

“Energia e Sostenibilità nel XXI secolo”

ENERGIA DAL MARE: MAREE E MOTO ONDOSO

<https://unipd.zoom.us/j/87164432041>

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Luca Martinelli & Piero Ruol

Dip. ICEA- Università di Padova

OBIETTIVI

- Stimolare la curiosità verso alcune tecnologie che hanno possibilità concreta di estrarre energia dalle maree e dalle onde
- Delineare le potenzialità della risorsa ondosa (200 G€/anno in Europa, 1G€/anno in Italia)
- Presentare un sistema di conversione dell'energia mareale italiana molto interessante
- Evidenziare le prospettive per l'Italia, soprattutto l'opportunità di fare ricerca e sviluppo in questo ambito

LAYOUT

- Convertitori di energia delle onde da vento (WEC)
 - Disponibilità di energia
 - Principi di funzionamento
 - Dispositivi in Europa e in Italia
 - Prove su modello fisico nei laboratori ICEA
- Convertitori di energia delle onde di marea (TEC)
 - Disponibilità di energia
 - Principi di funzionamento
 - Dispositivi in Europa e in Italia
- Conclusioni

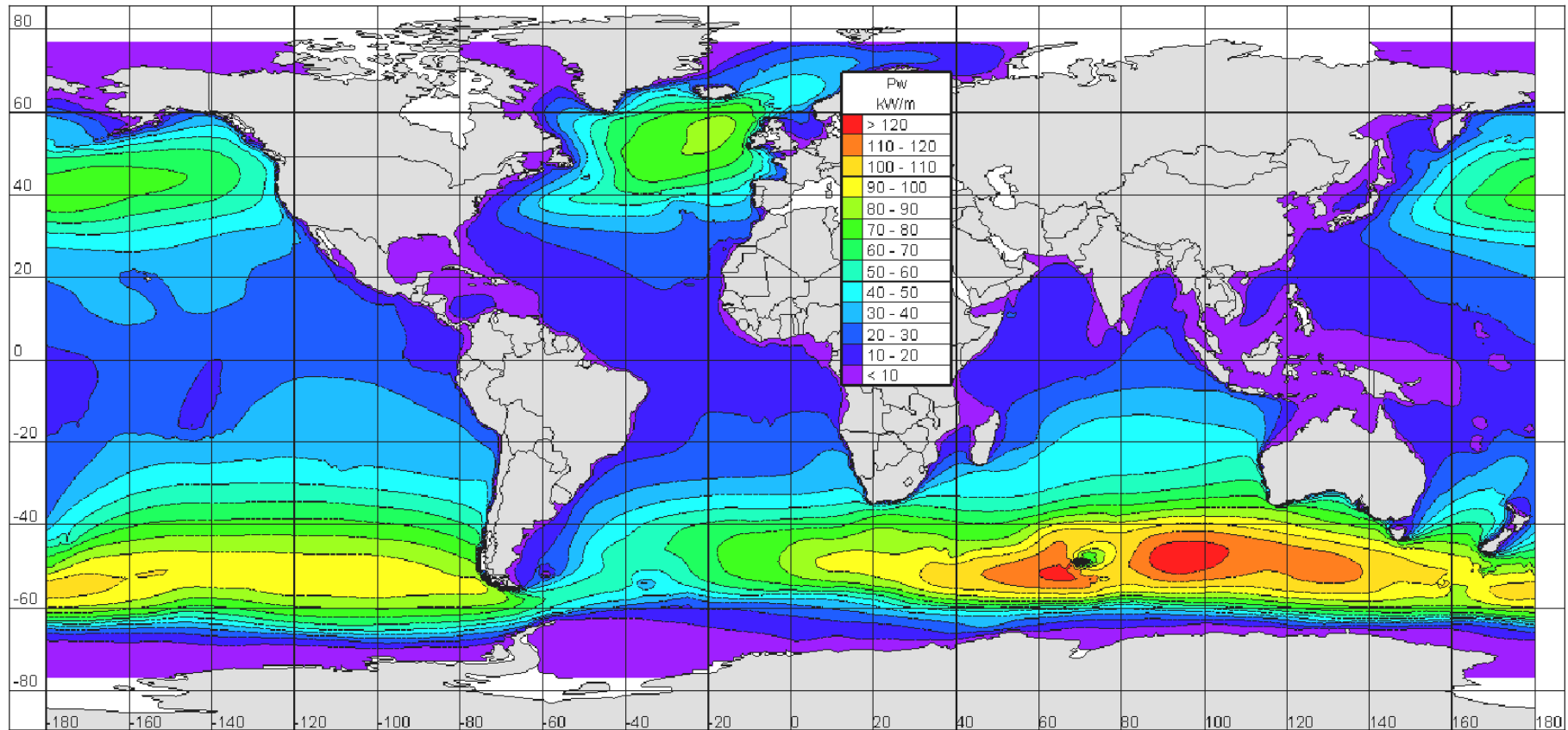
DISPONIBILITÀ DI ENERGIA ondosa

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

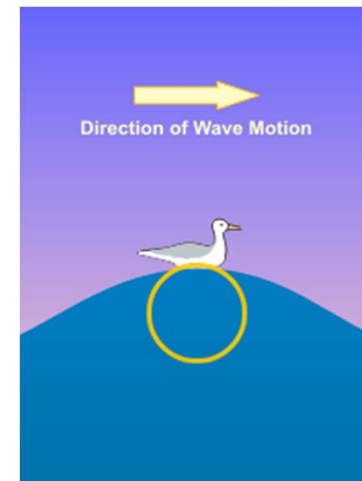
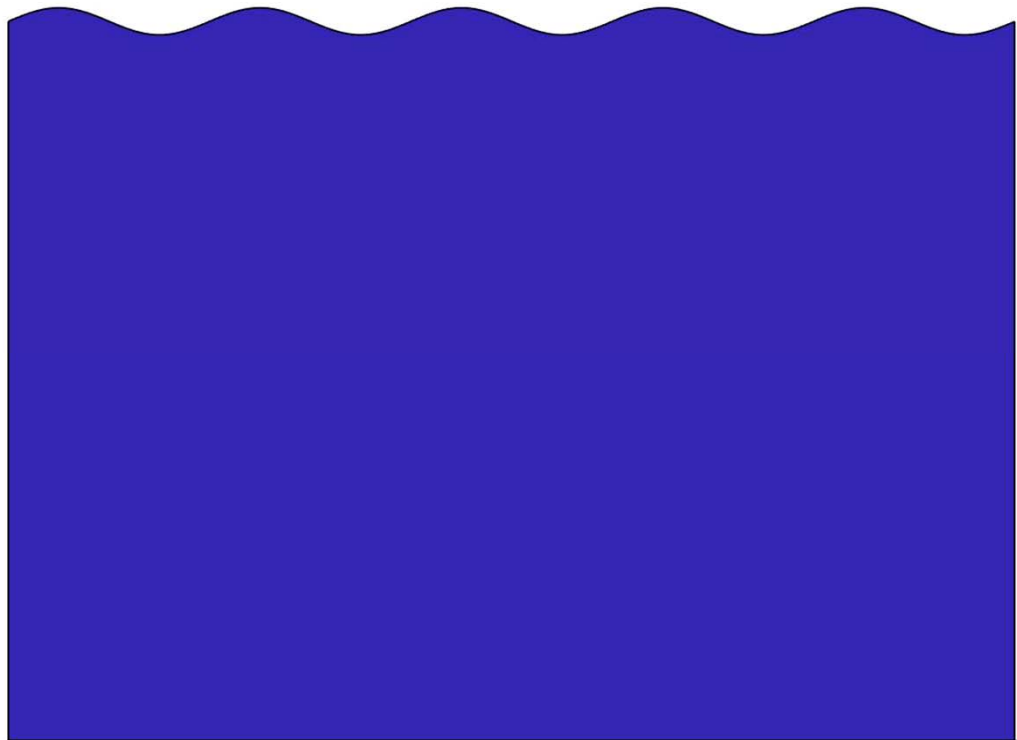
Disponibilità di energia



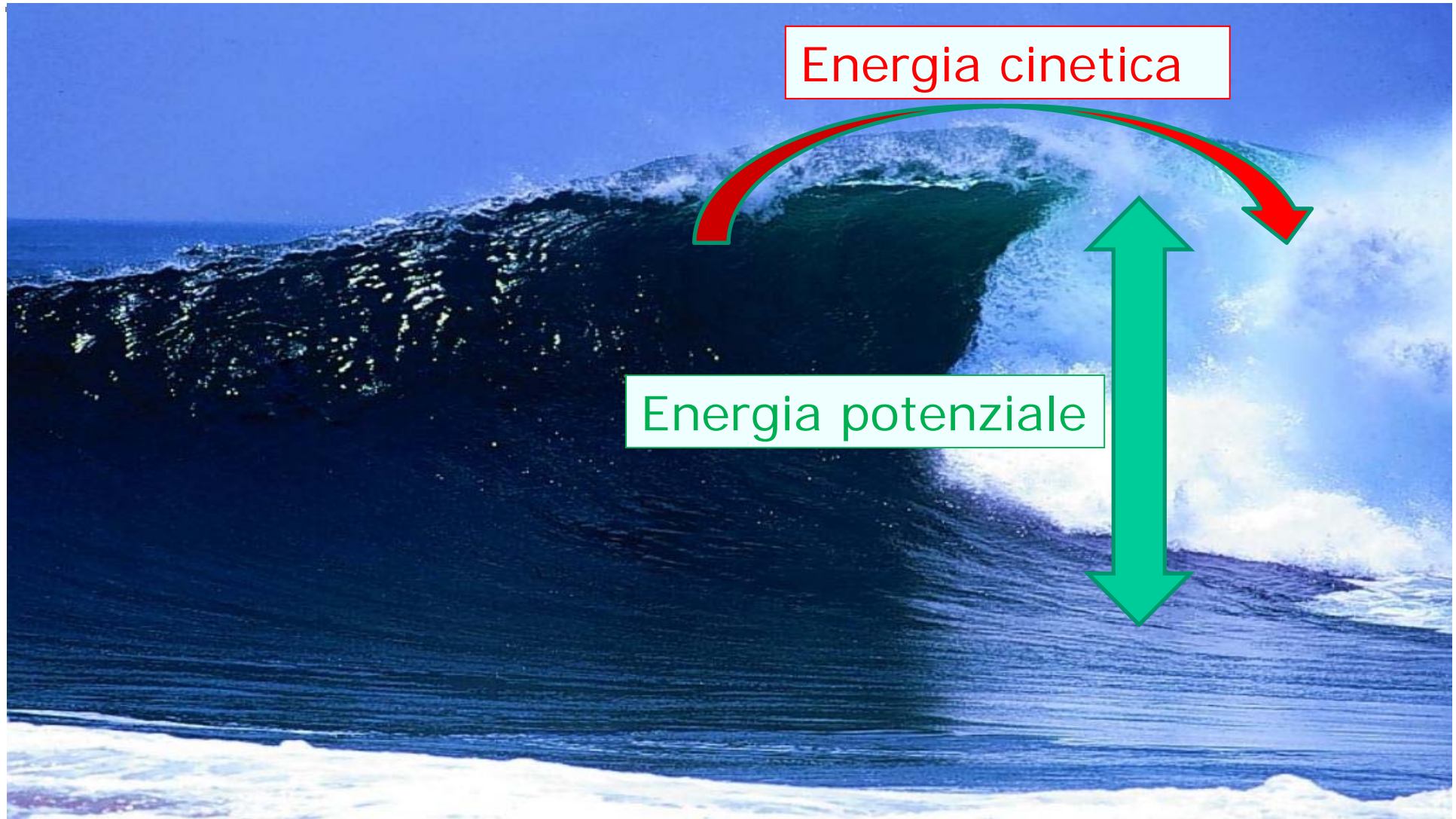
Cornett, 2008, A Global Wave Energy Resource Assessment, ISOPE2008

Cos'è un'onda?

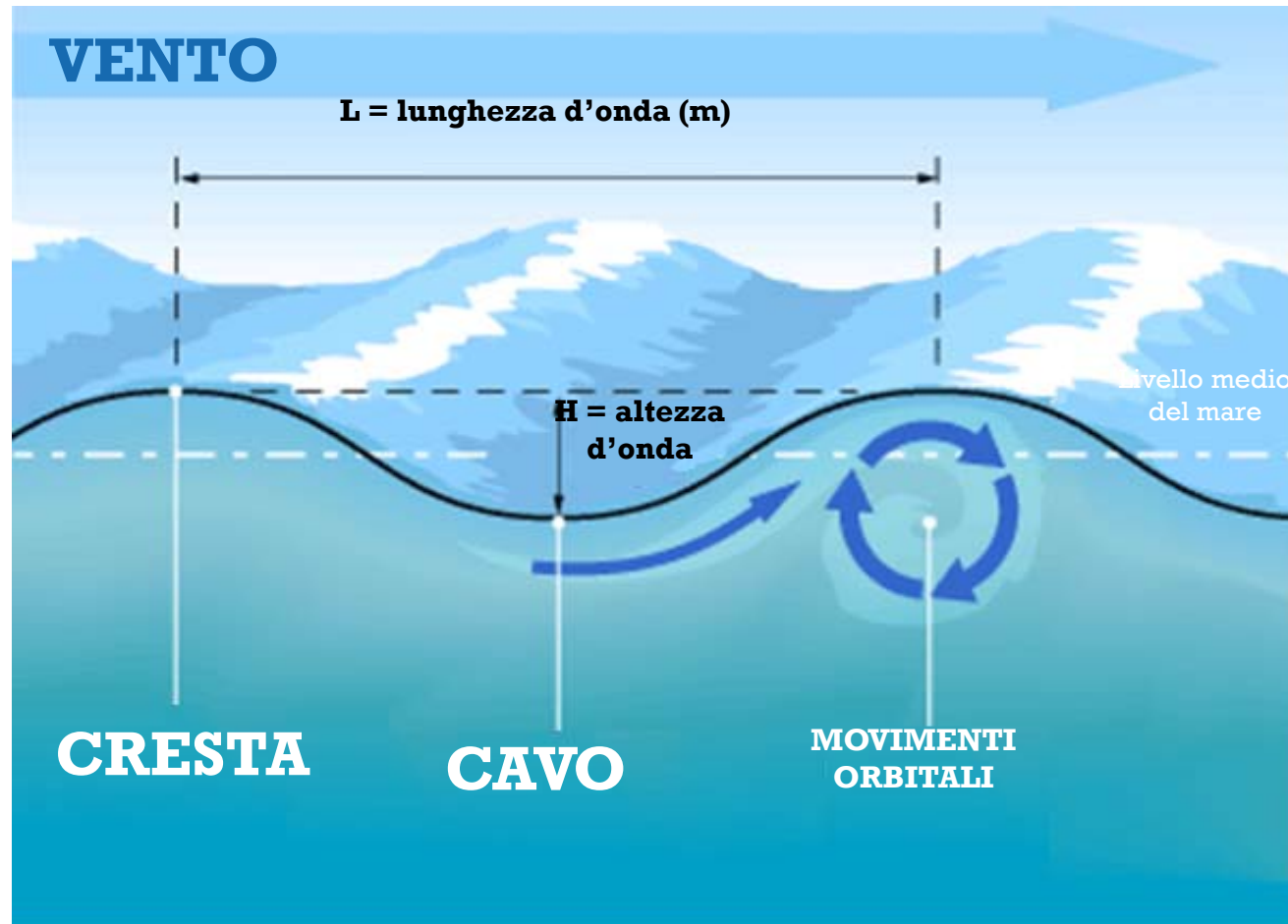
T = periodo d'onda (s)



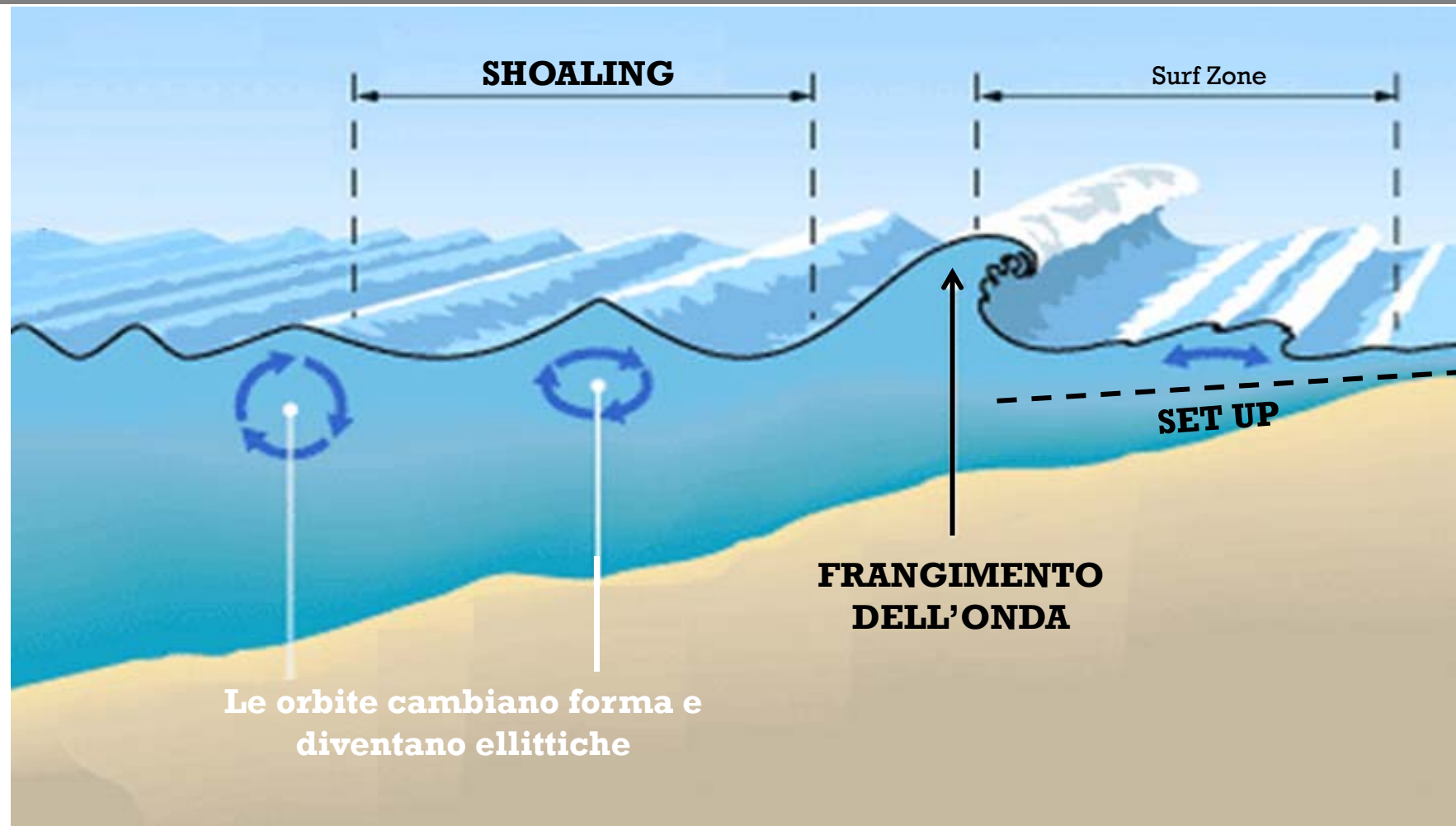
Energia ondosa



Come si possono caratterizzare le onde?



