

本資料は2000年12月25日付けで登録区分  
変更する。

研究調整Gr【管理担当箇所名】

# AN-1号孔におけるアンビリカルホース システムの水理試験および地下水採水結果

-SKB Report 6.053/15401『RESULTS OF HYDRAULIC TESTING AND GROUNDWATER  
SAMPLING IN BOREHOLE AN-1 AT THE SHOMASAMA FIELD IN JAPAN』の和訳-

平成4年7月

動力炉・核燃料開発事業団

中部事業所環境地質課

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute) 1992

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。については複製、  
転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。  
また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31  
— 動力炉・核燃料開発事業団 —  
— 中部事業所 技術開発課 —



AN-1号孔におけるアンビリカルホースシステムの  
水理試験および地下水採水結果

—SKB Report 6.053/15401『RESULTS OF HYDRAULIC TESTING AND GROUNDWATER SAMPLING IN BOREHOLE AN-1 AT THE SHOMASAMA FIELD IN JAPAN』の和訳—

(和訳担当者)

中野勝志\* 濑尾俊弘\*\* 古屋和夫\*\* 太田久仁雄\*\* 尾方伸久\*\*  
今井 久\*\* 若松尚則\*\* 梅田浩司\*\* 柳澤孝一\*\*

### 要 旨

本稿は、岐阜県瑞浪市明世町月吉正馬様洞試験サイトに掘削された深度約1,000mの試錐孔（AN-1号孔）において実施した、水理試験および地下水の採水結果について報告するものである。この水理試験と地下水の採水は、SKBがスウェーデンの放射性廃棄物の地層処分に係わるサイト特性調査で使用した、アンビリカルホースシステムを用いて行われた。水理試験は注水法を用いて孔内の2区間で、地下水の採水は4区間を行った。地下水の採水中に地上部と孔内部のデータ通信に問題が生じたこともあったが、装置の機能は全体的には満足のゆくものであった。

水理試験の結果より、AN-1号孔の岩盤の透水性はかなり低いことがわかった。設定した2つの測定区間の中で、透水性の高かった277.5～281.5m区間には、測定区間内を横断する割れ目が分布していると考えられる。同区間の透水量係数は約 $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ であった。また、岩盤の平均透水係数は約 $3 \times 10^{-8} \text{m}/\text{s}$ であった。一方、947～951m区間の透水量係数と平均透水係数は、それぞれ約 $4 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ ,  $10^{-9} \text{m}/\text{s}$ であり、透水性の低いことがわかった。

地下水の採水に係わる主な問題点は、AN-1号孔周辺の岩盤の透水性が低いため、地下水を十分に供給できる採水区間を見い出すことが困難であったこと、および地層水（閉鎖した採水区間内の岩盤の間隙に本来存在する地下水）を採水するのに長時間を必要としたことである。

\* 中部事業所 技術開発課 兼環境地質課

\*\* 中部事業所 環境地質課

## 目 次

	(ページ)
<b>要 旨</b>	
<b>1. はじめに</b>	1
<b>2. 水理試験</b>	
<b>2.1 試験装置</b>	
2.1.1 概 要	1
2.1.2 水理試験プローブ	1
2.1.3 注水システム	2
2.1.4 圧力計	2
2.1.5 温度センサー	2
2.1.6 流量計	2
2.1.7 アンビリカルホース	3
2.1.8 コンピュータシステム	3
<b>2.2 水理試験の実施</b>	
2.2.1 測定区間 947～951m	5
2.2.2 測定区間 277.5～281.5m	6
<b>2.3 解析および試験結果</b>	
2.3.1 理 論	7
2.3.2 測定区間 947～951m	12
2.3.3 測定区間 277.5～281.5m	13
<b>3. 地下水の採水</b>	
<b>3.1 背 景</b>	
<b>3.2 装 置</b>	
3.2.1 圧力プローブ	16
3.2.2 水圧式ポンプ	16
3.2.3 電気式ポンプ	16
3.2.4 地下水化学プローブ	16
<b>3.3 採水の実施</b>	
3.3.1 採水区間 277.5～281.5m	17
3.3.2 採水区間 540.5～560.5m	17
3.3.3 採水区間 947～951m	18
3.3.4 採水区間 965～975m	18
<b>3.4 採水結果およびコメント</b>	
3.4.1 概要	18
3.4.2 電極校正	19
3.4.3 酸化還元電位と pH測定	19
<b>4. 水理試験および地下水の採水で得られた知見</b>	21
<b>5. 結 論</b>	22
<b>6. 参考文献</b>	23
<b>7. 技術用語一覧</b>	24
<b>8. 付 錄</b>	

## 1. はじめに

PNCとSKBの業務契約により1991年2月20日から3月6日までの期間、岐阜県瑞浪市明世町月吉正馬様洞試験サイトのAN-1号孔において、水理試験と地下水の採水を行った。このプロジェクトは、日本の地下深部の結晶質岩を対象にSKBの開発したアンビリカルホースシステムの適用性を把握する目的で実施したものである。

SKBとの契約により、技術計画および地下水の採水を含む現地調査に関してはIP-A-Konsult、水理試験およびその評価を含めた全般についてはSGB社(Swedish Geological Company)が監修した。また、酸化還元電位とpHの解析に関してはAnchström Nilsson(Royal Institute of Technology, Dept. of Inorganic Chemistry, Stockholm)が協力した。

水理試験は、自動制御の水理試験装置として開発したアンビリカルホースシステムを用いて行われた。地下水の採水および原位置での地球化学パラメータの計測は、通常、移動分析車(SKB Mobile Filed Laboratory)に用いられる計測プローブを、アンビリカルホースシステムに適用できるように改良し用いた。これらの水理試験、地下水の採水および地球化学パラメータの計測装置は、“多目的”測定システム(“Multipurpose” equipment system)と称され、水理試験および地下水の化学組成の計測プログラムの改良に関して極めて柔軟に対応可能である。

試験の実施および取得データの評価・解析は、主に開発およびSKBの現地調査プログラムを利用する過程で得られたノウハウにより行われた。しかし、測定を実施する中で、採水時間内で最善の結果を得るために、地下水の採水プログラムなど幾つかの改良が行われた。

## 2. 水理試験

水理試験はAN-1号孔の2区間で実施した。初めに、947～951m区間を2月27日に、引き続き277.5～281.5m区間を2月28日に実施した。両区間の試験において、注水過程では測定区間の水圧を一定に維持しながら、注水量の変化を測定した。その後、回復過程〔与えた注水圧を開放する過程〕では、測定区間内の水圧変化を測定した。以下に試験装置の概要、水理試験方法および水理試験結果について述べる。

### 2.1 試験装置

#### 2.1.1 概要

1977～1979年に行われた第1段階のサイト特性調査の後、SKBは大深度対応の単孔式水理試験装置の開発を決定した。この装置の一つがアンビリカルホースシステムで、IPA-konsultが設計および製作を担当し、1981年には利用可能な状況にあった。その後、同装置は構造と機能を向上させるための改良が進められた。この目的は、水理試験装置の自動制御である。具体的には、パッカーの拡張、テストバルブ・リリーフバルブの操作、注水、注水量・圧力・温度の記録が、試験制御プログラムに沿って運転制御されることである。上述した試験制御プログラム“Measuring sequence for the

"hydraulic injection tests" を付録 1 に示す。また、AN-1号孔で使用した装置の概要を付録 2 に示す。

### 2.1.2 水理試験プローブ

水理試験プローブの概要を付録 3 に示す。プローブ No.1 を今回の試験に用いた。地上部の機器と孔内の水理試験プローブとの通信系は、アンビリカルホース内に収納されおり、試験プローブとは特別に設計したマルチカップリング (multi-coupling) により接続されている。ほとんどの試験プローブの両端にはマルチカップリングが備えられており、様々な組み合わせが可能である。

### 2.1.3 注水システム

試験の開始前に 500 ℥ の水タンク内を圧縮空気で昇圧することにより、地上部の送圧系から試験バルブまでの注水系統全体の圧力を注水圧に設定する。次に、〔実際の試験の参考にするために〕カニュールチューブ (cannula tube) を開放してカニュールテスト (cannula test) を実施する。試験では、流入量 (cannula tube の通過量)、圧力、温度を同時に記録する。そして、すぐにテストバルブを開放して水理試験を開始する。水理試験中は、測定区間内の水圧を一定に維持しておく。注水圧力 (P) は 0.5kPa から 900kPa の間で設定可能であるが、通常は P = 200kPa を用いる。地上部の注水圧力はホース内の圧力損失 (流量に依存) を考慮する必要がある。水圧制御の精度は ±0.5kPa である。

### 2.1.4 圧力計

測定区間の水圧測定のために、2 個の圧力計 (測定範囲 10MPa、非直線性 0.3%FSO、繰返し精度 0.1%FSO) が用いられている。この圧力計は上下パッカー間のプローブ内に設置されている。また、同様の圧力計がパッカーの拡張圧力を計測するために使用されている。地下水位の記録は、地下水位より数 m 下に降ろしたバブルパイプ (bubble pipe) 内の空気圧を計測することにより行われる。気圧も気圧計によって計測されている。これらの圧力計類は全て計測トレーラーに設置されている。

### 2.1.5 温度センサー

温度センサーは 3箇所に設置され、計測トレーラー内の気温、アンビリカルホース内の水温、および測定区間内の水温の測定を行っている。温度測定の精度は ±1 °C、分解能は 0.1 °C である。

### 2.1.6 流量計

流量の記録には 2 種類の流量計 (流量計 Q1 : 大流量用、Q2 : 小流量用) が用いられている。それぞれの性能を以下に示す。

#### ① 流量計 Q1

測定範囲 : 0.09 ~ 7 ℥ / min  
測定精度 : ± 1.0%  
ゼロ点の安定性 : 0.1 % FSO  
(zero stability)

#### ② 流量計 Q2

測定範囲 : 0 ~ 0.1 ℥ / min  
測定精度 : ± 0.4 %  
ゼロ点の安定性 : 9 × 10⁻⁵ ℥ / min  
(zero stability)

通常、流量の記録には流量計Q1が用いられ、流量が $0.09\text{ l/min}$ 以下になると自動的に流量計Q2へ切り替わる。このため、測定範囲は $0.1 \times 10^{-3} \sim 7\text{ l/min}$ である。

### 2.1.7 アンビリカルホース

アンビリカルホースの外径は48mmで総延長1,030mである。同ホース内には送水パイプ9本および電気信号ケーブル5本が収納されている。前述したように、ホースと水理試験プローブはマルチカップリング(multi-Coupling)により接合されている。

アンビリカルホースは計測トレーラー内のリールに巻かれて収納されており、孔内への挿入は機械により行われ、その挿入速度は最大10m/minである。

ホースの長さは、精度±0.1mとなるようにキャリブレーションしている。この詳細を付録4に示す。

### 2.1.8 コンピュータシステム

水理試験はコンピュータ制御により行われる。コンピュータシステムの主目的は、パッカー、注水システムおよび計測機器の運転制御と、計測データの収集・保存・表示、ならびに、試験中の測定値の確認と管理である。主な作業項目を次に示す。

- ① 末端プロセッサから約20個の計測データを収集する。
- ② 補正曲線によるキャリブレーションおよび変換式によるデータの変換を行う。
- ③ 測定中のデータをディスプレイ上に表示する。
- ④ 必要に応じて、測定値の経時変化図を表示する。
- ⑤ 事前の指示により、ディスクケットまたは固定ディスクに測定データを保存する。
- ⑥ D/Aチャンネルにおいて数式にもとづき制御電圧を調整する。
- ⑦ 流量に応じてリレーを操作する。
- ⑧ 測定を手順通り完全に行うため、リレーを介してバルブを操作する。
- ⑨ 測定中、測定区間の圧力を一定に維持するため、注水圧を制御する。
- ⑩ 試験終了後、試験結果を図化する。
- ⑪ 異常な測定値の場合にはアラームを発する。アラームは、リレーの閉鎖または音声による。

システムの構築においては、次のような基本方針を立てた。

- ① コンピュータに不慣れな人が、特別の訓練をせずに計測データの収集を行うことができるよう、操作しやすいシステムとすること。
- ② 現場にいるオペレータが実際の環境に応じて機能を変更できるように、システムに適応性を持たせること。
- ③ 必要に応じて新しい機能が簡単に追加できるシステムとすること。

#### (1) ハードウェア

ハードウェアはコンピュータ、2つの末端プロセッサ(periphery processors)、プロッターおよびプリンターで構成されている。

##### ① コンピュータ

Digital Equipment社製の10メガバイトのハードディスクとフロッピーディスク

を有したDEC350またはDEC380が用いられている。

② 末端プロセッサ

末端プロセッサ (PP:s) と称されている 2つ以上のマイクロプロセッサカードは, RS-232/422により, コンピュータと接続されている。このプロセッサカードには 1000kPa の圧力レンジ用として, 0.1kPa の分解能力をもったA/D コンバータが内蔵されている。また, 2系統のアナログ信号と, 閉鎖または中断の連結機能のために D/A コンバータも内蔵されている。PP:1 [上述した末端プロセッサの一つ] は, 測定用トレーラー内に設置され, 全ての調整ユニットおよび地上部の計測用センサーの制御を行っている。PP:2は, 水理試験プローブ内の乾燥した部分に設置され, パルプ, 圧力センサー・温度センサー, および水分からプローブを保護するための湿度センサーの制御を行っている。

③ プロッターおよびプリンター

測定データの図化出力には H P 社製のHP7750A が使用され, 直接コンピュータ DEC350と接続されている。また, プリンターにはデジタルLA50が使用され, プロッターと同様にコンピュータと接続されている。

(2) ソフトウェア

ソフトウェアには 2つの主プログラムが用いられている。1つは測定制御プログラムで, 水理試験の実施のために用いられ, もう1つは図化出力プログラムで, データファイルからの図化出力のために用いられている。測定制御プログラムは水理試験を実施する中で, 試験工程を制御するためのものである。測定制御プログラムの詳細を付録1に示す。

## 2.2 水理試験の実施

スウェーデンのサイト特性調査における水理試験の詳細は, Almérら(1986 a)の文献に記述されている。ここでは, 定圧水理試験の各フェーズの実施項目を以下に示す。

フェーズ0 : パッカー拡張前に, 試錐孔内の測定区間の位置における水圧を記録する。

フェーズ1 : 初期自然水圧 ( $P_1$ ) [reference pressure] の測定  
[ $P_1$  : パッカー拡張前の試錐孔内の水圧]

フェーズ2 : パッカーの拡張 (一般には 2~5 分程度)

フェーズ3 : ダウンホールテストバルブの閉鎖

ダウンホールテストバルブを閉鎖する。すなわち, 測定区間が閉鎖される (一般には 5 分程度)。注水開始の直前に, 初期水圧 ( $P_1$ ) [注水開始時の測定区間内の水圧] を測定する。

フェーズ4 : 注水過程

ダウンホールテストバルブを開放し, 測定区間に一定水頭を与えて試

験を開始する。一般に、注水圧力は200kPa〔初期水圧（P<sub>0</sub>）+200kPa〕とする。注水時間は一般に2時間である。注水停止の直前に、注水最終水圧（P<sub>f</sub>）〔注水終了時の測定区間内の水圧〕と注水最終流量（Q<sub>f</sub>）〔注水終了時の流量〕を測定する。

#### フェーズ5：回復過程

ダウンホールテストバルブを閉鎖し、注水を停止する。この過程は一般に2時間である。〔注水過程で与えた水圧が初期水圧レベルへ回復する時間（水圧の減衰時間を指す。今回の試験では試験時間を2時間と設定しているため、初期水圧まで完全に回復するまでのデータは取得していない）と圧力を計測する。〕

#### フェーズ6：回復過程の終了

回復過程の終了直前に、回復最終水圧（P<sub>r</sub>）〔回復過程の終了時ににおける測定区間内の水圧〕を測定する。〔今回の試験では試験時間を2時間と設定しているため、その時間に達したら測定区間内の圧力と時間を確認する。〕

#### フェーズ7：パッカーの収縮

#### フェーズ8：水理試験の終了

パッカーの収縮後、最終自然水圧（P<sub>n</sub>）〔水理試験終了後のパッカーレベルにおける試錐孔内の水圧〕を測定する。

AN-1号の試験においては、孔径がやや大きいためにフェーズ2（パッカーの拡張）のテストバルブの閉鎖までに40分を要した。試験工程の詳細を付録1に示す。また、水理試験の実施内容の概要を以下に示す。さらに、最終的な水理試験データのプロットを付録5と6に示す。

#### 2.2.1 測定区間 947~951m

はじめに、予備試験を947~951m区間で実施した。試錐孔内の初期自然水位はケーシング口元より地下約17~18mであった。水理試験プローブおよびアンビリカルホースを挿入した際、孔内の地下水位はケーシング口元の上まで上昇した。この現象より、試錐孔周辺の岩盤の透水性は低いことがわかった。この後、水位は低下する傾向にあったが、試験開始時までに初期自然水位へ完全に回復しなかった。予備試験は、約1時間で終了した。

次に、測定区間内の間隙水圧が完全に安定し〔パッカーの拡張に伴う測定区間内の圧力の上昇とその安定〕、初期水圧が確認された後、約2時間の注水過程（フェーズ4）と、2時間の回復過程（フェーズ5）の水理試験を実施した。試験の最終的なデータのプロットを付録5に示す。パッカー内に残圧があったために〔注水過程の前に実施した予備注水試験によるパッカー内の残圧〕、新たな試験ではパッカーの拡張（フェーズ2）

が約5分に短縮された（図A5.2参照）。図A5.3-4よりわかるように、注水過程の開始直後、圧力および流量のピークが表れ、その後約300秒経過したのち一定圧に保たれた。図A5.11-12を見ると、当初、流量はかなり大きかったが、約100秒で大幅に低下していることがわかる。

地上部で計測している試験孔内の水位は、試験の開始以前には完全に安定せず、わずかに低下する傾向であった。（フェーズ0～1）。ただし、初期自然水圧（ $P_1$ ）はいくぶん高めの値となった。しかし、測定区間の水圧は注水の開始以前に安定したので、この値を初期水圧（ $P_0$ ）と判断した。

注水停止後、測定区間内の圧力は徐々に低下したが、回復過程の終了時（試験時間を2時間に設定しているために）までに試験開始前の初期水圧（ $P_0$ ）へは回復しなかった。また、パッカーの収縮後の最終自然水圧（ $P_1$ ）は、水理試験開始前の初期自然水圧（ $P_0$ ）にほぼ回復した。注水を停止した後、流量は直ちに0となった（図A5.17参照）。注水終了時のダウンホールテストバルブの閉鎖は流量計への逆流（約30秒の小さな負の流量値）の原因となった。しかし、測定区間の圧力への影響はなかった。

注水過程（フェーズ4）の流量の測定結果にはバラツキが認められたが、その平均的な傾きは求めることができた（図A5.3およびA5.8-13参照）。短時間の間隔で流量測定を実施した注水過程のおわりに、大きなバラツキが認められた。この結果については生データのレポート（図A5.3およびA5.8-12参照）の図表を参照されたい。なお、この原因は明確になっていないが、技術的問題の可能性が高い。

図A5.5およびA5.7は、注水過程および回復過程の測定区間内の地下水温度（ $T_2$ ）の記録で、地下水温度は注水過程および回復過程とも約43°Cで安定していた。しかし、パッカーの圧力開放後、地下水温度は若干低下した。注入水の地上における温度（ $T_3$ ）は注水過程の間、若干上昇する傾向も見られたが、その後の試験においては、ほぼ23°Cで一定であった。また、地上部の室温（ $T_4$ ）は徐々に上昇し、試験終了時には約23°Cに達していた。

図A5.6は、注水過程および回復過程のパッカー圧力（ $P_4$ ）の記録である。図より、この間のパッカー圧力が約1400kPaで安定していることがわかる。また、気圧（B）も測定期間中、約103kPaで安定していることがわかる。地上で計測している地下水位〔隙水圧（W）〕は、測定期間中、徐々に低下する傾向にあったが、パッカーの収縮後、上昇を開始して当初の安定なレベルへ近づく傾向にあった。

## 2.2.2 測定区間 277.5～281.5m

この区間では、注水過程および回復過程をそれぞれ15分に設定した試験を実施した。測定データの最終プロットを付録6に示す。同区間ではパッカーの拡張に45分を要した。パッカーを拡張し、ダウンホールテストバルブを閉鎖した後（フェーズ2～3）の測定区間内の水圧の経時変化を図A6.2に示す。この図より、水圧が徐々に上昇していることがわかる。この状況は、岩盤中の割れ目より測定区間内へ地下水が徐々に流入していることを示していると考えられる。

図A6.4およびA6.7よりわかるように、注水開始の直後、注水圧力と流量はピークを示し、その後約300秒経過して安定した。また、図A6.3およびA6.8～A6.12のデータより、流量と圧力は前区間の試験と比べ安定していることがわかる。さらに、流量にもバラツ

キがほとんど認められない。

図A6.4およびA6.13～A6.19より、注水停止後、水圧は徐々に低下していることがわかる。ただし、前回の試験同様、区間内の水圧は回復過程の期間内では初期水圧( $P_0$ )まで回復していない。また、パッカー収縮後の最終自然水圧( $P_1$ )は、試験前の初期自然水圧( $P_1'$ )まで回復した。さらに、図A6.3およびA6.16より、注水停止後ただちに流量は0へ戻っていることもわかる。

図A6.5より、測定区間内の水温( $T_2$ )は試験の全工程にわたり約24°Cで一定であることがわかる。また、注入水の温度( $T_3$ )、地上部の室温( $T_4$ )はともに約18°Cで安定している。

図A6.6は注水過程および回復過程のパッカー圧力( $P_4$ )の記録である。図より、この間のパッカー圧力が約1300kPaで安定していることがわかる。また、気圧( $B$ )も測定期間中、約102.7kPaで安定していることがわかる。地上で計測している地下水位〔間隙水圧( $W$ )〕はパッカーの収縮後、わずかに上昇した(約0.2m)が、その後、ケーシング先端部から約16m下で安定した。

## 2.3 解析および試験結果

### 2.3.1 理論

結晶質岩石を対象とした水理試験の解析と理論は、Alménら(1986b)の文献に記述されている。また、試験データは別添資料集に記載されている。

A-ダイアグラムは試験全般の測定要素の一覧を示している。B-ダイアグラムおよびC-ダイアグラムは、それぞれ注水過程と回復過程の地下水の流動形態(flow geometry)に対応して設定されており、試験結果の解析に用いられる。

表2.1に地下水の流動形態の分類と、それに相当するダイアグラムの番号を示す。

表 2.1 地下水流動形態とそれに対応するダイアグラム  
(Andersson and Persson, 1985による)

地下水流動形態	ダイアグラム
線状(Linear)浸透流	B3, C2, C3
層状(Bilinear)浸透流	B2, C1
放射状(Radial)浸透流	B4, B5, C4, C5, C6
球状(Spherical) 浸透流	B6, C7

はじめに、地下水の流れが定常流(steady-state flow)であることを前提に測定区間の透水係数( $K_{ss}$ )を求めた(以降『透水係数の概算値』と呼ぶ)。次の非定常解析(transient flow interpretation)は、注水過程および回復過程において実際にどのような地下水の流動形態であるかを判定することによって行った。両対数ダイアグラムB5とC6は、注水過程および回復過程における実際の地下水の流動形態を判定するための道具として用いた。定圧試験(constant pressure test)の回復過程を解析するために、回復時間軸に相当時間(dt<sub>e</sub>)〔注水停止後の経過時間〕をプロットし、定常流量試験(constant flow rate test)と同じ標準曲線を用いた(Alménら、1986b)。

両対数グラフのデータカーブの中で、傾き1:2 および1:4 をもった直線部分は、1次元の浸透流である線状浸透流 (linear flow) と層状浸透流 (bilinear flow) を表している。これらは、測定区間を横断する割れ目または水みちが支配的な地下水の流れである。データカーブで1:4 以下の傾きを示す曲線部分は、(疑似) 放射状浸透流 [(pseudo radial flow)] を表す。また、安定状態に近づいていく平坦な曲線は、球状浸透流 (spherical flow) を表す (Andersson and Persson, 1985)。さらに、両対数グラフ上の傾き1:1 の直線部分は、孔内貯留効果または閉鎖外側境界の影響 (closed outer boundary effect) のいずれかを示すものと考えられる (Alménら, 1986b)。

実際の流動形態がわかれれば、〔流動形態ごとに〕専用の解析図を用いることにより解析ができる（表 2.1）。注水過程および回復過程のデータカーブで、線状浸透流または層状浸透流を示しているものは、B3-B2, C2-C3 およびC1ダイアグラムを用いて解析することができる。また、放射状浸透流（radial flow）は、B4およびC4-C5 ダイアグラムを、球状浸透流のカーブは、B6とC7のダイアグラムを用いて解析することができる。スウェーデンにおける結晶質岩石を対象とした注水試験の経験から、2 時間の試験を行った場合、通常、試験終了時には（疑似）放射状浸透流の流動形態となっていると考えられる。

(定常状態での) 透水係数の概算値 ( $K_{ss}$ ) を求めるために、次式を用いる(Alménら, 1986b)。

$$K_{oss} = \frac{Q_p \rho_w g C}{d P_{em} L} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

九三

$Q_p$  : 注入最終流量 [注水過程終了時の流量] ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$dP_{0m}$ : 初期水圧 ( $P_0$ ) に基づいて求めた平均注水圧力 ( $p_a$ )

L : 区間長 (m)

$\rho_w$  : 地下水(注入水)の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$  : 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

C : 無次元係数

本稿では、地下水の密度 ( $\rho_w$ ) = 1,000 kg/m<sup>3</sup>、重力加速度 (g) = 9.81 m/s<sup>2</sup> を用いて計算が行われた。また、(1)式で平均注水圧力を  $dP_{im}$  とすることにより、 $K_{iss}$  [パッカー拡張前の初期自然水圧を基に求めた透水係数の概算値] は、平均注水圧力 ( $dP_{im}$ ) を用いて算出される。地下水の流動形態に依存する無次元係数 (C) は次

式によって表される(Alménら, 1986b)。

$$C = \frac{1 + \ln(L/2r_w)}{2\pi} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ただし

$2 r_w$  : 試錐孔徑 (mm)

非定常解析 (transient analysis) では、注水および回復の両過程において（疑似）放射状浸透流であることを前提している。解析は、表2.1 の中に示したダイアグラムの内、注水過程はダイアグラムB4（片対数）とB5（両対数）を、回復過程はダイアグラムC4（片対数）とC6（両対数）を用いて行われる（表2.2 および表2.3 参照）。

注水過程における（疑似）放射状浸透流を前提とした場合、透水係数（K）は片対数ダイアグラムB4より次式で算出される（Alménら、1986b）。

$$K = \frac{0.183 \rho_w g}{d P_{\text{em}} L \Delta (1/Q)} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ただし

$\Delta(1/Q)$  : 1 対数サイクル時間 (a logarithmic time cycle) での流量の逆数の変化量 ( $s/m^3$ )

透水量係数 ( $T$ ) は  $T = K L$  である。スキンファクター ( $s$ ) は次式で算出される (Alménら, 1986b)。

$$s = 1.15 \left[ \frac{(1/Q)_{\text{min}}}{\Delta(1/Q)} - \log \frac{K}{r_{\text{min}}^2 S} \right] - 2.13 \quad (4)$$

九三

$(1/Q)_{\text{平均}} : 1$  分間の流量の逆数

$S_s$  : 比貯留係數( $m^{-1}$ )

流量の逆数は、解析に用いられる直線より読み取らねばならない。この値に10分間の値を用いる場合には、式(4)の定数は3.13にしなければならない。試錐孔の有効半径 ( $r_{w,t}$ ) の算出式を以下に示す。

両対数ダイアグラムB6の解析は、無次元時間 ( $t_b$ ) の関数である無次元流量 ( $Q_b$ ) を用いた標準曲線で行う。この標準曲線は、ダイアグラムB6に示される時間 ( $t$ ) に対する流量の実測値 ( $Q$ ) と重ね合わせて解析される。透水係数 ( $K$ ) の算出式を以下に示す(Alménら、1986b)。

$$K = \frac{0.159 Q_m \rho_w g}{d P_{0m} L Q_{0m}} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

ただし

$Q_m$ ,  $Q_{Dm}$ : データカーブおよび標準曲線上のマッチポイントでの流量( $m^3/s$ )

ダイアグラムB6における試錐孔の有効半径 ( $r_{wf}$ ) の算出は、次式で行われる(Alménら、1986b)。

ただし

$t_m$ ,  $t_{Dm}$ : データカーブおよび標準曲線上のマッチポイントでの時間(s)

スキンファクター ( $s$ ) の算出式は、上述した式(5)と同じである

回復過程についても、ダイアグラムC4（またはC5）およびC6より、同様な解析を行うことができる。透水係数（K）は、片対数ダイアグラムC4を用いたストレートライン解析（straight-line analysis）によって、次式で求められる（Alménら、1986b）。

$$K = \frac{0.183 Q_p \rho_w g}{L \Delta P} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ただし

$\Delta P$  : 1 対数サイクル時間の圧力変化量 (Pa)

スキンファクターは、ダイアグラムC4より次式で算出される(AImánら 1986b)

$$S = 1.15 \left( \frac{P_p - P_{1\text{-min}}}{AP} - \log \frac{K}{r_{\text{min}}^2 S} - 2.13 \right) \quad \dots \dots \dots (9)$$

九

$P_{t=1\text{min}}$  :  $dt_e = 1\text{ min}$  での〔注水停止後1分の〕圧力 (Pa)

上述したように、圧力は解析に用いられる直線より読み取らねばならない。 $dt_e = 10\text{min}$  の値を読み取った場合は、式(9)の係数に3.13を用いなければならない。

透水係数 (K) は、無次元圧力 ( $P_d$ ) と無次元の時間関数 ( $t_d$ ) による標準曲線を用いて、両対数ダイアグラムC6より求める。もし、孔内貯留効果が認められた場合、異なる無次元貯留係数 ( $C_d$ ) ごとに描かれた標準曲線を用いなければならない。最も適切な無次元貯留係数 ( $C_d$ ) の標準曲線は、ダイアグラムC6の実測された圧力と時間 ( $d t_e$ ) の関係の曲線と一致する。透水係数 (K) は次の式によって算出する (Alménら, 1986b)。

$$K = \frac{0.159 Q_p \rho_w g P_{Dm}}{d P_{pm} L} \quad \dots \quad (10)$$

ただし、

$dP_{pm}$ ,  $P_{dm}$ : データカーブ上および標準曲線上のマッチポイントでの圧力変化

試錐孔の有効半径の算出は、式(7)の  $t_m$  を  $d t_{em}$  に変換することにより、またスキンファクターは式(5)により算出される。

孔内貯留係数 (C) はダイアグラムC6の傾き1:1 の直線より、次式により求められる (Alménら、1986b)。

$$C = \frac{Q_p d t_{el}}{d P_{el}} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ただし

$d\tau_{el}$ ,  $dP_{pl}$ : 直線上の任意の点における時間(s) と圧力変化(pa)

無次元の孔内貯留量 ( $C_D$ ) は次式により算出される(Alménら 1986b)

$$C_D = \frac{C \rho_w g}{2 \pi S_L L r^2} \quad \dots \dots \quad (12)$$

例えば、試錐孔内を鉛直方向の割れ目が横断し、外側境界の影響 (outer boundary effect) が支配的となる以前に疑似放射状浸透流に達している場合の透水係数の算出を以下に示す。注入および回復過程の透水係数 ( $K$ ) は片対数ダイアグラムB4およびC4より、式(3)および(8)によって算出される。注水過程における両対数ダイアグラムB5の透水係数 ( $K$ ) は標準曲線上の  $(1/Q)$  と、 $(t_d)$  の関数により近似され次式で算出される。

$$K = \frac{0.159 \rho_w g}{d P_{em} L} \frac{1/Q_{dm}}{1/Q_e} \dots \quad (13)$$

ただし、

$1/Q_m$ ,  $1/Q_{Dm}$ : データカーブ( $s/m^3$ ) および標準曲線上のマッチポイントでの流量の逆数

割れ目の周長の半分（または試錐孔の有効半径）は、式(7)によって算出することができる。透水係数および試錐孔の有効半径は、回復過程のダイアグラムC6を用いて、式(10)および(7)より算出される。

## 2.3.2 測定区間 947～951m

測定区間 947～951mの透水係数の概算値 ( $dP_{0m}$ を基に算出) は、ダイアグラムA0の生データのプロットにより  $4.83 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  と算出された (Andersson and Andersson 1991)。流量カーブは、ダイアグラムB5の初期のプロットで抽出した。自動的に抽出されたダイアグラムA0中の注水過程終了時付近の流量 ( $Q_p$ ) のデータは、大きなバラツキが認められるため、解析に用いるデータとしては好ましくない。このため、注水過程の最後の約30秒間のデータは最終的な解析対象から削除した。これ以外に、データの処理は行っていない。最終的なデータのプロットを付録5に示す。

図A5.1のダイアグラムA0よりわかるように、上述した流量データの削除は全流量 ( $V_{tot}$ ) に僅かな影響しか与えておらず、注水圧力の差圧 ( $dP_{1m}$  と  $dP_{0m}$ ) の平均にも影響を及ぼしていない。しかしながら、注水最終流量 ( $Q_p$ ) [および、それに対応する疑似注水時間 ( $t_{pp}$ )] および最終注水圧力 ( $P_p$ ) には訂正がなされた。このために、透水係数の概算値 ( $K_{0ss}$ ) は注水過程のデータより再算出され、 $9.95 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  に変更した。注水および回復過程の非定常解析を以下に示す。

### ① 注水過程

注水過程の開始当初に認められた大流量は、区間内の短い割れ目またはくぼみによるものと考えられる。約 100秒以後の流量の急激な減少は、割れ目またはくぼみの範囲が小領域であることを示し、岩盤マトリックスの平均的流れへ移行する現象を示していると考えられる。

ダイアグラムB5:2 (図A5.12) は、注水過程における定常試験の放射状浸透流の標準曲線とデータカーブの後半部分が最も良く一致したことを見ている。したがって、ストレートライン分析は、ダイアグラムB4 (図A5.10) を用いて式(3)により行われる。標準曲線の分析もダイアグラムB5:2 を用いて行った。透水量係数 ( $T$ ) および平均透水係数 ( $K$ ) および、これに対応するスキンファクター ( $s$ ) と試験孔の有効半径 ( $r_{wf}$ ) は式(5)～(7)によって算出された (表2.2 参照)。スキンファクターの算出のためには、比貯留係数 ( $S_s$ ) を算定または推定しなければならない。スウェーデンにおける難透水性の結晶質岩を対象とした水理試験の経験より、比貯留係数 ( $S_s$ ) は  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  程度と考えられている (Almén ら, 1986b)。このため、ここでは比貯留係数 ( $S_s$ ) に上述した値を用いた。また、透水量係数および透水係数の値は測定区間付近の岩盤のマトリックスの特性を代表する値として算出された。

