



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

**GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN**

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings - och avloppsteknik

ISSN 0437 - 8165

---

**MARKVATTENFÖRHÅLLANDEN  
I URBANA OMRÅDEN**

**Slutrapport**

**Lars O. Ericsson**



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings - och avloppsteknik

ISSN 0437 - 8165

---

# MARKVATTENFÖRHÅLLANDEN I URBANA OMRÅDEN

## Slutrapport

Adress:

Chalmers Tekniska Högskola  
Geohydrologiska forskningsgruppen  
412 96 GÖTEBORG  
Tel. 031/810100

**Lars O. Ericsson**



## FÖRORD

Denna rapport utgör slutrapport för projektet "Markvattenförhållanden i urbana områden", som bedrivits vid Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg. Forskningsprojektet har varit ett delprojekt till det övergripande forskningsprogrammet "Lokalt omhändertagande av dagvatten" vilket tillhört Geohydrologiska forskningsgruppens, CTH, verksamhetsfält.

Forskningsprogrammet "Lokalt omhändertagande av dagvatten" har huvudsakligen finansierats med medel från Statens råd för byggnadsforskning (BFR). Förutom av BFR har undersökningar i Göteborg bekostats av Göteborgs Stads Egnahems AB (EHAB), Svenska Riksbyggen och Göteborgs VA-verk. I Halmstad har projektet fått stöd med material och vissa arbetsinsatser från kommunens gatukontor. Vidare har Tekniska Verken, Linköping och Chalmers tekniska högskola varit med att finansiera undersökningar som bedrivits inom projektets ram.

Jag vill här tacka alla dem som på ett eller annat sätt medverkat i projektarbetet. Projektledare har varit Per Wedel. Ett nära samarbete har bedrivits med Olov Holmstrand, "Lokalt omhändertagande av dagvatten - geohydrologiska förutsättningar". Fält- och laboratoriearbetet har huvudsakligen utförts av Bo Lind, Lars-Ove Sörman och Jan Rogbeck. Lisbet Westin gjorde en omfattande litteraturundersökning om de miljömässiga aspekterna på dagvattenhantering. Juhani Reitikainen har svarat för programmeringsarbetet och Annika Dahlqvist respektive May-Britt Fryksmark har sett till att ett kladdigt handskrivet manus kommit på pränt. Ett speciellt stort tack riktas till Stig Hård som förutom sin medverkan i fältarbetet varit författare till flera delrapporter. Stig Hård har även varit anställd som forskare i projektets slutskede.

Göteborg i augusti 1980.

Lars O Ericsson

FÖRORD	SID	i
<u>INNEHÅLL</u>		ii
SAMMANFATTNING		iv
PROJEKTETS PUBLIKATIONER		v
EN REFLEKTION		vii
1.	INLEDNING	1
2.	PROJEKTETS MÅLSÄTTNING OCH GENOMFÖRANDE	3
3.	VAD MENAS MED MARKVATTENFÖRHÅLLANDEN I URBAN MILJÖ?	5
4.	INTERNATIONELL KUNSKAPSNIVÅ, TEORI, MÄTMETODER	11
4.1	Vattnets rörelse under vattenomättade förhållanden	12
4.2	Markfysikaliska och hydrologiska modeller	13
4.3	Mätmetoder för vattenhalt och hydraulisk konduktivitet	14
4.4	Infiltrationsmätning	17
4.5	Markstrukturens inverkan på vegetationen och infiltrationskapaciteten	18
4.6	Dagvattnet och markens kemiska respektive biologiska processer	22
5.	MARKVATTENMAGASINETS BETYDELSE FÖR VATTENBALANSEN	25
5.1	Markvattenmätningar i Härryda (friktionsmaterial)	25
5.2	Bergsjö-området, Göteborg Mät punkt i jungfrulig miljö	27
6.	URBANISERINGENS INVERKAN PÅ MARKVATTENFÖRHÅLLANDEN OCH INFILTRATIONSKAPACITET	31
6.1	Markvattenmätningar i Angered	31
6.2	Markvattenmätningar i Bratthammar	33
6.3	Markvattenmätningar i Bergsjön	35
6.4	Påverkan av infiltrationskapacitet	38
7.	ETT YTGENERALISERANDE INSTRUMENT FÖR VATTENHALTSBESTÄMNING - TERMOVISION	39

8.	INFILTRATION GENOM GRÖNYTOR I BEBYGGDA OMRÅDEN	41
8.1	Hortons ekvation och Arnell, Lyngfelts dagvattenmodell	43
8.2	Laboratorieförsök i en låda angående enkelringsinfiltrationens funktion	45
8.3	Val av korrektionsfaktor vid fältmätningar	51
8.4	Regression enligt Hortons formel	58
8.5	Exempel på bearbetning av mätvärdena	60
8.6	Den säsongsmässiga variationen av infiltrationskapaciteten	62
8.7	Fältarbete och ytgeneralisering av infiltrationsmätningar, exempel	68
8.8	Infiltrationskapaciteten som funktion av markens humushalt och kornstorlek	76
9.	PERKOLATIONSMAGASIN OCH SPRICKVATTENMAGASIN - GEOHYDROLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR	81
9.1	Perkolationsmagasin i friktionsjord	82
9.1.1	En magasinmodell	82
9.1.2	Avbördningsförloppet i ett perkolationsmagasin	82
9.1.3	Avrinningshydrograf, tömning av magasin	85
9.2	Sprickvattenmagasin i torrskorpelera	88
9.2.1	Försöksmagasin i Bratthammar	89
9.2.2	Icke-stationärt flöde till och från ett sprickvattenmagasin	92
9.2.3	Exempel på icke-stationär tömning av ett sprickvattenmagasin	93
9.2.4	Stationärt flöde vid ett sprickvattenmagasin	96
9.3	Förundersökning vid perkolationsmagasin, sprickvattenmagasin	97
9.3.1	Grundvattenförhållanden	97
9.3.2	Magasinsförmåga i omättad zon	97
9.3.3	Genomsläpplighet	98
10.	REFERENSER	107

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 750148-4 från Statens råd för byggnadsforskning till Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola.

## SAMMANFATTNING

Markvattensituationen är väsentlig för vattenbalansen i såväl jungfruliga som bebyggda områden. Inom forskningsprojektet "Markvattenförhållanden i urbana områden" har en huvudmålsättning varit att med förhållandevis enkla undersökningsmetoder kunna göra ytgeneraliserande bedömningar angående markens omättade zon. De parametrar som mest studerats har varit markvattenhalt och infiltrationskapacitet. Dessa är av centralt intresse vid det lokala omhändertagandet av dagvatten.

Projektarbetet har till sin uppläggning varit mycket brett och strävat att utreda olika frågeställningar inom ett stort ämnesområde. Utifrån en teoretisk kunskapsbas genom litteraturstudier har olika förenklade metoder testats. Bland metoderna kan nämnas följande:

Inom markvattenprojektet har introducerats en metod för uppskattning av infiltrationskapaciteten på grönytor i bebyggda områden. Infiltrometermetodens tillförlitlighet har studerats och anpassats till en infiltrationsmodell (Hortons formel). Denna infiltrationsmodell kan användas vid datorberäkningar av dagvattensystem.

Under förutsättning av lika packningsförfarande vid olika grönytor har påvisats ett samband mellan infiltrationskapacitetens slutvärde och jordmånens kornstorlek, humushalt.

En metod för bestämning av hydraulisk konduktivitet vid vattenmättnad i den omättade markzonen presenteras i slutrapporten. Metoden ger ett lokalt representativt K-värde som kan användas vid dimensionering av perkolationmagasin. Inom projektets ram har även påvisats möjligheten att bestämma markvattenhalten vid markytan med hjälp av termovisionskamera.

Forskningsprojektet har varit ett delprojekt till det övergripande forskningsprogrammet "Lokalt omhändertagande av dagvatten", vilket tillhört Geohydrologiska forskningsgruppens, CTH, verksamhetsfält.

## PROJEKTETS PUBLIKATIONER

Här presenteras de publikationer som hänför sig till projektet "Markvattenförhållanden i urbana områden". Några av publikationerna har delvis tagits fram med anslagsmedel från projektet, "Lokalt omhändertagande av dagvatten - geohydrologiska förutsättningar".

Ericsson L O (red), 1977. Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport från första verksamhetsåret 1976-02-10--1977-01-31. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH. Meddelande nr 25. Göteborg, 1977.

Westin L, 1977. Miljömässiga aspekter på dagvattenhantering. Litteraturgenomgång. Byggforskningen, Rapport R94:1977. Stockholm, 1977.

Ericsson L O, Holmstrand O, 1978. Vattnets rörelse i den omättade zonen, mätmetoder. Litteraturgenomgång. Byggforskningen, Rapport R4:1978. Stockholm, 1978.

Holmstrand O (red), 1978. Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport nr 2 från perioden 1977-02-10--1977-11-30. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH, Meddelande nr 28. Göteborg, 1978.

Ericsson L O, 1978a. Infiltrationsprocessen i en dagvattenmodell. Teori, Undersökning, Mätning och Utvärdering. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH, Meddelande nr 30. Göteborg, 1978.

Ericsson L O, 1978b. Permeabilitetsbestämning i fält vid perkolationsmagasin. Dimensionering. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH, Meddelande nr 31. Göteborg, 1978.

Ericsson L O, 1978c. Infiltrationskapaciteten som funktion av markens humushalt och kornstorlek. Publ B110, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1978.



- Ericsson L O, 1978d. Markvatten och vegetation i bebyggda områden. Ymers årsbok 1978, Svenska sällskapet för antropologi och geografi. Stockholm, 1978.
- Ericsson L O, Hård S, 1978a. Infiltrationsundersökningar i stadsdelen Ryd, Linköping. Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr 32. Göteborg, 1978.
- Ericsson L O, Hård S, 1978b. Registrering av vattenhalten i markytan med hjälp av termovisionskamera. Publ B111, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg 1978.
- Ericsson L O, 1978e. Bestämning av hydraulisk konduktivitet i sandiga jordarter med hjälp av kornstorleksfördelningen eller specifika ytan. Publ D39. Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1978.
- Rogbeck J, 1977. Sammanställning av analysförfarandet angående 1976 års "Linköpingsprover". Intern PM, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1977.
- Kaufmann H, Röine D, 1978. Bestämning av hydraulisk konduktivitet i markens omättade zon. Examensarbete, Publ B122, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1978.
- Olsson J-A, Sääf L-J, 1978. Bestämning av hydraulisk konduktivitet i markens omättade zon. Examensarbete, Publ B116, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1978.
- Jonasson S, 1979. Dimensionering av perkolationsmagasin. En jämförande studie av olika metoder för bestämning av hydraulisk konduktivitet i friktionsjordar. Examensarbete, Publ B138, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg 1979.
- Ericsson L O, 1980. Markvattenförhållanden i urbana områden Slutrapport. Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr 51. Göteborg, 1980.

## EN REFLEKTION

"I begynnelsen ...

... Och Gud sade: "Samle sig det vatten som är under himmelen till en särskild plats, så att det torra bliver synligt." Och det skedde så.

Och Gud kallade det torra jord, och vattensamlingen kallade han hav. Och Gud såg att det var gott.

... Då bar jorden ännu ingen buske på marken, och ingen ört hade ännu skjutit upp på marken, ty HERREN Gud hade icke låtit regna på jorden, och ingen människa fanns, som kunde bruka jorden;

men en dimma steg upp från jorden och vattnade hela marken.

Och HERREN Gud danade *människan* (hebr. = adam) av stoft från *jorden* (hebr. = adama) och inblåste livsande i hennes näsa, och så blev människan en levande varelse."

Människan har således en härkomst som innebär ett stort ansvar inför sina gärningar. Ett ingrepp i den hydrologiska balansen är enligt ovan som att förneka sitt ursprung. Nåväl, det kan sägas på många sätt, alltifrån berättelsen om Skapelsen, Syndaflo den över slagern till barnvisan.

"Ned fall allt regnet, spola spindeln bort!"

Var rädd om det levande!

Varför kunde vi åtminstone inte utjämna vattenflödet innan vi skrev ramsan och givit spindeln en rimlig chans?

Har Du möjligtvis reflekterat över att marken faktiskt vant sig vid att få sitt årliga regnbehov sedan lång tid tillbaka? - Poeten har det!

"En herde spelar på sin flöjt om kvällen  
och flöjten vänjer sig och låter bra.  
Och regnet faller över torra ställen  
och marken vänjes vid vad den skall ha."

(E. Taube)

Tekniken borde kanske litet oftare besjåla de döda  
tingen?!

Så naturligt är Det. Vi blir oroliga och väntar otåligt  
när regnet uteblir för en stund. Detta tema har också  
inspirerat.

"Himlen ger skugga.  
Skugga ger molnen.  
Dimdroppar dugga.  
Snart blir det regn.  
Markerna vänta  
regnflöde - solsken.  
Själarna glänta  
vänta på flod.  
Rykande gråmoln  
rulla och välva  
ovan bekymmer om  
väder och vind  
sjunka mot stjärklar  
själar som skälva.  
Nu föll en droppe  
regn på min kind."

(A. Hambe)

"Jorden är torr.  
Inte bara i myllan  
torr till källornas botten.  
Torkan och jorden.  
Varför kan jag inte bli fri  
jag är ju inte bonde  
är varken säd eller träd.  
Jag är ju så vidtskild från trädets art  
som livets stigar kan leda.  
Rotad i jorden, riktad mot skyn  
- det låter som billig satir.

Nu börjar regnet falla."

(G. Beskow)

Men ibland kan även nederbörden gå till överdrift.

"Rymden är inte full av sång  
direkt. Men den är våt.  
Man kan inte hänga sig en gång  
om man inte har båt.

Man kan gå ut och andas in.  
Dock bör man medta kopp.  
Man är ett paraply av skinn.  
Ett badkar är ens kropp.

Allting flyter. Allt är blött.  
Var svensk sin egen sjö.  
Det suckar ur vårt våta kött:  
Har någon sett en ö?"

(S. Dagerman)

Tänk om alla kunde uppleva höstrusket och markens över-  
skridna förmåga att ta omhand regnet, som något minnes-  
värt.

"Minns du hur regnet fyllde höstens gropar med vatten?  
Du frågar när jag kommer åter? Det vet jag inte än.  
När får vi uppliva minnet av den glada och regniga natten  
och snoppa ljusen tillsammans i det västliga fönstret  
igen?"

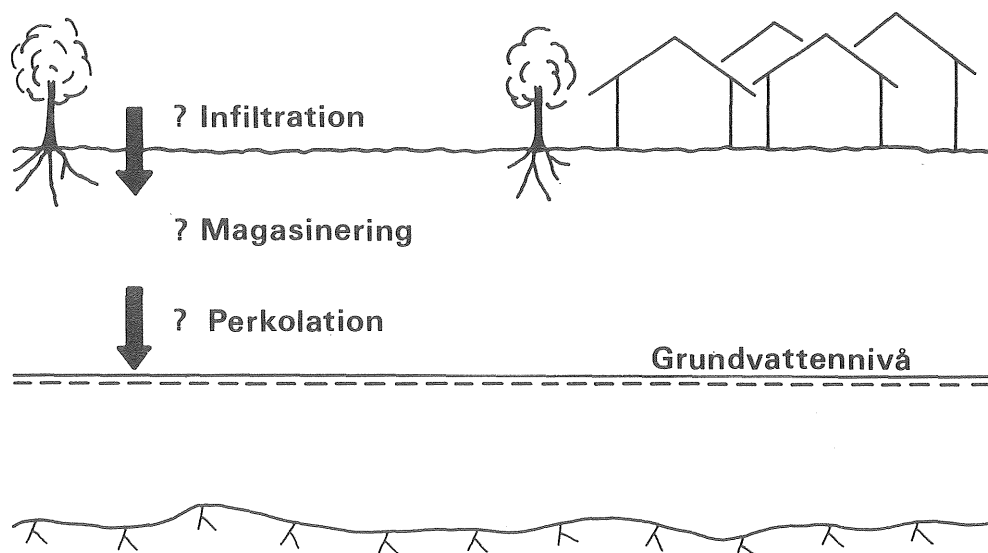
(Li Shang-Yin)

Marken och vattnet har alltid fascinerat!



## 1. INLEDNING

År 1973 startade vid Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, en forskningsverksamhet som inriktades på de hydrauliska förhållandena i markens vattenomättade zon. Forskningen initierades sedan Geohydrologiska forskningsgruppens båda projekt "Dagvattenstudier i Göteborg" och "Grundvattenbalans - Grundvattenbildning" uppvisade ett kunskapsbehov i ämnet. Det förstnämnda projektet hade behov att få infiltrationsprocessen och markvattenbildningen i bebyggd miljö belyst. Inom det sistnämnda projektets verksamhet förelåg ett allmänt önskemål att få den vattenomättade zonen undersökt. Detta för att säkrare kunna beskriva den hydrologiska balansen och grundvattnets samspel mellan jord och berg i försöksområdet Angered, Göteborg. Infiltrationsprocessen, perkolationen och markvattenmagasineringen har alltså utgjort de huvudsakliga frågeställningarna inom forskningsarbetet. Se figur 1.



Figur 1. Markvattenprojektets huvudsakliga frågeställningar.

De inledande forskningsresultaten redovisades 1976 (Holmstrand och Wedel, 1976) och det ansågs då att de mätmetoder som använts inte alltid hade varit helt tillfredsställande. Man konstaterade att det förelåg ett behov av "mera grundläggande studier såväl vad gäller undersökningsapparatutrustning som teoretisk behandling av problemen".

När Geohydrologiska forskningsgruppen 1976 påbörjade forskningen inom ämnesområdet "Lokalt omhändertagande av dagvatten", LOD, var det därför naturligt att låta ett delprojekt behandla den vattenomättade zonen. Forskningsprogrammet för lokalt omhändertagande av dagvatten uppdelades i tre delprojekt vilka sedan drivits som integrerade delar:

- a) Markvattenförhållanden i urbana områden.
- b) Lokalt omhändertagande av dagvatten - hydrologiska förutsättningar.
- c) Lokalt omhändertagande av dagvatten - geohydrologiska förutsättningar.

Forskningsarbetet har fortlöpande följts av en referensgrupp. Inför gruppen har två stycken delrapporteringar presenterats vilka därefter publicerats (Ericsson, 1977 och Holmstrand, 1978). I delrapporterna framgår för övrigt hela LOD-projektets målsättning och organisatoriska uppläggning.

Denna rapport har huvudsakligen sammanställts efter den arbetsdisposition för projektet "Markvattenförhållanden i urban miljö" som presenterades i forskningsansökan. Dvs, utifrån en teoretisk kunskapsbas som inhämtades genom litteraturstudier uppställdes de egentliga forskningshypoteserna. Resultaten presenteras därför så att de väsentligen innefattas i de övergripande målsättningarna för markvattenprojektet. I kapitlet "Projektets målsättning och genomförande" framgår projektuppläggningsen tydligare. De forskningsresultat som erhållits finns mestadels publicerade i delrapporter och uppsatser. I dessa beskrivs också försöksmetoderna mer noggrant än i denna slutrapport.

För vilka läsare är då innehållet i denna rapport avsett?  
- Rapporten kräver vissa allmänna förkunskaper i geohydrologi och riktar sig till VA-tekniker, byggnadsgeologer, geotekniker etc med dagvattenfrågor och planering som arbetsfält. Dessutom kan publikationen vara av intresse för landskapsarkitekter, hydrologer och forskare inom det agrikulturella ämnesområdet.

## 2. PROJEKTETS MÅLSÄTTNING OCH GENOMFÖRANDE

Forskningsuppgiftens målsättning kan sammanfattas i följande punkter:

1. Studium av markvattenmagasinets variationer med tiden och betydelse för vattenbalansen i urbana områden.
2. Studium av urbaniseringens inverkan på markvattenförhållanden och infiltrationskapacitet.
3. Bestämning av infiltrationskapacitetens storlek och variationer med tiden i urbana områden.
4. Studium av förutsättningarna för utförande av perkolationsanläggningar med hänsyn till förhållandena i markens omättade zon.

Projektarbetet inleddes med en omfattande litteraturgenomgång vilken publicerats i två BFR-rapporter (Ericsson och Holmstrand, 1978 samt Westin, 1977). Den första behandlar vattnets rörelse i den omättade zonen och olika mätmetoder som används för att klargöra de hydrauliska sambanden i denna zon.

Infiltrationen och perkolationen är emellertid ej enbart beroende av bearbetning, mekanisk sammansättning, rådande vattenhalt etc utan en påverkan fås även från de biologiska och kemiska processer som äger rum i marken. Likaså är det viktigt, sett ur ett ekologiskt perspektiv, att de biologiska och kemiska förhållandena i den omättade zonen är kända när ett förorenat dagvatten tillförs markytan. Den andra litteraturgenomgången har därför inom projektets ram givit en värdefull orientering om kunskapsläget beträffande dessa biologiska och kemiska processer.

Litteraturstudierna och erfarenheterna från det tidigare markvattenprojektet har legat till grund för de arbets- och försöksmetoder som använts. En slutgiltig analys av

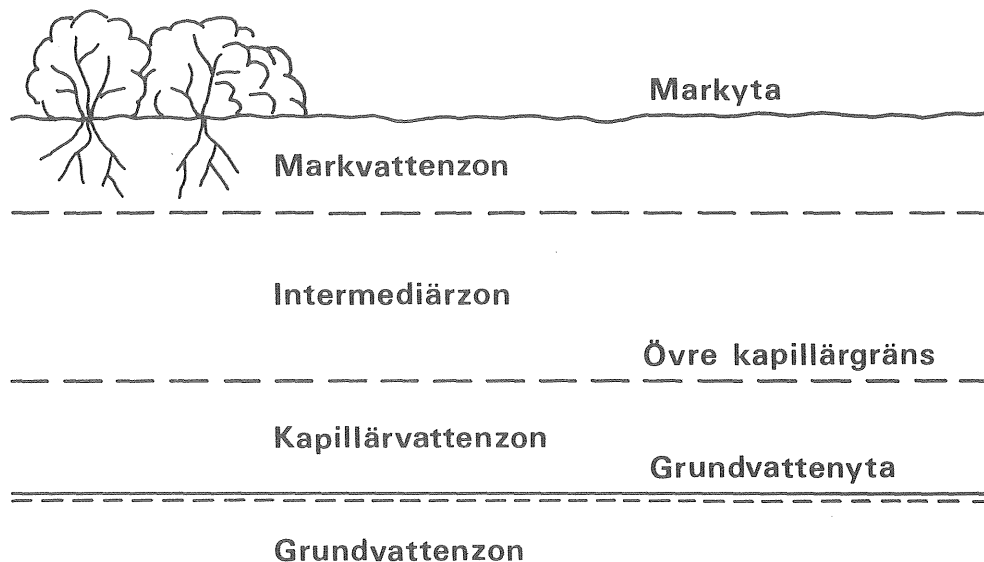


mätvärdena har dessutom ofta krävt externa uppgifter, t ex nederbörd, grundvattennivåer och portryck under längre tidsintervall.

Projektarbetet har till sin uppläggning varit mycket brett och strävat att utreda olika problem inom ett stort ämnesområde. Vi har försökt presentera resultaten i så generaliserande formuleringar som möjligt med anknytning till målsättningen. Emellertid vill vi påpeka att dessa resultat skall ses kopplade till sina lokala geohydrologiska förutsättningar.

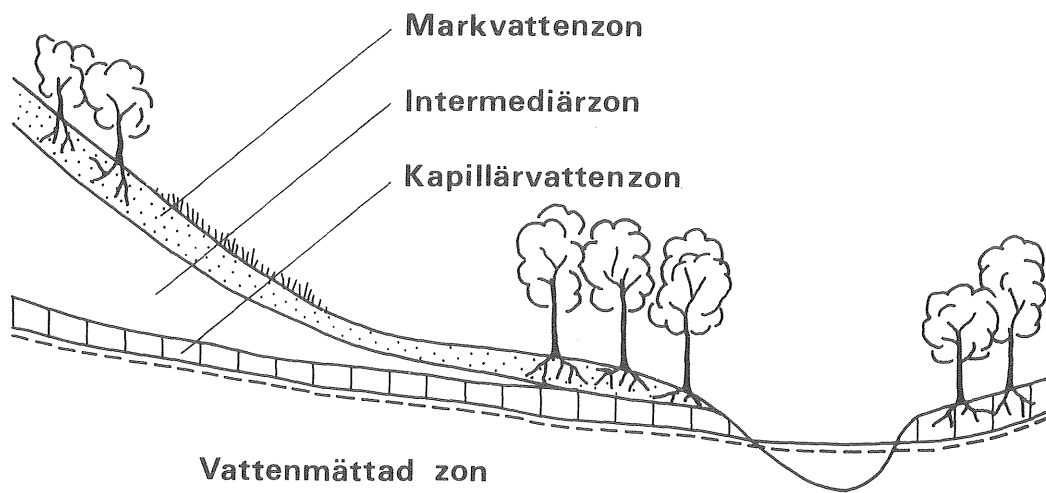
### 3. VAD MENAS MED MARKVATTENFÖRHÅLLANDEN I URBAN MILJÖ?

Vanligtvis indelas markens vattenomättade zon i ett antal delzoner enligt figur 2. Den översta delzonen, markvattenzonen, begränsas uppåt av markytan och nedåt av växternas undre rotzon. Intermediärzonen sträcker sig mellan markvattenzonen och kapillärvattenzonen. I intermediärzonen uppträder vattnet vanligtvis som sjunkvatten, dvs vatten som rör sig nedåt i form av sjunkande kapillärvatten eller som fritt sjunkande vatten. Kapillärvattenzonen omfattar delen från grundvattenytan till nivån för vattnets största kapillära stigning. Beroende på lokala förutsättningar utbildas dessa delzoner mer eller mindre fullständigt. Vid högt grundvattenstånd kan t ex en eller flera delzoner saknas, vilket framgår av figur 3.



Figur 2. Principskiss för den vattenomättade zonen i en urban miljö.

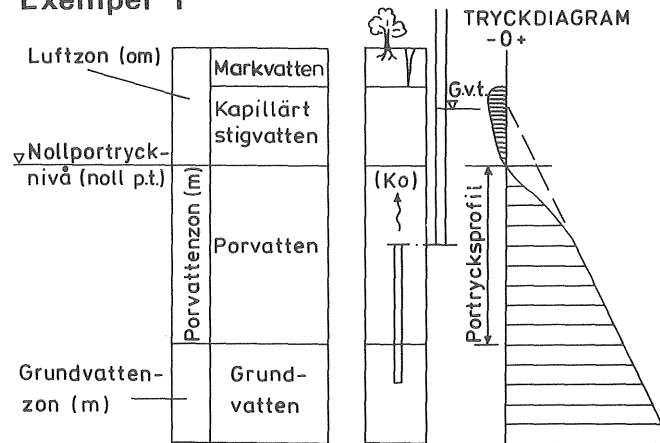
Projektets rubrik kan med hänsyn till indelningen ovan synas något förbryllande eftersom inte bara markvattenzonen utan hela den omättade zonen studerats. Något egentligt definieras således allt vatten mellan grundvattenzonen och markytan i en övergripande term, markvatten.



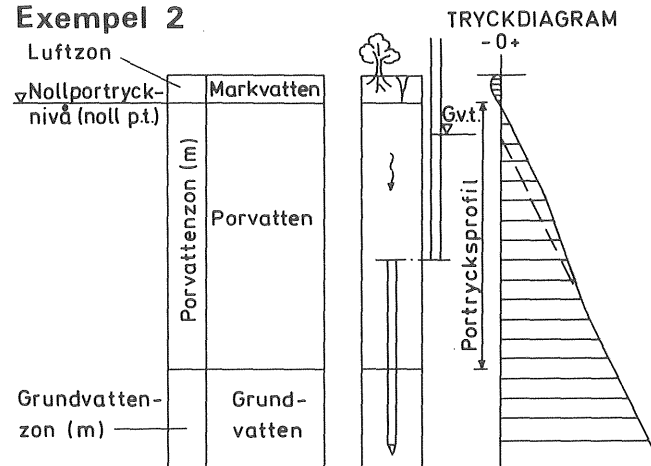
Figur 3. Principskiss för den omättade zonens indelning med lokala variationer.

Ovan nämnda indelning hänför sig till de förhållanden som råder vid öppna akvifärer. Om emellertid ett finkornigt jordartsmaterial (lera-silt) överlagrar ett grövre material (friktionsjord) förekommer grundvattenzonen under slutet trycktillstånd (slutet magasin). Om vattenmättnad råder i de överlagrande kohesionära jordarterna kallas det i porerna inneslutna vattnet för porvatten. På grund av uttorkning och uppsprickning i de övre finkornigare jordlagren under regnfattigare perioder utbildas överst i dessa lager ofta ett sprickvattenmagasin. Det slutna trycktillståndet kan förekomma i flera varianter med hänsyn till olika grundvattentryck och porvattentrycksfördelningar. I figur 4 visas tre olika exempel på slutna trycktillstånd. Zonindelningen ovanför grundvattenzonen framgår även. Denna geologiska miljö är mycket vanlig i våra storstadsregioner, Göteborg och Stockholm.

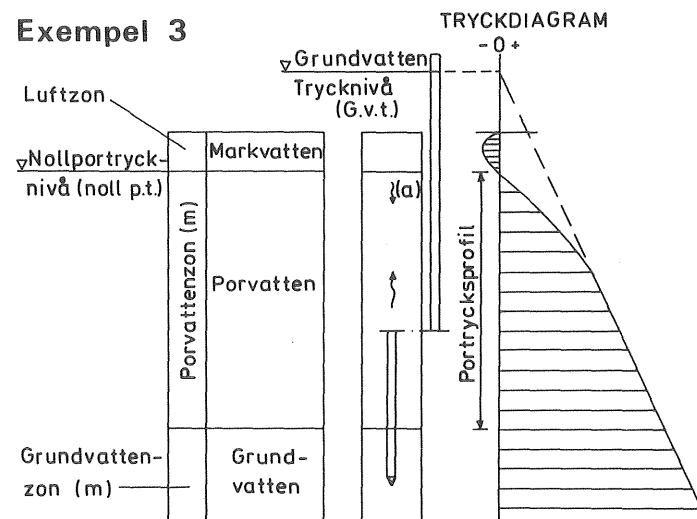
### Exempel 1



### Exempel 2



### Exempel 3

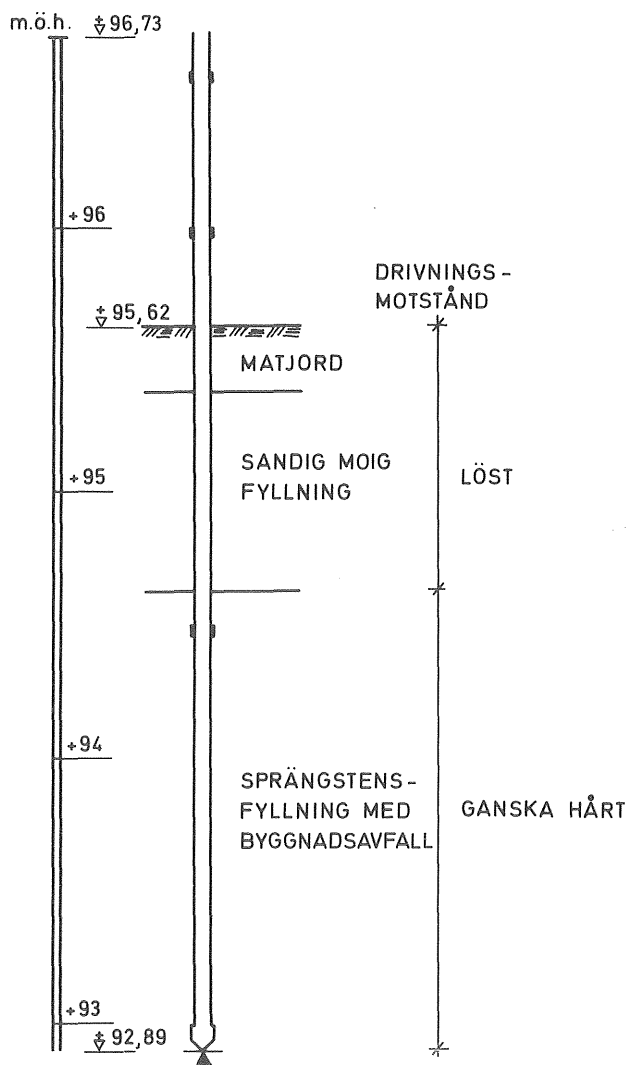


Figur 4. Tre exempel på slutna trycktillstånd i grundvattenmagasinet. Efter Berntson, 1978.

En nyexploatering och byggnation innebär ibland en intensiv omflyttning av fyllnadsmassor. Således förekommer i den omättade zonen ofta ler- och sprängstensfyllningar. Till och med byggnadsavfall påträffas mellan markytan och grundvattenzonen. Se figurerna 5 och 6.

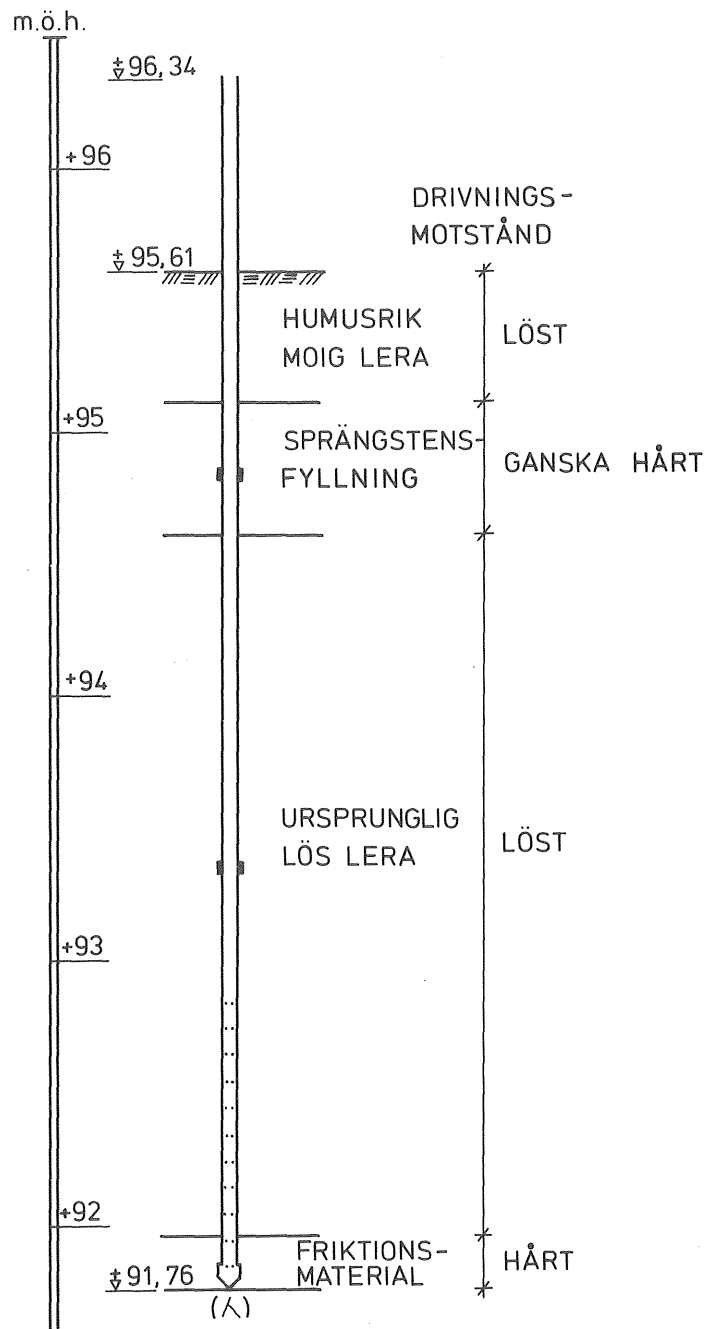
Med markvattenförhållanden i bebyggda områden menas alltså, i detta projekt, den vattenhaltsituation som finns ovanför grundvattenzonen. Således innefattas förutom den gängse zonindelningen även porvattenzon, sprickvattenmagasin och artificiellt uppbyggda markmiljöer.

### OBSERVATIONSRÖR M2



Figur 5. Markprofil vid mätrör M2, Bergsjön. Efter Holmstrand, Wedel, 1976.

## OBSERVATIONSRÖR M7



Figur 6. Markprofil vid mätrör M7, Bergsjön. Efter Holmstrand, Wedel, 1976.



#### 4. INTERNATIONELL KUNSKAPSNIVÅ, TEORI, MÄTMETODER

En direkt litteraturstudie över markvattenförhållanden i bebyggda områden liksom miljömässiga aspekter på dagvattenhantering har visat sig vara svår att göra på grund av litteraturbrist. Däremot finns en ansevärd mängd forskningsresultat och undersökningar publicerade inom den agriskulturella tillämpningen av ämnet. Den omättade zonen uppdelas då på gängse vis i ett antal delzoner, dvs markvattenzonen, intermediärzonen och kapillärvattenzonen. Denna indelning kan som tidigare belysts emellertid ej alltid anses vara relevant vid de förhållanden som kan råda i våra bebyggda områden.

I detta kapitel redogörs mycket kortfattat för teorin som behandlar vattnets rörelse under omättade förhållanden. Likaså ges en kort sammanfattning av de mätmetoder som vanligtvis används. För en mer detaljerad beskrivning hänvisas till Ericsson och Holmstrand (1978). Därefter följer ett sammandrag av vissa biologiska och kemiska processer med anknytning till markens omättade zon och dagvattenhantering. Detta ämnesområde presenteras som tidigare nämnts utförligare i "Miljömässiga aspekter på dagvattenhantering, Litteraturgenomgång" (Westin, 1977). (Se även Ericsson, 1978, d.)

I den internationella litteraturen förekommer en mängd referenser som behandlar biologiska och kemiska förlopp i marken. Emellertid avhandlar flertalet uppsatser förhållandena i naturlig mark eller också är de avsedda för att tillämpas inom jordbrukssektorn. Det förekommer knappast någon referens som inriktats på markprocesserna i de störda markmiljöer som råder i bebyggda områden. Dessutom har de vetenskapliga försöken ofta varit renodlade. Man har med andra ord renodlat problemen så att endast en eller några variablers inverkan på markprocesserna studerats. Marken är dock ett så komplext system att det utifrån de kemiska, biologiska och fysikaliska förutsättningarna kan vara svårt att förutsäga största effekten av den urbana miljöns störning.



#### 4.1 Vattnets rörelse under vattenomättade förhållanden

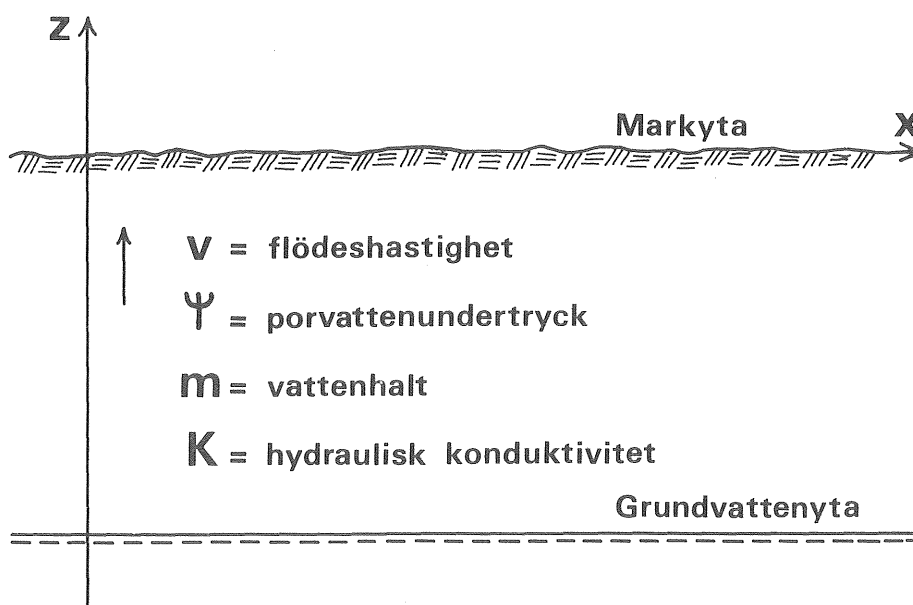
De fysikaliska, rent teoretiska förutsättningarna för vattnets magasinering och rörelse i omättade porösa medier är väl kända. För att praktiskt kvantifiera dessa fysikaliska processer i fält återstår emellertid fortfarande ett flertal svårigheter att övervinna. Ytterligare problem blir det om en ytgeneralisering av t ex infiltrationskapacitet eller markvattenmagasinering skall göras.

Vattnets rörelse i den omättade zonen beskrivs vanligtvis på följande sätt. Antag att vi utgår från en endimensionell vertikal infiltration vid regn till en mäktig homogen jord som initieellt är torrare än sin fältkapacitet. Regndropparna anses vara så små och talrika att regnet förutsätts vara ett kontinuerligt vattenmedium som når markytan. Luften i jorden anses vidare vara i en kontinuerlig fas vid atmosfärtryck. Om markstorheterna uppfyller villkoren så att Darcy's lag gäller, erhålls (se figur 7):

$$v = -K(\Psi) \cdot \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right] \quad (1)$$

En endimensionell form på kontinuitetsekvationen ger:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial z} \quad (2)$$

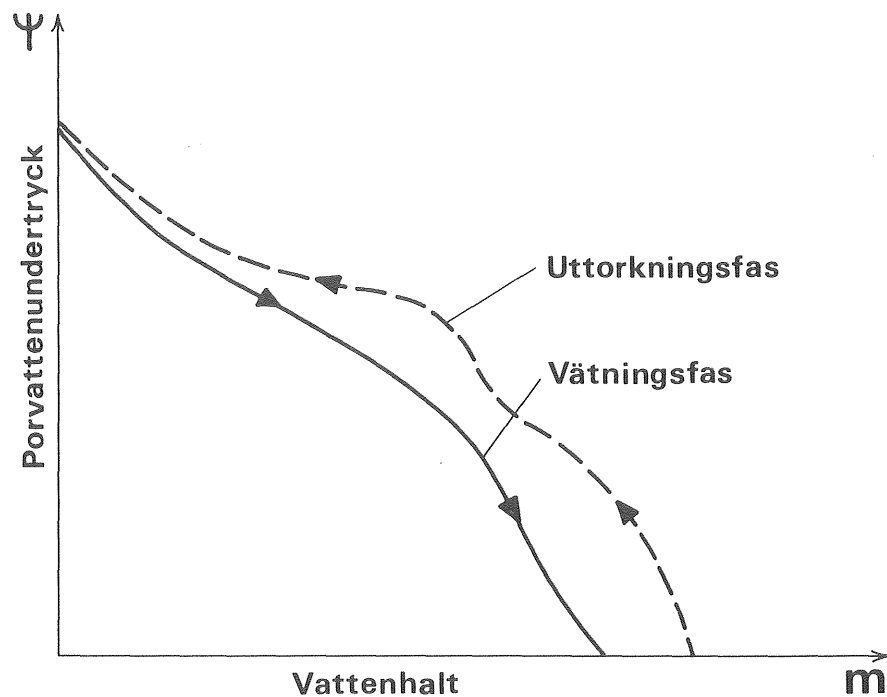


Figur 7. Markstorheterna i den vattenomättade zonen.

