

# Prosjekt damsikkerhet

Februar 1992

## Rapport nr. 4



Sintef NHL

## Tilstopping av flomløp

Prosjektansvarlige:

NVE Tilsyns- og beredskapsavdelingen (NVE-T)

Vassdragsregulantens Forening (VR)

## FORORD

Moderne norsk dambygging startet omkring århundreskiftet, da vi tok til å utnytte våre vannkraftressurser. Innledningsvis dominerte mur- og betongdammene, men særlig etter 1950 kom de store fyllingsdammene inn i bildet for fullt. I hele det aktuelle tidsrommet har norsk damteknologi holdt et høyt nivå, og dammene har hevdet seg godt internasjonalt med hensyn til kvalitet og sikkerhet.

I den intense utbyggingsperioden vi har vært igjennom i de senere tiår, har begrepet damsikkerhet i sterk grad vært knyttet til planlegging og bygging, der beregningsmetoder, laster, materialegenskaper og utførelse har vært nøkkelpbegreper. Men damsikkerhet avhenger også i sterk grad av hvordan vi overvåker, manøvrerer og tar vare på dammene, og hvor godt vi forstår og er forberedt på ulike hendelser og situasjoner som kan oppstå i driftsfasen. Det var særlig dette som var bakgrunnen for at NVE i 1987 tok initiativ til et samarbeidsprosjekt med VR og dameiere om damsikkerhet. Forprosjektet utga rapporten: "Risikoanalyse for dammer" i 1987, og selve hovedprosjektet startet med etablering av et styringsutvalg høsten 1988. Prosjektlederen tiltrådte i april 1989, og fra da av kom det praktiske arbeidet i gang. Prosjektet avsluttes i 1992.

Styringsutvalget består av:

- \* Sjefingeniør Bjarne Nicolaisen, NVE (form.)
- \* Sjefingeniør Jan Daleng, VR
- \* Prof. Dagfinn K. Lysne, Institutt for vassbygging, NTH
- \* Sjefingeniør Thorleif Hoff, Statkraft

Prosjektleder er sivilingeniør Svein Larsen.

Prosjektet har tatt utgangspunkt i dagens situasjon og har fått utredet ulike spørsmål som har betydning for damsikkerheten i driftsfasen, slik som aldring, flomavledning, overtopping, lekkasjer, funksjonssikkerhet av flomluker og beredskapsplanlegging. Dessuten behandles erfaringsinn-samling, dambruddstatistikk og risikovurderinger. Enkelte utredninger blir presentert i egne delrapporter som denne, men prosjektet avsluttes med sluttrapport som summerer opp resultatene av de utredninger prosjektet har utarbeidet.

Erfaringene fra bl.a. "Storofsen" for 200 år siden viser at en ved store ekstreme flommer må regne med at betydelige mengder trær og annet drivgods vil kunne komme i vassdragene som følge av utrasinger.

Den delrapport som fremlegges her: "Tilstopping av flomløp", er utarbeidet av SINTEF NHL.

Rapporten gjengir resultatene av modellforsøk som er gjort for å klarlegge betingelsene for at tilstopping skjer ved et fast overløp. Det er også gjort forsøk for å fastlegge kreftene som virker på drivgodset ved evt. oppsamling.

Delprosjektet er gjennomført og finansiert i et samarbeid med flere dameiere og Vassdragsregulantenes forening.

En fullstendig vurdering av et flomløps avledningsevne bør innholde vurderinger om tilstopping. Vurderingen bør være 3-delt:

- Hva blir konsekvensen dersom flomløpet tilstoppes?
- Hva slags, og hvilke mengder drivgods kan forventes å komme?
- Hvilken mulighet har en til å avlede eller stoppe drivgodset?

Denne delrapport vil være til hjelp under sistnevnte vurdering.

Sikkerhetsrisikoen er størst for de anlegg som ligger i skogsterreng og har fast overløp med bro, og som har en fyllingsdamseksjon.

Ved mange slike anlegg bør broen over overløpet fjernes.

Tilstopping kan også utgjøre en sikkerhetsrisiko ved tunnel/sjakt overløp i de tilfelle der tverrsnittet på sjaktinnløpet er lite.

Ved flomløpsluker vil vanlig tilstopping ikke utgjøre så stor risiko, men en har erfart at drivgods setter seg fast ved lukebein o.l. og forhindrer manøvrering av luker.

I hovedrapporten vil vi nærmere drøfte forhold knyttet til problematikken omkring tilstopping av flomløp.

Oslo, 10.02.92

  
Bjarne Nicolaisen

  
Svein Larsen


  
Jan Daleng

Forsidebilde viser dam Palagnedra, Sveits, etter en storflom med store drivgodsmengder i 1978.

Adresse: 7034 Trondheim

 Telefon: (07) 59 23 00  
 Telefax: (07) 59 23 76  
 Telex: 55 435 nhl n

ISBN nr.:

Rapportens tittel  <b>TILSTOPPING FLOMLØP SAMPLERAPPORT</b>	Dato  <b>1991-12-31</b>
	Antall sider og bilag  <b>37</b>
Forfatter(e)  <b>Klemet Godtland</b>	Ansv. sign.  <b>Øivind Solvik</b>
	Prosjektnummer  <b>605156</b>

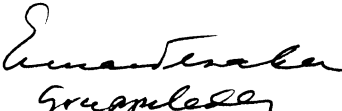
Oppdragsgiver <b>Vassdragsregulantenenes forening. Damsikkerhetsprosjektet</b>	Oppdr. givers ref. <b>Jan Daleng Svein Larsen</b>
---	--

Ekstrakt

Prosjektet tar for seg faren for at skogsvirke m.m., som flyter i vassdraget skal tilstoppe flomløp. Faren er spesielt stor når det er pilarer med brobane på overløpet. Forholdene er undersøkt i modell.

I første trinn er undersøkt tilstoppingsfaren ved enkeltrær. Nødvendig overløpshøyde, fri høyde og pilaravstand for å unngå tilstopping er funnet som funksjon av trestørrelsen (trehøyde, rotdiameter og krone).

I andre trinn er undersøkt betingelsene for at vaser av trær og kvist skal kunne passere et overløp. Videre er beregnet de forankringskrefter som skal til å for å holde vaser tilbake i vannstrømmen.

  
Grunnleggelse

	Stikkord – norsk	Stikkord – engelsk
Gruppe 1	Hydroteknikk	
Gruppe 2	Dam	
Egenvalgte stikkord	Flomløp	
	Tilstopping	
	Trær og vaser	
	Forankringskrefter	

## FORORD

Denne rapporten er utarbeidet av SINTEF NHL i 1991 og beskriver resultatene fra modellforsøk i NHLs laboratorium i forbindelse med prosjektet "Tilstopping av flomløp: Trinn 1 og 2".

Rapporten er en forkortet samleutgave av to tidligere rapporter som beskrev forsøksresultatene fra Trinn 1 og 2 mer detaljert. Samlerapporten er skrevet med tanke på praktisk bruk av resultatene fra modellforsøkene. Alle resultater er således omregnet til aktuelle prototypforhold, dvs de målene en har i virkeligheten. I rapporten er det av praktiske grunner brukt "runde" prototypmål, feks vasebredde  $b = 10.0$  m. Ved avvikende mål i det enkelte tilfelle multipliseres med det aktuelle forholdstall. De av leserne som ønsker å gå mer detaljert inn i stoffet henvises til de to delrapportene for Trinn 1 og 2 i prosjektet.

De to delrapportene har SINTEF NHL nr.:

Trinn 1:       STF60 A90031

Trinn 2:       STF60 A91120

Seniorforsker Øivind Solvik har vært faglig veileder i prosjektet.

Gruppesekretær Elisabeth Hovdahl har skrevet alle rapportene.

For øvrig rettes også takk til alle andre som har gitt hjelp og råd i forbindelse med prosjektet. En spesiell takk rettes til medlemmene i Styringskomiteen for prosjektet som har vært med og bidratt hele tiden både for Trinn 1 og 2 i prosjektet.

## INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
<b>FORORD</b>	
<b>INNHOLDSFORTEGNELSE</b>	I
<b>SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER</b>	III
<b>SYMBOLLISTE</b>	V
<b>1. INNLEDNING</b>	1
<b>2. PROSJEKTMÅL TRINN 1 OG 2</b>	2
<b>3. FORUTSETNINGER</b>	3
3.1. Modellbeskrivelse	3
3.1.1. Trinn 1	3
3.1.2. Trinn 2	4
3.2. Målestokk og skalaforhold	5
3.2.1. Modellteori	5
3.2.2. Målestokk og skalaforhold	5
3.3. Symboler	8
3.4. Skogsvirke	8
3.5. Forsøksopplegg	10
3.5.1. Trinn 1	10
3.5.2. Trinn 2	11
3.5.2.1. Tilstopping av vaser - nødvendig overløpshøyde	11
3.5.2.2. Måling av forankringskrefter	11
3.6. Sannsynlighetskriterier	11
3.6.1. Generelt vedrørende tilstopping av enkeltrær	11
3.6.2. Gjennomgangsprosent $n_{gj}$ (%)	12
3.6.3. Måling av forankringskrefter på vaser	12
<b>4. TILSTOPPING AV TRÆR (trinn 1)</b>	13
4.1. Generelt	13
4.2. Overløpshøyde	14
4.3. Pilaravstand	15
4.4. Fri høyde til bru	17

**INNHOLDSFORTEGNELSE** forts.

	Side
4.5. Nedstrøms bunn- og dybdeforhold	18
4.5.1. Dypere undervann	18
4.5.2. Nedstrøms stup høyde	20
4.5.2.1. Overløp uten bru	20
4.5.2.2. Overløp med bru	20
4.6. Vanndybde foran overløpet	22
<b>5. TILSTOPPING AV VASER (Trinn 2)</b>	<b>23</b>
5.1. Generelt	23
5.2. Vaser av grantrær lagt ut foran overløpet	23
5.2.1. Overløp uten pilarer	23
5.2.2. Overløp med pilarer	24
5.3. Vaser dannet av drivende grantrær	24
5.4. Tette vaser	25
<b>6. FORANKRINGSKREFTER PÅ VASER (Trinn 2)</b>	<b>26</b>
6.1. Generelt	26
6.2. Variable faktorer	27
6.3. Vannstrømmens bidrag til forankringskraften	29
6.4. Vindens bidrag til forankringskraften	33
6.5. Bølgers bidrag til forankringskraften	34
6.6. Eksempel på samlet virkning fra vannstrøm, vind og bølger	35
6.7. Flytetorv	37



## SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER

Samlerapporten for prosjektet "Tilstopping av flomløp" gjengir resultatene fra modellforsøk i forbindelse med problemene en får ved tilstopping pga enkeltrær og vaser av trær, kvist, flytetorv osv som kommer drivende. Modellforsøkene er utført av SINTEF NHL i 1990 og 1991. (Trinn 1 og 2).

Målet har vært å klarlegge under hvilke forhold tilstopping vil skje ved faste overløp. I Trinn 2 ble det også sett på de krefter en må regne med for å holde igjen vaser av drivende trær, kvist, flytetorv osv.

Dameierne bør ut fra resultatene som fremkom undersøke sine dammer og vurdere faren for tilstopping. Med den ordinære utforming av overløpene med pilarer og brobane vil faren være stor i skogbevokst terreng. Åpningene er ofte så små at de med meget stor sannsynlighet vil bli tilstoppet særlig av drivende vaser men også av enkeltrær som kommer og samler seg opp. Dette vil føre til redusert flomavledningskapasitet med resulterende vannstandsstigning i magasinet ovenfor dammen. Økt vannstand vil igjen kunne føre til redusert sikkerhet for dammen, spesielt gjelder dette fyllingsdammer.

Forsøkene i prosjektet kan sammenfattes i følgende tre hoveddeler:

1. Bestemmelse av nødvendig pilaravstand, overløpshøyde osv for at enkeltrær skal kunne passere overløpet (Trinn 1)
2. Bestemmelse av nødvendig overløpshøyde for at vaser skal kunne passere overløp med og uten pilarer. (Trinn 2)
3. Forankringskrefter for å holde igjen vaser. (Trinn 2)

### 1. Nødvendig pilaravstand, overløpshøyde osv for enkeltrær

Forsøkene viste at for å unngå betydelig tilstopping (flere enn 10-20% av trærne) må følgende hovedforutsetninger være oppfylt:

- Pilaravstanden må ikke være mindre enn ca 80% av trehøyden.
- Åpningen mellom eventuell bru og overløpet må være større enn ca 15 % av trehøyden.
- Nedstrøms stup må ikke være større enn 1/3 av trehøyden når en har bru over overløpet, forutsatt nødvendig åpning mellom bru og overløp.

Ved overløp uten bru og pilarer kan en få midlertidig tilstopping når overløpshøyden er mindre enn rot diameteren (1/6 av trehøyden).



## **SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER** forts.

### **2. Nødvendig overløpshøyde for vaser**

- Ved rent overløp uten pilarer er nødvendig overløpshøyde fra ca 10 til 16% av trehøyden for at minst 85% av vasens trær skal passere.
- Ved overløp med pilarer er nødvendig overløpshøyde fra 14 til 20% av trehøyden for at minst 85% av vasenes trær skal kunne passere. Pilaravstanden er forutsatt ca 1.1 ganger trehøyden.

### **3. Forankringskrefter for vaser mot vannstrøm, vind og bølger**

- Forsøkene har resultert i en generell formel for beregning av forankringskrefter som funksjon av vasetørrelse og vannhastighet.  $F = C_d \cdot b \cdot (30t+1) \cdot \rho \cdot v^2/2g$  (kg)
- Vasens bredde på tvers av strømrretningen og tykkelsen er av avgjørende betydning for forankringskraftens størrelse.
- Vasens lengde i strømrretningen betyr lite for forankringskraften forutsatt samme vasebredde.
- En vase nær overløpet vil påvirkes av noe større krefter enn en vase lenger oppstrøms. En bør holde vasen minst 5 ganger overløpshøyden unna overløpet. Ellers vil forankringskraften bli større.
- Varierende vanddybde ved samme vannhastighet betyr ikke noe for forankringskraften forutsatt at minimum vanddybde under vasen er minst lik vasetykkelsen.
- Bidraget til forankringskraften fra vind og bølger er relativt lite i forhold til vannstrømmens bidrag ved normale vann- og vindhastigheter samt forventet bølgehøyde der lenser er aktuelle å legge ut.
- I magasiner hvor vannhastighetene er ubetydelige vil derimot krefter fra vind og bølger bli dominerende. Kraftene må forøvrig beregnes i hvert enkelt tilfelle både for vind, bølger og vannhastigheter.

**SYMBOLLISTE**

$b$  = vasebredde på tvers av strømrretningen (m)

$C$  = overløpskoeffisient (-)

$C_d$  = dragkoeffisient mot vannstrøm og vindkrefter (-)

$F$  = total forankringskraft (kg)

$F_a$  = relativ forankringskraft - skjærkraft (kg/m<sup>2</sup>)

$F_b$  = relativ forankringskraft - skyvekraft (kg/m)

$F_{b\phi}$  = bølgers bidrag til forankringskraften (kg)

$F_u$  = vindens bidrag til forankringskraften (kg)

$F_v$  = vannstrømmens bidrag til forankringskraften (kg)

$g$  = tyngdens akselerasjon (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$h$  = vasens høyde over vannflaten (m)

$h_l$  = lav undervannsdypde (m)

$h_h$  = høy undervannsdypde (m)

$H$  = bølgehøyde (m)

$H_0$  = overløpshøyde (m)

$H_{bru}$  = fri høyde mellom bru og overløp (m)

$H_s$  = stuphøyde nedstrøms overløpet (m)

$H_{tre}$  = trehøyde/trelengde (m)

$l$  = vaselengde i strømrretningen (m)

$L$  = overløpslengde (m)

$\Delta L$  = pilaravstand (m)

$M = 1 : \lambda$  = målestokk  $\rightarrow$  skalaforhold (-)

## VI

$n$  = totalt antall trær som kommer drivende (stk)

$n_{gj}$  = gjennomgangsprosent for et visst antall drivende trær (%)

$P$  = terskelhøyde til overløpet (m)

$Q$  = vannføring ( $m^3/s$ )

$q$  = spesifikk vannføring ( $m^3/s \cdot m$ )

$t$  = neddykket vasetykkelse (m)

$v$  = vannhastighet (m/s)

$v_g$  = grensevannhastighet (m/s)

$v_m$  = vannhastighet i modell (m/s)

$v_p$  = vannhastighet i prototyp (m/s)

$u$  = vindhastighet (m/s)

$\varnothing_{rot}$  = rot diameter til trær (m)

$\rho$  = tetthet vatn ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$\rho_L$  = tetthet luft ( $1.3 \text{ kg/m}^3$ )

$\lambda$  = lengdemålestokk (-)

## 1. INNLEDNING

Faren for tilstopping av flomløp pga vegetasjon har opptatt flere dameiere. Arendal Vasdrags Brugseierforening tok i 1989 initiativet til et møte for å drøfte mulige tiltak som kan redusere faren for tilstopping. Prosjektet "Tilstopping av flomløp" kom igang etter møtet hos SINTEF NHL høsten 1989 og omfattet to trinn. På møtet deltok representanter fra en rekke kraftverk og dameiere rundt om i landet i tillegg til representanter fra NVE, VR, NHL og Damsikkerhetsprosjektet.

