

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA



ISSN 0347-8165

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Institutionerna för:

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings- och avloppsteknik

GRUNDVATTENBILDNING, SAMSPELET JORDLAGER OCH BERGGRUND

Exemplifierat med ett försöksområde i Angered

PER WEDEL

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Institutionerna för:

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings- och avloppsteknik



ISSN 0347-8165

GRUNDVATTENBILDNING, SAMSPelet JORDLAGER
OCH BERGGRUND

Exemplifierat med ett försöksområde i Angered

Adress:
Geologiska institutionen
Chalmers tekniska högskola
Fack
402 20 GÖTEBORG

PER WEDEL

FÖRORD

För att genomföra en så mångfacetterad forskningsuppgift som denna fordras medverkan av ett flertal personer med olika teoretisk bakgrund och erfarenheter.

Under arbetet med att planlägga projektet deltog Lars Nilsson med ansvar för problematiken kring berggrunden. Vid hans bortgång strax efter projektets igångsättning övertogs arbetsuppgifterna av Kai Palmqvist, under medverkan av Jan-Åke Åkesson. Huvuddelen av arbetet kring försöksområdets iordningställande samt insamling av data från fältarbetet jämte redovisning av dessa föll på Leif Cliffordson. Lars Ericsson har medverkat beträffande infiltration i berggrunden och markvattenbalansstudien. Mats Axelsson har genomfört infiltrationsförsök i berggrunden och har redovisat en teoretisk bakgrund till detta under ledning av Göran Ejdeling. Stig Hård genomförde avslutningen av fältarbetet, bearbetning av fältdata och har deltagit i slutredovisningen. Dessutom har Kaj Ahlbom, Urban Fält, Gustaf Lind och Per Lindvall bidragit till uppgiftens lösande. Chester Svensson har varit den länk, med vilken vi kunnat förena STEGA's värdefulla pionjärinsatser i området med denna studie.

Primärredovisningen måste genom denna medverkan av flera forskare med olika specialiteter, vars resultat skulle sammanvägas, vara detaljrik. Jag har därför måst välja mellan att skära bort allt det som senare inte fick direkt betydelse för lösandet av denna forskningsuppgift och att låta värdefull information om regionen och undersökningsmetoder stå kvar. En del av materialet som t ex nederbördsmätningen redovisas här trots att det inte kunde användas på det sätt som vi ursprungligen tänkt oss. Uppgifterna torde dock kunna ha värde för forskare och praktiker verksamma i regionen och redovisas därför ganska utförligt. Verkligheten belagd med fältförsök har heller inte alltid låtit sig fångas in av subtila beskrivningar som t ex teoretiska överväganden och matematisk lösning för strömning

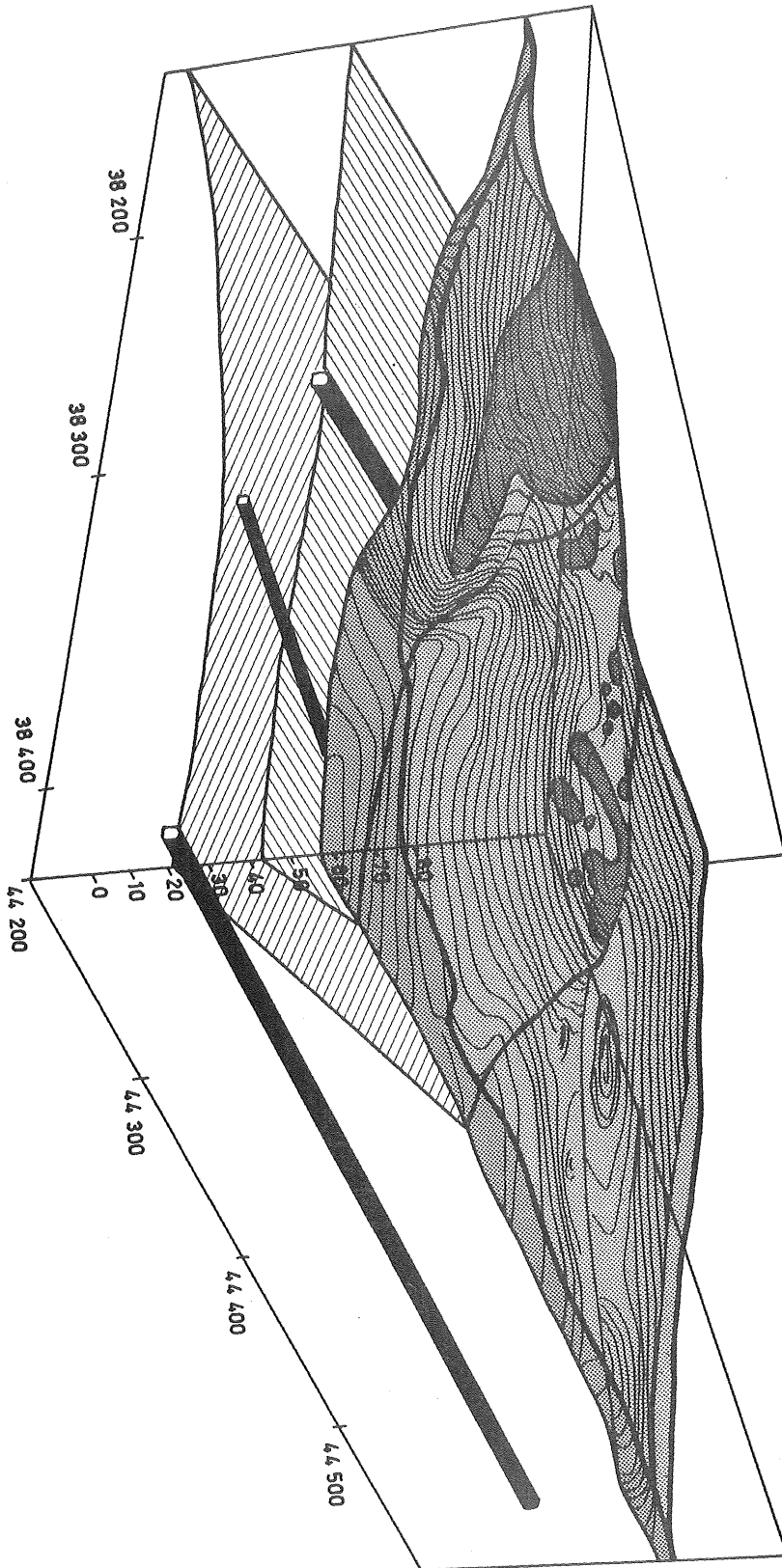
genom sprickor och strömningsförhållanden vid infiltration i en lutande spricka i berggrunden. En del av detta material finns dokumenterat i institutionens publikationsserie B.

Läsaren bör med hjälp av innehållsförteckningen och sammanfattningen kunna finna de kapitel som är av intresse för var och en i denna rapport.

Anslag för forskningsuppgiftens genomförande har erhållits från Statens råd för byggnadsforskning (BFR-projekt 720427-6).

Göteborg i januari 1978

Per Wedel



INNEHÅLL

SAMMANFATTNING		1
1	SYFTE, OMFATTNING OCH FORSKNINGS- OMRÅDETS BELÄGENHET	9
1.1	Syfte och omfattning	9
1.2	Försöksområdets belägenhet samt utbyggnad av tunnlar och bebygg- else	10
2	UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR	15
2.1	Berggrund	15
2.1.1	Detaljkartering	15
2.1.2	Kartering av utförda bergtunnlar	15
2.1.3	Insamling av tunneldrivningsdata	17
2.1.4	Kärnborrning	17
2.1.5	Observationsbrunnar i berg	18
2.2	Jordlager	25
2.2.1	Jordartskartering - Ingenjörsgео- logisk karta	26
2.2.2	Borrning i jordlagren	26
2.2.3	Dokumentation av schakter	27
2.3	Geofysiska undersökningar	28
2.3.1	Refraktionsseismiska mätningar	28
2.3.2	Magnetometriska och geoelektris- ka mätningar	28
2.4	Hydrogeologiska undersökningar	28
2.4.1	Nederbörd	29
2.4.2	Avrinning	29
2.4.3	Infiltrationskapacitet och mark- vatten	29
2.4.4	Undersökningsrör och observations- punkter för grundvatten	30
2.4.5	Sjunknings- och stigningsmätning	30
2.4.6	Loggning av bergborrhål	31
2.4.7	Hydrauliska försök	31
2.4.8	Portrycksmätning	34
2.4.9	Spårämnesförsök	34
2.4.10	Temperaturmätningar	35
2.4.11	Vattenkemiska undersökningar	35

3	BESKRIVNING AV OMRÅDET	37
3.1	Topografi	37
3.2	Berggrund	37
3.3	Tektonik	40
3.3.1	Dominerande svaghetszoner	47
3.4	Jordarter	52
3.4.1	Jordarter i markytan	52
3.4.2	Jordartslagerföljd	55
3.5	Resultat av geofysiska undersökningar	58
3.5.1	Seismiska mätningar	58
3.5.2	Låghastighetszoner i berggrunden	60
3.5.3	Magnetometriska mätningar	60
3.5.4	Övriga geofysiska mätningar	64
4	SAMMANSTÄLLNING AV NEDERBÖRDS- DATA	65
4.1	Mätstationer	65
4.2	Nederbörd i Tolered, Gunnilse och Angered centrum	65
4.3	Jämförelse mellan perioderna 1931-1960 och 1971-1975	68
4.4	Nederbörden i Gunnilse	70
4.5	Nederbördsmätning - Felkällor	71
5	INFILTRATION, AVRINNING OCH PER- KOLATION	75
5.1	Nederbördens infiltration	75
5.2	Avrinnings- och markvattenför- hållanden	78
5.3	Hydrologisk balans	84
5.3.1	Hypotes	84
5.3.2	Teoretisk bakgrund	85
5.3.3	Bestämning av ingående storheter	87
5.3.4	Läckage genom berggrunden	88
6	GRUNDVATTENMÄTNING OCH GRUNDVAT- TENFLUKTUATIONER	91
6.1	Mätning och registrering	91
6.2	Grundvattenfluktuationer	92

6.2.1	Korttidsvariationer	92
6.2.2	Långtidsvariationer	93
6.2.3	Grundvattnets lägsta och högsta nivåer under försöksperioden	95
6.2.4	Jämförelse nederbörd - grundvatt- nets säsongsfuktuationer	98
6.2.5	Jämförelse mellan mätserier för Göteborgs grundvattenkors och grundvattnet i Angered	99
6.3	Delakviferer inom undersöknings- området	100
6.3.1	Observationsrör i jord	100
6.3.2	Observationshål i berg	104
6.4	Grundvattennivåförändringar i sam- band med tunneldrivningen	105
6.4.1	Grundvattenobservationshål i berg	106
6.4.2	Grundvattenobservationsrör i jord	112
7	GRUNDVATTENNIVÅKARTOR	115
7.1	Grundvattennivåkarta för jordlag- ren	115
7.2	Nivåkarta för berggrundvatten	117
7.3	Jämförelse mellan grundvattnets nivå i jord och berg	119
8	BERGGRUNDENS OCH JORDLAGRENS PER- MEABILITET	123
8.1	Berggrundens permeabilitet	123
8.2	Matematisk lösning för strömning genom sprickor i berggrunden	124
8.3	Strömningsförhållanden vid infilt- ration i en lutande spricka	125
8.4	Genomförda försök	125
8.4.1	Infiltrationsförsök i bergborr- hål B2	127
8.4.2	Infiltrationsförsök i bergborr- hål B9	129
8.4.3	Infiltrationsförsök i bergborr- hål B4	130
8.5	Överslagsberäkningar av trans- missivitet och permeabilitet	131

8.5.1	Överslagsberäkning för bergborrhål B9 - B4	
8.5.2	Överslagsberäkning av transmissivitet vid bergborrhål B9 enligt Theis metod	132
8.5.3	Överslagsberäkning av transmissivitet vid bergborrhål B4 enligt Theis metod	133
8.5.4	Överslagsberäkning av transmissivitet vid bergborrhål B2 enligt Theis metod	133
8.5.5	Överslagsberäkning av permeabiliteten vid bergborrhål B9 enligt Wenzells metod	134
8.5.6	Slutsatser ur överslagsberäkningar av transmissivitet i berggrunden	135
8.6	Jordlagrens permeabilitet	136
LITTERATUR		139
FÖRTECKNING ÖVER UTGIVNA MEDDELANDEN		143

SAMMANFATTNING

Den genomförda forskningsuppgiften har givit kunskaper såväl om de transportvägar i berg och jord, genom vilka grundvattnet dräneras som beträffande arbetsmetoder för att bestämma detta. Fältarbetet har koncentrerats till ett försöksområde i Angered, Göteborg, där omfattande undersökningar genomförts dels för utbyggnad av ett centrum i den växande stadsdelen, dels inom ramen för olika forskningsuppgifter.

Det undersökta området är med avseende på de hydrogeologiska förhållanden mycket heterogent till sin karaktär. Detta gäller såväl jordartslagerföljden som berggrunden. Det har därför varit nödvändigt att noga analysera de geologiska förutsättningarna för grundvattenbildning och grundvattnets rörelse i berggrund och jordlager.

Berggrunden genomsätts av sprickor av olika karaktär, vilka kunnat skiljas från varandra genom en analys av de tektoniska förhållandena. Det har också varit möjligt att i viss mån belägga berggrundens hydrauliska egenskaper inom olika berggrundsavsnitt och att koppla data för vattenomsättningen med den kvalitativa analysen av berggrunden.

Berggrunden inom undersökningsområdet har vid flera tillfällen utsatts för tryckpåkänningar orsakade av spänningstillstånd i jordskorpan. Genom dessa tryckpåkänningar har den strukturbild, som berggrunden uppvisar i dag, utbildats. Deformationskrafterna har verkat under två principiellt olika betingelser, dels under en första fas då berggrunden reagerat plastiskt, dels under en andra, då den varit i stort sett rigid.

Berggrunden framstår nu som ett system av skollor, som taktegelformigt täcker varandra. Skollorna är åtskilda av västligt stupande överskjutningszoner med riktningar

kring N 10° W och N 20° E. Tre överskjutningszoner genom området är de dominerande svaghetszoner och dräneringskanaler, som bestämmer den hydrogeologiska situationen. Genom brantstående sprickzoner är skollorna i sin tur uppdelade i mindre blockenheter.

Brantstående sprickor och sprickzoner förekommer i riktningarna N 40° W, N 70° W och N 45° E.

Sprickor och zoner inom området uppvisar en varierande grad av öppenhet. Det föreligger därvid inte endast skillnader mellan olika typer av sprickor. Även längs en och samma spricka eller sprickzon kan öppna avsnitt förekomma omväxlande med täta avsnitt.

Större delen av markytan inom försöksområdet utgörs av lera. Lerlagrets mäktighet är växlande. I de norra och centrala delarna av området dominerar berg i dagen. Invid detta förekommer här och var silt. I leran finns talrika skikt av silt vilkas tjocklek varierar från 1 mm, till några cm. Lerlagret ligger dels direkt på den underliggande berggrunden, dels finns i stora delar av området friktionsmaterial mellan lerlagret och berggrunden. Detta friktionsmaterial utgörs dels av morän, dels av mo och sand. Mäktigheten av friktionsmaterialet varierar mellan 0 och 1,8 m.

Jordlagrens hydrauliska egenskaper är också mycket varierande. Markytan utgörs till stor del av lera, där infiltrationskapaciteten därför förväntades vara låg. Genomförda undersökningar visar dock att avrinningen från området är mycket liten. Nettonederbörden infiltreras till största delen. Den fortsatta perkolationen nedåt underlättas i hög grad av att grundvattenytan är av-sänkt, i begränsade delar så kraftigt, att hela lagerföljden i vissa fall anses som omättad. Nederbördens nedträngning underlättas såväl av torksprickor i de övre delarna av jordlagret, som förekomsten av permeabla skikt inlagrade i hela lerbädden.

De understa delarna av jordartslagerföljden är av speciell betydelse, eftersom de står i kontakt med berggrundsytan. Det har kunnat visas att dessa utgörs av vitt skilda jordarter från lerlager med mycket liten permeabilitet ($K < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) över silt- och moränbäddar till bäddar med mycket hög permeabilitet (K av storleksordningen $1 \cdot 10^{-4}$ m/s), som därför måste domineras av grova jordartsfraktioner.

Balansberäkningar, som genomförts inom ett 2,1 ha stort avrinningsområde inom västra delen av försöksområdet, visar för berggrundens del att permeabiliteten i medeltal bör vara större än $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Grundvattennivåernas fluktuationer har följts under mer än tre års tid och olika delakviferer kan skiljas ut inom området. Grundvattnets utströmning i jordlager och berggrund visar också att överskjutningszonerna är dominerande för strömningsmönstret men att även andra faktorer måste tas med i bedömningen.

De "kvantitativa bedömningar", som gjorts av berggrundens transmissivitet och permeabilitet, är mycket grova. Värdet av dylika bestämningar kan givetvis ifrågasättas utifrån en strikt vetenskaplig ståndpunkt. För det aktuella fallet är det emellertid möjligt att jämföra dels olika berggrundsavsnitt inbördes, dels berggrundens permeabilitet med jordarternas.

Sprickmönstret och de hydrauliska egenskaperna hos begränsade berggrundsavsnitt har också karakteriserats och beräknats. Genomförda beräkningar, med reservation för att de teoretiska förutsättningarna ej alltid uppfyllts, visar att permeabiliteten i liggandet till en överskjutningszon är av storleksordningen $1 \cdot 10^{-7}$ - $7 \cdot 10^{-7}$ m/s. Kombinationen av brantstående och flack spricka i berggrunden kan öka permeabiliteten till storleksordningen $1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

En överskjutningszon, som befinner sig över den nuvarande avsänkta grundvattenytan, har vid infiltrationsförsök visat sig ha en mycket hög permeabilitet. Denna slutsats kommer man till såväl efter kvalitativa övervägande som enligt den genomförda beräkningen, vilken gav en permeabilitet större än $1 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Hängandet till överskjutningszonen utgörs i varje fall delvis av sprickfattigt och därför ganska tätt berg, vilket framgår av erfarenheter från borrhningen jämte senare genomförda test. Tyvärr finns det inget värde på dess permeabilitet. Den bedöms dock vara klart lägre än genomsnittsvärdet för det västra avrinningsområdet, dvs permeabiliteten är mindre än $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Överslagsberäkningarna visar således att berggrundens permeabilitet är mycket varierande från mindre än $1 \cdot 10^{-8}$ m/s till mer än $7 \cdot 10^{-3}$ m/s inom ett område av storleksordningen 5 ha.

Permeabiliteten för berggrunden uppvisar således minst samma spännvidd, som gäller för jordlagren inom området. Avgörande för den stora avsänkningen av grundvattennivån, som tunnarna medfört, torde emellertid kombinationen permeabla jordarter och permeabla berggrundsavsnitt vara.

Överskjutningszonerna är av sådan uthållighet och når sådant djup, att de blir bestämmande för grundvattenförhållanden inom större terrängavsnitt. Överskjutningszonerna bestämmer dock ej alltid grundvattenbildningen i jordlagren. Genom utförda infiltrationsförsök i både berggrund och jordlager har dränering av jordakviferen till berggrunden och tunnlar konstaterats inom områdets nordöstra del. Dräneringen har där skett via brantstående och flackt liggande sprickplan.

Brantstående sprickor och ev ytsprickigt berg ger berggrunden en permeabilitet, som i medeltal kan jämföras

med moränen och siltlagren i området. Grundvattensänkningen kan därför nå djupare i berggrundens svackor än till nivån för utgåendet av överskjutningszonerna. Permeabiliteten är också tillräcklig för att tillåta hela årsnederbörden att passera efter den utjämning av flödet, som passagen genom jordlagren medför. Det grundvattenmagasin, som finns i friktionsjordarterna avlagrade i berggrundens svackor, visar däremot att de djupaste delarna av berggrundsytan i en del fall kan vara förhållandevis tät.

Undersökningen visar klart, att omfattande och detaljerade undersökningar är nödvändiga för att prognosticera en befarad grundvattensänkning. Jämförelsen med en i dag under mer omfattande förinjektering driven tunnel är svår att göra. I ingetdera fall torde dock grundvattensänkningen kunna karakteriseras med en jämbred zon längs tunneln.

De resultat, som erhållits vid undersökningen av zoner och allmänna berggrundsförhållanden inom Angeredsområdet, är representativa för stora delar av västra Sverige. Det gäller främst de områden där mer eller mindre förskiffrade bergartsled verkat styrande vid senare deformationer i jordskorpan. Längs förskiffringen anlagda störningszoner har därvid fått egenskaper betingade av de ursprungliga berggrundsförhållandena. Av speciellt intresse är därvid att studera de avsnitt längs en störningszon med regional utsträckning, där zonen är utbildad i bergartsled med olika egenskaper. Den avsänkingsbild, som undersökts i anslutning till den östra av de undersökta överskjutningszonerna kan exempelvis till väsentlig del ha fått sin utformning på så att zonen inom detta avsnitt är utbildad i ögongnejs. Såväl söder som norr därom är zonen däremot belägen i mer skiffrika bergartsled, vilket normalt innebär försämrad vattenföring.

Vattenföringen i olika typer av sprickor och zoner är inte enbart beroende av bergart och genes. Sålunda kan vattenföringen även i markanta störningszoner vara liten. Orsaken är därvid att förekommande sprickor till stora delar är lerfyllda. Inom Angeredsområdet har detta framför allt visats gälla skjuvsprickor och skjuvzoner med västnordvästlig strykning. Trots detta gäller inom stora delar av området att framför allt sprickor och zoner i denna riktning är tillräckligt öppna för att påverka grundvattenförhållandena.

Vid analysen av grundvattennivåförändringar i samband med tunneldrivningen konstaterades att brantstående sprickor, som står i förbindelse med överskjutningszonerna, har betydelse för grundvattenavsänkning inom stora delar av området. Grundvattenavsänkning har belagts i borrhål, som skär två överskjutningszoner, när gemensamhetstunnelns front drevs in i berggrundspartier med brantstående sprickor och sprickzoner.

Seismiska undersökningar har genomförts dels inför projekteringen av tunnlarna, dels inom ramen för undervisningen vid Geologiska institutionen, CTH/GU. Vi konstaterade där att endast överskjutningszonen är klart detekterbar med den seismiska refraktionsmetoden, medan det är osäkert, om övriga svaghetszoner går att upptäcka i berggrunden. En jämförelse mellan resultaten visar emellertid, att i liggandet till den östra av de undersökta överskjutningszonerna är hastigheten för den seismiska vågen något nedsatt över större delen av detta delområde. Genomföra infiltrationsförsök visar också såväl utgående från kvalitativa bedömningskriterier som utifrån transmissivitetsbestämningar, att berggrunden här i icke ringa grad är genomsatta av sprickor.

En del av de försöksresultat, som vi inte kunnat bearbeta inom ramen för detta projekt hoppas vi kunna återkomma till längre fram.

Erfarenheter från försöksområdet kan förväntas vara giltiga i första hand inom områden med samma eller likartade förhållanden som i Angeredsområdet. Sådana områden återfinns i första hand i Västsverige. Likartade grundvattenförhållanden uppträder inom andra delar av Sverige, där strukturstyrda zoner utgör en dominerande del av det tektoniska mönstret.

1 SYFTE, OMFATTNING OCH FORSKNINGSSOMRÅDETS BELÄGENHET

1.1 Syfte och omfattning

Avsikten med forskningsprojektet har varit att beskriva de faktorer som bestämmer grundvattnets bildning, strömning och dess rörelse mellan jord- och berggrund.

Då denna forskningsuppgift påbörjades rådde ännu på många håll den uppfattningen att man längs en tunnel skulle kunna bestämma en zon, med en viss bredd, där sänkningen av grundvattentrycket förväntas till en angiven nivå. Tunnels djup under markytan förväntades vara den avgörande faktorn för influensområdets utbredning.

Den nu genomföra forskningsuppgiften har närmat sig problemkomplexet från utgångspunkten att det genom analys av berggrundens sprickmönster och jordartsfördelning skall bli möjligt att göra en mindre generaliserad bedömning. Erfarenheten har ju också visat, att det på vissa ställen finns brunnar i jordlagren över en tunnel, som ej påverkas mätbart, medan stora sättningsskador, sannolikt orsakade av grundvattensänkning, konstaterats på flera hundra meters avstånd från samma del av tunnelsträckningen. En analys av ovannämnda slag, med avseende på vattenförande sprickor i berggrunden och jordartslagerföljd, förklarar emellertid en sådan paradox.

I dag tillåts ingen okontrollerad grundvattensänkning vid drivning av tunnlar. I tätbebyggda regioner har förinjektering i någon form blivit regel, läckvattenmängder och grundvattentrycknivåer övervakas noga. För att kunna upprätta ett ändamålsenligt observationsnät för mätning av grundvatten i jordlager och berggrund fordras dock att berggrundens sprickmönster och jordartsfördelningen är känd. Även för att kunna prognosticera grundvattensituationen, i de fall då injekteringen ej är tillfyllest, måste sådana analyser genomföras.

Den allmänna målsättningen har belysts genom undersökningar i Angeredsområdet, Göteborg, figur 1.

Förändringen av grundvattenförhållanden speciellt tunnarnas inverkan hade då redan varit föremål för STEGA-gruppens intresse som 1969 byggde ut observationsnätet med sikte på att utreda detta. Initiativet till upprättande av referensområdet kring Göteborg togs också av STEGA-gruppen. (STEGA, 1974). Härigenom har förhållandena dokumenterats för en längre tidsrymd än vad den aktuella forskningsuppgiften omfattar, vilket i hög grad underlättat arbetet.

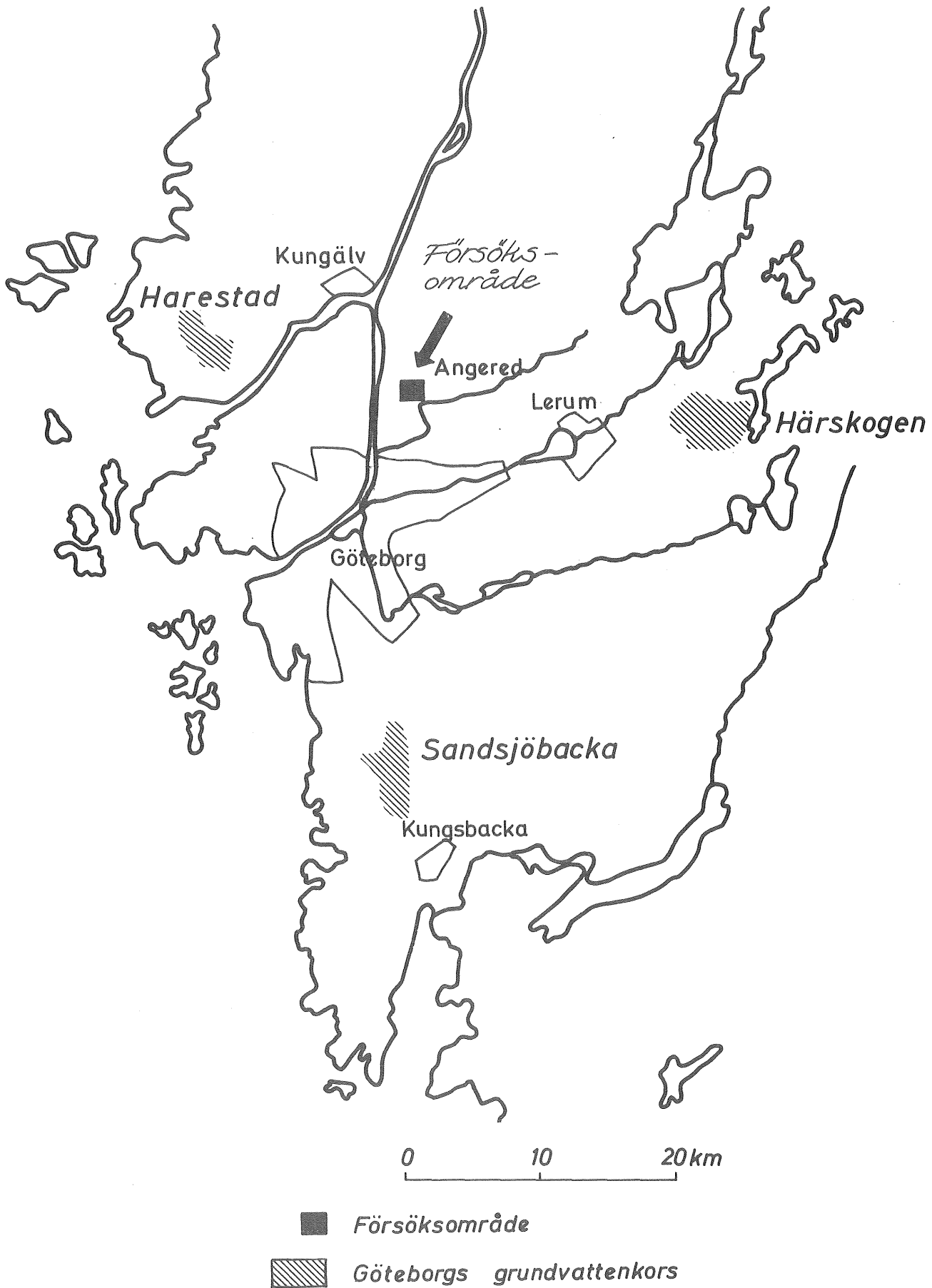
Förutsättningarna för grundvattenströmning mellan jordlagren och berggrunden är svåra att mäta med dagens instrument och mätmetoder. Jordlagrens struktur och lagringsförhållande samt berggrundens med vattengenomträngliga zoners karaktär, tektoniska särdrag och hydrauliska egenskaper, har härvid ägnats stor uppmärksamhet.

De enskilda faktorer, som bestämmer grundvattnets bildning och strömning i marken och grunden, har beräknats var för sig. Vattenbalansen för det undersökta området i sin helhet har det dock ej varit möjligt att belägga trots stora ansträngningar. Däremot har ett försök att visa grundvattenbalansen för ett delområde genomförts.

Under arbetets gång har stora erfarenheter av olika undersökningsmetoder och deras tillförlitlighet vunnits. Det har dock endast delvis varit möjligt att utvärdera materialet inom ramen för det nu genomförda projektet. Redogörelser för erfarenheter under de olika delundersökningarna som t ex borrhingsarbetet finns arkiverade.

1.2 Försöksområdets belägenhet samt utbyggnad av tunnlar och bebyggelse

Det undersökta området är beläget i Angered nordost om Göteborg. År 1965 påbörjades exploateringen av Angered för huvudsakligen bostadsbebyggelse. Den ursprungligen



Figur 1. Översiktskarta

planerade stora byggnadsvolymer medförde en omfattande utbyggnad av servicefunktioner såsom vatten, avlopp, el, tele etc. De rådande grundförhållandena i detta berg- och lerområde försvårade avsevärt en ledningsdragning på konventionellt sätt. Från kommunens sida undersöktes därför på ett tidigt stadium möjligheterna att förlägga huvudledningarna i bergtunnlar.

Genom det undersökta området har tre bergtunnlar utförts:

Dagvattentunneln, även kallad Lärjeåttunneln, med en area av 20 m², är dels avsedd för avledning av Lärjeåns högvattenföring, dels för dagvatten från Rannebergen, Angereds centrala delar och södra Gårdsten. Denna tunnel är belägen ungefär vid områdets södra begränsning. Spillvattentunneln, med en area av ca 5 m², utgör en del av Göteborgsregionens Ryaverksaktiebolags huvudtunnelsystem. Förutom Angered-Bergum avses detta betjäna ytterligare delar av Göteborgsregionen. Denna tunnel går strax söder om försöksområdets centrala del. Gemensamhetstunneln, med en area av 18-21 m², där ett flertal olika ledningar förlagts i samma tunnel, går genom försöksområdets norra del. (STEGA, 1974). Bergtunnlarnas lägen framgår av figur 2 och 3.

Projekteringen av bergtunnlarna har utförts av Sydsvenska Ingenjörbyrå AB (SIB). De geologisk-tektoniska undersökningarna i samband med projekteringen var uppdelade i två etapper. I den första etappen bedrevs undersökningarna översiktligt med syfte att med utgångspunkt från stadsplanemässiga synpunkter, tekniska krav, berggrundsförhållanden etc bestämma optimala tunnelsträckningar. Denna översiktliga berggrundsundersökning omfattande granskning av tidigare utförda grundundersökningar, flygbilds- och kartanalys, fältkartering och utförande av seismiska mätningar. Då man efter nämnda premisser kunde fastlägga ett mera definitivt förslag till sträckningar utfördes i en andra etapp detaljerade undersökningar. Under detta skede av undersökningen utfördes kompletterande fältkarteringar,

analys av geologiska och tektoniska förhållanden samt bergkontrollborrningar i de föreslagna tunnelsträckningarna.

I samband med utsprängningen av bergtunnlarna karterades dessa med avseende på bergarter, tektonik, lervittring och inläckande grundvatten. Även denna kartering har utförts av Sydsvenska Ingenjörbyrå AB.

Den ursprungligen för ca 90 000 invånare planerade stadsdelen omprojekterades under de första åren av 1970-talet till att rymma ca 25 000 invånare. Sommaren 1975 påbörjades schaktningsarbeten för Angereds centrum. Dessa schakter kom att omfatta södra delen av försöksområdet. Således erhöles en möjlighet att inspektera jordlagerföljden ned till berggrunden inom stora ytor. Dessutom frilades berggrunden och bortsprängdes delvis.

Jordmassorna röjdes av med schaktvagnar, varför observationsrören måste borttagas innan arbetet påbörjades. Det var därför inte möjligt att med entreprenörens hjälp dissekera jordlagren omkring våra försöks- och observationsrör. Schakten dokumenterades emellertid omsorgsfullt efter färdigställandet, varvid värdefull information om jord och berggrund erhöles.

Flera av observationsrören i såväl berg som jord, speciellt i den norra delen av försöksområdet, finns alltjämt kvar och kan komma till användning vid en eventuell uppföljning av byggprocessens fortsatta inverkan på området.

2 UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

De tidigare nämnda undersökningarna i samband med projekt-eringen bildar ett viktigt basmaterial till det aktuella forskningsprojektet. Till detta kommer det av STEGA utökade nätet för grundvattenobservationer. För att genomföra forskningsprojektet har dock kompletterande undersökningar utförts på en rad punkter. Dessutom har omfattande och mångfacetterade undersökningar genomförts i det specialstuderade området som denna rapport behandlar. Nedan följer en beskrivning av de kompletterande undersökningarna samt ges syftet med de olika momenten.

2.1 Berggrund

De tidigare nämnda undersökningarna i samband med projekteringen bildar ett viktigt basmaterial till det aktuella forskningsprojektet. För att genomföra detta har dock kompletterande undersökningar utförts på en rad punkter. Nedan följer en beskrivning av de kompletterande undersökningarna samt ges syftet med de olika momenten.

2.1.1 Detaljkartering

En detaljerad geologisk-tektonisk kartering har utförts. Härvid karterades berggrunden med avseende på sammansättning, omvandlingstendenser och sammanhållning inom olika avsnitt. Samtidigt utfördes observationer rörande berggrundens deformationsmönster med avsikt att urskilja ostörda, "täta" bergblock och öppna, vattenförande sprick- eller krosszoner. Karteringen utfördes på kartblad i skala 1:1 000, figur 2, visar en översiktskarta i skala 1: 2 000 och figur 5 moment 3.2 en bergartskarta.

2.1.2 Kartering av utförda bergtunnlar

Vid den ursprungliga tunnelkarteringen gjordes ingen differentierad kartering av olika tektoniska element. För att få en mer detaljerad bild av olika zoners intensitet, frekvenser av sprickor, sprickors och zoners strykning och

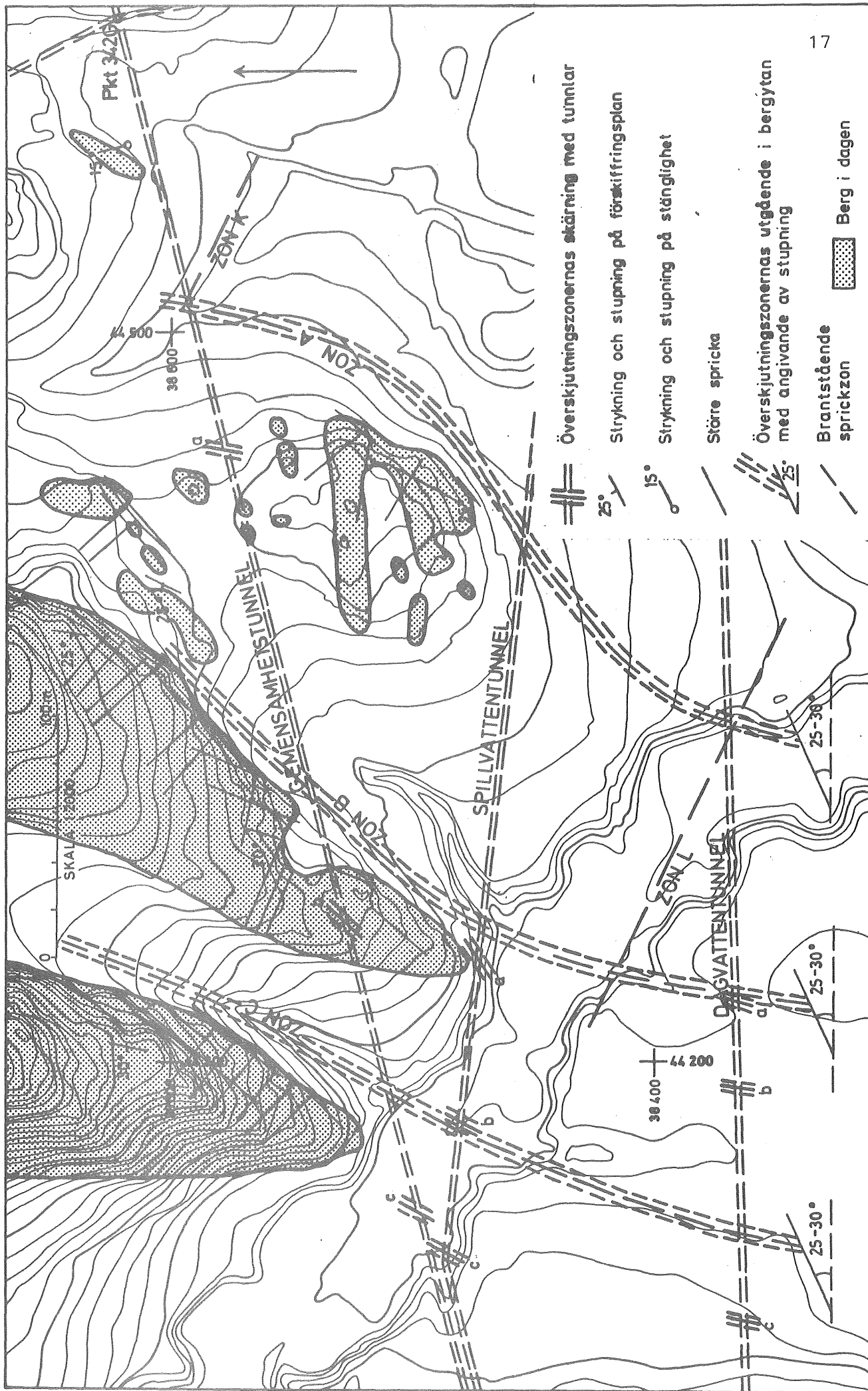
stupning etc gjordes därför inom ramen för detta projekt en mer detaljerad och differentierad kartering av tunnlarna inom undersökningsområdet. Utförda sprutbetongförstärkningar omöjliggjorde dock kartering inom vissa avsnitt. Särskilt markant var detta i gemensamhetstunneln. För att få en så god bild som möjligt även inom dessa avsnitt studerades de inklädda tunnelväggarna och taket med avseende på ojämnheter i tunnelprofil, blockstorlek, sprickriktningar etc. Dessa observationer jämfördes och sammanställdes sedan med den ursprungliga tunnelkarteringen. I samband med den kompletterande karteringen gjordes även observationer på i tunnlarna inläckande vatten, typ av sprickor och zoner som var vattenförande, omfattning etc. Läckagepunkterna markerades i tunnlarna för att observationer på ett eventuellt ökat läckage skulle kunna göras i samband med infiltrationsförsök.

