



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Institutionen för vattenbyggnad

YTAVRINNING

Litteraturstudier och fältförsök

av

Stig Andersson Jan Svensson

Examensarbete i vattenbyggnad 1973:5

Göteborg

Examensarbete 1973:5
YTAVRINNING
Litteraturstudier och fältförsök
av
Stig Andersson Jan Svensson

Examensarbete 1973:5

YTAVRINNING

Litteraturstudier och fältförsök

av

Stig Andersson

Jan Svensson

Godkänt 1974-06-14

Lennart Rahm

Professor

EXAMENSARBETE

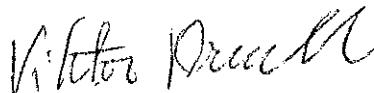
DAGVATTENAVRINNING INOM URBANT OMRÅDE

Detta examensarbete ingår i ett större projekt där hela problemkomplexet med dimensionering av avledningssystem för dagvatten studeras. Projektet finansieras av Statens råd för byggnadsforskning samt Göteborgs Vatten- och Avloppsverk. Inom ramen för arbetet studeras avrinningen från ett par bostadsområden i Göteborg samt nederbördsförhållandena över regionen.

Detta examensarbete är ett led i arbetet med att klarlägga de faktorer som har betydelse för dagvattenavrinningen inom ett urbant område. Speciellt skall studeras avrinningsförloppet på olika typer av ytor vid varierande flödesmängder och lutningar. Ytavrinningen studeras inom väl kontrollerade prov- ytor.

Arbetet börjar med en litteraturstudie av beräkningsmetoder och ingående variabler. Därefter sker val av försöksområden samt utveckling av mätmetoder. Mätresultaten bearbetas och jämförs med tidigare försök.

Göteborg i juni 1973



Viktor Arnell

<u>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</u>		<u>Sid.</u>
1.	INLEDNING	1. 1
2.	ALLMÄNT OM BERÄKNINGSMODELLER FÖR DAGVATTENAVRINNING	2. 1
3.	CINCINNATI-MODELLEN	3. 1
	3. 1 Ytflöde	3. 2
	3. 2 Ytflödesmodellens matematiska uppbyggnad	3. 2
	3. 3 Kortfattad beskrivning av modellens arbetssätt	3. 3
4.	YTAVRINNINGSTEORI	4. 1
	4. 1 Beskrivning av rörelsetillståndet	4. 1
	4. 2 Teoretisk behandling av ytavrinning	4. 1
5.	DISKUSSION AV YTAVRINNINGENS RÖRELSE- TILLSTÅND	5. 1
	5. 1 Friktionskoefficienten kontra Reynolds tal	5. 1
	5. 2 Slutsatser	5. 3
	5. 3 Regnets inverkan på flödet	5. 4
	5. 4 Regnets inverkan på hastighetsprofilen	5. 5
	5. 5 Sammanfattning	5. 8
6.	FÄLTUNDERSÖKNING	6. 1
	6. 1 Undersökningsmetodik	6. 1
	6. 2 Mätutrustning	6. 3
	6. 3 Utförande	6. 6
7.	ANALYS AV MÄTRESULTAT	7. 1
	7. 1 Hastigheten jämförd med teoretiska värden	7. 1
	7. 2 Råhetens inverkan på hastigheten	7. 2
	7. 3 Mannings tal	7. 3
	7. 4 Jämförelse med flödeskriterier	7. 4
8.	DISKUSSION AV FAKTORER SOM KAN PÅ- VERKA MÄTRESULTATEN	8. 1
9.	LITTERATURFÖRTECKNING	9. 1
	BILAGOR	

1. INLEDNING

Avsikten med detta examensarbete är, att med utgångspunkt från en datorbaserad avrinningsmodell, studera den del som behandlar ytavrinning. Inom denna del har av intresse varit att undersöka de styrande variabler som beskriver avrinningsförloppet speciellt inom urbana områden.

Undersökningen har utförts i form av fältförsök under tiden 15/6 - 15/7 1973 på olika typer av ytor, samtliga hårdgjorda. En litteraturstudie har gjorts, huvudsakligen inom amerikansk litteratur, över ytavrinningens teori, tidigare utförda försök och resultat, samt över datormodellens utseende och förutsättningar.

2. ALLMÄNT OM BERÄKNINGSMODELLER FÖR DAGVATTEN- AVRINNING.

För att få en ekonomisk dimensionering av dagvattensystem fordras att de beräkningsmetoder som används, för att bestämma dagvattenflödenas storlek i tid och rum, är så riktiga som möjligt. Således måste kvantitativa relationer mellan nederbörd och avrinning uppställas som innebär att man analyserar och beskriver avrinningsförloppets delprocesser såsom nederbörd, infiltration, ytmagasinering och ytflöde så korrekt som möjligt.

Uteslutande används hittills, för att dimensionera dagvattensystem, enkla modeller lämpade för handberäkning. Bland dessa kan nämnas de s. k. toppflödes(peakflow)-modellerna såsom rationella metoder, tid-areametoden, retardationsdiagrammetoden och vissa hydrografbaserade modeller. Samtliga dessa modeller kännetecknas av osäkra antaganden om de ingående parametrarna, varvid antingen under- eller överdimensionering kan förekomma.

I samband med datautvecklingen har möjligheten öppnats att på ett mer detaljerat sätt beskriva de ovan nämnda delprocesserna, och de hydrauliska problem som sammanhänger med avrinningsförloppet. Härvid har en rad datorbaserade modeller utvecklats, framförallt i USA. Av dessa modeller har vi studerat speciellt en, den s. k. University of Cincinnati Urban Runoff Model (UCUR).

3. CINCINNATI - MODELLEN

Denna datormodell består av flera undermodeller, se fig. 1, där var och en beskriver de olika delprocesserna infiltration, ytmagasinerings, ytflöde, rännstensflöde och ledningsflöde detaljerat. Vi har härvid begränsat oss till att studera undermodellen ytflöde.

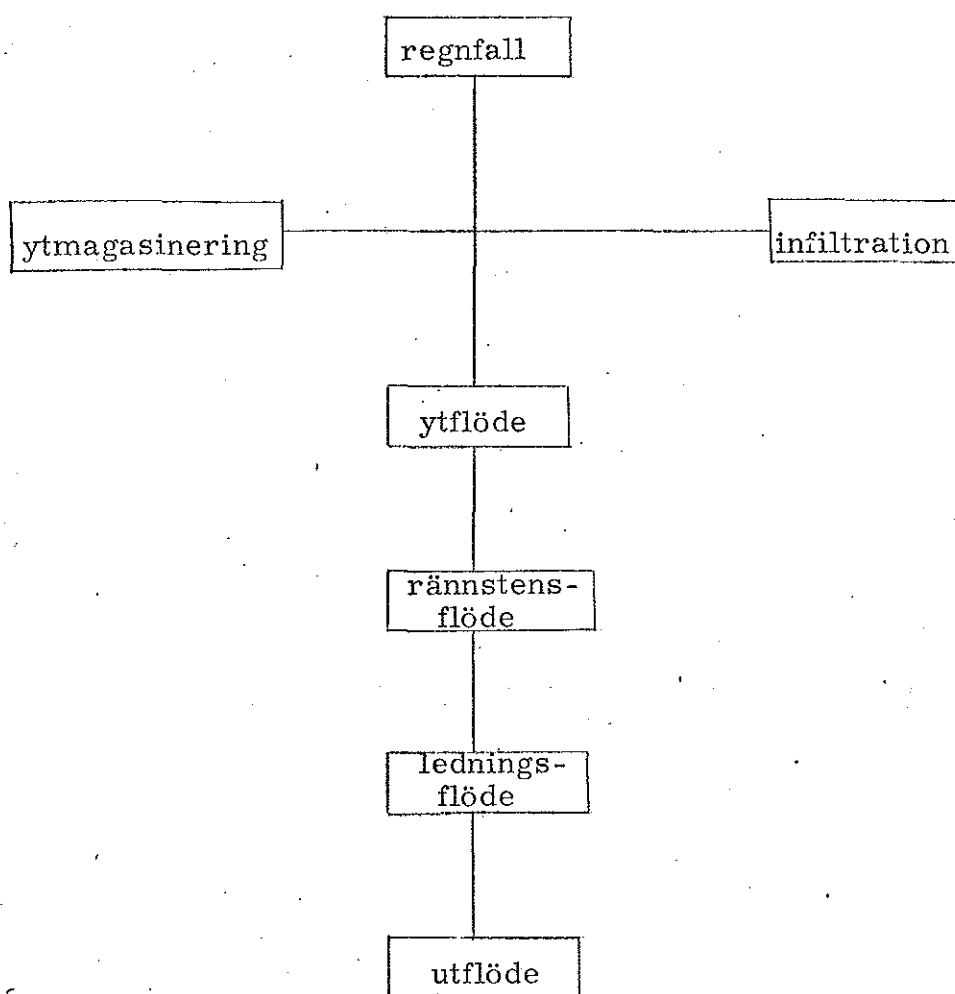


Fig. 1. Flödesdiagram för Cincinnati modellen.

3.1 Ytflöde

Då ett regn når markytan samlas vattnet först i de små ojämnheter som finns i markytan. Detta kallas för ytmagasinering. En del av regnet infiltreras ner i marken, en del avdunstar och annat vidhåller växtligheten. När regnintensiteten är större än infiltrationsinterceptionskapaciteten och avdunstningen bildas ett tunt vattenskiikt på markytan. Vattnet börjar sedan röra sig mot lägre liggande områden. Denna förflyttning kallas för ytavrinning. Den tillfälliga vattenvolym som finns i ett skikt över marken benämns hydrauliskt ytmagasin. Detta får inte förväxlas med den ytmagasinerade vattenvolymen, som inte på något sätt bidrar till ytavrinningen.

I den följande beskrivningen av modellen bortses ifrån avdunstning på grund av att de regn som är dimensionerande ofta är kortvariga. Likaså bortses från interception eftersom intresset koncentreras till hårdgjorda ytor.

3.2 Ytflödesmodellens matematiska uppbyggnad

Då djupet är litet i förhållande till bredden beskrives ytflödet som tvådimensionellt. De i modellen uppställda uttrycken för att beskriva ytflödet är dels en kontinuitetsekvation, dels en rörelseekvation (Mannings formel).

A. Kontinuitetsekvation

Kontinuitetsekvationen är uppställd med beteckningar enligt fig. 2 sid.4.1 och under följande förutsättningar:

- 1) flöde per breddenhet
- 2) liten bottenlutning $\sin \varphi \approx \varphi$
- 3) likformig hastighetsfördelning

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = i - f - s = r \quad (3.1)$$

där

x = längdkoordinati flödesriktning	[m]
y = flödesdjupet	[m]
q = utflödet/breddenhet	[m ³ /s/m]
r = tillflödet/ytenhet	[m ³ /s/m ²]
f = infiltrationskapacitet	[m ³ /s/m ²]
s = ytmagasinering	[m ³ /s/m ²]
i = regnintensitet	[m ³ /s/m ²]

B. Mannings formel

Mannings formel är uppställd under följande förutsättningar:

- 1) flödestillståndet är turbulent
- 2) hydrauliska radien R är lika med djupet y

$$q = \frac{1}{n} y^{5/3} S^{1/2} \quad (3.2)$$

där

y = flödesdjupet	[m]
q = utflödet/breddenhet	[m ³ /s/m]
S = ytans lutning i flödesriktningen	[m/m]
n = Mannings tal	

3.3 Kortfattad beskrivning av modellens arbetssätt

Med beteckningar enl. fig. 2 kan följande resonemang genomföras.
Ur kontinuitetsekvationen fås vid jämvikt:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \implies q = rx \quad (3.3)$$

Detta medför att utflödet från ytan vid jämvikt är:

$$q_e = r \cdot L \quad (3.4)$$

där L = ytans längd i flödesriktningen [m]

Mellan tiden $t = 0$ och $t = t_e$ (där t_e är tiden till jämvikt) är totala inflödet:

$$I = r \cdot L \cdot t_e \quad (3.5)$$

Den hydrauliska magasineringen D_e vid tiden t_e är:

$$D_e = \int_0^L y \, dx \quad (3.6)$$

där $D_e = [m^3/m]$

(3.2) och (3.3) insatta i (3.6) ger

$$D_e = 0,625 \frac{r^{0,6} n^{0,6} L^{1,6}}{S^{0,3}} \quad (3.7)$$

där $r =$ tillflödet/ytenhet $[m^3/s/m^2]$

$n =$ Mannings tal

$L =$ ytans längd i flödesriktningen $[m]$

$S =$ ytans lutning i flödesriktningen $[m/m]$

Medelvärdet av den hydrauliska magasineringen räknat per enhetsarea:

$$D_e = 0,625 \frac{r^{0,6} n^{0,6} L^{0,6}}{S^{0,3}} [m] \quad (3.8)$$

Ur Mannings formel fås utflödets storlek:

$$q = \frac{1}{n} y^{5/3} S^{1/2} \quad (3.9)$$

där $y =$ djupet vid $x=L$ $[m]$

$q =$ utflödet vid $x=L$ $[m^3/s/m]$

Utflödet räknat per enhetsarea:

$$q = \frac{1}{nL} y^{5/3} S^{1/2} [m/s] \quad (3.10)$$

där $L =$ ytans längd i flödesriktningen $[m]$.

