

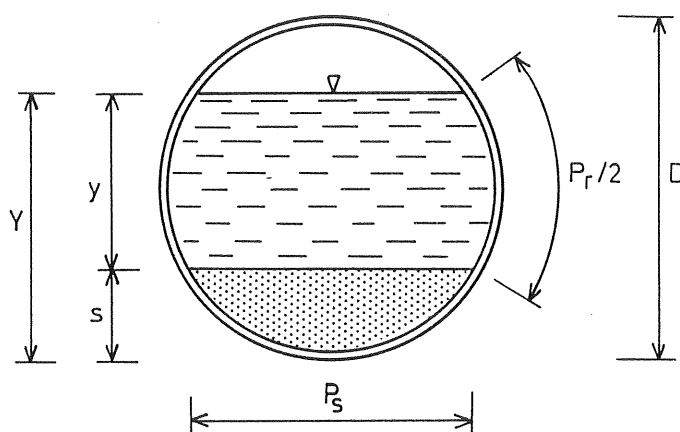
Institutionen för vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola

Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

ISSN 0348 1069

FLÖDESKAPACITET HOS AVLOPPSLEDNINGAR DELVIS FYLlda MED SEDIMENT

En inledande experimentell och teoretisk studie



Gustavo Perrusquía · Sven Lyngfelt · Anders Sjöberg

Report

Göteborg 1986

Series B : 48



Institutionen för Vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola

Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

FLÖDESKAPACITET HOS AVLOPPSLEDNINGAR DELVIS FYLLDA MED SEDIMENT

En inledande experimentell och teoretisk studie

Gustavo Perrusquía · Sven Lyngfelt · Anders Sjöberg

Report

Göteborg 1986

Series B : 48

Adress: Institutionen för Vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg

Telefon: 031/81 01 00

FÖRORD

Föreliggande rapport ingår som en del av redovisningen av projektet "Sedimentation och erosion i ledningssystem". Projektet drivs inom ramen för den ledningsteknikforskning som pågår vid Geohydrologiska forskningsgruppen vid CTH. Projektet finansieras av Statens råd för byggnadsforskning och sammanfattande projektnamn för projektgruppen är "Geohydrologiska metoder samt drift och underhåll av ledningssystem" (Projekt nr 840296-6).

Inom projektet pågår för närvarande laboratoriestudie av flödeskapaciteten hos en avloppsledning $\emptyset$ 225 mm, delvis fylld med sediment. Den här presenterade studien är genomförd i avsikt att dokumentera befintlig kunskap och teori relevant för nämnda laboratoriestudie.

Litteraturstudien och laboratoriestudien har genomförts av Gustavo Perrusquía. Rapporten har utarbetats gemensamt av alla författarna.

INNEHÅLL

	Sida
FÖRORD	i
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	ii
1 INLEDNING	1
2 BERÄKNING AV SAMMANVÄGD RÅHET OCH FRIKTION	3
2.1 Grundläggande ansatser vid s k sidoväggeliminering	3
2.2 Metoder för beräkning av sammanvägd råhet baserade på Mannings formel	6
2.3 Metoder för beräkning av sammanvägd råhet baserade på Darcy-Weisbachs formel	10
3 INLEDANDE LABORATORIETEST AV METODER FÖR BERÄKNING AV SAMMANVÄGD RÅHET	16
3.1 Delfyllnadskapacitet utan sediment	16
3.2 Delfyllnadskapacitet med sediment	17
3.3 Slutsats - jämförelse	21
4 NÅGRA FÄLT- OCH LABORATORIESTUDIER AV FLÖDET I LEDNINGAR MED SEDIMENT GENOMFÖRDA I USA OCH ENGLAND	23
4.1 Publicerade undersökningar	23
4.2 Råhetens beroende av bäddformen	26
4.3 Synpunkter på refererade fältmätningar	27
5 SAMMANFATTNING	29
6 REFERENSER	32
7 BETECKNINGAR	34
APPENDIX I	
Hydrauliska parametrar för den i laboratoriet genomförda mätserien	35

1 INLEDNING

I avloppsledningssystem som är flacka eller har lokala svackor sker en kontinuerlig sedimentations-erosionsprocess. Är den hydrauliska gradienten tillräckligt liten sker en tillväxt av sedimentlagren och en tämligen stabil sedimentbädd utbildas. Sedimentbäddar av denna typ är inte ovanliga och förekommer i såväl kombinerade ledningssystem som dag- och spillvattensystem, se t ex Sörman (1985).

Sedimenten påverkar hastighetsfältet dels genom att flödessektionen får annorlunda form och våt perimeter, dels genom att sedimentbädden har en annan, företrädesvis större, råhet än ledningens väggar. Den sammanlagda effekten blir ett ökat strömningsmotstånd, dvs en sänkning av kapaciteten. Eftersom sedimentbädden ofta finns i system där tillgången på fallhöjd är liten kan kapacitetsminskningen på grund av sediment få stor betydelse.

Vid strömning med fri vattenyta i en rörledning kan jämförelse göras med strömning i kanaler där man ofta har olika råhet på sidoväggarna och botten. En teknik som vanligen tillämpas vid kanalströmning innebär att en sammanvägd råhet uppskattas utgående från sidornas respektive bottenens råhet. Den sammanvägda råheten används sedan i det aktuella friktionssambandet vid beräkning av flödet. Flera metoder för beräkning av den sammanvägda råheten har presenterats. Metoderna har dock i huvudsak utnyttjats för flöden i relativt breda kanaler där inverkan av sidoväggarnas råhet inte är så dominerande. Någon egentlig undersökning inriktad mot strömningsförluster i ledningar delvis fyllda med sediment synes dock ej ha genomförts.

De flesta studier om strömningsförluster i ledningar behandlar "rena" ledningar och endast ett fåtal strömning över sedimentbäddar. De som utförts är inte heller direkt inriktade på kapacitetsbestämning. I den mån strömningsmotståndet och råheten analyseras används emellertid samma teknik som vid kanalströmning med en sammanvägd råhet. I sedimentbelagda ledningar kommer inverkan från väggarna att vara större än i breda kanaler och tillämpbarheten av tekniken med sammanvägd råhet är inte självklar. Någon alternativ metodik har emellertid ännu inte presenterats.

Avsikten med denna studie har varit att sammanställa och diskutera existerande metoder för beräkning av flöden i ledningar delvis fyllda med sediment. Metoderna exemplifieras med hjälp av resultat från en inledande experimentell studie av flödeskapaciteten hos en sedimentbelagd (friktionsmaterial) avloppsledning Ø225 mm.

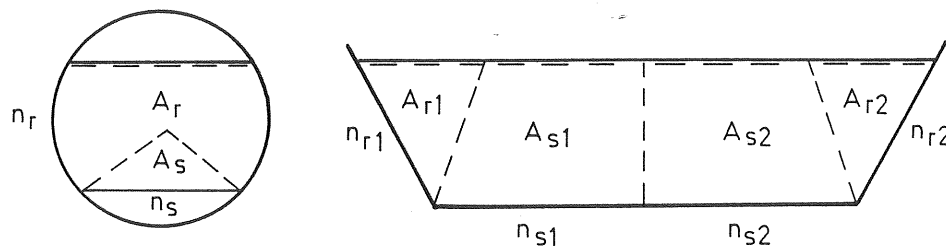
2 BERÄKNING AV SAMMANVÄGD RÅHET OCH FRIKTION

För att vi skall kunna beräkna flödet i en ledning där råheten, karakteriserad av t ex Mannings tal, varierar längs den våta perimetern måste vi vid utnyttjandet av Mannings formel kunna väga samman effekten av de olika råheterna. Olika metoder för beräkning av en sammanvägd råhet har därför föreslagits.

På motsvarande sätt är man vid studier av friktionsmotstånd i ledningar och kanaler intresserad av att kunna bestämma det friktionsmotstånd som genereras av t ex enbart botten. Eftersom den råhetskoefficient man får direkt ur mätningen är den sammanvägda så måste man då ha tillgång till metoder för att eliminera sidornas inverkan. Den teknik som då utnyttjas brukar kallas sidoväggeliminering.

2.1 Grundläggande ansatser vid s k sidoväggeliminering

Hastighetsfördelningen i den del av den våta tvärsnittsarean som ligger nära bottensedimenten bestäms i huvudsak av sedimentens råhetsegenskaper medan inverkan av sidoväggarnas råhet är mer eller mindre försumbar. Det motsatta förhållandet gäller för de delar av tvärsnittet som befinner sig nära sidoväggarna. En logisk och lätthanterlig ansats borde då vara att anta att flödets tvärsnittsarea A kan delas upp i delareor där varje del helt knyts till en bestämd del av den våta perimetern. Principen för en sådan uppdelning framgår av figur 1 där A_r och A_s svarar mot de delar av tvärsnittet som kopplas till sidoväggarna respektive botten.



Figur 1 Uppdelning av flödestvärsnittet i delareor. n är Mannings råhetskoefficient.

För varje delarea skulle vidare kunna förutsättas att

- * medelhastigheterna är lika och desamma som för hela sektionen, $V_s = V_r = V$
- * de hydrauliska gradienterna är lika och desamma som för hela sektionen, $S_s = S_r = S$

och att

- * det använda friktionssambandet kan användas på varje delarea för sig och på hela sektionen.

Ovanstående ansats presenterades av Einstein (1942) och utnyttjades av honom för att separera effekten av olika råhet hos botten och väggar på flödet i kanaler. I flera senare presenterade studier har samma metodik använts både i kanaler och avloppsledningar, se Einstein och Banks (1950), Pyle och Novak (1981), Ribberink (1982), Novak och Nalluri (1984).

Låt oss utgå från förutsättningarna enligt ovan och ett flödesfall där följande parametrar är kända, se figur 1:

Mannings råhetskoefficient för rörväggen (n_r)
 våta perimetern längs rörväggen (P_r)
 våta perimetern längs sedimenten (P_s)
 medelhastigheten (V)
 hydrauliska gradienten (S)

Mannings formel förutsättes kunna utnyttjas för såväl hela arean som för varje delarea,

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

där R är den hydrauliska radien.

Den hydrauliska radien R_r knuten till rörväggarna erhålles då till

$$R_r = \left(\frac{n_r V}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{3/2} \quad (2)$$

och motsvarande delarea A_r till

$$A_r = P_r R_r = P_r \left(\frac{n_r V}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{3/2} \quad (3)$$

Den del av den våta arean som kopplas till sedimenten erhålls som skillnaden mellan totala arean A och A_r

$$A_s = A - A_r = A - P_r \left(\frac{n_r V}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{3/2} \quad (4)$$

och motsvarande hydrauliska radie R_s till

$$R_s = \frac{A_s}{P_s} = \frac{A - P_r \left(\frac{n_r V}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{3/2}}{P_s} \quad (5)$$

Sedimentens råhetskoefficient n_s kan nu beräknas till

$$n_s = \frac{R_s^{2/3} S^{\frac{1}{2}}}{V} = \frac{(A - P_r \left(\frac{n_r V}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{3/2})^{2/3} S^{\frac{1}{2}}}{(P_s)^{2/3} V} \quad (6)$$

I den ovan beskrivna tekniken kan givetvis ett godtyckligt friktionssamband användas. Johnson (1942) utnyttjade den allmänna friktionsformeln (Darcy-Weisbachs formel)

$$V = \left(\frac{8gRS}{f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

där f är en friktionsfaktor. Parametrar motsvarande de i ekvationerna (2-6) blir då

$$R_r = \frac{V^2 f_r}{8gS} \quad (8)$$

$$A_r = P_r R_r = P_r \frac{V^2 f_r}{8gS} \quad (9)$$

$$A_s = A - A_r = A - P_r \frac{V^2 f_r}{8gS} \quad (10)$$

$$R_s = \frac{A_s}{P_s} = \frac{A - \frac{P_r V^2 f_r}{8gS}}{P_s} \quad (11)$$

och

$$f_s = \frac{8gSR_s}{V^2} = \frac{8gS}{V^2} \left(\frac{A - \frac{P_r V^2 f_r}{8gS}}{P_s} \right) \quad (12)$$

Den här beskrivna tekniken brukar alltså kallas sidoväggeliminering. Den har i de flesta fall använts för att eliminera inverkan av sidoväggarna i fall där egenskaper hos flödet knutna till sedimenten varit det primära målet för studien.

