

**R-02-30**

# **Beräkning av grundvattenflödet i en sprickzon med hjälp av utspädningsteknik, en metodstudie**

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



# **Beräkning av grundvattenflödet i en sprickzon med hjälp av utspädningsteknik, en metodstudie**

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](http://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 (SKBF KBS Arbetsrapport AR.84-06), 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

Svensk Kärnbränsleförsörjning AB, avdelning KBS, har givit Sveriges Geologiska AB i uppdrag att genomföra en metodstudie avseende möjligheten att genom utspädnings-teknik i borrhål bestämma grundvattenflödet i en sprickzon. Studien har även innefattat utveckling av en utrustning för detta ändamål.

Utspädningsmetoden möjliggör en oberoende direkt beräkning av grundvattenflödet i en punkt av en sprickzon under naturlig eller inducerad hydraulisk gradient. Metoden bygger på att utspädningen av ett spårämne, injicerat utan övertryck i en avskärmad sprickzon, står i proportion till grundvattenflödet i zonen.

En utrustning för utspädningsmätningar dimensionerad för minimum 76 mm diameter borrhål har framtagits. Utrustningen mäter optiskt (transmissionsmätning) spårämnes-koncentrationen i mätsektionen och är så konstruerad att injicering av spårämne samt omblandning i mätsektionen styrs elektriskt från markytan. Detta medför att tre, fyra utspädningsförsök kan utföras innan utrustningen behöver lyftas ur borrhålet för påfyllning av spårämne. Utrustningen har testats under kontrollerade förhållanden i laboratorie- och fältförsök. Försöken visar att utspädningsmetoden ger en god bestämning av grundvattnets flöde och hastighet.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund</b>	7
<b>2</b>	<b>Teori och förutsättningar</b>	9
<b>3</b>	<b>Översiktlig teknisk beskrivning</b>	15
3.1	Allmänt	15
3.2	Transmissionsmätare	15
3.3	Cirkulationsenhet	17
<b>4</b>	<b>Laboratorieförsök</b>	19
<b>5</b>	<b>Fältförsök</b>	21
5.1	Allmänt	21
5.2	Försök i borrhål G2	22
5.3	Jämförelse mellan utspädningsförsök, hydrauliska tester och spårförsök	24
<b>6</b>	<b>Diskussion och slutsatser</b>	27
	<b>Använda beteckningar</b>	29
	<b>Referenser</b>	31
<b>Appendix 1</b>	Transmissionsmätare	33
<b>Appendix 2</b>	Figurförteckning	35
<b>Appendix 3</b>	Figurer	37

# 1 Bakgrund

I kristallin berggrund sker grundvattnets rörelse till övervägande del i förekommande sprick- och krosszoner. Ämnen lösta i grundvattnet kommer följaktligen att transporteras i dessa sprick- och krosszoner. Kvantifiering av detta grundvattenflöde är därför av stor betydelse i säkerhetsanalysen vid förvaring av kärnbränsleavfall i kristallin berggrund.

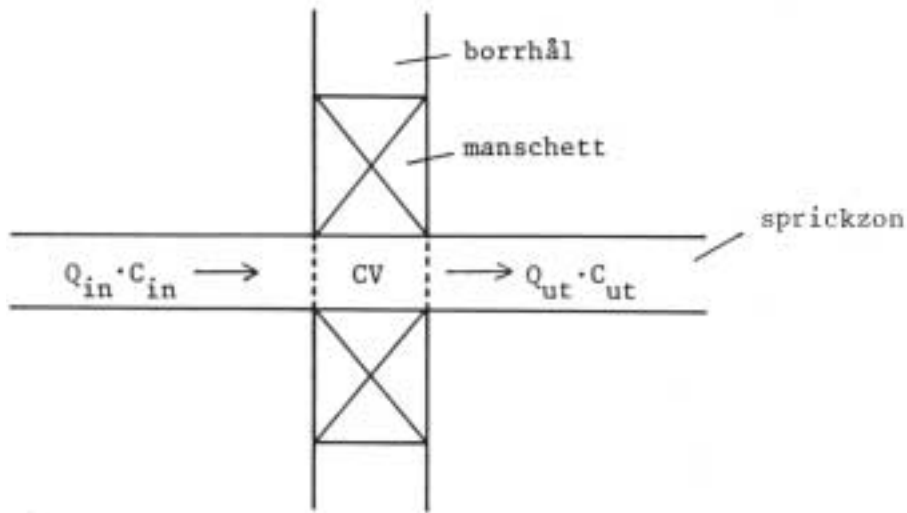
Svensk Kärnbränsleförsörjning AB, avdelning KBS, har givit Sveriges Geologiska AB i uppdrag att genomföra en metodstudie avseende möjligheten att beräkna grundvattenflöde i en sprickzon genom utspädningsteknik i borrhål. Studien innefattar även utveckling av en utrustning för detta ändamål.

Utspädningstekniken utgör en möjlighet att direkt beräkna grundvattenflödet lokalt i en sprickzon, till skillnad mot andra metoder som bygger på beräkningar av tryckgradient och hydraulisk konduktivitet. Metoden bygger på att utspädningen av ett spårämne, injicerat utan övertryck mellan manschetter omslutande en sprickzon, står i proportion till grundvattenflödet i zonen.

Beräkning av grundvattenflödet med utspädningsteknik har först beskrivits av Kocherin 1916 och har sedan dess utnyttjats för att beräkna grundvattenflödet i porösa medier /1/. Vid fält- och laboriemätningar i porösa medier har goda resultat rapporterats av bland annat Institut für Radiohydrometrie /2, 3, 4, 5/, Halevy et al /1/, Carlsson /6/ samt Mälkki /7/. Från tillämpningar av utspädningsteknik i sprickiga medier finns det mycket få referenser. Maini /8/ beräknade med god noggrannhet grundvattenflödet med utspädningsteknik vid laborieförsök i en sprickmodell. Lewis et al /9/ tillämpade utspädningstekniken i sprickigt berg i Placer County i Kalifornien. De tillsatte fluorecerande spårämne i hela borrhål och mätte utspädningen på intermittert tagna vattenprover.

## 2 Teori och förutsättningar

Om ett borrhål penetrerar ett vattenförande sprickplan och borrhålet avtätas över och under sprickplanet, kan grundvattenflödet genom den avtätade sektionen av borrhålet beräknas ur utspädningen av ett spårämne som injicerats mellan avtätningarna, se skiss.



*Principskiss – Sprickplan som penetreras av ett borrhål, vilket avtätats över och under sprickplanet.*

Mellan avtätningarna i borrhålet är spårämneskoncentrationen  $C$  och volymen  $V$ .

Kontinuitetsvillkoret ger:

$$Q_{in} \cdot C_{in} \cdot dt - Q_{ut} \cdot C_{ut} \cdot dt = d(C \cdot V) \quad (1)$$

antag att:

$$\begin{aligned} C_{in} &= 0 \\ Q_{in} &= Q_{ut} = Q \\ dV &= 0 \end{aligned}$$

Med dessa antaganden blir (1)

$$dC \cdot V = -Q \cdot C_{ut} \cdot dt \quad (2)$$

Med fullständig omblandning mellan avtätningarna blir  $C_{ut}$  samma som  $C$ , vilket ger

$$\int_{C_0}^C \frac{1}{C} dC = - \int_0^t \frac{Q}{V} dt \quad (3)$$

som med randvillkoret  $C = C_0$  vid tiden  $t = 0$  har lösningen

$$Q = -\frac{V}{t} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \quad (4)$$

Genom att dividera flödet,  $Q$ , med borrhålets tvärsnittsarea mellan avtätningarna fås grundvattnets medelhastighet genom borrhålet,  $v$ .

$$v = \frac{Q}{2 \cdot r \cdot L} \quad (5)$$

där  $r$  = borrhålsradien  
 $L$  = avståndet mellan avtätningarna (mätsektionens längd)

Borrhålet, som är en diskontinuitet i sprickplanet, utgör emellertid en störning i flödesfältet. Grundvattnets medelhastighet i det ostörda sprickplanet,  $v_f$ , fås genom att införa en kontraktionsfaktor,  $\alpha$ , definierad enligt

$$v_f = \frac{v}{\alpha} \quad (6)$$

Kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ , beror av störningen i sprickplanet lokalt kring borrhålet och ges vid laminärt flöde av /1/.

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r}{r_d}\right)^2 + \frac{K}{K_1} \left(1 - \left(\frac{r}{r_d}\right)^2\right)} \quad (7)$$

där  $r$  = borrhålsradien  
 $r_d$  = radien av störd zon, t ex intryckt borrhåls i sprickplanet  
 $K_1$  = hydraulisk konduktivitet mellan  $r$  och  $r_d$   
 $K$  = det ostörda sprickplanets hydrauliska konduktivitet

Om borrhningen ej stört omgivande sprickplan så är radierna  $r_d$  och  $r$  lika, vilket ger  $\alpha = 2$ .

I figur 2-1 visas kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ , som funktion av förhållandet mellan hydrauliska konduktiviteten i sprickplanet och den störda zonen,  $K/K_1$ , för valda värden på  $r/r_d$ . När  $r/r_d$  är 0,9, vilket motsvarar en störd zon på 6 mm runt ett 110 mm diameter borrhål, är kontraktionsfaktorn 1,08 om hydrauliska konduktiviteten i den störda zonen är en tiopotens lägre än i sprickplanet. Av figuren framgår klart vikten av ett väl rensat borrhål vid utspädningsmätningar i fält, där radie och hydraulisk konduktivitet i en eventuell störd zon inte kan bestämmas.

Vid Forschungsstelle für Radiohydrometrie /2/ har man undersökt om kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ , påverkas av mätinstrument eller rörgång i mätsektionen mellan avtätningarna. Man fann att mätinstrument med radie upp till 0,9 gånger borrhålsradien ej påverkade kontraktionsfaktorn.

När en spårämneslösning introduceras mellan avtätningarna i borrhålet kommer dess utspädning inte enbart att bero av grundvattnets medelhastighet i det ostörda sprickplanet,  $v_f$ , och kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ . 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 (6) får därför utvidgas med flödestermerna, som står för den del av den uppmätta hastigheten genom borrhålet som orsakas av spårämne och mätinstrument, enligt

$$v_f = \frac{1}{\alpha} (v - v_h - v_d - v_m) \quad (8)$$

där

$v_f$	=	grundvattnets medelhastighet i det ostörda sprickplanet,
$\alpha$	=	kontraktionsfaktorn,
$v$	=	grundvattnets uppmätta medelhastighet genom borrhålet
$v_h$	=	skenbar flödes hastighet orsakad av densitetseffekter
$v_d$	=	skenbar flödes hastighet orsakad av molekylär diffusion
$v_m$	=	skenbar flödes hastighet orsakad av artificiell omblandning

### **Densitetseffekter**

Hög spårämneskoncentration eller ett mätinstrument som avger värme ger upphov till en densitetsskillnad mot omgivande grundvatten. Densitetsskillnaden orsakar ett hydrostatiskt flöde,  $v_h$ , ut från mätsektionen.

Vid Institut für Radiohydrometrie /3/ har mätningar av hydrostatiska utflödet genomförts i en tvådimensionell strömningsmodell, i ena fallet fylld med grovsand ( $k = 3 \text{ E-3 m/s}$ ) och i andra fallet fylld med fingrus ( $k = \text{E-2 m/s}$ ). Med varierande startkoncentration av spårämnet  $\text{NH}_4\text{Br}$  uppmättes i båda fallen ett hydrostatiskt utflöde om koncentrationen översteg 40 ppm, se figur 2-2.

Författaren veterligt har inga mätningar av hydrostatiskt utflöde orsakat av temperaturdifferenser utförts, men även en svag uppvärmning ger en densitetsskillnad motsvarande 40 ppm spårämne. Vid spårämneskoncentrationen 40 ppm är densitetsskillnaden av storleksordningen 0,04 ‰ och en uppvärmning av vatten ger 0,01 ‰/0,1°C mellan 10–15°C och 0,005 ‰/0,1°C mellan 5–10°C.

### **Molekylär diffusion**

Låg spårämneskoncentration eliminerar densitetseffekter men eliminerar inte diffusion av spårämnet. Även i frånvaro av alla andra störningar så existerar alltid diffusionen. Den skenbara flödes hastigheten,  $v_d$ , orsakad av molekylär diffusion kan beräknas ur följande samband, /3/:

$$v_d = \frac{\pi \cdot D^*}{r} \quad (9)$$

där  $D^*$  = spårämnets diffusionskoefficient i det grundvattenförande mediet.

Valda spårämnens diffusionskoefficient i fritt vatten samt Finnsjögranit ges i tabell 2-1 och tabell 2-2.

**Tabell 2-1. Diffusionskoefficient i fritt vatten**

Ämne	Koncentration	Temperatur	$D_v$	Anm
NaBr	0,1 M	25°C	1,5 E-9 m <sup>2</sup> /s	1)
Glucose	0,39 %	25°C	0,67 E-9 m <sup>2</sup> /s	1) 3)
Cr-EDTA	9,9 g/l	20°C	0,42 E-9 m <sup>2</sup> /s	2)
Uranine	10 g/l	20°C	0,45 E-9 m <sup>2</sup> /s	2)

1) Handbook of CHEMISTRY and PHYSICS /10/.

2) Skagius & Neretnieks /11/.

3) Blue Dextran 2000 har en struktur liknande en kedja Glucose molekyler.

**Tabell 2-2. Effektiv diffusionskoefficient i Finnsjögranit**

Ämne	Koncentration	Temperatur	$D_e$	Anm
Cr-EDTA	9,9 g/l	20°C	6,9 E-15 m <sup>2</sup> /s	2)
Uranine	10 g/l	20°C	2,3 E-15 m <sup>2</sup> /s	2)

2) Skagius & Neretnieks /11/.

Mätningar med NH<sub>4</sub>Br i porösa medier,  $k = 1 \text{ E-1} - 1 \text{ E-5 m/s}$ , visar att  $D^*$  minskar med hydraulisk konduktivitet /3/. Flödeshastigheten,  $v_d$ , är således proportionell mot hydrauliska konduktiviteten, men omvänt proportionell mot borrhålsradien.

Den plana horisontella delen av kurvorna i figur 2-2 är flödeshastighet,  $v_d$ , orsakad av molekylär diffusion. Mediet med lägst hydraulisk konduktivitet,  $k = 3 \text{ E-3 m/s}$ , uppvisar lägst flödeshastighet,  $v_d = 4,4 \text{ mm/dygn}$  ( $5,1 \text{ E-8 m/s}$ ). Flödeshastigheten,  $v_d$ , som funktion av borrhålsradie ges i tabell 2-3, 2-4 och figur 2-3 för valda spårämnen och medier.