Ett empiriskt samband mellan utflödesdjupet y och den hydrauliska magasineringen D ges av:

$$y = D \left[1,0 + 0,6 \left(\frac{D}{D_e} \right)^3 \right] \quad (3.11)$$

där y = utflödesdjupet [m]
 D = hydrauliska magasineringen [m]
 D_e = hydrauliska magasineringen vid jämvikt [m]

I fallet då r minskar, avtar flödet över ytan, dvs $D_e < D$, varför kvoten sätts lika med 1.

Ekv. (3.10) blir då :

$$q = \frac{1}{nL} S^{1/2} D^{5/3} \left[1,0 + 0,6 \left(\frac{D}{D_e} \right)^3 \right]^{5/3} \quad [\text{m/s}] \quad (3.12)$$

För att bestämma avränningshydrografen betraktas magasineringen under en viss tidsperiod Δt [s]

$$r - q = \frac{dD}{\Delta t} \quad (3.13)$$

där r = inflödet till ytan
 q = utflödet från ytan
 dD = ändringen i magasinering
 Δt = tidsintervallet

Ovanstående formel (3.13) kan omskrivas på regressionsform enligt:

$$\frac{r_1 + r_2}{2} - \frac{q_1 + q_2}{2} = \frac{D_2 - D_1}{\Delta t} \quad (3.14)$$

eller

$$\frac{r_1 + r_2}{2} - \frac{q_1}{2} + \frac{D_1}{\Delta t} = \frac{q_2}{2} + \frac{D_2}{\Delta t} \quad (3.15)$$

där index 1 hänför sig till värden i början på tidsintervallet, medan index 2 hänför sig till värden i slutet på tidsintervallet.

Mannings formel enl (3.12) ersätter q_2 i formel (3.15).

Med $q_1 = 0$ och $D_1 = 0$ som startvärde ger regressionsformeln (3.15) D_2 och Mannings formel (3.12) q_2 , vilka är nya startvärden för regressionsformeln. D_e beräknas för varje r ur ekv (3.8).

Sammanfattning:

Man har i ytflödesmodellen således baserat flödesberäkningarna på empiriska samband och kontinuitetsvillkor. I de följande kapitlen har vi, med utgångspunkt från de grundläggande antagandena i modellen, försökt att klarlägga om ytavrinningen kan beskrivas med Mannings formel samt behandlat därmed sammanhängande problemställningar.

4. YTAVRINNINGSTEORI

4.1 Beskrivning av rörelsetillståndet

Rörelsetillståndet vid ytavrinning kan vara laminärt eller turbulent. Faktorer som påverkar rörelsetillståndet är: flödets storlek, viskositet, ytans lutning och råhet. Då markytan nästan alltid är ojäm, kommer djupet och lutningen att variera från punkt till punkt. Detta gör att flödet kan växla mellan laminärt och turbulent tillstånd på mycket korta avstånd. I ett område som är beväxt med gräs eller liknande kommer flödet att vara stråkande turbulent. En del av energin förbrukas då på vegetationen. Den så förbrukade energimängden ökar tills ett djup, som är lika med växtlighetens höjd har nåtts. Vegetationen medför även att den effektiva tvärsnittsarean minskar. Se vidare [4].

4.2 Teoretisk behandling av ytavrinning

Följande resonemang grundar sig huvudsakligen på innehållet i [2]. För att erhålla de ekvationer som beskriver ytavrinningen görs först en kontinuitets- och kraftbetraktelse.

Kontinuitetsekvation

Betrakta flödet per breddenhet på en yta med liten bottenlutning, $\sin \varphi \approx \varphi$. Flödets hastighetsfördelning är likformig. Med beteckningar enligt figur 2 kan kontinuitetsekvationen då skrivas:

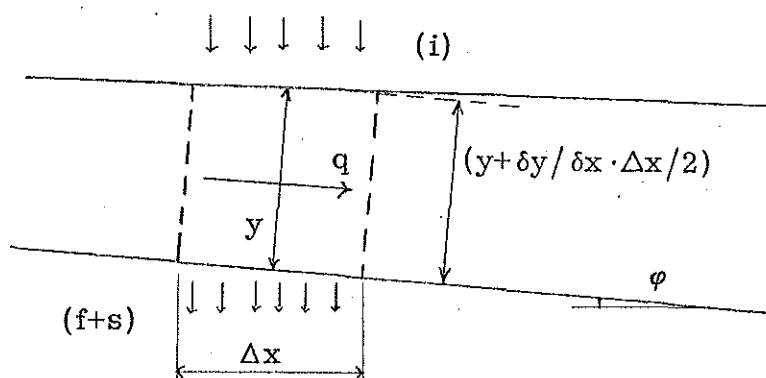


Fig 2. Ytflöde.

$$\frac{\partial q}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x = i \Delta x - f \Delta x - s \Delta x$$

då $A = y \cdot 1$ fås

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = i - f - s \quad (4.1)$$

där q = utflödet/breddenhet $[m^3/s/m]$
 i = regnintensitet $[m^3/m^2/s]$
 f = infiltrationskapacitet $[m^3/m^2/s]$
 s = ytmagasinering $[m^3/m^2/s]$

Kraftekvation

Om man bortser från regndropparnas kraft när de träffar vattenytan, kan kraftekvationen enl Eagleson skrivas:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = (i - f - s) \frac{y}{y} - (1 + \frac{2y}{b}) \frac{\tau_o}{\rho y} + g \sin \varphi \quad (4.2)$$

där v = flödeshastigheten $[m/s]$
 τ_o = skjuvspänningen vid botten $[N/m^2]$
 ρ = vattnets densitet $[kg/m^3]$
 b = bredden vinkelrätt mot flödesriktningen

Vid ytavrinning gäller att $b \gg y$ så $\frac{2y}{b} \approx 0$.

Jämfört med gravitationen har, enligt Eagleson, regn-infiltrationsprocessen en försumbar effekt på flödesdynamiken. En storleksanalys leder till slutsatsen att lutningen på den fria vattenytan och tröghetstermerna är försumbara i jämförelse med bottenlutning och friktion. Ekvation (4.2) kan då reduceras till

$$\tau_o = \gamma \cdot y \sin \varphi \quad (4.3)$$

där $\gamma = \rho \cdot g$ = specifika vikten för vatten.

4.21 Laminärt flöde

Vid laminärt flöde gäller Newtons lag för viskösa vätskor:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy'} \quad (4:4)$$

där τ = skjuvspänningen $[N/m^2]$
 v = hastigheten $[m/s]$
 μ = dynamiska viskositeten $[Ns/m^2]$
 y' = avståndet från botten till den nivå där τ mäts.

Ekvation (4:3) kan för varje laminärt skikt skrivas:

$$\begin{aligned} \tau &= \gamma (y - y') \sin \phi \\ \text{eller} \\ \tau &= \frac{\gamma \mu}{\nu} (y - y') \sin \phi \end{aligned} \quad (4:5)$$

där ν = kinematiska viskositeten i $[m^2/s]$

Från ekvationerna (4:4) och (4:5) fås:

$$\begin{aligned} dv &= g \frac{\sin \phi}{\nu} (y - y') dy' ; \\ v &= g \frac{\sin \phi}{\nu} (y y' - \frac{y'^2}{2}) \end{aligned}$$

Medelhastigheten $\bar{v}$ kan sedan erhållas som:

$$\bar{v} = \frac{1}{y} \int_0^y v dy' = \frac{g \sin \phi}{\nu} \frac{y^2}{3}$$

och

$$q = \frac{g \sin \phi}{3\nu} y^3 \quad (4:6)$$

4.22 Turbulent flöde

Då ytavrinningen är turbulent gäller Mannings formel.

Hydrauliska radien $R = \frac{\text{Arean}}{\text{Väta perimetern}}$ sätts här lika med

djupet y , då $b \gg y$. Mannings formel kan då skrivas:

$$q = \frac{1}{n} S^{1/2} \cdot y^{5/3} \quad (4:7)$$

där q = flödet $[m^3/s / m]$

y = djup $[m]$

S = lutningen

n = Mannings tal

Ekvationerna (4:6) och (4:7) kan skrivas på den generella formen:

$$q = K \cdot y^m \quad (4:8)$$

där för laminärt flöde gäller

$$m = 3$$

$$K = \frac{g \sin \varphi}{3 \nu} \left[\frac{1}{m \cdot s} \right]$$

där g $[m/s^2]$ och ν $[m^2/s]$

För turbulent flöde gäller

$$m = \frac{5}{3}$$

$$K = \frac{S^{1/2}}{n} \left[\frac{m^{1/3}}{s} \right]$$

För praktiskt bruk ger, enligt Keulegan, Chow och Eagleson, ekvation (4:8) en god approximation av flödet vid ytavrinning.

4.23 Flödes kriterier.

När Reynolds' kriterium $Re = \frac{V \cdot R}{\nu}$ tillämpas på ytavrinning sätts som tidigare R lika med djupet y . Gränsen mellan laminärt och turbulent flöde i öppna kanaler anses allmänt ligga vid $Re \approx 500$ enligt Linsley [4]. Värdet på Re för ytavrinning, som dock varierar betänkligt, ligger mellan 300 och 770 enligt samme författare.

Horton drog av detta slutsatsen att Reynolds' kriterium inte är tillämpligt på ytavrinning över relativt råa ytor. Han ansåg att energin för båda typerna av flöde måste vara den samma i övergångspunkten. Från analyser av hastighetsfördelningen i kanaler antog Horton, se [4], att när hastigheten för turbulent och laminärt flöde är lika, så är övergångs- och ickeövergångsenergin för turbulent flöde nästan identisk med övergångsenergin för laminärt flöde (per volymsenhet). Således, punkten för lika hastighet representerar det energiminimum som kan åstadkomma ett turbulent flöde.

Genom att sammanställa hastighetsekvationerna från laminärt och turbulent flöde fås följande förhållande:

$$\frac{g \cdot S}{\nu} \frac{y^2}{3} = \frac{1}{n} y^{2/3} \sqrt{S}$$

$$y^{2/3} \sqrt{S} = \frac{3 \nu}{g y^{2/3} \cdot n}$$

Insättes detta i Mannings formel fås:

$$v = \frac{1}{n^2} \frac{3 \nu}{g y^{2/3}} \quad (4:9)$$

Flödet kan alltså inte vara turbulent om hastigheten är mindre än den i ekvation (4:9) angivna. Då $q = v \cdot y$ fås turbulent flöde om

$$q > \frac{3 \nu y^{1/3}}{g n^2}$$

annars är flödet laminärt.

4.24 Ytavrinningens ekvationer

Ur ovan gjorda betraktelser finner man att ytavrinningen matematiskt kan beskrivas med följande ekvationssystem:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i - f - s$$

$$q = K y^m$$

5. DISKUSSION AV YTAVRINNINGENS RÖRELSETILLSTÅND

5.1 Friktionskoefficienten kontra Reynolds tal

Intresset för rörelsetillståndet vid ytavrinning har lett till att flera undersökningar på området har gjorts. Vid undersökningarna har flöden och hastigheter uppmätts. Ur dessa data har friktionskoefficienter (f) och Reynolds tal (R_e) framräknats. Värdena har prickats in i ett log-log-diagram med f och R_e på axlarna. Ur diagrammet har sedan dragits slutsatser om flödestyp och när övergång från laminärt till turbulent flöde sker.

Friktionskoefficienten f erhålls med hjälp av Darcy-Weissbachs formel

$$h_f = f \frac{L \cdot v^2}{d_o \cdot 2g} \quad (5:1)$$

där h_f = friktionsförlustshöjden [m]

f = friktionskoefficienten

L = längden [m]

v = medelhastigheten [m/s]

d_o = rördiametern [m]

g = jordaccelerationen [m/s²]

Då $d_o = 4R$ och lutningen $S = \frac{h_f}{L}$ där R = hydrauliska radien som sättes lika med medeldjupet fås:

$$f = \frac{8gRS}{v^2} \quad (5:2)$$

Reynolds tal fås som ovan.

En del av undersökningarna har gjorts med hjälp av regnsimulator, då även regnets inverkan på avrinningen har kunnat studeras. De flesta av försöken har gjorts på glatta ytor. Försöksresultaten är alltså inte direkt användbara på ytavrinning över naturliga ytor. De resultat som redovisas i diagram 1 är hämtade från försök gjorda av Owen [6], Strauber-Silberman-Nelson [9], Yoon-Wenzel [12].