Både den hydrauliska konduktiviteten och vattenhalten är funktioner av porvattenundertrycket. Om vattenrörelsen enbart förutsätts väta eller torka jorden är dessa funktioner unika och entydiga, men om flödesprocessen innefattar både vätning och torkning är sambanden mellan  $K$ ,  $m$  och  $\Psi$  ej entydiga. Detta fenomen kallas för hystereseffekten i den omättade zonen. (Se figur 8.)

Om ekvationerna (1) och (2) kombineras fås:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \partial \left\{ K(\Psi) \cdot \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right] \right\} / \partial z \quad (3)$$



Figur 8. Porvattenundertrycket som funktion av vattenhalten. Vidare framgår hystereseffekten. Principskiss.

#### 4.2 Markfysikaliska och hydrologiska modeller

Ekvation (3) har för närvarande ingen analytisk lösning eftersom den innehåller två beroende variabler, markvattenhalten och porvattenundertrycket. En av dessa variabler måste alltså elimineras genom någon form av variabeltransformation. Därefter kan en numerisk lösningsmetod användas. I den internationella litteraturen presenteras

ett flertal numeriska lösningar av s k markfysikaliska modeller som beskriver perkolations- eller infiltrationsförloppet. De flesta modeller är datoranpassade. (Se Ericsson och Holmstrand, 1978 eller Ericsson, 1978a.)

Det markfysikaliska angreppssättet anses ge en realistisk bild av vattnets rörelse. Två huvudsakliga problem tillstöter emellertid när en sådan modell skall upprättas. För det första krävs en stor mängd mätvärden, vilka fordrar en omfattande bearbetning och för det andra är inte perkolationen och infiltrationen en ren vertikal flödesprocess. Ett beroende finns t ex av marklutningen och av förhållandet mellan den vertikala och horisontella konduktiviteten. Därför har, speciellt när det gäller infiltrationsprocessen, ett flertal s k hydrologiska modeller framtagits (se Ericsson och Holmstrand, 1978 eller Ericsson, 1978a). De begreppsriktiga hydrologiska infiltrationsmodellerna bygger på kontinuerligt avtagande funktioner till dess att ett slutvärde erhålles. (Se kap 8.1.)

Det mest direkta förfarandet att i fält uppskatta komponenterna i en hydrologisk balansekvation kan göras med hjälp av en lysimeter. Lysimetern är en behållare med jordmaterial som placeras i naturlig miljö så att det råder minsta möjliga skillnad mellan jordmaterialet inom och utanför behållaren. Med lysimetern bestäms perkolerande vattenmängder vilka ställs i relation till nederbörden.

Ett annat sätt, att mer direkt studera infiltrations- och perkolationsprocessen, är med spårämnesteknik.

#### 4.3 Mätmetoder för vattenhalt och hydraulisk konduktivitet

Det är två faktorer som är centrala när den hydrauliska situationen i den omättade zonen skall beskrivas. Dessa faktorer är vattenhalten respektive den hydrauliska konduktiviteten.

Vattenhalten har hittills framför allt bestämts via den s k gravimetriska metoden. Vattenhalten bestäms genom att "in situ-proverna" vägs och torkas ( $100^{\circ}\text{C}$ ). Vattenförlusten uttrycks därefter i procent av torrsvikt eller av provets ursprungliga volym. Metoden används numera mest för att kalibrera andra mer indirekta metoder. En sådan är t ex den spektrofotometriska metoden där en monokrometrisk ljustråle sänds genom ett metan - jordextrakt. Ett samband råder sedan mellan strålningsabsorbktion och vattenhalten i jordprovet.

När vattenhalten skall bestämmas i hela den vattenomättade zonen är den radiometriska metoden vanligast. Denna metod bestämmer, via kalibrering, både densiteten (gammastrålning) och vattenhalten (neutronstrålning) för omgivande jordmaterial. Utan kalibrering erhålls en relativ förändring i vattenhalten med tiden och djupet i en och samma punkt.

Vattenhalten kan även mätas indirekt via porvattenundertrycket med tensiometer. Metoden kräver att omgivande jordarts pF-kurva bestäms.

En elektrisk in-situ metod som används är mätning med gipsblock. Gipsblocket har två ingjutna elektroder som ansluts till en ohmmeter. Den elektriska resistensen i gipsblocket varierar med dess vattenhalt som i sin tur är relaterad till omgivande jordarts vattenhalt.

På senare år har fjärranalys alltmer utnyttjats för att mäta vattenhalten närmast markytan. Ett flertal sådana metoder existerar eller är under utveckling.

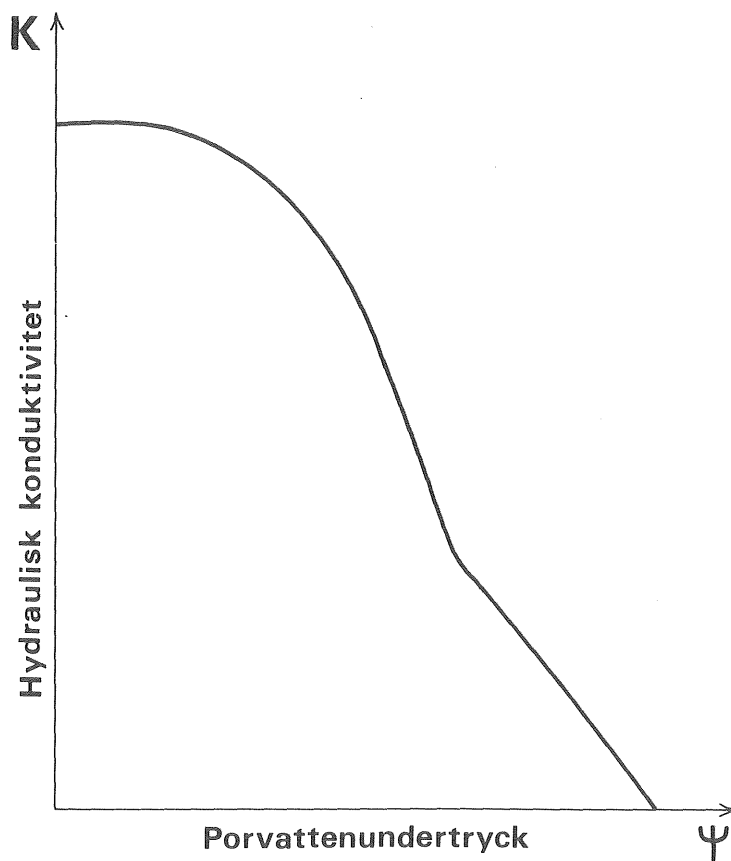
Genom att mäta solljusreflektionen får man t ex ett mått på vattenhalten ned till ca 5 cm:s djup. Det har nämligen visats att amplituden för markytetemperaturen är omvänd proportionell mot vatteninnehållet.

Radarmetoder har även tillämpats på markvattenmätning.

Dessa metoder påverkas emellertid av ojämnheter i markytan (några få millimeter) och av fria jon-innehållet.

Dielektricitetskonstanten för vatten är omkring 16 ggr större än för en torr jordart. Det är därför rimligt att anta att dielektricitetskonstanten är en verklig indikation på vattenhalten. En metod är under utveckling för att utnyttja detta samband. Metoden mäter ned till en meters djup och påverkas ej av oregelbundenheter på markytan. Dessutom lämpar sig metoden för fjärranalys.

Den hydrauliska konduktivitetens beroende av vattenhalten (porvattenundertrycket) måste vara känd för att korrekt lösa ett flödesproblem i den omättade zonen. (Se figur 9.)



Figur 9. Den hydrauliska konduktiviteten som funktion av porvattenundertrycket. Principskiss.

I fält kan konduktiviteten bestämmas med tensiometer genom ett förfarande som liknar s k enhålsförsök vid grundvattenundersökningar. Genom en kontrollerad störning av vattenhalten utanför tensiometerens porösa känselkropp mäts återhämtningsförloppet mot tiden.

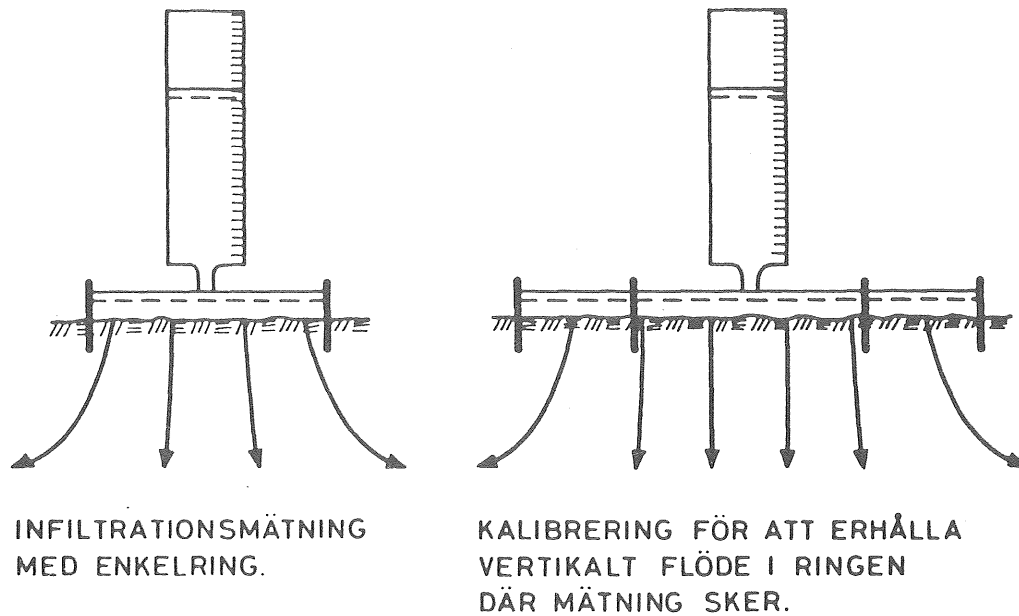
Ett antal empiriska samband har framtagits som beskriver hydrauliska konduktivitets beroende av jordarternas bindningstryck eller negativa portryck. Dessa bestämmningar härrör ofta från artificiellt packade jordarter och vattenhalten har varierats mellan ett undertryck av 0 till 2 m hängande vattenpelare.

Vid höga bindningstryck bestäms kapillära konduktiviteten av ett "filmflöde" på ytan av jordpartiklarna medan vatten-transport genom kapillärer dominerar för låga bindningstryck. Vidare är vid höga bindningstryck och för konstant vattenhalt den hydrauliska konduktiviteten proportionell mot jordartens densitet. Den hydrauliska konduktiviteten beror således på partiklarnas yta per enhetsvolym.

#### 4.4 Infiltrationsmätningar

Det vanligaste sättet att bestämma infiltrationskapacitet i fält görs med hjälp av enkelrings- eller dubbelringsinfiltrimeter. I litteraturen förekommer ett flertal typer och därmed olika rekommendationer för hur stora infiltrationsmeterringar skall vara. Vissa forskare hävdar t ex att vid dubbelringsförsök bör den inre ringen ha en diameter av 1 m och den yttre 1,2 m. (Se figur 10.)

Förutom ringinfiltrimetrar används sprinklerinfiltrimetrar för att simulera nederbörd och därmed bestämma infiltrationskapaciteten. Tillförd vattenmängd minus avrinningen ger den maximala infiltrationen vid en viss tidpunkt.



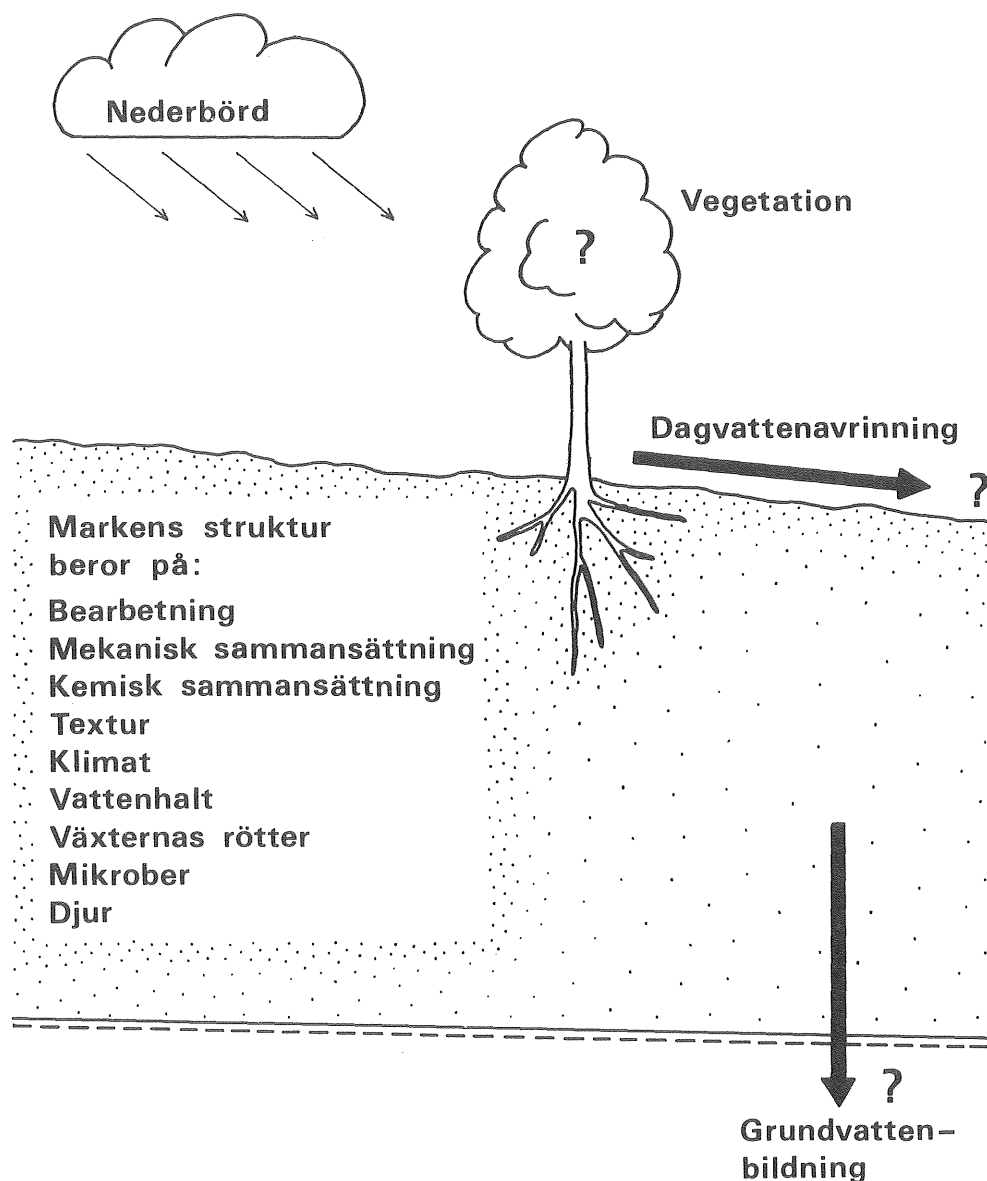
Figur 10. Figuren visar principen för en kalibrering av ett infiltrationsförsök. Efter Ericsson, 1978a.

#### 4.5 Markstrukturens inverkan på vegetationen och infiltrationskapaciteten

När markens ytstruktur förändras påverkas såväl vegetation, dagvattenavrinning som grundvattenbildning. Markstrukturens uppbyggnad är beroende av en mängd orsaker. I figur 11 visas ett antal faktorer som påverkar strukturen och samspelar på ett komplext vis.

I samband med byggnation störs den ursprungliga strukturen. Stora jordmassor komprimeras av tunga maskiner när gräsmattor, parker, idrottsplatser osv skall anläggas. Jordpackningen innebär att luftporositeten minskas utan att totala vatteninnehållet förändras. Växternas rötter söker sig genom jorden efter minsta motståndets väg. Om emellertid de naturliga hålrummen är för små för rötterna, måste dessa förbruka extra energi för att göra hålrummen större. Detta innebär att vissa jordpartiklar undanträngs och en ytterligare kompaktering erhålls.

Jordmånen bör ha en sådan sammansättning att markytan tål en störning utan att alltför negativa verkningar fås på vegetationen. Vid praktiskt taget all byggnation tas t ex det ursprungliga ytliga mullagret bort eller täcks över. Denna mull måste återföras igen för att man skall kunna göra planteringar. Växternas vattenhushållning är starkt beroende av humushalten i markens ytlager och humusskiktet magasinerar även, tack vare sina kolloidala egenskaper, närsalter som kommer växterna tillgodo.



Figur 11. Vid förändring av markens ytstruktur påverkas såväl vegetation, dagvattenavrinning som grundvattenbildning.



En jordmånsfyllning i ett nyexploaterat område bör vara så vattenhållande, att växternas vattentillgång främjas samtidigt som det är önskvärt att ytans infiltrationskapacitet överskrider de flesta regnintensiteter. Det innebär att ler-silthalten bör ligga omkring 15%. För att göra jordmånen porös krävs även ett visst sandinnehåll som underlättar perkolationen. Man bör emellertid vara medveten om att sandens huvudsakliga beståndsdelar, kvartskornen, är kemiskt inaktiva och därmed i det närmaste ouplösliga även i surt vatten. Därför bidrar sanden ej till växternas näringsförsörjning och av denna orsak blir gräsrötter som växer i sand mycket korta.

Om dagvattnet som skall tillföras marken innehåller mycket organiskt material ackumuleras detta lätt vid markytan eller strax under, om man t ex har en perkolationsanläggning. Innehållet av organiskt material medför att man även har en hög halt av mikroorganismer. Nedbrytningshastigheten påverkas då på följande sätt. I och med att partikelmängden ökar får man en ökning av den adsorberande ytan. Detta ger en intensifiering av adsorptionsprocesserna men samtidigt reduceras genomsläpplighetsförmågan dels av de mikrobiella cellerna, dels av de produkter som dessa organismer utsöndrar.

Mäter man hydrauliska konduktiviteten under lång tid hos en jordart där markytan kontinuerligt ligger under vatten erhålls ett kurvförlopp enligt figur 12.

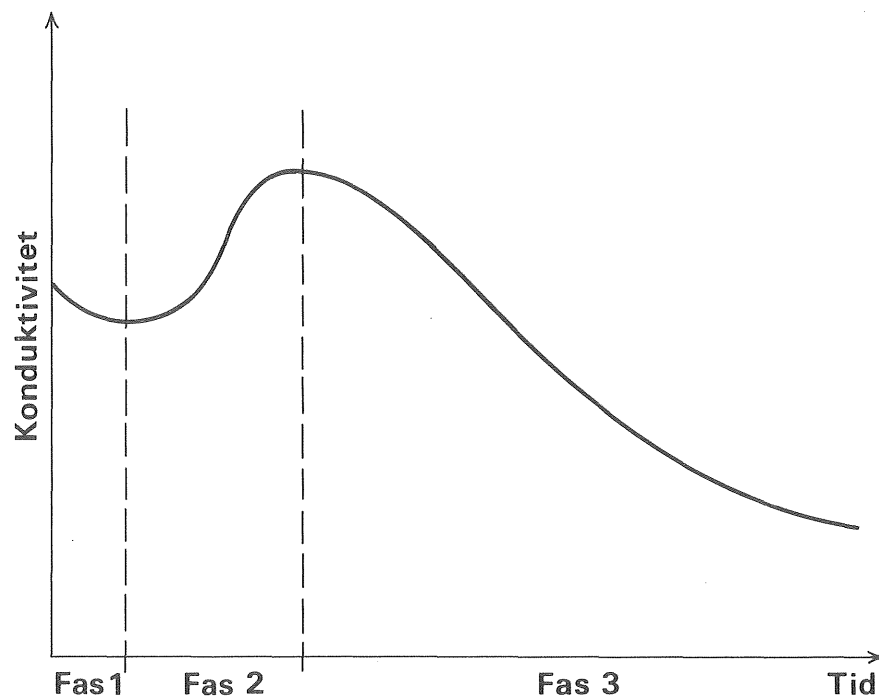
Nedgången i konduktivitet under fas 1 beror på att den initiellt torra jorden sväller vid vätning. Vissa salter tvättas även ur jorden.

I fas 2 sker en ökning av konduktiviteten på grund av att en del luftfyllda porer som minskat genomströmningsarean försvinner.

Efter en längre tids väta reducerar mikroorganismerna vattnets rörelse i jorden. Under fas 3 erhålls därför en långsam fysikalisk sönderdelning av aggregaten och vidare er-

hålls en biologisk igensättning av mikrobcellerna och deras producerade slem. Slemmet består huvudsakligen av polysackarider. Vid torra har emellertid polysackarider av varierande slag en starkt aggregerande effekt på jordmaterialet med påföljande konduktivitetsökning.

Eftersom dagvattnet som skall infiltrera innehåller höga halter av salter fås en minskad infiltrationskapacitet om jordarten har ett stort lerinnehåll. Detta beror på att alkalimetallsalterna har en viss förmåga att verka dispergerande på markkolloiderna med en reducerad infiltrationskapacitet till följd. På hårt trafikerade och exploaterade områden kan speciellt under vinterhalvåret detta vara fallet.



Figur 12. Konduktivitetsförändringar i mark under en längre tids vattenmättnad. Principskiss. Efter Allison, 1974.

#### 4.6 Dagvattnet och markens kemiska resp biologiska processer

Som ovan något antytts är det lokala omhändertagandet av dagvattnet ej enbart ett "kvittblivningsproblem". I vissa avseenden är dagvattnet starkt förorenat. Till exempel innehåller det generellt sett mer suspenderat material än vad renat spillvatten tillför en recipient. Vidare är tungmetallhalten ofta hög. Föroreningarna kommer från ett antal olika källor varav de mest betydelsefulla är nederbörd, stoftnedfall och korrosion. Dessutom är trafiken en viktig föroreningskälla.

Marken är ett komplext system som uppbyggs genom en samverkan mellan en mängd olika faktorer. Vid miljöpåverkande processer kan markmiljön uppvisa både reversibla och irreversibla mekanismer. Ibland sker således en bestående förändring medan i vissa andra fall förändringen enbart är tillfällig. De biokemiska reaktioner som äger rum i marken är betingade av vissa parametrar. I det nedanstående uppräknas några sådana av betydelse vid infiltration av förorenat vatten om t ex en viss reningseffekt skall bedömas:

- o pH. Adsorptions- och jonbytesprocesserna är pH-beroende. Vid mycket låga pH-värden kan anjonbyte ske.
- o Föroreningsformen och dess koncentration.
- o Komplementerande jonkoncentrationer. Vid de tillfällen då jonbytesprocesserna är den verkande reningsmekanismen kan andra joner som finns lösta, påverka och störa reaktionerna.
- o Temperaturen påverkar vanligtvis jonbytesaktiviteten i liten omfattning medan effekter fås på mikrobiologisk aktivitet.
- o Katjonbyteskapaciteten. Viktiga joner är i detta sammanhang  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$  och  $\text{H}^+$ . Dagvatten med stora mängder  $\text{Na}^+$  och  $\text{Ca}^{2+}$  kan verka omvandlande på lerans oorganiska material. Vidare ger industriella svavelutsläpp upphov till sur nederbörd. De till jorden adsorberade katjonerna ersätts successivt med vätejoner och på sikt fås en upplösning av markmineralerna.

Man kan vid föroreningsproblematiken dela in föroreningarna i dels sådana som inte är önskvärda av ekologiska skäl och dels sådana som påverkar grundvattnets kvalitet.

En infiltration på markytan kan vara fördelaktig ur renings-synpunkt med hänsyn till dagvattnets höga halt av tungmetaller. Dessa kommer i hög grad att ackumuleras i det översta markskiktet och därmed förhindras de från att nå grundvattnet eller vattendragen. På grund av tungmetaller-nas stora förmåga att fastläggas och ackumuleras i humus och förna måste man dock överväga vilka områden som skall bli utsatta för denna infiltration och vilken effekt som tungmetallanrikningen får på ekologin i området. De mikrobiologiska nedbrytningsprocesserna hämmas vid en förhöjd tungmetallhalt och därmed påverkas på sikt djur och växtliv. Därför bör infiltrationen ej förläggas till områden med produktivt syfte.

Ammoniumkväve har större förmåga att fastläggas i marken genom adsorption än nitratkväve, vilket är lättrörligt. Även fosfor är ett relativt lättrörligt ämne som kan följa med det perkolerande vattnet till grundvattnet. I dagvattnet är dock halterna av fosfor och kväve så ringa att en infiltration med hänsyn till dessa är praktiskt taget riskfri.

Om markytan blir rik på näringsämnen t ex genom ackumulat-ion av organisk substans, så förbättras möjligheterna för att en varierad mikroflora skall utvecklas. Därmed ökar chanserna för en nedbrytning av organiska föroreningar. Ett högadsorptivt samt mikrobiellt lager är nödvändigt för att erhålla en effektiv behandling och ett acceptabelt perkolerande vatten.

Huvuddelen av markorganismerna utgörs av bakterier. Det är dessa som angriper förnan tillsammans med aktinomyceter och andra svampar. Mikroorganismerna är dessutom markdjuren huvudsakliga föda. Utöver energi behöver markorganismerna, liksom de autotrofa växterna, vissa oorganiska

näringsämnen som t ex föreningar av kväve, fosfor, kalium och kalcium.

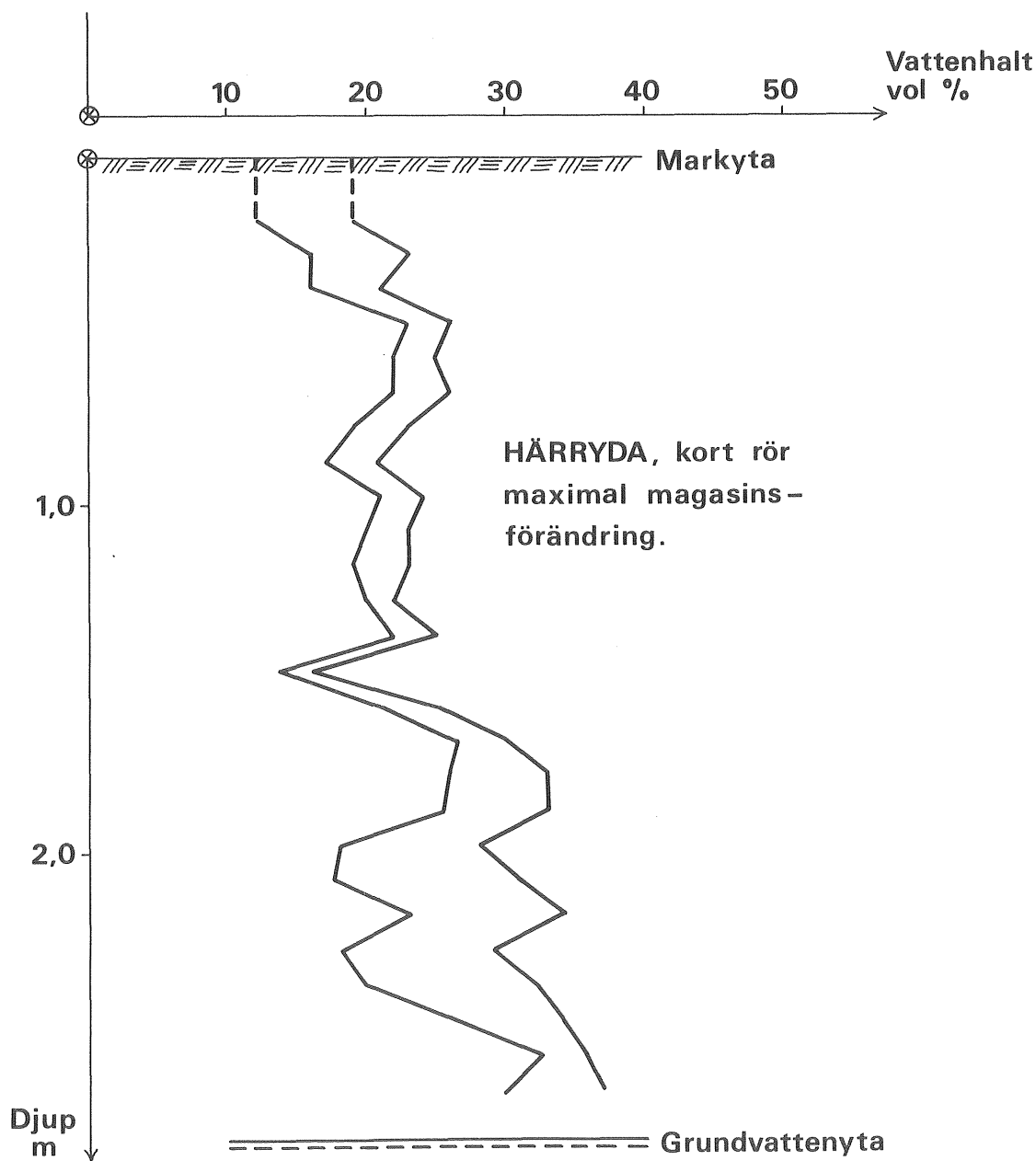
Markorganismerna är mer eller mindre anpassade till den rådande vattenhalten i marken. För mikroorganismerna är den lämpligaste vattenhalten ca 50-80% av fältkapaciteten. Alla svampar är nämligen aeroba organismer. De är beroende av molekylärt syre för sin andning. Endast vissa bakterier såsom t ex denitrifikationsbakterierna och svavelbakterierna kan utnyttja andra syrekällor. Förändringar i markvat-  
tenhushållningen kan därför ge ödesdigra konsekvenser för markfaunan.

Det nederbördsvatten som faller inom ett område fördelas i stort på ytavrinning, grundvattenbildning och avdunstning. Förhållandena i den omättade zonen påverkar därvid tidsförloppen och fördelningen av vattenmängderna. Erfarenhetsmässigt vet man att den omättade zonens magasin i jungfruliga områden huvudsakligen fluktuerar från markyta ned till 1 m:s djup i finkorniga jordarter och till större djup i grövre jordarter. Markvattenmagasinets förändring över ett hydrologiskt år är i stort lika med noll. Hydrologiskt sett är den viktigaste funktionen i markvattenmagasinet att det har en starkt utjämnande effekt på den totala avrinningen. Urbaniseringen påverkar de utjämnande egenskaperna på olika vis. För att erhålla ett begrepp om de storleksordningar på markvattenmagasin som kan komma ifråga kan nämnas att upp till en halv årsnederbörd uppmätts i detta magasin. Fluktuationen över året kan uppgå till 25% av årsnederbörden. Nedan följer två exempel på hur markvattenmagasinet uppför sig i olika jordarter under opåverkade förhållanden. För ytterligare information hänvisas till de studier som bedrivits av IHP (Internationella hydrologiska programmet).

### 5.1 Markvattenmätningar i Härryda (friktionsmaterial)

Under perioden 780417-780609 intensivmättes markvattenhalten med neutronsond i två obs-rör vilka placerats i en mellansandig grovmo (Härryda). Markvattnets magasinförändring i ett av rören åskådliggörs i figur 13. Jordprofilen uppvisar en förändring i hela mäktigheten. Detta beror bl a på att vissa maxvärden representerar vattenhalter över fältkapacitet. Under mars månad 1978 föll totalt 109,5 mm nederbörd och därför registrerades perkolerande vatten vid mätningarna i mitten av april månad. Den maximalt uppmätta fluktuationen i verkligheten under mätperioden motsvarar en nederbördsmängd av 176 mm. Under tiden 1978-04-17 t o m 1978-06-09 föll totalt 30 mm vilket visar att jordmäktigheten under denna period minst har kapacitet att magasinera ytterligare 146 mm. Denna jordarts

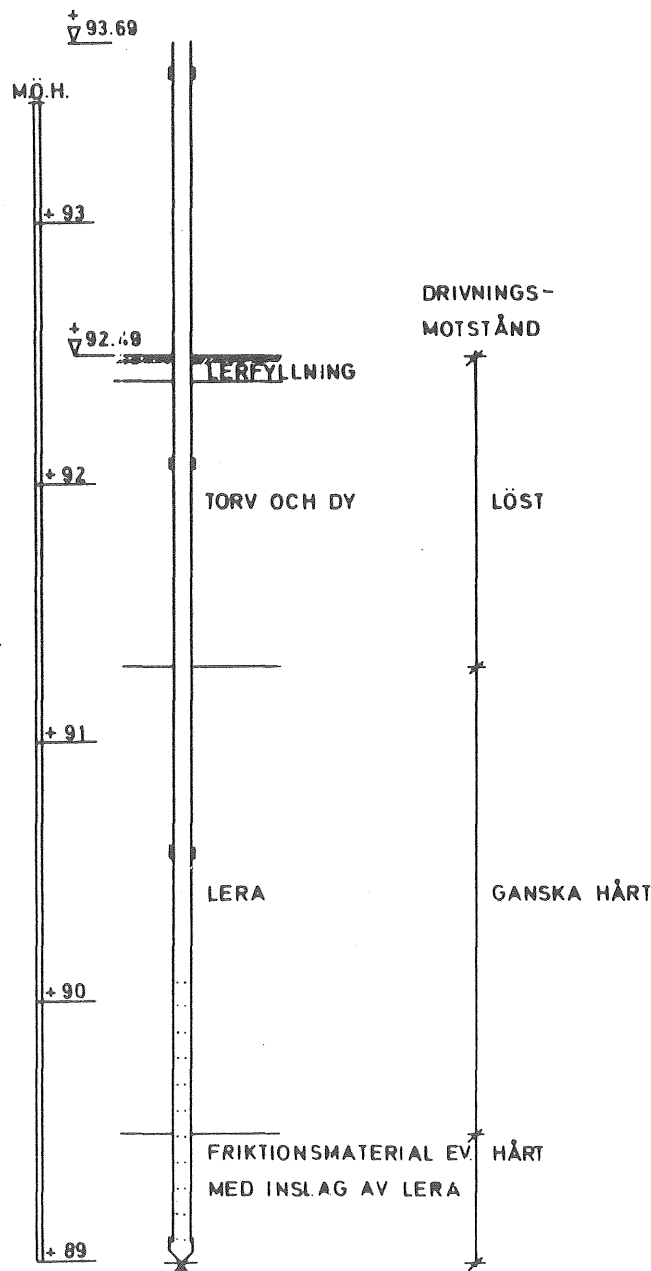
förmåga att ta omhand mer vatten begränsas således av med vilken intensitet vattnet tillförs kontra den hydrauliska konduktiviteten. Om man antar att det ytterligare tillgängliga magasinet (naturligt uppmätt under aktuell period) skulle fyllas på kontinuerligt mellan 780417-780609 med en gradient 1 skulle minst erfordras en hydraulisk konduktivitet av ca  $3 \cdot 10^{-8}$  m/s. Jordartens konduktivitet torde emellertid vara ca  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s varför stor överkapacitet i att ta omhand nederbörd således föreligger i detta fall.



Figur 13. Markvattenmagasinets maximala magasinförändring under tiden 780417-780609 i en mellansandig grovmo, Härryda.

## 5.2 Bergsjöområdet, Göteborg. Mät punkt i jungfrulig miljö

I stadsdelen Bergsjön, Göteborg, har markvattenmätningar genomförts under perioden 1974-03--1978-04 (se Holmstrand, Wedel, 1976). Exploateringsområdet utgörs geologiskt sett av huvudsakligen berg i dagen eller berg med tunna jordtäckan. Centralt inom stadsdelen fanns ursprungligen en större sänka som utgjorde ett kärrområde. I en opåverkad del av detta kärr ägde mätningar rum 1974-03--1975-04. De geologiska förhållandena vid mät punkten framgår av figur 14.



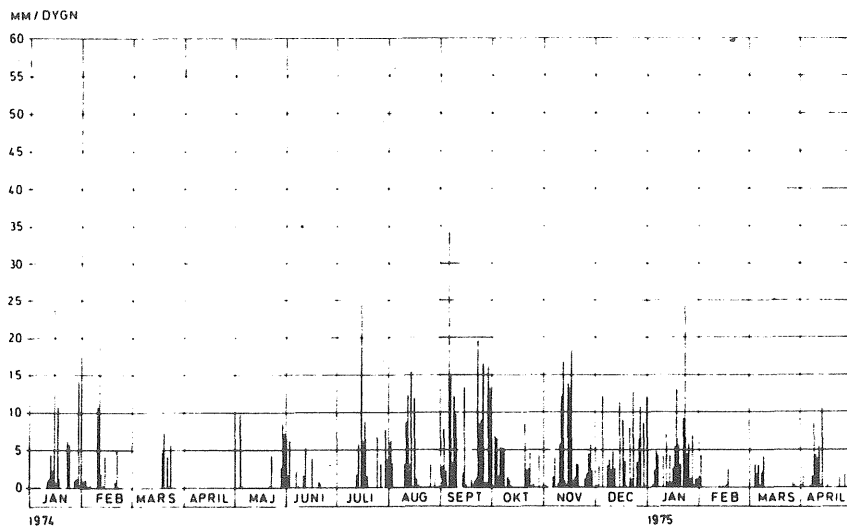
Figur 14. Markprofil vid mätrör M1, Bergsjön. Efter Holmstrand, Wedel, 1976.



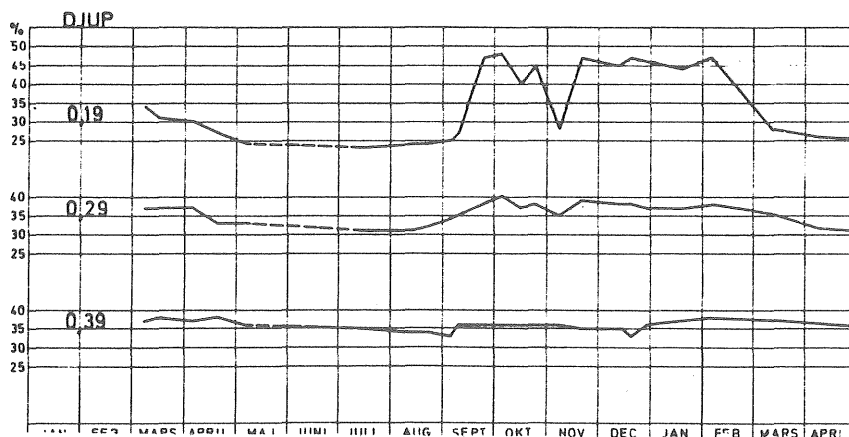
Grundvattnet i friktionsmaterialet befinner sig under slutet trycktillstånd. Markvattenmagasinets fluktuation sker därför enbart ned till 0,40 m:s djup från markytan. (Se figur 15.)

## BERGSJÖN RÖR M1

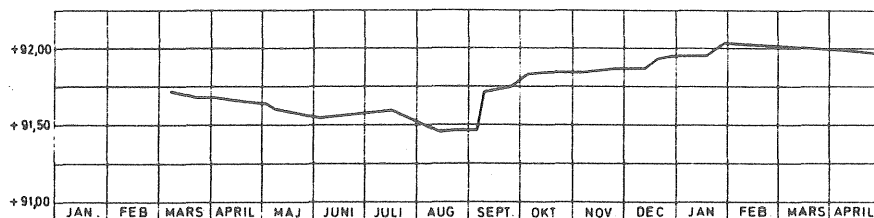
### DYGNSNEDERBÖRD



### MARKVATTENHALT VID OLIKA MARKDJUP (MARKYTA 92.49)



### GRUNDVATTENNIVÅ



Figur 15. Markvattenhaltens variationer på olika nivåer i mätrör M1, Bergsjön. Efter Holmstrand, Wedel, 1976.

Figur 15 visar att under perioder med riklig nederbörd erhålls ett tröskelvärde på markvattenhalten. Magasinet förmår ej ta omhand mer nederbörd. Evapotranspirationen och perkolationen styr därefter hur snabbt ett tillgängligt magasin erhålls. I förhållande till den ungefärliga stationära situationen som råder sommartid är det totala tillgängliga magasinet ca 70 mm nederbörd (Holmstrand, Wedel, 1976). Detta värde är naturligtvis ungefärligt och beroende av de aktuella nederbördsförhållandena men visar markvattenmagasinets funktion.



## 6. URBANISERINGENS INVERKAN PÅ MARKVATTENFÖRHÅLLANDEN OCH INFILTRATIONSKAPACITET

Urbaniseringen medför vanligtvis förändringar på den ursprungliga vattenomättade zonen. Masshanteringen ger helt nya markförhållanden med bl a hydrauliska egenskaper som skiljer sig mot de ursprungliga. Det är vidare känt att en hårdgörning genom t ex asfaltering, stora takytor ger totalt sett snabbare avrinningsförlopp från avrinningsområdena.

Inom projektet har konstaterats att urbanisering i form av djupa grundläggningsschakter, tunnlar, kulvertgravar verkar dränerande på både grund- och markvattenförhållandena. Återfyllningar utgörs ofta av material med större hålrumsvolymer än den ursprungliga jordarten. Detta resulterar i minskad utjämning av nederbörden i marken. Den minskade mark- och grundvattenbildningen får konsekvenser för vegetation, geoteknik samt för vattenbalansen i stort.

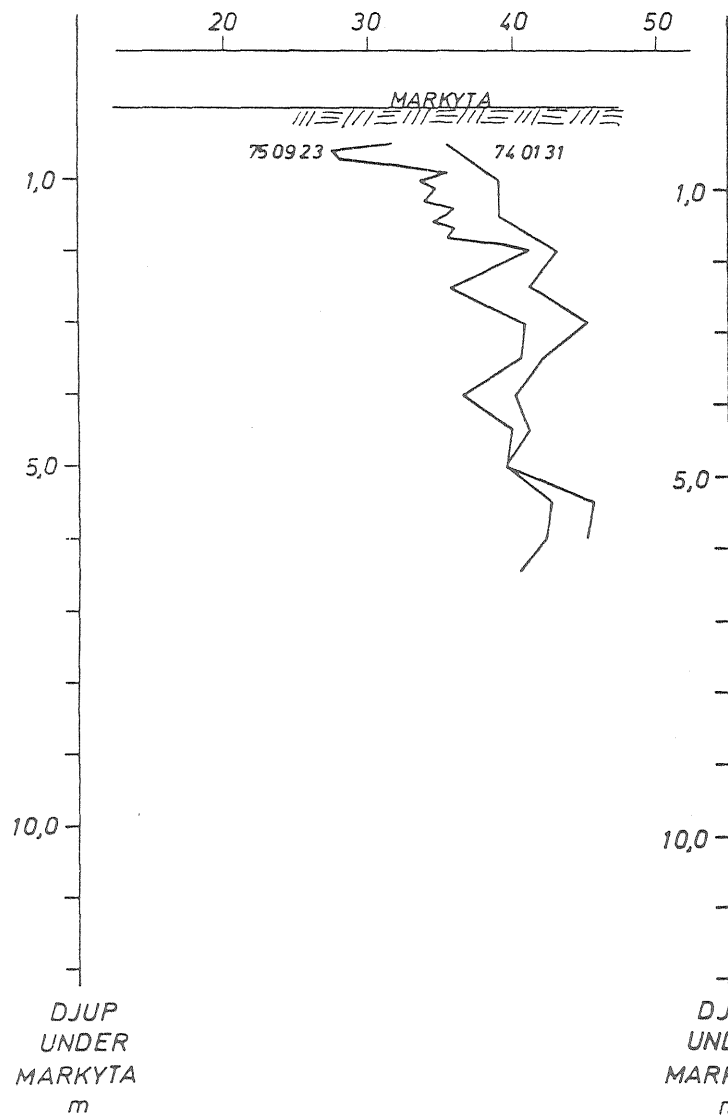
I kapitlet redovisas några exempel där effekter på markvattenmagasinet konstaterats. Avslutningsvis redovisas några erfarenheter som gäller urbaniseringens påverkan på infiltrationskapaciteten.

