kapaciteten väljs beroende av grundvattenflödet genom mätsektionen.

Injicering av spårämne sker genom att en del av utloppsflödet shuntas genom spårämnesbehållaren när två magnetventiler öppnas, se figur 2-3. Tekniken medför att spårämnet injiceras utan övertryck i mätsektionen, vilket är särskilt väsentligt vid låga grundvattenflöden. Öppnandet av magnetventilerna styrs från manöverenheten. Öppettiden är konstant varför cirka 4 ml (beroende på vald pumpkapacitet) shuntas genom spårämnesbehållaren vid varje injiceringstillfälle. Spårämnesbehållaren rymmer 30 ml. Med lämplig koncentration på spårämneslösningen kan tre till fyra utspädningsförsök utföras innan utrustningen måste lyftas ur borrhålet för påfyllning av spårämne.

Stålcyindern är fylld med en organisk fyllnadsvätska vilket hindrar inläckage av vatten.



Figur 2-3. Principskiss, cirkulationsenbet.

2.3.2 Modifieringar

Generellt har elsystem och komponenter bytts från 12V till 24V DC system. Nyttillverkning av övre ändstycke och modifiering av nedre har varit nödvändigt för det ökade antalet genomföringar som modifieringen inneburit. Ett flertal rör och rörkopplingar har efter laborietester bytts till annat material och fabrikat, med bättre kemisk resistens och mindre inbyggnadsmått.

Magnetventilerna som styr spårämnesinjiceringen, A i figur 2-3, hade i det tidigare utförandet ventilhus i nylon och tätade upp till maximalt 2 bar differenstryck. De har ersatts av ventiler med högre teknisk prestanda. Maximalt differenstryck är numera 4 bar och systemtryck 25 bar. Ventilhuset är av mässing och inre metalldelar av rostfritt stål. Styrelektroniken som reglerar magnetventilernas öppettid har flyttats till manöverenheten för att bereda plats åt en tryckkompenseringsanordning.

Spårämnesbehållaren fylls genom en slang ansluten till en ventil i nedre ändstycket. Tidigare fick cirkulationsenheten demonteras, tömmas på fyllnadsvätska och spårämnesbehållaren fyllas genom att gänga bort dess ena gavel.

För att göra det möjligt att på stora djup använda små och enkla kabel- och rör genomföringar i ändstyckena samt ventiler och pump som endast tål 25 respektive 21 bar systemtryck har den modifierade cirkulationsenheten försetts med en volym- och tryckkompenseringsanordning. En bälg av kloroprenkummi är monterad i stålcyllindern och grundvattnet kan strömma in och ut ur bälgen via ett rör genom övre ändstycket. Bälgen fyller två funktioner:

- Bälgen leder vattentrycket på aktuellt djup in i stålcyllindern vilken är fylld med en organisk fyllnadsvätska som fördelar trycket. Detta innebär att systemtrycket på pump, ventiler och rör endast blir skillnaden mellan trycket i mätsektionen och ovanför, där cirkulationsenheten är placerad.
- Den organiska fyllnadsvätskan som fördelar trycket i stålcyllindern och förhindrar inläckage av vatten har en liten kompressibilitetskoefficient men en större volymutvidgningskoefficient än vatten. Cyllindern rymmer 1 800 ml netto och utan en bälg som tar upp volymminskningen vore det omöjligt att fylla cyllindern vid rumstemperatur och sedan sänka ned den i ett borrhål med grundvattentemperatur på 5–10°C. Bälgen tar också upp fyllnadsvätskans volymutvidgning vid hanteringen av utrustningen utomhus sommardag.

Med en förgrening på inloppsröret till cirkulationspumpen är det möjligt att mäta/kontrollera hydrauliska konduktiviteten i mätsektionen samt bestämma dess piezometriska tryck. Vid mätningen stängs cirkulationspumpen av och magnetventilen B öppnas, se figur 2-3.

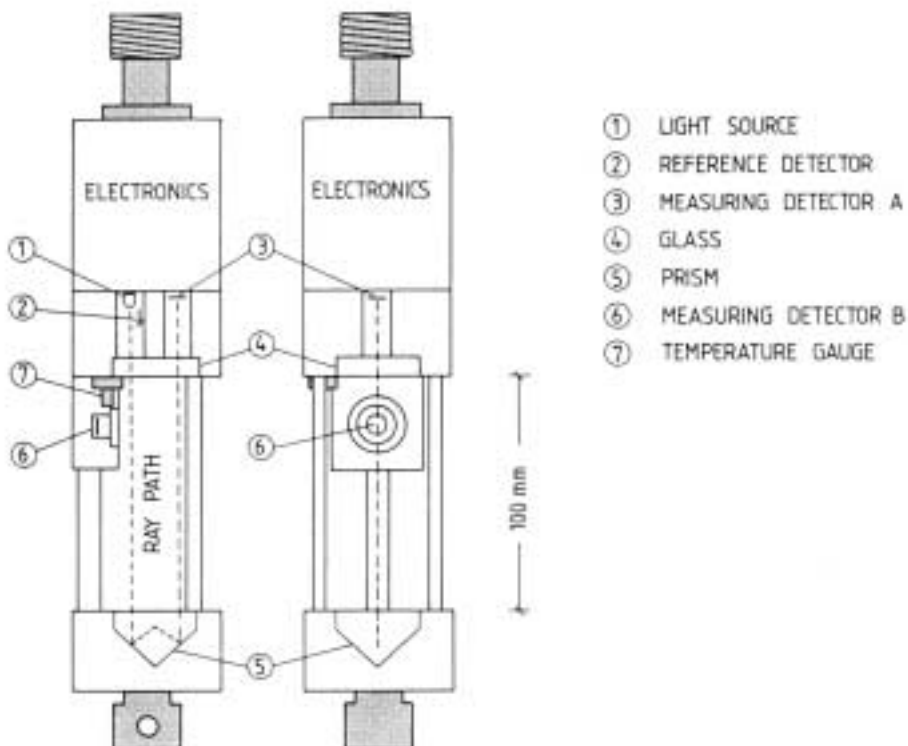
2.4 Transmissionsmätare

Transmissionsmätaren mäter optiskt koncentrationen av spårämne och är en vidareutveckling av ett instrument konstruerat av Edlund Elektronik, /Edlund, 1980/.

Transmissionsmätaren är 245 mm lång och 65 mm i diameter. För att få instrumentet mekaniskt stabilt har ljuskälla och detektor placerats tillsammans med elektroniken i ena änden av instrumentet, se figur 2-4 och 2-5. För att få tillbaka det utsända ljuset till detektorn används ett speciellt prisma (trippel mirror) som har egenskapen att reflekterat ljus alltid är parallellt med inkommande. Med denna konstruktion fås ett kompakt instrument med lång strålgång i vattnet, 200 mm.



Figur 2-4. Transmissionsmätare.



Figur 2-5. Principskiss, transmissionsmätare.

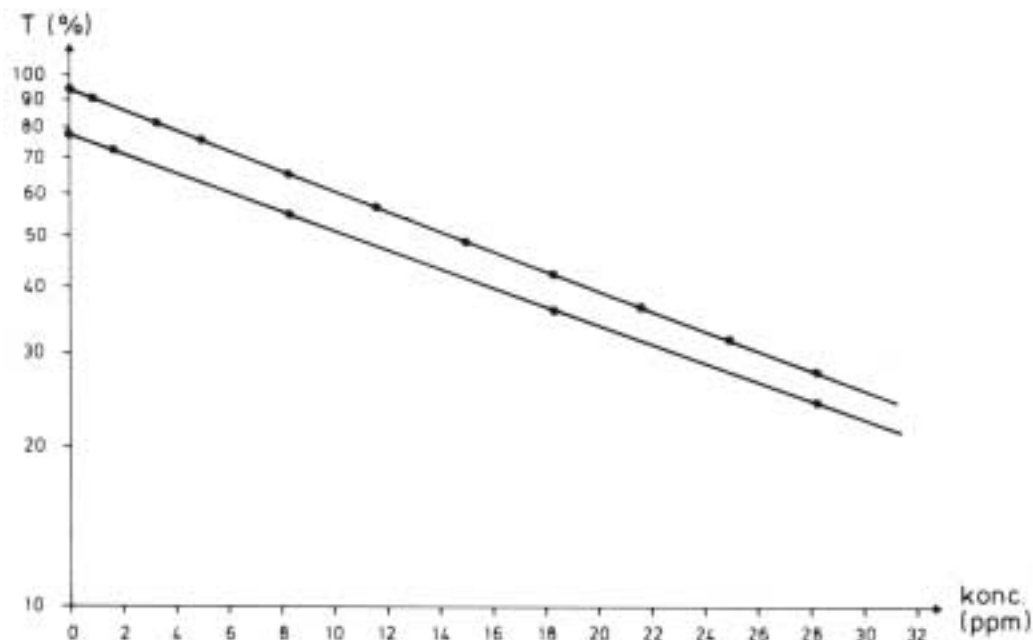
2.4.1 Funktionsprincip

Ljuskällan (1) sänder ut pulsat ljus som passerar genom strålgången i vattnet, reflekteras i prismet (5) och passerar åter genom vattnet till mätdetektorn (3). Referensdetektorn (2) används dels för att kompensera mätvärdet i detektor (3) för omgivningsbelysningen, dels för att justera styrkan på ljuskällan (1) till ett konstant värde över omgivningsbelysningen. För att öka precisionen i systemet mäts inte absolutvärdet hos signalen vid mätdetektorn (3) utan skillnaden mellan det utsända ljuset och det ljus som når mätdetektorn.

Då inget utsänt ljus har förmått passera genom strålgången i vattnet har mätvärdet definitionsmässigt betecknats 0. Då allt utsänt ljus kommit igenom har detta värde betecknats 100. Intervallet har sedan delats i 100 lika delar för att bilda en procentskala. På manöverenhetens display är upplösningen 0,1 % och med IC-minnet fås 0,01 % upplösning av transmissionen, T .

Ett färgspårämne i vattnet absorberar det utsända ljuset och koncentrationen spårämne är proportionell mot logaritmen på transmissionen. För varje spårämne upprättas en individuell kalibreringskurva. Selektiviteten och känsligheten för ett visst spårämne kan ökas genom att välja ljuskälla och detektor med specifika våglängdsområden.

Vid fältmätningar absorberar grundvattnet en del av det utsända ljuset, vilket innebär att transmissionen blir lägre än 100 %. Detta bakgrundsvärde på transmissionen, T_b , varierar mellan olika platser beroende på vattnets kemiska och fysikaliska egenskaper. Kalibreringskurvan för ett spårämne ändras med varierande bakgrundsvärde. Kalibreringskurvor har därför upprättats för vatten med varierande sammansättning. För Blue Dextran 2000 har kalibreringskurvor för grundvatten med högt (94 % T_b) respektive lågt (77 % T_b) bakgrundsvärde plottats i figur 2-6.



Figur 2-6. Kalibreringskurvor, Blue Dextran 2000 i grundvatten, med hög (94 % T_b) respektive låg (77 % T_b) bakgrundstransmission.

Samtliga kurvor konvergerar mot en gemensam skärningspunkt och en allmängiltig ekvation för spårämneskoncentrationen kan ställas upp enligt:

$$C = \frac{a}{b - \ln T_b} (\ln T_t - b) + a \quad (2-1)$$

där C = spårämneskoncentration
T_b = bakgrundstransmission
T_t = total transmission
a = konstant
b = konstant

Minsta mätbara transmissionsändring är 0,01 % T_t, vilket ger en upplösning bättre än 0,01 ppm koncentrationsändring Blue Dextran 2000. För spårämnena Metylenblått och Cr-EDTA är upplösningen ännu högre. Den allmängiltiga kalibreringsekvationen (2-1) kräver att bakgrundstransmissionen, T_b, är högre än 77 %. Kalibreringskurvor för de fall T_b är lägre än 77 % kan upprättas, men upplösningen blir sämre. Vid ett utspädningsförsök erfordrar den sämre upplösningen en hög startkoncentration spårämne i mätsektionen, vilket orsakar problem med densitetseffekter.

Med mätdektorn (6) kan turbiditeten på vattnet i borrhålssektionen mätas. Temperaturgivaren (7) används för att mäta vattentemperaturen under utspädningsförsöken. Med en omkopplare på manöverenheten (figur 2-1) väljs vilken signal som skall visas på displayen och lagras. Transmission, turbiditet eller temperatur.

2.4.2 Modifieringar

Några större funktionsmässiga modifieringar har inte gjorts. Däremot har en del elektronik bytts ut och ändrats för att ge bättre prestanda och stabilare mätvärden. Temperaturgivaren har bytts. Givaren ligger i en kapsel tillverkad av ett stycke rostfritt stål. I det tidigare utförandet hade givarens kapsling delar av plexiglas och tunt rostfritt rör. Givaren reagerade givetvis mycket snabbare på temperaturförändringar, men var ej tillräckligt mekaniskt stabil. Detta fick konsekvenser vid ett åsknedslag då blixten brände hål i kapseln och transmissionsmätaren fylldes med vatten.

Efter ombyggnaden har sonden kalibrerats och spårämnena Eosin-Metylenblau, Uranin och Elbenyl brilliant flavine testats. Eosin-Metylenblau var sorbtionsbenäget på utrustningsdetaljer vid hög koncentration. Efter avslutad injicering kan detta ge en ej önskad desorbition och ursköljning av spårämnet från utrustningen till mätsektionen under ett utspädningsförsök. Uranin och Elbenyl brilliant flavine gav inte tillräckligt bra upplösning med den ljuskälla som sonden för närvarande är utrustad med. Det utsända ljuset absorberas effektivast av blå lösningar som de tidigare testade spårämnena Metylenblått, Cr-EDTA och Blue Dextran 2000, vilka alla kan mätas med en god upplösning. För röda-gröna spårämnen, typ Uranin och Elbenyl b f, bör ljuskälla och detektor bytas ut för att få tillräckligt bra upplösning.

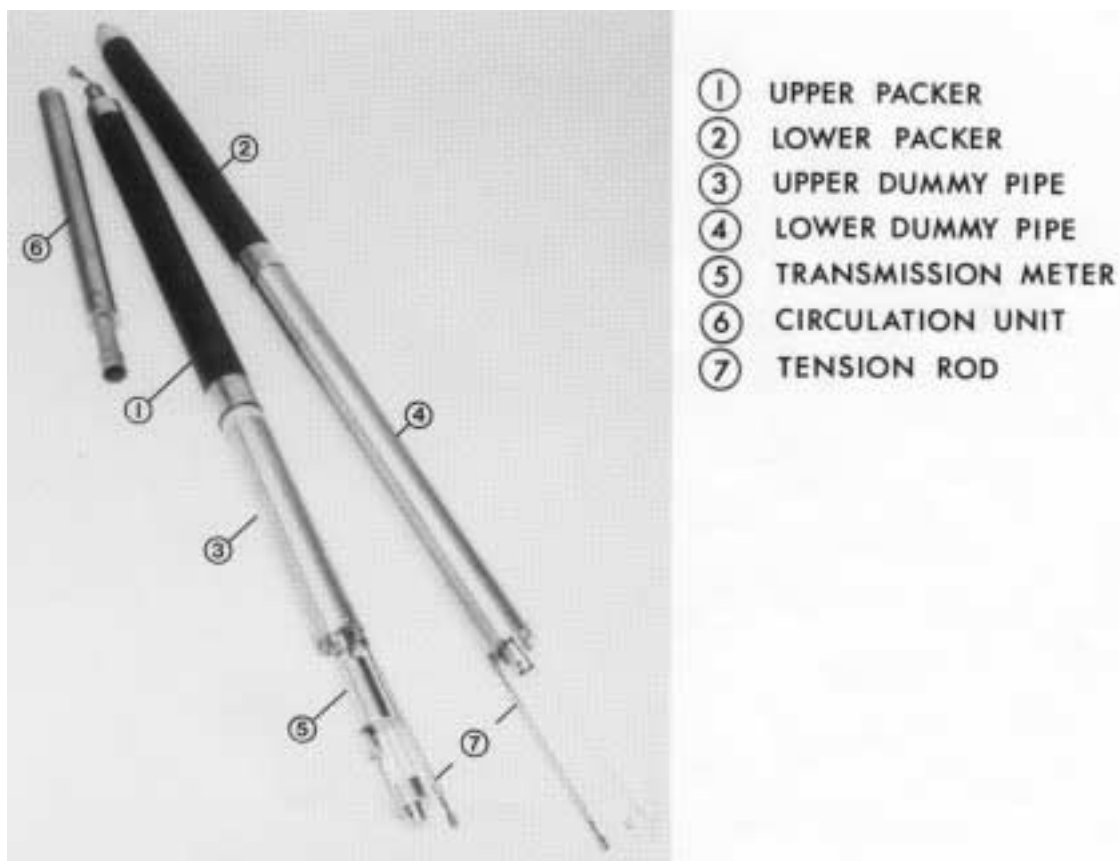
Den förväntade känsligaste delen på transmissionsmätaren, renhållning av optiken (glas och prisma) har inte varit något problem i de hittills genomförda försöken och har därför ej modifierats.

2.5 Manschettsystem

I den beskrivna utrustningen har transmissionsmätarens upplösning drivits mycket långt. Åtgärder som ytterligare förkortar mättiden är endast en optimering av förhållandet mellan borrhålsradie och instrumentradie/dummyradie, där mätsektionens vattenvolym minimeras utan att grundvattenströmningen genom borrhålet störs.