### ②回復過程

ダイアグラムC6 (図A5.19) 中の両対数グラフを見ると、疑似的放射状浸透流に収束する孔内貯留効果が支配的な浸透流 (borehole storage-dominated flow) の標準曲線が、データカーブと最も良く一致していることがわかる。これは、回復過程 2 時間の間では真の放射状浸透流 (true radial flow) に達していないことを示している。グラフには、約 1,000 秒まで孔内貯留効果が支配的であることが示されている。また、ここで注目すべき点は、両対数グラフ中の直線の傾きが 1:1 と示され、水理学的な岩盤の諸特性に係わる情報 (スキン効果など) が示されていないことがわかる。この後、過渡期 (transition period) へ移行する。経験的には、直線からのデータの偏差が約 1.5 対

数サイクルの時間経過後に放射状浸透流は発生している。また、今までの経験、および標準曲線に準じたデータカーブからの外挿では、真の放射状浸透流に達するためには、10時間以上の回復時間を必要とすると考えられている。

有効孔内貯留係数 ( $C$ ) は直線の傾き 1:1より式(11)によって、約  $2.8 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{Pa}$  と算定された。また、無次元の孔内貯留係数 ( $C_D$ ) は式(12)より約500 と推定された。ダイアグラムC6 (図A5.19) 中の標準曲線分析には、無次元の孔内貯留係数 ( $C_D$ ) = 1,000 とした場合の標準曲線と、スキンファクター ( $c$ ) = 0 が使用された。

測定区間の透水量係数、平均透水係数と、これに対応するスキンファクターおよび試錐孔有効半径はダイアグラムC6より、式(10), (5), (6)に沿って算出された。その詳細は表2.2に示す。この表の中には図A5.1より求められた透水係数の概算値 ( $K_{oss}$ ) も示した。また、上述したように比貯留係数 ( $S_s$ ) には  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  を用いた。この2時間の回復過程の中では真の放射状浸透流に達していると考えられるが、ダイアグラムC4 (図A5.17) を用いて式(8), (9)により概算的な直線の解析を行った。しかしながら、この解析は代表的なものとは考えていない。回復過程 (ダイアグラムC6) の孔内貯留が支配的な期間後のデータより算出した水理学パラメータの値は、岩盤のマトリックスの物性を代表していると考えられる。

表 2.2 AN-1号孔の 947-951m 区間ににおける水理試験の非定常解析の結果  
透水係数の概算値  $K_{oss} = 9.95 \times 10^{-10} \text{ m/s}$

過程 ／ダイアグラム	T ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	K ( $\text{m/s}$ )	s (-)	$r_w$ (m)
注水過程				
片対数 (B4)	$4.24 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-9}$	0.77	0.023
両対数 (B5)	$4.29 \times 10^{-9}$	$1.07 \times 10^{-9}$	0.69	0.025
回復過程				
[片対数 (C4)]	$1.86 \times 10^{-9}$	$4.66 \times 10^{-10}$	-2.89	0.90 ]
両対数 (C5)	$6.90 \times 10^{-9}$	$1.73 \times 10^{-9}$	0.39	0.034

### 2.3.3 測定区間 277.5~281.5m

最終的なデータプロットを付録6に示す。試験の開始以前に試錐孔内の水位は安定していた。したがって、ダイアグラムA0 (図A6.1) に表示された初期自然水圧 ( $P_1$ ) および初期水圧 ( $P_0$ ) ( $w_1, w_0$  も同様) は代表的な値と考えられる。また、注水終了時までのデータより抽出された注水最終流量 ( $Q_p$ ) も代表的なものと考えられる。

これより、透水係数の概算値 ( $K_{oss}$ ) は  $3.34 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  と算出された。注水および回復過程の非定常解析結果を以下に示す。

## ① 注水過程

ダイアグラムB5(図A6.11)より、前半部分の流量の逆数のカーブ ( $1/Q$ ) は、およそ1:2の傾きを有しており、測定区間に交差して分布する割れ目の中の線状浸透流を示している。これに対応するダイアグラムB3中のデータも直線で示される。ダイアグラムB5における約500秒以降の流量の逆数のカーブは、上方に急傾斜で屈折していることから、外側境界の影響を示すものと考えられる。この状況は、測定区間に横断する割れ目の存在を示すものと考えられる。もしくは、水みちの広がりに限界があるためとも解釈できる。この外側境界は割れ目または水みちを取り囲む岩塊に一致するものと考えられる。

水理特性の評価は、外側境界の影響が作用する前の流量の逆数のカーブの初期部分のデータを用いて行った。このため、データ曲線の解析は、はじめに式(13)を用いて区間内を高角度で横断する割れ目の標準曲線に合わせて行った。外側境界の影響が作用する前に真の放射状浸透流に達したか不明確であるが、ダイアグラムB4を用いて式(3)～(5)によりストレートライン分析も行った。解析については上述したダイアグラムを参照されたい。

測定区間の透水量係数 ( $T$ )、透水係数 ( $K$ ) と共に、これに対応するスキンファクター ( $s$ ) および割れ目の周長の半分 ( $X_s$ ) は、式(13)、(5)および(7)により算出した。また、割れ目の周長の半分は、横断する割れ目の拡張の概算的評価とみなされた。スキンファクター ( $s$ ) および割れ目の周長の半分 ( $X_s$ ) の算出のために、有効貯留係数 ( $S_s$ ) は  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$  と評価された。

透水量係数の算出値は、測定区間を横断して存在している割れ目中の浸透流の特徴を反映しており、透水係数の算出値は測定区間付近の岩盤の平均的特性を代表するものと考えられる。この時、岩盤のマトリックスは、割れ目の外側境界として作用したものと考えられる。

## ② 回復過程

ダイアグラムC6(図A6.18)を再度参照されたい。回復カーブの初期部分は、およそ1:2の傾きをもっており、測定区内に横断して存在する割れ目内の線状浸透流であることを示している。外側境界の影響は約500秒以降に認められる。これは、注水過程で得られたデータカーブと良く一致している。このため、水理学パラメータの評価は、ダイアグラムC6中の前半部分のデータカーブにより、式(10)、(5)および(7)を用いて行なわれた。また、ダイアグラムC6(図A6.16)中で、式(8)、(9)および(5)によってストレートライン解析も行なわれた。表2.3に示すように、水理学的パラメータは注水過程と同様に算出され、透水係数の概算値 ( $K_{oss}$ ) も示した。比貯留係数は前述した値を用いた。これらの水理学パラメータの算出値の妥当性は上述した内容と同じである。

表 2.3 AN-1号孔の277.5~281.5m区間における水理試験の非定常解析結果  
透水係数の概算値  $K_{\text{ss}} = 3.34 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

過程 ／ダイアグラム	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)	s (-)	r <sub>wf</sub> , X <sub>f</sub> (m)
注水過程				
片対数 (B4)	$9.78 \times 10^{-8}$	$2.45 \times 10^{-8}$	-0.36	0.072
両対数 (B5)	$7.22 \times 10^{-8}$	$1.81 \times 10^{-8}$	-3.70	2.0
回復過程				
片対数 (C4)	$1.35 \times 10^{-7}$	$3.37 \times 10^{-8}$	-2.78	0.80
両対数 (C6)	$1.16 \times 10^{-7}$	$2.90 \times 10^{-8}$	-3.70	2.0

### 3. 地下水の採水

正馬様洞試験サイトのAN-1号孔の深度277.5-281.5m, 540.5-560.5m, 947-951mおよび965-975mの各区間で採水を行った。

#### 3.1 背景

地下水の多くの成分は、保存状態の良い試料ならば、後で正確に分析することができる。しかし、いくつかの変化しやすい成分は、現場でただちに測定しなければならないということが、スウェーデンにおける初期のサイト特性調査で得られた経験からわかった。pHやEhのような最も変化しやすいパラメータは、むしろ試錐孔内の測定区間内で測定しなければならない。この目的のために、SKBは地下水のキャラクタリゼーションのためのシステムの開発を行ってきた(Alménら, 1986a)。本システムは主に、パッカー、ポンプおよび地下水化学プローブ(hydrochemical probe)から構成されている。

### 3.2 装置

正馬様洞試験サイトでの調査に用いられたアンビリカルホースシステムは、地下水化学プローブおよび電気式と水圧式の異なる2種類の揚水ポンプを完備している。また、記録用トレーラー内には、操作・表示・プロット・データのプリントのためのコンピュータシステムが設置されている（付録2参照）。なお、当システムの主要な部分については、2.1章に述べたとおりである。地下水の採水およびパラメータ測定専用の装置は、以下の部分から構成される（付録7および8参照）。

- ① 圧力プローブ
- ② 水圧式あるいは電気式ポンプユニット
- ③ 地下水化学プローブ
- ④ コンピュータシステム

#### 3.2.1 圧力プローブ

測定範囲10MPaの圧力計を内蔵した圧力プローブを使用している。圧力計の非直線性と繰り返し精度は、それぞれ0.3%FSOと0.1%FSOである。圧力計は遮水型である。

#### 3.2.2 水圧式ポンプ

試錐孔内の閉鎖区間からの地下水を採水するために、ピストンポンプを用いることがある。ポンプは、地上から水圧ホースを経由して加圧された水によって作動する。ピストンはスプリング方式で、その往復運動はタイムリレーによって制御される。水圧ホースを経て地上へ送水する通常の揚水能力は100-200m<sup>3</sup>/minである。地下水と接するポンプのすべての部分は、ステンレス製である。また、ポンプから地上までの地下水の揚水に用いるホース内の容量は、74.73lである。

#### 3.2.3 電気式ポンプ

電気式ポンプはプローブ内に備えつけられている。このプローブには、地下水化学プローブとの接続用にマルチカップリングが装着されている。ポンプの能力は、50mの水頭で100m<sup>3</sup>/min、35mの水頭で250m<sup>3</sup>/minである。

#### 3.2.4 地下水化学プローブ

通常、地下水化学プローブは上下パッカー間に取り付けられている。しかし、上部パッカーの直上に装着することもできる。プローブは、電極とその接続部を内蔵した測定チャンバーおよびデータ送信用の電子部品部から構成される。地下水がプローブ内へ侵入すると、地下水はその内部を満たし、1lの測定チャンバーを通過する。Eh電極は金、白金、グラッシャーカーボンである。このうち、金と白金の電極は常時、プローブに装着されている。pH電極は圧力補償のガラス電極であり、参照電極はAg/AgClダブルジェル（ダブルジャンクション機能と同じ）電極である。これらすべての電極は特別に設計されており、取り外しが可能である。温度は、常時、プローブに装着されているサ

一ミスターで測定される。

同プローブはマルチカップリングを介してマルチホースに接続され、電源とデータ通信のため、4本のケーブルが用いられている。プローブの電子部品部にはA/Dコンバータ、電極と差動増幅器入力部(differential amplifier)を接続するマルチプレクサー(multiplexer)、およびシリアルデータ通信のための受送信回路も含まれている。コンピュータとプローブ間の通信は、周波数変調されたデータ(frequency shifted data)で、300ボード(baud)の2重送信で行われる。

電極に流れる電流を制御するために、高インピーダンスのアンプがそれぞれの電極の入力部に装着されている。プローブの電源は地表から供給される直流24Vである。地表接地抵抗とプローブ間の電気的干渉を避けるため、DC/DCコンバータと光カプラーを用いている。プローブはステンレススチールを用いて組み立てられており、直径54mmのステンレススチールのパイプでカバーされている。プローブの長さは1.6mである。

### 3.2.5 コンピュータシステム

地下水採水システムにはDigital Equipment社製PDA-11/23型コンピュータとの互換性があるMDX-11型コンピュータが装備されている。このコンピュータはRX-11M+、マルチユーザー、マルチタスクオペレーティングシステム下で作動する。また、1メガバイトのメモリ、33メガバイトのワインチエスターハードディスクユニット、8インチフロッピーディスクユニットおよびRS-232シリアルチャンネルを備えている。周辺機器は、ターミナル、マトリックスプリンタおよびプロッタである。

コンピュータの目的は、以下のとおりである。

- ① 地下水化学プローブと圧力プローブからのデータを収集し、保存する。
- ② 測定中に図や曲線として端末にデータを表示する。
- ③ 測定結果をプロットする。
- ④ 測定結果をプリントアウトする。
- ⑤ 生データを処理する。
- ⑥ データベース入力ためにフロッピーディスクへデータを保存する。

ソフトウェアは、いくつものプログラムを起動させることができるメインプログラムからなる。測定しながら古いデータを処理するといったように、いくつかのプログラムを同時に作動させることができる。

## 3.3 採水の実施

各採水区間ににおいて行なわれた地下水の採水について以下に記述する。採水区間で使用した電気式、水圧式ポンプのレイアウトをそれぞれ付録7と8に示す。

### 3.3.1 採水区間 277.5～281.5m

採水区間に於ける装置のレイアウトを付録7に示す。地下水化学プローブNo.1、電気

式ポンプNo. 1を使用し、採水区間長は4mであった。パッカーを拡張する前の採水速度は、 $180\text{ m l/min}$ であった。パッカーを拡張した後の採水速度は  $74\text{ m l/min}$ に下がり、それ以後の揚水の間（62時間），連続的に下がる傾向にあった。また、揚水を終了した時の採水速度は  $31\text{ m l/min}$ であった。採水区間の圧力の低下は約0.7bar(7m)であった。

### 3.3.2 採水区間 540.5 ~560.5m

採水区間における装置のレイアウトを付録8に示す。地下水化学プローブNo. 1、水圧式ポンプNo. 1を使用し、採水区間長は20m であった。採水速度は、揚水した間（113時間）に、 $60\sim40\text{ m l/min}$ の間で変化した。採水区間の水位の低下は採水の途中では約6.4mであったが、徐々に水位の低下量は減少した。これは、採水区間内の水理状況が次第に良くなつていったこと（採水速度の増加）を示している。

揚水を停止する予定時間の約10時間前に、再び孔内のデータ通信系に故障が生じた。このため、地上での地下水のサンプリングのみを行い、試錐孔内のデータの収集を行えない状態で揚水は続けられた。ホース内の容積は約74lであるために、採水区間の地下水を地上まで揚水するためには、 $60\text{ m l/min}$ の採水速度で約21時間を要する。このために、孔内でのデータ収集の中止は、地上の測定と孔内での測定の比較には支障をきたすことはないものと考えられる（孔内でのデータ収集は既に揚水停止時間以降のデータを収集している）。さらに、データ通信系が故障した時までに、電極指示値は安定値に達していたため、10時間の試錐孔内のデータの欠如は、データ曲線を得る上で影響はないと考える。

### 3.3.3 採水区間 947 ~951m

採水区間における装置のレイアウトを付録8に示す。地下水化学プローブNo. 1と水圧式ポンプNo. 1を使用し、採水区間長は4mであった。揚水を開始してから約2時間後に、採水速度は  $42\text{ m l/min}$ となり、減少する傾向にあった。データ通信系の故障により、揚水終了後、修理のために孔内の機器は地上へ引き揚げられた。この短期間の揚水から、上述した採水速度では、これ以上の揚水のためには不十分であることが明らかとなった。

### 3.3.4 採水区間 965 ~975m

採水区間における装置のレイアウトを付録8に示す。地下水化学プローブNo. 1と水圧式ポンプNo. 1を使用し、採水区間長は10m であった。揚水を開始してから約5時間後に、新たなデータ通信系の故障が発生し、孔内の機器は地上へ引き揚げられた。採水速度は約  $50\text{ m l/min}$ から、揚水の最後には約  $37\text{ m l/min}$ へ低下した。採水区間における最終的な水位低下は22.7m であった。ここでも、採水速度がこれ以上の揚水のためには不十分であることが明らかとなった。

## 3.4 採水結果およびコメント

### 3.4.1 概要

次に、pHとEhの原位置測定の結果を示し、それについて議論する。生データ（電

極指示値) は、 pHと酸化還元電位の値を得るために、正確な校正定数を使用して再計算された。この計算には、SKBが実施した先の調査と同じコンピュータが使用された。

### 3.4.2 電極校正

電極は3つの異なる方法で校正された。校正に使用した緩衝液は、以下のとおりである。

- ① pH, Eh校正用フタル酸緩衝液(pH4) + キンヒドロン
- ② pH, Eh校正用リン酸緩衝液(pH7) + キンヒドロン
- ③ pH校正用炭酸緩衝液(pH10)

それぞれの電極の校正定数( $E^\circ$ )は緩衝液での測定結果より計算される。同じ電極に対して、その値は同じでなければならない。しかし、再現性が±10mVであれば、それは許容される。後述する計算に用いた $E^\circ$ 定数と同様に、それぞれの電極と緩衝液に対して計算された( $E^\circ$ )値を表3.1に示す。計算式を付録9に示す。

### 3.4.3 酸化還元電位とpH測定

AN-1号孔の4区間で調査が行われ、各区間の測定時間は、僅か4時間から数日間と様々であった。各測定区間のpHと酸化還元電位の代表値を表3.2に示す。また、各電極の測定結果の経時変化の図を付録9に示す。

#### ①測定区間 277.5 ~ 281.5m

計算には校正No.1の値を使用した。孔内の測定区間の温度は、それぞれの校正用緩衝液中の温度に近かった。また、8.1 ± 0.1の安定したpH値を得た。3種類のEh電極の値は、測定の終了時には±10mVの範囲で一致していたが、なお減少する傾向にあった。酸化還元電位は負の値を示し、地下水の還元状態を示しているが、より大きな負の値が予想される。

#### ②測定区間 540.5 ~ 560m

プローブ中のガラス電極の位置を、同区間の測定前に変更し、ガラス電極も交換した。pHとEhの計算には校正No.2の値を使用した。また、3種類の酸化還元電位の電極の値は一致し、測定の最後の60時間には完全に安定した。pHの測定値も非常に安定していたが、pH = 5.7という極めて低い値となった。pH電極は測定の前後で校正した(校正值は表3.1のNo.2と3)。この2つの校正值は良く一致し、揚水の間、電極が十分に機能したことを見ている。

#### ③測定区間 947 ~ 951m

計算には校正No.1の値を使用した。測定は測定開始後4時間で中断し、それから再び開始した。しかし、データ通信系の故障のために、僅か約5時間継続できたに過ぎなかった。これは信頼できるEh値を得るために短すぎる時間である。時間に対するpH値のプロットを、付録10の277.5 ~ 281.5m区間のデータと比較すると、pHの測定も信

頼できることは明らかである。さらに、短時間の採水の間の採水速度も不十分であることが示された。

#### ④測定区間 965 ~ 975m

計算には校正No.1の値を使用した。測定時間は僅か5時間であり、信頼できるEhの測定値を得るために短すぎた。一方、pH値は安定しているように思える。ここでも、データ通信系が故障する以前の採水速度が遅かったことが示された。

表 3.1 校正定数 (E<sup>°</sup> mV)

日付	校正No.1 910222	校正No.2 910228	校正No.3 919306
EOPHB	170		
EOPHB4	162		
EOPHB7	171		
EOPHB10	182		
EOPHIB		200	210
EOPHIB4		190	193
EOPHIB7		195	213
EOPHIB10		202	225
EOCB	270	250	230
EOCB4	273	252	246
EOCB7	265	245	229
EOCIB	270		
E0C1B4	276		
E0C1B7	265		
E0PTB	270	240	230
E0PTB4	272	254	246
E0PTB7	264	239	227
E0AUB	270	250	230
E0AUB4	286	257	245
E0AUB7	263	235	228

表3.2 酸化還元電位 (Eh) およびpHの測定値

測定区間 (m)	測定期間	水温 (°C)	pH	Eh (mV)
277.5~281.5	910222~910225	24	8.1	-140
540.5~560.5	910228~910305	28	5.7	-170
947.0~951.0	910225~910225	37	(7.0)	-
965.0~975.0	910227~910227	37	(7.8)	-

( ) の値は不明確である。

#### 4. 水理試験および地下水の採水で得られた知見

今回実施した水理試験および地下水の採水に関する技術的評価について以下に述べる。AN-1号孔における今回の試験がアンビリカルホースシステムにとって新しい環境や条件の下での試験であったことを考慮すると、今回の水理試験は成功したと考えられる。947～951m区間の水理試験では、圧力および流量の大きな変動が大きな問題であった。また、注入圧力が定圧状態に達するのにかなりの長時間（約300秒）を要した。その後も、かなり大きな（周期的な）圧力変動が試験期間全体を通して認められた（図A5.7参照）。この圧力変動により、注水過程の流量のデータに大きなバラツキが発生した。一方、注水終了後の圧力の回復時には、2つの試験とも安定した圧力のデータカーブが得られた。上述した圧力および流量の変動に関する問題は、かなり透水性の低い測定区間における自動圧力制御システムの精度に依存していると考えられる。定圧状態に達する時間は277.5～281.5m区間での到達時間と、ほぼ同じであるが（図A6.7）、277.5～281.5m区間における注入過程の圧力および流量のバラツキは947～951m区間よりも1オーダー以上高い。両方の試験において定圧状態に達するのにかなりの長時間を要したのは、おそらく試錐孔内の地下水位が高い(GL-17m)ことに起因している可能性がある。

947～951m区間の注水過程の最終部分において高頻度のデータ精査を行った箇所では、流量データに大きなバラツキが発生した（圧力のバラツキは小さい）。この原因は明らかではないが、技術的または電気的特性の可能性が高い。

今回の2区間の透水試験では、上述した問題は発生したが、平均的な傾向が容易に識別できるデータカーブが得られた。データのバラツキは、単にデータカーブ中のノイズとして取り扱うことができる。

地下水の採水についても満足の行くものであった。主な技術的問題は、装置のデータ通信系の故障であった。この問題は、プローブの製作過程における接続部の使用材料の混合比に係わる不正確な情報に起因するものであり、材料の強度と耐久性が低下する30°C以上の温度において発生した。この問題に関しては既に解決し（本調査後、対策が施された）、新しい接続部は検査の結果、60°Cまで何の支障もなかった。

水頭が比較的大きく、しかも採水により採水区間の水圧が大きく低下するようなAN-1号孔の低透水性の岩盤では、水圧式ポンプが地下水の採水に最も適していることが分かった。電気式ポンプは、圧力低下の少ない高透水性の岩盤には適していると思われる。

掘削されてから長期間放置された試錐孔では、異なる水質状態にある亀裂間に水理的な短絡が生じているため、原位置の地下水と測定値を得るために長い揚水時間が必要である。スウェーデンのサイト特性調査における低透水性区間での地下水の採水では、一般に2、3週間が必要とされている。AN-1号孔の採水区間では、そのような長い揚水時間をかけることはできなかった。しかし、2つの区間（277.5～281.5m, 540.5～560.5m）の採水において、許された採水時間内で、採取した地下水は安定した水質の状態に達した。この事実は、使用したサンプリング技術が適切だったことを示している。

測定区間長の変更、および水理試験プローブと地下水化学プローブの交換に関する本装置の適応性が実証された。また、その適応性が、適切な地下水採水区間の探索において重要であることがわかった。

## 5. 結論

正馬様試験サイトのAN-1号孔で実施されたアンビリカルホースシステムによる水理試験は成功し、地下水の採水結果と矛盾のない信頼性のある結果が得られた。水理試験の結果より、AN-1号孔周辺の岩盤の透水性は、かなり低いことがわかった。これは、同孔内にアンビリカルホースシステムのプローブを挿入した際、地下水レベルが約17m以上上昇し、ケーシングの口元より地下水がオーバーフローした現象とも一致する。

水理試験に設定した2区間の中で、透水性の高かった277.5～281.5m区間には、測定区間を横断する割れ目が分布していると考えられる。同区間の透水量係数は約 $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ と算出された。また、平均透水係数は約 $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ であった。スキンファクターの算出結果は負の値を示し、割れ目の発生（発達）が原因で試錐孔の有効半径が増加したことを表している。推定される割れ目の分布域は約4mと算出された。注水過程と回復過程の試験結果は良く一致していた。

947～951m区間の透水性は低かった。透水量係数および透水係数は、それぞれ約 $4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ と算出された。また、回復過程のデータが孔内貯留効果の影響を受けたことや、回復過程において放射状浸透流に達しなかった事実が明らかとなつたが、注水過程と回復過程の試験結果は良く一致していた。スキンファクターは0に近い値であり、これは同区間のボーリング孔に損傷が全くなかったか、あるいは大きな割れ目の発生がなかったことを示している。

AN-1号孔における地下水採水も、データ通信系の故障にもかかわらず成功だったと考えられる。277.5～281.5mおよび540.5～560.5m区間のpHと酸化還元電位は、安定した値が得られた。pHの測定値は5.7～8.1の範囲（精度±0.1）であった。ただし、前者の測定値[5.7]は信頼性に乏しいと考えられる。Ehの測定値は-140～-170mVの範囲（精度±25mV）であった。

AN-1号孔の地下水の全体的な化学特性に関する情報がより多くなければ、採取した地下水が地層水であるか評価することは難しい。スウェーデンでの経験によると、還元状態では、酸化還元電位が-200～-400mVの間の値になると予想されている。今回、酸化還元電位がやや高い理由の一つとして、採取した地下水が、全く乱れていない岩盤中の地下水ではない可能性が考えられる。しかし、スウェーデンと異なる地球化学的条件（鉱物組成、温度など）が存在するために、酸化還元電位が上記のような値となっている可能性も考えられる。

水理試験プローブと地下水化学プローブの交換、および測定区間長の変更に関する本装置の適応性が確認された。水理試験と地下水の採水の両方に用いられた測定技術は、AN-1号孔の実際の条件に適切であったことがわかった。

## 参考文献

- (1) Andersson, J-E. and Andersson, O. (1991): Raw-data report from hydraulic testing and groundwater sampling in borehole AN-1 in Japan. SKB Project Report 6.053/15401 to PNC.
- (2) Andersson, J-E. and Persson, O. (1985): Evaluation of single-hole hydraulic tests in fractured crystalline rock by steady-state and transient methods. SKB Technical Report 85-19.
- (3) Almén, K-E. et al. (1986a): Site investigation-Equipment for geological, geophysical, hydrogeological and hydrochemical characterization. SKB Technical Report 86-16.
- (4) Almén, K-E., Andersson, J-E., Carlsson, L., Hansson, K. and Larsson, N-A. (1986b): Hydraulic testing in crystalline rock. A comparative study of single-hole test methods. SKB Technical Report 86-27.

用語集

[A]

A/D converter

A/D コンバータ

[B]

baud

ボー（電信の通信速度の単位）

bilinear flow

層状浸透流

borehole section

採水区間

borehole storage-dominated flow

孔内貯留効果が支配的な浸透流

borehole storage effect

孔内貯留効果

bubble pipe

バブルパイプ

[C]

cannula test

カニュールテスト

cannular tube

カニュールチューブ

calibration constant

校正定数

casting

鋳造

closed outer boundary effect

閉鎖外側境界の影響

constant flow rate test

定流量試験

constant pressure test

定圧試験

[D]

DC/DC converter

DC/DCコンバータ

differential amplifier

差動增幅器入力部

dimensionless borehole storage coefficient

無次元貯留係数 ( $C_0$ )

dimensionless flow rate

無次元流量 ( $Q_0$ )

dimensionless pressure

無次元圧力 ( $P_0$ )

dimensionless time

無次元時間 ( $t_0$ )

double gel-filled electrode

ダブルゲル電極

downhole equipment

(水理試験) プローブ

downhole test valve

ダウンホールテストバルブ

dry mounted

遮水型

[E]

effective borehole radius

試錐孔の有効半径 ( $r_{wf}$ )

effective borehole storage coefficient

有効孔内貯留係数 ( $C$ )

Eh electrode

Eh 電極

electric communication	データ通信系
electrical pump	電気式ポンプ
electrode readings	電極指示値
electronic device	電子部品部

[F]

final pressure in the test section	注水最終水圧 (P <sub>p</sub> )
flow geometry	流動形態
flow rate	流量、採水速度
flow rate immediately before stop of injection	注水最終流量 (Q <sub>p</sub> )
fracture half length	割れ目の長さの半分
frequency shifted data	周波数変調されたデータ
friction loss	圧力損失
full duplex	2重送信

[G]

groundwater sampling	地下水の採水
----------------------	--------

[H]

hydraulic condition	水理状況
hydraulic conductivity	透水係数 (K)
hydraulic injection test	水理試験
hydraulic pump	水圧式ポンプ
hydraulic testing	水理試験
hydrochemical probe	地下水化学プローブ

[I]

inflations of packer	パッカーの拡張
initial (section) pressure	(試験区間の) 初期水圧 (P <sub>o</sub> )
injection period	注水過程
injection pressure	注水圧
injection water	注入水
interpretation	解析
isolated section	閉鎖区間

[L]

linear flow	線状浸透流
logarithmic time cycle	対数時間サイクル

[M]

matchpoint	マッチポイント
measuring chamber	測定チャンバー
multi coupling	マルチカップリング
multiplexer	マルチプレクサー

[O]

open borehole pressure after packer release	最終自然水圧 (Pe)
opto coupler	光カプラー
outer boundary effect	外側境界の影響

[P]

packer inflation pressure	パッカーの拡張圧力
periphery processor	末端プロセッサ
pH electrode	p H電極
preliminary injection test	予備試験
preliminary value of the hydraulic conductivity	透水係数の概算値
pressure compensated	圧力補償
pressure drawdown	圧力の低下
pressure immediately before stop of the recovery period	回復最終水圧 (Pf) 過程
pressure probe	圧力プローブ
pressure regulation system	水圧制御システム
pressure transducer	圧力計
pseudo-injection time	疑似注水時間 (tpp)
pseudo-radial flow	疑似放射状浸透流

[R]

radial flow	放射状浸透流
raw-data report	生データのレポート
receiver-transmitter circuit	受送信回路
recovery period	回復過程
redox electrode	E h電極
redox potential	酸化還元電位
reference electrode	参照電極
reference pressure	初期自然水圧 (Pi)
relief valve	リリーフバルブ
repeatability	繰り返し精度
representative groundwater	本来の地下水
rock matrix	岩盤マトリックス

[S]

sealed-off section	採水区間
serial data communication	シリアルデータ通信
site investigation	サイト特性調査
skin factor	スキンファクター
specific storage coefficient	比貯留係数 ( $S_s$ )
spherical flow	球状浸透流
standard injection test with constant pressure	標準定圧水理試験
steady-state flow	定常流
straight-line analysis	ストレートライン解析

[T]

test section	測定区間, 採水区間
tested section	測定区間
test valve	テストバルブ
transient flow interpretation	非定常解析
transition period	過渡期
transmissivity	透水量係数 ( $T$ )
true radial flow	真の放射状浸透流

[U]

unlinearity	非直線性
-------------	------

[W]

water injection system	注水系
water injection test	注水試験

[Z]

zero stability	ゼロ点の安定性
----------------	---------

## APPENDICES

### (付 錄)

Appendix 1 Measuring sequence for hydraulic injection tests  
(注水試験の測定行程)

Appendix 2 Equipment for hydraulic testing and groundwater sampling  
(水理試験装置および地下水の採水装置の概念)

Appendix 3 Equipment for hydraulic injection tests  
(注水試験装置の構造)

Appendix 4 Length calibration of the umbilical hose  
(アンビリカルホースの深度キャリブレーション)

Appendix 5 Hydraulic injection test in section 947~951m in AN-1  
(深度 947~951m区間の水理試験)

Appendix 6 Hydraulic injection test in section 277.5~281.5m in AN-1  
(深度 277.5~281.5m区間の水理試験)

Appendix 7 Ground water sampling—Electrical pump No. 1 and 2  
(地下水採水用電気式ポンプ No. 1, 2)

Appendix 8 Ground water sampling—Hydraulic pump  
(地下水採水用圧式ポンプ)

Appendix 9 Equations for calculation of pH and Eh  
(pHおよびEhの算定のための計算式)

Appendix 10 Ground water sampling in borehole 1—Redox potential(Eh)  
and pH —measurements  
(地下水の採水—EhおよびpHの計算結果)

## APPENDIX 1

### MEASURING SEQUENCE FOR HYDRAULIC INJECTION TESTS

MEASURING SEQUENCE FOR HYDRAULIC INJECTION TESTSREVISED 19910107  
*Amf*

<u>Time (min)</u>	<u>Measuring sequence</u>	<u>Test phase</u>
0	Test start. Certain initial information, such as date, name of borehole, length of measurement section etc, are stored	PACKER INFLATION PHASE
1	Downhole relief valve opens. Storage of measured data begins.	
2	Inflation of the packers. Controlling of the groundwater level starts. Rapid storage of measured values starts. The large range flow meter connected and the hose pressurized.	
3	Rapid storage of data stops.	
10	Checking that flow is zero (i.e. no leaks). Cannula test starts. Automatic exchange of flow meters initiated.	
15	Cannula test ends. The measured flow value is stored as reference for later check.	
40	Closing of downhole relief valve. Repeat check that flow is zero. The large range flow meter is connected.	
44	Rapid storage of data is started.	
45	The inflation pressure in the packers is shut in. Monitoring of packer pressure continues. The downhole test valve opens, starting the injection test.	INJECTION PHASE
46	Automatic change of flow meters initiated. Regulation of the injection pressure initiated.	
52	Rapid storage of data stops.	
164	Rapid data storage starts.	
165	Regulation of the injection stops. Test valve closes and the injection test stops while the pressure fall-off test starts.	PRESSURE FALL-OFF PHASE
167	Rapid storage of data stopped. Checking that flow is zero.	
185	Cannula test starts.	
189	Checking that cannula flow is the same as previously. Flow meters disconnected. Test of pressure decrease in the test section initiated. If the pressure decrease is sufficiently slow, the test can be interrupted, i.e. the computer jumps to T = 285.	
285	Packer pressure released. End of pressure fall-off test. Packer deflation.	
355	The measuring cycle is completed. Data storage stops. Comments may be entered on the data file.	

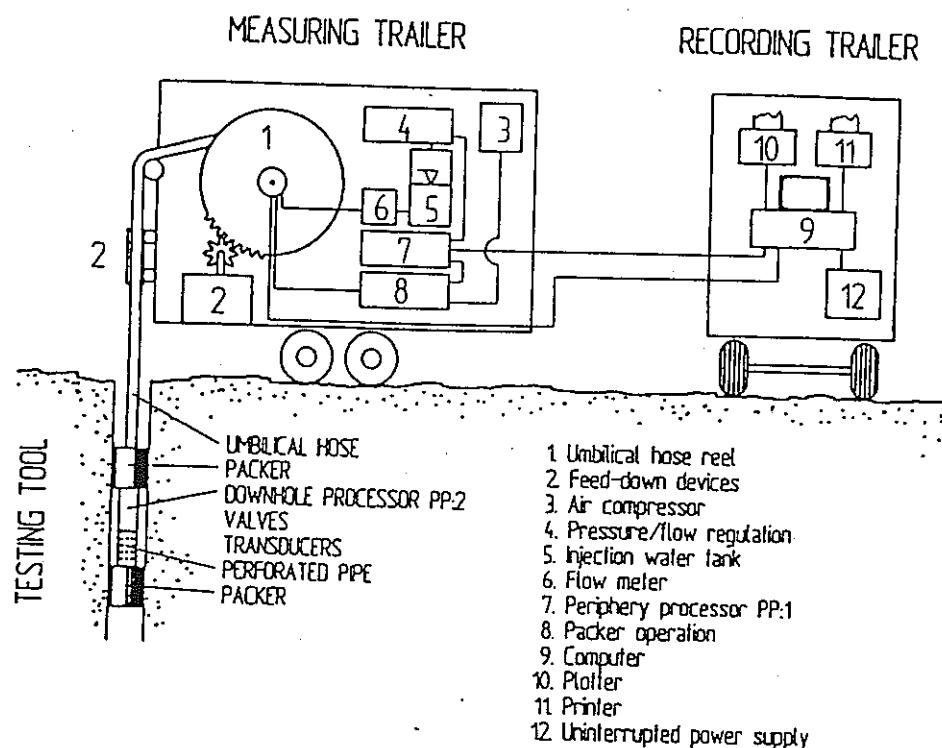
The defined times are used as standard, but can be changed if desired.