Følgende ble tatt opp på møtet:

- Presentasjon av problemstillingen med tilstopping av flomløp. Erfaring fra dameiere.
- NVEs syn på tilstoppingsproblemet.
- Erfaringer fra utførte modellforsøk.
- Hva burde nye modellforsøk omfatte?

Som følge av møtet ble det sendt ut forespørsel til en rekke dameiere hvor tilstoppingsproblematikken ble belyst og hvor en samtidig ba om svar på hvorvidt den enkelte dameier var interessert i å være med å finansiere prosjektet.

Det innkam positivt svar fra flere dameiere i tillegg til at bevilgninger også ble gitt via Damsikkerhetsprosjektet og VR til Trinn 1 av prosjektet.

Trinn 2 i prosjektet ble finansiert av Vassdragsregulantenenes forening og Damsikkerhetsprosjektet med halvparten på hver.

## 2. PROSJEKTMÅL TRINN 1 OG 2

Innholdet i denne samler rapporten omfatter hovedresultatene fra laboratorieforsøk for Trinn 1 og 2 i prosjektet: "Tilstopping av flomløp".

Tilstopping av overløp i dammer har mange og tildels lite belyste sider. En del norske dammer ligger i skogsterreng hvor det er en viss risiko for at større eller mindre antall trær kan bli revet løs i terrenget oppstrøms dammen som følge av en ekstrem flomsituasjon. En snakker da først og fremst om forholdene ved dimensjonerende (1000 årsflom) og påregnelig maksimalflom, men også mer tilfeldige lokale ras ved mindre flommer kan skape problemer som følge av drivende trær mot overløpene.

For at drivende enkeltrær og vaser ikke skal representere noen risiko må overløp og flomavledningsorganer mange steder være dimensjonert og utformet på en slik måte at sannsynligheten for tilstopping blir akseptabelt liten. I tilfeller hvor det ikke kan tillates at trær og vaser driver fram til overløpet vil de f.eks kunne stanses ved hjelp av lenser oppstrøms overløpet, påler nedsatt i elvebunnen med en viss avstand osv.

Målet har vært å klarlegge under hvilke forhold tilstopping vil skje ved faste overløp. Med flomavledningsorganer menes i denne rapporten faste overløp med og uten overliggende bru og pilarer. Åpningene mellom brupilarene og høyden mellom overløpsterskel og bru er på mange eksisterende dammer for små til å kunne avlede enkeltrær og vaser som måtte komme flytende. Oppstrøms og nedstrøms bunnforhold er også faktorer for et overløps avledningskapasitet som ble vurdert.

Det andre hovedmålet ved prosjektet var å bestemme de forankringskreftene som en må regne med for å stoppe drivende vaser i vannstrømmen. De kreftene som ble målt i modellen kan skaleres opp til aktuelle vasesørrelser i prototyp/virkeligheten ved hjelp av Froudes modellov.

En eventuell tilstopping og dermed reduksjon av dammens flomavledningskapasitet vil i første rekke føre til flomstigning i magasinet oppstrøms dammen med dertil større risiko for flomskader på "gård og grund". Mest kritisk er at en ved flomstigning høyere enn beregnet risikerer overtopping av selve damkonstruksjonene. Fyllingsdammer kan da i verste fall bryte sammen som følge av erosjon. Andre typer dammer kan også skades ved at betong, stål og andre konstruksjonsmaterialer blir utsatt for tilleggskrefter utover det de er dimensjonert for. Det er derfor svært viktig at flomavledningsorganene fungerer slik de er tenkt ved en ekstrem flom og ikke får sin kapasitet redusert som følge av tilstopping.

### 3. FORUTSETNINGER

#### 3.1. Modellbeskrivelse

##### 3.1.1. Trinn 1

Til forsøkene i Trinn 1 ble det bygget to modeller med forskjellig terskelhøyde ( $P_1$  og  $P_2$ ). Begge modeller hadde overløpstorskler med standard profil i hht Damforskriftenes retningslinjer.

Hvis en relaterer de benyttede terskelhøyder ( $P$ ) til en trehøyde lik  $H_{tre} = 10.0$  m i prototyp/virkeligheten tilsvarte det:

$$P_1 = 2.0 \text{ m og } P_2 = 15.6 \text{ m}$$

Det ble således vurdert tilfeller både med grunt og dypt vannivå foran overløpet.

Overløpets form ga optimale overløpskoeffisienter i området  $C = 2.1 \rightarrow 2.2$ . Det ble kun sett på overløp som var **rette**.

Det ble sett på tilfeller både med og uten pilarer. Overløpets totale lengde tilsvarte ca 3.5 ganger den aktuelle trehøyde:

$$L_{\text{overløp}} = 3.5 \cdot H_{\text{tre}}$$

I tilfellene med pilarer varierte pilaravstanden

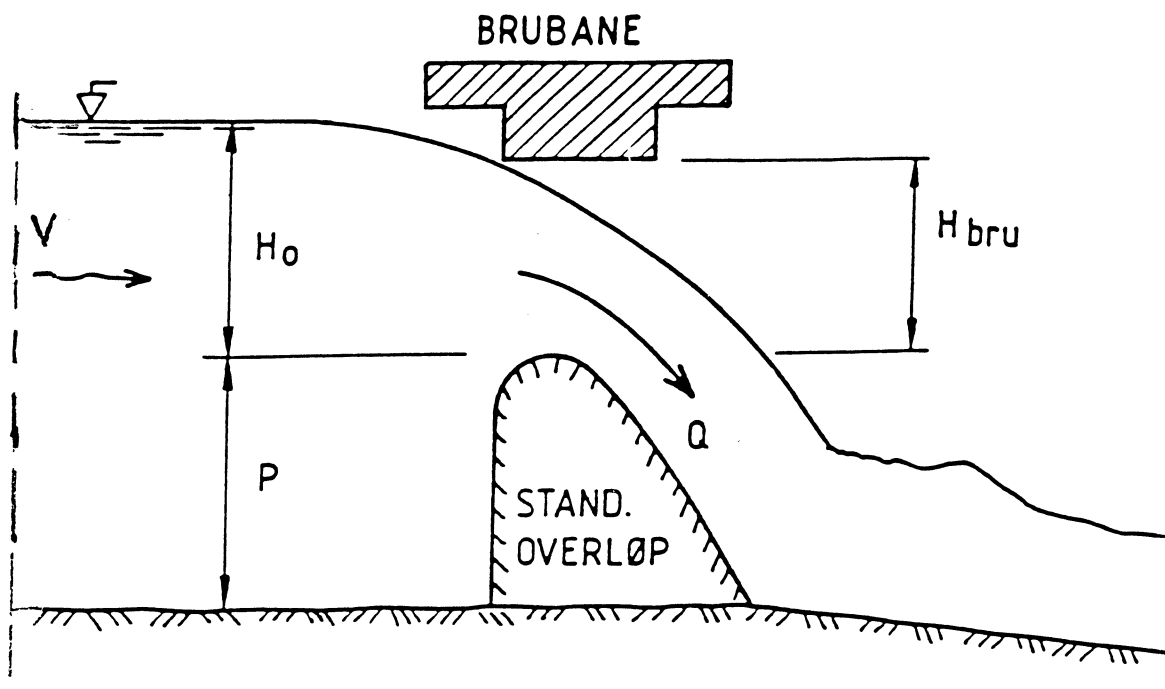
$$\Delta L = (0.8 \rightarrow 1.1) \cdot H_{\text{tre}}$$

Dvs fra 80 til 110% av trehøyden.

Relatert til en trehøyde  $H_{tre} = 10.0$  m tilsvarende pilaravstandene fra 8.0 til 11.0 m, mens pilarenes bredde tilsvarte 0.65 m i virkeligheten.

Fri høyde ( $H_{bru}$ ) mellom overkanten på overløpet og underkant av brua tilsvarte fra 1.1 til 1.4 m lysåpning. Det ble vurdert tilfeller både med og uten bru.

I Figur 1 er det vist et snitt gjennom det aktuelle overløpet med brubane over. Noen av de mest sentrale symbolene er også vist på figuren.



Figur 1. Overløpsterskel - aktuelle parametre.

I modellen var overløpets lengde ca 1.0 m, terskelhøyden var  $P = 6$  og  $47$  cm og fri åpning mellom brubane og overløp varierte fra 3.3 til 4.2 cm. I utstrekning var modellen ca  $30 \text{ m}^2$ .

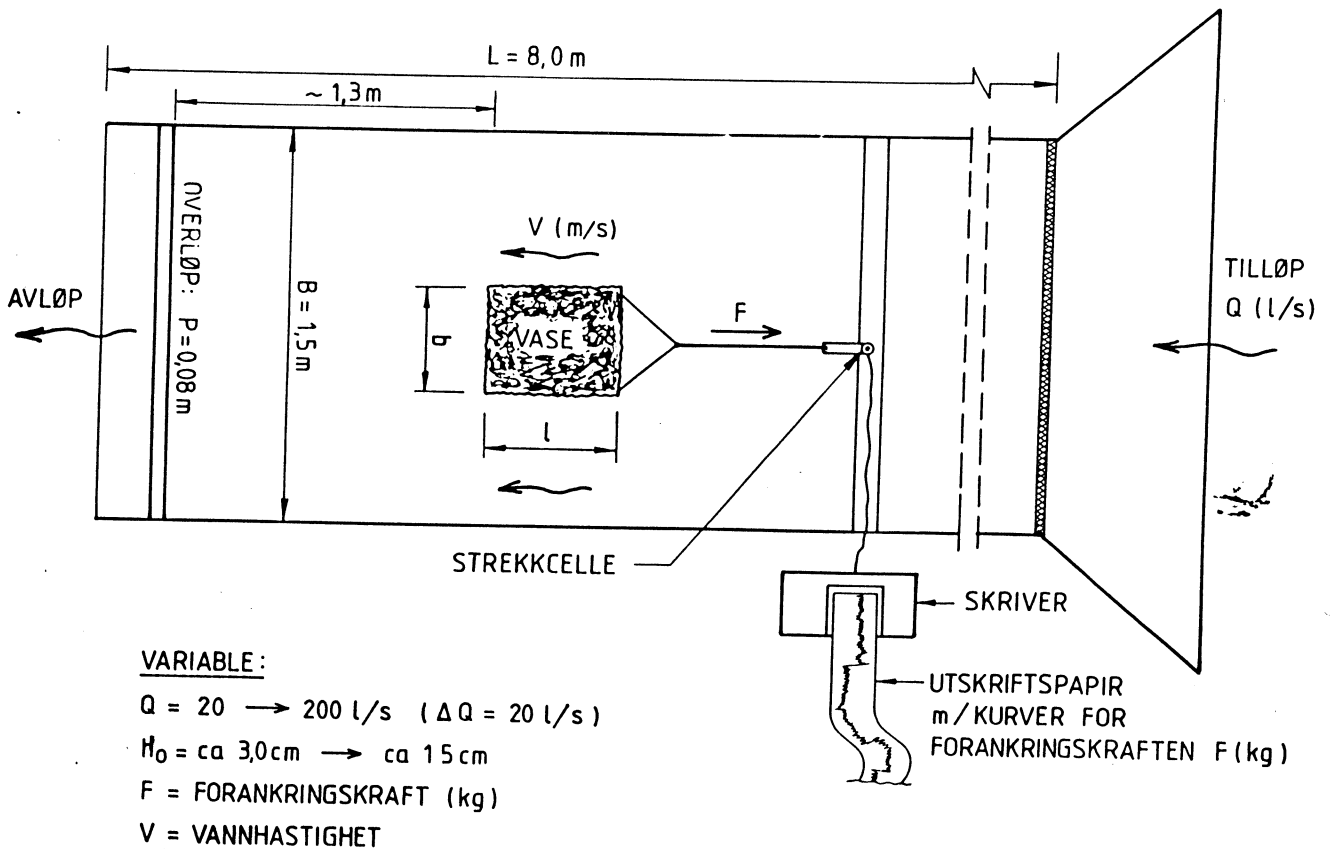
### 3.1.2. Trinn 2

Til forsøkene i Trinn 2 ble det bygget en renne som var 8.0 m lang og 1.5 m bred. Gjennom renna rant en konstant vannføring ved hvert enkeltforsøk. Vannføringen fra forsøk til forsøk varierte med sprang  $\Delta Q = 20 \text{ l/s}$  fra  $Q_{\min} = 20 \text{ l/s}$  til  $Q_{\max} = 200 \text{ l/s}$ . Lengst nedstrøms i renna passerte vatnet over en overløpsterskel med høyde  $P = 8 \text{ cm}$ . Vanndybden under forsøkene varierte fra ca 11 cm ved  $Q = 20 \text{ l/s}$  og til ca 22 cm ved  $Q = 200 \text{ l/s}$  relatert til bunnen i renna. På tilsvarende måte varierte vannhastigheten fra ca 0.10 m/s til 0.65 m/s fra minste til største vannføring.

Et stykke oppe i renna var det montert inn en strekkcelle for å måle de dragkrefter/forankringskrefter som virket på de flytende vasene fra vannstrømmen.

Figur 2 viser en skisse av forsøksriggen til Trinn 2.





Figur 2. Forsøksrigg for måling av forankringskraft.

### 3.2. Målestokk og skalaforhold

#### 3.2.1. Modellteori

Ved modellforsøk av strømningsforhold i ei elv med fritt vannspeil har vi funnet det forsvarlig å benytte Froudes modellov ved skalering. Det vil si at Froudetallet  $F$  i modell og prototyp skal være likt. Det er da forutsatt at strømningsmønsteret er dominert av gravitasjons- og treghetskrefter. De viskøse kreftene (indre friksjon) antas å ha en underordnet betydning for de strømningsforhold en har.

#### 3.2.2. Målestokk og skalaforhold

Modellforsøkene ble ikke utført med noen bestemt målestokk i forhold til virkeligheten. Resultatene kan overføres lineært til en hvilken som helst aktuell målestokk.

