

Dipartimento di Ingegneria Industriale  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'ENERGIA

# Analisi tecnica delle fondazioni fisse e galleggianti per turbine eoliche offshore



LAUREANDO

---

Giovanni Bellio

RELATRICE

---

Prof.ssa Anna Stoppato

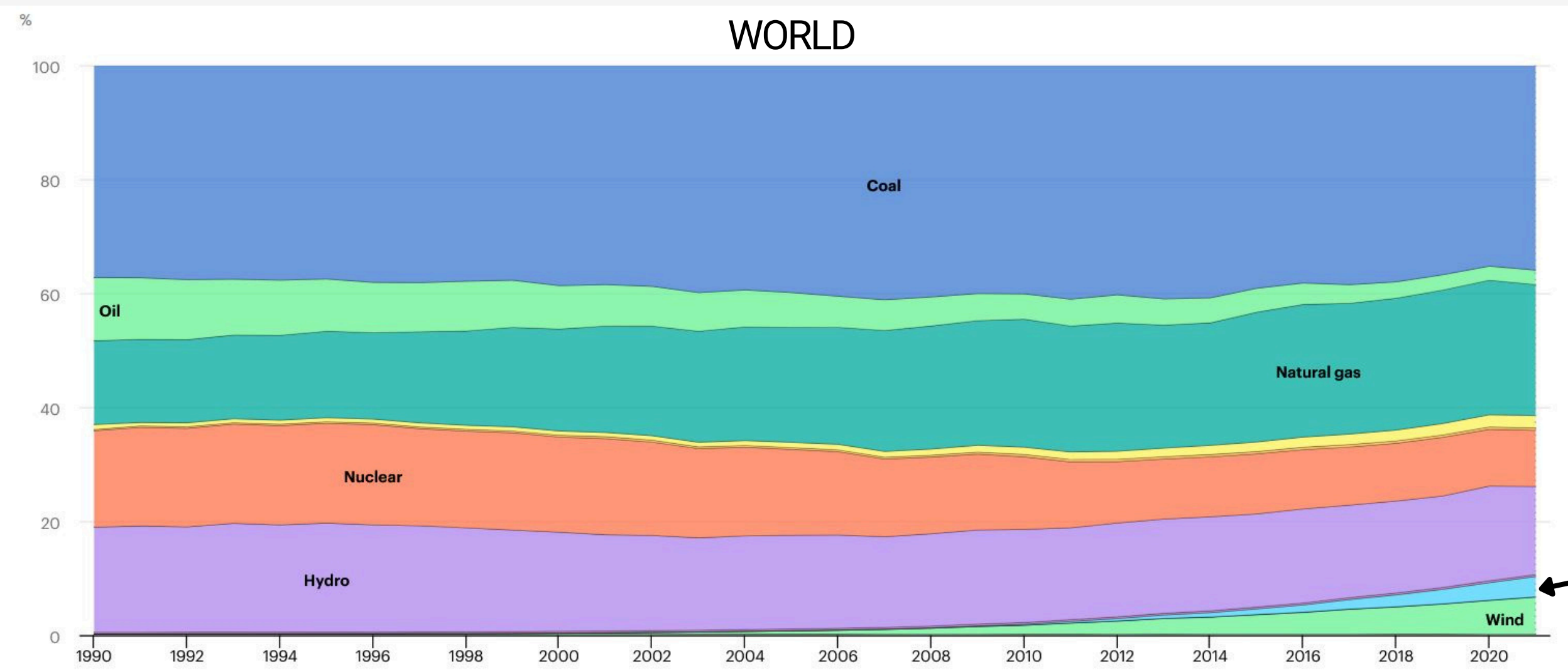


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**dii** DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
INDUSTRIALE

# ENERGIA ELETTRICA GENERATA DA EOLICO

@2021



IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>.

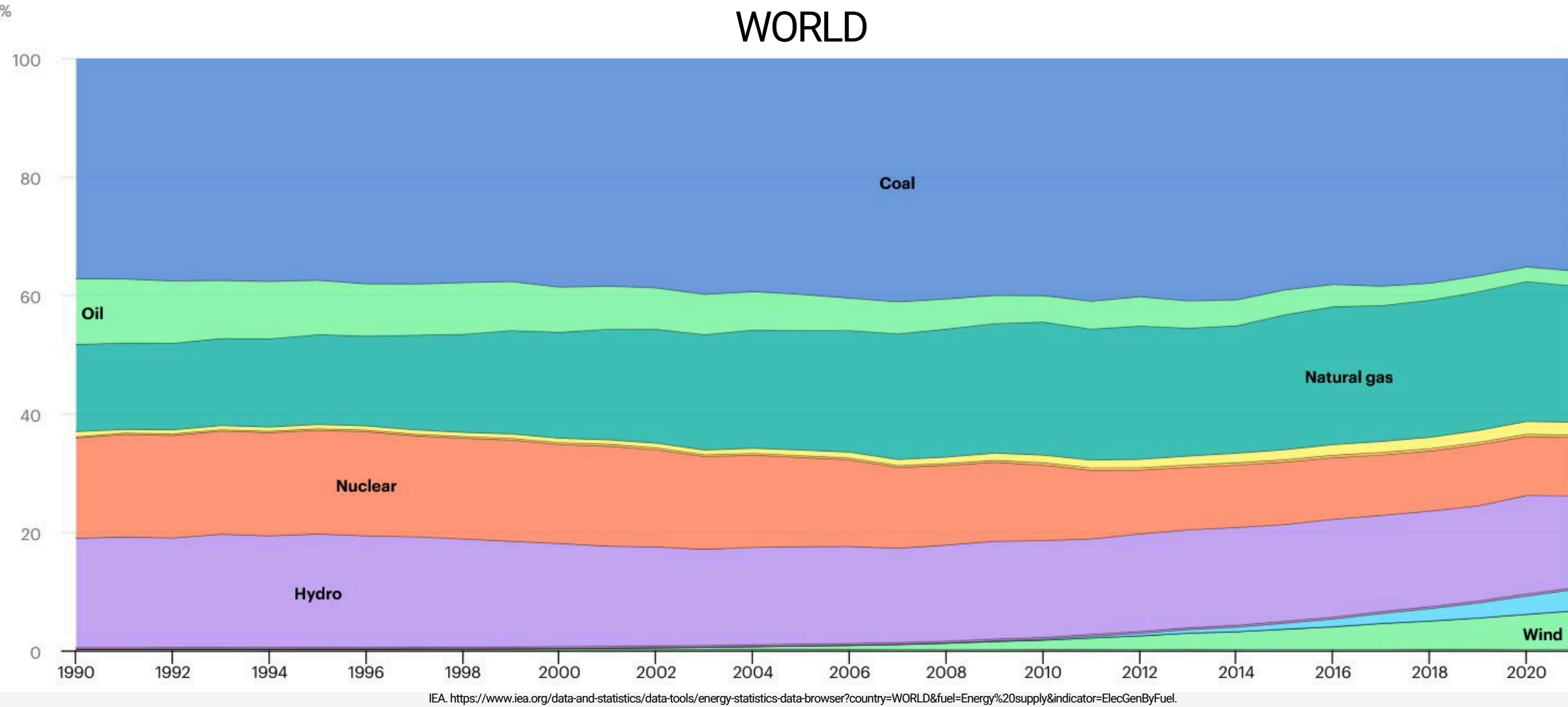
6,6% della generazione mondiale  
(1,6 milioni GWh)  
12% della generazione europea  
(522 mila GWh)



