

STF60 F89084

**BRUK AV BUNER SOM  
EROSJONSBESKYTTELSE I ELVER**

604483

**Norsk hydroteknisk laboratorium**  
Norwegian Hydrotechnical Laboratory

TILSLUTTET SINTEF/AFFILIATED WITH SINTEF


**NHL**  
**SINTEF-GRUPPEN**



**RAPPORT**  
**RAPPORT**  
**RAPPORT**

N - 7034 TRONDHEIM

TEL.: (07) 59 23 00  
TELEX: 55 435 NHL N

RAPPORTENS TITTEL  BRUK AV BUNER SOM EROSJONSBESKYTTELSE I ELVER	DATO  1989-09-29
	ANTALL SIDER OG BILAG  39+bilag
SAKSBEARBEIDER/FORF.  Øystein Kristiansen og Tor E. Dahl	ANSV. SIGN.  Einar Tesaker
	PROSJEKTNUMMER 604483

OPPDRA GSGIVER  NVE/Forbygningsavdelingen	OPDR. GIVERS REF.  Bård Andersen
---	--

EKSTRAKT  Dimensjoneringskriterier for bruk av buner (utstikkermoloer i elver) som erosjonsbeskyttelse basert på modellforsøk og litteraturstudium.
---

## STIKKORD PÅ NORSK

Hydroteknikk
Erosjon
Erosjonsbeskyttelse
Elv
Buner

# INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
INNHOLDSFORTEGNELSE.....	I
FIGURLISTE.....	III
TABELLISTE.....	IV
SAMMENDRAG.....	V
1. INNLEDNING.....	1
1.1. Bakgrunn.....	1
1.2. Formål.....	1
2. LITTERATURSTUDIE.....	5
2.1. Generelt.....	5
2.2. Dimensjoneringskriteria.....	5
2.2.1. Orientering av buner ift strømretningen.....	5
2.2.2. Avstand mellom buner.....	6
2.2.2.1. Sving.....	8
2.2.2.2. Rett strekning.....	12
2.2.3. Kriterier ved sammenligning av resultater....	13
2.2.4. Strømforhold.....	13
2.3. Lokalerosjon ved bune-tå.....	14
2.4. Utforming av buner.....	15
3. FORSØK.....	17
3.1. Modell.....	17
3.2. Registrering av strømningsmønster.....	20
3.3. Utførte forsøk.....	21
4. RESULTATER.....	25
4.1. Buner på rett strekning.....	25
4.1.1. Hastighetsreduksjon ved elvebredd bak bune...	25
4.1.2. Strømfordeling ved buner på rettstrekning....	28

## INNHOLDSFORTEGNELSE forts.

	Side
4.2. Buner i sving-horisontal bunn.....	31
4.2.1. Målt strømfordeling ved horisontale buner i sving.....	32
4.2.2. Bilder av strømfordeling ved horisontale buner i sving.....	32
4.3. Buner i sving - skrå bunn.....	34
4.3.1. Beskrivelse av modell og forsøksopplegg.....	34
4.3.2. Strømforhold uten buner.....	36
4.3.3. Strømforhold ved dykket bune.....	36
4.3.4. Utforming av buner.....	37
4.3.5. Strømforhold ved buner.....	38
4.3.6. Avstand mellom buner.....	41
4.4. Oppstuvning foran buner - rett strekning.....	44
5. DISKUSJON AV RESULTATER OG KONKLUSJON.....	45
5.1. Vurdering.....	45
5.2. Anvendelse.....	46
5.2.1. Rettstrekning.....	46
5.2.2. Sving-horisontal bunn.....	47
5.2.3. Sving-skrå bunn.....	47
5.3. Videre arbeid.....	48
5.3.2. Lokalerosjon ved buner.....	49
6. REFERANSER.....	50
Bilag A. Formler for erosjonsdybde ved bune-tå	
Bilag B. Målt erosjonsdybde ved bune-tå, sammenlignet med empiriske erosjonsformler, fra Copeland, R.R (1983)	
Bilag C. Strømforhold, horisontale buner på rettstrekning	
Bilag D. Strømforhold, skrå buner på rettstrekning	
Bilag E. Strømforhold, skrå buner i sving, basert på strømmålinger	
Bilag F. Strømforhold, horisontale buner i sving	
Bilag G. Strømforhold i overflaten, buner i sving - skrå bunn.	

## FIGURLISTE

	Side
Figur 1a. Prinsippskisse av buner, perspektiv.....	3
Figur 1b. Prinsippskisse av buner, snitt og plan med betegnelser .....	4
Figur 2. Strømforhold mellom buner ved økende avstand.....	7
Figur 3. Buner i sving.....	10
Figur 4. Reduksjon av hastighet sfa avstand - lengde forhold	12
Figur 5. Strømforhold ved buner.....	14
Figur 6. Profil av erosjonsgrop ved bune-tå.....	15
Figur 7. Skisse av fastinstallasjon for erosjonsmodeller....	18
Figur 8. Prinsippskisse av elveutforming, stadium 2.....	19
Figur 9. Bunetyper brukt i stadium 2, type 1a og 1b.....	23
Figur 10. Hastighet langs elvebredd bak en enkelt bune sfa avstand fra bune. Bune lengde $0.1 \cdot B$ .....	26
Figur 11. Hastighet langs elvebredd mellom to buner sfa avstand fra bune. Bune lengde $0.1 \cdot B$ .....	27
Figur 12. Hastighet langs elvebredd mellom to buner sfa avstand fra bune. Bune lengde $0.2 \cdot B$ .....	28
Figur 13. Buner i sving, detaljert strømfordeling.....	33
Figur 14. Prinsippskisse av elveutforming, sving med skrå bunn	35
Figur 15. Målt strømfordeling i elvetverrsnittet - uten buner	36
Figur 16. Målt strømfordeling ved og oppstrøme bune 1.....	39
Figur 17. Målt strømfordeling mellom bune 1 og bune 2, avstand 160 cm, $S/L=5.3$ .....	40
Figur 18. Hastighet ved bredden som funksjon av avstand fra bune.....	43

## TABELLISTE

	Side
Tabell 2.1. Dimensjonerende avstand mellom buner.....	11
Tabell 3.1. Data for bunetyper brukt i forsøk.....	23
Tabell 3.2. Oversikt over forsøk, .....	24

## SAMMENDRAG

Buner eller utstikkermoloer er et alternativ eller supplement til steinsetting av elvebredden. Bunene skal redusere faren for erosjon av elvebredden, og bunenes hovedfunksjon er å redusere vannhastigheten langs elvebredden under flom.

Selv om buner er brukt i stor utstrekning rundt om i verden, mangler det generelle hydrauliske dimensjoneringskriterier. Kriterier for avstand mellom buner i forhold til lengden av buner er i stor grad basert på lokale forhold. En gjennomgang av litteraturen som finnes viser at avstand-lengde forholdet som anbefales varierer mellom 2 - 6.3.

Et modellforsøk som hadde som formål å komme frem til praktiske dimensjoneringskriterier for bruk av buner er blitt kjørt på NHL. Både buner på rettstrekning og buner i sving har blitt studert. Kun buner med aksens vinkelrett på strømrretningen, men både skrå og horisontale (i vertikalplanet) har blitt studert i modellforsøker.

På rettstrekning vil en buneavstand på 10 x bunelengden gi en tilfredsstillende reduksjon av hastigheten ved elvebredden, dette gjelder både horisontale buner og skrå buner med helning 1:3. For skrå buner med helning 1:6 bør ikke avstanden være større enn 5 - 7.5 x bunelengden.

I svinger vil en buneavstand på 7.5 - 10 x bunelengden gi en tilfredsstillende erosjonsbeskyttelse, dette gjelder både horisontale buner og skrå buner med helning 1:3. For skrå buner med helning 1:6 bør ikke avstanden være større enn 5 x bunelengden. Imidlertid er kun en svingradius blitt undersøkt, og hvor bunnen sideveis i svingen var horisontal.

Lengden av bunene bør ligge i området 0.1 - 0.2 x overflatebredden av elven. For stor bunelengde medfører oppstuvning og stor økning av strømhastighet ved bunetåa.

## 1. INNLEDNING

### 1.1. Bakgrunn

NVE/Forbygningsavdelingen ønsker å få utredet bruk av buner som erosjonsbeskyttelse, som et alternativ eller supplement til steinsetting av hele elvebredden. Buner har i liten grad vært brukt i Norge, men i andre land som Sveits har buner helt tilbake fra 1890-årene vært brukt som erosjonsbeskyttelse. I Norge har buner fra gammelt av vært brukt som en forbedring av fiskeplasser i lakseelver, som et eksempel er Lærdalselva.

Nylig har en enkelt bune blitt bygd i Gaula, for lokal erosjonsbeskyttelse av elvebredden, og mulig forbedring av fiskeplasser. Virkningen på strømforholdene i Gaula av bunen ble i 1987 undersøkt i modell ved NHL. I Bævra og i Lågen er det i de senere år bygd flere buner for erosjonsbeskyttelse.

Ved erosjonsbeskyttelse av sandkyster brukes buner (eng. "groins") i stor utstrekning, og med god virkning. Forholdene er dog ikke direkte sammenlignbare, da både bølger og strøm virker inn ved kysterrosjon.

NVE/Forbygningsavdelingen ga i 1987 NHL i oppdrag å utføre forsøk med buner i sving og på rettstrekning, med horisontale, moloformede buner, vinkelrett på strømretningen. Disse forsøkene ble utført i siste del av 1988. Ved et møte med NVE/Forbygningsavdelingen november 1988 ble prosjektet utvidet til også å omfatte hellende buner, skrå i vertikalplanet, helning 1:6 og 1:3. Disse forsøkene ble utført vinteren 1989.

I januar 1990 ble det utført utvidede forsøk med buner i sving, hvor bunn i sving var skrå, elvesving med markert dypål.

### 1.2. Formål

Formålet med forsøket er å komme frem til praktiske dimensjoneringskriterier for bruk av buner i norske elver. De viktigste kriteriene er:



- avstand mellom buner - hhv i sving og på rettstrekning
- lengde av buner - i forhold til bredden av elv og eventuell helning i vertikalplanet.

En prinsippskisse av buner er vist på figur 1.

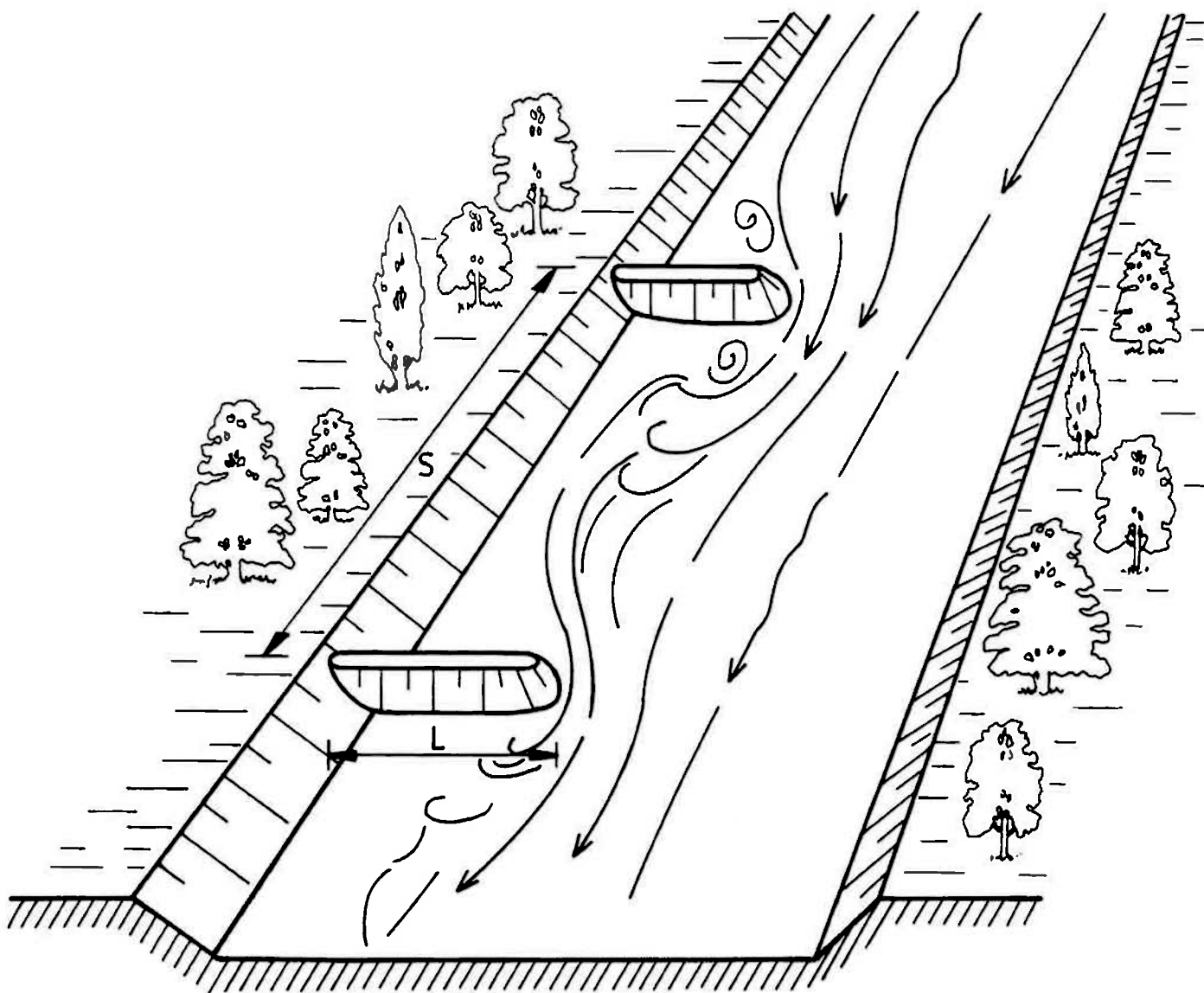
Bunene skal redusere faren for erosjon, utgraving av elvebredden, under flom, og hindre at skader på blant annet dyrket mark oppstår. Bunenes hovedfunksjon vil være å redusere vannhastigheten langs elvebredden under flom. Hvor stor hastighetreduksjon som er nødvendig vil kunne variere, avhengig av lokale forhold, som bunnmateriale i elva, eventuell plastring mellom bunene osv.

Ved bunetåa vil det lokalt oppstå større hastighet, og lokalerosjon vil opptre her om ikke plastring gjøres.

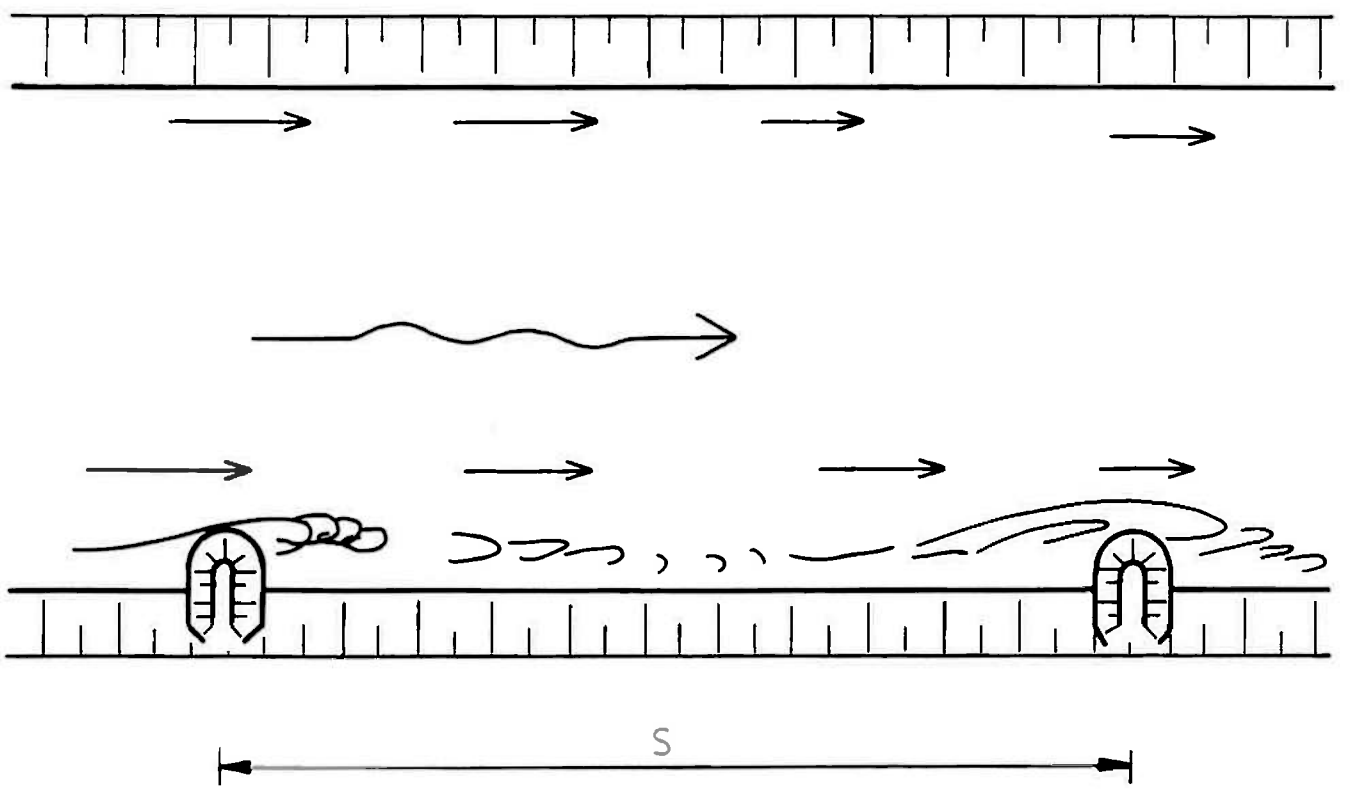
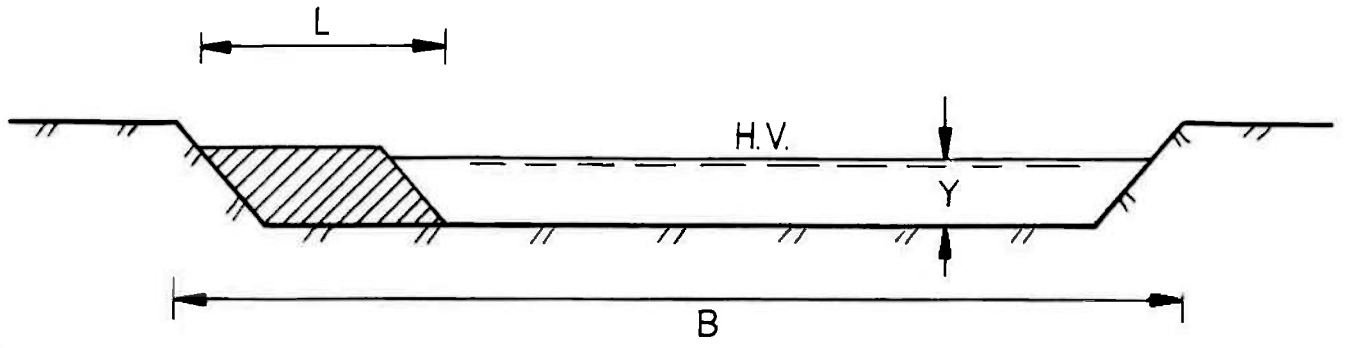
Hvordan bunene påvirker strømforholdene over et større område må det også tas hensyn til. Elvetverrsnittet vil lokalt bli innsnevret, og dette kan forårsake oppstuvning. Hastigheten på motsatt bredd kan også øke og forårsake erosjon der. Dette vil være avhengig av lokale forhold, og kan ikke innpasses i generelle dimensjoneringskriterier.

Hvilke kriterier som skal legges til grunn for når buner har en tilfredsstillende funksjon vil i stor grad måtte baseres på skjønn.

I sving og på rettstrekning vil forholdene være noe forskjellige, og begge situasjonene ble undersøkt.



Figur 1a. Prinsippskisse av buner, perspektiv.



Figur 1b. Prinsippskisse av buner, snitt og plan med betegnelser.

## 2. LITTERATURSTUDIE

### 2.1. Generelt

Buner (spur dikes) har vært brukt over hele verden som en forbedring av navigering, til flomkontroll, og som erosjonsbeskyttelse. Effekten av buner er å redusere strømmen langs bredden, derved reduseres strømmens mulighet for erosjon, og i noen tilfeller kan sedimentering mellom bunene skje. Selv om bruken av buner er utstrakt, finnes det ingen retningslinjer for hydraulisk dimensjonering av dem. Dimensjoneringen baseres på erfaring og vurdering, og kan variere i forskjellige geografiske områder. Copeland, R.R (1983) utførte et modellforsøk for å evaluere og demonstrere effekten av tette buner som en teknikk for erosjonsbeskyttelse i et konkavt bend. De parametre som ble studert var (1) lengde/avstands-forhold, bunenes vinkel ift strømmen, og (2) erosjonsbeskyttelse, beskyttelse av bune-tåa vha matter.

### 2.2. Dimensjoneringskriteria

#### 2.2.1. Orientering av buner ift strømretningen

Det er stor uenighet blant fagfolk om buner skal orienteres med aksene skrått oppstrøms eller nedstrøms ift strømretningen.

Argumenter for å la buner peke skrått oppstrøms er at strømmen avvises bedre fra buner, og sedimentering nedf buner skjer lettere.

Argumenter for å la buner peke skrått nedstrøms er mindre turbulens og erosjonsdybde ved bune-tåa. Rask og is fester seg ikke så lett.

Det er imidlertid ikke tilstrekkelige data fra felt eller modellforsøk som kan avgjøre hvilken vinkel som er best, det er derfor vanligvis anbefalt at buner legges med aksene loddrett på strømmen. Dette var også konklusjon fra Copeland, R.R (1983s21), loddrett orientering ga den beste erosjonsbeskyttelse.

### 2.2.2. Avstand mellom buner

Forholdet buneavstand-bunelengde er en funksjon av strømmingshastighet og vannføring, dette ble demonstrert i Copeland, R.R (1983)s21. Dette var en erosjonsmodell, hvor forsøkene ble kjørt i ca 24 t, inntil en relativ stabil situasjon var oppnådd.

Avstand fra bune-tå til den eroderte bredden ble brukt som et mål for en stabilt avstand-lengde forhold. For en vannføring på  $Q = 2.7$  cfs, vanndybde 0.24 ft, tilsvarende et Froudes tall  $Fr=0.4$ , fant en et optimalt avstand- lengde-forhold på ca 3:1. Ved en økning av vannføringen til 4.6 cfs, vanndybde 0.5 ft,  $Fr = 0.31$  ble det optimale avstand-lengde forhold redusert til ca 2:1.

Konklusjonen fra dette forsøket var at disse resultatene understreket behovet for å bruke dimensjoneringsdata for buner på en spesifikk basis, ved enten å basere dimensjonering av buner på erfaring fra lignende forhold, eller ved bruk av modellforsøk.

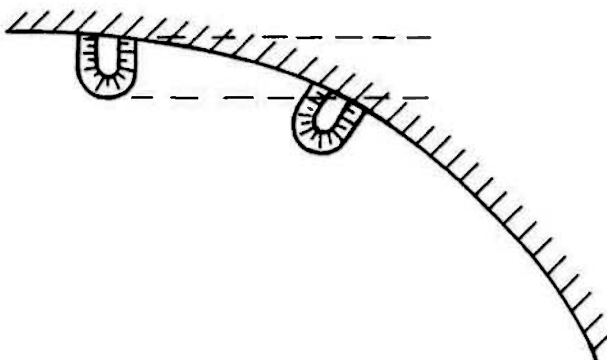
Effektiviteten av bunene til å avvise strømmen fra bredden, reduseres når avstanden øker. Virvlene som settes opp mellom bunene er illustrert i figur 2. Avstanden mellom bunene øker fra type 1 til 6.

Ved type 1 til 4 er avstanden kort, disse er mest aktuelle for bruk til forbedring av navigasjonsforhold, når en dyp kanal i midten av elven må opprettholdes. For erosjonsbeskyttelse er type 4, 5 og 6 aktuelle. Ved type 6 er avstanden så stor at bunene ikke gir en god nok erosjonsbeskyttelse lenger, strømmen angriper bredden direkte.

### 2.2.2.1. Sving

Et problem ved modellforsøk i sving, er hvilken bunnhelning på tvers som skal brukes. Bunene settes i yttersving, hvor det vanligvis er en dypål. I innersving er dybden mindre. Bunnhelning på tvers vil avhenge av flere faktorer; som vannføring, bunnmateriale, dekklagsdannelse, svingradius. Kriteriene som er gitt i litteraturen gir ikke anvisninger om hvilken bunnhelning på tvers som kriteriene er gyldige for.

Avstand mellom buner har generelt blitt relatert til den "effektive lengden", som er normalen, tangentielt til svingen, projisert fra bune-tåa til skjæring med bredden nedstrøms, se skisse.



Avstand til der tangenten skjærer bredden, kan beregnes ut fra:

$$S = R \sqrt{1 - \left(\frac{R-L}{R}\right)^2}$$

der  $R$  = svingradius i yttersving,  $L$  = bunelengde, og  $S$  = buneavstand. Som eksempel, en elv med bredde  $B = 100$  m, svingradius  $R = 600$  m, bunelengde  $L = 20$  m, vil etter disse retningslinjene kreve en buneavstand  $S = 153$  m,  $S/L = 7.7$ . Buneavstanden vil være sterkt avhengig av svingradiusen og bunelengden. Økes bunelengden til  $L = 30$  m, blir buneavstanden  $S = 187$  m,  $S/L = 6.2$ . I en krappere sving  $R = 400$  m, med  $L = 20$  m, blir buneavstand  $S = 125$  m,  $S/L = 6.2$ . I skarpe svinger bør denne avstanden reduseres med 20%.

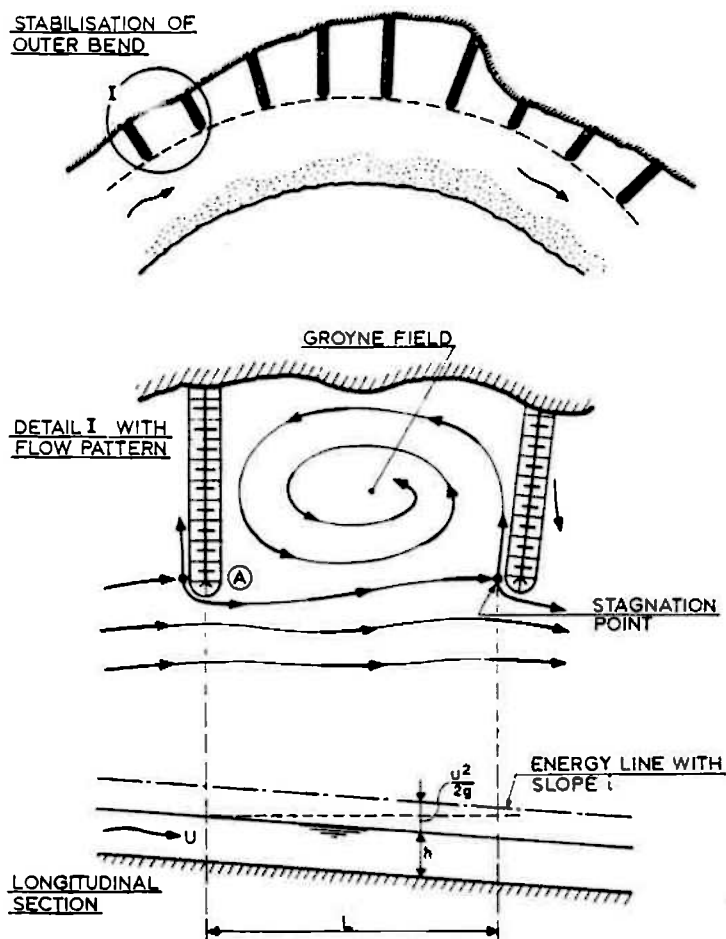
I figur 3 er det vist hvordan en yttersving er stabilisert vha en serie buner (groynes på engelsk), fra Jansen P. (1979). Avstanden mellom disse kan bestemmes basert på at de fungerer best når det er en sterk virvel mellom hver bune. Stabiliteten av en slik virvel er be-

stemt av faktoren  $2gS/C^2h$ , der  $h$  er vanddyb,  $C$  er Chezys faktor ( $C = Mh^{1/6}$ , der  $M =$  Mannings tall). Dette uttrykket er utledet ut fra at energitapet mellom to buner, iS, må være mindre enn hastighetshøyden  $U^2/2g$ . Basert på forsøk har en funnet at:

$$\frac{2gS}{C^2h} < 0.6 \quad (2.1)$$

For eksempel med en vanddybde  $h = 2$  m, og en Chezy koeffisient på  $C = 40$  ( $M = 36$ ), bør en buneavstand på  $S < 98$  m velges. Buneavstand øker proporsjonalt med vanddybet.