Försöken gjordes med tunna vattenskikt. Underlaget bestod i samtliga fall av glatta ytor. Sättet att mäta hastigheten har varierat något. Detaljerade beskrivningar ges i [6], [9] och [12].

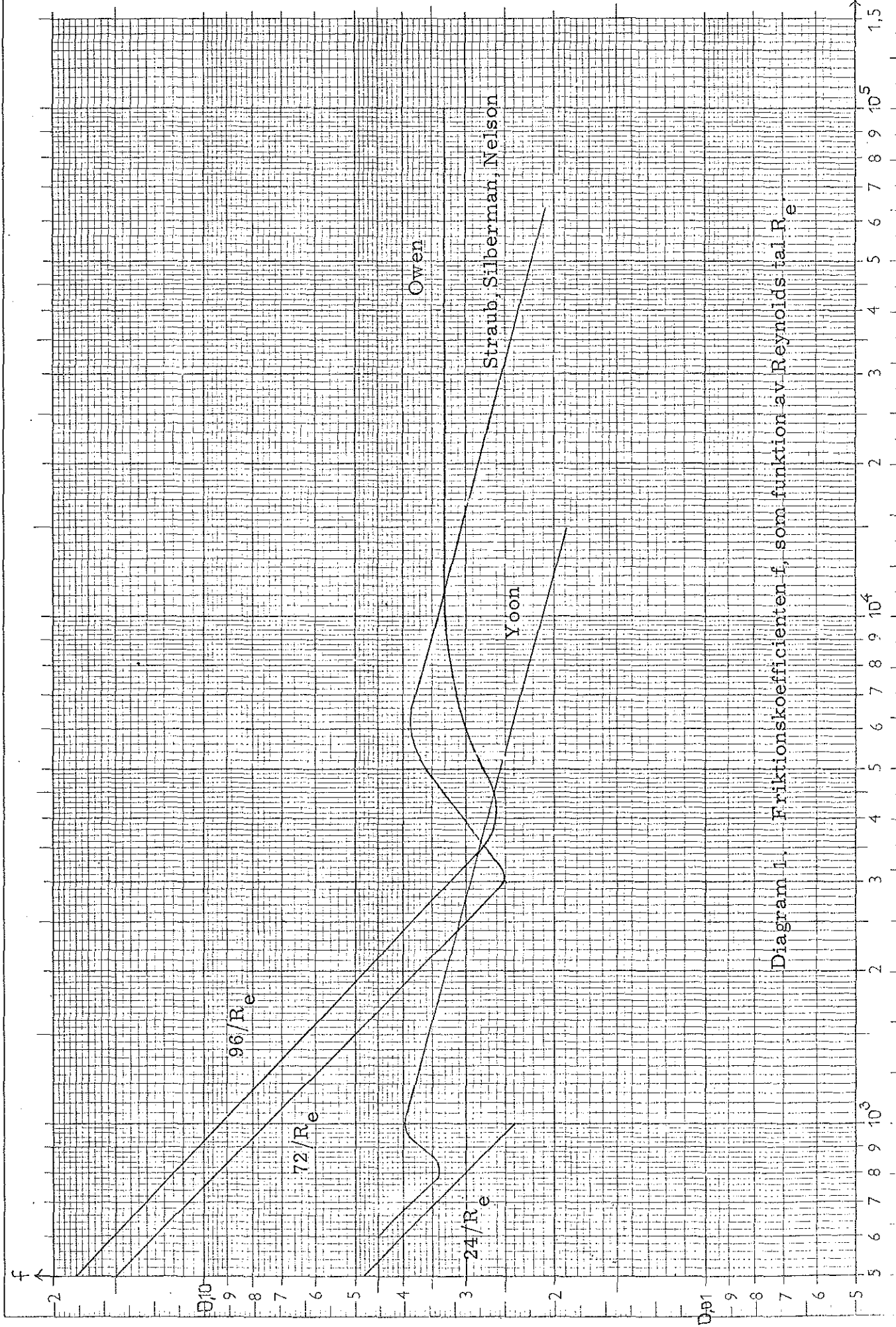


Diagram 1. Friktionskoefficienten f , som funktion av Reynolds tal Re .

Den rätlinjiga delen till vänster på diagrammet representerar laminärt flöde, sedan följer en övergångszon därefter en turbulent del.

Linjen på den laminära delen kan representeras av ekvationen $f = \frac{K}{Re}$ där $K = \frac{8gR^2S}{\sqrt{v}}$. Då v är proportionell mot $gS/\sqrt{v}$ blir K endast beroende på kanalens form vid glatta ytor. Den turbulenta zonen kan, enligt Iwagaki [6], beskrivas genom ekvationen:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,033 \log (Re \sqrt{f}) - 1,081 \quad (5:3)$$

5.2 Slutsatser

Från de av Straub, Selberman och Nelson [9] gjorda försöken har följande slutsatser dragits:

1. Friktions- och hastighetsfördelningen för flöden i glatta öppna kanaler vid låga Reynolds tal är kvantitativt lika med motsvarande för flöde i slutna rör med motsvarande gränser, när Reynolds tal grundat på hydrauliska radien, används som jämförande parameter.
2. Kanalens form saknar betydelse för friktion vid turbulent flöde i glatta kanaler vid låga Reynolds tal. Formen har stor betydelse vid laminärt flöde.
3. Det lägsta kritiska värdet på Reynolds tal för övergång mellan laminärt och turbulent flöde i glatta kanaler beror på kanalens form. Värdet låg på cirka 2000.

Försök på råa ytor med laminärt flöde visar att friktionsfaktorn är högre än vid laminärt flöde över glatta ytor. Några teoretiska metoder att korrekt beräkna friktionsförlusterna vid råa ytor finns inte, vare sig för turbulent eller laminärt flöde enligt [9].

5.3 Regnets inverkan på flödet

Från försök där regnfall har simulerats har Yoon och Wentzel [12] funnit följande:

Då $R_e < 2000$ ger ökad regnintensitet ett ökat friktionsmotstånd vid konstant Reynolds tal. På ett log-log-diagram, med f och R_e som tidigare, fås linjer parallella med $f = \frac{C}{R_e}$, där C = funktion av lutning och regnintensitet. Hur C varierar med i = regnintensiteten framgår av fig 3. Enligt Yoon [12].

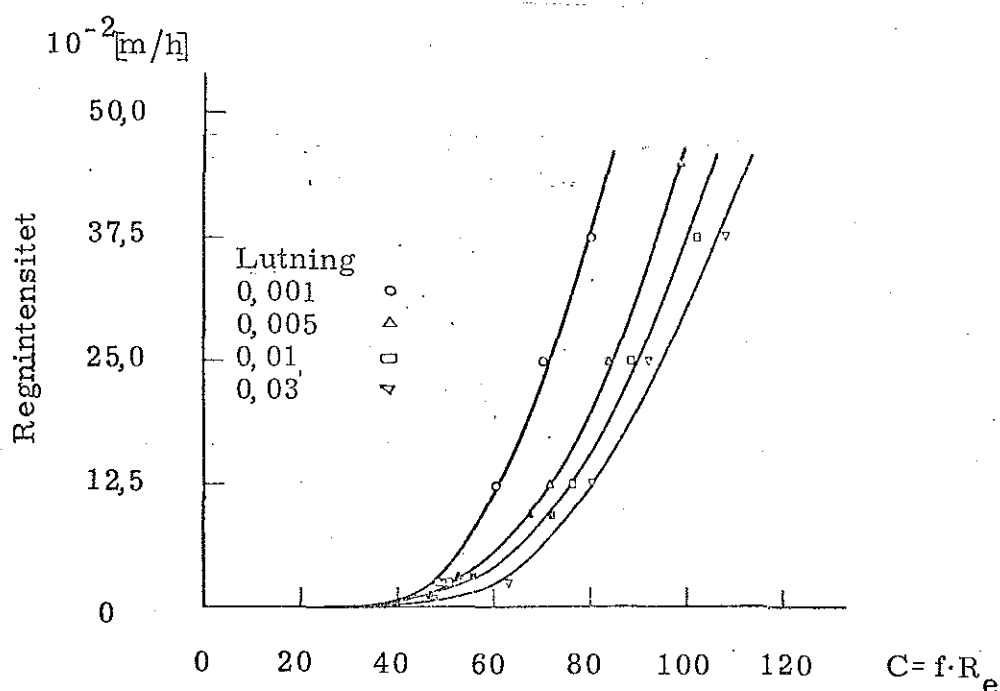


Fig 3. Regnintensiteten som funktion av C enligt Yoon.

Då $R_e > 2000$ minskar effekten av regnintensiteten snabbt tills den blir betydelselös. Se fig 4 enl Yoon och Wenzel [12]. Regnfallet gör att man får ett turbulent flöde vid lägre Reynolds tal än om inget regnfall förekommer.

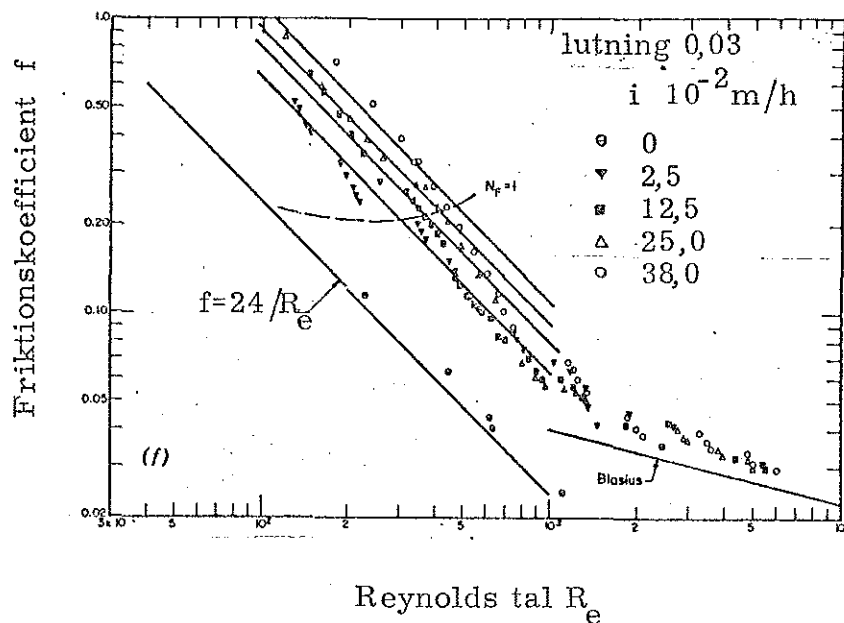


Fig 4. Regnintensitetens inverkan på friktionskoefficienten enligt Yoon.

5.4 Regnets inverkan på hastighetsprofilen

Hur hastighetsprofilen varierar med regnintensiteten, enligt Yoon och Wenzel [12], vid en konstant lutning av 0,005 framgår av figurerna 5 och 6. Ur figurerna framgår att vid ett givet Reynolds tal hastighetsgradienten vid ett givet djup under $\bar{y}$ (där $\bar{y}$ är punkten där $v = v_{\max}$) minskar och djupet ökar då regnintensiteten ökar.

Regnet har alltså en retarderande effekt på hastigheten. Effekten ökar när man närmar sig den fria vattenytan. Tendensen är störst vid låga Reynolds tal, där flödet skulle varit laminärt utan regn. När Reynolds tal blir större än 1500 blir effekten mindre utom nära vattenytan där hastigheten minskar markant. Effekten från regnintensiteten på hastighetsprofilen kan försummas vid höga Reynolds tal.

Hastighetsretardationen genom hela djupet kan förklaras genom en impuls betraktelse. Om regndropparna faller nästan vinkelrätt mot vattenytan, då är regndropparnas energi i flödesriktningen försumbar. Därför måste energi från flödet användas för att accelerera regndropparna från hastigheten 0 i flödesriktningen till den hastighet som råder på djupet ifråga. Hastigheten hos flödet är således något lägre än om inget regn skulle förekommit. Energin är större i flöden med höga Reynolds

tal och regndropparnas energi för given intensitet och droppstorlek är konstant. Detta förklarar varför effekten minskar vid ökade Reynolds tal.

