

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Sven Lyngfelt



GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Institutionerna för:

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings- och avloppsteknik

ISSN 0347-8165

INFILTRATIONSPROCESSEN I EN

DAGVATTENMODELL

Teori, Undersökningsmetod, Mätningar och
Utvärdering

LARS O ERICSSON

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

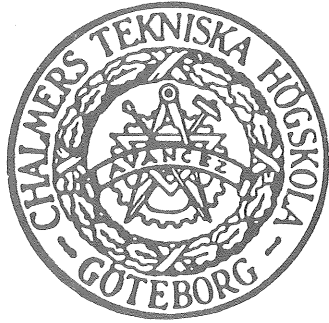
Institutionerna för:

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjnings- och avloppsteknik



ISSN 0347-8165

**INFILTRATIONSPROCESSEN I EN
DAGVATTENMODELL**

Teori, Undersökningsmetod, Mätningar och
Utvärdering

Adress:
Chalmers tekniska högskola
Geologiska institutionen
Fack
402 20 GÖTEBORG

LARS O ERICSSON

FÖRORD

Denna publikation är sammanställd inom ramen för den verksamhet som bedrivs av forskningsprojektet "Markvattenförhållanden i urbana områden". Detta projekt är ett delprojekt i det samordnade forskningsprogram "Lokalt omhändertagande av dagvatten" som är underordnat Geohydrologiska forskningsgruppen, Chalmers tekniska högskola.

Inom projektet har tidigare utgivits en litteratursammanställning, där vattnets rörelse i den omättade zonen liksom de huvudsakliga mätmetoderna i denna zon beskrivs. (Se Ericsson & Holmstrand, 1978). Utifrån litteratursammanställningen och egna erfarenheter har vi inom projektet utarbetat en metod för infiltrationsmätningar. Dessa mätningar skall ge en möjlighet att ytgeneralisera infiltrationskapaciteten på de permeabla ytorna inom bebyggda områden.

Göteborg i februari 1978

Lars O Ericsson

INNEHÅLL

FÖRORD	i
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	ii
SAMMANFATTNING	iii
1 INFILTRATIONEN I DAGVATTENMODELLEN	1
1.1 Avrinningsmodellens delprocesser	1
1.2 Infiltrationsmodeller	2
1.3 Arnell, Lyngfelts dagvattenmodell	9
2 INFILTRATIONENS SÄSONGSVARIATION	14
3 INFILTRATIONSMÄTNINGAR MED ENKELRINGS- INFILTRROMETER	19
3.1 Fältarbete	19
3.2 Korrigering av mätvärden	21
3.2.1 Laboratorieförsök i en låda	22
3.2.2 Permeabilitetsbestämningar av cylinderprov	28
3.2.3 Korrektionsfaktor	29
4 REGRESSION ENLIGT HORTONS FORMEL	38
5 EXEMPEL PÅ BEARBETNING AV MÄTVÄRDEN	41
6 REFERENSER	43

SAMMANFATTNING

I denna skrift redogörs för en mätmetodik, där fältmätningar med enkelringsinfiltrrometer skall ge erforderliga data till en infiltrationsmodell. Infiltrationsmodellen som används är Hortons ekvation. Detta uttryck för infiltrationen skall därefter direkt kunna användas i den dagvattenmodell som sammanställts av Arnell & Lyngfelt (1975). Förutom undersökningsmetodik, mätning med och utvärdering av enkelringsinfiltrrometer presenteras i allmänna, kortfattade ordalag en generell avrinningsmodells delprocesser. Exempel ges på både markfysikaliska och hydrologiska infiltrationsmodeller. Infiltrationsprocessens behandling i Arnell, Lyngfelts dagvattenmodell beskrivs även.

En teoretisk diskussion angående infiltrationens säsongsmässiga variation framförs i kapitel 2.

Tillförlitligheten hos infiltrationsmätningar med enkelring beror på huruvida en korrigerig för sidospridningen kan uppskattas. Ett laboratorieförsök har utförts, där enkel- respektive dubbelringsinfiltrrometerns funktion studerats vid en simulerad lagerföljd. Sammanfattningsvis gav försöket följande resultat. En dubbelringsinfiltrrometer bör ge riktigare värden än en enkelringsinfiltrrometer. En betydande säsongsmässig variation av infiltrationskapaciteten kan uppstå i kohesionsnära jordarter till följd av svällning.

En eventuell korrelation mellan infiltrationens slutvärde och permeabiliteten för prover i infiltrrometerns innerring har studerats. Något entydigt samband kunde ej påvisas.

Två fältförsök har genomförts i avsikt att få ett begrepp om hur stor korrigeringsfaktor som behöver göras av enkelringsinfiltrometers (r = 19,5 cm) slutvärde. Den verkliga infiltrationskapaciteten skall enligt dessa försök vara ca 30 % av uppmätt infiltrationsvärde. Med hänsyn till denna korrigeringsfaktor och forskningsresultat enligt Schwarzenberger och Olsson (1961) presenteras ett förslag till korrigeringskurva (korrigeringsfaktor som funktion av infiltrationsstid).

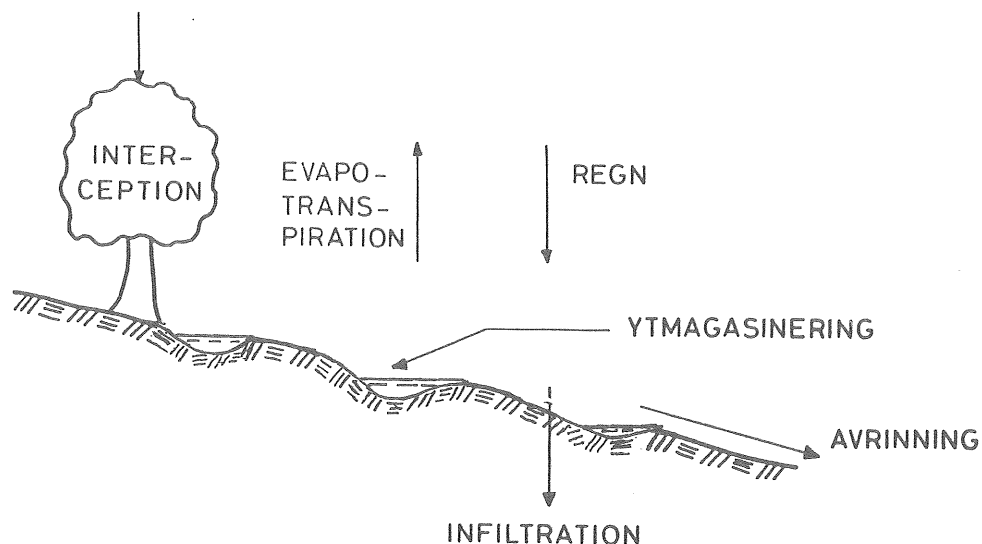
Slutligen redogörs för anpassningen av Hortons formel till mätdata och ett exempel på bearbetning av mätvärden ges.

1 INFILTRATIONEN I DAGVATTENMODELLEN

1.1 Avrinningsmodellens delprocesser

När man sammanställer en dagvattenmodell är det huvudsakliga syftet att bestämma ett avrinningsområdes regnöverskott eller direkta avrinning. Vissa "regnförluster" subtraheras från nederbörden och detta resulterar i ett regnöverskott. De förluster (se fig 1) som subtraheras från nederbörden beror på följande hydrologiska delprocesser:

1. Interception
2. Ytmagasinering
3. Evapotranspiration
4. Infiltration



Figur 1. Den direkta avrinningen är ett resultat av nederbörden från vilken vissa förluster subtraheras. Dessa förluster beror på vissa hydrologiska delprocesser. (Efter Overton & Meadows, 1976).

I det nedanstående följer några kommentarer som till stor del hämtats från Overton & Meadows (1976).

Med interception menas den process under vilken regnvattnet fångas upp av vegetationen innan det når marken. Interceptionens storlek är en funktion av vegetationens art, ålder och täthet, regnets karaktär samt årstid. Man har uppskattat att 10 - 20 % av nederbörden som faller under den aktiva växtperioden tas upp av vegetationen och återgår till den hydrologiska cykeln genom evaporationen.

Vatten som uppsamlas i markens små hålrum och svackor innan det infiltrerar eller avdunstar kallas för ytmasinerat regnvatten. På grund av den stora variationen i markens ytstruktur och en brist på vetenskapliga undersökningar föreligger för närvarande inget generellt uttryck för denna parameter.

Det är möjligt att analysera evapotranspirationsprocessen och formulera matematiska modeller, vilka kan användas i ett slags förutsägande syfte. Dessa modeller är mycket komplexa och kräver en stor mängd av "input-information". Evapotranspirationens komplexitet beror av vegetationens art och täthet, årstiden och markkaraktäristika. Vidare påverkar meteorologiska villkor såsom vindhastighet, luftfuktighet, temperatur, molntäcke och latitud. Vid tillämpning av en dagvattenmodell kan man emellertid bortse från avdunstningen, eftersom den är försumbart liten vid ett nederbördstillfälle.

1.2 Infiltrationsmodeller

Denna publikation syftar bl a till att skildra en mätmetod som bestämmer infiltrationskapaciteten för ett bebyggt områdes permeabla ytor. Det förekommer i princip två sätt att angripa infiltrationsproblemet. Dels kan det ske med hjälp av en markfysikalisk infiltrationsmodell eller också genom en hydrologisk infiltrationsmodell.

Markfysikalisk infiltrationsmodell

Det markfysikaliska angreppssättet ger sannolikt en mer realistisk infiltrationsmodell. En omfattande forskning har därför bedrivits under de senaste åren för att beskriva vattnets rörelse i den omättade markzonen. Två huvudsakliga problem tillstöter, när man skall använda en markfysikalisk modell. För det första krävs en stor mängd mätvärden, vilka fordrar en omfattande bearbetning. För det andra är infiltrationen inte en ren vertikal flödesprocess utan den beror av t ex marklutningen och förhållandet mellan den vertikala och horisontella konduktiviteten. Vid modellarbetet måste man därför överväga merarbetet som krävs vid en markfysikalisk modell relativt en hydrologisk modell.

Om Darcys lag (1), för strömning under omättade förhållanden kombineras med en kontinuitetsekvation (2) erhålles ekvation (3) som innehåller två beroende variabler. Denna ekvation har för närvarande ingen analytisk lösning (Ericsson & Holmstrand, 1978). Numeriska lösningsmetoder av ekvation (3) med dator föreligger emellertid.

$$v = -k(\psi) \left[\frac{\delta \psi}{\delta z} + 1 \right] \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{dv}{dz} \quad (2)$$

$$\frac{\delta m}{\delta t} = \delta \left\{ k(\psi) \left[\frac{\delta \psi}{\delta z} + 1 \right] \right\} / \delta z \quad (3)$$

v = flödehastighet, positiv uppåt

$k(\psi)$ = kapillär konduktivitet

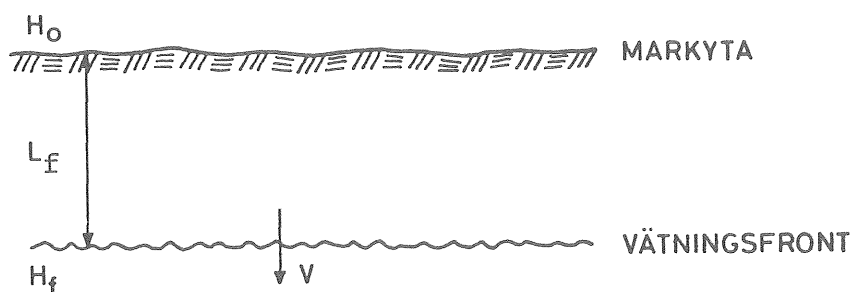
ψ = bindningstryck

z = vertikalt avstånd från markyta, riktat uppåt

m = vattenhalt i vol %

Vissa begreppsriktiga markfysikaliska modeller som bygger på omättat flöde (ekvation 1) har presenterats. För att exemplifiera en sådan beskrivs nedan en modell av Green och Ampt (1911). Modellen bygger på följande antaganden:

1. Det existerar en distinkt och väl definierad vätningsfront (se fig 2).



Figur 2. Vättningsfrontens läge, det dämpningsdjup och bindningstryck (H_0 och H_f) som råder. (Efter Overton & Meadows, 1976).

2. Bindningstrycket, vid vättningsfronten H_f förblir väsentligen konstant oavsett tid och position; (Undertrycket räknas med positivt bidrag till tryckgradienten).
3. Bakom fronten är jordarten likformigt vattenmättad och med en konstant konduktivitet K ; därav följer:
4. Vättningsfronten betraktas som en yta vilken skiljer en likformigt vattenmättad infiltrationszon från en totalt icke påverkad zon.
5. Detta resulterar i att K i relation till m (vattenhalten) är diskontinuerlig, m a o förändras momentant vid bindningstrycksgradienten som råder vid vättningsfronten.

Darcys lag ger:

$$v = K (H_o + H_f + L_f) / L_f \quad (4)$$

Antag att det ej föreligger något dänningsdjup H_o :

$$\Delta H_p = H_o + H_f \text{ (konstant)} \quad (5)$$

Om den summerade infiltrationen är F erhålls:

$$dF/dt = v = d(\Delta m \cdot L_f)/dt \quad (6)$$

där $\Delta m = m_t - m_i$, och m_t är transmissionszonens vattenhalt under infiltrationen och m_i är begynnelse värdet för vattenhalten som råder nedanför vätningsfronten. Ekvation (4) och (6) ger:

$$\Delta m \frac{dL_f}{dt} = K \cdot \frac{\Delta H_p + L_f}{L_f} \quad (7)$$

Integration av (7) ger

$$\frac{K \cdot t}{\Delta m} = L_f - \Delta H_p \cdot \ln \left(1 + \frac{L_f}{\Delta H_p} \right) \quad (8)$$

Men $F = \Delta m \cdot L_f$ vilket ger vätningsfrontens läge L_f vid tiden t :

$$t = \frac{\Delta m \cdot \Delta H_p}{K} \left\{ \frac{F}{\Delta m \cdot \Delta H_p} - \ln \left(1 + \frac{F}{\Delta m \cdot \Delta H_p} \right) \right\} \quad (9)$$

Den största svårigheten med Green & Ampt-modellen är att bestämma bindningstrycket vid vätningsfronten. Därför har ej denna modell givit så stor tillämplighet.

I den internationella litteraturen existerar ett flertal markfysikaliska modeller som bygger på liknande förenklade antaganden som modellen ovan. Modeller som härrör från Richard's ekvation (Se Ericsson, Holmstrand, 1978) förekommer också.

Hydrologisk infiltrationsmodell

På grund av svårigheterna att använda de markfysikaliska modellerna har ett flertal hydrologiska modeller framtagits. (Se Ericsson, Holmstrand, 1978). De modeller som hittills mest använts i dagvattenmodeller är Horton's respektive Holtan's ekvationer. De begreppsriktiga hydrologiska modellerna bygger på kontinuerligt avtagande funktioner tills dess att ett slutvärde erhålls.

Horton's modell

Horton har presenterat en infiltrationsekvation som lyder:

$$f = f_c + (f_o - f_c) e^{-kt} \quad (10)$$

där f är infiltrationshastigheten vid tiden t , f_o och f_c är begynnelse respektive 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 infiltrationskapaciteterna. Därmed skulle alltid en viss dämning förekomma. Detta är den största nackdelen med användningen av Horton's ekvation. Regnintensiteten varierar ju i verkligheten stort och därför understiger den därmed ofta infiltrationskapaciteten. I dagvattenmodeller förskjuts därför infiltrationskurvan med tiden tills dess att den integrerade regnintensiteten (mindre än infiltrationskapaciteten) är

lika med den integrerade infiltrationen (se kap 1.3). Den ackumulerade infiltrationsvolymen är lika med tidsintegralen av ekvationen (10).

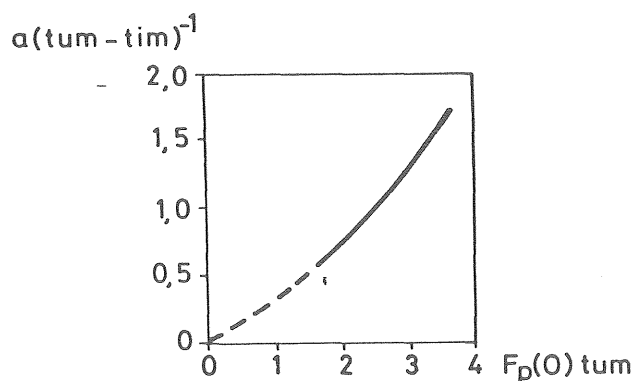
$$F = f_c t + \frac{f_o - f_c}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (11)$$

Holtan's modell

Holtan har föreslagit en begreppsriktig modell som bygger på iakttagelsen att allteftersom jordartens porer fylls avtar infiltrationshastigheten och når ett slutvärde. Slutvärdet f_c sammanknippas med gravitationens påverkan på flödet vid fältkapacitet. Modellen är formulerad på så sätt att den relaterar infiltrationshastigheten (f) till jordartens resterande tillgängliga porutrymme (F_p) innan vattenmättnad uppnås.

$$f = a \cdot F_p^n + f_c \quad (12)$$

Parametrarna a och n har bestämts experimentellt från infiltrometerförsök. Exponenten n var omkring 1,4 för alla de studerade ytorna medan koefficienten a varierade mellan 0,2 till 0,8. Koefficienten a 's variation beror av den initiella markvattenhalten på så sätt att a är högst vid vissningsgränsen och minst vid fältkapaciteten (se fig 3). Således varierar Holtan's parameter a med hänsyn till begynnelsevillkoren precis som Horton's k -värde.