I den praktiska tillämpningen är vi emellertid oftast inte intresserade av att bestämma sedimentens råhet eller friktionskoefficient. I stället vill vi, utifrån kända värden på väggens respektive sedimentytans råheter, kunna beräkna en sammanvägd råhet som kan utnyttjas i Mannings formel eller Darcy-Weisbachs formel applicerade på hela våta tvärsnittsarean. Metoder avsedda för en sådan beräkning redovisas i det följande.

2.2 Metoder för beräkning av sammanvägd råhet baserade på Mannings formel

Låt oss först utnyttja de två sista förutsättningarna på sidan 4; samma hydrauliska gradient och samma tillämpning av friktionsformeln för delareorna som för hela våta tvärsnittsarean.

Eftersom totalflödet är summan av delflödena, $Q=Q_r+Q_s$, gäller att

$$A V = A_r V_r + A_s V_s \quad (13)$$

Eliminering av V , V_r resp V_s med hjälp av Mannings formel samt ersättning av A med $P \cdot R$ ger

$$n = \frac{P R^{5/3}}{\frac{P_r R_r^{5/3}}{n_r} + \frac{P_s R_s^{5/3}}{n_s}} \quad (\text{Lotter}) \quad (14)$$

Sambandet presenterades av Lotter (se Chow, 1959) som tillämpade det på breda kanaler där $R \cong$ vattendjupet. Eftersom R_r och R_s är obekanta i ett ledningstvårsnitt är sambandet inte direkt tillämpbart.

Ett mer tillämpbart samband erhålls om dessutom hastigheten antas lika i hela tvärsnittet, $V = V_r = V_s$. Insättning av $A = P \cdot R$ och $R = (n \cdot V / S^{1/2})^{3/2}$ och motsvarande samband för delareorna A_r och A_s i sambandet

$$A = A_r + A_s \quad (15)$$

ger

$$P \cdot \left(\frac{n \cdot V}{S^{1/2}} \right)^{3/2} = P_r \left(\frac{n_r \cdot V}{S^{1/2}} \right)^{3/2} + P_s \left(\frac{n_s \cdot V}{S^{1/2}} \right)^{3/2} \quad (16)$$

varför den sammanvägda råhetskoefficienten n ges av

$$n = \left(\frac{P_r \cdot n_r^{3/2} + P_s \cdot n_s^{3/2}}{P} \right)^{2/3} \quad (\text{Horton}) \quad (17)$$

Ekvation (17) baseras således på de antaganden som ges i avsnitt 2.1. Sambandet presenterades av Horton (1933) som tillämpade det på kanaler med olika råhet på botten och sidorna. Horton härledde sambandet på ett annorlunda sätt men utnyttjar i grunden samma förutsättningar.

Exempel: Rektangulär kanal

$B = 10$ m (kanalbredd)

$Y = 3.33$ m (vattendjup)

$n_{\text{botten}} = 0.025$ (n_s)

$n_{\text{vägg}} = 0.012$ (n_r)

Ekvation (17) ger då en sammanvägd råhetskoefficient

$n = 0.0203$

Om vi i stället för antagandet om lika hastighet nu tar som utgångspunkt att det totala strömningsmotståndet $F = P \cdot \bar{\tau} = P \cdot \rho \cdot g \cdot R \cdot S$ i tvärsnittet är lika med summan av delareornas motstånd erhålls

$$P \cdot \rho \cdot g \cdot R \cdot S = P_r \cdot \rho \cdot g \cdot R_r \cdot S_r + P_s \cdot \rho \cdot g \cdot R_s \cdot S_s \quad (18)$$

Med Mannings formel applicerad på hela arean och på delareorna kan S , S_r och S_s elimineras ur denna ekvation

$$P \cdot n^2 \cdot \frac{V^2}{R^{1/3}} = P_r \cdot n_r^2 \cdot \frac{V_r^2}{R_r^{1/3}} + P_s \cdot n_s^2 \cdot \frac{V_s^2}{R_s^{1/3}} \quad (19)$$

Under antagande av att hastigheten samvarierar med hydrauliska radien på följande sätt,

$$\frac{V}{R^{1/6}} = \frac{V_r}{R_r^{1/6}} = \frac{V_s}{R_s^{1/6}} \quad (20)$$

erhålls

$$n = \left(\frac{P_r \cdot n_r^2 + P_s \cdot n_s^2}{P} \right)^{1/2} \quad (\text{Einstein}) \quad (21)$$

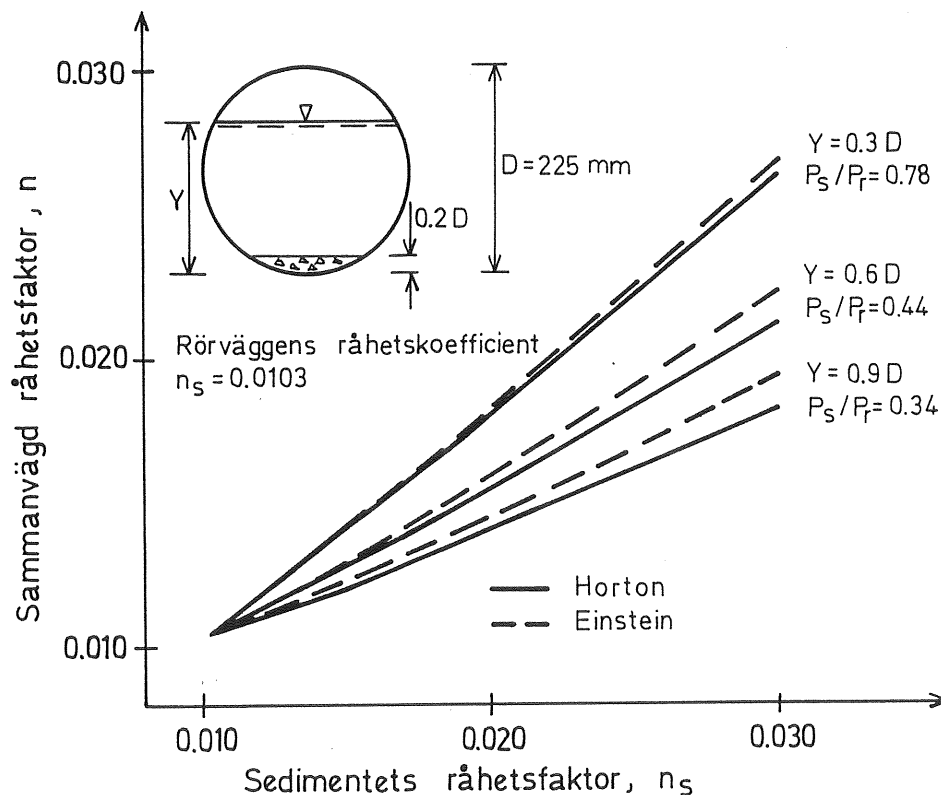
Uttrycket för den sammanvägda råheten enligt ekvation (21) föreslogs av Einstein (1950) som testade den i en kanal med olika råheter på kanalens botten och sidoväggar. Einsteins samband är ett av de i litteraturen mest använda uttrycken för sammanvägd råhet, se t ex Chow (1959), Motayed och Krishnamurthy (1978), Krishnamurthy och Christensen (1972).

Einsteins samband finns inte härlett i någon av ovan angivna referenser och det grundläggande antagandet som leder fram till ekvation (20) diskuteras inte heller. Antagandet att hastigheten på något sätt samvarierar med den hydrauliska radien framstår dock som rimlig.

De samband för beräkning av ekvivalent råhet som presenterats av Horton och Einstein är de mest använda i kanalströmningsfall, men de har också tillämpats på avloppsledningar med sediment.

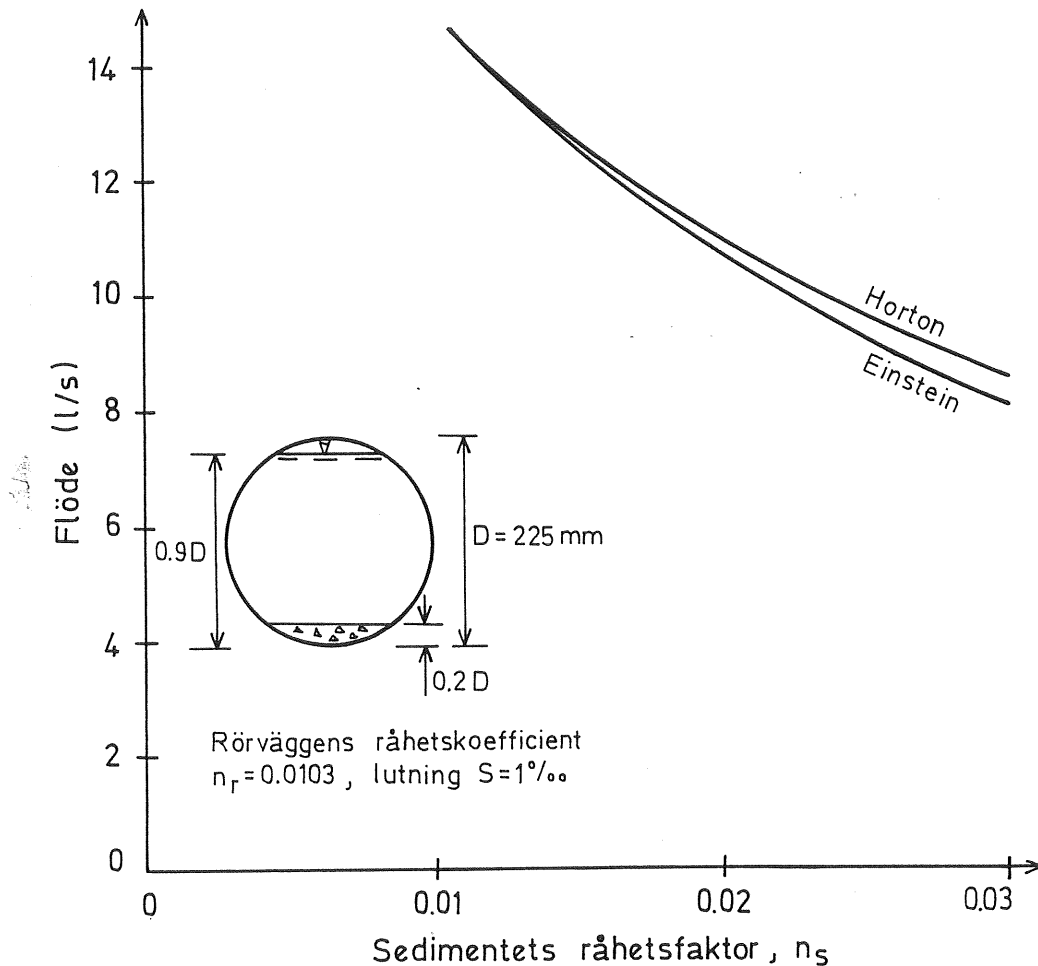
Figur 2 visar hur den ekvivalenta råheten beräknad med de olika sambanden varierar med sedimentens råhet och förhållandet mellan sedimentperimetern P_s och rörperimetern P_r uttryckt som P_s/P_r . Vi ser att skillnaden mellan råhetsvärdena beräknat med Hortons respektive Einsteins samband är liten.

Av figuren framgår också att de största skillnaderna erhålls då sedimentperimetern är liten i förhållande till rörväggsperimetern och sedimentråheten samtidigt är stor. Det bör påpekas att värden på n_s över 0.020 mycket väl kan erhållas just på grund av ojämnbäddform.



