

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING  
BLINDERN.

O-5/65

En vurdering av transport og utslipp av  
oppslemmet  $\text{SiO}_2$ -støv fra Fiskaa Verk,  
Kristiansand, på stort dyp i sjøen.

Saksbehandler: siv.ing. Paul Liseth  
Rapporten avsluttet: september 1965.

INNHALDSFORTEGNELSE.

	Side:	
I	INNLEDNING.	4
II.	STØVET	4
III.	FORTYNNINGSVÆSKEN.	6
IV.	AVLØPSVANNET.	6
V.	AVLØPSVANNETS FORTYNNING OG BEVEGELSE ETTER UTSLIPP.	7
	1. Modellforsøk.	8
	2. Betydningen av avløpsvannets spesifikke vekt og graden av fortykning for støvets bevegelse etter utslipp.	9
	3. Avlagring av støv på bunnen.	10
VI.	STØVETS FORURENSNING AV SJØVANNET OG BUNNEN I UTSLIPNINGS-OMRÅDET.	11
	1. Synlig forurensning.	11
	2. Kjemisk innvirkning på sjøvannet.	11
	3. Utslippets betydning for fisket.	12
	3.1 Forsøk med fisk	12
	3.2 Konklusjon	14
VII.	MULIGE UTSLIPNINGSSTEDER:	14
	1. Utslipp på 50 m dyp nord-øst for øya Dybingen.	15
	2. Utslipp på 50 m dyp øst for øya Hestehodet.	15
VIII.	DYPVANNsutslippet.	15
	1. Utslipningsarrangement på sjøbunnen	15
	2. Dypvannsledning. Hensiktsmessig diameter.	15
	3. Trykksystem for transport av avløpsvannet.	16
IX.	TRANSPORT AV AVLØPSVANNET UT I SJØEN.	17
	1. Trykksystemet med utluftningsenhet.	17
	2. Valg av uttaksdyp fra trykksystemet til dypvannsledningen. Kontroll av avløpsvannets nivåsenkning i trykk-kammeret ved plutselig stopp av tilførslen av avløpsvann.	18
	3. Beregning av nødvendig trykkehøyde for transport av avløpsvannet.	21
	3.1 Forutsetninger.	21
	3.2 Benoullis likning.	21
	3.3 Avløpsmengden i utslippet.	22
	3.4 Trykktapet i dypvannsledningen.	22
X.	SAMMENFATTENDE KONKLUSJON.	26

FIGURFORTEGNELSE.

- Fig. 1. Elektronmikroskopbilde av  $\text{SiO}_2$ -støv.
- Fig. 1.1 Avløpsvannets spesifikke vekt.
- Fig. 2-7. Modellstudier.
- Fig. 8. Konsentrasjonen av støv i sedimentlaget.
- Fig. 9. Beregnet sedimentvolum på sjøbunnen ved utslipp nord-øst for øya Dybingen.
- Fig.10. Gjennomsnittlig levetid for årsyngel av laks i forskjellige konsentrasjoner av  $\text{SiO}_2$ -støv.
- Fig.11. Mulige utslipningssteder. Dypvannsledningens tracé.
- Fig.12. Prinsippskisse av dypvannsledningens trykk-system med utluftning.
- Fig.13. Forslag til trykksystem med utluftningsenhet. Alternativ 1.
- Fig.14. Beregnet nivåsenkning i trykk-kammeret ved plutselig stopp i tilførslen av avløpsvann.
- Fig.15. Avløpsmengde og strømningshastighet i dypvannsledningen ved utslipp av 10 000 kg støv.
- Fig.16. Utslipp nord-øst for Dybingen. Nødvendig trykkehøyde som funksjon av støvkonsentrasjon  $n$ , transporthastighet  $V$  og utslipningstid  $t$  for 10 000 kg støv. Tilnærmet beregningsmetode.
- Fig.17. Friksjonsverdien  $\lambda$  ved transport av strukturviskose stoffer.
- Fig.18-19. Utslipp nord-øst for Dybingen. Nødvendig trykkehøyde som funksjon av støvkonsentrasjon  $n$ , transporthastighet  $V$  og utslipningstid  $t$  for 10 000 kg støv.
- Fig.20-21. Utslipp øst for Hestehodet. Nødvendig trykkehøyde som funksjon av støvkonsentrasjon  $n$ , transporthastighet  $V$  og utslipningstid  $t$  for 10 000 kg støv.

## I. INNLEDNING.

Smelteverket Fiskaa Verk, Kristiansand, har 4 smelteovner med en samlet kapasitet på 50 MW. Det produseres alle grader av FeSi, dessuten Si-metaller og CaSi. Alle ovnene er i dag åpne, og røken ledes ut i atmosfæren gjennom skorsteiner uten rensing. Røken inneholder blant annet store mengder finfordelt  $\text{SiO}_2$ -støv, som forårsaker en betydelig luftforurensning i området. For bekjempelse av støvplagen har verket bestilt elektrofilter for rensing av røken fra en av ovnene. Filteret skal settes i drift først på nyåret 1966. Etter en prøvetid med ett filter er det planlagt innkjøp av filter til samtlige ovner. Støvplagen i området skulle dermed være eliminert.

Verket har arbeidet med å finne anvendelse for de forskjellige støvkvantiteter fra ovnene. Da det imidlertid er usikkert hvorvidt støvet i fremtiden kan benyttes i større mengder, må verket finne en enkel og lempelig måte å fjerne støvet på, uten å sjenere omgivelsene. I den anledning har Fiskaa Verk anmodet Norsk institutt for vannforskning om å vurdere muligheten for å bringe støvet oppslemmet i vann gjennom en dypvannsledning ut på stort dyp i sjøen utenfor smelteverket.

## II. STØVET.

Støvet som fanges opp i filtrene er tenkt lagret i siloer. Over et kortere tidsrom slemmes støvet gradvis opp i vann og føres ut i sjøen.

Støvetts sammensetning og egenskaper er avhengig av produksjonen på de forskjellige ovner. Vårt institutt har ikke foretatt noen inngående undersøkelse av støvet, og våre vurderinger bygger derfor vesentlig på opplysninger mottatt fra Fiskaa Verk.

Støvet vil hovedsakelig bestå av to typer:

### 1. Støv fra FeSi-produksjonen.

Dette støvet består av finfordelte sfæriske partikler av glassaktig  $\text{SiO}_2$ . Partiklene har en diameter i størrelsesområdet 0,01 - 0,5 $\mu$ . Fig. 1 viser et elektronmikroskopbilde av  $\text{SiO}_2$ -støvet.

Ved analyser er følgende andre komponenter funnet i støvet:

CaO	ca. 0,6 %
MgO	" 1,2 "
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	" 1,2 "
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	" 1,1 "

I tillegg inneholder støvet noen få prosent carbon (fine kokspartikler). Det er ikke funnet giftige komponenter.

## 2. Støv fra CaSi-produksjonen.

Også her består støvet vesentlig av SiO<sub>2</sub>-partikler som beskrevet for den første støvtype. Støvet inneholder imidlertid en betydelig mengde CaO. Foruten SiO<sub>2</sub>-partikler er det funnet følgende komponenter:

CaO	ca. 16 %
MgO	" 1,9 "
FeO	" 3,1 "
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	" 1,9 "

I tillegg kommer noen få prosent carbon. Det er heller ikke her kjennskap til giftige komponenter.

For forsøk har vårt institutt fått til disposisjon ca. 25 kg støv fra FeSi-produksjonen. For tiden er det ikke mulig å skaffe støv fra CaSi-produksjonen. Støv fra FeSi-produksjonen er derfor lagt til grunn for alle forsøk og beregninger i denne rapporten. På bakgrunn av de ulike støvtypers sammensetning og de foretatte viskositetsmålinger ved Norges Geotekniske Institutt, antas imidlertid at støvtypen vil ha liten betydning for transporten ut i sjøen. Etter utslipp vil sannsynligvis støvet fra CaSi-produksjonen sedimentere noe raskere enn støv fra FeSi-produksjonen på grunn av en sterkere fnokkdannelse. Dette vil imidlertid neppe ha særlig betydning for støvets bevegelse og avlagring. Det vil senere bli foretatt modellforsøk av utslipp med støv fra CaSi-produksjonen.

Det første filteret vil skille ut ca. 10 000 kg støv pr. døgn. Den totale fremtidige støvmengden i utslippet vil være ca. 50 000 kg pr. døgn.

Den spesifikke vekt for støv fra FeSi-produksjonen er målt med pyknometer:

Vann som fortrenningsvæske	: $\gamma_{\text{støv}} = 2,213$
Tetraklorkullstoff som fortrenningsvæske:	$\gamma_{\text{støv}} = 2,221$

Det antas at den sp.vekt for støv fra CaSi-produksjonen vil avvike uvesentlig fra de ovenfor målte verdier.

### III. FORTYNNINGSVÆSKEN.

Som mulig fortynningsvæske er sjøvann, brakkvann og ferskvann vurdert. Avgjørende for valg av fortynningsvæske er avløpsvannets bevegelse og støvets avlagring på bunnen etter utslipp. Modellforsøk har vist at sjøvann som fortynningsvann gir de beste avlagringsforhold. Sjøen som vannkilde er ubegrenset. Fabrikkområdet ligger ved sjøen, og transportveien til blandingsstedet er relativt kort. Sjøvann bør derfor benyttes som fortynningsvæske.

Ved hjelp av en sugeledning bringes sjøvannet inn til en pumpestasjon på land, for derfra å pumpes opp til blandingsstedet 15 m over vannstanden i sjøen. Sjøvannet bør hentes på ca. 5 m dyp hvor ferskvannspåvirkningen i overflatevannet gjør seg lite gjeldende. På denne måten unngås også at flytestoffer bringes inn i ledningen. For å oppnå en hensiktsmessig fortykning av støvet må pumpestasjonen kunne pumpe fra 10 - 20 l/s, avhengig av utslipningsstedet i sjøen og dypvannsledningens diameter.

Sjøvannets spesifikke vekt er bestemt av temperatur og saltholdighet. Den varierer med de ulike årstider og med vannmassenes utskiftning. Det antas at den sp.vekt på 5 m dyp vil variere mellom 1,020 og 1,025.

### IV. AVLØPSVANNET.

For å studere avløpsvannets egenskaper med hensyn til konsistens, transport og sedimentering, henvendte vårt institutt seg til Norges Geotekniske Institutt, Blindern, for å få foretatt målinger av avløpsvannets viskositet, sedimenteringseffekt og om mulig en kornfordelingsanalyse. Målingene ble utført for varierende fortynningsvæsker og støvkonsentrasjoner, og er gjengitt i rapport fra NGI, vedlegg 1.

Som beskrevet i denne rapport danner blandingen av fortynningsvæske og finfordelte partikler et tofaset system med en strukturviskos og tiksotrop karakter. De strukturviskose stoffer forandrer sin viskositet etter den bevegelsestilstand de befinner seg i. Såvel en reduksjon i bevegelseshastighet som større konsentrasjon av støv forårsaker en økning i viskositeten (se bilag 3 og 4 i rapport fra NGI).

Avløpsvannets tiksotrope karakter har stor betydning for transporten ut i dypvannsledningen. Transporthastigheten må være tilstrekkelig for å hindre en avlagring eller opphopning av større konsentrasjoner av støv langs rørbunnen.

En reduksjon i avløpsvannets transporthastighet og opphopning av støv gir en høy viskositet, som igjen krever en stor trykkehøyde for å opprettholde bevegelsen; eventuelt bringe avsatt materiale i bevegelse. En utilstrekkelig spyling vil derved kunne føre til en hurtig reduksjon i dypvannsledningens kapasitet med fare for gjentetning.

For å holde avløpsvannets transporthastighet konstant, bør doseringen av støvet begynne og opphøre ved full gjennomstrømning av fortynningsvann. Dypvannsledningen bør spyles grundig såvel før som etter utslipp. På bakgrunn av de foretatte viskositetsmålinger antas at for å kunne oppnå en tilfredsstillende drift bør støvkonsentrasjonen ikke velges større enn  $n = 1/5$  (200 g/l). Konsentrasjonen av støv i avløpsvannet er betegnet med  $n$  og angir 1 kg støv pr. antall liter avløpsvann. I parentes er antall gram støv pr. liter avløpsvann ført opp.

Avløpsvannets sp.vekt er gitt ved følgende likning:

$$\gamma = n \cdot \left( 1 + \gamma_s \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma_{\text{støv}}} \right) \right)$$

hvor

$\gamma_s$  = sjøvannets sp.vekt (fortynningsvæske)

$\gamma_{\text{støv}}$  =  $\text{SiO}_2$ -støvet's sp.vekt

$n$  = støvkonsentrasjon =  $\frac{1 \text{ kg støv}}{\text{antall liter avløpsvann}}$

Avløpsvannets sp.vekt  $\gamma$  er tegnet inn på fig. 1.1 for ulike støvkonsentrasjoner  $n$ .

## V. AVLØPSVANNETS FORTYNNING OG BEVEGELSE ETTER UTSLIPP.

For å kunne utnytte sjøbunnen til deponering av støvet og skaffe sikkerhet mot forurensninger av vannet og strendene i utslipningsområdet, er det nødvendig å få best mulig kjennskap til hvordan blandingen støv - vann oppfører seg i sjøen etter utslipp.

Særlig er støvet's fortytning og bevegelse, og støvet's avlagring på bunnen, av betydning. I den forbindelse er det foretatt modellforsøk av utslipp hvor forskjellige varianter av fortynningsvæsker og støvkonsentrasjoner i avløpsvannet har vært studert.

## 1. Modellforsøk.

Modellen består av en glasskasse med dimensjon 100 x 60 x 13 cm. Den har innebygd en skrånende sandbunn med utslipningsarrangement. Modellen fylles med sjøvann. Avløpsvannet føres inn i modellen med selvføll. Blandingen støv + fortynningsvæske blandes og holdes i suspensjon i løpet av forsøksperioden ved hjelp av et røreværk.

Sjøvannet til modellforsøkene er hentet fra 40 m dyp utenfor Drøbak i Oslofjorden.

Modellen ble bygget og forsøkene utført etter Froude's modell-lov i målestokk 1 : 37,5. Avløpsvannet ble sluppet ut i modellen gjennom en rørledning med indre diameter tilsvarende 150 mm i prototypen. Utstrømningshastigheten varieres omkring 1 m/s i prototypen. Forsøkene ble utført ved 20°C. På grunn av modellens størrelse er resultatene kun benyttet som en orientering om støvets fortynning og bevegelse etter utslipp. Resultatene av modellforsøkene er avbildet i figurene 2 - 7. Betegnelsene på bildene fra modellen angir følgende:

- $n$  = støvkonsentrasjonen i avløpsvannet.
- $\gamma_s$  = sjøvannets sp.vekt.
- $\gamma_b$  = fortynningsvæskens sp.vekt.

Modellforsøkene ble utført i to serier, en med sjøvann som fortynningsvæske og en med ferskvann som fortynningsvæske. Støvkonsentrasjonen i avløpsvannet ble for begge serier variert med  $n = 1/5$  (200 g/l),  $1/10$  (100 g/l) og  $1/35$  (28,6 g/l). Konsentrasjonen  $n = 1/35$  (28,6 g/l) tilsvarer utslipp av 50 000 kg støv kontinuerlig over 1 døgn i en dypvannsledning med indre diameter 150 mm.

Med sjøvann som fortynningsvæske dannet avløpsstrålen for støvkonsentrasjonene  $n = 1/5$  (200 g/l) og  $n = 1/10$  (100 g/l), en sky av suspendert støv på bunnen under utslippet. På den fallende bunnen gle støvskyen videre nedover, og det oppsto en strøm av suspendert støv langs bunnen mot større dyp. For støvkonsentrasjonen  $n = 1/35$  (28,6 g/l), løste avløpsstrålen seg opp i en stadig voksende sky under utslippet. Det suspenderte støvet beveget seg ikke nedover, men ble blandet inn i stadig større omkringliggende vannmasser.



Med ferskvann som fortynningsvæske oppsto for støvkonsentrasjonene  $n = 1/5$  (200 g/l) og  $n = 1/10$  (100 g/l) også en sky av støv på bunnen under utslippet. Det suspenderte støvet beveget seg imidlertid ikke videre, men dannet en stadig voksende sky som etterhvert påvirket området ved utslippet. Ved støvkonsentrasjonen  $n = 1/35$  ble avløpsstrålen avbøyd mot overflaten. Støvet beveget seg oppover for å innlagres i vannmassene over utslippet.

## 2. Betydningen av avløpsvannets spesifikke vekt og graden av fortykning for støvets bevegelse etter utslipp.

Umiddelbart etter utslipp domineres avløpsvannets bevegelse og fortykning av avløpsstrålens jettvirkning. Ettersom avløpsstrålen mister sin kinetiske utstrømningsenergi påvirkes avløpsvannets bevegelse mer og mer av gravitasjonen. Avløpsvannets sp.vekt og graden av fortykning er avgjørende for støvets innblanding i de omkringliggende vannmasser og den endelige avlagring på bunnen. Avløpsvannets spesifikke vekt er bestemt av fortynningsvæsken og konsentrasjonen av støv.

Er avløpsvannet tyngre enn det omkringliggende sjøvann, danner avløpsstrålens turbulens og sp.vekt en sky av suspendert støv på bunnen under utslippet. Ved fallende bunn vil støvskyen, dersom den er tilstrekkelig tung, gli videre nedover til stadig større dyp. Derved oppstår en tetthetsstrøm nedover bunnen fra utslipningsstedet.

Det finfordelte støvet vil etter utslipp kunne holde seg suspendert i lengre tid, mens de største partiklene og fnokker sedimenterer. Denne sedimenteringseffekten vil i tetthetsstrømmen forårsake en gradering med de større korn og fnokker langs bunnen og det finfordelte støvet øverst i skyen. Konsentrasjonen av støv tiltar ved bunnen, og fortykningen øker i skyens øvre og ytre lag. Tetthetsstrømmens bevegelse og turbulens vil motvirke en avlagring av støv, og støvet bringes derved stadig videre av tetthetsstrømmen. Avhengig av topografien i utslipningsområdet og støvskyens spesifikke vekt vil tetthetsstrømmen kunne få en betydelig kinetisk energi som bringer støvet ut i stor avstand fra utslippet.

Har avløpsvannet omtrent samme sp.vekt som sjøvannet i utslipningsområdet, vil avløpsvannets fortykning bevirke en innlagring av støvet i vannmassene nær utslippet. Transporten av støvet vekk fra utslipningsstedet er liten, og vi får en avlagring av støv på bunnen under utslippet.

Er avløpsvannet lettere enn det omkringliggende sjøvann, føres avløpsvannet mot overflaten av oppdriften. Støvet blandes derved inn i vannmassene over utslippet.

Sett i relasjon til de mengder av støv som skal deponeres på bunnen og faren for en forurensning av sjøen og strendene i utslipningsområdet, er det av stor betydning å sikre at støvet etter utslipp føres videre nedover for avlagring på stort dyp i stor avstand fra utslippet. Som modellforsøkene viser bør sjøvann benyttes som fortynningsvæske. For å oppnå en effektiv tetthetsstrøm bør konsentrasjonen av støv i avløpsvannet ligge mellom  $n = 1/5$  (200 g/l) og  $n = 1/10$  (100 g/l).

### 3. Avlagring av støv på bunnen.

Når støvet avlagres dannes et sedimentlag hvor støvkonsentrasjonen  $n$  etter kort tid når en tilsynelatende grense. Denne konsentrasjonsgrensen er avhengig av sedimentlagets tykkelse. Den videre sammenpakking av støvet skjer ~~meget~~ langsomt, og det vil først etter meget lang tid kunne dannes et fast sediment.

For å studere støvet i sedimentert tilstand ble det blandet opp en rekke konsentrasjoner av støv i sjøvann. I målesylindere sedimenterte støvet og dannet ulike sedimenthøyder. Den midlere støvkonsentrasjonen i sedimentlaget ble målt etter 1, 2 og 3 uker, og gav hver gang den samme verdi. Støvkonsentrasjonen  $n$  som funksjon av sedimenthøyden er tegnet inn på fig. 8.

Som det fremgår av figuren beholder det sedimenterte støvet et høyt vanninnhold. Fastheten i det sedimenterte støvet er relativt liten, og avlagringsvinkelen (tilsynelatende friksjonsvinkel) antas å ligge mellom  $0^\circ$  og  $10^\circ$ . Avlagringsvinkelen lar seg vanskelig måle i modell, men bør observeres direkte under naturlige forhold.

Tenker vi oss den ugunstige situasjon med en avlagring av støv på bunnen like under utslippet og en avlagringsvinkel på  $10^\circ$ , vil det i følge fig. 9 ved utslipningsstedet nord-øst for øya Dybingen kunne deponeres ca.  $170\ 000\ m^3$

sedimentert støv, tilsvarende utslipp av 50 tonn støv pr. døgn i ca. 6 år. Bringes imidlertid støvet ved en effektiv tetthetsstrøm ut i stor avstand fra utslipningsstedet vil utslippet kunne skje over betydelig lengre tid.

