



# REGIONE CALABRIA

COMUNE DI TROPEA

PROVINCIA DI VIBO VALENTIA



P.O.R. Calabria FERS - FSE 2014/2020. Asse prioritario 7 - Obiettivo specifico 7.2 - Azione 7.2.2.

Potenziamento, riqualificazione e messa in sicurezza del porto di Tropea

## PROGETTO DEFINITIVO

ELAB.

A.1.1

TITOLO

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

SCALA

Progettazione, Direzione dei lavori e geologia

Il Responsabile Unico del Procedimento

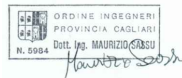
R.T.P. **TEC MED S.r.l.**



Arch. Gabriele CRISAFIO

Tec Med s.r.l.

Ing. Stefano Ponti  
Ing. Giovanni Oggiano  
Ing. Maurizio Sassu



E3 società cooperativa

Ing. Giuseppe Maradei  
dott.ssa Paola Angela Basta



Consultec società cooperativa

Ing. Omero Bassano  
Ing. Marco Consella



Ing. Rosario Bruzzaniti



Ing. Francesco Bagnato

Arch. Maria Carmela Giuditta



Responsabile della sicurezza: Ing. Rosario Bruzzaniti

## INDICE

1	Descrizione del paraggio.....	2
2	Descrizione delle forzanti meteomarine del paraggio .....	4
2.1	Analisi dei dati ondametrici .....	8
2.2	Calcolo dell'onda morfologica.....	12
2.3	Il calcolo della potenza long-shore delle onde .....	12
3	Lo studio degli eventi estremi del paraggio .....	13
4	La propagazione delle onde da largo a sottocosta .....	25
4.1	La propagazione del clima ondoso medio annuo .....	25
4.1.1	Griglie di calcolo.....	26
4.1.2	Risultati.....	27
4.2	La propagazione degli eventi estremi.....	32
4.3	Utilizzo dei risultati .....	42



## 1 Descrizione del paraggio

L'area oggetto d'intervento si affaccia sul Mar Tirreno ed è situata nella parte centro-meridionale della Regione Calabria (Figura 1), nella parte Nord del territorio comunale di Tropea, ai confini con il comune di Parghelia (Figura 2). Il settore di traversa è compreso fra  $249^{\circ}\text{N}$  e  $56^{\circ}\text{N}$ , con normale al litorale pari a  $336^{\circ}\text{N}$  (Figura 3).



Figura 1: Ubicazione territoriale





Figura 2: Ubicazione di dettaglio dell'area di studio - cartografia base Google Earth

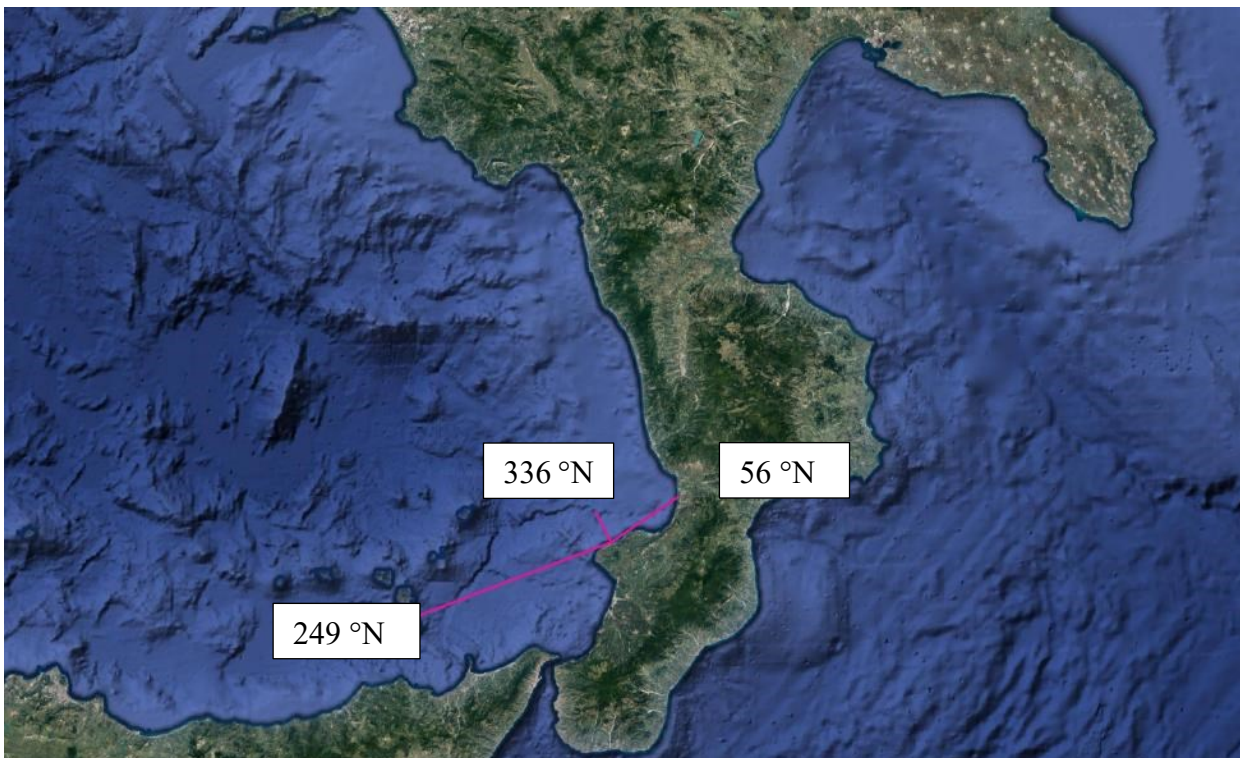


Figura 3: Settore di traversia



## 2 Descrizione delle forzanti meteomarine del paraggio

Per quanto concerne lo studio delle forzanti meteomarine, non essendo disponibili boe ondometriche o altri punti di misura in un intorno significativo (i dati di boe esistenti sono riferiti a Cetraro e coprono un arco temporale compreso fra il 1999 e il 2008), si è fatto riferimento ai dati di moto ondoso ricavati dal progetto europeo “Copernicus”, pubblicati sul sito internet <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>. Si tratta di una fonte di dati attendibile e pienamente riconosciuta dalla Comunità Scientifica. Il portale è certificato dall’Unione Europea per quanto concerne la validità dei dati ambientali, ed è frutto della collaborazione dei principali istituti di ricerca dei paesi della Comunità Europea.

Il portale in parola condivide i dati del database ERA5, popolato da dati frutto di rianalisi di quinta generazione per il clima negli ultimi 4 -7 decenni effettuata dal European Center for Medium Weather Forecast (ECMWF), aggiornato “quasi” in tempo reale (in realtà qualche giorno di ritardo), il che consente un’osservazione dei fenomeni praticamente contestuale alle necessità di interpretazione.

I dati di moto ondoso e di vento sono disponibili dal 1979. La tecnica di rianalisi sui dati combina le osservazioni in campo complete a livello globale usando le leggi della fisica con un metodo raffinato di assimilazione dei dati (il metodo “4D-Var” nel caso di ERA5).

ERA5 fornisce stime orarie per un gran numero di quantità atmosferiche, di onde oceaniche e di superficie terrestre. La stima dell’incertezza del dato viene campionata da un “ensemble” di 10 parametri di rilevazione a intervalli di tre ore. Media e diffusione dell’“ensemble” sono state pre-calcolate per comodità. Tali stime di incertezza sono strettamente correlate al contenuto informativo del sistema di osservazione disponibile che si è evoluto notevolmente nel tempo ed è in grado di indicare anche aree sensibili dipendenti dal flusso di energia dell’evento atmosferico ed oceanico osservato.

I dati meteorologici dai quali sono ricavati i dati d’onda hanno una distribuzione spaziale a maglia quadrata con distanza pari a  $0.25^\circ$  di Latitudine e Longitudine (Figura 4). Attraverso le operazioni di modellazione matematica, poi, è possibile ricavare dati uniformi nello spazio su griglie più raffinate.

Entrando nel dettaglio dell’area oggetto di interesse, è stato possibile ricavare i dati di onde al largo e di vento, per il paraggio costiero di Tropea.

Nella successiva Figura 5 è riportata la situazione del vento alle ore 20:00 del 05/06/2020, visualizzata attraverso l’applicativo Crayfish del software QGIS.



Figura 4: Ubicazione dei nodi di rianalisi dei dati metereologici.

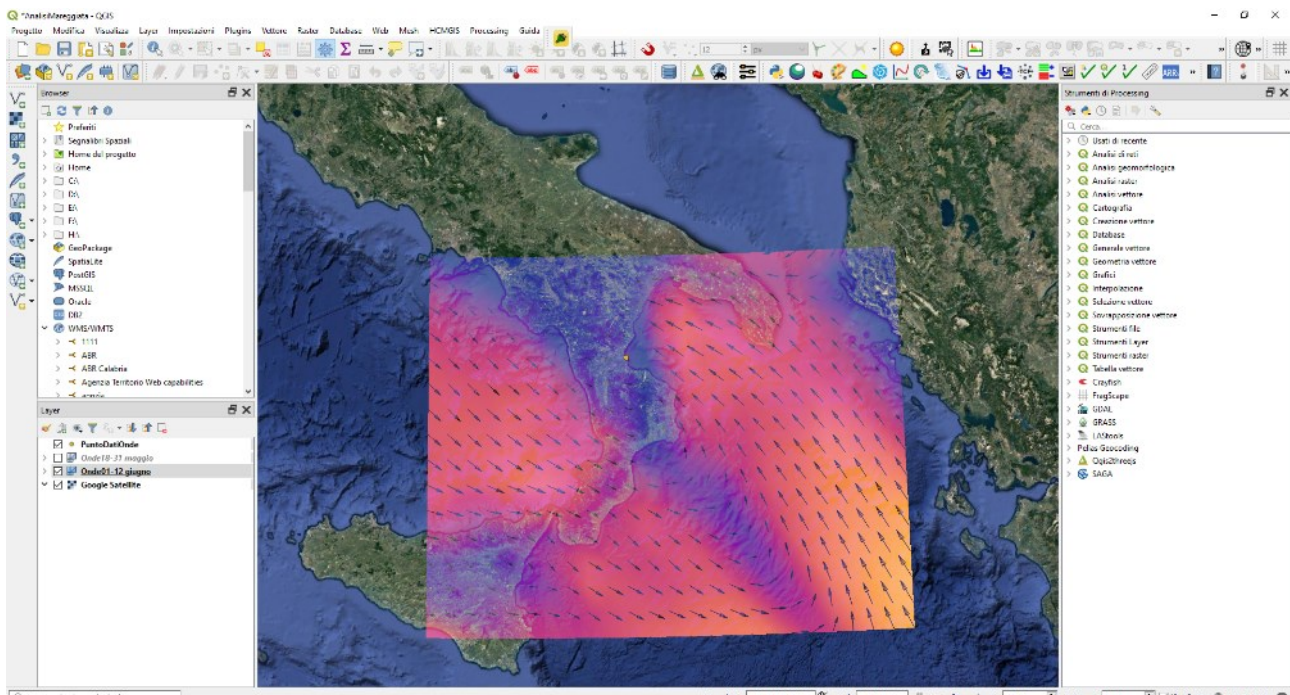


Figura 5: Esempio di visualizzazione locale degli eventi - situazione alle ore 20:00 del 05/06/2020.

Questi dati, direttamente scaricabili dal portale (Figura 6), in formato GRIB o NetCDF, necessitano di un software di decrittazione specifico.

Una volta caricati su QGIS, attraverso l'applicativo Crayfish è possibile estrapolare i dati di interesse in formato “.csv” (Figura 7), leggibile da un qualunque foglio elettronico, nelle coordinate prescelte.



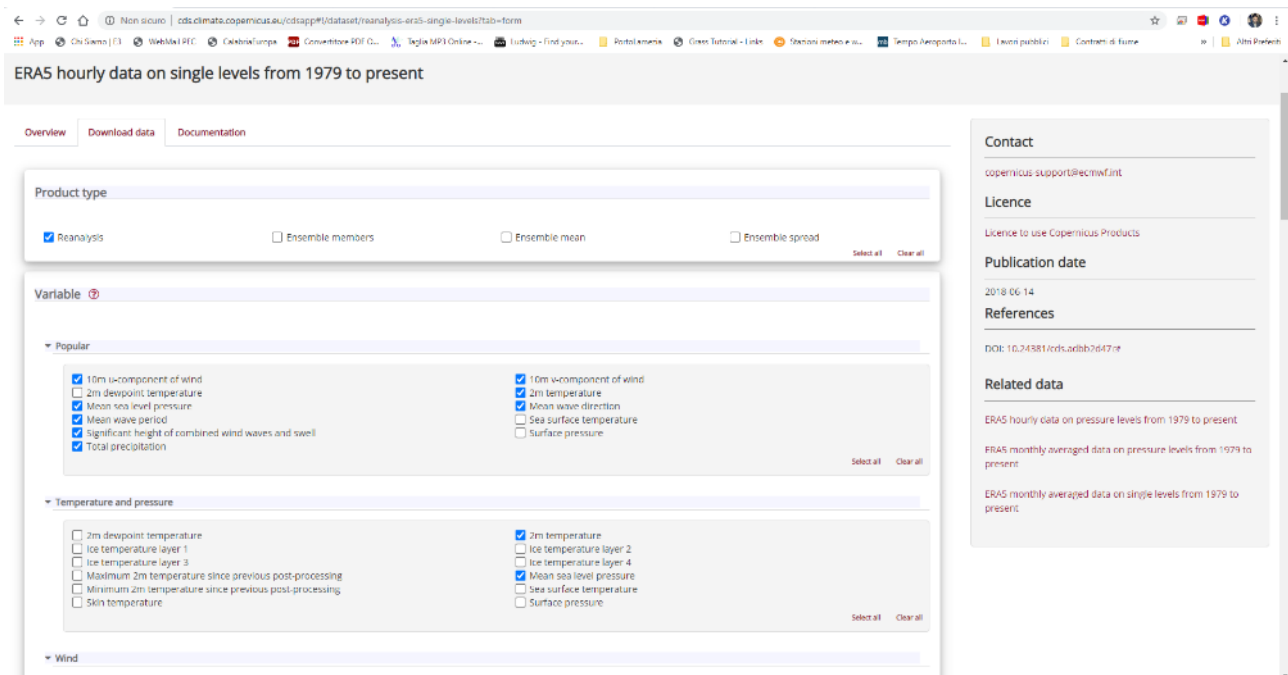


Figura 6: Schermata per il download dei dati.

