



Institutionen för vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola

Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

FLYTANDE VÅGBRYTARKRAFTVERK

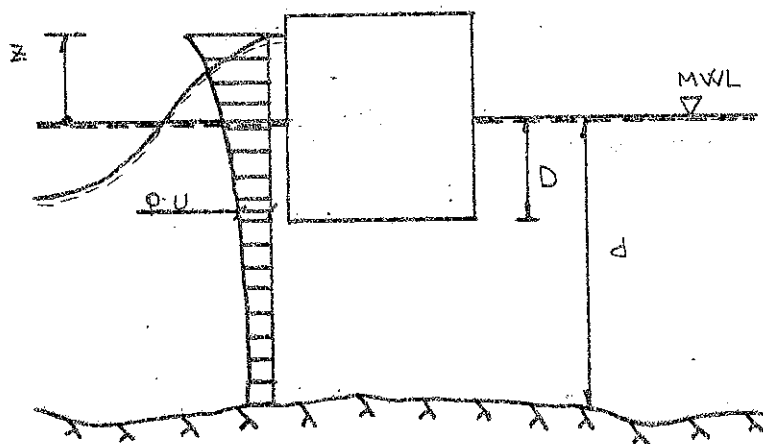
ETT EXAMENSARBETE I TVÅ DELAR :

DEL A

FUNKTION: VÅGKRAFTVERK
MARTIN KAVÉN

DEL B

FUNKTION: VÅGBRYTARE
LENA-KARIN JOHANSSON



EXAMENSARBETE

Nr. 1987:6

GÖTEBORG 1987



Institutionen för Vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola
Department of Hydraulics
Chalmers University of Technology

FLYTANDE VÅGKRAFTVERK

Ett examensarbete i två delar:

Del A

Funktion: Vågkraftverk

Martin Kavén

Del B

Funktion: Vågbrytare

Lena-Karin Johansson

Examensarbete

Nr. 1987:6

Göteborg 1987

Adress: Institutionen för vattenbyggnad
Chalmers Tekniska Högskola
· 412 96 Göteborg

Telefon: 031/72 10 00

Sammanfattning del A

Vi har utfört en teoretisk undersökning av möjligt energiuttag med flytande vågbrytare vid Visby hamn. Studien har inkluderat en uppskattning av botten-topografi, vindar, riktningar samt stryklängder mm. Därefter redovisar vi en modell för det hydrodynamiska systemet som skall ta till vara vågenergin. Kringliggande påverkan såsom is, fiske, båttrafik med mera har vi ej behandlat.

Resultat: Beräkningarna antyder att vågbrytarkraftverket bör ha dimensionen 9m per längdmeter vågfront samt väga 40 ton per meter. Uttagen effekt skulle då bli ca 1.6kW per meter vågbrytarkraftverk.

Någon kostnadsberäkning har ej gjorts. Jämförelsevis skulle vågbrytarkraftverket kunna täcka behovet av (ett fullständigt eluppvärmt hus, enfamiljs) el för ca 1 hushåll per längdmeter vågfront.

Sist kan sägas att många andra problem måste lösas med denna energiform såsom lagring (på kort/lång sikt), stabilitet i tiden (kan vara en lagringsfråga), kringliggande frågor som nämnts ovan.

Summary in English part A

We have made a theoretical investigation on the possibilities of gaining energy from floating breakwaters in the vicinity of Visby, Sweden. Our work has included a study of the natural conditions in the area such as bottom topography, winds, directions and fetches etc. Thereafter we penetrate a hydrodynamic theory of the buoy behaviour in deep water. Environmental problems as ice, fishing and boating are not dealt with.

Results: The calculations give a hint of the dimensions of the buoy as follows:
width: 9m
mass: 40 metric tons per meter wavefront.
The power gained is approximately
1.6kW per meter.

No cost estimate is done.

As a comparison the power gained would support one household (fully electrified) with electricity per meter wavefront.

Finally many other problems must be solved concerning this way of gaining energy, such as storage, stability in time (problems of long/short time storage) and concerns earlier mentioned.

Del B - funktion : vågbrytare

I del B av rapporten studeras vågbrytarkraftverkets funktion som vågbrytare. Dess utformning diskuteras, vågsituationen i hamnen betraktas och förankringskrafterna studeras.

Genom att studera inkommande och transmitterade vågeffekter samt beaktande av diffraktion medelst diagram, fås en bild av vågsituationen i hamnen för dimensionerande vindförhållanden (de sk 20-årsvindarna). I hamnens inlopp fås våghöjder på 13,3 m, som sedan avklingar till 8-10 m utmed de södra kajerna och 1,2-3 m utmed den norra vågbrytaren.

Krafterna per löpmeter mot vågbrytaren studeras med teorin om krafter mot en vertikal, totalreflekterande kaj. Belastningen i horisontalled beräknas till 925 ± 1595 kN/m och i vertikalled 360 ± 1090 kN/m. Beräkningarna är gjorda utifrån dimensionerade 20-årsvindar.

Förord

Vatten - det ämne som alla livsbetingelser är beroende av och som finns omkring oss i så skiftande former har sammanfört oss examensarbetare (Lena-Karin Johansson samt Martin Kavén) med Institutionen för Vattenbyggnad på Chalmers Tekniska Högskola. Vi har tillsammans med vår handledare (Nils Mårtensson) försökt att kombinera ett vågkraftverk och en flytande vågbrytare. Vi har många att tacka för hjälpen men framför allt Nils Mårtensson, verksam vid Chalmers samt Götaverken Arendal, Göteborg.

Bakgrundsarbetet, såsom framtagning av förutsättningar, teoristudier och programmering har utförts gemensamt. Optimering av effektuttaget från vågkraftverket har studerats djupare av M. Kavén och vågbrytarfunktionen av L-K Johansson.

Innehåll

Sammanfattning

del A : funktion vågkraftverk

del B : funktion vågbrytare

Förord

Innehåll

1. Inledning 1

Del A - funktion : vågkraftverk

2. Vindvågor

2.1 Allmänt 2

2.2 Vindens höjdberoende 3

2.3 Vindens riktning 4

2.4 Stryklängder 7

2.5 Normal- och extremvindar 9

2.6 Effekter 10

2.7 Energipotentialen 11

2.8 Jämförelse med andra mätningar 12

2.9 Slutkommentarer 16

3. Optimering

3.1 Allmänt 17

3.2 Vågklimat 18

3.3 Vågbrytarkraftverket 21

3.4 Optimering 30

3.5 Verkningsgradens nedskrivning 37

3.6 Slutkommentarer 38

Del B - funktion : vågbrytare

4. Vågförhållanden

4.1 Allmänt 39

4.2 Aktuella djupvattenvågor 39

4.3 Refrakterade vågor 41

4.4 Vågbrytarkraftverkets utformning. 50

5.	<u>Hamnförhållanden</u>	
5.1	Allmänt	52
5.2	Reflektion och transmission	53
5.2.1	Teoretisk effektbetraktelse	53
5.2.2	Beräknad transmission m h t effektbetraktelse	57
5.2.3	Beräknad transmission m h t konstruktionens bredd.	60
5.3	Diffraction	63
5.3.1	Diffraction vid vågbrytare	63
5.3.2	Aktuell diffraction	65
5.4	Sammanfattning	67
6.	<u>Krafter mot vågbrytaren</u>	
6.1	Allmänt	70
6.2	Vågkrafter	70
6.3	Dimensionerande belastningar	74

Bilagor

del B : Bilaga I : Sjökort över Visby hamn
Bilaga II: Aktuella diffraktionsdiagram.

Appendix

del A : Basdata
Technocean (diverse stenciler)
del B : Parameterlista

Litteraturförteckning

FLYTANDE VÅGBRYTARKRAFTVERK

ett examensarbete i två delar:

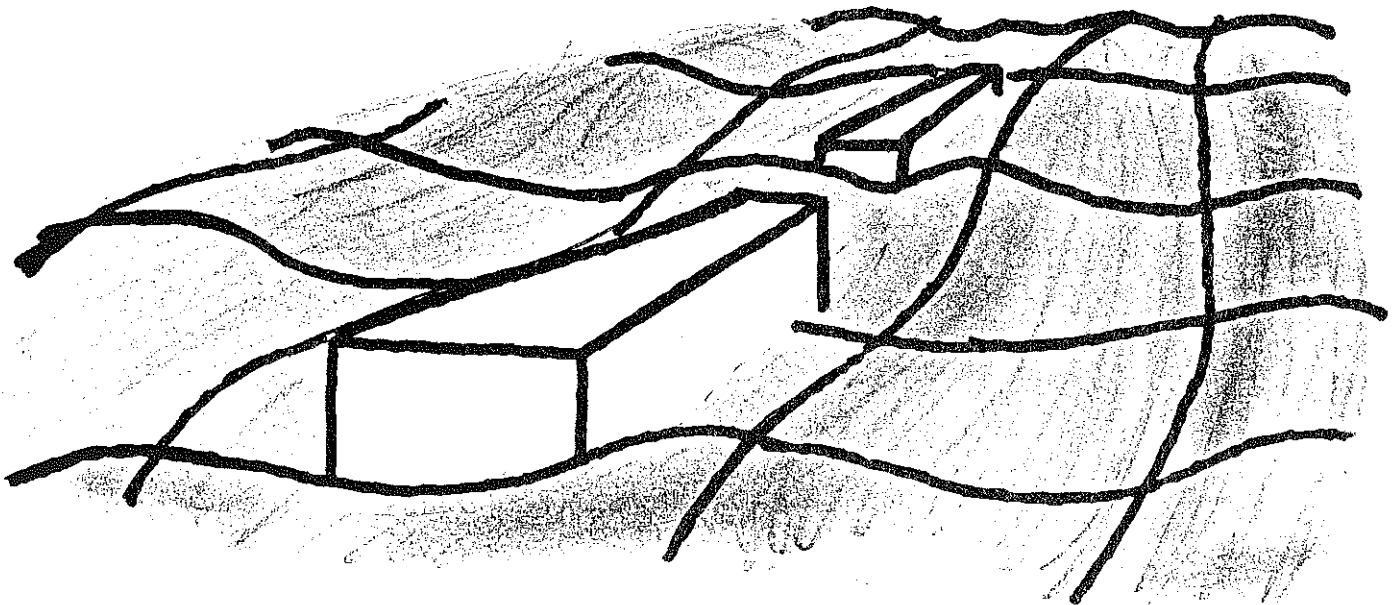
del A av Martin Kavén

del B av Lena-Karin Johansson

vid

Institutionen för Vattenbyggnad

Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg 1987



DEL A

1. Inledning

Denna rapport har som målsättning att teoretiskt undersöka möjligheten att utforma ett vågkraftverk som samtidigt skall fungera som en flytande vågbrytare.

Då en hamn skall byggas är det ofta nödvändigt att innesluta hamnbassängen med någon sorts vågbrytare för att skapa en lugn vattenyta. Vågbrytarens uppgift är att dämpa, utsläcka vågornas energi. Ofta placeras hamnar i relativt grunda vatten varvid bottenfasta vågbarriärer är ekonomiska. Många gånger byggs även hamnar i djupa vatten och då krävs en orealistisk mängd fyllnadsmassor. Den bästa lösningen är då att utforma flytande vågbrytare. Det finns en mångfald lösningar.

I många länder ser man sig om efter nya energikällor. Eftersom jorden till 75% täcks av vatten finns här, teoretiskt sett, en enorm energipotential.

Invid den svenska kusten är energipotentialen av storleksordningen 1-5 kW/m. En storm i Nordatlanten har som jämförelse en energipotential på 300-500 kW/m.

Ett vågkraftverk bör ta ut så mycket energi som möjligt ur vågorna.

En vågbrytare bör dämpa vågorna maximalt.

Dessa kriterier är svåra att kombinera, då man vill att vågbrytaren skall röra sig lite och kraftverket mycket.

Vi gör ett försök att beskriva ett vågbrytarkraftverk. Först måste vi dock återvända till naturförutsättningarna.

I N N E H Å L L (DEL A)

Förord

Sammanfattning - Summary in English

1.	Mål	(1)
2.	<u>Vindvågor</u>	
2.1	Allmänt	(2)
2.2	Vindens höjdberoende	(3)
2.3	Vindens riktning	(4)
2.4	Stryklängder	(7)
2.5	Normal- och extremvindar	(9)
2.6	Effekter	(10)
2.7	Energipotentialen	(11)
2.8	Jämförelse med andra mätningar	(12)
2.9	Slutkommentarer	(16)
3.	<u>Optimering</u>	
3.1	Allmänt	(17)
3.2	Vågklimat	(18)
3.3	Vågbrytarkraftverket	(21)
3.4	Optimering	(30)
3.5	Verkningsgradens nedskrivning	(37)
3.6	Slutkommentarer	(38)

Litteratur

Appendix: Basdata
 Technocean (diverse stenciler)

K A P I T E L 1

Mål

K A P I T E L 2

Vindvågor

2.2 Vindens höjdberoende

Eftersom observationerna gäller 10 meters höjd över havet har vi räknat ut motsvarande värden för 19.5 meter över havet. Detta då sambanden, ekvation(2-C), i vindvågberäkningarna (hindcasting) nyttjar vindhastigheten på 19.5 möh.

Följande formel rekommenderas av Pierson (1964):

$$U_y = U_{10} (1 + 2.5 \sqrt{C_{10}} \cdot \ln(y/10)) \quad (2-A)$$

där U = vindhastigheten i m/s

y = önskad höjd i m

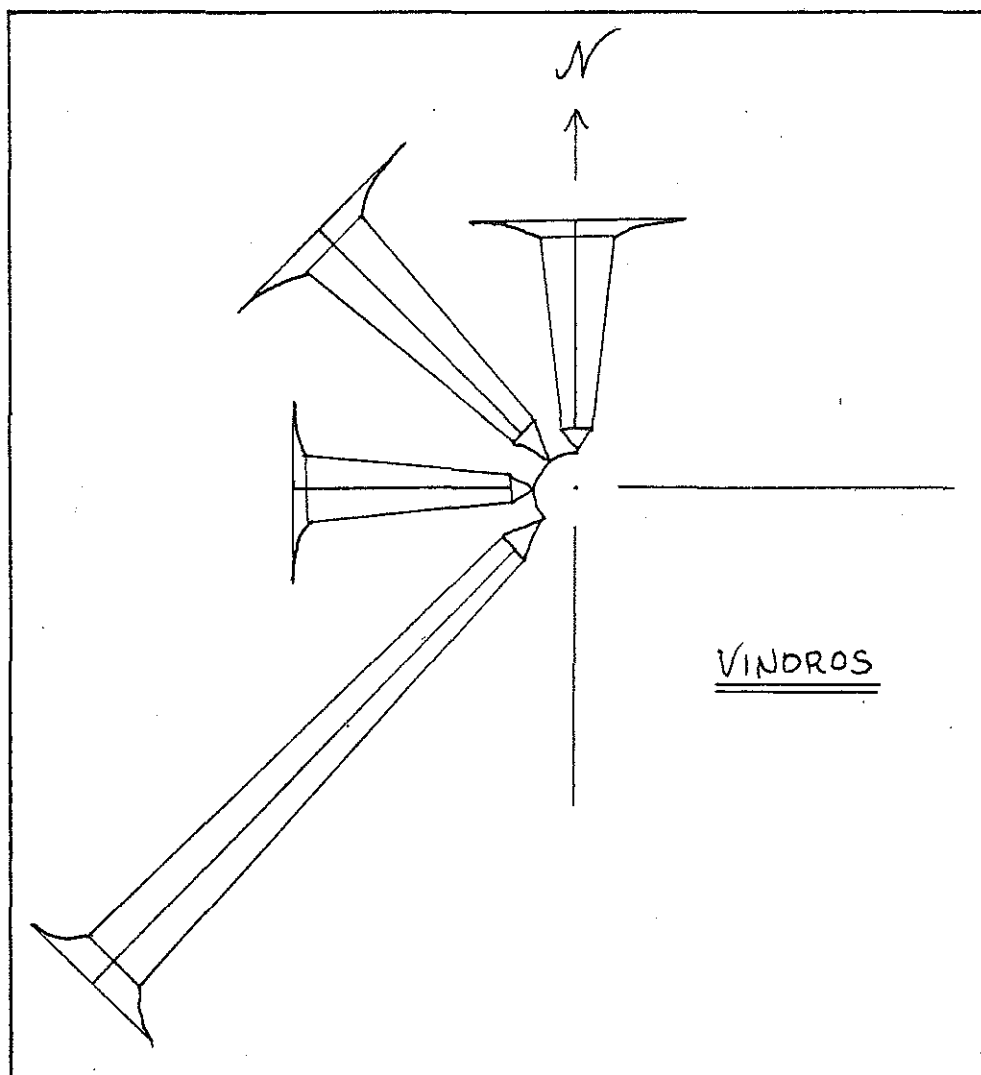
$$C_{10} = 5 \cdot 10^{-4} \sqrt{U_{10}} \quad \text{för } 1 \text{ m/s} < U < 15 \text{ m/s}$$

$$C_{10} = 2.6 \cdot 10^{-3} \quad \text{för } U > 15 \text{ m/s}$$

2.3 Vindens riktning

För att kunna placera ut "vågbrytarkraftverket" på bästa sätt (ur hållfasthets-, energi- samt dämpande synpunkt) måste vi veta i vilka riktningar det blåser och med vilken styrka.

En uppskattning av vindfördelningen i de olika riktningarna kan fås ur nedanstående vindros:



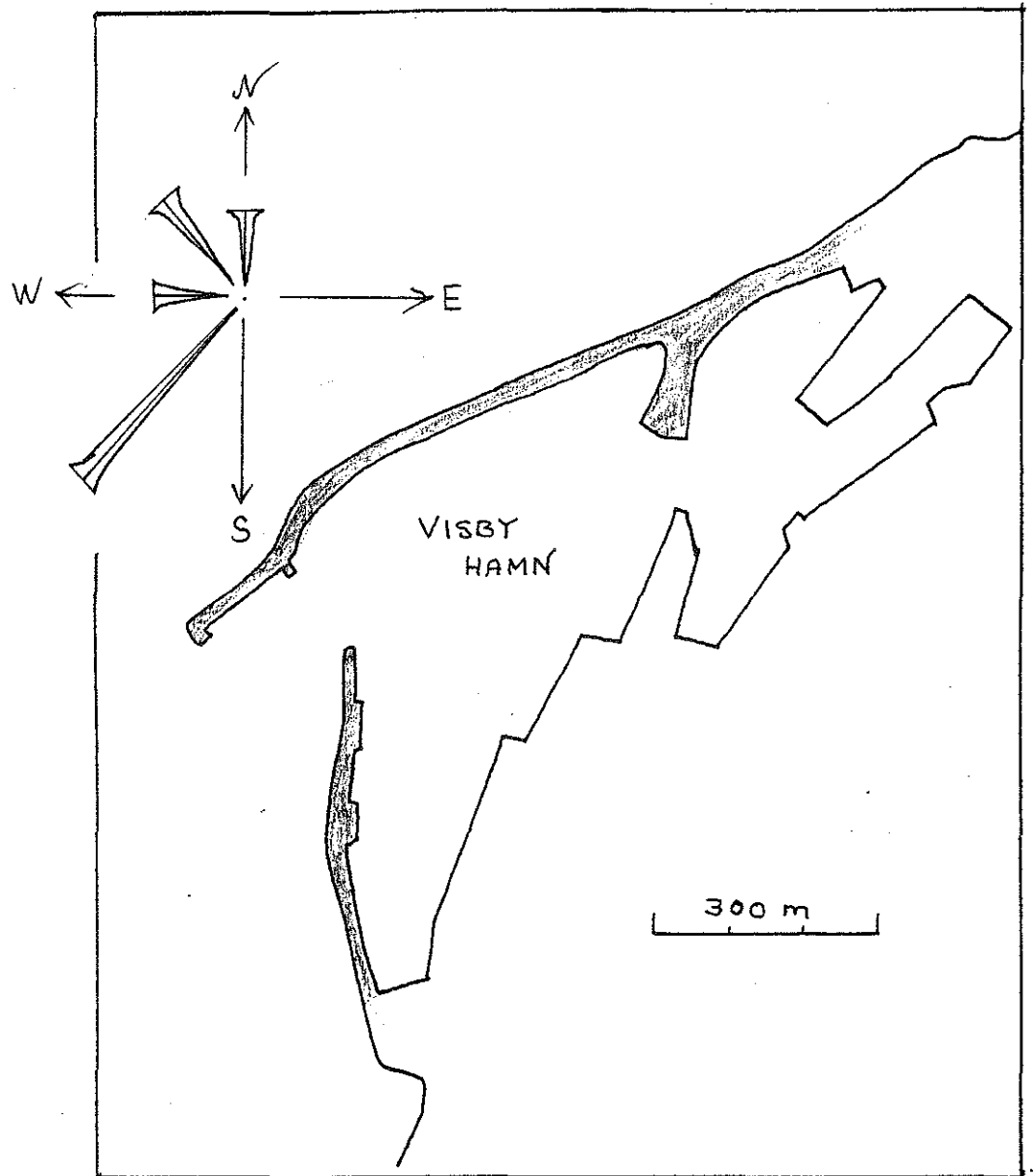
Fig(2-1) Vindros för Visby.

- Bredden på strutarna anger vindstyrka.
- Längden anger varaktigheten i de olika riktningarna.

Vindrosen visar att:

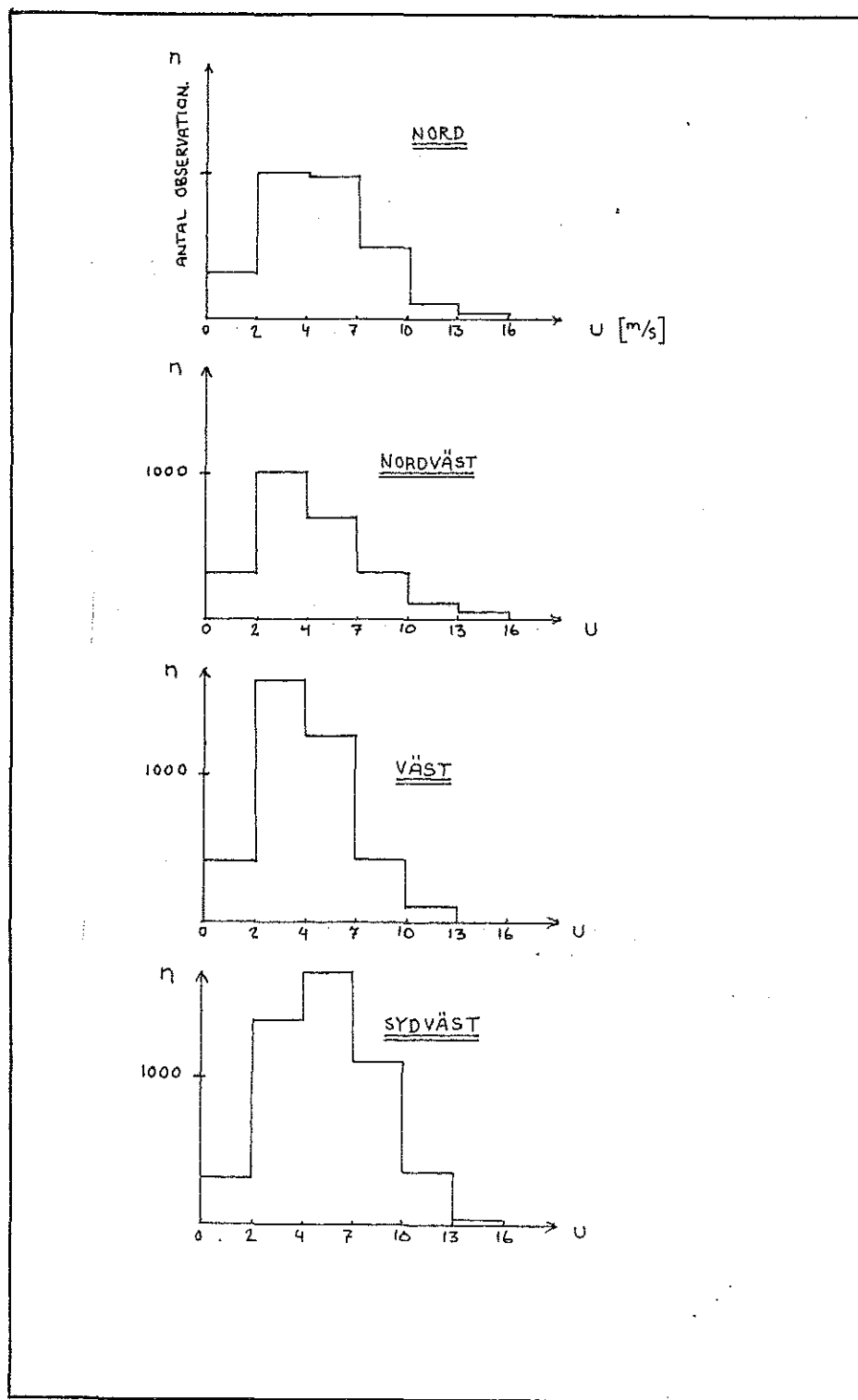
- 90% av vindhastigheterna ligger i regionen 2-10m/s
- det blåser mest från sydväst
- de starkaste vindarna kommer från norr.

Rapporten bygger på att befintliga vågbrytarpirer ej finns. De är skuggmarkerade i fig(2-2).



Fig(2-2) Vindrosens placering i Visby hamn.