Quando le onde si avvicinano alla costa subiscono diverse trasformazioni



Onde frangenti

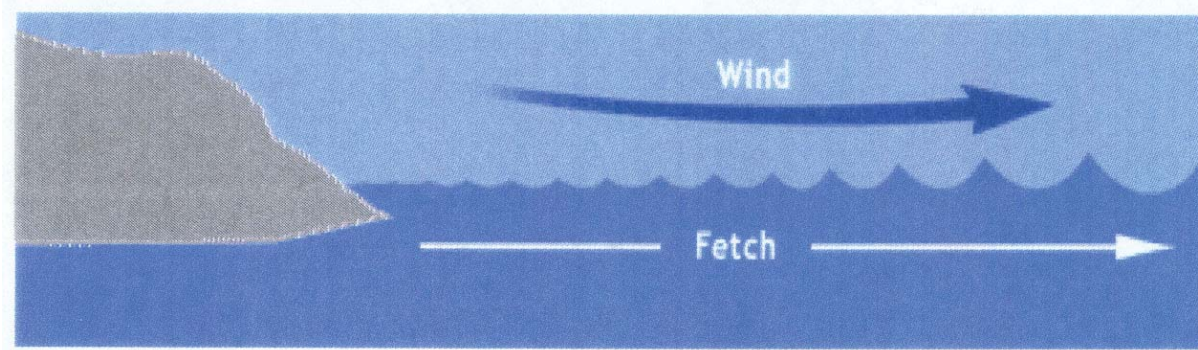


1222·2022
800
ANNI

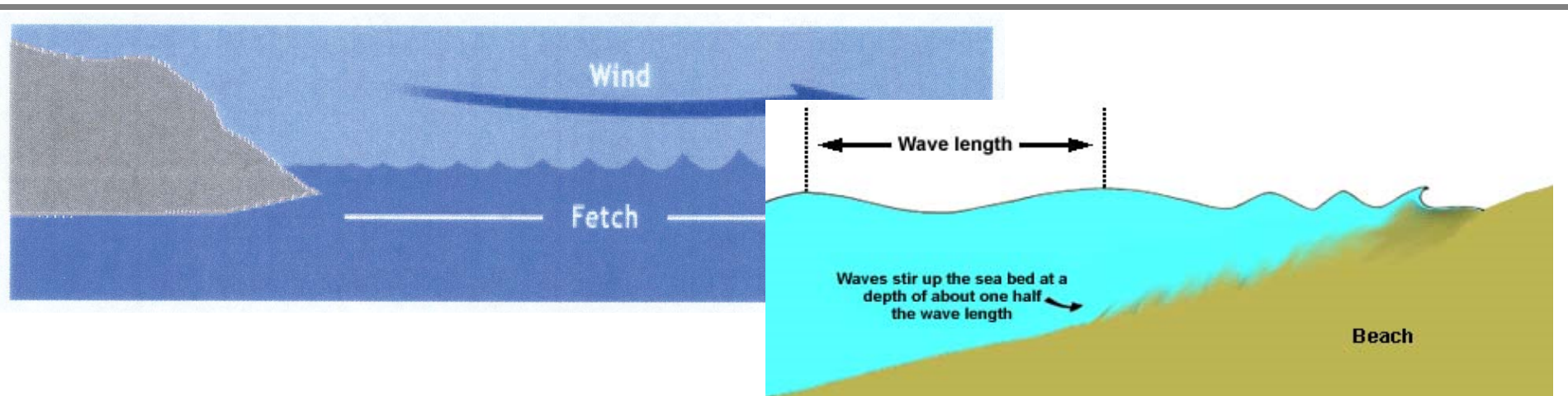


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Come si generano le onde

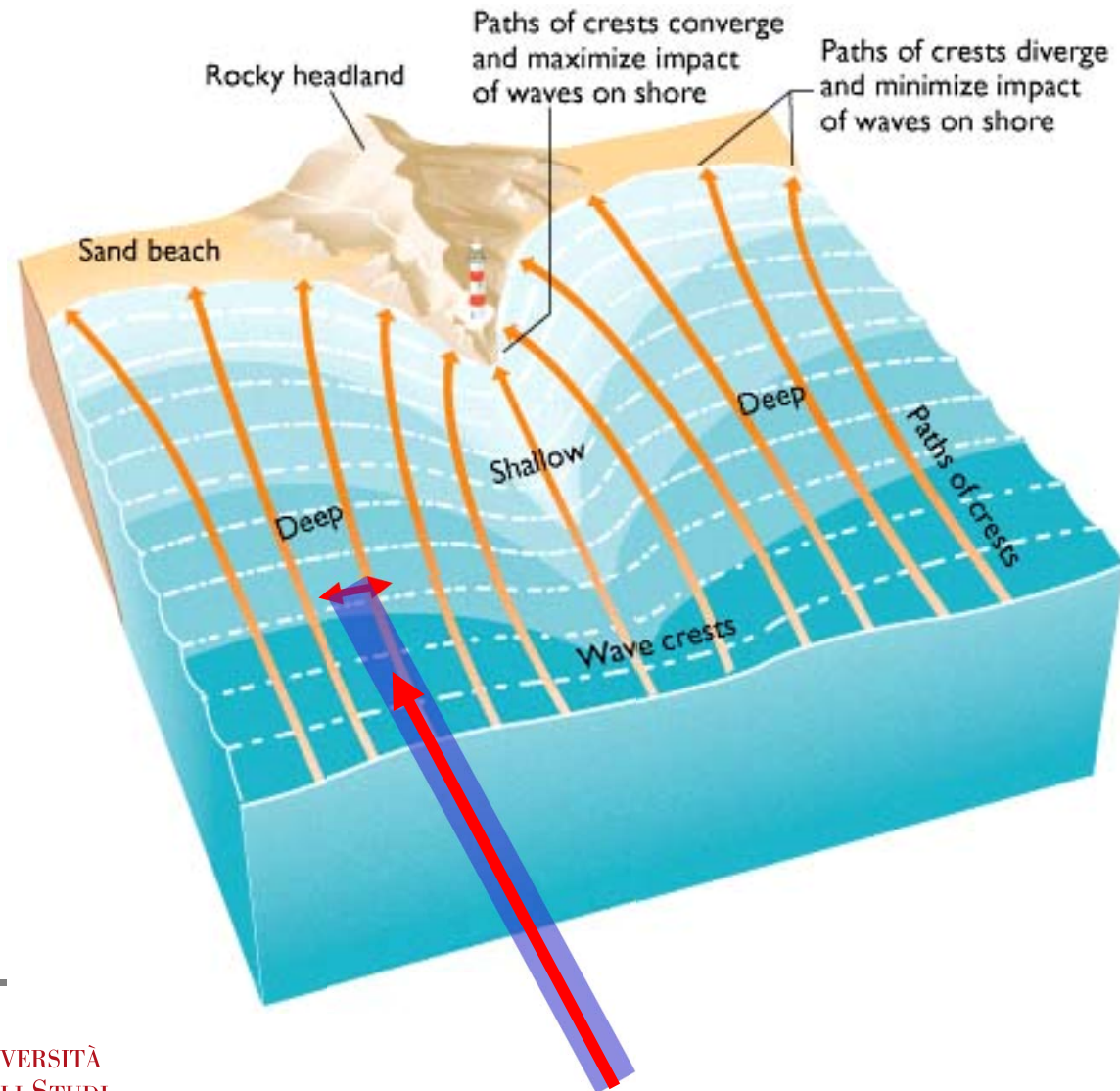


Trasferimento di energia alle onde

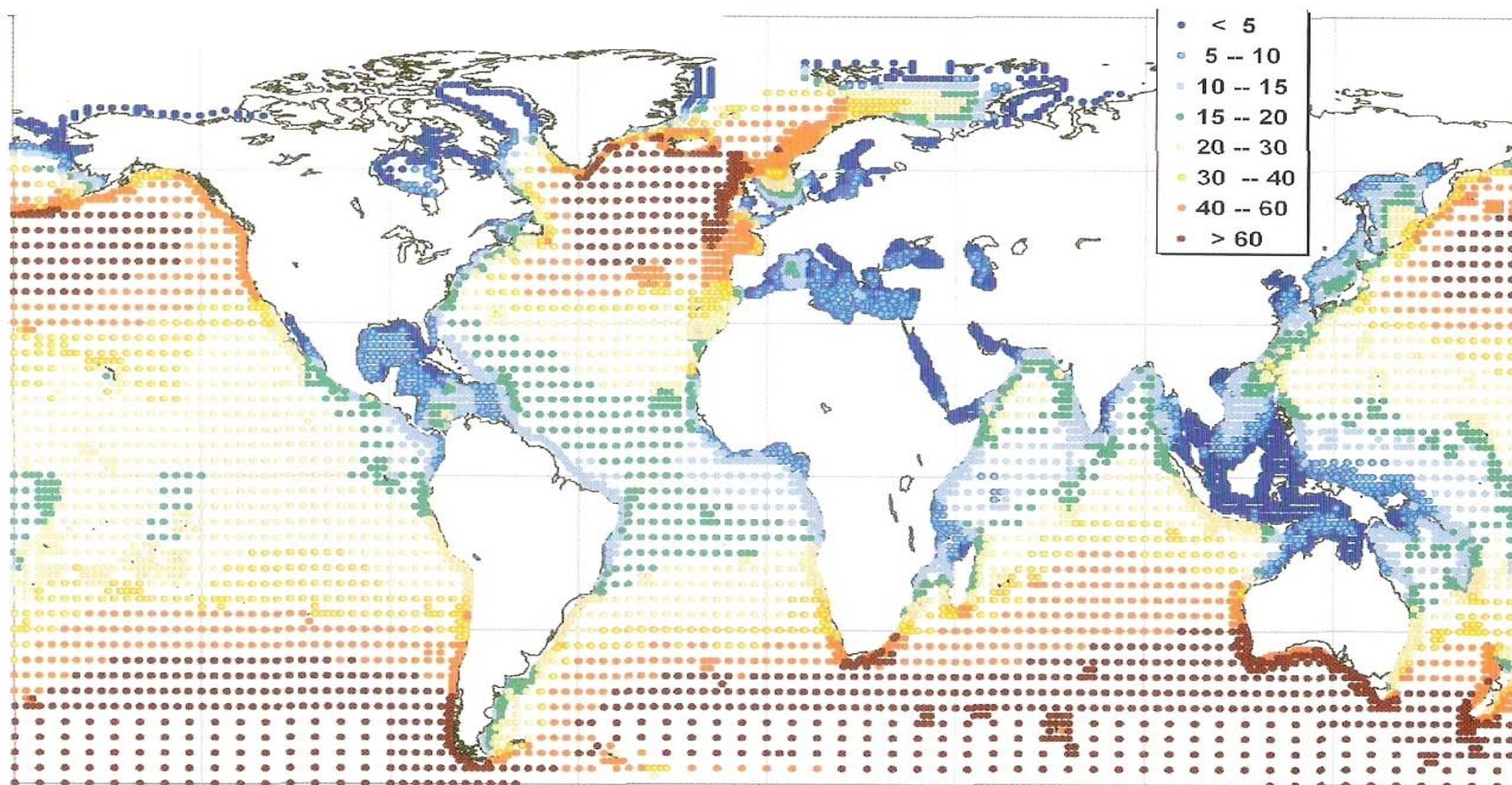


Energia del sole → generazione di venti → immissione di energia nel mare al ritmo di 0.1 W/m^2 (media) \ll irraggiamento solare (350 W/m^2) ma il vento fa crescere l'onda mentre questa avanza.
→ Si raccoglie l'onda dalla parte opposta del bacino.
1 fronte largo 1 m che avanza per 100 km, assorbe $0.1 \text{ W/m}^2 * 100\,000 \text{ m} = 10 \text{ kW/m}$ in media

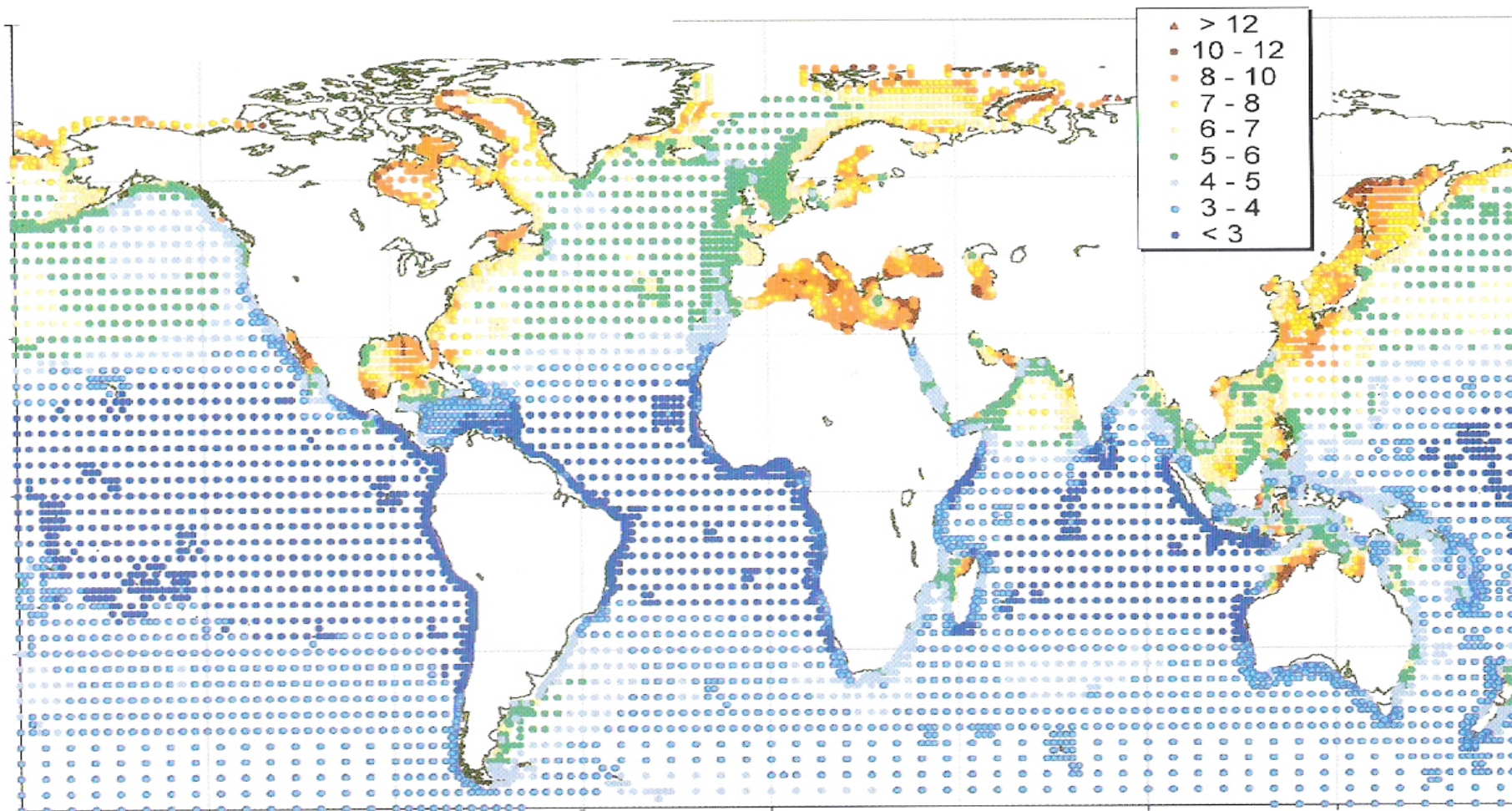
Unità di misura: $\langle \text{kW/m} \rangle$



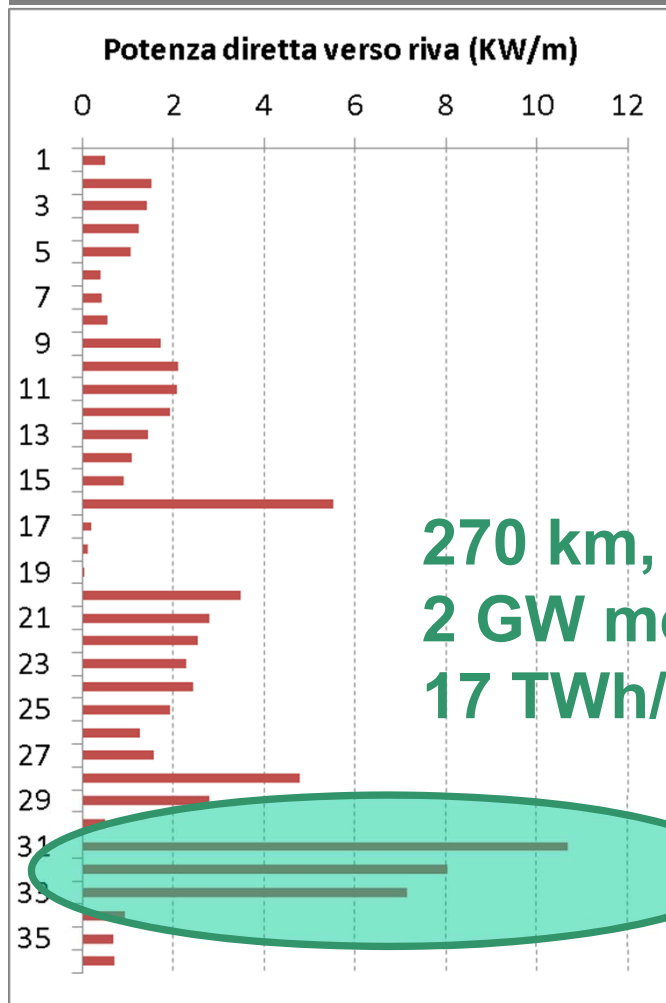
Disponibilità di Energia <kW/m>



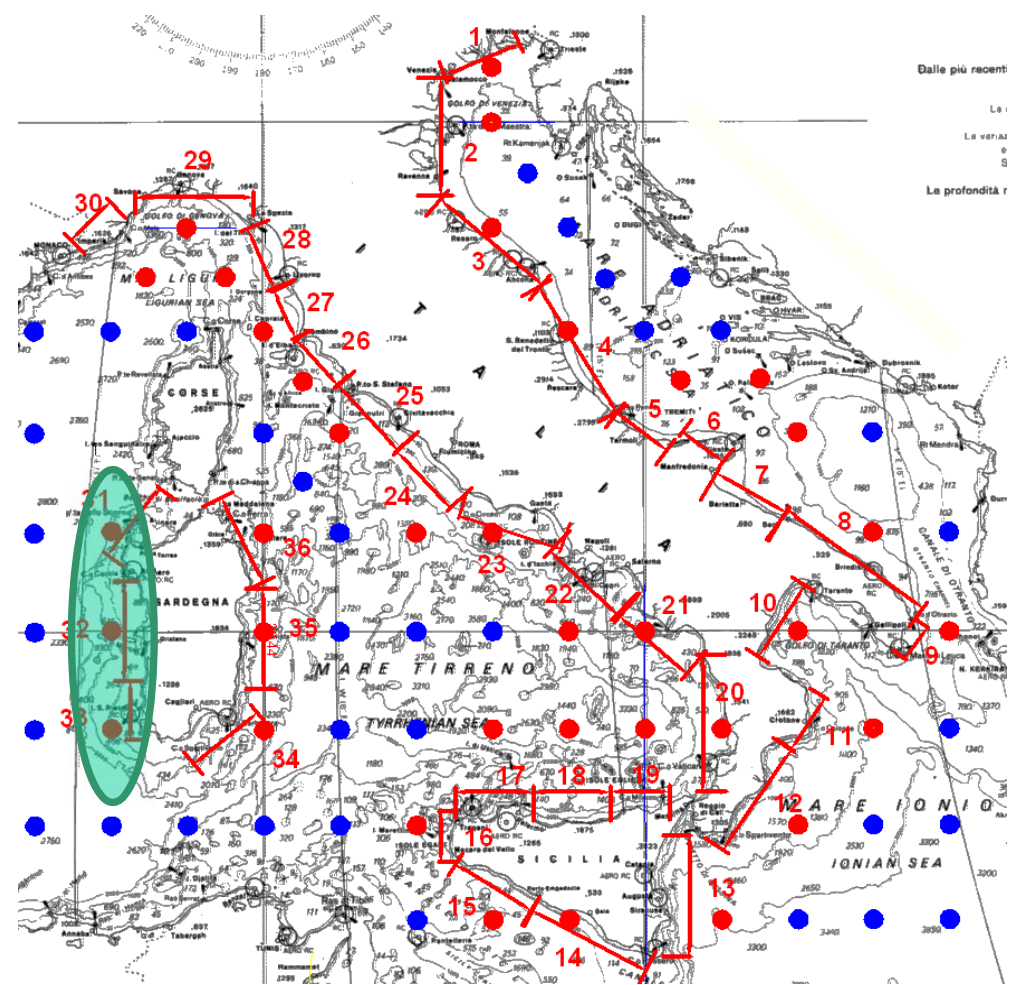
$Hs_{100}/Hs_{mean} \rightarrow$ Rapporto costo/Beneficio



Italia

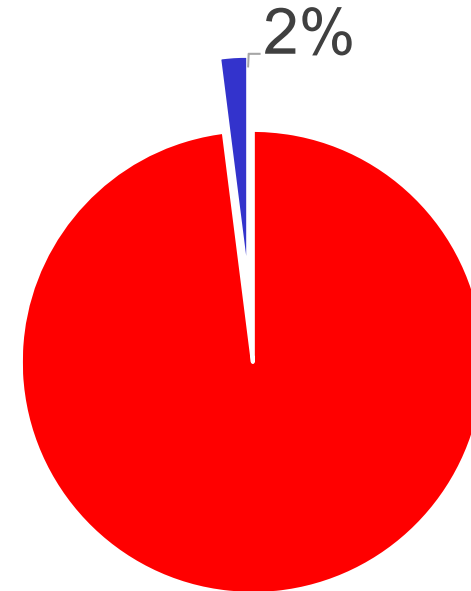


**270 km,
2 GW medi
17 TWh/y**



Italia

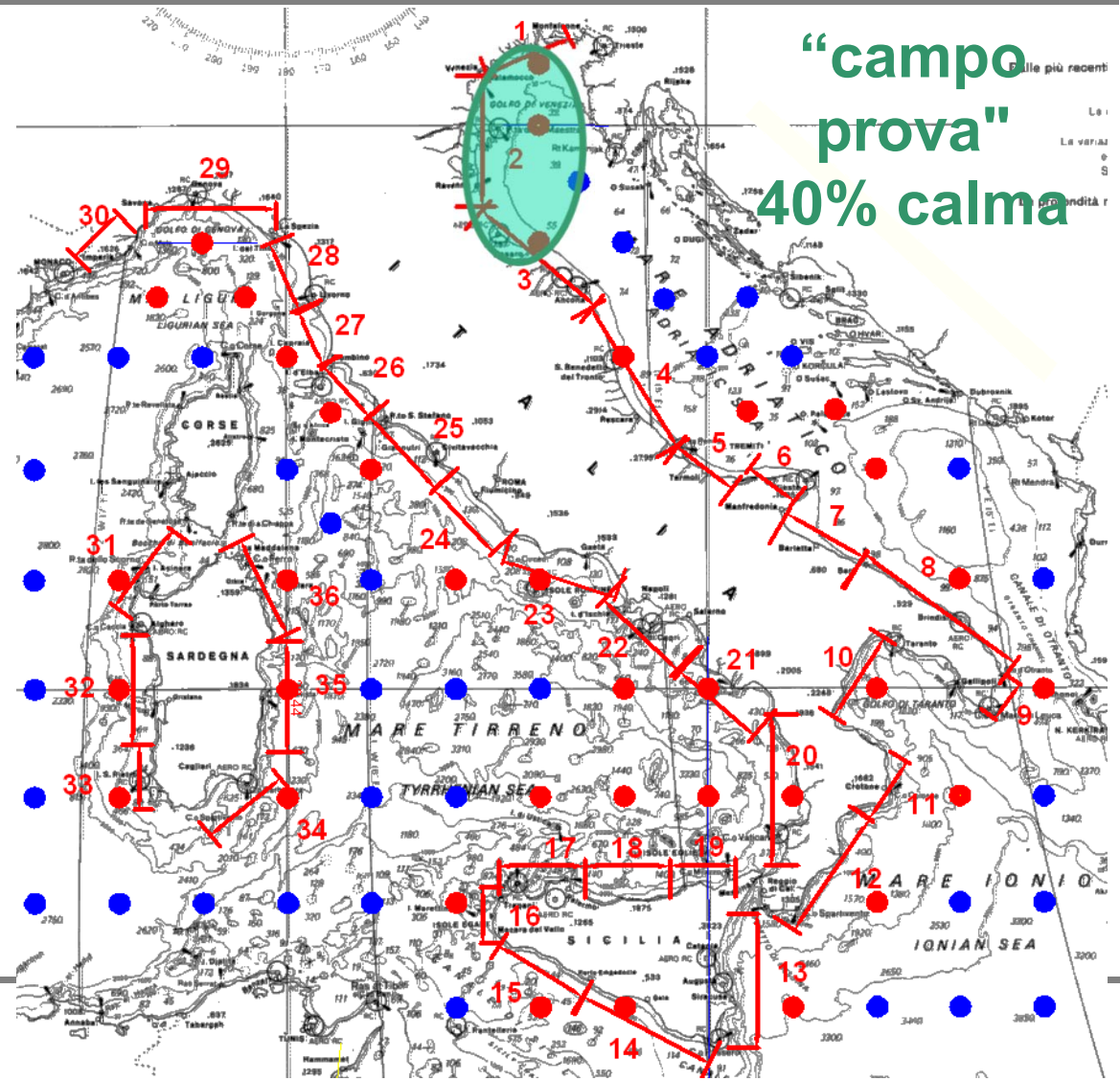
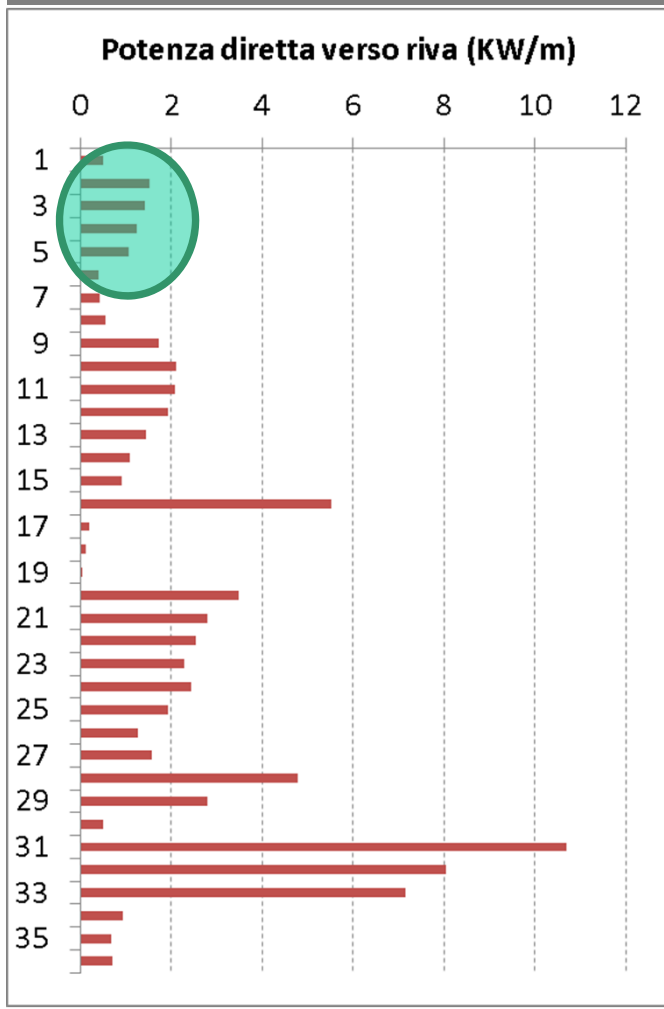
Consumo energia elettrica in italia: 330 TWh/y
 $330 \cdot 10^9 \text{ kWh/y} \times 0.15 \text{ €/kWh}$
→ 50 Miliardi di €/anno



Convertendo l' energia nel 270 km di costa Sarda (17 TWh/anno), con un'efficienza del 33% → si fornirebbe circa il 2% del consumo annuo, ossia → 1 Miliardo di €/anno

NB: non propongo di installare questi dispositivi!!