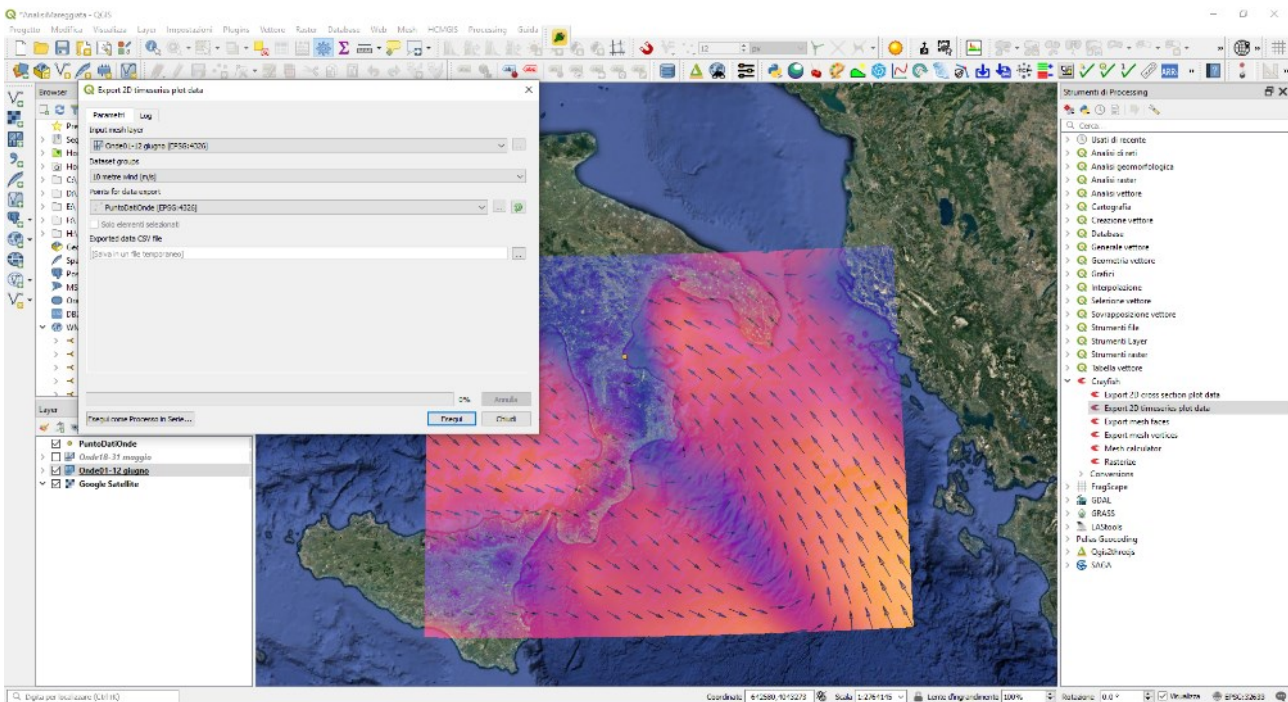


Figura 7: Esempio di download dei dati in formato “.csv”.

Sono stati acquisiti, dunque, i seguenti dati: altezza, periodo medio, periodo di picco e direzione dell'onda significativa nel periodo compreso fra il 01/01/1979 e il 31/12/2019.

Il paraggio è esposto principalmente ai mari provenienti dal 3° e dal 4° quadrante e, in parte, anche ai mari provenienti dal 1° quadrante. Al fine di scegliere e classificare in modo opportuno le onde acquisite dal portale del progetto “Copernicus” con l’obiettivo di ricostruire correttamente il clima meteomarinò a largo e, successivamente, il clima meteomarinò sottocosta, sono stati determinati per il paraggio oggetto di interesse il fetch geografico e il fetch efficace.

Il fetch geografico (Figura 8) è limitato dalla penisola italiana, dalla Sicilia e dalla Sardegna e si spinge fino ad un massimo di 600 km. Il fetch efficace (Figura 9) è stato determinato sulla base della formula di Saville:

$$F_{\text{eff}} = (\sum F_i \cos^2 \alpha_i) / \sum \cos^2 \alpha_i$$

dove

- $F_i$  è il fetch geografico della  $i$ -esima direzione (in Km),
- $\alpha_i$  è l'angolo che la direzione  $i$ -esima forma con quella in cui spira il vento.



Figura 8: Fetch geografico del paraggio di Tropea

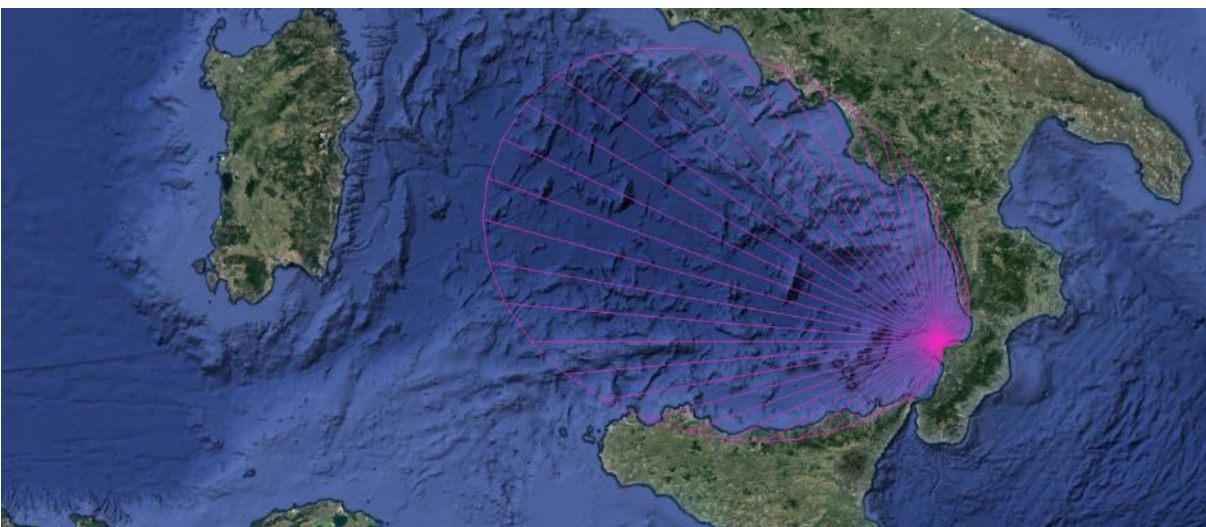


Figura 9: Fetch efficace del paraggio di Tropea



## 2.1 Analisi dei dati ondametrici

L'elaborazione dei dati del sito oggetto di interesse, limitato al settore di traversia indagato, ha visto l'analisi complessiva di 267.969 onde e 57.997 calme (21.64% dei dati analizzati).

Le onde sono state classificate in funzione dell'altezza (con classi d'altezza di 50 cm) e direzione (intervallo di 30 gradi) e sono riportate in Tabella 1 ed esplicitate nei grafici in Figura 10 e Figura 11, nei quali sono riportate il numero e le percentuali di apparizione delle onde, confrontate con le energie associate alle onde stesse. Non è detto, infatti, che la direzione di provenienza del maggior numero di onde coincida con la direzione di provenienza della maggiore energia associata al moto ondoso in quanto l'energia dipende certamente del numero di onde che appaiono ma anche dalle caratteristiche, quali altezza e periodo. A tal riguardo l'energia del moto ondoso (W) si calcola secondo la seguente relazione:

$$W = \frac{\rho * g^2}{64 * \pi} H_S^2 * T_p (W).$$

Tabella 1: Tabella di apparizione delle onde per il paraggio di Tropea.

Dir		345-15	15-45	225-255	255-285	285-315	315-345	TOTALE	
Dir media		0	30	240	270	300	330		
H	H media								
0.25-0.75	0,5	1254	1179	3808	40387	63156	12286	122070	58,16%
0.75-1.25	1	636	175	1583	21978	19189	4957	48518	23,12%
1.25-1.75	1,5	255	22	620	11252	6155	2092	20396	9,72%
1.75-2.25	2	59	0	216	5848	2543	951	9617	4,58%
2.25-2.75	2,5	0	0	82	3076	1369	385	4912	2,34%
2.75-3.25	3	3	0	19	1516	739	149	2426	1,16%
3.25-3.75	3,5	0	0	4	710	376	54	1144	0,55%
3.75-4.25	4	0	0	2	256	168	8	434	0,21%
4.25-4.75	4,5	0	0	1	92	105	2	200	0,10%
4.75-5.25	5	0	0	1	47	61	0	109	0,05%
5.25-5.75	5,5	0	0	0	24	12	0	36	0,02%
5.75-6.25	6	0	0	0	14	4	0	18	0,01%
6.25-6.75	6,5	0	0	0	3	1	0	4	0,00%
6.75-7.25	7	0	0	0	2	1	0	3	0,00%
7.25-7.75	7,5	0	0	0	0	5	0	5	0,00%
7.75-8.25	8	0	0	0	0	1	0	1	0,00%
8.25-8.75	8,5	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
8.75-9.25	9	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
9.25-9.75	9,5	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
TOTALE		2207	1376	6336	85205	93885	20884	209893	
% TOTALE		1,05%	0,66%	3,02%	40,59%	44,73%	9,95%	100,00%	

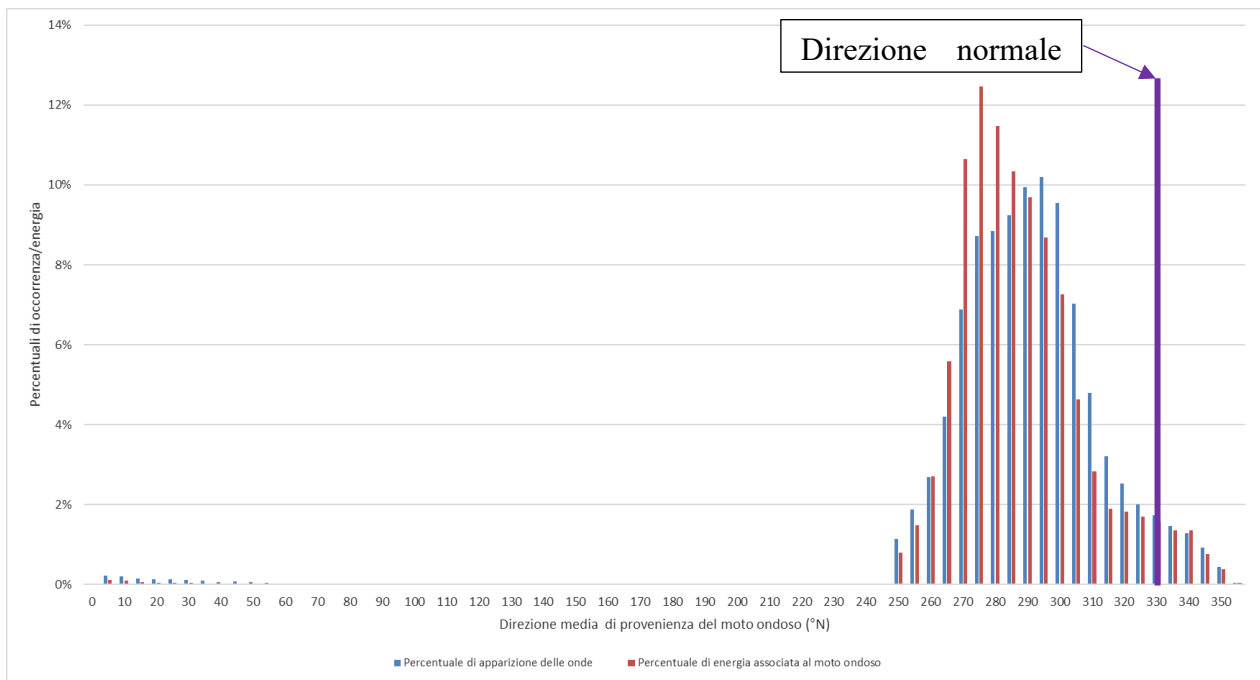


Figura 10: Grafico di apparizione delle onde per il sito di Tropea.

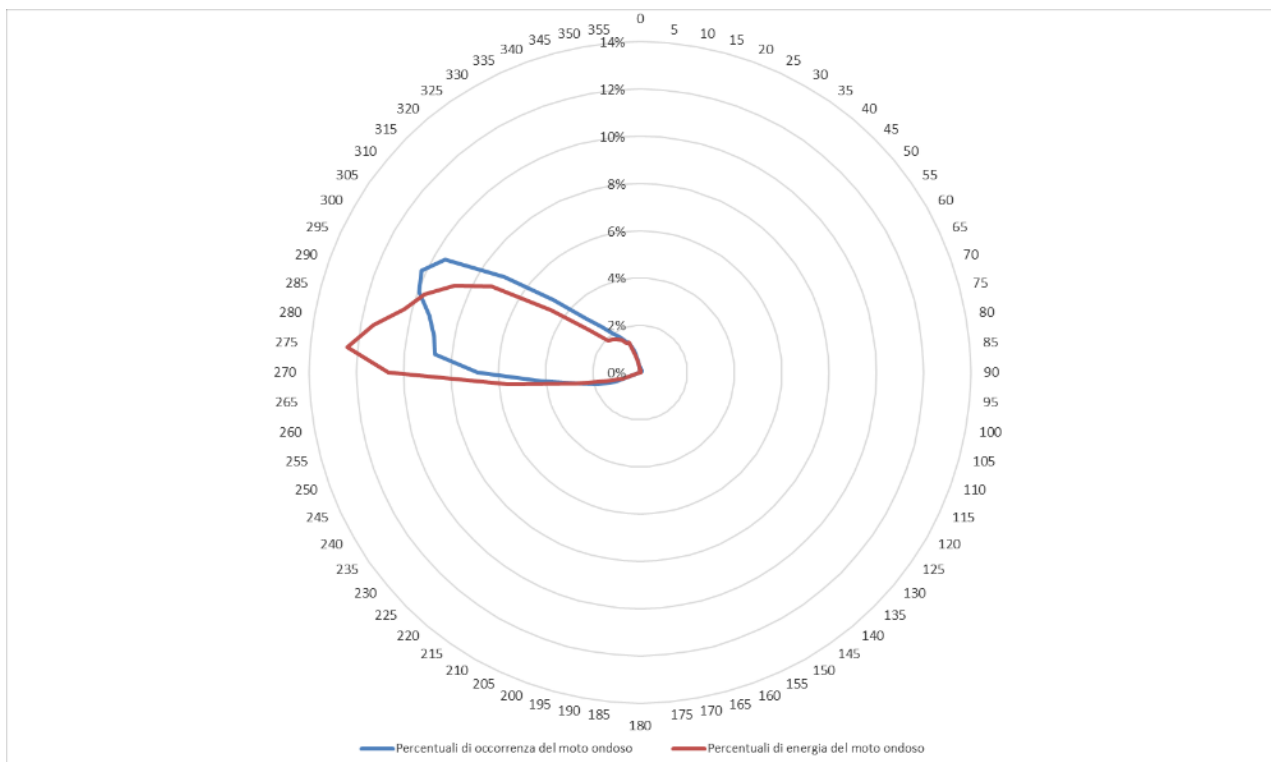


Figura 11: Grafico dell'energia del moto ondoso rispetto alla provenienza delle onde.