## VI. STØVETS FORURENSNING AV SJØVANNET OG BUNNEN I UTSLIPNINGSOMRÅDET.

### 1. Synlig forurensning.

Avhengig av avløpsvannets bevegelse etter utslipp vil finfordelt støv blandes inn i vannmassene omkring utslippet. Dette suspenderte støvet vil holde seg svevende i lengre tid og påvirker sjøvannets turbiditet og farge. Skjer utslippet i et område med liten utskiftning av vannmassene vil det suspenderte støvet kunne samle seg opp i en stadig tettere og større sky. Diffunderer eller bringes støvet av vannets bevegelse opp til overflaten får vi en forurensning i området, som kan gi sjøvannet en uestetisk og skjemmende karakter. Støvet vil også i en viss grad kunne tilgrise båter, staker, holmer, strender etc.

Støvet bør ikke under noen omstendigheter kunne nå opp til overflaten. Utslipp bør derfor skje på stort dyp og på en måte som sikrer en videre transport av støvet nedover til større dyp med avlagring i stor avstand fra utslippet. Utslipp bør videre skje i et område som ligger godt til rette for en effektiv utveksling med de større vannmasser fra havet utenfor.

### 2. Kjemisk innvirkning på sjøvannet.

De to aktuelle støvtyper vil i kjemisk henseende ha noe forskjellig innvirkning på sjøvannet i utslipningsområdet.

Støvet fra FeSi-produksjonen består hovedsakelig av komponenter som ikke vil reagere eller løse seg i vann. Et forsøk der støvet ble ekstrahert med destillert vann bekrefter dette, idet det bare ble ubetydelig økning av vannets ledningsevne etter ekstraksjonen. Vi antar derfor at støvet fra FeSi-produksjonen ved utslipp i sjøen ikke vil gi forandringer av betydning i sjøvannets kjemiske sammensetning.

Støvet fra CaSi-produksjonen inneholder vesentlig mer kalsium enn støvet fra FeSi-produksjonen. Forsøk ved instituttet viser at støvet inneholder ca. 2% CaO som er løselig i vann. Kalsiumoksyd løses i vann under dannelse av kalsiumhydroksyd, som er en sterk base. Avløpsvannet som inneholder støv fra CaSi-produksjonen vil derfor ha en høyere pH enn vanlig sjøvann. Ca. 1 g av

støvet oppslemmet i 250 ml destillert vann gav en pH på 10,9. Sjøvann har imidlertid vesentlig større bufferkapasitet enn destillert vann, og det må antas at heller ikke støvet fra CaSi-produksjonen vil gi forandringer av betydning i sjøvannets kjemiske sammensetning.

Vårt institutt har ikke undersøkt de to støvtypers innhold av giftstoffer, men det er lite sannsynlig at slike stoffer forekommer i mengder som kan ha noen merkbar skadelig innvirkning på sjøvannet i utslipningsområdet.

### 3. Utslippets betydning for fisket i området.

#### 3.1 Forsøk med fisk.

For å vurdere virkningen av  $\text{SiO}_2$ -støvet på fisk ble det foretatt forsøk med yngel av laks. Forsøkene ble utført i glassakvarier å 5 liter. Det ble benyttet vann fra laboratoriet, og i hvert akvarium ble det blåst inn luft fra en luftpumpe for å opprettholde gassbalansen. Temperaturen under forsøkene var  $10^\circ\text{C}$ . Det ble laget løsninger med forskjellige konsentrasjoner, og i hver testløsning ble satt 5 laksyngel i størrelser fra 2,5 - 3,5 cm. Det ble også utført forsøk hvor det i akvariene var anbragt en rører for å unngå sedimentering av støvet.

Under forsøkene ble fiskens reaksjoner og adferd iaktatt og eventuell død fisk notert og fjernet. Forsøkene hadde en varighet av inntil 7 døgn. For å uttrykke forsøksresultatene er innført begrepet gjennomsnittlig levetid. Denne er definert som:  $\frac{\sum t}{n} = T$ , hvor  $t$  er levetiden for hver fisk og  $n$  er antall fisk i hver test.

Resultatene av forsøkene er vist i fig. 10. Symbolene med oppadvendte piler markerer forsøk hvor det ikke oppsto dødelighet i forsøksperioden. I akvariene med rører oppsto ikke dødelighet i konsentrasjonene 0,2 og 0,4 g  $\text{SiO}_2$ /l, mens samtlige fisk døde i akvariet med 0,6 g/l. Forsøksperioden var her bare 2 døgn. I akvariene uten rører, hvor forsøksperioden var 7 døgn, oppsto ubetydelig dødelighet i løsninger med 0,2 g  $\text{SiO}_2$ /l eller mindre. I løsninger med 0,4 g/l oppsto også liten dødelighet, men fisken var her tydelig påvirket av oppholdet. I løsningen med 0,6 g  $\text{SiO}_2$ /l oppsto betydelig dødelighet.

Den kritiske grense for korttidseffekt syntes etter disse forsøkene å ligge omkring 0,4 g  $\text{SiO}_2$ /l. Fisk som var eksponert i de høyere konsentrasjoner døde

uten karakteristiske ytre symptomer. Gjellene var imidlertid dekket av partikler, og det er sannsynlig at døden vesentlig skyldtes en direkte virkning av partiklene. En del av fisken i de lavere konsentrasjoner (0,4 - 0,6 g/l) fikk hvite finner før døden inntrådte. Mikroskopering viste at dette vesentlig var koagulert slim og celleinnhold. Det er mulig dette først og fremst skyldtes partiklenes irritasjon av slim og hudvev, men det kan ikke sees bort fra at en effekt av kjemisk natur også kan ha gjort seg gjeldende.

Laks er en relativt ømtålig fiskeart overfor de fleste typer forurensning. Særlig gjelder dette det tidlige yngelstadium. De angitte konsentrasjoner hvor fisken ble skadet skulle derfor nærme seg det minimum som de fleste fiskearter ikke kan tåle. Forsøkene er utført i ferskvann, og resultatene kan ikke uten videre benyttes ved vurdering av virkning i sjøvann. Det er imidlertid ikke sannsynlig at forskjellen i partiklenes virkning i de to medier blir særlig stor. For de fleste typer av forurensning hvor kjemiske effekter gjør seg gjeldende vil virkningen være mer utpreget i ferskvann enn i sjøvann. Dette skyldes i stor utstrekning sjøvannets større saltinnhold og dermed bedre bufferkapasitet.

Det er ikke foretatt spesielle biologiske undersøkelser i fjorden hvor utslippet skal finne sted. Det er imidlertid foretatt befarings av området og innhentet opplysninger fra fiskere på stedet. I følge disse opplysninger foregår det et betydelig fritidsfiske etter makrell i hele fjordområdet omkring Odderøya. Noe sild fiskes også periodevis i dette området. Videre fiskes det noe torsk, lyr, sei, hvitting og aure under fritidsfiske med håndsnøre i den indre del av fjorden. En del tråling etter reker foregår utenfor Odderøya på en dybde av fra 50 - 100 favner. Dette fisket skal fortrinnsvis være konsentrert i fjordens nordøstlige område, dvs. utenfor Dvergsnestangen og Sjursøya. Fisket foregår vesentlig om vinteren og litt ut over våren.

Det er ikke mulig å vurdere konsekvensene av det planlagte utslipp eksakt. Det er imidlertid sannsynlig at organismer som er knyttet til de bunnområder hvor støvet sedimenterer i større mengder vil bli rammet. Det er rimelig å anta at utslippet vil resultere i død bunn i det nærmeste området omkring utslippstedet. Fortrinnsvis vil her stasjonære bunndyr, reker og bunnfisk, som f.eks. flyndrearter og torskefisk bli rammet. Av størst betydning vil her sannsynligvis konsekvensene for rekefisket kunne være. I følge de opplysninger som foreligger er det imidlertid ikke sannsynlig at de rekefelter som i dag benyttes vil berøres i noen særlig grad av utslippet. Pelagiske fiskearter som makrell, sild, laks, aure etc. vil neppe påvirkes i synderlig grad av utslippet. Disse

arter vandrer mye omkring og oppholder seg for en stor del i de høyere vannlag hvor forurensningene forutsettes ikke å gjøre seg særlig gjeldende.

### 3.2 Konklusjon.

Forsøk med yngel av laks i akvarier viste at den kritiske grense for en korttidseffekt av  $\text{SiO}_2$ -støvet var omlag  $0,4 \text{ g SiO}_2/\text{l vann}$ . I konsentrasjoner høyere enn dette ble laksyngel påført skader med døden som følge i løpet av 7 døgn. Utslipet i fjorden vil sannsynligvis kunne medføre skadevirkninger for bestanden av bunnfisk og reker i et ubestemt område omkring utslippet. I følge opplysninger fra fiskere i distriktet skal imidlertid fisket etter bunnfisk og reker i utslippsområdet ikke være særlig betydningsfullt.

## VII. MULIGE UTSLIPNINGSSTEDER.

Støvet skal føres ut til utslipningsstedet i en dypvannsledning forankret til bunnen. Dypvannsledningens tracé bør være uten store vinkelledninger og falle jevnt nedover mot utslipningsstedet. Avløpsmengden i utslippet og den maksimalt tilgjengelige trykkehøyde begrenser dypvannsledningens lengde.

Den totale fremtidige støvmengde pr. døgn i utslippet er 50 000 kg. I sedimentert tilstand representerer dette et betydelig volum. Måten støvet avlagres på og sjøbunnens topografi i utslipningsområdet er avgjørende for mengden støv som kan deponeres på bunnen. Som tidligere beskrevet vil det ved hensiktsmessig valg av fortynningsvæske og støvkonsentrasjon kunne oppnås en effektiv tethetsstrøm av suspendert støv nedover mot større dyp etter utslipp. På denne måten avlagres støvet over et stort område som sikrer en lang driftstid uten opphopning foran utløpet. Bunnen under utslippet bør derfor falle nedover mot størst mulig dyp.

Under avløpsvannets bevegelse og fortykning vil vi som tidligere beskrevet kunne få en innblanding av finfordelt støv i omkringliggende vannmasser. For å hindre at det suspenderte støvet når opp til overflaten og forurenser sjøen i utslipningsområdet, bør utslippet skje på størst mulig dyp. Utslipet bør videre skje i et område som ligger godt til rette for en effektiv vannutveksling med de større vannmasser fra havet utenfor.

På bunnen hvor vi til stadighet får en avlagring av støv vil bunnfaunaen etter hvert dø ut. Ved å velge utslippet på stort dyp vil imidlertid skadevirkningene være minimale.

Som mulige utslipningssteder foreslås følgende:

1. Utslipp på 50 m dyp nord-øst for øya Dybingen.

Utslipningssted med dypvannsledningens tracé er tegnet inn på fig. 11. Dypvannsledningen kan legges på bunnen i en noenlunde rettlinjert tracé med jevnt fall ut til utslipningsstedet. Den får en lengde på ca. 2000 m. Fra utslipningsstedet faller bunnen sterkt til 80 m dyp. Videre danner sjøbunnen en åpen renne med fall ca. 1 : 10 - 1 : 20 ut mot de større dyp i havet utenfor.

I området nord for Svensøya krysser dypvannsledningen et viktig opp-ankringsområde.

2. Utslipp på 50 m dyp øst for øya Hestehødet.

Utslipningssted med dypvannsledningens tracé er tegnet inn på fig. 11. Sjøbunnens topografi tillater her ikke et jevnt fall på dypvannsledningen. Etter ca. 1000 m når ledningen et lavpunkt for i de neste 500 m å stige ca. 5 - 10 m. Den resterende del av ledningen faller hele tiden mot utslipningsstedet. For å unngå de større dyp i Fiskaabukta bør ledningen legges i en bue inn i bukta. Dypvannsledningens lengde blir ca. 3000 m. Under utslippet faller bunnen de første 200 m ca. 1 : 3. Det videre fall mot de store dyp i havet utenfor er på ca. 1 : 10.

### VIII. DYPVANNsutslippet.

De nødvendige anordninger for dypvannsutslippet er utslipningsarrangement på sjøbunnen, dypvannsledning og et trykksystem på land.

1. Utslipningsarrangementet på sjøbunnen.

Ved en hurtig og sterk fortykning av støvet i sjøen etter utslipp reduseres effekten av den ønskede tetthetsstrøm nedover vekk fra utslipningsstedet. Avløpsvannet bør derfor slippes ut gjennom dypvannsledningens endeåpning uten noen form for spredning eller dysearrangement. Det anbefales at utslippet skjer ca. 3 m over bunnen med fallende bunn under utslippet.

2. Dypvannsledningen. Hensiktsmessig diameter.

Til dypvannsledningen kan kunststoffrør, trerør, stålrør og støpejernsrør benyttes. I strandsonen må ledningen beskyttes mot bølgebryting og annen mekanisk

påkjønning og bør derfor være nedgravet. Stålrør eller støpejernsrør vil her antageligvis være det mest egnede rørmaterialet. På større dyp anbefales kunststoffrør som med jevne mellomrom forankres med vekter til bunnen. Dypvannsledningens tracé bør være mest mulig rettlinjert og ha jevnt fall mot utslipningsstedet.

Som tidligere beskrevet er det av stor betydning at avløpsvannet har en selvspylende hastighet i dypvannsledningen. Det antas at transporthastigheten bør ligge på ca. 1 m/sek eller mere. Den minste tillatte hastighet er antatt til 0,80 m/s. Ved økende diameter på dypvannsledningen øker mengden av fortynningsvann som er nødvendig for å oppnå en tilfredsstillende spyling. De anleggsmessige og driftsmessige omkostninger for pumpestasjonen og dypvannsledningen tilsier minst mulig diameter.

Dypvannsledningens diameter bør imidlertid ikke velges for liten. En utilstrekkelig spyling med redusert hastighet i røret vil kunne føre til en avlagring av støv langs rørveggen, eventuelt opphopning av større konsentrasjoner av støv. Ved liten diameter vil dette gi en hurtig reduksjon i transportkapasiteten og fare for igjentetning.

Vårt institutt har ikke foretatt forsøk med transport av avløpsvannet gjennom rørledninger, og vi kan derfor ikke uttale oss nærmere om støvets egenskaper med hensyn til en avlagring og utspyling i dypvannsledningen. Forsøk utført ved Fiskaa Verk tyder imidlertid på at ved en transporthastighet på avløpsvannet lik 1 m/s eller mer og ved en effektiv spyling av ledningen med fortynningsvann mellom utslippene, vil støvet ikke kunne gi et vedvarende belegg i dypvannsledningen.

Dypvannsledningens lengde og den maksimale trykkehøyde er også av avgjørende betydning ved valg av dypvannsledningens diameter. Ved avtagende diameter og økende transportlengde kreves en større trykkehøyde for å oppnå en tilfredsstillende transport av avløpsvannet.

Den videre vurdering og beregning av dypvannsutslippet er foretatt for dypvannsledning med indre diameter 150 mm og 100 mm.

### 3. Trykksystem for transport av avløpsvannet.

Den nødvendige energi for transport av avløpsvannet ut til utslipningsstedet besørgeres av et trykksystem på land. Trykkehøyden kan enten oppnåes ved selvføll



med oppstuvning, pumping eller en kombinasjon av selvfall og pumping. I denne rapport er muligheten for å utnytte selvfall til transport av avløpsvannet vurdert.

## IX. TRANSPORT AV AVLØPSVANNET UT I SJØEN.

### 1. Trykksystemet med utluftningsenhet.

Ved selvfall besørages transporten av avløpsvannet ut til utslipningsstedet av den potensielle energi avløpsvannet har ved blandingsstedet på land. Når utslippet er i drift gir dette seg til kjenne ved en oppstuvning av avløpsvann i trykksystemet. Oppstuvningen i forhold til vannstanden i sjøen betegnes med trykkehøyde og angis i m slamhøyde.

Til trykksystemet bør det stilles følgende krav:

1. Gi mulighet for en oppstuvning til ønskede trykkehøyde.
2. Trykksystemet må være selvspylende uten muligheter for opphopning av sedimentert materiale.
3. Hindre at luft suges inn i dypvannsledningen.

Den maksimale oppstuvning er begrenset oppad av blandingsstedets beliggenhet ca. 15 m over vannstanden i sjøen. På fig. 12 er to alternativer av trykksystem vist i prinsipp.

Alt.1: Fra et utluftningsbasseng beliggende ved blandingsstedet føres avløpsvannet inn i et trykkrør som følger terrenget ned til stranden. Foruten å fjerne luft, vil bassenget i en viss grad kunne tjene som utjevningssbasseng. I strandsonen anordnes et utluftningskammer, hvor avløpsvannets strømbevegelse beroliges i den grad at luften kan unnvike i en utluftningspipe. Utluftningspipen må være høyere enn det maksimale oppstuvningsnivå. Fra utluftningsenheten føres avløpsvannet gjennom et uttak inn i dypvannsledningen. Alternativ 1 er tegnet inn på kart over strandområdet, fig. 13.

Alt.2: Fra et utluftningsbasseng strømmes avløpsvannet ned i en trykksjakt. Trykksjaktens tverrsnitt velges tilstrekkelig stort til at strømbevegelsen tillater en effektiv utluftning. Uttaket til dypvannsledningen skjer i bunnen av sjakten.

Det er viktig at trykksystemet gis en hydraulisk god utformning.

Spesielt er uttaket fra utluftningsenheten til dypvannsledningen av stor betydning. Likeledes må en overstrømming av trykksystem sikres med avløp.

Trykksystemet må i begge alternativer være selvspylende. En avlagring av støv i systemet vil kunne redusere kapasiteten til utslippet. En plutselig løsrivelse av større mengder sedimentert materiale vil kunne føre til en tiltetting av dypvannsledningen. Denne avlagringsfare unngås best ved at trykkrøret og bunnen i utluftningsenheten gis tilstrekkelig fall.

Det er av avgjørende betydning at luft ikke under noen omstendigheter kan suges inn i dypvannsledningen. Luft i avløpsvannet vil kunne samle seg opp i dypvannsledningen og derved påvirke ledningskapasiteten, evt. heve ledningen til overflaten.

Årsaken til at luft kommer inn i dypvannsledningen kan være følgende:

1. Dårlig utluftning av avløpsvannet i trykksystemet.
2. Uttaket til dypvannsledningen ligger over likevektsnivået for avløpsvannet i trykksystemet.
3. "Vortex"-dannelse over uttaket.
4. Trykksvingninger i dypvannsledningen som følge av plutselig stopp i utslippet.

Ved normal drift vil de på fig. 11 foreslåtte utluftningsenheter gi en god utluftning av avløpsvannet før dette når inn i dypvannsledningen. De ovenfor nevnte punkter 2, 3 og 4 vil gjøre seg gjeldende ved stopp og igangkjøring av utslippet. Ved å velge uttaket til dypvannsledningen fra trykkammeret på tilstrekkelig dyp, vil uttaket alltid være neddykket og derved hindres en innsuging av luft.

2. Valg av uttaksdyp fra trykksystemet til dypvannsledningen. Kontroll av avløpsvannets nivåsenkning i trykk-kammeret ved plutselig stopp i tilførslen av avløpsvann.

Avløpsvannets statiske likevektsnivå i trykksystemet er bestemt av sjøvannets spesifikke vekt, avløpsvannets spesifikke vekt og utslipningsdyp. Slippes avløpsvannet ut på 50 m dyp med en støvkonsentrasjon  $n = 1/7$  (143 g/l) vil likevektsnivået ligge 3,5 m under vannstanden i sjøen. For å hindre at luft kan suges inn i dypvannsledningen er uttaket til denne valgt ytterligere 2 m dypere, eller 5,5 m under vannstanden i sjøen.

Den ugunstigste situasjon for innsuging av luft oppstår ved plutselig stopp i tilførslen av avløpsvann. Denne situasjon får vi når fortynningsvannet ved et driftsuhell faller ut. Vannstanden i trykksystemet vil da synke samtidig som strømningshastigheten i dypvannsledningen avtar. Avhengig av avløpsvannets kinetiske energi og friksjonsforholdene i dypvannsledningen vil det kunne oppstå trykksvingninger som senker avløpsvannets nivå i trykk-kammeret under det statiske likevektsnivå. Senkes avløpsvannets nivå til uttaket til dypvannsledningen vil luft suges inn i ledningen. Likeledes kan en "vortex"-dannelse over uttaket føre til en innsugning av luft.

En beregning av avløpsvannets nivåsenkning i trykk-kammeret ved plutselig stopp i tilførsel av avløpsvann er utført under følgende forutsetninger:

Utformning av uttaket og den nedre del av trykk-kammeret er valgt som vist på fig. 14.

Trykk-kammerets bredde,	$B = 3,00 \text{ m}$
Dypvannsledningens diameter	$D = 150 \text{ mm}$
Dypvannsledningens lengde	$2000 \text{ m}$
Avløpsvannets sp.vekt	$\gamma = 1,103 \text{ (} n=1/7, 143 \text{ g/l)}$

Utgangssituasjonen for beregningene er plutselig stopp i tilførslen av avløpsvann ved en transporthastighet i dypvannsledningen på  $1,1 \text{ m/s}$  og et antatt nivå på avløpsvannet i trykksystemet lik vannstanden i sjøen. Den siste antagelse er nødvendig for å forenkle beregningene og representerer en sikkerhetsfaktor.