... e in Veneto?



Europa

Sviluppo fronte oceanico sfruttabile ca. 10'000 km

Potenza media $> 50\text{kW/m}=50\text{MW/km}$

→ 500 GW in media nell'anno

$500\text{GW} \cdot n^\circ\text{ore anno} = 4000 \text{ TWh/y}$ ($\eta=0.3 \rightarrow 180 \text{ T€}/y$)

Consumo mondiale annuo:

16695 TWh/anno

ca. 25% consumo mondiale

→ molto più di quanta ne serva

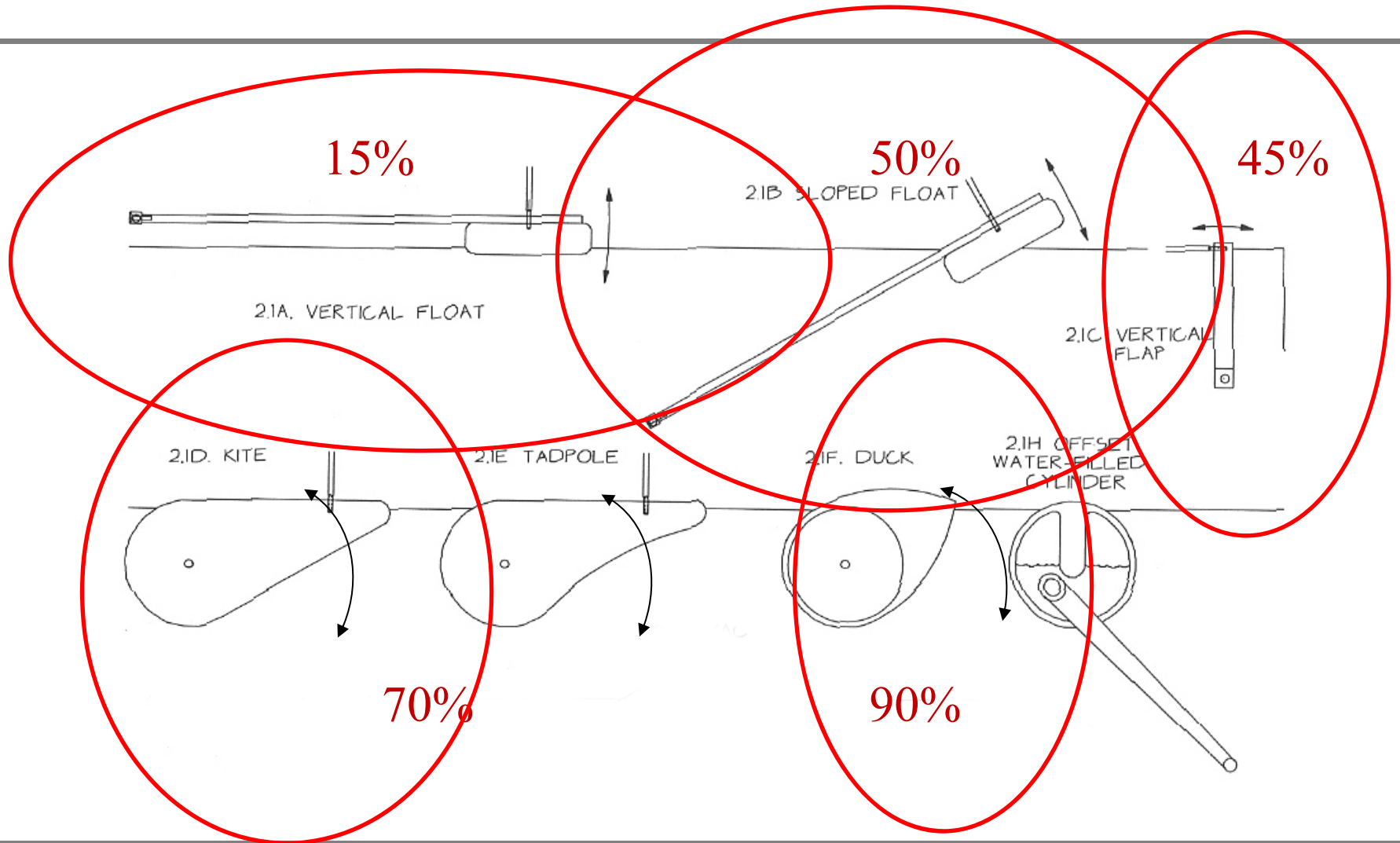
Ma come si può estrarre energia
elettrica dalle onde del mare?

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

1974 Edimburg, Salter's duck



SALTER'S DUCK

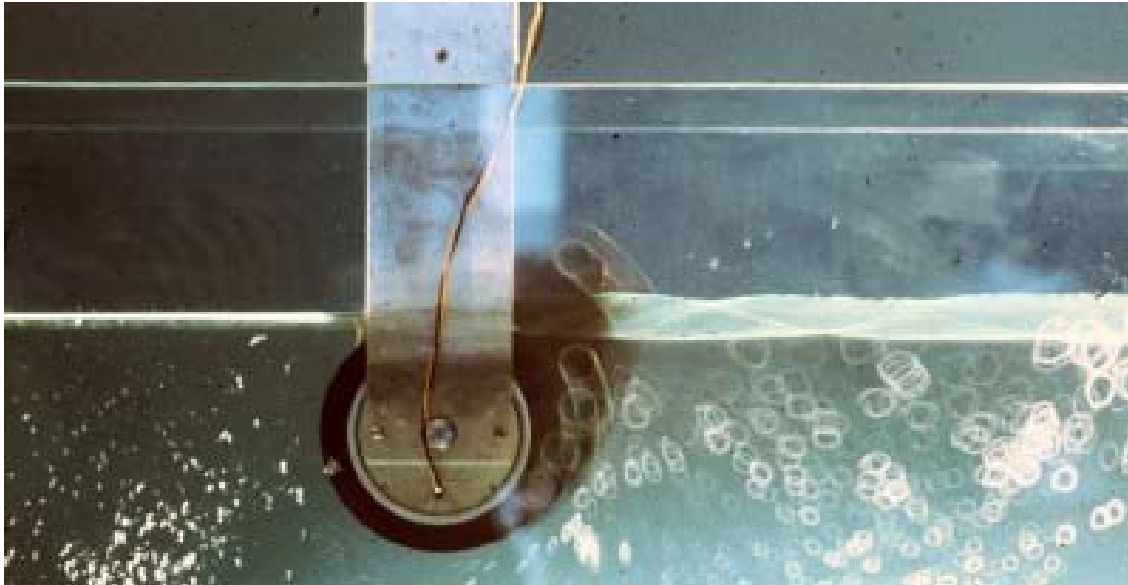
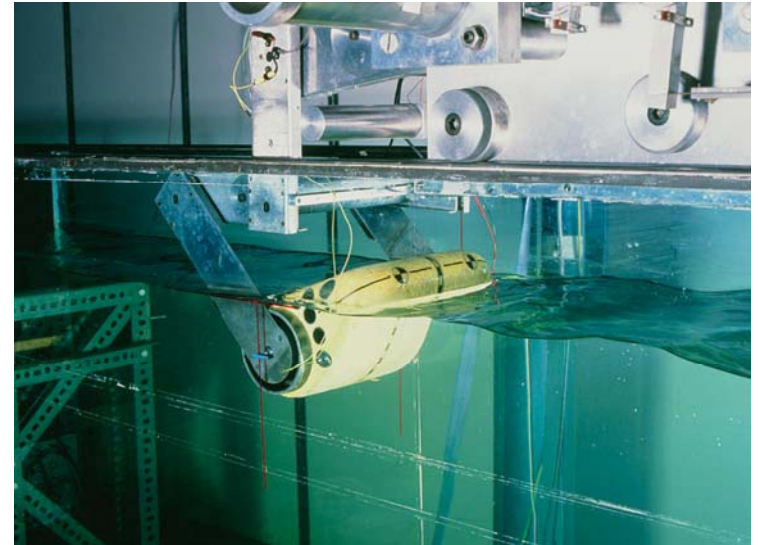
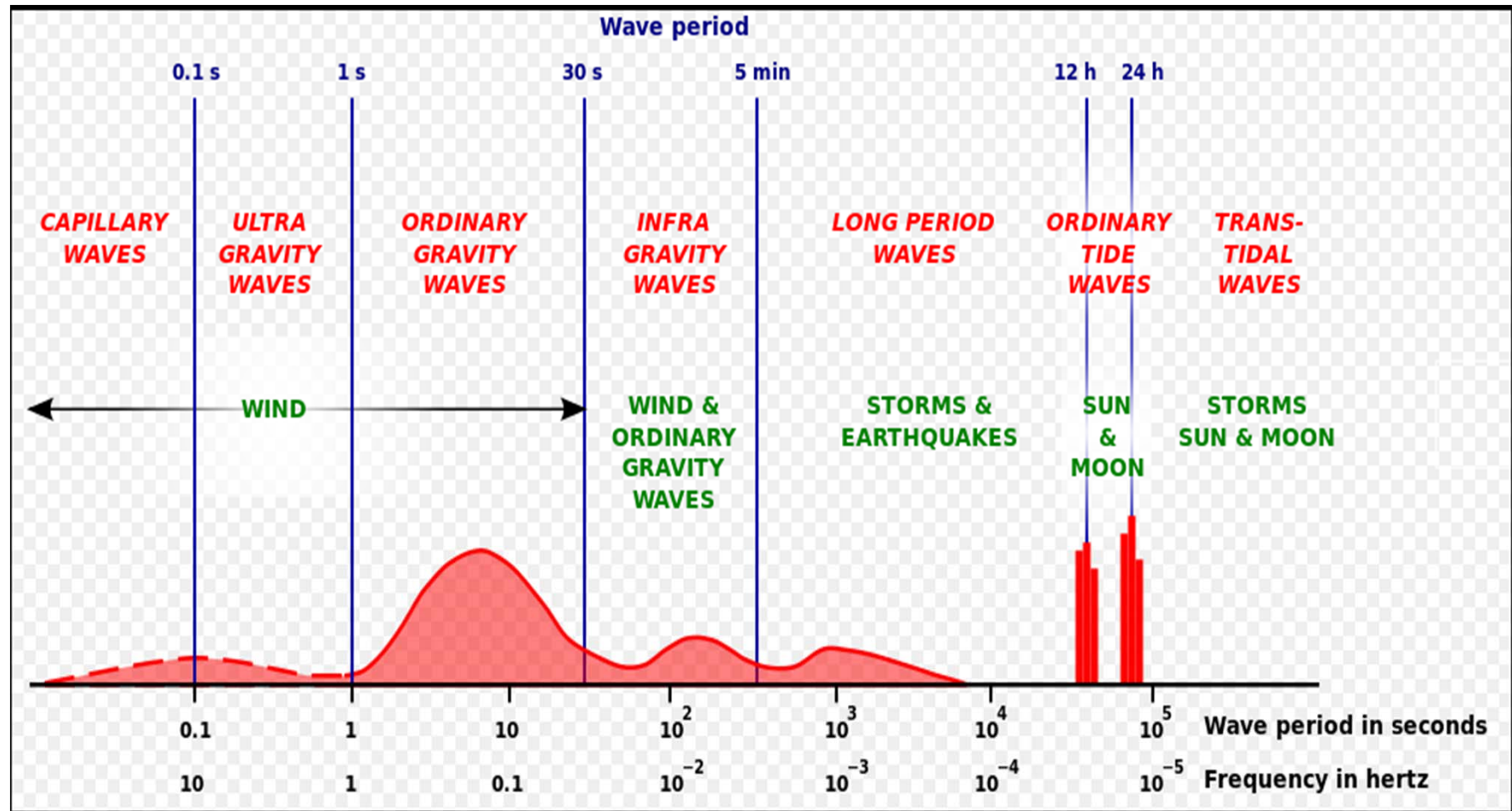


foto con tempo di esposizione di 1 s



L'energia del mare è contenuta nelle onde da vento e nelle maree



Energia dal mare

Flussi di marea

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Energia dal mare

Flussi di marea



*240 MW, Saint Malò,
alla foce del fiume La Rance*

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Energia dal mare

Flussi di marea

Correnti Marine

1222·2022
800
ANNI

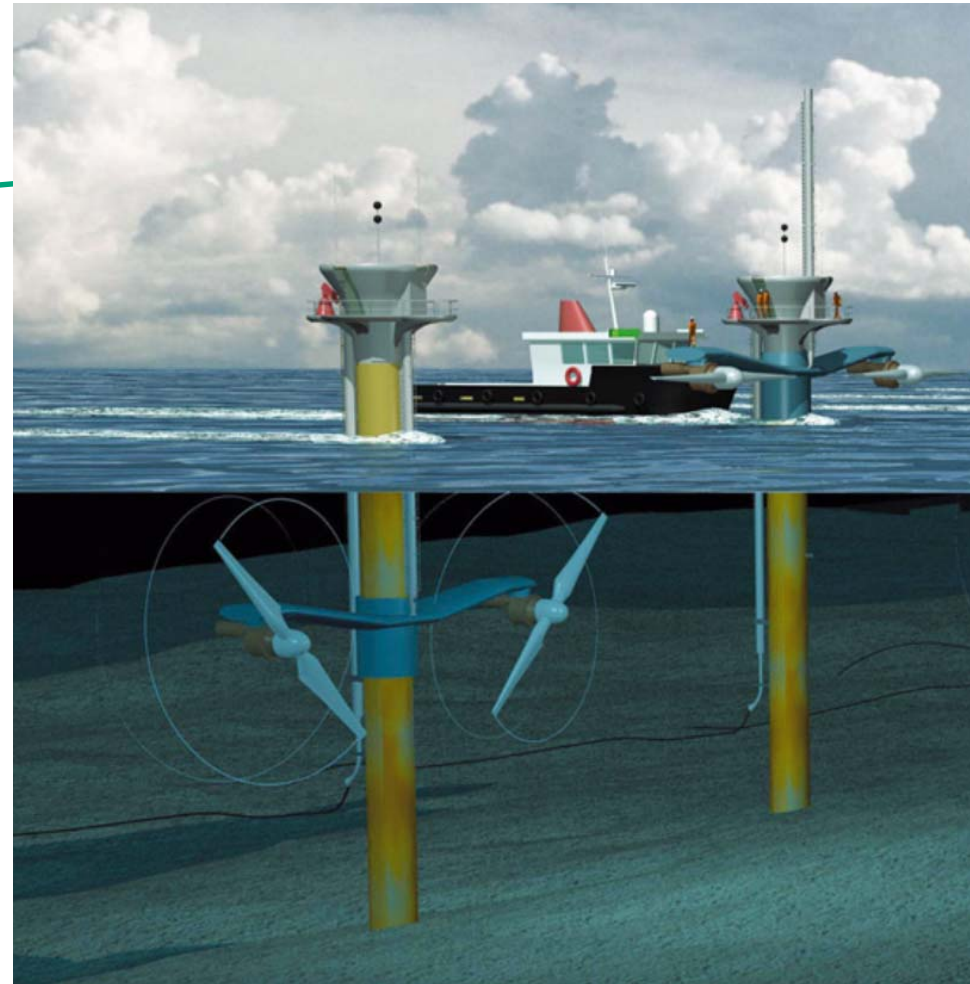


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Energia dal mare

Flussi di marea

Correnti Marine



*“SeaGen®” plant
off the coast of Northern Ireland
in Strangford Lough.*

Energia dal mare

Flussi di marea

Correnti Marine

Gradienti di
salinità

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Energia dal mare

Flussi di marea

Correnti Marine

Gradienti di
salinità

Gradienti termici

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Energia dal mare

Flussi di marea

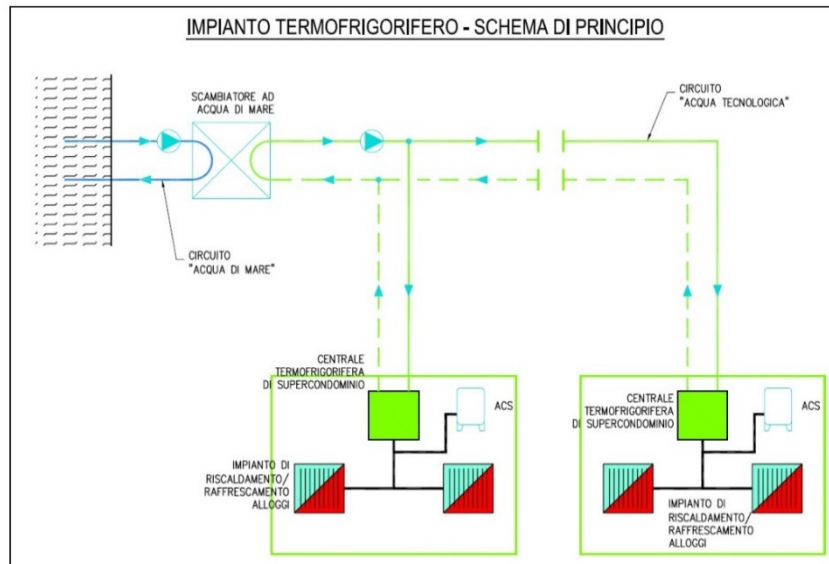
Correnti Marine

Gradienti di salinità

Gradienti termici



Carbon-free Resort "Porto Piccolo" (TS)



Heat exchange: Total Power = **4,5 MW**

PUMPS for sea Exchange: **3+1**

Length of "technical ring": **3 km**

Energia dal mare

Flussi di marea

- I movimenti dell'onda sono lenti, mentre i generatori hanno una efficienza maggiore se girano velocemente → Sistema di "moltiplicazione di giri"

Correnti Marine

- L'energia dell'onda è variabile all'interno del periodo, mentre il generatore ha una efficienza maggiore se l'energia da convertire è costante → regolarizzazione all'interno del periodo

Gradienti di salinità

- Le onde sono irregolari, si avvicendano gruppi ondosi molto energetici a una serie di onde basse → Sistema per sfruttare sia le onde alte che le basse

Gradienti termici

- Le forze estreme per le quali deve essere dimensionato il dispositivo sono molto maggiori delle mareggiate medie, da cui dipende la produzione di energia → Sistema per ridurre il carico in presenza di mareggiata estrema

Moto ondoso (W.E.C.)

- Ambiente aggressivo → Sistema di protezione dall'ambiente marino
- Impatto ambientale (anche acustico) → tendenza a spostarsi offshore

Energia dal mare

Flussi di marea

Correnti Marine

Gradienti di
salinità

Gradienti termici

Moto ondoso
(W.E.C.)

Wave
OverTopping
devices (OVT)

“Slot Cone Generator®”



Energia dal mare

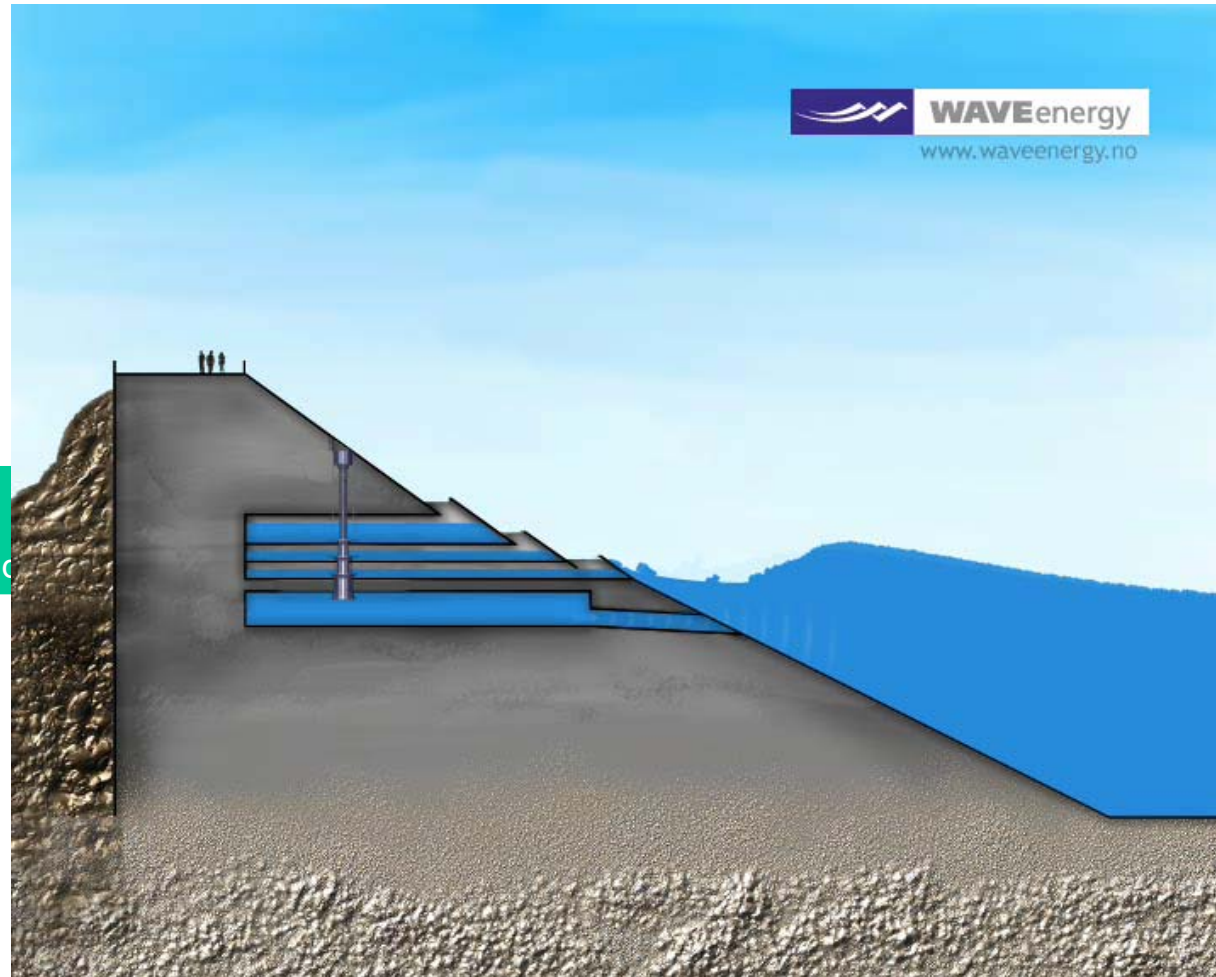
Flussi di marea

Correnti Marine

Gradienti di salinità

Gradienti termici

Moto ondoso
(W.E.C.)