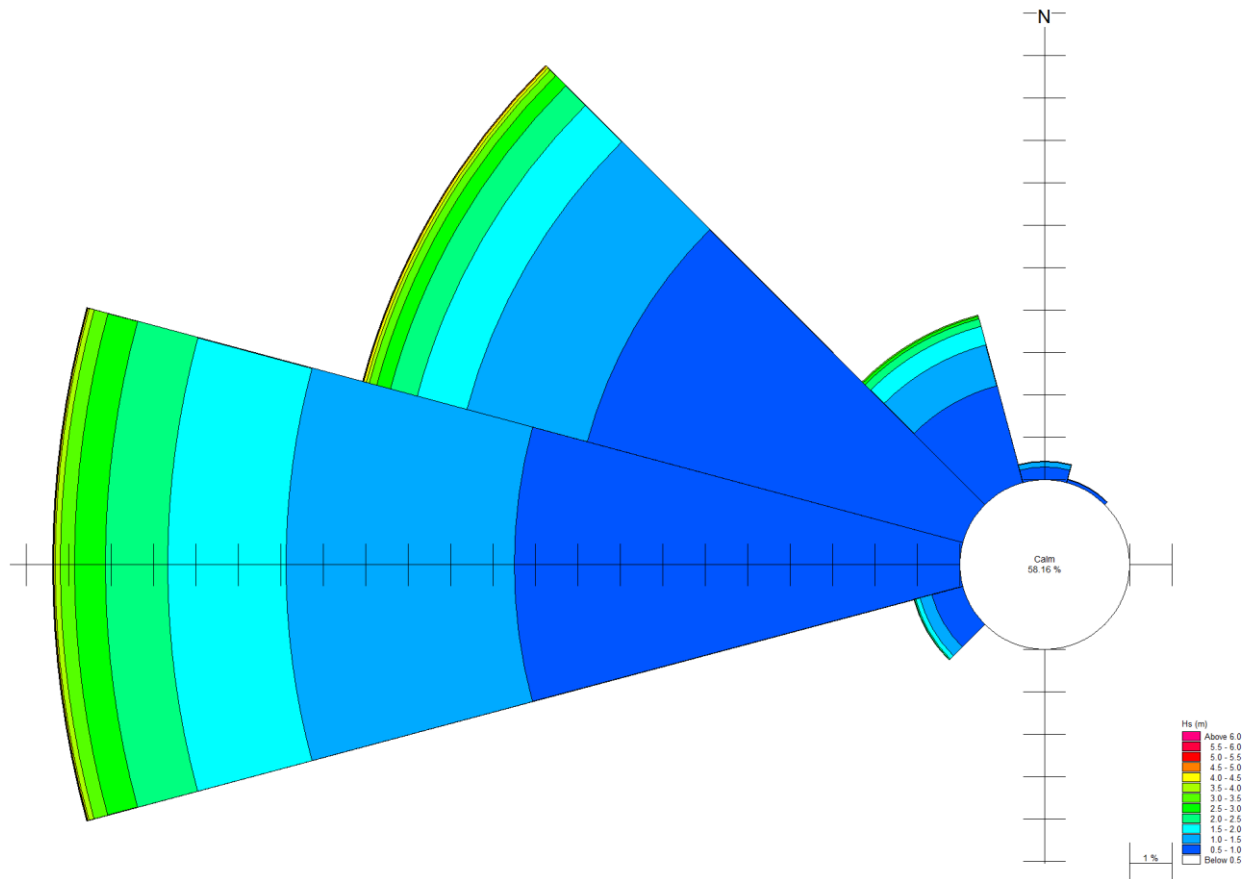


Figura 12: Rosa del clima al largo

Dalla Tabella 1 e dalla rosa delle onde si evince che:

- il settore regnante, ossia caratterizzato da massime frequenze di accadimento, il settore dominante, ossia caratterizzato da massime altezze d'onda e il settore prevalente, ossia caratterizzato da massima frequenza e massime altezze d'onda, è sempre quello compreso tra 285 e 315°N, corrispondente al settore mediano del IV quadrante, nello specifico alla direzione Nord-Ovest,
- complessivamente da questo settore e da quello adiacente (da Ovest) proviene più dell'85% delle ondatazioni, pari a circa 310 giorni all'anno, di cui circa lo 0,38 % hanno altezze superiori a 4 m;
- le onde che provengono dalle direzioni più settentrionali sono circa l'11% residuo degli eventi complessivi.

L'analisi dei dati ha consentito anche di stabilire la correlazione altezza-periodo di picco dell'onda e periodo medio-periodo di picco, rappresentanti nelle Figura 13 e Figura 14 e i cui valori sono:

$$T_p = 6.37H_s^{0.32} \quad e \quad T_m = 0.79T_p^{0.32}$$

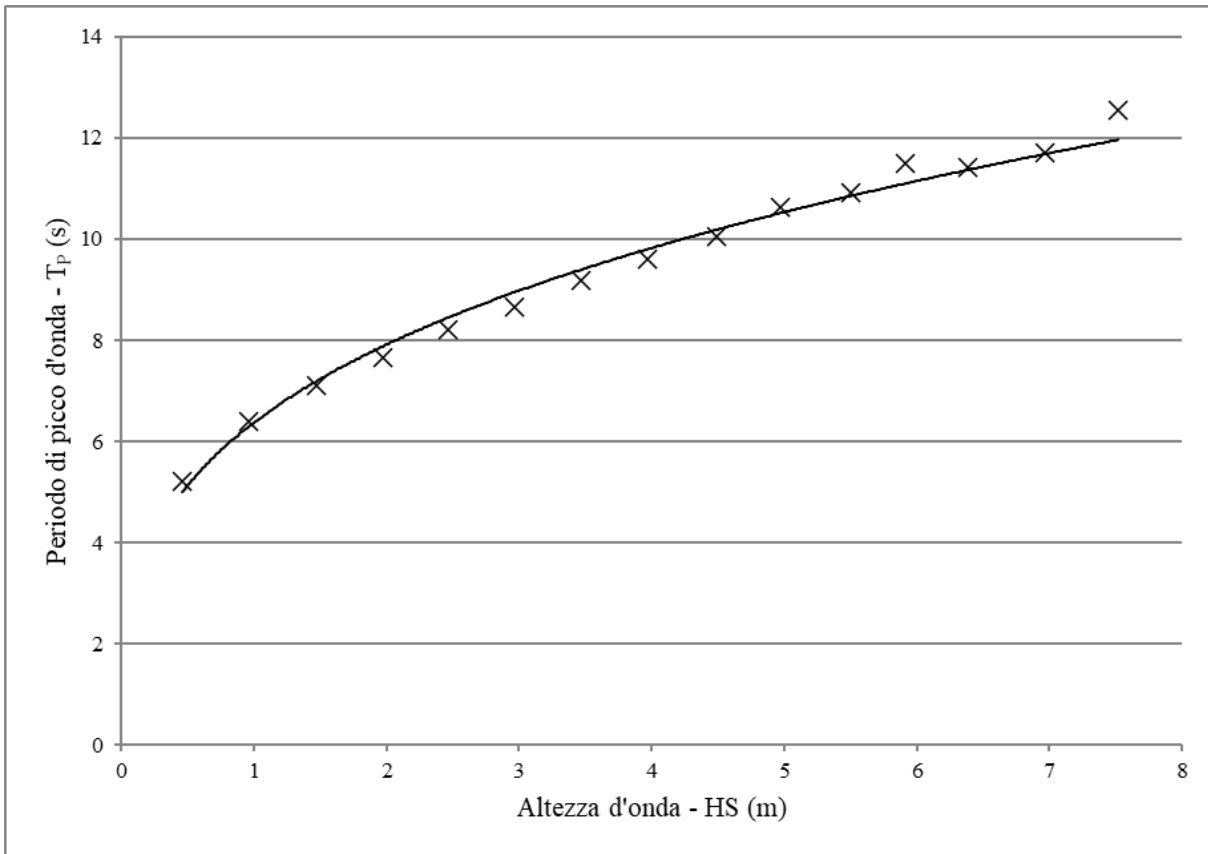


Figura 13: Andamento del periodo di picco in funzione dell'altezza d'onda

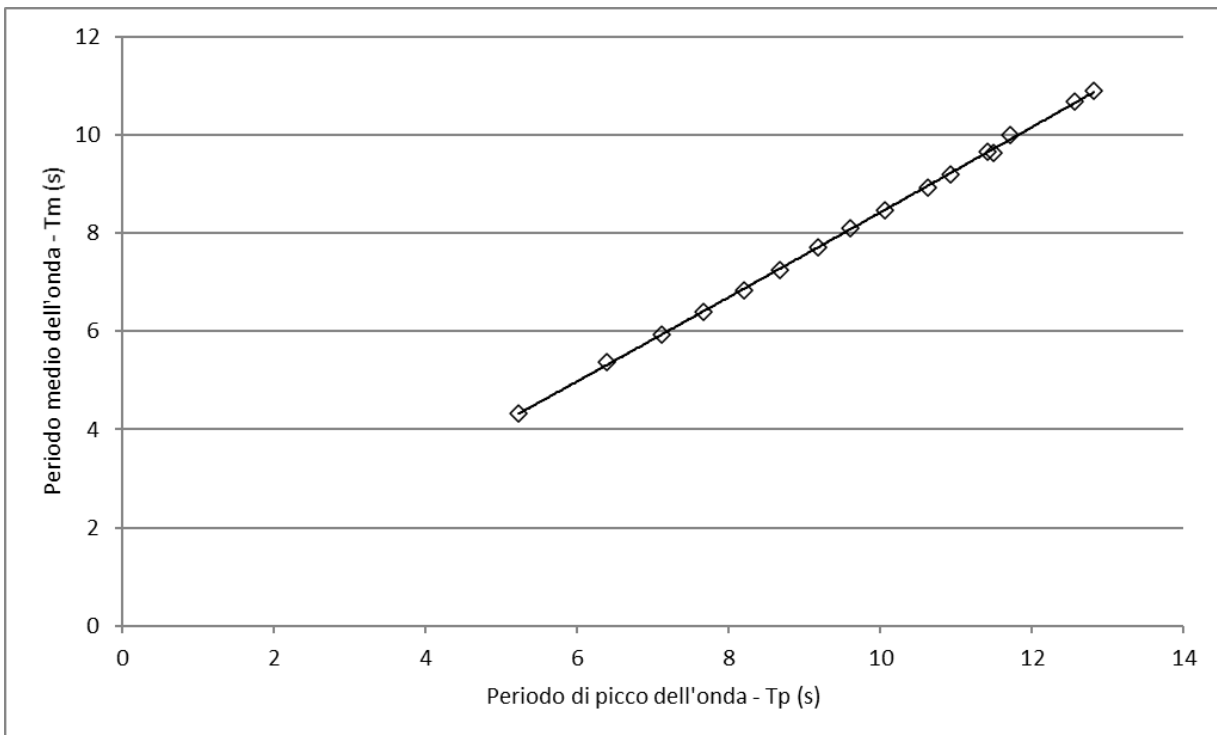


Figura 14: Andamento del periodo medio rispetto al periodo di picco delle onde

## 2.2 Calcolo dell'onda morfologica

Dall'elaborazione dei dati di onda si può calcolare il valore dell'onda morfologica ovvero l'onda che riassume le caratteristiche energetiche equivalenti a quelle indotte, in un anno statistico medio, da tutte le onde provenienti da un settore di traversia. Il calcolo è effettuato su tutte le onde del settore di traversia, l'altezza  $H_e$  (m) e il periodo  $T_e$  (s) sono così determinati:

$$H_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N H_{Si}^2 * T_{pi} * t_i}{\sum_{i=1}^N T_{pi} * t_i}} \text{ (m)}$$

$$T_e = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi} * t_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \text{ (s)}$$

La direzione di provenienza dell'onda morfologica  $\theta_e$  ( $^{\circ}$ N) è calcolata in riferimento al flusso di energia associato agli eventi di mareggiata, attraverso la seguente relazione:

$$\theta_e = \arctan \frac{\sum_{i=1}^N H_{Si}^2 * T_{pi} * t_i * \sin(\vartheta_i)}{\sum_{i=1}^N H_{Si}^2 * T_{pi} * t_i * \cos(\vartheta_i)} \text{ (}^{\circ}\text{N)}$$

I valori delle grandezze così calcolate sono:  $H_e=1.11$  m,  $T_e=5.38$  e  $\theta_e = 286.77$   $^{\circ}$ N.

## 2.3 Il calcolo della potenza long-shore delle onde

Un altro importante parametro ricavabile dall'analisi delle onde è la potenza delle onde che ha la componente parallela al litorale ( $P_{LS}$ ). Questo parametro consente di capire quanta dell'energia delle onde induce la formazione di correnti costiere.

Date le caratteristiche a largo dell'onda (altezza, periodo e direzione) e la direzione normale al litorale, per ciascuna onda, la componente parallela alla costa (long shore) della potenza si determina con la seguente relazione:

$$P_{LS} = \frac{\rho * g^2}{16} H_S^2 * C_g * \sin(2\alpha) \text{ (W)}.$$

Dove  $C_g$  (m/s) è la celerità del gruppo d'onde associate all'onda di altezza  $H_s$  (m).

Per convenzione si è scelto di considerare positivi i valori provenienti da destra e negativi i valori provenienti da sinistra. Sommando tutti i valori (positivi e negativi) si ottiene la potenza long shore netta per l'anno medio. In definitiva  $PLS > 0 = 28418,93$  kW/m,  $PLS < 0 = 4402122,71$  kW/m che determina un valore del PLS netto = 4.373.703,78 kW/m, pari a circa il 98,72 % della potenza complessiva, con verso da sinistra verso destra, ovvero da Sud verso Nord.