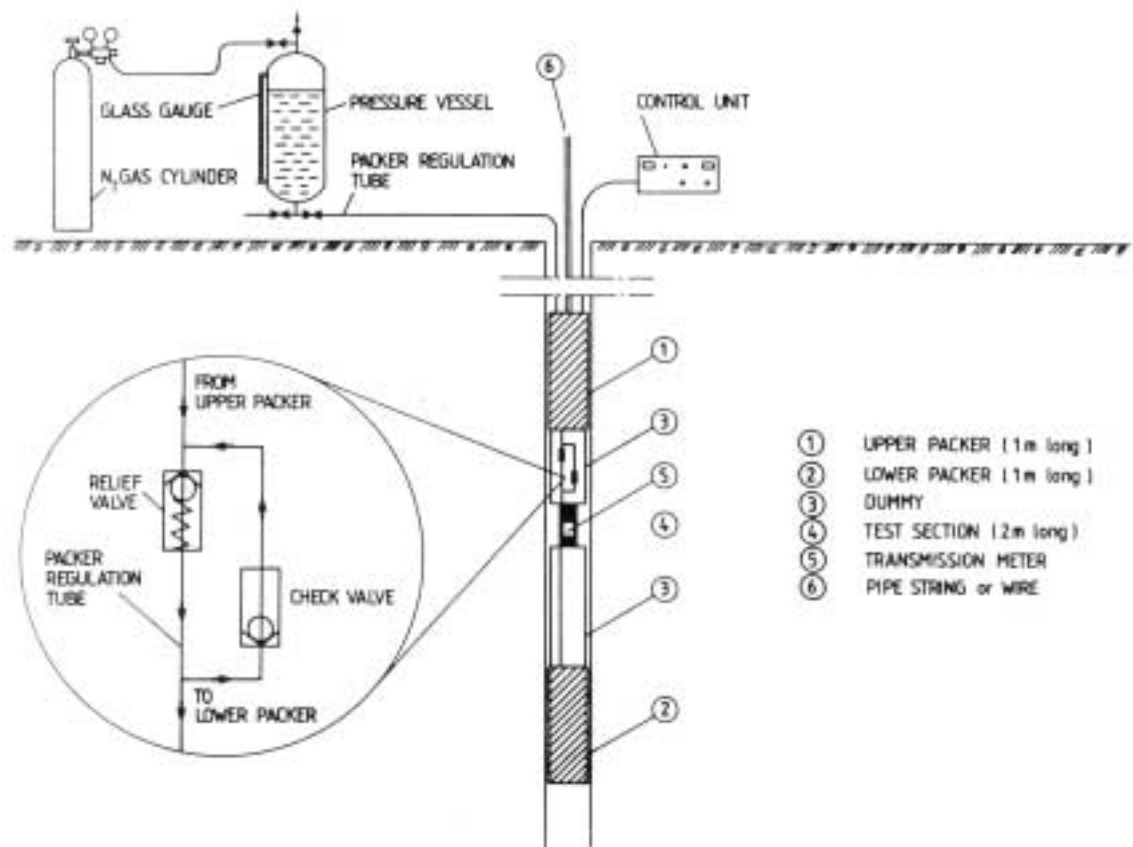
Ett manschettsystem speciellt avpassat för utspädningsmätningar har därför konstruerats. Manschetterna är byggda för 110 mm diameter borrhål och sammanbyggda med utbytbara dummykroppar som minskar mätsektionens vattenvolym och därmed mättiden, se figur 2-1 och 2-7. Mätsektionens längd bestäms av dummykropparna, som kan monteras i valfri längd.

Vid /Forschungsstelle für Radiohydrometrie, 1966/ har man undersökt hur grundvattenströmningen genom ett borrhål påverkas av däri placerad utrustning. Man fann att utrustning med diameter upp till 0,9 gånger borrhålsdiametern ej påverkade grundvattenströmningen. I ett 110 mm diameter borrhål vore således den optimala diametern på dummykropparna 99 mm. Det faktum att hammarborrhål är koniska, från ca 115 mm diameter vid markytan till mindre än 105 mm vid 100 m borrhålsdjup, medförde att dummykropparnas diameter begränsades till 89 mm diameter. Minskningen i mätvolymen är ändå väsentlig jämfört med tidigare manschettsystem, där endast rörgång satt mellan manschetterna. Mätvolymen har minskats 50 % och därmed har mättiden halverats.



Figur 2-7. Demonterad utspädningssond med manschetter, dummykroppar, transmissionsmätare och cirkulationsenhet.

Vid utspädningsmätningar beräknas grundvattenflödet ur utspädning, tid och vattenvolym i mätsektionen dvs volymen i borrhålet mellan manschetterna exklusive volymen av den utrustning som finns däremellan. Borrhålsvolymen i sektionen beräknas ur diameter och sektionens längd. Speciellt i hammarborrhål saknas ofta diameteruppgift dvs krondiametern för visst djup, och även om borrhålsdiametern är känd så medför borrhålsdiametern blir större än krondiametern. Hur mycket större beror på bergets egenskaper. Av den anledningen är det nödvändigt att på något sätt mäta diametern och beräkna borrhålsvolymen i varje utvald borrhålssektion. I den metod som utprovats utnyttjas dubbelmanschetten som avtätar borrhålssektionen även för bestämning av borrhålsdiametern. Metoden innebär att den volym vatten-sprit blandning som åtgår för att expandera dubbelmanschetten är proportionell mot borrhålsdiametern, se figur 2-8.

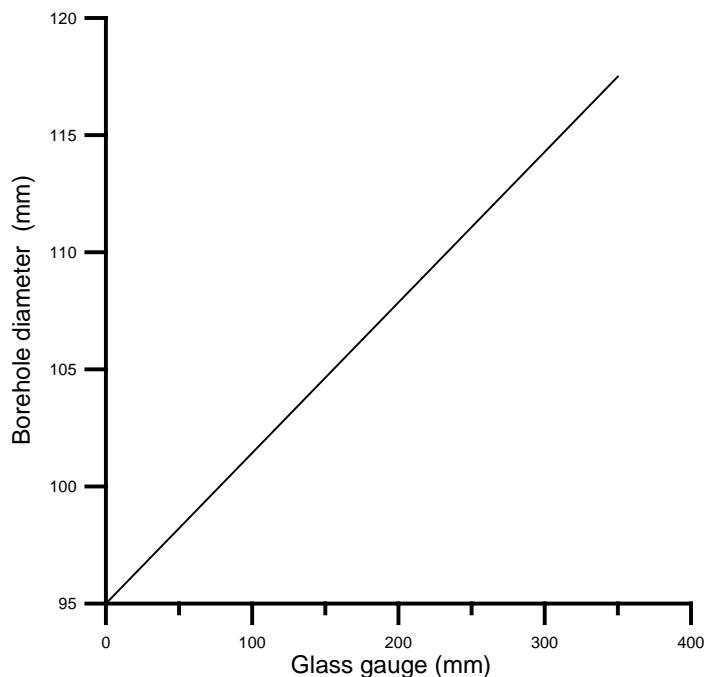


Figur 2-8. Manschettsystem.

Kalibrering sker genom att dubbelmanschetten expanderas till arbetstryck i stålrör med bestämda innerdiametrar (t ex 95, 105, 115 mm) och volymen sprit-vatten blandning som åtgår avläses på tryckkärlets nivårör och plottas mot rördiametern varvid en kalibreringskurva erhålles, se figur 2-9. I fält expanderas dubbelmanschetten till arbetstryck i ett stålrör med bestämd diameter och markering görs på nivåröret i tryckkärlet. Därefter släpps trycket i dubbelmanschetten och den sänks till önskad nivå i borrhålet och expanderas till arbetstryck. Därefter avläses tryckkärlets nivårör och diametern avläses ur kalibreringskurvan. Metoden har använts vid fältförsöken i fyra borrhålssektioner och visat sig fungera bra. Upplösningen var god, 0,1 mm diameter, med de manschetter och det tryckkärl som användes. Metoden ger direkt medeldiametern i borrhålet, som är den diameter som bör användas för volymsberäkning.

De sedimenterbara partiklar som utfällningar, borrhax mm, som alltid skrapas bort från borrhålsväggarna när sonden sänks i borrhålen stör transmissionsmätningen. Innan manschetterna expanderas och spårämne injiceras i mätsektionen mellan manschetterna bör så stor del som möjligt av de sedimenterbara partiklarna ha sjunkit nedanför och förbi mätsektionen. Den nödvändiga väntetiden kan minskas genom att expandera den översta manschetten först. Sedimenterbara partiklar behöver då endast sjunka den sträcka som utgör mätsektionens längd innan det är möjligt att expandera nedre manschetten och injicera spårämne.

Med ett in-line ventilsystem mellan övre och undre manschetten är det möjligt att med endast en tryckslang till manschetterna expandera dessa separat, se figur 2-8. Tryckhållningsventilen öppnar till nedre manschetten först när trycket är större än tätningstrycket för övre manschetten. Tätningstrycket är 1,4 bar och ventilen öppnar vid 2,0 bar. När de sedimenterbara partiklarna sjunkit förbi mätsektionen ökas trycket till arbetstryck 6 bar, tryckhållningsventilerna öppnas och även den undre manschetten expanderas. Backventilen gör det möjligt att släppa trycket samtidigt i båda manschetterna.



Figur 2-9. Borrhålsdiametern som funktion av nivåsenkning i tryckkärlet.

3 Teori

3.1 Grundläggande ekvationer, flöde-hastighet

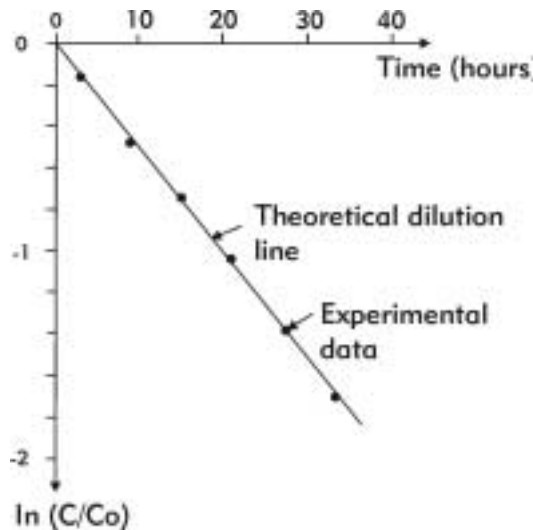
Grundvattenflödet beräknas ur vattenvolymen i mätsektionen och utspädning som funktion av tid enligt:

$$Q_w = -\frac{V}{t} \ln(C/C_o) \quad (3-1)$$

där Q_w = grundvattenflödet genom mätsektionen
 t = tid
 C/C_o = normerad spårämneskoncentration vid tiden t
 V = vattenvolym i mätsektionen

Utspädning som funktion av tid erhålls ur semi-log diagram av normerad spårämneskoncentration mot tid, se figur 3-1. I det ideala fallet är sambandet mellan tid och koncentration linjärt enligt ekvation (3-1).

Vattenvolymen i mätsektionen, V , utgörs av volymen i borrhålssektionen exklusive volymen av däri placerad utrustning. Volymen i borrhålssektionen beräknas ur sektionens längd och diameter. Utspänningsmätningarna har genomförts i hammarborrhål där borrhålsdiametern minskar mot djupet och att korrekt diameter endast kan fås genom mätning i borrhålet. Borrhålsdiametern har därför mätts i sektionen vid varje utspänningsförsök. Mätningen har skett med de manschetter som omsluter mätsektionen. Metoden beskrivs i avsnitt 2.5.



Figur 3-1. Exempel på utspänningsmätning vid grundvattenflödet, Q_w , $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ genom en 1,35 m lång mätsektion i ett 110 mm diameter borrhål.

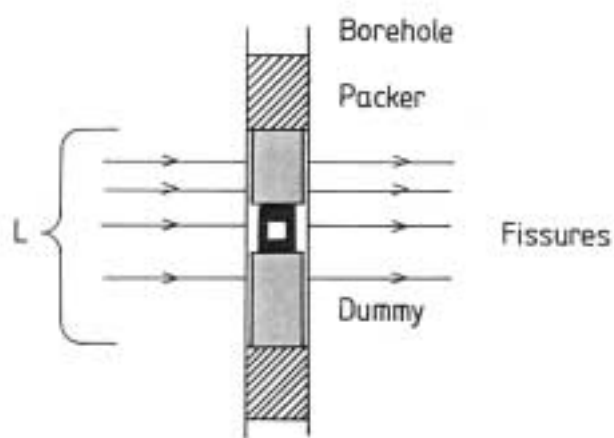
Genom att dividera flödet, Q_w , i ekvation (3-1) med borrhålets tvärsnittsarea mellan manschetterna fås grundvattnets medelhastighet genom mätsektionen, v .

$$v = \frac{Q_w}{2 \cdot r \cdot L} \quad (3-2)$$

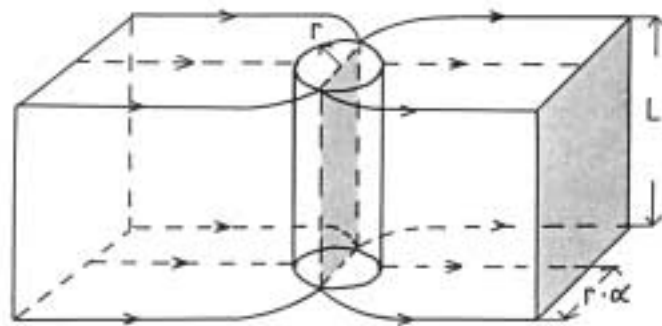
där r = borrhålsradien

L = avståndet mellan manschetterna (mätsektionens längd)

Figur 3-2 illustrerar hur mätsektionen omsluter en sprickzon. Vid fullständig omblandning i mätsektionen fördelas grundvattenflödet i sprickorna till en medelhastighet över mätsektionens tvärsnittsarea. Figur 3-3 visar i plan hur flödeslinjerna i en spricka konvergerar och divergerar runt borrhålet i det ideala fallet.



Figur 3-2. Schematisk skiss visande hur mätsektionen omsluter en sprickzon.



Figur 3-3. Schematisk skiss visande hur flödeslinjerna i ett sprickplan konvergerar och divergerar runt borrhålet i det ideala fallet.

Borrhålet, som är en diskontinuitet i sprickplanen, utgör en störning i flödesfältet, se figur 3-3. Grundvattnets Darcy-hastighet i den ostörda sprickzonen, v_f , definierad som flödet per ytenhet vinkelrätt transportriktningen fås genom att införa en kontraktionsfaktor, α , definierad enligt:

$$v = \alpha \cdot v_f \quad (3-3)$$

Kontraktionsfaktorn, α , beror av störningen i sprickplanen lokalt kring borrhålet. Förhållandet mellan kontraktionsfaktorn och den störda zonens tjocklek samt hydrauliska konduktivitet har beräknats av /Ogilvi, 1958/ och /Halevy et al, 1967/, och ges vid lami-närt flöde i sprickorna av ekvation (3-4).

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r}{r_d}\right)^2 + \frac{K_2}{K_1} \left(1 - \left(\frac{r}{r_d}\right)^2\right)} \quad (3-4)$$

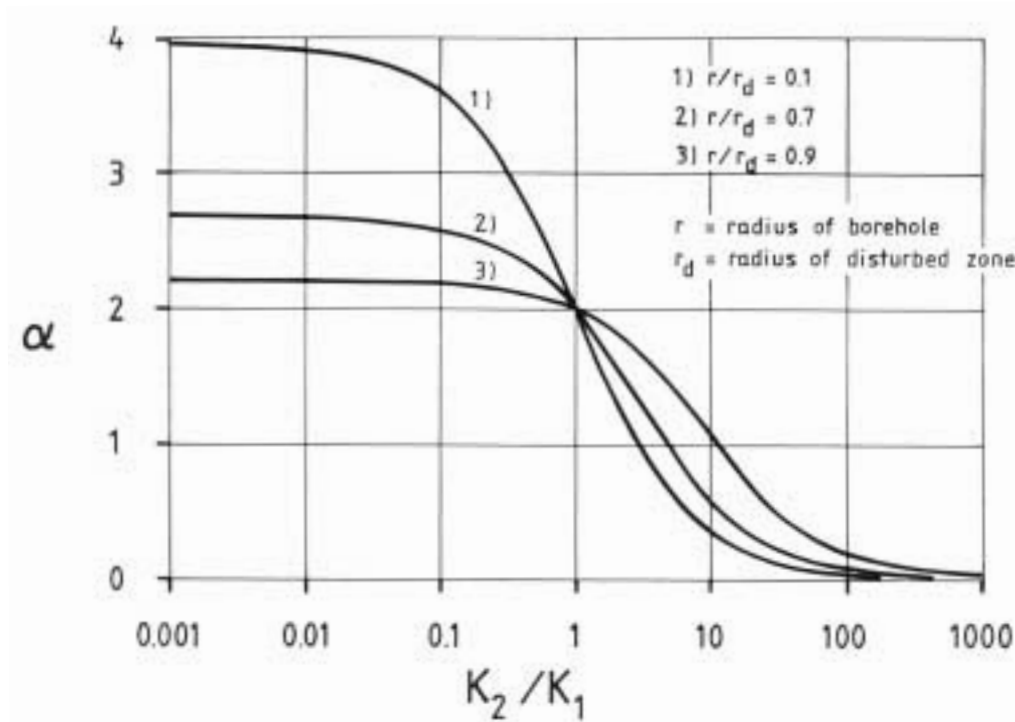
där r = borrhålsradie
 r_d = radie, yttre begränsning av störd zon
 K_1 = hydraulisk konduktivitet mellan r och r_d
 K_2 = den ostörda sprickans hydrauliska konduktivitet

Om borrhningen ej stört omgivande sprickplan är radierna r_d och r lika, vilket ger $\alpha = 2$. I sprickzonen kommer således grundvattenflödet inom dubbla borrhålsradien att konvergera genom borrhålet. Om det runt borrhålet finns en zon med lägre hydraulisk konduktivitet än sprickzonen, orsakad av borrhkax, kemisk igensättning etc blir α lägre än 2. Även bergspänningar kan medföra att hydrauliska konduktiviteten i sprickorna ändras lokalt runt borrhålet på grund av ändrat spänningsmönster efter upptaget av borrhålet, /Montazer och Stephansson, 1983/. En zon med högre hydraulisk konduktivitet runt borrhålet ger ett α högre än 2.