Figur 2 Jämförelse mellan Hortons och Einsteins samband för beräkning av olika sammansatt råhet n vid olika val av sedimentråhet n_s och P_s/P_r . $n_r=0.0103$. Sedimentens djup är 0.2 D.

I figur 3 ges ett exempel på hur flödet beräknat med de olika metoderna varierar med sedimentens råhetskoefficient n_s . Den valda ledningen har lutningen $S=1^0/100$, diametern $D=225$ mm och råhetskoefficienten $n_r=0.0103$.



Figur 3 Flödets variation med sedimentråheten n_s beräknad med Hortons och Einsteins samband (ekvation (17) och (21)) för delfyllnadsfallet $y=0.9D$ och sedimentdjupet $0.2D$. Röret har lutningen $S=1^0/100$, diametern 225 mm och råheten $n_r=0.0103$.

2.3 Metoder för beräkning av sammanvägd råhet baserade på Darcy-Weisbachs formel

De samband som redovisats i föregående avsnitt är baserade på Mannings formel. Motsvarande typ av samband kan härledas även

utifrån Darcy-Weisbachs formel. Denna formel har en sundare hydrodynamisk förankring än Mannings formel, som har en mera empirisk karaktär med en råhetskoefficient som ej är dimensionslös. Med Darcy-Weisbachs formel kan friktionsegenskaperna mera direkt kopplas till respektive ytors råhet karakteriserad av den ekvivalenta sandråheten k . Dessutom kan inverkan av ett varierande Reynolds tal beaktas.

Eftersom $R=A/P$ kan Darcy-Weisbachs formel skrivas (se ekvation (7))

$$A = \frac{P \cdot f \cdot V^2}{8g \cdot S} \quad (22)$$

Insättning i ekvation (15) ger

$$\frac{P \cdot f \cdot V^2}{8g \cdot S} = \frac{P_r \cdot f_r \cdot V_r^2}{8g \cdot S_r} + \frac{P_s \cdot f_s \cdot V_s^2}{8g \cdot S_s} \quad (23)$$

Om vi tillämpar förutsättningarna enligt avsnitt 2.1 om lika medelhastighet och hydraulisk gradient i alla delar av tvärsnittet erhålls

$$Pf = P_r f_r + P_s f_s \quad (24)$$

eller

$$f = \frac{P_r f_r + P_s f_s}{P} \quad (\text{Brooks}) \quad (25)$$

Sambandet för den ekvivalenta friktionsfaktorn f i ekvation (25) baseras således på samma förutsättningar som Hortons samband (ekvation (17)). Sambandet har utnyttats av Brooks, se Vanoni och Brooks (1957), Kennedy (1961). Brooks använde sambandet för att bestämma friktionsfaktorn f_s för en kanalbotten med sandbädd där sidoväggarnas friktionsfaktor var känd.

Friktionsfaktorn i Darcy-Weisbachs formel är för strömning i helt fylld sektion en funktion av rörväggens ekvivalenta sandråhet k och Reynolds tal, $Re=4V \cdot D/\nu$ där R är den hydrauliska radien och ν

är vätnets kinematiska viskositet. För turbulent strömning ($Re > 4000$) har Colebrook och White konstruerat följande samband som är det som allmänt utnyttjas för beräkning av ledningars kapacitet.

$$f^{\frac{1}{2}} = -2 \log \left(\frac{k/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re(f)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (26)$$

Låt oss förutsätta att detta samband kan utnyttjas även för varje delarea, dvs de areor som kopplas till sidoväggarna respektive botten. Vi bör då ersätta D med $4R$ i såväl kvoten k/D (relativ råhet) som i Re . För delareorna A_r resp A_s får vi då

$$(f_r)^{\frac{1}{2}} = -2 \log \left(\frac{k_r/4R_r}{3.71} + \frac{2.51}{Re_r(f_r)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (27)$$

$$(f_s)^{\frac{1}{2}} = -2 \log \left(\frac{k_s/4R_s}{3.71} + \frac{2.51}{Re_s(f_s)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (28)$$

Om vi vidare utnyttjar förutsättningarna att vi har samma hydrauliska gradient och samma medelhastighet för delareorna som för hela våta tvärsnittet kan vi genom att utnyttja ekv (7) skriva de två sambanden ovan på formen

$$(f_r)^{\frac{1}{2}} = -2 \log \left(\frac{k_r/4R_r}{3.71} + \frac{2.51 \, v}{R_r(128 \, g \, R_r S)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (29)$$

$$(f_s)^{\frac{1}{2}} = -2 \log \left(\frac{k_s/4R_s}{3.71} + \frac{2.51 \, v}{R_s(128 \, g \, R_s S)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (30)$$

Kända storheter är här k_r , k_s , g , v och S . Obekanta är f_r , f_s , R_r och R_s . För att kunna lösa ut dessa erfordras ytterligare två samband. Ur geometrivillkoret $A = A_r + A_s$ erhålles

$$A = R_r P_r + R_s P_s \quad (31)$$

där den totala arean A samt de våta perimetrarna P_r och P_s är kända. Ur villkoret $V = V_r = V_s$ erhålles vidare

$$\left(\frac{8gR_r S}{f_r} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{8gR_s S}{f_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

vilket ger

$$\frac{f_r}{R_r} = \frac{f_s}{R_s} \quad (33)$$

Om vi tar kvoten mellan ekv (29) och (30) erhålles med hjälp av ekv (31) och ekv (33)

$$\left(\frac{R_r}{R_s} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\log \left(\frac{k_r/4R_r}{3.71} + \frac{2.51\nu}{R_r(128 g R_r S)^{\frac{1}{2}}} \right)}{\log \left(\frac{k_s/4R_s}{3.71} + \frac{2.51\nu}{R_s(128 g R_s S)^{\frac{1}{2}}} \right)} \quad (34)$$

$$R_s = \frac{A - P_r R_r}{P_s}$$

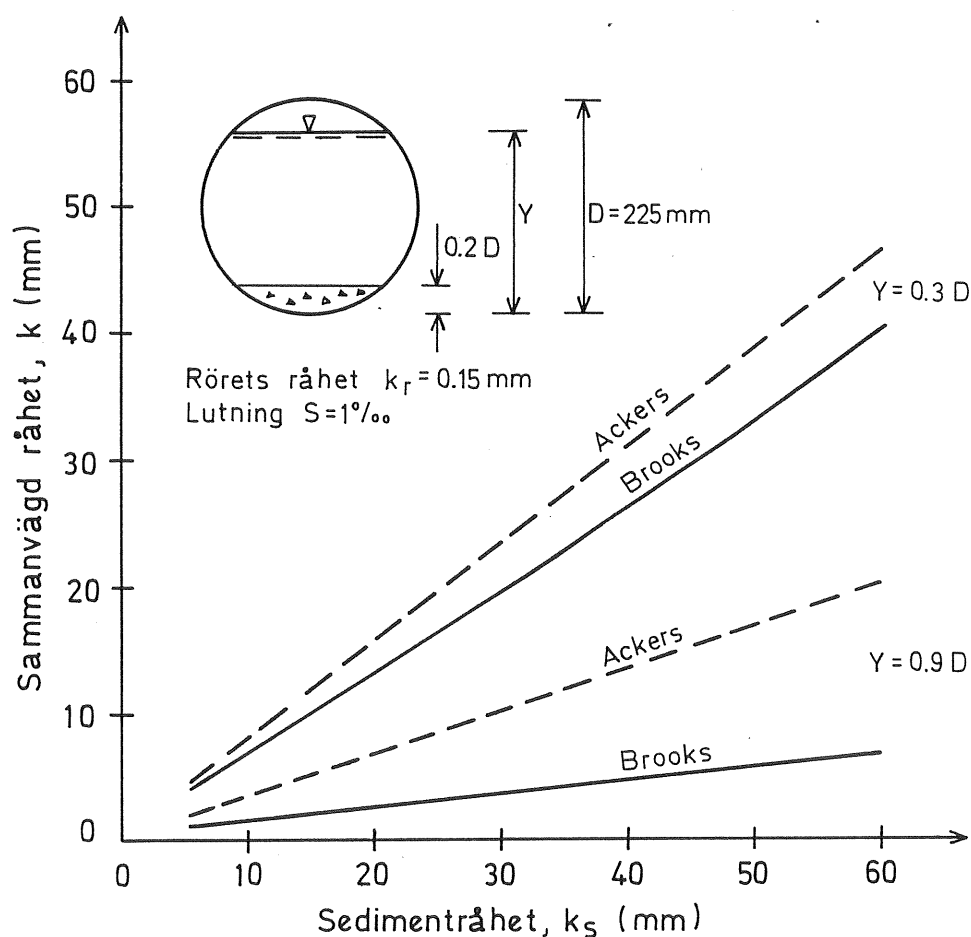
R_r och R_s kan nu lösas ur ekv (34) med hjälp av iterativ teknik varefter f_r och f_s kan beräknas ur ekv (29) resp ekv (30).

Metoden presenterad ovan bygger på en teknik för sidoväggeliminering utvecklad av Johnson (1942), se Vanoni och Brooks (1957). Eftersom metoden inte ger någon direkt analytisk lösning med avseende på sökta storheter och därför är arbetsam kan det finnas anledning att jämföra metoden med en förenklad ansats föreslagen av Ackers (1964). Ackers föreslår att en sammanvägd ekvivalent sandråhet beräknas med hjälp av sambandet

$$k = \frac{P_r k_r + P_s k_s}{P} \quad (\text{Ackers}) \quad (35)$$

Detta sammanvägda k -värde kan sedan användas direkt i ekv (26) för beräkning av den sammanvägda friktionskoefficienten f . Ackers utnyttjade ekv (35) vid utvärdering av fältmätningar i äldre avloppsledningar.

Brooks metod (ekv 25) baseras på en viktning av friktionsfaktorn f medan Ackers baseras på den ekvivalenta sandråheten k . Dessa metoder är därmed svåra att jämföra med Hortons och Einstens. Eftersom de båda utgår från Darcy-Weisbachs friktionssamband kan de emellertid jämföras sinsemellan för specifika flödesfall om friktionsfaktorn i Brooks metod omräknas till sandråhet k med Colebrook-Whites samband.

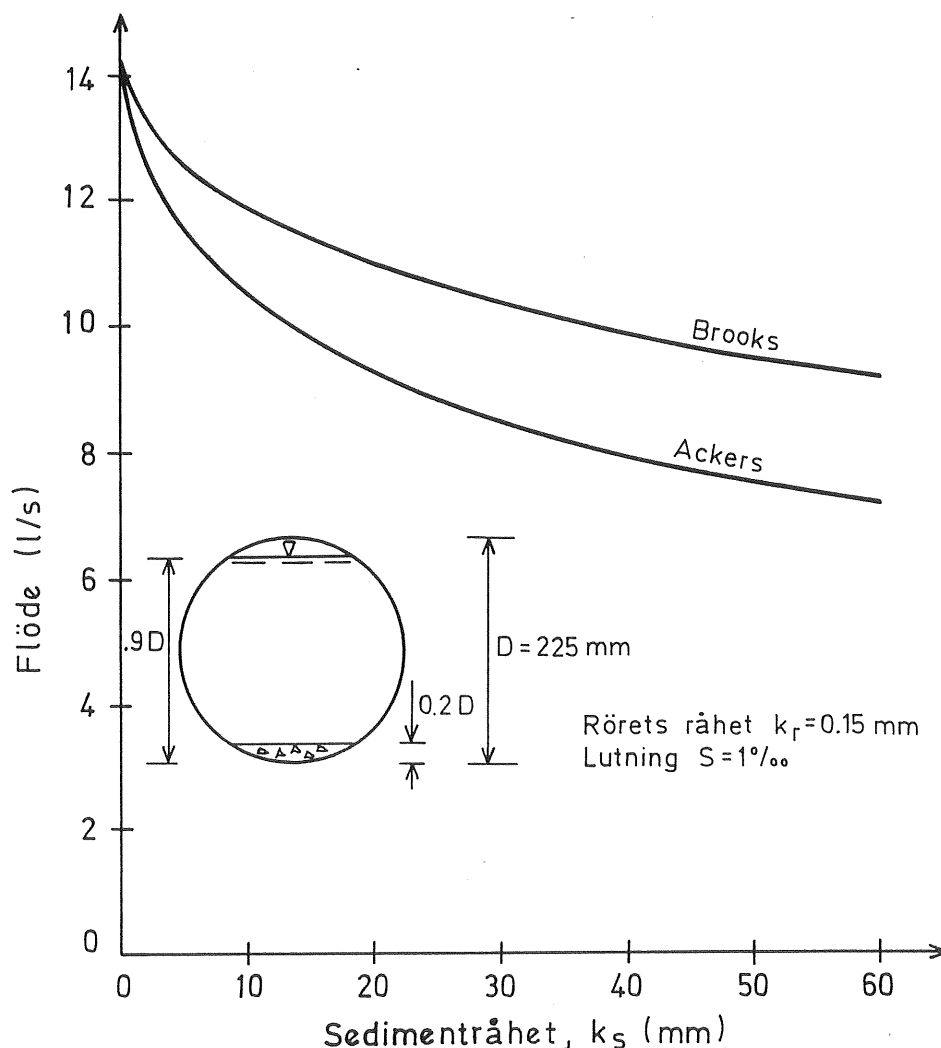


Figur 4 Jämförelse mellan Ackers och Brooks samband för beräkning av sammansatt råhet k vid olika val av sedimentråhet. Två fall av vattendjup har valts, $0.1D$ och $0.7D$. Sedimentdjupet är $0.2D$. Röret har lutningen $S = 1\text{‰}$, diametern $\varnothing = 225 \text{ mm}$ och råheten $k_r = 0.15 \text{ mm}$.