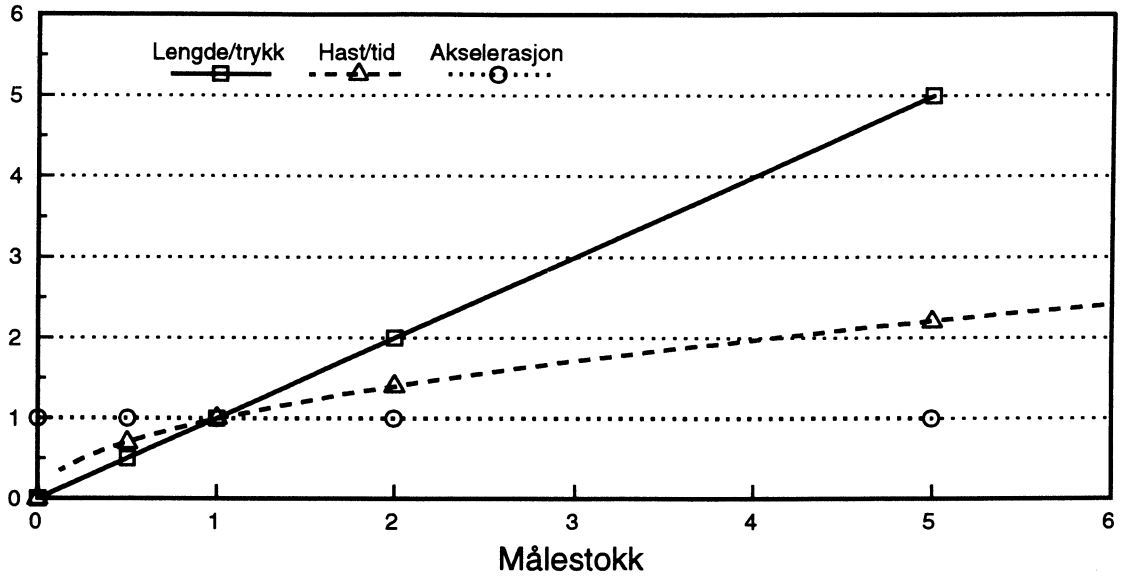
Etterfølgende tabeller og figurer er så langt det lot seg gjøre basert på runde tall, f.eks

trehøyde  $H_{tre} = 10.0$  m, vasebredde  $b = 10.0$  m, neddykket vasetykkelse  $t = 1.0$  m osv. De aktuelle mål for den enkelte dam vil naturlig nok avvike fra de runde målene presentert i denne rapporten. Ved hjelp av målestokk og skalaforhold for de enkelte aktuelle parametere kan en imidlertid regne om verdiene fra rapporten til det enkelte aktuelle tilfelle. I Tabell 1 er det vist en oversikt over de mest aktuelle fysiske parametere i forbindelse med "Tilstopping av flomløp". I tabellen er det tatt med tilsvarende skalaforhold for de to målestokkene  $M = 1 : 2$  og  $M = 1 : 5$ . Tabellen er utledet fra Froudes modellov.

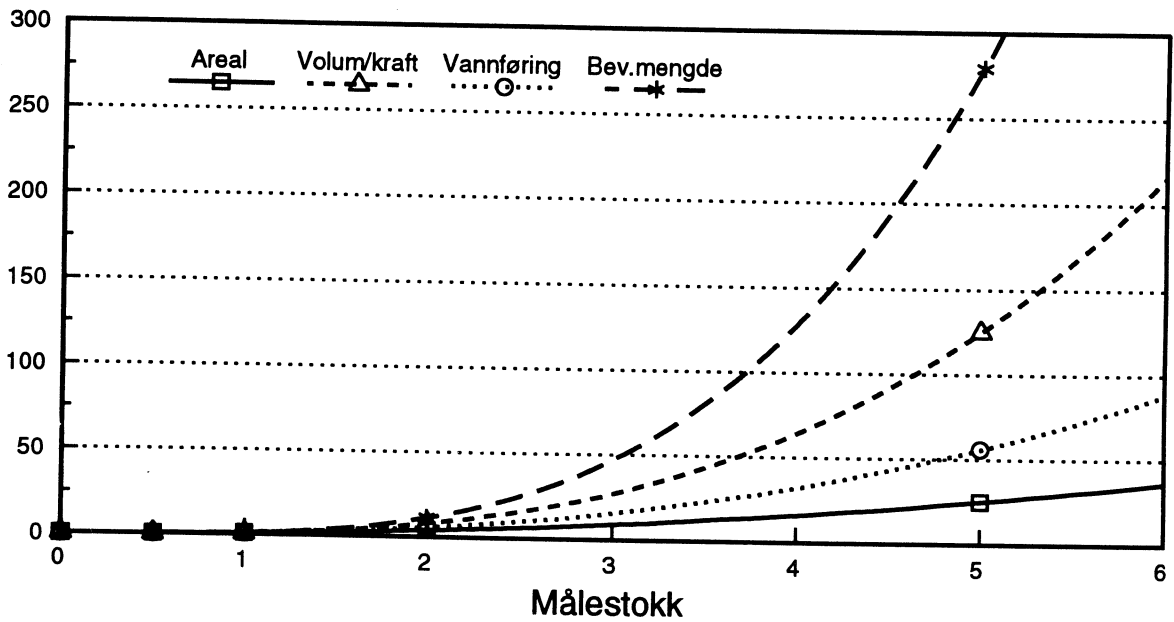
Tabell 1. Skalaforhold for noen sentrale parametere.

Parameter	Benevning	Skalaforhold $M = 1 : \lambda$		
		Generelt	$\lambda = 2$	$\lambda = 5$
Lengde	m	$1 : \lambda$	1 : 2	1 : 5
Areal	$m^2$	$1 : \lambda^2$	1 : 4	1 : 25
Volum	$m^3$	$1 : \lambda^3$	1 : 8	1 : 125
Tid	s	$1 : \lambda^{1/2}$	1 : 1.4	1 : 2.2
Hastighet	m/s	$1 : \lambda^{1/2}$	1 : 1.4	1 : 2.2
Akselerasjon	$m/s^2$	$1 : \lambda^0$	1 : 1	1 : 1
Vannføring	$m^3/s$	$1 : \lambda^{5/2}$	1 : 5.6	1 : 55.9
Kraft	$kgm/s^2$	$1 : \lambda^3$	1 : 8	1 : 125
Trykk	$kg/ms^2$	$1 : \lambda$	1 : 2	1 : 5
Bevegelsesmengde	$kgm/s$	$1 : \lambda^{7/2}$	1 : 11.3	1 : 279.5

I Figur 3 og 4 er det satt opp kurver for målestokk og skalaforhold. Figur 3 viser skalaforhold for parametrene lengde/trykk, hastighet/tid og akselerasjon, mens Figur 4 gjelder areal, volum/kraft, vannføring og bevegelsesmengde. Hver enkelt kurve viser hva parameteren øker til når målestokken forandres.



Figur 3. Skalaforhold for målestokker fra 0 til 6.



Figur 4. Skalaforhold for målestokker fra 0 til 6.

Nedenfor er gitt noen eksempler på omregning av aktuelle parametere fra et rundt mål til en aktuell verdi for en bestemt dam.

### Eksempel 1

Nødvendig pilaravstand for trehøyde

$$H_{tre} = 10.0 \text{ m er } \Delta L_o = 8.0 \text{ m (se Figur 7)}$$

For maksimal trehøyde i et vassdrag lik 15.0 m, dvs  $\lambda = 15/10 = 1.5$ , blir nødvendig pilaravstand:

$$\Delta L = \Delta L_o \cdot \lambda = 8.0 \cdot 1.5 = \underline{12.0 \text{ m}}$$

### Eksempel 2

En vase med runde mål  $b \cdot l \cdot t = 10 \cdot 10 \cdot 1.0 \text{ m}$  må holdes igjen med en forankringskraft mot vannstrøm ved  $v = 1.5 \text{ m/s}$  lik:  $F_o = \underline{3.7 \text{ tonn}}$ . (se Tabell 7)

En dameier vurderer imidlertid vaser med mål:  $20 \cdot 20 \cdot 2 \text{ m}$  som sannsynlige, men beholder vannhastigheten  $v = 1.5 \text{ m/s}$ , dvs  $\lambda = 2$  (målestokk  $M = 1 : 2$ )

Han må da regne med en tilsvarende forankringskraft for en slik vase i forhold til den "runde":

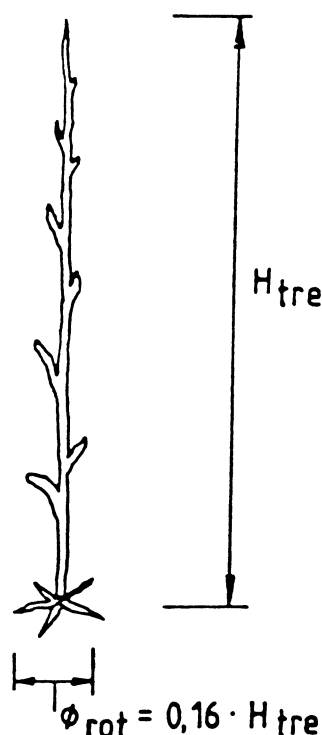
$$F = F_o \cdot \lambda^2 = 3.7 \cdot 4 = \underline{14.8 \text{ tonn}}$$

## 3.3. Symboler

Symboler som er benyttet i rapporten, både i teksten, tabeller og figurer, er definert i symbollista foran i rapporten.

## 3.4. Skogsvirke

I forsøkene ble det brukt granplanter med flatrot og tilsiktet rot diameter lik 16% av trehøyden. Dette var i hht erfaringsdata fra Landbrukshøyskolen på Ås. Figur 5 viser forholdet mellom trehøyde og rot diameter.



Figur 5. Forholdet mellom trehøyde og rot diameter.

Forsøkstrærne (granplantene) varierte i høyde fra 25 til 33 cm. Av praktiske grunner ble fast rot diameter 5 cm brukt.

En valgte å relatere skogsvirkets dimensjoner til overløpshøyden i stedet for vannføringen. Årsaken til det var at overløpshøyden er lettere å fastlegge fysisk i det enkelte damtilfelle enn spesifikk vannføring  $q$  ( $m^3/s \cdot m$ ).

Forsøksplantene ble tilpasset de virkelige forhold for store trær mest mulig mht E-modul, egenvekt, kvistlengder osv. De trær man tok sikte på å modellere var normal gran, furu og bjørk. Trær med store kroner ble derfor ikke vurdert.

Forsøkstrærne hadde en diameter på trestammen i toppen som i de fleste tilfeller er forholdsvis mye større enn det en vil ha i prototyp. Når en vet at toppen på prototyptrærne går ut i null diameter (svært mjuke) er det innlysende at forsøkstrærne var en del for stive i forhold til prototyptrær. Nødvendig pilaravstand vil derfor kunne reduseres noe i forhold til det modellforsøkene viste. Prototyptrærne vil brette/bøye seg mye lettere i toppen hvis de legger seg på tvers foran et overløp mellom to pilarer. I trehøyden medtas ikke det av toppen som er tynnere enn 5.0 cm. Resultatene fra modellforsøkene er således på "den sikre siden" vedrørende forholdet mellom trehøyde og nødvendig pilaravstand. Forholdsvis lengre trær ville sannsynligvis ha passert overløpet i prototypsituasjon.

### 3.5. Forsøksopplegg

#### 3.5.1. Trinn 1

Første trinn i prosjektet tok for seg rette overløpsterskler med og uten pilarer og brubane. I hovedtrekk klarla modellforsøkene nærmere forholdet mellom overløpshøyde, fri høyde, pilaravstand og dimensjonene på skogsvirket/enkeltrær (trehøyde, rotdiameter, krone osv).

Det ble gjort forsøk hvor en i hver serie kjørte gjennom et visst antall trær med registrering av hvor mange som passerte og hvor mange som satte seg fast. Registreringen ble utført individuelt, dvs trær som satte seg fast ble tatt vekk slik at det ikke innvirket på neste tre som kom drivende.

Forsøkene vedrørende klarlegging av nødvendig overløpshøyde ble utført uten bru. Når parameteren nødvendig pilaravstand ble klarlagt var  $H_{bru} = 5.0$  m relatert til trehøyde 10.0 m. Den fri høyden var da tilstrekkelig stor til at brua ikke hindret trærne i å passere. Det ble også sett på effekten av forskjellig vanddybde foran overløpet og dermed forskjellig tilløpshastighet.

Nedstrøms forhold ble undersøkt ved at forsøk ble gjort med forskjellig undervannsdybde/oppstuving og forskjellige stuphøyder.

I forsøkene ble følgende tre alternativer for nedstrøms bunn- og dybdeforhold prøvet:

1. Relativt flatt/lett skrånende bunn fra nedstrøms fot av overløpet, noe som førte til liten vanddybde.
2. Oppstuving av undervannet, større nedstrøms vanddybde.
3. Loddrette stup, høyde ca 3.3, 6.7 og 10.0 m relatert til trehøyde 10.0 m.

Nedstrøms forhold er en viktig parameter og ofte avgjørende for gjennomgangsprosenten, for drivende enkeltrær.

Det ble tidlig klart at forsøkstrærnes egenvekt hadde betydning for gjennomgangsprosenten, dvs hvor lett de enkelte trær satte seg fast opp i overløp, pilarer, bru osv. Stor egenvekt gir stor bevegelsesmengde. Forsøkene viste at tyngre trær passerte lettere enn tørre og lettere. Da vasstrukne tyngre trær er mest nærliggende det en kan forvente i virkeligheten (prototyp) ble de fleste av forsøkene utført med forsøkstrær som hadde ligget noen timer i vatn.

Overløpshøydene ble hovedsakelig variert med sprang på 0.15 m og varierte fra min 0.8 m til maks 1.9 m. Tilsvarende vannføringer varierte da fra  $1.5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  til  $5.5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  for overløpskoeffisient  $C = 2.1$  (relatert til trehøyde 10.0 m).

### 3.5.2. Trinn 2

#### 3.5.2.1. Tilstopping av vaser - nødvendig overløpshøyde

- Det ble brukt vaser av strå, sammenbundne grantrær og løse grantrær.
- I noen forsøk lot en de løse grantrærne komme drivende ned mot overløpet på lav vannføring hvor de samlet seg i en vase.
- Løse grantrær ble også lagt ut systematisk i kryss og tvers oppå hverandre i en vase foran overløpet.
- Det ble brukt overløp både med og uten pilarer.
- Når vasene lå foran overløpet ble vannføringen økt gradvis inntil alle enkeltrær, eventuelt vasen, hadde passert forbi.
- Nødvendig overløpshøyde ble registrert.

#### 3.5.2.2. Måling av forankringskrefter

Til forsøkene med måling av forankringskrefter for vaser ble det laget flytelegemer/vaser med forskjellig størrelse og av forskjellig materiale. De fleste av forsøkene ble gjort med vaser av strå og kvist, mens noen forsøk ble gjort med vaser av små granplanter som var bundet sammen.

Det enkelte forsøk ble utført ved at den aktuelle vasen ble festet til strekkcella som målte forankringskraften.

### 3.6. Sannsynlighetskriterier

#### 3.6.1. Generelt vedrørende tilstopping av enkeltrær

I hver forsøksserie med enkeltrær (Trinn 1) hvor alle parametere for øvrig ble holdt konstante ble det kjørt et visst antall forsøkstrær  $n$  (stk). Antall forsøkstrær varierte mellom ca 40 og 100 stk i de forskjellige forsøksserier alt etter nødvendigheten av å ha et visst antall trær for å få en mest mulig riktig sannsynlighet for at trærne ville passere overløpet.

Når et forsøksstre satte seg fast i overløp, pilarer, bru osv ble det fjernet før neste tre kom



drivende. Innbyrdes påvirkning mellom trærne ble således ikke registrert i forsøkene. Trinn 1 slik at resultatene representerer en individuell sannsynlighet for at det enkelte tre i drift skal sette seg fast og dermed redusere gjennomgangsprosenten.

I prøver utenom selve forsøksseriene ble det likevel registrert at hvis en lot trærne fortsatt henge fast ble de i mange tilfeller revet løs igjen av et nytt tre som kom med en viss bevegelsesmengde og således forbedret gjennomgangsprosenten. En slik forbedring går som nevnt ikke fram av resultatene i denne rapporten. På den annen side vil et fastsittende tre også kunne fange opp nye trær som kommer drivende, trær som ellers kunne ha passert. Det er et åpent spørsmål om denne akkumuleringseffekten oppveier løsrivingseffekten, eventuelt er større eller mindre i de forskjellige situasjoner.

### 3.6.2. Gjennomgangsprosent. $n_{gj}$ (%)

Gjennomgangsprosenten  $n_{gj}$  (%) er det antall trær/vaser som vil passere overløpet i forhold til det samlede antall trær/vaser som kommer drivende i løpet av en viss tid.

$$\text{Gjennomgangsprosent: } n_{gj} = \frac{100\% \cdot n_{\text{passert}}}{n}$$

### 3.6.3. Måling av forankringskrefter på vaser

Når en ser på vaser av trær, kvist, torv osv vil naturligvis ikke to vaser være like fra gang til gang. Heller ikke måling av de forankringskrefter som må til for å stanse vasene i vannstrømmen gir samme resultat, men varierer noe rundt en middelvei. Størrelsesorden av de målte krefter vil imidlertid være innenfor akseptabel nøyaktighet til det formål de er tenkt brukt.

## 4. TILSTOPPING AV TRÆR (Trinn 1)

### 4.1 Generelt.

I dette kapitlet er behandlet retningslinjer for å dimensjonere flomløpsåpninger tilstrekkelig store for å unngå tilstopping av drivende enkeltrær. Det er sett på:

- Nødvendig overløpshøyde for overløp uten bru og pilarer
- Nødvendig pilaravstand
- Nødvendig fri høyde mellom overkant overløp og underkant brubjelke

Det er også behandlet virkningen av nedstrøms bunn- og dybdeforhold, samt vanndybde foran overløpet.

