



Institutionen för vattenbyggnad  
Chalmers Tekniska Högskola

Department of Hydraulics  
Chalmers University of Technology

# Energi ur havsströmmar

av

Björn Ringesten

Report  
Series B:4

Göteborg 1977



Institutionen för vattenbyggnad  
Chalmers Tekniska Högskola

Department of Hydraulics  
Chalmers University of Technology

Energi ur havsströmmar

av

Björn Ringesten

Report

Series B:4

Göteborg 1977

---

Adress: Institutionen för vattenbyggnad  
Chalmers Tekniska Högskola  
Fack  
S-402 20 Göteborg 5, Sweden

Telefon: 031/ 81 01 00

## FÖRORD

På uppdrag av planeringsgruppen för vågenergi inom Nämnden för energiproduktionsforskning har civ. ing. Björn Ringesten vid inst. f. vattenbyggnad, CTH, utarbetat en inledande studie över möjligheten att utvinna energi ur havsströmmar. Rapporten bygger på intervjuer av personer, institutioner och företag med speciella kunskaper inom de aktuella områdena samt på litteraturstudier.

Rapporten behandlar översiktligt möjligheten att utvinna energi ur havsströmmar med hjälp av strömkraftverk. En översikt görs över strömförhållandena kring Skandinaviens kuster och tänkbar maskinuppsättning för ett kraftverk diskuteras. Vidare redovisas en överslagsmässig kostnadsberäkning.

I rapporten konstateras att havsströmmarna kring Skandinaviens kuster representerar små utvinnbara energimängder. Den genomförda kostnads kalkylen visar dessutom på ett ogynnsamt utgångsläge jämfört med andra alternativa energikällor.

Göteborg 1977-07-07

Anders Sjöberg

tf. professor

<u>Innehållsförteckning</u>	<u>Sid.</u>
REFERAT	1
INLEDNING	3
STRÖMFÖRHÅLLANDEN RUNT SKANDINAVIENS KUSTER	3
ENERGIUTVINNING MED HJÄLP AV TURBIN	4
UTFORMNINGEN AV KRAFTVERKET	5
MILJÖFAKTORER	7
KOSTNADER	8
SLUTSATS	9
Lista över tagna kontakter	11
Litteraturhänvisningar	11

## REFERAT

Havsströmmarna representerar en potentiell energikälla, vilken dock synes svår att tillvarata. Den globalt sett tillgängliga effekten uppskattas till enbart 1% av den tillgängliga vindeffekten.

Att utvinna energi ur havsströmmar har stor likhet med att utvinna vindenergin och samma fysikaliska lagar gäller. Strömningshastigheterna är dock avsevärt lägre, 0-5 m/s mot 0-45 m/s, men mediet har mycket högre densitet, 800 ggr, vilket något kompenserar den låga hastigheten.

Havsströmmar är långsamma, någon dm per sekund. De växlar ofta riktning och är väderberoende. I allmänhet är det ytskiktet som har det största energiinnehållet. Den effekttätaste strömmen synes finnas i Öresund med hastigheter upp till ca 1 m/s med god varaktighet. Energiflödet eller effekten per m<sup>2</sup> är vid denna hastighet 0.5 kW/m<sup>2</sup>.

I motsats till vindenergin är man, när det gäller havsströmmar, helt underställd den geografiska placeringen. En exploatering medför höga överföringskostnader eller/och får energin tas tillvara genom hydrolys. Principen för ett kraftverksaggregat är en generator med turbin, typ propeller, på ett fackverksbärverk. P. g. a. att strömmarna sällan är homogena utan skiktade måste turbindiameterens storlek begränsas. Antalet turbiner måste alltså vara stort. På en turbinaxel kan man i ovanstående exempel maximalt få ut  $0.6 \times 0.5 = 0.3$  kW/m<sup>2</sup> genomlupen yta.

Turbin- och generatorkostnaden kan vid en noggrann utredning beräknas. Kostnaderna för bärverket och dess förankring samt underhåll och drift kan däremot, i avsaknad av erfarenheter från liknande konstruktioner i havet, endast grovt uppskattas.