Figur 3. Parameterns a variation med tillgängligt porutrymme. (Efter Overton & Meadows, 1976).

Problemet med ekvation (12) är att exponenten $n = 1.4$ inte tillåter ekvationen att integreras så att man får infiltrationskapacitetens förändring med tiden. Overton (1964) har emellertid visat att om ekvation (12) integrerades med en exponent för F_p , $n = 2$, erhålls ej alltför stora avvikelser från Holtans ursprungliga resultat. Tillgänglig porvolym att infiltrera i vid regnets början $F_p(0)$ sätts då lika med totala vattentätheten AWC (available water capacity) minus begynnelsevärdet för vattenhalten IM (initial soil moisture). IM måste vara större än eller lika med det hydrokopiskt bundna vattnet.

$$F_p(0) = AWC - IM \quad (13)$$

Sambandet mellan F_p och den summerade infiltrerade volymen F är

$$F_p(t) = F_p(0) - F(t) \quad (14)$$

Ekvation (12) kan då skrivas:

$$dF/dt = a\{F_p(0) - F(t)\}^2 + f_c \quad (15)$$

som kan integreras till:

$$F = F_p(0) - (f_c/a)^{1/2} \cdot \tan \{(a \cdot f_c)^{1/2} (t_c - t)\} \quad (16)$$

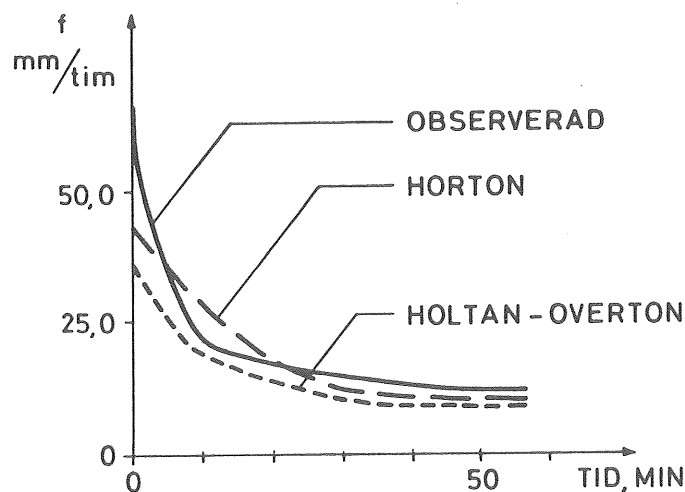
Ekvationen för infiltrationskapaciteten blir då:

$$f = f_c \frac{1}{\cos^2 \{(af_c)^{1/2} (t_c - t)\}} \quad (17)$$

t_c är tiden efter vilken konstant infiltrationshastighet uppnås:

$$t_c = (af_c)^{-1/2} \tan^{-1} \{(a/f_c)^{1/2} F_p(0)\} \quad (18)$$

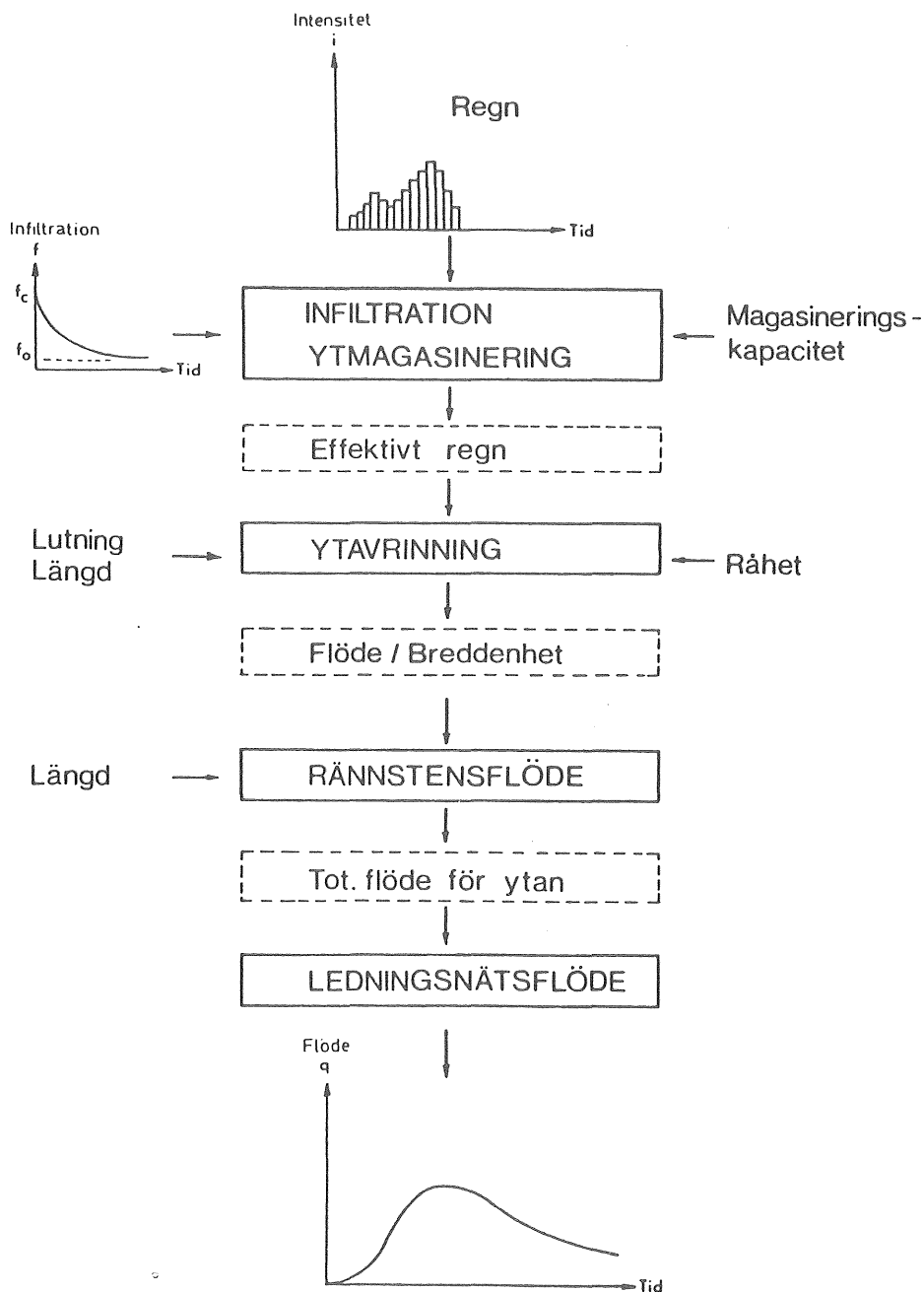
Horton's modell har hittills använts mest vid avrinningsmodeller i urbana områden medan Holtan's modell tillämpats på rurala ytor. I figur 4 åskådliggörs de båda hydrologiska infiltrationsmodellerna jämförda med ett fältförsök. För vidare information om Holtan's modell hänvisas till avrinningsmodellen ILLUDAS (Terstriep & Stall, 1974).



Figur 4. Hortons och Holtans infiltrationsmodeller jämförda med ett fältförsök. (Efter Overton & Meadows, 1976).

1.3 Arnell, Lyngfelts dagvattenmodell

I detta kapitel redogörs kortfattat för den avrinningsmodell som framtagits av Arnell, Lyngfelt vid Institutionen för vattenbyggnad, Chalmers tekniska högskola. Utgångspunkten för deras modellarbete har varit en beräkningsmodell som utvecklats vid Cincinnati-universitetet i USA. Nedanstående presentation har huvudsakligen hämtats från meddelande nr 12 i Geohydrologiska forskningsgruppens skriftserie (Arnell & Lyngfelt, 1975).

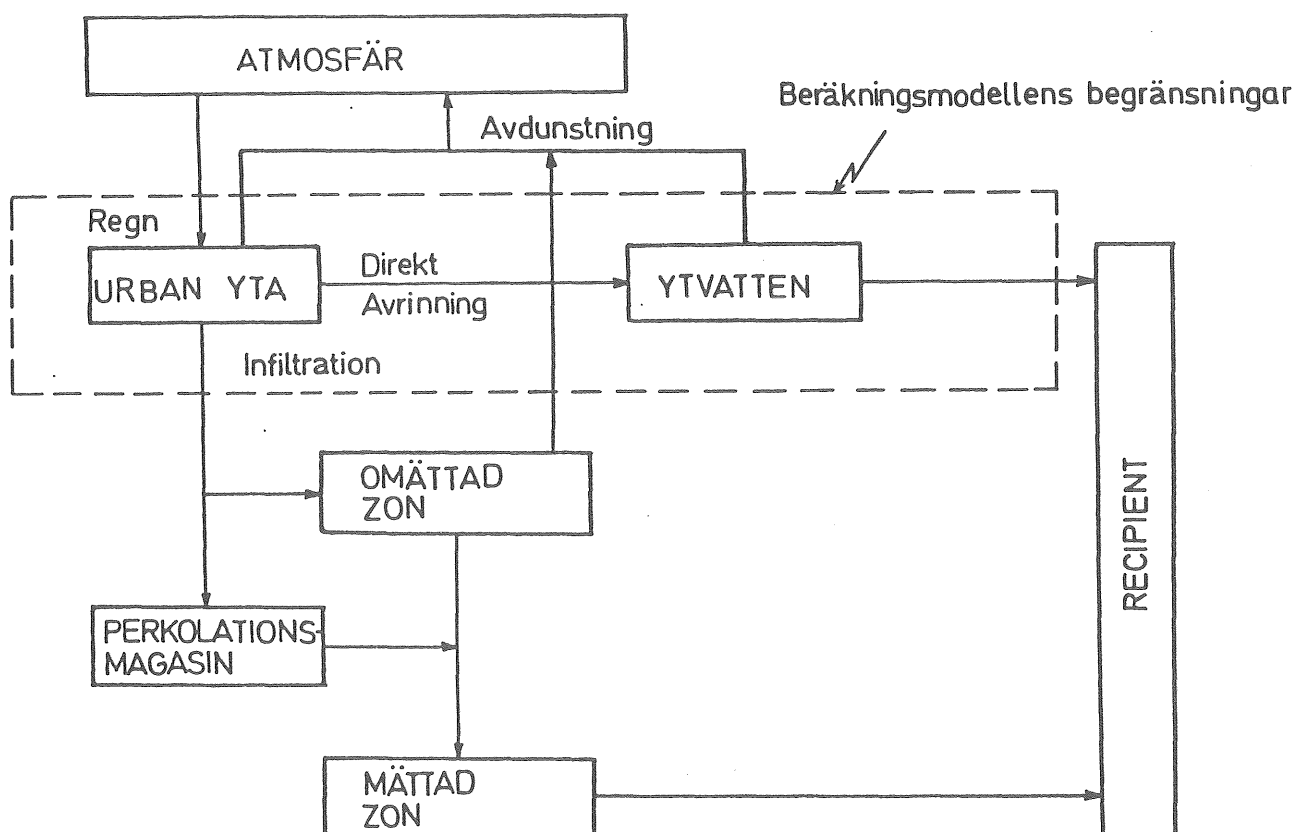


Figur 5. Beräkningsmodellens struktur. (Efter Arnell, Lyngfelt, 1975).

Beräkningsmodellen är uppdelad i sex delar: nederbörd, infiltration, ytvattenmagasinerings, ytvattenavrinning, rännstensflöde och flöde i ledningsnätet, (Se figur 5). Modellstrukturen omfattar de delar som har betydelse för beskrivning av avrinningen från bebyggda områden med relativt stor andel hårdgjorda ytor som takytor, belagda gator och parkeringsplatser.

De olika delprocesserna beskriver tillsammans en del av det totala hydrologiska kretsloppet inom ett urbant område, figur 6. Inkluderade i beräkningsmodellen är de delar som omfattar vattnets rörelser på markytan inklusive nederbörd och infiltration. Med infiltration avses vattnets nedträngande genom markytan. Avdunstning och vattnets rörelser i markens omättade och mättade zoner beskrivs ej. Detta medför att beräkningsmodellen ej lämpar sig för simulering av avrinningen från sådana områden där mark- och grundvattenmagasinen styr avrinningen, vilket i huvudsak ej är bebyggda och litet exploaterade områden. Att avdunstningen negligeras medför att det är olämpligt att beräkna avrinningen för tidsperioder som innehåller flera regntillfällen med längre uppehåll emellan.

Sammanfattningsvis kan man säga att beräkningsmodellen lämpar sig för analys av dagvattenavrinning från bebyggda områden för enstaka nederbördstillfällen.



Figur 6. Det urbana vattnets kretslopp med beräkningsmodellens begränsningar inlagda. (Efter Arnell, Lyngfelt, 1975).

Infiltrationsprocessen i Arnell, Lyngfelts modell behandlas på följande vis. Delområdena klassas antingen som impermeabla eller permeabla. Från de permeabla ytorna avgår vatten genom infiltration. Detta vatten anses ej längre delta i avrinningsprocessen på annat sätt än att det genom förändring av markvattenmagasinets status påverkar infiltrationskapaciteten vid markytan. Infiltrationskapaciteten definieras som markens förmåga att infiltrera vatten vid ett tidsögonblick.

Infiltrationskapaciteten beräknas med hjälp av Hortons ekvation:

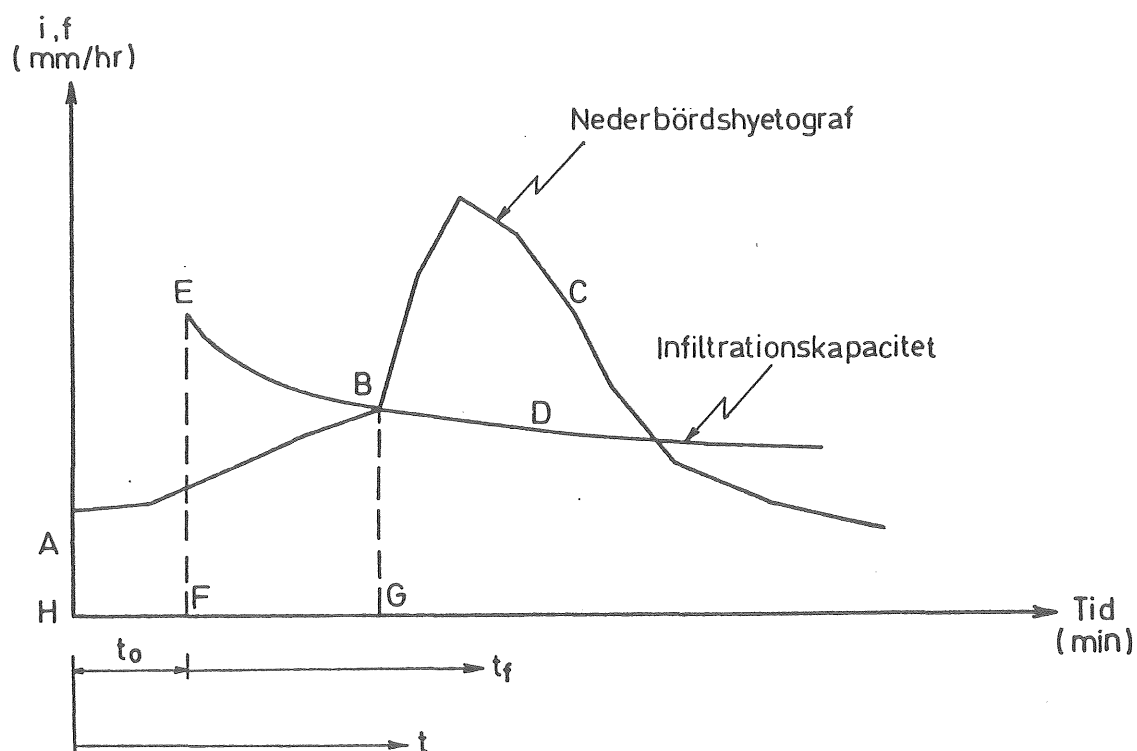
$$f = f_c + (f_o - f_c) e^{-kt_f} \quad (19)$$

- f = infiltrationskapacitet vid tiden t_f (mm/h)
 f_o = infiltrationskapacitet vid tiden $t_f = 0$ (mm/h)
 f_c = infiltrationskapacitet vid tiden när $t_f \rightarrow \infty$ (mm/h)
 k = avklingningshastighet (1/h)
 t_f = tid från början av infiltrationskapacitetskurvan (h)

Om regnintensiteten redan från regnets början är större än infiltrationskapaciteten startar infiltrationskurvan vid samma tidpunkt som regnhyetografen och infiltrationen beräknas enligt ekvation (19).

Om däremot regnhyetografens intensitetsvärden i början av regnet är lägre än infiltrationskapaciteten, förskjuts infiltrationskurvan i förhållande till regnkurvan så att vid den tidpunkt då regnkurvan skär infiltrationskurvan är den infiltrerade volymen lika med regnvolymer figur 7. Fram till skärningspunkten sätts den aktuella infiltrationen lika med nederbördsintensitetsvärdena och efter denna punkt lika med infiltrationskurvas värden. I de fall då regnintensiteten aldrig överstiger infiltrationskapaciteten infiltreras allt regn.

Ett speciellt fall inträffar när regnintensiteten efter en topp faller under de potentiella infiltrationsvärdena. Vatten infiltreras då från det ytmagasinet som har fyllts upp tidigare. Denna möjlighet fanns ej i den ursprungliga modellversionen och utgör en förbättring när regnet har flera intensitetstoppar.