Grunnlikninger:

$$\text{I} \quad \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + z + h_f = 0 \text{ (Newton)}$$

$$\text{II} \quad V \cdot F_{150} = F(z) \frac{dz}{dt} \text{ (Kontinuitet)}$$

$$\text{III} \quad h_f = \lambda \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{L}{D} \quad \text{(Friksjonstap, Darcy)}$$

hvor

$L$  = dypvannsledningens lengde

$g$  = gravitasjonskonstant

$Z$  = variabel for avløpsvannets nivå i trykksystemet

$V$  = transporthastighet i dypvannsledningen

$F(z)$  = avløpsvannets overflate ved en oppstuvning  $z$  i trykk-kammeret

$h_f$  = friksjonstap.

Integrasjonen er foretatt ved valg av endelige tidsintervaller  $\Delta t$ .

i	t sek	$\Delta t$ sek	z m	V m/s	$h_f$ m	$z+h_f$ m	$\Delta V$ m/s	$\Delta z$ m
0	0		-3,50	1,10	16,0	12,5		
		2					0,12	0,004
1	2		-3,496	0,98	12,8	9,3		
		2					0,09	0,003
2	4		-3,493	0,89	11,8	8,3		
		5					0,20	0,007
3	9		-3,486	0,69	6,5	3,0		
		5					0,07	0,005
4	14		-3,481	0,616	5,9	2,4		
		10					0,12	0,010
5	24		-3,47	0,50	4,1	0,6		
		10					0,03	0,009
6	34		-3,46	0,47	3,6	0,1		
		20					0,01	0,015
7	54		-3,445	0,46	3,4	0		
		60					0	0,045
8	114		-3,4	0,46	3,4	0		
		60					0	0,045
9	174		-3,355	0,46	3,4	0,1		
		60					0,02	0,045
10	234		-3,31	0,45	3,3	0		

De beregnede verdier er inntegnet på fig. 14. Det fremgår av kurvene at den store friksjonen i dypvannsledningen vil redusere transporthastigheten hurtig inntil likevekt mellom friksjon og oppstuvningstrykk finner sted. Den videre reduksjon i transporthastigheten skjer meget langsomt, og avløpsvannets nivå i trykkammeret reduseres sakte mot likevektsnivået. Det oppstår ingen trykk-svingning. Ved det valgte uttak 2 m under avløpsvannets likevektsnivå er faren for "vortex"-dannelse dermed minimal.

Velges dypvannsledningens diameter  $D = 100$  mm, eller dypvannsledningens lengde økes til 3000 m, vil dette gi ytterligere sikkerhet mot innsugning av luft på grunn av trykksvingninger. En variasjon i transporthastigheten i dypvannsledningen vil heller ikke kunne frembringe merkbare svingninger i trykk-kammeret.

### 3. Beregning av nødvendig trykkhøyde for transport av avløpsvannet.

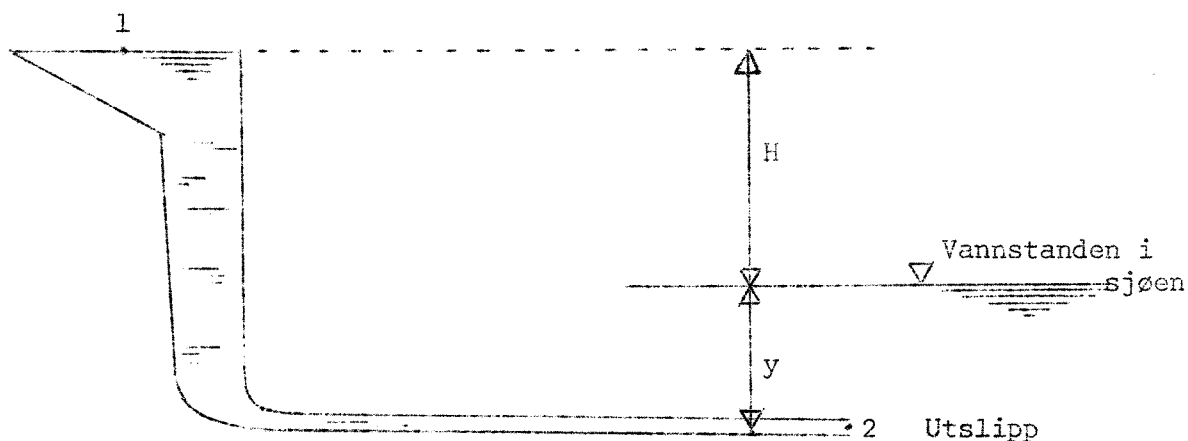
#### 3.1 Forutsetninger.

Utslipningssted:	Dybningen	Høstehedet
Dypvannsledningens lengde:	2000 m	3000 m
Dypvannsledningens diameter:	150 mm	150 mm
- " - :	100 mm	100 mm
Utslipningsdyp:	50 m	50 m
Støvets sp.vekt $\gamma_{støv}$ :	2,221	2,221
Fortynningsvannets sp.vekt $\gamma_b$ :	1,025	1,025
Sjøvannets sp.vekt i utslipnings- området antas konstant $\gamma_s$ :	1,025	1,025

Dypvannsledningen er hydraulisk glatt. Støvmengden fra det første filteret 10 000 kg pr. døgn er lagt til grunn for beregningene.

#### 3.2 Bernoullis likning.

Bernoullis likning gir følgende uttrykk for trykkhøyden H:



$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_f$$

$$H = h_1 - h_2 - y$$

$$H = \frac{\gamma_s \cdot y}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + h_f - y$$

hvor

$\gamma_s$  = sjøvannets sp.vekt

$\gamma$  = avløpsvannets sp.vekt

$V$  = transporthastighet i dypvannsledningen lik utstrømningshastigheten i utslippet.

$h_f$  = trykktap i dypvannsledningen lik friksjonstap langs rørveggen.  
 $y$  = utslipningsdyp.

### 3.3 Avløpsmengden i utslippet.

Transporthastigheten i dypvannsledningen er gitt ved ledningens diameter  $D$  og avløpsmengden  $q$ .

Den totale mengde avløpsvann  $Q$  for transport av 10 000 kg støv er

$$Q = \frac{10\,000}{n} \quad (1)$$

hvor  $n$  er konsentrasjonen av støv i avløpsvannet..

Avløpsmengden pr. tidsenhet kan beregnes etter følgende formel:

$$q = \frac{10\,000}{n \cdot t \cdot 3600} \quad (1/s)$$

hvor  $t$  er total utslipningstid i timer.

På fig. 15 er avløpsmengden  $q$  og strømningshastigheten  $V$  for en dypvannsledning med indre diameter 150 mm og 100 mm tegnet inn for ulike støvkonsentrasjoner  $n$  i avløpsvannet og ulike utslipningstider  $t$  for 10 000 kg støv.

### 3.4 Trykktapet i dypvannsledningen.

For beregning av trykktapet  $h_f$  i dypvannsledningen benyttes følgende likning:

$$h_f = \lambda \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{L}{D} \quad (\text{Darcy})$$

hvor

$\lambda$  = Friksjonsverdi

$L$  = Dypvannsledningens lengde

$D$  = Dypvannsledningens diameter

$V$  = Transporthastighet i dypvannsledningen.

Friksjonsverdien  $\lambda$  er en funksjon av avløpsvannets viskositet, strømnings art, tykkelsen av det laminære grensesjikt  $\delta$ , rørets ujevnhet  $s$  og rørets diameter  $D$ .

Som tidligere beskrevet har avløpsvannet en strukturviskos og tiksotrop karakter. De klassiske beregningsmetoder for trykktap i rør forutsetter at avløpsvannet er en Newtonsk væske, dvs.:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

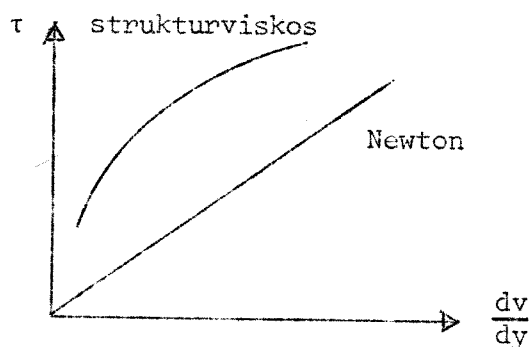
hvor

$\tau$  = skjærspenning

$\eta$  = væskens dynamiske viskositet lik en konstant

$\frac{dv}{dy}$  = hastighetsgradient i skjærsonen.

Disse beregningsmetoder vil ved fullt utviklede turbulente forhold i dypvannsledningen også gi noenlunde riktige verdier for de strukturviskose stoffer.



For en tilnærmet beregning av trykktapet i dypvannsledningen er avløpsvannet antatt lik en Newtonsk væske. Ved hydraulisk glatte rør og fullt utviklet turbulens har vi følgende uttrykk for  $\lambda$  (Prantel, Colebrook):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{Re \sqrt{\lambda}}{2,51}$$

$$\text{Reynolds tall } R_e = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

hvor

$V$  = transporthastighet

$D$  = dypvannsledningens diameter

$\nu$  = avløpsvannets kinetiske viskositet

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\text{dynamiske viskositet}}{\text{avløpsvannets tetthet}}$$

Den "tilsynelatende" dynamiske viskositet er målt ved Norges Geotekniske Institutt, Blindern, og beskrevet i rapport, vedlegg I. Reynolds tall er en karakteristisk faktor for strømmingens art og grad av turbulens. For Newtonske væsker angir  $R_e > 2320$  det turbulente strømningsområde.

Den nødvendige trykkhøyde for transport av avløpsvannet er beregnet for en dypvannsledning med indre diameter 150 mm og en lengde på 2000 m, (utslipningssted øst for øya Dybingen). Beregningen er foretatt for ulike konsentrasjoner av støv i avløpsvannet  $n = 1/5$  (200 g/l) til  $n = 1/10$  (100 g/l). Utslipningstiden for 10 000 kg støv varierer fra  $t = 0,5$  timer til  $t = 2$  timer. De beregnede verdier er tegnet inn på fig. 16.

For nøyaktigere å kunne beregne de strukturviskose stoffers strømningsart, bevegelse og trykktap i rør, er det i de senere år foretatt flere teoretiske undersøkelser over emnet. En eksakt beregningsmetode eksisterer imidlertid ikke, og det har vist seg vanskelig å finne en nøyaktig teoretisk beskrivelse av de strukturviskose egenskaper som samtidig gir grunnlag for en praktisk beregningsmetode for den prosjekterende ingeniør.

For en vesentlig del av de strukturviskose stoffer har følgende formulering vist seg hensiktsmessig:

$$\tau = k \left( \frac{dv}{dy} \right)^m$$

$\tau$  = skjærspenning

$k$  = stoffets "stivhet"

$\frac{dv}{dy}$  = hastighetsgradient

$m$  = strukturtall.

For spesialtilfellet  $m = 1$  angir likningen forholdet i en Newtonsk væske hvor stivheten  $k$  er lik den dynamiske viskositet  $\eta$ .

Friksjonsverdien  $\lambda$  lar seg nå ved hydraulisk glatte rør uttrykke på følgende måte:  
Laminære strømningsforhold:

$$\lambda = 8 \left( \frac{6m+2}{m} \right)^m \cdot \frac{1}{R_{e_m}}$$

Turbulente strømningsforhold:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,0 \left( \frac{1}{m} \right)^{0,70} \cdot \log \left( R_{e_m} \cdot \lambda^{1-\frac{m}{2}} \right) - 0,8m$$

$\lambda$  er grafisk fremstilt i fig. 17.



Reynolds tall  $R_{e_m}$  lar seg uttrykke for strukturviskose stoffer, ved hjelp av en dimensjonsbetraktning, på følgende måte:

$$R_{e_m} = \frac{D^m \cdot V^{2-m} \cdot \rho}{k}$$

$V$  = transporthastighet

$D$  = dypvannsledningens diameter

$\rho$  = avløpsvannets tetthet.

Overgang fra laminær til turbulent strømningsart finner sted ved  $R_{e_m} \approx 1500-2000$ .

For å kunne bestemme avløpsvannets strukturtall  $m$  og stivhet  $k$  ved ulike bevegelsestilstander, må skjærspenningen  $\tau$  måles som funksjon av hastighetsgradienten  $\frac{dv}{dy}$  (flytediagram). Skjærspenningsmålinger er utført ved Sentralinstitutt for industriell forskning, Blindern, og resultatet er gjengitt i rapport, vedlegg II.

Ved en strømningshastighet  $V$  i dypvannsledningen er den tilhørende skjærspenning ved rørveggen:

$$\tau = \frac{\rho}{g} \cdot \lambda \cdot V^2$$

Tegnes skjærspenningen som funksjon av hastighetsgradienten på dobbelt logaritmisk papir og tangenten til skjærspenningskurven trekkes for en bestemt strømningshastighet i rørledningen, tilsvarende strukturtallet  $m$  stigningsforholdet til tangenten, og stivheten  $k$  er ordinaten til tangenten for  $\frac{dv}{dy} = 1$ .

Den nødvendige trykkhøyde for transport av 10000 kg støv er tegnet inn på fig. 18 - 21. Utslipningstiden varieres fra  $t = 0,5$  timer til  $t = 4$  timer og støvkonsentrasjonen i avløpsvannet varieres fra  $n = 1/5$  (200 g/l) til  $n = 1/10$  (100 g/l). Beregningene er foretatt for en dypvannsledning med indre diameter 150 mm og en med 100 mm. Transportlengden er 2000 m og 3000 m ved utslipningssted henholdsvis nord-øst for øya Dybingen og øst for øya Hestehodet.

Som det fremgår tidligere i denne rapport bør støvkonsentrasjonen i avløpsvannet ligge mellom  $n = 1/5$  (200 g/l) og  $n = 1/10$  (100 g/l). Den maksimale trykkhøyde er begrenset oppad til 15 m. Minste tillatte strømningshastighet er antatt lik 0,80 m/s. Disse verdier begrenser et område på trykk-kurvene hvor utslippet har en tilfredsstillende drift. Dette området er tegnet inn på fig. 18 - 21 sammen med kurver for strømningshastighetene  $V = 0,80$  m/s, 1,00 m/s og 1,2 m/s.

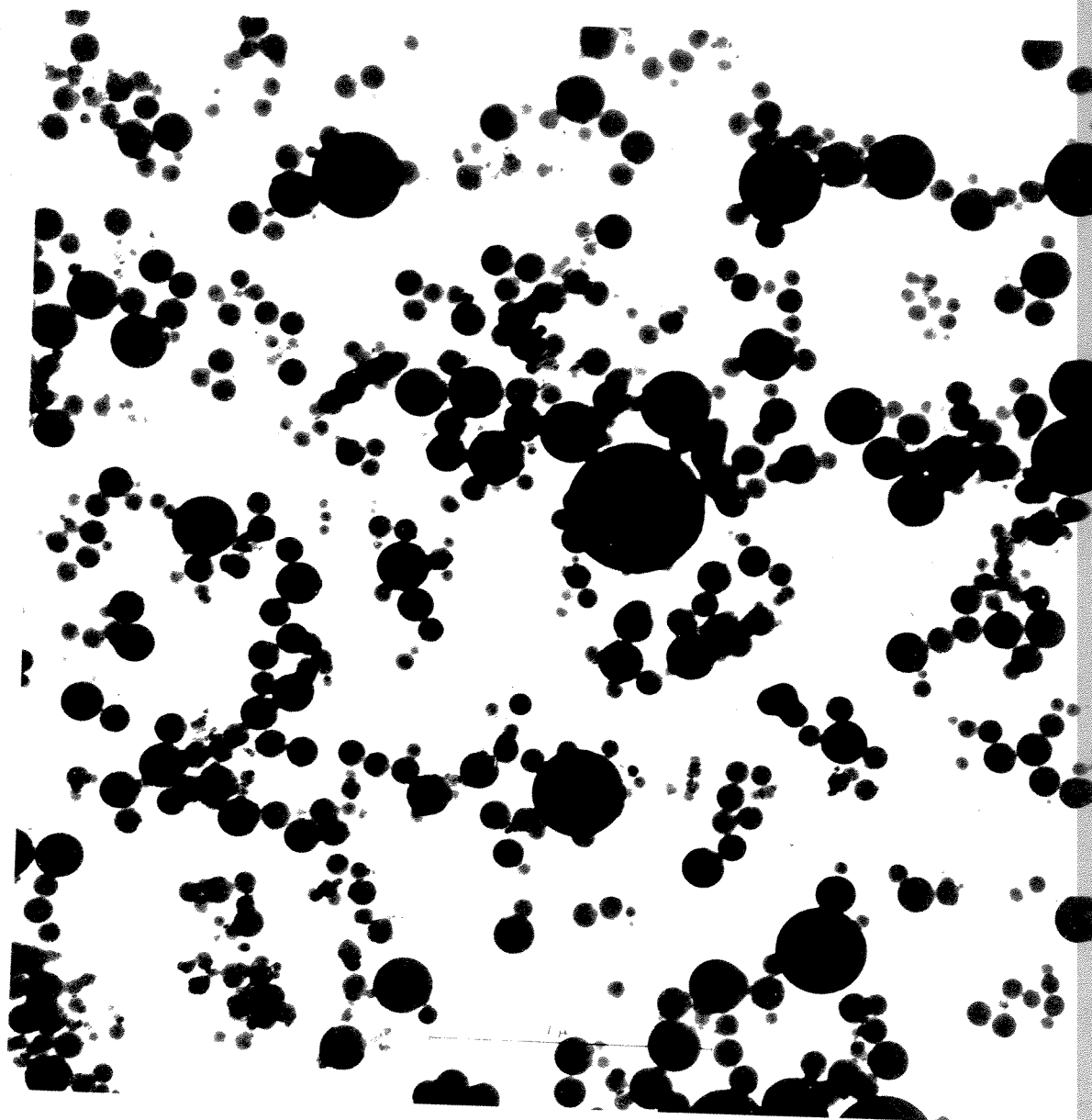
## X. SAMMENFATTENDE KONKLUSJON.

Fra en maksimal trykkhøyde på 15 m skal det oppslemmede støv føres ut i sjøen gjennom en dypvannsledning ved selvføll. For å oppnå en hensiktsmessig fortykning og avlagring av støv på bunnen etter utslipp, bør støvet slemmes opp i sjøvann i en konsentrasjon 100 - 200 g/l. Støvet vil da ved fallende bunn i utslipningsområdet danne en tetthetsstrøm nedover og ut til de større dyp. Derved er faren for en forurensning av sjøen minimal, samtidig med at en større mengde støv vil kunne deponeres på bunnen. Konsentrasjonen av støv i avløpsvannet bør velges ca. 150 g/l.

Utslipppet bør skje på 50 m dyp. Som mulige utslipningssteder er utslipp nord-øst for øya Dybingen og øst for øya Hestehodet vurdert. Beregningen av transporten av støv ut til utslipningsstedet viser at støvet bør slippes ut nord-øst for øya Dybingen. Dypvannsledningen kan her legges i en rettlinjert tracé med jevnt fall. Velges dypvannsledningens indre diameter lik 150 mm vil det kunne oppnås en transporthastighet mellom 1,00 - 1,20 m/s. Ved en indre diameter lik 100 mm vil transporthastigheten være 0,80 - 0,90 m/s. Det antas at ved en effektiv spyling av dypvannsledning, vil det kunne benyttes såvel en ledning med indre diameter 150 mm som 100 mm. Vi anbefaler imidlertid at det benyttes en dypvannsledning med indre diameter lik 150 mm da denne gir større sikkerhet mot driftsvanskeligheter. Ved utslipp øst for øya Hestehodet vil transporthastigheten på grunn av den lengre transportveg være mindre. Dypvannsledningens tracé vil her ikke kunne legges rettlinjert med jevnt fall, men vil ha et lavpunkt i Fiskaabukta for så å stige de neste 500 m. Den resterende del av ledningen faller mot utslipningsstedet. Dette vil sammen med den mindre transporthastigheten kunne føre til driftsvanskeligheter. Utslipningsstedet bør ikke velges øst for Hestehodet.

For å hindre en avlagring av støv med reduksjon i transportkapasitet og fare for gjentetning, må dypvannsledningen spyles grundig mellom hver utslipningsperiode. Dette kan gjøres ved at fortykningsvannet gjennomstrømmer ledningen i rikelig tid, såvel før som etter utslipp. Likeledes er det av stor betydning at luft ikke føres inn i dypvannsledningen. Trykksystemet på land må derfor gi god utluftning av avløpsvannet.

Etter de opplysninger vårt institutt har mottatt om støvets sammensetning og egenskaper, og etter de forsøk og studier vi har utført, er det lite sannsynlig at støvet vil kunne forårsake merkbare forurensninger i utslipningsområdet.



MAGNIFICATION 40 000

1 micron

Electron micrograph of silica powder. In electric smelting of ferrosilicon, quartz is vaporized as silicon monoxide which is oxydized to silica above the charge and condensed as fume in furnace gases. By filtering these gases the silica powder shown above is recovered.