2.1.3 Insamling av tunneldrivningsdata

Data från tunneldrivningen såsom indrift, injektering och förstärkning har samlats in för att ge en så total bild av berggrundsförhållandena som möjligt. Indrifter har plottats mot avsänkningar i observationsrör och observationsbrunnar i berg, vilket givit information om de stora grundvattenförande zonerna i berggrunden. Uppgifter om utförd injektering har kompletterat observationerna om inläckningen i tunnlarna och på så sätt har även detta givit information om vattenförande zoner. Vidare har sammanställningar av förstärkningsdata givit en bild av de olika zonernas beskaffenhet.

2.1.4 Kärnborrhning

Två kärnborrhål har utförts inom undersökningsområdet. Läget på kärnborrhålen framgår av figur 3. Kärnborrhålen har utförts för att kontrollera bergkvaliteten inom två tektoniska zoner. Nedan följer en kort beskrivning av respektive kärnborrhål.



Figur 2. Översiktskarta tektonik

SONDERINGAR

- Enkel sondering
- Dynamisk sondering (fallhejare)
- Sondring till förmodad fast botten
- Sondring till förmodat berg (s k bergsvar erhållet)
- Bergsondering minst 3 m under förmodad bergyta
- D:o samt undersökning av borrhakax
- Kärnborrning

PROVTAGNING

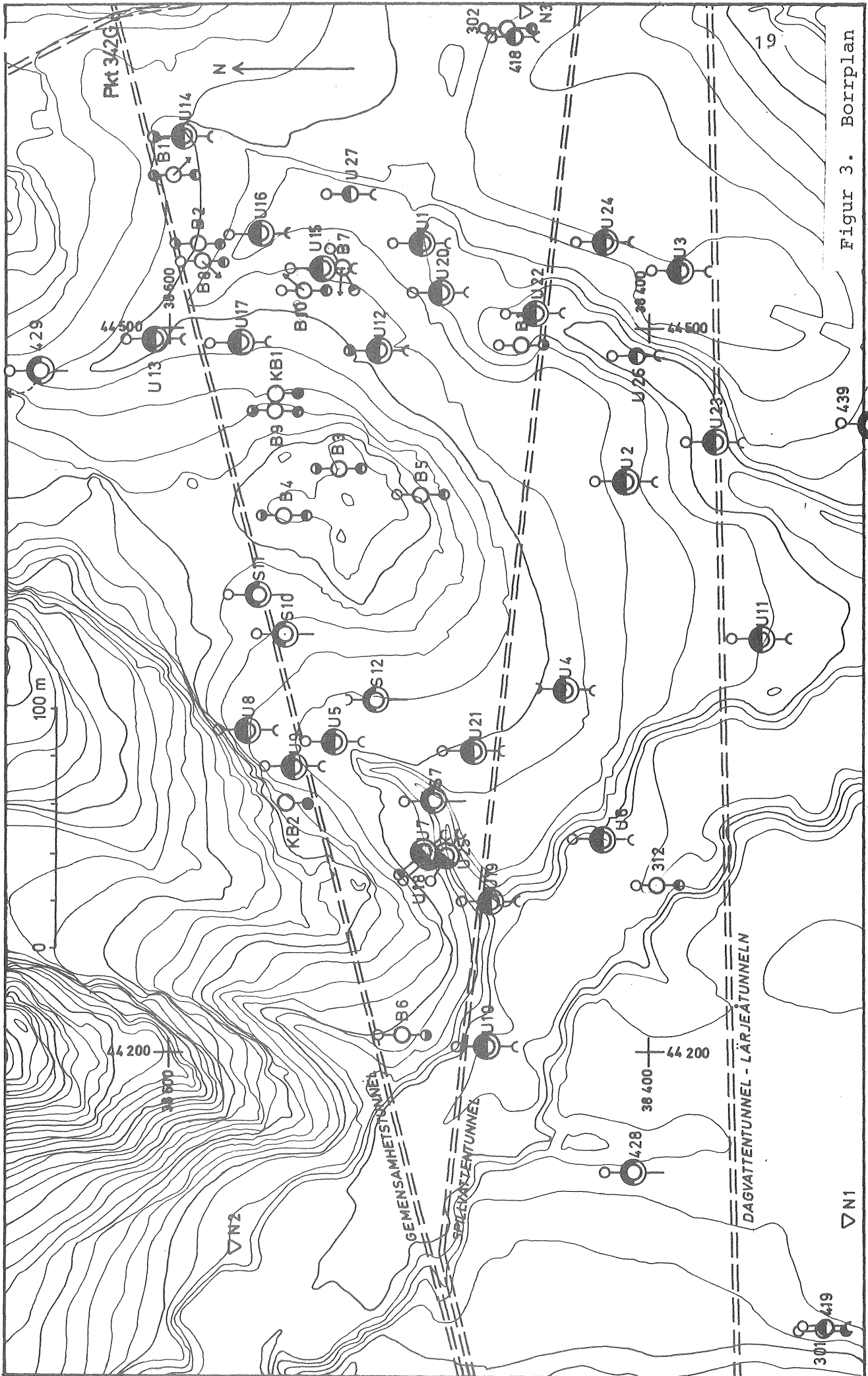
- Störda prover tagna genom skruvborrning och genom uppspolning i undersökningsrör

HYDROLOGISKA BESTÄMNINGAR

- Grundvattennivå bestämd vid korttidsobservation i öppet grundvattenrör
- Grundvattennivå bestämd vid långtidsobservation i öppet grundvattenrör
- Infiltrationsförsök
- ▽ Nederbörds-mätare (KTH)

BORRHÅLSBETECKNINGAR

- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| B1 - B11 | Bergborrhål BFR |
| KB1 - KB2 | Kärnborrhål BFR (Ø 22 mm) |
| 301, 302, 312 | Bergborrhål STEGA |
| U1 - U27 | Undersökningsrör BFR |
| S7, S10 - S12 | Observationsrör BFR |
| 418, 419, 428
429, 439 | Observationsrör STEGA |



Figur 3. Borrplan

Kärnborrhål nr 1 \emptyset 22 mm utfördes vertikalt. Avsikten med borrhålet var att bestämma läge och karaktär på en förmodad överskjutningszon. Enligt beräkningarna skulle denna zon nås ungefär 26-28 m under markytan.

Den genomborrade berggrunden består huvudsakligen av gnejs med granodioritisk sammansättning. Bergarten genomsetts ställvis av sliror. Inlagrade längs gnejsens förskiffringsplan finns mindre avsnitt av pegmatit och amfibolit.

Enskilda sprickor genomslår berggrunden ned till 27,2 m under hällens yta, där den förmodade överskjutningszonen nåddes. Efter ca en halv meter uppvisade kärnan åter "bra bergbeskaffenhet". Borrningen avbröts 29,36 m under hällens yta p g a spolvattenförlust.

Kärnborrhål nr 2 \emptyset 22 mm, som lutar 60° från horisontplanet mot söder, utfördes för att bestämma bergbeskaffenheten inom en brantstående skjuvzon. Iakttagelser vid ytkarteringen av de blottade partierna i anslutning till borrhålet antydde en mindre skjuvzon. Vid besiktningen av gemensamhets-tunneln (betonginkladd) konstaterades vattenläckage längs brantstående sprickplan, som bedömdes tillhöra zonen.

Bergarten utgöres av gnejs med granodioritisk sammansättning. Ställvis genomsettes gnejsen av sliror. Inlagrade längs gnejsens förskiffringsplan finns mindre avsnitt av pegmatit och amfibolit.

Kärnan visar, att berggrunden inom skjuvzonen uppbyggs av sprickrika partier åtskilda av mer hela berggrundsavsnitt. Borrningen avbröts efter 25,46 m.

2.1.5 Observationsbrunnar i berg

Sammanlagt 11 observationsbrunnar i berg har utförts med sänkbormaskin \emptyset 105 mm inom området. Läget på observationsbrunnarna framgår av borrhplan, figur 3. Målsättningen

vid placerandet av observationsbrunnarna har varit att dessa skall träffa olika tektoniska zoner och på så sätt ge information för förståelsen av grundvattenkommunikationen inom området. Nedan följer en kort beskrivning av respektive observationsbrunn. Betr längdmätning och belägenhet av punkt 342 se figur 30, sid 109.

B 1 Borrhålet har placerats i en brantstående sprickzon som med WNW-lig strykning korsar spillvattentunneln vid längdmätning 0/800. Uppkrossningen är liten i zonen, men då inläckning förekom vid tunneldrivningen och läckage även uppträdde efter utförda injekteringar, bedömdes zonen kunna ha en viss inverkan på omkringliggande områden.

Sulan på den söder om borrhålet belägna spillvattentunneln är belägen på ca + 23,5 m medan borrhålet når ned till + 23 m.

B 2 Borrhålet är placerat i en brantstående sprickzon som skär gemensamhetstunneln ca 100 m väster om punkt 342. Trots att uppkrossningen i zonen är relativt liten förekom flera vattenläckage vid tunnelkarteringen och injektering har utförts.

Borrhålet gjordes 25 m djupt. Efter renblåsning uppmättes en relativt långsam stigning av vattennivån. Sulan på gemensamhetstunneln ligger i närheten av hålet på nivån ungefär + 42 m. Borrhålsbotten motsvarar nivån + 50 m.

B 3 Borrhålet placerades så att det skulle träffa en västligt stupande överskjutningszon ungefär på nivån 30-35 m under markytan. Inom detta avsnitt förekom också flera större slag i berget. Borrhålet passerar sålunda den "hela" bergskivan över zonen, det s k hängandet, går igenom krosszonen och ner i det "hela" berget under zonen, det s k liggandet.

Gemensamhetstunneln norr om borrhålet har sin botten på ungefär + 40 m. Borrhålet går ned till + 38,5 m.

- B 4 Borrhålet placerades så att det ungefär på nivå 35 m skulle skära de stora ostligt stupande slag som iakttagits i gemensamhetstunneln omkring sektion 0/800. Flera avsnitt med sprickigt berg registrerades vid borrhningen.

Stignings- och sjunkningsmätningar på nivå 36 m visade emellertid både långsam stigning och sjunkning. Borrhålet fördjupades därför till 46 m för att nå den västligt stupade krosszon som korsats av borrhål 3 och korsar tunneln ungefär i sektion 0/800. Vid förnyade stignings- och sjunkningsmätningar gick hålet ej att fylla upp.

Gemensamhetstunnelns botten ligger ungefär på nivå + 40 m, medan borrhålsbotten motsvarar nivå + 35,5 m.

- B 5 Borrhålet är placerat i samma bergplint som borrhål 3. Avsikten med hålet var att undersöka om den krosszon, som genomborrats i borrhålen 3 och 4, kunde återfinnas i bergplintens södra del.

Borrhålet utfördes till en början till ett djup av 30 m. Ingen stigning eller sjunkning kunde emellertid konstateras, varför hålet fördjupades till nivå 48 m under markytan. Här kunde en mindre stigning och sjunkning konstateras.

Den närliggande spillvattentunneln har i sektion 0/800 sulan ungefär nivå + 23,5 m. Borrhålsbotten ligger på ca 34 m.

- B 6 Borrhålet placerades så att det skulle skära den överskjutningszon, som korsar gemensamhetstunneln i sektion 0/495 och spillvattentunneln i sektion 0/460. Borrhålet beräknades träffa zonen på ca 45-50 m djup. Vid djupet 45 m registrerades trasigt berg, vilket efter fortsatt borrhning avlöstes av helt berg.

Den norr om hålet belägna gemensamhetstunneln har i botten nivån + 35 m medan den söder om hålet belägna spillvattentunneln har sulan på nivån + 23 m. Borrhålet når ned till nivån + 20 m.

- B 7 Avsikten med borrhålet var att utröna berggrundens grundvattendrainerande effekt kring rör U 15. Borrhålet placerades så att det skulle skära den förmodade förlängningen av en brantstående sprickzon, som med nordöstlig strykning korsar gemensamhetstunneln i längdmätningen 0/925. Sprickzonen antydes seismiskt söder om gemensamhetstunneln genom avsnitt med berghastigheter kring 4500 m/s. För att få optimalt utbyte av borrhålet gradades det 20° från vertikalplanet i NW-lig riktning.

Resultatet från borrhningen visar på ett "helt" berg med endast några få enstaka större sprickor markerade. Borrhålet utfördes till ett djup av 42,8 m (motsvaras av nivån + 33,59 m). Vid renblåsning respektive vattenpåfyllning av borrhålet kunde ingen stigning eller sjunkning konstateras.

- B 8 Avsikten med borrhålet var att skära den brantstående spickzonen, som med NW-lig strykning skär gemensamhetstunneln ca 120

m väster om punkt 342. Söder om gemensamhets-tunneln antyds sprickor seismiskt genom avsnitt med berghastighet kring 4500 m/s samt topografiskt genom en NW-SE-lig bergsänka. Borrhålet är gradat 20° från vertikalplanet i SW-lig riktning.

Resultatet från borrhningen visar genomgående relativt låga sjunkhastigheter. En zon med sönderkrossat berg noterades på nivån ca 32-33,5 m under markytan. Borrhålet avslutades efter 42-48 m borrhning. Det motsvaras av nivå + 34,43 m. Sulan på den närliggande gemensamhetstunneln ligger på nivån ungefär + 42 m. Efter renblåsning av hålet konstaterades en mindre stigning. Borrhålet visade vid vattenpåfyllning ca 4 m sjunkning på 30 minuter.

- B 9 Avsikten med borrhålet var att få ytterligare en mätpunkt i den västligt stupande överskjutningszonen. Borrhålet placerades intill kärnborrhål 1 och utfördes vertikalt.

Borrsjunksdiagrammet visar, att en markant svaghetszon korsas av borrhålet ungefär på djupet 26,5-27,5 m under markytan. Detta resultat överensstämmer väl med resultatet från kärnborrhningen. Borrhålet avslutades efter 40,4 m borrhning, vilket motsvarar nivå + 38,08 m. Vid sjunkningsmätningen gick hålet ej att fylla upp över svaghetszonen omkring 27 m. Stigningsmätning är ej utförd.

- B 10 Då B7 ej visade någon grundvattendrainerande effekt i berggrunden kring rör U15 utfördes ytterligare ett borrhål i närheten av rör U15. Avsikten med detta var att korsa en brantstående sprickzon med strykningen unge-

fär N 70^o W. För att nå optimalt resultat gradades borrhålet 20^o från vertikalplanet i NNW-lig riktning in mot denna sprickzon.

Borrsjunktionsdiagrammet visar flera avsnitt med sönderkrossat berg ca 21-21,5, 32-32,5, 36,5-38,5, 39,5-40,5, 41,5-45 m under markytan. Borrhålet avslutades 45 m under markytan, vilket ungefär motsvarar nivån + 32,13 m. Vid renblåsning respektive vattenpåfyllning av borrhålet kunde en mindre stigning och sjunkning konstateras. (2 m/30 min).

- B 11 Avsikten med detta borrhål var att söder om gemensamhetstunneln skära den brantstående sprickzon, som med NE-lig strykning korsar gemensamhetstunneln i längdmätningen 0/925. Norr och söder om gemensamhetstunneln indikerades zonen topografiskt genom en bergsänka i NE-SV-lig riktning samt i viss mån seismiskt genom berghastigheter mellan 4200 och 4500 m/s. Borrhålet gradades 20^o från vertikalplanet i SE-lig riktning.

Resultatet från borrhningen visar flera mindre avsnitt med sönderkrossat berg, ca 16,5-17 m, 22-23 m och 25,5-26 m under markytan. Borrhningen avslutades 43,4 m under markytan, motsvarar nivån + 34,7 m. Vid vattenpåfyllning av borrhålet erhöles en snabb sjunkning (ca 10 m/30 min). Stigningsmätning gick ej att utföra p g a att mät donet fastnade i en spricka.

2.2 Jordlager

Jordarterna i området var vid forskningsprojektets start belagda genom dels de undersökningar som utförts inför projekteringen av Angered, dels de grundvattenobservationsnät som upprättats av STEGA. Sålunda var jordartsfördelningen i ytan och lagerföljden känd i grova drag. Under den nu genomförda forskningsuppgiften företogs ett

stort antal borrhningar varigenom kunskapen växte ut ytterligare till en detaljerad bild av jordartsförhållandena.

2.2.1 Jordartskartering - Ingenjörsgelogisk karta

Den jordartskarta som arbetats fram redan under STEGA's regi har efter en mindre revision legat till grund för en omarbetad jordartskarta. Jordartsfördelningen i markytan inom den intensivstuderade delen av försöksområdet presenteras på den ingenjörsgelogiska kartan, figur 14 i moment 3.4.2. På denna karta återfinns även uppgifter om jordlagrens mäktighet och förekomsten av friktionsmaterial under lerlagret. Friktionsmaterial under lerlagret redovisas dock endast under förutsättning att det är mer än 0,5 m mäktigt. Tunnare friktionslager under leran har därför större utbredning än vad som framgår av kartan.

2.2.2 Borrhning i jordlagren

Inom undersökningsområdet har under tiden november 1972-november 1974 utförts 27 undersökningsrör, 12 skruvborrningar samt ca 50 slagsonderingar. Borrhålens lägen framgår av figur 3. Slagsonderingarnas lägen är ej redovisade i plan men ligger till grund för bergnivå- och ingenjörsgelogisk karta, figurerna 4 och 14. Numren anger borrhningarnas kronologiska ordning. Undersökningsrören har drivits i tre omgångar. Rör U1 - U7 utfördes i november 1972. För bedömning av var dessa rör skulle placeras användes dels äldre borrhningsresultat, dels företogs skruvborrning S1 - S6 och 5 slagsonderingar. Skruvborrningarna S7 - S12 utfördes under januari 1973.

Med vägledning av grundvattennivåerna från de 7 första undersökningsrören och ca 25 nya slagsonderingar utfördes under februari och mars 1973 rören U8 - U14. Utgående från nivåmätningar i de första 14 undersökningsrören kunde en principiell grundvattennivåbild för området upprättas.

Rörnätet förtätades under september 1973 med rören U15 - U24 för att utröna oklara punkter i den förra nivå bilden och i någon mån utöka försöksområdet. Inför denna rördrivning utfördes ca 15 slagsonderingar för jordsdjupsbestämning. Under 1974 drevs rören U25 - U27 för att förtäta rörnätet i några intressanta punkter.

2.2.3 Dokumentation av schakter

Genom att byggandet av Angered centrum i bantad form påbörjades sommaren 1976, har också stora schakter tagits upp inom södra delen av undersökningsområdet. Det blev därigenom möjligt att kontrollera de observationer av jordartslagerföljden, som gjorts tidigare, och i viss mån att kontrollera undersökningsmetodernas tillförlitlighet. Dessa stora schakter möjliggjorde dessutom en säker dokumentation i efterhand av de förhållanden, som är viktiga för den hydrogeologiska utvärderingen.

Dokumentationen genomfördes aug -76 och resulterade i ett stort antal fotografier och uppritning av lagerföljder samt kartor, som visar var observationerna gjordes jämte belägenheten av provtagningsplatser. Endast en mindre del av detta material kan redovisas här. Den återstående delen finns arkiverad på Geologiska institutionen, CTH. Strukturer framträder visserligen bäst på putsad vägg som fått torka men ingen tid fanns för arbete i två steg som härigenom blir följderna. Under fältarbetet måste i stor utsträckning de "råa" väggarna utnyttjas. De stora ytorna i schakterna måste givetvis också fotograferas i det skick som grävmaskiner och schaktvagnar lämnat efter sig. Gränsen mot underliggande berg studerades emellertid noga vid dokumentationstillfället, varvid ev mellanlagrande friktionsmaterial grävdes fram. Eftersom torksprickor genomskatte schaktväggarna hade välputsade observationsväggar erfordrat avsevärda arbetsinsatser. På grund av tidsbrist och med risk att åtgärder på arbetsplatsen skul-

le kunna omintetgöra våra ansatser bedömdes det ej rimligt att i större utsträckning för hand schakta fram och iordningsställa alla de ytor som utvaldes för detaljstudium. De ytor vi arbetat med vid detaljstudiet var emellertid ändamålsenliga för lagerföljdsbeskrivningar och provtagningar genom att de enskilda lagren framträdde väl i den uttorkade leran.

2.3 Geofysiska undersökningar

2.3.1 Refraktionsseismiska mätningar

Refraktionsseismisk mätning har använts för att bestämma jorddjup och lokalisera svaghetszoner i berggrunden. En mindre del av undersökningsområdet är mycket väl täckt med seismiska profiler. I kombination med borrhingsresultatet ger detta en god bild av bergtopografin samt anvisningar om bergbeskaffenheten.

2.3.2 Magnetometriska och geoelektriska mätningar

Inom ramen för undervisningen i geofysik vid Geologiska institutionen, CTH/GU, har magnetometriska totalfältsmätningar genomförts. Susceptibilitetsmätning har företagits i gemensamhetstunneln, på berghällar och borrhäror från kärnborrhål nr 1. Geoelektriska resistivitetsmätningar med både likströms och växelströmselement har också prövats.

2.4 Hydrogeologiska undersökningar

Grundvattenbildningen i ett område styrs av nederbörd, magasinering, avdunstning och avrinning. Att bestämma storleken av dessa tre parametrar med tillräcklig noggrannhet är ofta var för sig en stor uppgift. Detta bedömdes ej få ta en för stor del av resurserna i anspråk för en forskningsuppgift med målsättning att belägga grundvattenströmningen mellan jord- och berggrund. Nedan följer en kortfattad redogörelse för vilka hydrogeologiska delundersökningar som genomförts.

2.4.1 Nederbörd

Nederbörden har noga registrerats alltifrån projektets start. Det bedömdes nämligen nödvändigt att känna nederbördstillfällena och nederbördsmängder vid analys av grundvattennivåförändringens orsaker. Utöver de nederbördsstationer SMHI och Göteborgs kommun har i omgivningarna installerades vid projektets start tre stycken ackumulerande nederbördsmätare för mätning av nederbörd inom området. Avdunstningens storlek har ej mätts.

2.4.2 Avrinning

Avrinningen från området kunde endast bestämmas för en mindre del. Denna del torde dock i detta avseende väl representera hela försöksområdet. Avrinningen i tunnlar kunde, trots att en mätstation upprättats redan vid byggandet av gemensamhetstunneln och trots stora ansträngningar under hela försökstiden, ej bestämmas på ett tillfredsställande sätt.

2.4.3 Infiltrationskapacitet och markvatten

Infiltrationskapaciteten har bestäms med dubbelringsinfiltrimeter på 10 försöksplatser. Markvattenhaltens förändring inom området har bestämts med såväl radiometrisk metod som med konventionell provtagning.

Markvattenförhållandena i området har belagts dels genom konventionell provtagning och vattenhaltsanalys, dels genom mätning med radiometrisk djupsond i grundvattenobservationsrörens övre del. Markvattenprofilens uppvätning och uttorkning har härigenom i viss mån kunnat följas. Provtagningen har omfattat den översta metern av lagerföljden. Därunder finns endast värden från mätning med radiometrisk djupsond. Årstidsbundna variationer har härvid konstaterats ned till mer än fem meters djup i sådana lägen där grundvattnet är avsänkt.

2.4.4 Undersökningsrör och observationspunkter för grundvatten

Jordlagren under de ytliga marklagren har undersökts genom borrhning. Eftersom i flera fall avsikten samtidigt varit att upprätta observationspunkter för mätning av grundvattennivån används sömlösa stålrör SMS 327 51-60. Rören, som levererades i 1,5 m längder, är gängade och försedda med utvändig muff. Silröret har öppen nedre änd och är i underkant försett med muff. Silrörets mantelyta är på den nedre metern uppborrad med 2,5 mm hål c/c 2 cm. Rören har neddrivits med hejarbock. Efter varje neddriven rörlängd har rören spolats ur och spolvattenförlusterna har uppmätts. På grund av att spolvattenövertrycket ökas med borrhningsdjupet över grundvattensytan är inte spolvattenförlusterna direkt jämförbara. Någon korrektion för tryckhöjden har ej gjorts men spolvattenförlusterna ger ändå viss information om vattengenomsläpplighet i genomborrade lager. Spolvattenförlusterna i lera har varierat från 0 till 38 l/min. Medianvärdet för vattenförlusten på de genomsläppliga nivåerna var 0,3 l/min när hänsyn ej tagits till varierande tryckhöjd. Det rätta värdet bör alltså ligga lägre. I friktionsmateriallagret närmast berget varierade spolvattenförlusten mellan 0 och 50 l/min.

2.4.5 Sjunknings- och stigningsmätning

Mätning av vattnets sjunkning och stigning i bergborrhål genomfördes i samband med bergborrningen av borrhningsentreprenören samt i kärnborrhål och vid drivning av undersökningsrören i jord av oss själva. Metoden ger endast kvalitativa uppgifter eftersom vattenförlusten bestämts genom att röret först fyllts till överkanten och därefter avsänkningen per minut uppmätts. Vattnets tryckhöjd har varierat från mätning till mätning, och vattenförlusterna är inte direkt jämförbara. Värdefulla uppgifter om sprickor resp permeabla skikt förekomst erhålls emellertid.

För bergborrhålen (diameter 104-111 mm) uppritas stignings- och sjunkningsdiagram för nivåerna 15 resp 30 m under markytan samt vid borrhningens avslutande i varje borrhål.

2.4.6 Loggning av bergborrhål

Loggning av bergborrhål 1-6 utfördes under medverkan från Institutionen för kulturteknik, KTH. Med loggens hjälp konstaterades förekomst av sprickor, borrhålets diameter samt under grundvattenytan självpotentialen och resistiviteten. Sistnämnda mätning antyder förekomsten av stagnant vatten respektive strömning av grundvatten genom sprickor. Dessutom konstaterades vid loggningen att det på grund av åverkan ej var möjligt att nå botten i samtliga hål. Resultatet av loggningen har arbetats in i redogörelsen för de olika borrhålen.

2.4.7 Hydrauliska försök

Efter färdigställandet av de första observationspunkterna för grundvattenmätning genomfördes en rad hydrauliska undersökningar i de olika borrhålen. De grundvattenförhållanden som inledningsvis konstaterades inom området styrde sedan utbyggnaden av ett förtätat observationsnät. Parallellt med de senare etapperna av borrhningsarbetet genomfördes en rad hydrauliska undersökningar.

Slugtest har prövats i såväl berg- som jordborrhål. Metoden (se Cooper 1967 och Papadopulus 1973) ger en möjlighet att bestämma transmissiviteten i en sluten akvifer.

Metoden innefattar ett momentant tillförande eller bortledande av en känd vattenvolym från en brunn. Normalt kan endast en liten vattenvolym tillsättas momentant i en brunn. Av detta skäl är verkningarna av den tillförda vattenmängden vanligen inte märkbara i akviferen bort-

om brunnens omedelbara närhet. Därför görs vattennivåmätningarna endast i den testade brunnen. Allvarliga fel kan erhållas om brunnen inte helt penetrerar akviferen eller har för kort filterlängd.

I stället för tillförandet av en vattenslug har i vår försöksserie ett stort sänklod av känd volym plötsligt släppts ned under vattenytan. Fördelen med detta är att starttidpunkten blir mera väldefinierad än när vatten hålls i brunnen och helt eller delvis rinner ned utefter brunnsväggen. Vattennivåmätningarna måste snabbt påbörjas efter jämviktsstörningen i brunnen.

Testen utgör ett enkelt sätt att bestämma punkttransmissiviteter. I vissa typer av grundvattenundersökningar kan ett stort antal sådana punkttransmissiviteter ofta vara av större värde än ett enstaka värde på transmissivitet erhållet vid ett långvarigt pumpförsök. Eftersom transmissivitetskoefficienten, bestämd vid testen, vanligen hänför sig till materialet nära in- till brunnen, kan okritiskt användande av resultaten leda till felaktiga slutsatser. Trots detta gör testmetodens enkelhet förfarandet försvarbart under förutsättning att de antaganden som teorin bygger på väsentligen är uppfyllda och testens begränsningar till fullo inses.

Tillrinningen till testbrunnar i lågpermeabla formationer är ofta för låg för att tillåta provpumpningar av även relativt kort varaktighet, och slugtesten blir en av de få tillgängliga fälttestmetoderna. Resultat återfinns i Tabell 7 moment 8.6.

För att närmare studera utvalda sektioner av bergborrhålen med avseende på eventuella sprickors hydrauliska egenskaper har försök med tätningmanschetter genomförts. Arbetet med sådana är ganska tidsödande men kan ge detaljerad information. I första hand är denna kvalitativ, men under vissa förutsättningar kan även kvan-

titativ information beträffande vattenomsättningen erhållas för skilda delar av den genomborrade bergmassan. Mycket viktigt är att manschetterna kunnat användas för kontroll av om foderrören införts tätt i berget eller om det läcker in vatten från jordlagren.

Ovanför grundvattenytan kan manschetten flyttas successivt nedåt i borrhålet, varvid nivån för ev inläckande vatten och därmed sprickor lokaliserar. Även där sidoberget är torrt kan genom en på samma sätt genomförd successiv förflyttning av manschetten nedåt, vattengenomsläppliga sprickor konstateras. Detta utförs genom att tillsätta en bestämd mängd vatten över manschetten. På varje nivå som skall undersökas åstadkommes härigenom ett vattenövertryck i borrhålet, varigenom vatten kan infiltreras i permeabla sprickor.

Under grundvattenytan kan en avspärrad del av borrhålet undersökas på samma sätt genom slugtest, se ovan. Härvid erhålls upplysning om dränering av borrhålet jämte permeabiliteten för undersökta delar av detsamma. Detta kräver dock att berget inte har alltför låg genomsläpplighet.

Svårigheterna med manschettförsöken är många. Framför allt är arbetet tidskrävande. Det är också svårt att avgöra, om manschetten tätar ordentligt mot borrhålsidan. Beträffande utvärderingen av resultatet måste man också minnas, att även om man vet storleken på vattenövertrycket ovanför en spricka, så vet man inget om totala trycket, eftersom man inte känner sprickans ursprungliga vattentrycknivå. Det händer t ex att en jämviktsnivå ställer in sig ovanför en spricka på grund av vattenövertryck i sprickan.

Det är svårt att jämföra mätningar, utförda vid olika tillfällen, eftersom trycknivån i sprickor respektive vattenytans jämviktsläge varierar mellan olika mättillfällen.

Vid jämförelse av olika mätningar är det givetvis viktigt, att man jämför olika försök med samma vattenöverhöjning. Ett sätt att i viss mån kompensera för olika vattenöverhöjningar är att ange överhöjningen vid tiden t såsom h_t/h_0 , där h_0 är överhöjningen vid tiden 0. Detta kräver dock att dränaget enbart är beroende av vattentryckhöjden, vilket inte är helt sant, eftersom friktionsförluster, turbulens, m m kan uppstå.

Injektionsförsök eller djupinfiltration har genomförts i såväl berggrund som jordlager. Avsikten med detta har varit att bestämma samma geohydrologiska parametrar som vid en provpumpning. Anledningen till att detta förfarande valdes är att grundvattennivån i såväl jord som berggrund var så kraftigt avsänkt att en provpumpning skulle medfört avsevärda praktiska problem. I flera fall skulle en ytterligare sänkning av nivån i observationspunkterna ha torrlagt dessa helt. Resultaten av dessa försök redovisas dels nedan, dels inom ramen för forskningsprojektet "Djupinfiltration" (Carlsson, 1978).

2.4.8 Portrycksmätning

Portrycksmätningar har företagits i området dels för att följa upp säsongsvariationer, dels i samband med djupinfiltrationsförsök (se Carlsson, 1978). Av de piezometrar (svängande sträng), som sattes ut för att följa de långsiktiga förändringarna, gav dock på grund av den kraftiga grundvattenavsänkningen endast en av dem värden som kunnat utnyttjas.

2.4.9 Spårämnesförsök

Spårämnesförsök för att belägga vattenomsättningen i bergborrhål och kommunikationsvägar för grundvatten i berggrunden genomfördes med koksalt. Ursprungligen planerades ett isotopförsök, men på grund av befärad inläckning i gemensamhetstunneln måste detta uppges. Resultatet av saltförsöken är ej helt invändningsfria men kan utnyttjas som ett komple-

ment till övriga undersökningar. Metoden har utnyttjats dels kvalitativt för att spåra kommunikationsvägar mellan bergborrhål, dels kvantitativt för att beräkna vattenomsättningen i enskilda bergborrhål. Fördelningen av salt i vattenpelaren i borrhålet antyder också förekomsten av grundvattenförande sprickor i berggrunden. Dessa saltförsök redovisas dock ej för sig. Resultaten har emellertid i viss mån varit vägledande för de fortsatta undersökningarna av bergborrhålen.

2.4.10 Temperaturmätningar

Mätning av grundvattentemperaturen i bergborrhål har genomförts med noggrannheten en hundradels grad Celsius för att försöka spåra inläckande vatten med, från omgivningen, avvikande temperatur. Indirekt skulle därmed sprickor kunna lokaliseras. En trappstegsformad temperaturprofil kan ofta tyda på vertikala strömningar mellan sprickor med olika tryckhöjd. (G Jacks, 1970). En tanke har även varit att utläckande vatten skulle kunna ge upphov till temperaturskillnader och skiktningar i borrhålen.

Temperaturmätningar har även utförts i samband med en del infiltrationsförsök. Avsikten har därvid varit att lokalisera de hydrauliska förbindelserna mellan borrhålen. Resultaten, som i viss mån underlättat undersökningarna av borrhålen och deras hydrauliska egenskaper, har arbetats in i redogörelsen och presenteras ej fristående.

2.4.11 Vattenkemiska undersökningar

Kemisk undersökning av vatten från bergborrhålen har företagits. Resultaten från dels två olika provtillfällen, dels de olika borrhålen inbördes kunde dock ej utnyttjas vid studiet av grundvattenomsättningen.

3 BESKRIVNING AV OMRÅDET

3.1 Topografi

Undersökningsområdet karakteriseras av långsträckta bergryggar med ungefär nord-sydlig utsträckning. Bergryggarna uppvisar vanligen en asymmetrisk form med flackt stupande västsida och brant östsida. Mellan bergryggarna förekommer dalgångar, vars relativt jämna överyta lutar svagt mot söder. Dalgångarna förenar sig i områdets södra del till ett sammanhängande jordfyllt bäcken. Berggrundstopografin framgår av bergnivåkartan, figur 4.

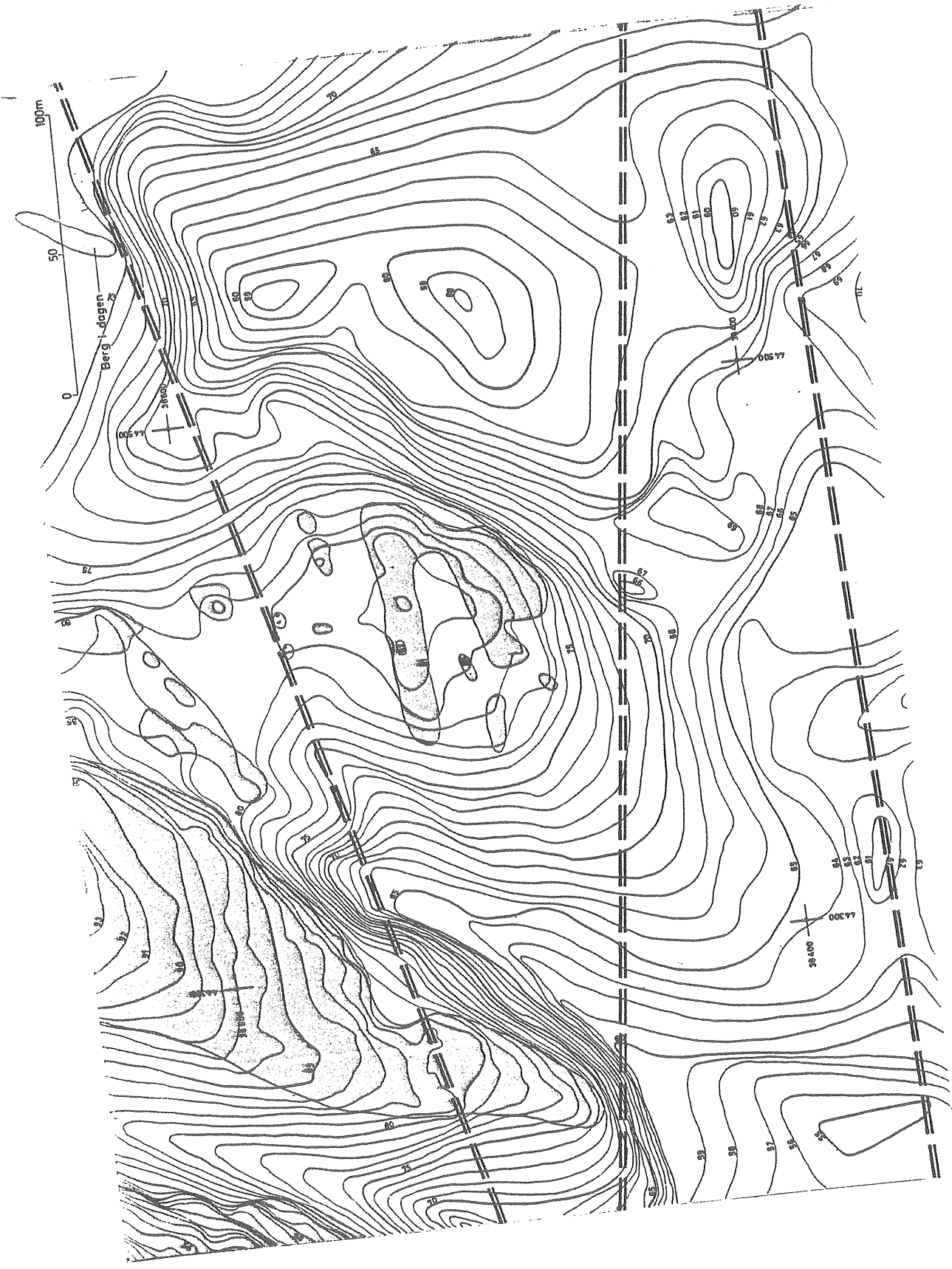
3.2 Berggrund

Berggrunden inom området uppbyggs huvudsakligen av gnejser med varierande sammansättning och utbildning. Gångbergarter uppträder mycket underordnat.