Energia dal mare

Flussi di marea

Correnti Marine

Gradienti di
salinità

Gradienti termici

Moto ondoso
(W.E.C.)

Wave
OverTopping
devices (OVT)

Wave Activated
Bodies (WAB)

“Slot Cone Generator®”



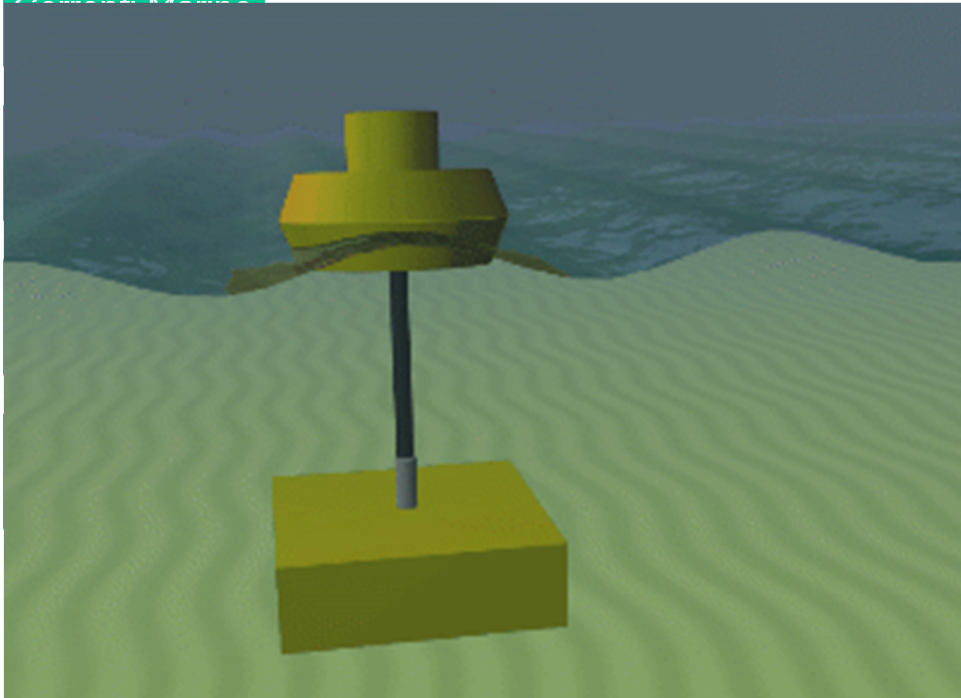
“Wave Hub ®”



Energia dal mare

Flussi di marea

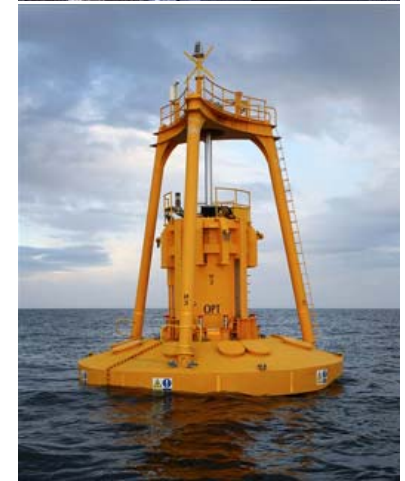
Correnti Marine



“Slot Cone Generator®”



“Wave Hub ®”



Energia dal mare

Flussi di marea

Correnti Marine

Gradienti di salinità

Gradienti termici

Moto ondoso
(W.E.C.)

Wave
OverTopping
devices (OVT)

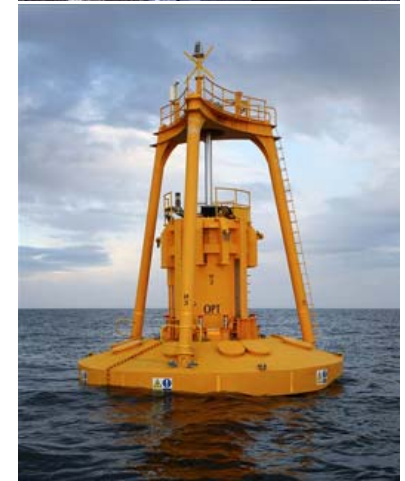
Wave Activated
Bodies (WAB)

Oscillating
Water Column
devices (OWC)

“Slot Cone Generator®”



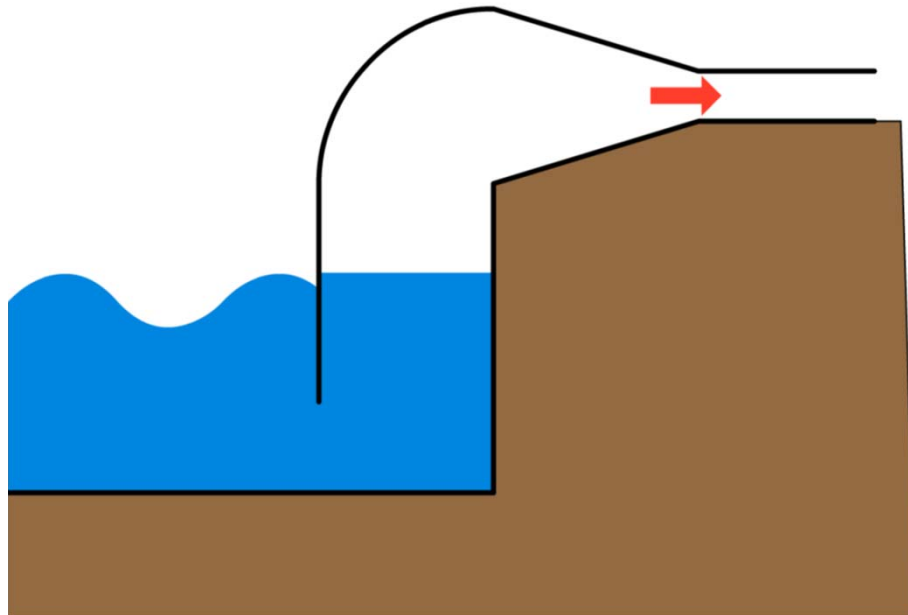
“Wave Hub ®”



“Pico®”



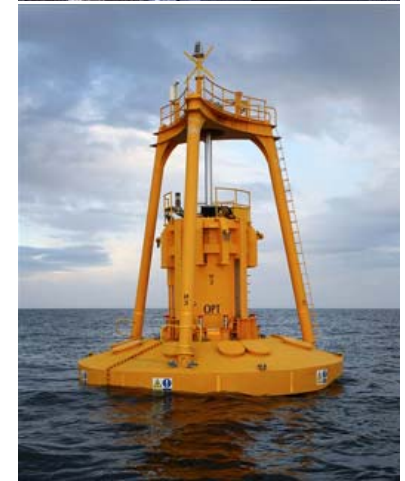
Energia dal mare



“Slot Cone Generator®”



“Wave Hub ®”



“Pico®”



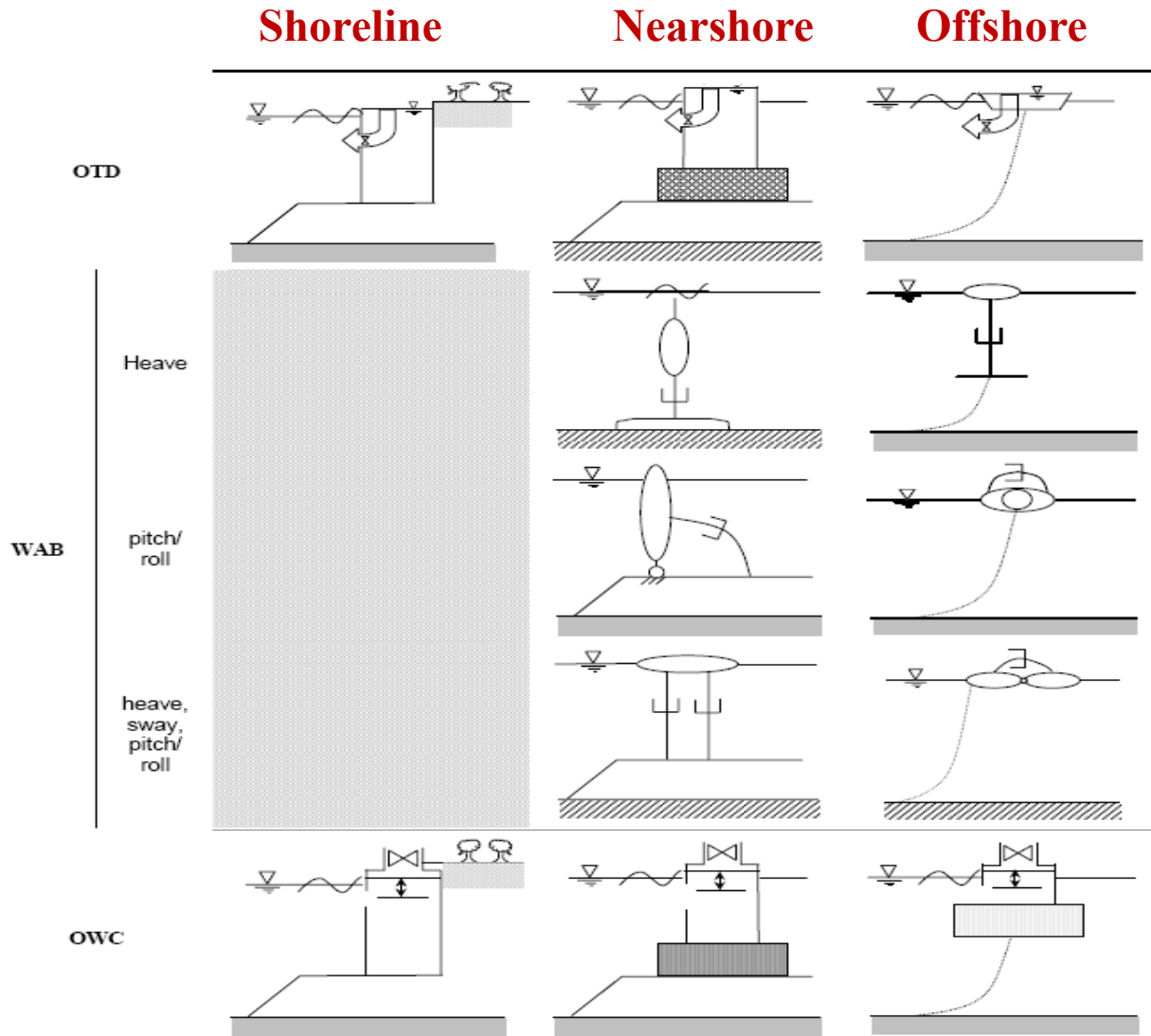
Classificazione

Tracimazione

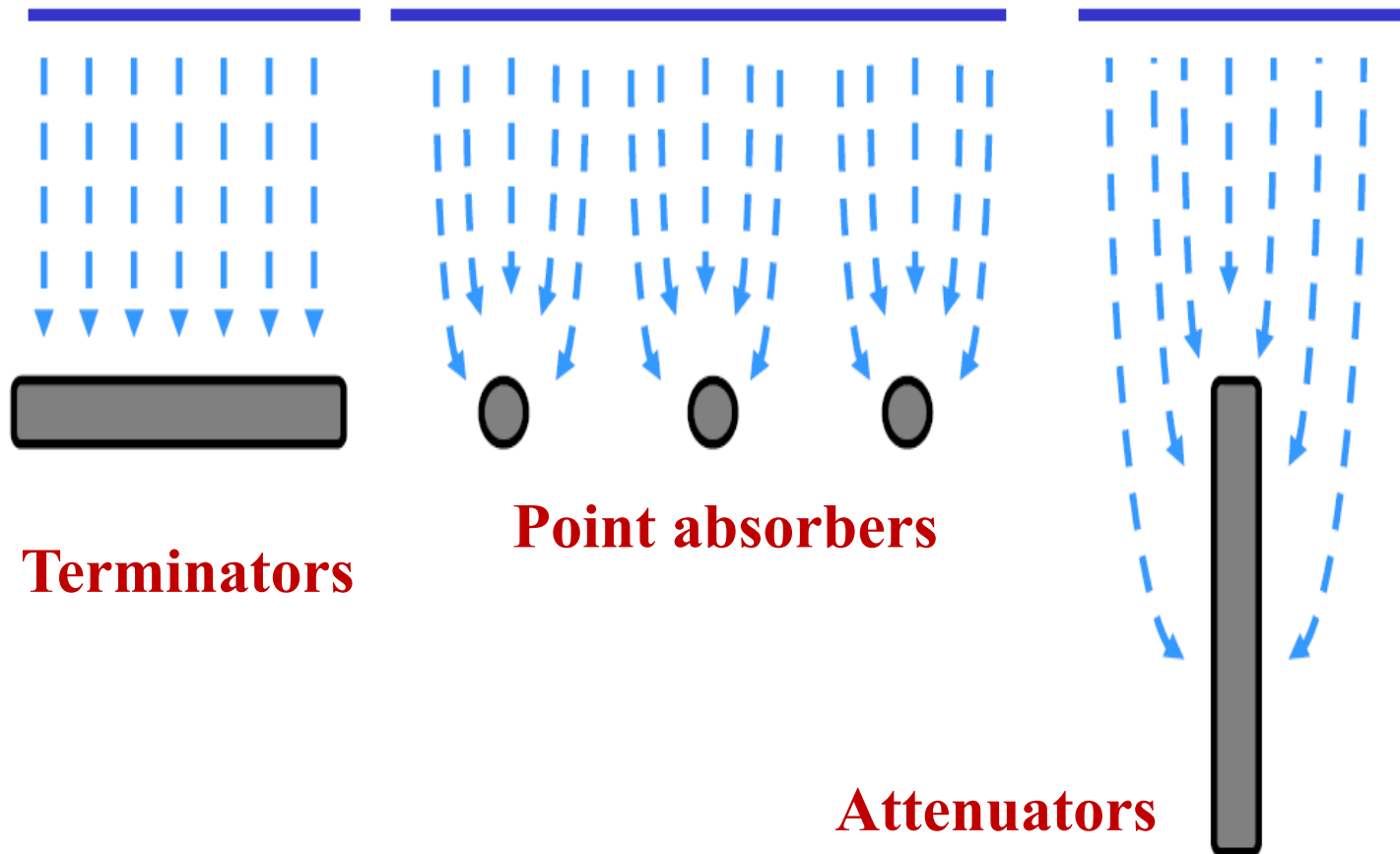
**Movimenti:
fra la struttura
e il fondo, o
movimenti
relativi**

**Camera d'aria
oscillante**

Operating Principles

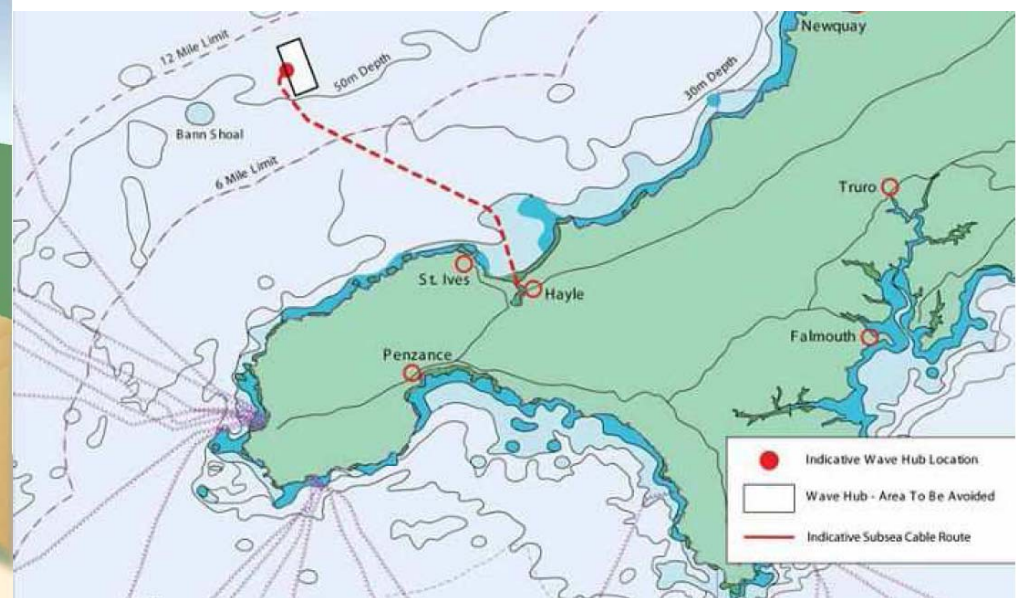
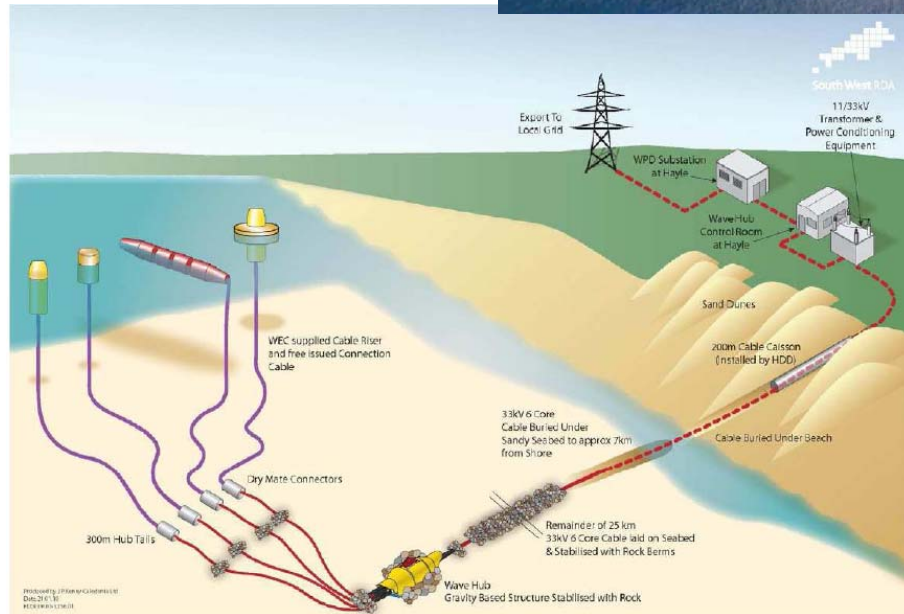
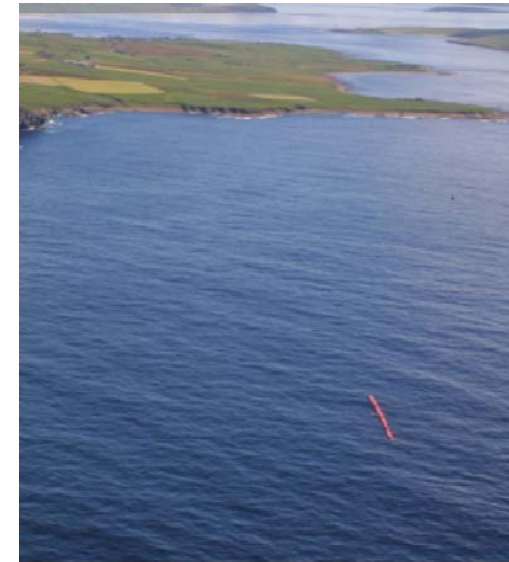


Classificazione dei WECs



Laboratori per la fase di Dimostrazione

Wave Hub,
Cornovaglia
(capacità rete
250 MW)



Laboratori per la fase di Dimostrazione

- Danimarca: Hanstholm
- Svezia: Lysekil
- Norvegia:
 - MET Center (combinato con Wind Turbines)
 - Runde Environmental Center
- Scozia: EMEC - <http://www.emec.org.uk/services.asp>
- Galles: Wave Hub (250 MW)
- Irlanda: Galway bay
- Portogallo:
 - Sao Pedro de Moel (250 MW)
 - Agucadora (PELAMIS)
 - NOEL www.noel.unirc.it
 - Piattaforma CNR