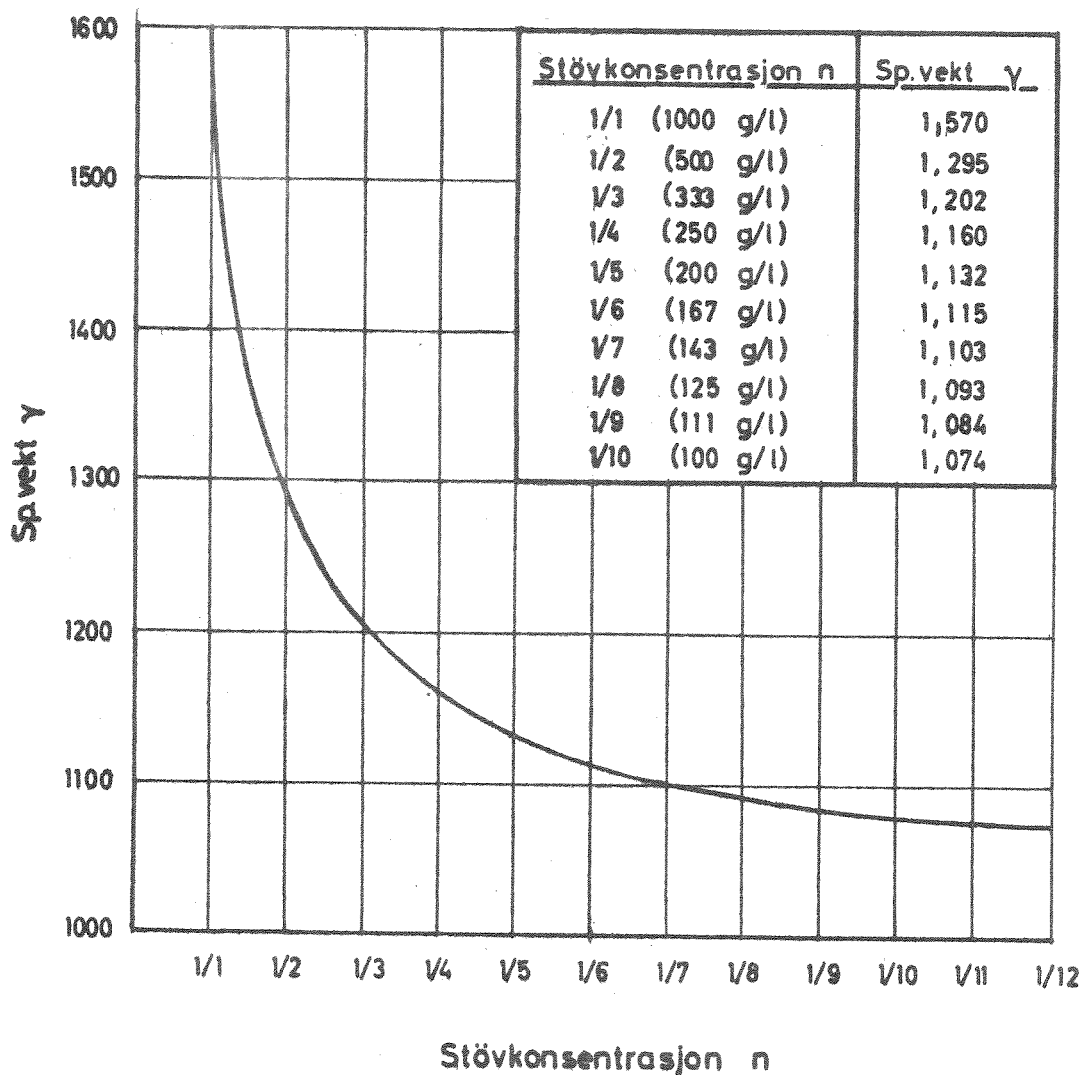
ELEKTROKEMISK A/S, FISKA VERK  
KRISTIANSAND S., NORWAY

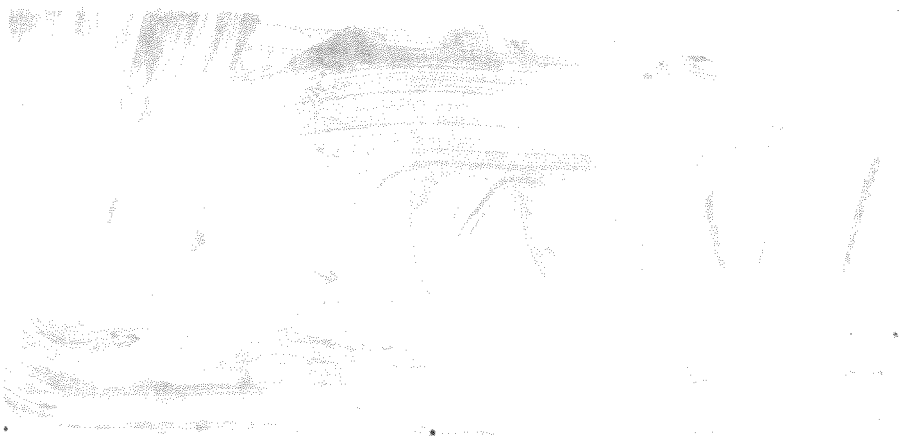
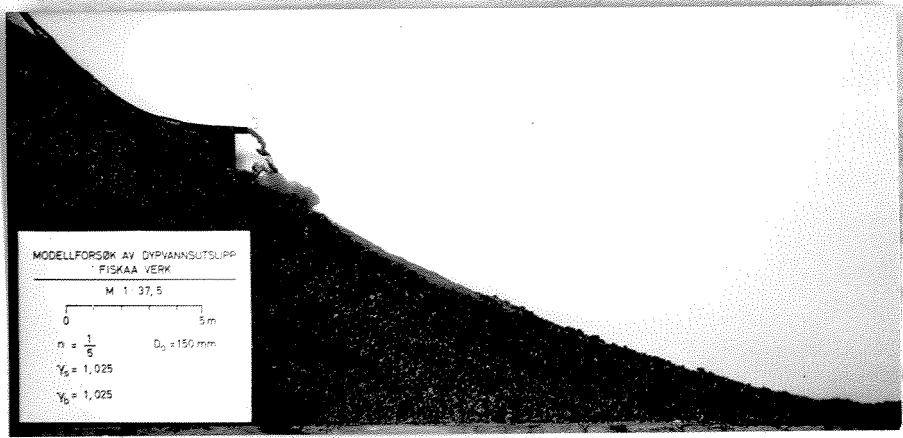
Fig.1

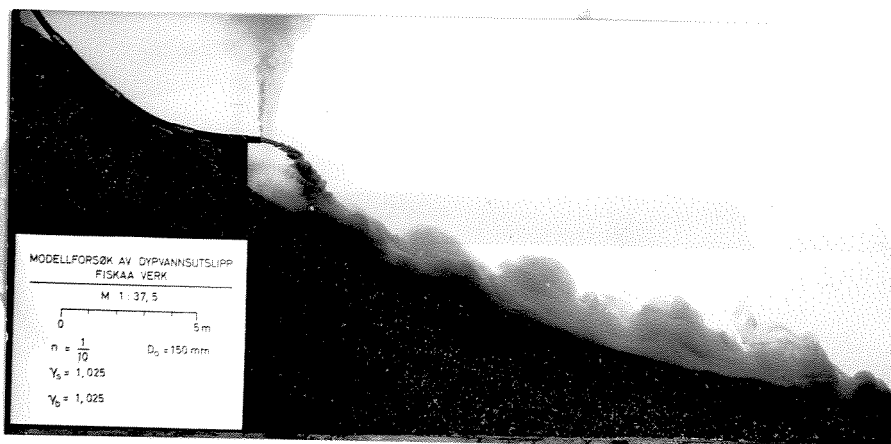
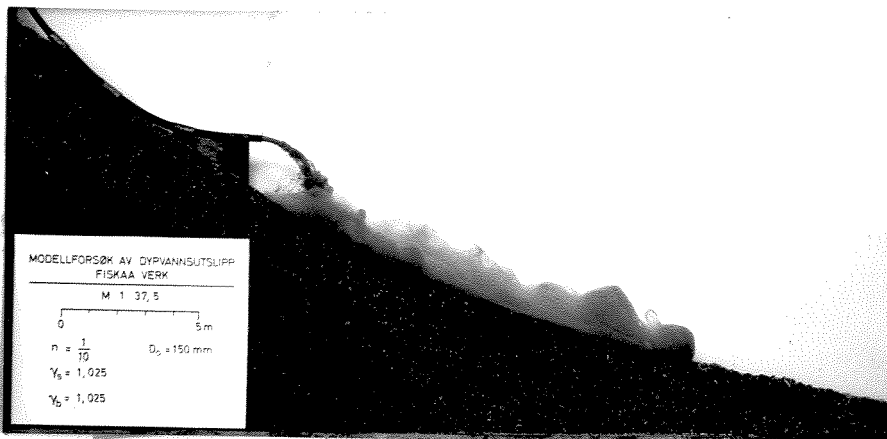
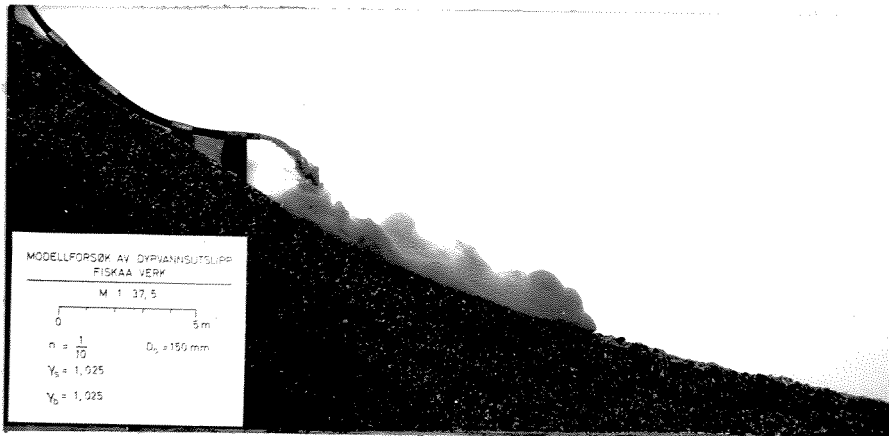
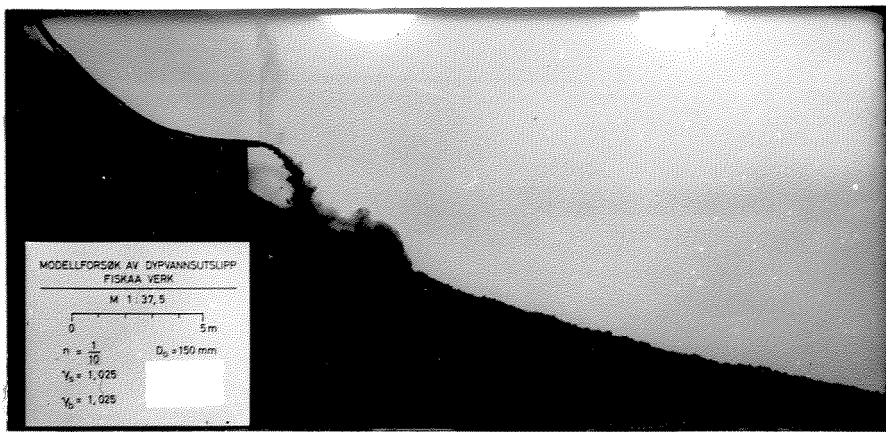
O-5/65\*

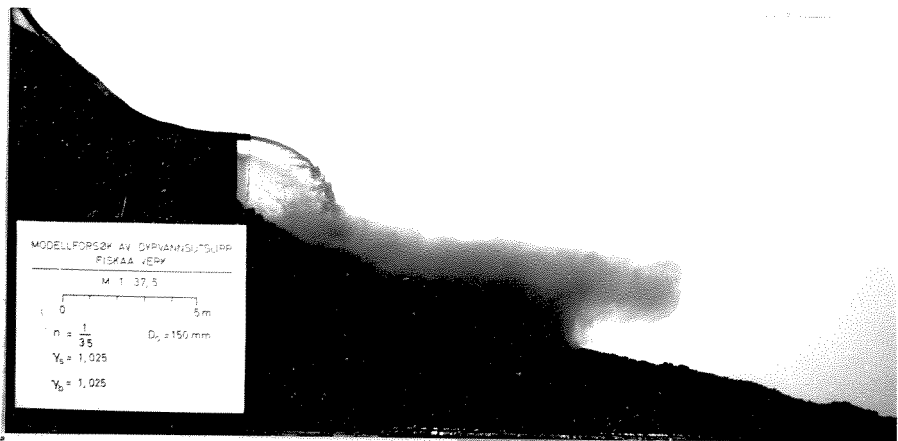
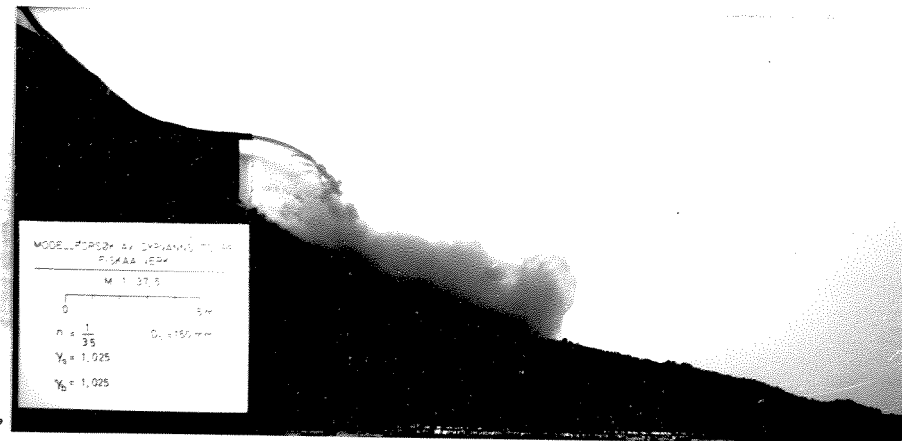
Avløpsvannets sp.vekt:  $\gamma$   
 Fortynningsvæske sjö vann:  $\gamma_s = 1,025$   
 SiO<sub>2</sub>-stövets sp.vekt:  $\gamma_{stöv} = 2,221$   
 Stövkonsentrasjon:  $n = \frac{1 \text{ kg. stöv}}{\text{antall liter avløpsvann}}$

$$\gamma = n \left[ 1 + \gamma_s \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma_{stöv}} \right) \right]$$





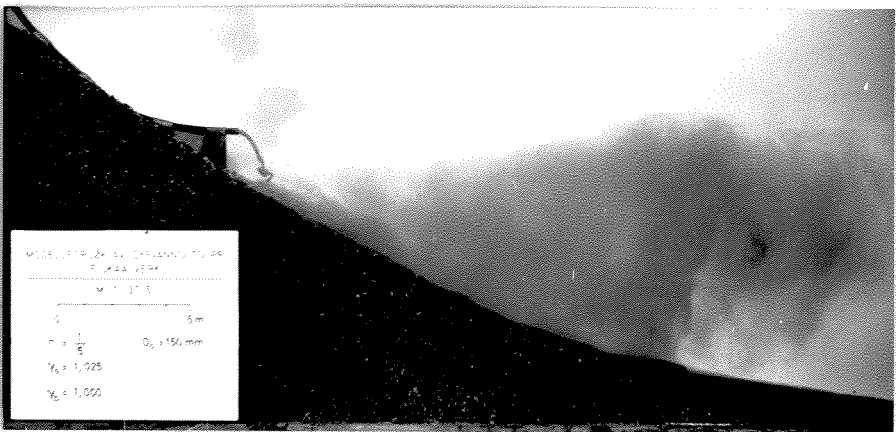
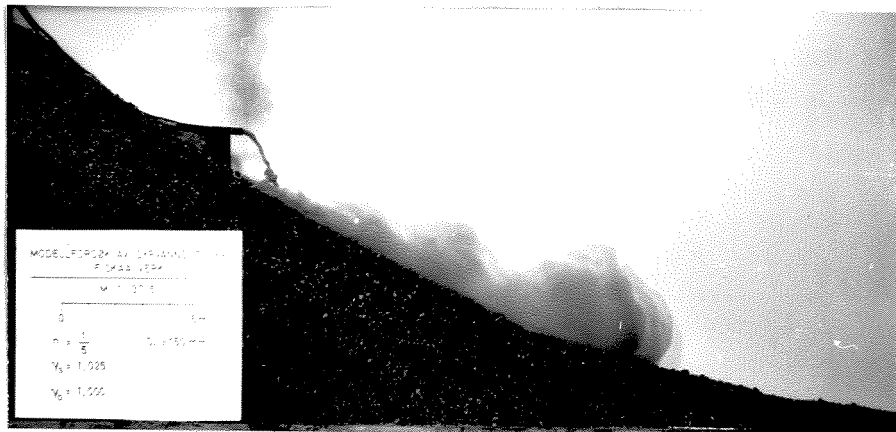




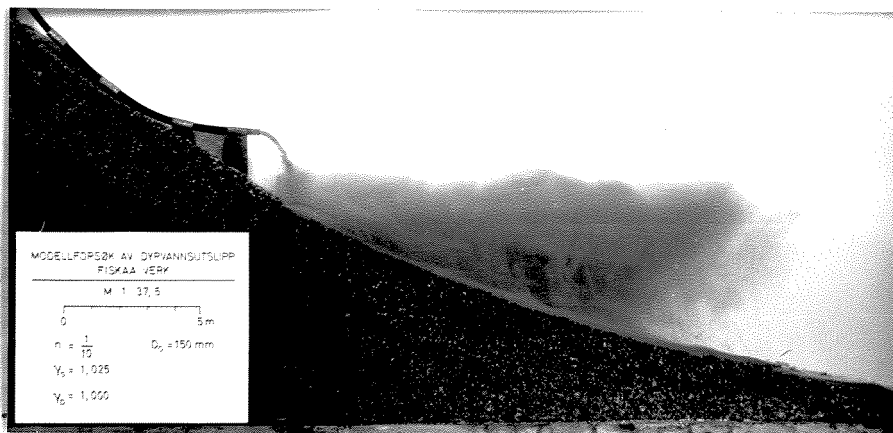
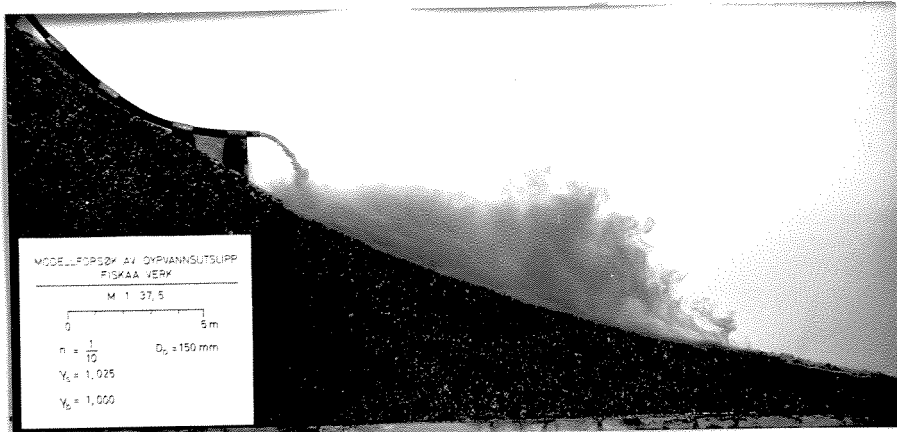
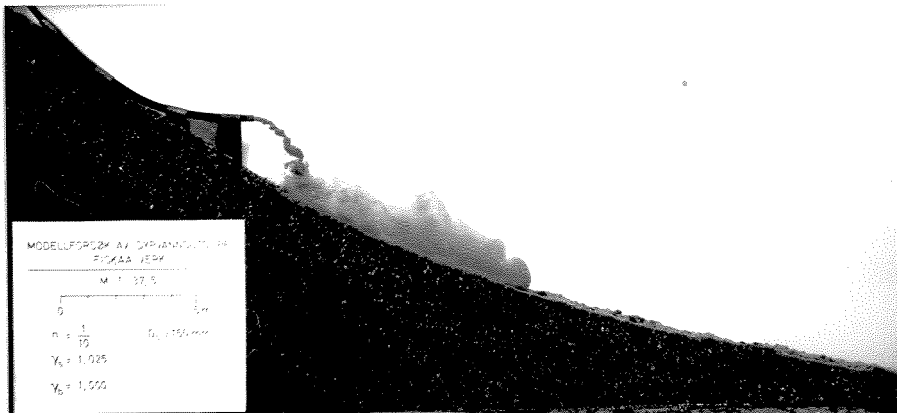
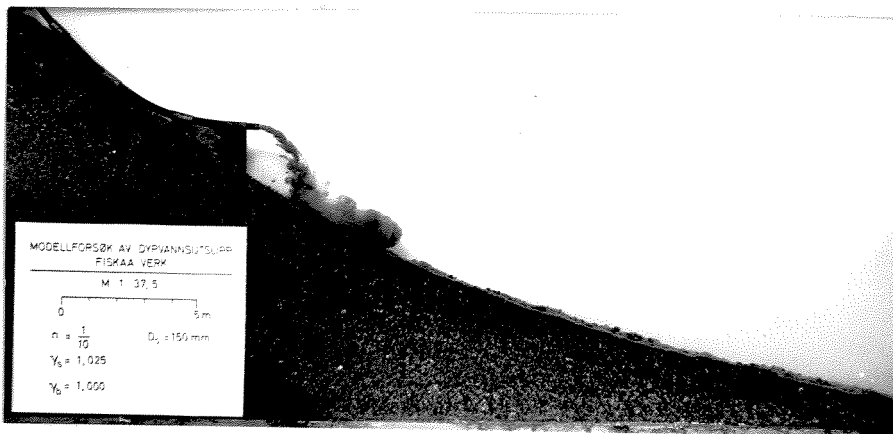
**VATTENFORSKNING**  
**BLINDERN**

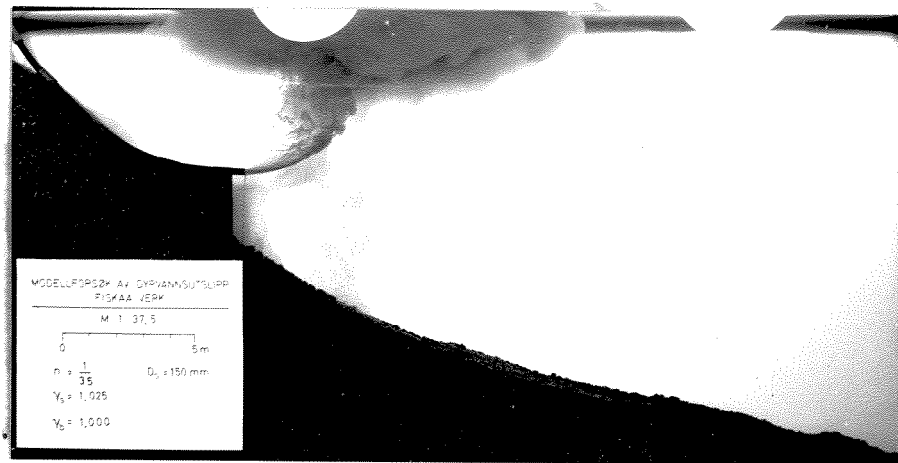
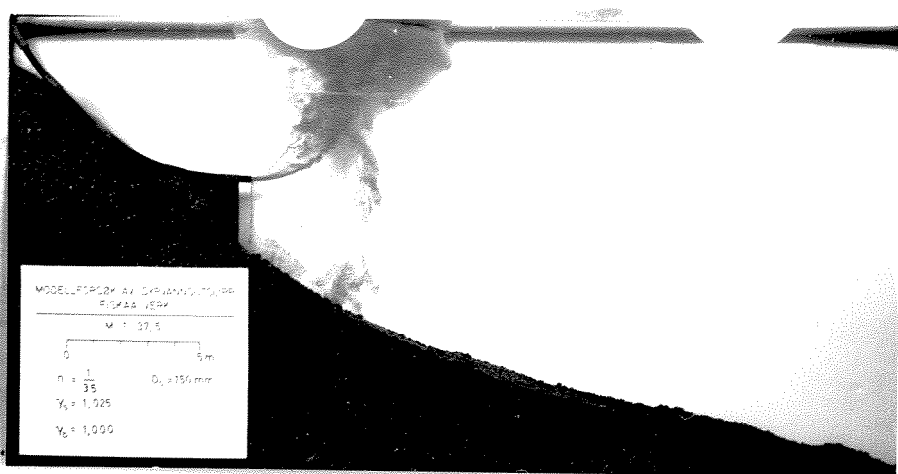
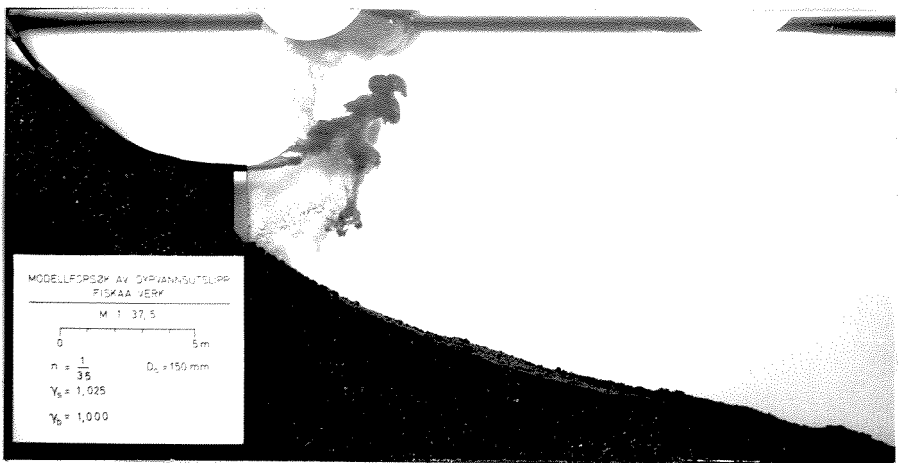
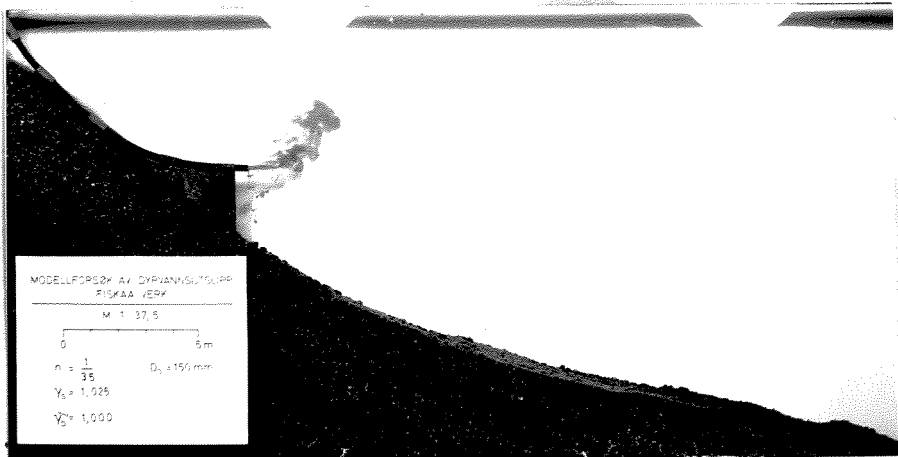
Modellstudier M 1:37,5  
Stövkonsentrasjon  $n = 1/35$  (28,6 g/l)  
 $\gamma_s = 1,025$   $\gamma_b = 1,025$

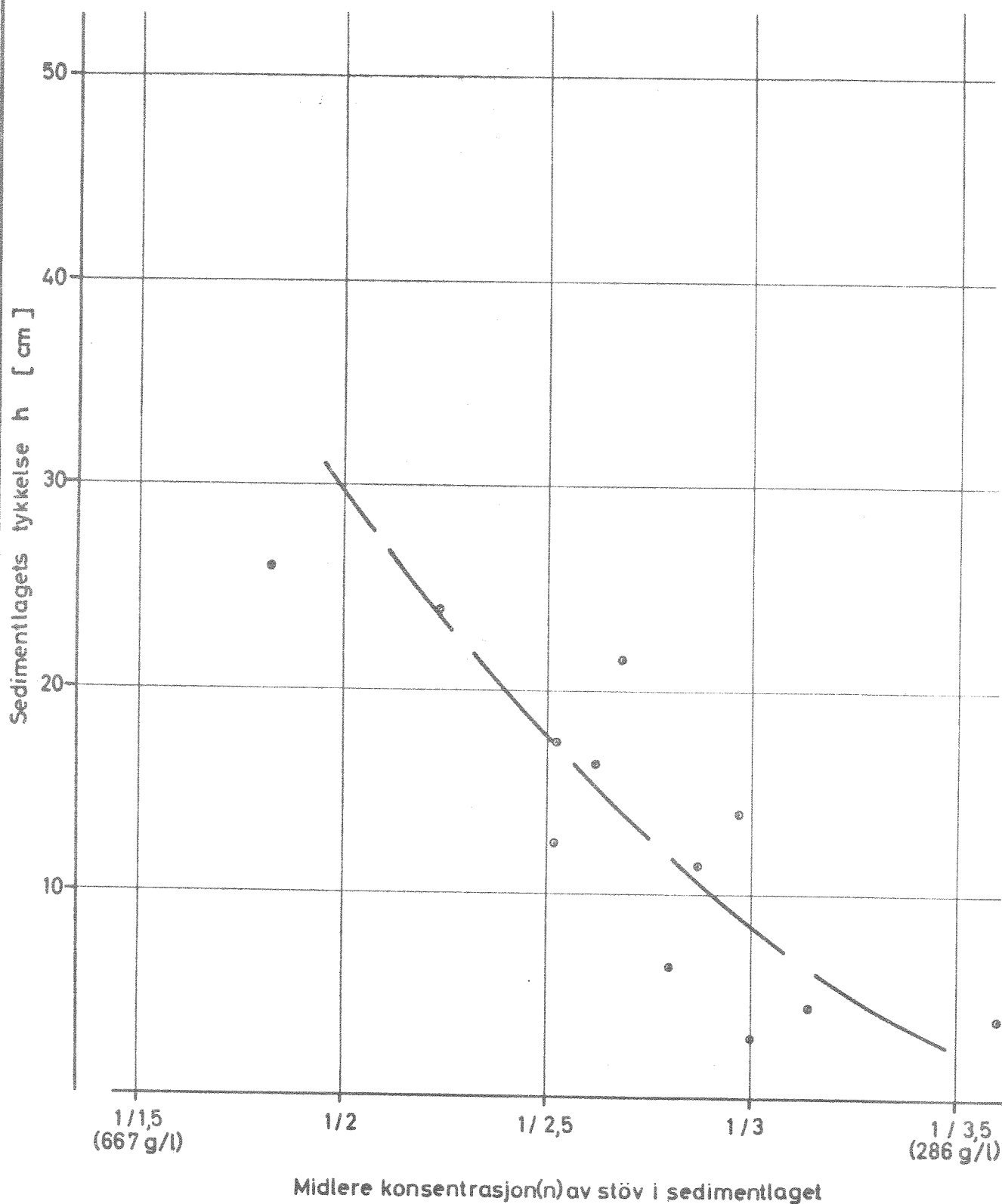
Fig. 4  
O-5/65 4722



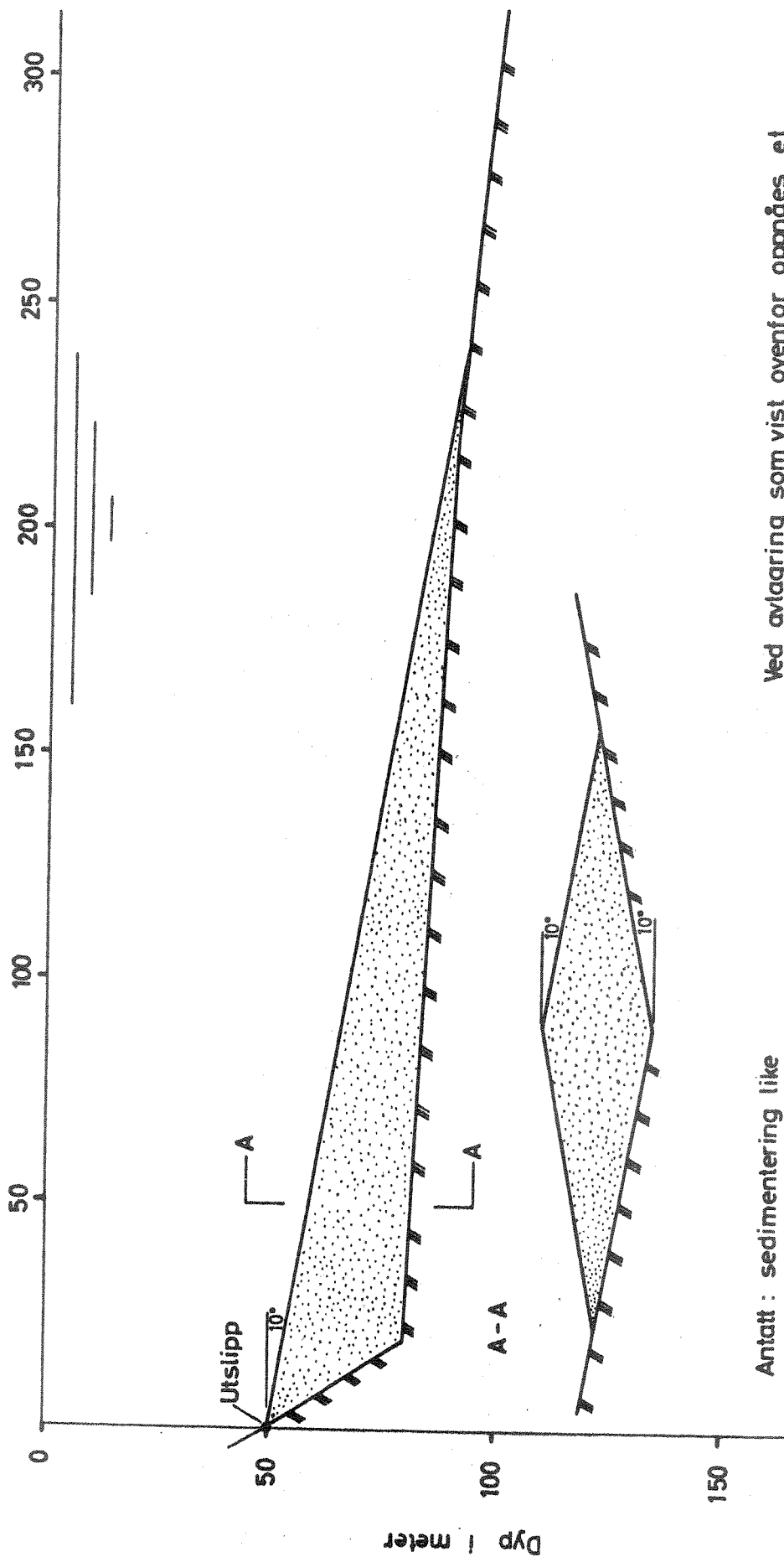








Avstand fra utslipningspunktet [ m ]



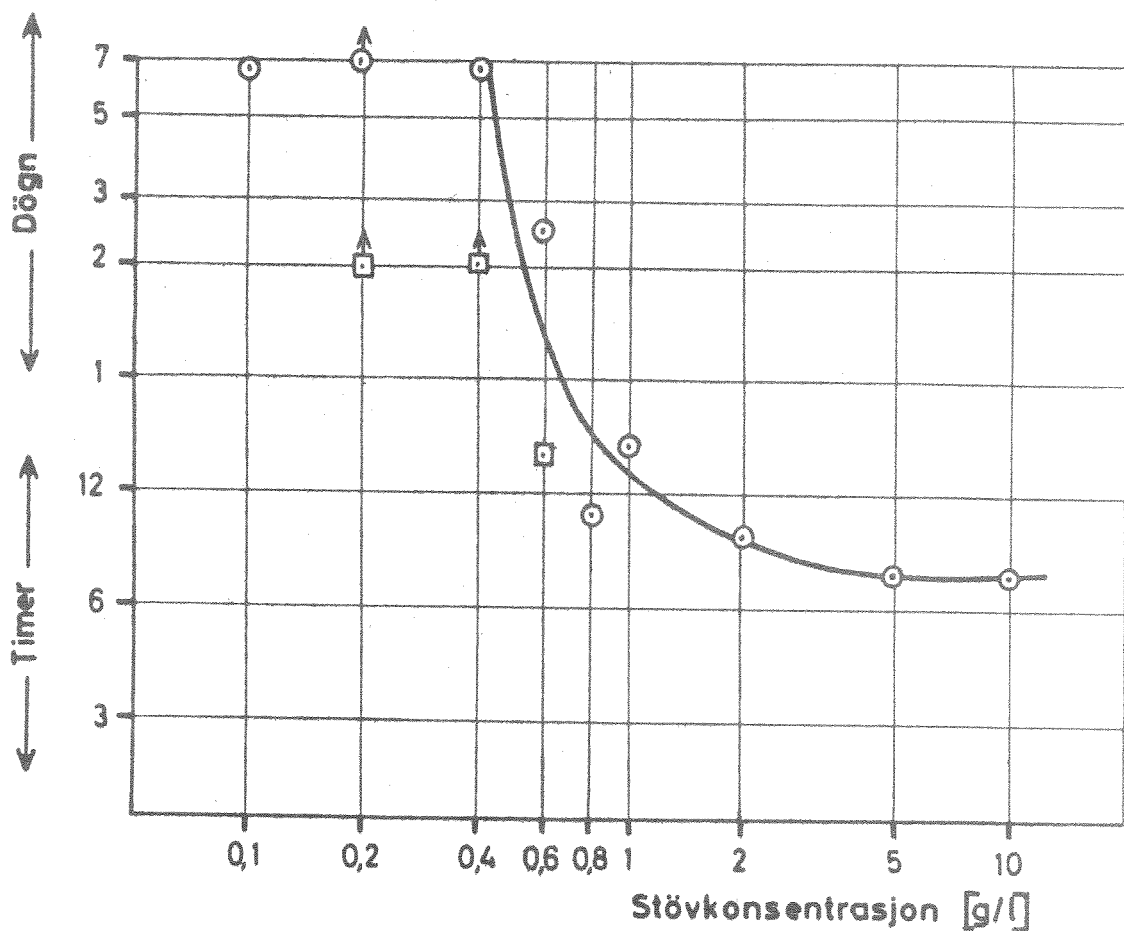
Antatt : sedimentering like ved utslipningspunktet

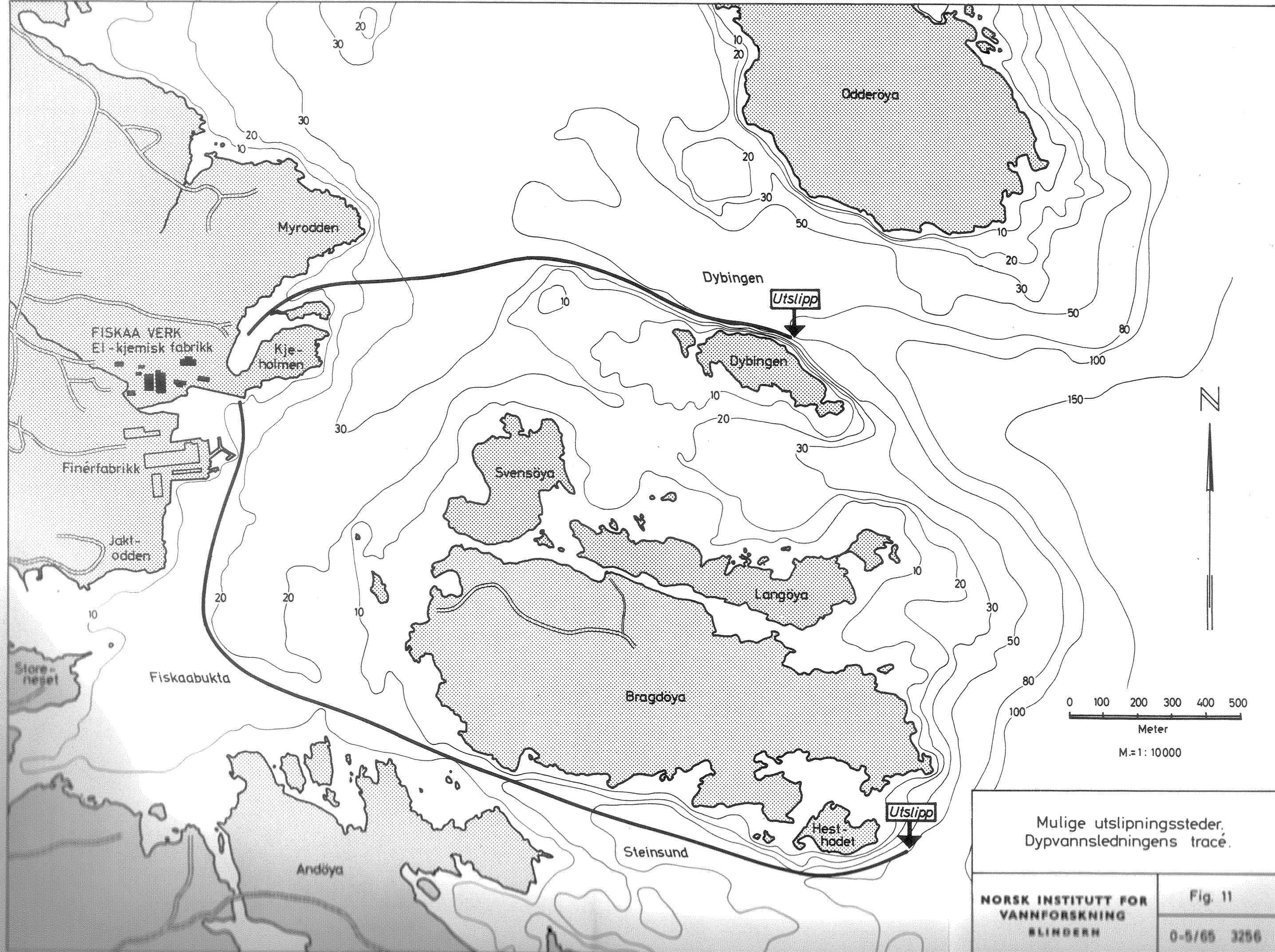
Avlagringsvinkel  $\psi = 10^\circ$

Midlere konsentrasjon av stöv i det sedimenterte lag (ifølge fig.8)  $n = 1/15$ .

Ved avlagring som vist ovenfor oppnåes et sedimentvolum på 170 000 m<sup>3</sup>. Dette tilsvarer ved en midlere konsentrasjon av stöv  $n = 1/15$  i de sedimenterte lag, utslipp av 50 tonn stöv pr. døgn i ca. 6 år.