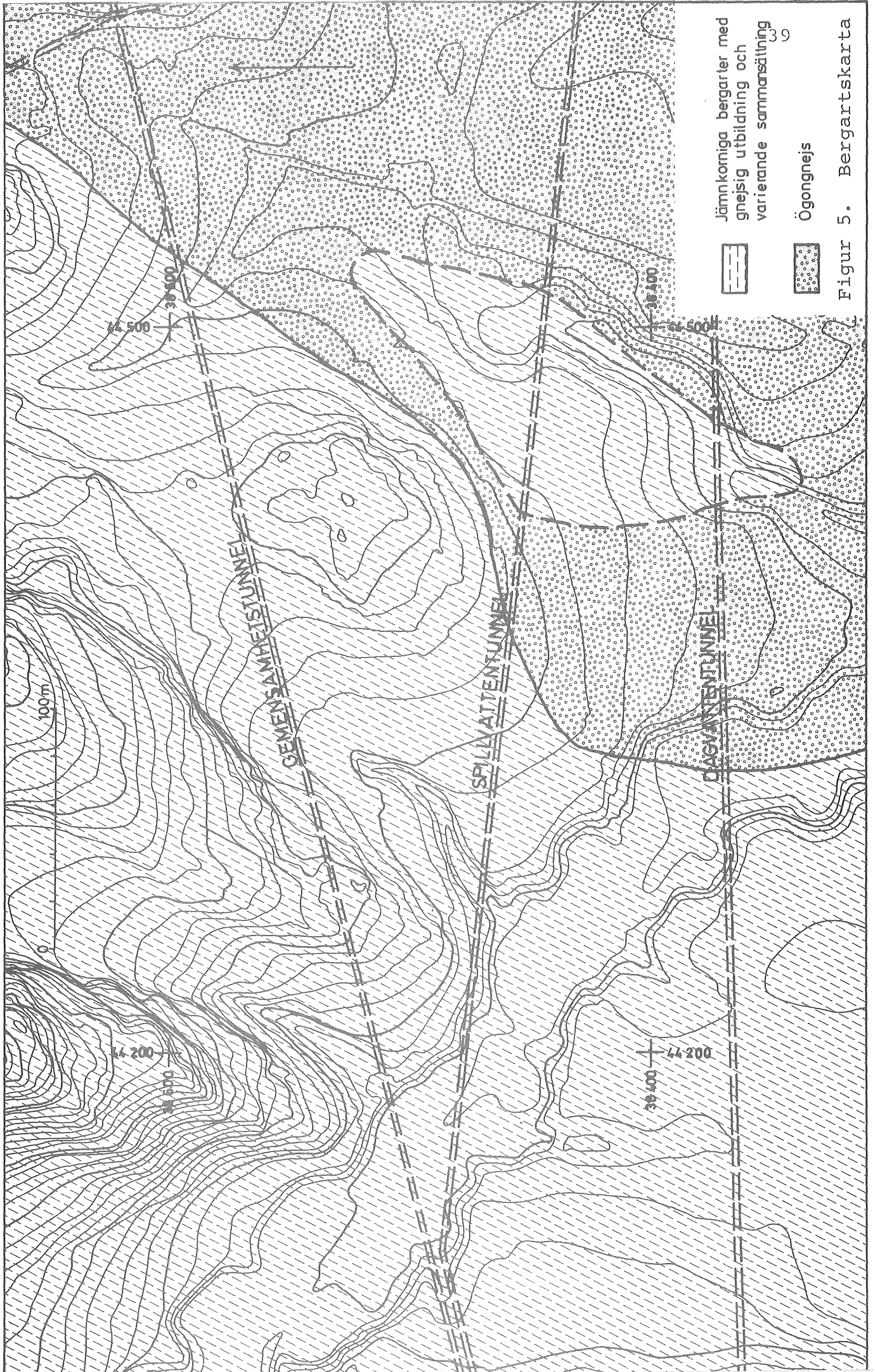
Gnejserna har på figur 5 sammanförts i två huvudgrupper. I ena gruppen har samlats jämnkorniga bergarter med gnejsig utbildning och varierande sammansättning. I den andra gruppen är den dominerande bergarten ögongnejs.



I den första gnejsgruppen varierar mineralsammansättningen mellan granodioritiska och granitiska led. Huvudmineral i de granodioritiska varianterna är plagioklas, kvarts, biotit och hornblände, medan kvarts och fältspat dominerar i de granitiska varianterna. Sliror av kvarts och fältspat uppträder ställvis i de mörkare varianterna. Bergarterna i denna grupp har oftast en utpräglad skiffrig eller stänglig struktur. De är i blottning friska och uppvisar inga tecken på nedbrytning.

Ögongnejsen, i den andra gruppen, uppbyggs av en medelkornig grundmassa med stora ögon av kalifältspat. Grundmassan utgörs av kvarts, kalifältspat, plagioklas och biotit. Ögonen är stundtals pressade och består av aggregat av mindre korn utdragna i bergartens stänglighetsriktning till sliror



Figur 4. Bergnivåakarta



- 
 Jämnikorniga bergarter med gnejsig utbildning och varierande sammansättning
- 
 Ögongnejs

Figur 5. Bergartskarta

eller ådror. I ögongnejsen förekommer skivor av finkornig salisk gnejs med skarpa kontakter mot omgivande ögongnejs. Ögongnejsen är i blottning frisk och oomvandlad.

Amfibolit förekommer som smärre skivor eller linser inlagrade längs gnejsernas förskiffringsplan. Huvudmineral är plagioklas, biotit och hornblände. Amfibolitens kontakt mot gnejserna är vanligen starkt förskiffrade. I större kroppar är de centrala partierna ofta massformiga.

Pegmatit förekommer som smärre gångar och körtlar. Bergarten är i blottning frisk och uppvisar inga tecken på nedbrytning.

3.3 Tektonik

Berggrunden inom undersökningsområdet har vid flera tillfällen utsatts för tryckpåkänningar orsakade av spänningstillstånd i jordskorpan. Genom dessa tryckpåkänningar har den strukturbild, som berggrunden uppvisar i dag, utbildats. Deformationskrafterna har verkat under två principiellt olika betingelser, dels under en första fas då berggrunden reagerat plastiskt, dels under en andra, då den varit i stort sett rigid, se figur 2, moment 2.1.

Under de plastiska deformationerna har ansatta spänningar utjämnats genom glidningar och rotationsrörelser i bergartsmassan. Vid de rupturrella deformationerna har däremot ansatta spänningar utjämnats genom sprickbildningar och sönderkrossning.

Under veckningsrörelserna har förskiffringsplan utbildats, där planparallella glidningar inträffat i bergartsmassan, medan stänglighet anlagts där rotationsrörelser dominerat. Inom undersökningsområdet stryker förskiffringsplanen i ca N 20-40° E och stupar 20-40° W. Stängligheten stryker ca N 15° W och stupar 10-15° N.

Efter veckningarna har berggrunden skjutits samman ytterligare. Detta har orsakat överskjutningar, varvid olika

bergartsled skjutits upp över varandra. De avsnitt i berggrunden, där dessa rörelser ägt tum, framstår i dag som starkt förskiffrade och delvis mineralomvandlade.

Efter de plastiska veckningarna konsoliderades berggrunden. Vid nya spänningstillstånd i jordskorpan har materialets hållfasthet överskridits, varvid ett mönster av kross- och sprickzoner utbildats. Äldre förskiffrade överskjutningszoner har härvid i vissa fall verkat som svaghetslinjer, längs vilka nya överskjutningar inträffat. I andra fall har överskjutningar inträffat utan att gamla svaghetslinjer verkat styrande. Brantstående skjuvzoner uppstod i spetsig vinkel mot deformationsriktningen.

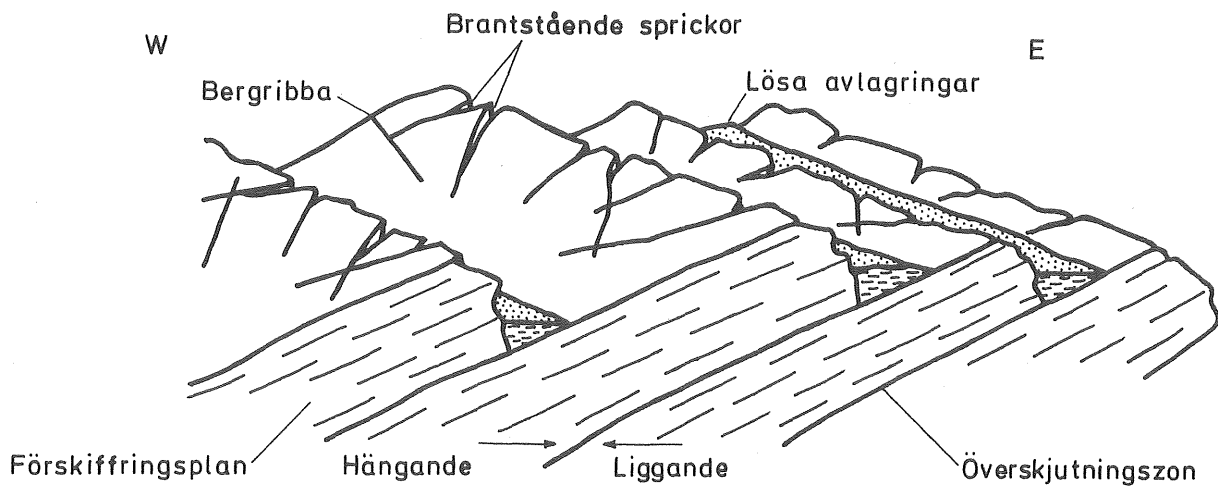
Berggrunden framstår nu som ett system av skollor, som taktegelformigt täcker varandra. Skollorna är åtskilda av västligt stupande överskjutningszoner med riktningar kring 10° W och $N 20^{\circ}$ E. Genom brantstående sprickzoner är skollorna i sin tur uppdelade i mindre blockenheter.

Brantstående sprickor och sprickzoner förekommer i riktningarna $N 40^{\circ}$ W, $N 70^{\circ}$ W och $N 45^{\circ}$ E, (figur 2).

Utöver dessa typer av sprickor och zoner förekommer i områdets östra del flackt mot norr stupande sprickplan. Lutningen på ytorna synes i stort sammanfalla med stänglighetens stupning.

Sprickor och zoner inom området uppvisar en varierande grad av öppenhet. Det föreligger därvid inte endast skillnader mellan olika typer av sprickor. Även längs en och samma spricka eller sprickzon kan öppna avsnitt förekomma omväxlande med täta avsnitt.

Denna växling mellan öppna och täta avsnitt kan dels ha utbildats vid en sprickas tillkomst, dels vara ett resultat av senare påkänningar inom det aktuella



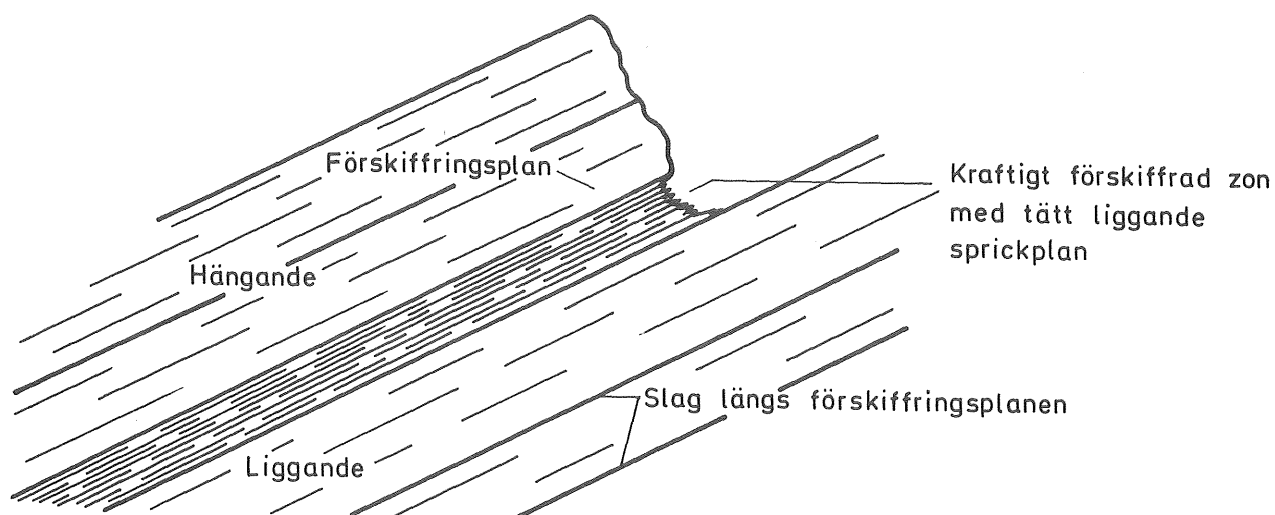
Figur 6. Principskiss över berggrundens spricktekoniska utformning inom Angeredsområdet.

avsnittet, varvid den tidigare anlagda sprickan anpassar sig till en ny spänningssituation i berggrunden.

En ytterligare bidragande orsak är att vissa sprickor och zoner för lermineral mellan sprickplanen. Detta gäller framför allt överskjutningar och brantstående sprickor i riktningen $N 70^{\circ} W$. Anledningen till detta kan vara att båda typerna av störningar vid sin bildning stått under tryck, vilket orsakat en mineralomvandling, vars slutprodukt är mer eller mindre svällande lermineral.

Mot bakgrund av ovanstående kan en sprickas eller zons utbildning och öppenhet variera inom tämligen vida gränser. Nedan redovisas med hjälp av principskisser de olika varianter, som iakttagits inom området.

Inom mörka glimmerrika bergartsled har rörelsezoner längs förskiffringsplanen en karakteristisk utbildning. Inom en vanligtvis några dm bred zon är berget starkt förskiffrat och tätt liggande planparallella sprickor uppträder längs zonens förskiffring. Lermineralisering förekommer längs en eller flera av des-



Figur 7. Principskiss över överskjutningszon i skiff- riga, glimmerrika bergartsled. Zonen är kraftigt förskiffrad med tätt liggande planparallella sprickor. I såväl hängande som liggande uppträder enstaka slag längs förskiffringsplanen.

sa sprickor. Sprickorna är vanligen så gott som täta. I såväl hängande som liggande återfinns enstaka slag längs förskiffringen (figur 7).

Speciellt i hängandet kan berget ibland erhålla en tydligt skivig utbildning med upptill halvmeter tjocka berggrundsskivor skilda åt av slag längs förskiffringen. Lermineralisering saknas mestadels och viss vattenföring kan förekomma.

Inom mer heterogent uppbyggda berggrundsavsnitt med inlagringar av amfibolitskivor längs förskiffringsplanen har rörelser ofta skett i anslutning till amfibolitskivorna. Tunna amfibolitskivor har därvid blivit kraftigt förskiffrade och vanligen mer eller mindre leromvandlade. I samband med tjockare amfibolitskivor är det kontaktzonen som drabbats av förskiffring och lermineralisering. I båda fallen överensstämmer zonen utbildning med den typ som redovisats i figur 7.

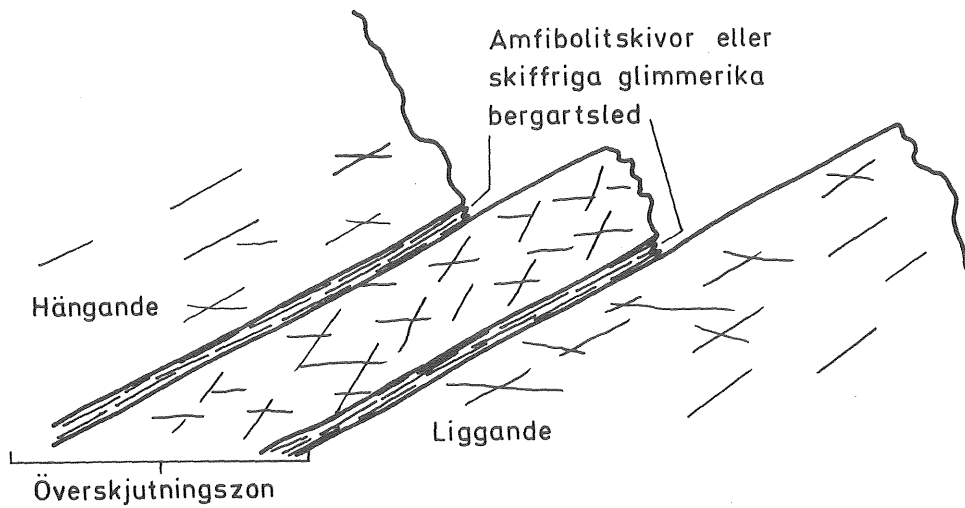
Ibland kan emellertid zonen anta en mera komplex uppbyggnad. I figur 8 redovisas en variant som ibland förekommer där två eller flera tunna amfibolitskivor ingår i samma zon eller där en växellagring av glimmerrika och glimmerfattiga bergartsled innefattas i zonen. Amfiboliterna och de glimmerrika bergartsleden är liksom tidigare kraftigt förskiffrade och lermineralisering kan uppträda längs ett eller flera av de tätt liggande sprickplanen. Mellan de tunnskiviga delarna av zonen är denna blockigt - småblockigt utbildad. I vissa fall kan lermineralisering förekomma längs sprickplanen. Zonens bredd kan uppgå till flera meter. Närmast zonen är hängandet vanligtvis blockigt utbildat. Viss vattenföring uppträder ofta i detta avsnitt.

Inom homogent uppbyggda berggrundsavsnitt med endast svagt förskiffrade bergarter får en överskjutningszon en blockig - småblockig utbildning (fig 9). Smala stråk med mer eller mindre intensiv sönderkrossning kan förekomma inom zonen. Leromvandling kan uppträda inom sönderkrossade avsnitt. Zonens bredd kan uppgå till flera meter. I de blockiga avsnitten förekommer vanligen relativt öppna sprickor. Närmast zonen är hängandet vanligen storblockigt utbildat.

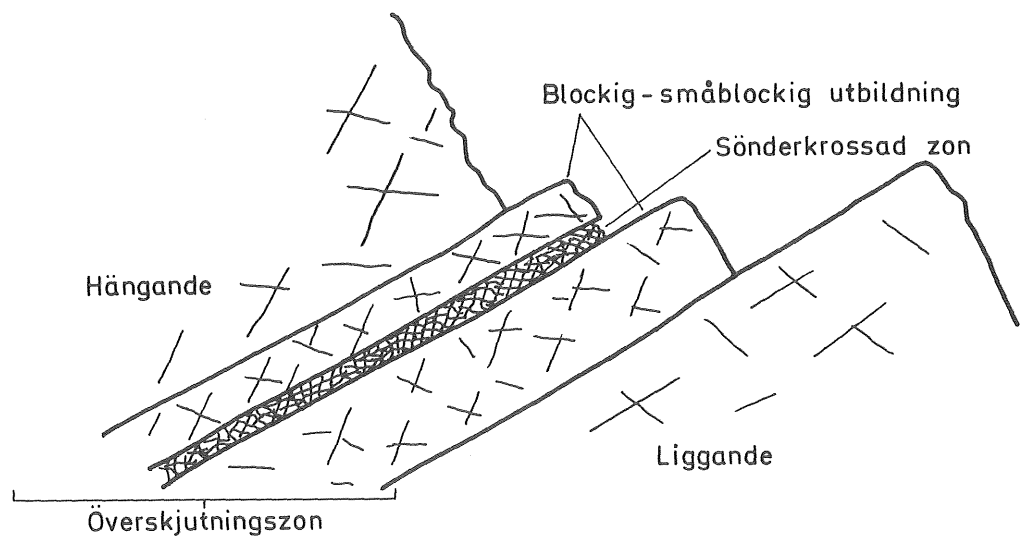
Brantstående zoner inom området är vanligen utbildade genom planparallella sprickor i zonens strykningsriktning (fig 10). Zonerna kan i bredd variera mellan några dm och upp till flera meter. Leromvandling kan förekomma längs ett eller flera sprickplan. Sprickornas grad av öppenhet varierar inom relativt vida gränser.

Inom tydligt förskiffrade berggrundsavsnitt föreligger vanligen viss blockighet inom denna zontyp. Utöver sprickor parallella med zonen avgränsas blocken av slag utbildade längs förskiffringsplanen (fig 11).

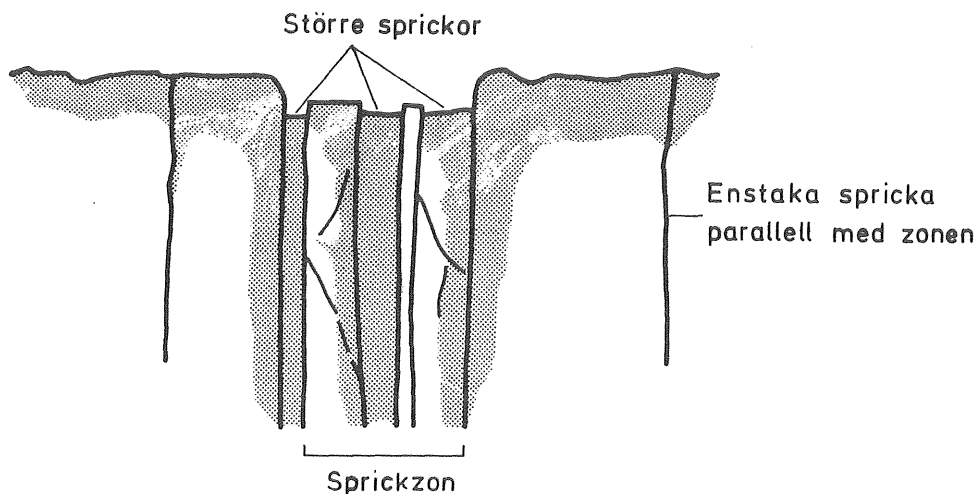
Inom zontypen, redovisad i figur 10, är vattenföringen koncentrerad till enstaka slag med tämligen dålig in-



Figur 8. Principalskiss över överskjutningszon i heterogent uppbyggda berggrundsavsnitt. Zonen omfattar presade, tunnskiviga avsnitt med mellanliggande avsnitt med blockigt - småblockigt berg.



Figur 9. Principalskiss över överskjutningszon inom ett homogent uppbyggt berggrundsavsnitt. Zonen omfattar ett blockigt - småblockigt berg innehållande avsnitt med stark sönderkrossning.

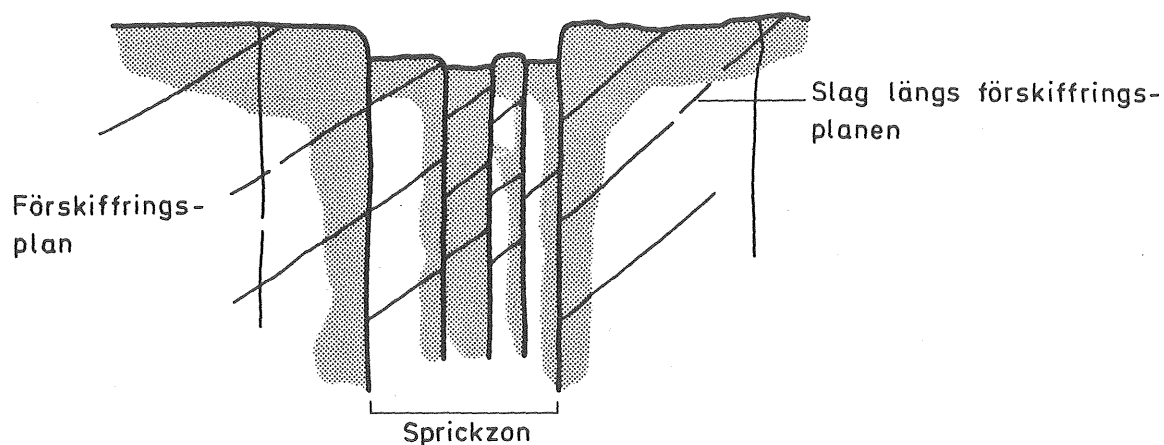


Figur 10. Principskiss över brantstående sprickzon karakteriserad av planparallella sprickor i zonen riktning.

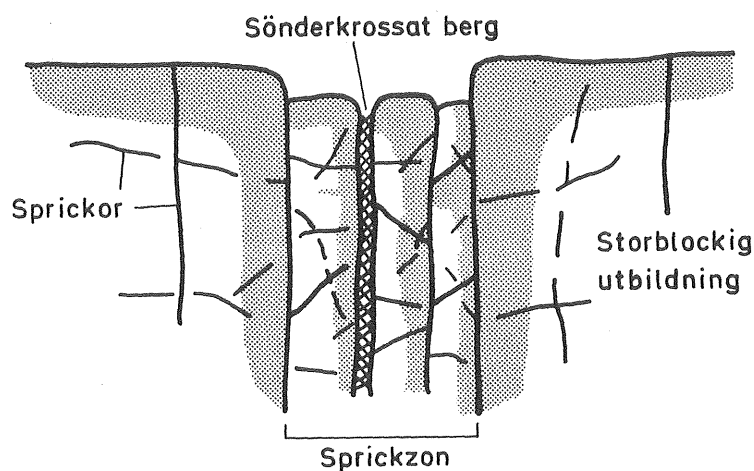
bördes kommunikation. I den i figur 11 illustrerade zontypen förbättras kommunikationen inte endast mellan de brantstående sprickorna i zonen utan även mellan zonen och omgivande berg.

En liknande effekt erhålles i brantstående zoner där berget utan styrning av eventuell struktur erhållit en blockig utbildning. Inom dessa zoner kan även uppträda smala stråk med sönderkrossat och i vissa fall leromvandlat berg (figur 12). I anslutning till zonen har berget vanligen en storblockig utbildning.

De illustrerade typerna av zoner utgör de huvudsakliga dräneringskanalerna i berggrunden. Även de "hela" berggrundsavsnitten mellan zonerna innehåller emellertid dräneringskanaler av varierande storlek. Enstaka sprickor kan vara relativt öppna men får genom sin ofta tämligen begränsade längdutsträckning liten betydelse som dräneringslinjer. Inom avsnitt med korsande sprickgrupper kan viss vattentransport ske genom det av sprickgrupperna blockigt utbildade berget. De öppnaste delarna av sprickorna förekommer längs skäraxlarna. Detta märks framför allt i skäraxlarna mellan flacka och brantstående sprickor (fig 13).



Figur 11. Principskiss över brantstående sprickzon inom tydligt förskiffrade berggrundsavsnitt.

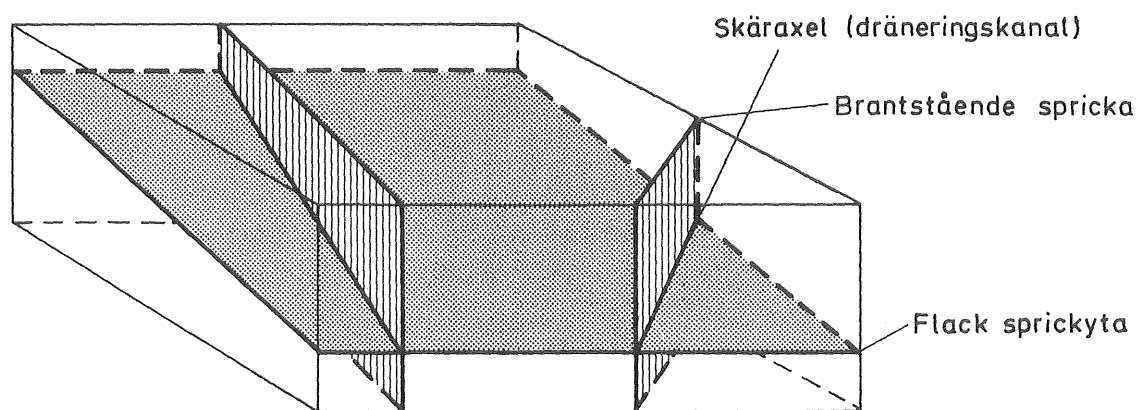


Figur 12. Principskiss över brantstående sprickzon med blockig utbildning och stråk med sönderkrossat berg.

3.3.1 Dominerande svaghetszoner

Den tektoniska bilden på fig 2 domineras av de tre överskjutningszonerna A, B och C. Zonernas uppbyggnad har studerats i bergtunnlarna, där zonerna korsar dessa. Kompletterande information har erhållits genom utförda seismiska mätningar och borrhningar.

Som påvisats i figur 7-9 med tillhörande textkommentarer bestäms överskjutningszonernas utbildning i



Figur 13. Principskiss över dräneringskanaler utbildade i skäraxlarna mellan brantstående och flack sprickyta.

hög grad av de bergarter och strukturer som förelegat vid zonernas tillkomst. Detta framgår tydligt inom området genom att samtliga zoner passerar genom olika bergartsled.

Zon A är vid sin skärning med gemensamhetstunneln utbildad i ögongnejs. Berget är blockigt - småblockigt med ett smalt avsnitt med sönderkrossat berg, där leromvandling förekommer (jfr fig 9). Smärre vattenläckage kan iakttas trots att injektering utförts. Detta antyder att zonen inom detta avsnitt är vattenförande.

På fig 5 har markerats en sannolik gräns mellan de jämnkorniga gnejserna i väster och ögongnejsen i öster. Genom att jämföra denna gräns med bergutgåendet av zon A, enligt indikation från seismik och borrhningar, framgår att zonen endast på en kortare sträcka är utbildad i ögongnejsen. Zonens bergutgående i jämnhöjd med och söder om bergbrunn B 5 antyder att zonen måste vara utbildad i den jämnkorniga gnejsen eller i randzonen mot ögongnejsen. Detta styrkes av att zon A i skärningen är belägen i gränssonen mellan de nämnda bergarterna.

I korsningen med spillvattentunneln är berget i zonen kraftigt pressat med ett mindre leromvandlat avsnitt. Zonens utbildning framgår i princip av figur 7. Inga läckage har iakttagits. Eftersom injektering ej utförts i detta avsnitt är zonen troligen tät.

Där zon A korsar dagvattentunneln har gnejsen en mer massformig utbildning och är genomdragen av sliror eller ådror av samma material. Berget är i zonen blockigt - småblockigt med smärre avsnitt skivigt, sönderkrossat och leromvandlat berg (jfr fig 9). Relativt stora vattenläckage har förekommit vid tunneldrivningen. Efter utförd injektering kan inga läckage spåras i väggar och tak. Inläckning kan dock förekomma i sulan.

Av ovanstående framgår, att zon A har varierande utbildning och egenskaper inom olika avsnitt längs zonen. Den är sannolikt vattenförande längs större delen av zonen men inom ett område omkring korsningen med spillvattentunneln torde zonen uppvisa dålig genomsläpplighet eller vara helt tät.

Zonerna B och C är i sin helhet belägna inom de jämnkorniga gnejserna. Överskjutningszon B är vid sin korsning med gemensamhetstunneln karakteriserad av ett blockigt - småblockigt berg med två skikt där berget är sönderkrossat och leromvandlat (jfr figur 8). Inga läckage har noterats vid tunneldrivningen. Vid senare besiktningar har dock smärre läckage konstaterats, vilket antyder att zonen inom detta avsnitt är i viss mån vattenförande.

Där zonen korsar spillvattentunneln har sprutbetongförstärkning utförts. Detaljuppgifter om zonens uppbyggnad saknas, men viss lermineralisering förekommer. Läckage förekommer inom avsnittet trots att injektering utförts.

Där zon B korsar dagvattentunneln har gnejsen en mer massformig utbildning och är genomdragen av sliror eller ådror

av surare material. Berget är i zonen blockigt - småblockigt med smärre avsnitt skivigt, sönderkrossat och leromvandlat berg (jfr fig 9). Relativt stora vattenläckage har förekommit vid tunneldrivningen. Efter utförd injektering kan inga läckage spåras i väggar och tak. Inläckning kan dock förekomma i sulan.

Som sammanfattning av uppbyggnaden hos zon B gäller att zonen har en relativt likartad utbildning längs strykningens riktningen. Zonen torde i sin helhet vara vattenförande med en tendens till öppnare sprickor i zonens södra del.

Överskjutningszon C är vid sin korsning med gemensamhetstunneln belägen inom ett avsnitt, där gnejsen uppvisar tydlig förskiffring. Zonen är kraftigt förskiffrad med skikt, där lermineralisering iakttagits (jfr fig 7). Smärre läckage har iakttagits efter injektering inom avsnittet.

Vid korsningen med spillvattentunneln är zonen täckt av en sprutbetong. Lerslag längs förskiffringsplanen antyder en likartad uppbyggnad som vid passagen av gemensamhetstunneln. Läckage kvarstår även efter utförd injektering.

Vid korsningen mellan dagvattentunneln och zon C har denna en liknande utbildning som vid korsningen med gemensamhetstunneln. Berget är sålunda blockigt - småblockigt med smala stråk av sönderkrossat och leromvandlat berg (jfr fig 9). Relativt stora läckage har iakttagits även efter utförd injektering.

Som sammanfattning kan sägas, att zon C har en skiffrig utbildning i områdets norra del. Mot söder får zonen en mer blockig utbildning med ökad tendens till öppna sprickor. Zonen torde i sin helhet vara vattenförande.

Brantstående zoner inom området förekommer med varierande storlek och utseende. På figur 2 har markerats de större brantstående zoner, som kunnat studeras i tunnlarna.

Ett problem vid upprättandet av den tektoniska kartan är att avgöra om, och i så fall vilka av de brantstående zonerna, som skär igenom flera berggrundsskivor. Ett exempel på detta är det stråk av brantstående sprickor och zoner, som vid skärningspunkterna med alla tre tunnlarna ger en antydning om en genomgående zon med ungefärlig sträckning U 11 - U 10 och vidare mot västnordväst. Det är dock möjligt och i de övriga redovisade zonerna troligt att det rör sig om olika zoner i hängande och liggande. Dessa kan dock ha samma riktning och likartad uppbyggnad och endast i horisontal led ligga något förskjutna. Detta kan exempelvis vara fallet med zonerna vid U17 respektive den zon som genomborrats med B10.

Som framgår av figur 2 dominerar zoner med nordvästlig och västnordvästlig strykning. Av zonerna i stråket U 11 - U 10 med fortsättning mot västnordväst har zonerna en blockig utbildning med i flera fall lermineralisering längs de dominerande sprickorna i zonernas längsriktning (jfr fig 11 och 12). Zonerna har vid tunneldrivningen givit upphov till läckage, vilka i flera fall kvarstått även efter injektering.

Detta gäller även zonerna i hängande respektive liggande till zon A. Zonerna i hängandet är, där de kan studeras i blottat berg, vanligen av den typ som beskrivs i fig 10 med textkommentar. Omkring längdmätning 0/800 och 0/820 i gemensamhetstunneln förekommer i liggandet zoner av samma typ. Dessa motsvaras i riktning och läge sannolikt av likartade zoner i hängandet.

Likartade zoner med ställvis uppträdande blockighet har västnordvästlig strykning förbi B2 samt med nordöstlig strykning öster om B2.

Den zon som genomborrades av B11 har en blockig utbildning, där de helt dominerande sprickorna stryker i zonens riktning. Lermineralisering har ej iakttagits.

Zonerna, som genomborras av B8 och B10, har vid borrningen uppvisat ett delvis sönderkrossat och sannolikt leromvandlat berg. Zonernas uppbyggnad torde överensstämma med vad som illustrerats i figur 12.

Mellan de redovisade zonerna är berget vanligen storblockigt uppspaltat genom sprickor parallella med zonerna framför allt med västnordvästlig och nordostlig strykning. Utöver dessa sprickgrupper får berget sin storblockiga karaktär av flacka slag, som stupar svagt mot norr eller nordnordväst. Dessa slag förekommer framför allt i ögongnejsen mellan gemensamhets- och spillvattentunneln.

3.4 Jordarter

3.4.1 Jordarter i markytan

Markytan utgörs av åker, äng med örtrik lövskog invid bergklackarna. Jordarten närmast markytan ned till 30-40 cm djup utgörs av en måttlig till mycket mullrik lera. I skogsdungarna tycks mullhalten vara högre och avtaga med graden av odling. Invid bergklackarna och i ravinerna är inslaget av silt i lerans ytlager högre än på omgivande marker. Ingenjörsgelogiska kartan fig 14 visar, att området främst utgörs av lera. I anslutning till områdets bergklackar påträffas i viss utsträckning sand och grovmo. Morän utgör endast en ringa del av markytan och då i anslutning till berg. Jordartsfördelningen i angränsande område är även känd genom den kartering som genomfördes inom ramen för STEGA's Angeredprojekt, vilket också till en del ligger till grund för den Ingenjörsgelogiska kartan.

3.4.2 Jordartslagerföljd

Lagerföljden i området är tämligen enhetlig. Det dominerande lagret är en skiktad lera med växlande mäktighet. Dess mäktighet ökar från flacka hållar i dagen till 14 m inom det intensivstuderade området och vidare till ca 30 m söder om försöksområdet. Lokala avvikelser tycks endast förekomma invid berggrunden. I övrigt kan området karakteriseras med nedanstående lagerföljdsbeskrivning.

Under matjordsskiktet följer vanligen en lagerföljd med omväxlande lera och silt. Lerans färg domineras av brunt i de ytliga lagren. Mot djupet och ooxiderat tillstånd växlar färgen mellan dels bruna skikt, dels mörkt brungrå till gröngrå skikt. I leran observerades talrika siltskikt, vilkas tjocklek varierar från 1 mm till några cm, i enstaka fall till över 10 cm. Längden av dessa skikt är varierande men har i flera fall kunnat följas mer än 10 m i schaktväggarna. Uthålligheten av en del siltskikt är dock sannolikt mycket större än så. Dessa skikt är av speciellt intresse, eftersom de har en avsevärt högre permeabilitet än omgivande lera. I en del fall har det konstaterats, att siltskikten skär över varandra så att ett system av skikt med högre permeabilitet bildas.


Vid betraktande av skärningarna kan man även konstatera att lerlagren, uppdelade av siltskikt, i stort följer underlaget. Detta medför att ett och samma skikt kan sträcka sig från nära markytan ned till avsevärt djup i lagerföljden. Skikten är också avskurna av raviner som genomkorsar området (se Borrplan, figur 3). Leran vilar dels på friktionsmaterial, dels direkt på berggrunden.


Friktionsmaterialet under leran utgörs dels av sorterade jordarter såsom mo och sand, dels av morän. Det är ej möjligt att utifrån borrhningarna skilja mellan jordarter med avseende på bildningssätt som moränbe-




Figur 14 a. Ingenjörsgölogisk karta - Jordarter.

Beteckningar JORDARTER

 Berg i dagen
eller på ringa djup (mindre än 0,5 m)

 Grus, sand, grovmo


 Grovsediment minst 0,5 m mäktigt
under finsediment

 Silt

Markyta 1 m ekv.