Convertitori di energia ondosa basati sul principio dell'overtopping OTD

1222·2022
800
ANNI

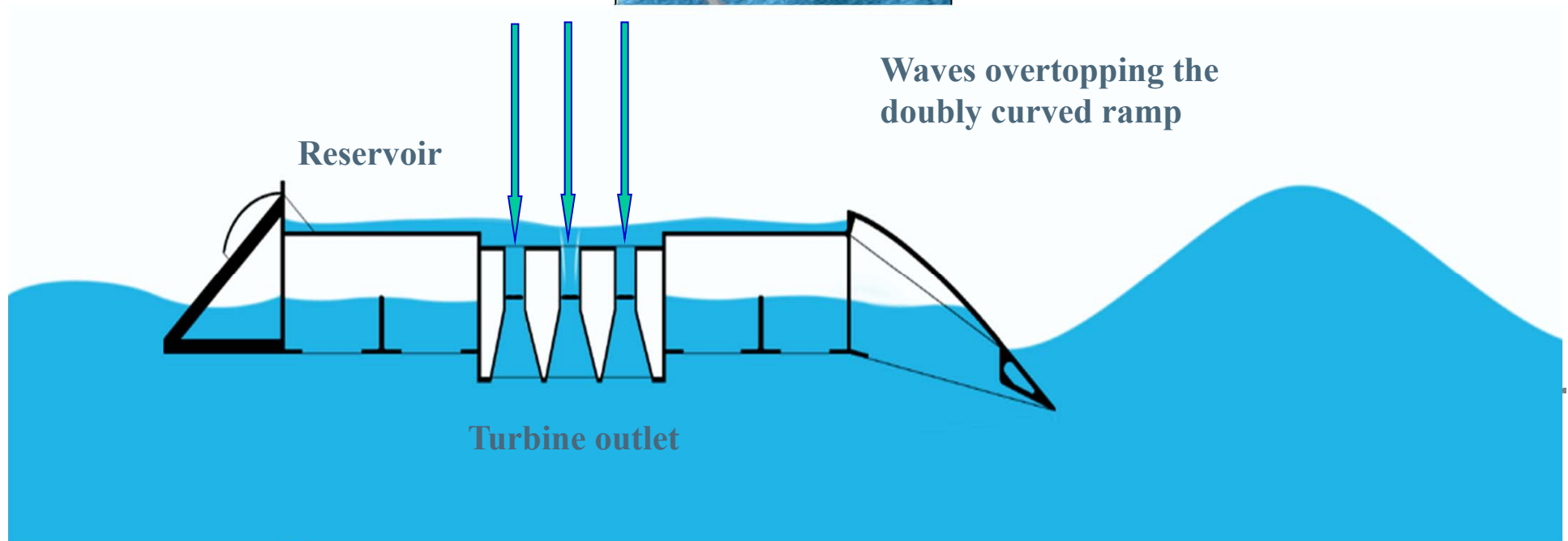


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Wave Dragon (OTD)



Wave Dragon





1222 · 2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Wave Dragon

Fase di ricerca e sviluppo: provare il dispositivo in mare (in scala ridotta)



Wave Dragon

Unità	Clima	Produzione	Dimensioni
4MW	24 kW/m	12 GWh/y/unità	260m x150m
7MW	36 kW/m	20 GWh/y/unità	300m x170m
11MW	48 kW/m	35 GWh/y/unità	390m x220m

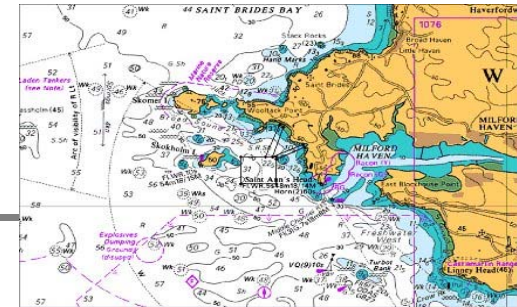
1:50 Modello in
vasca ad onde



Modello in scala 1:4,5 a
Nissum Bredning



Prototipo
7 MW Milford Haven



Convertitori di energia ondosa che sfruttano il movimento relativo fra punti diversi WAB

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

The Wave Energy Converter *Wave Star*

A multi point absorber system



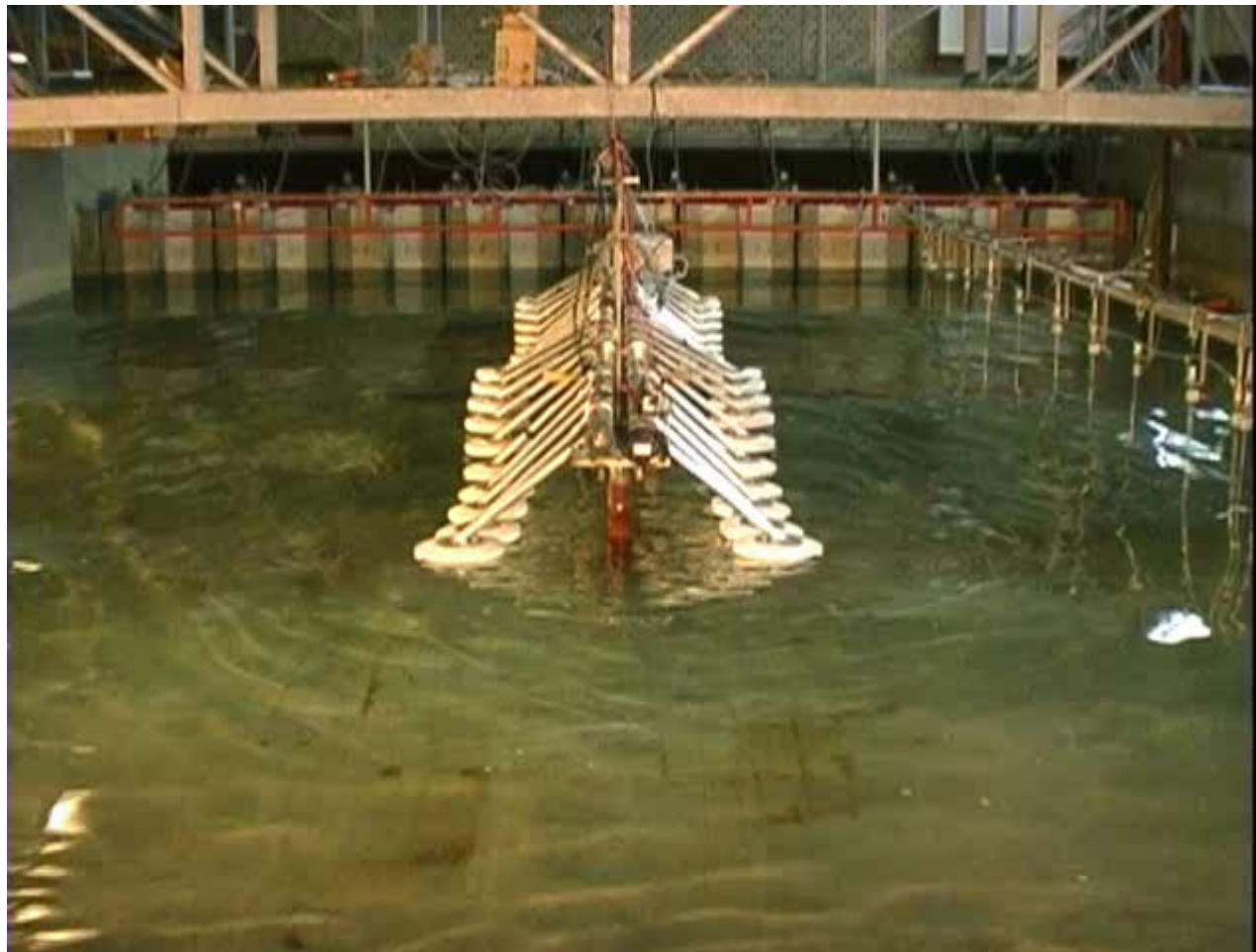
www.wavestarenergy.com

Scale 1:10 testing in Nissum Bredning



Scale 1:40 testing at AAU





1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

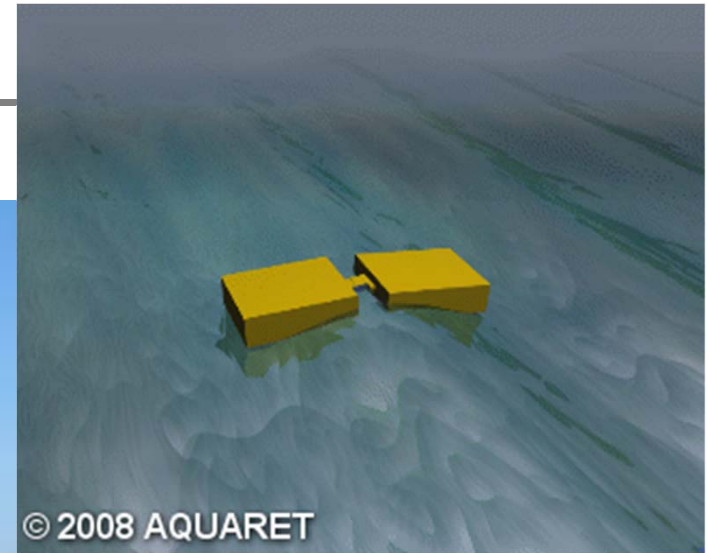
Test in scala 1:10 a Nissum Bredning



Test in scala 1:2 al porto di Hanstholm



DEXA



1222·2022
800
ANNI

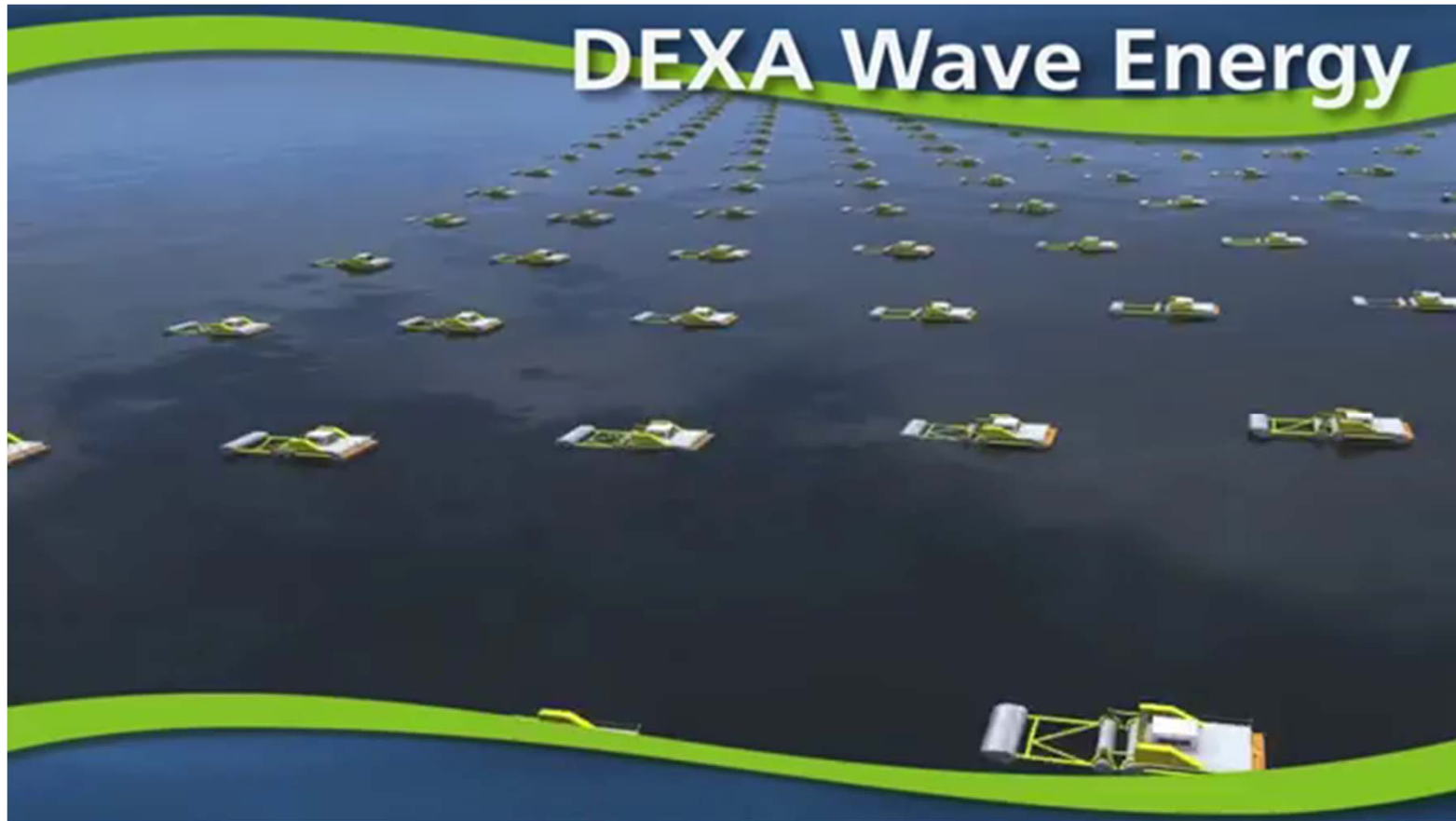


UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Disposizione in Arrays

<https://www.youtube.com/watch?v=NzEjUWMb2bU>

https://www.youtube.com/watch?v=ySJvgx4xB_I

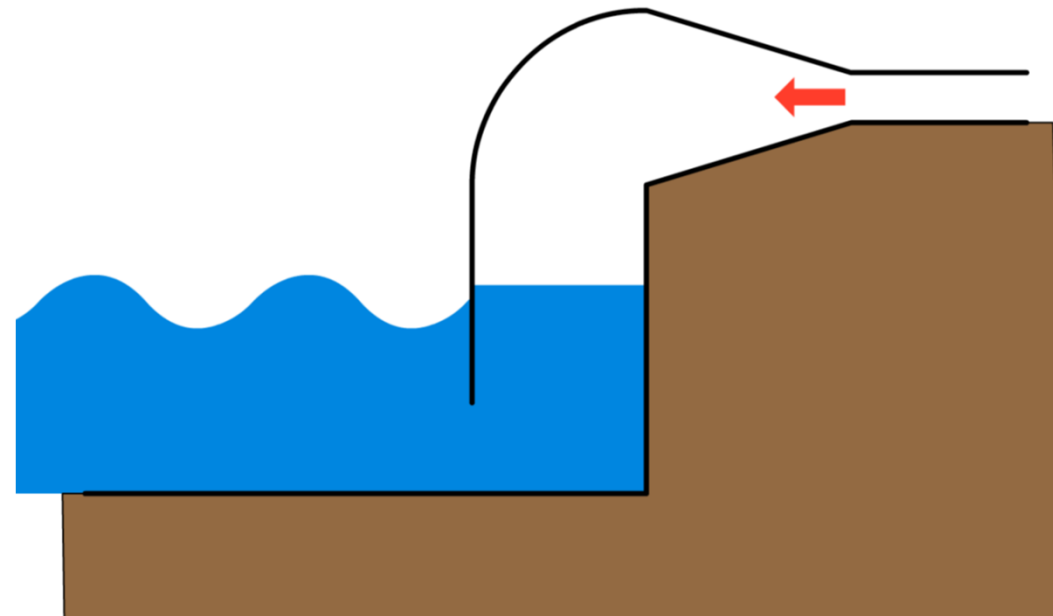


WEPTOS



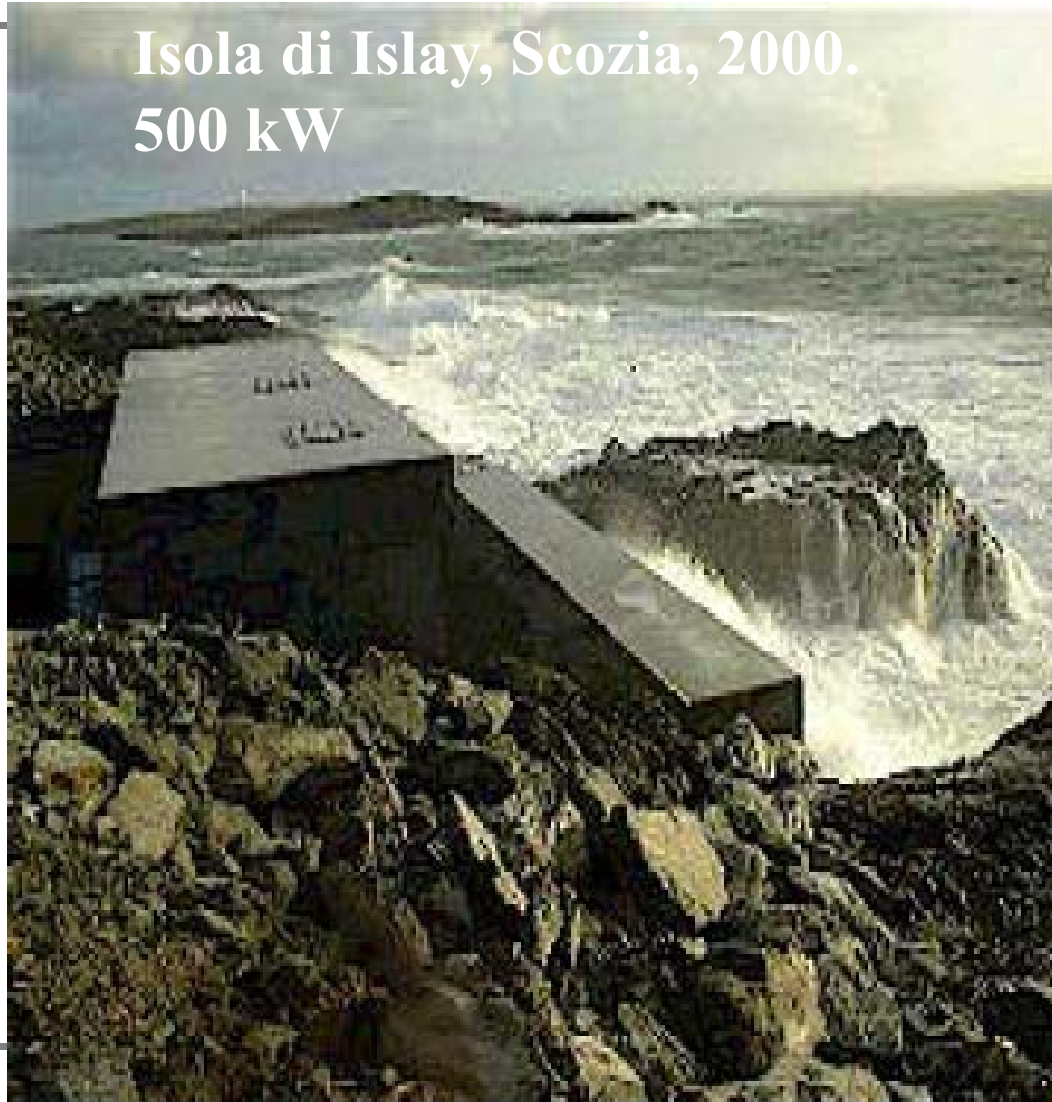
Principio funzionamento → video a 2'30''

Convertitori di energia ondosa basati sul principio della colonna d'acqua oscillante (OWC)



LIMPET

Isola di Islay, Scozia, 2000.
500 kW



1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

OE Buoy



Dispositivi Italiani

- **REWEC3** (dimostrazione 20 kW)
- **ISWEC** (dimostrazione 10 kW)
- **Dimemo/Obrec** (dimostrazione, 3 kW)

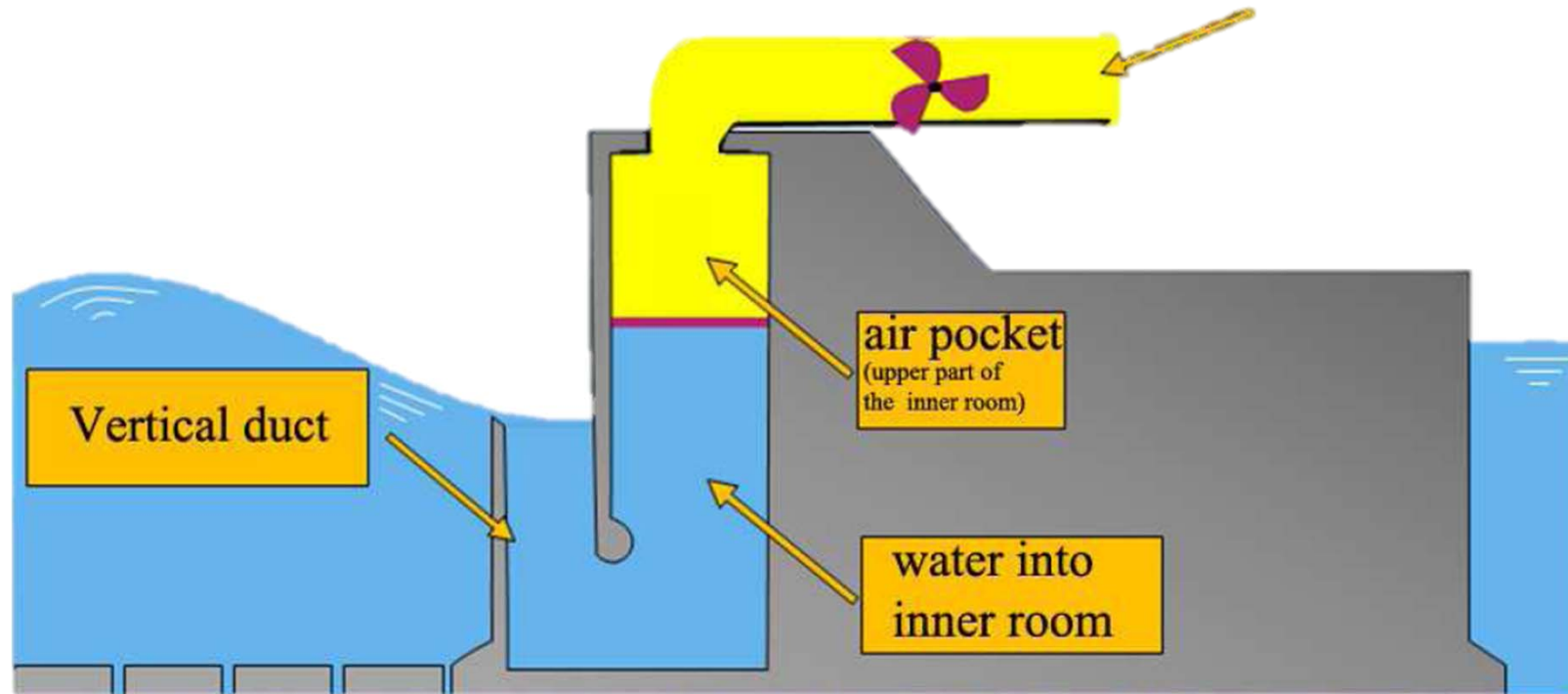
- **40 South Energy** (dimostrazione)
- **Generma** (prova in mare)
- **ShoWED** (dimostrazione, 1 kW)
- ...