Kraftverket kan byggas med i princip konventionell teknik. För att inte korrosionsskyddet och det löpande underhållet skall bli för komplicerat och kostsamt (placeringen blir ju ur denna synpunkt mycket ogynnsam) kunde man tänka sig ett utbyte av hela enheten i intervaller om exempelvis 10 år. Det förutsätter en viss standardisering av aggregatens bärverk. Servicearbetet göres sedan på land och bärverket kunde eventuellt anses förbrukat.

Kostnaden för ett havsströmkraftverk och transmission bestående av 20 aggregat med turbindiametern 15 m uppskattas till 33 milj. kronor. Med en beräknad livslängd på 30 år, räntan 10% och en renovering för 6 milj. kr. efter 10 och 20 år bleve annuiteten 3.8 miljoner. En årlig löpande kostnad på 0.4 milj. tillkommer. Vid en årlig total energiproduktion av 4 MWh, som kunde vara fallet med en placering i Öresund, blir energipriset ca 0.95 kr/kWh, vilket kan jämföras med motsvarande uppskattningar för ett vindkraftverk: 0.15 - - 0.20 kr/kWh.

För att ett strömkraftverk skall bli ekonomiskt bärkraftigt fordras högre energikvalitet, dvs högre strömningshastighet och kontinuerligare ström, än vad våra farvatten kan bjuda. Som exportprodukt till länder med rätta förutsättningar vore kanske kraftverken värda en djupare utredning.

## INLEDNING

De första artiklar, som beskriver möjligheten att utvinna energi ur havsströmmar på ett relevant sätt, dyker upp på 50-talet. Men ämnet har behandlats lätt och ringa erfarenheter har samlats. Orsaken är primärt strömmarnas låga effekttäthet, dvs. strömmarnas låga hastighet och dåliga kontinuitet. De är dessutom skiktade och växlar riktning, vilket speciellt är fallet i våra farvatten. Man uppskattar effekten i havsströmmarna globalt sett till ca  $10^4$  MW (3). Tidvattnets effektinnehåll är lika stort medan tillgänglig vind-effekt är 100 ggr större och vågeffekten kanske 1000 ggr större.

En utvecklad metod för energiutvinningen saknas. Lämplig turbintyp existerar inte. Strömmar med tillräckligt hög hastighet kring Skandinavien kuster är i första hand lokaliserade till trängre passager och eventuella kraftverk bleve p. g. a. sin utbredning påtagliga hinder för sjöfarten.

## STRÖMFÖRHÅLLANDEN RUNT SKANDINAVIENS KUSTER

Nedan följer en grov inventering av olika typer av strömmar och dessas hastighet, speciellt då runt Skandinavien kuster:

Till havs finns en global oceancirkulation, ytströmmar av uppvärmt vatten som flyter mot polerna, med hastigheter av storleksordningen 0.1 m/s. Under korta perioder, klart intermittent, kan strömhastigheterna uppgå till 1 m/s beroende på väderförhållandena. Strömmarna utanför bohuskusten tillhör denna kategori.

I sund är hastigheten högre. Data från fyrskeppsobservationer i Öresund visar att 1 m/s är relativt vanligt i ett ytskikt om 10-15 m, se figur sid. 9. Strömmens varaktighet i vardera riktningen är då något dygn. I Stora och Lilla Bält är medelhastigheten 0.3 m/s mätt över hela året. Tillfälliga toppar når 1.1 - 1.2 m/s men under mycket kort tid, mindre än ett dygn. Vanligare förekommande tillfälliga toppar ligger på 0.6 - 0.8 m/s. Tidvattenbidraget till dessa hastigheter kan uppgå till 0.2 m/s. Malö strömmar håller reellt inte högre hastighet än 0.5 m/s.

Idefjordens ström är till stor del tidvattengenererad - det rör sig om ett tidvatten med 0.3 - 0.4 m amplitud. Fjordarna i Västlandet i Norge har de bästa förutsättningarna att nyttja tidvattnet. Nivåskillnaden är vid Stavanger 0.5 m och vid Lofoten 3 m. Som jämförelse kan nämnas att tidvattenkraft-

verket i la Rance i Frankrike har en nivåskillnad av ca 6 m, ibland det dubbla, och att det dessutom i övrigt har bättre förutsättningar men ändå inte anses lönsamt. Anläggningskostnaden var 2.5 ggr så hög som för ett motsvarande kraftverk av konventionell typ (6).