# ENERGIA ELETTRICA GENERATA DA EOLICO

WORLD

@2021

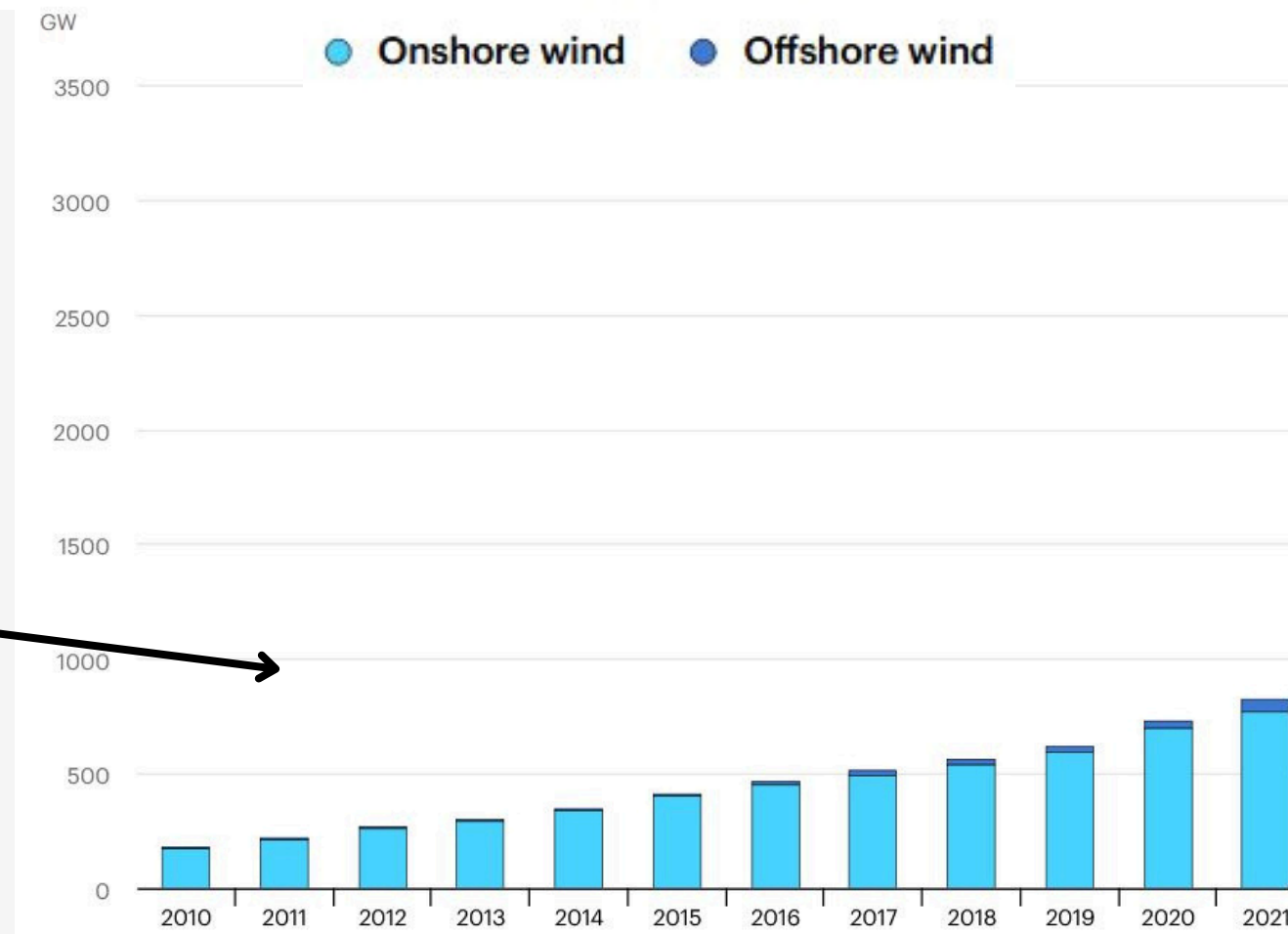


6,6% della generazione mondiale  
(1,6 milioni GWh)  
12% della generazione europea  
(522 mila GWh)

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/wind-power-capacity-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>

830 GW potenza installata:

- 774,3 GW onshore
- 55,7 GW offshore (7,2%)



# PRO DELL'EOLICO OFFSHORE

- Risorsa eolica abbondante in mare
- Basso impatto visivo e acustico
- Ambiente spazioso: turbine più grandi
- Producibilità maggiore rispetto a onshore
- Sfruttamento risorsa eolica anche in fondali profondi

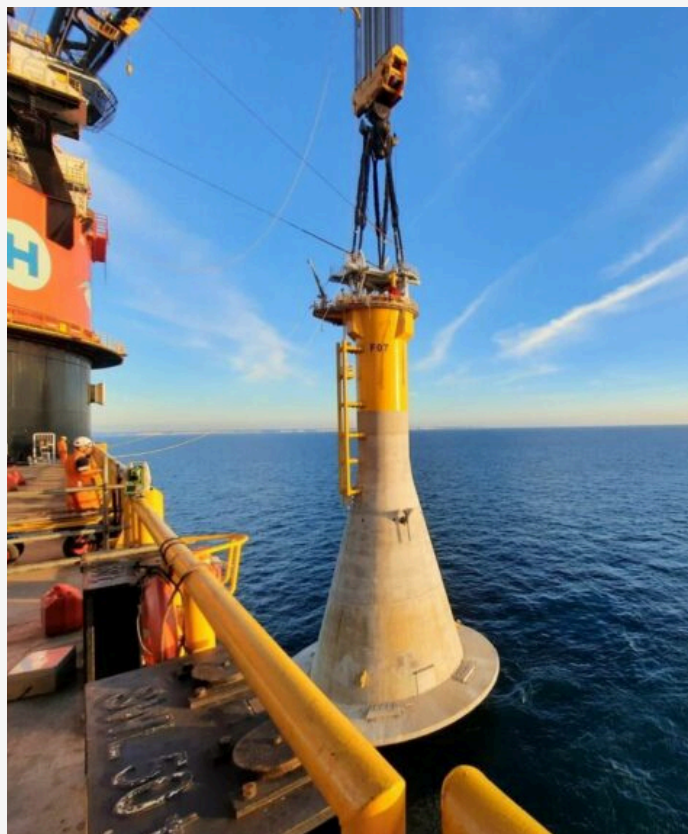


# CONTRO DELL'EOLICO OFFSHORE



- Costo elevato
- Tecnologia non ancora pienamente matura
- Solo quattro impianti attualmente in servizio