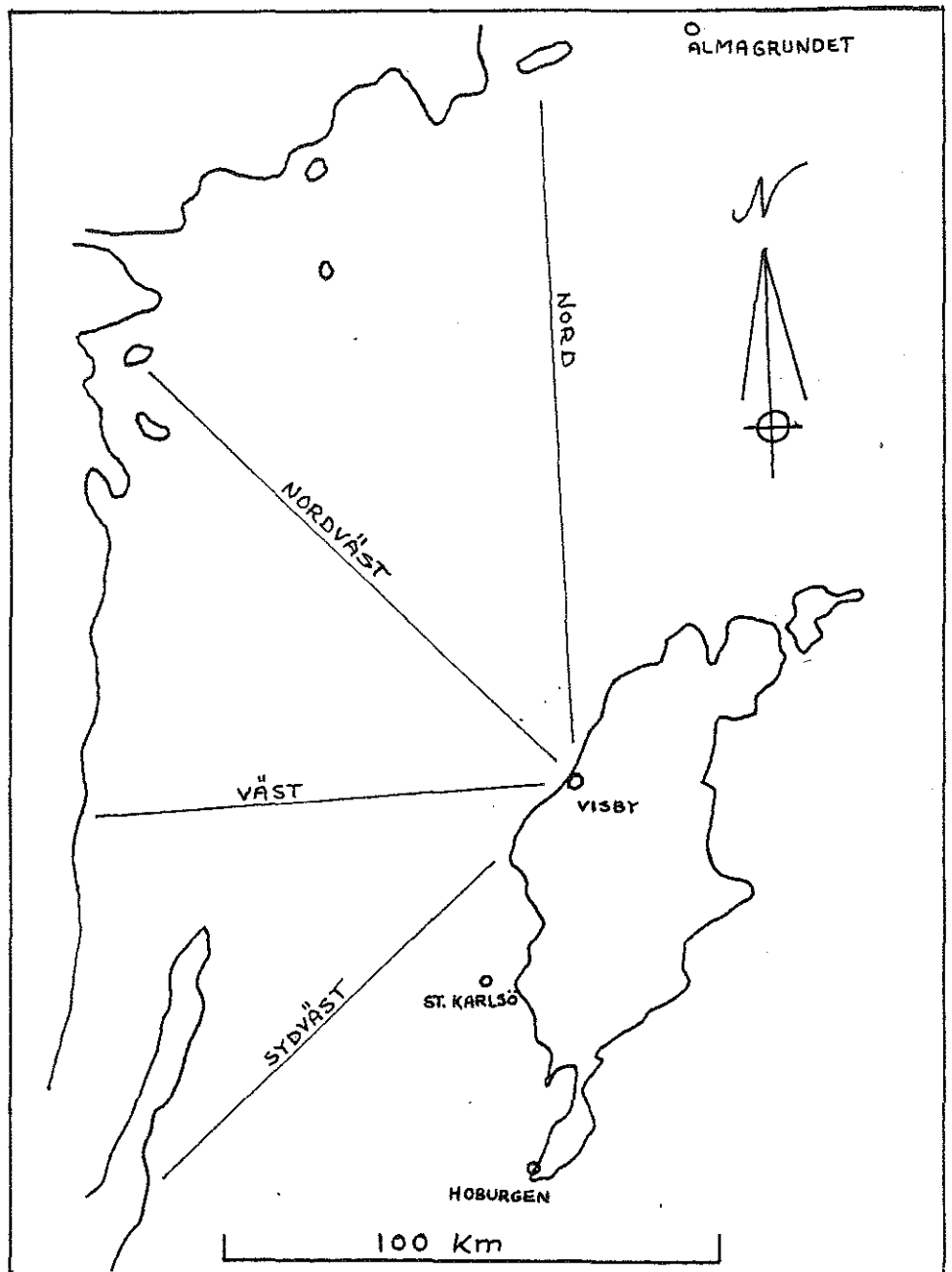
Figurerna å nästkommande sidor, fig(2-3) samt fig(2-4), visar antalet observationer av de olika vindhastigheterna i respektive riktning samt stryklängder.



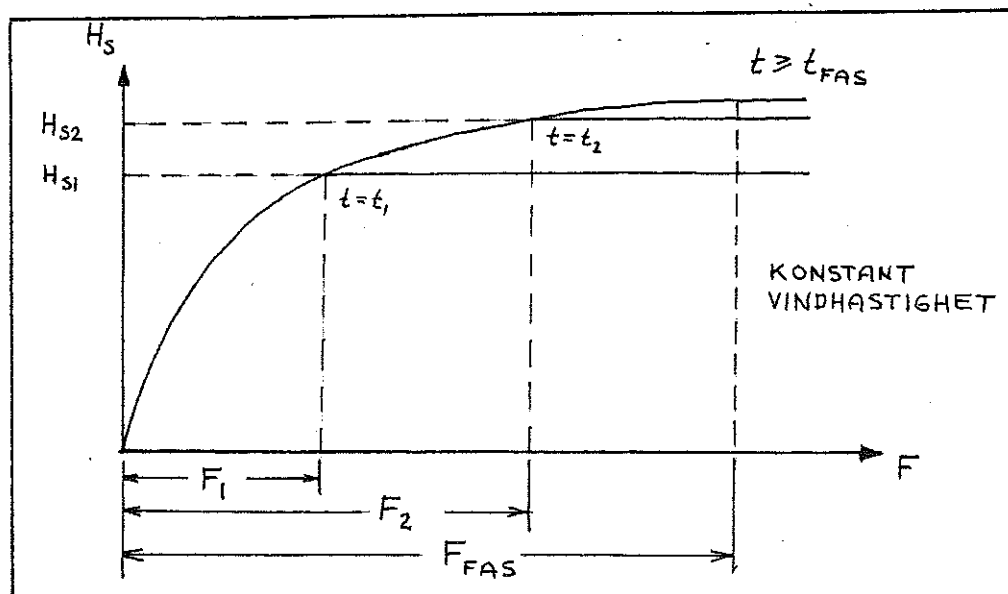
Fig(2-3) Frekvensdiagram. Diagrammen bygger på antalet observationer av vindhastigheter i olika riktningar.

2.4 Stryklängder

Om vinden blåser över ett tillräckligt stort område under en tillräckligt lång tid (vilket vi förutsätter i dimensioneringsstadiet ur hållfasthetssynpunkt) nås en punkt där ytterligare energi från vinden till vågen ej kan överföras. Se fig(2-5). Detta kallas FAS (Fully Arisen Sea). För att uppnå FAS krävs således en minimistryklängd/tid. Vidare krävs då långa stryklängder samt varaktigheter vid starka vindar för att FAS skall kunna uppnås. Vi har valt att studera fyra huvudriktningar, se fig(2-4).



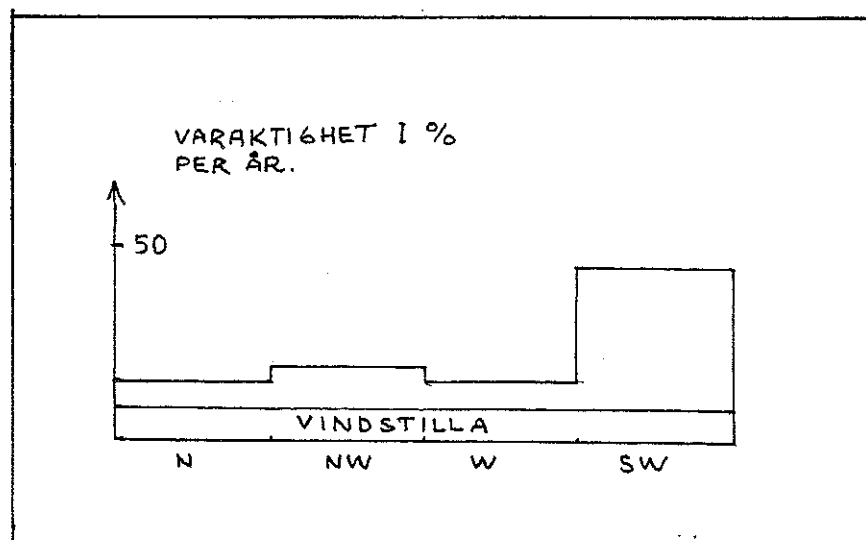
Fig(2-4) Stryklängder.



Fig(2-5) Våghöjdens beroende av stryklängd samt tid (varaktighet).

Maximal våghöjd med avseende på FAS kan i Visby området endast uppnås då vindarna understiger 7 m/s. Stryklängderna räcker ej till för vindar överstigande 7 m/s.

Hastighetsintervallet 2-10 m/s för Visby-området kräver en minimivaraktighet för vindarna på ca 5-20 minuter, vilket kan anses vara en ganska kort tid. Därmed antager vi i fortsättningen att FAS kan uppnås.



Fig(2-6) Vindens varaktighet i de olika riktningarna, jämför med fig(2-1).

2.5 Normal- och extremvindar

Med normalvind menar vi de vindar som förekommer mest under ett år. De ligger till grund för dimensioneringen ur energiproducerande synpunkt. Med extremvindar menar vi de vindar som uppträder en gång per år
en gång per tjugo år eller
en gång per femtio år.

Dessa ligger till grund för hållfasthetsberäkningarna. Tjugoårsvinden är för oss den intressanta då vågbrytarkraftverket knappast har längre livslängd än tjugo år.

För att få fram ovanstående extremvindar har vi nyttjat oss av Weibulls plottningsformel:

$$P_n = \frac{n}{N + 1} \cdot 365 \quad (2-8)$$

där n = antalet observationer med
vindstyrkor över U_n

$$R_n = 1/P_n = \text{återkomstperiod}$$

Tabell(2-1) Extremvindarna i de olika riktningarna i m/s:

	1-årsvind	20-årsvind	50-årsvind
N	22.5	29.0	30.0
NW	23.0	30.0	32.0
W	22.0	31.0	35.0
SW	22.0	28.0	30.0

Källa: SMHI, vindmätningar vid Visby flygplats.

2.6 Effekter

För att beräkna vågornas effekt har vi använt oss av ett så kallat Modified Pierson-Moskowitz Spectrum. Förutsättningen för att nyttja det sambandet bygger på att dimensionerande vindar ej överstiger 7 m/s. Med andra ord FAS skall kunna uppnås.

Nedan redovisas formeln enligt Pierson-Moskowitz (1964):

$$S(f) = \alpha \cdot \frac{g^2}{(2\pi)^4 \cdot f^5} e^{(-\beta(g/2\pi U_{19.5} \cdot f)^4)}$$

där

$$\alpha = 8.1 \cdot 10^{-3} (F/F_{FAS})^{-0.194} \quad (2-C)$$

$$\beta = 0.1 \cdot e^{((\ln 7.4)(F/F_{FAS})^{-0.284})}$$

$$F_{FAS} = 2.4 \cdot 10^3 \cdot U_{19.5}^2$$

$$\text{Effekt} = \frac{\rho g^2}{4\pi} \cdot \int \frac{S(f)}{f} \cdot df \quad (2-D)$$

Vågeffekten kan beräknas enligt formel(2-D) ovan.

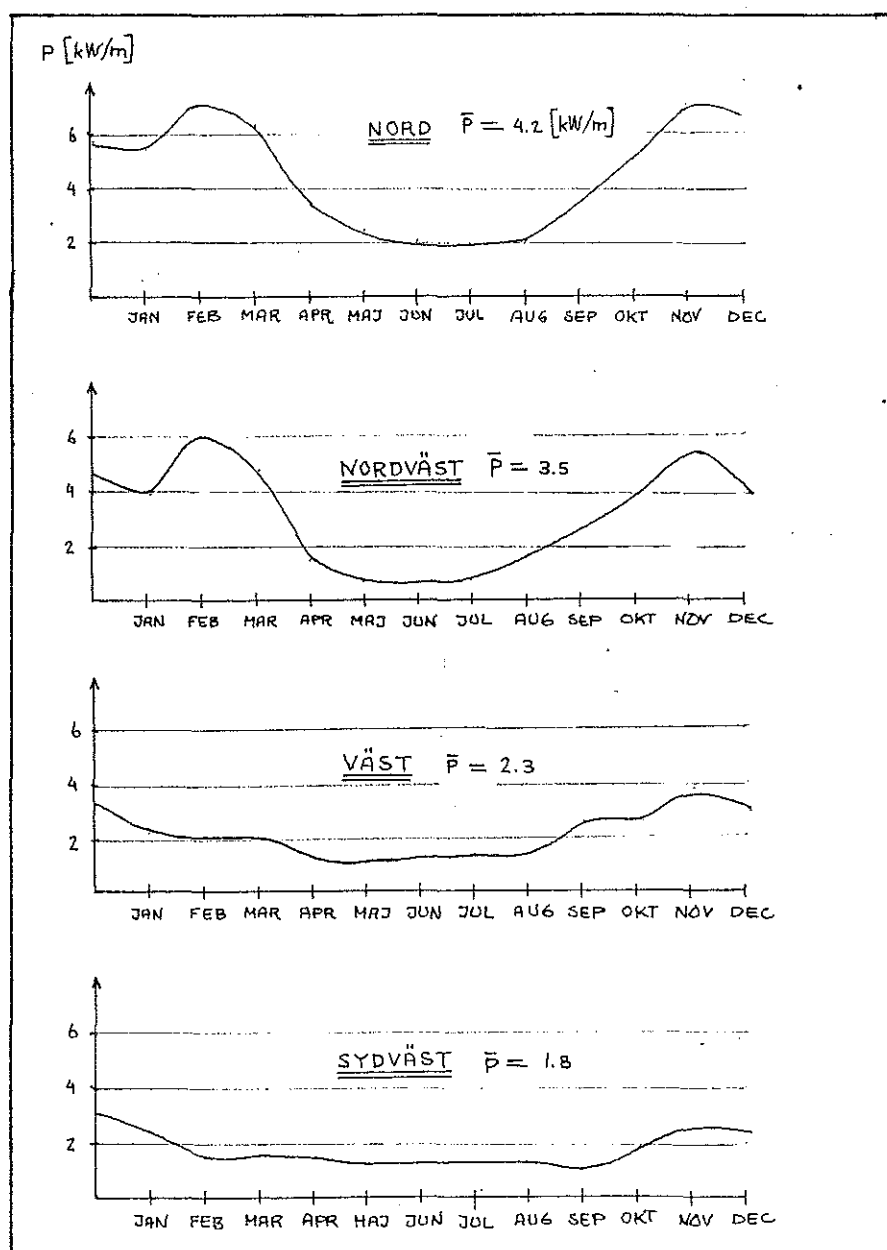
Tabell(2-2) Vågeffekter i kW/m vid några olika vindhastigheter:

	4 m/s	7 m/s
N	0.2	2.4
NW	0.2	2.4
W	0.2	2.1
SW	0.1	1.1

2.7 Energipotentiaalen

I följande diagram redovisas vågenergipotentiaalen i olika riktningar under ett år. Ordinatnan anger medelvärden över hela hastighetsspektrum. (Statistik från Visby flygplats, korrigerad för höjden).

Nord och nordväst ger högre effekter medan väst och sydväst har lägre varaktighet enligt tidigare diagram, jämför fig(2-1).



Fig(2-7) Vågenergipotentiaalens årsvariation.

2.8 Jämförelse med andra mätningar

Fig(2-8) är en sammanslagning av fig(2-7) och visar vågeffektens variation över året. Fig(2-9) är en jämförelse med Technocean, T0. Materialet från T0 återfinnes i appendix. T0 är ett teknikföretag i Göteborg. I fig(2-9) har året indelats i tremånadersperioder av T0 varvid vi har gjort samma sak med våra beräkningar och överfört fig(2-8) i fig(2-9) för jämförelses skull. Den heldragna linjen i fig(2-9) är T0:s och den streckmarkerade hänför sig till våra beräkningar. Man kan se en överensstämmelse i utseendet mellan beräkningarna, dock har vi fått något lägre värden.

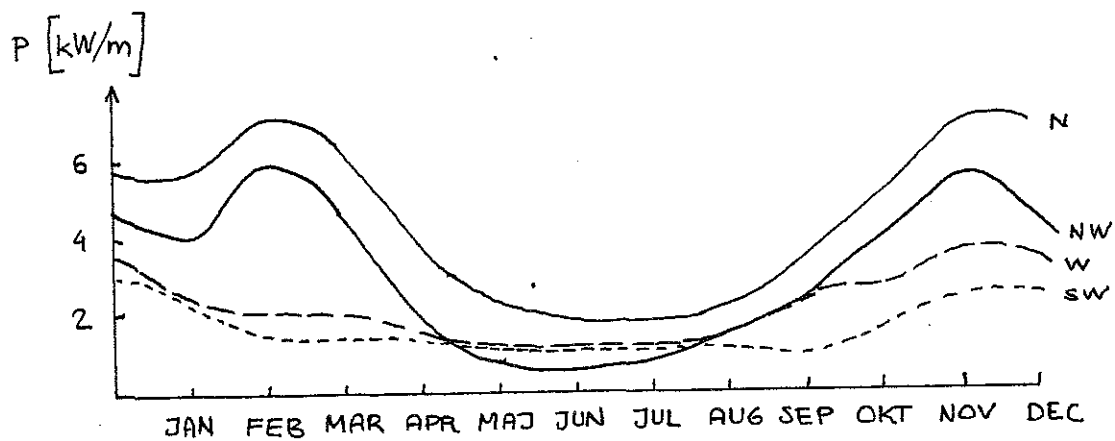
Technocean har korrigerat sina beräkningar enligt, se appendix, nedan:

- Varaktigheten har normerats mot ett kvartal motsvarande 2190 timmar.
- Hänsyn har tagits till is vid beräkning av varaktigheten.
- Kalibrering mot mätningar har gjorts av de beräknade värdena.

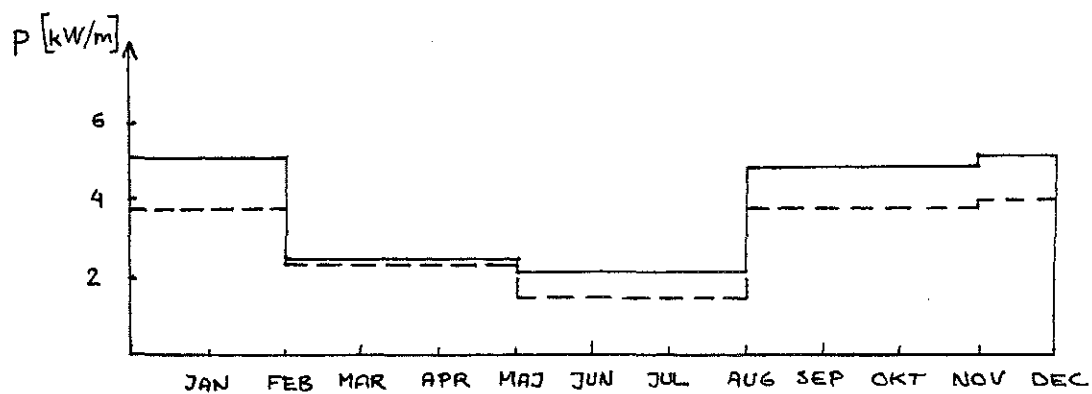
Eftersom det Julianska året är 365.25 dagar motsvarar det 2191.5 timmar per kvartal. (24 timmar per dygn). Normering kan anses vara onödig.

Korrektionsfaktorn för is ligger kring 1.0 enligt T0. Varför de har en ganska obetydlig inverkan i skillnaderna i diagrammen.

Korrektionsfaktorerna då det gäller kalibrering mot mätningar visar att vintertid erhålles större vågeffekter än de beräknade, det beror bland annat på att de tyngre kalla luftmassorna vintertid påverkar vågbildningen.



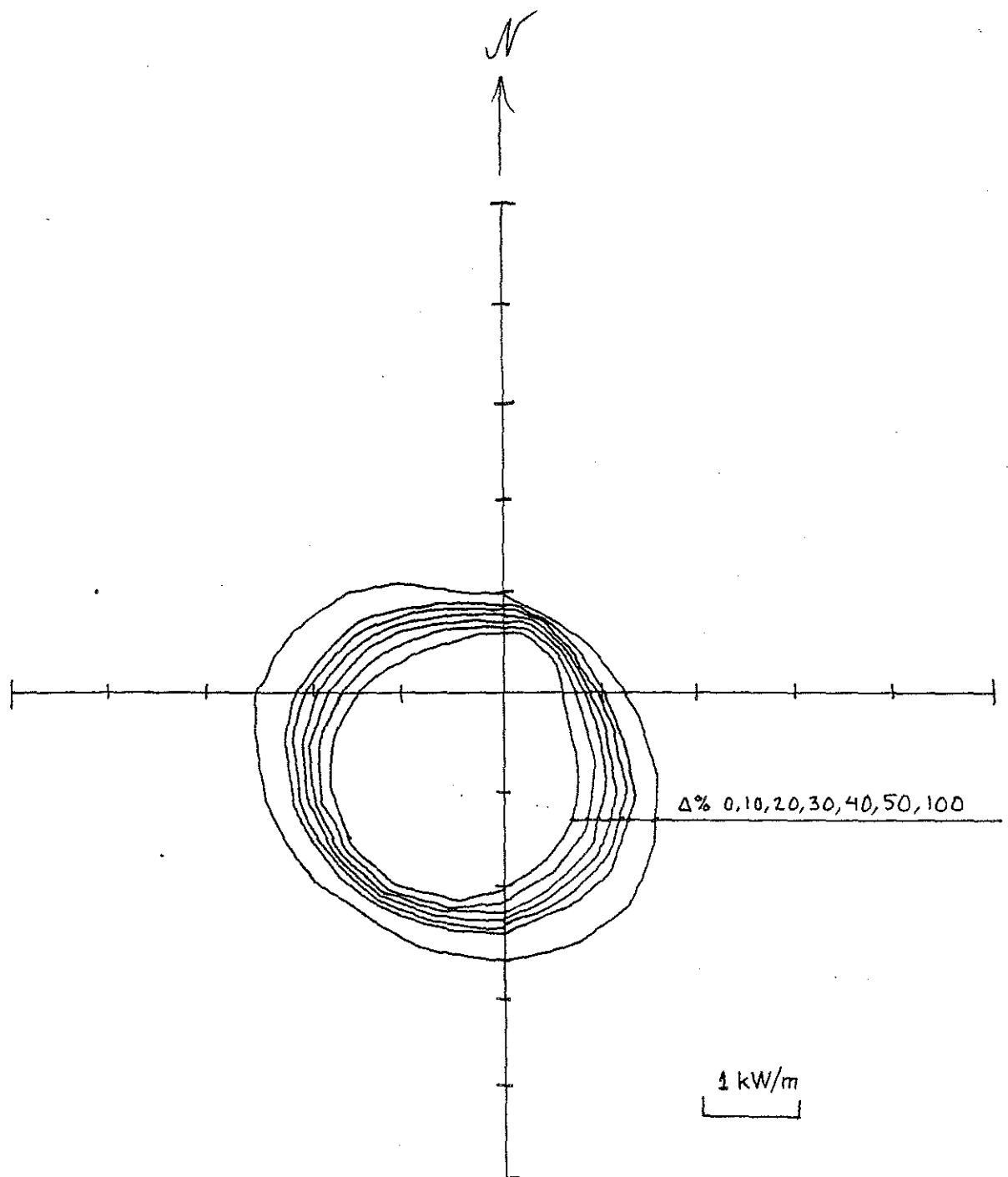
FIG(2-8) Vågenergipotentialen sammanställd från figur(2-7).



FIG(2-9) Vågenergipotentialen, en jämförelse mellan våra beräkningar och Technocean (se appendix).

Vi har rätt och slätt beräknat effektinnehållet utan korrektionsfaktorer, vilket kan vara en förklaring till skillnaderna i resultaten. En uppenbar orsak är att våra beräkningar bygger på landobservationer vid Visby flygplats. T0:s beräkningar bygger på observationer gjorda vid Stora Karlsö.

Fig(2-10) ger, för ytterligare jämförelse, en uppskattning av vågenergipotentialen, (egentligen vågeffektpotentialen), vid Almagrundet, se fig(2-4). Den något längre stryklängden i sydvästlig riktning för Almagrundet ger något högre energipotential. Men i övrigt är vind-(våg)fördelningen ganska lika Visby. Man skulle kunna våga sig på en slutsats att vind-energipotentialen är ganska stabil i området som helhet med avseende på riktningarna.



F16(2-10) Vågenergipotentialen (Totalt) vid Almagrundet enligt SSPA Marintekniska Institutet. Mellan åren 27/10/78-30/9/83.

Δ = 100 % motsvarar vågeffekten i ett ostört "punktkraftverk" med verkningsgraden 100 %. (Hänsyn har tagits till sned infallsvinkel i ovanstående figur).

2.9 Slutkommentarer

Ur diagrammen kan utläsas att effektpotentialen (ur dimensioneringssynpunkt) är ganska lika i respektive riktning. Några större skillnader förekommer ej varför vågbrytarkraftverken kan göras i en och samma dimension. Detta är positivt med tanke på eventuella fördelar vid serieproduktion.

K A P I T E L 3

Optimering

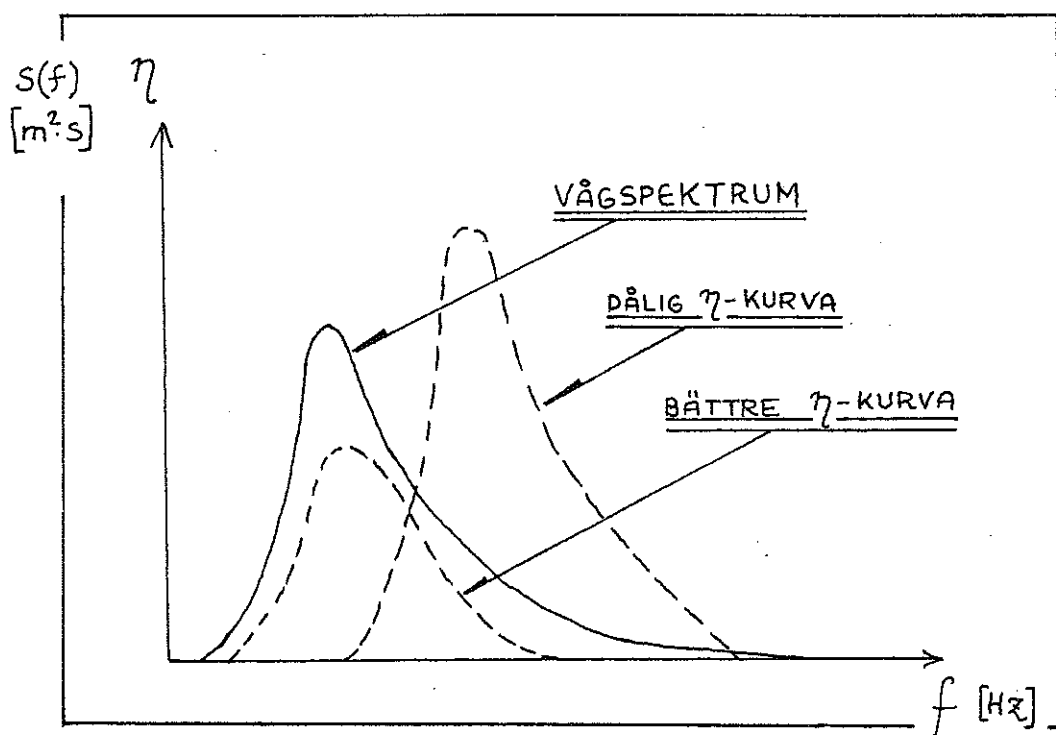
3. Optimering

3.1 Allmänt

Vi strävar efter att kunna kombinera en vågbrytare (som skall dämpa vågorna maximalt) och ett vågkraftverk (som skall producera så mycket energi som möjligt). Vågklimatet beskrivs vi med ett Pierson-Moskowitz spektrum, se ekv(2-C).

Anläggningens rörelseegenskaper m a p vågrörelserna kan beskrivas med en Transferfunktion, se ekv(3-C). Det visar sig vara svårt att kombinera funktionerna maximalt energiuttag samt maximal dämpning.

Vi försöker passa in verkningsgradskurvan, ekv(3-L), med vågspektrum, ekv(2-C), se fig(3-1) nedan.



Fig(3-1) Verkningsgrad kontra vågspektrum.

Hur bör anläggningen se ut?

Längre fram i rapporten behandlas

Transferfunktionens beroende av massan

vattenlinjearea samt
yttre dämpning.