I figur 3-4 visas kontraktionsfaktorn, α , som funktion av K_2/K_1 för valda värden på den störda zonens tjocklek, uttryckt som r/r_d , enligt följande tabell.

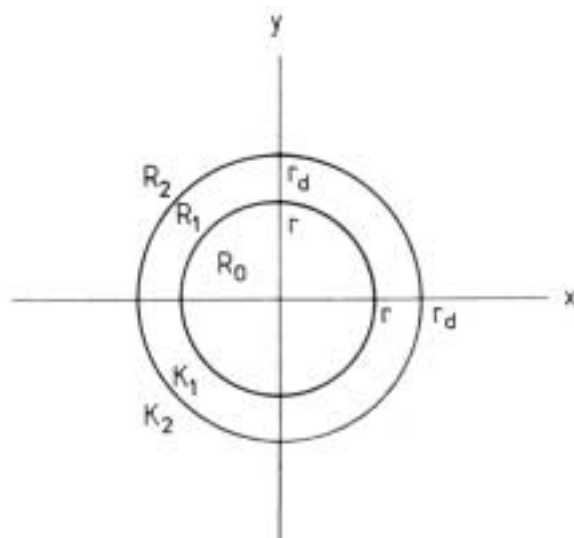
Tabell 3-1. Tjocklek i millimeter på störd zon runt borrhålet, som funktion av r/r_d vid olika borrhålsdiametrar.

| r/r_d | Borrhålsdiameter (mm) | | |
|---------|-----------------------|-----|-----|
| | 110 | 76 | 56 |
| 0,9 | 6 | 4 | 3 |
| 0,7 | 24 | 16 | 12 |
| 0,1 | 495 | 342 | 252 |



Figur 3-4. Kontraktionsfaktorn, α , som funktion av K_2/K_1 vid olika tjocklek på störd zon runt borrhålet, uttryckt som r/r_d .

Kontraktionsfaktorn, α , framräknad enligt ekvation (3-4) gäller när sprickorna skär borrhålsaxeln i 90° vinkel. Figur 3-5 visar schematiskt hur borrhålet, en störd zon och den ostörda sprickan fördelar sig i sprickplanet under denna förutsättning. Den inre cirkulära skivan, radie r , representerar borrhålet R_0 . Cirkulära ringen R_1 , begränsad av radierna r och r_d representerar den störda zonen runt borrhålet. Den ostörda sprickan utgör region R_2 .



Figur 3-5. Schematisk skiss i sprickplanet av borrhål, R_0 , störd zon, R_1 och ostörd spricka, R_2 , när sprickorna skär borrhålsaxeln i 90° vinkel.

Den hydrodynamiska störningen i sprickan inducerad av borrhålet beror inte enbart av hydrauliska konduktiviteten i varje region (K_j för $j = 1,2$) utan också på regionernas geometri. För alla skärningsvinklar mellan sprickorna och borrhålsaxeln som avviker från 90° kommer gränslinjerna mellan varje region, dvs borrhål, störd zon och ostörd spricka, att bli en ellips vars dimensioner bestäms av skärningsvinkeln.

Om borrningen ej stört omgivande sprickplan kommer störningen i grundvattnets flödesfält runt borrhålet aldrig att överskrida dubbla längden på ellipsens storaxel a_1 /opublicerat material Environmental Protection Services Canada, 1984/. Kontraktionsfaktorn, α , kan därvid uttryckas enligt ekvation (3-5). Se vidare appendix 2.

$$\alpha = \frac{2 \cdot a_1}{b_1} \quad (3-5)$$

3.2 Mätgränser

3.2.1 Minsta mätbara flöde

Utspädningen av spårämnet i mätsektionen beror inte enbart av grundvattenflödet i den ostörda sprickzonen och kontraktionsfaktorn, α , enligt ekvationerna (3-2) och (3-3). I mätsektionen sker även en viss utspädning på grund av att det med spårämne märkta vattnet har fått andra fysikaliska och kemiska egenskaper än vattnet utanför mätsektionen. Likaså kan det instrument som placeras mellan avtätningarna för att mäta utspädningen av spårämne ändra de fysikaliska förhållandena i mätsektionen.

Ekvation (3-3) får därvid utvidgas med flödesterm, som står för den del av medelhastigheten genom mätsektionen som orsakas av spårämne och mätinstrument.

$$v = \alpha \cdot v_f + v_h + v_d + v_m \quad (3-6)$$

där v = grundvattnets medelhastighet genom borrhålet
 α = kontraktionsfaktorn
 v_f = grundvattnets medelhastighet i den ostörda sprickzonen
 v_h = skenbar flödes hastighet orsakad av densitetseffekter
 v_d = skenbar flödes hastighet orsakad av molekylär diffusion
 v_m = skenbar flödes hastighet orsakad av artificiell omblandning

Skenbara flödes hastigheter orsakade av densitetseffekter, v_h , och artificiell omblandning, v_m , är mycket små vid låga spårämneskoncentrationer och omblandningskapaciteter /Gustafsson, 1983/.

Låg spårämneskoncentration eliminerar densitetseffekter men inte molekylär diffusion av spårämnet in i sprickorna. Även i frånvaro av alla andra störningar existerar alltid diffusionen.

Minsta mätbara grundvattenflöde med utspädningsmetoden bestäms således av förhållandet (kvoten) mellan molekylär diffusion och advektion (grundvattentransport) samt kravet på noggrannhet i mätningen. Exempelvis kan ett lägre flöde bestämmas för kvoten 0,1 än om den molekylära diffusionen önskas försumbar, dvs kvoten $<0,01$.

Skenbara flödes hastigheten, v_d , orsakad av molekylär diffusion kan beräknas ur följande samband /Institut für Radiohydrometrie, 1969/.

$$v_d = \frac{\pi \cdot D^*}{r} \quad (3-7)$$

där D^* = spårämnets diffusionskoefficient i det grundvattenförande mediet (effektiv diffusivitet).

Mätningar med spårämnet NH_4Br i porösa medier, $K = \text{E}-1 - \text{E}-5$ m/s, visar att D^* minskar med minskad hydraulisk konduktivitet /Institut für Radiohydrometrie, 1969/. Flödes hastigheten, v_d , är således proportionell mot hydrauliska konduktiviteten, men omvänt proportionell mot borrhålsradien.

En begränsning i utspädningsmetoden är svårigheten att bestämma diffusions hastigheten vid fältmätningar. Om mätningen sker i kärnborrhål kan diffusions hastigheten, v_d , i en mätsektion uppskattas enligt följande:

- Diffusions hastigheten beräknas för borrhärlor av olika bergart, sprickighet etc, på vilka man har bestämt den effektiva diffusiviteten, D^* , i laboratoriemätningar.
- Borrhärlan från mätsektionen jämförs sedan med borrhärlprover för vilka diffusions hastigheten har beräknats.

Laboratoriemätningar av den effektiva diffusiviteten har gjorts av bl a /Skagius et al, 1982, 1985a, 1985b/ på 10 mm tjocka skivor av borrhärlor. I en mätsektion som omfattar både sprickor och "helt" berg får ett medelvärde antagas på diffusions hastigheten.

Den skenbara flödes hastigheten, v_d , orsakad av spårämnets molekylära diffusion ges i tabell 3-2, för olika grundvattenförande media och vid olika borrhålsradier. Flödesporositeten för sprickzonen i tabell 3-2 har antagits till $1\text{E}-3$ och enligt /Norton och Knapp, 1977/ visar fältobservationer och publicerade data att flödesporositeten i kristallint berg varierar inom $1\text{E}-6$ till $1\text{E}-3$. Flödesporositeter beräknade från spårförsök i sprickzoner i granit faller inom denna variationsbredd. /Gustafsson och Klockars, 1981/ anger $8\text{E}-4$ för Finnsjögranit och /Andersson och Klockars, 1985/ anger $7\text{E}-5$ för Stripa-granit.

Tabell 3-2. Flödes hastighet, v_d , i olika media för spårämnet Cr-EDTA, (m/s).

| Borrhålsradie (mm) | Grundvattenförande medie | | |
|--------------------|--------------------------|--|--------------|
| | Grovsand* | Granit och Gnejs** "hel" och sprickig | Sprickzon*** |
| 28 | 3,7 E-8 | 7,7 E-13-5,5 E-12 | 5 E-11 |
| 38 | 2,8 E-8 | 5,7 E-13-4,0 E-12 | 4 E-11 |
| 55 | 1,9 E-8 | 3,9 E-13-2,8 E-12 | 3 E-11 |

* Viktat experimentellt värde ($K = 3 \text{ E}-3$ m/s) genom trådnät med 50 % perforation, /Institut für Radiohydrometrie, 1969/.

** Teoretiskt värde enligt ekvation (3-7) och experimentellt bestämda D^* från /Skagius et al, 1982, 1985a, 1985b/.

*** Viktat teoretiskt värde vid flödesporositeten $1,0 \text{ E}-3$.

Beroende på önskad noggrannhet i bestämningen av grundvattenflödet, dvs kvoten 0,1 eller 0,01 mellan molekylär diffusion och advektion är de minsta mätbara flödeshastigheterna i kristallint berg och grovsand således 10 till 100 gånger högre än de som orsakas av molekylär diffusion, enligt tabell 3-2.

För utspädningsmätningarna i fält valdes spårämnet Blue Dextran 2000 som på grund av sin stora molekylvikt har den lägsta diffusionshastigheten av de i avsnitt 2.4 redovisade spårämnena. Laboratoriemätningar på dess effektiva diffusivitet eller flödeshastighet, v_d , i olika grundvattenförande media har ej gjorts, men hastigheterna förmodas vara lägre än de som ges för Cr-EDTA i tabell 3-2.

3.2.2 Mättid

I lågkonduktiva partier av berggrunden begränsas tillämpbarheten av utspädningsmetoden av mättiden. Mättiden för en utspädningsmätning kan beräknas ur ekvation (3-1) samt substitution med (3-2) och (3-3) enligt:

$$t = - \frac{\pi(r^2 - r_i^2)}{v_f \cdot 2 \cdot r \cdot \alpha} \ln(C/C_o) \quad (3-8)$$

där r = borrhålsradien
 r_i = mätinstrumentets radie

grundvattnets flödeshastighet (Darcy-hastighet), v_f , fås ur:

$$v_f = K \cdot I \quad (3-9)$$

där K = hydraulisk konduktivitet
 I = gradient

Förutom hydrauliska konduktiviteten och gradienten bestäms mättiden av radien av borrhålet och däri placerat mätinstrument samt önskad differens mellan spårämnets start och slutkoncentration i mätsektionen.

Ett mätinstrument med god upplösning minskar den erforderliga differensen för att säkert kunna utvärdera en utspädningsmätning och i transmissionsmätaren har upplösningen drivits mycket långt. Differensen mellan spårämnets start- och slutkoncentration kan emellertid ej vara hur liten som helst, ty då finns möjligheten att även en svag sorbtion av ett "vattentroget" spårämne på borrhålsvägg och instrument kan ge mätbara fel i utspädningsförloppet.

En optimering av förhållandet mellan borrhålsradie och instrumentradie/dummyradie, där mätsektionens vattenvolym minimeras utan att grundvattenströmningen genom borrhålet störs kan endast göras till fullo i kärnborrhål. I hammarborrhål får dummydiametern avpassas till minsta borrhålsdiametern, se avsnitt 2.5. Även vid optimal instrumentradie ökar mättiden med ökande borrhålsradie.

Mättiden som funktion av hydraulisk konduktivitet och gradient i ett 110 mm borrhål ges i tabell 3-3, där spårämneskoncentrationen, C/C_0 , har minskat till 0,97 respektive 0,95 på de angivna tiderna. Tabellen är vidare beräknad med optimal dummydiameter, dvs 0,9 gånger borrhålsdiametern, och med kontraktionsfaktorn $\alpha = 2$. Mättiderna i ett 56 mm diameter borrhål är hälften av de som anges i tabell 3-3.

Tabell 3-3. Mättid som funktion av hydraulisk konduktivitet och gradient, vid utspädningsmätning i 110 mm diameter borrhål.

| K (m/s) | Mättid i 110 mm diameter borrhål* | |
|----------------|--|-----------------|
| | I = 0,01 | I = 0,05 |
| E-5 | 40–70 minuter | 8–14 minuter |
| E-6 | 8–12 timmar | 80–140 minuter |
| E-7 | 70–120 timmar | 14–24 timmar |
| E-8 | 30–50 dygn | 6–10 dygn |
| E-9 | 300–500 dygn | 60–100 dygn |

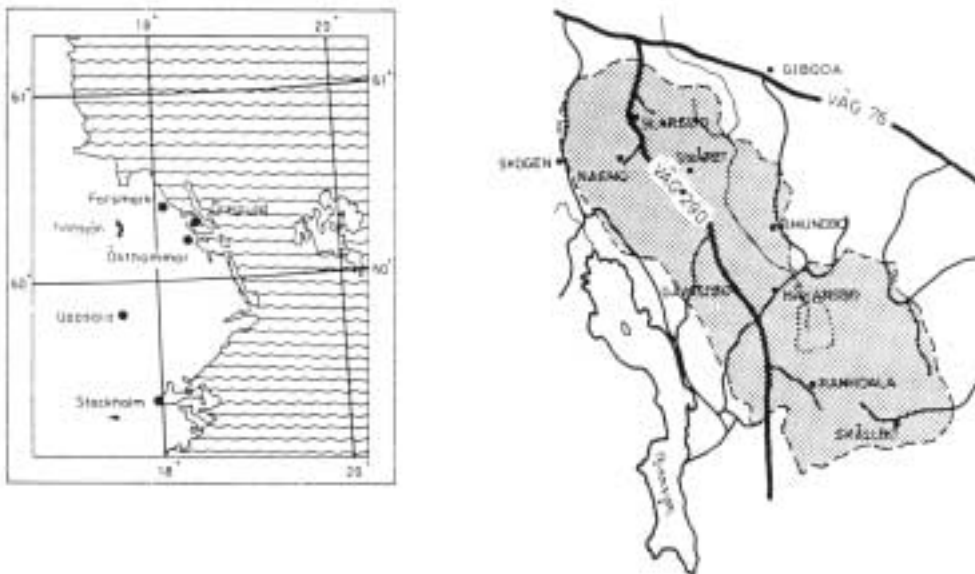
* I 56 mm diameter borrhål är mättiden hälften av den som anges i tabellen.

4 Fältförsök

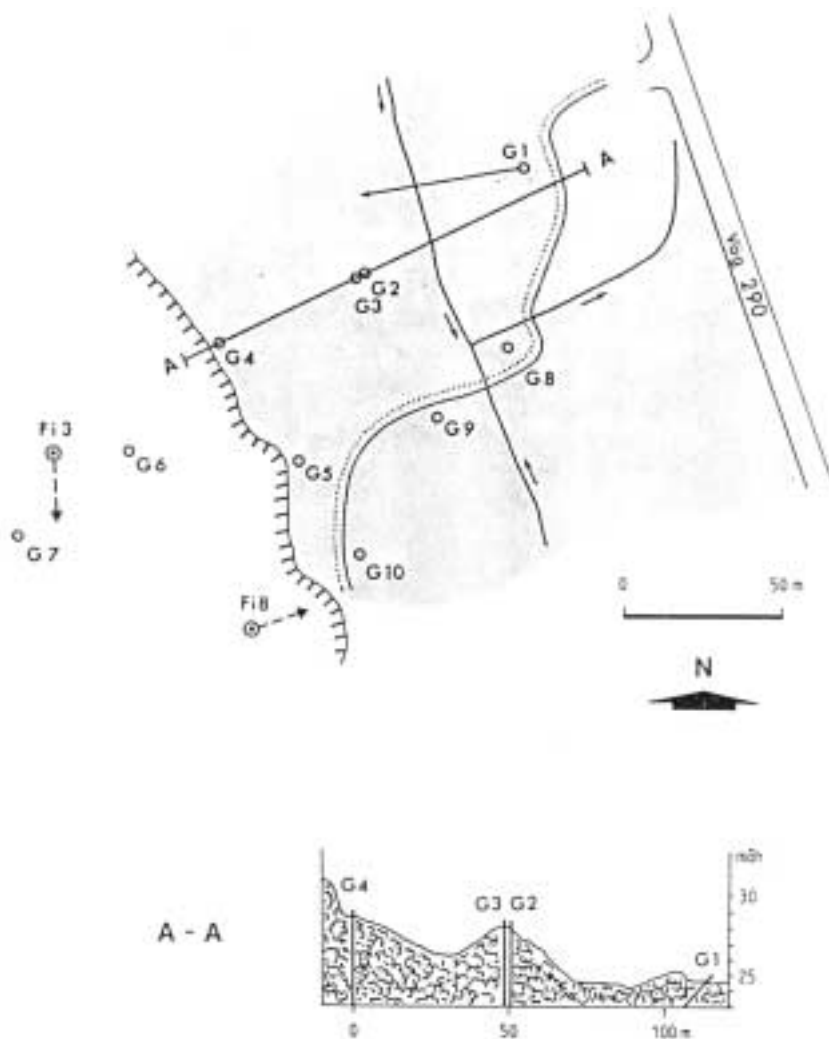
4.1 Försöksområde

4.1.1 Allmän beskrivning, geologi och topografi

Fem utspädningsmätningar har genomförts i två 110 mm diameter hammarborrhål i granit inom Finnsjöns undersökningsområde, beläget öster om Finnsjön i norra Uppland, se figur 4-1. Geologi, hydrologi och grundvattenförhållanden inom området och speciellt i anslutning till de i mätningarna utnyttjade borrhålen vid Gåvastbo har beskrivits i ett flertal rapporter, /Almén et al, 1978/, /Gustafsson och Klockars, 1981/, /Jämtlid et al, 1981/, /Klockars och Persson, 1978/ samt /Olkiewicz et al, 1979/. Årsmedelnederbörden inom området är ca 685 mm. Topografin är tämligen flack, med nivåer mellan 20–44 meter över havet. De lösa avlagringarna, av vilka moränen utgör huvudinslaget, har mestadels ringa mäktighet. Andelen berg i dagen är relativt hög, uppemot 20 %. Berggrunden är av urbergstyp, och består av äldre gnejsig granodiorit och ung granit. Leptit förekommer i områdets södra och norra del, i norra delen även djupgrönsten.