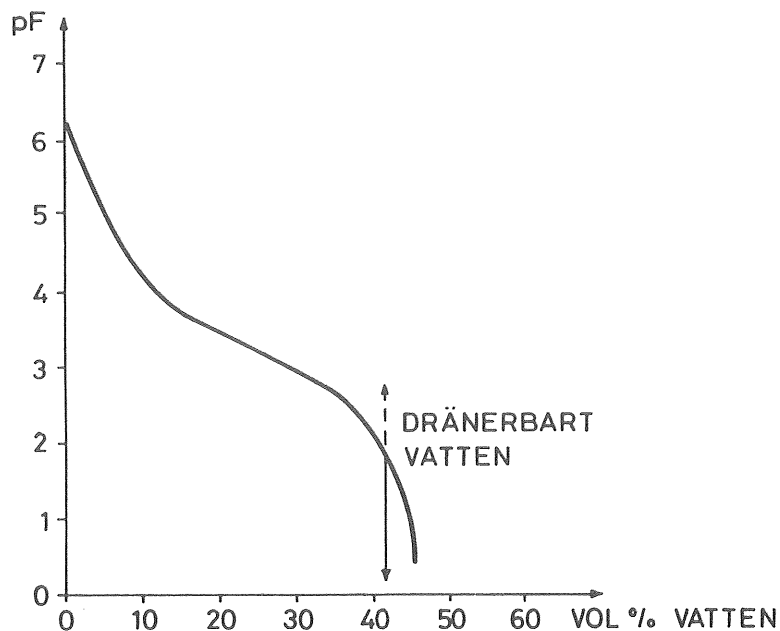


Figur 7. Förskjutning av infiltrationskurvan i förhållande till regnkurvan. (area ABGH = area FEBG). (Efter Arnell, Lyngfelt, 1975).

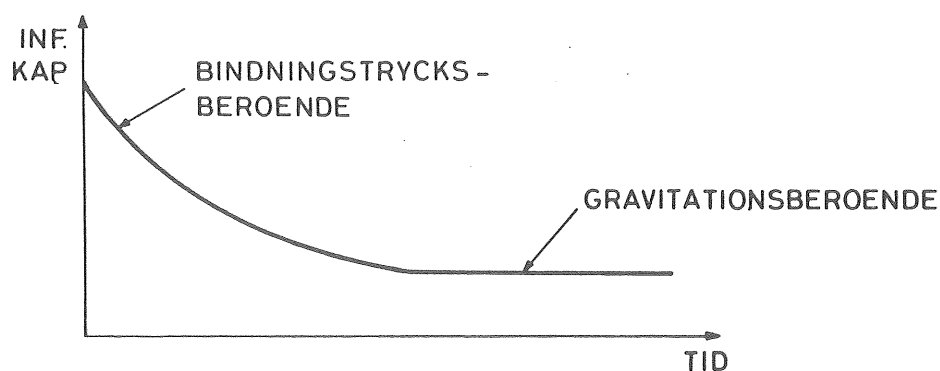
2 INFILTRATIONENS SÄSONGSVARIATION

Markvattenzonens vattenhalt styr i hög grad infiltrationskapaciteten. Man har en säsongsmässig variation över det hydrologiska året. Vissa extrema markfuktighetstillstånd kan då tänkas uppträda. Hög vattenhalt förekommer direkt efter snösmältningen eller i samband med långvariga lågtrycksregn under hösten. Låg vattenhalt kan förekomma under sensommaren, då evapotranspirationen är stor. Vid dessa torrare perioder är emellertid nederbördsintensiteterna större tack vare de sk konvektiva regnen (åskregnen). För att beräkna avrinningen bör därför de extrema markfuktighetstillstånden kombineras med de regn som kan förväntas uppkomma. I detta kapitel kommenteras de säsongsberoende skillnaderna vid infiltrationsförsök utifrån en teoretiskt diskuterande synvinkel.

Vattenhalten i en jordart brukar ofta presenteras med hänsyn till olika bindningstryck i sk pF-diagram (se figur 8) (Ericsson & Holmstrand, 1978). Fältkapaciteten är den vattenmängd som binds i ett jordmaterial efter fri dränering. Vid vattenhalter som är lägre än fältkapacitet är vattenrörelserna i jordarten huvudsakligen beroende av de skillnader i undertryck (bindningstryck) som råder. Vid vattenhalter större än fältkapaciteten beror flödets storlek till största delen av gravitationen. Om en jordart därför är mycket torrare än fältkapaciteten får infiltrationskurvan det utseende som visas i figur 9. Darcy's lag, för vattnets rörelse vid omättade förhållanden, understryker också uppdelningen av vattenhastigheten i en term som beror av bindningstryckets gradient och en term som beror av gravitationen: $v = k(\psi) \left[\frac{\delta\psi}{\delta z} + 1 \right]$. v är flödeshastigheten, positiv uppåt. $k(\psi)$ är den kapillära konduktiviteten. ψ är bindningstrycket. z är det vertikala avståndet från markytan, riktat uppåt.

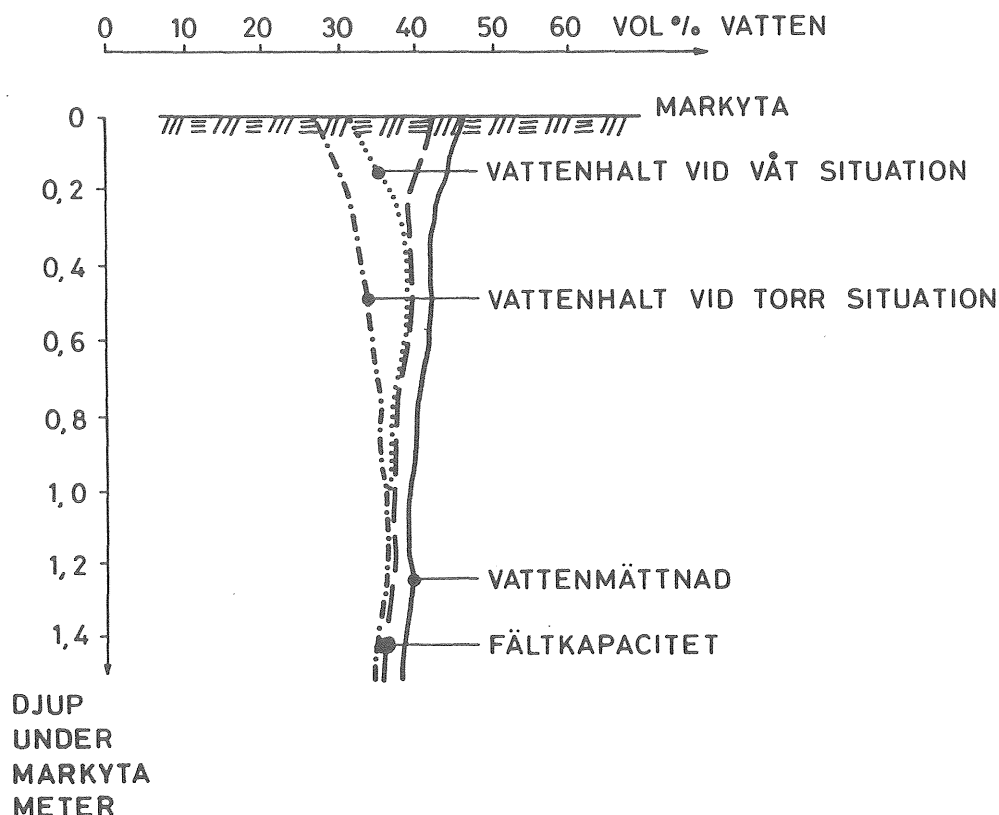


Figur 8. pF-kurva för ett jordmaterial.



Figur 9. Infiltrationskurva för en jordart som är torrare än fältkapacitet.

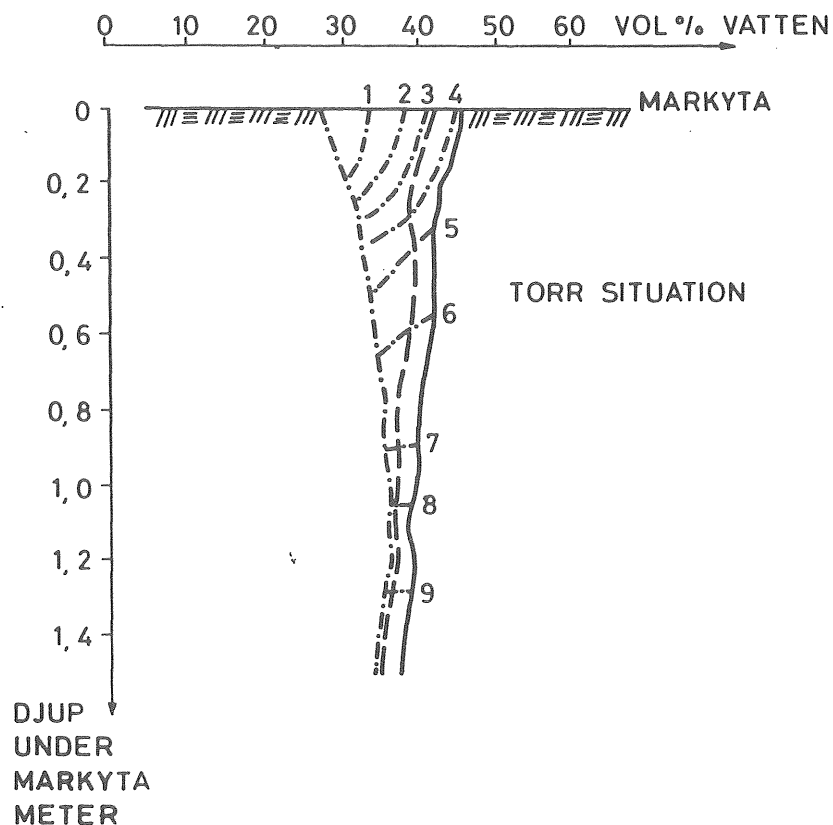
Fältkapaciteten i den omättade zonen, från markytan till grundvattenytan, kan variera med hänsyn till olika jordartssammansättningar i skilda lager. Vid undersökningar i urbana och rurala områden (Holmstrand & Wedel, 1976) har det konstaterats att vattenmagasinet i markens omättade zon huvudsakligen förändras i den översta metern under markytan. Magasinsförändringarna sker i den s k markvattenzonen som nedåt begränsas av växternas rötter. I figur 10 åskådliggörs schematiskt



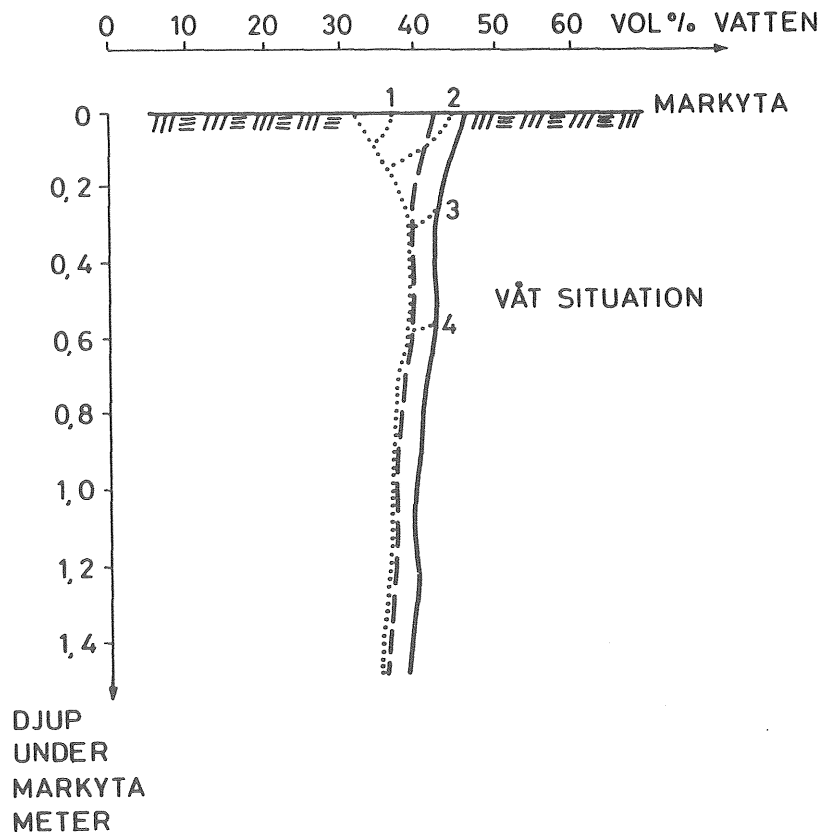
Figur 10. En schematisk beskrivning av två olika markfuktighetstillstånd.

två olika markfuktighetssituationer, en torr och en våt, och fältkapacitetens respektive vattenmättnadens variation med djupet. Vid ett infiltrationsförsök, då den torrare situationen råder, blir marken till en början allt våtare vid ytan och en successiv uppvätning sker mot djupet. Infiltrationskapaciteten når ett slutvärde då fältkapaciteten överskridits i hela markprofilen. Kapaciteten närmar sig då det lägsta permeabilitetsvärdet som föreligger i något av jordartslagren. Uppvätningen skildras schematiskt i figur 11.

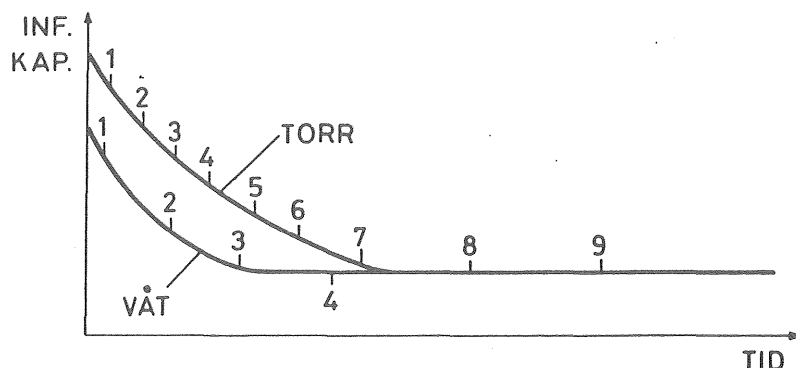
Om det råder en genomsnittligt fuktigare situation i marken nås fältkapacitetsvärdena och vattenmättnaden snabbare och en följd härav är att det lägsta infiltrationskapacitetsvärdet också uppträder tidigare. Schematiskt beskrivs detta i figur 12. Vid en och samma provplats men vid olika vattenhalter fås därför olika utseenden på infiltrationskurvorna. Slutvärdet blir dock detsamma. I figur 13 jämförs de ovan schematiskt beskrivna situationerna.



Figur 11. Schematisk skildring av uppvätning vid regninfiltration i en "torr" lagerföljd. Siffrorna anger tidpunkter.

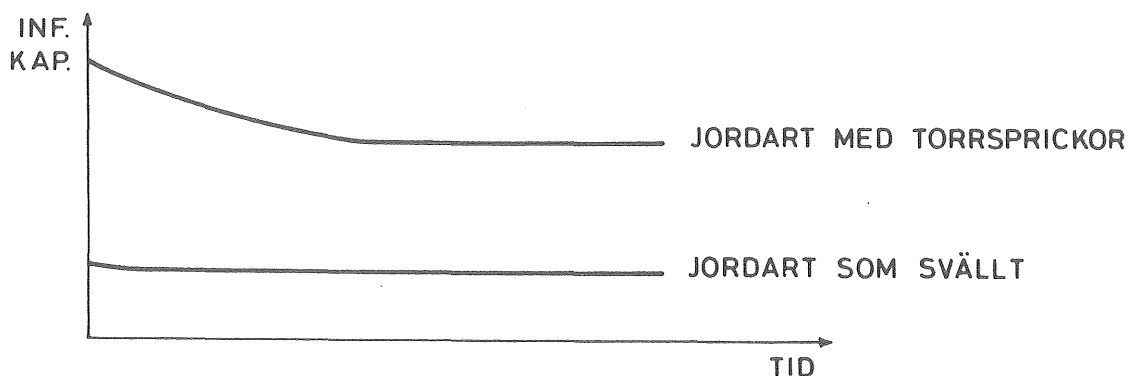


Figur 12. Schematisk skildring av uppvätning vid regninfiltration i en "våt" lagerföljd. Siffrorna anger tidpunkter.



Figur 13. Infiltrationskurvans schematiska utseende vid en "torr" och en "våt" situation.

I kapitel 3.2.1 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 torrspäckor som kan magasinera och transportera regnvatten. Efter en lång våt period sväller som regel den leriga jordarten, torrspäckorna försvinner och vattnet tvingas att transporteras i jordartens porer. Detta porutrymme är mycket litet i förhållande till torrspäckorna och infiltrationskapaciteten minskar därmed avsevärt. Även om vi i våra undersökningar utgått från att infiltrationskapaciteten huvudsakligen påverkas av underlagande 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 14.