 Överskjutningszon

Lera

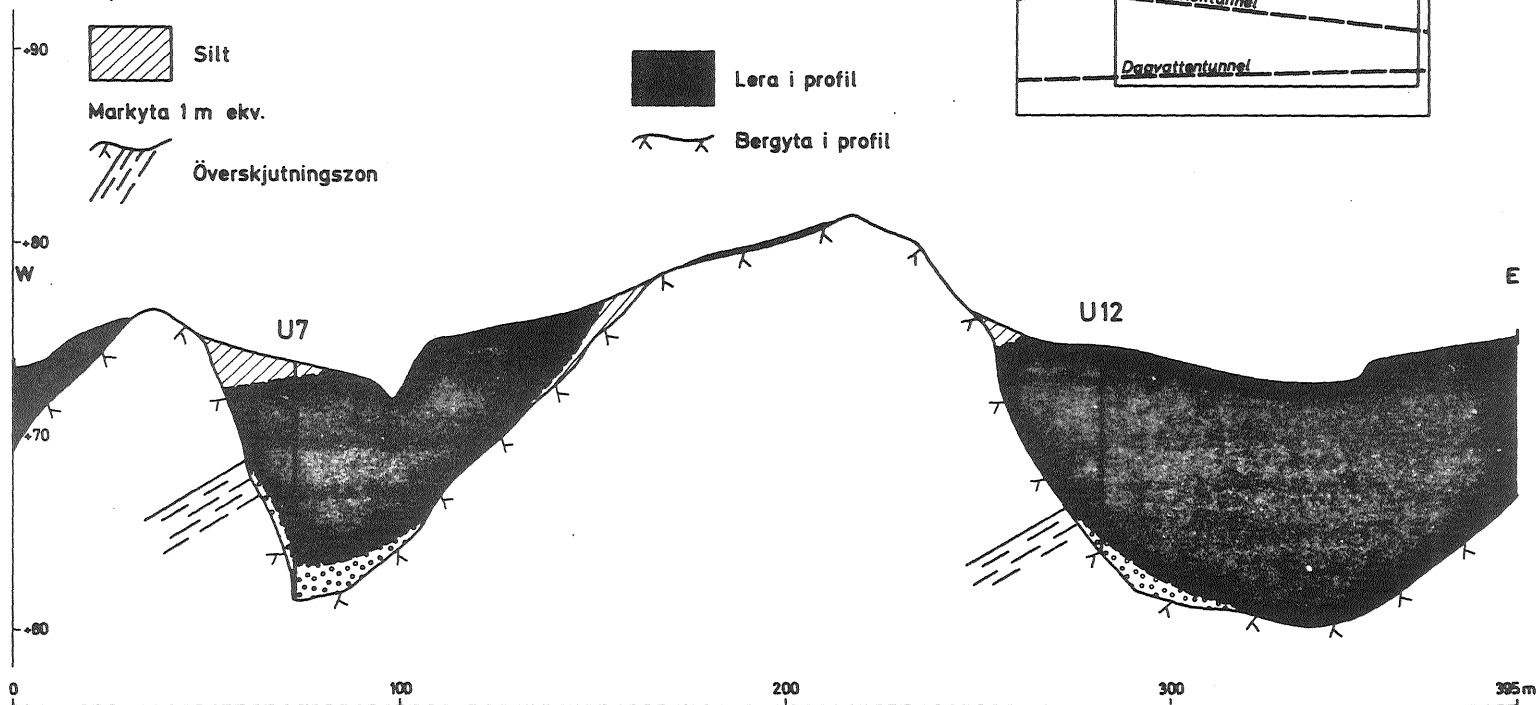
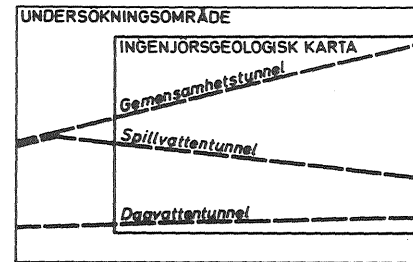
 0 - 5 m

 5 - 10 m

 > 10 m

 Lera i profil

 Bergyta i profil

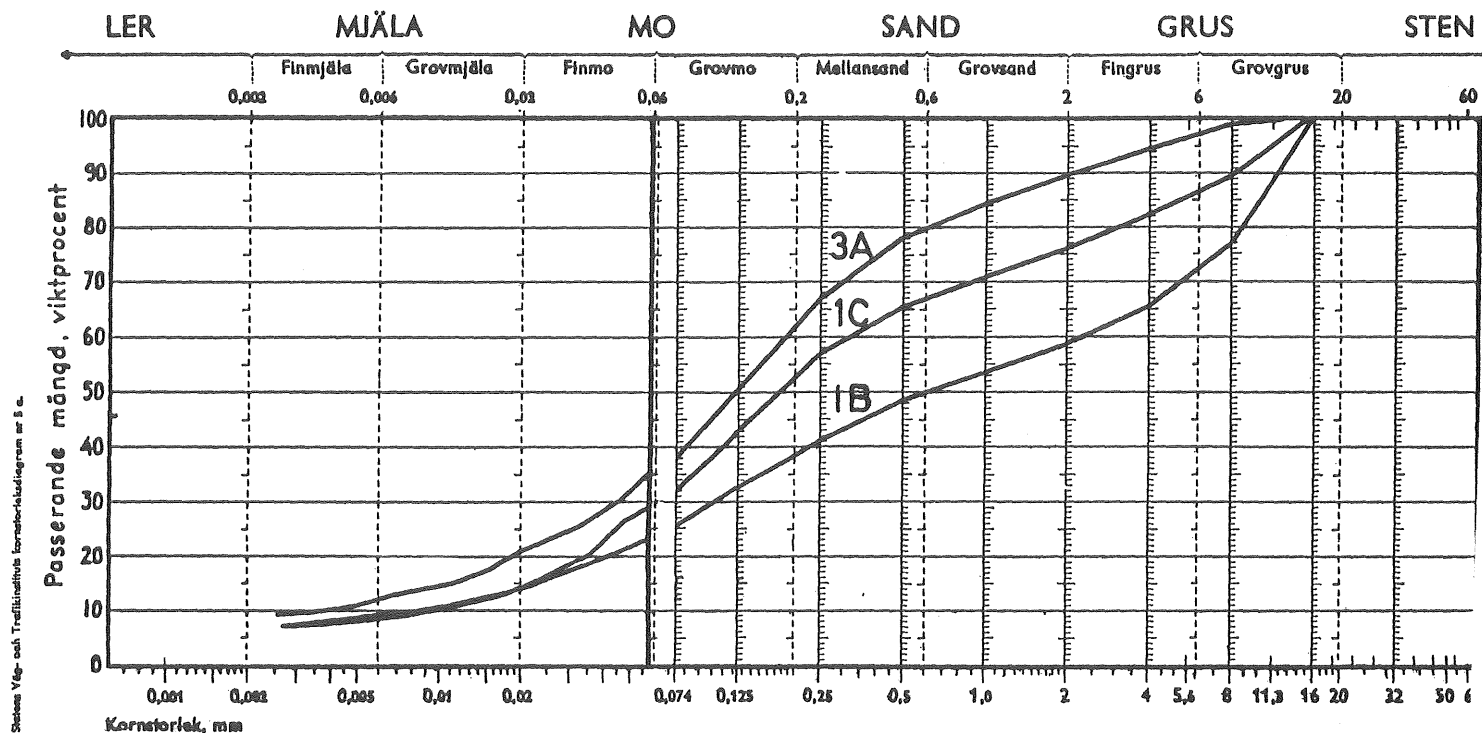


Figur 14 b. Ingenjörsgelogisk karta - Jordarter, profil.

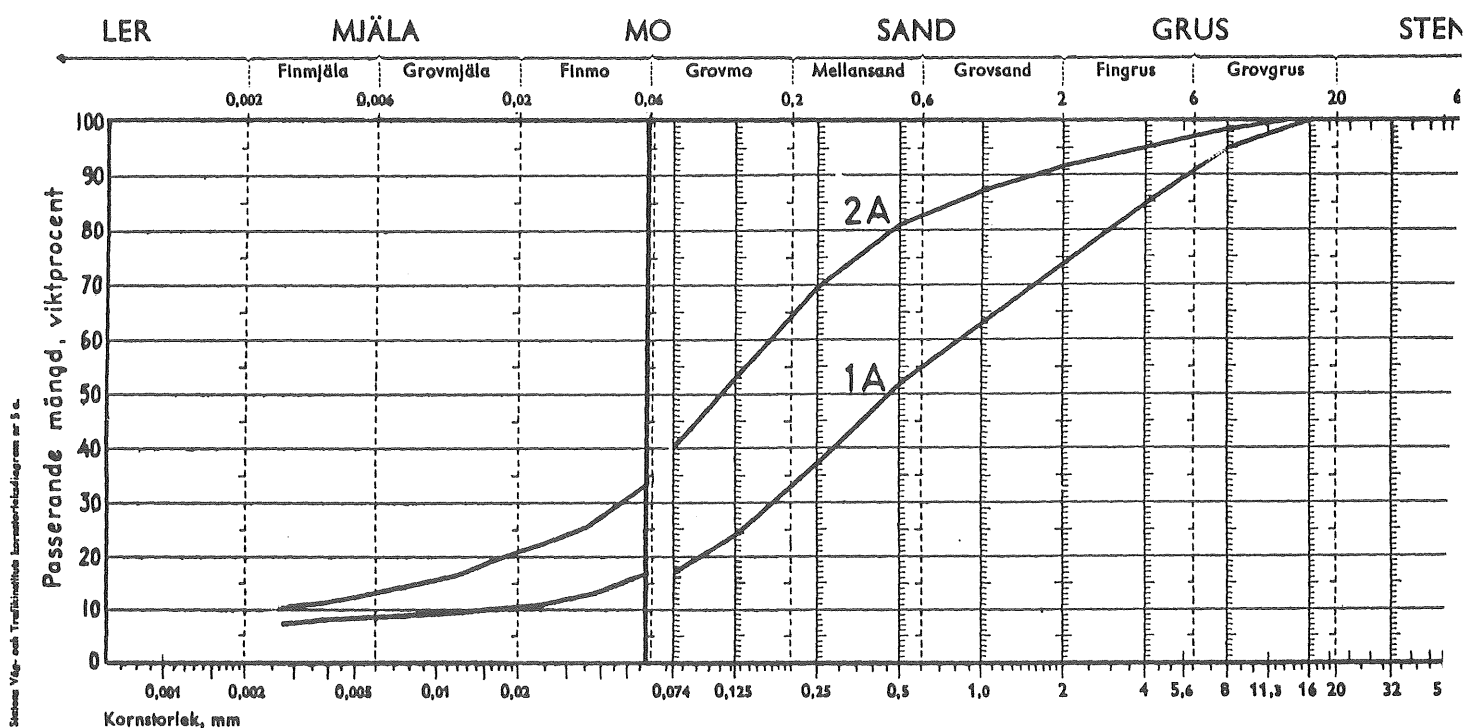
greppet förutsätter, med de fortsatta undersökningarna har härvidlag varit avgörande. Mäktigheten av det genom borrhning påvisade friktionsmaterialet varierar mellan 0 och 1,8 m. Vanligen är mäktigheten av friktionsjordarten mindre än 0,5 m. I tre observationspunkter av 27 finns misstankar om att undersökningsröret stoppat på block innan det nått berg. I samtliga dessa fall torde blocken ligga på eller nära bergytan.

Silt och siltig sand, ibland med ett påtagligt inslag av grus, har i några fall konstaterats som ett skikt under leran på krönet av de små bergklackarna, vilka schaktats fram (fig 15). Detta skikt kan ibland ha karaktären av ett bottenvarv i leran. Ibland utgörs det av ett lager mellan leran och berget, som är så tunt att det endast kan identifieras som ett "puder" på undersidan av understa lerlagret. En förutsättning för denna iakttagelse var att leran var så kraftigt uttorkad som fallet var vid den aktuella tidpunkten.

Morän förekommer i markytan inom undersökningsområdets västra del i anslutning till berg. Genom observationer i de stora schakterna har också morän konstaterats invid bergklackarna. Dessa observationer verifierar de förmodanden, som gjorts med utgångspunkt från observationerna vid borrhningsarbetet, beträffande moränlagrets begränsade utbredning. I schaktväggarna kunde på långa sträckor den "böljande" berggrundsytan följas. På denna återfanns morän i svackor och på kullarnas sidor medan hjässorna ej har någon moränkappa. Mäktigheten av moränbädden är ringa, ungefär en halv meter eller mindre, och kilar ut mot berghällarnas högre delar. Moränens mekaniska sammansättning, sandig till moig morän, framgår av diagram, figur 16. Beträffande dess hydrauliska egenskaper, se nedan Grundvatten i jordlagren, moment 8.6.



Figur 15. Mekaniska analyser av prover från friktionsmaterial mellan lerlager och berggrund. Prov 1B, siltigt sandigt Grus. Prov 1C, grusig siltig Sand. Prov 3A, grusig siltig Sand.



Figur 16. Mekanisk analys av prover från morän från schaktgropar i Angered centrum. Prov 1A, sandig Morän på släntberg. Prov 2A, moig Morän i svacka i berggrunden.

3.5 Resultat av geofysiska undersökningar

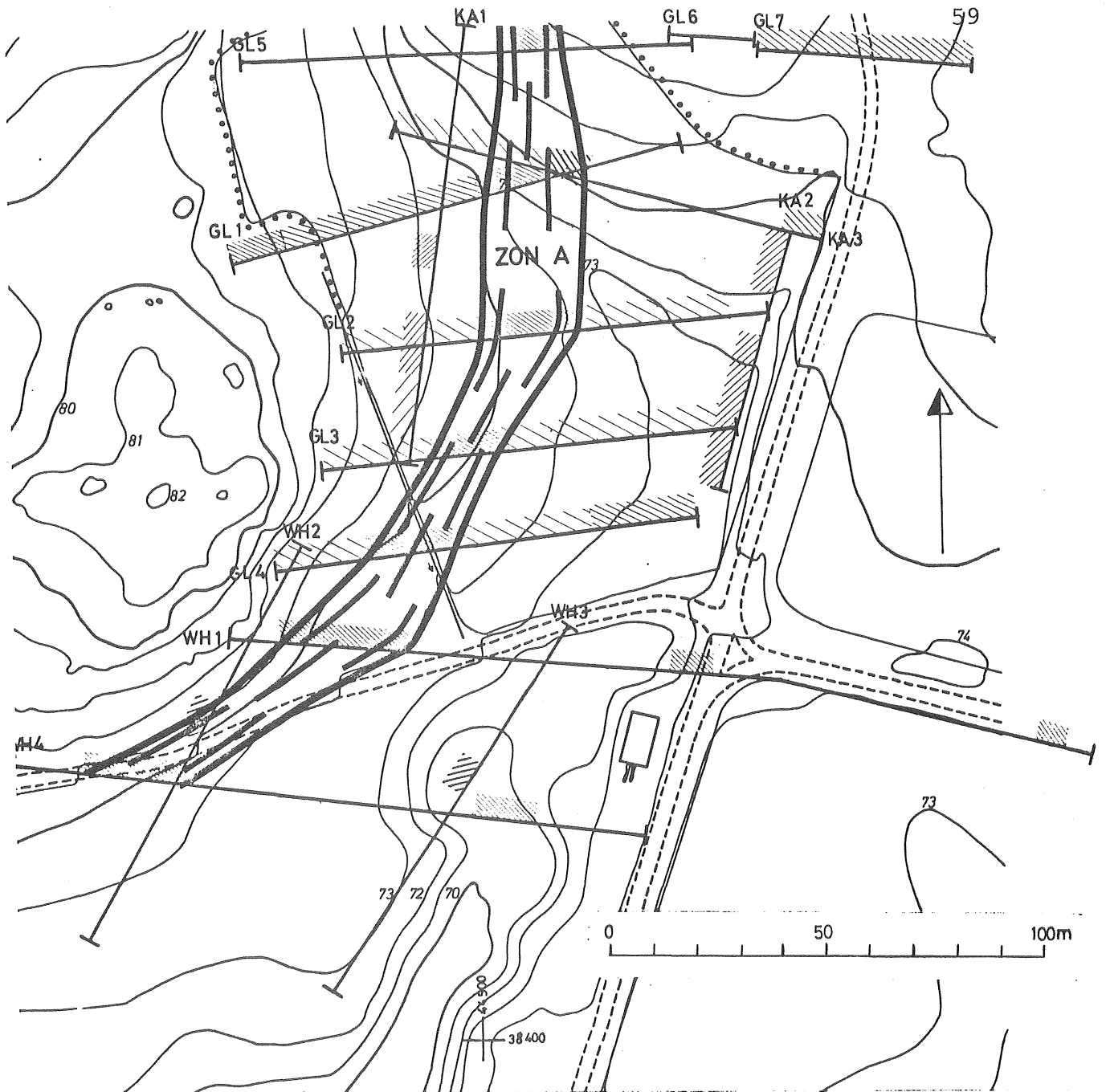
Omfattande geofysiska undersökningar har genomförts i fältarbetsområdet för att stödja de resultat som erhållits vid borrhningen och den geologiska utvärderingen. Dessutom har området utnyttjats för undervidningen i geofysik. Det har härigenom varit möjligt att jämföra olika metoder. Redovisningen av detta finns arkiverad på Geologiska institutionen, CTH/GU. I detta sammanhang presenteras endast huvuddragen av resultaten.

3.5.1 Seismiska mätningar

De seismiska undersökningarna är utförda med refraktionsseismik. Profilernas lägen framgår av figur 17. GL 1 - GL 4 utfördes med både spräng- och hammarseismikutrustning. GL 5 - GL 7 utfördes med hammarseismikutrustning. Profilerna WH 1 - WH 4 och KA 1 - 3 gjordes med sprängseismik.

De förutsättningar, som måste uppfyllas för att den refraktionsseismiska metoden skall fungera väl, verkar ha funnits här. Dessa förutsättningar är: att tryckvågshastigheten inte får minska nedåt i jordartslagerföljden eller att det inte får finnas något "blint" mellanhastighetslager som inte kan upptäckas p g a att det maskeras av bergvågen.

Vid den konventionella tolkningen av standardseismiska profiler får man en djupbestämning per skottpunkt. Detta innebär vanligen 2 till 6 bestämningar över 100 m. En mera detaljerad bild av berggrunden kan erhållas genom time-term-metoden, som bestämmer jorddjupet under varje geofon, dvs var femte meter i vår uppställning. Denna metod förutsätter att bergvågen från skott på motsatta sidor om geofonutlägget är känd. Ett exempel på en sådan tolkning visas på figur 18.



SEISMIKPROFILER, BFR

SEISMISKA HASTIGHETER

>5000m/s	
4500-5000m/s	
4000-4500m/s	
3000-4000m/s	
2000-3000m/s	

SEISMIKPROFIL MED LÅGHASTIGHETSZON

Figur 17. Läge för seismiska profiler och ljudvågens utbredningshastighet samt läget för över-skjutningszon A.

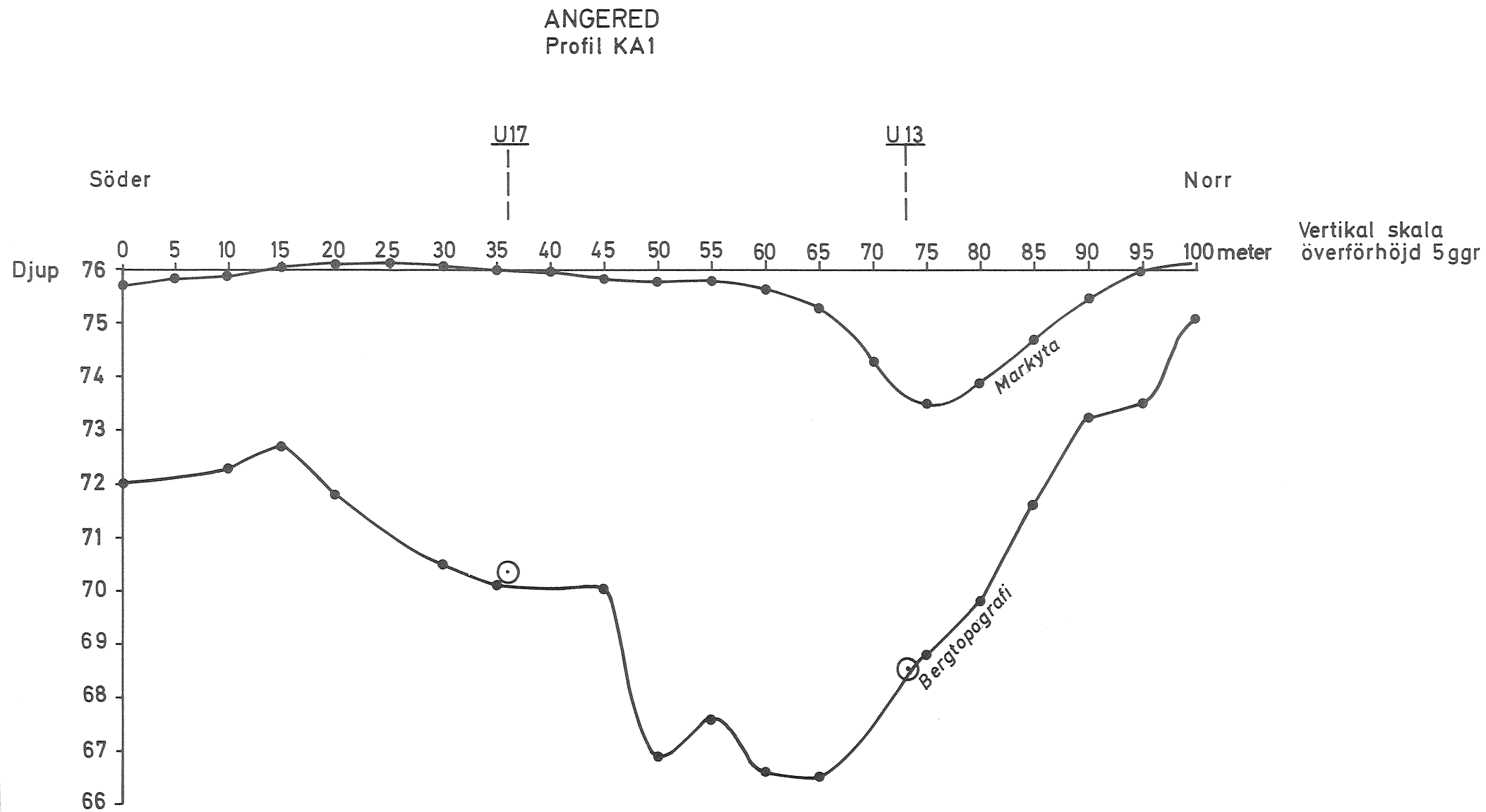
3.5.2 Låghastighetszoner i berggrunden

Från tunnelkartering och bergborrningsresultat var det redan före seismikundersökningarna klarlagt, att en överskjutningszon har sitt utgående ur berg i området. Samtliga 9 seismikprofiler som skär zonens beräknade utgående innehåller en markerad låghastighetszon. Förbindningen av dessa låghastighetszoner, som framgår av figur 17, visar att de flesta profilerna skär överskjutningszonens utgående nästan vinkelrätt. Bredden på seismikprofilernas låghastighetszon varierar mellan 7 och 21 m, vilket här sättes lika med zonens utgående i berggrundytan. Som jämförelse kan nämnas att överskjutningszonen, där den påträffas i bergborrhålen endast har en mäktighet av mindre än en meter och stupningen är ca 30° åt väster. Kring punkt U 12 har ett flertal rör drivits med hejarbock. Djupen varierar med ett par meter mellan rör som står ett par meter från varandra. Några rör har stoppat mot en lutande berg- och blockyta. Man kan därför misstänka, att bergytan inom låghastighetszonen antingen är blockrik eller förklyftad, eller att det finns ett smärre stup i anslutning till överskjutningszonens utgående. Det senare har inte kunnat verifieras vid borrhningarna.

De övriga seismiska låghastighetszonerna är smalare än de som passerar den kända överskjutningszonen. Ett par av dem överensstämmer med brantstående sprickplan som karterats i tunnlarna, medan övriga är svåra att identifiera. Flera i tunneln påträffade vattenläckande brantstående sprickzoner har inte återfunnits som seismiska låghastighetszoner. Det verkar alltså, av seismikresultaten att döma, som om överskjutningszonen är väl detekterbar, men att det är osäkert om övriga svaghetszoner i berggrunden går att upptäcka vid en seismisk undersökning.

3.5.3 Magnetometriska mätningar

Under februari-mars samt juli månad 1974 utfördes magnetiska totalfältsmätningar med protonmagnetometer i

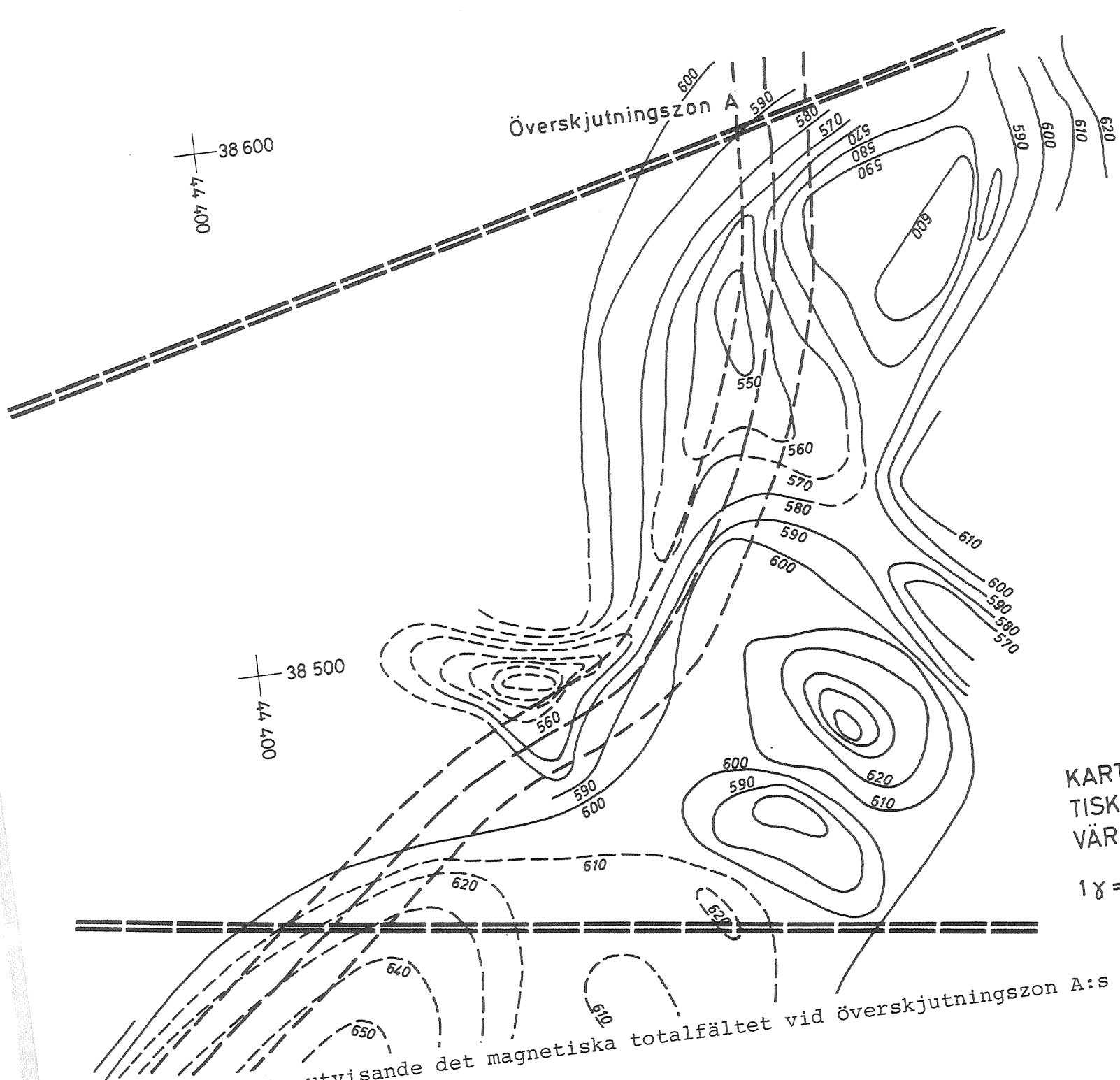


Figur 18. Refraktionsseismisk profil KA1 (sprängseismik) upprättad med hjälp av time-term-metoden. Ringarna anger rör underkant för observationsrören U13 och U17.

samma område som undersöktes seismiskt. Mätningarna har relaterats till en baspunkt vid kärnborrhål 1. Baspunkten har dock inte jämförts mot någon känd magnetisk baspunkt, varför endast de relativa värdena bör beaktas. På grund av magnetiska störningar, när några av profilerna skulle korreleras med baspunkten, är vissa profiler något osäkra. Mätgeometrin för profilerna är inte fullt tillfredsställande p g a att profilerna av praktiska skäl lagts mellan undersökningsrör samt att rören ger kraftiga störningar av magnetfältet i sin närhet (se figur 19).

Susceptibilitetsmätning, magnetiskt flöde χ , har företagits i gemensamhetstunneln, på berghällar och på borrhärnan från kärnborrhål 1. Mätningarna visade, att den basiska gnejsen i området har ca dubbelt så hög susceptibilitet som ögongnejsen. Mätningarna på borrhärnan visade en svagt varierande susceptibilitet från ytan och ned till mellan 16 och 21 m djup, där en markerad sänkning av susceptibiliteten äger rum. Det lägre värdet håller sig ganska konstant ned till borrhålsbotten.

Figur 19 visar den magnetiska totalfältsbilden som erhöles från magnetometermätningarna. Kartbilden visar flera relativt smala anomala element. Bland dessa finns ett långsträckt minimum i magnetfältet, som till riktning och läge ungefär överensstämmer med den seismiska låghastighetszonen vid överskjutningszonens utgående ur berg. Bergartskontakten mellan ögongnejs och basisk gnejs sammanfaller sannolikt inte med denna anomali och bör heller inte ge anomali av detta utseende. Anomalin kan mycket väl bero på överskjutningszonen, men eftersom det inom området finns andra oförklarade anomalier, av vilka ett par är starkare, hade det inte varit möjligt att förutse överskjutningszonen enbart på grundval av magnetometrimätningarna.



Överskjutningszon A

KARTA UTVISANDE DET MAGNETISKA TOTALFÄLTET. TILL ANGIVNA VÄRDEN SKALL 49 000 γ ADDERAS.
 $1 \gamma = 10^{-9}$ weber/m² (mks A)

Karta utvisande det magnetiska totalfältet vid överskjutningszon A:s utgående.

007 77
38 600

009 77
38 600

007 77
38 500

009 77
38 500

3.5.4 Övriga geofysiska mätningar

Försök att detektera bergets svaghetszoner med hjälp av elektromagnetisk mätning har inte lyckats. Reproducerbara mätvärden erhöles inte, kanske p g a att uppmätta värden var så svaga att mätningen kraftigt påverkades av minsta vridning av instrumentet ur profilriktningen eller ur horisontalplanet. De låga mätvärdena och den dåliga penetrationsförmågan skulle kunna bero på att leran med sin goda ledningsförmåga fungerar som en skärm över berget.

Geoelektrisk mätning utfördes med både likströms- och växelströmselement. Profilmätning (s k geoelektrisk kartering, där en hel elektroduppsättning med konstant elektrodavstånd flyttas utefter en profillinje) gav ingen korrelation med överskjutningszonen. Geoelektrisk sondering avslöjade inte friktionsmaterialens mäktighet.

4 SAMMANSTÄLLNING AV NEDERBÖRDSDATA

4.1 Mätstationer

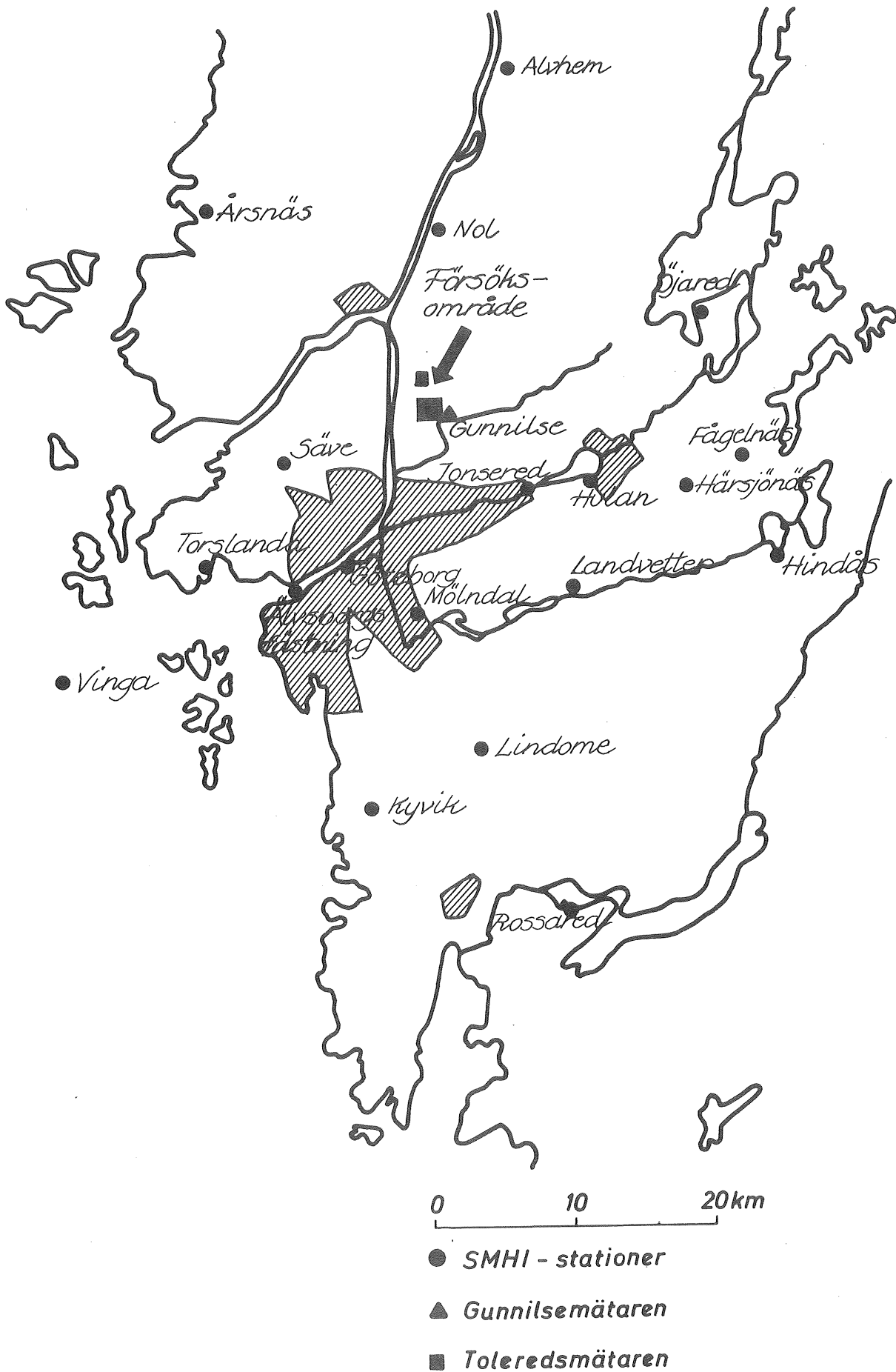
Inför uppgiften att utreda grundvattenförändringens orsaker blev en av de inledande åtgärderna att upprätta stationer för mätning av nederbörden i forskningsområdet Angered.

På grund av skadegörelse på mätutrustningen har kontinuerlig nederbördsräkning inte kunnat genomföras inom undersökningsområdet. Kompletterande nederbördsuppgifter har därför i stället fått hämtas från närbelägna mätstationer. De mätstationer som är av intresse är de av STEGA år 1969 upprättade stationerna Tolered och Gunnilse. Mätstationen i Tolered lades ned i juni 1973 medan Gunnilsestationen fortfarande är igång. Toleredsmätaren var belägen 1,1 km norr om undersökningsområdet och i liknande terräng som undersökningsområdet. Gunnilsemätaren ligger 1,4 km öster om undersökningsområdet och ca 250 m från Rannebergens sydöstra stup. Närheten till Rannebergen medför eventuellt att nederbördssituationen i Gunnilse avviker en del från nederbördssituationen i Angered centrum-området. Avståndet mellan Gunnilsemätaren och Toleredsmätaren var ca 2,2 km, se figur 20.

Vid mätstationen i Tolered 1969 - 1973 och i Gunnilse 1969 - 1974 användes nederbördsräknare av s k SMHI-typ. Avläsningar av dessa räkare gjordes manuellt en gång per dygn. Under 1975 användes vid Gunnilse en självregistrerande räkare, typ Hellman. Inom försöksområdet, Angered centrum, har nederbörden räknats i s k KTH-totalisatorer. Avläsning av dessa räkare har skett manuellt ca två gånger per månad.

4.2 Nederbörden i Tolered, Gunnilse och Angered centrum

I Tolered och Gunnilse räknades under den gemensamma observationsperioden följande årsvärden.



Figur 20. Översiktskarta utvisande SMHI-stationer i Göteborgsområdet samt VA-verkets nederbördsrätmätare i Gunnilse.

TAB. 1. Årsnederbörd i Tolered och Gunnilse.

År	Nederbörd mm		Diff mm
	Tolered	Gunnilse	
1970	804	855	51
1971	902	920	18
1972	825	847	22

Differensen mellan de två mätpunkterna är som synes liten. Under tiden 730627 till 731217 uppmättes i nederbördsräknare N1 inom Angereds centrum-området 407 mm och i Gunnilse 442 mm. Under tiden 740103 till 741220 utom tiden 740305 - 740422 uppmättes i räkare N3 865 mm och i Gunnilsemätaren 855 mm.

1975 kunde kontinuerlig nederbördsräkning genomföras inom undersökningsområdet, med avläsning var 14:e dag. Mätperioden omfattar tiden 741220 - 751222. Under mätperioden saknas nederbördsuppgifter vid två avläsningar, för räkare N 2 740317 och för N 3 740929. Vid sammanräkningen av årsnederbörden har vid dessa tillfällen genomsnittet för de båda fungerande räkarna använts. Den uppmätta nederbörden var i räkare N 1 704 mm, N 2 735 mm och N 3 767 mm. I Gunnilsemätaren uppmättes under 1975 684 mm. Innan jämförelse med Gunnilsemätaren kunde göras måste nederbördsmängden i N1, N 2 och N 3 korrigeras. Eftersom avläsning har gjorts ca två gånger i månaden kan den exakta årsnederbörden ej anges. Under den sista veckan 1974 föll ca 60 mm nederbörd och under de 10 sista dagarna 1975 ca 10 mm. För att erhålla ett ungefärligt värde på årsnederbörden måste de uppmätta nederbördsmängderna korrigeras med - 50 mm. Årsnederbörden blir då för räkare N 1 ca 654 mm, N 2 ca 685 mm och N 3 ca 717 mm.

Någon signifikant skillnad mellan nederbördsförhållandena i undersökningsområdet och Gunnilse har inte kunnat upptäckas, varför Gunnilsemätaren kan antas representera nederbördsförhållandena i undersökningsområdet med tillräcklig noggrannhet, under hela försöksperioden.

Skillnaden i nederbörd mellan de olika stationerna kan mycket väl förklaras med att olika instrumenttyper har använts. Mätarnas placering, höjd över markytan och läge i terrängen spelar också en avgörande roll för mängden uppmätt nederbörd.

4.3 Jämförelse mellan perioderna 1931-1960 och 1971-1975

Jämförelse mellan 30-årsmedelvärden 1931-1960 (normalnederbörd) och 5-årsmedelvärden 1971-1975 för några SMHI-stationer i Göteborgstrakten redovisas i TAB. 2. Figur 20 visar SMHI-stationernas läge i Göteborgstrakten samt läget för Gunnilse och Toleredsmätaren.

TAB. 2. Fem- och trettioårsmedelvärden för några SMHI-stationer.

SMHI-station Tidsperiod	Vinga	Tors- landa	Göte- borg	Möln- dal	Öja- red	Alv- hem	Rossa- red	Genom- snitt
1931-1960	706	682	704	849	796	749	781	
1971-1975	600	682	697	832	743	795	770	
Differens	-106	± 0	- 7	-17	-53	+46	-11	-21

Vid jämförelse mellan normalnederbörden 1931-1960 och medelnederbörden för de fem sista åren framgår enligt TAB. 2 att samtliga stationer utom Alvhem och Torslanda har haft nederbördsunderskott. Underskotten är för den sista 5-årsperioden i genomsnitt 21 mm/år.

TAB. 3. Jämförelse av årsnederbörden 1971-1975 med 5- och 30-årsmedelvärden för några SMHI stationer och Gunnilsemätaren

Stationer Tidsperiod	Vinga SMHI	Tors- landa SMHI	Göte- borg SMHI	Möln- dal SMHI	Öja- red SMHI	Alv- hem SMHI	Rossa- red SMHI	Gun- nilse va-verk	Genom snitt SMHI
1971	698	720	847	891	786	839	793	920	
Diff 71-75	+ 98	+ 38	+150	+ 59	+ 43	+ 44	+ 23	+ 86	+ 65
31-60	- 8	+ 38	+ 43	+ 42	- 10	+ 90	+ 12	-	+ 30
1972	592	638	610	811	754	822	728	847	
Diff 71-75	- 8	- 44	- 87	- 21	+ 11	+ 27	- 42	+ 13	- 23
31-60	-114	- 44	- 94	- 38	- 42	+ 73	- 53	-	- 45
1973	604	680	626	803	i 768	728	766	781	
Diff 71-75	+ 4	- 2	- 71	- 29	+ 23	- 67	- 4	- 53	- 20
31-60	-102	- 2	- 78	- 46	- 28	- 21	- 15	-	- 42
1974	642	753	744	934	810	884	867	940	
Diff 71-75	+ 42	+ 71	+ 47	+102	+ 67	+ 89	+ 97	+106	+ 74
31-60	- 64	+ 71	+ 40	+ 85	+ 14	+135	+ 86	-	+ 52
1975	461	620	631	724	597	700	694	684	
Diff 71-75	-139	- 62	- 66	-108	-146	- 95	- 76	-150	- 99
31-60	-245	- 62	- 73	-125	-199	- 49	- 87	-	-120

i=interpolerat värde

Sammanfattning

- 1971 Nederbördsöverskott; 30 mm högre än normalnederbörd, 65 mm högre än 5-årsmedelvärdet 1971-75.
- 1972 Nederbördsunderskott; 45 mm lägre än normalt, 23 mm lägre än 5-årsmedelvärdet.
- 1973 Nederbördsunderskott; 42 mm lägre än normalt, 20 mm lägre än 5-årsmedelvärdet.
- 1974 Nederbördsöverskott; 52 mm högre än normalt, 74 mm högre än 5-årsmedelvärdet.
- 1975 Stort nederbördsunderskott; 120 mm lägre än normalt, 99 mm lägre än 5-årsmedelvärdet.

4.4 Nederbörden i Gunnilse

Av TAB. 4 framgår nederbördsvärden i Gunnilse för varje månad under tidsperioden 1971-1975 samt månadsmedelvärden för denna period.

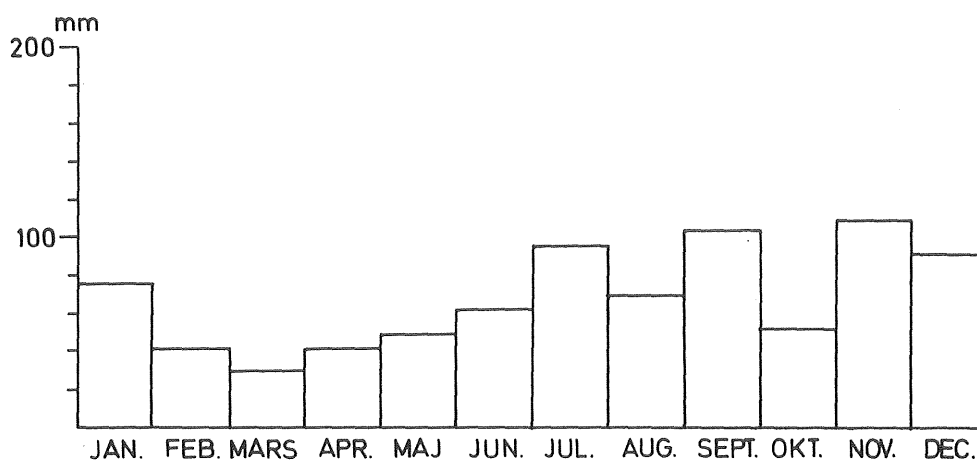
TAB. 4. Nederbördsvärden i Gunnilse för varje månad under tidsperioden 1971-1975 samt månadsmedelvärden för denna period.

	1971	1972	1973	1974	1975	1971-1975
Januari	79,3	27,9	60,0	88,2	126,0	76
Februari	52,7	18,4	78,2	56,3	8,5	43
Mars	50,3	29,6	24,0	27,6	23,1	31,
April	39,0	70,3	68,3	0,0	i 44,5	44
Maj	24,7	97,4	60,7	41,8	i 29,5	51
Juni	80,6	139,3	32,4	25,5	27,8	61
Juli	91,1	123,7	51,5	79,5	130,3	95
Augusti	119,4	57,3	65,5	81,2	32,2	71
September	88,3	24,5	84,3	203,5	118,3	104
Oktober	87,0	39,9	48,8	68,7	37,4	56
November	143,3	97,4	125,2	132,4	50,2	110
December	64,1	120,8	82,3	135,5	56,1	92
Totalt	919,8	846,5	781,2	940,2	683,9	834

i = interpolerat värde

Nederbörden 1972 överensstämde ungefär med 5-årsmedelvärdet medan 1973 var torrare än normalt (-53 mm) och 1974 var våtare än normalt (+106 mm). 1975 uppvisar extremt låg nederbörd (-150 mm). Av figur 21 framgår månadsmedelvärden för tidsperioden 1971-1975.

Av figur 22 över månadsnederbörd och 5-årsmedelvärden framgår att våren och sommaren 1972 hade stort regn-överskott medan hösten hade underskott. Januari och

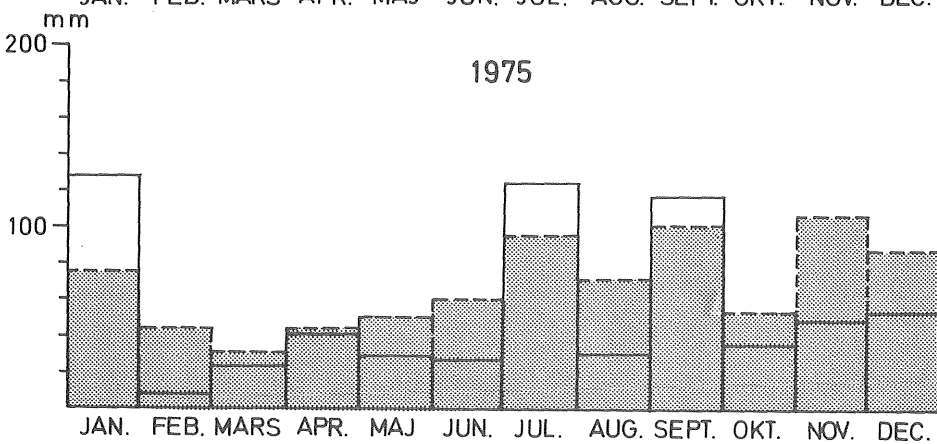
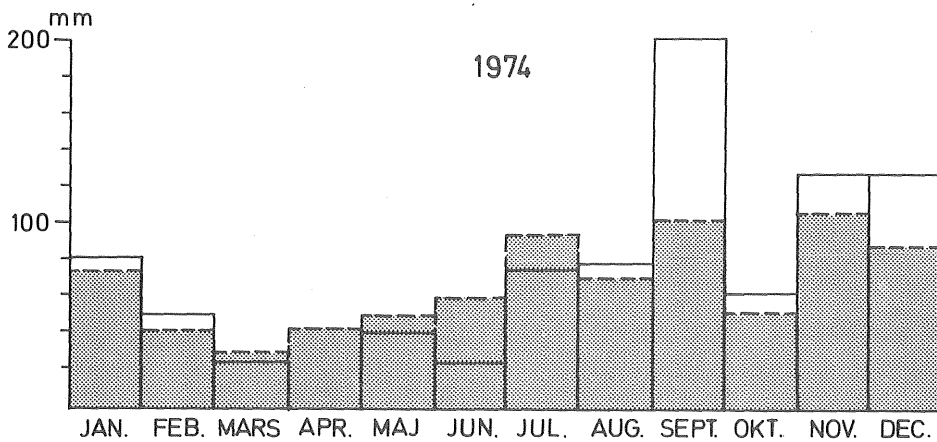
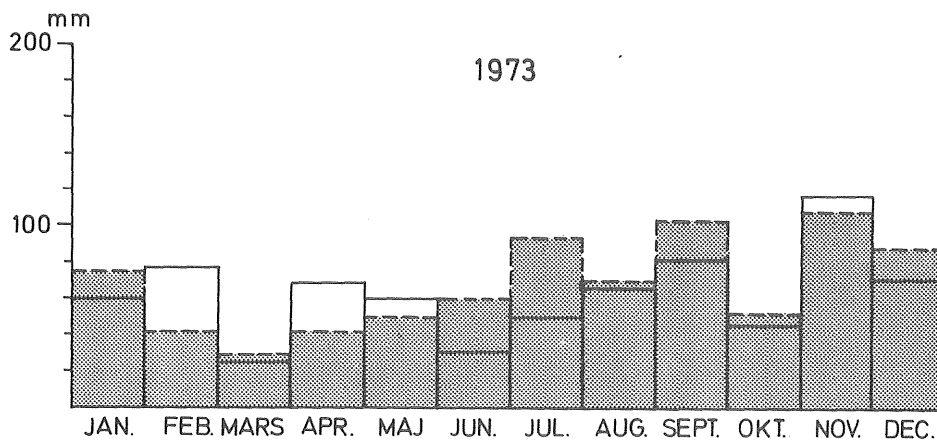
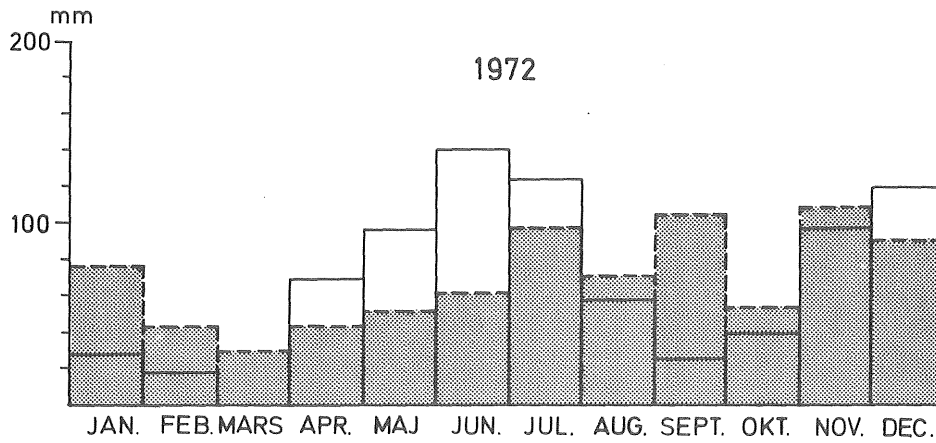


Figur 21. Månadsmedelvärden 1971-1975 för VA-verkets mätare i Gunnilse.

februari uppvisar underskott medan mars har i stort sett normal nederbörd. Sommarmånaderna juni och juli hade regnunderskott både 1973 och 1974. 1975 hade juni ett stort underskott medan juli hade överskott. Hösten 1973 hade nederbördsunderskott medan hösten 1974 hade överskott. Detta överskott var extremt stort under september och stort under december. Under 1975 hade 9 månader av årets 12 nederbördsunderskott. Februari, juni, augusti och november hade extremt stort nederbördsunderskott. Januari, juli och september hade överskott på nederbörd. Mars hade låg nederbörd både 1973, 74 och 75. 1975 var det extremt stor skillnad mellan nederbörden i januari och februari.

4.5 Nederbördsättning - Felkällor

Vid utvärdering av dessa nederbördsdata har beaktats att uppmätta nederbördsmängder kan vara behäftade med mätfel, bl a på grund av mer eller mindre ofrånkomliga brister i fråga om instrumentutrustning och uppställning. Mätfelen är systematiska, de uppmätta mängderna



Figur 22. Diagram över den genomsnittliga månadsnederbörden 1971-1975 (rastrerat) och månadsnederbörden 1972-1975 för VA-verkets nederbördsmätare i Gunnilse.

är som alltid mindre än de verkliga nederbördsmängder som når marken. SMHI räknar med att mätfelen uppgår till mellan 5 och 15% av den uppmätta mängden.

Inom arbetsområdet har s k KTH-totalisatorer använts. De skall normalt ha en öppningsarea på 200 cm². Vid kontrollmätning har det emellertid visat sig, att öppningsarean för de tre mätarna varierar mellan ca 200 och 206 cm². De har därmed visat något för stora nederbördsmängder, som mest mellan 3-6%. Vid jämförelser mellan stationerna bör man ha dessa brister i åtanke.

5 INFILTRATION, AVRINNING OCH PERKOLATION

5.1 Nederbördens infiltration

Med infiltration avses vattnets inträngande i marken, medan den fortsatta strömningen ned mot grundvattensytan benämnes perkolation. Infiltrationskapacitet är den vattenmängd per tidsenhet och ytenhet, vanligen mm/tim, som vid en given tidpunkt kan tränga ned genom markytan.

Infiltration i marken kan förekomma under regn och snösmältning. Infiltrationens storlek är beroende av ett flertal faktorer så som markytans beskaffenhet, vegetation samt ytjordartens mekaniska sammansättning och struktur. Det topografiska läget i terrängen och grundvattnets trycknivå spelar för svenska förhållanden en avgörande roll. Stora säsongsbundna variationer är vanliga med avsevärt större infiltrationskapacitet på sommaren än under övriga året.

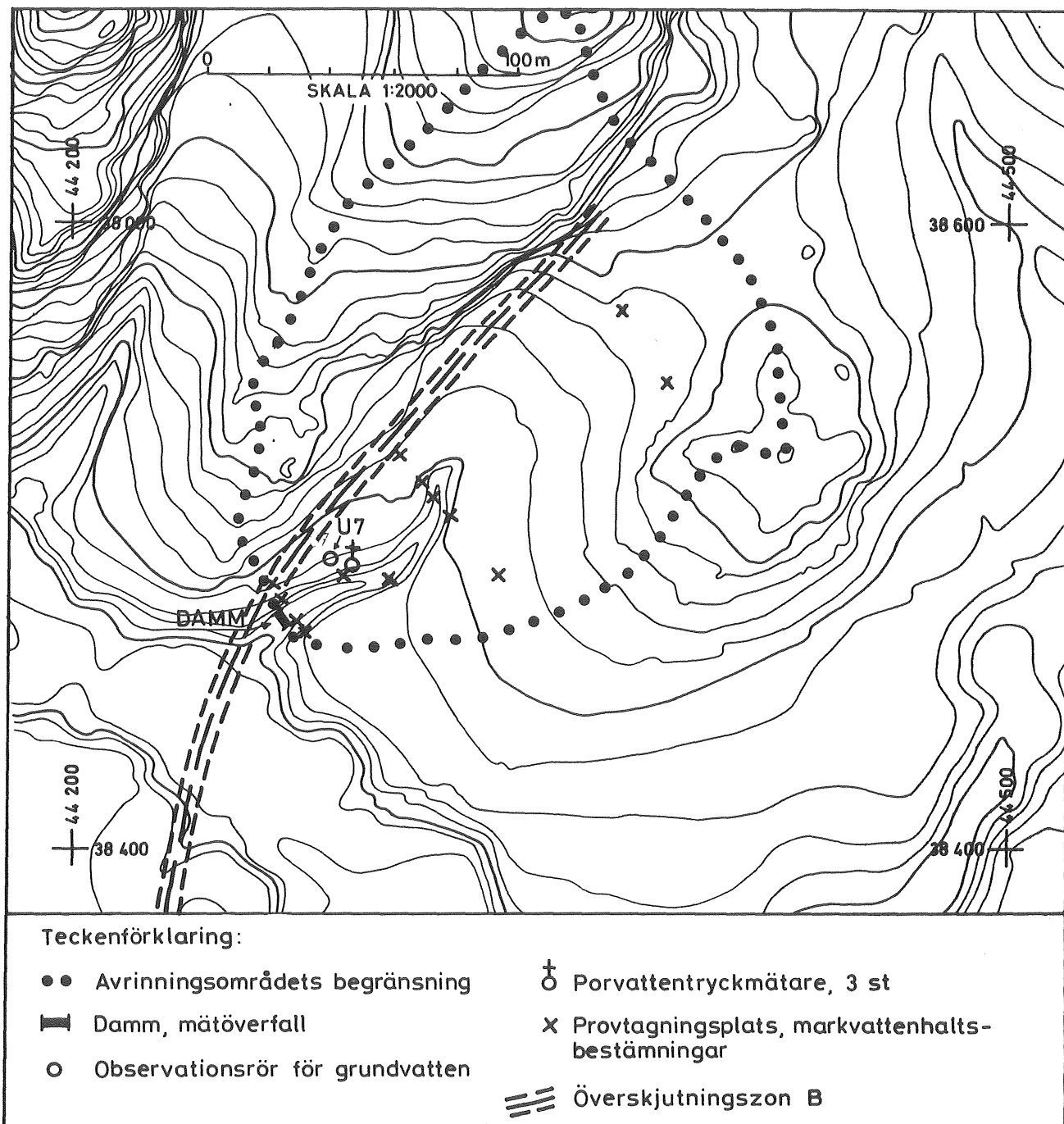
I vårt försök sommaren 1975 har dubbelringinfiltrationsmeter använts (Holmstrand, 1976). På varje försöksplats har två bestämningar gjorts. Den ena på vegetationsklädd markyta, den andra med ringarna nedgrävda 30 cm. Infiltrationskapaciteten vid olika tidpunkter efter försökens start framgår av TAB. 5. För en utförligare beskrivning av dessa försök se Engdahl, 1975. Tyvärr har inte försöken alltid kunnat drivas så länge att konstanta värden erhållits.

Under försöken konstaterade vi att infiltration i början i allmänhet vara avsevärt större i markytan än på 30 cm djup. I två fall var kapaciteten lägre i ytan. I det ena fallet orsakades detta att markytan utgjordes av en hård, torkad yta utan vegetation. Anledningen till avvikelserna i det andra fallet var för de första måttillfällena till en del att marken var fuktig p g a regn. Slutvärdet antyder dock att en annan förklaring också måste sökas.

Infiltrationskapaciteten vid försökens början var ute på fälten 20-400 mm/tim. Invid bergklackarna var infiltrationskapaciteten mycket större än i övriga delar av området. Infiltrationen vid markytan var 700-1200 mm/tim vid försöksstart. De huvudsakliga anledningarna till dessa höga värden torde vara jordartens något grövre sammansättning runt bergknallarna (se nedan och ingenjörsgelogisk karta, figur 14) och vegetationen där.

TAB 5. Infiltrationskapacitet i mm/tim på försöksplatserna 1-10. a = försök i markytan, b = försök 30 cm under markytan. Efter Engdahl 1975.

Infiltrationskapacitet i mm/tim efter angiven tid.					
Försök	Vid start	2 tim	4 tim	6 tim	8 tim
1 a	11	11	16	7	
b	410	164	136	82	
2 a	17	1	0,5		
b	7	11	14		
3 a	765	325	190	190	
b	325	190	150		
4 a	300	164	136	95	
b	122	109	55	41	
5 a	765	220	165	165	165
b	290				
6 a	245	33	22	16	
b	5	3	2		
7 a	87	22	19		
b	175	82	44		
8 a	380	160	68		
b	12	2			
9 a	980	545			
b	208	120			
10 a	1200	550			
b	95	33			



Figur 23. Figur över det studerade avrinningsområdet i Angered.

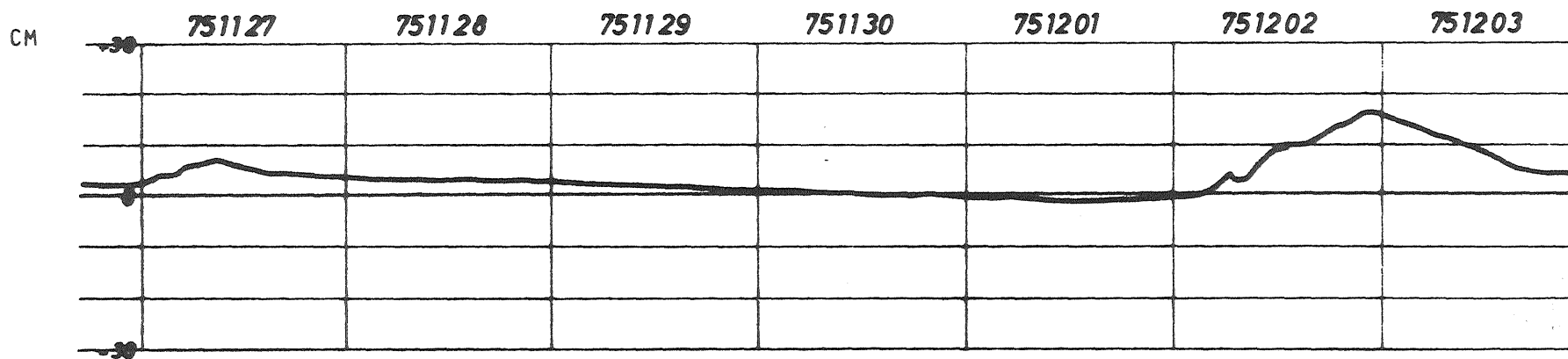
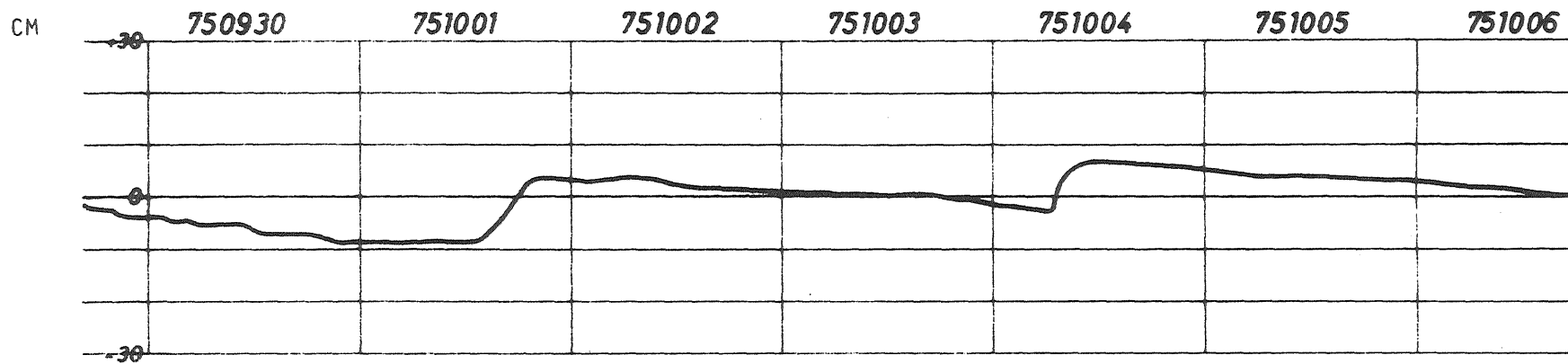
Infiltrationskapaciteten på 30 cm djup var mycket varierande 5-500 mm/tim vid start. Anledningen till detta har ej belagts.

Infiltrationskapaciteten var efter två timmar avsevärt reducerad. Efter fyra timmar har infiltrationen börjat anpassa sig mot ett konstant värde i de flesta försöken. Efter 6 timmar var, för försöksplatser invid berghällar, infiltrationskapaciteten ungefär 200 mm/tim. Ute på fälten pekar slutvärdet mot storleksordningen 50 mm/tim.

Infiltrationskapaciteten avtar snabbt med tiden. Efter fyra timmars försök har infiltrationskapaciteten, i flera fall, börjat anpassa sig mot ett konstant värde. Antalet bestämningar är med den spridning resultatet fått för få för att ligga till grund för en indelning av området i ytor med olika infiltrationskapacitet. Invid berghällarna tycks dock kapaciteten enligt ovan vara högre. Riktvärdet för infiltration vid ett regn med några timmars varaktighet torde kunna sättas till 200 mm/tim för dessa ytor. Ute på fälten är infiltrationskapaciteten under samma förhållanden avsevärt lägre, ungefär 50 mm/tim. Allt tyder dock på att infiltrationskapaciteten är tillräckligt stor, över så gott som hela området, för att tillåta infiltration av den nederbörd som faller där.

5.2 Avrinnings- och markvattenförhållanden

För att närmare belysa förhållandena i den omättade zonen och i någon mån bedöma grundvattenbildningen i området med utgångspunkt från avrinnings-, infiltrations- och markvattenförhållanden inriktades markvattenstudierna på ett avgränsat avrinningsområde inom försöksområdets nordvästra del (Eriksson, 1977). Detta avrinningsområde är 2,1 ha stort och ytvattendelaren framgår av figur 23. Topografiskt domineras avrinningsområdet sydvästra del av en bäckravin. 10 m nordost om undersökningsrör U 19 uppfördes i slutet av juli 1975 en mät-



Figur 24. Pegeldiagram för mätdammen vid avrinningsområdet i Angered för tidsperioderna 750930--751006 och 751127--751203.

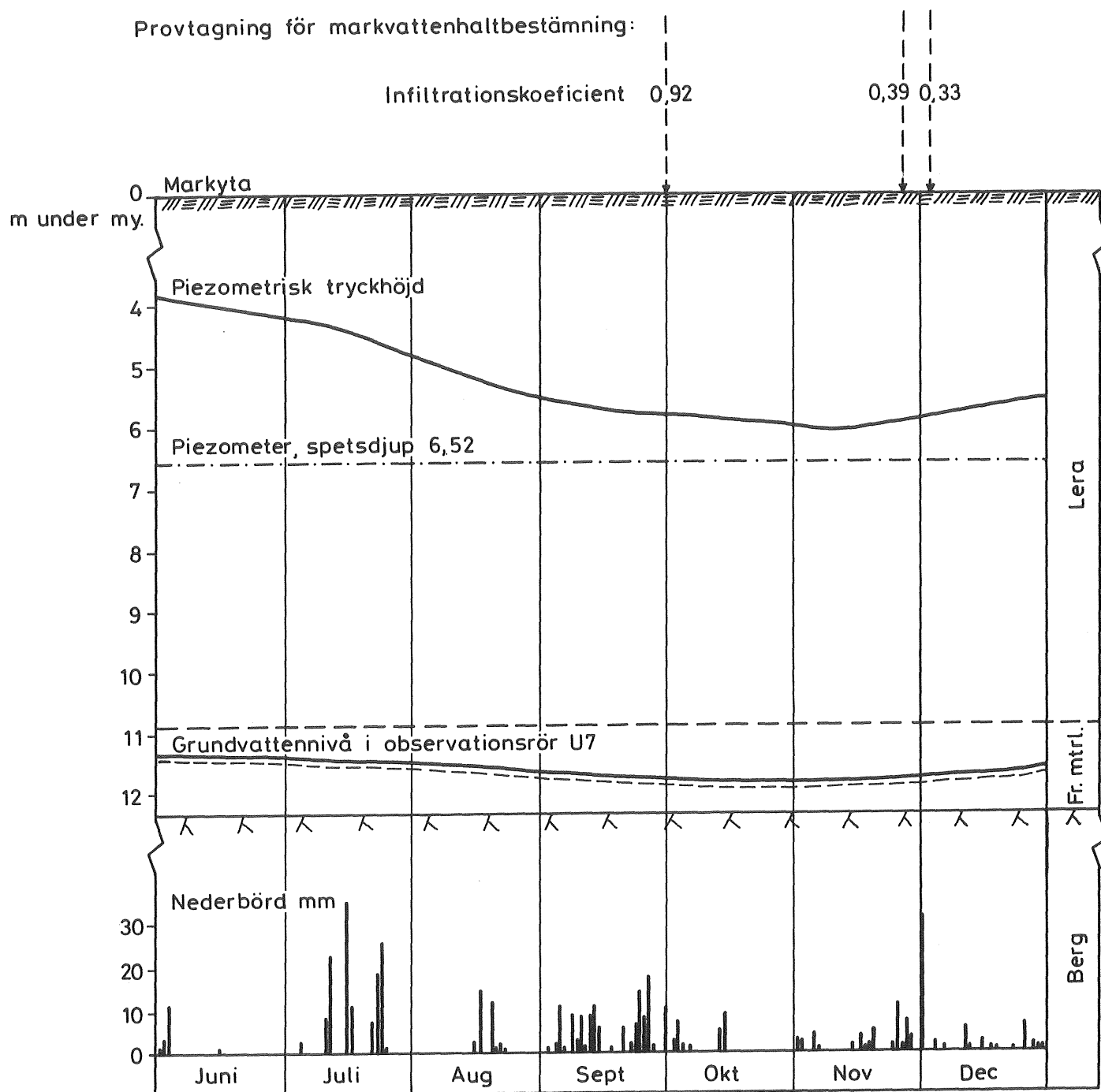
damm med Thomsonöverfall (90°) för att möjlighet skulle finnas att under hösten uppmäta ytavrinning från området. Från 750801 t o m 751219 har dammen varit instrumenterad med en registrerande pegel, se figur 24.

Jordprovtagning har utförts dels med skruvborr och dels med cylinderprovtagare (modell Sigvard Anderson). Vid tre tillfällen under hösten 1975 har prover tagits vid tio platser. Proverna har insamlats på var tionde centimeter från markyta ned till ett djup som varierat mellan 0,5 m och 1,0 m. Cylinderprovtagaren användes för provtagning i ytan (10 cm:s cylindrar). Provtagningspunkterna framgår av figur 23.

Av provtagningen har framgått, att det i avrinningsområdet, från markyta ned till 30-40 cm:s djup, huvudsakligen finns en mullrik till mycket mullrik, mjällig lera. Där under minskar humushalten och jordarten kan betecknas som en något till måttligt mullhaltig moig mellanlera ned till ca 50 cm:s djup.

Dygnsnederbörden för år 1975 i Gunnilse framgår av fig. 25 där även provtagningstillfällena är markerade. Följande kan sägas om nederbörden under försöksperioden: Tredje veckan i augusti förekom viss nederbörd. Fr o m 750905 t o m 751007 hade man en ihållande nederbördsperiod, vilken avlöstes av en något regnfattigare period fram till 751115. Under denna regnfattigare period regnade det dock omkring den 15:e oktober samt första veckan i november. Därefter följde en nederbördsrik tid till slutet av året med bl a ett intensivt regn 751202.

Den första registreringen på avrinning vid mätöverfallet inträffade 750927. Vid nederbördstillfällena i oktober konstaterades också avrinning ut från området, fig 24. I samband med dessa nederbördstillfällen skedde avrinningen tämligen momentant och en upptorkning tycktes följa direkt på regnet. Efter nederbörd omkring den 15:e oktober, ca 16 mm, registrerades avrinning med ett förlopp liknande det ovan nämnda. I god överensstämmelse med den nederbördsfattigare perioden i november hade inte någon avrinning ägt rum fram till 751125.



Figur 25. Grundvattennivåns (U7) och den piezometriska trycknivåns fluktuation samt nederbörden i Gunnilse under juni till december 1975.

Därefter svarade avrinningen på nederbörden och i korrelation med detta förelåg, enligt den sista jordprovtagningen, vattenhalter omkring fältkapacitet i det översta markskiktet. Efter 751207 hade det varit ett tämligen konstant flöde ut från området tills dess att dammen blev istäckt omkring den 17:e december.

I området har regelbundna portrycksmätningar företagits i tre piezometrar (svängande sträng). Piezometrarnas placering framgår av figur 23 och spetsdjupen var 11,18 m (mätare nr 74174), 9,50 m (74177) resp 6,52 m (74176). Vid drivning av mätare 74177 överskreds tillåtet maximalt tryck, varför denna mätare ej givit tillförlitliga värden. Mätare 74174 har under försökstiden visat nolltryck medan mätare 74176 uppvisat det kurvförlopp för den piezometriska tryckhöjden som framgår av figur 25. Den senare omnämnda mätarens registrerade tryck låg i förhållande till dess spetsdjup mycket när noll. I figuren visas den piezometriska tryckhöjden för observationsrör U 7, vilket är beläget ca 7,0 m från piezometer 74176 samt på samma plushöjd. Kurvförloppet för U 7 är signifikativt för de undersökningsrör som är belägna närmast omkring piezometrarna. Vidare bör påpekas, att trycknivån i U 7 endast var belägen 0,5-1,0 m ovanför bergytan. Den piezometriska tryckbilden är med andra ord störd och en dränering har ägt tum i såväl friktionsmaterial som lera.

Allmänt om kurvförloppen kan sägas, att amplituderna för undersökningsrörens trycknivåfluktuationer, i förhållande till piezometer 74176 är mindre och att den säsongsbetonade ökningen i tryckhöjd inträffade ca 14 dagar senare i lera än i underliggande friktionsmaterial. Förklaringen är sannolikt att dräneringen hade en starkt utfläckande inverkan på det grövre jordartsmaterialets trycknivåfluktuation samt att den låga permeabiliteten för lera gav den ovan omtalade fördröjningen i magasinsförändringen.

Eftersom grundvattennivån i det underliggande friktionsmaterialet under mätperioden och rådande sänkta förhållanden

ej når upp till akviferens övre yta måste tryckökningen vid piezometern bero på perkolerande vatten, dels vertikalt, dels eventuellt via tunna skikt av friktionsmaterial i leran.

Om man förutsätter, att evapotranspirationen varit noll vid själva regntillfällena, skulle en mycket grov uppskattning på infiltrationen kunna göras. Infiltrationskoefficienten som utgör förhållandet mellan infiltrerad vattenmängd och bruttonederbörd var 751001 lika med 0,92, 751127 lika med 0,39 och 751202 lika med 0,33 (se figur 25). Förändringen av infiltrationskoefficienterna belyser alltså väl den allmänna minskningen i infiltrationskapacitet ju våtare förhållandena var i det 0,5 m översta skiktet.

Markvattenmätningar med radiometrisk djupsond har utförts vid några enstaka tillfällen. Om man anser, att den kalibrering som genomförts är representativ för lerlagren i stort, kan man konstatera följande:

Från och med 1,0 m djup under markyta och ned till friktionsmaterialet uppgår i allmänhet vattenhalten till 40-50 vol %, dvs något under fältkapacitet (laboratoriebestämd till 50-60%). Vidare kan man konstatera, att en viss årstidsberoende magasinsförändring sker över hela lermäktigheten (se figur 25) och icke endast i den översta metern, vilket är vanligt i rurala områden. Avvikelserna från det normala mönstret är en följd av de dränerade förhållanden som råder och således har man icke vattenmättnad i större delen av lerlagerföljden vilket bl a har givit negativa portryck vid portryckssondering. Den nedåtriktade potentialstyrda vattentransporten påverkas dock säkert av den i horisontell led mer gynnsamma hydrauliska situation, som råder i de skikt av silt som finns inlagrade i leran.

Vid rördrivningen konstaterades förlust av spolvatten på en del nivåer i lerlagret, se TAB. 6. Anledningen till detta torde vara förekomsten av vattengenomsläppliga la-

ger av friktionsmaterial i leran. Permeabiliteten i dessa lager måste vara avsevärd, eftersom vattenförlusten sannolikt koncentreras till en begränsad del av de lager, där rörspets och perforerad nedre del av undersökningsrören placerats vid varje urspolning. K-värdet för sådana skikt kan antagas vara större än för moränen i området.

Eftersom lagren lutar något (se jordarter 3.4) kan vatten som infiltreras i ytan via dessa lager transporteras nedåt. Diskordant lagring på erosionsytor, över vilka grövre fraktioner inlett en ny sedimentationscykel, skär här och var ovannämnda permeabla lager, varigenom en fortsatt nedträngning av infiltrerat vatten möjliggörs.

Vid grävning i området under höst och vinter konstaterades i en del gropar en påtaglig vattenströmning några dm under markytan. Detta tycktes koncentrerat till gränsen mellan den luckra "ytjorden" och tätande skikt därunder. Den avrinning som konstaterats kan sannolikt till stor del hänföras till just sådant vatten och härrör i mindre grad till vatten, som rann över markytan i vegetationsskiktet.

5.3 Hydrologisk balans

Antalet mätningar i Angeredsområdet är trots de anställningar som gjorts för få för att en tillräcklig underbyggd beräkning av den perkolerande vattenmängden skall kunna göras. Med utgångspunkt från Philips (1957) balansekvation för förändring av markvatteninnehållet har ändå ett försök att uppskatta vattenläckaget genom berggrunden från det specialstuderade avrinningsområdet genomförts.

5.3.1 Hypotes

Grundvattenförhållandena i det 2,1 ha stora avrinningsområdet påverkas i hög grad av överskjutningszon B i berggrunden, under leran och friktionsmaterialet, se figurerna 14 och 23.

TAB. 6. SAMMANSTÄLLNING AV UPPGIFTER OM UNDERSÖKNINGSRÖR OCH JORDARTSLAGERFÖLJDEN I ANSLUTNING TILL DESSA.

Rör nr	1 Markytensivå	2 Jorddjup	3 Frikt. lager	4 Torrskorpe- djup	5 Permeabla i leran m	skikt
U 1	72.18	14.2	0.05	-	4.0	0.90
U 2	72.37	3.3	0.10	-	0.0	-
U 3	74.46	7.1	0.00	-	0.0	-
U 4	74.25	6.2	0.70	-	0.0	-
U 5	75.63	10.3	0.10	-	5.0	0.14
U 6	68.85	4.0	0.00	-	0.0	-
U 7	73.87	12.3	1.80	-	2.0	3.00
U 8	76.90	5.3	0.75	3.00	0.0	-
U 9	76.08	10.3	0.30	3.50	1.5	0.40
U 10	69.25	3.3	0.25	0.00	-	-
U 11	70.98	11.1	0.00	3.00	4.0	6.00
U 12	74.74	10.9	0.75	4.50	5.5	38.00
U 13	73.98	5.5	0.50	0.00	0.0	-
U 14	74.99	9.0	0.50	0.00	4.5	0.03
U 15	73.91	11.7	0.25	2.75	9.0	1.20
U 16	72.86	14.6	0.75	1.00	2.5	1.50
U 17	76.01	5.7	0.15	2.75	3.0	0.10
U 18	73.51	12.3	1.60	2.50	8.0	1.10
U 19	69.77	9.8	0.05	0.00	0.0	-
U 20	71.73	13.4	0.05	0.00	4.5	2.10
U 21	74.69	5.8	0.60	3.75	1.0	0.03
U 22	70.47	8.1	0.40	0.00	2.0	0.50
U 23	69.47	4.8	0.08	1.00	0.0	-
U 24	73.93	10.1	0.05	3.25	6.0	3.70
U 25	71.03	8.9	0.04	0.00	3.0	0.002
U 26	70.57	2.3	0.00	0.00	-	-
U 27	72.55	12.2	0.20	0.00	-	-

Förklaringar:

1. Plushöjd över Göteborgs nollplan
2. Totalt jorddjup i meter
3. Friktionsmateriallets lermäktighet i meter
4. Djup i meter till torrskorpans underkant
5. Höjd över friktionsmateriallager (m) och spolvattenförlust (l/min) i mest genomsläppliga skikt

5.3.2 Teoretisk bakgrund

Den omättade zonen kan betraktas som en övergångszon, där vatten adsorberas, magasineras på annat sätt eller överförs antingen till grundvattenytan eller mot markytan och

atmosfären. Naturligtvis förekommer horisontella rörelser, men eftersom den omättade zonen normalt är vidsträckt i förhållande till sitt djup innehåller en markvatten-balans-ekvation vanligtvis enbart vertikala komponenter. Philip har introducerat följande enkla markvattenmodell:

$$\Delta m = f + c - d - e + v \quad (1)$$

- Δm - förändring av markvatteninnehåll
- f - infiltration
- c - vattenmängd från den kapillära "uppsugningen"
- d - dränage till grundvattenzon
- e - evapotranspiration
- v - ökning eller minskning av vattenånga

Vattenånga förekommer i liten mängd i förhållande till övriga komponenter och i det fortsatta resonemanget bortses från denna komponent. Således är $v = 0$.

Eftersom ekvation (1) är avsedd för ett kontinuerligt jordlager måste vissa förenklingar göras i antagandena. Friktionsmaterialet mellan leran och berggrunden kan hydrogeologiskt i beräkningsmodellen anses vara en begränsad öppen akvifer, 0,15 ha stor, där grundvattnets trycknivå p g a avsänkning är belägen i akviferen, se figur 32, moment 7.1. Lerans mäktighet är i förhållande till friktionsmaterialets mycket större och hela lagret betraktas i det följande som markvattenzon. Detta antagande får anses välgrundat med tanke på de negativa portryck som uppmätts.

Tillskottet till markvatteninnehållet i leran av kapillär uppsugning (c) från grundvattenytan i friktionsmaterialet, sättes således lika med noll.

Följande ekvationer uppställs:

$$f = n - q \quad (2)$$

$$d = a + \lambda \quad (3)$$

där n är nederbörden, q är avrinningen. Vidare är dränaget till grundvattenzonen sammansatt av två komponenter a = magasinförhöjning i friktionsmaterialet och λ = läckage genom krosszonen. Ekvationerna (1), (2) och (3) med påtalade modifieringar av vattenångeinnehåll och kapillärt upptransporterat vatten ger då:

$$n = q + e + a + \Delta m + \lambda \quad (4)$$

Av de i ekvation (4) ingående storheterna kan vi för det aktuella avrinningsområdet göra en uppskattning av alla parametrarna utom λ , dvs läckaget genom krosszonen.

5.3.3 Bestämning av ingående storheter

Den hydrologiska balansen studeras för en tidsrymd av två månader, nämligen tiden 751015 - 751215. Tiden är vald med hänsyn till att värden på avrinningen enbart föreligger från hösten 1975, fig. 24 och 25.

Nederbörden under tiden 751015 - 751215 uppmättes till 103 mm. Vid felanalys i nederbördsmätningen antages för slutresultatet ett mätfel på $-(10-15)$ % i medeltal och verklig nederbörd torde således kunna uppgå till 118 mm. Det bör observeras, att instrument- och bearbetningsfel ej beaktats. (Se Arnell, 1974).
 $n = 118$ mm.

Avrinningen från det 2,1 ha stora försöksområdet har bestämts med hjälp av mätöverfall. Den totala avrinningen från området under den betraktade tiden motsvarade 24 mm nederbörd $q = 24$ mm.

Evapotranspirationen har bestämts med hjälp av det förfarande som utarbetats av Bergsten (1950). Metoden ger den potentiella avdunstningen och anses gälla för områden i Sydsverige.