**Tabell 2-3. Flödeshastighet,  $v_d$ , i fritt vatten (mm/dygn)**

Ämne	Radie (mm)						Anm
	17	25	50	75	100	150	
NaBr	24,0	16,3	8,1	5,4	4,1	2,7	4)
Glucose	10,7	7,3	3,6	2,4	1,8	1,2	4) 3)
Cr-EDTA	6,7	4,6	2,3	1,5	1,1	0,8	4)
Uranine	7,2	4,9	2,4	1,6	1,2	0,8	4)

3) Se tabell 2-1.

4) Teoretiskt värde enligt ekvation (9) och tabell 2-1.

**Tabell 2-4. Flödeshastighet,  $v_d$ , i olika medier (mm/dygn)**

Ämne	Medie	Radie (mm)						Anm
		17	25	50	75	100	150	
NH <sub>4</sub> Br	grovsand	20,3	11,6	6,8	4,3	3,4	2,4 (mm/d)	5)
Cr-EDTA	granit	11,0	7,5	3,7	2,5	1,9	1,2 (mm/d) • 10 <sup>5</sup>	6)
Uranine	granit	3,7	2,5	1,2	0,8	0,6	0,4 (mm/d) • 10 <sup>5</sup>	6)

5) Experimentellt värde i grovsand,  $k=3 \text{ E-3 m/s}$ , genom trådnät med 50 % perforation, Institut für Radiohydrometrie /3/.

6) Teoretiskt värde enligt ekvation (9) och tabell 2-2.

I lågkonduktivt berg är flödes hastigheten,  $v_d$ , orsakad av molekylär diffusion mycket låg. I granitprover från Finnsjöområdet var flödes hastigheten under  $1,1 \text{ E-4 mm/dygn}$  ( $1,3 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ ), tabell 2-4. I en sprickzon blir flödes hastigheten högre än i de lågkonduktiva granitproven, men lägre än i fritt vatten, tabell 2-3.

Flödes hastigheten i grovsand,  $k = 3 \text{ E-3 m/s}$ , för de högmolekylära spårämnen Glucose, Cr-EDTA och Uranine kan uppskattas genom att flödes hastigheten i fritt vatten multipliceras med kvoten mellan Bromidernas hastighet i fritt vatten och i grovsand, tabell 2-3, 2-4 och figur 2-3.

För de spårämnen och borrhålsradier som kan komma i fråga blir flödes hastigheten,  $v_d$ , orsakad av molekylär diffusion mycket liten, under  $3,7 \text{ mm/dygn}$  ( $4,3 \text{ E-8 m/s}$ ).

I sprickigt berg, med hydraulisk konduktivitet i området  $7 \text{ E-8} - 2 \text{ E-6 m/s}$ , uppskattade Lewis et al /9/ flödes hastigheten,  $v_d$ , till  $0,09 \text{ mm/dygn}$  ( $1 \text{ E-9 m/s}$ ).

### **Artificiell omblandning**

Omblandning krävs för att säkerställa kontinuerlig utspädning samt för att uppfylla villkoret att spårämneskoncentrationen i mätsektionen är homogen i varje ögonblick /2, 8/.

Endast vid låga grundvattenflöden i homogena porösa medier är den molekylära diffusionen tillräcklig för att hålla homogen spårämneskoncentration i mätsektionen. Vid utspädningsförsök i grovsand ( $k = 3 \text{ E-3 m/s}$ ) var den molekylära diffusionen tillräcklig för att hålla homogen spårämneskoncentration i mätsektionen vid lägre grundvattenflöden än  $30 \text{ mm/dygn}$  ( $3,5 \text{ E-8 m/s}$ ) /4/.

I sprickiga medier krävs artificiell omblandning och dess intensitet måste avpassas till grundvattenflödet. Om omblandningen är för svag i förhållande till grundvattenflödet, följer inte utspädningsförloppet entydigt det linjära sambandet, enligt ekvation (4), mellan tid och logaritmerad koncentration. Överskrider omblandningen en högsta tillåtna intensitet,  $v_{\max}$ , ökar utspädningen i mätsektionen och en skenbar flödes hastighet,  $v_m$ , uppmäts. Maini /8/ genomförde utspädningsförsök i en sprickmodell där han undersökte inverkan av artificiell omblandning. Omblandningen skedde med en omrörarmagnet i botten på mätsektionen, se skiss i avsnitt 4. Utspädningsförsök utfördes med vattenhastighet  $1,11 \text{ E-3 m/s}$  och  $1,67 \text{ E-2 m/s}$  genom sprickplanet och omrörarmagneten roterande med 20, 40, 60 eller 80 varv per minut. Förhållandet mellan tid och logaritmerad koncentration blev identisk vid en given vattenhastighet, dvs den höjda omblandningsintensiteten påverkade inte utspädningsförloppet. Försöken visar att högsta tillåtna omblandningsintensitet är relativt hög.

Försök vid Forschungsstelle für Radiohydrometrie /2/ visar dessutom att skenbara flödes hastigheten,  $v_m$ , endast uppgår till 10 % av grundvattenflödet när  $v_{\max}$  överskrids med en faktor tre. Högsta tillåtna omblandningsintensitet,  $v_{\max}$ , beror av det grundvattenförande mediet (sprickfrekvens, hydraulisk konduktivitet) och grundvattenflödet. Intervallet mellan lägsta,  $v_{\min}$ , och högsta tillåtna intensitet,  $v_{\max}$ , ökar med ökande grundvattenflöde /2/.

Vid mätningar med utspädningsmetoden är störningar på det naturliga grundvattenflödet orsakade av spårämne och instrumentering mycket små. Den utspädning av spårämnet som orsakas av dessa störningar är det vid eventuellt behov möjligt att korrigera för.

## Mättid

I lågkonduktiva partier av berggrunden begränsas tillämpbarheten av utspädningsmetoden av mättiden. Mättiden vid ett utspädningsförsök kan beräknas enligt

$$t = - \frac{\pi(r^2 - r_i^2)}{v_f \cdot 2 \cdot r \cdot \alpha} \ln \frac{C}{C_o} \quad (10)$$

där  $r$  = borrhålsradien  
 $r_i$  = mätinstrumentets radie

grundvattnets flödes hastighet,  $v_f$ , fås ur

$$v_f = K \cdot I \quad (11)$$

där  $K$  = hydraulisk konduktivitet  
 $I$  = gradient

Förutom hydrauliska konduktiviteten och gradienten bestäms mättiden vid ett utspädningsförsök 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 ett utspädningsförsök. Med den utspädningsutrustning som framtagits vid SGAB (se avsnitt 3) ges den erforderliga mättiden vid hydrauliska gradienten 0,01 i tabell 2-5.

**Tabell 2-5. Mättid vid utspädningsförsök i borrhål vid gradienten 0,01**

Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Borrhål 76 mm diameter	Borrhål 110 mm diameter
E-8	40–300 dygn	160–600 dygn
E-7	4–30 dygn	16–60 dygn
E-6	11–80 timmar	2–6 dygn
E-5	1–8 timmar	4–28 timmar

Vid pumpning i ett närbeläget borrhål kan gradienten vara 10 gånger större än den i tabell 2-5 antagna naturliga gradienten. De i tabell 2-5 givna mättiderna komma därvid att minska till en tiondel. I den beskrivna utrustningen har mätinstrumentets upplösning drivits mycket långt. Åtgärder som återstår för att minska mättiden är endast en optimering av förhållandet mellan borrhålsradie och instrumentradie, där mätvolymen minimeras utan att strömningen genom borrhålet störs.

## 3 Översiktlig teknisk beskrivning

### 3.1 Allmänt

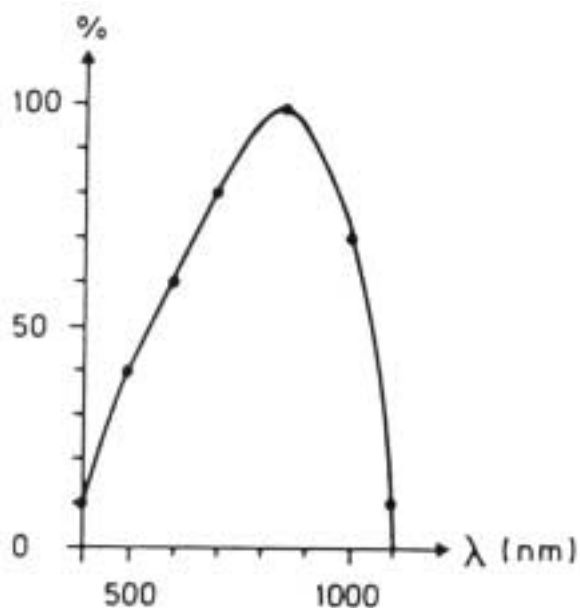
För att ge en uppfattning om utspädningsutrustningens funktion ges nedan en kortfattad beskrivning. Siffror inom parentes hänför sig till figur 3-1.

Den utrustning som framtagits består av ett flertal enheter. Mellan manschetter (1), som omsluter den sprickzon som studeras sitter transmissionsmätaren (2). Transmissionsmätaren mäter optisk koncentration av spårämne. Ovanför övre manschetten ligger en cirkulationsenhet (3) i ett ytterrör. Cirkulationsenheten innehåller en pump, vars insug och utlopp mynnar mellan manschetterna, samt en spårämneshållare kopplad till pumpens utlopp. Med kabeln (5) är transmissionsmätaren och cirkulationsenheten sammankopplade med manöverenheten (6). Med manöverenheten styrs cirkulationspumpen och injicering av spårämne. Transmissionen kan avläsas på en display på manöverenheten och dessutom registreras transmissionen kontinuerligt med en skrivare (7) eller punktvis med dataminne (9). Dataminnet rymmer 500, alternativt 1 000 mätvärden beroende på val av upplösning. Provtagningsintervallet, från 7,5 minuter till 8 timmar, väljs med en omkopplare på mellankopplingen (8). När mätvärdena i dataminnet skall utvärderas kopplas minnet från mellankopplingen (8), där ett nytt dataminne kan anslutas, och till ett interface (10) för överföring till en ABC-800 dator (11).

### 3.2 Transmissionsmätare

Instrumentet har konstruerats av Edlund Elektronik och är en vidareutveckling av ett tidigare instrument /12/. Transmissionsmätaren är 245 mm hög och 65 mm i diameter, figur 3-2. För att få instrumentet mekaniskt stabilt har ljuskälla och detektor placerats tillsammans med elektroniken i ena änden av instrumentet. 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.

Ljuskälla är en ljusdiod med emissionsmaximum vid 650 nm och detektor en fotodiod med känslighetsspektra enligt figur sidan 18. Transmissionsmätaren beskrivs mer ingående i appendix.



Fotodiodens känslighetspektra.

### Kalibrering och val av spårämne

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 dataminnenet fås 0,01 % upplösning av transmissionen, T. Kalibreringskurvor, för transmission mot koncentration spårämne i vattnet, har upprättats för ämnena Metylenblått, Cr-EDTA och Blue Dextran 2000. Dessa inaktiva spårämnen är blåa i vattenlösning och har valts därför att blåa lösningar effektivt absorberar det av ljusdioden utsända ljuset,  $\lambda = 650$  nm. Av kalibreringskurvorna, figur 3-4, 3-5, 3-6, framgår att upplösningen 0,01 % T ger möjlighet att mäta mycket små koncentrationsändringar av samtliga ämnen. För de fortsatta laboratorie- och fältmätningarna valdes Blue Dextran 2000 med förväntad lägst diffusionshastighet på grund av dess stora molekylvikt ( $\approx 2 \cdot 10^6$ ).

Vid fältmätningar varierar bakgrundsvärdet på transmissionen mellan olika platser beroende på vattnets varierande kemiska och fysikaliska egenskaper. Kalibreringskurvan för ett spårämne ändras med varierande bakgrundsvärde. Kalibreringskurvor har därför upprättats för vatten med varierande bakgrundsvärde. För Blue Dextran 2000 har kalibreringskurvorna med högsta respektive lägsta testade bakgrundsvärde plottats i figur 3-6. Samtliga kurvor konvergerar mot en gemensam skärningspunkt och en allmängiltig ekvation för spårämneskoncentrationen kan ställas upp enligt

$$C = \frac{a}{b - \log T_b} (\log T_m - b) + a \quad (12)$$

där C = koncentration Blue Dextran 2000 (ppm)  
 $T_b$  = bakgrundsvärde på transmissionen  
 $T_m$  = mätvärde på transmissionen  
a = konstant (i detta fall 100,049)  
b = konstant (i detta fall 0,104)

Om dataminnet ((9) i figur 3-1) används vid mätningarna fås transmissionen ur följande samband:

$$T_m = 100,00 - M \quad (13)$$

där  $M$  = minnesenheter, 0,00–100,00

Koncentrationen fås genom att substituera (13) i (12).

Den allmängiltiga kalibreringsekvationen (12) kräver att bakgrundsvärdet är högre än 77 % transmission. Det går givetvis att upprätta kalibreringskurvor för de fall bakgrunds- transmissionen är lägre än 77 %, men upplösningen blir sämre. Vid ett utspädningsförsök erfordrar den sämre upplösningen en hög startkoncentration spårämne i mätsektionen, vilket orsakar problem med densiteteffekter, se avsnitt 2.

### 3.3 Cirkulationsenhet

Cirkulationsenheten består av en stålcylander med längd 650 mm och diameter 70 mm. Cyldern har demonterbara gavlar och är ihopgängad på mitten för enkel service och påfyllning av spårämne, se figur 3-2 och 3-3. Stålcyldern ligger i ett ytterrör, med längd 900 mm och diametern 73,7 mm, som ersätter motsvarande längd av rörgången.

#### **Funktionsprincip**

I cyldern finns en magnetdriven pump, vars huvudsakliga funktion är att i varje ögonblick hålla homogen spårämneskoncentration i mätsektionen. Pumpens inlopps- och utloppsrör går igenom nedre gaveln i täta genomföringar. Insug och utlopp leds vidare i slangar genom övre manschetten och mynnar i mätsektionen, mellan manschetterna.

Pumpkapaciteten styrs med manöverenheten och kan väljas steglöst mellan 0,0 och 1,6 liter 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 3-3. Magnetventilerna styrs av manöverenheten. Öppettiden är konstant varför cirka 4 ml (beroende på vald pumpkapacitet) shuntas genom spårämnesbehållaren vid varje injiceringstillfälle. Spårämnesbehållaren rymmer cirka 30 ml. Med lämplig koncentration på spårämneslösningen kan tre, fyra utspädningsförsök utföras innan utrustningen måste lyftas ur borrhålet för påfyllning av spårämne. Stålcyldern är fylld med en oljeblandning vilket hindrar inläckage av vatten.