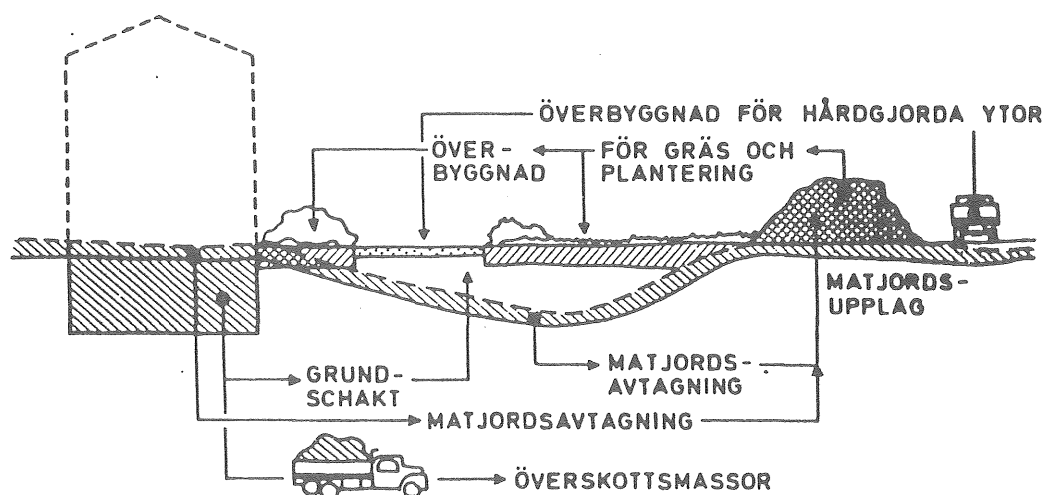
Figur 14. En överlagrad effekt p g a svällning minskar infiltrationskapaciteten.

3 INFILTRATIONS MÄTNINGAR MED ENKELRINGS - INFILTROMETER

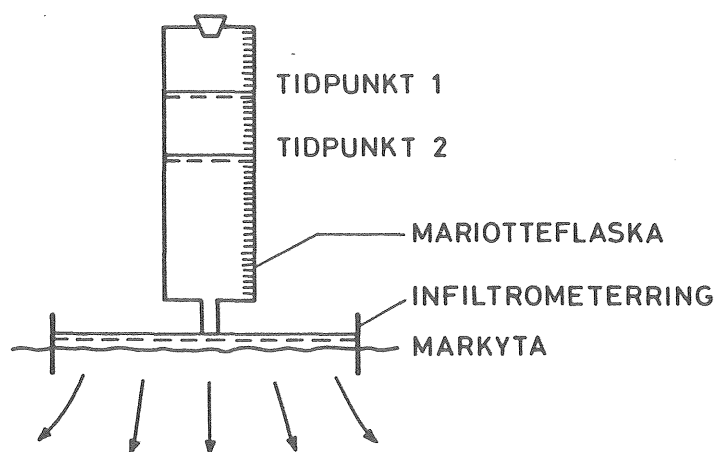
3.1 Fältarbete

De geologiska förutsättningarna för infiltration och perkolation kan variera stort inom ett bebyggt område. Dessutom utgörs det översta markskiktet hos grönytorna ofta av fyllnadsmassor, vilket ytterligare komplicerar en areell generalisering av infiltrationskapaciteten. Emellertid präglas fyllningens sammansättning av den underlagande geologiska miljön. Det är nämligen så att vid återfyllning och gräsyteanläggning, efter själva byggandet, används för det mesta jordmaterial med lokalt ursprung, d v s man tar schaktmassor från ett lokalt matjordsupplag för att erhålla en god transportekonomi (se figur 15). Som ett första steg i undersökningarna väljs därför områden med primärt varierande geologiska förutsättningar för infiltration.

Infiltrationsmätningarna sker med hjälp av enkelringsinfiltrometrar (radie 19,5 cm), vars utseende och funktion framgår av figur 16. En mer ingående beskrivning av ringinfiltrometern ges av Holmstrand & Wedel, (1976) och Ericsson & Holmstrand (1978).



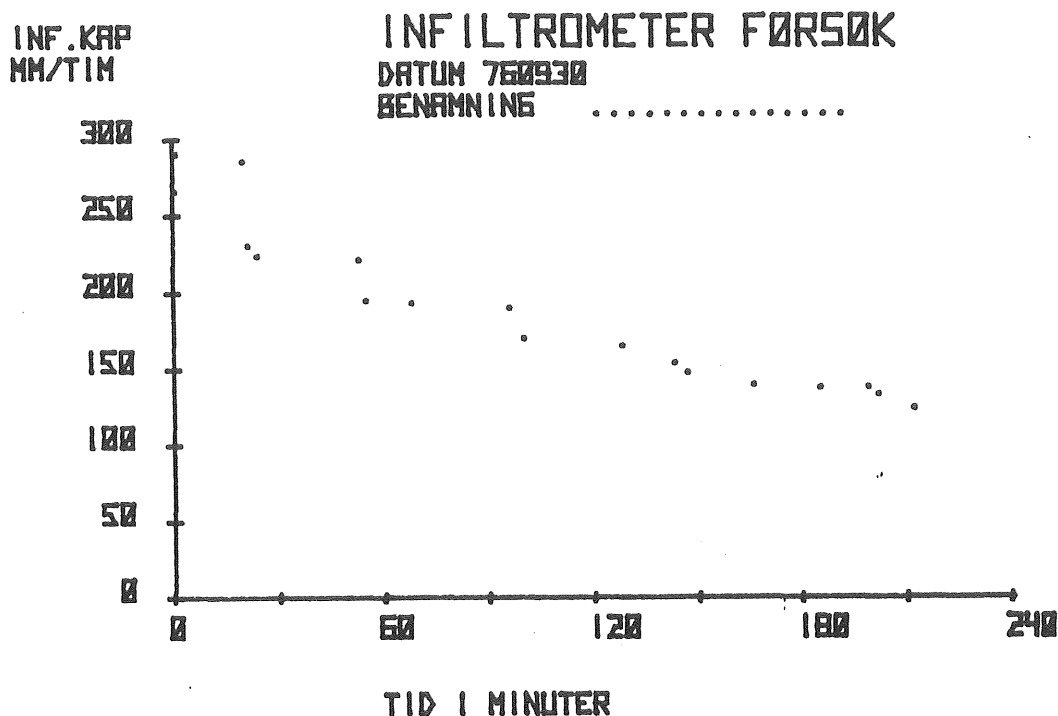
Figur 15. Jordmassorna transporteras i så liten omfattning som möjligt för att erhålla god transportekonomi. Den underlagande geologiska miljön bör därför lokalt påverka matjordsfyllningen för gräsytor och planteringar. (Efter Hallin, 1975).



Figur 16. En enkelringsinfiltrometer.

Det är praktiskt svårt att genomföra en stor mängd infiltrationsmätningar inom ett bebyggt område. Man skulle t ex kunna placera infiltrometrar i ett rutnät inom delområdena och på detta sätt skapa sig ett statistiskt underlag för en bedömning av infiltrationen. Men istället utväljs vissa delytor inom de geologiskt representativa områdena. Dessa delytor bedöms ha en likartad infiltrationskapacitet. Valet görs med hänsyn till fyllningens sammansättning och mäktighet, vegetation, packningsgrad och marklutning. Exempel på en framtagna karta som bas för infiltrationsuppskattningar presenteras i en uppsats i meddelande 25, Geohydrologiska forskningsgruppen (Ericsson, 1977).

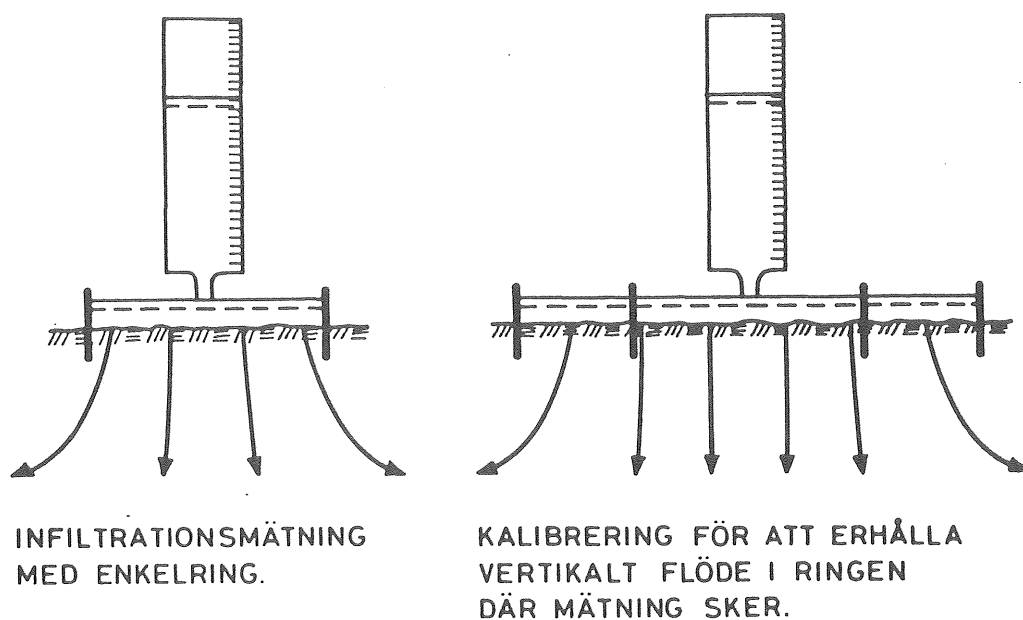
När infiltrometrarna utplaceras uppmäts infiltrationskapaciteten under så lång tid att ett konstant värde anses föreligga. I figur 17 visas ett infiltrationsförlopp som uppmätts i fält.



Figur 17. Mätvärden från ett infiltrationsförsök.

3.2 Korrigering av mätvärden

Vid infiltrationsmätningar har använts enkelringsinfiltrationsmeter ($r = 19,5$ cm) för att bestämma infiltrationskapaciteten. I den internationella litteraturen finns ett flertal undersökningar som beskriver och utreder tillförlitligheten hos infiltrationsmätningar (se Ericsson & Holmstrand, 1978). Erfarenheterna visar, att mätvärden från en enkelringsinfiltrationsmeter bör korrigeras med hänsyn till sidospridning (se figur 18). I detta kapitel redogörs för ett laboratorieförsök som utförts i avsikt att utreda infiltrationsmeterens funktion i matjordsfyllning på lera. Därefter jämförs permeabilitetsbestämningar på ostörda prover med infiltrationsmetervärden (enkelring). Slutligen diskuteras hur fältdata kan korrigeras med hänsyn till sidospridning utifrån egna och andras erfarenheter.

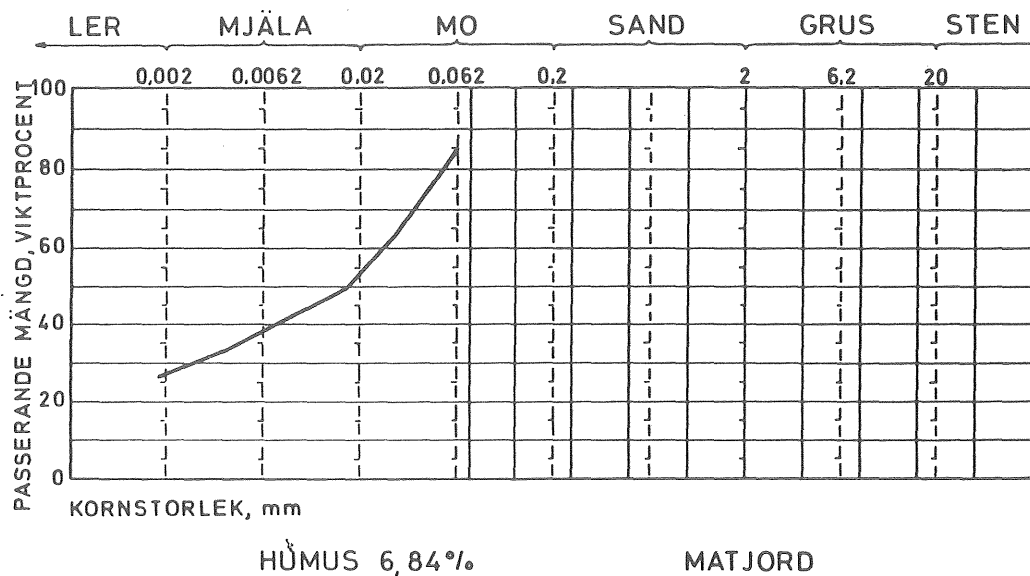


Figur 18. Figuren visar principen för en kalibrering av infiltrometerförsöken.

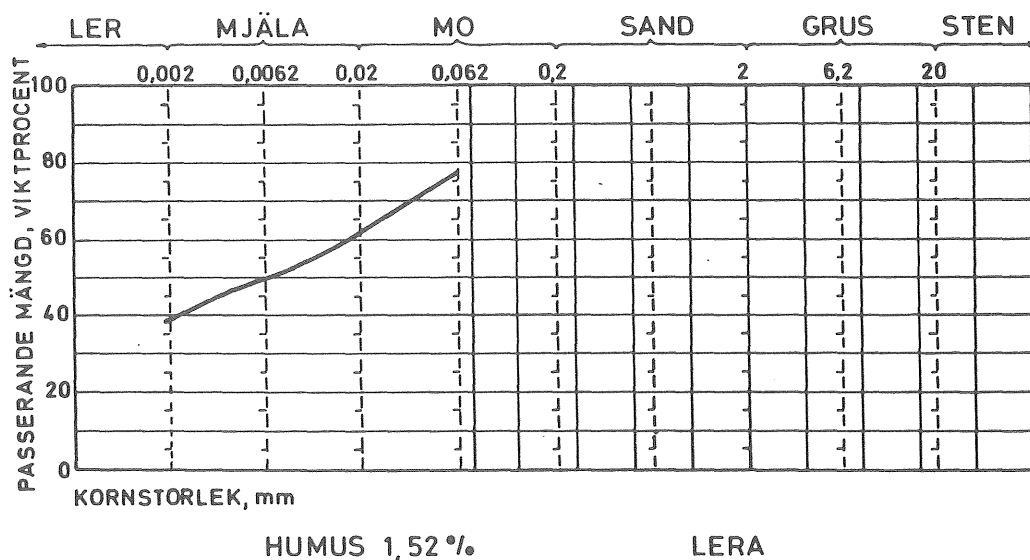
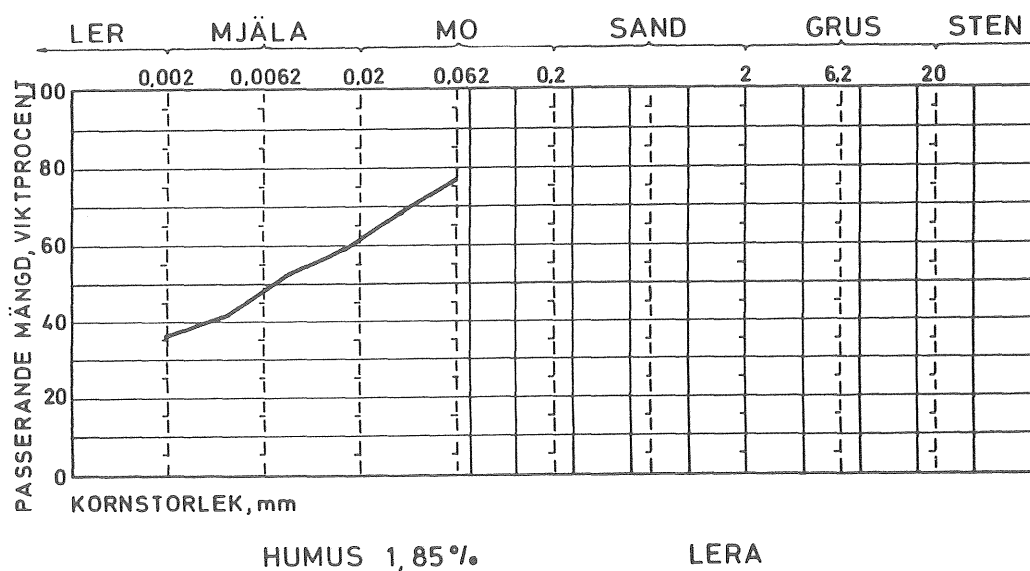
3.2.1 Laboratorieförsök i en låda

För att utreda infiltrometerns 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 19, 20 och 21. Under leran placerades ett filter med sand och singel där grundvattentrycknivån kunde varieras. Leran var av torrskorpekaraktär när den packades.