Svingradius eller bunelengde inngår ikke i dette uttrykket. En svakhet med dette uttrykket er at når Chezy-koeffisienten øker, dvs diameter på materialet i elvebunnen reduseres, så øker buneavstanden, noe som er det motsatte som en ville forvente ut fra fare for erosjon av elvebredden. Dette uttrykket kan derfor kun anbefales å brukes som et supplement til andre retningslinjer.



Figur 3. Buner i sving.

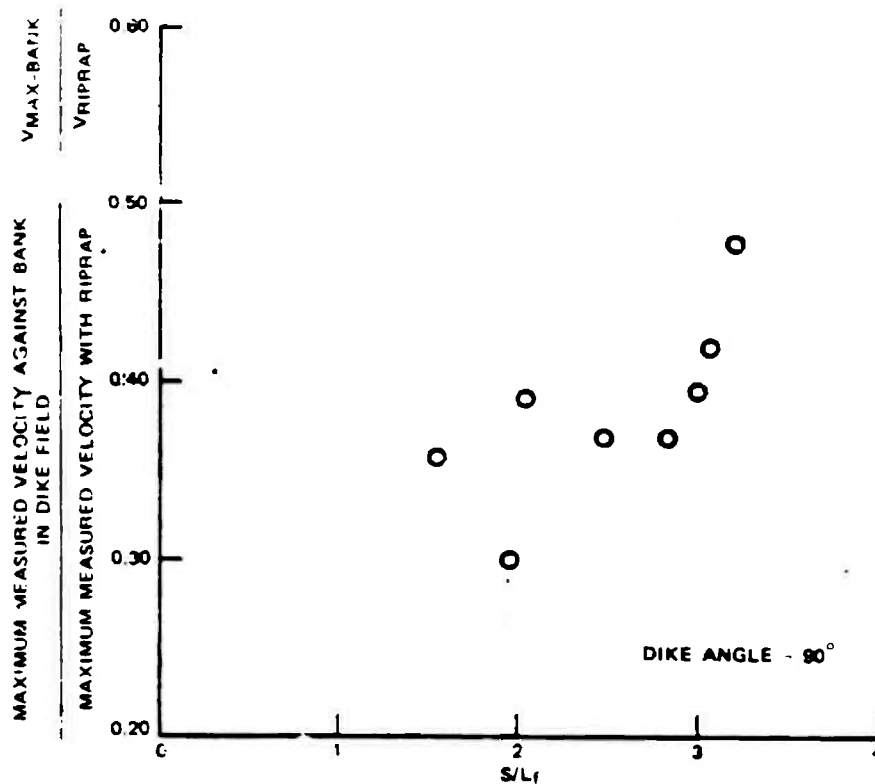
Retningslinjer for avstand mellom buner fra forskjellige kilder er vist i tabell 2.1, hvor både sving og rettstrekning er med (Copeland, R.R (1983)). Disse data er basert på erfaringer og modellforsøk i land hvor elvebunnmaterialet ofte er finkornige masser, som er sterkt utsatt for erosjon, i motsetning til i Norge hvor det vanligvis er mere grovkornigere, mer graderte masser.



Tabell 2.1. Dimensjonerende avstand mellom buner.

Spacing	Type of Bank	Reference	Comment
1L	Concave	United Nations (1953)	General practice
2 to 2.5L	Convex	United Nations (1953)	General practice
4 to 6L	Concave	Richardson and Simons (1973)	Bank may need riprap
3L	Concave	Grant (1948)	
5.1 to 6.3L	Straight	Alvarez	
2.5 to 4L	Curves	Alvarez	
2 to 2.5L		CBIP (1956)	
1.5	Concave	Los Angeles District (1980)	Levee protection with riprap
2.0	Straight	Los Angeles District (1980)	
2.5	Convex	Los Angeles District (1980)	
2		Neill (1973)	If two or more dikes
4		Neill (1973)	
3 to 5L		Strom (1941)	

Som et godt mål for hvordan buner reduserer erosjon av bredden, er strømhastigheten mot bredden. I Copeland, R.R (1983) fant en at hastigheten mot bredden ble redusert til ca 40% ved buner sammenlignet med en tilsvarende sving beskyttet med steinsetting. I figur 4 er reduksjon av hastighet vist sfa avstand-lengde forhold.



Figur 4. Reduksjon av hastighet sfa avstand-lengde forhold.

Hvorvidt en steinsetting mellom bunene er nødvendig må vurderes i det enkelte tilfelle, avhengig av strømforhold og elvebreddmateriale.

#### 2.2.2.2. Rett strekning

Fra tabell 2.1 ses at lengde-avstandsforholdet for rettstrekning varierer mellom 2.0 til 6.3. Årsaken til denne store variasjonen kan være varierende betingelser ved de forskjellige undersøkelsene, blant annet lengde-avstandsforholdet 6.3 brukes i kombinasjon med steinsetting mellom bunene.

I Farraday, R.V. et al (1983) er det gitt en formel som en retningslinje for avstand mellom buner

$$S < \frac{C y^{1.33}}{2g n^2} \quad (2.2)$$

hvor  $S$  = avstand mellom buner,  $C$  = en konstant ( $\approx 0.6$ ),  $y$  = midlere vanddyb,  $n=1/M$ ,  $M$  er Mannings koeffisient, og  $g$  = tyngdens aksellerasjon. Dette er samme formel som i (2.1).

Andre tilnærmede formler for avstand mellom en rekke buner langs en rett elv er

$$S = 4 - 4.5 L \quad (2.3)$$

$$S = 1 - 2 B \quad (2.4)$$

hvor  $L$  = lengden av buner, og  $B$  = bredden av elva.

I svinger anbefales at avstanden gitt ved (2.3) og (2.4) minskes i yttersvingen av en kurve, og økes i innersvingen av en kurve.

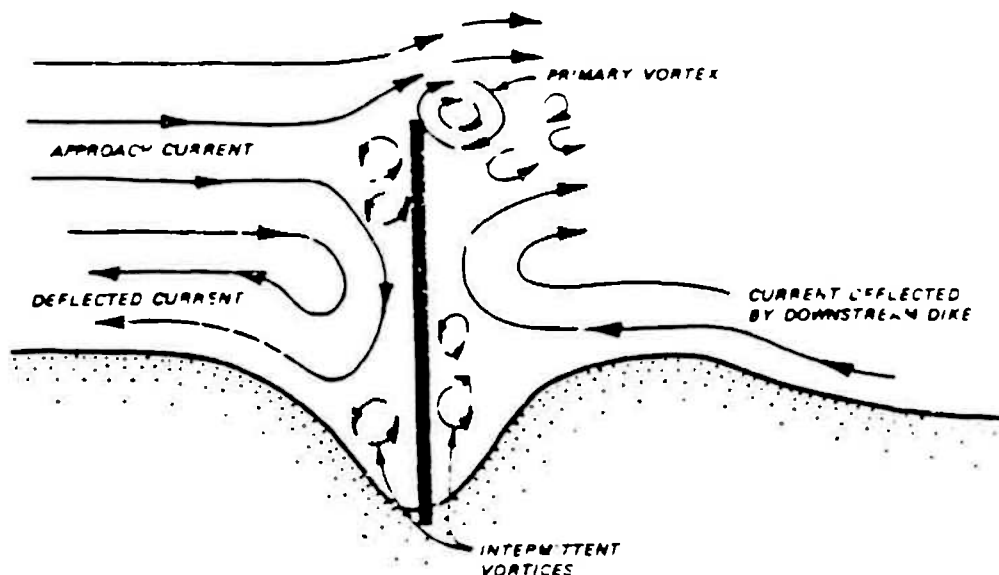
Ved bruk av buner som erosjonsbeskyttelse velges lengde og avstand ut fra økonomiske hensyn. Lange buner gir større avstand, men er dyrere å bygge. Korte buner krever et større antall. Som en generell regel anbefaler Farraday, R.V. et al (1983) at lengden av buner for erosjonsbeskyttelse ikke bør overstige  $1/4$  av elvens bredde.

### 2.2.3. Kriterier ved sammenligning av resultater

Hvilke kriterier som velges for når bunene gir tilstrekkelig beskyttelse er nok den viktigste parameteren. Da denne i stor grad baseres på skjønn, er det forståelig at variasjonene er store mellom forskjellige undersøkelser. Hvilken sikkerhetsfaktor som velges kommer også inn. Hvis konsekvensene er store når erosjonsutvikling starter, gjenspeiler dette seg i krav til liten avstand mellom buner. Alle disse faktorene må tas med i vurderingen av tidligere resultater.

### 2.2.4. Strømforshold

I figur 5 er det i prinsipp vist strømforsholdene ved en bune, fra Copeland, R.R (1983).



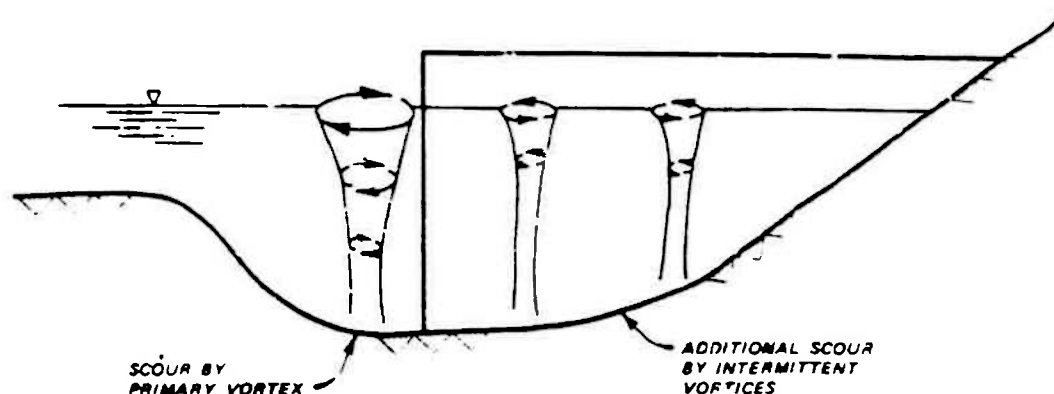
Figur 5. Strømforhold ved buner.

### 2.3. Lokalerosjon ved bune-tå

Ved bune-tåa skapes det kraftig turbulens, som forårsaker lokalerosjon ved buner, dette er skissert i figur 6, fra Copeland, R.R (1983).

Dybden av erosjonsgropa som utvikles, og friksjonsvinkelen av bunnmaterialet er de viktigste faktorene som bestemmer utstrekningen av erosjonsgropa ved buner. Det er derfor nødvendig å gi et overslag over forventet erosjonsdybde ved bune-tåa, da buner må bygges dypere enn maksimal forventet erosjonsdybde.

En etablert metode for å anslå erosjonsdybde mangler. Den sikreste metoden er å anslå erosjonsdybden fra felt eller modellforsøk. Mangler opplysninger fra felt eller modell, kan overslagsformler brukes.



Figur 6. Profil av erosjonsgrøp ved bune-tå.

I bilag A er det gjengitt flere formler for dybde av erosjonsgrøp, disse er basert på resultater fra modellforsøk, uten verifikasjon fra prototyp, (Copeland, R.R (1983)). Resultatene er i hovedsak fra modellforsøk av en enkelt bune på en rettstrekning, effekt av variasjon av strømmens angrepsvinkel er ikke tatt hensyn til.

Data fra prototyp er vanskelig å skaffe, da målingene må tas under flom. I lavvannsperioder vil erosjonsgrøpa delvis fylles igjen.

I Copeland, R.R (1983) ble målinger av erosjonsdybde ved tå,  $y_s$ , i forhold til vanddybde  $y$  sammenlignet med de empiriske formlene som er gjengitt i bilag A. Resultatene fra dette er vist i bilag B. Resultatene viser at store avvik forekommer.

For å hindre skade på bune må tåa erosjonsbeskyttes. Ved å legge ut stein, på bunnen utenfor tåa, reduseres faren for at bunene undergraves. Copeland, R.R (1983).

Skrå buner, med skrå sider og neser gir grunnere erosjonsgrøp enn en rett vegg, Liu M. K., et al (1961).

#### 2.4. Utforming av buner

Buner blir vanligvis bygd av stein, med sideskrånninger som ikke er for bratte, 1:1.5 - 1:2. Skråningen ut mot elva er slakere, 1:15 - 1:200. Av økonomiske grunner kan kjernen bygges av det eksisterende elvebunn-

materiallet. Høyden av bunen inne ved elvebredden er i nivå med høyeste flomvannstand. Endeskråningen lages slakere enn sideskråningene, 1:5 - 1:10. Dette gjøres for å få enn gradvis overgang mellom hvirvlene som dannes av bunene og hovedstrømmen. En slak endeskråning vil redusere erosjon ved bunetåa.

Lengden av bunen er avhengig av bune-avstanden, korte buner krever at de står tettere. Ved lange buner kan avstanden økes, men de er mer utsatt for strømkrefter, og må derfor bygges sterkere. Bunelengden bør ikke overstige  $1/4$  av bredden av elva. Men bunelengden bør minst være 3 ganger vanddybden.

### 3. FORSØK

#### 3.1. Modell

Modellforsøkene er gjort i NHLs permanente erosjonsbasseng, som er en fast installasjon, vist i figur 7. Et elveleie er lagd i sand, med pukkk i bunn. Pukkk i bunn ble lagt for å få et stabilt elveleie, da dette ikke var en erosjonsstudie, men en studie av hvordan buner innvirker på strømforholdene.

Bunene ble bygd av betongelementer og/eller pukkk, og kunne lett endres og flyttes.

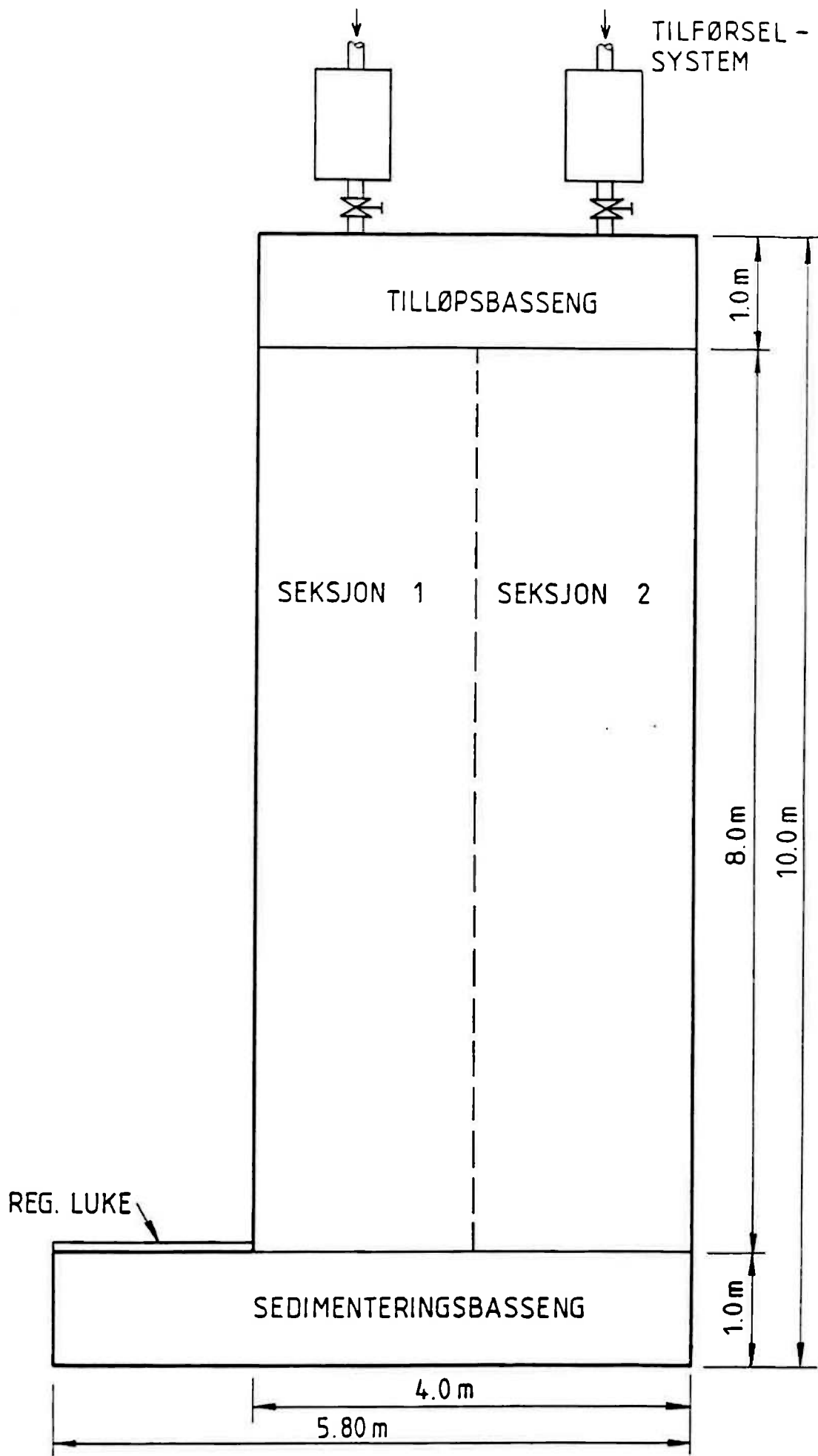
Modell-data er vist i figur 8a, som viser dimensjoner av det bygde elveleiet. Lengde ca 8 m, bredde 1 m, bunnhelning 3 cm per 8 m, svingradius 5 m, (inner-sving).

Vannføring under forsøk var i hovedsak konstant lik 45 l/s, som ga en vanddybde på ca 8 cm, en midlere vannhastighet på ca 50 cm/s, og et Froudetall på 0.57. Noen forsøk ble også kjørt med lavere vannføring.

En modellmålestokk var ikke definert, da dette var en generell studie. Resultatene presenteres dimensjonsløst, som bunelengde ift elvebredde osv.

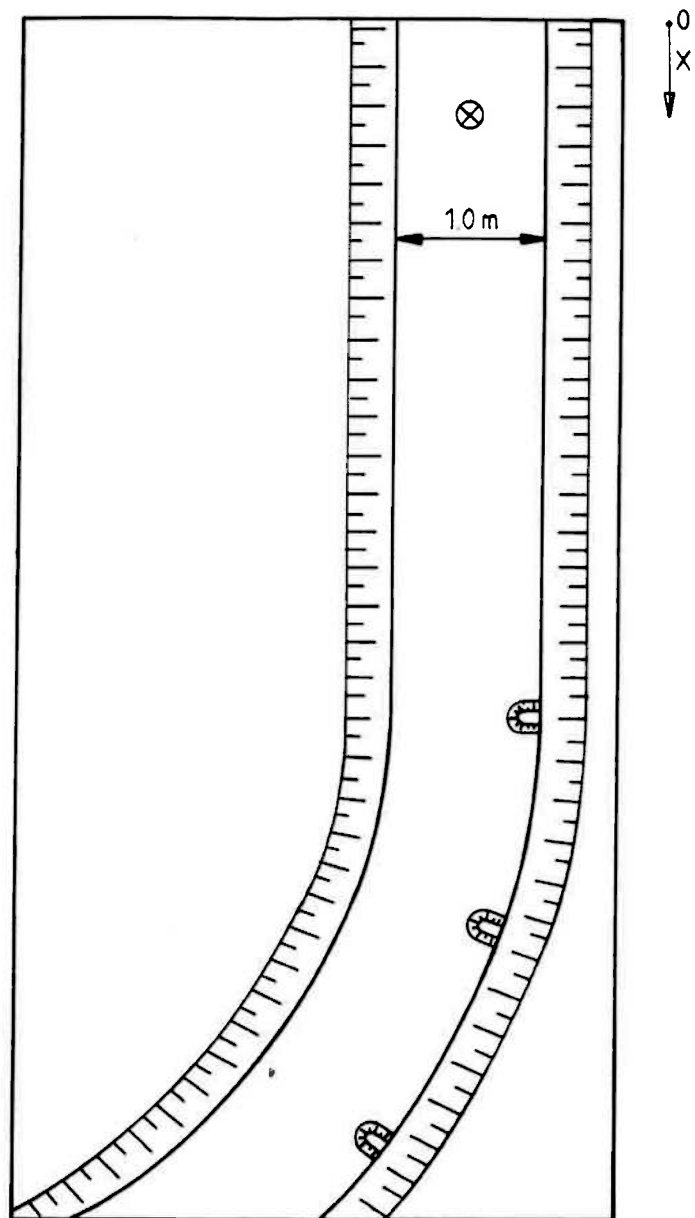
Figur 8b viser elveleiet som ble laget i erosjonsbasenget. Rettstrekningen før svingen har en lengde på 4 m, bredden i bunnen var 1 m. Rettstrekningen ble valgt så lang at jevne strømningsforhold var oppnådd før svingen.

Svingen har en radius på 5\*bredden (innersving-radius). På grunn av at modellen er smal, bare 4 m bred, omfatter svingen en sektor på ca 30°. Modell-elven har horisontal bunn, både på rettstrekningen og i svingen. Sideskråningene har helning 2:3. Bunnmaterialet er pukkk 8 - 12 mm, som er så grovt at erosjon ikke oppstår. Det er kun endring i strømforholdene som følge av bunene som studeres i denne fasen, eventuell erosjon ved buner vil måtte studeres i et senere, utvidet forsøk.



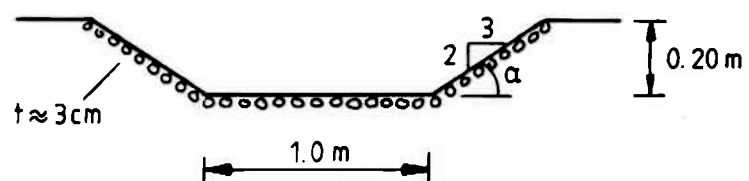
Figur 7. Skisse av fastinstallasjon for erosjonsmodeller.





a)

M = 1:50



b)

Figur 8. Prinsippskisse av elveutforming, stadium 2.

### 3.2. Registrering av strømningsmønster

Den metoden som er brukt for å sammenligne forskjellige alternativer av bueutforminger, er å sammenligne strømningsmønsteret - hastighetsfordelingen - i et horisontalt snitt.

Det er da antatt at den relative hastighetsfordelingen i to forskjellige horisontale snitt er tilnærmet konstant, som i de fleste tilfeller er en rimelig antagelse. Imidlertid, i et bakevjeområde kan dette være en for grov antagelse.

For å dokumentere hastighetsfordelingen er to forskjellige metoder brukt

- direkte hastighetsmåling
- strømbilder

Direkte hastighetsmåling gir hastighetsvektoren i en gitt posisjon ved et gitt tidspunkt, og er tidkrevende når et større antall punkter skal måles.

Strømbilder gir hastighetsvektorene i et stort antall punkt ved et gitt tidspunkt. Tallverdier for hastighetsvektorene, hastighet og retning kan måles fra bildet. Hastighetsvektorene kan digitaliseres inn vha et digitaliseringsbord koplet til en datamaskin.

Strømbilder kan kun gi hastighetsfordelingen i overflaten, mens ved strømmålinger kan hastighetsfordelingen på et vilkårlig dyp finnes.

Ved hastighetsmålingene er en elektomagnetisk måler brukt. Diameteren på målesonden er ca 1 cm, og både x og y retning av strømmen registreres. Hastighet og strømretning kan da beregnes ut fra måledataene.

Målesonden er montert på en rigg, og kan beveges over hele modellområdet, slik at posisjonen registreres nøyaktig for hver måling.

Hastigheten måles i en bestemt, konstant vanddybde.

Data for posisjon og hastighetskomponenter legges inn på en datamaskin, og hastighetsvektorer beregnes og plottes ut.

Strømbilder tas ved at konfetti - små papirbiter - spres jevnt utover modellen, og det tas bilder med lang lukkertid, 0.5-1 sekund. Hver konfetti vil avtegne en lys stripe på bildet, med lengde proporsjonal med vannhastighet og lukkertid.

Strømbilder gir kun overflateshastighet, men gir hastigheten for et stort antall målepunkter ved et gitt tidspunkt.

### 3.3. Utførte forsøk

Forsøkssituasjonene kan deles opp to kategorier som hver har to hovedvarianter.

- (1) ● elvesituasjon
  - (a) - rettstrekning
  - (b) - sving
- (2) ● bunetype
  - (a) - horisontal, molotype
  - (b) - skrå, dykket

I stadium 1 ble (1a) og (2a) kombinert, rettstrekning-horisontale buner

I stadium 2 ble (1b) og (2a) kombinert, sving-horisontale buner

I stadium 3 ble (1a) og (1b) kombinert med (2b), rettstrekning+sving-skrå buner.

Innenfor hver av disse underoppdelingene er det et stort antall parametre som kan varieres:

- elv:
  - bunnhelning langsetter
  - bunnhelning på tvers i sving
  - sidehelning
  - vannføring
  - strømmningssituasjon
  - bunnmateriale
  - svingradius
- buner
  - lengde
  - avstand til neste bune

- antall buner
- retning ift til strømretning
- helning av dykket bune
- høyde av dykket bune ift vannføring
- startplassering i sving

Bare en liten del av disse parametrene var det mulig å variere skulle forsøkene holdes innenfor et rimelig omfang.

I hovedsak er det de to parametrene:

- lengde av buner
- avstand mellom buner

som er blitt studert.

De andre forutsetningene under forsøket:

- Bunene stod normalt på strømretningen.
- For dykkede buner ble maksimal høyde valgt lik flomvannstand. De horisontale bunene var over flomvannstand.
- For skrå buner var helningen 1:3 og 1:6.
- Antall buner varierte mellom 1 og 4.
- Bunnhelning og bredde ble holdt konstant.
- Vannføring var konstant. I stadium 1 ble også vannføringen variert.
- Bunnmaterialet var grovt, ingen erosjon av elvebunnen oppstod.
- Strømmingssituasjonen var normalstrømming, jevn vanndybde
- En svingradius - 5\*bredden - ble brukt.

Tabell 3.1 og figur 9 gir en oversikt over bunetypene som er brukt. Tabell 3.2 gir oversikt over utførte forsøk.

I hovedsak ble forsøkene gjort med konstant vannføring. (45 l/s). I forsøksstadium 1- rettstrekning/horisontale buner- ble også vannføringen variert.

Et par tilfeller med lav vannføring ble også kjørt i forsøksstadium 3 - skrå buner.

Undervannet ble regulert slik at det var normalstrømming, dvs konstant vanndybde. Bunnhelningen var valgt slik at strømmingen var under-

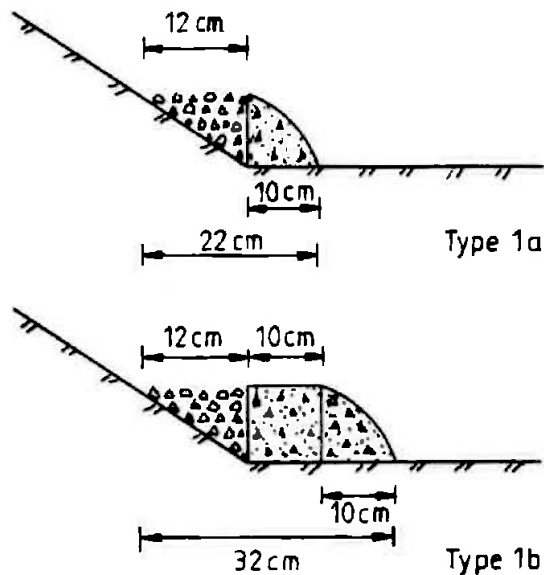
kritisk, Froudes tall  $Fr < 1$ .