### 3 Lo studio degli eventi estremi del paraggio

L'analisi delle onde che si abbattono sul litorale oggetto di interesse è importante per determinare le forzanti meteomarine che sollecitano le strutture d'interesse e valutare, nello specifico, il valore del sovrizzo delle onde sulle strutture e, quindi, gli effetti di tracimazione del molo.

La valutazione delle caratteristiche dell'onda (altezza, periodo e direzione), fondamentale nella progettazione di una qualunque opera marittima, si effettua attraverso un approccio statistico e l'analisi prende il nome di analisi delle onde estreme. Il problema è ricondotto alla determinazione dell'altezza d'onda  $H_s$  di assegnato tempo di ritorno  $T$ . Si definisce come tempo di ritorno (espresso in anni), di un'onda di assegnata altezza significativa, il numero di anni in cui tale altezza viene mediamente raggiunta o superata una sola volta. Attraverso le correlazioni tra altezza significativa e periodo medio o di picco, si attribuisce il valore del periodo all'onda con assegnato tempo di ritorno. L'approccio che si utilizza consiste nel ricostruire, mediante processi di *hindcasting* (cioè di confronto con dati storici), le tempeste più significative verificatesi in un qualunque punto di interesse.

In primo luogo, quindi, si è eseguita un'analisi numerica degli eventi registrati negli ultimi 40 anni, riscontrando quanto riportato in Tabella 1, in cui si è indicato con:

- 1)  $H_{smed}$  (m) il valor medio delle onde significative registrate nell'anno di riferimento;
- 2)  $H_{smax}$ (m) il massimo valore dell'altezza d'onda registrato nell'anno di riferimento;
- 3)  $H_{maxmed}$ (m): la media dei valori di altezza massima registrate nell'anno di riferimento;
- 4)  $H_{maxmax}$ (m): il massimo valore di altezza massima registrato nell'anno di riferimento;
- 5)  $E_{tot}$  (Wh/m): l'energia ondosa complessiva manifestatasi;
- 6)  $h_{s>3}$  (m): il numero di altezza d'onda significativa superiori a 3 m e inferiori a 4 m;
- 7)  $h_{s>4}$  (m): il numero di altezza d'onda significativa superiori a 4 m e inferiori a 5 m;
- 8)  $h_{s>5}$ (m): il numero di altezza d'onda significativa superiori a 5 m.

Una volta acquisite le informazioni numeriche si è passati all'elaborazioni con i metodi statistici, applicando le distribuzioni di Gumbel e Weibull, secondo l'analisi POT (Peaks Over Threshold, detto anche "della serie di durata parziale sopra soglia") proposta da Goda e ampiamente utilizzata negli studi sulla statistica degli eventi estremi.

Data, inoltre, la possibilità di ottenere un gran numero di dati ondosi (41) si è anche applicato ai massimi valori di altezza d'onda significativa registrati in ciascun anno la distribuzione di Gumbel, in modo da confrontare i risultati.

La metodologia POT è stata applicata, inoltre, ai tre settori angolari in cui si è suddiviso il paraggio, per valutare le massime altezze significative che si manifestano per ciascuna delle tre direzioni di interesse individuate.

Tabella 2: Analisi numerica degli eventi ondososi sul paraggio.

anno	Hsmed (m)	Hsmax (m)	Hmaxmed (m)	Hmaxmax (m)	Etot (Wh/m)	hs>3 (m)	hs>4 (m)	hs>5 (m)
1979	0,71	7,61	1,35	14,42	2,22E+04	82	32	7
1980	0,72	7,77	1,36	14,73	2,10E+04	71	13	8
1981	0,74	5,46	1,41	10,43	2,53E+04	130	31	6
1982	0,59	3,59	1,11	7,00	1,19E+04	31	0	0
1983	0,63	5,22	1,20	10,09	1,62E+04	79	9	3
1984	0,68	5,48	1,28	10,52	1,72E+04	76	27	7
1985	0,61	3,93	1,16	7,63	1,36E+04	44	0	0
1986	0,67	4,62	1,26	8,82	1,94E+04	111	19	0
1987	0,63	5,91	1,20	11,31	1,70E+04	78	29	15
1988	0,65	5,10	1,24	9,71	1,78E+04	61	23	8
1989	0,53	3,76	1,00	7,22	1,10E+04	56	0	0
1990	0,60	4,55	1,14	8,68	1,46E+04	63	18	0
1991	0,64	5,11	1,21	9,69	1,65E+04	91	20	5
1992	0,61	4,73	1,15	9,03	1,33E+04	37	7	0
1993	0,64	3,76	1,20	7,18	1,53E+04	71	0	0
1994	0,60	4,76	1,14	9,07	1,43E+04	67	6	0
1995	0,69	4,56	1,32	8,82	1,83E+04	59	7	0
1996	0,73	3,70	1,39	7,10	1,90E+04	66	0	0
1997	0,61	4,61	1,16	8,85	1,46E+04	59	10	0
1998	0,67	3,30	1,27	6,41	1,57E+04	21	0	0
1999	0,65	3,74	1,22	7,14	1,62E+04	39	0	0
2000	0,64	5,74	1,20	10,89	1,69E+04	77	35	11
2001	0,68	3,83	1,29	7,41	1,62E+04	29	0	0
2002	0,66	3,49	1,25	6,67	1,34E+04	15	0	0
2003	0,63	4,91	1,19	9,41	1,54E+04	55	14	0
2004	0,68	4,95	1,29	9,52	1,78E+04	73	9	0
2005	0,68	4,33	1,29	8,28	1,64E+04	30	8	0
2006	0,62	3,47	1,17	6,62	1,34E+04	13	0	0
2007	0,67	4,47	1,26	8,61	1,75E+04	55	14	0
2008	0,64	5,64	1,21	10,81	1,68E+04	77	28	15
2009	0,71	3,85	1,34	7,43	1,88E+04	71	0	0
2010	0,79	4,43	1,50	8,47	2,36E+04	109	13	0
2011	0,61	3,57	1,15	6,82	1,29E+04	9	0	0
2012	0,72	4,89	1,36	9,53	2,26E+04	105	28	0
2013	0,70	4,03	1,33	7,78	1,85E+04	46	1	0
2014	0,64	3,51	1,22	6,72	1,44E+04	24	0	0
2015	0,64	3,39	1,21	6,57	1,55E+04	30	0	0
2016	0,69	3,70	1,30	7,14	1,73E+04	35	0	0
2017	0,64	4,00	1,21	7,60	1,61E+04	67	0	0
2018	0,72	4,32	1,36	8,36	2,00E+04	96	7	0
2019	0,68	5,19	1,29	10,00	1,73E+04	47	20	4

La distribuzione di Gumbel ai massimi valori di altezza significativa annui, si effettua nel modo successivamente descritto.

L'insieme dei valori  $x$  assunti da una generica grandezza può essere considerato una variabile casuale  $X$  la cui popolazione è costituita dall'insieme di tutti i valori che la  $x$  ha assunto per il passato o potrà



assumere in futuro. La serie statistica costituita dagli  $n$  valori  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  assunti dalla  $x$  in un determinato punto del paraggio, può essere considerato come un campione di dimensione  $n$  tratto a caso dalla popolazione della  $X$ . L'obiettivo, quindi, è risalire dalla composizione nota del campione a quella incognita della popolazione, tenendo però bene in conto che, per difetto di campionatura, la composizione del primo può scostarsi, più o meno, da quella della seconda.

All'interno di una generica variabile casuale  $Z$ , definita variabile originaria, si considera un campione di dimensione  $k$  di osservazioni tratte a caso dalla popolazione della  $z$  e si assume come variabile il massimo valore  $x=z_k$  assunto da  $z$  fra le osservazioni del campione. Posto che dalla popolazione della  $z$  possono pensarsi tratti infiniti campioni di dimensione  $k$  e posto che  $z_k$  assume di volta in volta valori diversi, alla distribuzione della variabile originaria  $z$  si può associare quella del valore massimo in un campione di dimensione  $k$ . Ciò premesso, la funzione di ripartizione  $\Phi(x)$  del massimo valore  $x=z_k$ , raggiunto dalla variabile originaria  $z$  in un campione di dimensione  $k$ , misura la probabilità che  $x$  risulti inferiore o al più eguale a un assegnato valore.

Se fosse nota la funzione di ripartizione  $\Phi(z)$  della  $z$ ,  $\Phi(x)$ , in base al quinto assioma del calcolo delle probabilità, sarebbe definito a mezzo della relazione:

$$\Phi(x = z_k) = [\Phi(z)]^k$$

se le  $k$  osservazioni che costituiscono il campione sono indipendenti una dall'altra.

In effetti la  $\Phi(z)$  raramente è nota. Quando però si considerino campioni di grande dimensione, sicché i valori massimi  $z_k$  risultano spostati nel campo dei valori più grandi della  $x$ , ai fini applicativi è sufficiente conoscere l'andamento della  $\Phi(z)$  in prossimità dei valori massimi e dedurre da questo l'andamento assunto dalla  $\Phi(x)$  per diversi valori di  $k$ , in particolare esaminando se essa tende a una forma asintotica al crescere di  $k$  all'infinito. La  $\Phi(z)$  risulta generalmente di tipo esponenziale.

Sia  $\varepsilon$  il valore di  $z$  che ci si deve attendere che venga superato una volta su  $k$  (estremo atteso), per cui:

$$k[1 - \Phi(z = \varepsilon)] = 1$$

considerando il parametro  $\alpha = k\Phi(z = \varepsilon)$  che misura la rapidità con cui  $\varepsilon$  varia al variare di  $k$  (intensità di funzione) e sviluppando in serie di Taylor la funzione  $\Phi(z)$  in prossimità di  $\varepsilon$  si può dimostrare che per grandi valori di  $z$ , quale che sia  $\Phi(z)$ , risulta:

$$\Phi(z) = 1 - \frac{1}{k} e^{-\alpha(x-\varepsilon)}$$

$$\Phi(x) = \left[ 1 - \frac{1}{k} \cdot e^{-\alpha(x-\varepsilon)} \right]^k$$

che tende, per  $k$  tendente ad infinito, alla funzione asintotica:

$$\Phi(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\varepsilon)}}$$

che viene perciò definita legge asintotica del massimo valore, o legge doppio esponenziale o legge di Gumbel.

I parametri  $\varepsilon$  ed  $\alpha$  sono legati alla media  $\eta$  e allo scarto quadratico medio  $\sigma$  della  $x$  dalle relazioni:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma = \frac{\sigma}{1,28255}$$

$$\varepsilon = \eta - 0,450 \sigma$$

Si è applicato questo schema modellistico ai dati dei massimi di altezza d'onda individuati a largo del paraggio oggetto di interesse, trovando i risultati successivamente descritti.

I parametri di riferimento della distribuzione sono riportati in Tabella 3, l'espressione completa della funzione della distribuzione cumulativa (CDF, Cumulative Distribution Function) in Tabella 4, mentre i frattili della distribuzione probabilistica sono riportati in Tabella 5.

Tabella 3: parametri di riferimento della distribuzione.

Parametro	Durate
	24 ore
Dimensione campione	41
Valore medio	4.56
Dev. standard	1.02
Alfa	1.2596
Epsilon	4.102

Tabella 4: Espressione delle CDF della distribuzione.

Gumbel: Serie osservazioni 1	$F_x(x) = \exp \left[ -\exp \left( -1,260 (x - 4,102) \right) \right]$
---------------------------------	--



Tabella 5: Frattili della distribuzione probabilistica.

Tempi di ritorno	Durate
	24 ore
2 anni	4.39
5 anni	5.29
10 anni	5.89
20 anni	6.46
50 anni	7.20
100 anni	7.75

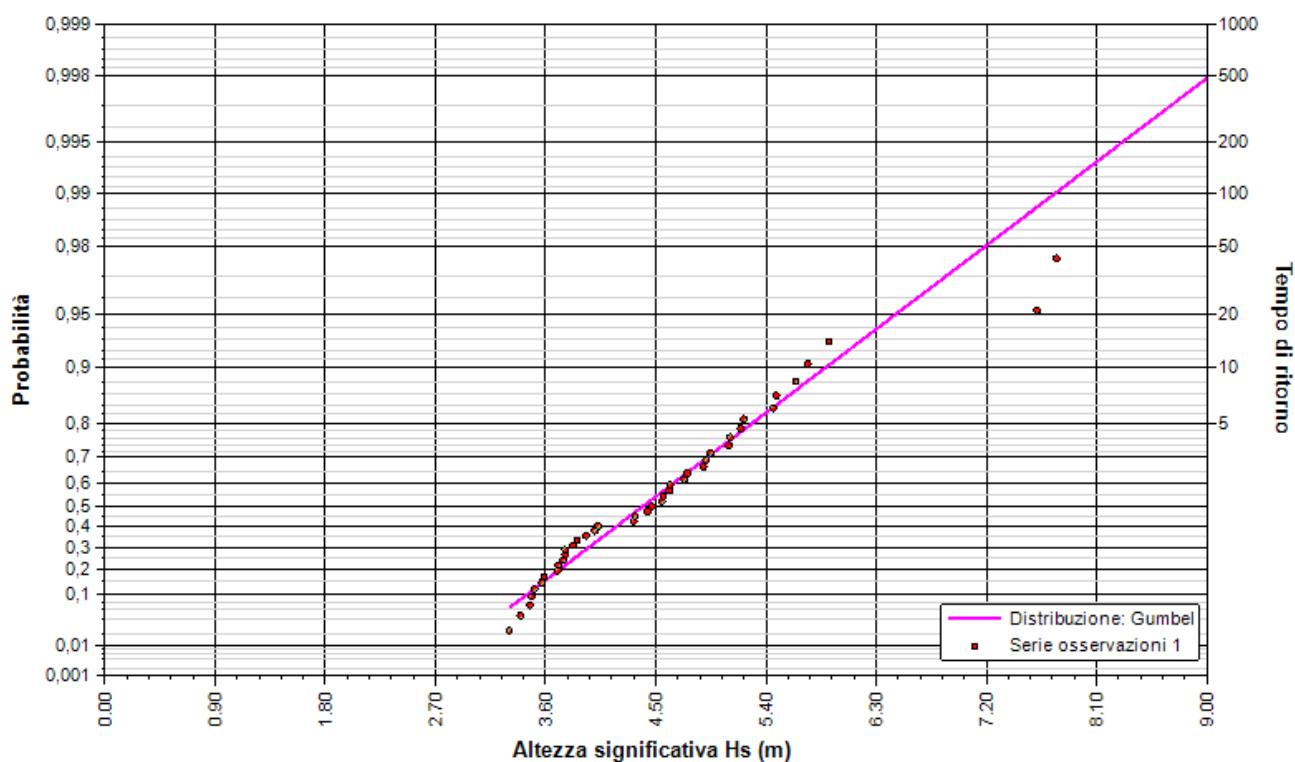


Figura 15: Elaborazione Gumbel delle massime altezze d'onda significativa del paraggio

Per quanto riguarda, invece, il metodo proposto da GODA, si tratta di una metodologia di estrazione delle mareggiate su tutto il campione di dati delle onde registrate che, quindi, può essere superiore al numero di anni considerati. Una volta estratti, dalla popolazione considerata, i dati di altezza d'onda, si applicano a questi le distribuzioni di Weibull e di Gumbel per riconoscere la distribuzione che meglio si adatta ai dati presenti.