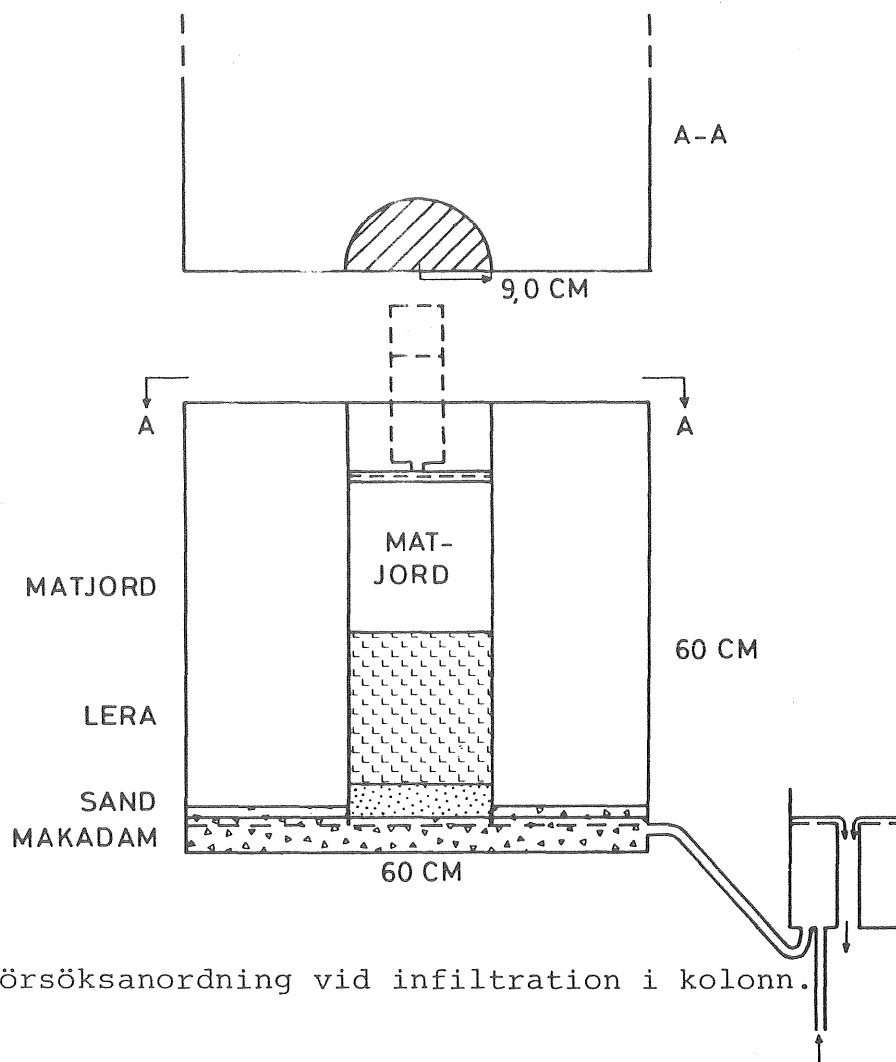
Först simulerades ett "endimensionellt" flöde (A4) i en halvcylindrisk ($r = 9,0$ cm) kolonn. (Se figurerna 22 och 23). Därefter fick kolonnen stå i 12 dygn, varefter ett likartat försök utfördes (A5), dock ej under så lång infiltrationstid (se figur 23).



Figur 19. Pipettanalys på matjordsskiktet. Humushalt 6,8 %.



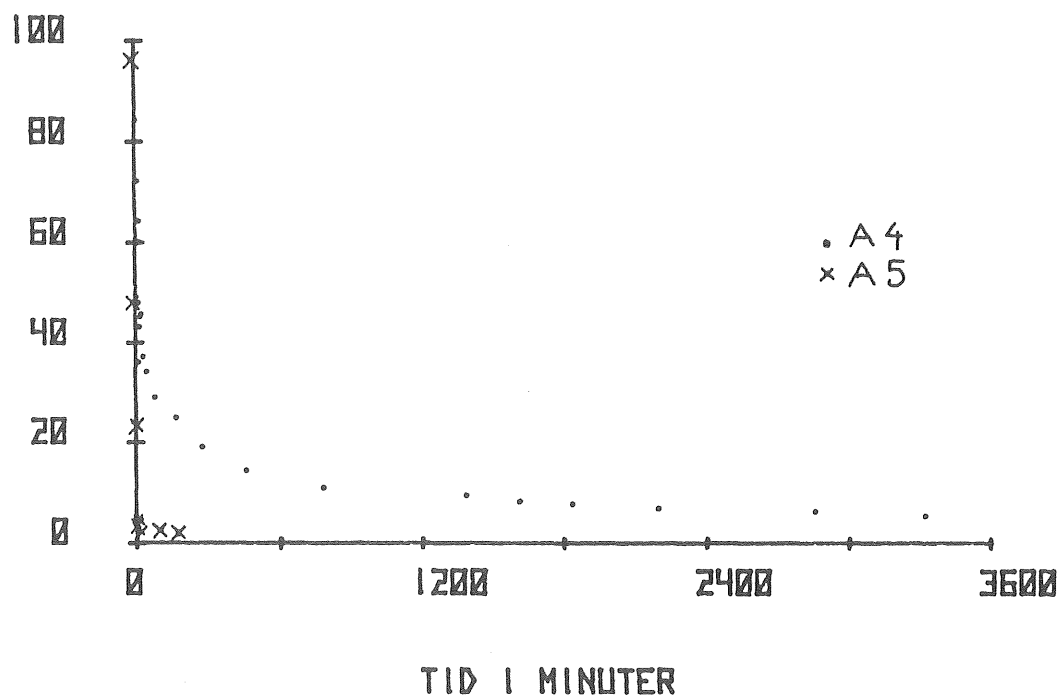
Figur 20, 21. Pipettanalys på den underlagrande leran. Humushalt 1,9 % (20) respektive 1,5 % (21).



Figur 22. Försöksanordning vid infiltration i kolonn.

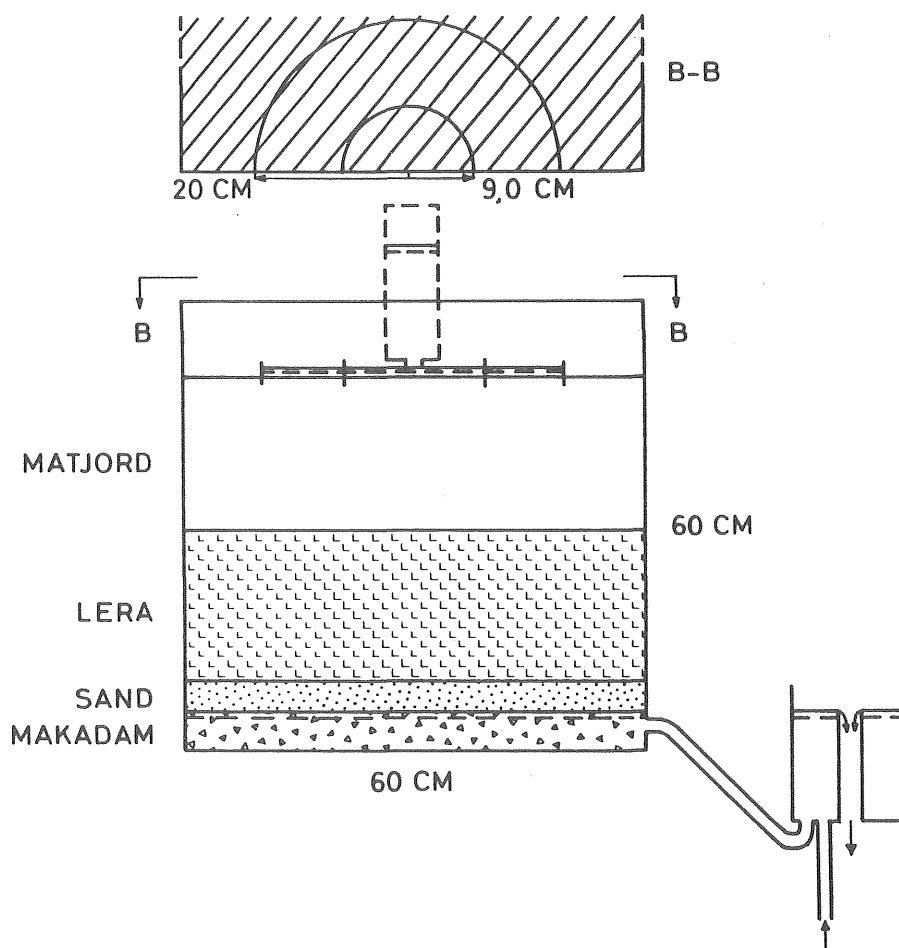
INF.KAP
MM/TIM

INFILTROMETER FÖRSÖK



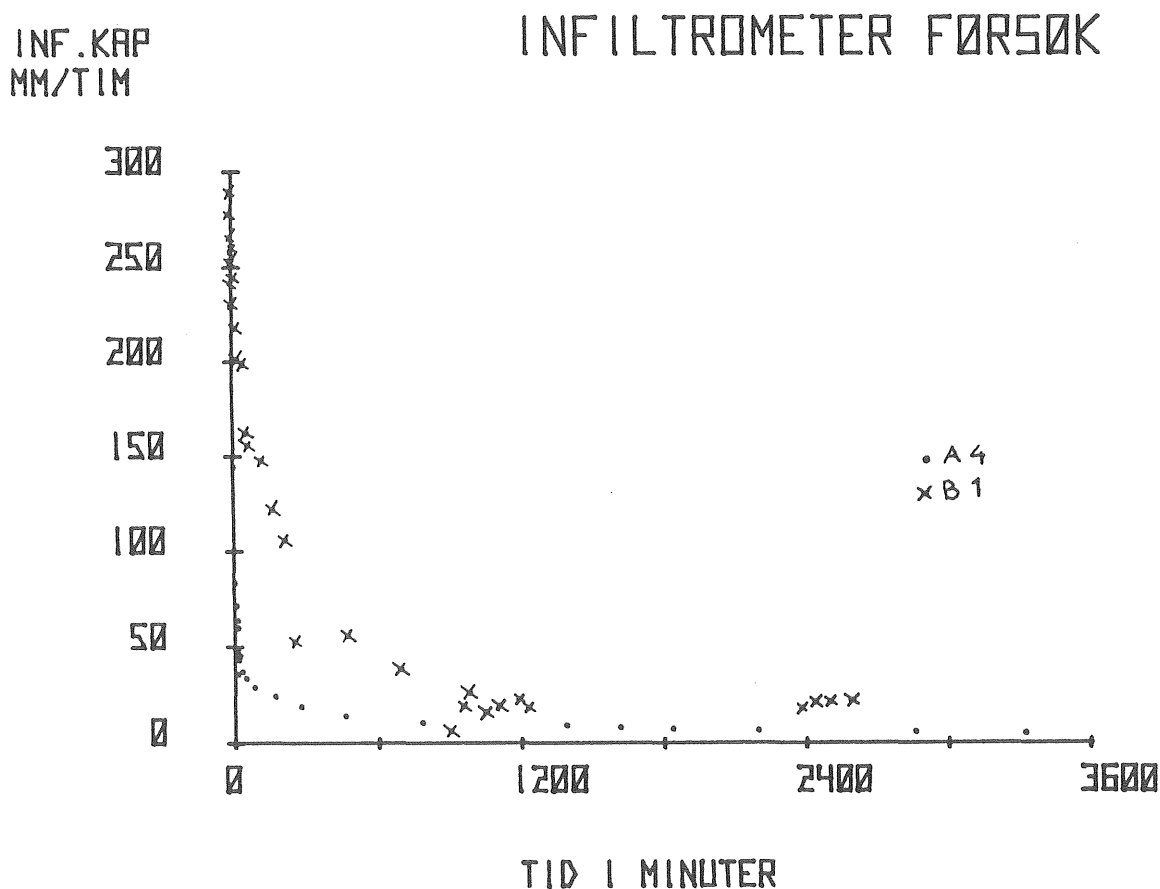
Figur 23. Infiltrationskurva för A4 och A5.

Man kan i figur 23 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 ur något under infiltrationsuppehållet. Vattenet magasineras vid återinfiltrationen snabbt i detta övre skikt. Därefter når vätningsfronten 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.



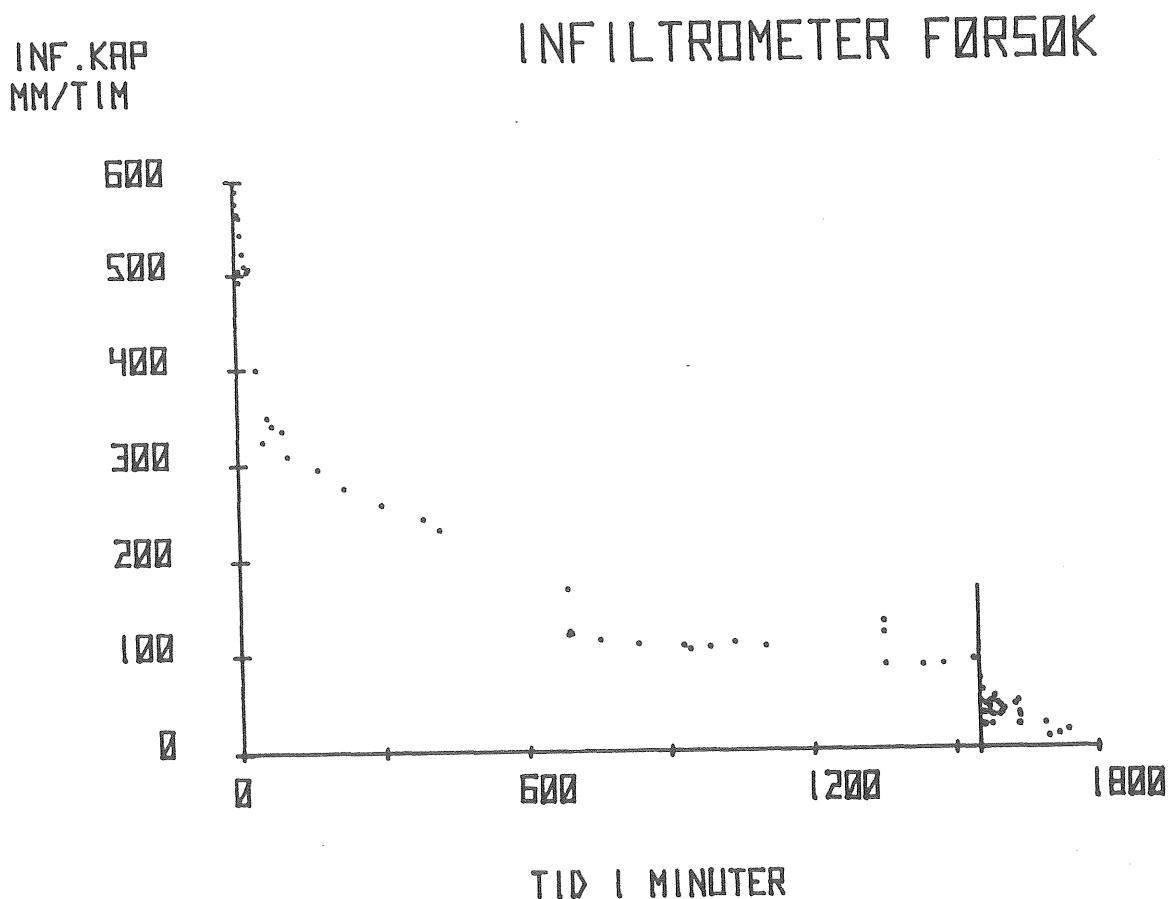
Figur 24. Försöksanordning vid enkelrings- respektive dubbelringsundersökningen.

Efter dessa s k "endimensionella" kolonnförsök packades lådan på identiskt sätt (se figur 24). Avsikten var nu att studera infiltrationskurvornas förlopp vid enkelringsinfiltrometer och dubbelringsinfiltrometer. 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 25). En viss sidospridning förekom alltså som på något sätt bör korrigeras mot det riktiga "endimensionella" värdet.



Figur 25. Enkelringsförsöket (B1) jämfört med kolonnförsöket. (A4).

För att korrigera enkelringsvärden i fält och för att kunna efterlikna en mätning av vertikalt flöde i en jordkolonn används ofta följande metod. Koncentrisk 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 18). Effekten av dubbelring studerades i försök B2 och B3. Försök B2 pågick tills ett konstant värde uppnåtts och därefter kopplades ytterringen 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 till känna i form av den punktskara som ses i figur 26 (efter 1545 min). En tydlig nedåtgående trend i kapaciteten visar emellertid att förfarandet med dubbelring bör ge ett riktigare värde på infiltrationskapaciteten.

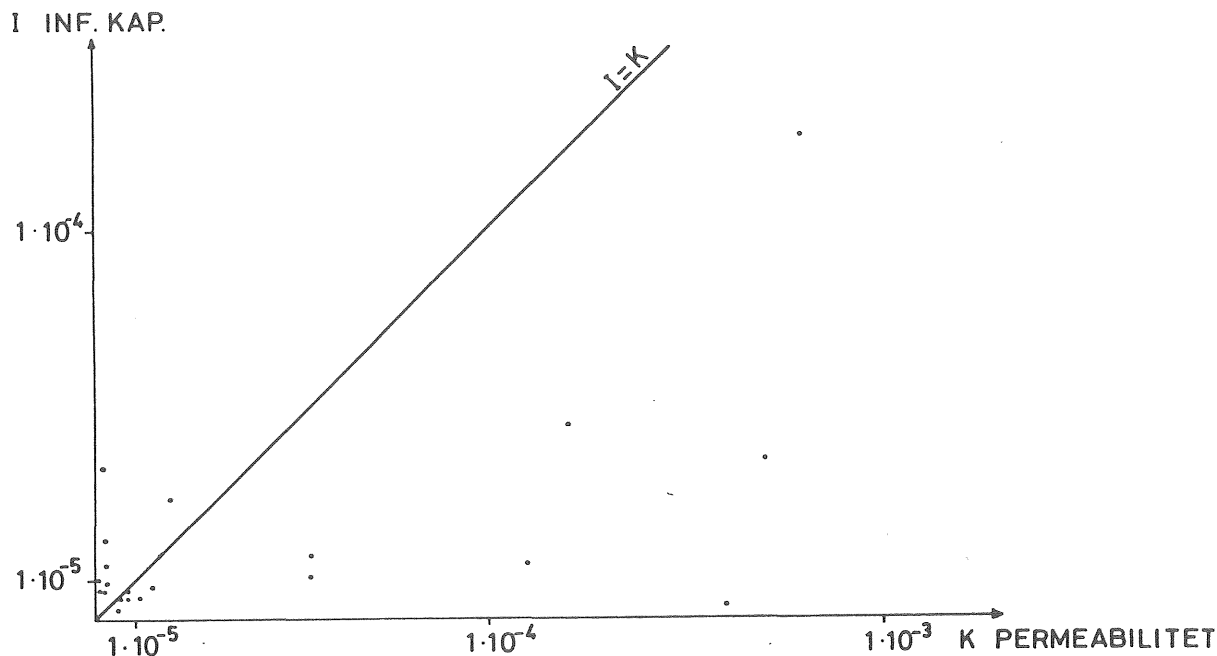


Figur 26. Effekten av påkopplad dubbelring är en minskad infiltrationskapacitet.