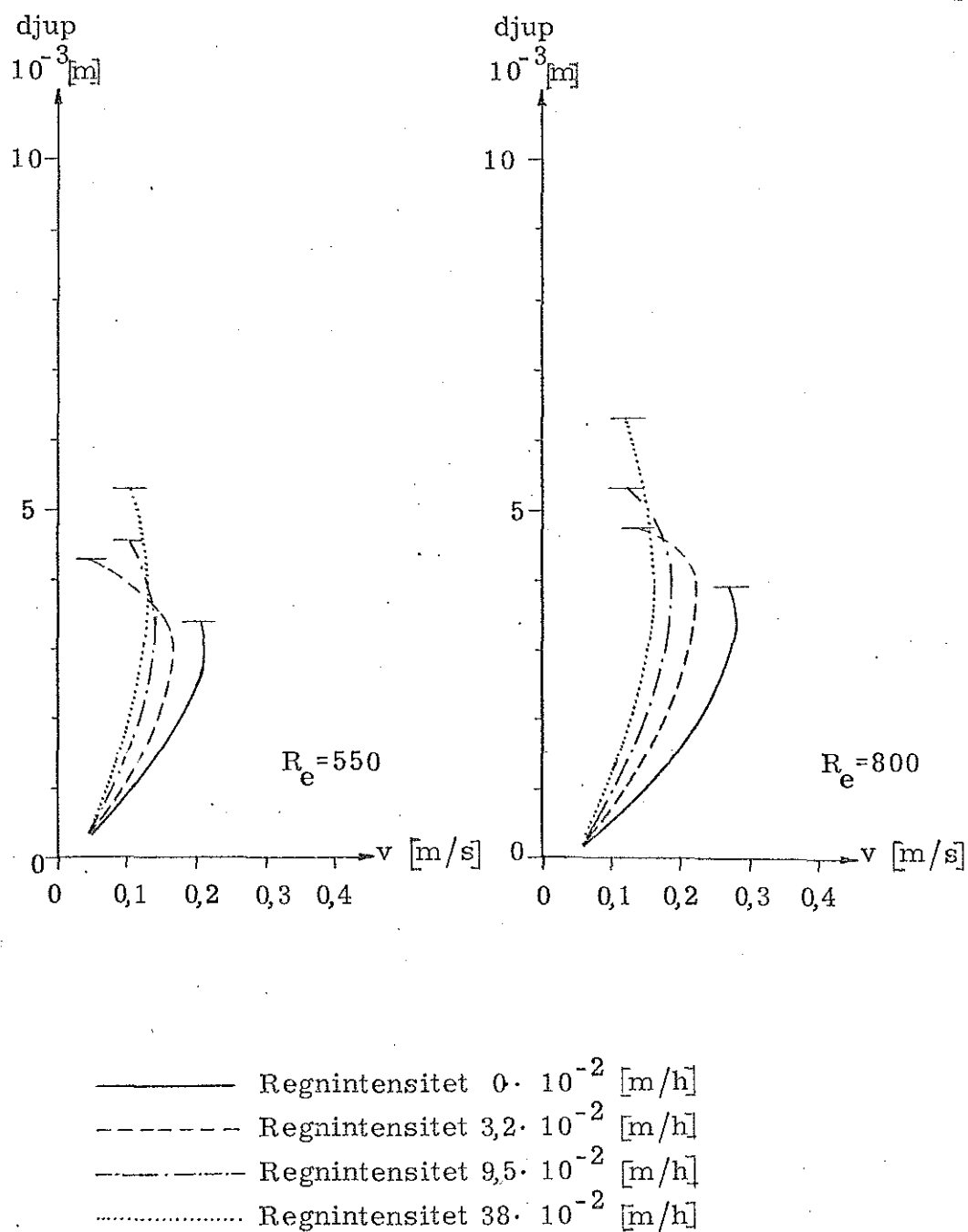


Fig 5. Hastighetsprofiler för lutningen 0,005 enligt Yoon.

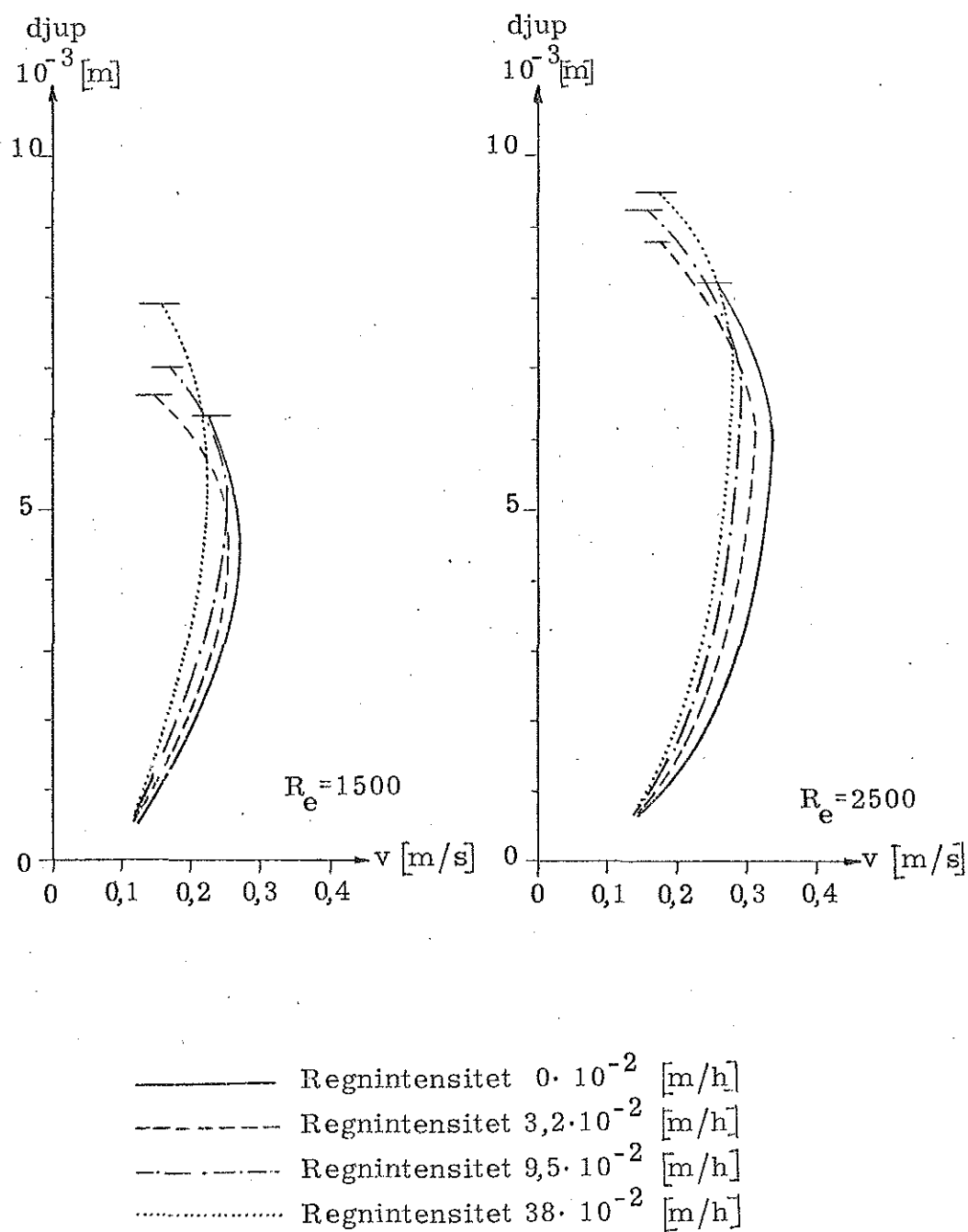


Fig 6. Hastighetsprofiler för lutningen 0,005 enligt Yoon.

5.5 Sammanfattning

Ytavrinningen kan växla snabbt mellan laminärt och turbulent flödestillstånd. De ytor som avrinningen sker över är råa. Detta ökar sannolikheten för att få turbulent flöde. Då dessutom regn faller på den fria vattenytan ökar ytterligare sannolikheten för turbulent flöde. Det synes därför troligast att ytavrinningen i de flesta fall är turbulent, åtminstone för kraftiga regn. Flödet skulle då kunna beskrivas med Mannings formel.

6. FÄLTUNDERSÖKNING

6.1 Undersökningsmetodik

Problemställningen är att försöka klarlägga de faktorer som sammanhänger med dagvattenavrinning inom urbana områden, det vill säga i detta fall uteslutande hårdgjorda ytor. Härvidlag gäller det att undersöka de variabler, som har betydelse för avrinningsförloppet, samt på något sätt mäta dem.

I den förut kortfattade beskrivna Cincinnatimodellen, baseras beräkningarna bl. a. på Mannings formel, vilken gäller för turbulent strömningstillstånd. Detta antagande görs i modellen trots att gränsen mellan laminärt och turbulent strömningstillstånd är svår att dra. Undersökningen utgår därför ifrån frågan, huruvida Mannings formel någorlunda väl kan anses beskriva avrinningsförloppet.

De i Mannings formel ingående variabler man har att arbeta med är flödet, typ av yta, det vill säga olika råheter, samt ytans lutning.

Vid val av försöksområde är det viktigt att man får så jämn lutning som möjligt. Typen av yta skall kunna klassificeras och inom varje typ ska lutningen kunna varieras. Undersökningen avses endast utföras på ytor av typ asfaltbetong. Trots besvärligheter att inom samma typ av yta finna olika lutningar väljs att göra försöken i fält på grund av praktiska svårigheter vid försök i laboratorium.

Utsläppt vattenmängd över provytorna kontrolleras med en flödesmätare. Eftersom hastigheten på vattnet över provytan skall mätas fordras det en någorlunda tillförlitlig metod att bestämma tiden för vattnets förflyttning mellan två punkter. Som utgångspunkt arbetar vi med tre olika metoder för att bestämma vattnets rörelse:

1. med hjälp av färgämne
2. med hjälp av "konfetti", utstansade pappersbitar med diametern 5 millimeter
3. med hjälp av spårämnet salt, elektroder samt ett registrerande instrument

Efter provning av de olika metoderna framkom följande:

Metod 1

medför, under vissa betingelser, svårigheter att korrekt kunna avläsa tiden.

Färg kan dock med fördel användas som indikering hur spridningsbilden efter dosering ser ut

Metod 2

medför tämligen varierande tidsvärden troligen beroende på vindpåverkan samt en viss vidhäftning till botten, eftersom pappret blöts ner efter en viss tid.

Metod 3

visar sig ge de jämnaste tidsresultaten vid upprepade försök under lika villkor, samt ger tydliga registreringar på instrumentet varför denna metod kom att användas.

Under hela mätperioden har vi konstanta flöden över ytan. Flödenas storlek översatta till regnintensitet vid varierande influensområden framgår av fig. 7. Mätområdet ligger mellan 0,2 - 0,7 l/s. Mindre flöden än de redovisade kunde av mättekniska skäl ej användas.

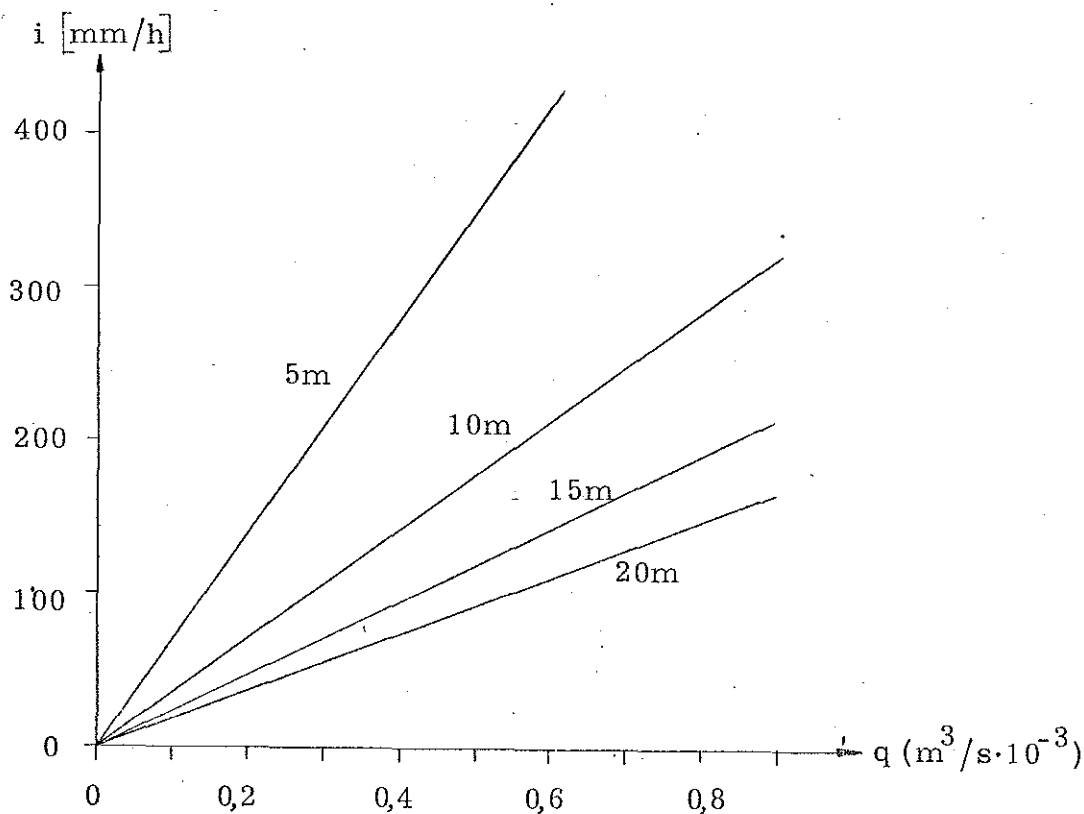


Fig 7. Regnintensiteten som funktion av utflödet vid varierande influensområde.