I förträngningar i djupled som i Bornholmsgattet och mellan Ålands hav och Bottenhavet tvingas vattnet över en tröskel. Här uppnås en hastighet hos djupströmmen på ca 0.5 m/s med god kontinuitet.

Strömmarna kring Skandinavien har alltså en mycket låg effekttäthet. Hastigheterna är av storleksordningen 0.1 - 0.5 m/s. I djupled är inte strömmen homogen utan skiktad med olika hastigheter, som också kan vara negativa. Strömmens riktning växlar men har huvudriktningar. Den är i stort sett helt väderberoende. Energimängden vid en hastighet på 1 m/s är  $0.5 \text{ kW/m}^2$  och vid 0.5 m/s  $0.06 \text{ kW/m}^2$ . Öresunds totala kinetiska energimängd är i realiteten högst någon hundraedels TWh/år. De utvinnbara energimängderna är således mycket små.

#### ENERGIUTVINNING MED HJÄLP AV TURBIN

En metod att utvinna energi ur strömmande vatten är att låta en turbin driva en generator. Man tar således tillvara en del av hastighetsenergin på samma sätt som hos ett vindkraftverk. Teorin är också identisk. Jfr uttrycket "underwater wind mill". Turbinen förutsättes kunna rotera åt båda hållen.

Den normalt förekommande vertikala hastighetsprofilen genom en ström ger vid handen på vilken nivå turbinen lämpligen placeras och hastighetsskiktets tjocklek begränsar eventuellt turbindiametern. Den ringa strömningshastigheten betyder att en stor yta måste täckas och ett havsströmkraftverk består alltså av ett batteri av turbiner. En havsström kan inte utnyttjas över hela sin bredd - den valde då en bana runt motståndet. En central placering med högst 10%-ig upptäckning är att föredra. Ett band turbiner över ett sund skulle på sikt fungera som en uppdämning.

Generatoren med turbin hålls på plats av ett bärverk av exempelvis fackverks-typ. Det måste inte vara stumt fixerat på fundament på botten utan kan hänga i pontoner och vara förankrat. Förankringen härvidlag är dock komplicerad.



Teoretiskt optimalt energiuttag över en turbin i strömmande vatten vid friktionsfritt förlopp är (7)

$$P = 0.6 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 F \text{ watt}$$

Flödes hastigheten är då reducerad till en tredjedel efter turbinen.  $\rho$  = vattnets densitet i  $\text{kg/m}^3$ ,  $v$  = flödes hastigheten i  $\text{m/s}$  och  $F$  = turbinens löpyta:

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ (m}^2\text{)}.$$

Om hastigheten antages vara 1  $\text{m/s}$ , dvs den i Sverige högsta användbara siffran, och densiteten sättes till  $1000 \text{ kg/m}^3$ , blir bruttoeffekten vid följande olika turbindiametrar:

Diameter:	2	5	10	15	30	50	m
Brutto output:	0.9	5.9	23	53	210	590	kW

Inom parentes kan nämnas att denna hastighet, 1  $\text{m/s}$ , motsvarar en fallhöjd av  $v^2/2g = 0.05 \text{ m}$ .

## UTFORMNINGEN AV KRAFTVERKET

### Turbinen

Hos turbinen måste så högt varvtal som möjligt eftersträvas med tanke på vattenströmmens ringa hastighet. Man väljer alltså en fåbladig kaplanturbin, propellerliknande, som ju med den lägre materialåtgången också blir billigast. En turbintyp som savoniusrotorn innehåller mycket mer material och har en låg verkningsgrad, 15-25%. Turbinens varvtal bestäms av generatorns motståndsmoment och vattnets strömningshastighet. Det är lämpligt att kunna reglera bladens stigning för att få maximal verkningsgrad - på så sätt 40% - och att en automatik för detta utvecklas.