# FONDAZIONI FISSE



**Gravity base**



**Monopile**



**Tripod**



**Jacket**



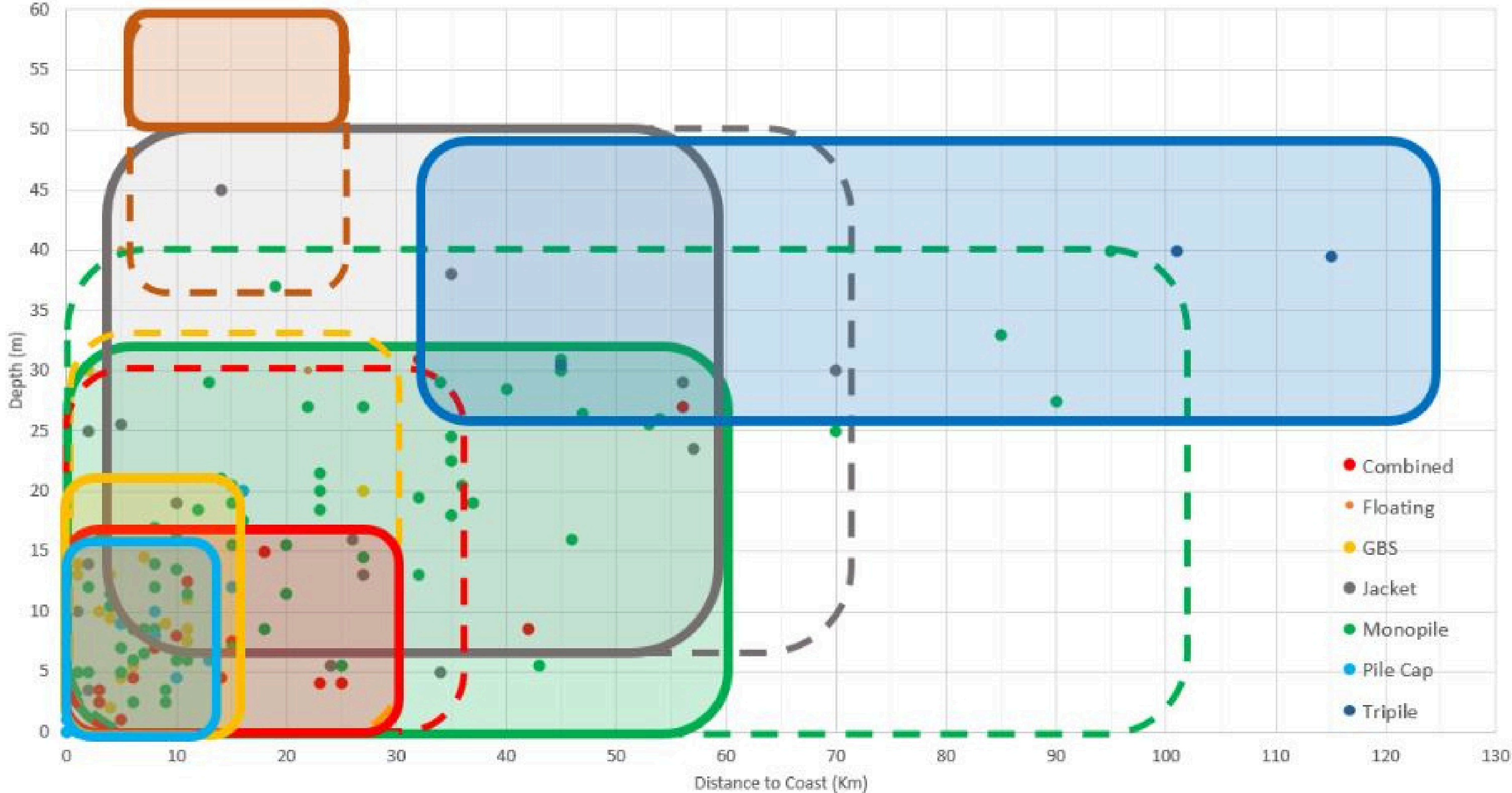
**Suction caisson**



**Pile cap**

# CLASSIFICAZIONE DELLE FONDAZIONI FISSE

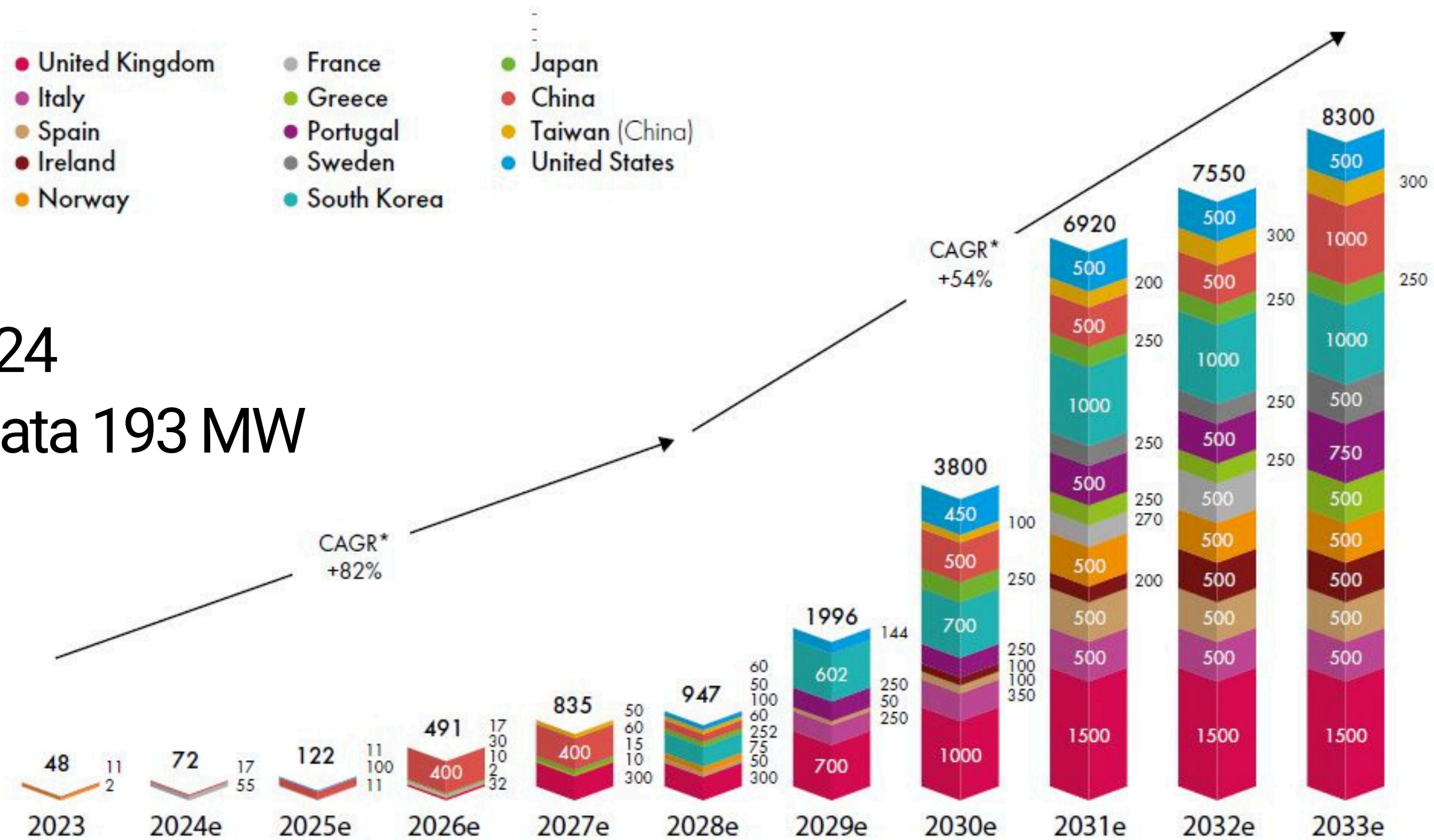
Typologies of Foundations by Range of Use (1995-2018)



Sánchez, S., López-Gutiérrez, J. S., Negro, V., & Esteban, M. D. (2019). Foundations in offshore wind farms: Evolution, characteristics and range of use. Analysis of main dimensional parameters in monopile foundations. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 7, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/JMSE7120441>