Figur 4-1. Karta utvisande läget av Finnsjöns undersökningsområde.



Figur 4-2. Schematisk karta över försöksplatsen vid Gåvastbo, visande lokaliseringen av borrhålen.

Utspädningsmätningarna har genomförts i de vertikala hammarborrhålen G8 och G9 i Finnsjöområdet västra del i anslutning till en krosszon vid Gåvastbo, se figur 4-2. Krosszonen som är belägen i dalbotten har en ungefärlig nord-nordvästlig strykning och återfinns i kärnborrhål Fi8, som ett antal parallellförskjutna sprickzoner.

Försöksplatsen kan beskrivas som en bergplint i öster begränsad av krosszonen vid Gåvastbo och i norr och söder avgränsad av mindre öst-västliga markerade sprickzoner.

Plinten består av ett relativt väl blottat hållområde, med till största delen avverkad mark. Inom hållpartierna är den övervägande delen av sprickorna brant stående med en tendens till stupning mot öster.

Sprickrosdiagram visar ett sprickmaximum N50W, parallellt med förskiffringen i gnejsgraniten. Riktning runt N20W indikerar sprickminimum och överensstämmer med Gåvastbo-linjens riktning. I hållen observeras också ett system av horisontella till sydligt flackt stående sprickor.

Dalsänkan utmed krosszonen öster om plinten domineras av skogsplanterad åkermark och mindre uppstickande hållar. I dalsänkan är de lösa avlagringarna ca 5 m som mäktigast. Vid G8 är de 1 m och vid G9 och G1 4 m. Berget överlagras av morän, därpå lera och överst ett tunt torvlager.

Bergarten karterad på ytan såväl som i kärnborrhålet Fi 8 består av en övervägande grå, medelkornig, granodioritisk – granitisk gnejsgranit. Bergartens sammansättning bestämd från borrhax från borrhål G3 framgår av tabell 4-1, /Skagius et al, 1981/.

Tabell 4-1. Mineralogisk sammansättning hos gnejsgraniten vid Gåvastbo, Finnsjön.

| Mineral | Andel |
|---------------|-------|
| Kvarts | 39 % |
| Plagioklas | 26 % |
| Mikrolin | 17 % |
| Biotit | 6 % |
| Hornblände | 8 % |
| Epidot | 3 % |
| Klorit/Kalcit | 1 % |

Enstaka oregelbundna gångar av pegmatit och aplit genomsätter gnejsgraniten, vanligen endast upp till 0,2 m breda. Kvarts uppträder i enstaka gångar, samt ställvis som sprickfyllnad. Vanligt förekommande sprickfyllnad är kalcit, prehnit, laumontit, klorit och kvarts.

4.1.2 Geohydrologi

Berggrunden är tämligen rik på vattenförande sprick- och krosszoner i de övre 100 m, vilket återspeglas i de 10 hammarborrhålen G1–G10 inom området. Transmissiviteten erhållen från kort- och långtidsprovpumpningar är i storleksordningen E-5 m²/s för borrhålen i dalsänkan.

Hydrauliska konduktiviteten uppmätt för 2 m-sektioner i borrhålen med stationära vatteninjektionstester med 10 minuters injektionstid påvisar stor spridning mellan enskilda mätsektioner och mellan de olika borrhålen. Av de undersökta borrhålssektionerna överstiger den hydrauliska konduktiviteten E-6 m/s i 5 % av antalet mätsektioner.

Den naturliga grundvattenströmningen inom försöksplatsen torde generellt följa topografin, dvs en strömning från plinten mot dalsänkan vid Gåvastbo, vilket indikeras av de storskaliga gradienterna inom försöksplatsen, beräknade ur grundvattennivåer i öppna borrhål (G1–G10). Vattentrycksmätningar i avtätade 2 m-sektioner i befintliga bergborrhål påvisar en nedåtriktad grundvattentransport vid plinten, med en uppåtriktad strömning av grundvatten i sänkan. Sammantaget ger dessa observationer bilden av en tredimensionell grundvattenströmning med inströmningsområdet omfattande bergplinten och ett utströmningsområde i dalsänkan utefter befintlig krosszon. Längs dalgången och i krosszonens övre delar bedöms en mer eller mindre horisontell grundvattenströmning med nordlig riktning råda.

4.2 Borrhål och mätsektioner

Tidigare gjorda bestämningar av grundvattenflödet med utspädningssond i borrhål G2 inom samma försöksområde /Gustafsson, 1983/ genomfördes under bedömda stationära grundvattenförhållanden mellan borrhålen G2 och G1. Grundvattnets strömning i sprickzonen mellan borrhålen styrdes genom kontinuerlig pumpning med konstant vattenuttag av $1 \text{ E-4 m}^3/\text{s}$ ur borrhål G1. I försök att genomföra nedan redovisade bestämningar av grundvattenflödet i G8 och G9 under så lika grundvattenförhållanden som möjligt pågick vattenuttaget ur G1 oavbrutet med samma kapacitet, ($1 \text{ E-4 m}^3/\text{s}$), som i de tidigare försöken. Genom vattenuttaget ur borrhål G1 har grundvattenytan sänkts och inom ett visst område har kontrollerade grundvattenförhållanden erhållits, med en mot borrhål G1 riktad grundvattenströmning. Strömningen kan betraktas radiellt konvergerande, fast flödet i detalj styrs av befintliga sprickvägar.

Borrhålen G8 och G9 valdes för bestämningar av grundvattenflödet med utgångspunkt av:

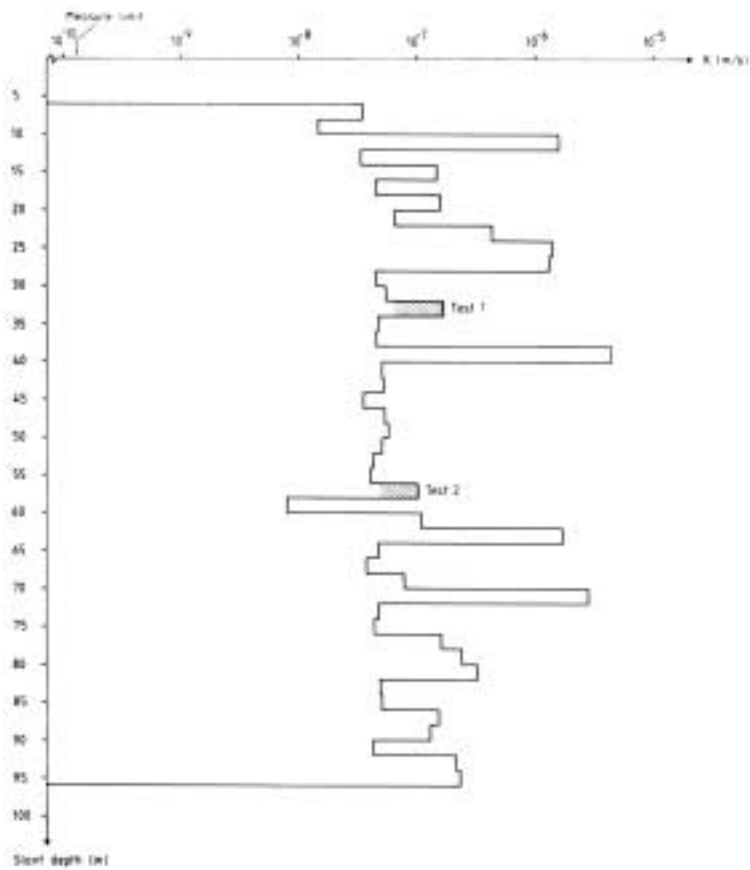
- De täcker den hydrauliska konduktiviteten inom området $K = 1 \text{ E-8} - 1 \text{ E-7 m/s}$, vilket kompletterar tidigare bestämningar av grundvattenflödet med utspädningssonden i området $K = 1 \text{ E-6 m/s}$. Intervallet $K = 1 \text{ E-8} - 1 \text{ E-5 m/s}$ torde täcka de större vattenförande sprickzonerna. De lägre konduktiviteter prioriterades då mätningar där tydligare visar eventuella svagheter i utspädningssondens funktion.
- De ligger rätt i förhållande till uttagsborrhålet G1, dvs vattenuttaget i G1 ändrar inte grundvattnets naturliga strömningsriktning över borrhålen G8 och G9, se avsnitt 4.1.2. Däremot kan vattenuttaget ur G1 ha en viss inverkan på gradientens storlek över borrhålen.

Två mätsektioner per borrhål utvaldes för bestämning av grundvattenflödet med utspädningssonden. Utifrån fördelningen av hydrauliska konduktiviteten i borrhålen valdes sektioner i intervallet $K = 1 \text{ E-8} - 1 \text{ E-7 m/s}$ omgivna av så lågkonduktiva sektioner som möjligt, se tabell 4-2 och figurerna 4-3 och 4-4. Antalet sprickor/sprickindikationer har i de valda sektionerna bestämts med hjälp av TV-loggning och redovisas i tabell 4-3.

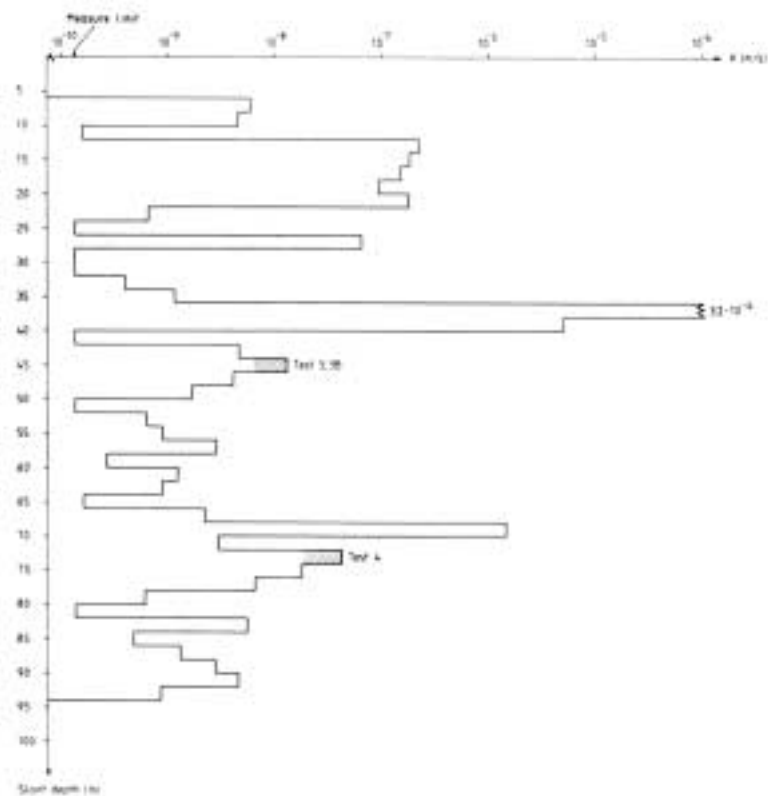
Tabell 4-2. Utvalda borrhålssektioner för bestämning av grundvattenflödet.

| Borrhål | Sektion (m) | K^* (m/s) | Försök |
|---------|-------------|-------------------|--------|
| G8 | 32-34 | $1,7 \text{ E-7}$ | 1 |
| G8 | 56-58 | $1,0 \text{ E-7}$ | 2 |
| G9 | 44-46 | $1,3 \text{ E-8}$ | 3, 3B |
| G9 | 72-74 | $4,1 \text{ E-8}$ | 4 |

* Beräknad ur vatteninjektionstest.



Figur 4-3. Hydrauliska konduktiviteten som funktion av borrhålslängd i borrhål G8.



Figur 4-4. Hydrauliska konduktiviteten som funktion av borrhålslängd i borrhål G9.

Tabell 4-3. Antal sprickindikationer i de utvalda borrhålssektionerna.

| Borrhål | Sektion (m) | Sprickindikationer | | |
|---------|-------------|--------------------|---------|--------|
| | | totalt | "stora" | flacka |
| G8 | 32–34 | 13 | 3 | 1 |
| G8 | 56–58 | 22 | 2 | 4 |
| G9 | 44–46 | 14 | 1 | – |
| G9 | 72–74 | 14 | 1 | 4 |

4.3 Utspädningsmätningar i borrhålen G8 och G9

Fem utspädningsmätningar har genomförts i de vertikala hammarborrhålen G8 och G9. Mätningarna har gjorts i 2 m-sektioner, vars hydrauliska konduktivitet och sprickkaraktäristik redovisas i avsnitt 4.2. Sektionerna har avtätats med utspädningssondens 1 m långa gummimanschetter, se figur 2-1.

Grundvatten är normalt klart och har en hög transmission för utsänt ljus, men naturliga variationer i grundvattnets kemiska och fysikaliska egenskaper medför att bakgrundstransmissionen, T_b , varierar mellan olika platser (se avsnitt 2.4.1). I borrhål kan dessutom grumlighet uppstå på grund av utfällningar, dålig rensning från borrhax etc. Bakgrundsvärdet på transmissionen påverkar mätningen av spårämneskoncentrationen enligt ekvation (2-1) och det är därför önskvärt att bakgrundstransmissionen är konstant under en utspädningsmätning. Om så inte är fallet blir koncentrationsbestämningarna felaktiga och en kompensering eller felberäkning måste göras, vilket redovisas med beräkningsexempel i avsnitt 5.

Varje utspädningsmätning inleddes, av de ovan givna orsakerna, med en längre tids registrering av bakgrundstransmissionen i mätsektionen. Efter det att ett konstant värde erhållits injicerades spårämne i mätsektionen och utspädningsförloppet registrerades punktvis med IC-minne en gång per timme och kontinuerligt med skrivare, se avsnitt 2.1. Vid samtliga mätningar användes spårämnet Blue Dextran 2000. Data över de fem genomförda mätningarna ges i tabell 4.4.