Sammanfattningsvis kan följande sägas om laboratorieförsöket. Enkelringsinfiltrationsvärden i fält skall korrigeras med hänsyn till sidospridning (se kapitel 3.2.3). Värden från dubbelringsinfiltrationsmeter bör ge rik-
tigare värden än enkelringsinfiltrationsmeter. En betydande säsongsmässig variation av infiltrationskapaciteten kan uppstå i kohesionära jordarter till följd av svällning.

3.2.2 Permeabilitetsbestämningar av cylinderprov

Vid en infiltrationsundersökning i stadsdelen Ryd, Linköping, togs "ostörda" prover, cylinderprover, från den våta arean som begränsats av infiltrationsmeterens enkelring. Cylinderproverna togs med hjälp av Sigvard Anderssons sk cylinderprovtagare (se Holmstrand & Wedel, 1976). Cylinderarnas längd är 10 cm och radien 3,5 cm. Proverna begränsas uppåt av markytan. Permeabiliteten för de ostörda proverna bestämdes därefter i laboratorium. Syftet med dessa bestämningar var att försöka korrelera permeabiliteten med slutvärdet för infiltrationskapaciteten. Rent teoretiskt borde permeabilitetsbestämningarna ge lägre värden än infiltrationsmetermätningarna på grund av sidospridning undviks. Denna undersökning skulle alltså kunna ge en korrigering av infiltrationsmetermätningarna med enkelring (se figur 27). Figuren visar emellertid att någon korrelation mellan de båda mätförfarandena knappast föreligger. Permeabilitetscylinderarnas genomströmningsarea torde vara för liten för att vara representativ för infiltrationsringens. Markens markstruktur varierar alldeles för mycket för att infiltrationen skall kunna generaliseras med så små provytor. Dessutom är infiltrationskapaciteten avhängig av den kapillära konduktiviteten hos det tätaste lagret i marken. Detta lager kan ligga på en lägre nivå än dit provcylindern når och jämförelsen med infiltrationsmetermätningen blir således ännu mer tveksam.

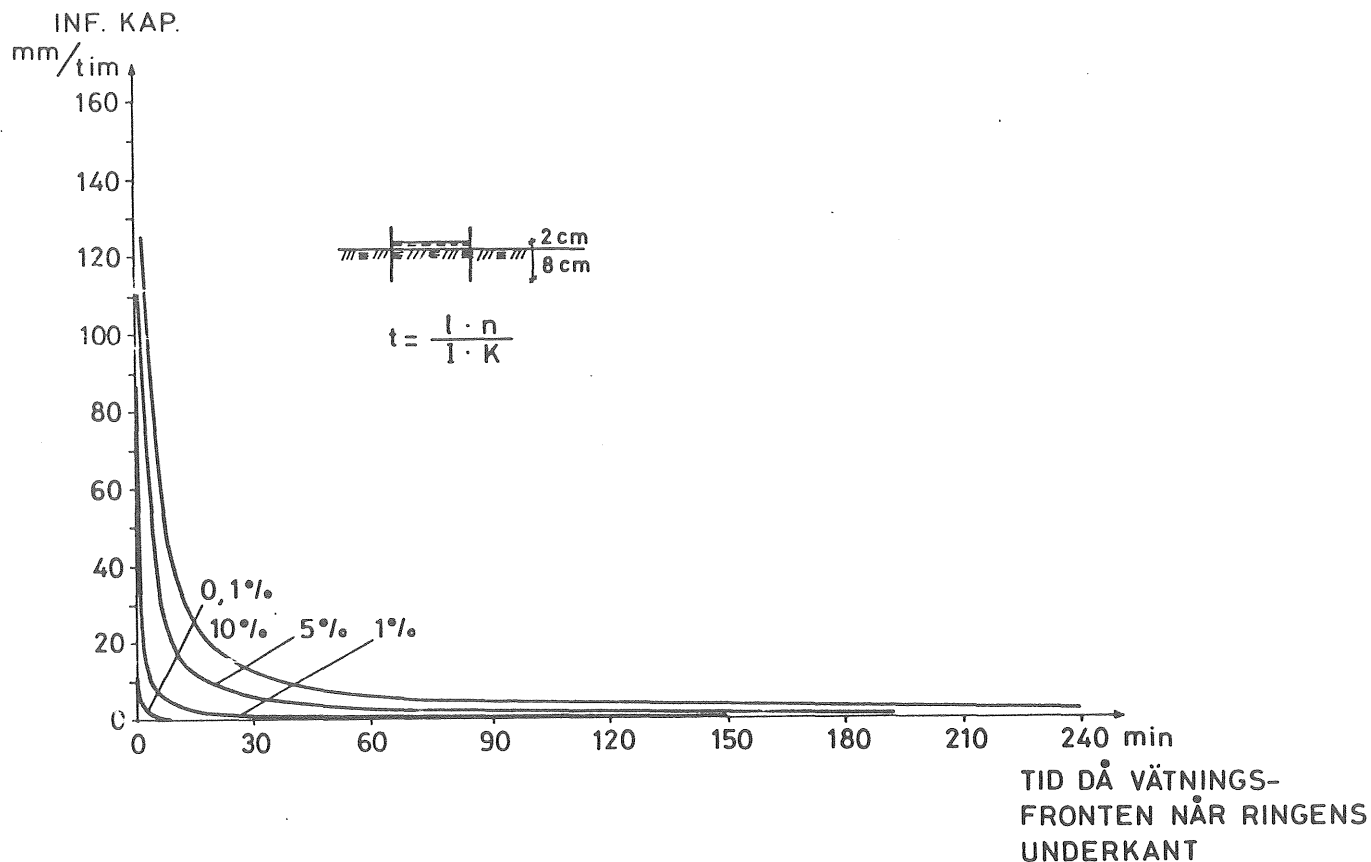


Figur 27. Samhörande värden för permeabiliteten hos prover i infiltrometerringen och infiltrationskapacitetens slutvärde.

3.2.3 Korrektionsfaktor

Hur skall korrigerig av mätdata med ringinfiltrometern genomföras? I detta avsnitt presenteras dels egna teorier och försök, dels vissa sammanfattande resultat av en amerikansk undersökning (Schwartzendraber & Olsson, 1961). Den amerikanska undersökningen presenteras mer noggrant i en speciell litteraturgenomgång (Ericsson, Holmstrand, 1978).

Infiltrationsringens underkant når ungefär 8 cm ned under markytan. Vid jordarter med mycket låg kapillär 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 korrigerig av mätdata bör ske.



Figur 28. Kurvorna representerar olika effektiva porositeter. Olika infiltrationskapaciteter ger olika tider då vätningsfronten når infiltrometerringens underkant. OBS! Infiltrationsförloppet är mycket förenklat.

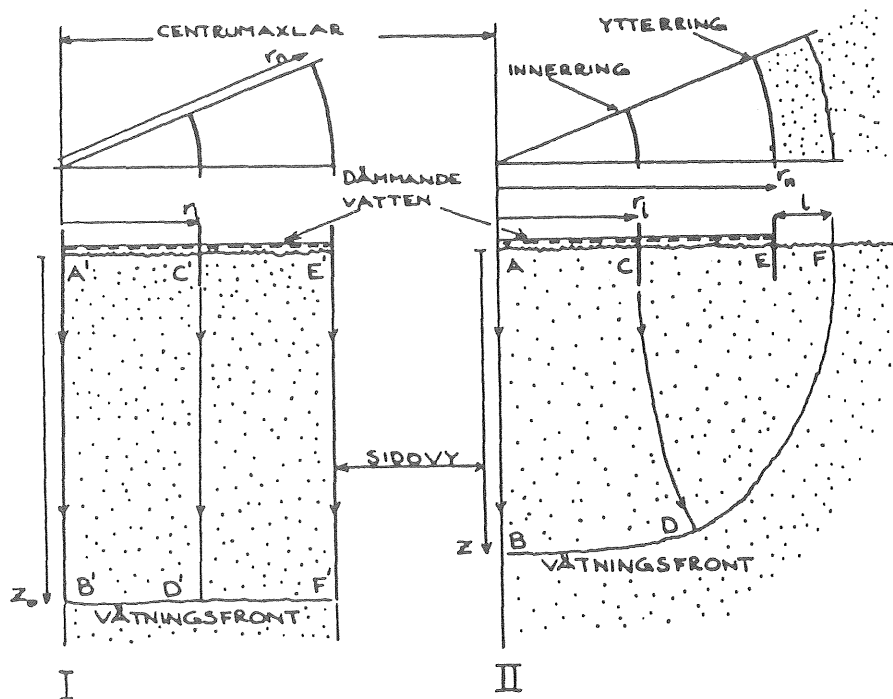
I figur 28 presenteras en idealiserad situation som åskådliggör när vätningsfronten når ringens underkant vid olika uppmätta infiltrationskapaciteter. Kurvorna representerar några olika valda effektiva porositeter. Konduktiviteten är för enkelhets skull satt oberoende av vattenhalten och likaså är vattenrörelsen enbart beroende av gravitationen. D v s full mättnad råder. Det har antagits att mariotteflaskans pip vid infiltrationsförsöken lämnar ett avstånd av 2 cm till markytans. 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 infiltrometerförsök, där mätdata gett startvärden på infiltrationskapaciteter ≤ 5 mm/tim. Ligger mätvärdena (startvärden) 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.

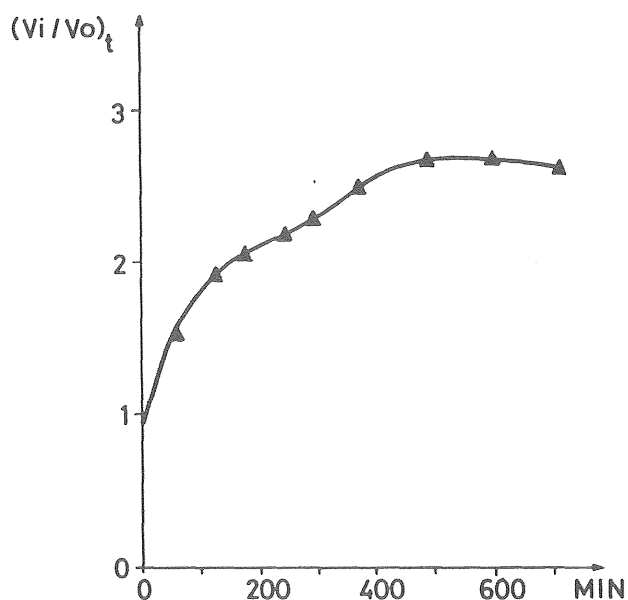
Tidigare har nämnts, att Schwartzendruber och Olsson (1961) genomfört en modellstudie över dubbelringsinfiltrometers funktion. Avsikten var att bestämma storleken på innerring och tillhörande dubbelring för att få så tillförlitliga mätvärden som möjligt. Korrigering för sidospridningen var alltså tänkt att göras med hjälp av en dubbelring. De storlekar som rekommenderas på ringarna (innerring, $r = 50$ cm, ytterring, $r = 60$ cm) är emellertid praktiskt svårhanterade och därför valde vi en mindre enkelring ($r = 19,5$ cm) med möjlighet att korrigera sidospridningen i efterhand. Nedan presenteras kortfattat vissa av Schwartzendrubers & Olssons resultat.

Sidospridningen är en funktion av både vätningsfrontens läge och det porösa mediets (jordartens) kapillaritet eller fältkapacitet. För grovkorniga material är sidospridningen liten medan den ökar för finkorniga material. Om kapillariteten är konstant ökar sidospridningen med ökat djup för vätningsfronten. När vätningsfronten ligger precis i markytan har man ingen sidospridning eller kvoten mellan verklig (V_0) och uppmätt (V_i) infiltrationskapacitet är lika med 1. Denna kvot minskar sedan med vätningsfrontens läge. Se figur 29. Schwartzendruber & Olson presenterar bl a en kurva (V_i/V_0) för ett försök med innerring ($r = 8'' = \approx 20,2$ cm) men utan dubbelring (se figur 30). $(V_i/V_0)_t$ ökar med tiden till ett "asymptotiskt" värde, lika med 2,65. D v s det upp-

mätta värdet är 2,65 ggr för stort efter 700 min. Kurvan gäller för ett ursprungligt torrt finkornigt material, med Bouwers kritiska spänning lika med 76 cm (kapillaritetsgränsen). En korrigering vid ett infiltrometerförsök bör alltså göras med hjälp av en korrektionsfunktion som ger störst korrektion då konstant infiltrationsintensitet (slutvärde) erhållits och som är lika med 1 vid försökets början.

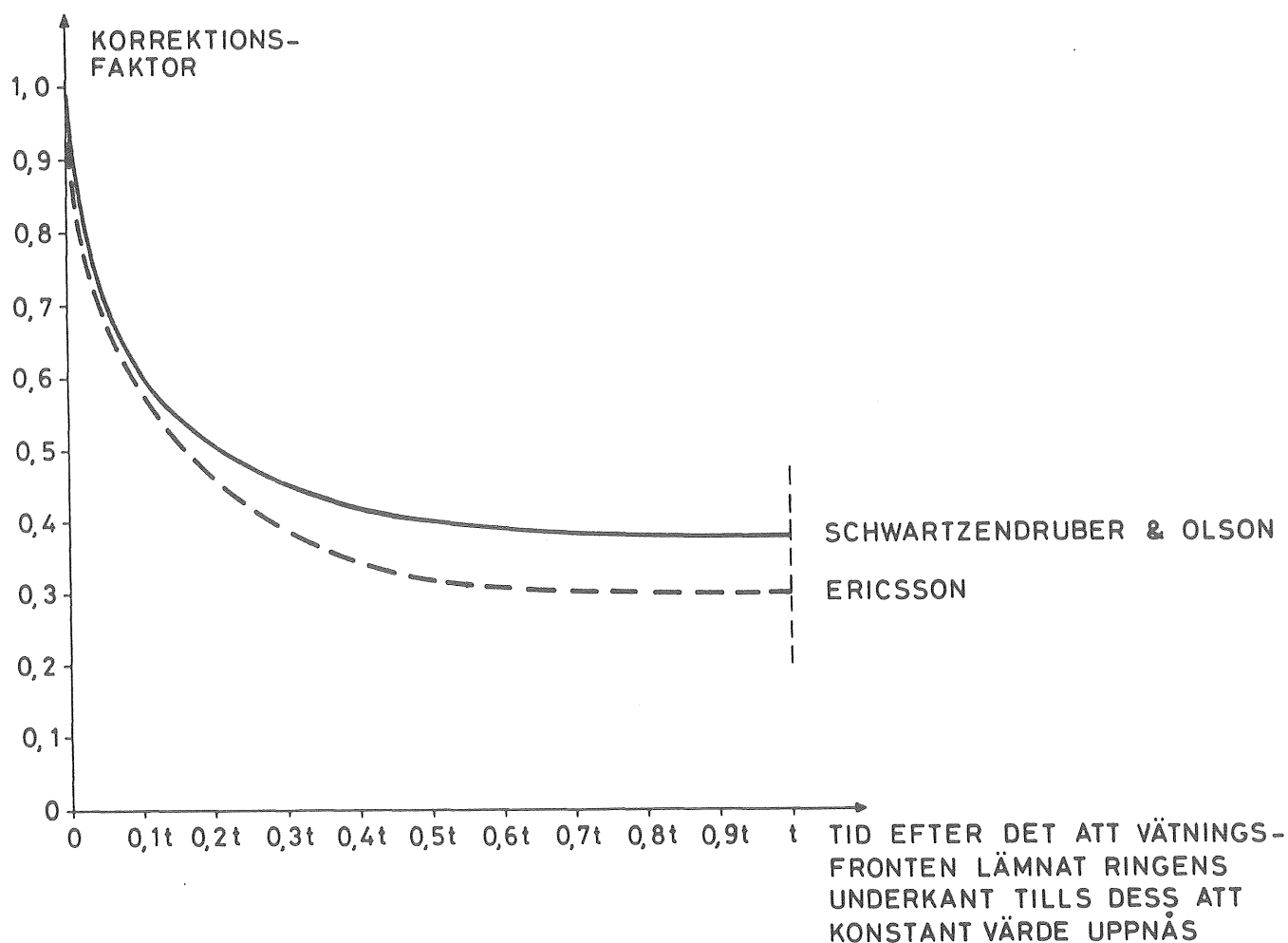


Figur 29. Vättningsfrontens utseende för, (I) "endimensionellt" flöde och (II) "tredimensionellt" flöde under en dubbelringsinfiltrimeter. (Efter Schwartzendruber & Olson, 1961).