6.2 Mätutrustning

Ett krav på provytorna var att de skulle vara väl definierade. Detta innebär att dessa områden, där mätningarna skulle ske, måste vara tydligt begränsade mot omgivningen. För detta ändamål tillverkade vi en ram av ihopkopplingsbara träreglar, som placerades på var sida om provytan, se fig. 9. Var och en hade en totallängd av ca. 4,5 m. Eftersom kravet på täthet utefter sidorna hos konstruktionen var stor, bekläddes ena högkanten på reglarna med skumplast, som i sin tur omgavs av en plastduk. Under hela försöksperioden hölls avståndet mellan reglarna konstant till 1,0 meter med hjälp av två tvärreglar, som kunde fästas på ramen.

För försöken tillräcklig mängd vatten erhöles från brandposter, från vilka en slang drogs fram till provområdet, se fig. 10. Den över provytan utsläppta mängden vatten per tidsenhet kontrollerades med en flödesmätare, en s.k. rotameter, vars kapacitetsområde var $0 - 0,70 [l/s]$, se fig. 11. Erforderlig reglering av volymströmmen gjordes med en strypventil framför rotameteren. Rotameter och strypventil var monterade på en träställning.

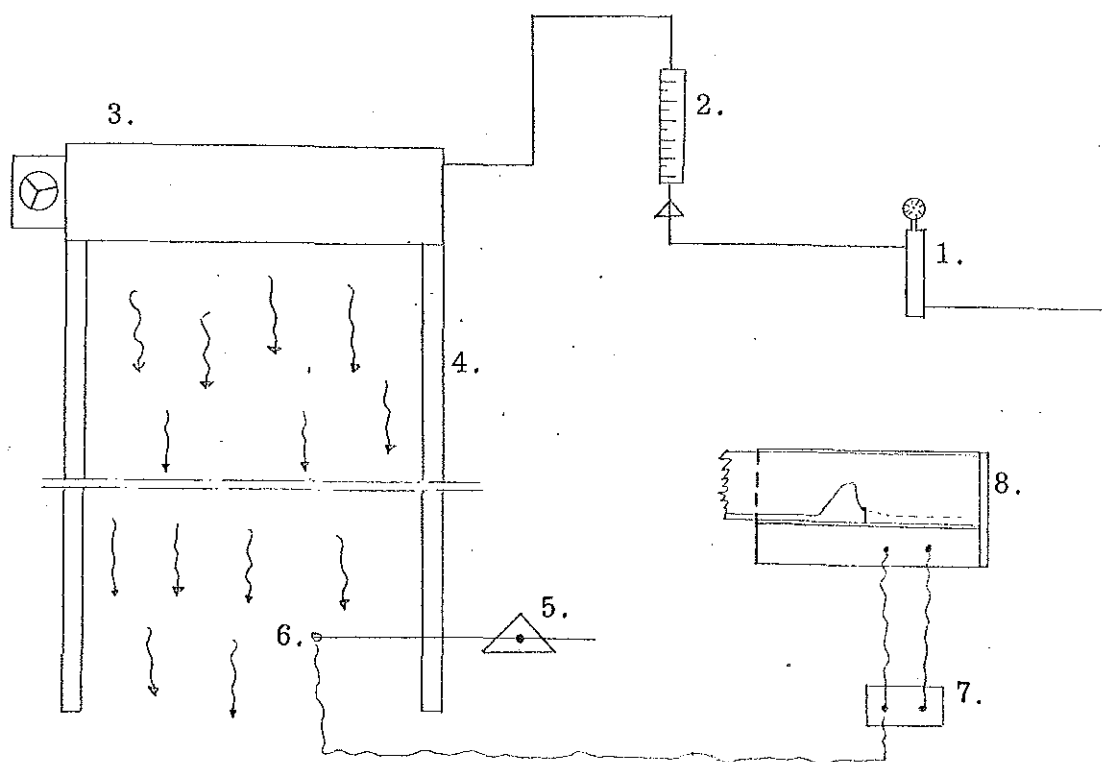
Ett stort problem var hur man skulle få ett jämnt flöde över provytorna. Detta löstes med hjälp av ett skarpkantat överfall. Överfallet tillverkades av plywood med dimensionerna $1,20 \times 0,30 \times 0,30 [m^3]$ och var försedd med 6 st utskov (typ Thomson) av aluminium, se fig. 9. För att strömningen inte skulle vara för orolig inne i lådan, vilket annars skulle medföra ojämn fördelning över utskoven, släpptes vattnet ut genom en perforerad slang. Regleringen av lådan i höjddled, för att få samma mängd vatten genom utskoven, gjordes med en vid kortändan fast monterad skruvanordning.

Den doserade saltlösningen hade en salthalt på ca. 6 %. Dosering gjordes med en platspruta. Doseringsmängden vid varje mättillfälle var ca. 1 milliliter.

Registreringen, av den i vattnet doserade saltlösningen, skedde med en mätelektrod kopplad över en Wheatstonesbrygga till en skrivare. Mätelektroden hölls fixerad i vattenströmmen med en provrörshållare. Hållaren i sin tur fästes i ett stativ som stod utanför träramen. Skri-

varen var Minigor RE 501 fabrikat Goerz. Detta instrument är av typen potentiometerskrivare. Den är en kombination av x-y och y -tid skrivare. Den är dessutom portabel och batteridriven. Möjligheter finns att variera känslighet samt frammatningshastighet. Registreringen sker på vaxskiktpapper, som matas fram kontinuerligt. Se fig. 12.

För att bestämma ytornas lutning använde vi oss av avvägningsinstrument och avvägningsstång. Försöksanordningens principiella uppbyggnad framgår av fig. 8.



- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. Brandpost | 5. Stativ |
| 2. Rotameter med ventil | 6. Mätelektrod |
| 3. Överfall med justeranordning | 7. Wheatstonesbrygga |
| 4. Träram | 8. Potentiometerskrivare |

Fig 8. Försöksanordningens principiella utseende.



Fig 9. Överfall och del av träram.

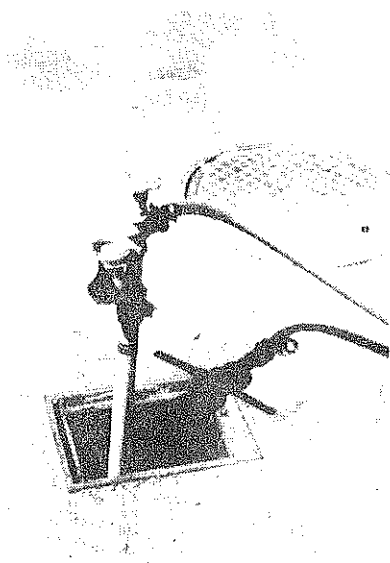


Fig 10. Brandpost.

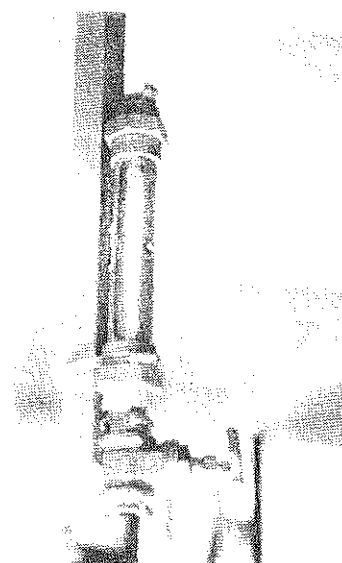


Fig 11. Rotameter.

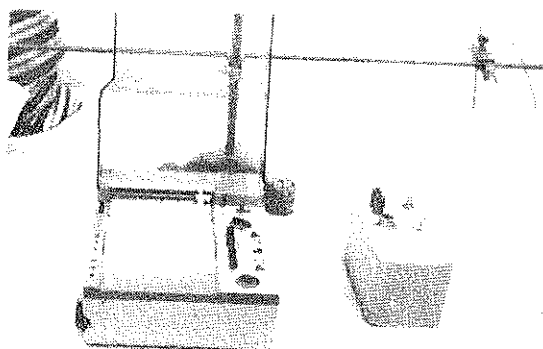


Fig 12. Potentiometerskrivare, Wheatstonesbrygga, stativ med mätelektrod.

6.3 Utförande

Kravet på provytorna var stort, dels ifråga om ytjämnhet och dels ifråga om konstant lutning. Varje provyta måste därför noggrant avvägas. Avvägning gjordes på millimetern när och längdmätning på centimetern när av provområdena, varefter deras lutning kunde bestämmas. Provytorna markerades sedan med färg. I samband med avvägningen klassificerades ytorna ifråga om ytjämnhet. Mätningarna gjordes huvudsakligen på asfaltbetong av tät resp. öppen typ med maximal stenstorlek 12 millimeter (Ab 12). Exempel på yttyper ses i fig. 13.

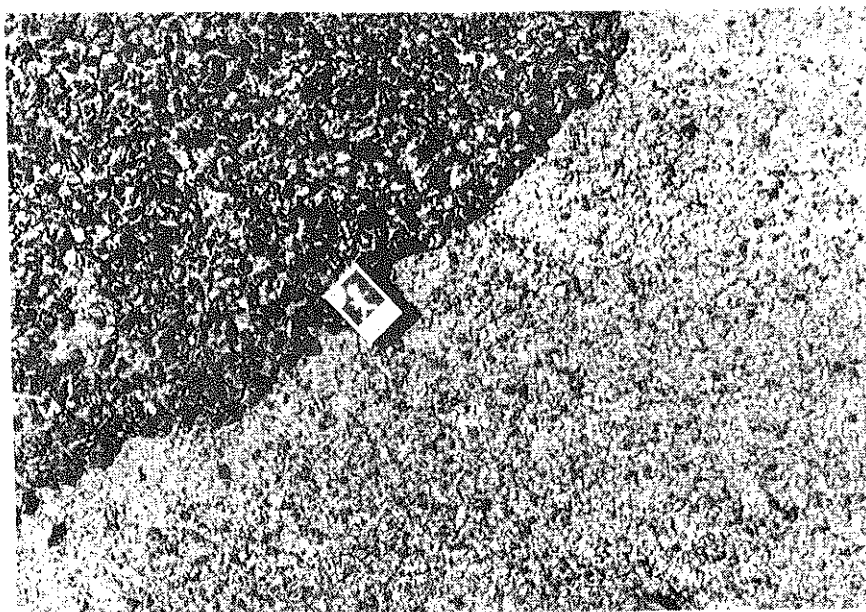


Fig 13. Provytor Ab12ö respektive Ab8ö

Mätningarna inleddes med placering av träramen på det markerade området. Tvärreglarna sattes på, för fixering av det inbördes avståndet 1,0 m mellan begränsningssidorna. Överfallet placerades i överkant av provytan och erforderliga slanganslutningar gjordes. Innan mätningarna började kontrollerades att läckaget vid sidorna var så litet som möjligt. Om läckage förekom kunde ramen pressas ned med hjälp av tyngder. Likaså tillsågs att flödet genom utskoven var jämnt fördelat. Korrigering gjordes med skruvanordningen. En mycket viktig detalj är att ingen del av provområdet är torrt när mätningen görs.

För att visuellt undersöka huruvida strömningen över provytan var jämnt fördelad, vilket är ett nödvändigt villkor för mätningens riktig-

het, använde vi oss av pappersbitar med en diameter på ca. 1,5 millimeter utstansade från en hålremsa. Detta test försökte vi utföra under ingen eller ringa vindpåverkan. Dessa pappersbitar hade ingen tendens till att bli våta och därmed sjunka eller fastna på botten.

Då kontrollerna var gjorda inställdes flödesmätaren, rotametern, på ett konstant värde. Mätelektroden placerades i vattenströmmen och anslöts till skrivaren. Avståndet mellan doseringspunkt och mätelektrod uppmättes på centimetern när. och noterades. Detta avstånd varierade mellan 1,5 - 2,5 m genom försöksserien. Vidare tillsågs att doseringspunkten låg så långt ifrån överfallet att ett stabilt flöde hade uppnåtts.