## 4 Laborieförsök

Fem utspädningsförsök, med Blue Dextran 2000 som spårämne, genomfördes i ett plexiglasrör med 110 mm innerdiameter och med 304-760 mm lång mätsektion. I samtliga fall simulerades en vattenförande spricka genom att vatten pumpades genom sektionen via tre inlopp och tre utlopp med 4 mm diameter, se figur 4-1. Försöken redovisas i figurerna 4-2 – 4-6 och sammanställs i tabell 4-1.

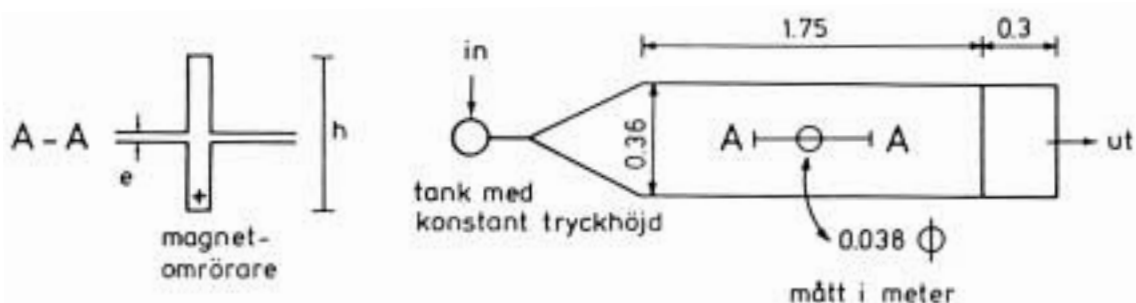
**Tabell 4-1. Utspädningsförsök i plexiglasrör, 110 mm diameter**

Försök nr	Pumpflöde (ml/min)	Beräknat flöde genom utspädning (ml/min)	Differens (%)	Försökslängd (timmar)	Koncentration		Korrelationskoefficient tid-ln (c/Co)	Mätsektion	
					start (ppm)	stopp (ppm)		längd (mm)	volym (ml)
L 1	3,0	2,43	-20	17,4	41	28	-0,999	720	6387
L 2	2,9	2,54	-11	12,0	45	22	-0,996	304	2452
L 3	16,7	16,04	-4	4,0	18	11	-0,995	760	6765
L 4	6,5	7,08	+9	1,3	52	41	-0,999	306	2493
L 5	30,0	33,54	+12	2,5	22	3	-0,999	324	2656

Vid samtliga försök, med pumpflöden varierande mellan 2,9 och 30,0 ml/min, följer utspädningen nästan helt det teoretiska linjära sambandet, enligt ekvation (4), mellan tid och logaritmerad koncentration. Korrelationskoefficienten var i medeltal 0,998.

De i tabell 4-1 redovisade differenserna mellan pumpflöden och flöden beräknade ur utspädning kan tyckas något höga i vissa fall. Där beror en del av differensen på osäkerhet i bestämning av pumpflödet, vilket även den goda korrelationen mellan tid och logaritmerad koncentration tyder på. Korrelation mellan pumpflöden och flöden beräknade ur utspädning var ändå mycket god, korrelationskoefficient 0,997.

Maini /8/ genomförde utspädningsförsök i en sprickmodell bestående av två parallella plexiglasskivor, separerade 1,25 mm. Sprickplanet penetreras av ett plexiglasrör med 38 mm diameter, se skiss nedan.



*Skiss över Maini's sprickmodell.*



Modellens byggnad gör det möjligt att jämföra både flöde och hastighet mellan utspädningsförsök och direkta mätningar. Resultat från Maini's försök sammanställs i tabell 4-2. Vid utvärderingen av utspädningsmätningarna har kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ , ansatts till 2,0.

**Tabell 4-2. Jämförelse mellan utspädningsförsök och direktmätning i Maini's sprickmodell**

	Direktmätning	Utspädningsförsök	Differens (%)
Flöde genom plexiglasrör	–	7,2 ml/min	
	–	97,9 ml/min	
Flöde genom sprickplan	30,0 ml/min 450,0 ml/min	33,9 ml/min 463,9 ml/min	
Hastighet genom sprickplan	1,11 E-3 m/s 1,67 E-2 m/s	1,26 E-3 m/s 1,72 E-2 m/s	+13 +3

Maini's försök bekräftar experimentellt giltigheten i ett sprickplan av den teoretiskt framräknade kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ , (ekvation (7), avsnitt 2).

## 5 Fältförsök

### 5.1 Allmänt

Fältförsöken har genomförts inom Finnsjöns fältforskningsområde, beläget öster om Finnsjön i norra Uppland. De hammarborrade hålen G1–G6 samt G8 och G9 vid Gåvastbo (se figur 5-1) har utnyttjats för försöken. Geologiska och hydrologiska förhållanden inom området och speciellt i anslutning till utnyttjade borrhål har beskrivits i ett flertal rapporter /13, 14, 15, 16, 17, 18/.

Grundvatten är normalt klart och har en hög transmission för utsänt ljus. I borrhål kan emellertid grumlighet uppstå på grund av utfällningar, dålig rensning från borrhåls etc. Fältförsöken inleddes därför med bestämning av bakgrundstransmissionen inom området, dvs bestämning av grundvattnets genomsläpplighet för den ljusvåglängd som transmissionsmätaren utsänder.

Utgående från tidigare utförda mätningar av hydrauliska konduktiviteten, se Klockars och Persson /17/, utvaldes ett antal hög- och lågkonduktiva sektioner i borrhålen G1–G6 samt G8 och G9 för bestämning av bakgrundstransmissionen.

Tabell 5-1 redovisar uppmätta värden för de utvalda sektionerna. Värden större än 77 % är önskvärda med hänsyn till kravet på god upplösning vid utspädningsförsök, se avsnitt 3.2. De uppmätta värdena är generellt större än 77 %.

**Tabell 5-1. Bakgrundstransmission i hammarborrhål vid Gåvastbo, Finnsjöområdet**

Borrhål	Sektion (m)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Transmission (%)
G 1	pumpvatten från hela hålet		93,0
G 2	91–93	3,3 E-6	86,6
G 3	8–10	0,7 E-6	83,5
	10–12	1,0 E-6	83,5
	26–28	5,2 E-6	77,2
	38–40	0,5 E-6	85,6
	40–42	1,4 E-6	85,6
	50–52	1)	85,0
	64–66	5,7 E-6	84,5
	72–74	0,9 E-6	79,0
	74–76	0,8 E-6	79,0
G 4	42–44	1)	89,3
	60–62	1)	78,5
	70–72	1,5 E-6	83,0
	72–74	0,3 E-6	83,0
	74–76	0,1 E-6	83,0
	92–94	1)	77,0
G 6	8–10	1)	77,9
	42–44	1)	50,7
	80–82	1)	20,0
G 8	10–12	1,5 E-6	77,1
	32–34	1,7 E-7	90,9
	38–40	4,3 E-6	74,4
	50–52	4,0 E-8	92,0
	70–72	2,7 E-6	92,7
G 9	12–14	1,8 E-7	85,3
	14–16	1,5 E-7	85,3
	36–38	3,2 E-4	91,0
	38–40	5,0 E-6	91,0
	50–52	2)	95,5
	68–70	1,4 E-6	75,0
	80–82	2)	88,5

1) = mätgräns 7 E-9 m/s.

2) = mätgräns 1,3 E-10 m/s.

Efter bestämning av bakgrundstransmissionen i borrhålen genomfördes funktionstester av utspädningsutrustningen (figur 3-1) samt utspädningsförsök i sprickzonen vid djupet 91–93 m i borrhål G2.

Sprickzonen i G2 utvaldes med utgångspunkt av att den tidigare har dokumenterats med hydrauliska tester och spår försök samt att bakgrundstransmissionen var tillräckligt hög för att genomföra utspädningsförsök med god noggrannhet.

## 5.2 Försök i borrhål G2

Tre utspädningsförsök har genomförts i hammarborrhål G2. Den testade sprickzonen vid 91–93 m djup återfinns i det närliggande borrhålet G1 på nivån 100–102 m, se figur 5-2, 5-3 och 5-4. Sprickzonens hydrauliska egenskaper har tidigare undersökts av Klockars och Persson /17/ samt Gustafsson och Klockars /18/. För att genomföra försöken under kontrollerade betingelser har grundvattnets strömning i sprickzonen styrts genom vattenuttag ur borrhål G1.

Utspänningsförsöken i G2 har genomförts under bedömda stationära grundvattenförhållanden mellan borrhålen G1 och G2. Försöken har genomförts i avgränsade sektioner med längden 1,35 m och 1,52 m. Sektionerna har avgränsats medelst manschetter. Figur 3-1 visar en bild på använd utrustning. Data över de tre försöken framgår av tabell 5-2.

**Tabell 5-2. Sammanställning av försöksdata från utspänningsförsök med Blue Dextran 2000 i hammarborrhål G2 vid Gåvastbo, Finnsjöområdet**

Försök nr	Längd (m)	Mätsektion	Volym (ml)	$\Delta h$ G2-G1 (m)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Försökslängd (timmar)	Koncentration start (ppm)	Koncentration stopp (ppm)
F1	1,35	90,08–91,43	8488	12,9	$<7 \times 10^{-9}$ <sup>1)</sup>	38	26	19
F2	1,35	92,08–93,43	8488	6,3	$3,3 \times 10^{-6}$ <sup>2)</sup>	33	5	1
F3	1,52	92,67–94,20	11854	6,4	$3,3 \times 10^{-6}$ <sup>2)</sup>	80	13	1

1) Beräknat ur vattenförlustmätning i sektion 89–91 m /17/.

2) Beräknat ur vattenförlustmätning i sektion 91–93 m /17/.

Försöket F1 har genomförts i en lågpermeabel del av berggrunden medan försöken F2 och F3 representerar en permeabel sprickzon, se tabell 5-2 och figur 5-3.

Resultaten av utspänningsförsöken redovisas i figurerna 5-5, 5-6 och 5-7. Den uppmätta utspädningen följer det teoretiska sambandet, enligt ekvation (4), mellan tid och logaritmerad koncentration. Tabell 5-3 sammanfattar resultaten av försöken.

**Tabell 5-3. Utspänningsförsök i hammarborrhål G2 vid Gåvastbo, Finnsjöområdet**

Försök nr	Beräknat flöde genom utspädning (ml/min)	Korrelationskoefficient tid-ln ( $C/C_0$ )
F 1	0,78	-0,993
F 2	7,26	-0,999
F 3	5,42	-0,999

De beräknade flödena i tabell 5-3 har inte korrigerats för störningar orsakade av spårämne och instrumentering. Densitetseffekter kan försummas då spårämnets startkoncentration legat mycket under det kritiska värdet, se figur 2-2 och tabell 5-2. Instrumenteringens konstruktion och uppbyggnad ger minimal uppvärmning av det omgivande vattnet, se figur 3-1 och appendix. Densitetseffekter orsakade av temperatur-differenser kan därför också försummas.

Vid utspänningsförsök med ett högmolekylärt spårämne i 110 mm diameter borrhål är flödeshastigheten orsakad av spårämnets molekylära diffusion mycket liten.

I tät granit mindre än 4 E-5 mm/dygn (4,6 E-13 m/s) och i grov sand,  $k = 3$  E-3 m/s, 2,5 mm/dygn (2,9 E-8 m/s). Låga värden har också rapporterats av Lewis et al /9/ som uppskattade flödeshastigheten till 0,09 mm/dygn (1 E-9 m/s) i sprickigt berg med hydraulisk konduktivitet i området 7 E-8 – 2 E-6 m/s.

Försök F1 har genomförts i en lågpermeabel del av berggrunden med hydraulisk konduktivitet av ca E-8 m/s. Enligt Lewis et al /9/ är den diffusionsbetingade flödes hastigheten mindre än 1 E-9 m/s i sprickigt berg av denna permeabilitet. Omräknat till flöde genom mätsektionen motsvarar hastigheten 1 E-9 m/s ett flöde av 0,008 ml/min, vilket endast är en procent av det genom utspädning beräknade flödet. Flödet genom mätsektionen orsakat av spårämnets diffusion är så lågt att det kan försummas.

Försök F2 och F3 har genomförts inom en sektion med en hydraulisk konduktivitet av ca E-6 m/s. Tidigare spår försök visar emellertid att det inom denna sektion finns en väl avgränsad sprickzon med hydraulisk konduktivitet 2-3 E-3 m/s /18/. Sprickzonens totala vidd är endast en promille av mätsektionens längd. Flöde genom mätsektionen orsakat av spårämnets diffusion kan därför försummas.

### 5.3 Jämförelse mellan utspädningsförsök, hydrauliska tester och spårförsök

De uppmätta flödena i försök F2 och F3 (tabell 5-3) kan med tillämpning av ekvation (5) och (8) omräknas till flöde genom den testade sprickzonen mellan borrhålen G1 och G2. Med antagandet att kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ , är lika med 2 och att störningar orsakade av spårämne och instrumentering kan försummas blir flödet 6,05 E-8 m<sup>3</sup>/s i försök F2 och 4,52 E-8 m<sup>3</sup>/s i försök F3.

Flödet genom den testade sprickzonen kan också beräknas med kännedom om dess hydrauliska konduktivitet samt tryckskillnaden mellan borrhålen G1 och G2 vid en given pumpkapacitet i borrhål G1.

Den mängd vatten som per tidsenhet kommer från sprickzonen vid pumpning i borrhål G1 är Q. Med antagande av radialsymmetrisk strömning enligt figur 5-2 samt inget vattenläckage från bergmassan till sprickzonen kan flödet i sprickzonen i G2 beräknas enligt

$$Q_{G2} = \frac{r_2}{\pi \cdot r_1} \cdot Q \quad (14)$$

där  $r_1$  = avstånd mellan borrhål G1 och G2  
 $r_2$  = radien av borrhål G2

Flödet Q från sprickzonen ges av

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\ln \frac{r_1}{r_o}} \cdot K_s \cdot \Delta h \quad (15)$$

där Q = vattenflödet från sprickzonen till borrhål G1  
 $r_o$  = radien av borrhål G1  
L = sprickzonens vidd  
 $K_s$  = sprickzonens hydrauliska konduktivitet  
 $\Delta h$  = skillnaden mellan grundvattnets tryckhöjd vid  $r_o$  och  $r_1$

Hydrauliska konduktiviteten,  $K_s$ , i sprickzonen mellan borrhål G1, sektion 100–102 m, och G2, sektion 91–93 m, har beräknats till 2.2 E-6 m/s /17/.

Uppmätt tryckskillnad,  $\Delta h$ , längs sprickzonen mellan borrhålen G1 och G2 var under försök F2 6,3 m och under försök F3 6,4 m. Flödet i sprickzonen beräknat med ovan givna hydrauliska data och från utspädningsförsöken framgår av tabell 5-4.