Questo metodo, detto della serie di durata parziale sopra soglia o metodo POT (Peaks Over Threshold, come già anticipato), è applicabile direttamente ai dati di altezza significativa rilevati in situ. La metodologia POT è lo schema di analisi più efficiente ed accurato (Goda, 1988). Nonostante le misure sperimentali siano relative a serie temporali di limitate dimensioni e presentino incertezza molto più alta rispetto alle misure dirette si è verificato che le stime ottenute sulla base delle misure ondametrichhe sono da considerarsi sicuramente più affidabili delle altre (Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio, 2005).

La stima dell’altezza d’onda di progetto di un’opera marittima si basa sull’analisi probabilistica a lungo termine dei valori di altezza d’onda direttamente misurati. Assegnato un valore “x” d’altezza d’onda, la probabilità che questo sia superato in un anno è pari a:

$$1 - F(x) = \frac{1}{T_r}$$

Fissato un periodo di ritorno di n anni si ha che:

$$F(x) = \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n$$

Se indichiamo con L la vita presunta di un’opera (numero di anni in cui mantiene inalterate le proprie caratteristiche costruttive), la probabilità p, che x sia superata una sola volta in L anni, risulta:

$$p = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^L$$

Questa equazione ci permette di stimare l’altezza d’onda di progetto  $H_D$ , altezza che viene superata una volta in L anni con una probabilità p. Requisiti fondamentali, affinché il valore elaborato dall’analisi risulti affidabile, sono la disponibilità di un campione di dati riferito allo stesso paraggio costiero (omogeneo), la disponibilità di un campione di dati riferiti ad eventi diversi tra loro (indipendenti) e che gli stessi dati siano riferiti ad un arco temporale sufficientemente lungo (se K è il numero di anni di osservazioni,  $T_r = 3K$ ).

Il metodo POT modificato da Goda si applica estrapolando dal campione di dati forniti dalla boa i valori che superano un prefissato valore di partenza chiamato  $H_{0GODA}$  (per i mari italiani  $H_{0GODA}$  viene posto pari a 2 metri). Il campione di dati estrapolato viene successivamente sottoposto ad una ulteriore schermatura estrapolando i valori superiori ad un secondo valore soglia  $H_c$  (con  $H_c \geq H_{0GODA}$ ). Il valore di  $H_c$  deve essere opportunamente scelto affinché il campione di dati su cui si andrà a fare l’analisi probabilistica risulti compreso tra 30 e 50 valori. Le distribuzioni usate per l’analisi probabilistica sono la distribuzione di Gumbel e la distribuzione di Weibull che hanno le seguenti espressioni:

Gumbel: 
$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left[ -\left(\frac{x-B}{A}\right) \right] \right\}$$

Weibull: 
$$F(x) = 1 - \exp \left[ -\left(\frac{x-B}{A}\right)^k \right]$$

con A e B parametri rispettivamente di scala e di posizione e k parametro di forma.



In particolare il parametro  $k$  può assumere valori pari a 0.75, 1.0, 1.4, 2.02 per la distribuzione di Weibull. Introducendo il concetto di variabile ridotta

$$y_m = \frac{H_s - B}{A}$$

da cui:

$$H_s = Ay_m + B$$

e rappresentando i punti campionari attraverso la formula di *plotting position*

$$F_m = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta}$$

con  $m$ , indice di posizione dell' $i$ -esimo dato ordinato in modo decrescente,  $N_T$ , numero di dati aventi  $H_s \geq H_{0GODA}$ ,  $a$  e  $b$  coefficienti caratteristici per il tipo di distribuzione utilizzata, noto  $F_m$ , attraverso la relazione inversa si stima  $y_m$ :

Gumbel  $y_m = -\ln(-\ln F_m)$

Weibull  $y_m = [-\ln(1 - F_m)]^{\frac{1}{k}}$

Noto  $y_m$  si perviene alla stima dei parametri  $A$  e  $B$ , dunque della distribuzione che meglio si adatta a rappresentare il campione di dati, attraverso il Metodo dei Minimi Quadrati tra i valori di altezza d'onda misurati e quelli forniti dalla variabile ridotta, valutandone il coefficiente di correlazione. Fatto ciò si stima il valore d'altezza d'onda per fissati valori del tempo di ritorno attraverso la relazione lineare:

$$H_{T_r} = Ay_{T_r} + B$$

Con  $A$  e  $B$  parametri della distribuzione rappresentativa del campione e  $y_{T_r}$  stimato con le seguenti relazioni in funzione della distribuzione utilizzata:

Gumbel:  $y_{T_r} = -\ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right) \right]$

Weibull:  $y_{T_r} = [-\ln(\lambda T_r)]^{\frac{1}{k}}$

$y_{T_r}$  è il valore della variabile ridotta corrispondente a quel fissato tempo di ritorno  $T_r$  e  $\lambda$  rappresenta il numero medio di mareggiate in un anno, che si ottiene come rapporto tra  $N_T$  e il numero di anni di osservazioni disponibili.

Per quanto concerne l'analisi effettuata su tutti i dati del paraggio sono stati utilizzati i seguenti valori:

- per l'altezza della soglia per la determinazione della mareggiata sono stati assunti due valori pari rispettivamente a  $H_s=3$  m e a  $H_s=3.5$  m;
- il numero di onde superiori a 3 m è 242;
- il numero di onde superiori a 3.5 m è 122.

La distribuzione che meglio approssima i dati è la distribuzione di Weibull con  $k=1$  (Tabella 6).

Nella successiva Tabella 7 sono riportati i valori di Hs per i vari tempi di ritorno considerati, esplicitati nel grafico in Figura 16.

*Tabella 6: Analisi delle distribuzioni statistiche per tutti i dati del paraggio.*

k	N	R <sup>2</sup>	n	A
1	1	0,989	0,71277	2,97854
0	2	0,986	0,65935	3,168843
0,75	3	0,980	0,393649	3,335793
1,4	4	0,979	1,246024	2,423813
2	5	0,962	2,053856	1,607799

*Tabella 7: Distribuzione degli eventi ondosi per ciascun tempo di ritorno e tutto il settore di traversia.*

TR	H
1	4,26
5	5,41
10	5,90
25	6,56
50	7,05
100	7,54

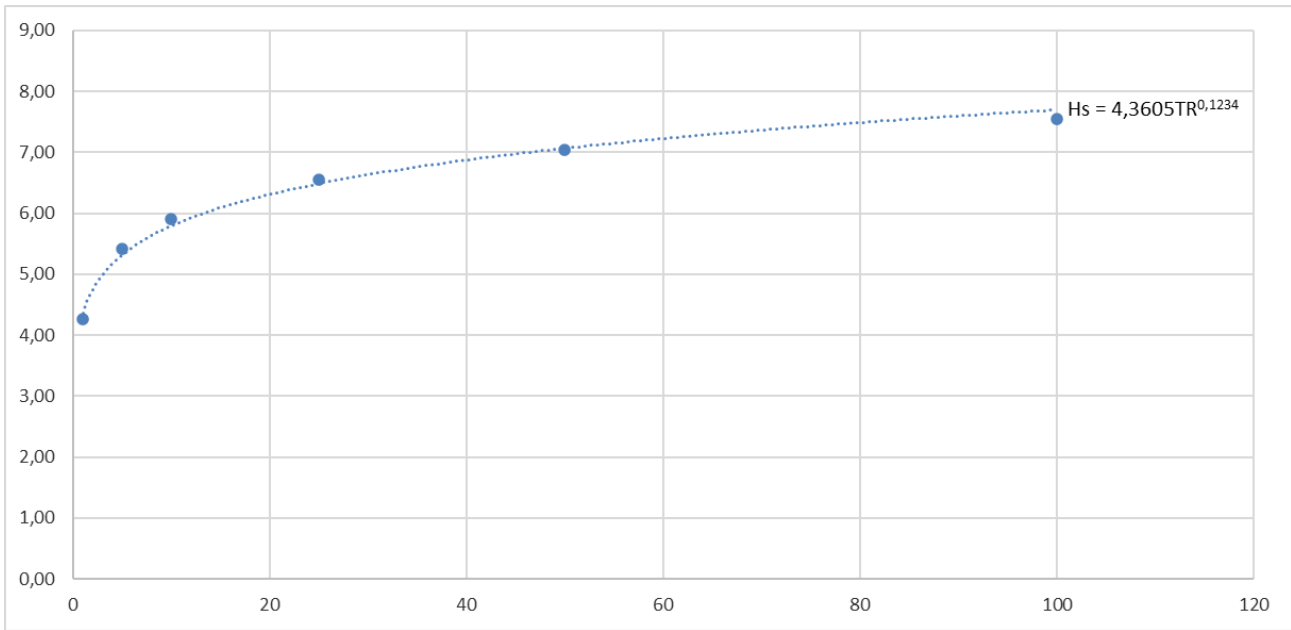


Figura 16: Andamento del valore di altezza d'onda rispetto al tempo di ritorno considerato per tutto il settore di traversia.

Come è possibile osservare, i valori ritrovati rispetto alla distribuzione di Gumbel eseguita sui massimi annui è assolutamente comparabile (le differenze sono statisticamente poco significative) e, quindi, saranno prese come base dei dati per le successive elaborazioni.

Sono state effettuate con lo stesso procedimento le elaborazioni dei dati delle onde provenienti dai sottosettori di traversia considerati.

Per quanto riguarda il settore 250-280 °N, si è riscontrato quanto segue:

- altezza delle soglie per la determinazione della mareggiata:  $H_s=3$  m,  $H_s=3.5$  m;
- numero di onde superiori a 3 m: 160;
- numero di onde superiori a 3.5 m: 80.

La distribuzione che meglio approssima i dati è la distribuzione di Weibull con  $k=0.75$  (Tabella 8).

Nella successiva Tabella 9 sono riportati i valori di  $H_s$  per i vari tempi di ritorno considerati, esplicitati nel grafico di Figura 17.

Tabella 8: Analisi delle distribuzioni statistiche per tutti i dati del settore 250-280 °N.

k	N	R <sup>2</sup>	n	A
0,75	1	0,986	0,366483	3,335809
1	2	0,985	0,6593955	3,0097155
0	3	0,977	0,6087948	3,1878664
1,4	4	0,966	1,1469767	2,5042063
2	5	0,942	1,8840599	1,7610087

Tabella 9: Distribuzione degli eventi ondosi per ciascun tempo di ritorno nel settore angolare 250-280 °N.

TR	H
1	3,90
5	4,92
10	5,42
25	6,14
50	6,72
100	7,32

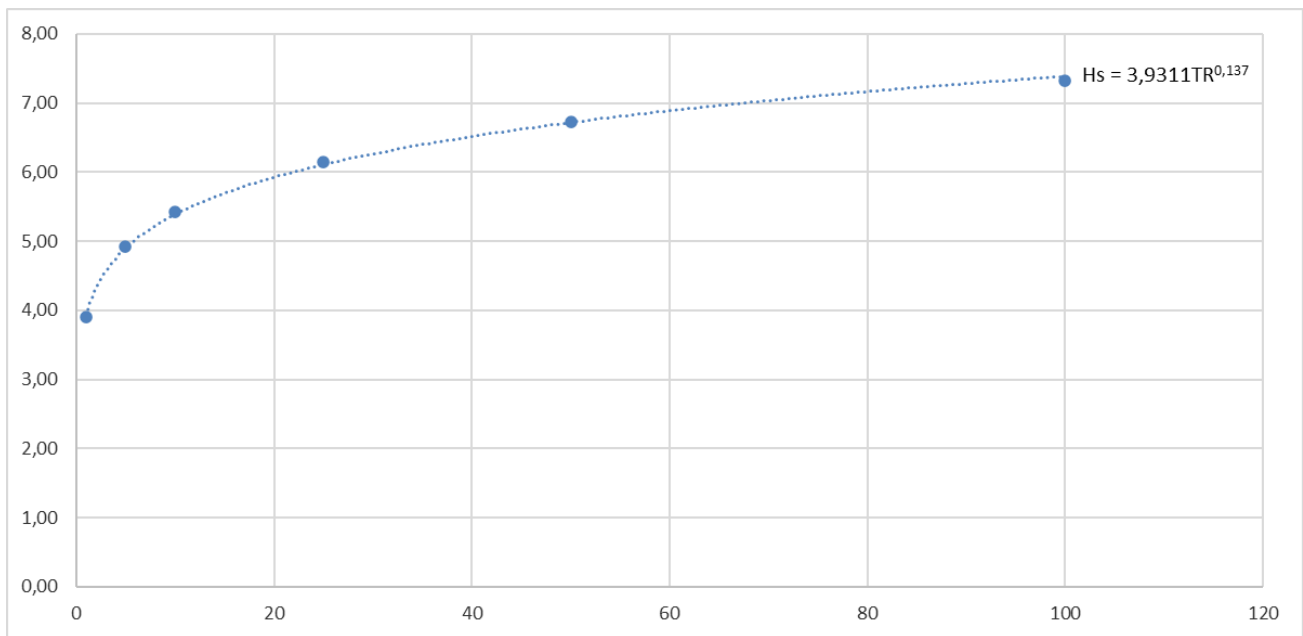


Figura 17: Andamento del valore di altezza d'onda rispetto al tempo di ritorno considerato per il settore 250-280 °N.

