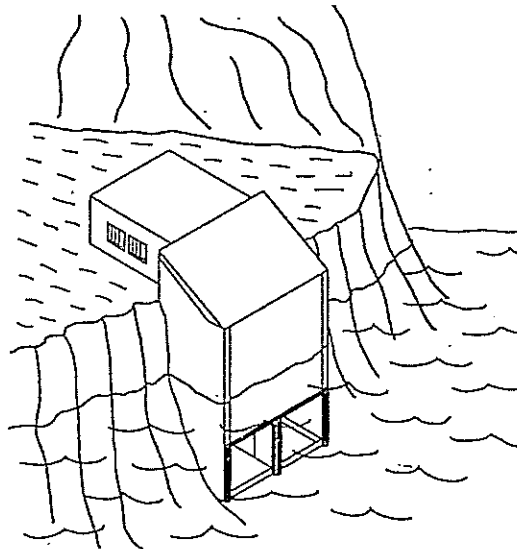




UNIVERSITETET I TRONDHEIM  
NORGES TEKNISKE HØGSKOLE  
INSTITUTT FOR FYSIKK

## GROVPROSJEKTERING AV BØLGJEKRAFTVERK MED TO VENTILSTYRTE SVINGANDE VASSØYLER



Internt notat  
desember 1990  
Per Magne Lillebekken,  
Johannes Falnes.

# GROVPROSJEKTERING AV BØLGJEKRAFTVERK MED TO VENTILSTYRTE SVINGANDE VASSØYLER

J. Falnes og P.M. Lillebekken  
Institutt for fysikk, NTH

## Innleiing og samandrag

Det er velkjent at Kværner Brug i 1985 sette i drift eit bølgekraftverk av typen med svingande vassøyle på eit bratt berg i stranda på Toftestallen i Øygarden. Fleire liknande anlegg, men noko mindre, har blitt bygde i Japan, og eit anna anlegg er under fullføring på vestkysten av Skottland.

Energiopptaket i eit slikt anlegg kan aukast om det blir utforma som eit tokammersystem, som gjer at ein med fordel kan utnytta prinsippet med optimal fasestyring. Med tokammersystemet er det to samarbeidande svingande vassøyler som pumpar luft gjennom ein felles turbin, som står mellom to luftkammer med kvar sin styrte luftventil mot den ytre atmosfæren.

Kværner sitt svingekammer på Toftestallen blei bygt i betong og (for den delen som var over nivået +3,5 m) i stål. For det anlegget som seinare blei planlagt bygt på Tonga i det sørlege Stillehavet, er heile kammeret tenkt bygt i betong. Med utgangspunkt i desse konstruksjonane, og med dimensjonar som på Toftestallen, er det i dette notatet vurdert kor stor meirkostnad det hadde blitt om anlegget hadde vore bygt som eit tokammersystem i staden for eit einkammersystem.

For tokammersystemet krevst ein vertikal skiljevegg som deler den svingande vassøyla og luftkammeret i to jamsides vassøyler og to jamsides luftkammer. Dessutan krevst det ein styrt luftventil til kvart av dei to kammera.

Notatet her konkluderer med at det vil kosta omlag 10 til 15 prosent ekstra om ein byggjer anlegget som eit tokammersystem.

---

Dette arbeidet har fått finansiell støtte frå Noregs teknisk-naturvitskaplege forskingsråd (NTNF) og frå Olje- og energidepartementet (OED).

### Framlegg til landfast tokammersystem

Med utgangspunkt i notat frå Kværner Brug AS 1989-08-30 ("Technical description. Principles and operation of 2nd generation design of Kværners' multiresonant oscillating water column"), vedrørende det påtenkte (men inntil vidare skrinlagde) bølgekraftverket i betong på Tonga, har vi skissert eit framlegg til tokammerkraftverk som vist på teikningar i vedlegg A. Det skil seg frå Kværner sitt kraftverk ved den vertikale skiljeveggen og ved det at luftturbinen står mellom dei to luftkammera. Luftkammera kommuniserer altså med den utvendige atmosfæren berre gjennom dei styrte luftventilane. Desse kan plasserast i ytterveggen på maskinhuset. Dimensjonane på kraftverket svarar til Kværner sitt anlegg på Toftestallen der flata er 50 m<sup>2</sup> under den innestengde lufta i kammeret. I vårt framlegg er altså flata 25 m<sup>2</sup> i kvart av dei to kammera.