**Tabell 5-4. Flöden vid borrhål G2 i sprickzonen mellan borrhål G1 och G2 beräknade från hydrauliska data samt utspädningsförsök**

Metod	Försök	$\Delta h$ (m)	Flöde (m <sup>3</sup> /s)	Sektion (m)
Hydrauliska data		6,3	1,61 E-8	91-93
		6,4	1,64 E-8	91-93
Utspädning	F2	6,3	6,05 E-8	92,1-93,4
	F3	6,4	4,52 E-8	92,6-94,2

Tidigare utförda spårförsök längs sprickzonen mellan G2 och G1 har visat på en vattenhastighet av 1 E-4 m/s vid borrhål G2 under vattentryckförhållanden nära de som gäller vid utspädningsförsök F2 och F3.

Utspädningsförsöken ger flöden genom respektive mätsektion. Vattenhastigheten i sprickzonen som omsluts av mätsektionen kan beräknas med kännedom om sprickvidden,  $e$ , tillgänglig för vattentransport enligt

$$v = \frac{Q}{e \cdot 2 \cdot r_2} \quad (16)$$

där  $Q$  = flöde genom mätsektionen

Sprickvidden,  $e$ , har beräknats från spårförsök i kombination med hydrauliska tester till 1,6 E-3 m /18/. Tabell 5-5 redovisar vattenhastigheter i sprickzonen vid borrhål G2 beräknade från spårförsök och utspädningsförsök under jämförbara förhållanden, inne- bärande styrd grundvattenströmning genom pumpning ur borrhål G1.

**Tabell 5-5. Vattenhastighet vid borrhål G2 i sprickzonen mellan borrhål G1 och G2**

Metod	Försök	$\Delta h$ (m)	$v$ (m/s)	Sektion (m)
Spårförsök		6,7	1,0 E-4	91-93
Utspädning	F2	6,3	3,4 E-4	92,1-93,4
	F3	6,4	2,6 E-4	92,6-94,2

Med beaktande av de något skilda mätsektionerna mellan försöken samt med de antaganden som gjorts om radialsymmetrisk strömning och väl rensat borrhål ( $\alpha = 2$ ) är överensstämmelsen mellan metoderna god.

## 6 Diskussion och slutsatser

Hydrologiska undersökningar innebär delvis beräkning av olika parametrar genom indirekta metoder. Vanligen beräknas grundvattenflödet ur Darcy's lag med ansättande av beräknade gradienter och konduktivitetvärden.

Den metod som testats här är en direkt enhålsmetod för att fastställa grundvattenflödet i en punkt av en sprickzon. Metoden innebär mätning av utspädningshastigheten av ett spårämne, vilket injicerats utan övertryck mellan manschetter omslutande en sprickzon. Metoden har således ingen penetrerande verkan på berggrunden och det beräknade grundvattenflödets giltighet i hela sprickzonen beror på dess homogenitet och isotropi.

Det beräknade grundvattenflödet kan relateras till en hydraulisk konduktivitet för den undersökta delen av borrhålet. Detta kräver dock kännedom om den hydrauliska gradienten. Metodens möjlighet till exakt bestämning av hydrauliska konduktiviteten är därför begränsad. Metoden ger istället detaljerad information om grundvattenflödet närmast ett borrhål och kan användas för loggning av borrhål med avseende på grundvattnets strömningsförhållanden.

I föreliggande undersökning har jämförelser gjorts med grundvattenflöden och hastigheter beräknade från tidigare utförda hydrauliska tester och spår försök. En god överensstämmelse har därvid erhållits vilket anger att metoden bör få stort värde för insamling av basdata eller för kontroll av beräkningar.

Metodens lämpligaste arbetsintervall torde vara i de mer vattenförande partierna av berggrunden. Inverkan av störande faktorer är här lägre på grund av större genomströmningshastigheter. Dessutom är tidsåtgången kortare och ett stabilare utspädningsförlopp erhålls.

Störningar på det naturliga grundvattenflödet orsakade av spårämne och instrumentering är mycket små. Vid eventuellt behov är det möjligt att korrigera för dessa störningar. Största osäkerhetsfaktorn vid beräkning av flödet i en sprickzon med användning av utspädningsmetoden är huruvida det lokalt uppmätta flödet i borrhålet är representativt för sprickzonen, men den problematiken återkommer alltid vid alla typer av mätningar i heterogena medier.

Följande krav ställs för genomförande av en undersökning med den framtagna utspädningsutrustningen:

- Endast ett borrhål är nödvändigt.
- Borrhålsdiameter  $\geq 76$  mm. (Ett instrument för borrhålsdiameter 56 mm kan utföras.)
- Grundvattnets flödeshastighet kan mätas från ca E-10 m/s till turbulent flöde. (Vid hydrauliska gradienten 0,01 kan mätningar utföras om hydrauliska konduktiviteten är E-8 m/s eller större.)
- Bakgrundstransmission  $\geq 77$  %. (För transmission ned till ca 65 % kan separata kalibreringskurvor tas fram.)

### **Fortsatt utveckling**

Utrustningen har hittills endast testats i tre försök. Ytterligare några tester bör genomföras i sprickzoner med varierande genomströmning och hydraulisk konduktivitet.

Efter en inkörningsperiod har utspädningsutrustningen fungerat tillfredsställande (utom när ett åsknedslag förstörde vissa delar). Den förväntat känsligaste delen, renhållning av optiken (glas och prisma) gav inga problem. Cirkulationsenheten behöver dock förbättras med tryckkompensering och förenklad påfyllning av spårämne.

Behovet av ett instrument för mätning på stora djup i hål med diameter 56 mm bör diskuteras.



## Använda beteckningar

$\alpha$	kontraktionsfaktor	–
C	koncentration spårämne i grundvattnet	ppm
$C_o$	koncentration i grundvattnet omedelbart efter injicering	ppm
$D_e$	effektiv diffusionskoefficient	$m^2/s$
$D_v$	diffusionskoefficient i fritt vatten	$m^2/s$
$D^*$	diffusionskoefficient i det grundvattenförande mediet	$m^2/s$
e	sprickvidd	m
$\Delta h$	skillnaden i grundvattnets tryckhöjd mellan två punkter	m.v.p.
I	hydraulisk gradient	–
K	hydraulisk konduktivitet	m/s
$K_1$	hydraulisk konduktivitet i störd zon	m/s
$K_s$	hydraulisk konduktivitet i sprickzon	m/s
L	längd på mätsektion, vidd av sprickzon	m
$\lambda$	våglängd	nm
M	minnesenheter (dataminne)	–
Q	grundvattenflöde	$m^3/s$
r	borrhålsradie	m
$r_o$	radie av borrhål G1	m
$r_1$	avstånd mellan borrhål G1 och G2	m
$r_2$	radie av borrhål G2	m
$r_d$	radie av störd zon	m
$r_i$	radie av mätinstrument	m
t	tid	s
T	transmission	%

$T_b$	transmission, bakgrundsvärde	%
$T_m$	transmission, mätvärde	%
$V$	volym	$m^3$
$v$	grundvattnets flödes hastighet	m/s
$v_d$	skenbar flödes hastighet orsakad av molekylär diffusion	m/s
$v_f$	grundvattnets flödes hastighet i det ostörda sprickplanet	m/s
$v_h$	skenbar flödes hastighet orsakad av densitetseffekter	m/s
$v_m$	skenbar flödes hastighet orsakad av artificiell omblandning	m/s

## Referenser

- /1/ **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.
- /2/ **Forschungsstelle für Radiohydrometrie, 1966.** Jahresbericht 1965, am Institut für allgemeine und angewandte Geologie und Mineralogie der Universität München.
- /3/ **Institut für Radiohydrometrie, 1969.** Jahresbericht 1968, der Universität München.
- /4/ **Institut für Radiohydrometrie, 1968.** Jahresbericht 1967, der Universität München.
- /5/ **Institut für Radiohydrometrie, 1967.** Jahresbericht 1966, der Universität München.
- /6/ **Carlsson L, 1970.** Försök att med hjälp av utspädningsteknik bestämma grundvattnets skenbara medelströmhastighet, Publikation A 70:2, Inst. för vattenförsörjning och avlopp, CTH.
- /7/ **Mälkki E, 1978.** On interpretation of groundwater flow velocity data obtained by using point dilution method, Proc. Second Nordic IHP Meeting, Hanasaari Cultural Centre Finland, 1978.
- /8/ **Maini Y N T, 1972.** In Situ Hydraulic Parameters in Jointed rock – Their Measurement and Interpretation, doctoral thesis, Faculty of Engineering, University of London.
- /9/ **Lewis D C, Kriz G J, Buroy R H, 1966.** Tracer dilution sampling technique to determine hydraulic conductivity of fractured rock, *Water Resources Research*, Vol. 2, 1966, p. 533–542.
- /10/ **Handbook of Chemistry and Physics, 1980.** 61 st Ed, 1980–1981, CRS press.
- /11/ **Skagius K, Neretnieks I, 1982.** Diffusion in crystalline rocks of some sorbing and nonsorbing species, *KBS Teknisk Rapport*, 82-12.
- /12/ **Edlund L, 1980.** Utveckling av fältinstrument för transmissions- och extinktionsmätningar, *Vannet i Norden*, nr 1-1980, p. 61–68.
- /13/ **Almen K-E, Ekman L, Olkiewicz A, 1978.** Försöksområdet vid Finnsjön. Beskrivning till berggrunds- och jordartskartor. *SKBF-KBS Teknisk rapport* 79-02.
- /14/ **Olkiewicz A, Scherman S, Kornfält K-A, 1979.** Kompletterande berggrundsundersökningar inom Finnsjö- och Karlshamnsområdena. *SKBF-KBS Teknisk rapport* 79-05.
- /15/ **Scherman S, 1978.** Förarbeten för platsval, berggrundsundersökningar. *KBS Teknisk rapport* 60.

- /16/ **Jämtlid A, Magnusson K-Å, Olsson O, 1981.** Elektriska mellanhålmätningar i Finnsjön, Rapport Prav 4.23.
- /17/ **Klockars C-E, Persson O, 1978.** Berggrundvattenförhållanden i Finnsjöområdets nordöstra del. KBS Teknisk rapport 60.
- /18/ **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.

### Transmissionsmätare

Transmissionsmätaren är 245 mm hög 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 A-1. 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.

Ljuskälla är en röd (650 nm) ljusdiod. Genom att välja ljusdiod istället för glödlampa vinner man fördelar samtidigt som det ger vissa nackdelar. Fördelarna är främst väldefinierad och stabil spektral sammansättning på det utsända ljuset, mycket lång livslängd, låg strömförbrukning och mekaniskt mycket okänslig. Bland nackdelarna märks framför allt intensitetens mycket kraftiga beroende av diodtemperaturen och den relativt låga intensiteten. Problemet med den låga intensiteten är löst genom att pulsa strömmen. En vanlig 0,05 A diod kan på detta sätt drivas med upp till 2 A. Intensiteten blir då mer än tillräcklig. Det pulsende ljuset medför att ac-kopplingar kan användas mellan förstärkarstegen. Med detta arrangemang har driften hos förstärkarna minimerats. Problemet med intensitetens variation med temperaturen är löst genom att mäta pulsamplituden på det utsända ljuset och jämföra detta med en intern referens. Skillnadssignalen får ändra intensiteten hos ljusdioden.

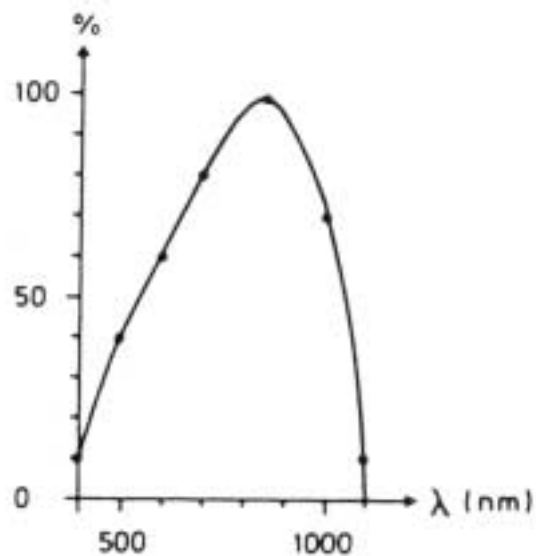
Till detektor används kombinationen backspänd fotodiod med operationsförstärkare. Denna är mycket linjär, liten, mekaniskt och elektriskt mycket stabil samt drar lite ström. Fotodiodens känslighetsspektra visas i figur A-2.

Problem med mörkerström hos fotodioden finns ej, därför att intensiteten hos ljusdioden mer än väl räcker för att maskera denna. Störningar från omgivningsbelysningen elimineras med en elektrisk koppling där den del av den förstärkta detektorsignalen som innehåller information om omgivningsbelysningen leds tillbaka till detektorn i motfas. För att ytterligare öka precisionen i systemet mäts inte absolutvärdet hos signalen vid mätdetektorn utan skillnaden mellan det utsända ljuset och det ljus som når mätdetektorn. Denna skillnad justeras så att den blir 0 då ingen absorption skett och maximal då inget ljus når fram. Den pulsende mätsignalen är svår att läsa av varför en samplingskrets inkopplats för att göra ett analogt mätvärde av pulserna. Dessa digitaliseras sedan på vanligt sätt och visas på en display på manöverenheten.

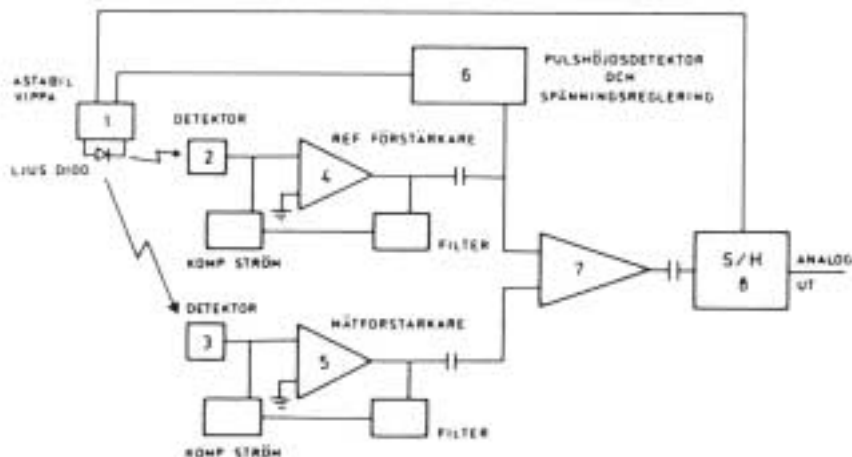
Studeras blockschemat i figur A-3 framgår funktionen klarare. Ljusdioden 1 skickar ut pulsat ljus mot referensdetektor 2 och mät-detektor 3. Signalen förstärks i förstärkarna 4 och 5. Den del av signalen som innehåller information om omgivningsbelysningen filtreras ut och leds tillbaka i motfas till förstärkarnas ingång. Med detta förfarande kan en mycket hög förstärkning användas utan risk att ströljus får förstärkarna att bottna. Signalen från förstärkare 4 används dels till att bilda den ytterligare i förstärkare 7 förstärkta skillnadssignalen mellan förstärkare 4 och 5 och dels för jämförelse med en intern referens. Eventuell skillnad styr en reglerkrets 6 som styr intensiteten hos ljusdioden. Mätpulserna samlas synkront med ljusdiodens pulser i S/H kretsen 8. Mätvärdet kan därefter visas direkt eller som här digitaliseras för att ge full upplösning av signalen.