In Italia il clima è mite e la disponibilità energetica non è elevata. Una strategia promettente consiste nel progettare dispositivi che possiedano duplici funzioni, integrati nel sistema portuale



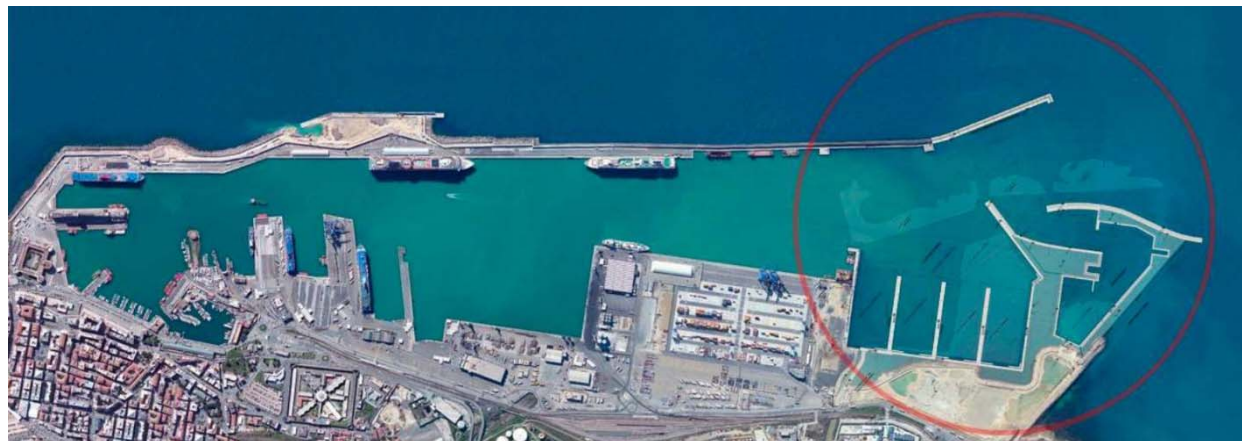
REWEC3

Costo: +7% costo diga
CAPTURE WIDTH:
60-110% lunghezza diga



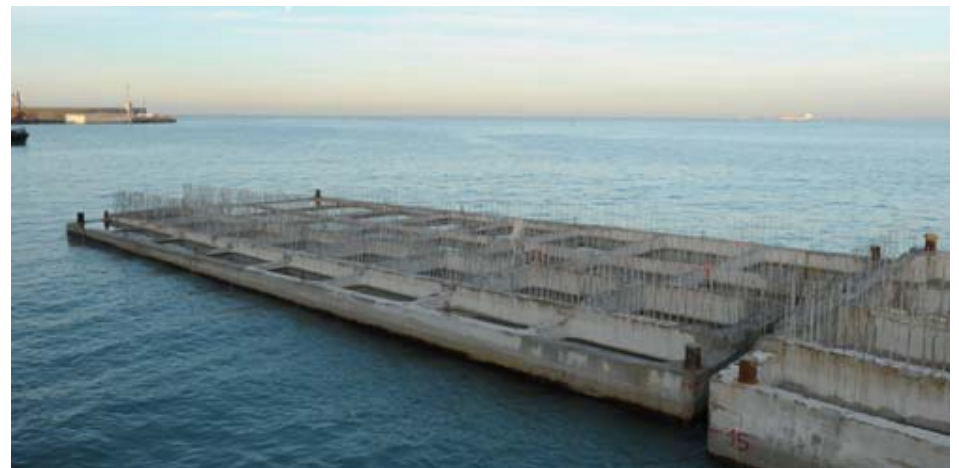
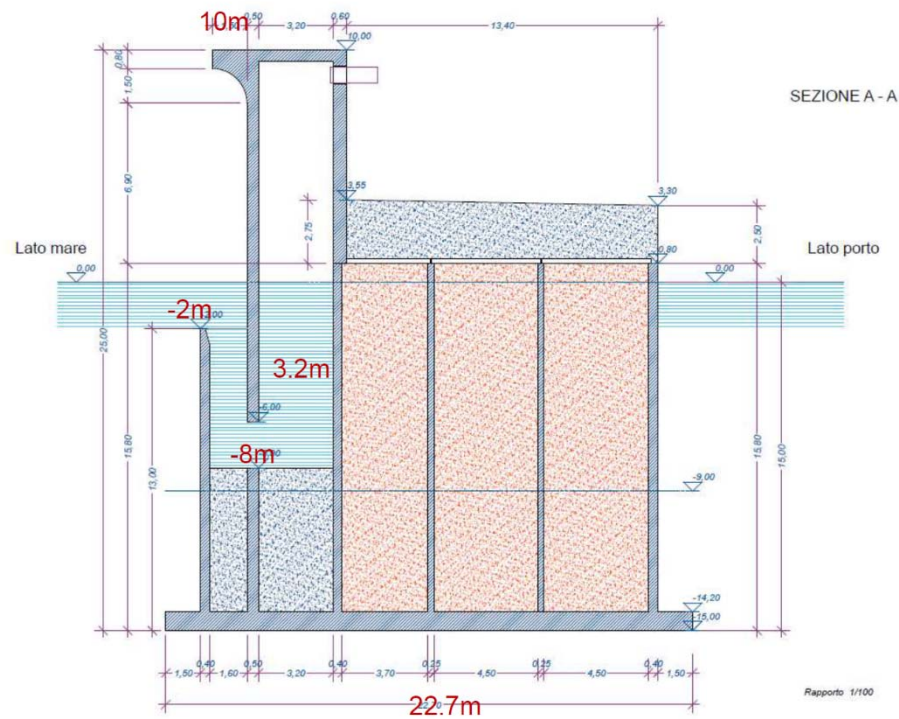
Boccotti et al. Ocean Engineering 34 822 (2007) 820–841

Ampliamento del porto di Civitavecchia

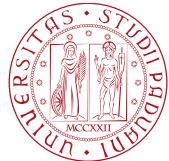


17 cassoni da 34 m, 136 camere – 2.7 MW

Ampliamento del Porto di Civitavecchia



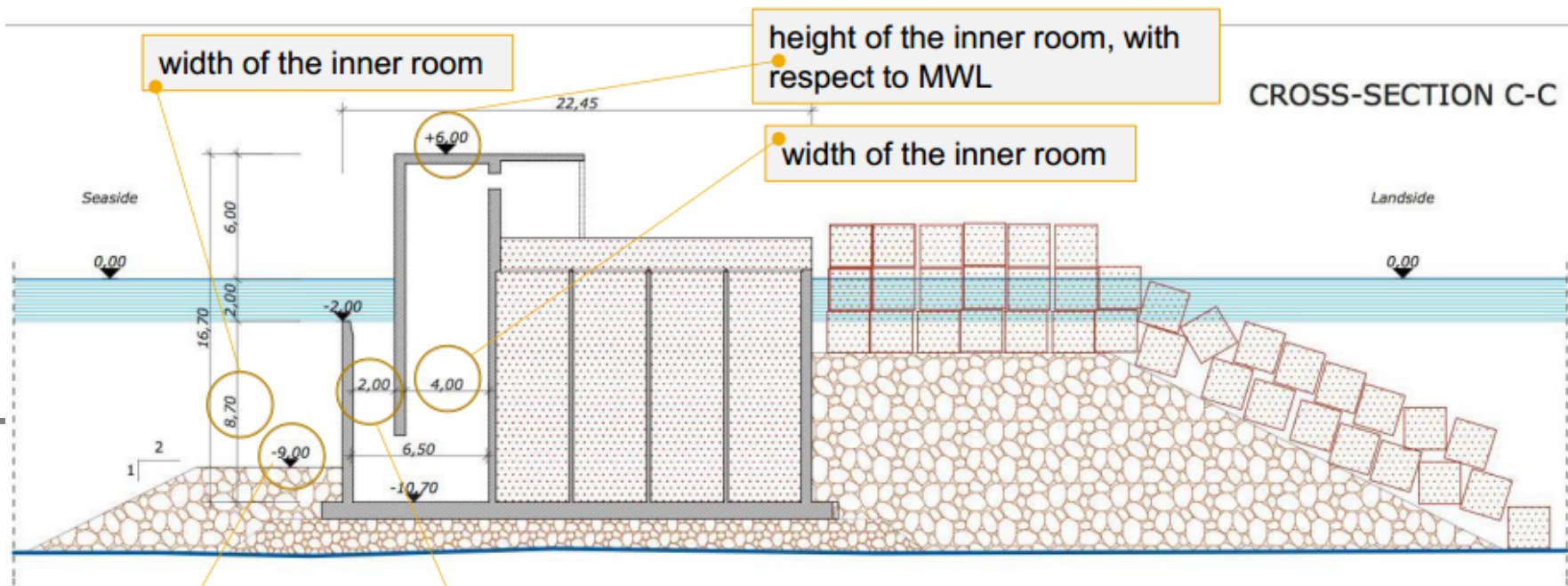
1222 · 2022
800
ANNI



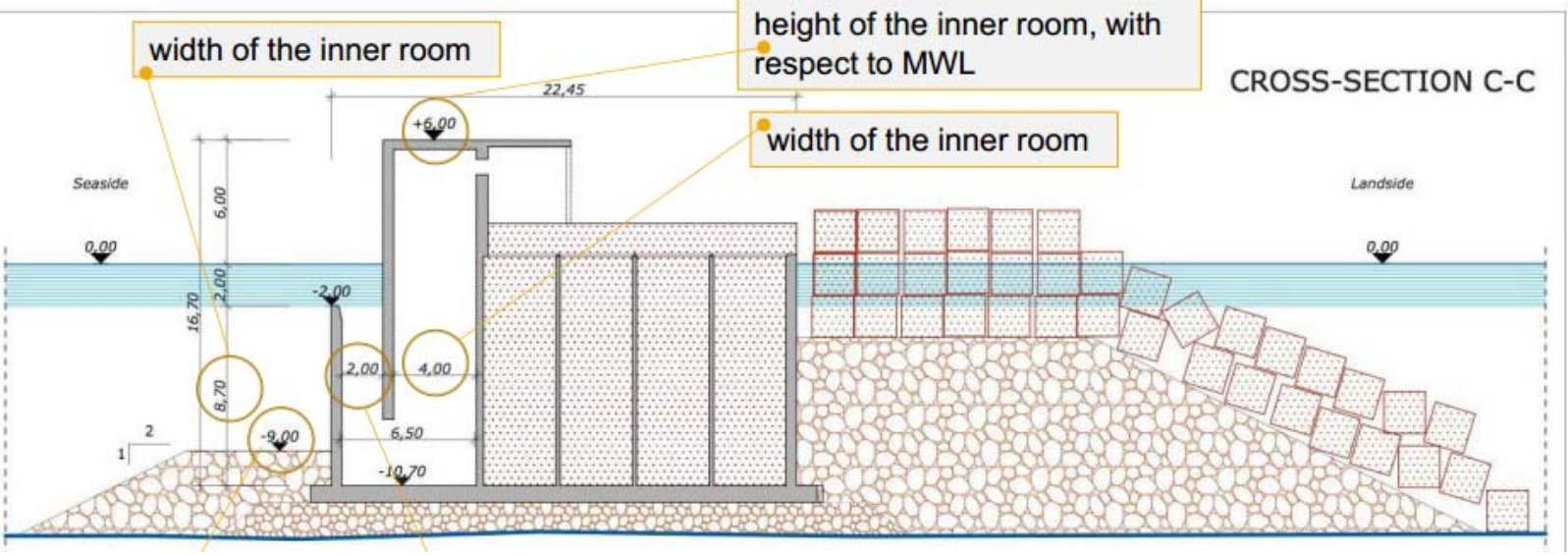
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Altri Progetti REWEC

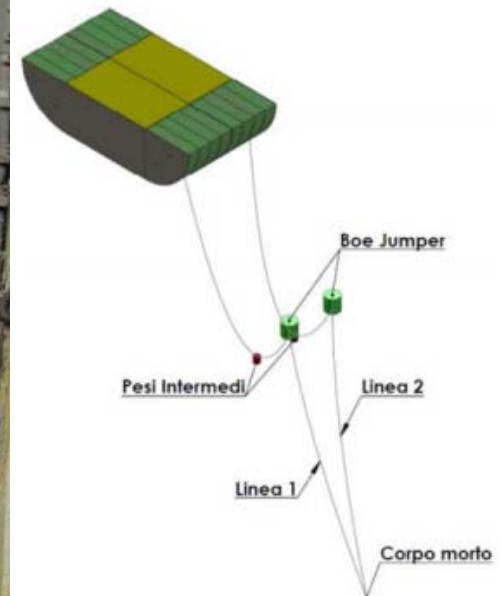
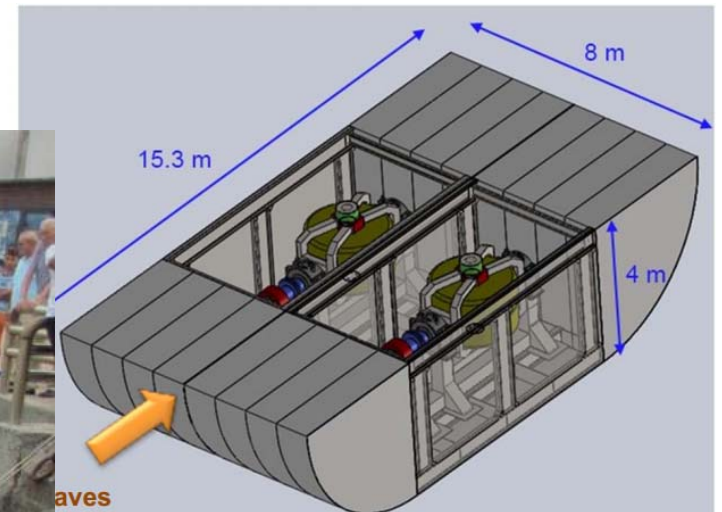
- Porto di Salerno
- Porto delle Grazie di Roccella Ionica (RC)
- Porto di Crotone
- Porto di Vibo Valenzia
- Porto di Genova



Porto commerciale di Salerno



ISWEC, Pantelleria, 240 MWh/y



Dimemo (Diga Marittima per l'Energia del Moto Ondoso) / OBREC (Overtopping
BReakwater for Energy Conversion)
Molo S. Vincenzo, Porto di Napoli, 2015



1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Dimemo/Obrec

Sostituisce i massi artificiali con una vasca



Dimemo / Obrec



1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

FASI DI SVILUPPO DI UN WEC

- Fase 1 : Verifica dell'idea
- Fase 2 : Stima dell'efficienza del dispositivo
- Fase 3 : Studio di fattibilità
- Fase 4 : Studi specifici
- Fase 5 : Studio in sito su modello in scala 1:4-1:10
- Fase 6 : Dimostrazione
- Fase 7 : Commercializzazione

FASI DI SVILUPPO DI UN WEC

- Fase 1 : Verifica dell'idea
- Fase 2 : Stima dell'efficienza del dispositivo
- Fase 3 : Studio di fattibilità
- Fase 4 : Studi specifici
- Fase 5 : Studio in sito su modello in scala 1:4-1:10
- Fase 6 : Dimostrazione
- Fase 7 : Commercializzazione

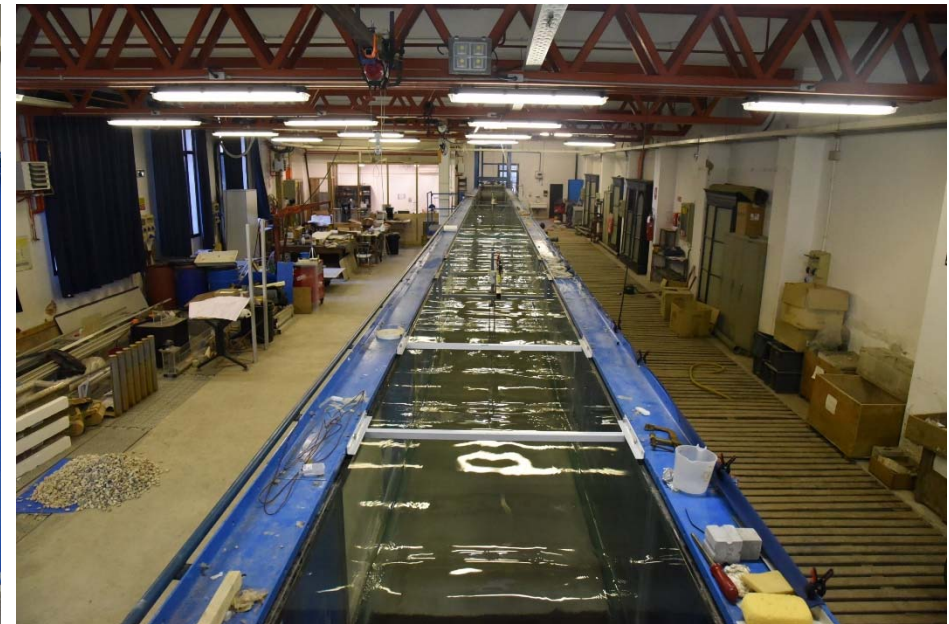
LABORATORIES AVAILABLE TO THE UNIVERSITY OF PADOVA

Wave flume

Length	36 m
Width	1.0 m
Depth of flume	1.3 m
Water depth	1.0 m
Maximum height	0.3 m
Wave period	0.5-5 s

Instrumentation

- Resistive wave gauges
- Air and current flow meter
- Pressure transducers and strain gauges
- High resolution cameras
- Electronic water discharge measuring instruments
- Automatic bottom profilers



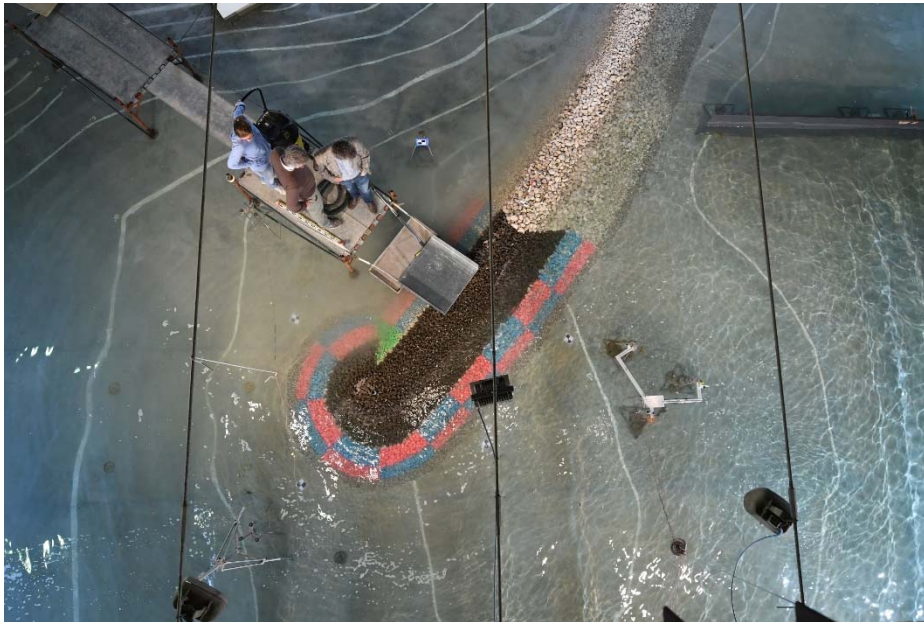
LABORATORIES AVAILABLE TO THE UNIVERSITY OF PADOVA

Wave Basin

Dimensions	20.6 m x 17.8 m
Water depth	0.80 m
Wave paddle	0.85 m high 8.0-12.0 m long
Water depth	0.80 m
Maximum height	0.3 m
Wave period	0.5-5 s

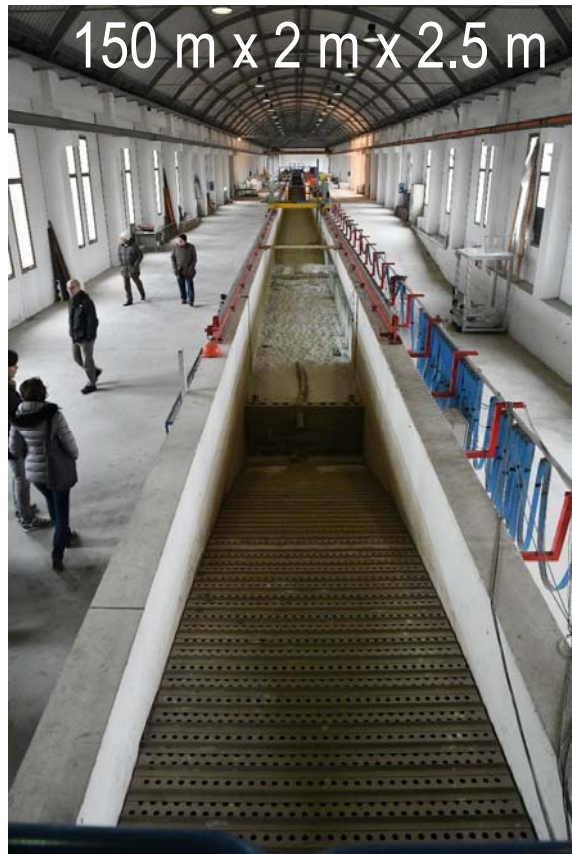
Instrumentation

Automatic bottom profilers (laser and touch-sensitive probes)
Resistive wave gauges
Laser level and laser measuring device
Pressure transducers and strain gauges
High resolution cameras

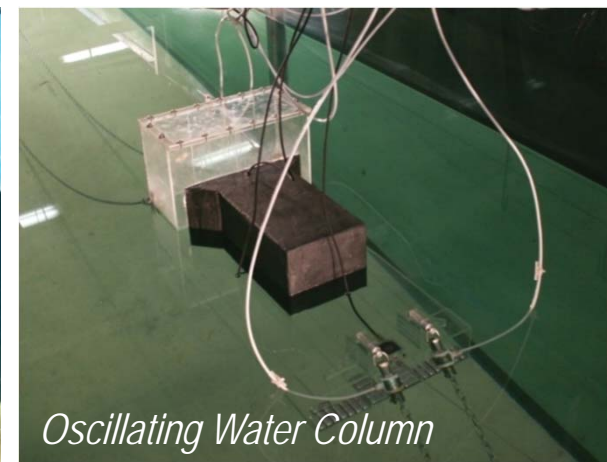
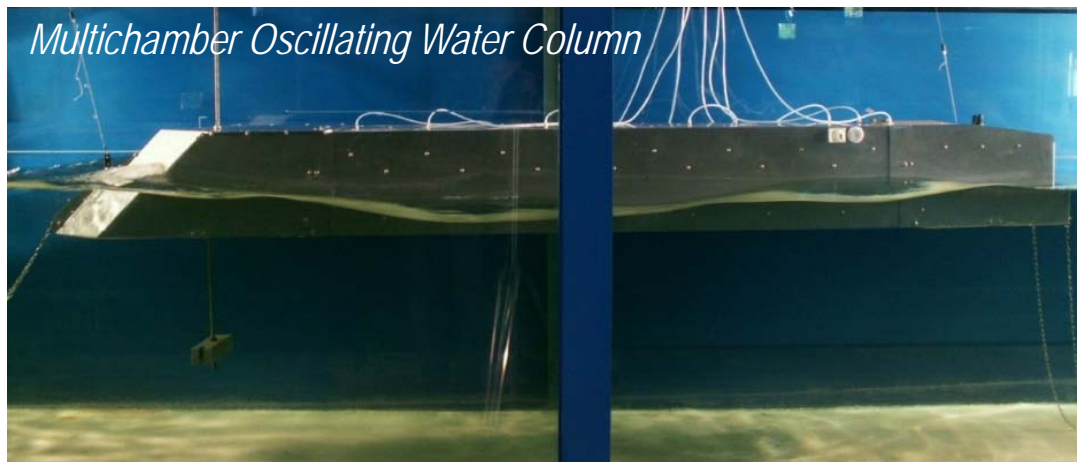
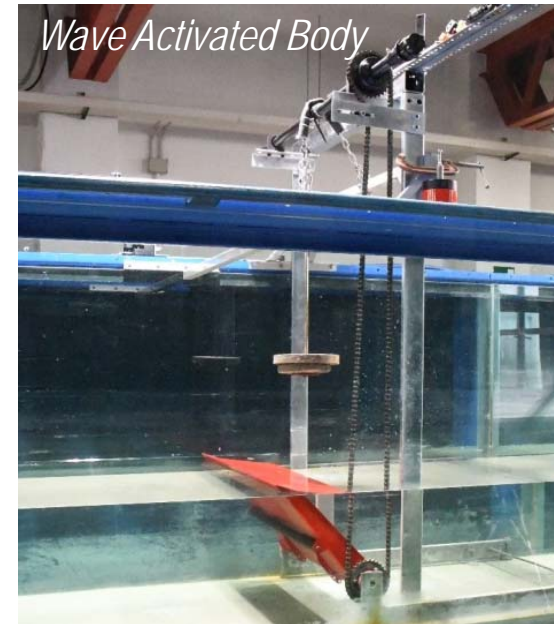