- ↑ Ingen dødelighet i forsøksstiden
- Akvarium med rører
- Akvarium uten rører

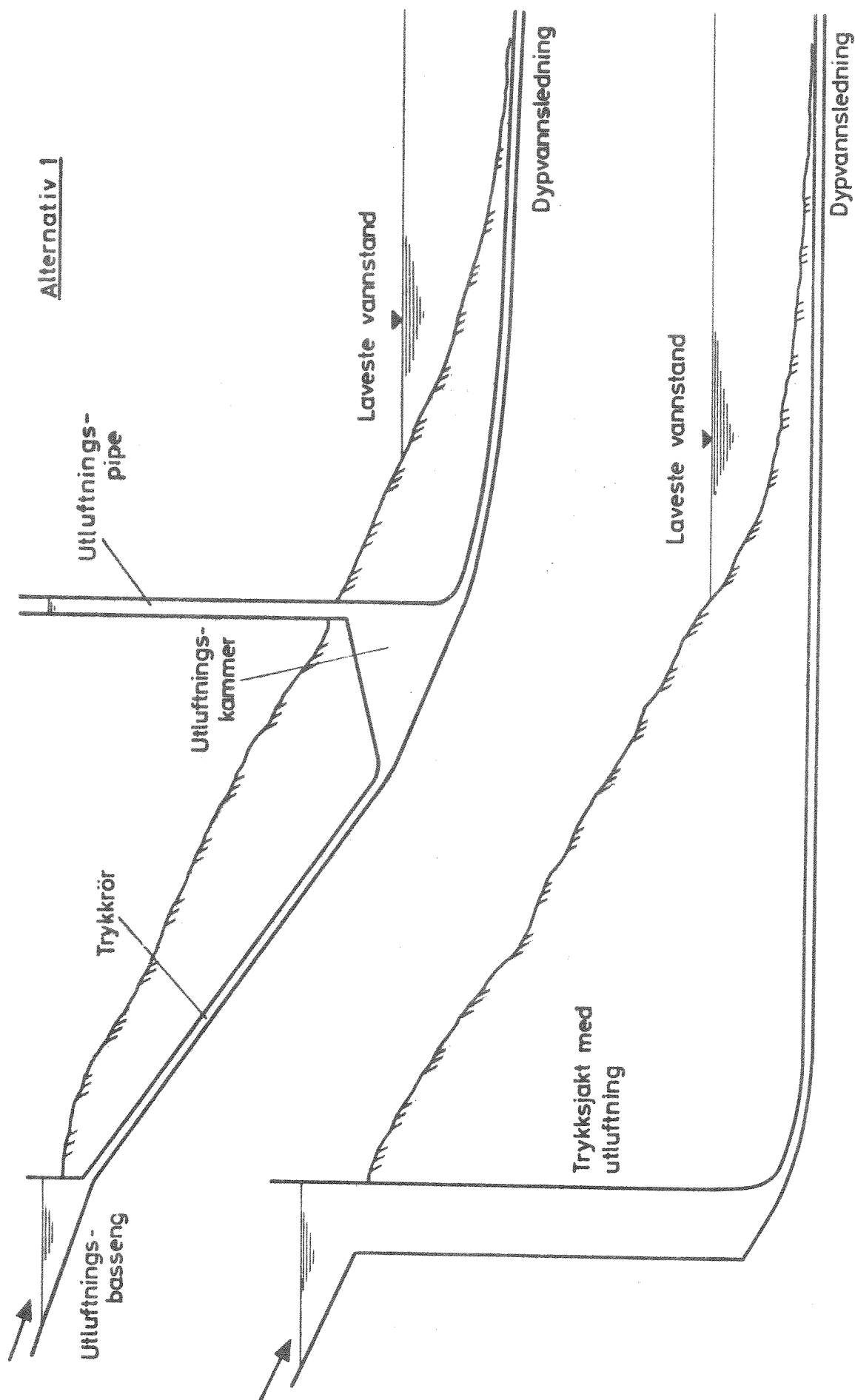


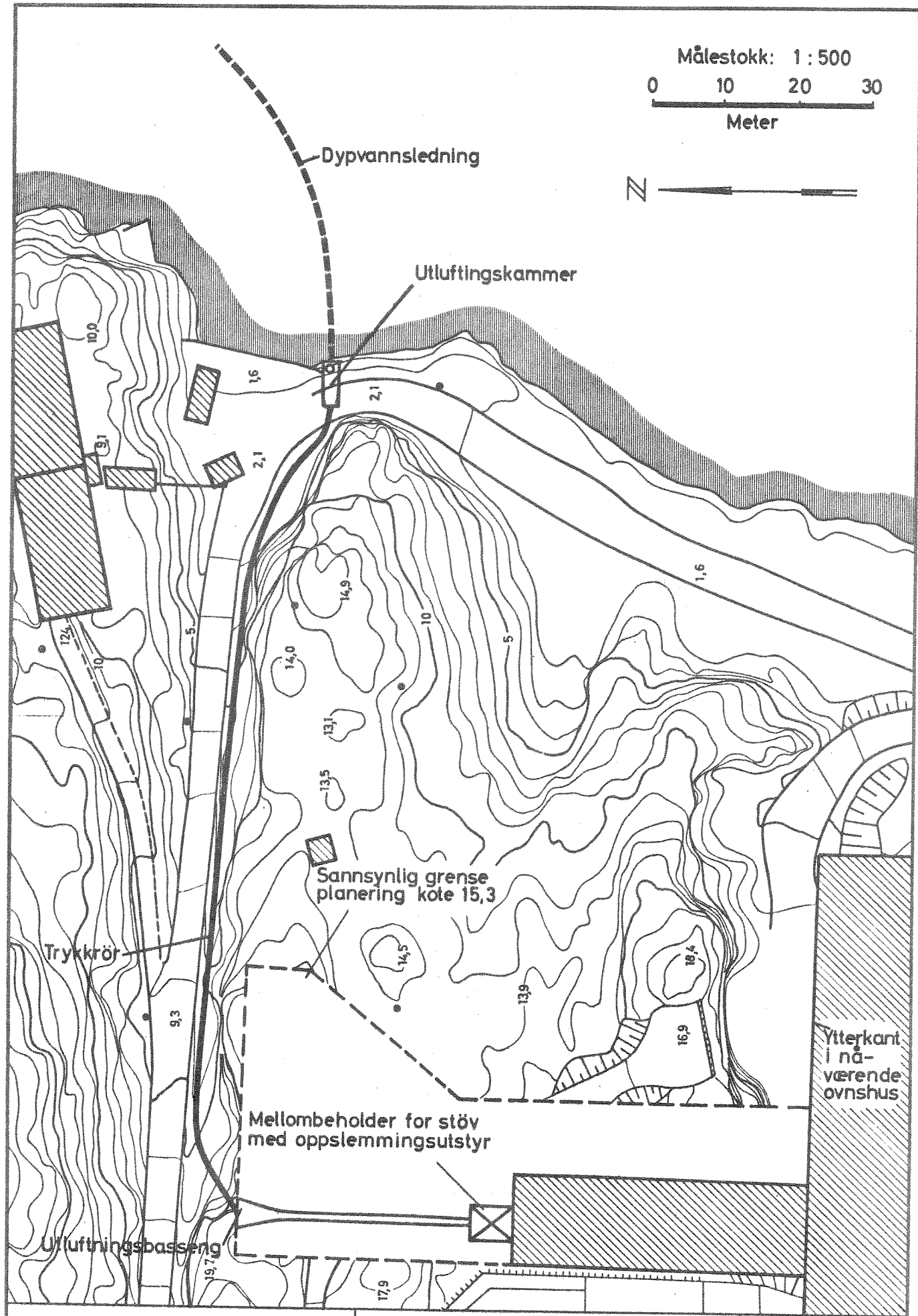


Mulige utslipningssteder.  
Dypvannsledningens tracé.

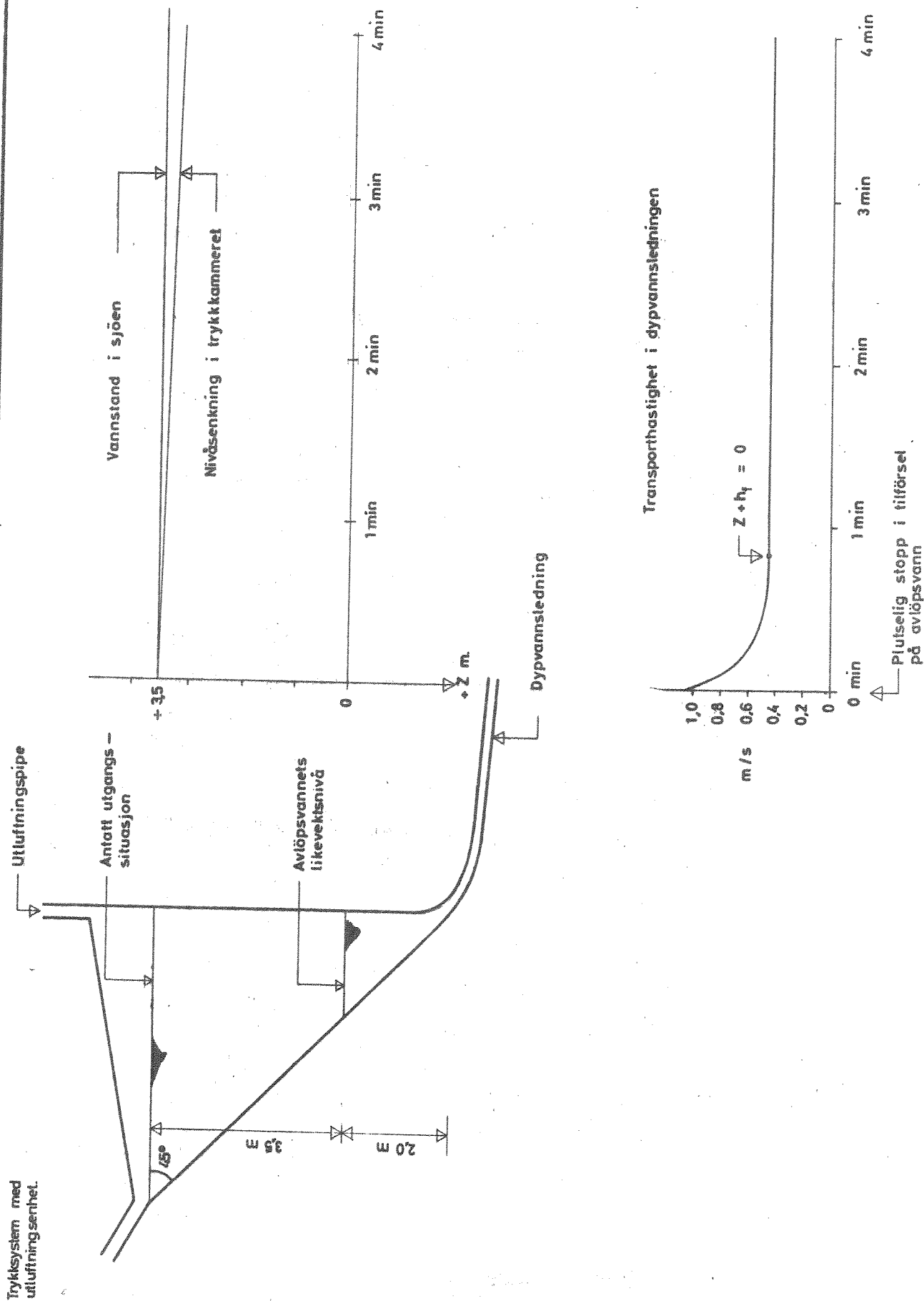
NORSK INSTITUTT FOR  
VANNFORSKNING  
BLINDERN