En jämförelse av de två metoderna redovisas i figur 4 för en ledning $\varnothing 225 \text{ mm}$, friktionslutningen $S = 1\text{‰}$ och ekvivalenta sandråheten för ledningsväggarna $k_r = 0.15 \text{ mm}$. Jämförelsen baseras på sammanvägda råhetsvärden k . Det k_s -värde som svarar mot Brooks

metod har beräknats ur Colebrook-Whites samband (26) med den sammanvägda friktionsfaktorn f som ges av ekv (25). Av figuren framgår att avsevärda skillnader i rårhetsvärden kan erhållas, speciellt vid stora fyllnadshöjder.

I figur 5 ges ett exempel på vilka skillnader som kan erhållas i flödesvärdena med de två metoderna. Den valda ledningen har lutningen $S=1^0/00$, diametern $D=225$ mm och rårhetskoefficienten $k_r=0.15$ mm. Vi ser att skillnaderna i flöde blir mestadels under 20% trots de stora skillnaderna i rårhetsvärde. Som mest erhålls i fallet $k_s=70$ mm en skillnad på ca 20%. Detta kan jämföras med de metoder som baseras på Mannings formel där avvikelsen i flödesvärden är proportionell mot avvikelsen i rårhetskoefficienten n .



Figur 5 Flödets variation med sedimentråheten k_s beräknad med Ackers resp Brooks samband (ekvation (25)^S och (35)) vid vattendjupet $0.7D$ och sedimentdjupet $0.2D$. Röret har lutningen $S=1^0/00$, diameter $\varnothing=225$ mm och råheten $k_r=0.15$ mm.

3 INLEDANDE LABORATORIETEST AV METODER FÖR BERÄKNING AV SAMMANVÄGD RÅHET

Som tidigare påpekats synes några egentliga undersökningar av metoder för beräkning av strömningsförluster i ledningar delvis fyllda med sediment ej ha genomförts. Det bedömdes därför angeläget att en sådan experimentell studie genomfördes.

Studien har genomförts i en sedimentbelagd avloppsledning ($\emptyset 225$ mm, $S=1^0/00$) uppbyggd i en av Institutionens för vattenbyggnad laboratoriehallar. Försöksanordningen och den experimentella metodiken kommer att beskrivas i en senare rapport. Här kommer endast att presenteras en jämförelse av uppmätt och med olika metoder beräknad flödeskapacitet för varierande sedimentdjup och vattenfyllnad vid likformig strömning. Endast delvis vattenfyllda flödesfall har studerats.

3.1 Delfyllnadskapacitet utan sediment

Tidigare presenterade formler för beräkning av sammanvägd råhet förutsätter att rörväggens råhet är känd i form av Mannings n_r eller ekvivalenta sandråheten k_r . Dessa storheter har bestämts som de värden som ger bästa anpassningen av Mannings formel respektive Darcy-Weisbachs formel till de uppmätta kapacitetsvärdena. God överensstämmelse erhöles för (se figur 6)

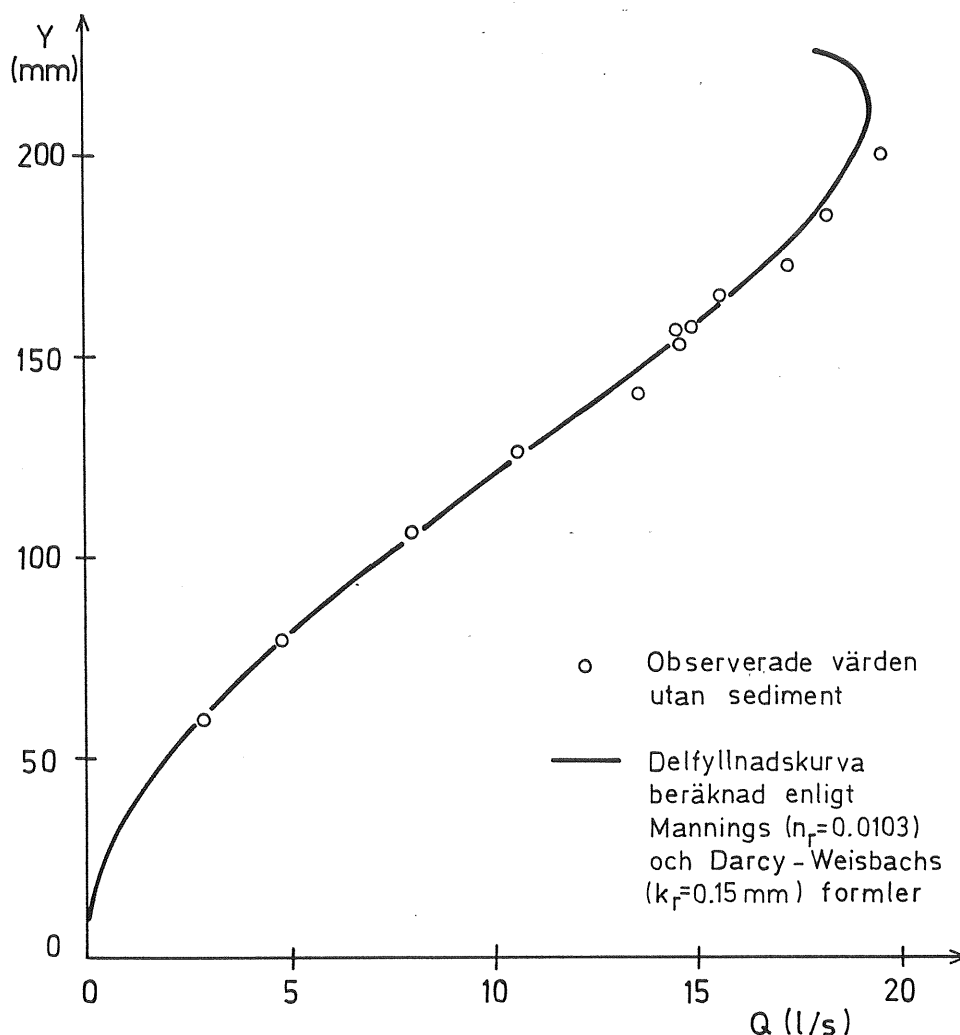
$$n_r = 0.0103 \text{ resp } k_r = 0.15 \text{ mm.}$$

Som framgår av figur 6 överensstämmer de båda sambanden helt sinsemellan. Colebrook-Whites formel kan uppenbarligen användas direkt för delfylld ledning enligt ekvation (27). Normalt används i Sverige Colebrook-Whites samband på den form som ges av ekvation (26) dvs för fylld ledning och i kombination med ett delfyllnadssamband $Q/A_f=f(Y/D)$ (t ex Brettings ekvation), VAV P28.

För stora värden på relativa vattendjupet Y/D erhöles vågbildning vilket gjorde mätvärdena osäkra.

I en tidigare undersökning av en ledning av samma typ bestämdes på motsvarande sätt råheten till $n_r=0.0105$ (Bäckman och Svensson, 1983).

I fortsättningen diskuteras parallellt Mannings respektive Darcy-Weisbachs formler. I den senare gäller alltid att friktionsfaktorn f bestämts med hjälp av Colebrook-Whites samband där detta förutsätts gälla för delfylld sektion enligt ekvation (27).

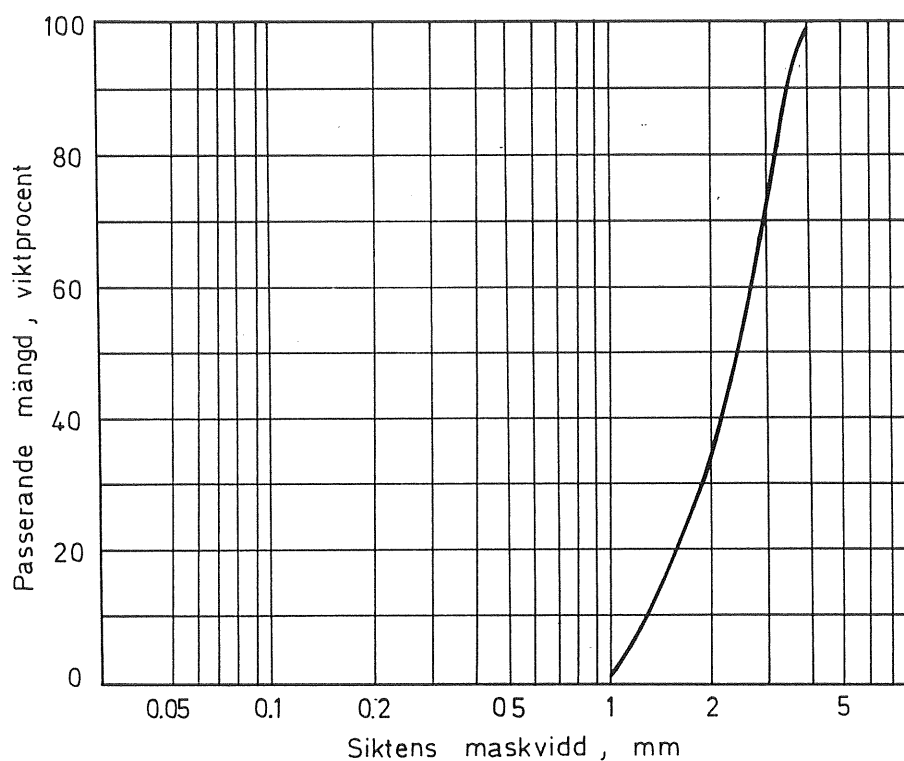


Figur 6 Uppmätta vattendjup - flöden i en Ø225 mm betongledning, $S=1^0/00$ samt anpassade kurvor beräknade med Mannings respektive Darcy-Weisbachs formler.

3.2 Delfyllnadskapacitet med sediment

Sedimentet utgjordes av tämligen ensartad sand med en siktkurva enligt figur 7 och siktvärdena $d_{10}=1.3 \text{ mm}$, $d_{50}=2.5 \text{ mm}$ och $d_{90}=3.5 \text{ mm}$. d_{50} är den maskstorlek genom vilken 50% av materialet passerar vid siktningen. Denna sand var tillräckligt grov för att erosion och materialtransport ej skulle uppstå. Målsättningen med detta inledande försök var ju endast att studera tillämpligheten av uppställda formler för sammanvägd råhet, varför en stabil och jämn botten eftersträvades.