LABORATORIES AVAILABLE TO THE UNIVERSITY OF PADOVA

Voltabarozzo facility (Ministry Public Works)



STUDI IN LABORATORIO MARITTIMO



CONVERTITORI DI ENERGIA MAREALE

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

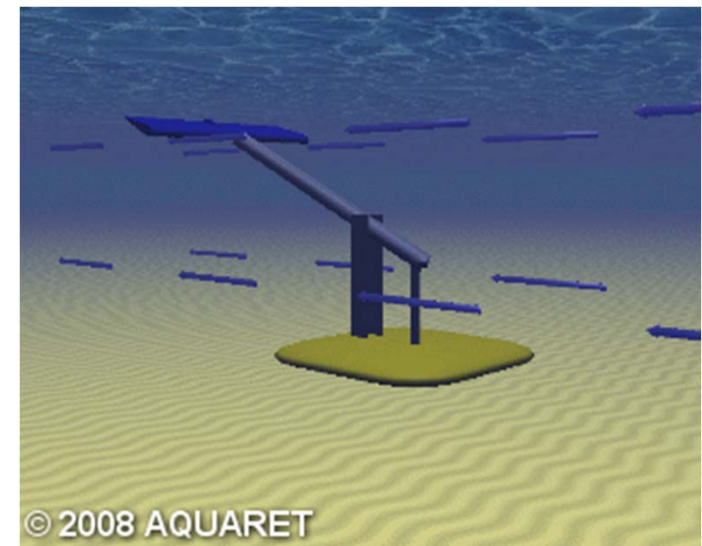
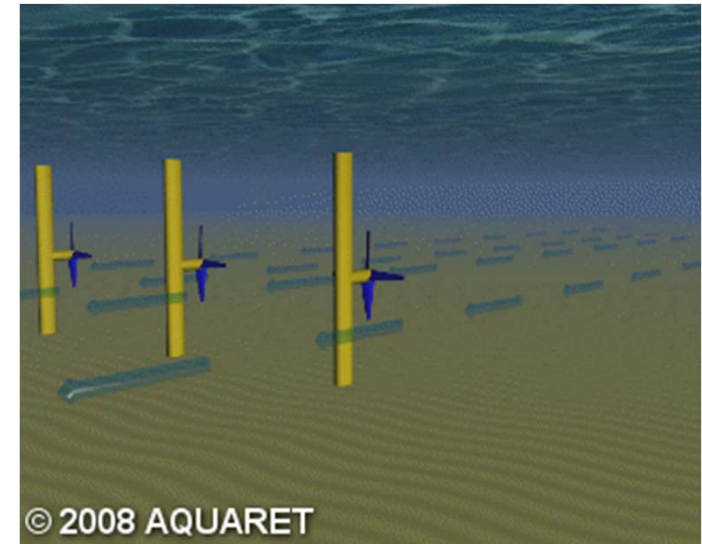
Classificazione dei “Tidal Energy Converters”

Principi di funzionamento:

- Energia potenziale = sfruttano il dislivello idraulico
- Energia cinetica (tipicamente molti dispositivi affiancati)
 - Turbine ad asse orizzontale/verticale
 - Hydrofoil (profili alari) oscillanti

Posizione

- acque basse
- acque profonde
 - Superficiali (galleggianti) – e.g. **Orbitel O2**
 - Al fondo (posate al fondo) – e.g. **Sabella**
 - A mezza altezza (ancorate con cavi), e.g. **SeaPower**



Available tidal Energy: barrages and lagoons, river mouths

The first tidal energy converters were formed by gates that enclosed water in high tides and used the return flow to operate grain mills.

There is a need for:

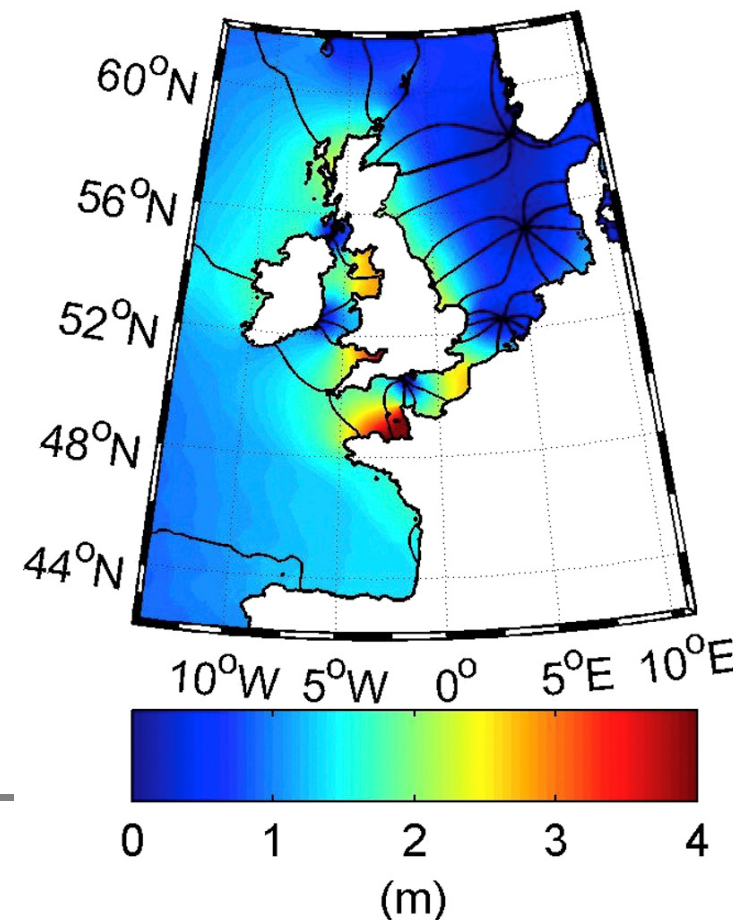
- suitable location
- significant jump

Unacceptable impact produced by:

- the necessary civil engineering works
- the effect of limited circulation on water quality

→ technically <100 GW> but realistically less than <1 GW> [= 87'600 GWh/y]

(a) M2 co-tidal chart

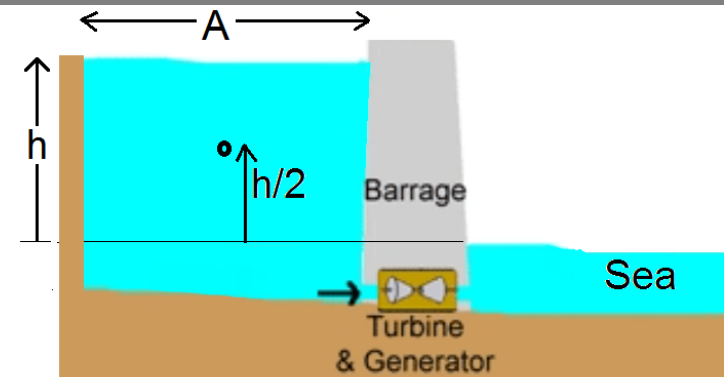


Neil et al., Energy, (73) 2014

Energia potenziale

Tidal Barrage TEC: focus on tidal range

$$E_P = \frac{1}{2} \rho A g h^2 \quad h = \text{head}$$



Generation (water is turbined) during:

- ebb tide (fase di discesa). Flood is free, trap inside
- flood tide (salita). Ebb is free, easier to empty pollutants/sediments
- both. More continuous production (e.g. 14 h/day for EVERY DAY)

Possible use of second basin

Coastlines are classified as

- microtidal (range < 0.5 m), mesotidal (between 0.5 and 4 m), macrotidal (> 4.0 m).

Actually, only macrotidal coastlines are attractive.

Note: limited n° of suitable sites, large impact → negligible potential from a global perspective

Rance River, Bretagne

Le Rance began operation in 1966, with generating capacity of 240 MW, fostered for years the use of marine energies

240 MW (24 x 10 MW)

Generates during both ebb and flood



Sihwa Lake, South Korea

43.8 km² artificial lake built in 1994, using a 12.7 km long seawall to provide flood mitigation, and secure irrigation water by converting the costal reservoir to fresh water.

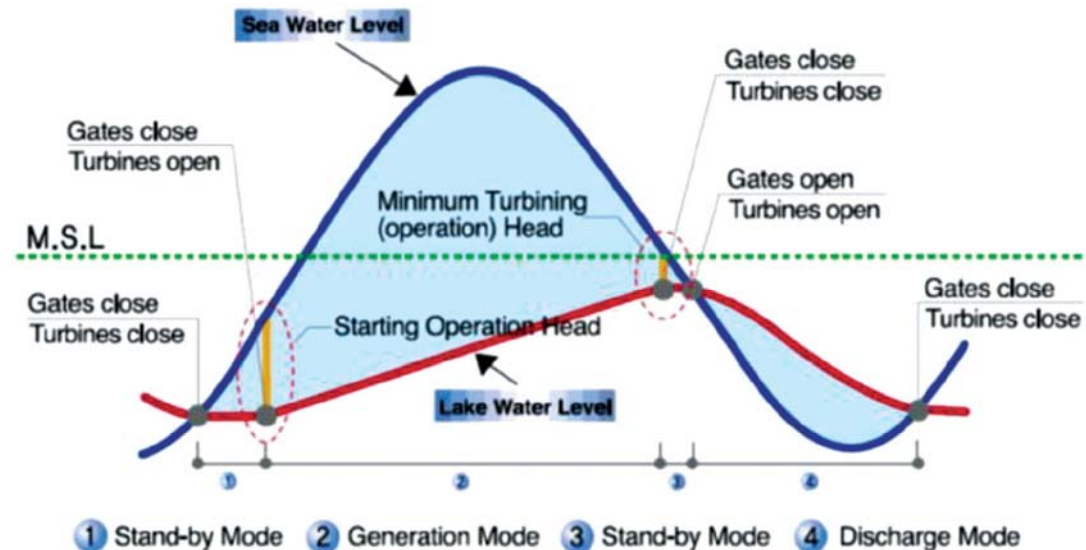
Tidal Range Converter:

10 turbines x 25.4 MW

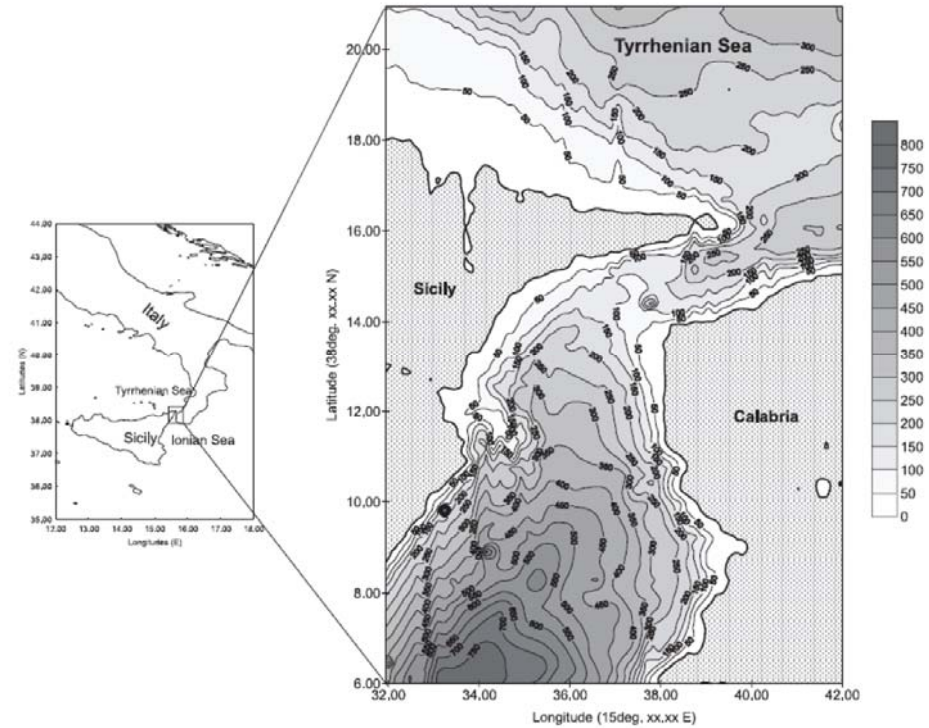
Tidal range: 3.3 m to 7.8 m

you may watch:

<https://www.youtube.com/watch?v=26l0x6nyiyo>



Tidal stream



SeaGEN – horizontal axis

Underwater turbine generating electricity from tidal streams,

Situated at Strangford Lough, in Northern Ireland 150kW

Connected to the UK grid on since 2008 (first in UK).

$d=16$ m, tip velocity 2.4 m/s

SeaGen previously also known by the name of the developers, Marine Current Turbines (UK), is now wholly owned by Siemens.



Open Centre – horizontal axis

Designed by the Open Hydro Group, built by Cantick Head Tidal.

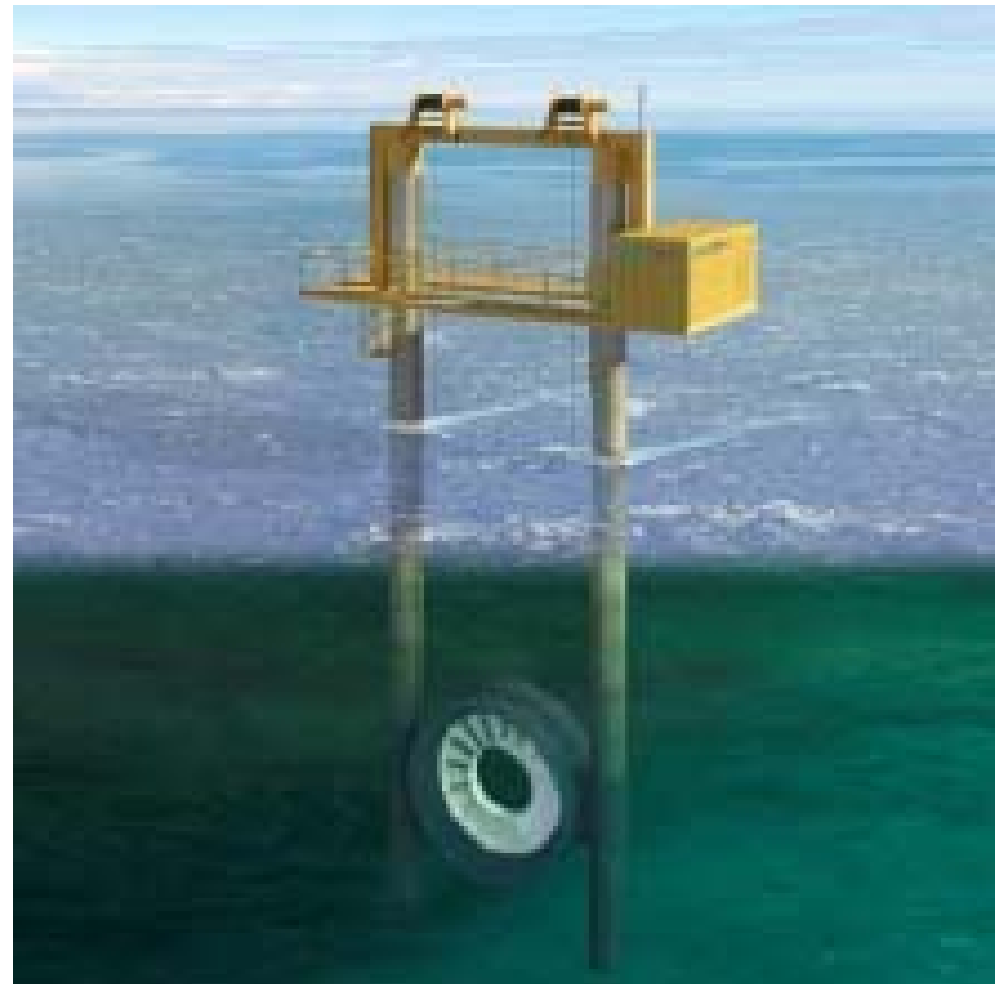
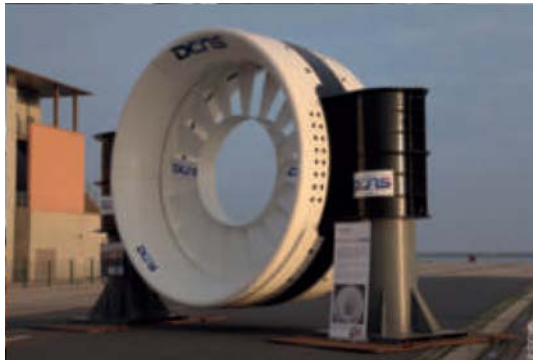
Tested at EMEC in Orkney, 2006.

Connected to UK grid in 2008.

A device has been installed at the Bay of Fundy

Asymmetric load absorbed by 2 piles

Large underwater turbine, resembling a jet engine, fixed to the sea floor.



KOBOLD- VERTICAL AXIS

Deployed in 2001 in Messina straight

Ponte di Archimede S.p.A

Water depth 20 m, 150 m offshore

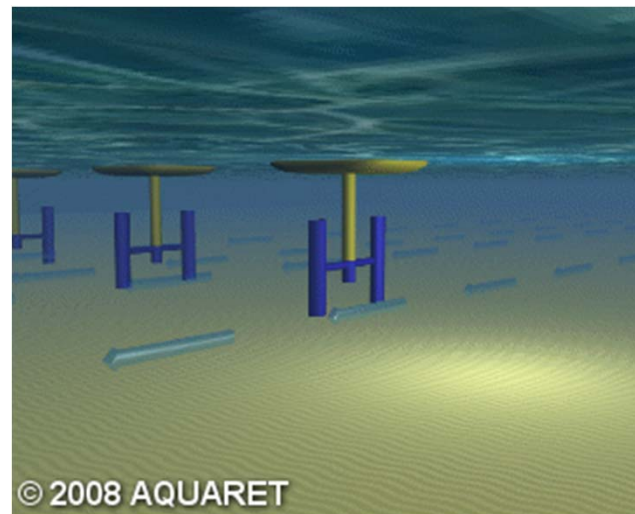
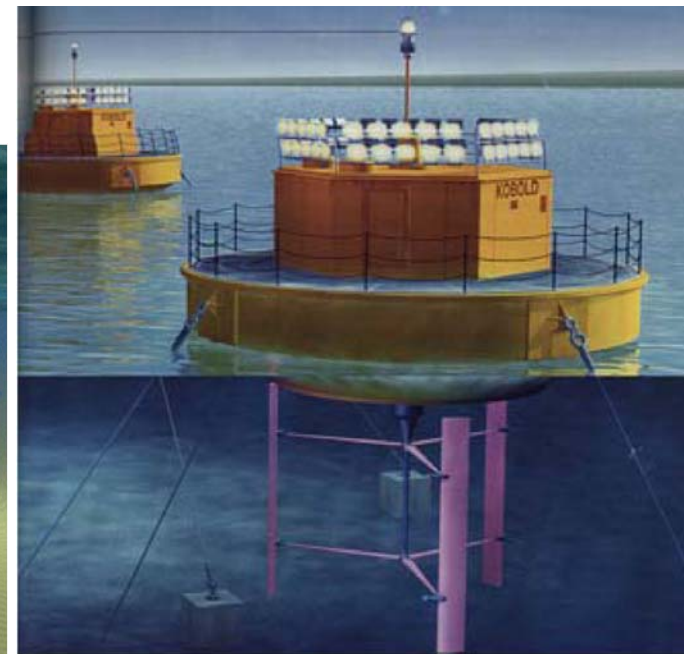
Current velocity 2 m/s

Vertical blades partially free to pitch

rotational speed multiplied 90 times

$P=128$ kW,

Efficiency 25 to 30%

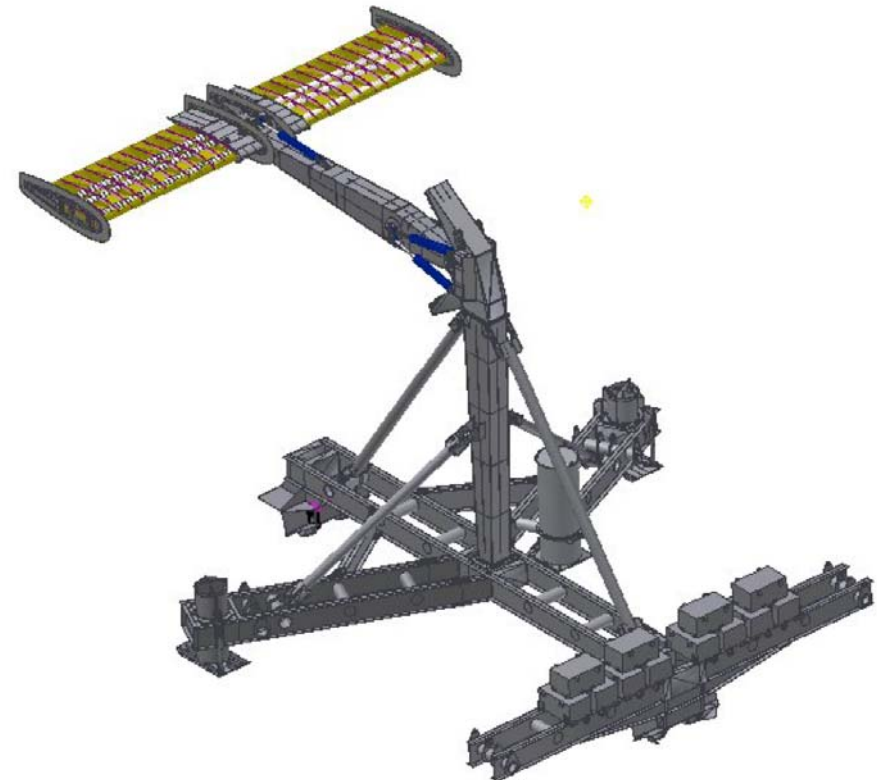


Stingray

Developed by Engineering Business Ltd

150 kW device tested in the Yell Sound, Shetland, in 2002. No more in operation

The controllable hydroplane angle applies the vertical upward or downward lift



Stingray

Developed by Engineering Business Ltd

150 kW device tested in the Yell Sound, Shetland, in 2002. No more in operation

Vertical motion attached to a pivoting arm, with a hydraulic cylinders that pressurize fluid used to power a hydraulic motor that drives an electric generator.