För varje flöde över ytan hade vi tre elektrodplaceringar på samma avstånd från doseringspunkten. Vid varje elektrodplacering gjordes två mätningar, det vill säga summa sex mätningar för varje volymström. I genomsnitt använde vi oss av fyra olika flöden per provområde. Dosering av saltlösningen utfördes manuellt i vattenströmmen, rakt ovanför aktuell elektrodplacering. Exakt samtidigt med doseringen gjordes en markering på det i skrivaren frammatade pappret. Dessutom skrevs flödet över ytan upp, lutning samt typ av yta. Genom hela försöksserien används en hastighet på pappersframmatningen 1 cm/4s, vilken gav den bästa proportionen mellan höjd och längd på den ritade kurvan. Exempel på registrerad kurva ses i fig. 14. Eftersom utsläppt saltmängd var så liten, ansåg vi att dosering skedde praktiskt taget momentant. Doseringspunkten är därför markerad med en pil i figuren.

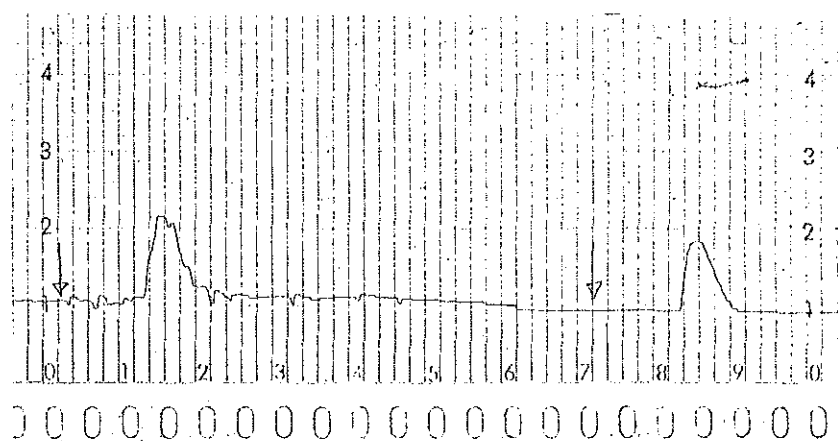


Fig 14. Uppritad kurva av potentiometerskrivare.

Utöver mätningar med salt gjordes samtidigt några försök med de utstansade pappersbitarna, konfettin, varvid tiden avlästes med kronometer. Den härur beräknade hastigheten kallades ythastighet. Temperaturmätningar på vattnet gjordes vid flera tidpunkter. Temperaturen var $16 \pm 1^{\circ}\text{C}$ genom hela försöksserien.

7. ANALYS AV MÄTRESULTAT

7.1 Hastigheten jämförd med teoretiska värden

En av målsättningarna med försöken var att undersöka om ytavrinningen kan beskrivas med hjälp av Mannings formel. De försöksresultat som har erhållits har därför jämförts med teoretiskt uträknade värden ur Mannings formel. Diagram 2 visar hur medelhastigheten varierar med flödet vid konstant lutning (0,064) och råhet (Ab 12ö). Mätresultaten är baserade på tider som erhöles vid konduktivitetmätningar. Tiden erhöles genom att mäta sträckan mellan injekteringsmarkeringen och tyngdpunkten på kurvan, som skrivaren gav, se fig. 14. Detta ger ett medelvärde på tiden, varför den sedan beräknade hastigheten har betecknats som medelhastigheten. Den teoretiskt beräknade kurvan fås ur Mannings formel. Vid beräkningarna har Mannings tal (n) och lutningen (S) varit konstanta medan flödet q har varierat mellan $1,00 \cdot 10^{-4}$ och $7,00 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}$. Värdet på Mannings tal (n) har för Ab 12ö ansetts vara konstant 0,032. Detta värde har erhållits genom att studera värden för Ab12ö i diagram 5. I diagram 2 jämförs sedan hur formen mellan den uppmätta och den teoretiska kurvan överensstämmer. Det saknar alltså betydelse om n avviker något från det korrekta värdet, då detta inte inverkar på kurvans form utan endast på dess höjdläge i diagrammet.

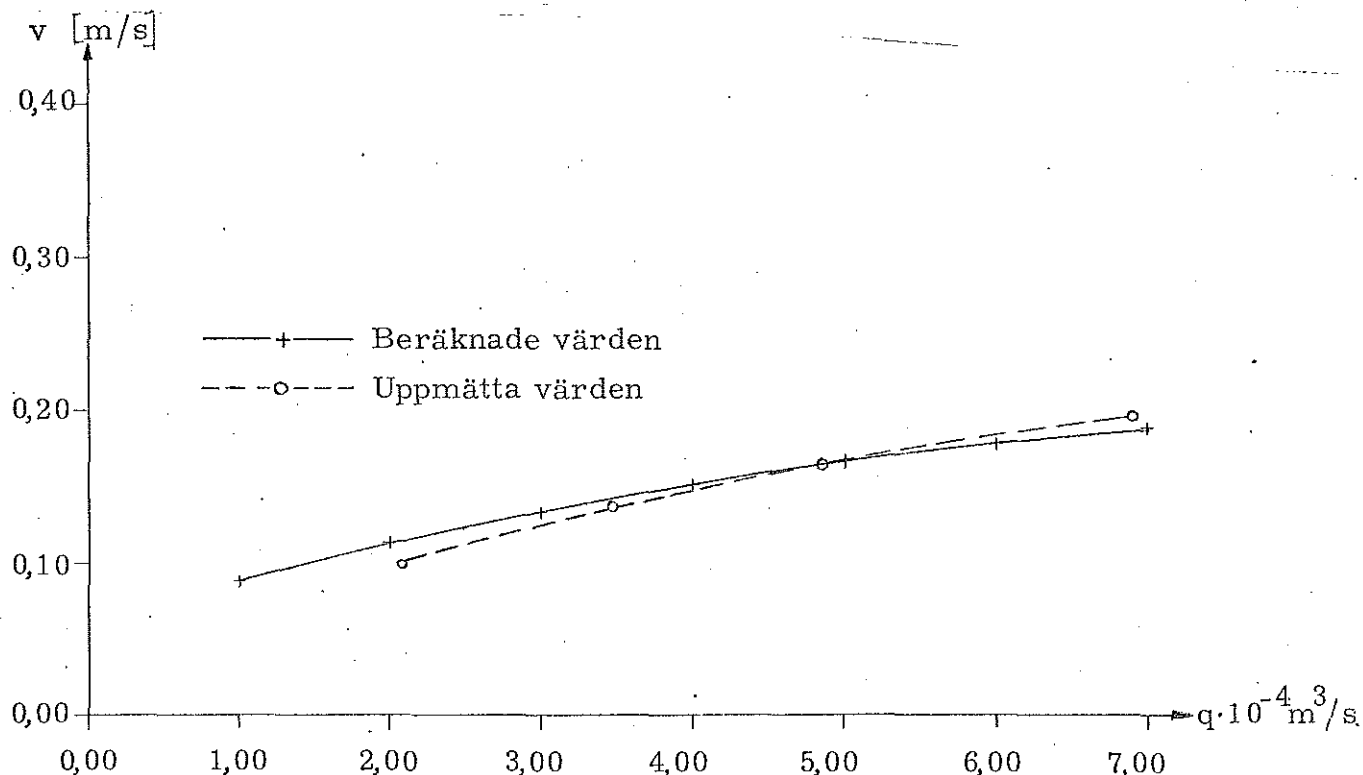


Diagram 2. Jämförelse mellan teoretiskt beräknade värden ur Mannings formel och uppmätta värden på Ab 12ö vid lutningen 0,064.

Diagram 3 återger hur medelhastigheten varierar med lutningen vid konstant flöde ($0,208 \text{ l/s}$) och råhet (Ab 12t). Även här har mätresultaten jämförts med teoretiskt beräknade värden ur Mannings formel.

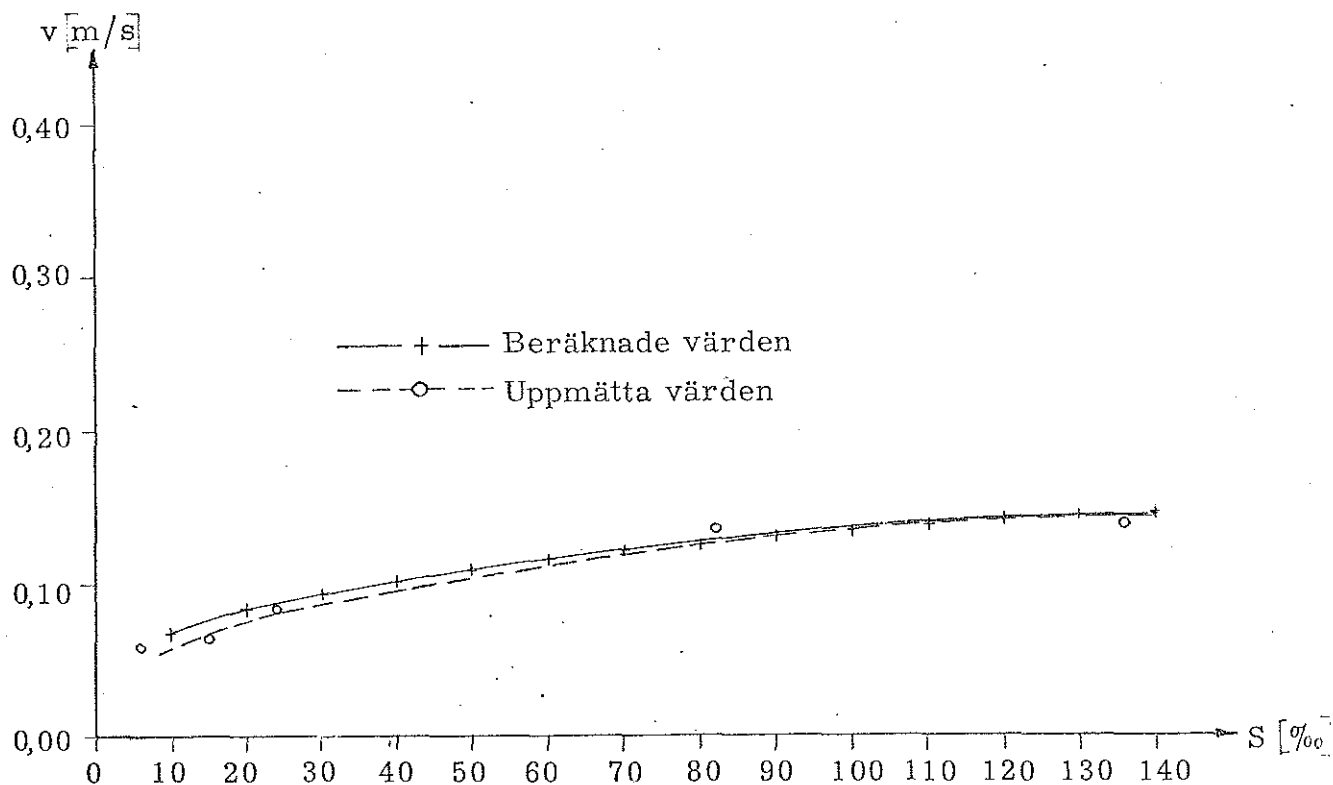


Diagram 3. Jämförelse mellan teoretiskt beräknade värden ur Mannings formel och uppmätta värden på Ab 12t vid flödet $0,208 \text{ l/s}$.

I diagram 2 och 3 visar de uppmätta och beräknade värdena god överensstämmelse. Den mindre avvikelse som finns i diagram 2 kan bero på att n har satts till ett konstant värde. I verkligheten varierar nämligen n med flödet, se avsnitt 7.3. Värdet på Mannings tal i diagram 3 har satts till medelvärde av i diagram 5 redovisade mätningar för $q = 0,208 \text{ l/s}$ på AB 12t, varför kurvorna väl sammanfaller.

7.2 Råhetens inverkan på hastigheten

Av intresse har även varit att se hur hastigheten ändras vid olika råhet. Diagram 4 är en jämförelse mellan hastigheterna, när underlaget består av Ab 8t och Ab 12t.