### 6.1 Markvattenmätningar i Angered

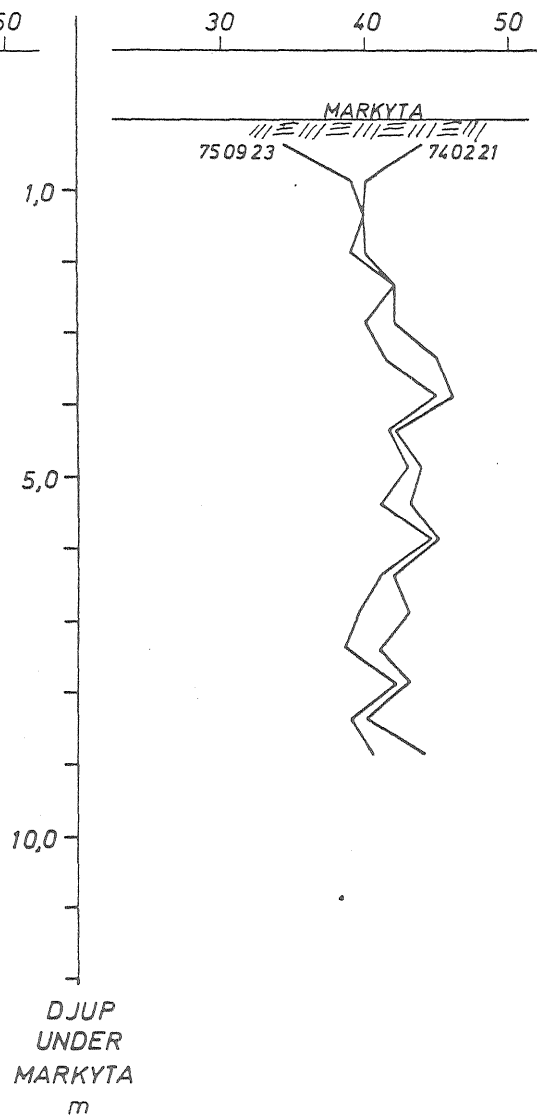
I Angeredsområdet, Göteborg, genomfördes under åren 1974-1978 omfattande geohydrologiska undersökningar avseende grundvattenbalans och grundvattenbildning (Wedel, 1978). Bland annat mättes markvattenmagasinets förändringar. Geologiskt utgörs området främst av lera, ca 10 m mäktig, som underlagras av friktionsmaterial på berg. Grundvattnets trycknivå är kraftigt avsaknt genom tre stycken tunnlar. Denna typ av urbanisering har haft följande inverkan på markvattenhalten.

Magasinsförändringen sker över hela lermäktigheten (se figur 16) och inte endast i den översta metern, vilket

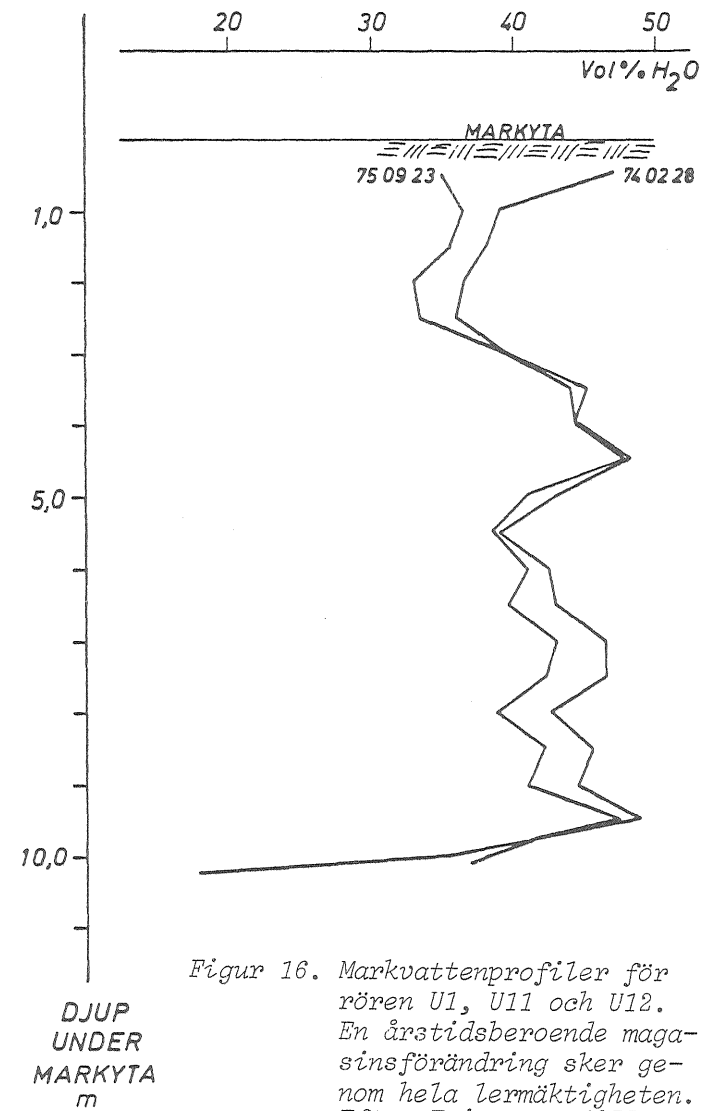
U1



U11



U12



Figur 16. Markvattenprofiler för rören U1, U11 och U12. En årstidsberoende magasinförändring sker genom hela lermäktigheten. Efter Ericsson, 1977.

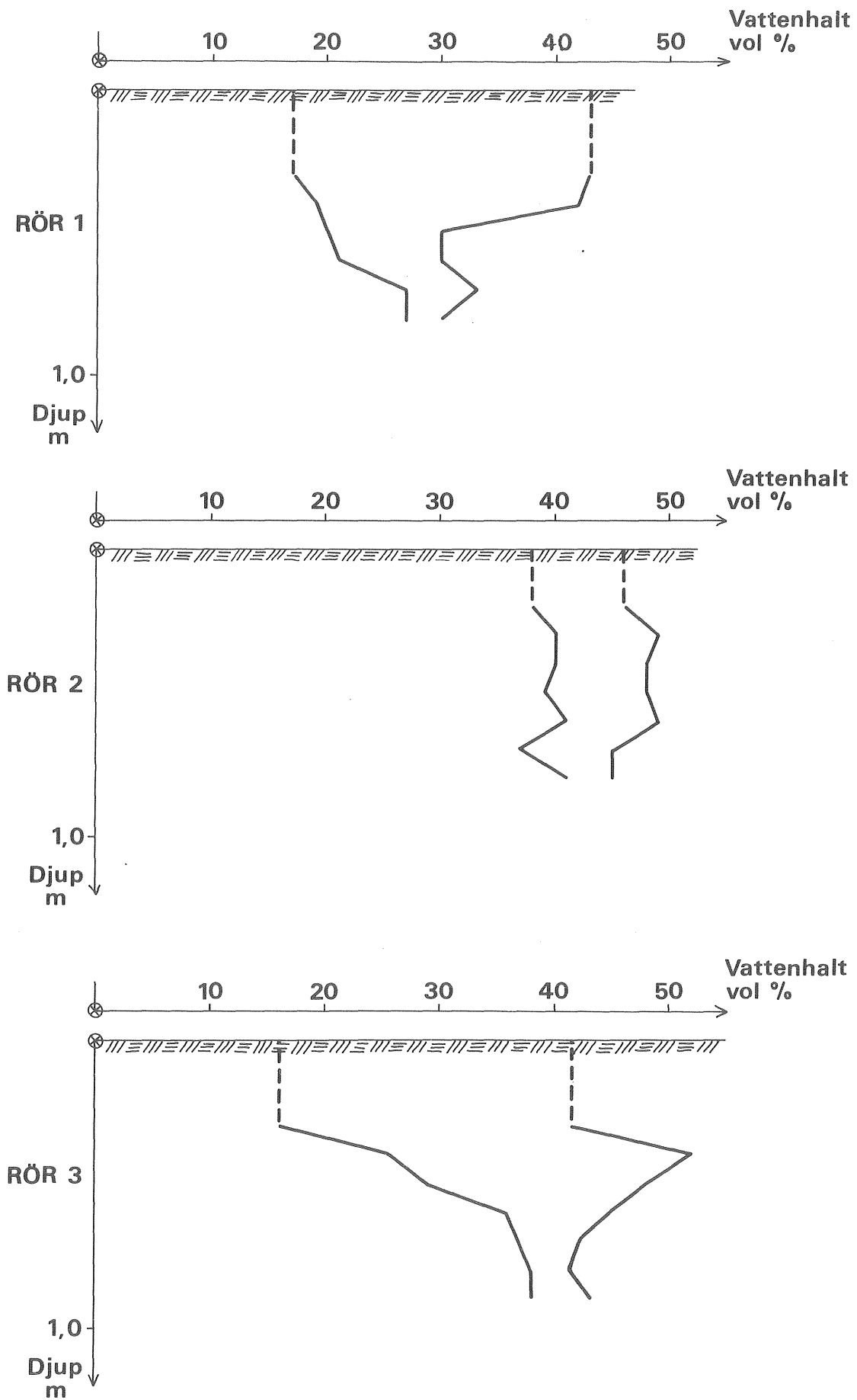
borde vara fallet i denna jordart. Detta innebär att man erhållit icke-vattenmättnad i hela lerprofilen. Portrycks-sondering har bl a givit negativa portryck. De uppmätta magasinförändringarna i den omättade zonen tyder på att en perkolation är möjlig genom lerlagren i detta område. (Ericsson, 1977.)

## 6.2 Markvattenmätningar i Bratthammar

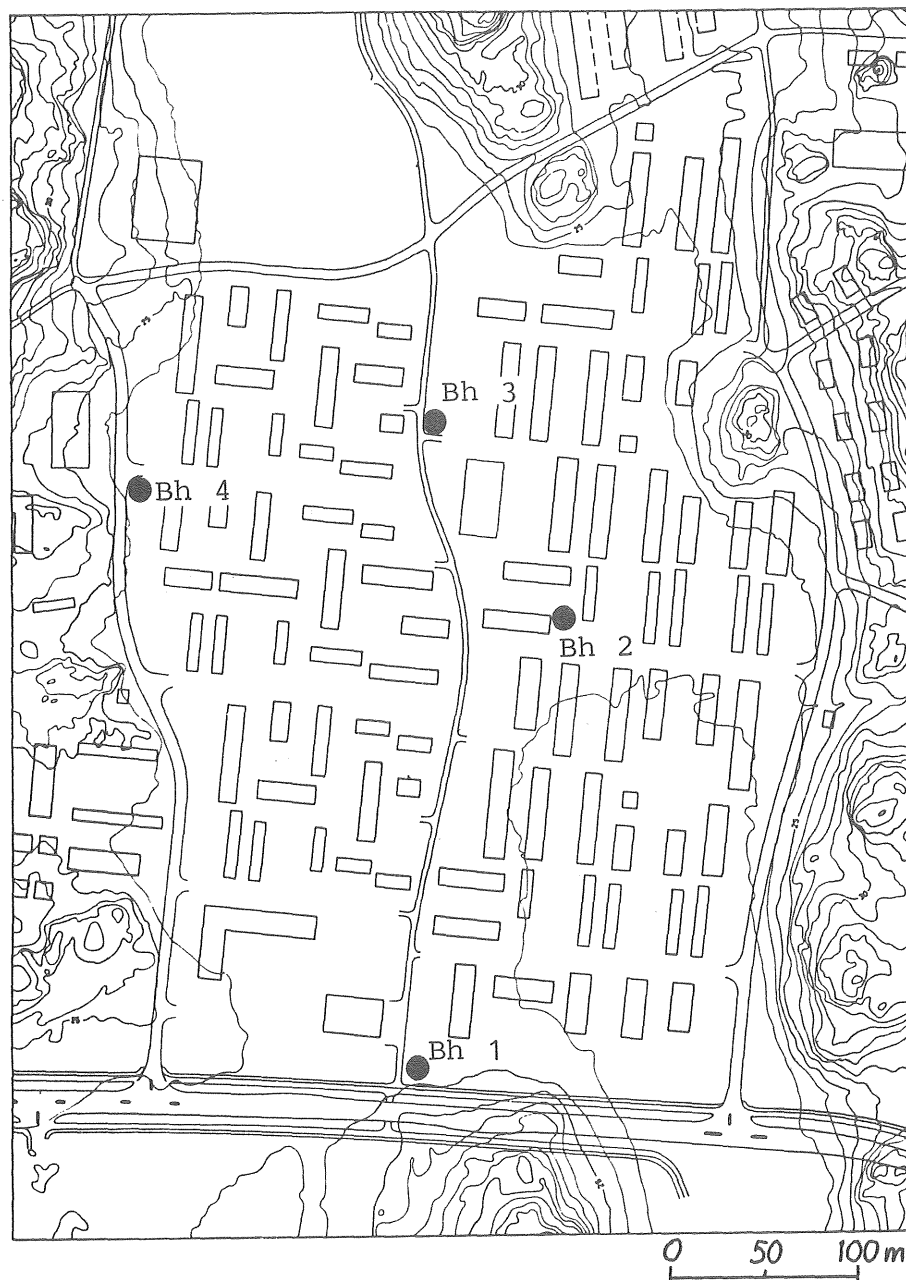
Under tiden 1977-06-15 t o m 1978-09-13 genomfördes neutronsondsmätningar i området Bratthammar, Göteborg. Området har intensivstuderats med avseende på lokalt omhändertagande av dagvatten i sprickvattenmagasin förlagda till lerans torrskorpa (se vidare Holmstrand et al, 1980).

Tre observationsrör utplacerades i områden (se figur 18) där de förblev opåverkade av exploateringens masshantering under mätperioden. Mätningarna visar att markvattenmagasinet varierar ned till ca 1 m:s djup, dvs i torrskorpan. Fluktuationerna i de tre rören mättes ned till 0,80 m:s djup och de maximala magasinvariationerna under mätperioden var minst ca 140 mm, 64 mm resp 154 mm (se figur 17). Rör 2 uppvisar en genomsnittligt hög vattenhalt och en liten magasinvariation. Förklaringen står att finna i det hydrauliska samband som finns med en näraliggande kulvertgrav.

Under tiden 1977-09-01 till 1978-09-01 föll totalt 690 mm nederbörd i Bratthammar. Detta innebär att den naturliga magasinvariationen vid observationsrören 1 och 3 uppgått till minst 20 respektive 22 procent av den totala årsnederbörden inom området. Med andra ord magasineras och omsätts en ansenlig nederbördsmängd över året i torrskorpelera med 1 m mäktighet. Detta tillgängliga magasin har således en starkt utjämnande funktion i det naturliga kretsloppet. Markvattenmagasinet vid rör 2 har emellertid ej denna utjämnande funktion utan bidrar till en snabbare avrinning från området genom kulvertgraven.



Figur 17. De maximalt uppmätta magasinförändringarna för undersökningsrören i Bratthammar.



Figur 18. Observationsrörens placering i Bratthammar i vilka markvattenmätningar genomfördes.

### 6.3 Markvattenmätningar i Bergsjön

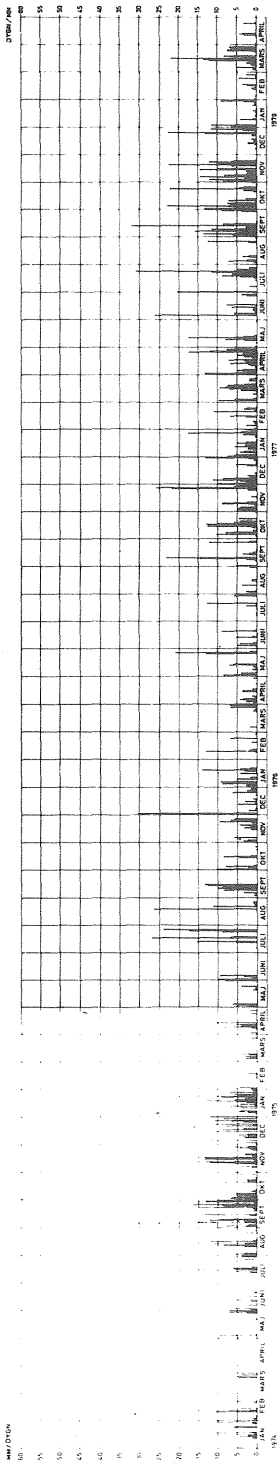
I kapitel 5.2 beskrevs översiktligt de geohydrologiska förhållandena i detta exploateringsområde. Mätningarna i de av urbaniseringen påverkade delområdena har givit följande resultat vad gäller markvattenmagasinet.

Ett flertal djupa schakter har sänkt grundvattnets trycknivå i friktionsmaterialet som underlagrar finsedimenten. Schakterna har återfyllts med sprängsten och byggnads-

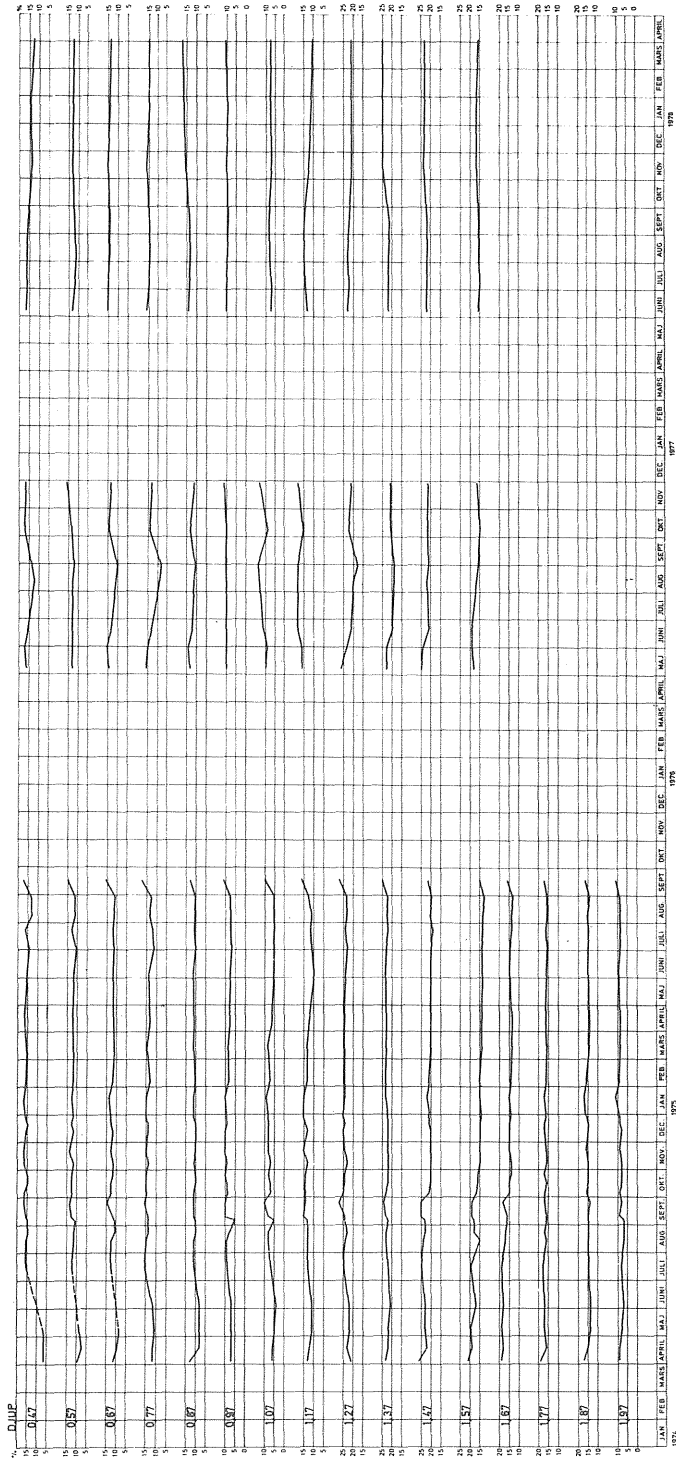


BERGSJÖN RÖR M4

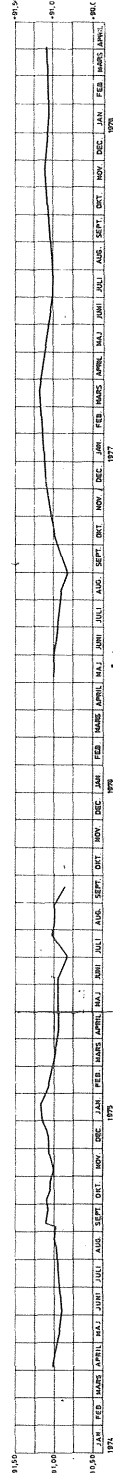
DYGNSNEDERBÖRD



MARKVATTENHALT VID OLIKA MARKDJUP (MÄRKTÄ 93,23)



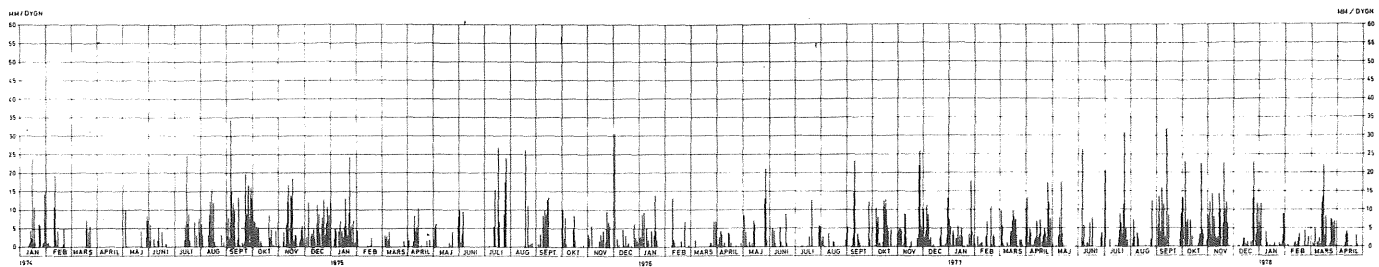
GRUNDVATTENNIVÅ



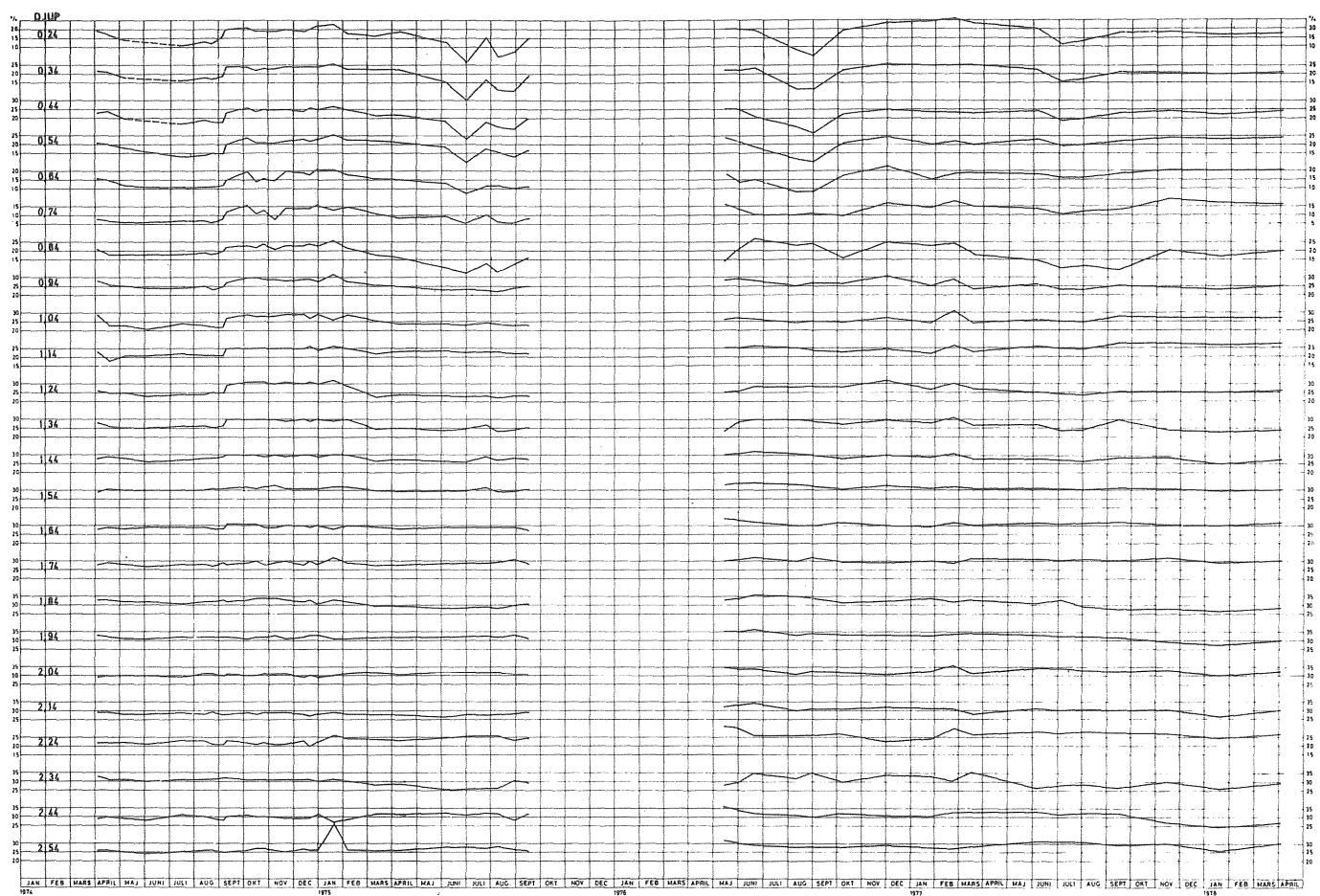
Figur 19. Markvattenhaltens variation på olika nivåer i mätrör M4, Bergsjön.

BERGSJÖN RÖR M7

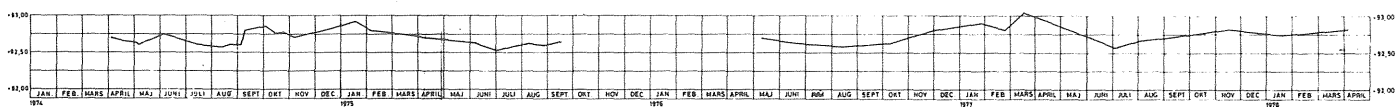
DYGNSNEDERBÖRD



MARKVATTENHALT VID OLIKA MARKDJUP (MARKNYTA: 95,511)



GRUNDVATTENNIVÅ



Figur 20. Markvattenhaltens variation på olika nivåer i mätrör M7, Bergsjön.

avfall och således har större magasinvolymmer bildats i marken. Se t ex figurerna 19 och 20 och jämför förhållandena i dessa observationsrör med observationsröret som beskrevs i kapitel 5.2. Fluktuationen vid markytan minskar på grund av dessa dränerande förhållanden med material med högre konduktivitet. Den utjämnande funktion som den omättade och mättade zonen har på den totala avrinningen minskar med dessa ingrepp. Dessutom tillkommer effekten av den större andelen hårdgjorda ytor som ger en snabbare avrinning.

#### 6.4 Påverkan av infiltrationskapacitet

Någon systematisk undersökning om hur olika effekter av urbanisering påverkar infiltrationskapaciteten har ej kunnat genomföras i projektet. Utifrån de speciella infiltrationsstudier som bedrivits i Rydområdet, Linköping, kan emellertid vissa slutsatser dras (se kapitel 8.7).

Onormal förslitning och packning på gräsbevuxna ytor verkar reducerande på infiltrationskapaciteten. När gräset "slås ut" ger rotkanalerna ej längre samma uppluckring av jordmånsprofilen. Likaså minskar bildningen av torrsprickor på grund av den mindre vattenomsättningen genom gräset.

Naturligtvis styr matjordens sammansättning infiltrationsförloppen då grönytor anläggs i exploateringsområden. Ofta präglas emellertid infiltrationsegenskaperna av den ursprungliga geologin. Se kapitel 8.7. Om en gräsyta anläggs på ett tunt matjordsskikt som överlagrar en ursprunglig morän reduceras dock kapaciteten avsevärt. En väl utbildad podsolprofil i morän har en mycket stor infiltrationskapacitet. Under den nederbördsfattiga perioden erhöles slutvärden för infiltrationen i den opåverkade skogsmarken på ca 150-200 mm/tim. Detta skall jämföras med gräsytan vilken har samma underlagrande jordart. Slutvärdet var här ca 20 mm/tim.

För ytterligare information om infiltrationsegenskaperna hos olika jordarter hänvisas till kapitel 8.

## 7. ETT YTGENERALISERANDE INSTRUMENT FÖRE VATTENHALTSBESTÄMNING - TERMOVISION

Avsikten med denna publikation har ej varit att noggrant beskriva det geohydrologiska planarbetet för att utreda förutsättningarna för lokalt omhändertagande av dagvatten. Det är emellertid svårt att helt avstå från att kommentera detta planeringsarbete eftersom det är förknippat med svårigheterna att ytgeneralisera geohydrologiska parametrar i den omättade zonen.

På senare år har det uttryckts önskemål om en alternativ planeringsmodell där de geohydrologiska faktorerna belyses. En sådan planeringsmodell syftar till en noga genomtänkt planering med ett så fördelaktigt kommunalt och samhälls-ekonomiskt områdesutnyttjande som möjligt.

Både vid infiltration på grönytor och vid utnyttjande av sprickvatten- och perkolationsmagasin krävs en geohydrologisk planering (se kapitel 8 och 9). Fukttigheten vid markytan måste bedömas liksom säsongsmässiga variationer i markvattenhalt. Det finns i dag ett flertal metoder som punktvis kan ge svar på dessa frågor. Ett bra och enkelt, praktiskt ytgeneraliserande instrument saknas emellertid.

Forskningen har, som tidigare nämnts, inriktats mot olika typer av fjärranalysmetoder. Det har visat sig att områden med hög markvattenhalt har stor termisk tröghet och anpassar sig långsammare till temperaturförändringar jämfört med torra områden. Detta kan utnyttjas för bestämning av vattenhaltsvariationer i markytan.

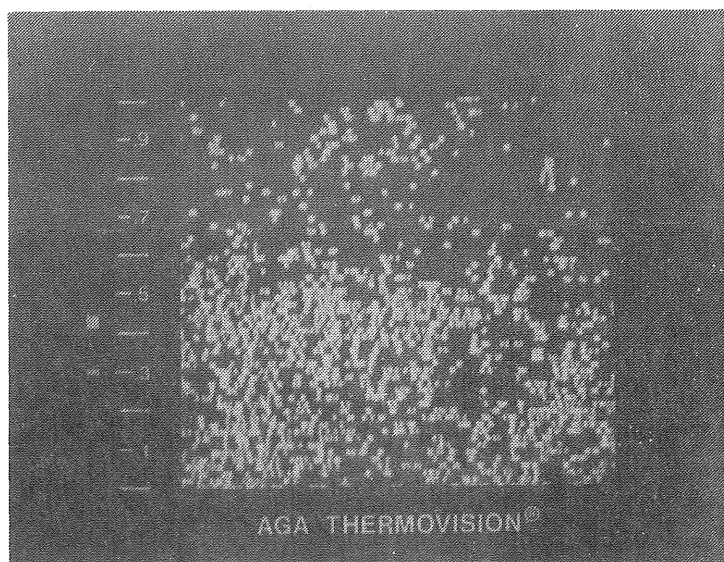
De flesta fjärranalysregistreringar har utförts från hög höjd med satellit eller flygplansbaserade sensorer. Inom markvattenprojektet har vi undersökt möjligheterna, med likartat angreppssätt, att försöka registrera lokala variationer i markvattenhalt från låg höjd, ca 100 m och lägre.

Ett fältförsök genomfördes i Slottskogen, Göteborg. Med hjälp av en termovisionskamera med spektral-området

2,0-5,6  $\mu\text{m}$  utfördes registreringar från 9 m:s höjd. Den studerade ytan var 2,5 x 2,5 m. Inom försöksytan fanns en artificiellt bevattnad delyta. Samtidigt gjordes mark- och lufttemperaturmätningar, avdunstningsbestämningar samt vissa markfysikaliska bedömningar.

Utvärderingen av försöket visar att termovisionskameran kan vara ett lämpligt ytgeneraliserande instrument i framtiden. Figur 21 visar hur den artificiellt bevattnade ytan kan urskiljas på en termovisionsbild. Emellertid återstår flera praktiska problem att lösa med mätmetoden. Det är nödvändigt att laboratoriemätningar genomförs med renodlade förutsättningar, dvs konstant vattenhalt, viss vegetation, fasta infallsvinklar osv, innan den komplexa verkligheten kan tolkas.

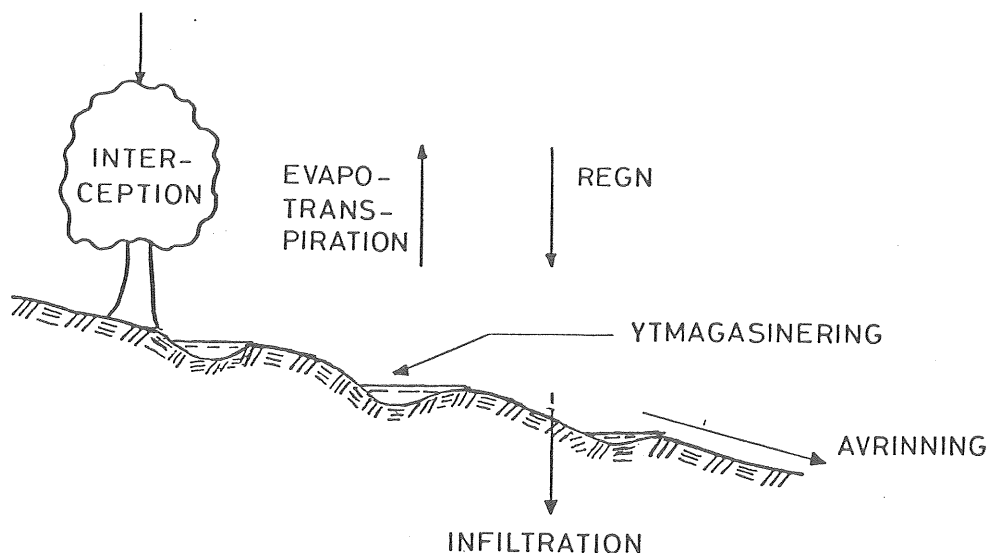
Termovisionsförsöket beskrivs noggrant i "Registrering av vattenhalten i markytan med hjälp av termovisionskamera" (Ericsson och Hård, 1978b).



Figur 21. Figuren visar en bevattnad delyta, glesare punkttäthet = varmare yta, i bildens övre högra hörn. Efter Ericsson och Hård, 1978b.

## 8. INFILTRATION GENOM GRÖNYTOR I BEBYGGDA OMRÅDEN

Vid dagvattenhanteringen är man huvudsakligen intresserad av att bestämma ett avrinningsområdes regnöverskott eller direkta avrinning. Nederbörden indelas i ett antal hydrologiska delprocesser, vilka framgår av figur 22. När det gäller det lokala omhändertagandet av dagvatten från t ex tak och gator liksom vid tillämpning av dagvattenmodeller är således infiltrationen en betydelsefull hydrologisk delprocess.



Figur 22. I figuren redovisas de hydrologiska delprocesser som äger rum vid markytan. Efter Ericsson, 1978a.

Sammanfattningsvis kan följande sägas om infiltrationsprocessen på urbana grönytor:

Infiltrationskapaciteten på genomsläppliga "mjuka" ytor i bebyggda områden kan bestämmas med enkelringsinfiltrimeter. Bestämningen förutsätter emellertid att en kalibrering av mätvärdena görs på grund av sidospridning av den infiltrerade vattenmängden. Kalibreringen har belagts genom laboratorie- och fältförsök.

Utifrån de intensitetskurvor för infiltrationen som uppmätts i ett antal punkter kan en ytgeneralisering av in-

filtrationen göras. Utplaceringen av infiltrometrarna sker med hänsyn till markfyllningens eller jordartens sammansättning och mäktighet, vegetation, packningsgrad och marklutning. Ytorna som väljs kan sägas vara geologiskt representativa områden.

En betydande säsongsmässig variation av infiltrationskapaciteten kan uppstå i kohesionära jordarter till följd av svällning.

Med infiltrometermätningar kan ingångsvärden till Hortons ekvation (hydrologisk modell) bestämmas. Ett speciellt regressionsprogram har därför framtagits som anpassar ekvationen till korrigerade mätvärden.

Under antagande att packningsförfarandet inom ett och samma exploaterade bostadsområde har utförts på likartat sätt har följande samband konstaterats:

$$I_{\text{slut}} = C \cdot d_{25}^2 \cdot 10^{a \cdot H} \quad (4)$$

där  $a$  och  $C$  är konstanter;  $d_{25}$  är den kornfraktion som in- delar jordarten i 25% finare och 75% grövre material.  $H$  är humushalten i viktsprocent.  $I$  är infiltrationskapacitetens slutvärde.

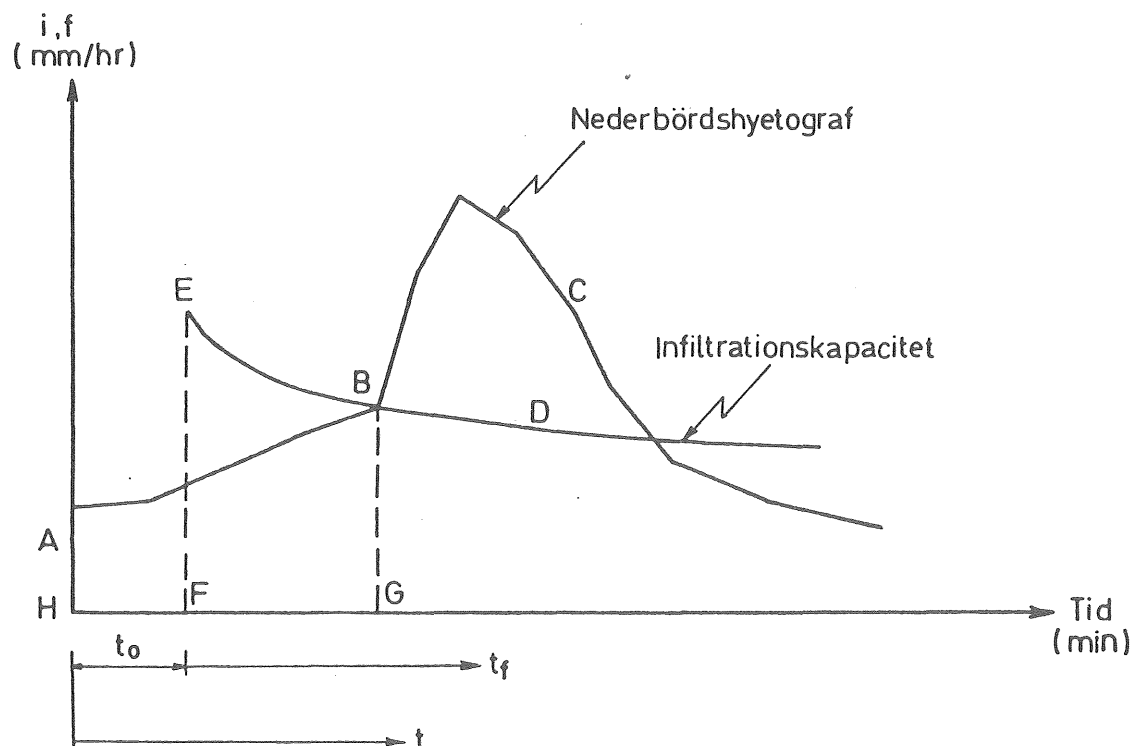
De resultat som presenteras i nedanstående delkapitel är huvudsakligen hämtade från "Infiltrationsprocessen i en dagvattenmodell. Teori, undersökningsmetod, mätningar och utvärdering" (Ericsson, 1978a) samt från "Infiltrationskapaciteten som funktion av markens humushalt och kornstorlek" (Ericsson, 1978c). Teorierna har tillämpats vid en större infiltrationsundersökning som redovisats i "Infiltrationsundersökningar i stadsdelen Ryd, Linköping" (Ericsson och Hård, 1978a).

### 8.1 Hortons ekvation och Arnell, Lyngfelts dagvattenmodell

I kapitel 4.2 redogjordes för markfysikaliska respektive hydrologiska infiltrationsmodeller. Horton (se Ericsson, 1978a) har presenterat en hydrologisk modell som lyder:

$$f = f_c + (f_o - f_c) e^{-kt} \quad (5)$$

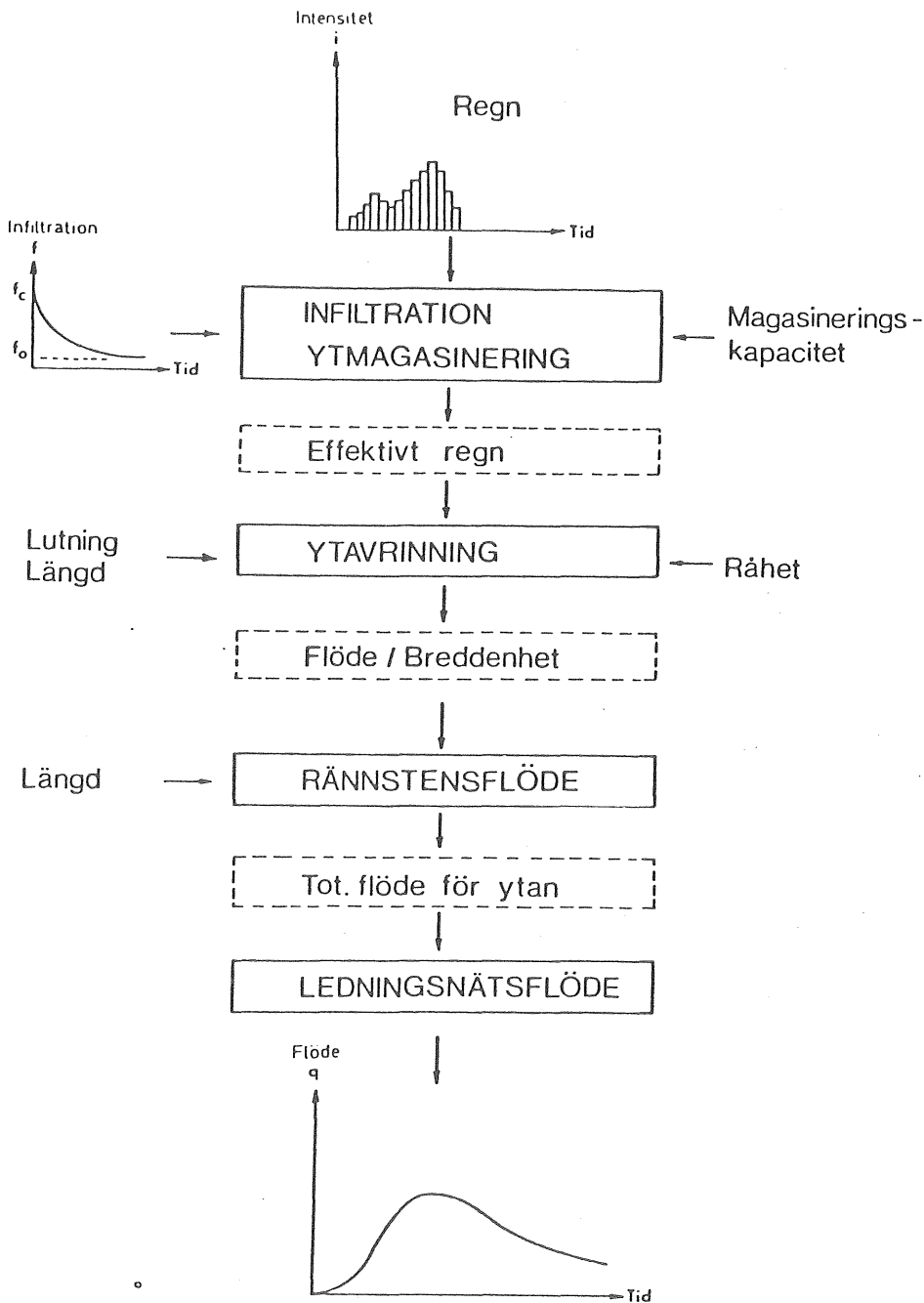
där  $f$  är infiltrationshastigheten vid tiden  $t$ ,  $f_o$  och  $f_c$  är begynnelse- samt slutvärdet och  $k$  är infiltrationskonstanten som beror av jordart och vegetation. Infiltrationshastigheterna betraktas som kapacitetshastigheter och Horton har därmed antagit att regnintensiteten alltid är större än infiltrationskapaciteten. Därmed skulle alltid en viss dämning förekomma. Men regnintensiteten varierar ju i verkligheten stort och därför understiger den därmed ofta infiltrationskapaciteten. I dagvattenmodeller förskjuts därför infiltrationskurvan med tiden till dess att den integrerade regnintensiteten (mindre än infiltrationskapaciteten) är lika med den integrerade infiltrationen (se figur 23).



Figur 23. Förskjutning av infiltrationskurvan i förhållande till regn-kurvan (Area ABGH = area FEBG). Efter Arnell, Lyngfelt, 1975.



Vid institutionen för vattenbyggnad, Chalmers tekniska högskola, har Arnell, Lyngfelt (1975) utvecklat en avrinningsmodell för dagvatten. Utgångspunkt för deras modellarbete har varit en beräkningsmodell vid Cincinnati-universitetet i USA. Beräkningsmodellen är uppdelad i sex delar: nederbörd, infiltration, ytvattenmagasinering, ytvattenavrinning, rännstensflöde och flöde i ledningsnätet (se figur 24).



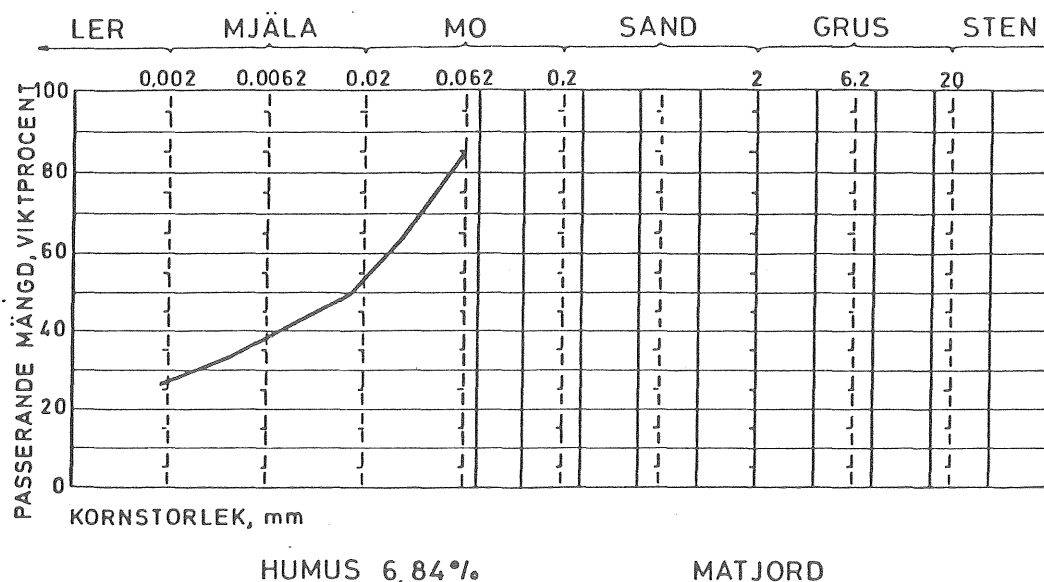
Figur 24. En dagvattenmodell. Efter Arnell, Lyngfelt, 1975.

Modellen är anpassad för bebyggda områden med relativt stor andel hårdgjorda ytor, som takytor, asfaltbelagda gator och parkeringsplatser. De olika delprocesserna beskriver tillsammans en del av det totala hydrologiska kretsloppet i ett urbant område. I beräkningsmodellen inkluderas vattnets rörelse på markytan samt nederbörd och infiltration. Avdunstningen och vattnets rörelser i markens omättade och mättade zoner innefattas ej i modellen.

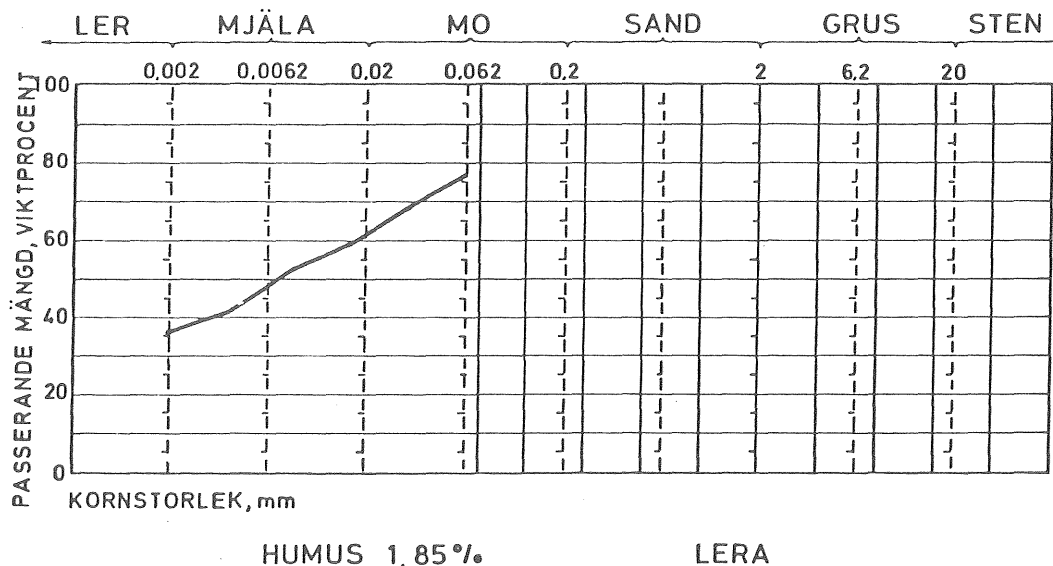
Infiltrationsprocessen i Arnell och Lyngfelts modell beskrivs med hjälp av Hortons ekvation. För att bestämma de i ekvationen ingående konstanterna  $f_0$ ,  $f_c$  och  $k$  kan enkelringsinfiltrimetrar användas. Detta har föranlett oss att granska funktionen hos denna typ av infiltrrometer.

## 8.2 Laboratorieförsök i en låda angående enkelringsinfiltrimeterns funktion

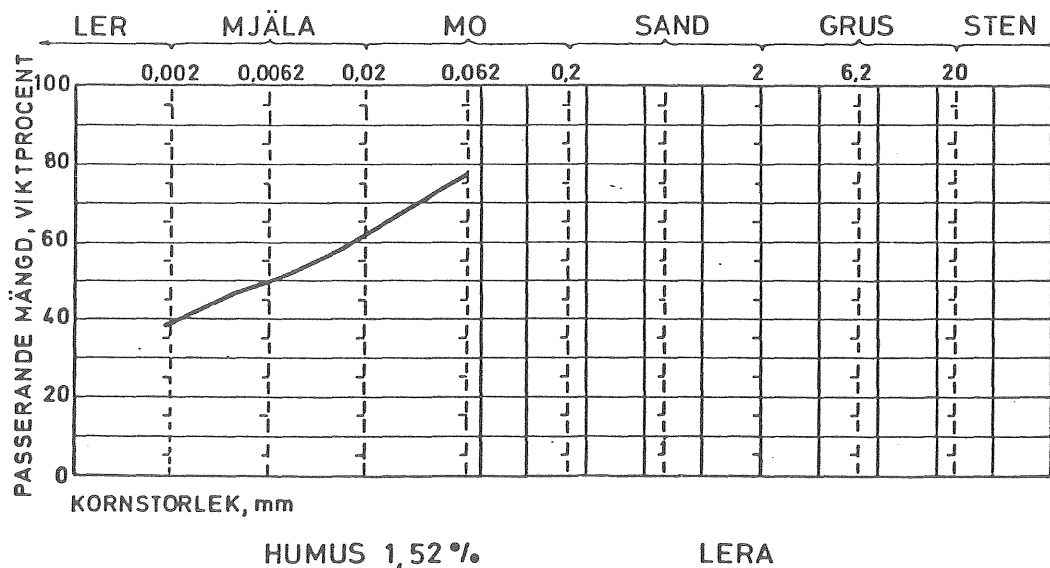
För att utreda infiltrimeterns funktion vid de markförhållanden som kan påträffas i bebyggda områden har ett laboratorieförsök utförts i en låda (60x60x60 cm). Vi valde att simulera en situation, där en 20 cm mäktig, lerig matjordsfyllning underlagrades av 20 cm siltig lera, se figurerna 25, 26 och 27. Under leran placerades ett filter med sand



Figur 25. Pipettanalys av matjordsskiktet. Humushalt 6,8%.  
Efter Ericsson, 1978a.



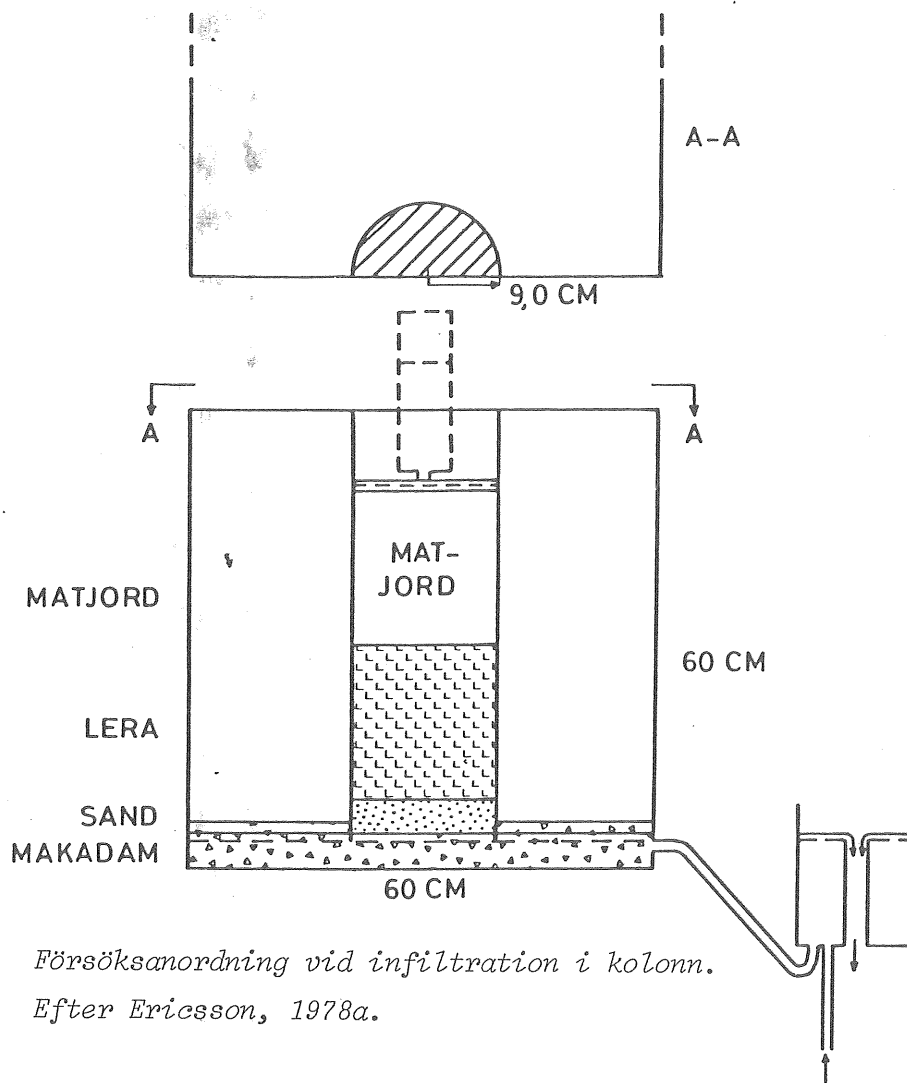
Figur 26. Pipettanalys på den underlagrande leran. Humushalt 1,9%.  
Efter Ericsson, 1978a.



Figur 27. Pipettanalys på den underlagrande leran. Humushalt 1,5%.  
Efter Ericsson, 1978a.

och singel, där grundvattentrycknivån kunde varieras. Leran var av torrskorpekaraktär när den packades.

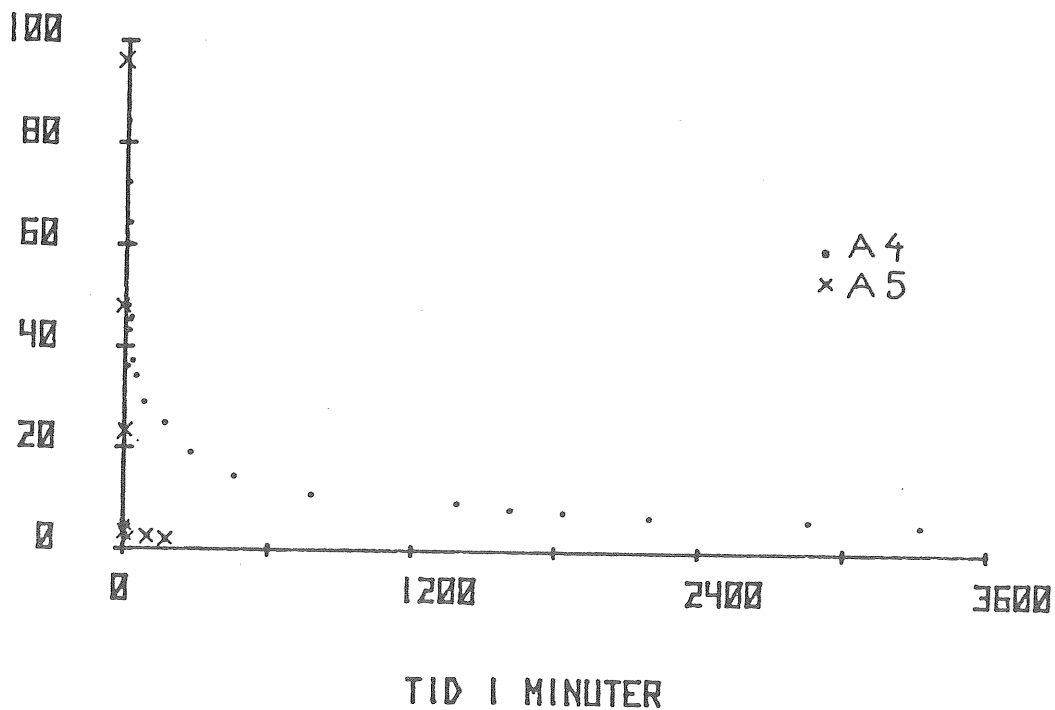
Först simulerades ett "endimensionellt" flöde (A4) i en halv cylindrisk ( $r = 9,0$  cm) kolonn. (Se figurerna 28 och 29.) Därefter fick kolonnen stå i 12 dygn, varefter ett likartat försök utfördes (A5), dock ej under så lång infiltrationsstid (se figur 29).



Figur 28. Försöksanordning vid infiltration i kolonn.  
Efter Ericsson, 1978a.

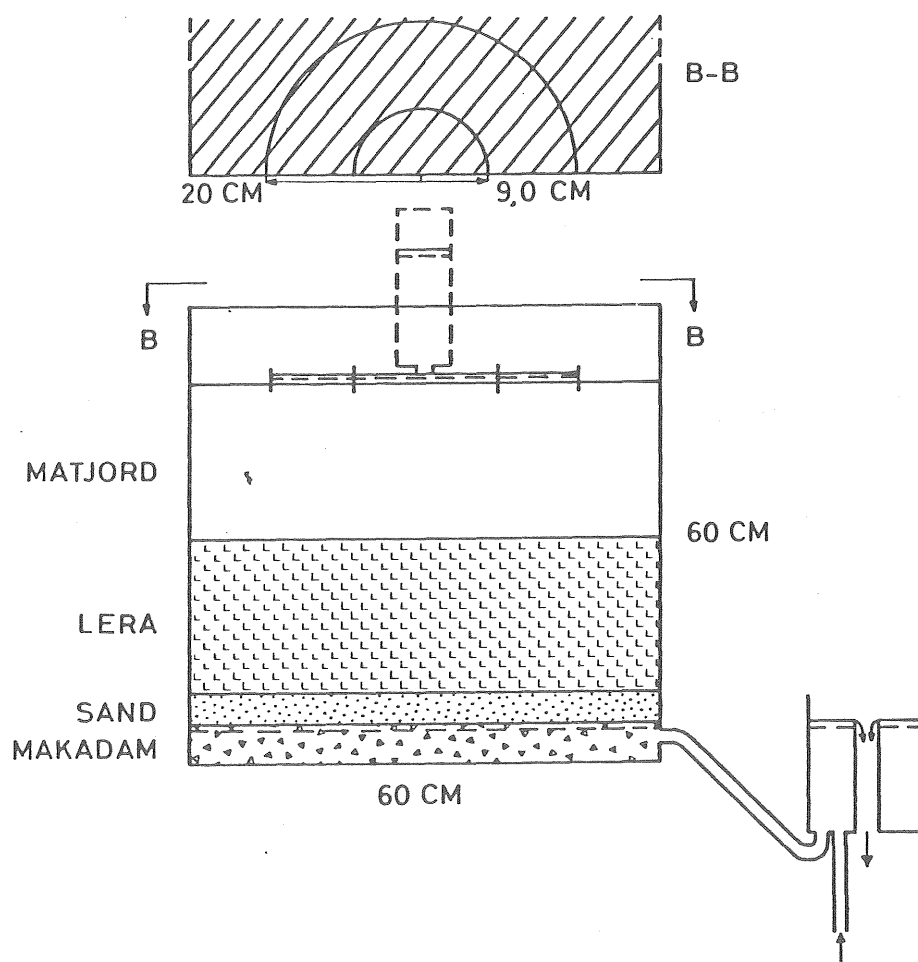
INF.KAP  
MM/TIM

INFILTROMETER FÖRSÖK



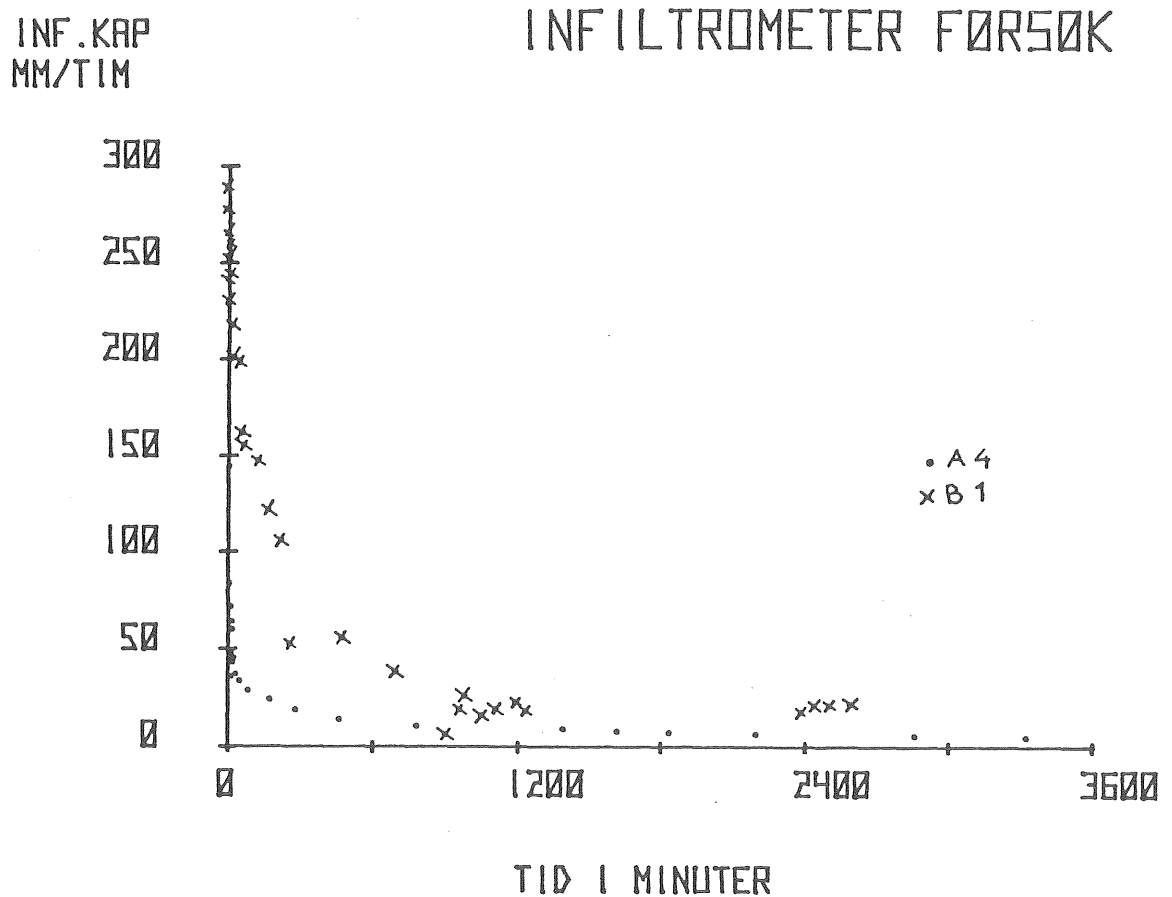
Figur 29. Infiltrationskurva för A4 och A5. Efter Ericsson, 1978a.

Man kan i figur 29 notera att försök A4 har ett högre slutvärde i infiltrationskapacitet än försök A5. Begynnelsevärdena skiljer sig emellertid inte så mycket. Förklaringen måste vara att överytan i matjorden torkat ut något under infiltrationsuppehållet. Vattnet magasineras vid återinfiltrationen snabbt i detta övre skikt. Därefter når vättningsfronten leran. Leran har under infiltrationsuppehållet svällt och blivit tätare, varför infiltrationskapacitetens slutvärde sjunkit. Försöket kan anses representera en situation som kan uppkomma i finkorniga jordarter, vilka ej har någon möjlighet att dränera eller där vattenomsättningen tar lång tid. Man bör få denna effekt efter en kraftig snösmältning i lerhaltiga jordarter.



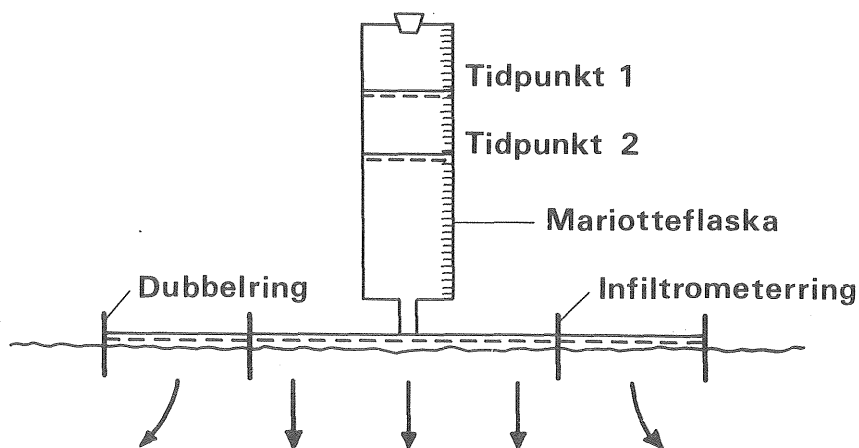
Figur 30. Försöksanordning vid enkelrings- respektive dubbelringsundersökningen. Efter Ericsson, 1978a.

Efter dessa s k "endimensionella" kolonnförsök packades lådan på identiskt sätt (se figur 30). Avsikten var nu att studera infiltrationskurvornas förlopp vid enkelringsinfiltrrometer och dubbelringsinfiltrrometer. Ett enkelringsförsök ( $r = 9,0$  cm) pågick i nästan 2 dygn (B1). Som resultat erhöles en högre infiltrationskapacitet vid detta "tredimensionella" försök jämfört med det "endimensionella" (se figur 31). En viss sidospredning förekom alltså som på något sätt bör korrigeras mot det riktiga "endimensionella" värdet.



Figur 31. Enkelringsförsöket (B1), jämfört med kolonnförsöket.  
Efter Ericsson, 1978a.

För att korrigera enkelringsvärden i fält och för att kunna efterlikna en mätning av vertikalt flöde i en jordkolonn används ofta följande metod. Koncentriska ringar placeras utanför enkelringen och vatten placeras på samma nivå mellan ringarna som i inre ringen för att erhålla en tryckutjämning. Därmed styrs vattenflödet i innerringen mot ett vertikalt flöde (se figur 32). Effekten av dubbelring studerades i försök B2 och B3. Försök B2 pågick tills ett konstant värde uppnåtts och därefter kopplades ytterrigen in (B3). Vid försök B3 var det vissa problem med att hålla nivån i ytterrigen konstant och på samma nivå som i enkelringen. Tryckskillnaderna mellan inner- och yttering har därför gett sig tillkänna i form av den punktskara som ses i figur 33 (efter 1545 min). En tydlig nedåtgående trend i kapaciteten visar emellertid att förfarandet med dubbelring bör ge ett riktigare värde på infiltrationskapaciteten.

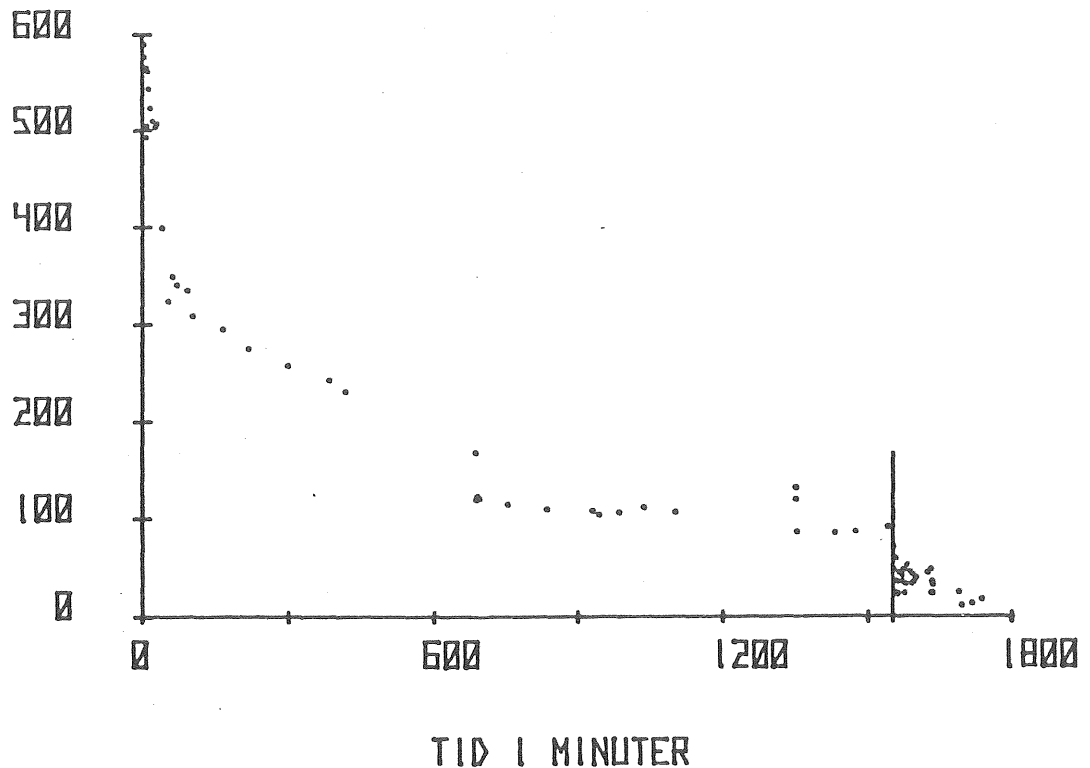


Figur 32. En dubbelringsinfiltrationsmeter.

Sammanfattningsvis kan följande sägas om laboratorieförsöket. Enkelringsinfiltrationsvärden i fält skall korrigeras med hänsyn till sidospridning. Värden från dubbelringsinfiltrationsmeter bör ge riktigare värden än enkelringsinfiltrationsmeter. En betydande säsongsmässig variation av infiltrationskapaciteten kan uppstå i kohesionära jordarter till följd av svällning.

INF.KAP  
MM/TIM

## INFILTROMETER FÖRSÖK



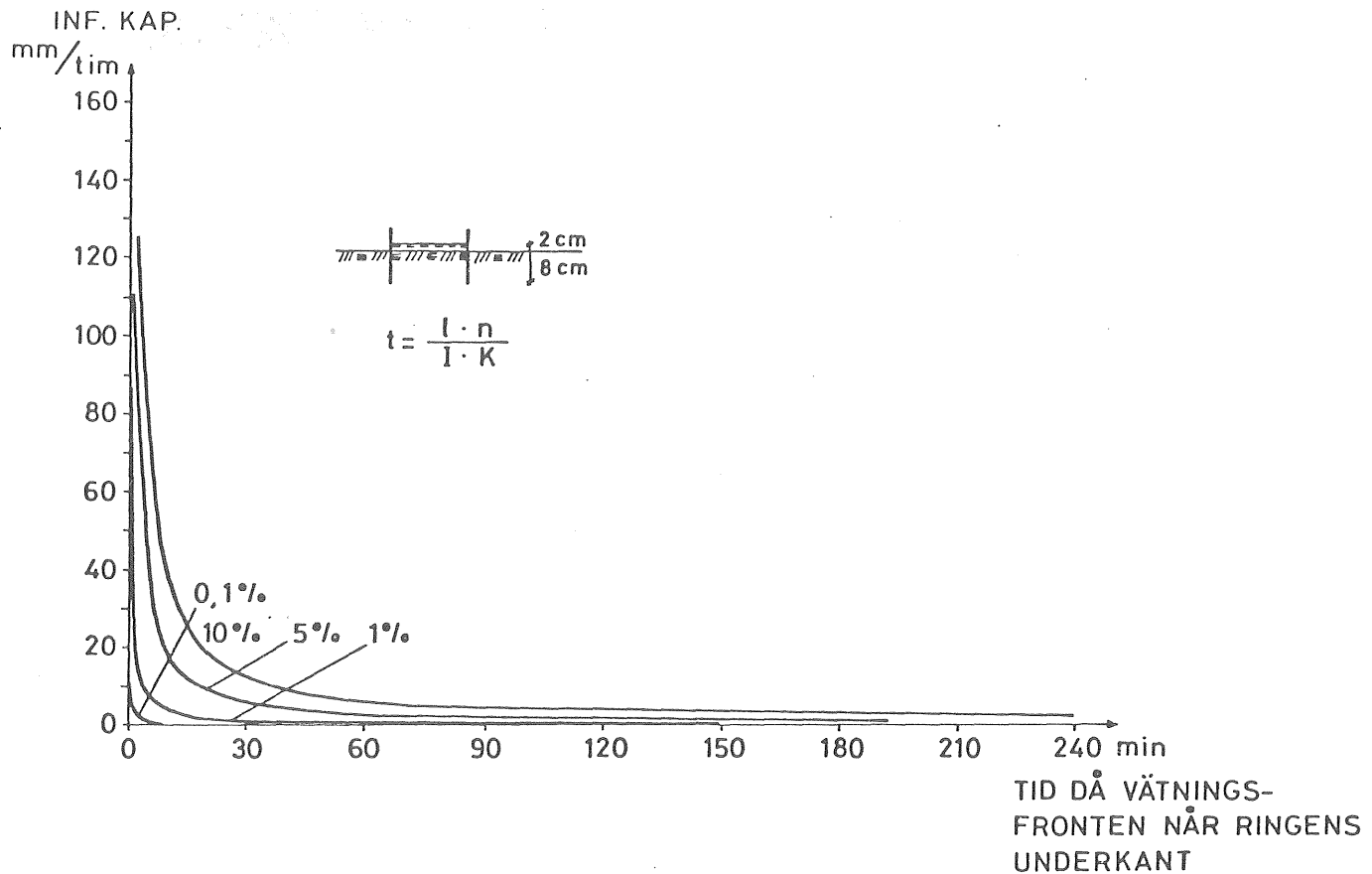
Figur 33. Effekten av påkopplad dubbelring är en minskad infiltrationskapacitet. Efter Ericsson, 1978a.

### 8.3 Val av korrektionsfaktor vid fältmätningar

Vid de enkelringsinfiltrationsmeterförsök som utförts i fält inom projektet har använts ringar med radien  $r = 19,5$  cm. Denna radie är för liten och därför bör enligt laboratorieförsöket och internationella erfarenheter en korrigering av sidospridningen göras.

Infiltrationsringens underkant når ungefär 8 cm ned under markytan. Vid jordarter med mycket låg hydraulisk konduktivitet och permeabilitet kan man förvänta sig att vätningsfronten aldrig når detta djup. En korrektion för sidospridning skall i dessa fall ej göras, eftersom vattenflödet tvingas till en rent vertikal rörelse. Det är emellertid svårt att praktiskt fastställa när vätningsfronten når ringens underkant och korrigering av mätdata bör ske.



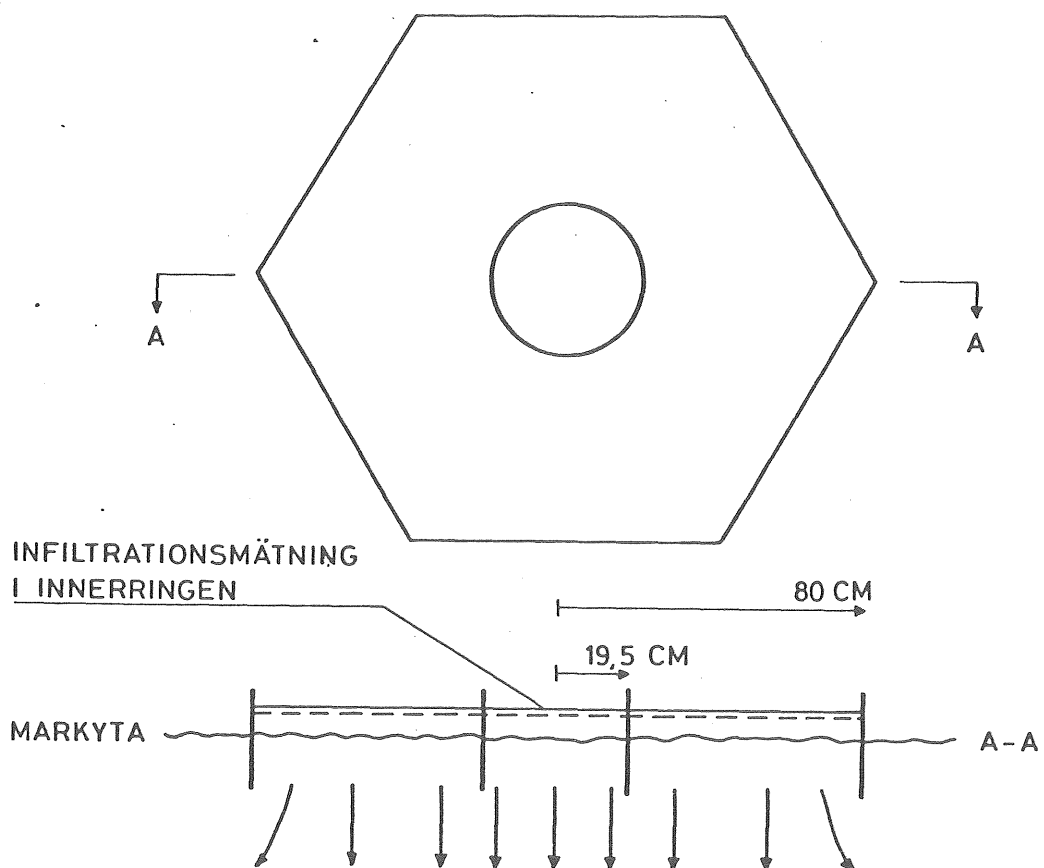


Figur 34. Kurvorna representerar olika effektiva porositeter. Olika infiltrationskapaciteter ger olika tider till dess att vätningsfronten når infiltrometerringens underkant. Obs! Infiltrationsförloppet är starkt förenklat. Efter Ericsson, 1978a.

I figur 34 presenteras en idealiserad situation som åskådliggör när vätningsfronten når ringens underkant vid olika uppmätta infiltrationskapaciteter. Kurvorna representerar några olika valda effektiva porositeter. Konduktiviteten är för enkelhets skull satt oberoende av vattenhalten och likaså är vattenrörelsen enbart beroende av gravitationen. Det vill säga full mättnad råder. Det har antagits att mariotteflaskans pip vid infiltrationsförsöken har ett avstånd av 2 cm till markytan. Denna dämning i innerringen påverkar den hydrauliska gradienten. I detta hypotetiska fall har tidsberäkningarna gjorts med en konstant gradient lika med 1,25. De beräknade tiderna bör med dessa antaganden vara längre än i verkligheten. Med hänsyn till dessa beräkningar och de allmänna praktiska felkällorna i mätmetoden, så bedöms det som lämpligt att ej korrigera de in-

filtrationskapaciteter  $< 5$  mm/tim. Ligger mätvärdena (startvärdet) mellan 5 och 30 mm/tim kan det vara lämpligt att närmare studera jordarten (eff porositet) vid markytan och därefter bestämma efter vilken mättid som man bör korrigera sina värden.

En uppskattning av korrektionsfaktorns slutvärde för de enkelringsinfiltrometrar ( $r = 19,5$  cm) som används vid CTHs infiltrationsstudier har utförts i fält. Två bestämningar har gjorts på en gräsyta utanför sektionen för Väg- och Vattenbyggnad, Chalmers tekniska högskola. Försöken var endast avsedda att erhålla ett kvantitativt mått på förändringen av infiltrationskapacitetens slutvärde vid påkoppling av ytterring utanför enkelringsinfiltrometern. Infiltration i enkelring pågick till dess att infiltrationskurvan upp-



Figur 35. Korrigering av enkelringsinfiltrometers slutvärde i fält.  
Efter Ericsson, 1978a.

visade ett konstant värde. Därefter påkopplades infiltration mellan inner- och ytterring. Ytterringen hade approximerats till en sexhörning med 80 cm sida. Infiltrationen uppmättes i innerringen till dess att ett konstant värde återigen erhöles. Vattnets trycknivå mellan inner- och ytterring hölls konstant lika med nivån i innerringen (se figur 35).

De båda korrigeringsförsökens infiltrationskurvor visar en tydlig påverkan av ytterringen. Kapaciteterna sjunker och anpassar sig mot nya asymptoter. Försök 770527 gav en slutlig infiltrationskapacitet som motsvarade ca 32% av enkelringsvärdet (se figur 36). Försök 770530 gav ett värde som var ca 28% av enkelringsvärdet (se figur 37).

Vid dessa försök var begynnelsevärdena så höga att sidospridningen kan antas börja vid försökets start. De uppmätta enkelringsvärdenas slutvärden bör alltså enligt dessa försök korrigeras med en faktor lika med 0,30.

Schwartzendruber och Olson (1961) har genomfört en modellstudie över infiltrometerens funktion. På basis av vätningsfrontens perkolerande hastighet vid endimensionellt ( $V_o$ ) respektive tredimensionellt ( $V_i$ ) flöde konstaterade man att  $(V_i/V_o)$ , efter samma tid, uppnådde ett asymptotiskt värde, lika med 2,65. Detta gällde för en enkelring med radien  $r = 8'' = 20,2$  cm och med tillämpning på en finkornig jordart. Bouwers kritiska spänning var lika med 76 cm (kapillaritetsgränsen).

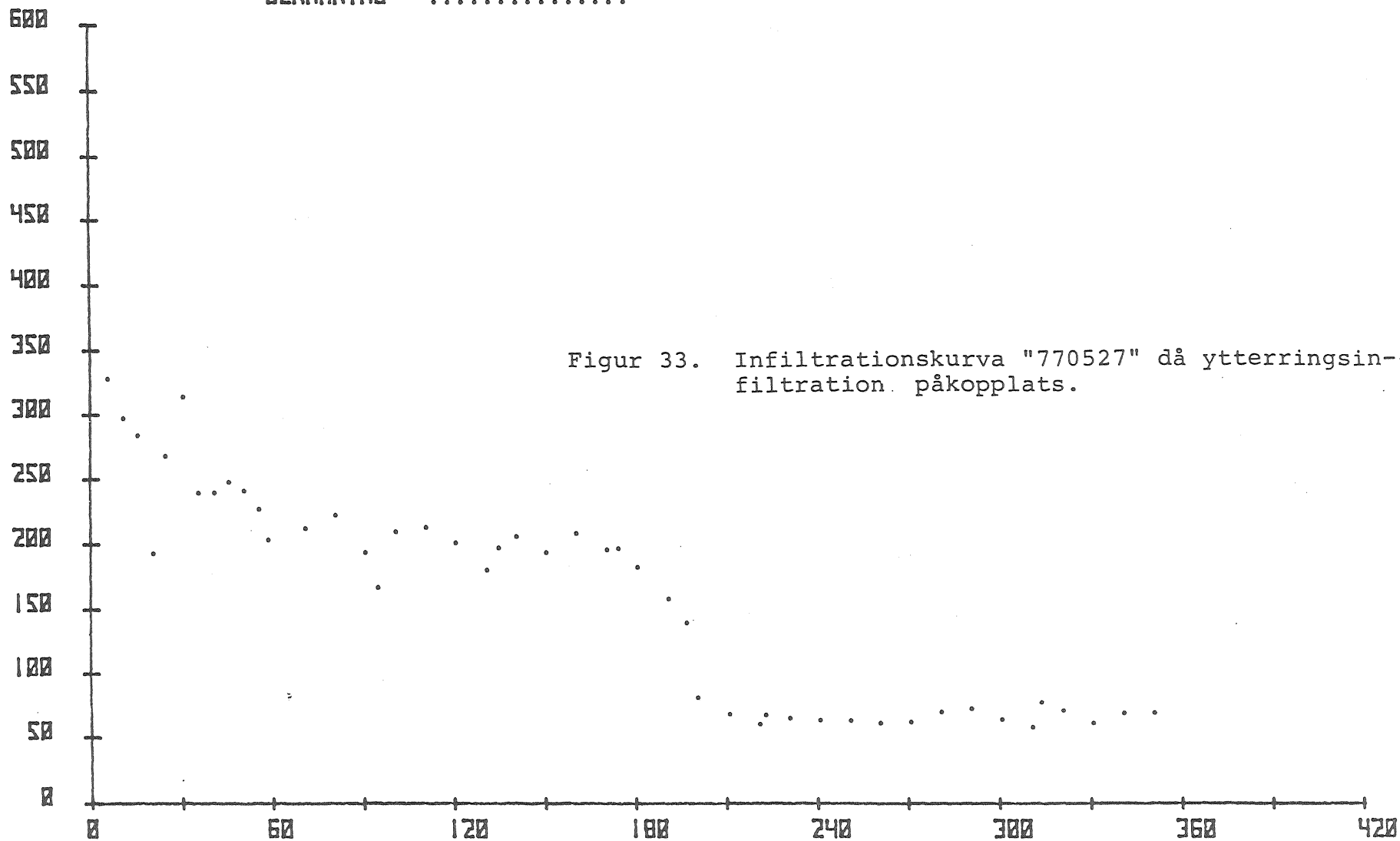
Tidigare konstaterades att vid låga mätvärden på kapaciteten når sannolikt inte vätningsfronten infiltrometerens underkant och man bör då ej korrigeras för sidospredning. En korrektionsfunktion bör alltså verka efter den tid då vätningsfronten passerat ringen och till dess att ett konstant infiltrationsvärde erhöles. Figur 30 visar det inverterade värdet av  $(V_i/V_o)_t$  (korrektionsfaktorn) som funktion av ovan nämnda tid. Slutvärdet enligt Schwartzendruber och Olson skall då multipliceras med 0,38 vid ett infiltrometerförsök i den finkorniga jordarten. Dessa resultat bör kunna

INF. KAP  
MM/TIM

# INFILTRROMETER FØRSØK

DATUM 770527

BENAMNING .....



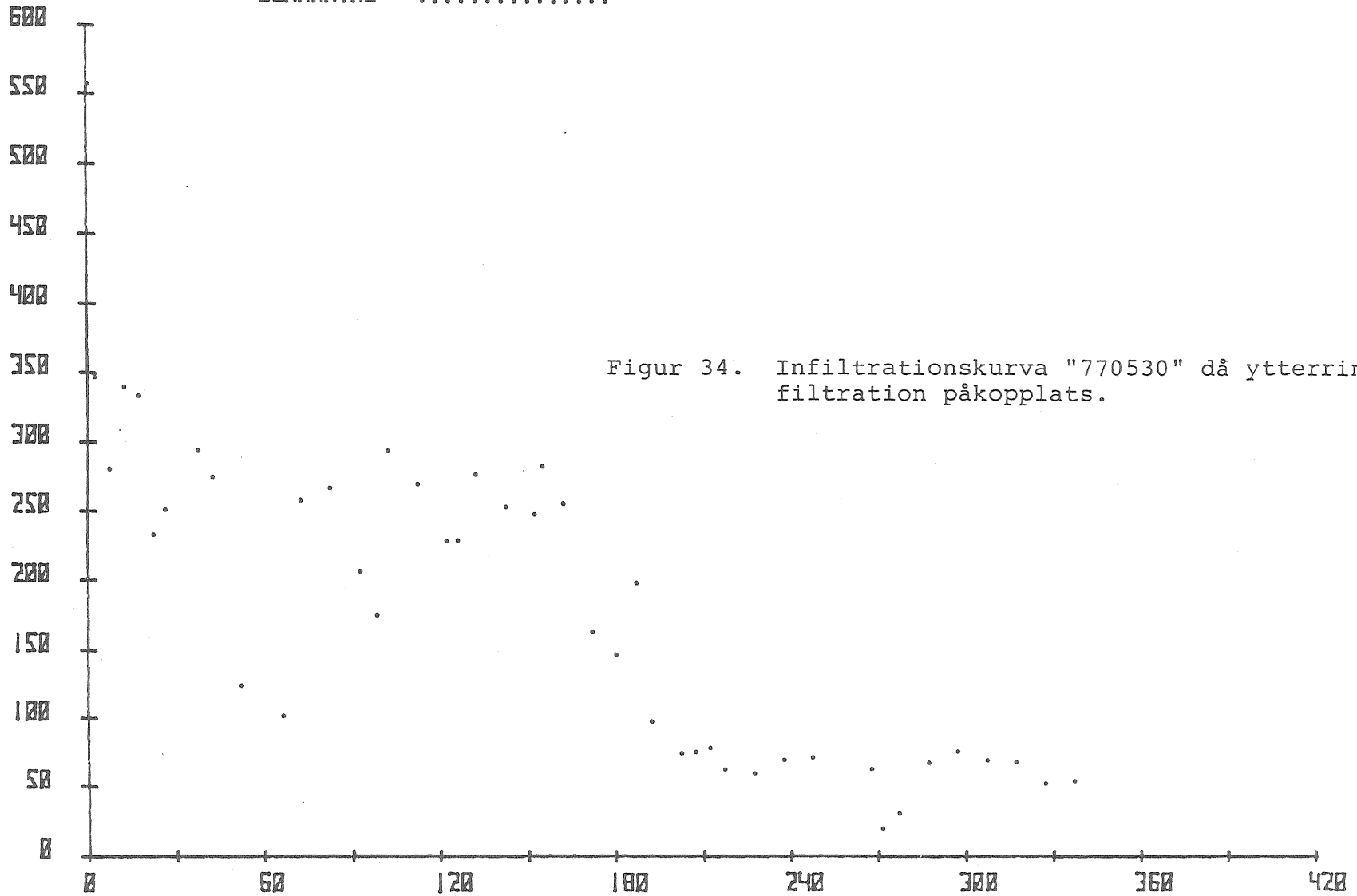
Figur 33. Infiltrationskurva "770527" då ytterringsinfiltration påkopplats.

TID I MINUTER

Figur 36. Infiltrationskurva "770527" då ytterringsinfiltration påkopplats.

INF. KAP  
MM/TIM

INFILTROMETER FØRSØK  
DATUM 770530  
BENAMNING .....



Figur 34. Infiltrationskurva "770530" då ytterringsinfiltration påkopplats.

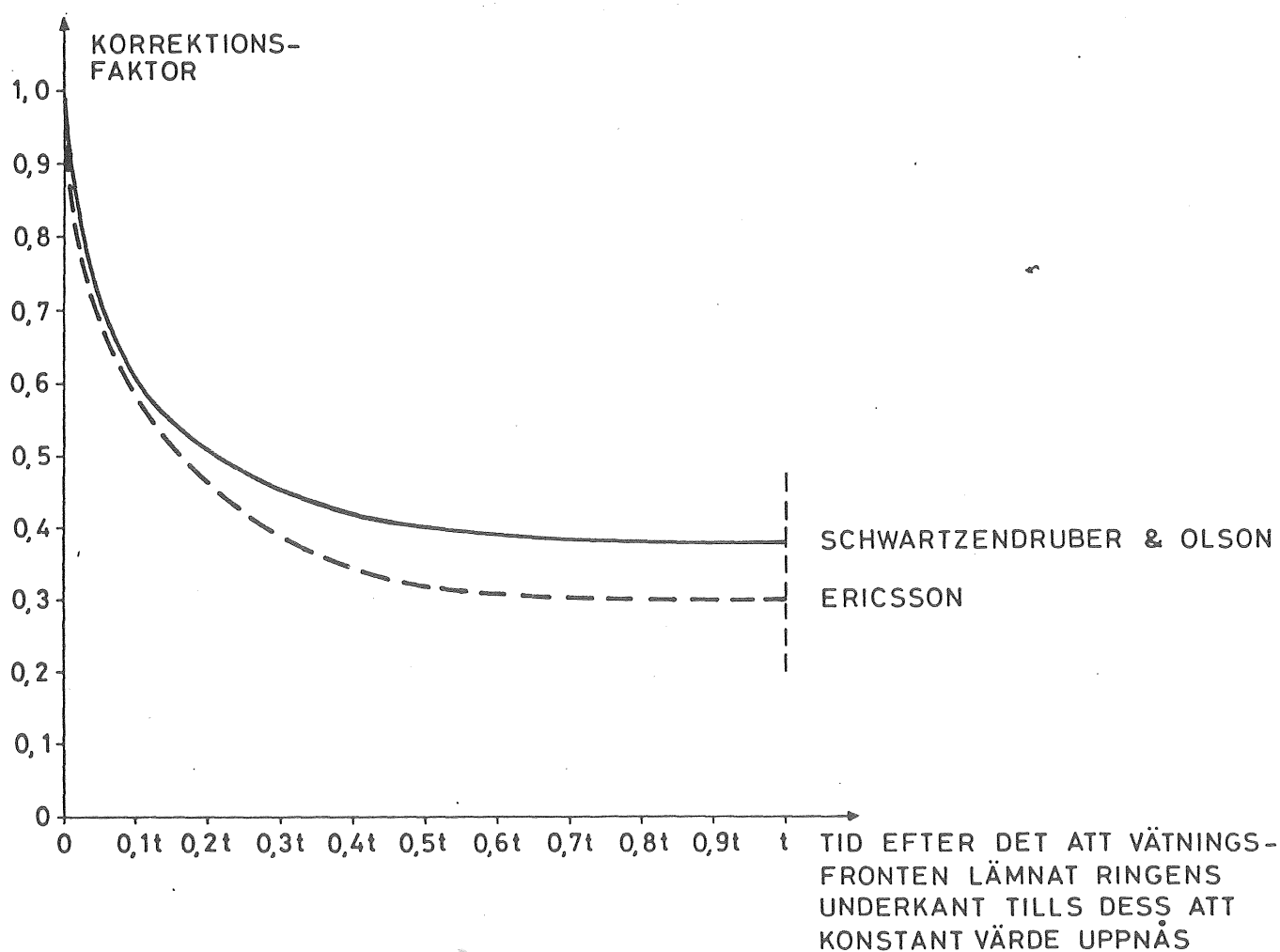
g

TID I MINUTER

Figur 37. Infiltrationskurva "770530" då ytterringsinfiltration påkopplats.

användas vid en jämförelse med och korrigerings av våra infiltrometerförsök på grund av infiltrometerringarnas lika storlekar ( $r = 20,2$  cm respektive  $19,5$  cm).

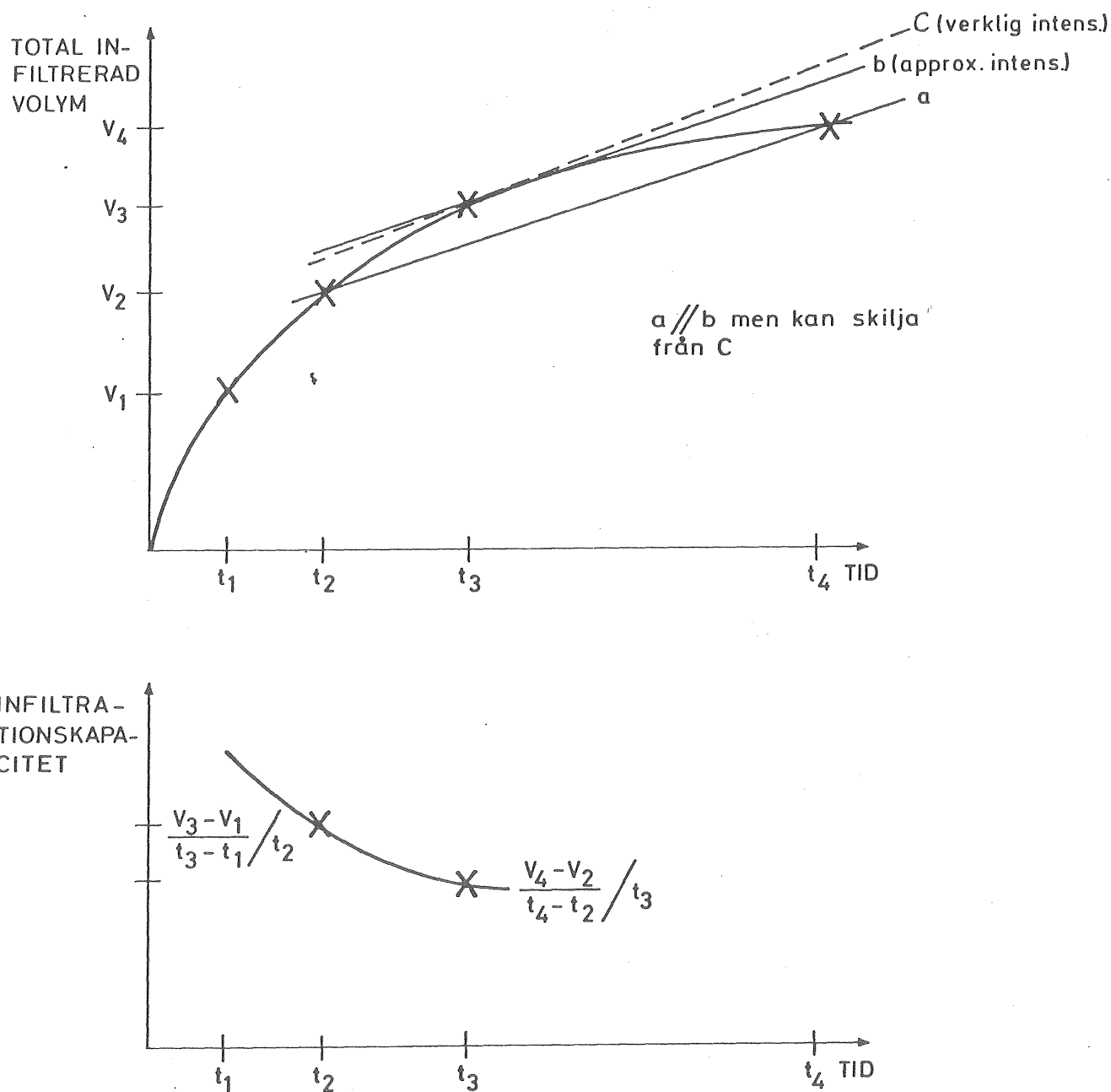
Om samma kurvform som Schwartzendruber och Olsons behålls, skulle en korrektionsfunktion för våra enkelringsinfiltrometrar kunna se ut som den streckade linjen i figur 38. Det måste dock påpekas att en korrektionsfunktion ej kan vara en entydig funktion med tiden. De markfysikaliska förutsättningarna påverkar korrektionen olika. Man skulle emellertid vid de försök som bedrivs i finkornigare jordmånstyper använda en funktion liknande den i figur 38. På detta sätt kan man erhålla en trovärdigare kvantifiering av infiltrationskapaciteten med hjälp av enkelringsmätningar.



Figur 38. Korrektionsfaktorn som funktion av tiden, till dess att konstant värde uppnås. Efter Ericsson, 1978a.

8.4 Regression enligt Hortons formel

I kapitel 8.1 redogjordes för hur infiltrationsprocessen behandlas i Arnell och Lyngfelts dagvattenmodell. Infiltrationskapaciteten beskrivs med Horton's formel. Målsättningen vid infiltrationsmätningarna har därför varit att med hjälp av uppmätta infiltrationsvärden i fält ta fram konstanterna  $f_c$ ,  $f_0$  och  $k$  vid olika extrema markfuktighets-tillstånd.



Figur 39. En principiell beskrivning av hur uppmätta värden approximeras till infiltrationskapaciteten vid tiden  $t_3$ . Efter Ericsson, 1978a.

HORTONS FORMULA      INDEX OF       $F\theta - FC$       K      FC       $F\theta$   
 DETERM.

$Y = FC + (F\theta - FC) \exp(KT)$      $\theta .983486$      $23.\theta 2$      $-1.1781\theta\theta$      $7.4\theta$      $30.42$

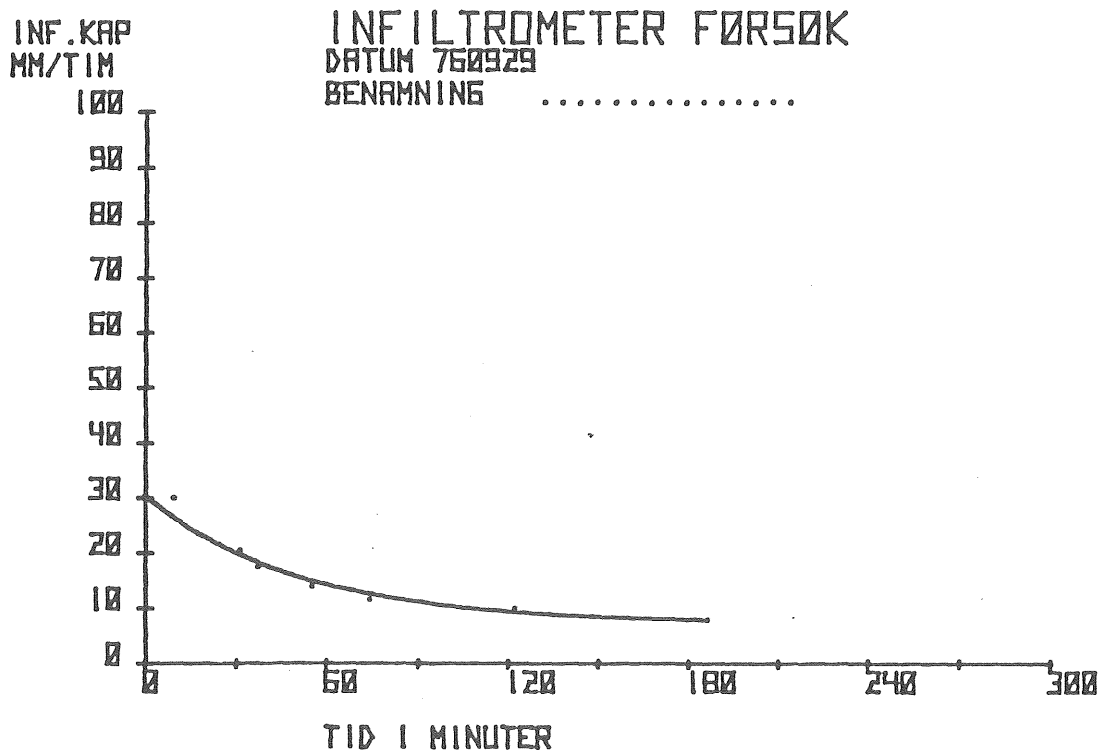
MEAN AND STANDARD DEVIATION OF RAW DATA

	MEAN	STANDARD DEVIATION
X	82.75	62.69597845
Y	15.1309975	7.473386761

$Y = FC + (F\theta - FC) \exp(KT)$  IS AN EXPONENTIAL FUNCTION. THE RESULTS OF A LEAST-SQUARES FIT OF ITS LINEAR TRANSFORM (SORTED IN ORDER OF ASCENDING VALUES OF X) ARE AS FOLLOWS:

X-ACTUAL	Y-ACTUAL	Y-CALC	POT DIFFER
9.00	30.12	26.69286	12.8
31.00	20.66	19.92548	3.6
37.00	17.52	18.53346	-5.4
55.00	14.22	15.21875	-6.5
74.00	11.75	12.78415	-8.1
122.00	10.10	9.49799	6.3
148.00	8.74	8.65919	0.8
180.00	7.95	7.99711	-0.6

Figur 40. Exempel på utskrift vid regression enligt Hortons formel.  
 Efter Ericsson, 1978a.



Figur 41. Exempel på kurvplott vid anpassning av Hortons formel till mätdata. Efter Ericsson, 1978a.

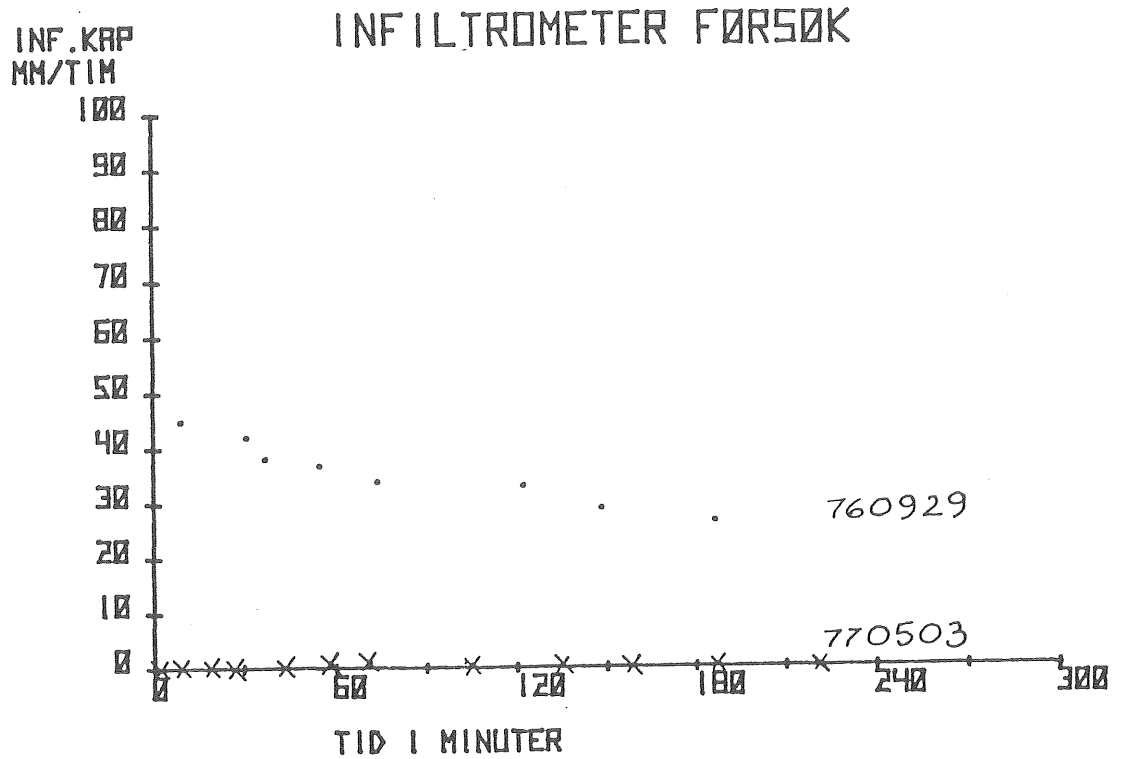


En mätning i fält ger den samlade vattenvolymen vid olika tidpunkter som runnit ur mariotteflaskan och infiltrerat. Kapaciteten vid varje mättillfälle interpoleras fram med hänsyn till mätningen före och efter aktuell tidpunkt. Schematiskt framgår kapacitetsberäkningen av figur 39. De beräknade infiltrationsvärdena bör därefter korrigeras med hänsyn till eventuell sidospridning under enkelringen. Därefter kan anses att man kvantifierat infiltrationskapaciteten vid olika tidpunkter.

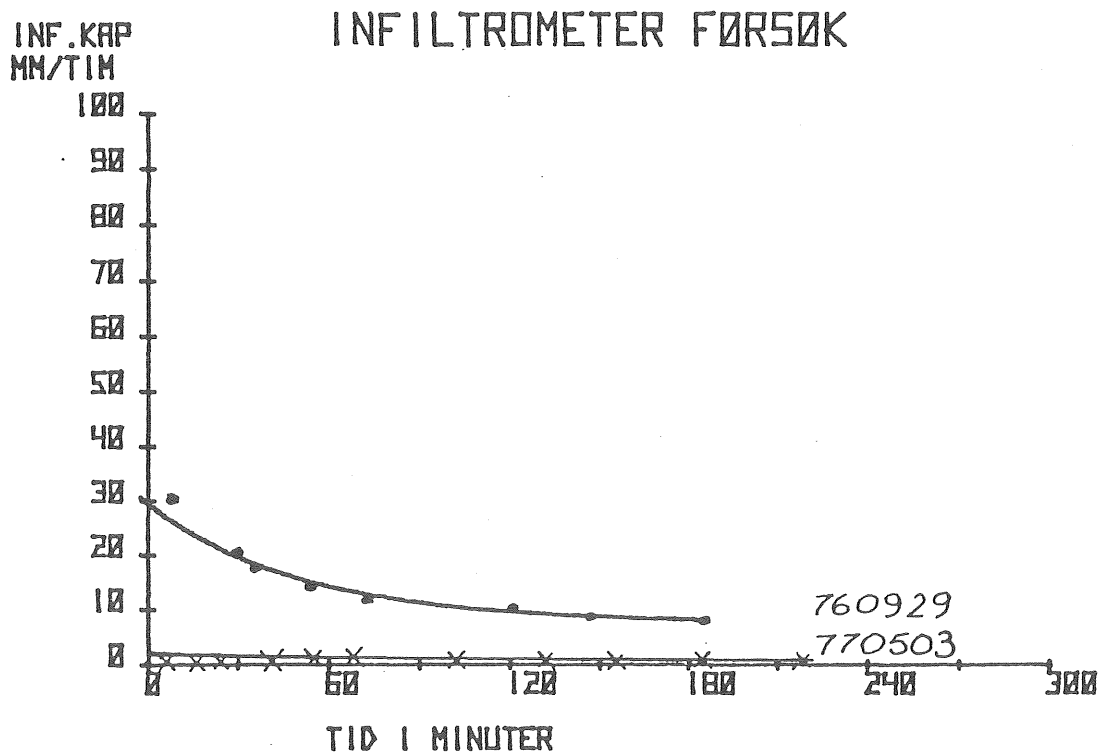
För att bestämma  $f_c$ ,  $f_o$  och  $k$  måste en regressionsanalys genomföras med hänsyn till mätvärdena. Det regressionsprogram som används bygger på ett standardprogram av Hewlett-Packard (Curfit A 404-36038 B). Standardprogrammet har omarbetats så att en för ändamålet passande utskrift erhålles. Vidare ingår en plottningsrutin. Bästa kurvpassning itereras fram tills man funnit största determinationskoefficient. Determinationskoefficienten är kvadraten på korrelationskoefficienten. Exempel på utskrift och kurvplot framgår av figurerna 40 och 41.  $f_o$  och  $f_c$  anges i mm/tim medan  $k$  anges i l/tim.

### 8.5 Exempel på bearbetning av mätvärden

I figur 42 visas rådata på intensitetsvärden från två infiltrationsförsök i Rydområdet, Linköping. Mätningarna är utförda vid två extrema markfuktighetssituationer, dels efter en mycket torr period (790929) och dels ca två veckor efter snösmältningen (770503). Provplatserna är nästan identiskt lika. Under ett tunt jordmånskikt ligger en till synes opåverkad glaciallera. Jordmånsfyllningen innehåller mycket lera och humushalten är ca 7%. Vid tidpunkten 760929 låg den naturliga vattenhalten ca 5 volymprocent under fältkapacitet. Vid tidpunkten 770503 rådde full vattenmättnad. Rådata behandlas i detta fall på följande vis.



Figur 42. Mätdata från två infiltrometerförsök i Rydområdet, Linköping. Efter Ericsson, 1978a.



Figur 43. Mätvärdena i figur 42 har korrigerats och Hortons ekvation har anpassats till de korrigerade värdena. Efter Ericsson, 1978a.

Försök 760929 korrigeras från start till slutvärde enligt den streckade korrektionsfunktionen (figur 38). Begynnelsehastigheten anses här vara så hög att vätningsfronten når ringens underkant tämligen snabbt. Försök 770503 korrigeras ej alls eftersom det är mycket troligt att vätningsfronten ej når ringens underkant. En regressionsanalys av mätdata ger därefter följande konstanter. Vid försök 790929  $f_C = 7,40$ ,  $f_O = 30,42$ ,  $k = -1,18$  och vid försök 770503  $f_C = 0,19$ ,  $f_O = 0,63$ ,  $k = -0,89$ . Se figur 43. Denna provplats uppvisar en tydlig säsongsmässig variation som till största delen beror på den svällning, som den lerhaltiga jordarten genomgår. Olika representativa delytor kan alltså utvärderas på detta sätt och därmed ges en möjlighet att ytgeneralisera infiltrationskapaciteten vid olika markfuktighetssituationer.

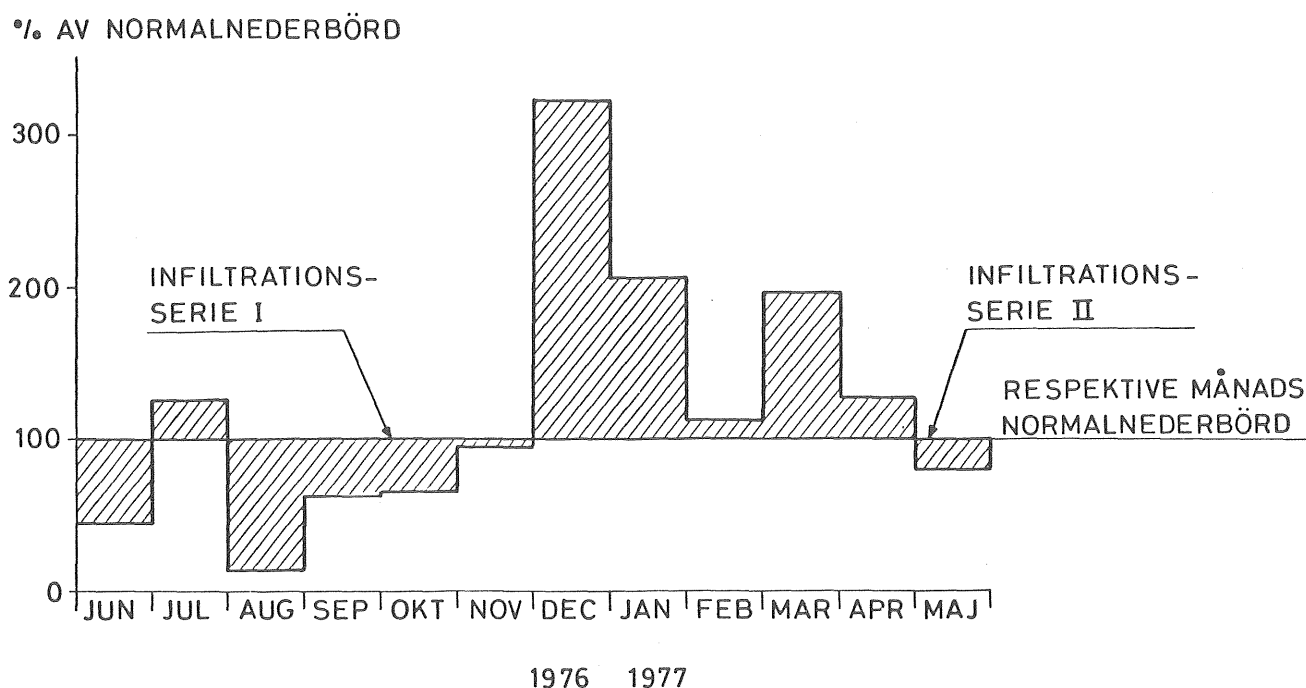
#### 8.6 Den säsongsmässiga variationen av infiltrationskapaciteten

En av målsättningarna i forskningsprojektet var att uppskatta den säsongsmässiga variationen av infiltrationskapaciteten. En kontinuerlig bestämning av denna förändring är mycket svår att göra. Markvattenhalten, vilken påverkar infiltrationskapaciteten, förändras nämligen mycket oregelbundet med hänsyn till nederbördssituation och klimat.

Vi har studerat två extrema markfuktighetstillfällen. Infiltrationskapaciteten mättes inom ett område dels efter en mycket torr sommar (1976) och dels efter en mycket nederbördsrik vinter (1976/77) med påföljande intensiva snösmältning. I figur 44 åskådliggörs månadsnederbörden i området i procent av respektive månads normalnederbörd. (Se Ericsson och Hård, 1978a.)

I avsikt att ytterligare belysa markfuktighetssituationen vid de två försöksserierna togs slumpvisa vattenhaltsprover vid markytan (0-5 cm djup), på de ytor där vi förväntade oss att kunna generalisera infiltrationskapaciteten. För att få ett begrepp om det relativa fuktighetstillstån-

det vid markytan är emellertid den naturliga vattenhalten i sig ej intressant. Den naturliga vattenhalten skall ställas i relation till fältkapaciteten. Fältkapaciteten uttrycker den vattenmängd som binds i ett jordmaterial efter fri dränering. Skillnaden mellan fältkapacitet och naturlig vattenhalt kan sägas vara ett mått på hur mycket vatten en jordart ytterligare kan innehålla utan att den dräneras. Är den naturliga vattenhalten större än fältkapaciteten innehåller jordarten obundet vatten som kan dräneras ur jordarten på grund av gravitationen. Vattenhalten i relation till fältkapaciteten styr alltså i hög grad infiltrationsförloppet. Detta belyses närmare i publikationen "Infiltrationsprocessen i en dagvattenmodell" (Ericsson, 1978a).



Figur 44. Månadsnederbörden i procent av respektive månads normalnederbörd (100%). Det vill säga sommaren 1976 var mycket nederbördsfattig och vintern 1976-77 var mycket nederbördsrik. Efter Ericsson och Hård, 1978a.

Vid försöksserie 1 efter sommaren innehöll inget jordprov en naturlig vattenhalt,  $W_n$ , som översteg fältkapaciteten,  $W_f$ . I de prov som togs i lerig fyllning uppgick skillnaden  $W_f - W_n$  till 2-10 volymprocent. Fyllning på isälvsmaterial uppvisade skillnad i  $W_f - W_n$  på omkring 10 volymprocent.

Prover togs även under försöksserie 2. Fyllning på isälvs-material hade även då en skillnad i  $W_f - W_n$  på omkring 10 volymprocent. Morän uppvisade ungefär samma värde. De lerhaltiga proverna visade emellertid på en fuktigare situation i markytan. Skillnaden  $W_f - W_n$  varierade nu mellan 0-5 volymprocent. Vissa lerhaltiga prover hade en naturlig vattenhalt som översteg fältkapaciteten. Det kan synas förvånande att fyllningen på isälvs materialet och moränen ej uppvisade högre markfuktighet. Cylinderproverna representerar emellertid värden från de fem översta centimetrarna och vattenhalten borde vara högre enbart någon decimeter under markytan där vattenomsättningen ej är så hastig. De mer grovkorniga jordarterna har en större effektiv porositet och dräneras därför snabbare än de fin-korniga. Vidare innehåller de grovkorniga jordarterna en större del vatten som är lösare bundet. Därför erhålls en snabbare avgång av vatten i markytan på grund av evapotranspiration. För att bestämma när infiltrationskapaciteten når ett konstant värde är det därför viktigt att studera hela den zon, markvattenzonen, där vatten vid markytan omsätts.

Figur 45 visar förhållandena vid fyllning av grovmo med något organiskt innehåll på isälvs-material. Försök L22 är utfört efter sommaren 1976 medan försök 20 är utfört efter snösmältningen 1977.

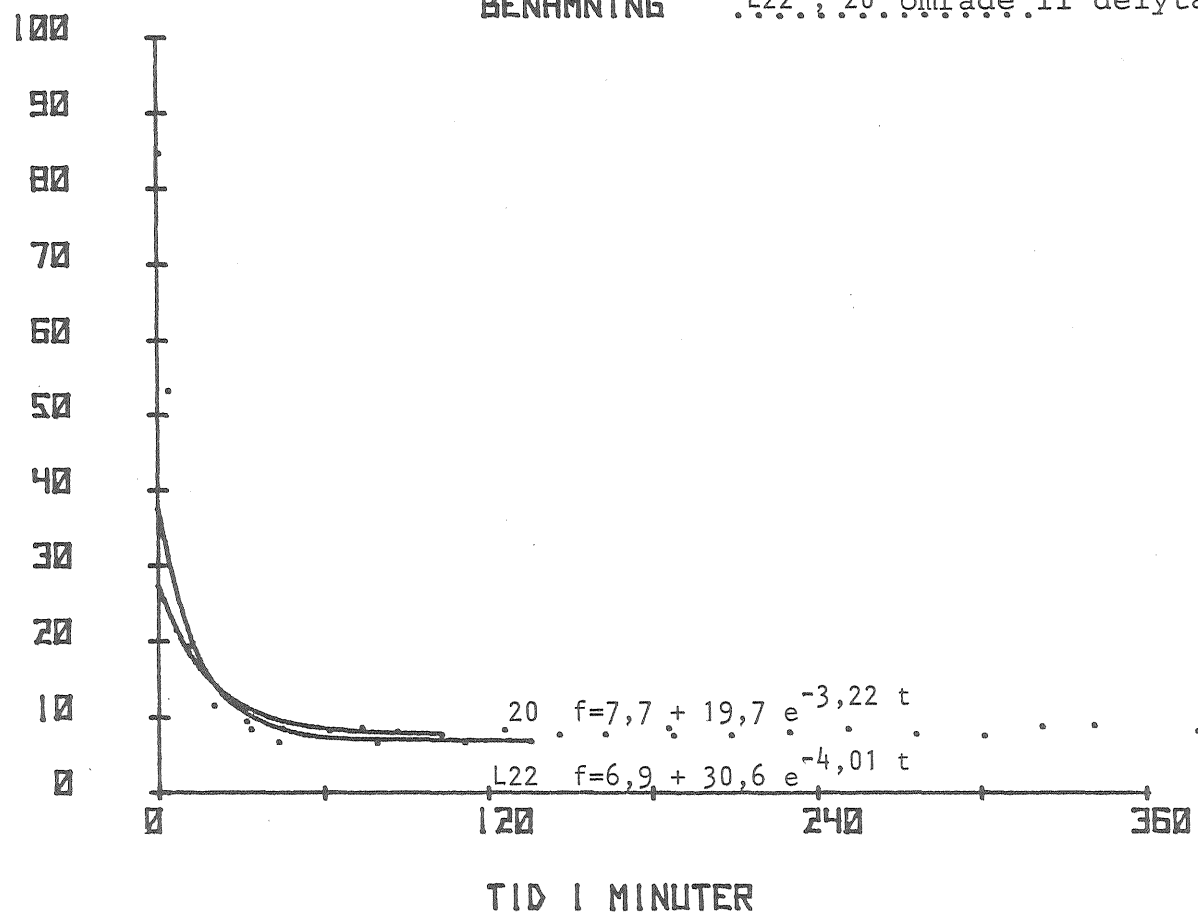
Figur 46 visar en tydlig säsongsmässig variation. Provplatsen är belägen på en lerig fyllning som underlagras av glaciallera. Försök L3 representerar situationen efter sommaren medan försök 4:s kurva skildrar infiltrationskapaciteten efter snösmältningen.

Följande slutsatser kan dras av figurerna: Om det råder en genomsnittlig fuktigare situation i marken nås fältkapacitetsvärdena och vattenmättnaden snabbare. Det lägsta infiltrationskapacitetsvärdet uppträder härav tidigare. Vid en och samma provplats men vid olika vattenhalter erhålls därför olika utseenden på infiltrationskurvorna. En schematisk beskrivning framgår av figur 47.

INF. KAP  
MM/TIM

# INFILTROMETER FÖRSÖK

BENÄMNING L22, 20 område II delyta a

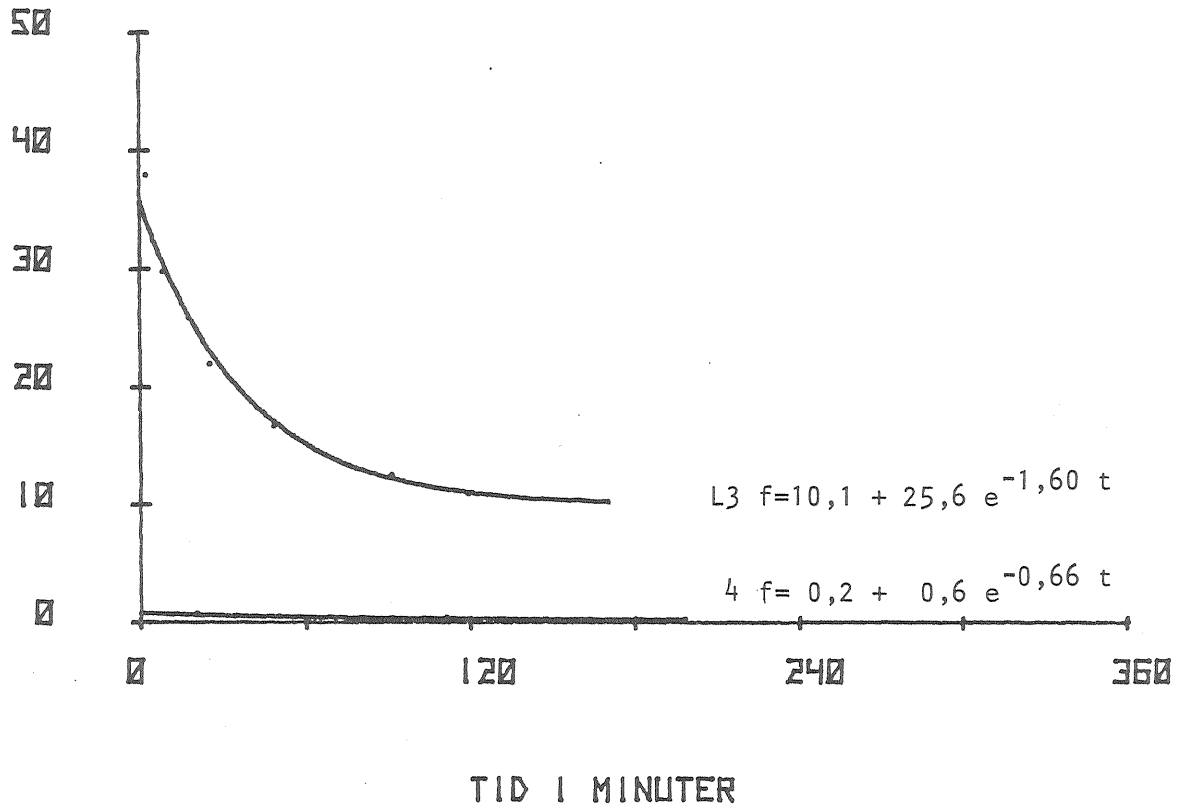


Figur 45. Infiltrationsförhållanden i fyllning av grovmo med något organiskt innehåll på isälvsmaterial. Försök L22 är utfört efter sommaren 1976 medan försök 20 är utfört efter snösmältningen 1977. Efter Ericsson och Hård, 1978a.

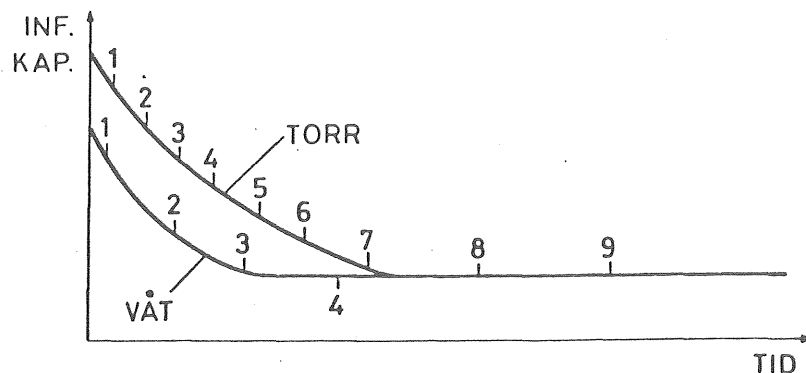
INF.KAP  
MM/TIM

# INFILTRMETER FÖRSÖK

BENÄMNING L3,4 område I delyta a  
.....

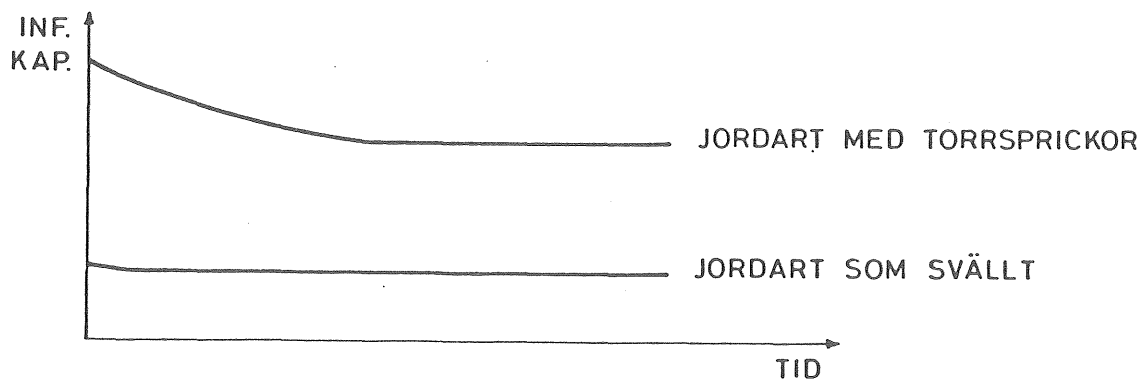


Figur 46. En tydlig säsongsmässig variation framgår av figuren. L3 representerar situationen efter sommaren medan försök 4 åskådliggör förhållandena efter snösmältningen. Efter Ericsson och Hård, 1978a.



Figur 47. Infiltrationskurvans schematiska utseende vid en "torr" och en "våt" situation. Efter Ericsson, 1978a.

I kapitel 8.2 konstateras att en minskning av infiltrationskapaciteten kan uppstå i kohesionära jordarter på grund av vätning under lång tid. I en lerig jordart kan de hydrauliska egenskaperna förändras avsevärt. Vid en lång torrperiod uppstår i lerhaltiga jordarter torrsprickor som kan magasinera och transportera regnvatten. Efter en lång våt period sväller som regel den leriga jordarten, torrsprickorna försvinner och vattnet tvingas att transporteras i jordartens porer. Detta porutrymme är mycket litet i förhållande till torrsprickorna och infiltrationskapaciteten minskar därmed nästan helt. Även om vi i våra undersökningar utgått från att infiltrationskapaciteten huvudsakligen påverkas av underlagrande geologiska miljö är det möjligt att exempelvis fyllnadsmassor på isälvsmaterial kan innehålla lera och organiska kolloider som sväller vid långvarig väta. Man kan då förutom den säsongsmässiga variation som ovan beskrivits, få en överlagrad effekt av svällning med en minskad infiltrationskapacitet till följd, se figur 48.

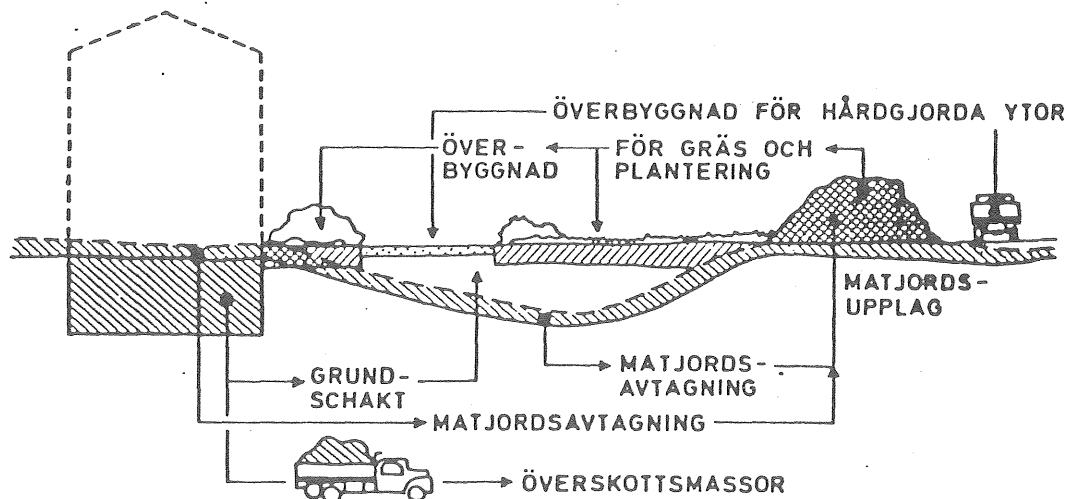


Figur 48. En överlagrad effekt på grund av svällning minskar infiltrationskapaciteten. Efter Ericsson, 1978a.



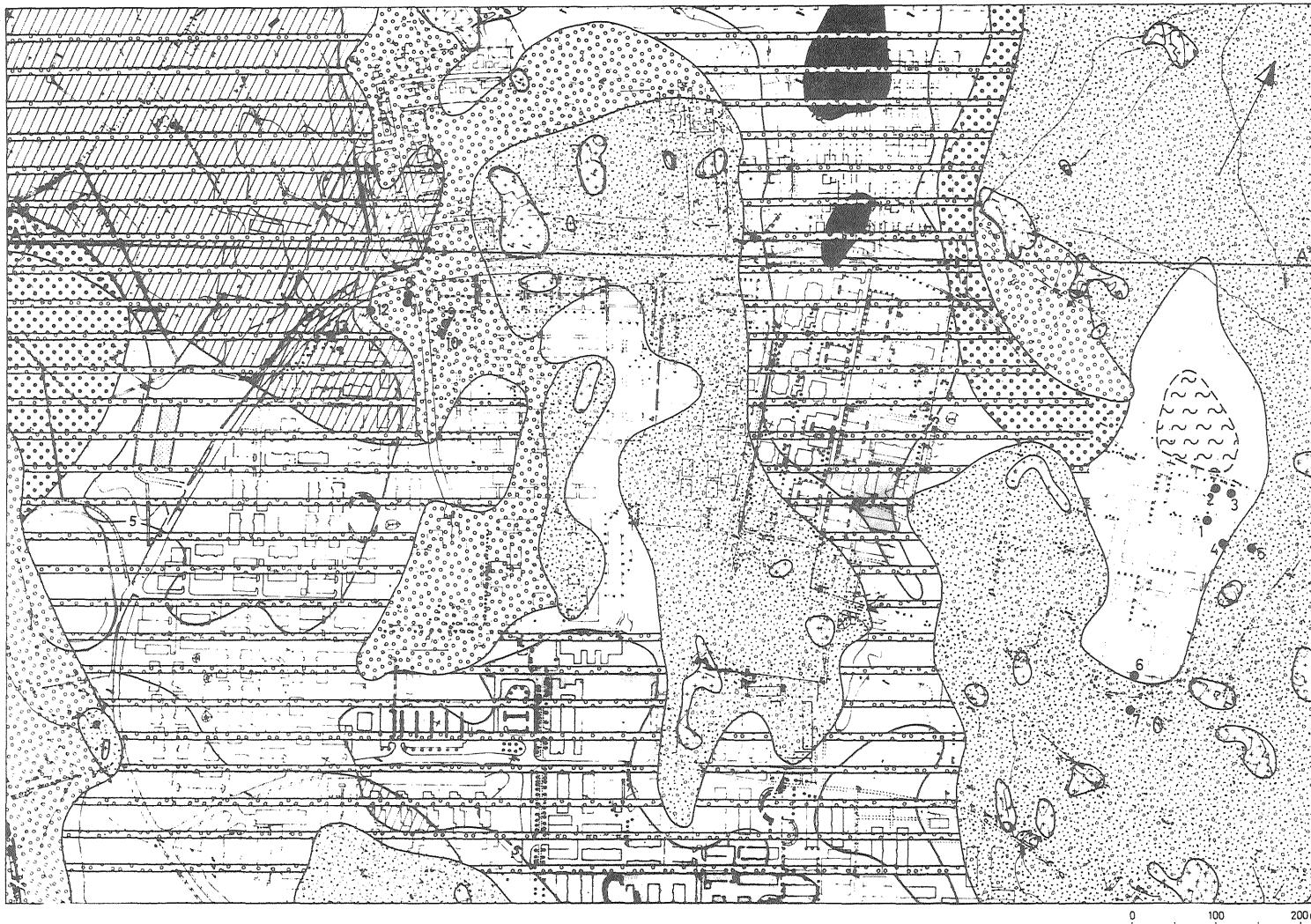
## 8.7 Fältarbete och ytgeneralisering av infiltrationsmätningar, exempel

De geologiska förutsättningarna för infiltration och perkolations kan variera stort inom ett bebyggt område. Dessutom utgörs det översta markskiktet hos grönytorna ofta av fyllnadsmassor, vilket ytterligare komplicerar en arell generalisering av infiltrationskapaciteten. Emellertid präglas fyllningens sammansättning av den underlagrande geologiska miljön. Det är nämligen så att vid återfyllning och gräsyteanläggning, efter själva byggandet, används för det mesta jordmaterial med lokalt ursprung, dvs man tar schaktmassor från ett lokalt matjordsupplag för att erhålla en god transportekonomi (se figur 49). Som ett första steg i undersökningarna väljs därför områden med primärt varierande geologiska förutsättningar för infiltration. Efter en geologisk analys upprättas därför en ingenjörsgelogisk karta avseende jordarter. Kartan bygger på geologiska beskrivningar, geotekniska och geohydrologiska utredningar. Som exempel visas figur 50 med tillhörande sektion A-A, figur 51. Området som beskrivs är stadsdelen Ryd, Linköping.















Figur 49. Jordmassorna transporteras i så liten omfattning som möjligt för att erhålla god transportekonomi. Den underlagrande geologiska miljön bör därför lokalt påverka matjordsfyllningen för gräsytor och planteringar. Efter Hallin, 1975.

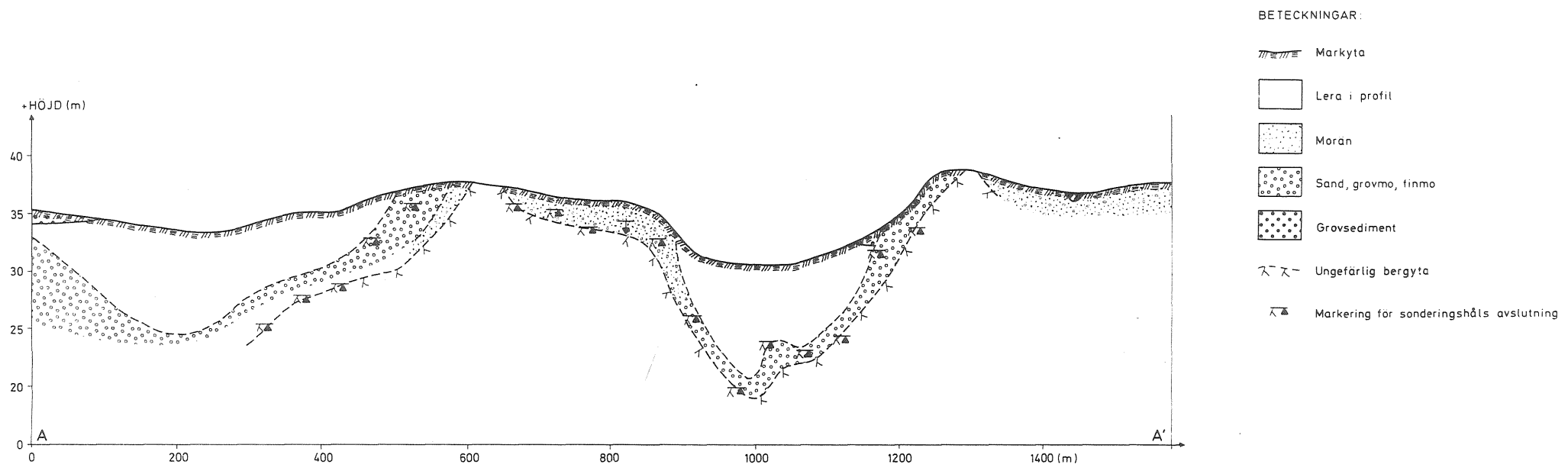
# JORDARTER








## BETECKNINGAR:

-  Berg i dagen eller på ringa djup (mindre än 0,5 m)
-  Morän
-  Sand, grovmo, finmo
-  Grovsediment, minst 2 m mäktigt under finsediment
-  Grovsediment, minst 0,5 m mäktigt, som har konstaterats eller kan antagas underlagras av finsediment
-  Lagerföljden består av både lera och silt
  
- Lera
  -  0 - 5 m
  -  5 - 10 m
  -  > 10 m
-  Torv <1 m
-  Fyllning
  
-  Provtagningsplatser, jordprover

LINKÖPING, RYD  
 INGENJÖRSGEOLOGISK KARTA  
 SKALA  
 Fig. 50



- BETECKNINGAR:
-  Markyta
  -  Lera i profil
  -  Moran
  -  Sand, grovmo, finmo
  -  Grovsediment
  -  Ungefärlig bergyta
  -  Markering för sonderingshålts avslutning

SEKTION A - A'  
 på ingenjörsgelogiska kartan  
 LINKÖPING, RYD  
 LÅNGDSKALA  
**Fig. 51**

Utifrån de geologiska förutsättningarna som präglat markfyllningens sammansättning utväljs försöksområdena (se figur 52). Exempelvis underlagras fyllningen i område I av glaciallera och morän, medan i område II, av siltig glaciallera och isälvsmaterial. Morän förekommer i den naturliga skogsmarken vid randen av område I.

Figurerna 53 och 54 visar de ytgeneraliserade försöksområdena. Dessa är indelade i ytor med olika representativa infiltrationsförlopp och säsongvariationer. Inför utplaceringen av infiltrometrarna görs en tämligen noggrann ytkartering. Hänsyn tas då till fyllningens sammansättning, bedömd packningsgrad och marklutning.

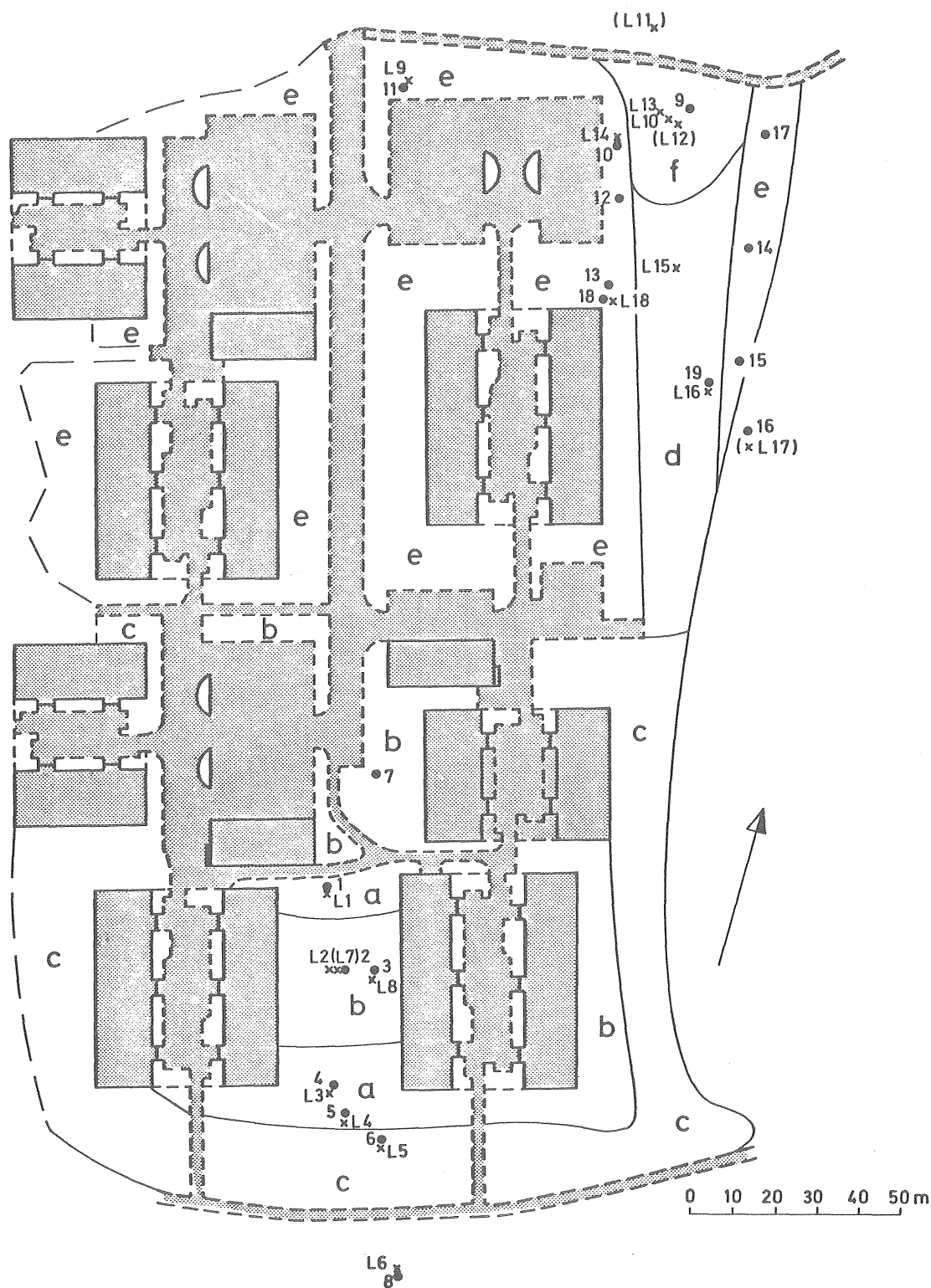
Den ytgeneralisering av infiltrationsförloppen som här genomförts bygger ej på en statistisk bearbetning av resultatet från infiltrometerförsöken. Försöksmaterialet var därtill alldeles för litet och komplext. Några feluppskattningar har därför inte kunnat göras. Med det förfarande som undersökningen utförts kan man ge trovärdiga riktlinjer för hur infiltrationen tillgår i de två försöksområdena.

Med torr respektive våt period i figur 53 och 54 menas den extremt torra respektive den extremt våta klimatsituation som rådde vid försökstillfällena. Infiltrationsförloppen ser vid andra markfuktighetssituationer annorlunda ut. Man kan dock säga att intensiva åskregn vid sensomartid bör ställas i relation till kurvförloppen vid "torr period". Långvarig nederbörd under hösten samt nederbörd strax efter snösmältningen bör ställas i relation till kurvförloppen vid "våt period".

I det nedanstående ges två exempel på hur en beskrivning till en delyta kan formuleras. Delytorna är hämtade från figurerna 53 och 54.



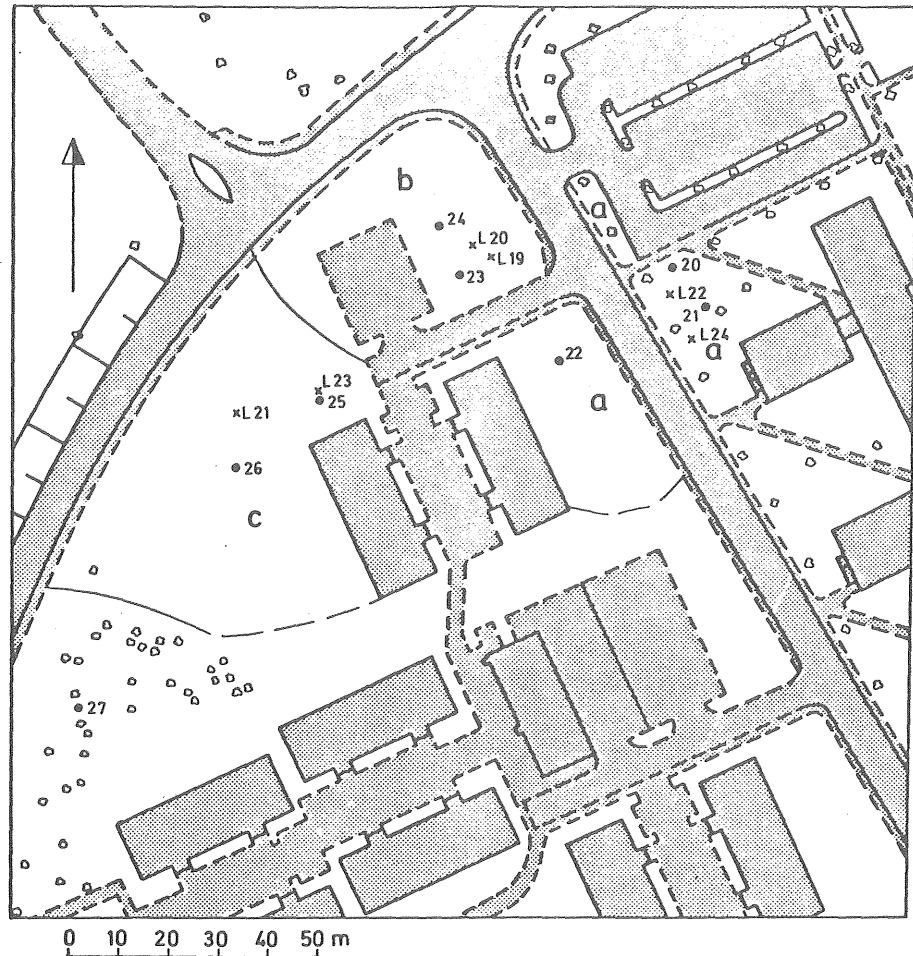
Figur 52. Översiktskarta över Rydområdet, försöksområdena I och II är rastrerade. Efter Ericsson och Hård, 1978a.



Figur 53a. Läge för delytor med varierande infiltrationskapacitet inom försöksområde I Ryd, Linköping. Skala 1:500. Teckenförklaringar, beteckningar och infiltrationsförlopp för respektive delyta redovisas på figur 53b. Efter Ericsson och Hård, 1978a.

a	$f = 7 + 28 \cdot e^{-1,50 \cdot t}$ torr period $f = 0,5 + 0,8 e^{-0,80 \cdot t}$ våt period
b	$f = 16 + 85 \cdot e^{-2,40 \cdot t}$ torr period $f = 3,0 + 1,5 e^{-0,70 \cdot t}$ våt period
c	$f = 20 + 55 \cdot e^{-2,50 \cdot t}$ torr period $f = 5 + 10 \cdot e^{-2,50 \cdot t}$ våt period
d	$f = 40 + 200 \cdot e^{-1,40 \cdot t}$ torr period $f = 7 + 2 \cdot e^{-1,00 \cdot t}$ våt period
e	$f = 18 + 20 \cdot e^{-1,15 \cdot t}$ torr period $f = 7 + 4 \cdot e^{-0,20 \cdot t}$ våt period
f	$f = 7 + 60 \cdot e^{-1,10 \cdot t}$ torr period $f = 0,5 + 1,5 e^{-0,30 \cdot t}$ våt period
	Hårdgjorda ytor
x	Mätning under tidsperioden 760929-761001
•	Mätning under tidsperioden 770503-770505

Figur 53b. Infiltrationsförlopp för delytor inom försöksområde I Ryd, Linköping ( $f$  i mm/tim och  $t$  i tim). Efter Ericsson och Hård, 1978a.



a	$f = 10 + 50 \cdot e^{-3,90 \cdot t}$ torr period $f = 5 + 20 \cdot e^{-3,90 \cdot t}$ våt period
b	$f = 10 + 35 \cdot e^{-2,50 \cdot t}$ torr period $f = 0,5 + 10 \cdot e^{-0,10 \cdot t}$ våt period
c	$f = 5 + 15 \cdot e^{-2,50 \cdot t}$ torr period $f = 3 + 2 \cdot e^{-0,30 \cdot t}$ våt period
	Hårdgjorda ytor

x Mätning under tidsperioden 760929-761001

• Mätning under tidsperioden 770503-770505

Figur 54. Läge och infiltrationsförlopp för delytor med varierande infiltrationskapacitet inom försöksområde II Ryd, Linköping ( $f$  i mm/tim och  $t$  i tim). Skala 1:500. Efter Ericsson och Hård, 1978a.



Exempel 1Försöksområde I delytor a (figur 53)

I den norra delytan har fyllnadsmassorna ca 30 cm:s mäktighet och underlagras av ostörd glaciallera. Fyllningen innehåller tämligen mycket lera (ca 20% < 0,002 mm) och humushalten i mätpunktens översta jordmånsskikt (0-10 cm) var ca 7-8%. Den södra delytan har en ca 50 cm mäktig fyllning som förutom ett rikt lerinnehall även innehåller visst friktionsmaterial. Efter en längre tids nederbörd eller efter snösmältningen är infiltrationen starkt reducerad jämfört med varm torr sommarperiod. Infiltrationen styrs sommartid av de torrsprickor som uppstår men efter en längre tids väta sväller sprickorna igen och infiltrationen minskar. Infiltrationen bedöms följa förloppen:

$$\text{Torr period: } f = 7 + 28 \cdot e^{-1,50t} \text{ mm/tim}$$

$$\text{Våt period: } f = 0,5 + 0,8 \cdot e^{-0,80t} \text{ mm/tim}$$

Exempel 1Försöksområde II, delytor a (figur 54)

Under ett tunt matjordsskikt består delytorna av en fyllning med en mäktighet som varierar mellan ca 15 cm och 40 cm. Humushalten i ytan är låg, omkring 2%. Därunder följer isälvsmaterial. Fyllningen består av mycket grovmo, något organiskt material men obetydligt med sten och grus. I isälvsaterialet på ca 60 cm:s djup påträffas lokalt grövre fraktioner såsom grus och sten. Infiltrationen bedöms följa förloppen:

$$\text{Torr period: } f = 10 + 50 \cdot e^{-3,90t} \text{ mm/tim}$$

$$\text{Våt period: } f = 5 + 20 \cdot e^{-3,90t} \text{ mm/tim}$$

### 8.8 Infiltrationskapaciteten som funktion av markens humushalt och kornstorlek

Ett flertal faktorer påverkar infiltrationens storlek och det är svårt att gradera de olika faktorernas inverkan. Låt oss emellertid anta att markbearbetningen, vegetationen och jordmånens struktur är de faktorer som mest påverkar

markens genomsläpplighet. Av dessa faktorer eliminerar vi markbearbetningen genom att anse att packningsförfarandet inom ett och samma bostadsområde är likartat. Vi har genom att studera infiltrationskapacitetens slutvärde kontra jordmånens sammansättning erhållit följande resultat för några gräsytor i bebyggd miljö. Försöksområde är Ryd, Linköping (Ericsson, 1978c).

Den hydrauliska konduktiviteten hos en jordart är erfarenhetsmässigt proportionell mot en effektiv korndiameter i kvadrat. Med hänsyn till detta och under antagande att en jordarts genomsläpplighetsförmåga är proportionell mot en funktion av humushalten ansattes ekvationen:

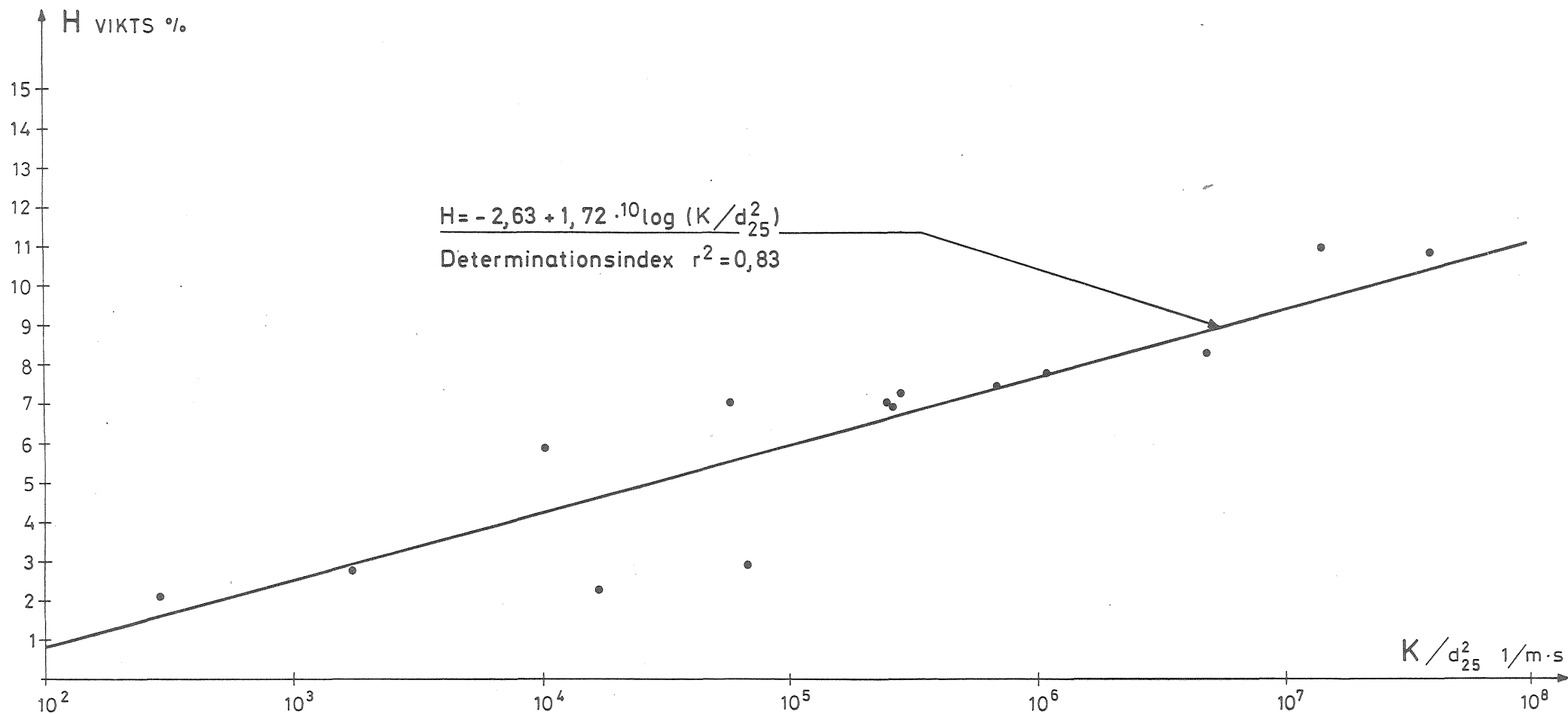
$$I_{\text{slut}} = C \cdot d_{25}^2 \cdot f(H) \quad (6)$$

$I_{\text{slut}}$  (m/s) är infiltrometerförsökets slutvärde,  $C$  är en konstant,  $H$  (viktsprocent) är humushalten och  $d_{25}$  (m) är kornfraktionen som delar jordarten i 25% finare och 75% grövre material.  $H$  och  $d_{25}$  bestämdes från provcylindrar ( $\phi=7$  cm) som omfattade delen från markyta till 10 cm:s djup. Proverna togs inom infiltrometerringens begränsningsyta.

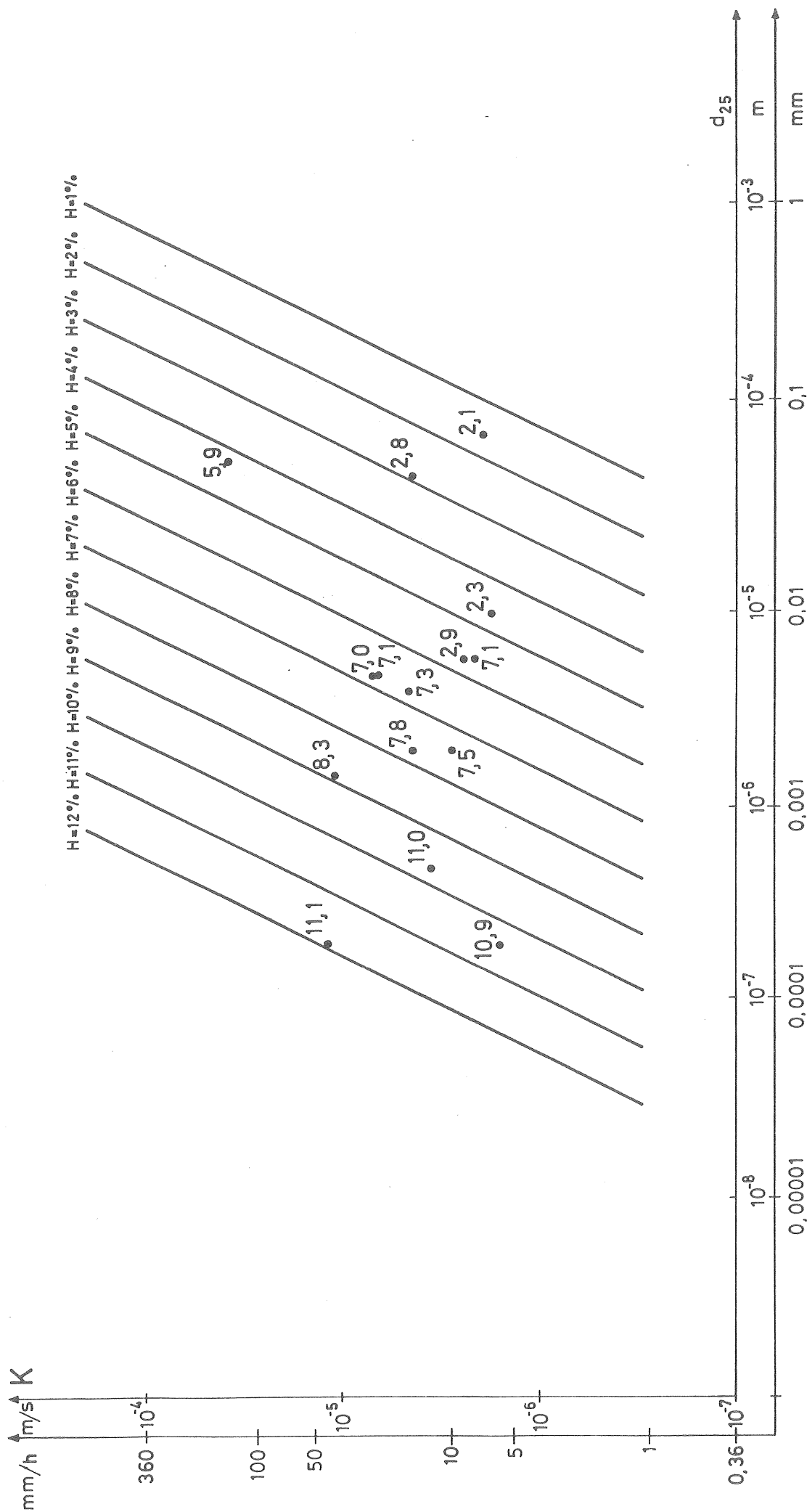
Jordmånen består ofta av mycket finmaterial. Vid våra undersökningar var det omöjligt att välja en effektiv korndiameter  $d_e=d_{10}$ . Därför valdes  $d_{25}$  som en representativ korndiameter. Ojämnkornigheten kunde ej representeras med  $d_{60}/d_{10}$  utan som ett mått på kornfraktionernas fördelning studerades  $d_{60}/d_{25}$ . Ojämnkornighetsparametern  $d_{60}/d_{25}$  varierade mellan 5 och 200. Denna spridning kan ge upphov till vissa fel i utvärderingen.

I figur 55 visas ett lin-log diagram där humushalten plottats mot  $I_{\text{slut}}/d_{25}^2$ . En kurvanpassning med minsta kvadratmetoden gav följande samband mellan  $H$  och  $I_{\text{slut}}/d_{25}^2$ .

$$H = -2,6 + 0,75 \cdot \ln(I_{\text{slut}}/d_{25}^2) \quad (7)$$



Figur 55. Humushalten  $H$  i viktsprocent plottad i semilogaritmiskt diagram som funktion av  $K/d_{25}^2$ . Mätvärden från Ryd, Linköping (760920-761001). Efter Ericsson, 1978c.



Figur 56. Infiltrationskapacitetens slutvärde som funktion av  $d_{25}$ . Humuskhalten är noterade vid respektive mät punkt. Den inlagda kruskalan representerar ekvationen som erhållits vid kurvanpassning med minsta kvadratmetoden. Efter Ericsson, 1978c.

Determinationsindex (kvadraten på korrelationskoefficienten) är 0,83. Eftersom man inte kan bortse från en säsongsmässig variation används här värden endast från en nederbördsfattig period. Om ekvation (7) omformuleras erhålls (se figur 56)

$$I_{\text{slut}} = 33,9 \cdot d_{25}^2 \cdot 10^{0,6 \cdot H} \quad (8)$$

Vid en extremt markfuktig period erhöles en sämre kurvanpassning. Detta beror på att olika jordarter uppför sig hydrauliskt olika vid hög vattenhalt. Jordarter med högt lerinnehåll sväller och minskar därmed sin infiltrationskapacitet avsevärt. Om jordarten emellertid innehåller förhållandevis mycket friktionsmaterial påverkas den ej av "igensvällning" av torrsprickor i samma utsträckning. En sådan jordart har ett likartat slutvärde vare sig "våta" eller "torra" förhållanden råder. Vid ett visst innehåll av finmaterial ändras därför infiltrationsegenskaperna radikalt under markfuktiga perioder och till detta har ej tagits hänsyn i kurvanpassningen (se kap 8.6).

Sammanfattningsvis kan sägas att ett samband erhållits mellan infiltrationskapacitet, humushalt och kornstorlekssammansättningen hos en jordart. En bättre korrelation gentemot och en säkrare prognos av infiltrationskapacitetens slutvärde fås sannolikt om hänsyn även tas till lokal packningsgrad i markytan, ojämnkornighet och ytstruktur.

9. PERKOLATIONSMAGASIN OCH SPRICKVATTENMAGASIN -  
- GEOHYDROLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

I kapitel 8 behandlades infiltrationsprocessen på grönytor i bebyggda områden. Detta kapitel avser att behandla en annan aspekt på det lokala omhändertagandet av dagvatten i urban miljö, nämligen utnyttjandet av perkolations- och sprickvattenmagasin. Beroende på den geologiska miljön sker det lokala omhändertagandet av dagvatten huvudsakligen på två sätt. Endera används lerområdenas torrsprickor för magasinering eller också får dagvattnet perkolera fritt i friktionsmaterial via perkolationsmagasin.

Sammanfattningsvis kan följande sägas om sprickvatten- och perkolationsmagasin: Vid en bedömning av de geohydrologiska förutsättningarna är två faktorer hos jordarten av centralt intresse, magasineringsförmågan och genomsläppligheten. För en kohesionär jordart används torrsprickorna för magasinering och vattenflödet sker i dessa sprickor. I en friktionsjordart magasineras vattnet i den effektiva porositeten och i dessa hålrum sker även vattnets rörelse. Om ett sprickvatten- eller perkolationsmagasin skall dimensioneras krävs att dessa faktorer är kända. Emellertid är mätmetoderna i den omättade zonen förhållandevis svåra att använda för att på ett enkelt praktiskt tillvägagångssätt kunna ytgeneralisera perkolationen och därmed göra en bra dimensionering. Inom projektet har vi därför studerat och jämfört några enkla mätmetoder. Observera att tjälens påverkan har ej studerats i detta projekt.

En modell för hur ett perkolationsmagasin töms och fluktuerar i samband med tillförsel av dagvatten har tagits fram. Modellen bör modifieras med hänsyn till släntlutningar. Vidare bör tömningsfunktionen studeras ytterligare för att erhålla en bättre korrigering till verklig avtappning. Dimensioneringsmetoden bygger på ett lokalt representativt värde för den hydrauliska konduktiviteten. In-situ värden bör ge bästa resultat med hänsyn till den stora spridning som erhålls med olika metoder för bestämning av hydraulisk konduktivitet. Spridningen kan uppgå till mer än  $1 \cdot 10^{-1}$  m/s.

Ett transmissivitetssvärde har bestämts för torrskorpeleran som omger ett sprickvattenmagasin i Bratthammar. Detta har skett med hjälp av mätvärden från filterspetsar i anslutning till magasinet. Avbördningen till omkringliggande torrskorpelera liksom den dränerande effekten av magasinet kunde därvid bestämmas.

### 9.1 Perkolationsmagasin i friktionsjord

Ett perkolationsmagasins förmåga att avleda dagvatten och tillföra det till grundvattnet beror av två processer, magasinets avbördande egenskaper och grundvattennivåns reaktion.

Perkolationsmagasinets funktion, när det tagit omhand dagvattnet, är ett transient förlopp. Flödet till magasinet på grund av avrinningshydrografen kan orsaka variationer i magasinets djup. Flödet ut från magasinet varierar inte bara med förändringarna i magasinets djup utan är också beroende av variationerna hos jordarternas geohydrologiska storheter, dvs magasinets koeficient och hydrauliska konduktivitet. Förhöjningen och avsänkningen av grundvattennivån i den underliggande öppna akviferen är också tidsberoende.

#### 9.1.1 En magasinets modell

I projektet har en mycket starkt förenklad dimensioneringsmetod, med två alternativ, framtagits och undersökts (se Ericsson, 1978b). Avsikten har varit att presentera en enkel modell där utflödet ej är konstant utan beror på magasinets fyllnadsgrad.

Dimensioneringsmetoden bygger på följande antaganden. Den hydrauliska konduktiviteten varierar ej med vattenhalten och är lika i vertikal och horisontell led. Grundvattnets förhöjning antas ej påverka flödet från magasinet. Vatten antas försvinna både från botten och sidorna i magasinet.

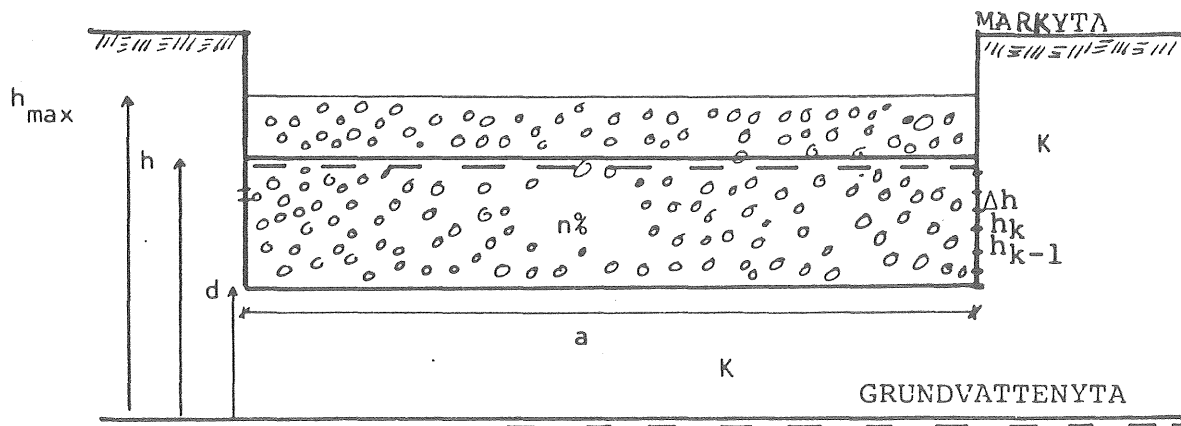
Vid alternativ 1 (metod 1) antas avståndet mellan grundvattennivån och magasinets botten vara känt och jordvolymen

förutsätts där vara helt vattenmättad. Det innebär att utflödet genom magasinsbotten kommer att påverkas av den hydrauliska gradienten som råder. Vattnet som infiltrerar genom väggarna antas perkolera med en hydraulisk gradient lika med 1, dvs enbart gravitationen påverkar. Denna metod bör användas då avståndet till grundvattenytan är litet.

Vid alternativ 2 (metod 1) är avståndet till grundvattenytan ej känt och den hydrauliska gradienten som styr utflödet antas lika med 1 i den omgivande jordarten. I övrigt råder samma förutsättningar som vid alternativ 1. Denna metod bör användas då avståndet till grundvattenytan är så stort att någon påverkan av dämning ej fås i magasinet.

#### 9.1.2 Avbördningsförloppet i ett perkolationsmagasin

När den hydrauliska konduktiviteten bestämts kan infiltrationsförloppet i ett magasin beskrivas med vissa ekvationer. Antag att perkolationsmagasinet innehåller makadam med en effektiv porositet  $n$ .



Figur 57. Förutsättningar vid alternativ 1. Efter Ericsson, 1978b.