Not successful



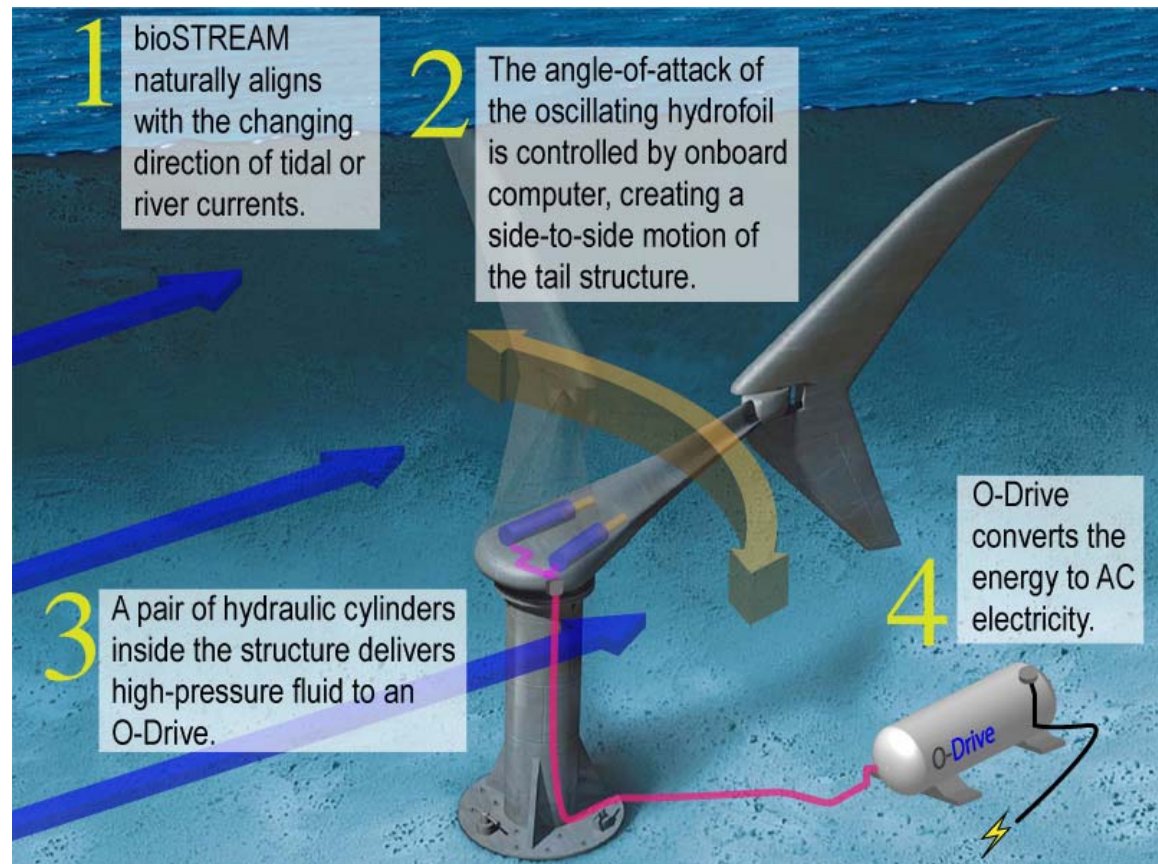
BioStream

Biostream Ltd.

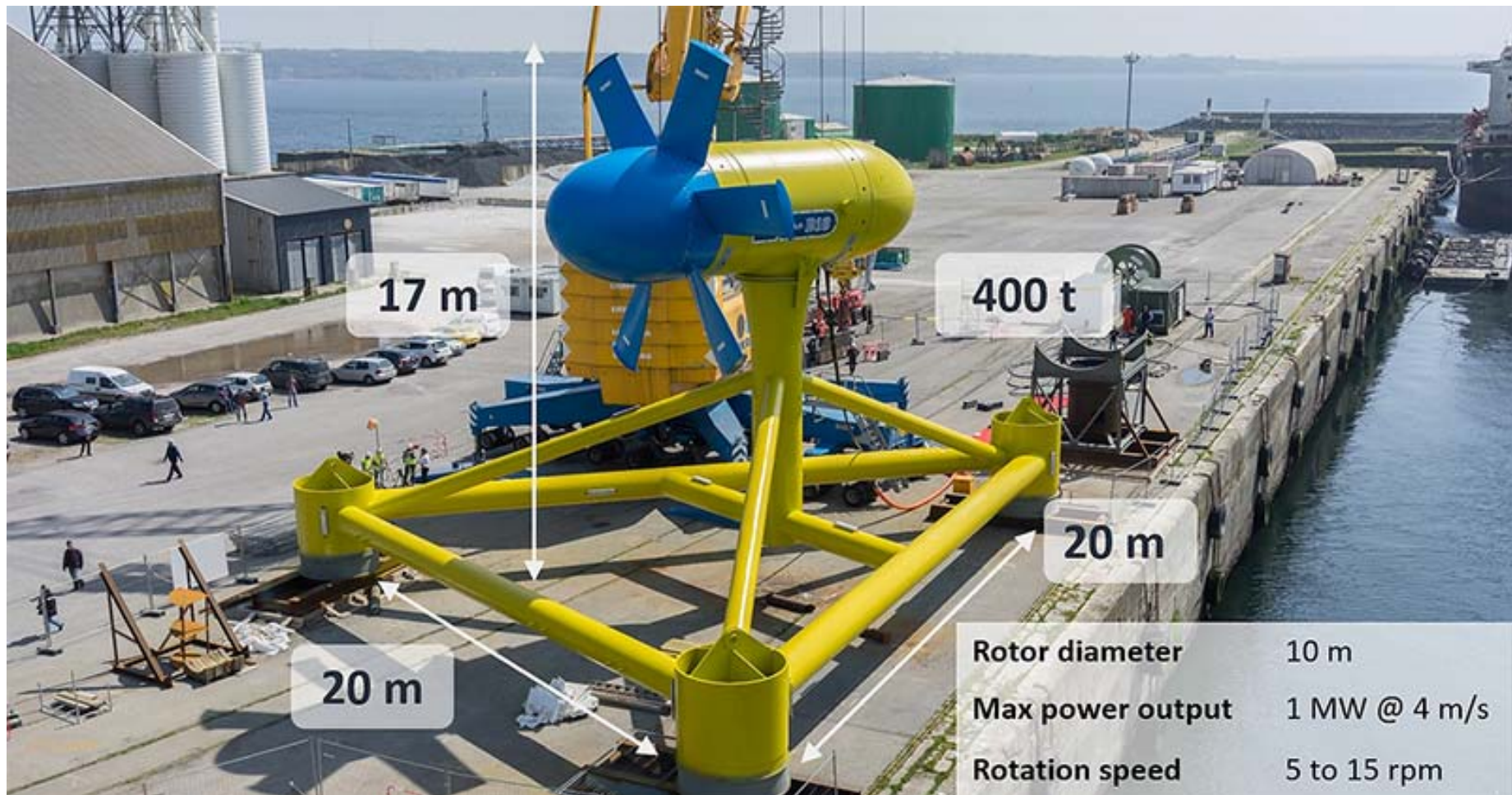
Oscillating hydrofoil with vertical axis

Rotates 360°

Controlled hydraulic PTO



Sabella



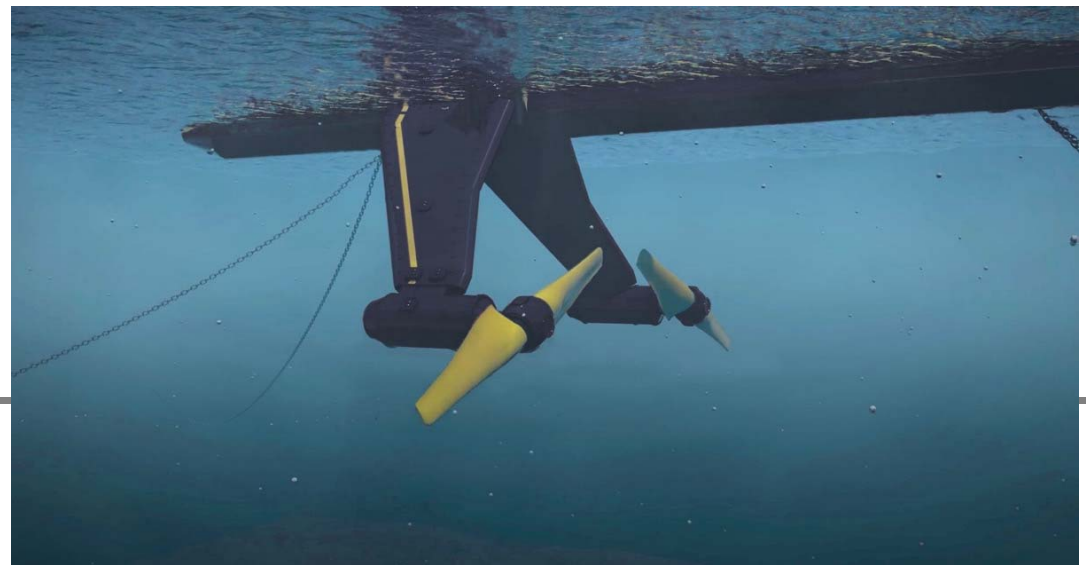
Orbital O2 - floating

Two contra-rotating turbines mounted on a single crossbeam

Each unit has a peak power of 2MW is buoyant and moored with steel lines to the seabed

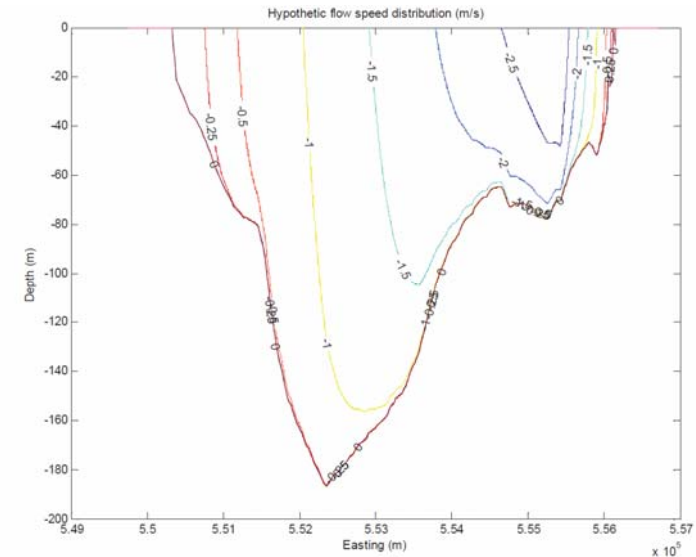
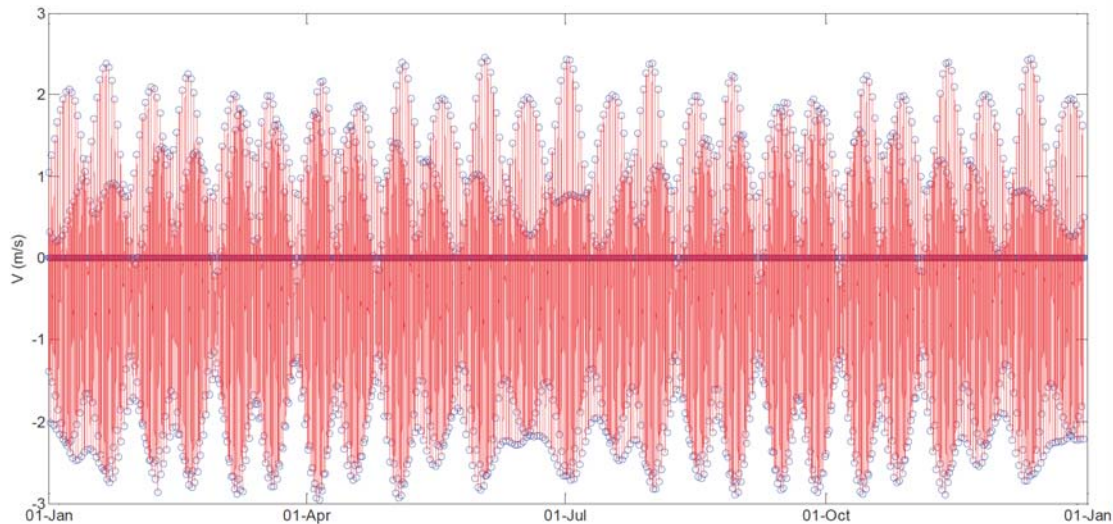
Rotating blades to adapt to flow inversion, without reorientation of the barge

Barge subject to wave action, rotates to align perpendicularly to wave front

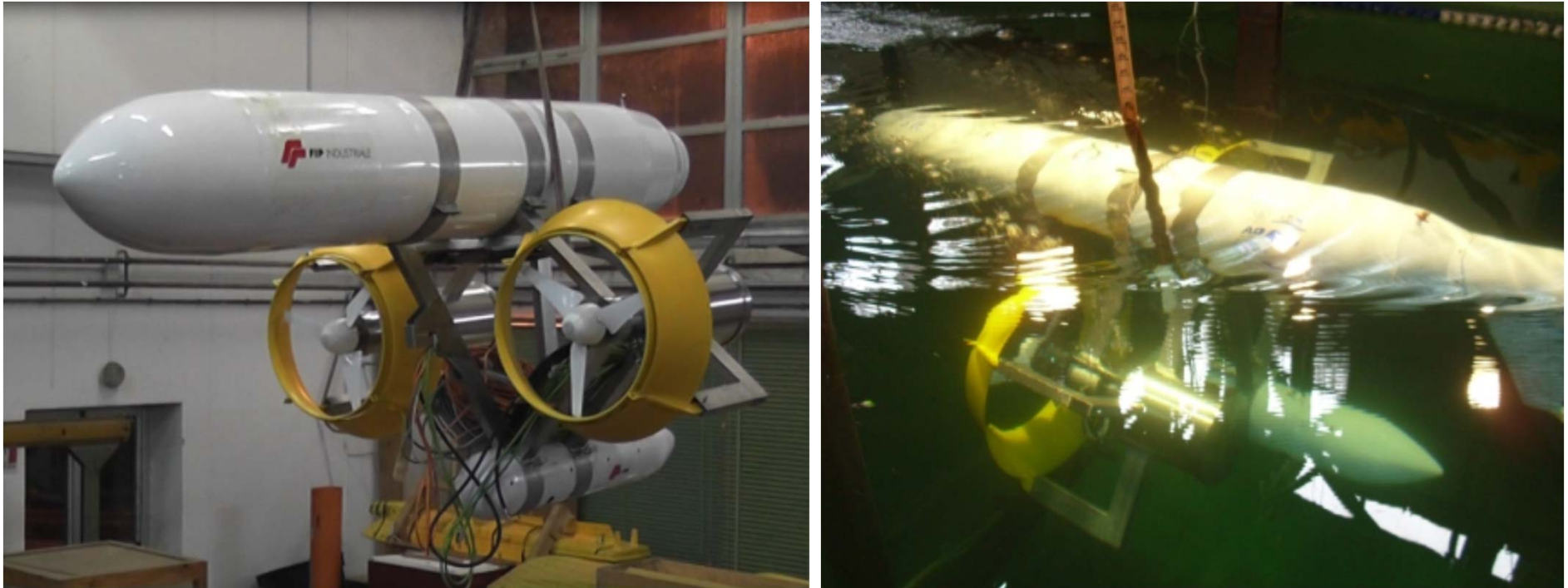


Messina Strait

Available resource 1471 GWh
using a Significant Impact Factor of 0.2
and realistic $\eta \rightarrow$ Possible output = 126 GWh
Possible locations: white area in figure

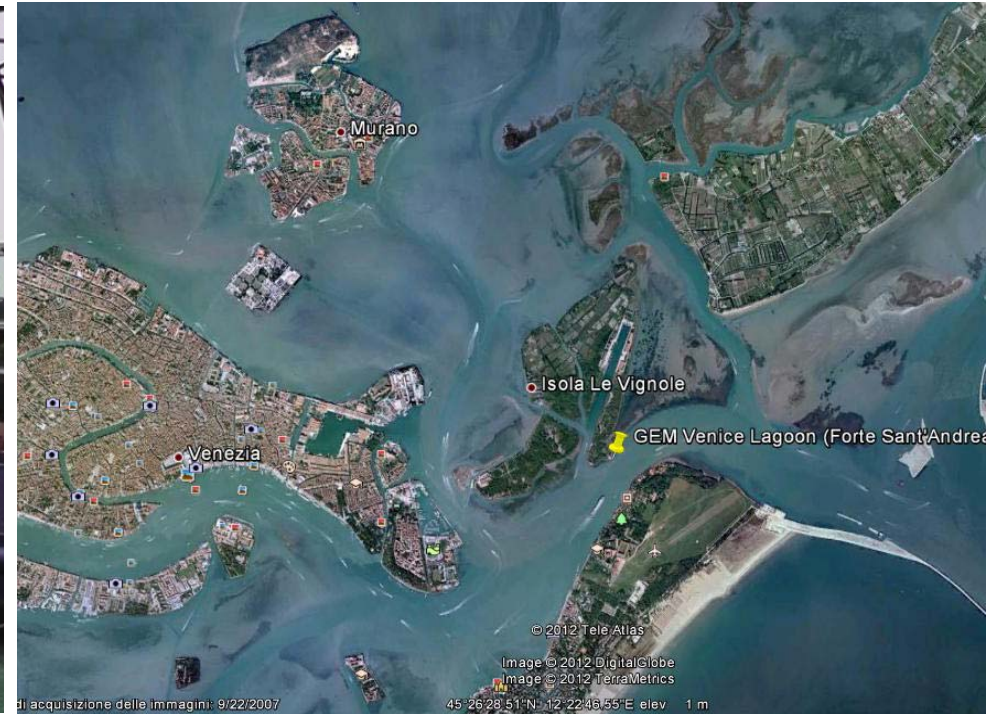


Gemstar



Developed in the Water Tank of the Naval Laboratory of University of Napoli Federico II. Patent by Prof. Coiro.

Gemstar



Deployed in 2012 in front of the island of Forte Sant Andrea, in Venetian Lagoon. Such location with currents up to 1.6 m/s, depth 10 m below sea level. turbine diameter=3.08 m; diffuser diameter = 4.08 m. 38 rpm. Tip speed 1.5 m/s; Overall dimensions 9.2 m x 5.2 m x 10.4 m

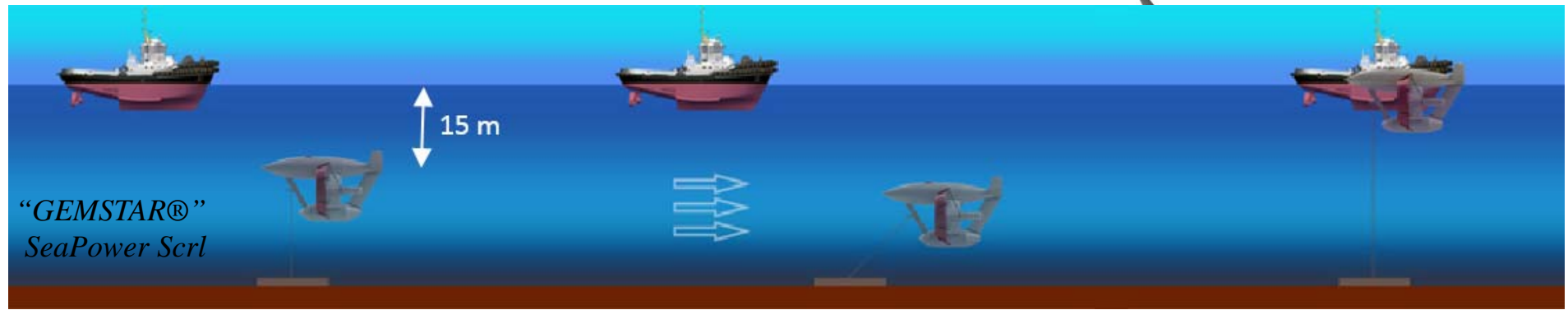
Italian device: Gemstar

Sometime called "kite" system, but more properly bottom tethered floating Stream TEC type

Device of 300 KW suited to in the Messina Strait, where current > 2.0 m/s. The output is constant up to currents of 3.0 m/s, and in safe mode hereafter.

Yearly contribution of almost 1 GWh/y (300'000 €/y)

Total cost of order 2'000'000 €. Within the P.O.N. funding program, a low interest 3'000'000 € loan with 20 years payback period is offered to the (hypothetical) builder



Test Sites

- Danimarca: Hanstholm
 - Svezia: Lysekil
 - Norvegia:
 - MET Center (combinato con Wind Turbines)
 - Runde Environmental Center
 - Scozia: EMEC -
<http://www.emec.org.uk/services.asp>
 - Galles: Wave Hub (250 MW)
 - Irlanda: Galway bay
 - Portogallo:
 - Sao Pedro de Moel (250 MW)
 - Agucadora (PELAMIS)
 - NOEL www.noel.unirc.it
 - Piattaforma CNR
-



EMEC ORKNEY
THE EUROPEAN MARINE ENERGY CENTRE LTD

Fall of Warness tidal test site, Orkney

<https://youtu.be/rtD7GnuGFNw>

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Conclusioni

- Ad oggi la tecnologia dei Convertitori di Energia Ondosa non è matura.
- Alcuni dispositivi italiani sono molto promettenti.
- Per convertire molta energia, dell'ordine del 2% di quella consumata in Italia, è necessario posizionare centinaia di chilometri di dispositivi (al largo, dove l'impatto è inferiore).
- Per la fase della sperimentazione in situ in scala ridotta, l'Italia ha condizioni ideali: vi sono diverse zone idonee, con molti lunghi di calma, in periodi ben prevedibili.
- La fase di dimostrazione potrebbe essere svolta al largo della costa occidentale della Sardegna (10 kW/m).

Grazie per l'attenzione!
luca.martinelli@unipd.it



1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA