



Institutionen för Vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola
Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

Sediment- och strömningsförhållanden
i två avloppsledningar i Göteborg

av

Rikard Appelgren

Examensarbete

Nr 1988:1

Göteborg 1988

Adress: Institutionen för vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg

Telefon: 031/72 10 00

Förord

Följande examensarbete ingår som en del i ett forskningsprojekt med benämningen Sedimentation och erosion i ledningssystem. Projektet drivs inom ramen för den ledningsteknikforskning som pågår vid Institutionen för Vattenbyggnad vid Chalmers Tekniska Högskola.

Inom projektet pågår en laboratoriestudie av flödeskapaciteten hos en avloppsledning som delvis är fylld med sediment. Under sommaren har fältmätningar utförts i Göteborgs avloppsnät. Nivå och flödesmätningar har gjorts för att komplettera tidigare uppgifter om de aktuella ledningssträckorna.

Examensarbetet omfattar fältmätningar, med sammanställning av nya och gamla uppgifter kring två ledningssträckor i Göteborgs avloppsnät.

Jag vill tacka min handledare Sven Lyngfelt för den hjälp och de råd han bistått med. Dessutom vill jag rikta ett stort tack till Lars-Ove Sörman för ovärderlig hjälp med fältmätningarna.

Rikard Appelgren

(iiii) De erosionsteorier man applicerade på fältmätningarna gav ibland samma bild av mängden eroderat material för att nästa gång ge skilda värden. Den empiriska ekvation som framtagits vid laboratorieförsök, gav genomgående lägre koncentrationer av eroderat material än vad man kan vänta sig i denna typ av ledning. Det visade sig bero bero på faktorer som hydraulisk radie och hastighet varför man måste anse de empiriska ekvationerna obrukbara om de inte anpassas för det ledningssystem det skall användas för.

Sammanfattning

Examensarbetet hade som utgångspunkt att med hjälp av nivåmätningar längs med två ledningssträckor i Göteborg sammanlänka de hydrauliska förhållandena med sedimentbilden i systemet. Man hoppades på detta sätt bättre kunna förklara sedimentavlagringarnas existens och de primära orsakerna till dessa.

Under arbetets gång blev man intresserad av två teorier för att beräkna mängden eroderat material i en ledning. Då dessa teorier uppkommit ur laboratorieförsök, ville man se om de gick att applicera på ledningar i fält då den empiriska ekvationen var framtagen för de lägre koncentrationer av sediment som finns i dagvatten- och kombinerade ledningar.

Resultatet från detta arbete visar följande:

- (i) Sedimentavlagringarna orsakas av lokala sättningar i flackå ledningssystem.
- (ii) För en viss sättningsbild kommer avlagringarna att öka tills systemet når en form av jämvikt. När denna punkt är nådd, svänger avlagringarnas tjocklek mellan värden som blir specifika för varje regnhistoria. Då denna i viss mån är beroende av årstiden får man de största avlagringarna under sommaren, som sedan minskar genom erosion under hösten.
- (iii) I samband med denna vandring mot en jämviktspunkt sker också en förändring av sedimentens sammansättning. Det finare materialet tvättas ut och det verkar som att kurvan vandrar och passerar en punkt där andelen material mindre än 0.5 mm är mindre än 50 %.

REGISTER

BETECKNINGAR

1. INLEDNING
2. SEDIMENTENS AVLAGRING OCH TRANSPORT I LEDNINGAR
 - 2.1 Skillnader mellan rör- och kanalströmning
 - 2.2 Transportförlopp
 - 2.3 Dynbildning
 - 2.4 Sedimentbäddens sammansättning
 - 2.5 Gränsvärden för sedimentation
 - 2.6 Hydraulisk råhet i avloppsledningar
 - 2.7 Sammanfattning
3. FALTFÖRSÖK
 - 3.1 Sedimentmätning
 - 3.2 Nivå- och Hastighetsmätning
4. BEHANDLING AV RADATA
5. STATION NR 1 HUVUDLEDNING MARKLANDSGATAN
 - 5.1 Hydrologiska förutsättningar
 - 5.2 Hydrauliska förutsättningar
 - 5.3 Ledningens sedimentläge
 - 5.4 Erosion
6. STATION NR 2 VON UTFALLSGATAN
 - 6.1 Hydrologiska förutsättningar
 - 6.2 Hydrauliska förutsättningar
 - 6.3 Ledningens sedimentläge
 - 6.4 Erosion
7. RESULTAT

8. REFERENSER

BILAGA A	AVVÄGNINGSRESULTAT
BILAGA B	DIAGRAM REGN-FLÖDE
BILAGA C	SEDIMENTENS INVERKAN PÅ KAPACITETEN
BILAGA D	VATTENYTANS LUTNING
BILAGA E	FLÖDE-HASTIGHET-AREA
BILAGA F	SEDIMENTDJUP I BRUNNARNA
BILAGA G	SIKTANALYSER
BILAGA H	JÄMFÖRELSE AV TVÅ EROSIONSTEORIER
BILAGA I	ANPASSNING AV MAYS EKVATION

BETECKNINGAR

A	Flödets tvärsektion tillhörande djup y
C_v	Sedimentkoncentration (ppm)
D	Rördiameter
d	Sedimentstorlek
d_{mm}	Sedimentstorlek i mm
F	Froudes tal
F_{cd}	Dimensionslöst tal
f	Friktionsfaktor
g	Tyngdaccelerationen
S_f	Vattenytans lutning
k_r	Ekvivalent sandrâhet för rörväggen
k_s	Ekvivalent sandrâhet för sediment
n_r	Mannings råhetskoefficient för rörvägg
n_s	Mannings råhetskoefficient för sediment
q_t	Total materialtransport
P	Våta perimetern P_r för rörvägg P_s för sediment
P_1	Andel av sediment som är finare än 1.0mm
Q	Flöde
R	Hydraulisk radie A/P
T	Vattenlinjebredd
s_w	Vattnets specifika densitet
s_s	Sedimentens specifika densitet
V_{cd}	Under denna hastighet börjar partiklar på rörets insida att bilda stationära avlagringar
V_s	Vattenhastighet vid självrensning
V_t	Vattenhastighet för vilken enstaka partiklar börjar röra på sig
V_{td}	V_t för partiklar på sedimentbädd
V_{tP}	V_t för partiklar på rörets insida
v_o	Gränshastighet

V_{td}	V_t för partiklar på sedimentbädd
V_{tp}	V_t för partiklar på rörets insida
v_o	Gränshastighet
S_b	Rörets lutning
y	Flödesdjup mätt ner till botten
y_m	Medelvattendjup
y_s	Sedimentbäddens balanserade djup
z_b	Bäddens medelyta
τ	Skärspänning
τ_o	Medelskärspänning
τ_{co}	Kritisk skärspänning
n	Vertikal koordinat med hänsyn till z_b
$\bar{z}$	Bottenkonfigurationens höjd (mm)
ϵ	Avstånd mellan formationerna (mm)
θ	Skärspänningsfaktor längs bädd (Dimensionslös)
ϕ	Transportfaktor för sediment (Dimensionslös)
ν	Viskositet
δ_w	Vattnets densitet
δ_s	Sedimentens densitet

1. INLEDNING

Examensarbetet omfattar fältmätningar, med sammanställning av nya och gamla uppgifter kring två ledningssträckor i Göteborgs avloppsnät. Med hjälp av nivåmätningar vill man sammanlänka de hydrauliska förhållandena med sedimentbilden i systemet. Man hoppas på detta sätt bättre kunna förklara sedimentavlagringarnas existens och de primära orsakerna till dessa.

Avlagringar av material i avloppsledningarna är ett gammalt problem, som nu fått förnyad aktualitet. Materialet som dels följer med vattnet in i ledningarna, men även infiltreras längs med dessa, kommer att påverka dess funktion. En avsättning av materialet då vattenföringen är låg, ger en reducerad kapacitet med risk för översvämning som följd.

En genomgång av Göteborgs kommuns driftstörningsarkiv visar att hälften av störningarna orsakas av sediment. Dessa problem koncentreras dels till klena spillvattenledningar i flacka dalgångar dels till grova kombinerade ledningar i de flacka centrala delarna av staden. (Sörman 1985)

Materialet transporteras dels som suspension, dels utmed botten av röret. Det suspenderade materialet är i huvudsak lera och organiska partiklar medan det bottentransporterade är grövre material, huvudsakligen sand och silt.

För att partiklar skall transporteras i suspension, krävs att turbulenta strömningsförhållanden råder. Viktiga faktorer som påverkar är ledningens lutning och k -värde, vattenflödet samt densitet och storlek på partiklarna.

Skärspänningen (τ) mellan vattnet och bottenmaterialet kommer att påverka storleken av transporterad mängd sand. Om skärspänningen

överskrider ett visst kritiskt värde kommer materialet att transporteras utmed botten av ledningen. Skärspänningen är en funktion av den hydrauliska radien (R), vattnets densitet och energilinjens lutning.

En uppbyggnad av sedimenten fås om en viss kritisk skärspänning underskrids. Detta sker under torrvädersperioder då vattenföringen är låg. Om vattenlinjens lutning minskat på grund av sättningar eller dämning nedströms, blir inte vattenföringen tillräckligt hög vid regn för att spola bort allt sediment. Man får då en nettoavsättning med en uppbyggnad av sedimenten som följd. Om systemet är tillräckligt flackt, får man reducerade vattenhastigheter uppströms.

Tidigare fältarbeten som gjorts inom området är sedimentanalyser på ledningssträckor som ligger i flacka områden. En jämförelse mellan siktkurvorna ger inga tydliga skillnader mellan olika ledningssystem, dess läge eller källa.

De mätningar av sediment-tjocklek och -sammansättning som gjorts, visar att i de flesta fall uppnås, efter en period av uppbyggnad ett balanserat tillstånd utan eller med mycket svag tillväxt. Gemensamt för siktkurvorna i dessa punkter är att för material > 0.5 mm är viktsandelen större än 50%. Sedimentprov skulle därmed kunna användas för att bedömma om ett system är i obalans med låg kapacitet som följd. Underlaget för detta påstående är ännu begränsat varför ytterligare mätningar måste göras, för att bekräfta analysens användbarhet som funktionskontrollmetod.

2. SEDIMENTENS AVLAGRING OCH TRANSPORT I LEDNINGAR

Genom att studera litteraturen, som omfattar kanal- och rörströmning, finner man att ett antal undersökningar genomförts inom området. Många utav dessa försöker överföra de teorier och kunskaper som finns inom kanalströmning till rörströmning med dess sedimentationsproblem. (May 1982)

2.1 Skillnader mellan rör- och kanalströmning

Fastän det finns likheter mellan sedimenttransport i ett rör och en öppen kanal, försvåras behandlingen av avloppsrör av följande orsaker:

- (i) Sedimenttransportens funktion är inte enbart bestämd av transporterad mängd material. I en kanal är tillgången av material obegränsad. Flödets transportförmåga bestämmer då både storlek och typ av sedimenttransport. I ett rör kan sedimenttransporten vara oberoende av vattenhastigheten. Samma transportmängd kan fås vid hög hastighet då materialet förflyttas i suspension eller vid en lägre hastighet då transporten sker utmed botten av ledningen. Detta sker då materialtillgången är begränsad.
- (ii) Den yta över vilken materialet transporteras förändras då transportmängden ökar. Vid låga transportmängder rör sig partiklarna längs rörets yta. Då mängderna ökar fås en lagring av sediment och råheten ökar avsevärt. Partiklarna rör sig nu längs en yta av sediment vilket motsvarar det som sker i en kanal
- (iii) Bredden på det sedimentskikt som utsätts för erosion längs rörets botten är inte konstant utan ökar med mängden avlagrat material.

- (iv) Förlusterna längs röret bestäms av råheten hos två ytor; rörväggens och sedimentets. Råheten hos sedimenten är betydligt större än för röret. En sammanvägning av dessa värden blir svår då förhållandet varierar med hur, och i vilken mängd, sedimenten transporteras.
- (v) Närvaron av sediment påverkar strömningsförhållandena mer vid rörströmning än vid kanalströmning. Om röret går fullt ger sedimenten en förminskad area med högre hastigheter som följd. Detta problem uppstår inte i kanaler, då det motverkas av den fria ytan. Av störst betydelse är dock sedimentbäddens påverkan på flödet med ökade förluster som följd.

2.2 Transportförlopp

En beskrivning av sedimentens transportförlopp kan göras genom att studera två fall. Först låter man tillförseln av material vara konstant medan man gradvis ökar flödet. Vid det andra fallet håller man ett jämnt flöde genom röret, samtidigt som man ökar koncentrationen av sediment.

Beskrivningen nedan av fall ett härrör från en rapport skriven av Graf (1971).

Enstaka partiklar som ligger på rörets botten kommer inte att röra på sig förrän flödet överskrider en viss hastighet V_{tp} . Om avlagringar av sediment finns, benämnes denna hastighet V_{td} . V_{td} är större än V_{tp} , vilket framgår av vad som sagts tidigare. Då hastigheten når ett värde som ligger något över gränsvärdet, börjar sedimenten transporteras längs ytan. Detta sker genom rullande, hasande och hoppande på och i skiktet närmast botten. Genom denna erosion förändras bottenkonfigurationen. Det finns flera teorier som behandlar den kvantitativa mängdberäkningen av denna transport. De är emellertid ofta härledda med utgångspunkt från speciella villkor och är därför inte generella.

Om man nu ökar hastigheten V_{td} når man slutligen en nivå, där allt material transporteras i suspension på grund av turbulens i flödet. Vid denna nivå på flödet, avtar sedimenthalten mycket påtagligt med avståndet från botten. Det är denna fördelningskurva som möjliggör balans mellan den turbulenta transporten av materialet uppåt och transporten på grund av gravitationen nedåt. Genom att öka hastigheten ytterligare, får man en utjämning av den vertikala koncentrationsfördelningen. Om stationärt tillstånd uppnås, råder balans mellan mängden av material som per tidsenhet övergår i suspensionsfas och den mängd material som sedimenterar under motsvarande tid. Till skillnad från de bottentransporterade sedimenten, kan suspenderat material analyseras som ett diffusionsproblem.

Om man övergår till det andra fallet, som Graf beskriver, finner man att det finns vissa avvikelser från sedimentationsförloppet i en avloppsledning. I de försök som ligger till grund för beskrivningen nådde vattenytan rörets hjässa. Den är därför representativ för de tillfällen när avloppsledningar utsätts för så stora flöden att de fylls. I försöket skedde sedimenttillförseln i rörets början medan man i verkligheten även har en kontinuerlig tillförsel längs ledningen. Detta innebär att förloppet inte överensstämmer med verkligheten, men bör ändå ge underlag för ökad förståelse.

I ett rör sker en bottentransport av material då hastigheten ligger något över det kritiska värdet V_{tp} . Vid ett jämnt flöde ökas nu koncentrationen av sediment successivt, och man får en avlagring av sediment. Om sedimentkoncentrationen betydligt överskrider transportkapaciteten, kommer partiklarna att avlagras där de kommer in i röret. Uppbyggnaden kommer att fortgå tills hastigheten når den gräns vid vilken vattnet förmår transportera sedimenten. Avlagringarna utökas långsamt nedströms, och tillväxten avstannar då flödet genom den nu förminskade tvärsnittsarean ger en sedimenttransport som motsvarar den mängd som tillförs.

Laursen(1956) har i en rapport koncentrerat sig på de förhållanden som råder i en dagvattenledning. Han har visat att om avlagring av sediment sker då ledningen endast är delvis full, kan det jämviktsläge som beskrivits ovan inte uppnås förrän flödet sker under fullt utbildat tryck.

När avlagringarna ökar får man ett större motstånd med ökat vattendjup och lägre hastighet som följd. Transportkapaciteten minskar och sedimentationen fortsätter tills röret är fullt med vatten. När man når detta tillstånd ger ytterligare sedimentation en ökad hastighet och transportkapacitet. Detta förutsätter dock att flöden och tillförseln av sediment är jämn under tillräckligt lång tid för att jämvikt skall uppnås. Om detta uppfylls krävs även att markytan vid brunnarna ligger så högt över ledningen att erforderlig tryckhöjd kan uppnås då vattnet stiger i brunnen. Denna tryckhöjd skall kunna övervinna det tillkomma motståndet när rören delvis fylls med sediment. Om tryckhöjden blir för låg fortsätter sedimentationen tills brunnen svämmas över eller röret blir helt fyllt.

2.3 Dynbildning

May(1982) har i sin rapport beskrivit hur sedimenten förflyttar sig längs en ledning under olika förutsättningar. Nedan följer en redogörelse om dessa.

När man succesivt ökar tillförseln av sediment, minskar avståndet mellan partiklarna. Vid en viss koncentration bildar partiklarna små moln som sedan stoppar upp och upplöses av turbulens i flödet. Om dessa moln blir tillräckligt stora, skyddar partiklarna varandra och en upplösning motverkas. Sedimenttransporten övergår nu till att bestå av en mängd väl avskilda dyner som förflyttar sig i rörets längdriktning.

Partiklarna eroderas på dynens uppströmssida vilket visas i figur 1. Dessa rör sig sedan längs en yta av sediment och avsättes på läsidan.

På läsidan bildas ett område i vilket sedimenten roterar, som motverkar att partiklarna försvinner med strömmen. Partiklarna ligger sedan stilla tills dynen passerat över dem och de åter befinner sig på uppströmssidan. Trots att de inte alltid befinner sig i rörelse, har alla partiklarna samma medelhastighet som dynen.

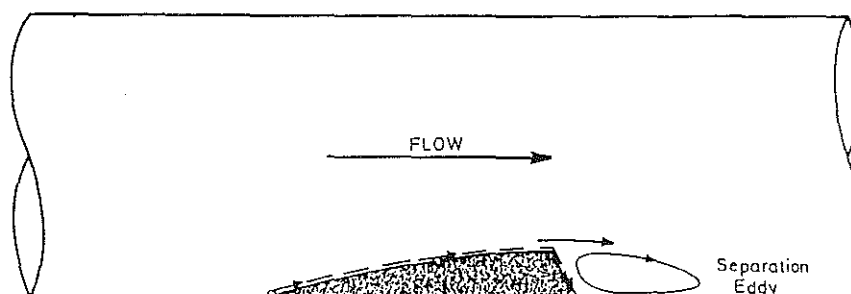


Fig 1. Dynrörelsens mekanism. (May 1982)

Hastigheten ökar med storleken på denna. Större dynen tenderar därför att komma ikapp mindre sådana. Den större dynens nedströmsida kommer att skära av tillförseln av material hos den mindre dynen varvid denna stannar, och absorberas av dynen bakom. Detta fenomen förklarar varför dynerna blir större samt varför avståndet mellan dem förlängs under transporten utmed röret.

Om man slutligen ökar koncentrationen av sediment ännu mer kommer avlagringar att bildas i rörets början, och sedimenten att röra sig nedströms enligt vad som beskrivits i 1.2. Dessa formationer på sedimenten sker endast inom ett visst hastighetsintervall. Vid hastigheter över 1 m/s fås ingen dynbildning, då även partiklar djupare ned i avlagringen börjar röra på sig, och det rörelsemönster som beskrivits ovan kommer att försvinna.

2.4 Sedimentbäddens sammansättning

Ribberink(1982) har i en rad experiment som sträckt sig över två år studerat sedimentens transport och sammansättning i en kanal. Detta har skett i en rektangulär profil med en tillförsel av sediment i kanalens början. Sedimenten består av kornstorlekar mellan 0.6 och 1.7 mm. Detta innebär att de flesta skillnader som beskrivits i 2.2 har försvunnit.

Experimenten har medvetet utförts i det område vid vilket dyner bildas. Simon et al(1965) har gjort en indelning av olika bottenkonfigurationer, i vilken man finner att dynbildningen sker i den lägre regimen, samt att sedimentens medeldiameter måste vara större än 0.6 mm för att undervika att endast räfflor bildas. Denna indelning visas i figur 2.

Mätning av sedimenttjocklek skedde kontinuerligt var 10 cm längs med hela kanalen. Genom att mycket försiktigt föra ner rör med mycket tunna väggar i sedimenten, kunde man suga upp sedimenten lager efter lager enligt figur 3. Detta gav en möjlighet att tvådimensionellt beskriva skillnader i sedimentens sammansättning.

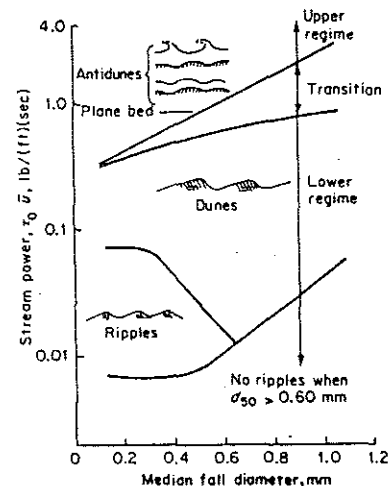


Fig 2. Konfigurationsindelning.

(Ribberink 1982)

Det fenomen som upptäcktes var att man i bädden kunde finna en vertikal gradering av sedimenten. Skillnader i volymkoncentration hos olika fraktioner kunde vara upp till 30 %.

Fyra olika skikt kunde urskiljas. I det djupaste skiktet sker en övergång från det grova materialet som transporteras till det material som befinner sig i den orörda bädden. Detta skikt kan

betraktas som en reserv, som ibland bidrar till framför allt de grövre fraktionerna i transportskiktet. Då detta skikt utsätts för få och oregelbundna störningar sker sedimentutbytet med de övre skikten under en mycket lång tidsperiod.

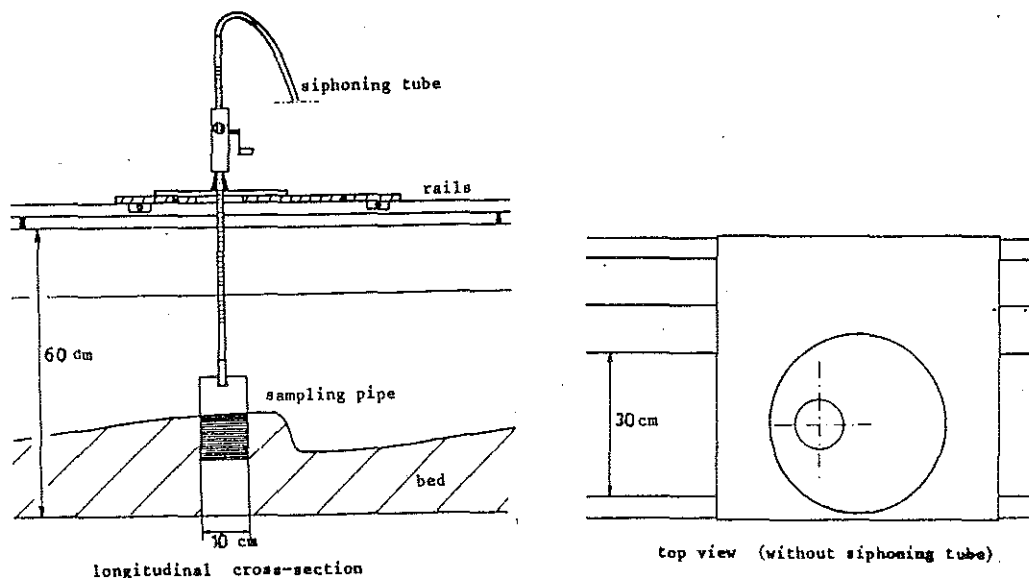


Fig 3. Sedimentuppsamlare (Ribberink 1982)

I de övre skikten sker regelbundna sedimentrörelser. Här ser man mycket tydligt att det råder en vertikal gradering av sedimenten. Genom att jämföra siktkurvorna för material i det skikt där transporten av sediment sker, med siktkurvan för det transporterade material som ansamlades i kanalens slut finner man att dessa inte är lika. Sedimenten i transportskiktet har en större andel grovt material än det transporterade.

I figur 4 visas resultaten från en av mätningarna. De tillförda sedimenten utgörs här av 50 % fint material som ligger mellan 0.6 mm till 1.0 mm och där resten ligger i fraktioner upp till 1.7 mm. I den nedre delen av figuren visas sedimentbäddens konfiguration, samt mätpunkternas position. En horisontell linje har ritats ut i den övre delen av figuren och den representerar medelhöjden hos sedimentbädden. De mörka fälten motsvarar avlagringar med en andel av finare sediment (P_1) som är < 0.5 (grovt material) medan det ljusare då innehåller finare sediment med en andel $P_1 > 0.5$. P_1 utgör andel sediment mellan 0.6 och 1.0 mm.

Man finner att det råder stor skillnad i bäddens vertikala sammansättning. Man finner den dels i det övre transportlagret dels i det underliggande lagret som inte påverkas av förändringar i bäddens nivå. Genom att studera resultaten från flera prover har författaren kunnat urskilja vissa gemensamma faktorer. I de övre skikten blir materialet allt grövre ($dP_1/dz_b > 0$) tills man når ett minimum ($dP_1/dz_b = 0$). Slutligen får man en gradvis förändring mot finare material ($dP_1/dz_b < 0$). z_b motsvarar här det djup i sedimentbädden som man befinner sig på.

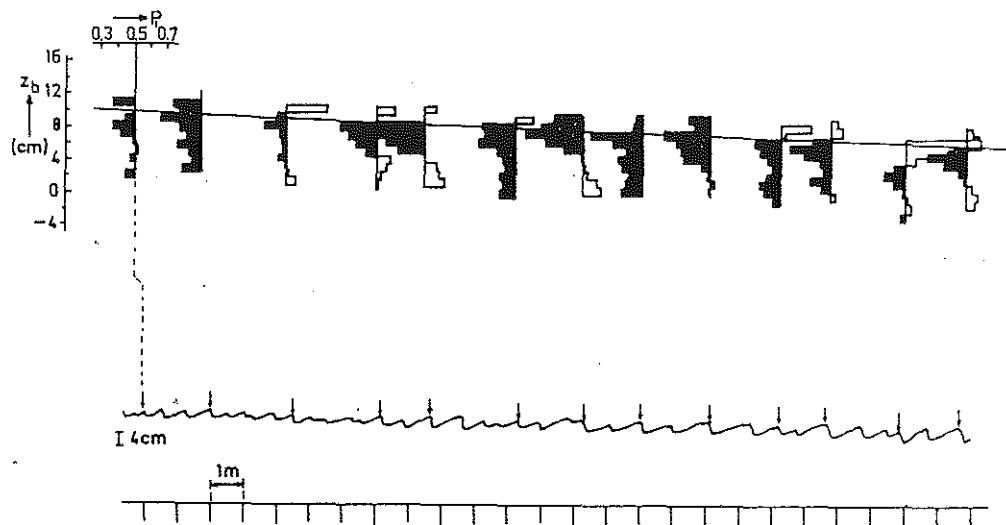


Fig 4. Exempel på vertikal gradering (Ribberink 1982)

I det försök som nu beskrivits skedde provtagningen längs en linje i kanalens centrum. En jämförelse mellan denna linje och prover tagna i närheten av kanalväggen visas i figur 5.

Man finner även här en vertikal sortering av materialet, men den har vissa olikheter med de som tidigare redovisats för centrumlinjen. De övre lagren innehåller större andel finare material och övergången till grövre material sker djupare ned i sedimentbädden.

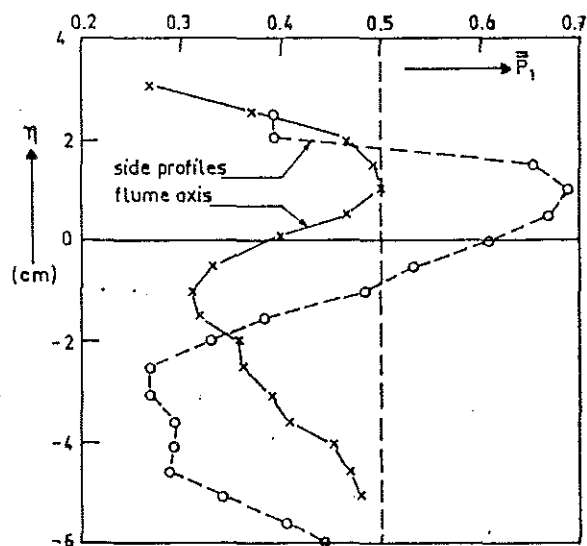


Fig 5. Vertikal sortering i kanalmit och vid vägg.
(Ribberink 1982)

2.5 Gränsvärden för sedimentation

May(1982) har i sin rapport gjort en överblick över de empiriska ekvationer som tagits fram för att bestämma gränsvärden då sedimentation sker.

Den omfattar ett experiment som utförts på ett rör med 50.8 mm diameter. Sedimentens d_{50} varierade mellan 0.25 och 1.6 mm. Två metoder användes där man dels ändrade vattenytans lutning, dels ökade mängden tillförda sediment. Resultatet av detta experiment kan uttryckas i en dimensionslös transportparameter W där

$$W = \frac{Q}{\sqrt{g(s_s - 1)} D^{2.5} C_v^{1/3}} \quad (1)$$

där s_s är specifik densitet och C_v sedimentkoncentrationen.

Genom att införa ett gränsvärde för sedimentation W_s som då motsvarar en hastighet V_s kan ett samband fås mellan W_s och y/D där y är vattendjupet. Sambandet visas i figur 6.

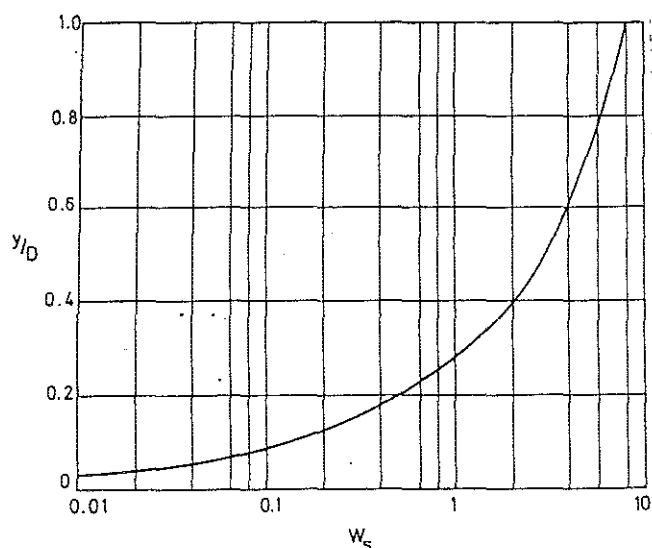


Fig 6. Gränsvärdet för sedimentation vid en delvis fylld ledning. (May 1982)

Man finner att sedimentens storlek inte påverkar W_s nämnvärt och genom att skriva om ekv (1) får man

$$\frac{V_s}{\sqrt{2g(s_s-1)y}} = \frac{C_v^{1/3} W_s}{(A/D)(2y/D)^{1/2}} \quad (2)$$

Genom att använda förhållandet i figur 6 kan ekv (2) skrivas

$$\frac{V_s}{\sqrt{2g(s_s-1)y}} = a C_v^{1/3} \quad (3)$$

där a är en funktion av y/D . I området $0.1 \leq y/D \leq 1.0$ kan a approximeras till 7.0 varvid ekv (3) kan skrivas

$$\frac{V_s}{\sqrt{2g(s_s-1)y}} = 7.0 C_v^{1/3} \quad (4)$$

Ekv (4) har tagits fram under förhållanden där koncentrationen av sediment varit hög, och det finns belägg för att den här empiriska formeln ej med säkerhet kan extrapoleras till de lägre koncentrationer som finns i dag- och spillvattenledningar. I de fall där den är användbar ger den mycket lätt en uppfattning om hur stor sedimenterosionen är om flödes förhållandena är kända.

För att kunna bestämma förhållandet mellan C_v och V_m även för de lägre koncentrationerna lät man utföra en ny omgång med experiment. Med hjälp av en mängd provdata kunde man arbeta fram följande empiriska formel:

$$C_v = \frac{2.05}{100} \left(\frac{D^2}{A} \right)^{0.6} \left(\frac{V_m^2}{g(s_m - 1)D} \right)^{3/2} \left(\frac{1 - v_o}{V_m} \right)^{1.4} \quad (5)$$

För koncentrationer mellan 4.5 och 920 ppm ger den en standardavvikelse på 17%. v_o som benämnes gränsvärdes hastighet kan uppskattas med en ekvation som lyder:

$$v_o = (g d 0.61 (s_m - 1))^{1/2} \left(\frac{d}{R} \right)^{-0.27} \quad (6)$$

men man bör iakta att v_o inte är konstant för en viss sedimentstorlek utan varierar med rörets storlek samt y/D . Sedimentens densitet bör även ligga runt 2.65 t/m³ då detta värde på s_m användes i experimenten. Man bör inte heller extrapolera ekv (5) till mycket högre hastigheter än de som användes vid experimenten. Dessa låg mellan 0.4 och 1.2 m/s. Teorier påvisar att förhållandet mellan C_v och V_m kommer att förändras vid högre hastigheter, och författaren anser då följande ekvation framtagen av Robinson & Graf mera lämplig.

$$F_{cd} = 0.928 \frac{(C_v^{0.105} d_{mm}^{0.056})}{(1 - \tan w)} \quad (7)$$

där w är rörets lutning och

$$F_{sd} = \frac{V_{sd}}{\sqrt{2g(s_s-1)D}} \quad (8)$$

2.6 Hydraulisk Råhet I Avloppsledningar

De faktorer som påverkar den totala råheten i avloppsrör är många. Då dessa ofta är mycket svåra att beskriva i absoluta tal blir råhetsbestämningen svår att göra exakt. Henderson (1984) har beskrivit dessa faktorer samt redovisat ett antal alternativ för att beräkna råheten.

De värden som fås av tillverkare för en viss typ av rör, kommer vanligtvis från laboratorieförsök med ideala förhållanden. När avloppsrören använts ett tag visar det sig att råheten kan öka betydligt och bli oberoende av rörets material. Sättningar och slarv vid byggnation kan göra att skarvarna blir excentriska vilket kan ge ett tillskott till den ekvivalenta sandråheten (k_s) på upp till 100 mm. I avloppsrör som saknar avlagringar och konstruktionsfel blir råheten beroende av det slam som snabbt utbildas längs våta perimetern då ledningen tas i bruk. Ytterligare faktorer som påverkar råheten är ålder, rörets utformning, vattnets sammansättning och temperatur samt sediment.

Som nämnts tidigare kommer sedimentavlagringar att ge minskad hydraulisk kapacitet hos ledningen. Detta orsakas av den förminskade flödesarean samt ökade förluster på grund av friktion mellan flöde och sediment. Orsaken till de ökade förlusterna kan härledas till tre källor.

- Råheten hos enskilda sedimentkorn.
- Energiåtgången vid sedimenttransport.
- Råheten hos bottenkonfigurationer som bildas i rörliga sediment

Hur sedimenten påverkar ett rörs råhet är svårt att förutse. I extrema fall kan k_{m} uppnå värden kring 150 mm. Då hastigheterna är låga och man har en plan sedimentyta kan k_{m} beräknas enligt:

$$k_{\text{m}} = 1.5d_{15} \quad (9)$$

där d_{15} är den maskstorlek genom vilken 65% av materialet passerar vid siktning. (Henderson 1984)

Undersökningar visar att räfflor och dyner som bildats under högre flöden kan ge ett stort tillskott till råheten då vattennivån åter sjunker. Denna ökning är beroende av storlek, form och täthet hos bottenkonfigurationen. Råheten kan för dessa formationer beräknas med en ekvation som är framtagen av Shinohara och Tsubaki (1959). Detta förhållande kan användas för ledningar med ett vattendjup som är betydligt större än konfigurationens höjd (Φ).

$$k_{\text{m}} = 7.5 \Phi \frac{\Phi}{\epsilon}^{0.57} \quad (\text{mm}) \quad (10)$$

där ϵ är avståndet mellan formationerna.

Vattendjupets storlek har betydelse för rörets totala råhet. I figur 7 ser man en typisk kurva för förhållandet mellan relativt vattendjup och den ekvivalenta sandråheten. Vid lägre flöden är den relativa råheten (k_{m}/R) hög, då sedimenten upptar en större del av den våta perimetern. När röret är fullt sker en viss utjämning av sedimentytan, men den principiella orsaken till det minskade k_{m} värdet är att sedimenten påverkar en mindre del av flödet.

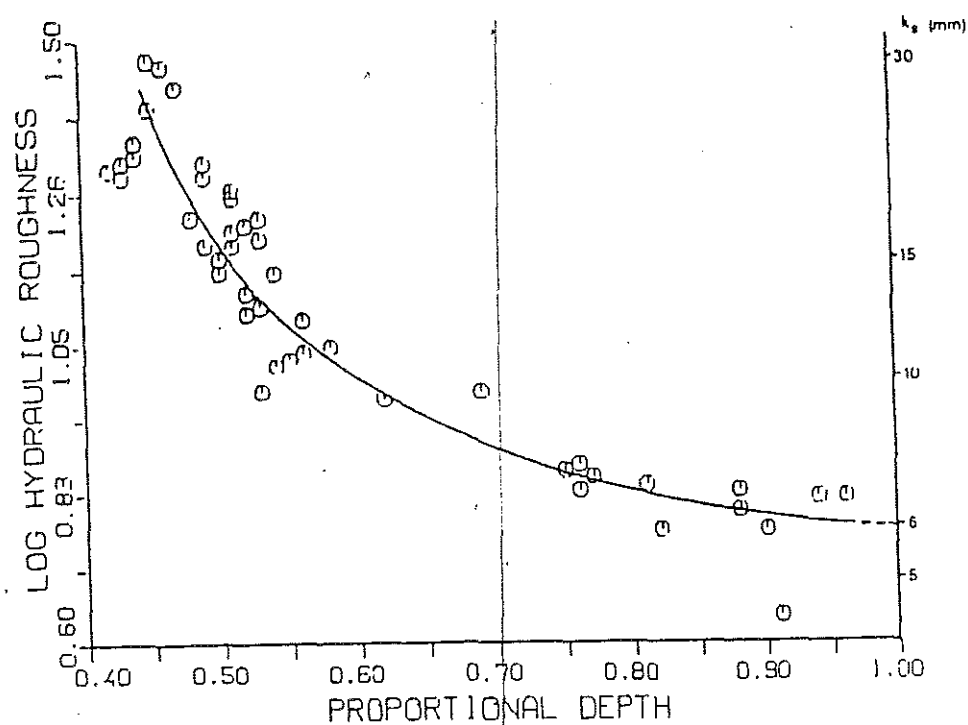


Fig 7. Hydraulisk råhet som funktion av relativt djup.
(Henderson 1984)

Vattendjup och flöde påverkar också sedimentens råhet. Man finner att råheten ökar då räfflor bildas för att sedan minska då dessa övergår i dyner och slutligen en slät yta. Detta förhållande beskrivs i figur 8, där man ser att den ekvivalenta sandråheten kan sammanlänkas med Froudes tal (F). (Henderson 1984)

De högre k_s värdena fås då Froudes tal ligger mellan 0.2 och 0.45. Om sedimentet innehåller kohesivt material fås något högre värden som mellan 0.3 och 0.5. Vid Froudes tal kring 0.6 och upp till det överkritiska området börjar dynerna erodera bort och sedimenten bildar en plan yta. I det överkritiska området kan antidynner bildas. Dessa ger mycket lägre motstånd än andra ytformer, varför k_s ej ökar då den plana bädden övergår i denna konfiguration

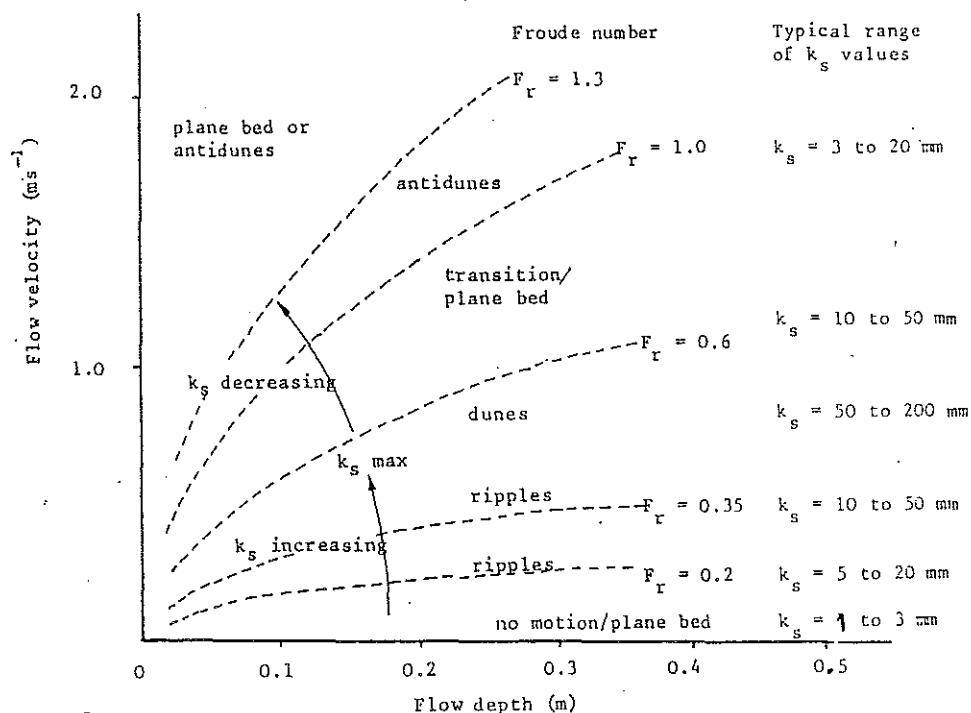


Fig 8. Förhållandet mellan bottenkonfiguration, uppskattad råhet och flödes förhållanden för en sandbädd. (Henderson 1984)

För att kunna beräkna flödet i röret måste man sammanväga de olika råheterna längs den våta perimeteren. Denna sammanvägda råhet kan beroende på vald koefficient användas i Mannings- eller Darcy-Weibachs formel. Hur nedanstående formler härleds framgår i en rapport av Perrusquia, Lyngfelt, Sjöberg (1986). Nedanstående redogörelse bygger på uppgifter från denna.