# FONDAZIONI GALLEGGIANTI

New floating wind installations, Global (MW)\*\*



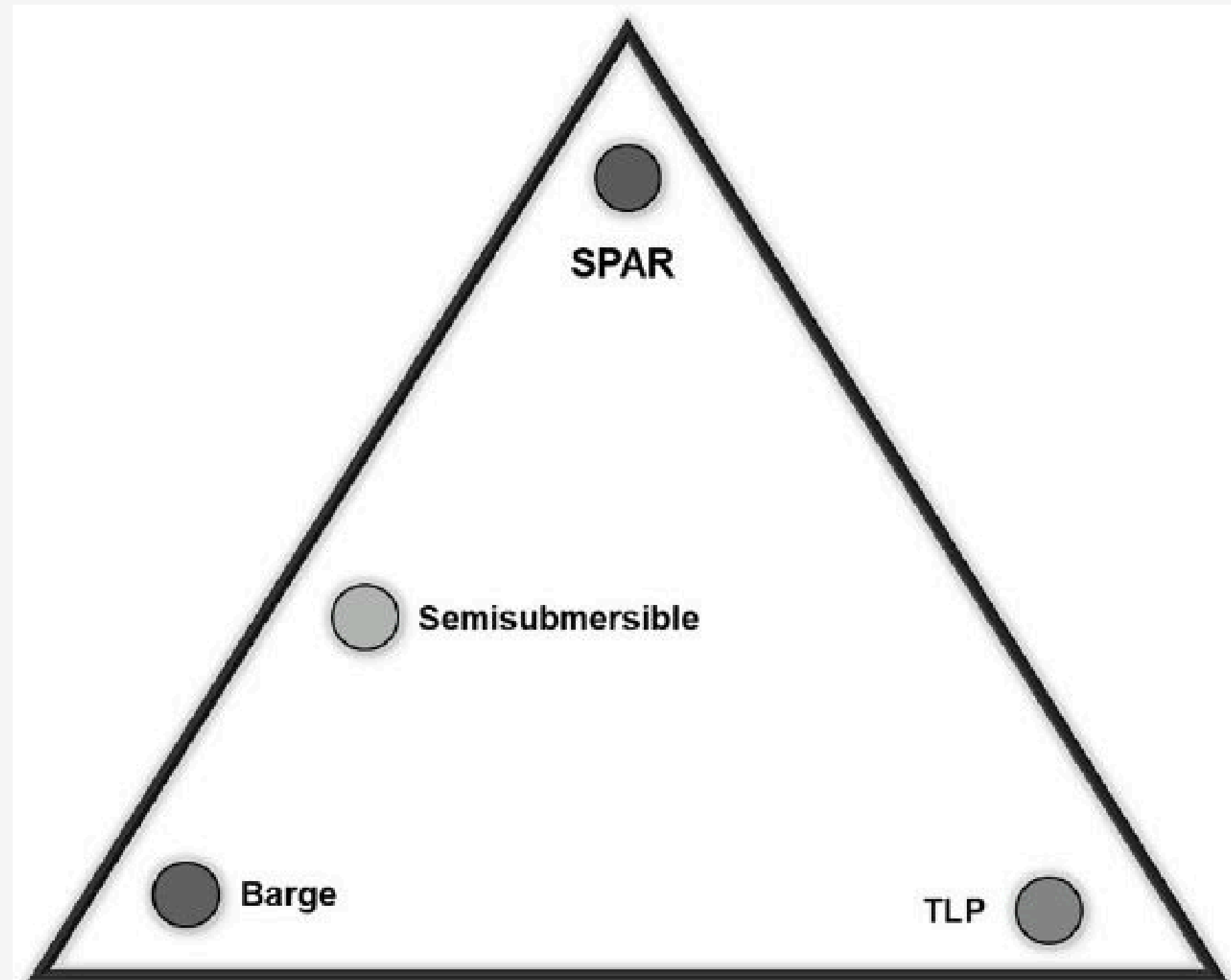
@2024  
potenza installata 193 MW

\*Compound Annual Growth Rate., \*\*Note: this floating wind outlook is already included in GWEC's global offshore wind forecast.  
Source: GWEC Market Intelligence, June 2024



# CLASSIFICAZIONE DELLE FONDAZIONI GALLEGGIANTI

**Ballast**



[19] Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., & Sclavounos, P. (2005). Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines. <http://www.osti.gov/bridge>

**Waterplane area**

**Mooring e buoyancy**

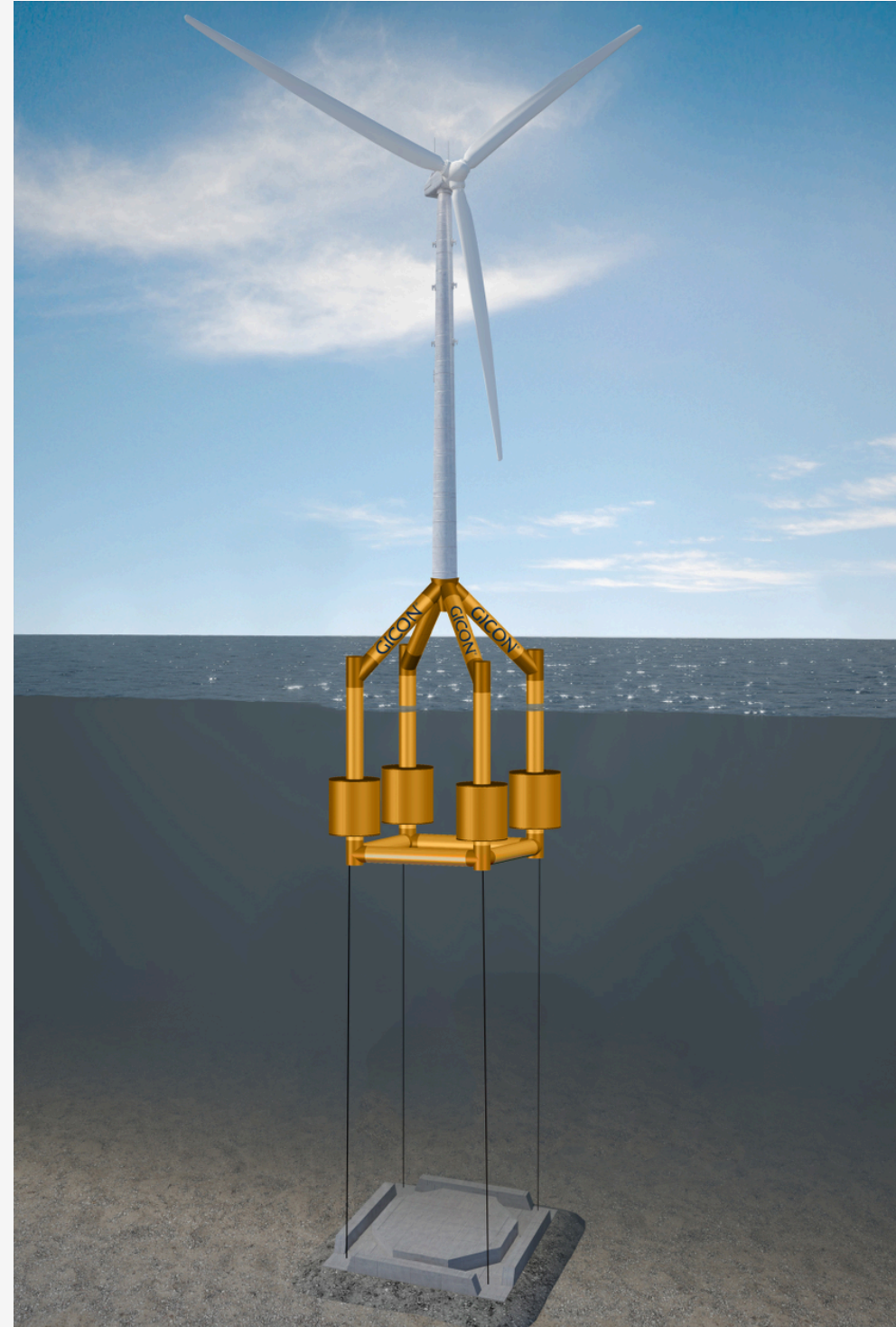
# TENSION LEG PLATFORM (TLP)



# TENSION LEG PLATFORM (TLP)

## Principio di funzionamento

- Ancoraggio verticale in tensione
- Tensione garantita da spinta di galleggiamento sulla struttura
- Impiego di una o più ancore in cemento



# TENSION LEG PLATFORM (TLP)

## Principio di funzionamento

- Ancoraggio verticale in tensione
- Tensione garantita da spinta di galleggiamento sulla struttura
- Impiego di una o più ancore in cemento



## Vantaggi e svantaggi

- Struttura relativamente leggera
- Ancoraggio adatto a medie profondità
- Installazione e traino complessi
- Instabile senza ancoraggio

# SPAR



# SPAR

## Principio di funzionamento

- Scafo metallico cilindrico contenente zavorre
- Parte superiore dello scafo fornisce la spinta di galleggiamento
- Stabilità grazie ad abbassamento del centro di massa