Figur A-1. Principskiss av transmissionsmätaren.



Figur A-2. Fotodiodens känslighetspektra.

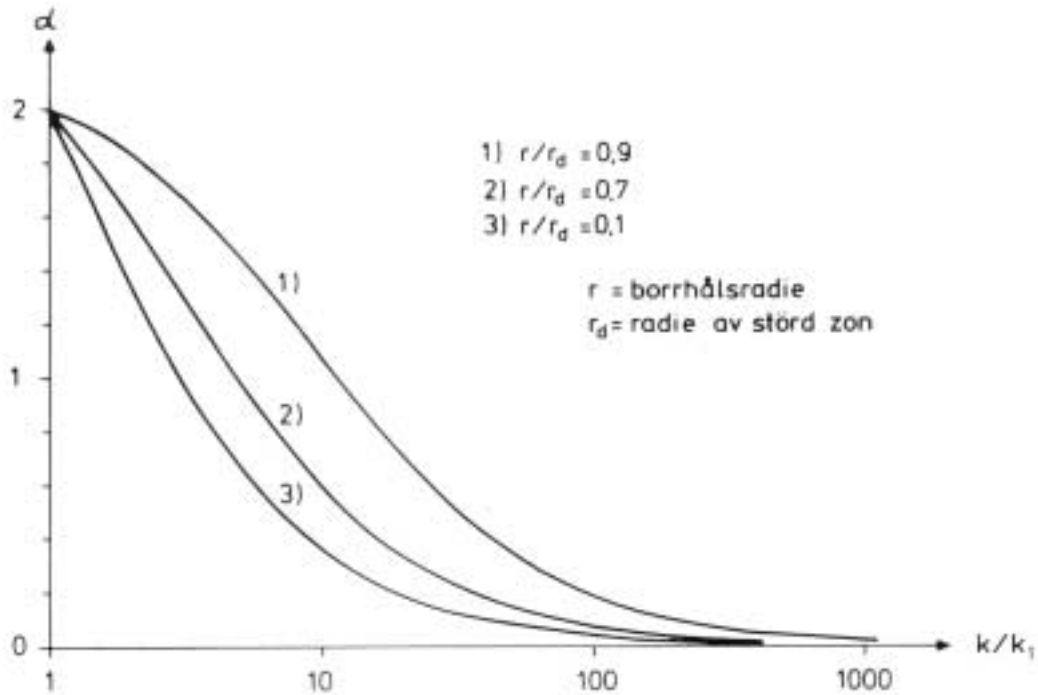


Figur A-3. Blockschema över elektroniken i transmissionsmätaren.

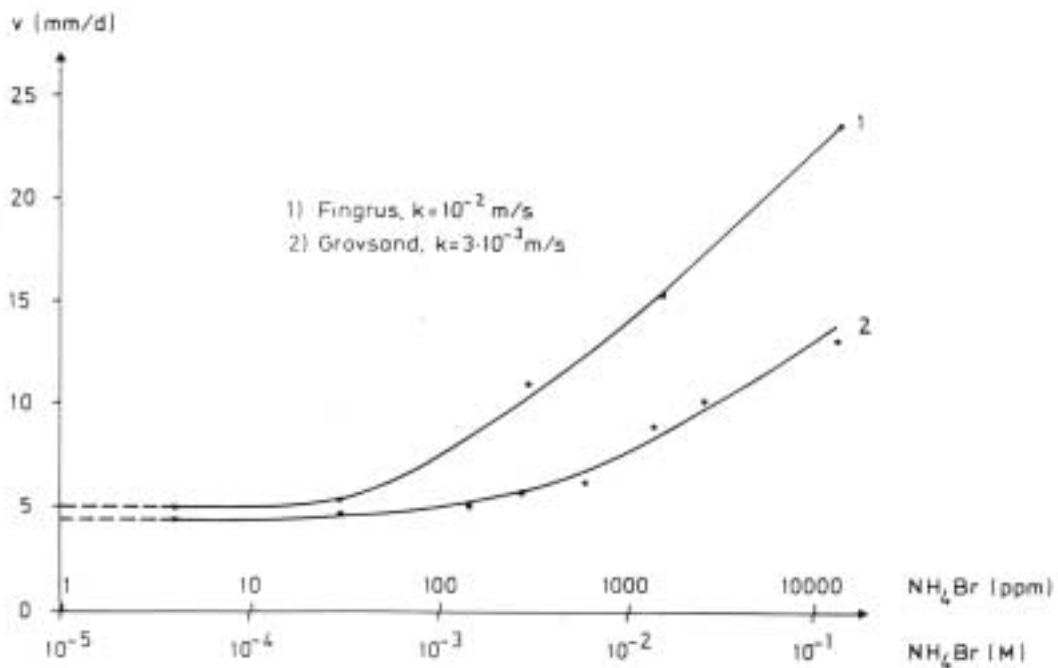
### Figurförteckning

- 2.1 Kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ , som funktion av förhållandet  $k/k_1$ .
- 2.2 Skenbar flödes hastighet  $v$  ( $v=v_h+v_d$ ) vid olika startkoncentrationer, orsakad av densitetseffekter,  $v_h$ , och molekylär diffusion,  $v_d$ .
- 2.3 Skenbar flödes hastighet,  $v_d$ , orsakad av molekylär diffusion.
- 3.1 Översiktsskiss, utspädningsutrustning.
- 3.2 Transmissionsmätare och cirkulationsenhet.
- 3.3 Principskiss, cirkulationsenhet.
- 3.4 Kalibreringskurva, Metylenblått i referensvatten 1.
- 3.5 Kalibreringskurva, Cr-EDTA i referensvatten 1.
- 3.6 Kalibreringskurva, Blue Dextran 2000 i referensvatten och grundvatten.
- 4.1 Laborarieuppsättning för utspädningsförsök i 110 mm diameter plexiglasrör.
- 4.2 Utspädningsförsök L1.
- 4.3 Utspädningsförsök L2.
- 4.4 Utspädningsförsök L3.
- 4.5 Utspädningsförsök L4.
- 4.6 Utspädningsförsök L5.
- 5.1 Schematisk karta över försöksplatsen utvisande borrhålens läge.
- 5.2 Schematisk skiss över radialsymmetrisk strömningsmodell.
- 5.3 Hydraulisk konduktivitet som funktion av borrhåls längd i borrhål G2.
- 5.4 Hydraulisk konduktivitet som funktion av borrhåls längd i borrhål G1.
- 5.5 Utspädningsförsök F1.
- 5.6 Utspädningsförsök F2.
- 5.7 Utspädningsförsök F3.

Figurer

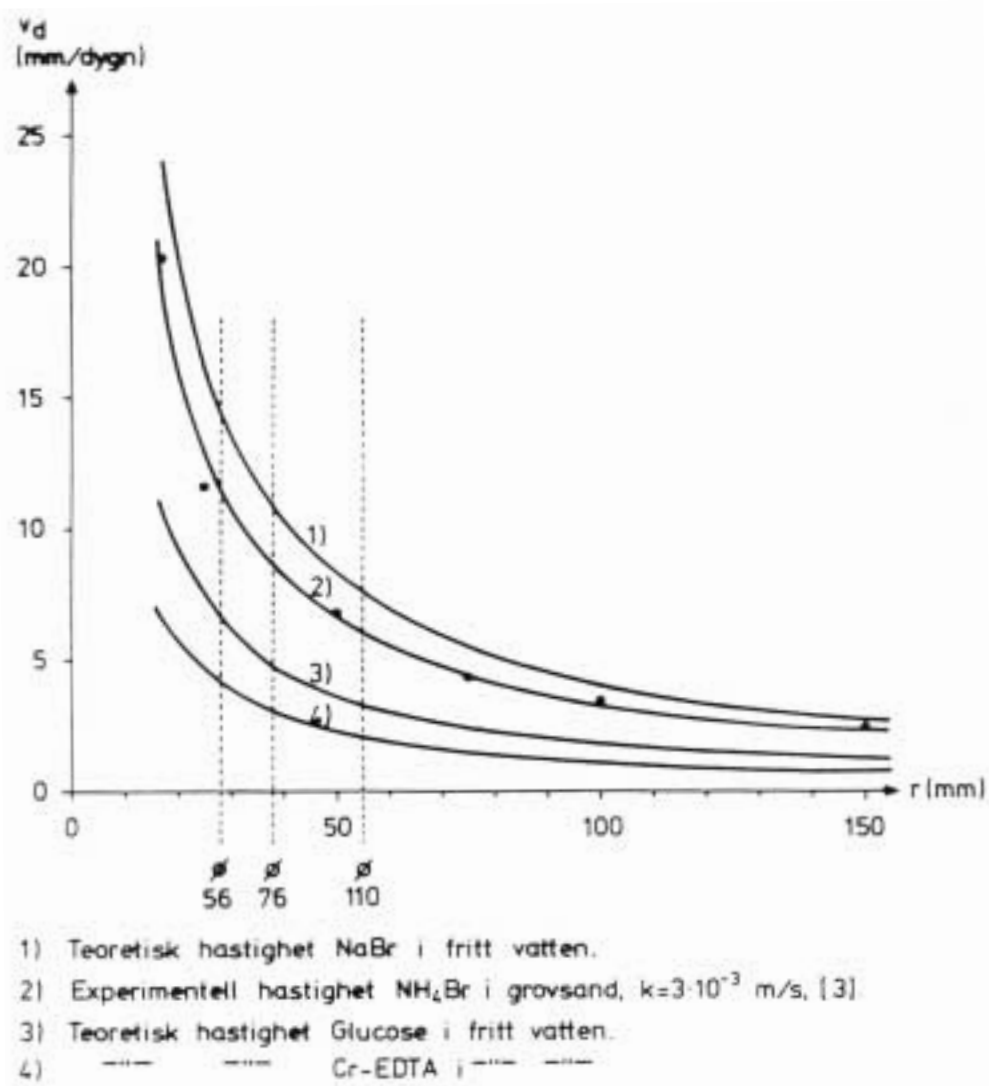


Figur 2-1. Kontraktionsfaktorn,  $\alpha$ , som funktion av förhållandet  $k/k_1$ .



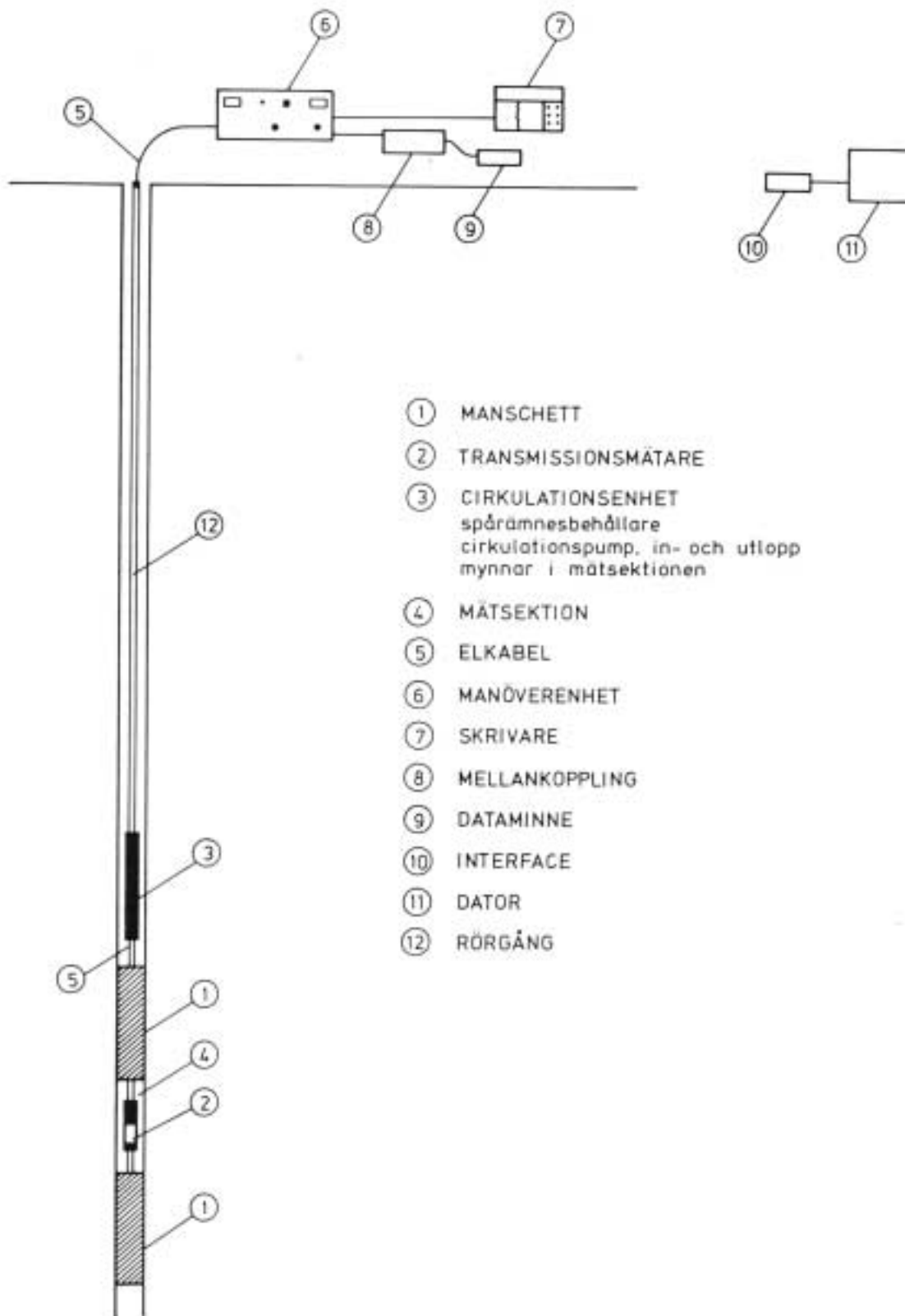
Figur 2-2. Skenbar flödes hastighet  $v$  ( $v = v_b + v_d$ ) vid olika startkoncentrationer, orsakad av densitetseffekter,  $v_b$ , och molekylär diffusion,  $v_d$ .