En turbin är tämligen okänslig för hastighetsgradienter inom den genomlupna ytan och uppfattar hastighetens medelvärde. Med två blad och under belastning blir varvtalet troligen så lågt som 5-10 varv per minut vid en diameter på 10 m. Vid större diameter är det ännu lägre. Det är alltså under alla förhållanden nödvändigt med en kugghjulsväxel för att nå ett tillräckligt varvtal på generatoren. Utgående varvtal blir mycket varierande trots stigningsreglaget.

Med tanke på vattenströmmarnas skiktning i våra farvatten blir optimala diametern hos turbinen endast 10-20 m. Fordringarna på utförande och hållfasthet understiger vida fartygspropellerns. Möjligen kan bladen gjutas i halvor på längden och därvid göras ihåliga för att nedbringa densiteten och utföras i ett billigt men korrosionsbeständigt material. Därmed kunde kostnaden kanske nedbringas till 100.000 - 200.000:-- och vikten till runt 10 ton för en turbin i denna storleksklass.

### Generatorn

Mycket talar för att en synkron- eller asynkrongenerator blir mest ändamålsenlig. De kan konstrueras för mycket långa serviceintervaller, kanske 10 år, vilket är en vägande utgångspunkt. Likströmgeneratorns kommutator fordrar tillsyn oftare.

Då turbinens varvtal måste växlas upp mycket blir vattenströmmens hastighetsvariationer ytterligare accentuerade. Asynkrongeneratorn kan ge effekt till nätet redan vid låga varv och utan att nödvändigtvis ligga i fas. Den fordrar magnetiseringsspänning, som en varvtalsstyrd automatik kan koppla in för att inte i onödan belasta nätet. Med en snabb och kontinuerlig ström kan synkrongeneratorn vara aktuell.

Generatorn i sig fordrar inte en bestämd rotationsriktning och turbinens blad behöver inte ställas om vid strömningsriktningens växling. En automatisk elektrisk omkopplare på transmissionen kunde härvid träda i funktion.

Generatorns dimensioner bestäms i princip av varvtalet, vartill kuggväxeln är anpassad. Placeringen i vatten innebär inget egentligt problem. Kostnaden för en 8-polig asynkrongenerator för 750 v/min i storleksordningen 100-2000 kW har JKAF inom ASEA uppskattat till 6000:--/kW inklusive kondensatorbatteri, transformator, reläskydd, ställverk o. dyl.

Anslutningen av kraftverksgeneratorn kan göras direkt på nätet. Transmissionen med undervattenskablar är en av huvudposterna i kostnads kalkylen.

### Bärverket

Turbinen med generator hålles på plats av ett bärverk. Utformningen, som ska

kombinera styrka med ringa strömningsmotstånd, blir möjligen av typ fackverk som ställs antingen på fundament på havsbotten eller "hänges" i pontoner och ankras väl. Det senare har många fördelar men förankringen är komplicerad och måste utredas då rörelserna under inverkan av strömmen måste minimeras bl. a. för att inte fresta anslutningen av elkablarna. Med ett utarbetat system för denna förankringsform kunde hög flexibilitet vinnas; kraftverket ställde i viss mån in sig vinkelrätt strömmen och det blev transportabelt och därmed mer servicevänligt. Dessutom kunde kraftverket placeras på den gynnsammaste nivån genom att helt enkelt sänkas med hjälp av förankringen. Det är krafter i storleksordningen 60.000 N för en turbin på 10 m som förankringen skall stå emot.

Det är lämpligt att placera turbinerna i ett samlat batteri till ett kraftverk. Anordningen förbilligas och kabeldragningen blir enklare. För sjöfarten är det också lättare att iaktta en enhet. Bärverket bör konstrueras att fordra minimal service under sin livstid, ex. vis 10 år, för att sedan beroende på materialval bytas ut. Generator, växel och turbin kan återanvändas. Aggregaten måste i sin helhet årligen beläggas med giftig bottenfärg, s. k. antifouling.

#### MILJÖFAKTORER

Ett kraftverk, som endast tillvaratar en mindre del av den kinetiska energin i en havsström, har nästan inga effekter på den omgivande miljön. I någon mån kan näringsrikare bottenvatten drivas upp. För sjöfarten utgör kraftverket ett hinder, speciellt vid placering i sund med ytströmmar, där kraftverksbatteriet har stor utbredning.