Per quanto riguarda il settore 280-310 °N, si è riscontrato quanto segue:

- altezza delle soglie per la determinazione della mareggiata: Hs=3 m, Hs=3.5 m;
- numero di onde superiori a 3 m: 165;
- numero di onde superiori a 3.5 m: 92.

La distribuzione che meglio approssima i dati è la distribuzione di Weibull con k=0 (Tabella 10)

Nella successiva Tabella 11 sono riportati i valori di Hs per i vari tempi di ritorno considerati, esplicitati nel grafico in Figura 18.

Tabella 10: Analisi delle distribuzioni statistiche per tutti i dati del settore 280-310 °N.



k	N	R <sup>2</sup>	n	A
0	1	0,979	0,6776702	3,2895887
1	2	0,978	0,7394186	3,0746793
1,4	3	0,974	1,2747325	2,5340829
0,75	4	0,961	0,4136088	3,4227617
2	5	0,961	2,0747683	1,7393426

Tabella 11: Distribuzione degli eventi ondosi per ciascun tempo di ritorno nel settore angolare 280-310 °N.

TR	H
1	4,16
5	5,32
10	5,80
25	6,43
50	6,90
100	7,37

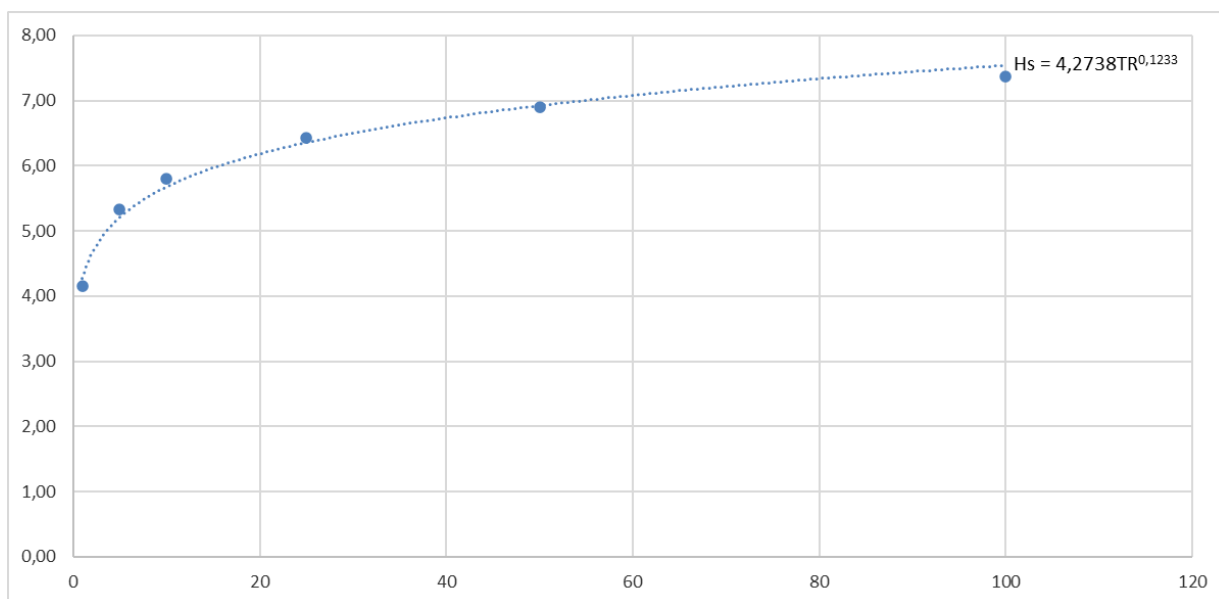


Figura 18: Andamento del valore di altezza d'onda rispetto al tempo di ritorno considerato per il settore 280-310 °N.

Per quanto riguarda il settore 310-340 °N, si è riscontrato quanto segue:

- altezza delle soglie per la determinazione della mareggiata:  $H_s=2.5$  m,  $H_s=3.0$  m;
- numero di onde superiori a 2.5 m: 53;
- numero di onde superiori a 3 m: 23.

La distribuzione che meglio approssima i dati è la distribuzione di Weibull con  $k=0.75$  Tabella 12

Nella successiva Tabella 13 sono riportati i valori di  $H_s$  per i vari tempi di ritorno considerati, esplicitati nel grafico in Figura 19.

*Tabella 12: Analisi delle distribuzioni statistiche per tutti i dati del settore 310-340 °N*

k	N	$R^2$	n	A
0,75	1	0,987	0,4398771	2,6834989
1	2	0,980	0,7957388	2,2715669
0	3	0,972	0,7440663	2,4680282
1,4	4	0,962	1,4022845	1,6245616
2	5	0,940	2,3368121	0,666001

Tabella 13: Distribuzione degli eventi ondosi per ciascun tempo di ritorno nel settore angolare 310-340 °N.

TR	H
1	2,76
5	3,71
10	4,24
25	5,02
50	5,66
100	6,33

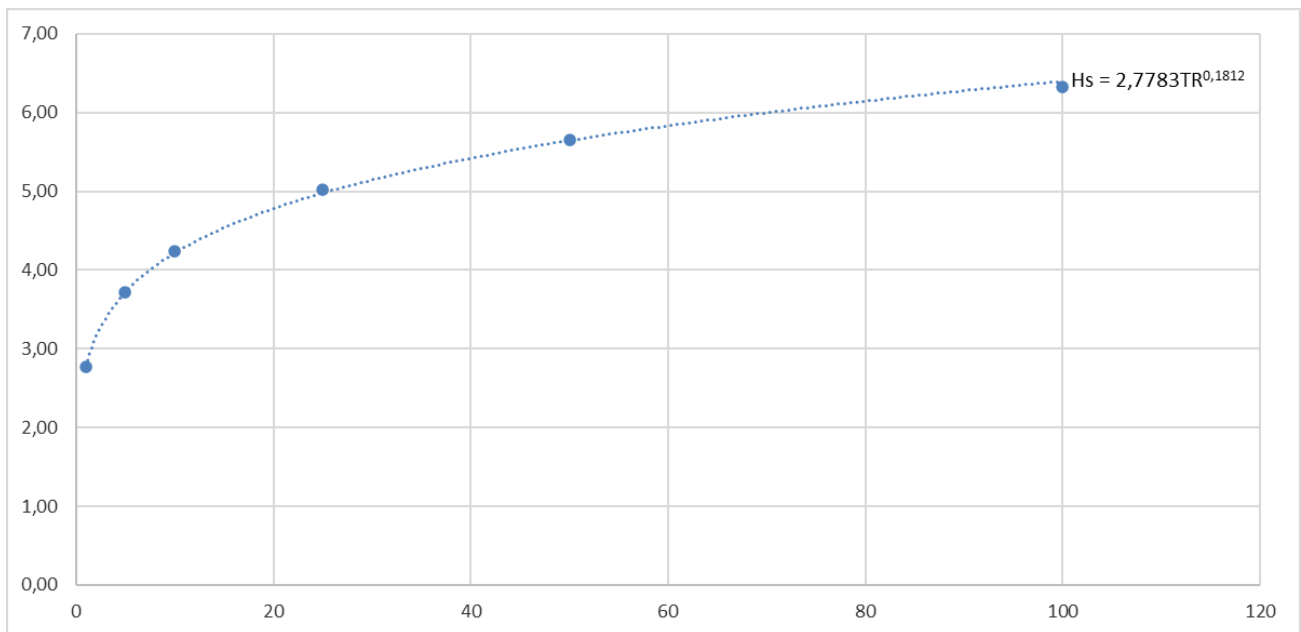


Figura 19: Andamento del valore di altezza d'onda rispetto al tempo di ritorno considerato per il settore 310-340 °N.

## 4 La propagazione delle onde da largo a sottocosta

### 4.1 La propagazione del clima ondoso medio annuo

Una volta determinato il clima ondoso al largo del sito in esame e gli eventi ondosi estremi, si è proceduto alla propagazione delle onde (altezza, direzione e periodo) fino a un punto significativo sottocosta, per poter valutare l'impatto dei fenomeni di trasformazione di moto ondoso dovuti, principalmente, a shoaling e rifrazione.

I valori delle ondatazioni rappresentative del clima ondoso medio annuo, ricostruito dai dati al largo, sono stati quindi trasferiti sottocosta, nel paraggio di Tropea, mediante l'applicazione di modellistica numerica. In particolare è stato utilizzato il modulo Near-Shore Spectral Waves (NSW) del codice di calcolo MIKE21 sviluppato dal Danish Hydraulic Institute.

Il modulo MIKE21 NSW utilizza una griglia a maglia regolare strutturata per simulare la crescita, la dissipazione e la trasformazione delle onde di vento e di "mare lungo" (onde di "swell").

Nel caso in esame, tra le diverse possibilità offerte del codice di calcolo, è stata utilizzata la formulazione che si basa sulla parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'energia dell'onda utilizzando un approccio numerico ai volumi finiti.

Il modello considera tutti i principali fenomeni di trasformazione energetica che intervengono nella propagazione del moto ondoso dal largo verso riva, provocando la variazione dell'altezza d'onda e della direzione di propagazione. Questi fenomeni sono:

- crescita dell'onda sotto l'azione del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al "white-capping" (le cosiddette "pecorelle");
- dissipazione dovuta all'attrito al fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento per interazione con il fondale;
- "shoaling" (interazione con il fondale) dovuto alla variazione di profondità lungo la traiettoria di propagazione dell'onda;
- rifrazione, dovuta alle variazioni batimetriche;
- interazione tra onde e correnti;
- diffrazione.

I dati ondametrici di input utilizzati per il modello sono l'altezza d'onda significativa  $H_s$ , il periodo di picco  $T_p$ , la direzione media di propagazione MWD (Mean Wave Direction) e l'indice di dispersione direzionale  $n$ . Oltre a questi dati, imposti come input del modello, sono stati forniti anche i parametri necessari per la rappresentazione della scabrezza del fondo e il coefficiente per l'equazione di frangimento dell'onda; data la mancanza di riscontri sperimentali e vista l'impossibilità di una loro eventuale valutazione mediante calibratura del modello, sono stati utilizzati valori di letteratura pienamente rappresentativi delle condizioni analizzate. Per quanto riguarda la perdita di energia per attrito sul fondo si è quindi utilizzato il coefficiente di Nikuradse che è stato posto uguale a 0.01 mm per l'intero dominio di calcolo, mentre per il frangimento, impostato nel modello con la formulazione di Battjes and Janssen, sono stati utilizzati i parametri  $\gamma_1=1$ ,  $\gamma_2=0.8$  e  $\alpha=1$ .

#### **4.1.1 Griglie di calcolo**

L'applicazione del MIKE21 NSW richiede la costruzione di un dominio di calcolo che comprenda un'ampia zona di mare e di costa del paraggio in studio, avente il contorno al largo (offshore) posizionato in acque profonde, dove cioè il moto ondoso non subisce fenomeni di interazione con il fondale.

Per mantenere una adeguata inclinazione tra la direzione media di propagazione dell'onda e la direzione della griglia di calcolo alle differenze finite sono state realizzate tre diverse maglie di



calcolo (griglie G1, G2 e G3), come rappresentato nella figura seguente, ognuna utilizzata per il trasferimento delle ondatazioni provenienti dai diversi settori marini.

Nella medesima figura è rappresentato il punto di estrazione dei risultati, posizionato al largo di Tropea in una posizione mediana rispetto al paraggio, su una profondità di circa -10 m s.l.m. I dati batimetrici utilizzati nel modello, che si estende verso il largo fin oltre la batimetrica -200 m s.l.m. sono stati dedotti dalle Carte Nautiche.

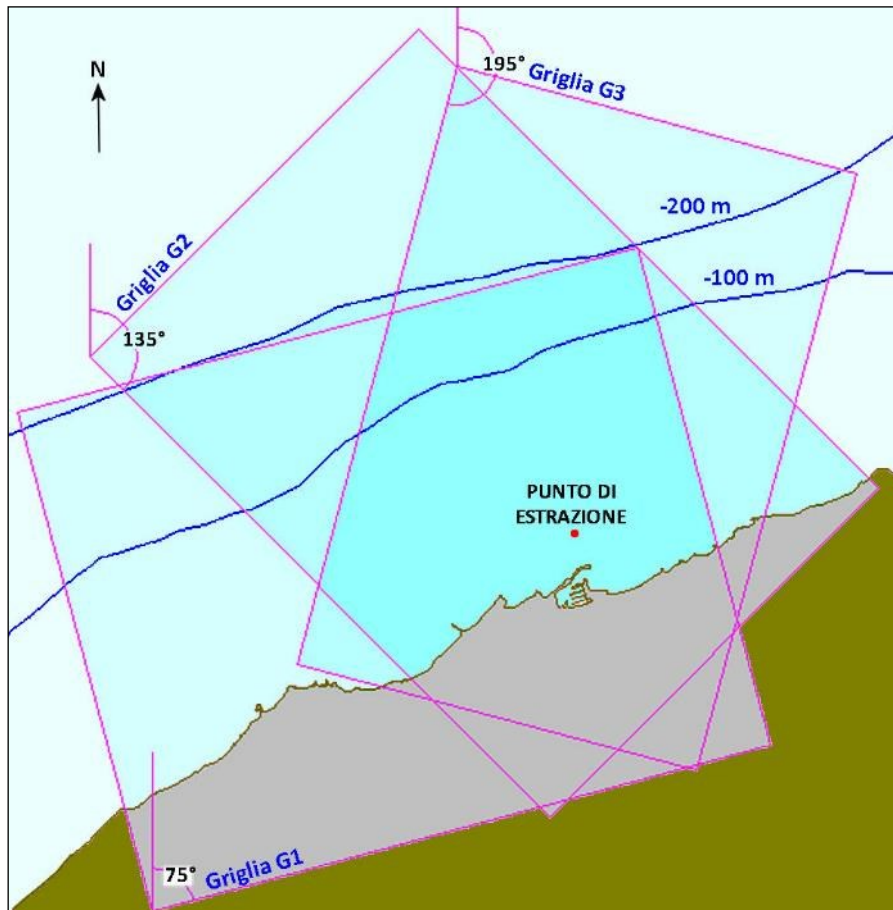


Figura 20: Griglie di calcolo del modello NSW.

#### 4.1.2 Risultati

I risultati della propagazione sono riportati nella tabelle seguenti. La prima tabella riporta i risultati analitici ottenuti per il trasferimento delle singole ondatazioni sulle corrispondenti griglie di calcolo. La seconda tabella il clima risultante delle onde sottocosta, confrontato con quello al largo.