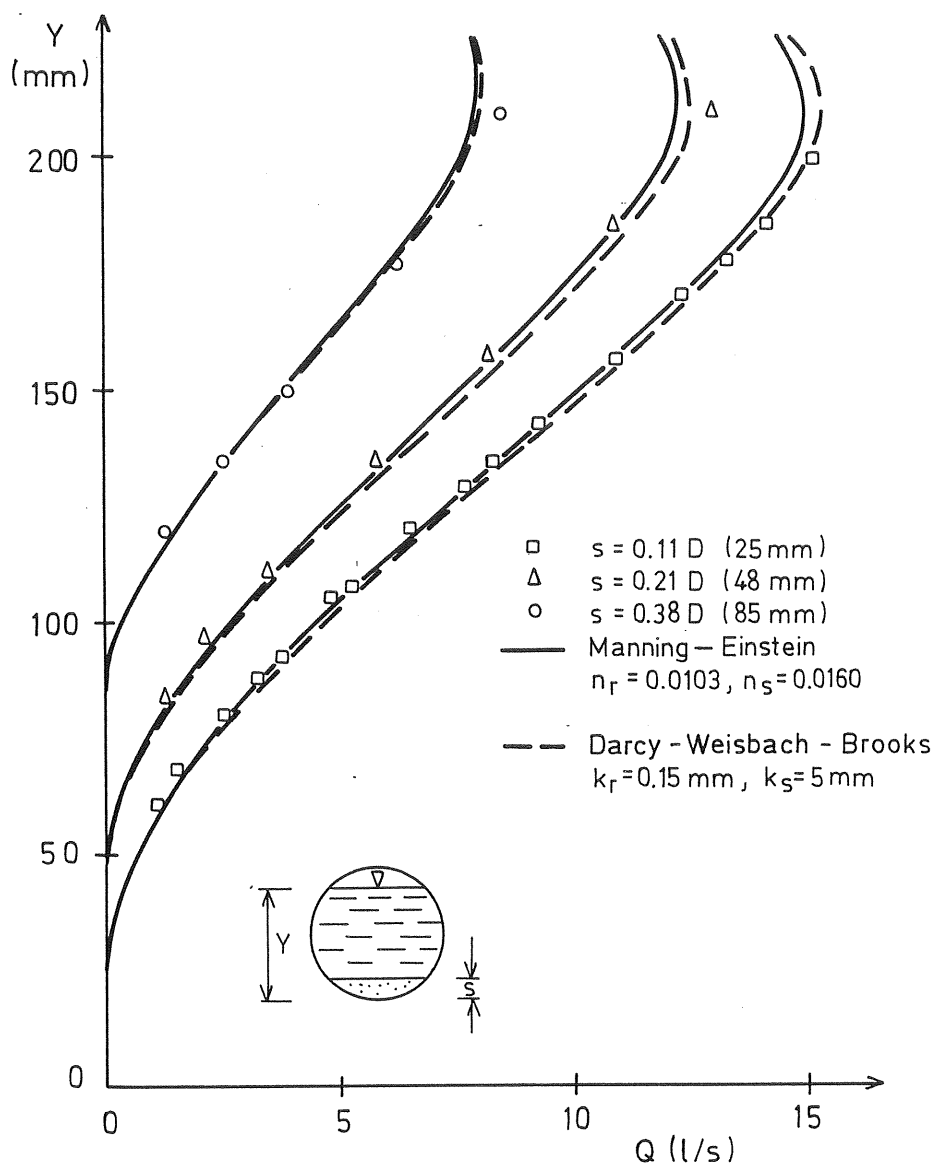
De för sedimentdjupen $0.11D$, $0.21D$ resp $0.38D$ erhållna försöksresultaten redovisas i figur 8.



Figur 7 Siktkurva för den i samtliga försök använda sanden.

Med utgångspunkt från dessa diagram bestämdes den sedimentråhet n_s respektive k_s som gav bästa överensstämmelse mellan uppmätta och med hjälp av olika ansatser för sammanvägd råhet beräknade delfyllnadskapaciteter. God överensstämmelse erhöles med följande värden på aktuella råheter:

Formel	Ansats för sammanvägd råhet	Utnyttjade råhetsvärden	
Mannings formel	Horton (ekv 17)	$n_r=0.0103$	$n_s=0.0164$
Mannings formel	Einstein (ekv 21)	$n_r=0.0103$	$n_s=0.0160$
Darcy-Weisbachs formel	Brooks (ekv 34, 29, 30, 25)	$k_r=0.15 \text{ mm}$	$k_s=5 \text{ mm}$
Darcy-Weisbachs formel	Ackers (ekv 35)	$k_r=0.15 \text{ mm}$	$k_s=3 \text{ mm}$

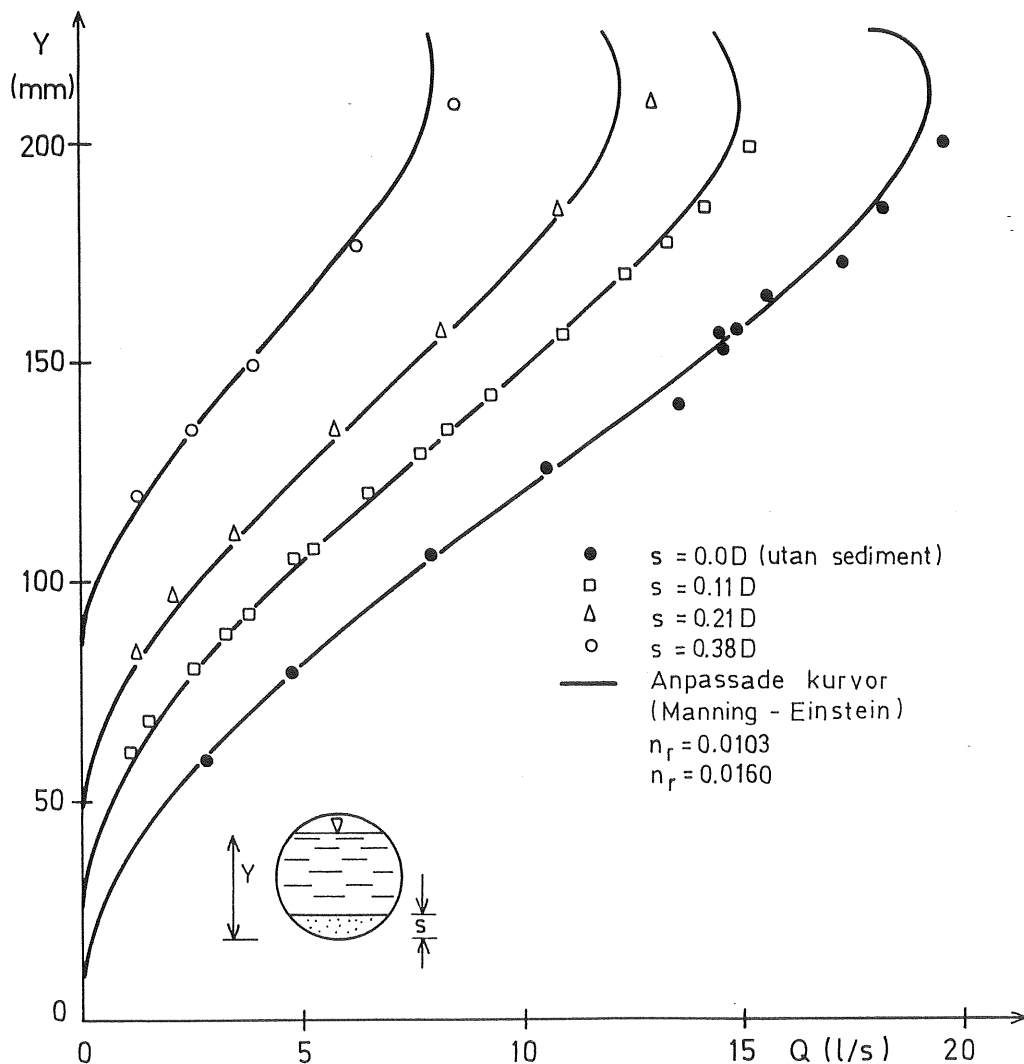


Figur 8 Uppmätta vattendjup - flöden i en $\varnothing 225$ mm betongledning, $S=1/100$, med tre sedimentnivåer (s) samt anpassade kurvor beräknade med Mannings-Einsteins respektive Darcy-Weisbach-Brooks formler.

I figur 8 redovisas två av de fyra testade ansatserna, Manning-Einstein och Darcy-Weisbach-Brooks. Som framgår av figuren ger de båda ansatserna en mycket likartad kurvform; med en mindre justering av sedimentråheten t ex n_s skulle kurvorna helt överlappa varandra. Det samma gäller för de två ansatserna Manning-Horton och Darcy-Weisbach-Ackers. Det bör påpekas att något ändrade råhetsvärden för sedimenten måste väljas för de senare ansatserna (se tabellen ovan).

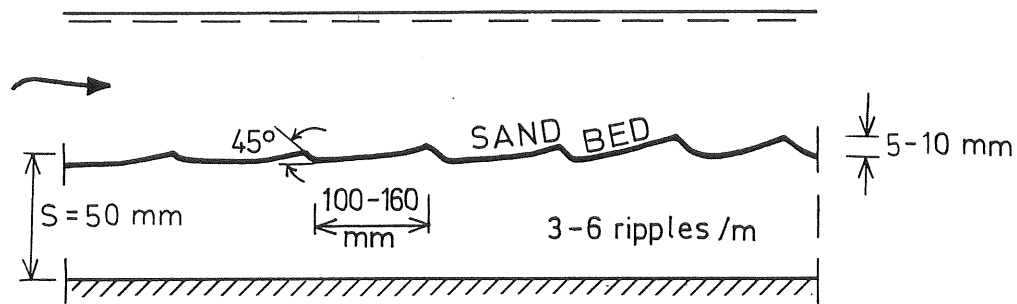
De teoretiskt beräknade delfyllnadskurvorna är i någon mån för svagt krökta i förhållande till mätpunkterna, dvs en optimal anpassning ger något för höga beräknade flöden vid låga vattendjup jämfört med mätpunkterna och motsvarande något för låga flöden vid höga vattendjup. Detta kan tolkas som att råheten något varierar med vattendjupet (k_s minskar med ökat vattendjup). Samtidigt kan en svag variation i k_s -värdet med sedimentdjupet noteras. Denna variation är mindre än motsvarande variation $k_s=f(Y)$.

I praktiken kan råhetsvärdena betraktas som oberoende av både vattendjup och sedimentdjup och de uppställda ansatserna bedöms därvid användbara för de förhållanden som representeras av mätserien. I figur 9 har mätningarna i ledningen med och utan sediment sammanställts tillsammans med kurvan för Mannings-Einstein-ansatsen. Hydrauliska parametrar för försöksserien redovisas i appendix I.



Figur 9 Uppmätta vattendjup - flöden i en $\varnothing 225$ mm betongledning, $S=1/100$, med fyra sedimentnivåer (s) samt anpassade kurvor beräknade med Mannings-Einsteins formler.

Några enstaka preliminära försök har också gjorts med en mer fin-kornig sand. Med samma försöksuppställning som för den mer grov-korniga sanden erhöles vid ett par tillfällen en bäddform enligt figur 10 (ungefärligt uppskattad). För dessa fall erhöles med Brooks respektive Ackers ansatser $k_s=7$ och 11 mm (Ackers) och $k_s=8$ och 19 mm (Brooks), dvs mer än en fördubbling jämfört med den grova sanden.



Figur 10 Sedimentbädd med finkornig sand där ripples utbildats.

3.3 Slutsats-jämförelse

Resultaten från dessa inledande försök motsäger alltså ingen av de studerade ansatserna;

- användning av Mannings resp Darcy-Weisbachs samband för del-fyllda ledningar
- beräkning av sammanvägd råhet enligt Einstein, Horton, Brooks resp Ackers.