Tokammersystemet er opphavelig ein japansk idé (Masuda) der ventilane er passive tilbakeslagsventilar, som tener til å likeretta luftstraumen gjennom turbinen. Dei slepper luft berre inn i kammeret på høgtrykksida av turbinen (høgtrykk-kammeret) og berre ut frå kammeret på lågtrykksida av turbinen (lågtrykk-kammeret). Med vårt framlegg er det eit hovudpoeng at ventilane ikkje er passive, men at dei skal styrast slik at vassøylene får optimale svingerørsler. Dette gir eit størst mogleg energiopptak når bølgjene er moderate. På den andre sida kan ventilane brukast til å avgrensa energiopptaket til det som turbinen er dimensjonert for, når det er store eller ekstreme bølger.

### Kværner sitt anlegg på Toftestallen

En del detaljerte opplysningar om Kværner sitt anlegg på Toftestallen finn vi i kap. 6 i den fortrulege rapporten "Bølgekraftverk Toftestallen. Prosjektkomiteens sluttrapport 31.12.1987". Ein del av sidene i kap. 6 er tatt inn som vedlegg B til notatet her. To figurar viser utforming og hovuddimensjonane av kraftverket, bygt i betong og stål. Elles går det fram at byggjekostnadene var godt og vel 13 Mkr (1984-86). Etter kostnadsanalysen blir dette redusert til ein sum på 8,5 Mkr, når utviklingskostnader og spesielle prototypkostnader er frådregne.

Frå kostnadstala i vedlegg B kan ein notera seg at turbinen med skovler står for over femteparten av totalkostnaden. Elles går det av oppstillingane fram at strupeventilen under luftturbinen kosta mindre enn 0,18 Mkr. (Denne ventilen kan opna og stengja på 0,1 s, og opningsarealet er 3-4 m<sup>2</sup>, etter det vi har fått opplyst i privat samtale med Ambli, Kværner.)

Ekstra kostnad med tokammersystemet i forhold til einkammersystemet

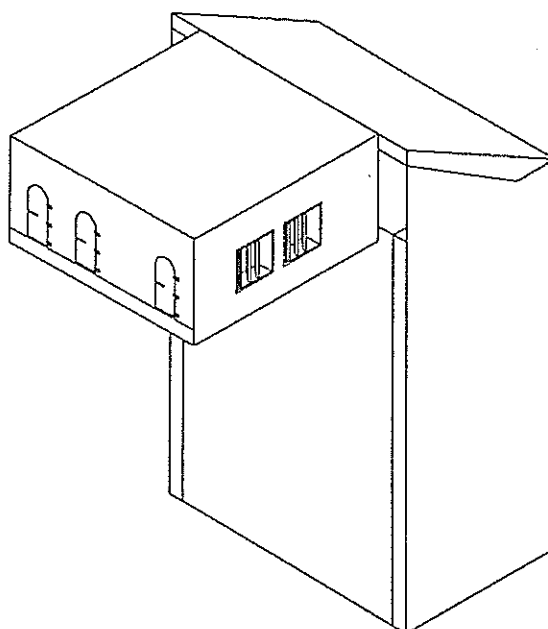
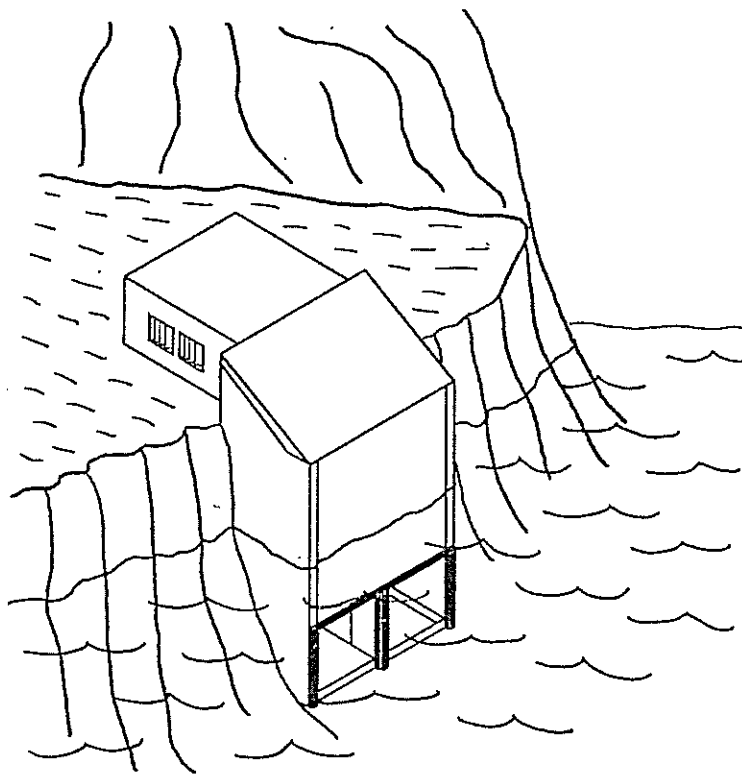
Med grunnlag i dei spesifiserte kostnadene gitt i vedlegg B for anlegget på Toftestallen er det i vedlegg C gjort overslag over dei meirkostnader det vil bli om ein byggjer eit tokammersystem i staden for eit enkeltkammersystem. Det blir ekstra utgifter til forskaling, betong og armeringsstål for den vertikale skiljeveggen. Det blir meirkostnad til litt ekstra sprenging. Til styring trengst det to luftventilar, som kvar bør ha eit areal på minst 7-8 m<sup>2</sup>. Antar vi konservativt ein kostnad proporsjonal med ventilarealet, og reknar vi at det (for å få stort nok opningsareal) trengst 4 stk (dvs. 3 stk ekstra) slike styrte ventilar som i anlegget på Toftestallen, utgjer dei ein kostnad på maksimalt 0,54 Mkr., og dette er den vesentlege meirkostnaden. Total meirkostnad er ca. 12 prosent når heile konstruksjonen er bygt i betong. Dersom det i staden er nytta stål for det som er over nivået +3,5 m, viser estimatet ein meirkostnad på 13,6 prosent.