Sist görs en uppskattning av effekten med hänsyn taget till reducering av verkningsgraden, se slutet på avsnitt 3.5, samt hur mycket energi som kan utvinnas.

3.2 Vågklimatet

På följande två sidor redovisas PM-spektra för Visby, fig(3-2), samt Almagrundet, fig(3-3). Diagrammen visar energitätheten för olika vindhastigheter, enligt tabell(3-1).

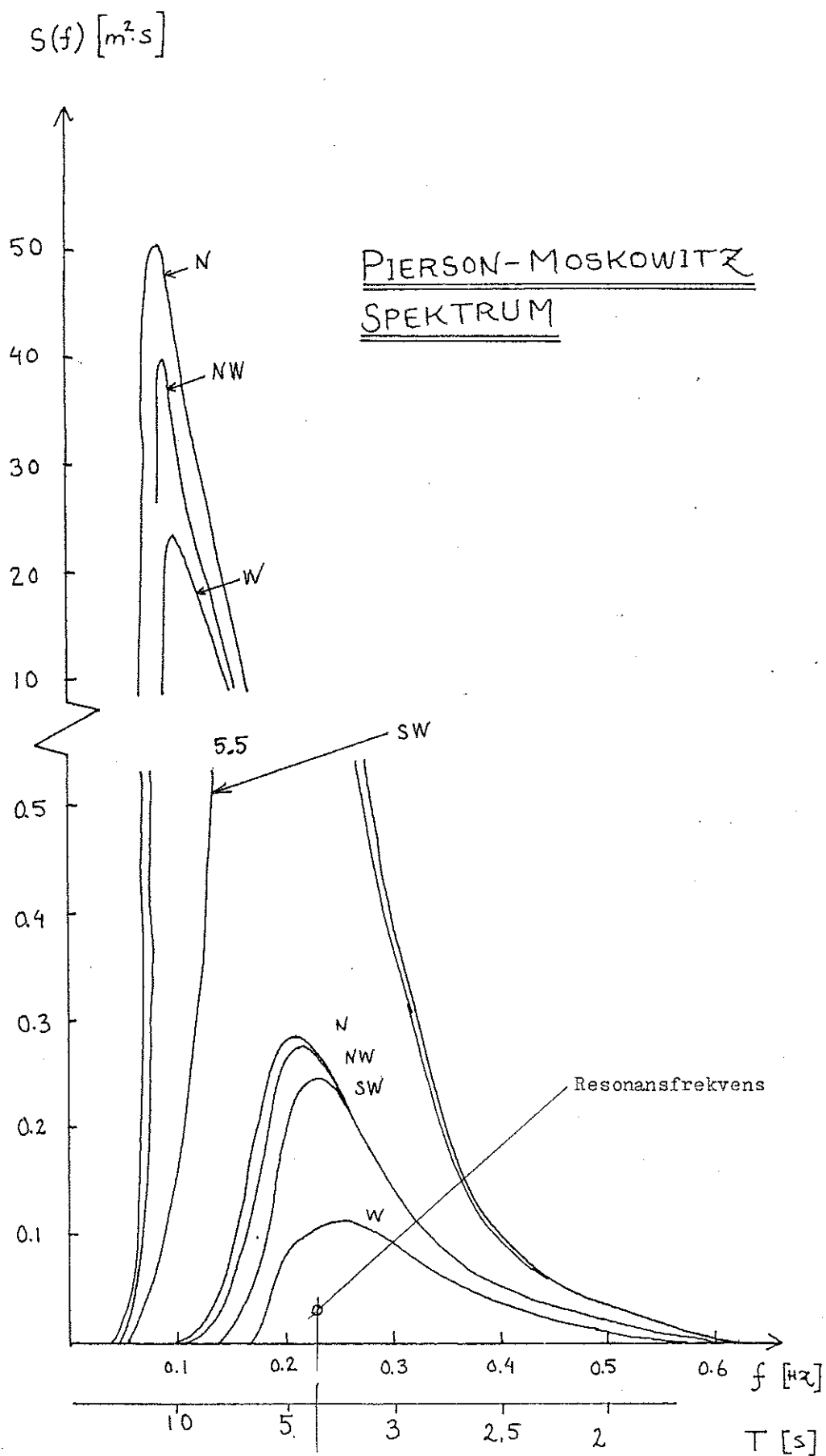
Ur Visbydiagrammet ser vi att då vi skall dimensionera anläggningen bör amplitudresponsens topp ligga i intervallet 1.6-10 sekunder (under stormförhållanden 1.6-20 sekunder). Resonans, d v s transferfunktionens maximum, bör således inträffa vid frekvensen 0.23 herz (perioden 4.4s) för att få en väl avstämd anläggning ur dämpningssynpunkt.

(Våra fortsatta beräkningar grundar sig endast på värden framtagna i Visby-området, Almagrundet är med endast som jämförelse.)

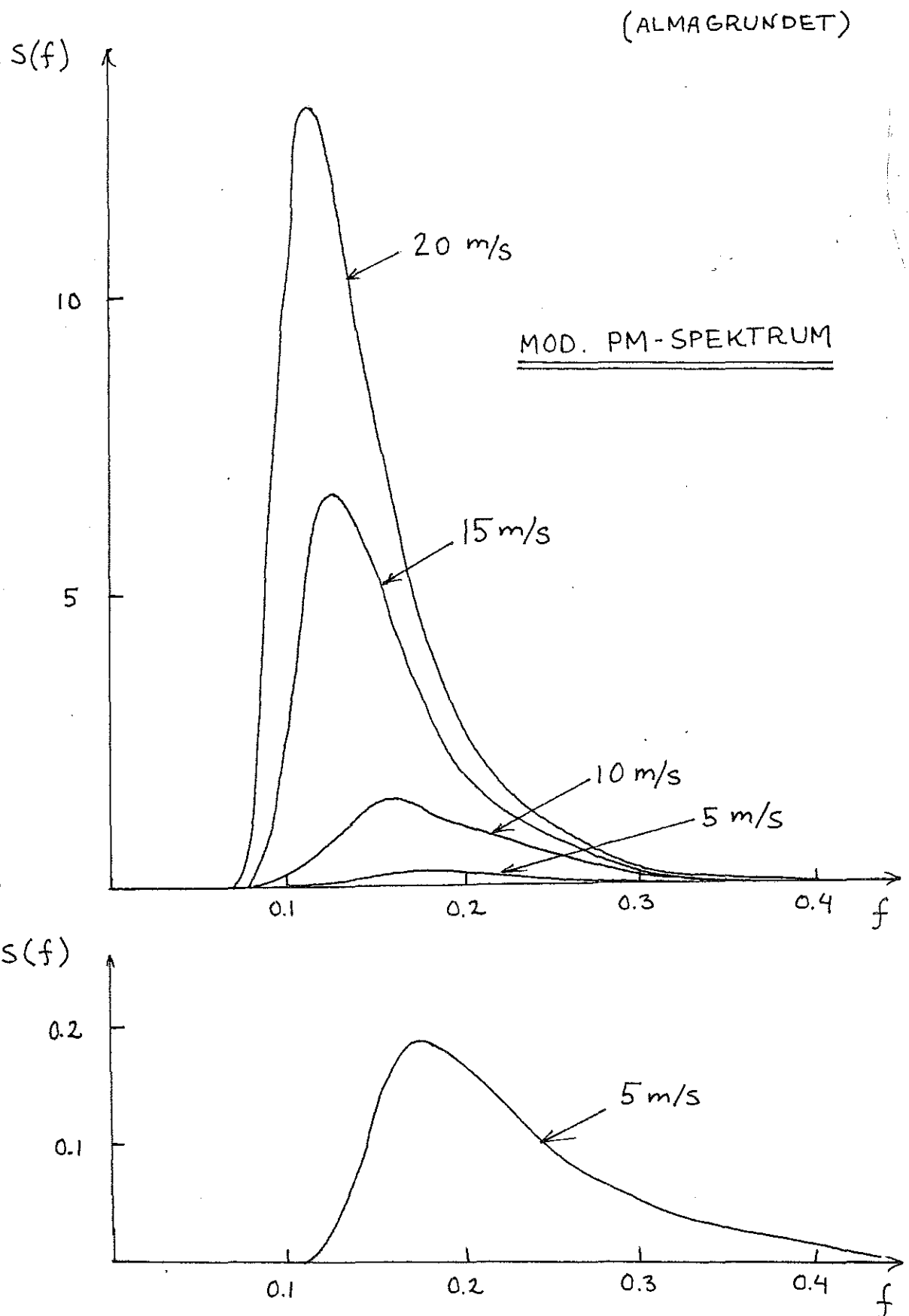
Det måste betonas att då vattnen är djupa ganska snart utanför Visby har vi i beräkningarna antagit att djupt vatten gäller överlag.

Tabell(3-1) Vågklimatet för Visby.

	Normalvind (m/s)	H_s (m)	Extremvind (m/s)	H_s^{20} (m)
N	6	0.8	29	12.0
NW	6	0.8	30	13.3
W	5	0.6	31	10.3
SW	7	0.8	28	5.5



Fig(3-2) Mod.PM-spektrum för Visby.



Fig(3-3) Av Marintekniska Institutet SSPA framtagna medelspektra vid öppen sjö.

Station: Almagrundet, 27/10/78-30/11/81.

3.3 Vågbrytarkraftverket

Först måste vi ta fram en matematisk modell för kraftverkets vertikala rörelse. (Vi fösummar för enkelhetens skull de övriga rörelserna). Det oscillerande systemet kropp-vatten antages vidare vara linjärt för att det skall vara enkelt att superponera de olika vågfrekvenserna. Vattenvågorna anses vara rena sinusvågor.

$$\text{Vågrörelsen} \quad \zeta(t) = \zeta_0 \cos(\omega t) \quad (3-A)$$

där $\zeta(t)$ = vattenytans läge
i tiden

ζ_0 = amplituden

ω = vinkelhastigheten

t = tiden

Kroppen:

För enkelhetens skull har vi antagit att kroppen har en rektangulär geometri. Se fig(3-4).

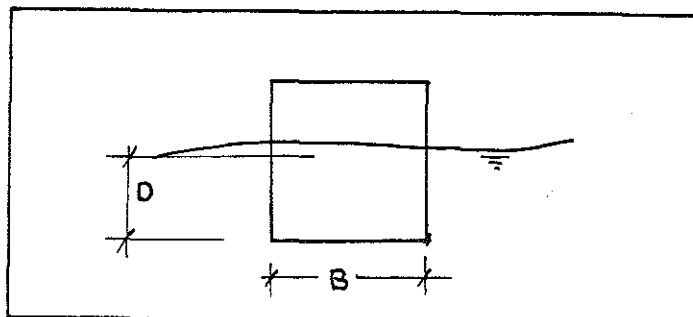
Vidare antaganden införes:

$$A = B = 2D$$

där A = vattenlinjearea per längdmeter

B = kroppens bredd

D = djupgåendet



Fig(3-4) Tvärsnitt av kroppen.

Vi har valt djupgåendet till halva bredden då detta medför att kroppen flyter stabilt i vattnet. (Eller snarare om tyngdpunkten ligger djupare än halva djupgåendet är kroppen stabil).

Vidare medger förenklingarna att vi kan sätta:

$$\text{Återförande kraft} = C_r \cdot Z = \rho g B Z$$

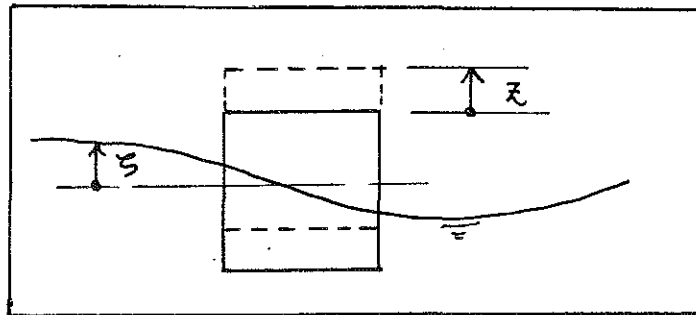
$$\text{Pådrivande kraft} = C_p \zeta = \rho g B \zeta e^{-kD}$$

där Z = kroppens läge (se fig(3-5))

ζ = vattenytans läge

D = djupgång i meter

B = kroppens bredd i meter



Fig(3-5) Pontonrörelse i vågor.

(Som parentes kan sägas att en cylindrisk kropp är att föredra då den cirkulära geometrin ej ger upphov till genererade vågor av kroppens rullning. Här utreder vi dock enbart de vertikala rörelserna).

Kroppens vertikala rörelse beskrivs med följande ekvation:

$$(m + a)\ddot{z} + (b + b_1)\dot{z} + C_r z = F_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (3-8)$$

där m = den accelererade massan

a = medsvängande vattenmassa

z = kroppens läge

b = den hydrodynamiska dämpningen

b_1 = den yttre dämpningen (energiuttaget)

C_r, C_p = återförande resp. pådrivande tryck
(kroppens-vattnets styvhet).

a och b har studerats experimentellt i liten skala, (Wave-power buoys, CTH rapport GR55, febr.1984 Gbg), varvid vi utnyttjade oss av resultaten.

Experimenten gick ut på att få fram dimensionslösa koefficienter för en bojs rörelser:

$$\mu(\omega) = a/\rho V \quad (3-C)$$

$$\varepsilon(\omega) = b/\rho V \omega \quad (3-D)$$

där V = undanträngd vattenvolym

Studerandet av μ och ε gav a och b , se vidare längre fram.

$F_0 \cos(\omega t + \varphi)$ är den yttre kraften, d v s vågrörelsen som håller kroppen i fortsatt svängning.

F_0 är i sin tur:

$$F_0 = \zeta_0 \sqrt{(c_p - a\omega^2)^2 + (b\omega)^2} \cdot e^{-kD} \quad (3-E)$$

där $k = \frac{\omega^2}{g}$ för djupt vatten.

Med antagande att alla koefficienter är konstanta m a p tiden får vi följande lösning:

$$z(t) = z_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (3-F)$$

Responsen mellan kropp och vattenmassa kan nu tecknas som:

$$\gamma = \frac{z_0}{\zeta_0} = \sqrt{\frac{(c_p - a\omega^2)^2 + (b\omega)^2}{(c_r - (m + a)\omega^2)^2 + (b + b_1)^2 \omega^2}} \cdot e^{-kD} \quad (3-G)$$

γ kallas amplitudresponsen.

Upptagen energi vars effekt man vill ta till vara kan uttryckas, (där L = längd i meter):

$$p = (1/2) \cdot b_1 \cdot \dot{z}_0^2 / L \quad (\text{N/s}) \quad (3-H)$$

d v s

$$p = (1/2) \cdot b_1 \omega^2 \cdot z_0^2 / L \quad (\text{N/s}) \quad (3-I)$$

Vågornas totala medeleffekt:

$$P = \rho g^2 \zeta_0^2 / 4\omega \quad (\text{N/s}) \quad (3-J)$$

Uttagsmängden på en längdmeter, L , kan nu tecknas:

$$\frac{p}{P} = \frac{\omega^3 \cdot b_1 \cdot 2}{\rho g^2} \cdot \gamma^2 \quad (-) \quad (3-K)$$

som är oberoende av vågamplituden.

Uttagsmängden kan sägas vara en sorts "verkningsgrad":

$$\eta = \frac{p}{P} \quad (3-L)$$

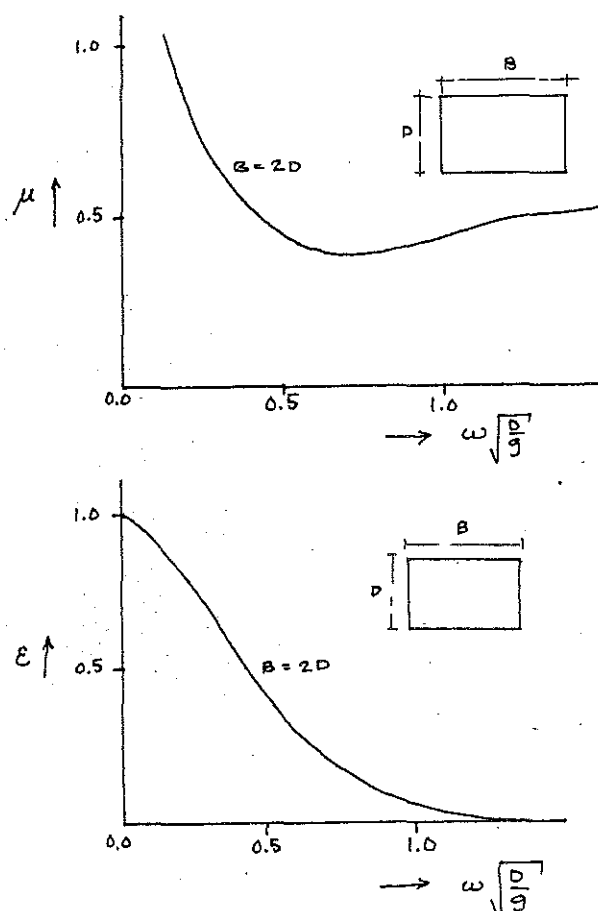
För att slutligen sammanföra vågspektrum med "verkningsgraden" har vi numeriskt prövat olika kombinationer av b_1 , m samt B .

Något om ε och μ

För att kunna beskriva samverkan mellan kropp och vattenmassa måste vi ha kännedom om vattnets hydrodynamiska dämpning (b) samt den av kroppen orsakade medsvängande vattenmassan, added mass (a). a och b kan beskrivas med ekv(3-C) samt ekv(3-D). Generellt kan sägas för en tvådimensionell rektangulär cylindrisk kropp, att ju kortare vågperioden blir:

- desto mindre blir den hydrodynamiska dämpningen, den går mot noll,
- så går den medsvängande vattenmassan mot ett konstant värde.

Se fig(3-6).



Figur(3-6) Added mass samt dämpningskoefficienter för en rektangulär cylindrisk kropp. (Tvådimensionell).

a och b kan beräknas med hjälp av tillhörande ekvationer till fig(3-7) samt fig(3-8) då de gjorts om till att gälla för ett tvådimensionellt fall.

För ett tredimensionellt fall gäller enligt fig(3-7):

$$\hat{\mu} = -1.9\Omega + 0.66 \quad (3-M)$$

där $\Omega = b_1 / m \frac{C}{m}$

då $b_1 = 0$ är $\hat{\mu} = 0.66$

Enligt fig(3-6) fås $\mu \approx 0.49$ i frekvensintervallet 0.05-1.6.

Normalisering av added mass mot massan av en liggande halv cylinder (Jfr. Berghdal & Mårtensson, 1984):

$$\hat{m} = \rho \frac{\pi B^2}{8} \quad \text{d v s } \hat{\mu} = \mu_{mm} \hat{m}^{-1}$$

detta ger oss ett $\hat{\mu} \approx 0.62$, då $\hat{m}^{-1} = 1.27$.
ekv(3-M) kan nu skrivas:

$$\hat{\mu} = -1.9\Omega + 0.62 \quad (3-N)$$

och gäller då ett tvådimensionellt fall.

Ur fig(3-8) kan vi anta att ε är konstant,
 $\varepsilon = 0.25$, då vi håller oss inom $0.01 < n < 0.35$.
 Likaledes utläser vi nu ett konstant värde på ε
 ur fig(3-6), $\varepsilon = 0.38$, som gäller ett två-
 dimensionellt fall. Nu använder vi oss av
 fig(3-7) samt fig(3-8) för att beräkna a och b
 för ett tvådimensionellt fall.

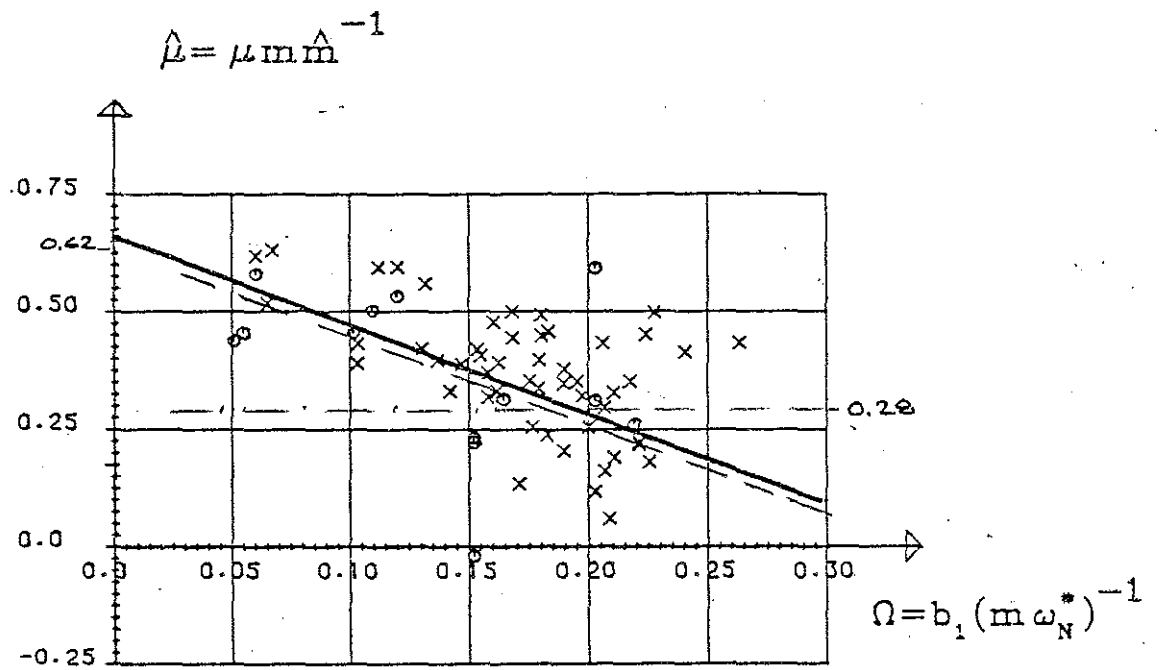
Då vi kommer till nästa avsnitt kommer vi att
 pröva olika alternativ för att få fram a och b:

$$\begin{aligned} \text{Fall 1} \quad \varepsilon &= 0.38 \\ \mu &= -1.9n + 0.62 \end{aligned}$$

enligt ovanstående resonemang.

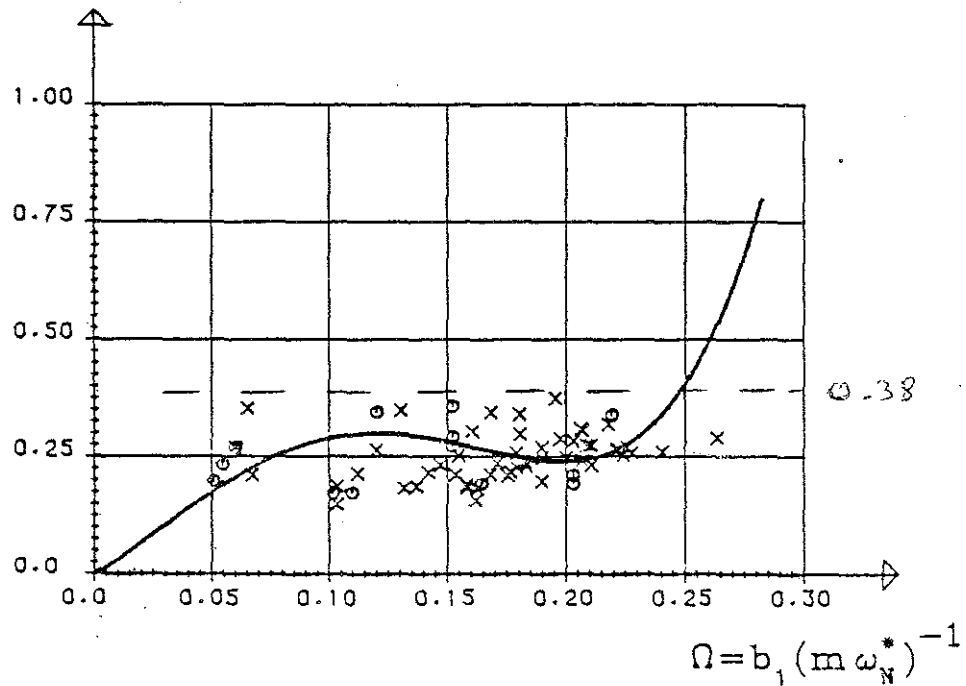
$$\begin{aligned} \text{Fall 2} \quad \varepsilon &= 1000n^4 - 380n^3 + 27n^2 + 3n \\ \mu &= 0.28. \end{aligned}$$

(I fall 2 jfr. med (8) i litteraturlistan).



ε

F16(3-7)



F16(3-8) $\hat{\mu}$ and ε as functions of the dimensionless external damping Ω . Selected experiments and regression curves.

Marks; x - spectrum G0 and o - spectrum G4.

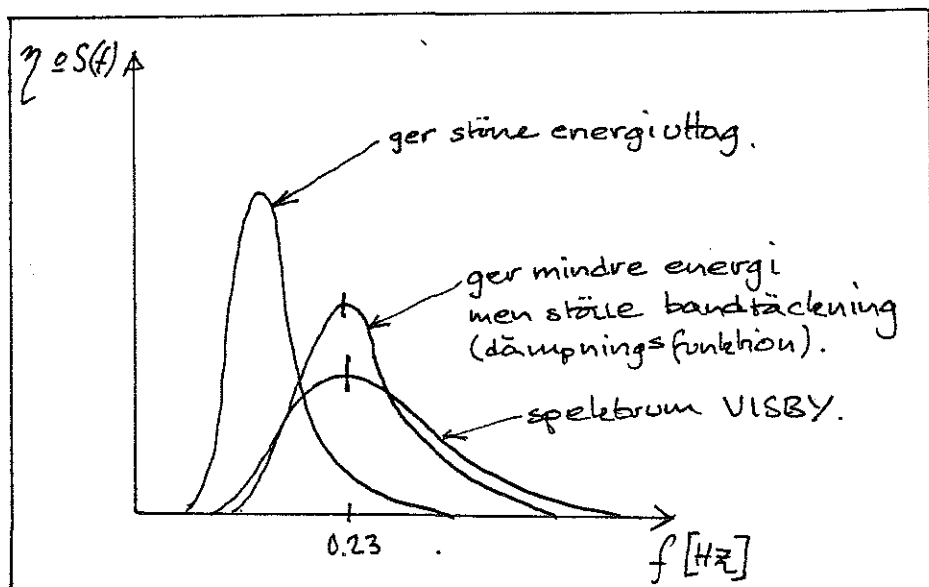
(BERGDAHL & MÄRTENSSON), 1984.

ε - har vi satt = konstant = 0.38 OBS!

3.4 Optimering

Det gäller att hitta bästa kombinationen mellan vågspektrum och kroppens spektrum.

Det visar sig att problemställningen snarare ser ut som i fig(3-9) än i fig(3-1).



Fig(3-9) Verkningsgrad kontra vågspektrum.

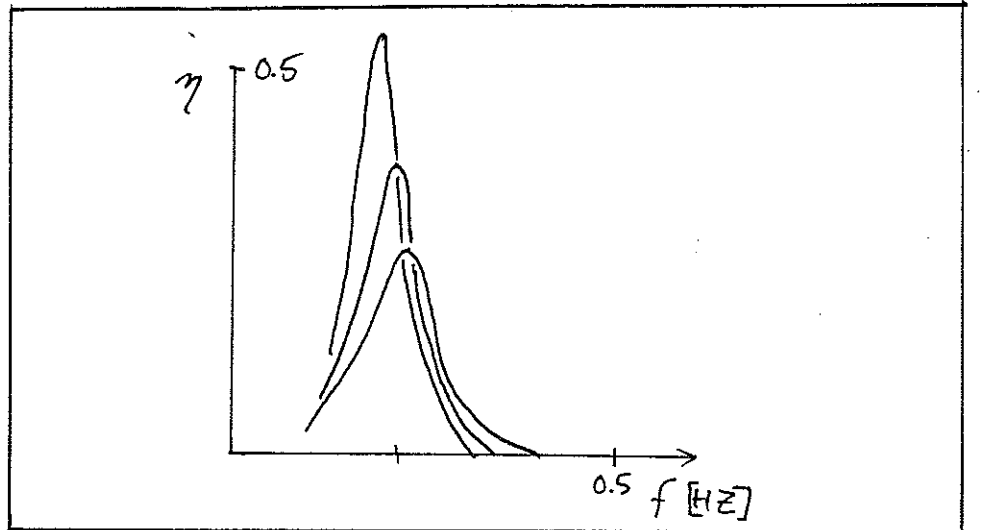
Vid optimeringen har vi utgått ifrån begränsningen $0.01 < \eta < 0.34$ (se avsnitt 3.3) och därmed har vi "låst" tillåten kombination av m och b_1 . (Begränsningen har vi infört då värden utanför intervallet är mycket osäkra).

Det vill säga vid vald bredd "B" på kroppen fås en maximalt tillåten massa enligt våra andra förutsättningar, ($A=B=2D$), som i sin tur ger maximalt tillåten dämpning " b_1 ".

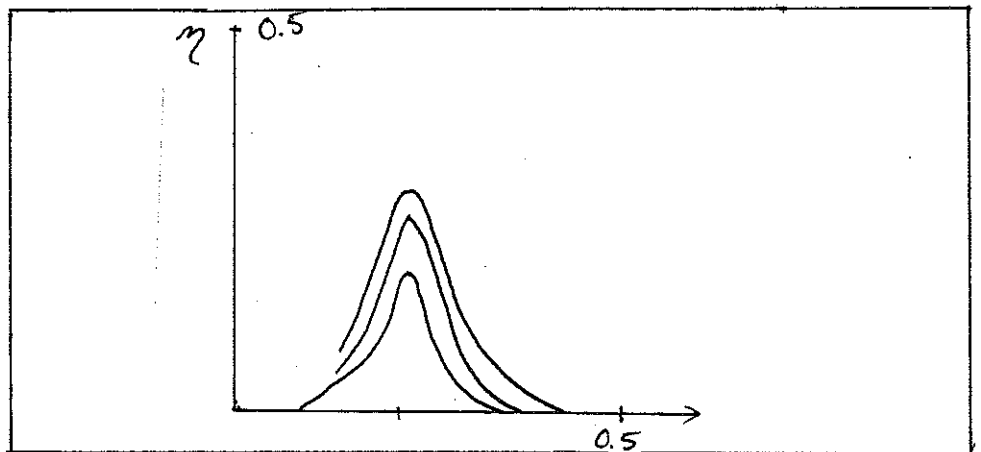
Studierna har visat att vid vald bredd, d v s massa, bör maximal dämpning nyttjas då detta ger maximal dämpning av de största vågorna och därmed störst energiuttag. (Större dämpning kan införas till en viss gräns då verkningsgraden börjar sjunka igen, men då håller vi oss ej inom våra antagna förutsättningar).

Detta sker inom ett smalare spektrum, se fig(3-10), vilket medför att en del vågor av större frekvens kommer att reflekteras tillbaka.

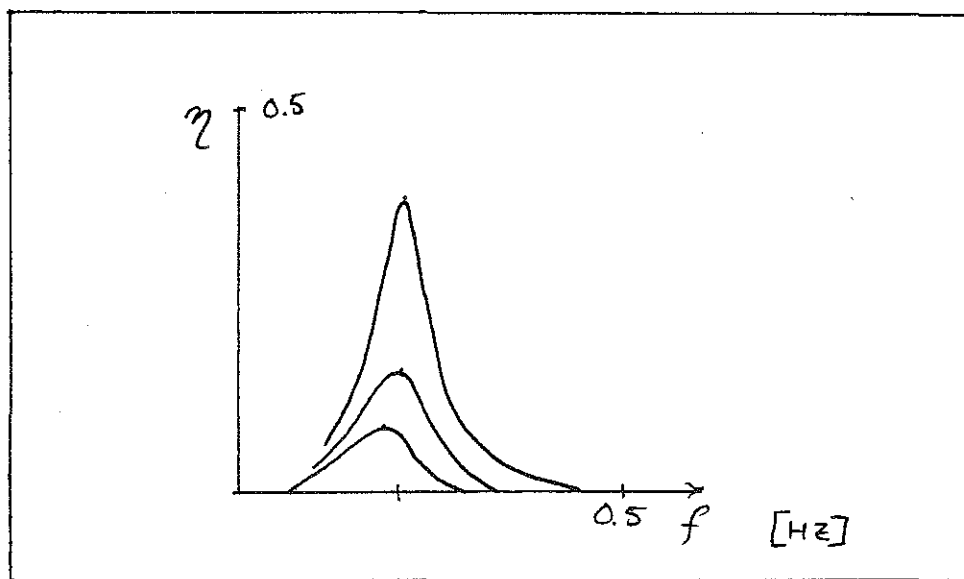
Verkningsgradens variation med C , b_1 samt m :



Fig(3-10) Kurvorna visar verkningsgradskurvans tendens då massan varierar. Då massan ökar flyttas maximum åt lägre frekvenser samtidigt som maximum ökar och kurvan smalnar av.



Fig(3-11) Kurvorna visar verkningsgradskurvans tendens då dämpningen varierar. Då dämpningen ökar ökar även maximum men stannar på given frekvens. Dock minskar maximum då tillräcklig styvhet har nåtts för att något utslag ej längre kan erhållas.



Fig(3-12) Kurvorna visar verkningsgradskurvans tendens då vattenlinjearean varierar. Då vi ökar vattenlinjearean minskar verkningsgraden kraftigt.

En begränsning i tillåtet testintervall av de olika parametrarna m , b_1 , samt B gavs av koefficienterna ϵ och μ , som beror av bland annat de i figurerna (3-10)-(3-12) använda parametrarna.

För att undersöka breddens inverkan på energi/dämpningsönskemålen har vi ställt upp en optimeringstablå enligt tabell(3-2) och fig(3-13). Vi har prövat olika bredder och ritat upp kurvan $S(f) \cdot \eta(f)$ som funktion av frekvensen. Se fig(3-13). Det visar sig att störst utslag fås för bredden 9 meter. Fig(3-14) visar hur bra överensstämmelse som uppnås mellan verkningsgrad och vågspektrum. 38% av tillgänglig energi kan fångas in, det gäller nordlig riktning.

Den totala verkningsgraden kan ställas upp som:

$$\eta_{TOT} = \frac{\int \eta(f) S(f)/f df}{\int S(f)/f df} \quad (3-0)$$

(Jfr. ekv(3-K))

Utgående från optimeringstablå, tabell(3-2), fås följande exempel på dimensioner samt "verkningsgrad".

Detta ger för bredden 9 meter

massan 40.0 ton

dämpn. 20.0 kNs/m

$\eta_{TOT} = 38\%$, vilket är nära den teoretiskt möjliga verkningsgraden på 50%, se tabell(3-2) med kommentar.

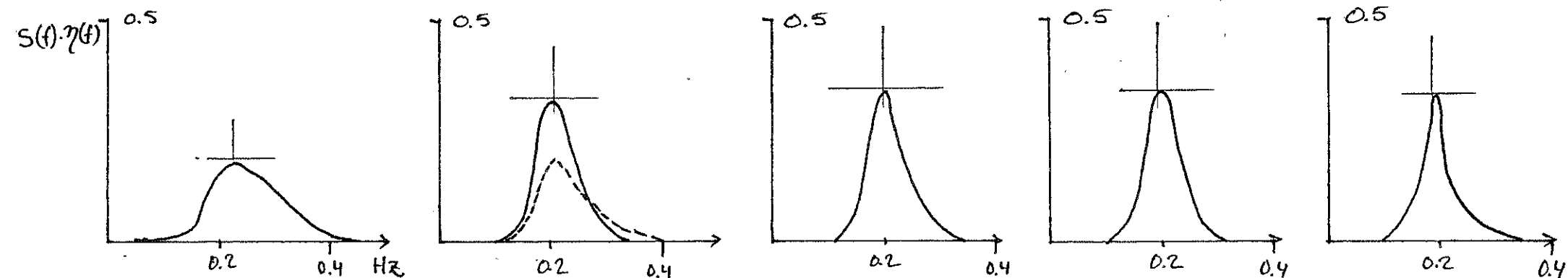
Fig(3-13)a Kurvorna representerar $S(f) \cdot \eta(f)$, maximum inträffar för bredden 9 meter.

Fall 1, se avsnitt(3.3). (ε konstant samt $\hat{\mu}$ varierar linjärt).

Bredd (m)	4	8	9	10	12
Massa (ton)	8	322	40	50	72
Dämpn. (kNs/m)	6	15	20	23	31
(%)	28	36	38	36	32
Effekt(kW/m)	1.29	1.64	1.71	1.64	1.47

Totalt tillgänglig energi 4.56kW/m varav
utvinningsbar 2.28kW/m.

34

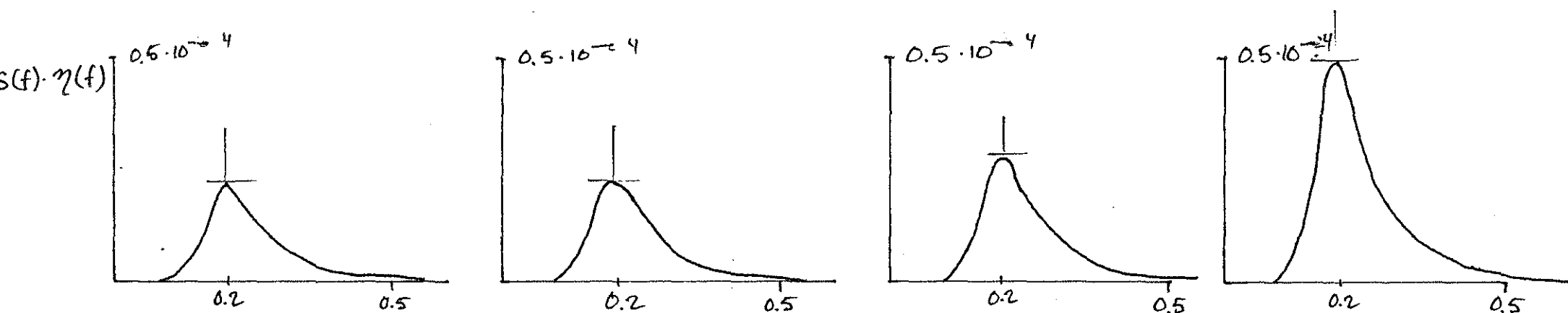


Figur(3-13)a $S(f) \cdot \eta(f)$ plottat mot olika bredd mm.

Fig(3-13)b Kurvorna representerar $S(f)$ (f), maximum nås ej inom antaget intervall $0.01 < \Omega < 0.34$.
Fall 2, se avsnitt(3.3). (μ konstant samt ε varierar).

Bredd (m)	50	40	30	9
Massa (ton)	1250	800	450	40
Dämpn.(kNs/m)	500	400	300	90
(%)	se not	se not	se not	se not
Effekt(kW/m)	se not	se not	se not	se not

Totalt tillgänglig energi 4.56kW/m varav
 utvinningsbar 2.28kW/m.



Figur(3-13)b $S(f) \cdot \eta(f)$ plottat mot olika bredd mm.

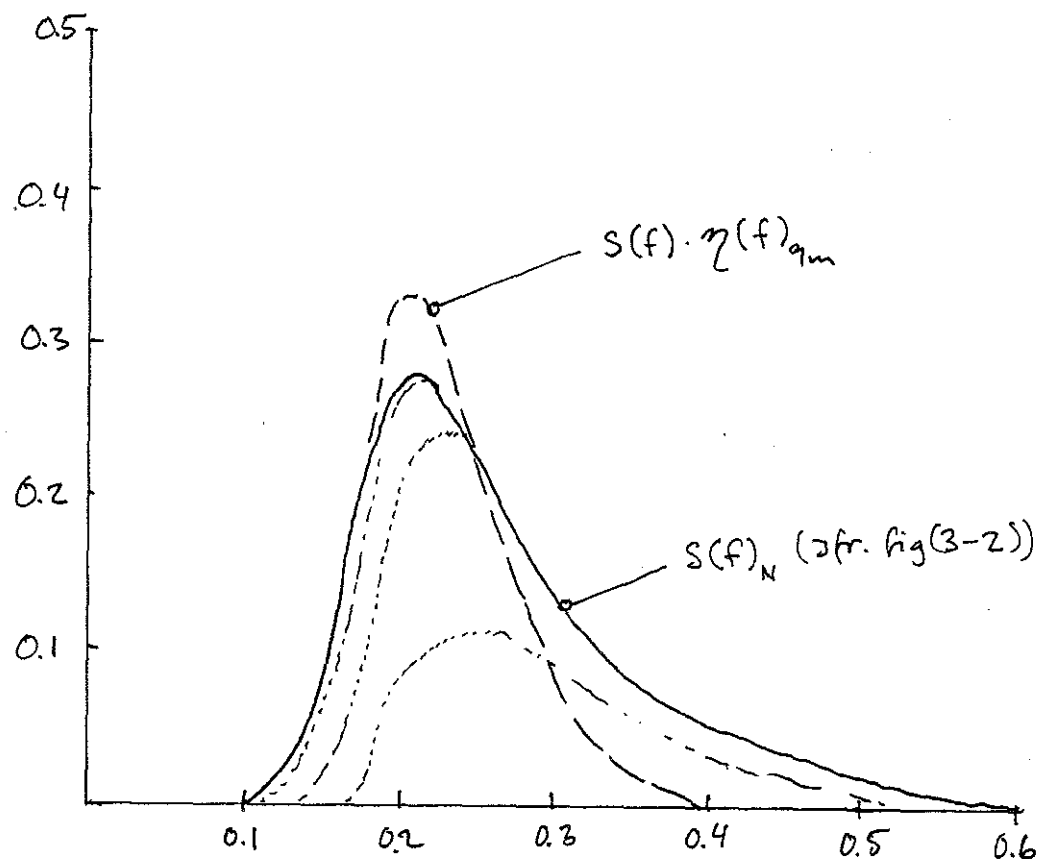
NOT::: Verkningsgraden samt energiupptagningen blir så låg att de ej
 är att räkna med. ($\eta \approx 10^{-2}\%$). Vågorna reflekteras. (BRA UR VÄG-
 BRYTAR SYN PUNKT).

Tabell(3-2) Optimeringstablå.

Bredd (m)	4	8		9	10		12	20
Massa (ton)	8	32	20	40	50	40	72	200
Dämpn. (kNs/m)	6	15	13	20	23	21	31	65
η_{TOT} (%)	17	36	*	38	36	*	32	17

Tillgänglig effekt = $2.28/0.5 = 4.56$ kW/m,
*(η_{TOT} är försumbart liten).

För ett oändligt antal vågbrytare med en frihetsgrad (i vårt fall vertikal) och med bästa möjliga inbördes avstånd blir energiupptagningen teoretiskt 50%. Vid fler frihetsgrader kan verkningsgraden ökas. Detta kan förklaras med att endast hälften av fashastigheten är gruppshastigheten, d v s den hastighet som bär på rörelseenergin i horisontalled.



Fig(3-14) Inpassning av $S(f) \cdot \eta(f)$ mot ursprungligt vågspektrum $S(f)$.

3.5 Verkningsgradens nedskrivning

För att komma närmare verkligheten måste verkningsgraden skrivas ned något p g a ishinder slitningar mm.

Riktning:

Vid energiberäkningen har vi hela tiden förutsatt att vågorna kommer in vinkelrät mot vågkraftverket. Energiupptagningen vid andra vindvågriktningar kan tecknas:

$$P_{in} = P \cos \varphi + \beta P \sin \varphi$$

där P_{in} = av kraftverket upptagen effekt då vågorna kommer in med en vinkel φ .

β = antaget värde 0.2 då kraftverket även tar upp energi parallellt med kraftverket.

($\beta = 0.2$ svarar mot ett linjekraftverk)

Vid undersökningar av tänkbara platser i Sverige för utplacering av vågkraftverk finner man att den uttagbara effekten varierar mellan 0.72-0.94 av teoretiskt tillgänglig energi med hänsyn till stabiliteten i vågriktningen.

Is:

Beroende på var vid den svenska kusten man befinner sig måste man ta olika hänsyn till isläggning. Enligt (5) varierar isläggningen vid de potentiellt utnyttjbara platserna mellan 0-15% av året.

Övrigt:

En uppskattning skulle kunna göras för reparationer och skador under ett år då vågkraftverket måste vara ur drift. Här saknas dock erfarenhet.

Övriga faktorer som inverkan av påsehling, fiske, fritid med flera störningar behandlas ej här.

3.6 Slutkommentarer

Energiuttaget för kraftverket med en bredd på 9 meter skulle alltså bli:

Beräknad verkningsgrad	38%
Riktningsstabilitet hos vinden	83%
Is	93%
Övrigt ?	?
	====
	35%

Totalt tillgänglig effekt: 4.56kW/m

Upptagen effekt: 1.6 kW/m

Antag att vågbrytarkraftverket kan köras dygnet runt ett år, d v s 8766 timmar.

Energitillgången blir då: 14 MWh/m.år

Som en energijämförelse kan nämnas att ett:

- dåligt isolerat hus i trakten av Orust förbrukar ca 24 MWh/år, (huset är helt elberoende).
- bra (något bättre än vad SBN-80 anger som kräv) isolerat hus i trakten av Kiruna förbrukar ca 9 MWh/år, (huset är helt elberoende).

Som tidigare nämnts så är verkningsgraden ej så viktig eftersom vågorna utgör en gratis energikälla och den vågbrytande effekten ändå får anses som väsentligast. Sedan om man får energi ur "vågbrytaren" är det ju alltid ett plus i kanten.

För Visby hamnområde skulle det innebära att totalt energiuttag skulle kunna bli med 1500 m vågbrytarkraftverk ($14 \cdot 1500 =$) 21 GWh/år.

Litteraturlista

- (1) Bernander & Bilton, Manual för REFRAC,
Institutionen för Vattenbyggnad Göteborg CTH,
Examensarbete 1984:1
- (2) Byström et al, Vågenergi för Gotland,
Gruppen för Vågenergiforskning Gbg CTH,
Examensarbete 1980
- (3) Claesson & Svensson, Vågenergipotential,
Gruppen för Vågenergiforskning Gbg CTH,
Rapport GR64 1984
- (4) Falkemo Curt, Vågenergiboken,
Ingenjörslärläget AB Stockholm 1980
- (5) Gruppen för Vågenergiforskning,
Vågenergiforskning i Sverige, Gbg CTH,
Rapport GR44 1981
- (6) Lillieblad & Matz, Förankrad fartygssektion....,
Institutionen för Vattenbyggnad Gbg CTH,
Examensarbete 1980:7
- (7) Mårtensson Nils, Windgenerated Waves,
Gruppen för Vågenergiforskning Gbg CTH,
Rapport GR52 1983
- (8) Mårtensson & Bergdahl, Wave-Power Buoys,
Gruppen för Vågenergiforskning Gbg CTH,
Rapport GR55 1984
- (9) Kwick Tord, Vindarna över Sverige,
SMHI Norrköping, Rapport NE 1983:16
- (10) Sjöberg Anders, Vindvågor, Institutionen för
Vattenbyggnad Gbg CTH, Undervisningsskrift
1983:3
- (11) SSPA, Vågdata och Vågeffekt....,
Marintekniska Institutet SSPA,
Rapport 2265-3 1983 (Göteborg CTH)
- (12) Technocean, teknikföretag i Göteborg,
diverse stenciler erhållna vid besök.

Appendix

Basdata:

Följande basdata utgår vi ifrån vid själva optimeringen av vågbrytarkraftverket.

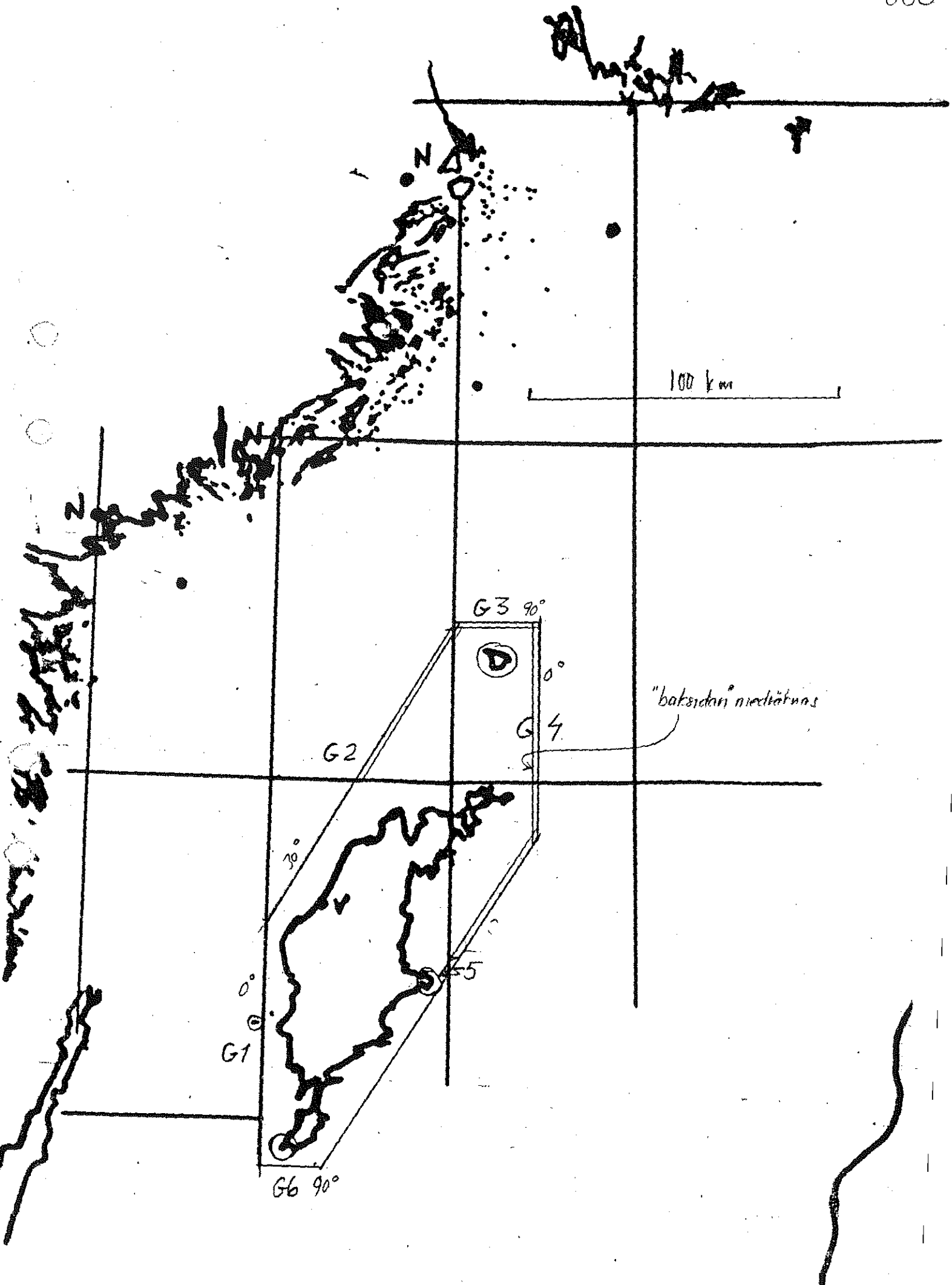
Riktning	Nord	Nordväst	Väst	Sydväst
Stryklängd (m) (effektiv)	124020	119400	96570	37200
Dimensionerande				
vind (m/s) U_s	6	6	5	7
20-årsvind (m/s)	29	30	31	28
H_s (m)	0.8	0.8	0.6	0.8
T_z (s)	3.3	3.3	2.8	3.0
L (m)	16.9	16.8	12.2	14.3
H_s^{20} (m)	12.0	13.3	10.3	5.5

Här har hänsyn till refraktion ej tagits med.

Appendix

Technocean:

Följande sidor utgör diverse stenciler
erhållna av Technocean vid personligt
besök. (Göteborg 1985).



Korrektionsfaktorer

Korrigeringar görs enligt följande:

- 1) Vågmedeleffekterna har beräknats genom hindcasting dels för fyra platser runt Gotland, dels för Almagrundet och Ölands Södra Grund. På de senare platserna har även mätningar utförts (även vindmätningar). Kalibreringar mot mätningarna har gjorts av de beräknade värdena.
- 2) Variabiliteterna har normerats så att ett kvartal motsvarar 2190 timmar.
- 3) Hänsyn till is har tagits vid beräkning av variabiliteten.

Plats	D-F	M-M	J-A	S-N	
ÖSG	2.08	0.76	0.79	1.54	1)
Almagrundet	1.18	0.57	0.41	1.26	1)
Gotiska Sandön	1.4	0.6	0.5	1.3	1)
	0.95	0.90	1.0	1.0	3)
	0.60	0.59	0.60	0.59	2)
	0.80	0.32	0.30	0.77	Korr faktor
Herrvik	1.6	0.7	0.6	1.4	1)
	0.95	0.95	1.0	1.0	3)
	0.69	0.68	0.72	0.68	2)
	1.05	0.45	0.43	0.95	Korr faktor
St Karlsö	1.7	0.7	0.6	1.4	1)
	0.95	0.90	1.0	1.0	3)
	0.60	0.59	0.61	0.59	2)
	0.97	0.37	0.37	0.83	Korr faktor
Höbuck	1.8	0.8	0.7	1.5	1)
	0.95	0.95	1.0	1.0	3)
	0.60	0.59	0.59	0.59	2)
	1.03	0.45	0.41	0.89	Korr faktor

Vägenergipotential GOTLAND

SIDA G1

Område G1

Riktning 0°

Längd 80 km

Plats Skra Karlsö

Kvarter D-F

Korrektionsfaktor 0.96
(Varaktighet & PM)

Huvudväg- riktning	Riktning- faktor	Varakt- ighet tim	Vägsmedel- effekt PM kW/m	Andel %	E ₀	E ₁₀₀
					kW/m	
0	0	361	4.3	1.0	0	1490
45	0.707	589	0.6	1.0	240	339
90	1	276	0.1	1.0	26	26
135	0.707	322	0.9	1.0	192	278
180	0	290	7.1	0	0	0
225	0.707	994	10.4	0.5	3508	4962
270	1	401	2.3	0.6	531	531
315	0.707	422	2.8	0.6	481	681

3615

4.57 + 1.18
Σ alla riktningar 4983 8307
2.28 kW/m

Plats Hoburg

Kvarter

D-F

Korrektionsfaktor 1.02
(Varaktighet & PM)

Huvudväg- riktning	Riktning- faktor	Varakt- ighet tim	Vägsmedel- effekt PM kW/m	Andel %	E ₀	E ₁₀₀
					kW/m	
0	0	406	0.8	0	0	0
45	0.707	420	1.6	0	0	0
90	1	274	5.6	0	0	0
135	0.707	316	6.9	0	0	0
180	0	464	11.8	1.0	0	5585
225	0.707	860	11.2	0.5	3473	4912
270	1	420	2.7	0.4	463	463
315	0.707	463	2.5	0.4	334	472

Energi kW/m Σ alla riktningar 5.73 4270 11432

- " - kW/m hela området 1.95 9253 19739

Vägsmedel-effekt kW/m 4.2 9.0

Total energi från området (GW_h/3 mån) 740 1579

(Total 744 1180)

Vägenergipotential

GOTLAND

SIDA G.2

Område G1

Riktning 0°

Längd 80 km

Plats Stora Karlsö

Kvarter M-M

Korrigeringsfaktor 0.36
(Vägenlängd & PM)Huvudväg-
riktningRiktning-
faktorVarakt-
ighet
timVägenmedel-
effekt PM
kW/mAndel
%E₀E₁₀₀

kW/m

0	0	317	2.4	1.0	0	274
45	0.707	571	0.3	1.0	44	62
90	1	303	0.1	1.0	11	11
135	0.707	733	0.8	1.0	149	211
180	0	491	4.7	0	0	0
225	0.707	716	4.8	0.5	437	619
270	1	242	0.7	0.6	37	37
315	0.707	290	1.6	0.6	71	100

Σ alla riktningar 749 1314

Plats Hoburg

Kvarter M-M

Korrigeringsfaktor 0.47
(Vägenlängd & PM)Huvudväg-
riktningRiktning-
faktorVarakt-
ighet
timVägenmedel-
effekt PM
kW/mAndel
%E₀E₁₀₀

kW/m

0	0	275	0.6	0	0	0
45	0.707	570	1.9	0	0	0
90	1	507	3.8	0	0	0
135	0.707	503	4.3	0	0	0
180	0	521	5.4	1.0	0	1322
225	0.707	702	4.8	0.5	560	792
270	1	273	1.4	0.4	72	72
315	0.707	418	1.3	0.4	72	102

Energi kW/m Σ alla riktningar 704 2288

- - - kW/m hela området 1453 3602

Vägenmedel-effekt kW/m 0.66 1.64

Total energi från området (kW/3 mån) 116 288

(hidzane 168 312)

Område G1

Riktning 0°

Längd 80 km

Plats Stora Karlsö

Kvarter J - A

Korraktionsfaktor 0,36
(Varaktighet & PM)Huvudväg-
riktningRiktning-
faktorVarakt-
ighet
timVägenmedel-
effekt PM
kW/mAndel
%E₀E₁₀₀

kW/m

0	0	377	1.5	1.0	0	204
45	0,707	441	0.2	1.0	22	32
90	1	186	0.0	1.0	0	0
135	0,707	445	0.4	1.0	45	64
180	0	387	4.0	0	0	0
225	0,707	1034	4.5	0.5	592	838
270	1	310	1.0	0.6	67	67
315	0,707	404	1.4	0.6	86	122

Σ alla riktningar 812 1327

Plats Hoburg

Kvarter J - A

Korraktionsfaktor 0,42
(Varaktighet & PM)Huvudväg-
riktningRiktning-
faktorVarakt-
ighet
timVägenmedel-
effekt PM
kW/mAndel
%E₀E₁₀₀

kW/m

0	0	304	0.5	0	0	0
45	0,707	415	1.2	0	0	0
90	1	323	2.0	0	0	0
135	0,707	329	2.0	0	0	0
180	0	450	4.1	1.0	0	775
225	0,707	868	5.0	0.5	644	911
270	1	458	1.2	0.4	92	92
315	0,707	522	1.0	0.4	62	88

Energi kWh/m Σ alla riktningar 798 1866

- " - kWh/m hela området 1610 3193

Vägenmedel-effekt kW/m 0,74 1,46

Total energi från området (GWh/3 mån) 129 255

(Tidigare 144 263)

Vågenergipotential

GOTLAND

SIDA G4

Område G1

Riktning 0°

Längd 80 km

Plats Stora Karlsö

Kvarter S-N

Korrigeringsfaktor 0,83
(Vardagsfakt & PM)Huvudväg-
riktningRiktning-
faktorVardags-
fakt
timVägenmedel-
effekt PM
kWh/mAndel
%E₀E₁₀₀

kWh/m

0	0	285	3.2	1.0	0	757
45	0.707	338	0.4	1.0	79	112
90	1	202	0.1	1.0	17	17
135	0.707	458	0.8	1.0	211	299
180	0	409	8.1	0	0	0
225	0.707	1198	10.3	0.5	3620	5121
270	1	399	2.1	0.6	417	417
315	0.707	390	3.5	0.6	481	680

Σ alla riktningar 4825 7403

Plats Hoburg

Kvarter S-N

Korrigeringsfaktor 0,89
(Vardagsfakt & PM)Huvudväg-
riktningRiktning-
faktorVardags-
fakt
timVägenmedel-
effekt PM
kWh/mAndel
%E₀E₁₀₀

kWh/m

0	0	332	0.7	0	0	0
45	0.707	259	1.0	0	0	0
90	1	249	3.6	0	0	0
135	0.707	368	4.6	0	0	0
180	0	534	10.9	1.0	0	5374
225	0.707	1025	9.7	0.5	3128	4224
270	1	455	2.7	0.4	437	437
315	0.707	426	2.2	0.4	236	334

Energi kWh/m Σ alla riktningar 3801 10369

- - - kWh/m hela området 8626 17772

Vägenmedel-effekt kWh/m 3.93 8.12

Total energi från området (GWh/3min) 690 1422

Tidigare beräkning (746 1370)

DEL B

VÅGBRYTARE

Lena-Karin Johansson

4. Vågförhållanden

4.1 Allmänt

För att studera hamnförhållandena som fås med den flytande vågbrytaren och vågkrafterna mot denna, krävs kännedom om vågklimatet utanför Visby. Med utgångspunkt från vinduppgifter i kap. 2., kan de aktuella vågparametrarna beräknas m h a sk "hind-casting". Då dessa värden gäller för sk djupvattenförhållanden måste de justeras m h t det minskande vattendjupet vid hamnen. Utifrån vågparametrarna dras slutsatser om vågbrytarkraftverkets utformning.

4.2 Aktuella djupvattenvågor

Eftersom inga vågmätningar har gjorts i det aktuella området, uppskattas vågparametrarna m h a sk spektralmoment av ett givet vågspektrum. För det aktuella fallet har det sk "modified" Pierson-Moskowitz-spectra använts, vilket presenteras i kap 2.6. Det n:te spektralmomentet definieras som

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (4-1)$$

Den totala energin i en vågrörelse kan uttryckas som

$$E = \rho g \int_0^{\infty} S(f) df = \rho g m_0 \quad (4-2)$$

Signifikanta våghöjden, H_s , är

$$H_s = 4 \sqrt{m_0} \quad (4-3)$$

Medelvåglängden erhålls ur

$$T = \sqrt{m_0 / m_2} \quad (4-4)$$

och medelvåglängden som

$$L = \frac{g}{2\pi} T_z^2 = g \sqrt{\frac{m_0}{m_4}} \quad (4-5)$$

Vågbrytarens livslängd antas vara maximalt ca 20 år, och den sk 20-årsvågen anses därför vara dimensionerande för den vågbrytande funktionen och krafterna i förankringarna.

M h a av dator beräknades vågparametrarna för den sk 20-årsvinden (jfr tabell (2-1)) och dessa presenteras i tabell (4.1).

Tabell 4.1. Dimensionerande djupvattenvågor för 20 års-vinden.

	Hs (m)	Hmax (m)	Tz (s)	L (m)	U 20år (m/s)
N	6,4	11,8	7,7	93	29
NW	7,1	13,2	8,3	107	30
W	6,4	12,0	7,8	95	31
SW	3,2	5,9	5,3	44	28

M h a normalfördelningen kan man avläsa den vindhastighet som underskrids till 95% av tiden.

(Vinduppgifterna baseras här på mätningar gjorda under tre års tid.) De till denna vindhastighet hörande vågparametrarna anses dimensionerande för valet av vågbrytarens höjd m h t risken för översköljning. Vindhastigheterna och tillhörande vågparametrar presenteras i tabell 4.2.

Tabell 4.2. Vindhastigheter som 95% av tiden underskrids och tillhörande vågparametrar.

	Hs (m)	Hmax (m)	Tz (s)	L (m)	Vindhastighet (m/s)
N	3,6	6,7	6,2	207	16
NW	2,7	5,0	5,5	164	13
W	2,5	4,7	5,3	152	13
SW	2,1	3,9	4,5	116	16

4.3 Refrakterade vågor

De i kap. 4.1 angivna vågparametrarna är beräknade med antagande om djupvattenförhållanden (jfr bilaga I). Hänsyn till refraktion måste dock tas för att få en bild av de aktuella förhållandena vid vågbrytaren.

Refraktionen innebär den inverkan ett minskande vattendjup har på vågrörelsen. Eftersom våglängden och därmed våghastigheten minskar med minskande vattendjup kommer vågorna att böja av för att slutligen bli vinkelräta mot stranden. Våghöjden reduceras i vikar och bukter och ökar vid uddar.

M h a datorprogrammet "REFRAC", (Inst. för Vattenbyggn., CTH), beräknades de refrakterade vågornas höjd och våglängder.

Vid betraktande av vindrosen för Visby, (fig. 2-1 och fig. 2-2), framgår bl a att den sydvästliga vinden är förhärskande men som konstaterats är vindhastigheterna i de övriga riktningarna högre. De bästa hamnförhållandena fås därmed rimligen av en hamn helt omgiven av vågbrytare. Då den flytande vågbrytaren erbjuder möjligheten att förankras på stora djup kan vågbrytaren placeras så att även hamninloppet kan skyddas. Rapporten kommer i fortsättningen att behandla en vågbrytare med placering enligt fig (4.1) nedan.

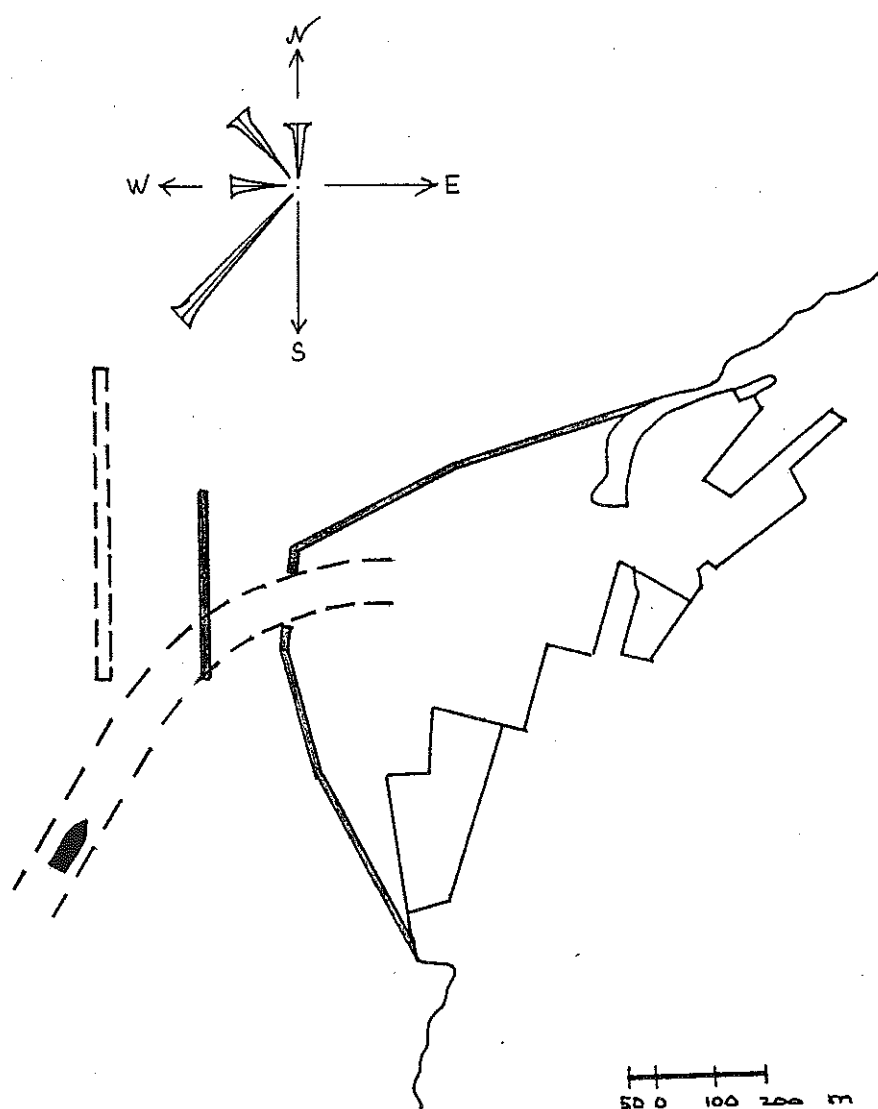


Fig. (4.1) Vald placering av flytande vågbrytare i Visby hamn.

Vågbrytarna har placerats utan hänsyn till de i Bygg del V angivna kraven på farleder och hamnar. Den i fig. 4.1 streckade vågbrytaren visar en lämplig placering enligt ovan nämnda krav. Denna placering ger dock väsentligt högre transmission och därigenom kraftigare vågor i hamnen. På de följande sidorna redovisas refrakterade våghöjder och våglängder för de vindar, som efter refraktionsberäkningen visade sig vara dimensionerande för vågbrytarens funktion och konstruktion.

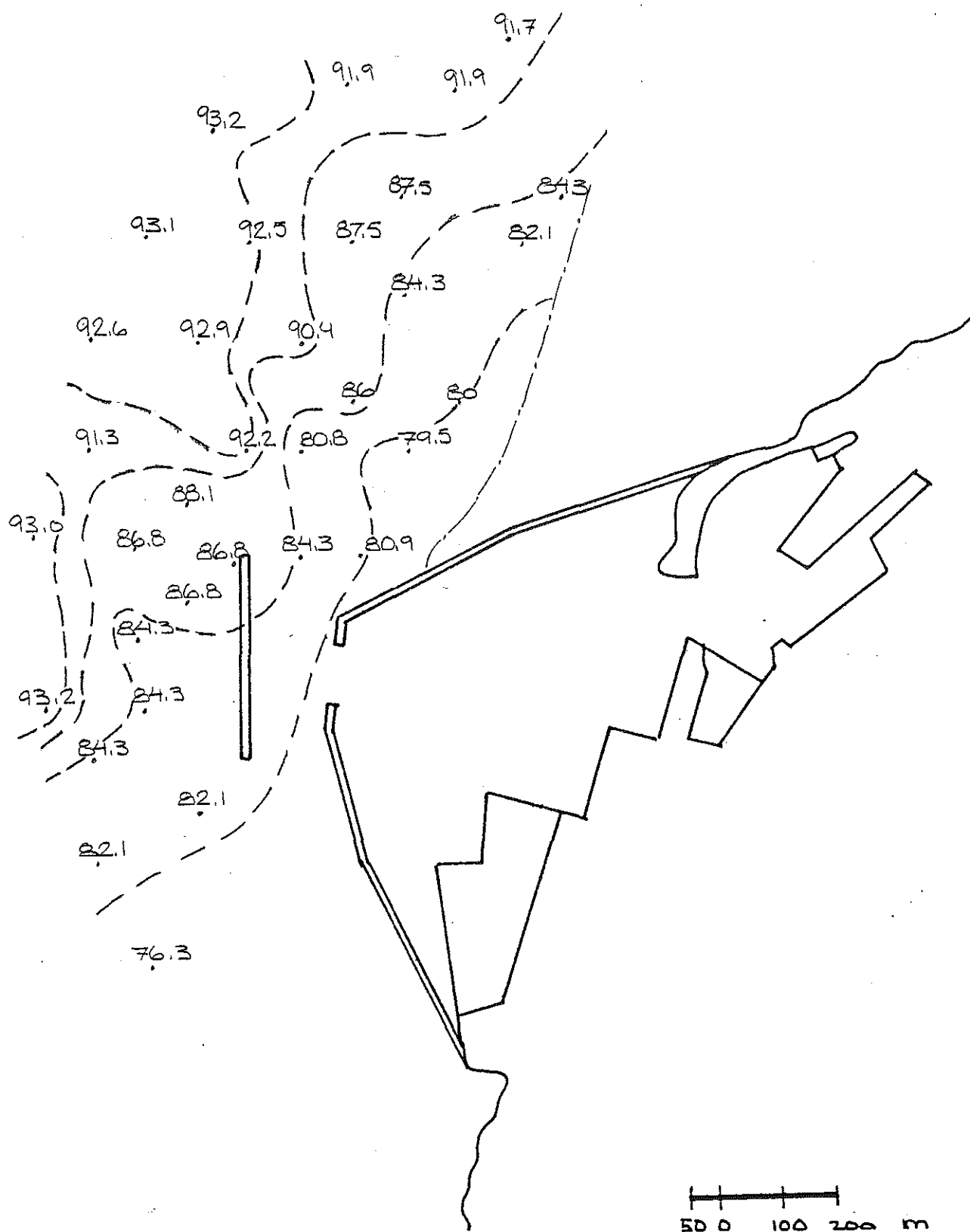


Fig. (4.3)

Refrakterade våglängder [m]
 Nordlig vind, 29 m/s
 - - - - - vågen bryter

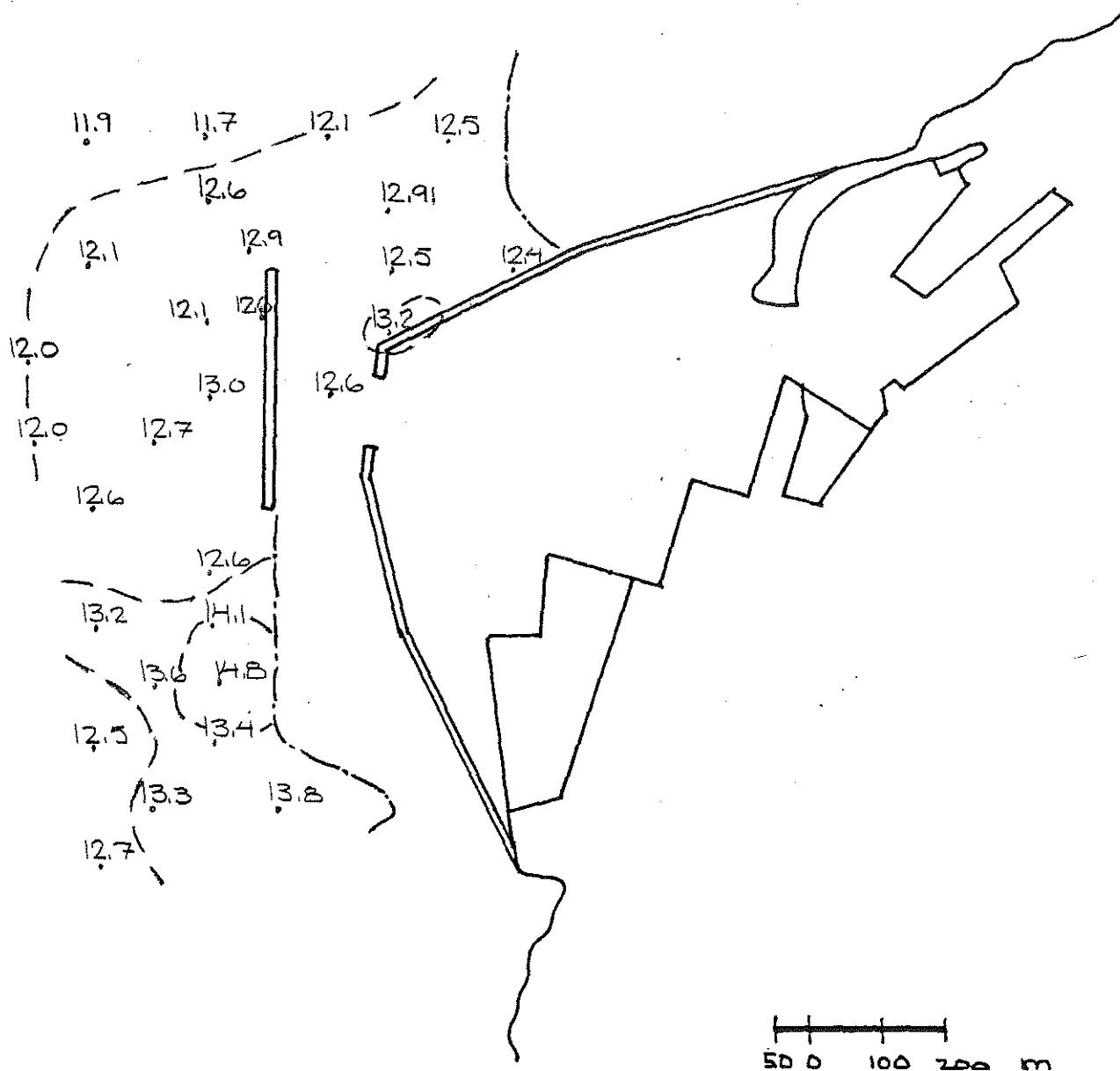


Fig. (4.4)

Refrakterade våghöjder [m]
 Västlig vind, 31 m/s
 - - - - - vågen bryter

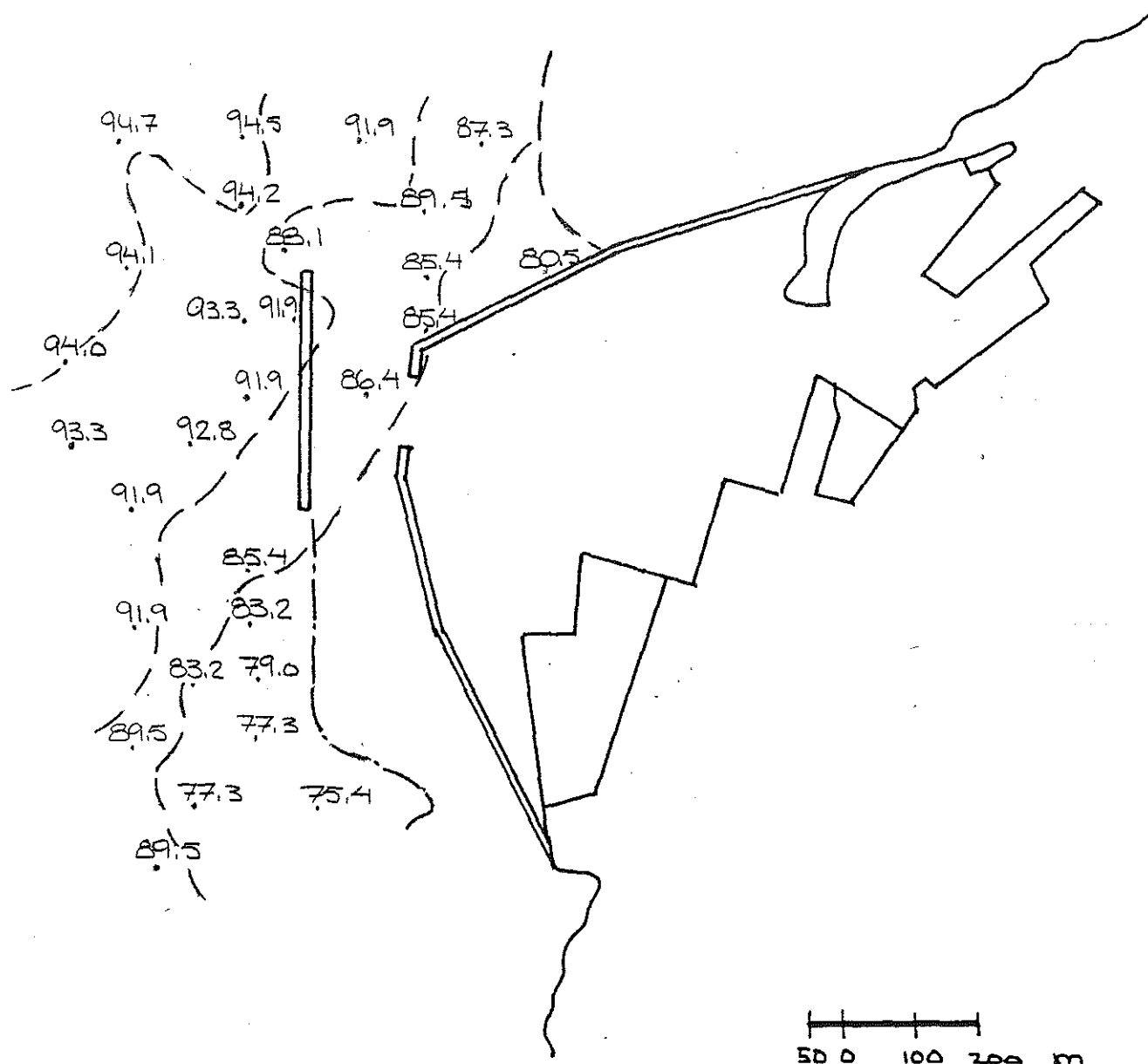


Fig. (4.5) Refrakterade våglängder [m]
 Västlig vind, 31 m/s
 -.-.-vågen bryter

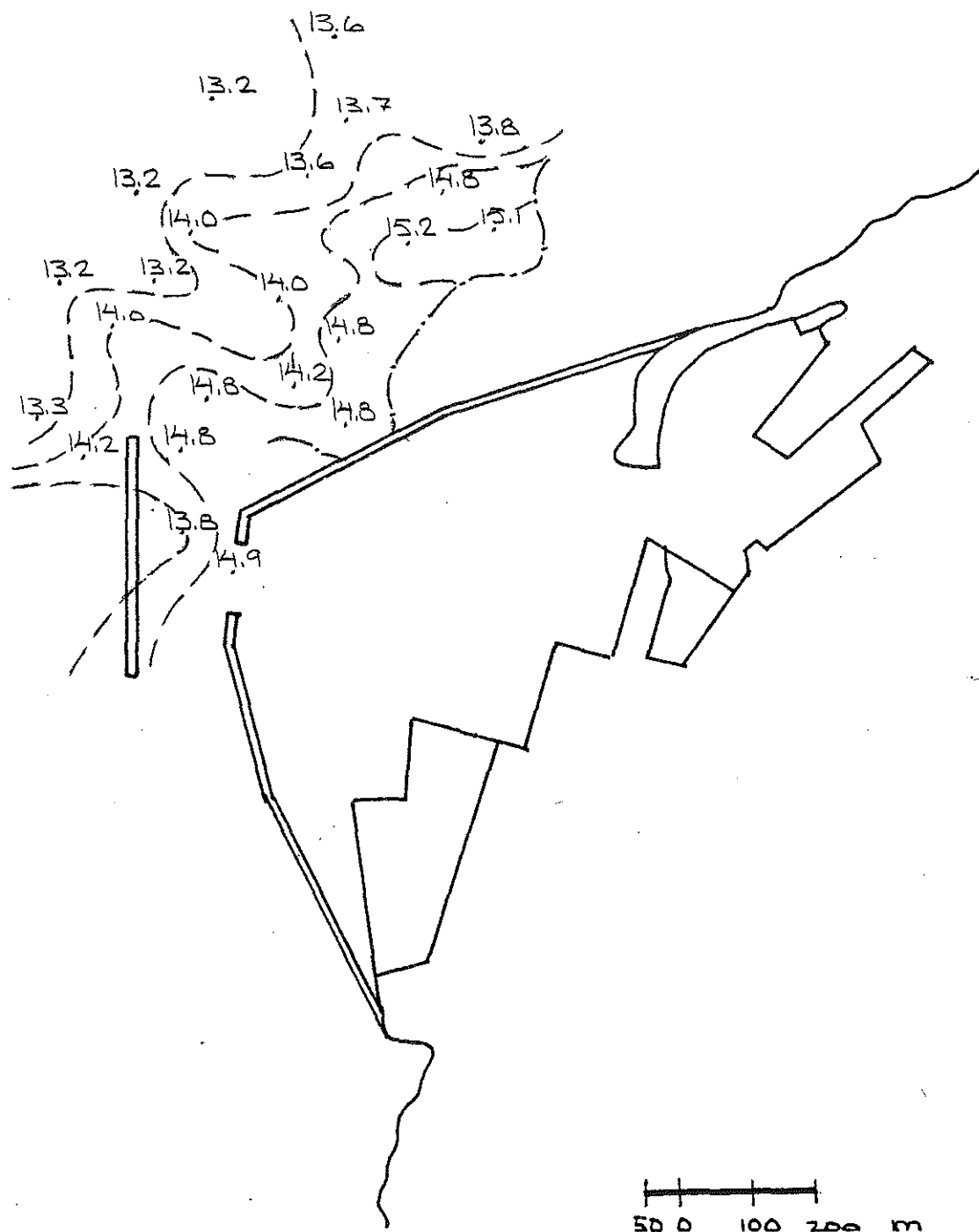


Fig. (4.6) Refrakterade våghöjder [m]
 Nordvästlig vind, 31 m/s
 - - - - - vågen bryter

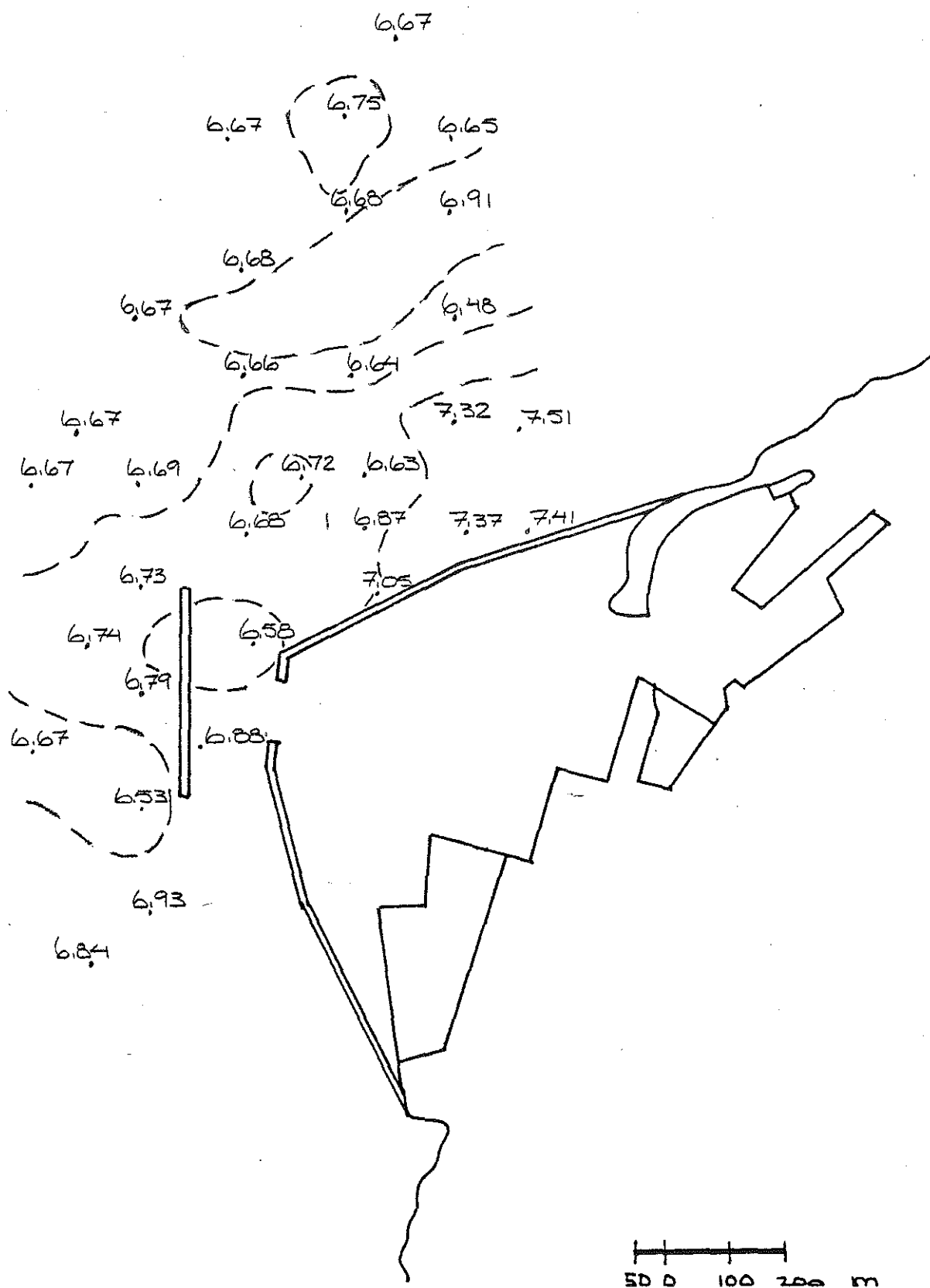


Fig. (4.8) Refrakterade våghöjder [m]
Nordlig vind, 16 m/s

4.4 Vågbrytarkraftverkets utformning

Som tidigare nämnts har den vindhastighet som till 95% sannolikhet underskrids valts till dimensionerande för flytkroppens höjd. Då ett system av stående vågor uppstår framför vågbrytaren (se 6.2), kommer den aktuella våghöjden att vara $2H$, dvs med amplituden H . Den flytande vågbrytarens totala höjd bör alltså vara $2H$ med djupgången H under lugnvattenytan.

Dimensionerande våghöjd framgår av fig. (4-8), som gäller för 16 m/s nordlig vind, och är ca 7.40 m. Vågbrytarens dimensioner blir då

$$\text{bredden } B = 9 \text{ m} \quad (\text{enl. kap. 3})$$

$$\text{höjden } h = 14,8 \text{ m}$$

Hur bör vågbrytaren utformas för att vara flytstabil? Villkoret för en flytande kropps stabilitet uttrycks som

$$h_m = \frac{g I_a}{M} - e < 0 \quad (4-6)$$

där h_m = metacenterhöjden

I_a = vattenlinjeareans tröghetsmoment
m a p vridningsaxeln.

M = flytkroppens tyngd

e = avståndet mellan displacementets tyngdpunkt (TD) och flytkroppens tyngdpunkt (TP).

Med givna värden ($m=40$ ton/m ; $B=9$ m) fås att avståndet mellan TD och TP ska understiga 1,5 m.

Man kan tänka sig flera möjligheter att utforma vågbrytarkraftverket t e x

- som ett relativt sett tunnväggigt tvärsnitt
- med skärm på framsidan för att hindra de högsta vågorna och eventuellt minska transmissionen. Jfr fig. (4.9) nedan.

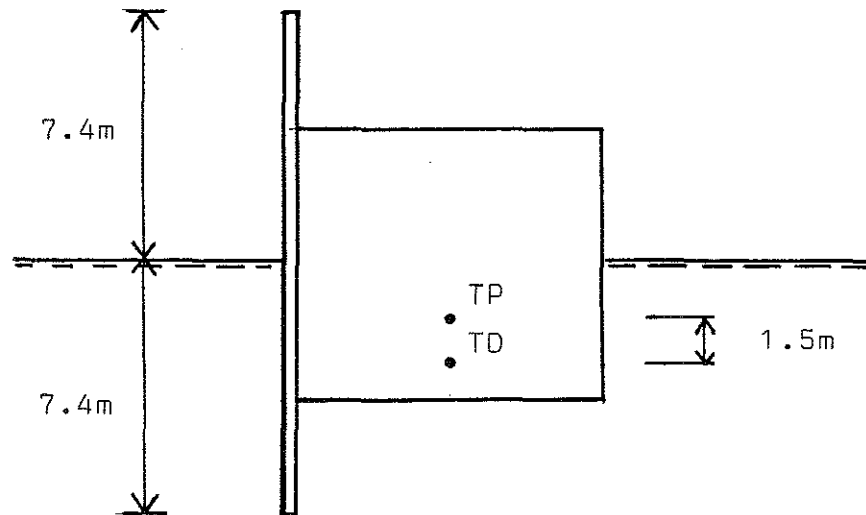


Fig. (4.9) Alt. utformning av vågbrytar-kraftverket.

Den slutliga utformningen av konstruktionen kommer att styras av diverse villkor bl a att

- massan ska vara ca 40 ton/m för optimalt effektuttag.
- avståndet mellan TD och TP ska vara mindre än 1,5 m m h t flytstabiliteten.
- den vågbrytande förmågan ska vara tillräcklig.
- konstruktionen måste klara de aktuella påfrestningarna.

5. Hamnförhållanden

5.1 Allmänt

Hamnens främsta uppgifter kan sägas vara att dels utgöra en lämplig plats för lastning och lossning, dels ge skydd mot kraftiga vågor i händelse av oväder.

Bägge dessa funktioner är beroende av hamnens vågsituation, och då främst av vågbrytarnas förmåga att minska våghöjderna.

Genom att studera den flytande vågbrytarens transmission och vågornas diffraktion kring vågbrytarna kan en uppskattning fås av vågklimatet i hamnen. Transmissionen studeras dels medelst en effektbetraktelse, dels med en teori som tar hänsyn till inverkan av konstruktionens bredd, då denna inverkan ökar med minskande vattendjup.

För att underlätta studiet av hamnen betraktas enbart fyra punkter utmed vågbrytaren, vilket framgår av fig (5.1).

Punkterna har valts m h t vågornas diffraktion kring och det varierande vattendjupet utmed vågbrytaren (Jfr bilaga I).

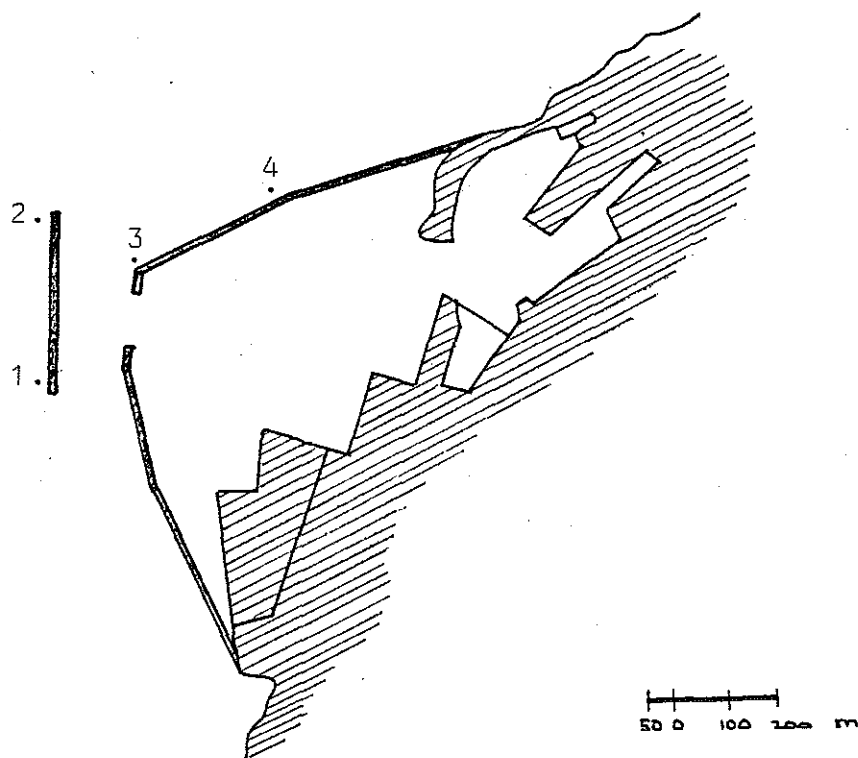


Fig. (5.1) Aktuella beräkningspunkter

5.2 Reflektion och transmission

5.2.1 Teoretisk effektbetraktelse

Den mot vågbrytaren infallande vågeffekten delas upp i tre delar, se fig 5.2, (vilkas andel varierar med vågbrytarens verkningsätt).

En del av effekten reflekteras och bildar ett vågsystem med samma period och hastighet, men med en annan riktning och lägre våghöjd än för det infallande vågsystemet. Rörelseriktningen hos de reflekterade vågorna beror av de infallande vågornas infallsvinkel mot vågbrytaren.

Då den flytande vågbrytaren låter en viss del av den infallande effekten passera, på sitt begränsade djupgående, kommer ett transmitterat vågsystem att bildas. Detta har samma period, hastighet och i allmänhet samma riktning som det infallande vågsystemets, men med reducerad våghöjd.

Då den aktuella vågbrytaren samtidigt är ett vågkraftverk, tas även effekt ut av systemet (Jfr kap 3), vilket reducerar våghöjden i hamnen. Då vågbrytaren kommer att störa vågens rörelse, övergår en andel av vågeffekten till värme genom virvelbildningen. Storleken av denna effekt är svår att uppskatta och försummas därför fortsättningsvis, då dess betydelse torde vara liten.

Vågskyddets princip kan då uttryckas som effektbalansen

$$P_{in} = P_r + P_t + P_d \quad (5-1)$$

vilket illustreras av fig.(5.2).

I den följande delen av rapporten studeras vågförhållanden i hamnen och föränkringskrafter i bojen vid så höga vindhastigheter att effektuttaget (P_d) från vågkraftverket är lika med noll. Verkningsgraden har alltså antagits vara noll, d v s antingen

är kraftverket (effektuttaget) avstängt eller kraftigt strypt. Då återstår endast att studera den reflekterade (P_r) och transmitterade effekten (P_t).

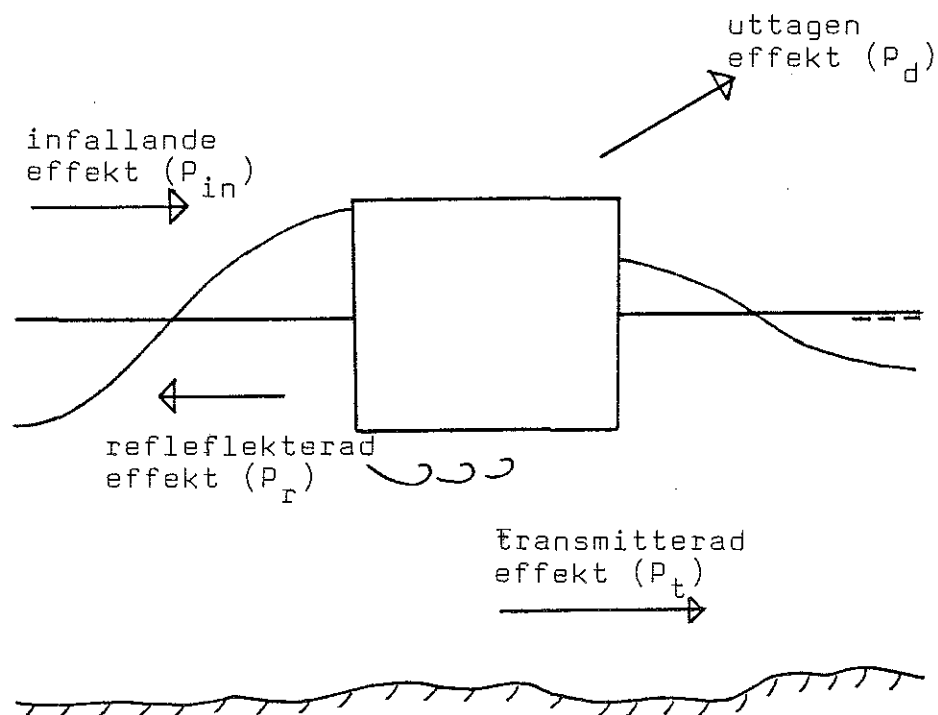


Fig. (5.2) Vågskyddets princip.

Andelen vågeffekt som reflekteras definieras som

$$K_r = \frac{\text{reflekterad våghöjd}}{\text{infällande våghöjd}} = \frac{H_r}{H_i} \quad (5-2)$$

och på samma sätt definieras andelen transmitt-
erad effekt som

$$K_t = \frac{\text{transmitterad våghöjd}}{\text{infällande våghöjd}} = \frac{H_t}{H_i} \quad (5-3)$$

Då den uttagna och dissiperade effekten (P_d) försummas gäller att

$$K_r = (1.0 - K_t^2)^{1/2} \quad (5-4)$$

Vågeffekten är proportionell mot våghöjden i kvadrat, (för samma vågperiod (grupphastighet)), vilket i sin tur innebär att K_R och K_t är proportionella mot roten ur den relativa energireflectionen resp. - transmissionen. Genom att anta att den vågeffekt som träffar vågbrytaren totalreflekteras, kan den reflekterade effektens andel av den infallande effekten studeras. Detta bör ge rimliga värden på K_R och därmed även på K_t .

Vågeffekten är vågens energi multiplicerad med vågens hastighet. Eftersom den infallande och reflekterade vågens hastighet är densamma, är effekten direkt proportionell mot vågenergin.

Enligt första ordningens vågteori kan vågtrycket i en bestämd punkt beskrivas med

$$p = \frac{\rho g a \cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (5-5)$$

En vätskepartikels horisontella hastighet uttrycks

$$u = \frac{g a k}{\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (5-6)$$

Den infallande vågens energi blir då

$$E = \iint p u \, dz \, dt \quad (5-7)$$

Vi är främst intresserade av förhållandena i viss tidpunkt, d v s problemet blir tidsoberoende och vi kan förenkla uttrycket (5-7) till

$$\frac{E}{dt} = \int p u \, dz \quad (5-8)$$

M h a antagandet om totalreflektion kan reflektionskoefficienten beräknas som

$$K_R = \left(\frac{-D \int_{-d}^z p u \, dz}{\int_{-d}^z p u \, dz} \right)^{1/2} \quad (5-9)$$

med beteckningar enligt figur (5.3).

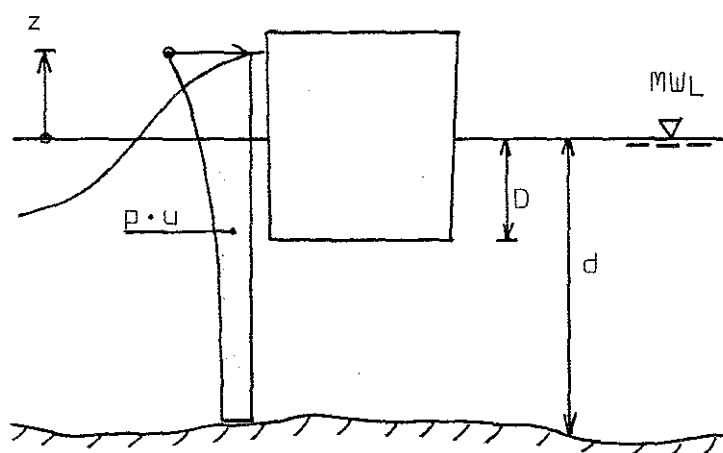


Fig. (5.3) Aktuella beteckningar

5.2.2 Beräknad transmission mht effektbetraktelse

M h a dator beräknades transmissionskoefficienten enligt ekv. (5-9), för olika förhållanden på d/L och D/L . Diagram uppritades och presenteras i fig (5.4)-(5.5)

För de fyra studerade punkterna utmed vågbrytaren, beräknades den transmitterade våghöjden m h a diagrammen. De transmitterade våghöjderna redovisas i tabellerna (5-1) - (5-4) nedan, och beräknades med de för vågbrytaren dimensionerande vågparametrarna enl. kap. 4.2.

Tabell 5-1. Beräknade transmitterade våghöjder för punkt 1. $d=18$ m, $D=7,4$ m.

Riktn	H (m)	L (m)	d/L	D/L	K_t	H_t (m)
N	13,0	84,3	0,214	0,088	0,59	7,67
NW	14,0	102	0,176	0,073	0,65	9,1
W	12,7	92,8	0,194	0,080	0,63	8,00

Tabell 5-2 Beräknade transmitterade våghöjder för punkt 2. $d=21$ m, $D=7,4$ m.

Riktn	H (m)	L (m)	d/L	D/L	K_t	H_t (m)
N	12,4	86,8	0,241	0,085	0,63	7,81
NW	14,2	101,2	0,208	0,073	0,65	9,2
W	12,9	88,1	0,238	0,084	0,63	8,13

Tabell 5-3. Beräknade transmitterade våghöjder för punkt 3. $d=12$ m, $D=7,4$ m.

Riktn	H (m)	L (m)	d/L	D/L	K_t	H_t (m)
N	11,8	80,9	0,143	0,091	0,57	6,73
NW	Vågen bryter					
W	8,1	85,4	0,141	0,087	0,58	4,72

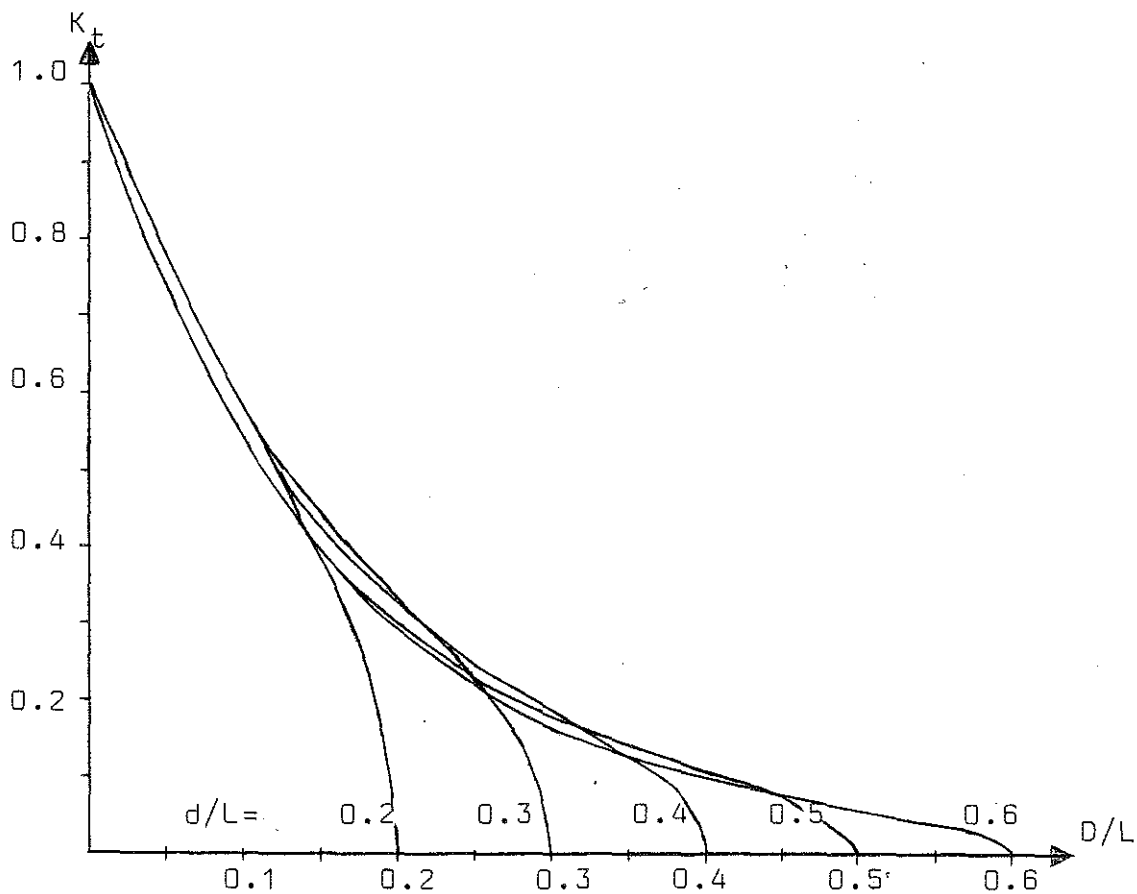


Fig. (5.4) Diagram över K_t beräknad mht effektbetraktelse för olika d/L .

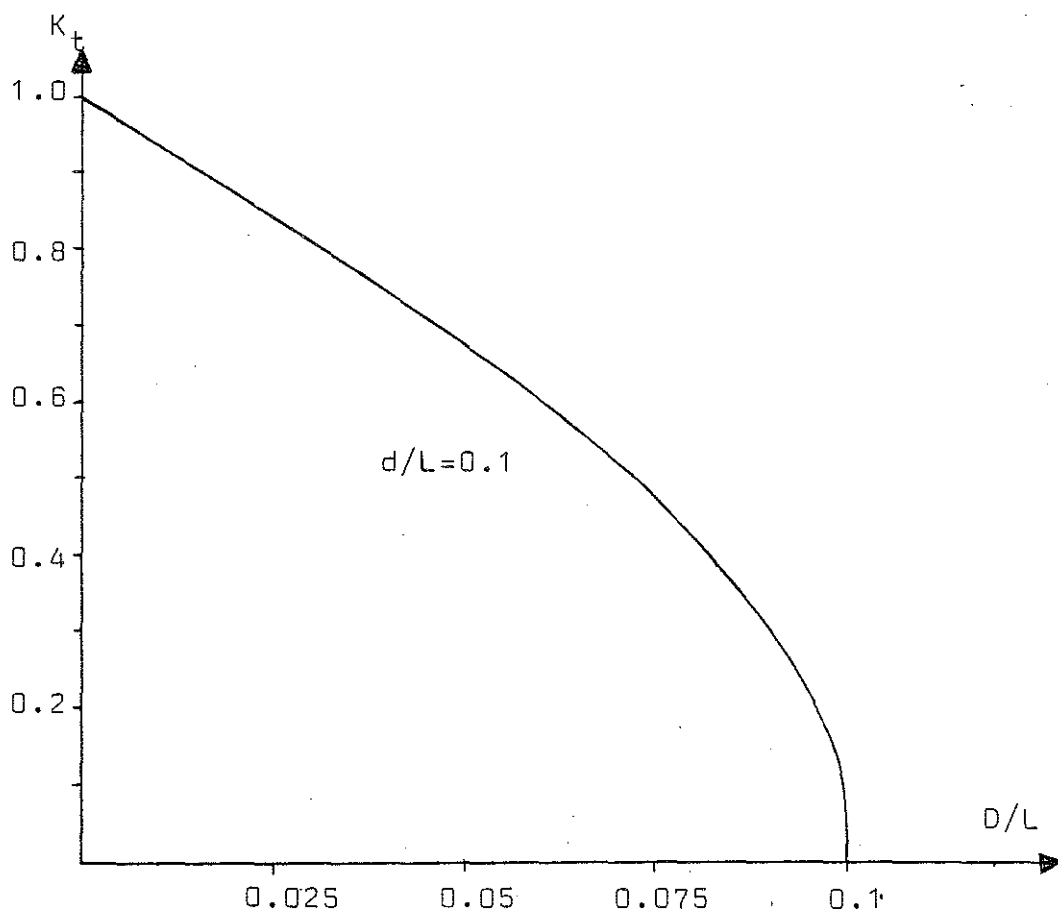


Fig. (5.5) Diagram över K_t beräknad mht effektbetraktelse för $d/L = 0.1$.

Tabell 5-4 Beräknade transmitterade våghöjder
för punkt 4. $d=10$ m, $D=7,4$ m.

Riktn	H (m)	L (m)	d/L	D/L	K_t	H_t (m)
N	Vågen bryter					
NW	14,9	85,7	0,117	0,086	0,37	5,51
W	12,4	80,5	0,124	0,092	0,35	4,34

5.2.3 Beräknad transmission m h t konstruktionens bredd

Enligt Wiegel, Oceanographical Engineering har man funnit att transmissionskoefficienten för en lådformad provkropp, till viss del nedsänkt i vattnet, kan skrivas som

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\pi B}{L} + \frac{D}{d-D}\right)^2\right)^{1/2}} \quad (5-10)$$

med beteckningar enligt fig. (5.6) nedan

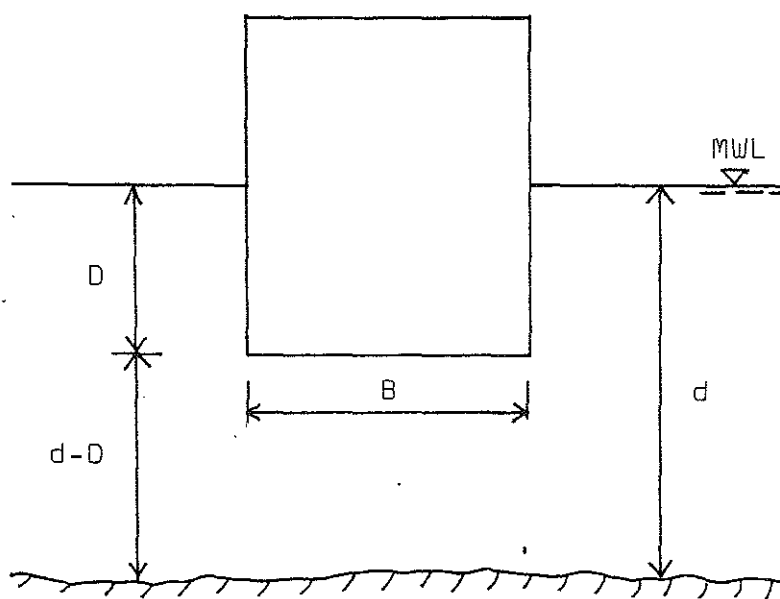


Fig. (5.6) Aktuella beteckningar enl. ekv. (5-10)

Ekv. (5-10) ovan gäller för en fast fixerad flytkropp och en jämförelse mellan beräknat resultat och gjorda försök framgår av figur (5.7).

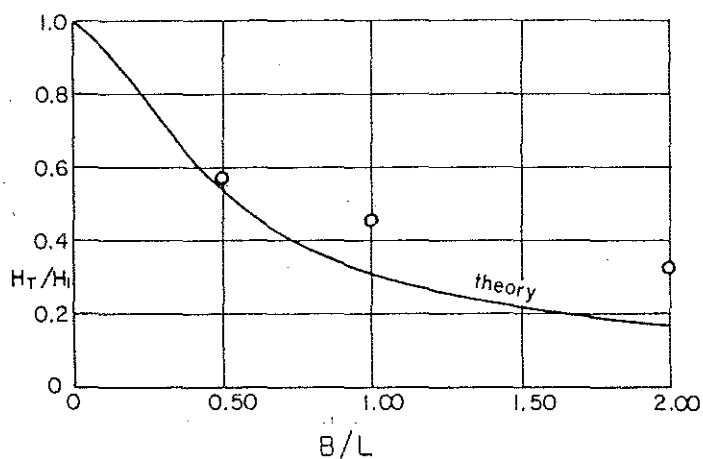


Fig. (5.7) Transmissionskoefficienten -
överensstämmelse mellan teori och
praktik (efter Wiegel [15])

Genom insättning av aktuella värden, d och D i
för de fyra tidigare studerade punkterna beräknades
transmissionskoefficienten för olika värden på B/L .
Aktuella kurvor för de fyra punkterna redovisas i
figur (5.8).

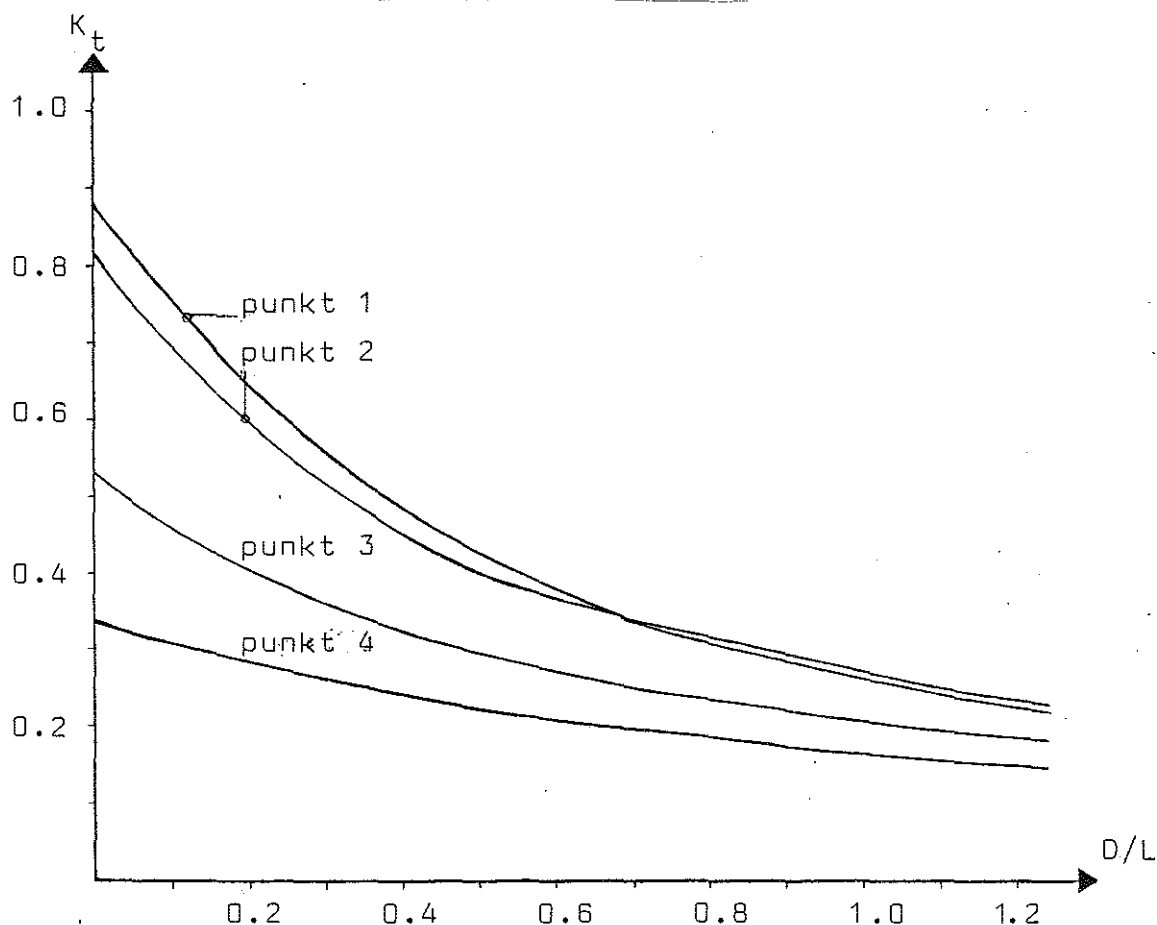


Fig. (5.8) Diagram över K_t beräknad enl.
Wiegel i fyra beräkningspunkter.

M h a diagrammen beräknades den transmitterade våghöjden för de aktuella punkterna, under samma förutsättning som i kapitel 5.2.2. I tabellerna (5-5) - (5-8) nedan redovisas de beräknade värdena.

Tabell 5-5. Beräknade transmitterade våghöjder enligt Wiegel för punkt 1.

Riktn	H	L	B/L	K_t	H_t
N	13	84,3	0,107	0,69	8,97
NW	14	102	0,088	0,775	10,85
W	12,7	92,8	0,096	0,705	8,95

Tabell 5-6. Beräknade transmitterade våghöjder enligt Wiegel för punkt 2.

Riktn	H	L	B/L	K_t	H_t
N	12,4	86,8	0,103	0,755	9,36
NW	14,2	101,2	0,089	0,775	11,0
W	12,9	88,1	0,101	0,76	9,80

Tabell 5-7. Beräknade transmitterade våghöjder enligt Wiegel för punkt 3.

Riktn	H	L	B/L	K_t	H_t
N	11,8	80,9	0,111	0,455	5,37
NW	Vågen bryter				
W	8,1	85,4	0,105	0,46	3,73

Tabell 5-8. Beräknade transmitterade våghöjder enligt Wiegel för punkt 4.

Riktn	H	L	B/L	K_t	H_t
N	Vågen bryter				
NW	14,9	85,7	0,105	0,305	4,54
W	12,4	80,5	0,112	0,30	3,72

5.3 Diffraktion

5.3.1 Diffraktion vid vågbrytare (efter Mattson (9))

Diffraktion är ett fenomen förbundet med energitransport vinkelrätt mot vågutbredningshastigheten. Denna energitransport märks tydligt om man betraktar vågor som faller in mot en vågbrytare som har begränsad utsträckning,

De infallande vågorna kommer dels att reflekteras, dels att ge upphov till en vågutbredning i lä av vågbrytaren. Denna utbredningsprocess är densamma som den som gäller för ljud- och ljusvågor.

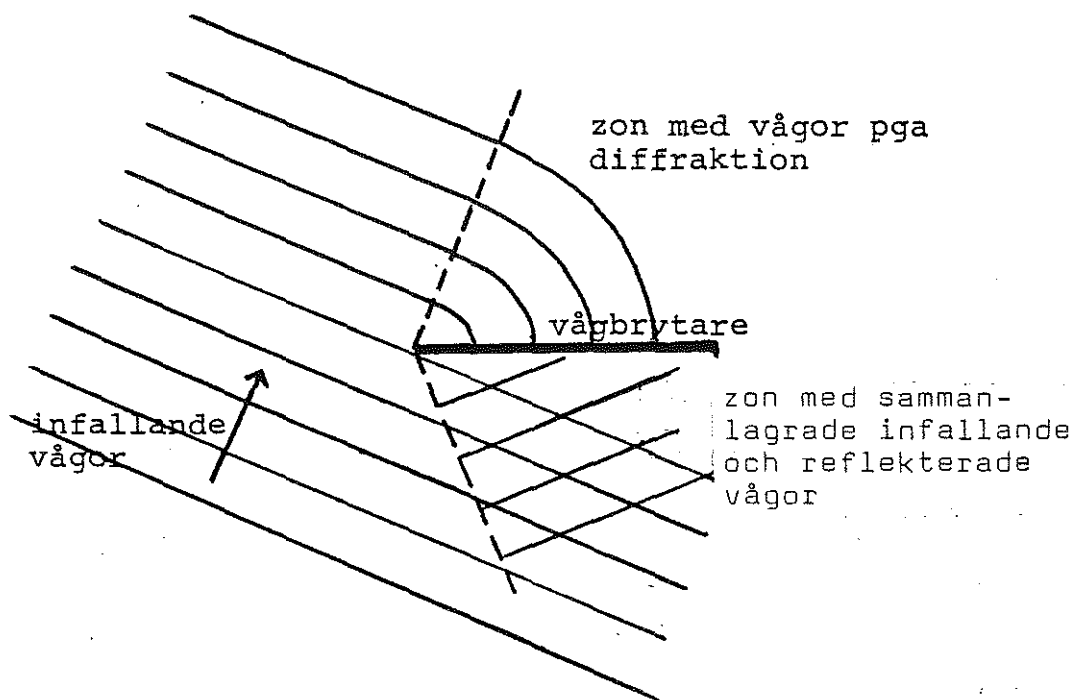


Fig. (5.9) Diffraktion vid vågbrytare

För beräkning av vågutbredningen bakom vågbrytare används dimensionslösa diffraktionsdiagram, ur vilka diffraktionskoefficienten, K_D , erhålls. K_D definieras som förhållandet mellan höjden på den resulterande vågen och höjden på den inkommande vågen.

Diagrammen upprättas under förutsättning att första ordningens teori gäller och att vågorna är regelbundna. Det förutsätter även att vattendjupet är konstant. Diagrammen är upprättade utan hänsyn till reflektionen inne i hamnen.

Våghöjden inne i hamnen är starkt beroende av diffraktionen. Även för att placera hamninloppet på sådant sätt att resonans i hamnen undviks krävs att hänsyn tas till diffraktionens inverkan.

5.3.2 Aktuell diffraktion

Diffraktionen i hamnen har uppskattats genom användning av diagram ur Shore Protection Manual. Dessa tar, vilket tidigare nämnts, ej hänsyn till reflektion inne i hamnen, vilket innebär en stor osäkerhet i uppskattningen av hamnens vågsituation. En idealiserad symmetrilinje i hamnen användes för att utgående från denna studera vågmönstret, då den valda vågbrytarplaceringen inte överensstämmer med de idealiserade diagrammens.

Den för vågbrytaren och hamnen farligaste vindriktningen har visat sig vara den nordvästliga. Vågeffekten, genererad av nordvästvinden, som når den västliga vågbrytaren kommer att transmittas enligt kap. 5.2.2 och 5.2.4, och vid vågbrytarens ändrar att diffrakteras. Genom att betrakta diffraktionsdiagram I, bilaga I, framgår att denna diffraktion ej påverkar vågförhållandena framför den nordliga vågbrytaren.

Den av vågbrytaren transmitterade vågeffekten ger ett vågförhållande framför hamninloppet som karakteriseras av $H=9,2$ m och $L=101,2$ m (Jfr tabell 5-2). Dessa vågor kommer i sin tur att diffrakteras vid passagen av hamnens inlopp. Vågsystemets infallsvinkel mot öppningen är ungefär 60° och öppningens längd är 100 m, dvs ca en våglängd. Diffraktionsdiagram II, bilaga I, förstorades i förhållande till aktuell våglängd, vilket framgår av fig (5.10).

Ur figuren framgår att den största våghöjden, p g a diffraktion, utmed kajerna fås där $K_d=0,5$, vilket motsvarar våghöjden $H_d = 0,5 H_i = 0,5 \times 9,2 = 4,6$ m. Diffraktionskoefficienten 0,2 motsvarar på samma sätt en våghöjd på 1,8 m ($0,2 \times 9,2$ m).

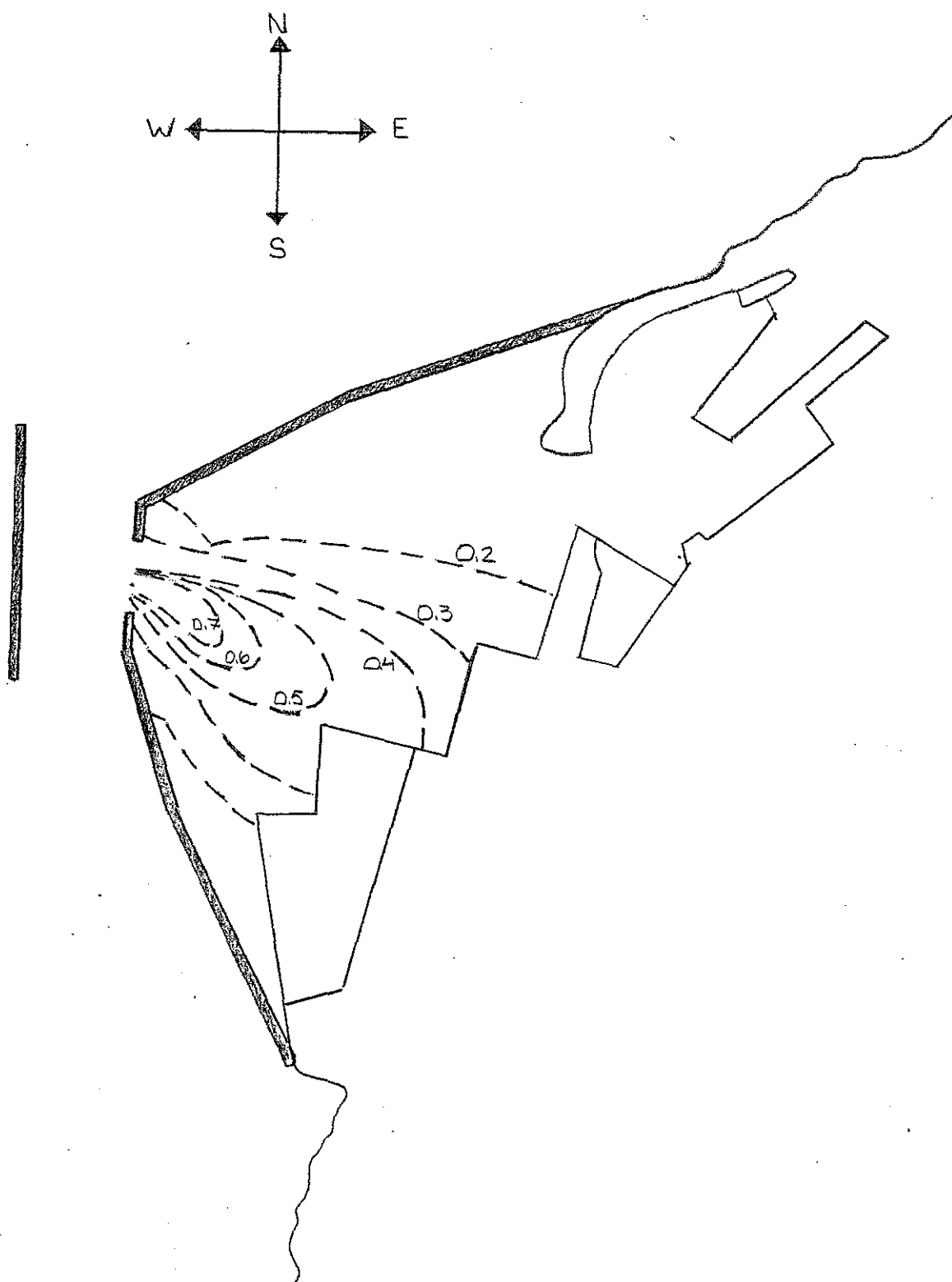


Fig. (5.10) Diffraktionsdiagram för nordvästlig vindriktning ($L=101\text{m}$)

5.4 Sammanfattning

I hamnbassängen kommer de transmitterade och diffrakterade vågorna att överlagras och tillsammans med de av vågbrytaren genererade vågorna, att bilda ett nytt vågsystem. Vågorna kommer att reflekteras mot kajerna, och de reflekterade vågorna påverkar i sin tur hamnens vågsituation.

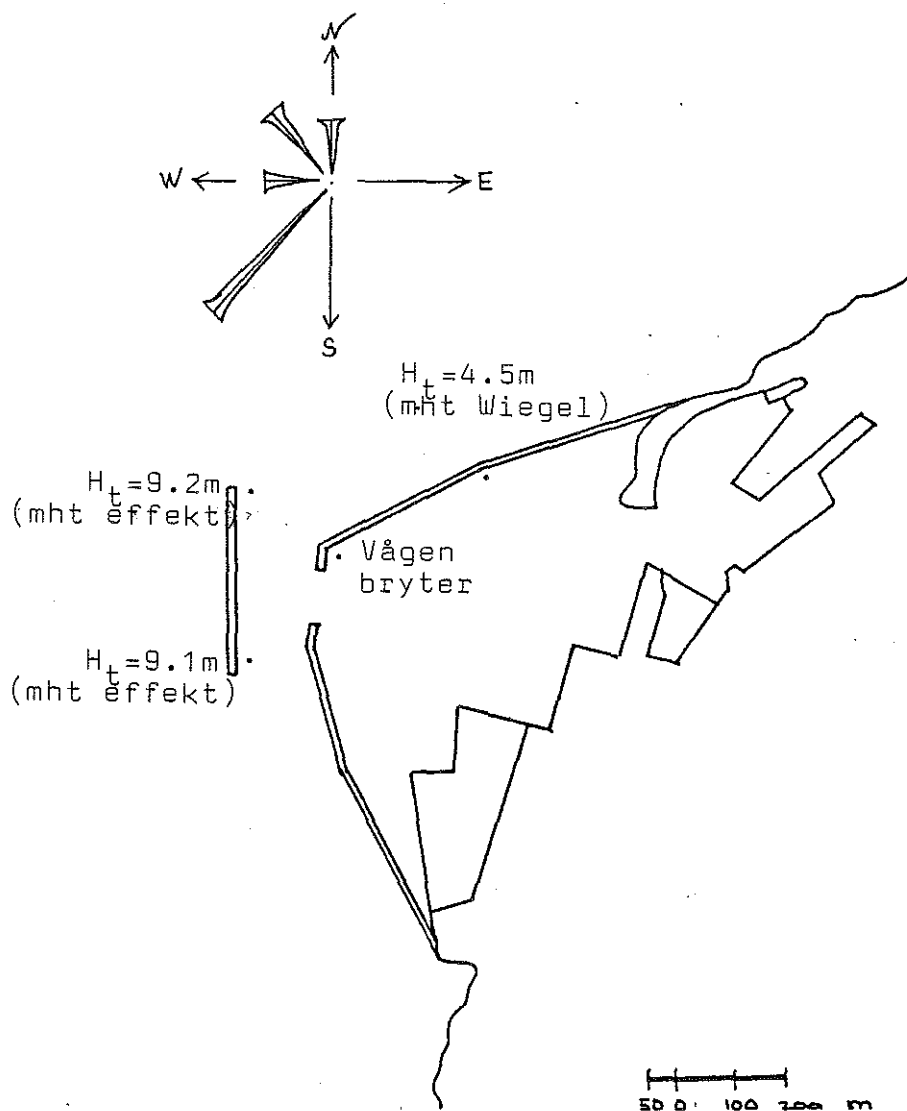


Fig. (5.11) Aktuell transmission (nordvästlig vind, 31 m/s)

De maximala transmitterade våghöjderna, enligt kap. 5.2, för den nordvästliga vindriktningen redovisas i figur(5.11). En jämförelse mellan de två beräkningssätten visar att inverkan av konstruktionens bredd ökar med minskande vattendjup.

En uppskattning av vågförhållandena i hamnen fås, under antagande av att kajerna inte reflekterar någon energi, genom superposition av de transmittade och de diffrakterade våghöjderna. Fig. (5.12) visar den beräknade vågsituationen.

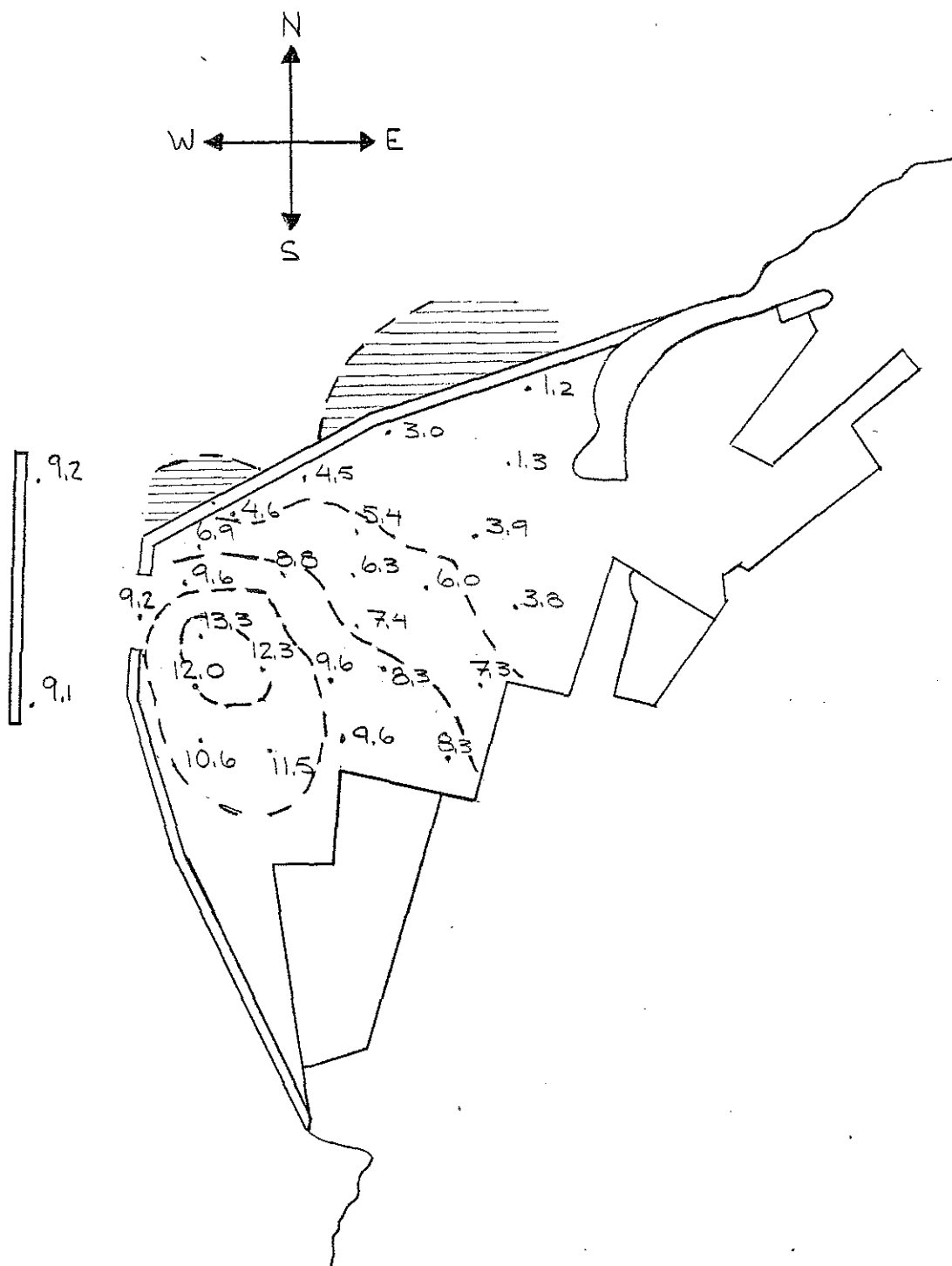


Fig. (5.12) Superposition av max.- våghöjder.
Nordvästlig vind.
(Vågen har brutit inom det streckade
området)

I hamnens inlopp uppkommer våghöjder på 13,3 m, för att längre in i hamnen avklinga till 8-10 m utmed de södra kajerna och 1,2-3 m utmed den norra vågbrytaren. Maximala våghöjderna utanför hamnen är ca 14,8 m. Våghöjderna inne i hamnen anses därför vara för höga för att hamnen ska betraktas som tillräckligt skyddad. För att förbättra hamnens vågsituation kan vågbrytarnas djupgång ökas (eller utnyttja en skärm för ökad reflektion) eller placera ytterligare vågbrytarkraftverk utanför hamnen.

6. Krafter mot vågbrytaren

6.1 Allmänt

De vågkrafter som kommer att påverka vågbrytaren studeras med utgångspunkt från teorin om krafter mot en totalreflekterande, vertikal kaj. Genom att betrakta vågtrycket mot konstruktionen och integrera detta över konstruktionens vertikala utbredning kan vågkrafterna beräknas. Härvid antas att den del av vågeffekten som infaller mot vågbrytaren totalreflekteras och ger en stående våg.

6.2 Vågkrafter

Vid beräkning av vågkrafter gäller inte den vanliga indelningen av djupt respektive grunt vatten ($d/L > 0,5$ resp. $d/L < 0,1$). Istället används enl. (1) Nagai's indelning där grunt vatten antas gälla då $0,135 \leq d/L \leq 0,35$, djupt vatten då $d/L > 0,35$.

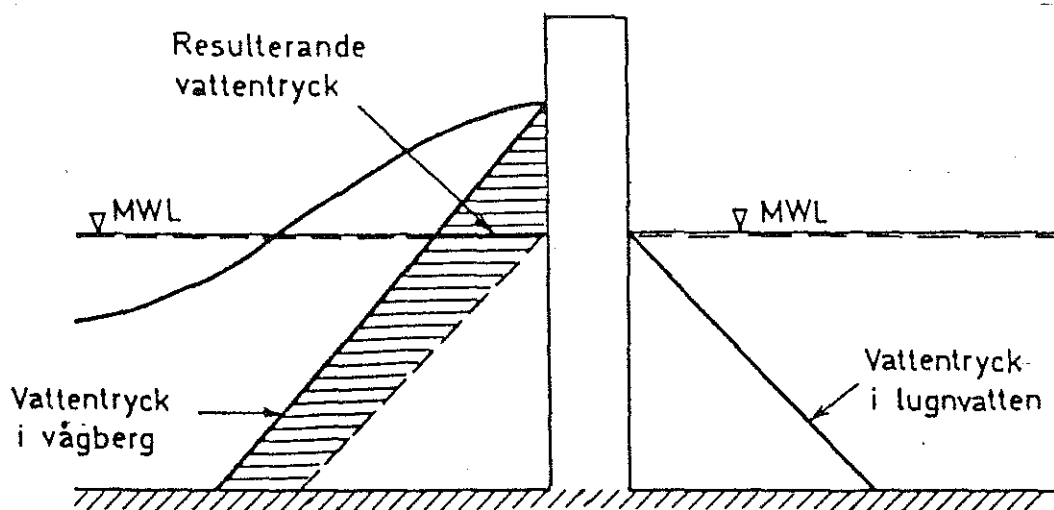


Fig. (6.1) Belastning mot vågbrytarskärm
(Efter Bergdahl)

I grunt vatten (enl. Nagai) kan belastningen för en kaj eller vågbrytarskärm beräknas ur ekvationerna (6-1) och (6-2) nedan. Vattentrycket över lugnvattenytan varierar med $p=0$ vid $z=H$ och $p=pgH$ vid $z=0$, vilket framgår av figur 6.1.

De aktuella vågtrycken för vågdal resp. vågberg kan skrivas som

$$p_{\max} = -\rho g z + \rho g H \cosh k(d+z) \quad (6-1)$$

$$p_{\min} = -\rho g z - \rho g H \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \quad (6-2)$$

där H betecknar den infallande vågens höjd. Höjden hos den stående vågen är alltså $2H$ och dess amplitud H .

De resulterande krafterna fås genom att integrera (6-1) och (6-2) från $-d$ till 0 och till detta addera trycket ovan lugnvattenytan. Krafterna blir

$$F_{\max} = \rho g \left(\frac{1}{2}(d^2 + H^2) + \left(\frac{H}{k} \right) \tanh kd \right) \quad (6-3)$$

$$F_{\min} = \rho g \left(\frac{1}{2}d^2 - \left(\frac{H}{k} \right) \tanh kd \right) \quad (6-4)$$

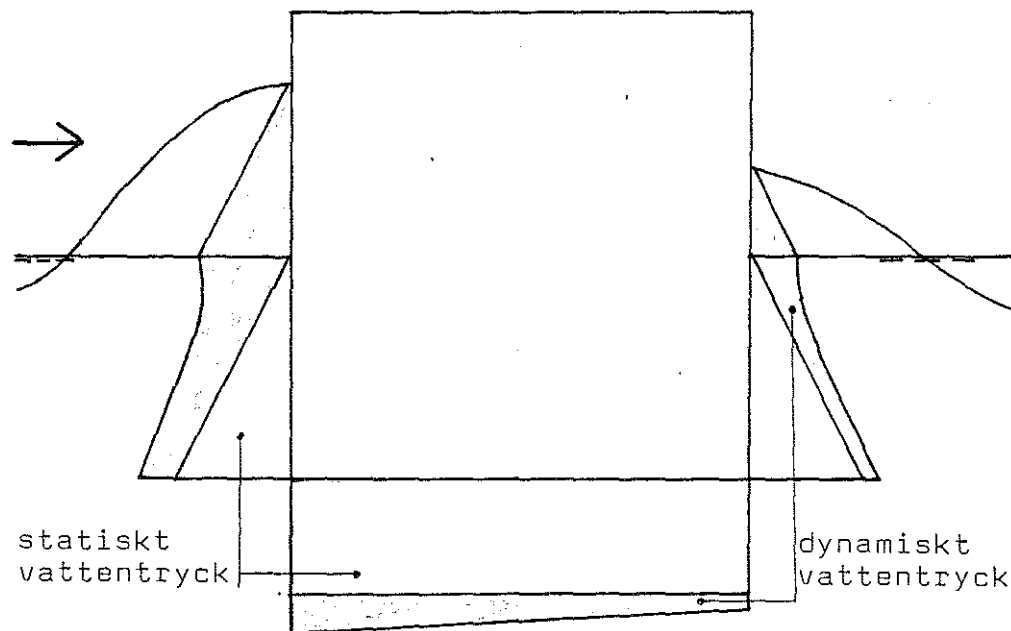


Fig. (6.2) Vågtryckets fördelning mot vågbrytaren.

Då den aktuella vågbrytaren har ett begränsat djupgående studeras vågtrycket, och integreras från vattenytan till kroppens underkant, med en fördelning enligt fig. 6.2. På det begränsade djupgåendet fås även ett vertikalt verkande vatten-tryck, vilket framgår av fig. 6.2.

Integrationsgränserna för ekv (6-1) och (6-2) ändras och går från $-D$ till 0 och de resulterande krafterna blir

$$F_{\max} = \rho g \left(\frac{1}{2} (D^2 + H^2) + \left(\frac{H}{k} \right) \left(\tanh kd - \frac{\sinh k(d-D)}{\cosh kd} \right) \right) \quad (6-5)$$

$$F_{\min} = \rho g \left(\frac{1}{2} D^2 - \left(\frac{H}{k} \right) \left(\tanh kd - \frac{\sinh k(d-D)}{\cosh kd} \right) \right) \quad (6-6)$$

Den kraft som förankringarna ska dimensioneras för blir därmed skillnaden i vågtryck mellan konstruktionens fram- och baksida.

För flacka vågor på mycket grunt vatten ($d/L = 0,135$ och $H/L = 0,04$), har Nagai funnit att tryckfördelningen över lugnvattenytan kan antas vara linjär med $p = 0$ vid $z = 1.30 H$ och $p = 1.3 H$ vid $z = 0$.

Den maximala horisontella kraften i ett vågberg mot en vågskärm blir i detta fall

$$F_{\max} = \rho g \left(\frac{1}{2} (d^2 + (1.3H)^2) + 0.15Hd + \left(\frac{H}{k} \right) \tanh kd \right) \quad (6-7)$$

På motsvarande sätt som för grunt vatten fås för den flytande vågbrytaren

$$F_{\max} = \rho g \left(\frac{1}{2} (D^2 + (1.3H)^2) + \left(\frac{H}{k} \right) \left(\tanh kd - \frac{\sinh k(d-D)}{\cosh kd} \right) + 0.30 \frac{H}{d} \left(dD - \frac{D^2}{2} \right) \right) \quad (6-8)$$

Det vertikala vattentrycket under den flytande kroppen består dels av statiskt vattentryck, som inte ger något bidrag till den dimensionerande kraften, dels av dynamiskt vattentryck. Dynamiska vågtrycket under vågbrytaren kan antas vara fördelat enligt fig. 6.2, med $p_1(D)$ som dynamiska trycket på djupet D framför vågbrytaren och $p_2(D)$ på motsvarande sätt trycket bakom vågbrytaren. Den vertikalt verkande kraften fås alltså som

$$F_v = p_2(D)B + (p_1(D) - p(D))\frac{B}{2} \quad (6-9)$$

6.3 Dimensionerande belastningar

Genom insättning av aktuella parametrar i ekv (6-5), (6-6) och (6-8) kan de dimensionerande belastningarna i horisontallded uppskattas.

Av figur 5.14 framgår att diffraktionens inverkan på våghöjden utmed vågbrytaren är lägre än övrigt i hamnen. Vågkrafterna ökar om våghöjden på vågbrytarens läsida minskar. På säker sida hämtas därför de erforderliga parametrar från tabellerna (5-1) - (5-8).

För punkt 1,2 och 3 uppfylls villkoret för ekv. (6-5) och (6-6), d v s $0,135 < d/L < 0,35$.

I punkt 4 är $d/L = 0,117 < 0,135$ och uppfyller alltså inte ovanstående villkor. Bivillkoret $H/L = 0,04$ är dock uppfyllt ($5,5\text{m}/85,7\text{ m} = 0,06$). Belastningen i punkt 4 beräknas där för även enl. ekv. (6-8).

Då vågbrytarens bredd är ungefär 10% av våglängden antas att maximal belastning infaller samtidigt på vågbrytarens fram- och baksida.

Tabell 6.1 Belastningar i horisontallded.

Punkt	Riktn.	framför		bakom		F_{dim} (kN/m)
		F_{max} (kN/m)	F_{min} (kN/m)	F_{max} (kN/m)	F_{min} (kN/m)	
1	N	1890		1030		860
			-500		-300	
2	NW	2160		1270		890
			-600		-300	
3	N	1710		755		955
			-470		-65	
4	NW	2320		670		1650
			-690		-20	
		3330		810		2520 *

(* enl. ekv 6.8)

De vertikala belastningarna beräknas med utgångspunkt från ekv. (6-9).

Jämförelse med ekv. (6-1) och (6-2) ger dynamiska vattentrycken som

$$p_{\text{dyn,max}} = \rho g H \cosh k(d+z) \quad (6-10)$$

$$p_{\text{dyn,min}} = -\rho g H \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \quad (6-11)$$

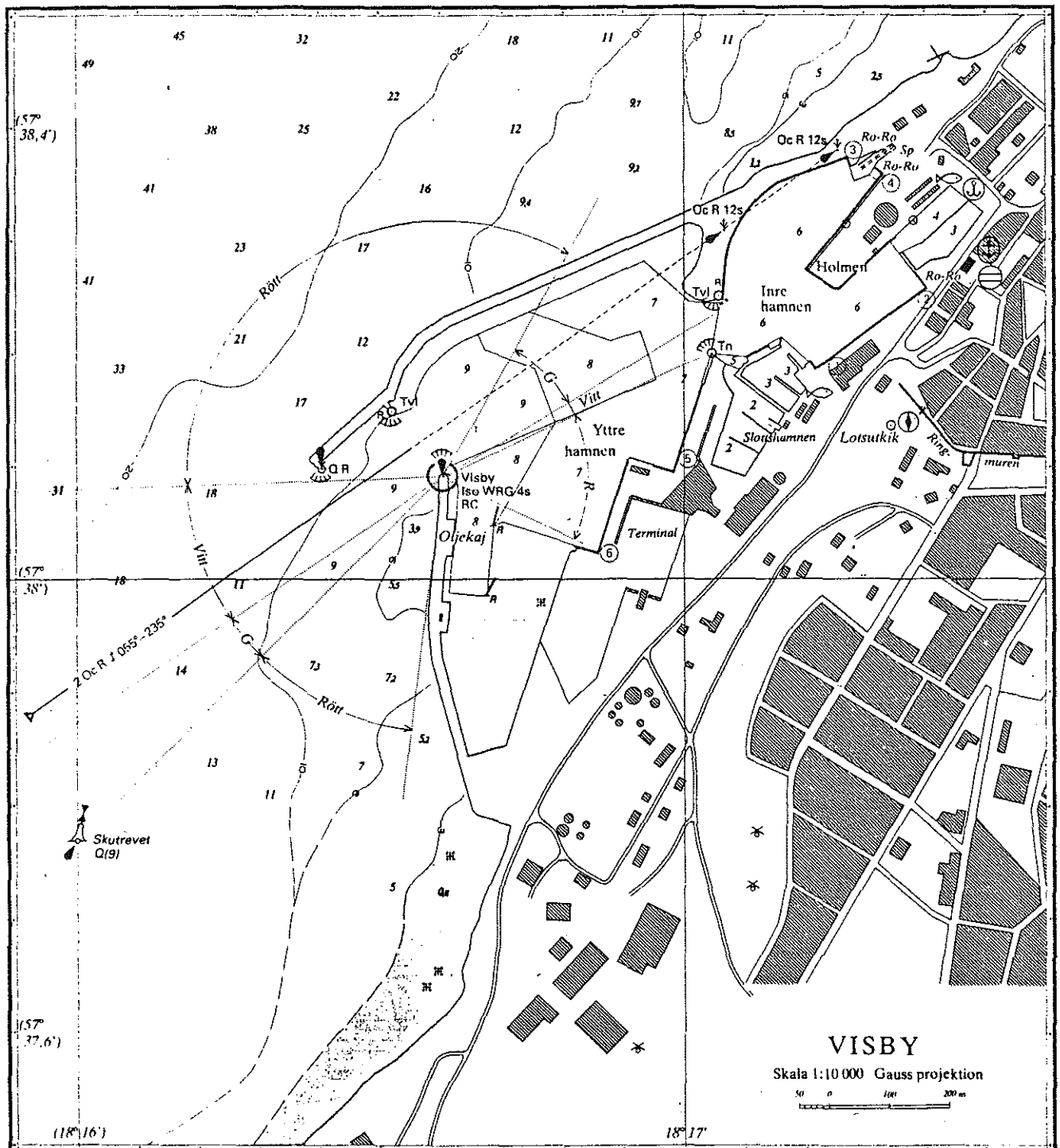
Med insättning av parametrar från tabellerna (5-1) - (5-8) i ekv. (6-10), (6-11) och sist (6-9) fås värden på de vertikala belastningarna. Dessa redovisas i tabell (6-2) nedan.

Tabell 6-2. Belastningar i vertikalled.

Punkt	Riktn.	Fmax (kN/m)	Fmin (kN/m)
1	N	1240	-610
2	NW	1450	-730
3	W	825	-560
4	NW	890	-695

BILAGOR

SJÖKORT ÖVER VISBY HAMN



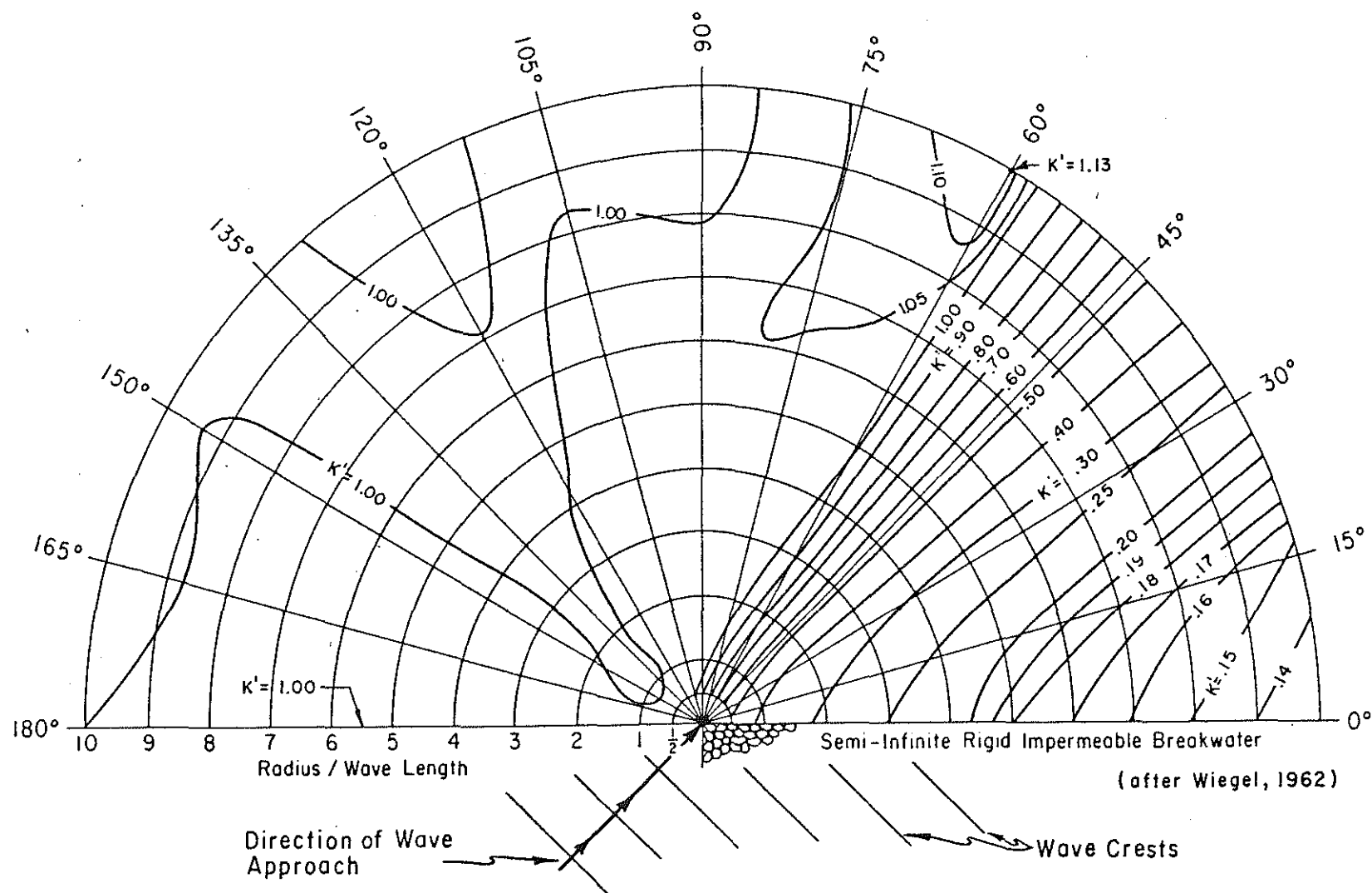


Figure 2-30. Wave Diffraction Diagram - 45° Wave Angle

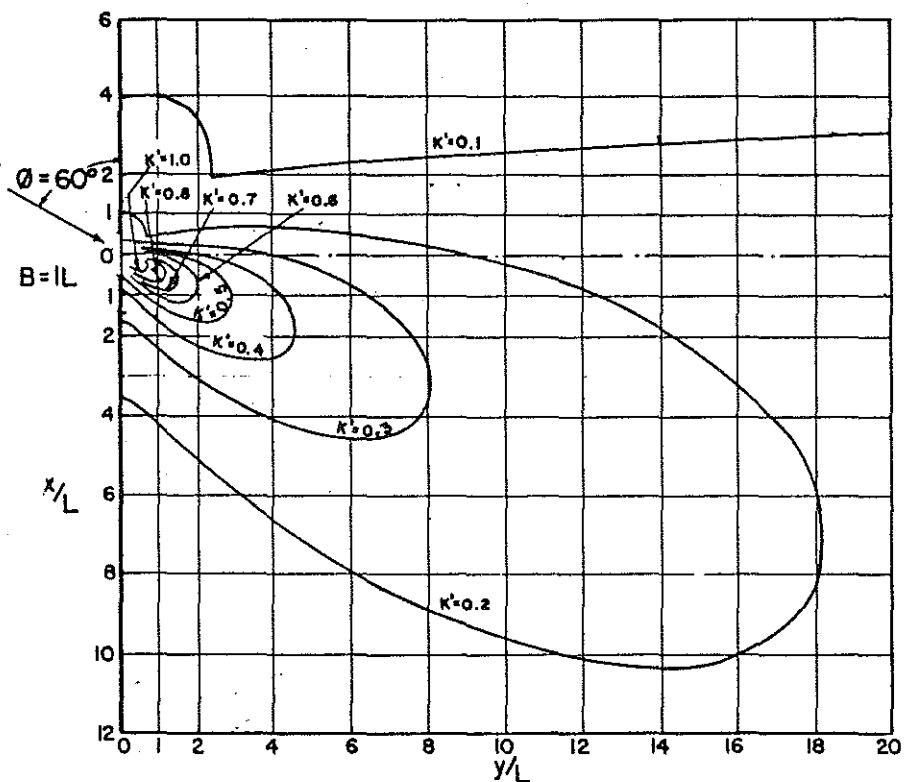


Figure 2-57. Diffraction for a Breakwater Gap of One Wavelength Width ($\phi = 60$)

DIFFRAKTIONS DIAGRAM II

(Vågbrytarens öppning är en våglängd.)
Hämtad ur "Shore Protection Manual, s 2-108".

APPENDIX

APPENDIX - Del B

Parameterlista

a	hydrodynamisk massa	
A	vattenlinjearea	$[m^2]$
b	hydrodynamisk dämpning	
b_1	dämpkonstant	
B	flytkroppens bredd	$[m]$
c	fjäderkonstant för den hydrostatiskt återförande kraften	
d	vattendjup	$[m]$
D	vågbrytarens djupgång	$[m]$
e	avstånd mellan displacementets tyngdpunkt och flytkroppens tyngdpunkt	$[m]$
E	vågenergi	$[Nm] = [J]$
f	frekvens	$[1/s]$
f_0	systemets resonansfrekvens	$[1/s]$
F	stryklängd; kraft	$[m]; [N]$
H	våghöjd	$[m]$
h_m	metacenterhöjden	$[m]$
I_0	vattenlinjeareans tröghetsmoment	$[m^4]$
k	vågta l ($2\pi/\lambda$)	
k_b	dämpningsfaktor	
K_d	diffraktionskoefficient	
K_r	reflektionskoefficient	
K_t	transmissionskoefficient	
L	våglängd	
m	svängande systemets massa	$[kg]$
m_n	n :te spektralmomentet	

p	vågtryck	$[N/m^2]$
p	vågeffekt	$[Nm/s] = [W]$
$S(f)$	vågspektrum	
T	vågperiod	$[s]$
U	vindhastighet	$[m/s]$
z	flytkroppens läge i vertikal- led	$[m]$
V	deplacementets volym	$[m^3]$
η	verkningsgrad; koordinat	$[-]; [m]$
φ	fasförskjutning mellan kraft och vågrörelse	
ω	vinkelfrekvens ($2\pi f$)	$[rad/s]$
ρ	densitet	$[kg/m^3]$
$\gamma(\omega)$	amplitudresponsfunktion	

Litteraturförteckning

- [1] Bergdahl, Lars, Beräkning av vågkrafter.
Göteborg CTH. Undervisningsskrift 1979 : 07
- [2] Bernander & Billton, Manual för REFRAC
Inst. för Vattenbyggnad, Göteborg CTH,
Examensarbete 1984 : 1
- [3] Byström et al, Vågenergi för Gotland,
Gruppen för Vågenergiforskning, Göteborg
CTH, Examensarbete 1980
- [4] Claesson & Svensson, Vågenergipotential i...,
Gruppen för Vågenergiforskning CTH Göteborg,
Rapport GR64 1984
- [5] Falkemo, Curt, Vågenergiboken, Ingenjörss-
förlaget AB Stockholm 1980
- [6] Gruppen för Vågenergiforskning, Vågenergi-
forskning i Sverige, CTH Göteborg,
Rapport GR44 1981
- [7] Lillieblad & Matz, Förankrad fartygssek-
tion i..., Institutionen för Vattenbyggnad
Göteborg CTH, Examensarbete 1980 : 7
- [8] Matsson, Bo, Den vertikala skärmen som våg-
skydd, Inst. för Vattenbyggnad, KTH Stock-
holm, Bulletin No TRITA - VBI - 103
- [9] Matsson, Susan, Datormodeller för vågre-
fraktion - en inventering, Inst. för
Vattenbyggnad, CTH Göteborg, Examensarbete
1986 : 1
- [10] Mårtensson, Nils, Windgenerated Waves,
Gruppen för Vågenergiforskning CTH Göteborg,
Rapport GR52 1983
- [11] Kvick, Tord, Vindarna över Sverige, SMHI
Norrköping, Rapport NE 1983 : 16

- [12] Sjöberg, Anders, Vindvågor, Institutionen för Vattenbyggnad, Göteborg CTH, Undervisningsskrift 1983 : 3

- [13] SSPA, Vågdata och Vågeffekt....., Marintekniska Institutet SSPA, Rapport 2265-3 1983 (Göteborg CTH).

- [14] Technocean, Teknikföretag i Göteborg, diverse stenciler erhållna vid besök.

- [15] Wiegel, Oceanographical Engineering (chapter 6).