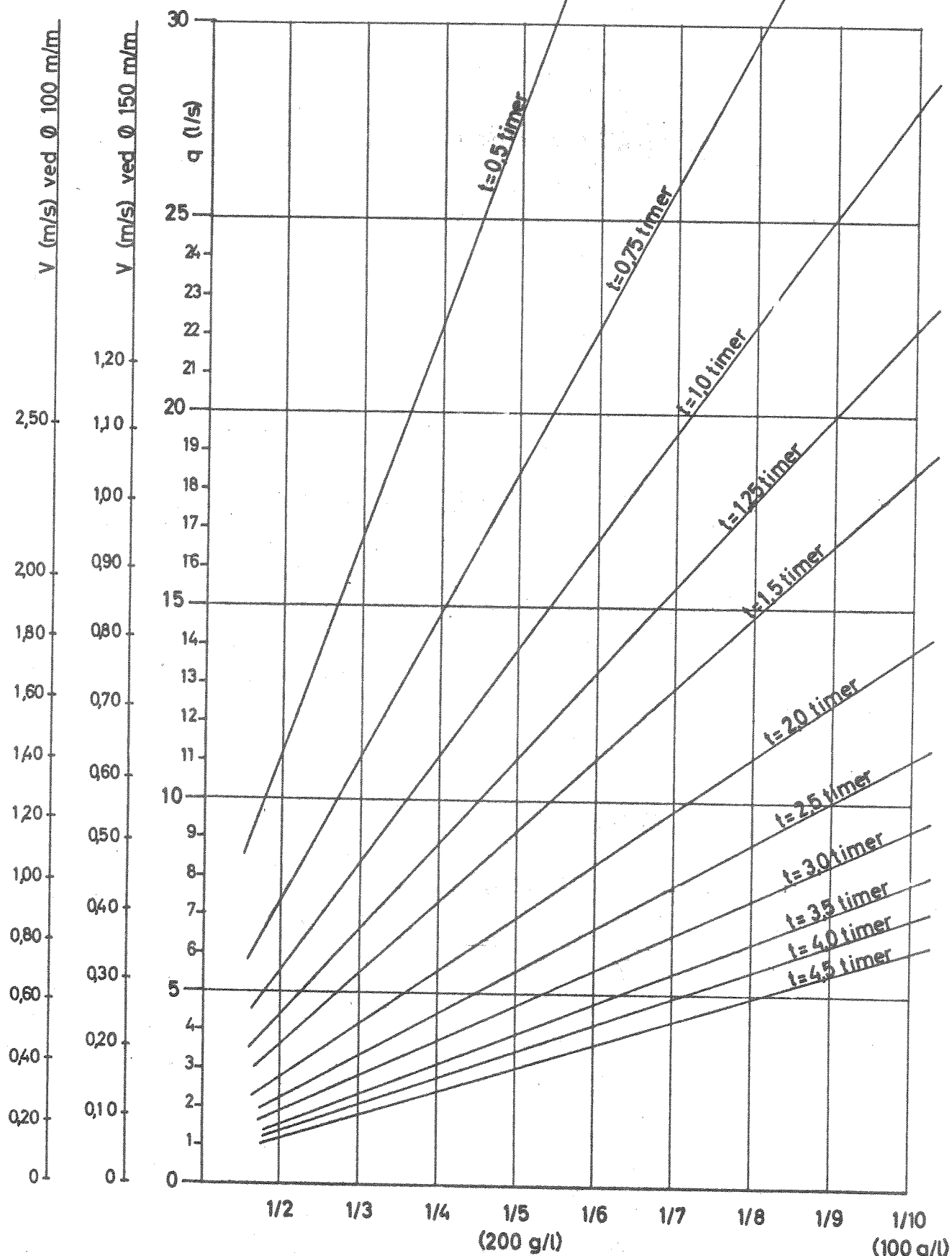
Fig. 11  
0-5/65 3256





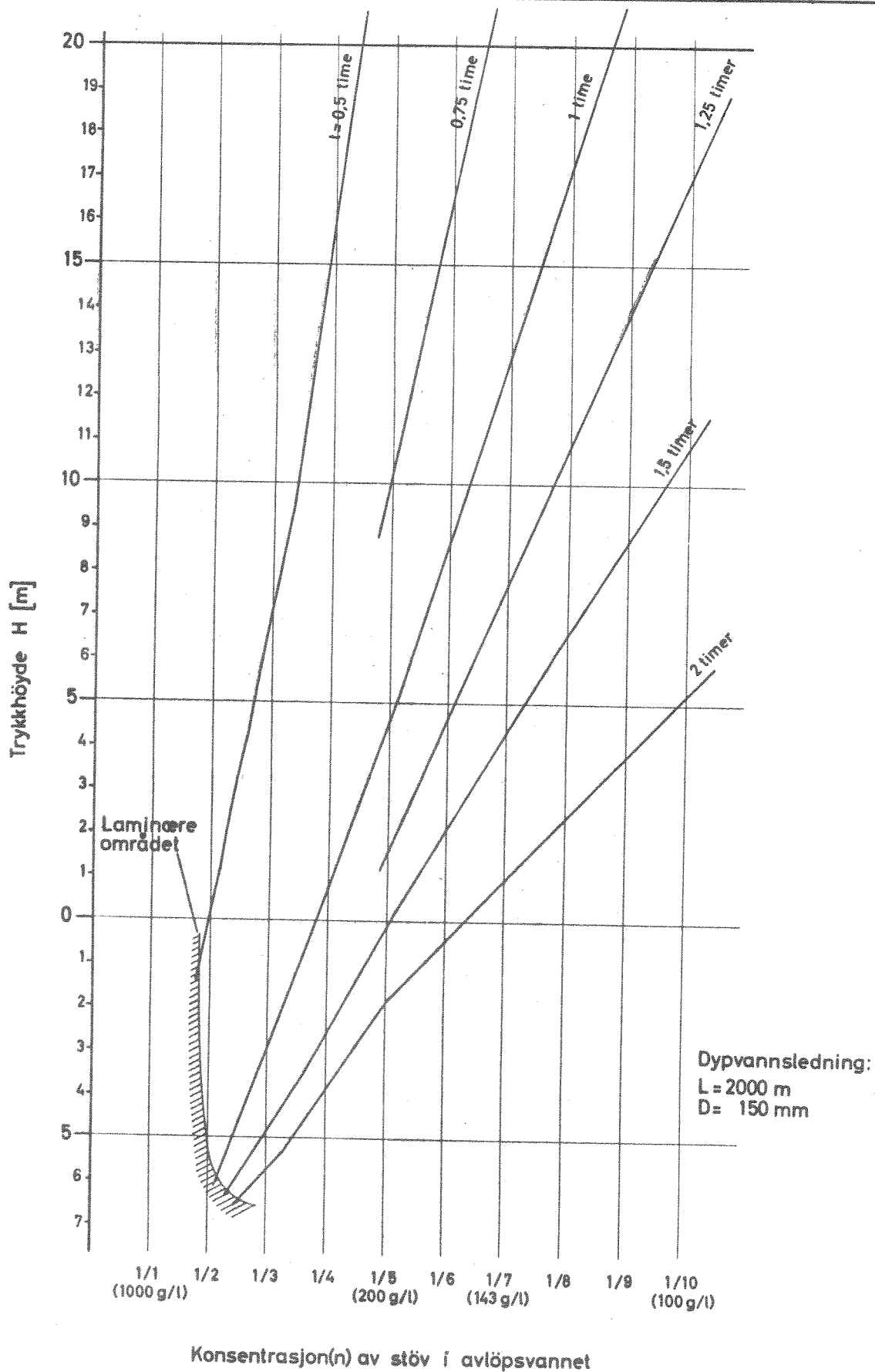


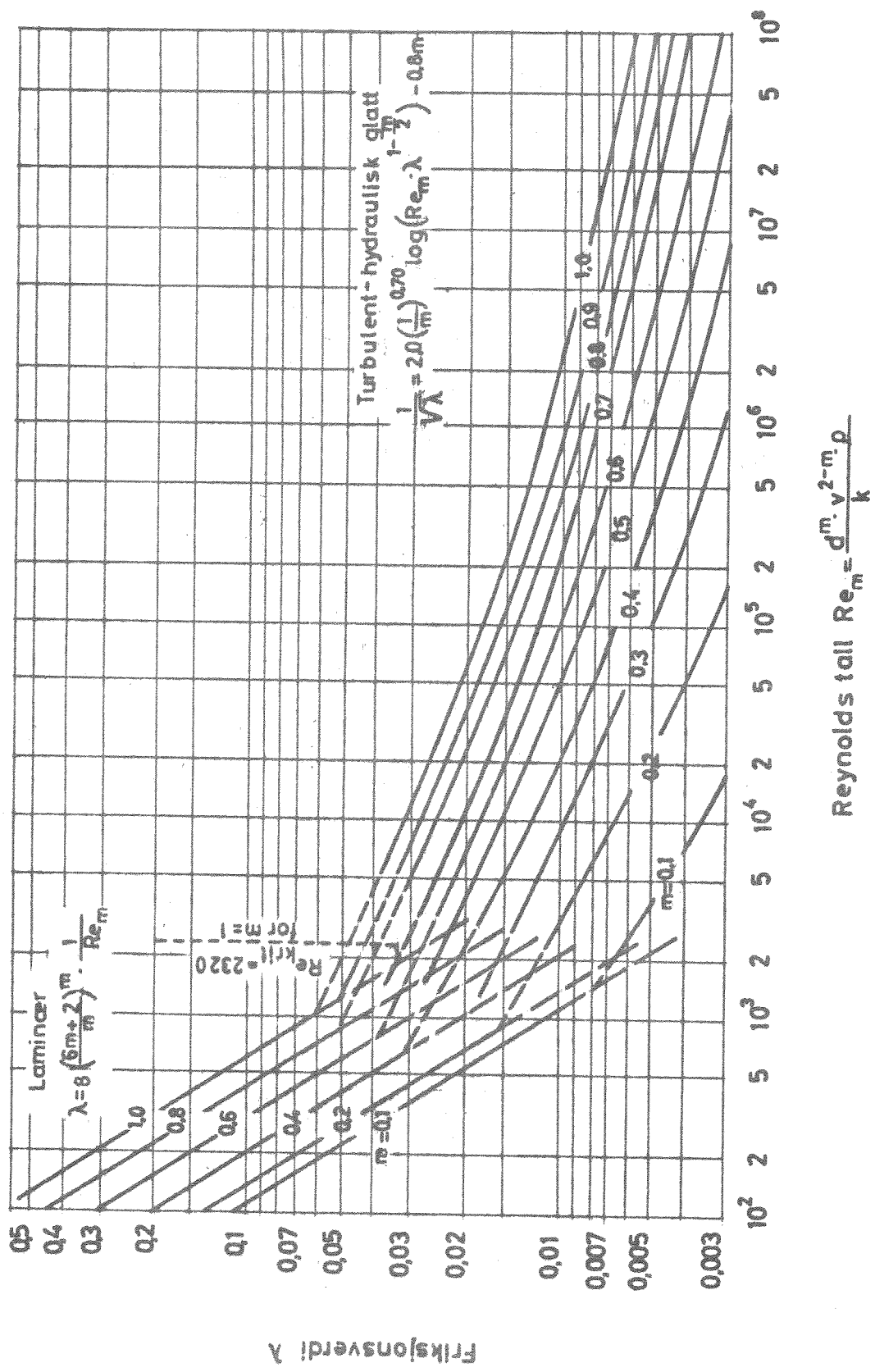


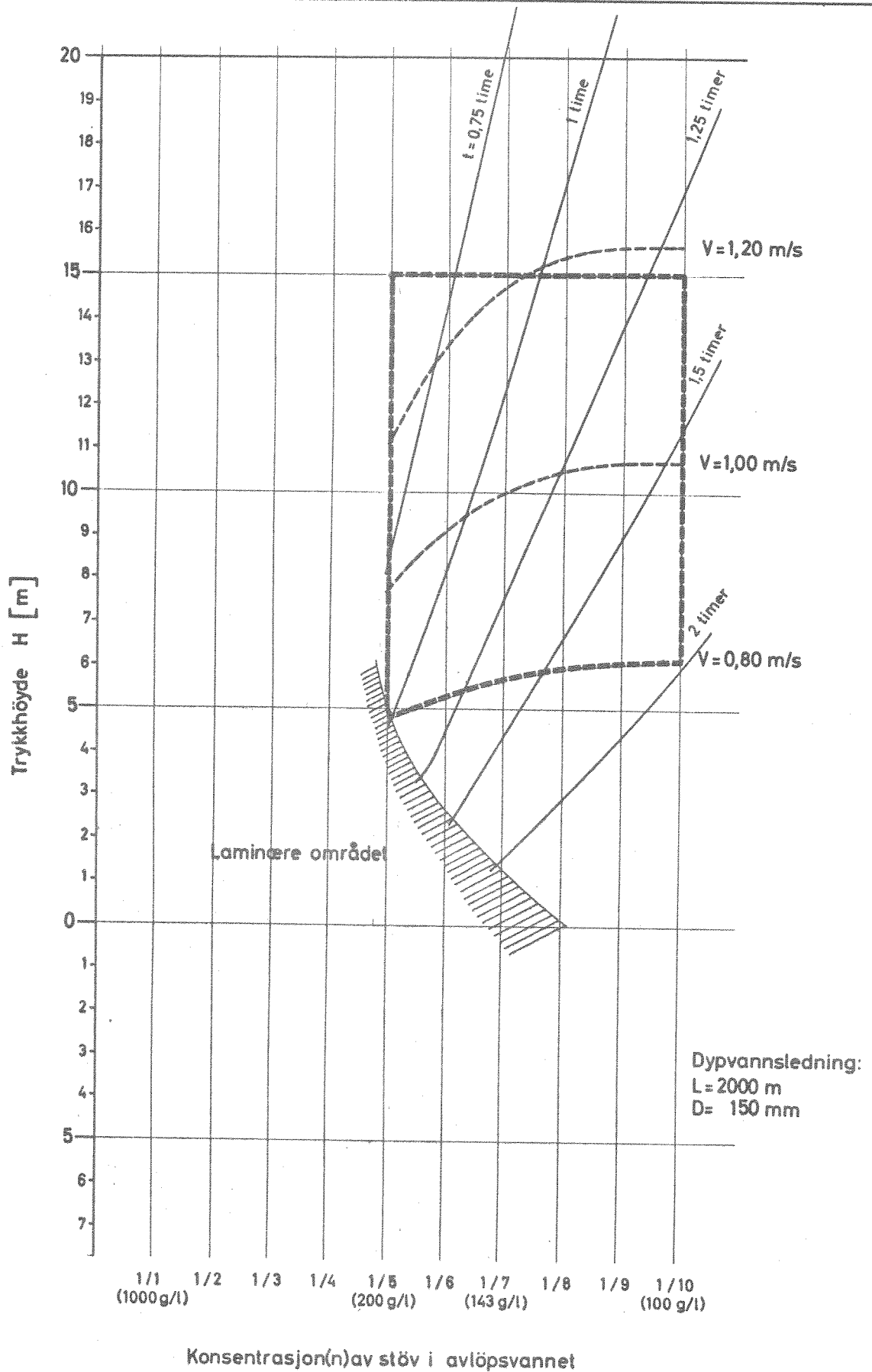


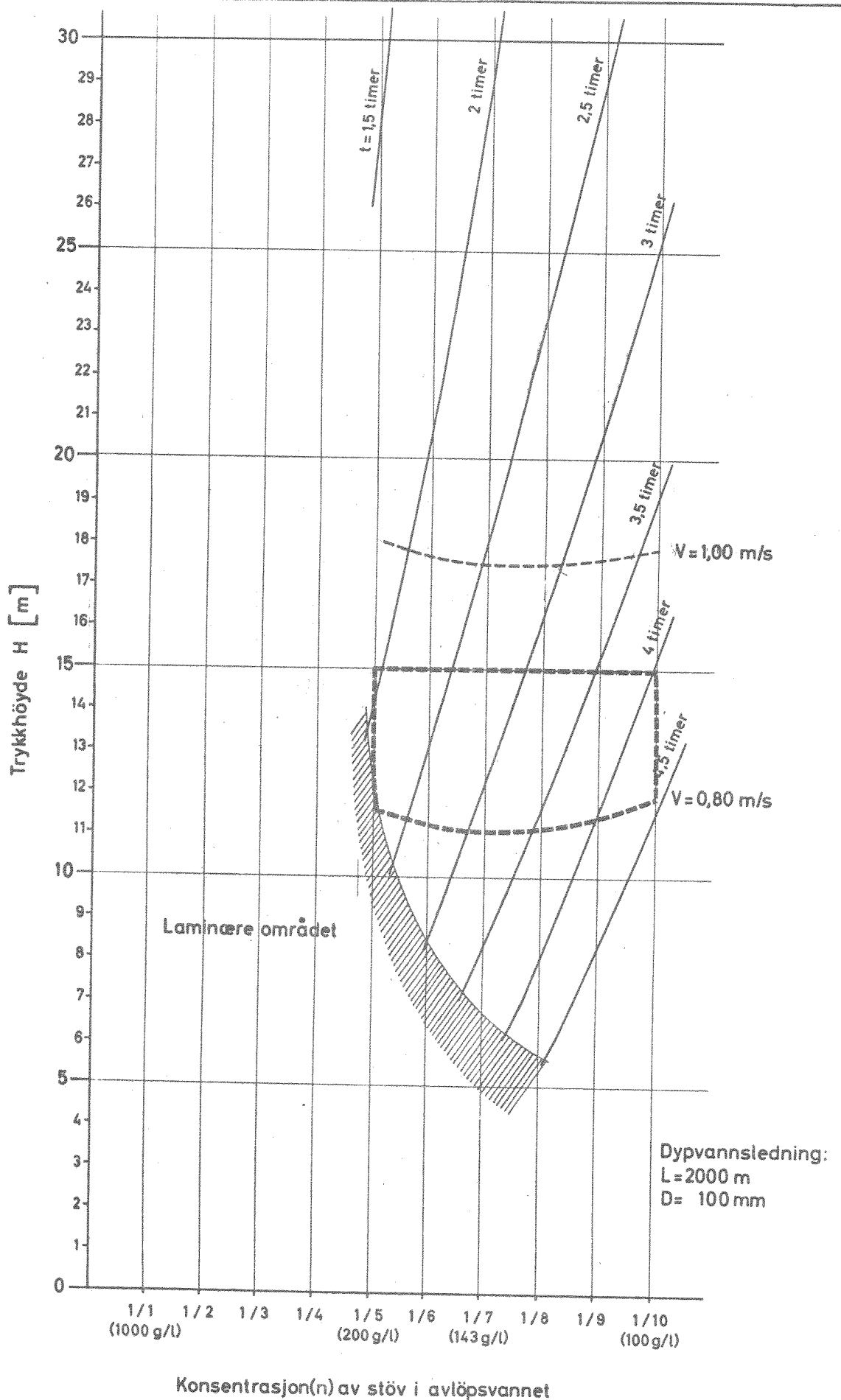
$q$  = avløpsmengde/tidsenhet  
 $V$  = strømningshastigheten

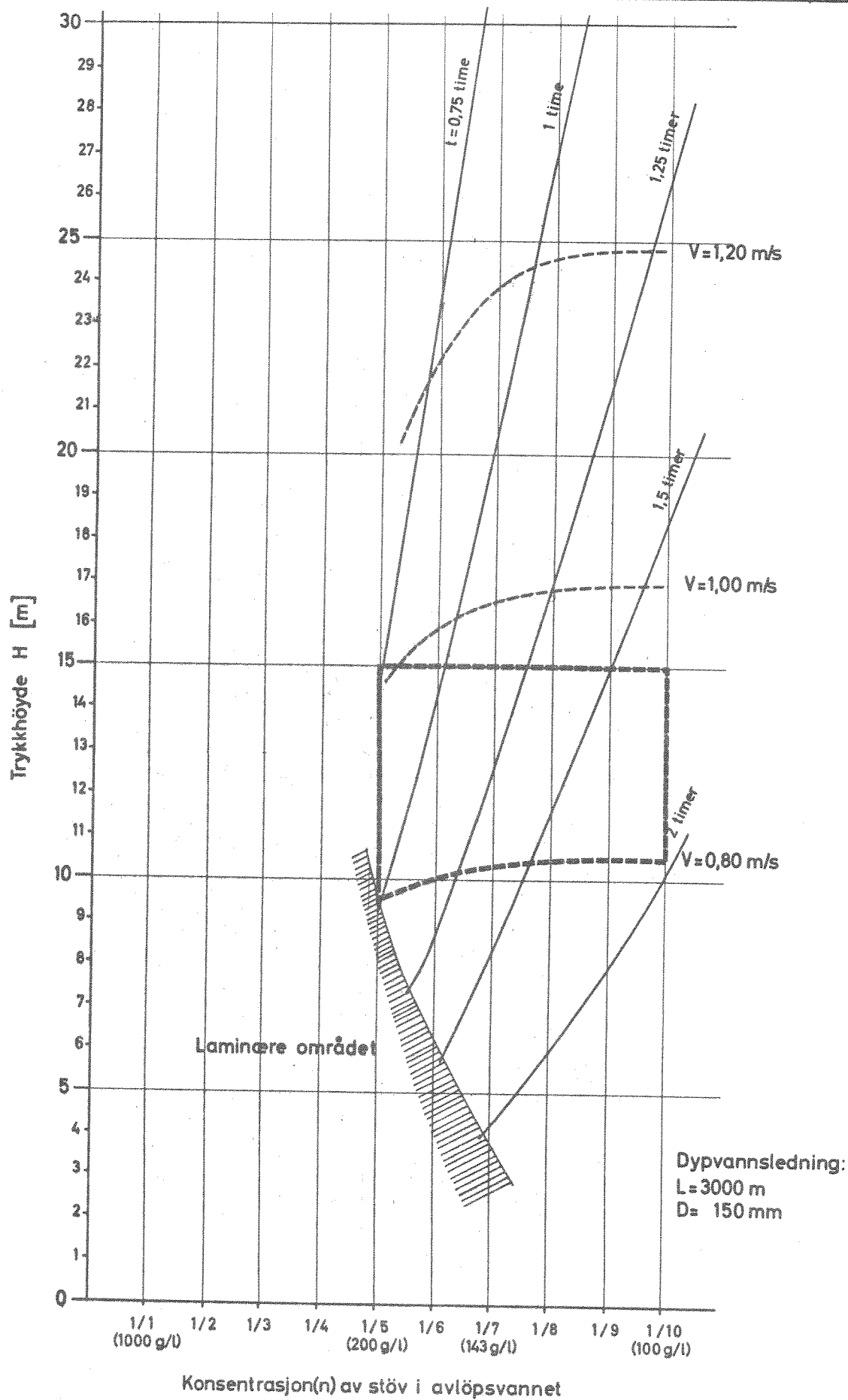
Konsentrasjonen  $n$  av støv i avløpsvannet

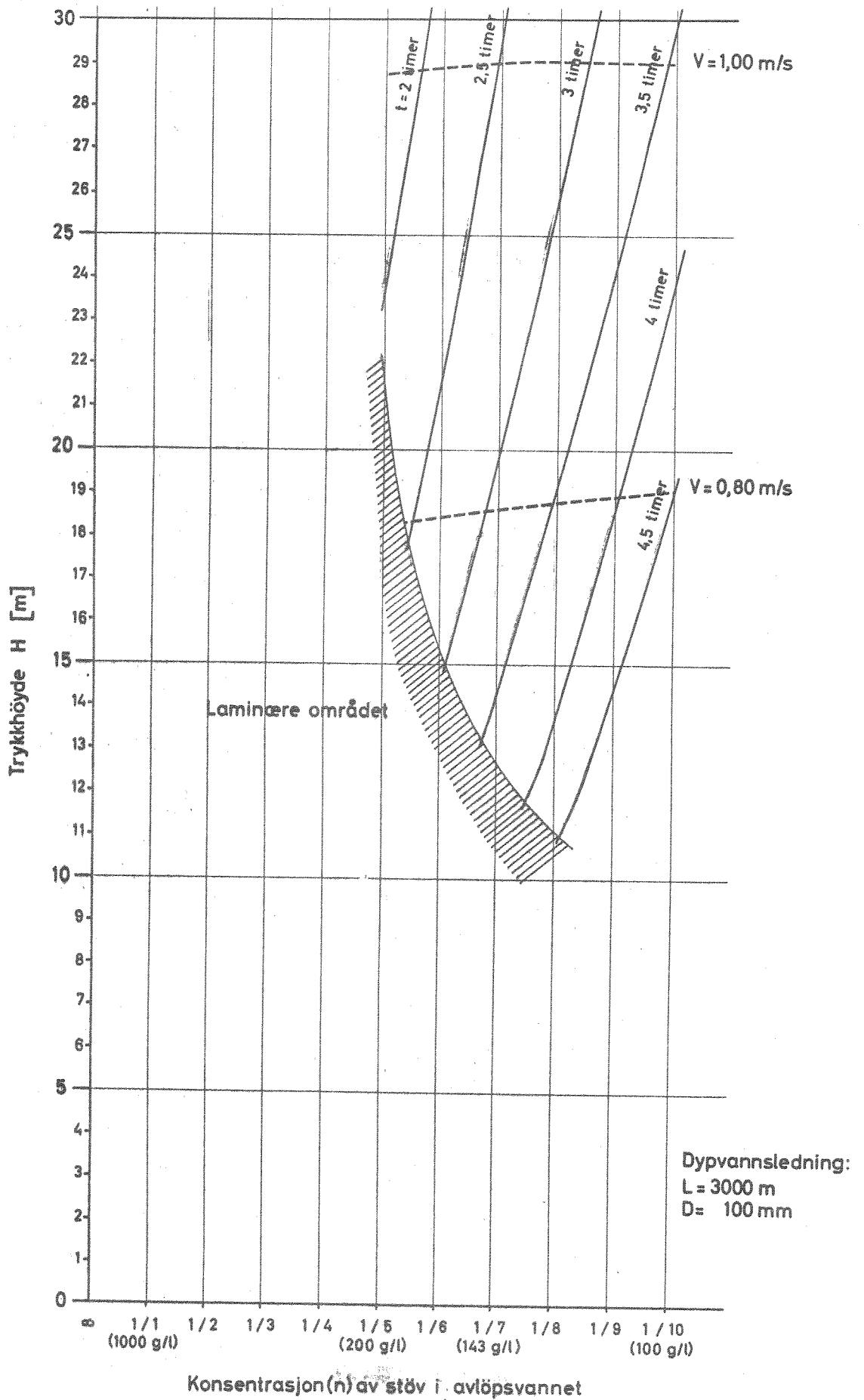














NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT  
*Norwegian Geotechnical Institute*

Rapport

Kiselsyrestøv fra  
Fiskaa Verk.

65/306

Oslo, 22. juli 1965.

FORSKNINGSVEIEN 1, OSLO 3 — TLF. 695880

Bilagsfortegnelse.

Nr. 1) viskositeter, tabellarisk.  
" 2)  
" 3) " , grafisk.  
" 4)

Etter henvendelse fra Norsk Institutt for Vannforskning har Norges geotekniske institutt foretatt en del undersøkelser vedrørende konsistens og andre egenskaper for kiselsyrestøv fra Fiskaa Verk i vandige suspensjoner.

Det var av interesse å få bragt på det rene støvets kornfordeling, dets oppførsel suspendert i ferskt og salt vann samt suspensjonenes viskositet ved forskjellige blandingsforhold.

Det viste seg straks at støvet var alt for finkornig til at det kunne foretas noen kornfordeling etter vanlige sedimentasjonsmetoder. Fra tidligere elektronmikroskopiske undersøkelser foretatt ved Sentralinstituttet for Industriell Forskning var det imidlertid kjent at kornstørrelsen varierte innenfor grensene  $0,5 \mu$  til  $0,01\mu$ , og at hovedmengden av kornene hadde korndiameter på ca.  $0,1 \mu$ . Kornfasongen var rent sværisk og materialet var røntgenamorft (glassaktig).

Viskositetsmålinger er blitt utført for suspensjoner med følgende konsentrasjoner av fast stoff pr. liter ferdig blanding:

100 g/l - 200 g/l - 300g/l - 500 g/l - 750 g/l og 1000 g/l.

Som blandevæske ble benyttet sjøvann med tetthet  $1,02 \text{ g/cm}^3$ .

For konsentrasjonene 100 og 200 g/l, ble det også kjørt forsøksserier med ferskvann (springvann) som blandevæske. I en tilleggsserie ble noe av støvet blandet opp med 15% finknust, brent kalk (CaO) og viskositetsmålinger foretatt med konsentrasjonene 100 og 200 g/l og med sjøvann som blandevæske.

Viskositetsmålingene ble i første omgang foretatt med et rotasjonsviskosimeter hvor rotasjonshastigheten kunne varieres fra 2 til 20 omdreininger pr. minutt. Ved de anvendte rotasjonslegemer tilsvarte imidlertid dette linjere hastigheter på langt under  $1 \text{ cm}^m/\text{sek}$ . ved rotasjonslegemets periferi. For en rekke av suspensjonene ble det derfor også kjørt forsøk med et kapillarviskosimeter, hvor den linjere strømningshastighet kunne varieres i området  $20 - 100 \text{ cm}^m/\text{sek}$ .

Alle viskositetsmålinger er foretatt ved en temperatur på  $20 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Resultatene av viskositetsmålingene er gitt i bilag nr. 1 og 2 og er videre grafisk fremstilt i bilag nr. 3 og 4. Som det fremgår av bilagene, varierer viskositeten (eller rettere betegnet den tilsynelatende viskositet) sterkt med blandingenes konsentrasjon. Om blandingene er laget opp med saltvann eller ferskvann, eller om støvet er tilblandet kalsiumoksyd, synes ikke å ha vesentlig betydning for blandingenes rheologiske egenskaper.

Det skal imidlertid bemerkes at blandingene ikke på noen måte oppfører seg som rene væsker. De tilsynelatende viskositeter varierer meget sterkt med de bevegelseshastigheter som er anvendt ved de eksperimentelle undersøkelser, slik at små hastigheter gir vesentlig høyere viskositetsverdier. Dette fenomen, som vanligvis betegnes som tixotropi er mere eller mindre typisk for tofasede systemer av en væske og finfordelte partikler. Årsaken til dette er at det etableres bindinger mellom partiklene. Disse bindinger er både av van der Waals (massekrefter) og elektrostatisk karakter. Bindingene vil kunne brytes ved mekanisk påkjenning og en reetablering vil ha et visst tidsforløp. Slike systemers rheologiske egenskaper vil derfor være sterkt avhengig av den bevegelsestilstand de befinner seg i og også av hvor lang tid de har befunnet seg i ro.