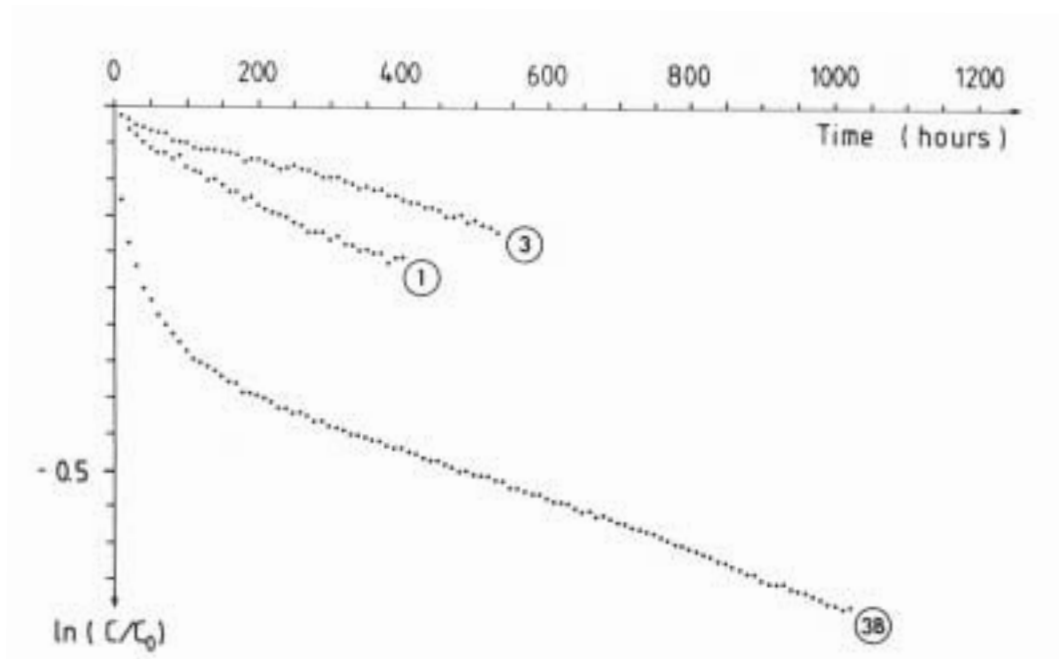
Tabell 4-4. Försöksdata från utspädningsmätningar med Blue Dextran 2000 i hammarborrhål G8 och G9 vid Gåvastbo, Finnsjöområdet.

| Mätning | Borrhål | Sektion (m) | T_b * (%) | Spårämneskoncentration | | | Mättid (timmar) |
|---------|---------|-------------|-------------|------------------------|-----------------|---------|-----------------|
| | | | | Start C_o (ppm) | Stopp C (ppm) | C/C_o | |
| 1 | G8 | 32–34 | 89,00 | 17,49 | 14,15 | 0,81 | 405 |
| 2 | G8 | 56–58 | 96,45 | 7,34 | 2,24 | 0,30 | 1 190 |
| 3 | G9 | 44–46 | 93,00 | 17,99 | 15,10 | 0,84 | 535 |
| 3B | G9 | 44–46 | 93,00** | 9,36 | 6,52 | 0,70 | 1 025 |
| 4 | G9 | 72–74 | 90,90 | 14,00 | 2,17 | 0,16 | 555 |

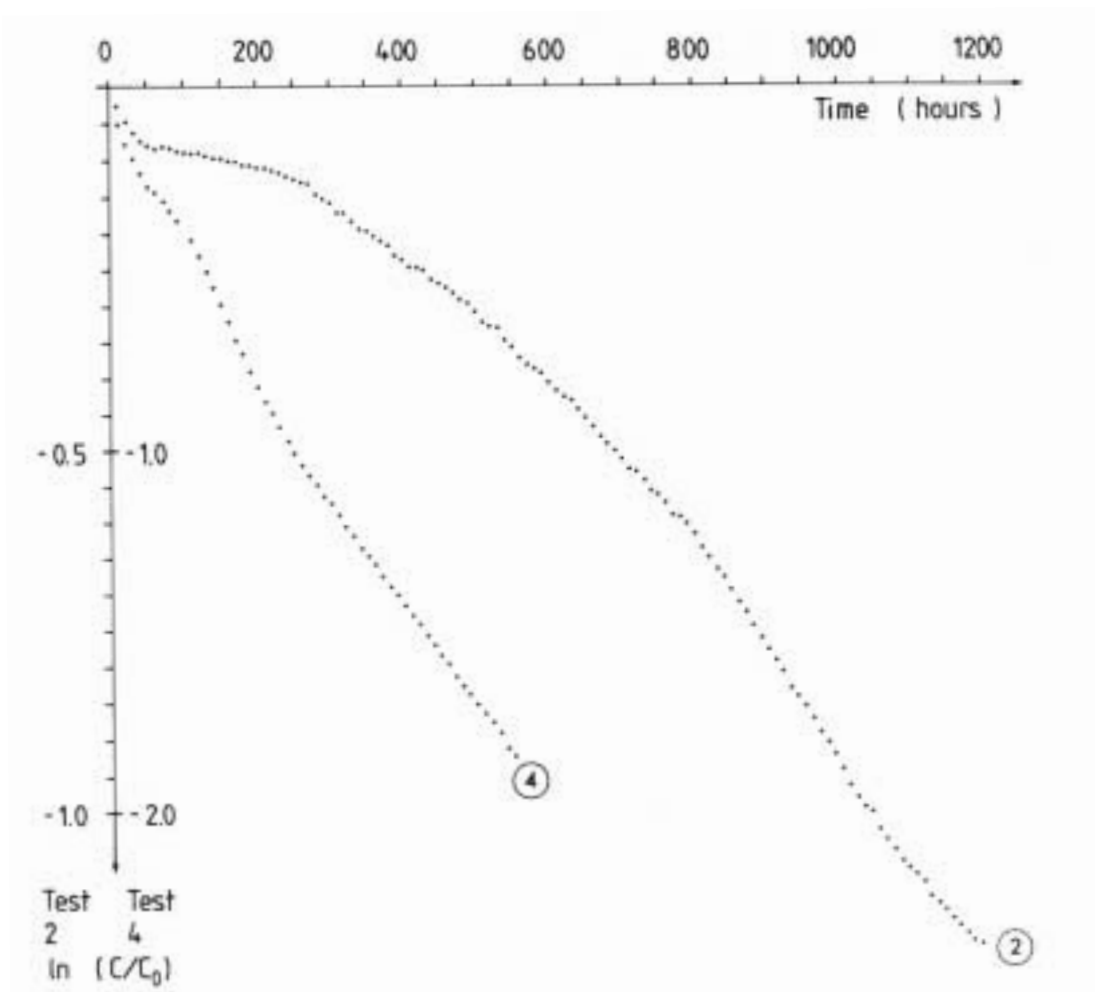
* bakgrundstransmission,

** när utspädningsförloppet blir linjärt efter 200 timmar.

Bakgrundstransmissionen, T_b , bör vara högre än 77 % med hänsyn till kravet på god upplösning vid utspädningsförsök, se avsnitt 2.4. De uppmätta värdena är generellt högre än 77 %. Resultaten av utspädningsmätningarna redovisas i figurerna 4-5 och 4-6 som semi-log diagram av koncentrationsminskningen mot tiden. Mättiderna har varit väl tilltagna för att utspädningsförlopp, grundvattenflöde med mera skulle kunna följas under skilda förutsättningar som t ex ändrad hydraulisk gradient och ändrad omblandningskapacitet i utspädningsvolymen. Under stationära förhållanden är sambandet linjärt mellan tid och logaritmen på normerad koncentration, där linjens lutning ökar med grundvattenflödet.



Figur 4-5. Utspädningsmätning 1 i G8 32–34 m samt 3 och 3B i G9 44–46 m.



Figur 4-6. Utspädningsmätning 2 i G8 56–58 m och 4 i G9 72–74 m.

4.3.1 Utspädningsmätning 1

Mätning i borrhål G8, sektion 32–34 m under 405 timmar (17 dygn) från slutet av oktober till början av november. Perioden var nederbördsrik, totalt 50 mm varav 31 mm föll under de första 100 timmarna.

Piezometriska trycket i mätsektionen mättes vid fyra tillfällen. Tryckvariationerna låg inom 35 mm vattenpelare. Trycket ökade i början och största värdet uppmättes efter ca 100 timmar, varefter det långsamt minskade. Vid försökets slut var trycket 23 mm under maxvärdet.

Hydrauliska gradienten mellan mätsektionen och borrhål G1 var lägst vid ca 100 timmar, $I = 0,06$. Därefter ökade den sakta till 0,13 vid försökets slut.

Utspädningsförloppet följer väl det teoretiska linjära sambandet. Den svaga minskningen i piezometriska trycket och ökningen i den hydrauliska gradienten mellan mätsektionen och borrhål G1 har ej påverkat utspädningsförloppet nämnvärt. Ett enkelt samband mellan dessa skulle ha lett till en svag ökning av utspädningshastigheten, i stället minskar den något.

Omblandningskapaciteten i mätsektionen var 970 ml/min under hela försöket.

4.3.2 Utspädningsmätning 2

Mätning i borrhål G8, sektion 56–58 m under 1 190 timmar (90 dygn) från mitten av november till början av januari. Perioden började med kraftiga regn i flera dygn. Totala nederbördsmängden under perioden var 61 mm. Efter ca 650 timmar föll nederbörden i form av snö, 35 mm.

Piezometriska trycket i mätsektionen mättes vid sju tillfällen. Tryckvariationerna låg inom 253 mm vattenpelare. Trycket stiger fram till ca 300 timmar, därefter sjunker det 242 mm på 400 timmar. Från 700 timmar till försökets slut har det sjunkit ytterligare 11 mm.

Hydrauliska gradienten mellan mätsektionen och borrhål G1 minskade i början och var som lägst efter ca 300 timmar, $I = 0,15$. Därefter ökar gradienten fram till 700 timmar där den blir konstant 0,18.

Utspädningsförloppet utgörs av tre, nästan linjära delar. De första 300 timmarna har lägst utspädningshastighet. Under denna period är nederbörden kraftig i form av regn och piezometriska trycket i mätsektionen ökar samtidigt som hydrauliska gradienten mellan mätsektionen och borrhål G1 minskar något.

Mellan 300 och 800 timmar är utspädningshastigheten betydligt större och ökar även något under perioden. Nederbörd faller endast som snö och piezometriska trycket sjunker samtidigt som hydrauliska gradienten ökar. Efter 800 timmar är hydrauliska gradienten nästan konstant och piezometriska trycket sjunker endast ca 9 mm på 400 timmar.

Under detta försök gjordes tester med olika omblandningskapaciteter i mätsektionen 500, 745 och 970 ml/min. De tre markanta ändringarna i utspädningshastigheten sammanföll ej med byte av omblandningskapacitet. Kapaciteterna har således ej varit så höga att mätningen störts men tillräckliga för en fullständig omblandning i mätsektionen. Den lägsta, eller troligtvis ännu lägre, omblandningskapacitet hade med fördel kunnat användas under mätningen.

4.3.3 Utspädningsmätning 3

Mätning i borrhål G9, sektion 44–46 m under 535 timmar (22 dygn) i februari månad. Nederbörden föll som snö, totalt 44 mm.

Piezometriska trycket mättes endast vid försökets början och slut. Trycket minskade 75 mm mellan mätningarna.

Hydrauliska gradienten mellan mätsektionen och borrhål G1 var lika vid båda mätningarna, $I = 0,14$.

Utspädningsförloppet följer väl det teoretiska linjära sambandet. Hydrauliska gradienten var också oförändrad. Två mätningar räcker inte för att bedöma piezometriska tryckets variationer under försöket.

Försöket avbröts på grund av att trycket i manschetterna släppte helt när en koppling på gastubens reducerventil läckte.

Omblandningskapaciteten i mätsektionen var 500 ml/min under hela försöket.

4.3.4 Utspädningsmätning 3B

Mätning i borrhål G9, sektion 44–46 m under 1 025 timmar (43 dygn) från början av mars till mitten av april. Nederbörden, totalt 56 mm, föll i huvudsak vid tre tillfällen. Under försökets första dygn föll 10 mm som snö. Efter 550 timmar 14 mm regn under ett dygn och efter 950 timmar 21 mm regn.

Piezometriska trycket i mätsektionen mättes vid fyra tillfällen. Trycket ökar under hela försöket till 623 mm över startvärdet.

Hydrauliska gradienten mellan mätsektionen och borrhål G1 minskar under försöket, från 0,14 till 0,05.

Försöket påbörjades innan alla partiklar som lossnat från borrhålsväggen vid den tidigare manschettkollapsen hunnit sedimentera. Spårämneskoncentrationen har därför beräknats med samma bakgrundstransmission som gällde för det tidigare försöket, $T_b = 93,00\%$. Bakgrundstransmissionen ökar kraftigt i början och efter ca 200 timmar har den nått ett konstant värde och utspädningsförloppet blir linjärt.

Utspädningsförloppet har ej påverkats nämnvärt av ändringar i piezometriskt tryck och hydraulisk gradient.

Omblandningskapaciteten var 500 ml/min under hela försöket.

4.3.5 Utspädningsmätning 4

Mätning i borrhål G9, sektion 72–74 m under 555 timmar (23 dygn) under maj månad. Ingen nederbörd under perioden, däremot kraftiga regn med total regnmängd 47 mm under 5 dygn före försöket.

Piezometriska trycket i mätsektionen mättes vid fyra tillfällen. De första 50 timmarna var trycket oförändrat, därefter minskar trycket under hela försöket till 450 mm under maxvärdet.

Hydrauliska gradienten mellan mätsektionen och borrhål G1 var oförändrad de första 50 timmarna, $I = 0,03$. Därefter ökar gradienten och från 380 timmar är den 0,14. Den kraftigaste gradientförändringen är mellan 50 och 170 timmar.

Utspädningsförloppet är helt linjärt efter ca 200 timmar. En kraftig ökning i den hydrauliska gradienten mellan 50 och 170 timmar korrelerar med ökad utspädningshastighet.

Omblandningskapaciteten i mätsektioner var 500 ml/min under hela försöket.

4.4 Utvärdering och resultat

Vid utvärdering av utspädningsförlopp kan generellt sägas att beräkningen av grundvattenflödet blir säkrare med ökad längd på mätningen, dvs med så stor skillnad som möjligt mellan spårämnets initial- och slutkoncentration. Den del av utspädningsförloppet som kan användas för beräkning av grundvattenflödet begränsas emellertid i vissa fall av yttre faktorer såsom nederbörd och torrperioder samt snöackumulation och smältning, vilket ger ändrade hydrauliska gradienter och därmed grundvattenflöden. Även en ändring i bakgrundstransmission, T_b , medför att utspädningsförloppet får en ändrad

lutning eller blir olinjärt. Början av utspädningsförloppet, den s k blandningsfasen, när spårämnet skall fördelas homogent i mätsektionen kan ej användas i utvärderingen. Tabell 4-5 sammanställer grundvattenflöden och Darcy-hastigheter (ekvation 3-3) beräknade ur de linjära delarna av utspädningsförloppen. För jämförelse redovisas även några flöden beräknade ur längre tidsintervall.

Tabell 4-5. Grundvattenflöden och Darcy-hastigheter beräknade från utspädningsmätningar i hammarborrhål G8 och G9.

| Mätning | Borrhål | Sektion (m) | Diam (mm) | V (ml) | Intervall (timmar) | Korrel koeff tid-ln(C/C ₀) | Q _w (m ³ /s) | v _f (m/s) |
|---------|---------|-------------|-----------|--------|--------------------|--|------------------------------------|----------------------|
| 1 | G8 | 32-34 | 117,2 | 10718 | 20-400 | 0,985 | 1.42 E-9 | 3,05 E-9 |
| 2 | G8 | 56-58 | 114,1 | 9594 | 50-270 | 0,978 | 0.61 E-9 | 1,34 E-9 |
| | G8 | " | " | " | 280-800 | 0,993 | 2.42 E-9 | 5,33 E-9 |
| | G8 | " | " | " | 800-1100 | 0,999 | 4.32 E-9 | 9,50 E-9 |
| | G8 | " | " | " | 280-1190 | 0,982 | 3.19 E-9 | 7,01 E-9 |
| 3 | G9 | 44-46 | 115,6 | 10134 | 80-530 | 0,988 | 0.75 E-9 | 1,63 E-9 |
| 3B | G9 | " | " | " | 200-1020 | 0,998 | 0.98 E-9 | 2,13 E-9 |
| 4 | G9 | 72-74 | 107,4 | 7269 | 200-550 | 0,999 | 5,73 E-9 | 1,34 E-8 |
| | G9 | " | " | " | 10-550 | 0,993 | 6.55 E-9 | 1,53 E-8 |

De ur utspädning beräknade flödena, Q_w, i tabell 4-5 har inte korrigerats för störningar orsakade av spårämne eller instrumentering. Den utspädning som orsakas av dessa störningar kan i dessa fall försummas i förhållande till den utspädning som grundvattenflödet orsakar /Gustafsson, 1983/.

Darcy-hastigheterna, v_f, har beräknats med antagandet att kontraktionsfaktorn, α, är lika med 2, dvs väl rensat borrhål utan störning på det omgivande berget och sprickorna skär borrhålsaxeln i 90° vinkel.

4.4.1 Jämförelse mellan utspädningsmätningar och hydraultester

Korrelationen mellan utspädningsmätningar och hydraultester kan provas indirekt genom att den framräknade Darcy-hastigheten, v_f, i sprickzonen divideras med hydrauliska konduktiviteten, K, bestämd från stationär vatteninjektionstest. En hydraulisk gradient $I = v_f/K$ vid borrhålen erhålles därmed. Under de förutsättningar som gällde under utspädningsmätningarna borde enligt Thiems brunnsekvation gradienten vid borrhålen vara av storleksordningen 0,01-0,10. De beräknade hydrauliska gradienterna redovisas i tabell 4-6. Gradienterna har förväntad storlek i mätning 1 och 2 i borrhål G8, men ej i mätning 3, 3B och 4 i borrhål G9. I de sista försöken är gradienterna en faktor 2-4 för stora.

Tabell 4-6. Beräknade hydrauliska gradienter vid borrhålen.

| Mätning | Borrhål | Sektion (m) | Darcy hastighet, v _f , vid α = 2 (m/s) | Hydraulisk konduktivitet (m/s) | Beräknad hydraulisk gradient v _f /K |
|---------|---------|-------------|---|--------------------------------|--|
| 1 | G8 | 32-34 | 3,1 × E-9 | 1,7 × E-7 | 0,02 |
| 2 | G8 | 56-58 | 7,0 × E-9 | 1,0 × E-7 | 0,07 |
| 3 | G9 | 44-46 | 1,6 × E-9 | 1,3 × E-8 | 0,12 |
| 3B | G9 | 44-46 | 2,1 × E-9 | 1,3 × E-8 | 0,16 |
| 4 | G9 | 72-74 | 1,3 × E-8 | 4,1 × E-8 | 0,32 |

Orsakerna till de stora gradienterna i mätning 3, 3B och 4 kan vara flera. Med utspädningsmetoden mäts det faktiska flödet genom mätsektionen i den naturliga gradientens riktning i en sprickzon som förmodas uppvisa en viss grad av heterogenitet. Denna heterogenitet beror av fördelningen av anliggningspunkter och mellanliggande öppna partier av varierande bredd. Flödesbestämningar med utspädningsmetoden har en teoretisk "räckvidd" av cirka två borrhålsdiametrar, varför betydande variationer i flöde kan förekomma inom ett och samma konduktivitetssområde eller sprickzon. Konventionella vatteninjektionstester har en influensradie, som i det högre konduktivitetsintervallet kan överskugga detta fenomen. I de fem försöken ovan har det stationära flödet vid vatteninjektionstesterna varit 500–6 000 gånger högre än det uppmätta grundvattenflödet genom sektionerna. Vid vatteninjektionstest beräknas också K-värdet på antagandet om radiell divergent flöde i ett homogent media och olika beräkningssätt skiljer sig med en faktor 2-3 för en och samma sektion. Kontraktionsfaktorn, α , har också en förväntad variation inom $\alpha = 2 \pm 1,5$, vilket medför att v_f och därmed den beräknade hydrauliska gradienten av den orsaken kan variera inom ± 75 %.