Ur praktisk synpunkt synes man tills vidare kunna anta att alla ansatserna är utnyttjbara. Ytterligare försök med både grövre och finare sedimentmaterial samt ojämna stabila och rörliga sediment-bottnar krävs dock innan några generella slutsatser kan dras. Dessutom måste ett bedömningsunderlag skapas för praktisk uppskattning av n_s och/eller k_s .

I följande kapitel redovisas några i litteraturen beskrivna fält- och laboriestudier. Bland annat anger Henderson (1984A) empiriska samband för beräkning av både jämn och ojämn bäddform (ekv

(36) och (37)). Om dessa samband appliceras på förhållandena i den här utförda laboriestudien erhålls för

jämn bäddform	$k_s \cong 4-6 \text{ mm}$
ojämn bäddform	$k_s \cong 11 \text{ mm}$

Dessa värden stämmer i stort med motsvarande värden erhållna ur våra mätserier och som redovisats i föregående avsnitt. Nämda samband kan åtminstone preliminärt antas möjliga att använda i praktiken.

4 NÅGRA FÄLT- OCH LABORATORIESTUDIER AV FLÖDEN I LEDNINGAR MED SEDIMENT GENOMFÖRDA I USA OCH ENGLAND

4.1 Publicerade undersökningar

Litteraturen om friktionsförluster i avloppsledningar är relativt omfattande. Undersökningar som innefattar friktionsförluster i ledningar med sediment är mer sällsynta och de som finns behandlar inte själva kapacitetsproblemet. En del studier eller delar av studier är ändå av intresse och refereras nedan.

Ackers (1964) undersökte avloppsledningar i fält. Några av dessa befanns innehålla bottensediment. I tabell 1 har uppgifter om dessa ledningssträckningar sammanställts. Parameterbeteckningarna framgår av tabellen. Hastigheten V och Froudes tal F_r

$$F_r = \frac{V}{(gA/B)^{\frac{1}{2}}}$$

där B är vattenlinjebredden, har bestämts ur flödes- och vattenståndsmätningar. Den sammanvägda sandråheten för ledningen med sediment har beräknats med hjälp av flödesdata och Colebrook-Whites ekvation (26). "Kapaciteten" anger förhållandet mellan aktuell flödeskapacitet och flödeskapaciteten för "ren" ledning med motsvarande vattendjup beräknad med hjälp av Colebrook-Whites ekvation.

Tabell 1 Data för ledningar med sediment efter Ackers (1964).

Ort: Coventry, UK							Sammanvägd	
Nr	Typ	Diameter D (mm)	Lutning S	Y/D	s/D	Hastighet V (m/s)	Froudes tal F_r	Kapacitet k (mm) (%) 1)
1	Betong	685	0.00662	0.15	0.04	0.39	0.42	122 40
2	Tegel	1300	0.00043	0.30	0.04	0.47	0.25	3 99
3	Tegel	990	0.00197	0.53	0.04	0.77	0.47	61 81
4	Tegel	1370	0.00058	0.75	0.22	0.27	0.10	3 26

1) Uppskattad med utgångspunkt från av Ackers redovisade data (definieras på sid 23)

Ledning 1: sediment = sand och grus, medeldiameter = 12 mm, max diameter = 50 mm, ytvattenvågor, amplitud = 25 mm, längd = 75-150 mm

Ledning 2: sediment = mjäla

Ledning 3: sediment = sand och grus, medeldiameter = 0.5 mm, ytvattenvågor, bäddformens amplitud = 25-75 mm och våglängd = 150-450 mm

Ledning 4: sediment = mjäla, minskning i tvärsnittsarea = 21%

Av mätningarna drog Ackers slutsatsen att det finns ett samband mellan Froudes tal och ledningens ekvivalenta råhet. Han anger dock inget explicit samband men gör bedömningen att det största strömningsmotståndet erhålls i intervallet $0.3 < F_r < 0.5$.

Enligt Ackers påverkar sedimentens bäddform råheten och bäddformen beror i sin tur på sedimentens kornstorlek och på Froudes tal. Vissa kombinationer av Froudes tal och bäddform resulterar i ytvattenvågor som ytterligare förhöjer den ekvivalenta råheten.

Henderson (1984A, 1984B) sammanställde på ett liknande sätt data från ledningar i fält. Han har också i sitt material ledningssträckningar med sedimentavlagringar. Dessa har sammanställts i tabell 2 (innehåller samma parametrar som tabell 1).

Tabell 2 Data för ledningar med sediment efter Henderson (1984A, 1984B).

Nr	Typ	Diameter		Lutning	Y/D	s/D	Hastighet	Froudes tal	Sammanvägd	
		D (mm)	S				V (m/s)	F_r	sandråhet	Kapacitet
									k (mm)	(%)
<u>Ort: Kansas, USA</u>										
1	Betong	2750	0.00055	0.26	0.05	0.78	0.36	0.36	8.3	*
<u>Ort: York, UK</u>										
2	Tegel	760	0.0040	1.00	0.08	-	-	-	18	*
3	Lera	380	-	0.84	0.38	0.91	0.55	0.55	350	*
<u>Ort: Swanage, UK</u>										
4	Lera	700	0.0012	1.00	0.07	-	-	-	3.9	*

* Information om k_r för röret saknas.

Ledning 1: sediment = grus, sand och partiklar

Ledning 3: sediment = mjäla, grus och partiklar, minskning i tvärsnittsarea = 35%

Hendersons analysmaterial överensstämmer i stora drag med Ackers.

Johnson (1944) studerade också avloppsledningar i fält. Två sträckningar med sediment ingår i materialet, vilket beskrivs i tabell 3.

Tabell 3 Data för ledningar med sediment efter Johnson (1944).

Ort: Kentucky, USA								Sammanvägd	
Nr	Typ	Diameter D ¹⁾ (mm)	Lutning S	Y/D	s/D	Hastighet V (m/s)	Froudes tal F _r	sandråhet k (mm)	Kapacitet (%) 2)
1	Betong	4624	0.0005	0.12	0.003	0.64	-	3.4	92
2	Betong	1868	0.0005	0.27	0.02	0.81	0.32	1.5	98

1) ekvivalent diameter 2) uppskattad från av Johnson givna data

Ledning 2: sediment = max avsättning = 50 mm

May (1982) undersökte avloppsledningar både i fält och laboratorium. Hans laboratoristudie var inriktad på att definiera de strömningsvillkor som måste gälla för att sedimentackumulering inte skall erhållas. Ledningar med varierande sedimentdjup ingår i Mays fältmätningar. Data för en sådan ledning är sammanställda i tabell 4.

Tabell 4 Data för ledning med sediment efter May (1982).

Ort: Bracknell					
Ledning: 1830 mm:s betongledning					
Lutning S = 0.00085; d_{50} = 2.5 mm					
Y/D	s/D	Kapacitet ¹⁾ (%)	Dyner		Approx. samman- vägd sandråhet k (mm) 1)
			Ampl. (mm)	Längd (m)	
0.244	0.02	90	62	47	1.0
0.337	0.02	94	76	34.2	0.3
0.306	0.02	86	76	27.6	1.5
0.315	0.02	86	74	46.6	1.5
0.326	0.01	95	51	44.8	0.3

1) uppskattad från av May givna data (definieras på sid 23)

4.2 Råhetens beroende av bäddform

För en jämn bäddform anger Henderson (1984A) sandråheten k_s för sediment i en avloppsledning till

$$k_s = 1.5 \text{ à } 3.0 \cdot d_{65} \quad (36)$$

där d_{65} är den maskvidd som 65% av sedimentprovets vikt passerar vid siktnings. Typiska värden på d_{65} är enligt Henderson 0.5–5 mm. Det angivna intervallet förefaller överensstämma tämligen väl med svenska förhållanden. Dock kan d_{65} i dagvattenledningen och kombinerade ledningar ibland överstiga 5 mm, Sörman (1985).

För ojämna bäddformer föreslår Henderson ett samband för beräkning av den ekvivalenta sandråheten som presenterats av Shimohara och Tsubaki

$$k_s = 7.5 \cdot \Delta \left(\frac{\Delta}{\lambda} \right)^{0.57} \quad (37)$$

där

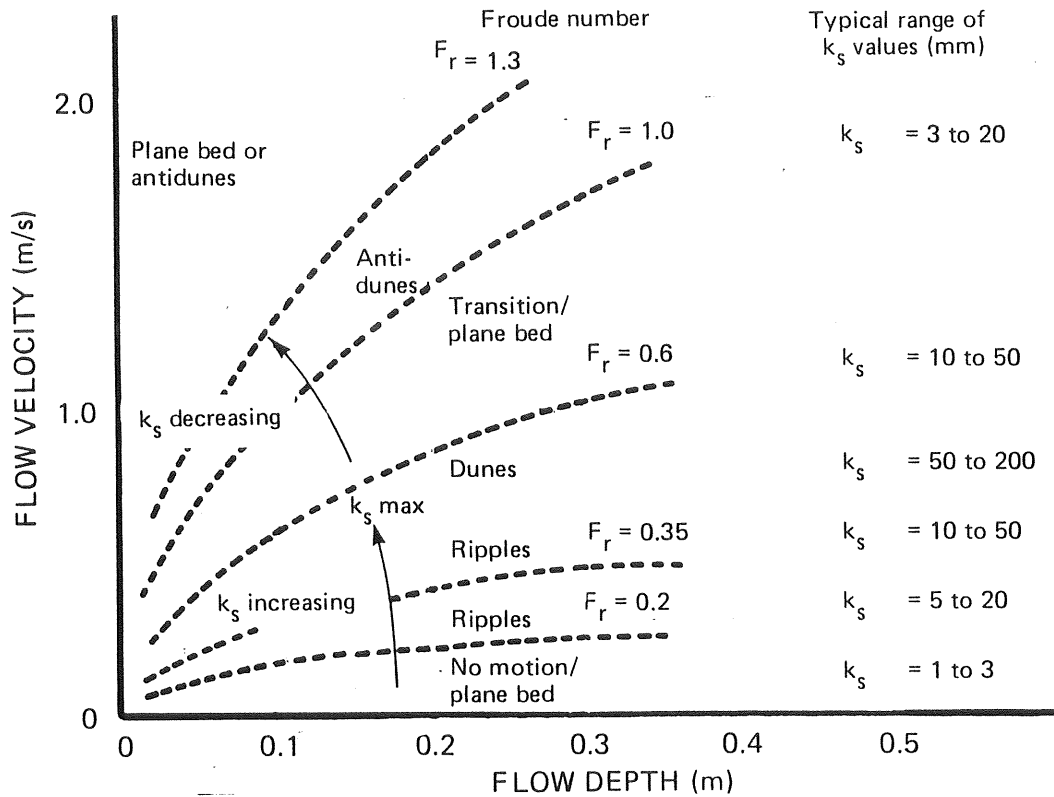
k_s = ekvivalent sandråhet för sedimentet (mm)

Δ = bäddformens amplitud (mm)

λ = bäddformens våglängd (mm)

Sambandet baseras enligt Henderson på mätningar utförda både i laboratorium och i fält. Enligt nämnda samband får även en liten variation i bäddform en stor påverkan på råheten. Exempelvis medför en bäddhöjdsvariation på 20 mm/m ett värde på $k_s=16$ mm. Värden på sandråheten på minst 10 mm borde således regelmässigt kunna erhållas i avloppsledningar med sediment.

Som påpekats i avsnitt 4.1 beror bäddformen av sedimentens kornstorlek och Froudes tal. Det principiella sambandet mellan råhet, flödeskaraktistika och bäddformer utvecklade i fin sand redovisas i figur 11.



Figur 11 Principiell relation mellan bäddform, uppskattad råhet och flödeskaraktistika för fin sand. Av Hendersson (1984A) hämtad från Raudkivi: Loose Boundary Hydraulics, Pergamon Press 1967.