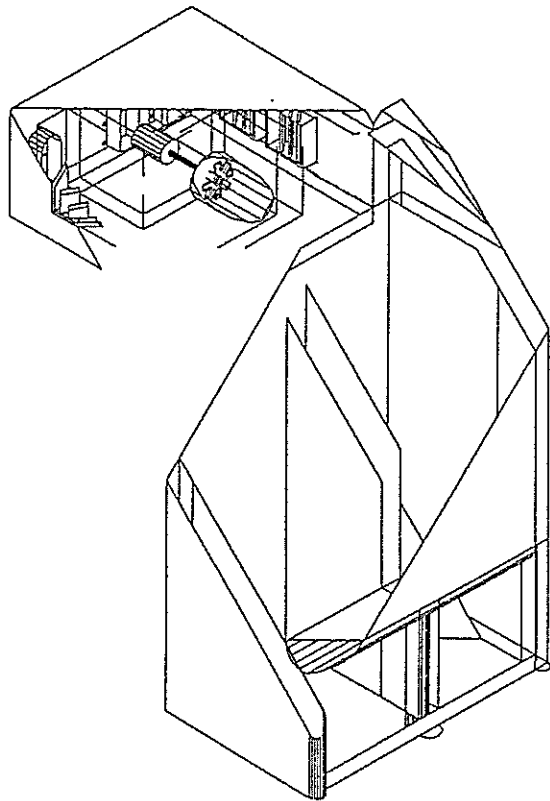
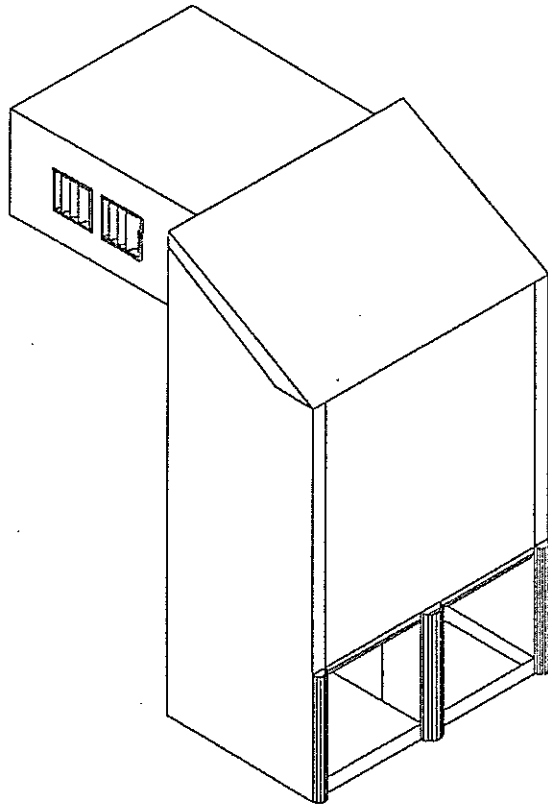
Ein kan altså etter dette gå ut frå at tokammersystemet blir 10 til 15 prosent dyrare å byggja enn eit enkeltkammersystem av tilsvarande storleik som det Kværner har bygt på Toftestallen. Merk at kostnadsestimatet her er konservativt også for di vi ikkje har teke omsyn til den kostnadsreduksjonen som kan oppnåast for di ein står friare i val av turbintype. Turbinen treng ikkje vera av sjølvlikerettande type som f.eks. ein Wells-turbin. For med tokammersystem går lufta vesentleg berre den eine vegen gjennom turbinen. Og då den optimale turbinadmittansen er mindre, får turbinen, for ein gitt effekt, mindre fysiske dimensjonar.