5 Feldiskussion

5.1 Allmänt

Vid mätning av grundvattenflödet i sprickzoner med utspädningsmetoden relateras det uppmätta grundvattenflödet genom mätsektionen i borrhålet till storleken av det ostörda grundvattenflödet i sprickzonen. Det totala felet vid bestämningen av grundvattenflödet i sprickzonen kan delas upp i flera fel under två huvudgrupper enligt följande:

1. Fel i utrustning och osäkerheter i mättekniken som medför att det uppmätta flödet genom mätsektionen ej är korrekt.
2. Fel vid konverteringen av uppmätt flöde till verkligt ostört grundvattenflöde. Felet beror av att det ej går att exakt bestämma hur stor bredd av sprickzonen som det uppmätta grundvattenflödet representerar, dvs till vilken grad grundvattenflödet konvergerar och divergerar i närheten av borrhålet vid en specifik mätning.

5.2 Känslighetsanalys av olika faktorer

Störningar på grundvattenflödet genom mätsektionen orsakade av spårämne och utrustning är mycket små och finns redovisade i avsnitt 3.2.1 samt /Gustafsson, 1983/. Däremot kan själva mättekniken med optisk mätning in-situ av koncentration spårämne ge felaktiga mätresultat. Orsaken till detta är att även grundvattnet och eventuella föroreningar så som utfällningar, borrhax med mera absorberar en del av det ljus som transmissionsmätaren utsänder för mätning av koncentration spårämne. Transmissionen för det utsända ljuset blir därmed lägre än 100 %. Detta bakgrundsvärde, T_b , ingår som en konstant i kalibreringsekvationen för koncentration spårämne som funktion av total transmission, enligt ekvation (2-1). Med transmissionsmätare går det ej att separera bakgrunden, T_b , ur den totala transmissionen, T_t , som är summaeffekten av både bakgrundens/grundvattnets och spårämnets ljusabsorbtion.

När spårämne injicerats får därför all ändring av den totala transmissionen antas bero på spädning av spårämnet. Att bakgrundsvärdet, T_b , är lägre än 100 % påverkar således inte mätresultatet så länge det är konstant, däremot kommer en ändring av T_b under pågående utspädningsförsök, från det i kalibreringsekvationen ansatta värdet att ge fel spårämniskoncentration och därmed fel grundvattenflöde.

När sonden sänks i borrhålen skrapas utfällningar, borrhax med mera bort från borrhålsväggarna och en bakgrundstransmission, T_b , som är lägre än den för grundvattnet riktiga kommer att uppmätas. I takt med att föroreningarna sedimenterar ökar T_b och når med tiden ett konstant och för grundvattnet riktigt värde. I de fall T_b registrerats från sänkning/etablering till dess ett konstant värde erhållits har ökningen följt ekvation (5-1).

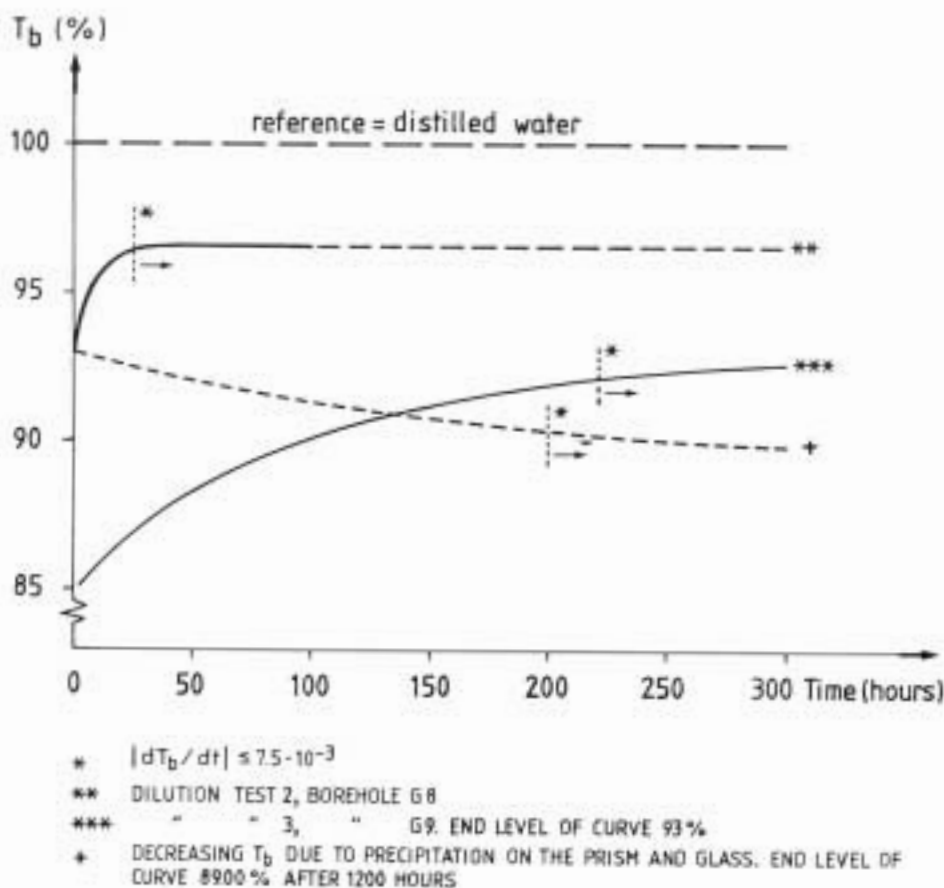
$$T_b = T_1 + T_2(1 - e^{-z \cdot t}) \quad (5-1)$$

där T_b = bakgrundstransmission
 T_1 = bakgrundstransmission vid $t = 0$
 T_2 = konstant
 t = tid
 z = konstant

Den tid det tagit att nå ett konstant värde har varierat från försök till försök, se figur 5-1. Vilket förmodligen beror på vilken typ av förorening det är som orsakar störningen. Borrkax, vissa järnutfällningar med mera kan väntas sedimentera relativt snabbt. Kemiska utfällningar och partiklar i eller nära kolloidstorlek kan, beroende på grundvattenströmningen genom borrhålet, sedimentera mycket långsamt eller inte alls.

I motsats till sedimentering och ökning av bakgrundstransmissionen finns möjligheten att en med tiden ökande beläggning på transmissionsmätarens optik orsakad av t ex kemisk utfällning, minskar bakgrundstransmissionen vilket exemplifieras i figur 5-1. Detta har dock ej observerats i de hittills genomförda fältmätningarna, även om transmissionsmätaren som längst varat nedsänkt 4 månader i en avtätad mätsektion.

Om spårämne injiceras och en utspädningsmätning påbörjas innan bakgrundstransmissionen, T_b , nått ett konstant värde och koncentration spårämne under det följande utspädningsförloppet beräknas med det bakgrundsvärde, T_b , som gällde vid injiceringsögonblicket så kommer spårämneskoncentrationen och därmed utspädningsförloppet, ur vilket grundvattenflödet beräknas, att bli felaktigt. Hur stort felet blir beror bl a på grundvattenflödets storlek och hur T_b ändras under mätningen samt spårämnets initial-

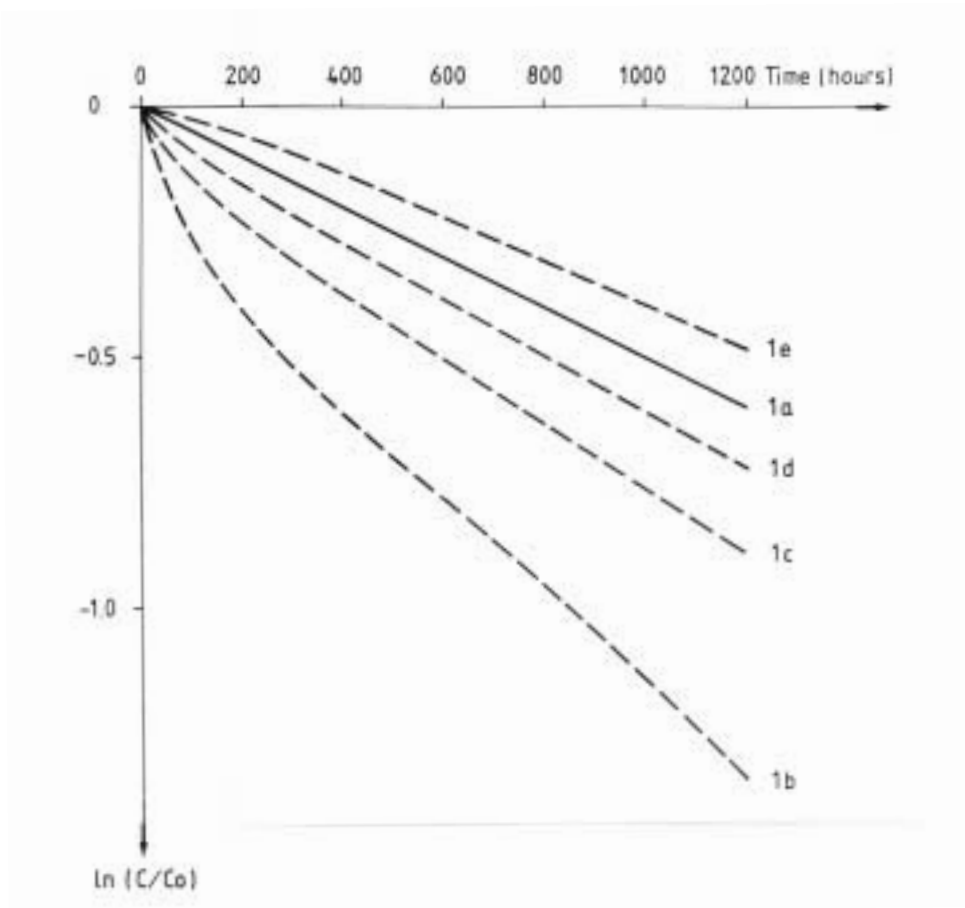


Figur 5-1. Bakgrundstransmissionen, T_b , i mätsektionen som funktion av tid efter tätning med manschetterna.

koncentration, C_0 , i mätsektionen. Figur 5-2 visar det riktiga och de skenbara utspädningsförloppen vid grundvattenflödet $1,2 \text{ E-9 m}^3/\text{s}$ genom mätsektionen i följande fall:

- *1a*: riktigt utspädningsförlopp, vid konstant T_b och godtyckligt C_0
- *1b*: skenbart utspädningsförlopp där T_b ökar enligt ekvation (5-1) och som visas i figur 5-1, från 85,00 % i injiceringsögonblicket till 93,00 % efter 700 timmar, men spårämneskoncentrationen beräknas med T_b 85,00 % under hela förloppet. $C_0 = 7,50 \text{ ppm}$
- *1c*: samma som 1b ovan men $C_0 = 15,00 \text{ ppm}$
- *1d*: samma som 1b ovan men $C_0 = 30,00 \text{ ppm}$
- *1e*: skenbart utspädningsförlopp där T_b minskar från 93,00 % i injiceringsögonblicket till 89,00 % efter 1 200 timmar och spårämneskoncentrationen beräknas med T_b 93,00 % under hela förloppet. $C_0 = 15,00 \text{ ppm}$.

Om grundvattenflödet beräknas under de första 200 timmarna av utspädningsförloppet, dvs när bakgrundstransmissionen fortfarande ändras mycket, blir felet relativt stort. I tabell 5-1 ges grundvattenflöden beräknade ur det riktiga och de skenbara utspädningsförloppen.



Figur 5-2. Riktigt (*1a*) och skenbara utspädningsförlopp vid grundvattenflödet $1,2 \text{ E-9 m}^3/\text{s}$ genom mätsektionen.

Tabell 5-1. Grundvattenflöden beräknade ur de första 200 timmarna av utspädningsförloppen, vid grundvattenflödet 1,2 E-9, m³/s.

| Fall | C ₀ (ppm) | k* | Q _w (m ³ /s) | Fel (%) |
|------|----------------------|-----|------------------------------------|---------|
| 1a | – | 1,0 | 1,2 E-9 | 0 |
| 1b | 7,50 | 4,1 | 4,9 E-9 | + 310 |
| 1c | 15,00 | 2,3 | 2,8 E-9 | + 130 |
| 1d | 30,00 | 1,6 | 1,9 E-9 | + 60 |
| 1e | 15,00 | 0,6 | 0,7 E-9 | – 40 |

* Utspädningsförloppets relativa lutningskoefficient.

Felet minskar med ökande initialkoncentration, C₀, av spårämne i mätsektionen. Notera att i fall 1b, 1c och 1d avviker bakgrundstransmissionen som mest 8 % från korrekt värde, medan motsvarande avvikelse är 4 % i fall 1e.

Om grundvattenflödet beräknas ur utspädningsförloppens senare linjära del när bakgrundstransmissionen ej längre ändras nämnvärt blir felet i flödesbestämningen betydligt mindre. Grundvattenflöden beräknade ur det riktiga och de skenbara utspädningsförloppen mellan 400 och 1 000 timmar ges i tabell 5-2.

Tabell 5-2. Grundvattenflöden beräknade ur utspädningsförloppen mellan 400 och 1 000 timmar, vid grundvattenflödet 1,20 E-9 m³/s.

| Fall | C ₀ (ppm) | k* | Q _w (m ³ /s) | Fel (%) |
|------|----------------------|------|------------------------------------|---------|
| 1a | – | 1,00 | 1,20 E-9 | 0 |
| 1b | 7,50 | 1,76 | 2,11 E-9 | + 76 |
| 1c | 15,00 | 1,28 | 1,53 E-9 | + 28 |
| 1d | 30,00 | 1,12 | 1,35 E-9 | + 12 |
| 1e | 15,00 | 0,88 | 1,05 E-9 | – 12 |

* Utspädningsförloppets relativa lutningskoefficient.

Teoretiska beräkningar av utspädningsförlopp visar att genom att injicera spårämne först när ändringen i bakgrundstransmission, uttryckt som dT_b/dt, understiger 7,5 E-3 enligt ekvation (5-2) blir felet i utspädningsförloppet och därmed grundvattenflödet försumbart även vid låga initialkoncentrationer i mätsektionen.

$$|dT_b / dt| \leq 7,5 E - 3 \quad (5-2)$$

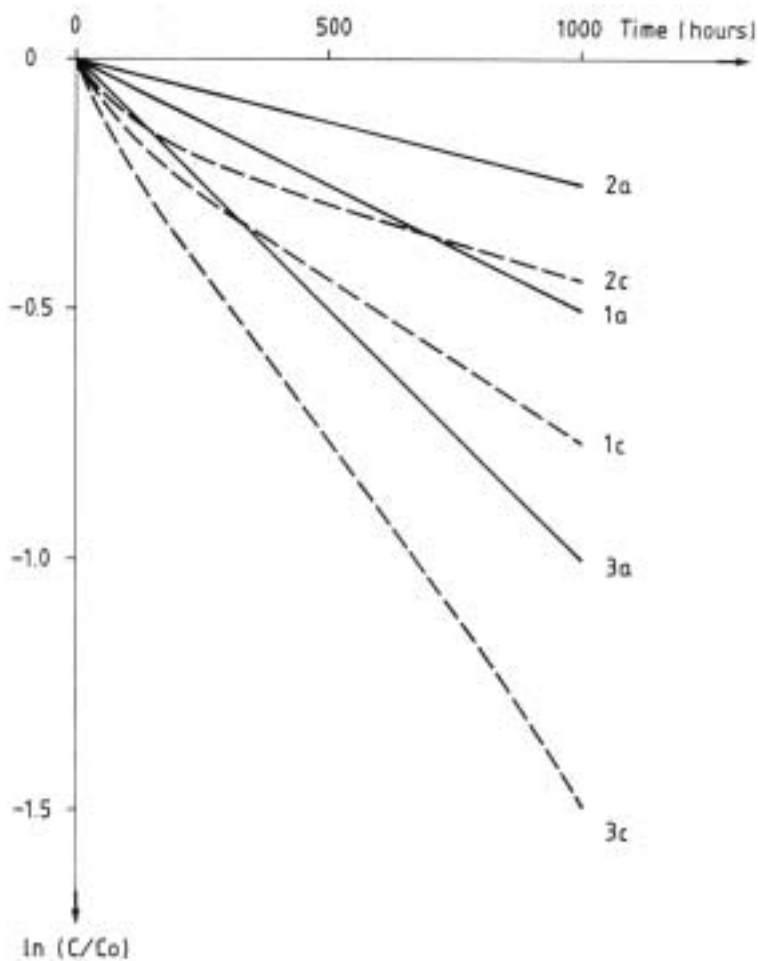
där T_b = bakgrundstransmission (%)
t = tid (timmar)

En avvägning måste göras mellan vilken noggrannhet som önskas i flödesbestämningen och tillåten väntetid för att dT_b/dt skall vara så nära det ovan givna värdet som möjligt, se figur 5-1.