Om ett sund till fullo utnyttjades skulle innanför liggande vatten dämmas upp. Med en sådan placering tillkommer inverkan av ändrad vattenomsättning, saltkoncentration, vattentemperatur, m. m.

Under 3/4 av året vore oskyddade aggregat utsatta för påväxt av framför allt havstulpaner och musslor och dessa kunde bilda ett cm-tjockt skikt på några veckor. Aggregaten måste således bringas iland och beläggas med antifouling med 12-18 månaders intervaller. Giftet från en dylik färg anses inte ge nämnvärda skadeverkningar på miljön.

## KOSTNADER

Denna energiform förefinns sällan i anslutning till befintligt kraftnät, utan en kostsam kabeldragning måste medkalkyleras. Vid en fullständig undersökning låter sig kostnaden för turbin, generator och transmission någorlunda fastställas. I denna rapport blir endast grova uppskattningar aktuella för att få en storleksordning på priset.

Ett kraftverk i en ytström med upp till 1,5 m/s bestående av 20 st 15 m-turbiner med en placering i Öresund ger följande kostnadsbild:

Turbin à 150 000:-- , 20 st	3 milj. kr.
Generator m. m. á 1 000 000:-- , 20 st.	20 --"
Bärverk	3 --"
Kabelanslutning	<u>7 --"</u>
Totalt	33 milj. kr.

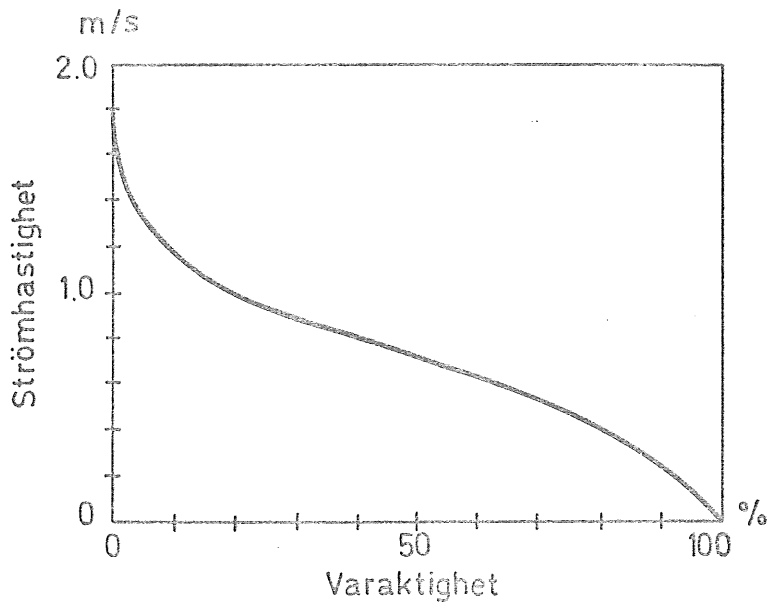
I intervaller om 10 år tänkes aggregaten renoverade för ca 6 milj. kr. Restvärdet efter 30 år sättes till 0 kr.

Diskonterat nuvärde med 10% räntesats blir  $33 + 6 \cdot 0,3055 + 6 \cdot 0,1486 = 36,2$  milj. kr.

Årligt annuitetsbelopp (10%, 30 år) blir  $36,2 \cdot 0,106079 = 3,84$  milj. kr.

En löpande kostnad för underhållet, i första hand antifoulingbehandling, torde per år bli ca 0,4 milj. kr.

Kraftverkets årsproduktion bedöms bli ca  $20 \cdot 200.000 \text{ kWh} = 4 \text{ MWh}$  baserat på nedanstående framtagna varaktighetsdiagram för ytskiktet i Öresund mellan Helsingborg och Helsingör. En kWh betingar då ett pris av ca 0.95 kr.



Varaktighet för nord- och sydgående strömmar på några meters djup i Öresund, midsunds mellan Helsingör och Helsingborg. Diagrammet har konstruerats med utgångspunkt från bl. a. (8).