## VEDLEGG A

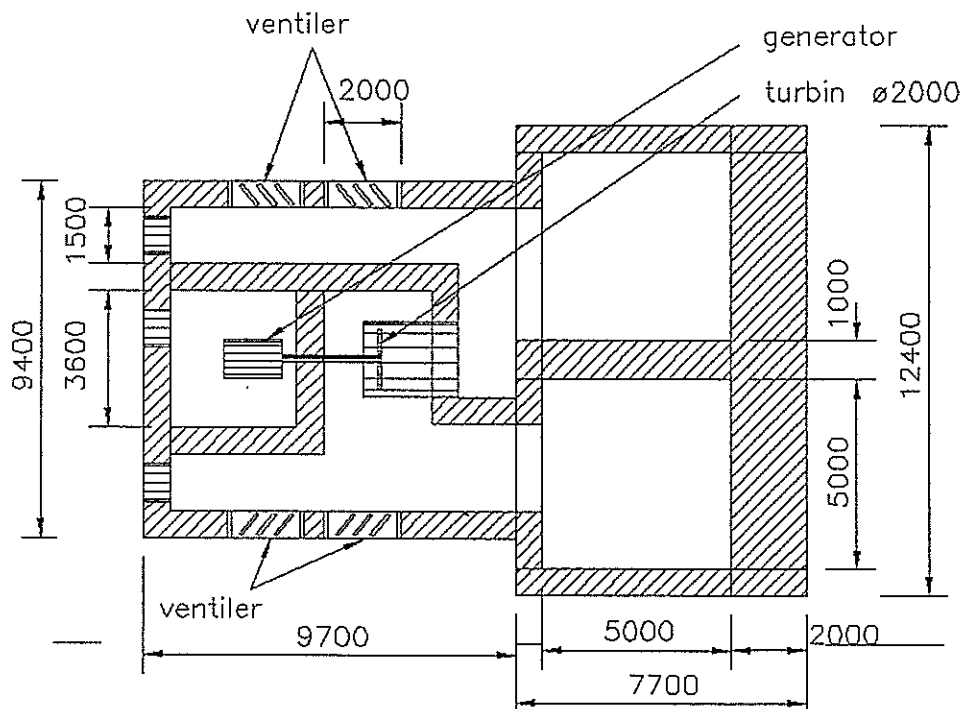
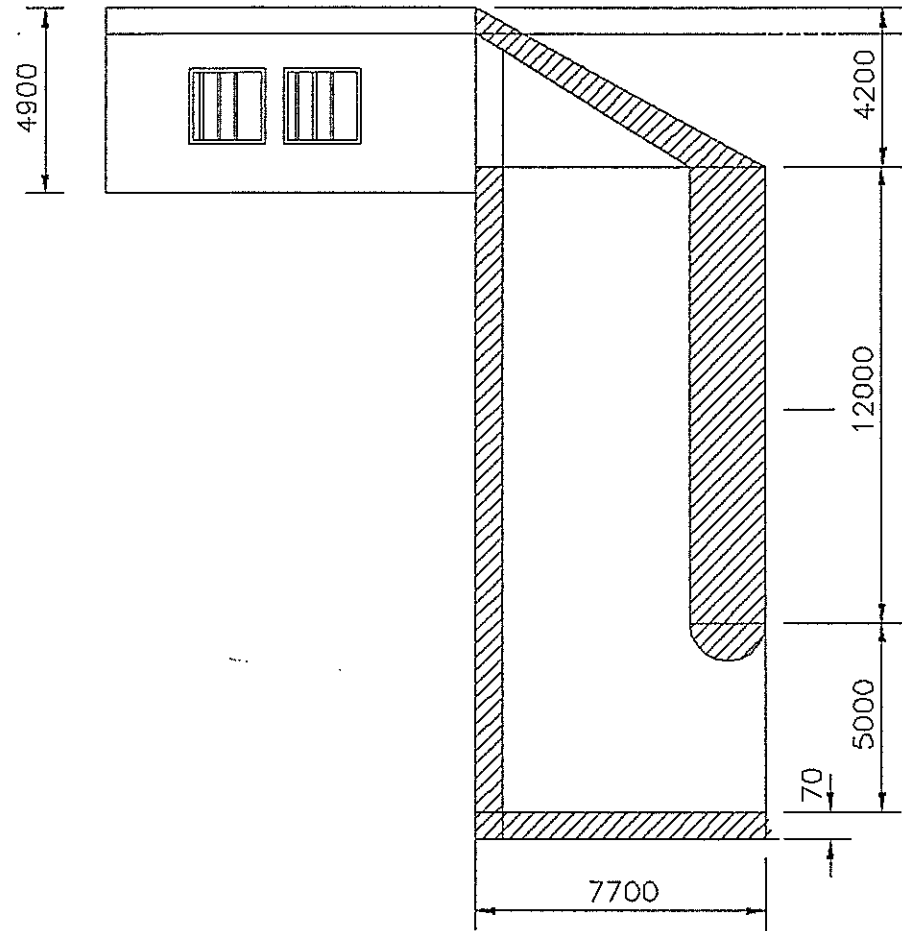
Framlegg til bølgekraftverk etter tokammersystemet.