# SPAR

## Principio di funzionamento

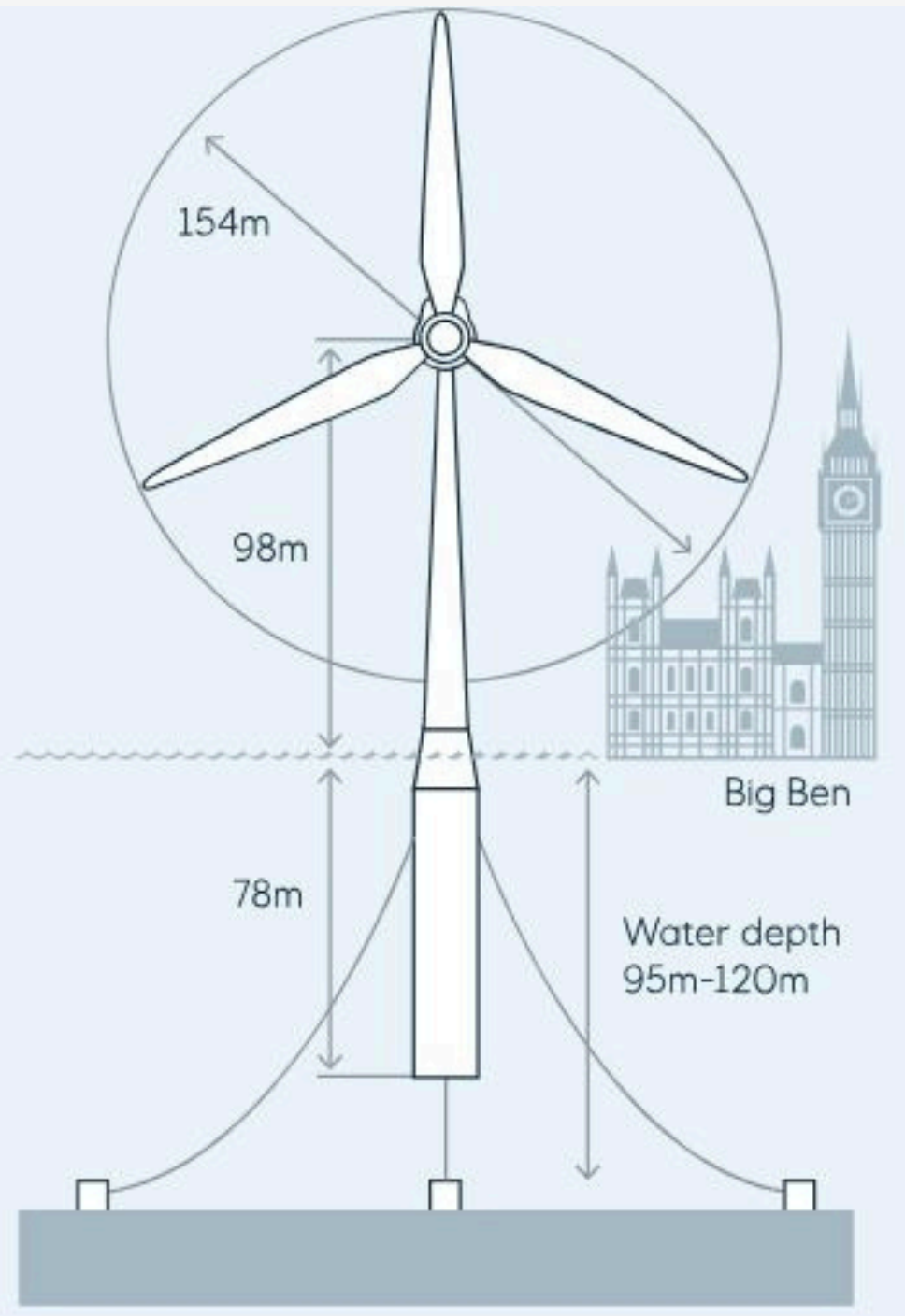
- Scafo metallico cilindrico contenente zavorre
- Parte superiore dello scafo fornisce la spinta di galleggiamento
- Stabilità grazie ad abbassamento del centro di massa



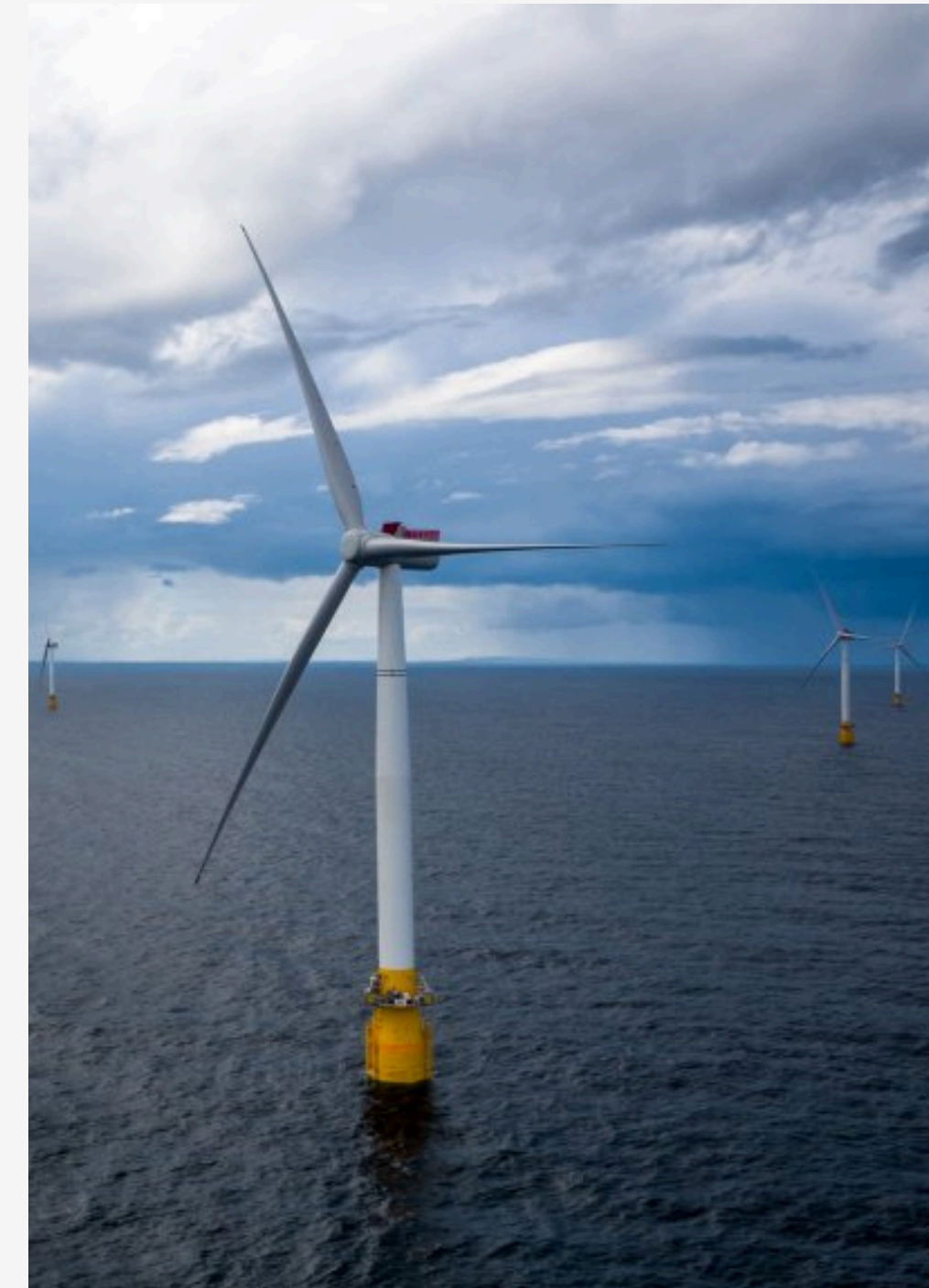
## Vantaggi e svantaggi

- Elevata stabilità intrinseca
- Installazione complessa
- Elevato range di movimenti