Om bakgrundstransmissionen, T_b, ändras med tiden enligt figur 5-1 och en utspädningsmätning påbörjas innan T_b nått ett konstant värde enligt exemplen ovan så har även grundvattenflödets storlek betydelse för hur stort felet blir vid flödesbestämningen.

I figur 5-3 visas hur de skenbara utspädningsförloppen (1c, 2c, 3c) skiljer sig från de riktiga (1a, 2a, 3a) vid tre olika grundvattenflöden, Q_w , genom mätsektionen. Ändringen i bakgrundstransmission och spårämnets initialkoncentration är lika i de tre fallen, dvs T_b ökar från 85,00 % till 93,00 % enligt ekvation (5-1) och figur 5-1 respektive $C_0 = 15,00$ ppm (fall c).

- 1a-1c: $Q_w = 1,2 \text{ E-9 m}^3/\text{s}$
- 2a-2c: $Q_w = 0,6 \text{ E-9 m}^3/\text{s}$
- 3a-3c: $Q_w = 2,4 \text{ E-9 m}^3/\text{s}$



Figur 5-3. Riktiga och skenbara utspädningsförlopp vid olika grundvattenflöden, med initialkoncentration spårämne 15,00 ppm i mätsektionen.

Om grundvattenflödet beräknas ur de första 200 timmarna av utspädningsförloppen minskar felet med ökande grundvattenflöde enligt tabell 5-3. Om däremot de linjära delarna av utspädningsförloppen används för beräkningen så ökar felet med ökande grundvattenflöde, se tabell 5-4. Detta förklaras med att de linjära delarna av utspädningsförloppen har minskande spårämneskoncentration med ökande grundvattenflöde. Med minskande spårämneskoncentration ökar felet i koncentrationsberäkningen vid en given avvikelse på bakgrundstransmissionen.

Tabell 5-3. Grundvattenflöden beräknade ur de första 200 timmarna av utspädningsförloppen, vid initialkoncentrationen $C_0 = 15,00$ ppm.

| Fall | C_0 (ppm) | k^* | Q_w (m ³ /s) | Fel (%) |
|------|-------------|-------|---------------------------|---------|
| 2a | – | 1,0 | 0,6 E-9 | 0 |
| 2c | 15,00 | 3,6 | 2,2 E-9 | + 260 |
| 1a | – | 1,0 | 1,2 E-9 | 0 |
| 1c | 15,00 | 2,3 | 2,8 E-9 | + 130 |
| 3a | – | 1,0 | 2,4 E-9 | 0 |
| 3c | 15,00 | 1,8 | 4,3 E-9 | + 80 |

* Utspädningsförloppets relativa lutningskoefficient.

Tabell 5-4. Grundvattenflöden beräknade ur utspädningsförloppen mellan 400 och 1 000 timmar, vid initialkoncentrationen $C_0 = 15,00$ ppm.

| Fall | C_0 (ppm) | k^* | Q_w (m ³ /s) | Fel (%) |
|------|-------------|-------|---------------------------|---------|
| 2a | – | 1,00 | 0,60 E-9 | 0 |
| 2c | 15,00 | 1,23 | 0,74 E-9 | + 23 |
| 1a | – | 1,00 | 1,20 E-9 | 0 |
| 1c | 15,00 | 1,28 | 1,53 E-9 | + 28 |
| 3a | – | 1,00 | 2,40 E-9 | 0 |
| 3c | 15,00 | 1,37 | 3,30 E-9 | + 37 |

* Utspädningsförloppets relativa lutningskoefficient.

Vid en jämförelse framgår det av tabellerna 5-1 – 5-4 att vid en given avvikelse i bakgrundstransmissionen har grundvattenflödets storlek mindre betydelse för felet än spårämnets initialkoncentration vid bestämningen av grundvattenflödet genom mätsektionen.

Om initialkoncentrationen av spårämne väljs så hög som möjligt med hänsyn till andra felkällor, t ex molekylär diffusion och densitetseffekter, blir felet i det bestämda grundvattenflödet litet (10–15 %), även om det i kalibreringsekvationen (2-1) ansatta värdet på bakgrundstransmissionen skiljer sig så osannolikt mycket som 8,00 % från det korrekta värdet.

Generellt kan sägas att vid bestämningen av det ostörda grundvattenflödet i sprickzoner ger osäkerheten i faktorn α , som anger till vilken grad grundvattenflödet konvergerar och divergerar i närheten av borrhålet ett betydligt större fel än de som orsakas av utrustning och mätteknik enligt beskrivningen ovan. Om borrhningen av ett hål genom en sprickzon ej stört sprickzonen utanför borrhålsdiametern så kommer grundvattenflödet inom dubbla borrhålsradien att konvergera genom borrhålet, dvs $\alpha = 2$. På grund av störningar såsom uppspräckning eller igensättning kommer α att variera inom uppskattningsvis $\alpha = 2 \pm 1,5$ vilket ger en noggrannhet i bestämningen av det ostörda grundvattenflödet med ± 75 %.

6 Diskussion och slutsatser

Denna rapport har behandlat modifiering och förbättring av en utrustning för mätning av grundvattenflödet genom avtätade borrhålssektioner, s k utspädningssond. Sonden har provats i laborietester och vid fem utspädningsmätningar i hammarborrhål. Generellt kan sägas att den modifierade utspädningssonden fungerat väl. Vid fältmätningarna erhöles god korrelation mellan ändringar i grundvattenflöde och uppmätta ändringar i den hydrauliska gradienten inom försöksområdet. Indirekta jämförelser med hydraultester uppvisade små differenser, vilka ligger inom metodernas felmarginaler. Den modifierade utspädningsutrustningens prestanda avseende mätgränser, mättider, funktion och driftsäkerhet visar att utspädningsmetoden är en väl användbar teknik för in-situ bestämning av grundvattenflöden under naturlig gradient och i den naturliga gradientens riktning.

Några punkter av speciellt intresse för metodens begränsningar avseende utrustning och utvärdering diskuteras i avsnitten 6.1 och 6.2 nedan.

6.1 Utrustning

6.1.1 Manschettsystem

Manschettsystemet har modifierats bl a för att minimera den totala tiden för genomförande av en utspädningsmätning. Den nödvändiga tiden för att mäta ett specifikt grundvattenflöde genom mätsektionen bestäms av fem faktorer:

- Hydrauliska konduktiviteten.
- Hydrauliska gradienten.
- Borrhålsdiametern.
- Vattenvolymen i mätsektionen.
- Önskad differens mellan spårämnets start- och slutkoncentration.

Av dessa fem faktorer är det endast vattenvolymen i mätsektionen och spårämneskoncentrationens differens som är relaterade till utrustningen och kan påverkas. Vattenvolymen har minskats med dummy kroppar så mycket som är möjligt utan att grundvattenströmningen genom mätsektionen störs. Fältmätningarna visar att med transmissionsmätarens goda upplösning och ett vattentroget spårämne är det tillräckligt med 3–5 % i differens mellan spårämnets start- och slutkoncentration i mätsektionen. De mättider som redovisas i avsnitt 3.2.2 och appendix 1 är beräknade under de ovan givna förutsättningarna och kan inte minskas. Däremot kan det tvärtom vara så att det vid stora gradienter i högkonduktiva sektioner ($1E-5$ – $1E-6$) är nödvändigt att förlänga mättiden på grund av att tidsutrymmet för den s k omblandningsfasen annars blir för kort.

Väntetiden från det att sonden sänkts till mätsektionen och till dess att grundvattnet är så fritt från sedimenterbara partiklar att spårämne kan injiceras och en utspädningsmätning påbörjas har minskats genom möjligheten att expandera översta manschetten först och låta partiklarna sjunka nedanför mätsektionen innan nedre manschetten expanderas.

Det finns möjlighet att ytterligare minska väntetiden och minimera störningen från sedimenterbara partiklar genom att innesluta transmissionsmätarens strålgång i en "kyvett". Ett finare filter monteras då på cirkulationspumpens inlopp och en stor del av utloppsflödet pumpas genom "kyvetten". Vilken tidsfördröjning eller störning detta eventuellt ger på utspädningsförloppet måste undersökas vidare genom beräkningar och laboratorietester.

En metod för bestämning av mätsektionernas medeldiameter med hjälp av utspädningssondens manschetter utprovades och gav mycket bra resultat i laboratorietester. Metoden användes vid utspädningsmätningarna i hammarborrhålen. Jämförande mätningar med caliper-log har ej utförts men borde vid senare tillfälle provas. Erhålls en god korrelation innebär det att utspädningsmetoden blir än mer ekonomisk, då särskilda caliper loggningar av mätsektionerna ej behöver göras.

6.1.2 Transmissionsmätare och cirkulationsenhet

Transmissionsmätaren och cirkulationsenheten har fungerat väl ned till de djup och under de tidsrymder de varit nedsänkta i borrhålen. Den förenklade spårämnespåfyllningen och den automatiska tryckkompresseringsanordningen har väsentligt underlättat handhavandet av cirkulationsenheten.

6.2 Utvärdering

Vid mätning av grundvattenflödet i sprickzoner med utspädningsmetoden relateras det uppmätta grundvattenflödet genom mätsektionen i borrhålet till storleken av det ostörda grundvattenflödet genom sprickzonen.

Det uppmätta flödet genom mätsektionen kan vara felaktigt beroende på fel i utrustning och osäkerheter i mättekniken samt ett spårämne som ändrar de kemiska och fysikaliska förhållandena på vattnet i mätsektionen gentemot omgivande grundvatten. Andra osäkerhetsfaktorer finns också vid konverteringen av det uppmätta flödet till ostört grundvattenflöde i sprickzonen.

6.2.1 Utrustning och spårämne

De i denna rapport redovisade undersökningarna visar att utrustning och spårämne orsakar mycket små fel i det uppmätta flödet och utrustningens konstruktion i kombination med rätt vald spårämneskoncentration gör alla utom en av dessa felkällor försumbara. Det är endast utspädning orsakad av spårämnets molekylära diffusion in i sprickorna som inte kan elimineras. Beroende på om felet önskas försumbart, dvs mindre än 1 % eller om ett fel på 10 % accepteras är det minsta mätbara flödet 100 eller 10 gånger högre än den molekylära diffusionshastigheten ut från mätsektionen. Den molekylära diffusionshastigheten kan emellertid inte mätas in-situ då den ej kan skiljas från ren advektiv transport i ett naturligt system med en hydraulisk gradient. I sprickigt medie får därför olika typer av laboriemätningar och medelvärdesberäkningar ligga till grund för bestämningen av diffusionshastigheten i varje enskild mätsektion. Diffusionshastigheterna är så låga att även fel med en faktor tio i bestämningarna ger god marginal för mätning av grundvattenflödet med mindre än 10 % fel orsakat av spårämnets diffusion. Under dessa förutsättningar är den minsta mätbara flödes-hastigheten $4 \text{ E-11} - 6 \text{ E-12} \text{ m/s}$ i sprickig granit.

6.2.2 Mätteknik

Den optiska mätningen av spårämneskoncentrationen med transmissionsmätare påverkas av bakgrundstransmissionen, T_b , vars storlek beror på till vilken grad grundvattnet och däri suspenderade partiklar absorberar det ljus som transmissionsmätaren utsänder. Då fältmätningarna visade att det i vissa fall kan ta lång tid att erhålla en konstant hög bakgrundstransmission i mätsektionen har beräkningar gjorts på hur stort felet blir om spårämne injiceras och en utspädningsmätning påbörjas då T_b fortfarande ändras snabbt. Felet har också beräknats vid en konstant differens i T_b mellan det ansatta värdet i kalibreringsekvationen till transmissionsmätaren och det verkliga värdet i mätsektionen.

Om spårämneskoncentrationen i mätsektionen är så hög som möjligt med hänsyn till andra felkällor, t ex molekylär diffusion och densitetseffekter, visar beräkningarna att felet i det bestämda grundvattenflödet blir i storleksordningen 60 % om bakgrundstransmissionen ändrat sig från 85,00 % T_b till cirka 93,00 % T_b under 200 timmars utspädning. Bestäms däremot grundvattenflödet med en konstant differens i bakgrundstransmissionen på 8,00 % enheter blir felet endast 10–15 %.

En konstant differens ger således ett mindre fel i bestämningen av grundvattenflödet än om T_b ändras med tiden, även om differensen mellan ansatt och verkligt värde vid varje tidpunkt är större i det konstanta fallet.

Beräkningarna ovan får ses som exempel på hur stort felet kan bli om det ansatta värdet på T_b avviker osannolikt mycket från verkligt värde. I de genomförda fältmätningarna har spårämnet injicerats först när bakgrundstransmissionen visat ett konstant högt värde. I efterhand gjorda beräkningar visar emellertid att det är tillräckligt att vänta med spårämnesinjiceringen till dess att ändringen i bakgrundstransmissionen, uttryckt som dT_b/dt , understiger $7,5 \cdot 10^{-3}$ %/h för att felet vid bestämningen av grundvattenflödet skall bli försumbart. Därmed kan väntetiden reduceras avsevärt. Den ändring av transmissionsmätaren som diskuterats i avsnitt 6.1.1 med inneslutning av strålgången i en ”kyvett” skulle också bidra till minskad väntetid.

6.2.3 Konvertering av uppmätt flöde till grundvattenflöde i sprickzonen

Utspädningsmätningen ger grundvattenflödet genom mätsektionen. Grundvattenflödet per ytenhet vinkelrätt transportriktningen i sprickzonen beräknas ur det uppmätta flödet med antagande om storleken på kontraktionsfaktorn, α , som anger till vilken grad grundvattenflödet konvergerar och divergerar i närheten av borrhålet. För att erhålla vattenhastigheten i de enskilda sprickorna krävs även antagande om sprickvidd eller flödesporositet.

I det ideala fallet är kontraktionsfaktorn $\alpha = 2$. På grund av störningar såsom uppspräckning och igensättning kommer α att variera inom uppskattningsvis $\alpha = 2 \pm 1,5$, vilket ger en noggrannhet i bestämningen av det ostörda grundvattenflödet med ± 75 %.

Sprickvidder och flödesporositeter kan endast fås från laboratorie- och fältförsök i sprickiga medier med hydraultester och spår-försök. Vilket fel som introduceras då värden från dessa försök appliceras på specifika mätsektioner kan inte exakt kvantifieras, men beror på flödesporositetens och sprickviddens variationsbredd i det medie och den hydrauliska konduktivitet som utspädningsmätningen utförs i.

Använda beteckningar

| | | |
|----------|---|---------|
| α | Kontraktionsfaktor | – |
| a_1 | Ellipsens storaxel | m |
| b_1 | Ellipsens lillaxel | m |
| β | Skärningsvinkel mellan sprickplan och planet vinkelrätt borrhålsaxeln | |
| C | Koncentration spårämne i mätsektionen | ppm |
| C_o | Initialkoncentration i mätsektionen | ppm |
| D^* | Diffusionskoefficient i det grundvattenförande mediet | m^2/s |
| γ | Grundvattenflödets infallsvinkel mot ellipsernas storaxlar | |
| I | Hydraulisk gradient | – |
| K | Hydraulisk konduktivitet | m/s |
| k | Relativ lutningskoefficient | – |
| K_1 | Hydraulisk konduktivitet i störd zon | m/s |
| K_2 | Hydraulisk konduktivitet i ostörd sprickzon | m/s |
| L | Längd på mätsektion | m |
| Q_w | Grundvattenflöde genom mätsektionen i borrhålet | m^3/s |
| Q_f | Grundvattenflöde i den ostörda sprickzonen | m^3/s |
| r | Borrhålsradie | m |
| r_d | Yttre radie av störd zon | m |
| r_i | Radie av mätinstrument/dummy | m |
| t | Tid | s |
| T | Transmission | % |
| T_b | Transmission, bakgrundsvärde | % |
| T_1 | Transmission, bakgrundsvärde vid $t=0$ | % |

| | | |
|-------|---|-------|
| T_t | Total transmission | % |
| V | Volym vatten i mätsektionen | m^3 |
| v | Grundvattnets flödes hastighet genom mätsektionen | m/s |
| v_d | Skenbar flödes hastighet orsakad av molekylär diffusion | m/s |
| v_f | Grundvattnets Darcy-hastighet i den ostörda sprickzonen | m/s |
| v_h | Skenbar flödes hastighet orsakad av densitetseffekter | m/s |
| v_m | Skenbar flödes hastighet orsakad av artificiell omblandning | m/s |

Referenser

Almén K-E, Ekman L, Olkiewicz A, 1978. Försöksområdet vid Finnsjön. Beskrivning till berggrunds- och jordartskartor. SKBF-KBS Teknisk rapport 79-02.

Andersson P, Klockars C-E, 1985. Hydrogeological investigations and tracer tests in a well-defined rock mass in the Stripa mine, SKB Technical Report 85-12.

Edlund L, 1980. Utveckling av fältinstrument för transmissions- och extinktionsmätningar, Vannet i Norden, nr 1-1980, sid 61-68.

Environmental Protection Services, Department of the Environment Canada, 1984. Velocity Correction Factor when Groundwater Flow Is Not Perpendicular to the Borehole (opublicerat material).

Forschungsstelle für Radiohydrometrie, 1966. Jahresbericht 1965, am Institut für allgemeine und angewandte Geologie und Mineralogie der Universität München.

Gustafsson E, Klockars C-E, 1981. Studies on Groundwater Transport in Fractured Crystalline Rock under Controlled Conditions Using Nonradioactive Tracers, KBS Teknisk rapport, 81-07.