Teikningar i perspektiv og snitt.



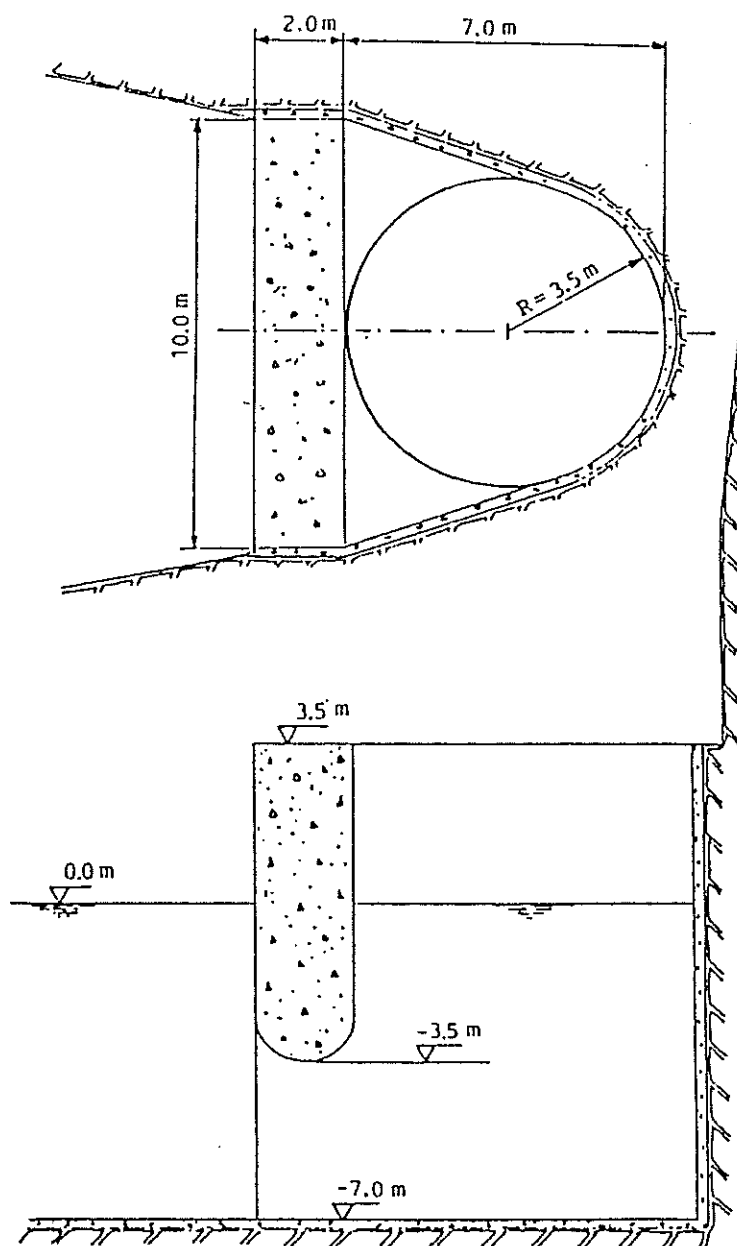


snitt 1m bak ytterside



## VEDLEGG B

Teikningar og kostnadstal for Kværner Brug sitt bølgekraftverk på Toftestallen,  
henta frå kapittel 6 i den fortrulege rapporten "Bølgekraftverk Toftestallen."  
Prosjektkomiteens sluttrapport, 31.12.1987."



Kammerareal	:	50 m <sup>2</sup>
Maksimalt utsving	:	+/- 3,5 m
Havnelengde	:	ca. 1 m.

Denne er ru og ikke sammenhengende da fjellformasjonene i forkant har rast ut i vannet.