Nødvendige mål og dimensjoner er relatert til en "rund" trehøyde  $H_{tre} = 10.0$  m.

Tilsvarende normal rot diameter i hht erfaringsdata gitt av NLH på Ås er:

$$\varnothing_{rot} = 0.16 \cdot H_{tre} = 1.6 \text{ m (16\% av trehøyden)}$$

Dersom det i et vassdrag vil kunne komme trær med vesentlig avvikende form og mål på rot i forhold til det "normale" (16 % av trehøyden) må dette tas med i vurderingen vedrørende dimensjonering av flomløpsåpningene.

Når vatnet passerer overløpet på en dam vil ca 1/3-del av overløpshøyden være omgjort til hastighetsenergi. Vanndybden over overløpet vil da være  $2/3 \cdot H_0$ . Eksempelvis vil en overløpshøyde lik  $H_0 = 1.5$  m gi en vanndybde over overløpet lik 1.0 m. Dette er viktig å være klar over når en sammenligner de aktuelle trærnes høyde, samt rot- og kronedimensjoner, med de aktuelle åpningsparametere.

## 4.2. Overløpshøyde

Nødvendig overløpshøyde og fri høyde til bru var de parametrene som ble grundigst behandlet i forsøkene.

I Tabell 2 er satt opp gjennomgangsprosenter en kan forvente for trær med høyde 10.0 m og tilsvarende rot diameter 1.6 m relatert til den aktuelle overløpshøyde. Verdiene i tabellen er basert på et samlet antall trær for hver vannføring lik  $n = 160 - 170$  stk trær unntatt for den laveste vannføringen hvor antall trær var  $n \approx 70$  stk.

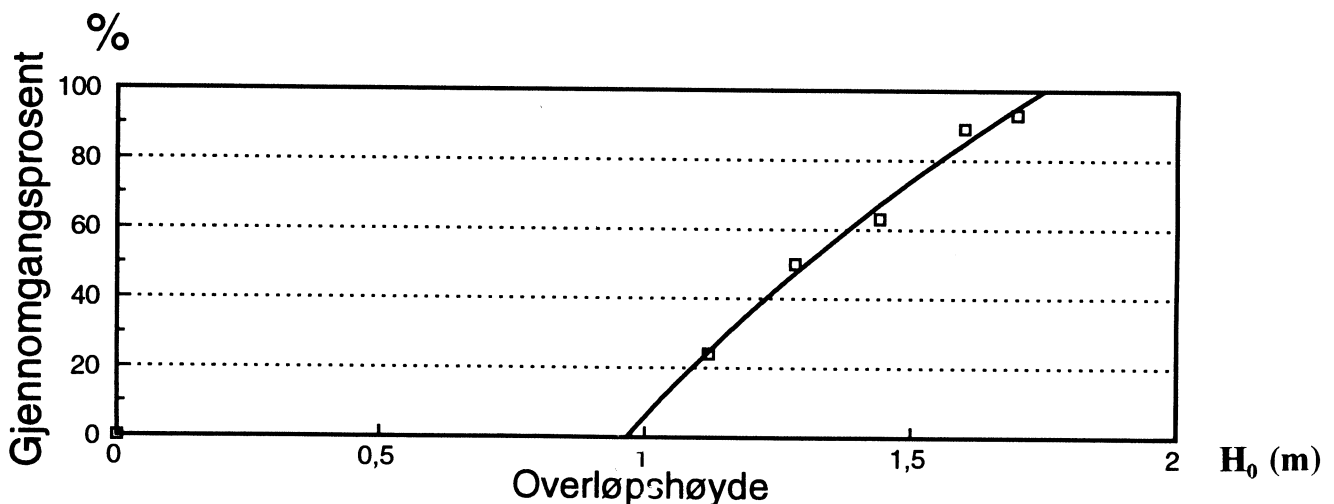
Tabell 2. Gjennomgangsprosenter ( $n_{gi}$ ) ved økende overløpshøyde.  
Trehøyde  $H_{tre} = 10.0$  m og rot diameter  $\varnothing_{rot} = 1.6$  m

Q (m <sup>3</sup> /s·m)	v (m/s)	H <sub>0</sub> (m)	n <sub>gi</sub> (%)
2.7	0.92	1.12	24
3.4	1.10	1.28	50
4.1	1.28	1.44	63
4.9	1.44	1.60	89
5.3	1.53	1.70	93

Gjennomgangsprosentene gjelder for overløp **uten** bru. Nedstrøms terrengforhold var som vist på Figur 1 med lavt undervann (høyt undervann er behandlet i avsnitt 4.5). Terskelhøyden var 2.0 m. I et senere avsnitt er det sett på tilfeller hvor det er større høydeforskjell mellom overløp og nedstrøms terreng.

Når høydeforskjellen er liten mellom overløp og terrenget nedstrøms vil trærne passere lettest når de kommer drivende med lengdeaksen parallelt overløpet. I motsatt fall når de kommer vinkelrett på overløpet har de større tendens til å sette seg fast ved at toppen eller rota blir stående mot bunnen nedstrøms. Hvis bunnen i tillegg er ujevn øker problemet.

Tallene i tabellen ovenfor er framstilt grafisk i Figur 6.



Figur 6. Gjennomgangsprosenter for 10.0 m høye trær i forhold til overløpshøyden  
Terskelhøyde oppstrøms og nedstrøms overløpet  $P = 2.0$  m

### 4.3. Pilaravstand

Tre forskjellige pilaravstander (8.0, 9.3 og 11.0 m) relatert til trehøyde 10.0 m ble behandlet. Fri høyde til bru var så stor at den ikke var bestemmende for gjennomgangsprosenten. Svært mange av trærne satte seg fast i selve overløpet/pilarene mens et fåtall la seg på tvers fra pilar til pilar som følge av at pilaravstanden var for liten.

Det ble brukt tre forskjellige trehøyder (8.3, 10.3 og 11.0 m).

Antall trær for hver forsøksserie varierte fra ca. 40 til 100 stk.

Tabell 3. Gjennomgangsprosenter ved pilaravstand  $\Delta L = 8.0$  m

Q (m <sup>3</sup> /s m)	H <sub>0</sub> (m)	H <sub>tree</sub> (m)	n <sub>1gj</sub> (%)	n <sub>2gj</sub> (%)
4.5	1.6	8.3	86	100
"	"	10.3	78	88
"	"	11.0	67	86
4.6	1.7	8.3	89	99
"	"	10.3	79	90
"	"	11.0	71	88

Tabell 4. Gjennomgangsprosenter ved pilaravstand  $\Delta L = 9.3$  m

Q (m <sup>3</sup> /s m)	H <sub>0</sub> (m)	H <sub>tree</sub> (m)	n <sub>1gj</sub> (%)	n <sub>2gj</sub> (%)
4.6	1.7	8.3	79	100
"	"	10.3	83	98
"	"	11.0	86	97
5.2	1.8	8.3	96	100
"	"	10.3	83	100
"	"	11.0	81	93

Tabell 5. Gjennomgangsprosenter ved pilaravstand  $\Delta L = 11.0$  m

Q (m <sup>3</sup> /s m)	H <sub>0</sub> (m)	H <sub>tree</sub> (m)	n <sub>1gj</sub> (%)	n <sub>2gj</sub> (%)
4.4	1.6	11.0	71	100
4.6	1.7	8.3	92	100
"	"	10.3	83	100
5.2	1.8	8.3	89	100
"	"	10.3	88	100
"	"	11.0	91	100

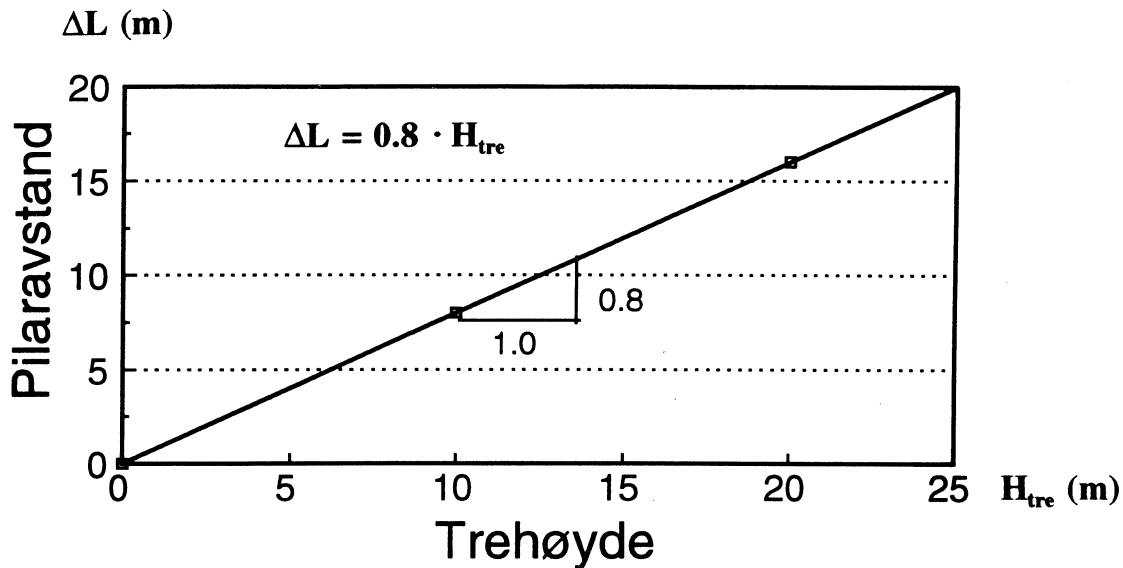
n<sub>1gj</sub> = gjennomgangsprosent når en tar med **alle** trær som satte seg fast.

n<sub>2gj</sub> = gjennomgangsprosent når en bare tar med de trær som la seg på tvers fra pilar til pilar og således var bestemmende for nødvendig pilaravstand.

Selv i tilfellet med den minste pilaravstanden og største trehøyden var gjennomgangsprosenten høy. Årsaken var at trærne viste god evne til å "rette seg inn" foran overløpet slik at treet kom med lengdeaksen vinkelrett på overløpet og dermed passerte lettere.

I Tabell 5 er pilaravstanden lik den største trehøyden som ble benyttet. Det er derfor innlysende at  $n_{2gj}$  er 100 % for alle forsøkene. Hvis en derimot sammenligner  $n_{1gj}$  med gjennomgangsprosenten i Tabell 2 for overløp **uten** pilarer ser en at det er noe dårligere gjennomgang når det er pilarer. Dette kommer av at trærnes kollisjoner med pilarene reduserer bevegelsesmengden til trærne så mye at de lettere henger seg opp på terskelen.

Ut fra resultatene bør pilaravstanden være minst 0.8 ganger trehøyden for å unngå for stor fare for tilstopping. I Figur 7 er således nødvendig pilaravstand satt opp grafisk mot trehøyden.



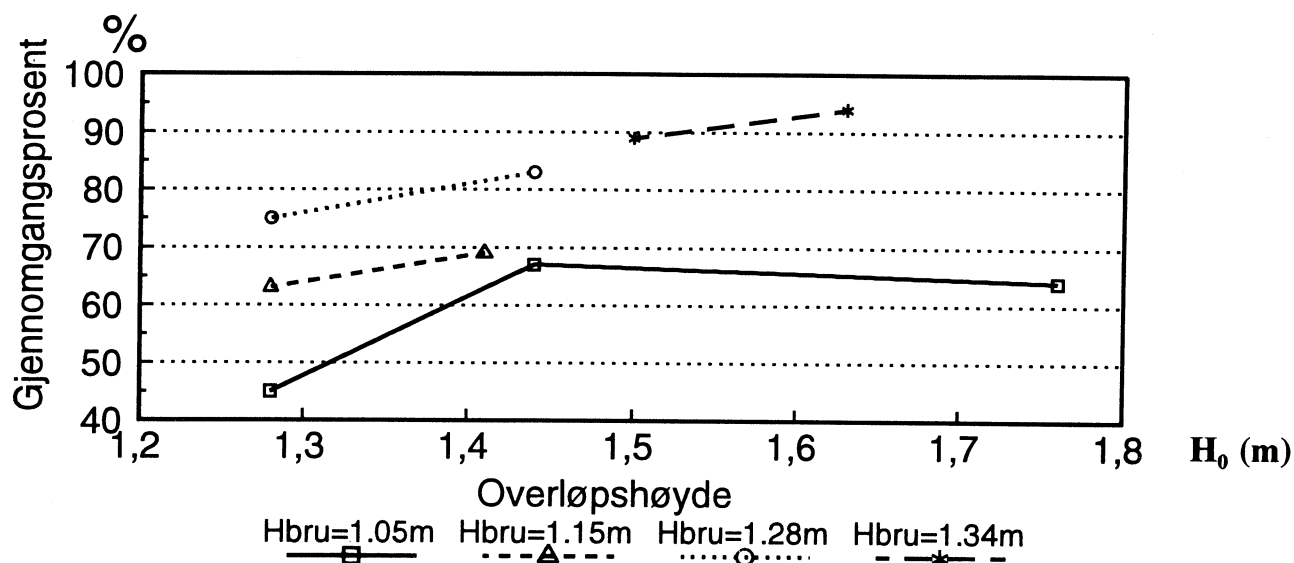
Figur 7. Nødvendig pilaravstand som funksjon av trehøyden for å unngå tilstopping (forutsatt at overløpshøyden samtidig er stor nok)

#### 4.4. Fri høyde til bru

Det ble sett på fire forskjellige bruåpninger. Relatert til trehøyde 10.0 m og rottdiameter 1.6 m var de fire åpningene: 1.05 m - 1.15m - 1.28 m - 1.34 m

Antall trær i hvert forsøk varierte fra 32 til 80 stk. Det var overløp uten pilarer i disse forsøkene.

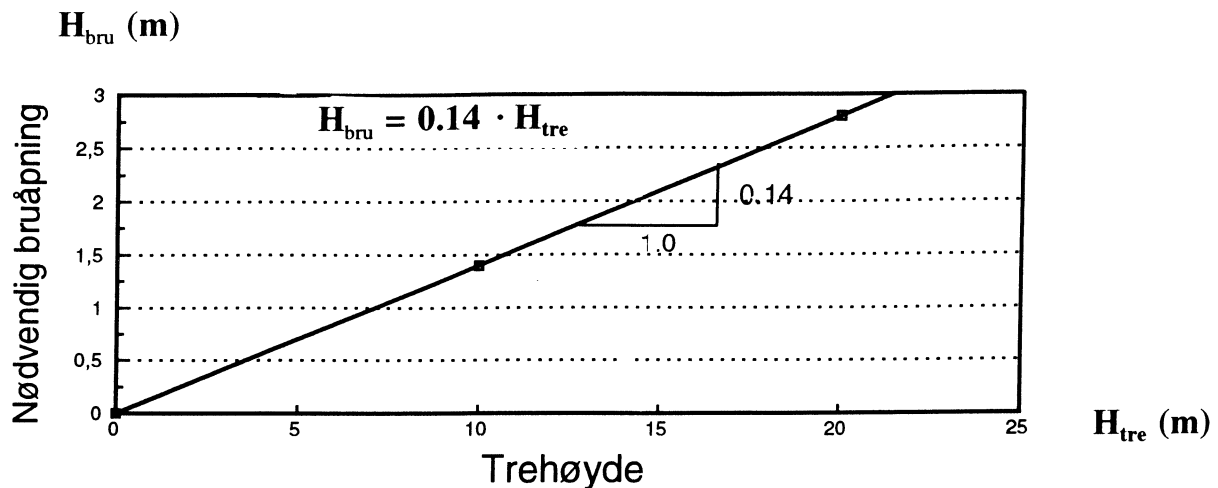
I Figur 8 nedenfor er det satt opp kurver for de fire bruåpningene som viser gjennomgangsprosjenter i forhold til overløpshøyden.



Figur 8. Gjennomgangsprosjenter ved fire forskjellige bruåpninger.