4.3 Synpunkter på refererade mätningar

De sammanställda exemplen på ledningar med sediment uppvisar en stor variation med avseende på både flödesförhållanden och sedimenten. Jämfört med svenska förhållanden framstår inte exemplen som unika utan motsvarande fall kan väl tänkas förekomma här i landet.

Som framgår erhålls i de flesta fall en mycket påtaglig reduktion av flödeskapaciteten. Den beräknade sandråheten för sedimenten får i flera fall mycket höga värden som går långt utöver vad som kunde förväntas med hänsyn till sedimentens kornstorlek och den minskade arean. Den maximala råheten kan enligt Henderson (1984A) överstiga hydrauliska medeldjupet. De i avsnitt 4.2 redovisade höga värdena orsakas av ojämna bäddformer. Eftersom inga uppgifter ges om bäddformen kan inte några jämförelser göras med de i avsnitt 4.2 refererade sambanden mellan sandråhet och kornstorlek-

bäddform hos sedimentet. Det samband som ges för ojämna bäddformer, ekvation (37), leder till höga värden på råheten i nivå med dem som redovisas i exemplen.

5 SAMMANFATTNING

Sedimentavlagringar förekommer i såväl dagvatten- som spillvattenförande ledningar. I ledningar med sediment reduceras flödeskapaciteten, ibland mycket påtagligt. Faktorer som har betydelse för kapaciteten och som påverkas av sedimenten är tvärsnittsarean, hydrauliska radien och råheten.

För att kunna beräkna flödet i en ledning med sediment måste en representativ eller ekvivalent råhet först bestämmas. Denna råhet vägs samman av ledningens och sedimentens individuella råheter.

Flera metoder för att beräkna den ekvivalenta råheten har presenterats i litteraturen. I metoderna varierar de valda hydrauliska förutsättningarna och friktionssambanden. De så kallade Horton och Einsteins metoder baseras på Mannings formel och ges av

$$n = \left(\frac{P_r n_r^p + P_s n_s^p}{P} \right)^{1/p} \quad (38)$$

där $p = 3/2$ eller 2 i Hortons respektive Einsteins metoder.

Liknande samband har formulerats där friktionsfaktorn f (Brooks) eller den ekvivalenta sandråheten k (Ackers) används som råhetsparameter

$$f = \frac{P_r f_r + P_s f_s}{P} \quad (39)$$

$$k = \frac{P_r k_r + P_s k_s}{P} \quad (40)$$

Svårigheten vid den praktiska tillämpningen av sambanden är att uppskatta sedimentens råhet. I några studier har sambanden i stället omvänt använts för att bestämma råheten för sedimenten utgående från kända flödesförhållanden. De sedimentråheter som härigenom erhöles uppvisar en variation med sedimentens mängd (uppfyllnadsgrad), kornstorlek och bäddform. Underlaget är emellertid inte tillräckligt för att formulera en relation mellan geometriska parametrar hos sedimenten och råheten.

Samband som föreslagits (Henderson) är för jämn bäddform

$$k_s = 1.5 \text{ till } 3.0 d_{65} \quad (41)$$

och för ojämn bäddform

$$k_s = 7.5 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{\Delta}{\lambda} \right)^{0.57} \quad (42)$$

(Δ = bäddformens amplitud (mm), λ = bäddformens våglängd (mm)). Sambandens relevans måste betraktas som osäker och studier som kan verifiera eller utveckla dessa skulle vara av stort värde.

Litteraturstudien visar att kunskapen om hur kapacitetsberäkningar i ledningar med sediment skall göras är otillräcklig. Fler studier behöver genomföras dels för att verifiera de samband för beräkning av flödeskapaciteten som diskuterats i denna rapport men också för att ge ett erfarenhetsunderlag vid uppskattning av sedimentens råhet. Med hänsyn till svårigheterna att kontrollera främst flödesparametrarna i fält framstår det som lämpligt att genomföra delar av dessa studier i laboratorium, men då i en skala så nära fullskalan som möjligt.

Vid Institutionen för vattenbyggnad, CTH, pågår kapacitetsstudier i en 23 m lång betongledning, $\emptyset 225$ mm. Avsikten är att studera strömningen vid olika fyllnadsgrader med avseende på sediment och vatten, och härigenom söka verifiera eller utveckla samband för beräkning av flödeskapaciteten i ledningar med sediment. Dessutom skall sedimentations- och erosionsförloppet i ledningar med lokal sättning analyseras.

Hittills utförda kapacitetsstudier är utförda i rak ledning med en jämn bäddform bestående av ensartad sand $d_{50}=2.5$ mm där ingen materialtransport sker. Resultaten visar att med en relevant sammanvägd råhet kan både Mannings och Darcy-Weisbachs formler användas för delfyllda ledningar innehållande sediment. Samtliga diskuterade ansatser för beräkning av sammanvägd råhet bedöms användbara. Det bör dock noteras att sedimentets beräknade råhet (beräknad utgående från uppmätta flöden och vattendjup) varierar

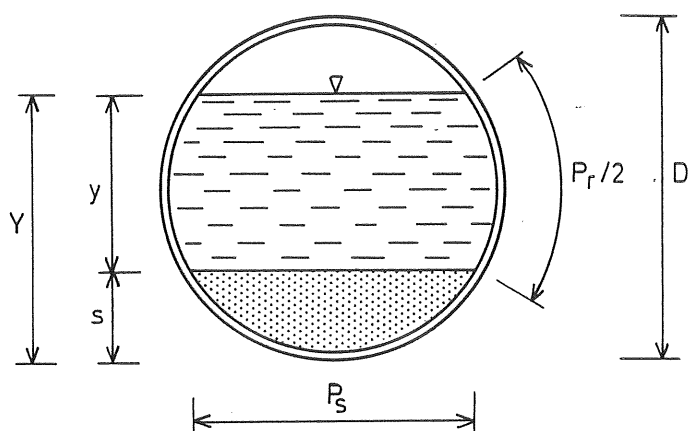
mellan de olika ansatserna. Dessa uppskattade råheter stämmer också någorlunda väl med motsvarande värden beräknade med Hendersons empiriska samband (se ovan).

6 REFERENSER

- Ackers, P et al (1964): Effects of use on the hydraulic resistance of drainage conduits. Proceedings Institution of Civil Engineers, UK. Vol. 28.
- Bäckman, H och Svensson, G (1983): Flödesmätning i avloppsnät med portabla utrustningar. Chalmers tekniska högskola, Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr 69, Göteborg.
- Chow, V T (1959): Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Einstein, H A (1942): Formulas for the transportation of bed load. Transactions ASCE, Vol. 107. USA.
- Einstein, H A och Banks, R B (1950): Fluid resistance of composite roughness. Transactions American Geophysical Union, Vol. 31. USA.
- Henderson, R J (1984A) A guide to hydraulic roughness in sewers. Water Research Center External Report No. 131E, UK.
- Henderson, R J (1984B): The hydraulic roughness of used sewers. Proceedings International Conference on the Planning, Construction, Maintenance and Operation of Sewerage Systems, Reading University, UK.
- Horton, R E (1933): Separate roughness coefficients for channel bottom and sides. Engineering News-Record, Vol. 111, USA.
- Johnson, C F (1944): Determination of Kutter's n for sewers partly filled. Transactions ASCE, Vol. 109, USA.
- Johnson, J W (1942): The importance of considering side-wall friction in bed-load investigations. Civil Engineering, Vol. 12, USA.

- Kennedy, J F (1961): Stationary waves and antidunes in alluvial channels. California Institute of Technology Report No. KH-R-Z, USA.
- Krishnamurthy, M och Christensen, B A (1972): Equivalent roughness for shallow channels. Proceedings ASCE Hydraulic Division, Vol. 98, USA.
- May, R W P (1982): Sediment transport in sewers. Hydraulics Research Station Report No. IT 222, UK.
- Motayed, A K och Krishnamurthy, M (1978): Composite roughness of natural channels. Proceedings 26th ASCE Hydraulics Division Special Conference on Verification of Mathematical and Physical Models in Hydraulic Engineering. University of Maryland, USA.
- Novak, P och Nalluri, C (1984): Incipient motion of sediment particles over fixed beds. Journal of Hydraulic Research, Vol. 22, UK.
- Pyle, R och Novak, P (1981): Coefficient of friction in conduits with large roughness, Journal of Hydraulic Research, Vol 19, UK.
- Ribberink, J S (1982): Experiments with non-uniform sediment in case of bed-load transport. Delft University of Technology Report No. 83-2, Holland.
- Sörman, L-O (1985): Sedimentation och erosion i ledningssystem. Förstudie. Inventering och analys av driftstörningar, rensningsteknik och spolschema för avloppsledningar. Chalmers tekniska högskola, Institutionen för vattenbyggnad. Report series C:23. Göteborg.
- Vanoni V A och Brooks, N H (1957): Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams. California Institute of Technology Report No. E-68, USA.

7 BETECKNINGAR



A_r	del av vattnets tvärsnittsarea knuten till rörväggen
A_s	del av vattnets tvärsnittsarea knuten till sedimenten
A	$A_r + A_s$
B	vattenlinjebredd
D	ledningsdiameter
F	$V/(gA/B)^{\frac{1}{2}}$ (Froudes tal)
f_r	rörets friktionsfaktor
f_s	sedimentens friktionsfaktor
f	sammanvägd friktionsfaktor (se ekv (25))
k_r	ekvivalent sandråhet för rörväggen
k_s	ekvivalent sandråhet för sedimenten
k	sammanvägd sandråhet (se ekv (35))
n_r	Mannings råhetsfaktor för rörväggen
n_s	Mannings råhetsfaktor för sedimenten
n	sammanvägd Mannings råhetsfaktor (ekv (17) eller ekv (21))
P_r	rörets våta perimeter
P_s	sedimentets våta perimeter
P	$P_r + P_s$
Q	flöde
R_e	$4VR/\nu$ (Reynolds tal)
R_r	A_r/P_r hydraulisk radie
R_s	A_s/P_s
R	A/P
r	index för parametrar knutna till röret
S	ledningslutning
s	sedimentdjup, index för parametrar knutna till sedimenten
V	Q/A hastighet
Y	$y + s$
y	vattendjup över sedimenten

APPENDIX I

Hydrauliska parametrar för den i laboratoriet genomförda mätserien.