Fig. 6.1 Hoveddimensjoner svingekammer



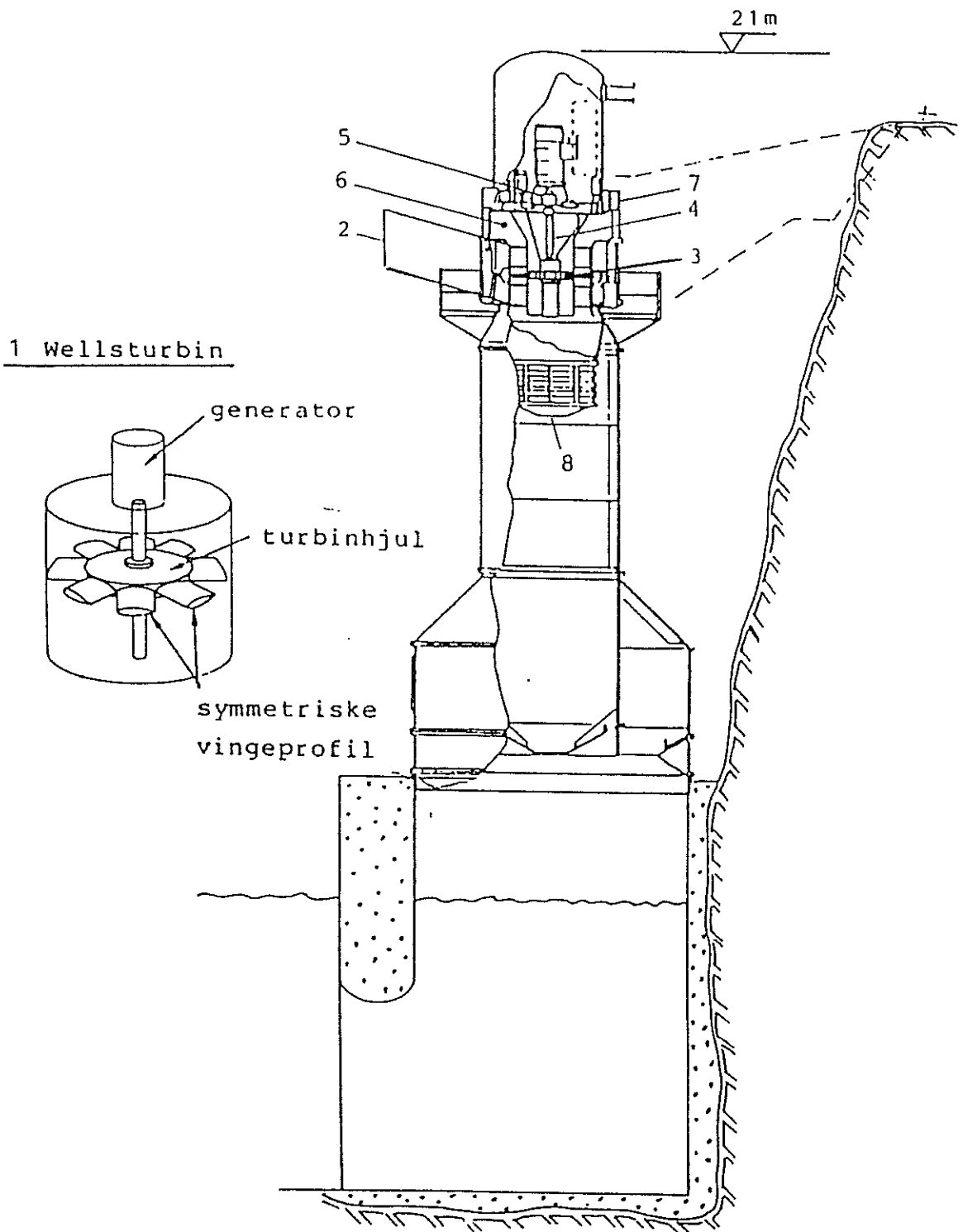


Fig. 6.2 Turbin og tårn

6.3.1 Byggeprosjekt

De faktisk påløpne kostnader er her sammenlignet med opprinnelig budsjett i følgende tabell:

	MEDGÅTT (-84, -85, -86 kr)	BUDSJETT (1984 kr)
<u>Administrasjon:</u>		
- Kontroll på byggeplass prosjektleder (1 år) 2 mannår + reiser	kr 2 150 000,-	
- Detaljprosjektering 4 mannår	" 2 000 000,-	
Delsum	kr 4 150 000,-	kr 4 600 000,-
<u>Bygningsarbeider:</u>		
- Tilrigging, anl.kraft (dieselgen.)	" 400 000,-	
- Vanddemper, fangdam etc.	" 190 000,-	
- Gravearbeider/sprengnings- arbeid 2000 m <sup>3</sup> a kr 200/m <sup>3</sup>	" 400 000,-	
- Forskaling 450 m <sup>2</sup> a ca kr 300/m <sup>2</sup>	" 135 000,-	
- Betong 500 m <sup>3</sup> a ca kr 750/m <sup>3</sup>	" 375 000,-	
- Div. kostnader (merarbeide)	" 80 000,-	
- Armering 40 tonn a kr 7 000/tonn	" 280 000,-	
Delsum	kr 1 860 000,-	kr 1 550 000,-
Stålarbeider, inkl montasje	" 1 400 000,-	" 900 000,-
Innredning, avløp etc.	" 0,-	" 0,-
Boliger, oppsynsmann	" 150 000,-	" 0,-
<u>Maskintekn. installasjoner:</u>		
Turbin levert fra Sørumsand	" 1 650 000,-	
Løpehjulskovler, 15 stk	" 220 000,-	
Lyddemper	" 200 000,-	
Ventil, Hydraulikk, bremser, tetninger, trykk og turtalls- givere for drift	" 180 000,-	
Delsum	kr 2 500 000,-	kr 1 150 000,-