Resultatene tilsier at fri bruåpning bør være minst 0.85 ganger rottdiameteren eller 0.14 ganger trehøyden, dvs  $H_{bru} = 0.85 \cdot 0.16 \cdot H_{tre}$  (normalt er  $\varnothing_{rot} = 16\%$  av trehøyden)

I Figur 9 er nødvendig bruåpning vist som funksjon av trehøyden. I områder med mer tett-vokste trær og større rottdiameter i forhold til trehøyden enn 16 % bør det vurderes å øke nødvendig bruåpning i forhold til det Figur 9 viser.



Figur 9. Nødvendig bruåpning for å unngå tilstopping i forhold til trehøyden (gjelder "normalt" forhold rot diameter/trehøyde lik 0.16)

#### 4.5. Nedstrøms bunn- og dybdeforhold

Forholdene nedstrøms overløpet vil i relativt stor grad kunne virke inn på overløpets evne til å avlede trær og annet drivgods. Spesielt ved liten høydeforskjell mellom overløp og nedstrøms terreng i avløpskanalen er det viktig at bunnen ikke er for ujevn med feks store steiner, sprekker etc. Hvis bunnen er mest mulig jevn og glatt vil trær som kommer over overløpet lettere "gli av" og føres videre med vannstrømmen. Nedenfor er det forøvrig sett spesielt på virkningen av to forhold:

- Oppstuvning/dypere undervann
- Forskjellig nedstrøms høydeforskjell/stuphøyde

Terskelhøyden oppstrøms var  $P = 2.0$  m.

##### 4.5.1. Dypere undervann

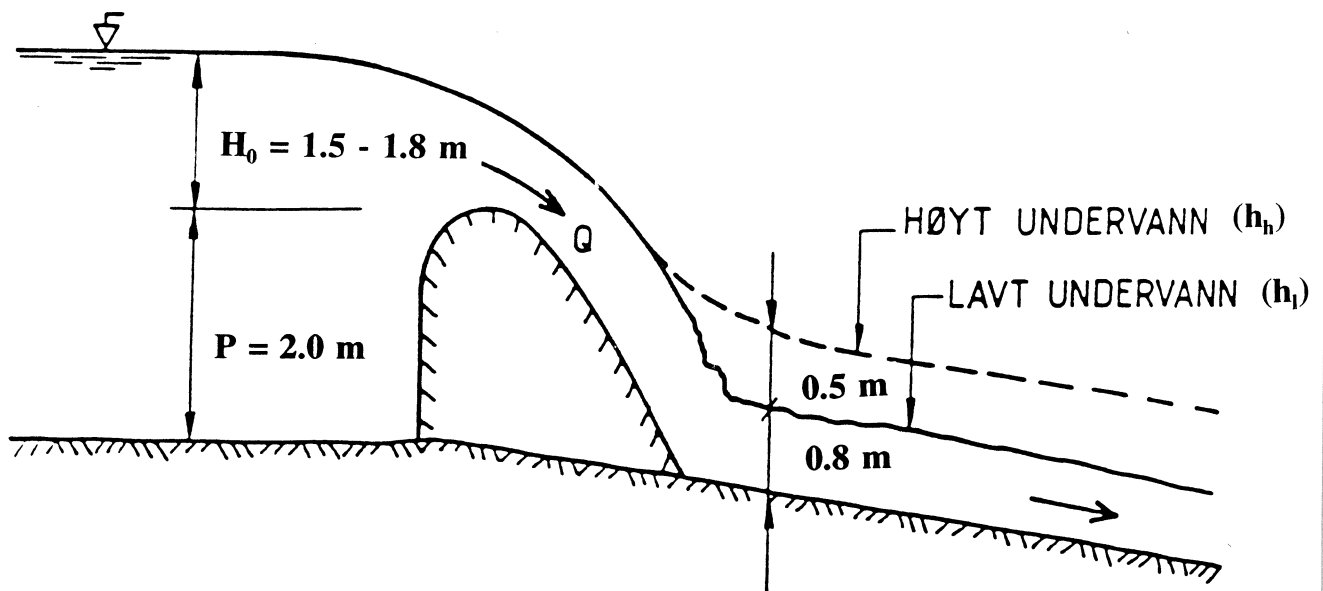
Det ble gjort forsøk med to forskjellige undervannsdybder nedstrøms overløpet:

- Liten dybde:  $h_l = 0.80$  m (lavt undervann)
- Stor dybde:  $h_h = 1.30$  m (høyt undervann)

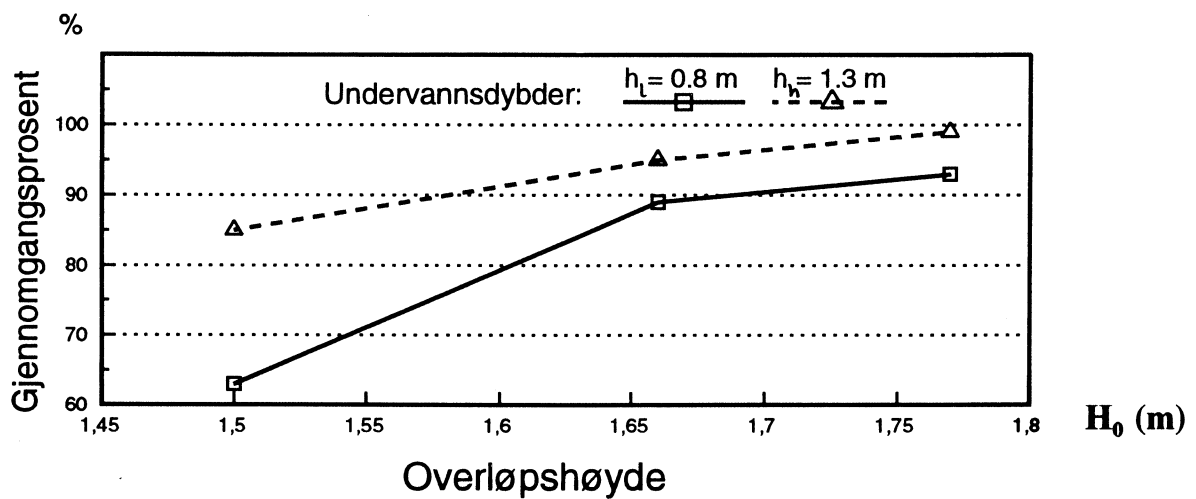
Vanndybdene er relatert til trehøyde 10.0 m.

Figur 10 på neste side viser oppstuvningen av undervannet mens Figur 11 viser virkningen på gjennomgangsprosenten i de to tilfellene. En ser tydelig at dypere undervann virker gunstig inn på avledningskapasiteten for drivende trær og annet rask.





Figur 10. Oppstuvning av undervann



Figur 11. Gjennomgangprosent for lavt ( $h_l$ ) og høyt ( $h_h$ ) undervann

**NB!** Ovenstående gjelder forutsatt at nedstrøms terreng ikke er så flatt at en får en stående valse i vannstrømmen. Den vil i så fall kunne forhindre at trærne trekkes videre av strømmen etter å ha passert overløpet.

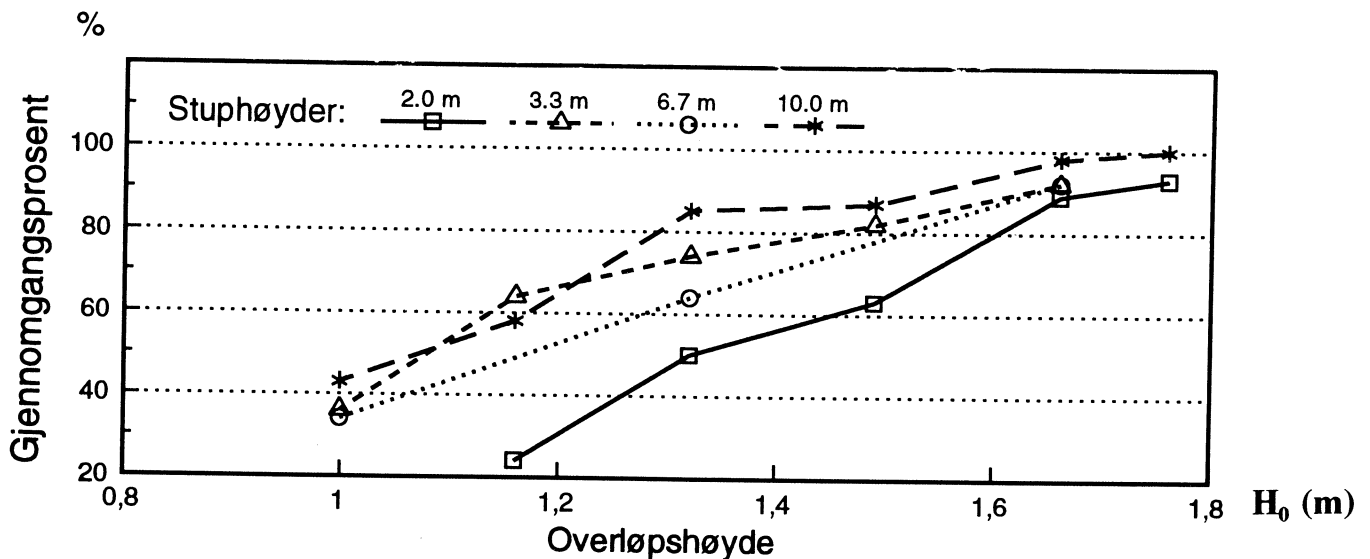
#### 4.5.2. Nedstrøms stuphøyde

Det ble sett på forholdene for overløp med og uten bru ved forskjellige stuphøyder. I alt 4 nedstrøms høydeforskjeller mellom overløp og terrengbunn ble sett på. De fire stuphøydene var:  $H_s = 2.0 - 3.3 - 6.7 - 10.0$  m

##### 4.5.2.1. Overløp uten bru

Overløpslengden var  $\Delta L = 33.5$  m. Figur 12 viser gjennomgangsprosjenter i forhold til overløpshøyden for de fire stuphøydene. Alle mål var relatert til trehøyde 10.0 m.

Det var en klar tendens at for overløp **uten** bru ble faren for tilstopping mindre med økende nedstrøms høydeforskjell. Det kom av at trærne tippet lettere utfor stupet og forsvant unna når stuphøyden økte.

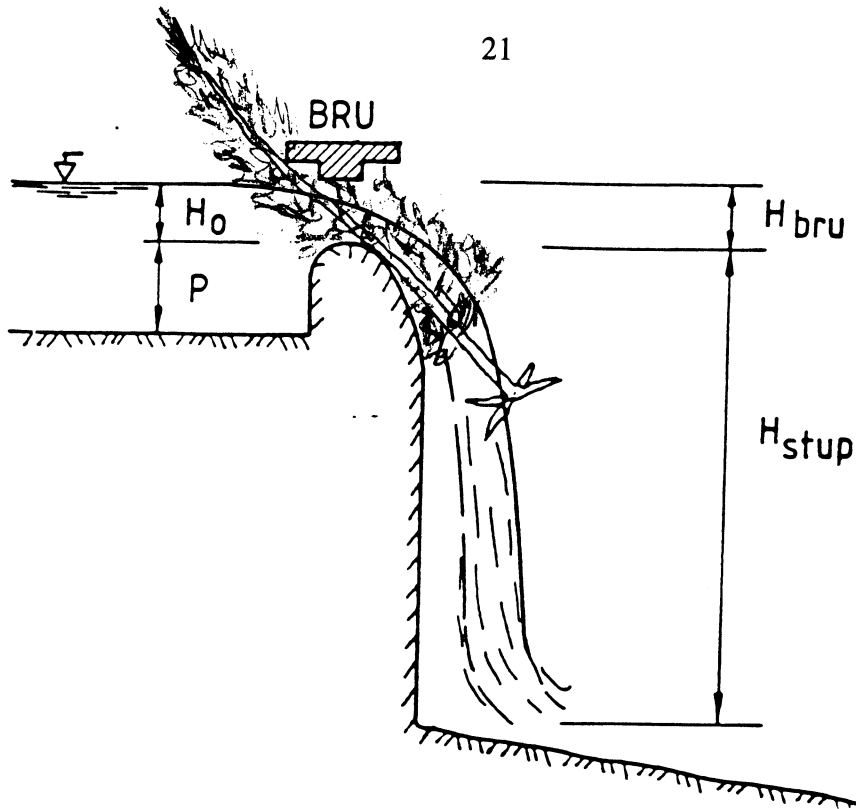


Figur 12. Gjennomgangsprosjenter for overløp uten bru og forskjellig nedstrøms stuphøyde. Trehøyde 10.0 m.

##### 4.5.2.2. Overløp med bru

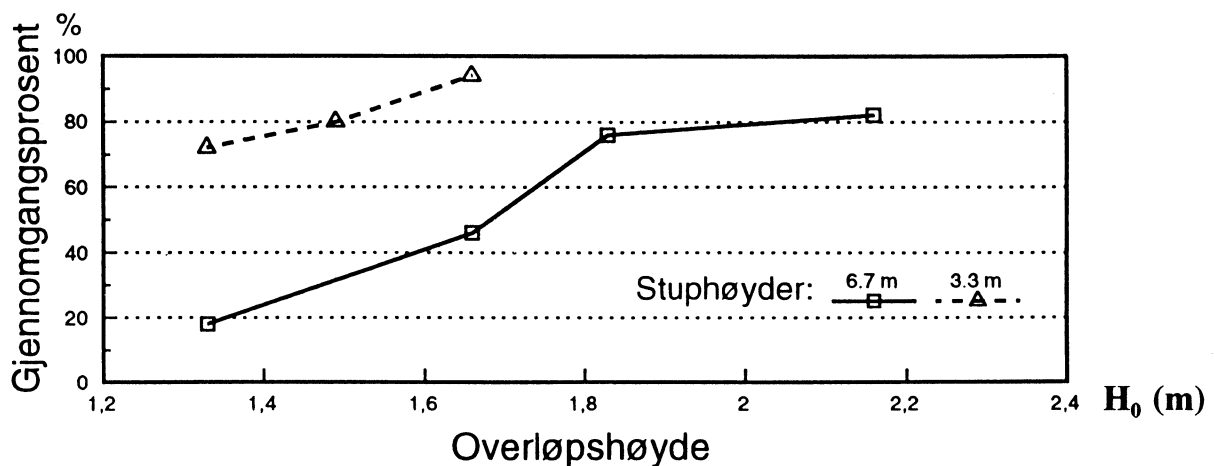
Det ble deretter sett på tilfellet hvor en har overløp **med** bru. Det viste seg at situasjonen ble snudd helt om med hensyn til faren for tilstopping i forhold til tilfellet når det ikke var bru over overløpet. Faren for tilstopping **økte** nå kraftig med økende stuphøyde. Forklaringen er at når en har overløp med bru og et tre kommer drivende vil det i de aller fleste tilfeller låses effektivt fast mot brua på den ene enden og mot overløpet på den andre. Effekten økte når stuphøyden økte. Situasjonen med et fastlåst tre er vist i Figur 13 på neste side.

Alle mål var relatert til trehøyde 10.0 m. Fri høyde mellom bru og overløp ble da 1.33 m.

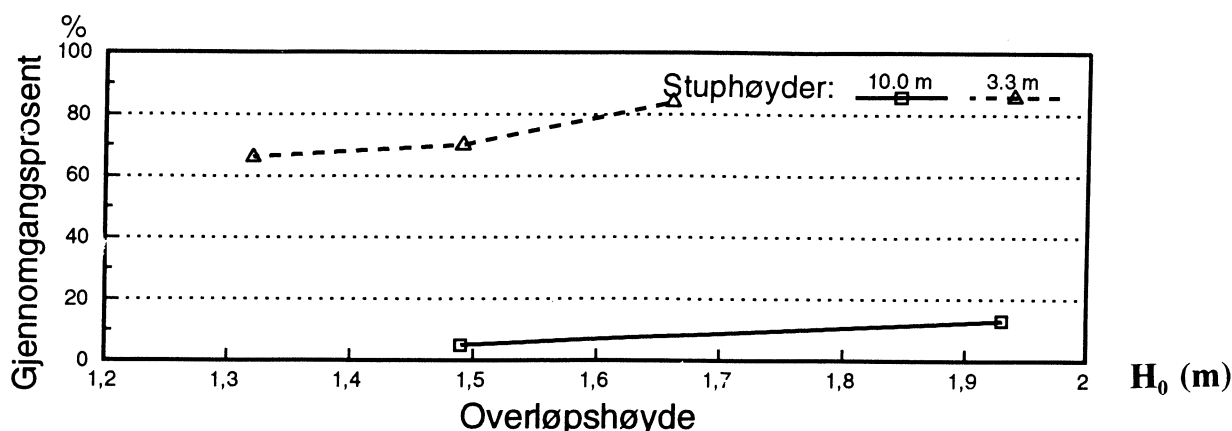


Figur 13. Fastlåst tre i tilfellet overløp med bru og stup.