Ved vannføring 45 l/s var vanndybden ca 8 cm, midlere strømhastighet 50 cm/s. Bunnskjærspenning tau var  $4 \text{ N/m}^2$ , som tilsvarener en stabil steinstørrelse  $d = 3 \text{ mm}$ , dvs ingen erosjon av bunnen, hvor  $d = 8 - 12 \text{ mm}$ .

Forhold vanndybde/bredde = 0.08. En 10 m bred elv med tilsvarende strømforshold ville ha en vanndybde på 0.8 m, ved en modellmålestokk på 1:10.

Tabell 3.1. Data for bunetyper brukt i forsøk.

Bune	Type	Lengde L	L/B	Vanndybde	Skråningsheining
		cm		cm	
Horisontal	1a	32	0.26	8	"2/3"
Horisontal	1b	22	0.18	8	"2/3"
Skrå, 1:3	2a	24	0.19	8	"2/3"
Hor/skrå, 1:3	2b	36	0.29	8	"2/3"
Skrå, 1:6	3	48	0.39	8	"2/3"



Figur 9. Bunetyper brukt i stadium 2, type 1a og 1b.

Tabell 3.2. Oversikt over forsøk, stadium 2 og 3.

Nr.	Situasjon	Vannføring	Dune nr. 1		Dune nr. 2		Avst. 1-2	Dune nr. 3		Avst. 2-3	Dune nr. 4		Avst. 3-4
			Posisjon	Type	Posisjon	Type		Posisjon	Type		Posisjon	Type	
		l/s	m		m		m	m		m	m		m
1	Rett/sving	44.5	4.5	1a	5.5	1a	1	6.5	1a	1	7.5	1a	1
2	Rett/sving	44.5	4.5	1a	6.5	1a	2	7.5	1a	1			
3	Rett/sving	44.5	4.5	1a	7.5	1a	3						
4	Rett/sving	44.5	4.5	1b	7.5	1a	3						
5	Rett/sving	44.5	4.5	1b	7.5	1b	3						
6	Rett	44.5											
7	Rett	44.5	2	2b	4	2b	2						
8	Rett	44.5	2	2a	4	2a	2						
9	Rett	44.5	2	2a									
10	Rett	44.5	2	2a	4.5	2a	2.5						
11	Rett	44.5	2	2a	5	2a	3						
12	Rett	44.5	2	3									
13	Rett	44.5	2	3	4	3	2						
14	Rett	44.5	2	3	4.5	3	2.5						
15	Rett	44.5	2	3	5	3	3						
16	Rett	20.9	2	3	5.2	3	3.2	8	3	2.8			
17	Rett	26.7	2	3	5.2	3	3.2	8	3	2.8			
18	Sving	26.7	2	3	5.2	3	3.2	8	3	2.8			
19	Sving	26.7	2	3	5.2	3	3.2	8	3	2.8			
20	Sving	44.5	2	3	5.2	3	3.2	8	3	2.8			
21	Sving	44.5	2	3	5.2	3	3.2						
22	Sving	44.5	2	3	5.2	3	3.2	7.6	3	2.4			
23	Sving	44.5			5.2	3		7.6	3	2.4			
24	Sving	44.5			5.2	3							
25	Sving	44.5			5.2	3		8	3	2.8			
26	Sving	44.5			5.2	2a		8	2a	2.8			
27	Sving	44.5	2	2a	5.2	2a	3.2	8	2a	2.8			
28	Sving	44.5	2	2a	5.2	2a	3.2						
29	Sving	44.5	2	2a	5.2	2a	3.2	7.4	2a	2.2			
30	Sving	44.5			5.2	2a		7.4	2a	2.2			
31	Sving	44.5			5.2	2a							

## 4. RESULTATER

### 4.1. Buner på rett strekning

#### 4.1.1. Hastighetsreduksjon ved elvebredd bak bune

I stadium 1 av modellundersøkelsene ble hastighet langs elvebredden bak en enkelt bune og mellom to buner målt. Hastighet ble målt ca 3 cm ut fra bredden, i 3 cm dyp.

Dette ble gjort for:

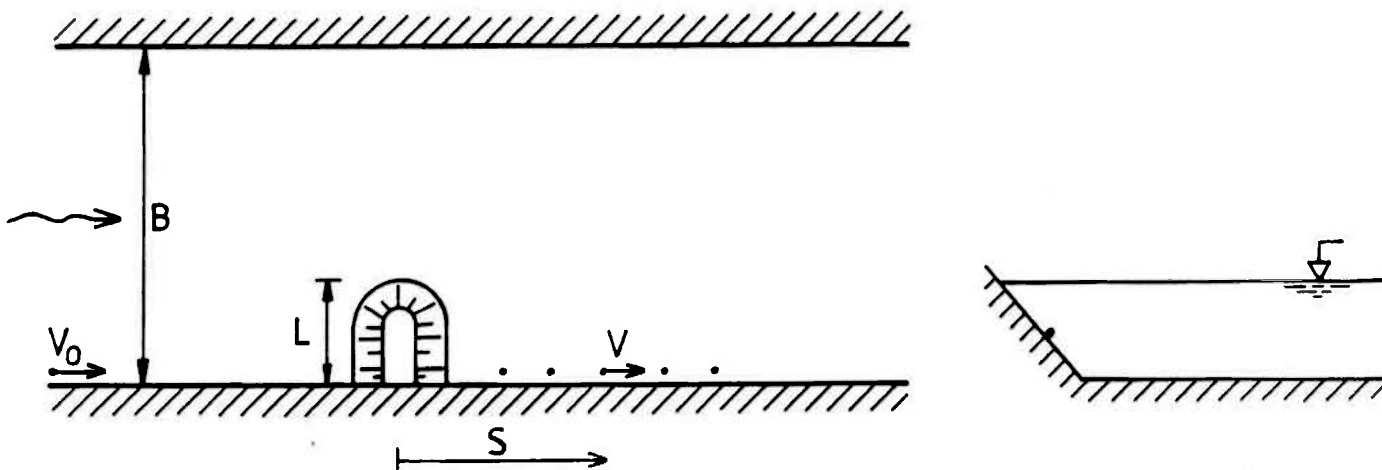
- varierende buneavstand
- varierende bunelengde
- varierende Froudetall

For hver endring av parametrene ble maximum målt hastighet ved elvebredden brukt som karakteristisk verdi.

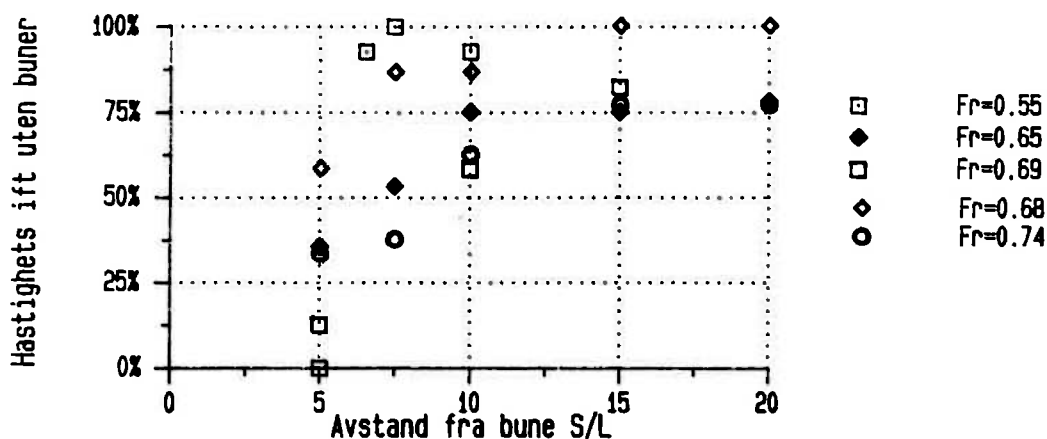
Under disse forsøkene var bunnhelning 1/300, og bunnmaterialet i modell var stein med  $d_{50} = 5$  mm.

#### Hastighet bak en enkelt bune

Hastighet ved elvebredd bak en enkelt bune, med lengde  $0.1 \cdot B$  ble målt, som vist på skisse. Hastighet i elv uten bune ble også målt, i samme posisjon.



Figur 10 viser hvordan hastighet langs elvebredd bak en bune blir redusert. Spredningen er stor, det skyldes at målingene er tatt helt opp til elvebredden, der hastigheten varierer sterkt med avstand fra bunn. Bak bunen dannes det også virvler, hvor hastighet varierer både i styrke og retning. Men tendensen er klar, hastighet blir redusert til < 50% av opprinnelig hastighet 5 - 10 bunelengder bak bunen.



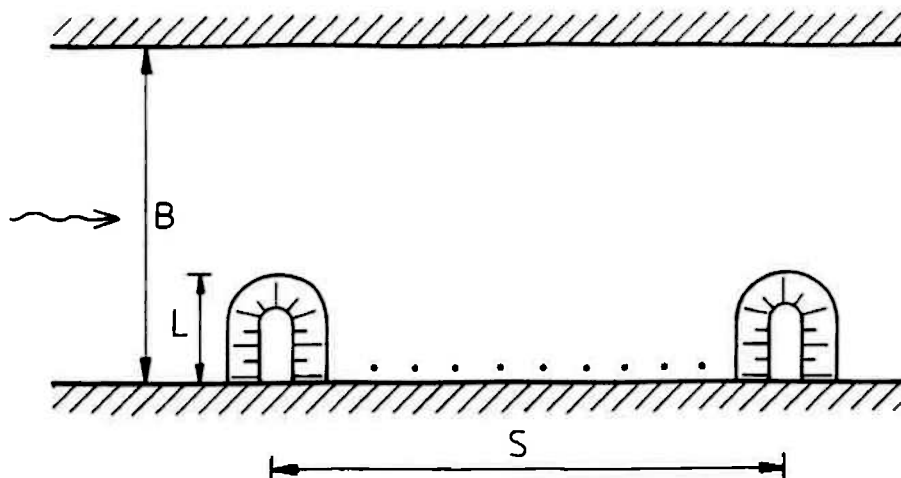
Figur 10. Hastighet langs elvebredd bak en enkelt bune sfa avstand fra bunen. Hastigheten er dimensjonsløs, i prosent av hastighet uten buner. Bune lengde  $0.1 \cdot B$ .

Hvor stor hastighetsreduksjon som er nødvendig vil avhenge av hvilket bunnmateriale som er på stedet, og strømforholdene. Når hastigheten reduseres med en faktor 2 (50%), vil nødvendig stabil steinstørrelse reduseres med kvadratet av hastighetsreduksjonene,  $2^2 = 4$ . Som eksempel, om nødvendig steinstørrelse for å unngå erosjon under flom uten buner er 20 mm, vil stabil steinstørrelse være 5 mm om hastigheten ved elvebredd reduseres til 50% av opprinnelig verdi.

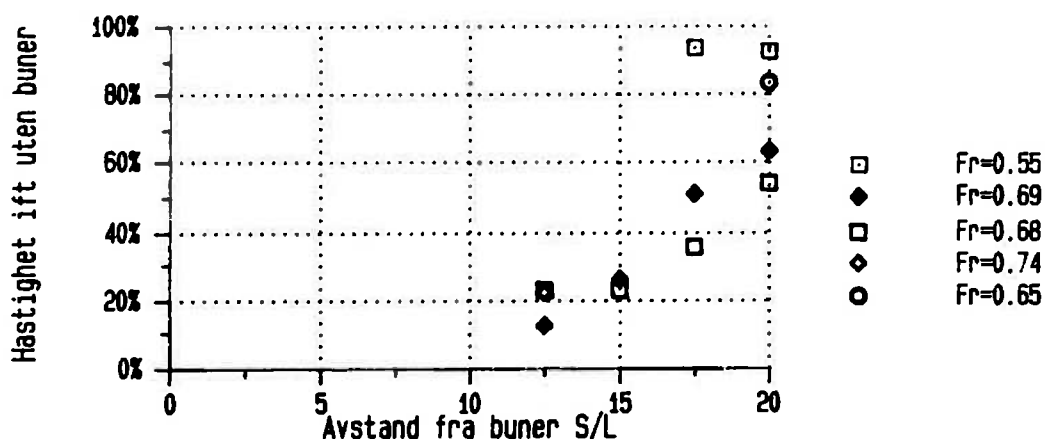
#### Hastighet mellom to buner

Hastighet ved elvebredd mellom to buner, med lengde  $0.1 \cdot B$  ble målt som funksjon av buneavstand S, som vist på skisse. For hver S-verdi ble maksimum hastighet valgt som karakteristisk verdi. Hastighet i elv uten buner ble også målt, i samme posisjon.



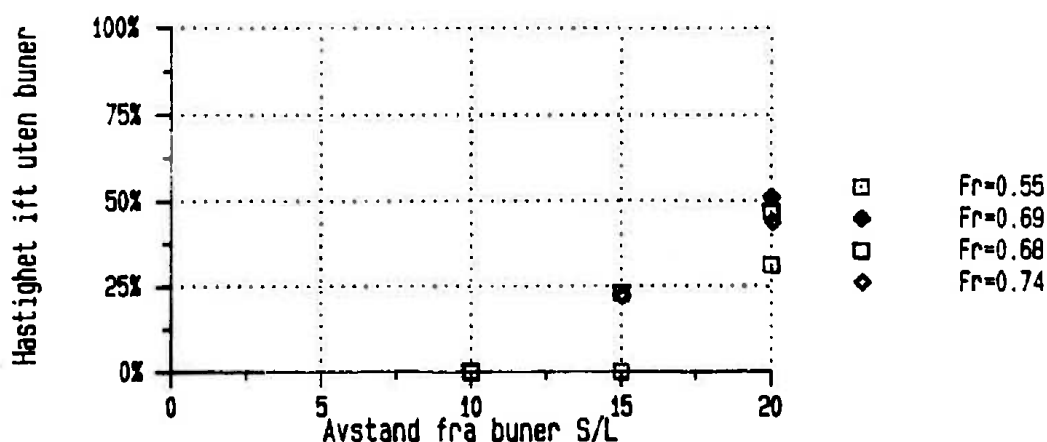


Figur 11 viser hvordan hastighet langs elvebredd mellom to buner blir redusert, når bunelengden er  $0.1 B$ . Spredningen er mindre her. Hastighetsreduksjonen er større enn for en enkelt bunne, det skjer et samvirke mellom bunene. Disse målingene indikerer at en hastighetsreduksjon på 50% vil oppnås med en buneavstand på 15 - 18 bunelengder, når  $L = 0.1 B$ .



Figur 11. Hastighet langs elvebredd mellom to buner sfa avstand fra bunne. Bune lengde  $0.1 \cdot B$ . Hastighet er dimensjonsløs, i prosent av hastighet uten bunne.

Figur 12 viser hvordan hastighet langs elvebredd mellom to buner blir redusert, når bunelengden er  $0.2 B$ . Disse målingene indikerer at en hastighetsreduksjon på 50% vil oppnås med en buneavstand på opptil 20 bunelengder, når  $L = 0.2 B$ .



Figur 12. Hastighet langs elvebredd mellom to buner sfa avstand fra bune. Bune lengde  $0.2 \cdot B$ . Hastighet er dimensjonsløs, i prosent av hastighet uten bune.

#### 4.1.2 Strømfordeling ved buner på rettstrekning

For å kartlegge hvordan buner påvirker strømforholdene over et større område, ble det tatt strømbilder, hvor avstand mellom buner ble variert.

##### Horisontale buner

Strømbilder for horisontale buner på rettstrekning er vist i bilag C.

Bilag C1 viser hvordan en bune  $L = 0.32/1.24 = 0.26 B$ , endrer strømforholdene i forhold til elv uten buner. Det dannes virvler bak bunen, med betydelig lavere strømhastighet.

Strømhastigheten reduseres også oppstrøms. Det er en hovedårsak til at flere buner samvirker.

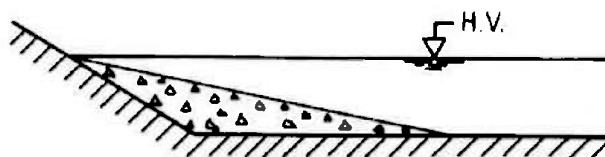
Strømforholdene mellom to buner,  $S/L = 5.7$  og  $7.9$  er vist i bilag C2. I begge tilfeller er det rolige strømforhold mellom bunene, og også oppstrøms den øverste, og nedstrøms den nederste. Ved  $S/L = 9.5$ , bilag C3, er strømhastigheten lav mellom bunene.

Bilag C4 - C7 viser strømforholdene mellom kortere buner  
 $L = 0.22/1.24 = 0.18 B$ .

Selv når buneavstanden økes opp til  $S/L = 16.5$ , så viser C7 at strømmen ved bredden er sterkt redusert ift strøm uten buner, se C1.

#### Skrå buner, i vertikalplanet

Buner som skråner vil vises mindre ved lav vannstand, og vil også kreve mindre fyllingsvolum. For å fungere må de nå over høyeste vannstand under flom, ved bredden, se skisse. Ved lav helning vil derfor skrå buner rekke lengre ut i elva enn en horisontal bune



Skrå buner vil innsnevre tverrsnittet mindre, og faren for en evt oppstuvning, og faren økt hastighet på motsatt bredd er lavere.

Hastighet ved bunetåa blir i liten grad økt, og faren for lokalerosjon ved bunetåa er betraktelig redusert.

Bruk av skrå buner har flere fordeler, men skrå buner vil ikke i samme grad redusere hastigheten ved elvebredden, spesielt ikke i de øvre vannlag. For å få en lik erosjonsbeskyttelse av elvebredden, spesielt i nivå med flomvannstand, må avstanden mellom skrå buner være kortere enn tilsvarende horisontale buner. Selv om volum per skrå bune er lavere enn for horisontale buner, vil en redusert avstand mellom bunene bety at masseforbruket ikke nødvendigvis blir lavere ved bruk av skrå buner.

Forsøk med skrå buner, med helning 1:6 og 1:3 ble gjort for sammenligning med horisontale buner.

Strømbilder for skrå buner på rettstrekning er vist i bilag D.

#### Skrå buner helning 1:6

Strømforholdene bak en skrå bune, lengde  $L = 48 \text{ cm} = 0.39B$  er vist i bilag D1. Ved sammenligning med C1 ses at området med reduksjon av hastighet ved elvebredden er betraktelig mindre ved skrå buner. Det må understrekes at strømbildet viser strømfordelingen i overflaten, dypere ned i vannmassen reduseres vannhastigheten ved bredden mer enn bildet på D1 viser.

Strømforholdene mellom to buner, lengde  $L = 48 \text{ cm} = 0.39B$ , med avstand  $S = 2.3 \text{ m}$ ,  $S/L = 4.7$  er vist i bilag D2. I dette tilfellet er det rolige strømforhold mellom bunene, og ved denne avstand vil skrå buner gi tilsvarende erosjonsbeskyttelse som horisontale buner.

Strømforholdene mellom to buner, lengde  $L = 48 \text{ cm} = 0.39B$ , med avstand  $S/L = 6.6$  er vist i bilag D3. I dette tilfeller er strømforhold mellom bunene ikke tilfredstillende for erosjonsbeskyttelse av elvebredden, avstanden mellom bunene er for stor, og ved denne avstand vil skrå buner ikke gi tilsvarende erosjonsbeskyttelse som horisontale buner.

#### Skrå buner helning 1:3

Strømforholdene bak en skrå bune, lengde  $L = 24 \text{ cm} = 0.19B$  er vist i bilag D3. Ved sammenligning med C1 ses at området med reduksjon av hastighet ved elvebredden er betraktelig mindre ved skrå buner. Ved sammenligning med D1 ses at området med reduksjon av hastighet ved elvebredden er større ved helning 1:3 enn ved helning 1:6. Det må understrekes at strømbildet viser strømfordelingen i overflaten, dypere ned i vannmassen reduseres vannhastigheten ved bredden mer enn bildet på D3 viser.

Strømforholdene mellom to buner, lengde  $L = 48 \text{ cm} = 0.39B$ , med avstand  $S = 2.3 \text{ m}$ ,  $S/L = 9.3$  er vist i bilag D2. I dette tilfeller er det rolige strømforhold mellom bunene, og ved denne avstand vil skrå buner gi tilsvarende erosjonsbeskyttelse som horisontale buner. Ved sammenligning med D1 ses at reduksjon av hastighet ved elvebredden er tilsvarende ved helning 1:3 enn ved helning 1:6. Buner med helning 1:3

er like effektive. Den aktuelle avstand mellom bunene er den samme som ved helning 1:6, men pga større helning blir bunene kortere, og S/L-forholdet øker. Ved samme høyde inne ved elvebredden vil buner med helning 1:3 kreve ca 50% av massen som en bune med helning 1:6. Kostnadmessig er buner med helning 1:3 derfor gunstigere enn buner med helning 1:6.

Strømforholdene mellom to buner, lengde  $L = 24 \text{ cm} = 0.19B$ , med avstand  $S = 2.8 \text{ m}$ ,  $S/L = 11.8$  og  $S = 3.3 \text{ m}$ ,  $S/L = 13.8$  er vist i bilag D4. I dette tilfellet er strømforhold mellom bunene ikke tilfredstillende for erosjonsbeskyttelse av elvebredden, avstanden mellom bunene er for stor, og ved denne avstand vil skrå buner ikke gi tilsvarende erosjonsbeskyttelse som horisontale buner.

Skrå buner med helning 1:3 og helning 1.6 vil gi tilsvarende erosjonsbeskyttelse som horisontale buner om avstanden mellom bunene reduseres sammenlignet med avstanden med horisontale buner.

Buner med helning 1:3 er kostnadmessig en gunstigere løsning enn buner med helning 1:6. For begge helninger bør avstanden mellom bunene være den samme for å få tilsvarende erosjonsbeskyttelse.

Forsøk med liten vannføring ble også gjort. I D5 vises strømfordeling med buner helning 1:6,  $L = 48 \text{ cm}$ ,  $S = 3.0 \text{ m}$ ,  $S/L = 6.4$ . I dette tilfellet er hastighetsreduksjon ved bredden tilfredsstillende. Men ved lav vannføring er faren for erosjon av elvebredden liten, og dette tilfellet er lite viktig i praksis.

#### 4.2. Buner i sving-horisontal bunn

I sving foregår erosjon i yttersving, som derfor vil være den naturlige

plass å plassere buner. Under forsøkene ble den første av bunene plassert ved inngang til til sving. Bunn i sving var horisontal, i virkeligheten vil buner i sving være dypere i yttersving.

Det er logisk å forvente at buneavstand i sving må være mindre enn buneavstand på rettstrekning. En vannpartikkel som fortsetter rett fram fra bunetåa vil treffe elvebredden tilsvarende lengden av

neste bune plasseres der tangenten til svingen fra bunetåa treffer elvebredden, referer tidligere skisse. Se avsnitt 2.2.1.

#### 4.2.1. Målt strømfordeling ved horisontale buner i sving

For å bedre kunne vurdere hvordan buner påvirker strømforholdene, ble strømforholdene kartlagt ved omfattende hastighetsmålinger foran og bak bunene, og ute i elva. Målingene ble gjort på dyp ca  $0.6 \cdot \text{dybde}$ , og både retning og hastighet ble målt. Bunelengde, buneavstand og antall buner ble variert mellom 2 og 4 buner.

På figurene er startpunkt av pilposisjon hvor hastighet ble målt. Bunetype er indikert på figur. Strømfordeling er vist i bilag E1 til E5. I figuren øker buneavstand gradvis. Som bilag E5 viser, gir en buneavstand på  $S = 3.5$  m, med bunelengde  $L = 0.22$ ,  $S/L = 15.9$  ca 50% reduksjon, men strømmen går inn mot bredden før bunen, og  $S/L$  på 15.9 er for stor avstand i sving.

Bilag E3, med bunelengde  $L = 0.32$  m, og buneavstand  $S = 3.0$  m,  $S/L = 9.4$  viser at strømmen nær bredden er sterkt redusert i forhold til strøm ute i elva. I sving bør buneavstand ikke være større enn  $S/L = 10$ .

#### 4.2.2. Bilder av strømfordeling ved horisontale buner i sving

Strømfordeling lokalt ved en enkelt bune i sving er vist på fotoet i figur 13a. Figur 13b viser strømfordeling i svingen ved to buner, den første plassert foran inngang til svingen.



Figur 13. Buner i sving, detaljer strømfordeling.  $L=32\text{cm}$  a) 1 bune  
b) 2 buner  $S=3,5\text{cm}$   $S/L=10.9$

### 4.3. Buner i sving - skrå bunn

Etter at forsøkene med buner på rettstrekning og i sving med horisontal bunn var ferdige, ble det gjort tilleggsforsøk med buner i elvesving med skrå bunn, dvs med en markert dypål i yttersving. Resultatet av disse forsøkene, med en kort beskrivelse av modellen, blir beskrevet i dette underkapitlet.

#### 4.3.1. Beskrivelse av modell og forsøksopplegg

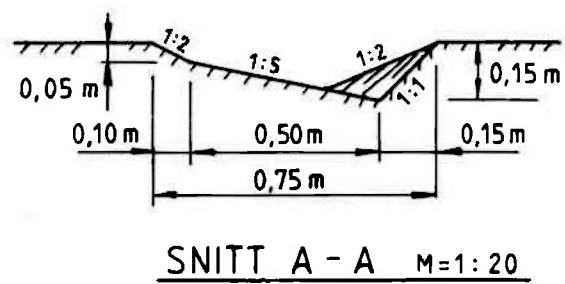
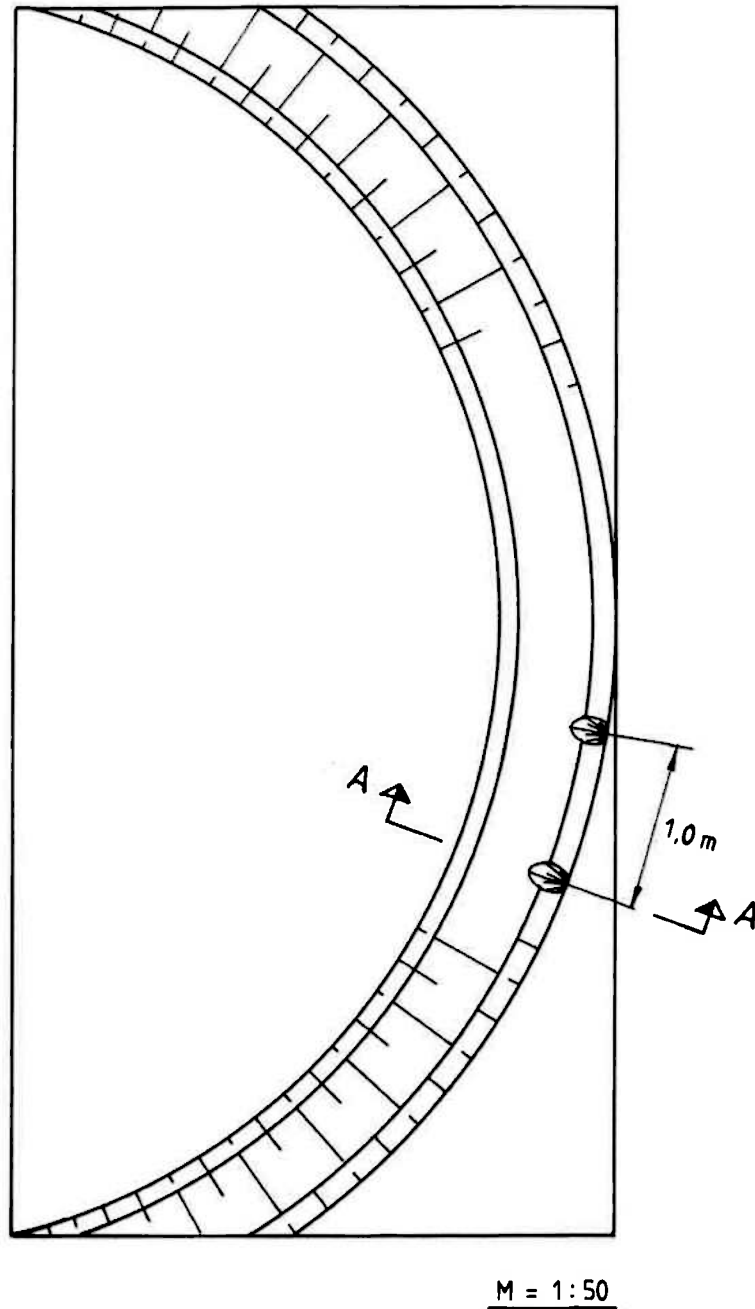
Hensikten med forsøkene var å undersøke effekten av dykkede buner/buner fylt opp til overflaten i en elvesving med skrå bunn, med en markert dypål i yttersving.