Tabella 14: Risultati del modello di propagazione delle onde dal largo alla -10 m s.l.m.

	ONDE AL LARGO				Frq (%)	ONDE TRASFERITE	
	HS (m)	Tp (s)	Tm (s)	Dir (°N)		HS (m)	Dir (°N)
	m	s	s	°N		m	°N
Griglia G1	0.5	5.11	4.22	240	1.8143	0.23	271
	1	6.37	5.29	240	0.7542	0.38	283
	1.5	7.24	6.04	240	0.2954	0.54	289
	2	7.93	6.63	240	0.1029	0.70	293
	2.5	8.51	7.13	240	0.0391	0.86	295
	3	9.01	7.57	240	0.0091	1.03	297
	3.5	9.46	7.96	240	0.0019	1.20	299
	4	9.87	8.31	240	0.0010	1.37	300
	4.5	10.25	8.64	240	0.0005	1.54	301
	5	10.59	8.94	240	0.0005	1.71	302
	0.5	5.11	4.22	270	19.2417	0.36	288
	1	6.37	5.29	270	10.4710	0.63	295
	1.5	7.24	6.04	270	5.3608	0.89	298
	2	7.93	6.63	270	2.7862	1.14	301
	2.5	8.51	7.13	270	1.4655	1.39	302
	3	9.01	7.57	270	0.7223	1.63	303
	3.5	9.46	7.96	270	0.3383	1.87	304
	4	9.87	8.31	270	0.1220	2.11	305
	4.5	10.25	8.64	270	0.0438	2.34	305
	5	10.59	8.94	270	0.0224	2.57	306
5.5	10.92	9.22	270	0.0114	2.81	306	
6	11.22	9.48	270	0.0067	3.04	307	
6.5	11.51	9.73	270	0.0014	3.27	307	

	ONDE AL LARGO					ONDE TRASFERITE	
	HS (m)	Tp (s)	Tm (s)	Dir (°N)	Frq (%)	HS (m)	Dir (°N)
	m	s	s	°N	%	m	°N
	7	11.79	9.97	270	0.0010	3.50	307
Griglia G2	0.5	5.11	4.22	300	30.0896	0.46	309
	1	6.37	5.29	300	9.1423	0.85	315
	1.5	7.24	6.04	300	2.9324	1.24	318
	2	7.93	6.63	300	1.2116	1.65	320
	2.5	8.51	7.13	300	0.6522	2.07	322
	3	9.01	7.57	300	0.3521	2.50	323
	3.5	9.46	7.96	300	0.1791	2.93	324
	4	9.87	8.31	300	0.0800	3.38	325
	4.5	10.25	8.64	300	0.0500	3.82	326
	5	10.59	8.94	300	0.0291	4.26	326
	5.5	10.92	9.22	300	0.0057	4.67	327
	6	11.22	9.48	300	0.0019	5.04	327
	6.5	11.51	9.73	300	0.0005	5.36	328
	7	11.79	9.97	300	0.0005	5.65	328
	7.5	12.05	10.20	300	0.0024	5.90	329
	8	12.29	10.41	300	0.0005	6.12	329
	0.5	5.11	4.22	330	5.8535	0.47	328
	1	6.37	5.29	330	2.3617	0.89	331
	1.5	7.24	6.04	330	0.9967	1.32	332
	2	7.93	6.63	330	0.4531	1.76	334
2.5	8.51	7.13	330	0.1834	2.21	334	
3	9.01	7.57	330	0.0710	2.68	335	
3.5	9.46	7.96	330	0.0257	3.16	335	
4	9.87	8.31	330	0.0038	3.64	336	

	ONDE AL LARGO				Frq (%)	ONDE TRASFERITE	
	HS (m)	Tp (s)	Tm (s)	Dir (°N)		HS (m)	Dir (°N)
	m	s	s	°N		m	°N
	4.5	10.25	8.64	330	0.0010	4.11	336
Griglia G3	0.5	5.11	4.22	0	0.5974	0.47	2
	1	6.37	5.29	0	0.3030	0.90	360
	1.5	7.24	6.04	0	0.1215	1.33	358
	2	7.93	6.63	0	0.0281	1.77	357
	3	9.01	7.57	0	0.0014	2.69	356
	0.5	5.11	4.22	30	0.5617	0.47	27
	1	6.37	5.29	30	0.0834	0.87	22
	1.5	7.24	6.04	30	0.0105	1.28	19

Tabella 15 - Clima ondoso delle onde trasferite sottocosta (a profondità -10 m s.l.m.m.).

Dir (°N)		225-255	255-285	285-315	315-345	345-15	15-45	TOTALE
Dir media (°N)		240	270	300	330	0	30	
H (m)	H media							
0.25-0.75	0.5		0.7542	60.2007	5.8535	0.5974	0.5617	67.97
0.75-1.25	1			18.8048	5.2941	0.3030	0.0834	24.49
1.25-1.75	1.5			0.7242	2.2083	0.1215	0.0105	3.06
1.75-2.25	2			0.4602	1.2888	0.0281		1.78
2.25-2.75	2.5			0.0662	0.4231	0.0014		0.49
2.75-3.25	3			0.0181	0.2049			0.22



Dir (°N)		225-255	255-285	285-315	315-345	345-15	15-45	TOTALE
Dir media (°N)		240	270	300	330	0	30	
H (m)	H media							
3.25-3.75	3.5			0.0024	0.0839			0.09
3.75-4.25	4				0.0510			0.05
4.25-4.75	4.5				0.0348			0.03
4.75-5.25	5				0.0019			0.00
5.25-5.75	5.5				0.0010			0.00
5.75-6.25	6				0.0029			0.00
% TOTALE		0.00	0.75	80.28	15.45	1.05	0.66	98.19
						calme <0.25		1.81

La rosa delle onde è riportata nella seguente Figura 21. Si nota che, nel trasferimento dal largo alla costa, oltre ad una riduzione dell'altezza d'onda si nota una evidente rotazione delle ondazioni in senso orario dovuto essenzialmente all'assetto batimetrico al largo, influenzato dalla presenza del promontorio che va da Capo Vaticano a Tropea. Il settore da 285 a 315 °N raccoglie circa l'80% delle ondazioni.

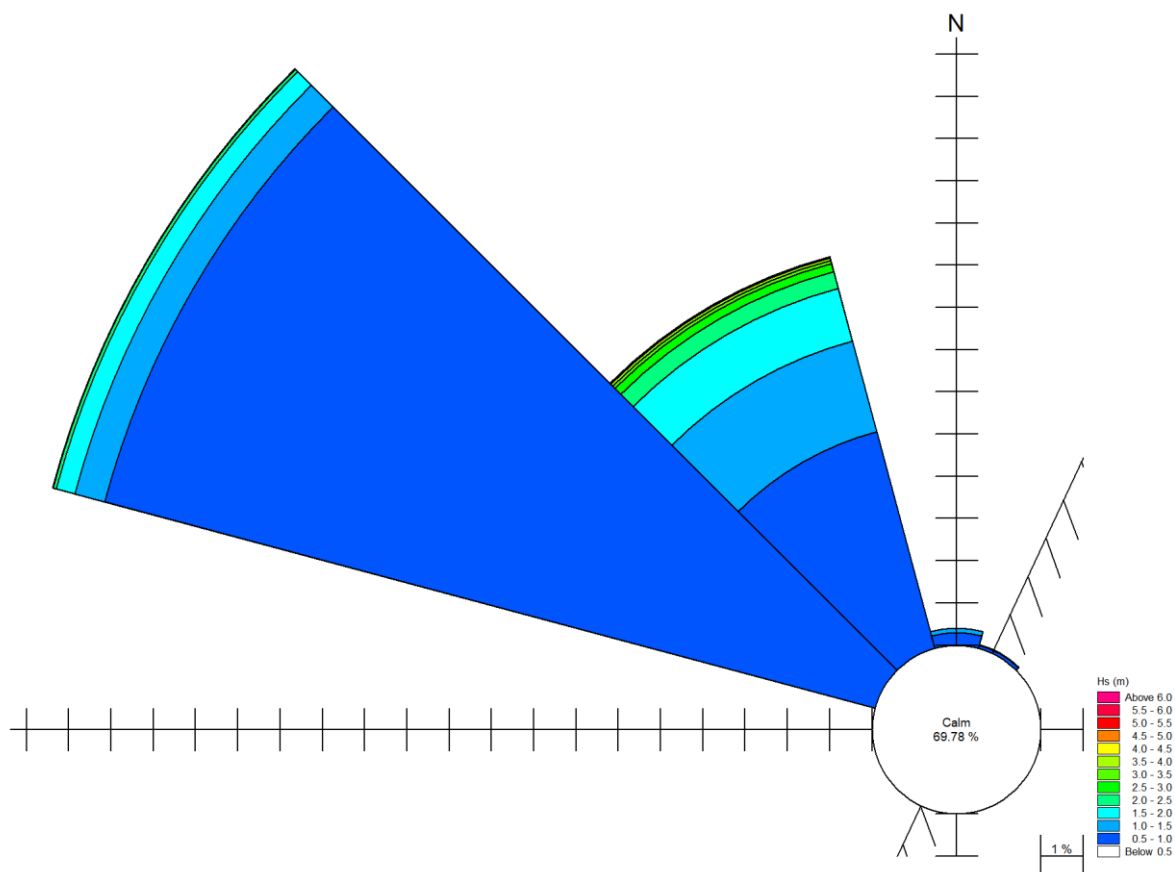


Figura 21: Rosa delle onde (clima) sottocosta (le calme hanno valore di altezza d'onda inferiore a 0.25 m).

## 4.2 La propagazione degli eventi estremi

Ai fini della verifica del comportamento delle opere portuali in condizioni di forte sollecitazione è stata calcolata l'altezza d'onda per un tempo di ritorno assegnato. A questo scopo è stata effettuata l'analisi statistica dei valori delle altezze d'onda rappresentative delle condizioni estreme di ogni singola mareggiata.

Per eseguire l'analisi statistica delle altezze d'onda è necessario selezionare preliminarmente dei campioni di dati che rispondano al doppio requisito di essere tra di loro statisticamente indipendenti ed omogenei.

Per quanto riguarda l'indipendenza statistica si utilizza il già introdotto metodo POT (Peaks Over Threshold) che consiste nel prendere in esame il solo valore massimo di altezza d'onda (valore di picco) che si verifica nell'ambito di una singola mareggiata. L'individuazione di ciascuna mareggiata nell'ambito della serie storica viene effettuata introducendo una soglia di altezza d'onda e considerando che il singolo evento (mareggiata) abbia inizio quando l'altezza d'onda significativa supera per la prima volta il valore della soglia prestabilita.

Conseguentemente si ipotizza che l'evento termini quando l'altezza d'onda significativa assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia oppure quando si verifica un forte scarto della direzione del moto ondoso.

Gli stati di mare, caratterizzati da una altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) superiore alla soglia individuata, sono quindi oggetto di una elaborazione statistica al fine di ricavare, mediante una regolarizzazione degli eventi estremi secondo note funzioni probabilistiche, le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati tempi di ritorno  $T_R$  (o probabilità di occorrenza).

Nel caso in esame è stata fissata una soglia di altezza d'onda pari a 5.0 m che ha permesso di estrarre una serie di massimi dai quali sono state ottenute le altezze d'onda per diversi periodi di ritorno riportati nella tabella seguente.

Le onde al largo caratterizzate da direzione di provenienza di  $265^\circ N$ ,  $295^\circ N$  e  $325^\circ N$  sono state quindi traslate sottocosta con il modello di trasferimento costruito con il codice MIKE21 NSW, ottenendo i valori riportati nel seguito.

Tabella 16: Eventi estremi al largo e sottocosta (-10 m s.l.m.m.).

ONDE AL LARGO					ONDE SOTTOCOSTA (-10 m)	
Hs (m)	Tp (s)	Tm (s)	Dir ( $^\circ N$ )	TR (anni)	Hs (m)	Dir ( $^\circ N$ )
6.14	10.93	8.67	265	25	3.08	305
6.72	11.2	8.89	265	50	3.35	306
7.32	11.47	9.10	265	100	3.62	306
6.43	11.07	8.79	295	25	5.10	328
6.9	11.28	8.95	295	50	5.34	328
7.37	11.49	9.12	295	100	5.55	329
5.02	10.34	8.21	325	25	4.35	334
5.66	10.68	8.48	325	50	4.81	334
6.33	11.02	8.75	325	100	5.22	335

Con le onde così costruite è stato sollecitato, nel seguito dell'analisi descritta nella Relazione Morfodinamica, il modello costruito con il codice di calcolo MIKE21 PMS (Parabolic Mild-Slope Equation) per la ricostruzione del campo di ondazione sottocosta e, in particolare, per la determinazione dei valori massimi di moto ondoso che interferiscono con le strutture portuali.

Nelle figure seguenti sono riportati i campi d'onda per i 9 eventi riportati nella tabella precedente, con direzioni  $265^\circ N$ ,  $295^\circ N$  e  $325^\circ N$  e tempi di ritorno di 25, 50 e 100 anni.