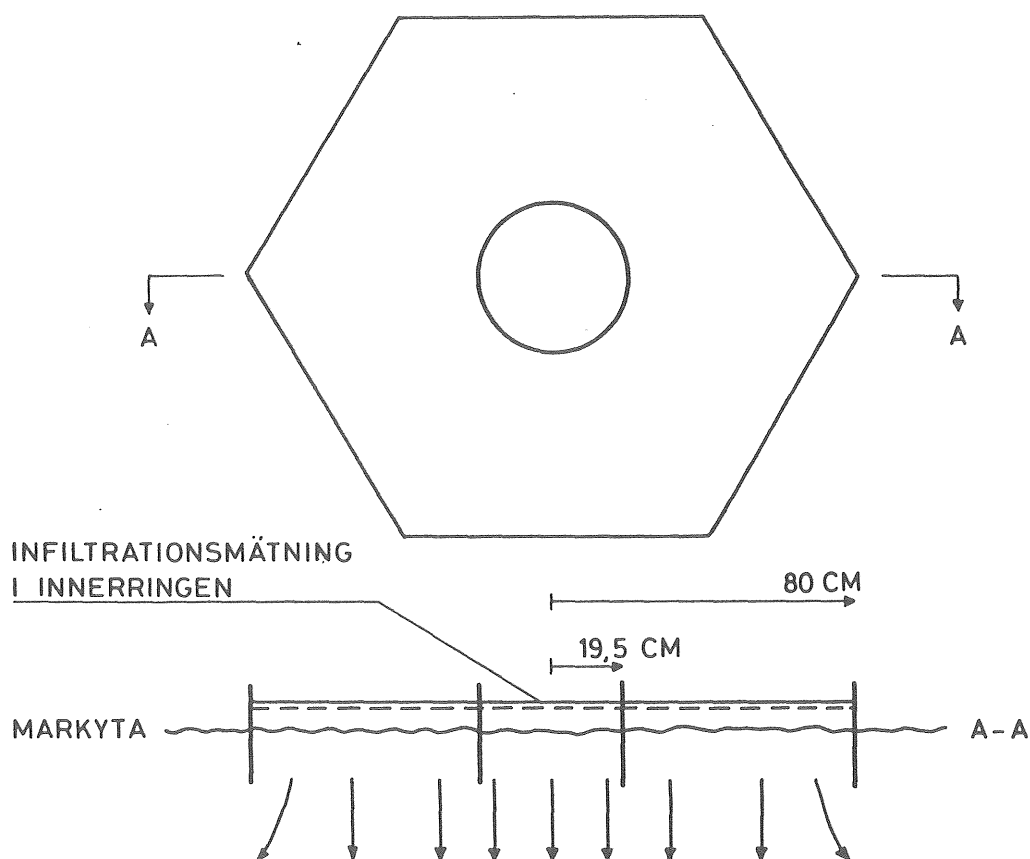
Figur 30. Hastighetskvoten $(v_i/v_o)_t$ i relation till tiden för enkelring ($r = 20,2$ cm). (Efter Schwartzendruber & Olson, 1961).

Tidigare konstaterades att vid låga mätvärden på kapaciteten når sannolikt inte vätningsfronten infiltreringsringens underkant och man bör då ej korrigeras för sidospridning. En korrektionsfunktion bör alltså verka efter den tid då vätningsfronten passerat ringen och tills dess att ett konstant infiltrationsvärde erhålls. Figur 31 visar det inverterade värdet av $(V_i/V_o)_t$ (korrektionsfaktorn) som funktion av ovan nämnda tid. Slutvärdet enligt Schwartzendruber, Olson skall då multipliceras med 0,38 vid ett infiltrationsförsök i den finkorniga jordarten. Dessa resultat bör kunna användas vid en jämförelse med och korrigering av våra infiltrationsförsök, på samma infiltrationsringarnas lika storlekar ($r = 20,2$ cm respektive $19,5$ cm).



Figur 31. Korrektionsfaktorn som funktion av tiden, tills dess att konstant värde uppnås.

En uppskattning av korrektionsfaktorns slutvärde för de enkelringsinfiltrometrar ($r = 19,5$ cm) som används vid CTH:s 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 tills dess att infiltrationskurvan uppvisade ett konstant värde. Därefter påkopplades infiltration mellan inner- och ytterring. Ytterringen hade approximerats till en sexhörning med 80 cm sida. Infiltrationen uppmättes i innerringen tills dess att ett konstant värde återigen erhöles. Vattnets trycknivå emellan inner- och ytterring hölls konstant lika med nivån i innerringen, se figur 32.



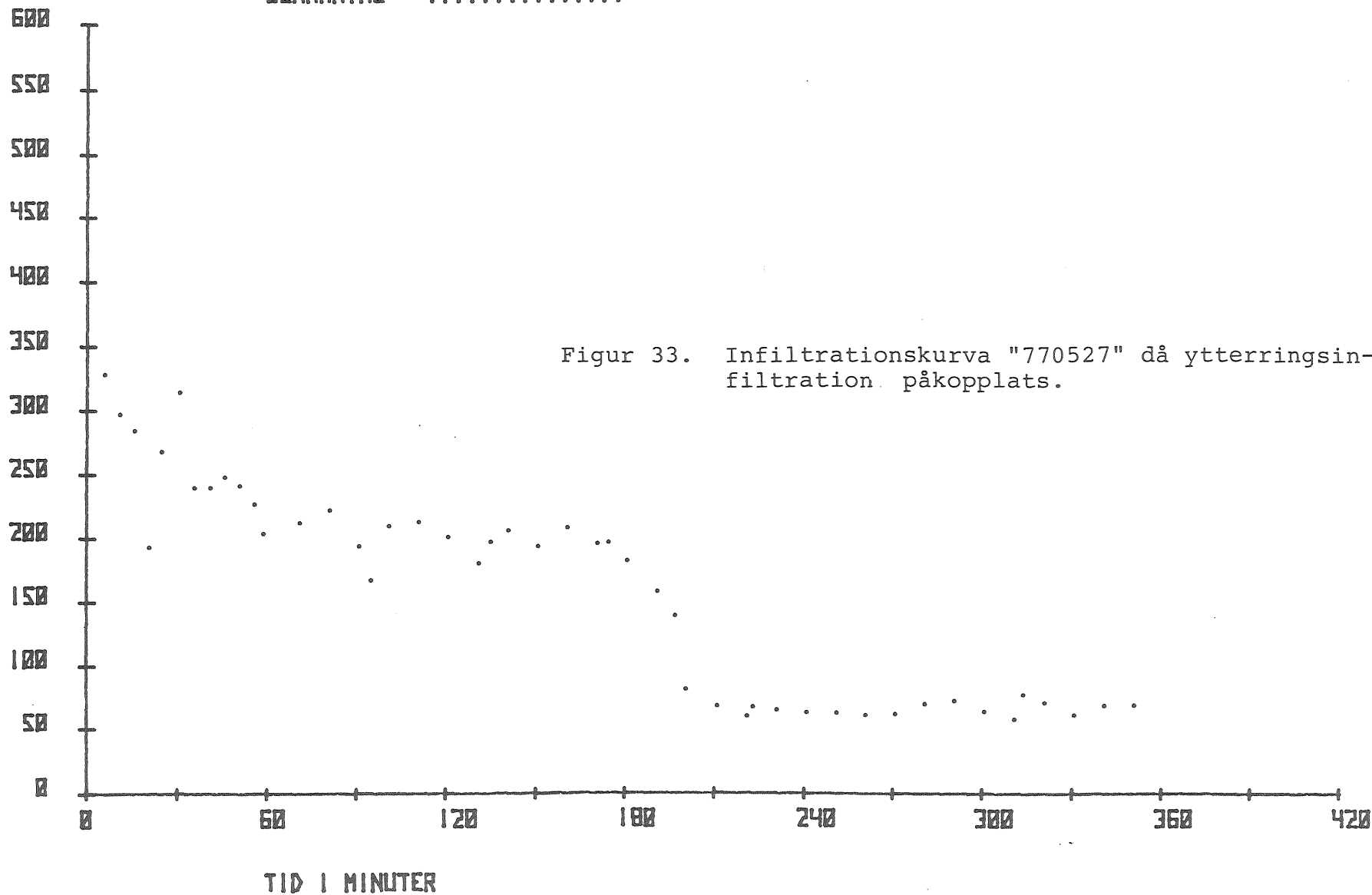
Figur 32. Korrigering av enkelringsinfiltrometerns slutvärde i fält.

INF. KAP
MM/TIM

INFILTROMETER FØRSØK

DATUM 770527

BENAMNING

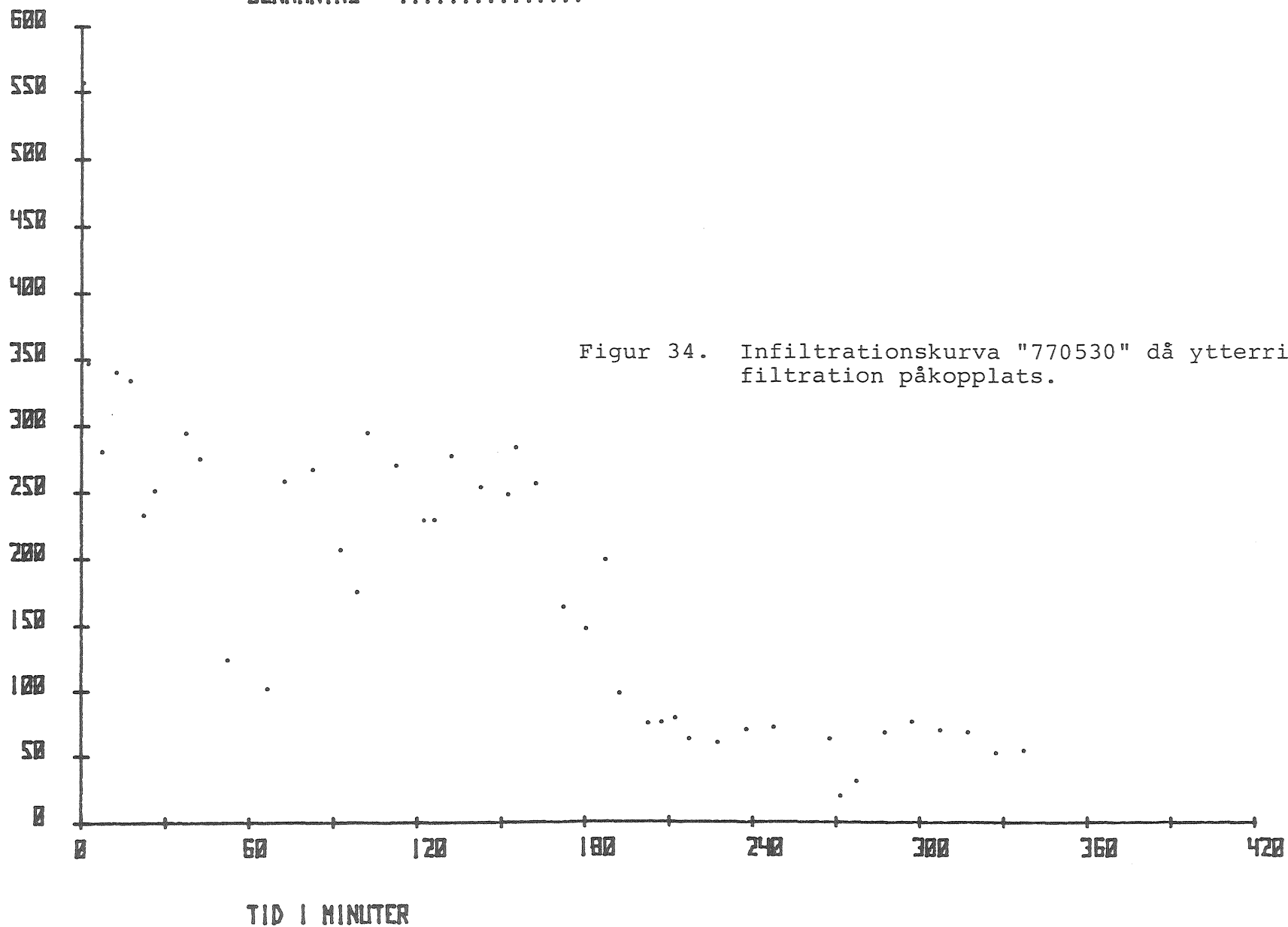


INF.KAP
MM/TIM

INFILTRMETER FØRSØK

DATUM 770530

BENAMNING



Figur 34. Infiltrationskurva "770530" då ytterringsinfiltration påkopplats.

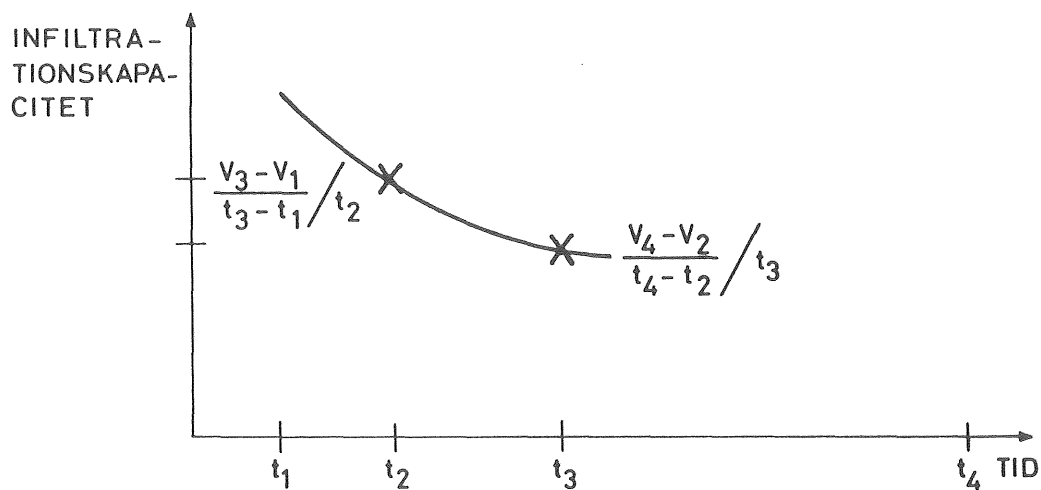
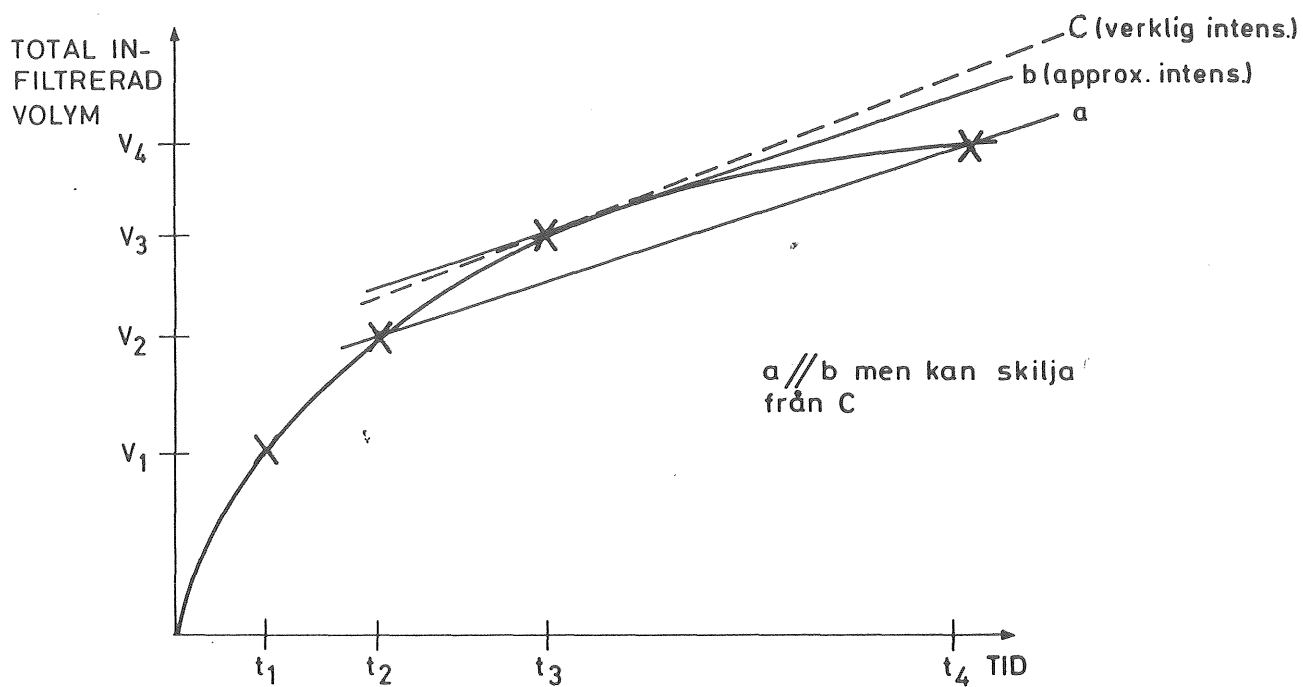
De båda korrigeringsförsökens infiltrationskurvor visar en tydlig påverkan av ytterrigen. Kapaciteterna sjunker momentant och anpassar sig mot nya asymptoter. Försök 770527 gav en slutlig infiltrationskapacitet som motsvarade ca 32 % av enkelringsvärdet, se figur 33. Försök 770530 gav ett värde som var ca 28 % av enkelringsvärdet, se figur 34.

Vid dessa försök var begynnelsevärdena så höga att sidespridningen kan antas börja vid försökets start. De uppmätta enkelringsvärdenas slutvärden bör alltså enligt dessa försök korrigeras med en faktor lika med 0,30. Om samma kurvform som Schwartzendruber, Olsons behålls, skulle en korrektionsfunktion för våra enkelringsinfiltrometrar kunna se ut som den streckade linjen i figur 31. Det måste dock påpekas att en korrektionsfunktion ej kan vara en entydig funktion med tiden. De olika markfysikaliska förutsättningarna påverkar korrektionen olika. Man skulle emellertid vid de försök som bedrivs i finkornigare jordmånstyper använda en funktion liknande den i figur 31. På detta sätt kan man erhålla en trovärdigare kvantifiering av infiltrationskapaciteten med hjälp av enkelringsmätningar.