Dygns- och månadsmedeltemperaturer för Bergsjön samt Floda har erhållits från institutionen för VA-tekniks mätstationer. Dessa ingångsparametrar ger för den aktuella tiden en sannolik potentiell avdunstning av 27 mm. $e = 27$ mm

Grundvattennivån under den betraktade tiden steg i observationsrören U 7, U 18 och U 25 med 5 cm, 4 cm och 6 cm resp. Dessa observationsrör är belägna inom avrinningsområdet och får således representera den generella grundvattenhöjningen i friktionsmaterialet. Den effektiva porositeten för materialet är ca 20% och ytan av akviferen 0,15 ha, vilket ger en förhöjning av trycknivån motsvarande ungefär 0,07 mm.

$$a = 0,1 \text{ mm.}$$

Markvattenvariationen i avrinningsområdet har konstaterats omfatta hela lermäktigheten. Magasinsförändringen är årstidsberoende, se 5.2 och figur 25. De mätningar som utförts med radiometrisk djupsond har föranlett oss att uppställa en hypotetisk markvattenförhöjning under den betraktade tidsperioden. Enligt denna är förändringen 2,5 vol % i ytan och minskar till 0,5 vol % 2 m under markytan. Därunder är vattenhaltsförändringen 0,5 vol %. Medelmäktigheten av leran är ca 5 m.

Men hänsyn tagen till markvattenmagasinets yta och djup motsvara magasineringen 17 mm nederbörd. $m = 17 \text{ mm.}$

5.3.4 Läckage genom berggrunden

Eftersom grundvattenbildningen i friktionsmaterialet endast motsvarar 0,1 mm nederbörd kan vi bortse från denna.

Ekvation (4) ger då:

$$118 = 24 + 27 + 17 + \lambda$$

$$\lambda = 50 \text{ mm}$$

Denna läckagemängd motsvarar ett flöde av 12 l/min till gemensamhetstunneln från det 2,1 ha stora avrinningsområdet. Osäkerheten i bestämningen av de ingående parametrarna är som inledningsvis framhölls mycket stor och till detta kommer svårigheten att bestämma förändringen av mark- och grundvattenmagasinen.

I anslutning till nederbördstillfällena märks ingen påtaglig höjning av nivån i grundvattenmagasinet. Samtidigt kan en kraftig ökad inläckning i tunnlarna konstateras vid besiktning. Tyvärr har storleken av denna inläckning ej kunnat uppmätas. Tillsammans med ovanstående studium av den hydrologiska balansen tyder detta på att permeabiliteten för berggrunden räknat över hela ytan är större än det ur ovanstående framräknade värdet $9 \cdot 10^{-9}$ m/s, ungefär lika med $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

6 GRUNDVATTENMÄTNING OCH GRUNDVATTENFLUKTUATIONER

6.1 Mätning och registrering

Grundvattennivåns förändring har följts i observationshålen under hela försöksperioden. Observationsnätet utökades under 1973 och 1974 med elva stycken bergborrhål och 30 observationsrör i jordlagren inom ramen för detta projekt. Mätning har vanligen företagits en gång per fjorton dagar, tidvis en gång per vecka t o m jan 1976. I samband med försök har nivåerna mätts med kortare intervall. Grundvattennivåns fluktuation redovisas i mom. 6.2 omfattande hela försöksperioden. Nivådiagram med likartat utseende har sammanförts till grupper, se figur 27.

De kurvor som uppvisar ett likartat utseende förväntas representera likartade grundvattenförhållanden. Passning av grundvattennivådiagram för att därigenom söka dra slutsatser om vilka observationsrör som placerats i samma eller likartade akviferer förutsätter långa mätserier. Förfaringssättet ger givetvis utrymme för subjektiva värderingar, men i många fall tycks tidpunkten för mättillfället eller intervallen dem emellan spela större roll för resultatet. Även "datorpassning" är beroende av detta. Speciellt tydligt märks betydelsen av tidpunkten för mättillfället i förhållande till nederbördstillfällena vid studiet av grundvattenfluktuationer i berggrunden. Överhuvudtaget är möjligheten att värdera respon- sen på t ex nederbördstillfällena i en akvifer av ifrågasvarande slag starkt begränsad med de mätintervall som är aktuella med nuvarande manuella mätdon och mekaniska registreringsinstrument.

De självregistrerande peglar (typ KTH) som använts inom området fordrar att observationshålet har en minsta diameter av 100 mm. Detta gör det uteslutet att använda dem i de många undersökningsrören i jordlagren. Eftersom berggrundvattnet var kraftigt avsänkt måste långa linor användas mellan flottör och registreringstrumma. Längs vägg-

arna i borrhålen sipprar vatten ned så att dessa är fuktiga. Dessutom fälls järnhydroxider ut och redan några få graders avvikelser från lodlinjen vid borrningen medför avsevärda svårigheter på de aktuella djupen. Även måttband vid manuell mätning med ljuslod har en tendens att klibba vid borrhålsväggarna.

Grundvattennivån för varje mättillfälle har lagrats för databehandling (Hellgren, 1974). Diagram över grundvattennivåns förändring under hela tiden projektet löpte kan lätt tas fram. Dessutom ritar datorn interpolerade värden för jordgrundvattennivåkartor för varje mättillfälle som önskas. Detta har varit mycket värdefullt vid utvärderingen av studier som genomförts i enstaka eller grupper av observationspunkter.

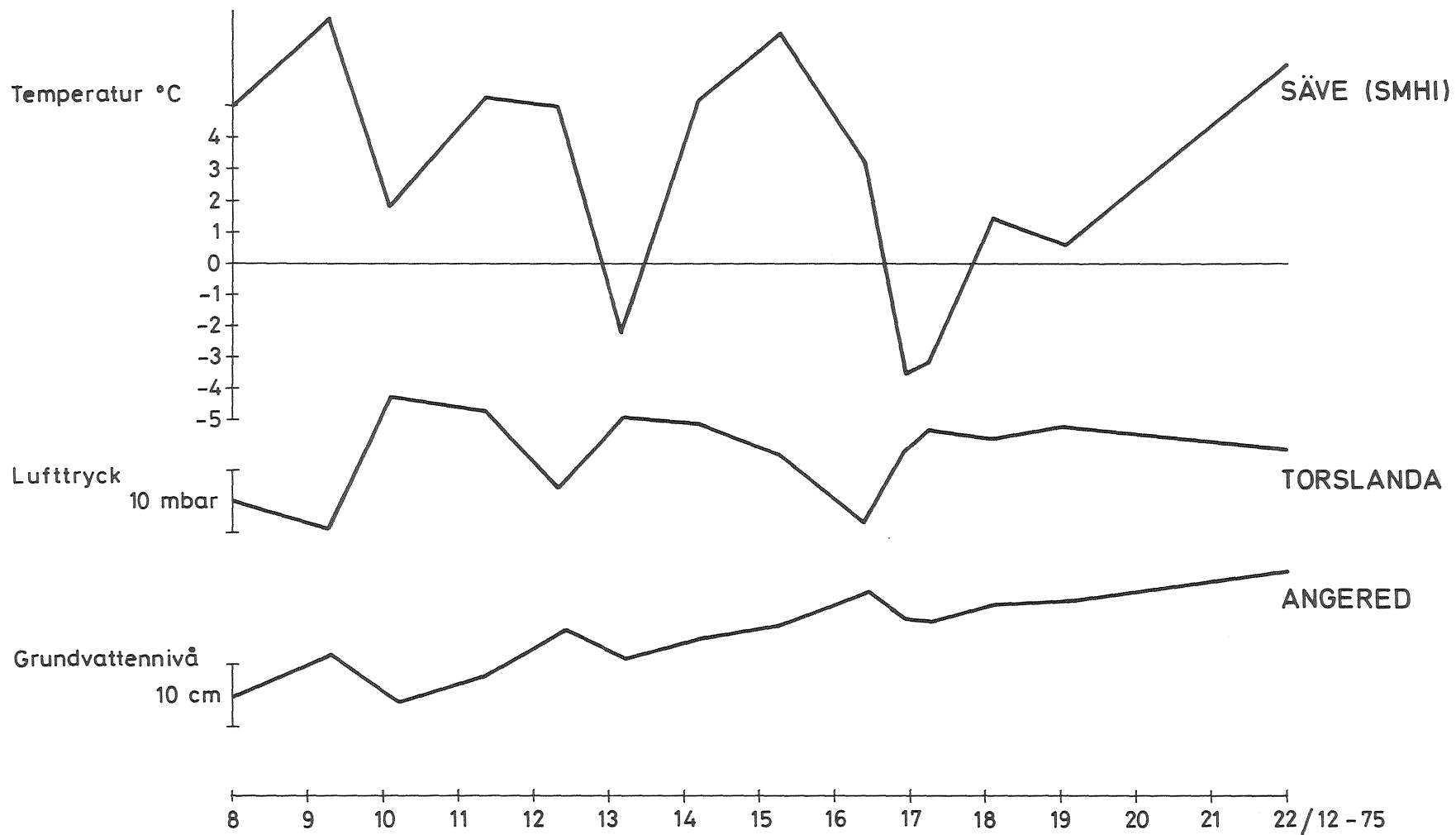
6.2 Grundvattenfluktuationer

Vid utvärdering av geohydrologiska undersökningar, där slutsatser drages av grundvattennivåvariationen i observationspunkter, är det mycket viktigt att kunna skilja genom mänsklig påverkan förorsakade förändringar från ett av naturen ev. betingat tillskott till variationen. De av naturen betingade variationerna är dels korttidsvariationer, som kan vara svåra att urskilja med de intervall vi har mellan mätningarna, dels långtidsvariationer, som i första hand är säsongsberoende.

6.2.1 Korttidsvariationer

Akviferernas beroende av de klimatiska betingelserna är högst olika. Sålunda konstateras att bergakviferen visar nästan omedelbar respons på nederbörd. Detta är särskilt påtagligt vid observation av inläckningen i tunnarna. Tyvärr har det som tidigare nämnts ej varit möjligt att mäta denna inläckning. Markzonen och vegetationen utjämnar under sommarhalvåret grundvattenfluktuationerna och därför blir korttidsvariationerna mindre.

Inverkan genom förändring av gravitationen på grundvattennivåerna i jordlagren är på grund av de i detta sam-



Figur 26. Kurvor utvisande temperatur, luftryck och den genomsnittliga grundvattennivåvariationen i 11 stycken observationsrör i Angered under tidsperioden 8-22 december 1975.

manhang små djupen ringa. Effekten av lufttrycksförändringen däremot är mera påtaglig (se figur 26) och bör beaktas vid utvärdering av grundvattennivåfluktuationer.

Under infiltrationsförsök i U 14 i dec 1975, då grundvattennivån mättes mycket tätt, visade det sig att dygnsvariationen var betydande. Den uppgick som mest till 0,20 meter i undersökningsrören i jord perioden 751209-751219 och 0,15 meter i bergborrhål perioden 751211-751219. Nederbörden, ca 9 mm, var under denna tid jämnt fördelad.

Under försöken har det även visat sig att nivåförändringar skett genom nederbördsstyrda inläckage från ytliga sprickor och otäta foderrörsinfästningar. Vid infiltrationsförsök är det därför mycket viktigt att väl känna till observationshålens funktion och egenskaper, samt att mäta nederbörden som faller inom försöksområdet. Nederbördsstyrda inläckage har vid vissa försök framgångsrikt skärmats av med hjälp av tätningssmanschetter.

6.2.2 Långtidsvariationer

Det är mycket angeläget att känna den naturliga årliga förändringen av grundvattenmagasinen i området och att kunna jämföra den aktuella situationen med förändringarna under tidigare år. Detta har varit möjligt dels tack vare att mätningarna pågått under tre år i försöksområdet och att det finns enstaka längre observationsserier. (Göteborgs VA-verk och STEGA). Jämförelsen med grundvattenkorset för Göteborg har också i hög grad underlättat arbetet. Klimatiska variationer över längre tidsrymder än årstidsväxlingen är också vanliga. Under den tidsperiod, som försöken pågick, har också femårsperioden 1971 - 1975 visat sig avvika från trettioårsperioden 1931 - 1960. Denna förändring visade sig medföra ett allt lägre sommarvattenstånd under perioden (utom 1974) i flera akviferer inom Göteborgsregionen. För Angeredsområdet är emellertid den kraftiga grund-

vattensänkning, som blev följden av tunneldrivningen, den helt dominerande effekten. Skulle en motsvarande grundvattensänkning ha förorsakats av naturen, kunde endast naturkatastrofer vara orsak.

6.2.3 Grundvattnets lägsta och högsta nivåer under försöksperioden

Grundvattnets lägsta och högsta nivåer i jordlagren och berggrunden har jämförts årligen under försöksperioden i avsikt att belysa grundvattenrörelsen mellan jordlagren och berggrunden. Tyvärr är antalet bergborrhål särskilt i försöksperiodens början litet. Även observationsnätet i jordlagren har byggts ut under försöksperioden. Ingen klar tendens har kunnat urskiljas med avseende på om högsta och lägsta grundvattennivån inträffade först i berg respektive jordlager. För enstaka bergborrhål, främst B5, konstateras dock en omedelbar respons på nederbörd samt en kraftig grundvattenavsänkning under längre torrperioder. Berträffande situationen vid de enskilda extremitillfällena redogörs nedan.

Grundvattnets lägsta nivå år 1973

Vid avläsningarna 731023 och 731030 hade 10 respektive 7 rör minima. Övriga rör hade sina lågpunkter relativt jämnt spridda mellan 730919 och 731211. Rörgruppen 429, U13, U16, U1, 418 hade minimum 730919-730925 och grupperna U5, U7, U9, U18 och S11 respektive U1, U20, U22, U23, U24 och 439 hade minimum 731025-731030. De trögt fungerande rören U3, U11, U19 och 438 hade sina lågpunkter 731106-731112. Bergborrhålen hade så när som på en observationspunkt sina miniminivåer mellan 730919 och 731025 med en topp 731025 då tre hål hade minimivattenstånd. Lågvattenståndet i jordlagren inträffar alltså samtidigt med och i en del hål något senare än i bergborrhålen.

Grundvattnets högsta nivå våren 1974

Inom mätperioden fanns hos de allra flesta rören två stycken väl utbildade toppar, av vilka den första i regel är den högsta. Inte mindre än 20 st rör når sitt maximum 740212 och de övriga extremvärdena ligger i tiden mellan 740328 och 740506. 740404 hade 4 rör maxima samtidigt som 11 andra rör hade ett toppvärde som var lägre än 740212. Av bergborrhålen hade 3 st maximum 740212, 3 st 740220, 1 st 740305 och 1 st 740422. Berggrundvattnet når alltså maximum ungefär samtidigt som det första vattenståndsmaximet i jord men med en viss eftersläpning.

Grundvattnets lägsta nivå år 1974

Rören når sina lägsta vattenstånd under tiden 740902-740930. 740902 hade 14 rör maximum, 740820 4 rör och 740916 4 rör. Minimivattenståndet ligger alltså ganska väl samlat kring 740902. Nästan alla rör på norra halvan av området har en bottennivå 740902. Rörgruppen U 5, U 8 och U 9 hade dessutom ett minimum 740916. På områdets södra halva finns både rör som når sina extremvärden tidigare och senare än de på norra halvan. De tröga rören U3, U 11 och 428 hade sena minimum. Av bergborrhålen hade 4 st sin lågpunkt 740902 och ett vardera 740611, 740802 och 740915. Förhållandena i berggrunden avviker alltså inte markant från förhållandena i jordlagren.

Grundvattnets högsta nivå 1974 - 1975

Rörens högsta vattennivåer ligger spridda mellan 741111 och 750526. De flesta rören hade sitt extremvattenstånd mellan 741111 och 750204. En välutbildad topp finns 750107 och 750120 då 8 st respektive 4 st rör hade sitt maximum. En senare topp finns utbildad under april månad. Under denna månad har 6 st rör sina maximinivåer. De rör som hade sitt maximum mellan 741111 och 750204 hade nästan samtliga högt vattenstånd (en andra topp) under samma månad, dock ej högsta extremvärde. De rör som hade

sitt extremvärde mellan 741125 och 750204 (1:a max) ligger som regel i områdets norra och östra del. Av 12 st rör som hade sitt extremvärde 740912, 741220 och 750107 står 10 st i nordost. De rör som hade sitt extremvärde senare än 750204 ligger som regel i områdets södra del.

Av de tolv betraktade bergborrhålen har 6 st maxima i december 1974 (2 st 741209 och 4 st 741220). Av de övriga ligger 4 st inom tidsintervallet 741111-750120 och resterande två 740916 respektive 750513. Grundvattenstånden når i de flesta fall sina maximivärden tidigare i berg än i jord.

Grundvattnets lägsta nivå 1975

Rören når sina miniminivåer mellan 750815 och 751124. 750929 hade 13 st rör sitt minimum. Miniminivån för de övriga rören ligger ganska jämt fördelade men med två mindre toppar, där 6 st rör hade sina miniminivåer mellan 750901-750915 och 6 st rör mellan 751110-751124. Samtliga rör med miniminivåer 750929 ligger väl samlade i två grupper, utsträckta i NNO - SSO-lig riktning, i områdets västra och östra delar. Rörgruppen U13, S11 och 429 hade sin miniminivå 750901. De ligger samtliga inom områdets norra del.

I söder finns rör som uppvisar både tidigt och sent extremvärde. De tröga rören U3, U11 och 428 hade sena minima. Bergborrhålen hade sina miniminivåer mellan 750707 och 751124. I september och oktober hade 4 respektive 5 av rören sina miniminivåer. Resterande rör hade sina minima i juli (2 st). Bergborrhål B9 är tomt från 751110 till 751222. Minimivattenståndet inträffade ungefär samtidigt i berg och jord, dock med någon eftersläpning i berg. Två bergborrhål B3 och B5 hade markant tidig miniminivå 750707. Båda dessa rör har visat sig påverkas snabbt av nederbördsituationen och den tidiga miniminivån kan förklaras med stort nederbördsunderskott i juni.

Grundvattnets högsta nivå 1975 - 1976

På grund av schaktningsarbeten inom arbetsområdet fick flera (13 st) av observationsrören dragas upp under vecka 4, 1976. Vid avläsningen 760120 visade samtliga rör högre nivå än tidigare avläsningar. Troligtvis är nivåerna för ett flertal av dessa rör maxnivåer. Men eftersom inga fler mätningar kan göras, kan nivåerna ej med säkerhet anges som maximinivåer.

Av övriga 19 st rör har 13 st sin maximinivå 760120. S11 hade sin maximinivå 751222 och 439 760105. U 18 uppvisar samma nivå 760120 och 760216. 2 st rör, U7 och S10, uppvisade stigande nivåer även vid mätningen 760216. Rör 428 hade uteslutits ur kommentaren eftersom det troligen hade påverkats av schaktningsarbeten. Maximinivån i berg infaller samtidigt som i jord. Av 12 st rör hade 9 st sina maximinivåer 760120. 2 rör, B1 och 312, hade 760120 ännu ej uppnått sina maximinivåer. Rör B5 hade sin maximinivå 750905 efter stort nederbördsöverskott i september.

6.2.4 Jämförelse nederbörd - grundvattnets säsongfluktuationer

Den aktuella försöksperioden kännetecknas av ett förhållandevis stort nederbördsunderskott, se mom. 4.3. Nedan följer en kortfattad jämförelse mellan nederbördens årliga fördelning och grundvattnets säsongfluktuationer.

Den allmänna avsänkningen av grundvattennivåerna startade tidigare den regnfattiga våren 1974 än 1973. 1974 års miniminivå inträffade i början av september medan 1973 års miniminivå låg i slutet av oktober. Höstens påfyllning av grundvattenmagasinen började tidigare 1974 än 1973, på grund av den mycket höga nederbörden i september 1974, medan hösten 1973 hade ett svagt regnunderskott. Grundvattenståndet hade 2 maxima 1973, ett i februari och ett andra maximum i april-maj efter ett visst nederbördsöverskott både i april och maj. 1974

års nivåmaximum inträffade i februari efter en regnrik januari.

Nivåmaxima 1974-75 ligger utspridda mellan november och februari. Nivåmaximum 1975 är inte så distinkt fixerad i tid som 1973 och 1974. Hösten 1974 hade stort nederbördsöverskott med extremt hög nederbörd i september. Även januari 1975 hade extremt hög nederbörd. Ett andra diffusare nivåmaximum infaller i slutet av april efter en mycket nederbördsfattig senvinter och vår. 1975 års miniminivå låg i slutet av september. Nederbördens fördelning var mycket ojämn under sommaren 1975. Maj, juni och augusti hade stort nederbördsunderskott medan juli och september hade överskott. Grundvattenrörens minimivattenstånd ligger tidsmässigt spridda över två månader 1973 och 1974. Under det regnfattiga året 1975 ligger miniminivåerna spridda över tre månader.

Nivåmaxima 1975 - 1976 ligger mycket väl samlade runt den 20/1 efter en nederbördsfattig höst. Oktober och december hade stort nederbördsunderskott medan november hade extremt stort underskott.

6.2.5 Jämförelse mellan mätserierna för Göteborgs grundvattenkors och grundvattnet i Angered

Grundvattennivåförändringens förlopp är något olika i de tre områden som utgör grundvattenkorset, men extremvärdena inträffar i regel samtidigt, med det undantaget att Härskogens akviferer visar en svag tendens till tidigare påfyllning efter sommarens lågvattenstånd än de andra områdena.

Signifikant för grundvattenkorset är att höstmaximum 1974-75 är högre än vårmaximum 1974 samt att nivåminimum 1974 är markant lägre än nivåminimum 1973 utom för Härskogen. Angered avviker från detta genom att nivåminimum 1973 är något lägre än minimum för 1974. Vidare började höstens magasinpåfyllnad 1973 markant senare i Angered än i grundvattenkorset.

Grundvattenamplituden är högst i Angered, sannolikt en effekt av grundvattensänkning, och lägst i Härskogens öppna akviferer där utströmning till angränsande markområden och ytvattendrag blir följderna vid höjda grundvattennivåer.

Amplituder:	Angered	ca 1,0 m
	Harestad	ca 0,6 m
	Härskogen	ca 0,3 m
	Sandsjöbacka	ca 0,7 m

6.3 Delakviferer inom undersökningsområdet

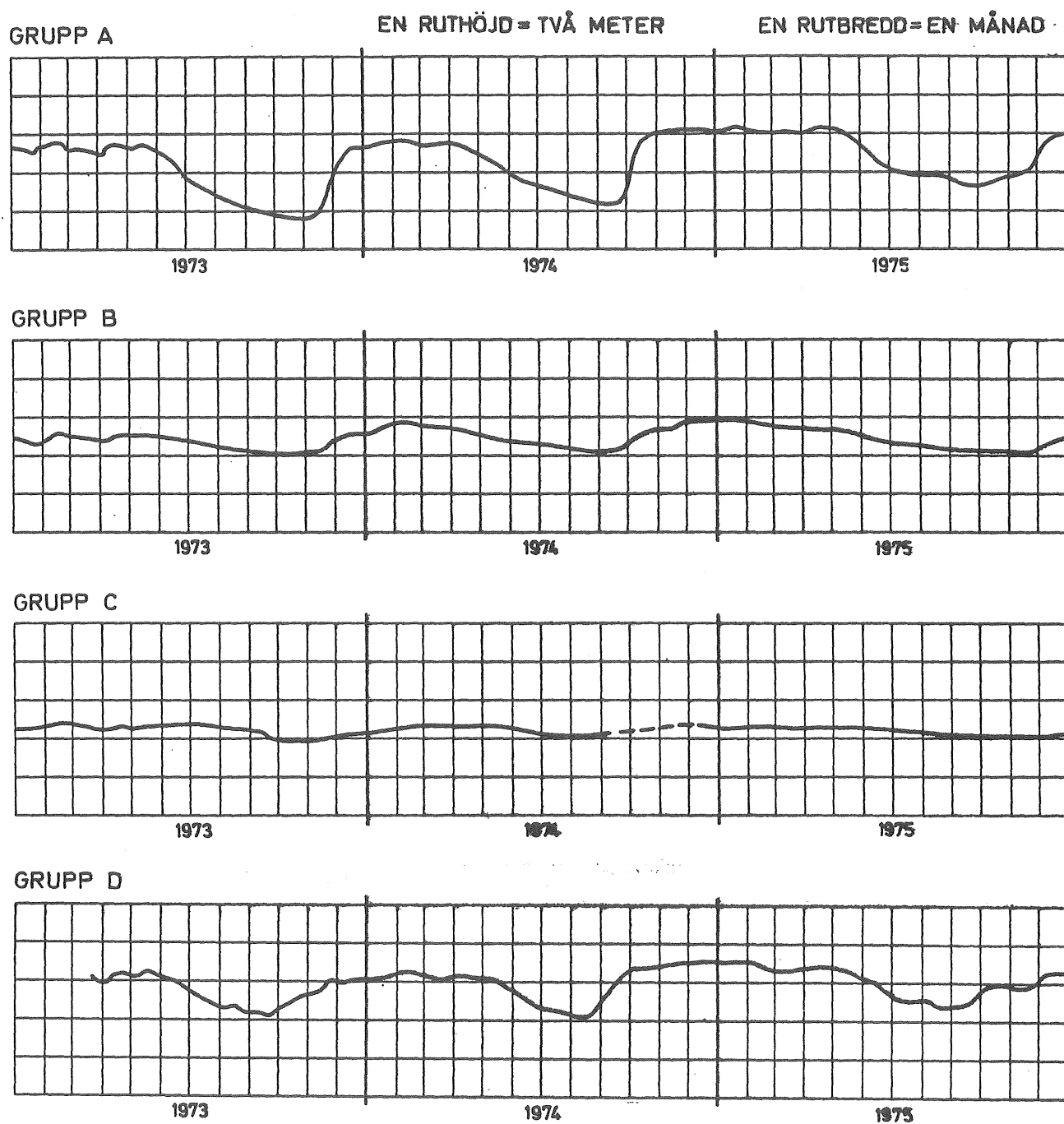
I avsikt att om möjligt urskilja olika delakviferer inom undersökningsområdet har en gruppering av nivådiagram från grundvattenobservationspunkterna genomförts (fig. 27). Den varierande responsen vid nederbördstillfällena tillsammans med förloppet av de säsongsberoende fluktuationerna har härvid utnyttjats.

6.3.1 Observationsrör i jord

Huvudgrupp A: U5, U8, U9. Mycket god passning. Varianter: S10 principöverensstämmelse men störd funktion. U14 principöverensstämmelse.

Karaktäristik: Ganska jämna kurvor med stor amplitud. Inget omedelbart nederbördsberoende. Dräneringsförloppet går långsammare än påfyllningsförloppet. Medelnivån stiger något under observationsperioden för U5 och U9 men ej för U8.

U5 och U9 är nästan identiskt lika medan U8 dräneras snabbare än de övriga. Den snabba dräneringen är speciellt märkbar under 1973. Avsänkningen sker i två etapper varav den första är snabbast. Variationsmönstret är principiellt lika med grupp B. Viss likhet med grupp D, men grupp A når minimivattenstånd senare.



Figur 27. Grundvattennivåns fluktuation, grupperade nivådiagram för observationsrör i jordlagren under tidsperioden 1973-1975.

Huvudgrupp B: U1, U20, U22, U27, 418. God passning. Varianter: U23 når lågpunkterna tidigare. Mindre amplitud. U24 når lågpunkterna senare. Mindre amplitud. U6 når lågpunkterna tidigare, mera dämpad. Amplituden minskar 1975. U19 principöverensstämmelse, jämn kurva. Distinktare toppar. U16 principöverensstämmelse.

Karaktäristik: Något småbrutna kurvor med måttlig amplitud. Inget märkbart nederbördsberoende. Dräneringsförloppet går långsammare än påfyllningsförloppet. Ungefär konstant medelnivå. 1975 sker magasinpåfyllningen långsamt. Grundvattnets maxnivå ligger betydligt lägre 1975-76 än 1974-75. Variationsmönstret är principiellt lika med grupp A. En viss likhet föreligger med grupp D, i synnerhet U14 och U18.

Huvudgrupp C: U7, U18, U25, S7. God passning. Varianter: U21 principlighet, men allmänt något stigande tendens. U16 dålig detaljlikhet men liknande kurvförlopp.

Karaktäristik: Ganska jämna kurvor med liten amplitud. Inget omedelbart nederbördsberoende. Ingen signifikant ändring av medelnivån under observationsperioden. Medelnivån ökar något för U7 från 1973-74. Mätningar saknas i U7 från maj 1974 till mars 1975. Likhet med andra grupper: U21 passar även som variant av huvudgrupp B.

Huvudgrupp D: U13, U14. Passningen är måttlig god. Varianter: U17 principöverensstämmelse med U13. 429 visar principöverensstämmelse med U13 och U14 men har liten amplitud.

Karaktäristik: Något brutna kurvor med relativt stor amplitud. Under vinterhalvåret kan nederbördstillfällena i viss mån spåras i kurvorna. Medelnivån visar mycket svag höjning under observationsperioden. Under 1974 är magasinpåfyllningen snabb så är ej fallet 1973 och 1975. Detta kan förklaras av att nederbörden under september 1974 var hela 203 mm. 429 har mycket långsam magasinpåfyllning 1975.

Likhet med andra grupper: En viss likhet föreligger med grupp A och grupp B. Kurvgången hos 429 påminner om U16 men är något förskjuten.

Återstående observationspunkter, dvs U3, U4, U10, U15, U19, U21, U26, 428 och 439 samt S11 och S12 har ej kunnat inordnas i någon av ovanstående variationsmönster och ej heller passas ihop inbördes.

Med hjälp av den genomförda analysen av grundvattenståndsvariationen och grupperingen av nivå-diagram har olika delakviferer med skilda karaktärer kunnat urskiljas. De rör som ingår i grupp A ligger väl samlade i den övre delen av den ravin, som sträcker sig i nordost - sydvästlig riktning i anslutning till överskjutningszonen B:s utgående. Rören är placerade inom eller i omedelbar anslutning till ett avgränsat lager av friktionsmaterial med mäktigheten ca 0.5 m. Grundvattennivå-bilden och återhämtningsförsök tyder på en relativt hög permeabilitet i friktionsmaterialiet.

Rörgruppen B ligger inom en avgränsad sänka i berggrunden, där likartade hydrogeologiska förutsättningar råder. Avståndet till områden med goda infiltrationsmöjligheter är stort. Infiltration från bergplinten i nordväst möjliggörs genom överskjutningszonens utgående. Infiltration är å andra sidan möjlig genom den skiktade leran, se mom. 3.4.2. Området karaktäriseras av en enhetlig jordlagermäktighet. Markytan genomdrages av en ravin, som sträcker sig i nord-sydlig riktning genom området. Grundvattennivå-kartan visar en strömning mot överskjutningszonen i nordväst. I sydväst avgränsas området av en bergsrygg i VNV - OSO-lig riktning. Bergsryggen har skärmat av den södra delen av undersökningsområdet och fungerar under de nu av-sänkta förhållandena som en vattendelare för grundvattnet i jordlagren.

Rörgrupp C ligger mycket väl samlad inom ravinens södra del i anslutning till överskjutningszonen B:s utgående. Området dräneras via överskjutningszonen B:s skärning med gemensamhetstunneln. Ett mäktigare lager friktionsmaterial återfinns inom detta område. Goda infiltrationsmöjligheter finns längs friktionszonen i anslutning till berg strax nordväst om ravin.

Rörgrupp D ligger inom ett område, där förutsättningarna för infiltration varierar. Jordmäktigheten varierar betydligt inom området.

Resultaten är föga anmärkningsvärda men stöder riktigheten av antaganden beträffande grundvattenfluktuationernas orsaker och strömningsbildens utseende.

6.3.2 Observationshål i berg

Antalet bergbrunnar är litet och den första etappen omfattade endast B1-6 förutom de STEGA borrar i anslutning till vårt försöksområde, se figur 3, mom. 2.1.5.

Huvudgrupp I: B4, 312. De båda grundvattennivåkurvorna passar mycket väl med varandra. Amplituden är dock något större för 312 än B4. Plushöjden är för båda ca 44 m.

Huvudgrupp IIa: B1, B3, B6. Grundvattennivåkurvorna överensstämmer väl med varandra. B1 avviker något genom en välutbildad miniminivå i oktober 1975. B6 avviker genom en nära nog konstant grundvattennivå under de sex sista månaderna 1975. Den genomsnittliga plushöjden är för B1 ca 63 m, B3 ca 50 och B6 ca 30 m.

Huvudgrupp IIb: B2, B10. Grundvattennivåkurvorna överensstämmer ganska väl. Amplituderna är lika. B10 har en något knyckigare kurva. Passningen är sämst i september och oktober. Plushöjden är för B2 ca 55 m, B10 ca 48 m.

Variationer: Principiellt passar även B8 in i grupp II b. Passningen är någorlunda till framför allt B10. B8 har dock större amplitud. Passningen mot B2 är något sämre. Plushöjd ca 51 m. B9 passar måttligt bra med B10 med avseende på kurvgång. Plushöjden för B9 är ca 45 m. B11 passar ganska dåligt mot B2, B10. Plushöjden för B11 är ca 63 m.

Ej grupperade rör: B7 passar ej med någon annan kurva. Plushöjden för B7 är ca 49 m. 301 passar ej med någon annan kurva. Kurvformen liknar grupp IIa (B1, B3, B6). Plushöjd ca 48 m. Stigande medelnivå. 302 passar ej med någon annan kurva. Utseendemässigt liknar kurvan B5:s kurva. Kurvan har olika utseende 1974 och 1975. 1974 är kurvan ganska lugn medan den 1975 blir mycket knyckig och oregelbunden. Plushöjd ca 63-64 m. B5 passar ej direkt med någon annan kurva. Genomsnittskurvan för B5 passar någorlunda med B4 med undantag för månaderna september och november 1975. Under dessa månader visar kurvan stort nederbördsberoende. Plushöjd ca 59 m.

Antalet bergborrhål medger ej att delakviferer utskiljs såsom det var möjligt att göra beträffande jordlagren men resultatet har varit ett stöd vid genomförandet av infiltrationsförsöken, se mom. 8.4, och förståelsen av grundvattensänkningens förlopp inom området, se mom. 6.4.

6.4 Grundvattennivåförändringar i samband med tunneldrivningen

Avsikten med den genomförda studien har varit att klarlägga vilken eller vilka svaghetszoner i berggrunden som varit verksamma vid områdets dränering i samband med tunnelutsprängningen. Den framtagna geologiska-tektoniska kartbilden inom centrumområdet har därvid jämförts dels med grundvattennivåerna i befintliga borrhål dels med tunnelfronternas veckolägen.

Inom undersökningsområdet, Angered centrum, fanns vid tunneldrivningen grundvattenobservationsrör både i berg och jord. Observationsrören ingick i ett observationsnät för grundvatten som upprättades 1967 av Göteborgs stads vatten- och avloppsverk. Mätningarna övertogs 1968 av STEGA som kompletterade observationsnätet med 36 bergborrhål och 30 grundvattenobservationshål i jord. Inom centrumområdet drevs 3 st bergborrhål 301, 302 och 312 samt 5 st jordhål 418, 419, 428, 429 och 439. Observationsrörens läge framgår av fig 3.

De av STEGA upprättade observationsrören har varit mycket värdefulla vid analysen av grundvattennivåförändringar i samband med tunneldrivningen.

Grundvattennivåmätningar utfördes i bergborrhålen 301 och 302 med självregistrerande peglar från maj 1969 till januari 1973, i bergborrhål 312 från september 1969 till januari 1973. Manuell uppmätning av grundvattennivån gjordes som regel en gång per vecka vid byte av pegeldiagrampapper. Efter januari 1973 har manuella mätningar utförts ca två gånger per månad.

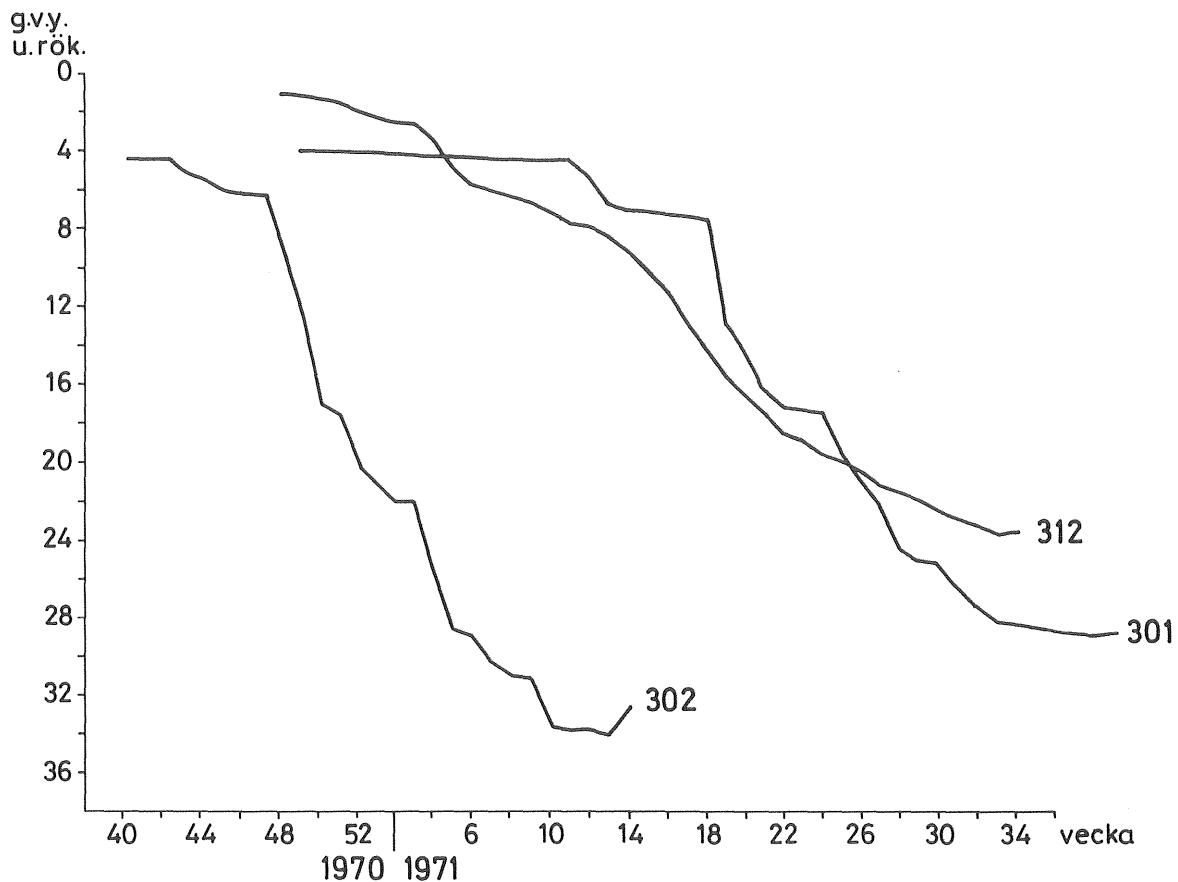
Grundvattennivåmätningar i jordhålen har gjorts manuellt ca en gång per vecka från september 1969 till juni 1970. Från juli 1970 till januari 1971 utfördes mätningar ca en gång per månad. Från februari uppmättes grundvattennivån i jordhålen ca 2 gånger per månad. Samtliga mätningar gjordes i STEGAs regi. Observationsrörens grundvattennivåer framgår av figurerna 28 och 29.

Tunneldrivningen, Angered's tunnlar, etapp 2, pågick under 1970 och 1971. Drivningen skedde från öster mot väster. Tunneldrivningen började med nedfartstunnelns påslag norr om Gunnared's gård i oktober 1970. Tunnelnfronterna passerade de centrala delarna av Angered's centrum i mars 1971. I januari 1972 var utsprängningen klar. Tunnelnfronternas veckolägen framgår av figur 30.