## APPENDIX 2

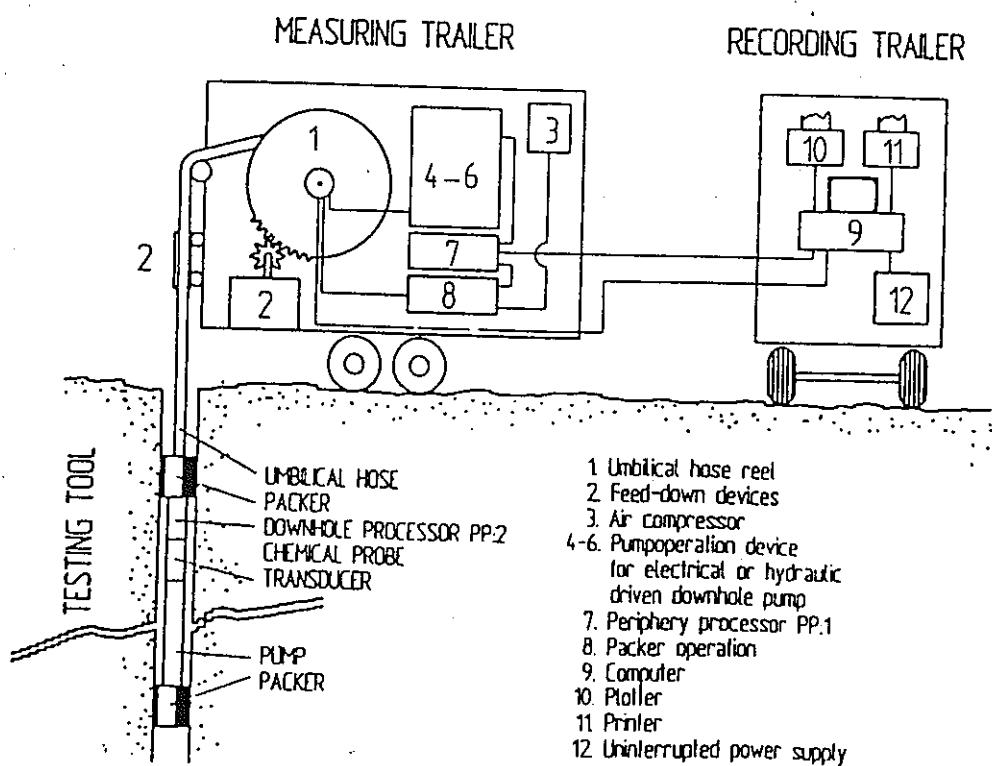
EQUIPMENT FOR HYDRAULIC TESTING AND HYDROCHEMICAL SAMPLING



## EQUIPMENT FOR HYDRAULIC TESTING



## EQUIPMENT FOR HYDROCHEMICAL SAMPLING



APPENDIX 3

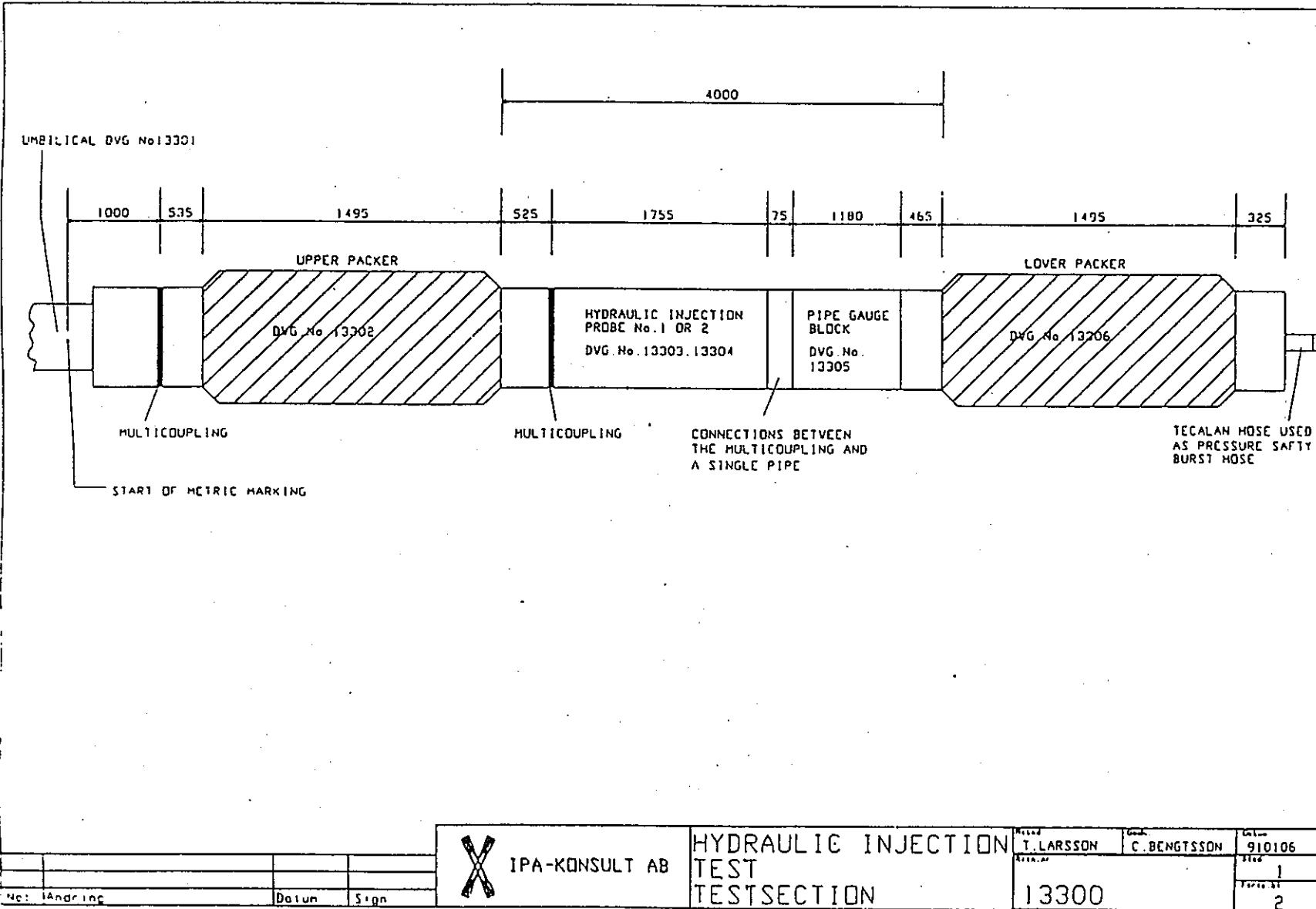
M2



IPA-KONSULT AB

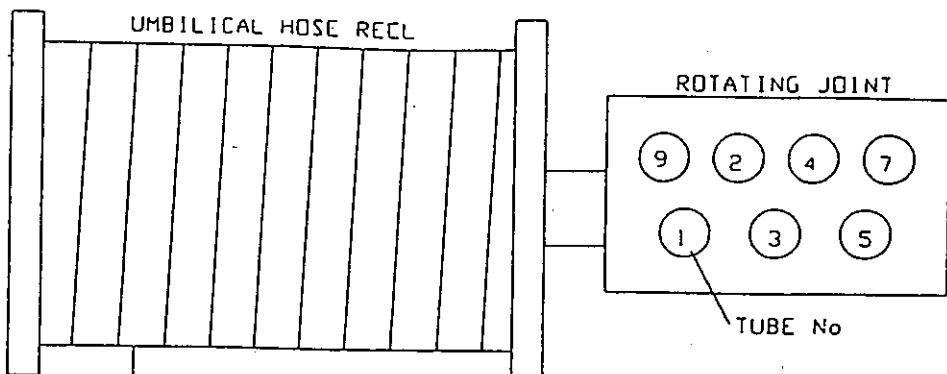
HYDRAULIC  
INJECTION TEST

1990-11-26  
O ANDERSSON



A3.1

## HYDRAULIC INJECTION TEST ROTATING JOINT AND UMBILICAL



UMBILICAL TYPE 49251-4  
SEE APPENDIX A.

LENGTH CALIBRATION  
SEE APPENDIX B.

0001

METRIC MARKING  
STARTS AT 1 METER

### ROTATING JOINT

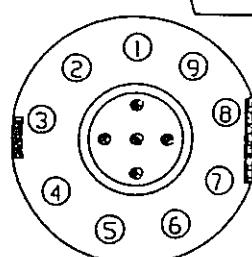
TUBE No	KEY
1	FLOW 1
2	NOT IN USE
3	PACKER
4	NOT IN USE
5	NOT IN USE
7	FLOW 2
9	NOT IN USE

### UMBILICAL

TUBE No	ID Ø mm	Ø TOT. mm	KEY
1	9.6	10X74.733 <sup>4</sup>	FLOW 1
3	4.1	10X13.631 <sup>4</sup>	PACKER
5	4.1	10X13.631 <sup>4</sup>	NOT IN USE
7	9.6	10X74.733 <sup>4</sup>	FLOW 2
9	6.4	10X33.215 <sup>4</sup>	NOT IN USE

### MULTICOUPLING

TUBE No	KEY
1	FLOW 1
2	RELIEF
3	PACKER
4	NOT IN USE
5	NOT IN USE
6	NOT IN USE
7	FLOW 2
8	NOT IN USE
9	NOT IN USE



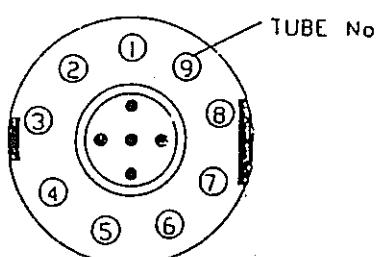
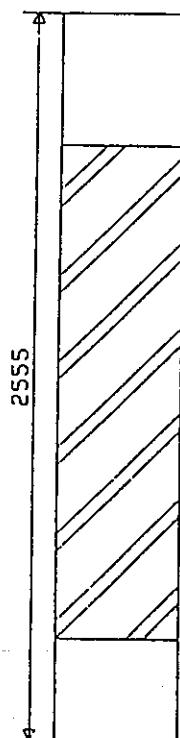
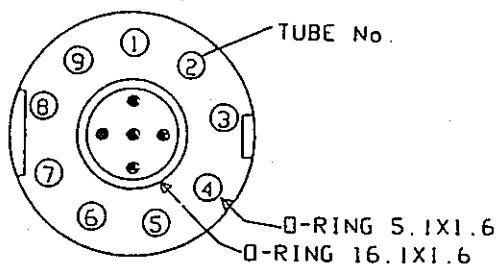
PIPE No 2 RELEASED  
BEHIND THE COVER-  
PIPE



IPA-KONSULT AB

Rörelsd T. LARSSON	Godh C BENGTSSON	Delvis 901030
Benämning CONNECTIONS	Bild 2	
Risningsnr 13301	Lärts nr 3	

## HYDRAULIC INJECTION TEST UPPER PACKER



## UPPER MULTICOUPING

TUBE No	KEY
1	FLOW 1
2	RELIEF
3	PACKER
4	PLUGGED UP
5	THROUGH PIPE
6	PLUGGED UP
7	FLOW 2
8	PLUGGED UP
9	THROUGH PIPE

## LEAKTESTING CARRIED OUT

DATE	SIGNATURE	RESULTS

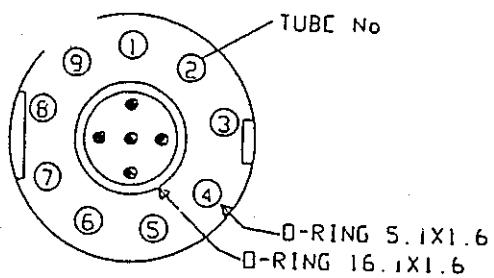
## LOWER MULTICOUPING

TUBE No	KEY
1	FLOW 1
2	RELIEF
3	PACKER
4	PLUGGED UP
5	THROUGH PIPE
6	PLUGGED UP
7	FLOW 2
8	PLUGGED UP
9	THROUGH PIPE

 IPA-KONSULT AB	T. LARSSON	C. BENGTSSON	Datum 901030
	Beskrivning CONNECTIONS		Blo 3
	Klient nr 13302	Forts. d 4	

# HYDRAULIC INJECTION TEST

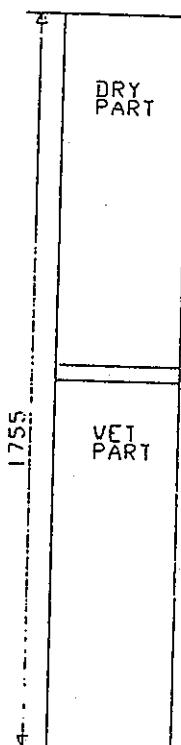
## HYDRAULIC INJECTION PROBE No 1



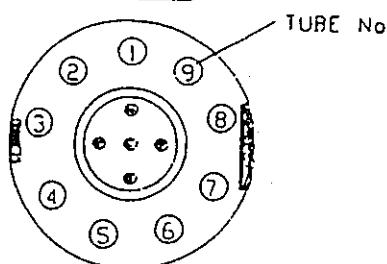
UPPER MULTICOUPLING	
TUBE No	KEY
1	FLOV 1
2	RELIEF
3	PACKER
4	PLUGGED UP
5	PLUGGED UP
6	PLUGGED UP
7	FLOV 2
8	PLUGGED UP
9	PLUGGED UP

TUBE No. 9 IS CONNECTED TO TUBE No. 9 IN LOWER MULTICOUPLING.

TUBE No. 5 SHALL BE OPENED DURING LEAKTEST.



LEAKTESTING CARRIED OUT		
DATE	SIGNATURE	RESULTS

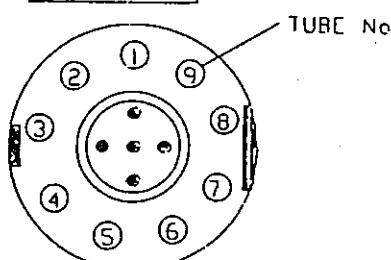
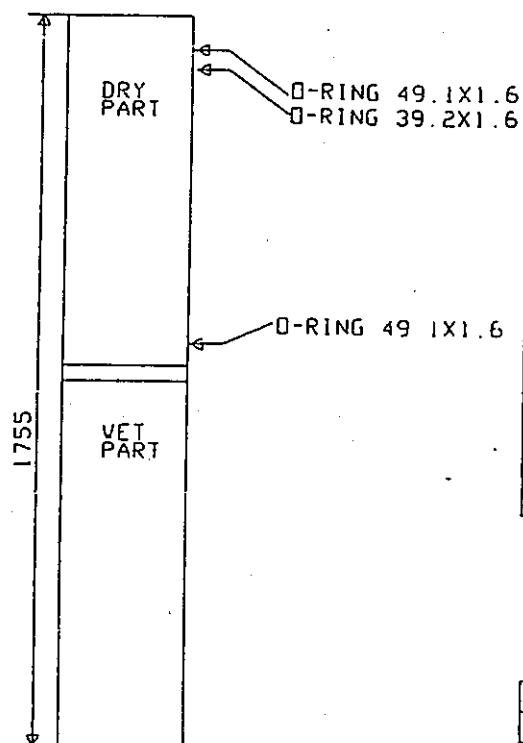
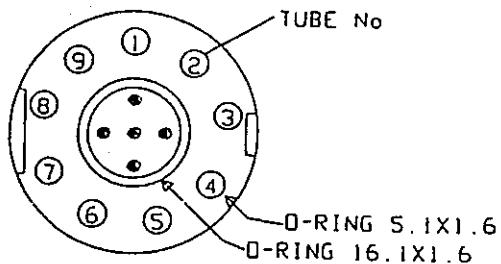


LOWER MULTICOUPLING	
TUBE No	KEY
1	PLUGGED UP
2	PLUGGED UP
3	PACKER
4	PLUGGED UP
5	PLUGGED UP
6	PLUGGED UP
7	PLUGGED UP
8	PLUGGED UP
9	PLUGGED UP

 IPA-KONSULT AB	Ritad	T. LARSSON	Görd	C. BENGTSSON	Datum	901030
	Beteckning	CONNECTIONS			Bild	4
	Ritad av	13303			Förslag till	

# HYDRAULIC INJECTION TEST

## HYDRAULIC INJECTION PROBE No. 2



### UPPER MULTICOUPLING

TUBE No	KEY
1	FLOW 1
2	RELIEF
3	PACKER
4	PLUGGED UP
5	PLUGGED UP
6	PLUGGED UP
7	FLOW 2
8	PLUGGED UP
9	PLUGGED UP

TUBE No. 9 IS CONNECTED TO TUBE No. 9 IN LOWER MULTICOUPLING

TUBE No. 5 SHALL BE OPENED DURING LEAKTEST

### LEAKTESTING CARRIED OUT

DATE	SIGNATURE	RESULTS

### LOWER MULTICOUPLING

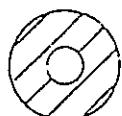
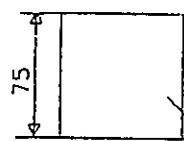
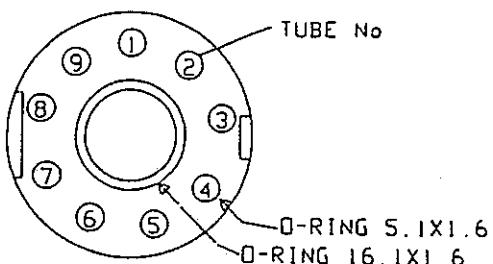
TUBE No	KEY
1	PLUGGED UP
2	PLUGGED UP
3	PACKER
4	PLUGGED UP
5	PLUGGED UP
6	PLUGGED UP
7	PLUGGED UP
8	PLUGGED UP
9	PLUGGED UP



IPA-KONSULT AB

Ritad T. LARSSON	Görd C. BENGTSSON	Datum 901030
Beteckning CONNECTIONS	Bild 5	
Ritnr 13304	Forts. bl 6	

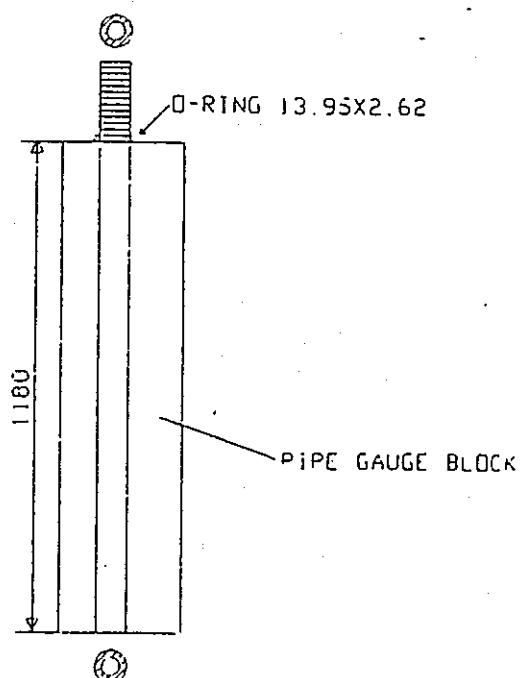
**HYDRAULIC INJECTION TEST  
CONNECTIONS BETWEEN THE MULTI-  
COUPLING AND A SIGLE PIPE.**



**MULTICOUPING**

TUBE No	KEY
1	PLUGGED UP
2	PLUGGED UP
3	PACKER
4	PLUGGED UP
5	PLUGGED UP
6	PLUGGED UP
7	PLUGGED UP
8	PLUGGED UP
9	PLUGGED UP

CONNECTIONPART BETWEEN THE MULTICOUPING  
AND THE SINGLE PIPE



PIPE GAUGE BLOCK

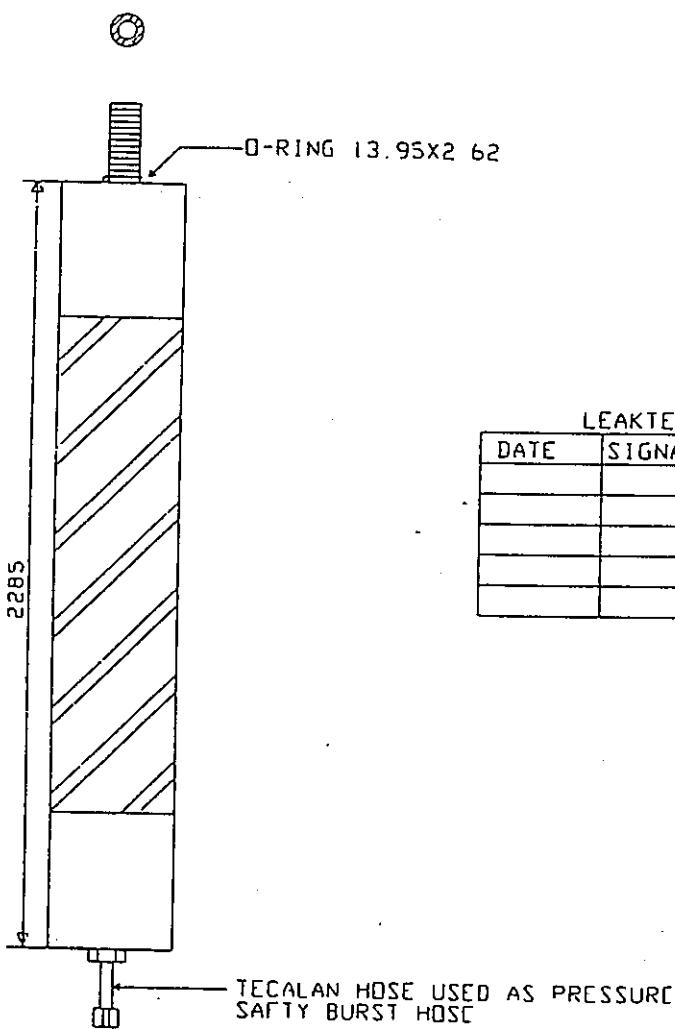


IPA-KONSULT AB

Namn I LARSSON	Lok C BENGTSSON	Datum 901030
Beteckning CONNECTIONS		Bild 6
Ritnings nr 13305		Förslag till 7

## HYDRAULIC INJECTION TEST

### LOWER PACKER



#### LEAKTESTING CARRIED OUT

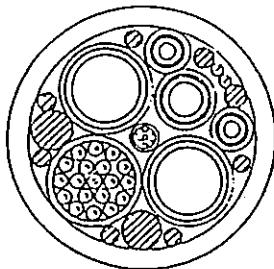
DATE	SIGNATURE	RESULTS

 IPA-KONSULT AB	Ritad T LARSSON	Godm C BENGTSSON	Datum 901030
	Beskrivning <b>CONNECTIONS</b>	Bild 7	
	Ritnr <b>13306</b>	Forts. nr -	

## APPENDIX 4

### LENGTH CALIBRATION OF THE UMBILICAL HOSE

M2

UMBILICAL TYPE 49251-4

## MECHANICAL CHARACTERISTICS

OVERALL DIAMETER	: 45.0 mm. +/- 0.5 mm.
WEIGHT IN AIR	: 1.730 kg/km with dry hoses
WEIGHT IN SEA WATER	: 100 kg/km with dry hoses
MIN. BREAK STRAIN	: 26.58 kN (stress member only)
RCC. BEND RADIUS	: 675 mm.
ELONGATION	: < 2%

LENGTH CALIBRATION

MARKING	MEASURED	OFFSET	TGT. MEASURED	DELTA L	MARKING	MEASURED	OFFSET	TGT. MEASURED	DELTA L
100	0.00	0.00	0.00	0.00	510	50.31	462.10	512.41	2.41
200	10.03	0.00	10.03	0.03	520	60.38	462.10	522.48	2.48
300	20.05	0.00	20.05	0.05	530	70.46	462.10	532.56	2.56
400	30.08	0.00	30.08	0.08	540	80.52	462.10	542.62	2.62
500	40.09	0.00	40.09	0.09	550	90.58	462.10	552.68	2.68
600	50.11	0.00	50.11	0.11	560	10.68	552.68	562.76	2.76
700	60.13	0.00	60.13	0.13	570	20.13	552.68	572.81	2.81
800	70.16	0.00	70.16	0.16	580	30.20	552.68	582.88	2.88
900	81.20	0.00	81.20	0.20	590	40.28	552.68	592.96	2.96
1000	94.24	0.00	94.24	0.24	600	50.33	552.68	603.01	3.01
1100	10.04	100.26	110.30	0.30	610	60.40	552.68	613.08	3.08
1200	20.07	100.26	120.33	0.33	620	70.48	552.68	623.16	3.16
1300	30.11	100.26	130.37	0.37	630	80.55	552.68	633.23	3.23
1400	40.14	100.26	140.40	0.40	640	90.62	552.68	643.30	3.30
1500	50.18	100.26	150.44	0.44	650	10.08	643.30	653.38	3.38
1600	60.22	100.26	160.48	0.48	660	20.14	643.30	663.44	3.44
1700	70.27	100.26	170.53	0.53	670	30.21	643.30	673.51	3.51
1800	80.31	100.26	180.57	0.57	680	40.28	643.30	683.58	3.58
1900	90.35	100.26	190.61	0.61	690	50.35	643.30	693.65	3.65
2000	10.05	190.61	200.66	0.66	700	60.43	643.30	703.73	3.73
2100	20.09	190.61	210.70	0.70	710	70.51	643.30	713.81	3.81
2200	30.13	190.61	220.74	0.74	720	80.58	643.30	723.88	3.88
2300	40.19	190.61	230.80	0.80	730	90.66	643.30	733.95	3.95
2400	50.23	190.61	240.84	0.84	740	10.07	733.96	744.03	4.03
2500	60.28	190.61	250.89	0.89	750	20.14	733.96	754.10	4.10
2600	70.33	190.61	260.94	0.94	760	30.21	733.96	764.17	4.17
2700	80.38	190.61	270.99	0.99	770	40.28	733.96	774.24	4.24
2800	90.43	190.61	281.04	1.04	780	50.36	733.96	784.32	4.32
2900	10.05	281.04	291.09	1.09	790	60.44	733.96	794.40	4.40
3000	20.11	281.04	301.15	1.15	800	70.50	733.96	804.46	4.46
3100	30.16	281.04	311.20	1.20	810	80.57	733.96	814.53	4.53
3200	40.22	281.04	321.26	1.26	820	90.65	733.96	824.61	4.61
3300	50.28	281.04	331.32	1.32	830	10.06	824.61	834.67	4.67
3400	60.33	281.04	341.37	1.37	840	20.15	824.61	844.61	4.76
3500	70.39	281.04	351.43	1.43	850	30.22	824.61	854.63	4.83
3600	80.45	281.04	361.49	1.49	860	40.30	824.61	864.91	4.91
3700	90.51	281.04	371.55	1.55	870	50.37	824.61	874.98	4.98
3800	10.06	371.55	381.61	1.61	880	60.45	824.61	885.06	5.06
3900	20.12	371.55	391.67	1.67	890	70.52	824.61	895.13	5.13
4000	30.18	371.55	401.73	1.73	900	80.61	824.61	924.61	5.22
4100	40.24	371.55	411.79	1.79	910	90.68	824.61	915.29	5.29
4200	50.29	371.55	421.84	1.84	920	10.07	915.29	925.36	5.36
4300	60.36	371.55	431.91	1.91	930	20.15	915.29	935.44	5.44
4400	70.41	371.55	441.96	1.96	940	30.23	915.29	945.52	5.52
4500	80.49	371.55	452.04	2.04	950	40.31	915.29	955.60	5.60
4600	90.55	371.55	462.10	2.10	960	50.38	915.29	965.67	5.67
4700	10.06	462.10	472.16	2.16	970	60.38	915.29	975.73	5.65
4800	20.14	462.10	482.24	2.24	980	70.38	915.29	985.67	5.65
4900	30.18	462.10	492.28	2.28	990	80.40	915.29	995.69	5.69
5000	40.25	462.10	502.35	2.35	1000	90.42	995.69	1086.11	5.69

 IPA-KONSULT AB	Ritad T. LARSSON	Gedk. O. ANDERSSON	Datum 910106
	Betänkning UMBILICAL	Blad 1	
Krit.nr. 13400		Forts. bl. -	

**APPENDIX 5**

**HYDRAULIC INJECTION TEST IN SECTION 947 - 951 M IN AN-1**

$P_1$	9221.4	kPa
$P_0$	9205.9	kPa
$P_0 - P_1$	-15.6	kPa
$P_b$	9507.5	kPa
$P_b - P_1$	286.0	kPa
$P_r$	9369.0	kPa
$P_r - P_1$	147.5	kPa
$P_a$	9202.6	kPa
$P_b$		kPa
$B_b$		kPa
$t_b$		
$W_1$	-17.17	m
$W_0 - W_1$	0.00	m
$t_0$	6910	s
$t_{00}$	20246	s
$dt_r$	7109	s
$Q_0$	1.651E-07	$m^3/s$
$V_{tot}$	3.343E-03	$m^3$
$dP_{1e}$	288.1	kPa
$dP_{ee}$	303.6	kPa

COMMENTS

DIAGRAM A0		ANO 1
DATE	: 1991-02-27	SECTION : 947- 951
START TIME:	20: 09: 01	CONSULTANT: IPA/SGAB
FIELD CREW:	CB SJ	CLIENT : PNC/SKB
TEST TYPE : Injection test; Const		

$K_{1..}$	1.05E-09	m/s
$K_{0..}$	9.95E-10	m/s
X	X	m
Y	Y	m
Z	Z	m
AW		deg
IW	90	deg
DW	100	mm
LK	1.39	m
LL		m
LB	20.00	m
EC	SOND 2	

Fig. A5.1 Summary of data and results of injection test in section 947–951 m.

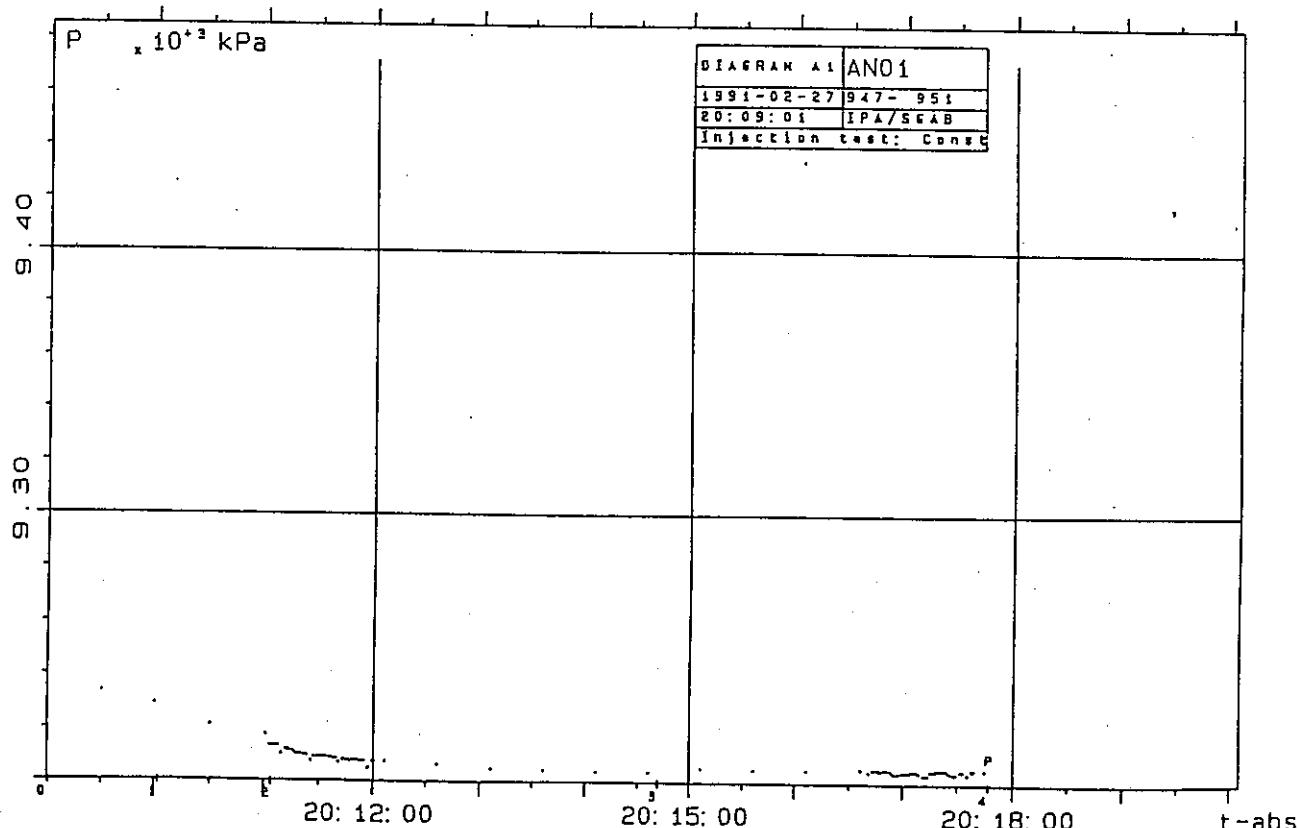


Fig. A5.2 Absolute pressure ( $P$ ) versus real time ( $t$ -abs) before start of injection.