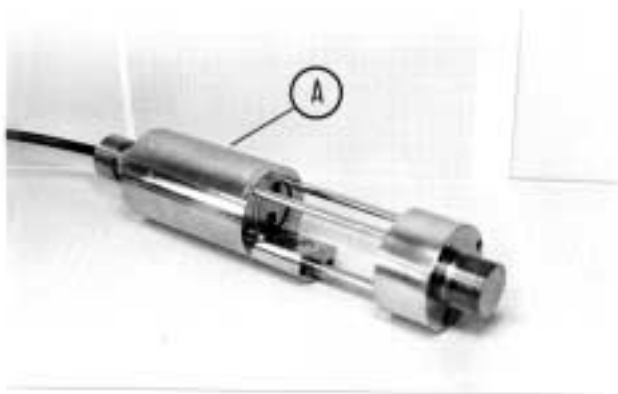
Figur 2-3. Skenbar flödes hastighet,  $v_d$ , orsakad av molekylär diffusion.

# UTSPÄDNINGSUTRUSTNING



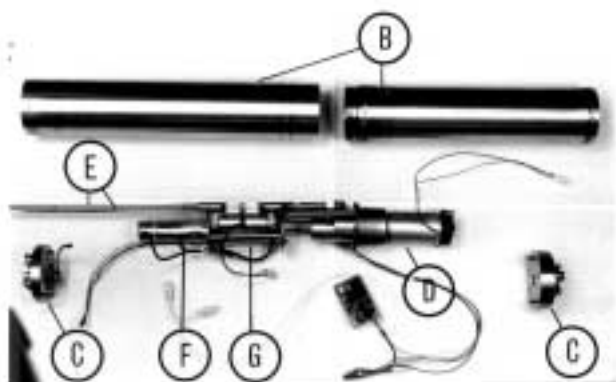
- ① MANSCHETT
- ② TRANSMISSIONSMÄTARE
- ③ CIRKULATIONSENHET  
spårämnesbehållare  
cirkulationspump, in- och utlopp  
mynnar i mätsektionen
- ④ MÄTSEKTION
- ⑤ ELKABEL
- ⑥ MANÖVERENHET
- ⑦ SKRIVARE
- ⑧ MELLANKOPPLING
- ⑨ DATAMINNE
- ⑩ INTERFACE
- ⑪ DATOR
- ⑫ RÖRGÅNG

Figur 3-1. Översiktsskiss, utspädningsutrustning.



## TRANSMISSIONSMÄTARE

- Ⓐ TRANSMISSIONSMÄTARE

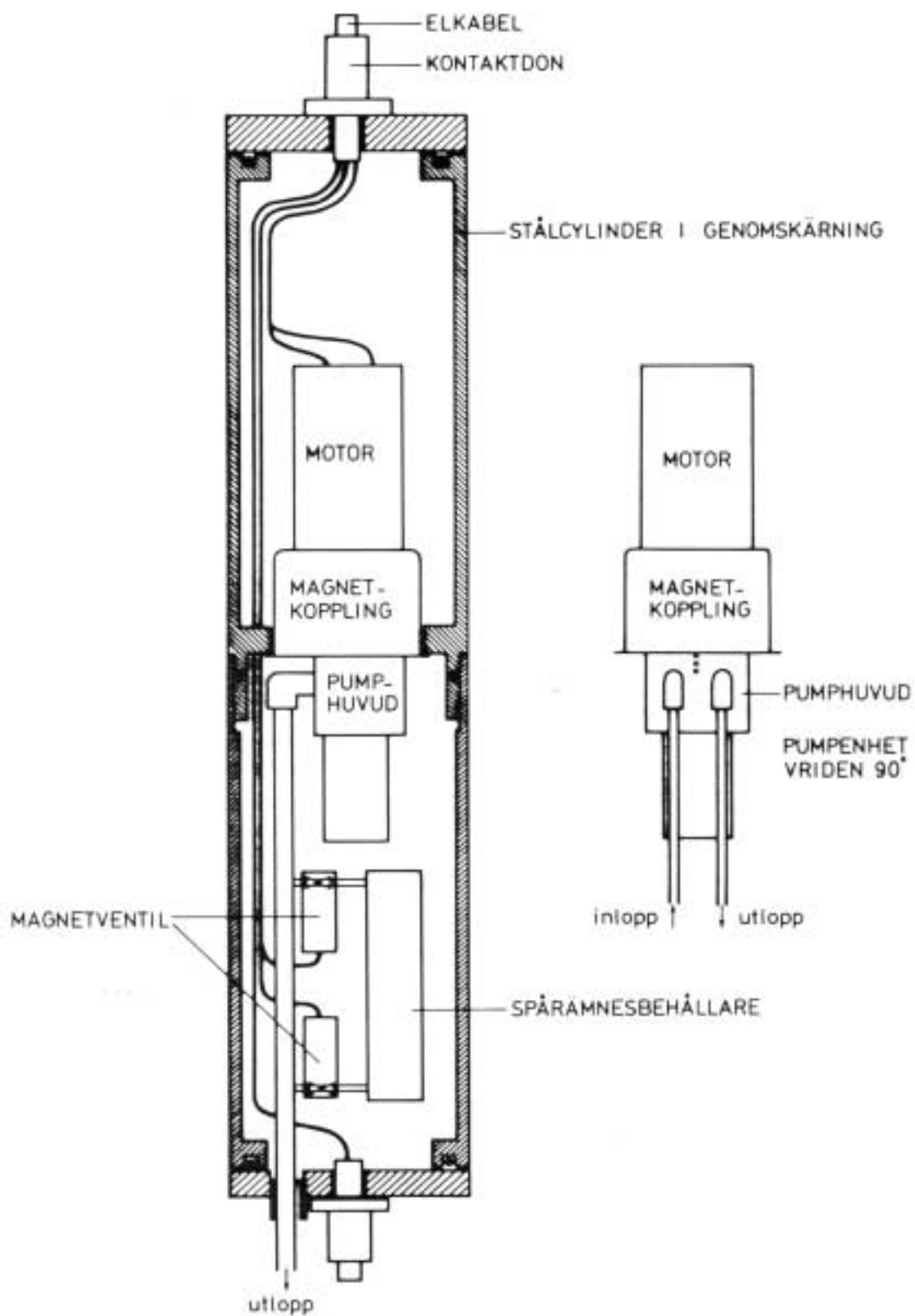


## CIRKULATIONSENHET

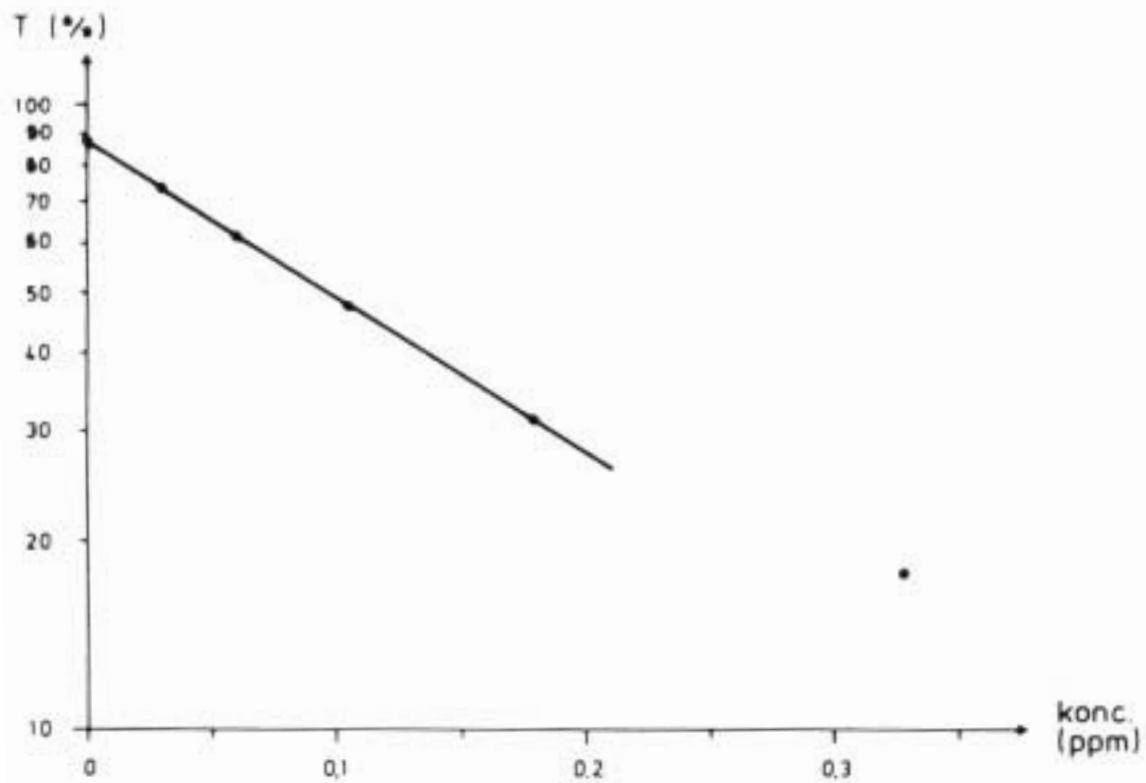
- Ⓑ STÅLCYLINDER
- Ⓒ GAVLAR
- Ⓓ PUMP
- Ⓔ INLOPP OCH UTLOPP
- Ⓕ SPÅRÄMNESBEHÅLLARE
- Ⓖ MAGNETVENTILER
- Ⓗ MONTERAD CIRKULATIONSENHET
- Ⓘ YTTERRÖR



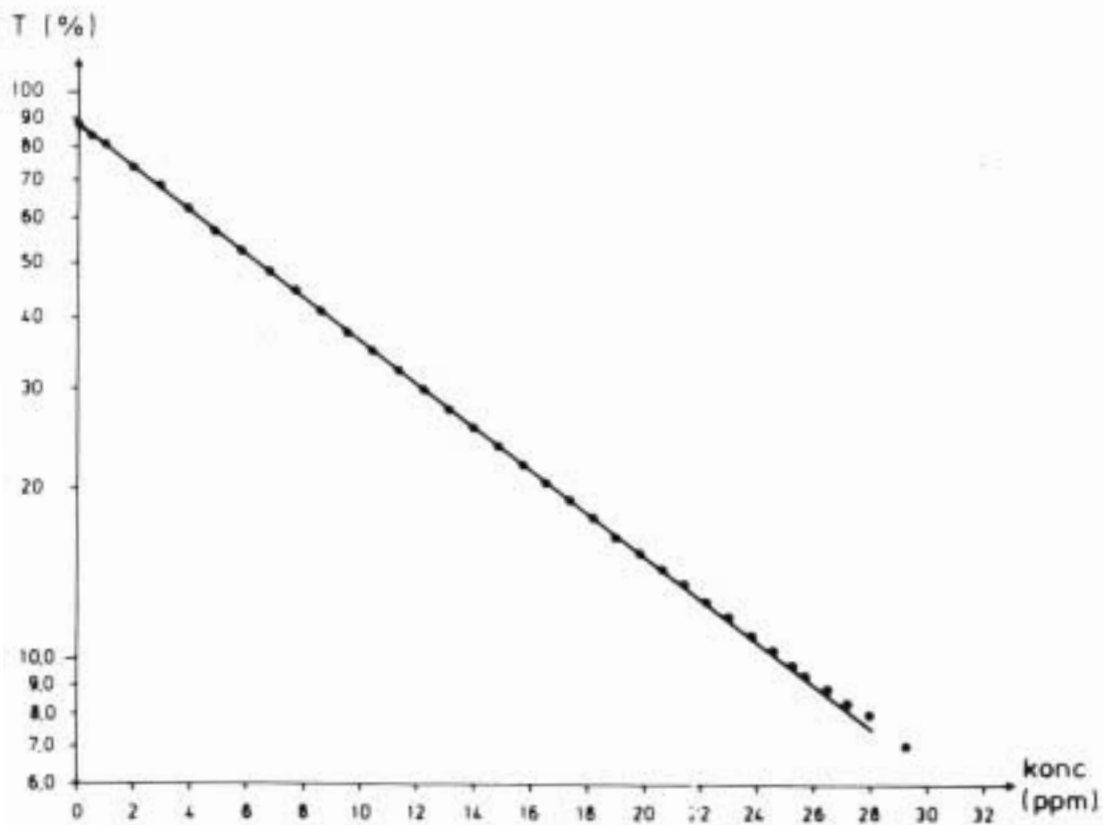
*Figur 3-2. Transmissionsmätare och cirkulationsenhet.*



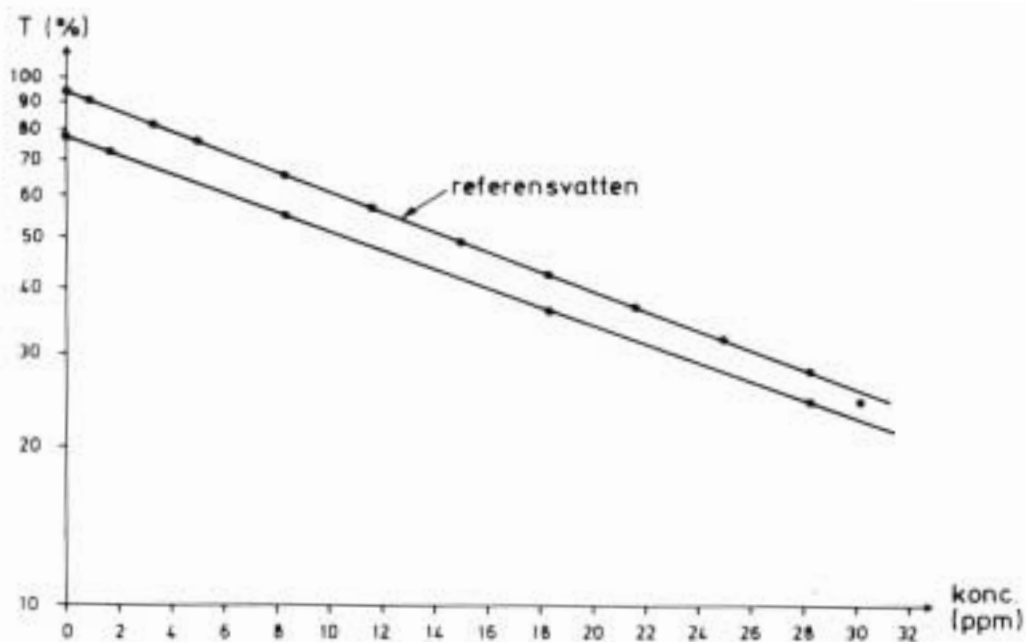
Figur 3-3. Principskiss, cirkulationsenhet.