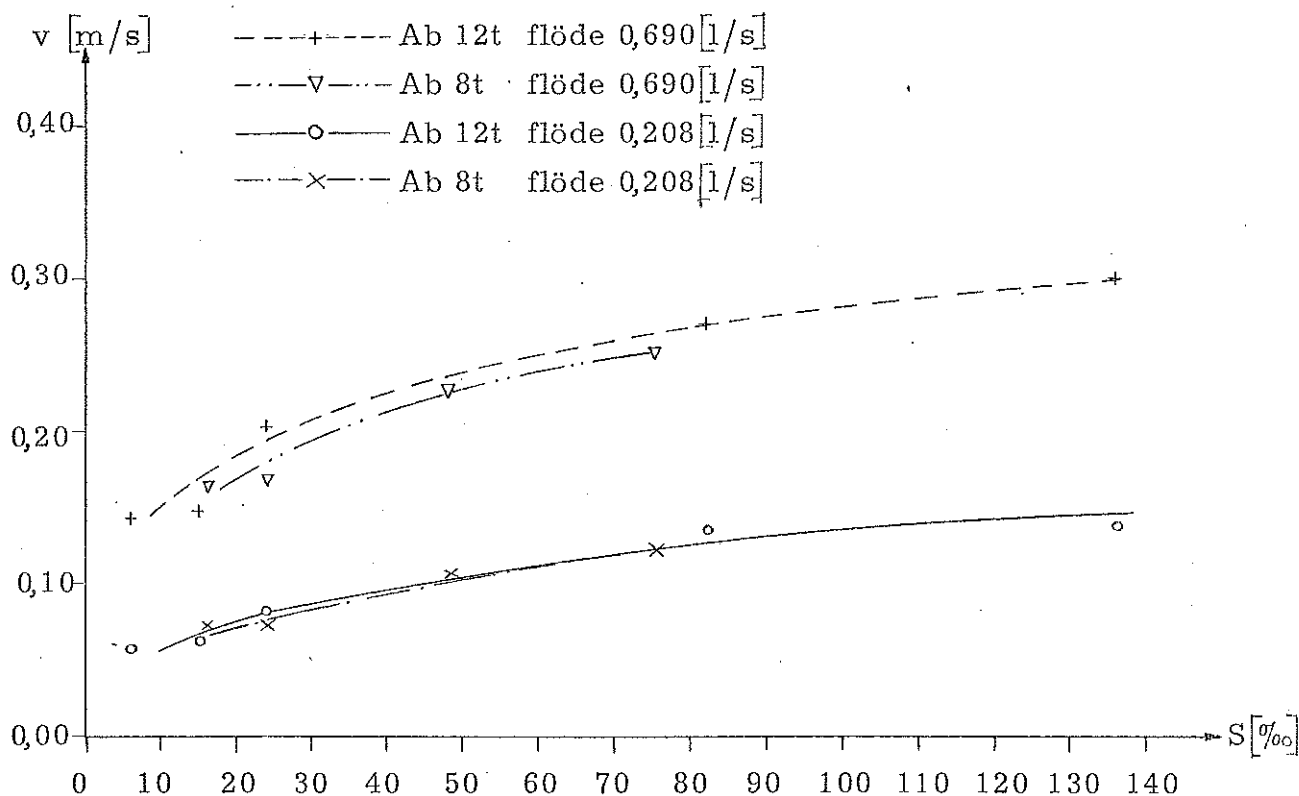


Diagram 4. Hastigheten som funktion av lutningen vid konstant flöde och råhet.

Från diagram 4 framgår att skillnaden i hastighet mellan de två asfaltstyperna inte är stor. Hastighetsskillnaden blir förmodligen större mellan öppna och täta asfaltstyper. En jämförelse mellan bilagorna 1 och 2 ger en uppfattning om hastighetsskillnaden. Svårigheter att finna lämpliga provytor har gjort att någon representativ mätserie för öppna asfaltytor inte kan redovisas.

7.3 Mannings tal

Ur de uppmätta värdena har Mannings tal framtagits. Värdena redovisas i diagram 5.

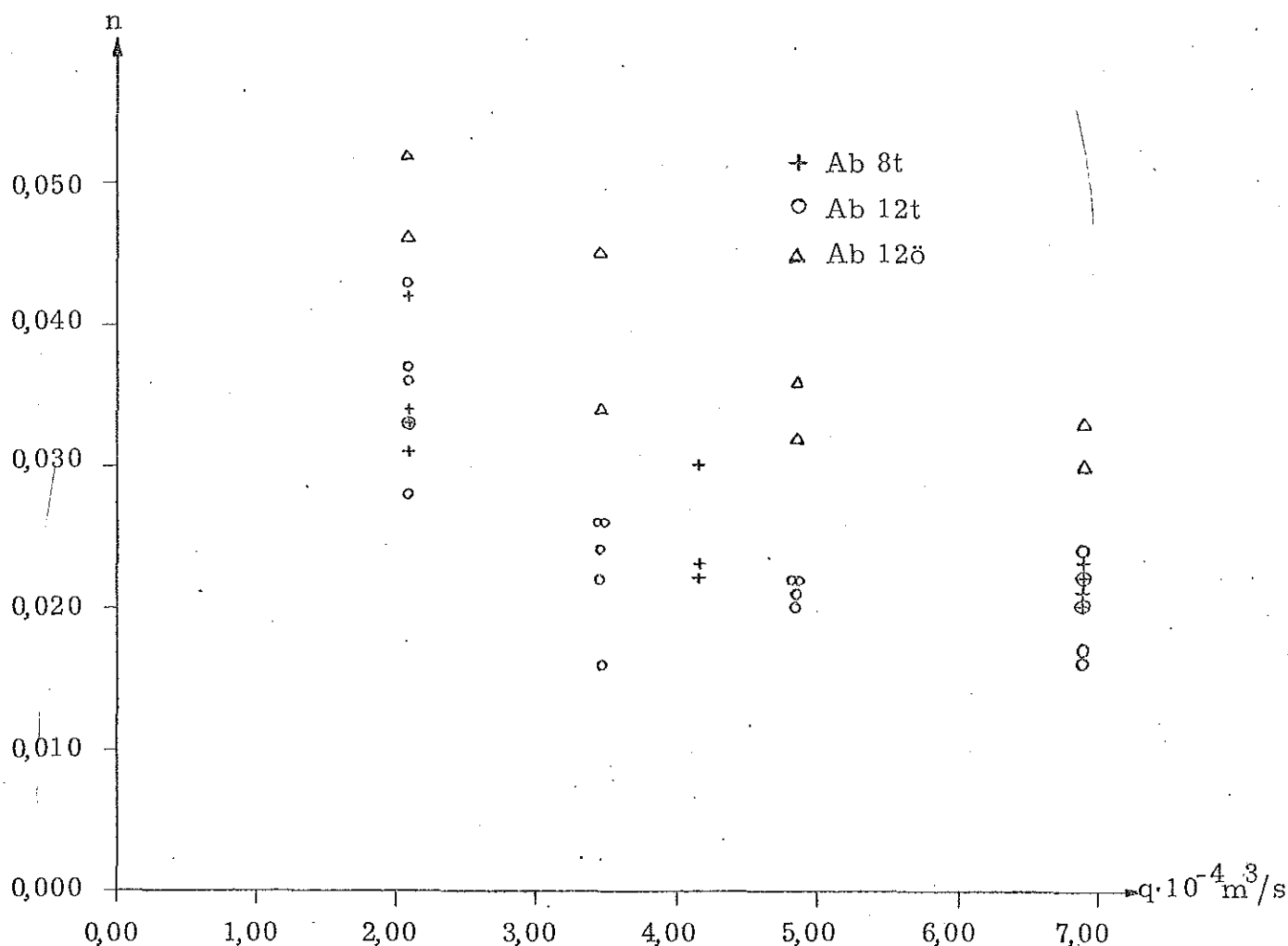
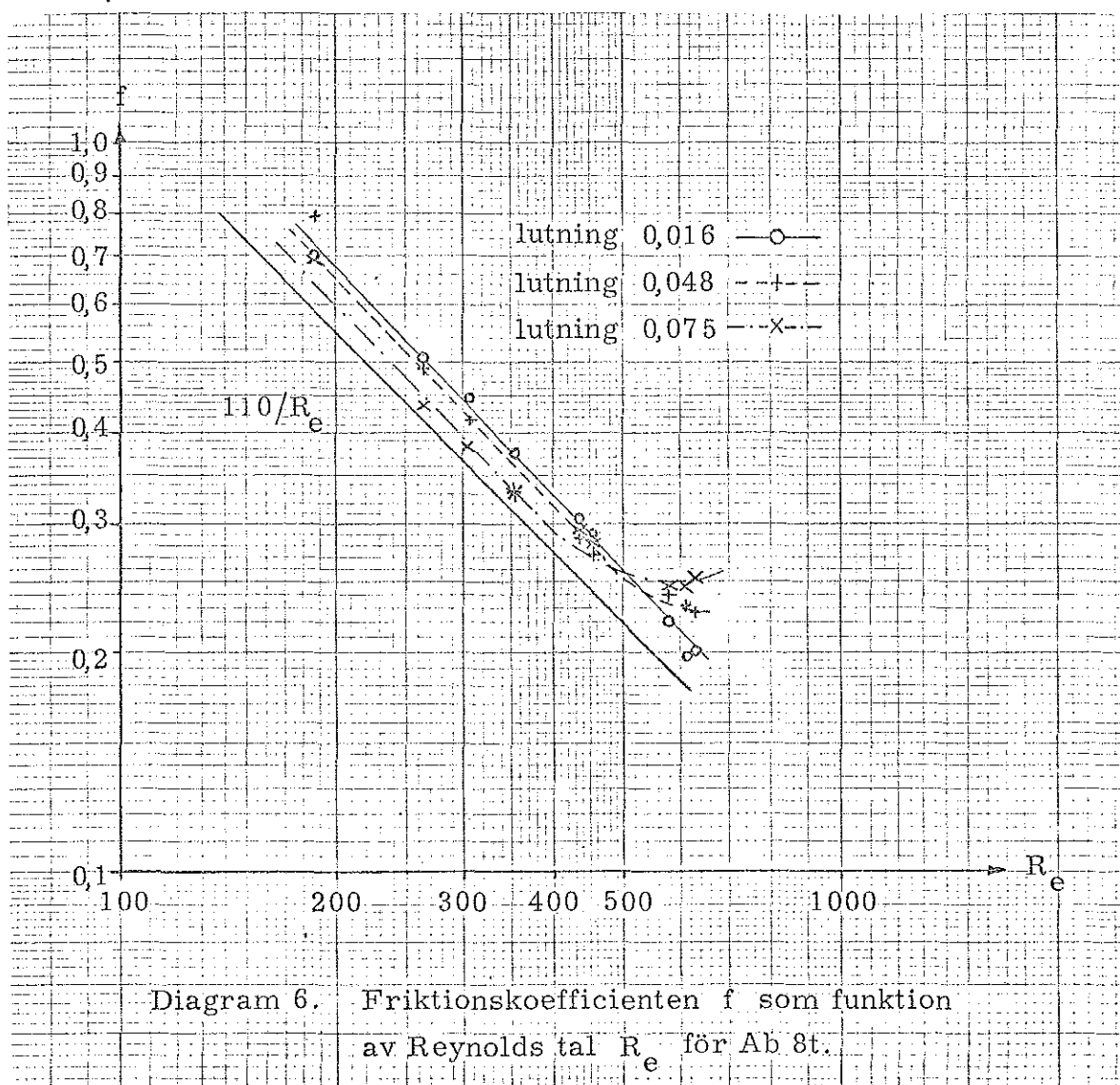


Diagram 5. Mannings tal n som funktion av flödet q för olika asfalttyper.

Diagrammet visar att Mannings tal varierar med flödet. Variationen är inte större än att man vid praktiska beräkningar kan sätta Mannings tal till ett konstant värde. Medelvärdet för Ab 12t och Ab 8t kan sättas till 0,022. Värdet på Ab 12ö är något osäkrare att bestämma men torde ligga på omkring 0,032. De värden som redovisas i handböcker ligger i samma storleksordning som mätresultaten, men någon direkt jämförelse kan dock inte göras då dessa värden gäller för kanalströmning.

7.4 Jämförelse med flödeskriterier

För att bestämma om flödet var laminärt eller turbulent användes metoden att på log-log papper inpricka f som funktion av Re . f fås med Darcy Weissbachs formel som $f = \frac{8g \cdot RS}{v^2}$ och $Re = \frac{v \cdot R}{\nu}$. Den hydrauliska radien R sätts lika med medeldjupet. I diagram 6 har de bäst underbyggda mätserierna inlagts.



De räta linjerna i diagram 6 kan skrivas på formeln $f = \frac{D}{Re}$ där D beror av lutning och råhet hos ytan.

Ur diagrammet framgår att D ligger mellan 120 och 145. Konstanten D är alltså större än den konstant som erhålls vid glatta kanaler, vilket stämmer med teorin i kap. 4.

Övergångszonen mellan laminär och turbulent kan märkas på kurvan för lutningarna 75 och 48 %. Övergången från laminärt till turbulent flöde börjar enligt diagrammet vid ca. $Re = 450$.

Om man istället använder det i kap. 4 uppställda flödes kriteriet att

flödet är turbulent om $q > \frac{3\sqrt{y}}{g n} \frac{1}{2}$ fås att samtliga i diagram 6 redovisade flöden är turbulenta.