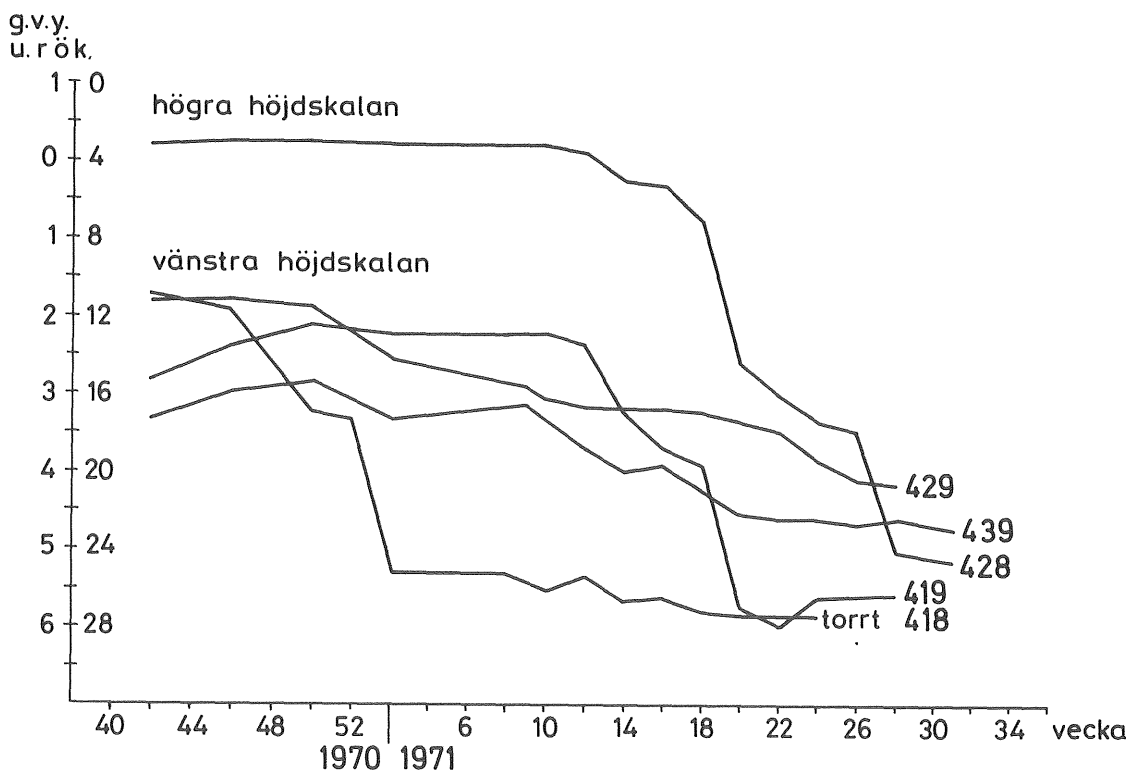
6.4.1 Grundvattenobservationshål i berg

Bergborrhål 302

Den ursprungliga grundvattennivån stod i borrhål 302 ca 4,5 m under röröverkant. Från vecka 42 till vecka 47 1970 sjönk nivån i borrhål 302 ca 2 m, figur 28. Från vecka 47 skedde en mycket snabb avsänkning. Den totala avsänkningen uppgick vecka 10 1971 till ca 28 m. Vecka 47 befann sig nedfartstunnelns front ca 75 m NO om bergborrhål 302.



Figur 28. Grundvattennivåer i bergborrhålen 301, 302 och 312 (STEGA) vid tiden för tunneldrivningen, Angereds tunnlar etapp 2.



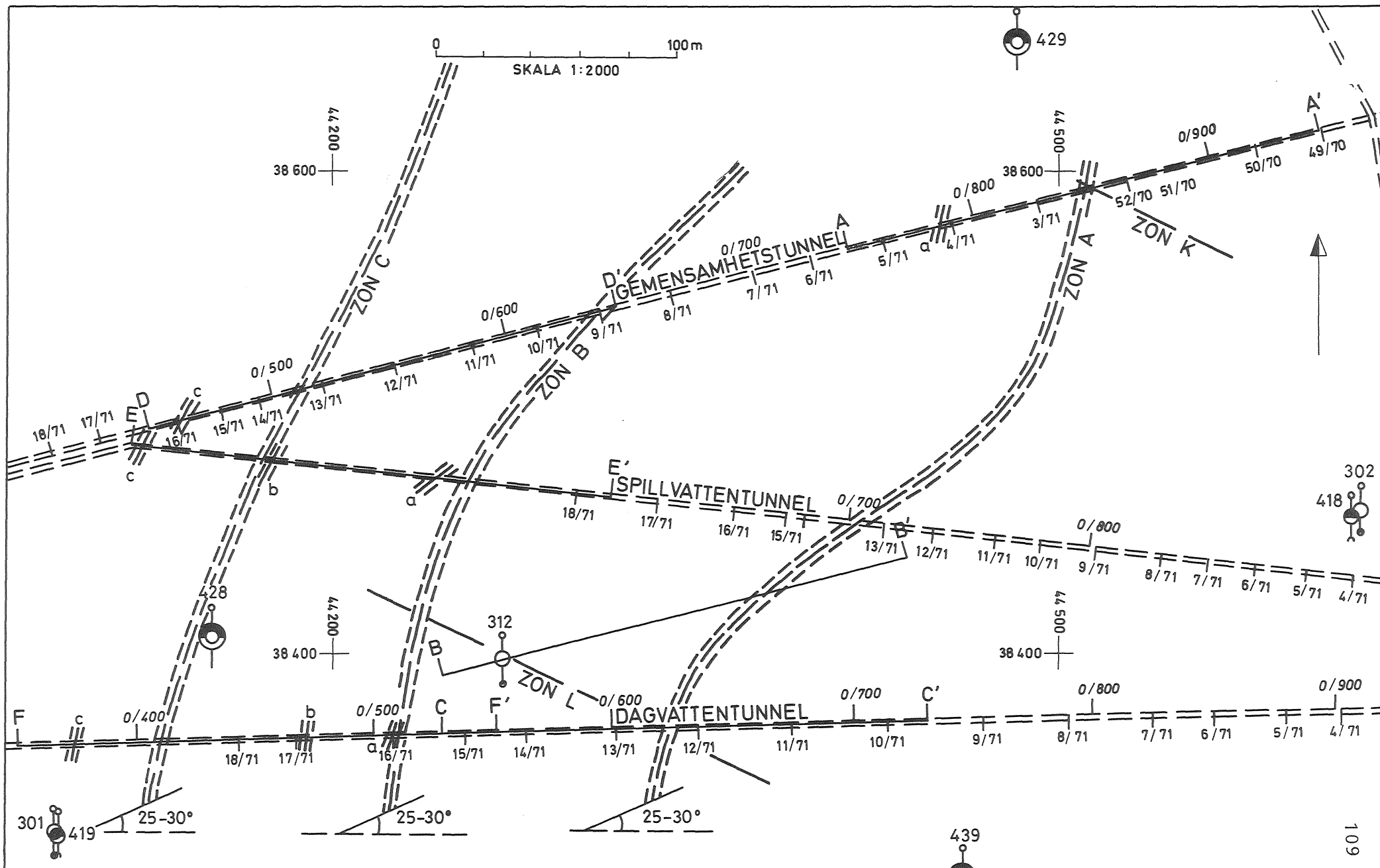
Figur 29. Grundvattennivåer i observationsrören 418, 419, 428, 429 och 439 (STEGA) i jordlagren vid tiden för tunneldrivningen, Angereds tunnlar etapp 2.

I detta avsnitt finns rikligt med brantstående sprickor i företrädesvis N 20° E samt flackt åt norr lutande plan. Vid besiktningen av tunnlarna iaktogs läckage i detta avsnitt och de största läckagen inträffade i skäraxlarna mellan de brantstående och de flackt åt norr lutande planen. Figur 13 visar en principskiss över sprickplanen och dräneringskanaler längs sprickplanens skärningsaxlar.

Bergborrhål 312

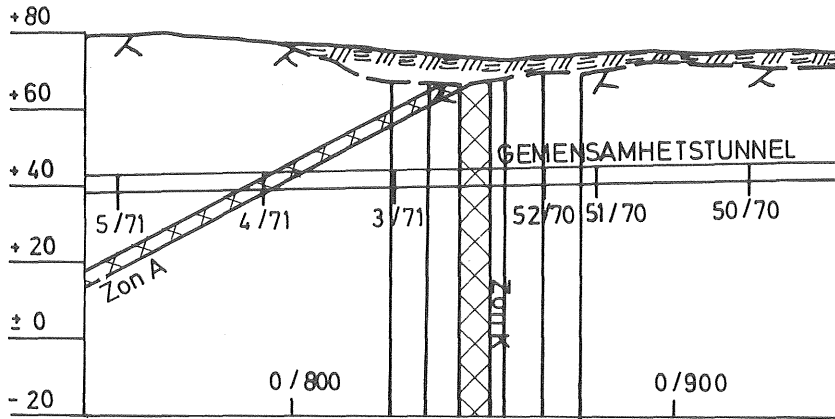
Den ursprungliga grundvattennivån stod i borrhål 312 ca 1 m under röröverkant. Under 1960 och 1970 var nivåamplituden för borrhål 312 mindre än 0,5 m. Från vecka 48 till vecka 52 1970 sänktes nivån i borrhål 312 ca 1 m, se figur 28. Gemensamhetstunneln drevs då in i ett avsnitt med företrädesvis brantstående sprickor, se figur 30 och sektion A-A', figur 31. Tunneln befann sig vid denna tidpunkt ca 340 m NO om borrhål 312. De brantstående sprickorna står i förbindelse med överskjutningszonen A, vars plan skär borrhål 312, sektion B-B', figur 31. Vid tunnelkarteringen som utfördes i samband med drivningen observerades vattenläckage inom detta tunnelavsnitt. Spill- och dagvattentunneln befann sig vid denna tidpunkt ca 400 m öster om borrhål 312. Något vatteninläckage observerades inte vid denna tidpunkt i dessa båda tunnlar. Vecka 3 1971 ökade avsänkningsstakten markant för bergborrhål 312. Gemensamhetstunneln skar då en vattenförande brantstående zon K som står i förbindelse med överskjutningszonen A, sektion A-A', figur 31. Vecka 4 var avsänkningsförloppet som snabbast. Tunneln skar då igenom överskjutningszonen A. Vid tunnelkarteringen observerades flera kraftiga vattenläckage vid passagen av zonen A. Både vid zonen A och K har efterinjektering sedan utförts för att begränsa vatteninläckningen. Besiktning av tunnlarna under forskningsprojektets gång har visat, att läckage fortfarande förekommer inom den aktuella sektionen.

I slutet av vecka 5 minskade avsänkningshastigheten. Vecka 12 ökade avsänkningshastigheten ånyo. Dagvattentunneln drevs

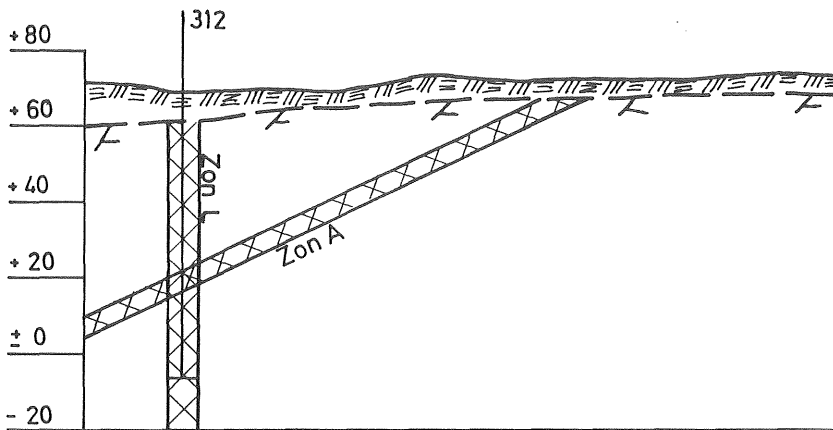


Figur 30. Tunnelfronternas veckolägen, brantstående sprickzoner, överskjutningszonerna A-C:s lägen och zoner-
nas skärning med tunnlarna samt läget för sektionerna A-A' - F-F' på figurerna 31 a och b.

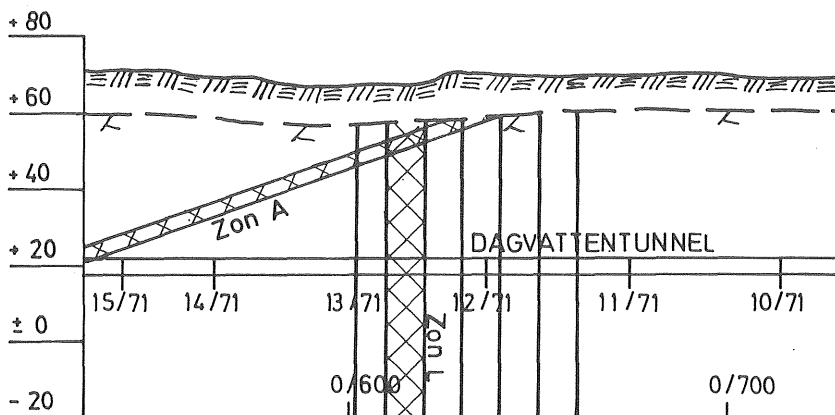
A-A'



B-B'

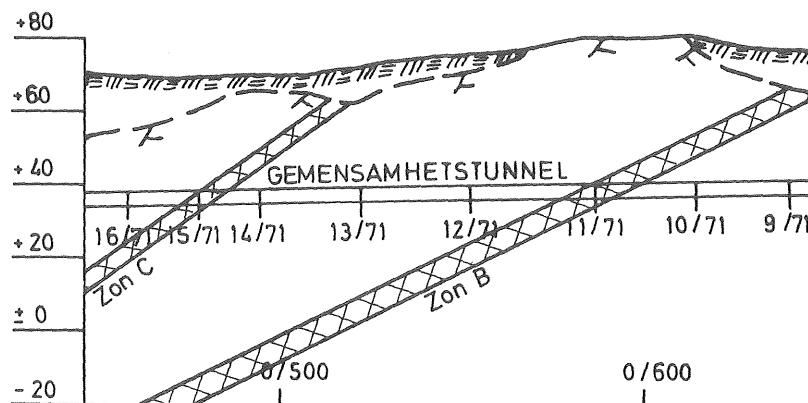


C-C'

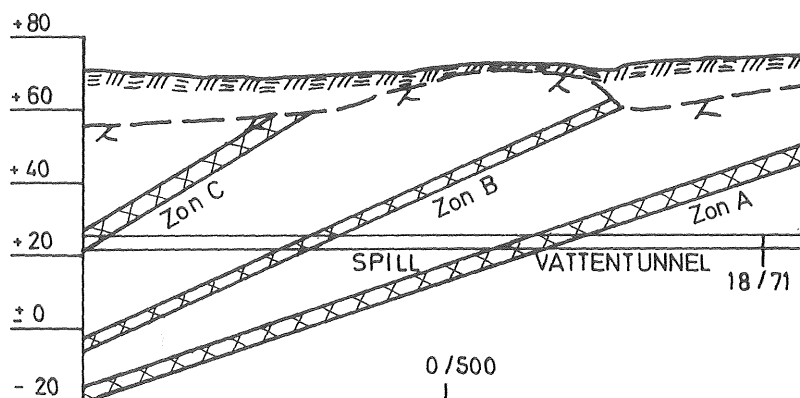


Figur 31 a. Sektionerna A-A' - C-C' utvisande över-
skjutningszon A:s skärning med brant-
stående sprickzoner och tunnlar. Sek-
tionernas lägen framgår av fig. 30.

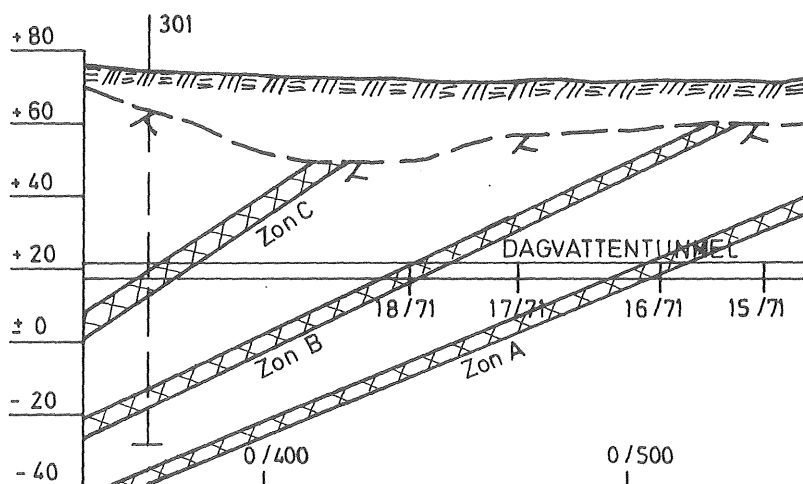
D-D'



E-E'



F-F'



Figur 31 b. Sektionerna D-D' - F-F' utvisande överskjutningszonerna A, B och C:s skärning med tunnlar. Sektionernas lägen framgår av fig. 30.

då in i ett parti med brantstående sprickor och zonen L med riktningen N 60° W, sektion C-C', figur 31. Efterinjektering har utförts i flera etapper inom detta tunnelavsnitt. Vid besiktning av tunnlar under forskningsprojektets gång förekom fortfarande flera läckage. Under vecka 15 och 16 var avsänkingsförloppet som snabbast. Dagvattentunneln passerar vid denna tidpunkt 25 m söder om bergborrhål 312.

Efter vecka 22 minskade avsänkningen successivt och upphörde helt vecka 33. Den totala avsänkningen var då ca 23 m.

Bergborrhål 301

Den ursprungliga grundvattennivån stod i borrhål 301 ca 4 m under röröverkant. Från vecka 49 1970 till vecka 11 1971 minskade nivån ca 0,4 m, se figur 28. Under vecka 11 skedde en snabb avsänkning som pågick till vecka 13. Gemensamhetstunneln drevs vid denna tidpunkt igenom överskjutningszonen B, sektion D-D', figur 31, vars plan skär borrhål 301. Avståndet mellan borrhål 301 och dagvattentunnelns front var vid denna tidpunkt ca 265 m. Avståndet till spillvatten- och dagvattentunnelns fronter var ca 410 respektive 310 m. Under vecka 13 till 18 var avsänkningen relativt liten ca 1 m. Avsänkningen ökade dock under vecka 15 och 16, då gemensamhetstunnelns front skar igenom överskjutningszon C, sektion D-D', figur 31. Under vecka 18 sänktes nivån i bergborrhål 301 ca 5,5 m. Dagvattentunnelns front skar vid denna tidpunkt igenom överskjutningszon B ca 85 m NO om borrhål 301, sektion F-F', figur 31. Avsänkningen i borrhål 301, fortgick med relativt brant gradient fram till vecka 33, då avsänkningen i princip upphörde. Dagvattentunneln drevs under denna tidsperiod genom överskjutningszon C och spillvattentunneln genom överskjutningszonerna B och C. Sektion E-E' och F-F', fig 31.

6.4.2 Grundvattenobservationsrör i jord

Observationsrör 418

Vecka 46 1970 sänktes grundvattennivån hastigt i observationsrör 418. Avsänkingsbeloppet uppgick vecka 2 1971 till ca 3 m

se figur 29. Avsänkningen började samtidigt i både jord och berg (bergborrhål 302).

Observationsrör 419

Från vecka 10 till 22 1971 sänktes nivån ca 3,5 m i observationsrör 419, se figur 29. Avsänkningen skedde även här samtidigt i både jord och berg (bergborrhål 301).

Observationsrör 428

Nivån i observationsrör 428 började sänkas under vecka 10-12 1971, dvs samtidigt med observationsrören 419 och 301, som ligger ca 105 m SV om observationsrör 428. Gemensamhetstunnelns front skar vid denna tidpunkt överskjutningszon B 165 m NO om observationsrör 428, se figur 30. Avsänkningen skedde med måttlig gradient t o m vecka 18, varefter den snabbt ökade. Den ökade avsänkingshastigheten orsakades troligen av att dagvattentunnelns front vid denna tidpunkt även skar igenom överskjutningszon B:s plan söder om observationshål 428. Den totala avsänkningen i observationsrör 428 uppgick vecka 28 till ca 21 m. I detta fall torde grundvattentrycket i jordlagren i mycket hög grad ha styrts av grundvattentrycket i berggrunden.

Observationsrör 429

Nivån i observationsrör 429 sänktes ca 1 m från vecka 50 1970 till vecka 12 1971.

Observationsrör 439

Nivån i observationsrör 439 sänktes ca 1,5-2 m från vecka 50 1970 till vecka 22 1971.

Kommentar

Sedan tunnelutsprängningen har grundvattennivån ej i vare sig berg eller jord nått upp till de nivåer som observationsrören uppvisade före utsprängningen.

Överskjutningszonerna dominerar vattentransporten både i berg och jord inom det studerade området. God hydraulisk kommunikation finns utbildad över långa avstånd. Lokalt är även de brantstående sprickorna av betydelse och samverkar med överskjutningszonen under avsänkingsförloppet. De brantstående sprickzonernas permeabilitet tycks öka med zornernas bredd, jfr mom. 3.3.

Inom det studerade området kan grundvattenavsänkning under tunneldrivningsskedet längst beläggas på 340 m avstånd från gemensamhetstunnelns front.

7 GRUNDVATTENNIVÅKARTOR

7.1 Grundvattennivåkarta för jordlagren

Grundvattennivåkartan för jordlagren, se figur 32, visar tydligt två från varandra skilda avsänkingsområden, det ena i väster över spillvattentunneln, det andra i öster men ej över någon av tunnlarna. Avsänkningen i området är alltså ej symmetriskt utbredd från tunnlarna. Ej heller har det visats att avsänkningen följer hela överskjutningszonens utgående vid bergytan. Grundvattennivåbilden visar i stället två begränsade delområden mot vilka grundvattengradienterna i jordlagren är riktade. Detta är så mycket mer anmärkningsvärt som grundvattenytans lutning söder om avsänkningstrattens centrum kommer att luta i motsatt riktning mot markytans lutning trots att det västra området är en ravin med stor lutning ut mot sydsydväst.

Bergytan, dvs jordakviferens underlag, lutar brantare på den västra sidan av sänkorna än på den östra, se figurerna 4 och 14. Samstämmiga uppgifter från borrhningar, seismiska och geologisk-tektoniska undersökningar visar att utgåendet av överskjutningszonerna återfinns en bit upp på den västra sidan och ej koncentrerats till de djupaste partierna av sänkorna. Utgåendet i det östra avsänkingsområdet synes i varje fall ej sammanfalla med de djupare partierna. Grundvattenavsänkningen är också störst vid dalgångens västra sida. Gradienten är därför riktad mot denna och det står inget vatten på berget. I de djupaste delarna av sänkan har grundvattenytan aldrig under mätperioden avsänkts mer än ungefär till 64 m nivå, dvs till ungefär 6 m över bergytan. Påfyllningen av denna del av akviferen uppgår ej till mer än knappt två meter, dvs når ej 66 m nivå. Vid västra bergsidan når grundvattnet å andra sidan ej ens under högvattenståndperioden nivå 62 m.

7.2 Nivåkarta för berggrundvatten

Inom undersökningsområdet finns ett förhållandevis tätt observationsnät för mätning av berggrundvattnets trycknivå. Med anledning härav har ett försök gjorts att upp-
rätta en grundvattennivåkarta, se fig. 33. Kartbilden har konstruerats med hjälp av nivådata 75-04-01 från 14 st bergborrhål, d v s samtliga observationspunkter inom undersökningsområdet. Vid konstruktionen har förfarits som om berget vore uppsprucket i så hög grad att det kan jämföras med en homogen porös akvifer. Grundvattennivåkartan kan då konstrueras med rätlinjig interpolation mellan närliggande borrhål på samma sätt som vanligen görs för jordakviferer.

Grundvattennivåbilden visar, i den östra delen av undersökningsområdet, att trycknivån minskar från ca + 64 m vid borrhål 302 till ca + 45 m vid borrhål B9, se fig. 33. Tryckgradienten minskar mot det område, där överskjutningszonen skär gemensamhetstunneln. I den västra delen av området minskar trycknivån från ca + 45 m vid borrhål 312 till ca + 30 m vid borrhål B 6. Området dräneras mot de brantstående sprickzoner som finns utbildade mellan överskjutningszon B och C. De brantstående sprickzonerna skär gemensamhetstunneln omedelbart norr om borrhål B 6.

Grundvattennivån ligger i B6 betydligt under sulan i gemensamhetstunnelns närmaste del. Dräneringen kan gå via dessa brantstående sprickor till överskjutningszonen B:s skärning med spillvattentunneln som här går 12,3 m djupare än gemensamhetstunneln.

Vid en jämförelse av nivådiagrammen för bergborrhålen 312 och B4 som båda borrhålen igenom överskjutningszon A erhålles en mycket god passning. Plushöjden för båda bergborrhålen är 750901 44 m. Amplituden är dock något större för bergborrhål 312 som står ca 220 m SV om B4, se mom. 6.3.2. Grundvattentrycklinjen mellan dessa båda observationspunkter är i konstruktionen i stort sett

parallell med överskjutningszonernas strykning, vilket är ytterligare bevis för dessa zoners dominerande betydelse för grundvattenströmningen.

Av grundvattennivåbildningen framgår även, att den djupare belägna spillvattentunneln i den östra delen av området ej på samma sätt influerar på nivåerna. Inverkan av dagvattentunneln, dvs Lärjeåttunneln, strax innanför områdets södra begränsning har det ej varit möjligt att på samma sätt analysera.

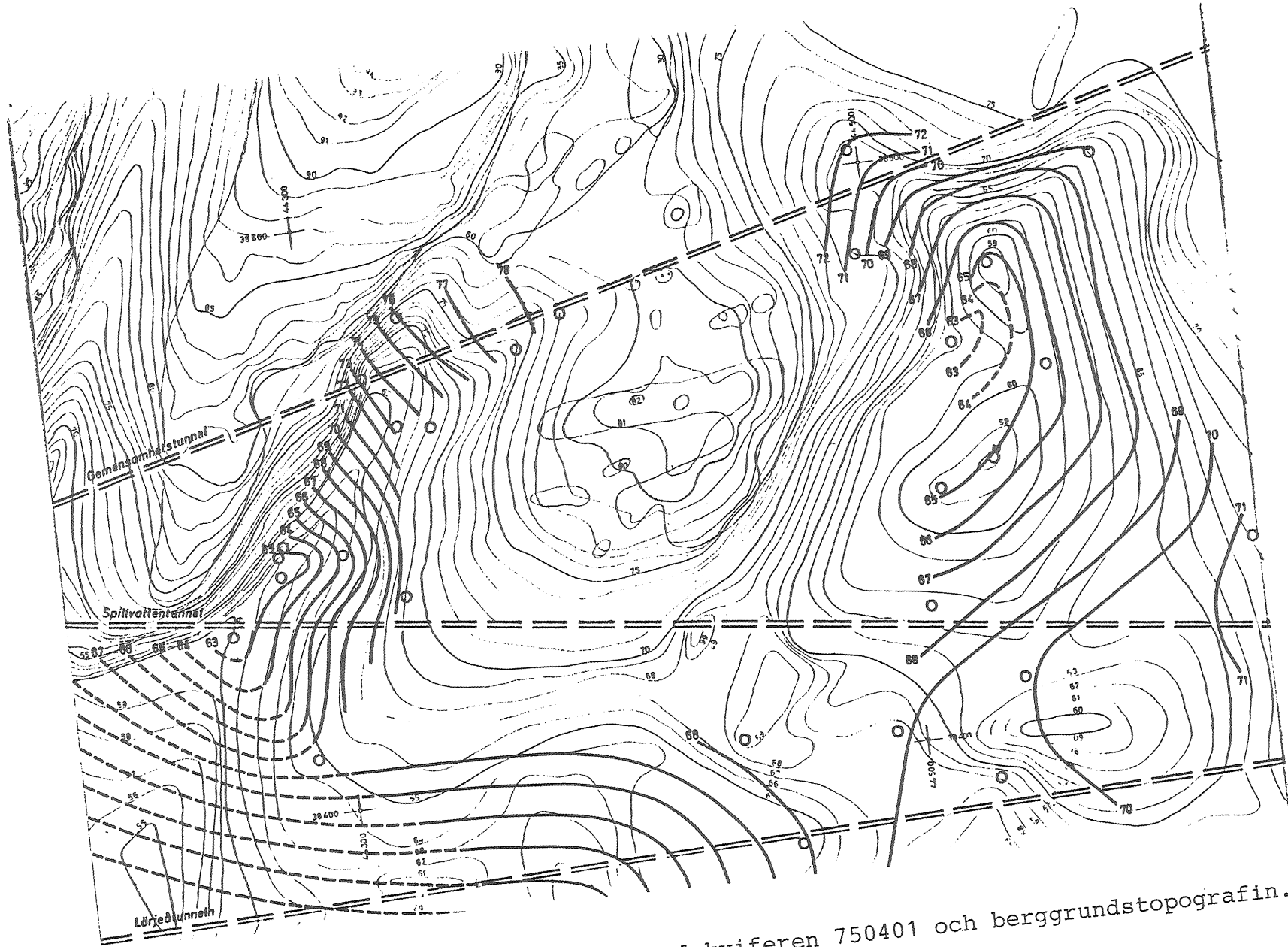
7.3 Jämförelse mellan grundvattnets nivå i jord och berg

De intensifierade mätningar av grundvattenförhållandena som genomförts i försöksområdet vid Gunnared sedan slutet av 1972 i jord och sedan sommaren 1973 i berg visar att grundvattennivån i försöksområdet fortfarande är kraftigt avsänkt. En viss återhämtning har emellertid ägt rum sedan tunneln sprängdes ut.

De grundvattennivåer som uppmätts i de olika bergbrunnarna visar att grundvattenytorna i östra delen av försöksområdet ligger högre än tunneltakets. Trycknivån för berggrundvattnet ligger i den östligaste delen strax under trycknivån för grundvattnet i jordlagren. I områdets västra del däremot ligger grundvattenytan uppmätt i bergborrhål, under sulan i den närmaste delen av gemensamhetstunneln.





De två avsänkingsområdena i jord är båda något utdragna i överskjutningszonernas strykningens riktning. Men det framgår tydligt att avsänkningen ej följer dessa strukturer utan är koncentrerade till ett kort avsnitt. Avsänkningen i jordlagren är sålunda riktad in mot ett begränsat område vid bergsidan.

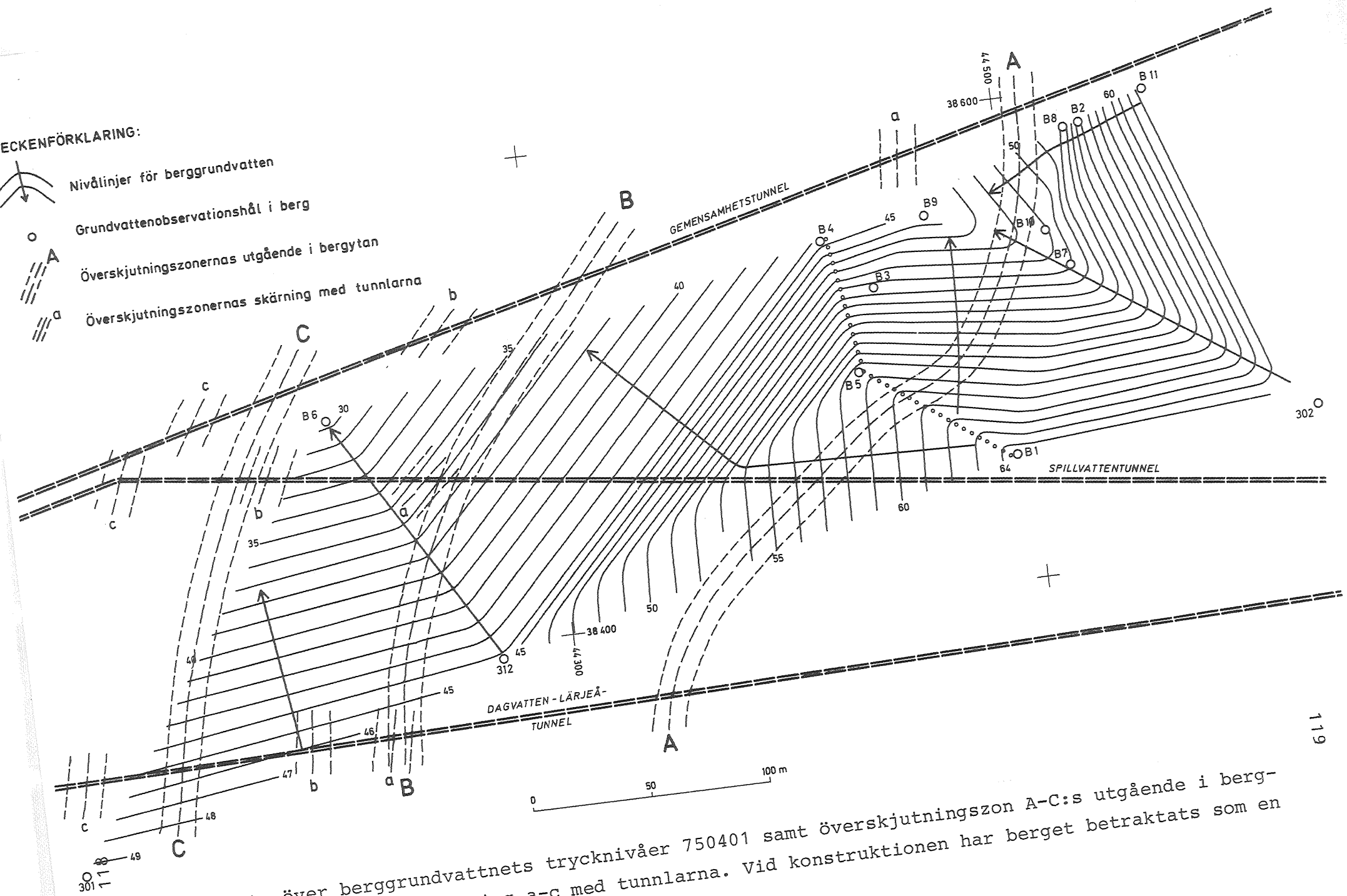
För det västra avsänkingsområdet sammanfaller området för de största avsänkningarna med överskjutningszonens utgående nedanför den branta östsidan av bergribban. Den



Figur 32. Grundvattennivåkarta för jordakviferen 750401 och berggrundstopografin.

ECKENFÖRKLARING:

-  Nivålinjer för berggrundvatten
-  Grundvattenobservationshål i berg
-  A Överskjutningszonernas utgående i bergytan
-  a Överskjutningszonernas skärning med tunnlarna



Figur 33. Karta över berggrundvattnets trycknivåer 750401 samt överskjutningszon A-C:s utgående i bergytan och zonernas skärning a-c med tunnlarna. Vid konstruktionen har berget betraktats som en homogen porös akvifer.

tektoniska analysen förutsätter brant stående sprickor i västnordvästlig riktning. Vid infiltrationsförsök i U7 (Carlsson, 1978) torde dessa också förmedla huvudparten av det från jordlagren inläckande grundvattnet i riktning mot B6 och till djupare belägna delar av överskjutningszon B och vidare till spillvattentunneln.

För det östra avsänkingsområdet är bilden något annorlunda. Grundvattenavsänkningen sammanfaller ej här med den djupare delen av sänkan i berggrundstopografin. Det har ej kunnat visas att överskjutningszon A's utgående sammanfaller med botten av denna sänka. Zonen återfinns något upp på den västra sidan av sänkan. Grundvattnet i jordlagren har under hela observationstiden stått lägre än nivån för överskjutningszonens utgående. Genomförda försök med manschett i bergborrhål B2, B8 och B11 samt infiltration i U14 visar att mindre sprickor möjliggör för grundvattnet att tränga ned i den här kraftigt avsänkta berggrundakviferen. Den tektoniska analysen och tunnelkarteringen anger här brantstående sprickor i riktning $N70^{\circ}W$ som kan förmedla grundvattnet till överskjutningszonen. Dessutom anges sprickor i riktning $N45^{\circ}O$ som belagts i tunnel. Infiltrationsförsök i nämnda borrhål har också indikerat god förbindelse mellan jordakviferen och berggrunden i detta avsnitt.

Infiltrationskapaciteterna här är dock ej på långt när så stora som de som uppmätts i bergborrhål som borrhats igenom överskjutningszonerna (B3, B4, B6 och B9). Infiltrationsförsök i U12 (Carlsson, 1978), vilket placerats med avsikt att ligga rätt över överskjutningszonens utgående, visar att jordlagren i anslutning till detta och berggrunden därunder har en infiltrationskapacitet som vida överstiger de värden som uppmätts vid infiltrationsförsöken i de djupare delarna av detta avsänkingsområde.

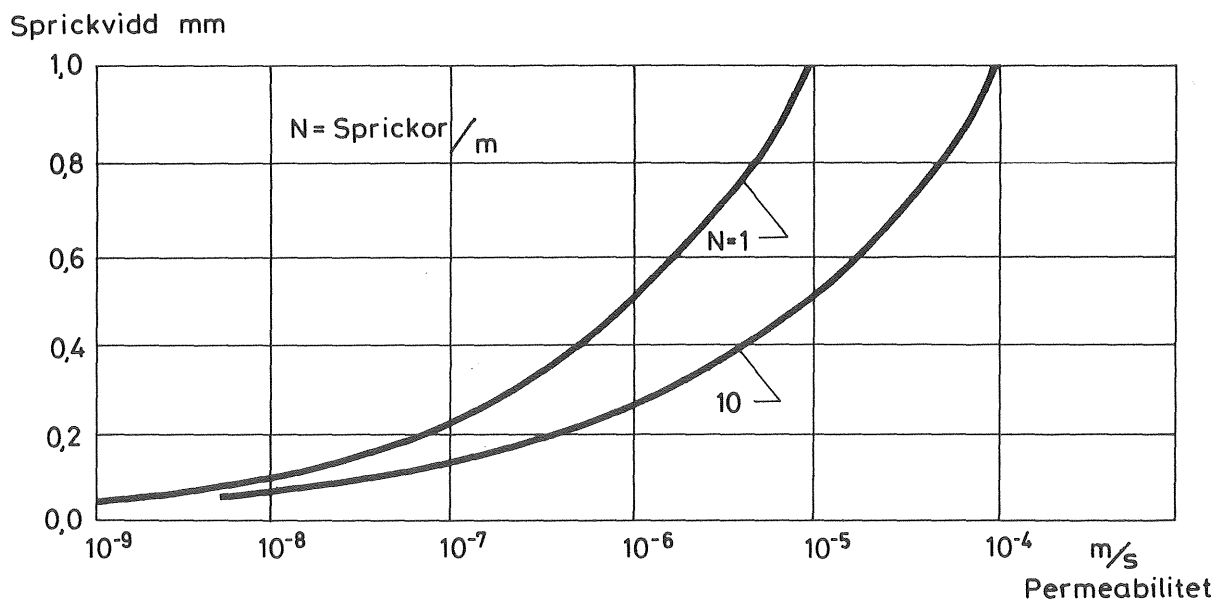
Strax söder om nyssnämnda avsänkingsområde vid B1 och 302 tycks trycknivåerna i berg vara nära under trycknivåerna i jordakviferen. Kviferen i jordlagren kan eventuellt sträcka sig ned i det ytsprickiga berget som här ej dräneras av vattenförande sprickor i berggrunden.

8 BERGGRUNDENS OCH JORDLAGRENS PERMEABILITET

8.1 Berggrundens permeabilitet

Undersökningar angående hydrauliska förhållanden i berg har utförts av ett flertal forskare. Intresset har tidigare varit störst för sedimentära bergarter med sikte på vattenförsörjning. Under senare års byggande i berg har intresset för grundvatten i kristallint berg tilldragit sig allt större intresse. Avgörande för permeabiliteten i kristallin berggrund är förekomsten av sprickor. Därmed är berggrunden tät, se figur 34. Eftersom berggrundens sprickighet är beroende av bergart och tektonik varierar berggrundens permeabilitet regionalt, se Carlsson och Carlstedt (1976).

Sprickigheten i berggrunden kan emellertid vara helt olika till sin karaktär. Tensionssprickor är ofta öppna och djupa och därför tämligen rikt vattenförande medan skjuvsprickor ofta primärt är täta. Överskjutningszoner uppvisar vanligen relativt stor vattenföring.



Figur 34. Permeabiliteten som funktion av sprickbredd och sprickantal. (Efter Morgenstern 1971).

Nyligen genomförda undersökningar av permeabiliteten i 73 st underjordsanläggningar visar att bergmassan vid flertalet anläggningar har en effektiv permeabilitet som ligger mellan 10^{-8} och 10^{-7} m/s (Bergman 1977). Detta visar att berggrunden har en permeabilitet som kan vara av samma storleksordning som värdet för morän.