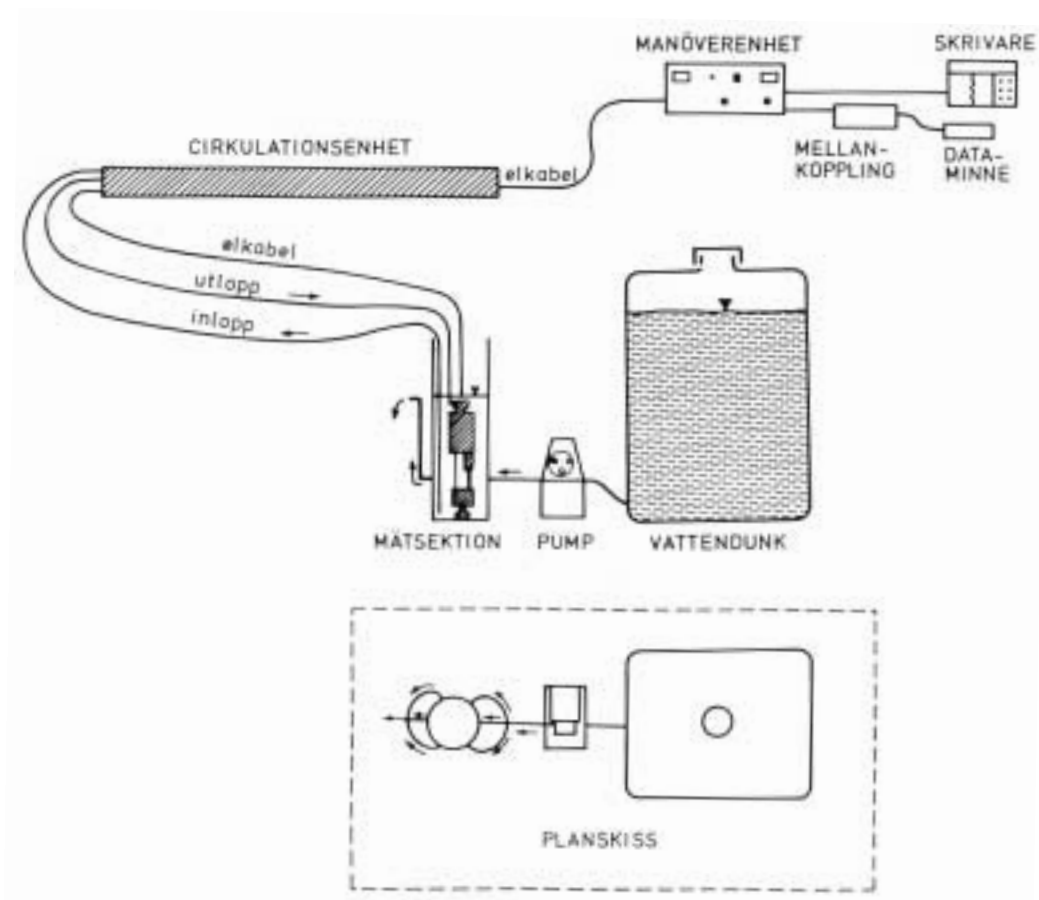
Figur 3-4. Kalibreringskurva, Metylenblått i referensvatten 1.



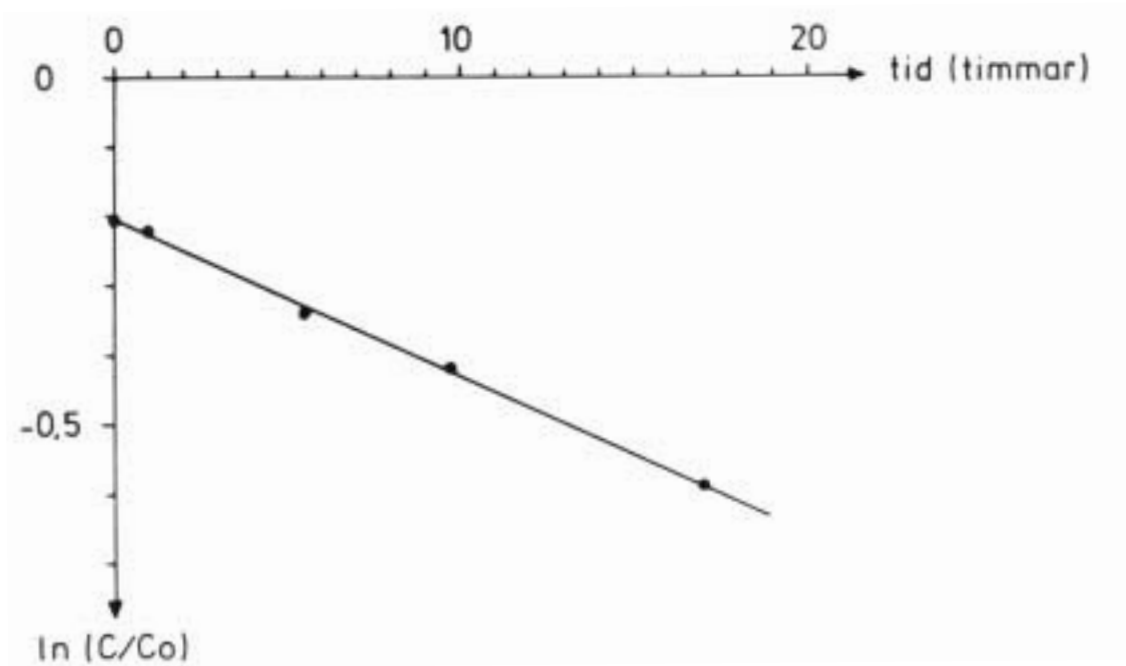
Figur 3-5. Kalibreringskurva, Cr-EDTA i referensvatten 1.



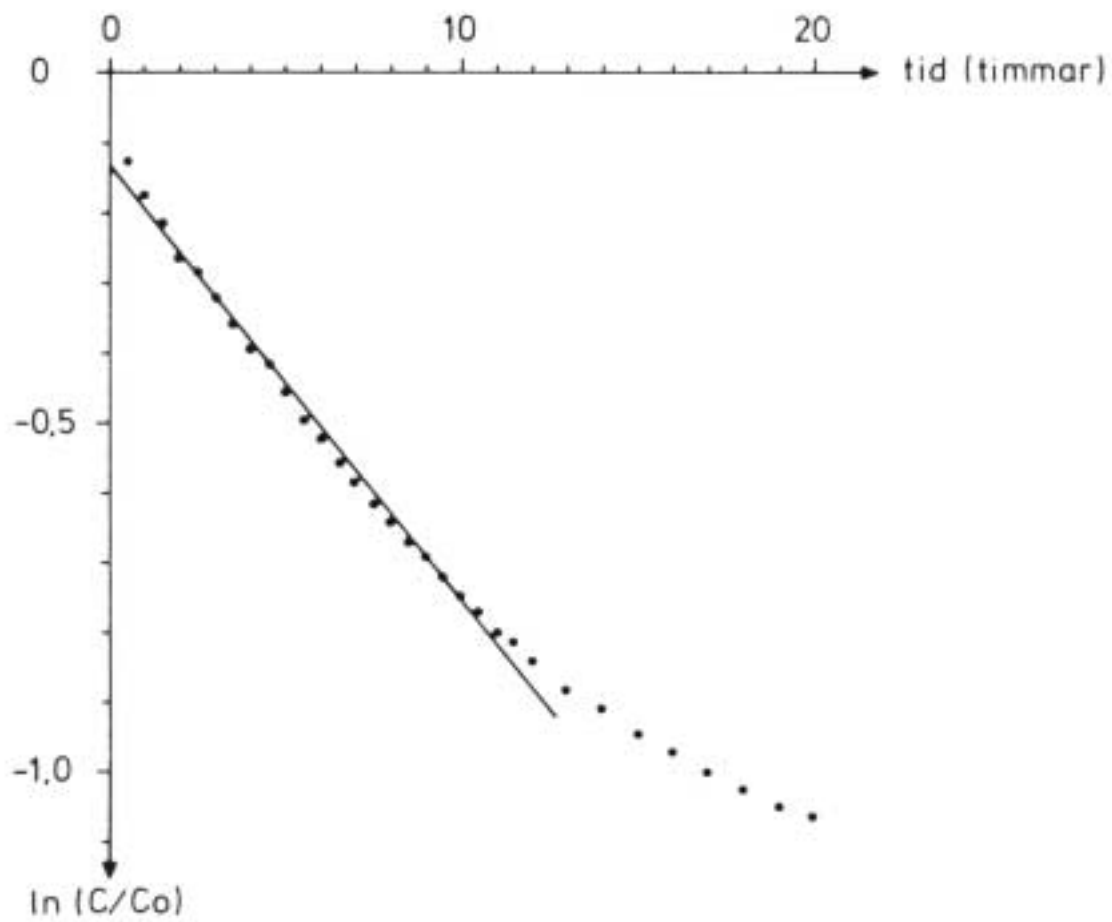
Figur 3-6. Kalibreringskurva, Blue Dextran 2000 i referensvatten och grundvatten.



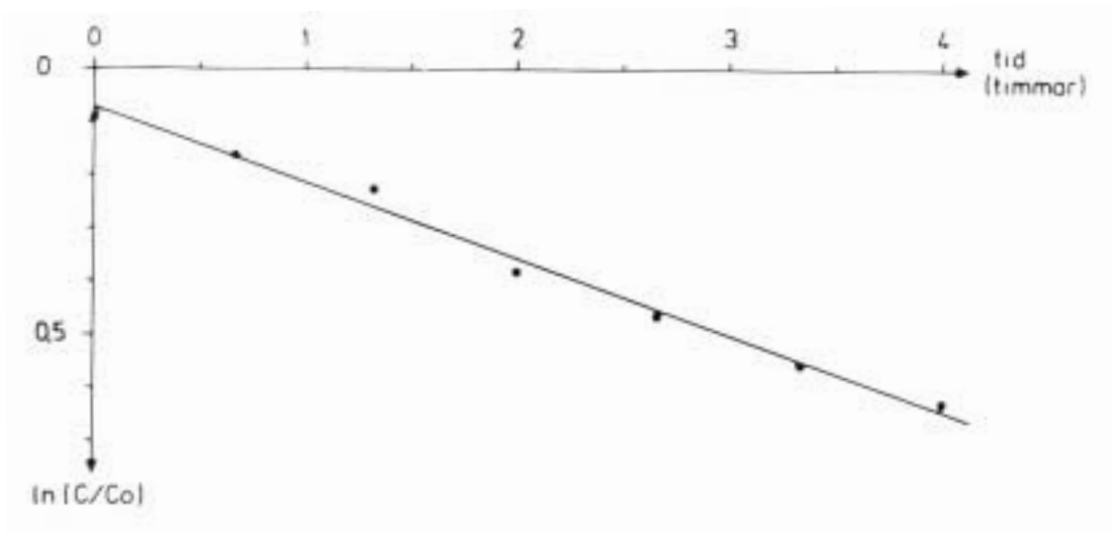
Figur 4-1. Laborarieuppsättning för utspädningsförsök i 110 mm diameter plexiglasrör.



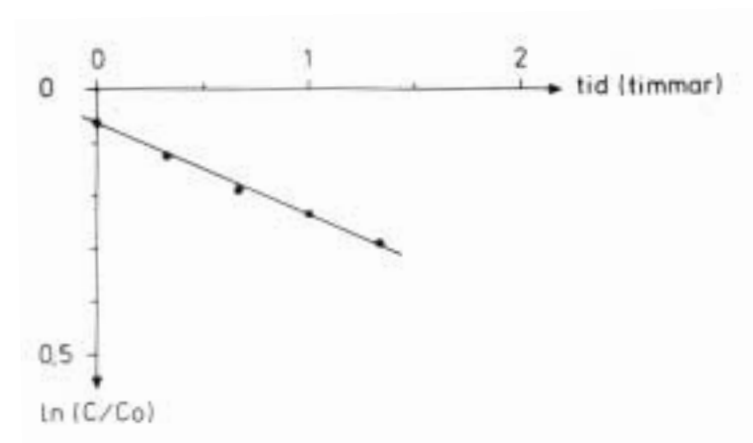
*Figur 4-2. Utspädningsförsök L1.*



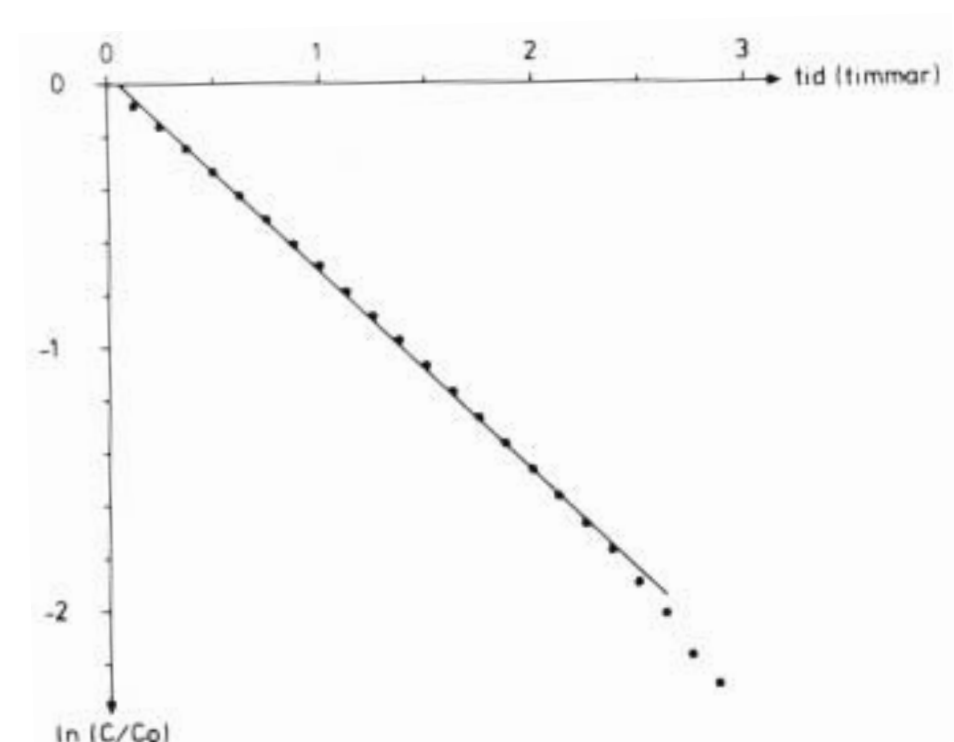
*Figur 4-3. Utspädningsförsök L2.*



Figur 4-4. Utspädningsförsök L3.

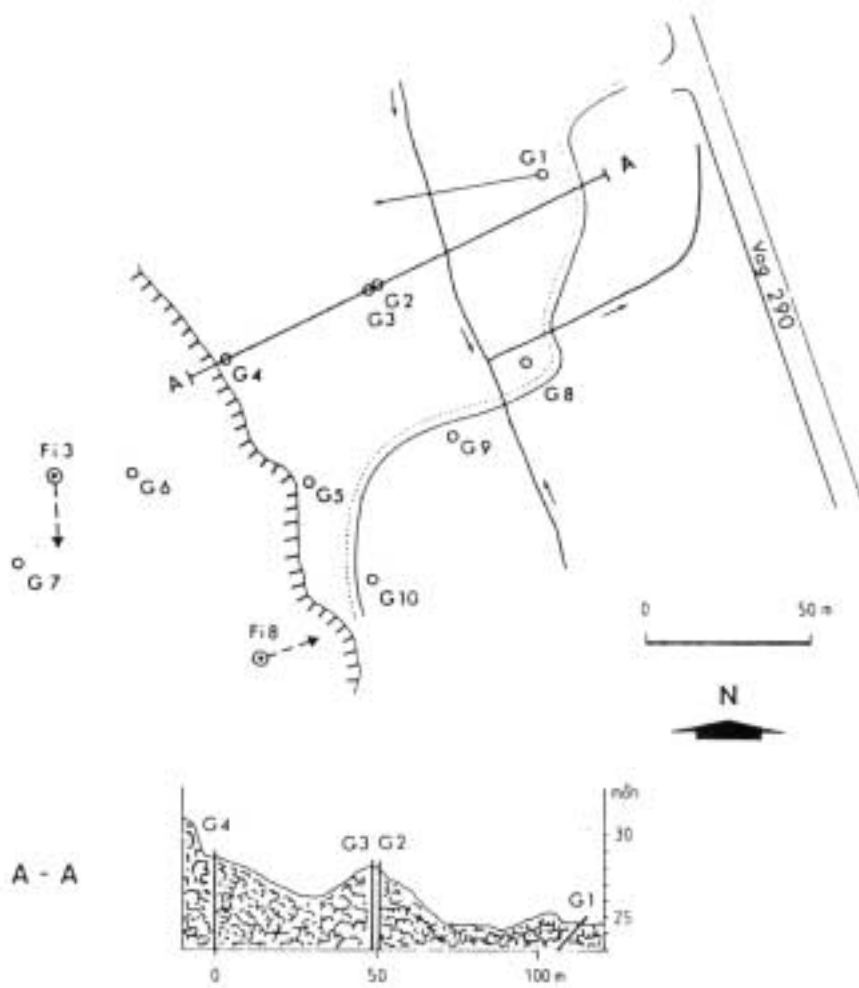


Figur 4-5. Utspädningsförsök L4.

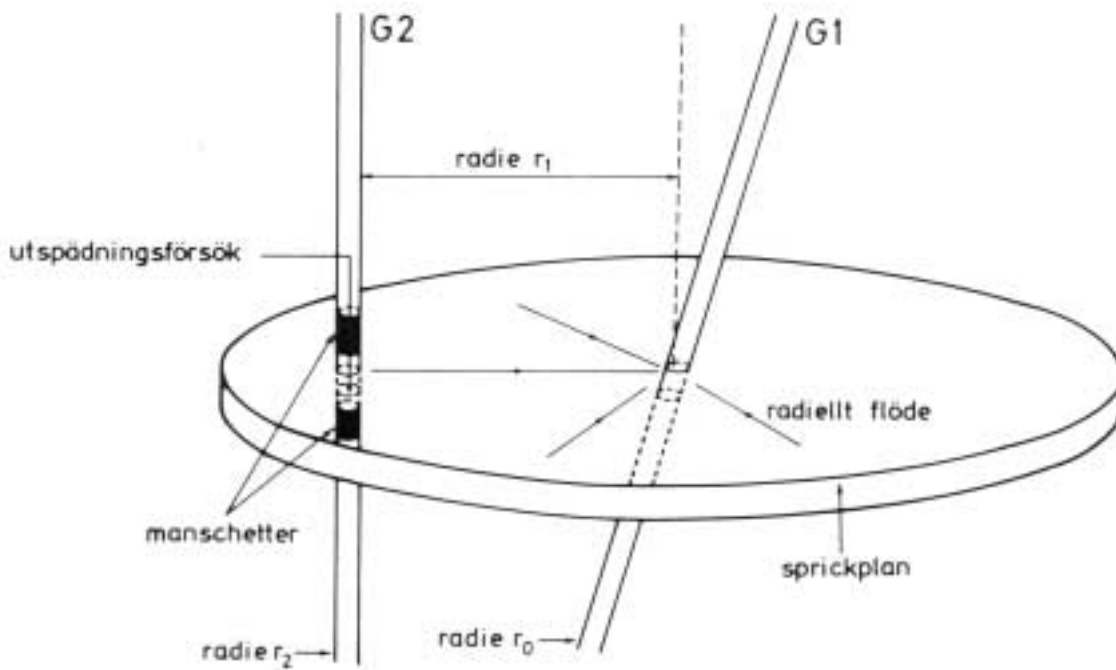


Figur 4-6. Utspädningsförsök L5.

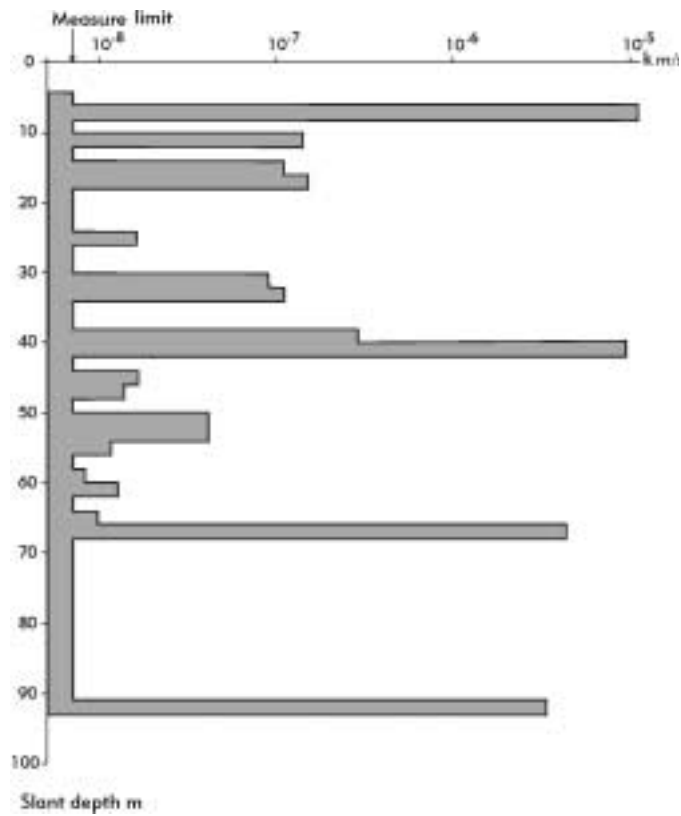




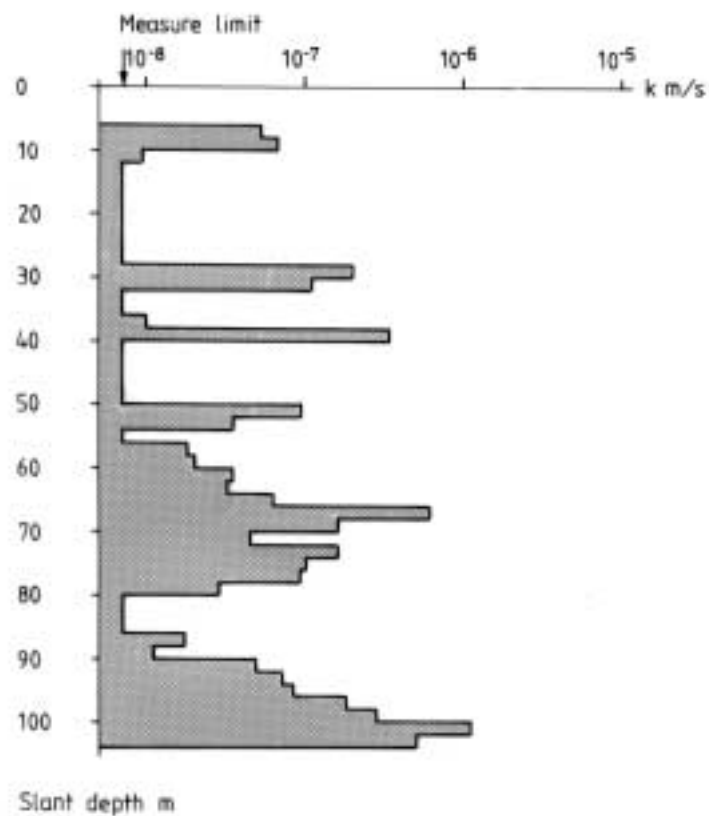
Figur 5-1. Schematisk karta över försöksplatsen utvisande borrhålens läge.



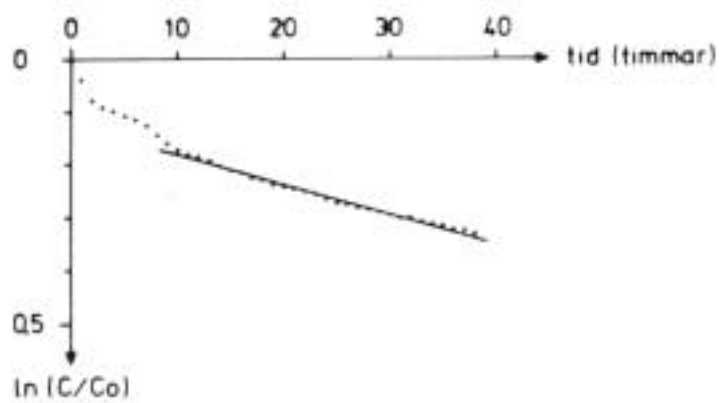
Figur 5-2. Schematisk karta över radialsymmetrisk strömningsmodell.



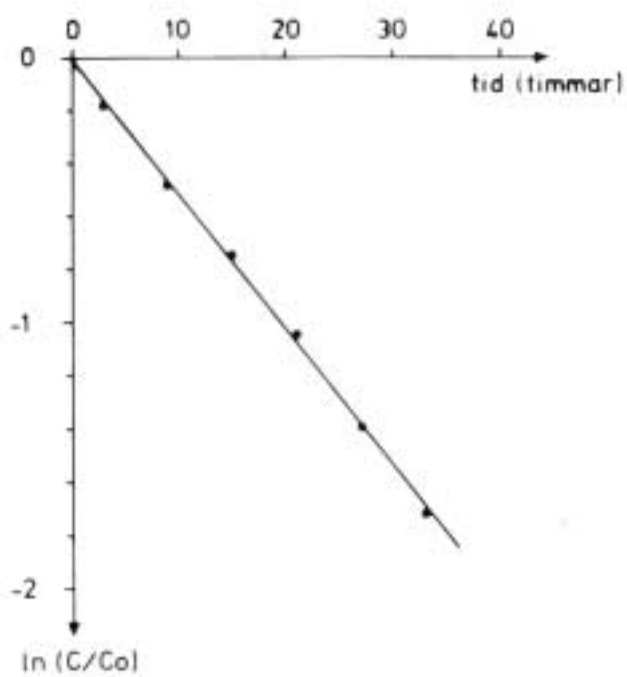
Figur 5-3. Hydraulisk konduktivitet som funktion av borrhålslängd i borrhål G2.



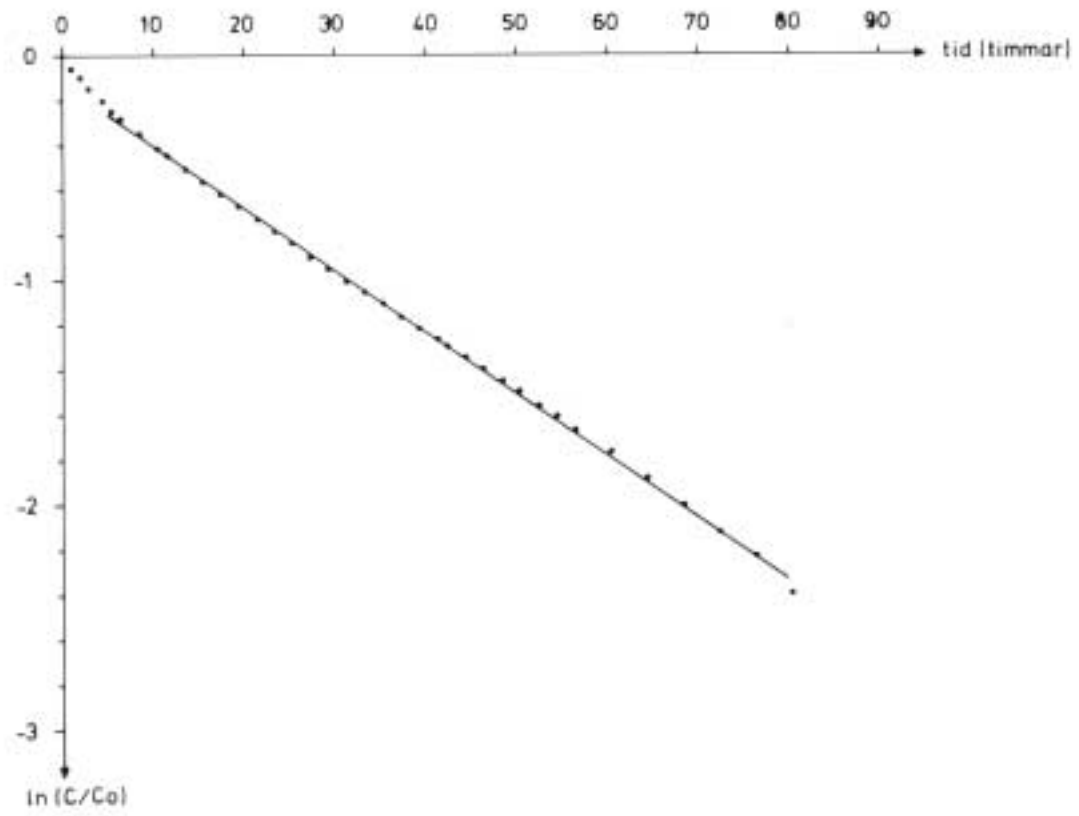
Figur 5-4. Hydraulisk konduktivitet som funktion av borrhålslängd i borrhål G1.



Figur 5-5. Utspädningsförsök F1.



Figur 5-6. Utspädningsförsök F2.



*Figur 5-7. Utspädningsförsök F3.*