8. DISKUSSION AV FAKTORER SOM KAN PÅVERKA MÄTRESULTATEN

Då vi valde att bestämma hastigheten vid försöken uppstod frågan om den av oss kallade medelhastigheten kunde anses vara representativ för avrinningsförloppet. Detta vårt antagande baserades på försök med färgdosering gjorda under samma betingelser som saltdoseringen. Spridningsbilden visade sig härvid väl motsvara den av potentiometerskrivaren registrerade kurvan. Vid dessa försök med färg framgick även att man fick en viss vidhäftning av färg till botten vid doseringspunkten. Till denna vidhäftning togs hänsyn vid utvärderingen av de registrerade kurvorna på så sätt att eventuella "svansar" kapades av. Mestadels var koncentrationen i dessa "svansar" så liten att man ej fick något utslag på skrivaren. En faktor som torde ha varit av underordnad betydelse vid saltförsöken var den påverkan vinden åstadkom.

Däremot hade vinden betydelse vid de försök vi gjorde för att bestämma ythastigheten. Utöver vindpåverkan erhöles osäkra resultat på grund av ytspänningsfenomen samt, under vissa förutsättningar, uppträdande transporterande vågor över provområdet. Dessa försök kunde därför inte ligga till grund för någon direkt jämförelse med saltförsöken.

Flödesvariationerna på grund av tryckväxlingar i ledningssystemen var av den storleksordningen att ingen påverkan vid försöken kunde anses föreligga. Man kan få en viss effekt på rotameterens kapacitet, på grund av beläggning på insidan efter en tids användning. Försökstiden var emellertid så kort varför ingen ny kalibrering av flödesmätaren utfördes.

Vidare kan en felkälla vara att man får ojämn strömning över provytorna på så sätt att små lokala ojämnheter gör att vattnet avrinner i rännilar på vissa sträckor, speciellt vid små vattföringar. Denna felkälla skulle man ha kunnat eliminera genom att använda sig av längre provområde, men detta innebar att en jämn lutning skulle vara svår att erhålla i fält. Denna felkälla försökte vi undgå genom noggrann kontroll och ha flera elektrodplaceringar.

I Mannings formel ingår R (hydrauliska radien) vilken är definierad som

$$R = A/p$$

där $A = \text{tvärsnittsarean [m}^2\text{]}$
 $p = \text{våta perimetern [m]}$

Om bredden sätts till B [m] och djupet till y [m] fås

$$R = \frac{B \cdot y}{B + 2y} \quad [\text{m}]$$

Man gör i detta fall antagandet $B \gg y$ (ty bred kanal), varför $R = y$. Eftersom försöken gjordes på råa ytor kan därför den våta perimetern bli betydligt större och därmed R mindre, se fig 15. Någon hänsyn härtill har ej tagits vid de gjorda beräkningarna.

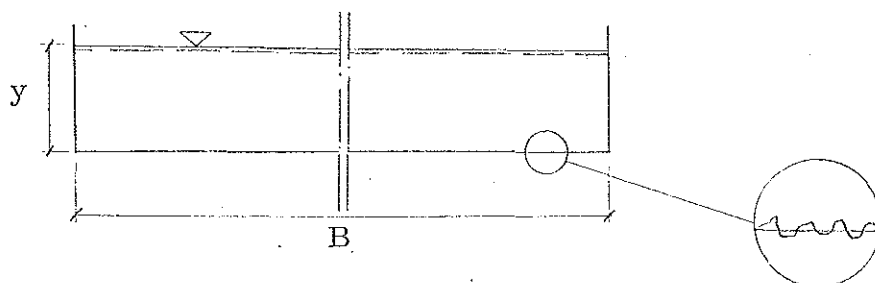


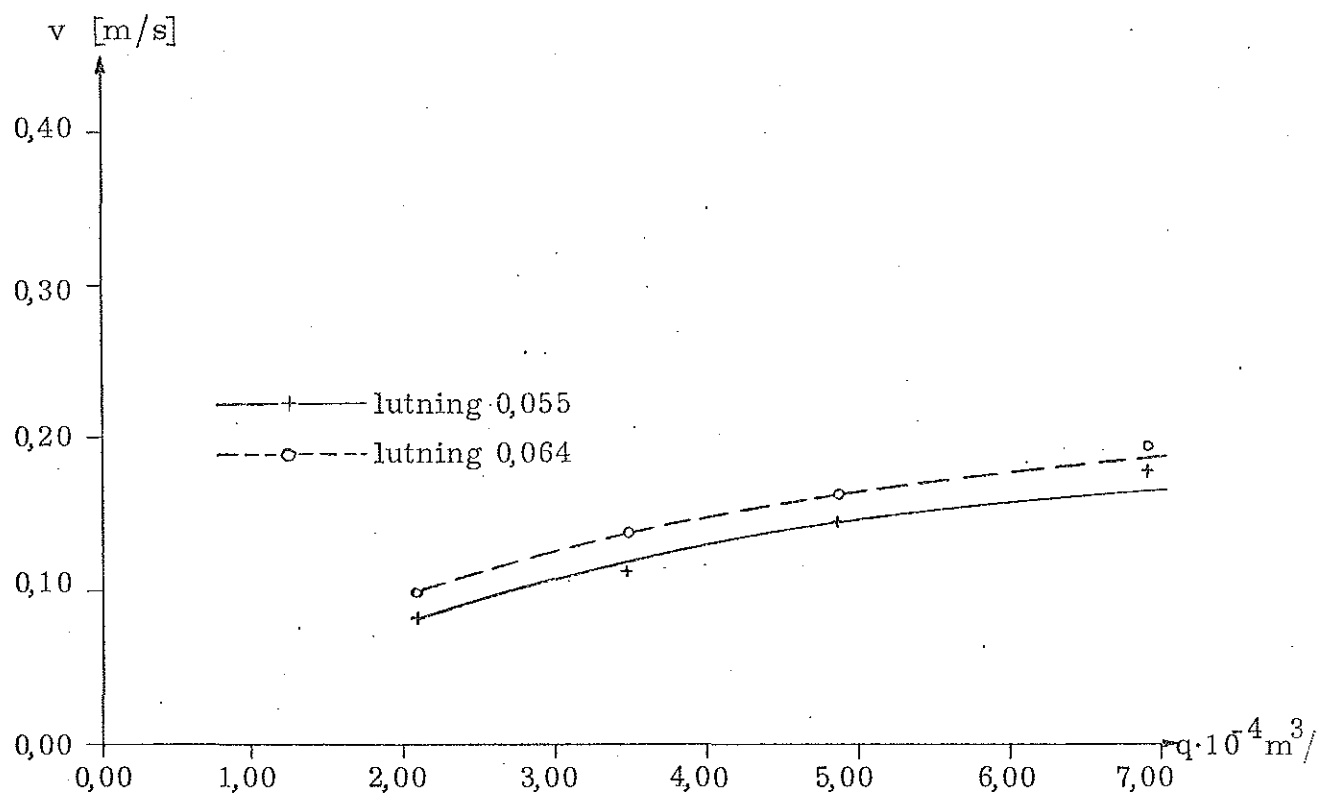
Fig 15. Tvärsektion av kanal.

De resultat som har redovisats har grundats på medelhastigheter. Noggrannheten i mätresultaten blir således beroende på hur väl de uppmätta värdena representerar medelhastigheten i den parabelformade profilen.

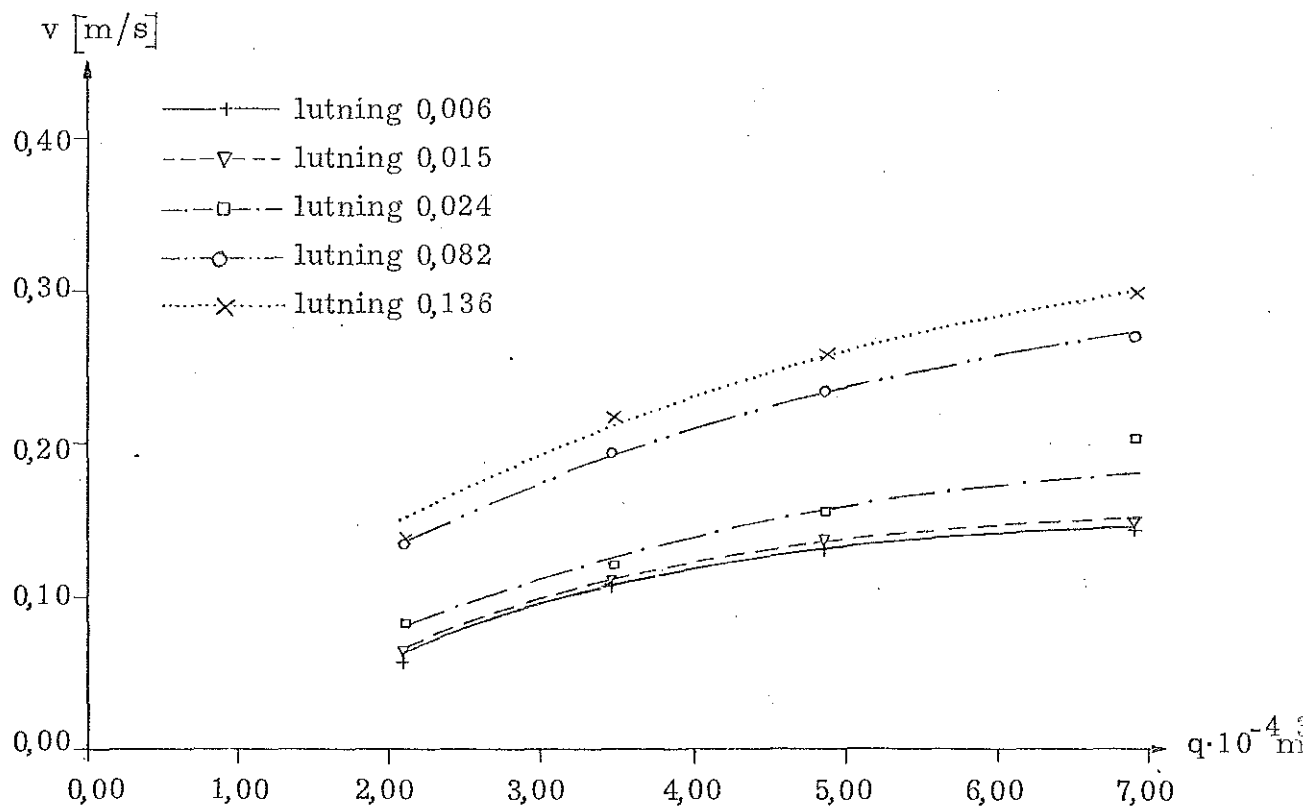
9. LITTERATURFÖRTECKNING

- [1] Chow, V.T.: Open Channel Hydraulics. Mc Graw-Hill 1959
- [2] Division of Water Resources Department of Civil Engineering,
University of Cincinnati, Urban Runoff Characteristics.
Environmental Protection Agency, Water Quality Office,
Water Pollution Control Research Series, October 1970 -
11024 DQU 10/70.
- [3] Horner, W.W., Jens S.W.: Surface runoff determination from
rainfall without using coefficients. Trans ASCE Vol 117,
No 2153 pp 1059-1066 1942
- [4] Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H.: Applied
Hydrology. Mc Graw-Hill 1949
- [5] Morgali, J.R., Linsley, R.K.: Computer analysis of over-
land flow. Journal of the hydraulics division, ASCE, vol 91,
No HY 3, part 1, May 1965
- [6] Owen, W.M.: Laminar to turbulent flow in a wide open
channel. Trans. ASCE Vol 119, pp 1157-1175. Discussion
by Iwagaki.
- [7] Papadakis, C., Preul, H.C.: University of Cincinnati
Urban Runoff Model. ASCE Vol 98, HY 10, October 1972
- [8] Shen, H.W., Li, R.: Rainfall effect on sheet flow over smooth
surface. ASCE Vol 99, No HY 5, May 1973
- [9] Straub, L.G., Silberman, E., Nelson, H.C.: Open channel
flow at small Reynolds number. Trans. ASCE Vol 123,
pp 685-714 1958
- [10] Woo, D., Brater, E.F.: Spatially varied flow from controlled
rainfall, ASCE Vol 88, No HY 6, Part 1, November 1962

- [11] Yen, B.C., Wenzel, H.G., Yoon, Y.N.: Resistance coefficients for steady spatially varied flow. ASCE Vol 98, No HY8, August 1972
- [12] Yoon, Y.N., Wenzel, H.G.: Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. ASCE Vol 97, No HY9, September 1971
- [13] Yu, Y.S., McNown, J.S.: Runoff from impervious surfaces. Journal of hydraulic research. Volume 2, No 1, 1964



Bilaga 1. Hastigheten som funktion av flödet vid konstant lutning och råhet (Ab 12ö).



Bilaga 2. Hastigheten som funktion av flödet vid konstant lutning och råhet (Ab 12t).