I områden med berggrund som genomsätts av dominerande men glest förekommande sprickor måste permeabiliteten hos dessa beaktas. Medelvärdet för bergmassans permeabilitet har då endast betydelse för balansberäkningar och uttagbara mängder. Vid berganläggningar där man önskar känna och kanske påverka grundvattenförhållanden i begränsade partier är detta ej tillräckligt. Ansträngningar såväl teoretiska som praktiska att lösa problematiken har gjorts på många håll. (Wittke, 1972). Främst FEM - finita elementmetoden - tycks ge goda möjligheter att vidareutveckla beräkningsmöjligheterna för strömning i sprickigt berg.

Stora svårigheter föreligger emellertid vid genomförande av försök i berggrund. Anledningen till detta torde ligga dels i att lämplig mätutrustning delvis saknas, dels i att placera lämplig mätutrustning på rätt ställe i berget. Om inte detta kan uppfyllas är det ej heller möjligt att lösa praktiska problem genom teoretiska beräkningar.

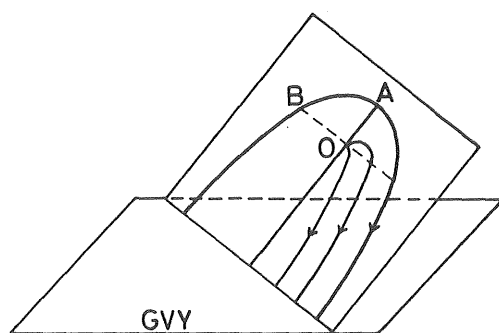
8.2 Matematisk lösning för strömning genom sprickor i berggrunden

Flödesekvationer för strömning i öppna eller fyllda sprickor med hänsyn till form och råhet har utvecklats bl a av Louis (1967). Av betydelse är ekvationerna för tvådimensionell strömning. Wittke (1972) har visat att strömning i en spalt kan behandlas med potentialteori. Strömning i en spricka beskrivs alltså av potentialen längs ränderna. Dachler (1963) visade dessförinnan beräkningen för strömning i en "jordfylld spalt". Detta

torde i en del fall motsvara berggrundens svaghetszoner bättre än modeller som förutsätter öppna, om än trånga, sprickor. De matematiska härledningarna finns i institutionens publ B 96 (Axelsson, 1977).

8.3 Strömningsförhållanden vid infiltration i en lutande spricka

Ämnesområdet har bearbetats av Tuckenbrodt (Wittke, 1969) som anvisat en matematisk lösning, se Axelsson (1977). Varken denna teori eller den subtila matematiska lösningen för strömning genom sprickor har kunnat nyttiggöras i vårt arbete i försöksområdet, där det fordrats betydligt handfastare grepp.



Figur 35. Infiltration i en lutande spricka över grundvattennivån (efter Wittke 1969).

8.4 Genomförda försök

Avsikten med de i försöksområdet genomförda infiltrationsförsöken har i första hand varit att söka klarlägga de hydrauliska förbindelserna mellan borrhålen. Genom att man från ingående undersökningar känner områdets geologi och tektoniskt betingade sprickmönster mycket bra bedömdes det möjligt att genomföra en analys av hur vattnet "strömmar" mellan olika delområden samt vilka sprickor som är avgörande för områdets dränering.

Anledningen till att infiltrationsförsök och ej propumpning genomfördes var att berggrundvattnet var så kraftigt

avsänkt att en ytterligare avsänkning bedömdes sänka grundvattennivån i området så att mätning i de befintliga bergborrhålen omöjliggjorts. Infiltrationsförsöken är dessutom nödvändiga då den hydrauliska kommunikationen i den del av berggrunden där grundvattnet är avsänkt skulle studeras. Vid infiltrationsförsöken har ett konstant vattenflöde (0,5-17 l/min) tillförts borrhålen. Nivåmätningar har under försöken gjorts i infiltrationsborrhålet och runt omkringliggande berg och jordborrhål efter ett logaritmiskt tidschema. Infiltrationen har som regel pågått under en vecka. Efter avslutad infiltration har återhämtningen studerats.

Infiltrationsvattnet tillfördes från VA-verkets vattenposter via ett kärl på foderrörets överkant. Vattennivån i detta kärl hölls konstant oavsett infiltrationskapacitet, genom att en flottörventil reglerade det inkommande vattnet. Det infiltrerade vattnet reglerades genom en ventil på infiltrationskärllets botten. För att undvika att vatten rann utefter borrhålsväggen och för att få en väl definierad vattenyta, infiltrerades vattnet i 2-tums plaströr som var upphängda i foderrören.

Vid en del försök användes även avspärrningsmanschett för att möjliggöra undersökning av delar av borrhålen var för sig. Manschetterna användes även för att spärra av den övre, genom ytsprickigt berg nedförda, delen av bergborrhålen så att nederbörd under försöket ej skulle påverka resultatet.

Utvärderingen av försöken har genomförts mot bakgrund av de klimatiskt- och lufttrycksberoende fluktuationerna. Att fastställa en minsta nivåförändring i ett observationsrör som gräns för om påverkan ansågs föreligga torde vara omöjligt. Vid utvärderingen av resultat från borrhål där nivåförändringen blev liten vid infiltrationsförsöket har tidigare gjorda erfarenheter och kunskaper om borrhålen vägts in vid tolkningen.

Temperaturen registrerades i observationspunkterna eftersom det förväntades vara möjligt att med ledning av avvikelser från den normala grundvattentemperaturen spåra vattenomsättningen under försökens gång. Någon säker indikation på infiltration erhöles dock ej med hjälp av temperaturmätning.

8.4.1 Infiltrationsförsök i bergborrhål B2

Vid infiltrationen i B2 svarar B11 först, ca 100 min efter start. Nivån ligger då ca 7,5 m högre än ursprungsnivån i B2.

Kommentar: Vid denna tidpunkt står grundvattenytan i B11 mellan 4 och 6 meter under bergytan. Att förbindelsen mellan B2 och B11 skulle gå genom ytsprickigt berg kan därmed uteslutas.

Den hydrauliska förbindelsen går med största sannolikhet via sprickan 23 m under r.ö.k. i B2 till slaget ca 18 m under r.ö.k. i B11. Den hydrauliska förbindelsen kan även gå via lägre liggande sprickor i B11 även om detta verkar mindre sannolikt.

B8 och U14 svarar ungefär samtidigt efter 270 resp 300 minuter. U14 svarar 200 min efter B11. Nivån står då 0,13 m högre i B11 än vid start. Nivån i B2 är ungefär konstant 100 min efter start och ca 6-7 m högre än begynnelsenivån.

Kommentar: Responser i U14 bedömdes inte bero på nivåökning i B11 (0,13 m) utan främst på det sammanlagda mottrycket som utbildas av B2 och till mindre del av B11. En hydraulisk förbindelse tycks därmed finnas mellan bergakviferen vid B11 och jordakviferen vid U14. Detta överensstämmer med vad som observerades vid borrningen av B11 då U14 påverkades.

Det är anmärkningsvärt att B8, som står så pass nära B2 (ca 8 m), svarar 200 min senare än B11 som står ca 30 m från B2. B8 svarar när vattennivån står 13,6 m under r ö k i B2. Foderröret i B2 når ned till samma nivå (13,5).

Kommentar: Det förefaller ganska troligt att den hydrauliska kommunikationen mellan B2 och B8 går antingen genom enbart ytsprickigt berg eller en kombination av ytsprickigt berg och otät infästning mellan foderrör och berg. Avståndet från bergytan till foderrörets underkant är enligt borrprotokoll 2,8 m. Manschettförsök visar på visst inläckage vid foderrörsunderkant 13,6-13,8 m under r.ö.k. Att B8 svarar först efter 270 min trots sin närhet till B2, samt B2:s relativt goda funktion $H/H_0 = 0,41$, se TAB. 7, tyder på obefintlig kommunikation mellan B2 och B8 under avsänkta förhållanden. Den tänkbara dräneringsvägen från B2 skulle därmed gå via B10 eller mellan B8, B2 och B10.

B8 svarar ca 5 m vilket, jämfört med övriga observationspunkter vid infiltrationsförsök inom området, är extremt stort.

Kommentar: Detta kan tyda på en direkt transport (vatten rinner) från B2 till B8 via ytsprickigt berg, foderrörets underkant eller kanske via en enstaka spricka som mynnar precis vid foderrörets underkant i B2.

Nivån i B4 ökar från den 29/4 till den 10/5 1975 med 0,20 m.

Kommentar: Denna ökning är eventuellt betingad av infiltration i B2.

Nivån sjunker i B3.

Kommentar: Detta motsvarar det för årstiden förväntade förloppet.

B10 svara efter 500 min. Avståndet mellan B10 och B2 är ca 47 m.

Sammanfattning av infiltrationsförsök i B2

Jordakviferen vid B11 och U14 dräneras åtminstone delvis av sprickor i berget.

B11 dräneras antingen enbart via sprickan 18 m under röröverkant eller också i kombination med lägre liggande sprickor.

B2 har ej någon hydraulisk direktkommunikation med B8.

B2 dräneras mot B10 eller mellan B8 och B10. Den fortsatta dräneringen tycks gå via B9 till B4. (Jfr infiltrationsförsök i B4 och B9).

8.4.2 Infiltrationsförsök i bergborrhål B9

Nederbörden var 0,5 mm under försökets gång. 10 l/min infiltrerades under 7,9 dygn. Återhämtningen uppmättes under 10,1 dygn. Nedan redovisas observationer i omkringliggande borrhål.

B1: En fluktuation i vattennivån på 6 cm under försöket var sannolikt ej beroende av infiltration.

B2: Nivån sjönk från +55,04 till +54,68.

B3: Manschett placerad på nivån +72,40 m spärrade av borrhålet så att ev nederbörd förhindras nedtränga. Begynnelsenivån var 49,35 m efter 2,9 dygn erhöles respons. Vid avstängning av infiltrationen var nivån på +50,61 m. Temperaturmätningen visade att infiltrationsvatten hade nått fram till borrhålet, se vidare kapitel 7.

B4: Vid starten var vattennivån +43,60 m. Respons kunde märkas redan efter 200 min. Maximal nivå var +46,68 m. Återhämtningen började omedelbart. Begynnelsenivå erhöles efter 8,8 dygn. Temperaturmätning visade på vattentransport.

B5: Nivån sjönk hela tiden i borrhål 5.

B7: Nivån sjönk hela tiden i borrhål 7.

B8: Respons inträffade 2,6 dygn efter start. Nivån steg från +50,71 till 51,20 m. Återhämtning skedde kontinuerligt.

B9: Infiltrationshål. Vattennivån vid start var +47,84 m, jämnvikt uppnås vid nivån +52,18 m i höjd med överskjutningszonen. Återhämtning under 5,3 dygn efter infiltrationsstopp.

B10: Nivån vid start var +48,36 m. Respons inträffar efter 2,1 dygn. Maximal nivå +49,44 m.

Sammanfattning: Nivån i B9 steg upp till överskjutningszonen. B3, B4, B8 och B10 påverkades. Observationer i gemensamhetstunneln gav klar indikation på större inläckage av vatten.

8.4.3 Infiltrationsförsök i bergborrhål B4

Nederbörden var 52,6 mm under försökets gång. 10 l/min infiltrerades under 6,0 dygn, 17 l/min därefter i 20 dygn. Återhämtning uppmättes under 12 dygn. Nedan redovisas observationer i omkringliggande borrhål.

B1: Nivån flukturerar med variationer på 14 cm.

B2: En nivåförändring på 10 cm inträffade 3,04 dygn efter start. Nivån steg från +54,58 m till +54,68 m. Förmodligen utgör nivåändringen respons på infiltrationen.

B3: Manschett sattes på nivån +72,40 m för att avstänga inläckage från ytan. Respons inträffade efter 7,3 dygn och efter det att ökning av infiltrationsmängden gjorts. Begynnelsenivån var +49,25 m maximal nivå +49,92 m. Då manschetten borttogs (efter 9 dygn) blev borrhålet påverkat av inläckage från ytan. En kraftig stigning erhöles p g a nederbörd. Nivån steg till +51,77 m.

B4: Infiltrationshål. Vattennivån var vid starten +43,09 m. Nivån steg kontinuerligt. Något jämviktsläge inträffade ej. Efter 6,0 dygn ökades mängden till 17 l/min. Maximal nivå +57,42 m nåddes vid avstängning. Återhämtningskurvan passerar begynnelsenivån 10,3 dygn efter avstängning.

B5: Inget samband med infiltration har konstaterats. Vid nederbörd stiger vattennivån.

B7: Vattennivån är nära nog konstant.

B8: Respons inträffar efter 1,4 dygn. Nivån var vid avstängning +50,71 m därefter följde en stigning till +50,84 m 2,06 dygn efter avstängningen. Återhämtning till begynnelsenivån efter 9,1 dygn.

B9: 6,3 dygn efter start konstaterades påverkan. Begynnelsenivån var +45,52 m. Maximal nivå nåddes 2,1 dygn efter avstängning (+45,79 m). Återhämtning till begynnelsenivån 5,1 dygn efter avstängning.

B10: Efter 1 dygn erhöles respons. Begynnelsenivån var +47,87 m. Vid avstängning var nivån +49,23 m. Maximal nivå erhöles 0,9 dygn efter avstängning, nivån var då +49,51 m. Återhämtning till begynnelsenivån varade 9,9 dygn efter avstängning.

Sammanfattning: Konstant nivå erhöles ej i B4. Borrhålen B2, B3, B8, B9 och B10 påverkades. Observation i gemensamhetstunneln tydde på kraftigt inläckage.

8.5 Överslagsberäkningar av transmissivitet och permeabilitet

I avsikt att utnyttja information från infiltrationsförsöken i 8.4 till mer än kvalitativa studier av dräneringsvägarna i berggrunden genomförs nedan några överslagsberäkningar trots att de teoretiska förutsättningarna därför inte alltid uppfyllts.

8.5.1 Överslagsberäkning för bergborrhål B9 - B4

Genom infiltration i B9 stiger vattennivån upp till överskjutningszonen 8 minuter efter start. Nivån i B4 börjar stiga 204 minuter efter start. Detta ger en tidsskillnad av 196 minuter.

Horisontella avståndet mellan infiltrations- och observationspunkt var 51 meter. Sprickans stupning är ca 30° . Hastigheten hos den framträngande vattenfronten kan då uppskattas till $5,0 \cdot 10^{-3}$ m/s. Eftersom sprickan vid försökets början ej är vattenmättad kan tryckgradienten anses vara $= \tan 30^{\circ}$.

Darcy's lag ger

$$v = K \cdot i$$

$$K = \frac{5,0 \cdot 10^{-3}}{\tan 30^{\circ}} = 9 \cdot 10^{-3}$$

Denna beräkning är givetvis mycket grov. Eftersom sprickan vattenfylls under tiden som försöket genomförs, dock ej med säkerhet till mättnad. Strömningen vid B9 och B4 är nära parallell men som framgår av figur 33 ligger B4 avsevärt vid sidan av strömningen från B9 mot tunneln. Det beräknade värdet är därför lägre än det verkliga. Detta stöds även av den stora infiltrationskapaciteten i dessa båda bergborrhål.

8.5.2 Överslagsberäkning av transmissivitet vid bergborrhål B9 enligt Theis metod

Beräkningen utförs med Theis metod för icke-stationära förhållanden. Observationshål B10 avstånd; $r = 50$ m. Infiltration; $Q = 10$ l/min. Tryckhöjning i B10 som funktion av tiden plottas i dubbellogaritmiskt diagram. Efter kurvpassning erhålls transmissiviteten $T = 2 \cdot 10^{-6}$ m²/s och magasinskoefficienten $S = 3 \cdot 10^{-3}$.

För att få fram ett värde på permeabiliteten mellan infiltrationspunkt och observationspunkt krävs en uppskattning av det sprickiga bergets karaktär mellan bergborrhålen B9 och B10. Med ledning av de kvalitativa undersökningar som genomförts bedömes berggrunden öster om överskjutningszon A, d v s

liggandet genomsätts av brantstående sprickor. Ytberget bedömes även vara sprickigt. Denna sprickakvifers mäktighet är inte tillräckligt känd utan sättes till att vara av samma storleksordning som den vattenfyllda delen av B10, dvs 16 m. Permeabiliteten blir då av storleksordningen $1 \cdot 10^{-7}$ m/s ($1,25 \cdot 10^{-7}$) för denna del av berggrunden.

8.5.3 Överslagsberäkning av transmissivitet vid bergborrhål B4 enligt Theis metod

Beräkningarna utförs med Theis metod för icke stationära förhållanden. Observationspunkt bergborrhål B10. Avstånd; $r = 94$ m. Infiltration; $Q = 10$ l/min.

Tryckhöjning i B10 som funktion av tiden plottas i dubbellogaritmiskt diagram. Efter kurvpassning erhålles transmissiviteten $T = 6 \cdot 10^{-6}$ m²/s och magasinskoefficienten $S = 1 \cdot 10^{-3}$.

Om samma diskussion genomföres för detta fall som i 8.5.2 beträffande liggandets permeabilitet blir denna av storleksordningen $4 \cdot 10^{-7}$ m/s ($3,75 \cdot 10^{-7}$). Överensstämmelsen med föregående exempel är trots de något förändrade förutsättningarna god.

8.5.4 Överslagsberäkning av transmissivitet vid bergborrhål B2 enligt Theis metod

Beräkningen utförs med Theis metod för icke stationära förhållanden. Observationspunkter bergborrhål B8 och B11. B8 och B11 är båda lutande. Infiltration $Q = 3$ l/min. Avståndet B2 till B8 är 10 m vid grundvattennivån; $r = 10$ m. Tryckhöjningen i B8 som funktion av tiden plottas i dubbellogaritmiskt diagram. Efter kurvpassning erhålles transmissiviteten $T = 1,1 \cdot 10^{-5}$ m²/s och magasinskoefficienten $S = 1,1 \cdot 10^{-2}$. Om samma diskussion genomförs för detta fall som i 8.5.2 blir permeabiliteten av storleksordningen $7,3 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Avståndet B2 till B11 är 34 m vid grundvattennivån $r = 34$ m. Tryckhöjningen i B11 som funktion av tiden plottas i dubbellogaritmiskt diagram. Efter kurvpassning erhålles transmissivi-

teten $T = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och magasinskoefficienten $S = 4,0 \cdot 10^{-4}$. I B11 studerades vid försöket även återhämtningsförloppet. Härvid erhöles transmissiviteten $T = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ och magasinskoefficienten $S = 4,4 \cdot 10^{-4}$. Med samma antagande som ovan blir permeabiliteten av storleksordningen $1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ resp $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ för återhämtningsförsöket.

8.5.5 Överslagsberäkning av permeabiliteten vid bergborrhål B9 enligt Wenzells metod

För beräkningen har i detta fall antagits att berget är så uppsprucket att man med häftig approximation kan betrakta det som en homogen porös akvifer. Dessutom antages stationära förhållanden råda och grundvattenmagasinet vara öppet.

Enligt Wenzells metod (Todd, 1959) för beräkning av uttag ur brunnar i akviferer med en ursprunglig tryckgradient.

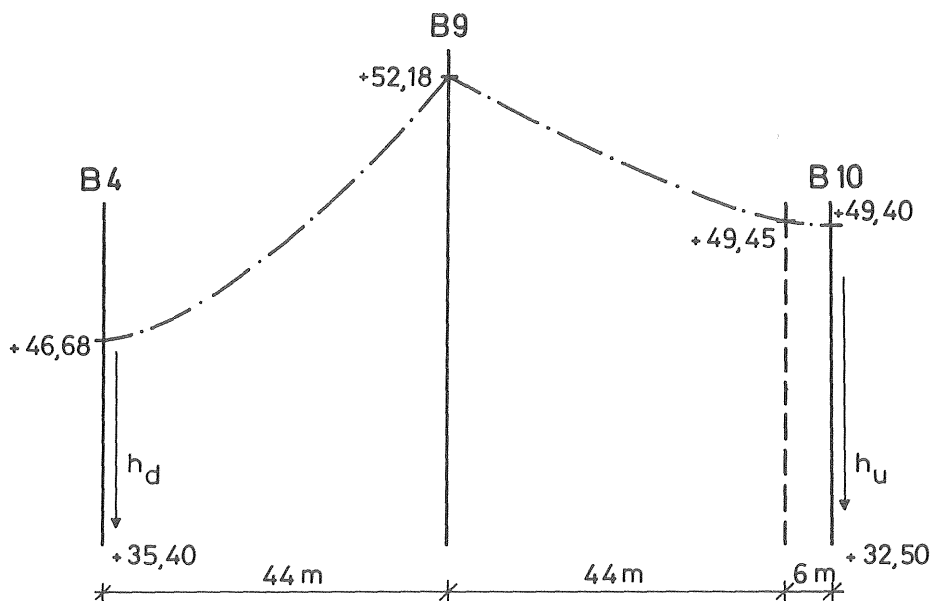


Fig. 36. Principskiss utvisande bergborrhål med aktuella trycknivåer.

$$K = \frac{2Q}{\pi r (h_u + h_d) (i_u + i_d)}$$

$r = 44 \text{ m}$ skall gälla även för uppströmsdelen, nivå uppströms blir då 49,45 m

$h_{u,d}$ räknas från borrhålsbotten

$i_d = 0,125$ $i_{d,u}$ har approximerats till tryckgradienterna
 $i_u = 0,062$ mellan försökshålet och vardera observations-
 hålet.

insatt i formeln ger

$$K = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$$

Helt stationära förhållanden uppnåddes ej vid försöket varför ovanstående beräkning är osäker.

Undersökningar i bergborrhål 9 har visat att överskjutningszonen är den dominerande kommunikationen åt väster till zonen skärning med gemensamhetstunneln.

8.5.6 Slutsatser ur överslagsberäkningar av transmissivitet i berggrunden

Förutsättningarna för de använda metoderna har ej tillfullo uppfyllts men detta förhållande vidlåter de flesta beräkningar av permeabilitet i kristallin berggrund. De beräknade värdena är mycket osäkra men torde trots detta ge en viss ledning. För berggrundsavsnittet mellan bergborrhålen B4 och B9 har överslagsberäkningarna i 8.5.3 och 8.5.4 givit permeabilitetsvärden $= 4 \cdot 10^{-7}$ resp $5 \cdot 10^{-7}$ m/s. Detta är genomsnittsvärden för såväl berggrundens helare som starkt uppkrossade delar. Permeabiliteten för avsnittet öster om bergborrhålet B9 fram till B10, dvs liggande till överskjutningszon A har på samma sätt uppskattats till att vara av storleksordningen $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Akviferen omfattar här ej överskjutningszonens utgående. Området kring B2 med brant stående sprickor har givit permeabilitetsvärden $1,2 \cdot 10^{-6}$ m/s - $1,6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Beträffande överskjutningszon A i avsnittet mellan bergborrhålen B4 och B9 tyder såväl överslagsberäkning 8.5.1 som erfarenheten från infiltrationsförsökens genomförande på att permeabiliteten för denna är större än $7 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Hittills publicerade permeabilitetsvärden för kristallin berggrund ligger mellan 10^{-5} m/s och 10^{-8} m/s för de fall där tätare och öppnare partier ej skiljts ut ifrån varandra. (Rasmussen, 1965, Bergman, 1975, Carlsson & Carlstedt 1976, Carlsson & Olsson, 1976). Värdena från Angered torde väl överensstämma med tidigare kända. Tyvärr har inget största värde för svaghetszonernas permeabilitet kunnat fastställas.

8.6 Jordlagrens permeabilitet

Förutsättningarna för vattenomsättning i jordlagren har diskuterats i moment 3 vid redovisningen av jordartslagerföljden. Perkolation genom markvattenzonen, grundvattenbildningen och läckaget till berggrunden har diskuterats i moment 5. I dessa moment påtalas också förekomsten av permeabla skikt i leran och dessas betydelse för dräneringen i jordlagerföljden. Det har således konstaterats att i de områden där berggrundvattnet är kraftigt avsänkt har också jordlagren dränerats genom dels dessa permeabla skikt i lera, dels friktionsmaterial mellan berggrund och lerlager. Av TAB. 7 framgår, vid borrhningsarbetet, lokaliserade permeabla skikt i leran och spolvattenförluster i mest genomsläppliga lager. I de flesta undersökningsrören konstaterades sådana skikt och i några fall var spolvattenförlusterna avsevärda.

Vid dokumentation av de i moment 2.2.3 omnämnda schakterna för centrumbebyggelsen insamlades prover från sand och silt-skikt ingående i lerlagrets undre delar, se figur 15. Permeabiliteten beräknat med Hazens formel är för dessa tre prover $1,4 \cdot 10^{-7}$ m/s, $7,4 \cdot 10^{-7}$ m/s och $9,4 \cdot 10^{-7}$ m/s. Bestämning i permeameter efter normerad packning kunde ej genomföras eftersom proverna var alltför finkorniga. Materialet har en moränliknande sammansättning men eftersom de underlagras av lerskikt bedömdes de vara avsatta som vattensediment och ej utgöras av morän. Alternativt har den understa delen av lagerföljden avsatts mycket nära iskanten och proverna utgöres av morän. Det närmast berget påträffade friktionsmaterialet har en växlande sammansättning. Det utgöres

ofta av mycket tunna skikt av silt eller sand från vilka inga prover stora nog för permeabilitetsbestämning kunnat insamlas. I några fall har prover från bäddar av moränkaraktär insamlats. Den mekaniska sammansättning hos två ytterlighetsprover redovisas i figur 16. Permeabiliteten för den direkt på berggrunden avlagrade moränen beräknad enligt Hazens formel är $3 \cdot 10^{-6}$ resp $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Av TAB. 7 framgår permeabiliteten i friktionslagret bestämd genom dels slugtest, dels beräknad enligt Hazens formel på uppspolade prover. Som synes är värdena för de i tvåtumsrören bestämda värdena avsevärt högre. Anledningen till detta torde i en del fall kunna vara att de genom tvåtumsrören uppspolade proverna ej är representativa, en erfarenhet som gjorts många gånger, eller att akviferen närmast tvåtumsrören kanske påverkats vid rördrivningen och senare renblåsningar. Den viktigaste anledningen torde dock vara att flertalet undersökningsrör är placerade utanför det område som schaktats ut och att skillnaden följaktligen motsvarade verkliga förhållandena. Erfarenheter från infiltrationsprover i U7 och U12 (se Carlsson, 1978) och vid U14 visar sålunda på hög permeabilitet i friktionsmaterialet närmast berggrunden. Tabellens (TAB. 7) värden $K = 10^{-3}$ för U7 betraktas därför som sannolikt.

TAB. 8. Sammanställning av undersökningsrör och genomförda test i dessa.

Rör nr	1 Markyttnivå	2 Jorddjup	3 Frikt.- lager	4 Permeabla skikt i leran	5 Återhämtning vid slugtest	6 K-Slug- test	7 K-Hazen	Förklaringar
U1	72.18	14.2	0.05	4.0	0.90	0.38	$2 \cdot 10^{-6}$	1. Plushöjd över
U2	72.37	3.3	0.10	0.0	-	0.27	-	Göteborgs noll- plan
U3	74.46	7.1	0.00	0.0	-	0.00	-	2. Totalt jorddjup i meter
U4	74.25	6.2	0.70	0.0	-	-	-	3. Friktionsmaterial- lagermaktighet i meter
U5	75.63	10.3	0.10	5.0	0.14	0.81	$1 \cdot 10^{-5}$	10 ⁻⁶
U6	68.85	4.0	0.00	0.0	-	0.00	-	-
U7	73.87	12.3	1.80	2.0	3.00	1.00	-	10 ⁻³
U8	76.90	5.3	0.75	0.0	-	0.86	$3 \cdot 10^{-6}$	-
U9	76.08	10.3	0.30	1.5	0.40	1.00	$1 \cdot 10^{-4}$	10 ⁻⁴
U10	69.25	3.3	0.25	-	-	0.74	-	10 ⁻⁶
U11	70.98	11.1	0.00	4.0	6.00	0.00	-	-
U12	74.74	10.9	0.75	5.5	38.00	-	-	-
U13	73.98	5.5	0.50	0.0	-	0.57	$4 \cdot 10^{-6}$	-
U14	74.99	9.0	0.50	4.5	0.03	0.85	-	-
U15	73.91	11.7	0.25	9.0	1.20	-	-	-
U16	72.86	14.6	0.75	2.5	1.50	0.74	$1 \cdot 10^{-6}$	5 · 10 ⁻⁴
U17	76.01	5.7	0.15	3.0	0.10	0.99	-	-
U18	73.51	12.3	1.60	8.0	1.10	0.98	$3 \cdot 10^{-6}$	5 · 10 ⁻⁴
U19	69.77	9.8	0.05	0.0	-	0.08	$4 \cdot 10^{-6}$	-
U20	71.73	13.4	0.05	4.5	2.10	0.88	-	-
U21	74.69	5.8	0.60	1.0	0.03	0.94	-	5 · 10 ⁻⁴
U22	70.47	8.1	0.40	2.0	0.50	0.95	$1 \cdot 10^{-5}$	-
U23	69.47	4.8	0.08	0.0	-	0.94	$8 \cdot 10^{-5}$	-
U24	73.93	10.1	0.05	6.0	3.70	1.00	$1 \cdot 10^{-4}$	-
U25	71.03	8.9	0.04	3.0	0.002	1.00	-	-
U26	70.57	2.3	0.00	-	-	0.63	-	-
U27	72.55	12.2	0.20	-	-	0.05	-	-

LITTERATUR

- Arnell, V, 1974, Intensitets-varaktighetskurvor för häftiga regn i Göteborg under 45-årsperioden 1926-1971. (Geohydrologiska forskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola) Meddelande nr 5. Göteborg.
- Axelsson, 1977, Infiltration i kristallint berg, kompletterande undersökning i Angered, Göteborg. (Geologiska institutionen) Publ B 96. Examensarbete. Göteborg.
- Bergman, M, 1975, Borrhålsundersökningar i berg. Tillförlitlighetsvärdering av metoder. (Byggforskningen) Rapport R 17:1975.
- Bergman, M, 1977, Grundvatteninläckning i tunnlar och berggrum. En dokumentation av förhållandena vid 73 tunnelavsnitt och berggrum i Sverige. (Byggforskningen) Rapport R 51:1977.
- Bergsten, 1950, Contribution to study of evaporation in Sweden. (SMHI). Meddelanden, ser D, nr 3.
- Brown, R H, 1972, Groundwater studies. Studies and reports in hydrology, 7. Paris.
- Carlsson, A, Olsson, T, 1976, Bestämning av berggrundens permeabilitet genom vattenförlustmätning. Särtryck ur Vannet i Norden, nr 3 - 76.
- Carlsson, L, Carlstedt, A, 1976, Estimation of transmissivity and permeability in Swedish bedrocks. (Nordic Hydrological Conference 29 aug - 1 sep 1976).
- Carlsson, L, 1978, Djupinfiltration i Angered. (Geohydrologiska forskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola) Meddelande nr 29. Göteborg.

- Cooper, H H et al, 1967, Respons of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. (Water Resource Res 3) 11, 263-269.
- Dachler, B, 1963, Grundwasserströmung. (Springer). Wien.
- Engdahl, M, 1975, Bestämning av infiltrationskapacitet i främst lerjordar, inom Angered, Göteborg. (Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola/Göteborgs universitet) Publ B 49.
- Ericsson, L O, 1977, Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport från första verksamhetsåret 1976-02-01-1977-01-31. (Geohydrologiska forskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola) Meddelande nr 25. Göteborg.
- Hellgren, L G, 1974, Programpaket för lagring och bearbetning av grundvattenobservationer. (Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola/Göteborgs universitet) Publ D 21.
- Holmstrand, O & Wedel, P, 1976, Markvattenundersökningar i ett urbant område. (Geohydrologiska forskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola) Meddelande nr 17. Göteborg.
- Jacks, G, 1970, Undersökningar i urbergsakviferer. (Nordisk Hydrologisk Konferens). Lund.
- Knutsson, G, Morfeldt, C-O, 1973, Vatten i jord och berg.
- Larsson, 1963, Tectonic and morphologic studies in precambrian rocks at groundwater prospecting in south Sweden. Lunds studies in geography, ser A, nr 25.
- Larsson, I, Knutsson, G, 1970, Grundvatten.

- Lindskoug, N-E, Nilsson, L-Y, 1974, Grundvatten och byggande. (Byggforskningen) Rapport R 20:1974.
- Louis, C L, 1967, Strömmungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels. (Universität, TH, Karlsruhe) Diss.
- Lysén, L, Palmqvist, K, 1976, Tätning av bergtunnlar. Projekteringsmetodik, injektering och förstärkning. (Byggforskningen) Rapport R 4:1976.
- Morgenstern, N R, 1971, Stability in open pit mining. Kap 5.
- Papadopoulos, S et al, 1973, On the analysis of slug test data. (Water Resources Research) 9 (4), 1087-1089.
- Philips, J R, 1957, The theory of infiltration. The profile of infinity. Soil Science Vol 83, No 6.
- Philips, J R, 1957, The theory of infiltration. Moisture profiles and relation to experiment. Soil Science Vol 84, No 3.
- Rasmussen, W C, 1965, Permeability and storage of heterogeneous aquifers in the United States. (Int union of geodesy and geophysics) Proceedings, p 317-325. Berkeley, California, US.
- SIB, 1970, Geologisk-tektonisk undersökning, Bergtunnlar Angered, etapp II.
- SMHI, Nederbörden i Sverige 1931 - 1975.
- STEGA, Nederbördsmätningar i Gunnilse och Tolered 1969 - 1973.

Todd, D K, 1959, Groundwater hydrology. (Wiley international edition).

Va-verket, Göteborg, Nederbörden i Göteborg 1971, 1972, 1973, 1974 och 1975.

Ward, R C, 1972, Principles of hydrology. (McGraw-Hill). London.

Wenner, C G, 1951, Grundvattenförhållanden i södra Sveriges berggrund. (Teknisk Tidskrift 1951) häfte 47.

Wittke, L, et al, 1969, Anströmungen von Hohlräumen im Fels.

Wittke, L, 1969, Durchströmung von klüftigem Fels. Theorie, Experiment und Anwendung. (Universität Karlsruhe), Heft 155.

Wittke, L, 1972, Rechnerische und elektroanaloge Lösung dreidimensionalen Aufgaben der Durchströmung von klüftigem Fels.

FÖRTECKNING ÖVER UTGIVNA MEDDELANDEN

- nr 1 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Lägesrapporter (1972-07-01--1973-03-01). 1973. 100 sidor. 20:-. (Utgången).
- nr 2 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 1. Evaluering av akviferers geohydrologiska data med hjälp av provpumpningsdata. 1973. 67 sidor. 20:-.
- nr 3 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 2. Evaluering av lågpermeabla lagers hydrauliska diffusivitet med hjälp av provpumpningsdata. 1973. 17 sidor. 15:-.
- nr 4 Viktor Arnell: Nederbördsräknare. En sammanställning av några olika mätyper. 1973. 39 sidor. 15:- (Utgången).
- nr 5 Viktor Arnell: Intensitets-varaktighetskurvor för häftiga regn i Göteborg under 45-årsperioden 1926 - 1971. 1974. 68 sidor. 20:-.
- nr 6 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Lägesrapporter (1973-03-01--1974-02-01). 1974. 167 sidor. 20:-
- nr 7 Olov Holmstrand, Per O Wedel: Ingenjörsgelogiska kartor - litteraturstudier. 1974. 55 sidor. 15:-.
- nr 8 Anders Sjöberg: Interim Report. Mathematical Models for Gradually Varied Unsteady Free Flow. Development and Discussion of Basic Equations. Preliminary Studies of Methods for Flood Routing in Storm Drains. 1974. 74 sidor. 20:-. (Utgången).
- nr 9 Olov Holmstrand (red.): Seminarium om ingenjörsgelogiska kartor. 1974. 38 sidor. 15:-. (Utgången).
- nr 10 Viktor Arnell, Börje Sjölander: Mätning av nederbördsintensiteter i Göteborgsregionen. Stationsbeskrivning. 1974. 53 sidor. 15:-. (Utgången).
- nr 11 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Rapport från arbetsgruppen "Dagvattnets beskaffenhet och egenskaper". Sammanställning av utförda dagvattenundersökningar i Stockholm och Göteborg 1969-1972. The character and properties of urban storm water results from investigations in Stockholm and Gothenburg 1969-1972. English summary. 1974. 46 sidor. 20:-.
- nr 12 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Interimrapport. Beräkningsmodell för simulering av dagvattenflöde inom bebyggda om-

- råden. Geohydrologiska forskningsgruppen i samarbete med VA-verket i Göteborg, meddelande nr 12, 1975. 50 sidor. 15:-.
- nr 13 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Nederbörds-avrinningsmätningar i Bergsjön, Göteborg 1973-1974. 1975. 92 sidor. 20:-.
- nr 14 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Delrapport. Dagvattnets sammansättning i Göteborg. Urban storm water quality. Interim report from a study in Gothenburg. English summary. 1975. 73 sidor. 20:-. (Utgången).
- nr 15 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt, Anders Sjöberg och Gilbert Svensson: Dagvatten, Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg, Norge, 1975. 1976. 33 sidor. 15:-
- nr 16 Leif Andréasson, Leif Carlsson, Klas Cederwall, Bengt-Arne Torstensson och Per Wedel: Grundvatten. Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg, Norge, 1975. 1976. 43 sidor. 15:-.
- nr 17 Olov Holmstrand: Markvattenundersökningar i ett urban område. 1976. 127 sidor. 25:-.
- nr 18 Göran Ejdeling: Beräkningsmodeller för prognos av grundvattenförhållanden. 130 sidor. 25:-.
- nr 19 Viktor Arnell, Jan Falk, Per-Arne Malmquist: Urban Storm Water Research in Sweden. In English. 1977. 30 sidor. 15:-.
- nr 20 Viktor Arnell: Studier av amerikansk dagvattenteknik. Resa i december 1976. 1977. 64 sidor. 15:-.
- nr 21 Leif Carlsson: Reserapport från studieresa i USA samt deltagande i 2nd International Symposium on Land Subsidence in Anaheim, USA. 29 nov - 17 dec 1976. 1977. 61 sidor. 15:-.
- nr 22 Per O Wedel: Grundvattenbildning, samspelet jordlager och berggrund. Exemplifierat från ett försöksområde i Angered. 1978. 130 sidor. 25:-.
- nr 23 Viktor Arnell: Nederbördsdata vid dimensionering av dagvattensystem med hjälp av detaljerade beräkningsmodeller. En inledande studie. 1977. 1977. 29 sidor. 20:-.
- nr 24 Leif Carlsson, Klas Cederwall: Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Geohydrologisk forskning vid CTH, Sektion V, under perioden 1972-75. 1977. 17 sidor. 15:-.
- nr 25 Lars O Ericsson (red.): Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport från första verksamhetsåret 1976-02-01--1977-01-31. 1977. 120 sidor. 25:-.
- nr 26 Ann-Carin Andersson, Jan Berntson: Kontrollerad grundvattenbalans genom djupinfiltration. En invertering av djupinfiltrationsprojekt. 1978. (Under utskrift).

- nr 27 Anders Eriksson, Per Lindvall: Lokalt omhändertagande av dagvatten. Resultatredovisning av enkät rörande drift och konstruktion av perkolationsanläggningar. 1978. 126 sidor. 25:-
- nr 28 Olov Holmstrand (red.): Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport nr 2 från perioden 1977-02-01--1977-11-30. 1978. 69 sidor. 20:-.
- nr 29 Leif Carlsson: Djupinfiltrationsstudier i Angered. 1978. 70 sidor. 20:-.
- nr 30 Lars O Ericsson: Infiltrationsprocessen i en dagvattenmodell. Teori, Undersökning, Mätning och Utvärdering. 1978. 45 sidor. 20:-.
- nr 31 Lars O Ericsson: Permeabilitetsbestämning i fält vid perkolationsmagasin. Dimensionering. 1978. 15 sidor. 15:-.
- nr 32 Lars O Ericsson, Stig Hård: Infiltrationsundersökningar i stadsdelen Ryd, Linköping. 1978. 145 sidor. 25:-.

Beställningar kan göras hos May-Britt Fryksmark, tel 810100/1648.