I kapitel 1.3 redogjordes för hur infiltrationsprocessen behandlas i Arnell, 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_o och k vid olika extrema markfuktighetstillstånd.

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 35. De beräknade infiltrationsvärdena bör därefter korrigeras med hänsyn till eventuell sidospredning 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 36 och 37. f_o och f_c anges i mm/tim medan k anges i l/tim.



Figur 35. En principiell beskrivning av hur uppmätta värden approximeras till infiltrationskapaciteten vid tiden t_3 .

HORTONS FORMULA	INDEX OF DETERM.	F0-FC	K	FC	F0
$Y=FC+(F0-FC)EXP(KT)$	0.983486	23.02	-1.178100	7.40	30.42

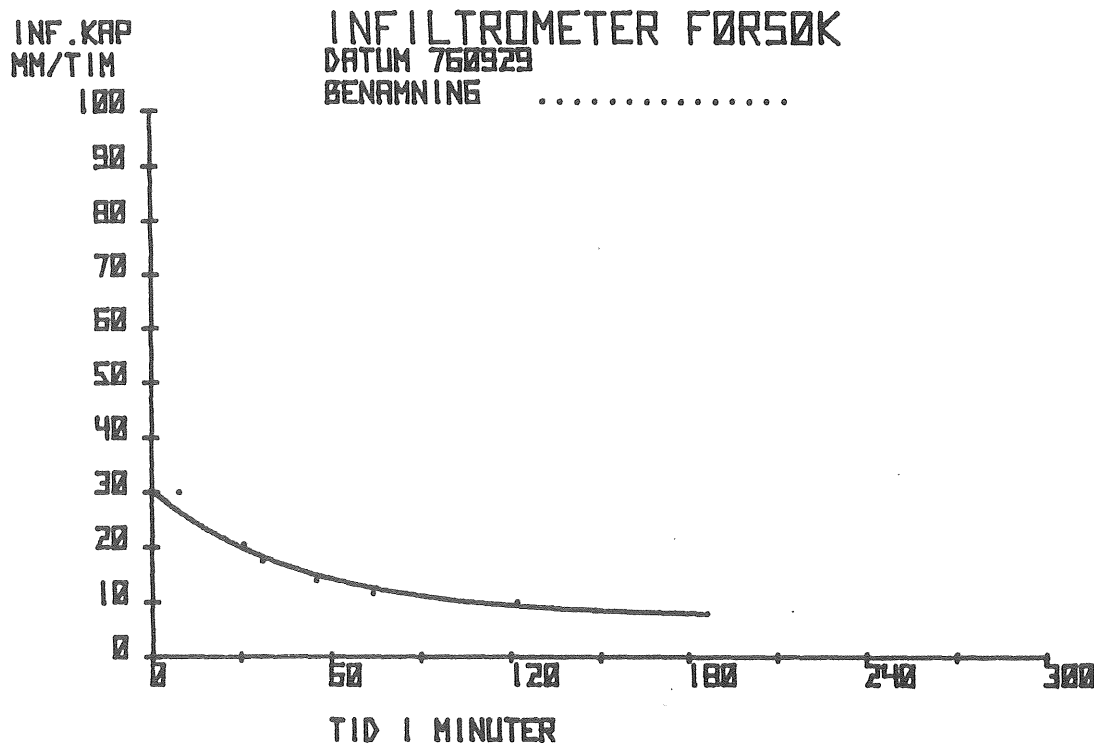
MEAN AND STANDARD DEVIATION OF RAW DATA

	MEAN	STANDARD DEVIATION
X	82.75	62.69597845
Y	15.1309975	7.473386761

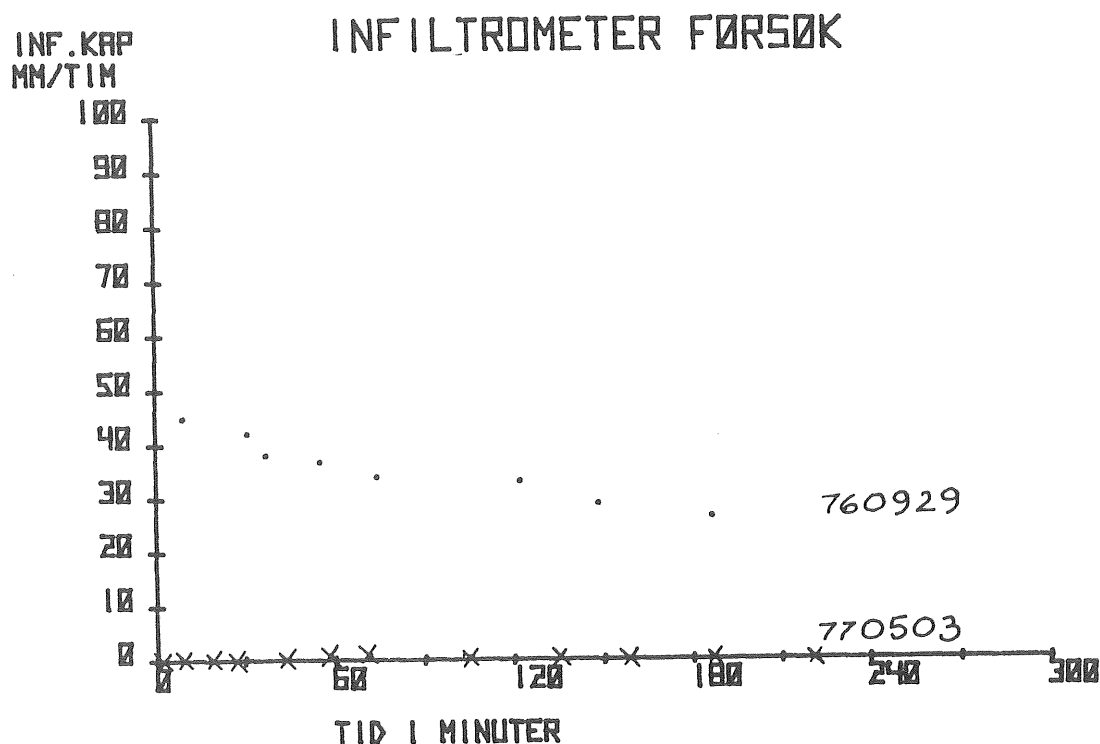
$Y=FC+(F0-FC)EXP(KT)$ IS AN EXPONENTIALFUNCTION. THE RESULTS OF A LEAST-SQUARES FIT OF ITS LINEAR TRANSFORM (SORTED IN ORDER OF ASCENDING VALUES OF X) ARE AS FOLLOWS:

Y-ACTUAL	Y-ACTUAL	Y-CALC	PCT 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
186.00	7.95	7.99711	-0.6

Figur 36. Exempel på utskrift vid regression enligt Hortons formel.



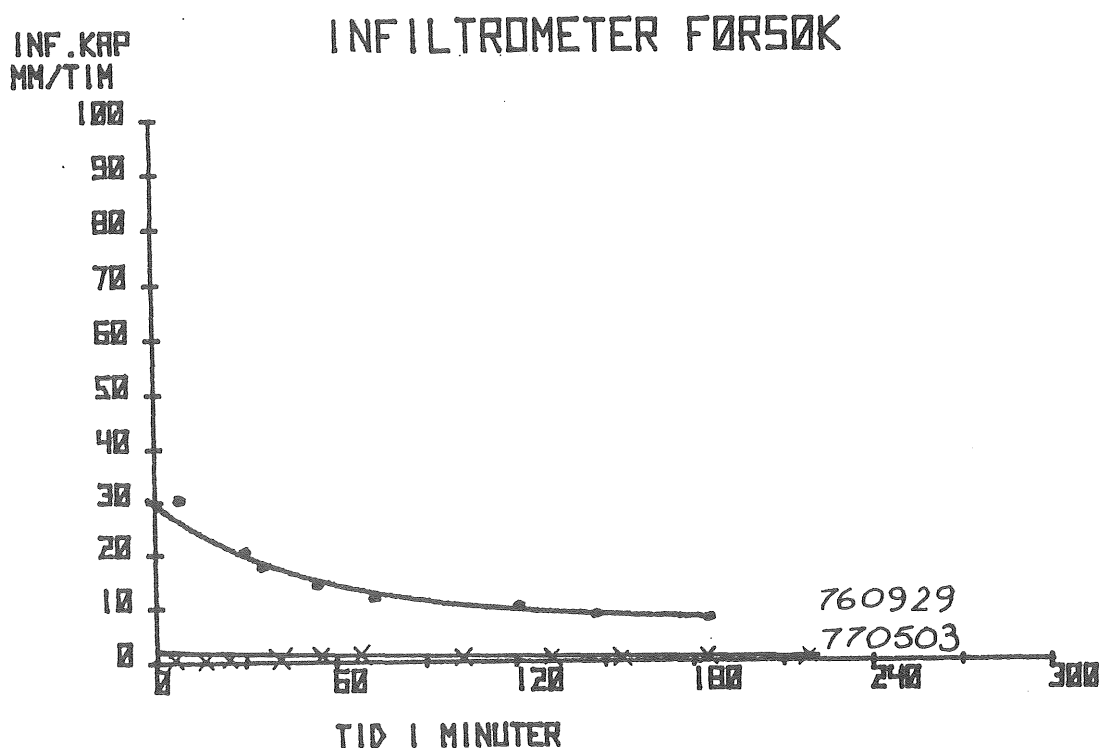
Figur 37. Exempel på kurvplott vid anpassning av Hortons formel till mätdata.



Figur 38. Mätdata från två infiltrrometerförsök i Rydområdet, Linköping.

I figur 38 visas rådata på intensitetsvärden från två infiltrationsförsök i Rydområdet, Linköping. Mätningarna är utförda vid två extrema markfuktighetssituationer, dels efter en mycket torr period (760929) 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 ler och humushalten är ca 7 %. Vid tidpunkten 760929 låg den naturliga vattenhalten ca 5 vol % under fältkapacitet. Vid tidpunkten 770503 rådde full vattenmättnad. Rådata behandlas i detta fall på följande vis.

Försök 760929 korrigeras från start till slutvärde enligt den streckade korrektionsfunktionen (figur 31). 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 760929 $f_c = 7,40, f_o = 30,42, k = -1,18$ och vid försök 770503 $f_c = 0,19, f_o = 0,63, k = -0,89$. Se figur 39. 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.



Figur 39. Mätvärdena i figur 38 har korrigerats och Hortons formel har anpassats till de korrigerade värdena.

6 REFERENSER

- Arnell, V & Lyngfelt, S, 1975. Interimrapport. Beräkningsmodell för simulering av dagvattenflöde inom bebyggda områden. (Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH). Meddelande nr 12. Göteborg.
- Ericsson, L (red), 1977. Lokalt omhändertagande av dagvatten. (Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH). Meddelande nr 25. Göteborg.
- Ericsson, L & Holmstrand, O, 1978. Vattnets rörelse i den omättade zonen. Mätmetoder. Litteraturgenomgång. Byggeforskningen, rapport R4 1978.
- Green, W H & Ampt, G A, 1911. Studies on soil physics: I. Flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science 4, pp 1-24.
- Hallin, I, 1975. Markbyggnad. LT:s förlag. Alnarp, 1975.
- Holmstrand, O & Wedel, P, 1976. Markvattenundersökningar i ett urbant område. (Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH). Meddelande nr 17. Göteborg.
- Overton, D E, 1964. Mathematical refinement of an infiltration equation for watershed engineering. USDA-Aes, pp 41-99.
- Overton, D E & Meadows, M E, 1976. Stormwater Modelling. Academic Press, 1976. New York.
- Schwartzendruber, D & Olson, T C, 1961. Model study of the double-ring infiltrometer as affected by depth of wetting and particle size. Soil Science, Vol. 92, pp 219 - 225.
- Terstriep, M & Stall J, B, 1974. The Illinois Urban Drainage Area Simulator (ILLUDAS). Illinois State Water Survey, Bulletin 58. Urbana, Illinois, 1974.

Chalmers Tekniska Högskola

GEOHYDROLOGISKA FORSKNINGSGRUPPEN

Institutionerna för

Geologi

Geoteknik med grundläggning

Vattenbyggnad

Vattenförsörjning- och avloppsteknik

Meddelande:

- nr 1 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvatten-
avrinning och grundvattenbildning. Läges-
rapporter (1972-07-01 - 1973-03-01). 1973.
- nr 2 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 1.
Evaluering av akviferers geohydrologiska
data med hjälp av provpumpningsdata. 1973.
- nr 3 Leif Carlsson: Grundvattenavsänkning Del 2.
Evaluering av lågpermeabla lagers hydrauliska
diffusivitet med hjälp av provpumpningsdata.
1973.
- nr 4 Viktor Arnell: Nederbördsrätmätare. En samman-
ställning av några olika mätartyper. 1973.
- nr 5 Viktor Arnell: Intensitets-varaktighetskurvor
för häftiga regn i Göteborg under 45-årsperioden
1926 - 1971. 1974.
- nr 6 Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvatten-
avrinning och grundvattenbildning. Läges-
rapporter (1973-03-01 - 1974-02-01).
1974.
- nr 7 Olov Holmstrand, Per O Wedel: Ingenjörsgelogiska
kartor - litteraturstudier. 1974.

- 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.
- nr 9 Olov Holmstrand (red.): Seminarium om ingenjörsgelogiska kartor. 1974.
- nr 10 Viktor Arnell, Börje Sjölander: Mätning av nederbördsintensiteter i Göteborgsregionen. Stationsbeskrivning. 1974.
- nr 11 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Rapport från arbetsgruppen "Dagvattnets beskaffenhet och egenskaper". Sammanställning av utförda dagvattenundersökningar i Stockholm och Göteborg 1969-1972. The character and properties of urban storm water results from investigations in Stockholm and Gothenburg 1969-1972. English summary. 1974.
- 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.
- nr 13 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt: Nederbörds-avrinningsmätningar i Bergsjön, Göteborg 1973-1974. 1975.
- nr 14 Per-Arne Malmquist, Gilbert Svensson: Delrapport. Dagvattnets sammansättning i Göteborg. Urban storm water quality. Interim report from a study in Gothenburg. English summary. 1975.
- nr 15 Viktor Arnell, Sven Lyngfelt, Anders Sjöberg och Gilbert Svensson: Dagvatten, Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg, Norge, 1975. 1976.

- nr 16 Leif Andréasson, Leif Carlsson, Klas Cederwall, Bengt-Arne Torstensson och Per Wedel: Grundvatten, Uppsatser presenterade vid konferens om urban hydrologi i Sarpsborg, Norge, 1975. 1976.
- nr 17 Olov Holmstrand: Markvattenundersökningar i ett urbant område. 1976.
- r 18 Göran Ejdeling: Beräkningsmodeller för prognos av grundvattenförhållanden. (Under utskrift).
- nr 19 Viktor Arnell, Jan Falk, Per-Arne Malmquist: Urban Storm Water Research in Sweden. In English. 1977.
- nr 20 Viktor Arnell: Studier av amerikansk dagvattentechnik. Resa i december 1976. 1977.
- nr 21 Leif Carlsson: Reserapport från studieresa i USA samt deltagande i 2nd International Symposium on Land Subsidence i Anaheim, USA. 29 nov - 17 dec 1976. 1977.
- nr 22 Per O Wedel: Grundvattenbildning, samspelet jordlager och berggrund. Exemplifierat från ett försöksområde i Angered. 1978. (Under tryckning).
- nr 23 Viktor Arnell: Nederbördsdata vid dimensionering av dagvattensystem med hjälp av detaljerade beräkningsmodeller. En inledande studie. 1977.
- nr 24 Leif Carlsson, Klas Cederwall: Urbaniseringsprocessens inverkan på ytvattenavrinning och grundvattenbildning. Geohydrologisk forskning vid CTH, Sektion V, under perioden 1972-75. 1977.

- nr 25 Lars O Ericsson (red.): Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport från första verksamhetsåret 1976-02-01 - 1977-01-31. 1977.
- nr 26 Ann-Carin Andersson, Jan Berntson: Kontrollerad balans genom djupinfiltration. En inventering av djupinfiltrationsprojekt. 1978. (Under utskrift).
- nr 27 Anders Eriksson, Per Lindvall: Lokalt omhändertagande av dagvatten. Resultatredovisning av enkät rörande drift och konstruktion av perkolationsanläggningar. 1978. (Under utskrift).
- nr 28 Olov Holmstrand (red.): Lokalt omhändertagande av dagvatten. Delrapport nr 2 från perioden 1977.02.01-1977.11.30. 1978. (Under tryckning).
- nr 29 Leif Carlsson; Djupinfiltrationsstudier i Angered. 1978. (Under utskrift).
- nr 30 Lars O Ericsson: Infiltrationsprocessen i en dagvattenmodell. Teori, Undersökning, Mätning och Utvärdering. 1978. (Under tryckning)
- nr 31 Lars O Ericsson: Permeabilitetsbestämning i fält vid perkolationsmagasin. Dimensionering. 1978. (Under tryckning).
- nr 32 Lars O Ericsson, Stig Hård: Infiltrationsundersökningar i stadsdelen Ryd, Linköping. 1978. (Under tryckning).