Med økende partikkelkonsentrasjon, vil væskeegenskapene etter hvert forsvinne og man vil få et plastisk system som vil oppvise en viss skjærfasthet bestående av et kohesjon- og et friksjonsledd. Dette fremgår av de angitte viskositetsdata hvor man i konsentrasjonsområdet 400 - 500 g/l, finner påtagelig økning i de målte verdier.

Drenert triaxialforsøk av en prøve som ved utbygning hadde et vanninnhold på 33,2 % regnet av tørrvekt viste en friksjonsvinkel på 29° og ikke målbar kohesjon.

Ved ikke drenerte forhold og ved betydelig høyere vanninnhold som vil være aktuelt ved utslippet, vil den naturlige skråningsvinkel for materialet neppe overstige 6°. Det skal her videre anføres at stabiliteten av en slik avsetning ikke kan ventes å bli særlig høy, og at man for eksem-

pel ved å fyre av en sprengladning , høyst sannsynlig vil få den til å flyte ytterligere utover.

Med hensyn til fnokningsegenskaper, viste materialet seg å fnokke både i sjøvann og ferskvann. Tilsetning av kalsiumoksyd syntes ikke å endre disse forhold.

Når det gjelder sedimentasjonshastigheter og oppnådde sedimentvolum, viste forsøk i reagensglass at en suspensjon med 50 g/l oppnådde et sedimentvolum på 28,5%, mens en suspensjon med 100 g/l oppnådde et sedimentvolum på 56%, begge etter en tid på 7200 min. Det vesentlige av sedimentasjonen var imidlertid avsluttet allerede etter 30 min. Sedimentasjonen skjedde utelukkende ved utfnokning og ikke som følge av enkeltpartiklers frie fall.

Vi er kjent med at Norsk Institutt for Vannforskning selv har utført en rekke slike sedimentasjonsforsøk, og skal derfor ikke kommentere dette videre. Vi vil dog gjøre oppmerksom på at støv-vann blandingen når den slippes ut på sjøbunnens sannsynligvis vil stille seg inn med et vesentlig lavere vanninnhold enn sedimentasjonsforsøk på laboratoriet kan fremvise.

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT



Laurits Bjerrum

---

Johan Moum  
Johan Moum.

Tabell over målte viskositetsverdier.

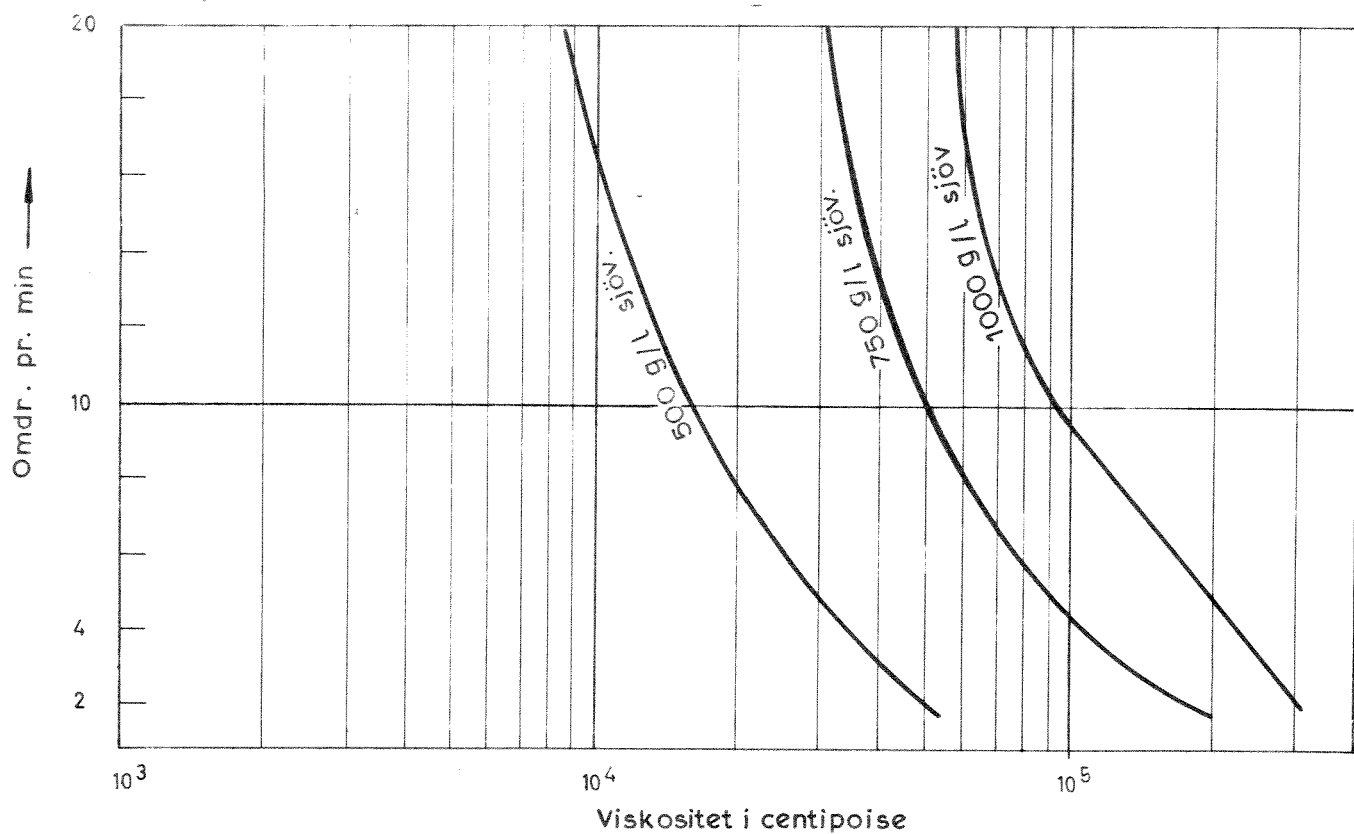
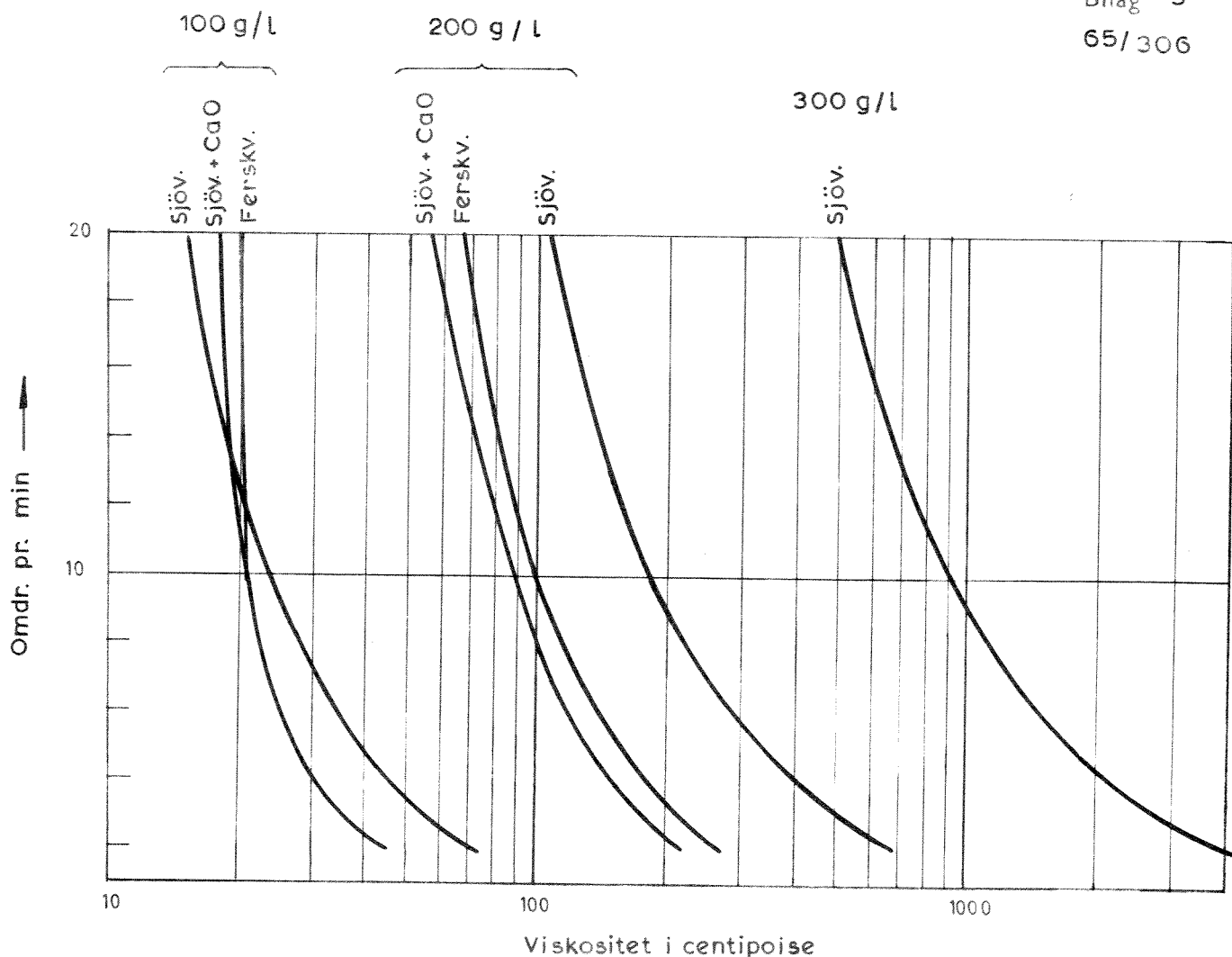
Rotasjonsviskosimeter			Kapillarviskosimeter		
Prøve	Omdr. / min.	Viskositet centipoise	Prøve	Hastighet cm/sek.	Viskositet centipoise
Støv + sjøv. 100 g/l	2	76	Støv + sjøv. 100 g/l	24,4	2,00
	4	45		42,5	2,04
	10	24		56,0	1,95
	20	15			
Støv + CaO + sjøv. 100 g/l	2	45	Støv + CaO + sjøv. 100 g/l	24,9	2,25
	4	30		31,9	2,22
	10	21		40,3	2,19
	20	18			
Støv + ferskv. 100 g/l	2	45	Støv + ferskv. 100 g/l	24,4	2,00
	4	30		32,2	1,96
	10	21		44,0	1,90
	20	20			
Støv + sjøv. 200 g/l	2	696	Støv + sjøv. 200 g/l	18,4	4,90
	4	416		52,5	4,04
	10	188		100,0	3,60
	20	106			
Støv + CaO + sjøv. 200 g/l	2	227	Støv + CaO + sjøv. 200 g/l	33,0	6,70
	4	151		48,2	5,80
	10	88		85,3	4,80
	20	57			
Støv + ferskv. 200 g/l	2	272	Støv + ferskv. 200 g/l	13,0	5,57
	4	182		44,2	3,69
	10	100		74,0	3,69
	20	68			

## Rotasjonsviskosimeter

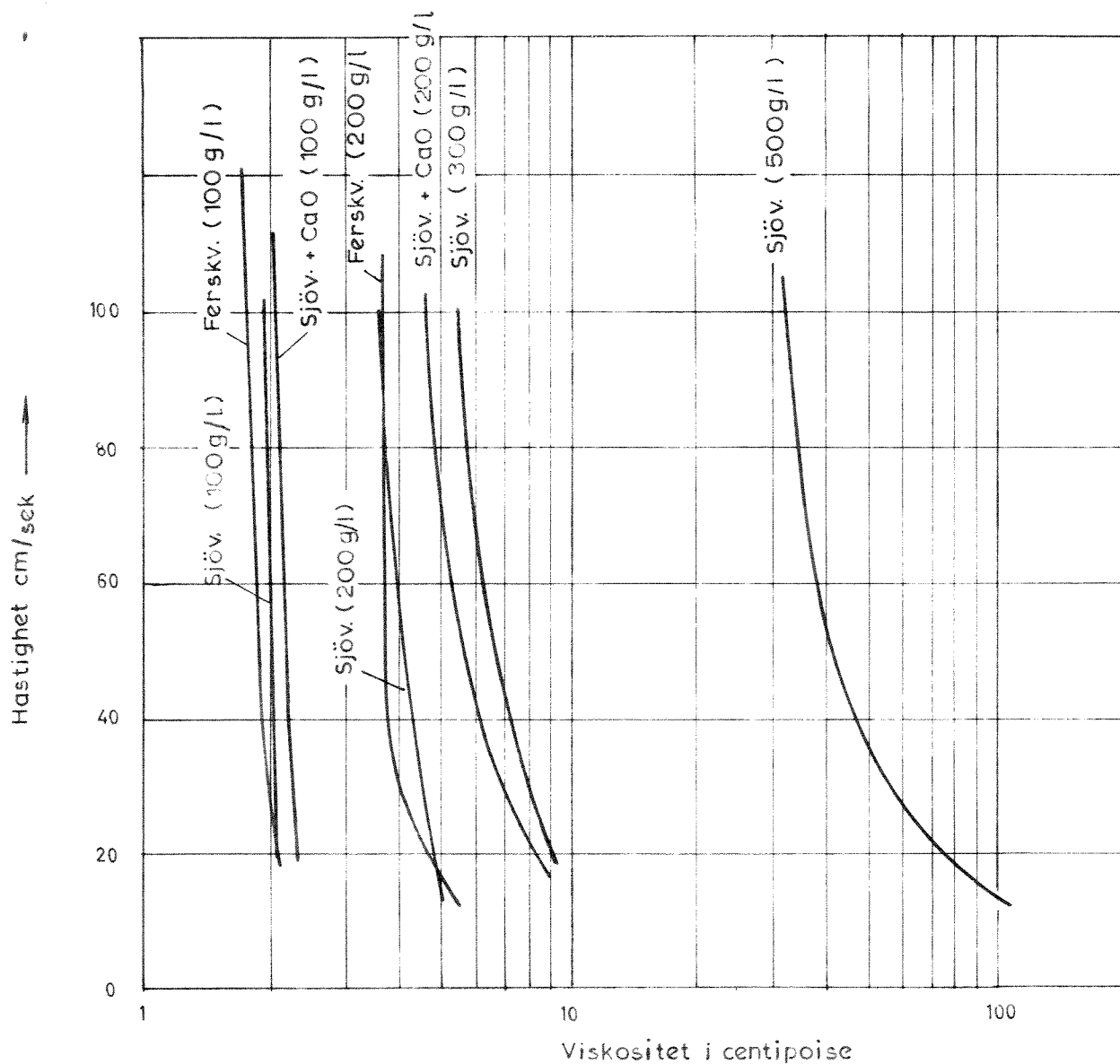
Prøve	Omdr. / min.	Viskositet centipoise
Støv + sjøv. 300 g/l	2	4240
	4	2230
	10	940
	20	500
Støv + sjøv. 500 g/l	2	53700
	4	35000
	10	16000
	20	8500
Støv + sjøv. 1000 g/l	2	197000
	4	113000
	10	51000
	20	30300
Støv + sjøv. 1500 g/l	2	310000
	4	227000
	10	94000
	20	56000

## Kapillarviskosimeter.

Prøve	Hastighet cm/sek.	Viskositet centipoise
Støv + sjøv. 300 g/l	32,0	7,5
	45,0	7,6
	68,0	6,0
Støv + sjøv. 500 g/l	12,2	109,0
	54,0	40,0
	90,0	33,8



MÅLINGER MED ROTASJONS-  
VISKOSIMETER.



MÅLINGER MED KAPILLAR -  
VISKOSIMETER.



Rapport

Måling av flyteegenskaper for  
kvartsstøv oppslemmet i sjøvann.

105

OH 367

Oslo, 13. september 1965.



## RAPPORT

### OPPDRA GSGIVER

Norsk institutt for vannforskning, Gaustadalléen 25, Blindern

### OPPDRA GET OMFATTER

Måling av flyteegenskaper for kvartsstøv oppslemmet i sjøvann

### AVDELING

### OPPDRA G NR.

### VÅR REF.

### DATO

OH

OH 367

PRK/l s

13. september 1965

Skjerspenningen som funksjon av hastighetsgradienten er målt i Haakes rotasjonsviskosimeter for forskjellige konsentrasjoner av kvartsstøv i sjøvann. Målingene ble utført ved 20°C, og målekammeret som er brukt, har betegnelsen NV. Det ble brukt et målehode som gir fullt utslag ved et dreiemoment på 50 g cm. Ved justering mot en Newtonsk olje med viskositet 28.95 poise ble faktoren mellom skalaavlesning og skjerspenning bestemt til 6.5. (Skalaavlesning x 6.5 = skjerspenning i dyn/cm<sup>2</sup>).

Resultatene er gjengitt i tabell 1 til 6, og skjerspenning som funksjon av hastighetsgradient for de forskjellige konsentrasjonene er vist i fig. 1 og 2. Det fremgår av disse at væskene er meget pseudoplastiske (strukturviskøse), og at de høyeste konsentrasjonene har en viss grad av tixotropi. Ved konsentrasjoner under 125 g/l er denne tixotropien borte.

SAKSBEHANDLER

GODKJENT

BILAG

ANTALL BLAD

*Per Kroken*  
Per Kroken  
siv.ing.

*Normann Bergem*  
Normann Bergem  
dr.techn.

2 kurveblad

4

TABELL 1  
KONSENTRASJON 200 g/l

Skjerspenning $\bar{\tau}$ ved		Hastighets- gradient, D sek <sup>-1</sup>	Tilsynelatende	
økende D dyn/cm <sup>2</sup>	minkende D dyn/cm <sup>2</sup>		viskositet $\eta$ cp	
15.0	11.7	16.17	93	72
16.3	13.0	32.32	50.2	40.2
17.5	14.3	48.52	36.1	29.5
20.2	18.0	97.04	20.6	18.55
23.0	20.0	145.50	15.8	13.75
29.0	26.0	291.0	9.97	8.94
34.0	31.0	436.66	7.78	7.1
49.0	46.0	873.32	5.61	5.27
61.0	59.0	1310.0	4.65	4.5
100		2620.0		3.82

TABELL 2  
KONSENTRASJON 166.6 g/l

Skjerspenning $\bar{\tau}$ ved		Hastighets- gradient, D sek <sup>-1</sup>	Tilsynelatende	
økende D dyn/cm <sup>2</sup>	minkende D dyn/cm <sup>2</sup>		viskositet $\eta$ cp	
10.4	8.5	32.34	32.16	26.28
11.7	9.7	48.52	24.11	19.99
13.0	11.7	97.04	13.40	12.06
14.3	13.0	145.50	9.8	8.9
20.0	18.0	291.0	6.87	6.18
25.0	23.0	436.66	5.72	5.26
38.0	36.0	873.32	4.35	4.13
49.0	47.0	1310.0	3.74	3.59
81.0		2620.0		3.09

TABELL 3

KONSENTRASJON 143 g/l

Skjerspenning $\bar{\tau}$ ved		Hastighets- gradient, D sek <sup>-1</sup>	Tilsynelatende	
økende D dyn/cm <sup>2</sup>	minkende D dyn/cm <sup>2</sup>		viskositet $\eta$ cp	
6.5	6.5	32.34	20.1	20.1
8.2	8.2	48.52	16.9	16.9
9.7	9.7	97.04	10.0	10.0
11.7	11.1	145.50	8.04	7.63
16.0	15.0	291.0	5.50	5.16
20.0	20.0	436.66	4.57	4.57
31.0	29.0	873.32	3.55	3.32
42.0	42.0	1310.0	3.21	3.21
74.0		2620.0	2.82	

TABELL 4

KONSENTRASJON 125 g/l

Skjerspenning $\bar{\tau}$ ved		Hastighets- gradient, D sek <sup>-1</sup>	Tilsynelatende	
økende D dyn/cm <sup>2</sup>	minkende D dyn/cm <sup>2</sup>		viskositet $\eta$ cp	
9.7	8.2	97.04	10.0	8.45
11.1	9.7	145.50	7.63	6.67
16.0	13.0	291.0	4.47	4.47
18.0	16.0	436.66	4.12	3.66
28.0	28.0	873.32	3.21	3.21
38.0	38.0	1310.0	2.90	2.90
67.0		2620.0	2.56	

TABELL 5  
KONSENTRASJON 111.1 g/l

Skjerspenning $\bar{\tau}$ ved		Hastighets- gradient, D sek <sup>-1</sup>	Tilsynelatende viskositet $\eta$	
økende D dyn/cm <sup>2</sup>	minkende D dyn/cm <sup>2</sup>		cp	
9.1	8.5	145.50	5.25	5.84
10.4	10.4	291.0	3.57	3.57
17.0	16.0	436.66	3.43	3.43
26.0	25.0	837.32	2.98	2.87
36.0	36.0	1310.0	2.75	2.75
62.0		2620.0	2.36	

TABELL 6  
KONSENTRASJON 100 g/l

Skjerspenning $\bar{\tau}$ ved		Hastighets- gradient, D sek <sup>-1</sup>	Tilsynelatende viskositet $\eta$	
økende D dyn/cm <sup>2</sup>	minkende D dyn/cm <sup>2</sup>		cp	
8.2	7.2	145.50	5.64	4.95
12.4	11.7	291.0	4.26	4.02
14.5	13.0	436.66	3.66	2.98
25.0	24.0	837.32	2.87	2.64
34.0	33.0	1310.0	2.59	2.52
60.0		2620.0	2.29	