Om alternativ 1 gäller (se figur 57) är utflödet vid en viss fyllnadshöjd lika med:

$$q_{ut} = - a \cdot b \cdot n \cdot dh/dt = K/d[(2ad+2bd+ab)h-2d^2(a+b)] \quad (9)$$

$a$  = längden på magasinet

$b$  = bredden på magasinet

$d$  = avståndet till grundvattenytan

$h$  = fyllnadsnivå

Ekvation (10) anger hur stort utflödet är som funktion av tiden efter det att en viss uppfyllnadsgrad ägt rum i magasinet.

$$q_{ut} = K/d(A \cdot h_{max} - B) \cdot e^{-\frac{A \cdot K}{a \cdot b \cdot d \cdot n} \cdot t} \quad (10)$$

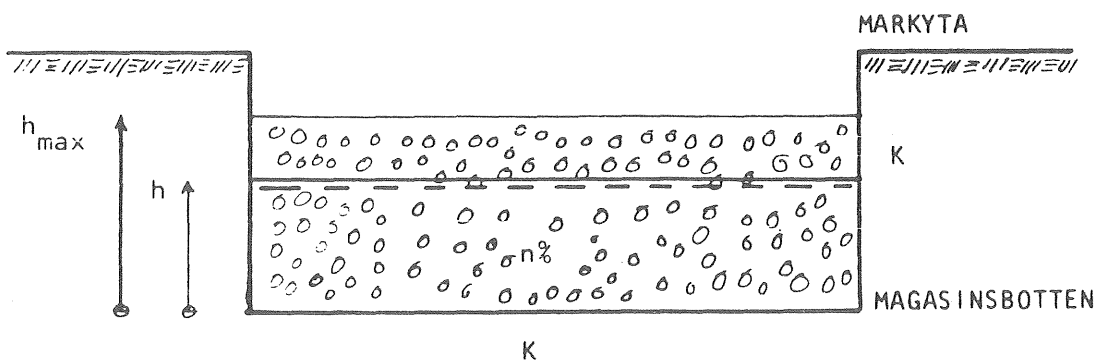
$A = (2ad+2bd+ab)$

$B = 2d^2(a+b)$

Om alternativ 2:s (metod 2) förutsättningar råder (se figur 58) erhålls följande ekvationer:

$$q_{ut} = a \cdot b \cdot n \cdot dh/dt = K \cdot [(2a+2b)h+ab] \quad (11)$$

$$q_{ut} = K[(2a+2b) \cdot h_{max} + ab] \cdot e^{-\frac{2K \cdot (a+b)}{a \cdot b \cdot n} \cdot t} \quad (12)$$



Figur 58. Förutsättningar vid alternativ 2. Efter Ericsson, 1978b.

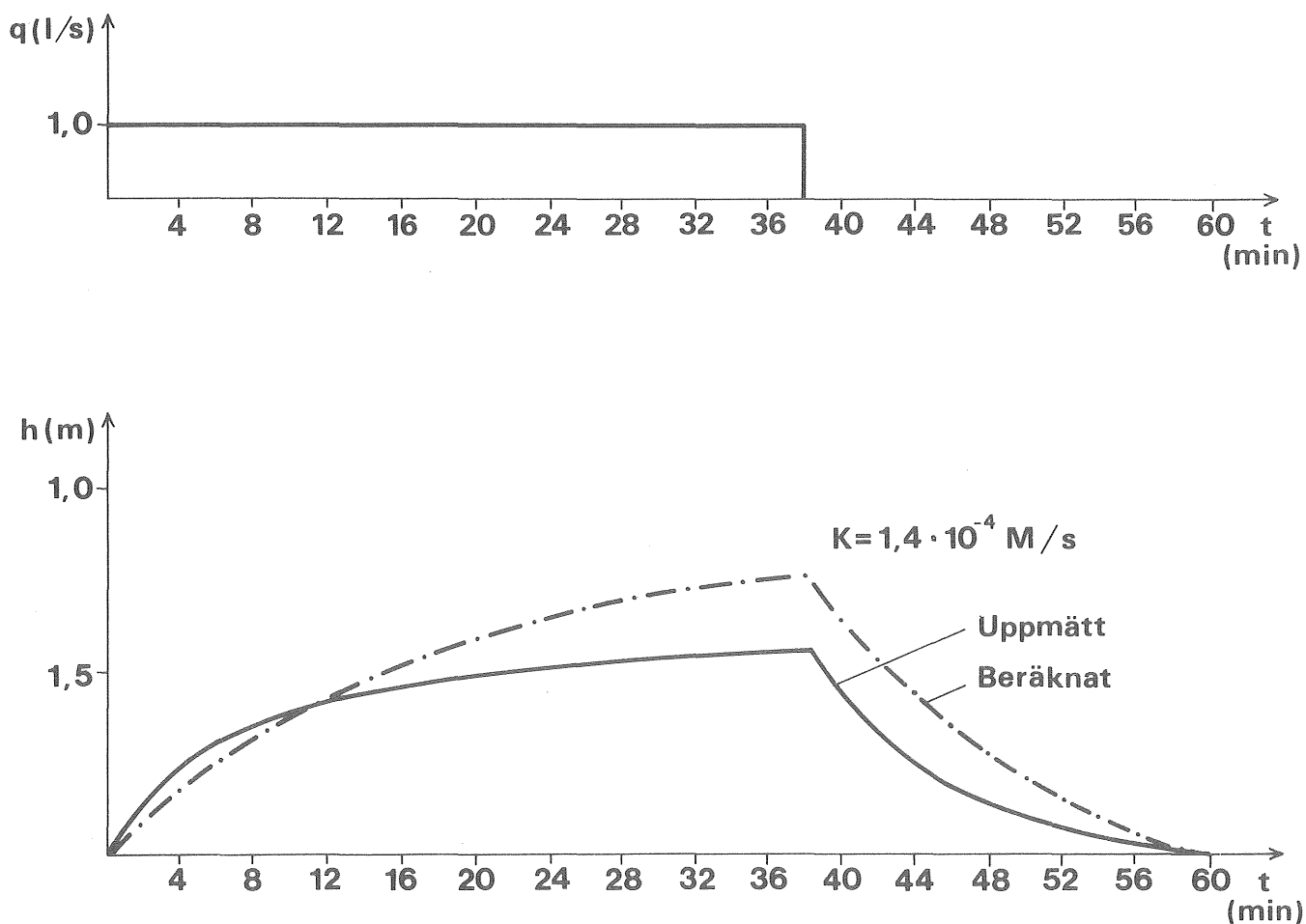
### 9.1 3 Avrinningshydrograf, tömning av magasin

Den regnvolym som ej rinner ut under själva varaktigheten skall magasineras. Den förhöjning  $\Delta h_k$  som då erhålls under ett valt konstant tidssteg  $\Delta t$  fås genom:

$$P \cdot \Delta t = a \cdot b \cdot n \cdot \Delta h_k + q_{ut,k} \cdot \Delta t \quad (13)$$

P är flödesintensiteten under  $\Delta t$  från avrinningshydrogra-fen. Med hjälp av ekvation (13) kan magasinetsdjupets för-ändring vid ett regntillfälle simuleras.

För att studera hur de teoretiska förutsättningarna stämmer i verkligheten genomfördes ett försök i ett instrumen-terat perkolationsmagasin. Magasinets bottenyta var 1x2 m och magasinets djup ca 1 m. Omgivande jordart var grovmoig mellansand och avståndet till grundvattenytan från botten var ca 1 m. Vid utvärderingen användes alternativ 2 (Jonasson,



Figur 59. Magasinsdjupets förändring med tiden då ett blockregn (1 l/s under 38 min) tillförts.

1979). Hur den hydrauliska konduktiviteten kan bestämmas framgår av kapitel 9.3.3.

Av figur 59 framgår hur magasinsdjupet förändrades med tiden då ett blockregn med intensiteten 1 l/s tillfördes under 38 min ( $K = 1,4 \cdot 10^{-4}$  m/s).

Figur 60 visar hur magasinet reagerade då ett "modifierat Sifaldaregn" tillfördes. Den streckade kurvan representerar förhållanden då den hydrauliska konduktiviteten generaliserats till  $K = 2,5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Kurvan visar att den antagna hydrauliska konduktiviteten är för stor i första och sista delen av kurvan medan den i mellersta delen är för liten. I verkligheten ökar således konduktiviteten mot markytan. Om varje delavsnitt anpassas till de i verkligheten uppmätta magasinsdjupen erhålls de konduktivitetensvärden som framgår av det nedersta diagrammet i figuren. För samma nivåer i markprofilen finner vi då att konduktiviteten avtagit med tiden. Med andra ord var omgivande jordart ej tillräckligt genomfuktad vid försöket.

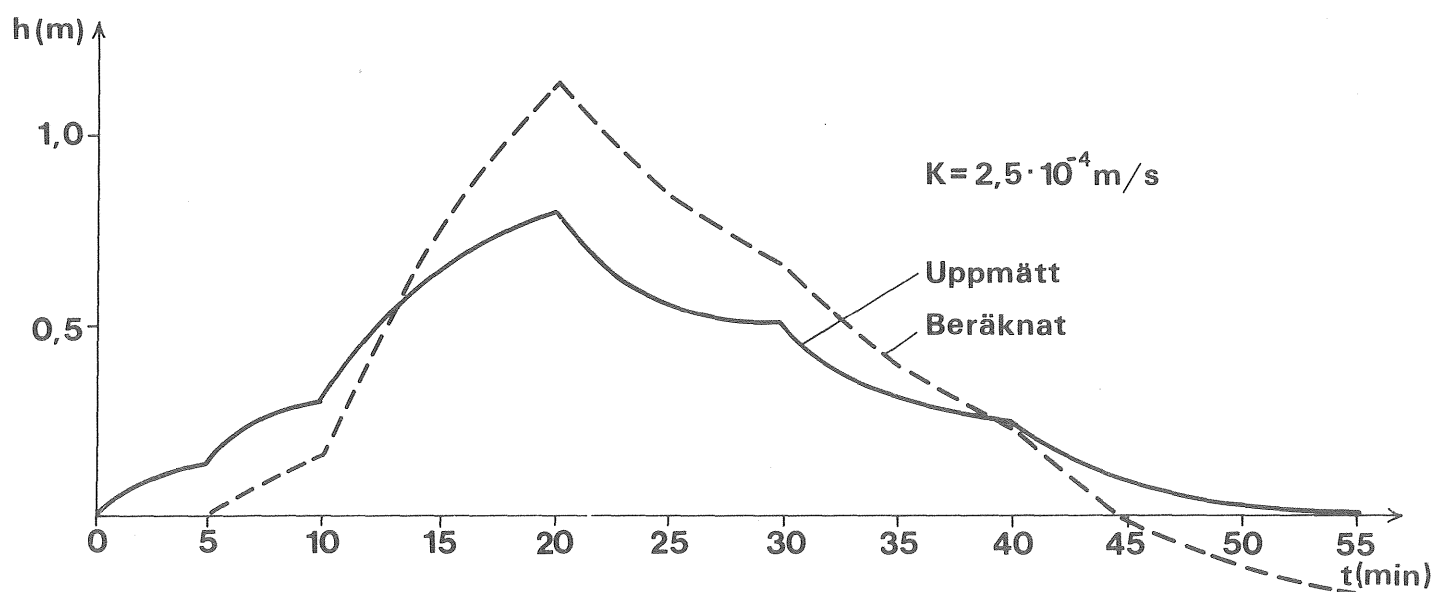
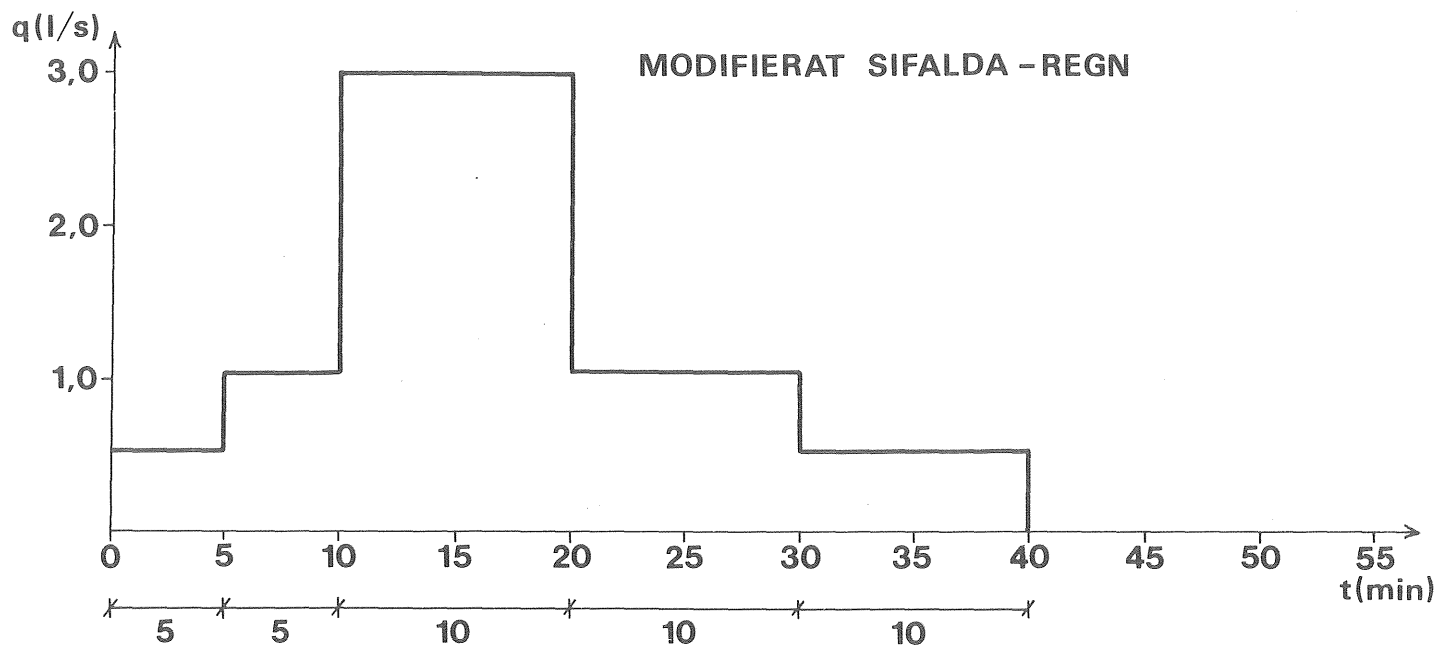
I figur 61 visas hur magasinshöjden avtog med tömnings-tiden. Den maximala fyllnadshöjden var 0,69 m och konduktiviteten generaliserades till  $K = 3,0 \cdot 10^{-4}$  m/s över hela fyllnadshöjden. Med de teoretiska förutsättningar och antaganden som tidigare beskrivits erhålls enligt metod 2 följande ekvation.

$$h = \frac{1}{2a+2b} [((2a+2b)h_{\max} + ab)e^{-\frac{t \cdot 2K(a+b)}{a \cdot b \cdot n}} - ab] \quad (14a)$$

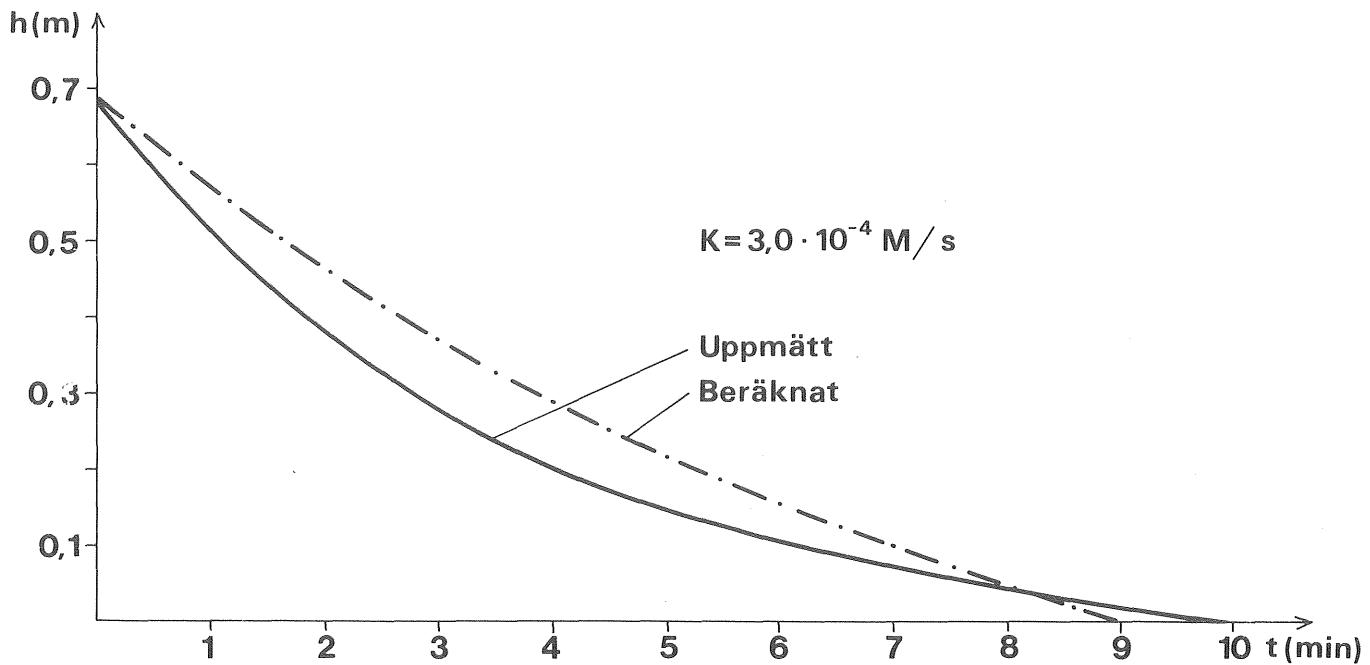
$$h = f(t) \quad (14b)$$

Det har visat sig att ekvation (14) bör korrigeras med en formfaktor för att erhålla bästa passning. En första ansats har visat att denna formfaktor då ger följande förändring av ekvation (14b).

$$h = e^{-0,72 \cdot t/t_{\text{ömn}}} \cdot f(t) \quad (15)$$



Figur 60. Försökmagasinetns reaktion när ett modifierat Sifaldaregn tillförts.



Figur 61. Magasinshöjdens avtagande med tömningstiden.

Den geometriska utformningen av perkolationsmagasinet ovan är starkt förenklad. I framtiden bör de geometriska villkoren i modellen modifieras med hänsyn till slänthlutningar.

Inför en slutgiltig bestämning och dimensionering av magasinets geometriska utformning med de metoder som här beskrivits kan det vara lämpligt att arbeta med en säkerhetsfaktor 1,5 på erforderlig volym.

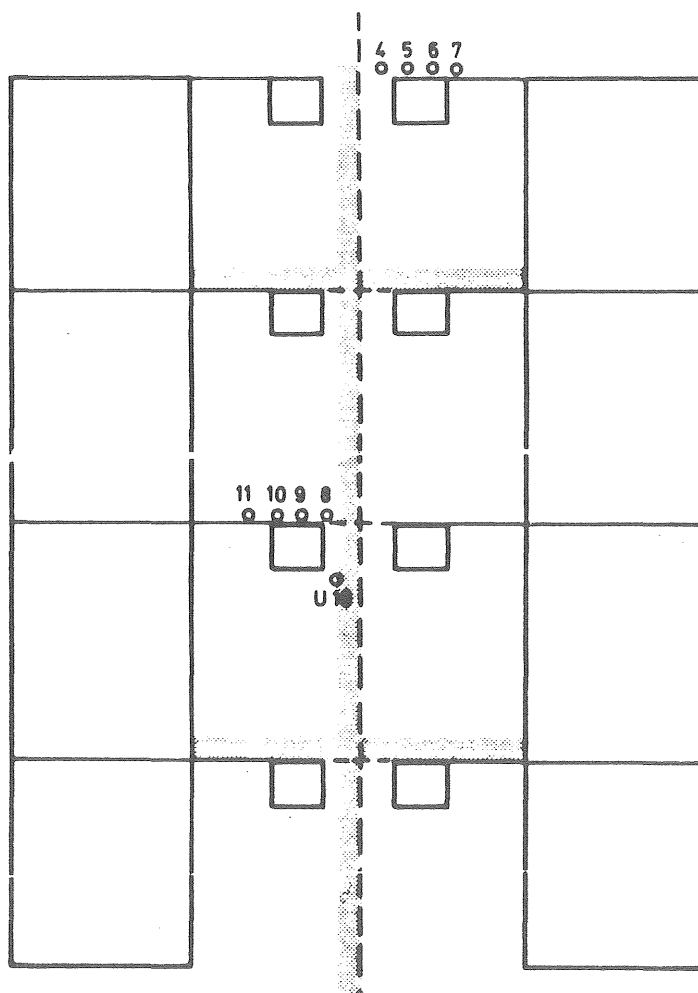
## 9.2 Sprickvattenmagasin i torrskorpelera

Förmågan att ta omhand dagvatten för ett magasin som placeras i torrskorpezonen hos en finsedimentförekomst är beroende av tillgänglig sprickvolym och torrsprickornas hydrauliska konduktivitet. På grund av den säsongsmässiga variationen, dvs igensvällning av sprickorna, kan funktionen hos ett sprickvattenmagasin variera under året. Ibland verkar magasinet dränerande på omgivande jordart medan det vid andra tidpunkter kan vara en vattentransport ut från magasinet. Sprickvattenmagasin förläggs ofta på samma nivå som schaktgravar för andra tekniska försörjningssystem. Den hydrauliska situationen blir därför svår att beskriva inom torrskorpeområden där dagvatten tas om-

hand lokalt. Vatten dräneras, bräddar och transporteras på ett komplext vis från sprickvattenmagasin till ledningsgravar och vice versa.

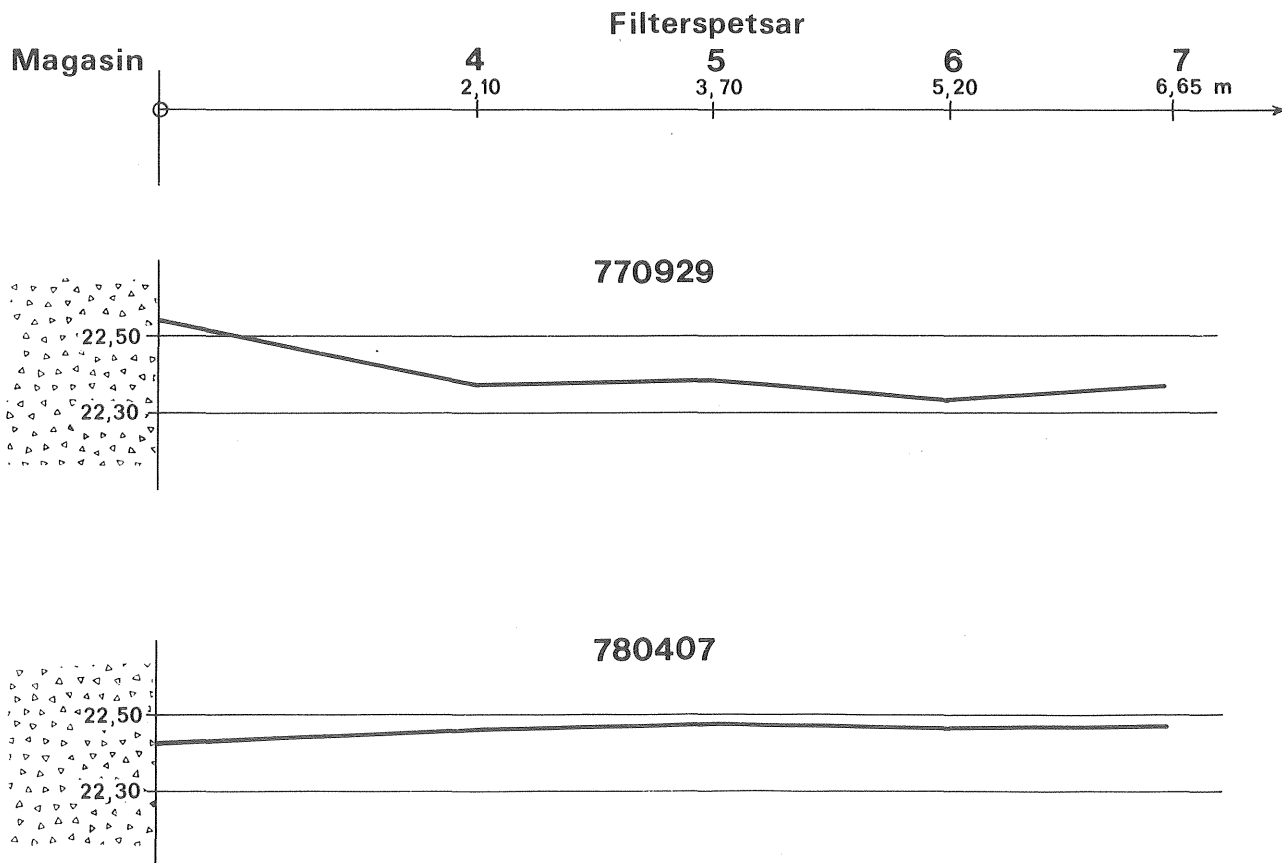
#### 9.2.1 Försöksmagasin i Bratthammar

I Bratthammar, Göteborg, har den hydrauliska funktionen hos ett antal sprickvattenmagasin studerats (se Holmstrand et al., 1980). För att mäta grundvattennivån i torrskorperleran, som omger magasinerna utplacerades 11 st filterspetsar som figur 62 visar. Åtta filterspetsar sattes i anslutning till ett sk gårdsmagasin, beläget centralt i området. Dessa filterspetsar utplacerades i två grupper om vardera 4 spetsar vinkelrätt mot magasinets längdriktning. Samtliga spetsar nedfördes till nivån 0,83 m under markytan (filtermitt).



Figur 62. Filterspetsarnas placering i anslutning till sprickvattenmagasinet. Efter Holmstrand, 1978.

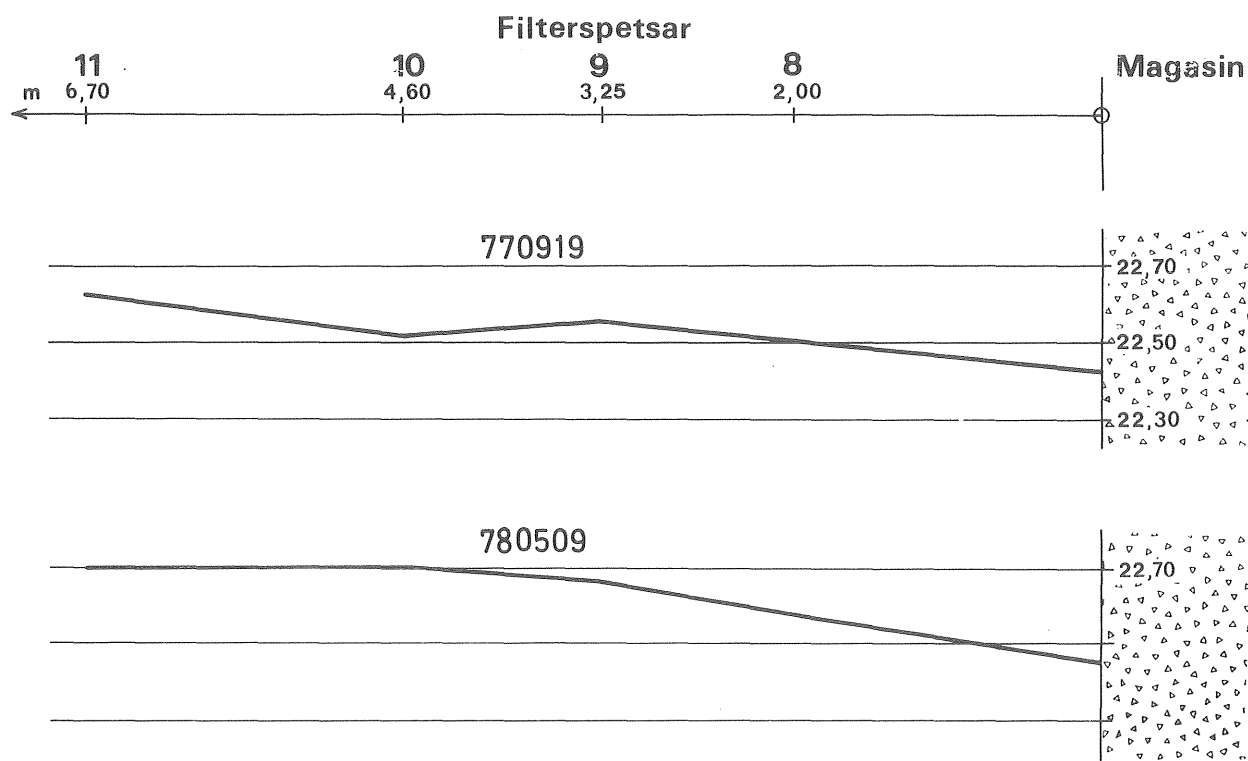
De genomförda mätningarna för sektion G4-7 visar att en tryckgradient finns utbildad från magasinet till den omgivande leran under den tid då vattennivån står lågt i den omgivande jordarten, dvs under sommaren och förhösten. Detta indikerar en vattentransport från magasinet till leran under denna tid. Under den våta perioden visar mätningarna för sektionen G4-7 att en svag tryckgradient finns utbildad antingen från eller mot magasinet eller också föreligger lika tryckhöjd i magasinet och den omgivande jordarten. Detta innebär att en svag dränering av leran sker vid vissa tillfällen under den våta perioden, senhösten t o m snösmältningen (se figur 63).



Figur 63. En vattentransport sker under sommaren och förhösten från magasinet (se 770929). Under den våta årstiden, senhösten t o m snösmältningen sker en svag dränering (780407).

Mätningarna från sektion G8-11 visar att en tryckgradient finns utbildad från leran mot magasinet vid samtliga mät-tillfällen. Detta indikerar att den omgivande leran under hela året dräneras av magasinet (se figur 64).

Vid jämförelse mellan trycknivåerna för filtergrupp G4-7 och G8-11 framgår att den genomsnittliga tryckhöjden ligger ca 0,1-0,2 m lägre för G4-7 än G8-11. Detta orsakas sannolikt av att leran vid filtergrupp G4-7 dräneras via de kabelgravar och nedstigningsbrunnar som ligger i anslutning till gatan norr om filterspetsgruppen.

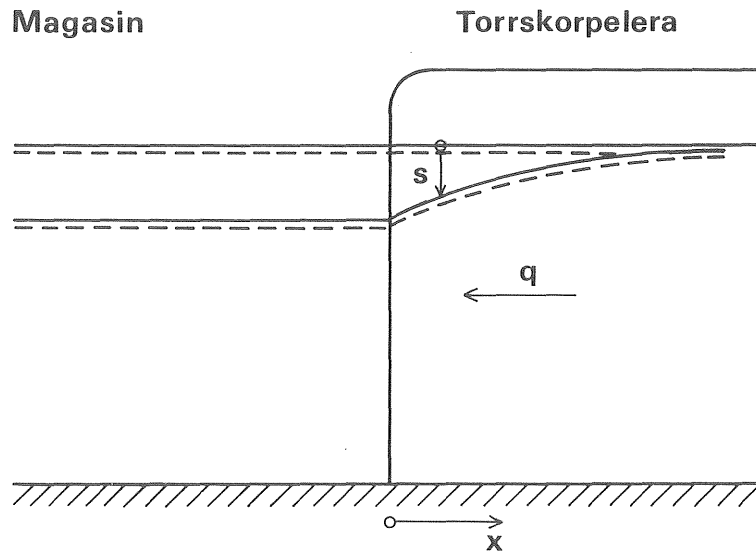


Figur 64. Vid sektion G8-11 dräneras den omgivande torrskorpeleran hela året av sprickvattenmagasinet.



### 9.2.2 Icke-stationärt flöde till och från ett sprickvattenmagasin

Under antagande att den hydrauliska konduktiviteten kan generaliseras över hela torrskorpans mäktighet erhålles följande. Magasinet förutsättes nedfört till torrskorpans underkant. Se figur 65.



Figur 65. Modell för utvärdering av genomsläppligheten i torrskorpan.

Vid tiden  $t = 0$  påbörjas störningen av magasinet vilket resulterar i en förändring av vattennivån. Om man förutsätter att transmissiviteten  $T = K \cdot H$  och magasinskoefficienten  $S$  är konstant ger flödesproblemet följande ekvationer:

$$\text{Darcy:} \quad q = -T \cdot \frac{\delta s}{\delta x} \quad (16)$$

$$\text{Kontinuitet:} \quad \frac{\delta q}{\delta x} = -S \frac{\delta s}{\delta t} \quad (17)$$

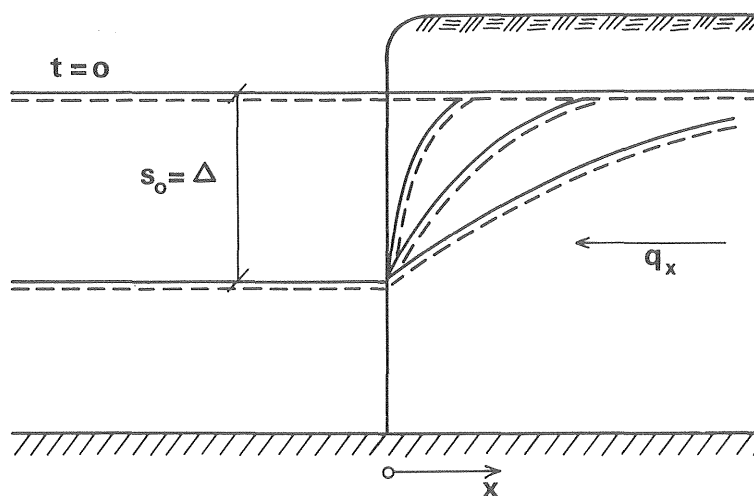
Ekvationerna (16) och (17) ger

$$\frac{\delta^2 s}{\delta x^2} = \frac{S}{T} \frac{\delta s}{\delta t} \quad (18)$$

Edelman (Huisman, 1972) anger fyra fall för att lösa ekvationen. En momentan förändring med  $\Delta$  av vattennivån i magasinet (fall 1, se figur 66) ger:

$$x = 0, \quad s_0 = \Delta \quad q_0 = \frac{s_0}{\sqrt{11}} \cdot \sqrt{S \cdot T} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}$$

$$x = x, \quad s_x = s_0 \cdot E_1 \quad q_x = q_0 \cdot E_2$$



Figur 66. Typfall 1 enligt Edelman, för att lösa ekvation 18.  
Efter Huisman, 1972.

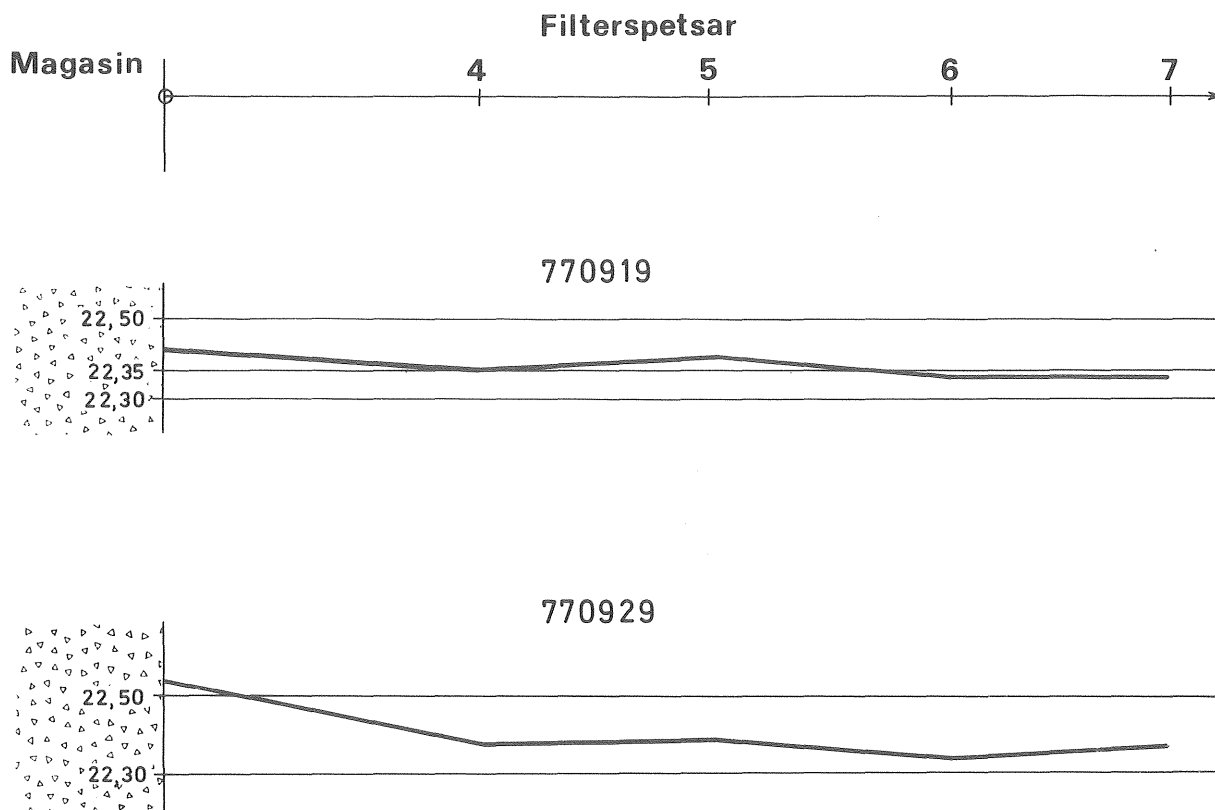
I ekvationerna är  $E_1$  och  $E_2$  funktioner av parametern,

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{S/T} \cdot \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (19)$$

Dessa funktioner finns tabellerade.

### 9.2.3 Exempel på icke-stationär tömning av ett sprickvattenmagasin

Under tiden 770916 t o m 770928 föll ingen nederbörd i Bratthammarområdet. Grundvattennivån i filterspetsarna G4 - G7 kom därvid att inta ett plant jämviktssläge på plushöjden ca +22,35 m. Se datum 770919 i figur 67. Från och med 770928 och fram t o m 771011 föll ca 71 mm

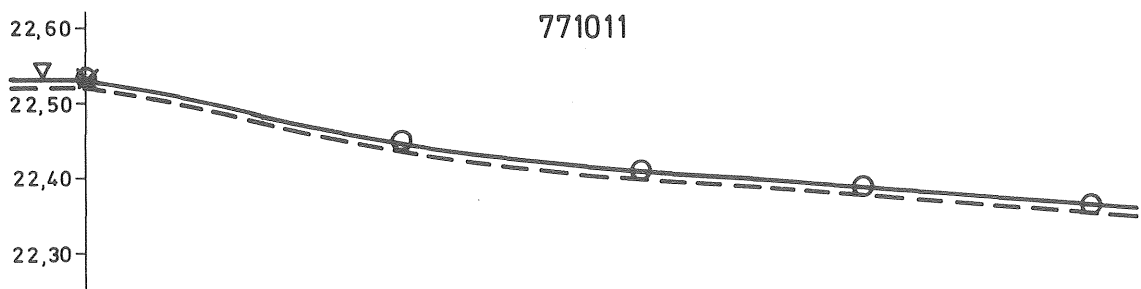
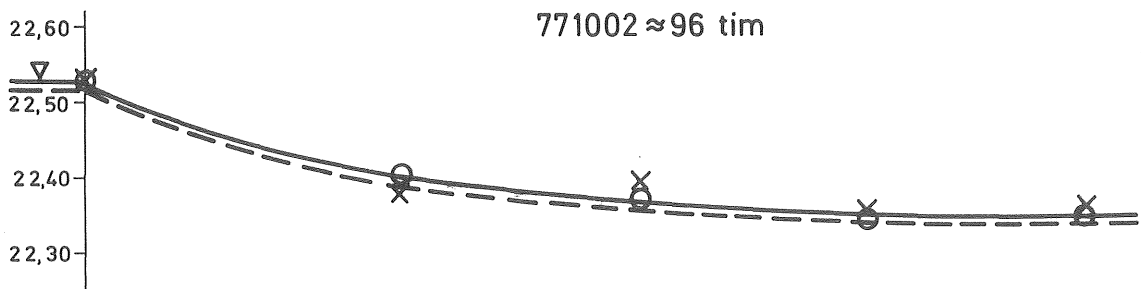
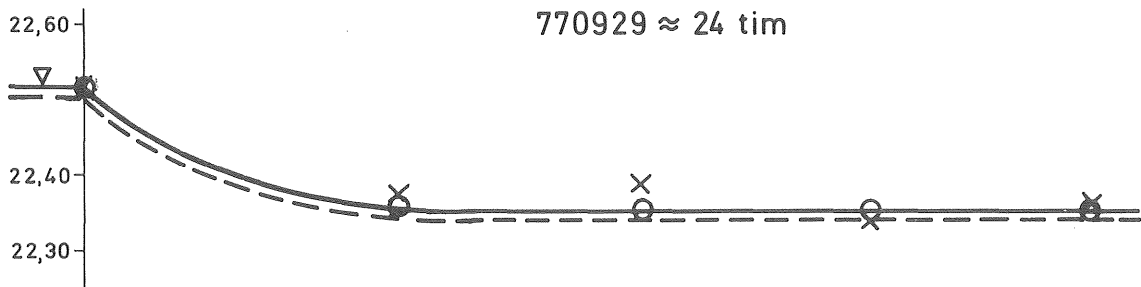
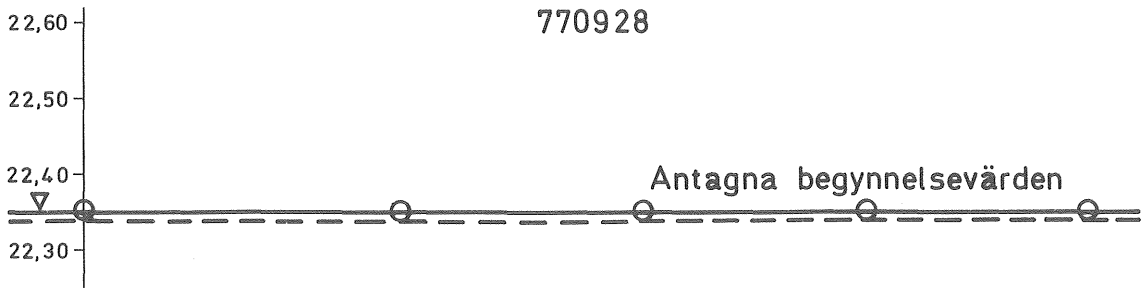
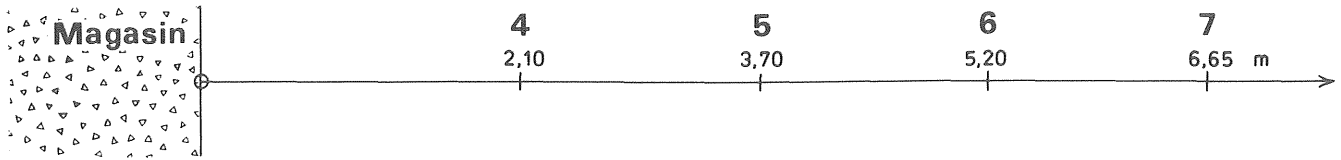


Figur 67. Filterspetsarna G4-G7 och magasinets nivå intog ett jämviktsläge (770919) innan magasinet "momentant" steg från och med 770928.

nederbörd och magasinets nivå kom att tämligen momentant inställa sig på nivån + 22,53 m.

Med hjälp av observerade data från 770929 och 771002 har ett transmissivitetsvärde för torrskorpan räknats fram med fall 1 i kap 9.2.2. Magasinskoefficienten bedömdes med hjälp av de radiometriska mätningarna till 5%. De bedömda flödessituationerna med transmissiviteten  $T = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  framgår i figur 68. En prognosticerad flödessituation vid nederbördsperiodens slut, 771011, framgår även av figur 68.

Med de givna förutsättningarna erhålles att magasinet i detta avsnitt genom den omgivande torrskorpan avbördar 0,33 l/tim, längdmeter (efter 1 dygn) och 0,16 l/tim, längdmeter (efter 4 dygn).



x Uppmätta värden  
 O Beräknade värden

Figur 68. Flödesmodell enligt Edelman fall 1 ger den heldragna kurvan. Överensstämmelsen med uppmätta värden är mycket god för  $T = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . En prognosticerad flödessituation framgår även (771011).

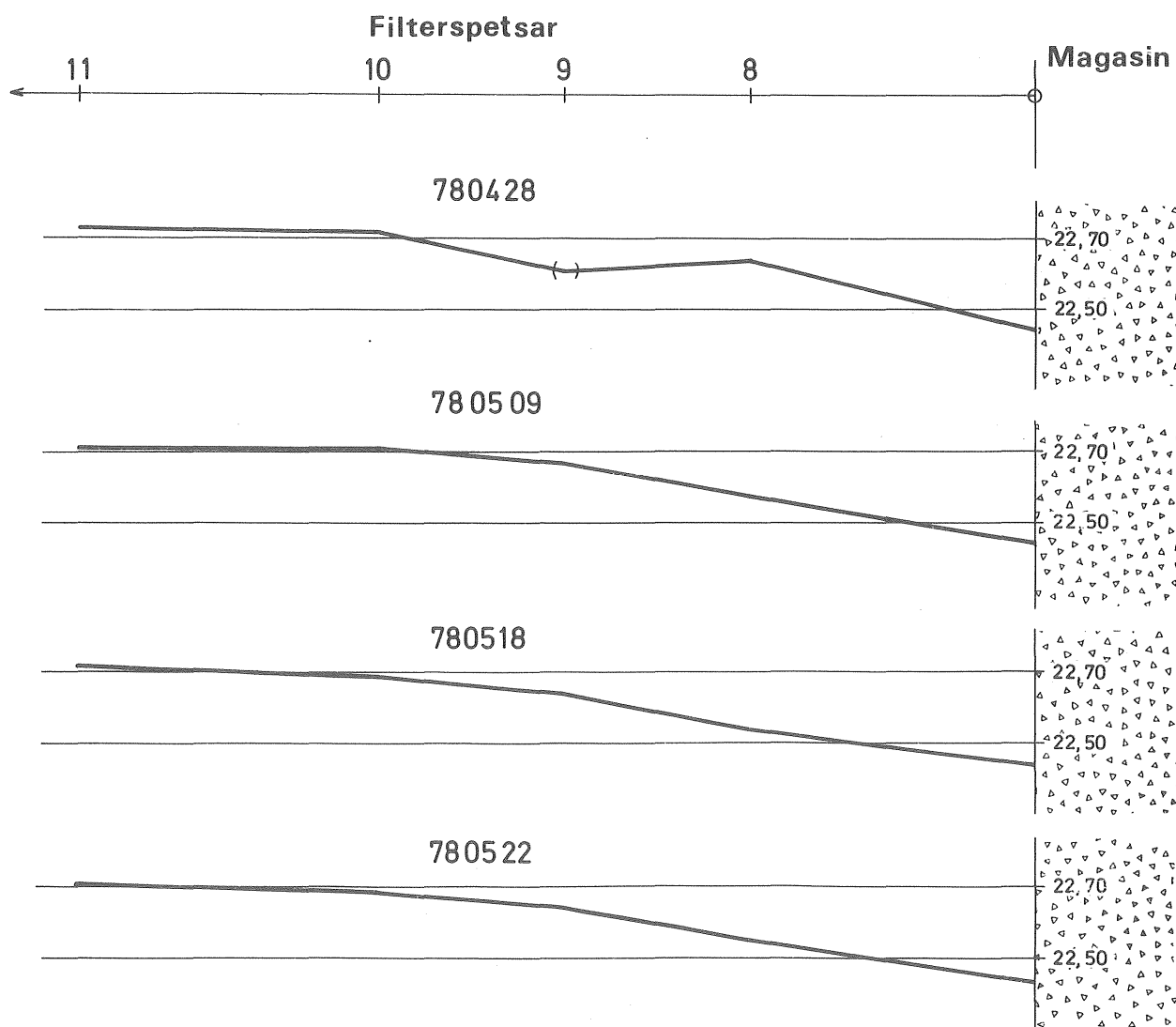
#### 9.2.4 Stationärt flöde vid ett sprickvattensystem

I samband med mätningarna med filterspetsarna kring sprickvattenmagasinet i Bratthammar erhöles en stationär flödes-situation under tiden 780428 - 780522 för G8 - G11 (se figur 69). Under denna tid var nederbörden lika med noll och magasinsnivån konstant lika med + 22,44. Magasinet fungerade med andra ord som dränerande på omgivningen. Om man antar att transmissiviteten är lika som under slutet av september 1977, dvs  $3,5 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ger Darcy's lag följande dräneringsmängd per längdmeter av magasinet:

$$q = 2 \cdot I \cdot T \quad (20)$$

$$q = 2 \cdot \frac{0,27}{6,7} \cdot 3,5 \cdot 10^{-7} = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

Detta motsvarar 0,10 l/tim, längdmeter av magasinet.



Figur 69. En stationär flödessituation erhöles under tiden 780428-780522 för filterspetsarna G8-G11.

### 9.3 Förundersökning vid perkolationsmagasin, sprickvattenmagasin

När ett perkolationsmagasin, sprickvattenmagasin skall projekteras är följande faktorer av betydelse: grundvattenförhållanden, magasin förmåga respektive genomsläpplighet i den omättade zonen. I detta kapitel redogörs för de erfarenheter som erhållits av några enkla undersöknings- och mätmetoder.

#### 9.3.1 Grundvattenförhållanden

För att göra en bedömning av grundvattenytans förhöjning kan en metod som utvecklats av Hantush (Walton, 1970) användas. De indata som bl a krävs är transmissiviteten och magasin koefficienten i den vattenmättade zonen. Dessa värden erhålles genom sk enhålsförsök. En momentan störning av vattennivån i t ex ett 2" obs-rör genomförs. Därefter mäts återhämtningen mot tiden och de geohydrologiska parametrarna T och S kan utvärderas (Earlougher, 1977 samt Gustafson 1980).

De naturliga fluktuationerna i grundvattenmagasinet och torrskorpans vattenförande magasin mäts förslagsvis med 2" obs-rör respektive filterspetsar.

#### 9.3.2 Magasinsförmåga i omättad zon

En betydelsefull faktor i den omättade zonen är magasin förmågan eller tillgängligt magasin för dagvattnet som perkolerar. En längre tidsserie med radiometrisk djupsond ger markvattenmagasinet naturliga fluktuation och därmed ett mått på hur mycket vatten som minst kan magasineras.

Tensiometern ger porvattenundertrycket vid en viss nivå och tidpunkt. För en utvärdering av vattenhalten krävs emellertid kännedom om jordartens pF-kurva. En längre tidsserie med tensiometer ger således också ett mått på verksamt markvattenmagasin.

De gipsblock som beskrivs i kapitel 4.3 har provats med motsägelsefullt resultat, varför metoden ej rekommenderas.

Denna indirekta metod är besvärlig att kalibrera och ger tolkningssvårigheter.

Cylinderprover som tas in-situ kan betraktas som förhållandevis ostörda prover. Den gravimetriska metoden ger den totala porvolymen och om proverna vattenmätas och dräneras erhålles fältkapaciteten. Vattenmättnad minus fältkapacitet ger den effektiva porositeten.

### 9.3.3 Genomsläpplighet

En av projektets målsättningar har varit att studera och jämföra några enkla mätmetoder för att bestämma en dimensionerande hydraulisk konduktivitet för perkolationsmagasin och sprickvattenmagasin. Nedan presenteras och kommenteras ett antal metoder.

#### Ringinfiltrometer:

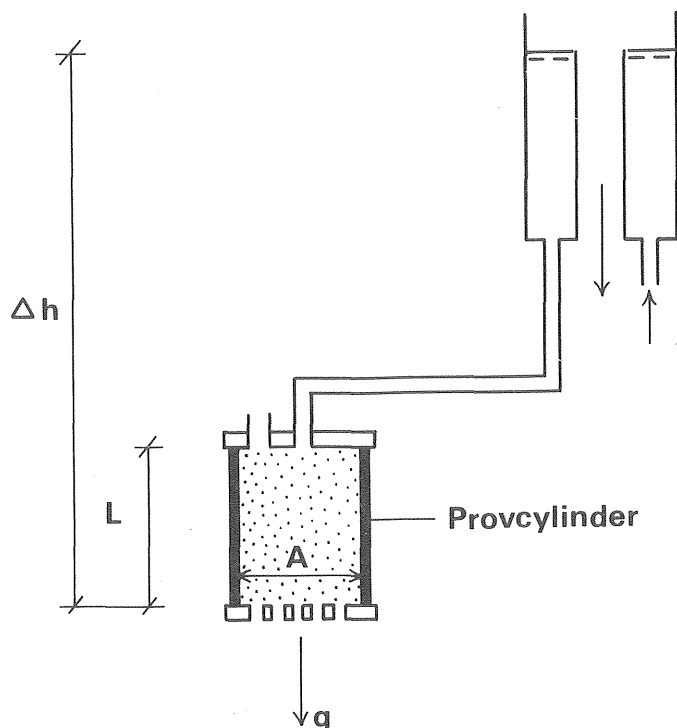
Metoden, med den ringstorlek som använts ( $\varnothing = 0,39$  m), beskrivs utförligt i kapitel 8. Som dimensionerande K-värde väljs slutvärdet på infiltrationskurvan.

#### Rörpermeameter

Detta är en enkel laboriemetod för bestämning av den hydrauliska konduktiviteten på ostörda prover (provcyllindrar  $\varnothing = 0,07$  m och längd = 0,10 m). Cylindern monteras i en hållare mellan plattor, se figur 70. Provet mätas och utsätts för ett konstant vattentryck varvid flödet genom provet mäts.

$$K = \frac{q}{A} \frac{L}{\Delta h} \quad (21)$$

Metoden lämpar sig bäst för friktionsmaterial med ej för stor andel finmaterial. Då vinns risk för urspolning av de finkornigare fraktionerna med ett för högt K-värde till följd. Innehåller jordarten en hög andel sten kan provtagningen störas med inhomogeniteter till följd.



Figur 70. Rörpermeameter, principskiss.

#### "Inversed Auger-Hole" metod

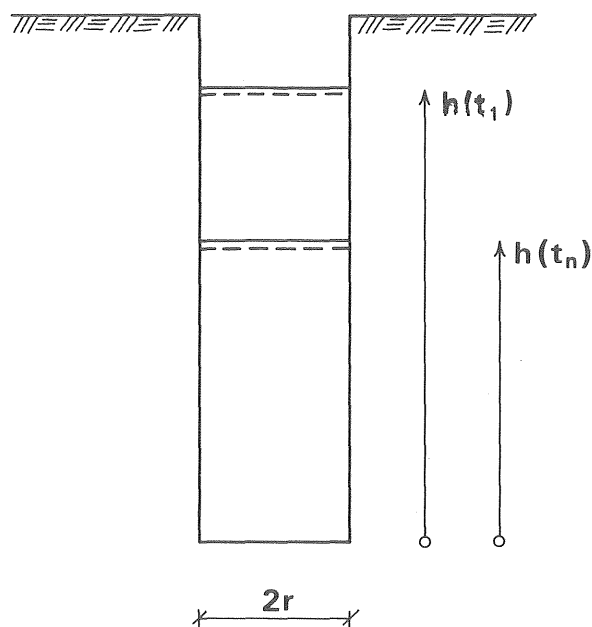
Denna metod används i agrikulturella sammanhang för att bestämma K-värdet över grundvattennivån. Metoden innebär att ett hål borraras (spadborraras) till ett visst djup varefter det fylls med vatten och avsänkningen mäts mot tiden. Kessler & Oosterbaan (1974), se figur 71.

$$K = 1,15 \cdot r \cdot \frac{{}^{10}\log(h(t_1)+r/2) - {}^{10}\log(h(t_n)+r/2)}{t_n - t_1} \quad (22)$$

Genom att plotta  $(h(t_i)+r/2)$  mot  $t_i$  på ett semilogaritmiskt diagram papper erhålles en rät linje.

Försöket skall genomföras efter en längre tids uppvätning av jordarten som angränsar till borrhålet. Vattenhalten skall därmed komma att ligga över fältkapacitet och nära vattenmättnad och ge ett väl definierat värde på den hydrauliska konduktiviteten, K. K-värdet i horisontell och vertikal led förutsätts i metoden vara lika och generaliseras över jordprofilen.





Figur 71. "Inversed Auger Hole" metod. Principskiss.

Metoden har en praktisk begränsning i jordartens förutsättning för spadborrning. Det kan ibland vara nödvändigt att stabilisera borrhållsväggen med en stödkorg vilken utvändigt försetts med fiberduk.

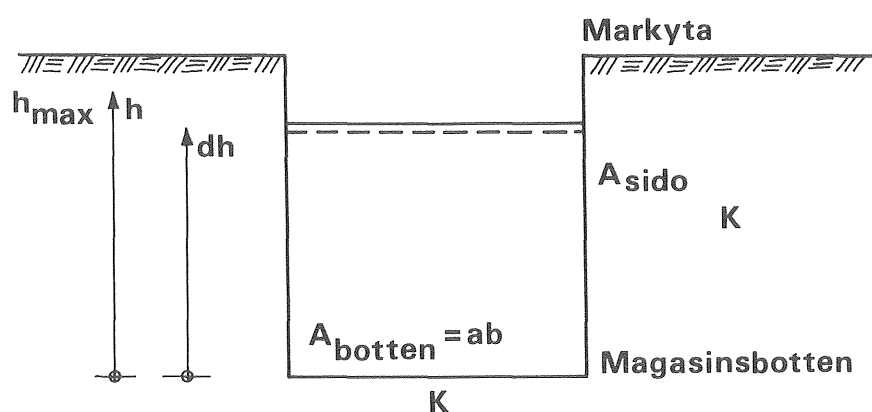
#### Provgropsförsök

Nedanstående metod bygger på den ovan beskrivna "Inversed Auger Hole" metoden men med andra geometriska förutsättningar, se figur 72. Jordartens effektiva porositet antas under försökets utförande vara ett oändligt magasin och vid beräkningarna påverkar en förhöjning av grundvattenytan ej den hydrauliska gradienten som styr utflödet från gropen.  $K$ -värdet i horisontell respektive vertikal led är lika. Vatten tillförs gropen momentant och därefter mäts avsänkningen mot tiden. Man antar vidare att jordarten tidigare vattenmättats så att enbart gravitationen styr utflödet, dvs gradienten är lika med 1 för vatten som försvinner både genom gropens väggar och botten.

$$K = \frac{1,15 \cdot a \cdot b}{(a+b)} \left[ \frac{{}^{10}\log((2a+2b)h_{\max}+ab) - {}^{10}\log((2a+2b)h+ab)}{t} \right] \quad (23)$$

I (Ericsson, 1978b) presenteras även en provgropsmetod (metod 1) där viss hänsyn tas till grundvattenytans läge. Principerna för provgropsmetoderna ligger till grund för de dimensionsförslag som presenteras i kapitel 9.1.2.

Den hydrauliska konduktiviteten kan även bestämmas med empiriska formler som utgår från kornstorleksfördelningen, kornform etc. Flera av dessa metoder tar hänsyn till konduktivitetens viskositetsberoende. De vanligaste empiriska sambanden är Hazens, Fair & Hatch och Ernst metod.



Figur 72. Provgropsmetod för  $K$ -värdesbestämning. Längd =  $a$ , bredd =  $b$ .

### Hazens metod

Metoden är ursprungligen avsedd för att bestämma permeabiliteten för brunnars filtermaterial. Materialet skall vara väl sorterat och jämnkornigt, dvs  $d_{60}/d_{10} < 5$ .

$$K = 0,01157 \cdot d_{10}^2 \cdot (0,7 + 0,03t) \text{ m/s} \quad (24)$$

$d_{10}$  - kornstorlek i mm för 10% finare och 90% grövre material

$d_{60}$  - kornstorlek i mm för 60% finare och 40% grövre material

$t$  - vattentemperatur i  $^{\circ}\text{C}$

Fair & Hatch metod

Denna metod beaktar sorteringsgraden noggrannare än Hazens formel.

$$K = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{1}{A} \cdot \left[ \frac{(1-n)^2}{n^3} \cdot \left( \frac{B}{100} \sum \frac{F}{D_m} \right)^2 \right]^{-1} \text{ m/s} \quad (25)$$

- A - Packningsfaktor, normalt lika med 5
- B - Kornformfaktor med värde 6 för runda korn och omkring 7,7 för kantiga
- F - Viktfraktionen i procent mellan två näraliggande siktar
- $D_m$  - Geometrisk mediet mellan de näraliggande siktar, i meter
- n - Totala porositeten.

Den största osäkerhetsfaktorn med denna formel är att finna en rimlig uppskattning av den totala porositeten. (Se vidare Gustafson, 1980.)

Ernst metod

Ytterligare en metod som tar hänsyn till sorteringsgraden är Ernst metod (Kessler & Oosterbaan, 1974). I metoden relateras porstorleken till specifika ytan hos jordpartiklarna. Ernst formel är enbart tillämplig på sandiga jordarter. Metoden är osäker om mer än 4% av jordmaterialet är mindre än 0,016 mm.

$$K = 0,625 \cdot U^{-2} \cdot C_{so} \cdot C_{cl} \cdot C_{gr} \text{ m/s} \quad (26)$$

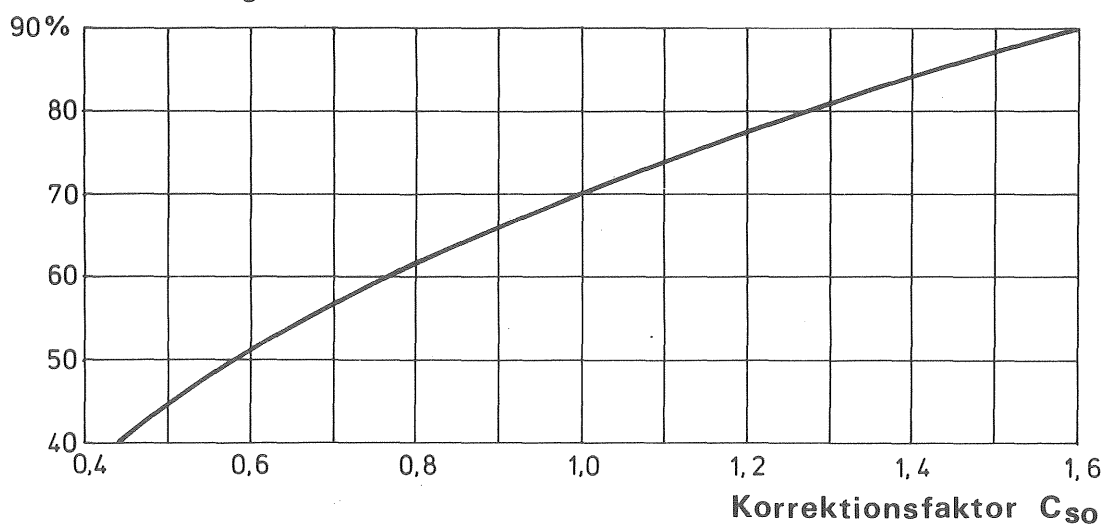
- U - Specifik yta för den dominerande sandfraktionen (se tabell 1)  $\bar{d}$  i cm ger U-värdet
- $C_{so}$  - Korrektionsfaktor för sandens sorteringsgrad. Den totala procentandelen av de tre mest representerade sandfraktionerna enligt tabell ger  $C_{so}$ . Se figur 73.
- $C_{cl}$  - Korrektionsfaktor för partiklar  $< 16 \cdot 10^{-3}$  mm, se figur 74
- $C_{gr}$  - Korrektionsfaktor för partiklar  $> 2$  mm, se figur 75

Tabell 1. Sandfraktionerna, gränserna för deras partikelstorlekar och respektive specifika yta  $U$  i  $1/cm$ .

Efter Kessler & Oosterbaan, 1974.

Sandfraktion, benämning	Fraktionsgränser i mm		$U = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)$ d i cm
	$d_1$	$d_2$	
siltig finsand	0,016	0,063	390
finsand	0,063	0,083	140
finsand	0,083	0,125	100
finsand	0,125	0,200	65
mellansand	0,200	0,333	40
mellansand	0,333	0,500	25
mellansandig grovsand	0,500	1,000	15
grovsand	1,000	2,000	7,5

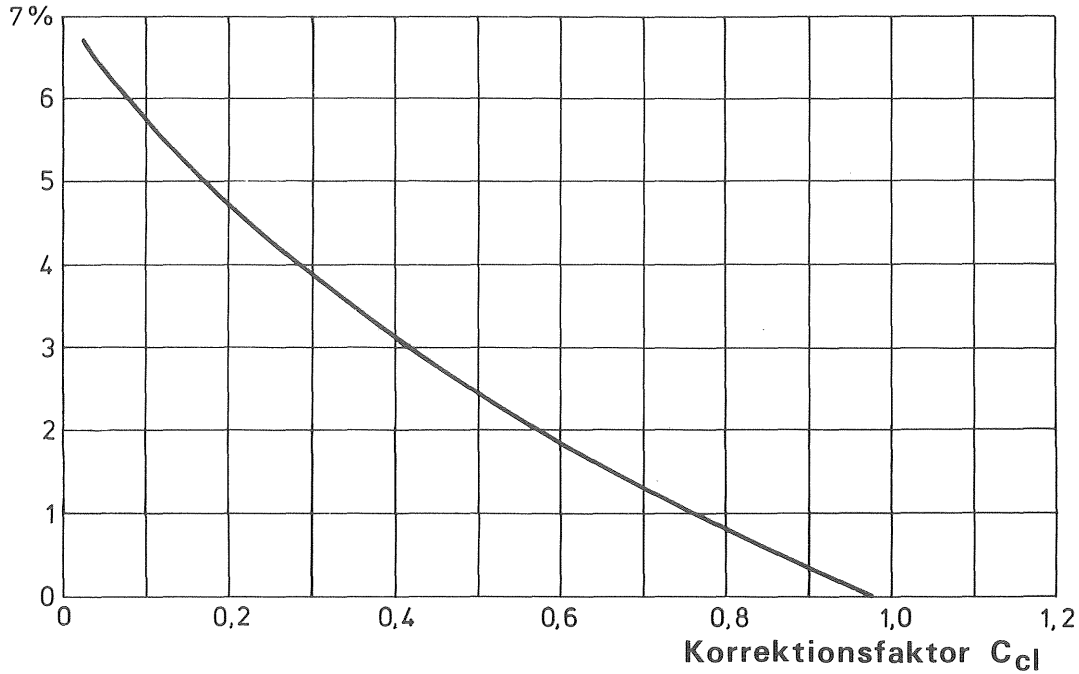
Andel som utgörs av de tre huvudfraktionerna



Figur 73. Korrektionsfaktor för sandens sorteringsgrad.

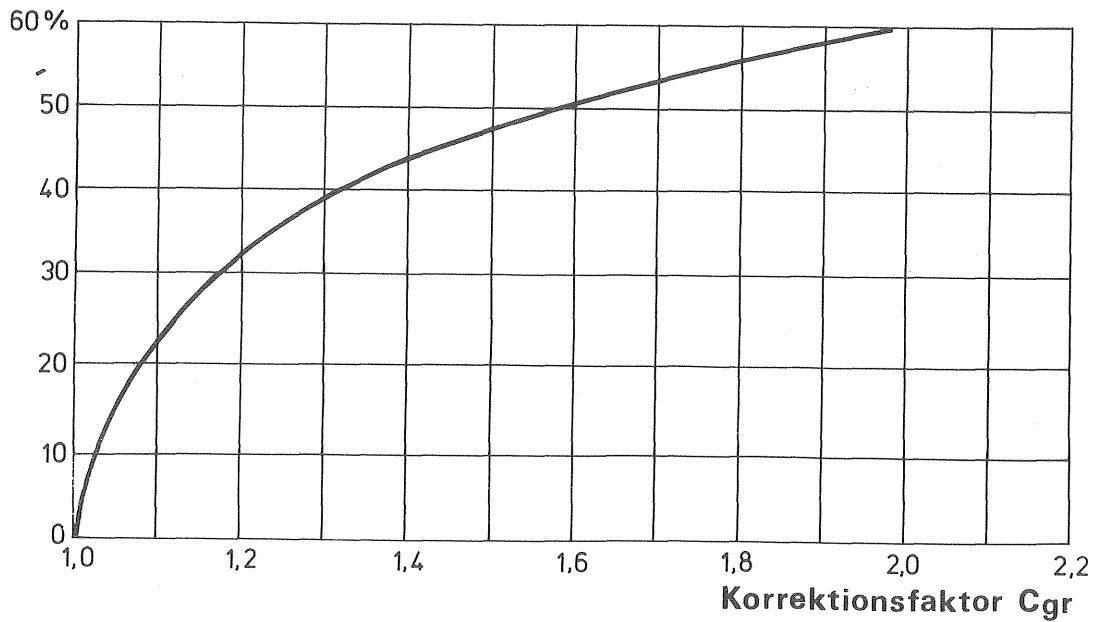
Efter Kessler & Oosterbaan, 1974.

### Fraktioner < 0,016 mm



Figur 74. Korrektionsfaktor för partiklar  $< 16 \cdot 10^{-3}$  mm.  
Efter Kessler & Oosterbaan, 1974.

### Fraktioner > 2 mm



Figur 75. Korrektionsfaktor för partiklar  $> 2$  mm.  
Efter Kessler & Oosterbaan, 1974.

I samband med de försök som genomfördes i det instrumenterade perkolationsmagasinet (se kapitel 9.1.3) jämfördes ett antal metoder för att bestämma den hydrauliska konduktiviteten. Jämförelsen framgår av tabell 2.

Tabell 2. En jämförelse mellan ett antal metoder för att bestämma den hydrauliska konduktiviteten.

Metod	K-värde, m/s	Anmärkning
Ringinfiltrometer	$1,5 \cdot 10^{-4}$	Korrigerat slutvärde med 0,3
Augerhole	$2,5 \cdot 10^{-4}$	
Provgrop	$4,5 \cdot 10^{-4} - 4,9 \cdot 10^{-4}$	
Hazen	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$t = 10^{\circ}\text{C}$
Fair & Hatch	$1,1 \cdot 10^{-3}$	total porositet = 0,41
Ernst	$3,2 \cdot 10^{-3}$	

I tabell 2 noteras att samtliga empiriska metoder givit högre värden än in-situ mätningarna. Detta är sannolikt beroende av att packningsgraden för de empiriska metoderna ej stämmer. Vidare kan konstateras att provgrops- och augerhole-metoderna ger ett högre värde än ringinfiltrometern. Mätningarna är genomförda i en deltabildning med högre konduktivitet i horisontell led än i vertikal led. Denna skillnad avspeglas sannolikt i ringinfiltrometerns avvikelser från de andra in-situ metoderna.

En begränsad jämförande studie (20 undersökningspunkter) i olika geologiska miljöer, dvs torrskorpelera, morän och isälvsmaterial, genomfördes även i projektet (Olsson & Säaf, 1978 samt Kaufmann & Röine, 1978). De metoder som jämfördes var ringinfiltrometer, rörpermeameter, augerhole metoden och Hazens formel. Materialet är för litet för en statistisk behandling men generellt erhöles följande resultat.

### Infiltrrometer - Auger-hole

Infiltrrometern gav lägre värden än auger-hole metoden i isälvsmaterial. Detta beror som tidigare noterats sannolikt på grund av skillnaden mellan horisontell och vertikal hydraulisk konduktivitet.

För moränen och torrskorpeleran gav infiltrrometern högre värden än auger-hole metoden. Orsaken är att vid neddrivning av infiltrrometerringen i stenig, blockig morän skapas hålrum vilka förbättrar infiltrationsmöjligheterna. Vid både moränens och torrskorpelerans auger-hole försök konstaterades igenslamning av försökshålens botten vilket verkade reducerande på K-värdet.

### Infiltrrometer - Rörpermeameter

Överensstämmelsen var i allmänhet god beroende på att de båda metodernas felkällor är likartade, dvs vattentransport sker längs cylinderkanterna och störning erhålles vid neddrivning. Rörpermeameter har sin naturliga begränsning i steniga material. För övrigt förhöll sig rörpermeameterens värden till de övriga metodernas liksom infiltrrometerens värden.

### Hazens formel - Övriga metoder

I de fall där Hazens formel med godtagbara förutsättningar kunde användas (isälvsmaterial) gav den genomgående för höga värden. Detta beror sannolikt till största del på att packningsgraden i verkligheten är större än vad Hazens formel tar hänsyn till.

Sammanfattningsvis kan sägas att spridningen i de olika mätmetodernas resultat för den hydrauliska konduktiviteten kan uppgå till mer än 1 tiopotens för samma geologiskt representativa prov eller provplats. Detta ger stora avvikelser vid dimensionering beroende på vilken mätmetod som används. Som allmän riktlinje bör det vara säkrast att välja någon in-situ metod som ger ett lokalt representativt K-värde (infiltrrometer i provgroppsbottnen, provgrop eller auger-hole). Med allmän kännedom om stratigrafi, geologiskt bildningssätt bör därefter en bättre dimensionering kunna erhållas.

- Alison L E, 1947. Effects of microorganisms on permeability of soil under prolonged submergence. *Soil Science*, vol 63, pp 439-450, 1947.
- Arnell V, Lyngfelt S, 1975. Interimrapport. Beräkningsmodell för simulering av dagvattenflöde inom bebyggda områden. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH, Meddelande nr 12. Göteborg, 1975.
- Berntsson J, 1978. Portryck kring va-ledningar. Erfarenheter från mätningar 1971-1976. BFR Rapport R18: 1978. Byggforskningen. Stockholm, 1978.
- Earlougher R, 1977. Advances in well test analysis. Henry L Doherty Memorial Fund of AIME. Society of Petroleum Engineers of AIME. New York, 1977.
- Ericsson L O (red), 1977. Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport från första verksamhetsåret 1976-02-01--1977-01-03. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH, Meddelande nr 25. Göteborg, 1977.
- Ericsson L O, 1978a. Infiltrationsprocessen i en dagvattenmodell. Teori, Undersökning, Mätning och Utvärdering. Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr 30. Göteborg, 1978.
- Ericsson L O, 1978b. Permeabilitetsbestämning i fält vid perkolationsmagasin. Dimensionering. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH, Meddelande nr 31. Göteborg, 1978.
- Ericsson L O, 1978c. Infiltrationskapaciteten som funktion av markens humushalt och kornstorlek. Publ B110, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1978.



- Ericsson L O, 1978d. Markvatten och vegetation i bebyggda områden. Ymer 1978. Årsbok 1978, Svenska sällskapet för antropologi och geografi. Stockholm, 1978.
- Ericsson L O, Holmstrand O, 1978. Vattnets rörelse i den omättade zonen, mätmetoder. Litteraturgenomgång. Byggeforskningen Rapport R4:1978. Stockholm, 1978.
- Ericsson L O, Hård S, 1978a. Infiltrationsundersökningar i stadsdelen Ryd, Linköping. Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr 32. Göteborg, 1978.
- Ericsson L O, Hård S, 1978b. Registrering av vattenhalten i markytan med hjälp av termovisionskamera. Publ B111, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1978.
- Gustafson G, 1980. Brunnsteknik. BFR-rapport (Manuskript).
- Hallin I, 1975. Markbyggnad. LT:s förlag. Alnarp, 1975.
- Holmstrand O (red), 1978. Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport nr 2 från perioden 1977-02-01--1977-11-30. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH, Meddelande nr 28. Göteborg, 1978.
- Holmstrand et al, 1980. Perkolationsmagasin i ett lerområde. Lokalt omhändertagande av dagvatten i Bratt- hammar, Göteborg. Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr . Göteborg, 1980.
- Holmstrand O, Wedel P, 1976. Markvattenundersökningar i ett urbant område. Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr 17, CTH. Göteborg, 1976.
- Huisman L, 1972. Ground Water Recovery. MacMillan. Delft, 1972.

- Jonasson S, 1979. Dimensionering av perkolationsmagasin. En jämförande studie av olika metoder för bestämning av hydraulisk konduktivitet i friktionsjordar. Examensarbete. Publ B138, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1979.
- Kaufmann M, Röine D, 1978. Bestämning av hydraulisk konduktivitet i markens omättade zon. Examensarbete, Publ B122, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1978.
- Kessler J, Oosterbaan R J, 1974. Determining hydraulic conductivity of soils. Drainage principles and applications III. International institute for Land Reclamation and Improvement. Vol 16, 1974.
- Olsson J-A, Sääf L-J, 1978. Bestämning av hydraulisk konduktivitet i markens omättade zon. Examensarbete, Publ B116, Geologiska institutionen, CTH. Göteborg, 1978.
- Schwartzendruber D, Olsson T C, 1961. Model Study of the Double-ring Infiltrimeter as Affected by Depth of Wetting and Particle Size. Soil Science, Vol 92, pp 219-225.
- Walton W C, 1970. Ground Water Resource Evaluation. Mc Graw-Hill series. New York, 1970.
- Wedel P, 1978. Grundvattenbildning, samspelet jordlager och berggrund. Exemplifierat från ett försöksområde i Angered. Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH, Meddelande nr 22. Göteborg, 1978.
- Westin L, 1977. Miljömässiga aspekter på dagvattenhantering. Litteraturgenomgång. Byggforskningen Rapport R94: 9177. Stockholm, 1977.



## GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Institutionerna för  
Geologi  
Geoteknik med grundläggning  
Vattenbyggnad  
Vattenförsörjnings- och avloppsteknik

## Meddelande:

- nr 1 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Lägesrapporter (1972-07-01 - 1973-03-01). 1973. 100 sidor. (Utgången)
- nr 2 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 1. Evaluering av akviferers geohydrologiska data med hjälp av provpumpningsdata. 1973. 67 sidor.
- nr 3 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 2. Evaluering av lågpermeabla lagers hydrauliska diffusivitet med hjälp av provpumpningsdata. 1973. 17 sidor.
- nr 4 Viktor Arnell: Nederbördsräknare. En sammanställning av några olika mätartyper. 1973. 39 sidor. (Utgången)
- nr 5 Viktor Arnell: Intensitets-varaktighetskurvor för häftiga regn i Göteborg under 45-årsperioden 1926-1971. 1974. 68 sidor.
- nr 6 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Lägesrapporter (1973-03-01 - 1974-02-01). 1974. 167 sidor.
- nr 7 Olov Holmstrand, Per O Wedel: Ingenjörsgelogiska kartor - litteraturstudier. 1974. 55 sidor. (Utgången)
- 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. (Utgången).
- nr 9 Olov Holmstrand (red.): Seminarium om ingenjörsgelogiska kartor. 1974. 38 sidor. (Utgången).
- nr 10 Viktor Arnell, Börje Sjölander: Mätning av nederbördsintensiteter i Göteborgsregionen. Stationsbeskrivning. 1974. 53 sidor. (Utgången).
- nr 11 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Dagvattnets beskaffenhet och egenskaper. Sammanställning av utförda dagvattenundersökningar i Stockholm och Göteborg 1969-1972. Engelsk sammanfattning. 1974. 46 sidor. (Utgången).
- nr 12 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Interimrapport. Beräkningsmodell för simulering av dagvattenflöde inom bebyggda områden. Geohydrologiska forskningsgruppen i samarbete med VA-verket i Göteborg, meddelande nr 12, 1975. 50 sidor.
- nr 13 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Nederbörds-avrinningsmätningar i Bergsjön, Göteborg 1973-1974. 1975. 92 sidor.
- nr 14 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Delrapport. Dagvattnets sammansättning i Göteborg. Engelsk sammanfattning. 1975. 73 sidor.
- nr 15 Dagvatten. Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg 1975. 1976. 33 sidor. 15:-- Följande uppsatser ingår:  
Arnell V. Beräkningsmetod för analys av dagvattenflödet inom ett urbant område.  
Lyngfelt S. Nederbörds-avrinningsstudier i Bergsjön, Göteborg.  
Sjöberg A. CTH-ledningsnätmodell DAGVL-A.  
Svensson G. Dagvattnets sammansättning, inverkan av urbanisering. (Utgången).
- nr 16 Grundvatten. Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg 1975. 1976. 43 sidor. 15:-- Följande uppsatser ingår:  
Andréasson L, Cederwall K. Rubbnings av grundvattenbalansen i urbana områden.  
Carlsson L. Djupinfiltration i slutna akviferer.  
Torstensson B-A. Följder av grundvattensänkning inom lerområden.  
Wedel P. Exempel på dränering av jordlager på grund av tunnelbyggande. (Utgången).
- nr 17 Olov Holmstrand, Per Wedel: Markvattenundersökningar i ett urbant område. 1976. 127 sidor.
- nr 18 Göran Ejdeling: Beräkningsmodeller för prognos av grundvattenförhållanden. 1978. 130 sidor.
- nr 19 Viktor Arnell, Jan Falk, Per-Arne Malmquist: Urban Storm Water Research in Sweden. 1977. 30 sidor.
- nr 20 Viktor Arnell: Studier av amerikansk dagvattenteknik. Resa i december 1976. 1977. 64 sidor.
- 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.
- nr 22 Per O Wedel: Grundvattenbildning, samspelet jordlager och berggrund. Exemplifierat från ett försöksområde i Angered. 1978. 130 sidor.
- nr 23 Viktor Arnell: Nederbördsdata vid dimensionering av dagvattensystem med hjälp av detaljerade beräkningsmodeller. En inledande studie. 1977. 29 sidor.
- 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
- nr 25 Lars O Ericsson (red.): Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport från första verksamhetsåret 1976-02-01 - 1977-01-31. 1977. 120 sidor.
- nr 26 Ann-Carin Andersson, Jan Berntsson: Kontrollerad grundvattenbalans genom djupinfiltration. En inventering av djupinfiltrationsprojekt. 1978. 273 sidor.
- nr 27 Anders Eriksson, Per Lindvall: Lokalt omhändertagande av dagvatten. Resultatredovisning av enkät rörande drift och konstruktion av perkolationsanläggningar. 1978. 126 sidor.

- nr 28 Olov Holmstrand (red.): Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport nr 2 från perioden 1977-02-01 - 1977-11-30. 1978. 69 sidor.
- nr 29 Leif Carlsson: Djupinfiltrationsstudier i Angered. 1978. 70 sidor.
- nr 30 Lars O Ericsson: Infiltrationsprocessen i en dagvattenmodell. Teori, Undersökning, Mätning och Utvärdering. 1978. 45 sidor.
- nr 31 Lars O Ericsson: Permeabilitetsbestämning i fält vid perkolationsmagasin. Dimensionering. 1978. 15 sidor.
- nr 32 Lars O Ericsson, Stig Hård: Infiltrationsundersökningar i stadsdelen Ryd, Linköping. 1978. 145 sidor.
- nr 33 Jan Hällgren, Per-Arne Malmquist: Urban Hydrology Research in Sweden 1978. Swedish Coordinating Committee for Urban Hydrology Research. 1978. 14 sidor.
- nr 34 Bo Lind, Göte Nordin: Geohydrologi och vegetation i Dalen 5, Karlskoga. 1978. 63 sidor.
- nr 35 Eivor Bucht, Bo Lind: Metodfrågor vid naturanpassad stadsplanering - erfarenheter från studie i Karlskoga. 1978. 65 sidor.
- nr 36 Anders Sjöberg, Jan Lundgren, Thomas Asp, Henriette Melin: Manual för ILLUDAS (version S2). Ett datorprogram för dimensionering och analys av dagvattensystem. 1979. 67 sidor.
- nr 37 Per-Arne Malmquist m fl: Papers on Urban Hydrology 1977-78. 99 sidor.
- nr 38 Viktor Arnell, Per-Arne Malmquist, Bo-Göran Lindquist, Gilbert Svensson: Uppsatser om Dagvattenteknik 1978. 30 sidor.
- nr 39 Bo Lind: Dagvatteninfiltration - förutsättningar inom ett bergsområde, Östra Gårdsten i Göteborg. 1979. 32 sidor.
- nr 40 Per-Arne Malmquist (red.): Geohydrologiska forskningsgruppen 1972-78. Sammanställning av uppnådda resultat. 1979. 96 sidor. Kostnadsfri.
- nr 41 Gilbert Svensson, Kjell Øren: Planeringsmodeller för avloppssystem. NIVA-modellen tillämpad på Torslanda avrinningsområde. 1979. 71 sidor.
- nr 42 Per-Arne Malmquist (red.): Infiltrera dagvatten. Diskussioner och figurer från CTH-seminarium 1979-04-20. 1979. 86 sidor.
- nr 43 Bo Lind: Dagvatteninfiltration - perkolationsanläggning i Halmstad. 1979. 58 sidor.
- nr 44 Viktor Arnell, Thomas Asp: Beräkning av bräddvattenmängder. Nederbördens varaktighet och mängd vid Lundby i Göteborg 1921-1939. 1979. 80 sidor.
- nr 45 Stig Hård, Thomas Holm, Sven Jonasson: Dagvatteninfiltration på grönytor - Litteraturstudie, kunskaps-sammanställning och hypotes. 1979. 278 sidor.
- nr 46 Per-Arne Malmquist, Per Lindvall: Dräneringsrörs igensättning - en jämförande laboratoriestudie. 1979. 44 sidor.
- nr 47 Per-Arne Malmquist, Gunnar Lannér, Erland Högberg, Per Lindvall: SÖDRA NÄSET - ett exempel på för- enklad utformning av gator och dagvattensystem i ett upprustningsområde. 1980.
- nr 48 Viktor Arnell, Håkan Strandner, Gilbert Svensson: Dagvattnets mängd och beskaffenhet i stadsdelen Ryd i Linköping, 1976-77. 1980.
- nr 49 Lars O. Ericsson, Stig Hård: Termisk registrering, en metod att kartera markvattenhalt - Termovisionsförsök i klimatkammare. 1980. 65 sidor.
- nr 50 Viktor Arnell: Dimensionering och analys av dagvattensystem. Val av beräkningsmetod. 1980. 56 sidor, 22 figurer.
- nr 51 Lars O Ericsson: Markvattenförhållanden i urbana områden. Slutrapport.
- nr 52 Olov Holmstrand (red.): Ingenjörsgelogisk kartering. Seminarium 1980-04-17. 110 sid, 25:- kr.
- nr 53 Olov Holmstrand: Lokalt omhändertagande av dagvatten. Sammanfattning av forskning om dagvatteninfiltration vid CTH 1976-79. 90 sid. 25:- kr.
- nr 54 Olov Holmstrand, Bo Lind, Per Lindvall, Lars-Ove Sörman: Perkolationsmagasin i ett lerområde. Lokalt omhändertagande av dagvatten i Bratthammar, Göteborg.