Montasje & idriftssettelse av maskintekniske installasjoner	kr 200 000,-	kr 300 000,-
---	--------------	--------------

Elektrotekniske installasjoner

Generator	kr 100 000,-	
Strømretter-utstyr	" 235 000,-	
Reguleringssystem inkl. PLS	" 900 000,-	
Tilknytning til felles anlegg	" 130 000,-	
Kabler og instrumentering	" 35 000,-	
Delsum	kr 1 400 000,-	kr 1 250 000,-

Montasje & idriftssettelse av el.tekn. inst.	kr 370 000,-	kr 400 000,-
Transporter	" 55 000,-	" 0,-
Forsikring	" 52 000,-	" 50 000,-
Inv.avg. (Forskn.prosjekt er fritatt)	" 0,-	" 0,-
Renter	" 0,-	" 0,-

Uforutsette kostnader

Svingekammer:

- Merkostnader pga. venting ved dårlig vær	kr 460 000,-
--	--------------

Stålarbeider:

- Merkostnader pga. venting ved dårlig vær. Kranleie. Ekstra ventil på tårnside. Leidere. Rep.	kr 260 000,-
--	--------------

Montasje og idriftssettelse av maskinteknisk utstyr:

- Dobbeltarbeide pga ventil. Ned/Oppbygging. Venting høsten -86. Kranleie. Ekstra el.mont.	kr 480 000,-	
Delsum	" 1 200 000,-	kr 900 000,-

TOTAL	kr 13 337 000,-	kr 11 100 000,-
	=====	=====

I tillegg kommer Kværner's andel av kostnadene til bølgeomålinger. (Se kap. 5.4).

## 6.4 KOSTNADSANALYSE

6.4.1 Direkte byggekostnader [D.v.s. eksklusiv utviklings- og spes. prototyp-kostnader]

Basert på disse forutsetningene vil kostnadene bli som følger: (tall i 1984 kr)

Byggeprosjekt

Design og detaljprosjektering	kr	850 000,-
Adm. inkl. kontroll på byggeplass	"	650 000,-
Tilrigging, anleggskraft (diesel-generator)	"	350 000,-
Vanndemper, fangdam etc.	"	190 000,-
Gravearbeider/sprengningsarbeid 2000 m <sup>3</sup> a kr 200,-/m <sup>3</sup>	"	400 000,-
Betongarbeid		
Forskaling 450 m <sup>2</sup> a ca kr 300,-/m <sup>2</sup>		
Betong 500 m <sup>3</sup> a ca kr 750,-/m <sup>3</sup>	kr	510 000,-
Diverse kostnader		
Armering		
40 tonn a kr 7 000,-/tonn	"	280 000,-
Stålarbeider, inkl. montasje	"	1 100 000,-
Leie bolig	"	50 000,-
Maskintekn. inst. inkl. turbin	"	1 950 000,-
Montasje & idriftsettelse av mask.tekn.inst.	"	100 000,-
Elektrotekn.inst. inkl. generator	"	1 150 000,-
Montasje & idriftsettelse av elektr.tekn. inst.	"	165 000,-
Transporter	"	55 000,-
Forsikring	"	52 000,-
	kr	7 852 000,-
Uforutsett	"	648 000,-
TOTAL:	kr	8 500 000,-
		=====

I tillegg må det inkluderes kostnader for vei, kobling til nett etc. Det vil også påløpe kostnader i forbindelse med bølgemålinger før byggestart. Normalt regner Kværner at bølgemålinger bør pågå i ett år. Resultatet av målingene bør sammenholdes med tilgjengelig bølgestatistikk. Kostnadene anslåes til å ligge i størrelsesorden 1 mill kr. Disse kostnadene veier forholdsvis tungt når det kun er snakk om én liten modul, men relativt mindre på store anlegg.

## VEDLEGG C

Spesifisering av ekstrakostnader i fall Kværner Brug sitt bølgekraftverk på Toftestallen hadde vore bygt som eit tokammerkraftverk i staden for eit enkeltkammerkraftverk.