# HYWIND SPAR

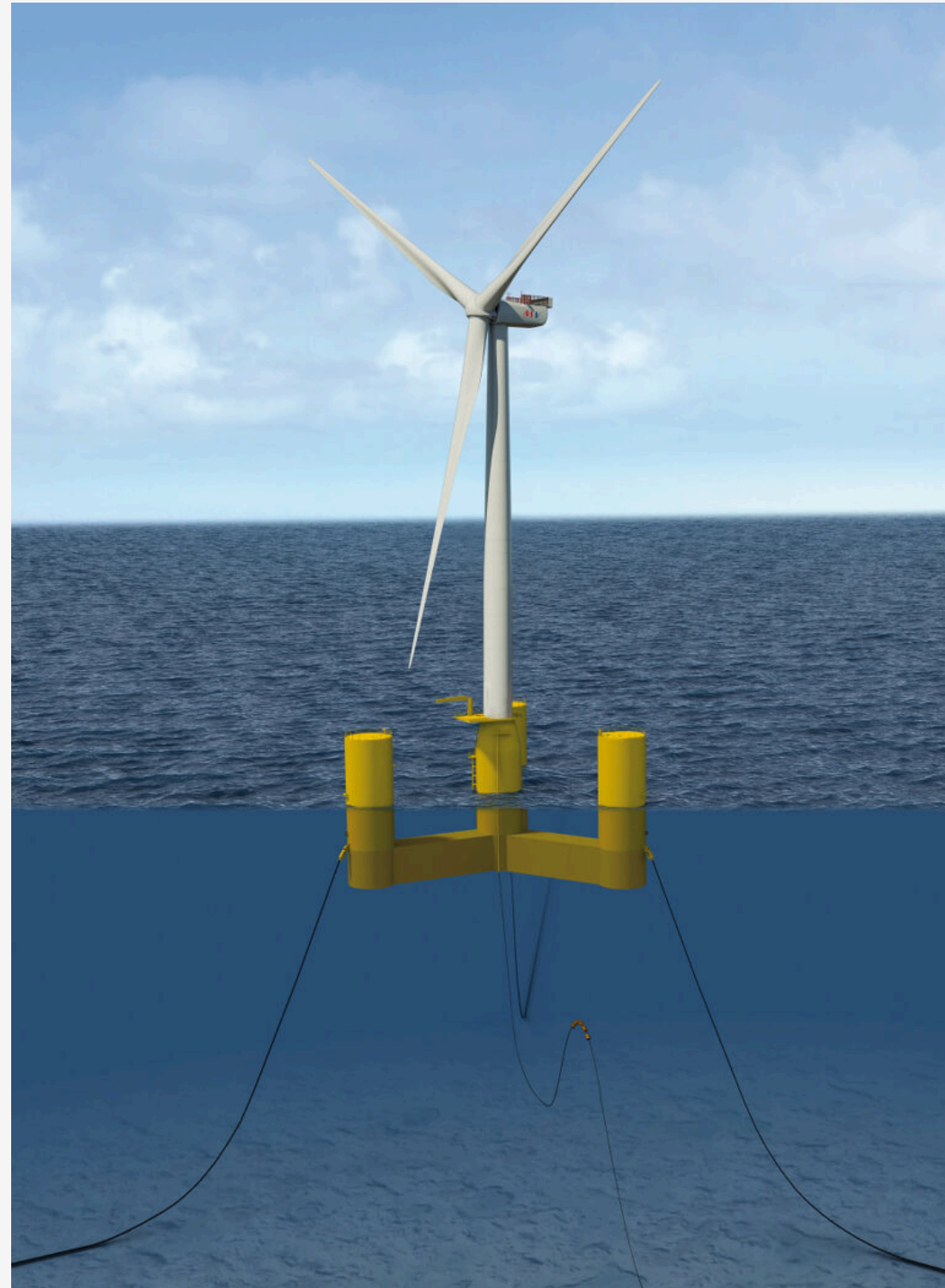


- Design impiegato in Hywind Scotland (30 MW - 6 MW) e Hywind Tampen (88 MW - 8,6 MW)
- Riduzione movimento grazie a sistemi di controllo
- Ancoraggio crow-foot
- Hywind Scotland producibilità del 54%





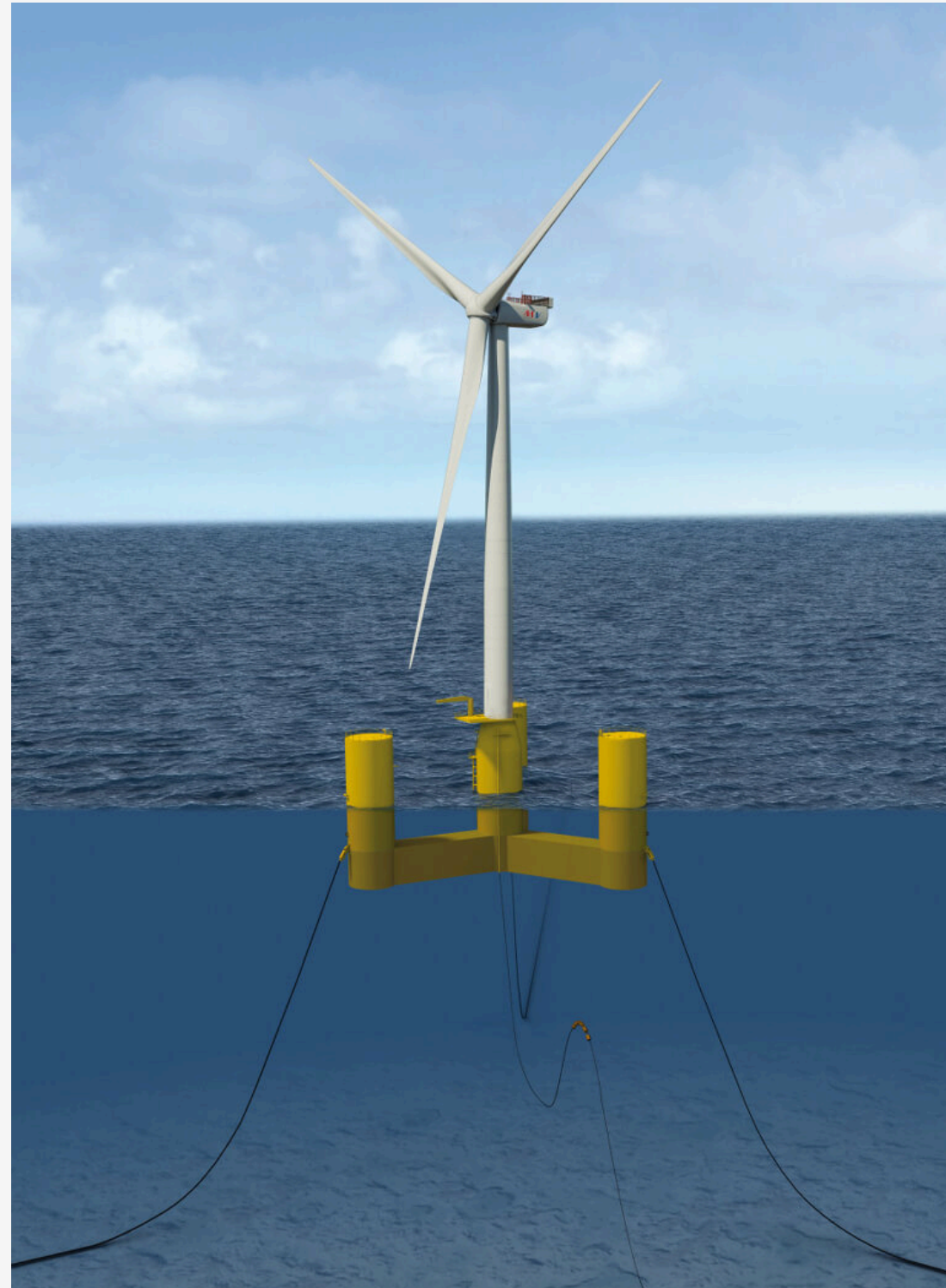
# SEMI-SUBMERSIBLE (SS)



# SEMI-SUBMERSIBLE (SS)

## Principio di funzionamento

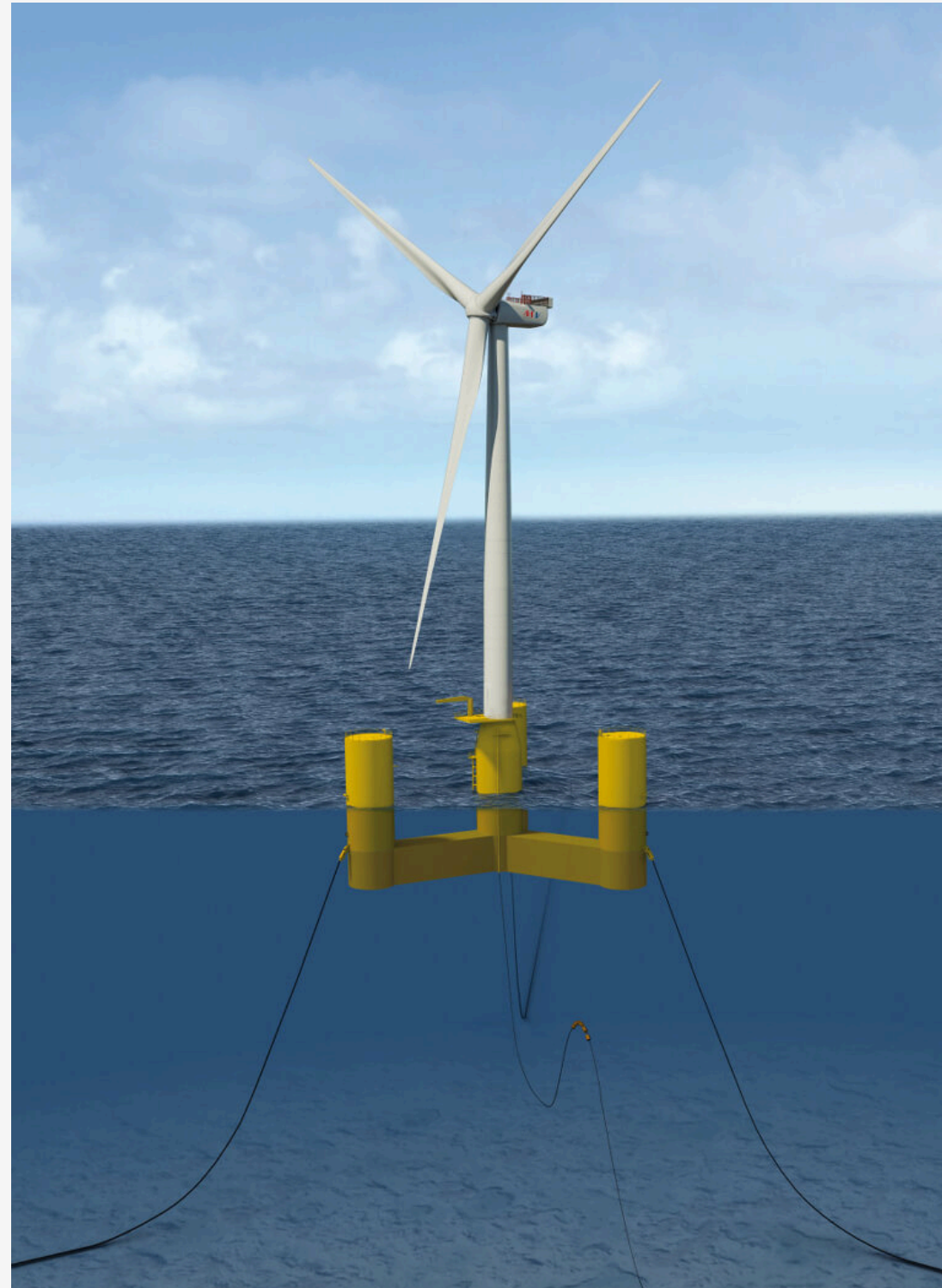
- Colonne o cassoni parzialmente immersi contenenti zavorre
- Sfrutta anche l'area di galleggiamento
- Torre al centro o su una colonna



# SEMI-SUBMERSIBLE (SS)

## Principio di funzionamento

- Colonne o cassoni parzialmente immersi contenenti zavorre
- Sfrutta anche l'area di galleggiamento
- Torre al centro o su una colonna

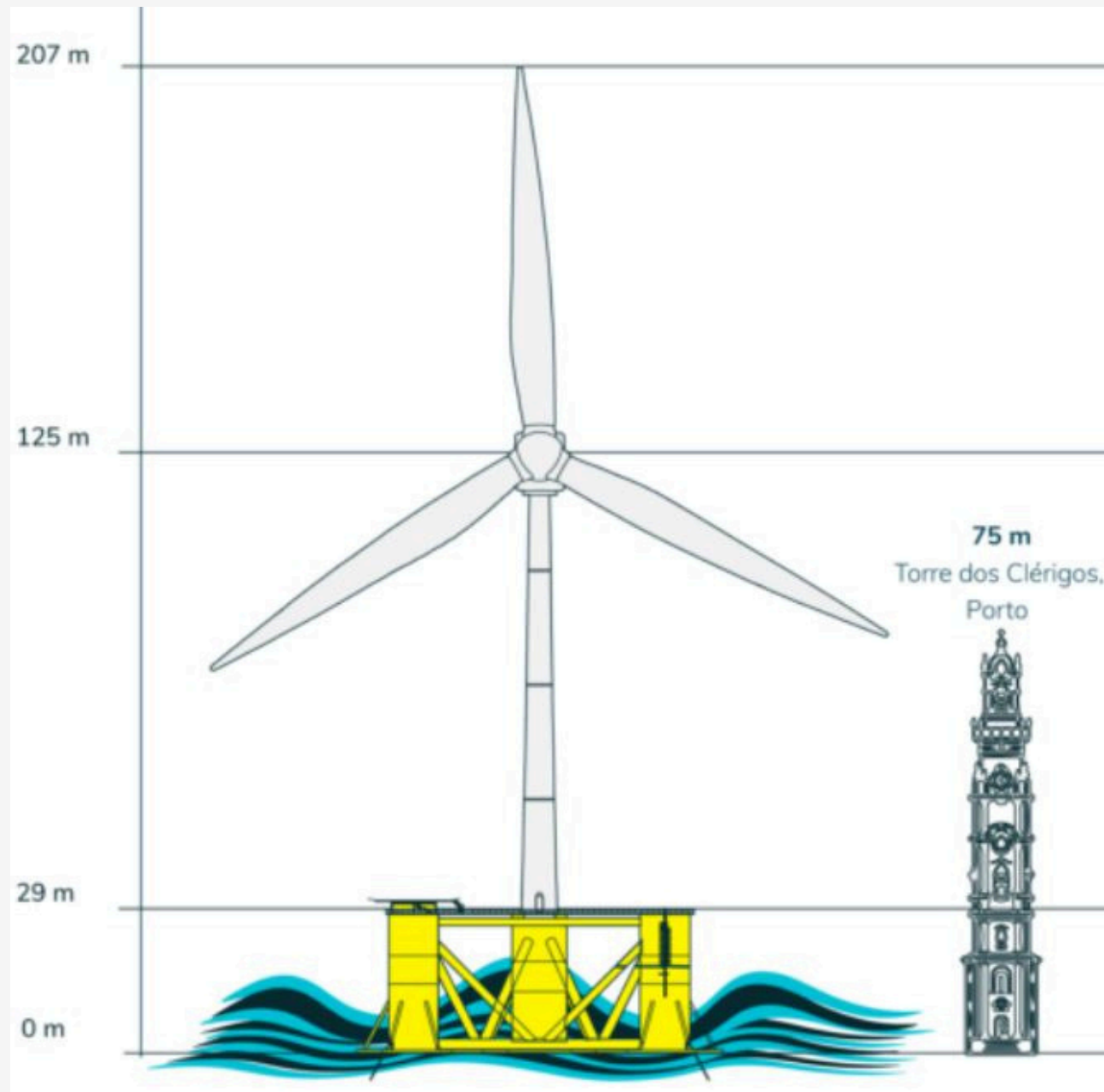


## Vantaggi e svantaggi

- Facile da assemblare e trainare
- Elevata quantità di materiali
- Ampio range di movimento
- Lunghe funi di ancoraggio

# WINDFLOAT

- Design impiegato in Kincardine (50 MW - 9,5 MW) e Windfloat Atlantic (25 MW - 8,4 MW)
- Water entrapment plate per maggior inerzia idrodinamica
- Sistema dinamico di zavorre ad acqua
- Prototipo con producibilità del 47%



# BARGE



# BARGE

## Principio di funzionamento

- Struttura larga e poco sommersa
- Massimizza l'area di galleggiamento



# BARGE

## Principio di funzionamento

- Struttura larga e poco sommersa
- Massimizza l'area di galleggiamento



## Vantaggi e svantaggi

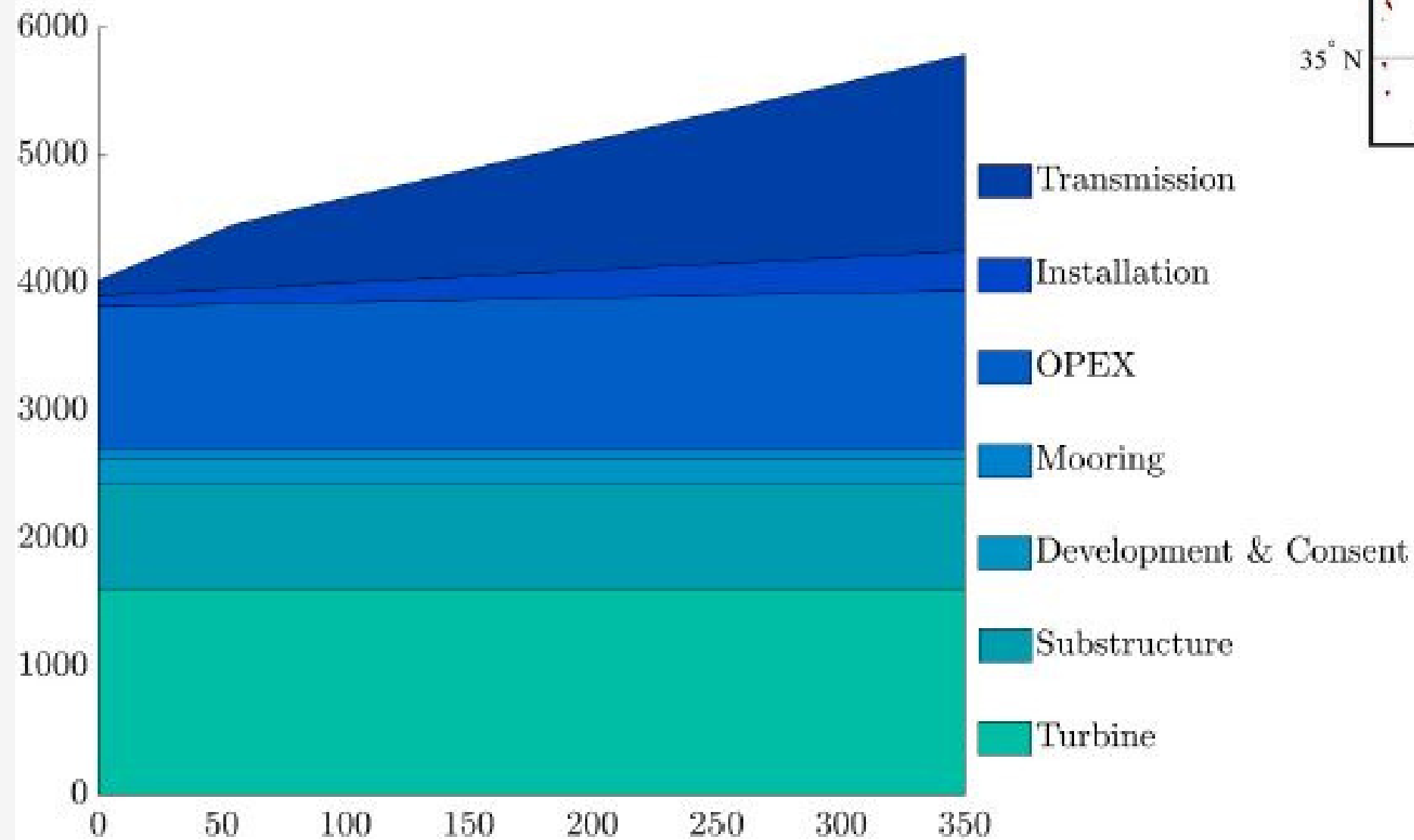
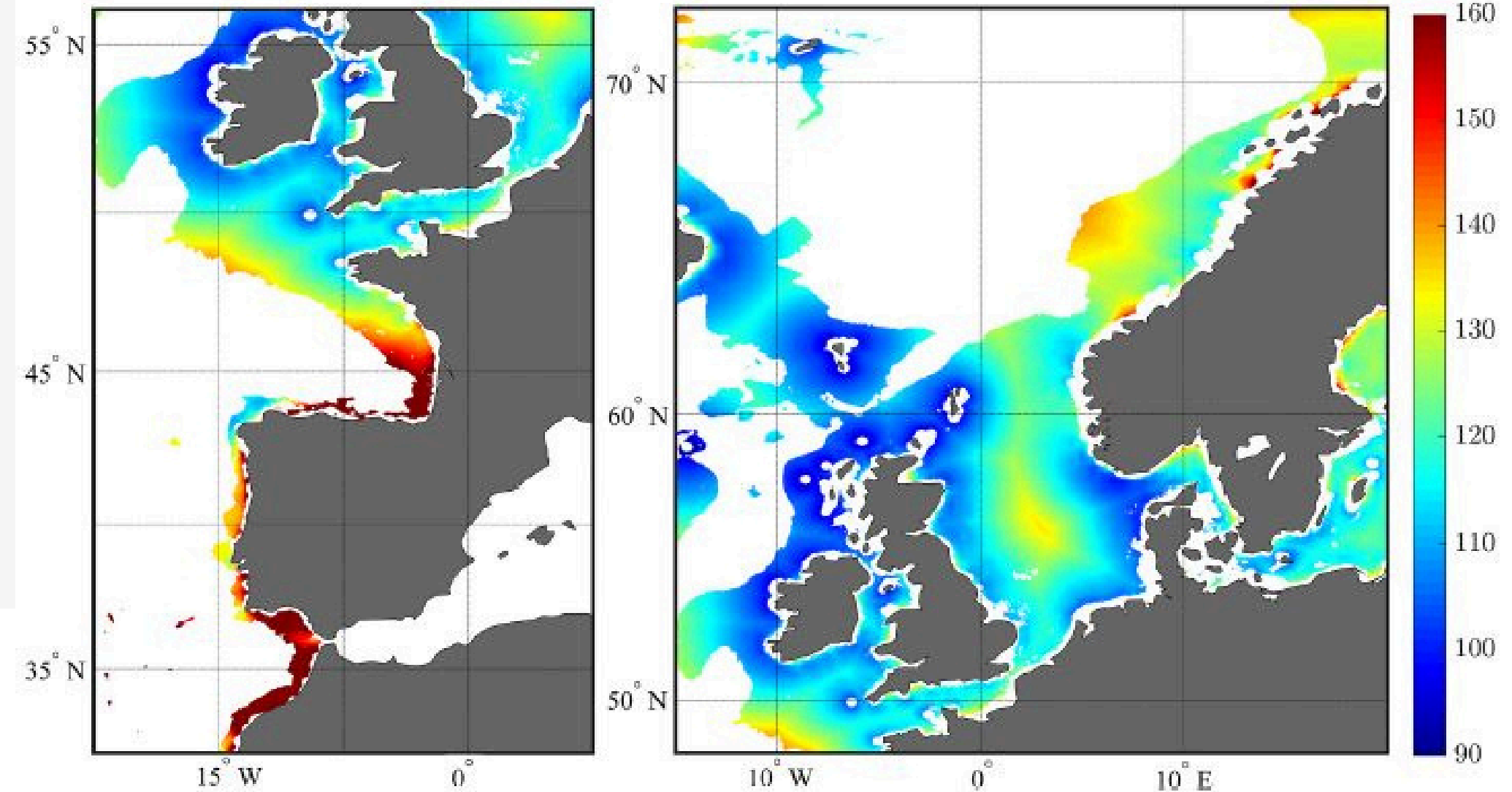
- Semplicità costitutiva
- Semplicità di installazione
- Elevatissima sensibilità al moto ondoso

# ANALISI DEI COSTI DELL'EOLICO GALLEGGIANTE

Martinez, A., & Iglesias, G. (2022). Mapping of the levelised cost of energy for floating offshore wind in the European Atlantic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111889>

Analisi spaziale dei costi di un impianto con 100 aerogeneratori da 10 MW ciascuno con fondazione Windfloat

Piccolo campione statistico per analisi LCOE



## RISULTATI:

- Costo delle fondazioni non dipende dalla profondità e vale circa 1/3 dei costi fissi
- LCOE fortemente correlato alla qualità della risorsa eolica
- LCOE basso (90-110€/MWh) in Mare del Nord e Spagna
- Riduzione de costi necessaria nel resto delle zone



# CONCLUSIONE

## OFFSHORE FISSO

- Tecnologia abbastanza matura
- Previsto calo significativo dell'LCOE fino a 30€/MWh
- Fondazioni con ruolo fondamentale per sostenere turbine più grandi in futuro
- Supply chain sottodimensionata rispetto alle prospettive di crescita

## OFFSHORE GALLEGGIANTE

- Tecnologia non ancora matura
- Diffusione commerciale prevista a fine decennio
- Fondazioni importanti per costo e prestazioni
- Fondazioni più promettenti: Spar (Hywind Spar) e Semisubmersibile (Windfloat)
- Tecnologia potenzialmente interessante per i mari italiani