I figur 14 vises en prinsippskisse av elveutformingen som ble brukt i disse forsøkene. Elveprofilet er 50 cm bredt i bunnen, med en jevn helning på tvers på 1:5. I yttersving har elvebredden en helning på 1:1, I innersving har elvebredden en helning på 1:2. Bunnen i elveprofilet ble festet med mørtel, dette gjorde det enklere å måle hastigheter.

I lengderetningen hadde elven en konstant radius på 4.0 m i innersving, og 4.60 m i yttersving. Bunnhelningen var 3 cm på 800 cm,  $I=1/267$ . Under forsøkene ble vannføringen tilpasset slik at det var en tilnærmet normalstrømning, med vanndybde 12 cm, målt i dypålen.

Bunene ble støpt i betong. Buner av pukk viste seg vanskelig å få til å stå stabilt ved så bratte helninger som viste seg nødvendig, uten å bruke for stor stein, relativt til modellskala.

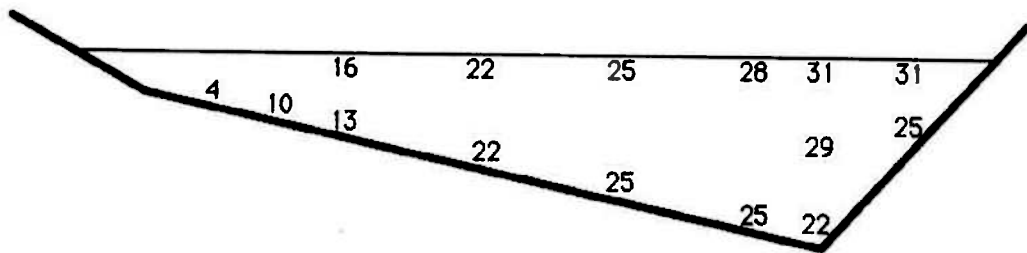




Figur 14. Prinsippskisse av elveutforming, sving med skrå bunn.

#### 4.3.2. Strømforhold uten buner

For å kartlegge strømforholdene ble hastighetene målt i et stort antall punkter i flere tverrsnitt. Under målingene ble det brukt et microflygel, en liten propell hvor antall omdreininger blir målt kontinuerlig, hastigheten kan så avleses på en kurve. Fordelen med dette instrumentet er at det gir en rask avlesning. Imidlertid måles hastigheten kun i en retning, måleren må dreies slik at det er den maksimale hastighetskomponenten som måles. I figur 15 er den målte strømfordeling i et typisk elvetverrsnitt vist. Det karakteristiske med strømfordelingen i en elvesving med en markert dypål er at størstedelen av vannføringen går i yttersving, der er også hastigheten størst. I innersving er hastigheten lav.



Figur 15. Målt strømfordeling i elvetverrsnittet - uten buner

I bilag G1, første bilde, er strømforholdene i overflaten uten buner vist på et foto.

#### 4.3.3. Strømforhold ved dykket bune

Det karakteristiske ved en dykket bune er at vannhastigheten over bunen øker sterkt. En sammenligning med strømning over en terskel er relevant. Karakteristisk for en strøm som øker hastigheten - akselererer - er at den motsetter seg retningsendringer, den strømmer rett frem. Strømmen vil derfor ha retning mot elvebredden nedstrøms bunen. Vannstrømmen vil angripe elvebredden ved og nedstrøms bunen med større hastighet enn uten bune. En dykket bune som fyller opp deler av

en markert dypål i en elvesving vil medføre større erosjon av elvebredden lokalt, på grunn av at hastigheten akselereres når vannet strømmer over.

En dykket bune avbøyer i liten grad vannet mot innersving. Vannstrømmen som passerer over bunen vil gi økt erosjon av elvebredden ved og nedstrøms bunen i nivået over den dykkede bunen. En løsning med dykkede buner anbefales ikke. Skal buner brukes i elvesvinger med dypål må bunen føres over høyeste flomvannstand.

#### 4.3.4. Utforming av buner

Buner i sving med skrå bunn - med en sterkt markert dypål - bør utformes noe forskjellig enn for de tilfeller der elven har en horisontal/flat bunn. En årsak er at strømfordelingen varierer over tverrsnittet, størstedelen av vannføringen går i yttersving, i det dypeste partiet. Blir en for stor del av det effektive tverrsnittet sperret av en bune, medfører dette en kraftig oppstuvning, og vannet blir presset over mot innersving, hvor hastigheten øker sterkt.

Som beskrevet i forrige avsnitt, hvis høyeste punkt på bunen ikke ble ført over høyeste flomvannstand medførte dette større fare for erosjon av elvebredden nedstrøms bunen. Bunene må føres over høyeste flomvannstand.

I svinger med dype dypåler kan dette kravet om at bunene må føres over høyeste flomvannstand stå i direkte motsetning til ønsket om en minimal innskrenkning av det effektive strømtverrsnittet.

Det er derfor viktig at bunen bygges med så stor helning som praktisk mulig. I forsøkene ble det brukt en helning på 1:2. I praksis vil det neppe være aktuelt å bygge dem brattere heller. 1:2 er antatt å være en helning som kan anbefales.

Denne utformingen er utprøvd i modell. Den beskytter elvebredden opp over høyeste flomvannstand, samtidig som den minimaliserer innskrenkning av det effektive strømtverrsnittet, minimaliserer oppstuvning, og minimaliserer hastighetsøkningen i innersving.

Denne bunetypen være mindre synlig, stikke mindre ut i elven enn den typen med slak helning som er utprøvd for elver med flat bunn. For at denne typen skal virke like bra må buneavstanden reduseres sammenlignet med bunetype med slak helning. Anbefalt buneavstand vil bli beskrevet i et senere avsnitt.

#### 4.3.5. Strømforhold ved buner

For å kartlegge hvordan buner påvirker strømforholdene, ble hastigheten målt i flere tverrsnitt. To buner ble lagt ut, bune 2 i avstand 160 cm nedstrøms bune 1. Hastighetene ble målt fra 100 cm oppstrøms bune 1 ned til 100 cm nedstrøms bune 2.

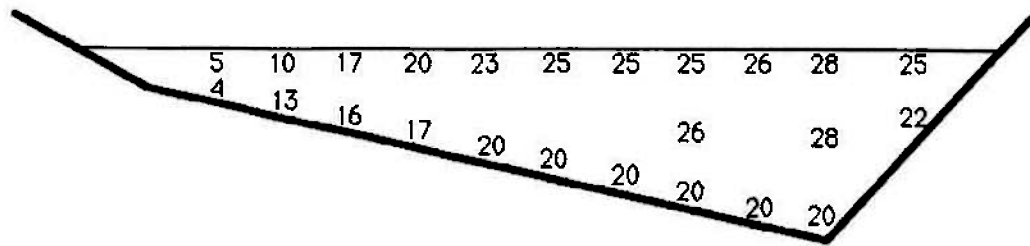
Buneutformingen som er indikert på figur 16, er skrå bune, helning 1:2, ført opp over høyeste vannstand. Høyden av bunen er 15 cm, total lengde 30 cm. Bredden av bunen er ca 20 cm.

Figur 16 viser hastighetsfordelingen oppstrøms og rett utenfor bune 1. Hastigheten er her ikke influert av bune 2, og figuren viser hvordan hastigheten påvirkes ovenfor en frittstående bune.

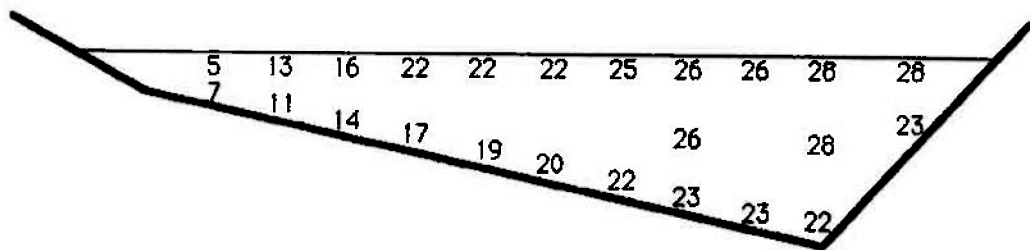
Figuren 16d) viser at rett utenfor bunen øker hastigheten, og dreier over mot innersvingen.

Oppstrøms avtar hastigheten noe like før bunen, delvis på grunn av at bunen forårsaker noe oppstuvning. Ved bredden ovenfor bunen avtar hastigheten hovedsaklig fordi vannstrømmen begynner å dreie mot innersving, det dannes et roligere parti oppstrøms, se figur 16c). Som figur 16b) viser er det ved avstand 100 cm - ca 3 bunelengder - oppstrøms ingen effekt av bunen.

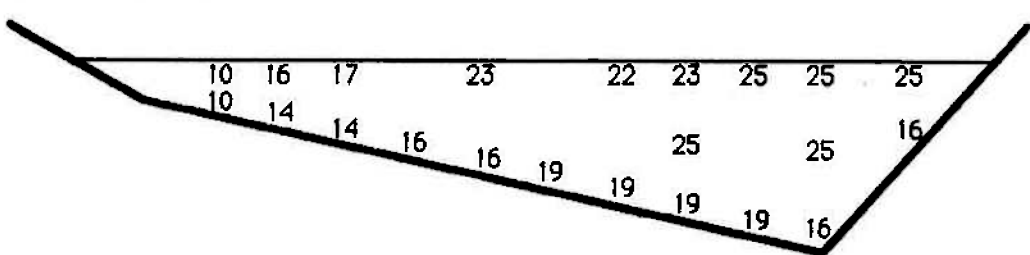
a) 150 cm oppstrøms bune.



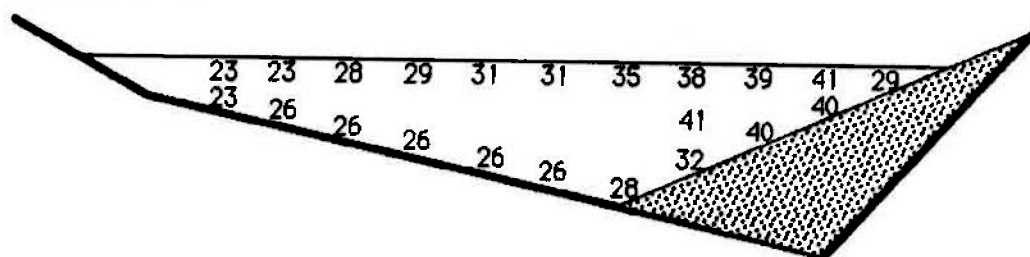
b) 100 cm oppstrøms bune.



c) 50 cm oppstrøms bune.



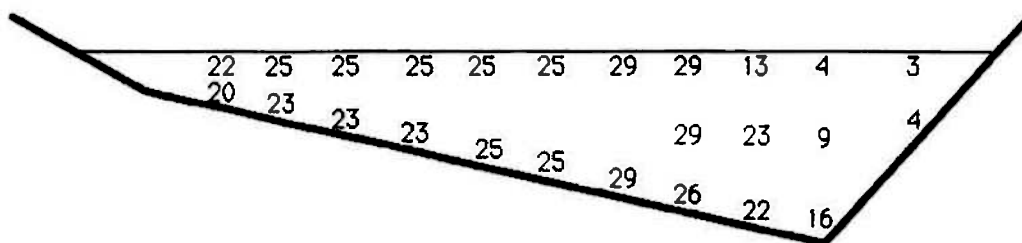
d) senter bune.



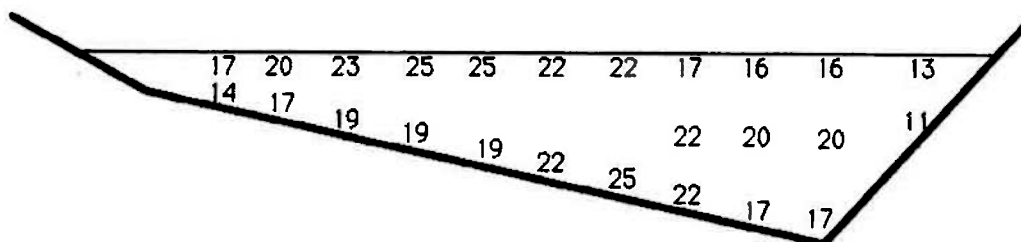
Figur 16. Målt strømfordeling ved og oppstrøme bune 1.

Figur 17 viser hastighetsfordelingen nedstrøms bune 1 og rett utenfor bune 2. Hastighetene er her her influert av både bune 1 og bune 2, og figuren viser hvordan hastigheten påvirkes mellom to buner. Avstanden mellom bunene vil påvirke hastighetsfordelingen, i neste avsnitt vil effekten på hastigheten ved varierende avstand mellom buner ved elvebredden beskrives.

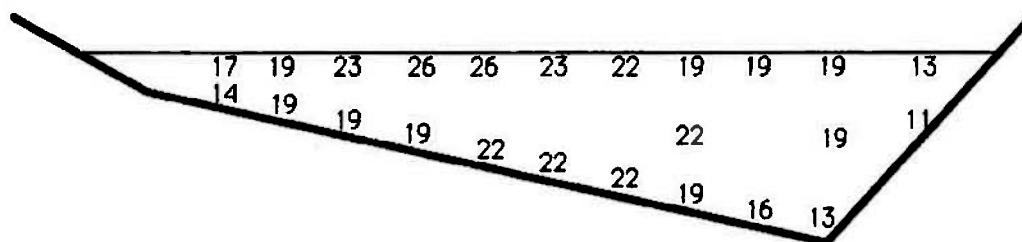
a) 50 cm nedstrøms bune 1.



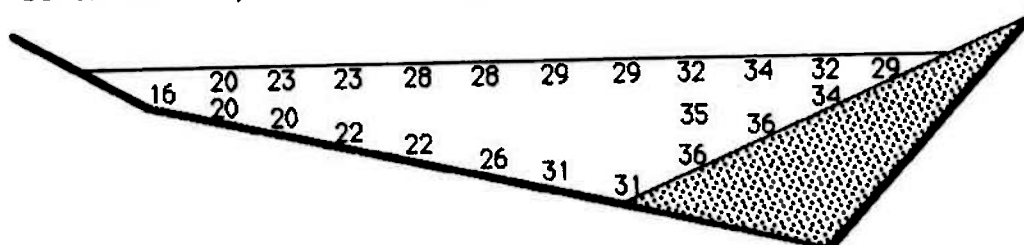
b) 100 cm nedstrøms bune 1



c) 140 cm nedstrøms bune 1



d) senter bune 2, 160 cm nedstrøms bune 1



Figur 17. Målt strømfordeling mellom bune 1 og bune 2, avstand 160 cm,  
S/L=5.3

#### 4.3.6. Avstand mellom buner

For å bestemme hvilken avstand mellom buner som reduserer hastigheten ved elvebredden ned mot 50% av hastighet uten buner, ble det gjort målinger. Hastighet ved elvebredden, ved midlere dybde, ca 5 cm under overflaten, ble målt for forskjellig avstand fra bune, både oppstrøms og nedstrøms, for tre tilfeller, 1) en enkelt bune, 2) to buner med buneavstand 160 cm,  $S/L=5.3$ , og 3) to buner med buneavstand 100 cm,  $S/L=3.3$ . Resultatet av disse målingene er vist på figur 18. Bunetypen er den samme som vist på figur 16 og 17.

I bilag G1, andre bilde, er det vist på et foto strømforholdene i overflaten ved en enkelt bune. I bilag G2, første bilde, er det vist strømforholdene i overflaten ved 2 buner, avstand 160 cm, i det andre bilde, er det vist strømforholdene i overflaten ved 2 buner, avstand 160 cm.

Figur 18a) viser at ved en enkelt bune er hastigheten ved bredden mindre enn 60% av opprinnelig hastighet opptil 2 bunelengder nedstrøms bunen. For større avstand øker hastighet opp mot opprinnelig hastighet.

Figur 18b) viser at ved to buner med avstand 160 cm,  $S/L=5.3$ , er hastigheten ved bredden maksimalt 60% av opprinnelig hastighet mellom bunene, i området mellom 2-4 bunelengder nedstrøms bune 1.

Ved to buner, og med redusert avstand til 100 cm,  $S/L=3.3$ , er hastigheten ved bredden maksimalt 50% av opprinnelig hastighet mellom bunene, i et begrenset området i avstand ca 2.5 bunelengder nedstrøms bune 1. For størstedelen av strekningen er hastigheten lavere.

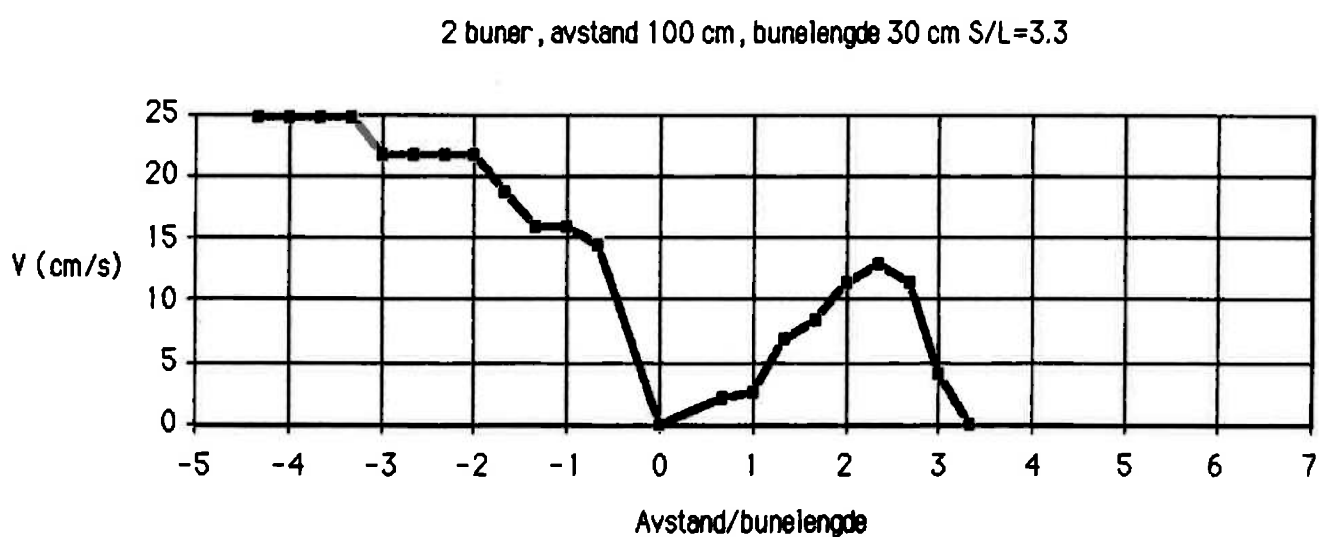
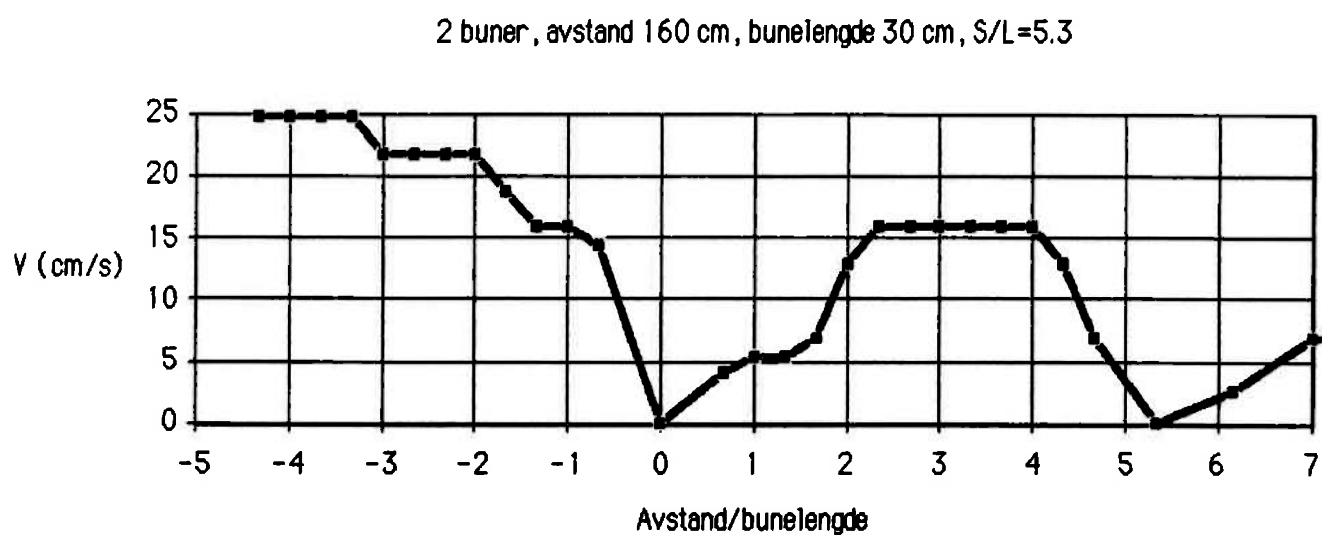
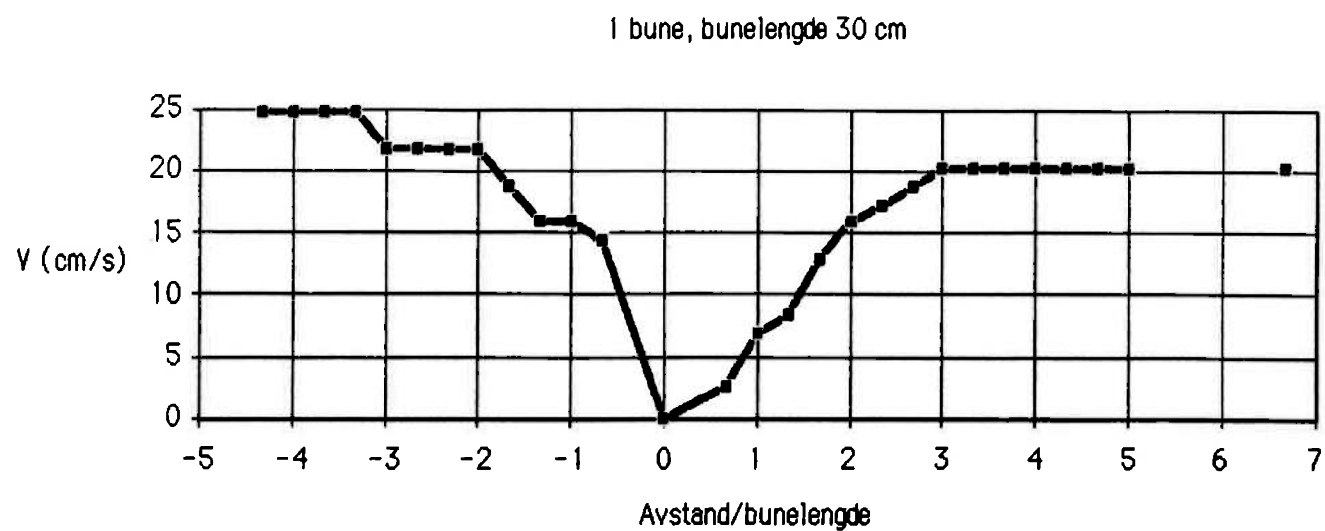
Ut fra disse målingene anbefales det at buneavstanden ved buner i sving, med en markert dypål, bør være i området 3-5 ganger bunelengden. Dette er basert på en buneutforming, hvor bunen starter ved høyeste flomvannstand, og bygges med steil helning ut i elva, i modellen er det brukt en helning på 1:2.

Imidlertid vil helningen være avhengig av opprinnelig helning av elvebredd i yttersvingen. Ved disse forsøkene det antatt at elvebredden er steil, helningen er 1:1 i modellen. Er helningen slakere,

må bunnen bygges slakere slik at den rekker tilstrekkelig ut i elva.

Bunelengden vil være avhengig av dypåleens dybde, ved en helning på 1:2 blir bunelengden 2 ganger vanndybden, og bunnavstanden blir da 6-10 ganger vanndybden i dypålen ved høyeste flomvannstand.





Figur 18. Hastighet ved bredden som funksjon av avstand fra bune.

#### 4.4. Oppstuvning foran buner - rett strekning

For å vurdere om buner kan forårsake oppstuvning, ble vannstanden oppstrøms målt vha et trykkuttak. Trykkuttaket var plassert i posisjon  $x = 1.0$  m, ref figur 8. I posisjon  $x = 2.0$  m, og  $x = 4.0$  m ble det plassert buner. Vannstand ble målt uten buner, med 1 bune, og med 2 buner. Skrå buner med helning 1:3 og 1:6 ble brukt. Resultatene av målingene er vist i tabell 5.1

Tabell 5.1. Oppstuvning foran buner.

	Vanndybde cm	Oppstuvning %
Ingen buner	8	0.0%
1 bune, 1:3, posisjon 2.0 m	8.33	4.1%
2 buner, 1:3, posisjon 2.0, 4.0	8.44	5.5%
1 bune, 1:6, posisjon 2.0 m	8.56	7.0%
2 buner, 1:6, posisjon 2.0, 4.0	8.8	10.0%

Buner med helning 1:6 gir relativt stor oppstuvning, og større oppstuvning enn buner med helning 1:3. Dette er rimelig da bunearealet ved helning 1:6 er  $0.014 \text{ m}^2$ , tverrsnittsarealet av elva ( $0.09 \text{ m}^2$ ) innsnevres 16%. Ved helning 1:3 er bunearealet  $0.05 \text{ m}^2$ , tverrsnittsarealet av elva innsnevres 5%.

## 5. DISKUSJON AV RESULTATER OG KONKLUSJON

### 5.1. Vurdering

vurdering mot tradisjonelle metoder

Når hensiktmessighet av buner skal vurderes, må de sammenlignes med tradisjonell forbygning, steinsetting av hele elvebredden. Skal buner brukes, bør fordelene være større enn ulempene.

#### **Fordeler med buner**

- lavere anleggskostnader

Buner som forbygning kan være en økonomisk gunstigere løsning pga

- a) mindre steinvolum avhenger av lengde-avstand-forhold, i enkelte tilfeller kan masseforbruket være lavere med tradisjonell forbygning
- b) rimeligere masse kan brukes
- c) enklere utlegging
- d) redusert areal som må steinsettes

- forbedrede fiskemuligheter

I mange tilfeller vil buner skape gode, nye fiskeplasser. De kan også gjøre det enklere for bevegelseshemmede å kunne fiske, om toppen av bunene bygges som en vei

#### **Ulemper med buner:**

- endring av strømforholdene

Buner forårsaker en lokal økning av hastigheten pga at tverrsnittet innsnevres. Strømmen kan også få en retning mot motsatt elvebredd, dette kan gi økt hastighet på motsatt bredd - og mulig erosjon. Innsnevring av tverrsnittet kan også forårsake oppstuvning, og oversvømming av arealer oppstrøms.

- lokalerosjon langs spissen

Rundt bunetåa vil hastighet øke betraktelig, og lokalerosjon vil oppstå om ikke bunnen forsterkes. Uten ekstra erosjonsbeskyttelse av bunnen, kan lokalerosjon medføre at deler av bunnen raser ut

- estetisk

Ved lav vannstand vil bunene vises godt, og kan virke som en estetisk "forurensing" av miljøet. Dette vil avhenge av hvor omhyggelig den er utført.

## 5.2. Anvendelse

### 5.2.1. Rettstrekning

Resultatet fra forsøkene viser at en buneavstand på ca  $10 \cdot$  bunelengden vil gi en tilfredstillende reduksjon av hastigheten ved elvebredden, over 50% hastighetsreduksjon, dette gjelder både horisontale buner og skrå buner med helning 1:3. For skrå buner med helning 1:6 bør ikke avstanden være større enn ca  $5 - 7.5 \cdot$  bunelengden.

Hvorvidt en 50% hastighetsreduksjon er tilstrekkelig for å hindre erosjon mellom bunene, uten at forbygning der må foretas, vil avhenge av det eksisterende elvebreddmateriale, og strømhastigheten i elven. Består elvebredden av rimelig grovt materiale, sand-grus, vil kun buner være tilstrekkelig.

Dette er betydelig større buneavstand enn det som angis i litteraturen fra utenlandske kilder, der det opereres med en buneavstand på  $2 - 6 \cdot$  bunelengden.

En forklaring til denne forskjellen er at utenlands består elvebunn-materialet ofte av fin masse, mens i Norge er det grovere masser som tåler større vannhastigheter.

Lengden av bunene bør ligge i området  $0.1 - 0.2 \cdot$  overflatebredden av elven. Buner med lengde  $0.25 \cdot B$ , som er prøvd i modell, viste seg å gi

for stor innsnevring av tverrsnittet, og stor lokal økning av hastighet. Dette gjelder for horisontale buner.

### 5.2.2. Sving-horisontal bunn

Resultatet fra forsøkene viser at en buneavstand på  $7.5 - 10$  \* bunelengden vil gi en tilfredstillende erosjonsbeskyttelse i svinger. Dette gjelder både horisontale buner og skrå buner med helning 1:3. Den første bunen er plassert ved inngang til svingen. For skrå buner med helning 1:6 bør ikke avstanden være større enn ca  $5$  \* bunelengden.

Forsøkene har vist at buneavstanden i svinger bør være noe mindre enn på rettstrekninger. Bunelengden bør også være kortere i svinger,  $0.05 - 0.15$  \* overflatebredden av elva. Buner i sving, som vil bli liggene ned i dypålen, vil medføre at (1) dypålen blir dypere, og (2) at dypålen vil flyttes noe inn mot innersving.

Også for svinger er dette en betydelig større buneavstand enn det som angis i litteraturen fra utenlandske kilder, der det opereres med en buneavstand på  $2 - 6$  \* bunelengden, ref tabell 2.1. Imidlertid er det stor sprik i de forskjellige metodene som angis i litteraturen for å bestemme buneavstand. For den svingradiusen på  $5B$  som ble brukt i modell, ville metoden med projeksjon av bunetå til skjæring med elvebredd gitt en buneavstand på  $S/L = 1.61/0.22 = 7.3$ . Bruk av formel 2.1a ville gitt en buneavstand på  $S/L = 3.3/0.22 = 15$ .

### 5.2.3. Sving - skrå bunn

I dette forsøket er det også undersøkt hvordan helning i sving vil påvirke buneavstand. Skrå bunn i sving påvirker resultatene, blant annet ved endrede strømforhold.

Buner i sving med skrå bunn - med en sterkt markert dypål - bør utformes noe forskjellig enn der elven har en horisontal bunn. Strømfordelingen varierer over tverrsnittet. Størstedelen av vannføringen går i yttersving, i det dypeste partiet. Blir innsnevringen av det effektive tverrsnittet for stor medfører dette en kraftig oppstuvning, og vannet blir presset over mot innersving, hvor hastigheten øker

sterkt.

Imidlertid viste forsøkene at om bunen ikke ble ført over høyeste flomvannstand medførte dette økt fare for erosjon nedstrøms den dykkete bunen. Bunene må føres over høyeste flomvannstand.

Kravet om at bunene må føres over høyeste flomvannstand står i direkte motsetning til ønsket om en minimal innskrenking av det effektive strømtverrsnittet. Det er derfor viktig at bunen bygges med så stor helning som praktisk mulig. I forsøkene ble det brukt en helning på 1:2, og en helning som kan anbefales.

Buneavstanden i svinger bør være kortere enn på rettstrekning. Buneavstanden i svinger med skrå bunn bør også være kortere enn i sving med horisontal bunn. Forsøkene har vist at en buneavstand på 3-5 ganger bunelengden gir en tilfredsstillende reduksjon av hastigheten inne ved elvebredden

### 5.3. Videre arbeid

Hvis det er aktuelt å benytte buner i elver med fine masser bør det kjøres erosjonsforsøk i modellen, med fin masse i elvebredden. Bunene reduserer vannhastigheten ved bredden, men det oppstår virvler. Hastigheten i disse virvlene har komponenter med retning mot bredden, og dette kan forårsake erosjon, selv om hastigheten er redusert i forhold til en situasjon uten buner.

Resultatene for buner i sving med flat bunn er basert på en svingradius, 5\*elvens bredde i bunn (innersvingradius). For sving med skrå bunn var svingradius 8\*elvens bredde i bunn. For krappere svinger anbefales en kortere buneavstand enn som angitt i rapport. For å få sikrere data, bør det gjøres forsøk med andre svingradius.

#### 5.3.1. Lokalerosjon ved buner

Lokalerosjon ved bunetå vil kunne oppstå om det ikke legges ut erosjonsbeskyttelse. Hvor stort område som er nødvendig å erosjonsbeskytte, eventuelt hvordan lokalerosjon påvirker stabilitet av

bunene, bør undersøkes i modell.

En eventuell forskjell i lokalerosjon ved horisontale og skrå buner kan da dokumenteres.

## 6. REFERANSER

Copeland, R.R (1983): "Bank protection techniques using spur dikes". U.S. Army Engnr Hydr Lab, HL-83-1, Vicksburg.

Kehe, S.M. and Klingeman, P.C. (198 ): "Williamette River adjustments to new spur dikes" in: "Water for Resource Development" s 296.

Miller, A.C. and Kerr, S.N. (198 ): "Modeling multiple spur schemes to control bank erosion" in: "Water for Resource Development" s 291.

Odgaard, A.J. and Kennedy, J.F. (1983): "River bend bank protection by submerged vanes". J of Hydr Engnr, aug 1983.

Odgaard, A.J. and Lee, H.Y.E (1982): "Analysis of Sacramento River bend flows, and development of a new method for bank protection". IIHR report no 241, Iowa Inst of Hydr research, Un of Iowa, Iowa City, May 1982. 626 (072)iq Io 9v NTUB, kopi NHLB.

Odgaard, A.J. and Lee, H.Y.E (1984): "Submerged vanes for flow control and bank protection in streams". IIHR report no 279, Iowa Inst of Hydr research, Un of Iowa, Iowa City, July 1984. 626 (072)tg Io 9v NTUB.

Stephenson, D. (1979): "Rockfill in hydraulic engineering". Elsevier, Amsterdam 1979 s 148 627.824.33 St 4r NHLB,ØK

U.S. Army Corps of Engineers (1978): "The streambank erosion control evaluation and demonstration act of 1974". U.S. Army Corps of Engineers interim report to Congress 30 september 1978. NHLB,TD, final report 1981 bestilt.

Liu M. K., et al (1961): "Effekt on bridge construction on scour and backwater". Report no CER60-HKL22, Dept of Civil Engn, Colorado State University, Fort Collins.

Jansen, P. Ph (1979): "Prinsiples of river engineering". Pitman, London 627.42 P93 NHLB.

Farraday; R.V. et al (1983): "Hydraulic factors in bridge design". Hydraulics Research, Wallingford.



## APPENDIKS

## BILAG A FORMLER FOR EROJNSDYBDE VED BUNE-TÅ

1.  $y_s = k \left( \frac{Q}{f} \right)^{0.33}$  Inglis (1949)  
k varies between 0.8 and 1.8
2.  $y_s = k \left( \frac{q^2}{F_{bo}} \right)^{0.33}$  Blench (1969)  
k varies between 2.0 and 2.75
3.  $y_s = kq^{0.67}$  Ahmad (1953)
4.  $y_s = yK \left( \frac{B_1}{B_2} \right) F_n^n$  Garde et al. (1961)
5.  $y_s = y + 1.1y \left( \frac{L}{y} \right)^{0.4} F_n^{0.33}$  Liu et al. (1961)
6.  $y_s = 8.375y \left( \frac{D_{50}}{y} \right)^{0.25} \left( \frac{B_1}{B_2} \right)^{0.83}$  Gill (1972)
7.  $\frac{L}{y} = 2.75 \frac{y_s - y}{y} \left\{ \left[ \frac{1}{r} \frac{(y_s - y)}{y} + 1 \right]^{1.70} - 1 \right\}$  Laursen (1962a)

$B_1$  = original channel width

$B_2$  = constricted channel width

$$C_D = \text{drag coefficient} = 1.33 \frac{\Delta \gamma_s D_{50}}{\omega^2 \rho}$$

$D_{50}$  = median grain size

$F_{bo}$  = Blench's "zero bed factor" = function of grain size

$$F_n = \text{Froude number} = \frac{v}{\sqrt{gy}}$$

$$f = \text{Lacey silt factor} = 1.59 \sqrt{D_{50}} \quad (D_{50} \text{ in mm})$$

$g$  = acceleration due to gravity

$k$  = function of approach conditions--varies with investigator

$x$  = function of  $C_D$  --varies between 2.5 and 5.0

$L$  = effective length of spur dike

$n$  = function of  $C_D$  --varies between 0.65 and 0.9

$Q$  = total stream discharge

$q$  = discharge per unit width at constricted section

$r$  = assumed multiple of scour at dike compared with scour in a long contraction--taken to be 11.5, by Laursen

$v$  = average velocity in unconstricted section

$y$  = average depth in unconstricted section

$y_s$  = equilibrium scour depth measured from the water surface

$\Delta \gamma_s$  = difference in specific weight between sediment and water

$\rho$  = mass density of water

$\omega$  = settling velocity of sediment

BILAG B MÅLT EROSIJONSDYBDE VED BUNE-TÅ, SAMMENLIGNET MED  
EMPIRISKE EROSIJONSFORMLER, FRA COPELAND, R.R (1983)

Method	$y_b/y.$	
	$Q = 2.7 \text{ cfs}$	$Q = 4.6 \text{ cfs}$
Demonstration model (4 dikes, $S/L_o = 4.1$ )	2.0-3.9	2.9-5.2
Inglis (1949) ( $0.8 < k < 1.8$ )	4.5-10.2	4.2-9.4
Blench (1969) ( $2.0 < k < 2.75$ )	4.3-5.9	3.9-5.4
Ahmad (1953) (moderate bend)	3.7-4.3	3.8-3.9
Garde et al. (1961)	3.0	3.1
Liu et al. (1961)	2.9	2.8
Gill (1972)	3.2	2.7
Laurson (1962a)	5.3	4.8

**BILAG C STRØMFORHOLD, HORIZONTALT BUNER PÅ RETTSTREKNING**

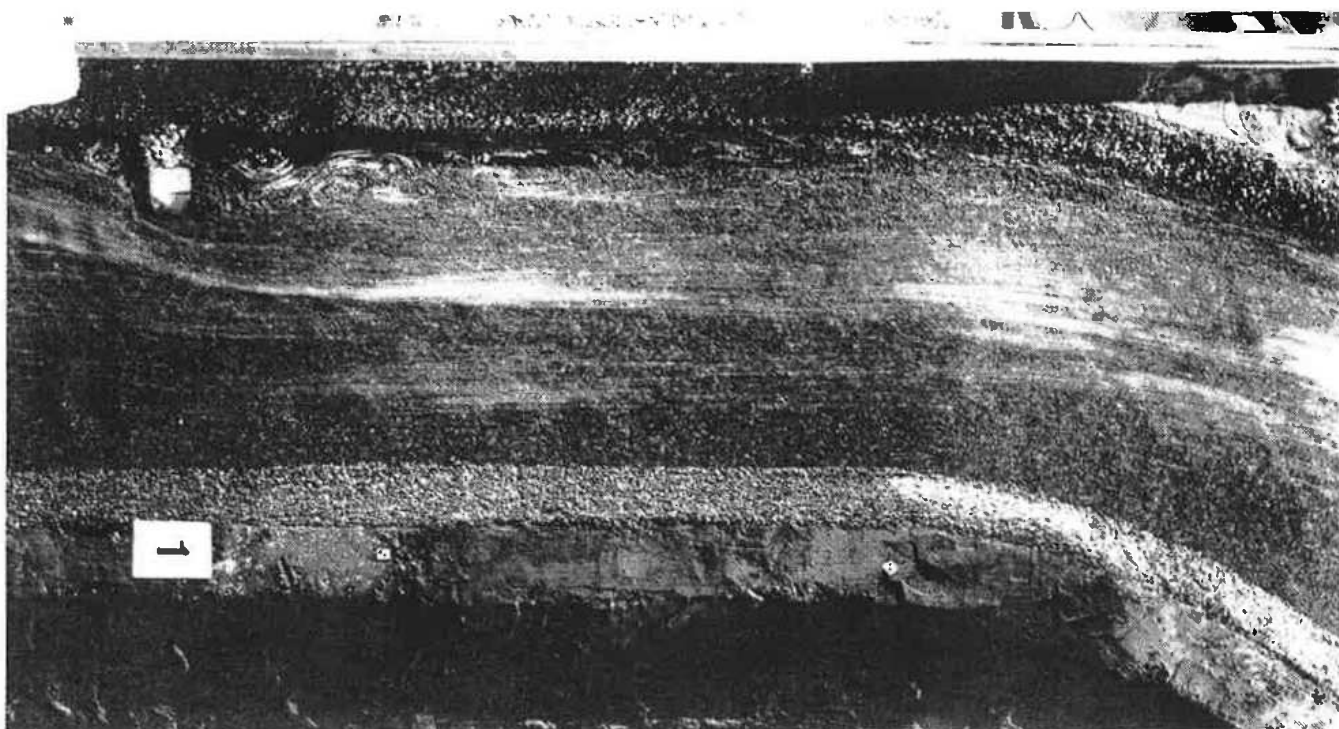
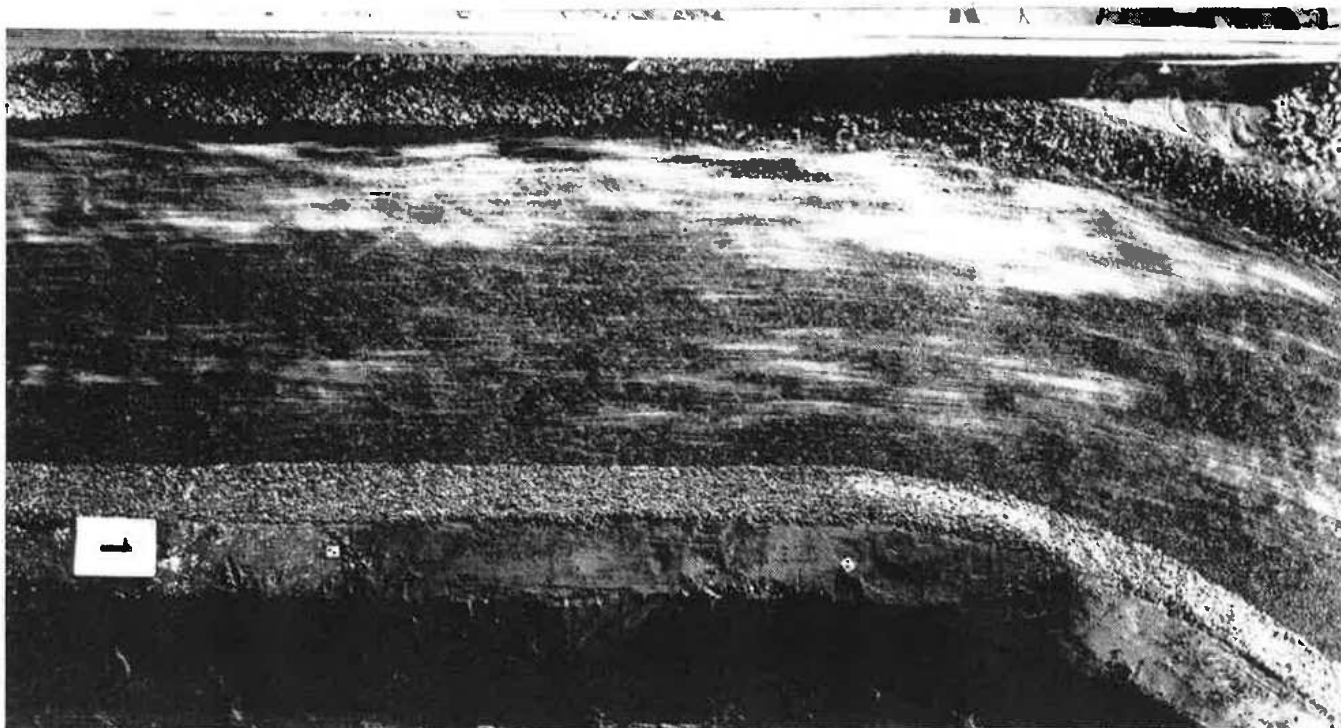
**BILAG D STRØMFORHOLD, SKRÅ BUNER PÅ RETTSTREKNING**


BILAG E STRØMFORHOLD, SKRÅ BUNER I SVING, BASERT PÅ STRØMMÅLINGER

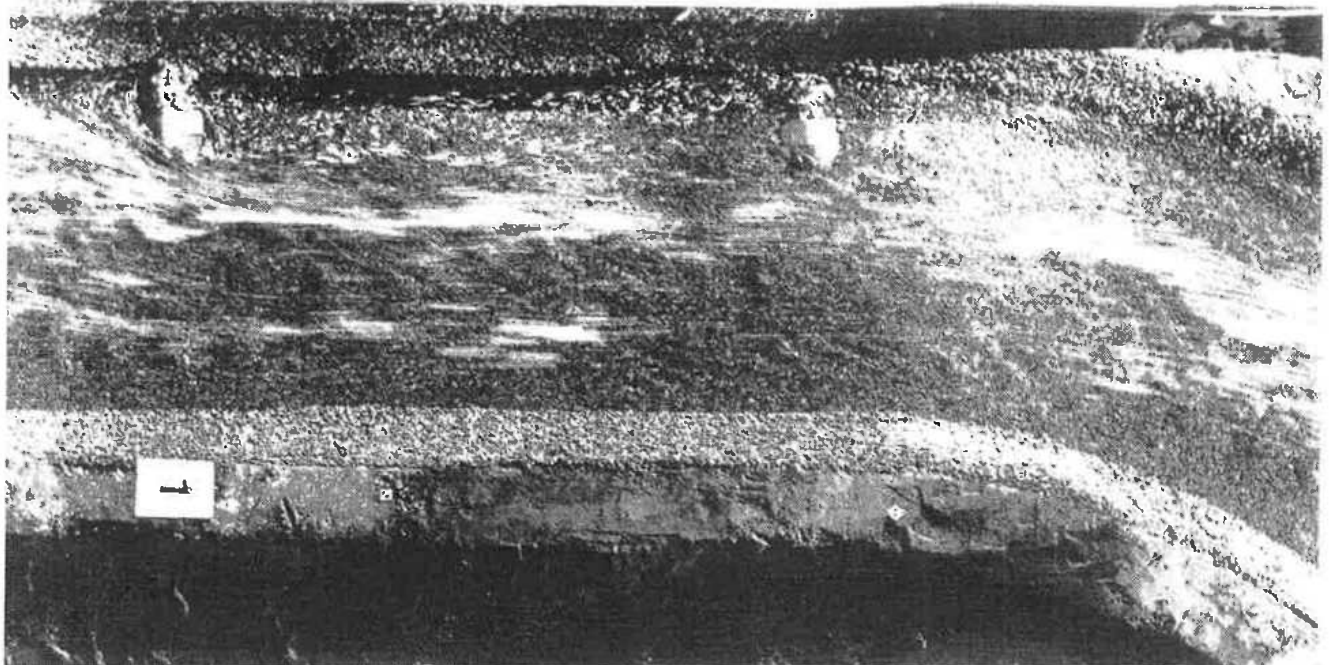
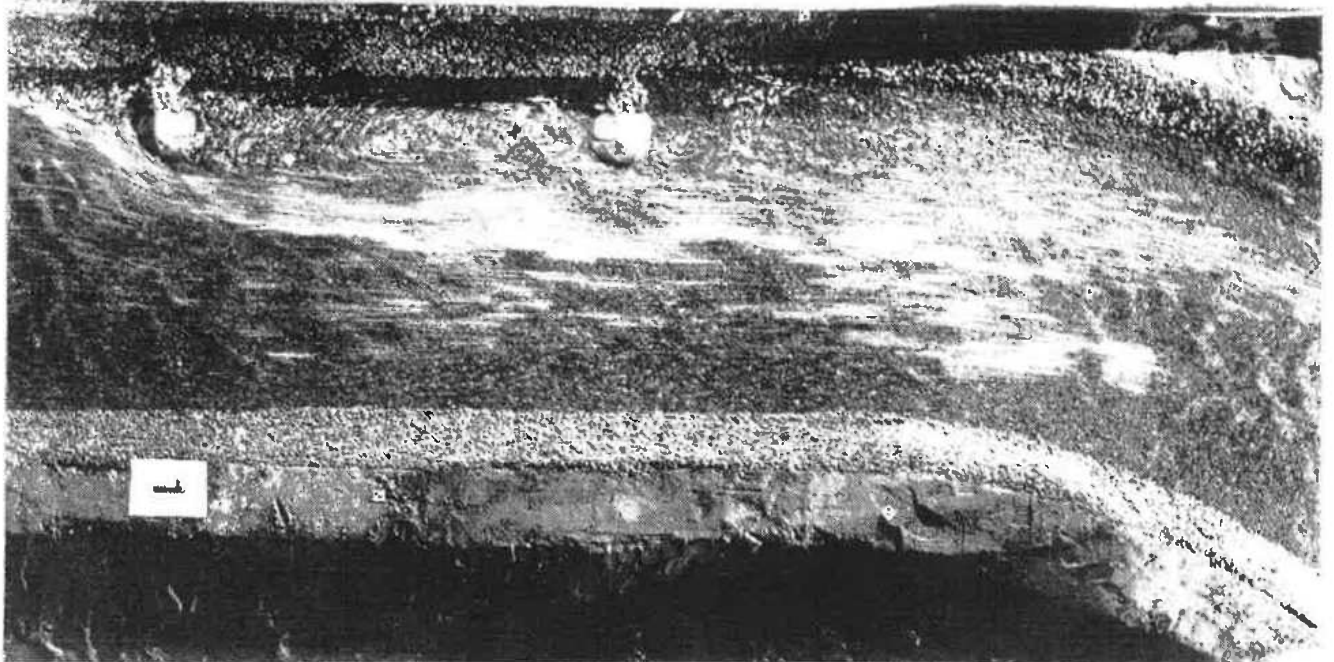
BILAG F STRØMFORHOLD, HORIZONTALT BUNER I SVING




BILAG G. STRØMFORHOLD I OVERFLATEN, BUNER I SVING - SKRÅ BUNN



Strømforhold, horisontale buner på rett strekning	a) Uten buner	b) 1 bune L=32cm =0.26B	<b>C1</b>
 <b>NHL</b> SINTEF-GRUPPEN	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		



Strømforhold, horisontale buner på rett strekning	2 buner L=32cm =0.26B	a) S=182cm S/L=5.7 b) S=254cm S/L=7.9	<b>C2</b>
	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		



Strømforhold, horisontale  
buner på rett strekning

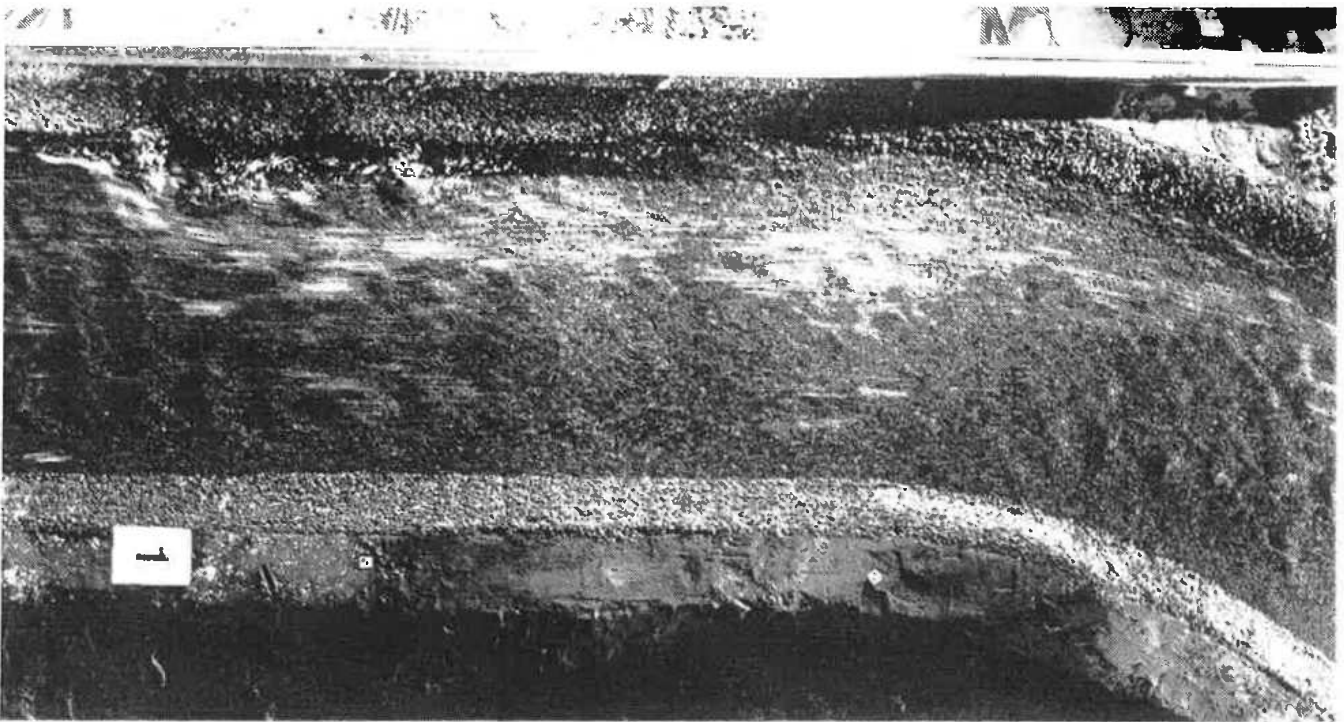
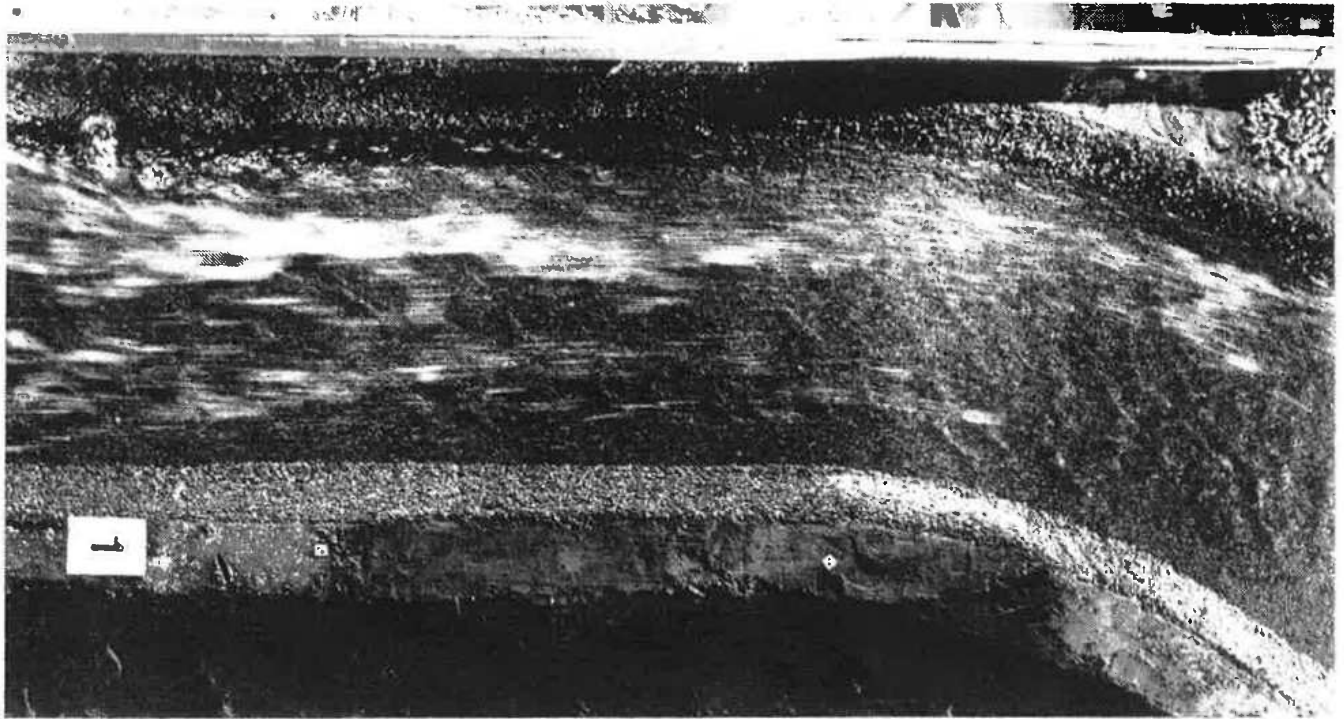
2 buner L=32cm  
=0.26B


S=3.03, S/L=9.5

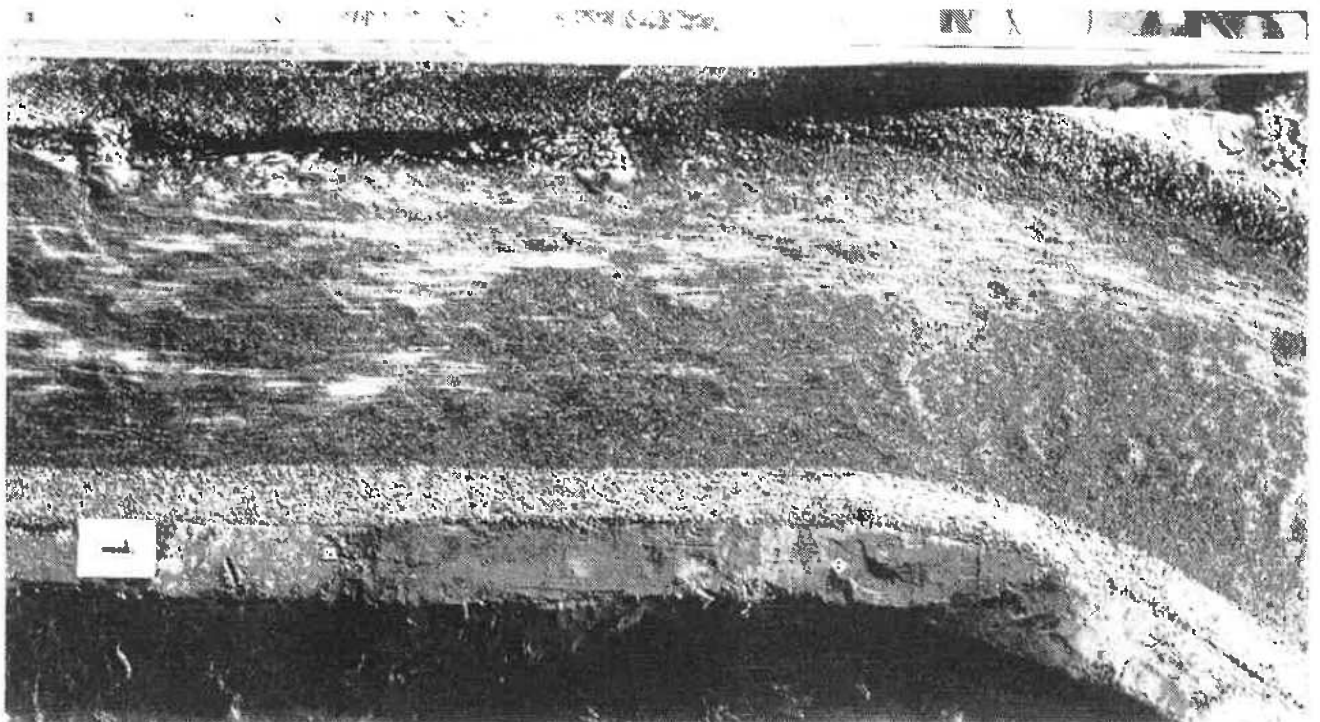
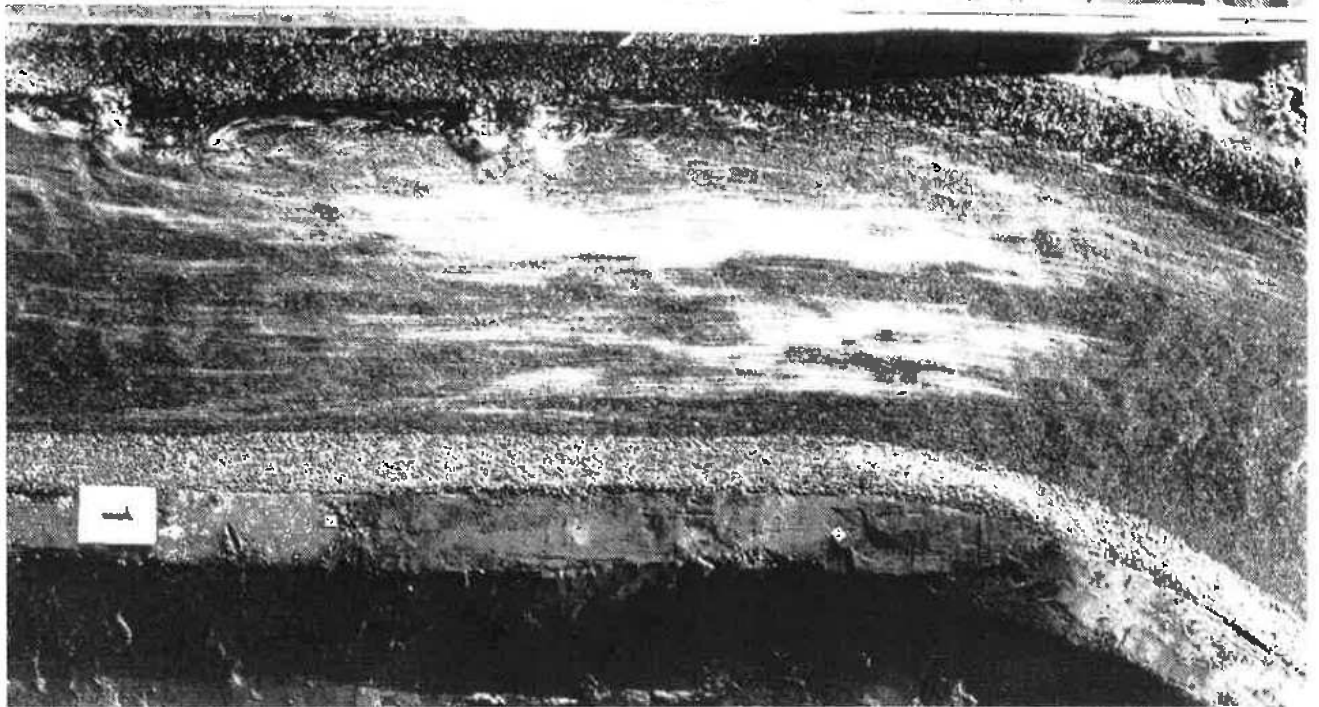
C3




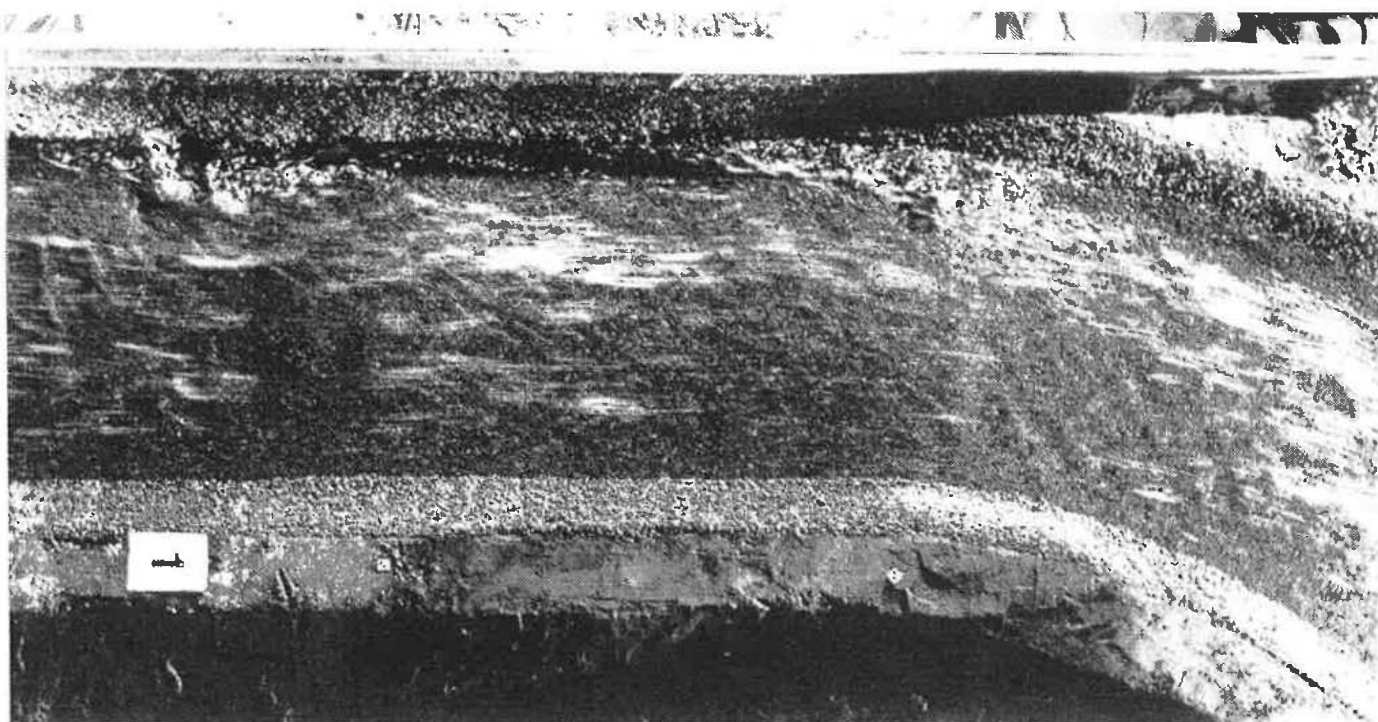
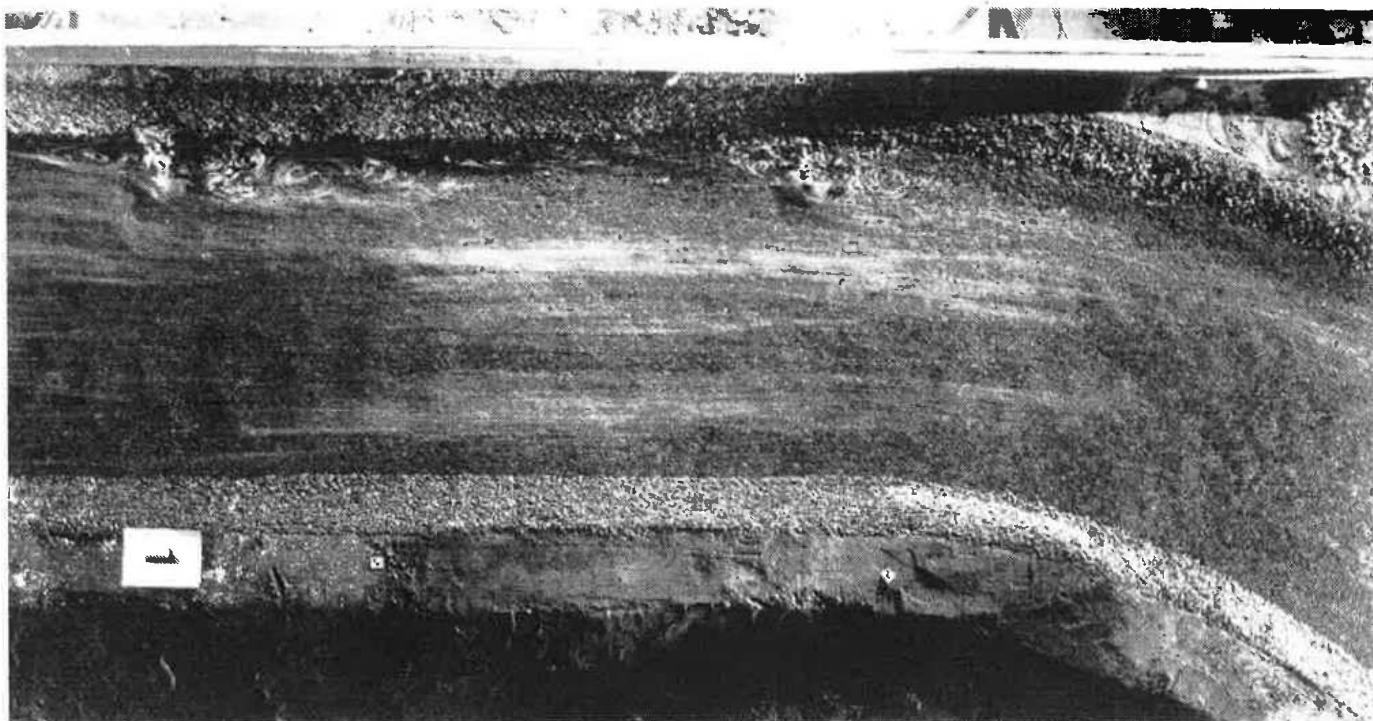
NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY




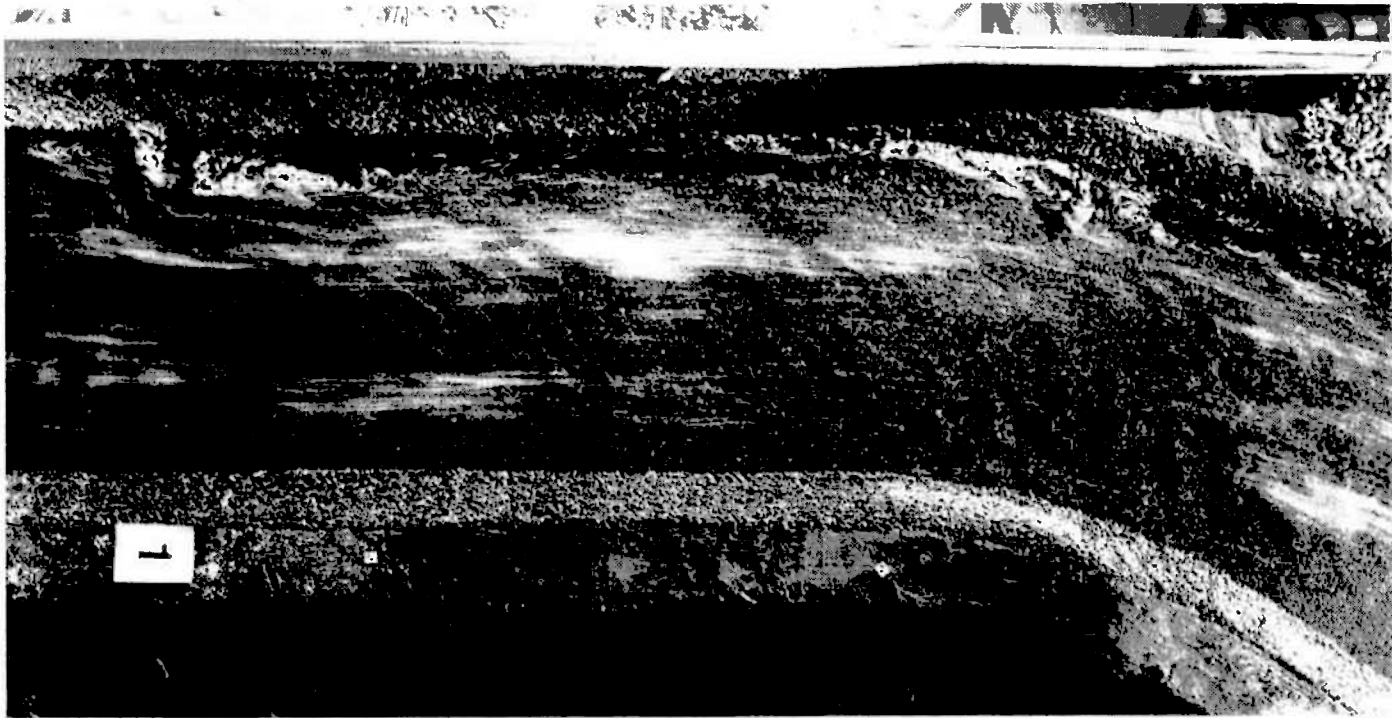
Strømforhold, horisontale buner på rett strekning	a) 1 bane L=22cm =0.18B	b) 2 baner L=22cm S=104, S/L=4.7	<b>C4</b>
	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		




Strømforhold, horisontale buner på rett strekning	2 buner L=22cm =0.18B	a) S=147, S/L=6.7 b) S=198, S/L=9.0	C5
 <b>NHL</b> SINTEF-GRUPPEN	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		

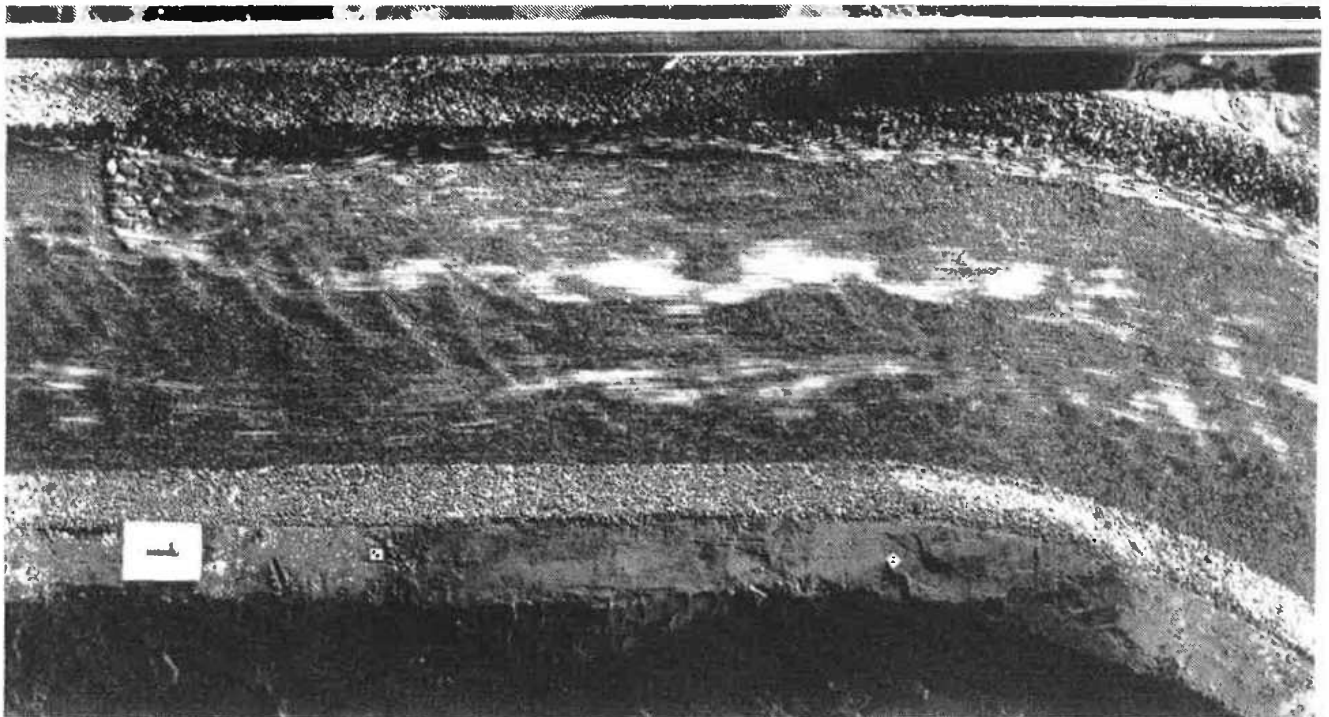



Strømforhold, horisontale buner på rett strekning	2 buner L=22cm =0.18B	a) S=259, S/L=11.8 b) S=307, S/L=14.0	<b>C6</b>
 <b>NHL</b> SINTEF-GRUPPEN	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		

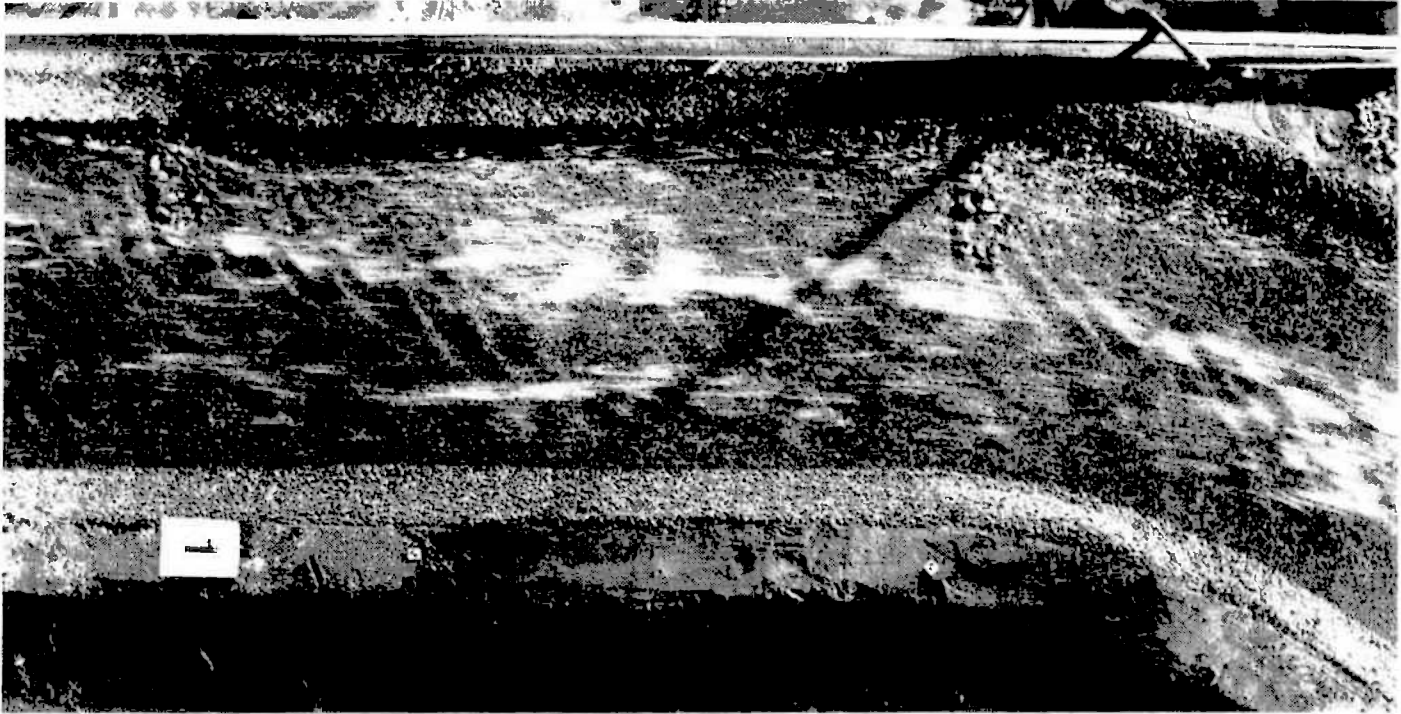



Strømforhold, horisontale buner på rett strekning	2 buner L=22cm =0.18B	S=363, S/L=16.5	C7
 NHL SINTEF-GRUPPEN	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		

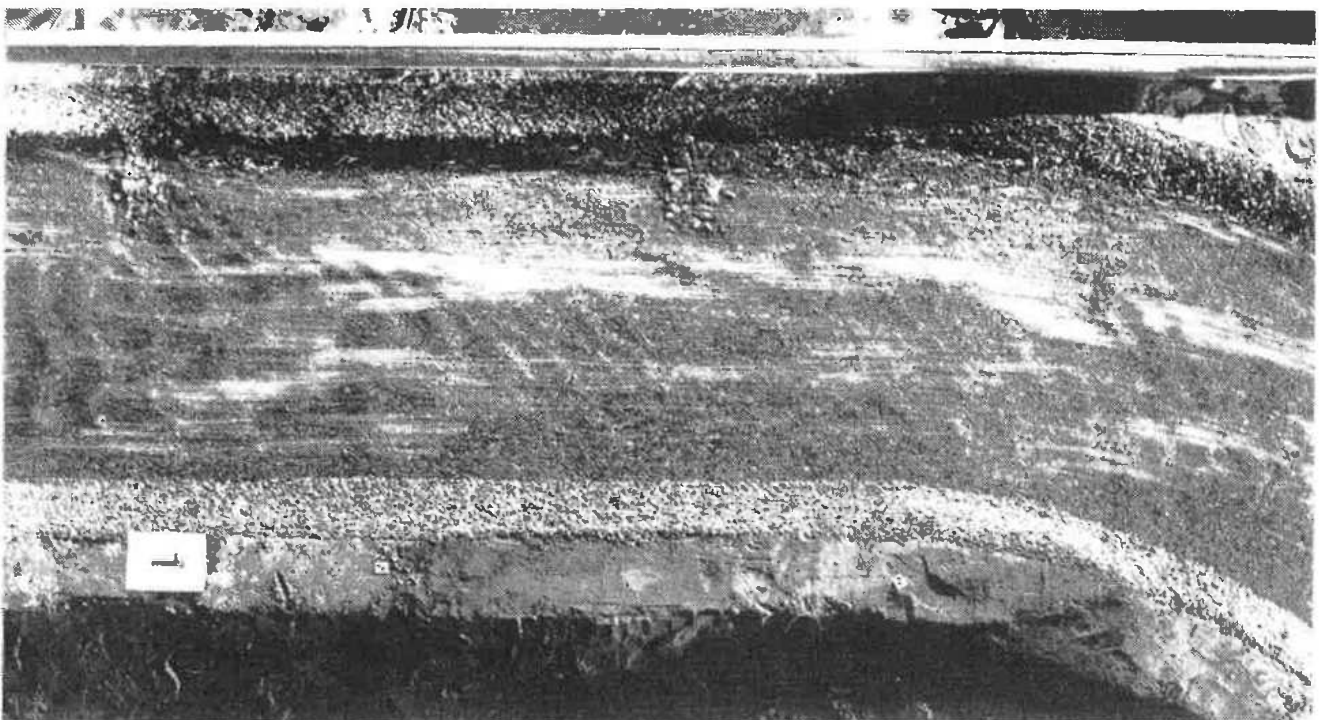
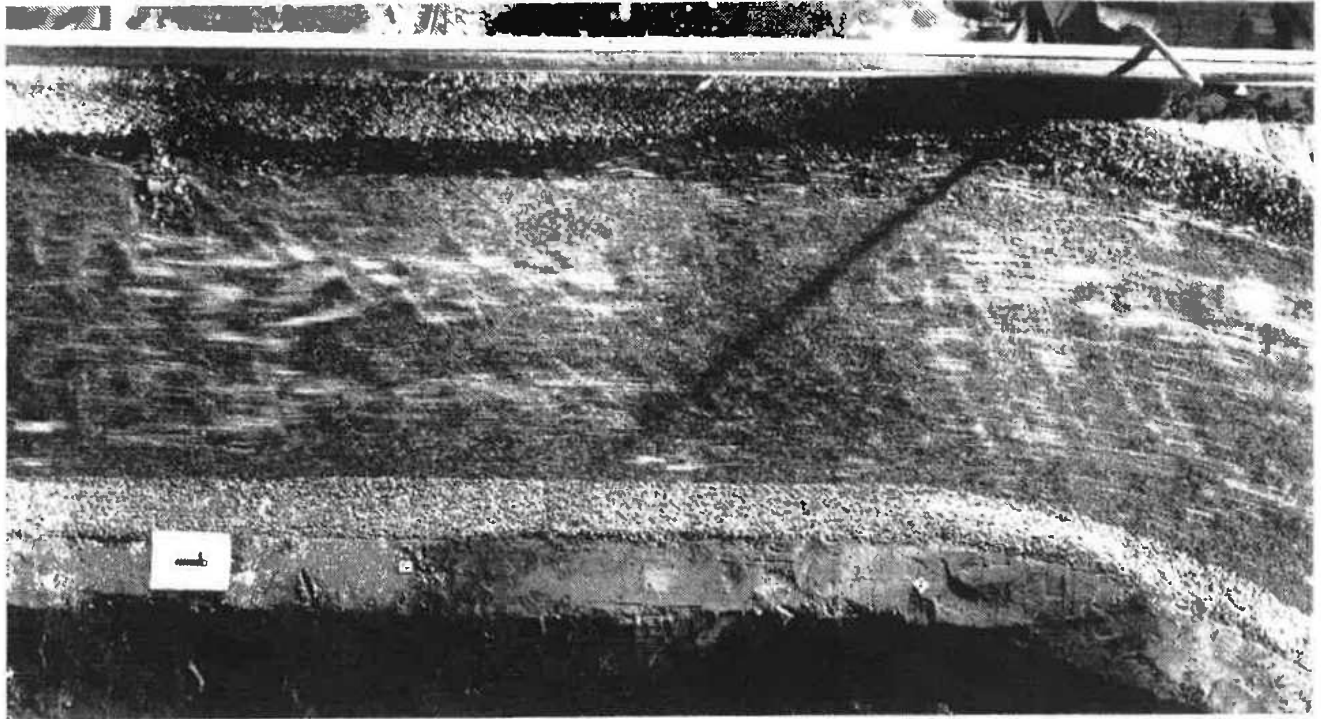





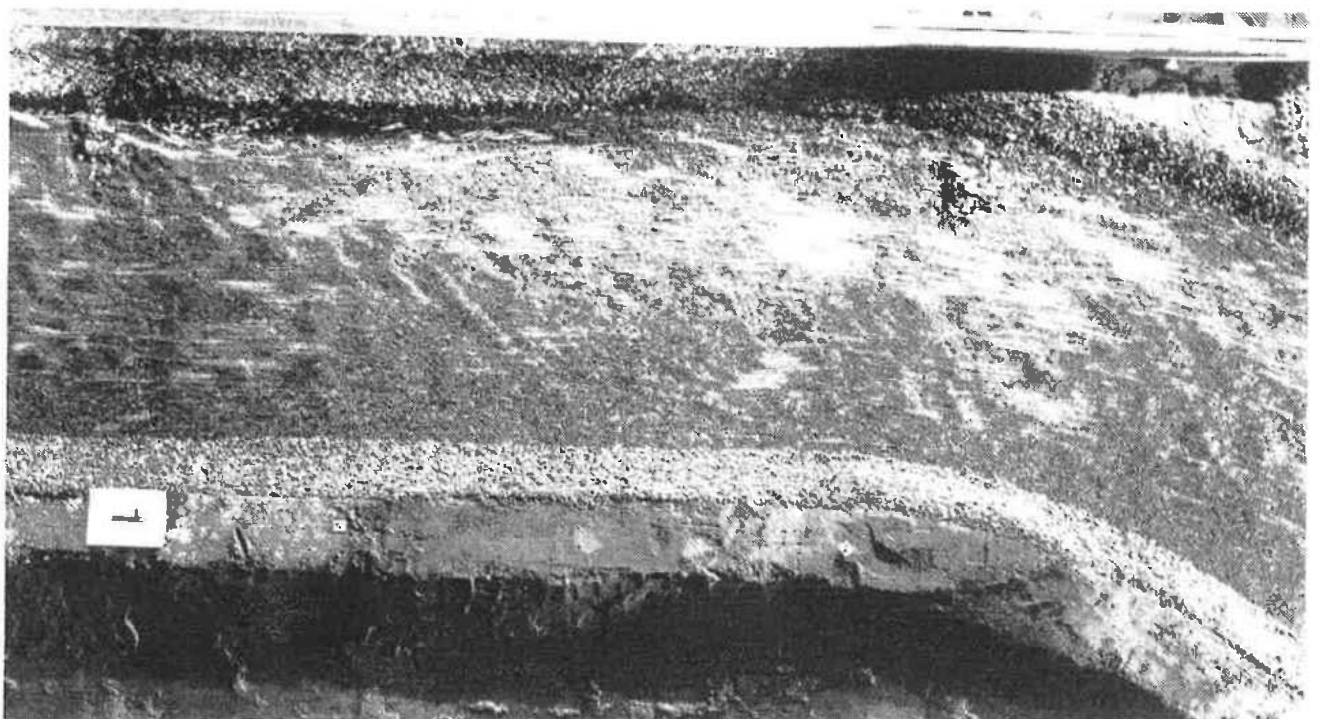
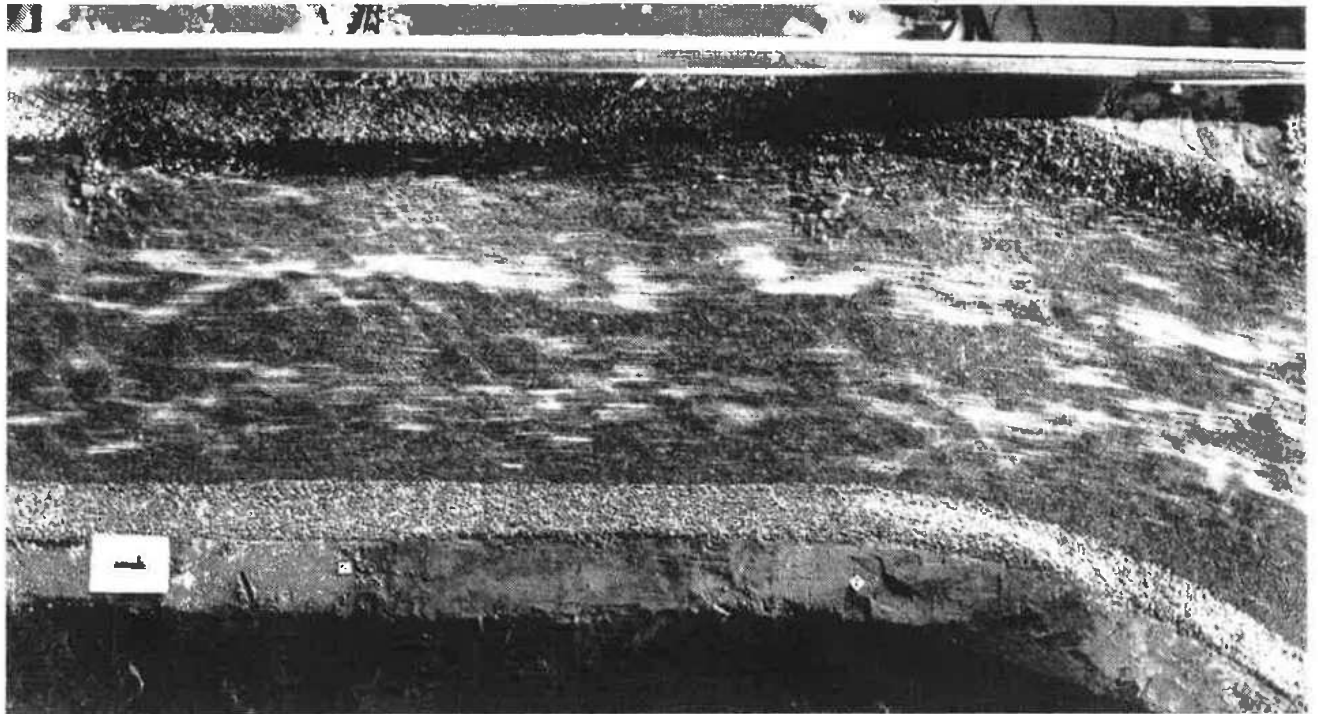
Strømforhold, skrå buner på rett strekning	Helning 1:6 L=48cm = 0.39B	a) 1 bune b) 2 buner S=224, S/L=4.7	<b>D1</b>
	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		




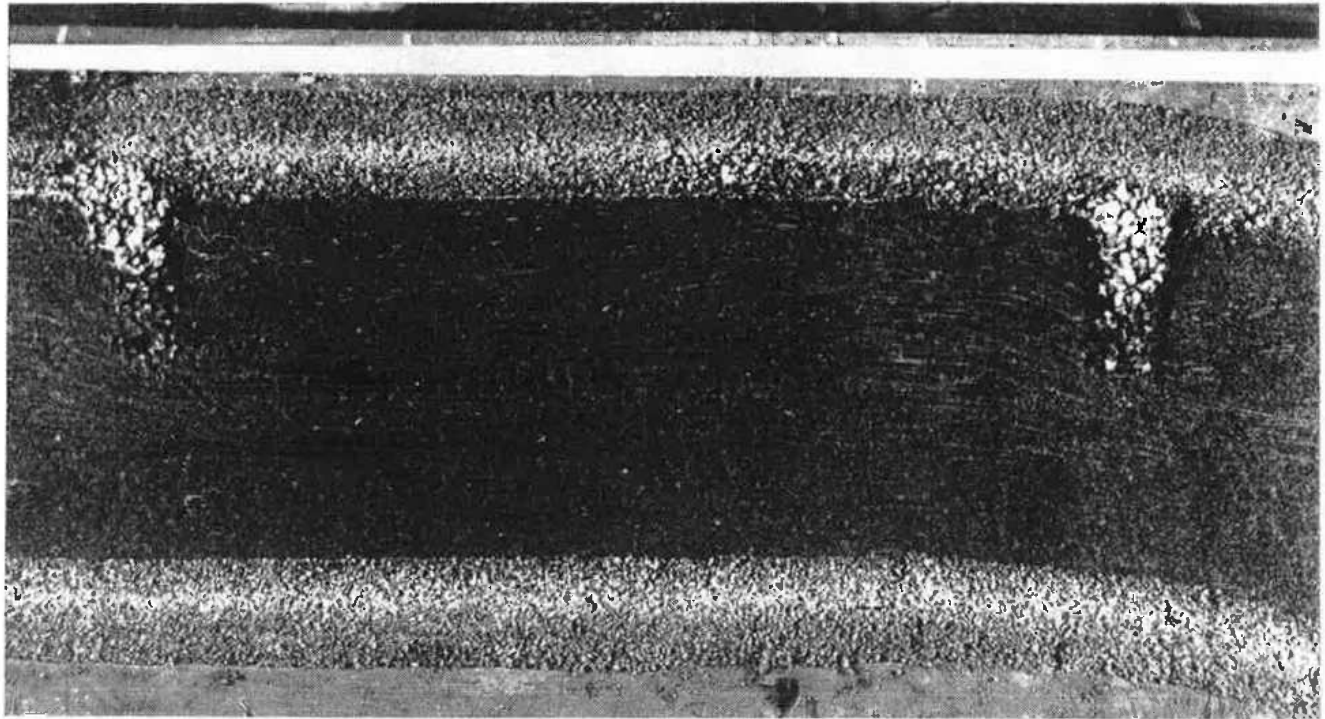
Strømforhold, skrå buner på rett strekning	Helning 1:6 L=48cm, =0.39B	S=317, S/L=6.6	D2
	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		



Strømforhold, skrå buner på rett strekning	Helning 1:3, $L=24\text{cm} = 0.19B$	a) 1 bune b) 2 buner $S=224, S/L=9.3$	<b>D3</b>
	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		



Strømforhold, skrå buner på rett strekning	Helning 1:3, L=24cm	a) S=283cm, S/L=11.8 b) S=331cm, S/L=13.8	<b>D4</b>
	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		

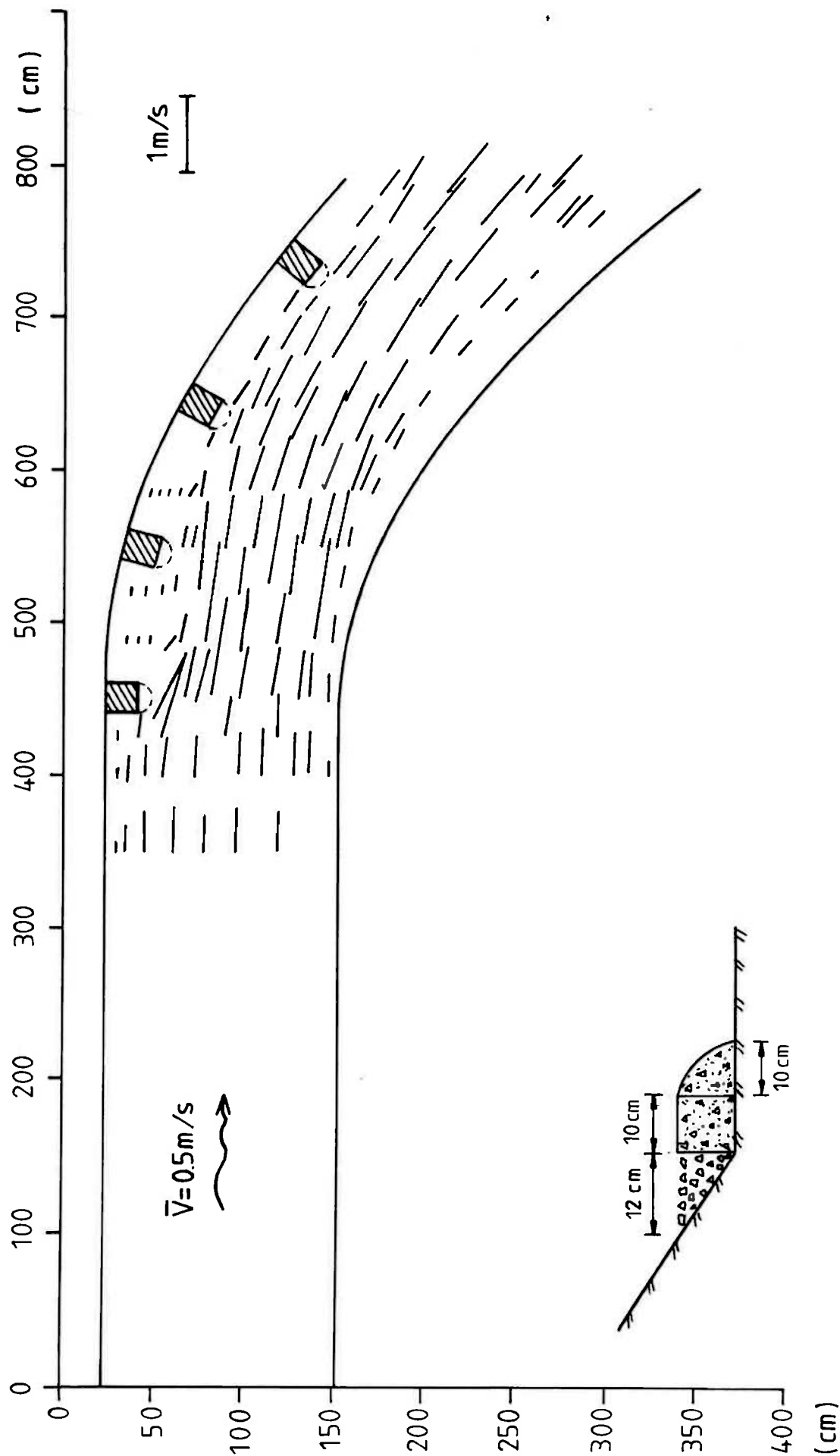


Strømforhold, skrå buner L=48cm, 1:6 S=3.0cm, S/L=6.4  
1:6 ved lav vannføring



NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY

D5

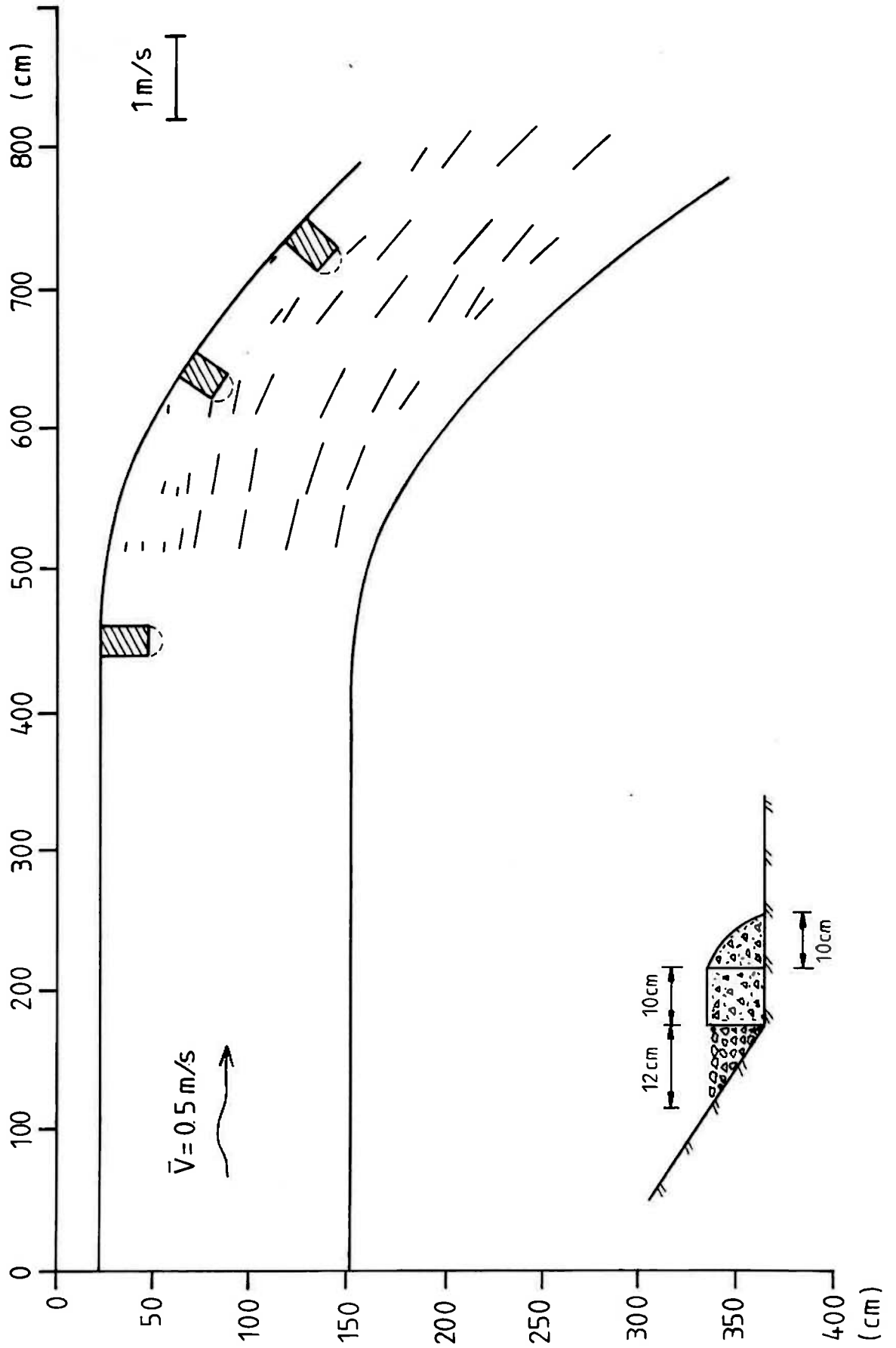


Strømforhold ved 4 buner i sving,  $L=0.26B$ ,  $S/L=3.1$



NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY

E 1

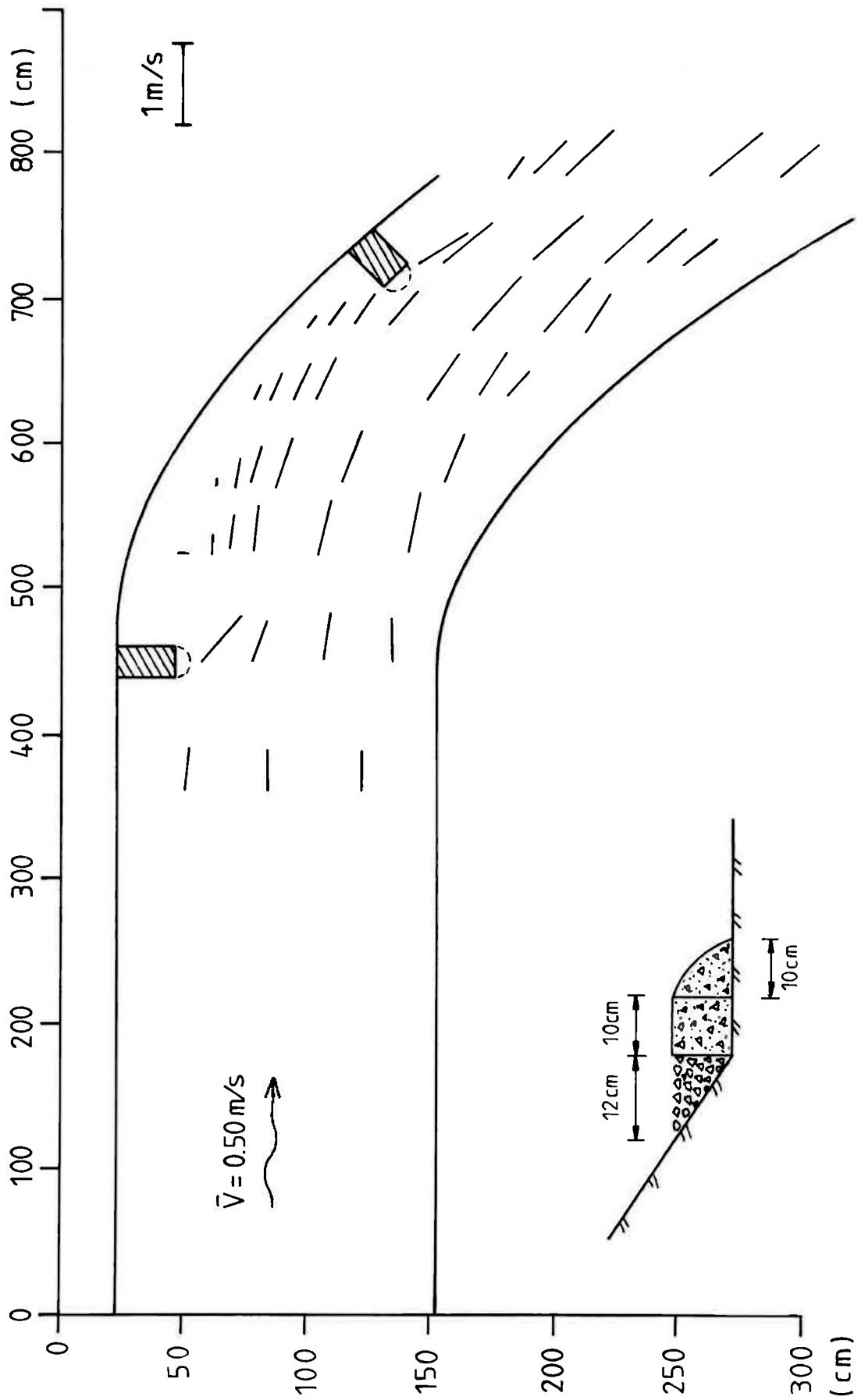


Strømførhold ved 3 buner,  $L=0.26B$ ,  $S/L=3.1$  og  $6.2$



NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY

E2



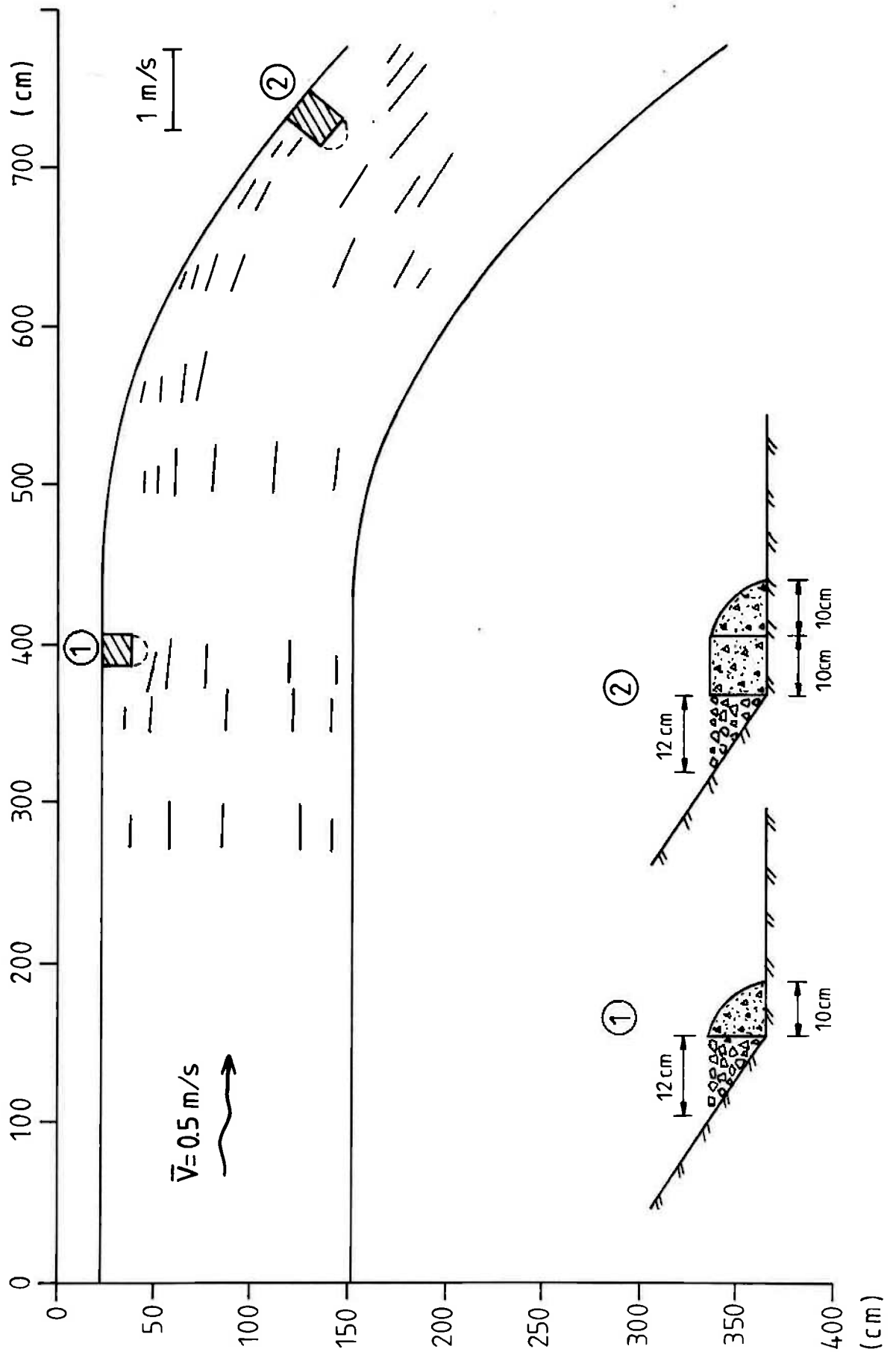
Strømførhold ved 2 buner,  $L=0.26B$ ,  $S/L=9.4$