Vid placering i ex. vis en bottenström med en hastighet av högst 0.5 m/s skulle samma kraftverk producera strömmen till ett kanske 10 ggr högre pris. Här är vattenströmmen något kontinuerligare. För andra strömmar kring Skandinavien kan ännu högre kostnad än vad som ovan skisserats förväntas.

#### SLUTSATS

Havsströmmarna kring Skandinavien kuster representerar små energimängder. I Öresund är den totala rörelseenergimängden av storleksordningen någon hundradels TWh/år, vilket motsvarar den årliga energiförbrukningen för ca 400 småhus. Endast en mindre del av denna energi torde dock kunna utvinna.

Kostnads kalkylen ger dessutom inget gynnsamt utgångsläge jämfört med andra alternativa energikällor, trots att vi givit strömkraftverket en fördelaktig placering i Öresund. Andra vattenströmmar kring Sverige har normalt en avsevärt lägre rörelseenergimängd. Ingen bearbetning är dock gjord. Flera faktorer, speciellt strömmarnas bristande kontinuitet, kan förrycka siffrorna

markant. Även de skilda komponenternas priser kan kraftigt avvika då de endast är grovt uppskattade.

Idén att få ett visst energitillskott från havsströmmar kan möjligen nyttjas av länder med gynnsammare förutsättningar; kontinuerlig kraftig ström (ex. vis ger Congoströmmen 71 000 kWh/m<sup>2</sup> och år) eller stora tidvattenamplituder. En kontinuerlig ström på 2 m/s skulle ge ett kWh-pris på ungefär 0.06 kr. Havsströmkraftverk skulle därför eventuellt kunna vara en exportprodukt.

För Skandinavien del är som nämnts egentligen endast Öresund möjligt att spekulera i.

### Lista över tagna kontakter

Från följande personer, institutioner och företag har synpunkter och upplysningar inhämtats:

R. Alestig	KMW, Kristinehamn
S. Bengtsson, Y. Hammalund	Inst.f. byggn. ekonomi och organisation, CTF
L. Bergdahl	Inst.f. vattenbyggnad, CTH
L. Claesson	B. Ludvigsson Ing. byrå AB, Göteborg
J. Forsberg	Inst.f. elektromaskinlära, CTH
B. Karlsson	Centrum för energiteknik, CTH
G. Kullenberg	Oceanografiska inst., Köpenhamn
A. Lindblom, Å. Elfner	Karlskronavarvet AB
E. Nilsson	Inst.f. strömningsmaskinlära, CTH
K. Restad, H. Waldenhaus, T. Rasmusson	Kockums Mek. Verkstads AB
J. Rohde	Oceanografiska inst. Göteborg
A. Sjöberg	Inst.f. vattenbyggnad, CTH
A. Svensson	Fiskeristyrelsen
U. Svensson	Inst.f. teknisk vattenresurslära, LTH
J. Söderström	Länsstyrelsen, Naturvårdsenheten, Göteborg
L. Wiegert	Ångpanneföreningen
Å. Williams	Statens Skeppsprovninganstalt

### Hänvisningar till litteratur och tidskrifter

- (1) Energiteknisk översiktscurs: Vattenkraft, Vattenfalls vattenbyggnadslaboratorium, Älvkarleby, 770222: Peter Larsen.
- (2) La Houille Blanche, nov. -57: Sur la possibilité d'utiliser l'énergie des courants marins au moyen de machines analogues aux aérogénérateurs: Reménieras et Smagghe.
- (3) Marine Technology Society Journal. Feb.-Mar. 1976: Extracting Energy from the Oceans.
- (4) Oceanographical Engineering, 1964, R. L. Wiegel: Currents, (13). Some characteristics of the oceans' waters (15).
- (5) Sea Technology, Jan. -74: Ocean research.
- (6) Surveyor, Feb. -75: Power from the Oceans.
- (7) Vindturbiner. Föreläsningar av prof. Erik Nilsson, 1976. CTH.
- (8) Öresunds-vand-komiteens undersökelse 1959-64. Köbenhavn 1967. Hydrografi. Kemi (IV).