## C.1

Meirkostnad med tokammersystem, i betong og stål, jamført med einkammersystemet på Toftestallen. Kostnadstala her er i 1985-kroner, og grunnlaget er spesifiserte kostnadstal frå vedlegg B.

Sprenging og betongarbeid.

Vertikal skiljevegg, 1 m tjukk, 7 m lang, 10,5 m høg

– Ekstra forskaling	$2 \times 7 \times 10,5 = 147 \text{ m}^2$ à kr. 300	44,1 kkr
– Ekstra betong	$1 \times 7 \times 10,5 = 73,5 \text{ m}^3$ à kr. 750	55,1 kkr
– Ekstra armering	$0,2 \times 73,5 = 14,7$ tonn à kr. 7000	102,9 kkr

Ekstra sprenging 11 m breidt i staden for

10 m breidt, dvs. 10 % tillegg til 400 kkr

40 kkr

Sum: Ekstra sprengings- og betongarbeid

242 kkr

Overslag over tillegg i stålarbeid

Vertikal skiljevegg av areal

$7 \times 2 + (7 + 3,5) \times 1,8 / 2 + 3,5 \times 6,4$

$14 + 9,45 + 22,4 = 45,85 = 46 \text{ m}^2$

Ståloverflate Toftestallen  $\approx 234 \text{ m}^2$

Meirkostnad ved skiljevegg (antatt proporsjonal

med areal)  $(46/234) \cdot 1400 \text{ kkr} =$

274 kkr

Antatt meirkostnad til hus for turbin og ventilar

100 kkr

3 stk ekstra styrte ventilar  $3 \times 180 \text{ kkr}$

540 kkr

(NB 2x2 ventilar à la Toftestallen

for å få stort nok opningsareal)

Meirkostnad med tokammer versus einkammer

1156 kkr

Merknad: Her er det ikkje teke med at turbinen i tokammersystemet truleg kan lagast billigare fordi den optimale turbinadmittansen er mindre med tokammersystemet, noko som fører til ein turbin med mindre fysiske dimensjonar.

Heile anlegget på Toftestallen er analysert til ein kostnad på 8,5 Mkr (når vel 4 Mkr spesielle prototyp- og utviklings-kostnader er frådregne) Jfr. vedlegg B. Den relative meirkostnaden med tokammerkraftverk vil etter dette bli maksimalt

$$\frac{1,156}{8,5} \cdot 100 \% = 13,6 \% \approx 14 \%$$

ekstrakostnad.

## C.2

Meirkostnad med bygging av tokammersystem når heile anlegget er i betong (altså ståltårnet utskift med betong). Jfr. figurane i vedlegg A og spesifiserte byggjekostnader (1985) i vedlegg B.

### Sprenging og betongarbeid

- Ekstra sprenging 1 m ekstra, 10 % tillegg	40	kk
Vertikal skiljevegg 1 m tjukk, 5 m lang, 20 m høg		
- Ekstra forskaling: 2x5mx20m = 200 m <sup>2</sup> à kr 300	60	kk
- Ekstra betong: 1mx7mx20m = 140 m <sup>3</sup> à kr 750	105	kk
- Ekstra armering: 0,2x140 = 28 tonn à kr 7000	196	kk
- Ekstra styrt ventil (3 stk)	540	
- Ekstra ventilhus med vegg mellom høgtrykkskammeret og lågtrykkskammeret, antatt	100	kk

---

Meirkostnad med tokammer versus einkammer 1041 kkr

Meirkostnaden er altså av storleiksorden 1,0-1,1 Mkr, altså litt mindre meirkostnad enn om tårnet er bygt i stål. Går vi ut frå at totalkostnaden er om lag 8,5 Mkr. for eit einkammersystem også når det er bygt i betong, blir den relative meirkostnaden

$$\frac{1,041}{8,5} \cdot 100 \% = 12,2 \%$$

(Føresetnaden om kva totalkostnaden ville ha vore om også tårnet på Toftestallen hadde vore bygt i betong – i staden for stål – har vore drøfta i privat samtale med Oskarsen på Kværner. Han meiner at det ville ha blitt noko mindre enn 8,5 Mkr i totalkostnad. Men dersom maskinane hadde vore tryggare plasserte i eit betonghus oppå holmen, på ein måte som går fram av figurar i vedlegg A, så ville totalkostnaden ha vore noko meir enn 8,5 Mkr.)

Konklusjonen på overslaga her i vedlegg C er altså at den relative meirkostnaden ville ha vore i området 10 till 15 % om anlegget på Toftestallen hadde vore bygt som eit tokammerkraftverk i staden for eit einkammerkraftverk.