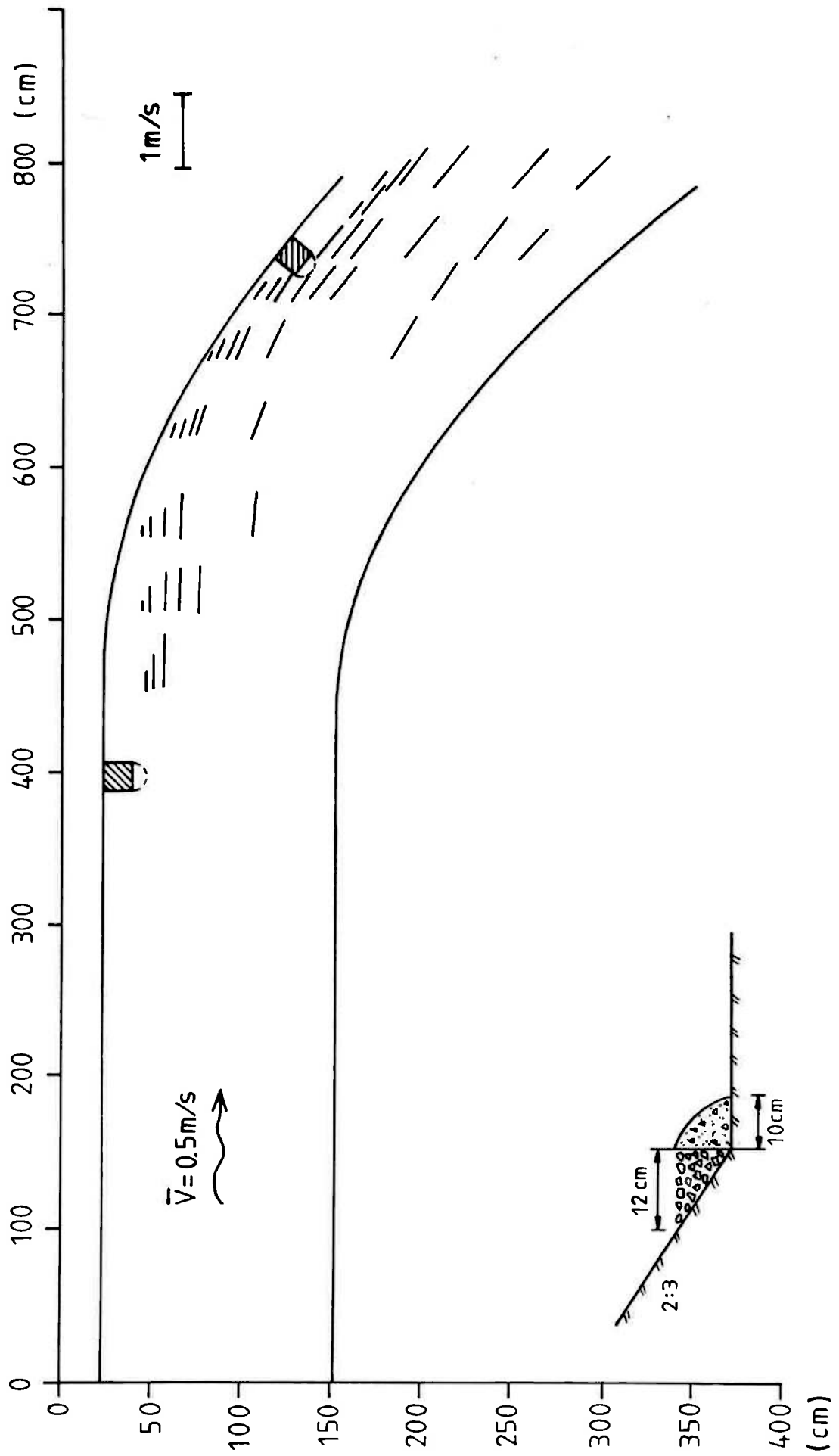
NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY

E3





Strømforhold ved 2 buner, kortere bune ved inngang sving  $L=0.18B$ , lengre bune i sving  $L=0.26B$ .  $S/L=3.5/0.32=10.9$  eller  $S/L=3.5/0.22=15.9$

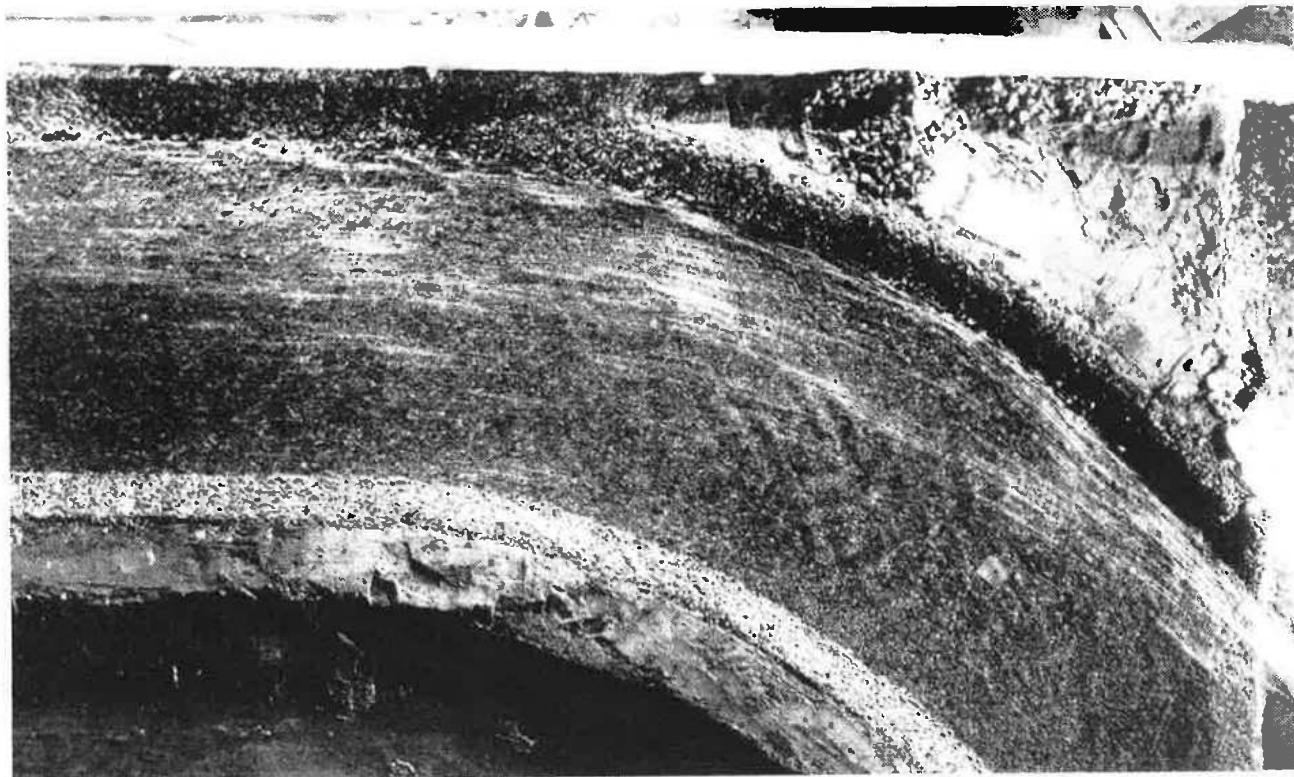


Strømforhold ved 2 buner,  $L=0.18B$ ,  $S/L=15.9$



NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY

E5



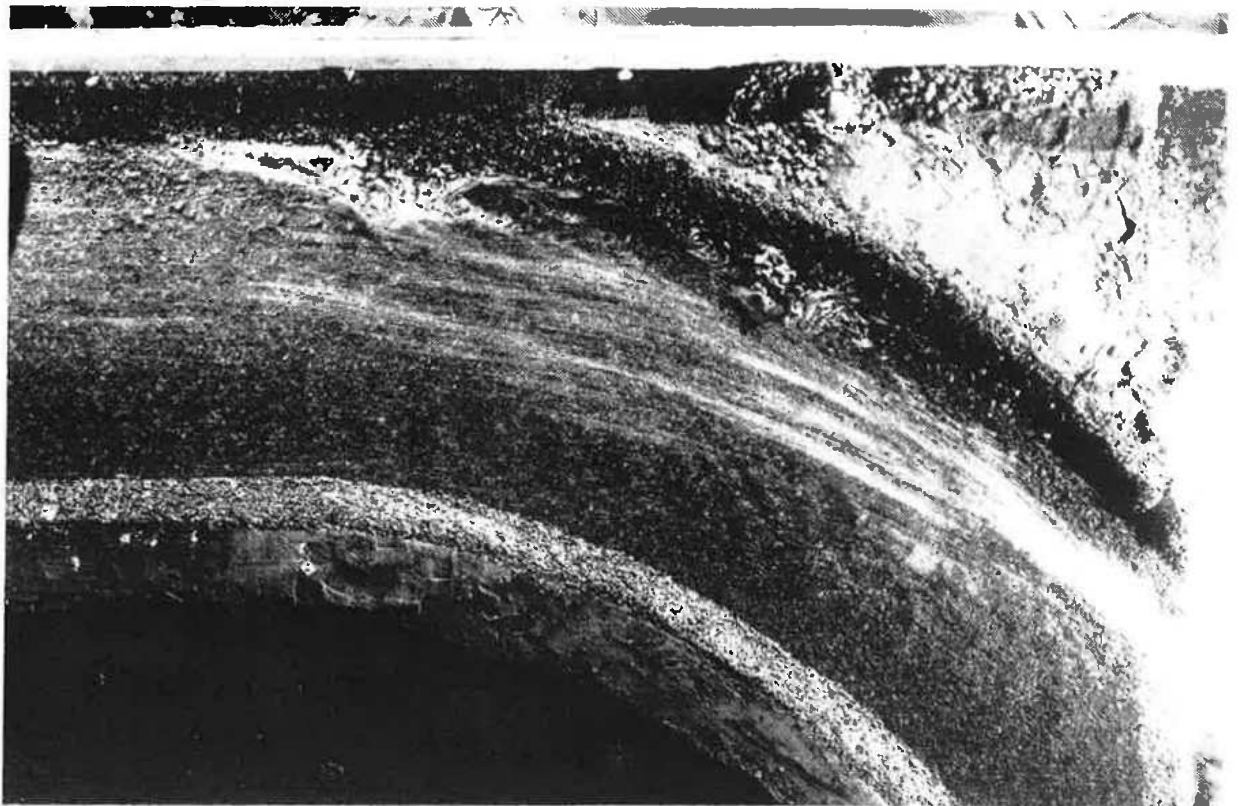
Strømforhold, horisontale  
buner i sving


a) Ingen buner  
b) 1 bune  $L=22\text{cm} = 0.18B$

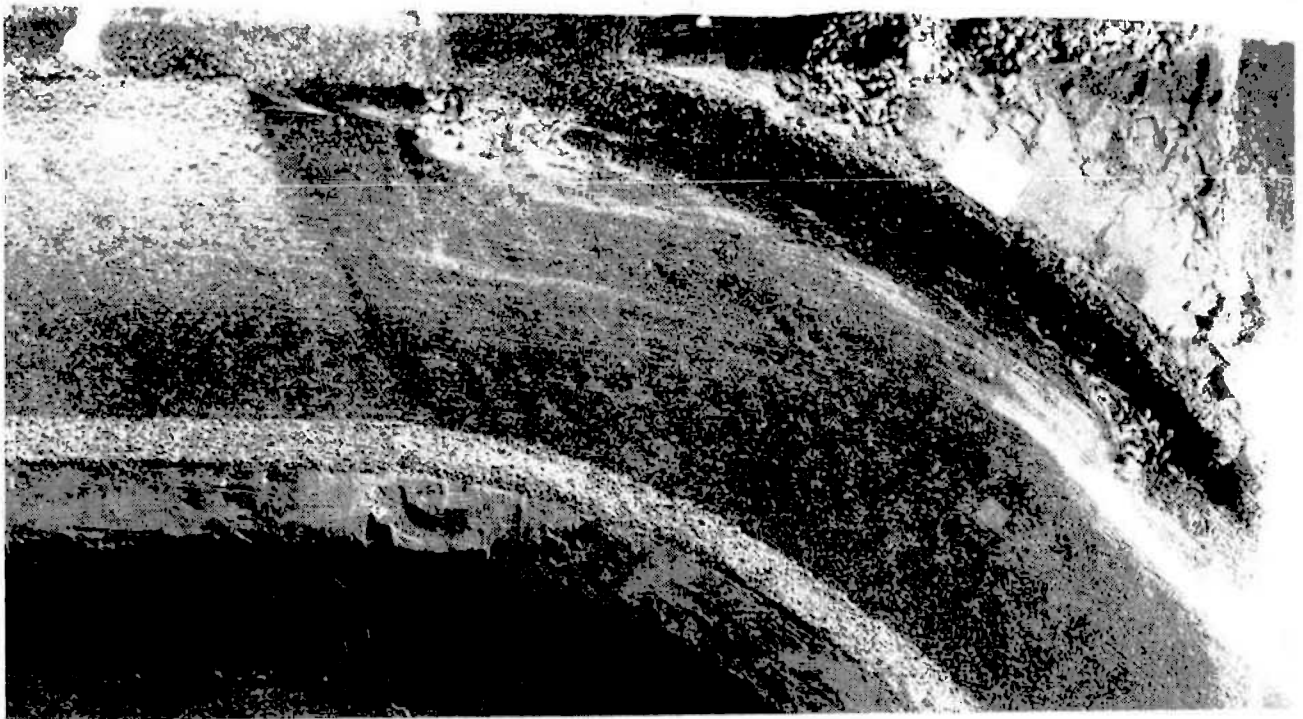
F 1




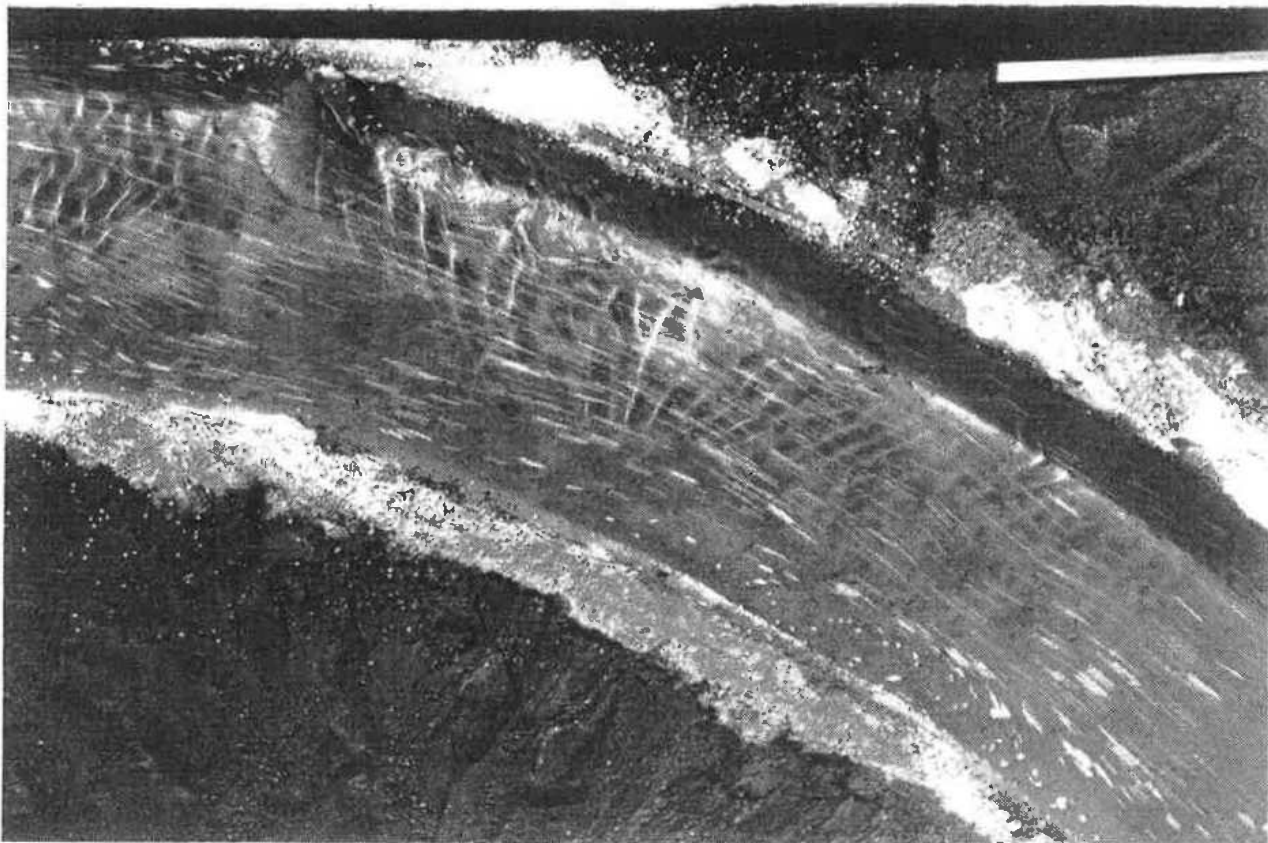
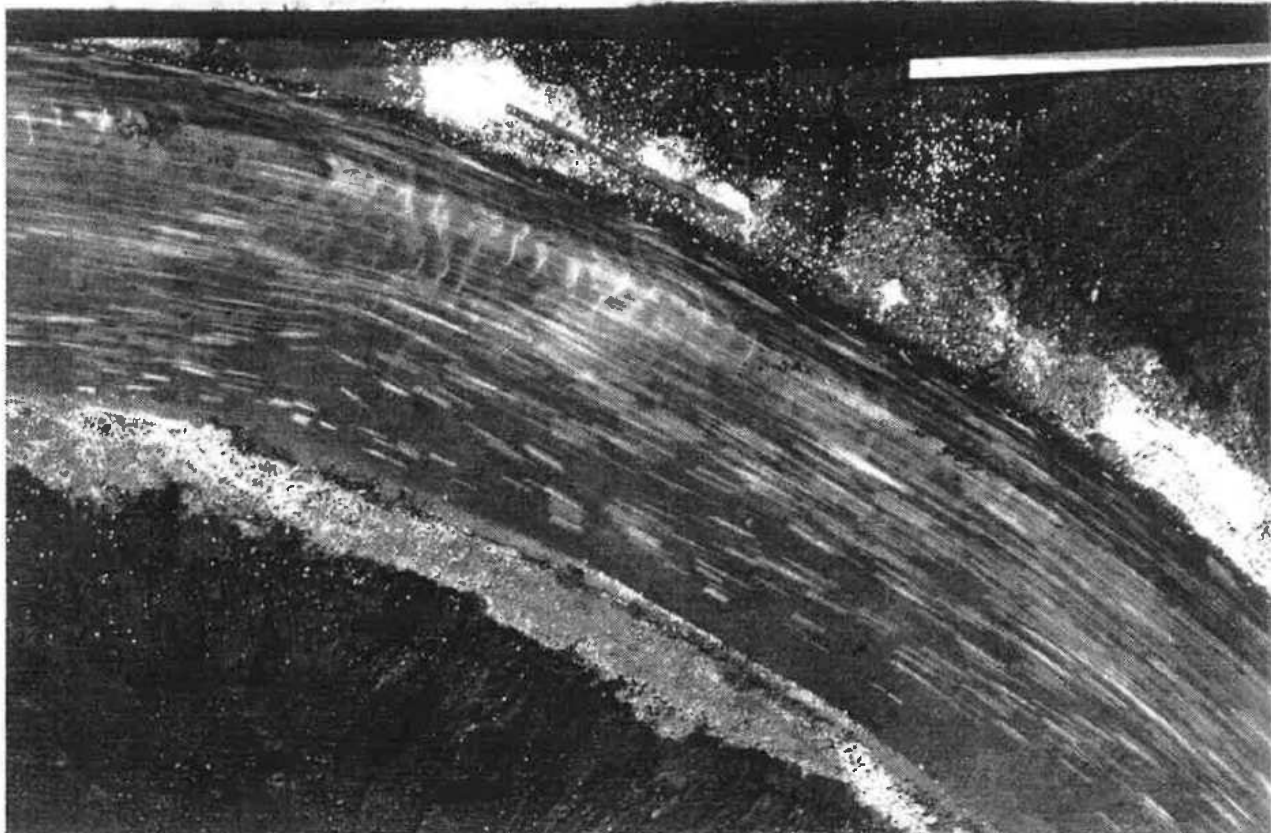
NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY



Strømforhold, horisontale buner i sving	2 buner, L=22cm =0.18B	a) S=174, S/L=7.9 b) S=227, S/L=10.3	<b>F2</b>
 <b>NHL</b> SINTEF-GRUPPEN	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY		



Strømforhold, horisontale 2 buner, L=22cm S=312 S/L=14.2 buner i sving =0.18B				F3
 NHL SINTEF-GRUPPEN	NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY			



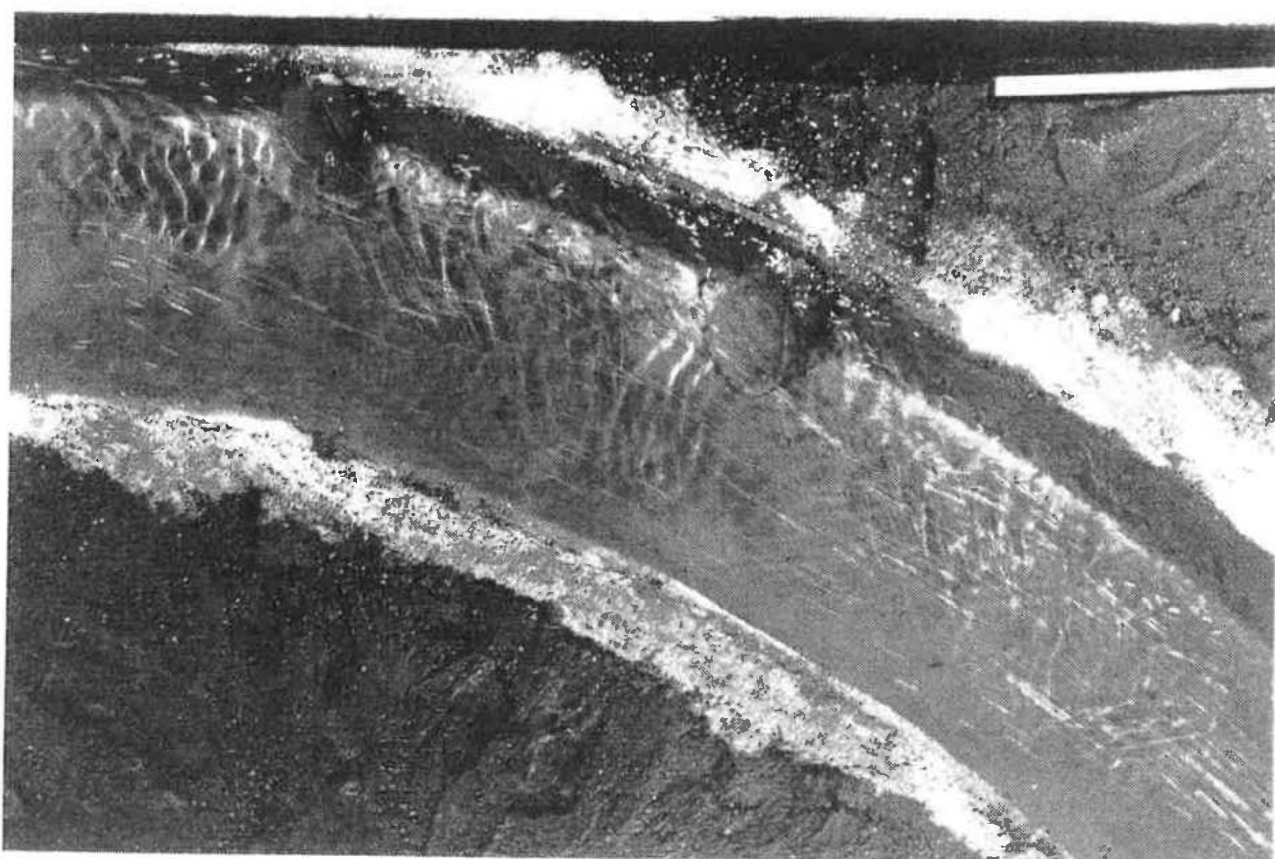
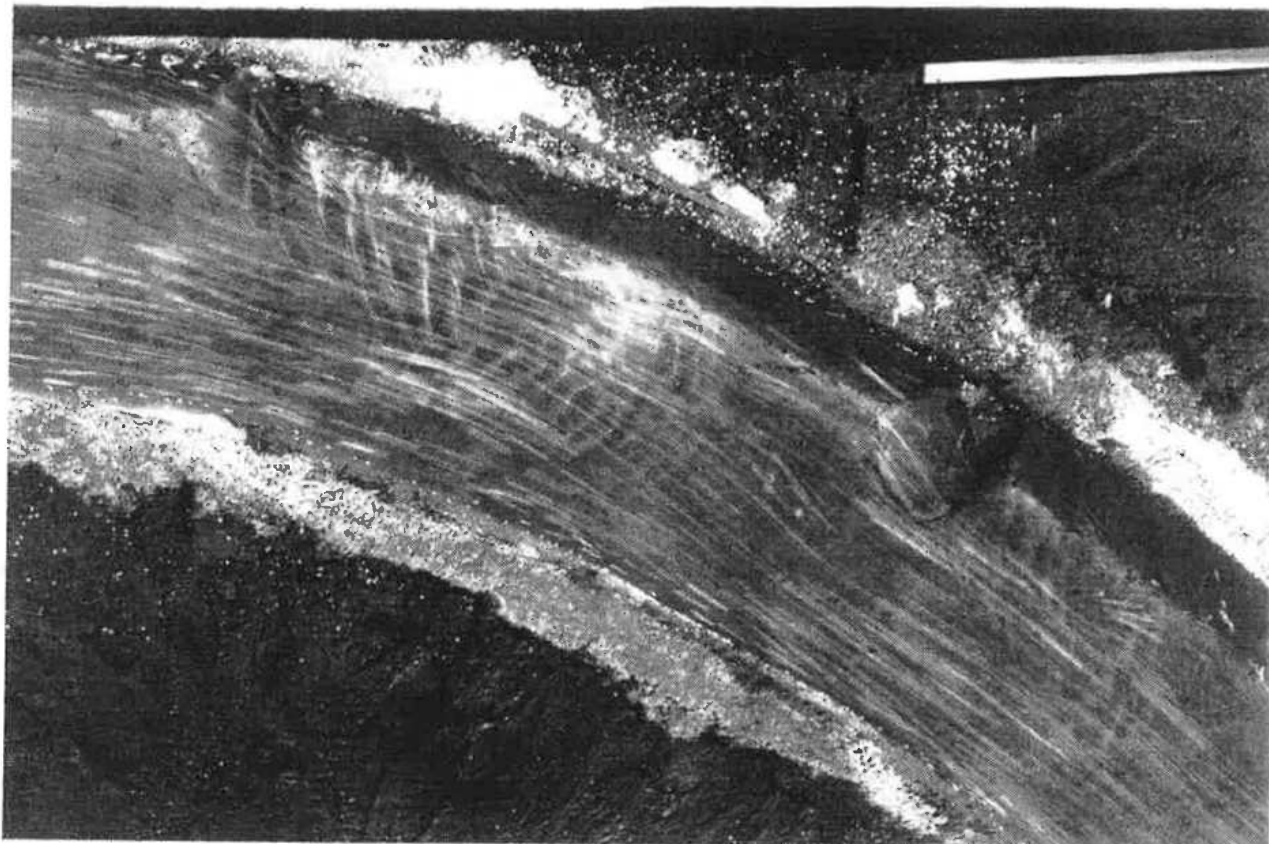
Strømforhold i overflaten, buner i sving - skrå bunn  
 a) uten buner b) 1 bune



SINTEF-GRUPPEN

NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
 NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY

C1



Strømførhold i overflaten, buner i sving - skrå dønn. 2 buner  
 a) Buneavstand 160cm S/L=5,3 b) Buneavstand 100cm S/L=3,3



NORSK HYDROTEKNISK LABORATORIUM  
 NORWEGIAN HYDROTECHNICAL LABORATORY

G2

- **SINTEF – Stiftelsen for industriell og teknisk forskning ved Norges tekniske høgskole**
  - **SINTEF-gruppen utfører oppdragsforskning for industri, næringsliv og offentlig forvaltning i nært samarbeid med NTH.**
  - **SINTEF-gruppen er landets største forskningsmiljø. Vi er ca. 1800 entusiastiske ansatte som arbeider hovedsakelig innen teknologi og naturvitenskap.**
  - **Vi er en ubyråkratisk organisasjon der det meste er mulig.**
  - **SINTEF, IKU, MARINTEK og EFI utgjør SINTEF-gruppen.**
- 
- SINTEF – The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology (NTH).
  - The SINTEF Group performs contract research for industry, organizations and public bodies in close cooperation with NTH.
  - The SINTEF Group is the largest R&D organization in Norway. Our professional staff of 1800 are engaged in most fields of technology and the natural sciences.
  - Matters are dealt with in a non-bureaucratic manner.
  - The SINTEF Group comprises SINTEF, IKU, MARINTEK and EFI.