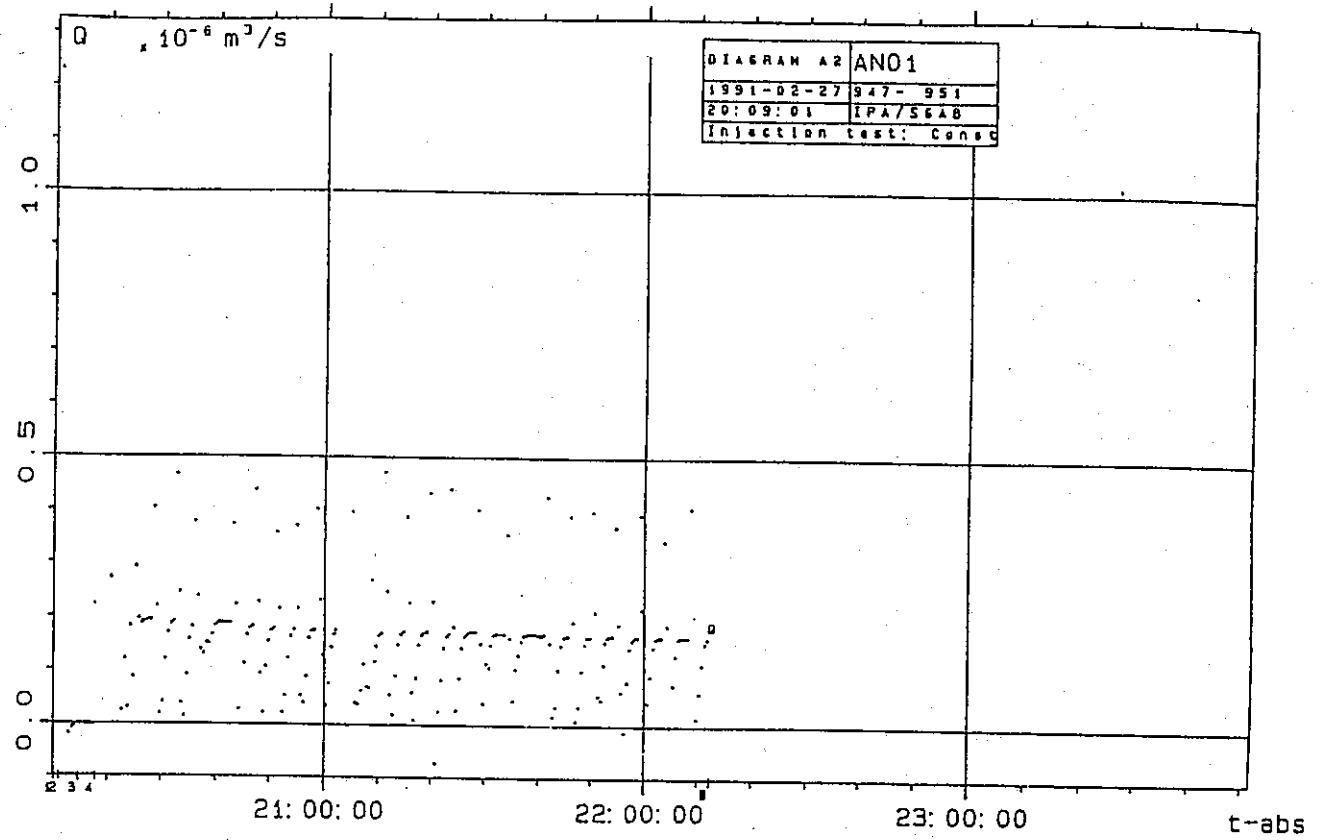


Fig. A5.3 Overview of flow rate ( $Q$ ) versus real time ( $t-\text{abs}$ ) during the entire test.

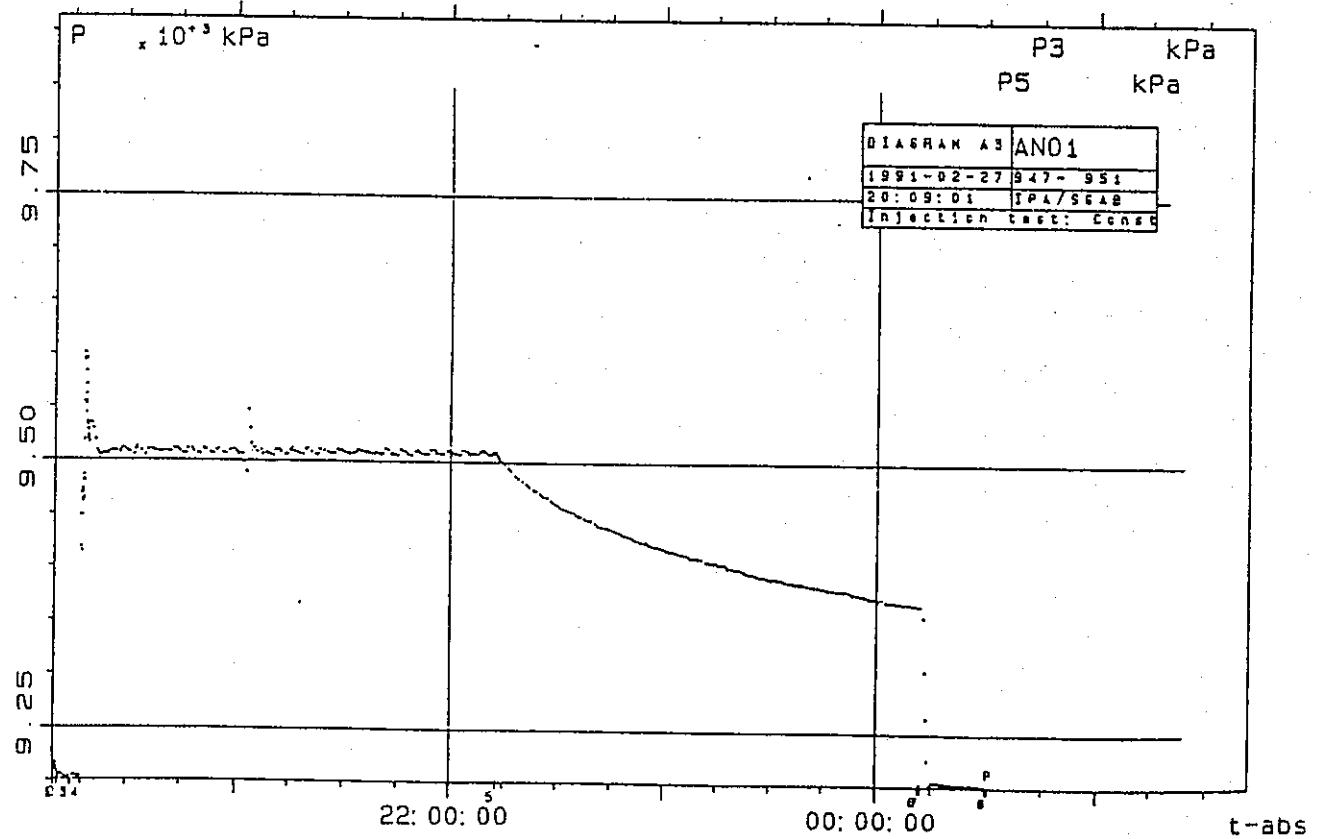


Fig. A5.4 Overview of absolute pressure ( $P$ ) versus real time ( $t-\text{abs}$ ) during the entire test.

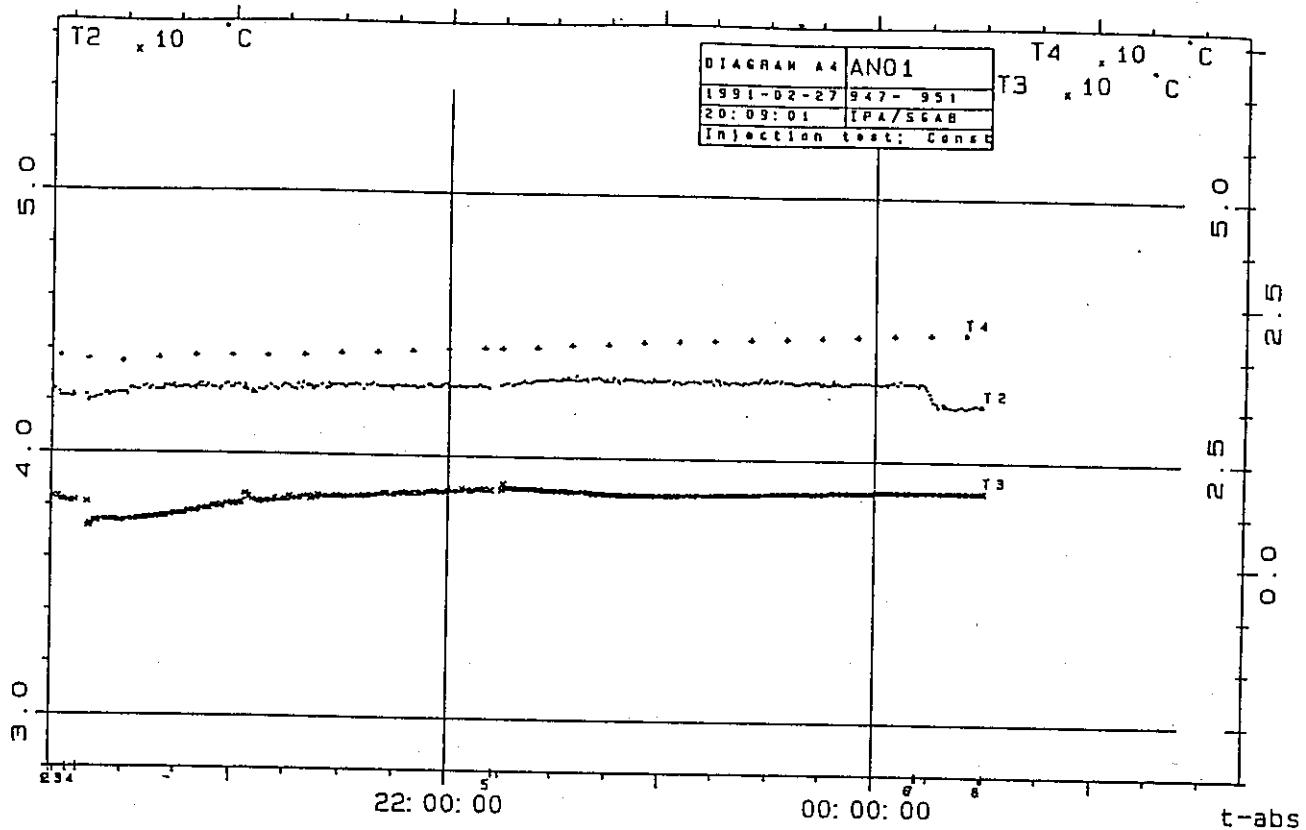


Fig. A5.5 Overview of groundwater temperature in the test section (T2), injection water temperature at the surface (T3) and air temperature in the test housing at the surface (T4) versus real time (t-abs) during the entire test.

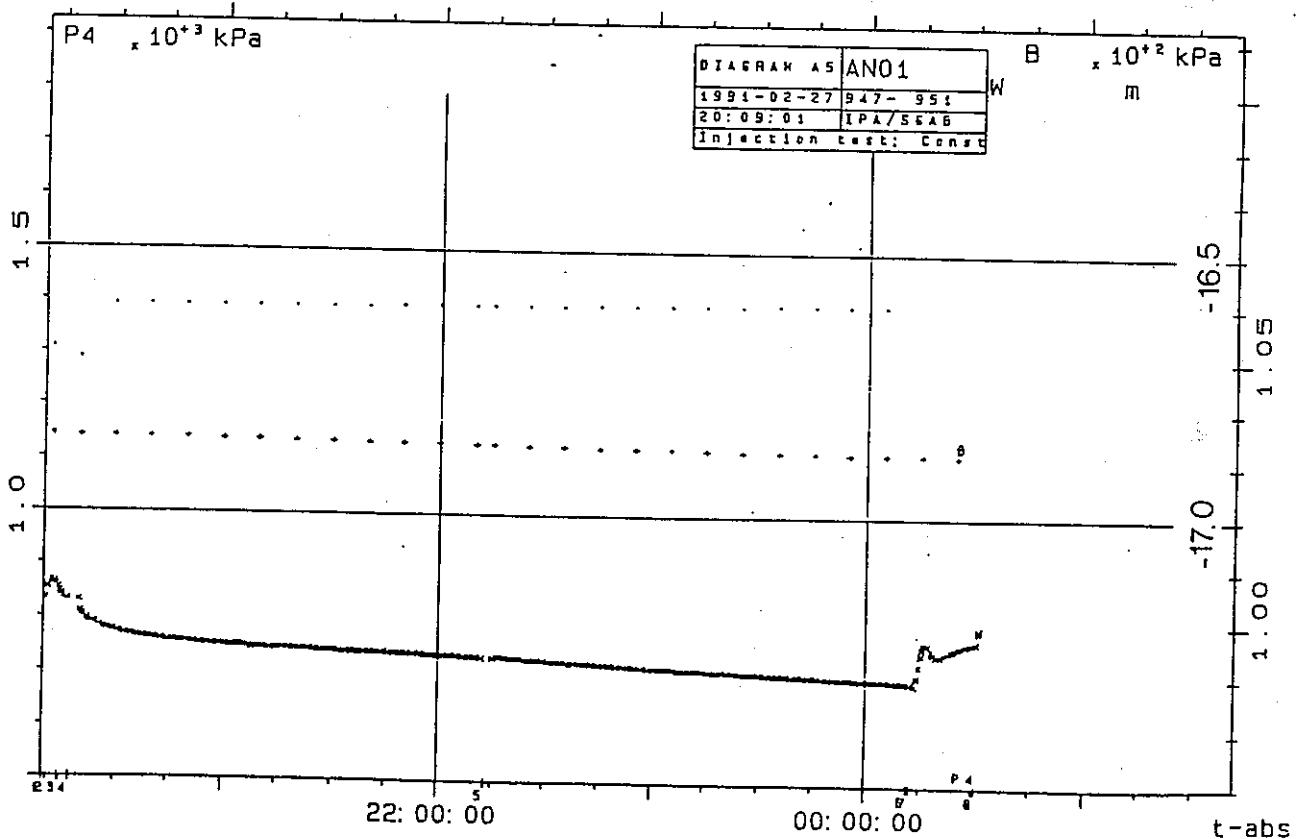


Fig. A5.6 Overview of packer inflation pressure (P4), barometric pressure (B) and distance to the groundwater table in the borehole (W) versus real time (t-abs) during the entire test.

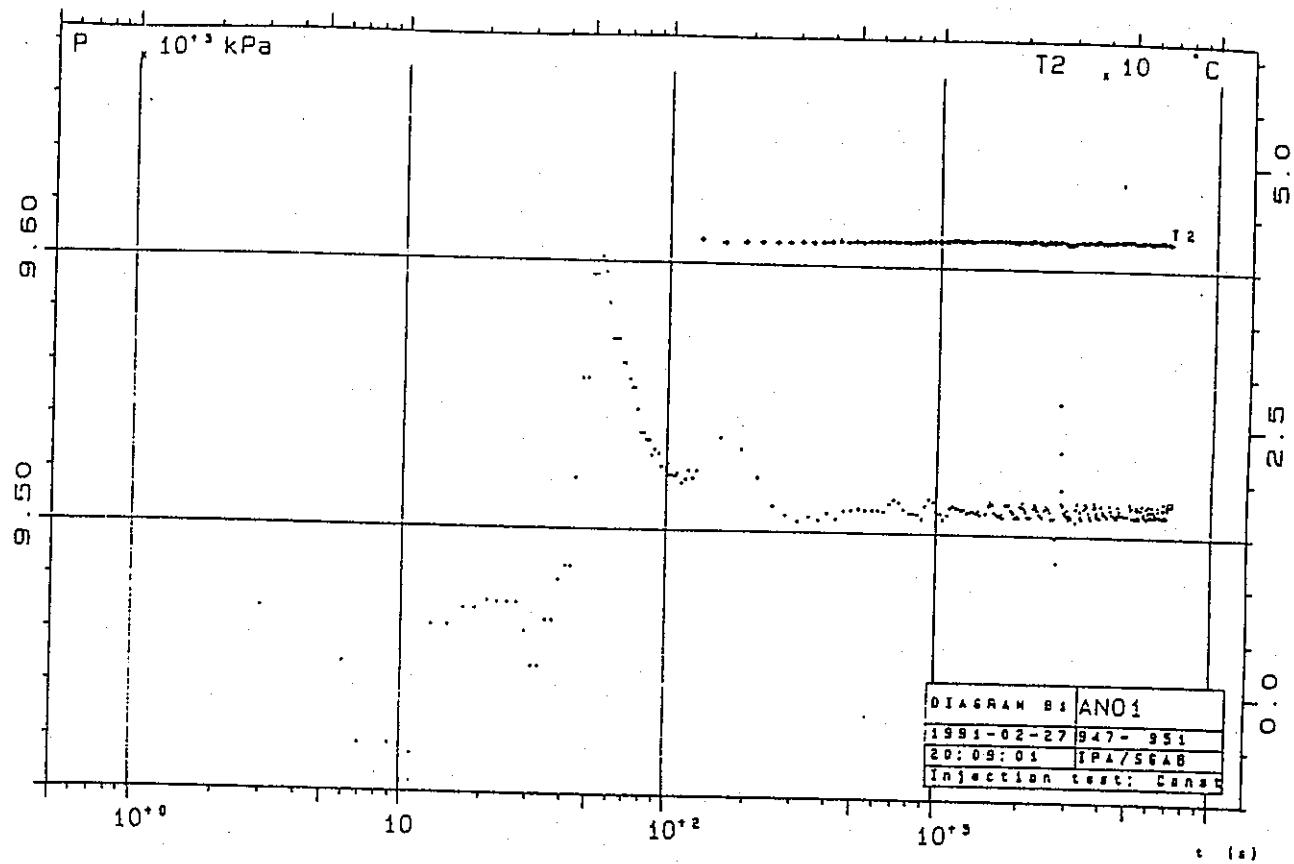


Fig. A5.7 Absolute pressure ( $P$ ) and groundwater temperature in the section ( $T_2$ ) versus time ( $t$ ) after start of injection during the injection period.

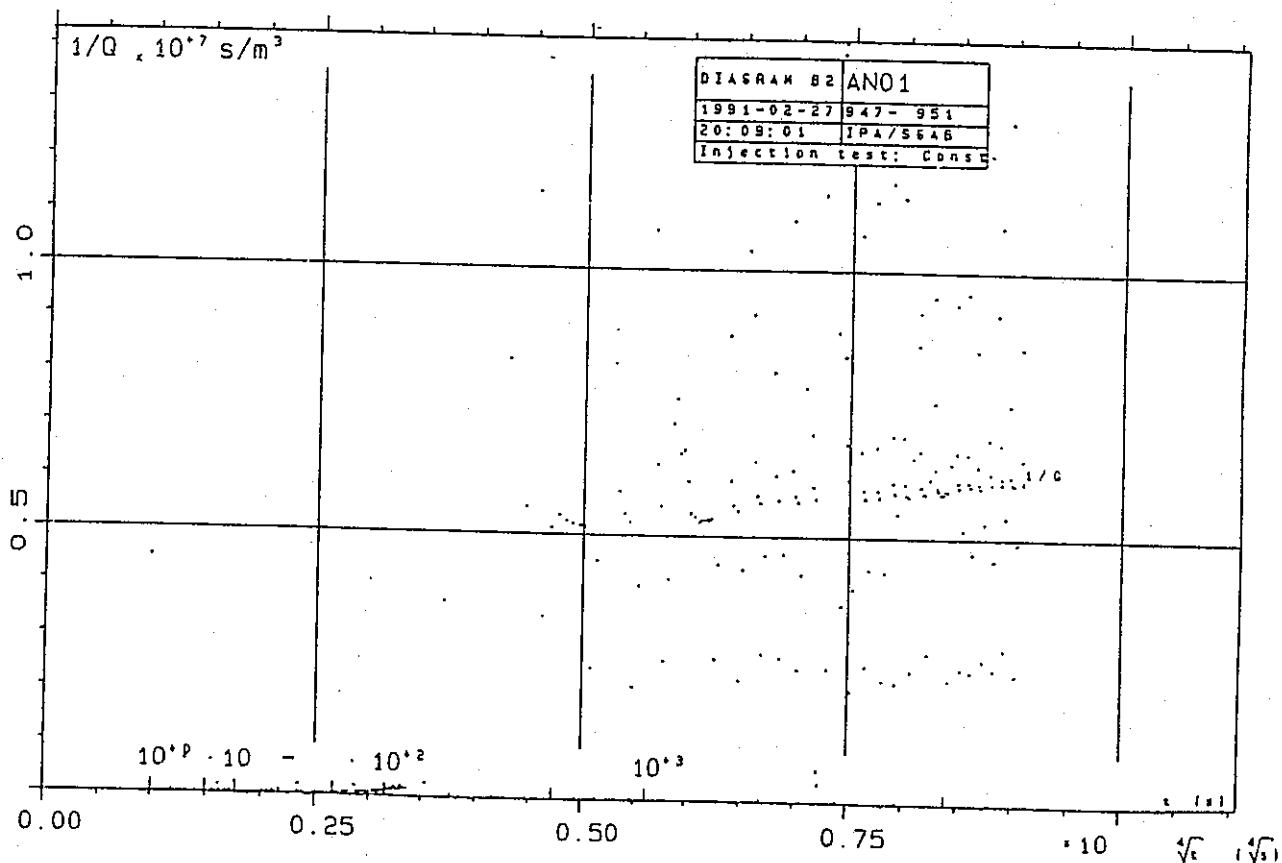


Fig. A5.8 Reciprocal flow rate ( $1/Q$ ) versus fourth root of time ( $t$ ) after start of injection during the injection period.

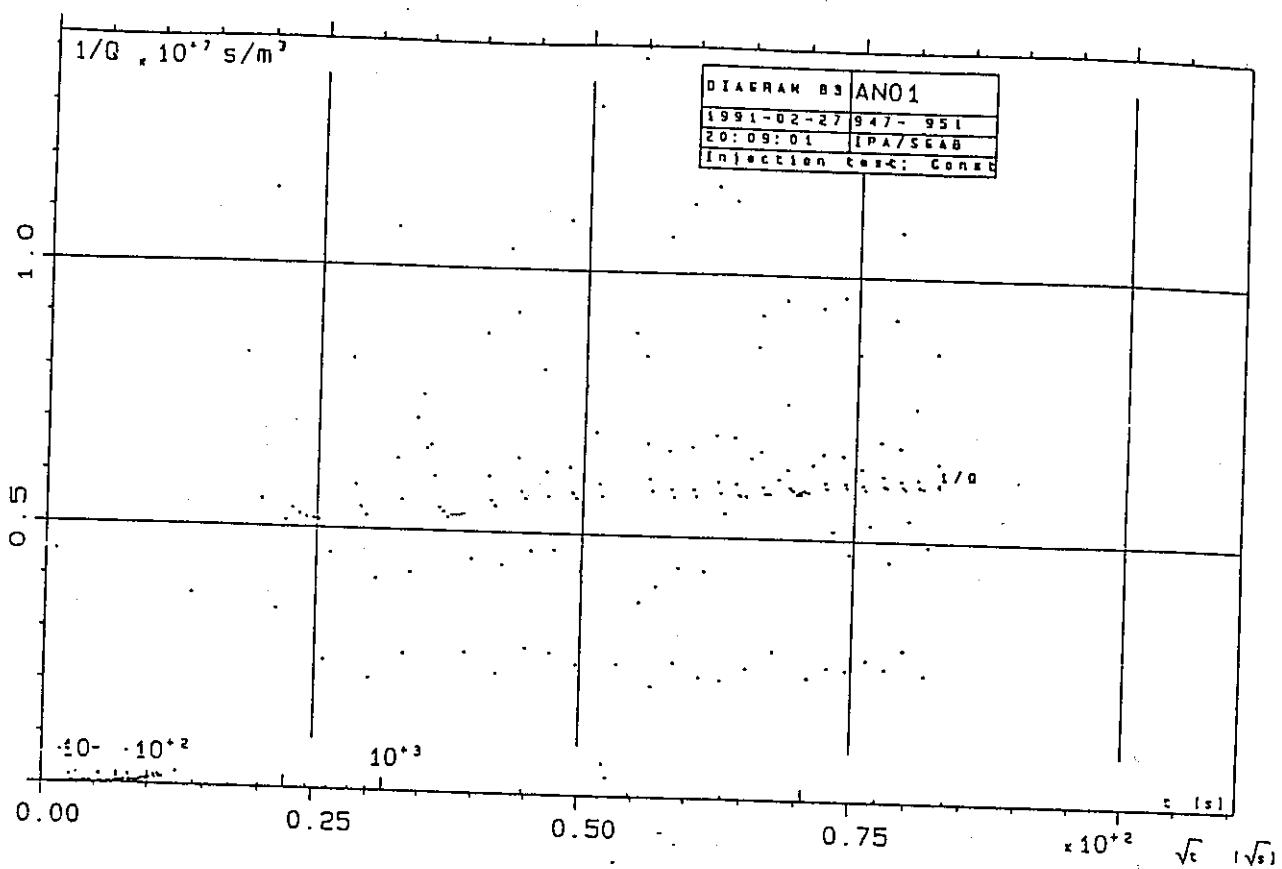


Fig A5.9 Reciprocal flow rate ( $1/Q$ ) versus square root of time ( $t$ ) after start of injection during the injection period..

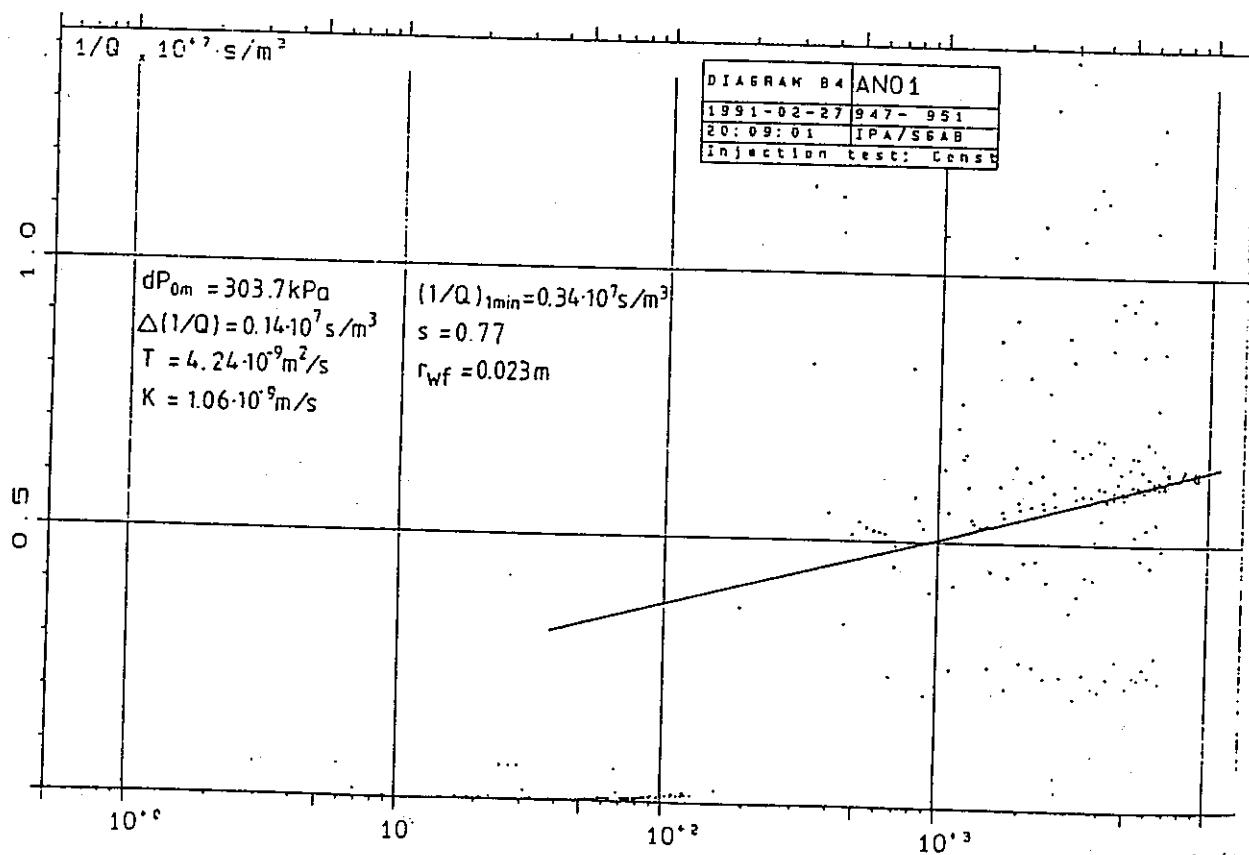


Fig A5.10 Reciprocal flow rate ( $1/Q$ ) versus time after start of injection ( $t$ ) during the injection period.

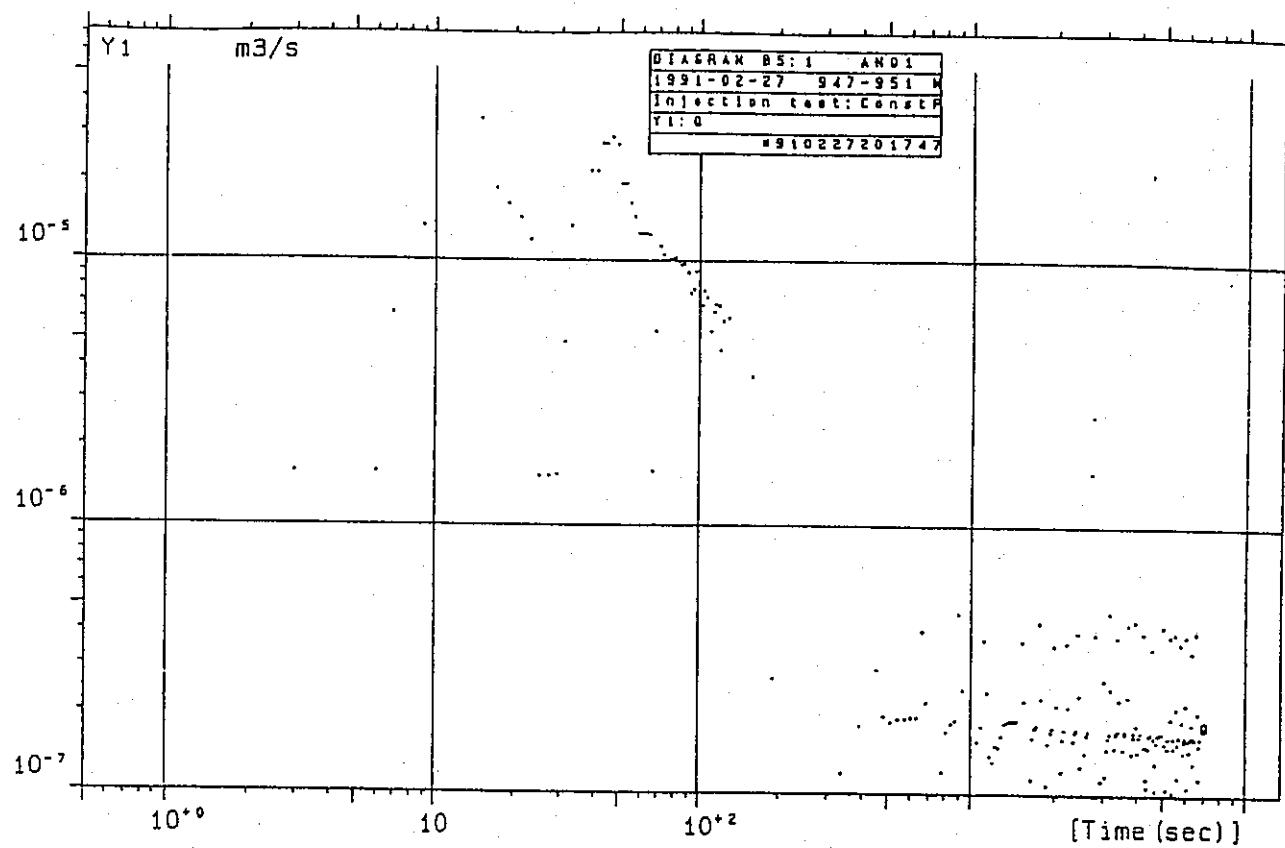


Fig A5.11 Flow rate ( $Q$ ) higher than  $10^{-7}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) versus time ( $t$ ) after start of injection during the injection period.

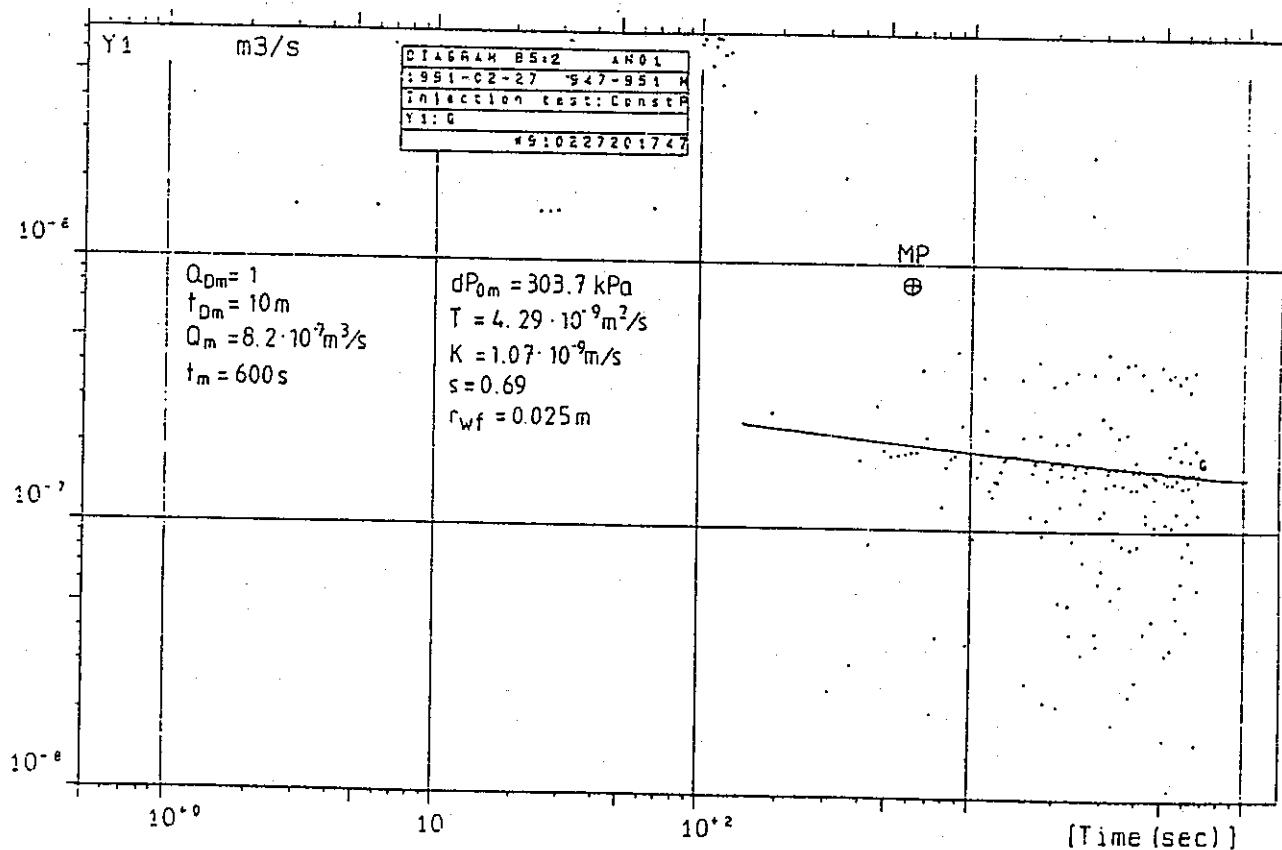


Fig A5.12 Flow rate ( $Q$ ) higher than  $10^{-8}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) versus time ( $t$ ) after start of injection during the injection period.

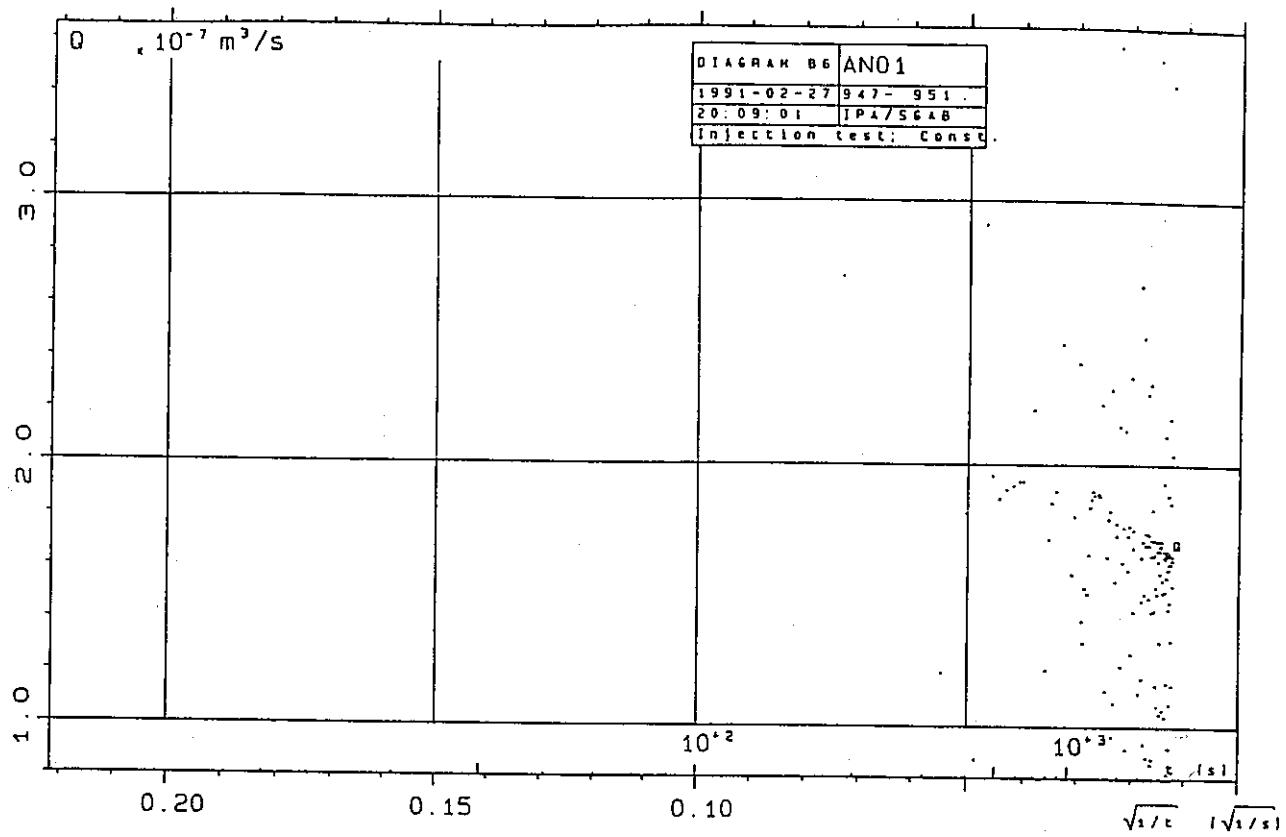


Fig A5.13 Flow rate (Q) versus reciprocal square root of time (t) after start of injection during the injection period.

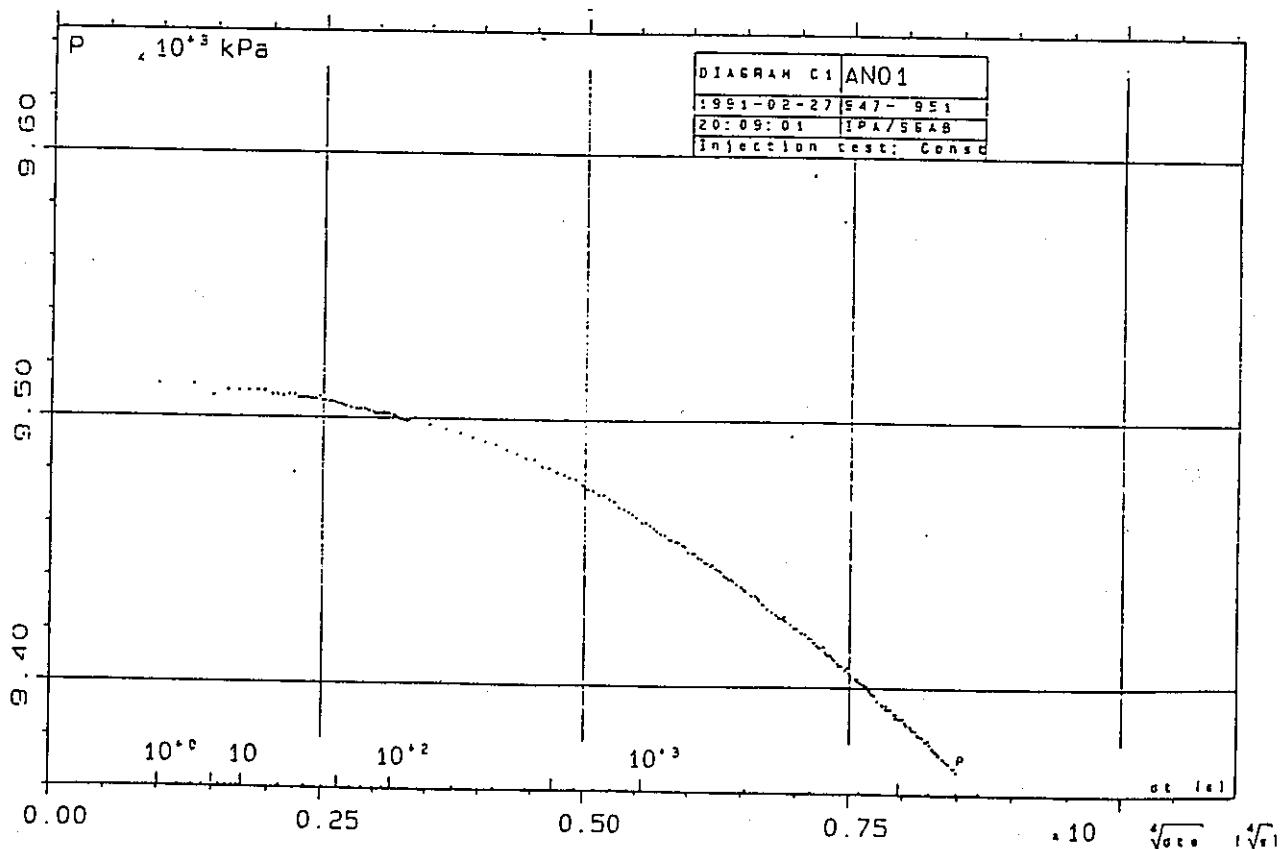


Fig A5.14 Absolute pressure (P) versus fourth root of equivalent time ( $dt$ ) after stop of injection during the recovery period.

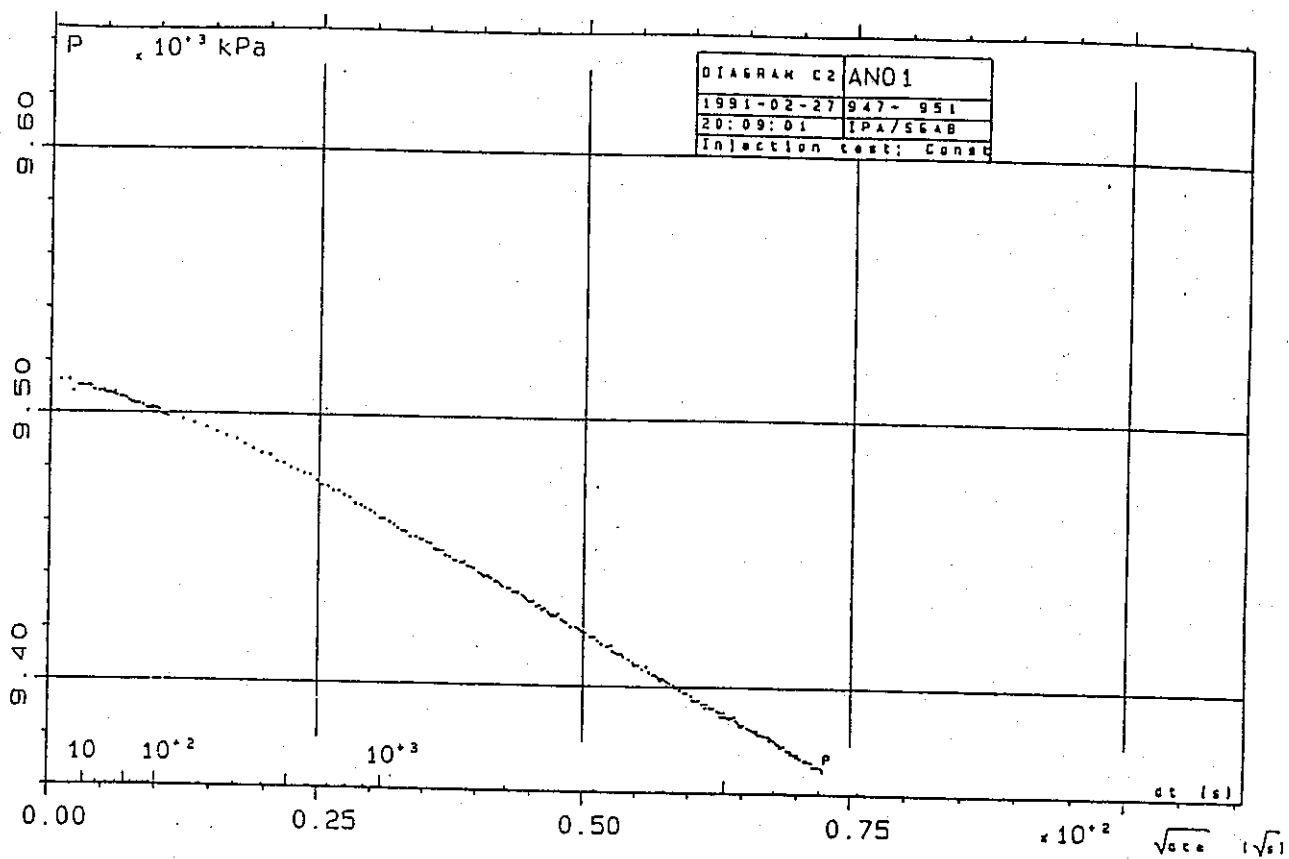


Fig A5.15 Absolute pressure (P) versus square root of equivalent time (dte) after stop of injection during the recovery period.

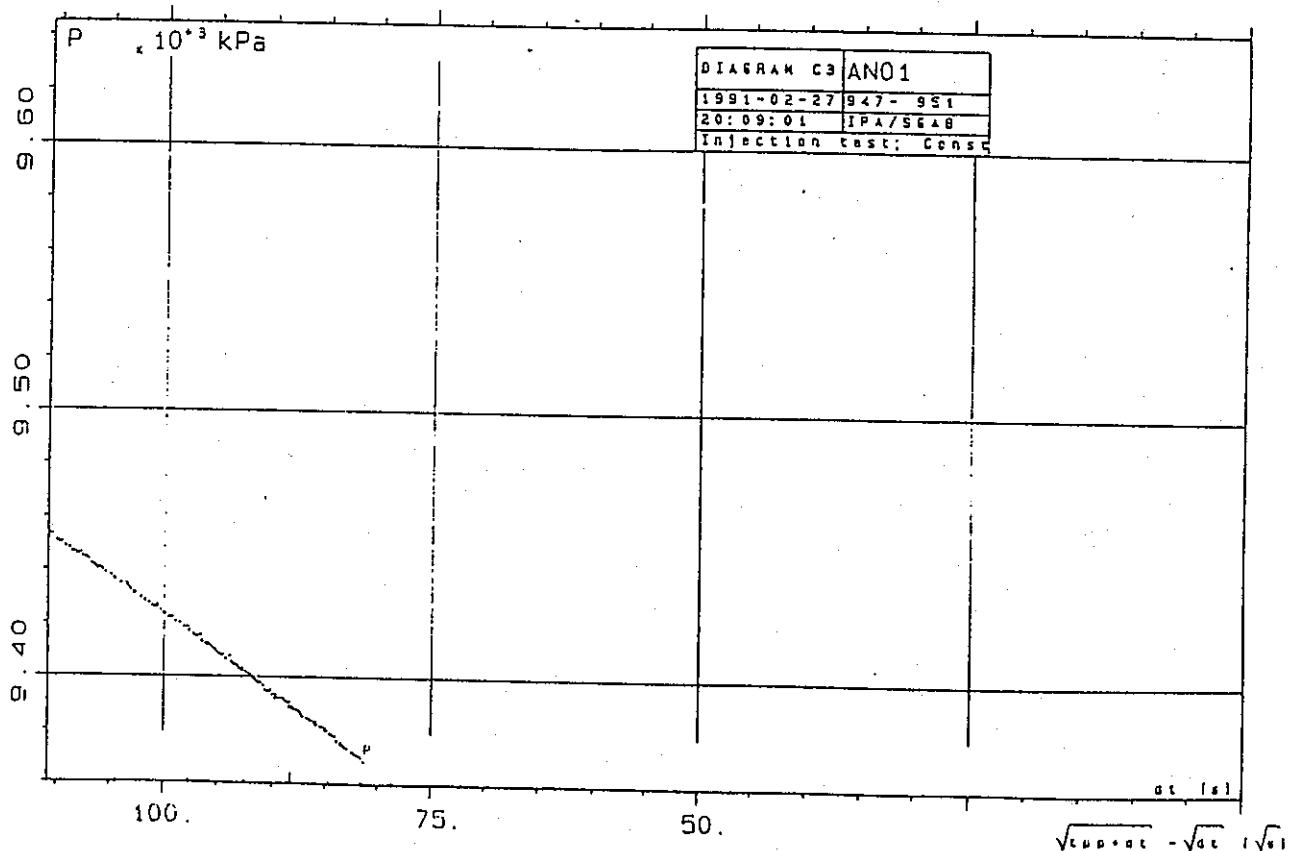


Fig A5.16 Absolute pressure (P) versus square root of corrected time (dt) after stop of injection during the recovery period.

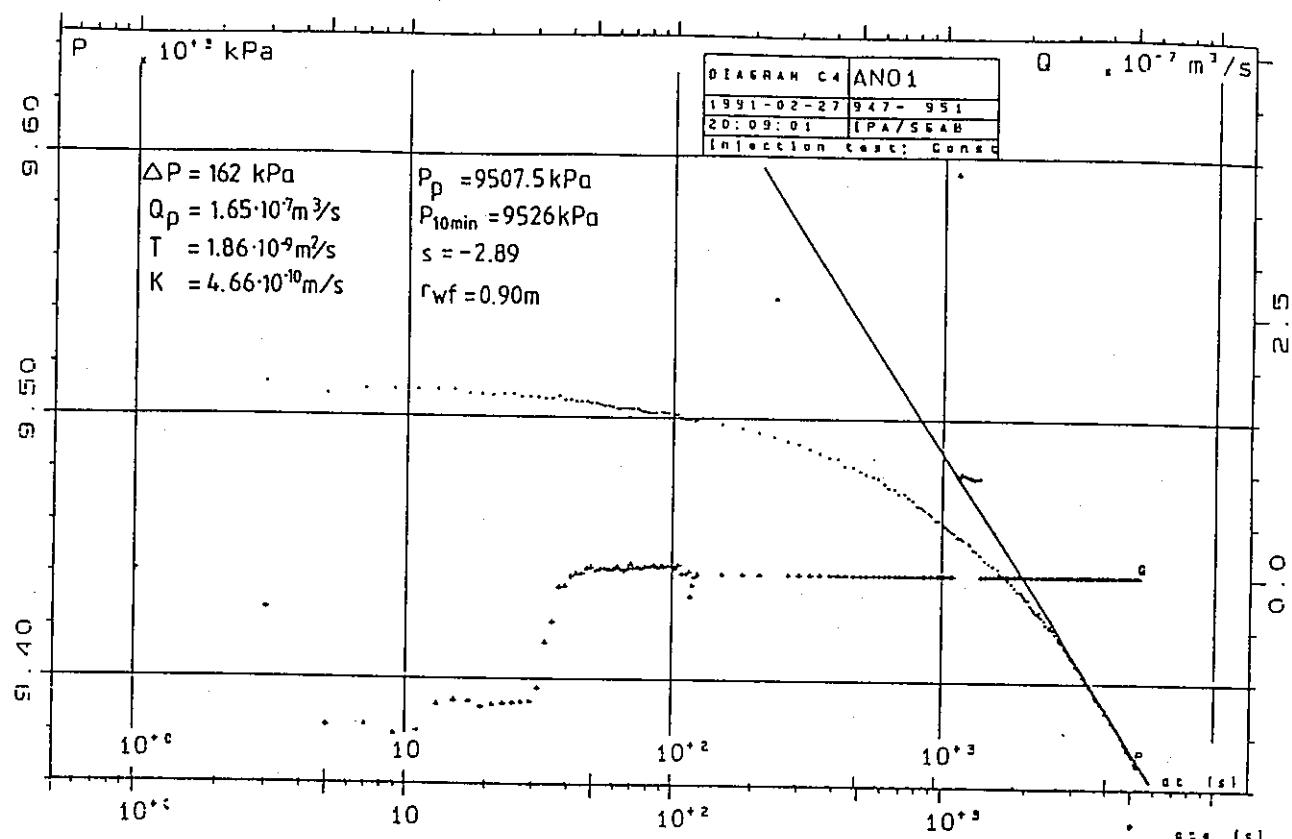


Fig A5.17 Absolute pressure (P) and flow rate (Q) versus equivalent time (dte) after stop of injection during the recovery period.

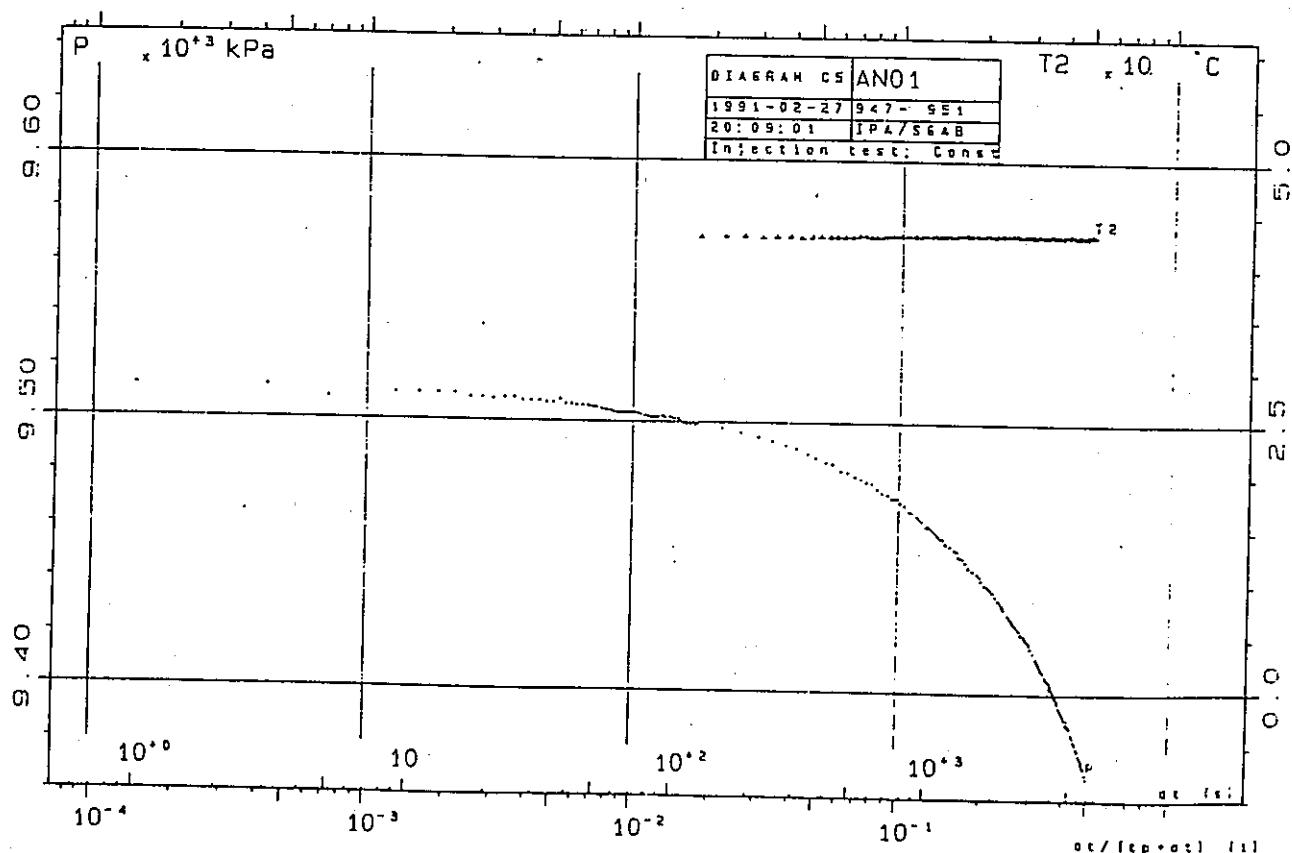


Fig A5.18 Absolute pressure (P) and groundwater temperature in the test section (T2) versus Horner time ratio during the recovery period.

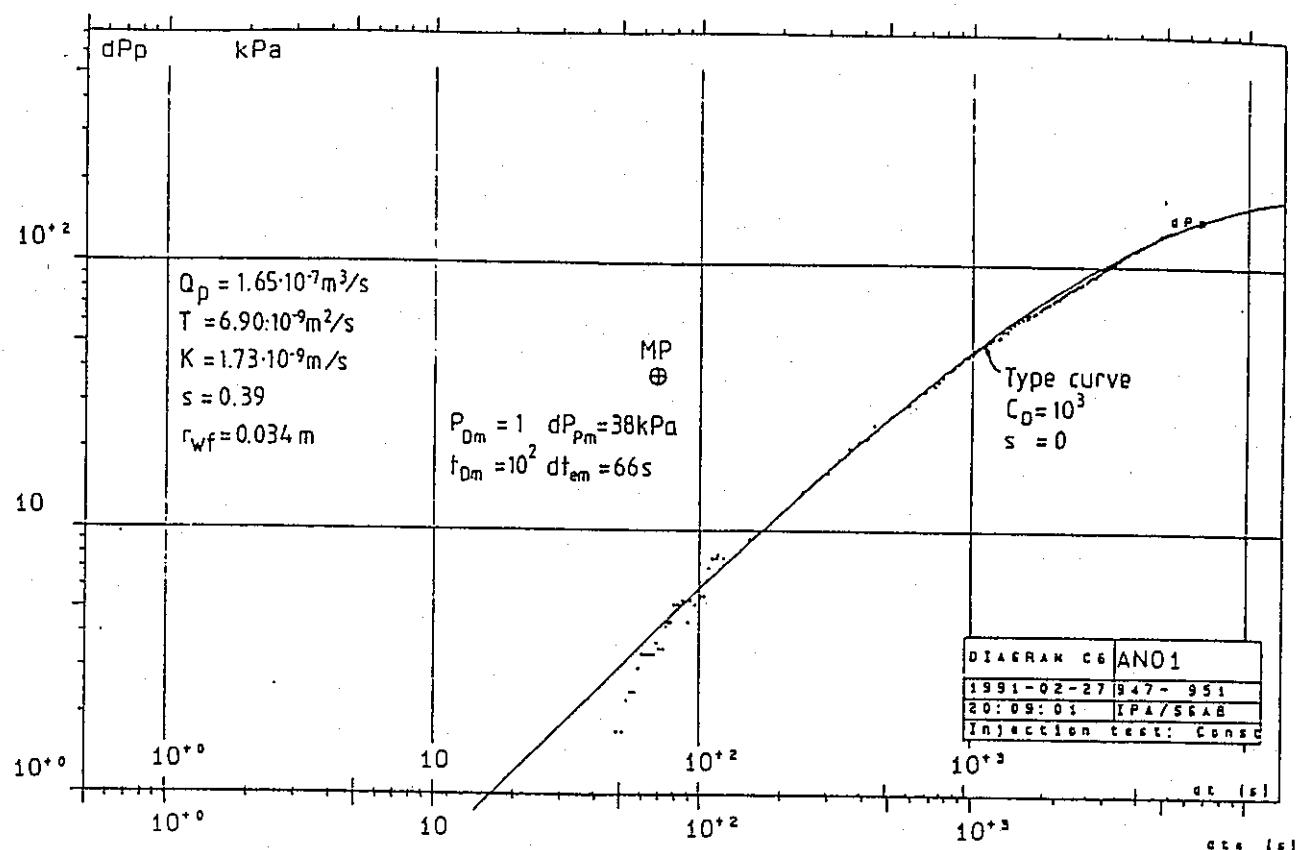


Fig A5.19 Absolute pressure ( $P$ ) versus equivalent time ( $dt_e$ ) after stop of injection during the recovery period.

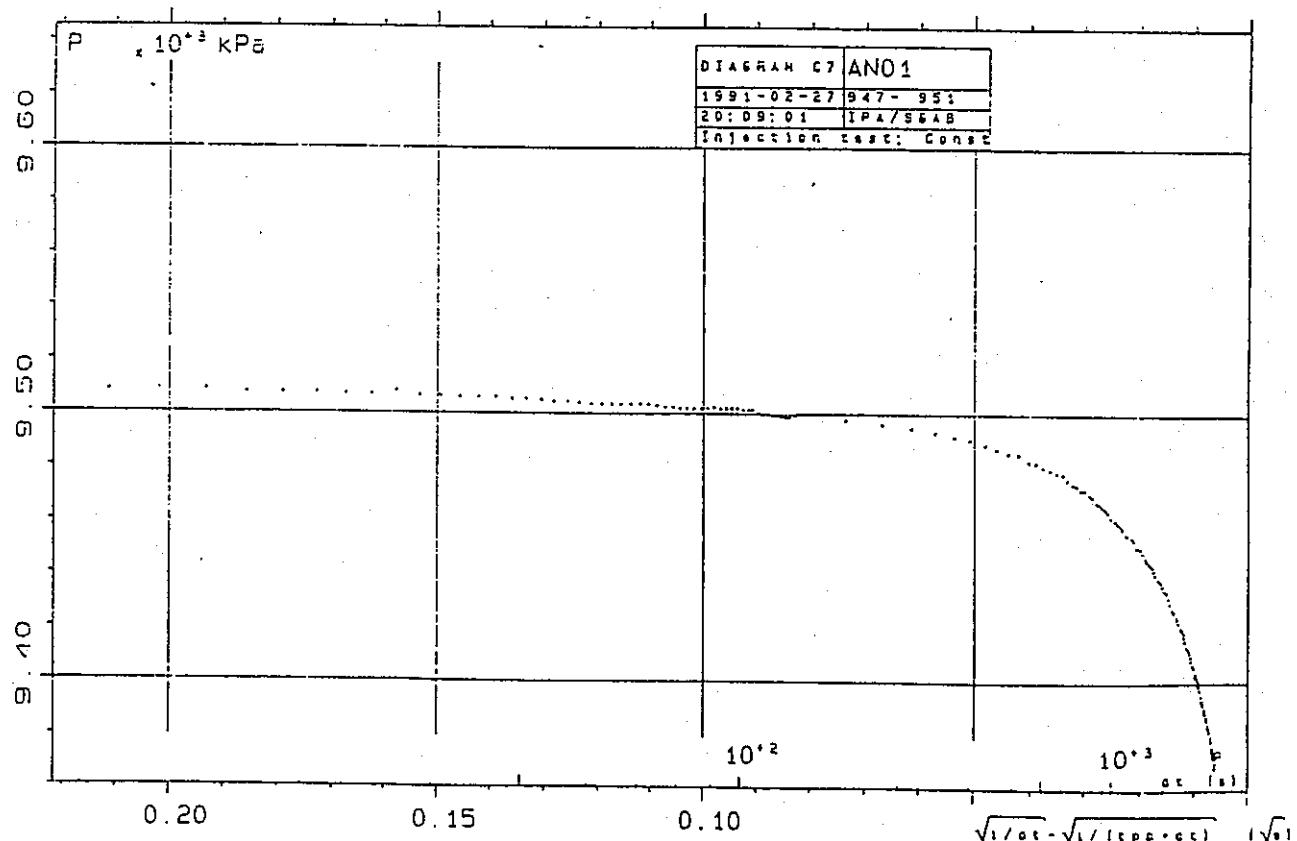


Fig A5.20 Absolute pressure ( $P$ ) versus square root of reciprocal corrected time ( $dt$ ) after stop of injection during the recovery period.

APPENDIX 6

HYDRAULIC INJECTION TEST IN SECTION 277.5 – 281.5 M IN AN-1

P <sub>1</sub>	2696.9	kPa
P <sub>0</sub>	2698.6	kPa
P <sub>0</sub> -P <sub>1</sub>	1.7	kPa
P <sub>p</sub>	2911.4	kPa
P <sub>p</sub> -P <sub>1</sub>	214.4	kPa
P <sub>r</sub>	2804.0	kPa
P <sub>r</sub> -P <sub>1</sub>	107.0	kPa
P <sub>e</sub>	2698.9	kPa
P <sub>b</sub>		kPa
B <sub>b</sub>		kPa
t <sub>b</sub>		
W <sub>1</sub>	-16.22	m
W <sub>0</sub> -W <sub>1</sub>	0.20	m
t <sub>0</sub>	873	s
t <sub>00</sub>	1696	s
dt <sub>r</sub>	931	s
Q <sub>p</sub>	4.013E-06	m <sup>3</sup> /s
V <sub>tot</sub>	6.807E-03	m <sup>3</sup>
dP <sub>1a</sub>	221.8	kPa
dP <sub>0a</sub>	220.1	kPa

COMMENTS

DIAGRAM A0		AN01
DATE	: 1991-02-28	SECTION : 277.5-281.5
START TIME:	02:52:01	CONSULTANT: IPA/SGAB
FIELD CREW:	CB SJ	CLIENT : PNC/SKB
TEST TYPE : Injection test; Const P		

K <sub>iss</sub>	3.31E-08	m/s
K <sub>oss</sub>	3.34E-08	m/s
X	X	m
Y	Y	m
Z	Z	m
AW		deg
IW	90	deg
DW	100	mm
LK	1.39	m
LL		m
LB	20.00	m
EC	SOND 2	

Fig. A6.1 Summary of data and results of injection test in section 277.5-281.5m.

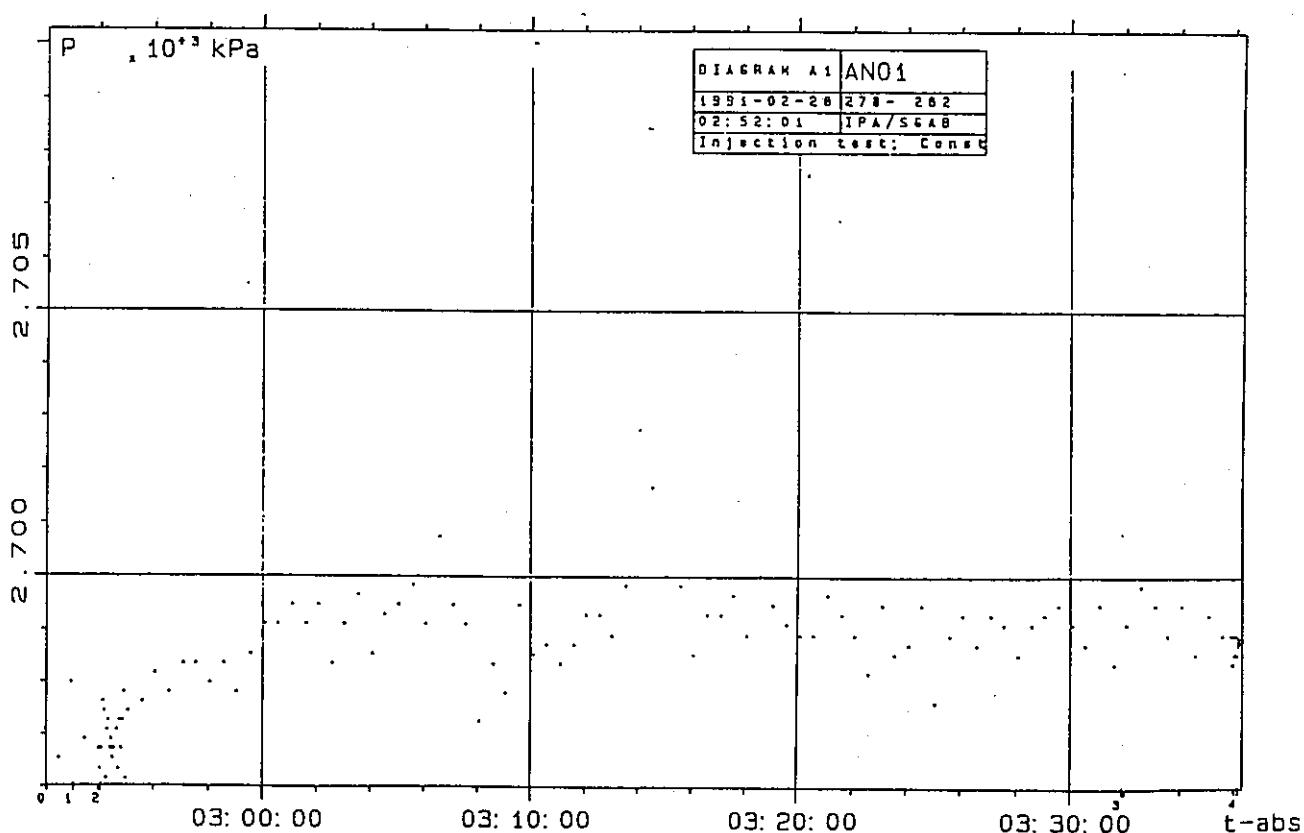


Fig. A6.2 Absolute pressure (P) versus absolute time (t-abs) before start of injection.

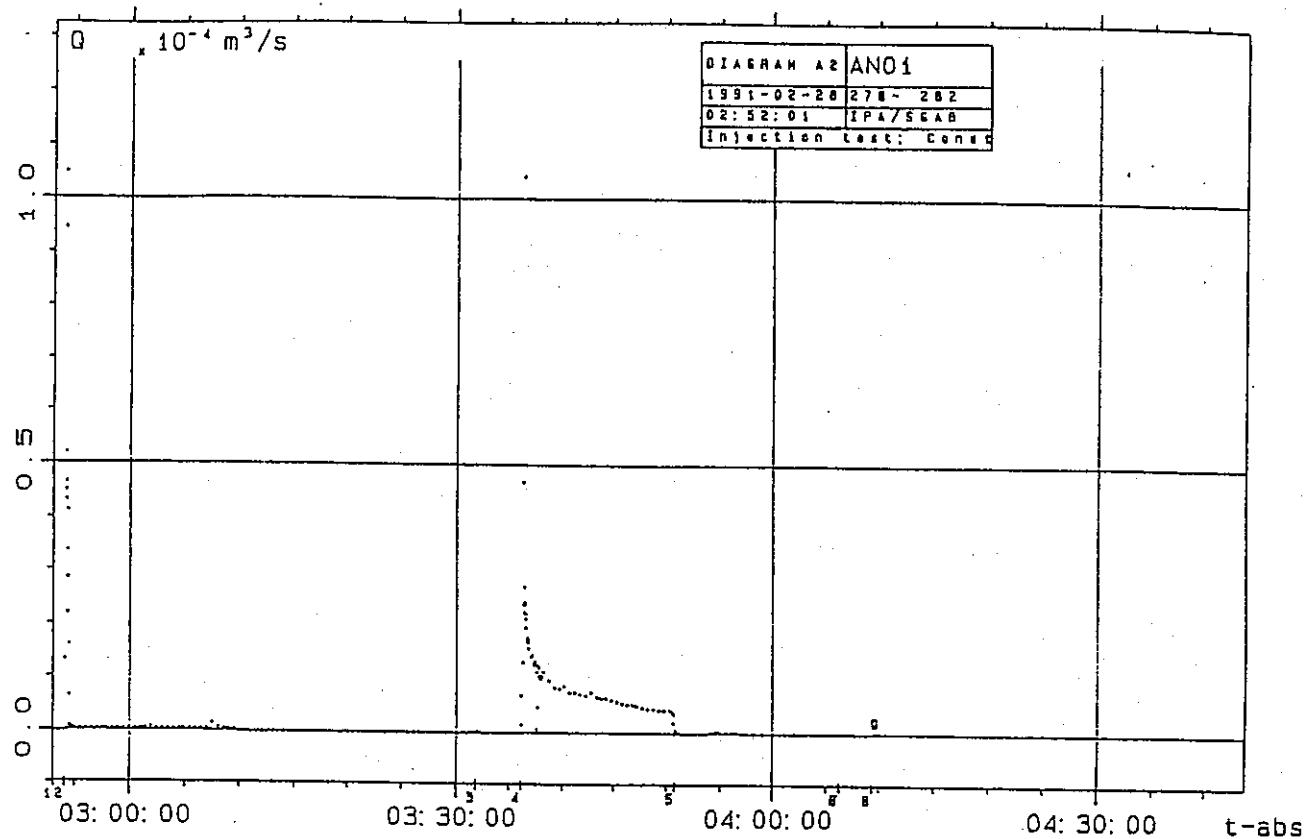


Fig. A6.3 Overview of flow rate (Q) versus real time (t-abs) during the entire test.

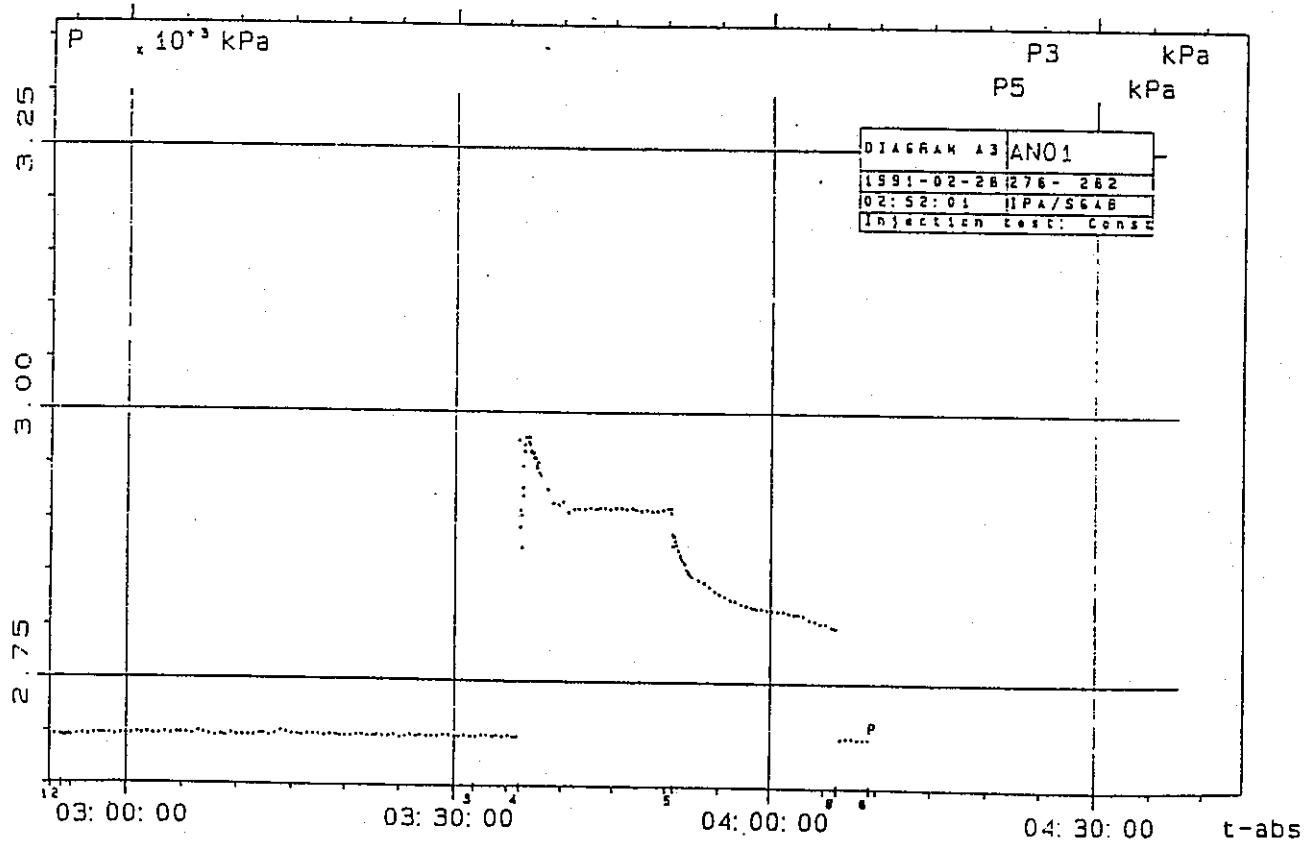


Fig. A6.4 Overview of absolute pressure (P) versus real time (t-abs) during the entire test.

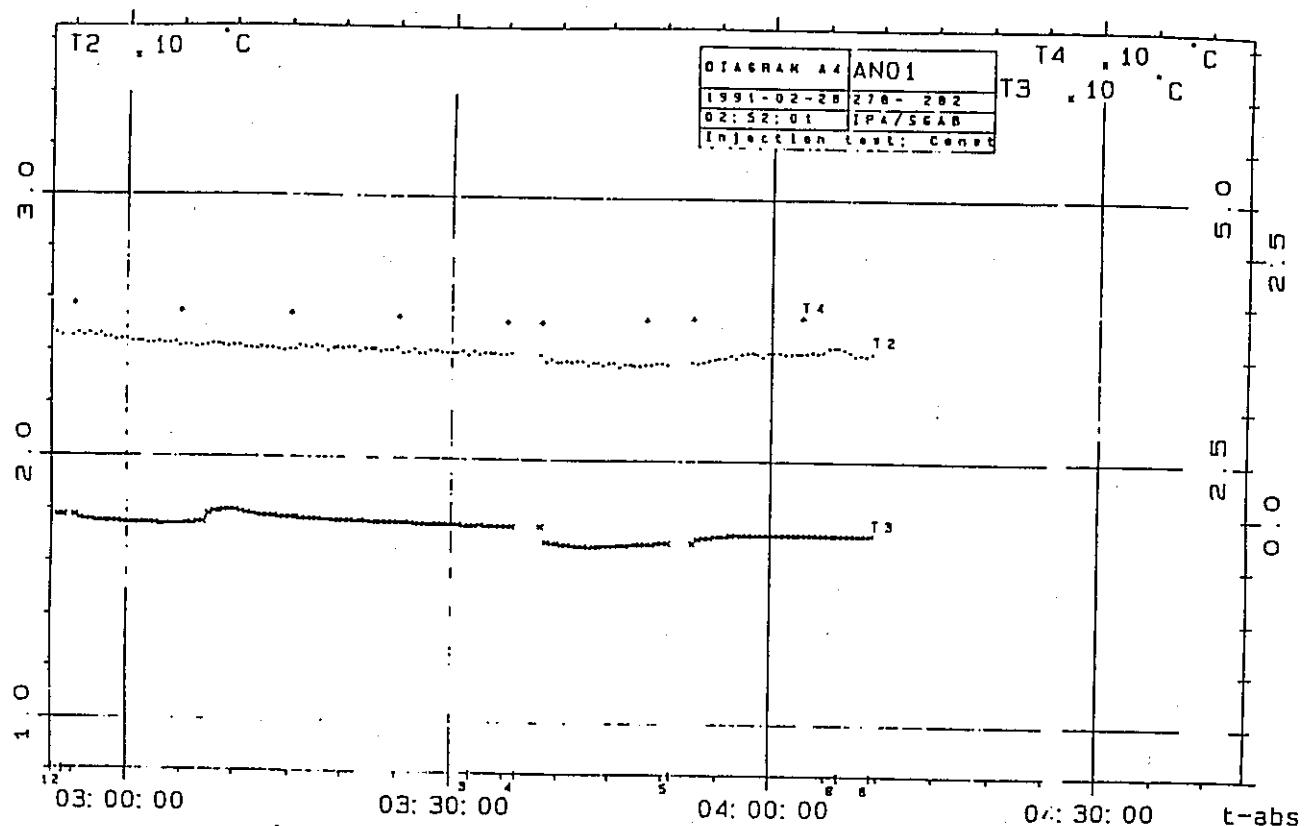


Fig. A6.5 Overview of groundwater temperature in the test section (T2), injection water temperature at the surface (T3) and air temperature in the test housing at the surface (T4) versus absolute time (t-abs) during the entire test.

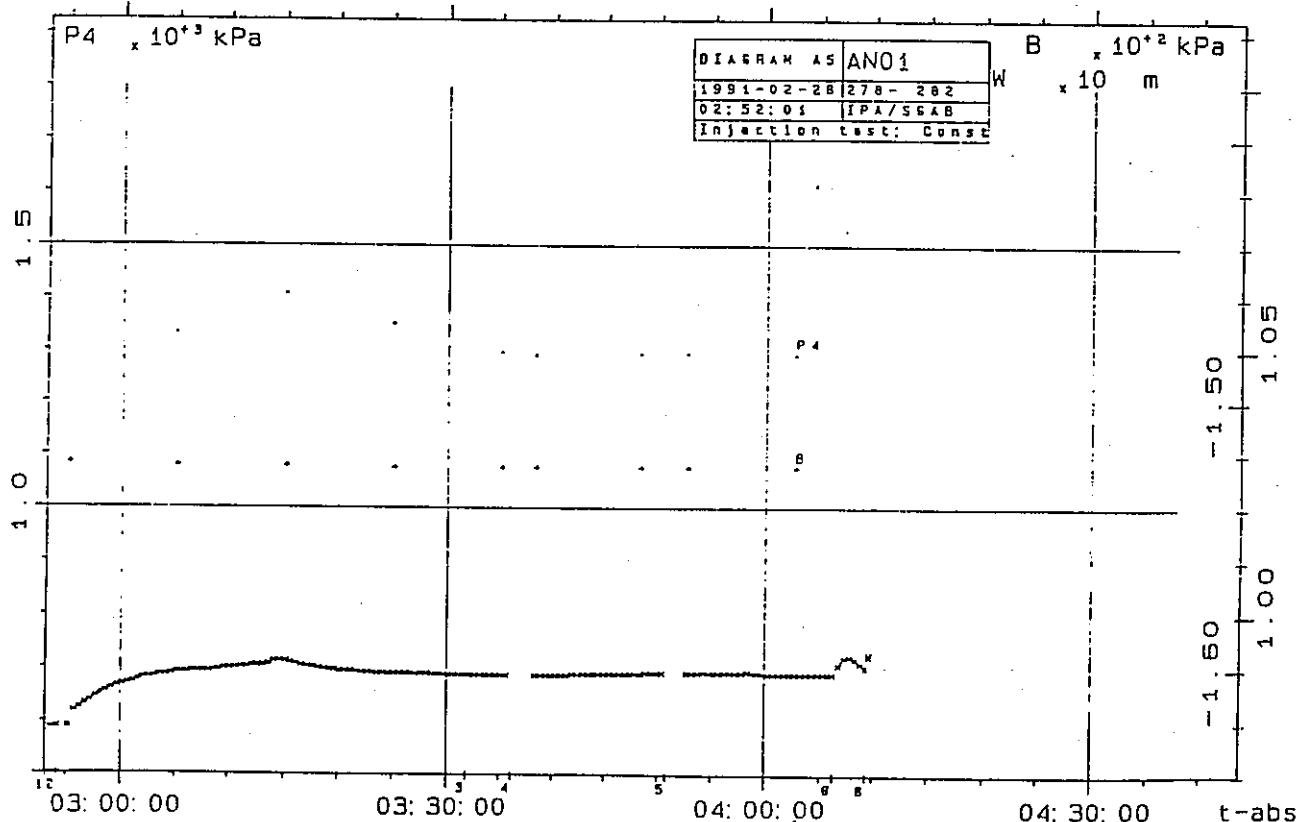


Fig. A6.6 Overview of packer inflation pressure (P4), barometric pressure (B) and distance to the groundwater table in the borehole (W) versus absolute time (t-abs) during the entire test.

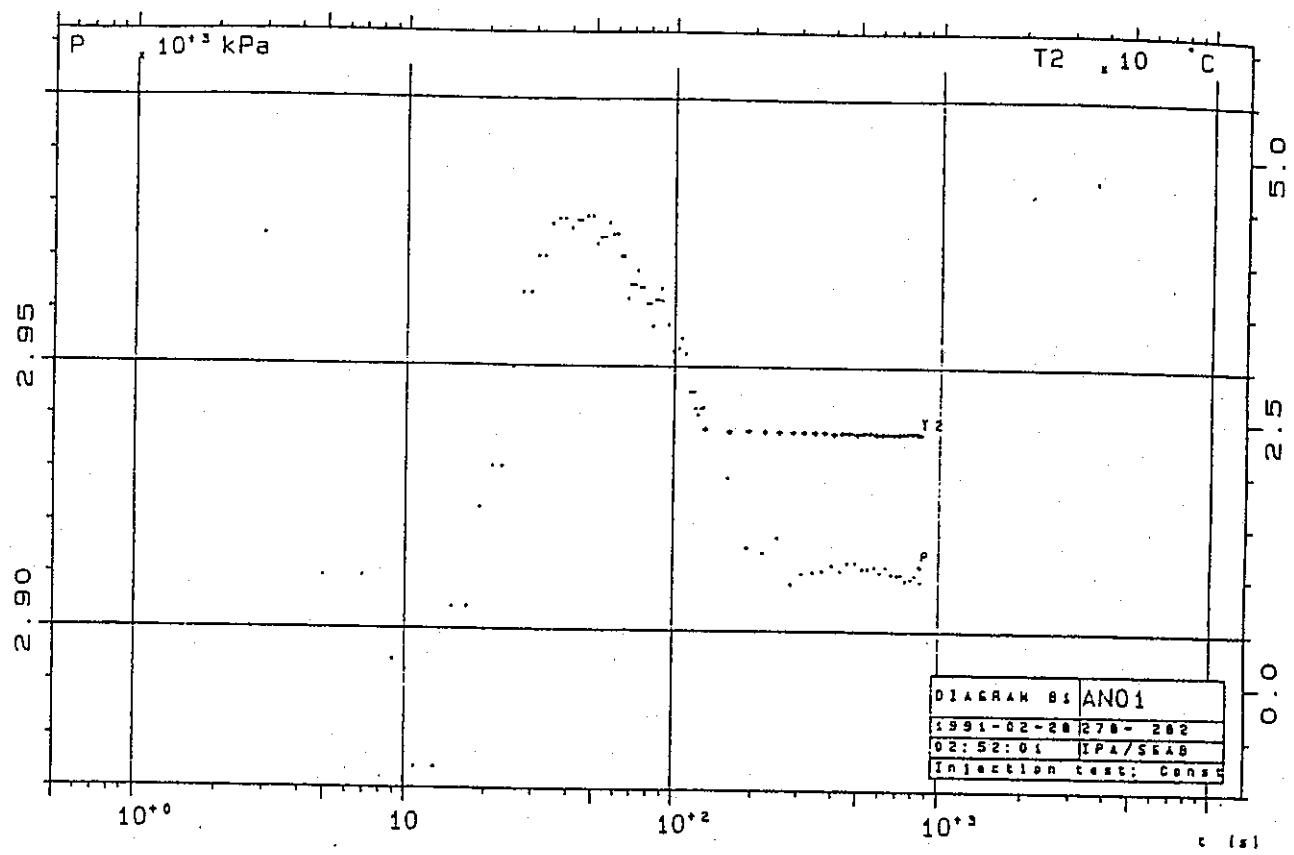


Fig. A6.7 Absolute pressure ( $P$ ) and groundwater temperature in the section ( $T_2$ ) versus time ( $t$ ) after start of injection during the injection period.

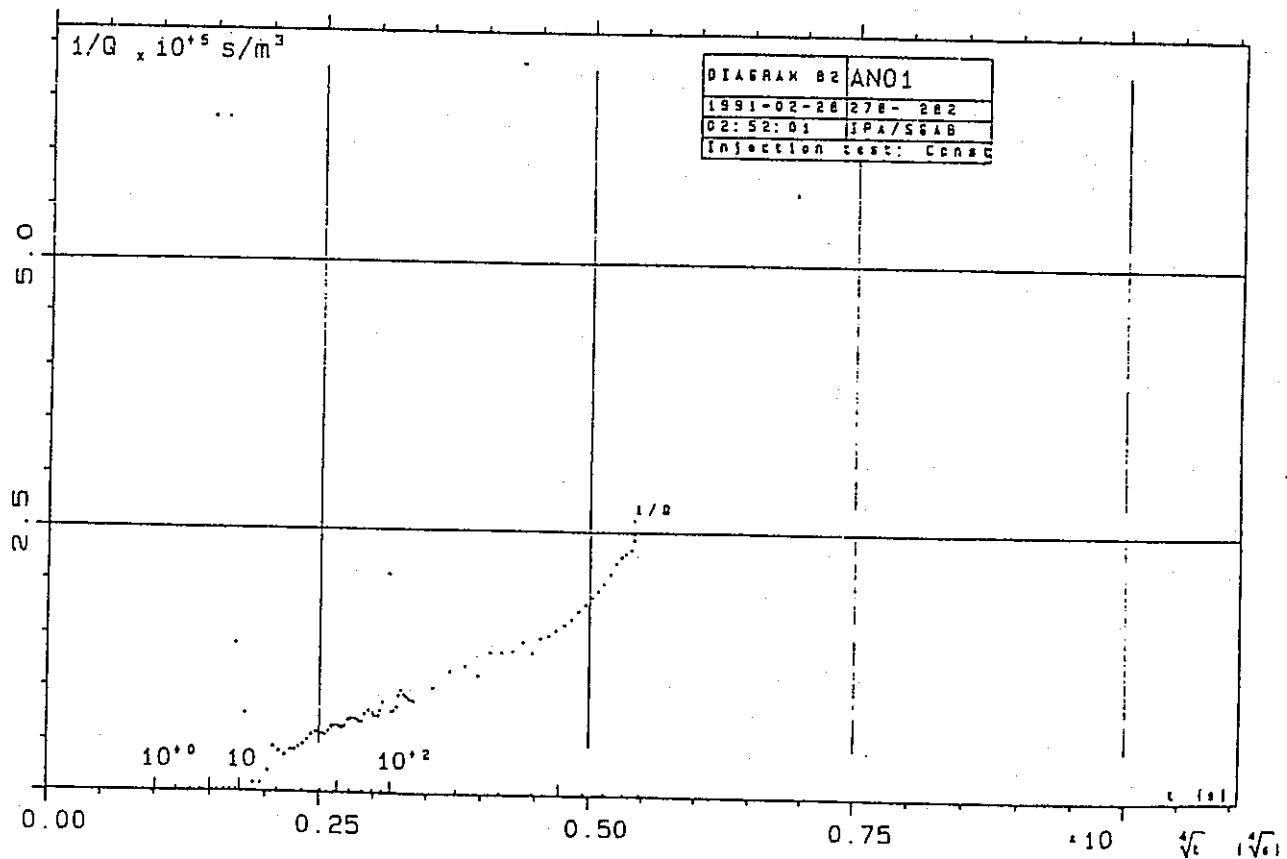


Fig. A6.8 Reciprocal flow rate ( $1/Q$ ) versus fourth root of time ( $t$ ) after start of injection during the injection period.

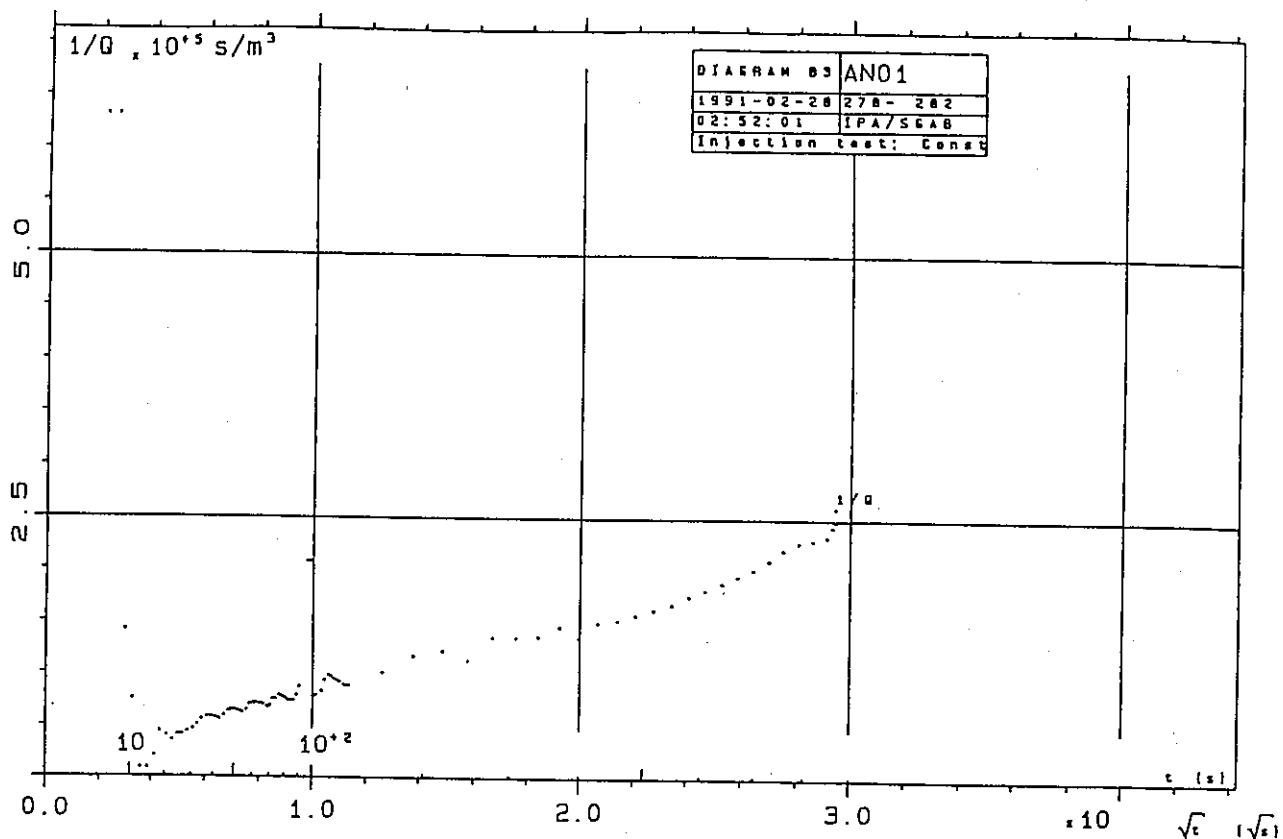


Fig A6.9 Reciprocal flow rate ( $1/Q$ ) versus square root of time ( $t$ ) after start of injection during the injection period.

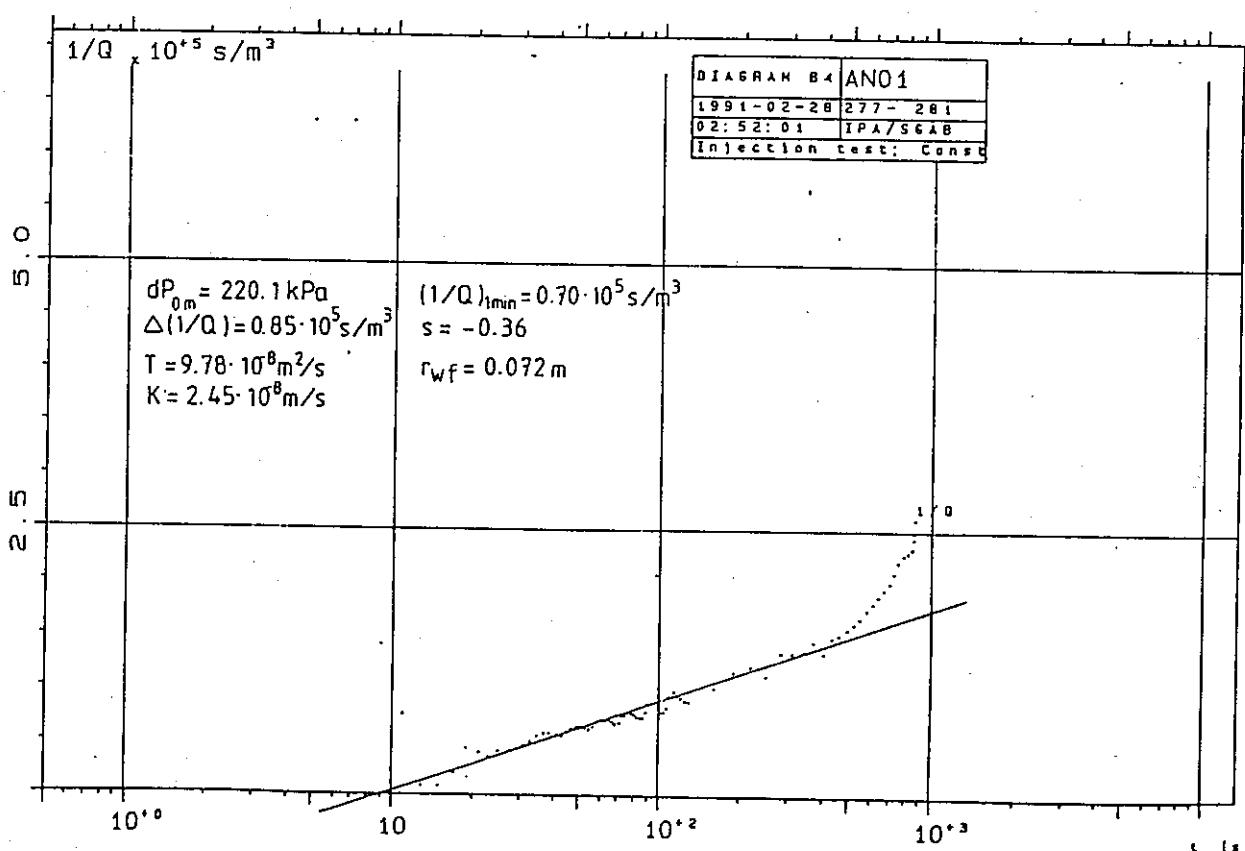


Fig A6.10 Reciprocal flow rate ( $1/Q$ ) versus time after start of injection ( $t$ ) during the injection period.

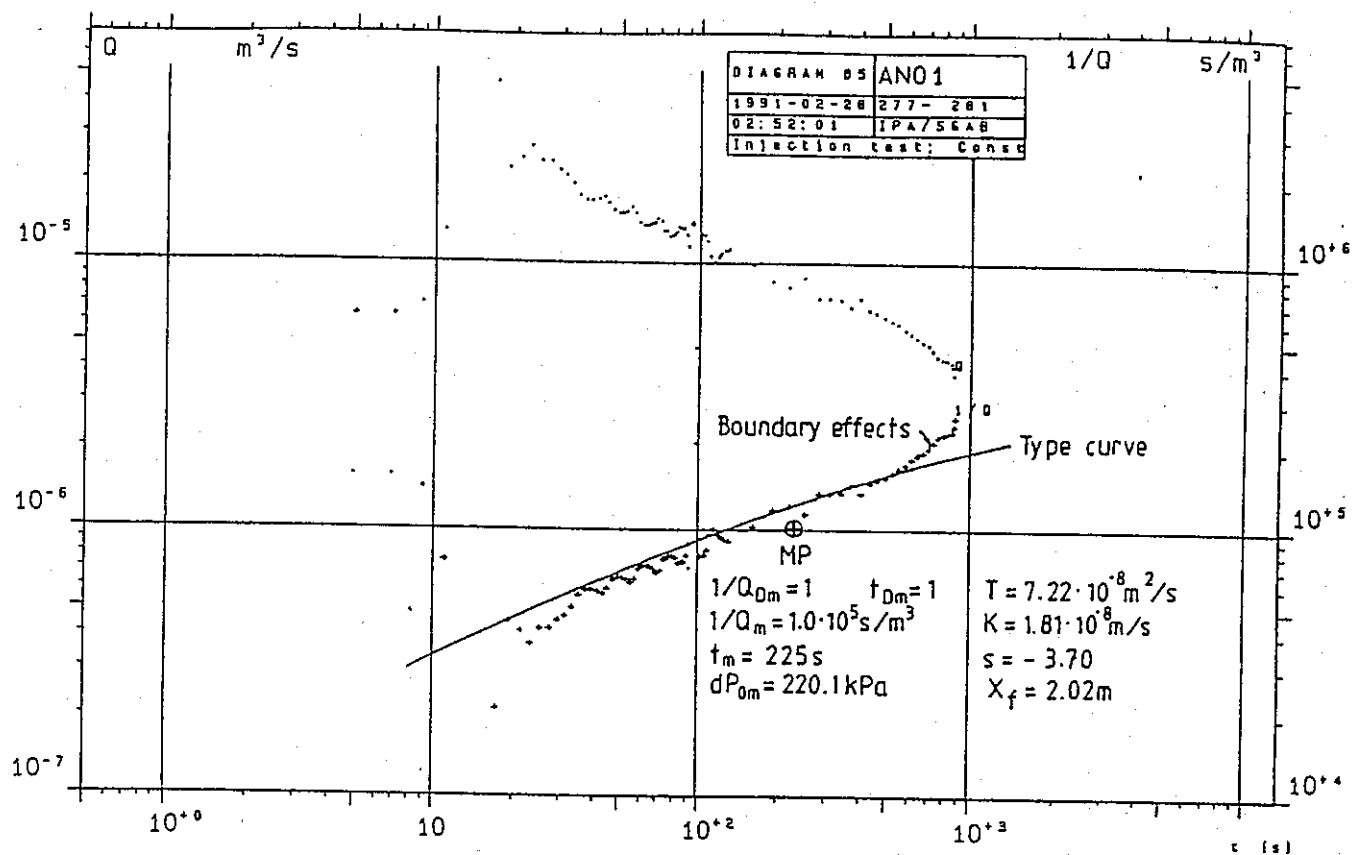
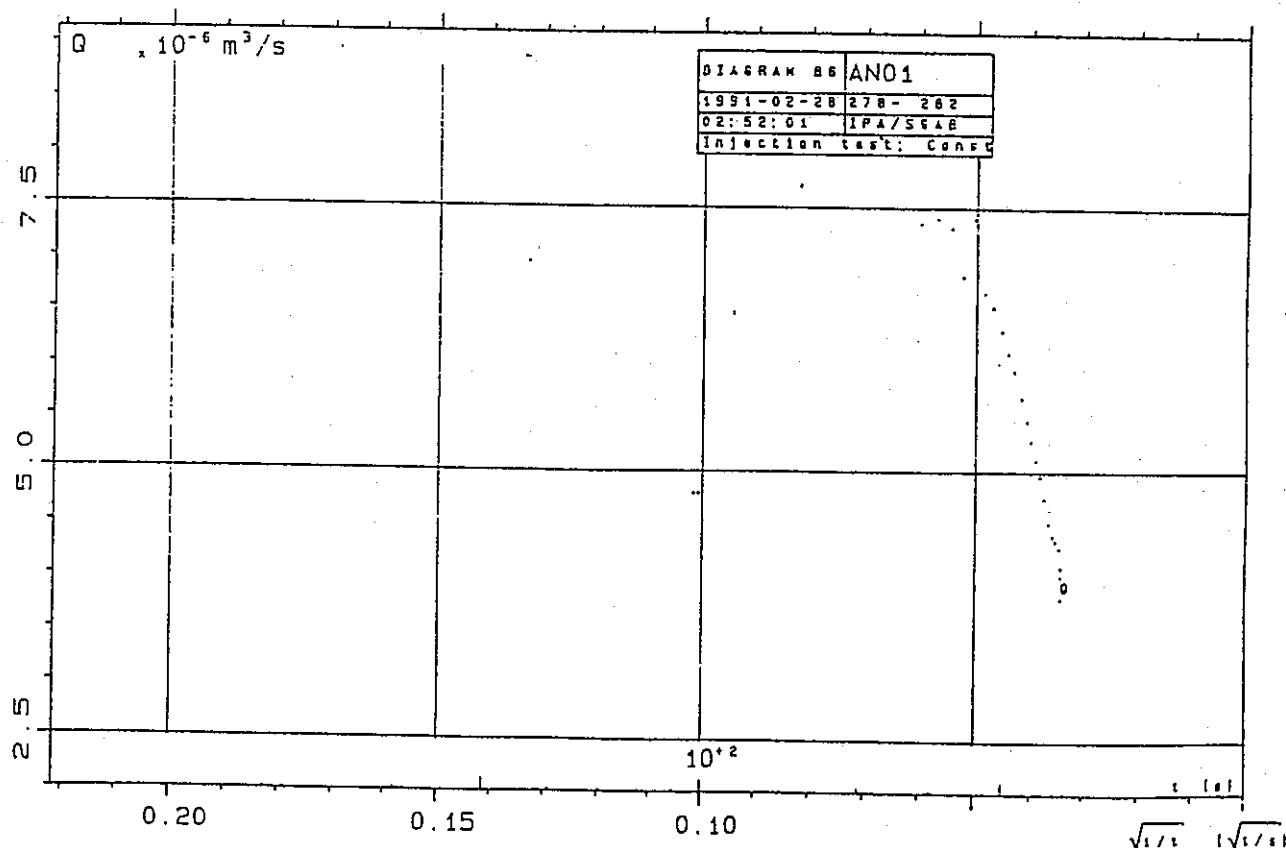


Fig A6.11 Flow rate ( $Q$ ) and reciprocal flow rate ( $1/Q$ ) versus time after start of injection ( $t$ ) during the injection period.



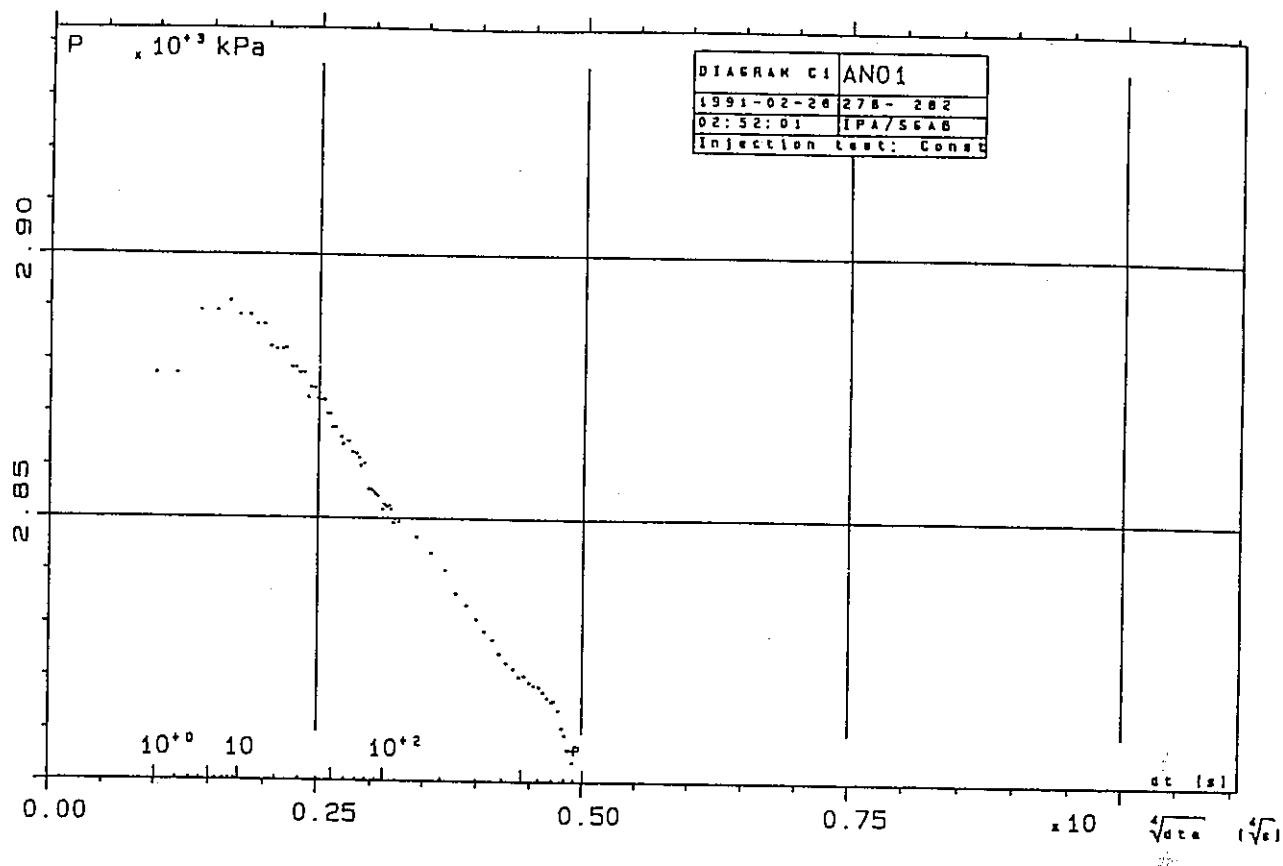


Fig A6.13 Absolute pressure (P) versus fourth root of equivalent time (dte) after stop of injection during the recovery period.

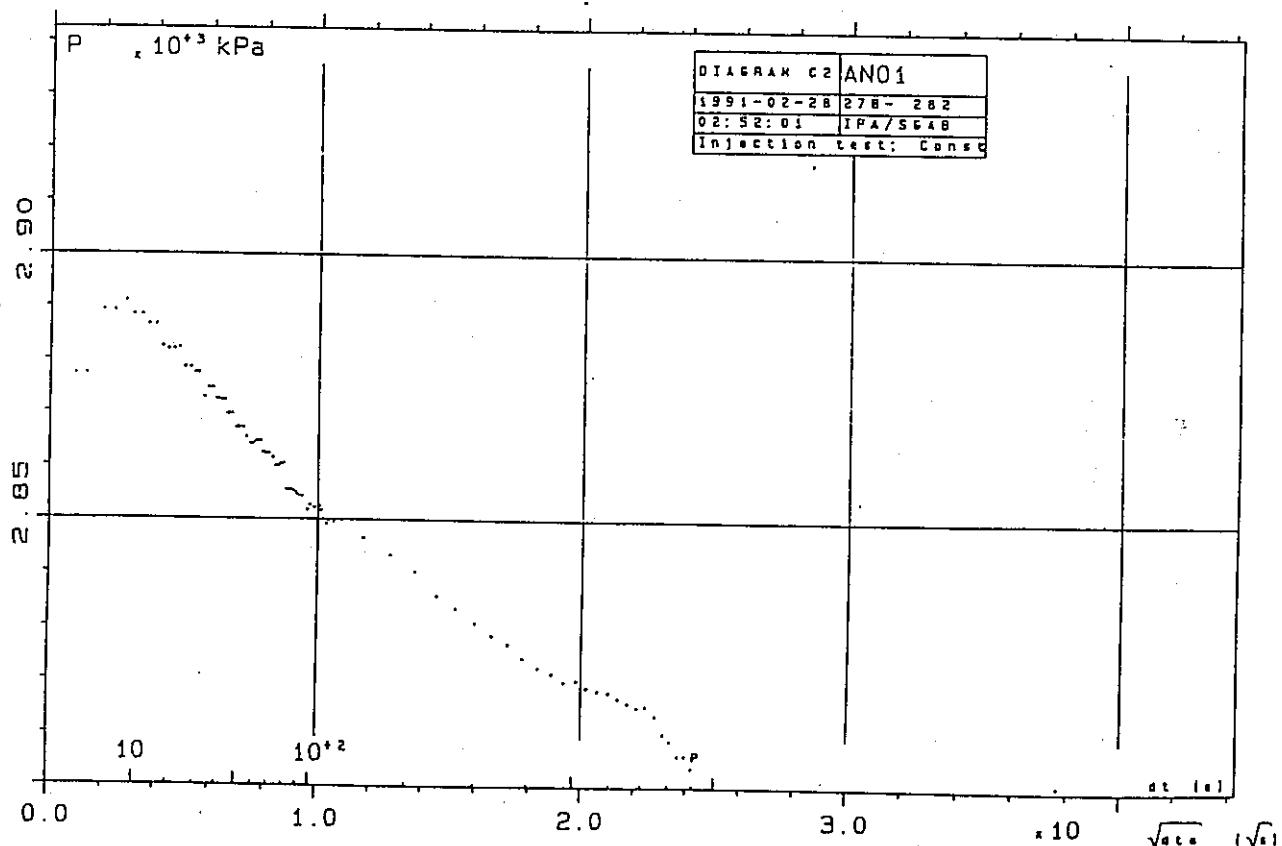


Fig A6.14 Absolute pressure (P) versus square root of equivalent time (dte) after stop of injection during the recovery period.

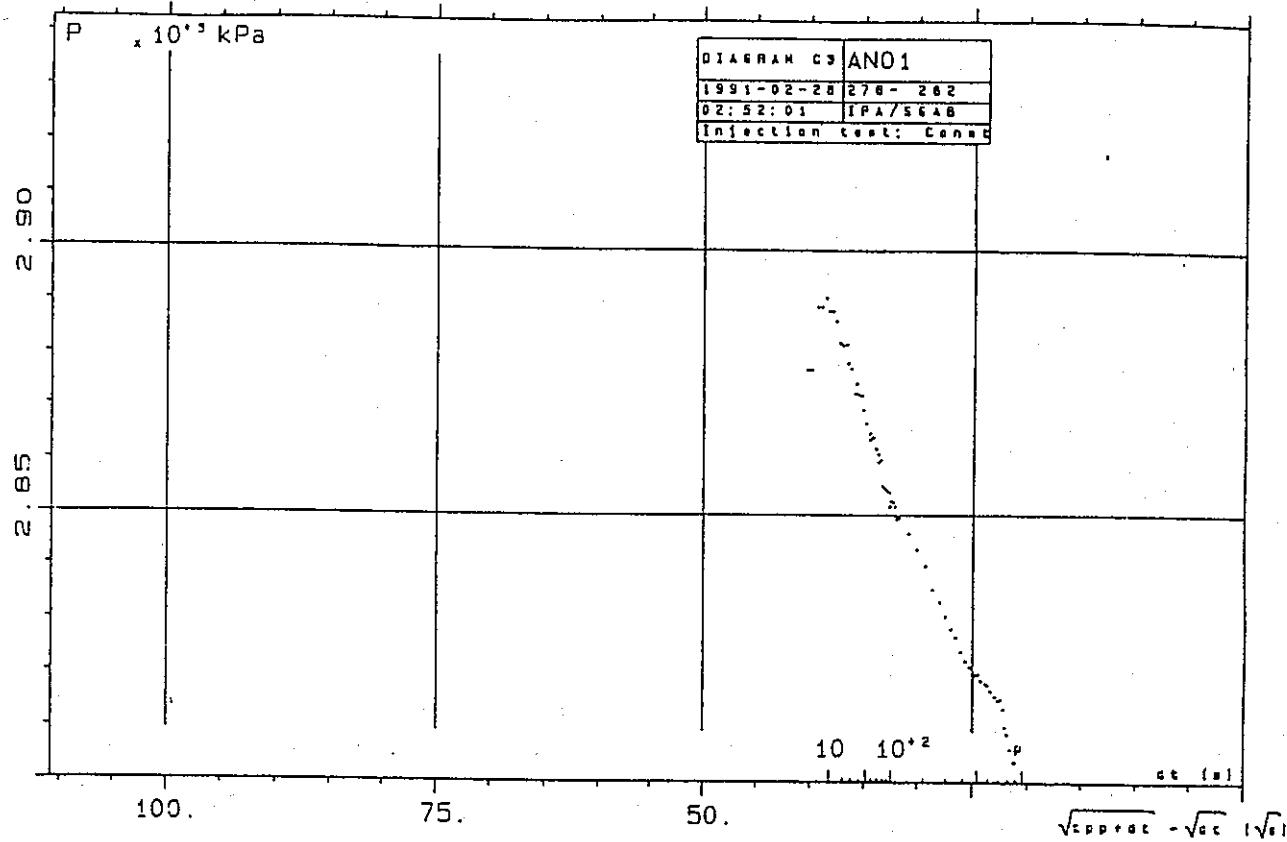


Fig A6.15 Absolute pressure ( $P$ ) versus square root of corrected time ( $dt$ ) after stop of injection during the recovery period.

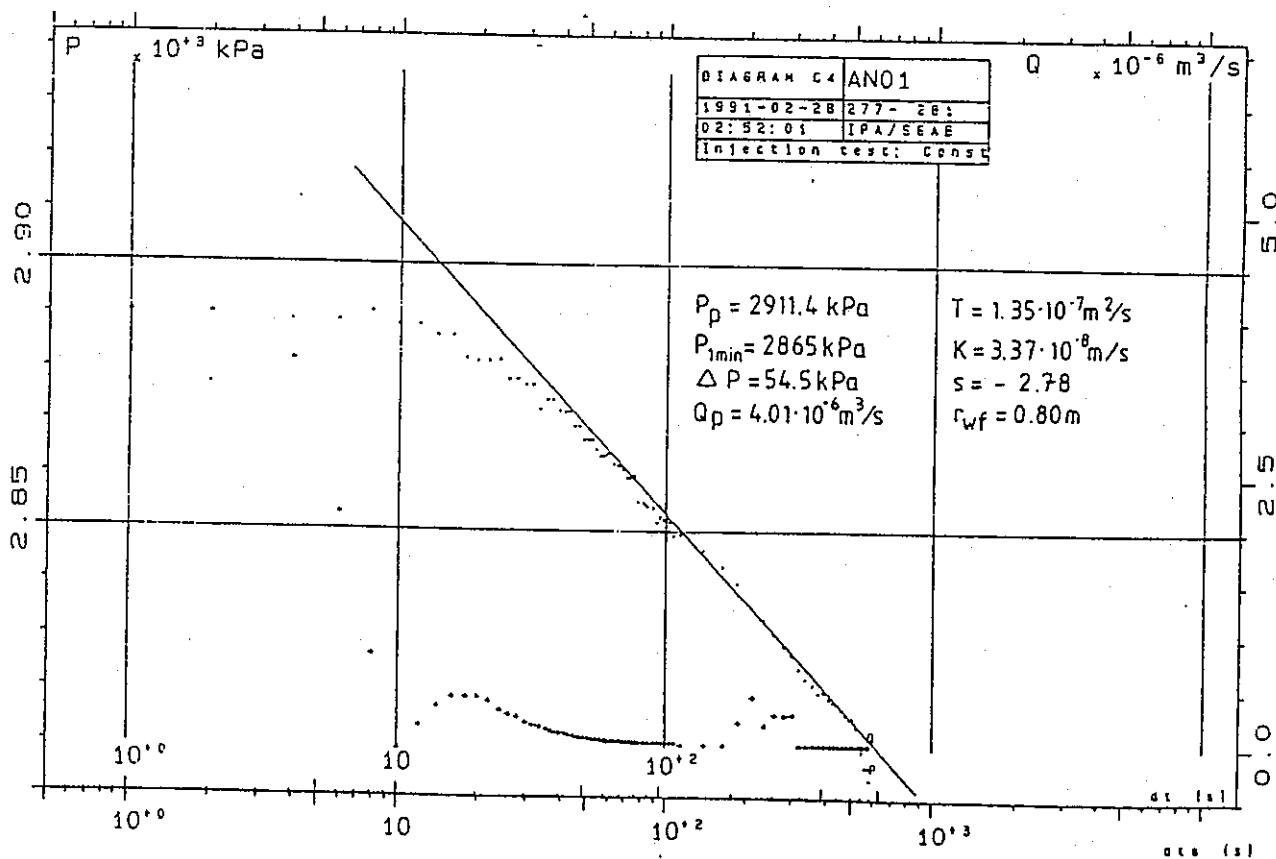


Fig A6.16 Absolute pressure ( $P$ ) and flow rate ( $Q$ ) versus equivalent time ( $dtc$ ) after stop of injection during the recovery period.

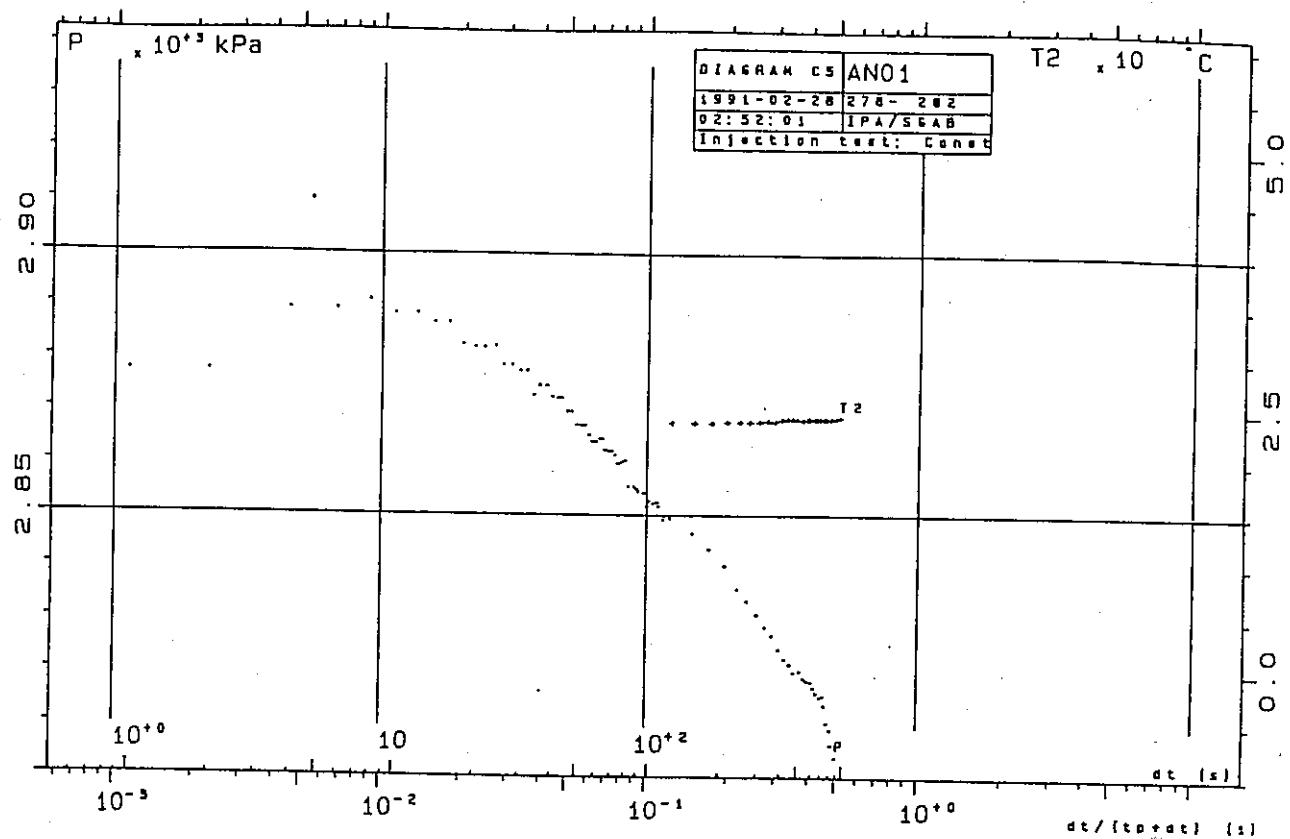


Fig A6.17 Absolute pressure ( $P$ ) and groundwater temperature in the test section ( $T_2$ ) versus Horner time ratio during the recovery period.

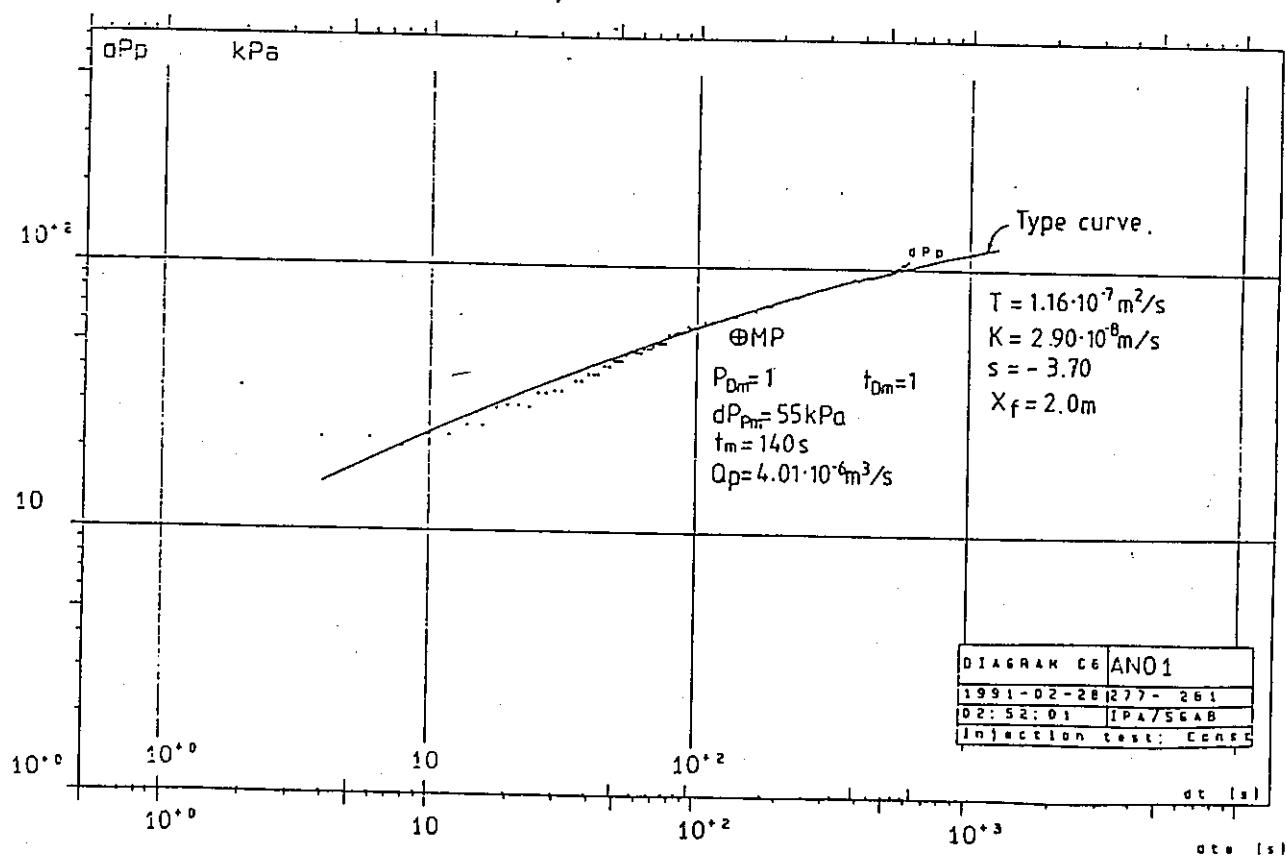


Fig A6.18 Absolute pressure ( $P$ ) versus equivalent time ( $dt$ ) after stop of injection during the recovery period.

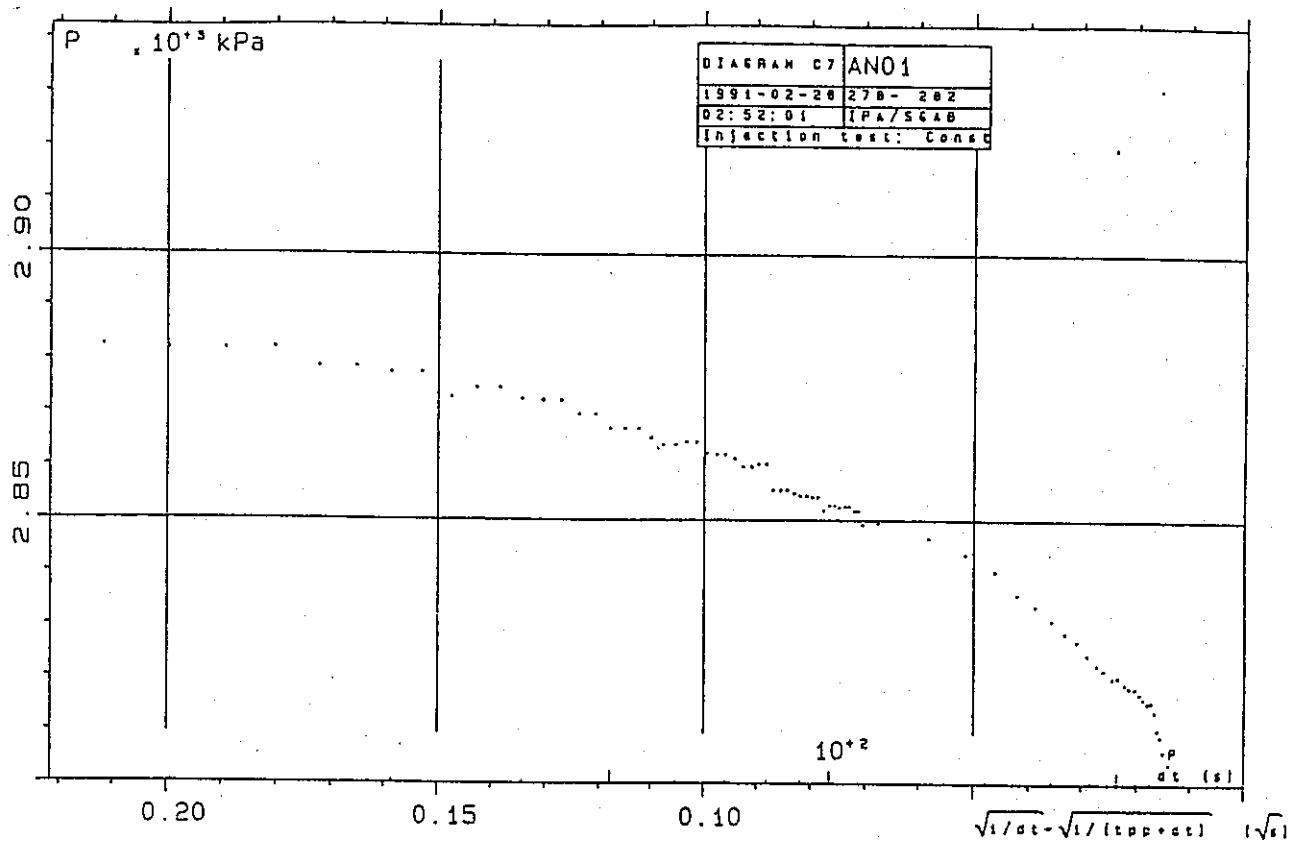


Fig A6.19 Absolute pressure (P) versus square root of reciprocal corrected time (dt) after stop of injection during the recovery period.

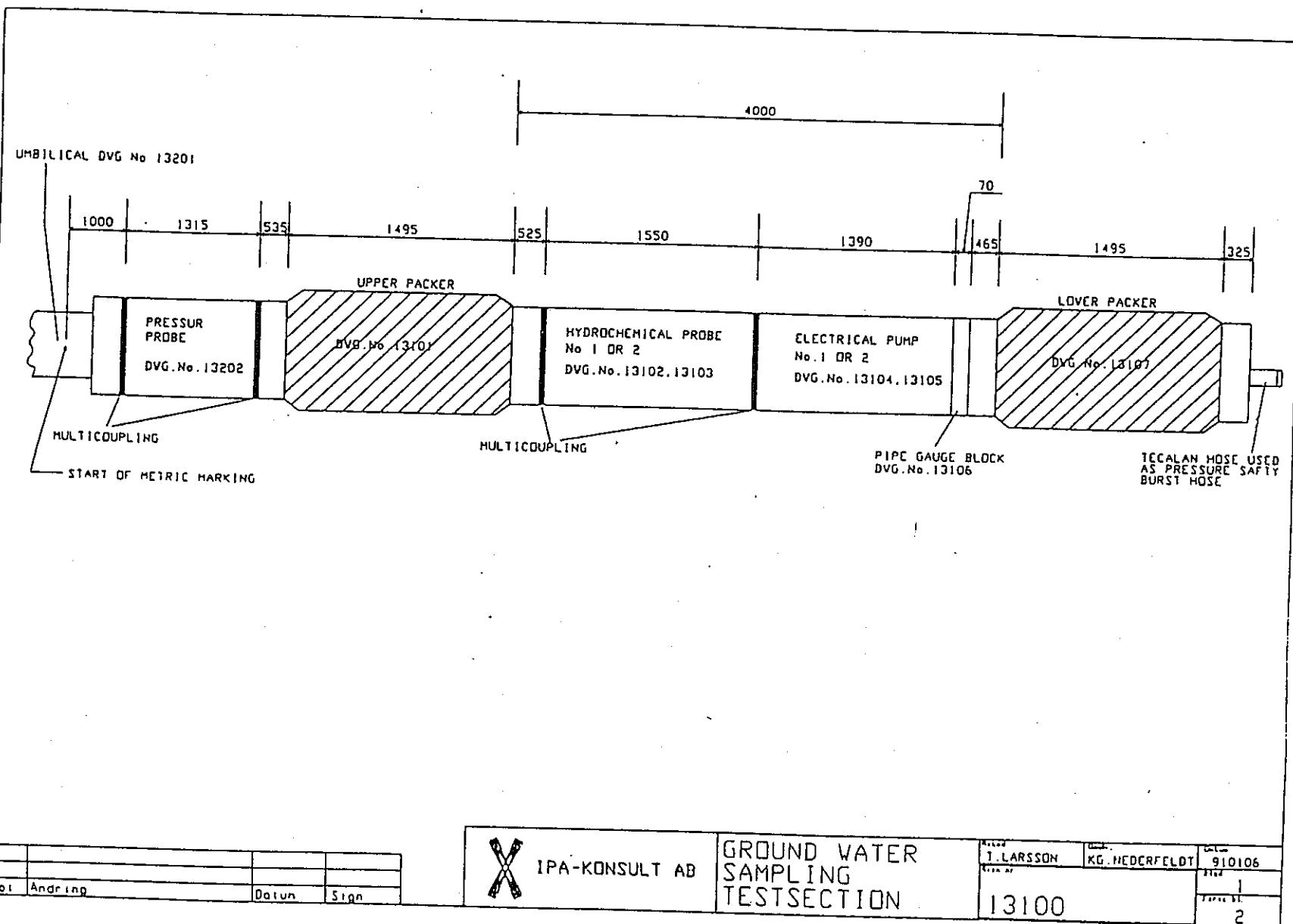
M2



IPA-KONSULT AB

GROUND WATER SAMPLING  
TEST SECTION ELECTRICAL  
PUMP No. 1 AND 2

1990-11-26  
D. ANDERSSON



IPA-KONSULT AB

GROUND WATER  
SAMPLING  
TESTSECTION

Arbete	J. LARSSON	Utan	UL-
	KG. NEDERFELDT		910106
Arbete av		Tilld.	1
		Uppdr. nr.	2
	13100		

A7.1

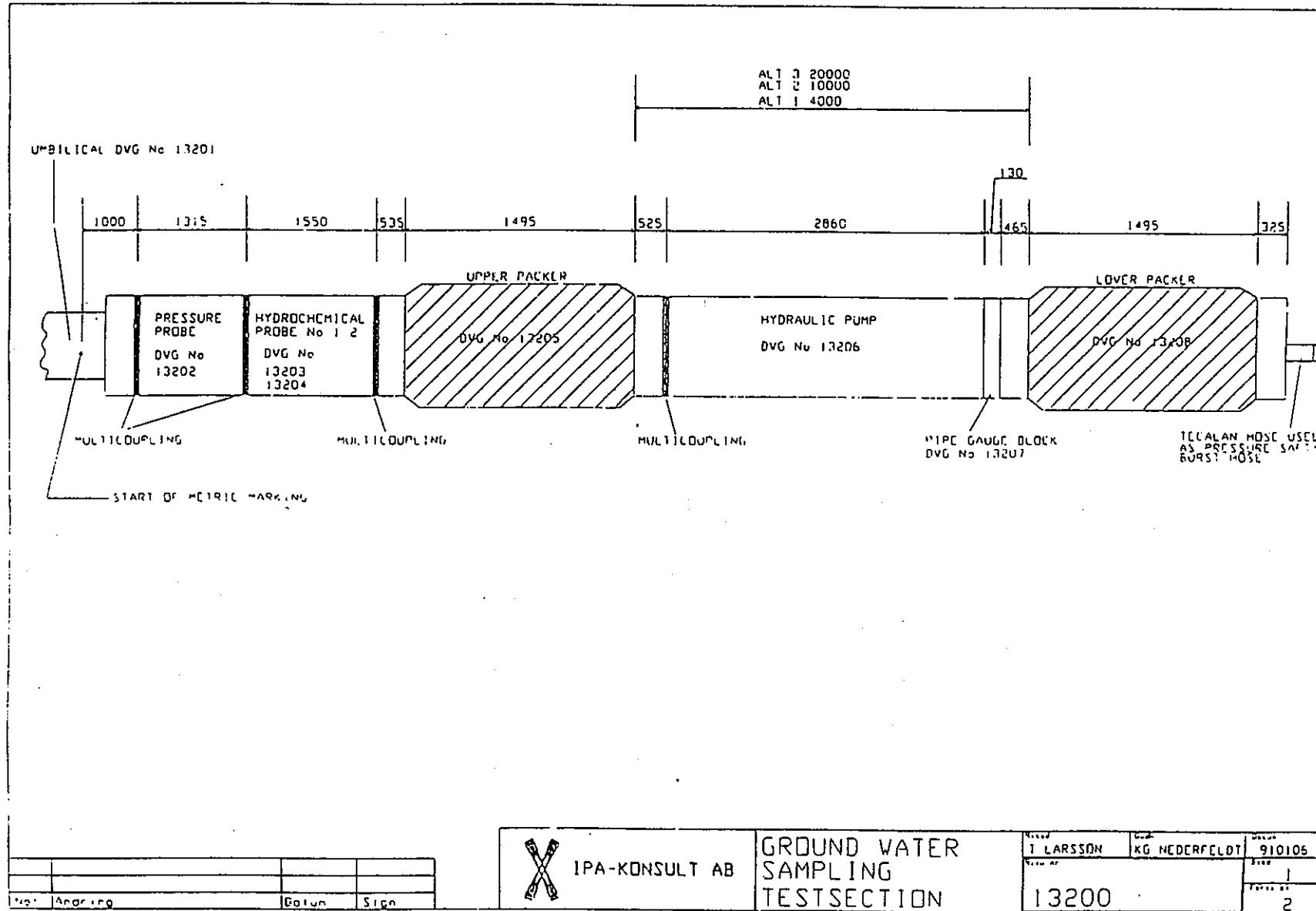
M2



IPA-KONSULT AB

GROUND WATER SAMPLING  
TESTSECTION HYDRAULIC  
PUMP

1990-11-26  
O. ANDERSSON



M2



IPA-KONSULT AB

GROUND WATER SAMPLING  
TESTSECTION HYDRAULIC  
PUMP

1990-11-26  
O. ANDERSSON

## APPENDIX 9

### EQUATIONS FOR CALCULATION OF pH and Eh

## 1. CALCULATIONS FROM ELECTRODE READINGS

### 1.1 Calculation of pH from electrode readings (mV)

Nernst's equation gives:

$$E = E^\circ + (RT/nF) \ln[H^+] \quad (1)$$

The potential  $E$  (mV) is measured in the different calibration buffer solutions where pH is known. pH has different temperature dependence in different pH-buffers. The temperature dependence is included in the expression used for calculating  $E^\circ$ .

$$E^\circ(\text{pH } 4) = E_{\text{meas}}(\text{pH } 4) + \text{pH}(10 \text{ C}) * (R/F) \ln 10 * KT \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E^\circ(\text{pH } 7) &= E_{\text{meas}}(\text{pH } 7) + (R/F) \ln 10 * KT * (\text{pH}(0 \text{ C}) - \\ &- 0.0025 * T) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E^\circ(\text{pH } 10) &= E_{\text{meas}}(\text{pH } 10) + (R/F) \ln 10 * KT * (\text{pH}(0 \text{ C}) - \\ &- 0.0125 * T) \end{aligned} \quad (4)$$

where:

$KT$  = measured temperature in Kelvin

$T$  = measured temperature in Celcius

The three  $E^\circ$ -values obtained from measurements in each one of the three buffer solutions should coincide. Differences of up to  $\pm 10$  mV are considered acceptable.

The average (or most representative)  $E^\circ$  value is used in the calculation of pH in the groundwater:

$$\text{pH} = (E^\circ(\text{pH}) - E(\text{meas})) / (\ln 10 * KT * R/F) \quad (5)$$

### 1.2 Calculation of $E_h$ from electrode readings

For the redox electrodes measured against the reference electrode the potential is given by:

$$E = E^\circ_{\text{O}} - E^\circ_{\text{Ag}/\text{Ag}^+} + RT/nF (-\ln[\text{Ag}^+]_{\text{ref}} + \ln[\text{H}^+]_{\text{soln}}) \quad (6)$$

The calibration constant  $E^\circ$  is given by the difference between theoretical  $E_h$  in the calibration solution and the measured electrode reading.  $E_h$  is temperature dependent. The second terms in the expressions below corrects for the temperature dependence.

$$E^\circ(\text{pH } 4) = Eh(\text{pH } 4, 0 \text{ C}) - 1.518 * T - E_{\text{meas}}(\text{pH } 4) \quad (7)$$

$$E^\circ(\text{pH } 7) = Eh(\text{pH } 7, 0 \text{ C}) - 1.953 * T - E_{\text{meas}}(\text{pH } 7) \quad (8)$$

The two values obtained for  $E^\circ$  may not differ more than 20 mV. The average (or most representative)  $E^\circ$  is used in the calculation of  $E_h$  in the groundwater.

$$E_h = E^\circ + E(\text{meas}) \quad (9)$$

## 2 EQUATIONS USED IN THE COMPUTER PROGRAM

pH - Calibration:

$$\begin{aligned}E0PHB4 &= EPHB4 + 0.7916 \cdot KTB \\E0PHB7 &= EPHB7 + 0.1984 \cdot KTB \cdot (7.06 - 0.0035 \cdot TB) \\E0PHB10 &= EPHB10 + 0.1984 \cdot KTB \cdot (10.3 - 0.0125 \cdot TB)\end{aligned}$$

E - Calibration:

$$\begin{aligned}E0CB4 &= 501.28 - 1.518 \cdot TB - ECB4 \\E0CB7 &= 335.5 - 1.953 \cdot TB - ECB7 \\E0PTB4 &= 501.28 - 1.518 \cdot TB - EPTB4 \\E0PTB7 &= 335.5 - 1.953 \cdot TB - EPTB7 \\E0AUB4 &= 501.28 - 1.518 \cdot TB - EAUB4 \\E0AUB7 &= 335.5 - 1.953 \cdot TB - EAUB7\end{aligned}$$

Measurements:

$$\begin{aligned}PHB &= (E0PHB - EPHB) \cdot 5.04/KTB \\EHCB &= E0CB + ECB \\EHPTB &= E0PTB + EPTB \\EHAUB &= E0AUB + EAUB\end{aligned}$$

List of parameters and explanation

EPHB4	= electrode reading (mV), pH 4 buffer
EPHB7	= electrode reading (mV), pH 7 buffer
EPHB10	= electrode reading (mV), pH 10 buffer
EOPHB4	= calibration constant (mV) pH 4 buffer
EOPHB7	= calibration constant (mV) pH 7 buffer
EOPHB10	= calibration constant (mV) pH 10 buffer
EOPHB	= representative calibration constant (mV) used in the calculation of pH
EPHB	= electrode reading, groundwater (mV)
PHB	= pH
PHIB	= pH measured by a second glass electrode

ECB4, EPTB4 and EAUB4	= electrode readings (mV) in buffer pH 4 (glassy carbon, platinum and gold electrodes)
ECB7, EPTB7 and EAUB7	= electrode readings (mV) in buffer pH 7
E0CB4, E0PTB4 and E0AUB4	= calculated calibration constants (mV) pH 4 buffer
E0CB7, E0PTB7 and E0AUB7	= calculated calibration constants (mV) pH 7 buffer
ECB, EPTB and EHAUB	= electrode reading (mV) by glassy carbon, platinum and gold electrodes respectively, groundwater
EHCB, EHPTB and EHAUB	= redox potential (mV) obtained by glassy carbon, platinum and gold electrodes, respectively

GROUNDWATER SAMPLING IN BOREHOLE AN-1

Redox potential (Eh) and pH-measurements

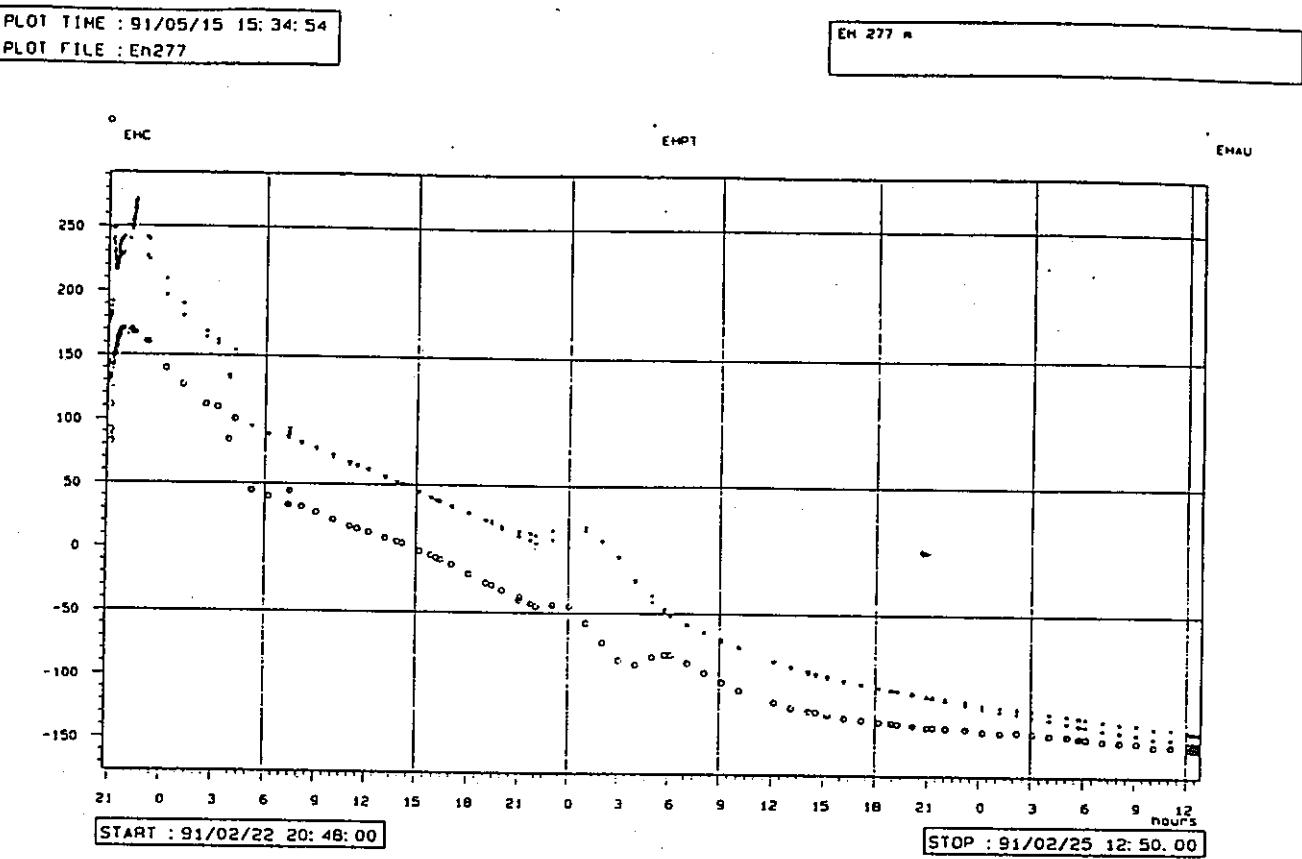


Fig. A10.1 Measured redox potential in section 277.5–281.5 m. (EHC=glassy carbon, EHPT=platinum and EHAU=gold electrode)

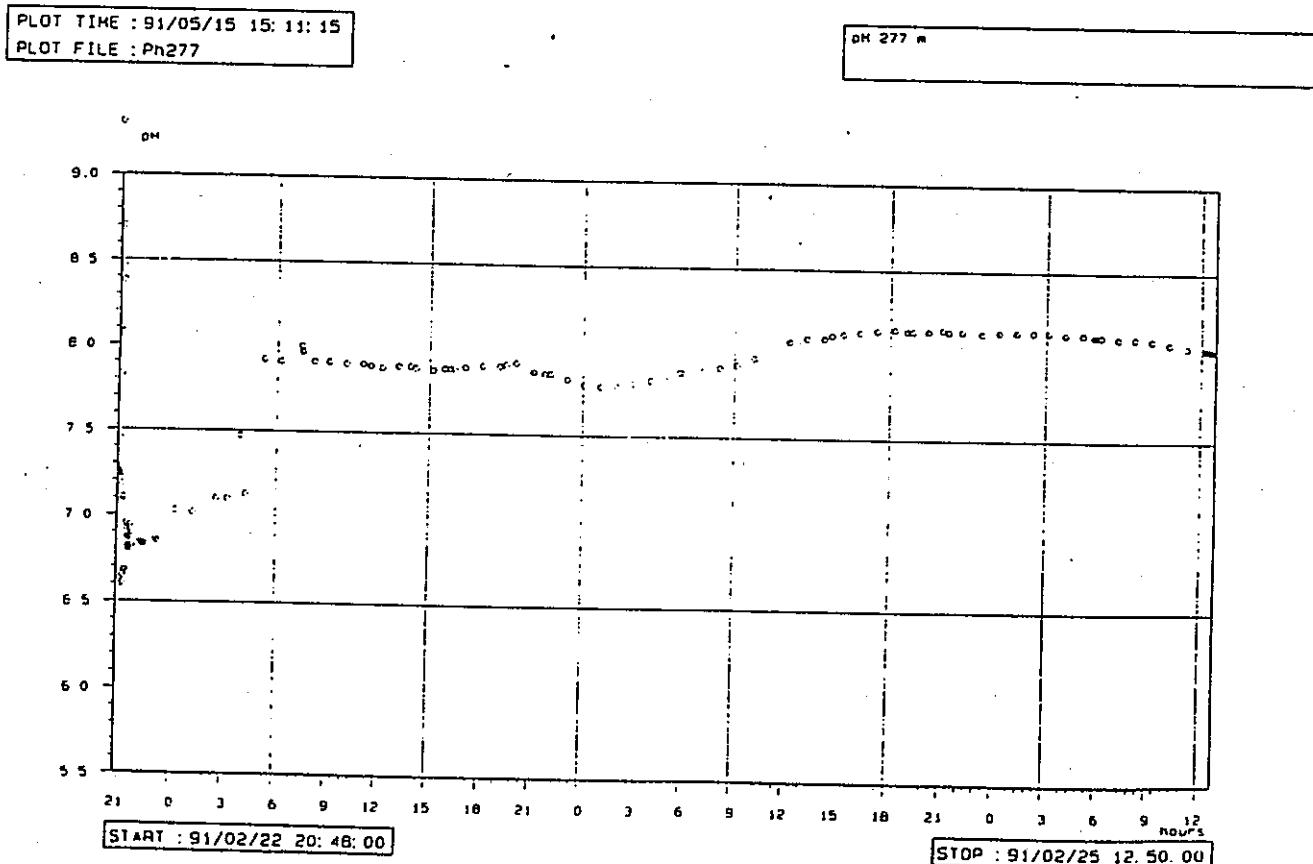


Fig. A10.2 Measured pH in section 277.5–281.5 m.

PLOT TIME : 91/05/15 15: 37: 51  
PLOT FILE : EnS40

EH 540 m

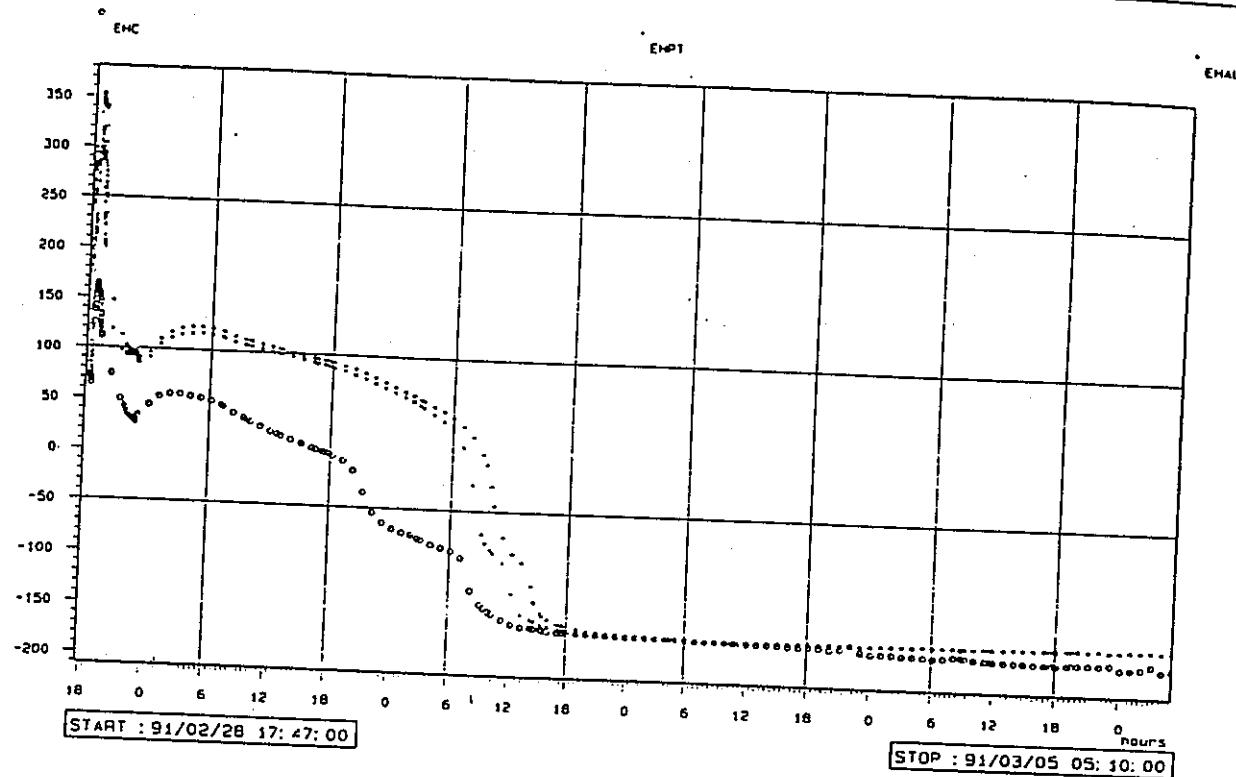


Fig. A10.3 Measured redox potential in section 540.5–560.5 m. (EHC=glassy carbon, EHPT=platinum and EHAU=gold electrode)

PLOT TIME : 91/05/15 15: 13: 12  
PLOT FILE : PhS40

DH 540 m

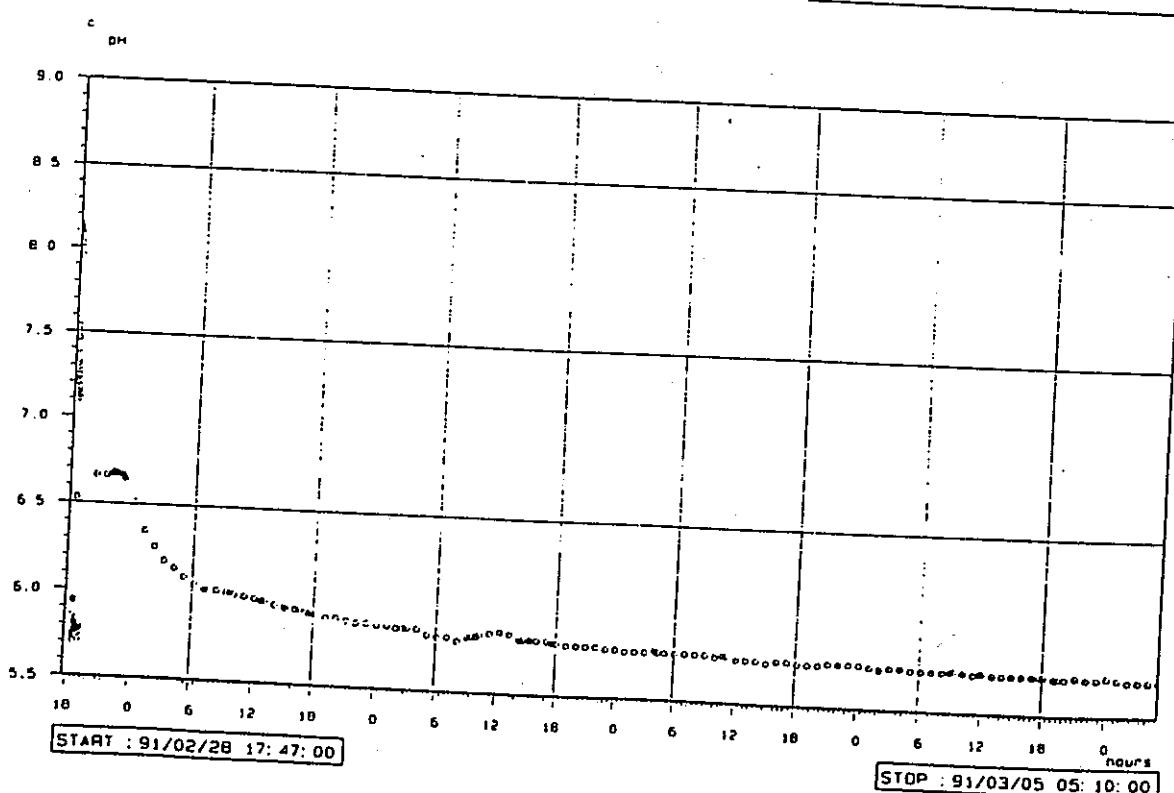


Fig. A10.4 Measured pH in section 540.5–560.5 m.

PLOT TIME : 91/05/15 15: 41: 44  
PLOT FILE : Eh947

CH 947 m

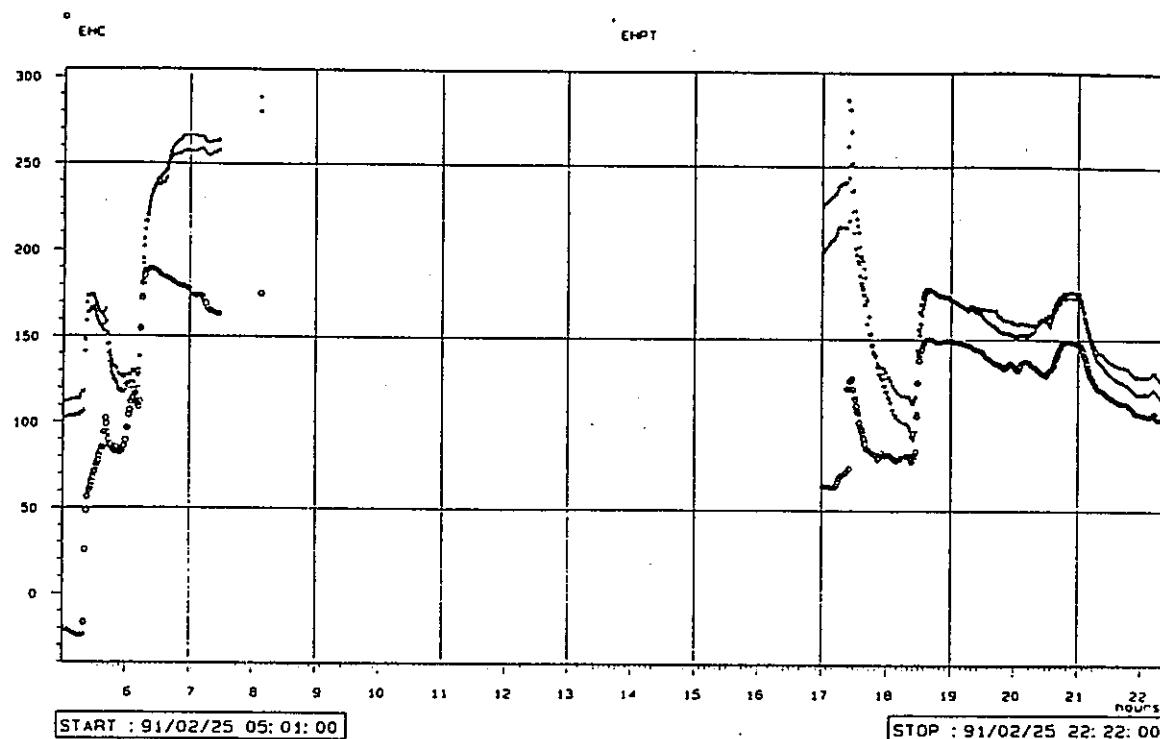


Fig. A10.5 Measured redox potential in section 947–951 m. (EHC=glassy carbon, EHPT=platinum and EHAU=gold electrode)

PLOT TIME : 91/05/15 15: 15: 48  
PLOT FILE : pH947

pH 947 m

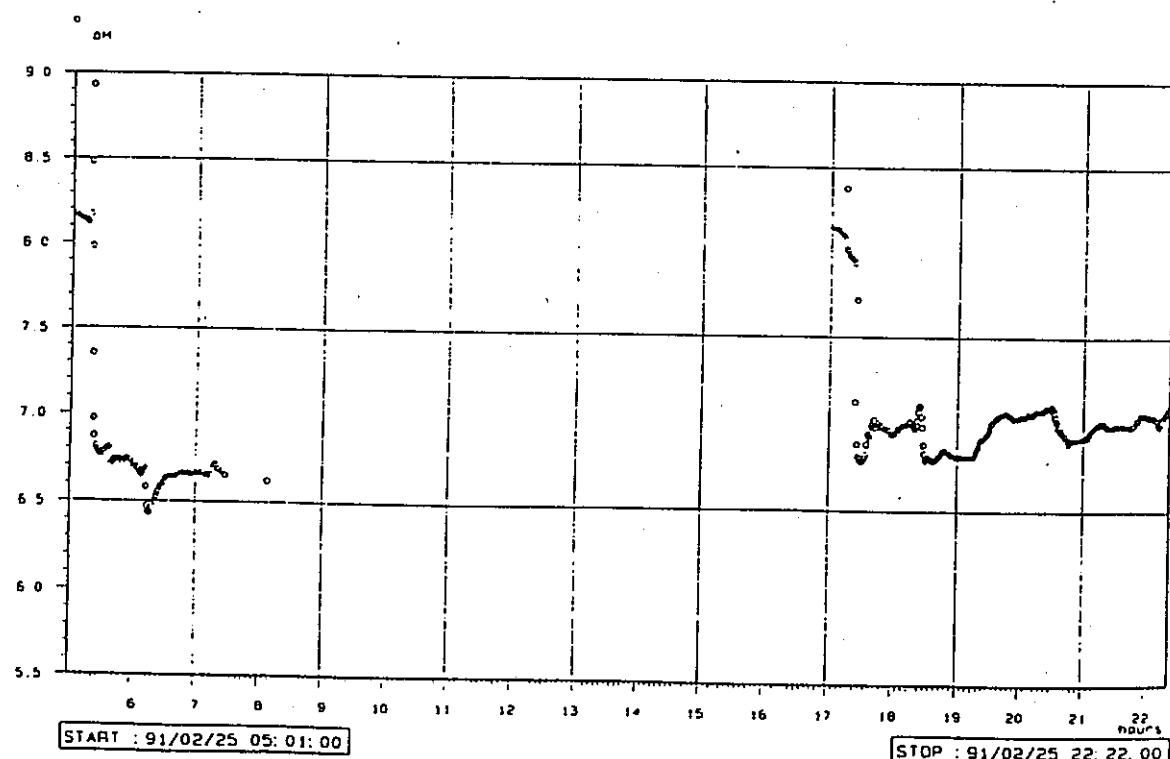


Fig. A10.6 Measured pH in section 947–951 m.

PLOT TIME : 91/05/15 15: 41: 44  
PLOT FILE : EH947

EH 947 a

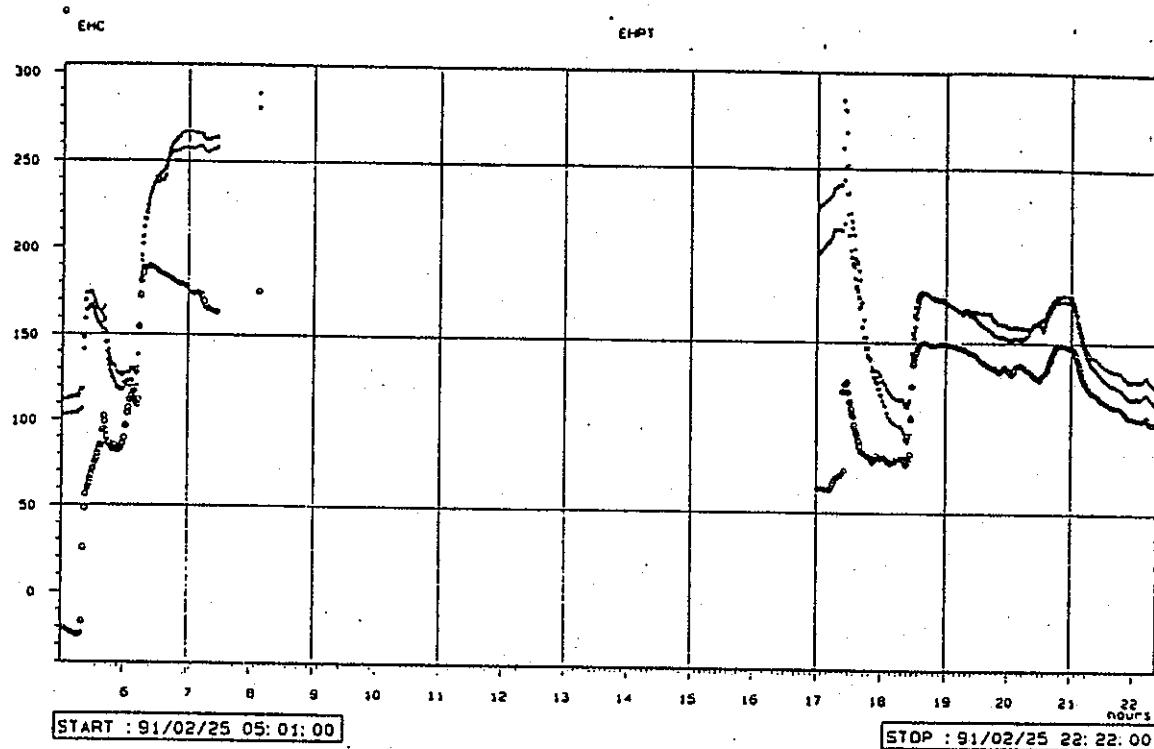


Fig. A10.5 Measured redox potential in section 947-951 m. (EHC=glassy carbon, EHPT=platinum and EHAU=gold electrode)

PLOT TIME : 91/05/15 15: 15: 48  
PLOT FILE : pH947

pH 947 a

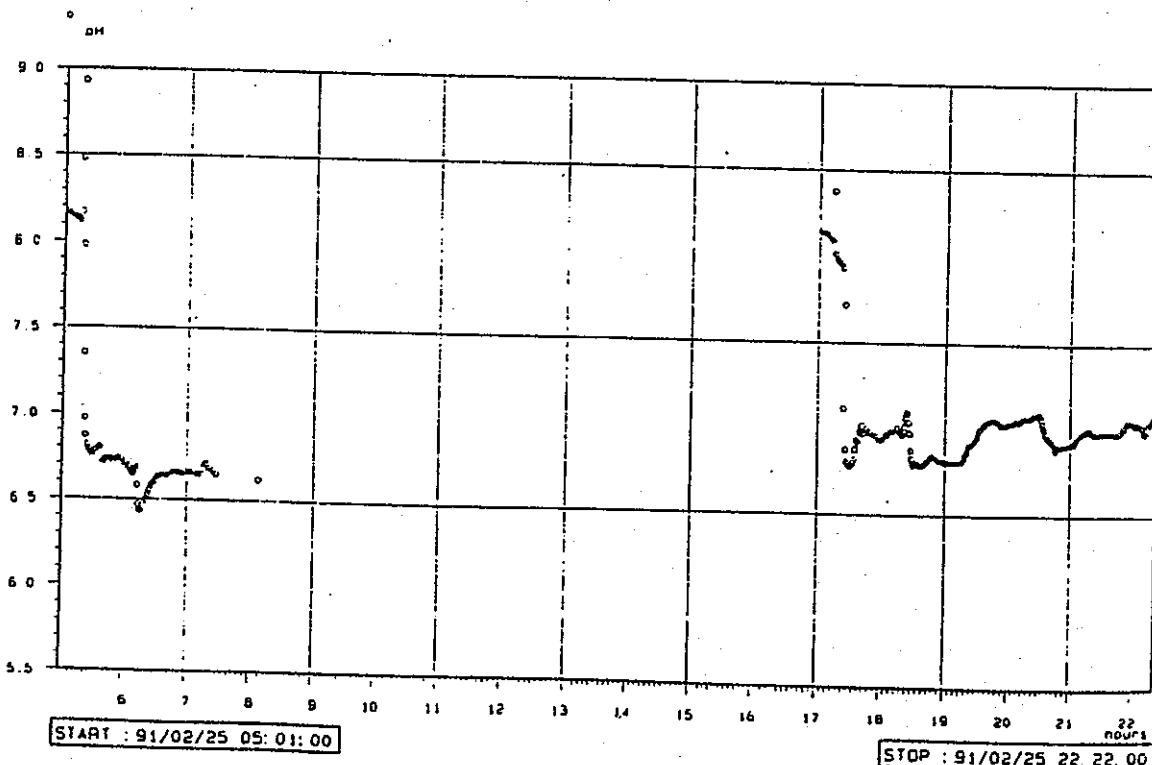


Fig. A10.6 Measured pH in section 947-951 m.

PLOT TIME : 91/05/15 16: 00: 35  
PLOT FILE : En965

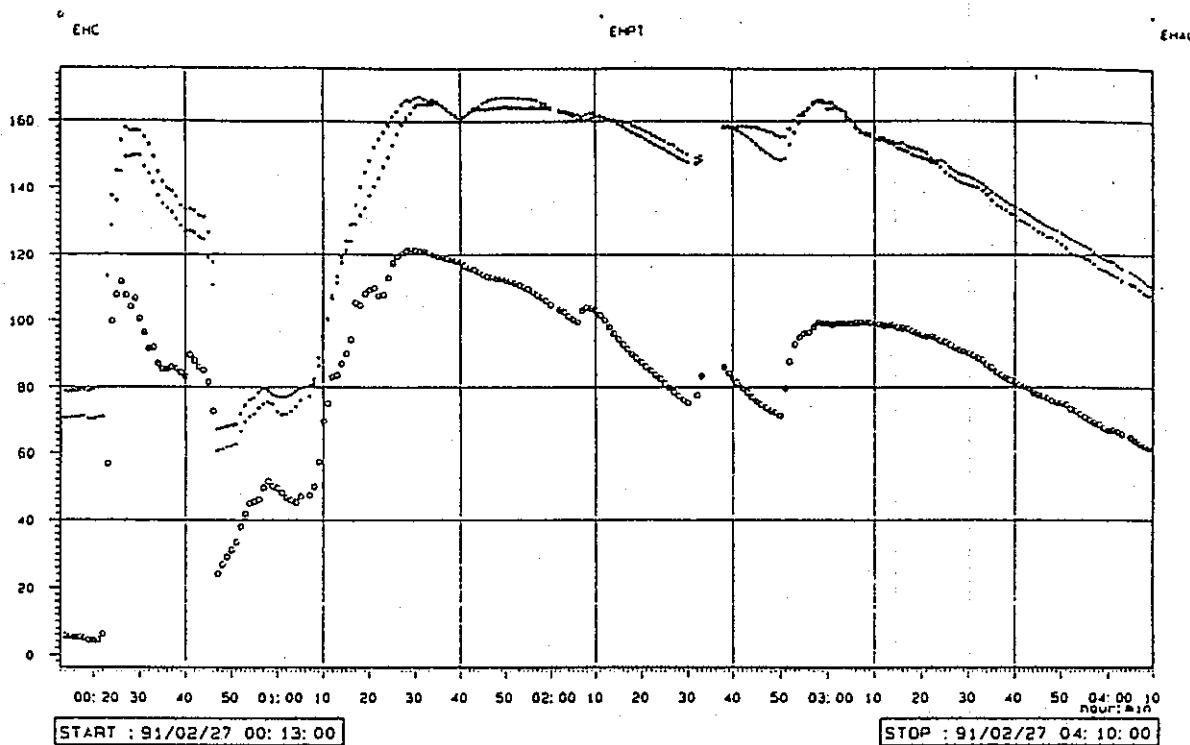


Fig. A10.7 Measured redox potential in section 965–975 m. (EHC=glassy carbon, EHPT=platinum and EHAU=gold electrode)

PLOT TIME : 91/05/15 15: 20: 57  
PLOT FILE : Ph965

pH 965 m

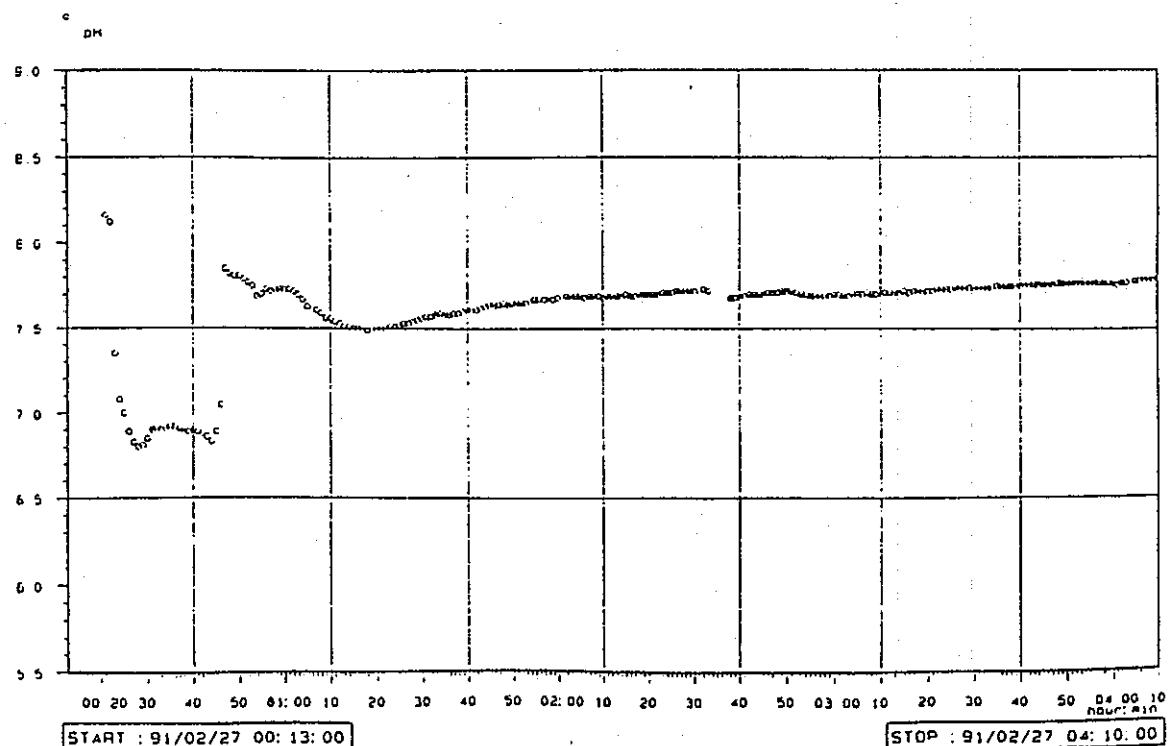


Fig. A10.8 Measured pH in section 965–975 m.