Tabell A Flödesparametrar för ledning utan sediment. $D=225$ mm,
 $S=1^0/00$, sedimentdjup = 0 mm

Y/D	Y (mm)	A (10^{-3} m^2)	Q ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	V (m/s)	F_r	$Re \cdot 10^3$	R (m)	A/B (m)	B (m)	P (m)
0.263	59.3	8.37	2.85	0.34	0.529	35.87	0.0345	0.0422	0.198	0.243
0.352	79.3	12.52	4.80	0.38	0.507	51.20	0.0438	0.0582	0.215	0.286
0.471	106	18.42	7.92	0.43	0.479	71.04	0.0541	0.0820	0.225	0.340
0.56	126	22.91	10.6	0.46	0.461	85.08	0.0602	0.1026	0.223	0.380
0.624	140.4	26.09	13.59	0.52	0.481	101.24	0.0637	0.1197	0.218	0.110
0.68	153	28.79	14.6	0.51	0.437	102.20	0.0660	0.1372	0.210	0.436
0.696	156.6	29.52	14.5	0.49	0.415	99.76	0.0665	0.1426	0.207	0.444
0.698	157	29.63	14.93	0.50	0.425	102.48	0.0666	0.1434	0.207	0.445
0.733	165	31.25	15.6	0.50	0.402	102.96	0.0675	0.1570	0.199	0.463
0.769	173	32.80	17.25	0.53	0.404	109.48	0.0682	0.1729	0.190	0.481
0.822	185	34.98	18.5	0.53	0.374	110.56	0.06845	0.2033	0.172	0.511
0.889	200	37.35	19.6	0.52	0.326	108.04	0.0674	0.2641	0.141	0.554

Tabell B Flödesparametrar för ledning med sediment. $D=225$ mm,
 $S=1^0/00$, sedimentdjup = 25 mm

Y/D	Y (mm)	A (10^{-3} m^2)	Q ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	V (m/s)	F_r	$Re \cdot 10^3$	R (m)	A/B (m)	B (m)	P (m)
0.271	61	6.3	1.08	0.172	0.309	14.04	0.0268	0.0315	0.200	0.235
0.302	68	7.72	1.61	0.209	0.344	19.64	0.0308	0.0374	0.207	0.250
0.356	80	10.26	2.54	0.248	0.362	28.12	0.0372	0.0476	0.215	0.276
0.391	88	12.00	3.33	0.278	0.379	34.76	0.0410	0.0546	0.220	0.293
0.413	93	13.10	3.81	0.291	0.382	38.44	0.0433	0.0591	0.222	0.303
0.467	105	15.78	4.90	0.311	0.374	45.76	0.0483	0.0703	0.225	0.327
0.48	108	16.45	5.24	0.318	0.376	48.04	0.0494	0.0732	0.225	0.333
0.533	120	19.15	6.56	0.343	0.374	56.12	0.0537	0.0853	0.225	0.357
0.573	129	21.16	7.70	0.364	0.377	62.68	0.0564	0.0951	0.223	0.375
0.6	135	22.49	8.33	0.370	0.370	65.68	0.0581	0.1020	0.220	0.387
0.636	143	24.24	9.30	0.384	0.366	70.36	0.0601	0.1119	0.217	0.404
0.698	157	27.21	11.0	0.404	0.356	77.48	0.0628	0.1397	0.207	0.433
0.756	170	29.82	12.35	0.414	0.337	81.52	0.0645	0.1542	0.193	0.463
0.787	177	31.14	13.3	0.427	0.332	84.72	0.0650	0.1689	0.184	0.479
0.822	185	32.57	14.2	0.436	0.320	86.80	0.0652	0.1893	0.172	0.499
0.884	199	34.79	15.15	0.435	0.283	85.80	0.0645	0.2418	0.144	0.539
0.956	215	36.72	16.10	0.438	0.222	81.96	0.0612	0.396	0.093	0.680

Tabell C Flödesparametrar för ledning med sediment. $D=225$ mm,
 $S=1^0/00$, sedimentdjup = 48 mm

Y/D	Y (mm)	A (10^{-3} m ²)	Q (10^{-3} m ³ /s)	V (m/s)	F_r	Re 10^3	R (m)	A/B (m)	B (m)	P (m)
0.373	84	7.33	1.3	0.177	0.309	15.04	0.0278	0.0337	0.218	0.264
0.431	97	10.20	2.15	0.211	0.315	22.60	0.0351	0.0458	0.223	0.291
0.493	111	13.34	3.5	0.262	0.344	33.52	0.0418	0.0593	0.225	0.319
0.6	135	18.70	5.8	0.310	0.340	48.24	0.0510	0.0848	0.220	0.367
0.702	158	23.62	8.25	0.349	0.329	60.64	0.0569	0.1148	0.206	0.415
0.822	185	28.77	10.9	0.379	0.296	69.44	0.0600	0.1672	0.172	0.479
0.933	210	32.41	13.0	0.401	0.238	71.20	0.0581	0.289	0.112	0.558

Tabell D Flödesparametrar för ledning med sediment. $D=225$ mm,
 $S=1^0/00$, sedimentdjup = 85 mm

Y/D	Y (mm)	A (10^{-3} m ²)	Q (10^{-3} m ³ /s)	V (m/s)	F_r	Re 10^3	R (m)	A/B (m)	B (m)	P (m)
0.533	120	7.81	1.33	0.170	0.291	14.08	0.0271	0.0348	0.225	0.289
0.6	135	11.15	2.56	0.230	0.326	24.52	0.0350	0.0506	0.220	0.319
0.667	150	14.40	3.9	0.271	0.332	34.00	0.0411	0.0679	0.212	0.350
0.787	177	19.80	6.25	0.316	0.308	46.44	0.0482	0.1074	0.184	0.411
0.929	209	24.75	8.51	0.344	0.237	51.40	0.0490	0.2140	0.116	0.506

Report Series A

- A:1 Bergdahl, L.: Physics of ice and snow as affects thermal pressure. 1977.
- A:2 Bergdahl, L.: Thermal ice pressure in lake ice covers. 1978.
- A:3 Häggström, S.: Surface Discharge of Cooling Water. Effects of Distortion in Model Investigations. 1978.
- A:4 Sellgren, A.: Slurry Transportation of Ores and Industrial Minerals in a Vertical Pipe by Centrifugal Pumps. 1978.
- A:5 Arnell, V.: Description and Validation of the CTH-Urban Runoff Model. 1980.
- A:6 Sjöberg, A.: Calculation of Unsteady Flows in Regulated Rivers and Storm Sewer Systems. 1976.
- A:7 Svensson, T.: Water Exchange and Mixing in Fjords. Mathematical Models and Field Studies in the Byfjord. 1980.
- A:8 Arnell, V.: Rainfall Data for the Design of Sewer Pipe Systems. 1982.
- A:9 Lindahl, J. Sjöberg, A.,: Dynamic Analysis of Mooring Cables. 1983.
- A:10 Nilsdal, J-A.: Optimeringsmodellen ILSD. Beräkning av topografins inverkan på ett dagvattensystems kapacitet och anläggningskostnad. 1983.
- A:11 Lindahl, J.: Implicit numerisk lösning av rörelseekvationerna för en förankringskabel. 1984.
- A:12 Lindahl, J.: Modellförsök med en förankringskabel. 1985.
- A:13 Lyngfelt, S.: On Urban Runoff Modelling. The Application of Numerical Models Based on the Kinematic Wave Theory. 1985.

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Institutionen för vattenbyggnad

Report Series B

- B:1 Bergdahl, L.: Beräkning av vågkrafter. (Ersatts med 1979:07). 1977.
- B:2 Arnell, V.: Studier av amerikansk dagvattenteknik. 1977.
- B:3 Sellgren, A.: Hydraulic Hoisting of Crushed Ores. A feasibility study and pilot-plant investigation on coarse iron ore transportation by centrifugal pumps. 1977.
- B:4 Ringesten, B.: Energi ur havsströmmar. 1977.
- B:5 Sjöberg, A., Asp, T.: Brukar-anvisning för ROUTE-S. En matematisk modell för beräkning av icke-stationära flöden i floder och kanaler vid strömmande tillstånd. 1977.
- B:6 Annual Report 1976/77.
- B:7 Bergdahl, L., Wernersson, L.: Calculated and Expected Thermal Ice Pressures in Five Swedish Lakes. 1977.
- B:8 Göransson, C-G., Svensson, T.: Drogue Tracking - Measuring Principles and Data Handling. 1977.
- B:9 Göransson, C-G.: Mathematical Model of Sewage Discharge into confined, stratified Basins - Especially Fjords. 1977.
- B:10 Arnell, V. Lyngfelt, S.: Beräkning av dagvattenavrinning från urbana områden. 1978.
- B:11 Arnell, V.: Analysis of Rainfall Data for Use in Design of Storm Sewer Systems. 1978.
- B:12 Sjöberg, A.: On Models to be used in Sweden for Detailed Design and Analysis of Storm Drainage Systems. 1978.
- B:13 Lyngfelt, S.: An Analysis of Parameters in a Kinematic Wave Model of Overland Flow in Urban Areas. 1978.
- B:14 Sjöberg, A., Lundgren, J., Asp, T., Melin, H.: Manual för ILLUDAS (Version S2). Ett datorprogram för dimensionering och analys av dagvattensystem. 1979.
- B:15 Annual Report 1978/79.
- B:16 Nilsdal, J-A., Sjöberg, A.: Dimensionerande regn vid höga vattenstånd i Göta älv. 1979.
- B:17 Stöllman, L-E.: Närkes Svartå. Hydrologisk inventering. 1979.
- B:18 Svensson, T.: Tracer Measurements of Mixing in the Deep Water of a Small, Stratified Sill Fjord. 1979.

Report Series B

- B:19 Svensson, T., Degerman, E., Jansson, B., Westerlund, S.: Energiutvinning ur sjö- och havssediment. En förstudie. R76:1980. 1979.
- B:20 Annual Report 1979.
- B:21 Stöllman, L-E.: Närkes Svartå. Inventering av vatten-tillgång och vattenanvändning. 1980.
- B:22 Häggström, S., Sjöberg, A.: Effects of Distortion in Physical Models of Cooling Water Discharge. 1979.
- B:23 Sellgren, A.: A Model for Calculating the Pumping Cost of Industrial Slurries. 1981.
- B:24 Lindahl, J.: Rörelseekvationen för en kabel. 1981.
- B:25 Bergdahl, L., Olsson, G.: Konstruktioner i havet. Vågkrafter-rörelser. En inventering av datorprogram. 1981.
- B:26 Annual Report 1980.
- B:27 Nilsdal, J-A.: Teknisk-ekonomisk dimensionering av avloppsledningar. En litteraturstudie aom datormodeller. 1981.
- B:28 Sjöberg, A.: The Sewer Network Models DAGVL-A and DAGVL-DIFF. 1981.
- B:29 Moberg, G.: Anläggningar för oljeutvinning till havs. Konstruktionstyper, dimensioneringskriterier och positioneringssystem. 1981.
- B:30 Sjöberg, A., Bergdahl, L.: Förankringar och förankringskrafter. 1981.
- B:31 Häggström, S., Melin, H.: Användning av simuleringsmodellen MITSIM vid vattenresursplanering för Svartån. 1982.
- B:32 Bydén, S., Nielsen, B.: Närkes Svartå. Vattenöversikt för Laxå kommun. 1982.
- B:33 Sjöberg, A.: On the stability of gradually varied flow in sewers. 1982.
- B:34 Bydén, S., Nyberg, E.: Närkes Svartå. Undersökning av grundvattenkvalitet i Laxå kommun. 1982.
- B:35 Sjöberg, A., Mårtensson, N.: Regnenveloppmetoden. En analys av metodens tillämplighet för dimensionering av ett 2-års perkolationsmagasin. 1982.
- B:36 Svensson, T., Sörman, L-O.: Värmeupptagning med bottenförlagda kylslangar i stillastående vatten. Laboratieförsök. 1982.

Report Series B

- B:37 Mattsson, A.: Koltransporter och kolhantering. Lagring i terminaler och hos storförbrukare. (Delrapport). 1983.
- B:38 Strandner, H.: Ett datorprogram för sammankoppling av ILLUDAS och DAGVL-DIFF. 1983.
- B:39 Svensson, T., Sörman, L-O.: Värmeupptagning med bottenförlagda slangar i rinnande vatten. Laboratorieförsök. 1983.
- B:40 Mattsson, A.: Koltransporter och kolhantering. Lagring i terminaler och hos storförbrukare. Kostnader. Delrapport 2. 1983.
- B:41 Häggström, S., Melin, H.: Närkes Svartå. Simuleringsmodellen MITSIM för kvantitativ analys i vattenresursplanering. 1983.
- B:42 Hård, S.: Seminarium om miljöeffekter vid naturvärmesystem. Dokumentation sammanställd av S. Hård, VIAK AB. BFR-R60:1984. 1983.
- B:43 Lindahl, J.: Manual för MODEX-MODIM. Ett datorprogram för simulering av dynamiska förlopp i förankringskablar. 1983.
- B:44 Activity Report. 1984.
- B:45 Sjöberg, A.: DAGVL-DIFF. Beräkning av icke-stationära flödesförlopp i helt eller delvis fyllda avloppssystem, tunnlar och kanaler. 1984.
- B:46 Bergdahl, L., Melin, H.: WAVE FIELD. Manual till ett program för beräkning av ytvattenvågor. 1985.
- B:47 Lyngfelt, S.: Manual för dagvattenmodellen CURE. 1985.