Figur 14 viser resultater for overløp med bru og så stor pilaravstand (33.5 m) at den ikke virket inn på gjennomgangsprosenten. Stuphøydene var 3.3 og 6.7 m. I Figur 15 er deretter vist tilsvarende for overløp med bru og pilarer i avstand  $\Delta L = 9.0$  m. Stuphøydene var nå 3.3 og 10.0 m. Det går klart fram av figurene at gjennomgangsprosenten ble redusert kraftig når stuphøyden nedstrøms overløpet økte og det samtidig var bru. Reduksjonen var også størst når forskjellen i stuphøyde var størst.



Figur 14. Gjennomgangsprosent for overløp med bru.  
Stuphøyder  $H_s = 3.3$  og  $6.7$  m.



Figur 15. Gjennomgangsprosenter for overløp med bru og pilarer  $\Delta L = 9.0$  m. Stuphøyder  $H_s = 3.3$  og  $10.0$  m.

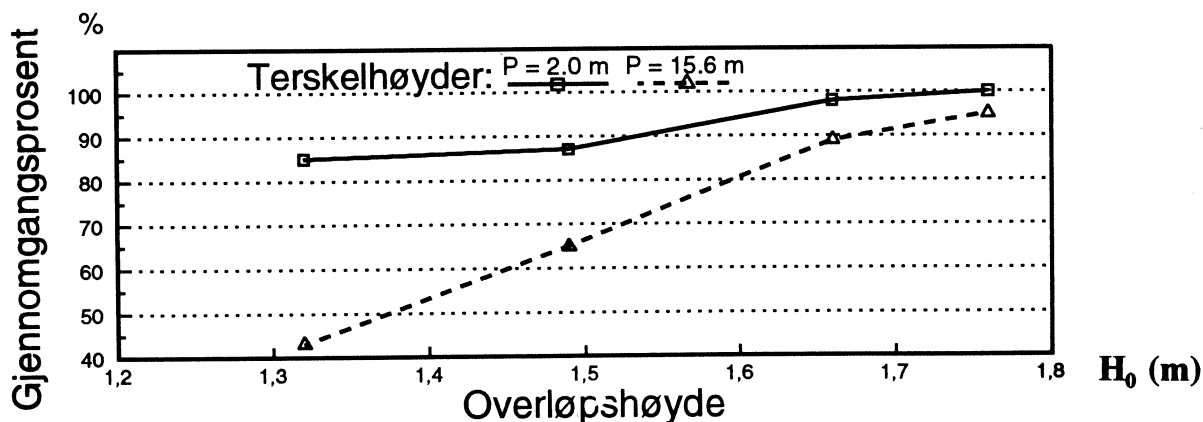
#### 4.6. Vanndybde foran overløpet

Det ble sett på hvordan forskjellig vannhastighet foran overløpet virket inn på faren for tilstopping. Det ble gjort ved å kjøre samme forsøk i to modeller med forskjellig oppstrøms terskelhøyde på overløpet. De to terskelhøydene var:

$$P_1 = 2.0 \text{ m} \quad \text{og} \quad P_2 = 15.6 \text{ m}$$

Begge forsøksseriene ble kjørt med nedstrøms stuphøyde  $10.0$  m. Målene var relatert til trehøyde  $10.0$  m.

Figur 16 viser resultatene for de to terskelhøydene. Forskjellen i gjennomgangsprosent er stor for de to minste overløpshøydene. Forsøkene viste at dypere vannivå foran overløpet reduserer vannhastigheten og dermed trærnes bevegelsesmengde så mye at det øker faren for tilstopping.



Figur 16. Gjennomgangsprosenter for forskjellig oppstrøms vanndybde/tilløpshastighet.

## 5. TILSTOPPING AV VASER (Trinn 2)

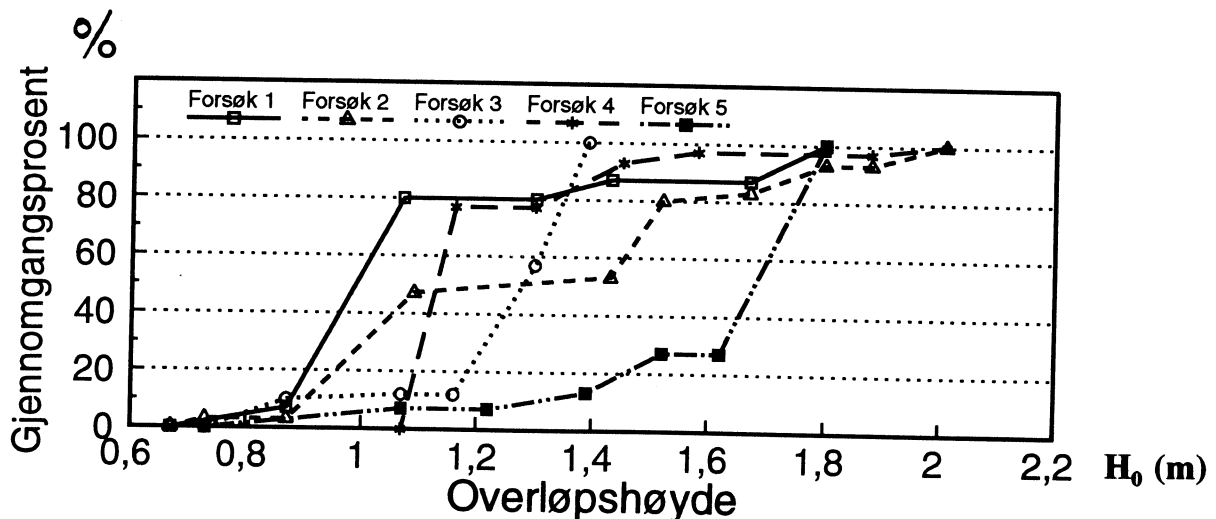
### 5.1. Generelt

Dette hovedkapittelet beskriver forsøk med vaser av grantrær for å bestemme nødvendig overløpshøyde som funksjon av vasetykkelsen. Tilsvarende som for tilfellet med enkeltrær ble gjennomgangsprosenten ( $n_{gj}$ ) for et visst antall forsøk ( $n$ ) bestemt. Det ble sett på overløp uten og med pilarer.

### 5.2. Vaser av grantrær lagt ut foran overløpet

#### 5.2.1. Overløp uten pilarer

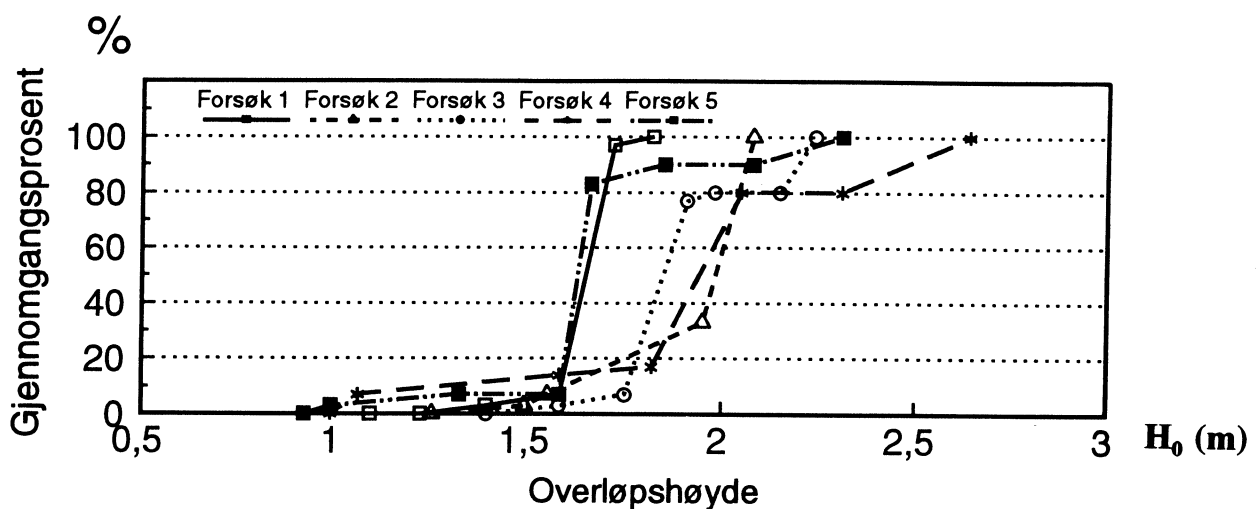
Det ble kjørt 5 forsøk med vaser dannet av 30 stk løse grantrær lagt foran overløpet ved lav vannføring. Trehøyden varierte og var relatert til prototypmål fra 8.3 til 10.0 m og terskelhøyden til overløpet var 2.7 m. Rotdiameter 1.6 m. Vasestørrelsen var ca. 25 · 25 m i forsøk 1 og 2, mens den i forsøk 3, 4 og 5 var ca. 15 · 15 m. Forsøkene ble utført ved at en lot vannstanden stige i sprang på 0.10 til 0.20 m. For hver vannstandsstigning ble det registrert hvor mange av de totalt 30 stk trærne en startet med som hadde passert overløpet. Figur 17 viser grafisk gjennomgangsprosentene i forhold til overløpshøyden. Det framgår at nødvendig overløpshøyde ligger i området 1.3 til 1.7 m for at minst 80 % av trærne skal passere overløpet. Det var typisk at noen få trær lenge holdt igjen vaser. Når disse så plutselig løsnet ettersom vannstanden steg dro de med seg en stor del av vaser. Dette er forklaringen til de bratte sprangene i kurvene.



Figur 17. Gjennomgangsprosent for vaser av løse grantrær. Overløp uten pilarer.

### 5.2.2. Overløp med pilarer

De samme forsøksseriene som ble beskrevet i avsnitt 5.2.1. ble også kjørt i tilfelle hvor en hadde overløp **med** pilarer. Pilaravstanden tilsvarte 11.7 m relatert til 10.0 m høye trær. Fri høyde til brua var 3.4 m og dermed så stor at den ikke virket inn på gjennomgangsprosenten. Det ble kjørt 5 forsøk med 15 · 15 m vaser av 30 stk trær. Forsøkene viste at nødvendig overløpshøyde ble noe større enn for overløp uten pilarer. Nødvendig overløpshøyde lå i området 1.6 til 2.0 m for at minst 80 % av vasens trær skulle passere.



Figur 18. Gjennomgangsprosenter for vaser av løse grantrær. Overløp med pilarer.

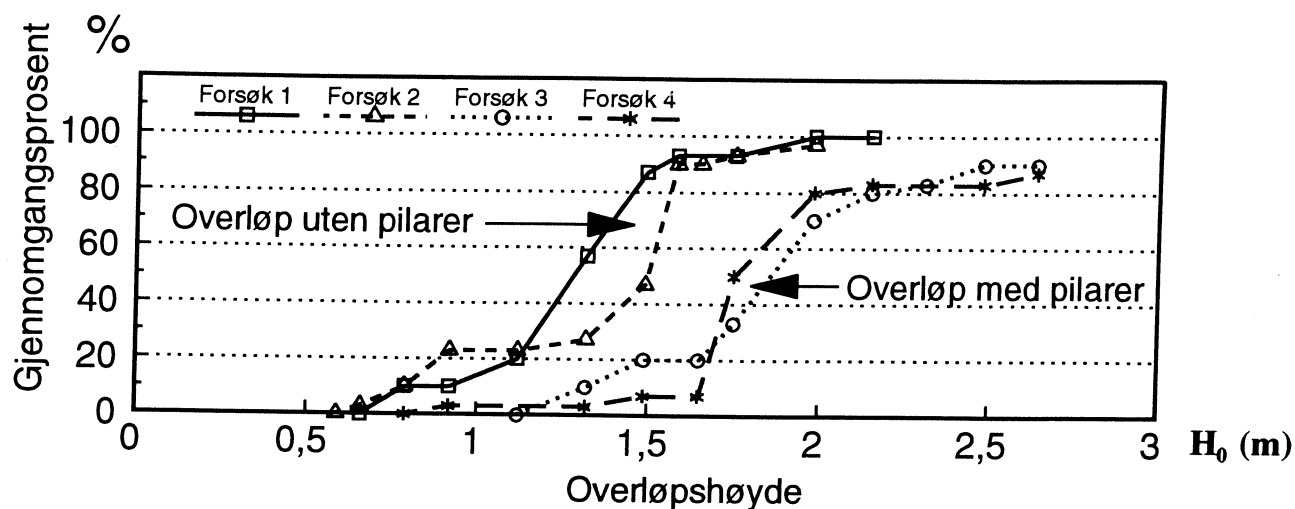
### 5.3. Vaser dannet av drivende grantrær

Grantrærne ble nå sluppet ut et stykke oppstrøms overløpet og kom drivende ned mot overløpet på lav vannføring hvor de samlet seg i en vase. Vasene ble derfor noe "løsere" pakket og ikke så mye infiltrert som vasene forsøkt i avsnitt 5.2. Forsøksbetingelsene forøvrig var som i avsnitt 5.2. Det viste seg at nødvendig overløpshøyde ikke ble særlig forskjellig i denne siste forsøksserien.

Derimot var det større forskjell mellom nødvendig overløpshøyde for overløp med og uten pilarer. Nødvendig overløpshøyde ble :

- Overløp uten pilarer:  $H_{0\text{ nødvendig}} = 1.5$  til  $1.6$  m
- Overløp med pilarer:  $H_{0\text{ nødvendig}} = 1.9$  til  $2.0$  m

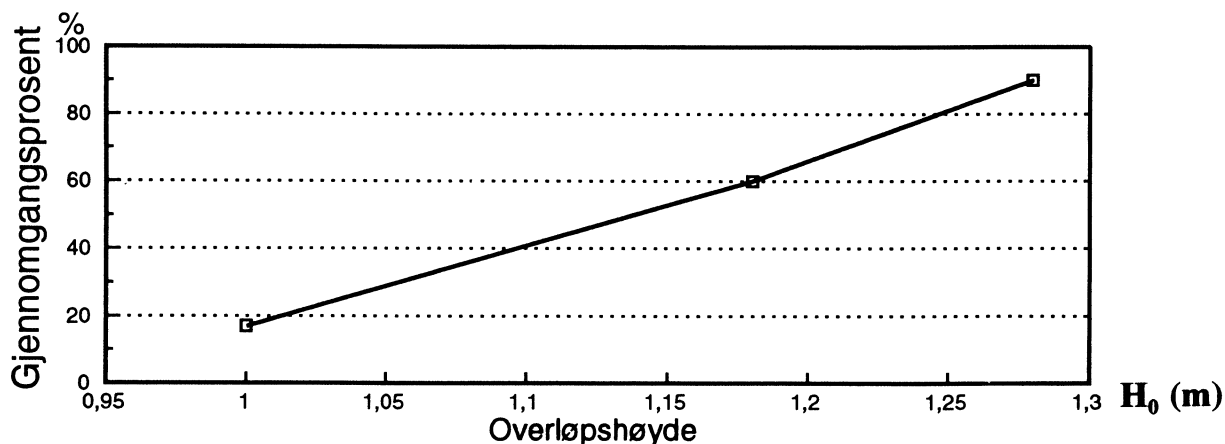
Figur 19 på neste side viser resultatene fra forsøk med overløp både med og uten pilarer.



Figur 19. Gjennomgangsprosenter for vaser dannet av drivende grantrær. Overløp med og uten pilarer.

#### 5.4. Tette vaser

Det ble også kjørt noen forsøk med tettere og mer kompakte vaser. Nødvendig overløpshøyde for disse ble bestemt i forhold til vasetykkelsen 1.0 m. Pilaravstanden var 11.7 m og fri åpning til bru var 3.4 m. Forsøkene ble utført tilsvarende som forsøkene med enkeltrær i Trinn 1, dvs en lot vasene drive ned mot overløpet og registrerte hvor mange som passerte ( $n_{gi}$ ) i forhold til det totale antall ( $n$ ). Antall vaser i hvert forsøk varierte fra 6 til 20 stk. Vasestørrelsen var ca  $10 \cdot 7$  m. Forsøkene viste at overløpshøyden måtte bli 1.3 m for at minst 90 % av vasene med tykkelse 1.0 m skulle passere. Figur 20 viser gjennomgangsprosenter i forhold til overløpshøyden.