I den förstnämnda karakteriseras råheten med Mannings råhetskoefficient n .

$$V = \frac{R^{2/3} S_f^{1/2}}{n} \quad (11)$$

Einstein (1942) föreslog en metod för att beräkna friktionsmotståndet hos en kanalvägg om bottenfriktionsfaktor var känd.

I metoden delar man in tvärsektionen i två delsektioner. För varje sektion antar man att hastigheten och den hydrauliska gradienten är den samma som för hela tvärsnittet. Valda friktions-samband skall kunna användas på bägge delsektionerna. Denna metod som kom att kallas sidoväggseliminering låg till grund för den formel Einstein(1950) föreslog för sammanvägning av Mannings råhetskoefficient n

$$n = \left[\frac{P_r n_r^2 + P_m n_m^2}{P} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Redan tidigare hade Horton(1933) arbetat fram en liknande formel

$$n = \left[\frac{P_r n_r^{3/2} + P_m n_m^{3/2}}{P} \right]^{1/2} \quad (13)$$

I litteraturen finner man att Einsteins samband är ett av de mest använda uttrycken för sammanvägd råhet. Det lämpar sig liksom Hortons uttryck bäst för kanalströmningsfall, men har också tillämpats på avloppsledningar med sediment. De två formlerna skiljer sig något från varandra. Skillnaden är liten och beroende av faktorerna P_m/P och n_m/n_r vilket framgår av figur 9. (Sjöberg, Lyngfelt, Perrusquia 1986)

Motsvarande samband föreslogs av Johnson(1942) som utgick från Darcy-Weibachs formel. Det förändrades sedan av Brooks som föreslog följande formel för att beräkna den sammanvägda friktionsfaktorn.

$$f = \left[\frac{P_r f_r + P_m f_m}{P} \right] \quad (14)$$

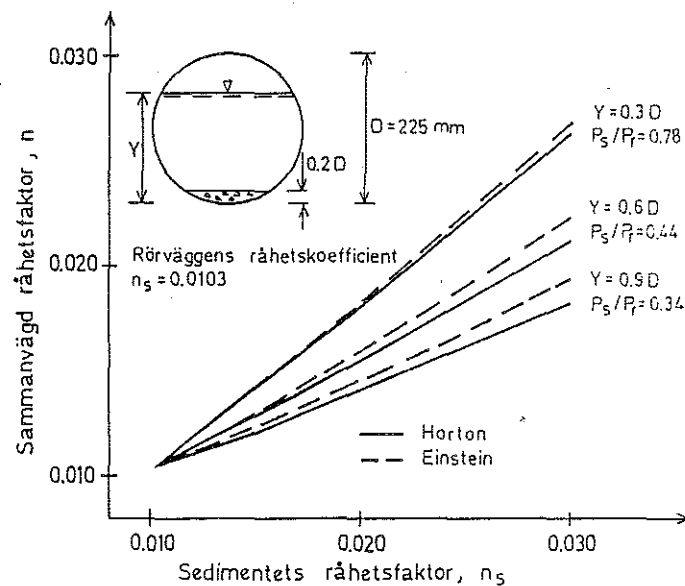


Fig 9. Jämförelse mellan Hortons och Einsteins samband för beräkning av olika sammansatt råhet n vid olika val av sedimentråhet n_s och $P_s/P_r \cdot n_r = 0.0103$. Sedimentens djup är $0.2 D$. (Lyngfelt, Sjöberg Perrusquia 1986)

Då denna formel kräver vissa omskrivningar samt att f_r och f_s måste bestämmas med hjälp av iterativ teknik blir den arbetsam och bör jämföras med en förenklad ansats av Ackers (1964). Ackers föreslår att en ekvivalent sandråhet beräknas med hjälp av sambandet.

$$k = \frac{f_r P_r k_r + P_s k_s}{f_r P_r + P_s} \quad (15)$$

Det sammanvägda k värdet kan sedan användas i Colebrook-Whites ekvation för att beräkna friktionsfaktorn.

Då Brooks metod utgör en sammanvägning av friktionsfaktorn f och Ackers metod en sammanvägning av ekvivalenta sandråheten k kan de ej jämföras med Hortons och Einsteins. Dock kan en inbördes jämförelse göras om friktionsfaktorn omräknas till sandråhet med

Colebrook-Whites ekvation. Av figur 10 framgår att man får avsevärda skillnader mellan de två sambanden.

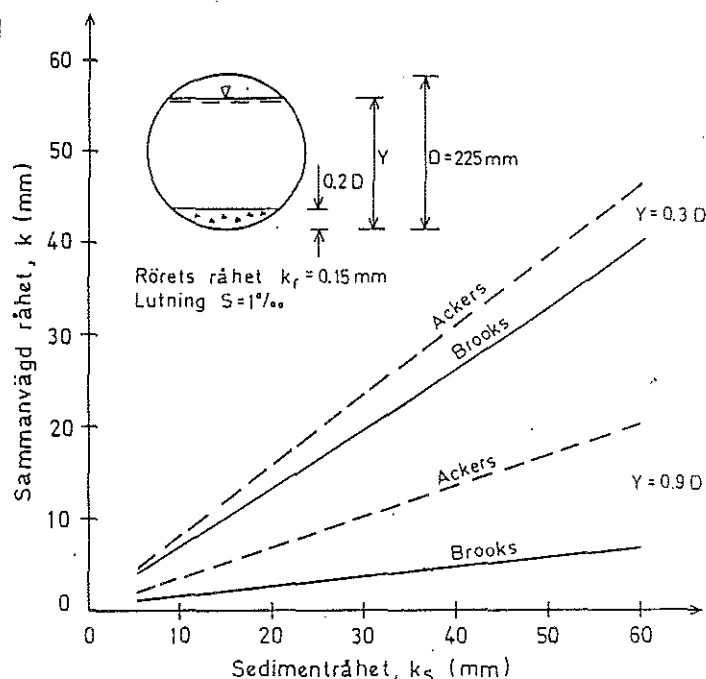


Fig 10. Jämförelse mellan Ackers och Brooks samband för beräkning av sammansatt råhet k vid olika val av sedimentråhet. (Perrusquia, Lyngfelt, Sjöberg 1986)

2.7 Sammanfattning

Denna överblick över teorier som behandlar sediment i ledningar visar att det är ett stort antal faktorer som inverkar.

För att kunna beskriva de krafter som sedimenten utsätts för krävs kännedom om aktuella hastigheter i systemet. Dessa påverkas i sin tur av bottenlutning, hydraulisk radie, vattendjup samt råheten hos rör och sediment.

Hur sedimenten påverkas av dessa krafter bestäms av dess densitet, partikelstorlek samt tillgänglig mängd. Med de faktorer som nämnts ovan kan uppkomna bottenkonfigurationer beskrivas.

Vid mätning i fält utgår man från tex en nivåmätning för att bestämma hydrauliska parametrar. Även sedimentens densitet och kornstorlek kan bestämmas. Dock är det mycket svårt att kontrollera mängden sediment som kommer in i och eroderar bort från ett ledningsavsnitt. Möjligheterna att undersöka sedimentens sammansättning längs med ledningen är också begränsade, vid små diametrar.

3. FÄLTFÖRSÖK

Fältmätningar har utförts i två etapper. Våren 1986 utförde S. Lyngfelt och L-O Sörman sedimentprofilsmätning av de båda ledningsetapper som nu åter undersökts. Tidigare hade även siktanalyser på sedimenten i brunnarna utförts. Dessa mätningar har kompletterats med nivå- samt ytterligare sedimentdjupsmätningar i brunnarna. Dessutom har brunnarna avvägts en bit upp- och nedströms de två ledningssträckorna för att ge en uppfattning om aktuella lutningar. Nedan följer en beskrivning av mätningarna och de metoder som använts.

3.1 Sedimentmätning

Fastän sedimentprofilsmätningar inte ingår inom ramen för detta examensarbete, kommer metoden att beskrivas eftersom resultaten från dessa mätningar ingår som del av de uppgifter som sammanställts om ledningssträckorna.

Metodiken som utvecklats vid Institutionen för Vattenbyggnad, CTH bygger på användning av en nivåmätare, den så kallade BAT-mätaren som normalt används för mätning av ledningsprofiler. (Lyngfelt 1987)

Nivåmätaren består i princip av en vattenfylld slang som i ena änden är ansluten till en tryckmätare och i andra änden till ett membran(givaren). Det är nu möjligt att mäta tryckskillnaden mellan slangens ändpunkter och givarens position kan bestämmas. För att göra mätningarna oberoende av tryckskillnader i mätpunkten finns en luftslang som skapar ett konstant mottryck, varvid man underviker att få negativa tryckregistreringar. Nivåmätaren har en noggrannhet på $\pm$ några millimeter.

För att mäta sedimentdjupet har en släde och en skida konstruerats på vilken givaren ska placeras. Slädens ben justeras så att de löper ovanför sedimenten, och nivågivaren placeras så att den löper genom ledningens centrumlinje. Hur släden är utförd och hur den skall placeras visas i figur 11.

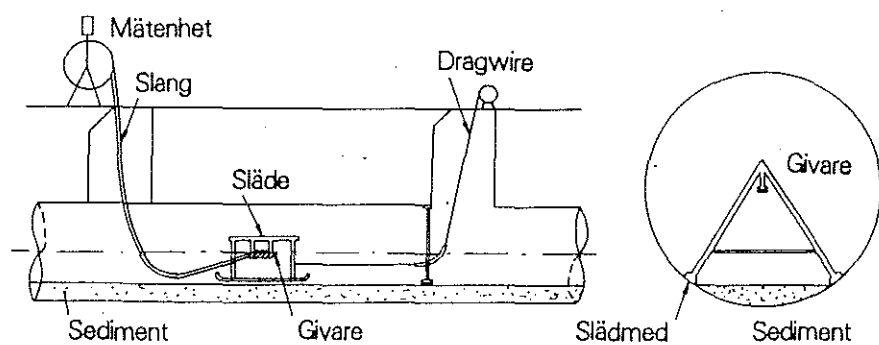


Fig 11. Mätning av sedimentnivå i ledning
(Lyngfelt 1987)

Genom att först dra släden uppströms mellan två brunnar med hjälp av en dragwire kan ledningsprofilen bestämmas. Givaren flyttas sedan över till skidan som glidandes på sedimenten dras tillbaka nedströms. Då man nu har såväl sedimentens som ledningens nivå kan även sedimentdjupet beräknas.

Den ovan beskrivna metoden ger en noggrann bild av sedimentprofilen. Då den är mycket tidsödande, blir det svårt att använda den för att kontinuerligt följa upp förändringar i avlagringar under en viss tidsperiod. Ett alternativ för att snabbt skaffa sig en aktuell bild av sedimentläget i ledningen är att mäta sedimentdjupet i brunnarna. Här bör man dock vara försiktig med påsticksledningar eftersom de gröper ut sedimenten. Om man har en ledningssträcka som i figur 12 där man haft en tämligen jämn sättningsgrad ger denna mätning en bra uppfattning om sedimentlagret.

Har man istället en ledning med ojämnt sedimentdjup som i figur 13 kan man inte genom att utgå från förändringen av

sedimentdjupet i brunnarna, få en riktig bild av sedimentvolymerna i ledningen.

Sedimentdjupet i brunnarna mättes genom att klättra ner i dessa. Då brunnarna ibland saknade sediment fick man söka sig 20-30 cm upp- eller nedströms denna för att finna dem. Vattenflödet i ledningen kom att påverka resultatets noggrannhet som kunde skattas till ± 3 mm.

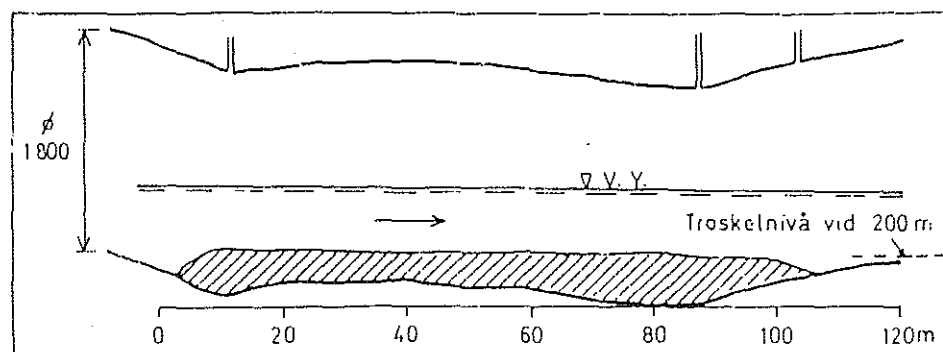


Fig 12. Ledningsprofil utsatt för jämn sättning.
(Lyngfelt, Sörman 1987)

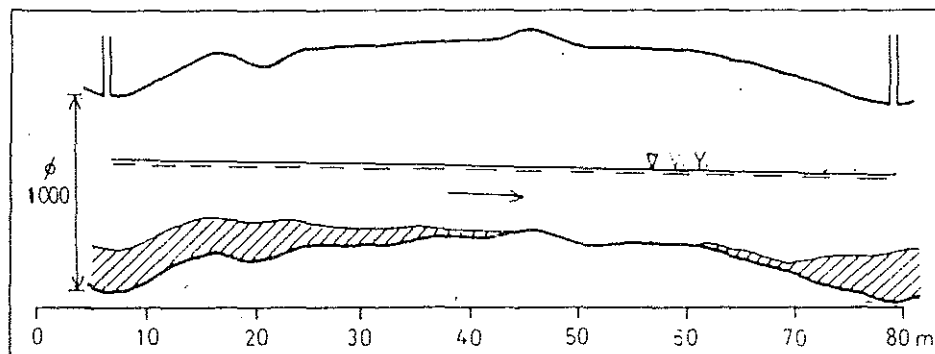


Fig 13. Ojämnt sedimentdjup beroende på lokala
sättningar vid brunn.
(Lyngfelt, Sörman 1987)

Nya sedimentprov togs i slutet av sommaren för att kunna jämföra dem med tidigare siktanalyser. Vid provtagningen användes en

långskaftad skopa. Den trycks ned i sedimentet, stängs och dras upp. Man får då med ett blandat prov av sedimentlagret ned till 5 a 15 cm djup. Om man har djupare liggande lager, innebär det att man får ett prov som skiljer sig från det man fått om hela sedimentets tvärsnitt funnits representerat. Nackdelen är också att man har svårt att få med det översta lättrörliga sedimentlagret eftersom det virvlar ur skopan vid lyftningen. Proven tvättades sedan i en tvättsikt med en maskstorlek på 0.074 mm. Efter torkning siktades proven i standardsiktar varvid en siktkurva kunde bestämmas.

Under sommaren avvägdes brunnarna i anslutning till mätstationerna för att kunna bestämma medelbottenlutningen.

3.2 Nivå och hastighetsmätning

För att kunna studera sambandet mellan sedimentparametrar och flödestillstånd utfördes under sommaren 1987 nivå- och hastighetsmätningar längs de två aktuella ledningssträckorna.

Vi placerade ut nivåmätningssinstrument i upp- och nedströmsbrunnarna, för att kontinuerligt kunna följa de förändringar som uppkom vid regn. Instrumentet som drivs med ett tolvvoltsbatteri består av tre delar. En sond fästs i brunnsväggen på en höjd av 140 cm över ledningsbotten. Den är kopplad till instrumentets mätenhet, och avger med hjälp av denna en impuls som reflekteras i vattenytan. Beroende på vattenytans höjd över botten får man en spänning som varierar mellan 0 och 5 V, där det sista värdet motsvarar en nivå på 100 cm. I mätenheten omvandlas spänningen till ett siffervärde som registreras i den sista delen av instrumentet; dataloggen. I figur 14 visas en förenklad skiss av nivåmätaren och man ser att det även finns uttag för temperaturregistreringar.

Dataloggen är uppbyggd av två delar, logikdel och minnesdel. Logikdelen innehåller en klocka i vilken mätintervallen kan väljas mellan 1 sekund och 1 timme. Den drivs med batterier på 1.2 Ah, och gångtiden är beroende av mätintervall, temperatur och antalet inkopplade kanaler som kan vara upp till 8 stycken. För varje kanal kan upp till 8000 mätvärden registreras. Om bara en kanal används och man har ett mätintervall på 1 minut kommer loggens kapacitet inte att kunna utnyttjas på grund av batterierna.

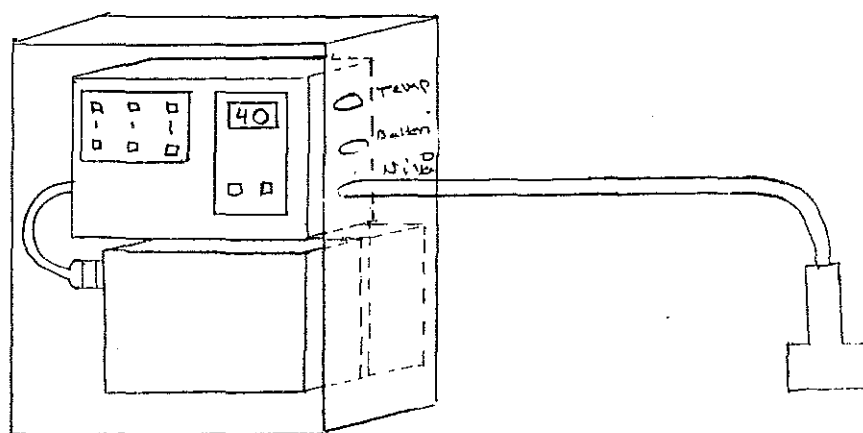


Fig 14. Nivåmätare utvecklad vid CTH.

Under de mätningar som utförts användes ett mätintervall på 1 minut. Bilbatteriernas gångtid var 5-6 dagar, och vanligtvis byttes loggarna ut samtidigt som dessa. I slutet av mätperioden gick det instrument som används för att radera loggen sönder, varvid loggarna inte kunde bytas. Vi kunde konstatera att dataloggarna hade en gångtid på ca två veckor under de aktuella förhållandena. I manualen anges en gångtid på fyra veckor för motsvarande mätintervall. Orsaken till denna halvering av kapaciteten kan härledas till de låga temperaturer som råder i brunnarna.

För att kunna behandla, och välja ut delar av den stora mängd rådata man får, kopplas dataloggen till en dator som läser av värdena och lagrar dessa för senare bearbetning.

Då batteriernas gångtid var varierande placerades ytterligare en mätare i uppströmsbrunnen för att komplettera eller ersätta nivåmätaren. Mätaren som benämnes DETFLOW, består av 2 stycken givare för att mäta nivå respektive vattenhastighet, elektronikenhet samt datalogger. Dataminnet kan lagra ca 16000 mätvärden. Om både nivå och hastighet lagras betyder det ca 8000 flödesvärden.

Eftersom det är nivåerna vid regn som man är intresserad av kan mätaren ställas för ett mätintervall på 1 minut då nivån överskrider ett visst värde. För de lägre nivåerna som motsvarar basflödet får man då ett mätintervall på 10 minuter, och mätarens gångtid förlängs betydligt. När flödesvärdena lästs över till datorn finns det färdiga program för att enkelt kunna ta fram nivå- och flödeskurvor.

4. BEHANDLING AV RADATA

För att kunna bearbeta rådata från fältmätningarna har ett flertal Fortranprogram använts. Då man har utnyttjat liknande mätningar tidigare fanns färdiga program att tillgå. De har utarbetats av S Lyngfelt vid Institutionen för Vattenbyggnad på Chalmers. Ett av dem har sedan kompletterats för att kunna utföra erosionsberäkningar enligt May (kap 1.5). Ur ett stort antal nivåmätningar plockas regn med en längd av upp till sex timmar ut. Dessa indata används sedan för att beräkna ett antal hydrauliska parametrar. Med hjälp av vattennivåerna beräknas först vattenytans lutning. Denna antas därmed vara lika längs med hela ledningen. Sedan beräknas den vattenförande arean samt parametrar som våta perimetern och hydraulisk radie. Flödet Q kan nu beräknas med allmänna friktionsformeln. Friktionskoefficienterna f_m och f_r bestäms ur k_m och k_r med hjälp av Colebrooks formel. Detta sker med iterativ teknik och metoden finns beskriven i en rapport av Sjöberg, Perrusquia, Lyngfelt (1986). Sedimentens ekvivalenta sandråhet har uppskattats genom att jämföra flödesberäkningar för ett antal värden på k_m med Detflowmätningar. När flödet är känt kan övriga hydrauliska och erosions parametrar beräknas vilket redovisas nedan.

Flödet Q

$$Q = VA = A(8g/f)^{1/2} (RS_f)^{1/2} \quad (16)$$

där S_f är vattenytans lutning.

Friktionskoefficient f har beräknats enligt Brooks (ekv 14).

Froudes tal F

Talet har beräknats med den konventionella formeln:

$$F = \frac{V}{(gy_m)^{0.5}} \quad (17)$$

Man tar hänsyn till sedimenten genom att låta $y_m = A/T$ där T är vattenlinjebredden och A är vattenarean.

Skärspänning

Medelskärspänningen har beräknats för en bred kanal.

$$\tau_o = \delta_w g y S_f \quad (19)$$

Kritisk sedimentdiameter för erosion

Den största kornstorlek som kan erodera vid aktuella skjuvspänningar har beräknats. Man utgår från Shields diagram, och tar fram $d_{erosion}$ med hjälp av iterativ teknik.

$$\frac{\tau_o}{(\delta_s - \delta_w)gd} = f \frac{V_* d}{\nu} \quad (20)$$

där

$$V_* = (\tau_o / \delta_w)^{1/2} \quad \text{och } \nu \text{ är vattnets viskositet.}$$

Erosion

Mängden eroderat material som passerar ett tvärsnitt under en viss tidsperiod har beräknats med två olika principer. Den första följer Engelund-Hansens transportekvation (1967).

$$q_b = \phi ((s_s - 1)gd^3)^{1/2} \quad (m^3/m \ s) \quad (21)$$

där

$$\phi = 0.08 \theta^{5/2} / f \quad (22)$$

och

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\delta_m - \delta_w)gd} \quad (23)$$

För att kunna undersöka ekv (4) och ekv (5) gjordes en komplettering av programmet där dessa koncentrationer beräknades. Mängden eroderat material fick man sedan genom följande:

$$q_e = C_v Q \delta_m / T_m \quad (24)$$

där T_m är sedimentytans bredd.

5. STATION NR 1 HUVUDLEDNING MARKLANDSGATAN

Denna station ligger i den övre delen av Högsbo-Järnbrotts områ-
dets huvudledningssystem. Dagvattenledningen som är byggd 1960
har en diameter på 800 mm.

Nivåmätarna var placerade i brunn 8 och brunn 9 vilket framgår av figur 15. För att Detflowmätaren skulle ge relevanta värden var den också placerad i brunn 8 och därmed utsatt för samma flöden.

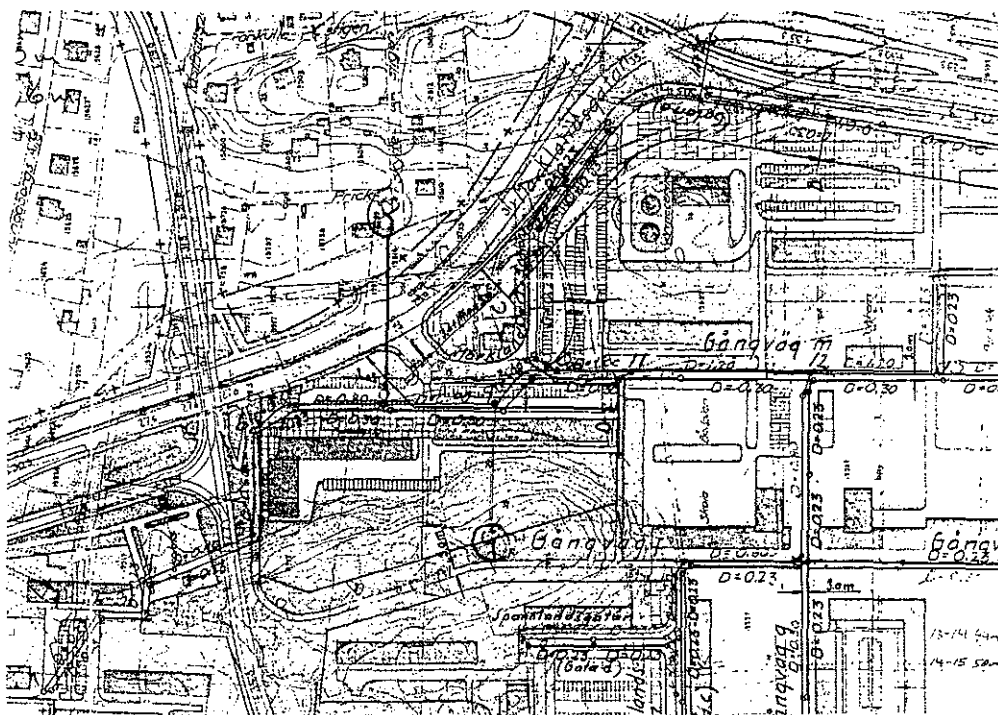


Fig 15. Översiktskarta Marklandsgatan.

Ledningssträckan har valts som station då den visat sig innehålla sediment. De låga lutningarna gör att ledningen blir mycket

känslig för ojämna sättningar med lägre hastigheter och en sediment avlagring som följde. Detta bekräftades också efter det att man avvägt ledningen (Figur 16). (Se bilaga A för avvägningresultat)

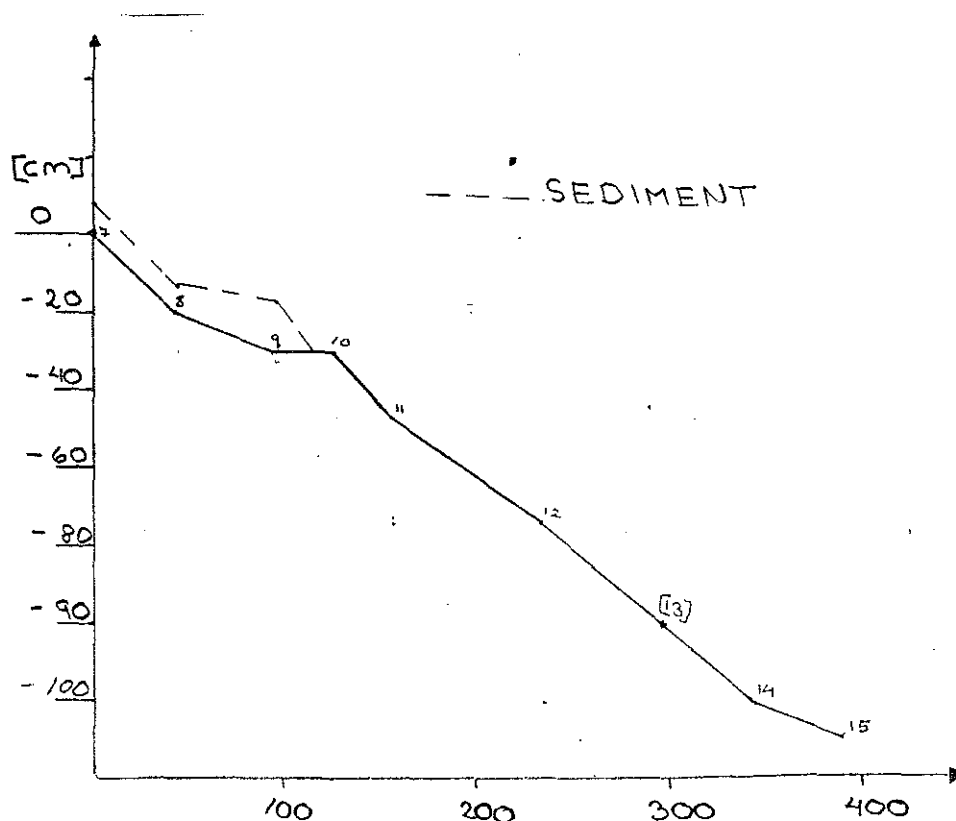


Fig 16. Profil Huvudledning Marklandsgatan

5.1 Hydrologiska förutsättningar

Ledningen sträcker sig uppströms mätavsnittet genom ett tätbebyggt område som till huvuddelen består av flerfamiljshus. Områden i anslutning till ledningen utgörs av bitumenbelagda ytor och delar med vegetation i form av gräs och buskar. Ledningen

börjar 86 meter uppströms brunn 8, vilket utgör 20% av den totala längden. Inga ledningar med en diameter större än 225 mm ansluter sig till huvudledningen mellans mätpunkterna. Detta sker först i brunn 10 varför det inte kommer att påverka mätresultaten.

Försök har gjorts att genom Gatukontorets och VA-verkets arkiv finna det underlag som använts vid dimensionering av ledningen. Dessa uppgifter har man ej lyckats spåra men man fann att avrinningsytan för delen uppströms brunn 8 skulle vara 7 ha.

Med utgångspunkt från denna siffra har man beräknat vilka flöden ett visst regn borde ge i ledningen. Resultatet har plottats mot de aktuella flödesvärden som uppmätts med Detflowmätaren (se kap 2.2). Beräkningarna har gjorts under förutsättningen att avrinningskoefficienten är 1 samt att man gjort ett tillägg på 8.6 l/s för basflödet. I bilaga B visas en plott under ett regn i juni 1987. Regndata grundas på mätningar från en station på Näset. Beräkningarna grundar sig på en del av regnet under en period av 18 timmar.

Om man jämför nederbördens volym med flödets, är den förra i storleksordningen två till tre gånger så stor för de tre delperioderna på 6 timmar. Här har jag inte räknat med den ytmagasinering som uppkommer vid regnets början. Förlusten är i storleksordningen 1 mm. Den tidsförskjutning som finns mellan regn och flöde kan uppskattas genom att förskjuta regnet så att kurvornas förändring bättre överensstämmer med varandra. Detta ger en förskjutning på mellan 40 minuter och 1 timme. Förhållandet mellan de två volymerna varierar fortfarande så kraftigt att man ej kan dra någon slutsats om den. Den dåliga korrelationen mellan de

två kurvorna gör det omöjligt att för denna station utgå från nederbördsdata för att uppskatta flödet i ledningen.

Regn under sommaren kan vara mycket lokala varför avståndet mellan mätstationerna, som är 4 km, bör vara orsaken till olikheten. Detta bekräftas också av den uppskattade tidsförskjutningen som är alldeles för hög då tillrinningstid vanligen beräknas till ca 10 min. Att lägga märke till är den låga avrinningskoefficient på mellan 0.3-0.5 som man får vid beräkningarna. Den är låg med hänsyn till omgivningen, varför man kan misstänka att en avrinningsyta på 7 ha är för stor. Då sommarens regn ej varit i samma storleksordning som de dimensionerande kan man vid dessa få en mindre medverkande avrinningsyta vilket skulle förklara den låga avrinningskoefficienten.

5.2 Hydrauliska förutsättningar

För att skaffa sig fördjupade kunskaper om ledningens beteende ur hydraulisk synpunkt och sammanlänka dessa uppgifter med den aktuella sedimentsituationen har man studerat ett antal regn under juni månad. Då intensitet och varaktighet hos dessa regn är betydligt lägre än de dimensionerande har man inte haft någon möjlighet att studera hur sedimentens närvaro påverkar ledningen när den fylls. I bilaga C har beräkningar gjorts för sedimentens inverkan på kapaciteten. Dessa visar att kapaciteten minskat med 17 % från 700 till 580 l/s.

Rörets ekvivalenta sandråhet har satts till 0.15 mm. För att kunna bestämma sedimentens råhet ks antog man vissa värden. De

resulterande flödena jämfördes sedan med mätningar från Detflow-mätaren. Av detta framgick att k_m var ungefär 30 mm. I figur 17 framgår att man då får något lägre maxflöden men en bättre anpassning i övrigt.

Vattenytans lutning visar för flöden större än 40 l/s mycket små förändringar och är $1 \pm 0.2\%$. (se bilaga D) Vid lägre flöden kan den under korta stunder överskrida 1.5 % och variationen blir mera markant. Dessa förändringar överensstämmer med dem i flödet och kan hänföras till en pumpstation uppströms i ledningen. Vattenytans lutning underskrider rörets medellutning på 1.5 % för de högre flödena. Detta bekräftar att det dämmer vid nedströms brunnen, vilket också kan misstänkas då man studerar figur 16. Ledningen mellan brunn 9 och brunn 10 har en lutning 0.2 %.. Sänkta hastigheter ger större djup i brunn 9 vilket i sin tur påverkar avsnittet uppströms.

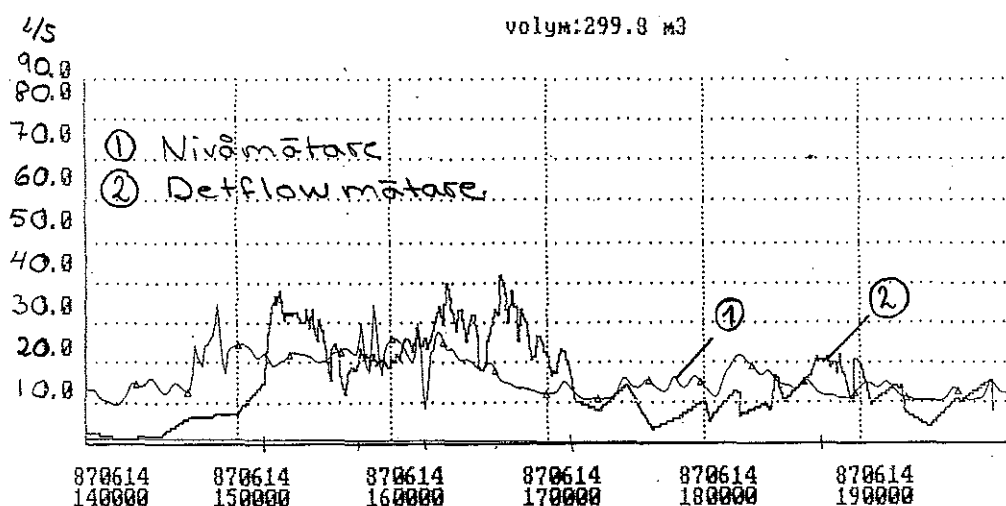


Fig 17. Jämförelse av flöden. Nivå- och Detflow mätare. $k_m = 30$ mm.

Flödena i ledningen har under mätperioden uppgått till ett maximalt värde av 145 l/s. Under en period av 6 timmar var det högsta medelflödet 95 l/s.

Avloppvattnets hastighet fluktuerar mellan 0.4 och 0.7 m/s. Med Froudes tal kring 0.4 har man ett strömmande tillstånd i ledningen. I bilaga E har flöden och hastigheter för ett regn sammanställts. Man ser att de båda parametrarnas förändring är likartad.

5.3 Ledningens sedimentinnehåll

Sediment i brunnarna

Sedimentläget i brunnarna har uppmätts ett par gånger under de senaste åren. I samband med nivåmätningar under sommaren 1987 skedde dessa kontroller mera regelbundet.

Dessa mätningar visar en variation upp till 12 cm för brunn 8 och 6 cm för nedströmsbrunnen. Man bör iakta att då man vid ett tillfälle inte fann några sediment i uppströmsbrunnen, fanns det ca 30 cm upp- och nedströms brunnen lager på 3-6 cm. Avsaknad av sediment i brunnen orsakas av en anslutande ledning i brunnen. Flödet i denna ledning ger upphov till en spolgrop som kommer att variera i storlek.

I samband med att ledningen avvägdes, gjordes en kontroll av sedimentläget i de övriga brunnarna. Man fann att sedimenten försvann i brunn 10 för att sedan återkomma i brunn 14, där vattenhastigheten var lägre än i brunnen uppströms.

Den största förändringen av sedimentdjupet i brunn 8 och 9 uppmättes i mars 1986. Kraftiga flöden orsakade av regn och snösmältning minskade sedimentdjupet med 6 cm under den korta perioden av tre dygn. Motsvarande period under sommaren med ett genomsnittligt flöde på 80 l/s gav ingen märkbar förändring av sedimentdjupet. Detta kan ge en uppfattning om de stora flöden som ledningen utsätts för under kraftiga regn i samband med en eventuell vårflod. I bilaga F har de sedimentdjupsmätningar som gjorts sammanställts.

Sedimentprofil

Mätningar av sedimentprofilen mellan brunn 8 och brunn 9 utfördes vid tre tillfällen under våren 1986. De utfördes av L-O Sörman och S Lyngfelt och nedanstående redogörelse grundar sig på resultat och anteckningar från dessa mätningar.

Den första mätningen utfördes den 21/3. Den framtagna släden till SS-mätaren hade för liten benvinkel, vilket medförde att den kanade upp på sedimenten och gav en felaktig ledningsprofil. Sedimentens profil kunde därför endast bestämmas med kula i vilken

SS-mätaren placerats. Samma sak skedde vid den andra mätningen medan man vid tredje försöket fick släden att fungera och därmed kunde komplettera sedimentprofilen med en ledningsprofil och bestämma sedimenttjockleken. Resultatet av de tre mätningarna finns redovisade i figur 18.

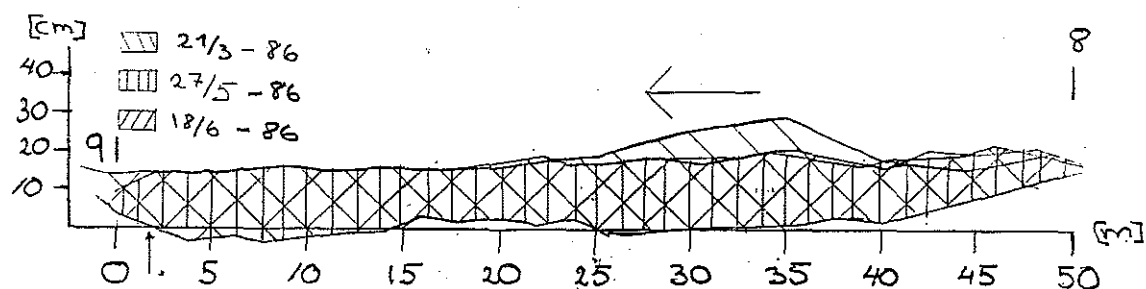


Fig 18. Sedimentprofil Marklandsgatan

Den mest markanta förändringen är den klack som försvunnit mellan den 21/3 och 27/3. Vid andra och tredje mätningen fick man en sedimentprofil som är jämnare än den underliggande ledningsprofilen. Sedimenten medverkar här till att jämna ut sättningarna och motverka att det dämmer lokalt i ledningen.

Av sedimentprofilen framgår att storleken på sättningarna är olika för brunn och omgivande ledning. Som sagts tidigare är det detta som orsakar sedimentavlagringar i ledningen. Sedimentavlagringarna jämnar delvis ut sättningarna och ökar samtidigt bottenlutningen. Medellutningen ökar från 1.5 % till 2.2 %.

Resultatet från de två sista mätningarna ger en sedimentprofil vars förändring med tillfredställande noggrannhet kan bestämmas genom att mäta sedimentavlagringarna i och omkring brunnarna.

Dock måste man ta hänsyn till den klack som registrerades vid första mättillfället, då dess uppbyggnad kan vara periodisk. Vad som orsakar denna oregelbundenhet i den för övrigt relativt jämna ytan är svårt att avgöra. Troligtvis är det en rännstensbrunn som ansluter till dagvattenledningen i denna punkt. Detta har inte gått att bekräfta med hjälp av de ritningar som funnits på Göteborgs gatukontor och VA-verk.

Därmed kvarstår att avgöra om det tillförs nya mängder sediment i punkten eller om klacken är en spolvall som bildats på grund av det tillkommande flödet. Detta flöde är beroende av samma faktorer som huvudflödet i ledningen, varför ett visst samband måste råda mellan dem. Det torde innebära att klacken ej kan vara en spolvall, då det flöde som skulle krävas för en uppbyggnad ger motsvarande högre flöden i huvudledningen med ökad erosion som följd. För att kunna avgöra om klacken existerat under sommaren måste sedimenttillförseln klargöras. Då området kring ledningen domineras av belagda ytor, är sand och grus från dessa den troliga källan för det tillförda materialet. Tillgången på sediment blir därmed säsongsberoende med en markant ökning under vintermånaderna. Av detta kan man dra slutsatsen att om det förekommit någon tillväxt av avlagringar i punkten under vår och sommar, är dessa begränsade till storlek och bör ej inverka på resultat som baseras på mätningar i brunnarna.

Sedimentens sammansättning

En analys av sedimentens sammansättning har i uppströmsbrunnen skett vid tre tillfällen. De skedde under hösten 1984 och under hösten och våren 1987.

I figur 19 har kurvorna från de tre mätningarna sammanställts. Här framgår att sedimentens sammansättning varierar med regn-historian som i sin tur delvis är knuten till årstiderna. Under sommaren har man lägre flöden med en minskad erosion. Även de finkorniga sedimenten kvarstannar till viss del och man får i detta fall en sorterad moig sand. Denna uppbyggnad fortgår fram till vårens islossning och kraftiga regn. Dessa flöden kommer att erodera bort de finkorniga materialet och man får ett ofullständigt sorterat sandigt grus.

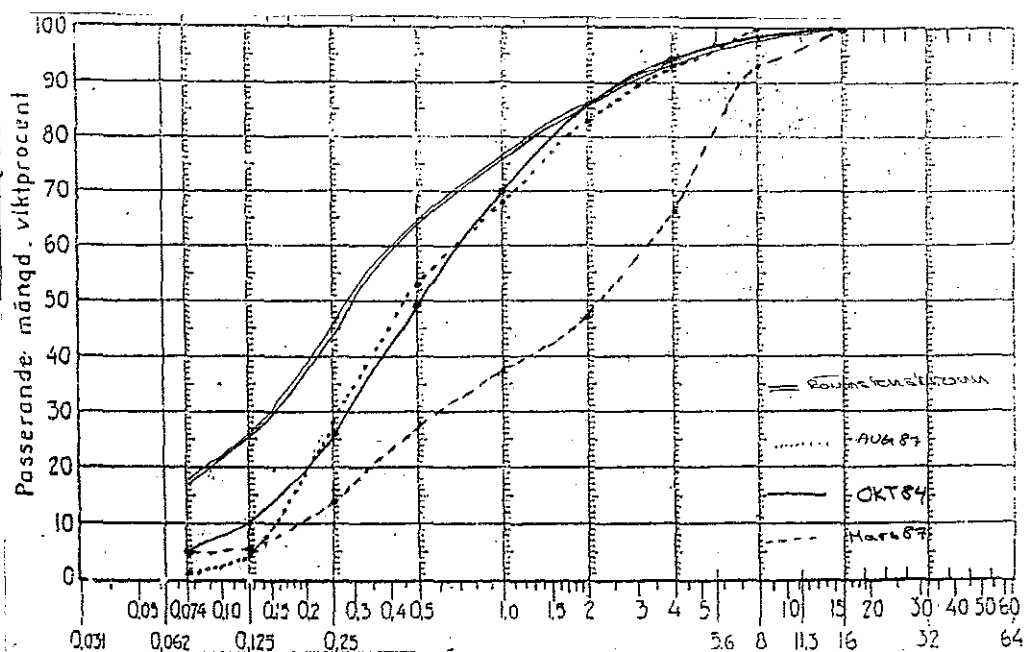


Fig 19. Brunn 8 Okt. 84, Mars 87, Aug. 87

I augusti 1987 gjordes motsvarande analyser på brunn 7 och 9. När dessa jämförs med resultatet i brunn 8 får man en markant skillnad (bilaga G). Att brunn 8 har en större andel finsediment än brunn 7 är naturligt med hänsyn till de högre hastigheter man kan förvänta sig i denna. Att man i brunn 9 fann liknande sammansättning kan ej härledas till ledningarnas lutning i figur (16). Vad som orsakat denna urtvättning, vilket skulle medföra att man har högre hastigheter än i brunn 8 har ej kunnat förklaras.

Av intresse är också kurvornas utseende. Då ledningen sträcker sig genom ett bostadsområde, längs med gågator, har man antagit att en stor del av sedimenten härör från den sandning som sker vintertid. Denna sand kommer efter hand att spolas ner, via brunnslock och trasiga eller fulla rännstensbrunnar, i ledningen. I ett examensarbete av Bo Johnson (1982) gjordes en siktanalys på innehållet i en rännstensbrunn i Landala. Denna kurva finns redovisad tillsammans med mätningarna från brunn 8. Det framgår att sanden och andra sediment från omgivningen kan utgöra källan till sediment i ledningarna. Därmed skulle en stor andel av finsedimenten som kommer in eroderas bort även under de lägre flöden som förekommer under sommaren.

5.4 Erosion

Denna rapport tar enligt vad som sagts tidigare endast upp tre stycken erosionsteorier. Inom området finns ett flertal åsikter om hur transportfunktionen beter sig. Dessa uttrycks vanligen med hjälp av empiriska ekvationer som utgår från hastigheten eller de aktuella skjuvspänningarna i ledningen. Många av de ekvationer som framtagits bygger på omfattande mätserier inom vissa flödes och diameter intervall.

Vid fältmätningar har man inte samma möjligheter att studera erosionsprocessen som vid laboratorieförsök. Det blir därmed mycket svårt att skaffa sig en bild över hur bottenkonfigurationerna varierar med olika flöden. Genom att använda figur 8 i kapitel 2 kan en uppskattning dock göras då hastigheten och vattendjupet är känt. Med ett Froudes tal kring 0.4 hamnar man i ett område där räfflor och eventuellt dyner kan utbildas.

Jag har valt att undersöka Mays erosionsteori, då denna framtagits för att kunna användas på avloppsledningar med en lägre sedimentkoncentration, än vad som använts i tidigare försök. Som jämförelse används även ekvation (4) fast den enligt May endast gäller för högre koncentrationer av sediment. Jag valde att jämföra dessa ekvationer med Engelund-Hansens erosions-teori för att se hur bra de överensstämmer. I den sista teorin tar man hänsyn till både suspenderat och bäddtransporterat material.

Då man använt sig av Engelund-Hansens Och Mays teorier har sedimentens diameter satts lika med d_{50} . Detta medför att resultaten avviker från verkligheten. Skillnaden beror på att en del av sedimentpartiklarna är större och ej kommer att erodera. Dessa partiklar skyddar underliggande lager, som delvis skulle erodera vid det aktuella flödet.

Att ovan förda resonemang stämmer framgår då man undersöker den kritiska diametern för erosion enligt Shield för de flöden man hade under sommaren. Vid dessa fick man en kritisk diameter som varierade mellan 1.5 och 3.8 mm. Om även basflöden skulle kunna erodera partiklar upp till 1.5 mm skulle man under sommaren ej kunna få den förskjutning av siktkurvan mot större andel fint material som uppenbarligen skett.

Om man jämför mängden eroderat material man får med ekvation (4) och ekvation (21) kommer avvikelser emellan dem att bero av y/D . Vid låga flöden där $y/D < 0.2$ kommer mängden eroderat material att bli störst för Engelund-Hansens teori. När flödet sedan ökar och y/D ligger kring 0.3 stämmer de båda ekvationerna bra överens, för att sedan åter skiljas när flödet ökar ytterligare. I de

kurvor som visas i bilaga H är det maximala flödet för den övre kurvan 146 l/s vilket motsvarar ett värde på y/D som är 0.43. I området $0.1 \leq y/D \leq 0.45$ kommer värdet enligt ekvation (4) att som mest avvika med 10% från det värde man erhåller med ekvation (21). För $y/D \geq 0.45$ får man antaga att skillnaden kommer att öka ytterligare. Detta visar dock att man med hjälp av ekvation (4) på ett enkelt sätt kan beräkna erosionen i ledningen för de lägre flödena.

Orsaken till att man får ett större fel ju mer man avlägsnar sig från punkten $y/D = 0.3$ beror på den approximation som gjorts vid omskrivning av ekvation (2). Genom att istället använda figur 6 får man ett resultat vars avvikelse ej är beroende av flödet.

Vad som ytterligare bekräftar att denna teori har en förankring i verkligheten är att den eroderade mängden sediment motsvarar en koncentration C_s som varierar mellan 9 och 30 ppm av flödet. Approximativa beräkningar som gjorts på avloppsledningar i fält av May och ytterligare tre oberoende källor visar att medelkoncentrationen för bäddtransporterade sediment ungefär är 20 ppm.

Om samma jämförelse görs för Mays empiriska ekvation (5) får man en erosion som bara är 2-7 % av Engelund-Hansens. Koncentrationerna var mycket låga. Det högsta värde man uppnått var $C_v = 2.3$ ppm. Då man använt sig av koncentrationer upp till 80 ppm vid försöken som låg till grund för framtagandet av ekvationen låg de koncentrationer som kunde förväntas i ledningen inom detta intervall. Däremot låg inte kvoten d/R inom det intervall man använt sig av för att beräkna potensen 0.6 varför denna troligen måste ändras. I bilaga I har man skattat i vilken storleksordning potensen bör ligga, men ingen noggrann undersökning har gjorts på vilka fel detta värde ger för de olika flödena. Även potensen i faktorn $1 - v_0/V_m$ har undersökts då värden för Marklandsgatan låg i gränsen för det intervall som användes av May. Som utgångspunkt för beräkningarna har man använt den mängd eroderat material som erhållits enligt ekvation (21). Resultatet av dessa beräkningar visar att potensen 4 bör ändras till -1.3 och 0.6 till 0.14. Dessutom måste konstanten 0.0205 i ekvation (5) minskas till $1.41 \cdot 10^{-3}$.

6. STATION NR 2 VON UTFALLSGATAN

Då detta kapitel är mycket likt det föregående med hänsyn till uppbyggnad och resonemang kommer jag här endast att redovisa resultaten då dessa bygger på samma tankegångar som förut.

Denna station ligger delvis utmed Säveån parallellt med Von Ut-fallsgatan. Den kombinerade dag- och avloppsledningen är byggd 1954 och har en diameter på 800 mm. Ledningen sträcker sig längs ett flertal industrier och tar därmed upp en del av dess spillvatten. Uppströms ledningsavsnittet där mätningarna utförts ligger Sävenäs sopförbränningsstation.

Ledningen har som station 1 problem med sedimentavsättningar vilket gett lägre kapacitet. Under sommaren utfördes nivåmätningar mellan tre brunnar. Instrumenten var placerade i brunn 4 och 6 vilket framgår av figur 20.

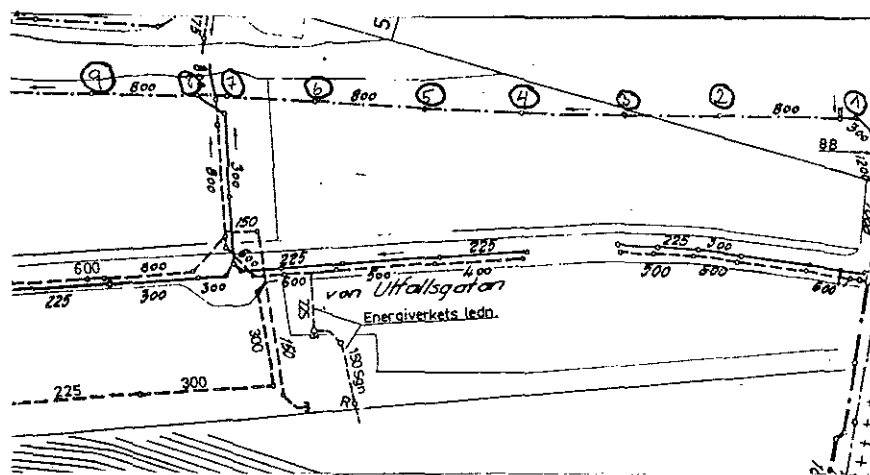


Fig 20. Översiktskarta Von Utfallsgatan

På grund av problem med framkomligheten har man vid denna station inte haft möjlighet att avväga brunnarna lika långt nedströms. I den sista brunnen man kunde nå fanns dock inga sedimentavsättningar och vattnets hastighet hade åter börjat öka, varför man kan anta att man nedströms denna punkt ej finner faktorer som kan påverka ledningssträckan uppströms.

I figur 21 får man en förklaring av de aktuella problemen. Mellan brunn 4 och 7 är lutningarna låga till måttliga. Mellan brunn 7 och 9 får man dock en negativ lutning. Dessa mycket kraftiga och ojämna sättningar har möjliggjort en avsättning av stora mängder sediment. (Se bilaga A för avvägningsresultat)

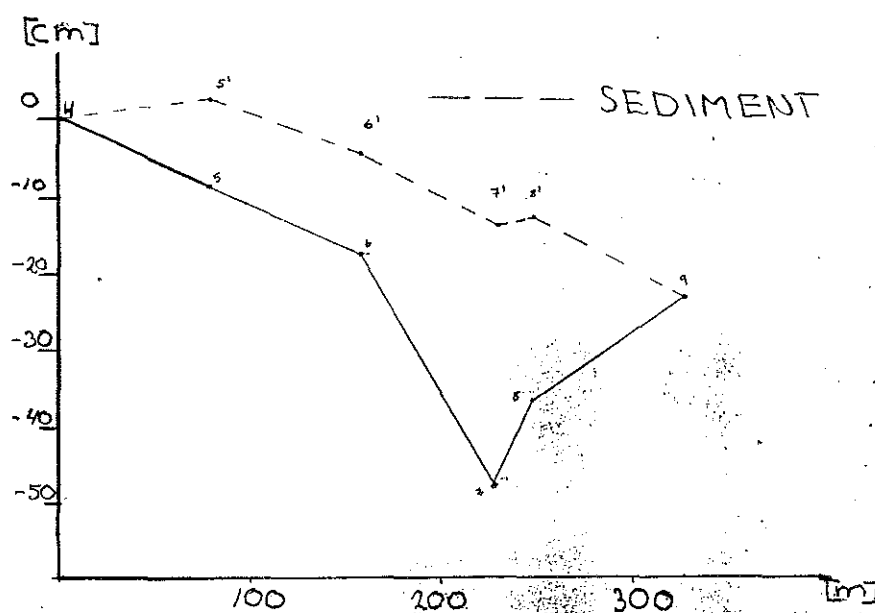


Fig 21. Profil Von Utfallsgatan

6.1 Hydrologiska förutsättningar

Ledningen sträcker sig uppströms mätavsnittet genom beväxt mark i anslutning till Säveån. Denna sträcka som är ca 300 m är omgiven av jord beväxt med vass varför avrinningskoefficienten är relativt låg. Ledningen viker sedan av söderut och följer nu bitumenbelagda ytor tills den korsar Partilleleden. Även därefter ligger den i anslutning till gator och bostadsområden med högre avrinningskoefficient. Denna sträcka är ca 1500 m lång vilket ger en sammanlagd ledningssträcka på 1800 m uppströms mätområdet.

I VA-verkets arkiv har man även för denna station funnit den dimensionerande avrinningsyta som använts för den del av ledningen som är aktuell. Avrinningsytans storlek är 16 ha, men här tillkommer även ett flöde orsakat av hushållen som är anslutna till ledningen. Värdet uppgår till 1100 personekvivalenter.

Vid en mätstation som endast ligger 1 km söder om ledningssträckan finns regndata att tillgå. Då regnperioderna i augusti var korta kunde jag ej studera något längre tidsintervall. Jag har därför valt att jämföra tre 6-timmars perioder i mitten av månaden. Av Detflow mätningarna framgår att basflödet i ledningen i genomsnitt uppgår till 8.3 l/s. Vid denna station framgår tidsförskjutningen bättre än vid Marklandsgatan. Även om nederbördens volym inte följer flödeskurvorna, får man ett förhöjt flöde 30-50 min efter regnets början. Korrelationen är betydligt bättre än för station 1 och om man jämför volymerna visar dessa på en avrinningskoefficient kring 0.6. Med hänsyn till omgivningen är detta rimligt, då man även här har en viss felmarginal orsakad av lokala intensitetsskillnader hos regnet. Även för denna station finner man att uppskattad tillrinningstid är för stor.

Med utgångspunkt från det som sagts anser jag att man för denna station, om tidsförskjutningen beaktas mycket väl, kan skatta flöden i ledningen med hjälp av nederbördsinformation. Den flödes- och nederbördsdata som ligger till grund för ovanstående påstående finns redovisade i bilaga B.

6.2 Hydrauliska förutsättningar

Nivåmätningar utfördes på denna station under augusti och september månad. Under denna tid hade regnperioderna blivit kortare jämfört med juni månad och varaktigheten var vanligtvis mindre än 6 timmar. Dessa relativt hastiga förändringar i flödet har gjort att man ej kunnat uppnå de stabila förhållanden som man nådde vid Marklandsgatan.

Av figur 21 framgår att sedimenten i delen nedströms mätstationen har en stor betydelse ur kapacitetsynpunkt. I brunn 7 och 8 fann man i medeltal 30 cm sediment vilket minskar flödesarean med 35 %. I bilaga C finns redovisat den sänkning av kapacitet man får på grund av sedimentens närvaro. Det framgår att kapaciteten minskar med 18 % från 523 till 426 l/s.

Rörets ekvivalenta sandråhet har för denna ledning satts till 30 mm. Detta är samma värde som för Marklandsgatan. Det tyder på att de sediment som avlagras har en råhet kring detta värde. Av figur 22 framgår att man valt lägre maxflöde för att kurvan bättre skall överensstämma vid lägre flöden. Det flowmätaren tar ej hänsyn till den flödesutjämnning som sker i ledningen varför den beräknade flödeskurvan bättre bör överensstämma med verkligheten.

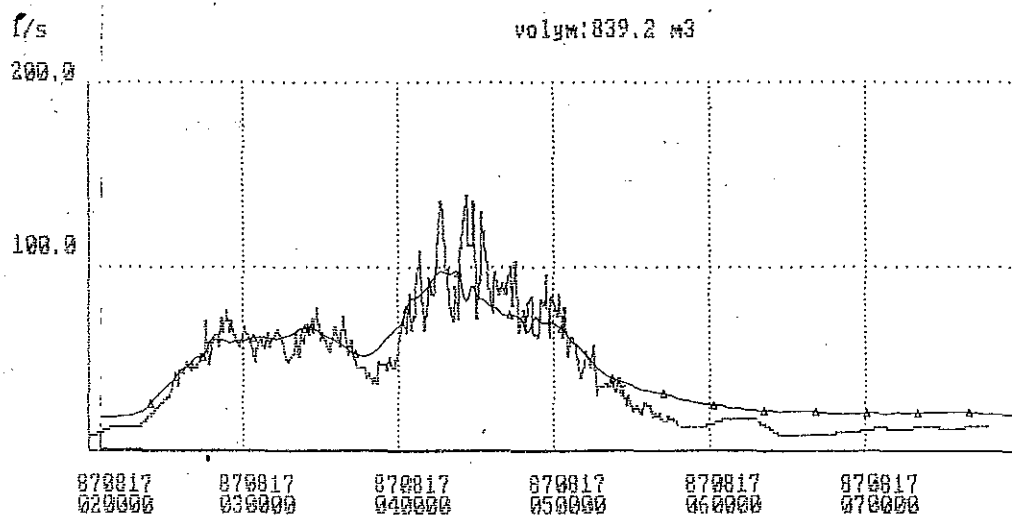


Fig 22. Jämförelse av flöden. Nivå- och Detflow
mätare. $k_m = 30$ mm.

Flödena i ledningen har under mätperioden uppgått till ett maximalt värde av 105 l/s vilket motsvarar ett vattendjup av 29 cm. Vid högre flöden har man mycket snabba och relativt stora nivåförändringar som påverkar dessa. De snabba fluktuationerna kommer att påverka hastigheten som minskar respektive ökar med flödet. (bilaga E).

Vad som orsakar dessa rörelser i flödesbilden är svårt att förklara. Då man ej finner oregelbundenheten hos basflödet kan den ej hänföras till en pumpstation uppströms som slår på regelbundet. Då dessa fluktuationer varierar mellan 10-40 l/s under tidsrymder ned till 10 minuter för det högre värdet, rör det sig här om stora procentuella förändringar.

Hastigheterna i systemet varierar mellan 0.3 och 0.7 m/s. Detta ger ett Froudes tal mellan 0.3 och 0.5 vilket innebär att man har strömmande tillstånd i ledningen. Både vattenhastighet och Froudes tal är i samma storleksordning som för Marklandsgatan.

Vattenytans lutning förändras i denna ledning med flödet. För de lägre flödena kring 20 l/s är lutningen omkring 0.6 %. och motsvarande kring 100 l/s är 1.7 %. Av bilaga D framgår att flödes- och lutningskurvorna är mycket lika till utseende. Ledningsprofilens lutning är 1.1 %. mellan brunn 4 och brunn 6. För flöden över 40 l/s överskrider vattenytans lutning detta värde. Då det är ovanligt att man har större lutning på vattenytan än på ledningen kan eventuella fel ha uppkommit då man beräknat medelvärden över en sträcka med brunn.

De lägre flödena påvisar att det dämmer i ledningen, vilket överensstämmer med sedimentbilden i systemet.

6.3 Ledningens sedimentinnehåll

Sediment i brunnarna

Av de åtta brunnar som man undersökt i anslutning till mätsträckan, visade sig brunn 1 och 4 inte innehålla några sediment. I de övriga brunnarna fann man mellan 2 och 35 cm sediment. Dessa mätningar redovisas i bilaga F.

Av den framgår att man i brunn 6 och längre nedströms haft en långsam tillväxt av sediment. Mest markant är denna i brunn 8 där man vid ungefär samma tidpunkt på året har en skillnad på 9 cm.

Denna förändring har gett upphov till en bottenyta med negativ lutning mellan brunn 7 och 8. Avsaknad av sediment i brunn 4 kan förklaras genom den sättning som skett av ledningen på bägge sidor om brunnen. Sedimenten har successivt legat mer oskyddat med en bortspolning som följde.

Uppströms brunn 4 har en liknande tillväxt av sedimentdjupet skett. Vid de två första mätningarna som avskiljdes av en period med normalt lägre flöden, har man fått en tillväxt med 1-2 cm. Under de efterföljande två åren har ytterligare sediment avlagrats. Trots att man haft erosion under de kraftiga vårflödena, har mängden sediment ökat. Detta tyder på ändrade flödesförhållanden eller att denna ledningsträcka ej uppnått en jämvikt mellan sedimentens avlagring och erosion. Med hänsyn till basflödets låga värde samt att ledningen rensats 1984 gör det senare mera troligt.

Som framgår av figur 21 har sedimenten en stor betydelse för utjämning av de stora sättningsskillnader som man finner i ledningssystemet. Även om de minskar ledningens kapacitet genom att minska den användbara sektionens yta, samt genom att bidra till en högre råhet, motverkas detta av de högre hastigheter med vilket vattnet nu kan transporteras. Då nivåmätningar ej utförts på dessa sträckor är det svårt att avgöra hur sedimentens närvaro påverkar kapaciteten.

Sedimentprofil

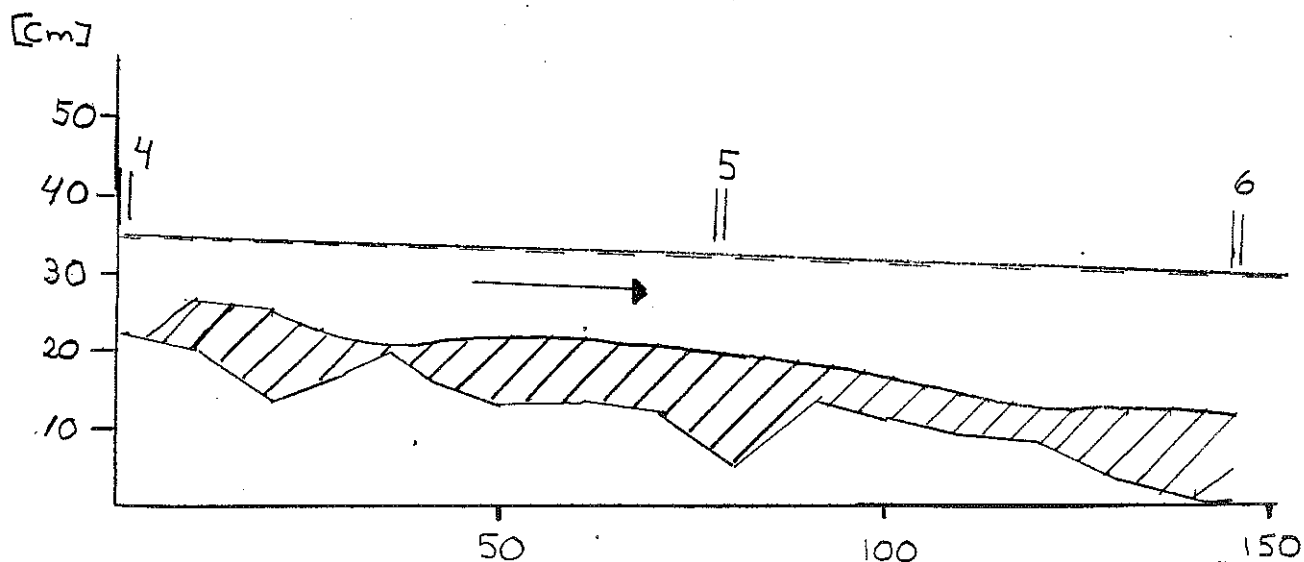


Fig 23. Sedimentprofil Von Utfallsgatan

Mätning av sedimentprofilen skedde mellan brunn 4 och 6 under juni 1986. Resultatet som framställts i figur 23 visar en ledningssträcka med lokala sättningar upp till 10 cm. Dessa har sedan utjämnats genom en avlagring av sediment och ytan har nu fått en jämnare lutning som i medeltal uppgår till 0.5%..

Av figuren framgår att sedimentuppbyggnaden börjar först en bit nedströms brunn 4. Detta påverkar i högsta grad möjligheterna att ur mätningar från brunn 5 utläsa sedimentavlagringens förändring längs hela ledningen och därmed eventuell erosion i ledningen. Avsaknaden av sediment orsakas av en anslutande ledning vars flöde spolar bort sedimenten.

Sedimentens sammansättning

En analys av sedimentens sammansättning har skett i brunn 5 vid två tillfällen. Båda proven har tagits under hösten varför variationen mellan årstiderna ej går att undersöka. I bilaga G finns kurvor från en analys av brunnarna i systemet. Här finner man vissa skillnader som förklaras nedan.

I november fann man en sorterad moig sand i brunn 5. Andelen sediment finare än 0.5 mm var 75%. Två år senare fann man fortfarande en moig sand. Andelen finmaterial ≤ 0.5 mm hade nu minskat till 52%. Denna urtvättning av de finare fraktionerna visar på en ökad hastighet i systemet. Resultaten från analyserna visas figur 24.

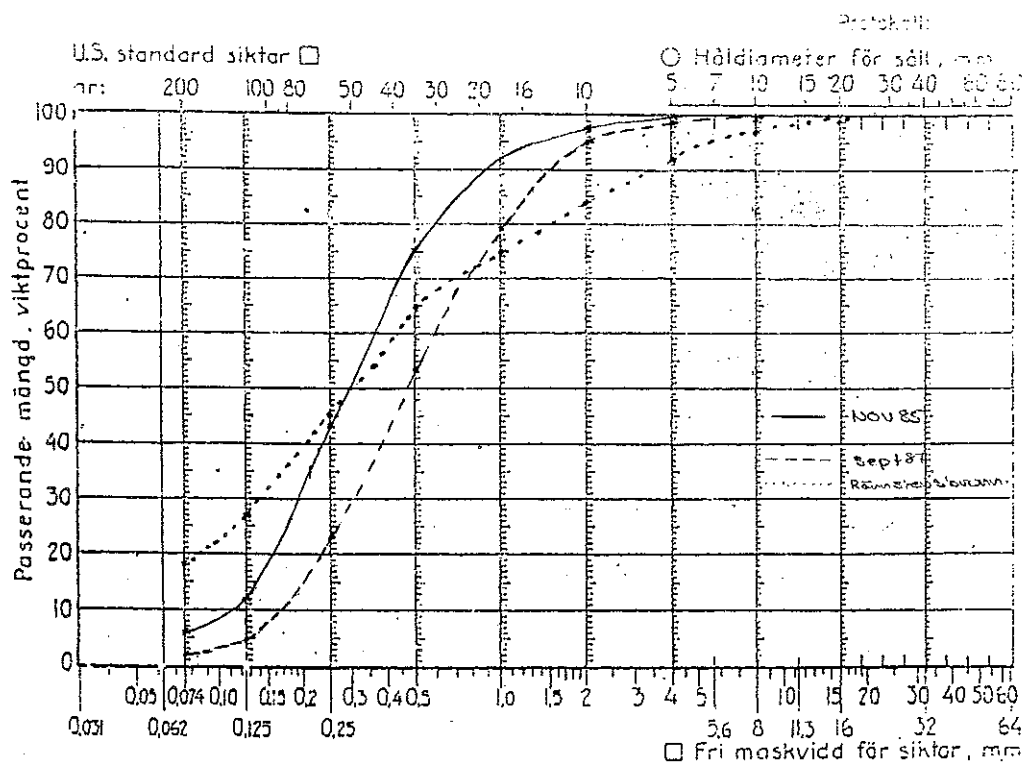


Fig 24. Brunn 5 Nov.85, Sept.87

När ledningen renspolades 1984 innebar det att sättningarna mellan brunn 7 och 9 blev mycket markanta, med en lägre hastighet som följd. Efterhand som sedimenten avlagrats och jämnat ut sättningarna har vattenhastigheterna ökat med en erosion av allt grövre fraktioner som följd.

I samma diagram har en kurva från innehållet i en rännstensbrunn lagts in. Kurvan som är den samma som i föregående kapitel saknar de grövre fraktioner som finns i systemet varför den ej kan representera det material som kommer in i ledningen. Den dåliga korrelationen mellan kurvorna kan hänföras till den omgivning som finns kring ledningen. Sand från vägbanor är inte den enda källan av betydelse i området vilket förklarar närvaron av de grövre fraktionerna.

Av bilaga G framgår det att man får ett allt finare material när man närmar sig brunn 8. Detta är naturligt med hänsyn till den dämning som sker i denna punkt med en lägre hastighet som följd.

6.4 Erosion

Med de flöden man haft i ledningen under sommaren framgår av Shields diagram att den kritiska korndiametern för erosion varit 4.5 mm. Vid de flöden man uppnått även vid låga regnintensiteter sjunker diametern till 1 mm. Om dessa värden motsvarar verkligheten innebär det att det skulle räcka med dessa flöden under sommaren för att erodera bort upp till 90 % av sedimenten i ledningen. Då detta ej är fallet, får man ytterligare belägg för det inbördes skydd som sedimenten utgör.

Vid denna station har vattenhastigheterna varit i samma storleksordning som för Marklandsgatan. Samma värde på den ekvivalenta sandråheten och Froudes tal leder till att man i figur 8 hamnar inom det område där räfflor utbildas längs sedimentytan. De korta regn man haft under mätperioden har stor betydelse för mängden eroderat material. Flödets varaktighet har stor betydelse och det har visat sig att det inte alltid är de kraftigaste flödena som ger den största erosionen då de vanligtvis är kortvariga.

Mängden eroderat material blir vid denna station enligt ekvation (21) ett till två gånger så stor som för ekvation (4). Skillnaden blir oberoende av faktorn y/D och därför påverkas inte felet av storleken på flödet. Erosion enligt ekvation (4) är i detta ledningssystem i samma storleksordning som tidigare. Vattenytans lutning med ett högre maxvärde för Von Utfallsgatan än för Marklandsgatan påverkar erosionen enligt Engelund-Hansen. Skjuvspänningarna påverkas av kvadraten på lutningens förändring. Vid en vattenlutning kring 0.6 % ger de bägge ekvationerna samma mängd eroderat material.

Hastigheten ökar samtidigt som lutningen vilket påverkar ekvation (4). Dess förändring är inte lika stor som för ekvation (21) varför den senare ger en större mängd eroderat material. I bilaga H har de två erosionsteorierna sammanställts med en plott över vattenlutningen. Man ser att när denna ökar kommer de två kurvornas derivator att skiljas åt och ekvation (21) ger en större erosion.

När motsvarande jämförelse görs för Mays ekvation (5) får man samma avvikelse som för station 1. De beräknade koncentrationerna

blev för de högsta flödena ca 10 ppm vilket ligger inom ramen för de försök som ekvationen baserats på. Faktorn d/R är för Von Utfallsgatan en tiopotens lägre än vad som användes vid försöket. Värdena på faktorn $1-v_0/V_m$ sammanföll delvis med Mays värden. I bilaga I redovisas beräkningarna för att bestämma nya värden på potensen x i $(d/R)^x$, y i $(1-v_0/V_m)^y$ samt konstanten framför uttrycket i ekvationen. Som utgångspunkt för beräkningen har mängd eroderat material enligt ekvation (21) använts. Resultatet visar att potensen x bör sättas till 0.15 och y till -1.5. Konstanten har beräknats till $1.08 \cdot 10^{-3}$.

En jämförelse med motsvarande värden för Marklandsgatan visar att dessa är av samma storleksordning. Mays ekvation skulle därmed ha anpassats till ett ledningssystem med större diameter och lägre hastigheter.

6. RESULTAT

Här följer en sammanställning av resultat och iakttagelser som gjorts i de två föregående kapitlen.

Metoden att använda regndata för att uppskatta flöden i ledningen har visat mycket varierande resultat. Som underlag måste man ha utfört nivåmätningar i ledningen för att få en referensram. Mätstationen där uppgifterna om regnet insamlats måste ligga mycket nära den aktuella ledningen. Det är också mycket viktigt att man använder sig av rätt avrinningsyta. Dess storlek påverkas av förhållandet mellan aktuellt och dimensionerande regn.

Vattenytans lutning och därmed hastigheten påverkas i mycket hög grad av hur respektive ledningssträcka ser ut nedströms. I flacka områden där den ursprungliga lutningen på ledningen varit låg, ger även lokala sättningar upphov till dämning. Då detta ger lägre hastigheter sker en ökad avlagring av sediment. Det visar sig att dessa sediment i sin tur kan utjämna sättningarna.

Av de mätningar som gjorts framgår att ett system tenderar att nå en viss jämvikt mellan avlagrade sediment och flödesförhållanden. Ett system som nått denna jämvikt har avlagringar vars tjocklek varierar med regnhistorian, men för varje sådan håller sig kring samma värden. I system som nyligen rensats finner man för samma regnhistoria en tillväxt av sedimentavlagringarna från år till år. Denna regnhistoria är vanligtvis kopplad till årtiderna och sedimentavlagringarna skulle därmed variera med dessa. De mätningar som gjorts visar på ett sådant sammanhang men mätunderlaget är begränsat.

Denna jämvikt framkommer även vid siktanalyser. Fördelningen mellan fraktioner varierar med årstiderna men ändras inte mycket från år till år. Andelen material mindre än 0.5 mm är mindre än 50 %. I ett system som rensats vandrar kurvan från ett år till ett annat mot större andel grovt material. Hur länge detta fortgår blir beroende av förhållanden i systemet. Dock verkar den uppnå den punkt som beskrivits ovan. Mätunderlaget för en koppling mellan regnhistoria och årstid är även här begränsad.

I inledningen av denna rapport beskrevs en möjlighet att använda siktanalys som en funktionskontrollmetod av ett system. De förhållanden som finns vid station 2 motsäger inte denna metod. Även om siktkurvan nått balanspunkten under sedimenttillväxt har den inte passerat den. Ledningen vid Marklandsgatan uppfyller också metodens villkor.

De försök som gjorts med att använda två empiriskt framtagna ekvationer för erosion visar att dessa blir beroende av variabler som d/R och $1-v_0/V_*$. Vad som är rätt mängd erosion i ledningen är naturligtvis svårt att säga. Laboratorieförsök visar att mängden eroderat material i avloppsledningarna borde vara större än vad Mays ekvation påvisar.

Flödena i ledningarna kom att ge ett Froudes tal mellan 0.4 och 0.5. Med vattenhastigheter mellan 0.3 och 0.7 m/s har man kunnat skaffa sig en bild av de bottenkonfigurationer som funnits i systemen. Vid de bägge stationerna borde det med hänsyn till de hydrauliska förhållandena vara räfflor vilket man också iakttog vid Marklandsgatan.

7. REFERENSER

Graf W.H. Hydraulics of sediment transport. M C Graw Hill New York 1971

May R.W.P. Sedimenttransport in sewers. Report No IT 222 Feb 1982

Cedervall K. Larsen P. Hydraulik för väg och vattenbyggare.

Laursen E.M. The hydraulics of a storm drain system for sediment transporting flow. Bull No 5 Iowa Highway Res. Board 1956.

Ribberink J.S. Experiments with non-uniform sediment in case of bed-load transport. Delft Tekniska Högskola Rapport No 83-2 (1982)

Sörman L-O. (1985) Sedimentation och erosion i ledningssystem.
Förstudie: Inventering och analys av driftstörningar, rensningsteknik och spolschema för avloppsledningar.
Inst. för Vattenbyggnad CTH. Rapport C:23.

Sörman L-O. Lyngfelt S. Sediment i avloppssystem.
-Ett nygamalt bekymmer inom ledningsteknikområdet. (1987)

Lyngfelt S. Measurement of sewer sediment elevation. (1987)

Henderson R.J. (1984A) A guide to hydraulic roughness in sewers.
Water Research Center, External Report No 131 E, UK.

Henderson R.J. (1984B) The hydraulic roughness in used sewers.

Perrusquia G. Lyngfelt S. Sjöberg A. Flödeskapacitet hos avlopps-
ledningar delvis fyllda med sediment. En inledande experimen-
tell och teoretisk studie. Inst. för Vattenbyggnad CTH.
Raapport B:48 (1986).

Johnsson B. Rännstensbrunnars betydelse för dagvattnets
föroreningsbelastning.
Examensarbete Institutionen för Vattenbyggnad 1982

System II ST Sediment transport module. A short description.
Danish Hydraulic Institute

BILAGA A AVVÄGNINGSRESULTAT

Marklandsgatan

Von Utfallsgatan

	dH	Längd	Lutn.		dH	Längd	Lutn	sed.
	cm	m	%.		cm	m	%.	cm
Brunn 7				Brunn 4				0
	20.4	42	4.80					
Brunn 8				Brunn 5	17.4	160	1.09	11
	7.3	50	1.50					
Brunn 9				Brunn 6				13
	0.5	30	0.17		29.9	68	4.40	
Brunn 10				Brunn 7				34
	16.3	32	5.10		-11.3	22	-5.14	
Brunn 11				Brunn 8				24
	27.0	78	3.50		-14.6	78	-1.87	
Brunn 12				Brunn 9				0
		63		Inklusive sediment				
Brunn 13	46.5		4.30	Brunn 4				
		44						
Brunn 14				Brunn 5	6.4	160	0.40	
	5.8	50	1.20					
Brunn 15				Brunn 6				
					8.9	68	1.31	
				Brunn 7				
					-1.3	22	-0.59	
				Brunn 8				
					9.4	78	1.20	
				Brunn 9				

BILAGA B DIAGRAM REGN-FLÖDE

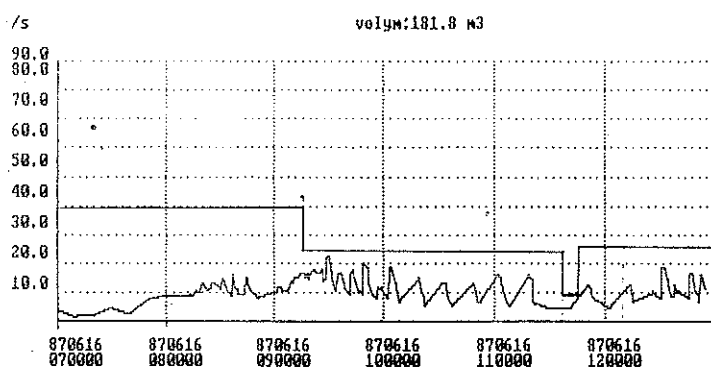
Marklandsgatan

Avrinningsyta 7 ha

Basflöde 8.6 l/s

Avrinningskoefficient x

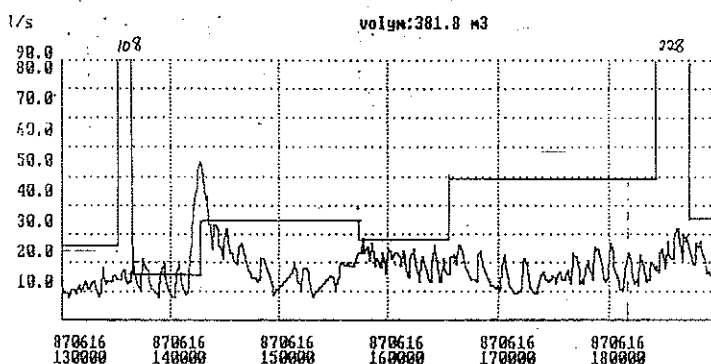
När volym regn beräknats har man tagit hänsyn till en tidsförskjutning på 40 minuter.



Volym regn 606.0 m³

Volym flöde 181.8 m³

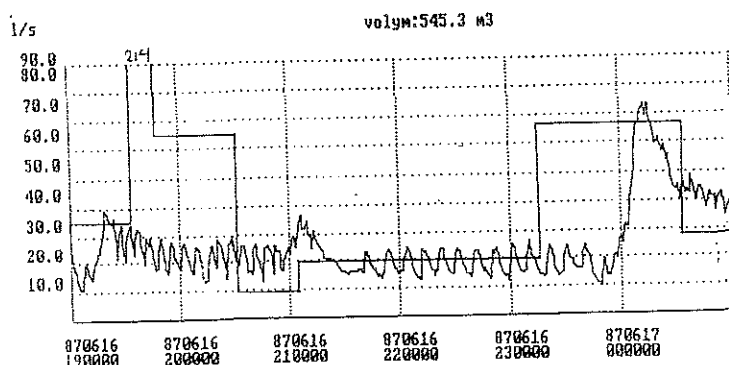
$$x = \frac{181.8}{608.0} = 0.30$$



Volym regn 791.0 m³

Volym flöde 381.8 m³

$$x = \frac{381.8}{791.0} = 0.48$$



Volym regn 1136.0 m³

Volym flöde 545.5 m³

$$x = \frac{545.5}{1136.0} = 0.48$$

$$\bar{x} = 0.42$$

Von Utfallsgatan

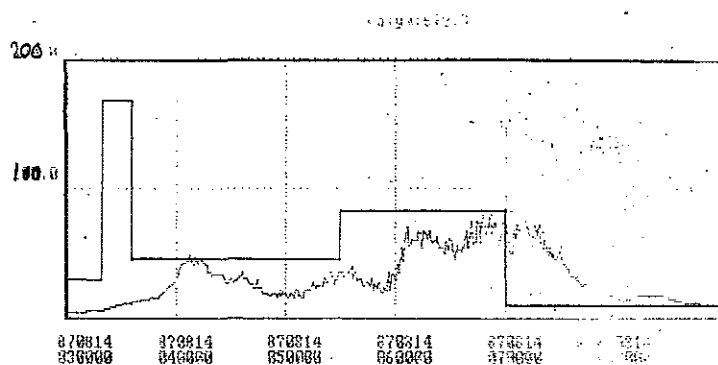
Avrinningsyta 16 ha

Belastning 1100 Pe

Basflöde 8.6 l/s

Avrinningskoefficient x

Tidsförskjutning 30 minuter

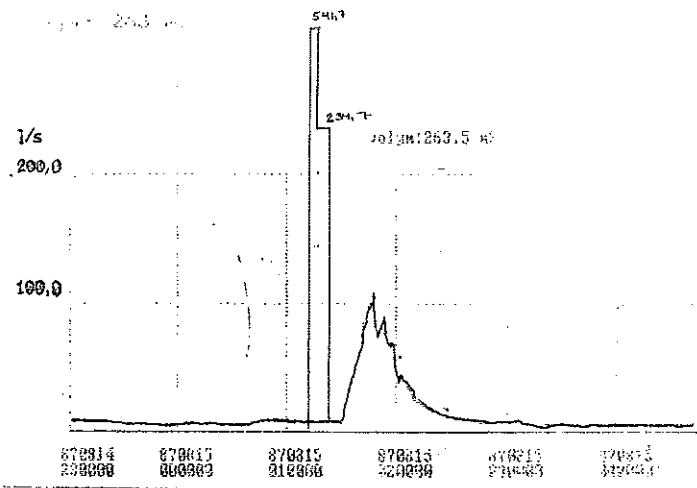


Volym regn 1293.0 m³

Volym flöde 670.3 m³

$$x = \frac{670.3}{1293.0} = 0.52$$

$$\bar{x} = 0.42$$

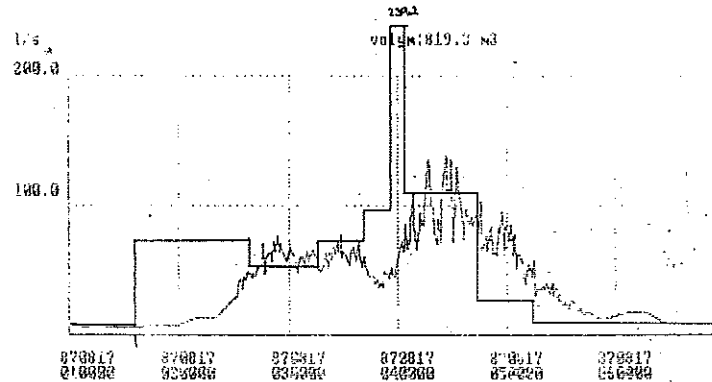


Volym regn 424.1 m³

Volym flöde 263.5 m³

$$x = \frac{263.5}{424.1} = 0.62$$

424.1



Volym regn 1168.0 m³

Volym flöde 819.3 m³

$$x = \frac{819.3}{1168.0} = 0.70$$

1168.0

$$\bar{x} = 0.61$$

BILAGA C SEDIMENTENS INVERKAN PÅ KAPACITET

För att undersöka hur sedimenten påverkar ledningens kapacitet när denna är full, har man låtit simulera ett regn som gett nivåer på 0.8 m. Beräkningar har sedan gjorts för ledning med och utan sediment.

Marklandsgatan

Sedimentdjup	3.5	0	cm
Area vattenförande sektion	0.489	0.502	m ²
Våta perimetern	2.19	2.20	m
Flöde	583	700	l/s

Kapaciteten minskar med 17 %.

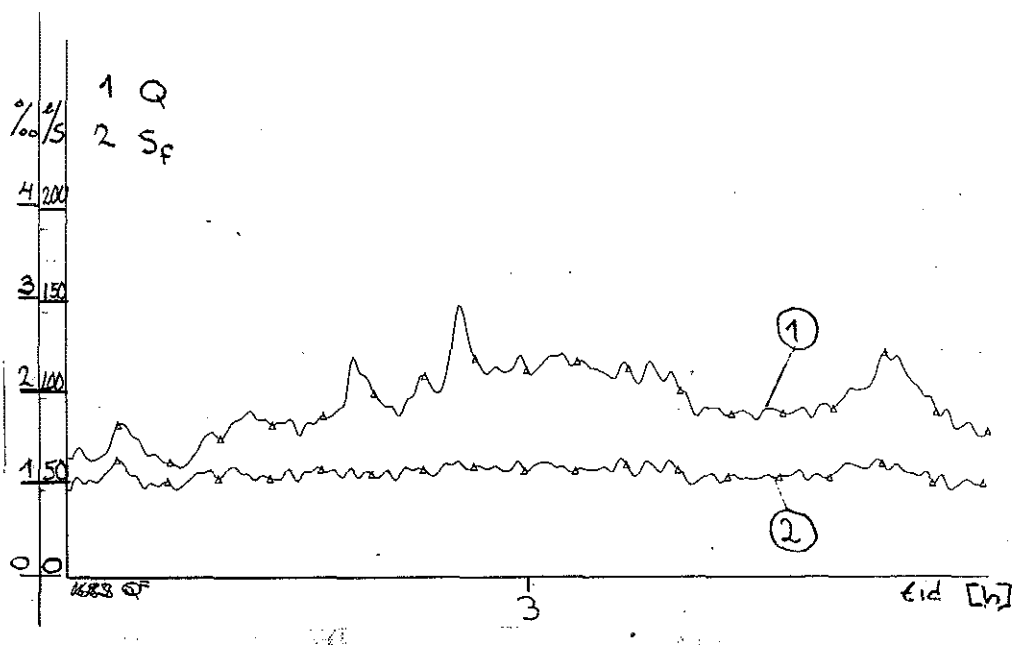
Von Utfallsgatan

Sedimentdjup	8.0	0	cm
Area vattenförande sektion	0.489	0.502	m ²
Våta perimetern	2.31	2.20	m
Flöde	426	523	l/s

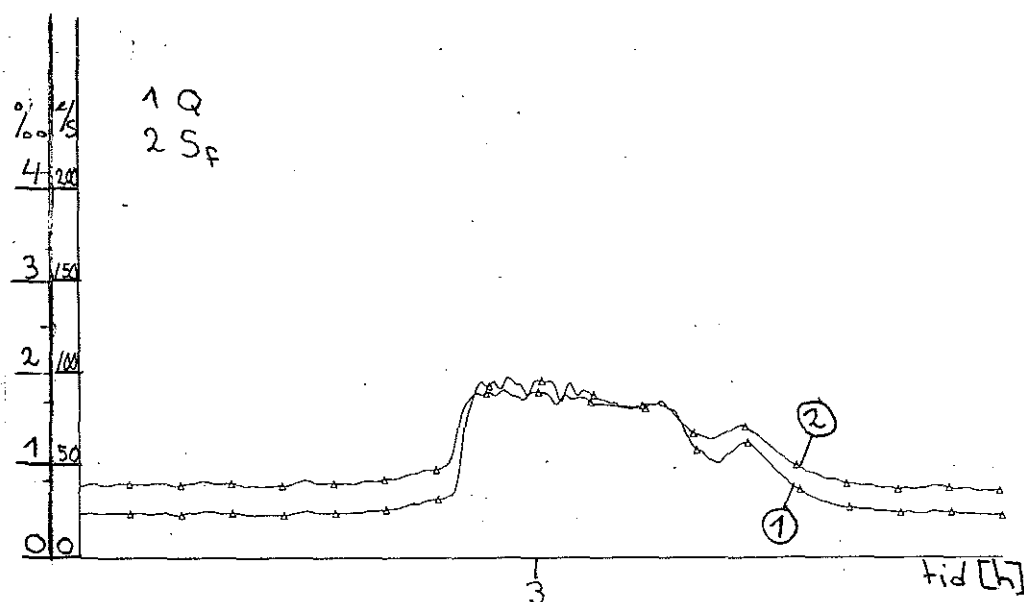
Kapaciteten minskar med 18.5 %.

BILAGA D VATTENYTANS LUTNING

Vid Marklandsgatan är vattenytans lutning jämn och varierar inte med förändringar i flödet. Som framgår av kurvan nedan ligger den kring 1.0 %.



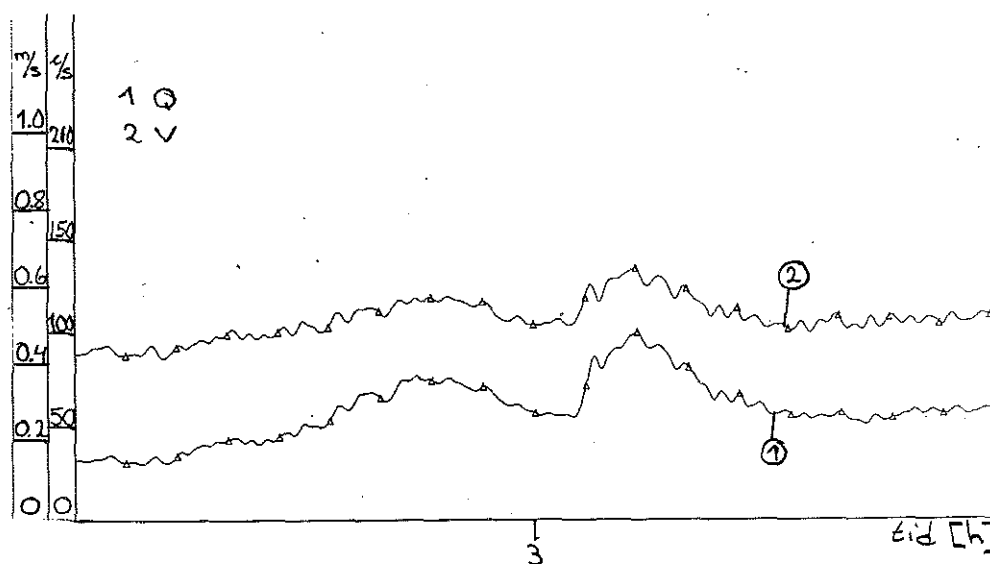
Vid Von Utfallsgatan beror lutningen av flödet. Vid de lägre flödena är lutningen 0.6 %. för att öka upp till 1.7 %. vid flöden kring 100 l/s.



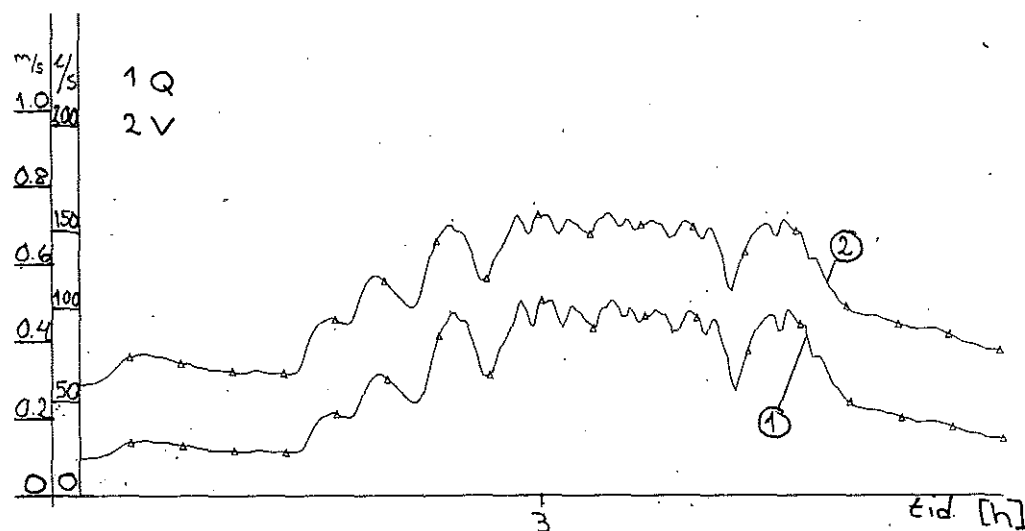
BILAGA E FLÖDE-HASTIGHET-AREA

Med hjälp av nedanstående diagram visas hur snabba flödesförändringar främst förändrar hastigheten medan arean hos den vattenförande sektionen förändras när de är långsamma.

Marklandsgatan



Von Utfallsgatan



BILAGA F SEDIMENTDJUP I BRUNNARNA

Marklandsgatan

Von Utfallsgatan

	Brunn	7	8	9		Brunn	2	3	6	7	8
84	24/10	-	6	-	85	14/06	2	2	7	-	15
86	21/03	-	12	13		07/11	3	4	7	-	15
	24/03	-	7	6	86	27/06	-	-	10	31	-
	16/05	-	-	6	87	11/08	-	-	12	-	-
	18/06	-	-	7		02/09	-	-	15	-	-
	25/08	-	5	6		08/09	5.5	-	13	35	24
87	26/03	-	7	-							
	10/06	-	0	7							
	12/06	-	0	7							
	22/06	-	3	7							
	18/08	7	0	6							

BILAGA G SIKTANALYSER

Marklandsgatan

I diagram 1 har siktkurvor för brunn 7,8 och 9 sammanställts. Dessa togs den 27/8-1987.

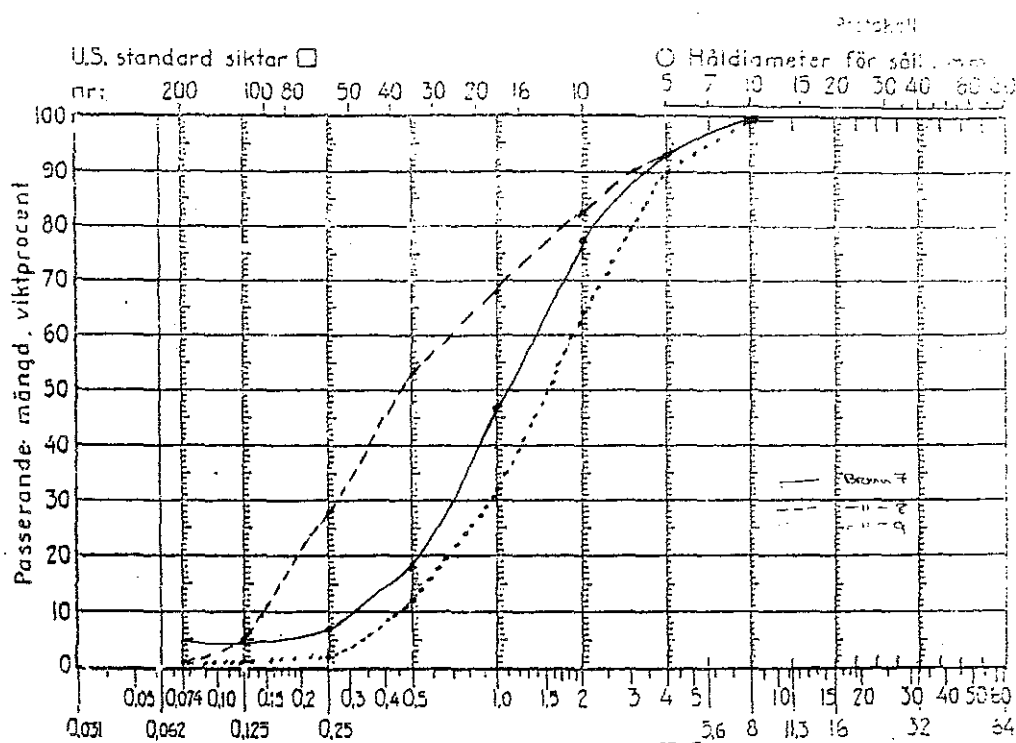


Diagram 1. Brunn 7,8 och 9 27/8-1987

Von Utfallsgatan

I diagram 2 har siktkurvorna för brunn 2, 5, 6 och 7 sammanställt. Proven togs 10/9-1987.

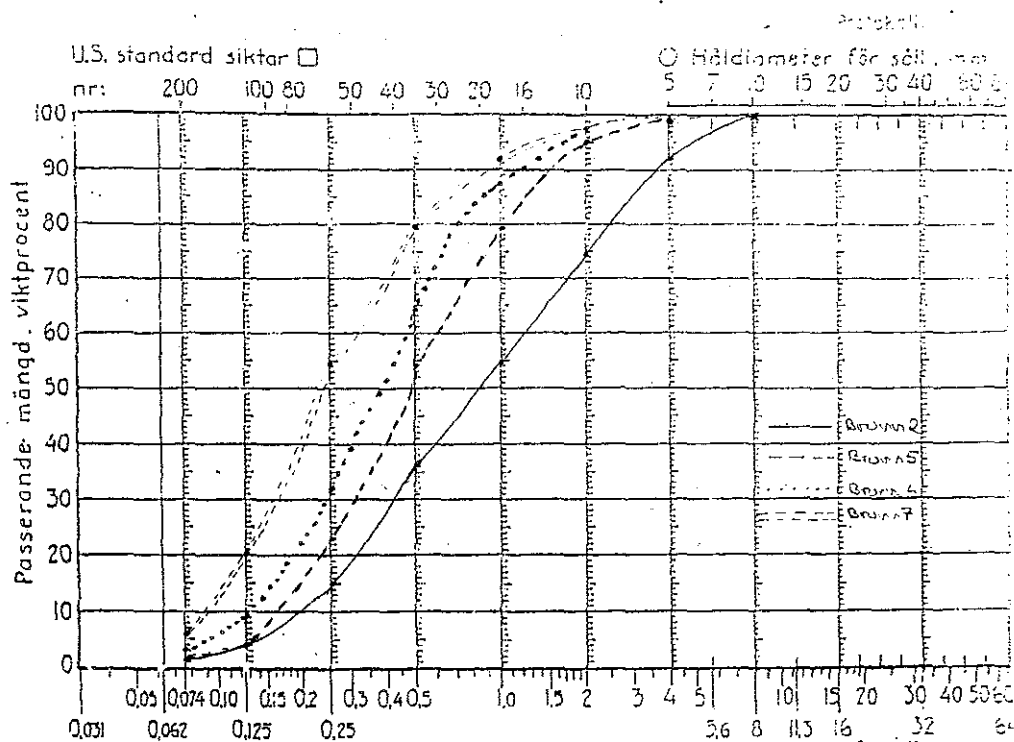


Diagram 2. Brunn 2,5,6 och 7. 10/9-1987

BILAGA H JÄMFÖRELSE AV TVA EROSIONSTEORIER

I nedanstående diagram visas hur skillnaderna mellan ekvation (4) och ekvation (21) varierar med faktorn y/D för Marklandsgatan.

$y/D < 0.2$ motsvarar flöden upp till 50 l/s.

$y/D \approx 0.3$ motsvarar flöden upp till 60 l/s

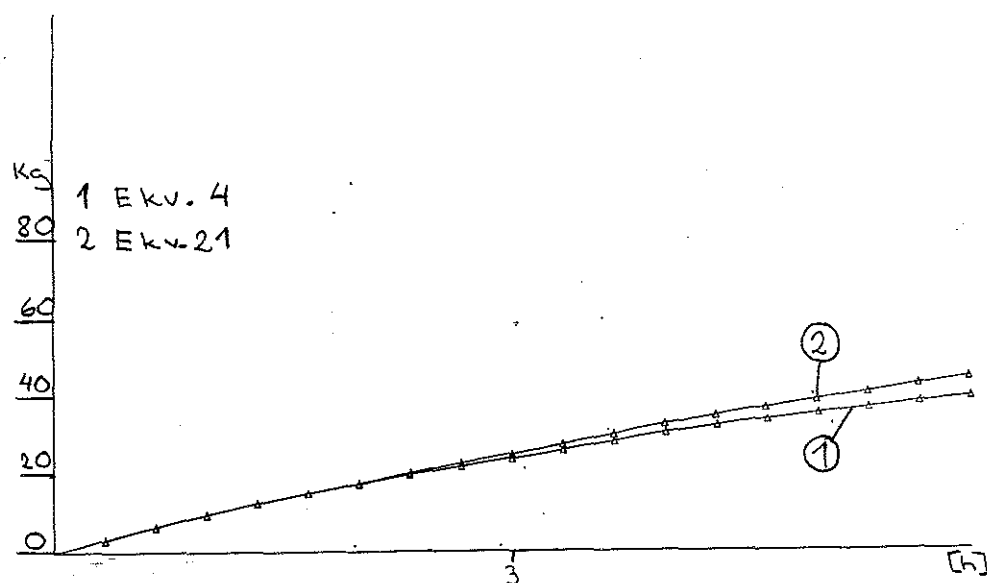


Diagram 1. $y/D < 0.2$

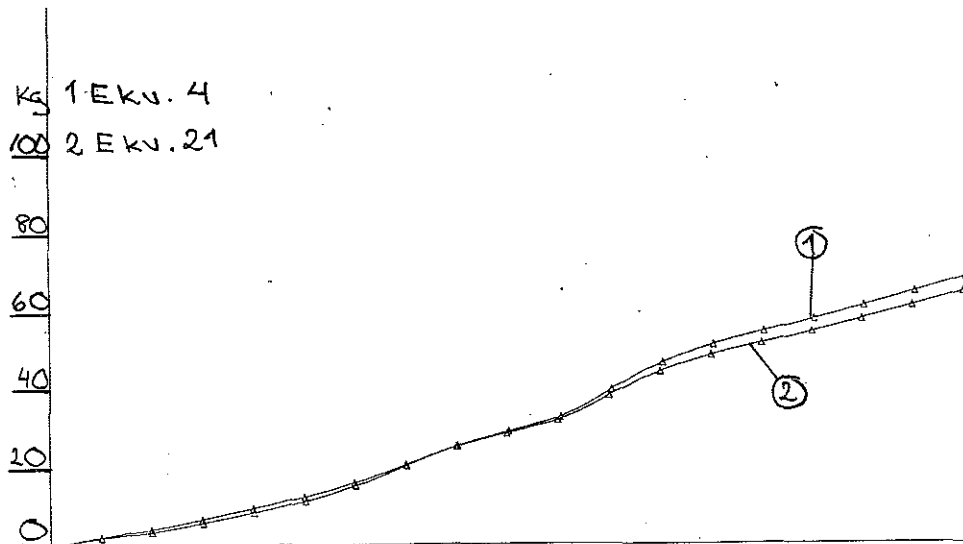


Diagram 2. $y/D = 0.3$

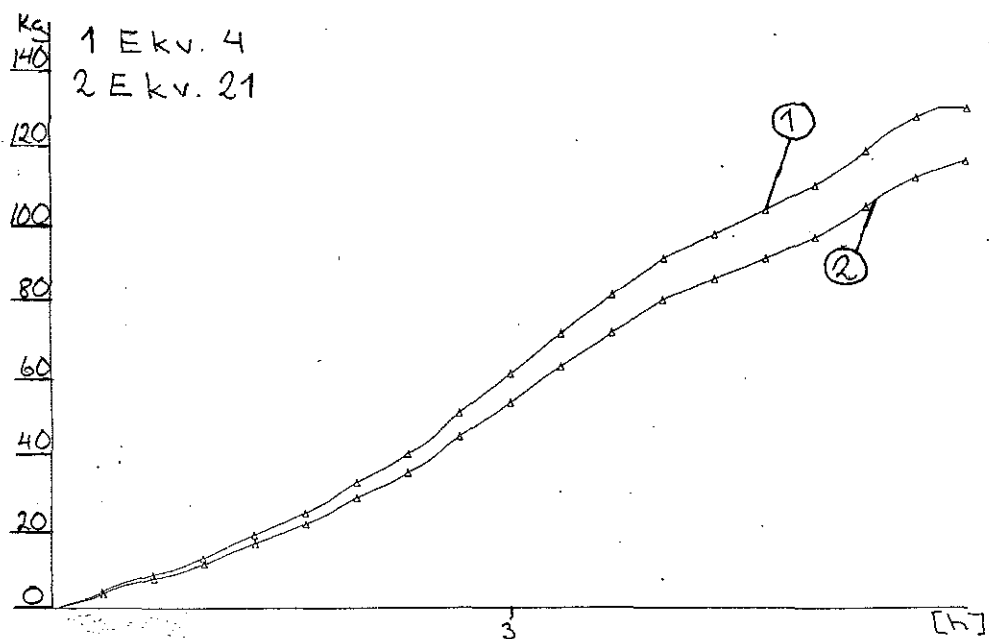


Diagram 3. $y/D > 0.3$

Vid Von Utfallsgatan beror skillnaderna av vattenytans lutning då den varierar betydligt mer för denna station. I nedanstående diagram visas hur denna skillnad ökar med vattenlutningen.

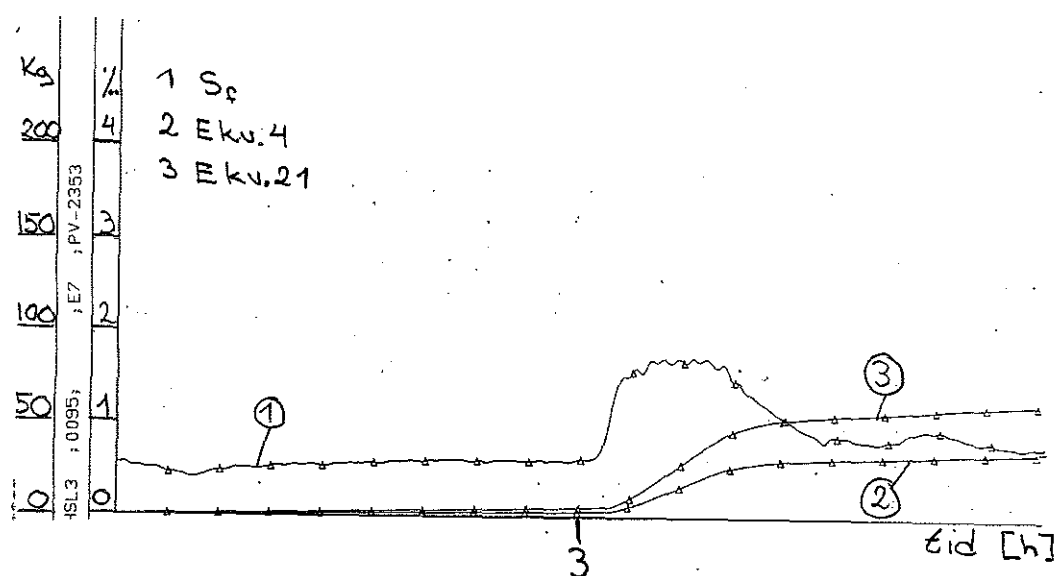


Diagram 4. Vattenytans lutning - Erosion.

BILAGA I ANPASSNING AV MAYS EKVATION

Felsökning i ekvation (5)

I dessa beräkningar har först faktorn $1-v_0/V_0$ placerats ensam i högerledet. Värdet på den har sedan plottats mot resterande del i ekvationen exklusive kvoten d/R och konstanten. En rät linje har anpassats till punkterna. Lutningen på linjen är för station 1 - 1.3 och för station 2 -1.5. På liknande sätt har sedan potensen för kvoten d/R beräknats. Den blev för station 1 0.14 och för station 2 0.15.

Som framgår av nedanstående tabell har jag valt att successivt öka vattendjupet med 5 cm upp till det maximala värdet under sommaren. Det högsta värdet som motsvarar en full ledning har simulerats fram.

Slutligen framtogs den nya konstant som skulle ersätta 0.0205 i ekvation (5). Dessa konstanter blev för station 1 $1.41 \cdot 10^{-3}$ och för station 2 $1.08 \cdot 10^{-3}$.

Marklandsgatan

Sedimentdjup 5 cm

$d_{50} = 0.5 \text{ mm}$

$$C_v(A/D^2) (g(s_s-1)D/V_s^2)^{3/2} = B$$

y	Q	V	E	A	P	C_v	v_o	$1-v_o$
cm	l/s	m/s	kg	m ²	m	ppm	m/s	V_s
11.5	8.49	0.270	0.033	0.061	0.737	24.8	0.218	0.193
16.4	24.46	0.400	0.083	0.095	0.853	21.4	0.236	0.408
21.1	45.55	0.489	0.144	0.129	0.956	19.9	0.249	0.492
25.8	68.35	0.536	0.177	0.165	1.054	16.3	0.259	0.518
31.6	115.85	0.674	0.446	0.211	1.172	24.2	0.269	0.601
34.9	146.55	0.743	0.673	0.237	1.238	28.9	0.273	0.632

	B	$B(1-v_o)^{1.3}$	d/R	$B(1-v_o)^{1.3} (d/R)^{-0.14}$
		V_s		V_s
11.5	$5.59 \cdot 10^{-3}$	$6.59 \cdot 10^{-4}$	0.0060	$1.35 \cdot 10^{-3}$
16.4	$2.32 \cdot 10^{-3}$	$7.23 \cdot 10^{-4}$	0.0045	$1.54 \cdot 10^{-3}$
21.1	$1.60 \cdot 10^{-3}$	$6.36 \cdot 10^{-4}$	0.0037	$1.39 \cdot 10^{-3}$
25.8	$1.27 \cdot 10^{-3}$	$5.40 \cdot 10^{-4}$	0.0032	$1.21 \cdot 10^{-3}$
31.6	$1.21 \cdot 10^{-3}$	$6.24 \cdot 10^{-4}$	0.0028	$1.42 \cdot 10^{-3}$
34.9	$1.22 \cdot 10^{-3}$	$6.72 \cdot 10^{-4}$	0.0026	$1.55 \cdot 10^{-3}$

Konstant = medelvärde

$1.41 \cdot 10^{-3}$

Von Utfallsgatan

Sedimentdjup 8cm

$d_{50} = 0.45 \text{ mm}$

y	Q	V	E	A	P	C _v	v _o	1-v _o
cm	l/s	m/s	kg	m ²	m	ppm	m/s	V _m
18.3	23.43	0.337	0.057	0.078	0.804	15.4	0.222	0.341
20.7	32.79	0.381	0.081	0.093	0.855	15.5	0.229	0.399
22.8	40.59	0.402	0.091	0.114	0.917	14.1	0.237	0.409
24.9	49.84	0.430	0.110	0.130	0.964	13.9	0.242	0.436
27.1	60.23	0.454	0.129	0.148	1.013	13.5	0.248	0.454
29.1	65.97	0.447	0.112	0.170	1.072	10.7	0.253	0.433

	B	$B(1-v_o)^{1.5}$	d/R	$B(1-v_o)^{1.5}$	$(d/R)^{-0.15}$
		V _m		V _m	
18.3	2.27 10 ⁻³	4.52 10 ⁻⁴	0.0047	1.01 10 ⁻³	
20.7	1.90 10 ⁻³	4.79 10 ⁻⁴	0.0041	1.09 10 ⁻³	
22.8	1.80 10 ⁻³	4.71 10 ⁻⁴	0.0036	1.10 10 ⁻³	
24.9	1.65 10 ⁻³	4.75 10 ⁻⁴	0.0034	1.11 10 ⁻³	
27.1	1.55 10 ⁻³	4.74 10 ⁻⁴	0.0031	1.13 10 ⁻³	
29.1	1.48 10 ⁻³	4.22 10 ⁻⁴	0.0028	1.02 10 ⁻³	

Konstant = medelvärde

1.08 10⁻³

Marklandsgatan

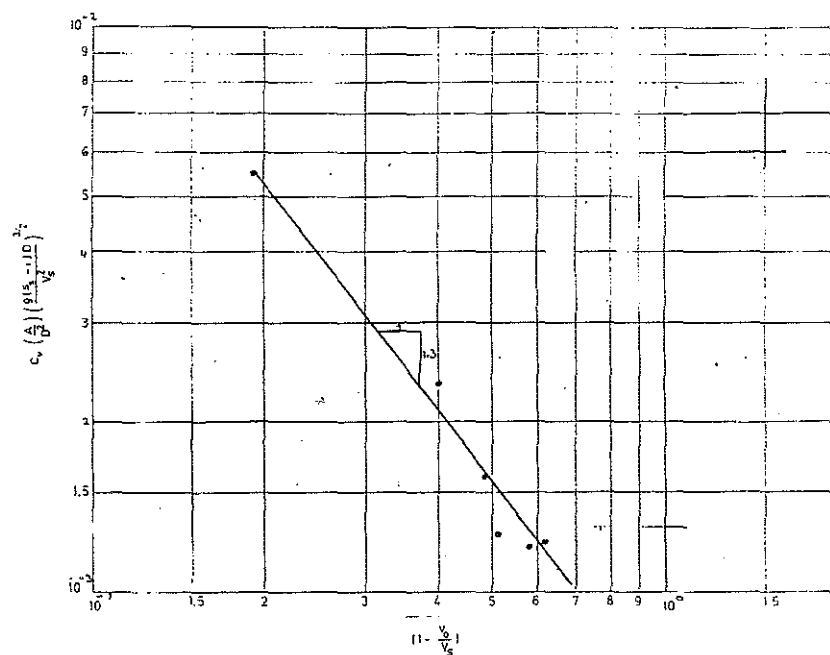


Diagram 1. Inverkan av gränshastighet v_0 .

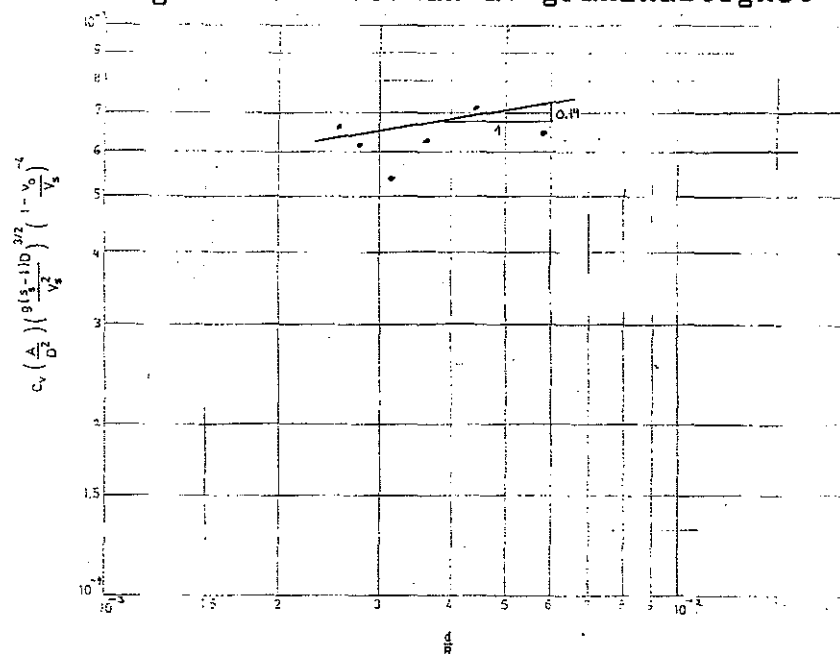


Diagram 2. Inverkan av relativ sedimentstorlek d/R .

Von Utfallsgatan

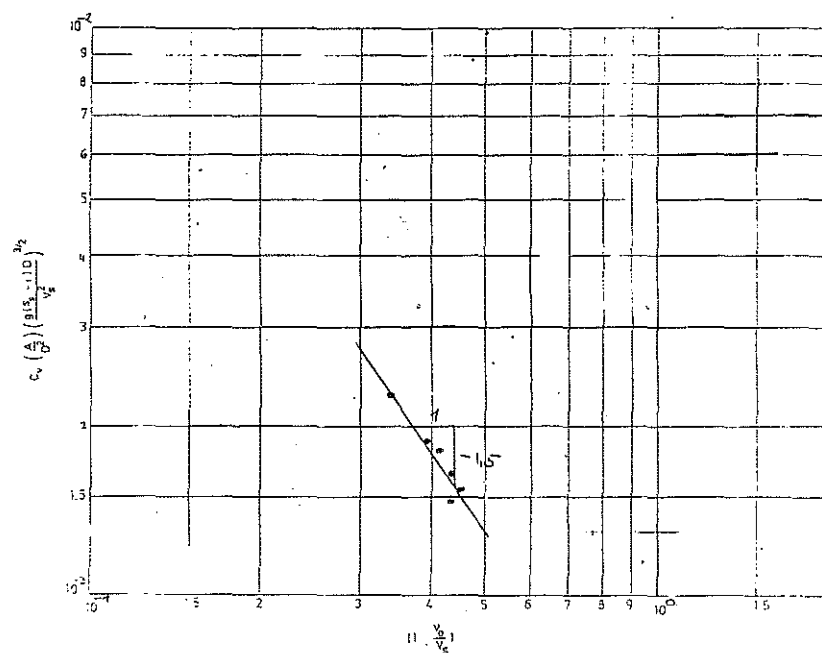


Diagram 3. Inverkan av gränshastighet v_0 .

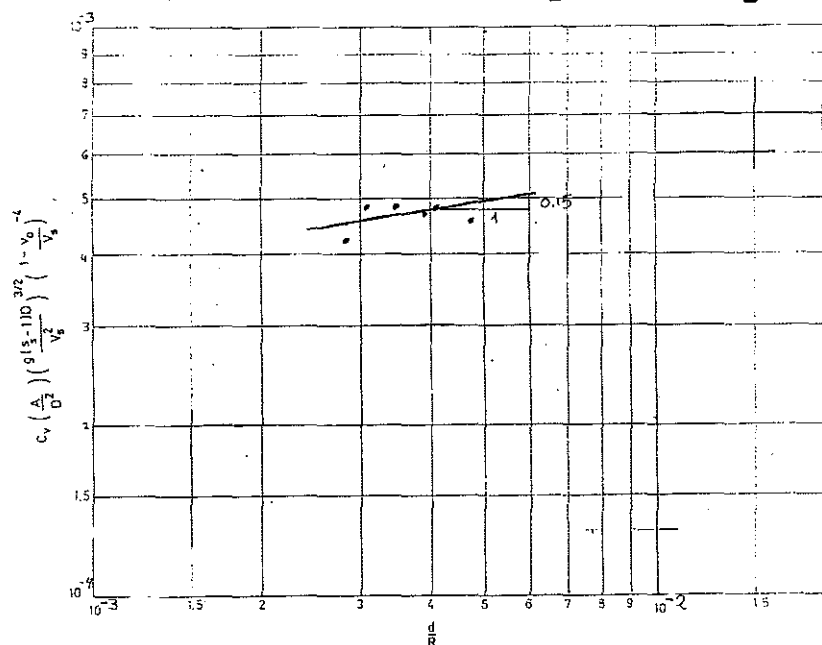


Diagram 4. Inverkan av relativ sedimentstorlek d/R .