Gustafsson E, 1983. Beräkning av grundvattenflödet i en sprickzon med hjälp av utspädningsteknik, en metodstudie, KBS Arbetsrapport, Ar. 84-06.

Halevy E, Moser H, Zellhofer O, Zuber A, 1967. Borehole Dilution Techniques: A Critical Review, Isotopes in Hydrology, p 531-564 (Proc Symp Vienna 1967), IAEA, Vienna.

Institut für Radiohydrometrie, 1969. Jahresbericht 1968, der Universität München.

Jämtlid A, Magnusson K-Å, Olsson O, 1981. Elektriska mellanhålmätningar i Finnsjön, Rapport Prav 4.23.

Klockars C-E, Persson O, 1978. Berggrundsvattenförhållanden i Finnsjöområdets nordöstra del. KBS Teknisk rapport 60.

Montazer P, Stephansson O, 1983. Finite Element Modelling of the Influence of a Borehole on the Permeability of a Single Fracture.

Norton D, Knapp R, 1977. Transport Phenomena in Hydrothermal Systems: The Nature of Porosity. Amer Jour Sci 277, 913-936.

Ogilvi N A, 1958. Elektroliteskij metod opredelenija skorostej filtracii, Bjull, ONTI, Nr 4, Gosgeoltehzdat.

Olkiewicz A, Scherman S, Kornfält K-A, 1979. Kompletterande berggrundsundersökningar inom Finnsjö- och Karlshamnsmrådena. SKBF-KBS Teknisk rapport 79-05.

Skagius K, Svedberg G, Neretnieks I, 1981. A Study of Strontium and Cesium Sorbtion on Granite. Report Prav 4.26.

Skagius K, Neretnieks I, 1982. Diffusion in Crystalline Rocks of Some Sorbing and Nonsorbing Species, KBS Teknisk Rapport, 82-12.

Skagius K, Neretnieks I, 1985a. Porosities and Diffusivities of Some Nonsorbing Species in Crystalline Rocks, SKB Technical Report 85-03.

Skagius K, Neretnieks I, 1985b. Diffusivity Measurements and Electrical Measurements in Rock Samples under Mechanical Stress, SKB Technical Report 85-05.

Instrumentspecifikation

Utrustning för in-situ bestämning av grundvattenflödet i sprickzoner med utspädningsteknik i borrhål. Utrustningens uppbyggnad framgår av figur 2-1.

Mätprincip

Sprickzonen avtätas med manschetter och ett spårämne injiceras utan övertryck i mätsektionen mellan manschetterna. Utspädningen av spårämnet är proportionell mot vattenflödet genom mätsektionen och således även mot grundvattenflödet i sprickzonen.

Borrhålsdiameter

≥76 mm. Framtagna manschetter med dummykroppar är avsedda för 95–125 mm borrhålsdiameter. Manschettsystemet kan lätt bytas ut för andra borrhålsdiametrar.

Maximalt arbetsdjup

Motsvarande 500 m vattenpelare.

Sektionslängd

0,75–20,00 m. Bestäms av längden på dummykropparna, vilka är utbytbara och cirkulationspumpens kapacitet. Maximalt kan mätsektionen ökas till 20 m utan omblandningsproblem. Minsta sektionlängd med framtagna manschetter är 750 mm. Med andra manschetter kan sektionlängden minskas till 300 mm.

Manschetternas tätningslängd

1 m.

Sondens totala längd vid 2 m lång mätsektion

5 200 mm, inklusive manschetter och cirkulationsenhet. Delningspunkt under transmissionsmätaren för att underlätta etablering i borrhålen.

- *Övre delen:* cirkulationsenhet, övre manschett, dummykropp och transmissionsmätare: 3 000 mm.
- *Nedre delen:* nedre manschett och dummykropp: 2 200 mm.

Vattenvolym i 2 m mätsektion med 89 mm diameter dummykroppar

Varierar med borrhålsdiametern enligt:

| Borrhålsdiameter (mm) | Vattenvolym (ml) |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 100 | 4 864 |
| 105 | 6 470 |
| 110 | 8 154 |
| 115 | 9 917 |
| 120 | 11 758 |

Omblandning i mätsektionen

Spårämnet fördelas jämnt i mätsektionen med en regelbar cirkulationspump, 0–1 350 ml per minut.

Injicering av spårämne

Utan övertryck från spårämnesbehållare kopplad via en shunt till cirkulationspumpens utlopp. Injiceringen styrs från manöverenheten vid markytan.

Beroende på vattenvolymer i mätsektionen räcker spårämnet till 3 á 4 utspädningsmätningar innan utrustningen måste lyftas ur borrhålet för påfyllning av spårämne.

Spårämnena

Färgspårämnena, Blue Dextran 2000, Cr-EDTA, Metylenblått. Ljuskälla och detektor kan bytas för mätning av andra spårämnena.

Koncentrationsmätning

Optiskt med transmissionsmätare i mätsektionen. 200 mm lång strålgång i vattnet. Lägsta rekommenderade bakgrundstransmission, T_b , i grundvattnet: 77 %.

Noggrannhet

0,01 % T_t . I koncentration spårämne ger 0,01 % T_t en noggrannhet som bestäms av ljuskällans och detektorns våglängdsområde i förhållande till färgspårämnets absorptionspektra.

Ljuskälla och detektor är utbytbara.

För spårämnet Blue Dextran 2000 är noggrannheten bättre än 0,01 ppm koncentrationsändring. För Cr-EDTA och Metylenblått är noggrannheten större.

Minsta mätbara flöde

Bestäms av förhållandet (kvoten) mellan molekylär diffusion av spårämnet in i sprickorna och advektion (grundvattentransport) samt kravet på noggrannhet i mätningen. Exempelvis kan ett lägre flöde bestämmas för kvoten 0,1 än om den molekylära diffusionen önskas försumbar dvs kvoten $<0,01$. Vid kvoten 0,01 ges minsta mätbara flödet i följande tabell.

| Grundvattenförande medie | Flödes hastighet (m/s) |
|---|------------------------|
| Grovsand | 3 E-6 |
| Granit och Gnejs (hel och "sprickig") | 6 E-11 – 4E-10 |
| Hydrauliskt högkonduktiv sprickzon i Granit och Gnejs | 4 E-9 |

Mättid

Bestäms av fem faktorer:

- Vattenvolymen i mätsektionen.
- Borrhålsdiametern.
- Sprickzonens hydrauliska konduktivitet.
- Hydrauliska gradienten.
- Önskad differens mellan spårämnets start- och slutkoncentration.

Mättiden till $C/C_0 = 0,95$ respektive 0,97 vid optimal dummy diameter i 110 mm diameter borrhål vid hydrauliska gradienten 0,01 och 0,05 ges i följande tabell:

| K (m/s) | Mättid i 110 mm diameter borrhål * | |
|---------|------------------------------------|-------------|
| | I = 0,01 | I = 0,05 |
| E-5 | 40–70 min | 8–14 min |
| E-6 | 8–12 tim | 80–140 min |
| E-7 | 70–120 tim | 14–24 tim |
| E-8 | 30–50 dygn | 6–10 dygn |
| E-9 | 300–500 dygn | 60–100 dygn |

* I 56 mm diameter borrhål är mättiden hälften av den som anges i tabellen.

Registrering av mätdata

- Punktvis med IC-minne för 500 mätvärden.
Provtagningsintervall kan väljas mellan 7 lägen: 7,5, 15, 30 minuter, 1, 2, 4, 8 timmar.
- Kontinuerligt med skrivare. Skrivarutgång 0–10 V.

Strömförsörjning

Nät och/eller batteridrift.

- 220 V AC, 6 A säkring.
- 24 V DC, 18,0 Ah batteri.

Automatisk uppladdning/underhållsladdning av batteri vid nät drift.
Drifttid med batteri ca 300 timmar.

Temperaturmätning i mätsektionen

0°C + 50°C, 0,1°C.

Borrhålsdiametermätning

För bestämning av vattenvolymen i mätsektionen. Sker med hänsyn av manschetterna som avtätar mätsektionen. Upplösning 0,1 mm i diameter.

Turbiditetsmätning i mätsektionen

Grundvattnets turbiditet/grumlighet bestäms genom mätning av 90° spritt ljus.

Piezometriskt tryck och hydraulisk konduktivitet

Med en förgrening på inloppsröret till cirkulationspumpen och en separat tryckgivare är det möjligt att mäta/kontrollera hydrauliska konduktiviteten i mätsektionen samt bestämma dess piezometriska tryck.

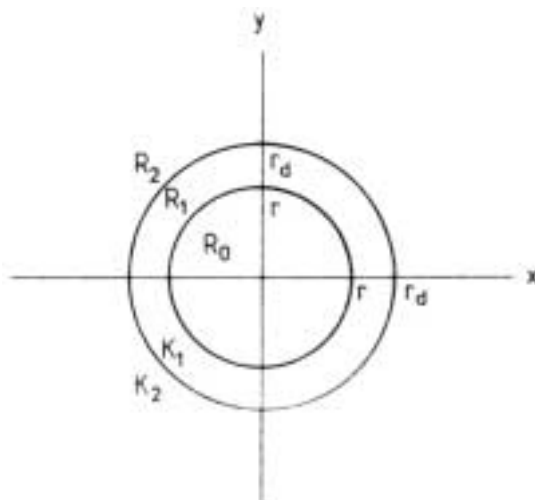
Beräkning av kontraktionsfaktorn

Beräkning av kontraktionsfaktorn, α , när grundvattenflödet ej är vinkelrätt mot borrhålsaxeln.

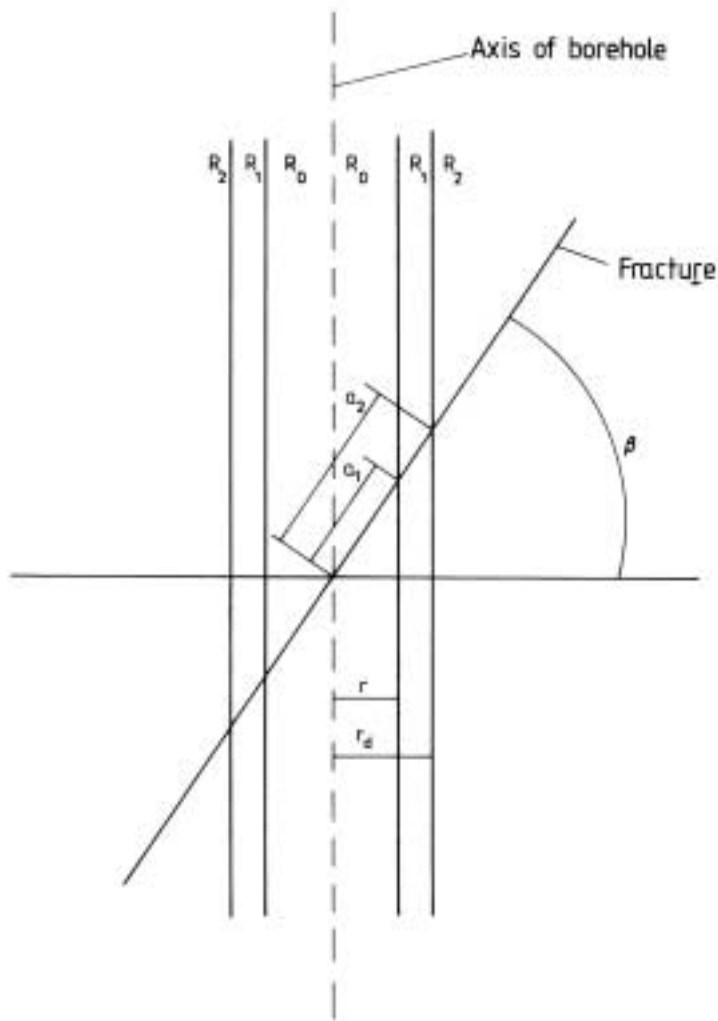
Kontraktionsfaktorn, α , framräknad enligt ekvation (3-4) i avsnitt 3.1 gäller när sprickorna skär borrhålsaxeln i 90° vinkel och figur A2-1 visar schematiskt hur borrhålet, en störd zon och den ostörda sprickan fördelar sig i sprickplanet under denna förutsättning.

Den inre cirkulära skivan, radie r , representerar borrhålet R_0 . Cirkulära ringen R_1 , begränsad av radierna r och r_d representerar den störda zonen runt borrhålet. Den ostörda sprickan utgör region R_2 .

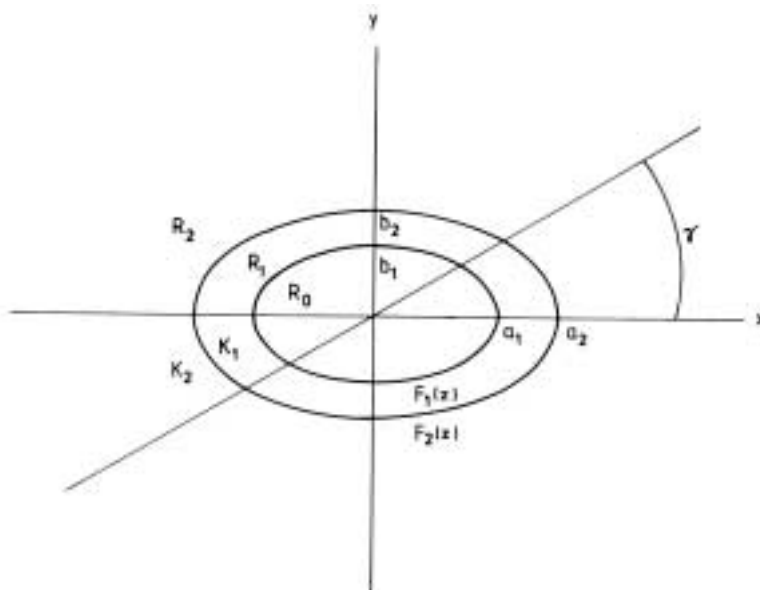
Den hydrodynamiska störningen i sprickan inducerad av borrhålet beror inte enbart av hydrauliska konduktiviteten i varje region (K_j för $j = 1,2$) utan också på regionernas geometri. För alla skärningsvinklar mellan sprickorna och borrhålsaxeln som avviker från 90° kommer gränslinjerna mellan varje region, dvs borrhål, störd zon och ostörd spricka, att bli en ellips vars dimensioner bestäms av skärningsvinkeln. Figur A2-2 och A2-3 visar geometrin i de fall skärningsvinkeln avviker från 90° .



Figur A2-1. Schematisk skiss i sprickplanet av borrhål, R_0 , störd zon, R_1 , och ostörd spricka, R_2 , när sprickorna skär borrhålsaxeln i 90° vinkel.



Figur A2-2. *Sektion av borrhål längs sin axel med störd zon, R_1 , och ostörd spricka, R_2 , vid skärningsvinkeln β mellan sprickplan och planet vinkelrätt borrhålsaxel.*



Figur A2-3. *Projektion på sprickplan av borrhål, R_0 , störd zon, R_1 , och ostörd spricka, R_2 , vid skärningsvinkeln β mellan sprickplan och planet vinkelrätt borrhålsaxeln. Riktningen på grundvattenflödet i sprickan markeras av pilen.*

För att beräkna kontraktionsfaktorn i dessa fall måste följande parametrar bestämmas /opublicerat material Environmental Protection Services, Canada, 1984/:

- (i) Storaxeln, a_j , och lillaxeln, b_j , för varje ellips ($j = 1,2$)
- (ii) Hydrauliska konduktiviteten, K_j , för varje region R_j ($j = 1,2$)
- (iii) Infallsvinkeln, γ , som grundvattenflödet har mot ellipsernas storaxlar.

Kontraktionsfaktorn, α , ges i dessa fall av

$$\alpha = \frac{Q_w}{Q_f} \quad (1)$$

där Q_f är grundvattenflödet i den ostörda formationen och Q_w är flödet genom borrhålet.

$$Q_w = K_1 \cdot \psi_1(x_2, y_2, r_1, \beta, \gamma) - K_1 \cdot \psi_1(x_1, y_1, r_1, \beta, \gamma) \quad (2)$$

där ψ_1 = strömfunktionen
 β = skärningsvinkeln mellan sprickan och planet vinkelrätt borrhålsaxeln.

$$x_1 = r_1 \sec\beta \cos\theta_1, y_1 = r_1 \sin\theta_1 \text{ för } \theta_1 = \arctan\left(-\frac{1}{\sec\beta \tan\gamma}\right)$$

$$x_2 = r_2 \sec\beta \cos\theta_2, y_2 = r_2 \sin\theta_2 \text{ för } \theta_2 = 180^\circ + \theta_1$$

Grundvattenflödet i den ostörda formationen, Q_f , fås ur:

$$Q_f = 2 \cdot K_2 \cdot I \cdot r_1 (\sec\beta \cos\theta_1 \sin\gamma - \sin\theta_1 \cos\gamma) \quad (3)$$

$$\text{där } \theta_1 = \arctan\left(-\frac{1}{\sec\beta \tan\gamma}\right)$$

I de fall skärningsvinkeln mellan sprickorna och borrhålsaxeln avviker från 90° är grundvattenflödets riktning avgörande för kontraktionsfaktorns storlek. Ju större infallsvinkel, γ , grundvattenflödet har mot ellipsernas storaxlar desto större blir kontraktionsfaktorn, α . Om borrningen ej stört omgivande sprickplan kommer störningen i grundvattnets flödesfält runt borrhålet aldrig att överskrida dubbla längden på ellipsens storaxel a_1 . Kontraktionsfaktorn, α , kan därvid uttryckas enligt:

$$\alpha = \frac{2 \cdot a_1}{b_1} \quad (4)$$