Figur 20. Gjennomgangsprosenter for tette vaser med tykkelse 1.0 m.



## 6. FORANKRINGSKREFTER PÅ VASER (Trinn 2)

### 6.1. Generelt

I kapittel 4 og 5 ble det sett på retningslinjer for at dammers overløp skal kunne avlede drivende enkeltrær og vaser av trær, kvist osv. På eksisterende overløp er det imidlertid ofte for små åpninger, dvs pilaravstand, fri høyde mellom overløp og bru osv til at drivgodset kan slippe gjennom. Resultatet vil da bli tilstopping, mindre strømmingstverrsnitt og vannstandstigning i magasinet ovenfor. I verste fall kan det gå ut over dammens sikkerhet.

En måte å hindre slik tilstopping på er å stoppe drivgodset **før** det kommer fram til selve overløpet. Det kan gjøres med lenser, påler nedslått i bunnen etc. Slike konstruksjoner vil nødvendigvis bli utsatt for krefter fra vasene og drivgodset de skal stoppe.

Forankringskreftene vil kunne bli forårsaket av tre forskjellige fysiske forhold:

- Vannstrøm (NHL har utført modellforsøk som er beskrevet i avsnitt 6.3)
- Vind (behandlet teoretisk i avsnitt 6.4)
- Bølger (vurdert størrelsesorden av i avsnitt 6.5)

I avsnitt 6.6 er det sett på samlet virkning av de tre forholdene gjennom et eksempel.

Avsnitt 6.7 beskriver problemer med flytetorv.

## 6.2. Variable faktorer.

Det er en rekke faktorer som vil ha større eller mindre betydning for den forankringskraft en må regne med for å stoppe og hindre en drivende vase i å fortsette videre. For en del av faktorene er det innlysende at de har betydning, mens det for andre er mer usikkert. Ved hjelp av statistisk behandling av forsøksresultatene kan en si noe mer om de enkelte faktors betydning. I Tabell 6 nedenfor er de mest sentrale faktorer og deres kvalitative betydning satt opp. Faktorene gjelder i utgangspunktet for vannstrømmens bidrag til forankringskraften men kan også overføres til vindkrefter og delvis bølger også.

Tabell 6. Forsøksvariable og deres betydning

Faktor nr	Faktor	Betydning
1	Vannføring ( $m^3/s \cdot m$ )	Meget stor
2	Vannhastighet (m/s)	Meget stor
3	Vasens areal ( $m^2$ )	Relativt liten
4	Vasens bredde (m)	Stor
5	Vasens neddykkede tykkelse (m)	Stor
6	Vasens plassering i forhold til overløp etc	Liten
7	Vasens tetthet og materialoppbygging	Relativt stor
8	Vanndybden der vasen forankres (m)	Liten

Nedenfor er gitt noen kommentarer til de enkelte variable faktorene i Tabell 6.

### **Vannføring og vannhastighet.**

Det er innlysende at både spesifikk vannføring og vannhastighet har meget stor betydning for den forankringskraft som vil opptre. Det går også direkte fram av den **generelle beregningsformelen** for beregning av kraften som er satt opp i avsnitt 6.3. I formelen inngår vannhastigheten i annen potens. Vannhastigheten er videre direkte proporsjonal med vannføringen. Det samme resonnementet kan overføres til vindhastighetens betydning for kraften på den delen av vasen som stikker over vannflaten.

Ved en nærmere bestemt vannhastighet i modellen ( $v_g$ ) "dukket" vasene ned i vannmassene når hastigheten økte forbi denne grensevannhastigheten. Kurvene for forankringskreftene ble brattere, dvs kraften økte forholdsvis mer etter at grensehastigheten var passert. En kan ikke med sikkerhet si at det samme skjer i prototyp/virkeligheten også, eller ved hvilken vannhastighet det skjer.

**Vasens areal.**

Når en vase av trær, kvist og annet rask holdes igjen i vannstrømmen vil det virke en skjærkraft mellom vasen og vatnet som strømmer forbi. Skjærkraften vil avhenge av vasens ruhet dvs hvor mye utstikkende greiner, kvist osv en har i hvert tilfelle. Forsøkene viste at vasens areal har relativt liten betydning for forankringskraften forutsatt at vasebredden er den samme. Det ble gjort forsøk med samme vasebredde men forskjellig areal for å fastslå arealets betydning for forankringskraften i forhold til bredden.

**Vasens bredde og neddykkede tykkelse.**

Når vannstrøm, vind og bølger treffer en fastholdt vase vil de forårsake en skyvekraft på vasen. Skyvekraften vil være direkte proporsjonal med angrepsflaten, dvs vasens bredde og tykkelse. Det er kjørt forsøk med samme vaseareal men forskjellige bredder for å fastslå breddens/tykkelsens betydning for forankringskraften i forhold til vasearealet.

**Vasens plassering i forhold til overløp etc.**

En vase nær overløpet påvirkes av noe større krefter enn en vase lenger oppstrøms. Som en praktisk håndregel kan en si at vaser ikke bør plasseres nærmere overløpet enn 5 ganger overløpshøyden, dvs i avstand  $5 \cdot H_0$ , ellers vil forankringskraften bli større.

**Vasens tetthet og materialoppbygging.**

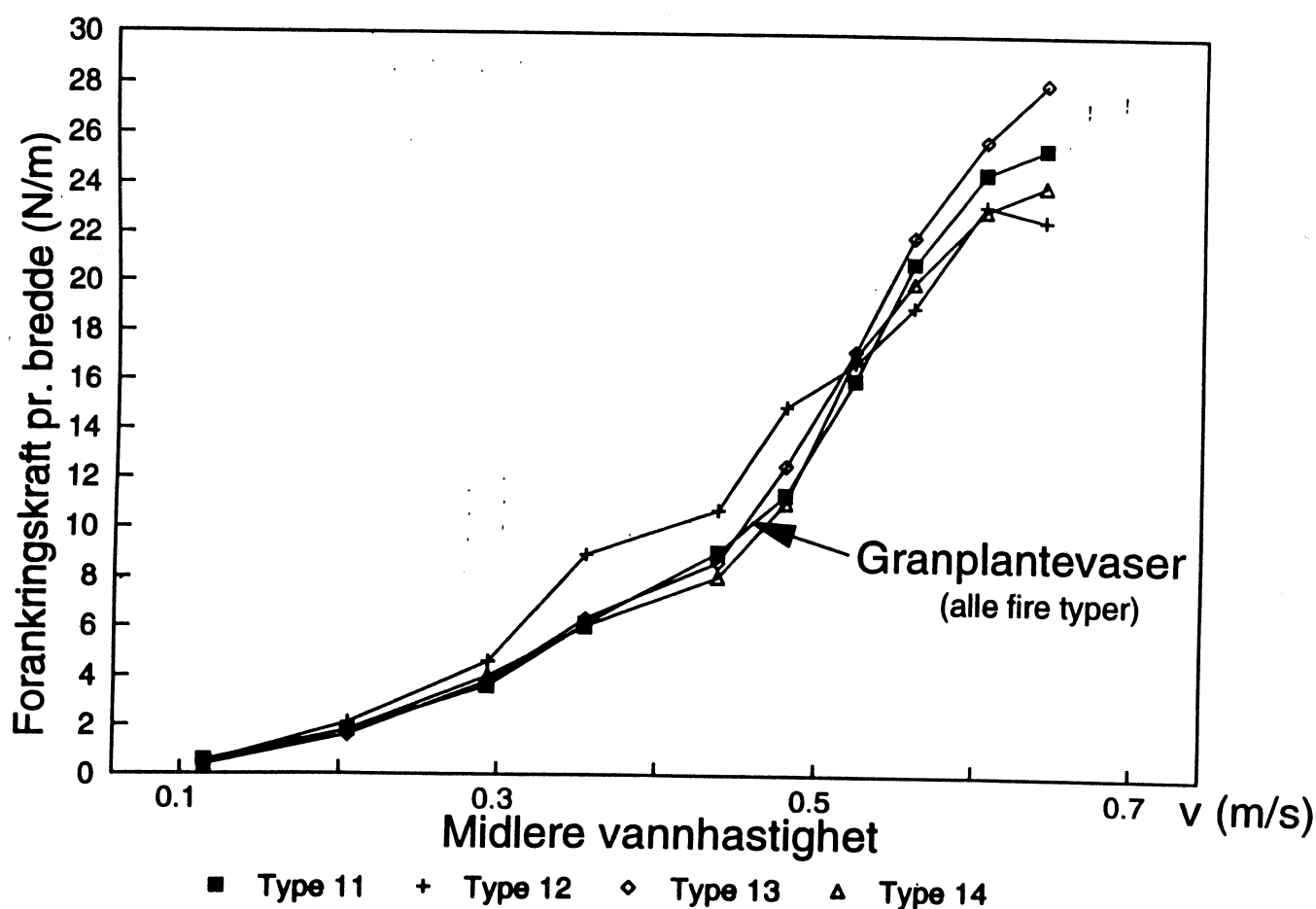
Materialene i vaser kan være trær, røtter, kvist, buskas, torv, jord, is osv med varierende tetthet i dobbel forstand. I utgangspunktet antas vasene å ha en tetthet som er nær vatnets tetthet slik at de flyter tungt/nesten neddykket. En glissen vase av relativt løst pakke trær vil slippe vannstrømmen/vinden lettere gjennom når vasen fastholdes sammenlignet med en vase oppblandet med trær, gras, jord osv.

**Vanndybden.**

Varierende vanndybde under vasen der den fastholdes betyr lite så fremt dybden ikke blir mindre enn vasetykkelsen. Strømningstverrsnittet blir da redusert så mye at det vil virke inn. Denne rapporten forutsetter at vanndybden under vasen er minst like stor som neddykket vasetykkelse.

### 6.3. Vannstrømmens bidrag til forankringskraften

Det ble kjørt en rekke forsøk med forskjellige typer vaser av strå og granplanter for å bestemme den forankringskraft vasene må holdes igjen med i vannstrømmen. I Figur 21 er vist eksempel på de forankringskrefter som ble målt for fire forskjellige vaser av granplanter.



Figur 21. Eksempel på målte forankringskrefter i modellforsøkene.

Forsøkene resulterte i at en kom fram til en generell formel for beregning av forankringskraften. Kraften er en funksjon av vasens dimensjoner (bredde, lengde og tykkelse) samt midlere vannhastighet. I denne rapporten går en ikke inn på de enkelte resultater fra modellforsøkene men viser i stedet noen eksempler på bruk av formelen på noen prototyp-tilfeller. De av leserne som ønsker å gå mer detaljert inn i forsøksresultatene henvises til delrapporten fra Trinn 2.

Den generelle beregningsformelen for forankringskraften mot vannstrøm ble ut fra **gjennomsnittsverdier** fra forsøkene bestemt til:

$$F_v = C_d \cdot b \cdot (30 \cdot t + 1) \cdot \rho \cdot v^2 / 2g \quad (\text{kg}) \quad (1)$$

eller hvis kraftenheten er Newton:

$$F_v = C_d \cdot b \cdot (30 \cdot t + 1) \cdot \rho \cdot v^2 / 2 \quad (\text{N}) \quad (2)$$

De enkelte symboler er definert i symbollista foran i rapporten.

Dragkoeffisienten  $C_d$  er avhengig av vannhastigheten:

$$C_d = 0.06 \quad \text{for } v \leq v_g \quad (\text{grensevannhastigheten})$$

$$C_d = 0.08 \quad \text{for } v \approx \geq v_g$$

$$C_d = 0.10 \quad \text{for } v \geq v_g$$

Grensevannhastigheten er definert som den hastigheten hvor vasene i modellforsøkene "dukket" ned i vannmassene ved økende vannhastighet. Grensevannhastigheten i modellen med vasebredde på tvers av strømrretningen lik  $b = 0.5$  m var  $v_{gm} = 0.3$  m/s. Tilsvarende grensevannhastighet i prototyp med målestokk  $M = 1$  :  $\lambda$  er:  $v_{gp} = v_{gm} \cdot \lambda^{1/2}$  (m/s). (Kfr. avsnitt 3.2.) Grunnen til at dragkoeffisienten øker når vannhastigheten passerer grensevannhastigheten er således at kurvene for forankringskraften viste en tydelig knekk ved denne hastigheten, dvs når vasene "dukket" ned i vannstrømmen. Fenomenet forklares ved at vasen blir påvirket av skjærkrefter fra vannmassene som strømmer forbi både på over- og undersiden etter at den har dukket ned.

Forsøkene viste at det er vasens bredde på tvers av strømrretningen og neddykket vasetykkelse som er avgjørende for forankringskraftens størrelse. Vasens areal betyr mindre. Den generelle formelen kan spaltes i to ledd, et for skyvekraften mot vasens frontside og et ledd for skjærkraften mellom vannmassene og vasens areal i horisontalplanet. Dette er nærmere beskrevet i delrapport for Trinn 2.

Dragkoeffisientene som er anbefalt brukt ovenfor gir forankringskrefter noe på "den sikre siden" i forhold til det modellforsøkene viste. Det er anbefalt brukt en dragkoeffisient lik 0.08 for vannhastigheter like over grensevannhastigheten. Dette er gjort for at kurvene skal få et jevnt forløp etter "knekkene" ved grensevannhastigheten.

### Eksempler på prototyptilfeller.

Nedenfor er vist eksempler på praktisk bruk av formelen i noen aktuelle situasjoner i virkeligheten.

Forankringskraften er beregnet i hht formel (1) for tre vase størrelser som er:

$$b \cdot l \cdot t = 10 \cdot 20 \cdot 1 \text{ m} - 10 \cdot 10 \cdot 1 \text{ m} - 5 \cdot 10 \cdot 1 \text{ m}$$

Vi går ut fra vasebredde  $b = 10.0$  m og finner lengdemålestokken for denne i forhold til standardvasen brukt i modellforsøkene som var  $b = 0.5$  m.

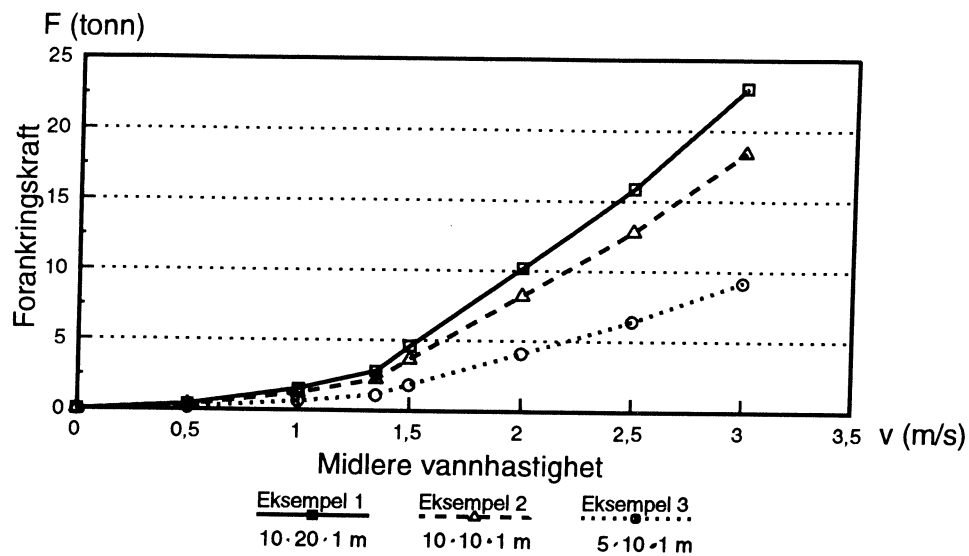
Målestokken blir:  $\lambda = 10.0 / 0.5 = 20$

Grensevannhastigheten i modell var 0.3 m/s. Tilsvarende grensevannhastighet i virkeligheten i dette tilfellet blir:  $v_g = 0.3 \cdot \sqrt{20} \approx 1.35$  m/s. Forankringskraften beregnes dermed med de tre forskjellige dragkoeffisientene. Tabell 7 viser kreftene for de tre vasene for vannhastigheter fra 0 til 3.0 m/s.

Tabell 7. Forankringskraft (tonn) for 3 forskjellige prototypvaser som funksjon av vannhastighet. Vasestørrelse  $b \cdot l \cdot t$  ( m )

$v$ (m/s)	$C_d$ (-)	10.0 · 20.0 · 1.0 m (eksempel 1)	10.0 · 10.0 · 1.0 m (eksempel 2)	5.0 · 10.0 · 1.0 m (eksempel 3)
0.5	0.06	0.38	0.31	0.15
1.0	0.06	1.53	1.22	0.62
1.35	0.06	2.79	2.23	1.12
1.5	0.08	4.59	3.67	1.83
2.0	0.10	10.2	8.2	4.1
2.5	0.10	15.9	12.8	6.4
3.0	0.10	23.0	18.4	9.2

Figur 22 på neste side viser de samme forankringskrefter grafisk. En legger merke til kurvenes knekk ved grensevannhastigheten. Videre går det fram hvis en sammenligner de tre vase størrelsene hvilken betydning bredde og tykkelse har i forhold til vasearealet.



Figur 22. Forankringskraft for 3 vasestørrelser.  
(verdiene i Tabell 7 vist grafisk)

Av figuren framgår det at:

- Halvering av vasearealet fra eksempel 1 til 2, men samme bredde  $b = 10$  m på tvers av strømretningen, gir liten reduksjon av forankringskraften.
- Halvering av bredden fra 10 til 5 m (eksempel 2  $\rightarrow$  3) gir halvering av forankringskraften.

I elver kan en få vannhastigheter lik 3.0 m/s og enda større. Det blir derfor fort store forankringskrefter i elver med sterk strøm i flomsituasjoner. I dammer derimot vil vannhastighetene være langt mindre selv ved storflom.

-----

Hittil er det bare sett på den forankringskraften en må regne med som følge av strømkreftene fra vannmassene som virker på en vase når den skal holdes igjen. Vind- og bølgekrefter som virker i samme retning som strømkreftene vil gi et ekstra bidrag til forankringskraften. Størrelsen av dette bidraget vil blant annet avhenge av vindhastigheten og bølgehøyden. I de to neste avsnittene er sett på vind og bølgers bidrag til forankringskraften.

#### **6.4. Vindens bidrag til forankringskraften.**

Tilsvarende som for forankringskraften mot vannstrøm kan forankringskraften som følge av vind spaltes opp i en skyvekraft og en skjærkraft. Nå er det den oppstikkende del av vasen over vannflaten som er avgjørende. I delrapporten for Trinn 2 er dette nærmere omtalt. Den totale forankringskraften som følge av vind er gitt ved:

$$F_u = b \cdot (h + C_d \cdot l) \cdot \rho_L \cdot u^2 / 2g \quad (\text{kg}) \quad (3)$$

Formelen (3) er på samme form som den tilsvarende formel for forankringskraft forårsaket av vannstrøm alene. Nedenfor er formel (3) benyttet på en av prototypvasene i Tabell 7.

#### **Eksempler på vindens bidrag til forankringskraften.**

Vi ser på en av vasene (eksempel 1) i Tabell 7 med mål:  $b \cdot l \cdot t = 10 \cdot 20 \cdot 1.0$  m

$t = 1.0$  m er den del av vasen som er neddykket. Ved vannhastighet 1.0 m/s var forankringskraften som følge av vannstrøm:  $F_v = 1.530$  kg

En antar at vasen har en gjennomsnittlig oppstikkende høyde over vannoverflaten:  $h = 0.5$  m, mens total tykkelse er:  $t + h = 1.0 + 0.5$  m = 1.5 m.

Videre benyttes:

$$\begin{aligned} C_d &= 0.0014 \cdot 2g = 0.028 && (\text{dragkoeffisient}) \\ \rho_L &= 1.3 \text{ kg/m}^3 && (\text{tetthet luft}) \\ u &= 20 \text{ m/s} && (\text{vindhastighet}) \end{aligned}$$

Vindens bidrag til forankringskraften i hht formel (3) blir:  $F_u = 282$  kg

Summen av vannstrøm- og vindkrefter blir:  $F = F_v + F_u = 1.530 + 282 = 1.812$  kg hvorav bidraget fra vinden utgjør ca. 15 - 16 %.

Med vindhastighet  $u = 30$  m/s får en tilsvarende:  $F_u = 632$  kg

Det utgjør ca. 29 % av samlet forankringskraft fra vannstrøm og vind.

Eksemplene viser at selv med så liten vannhastighet som 1.0 m/s og så stor vindhastighet som 30 m/s utgjør vannstrømmen den dominerende del av total forankringskraft.

I magasiner derimot, hvor det er ubetydelige vannhastigheter, vil vind- og bølgekrefter kunne bli dominerende.



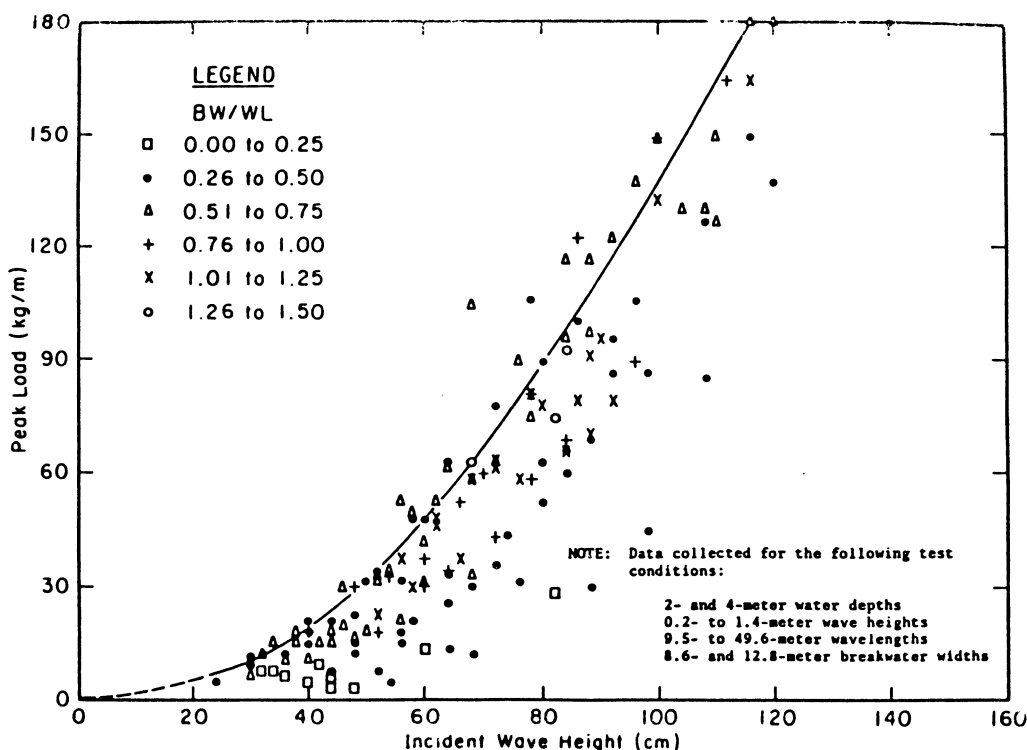
### 6.5. Bølgers bidrag til forankringskraften

I tillegg til vannstrøm og vind vil også bølger gi bidrag til den samlede forankringskraften. Normal bølgehøyde i de fleste aktuelle tilfeller med utlegging av lenser etc i elver vil være under 0.5 m. I magasiner vil bølgehøyden kunne bli fra 0.5 til 1.0 m, i de største magasiner muligens enda større. Til praktisk bruk snakker en altså om bølgehøyder  $H \leq 0.5$  m. Nedenfor er det sett overslagsmessig hva det kan bety av krefter på en fastholdt vase. Som referanse er brukt en amerikansk rapport "Technical Paper No. 78-3" utarbeidet av U.S.ARMY Corps of Engineers vedr. bølgedempere av bildekk. Fra denne rapporten er det tatt ut maksimalverdier for forankringskraften på bølgedemperen som så er overført til våre vaser av trær, kvist, jord osv. Figur 23 viser kurve og resultater fra de amerikanske forsøkene med bildekk hvor maksimal kraft er gitt som funksjon av bølgehøyden for en tilfeldig bølge.

Det er sett på tre eksempler vedr estimering av bidraget fra bølger på forankringskraften. Bølgehøyden i de tre tilfellene er:

$$H = 1.0 - 0.5 - 0.3 \text{ m}$$

Vasen med bredde  $b = 10.0$  m (eksempel 1 i avsnitt 6.3) er brukt for å beregne bølgekraften. Resultatene er satt opp i Tabell 8 sammen med forankringskraften fra vannstrøm alene med vannhastighet 1.5 m/s ( $F_v = 4.590$  kg, kfr Tabell 7)



Figur 23. Forankringskraft fra bølger på bølgedempere av bildekk (diagrammet er hentet fra en amerikansk rapport)

Tabell 8. Forankringskraft fra bølger på vase med bredde  $b = 10.0$  m og samtidig en vannhastighet  $v = 1.5$  m/s (kfr Figur 23 og Tabell 7)

Bølgehøyde $H$ (m)	Bølgekraft $F_{b\phi}$ (kg)	Strømkraft $F_v$ (kg)	Forholdstall $F_{b\phi}/F_v$ (%)
1.0	1300	4590	28.3
0.5	300	4590	6.5
0.3	100	4590	2.2

Ved "normale" bølgehøyder ( $H \leq 0.5$  m) utgjør bidraget fra bølger således veldig lite i forhold til bidraget fra vannstrømmen.

### 6.6. Eksempel på samlet virkning fra vannstrøm, vind og bølger.

Til slutt i dette kapittelet ser vi på et eksempel med samlet virkning på forankringskraften fra vannstrøm, vind og bølger. Det er brukt samme vase som i eksempel 1 i Tabell 7:

$$\text{Vase med mål: } b \cdot l \cdot t / h = 10 \cdot 20 \cdot 1.0 / 0.5 \text{ m}$$

hvor  $t$  og  $h$  er neddykket og oppstikkende del av vasen over vann

I Tabell 9 er de forskjellige hastigheter og krefter satt opp. Vannhastighetene ligger i intervallet  $v = 0$  til  $2.0$  m/s mens vindhastighetene går fra  $u = 0$  til  $30$  m/s. Vedr. bidrag fra bølger er dette beregnet for en bølgehøyde  $H = 0.5$  m slik at  $F_{b\phi} = 300$  kg for alle vann- og vindhastigheter. Samlet virkning fra vannstrøm, vind og bølger er gitt som:

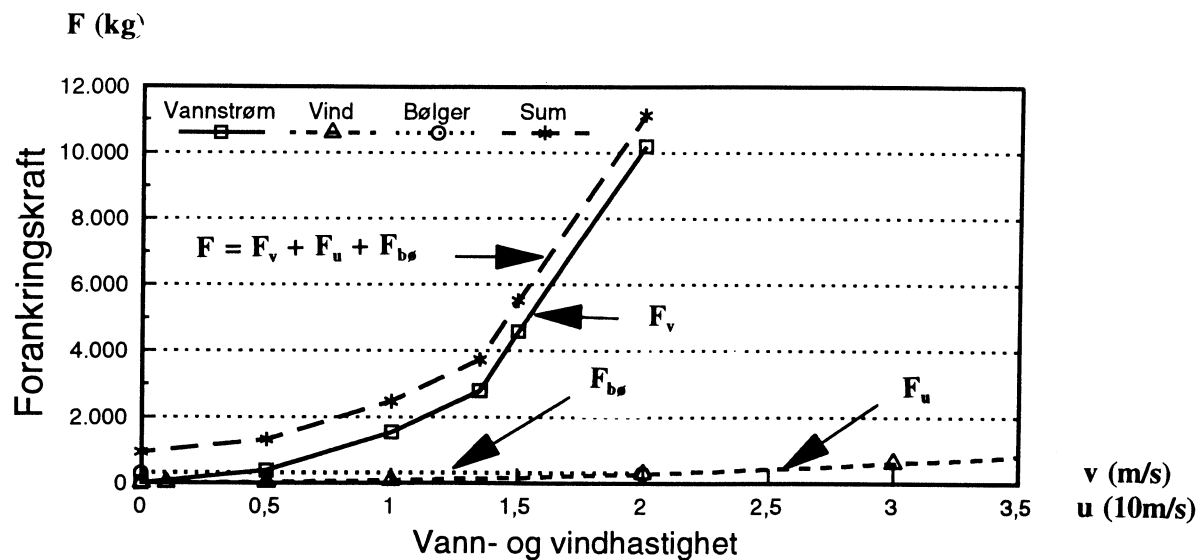
$$\text{Samlet forankringskraft: } F = F_v + F_u \text{ (633 kg)} + F_{b\phi} \text{ (300 kg)} \text{ (kg)}$$

Det er altså brukt bidrag fra vind ved  $u = 30$  m/s ( $F_u = 633$  kg) og bidrag fra bølger ved bølgehøyde  $H = 0.5$  m ( $F_{b\phi} = 300$  kg)

Tabell 9. Samlet forankringskraft (kg) fra vannstrøm, vind og bølger

$v$ (m/s)	$F_v$ (kg)	$u$ (m/s)	$F_u$ (kg)	$F_{b\phi}$ (kg)	$F = \sum F_{v,u,b\phi}$ (kg)
0.5	380	1.0	1	300	1313
1.0	1530	5.0	18	300	2463
1.35	2790	10.0	70	300	3723
1.5	4590	20.0	281	300	5523
2.0	10200	30.0	633	300	11133

Figur 24 viser verdiene i Tabell 9 grafisk. Som det framgår dominerer bidraget fra vannstrømmen selv ved så stor vindhastighet som 30 m/s. Ved mindre vindhastigheter blir vindens bidrag tilsvarende mindre.



Figur 24. Forankringskreftene i Tabell 9 framstilt grafisk

## **6.7. Flytetorv etc.**

### **Flytetorv.**

Oppregulering av magasin kan få store torvflak til å flyte opp. Dette er et problem som sannsynligvis har et betydelig omfang. Det er feks rapportert om flytetorv på flere meters tykkelse og et areal på flere hundre m<sup>2</sup>. Flytetorv er i motsetning til de vaser av trær og kvist som er behandlet i modellforsøkene, kompakte og tunge. For å holde en slik torv i ro foran et overløp kan en benytte det samme beregningsgrunnlag som for vaser. Men på grunn av flytetorvens store masse må en her i tillegg vurdere de retardasjonskrefter som oppstår når en slik torv i bevegelse skal bringes til ro. Disse kreftene er proporsjonale med flytetorvens bevegelsesenergi og omvendt proporsjonale med retardasjonslengden. Bevegelsesenergien kan vi gjøre visse overslag over ut fra de stedlige forhold, men retardasjonslengden vil avhenge av flytetorvens fasthet og egenskaper som støtdemper. Vi har ingen informasjon omkring disse forholdene, men kan gi et eksempel basert på visse antagelser:

Vi regner for 1 m<sup>3</sup> torv med tetthet  $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$  en tilløpshastighet  $v = 0.50 \text{ m/s}$

Retardasjonsstrekning er valgt:  $s = 0.20 \text{ m}$

Bevegelsesenergi = Retardasjonsenergi  $\rightarrow \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = K \cdot s$  som gir:

$$K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot 1/s = \frac{1}{2} \cdot 950 \cdot 0.5^2 \cdot 1 / 0.20 \approx 600 \text{ N} \quad (\approx 60 \text{ kg})$$

Støtkraften ble altså ca. 60 kg pr m<sup>3</sup> torv i vårt eksempel.

Vår anbefaling blir, at hvis det er mulig at flytetorv kommer inn i systemet, så må en vurdere konsekvensene nærmere, både dersom en søker å stoppe flytetorven og dersom en ikke gjør det. Vi vil til slutt påpeke at flytetorvproblemet ikke er løst bare fordi en regulering er av eldre dato. I en ekstrem flomsituasjon kan nye torvflak komme i drift på grunn av høyere vannstand, nedbør og vind.

### **Annet flytende drivgods**

I en ekstrem flomsituasjon vil en måtte regne med at alle slag drivgods kan komme flytende.

Det kan dreie seg om høyløer, høyballer, pumpestasjoner osv ved siden av campinghytter og -vogner. I områder hvor det finnes mange fritidsbåter av forskjellig størrelse kan disse bli et spesielt problem.