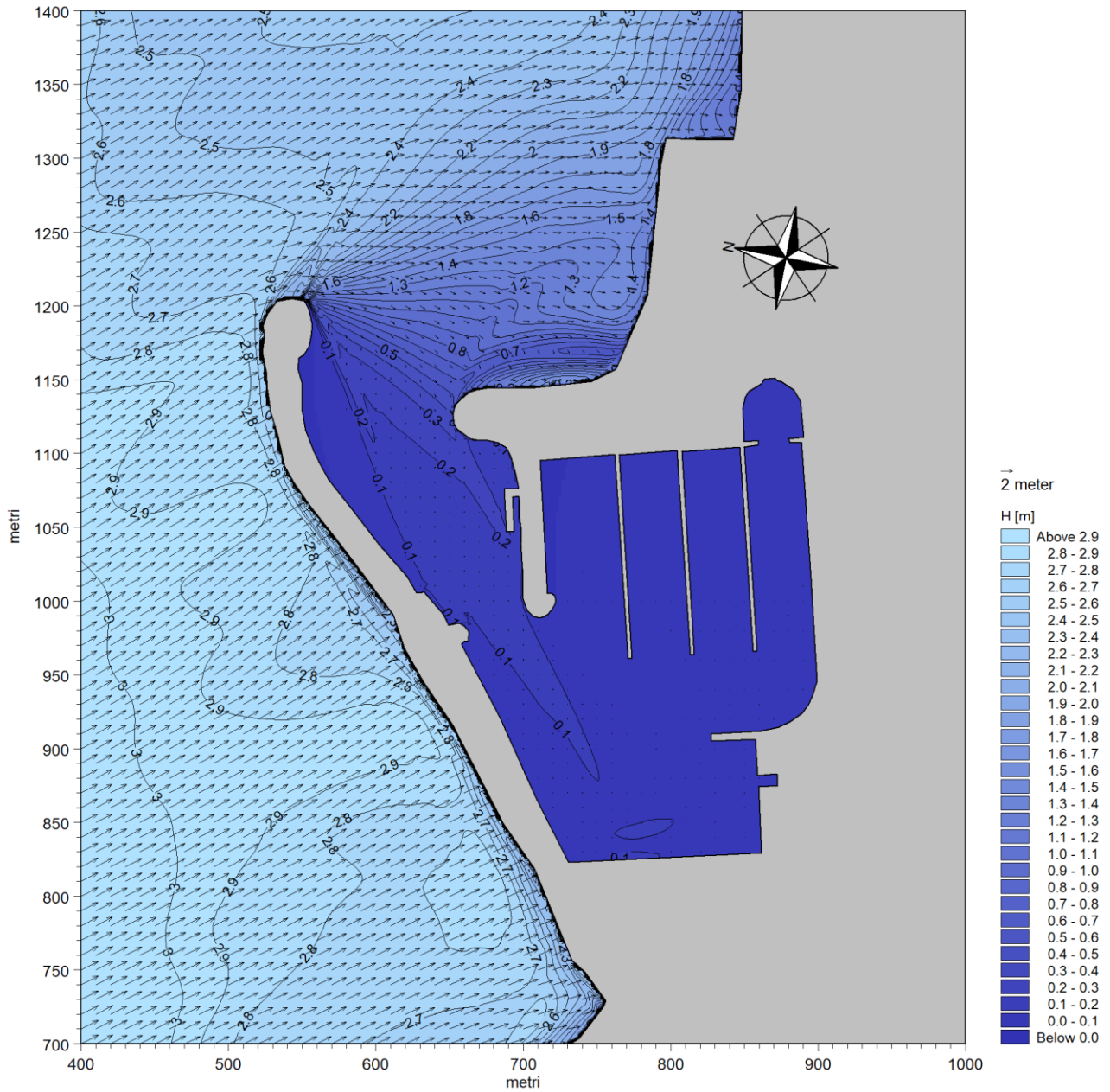


Figura 22: Onda con Tempo di Ritorno di 25 anni e direzione di propagazione al largo 265°N.



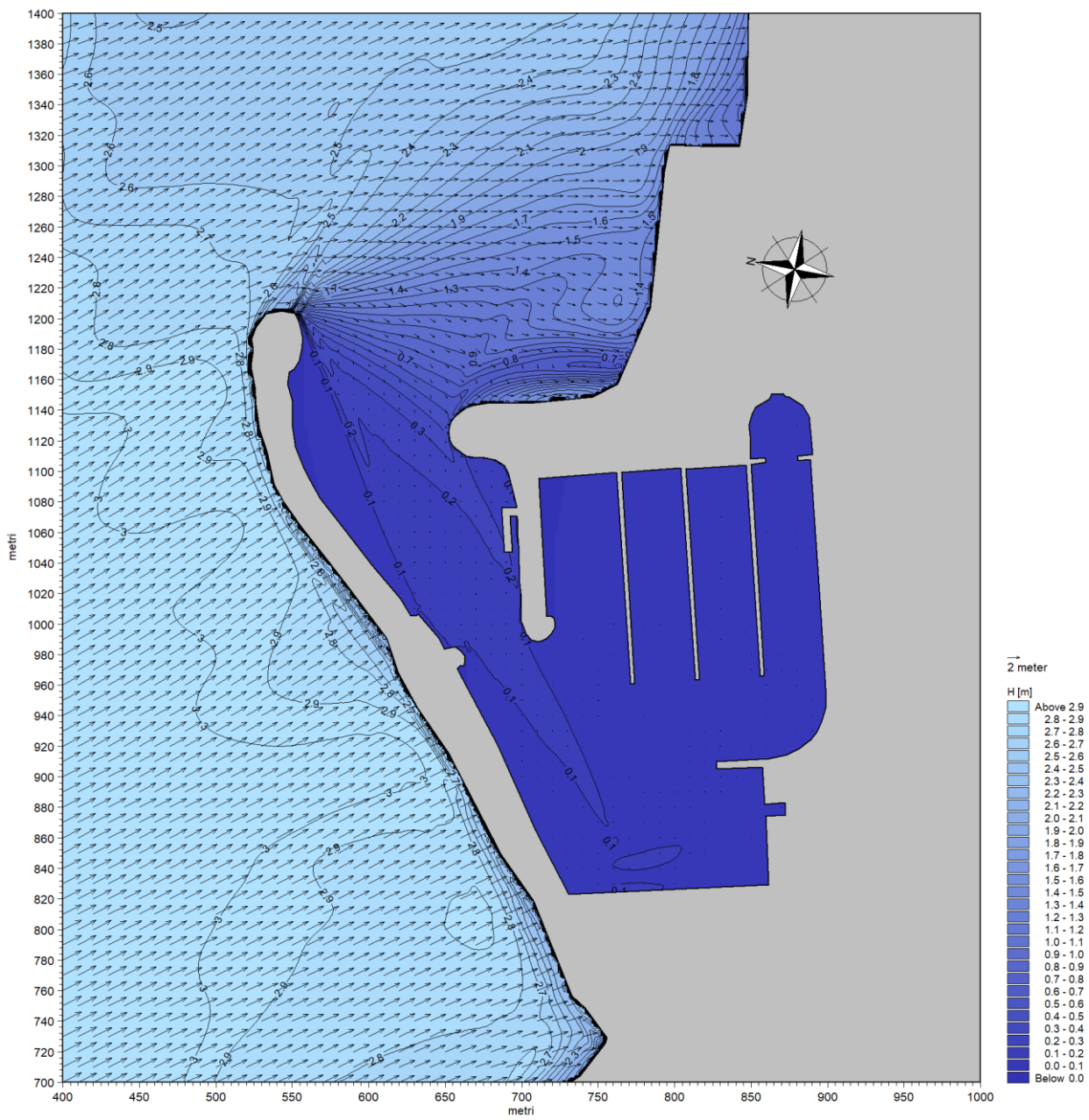


Figura 23: Onda con Tempo di Ritorno di 50 anni e direzione di propagazione al largo 265°N.

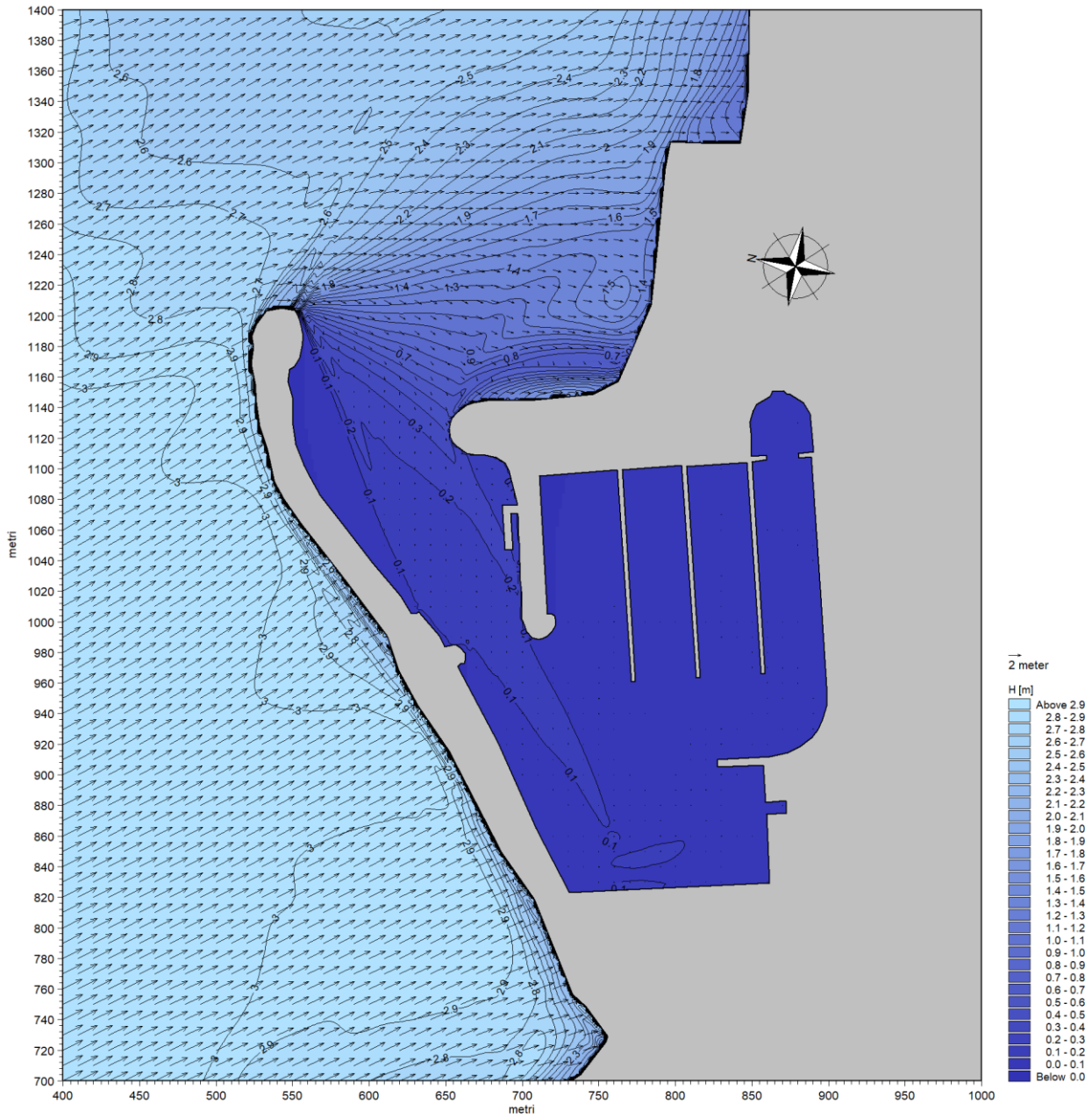


Figura 24: Onda con Tempo di Ritorno di 100 anni e direzione di propagazione al largo 265°N.

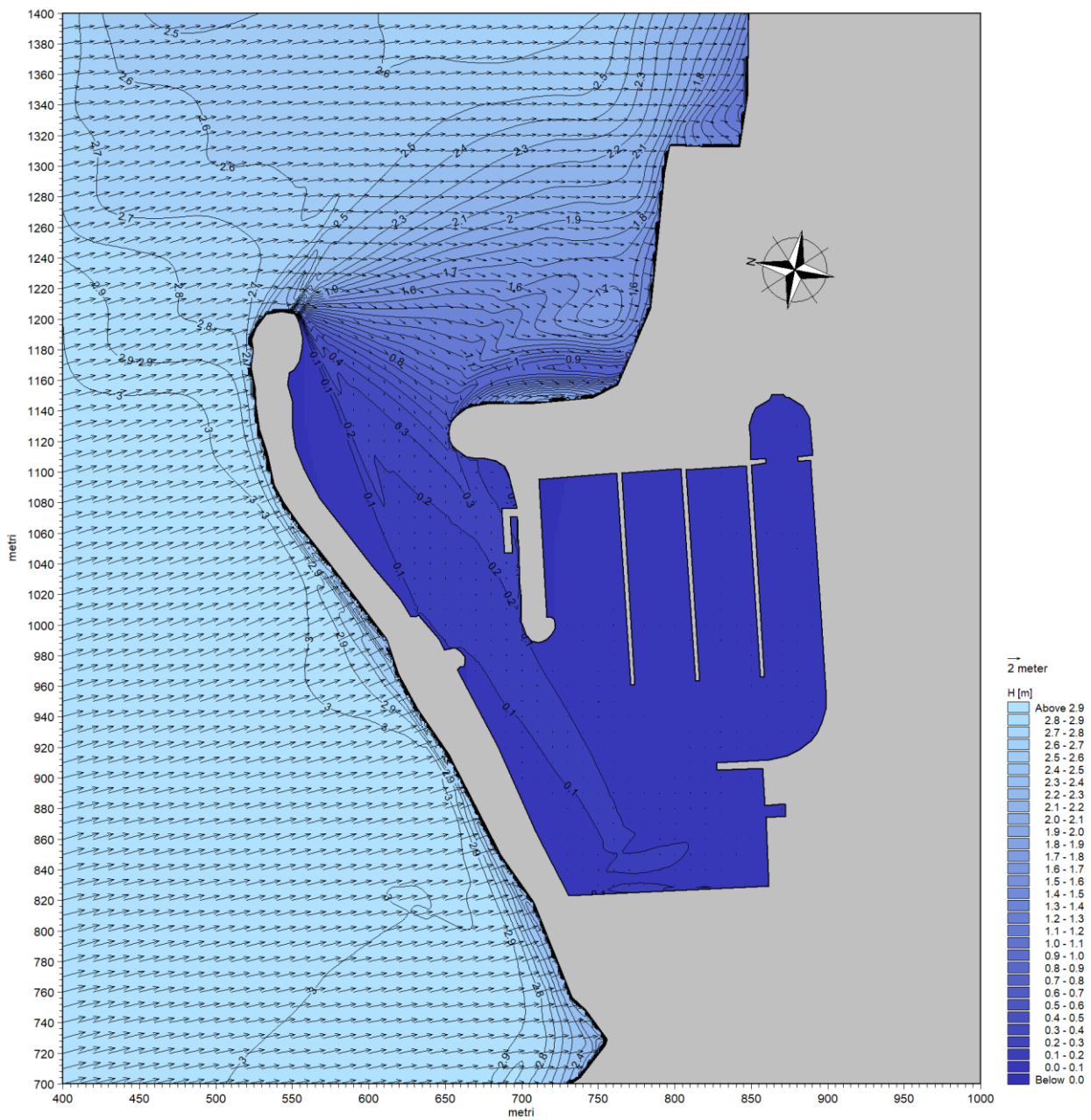


Figura 25: Onda con Tempo di Ritorno di 25 anni e direzione di propagazione al largo 295°N.

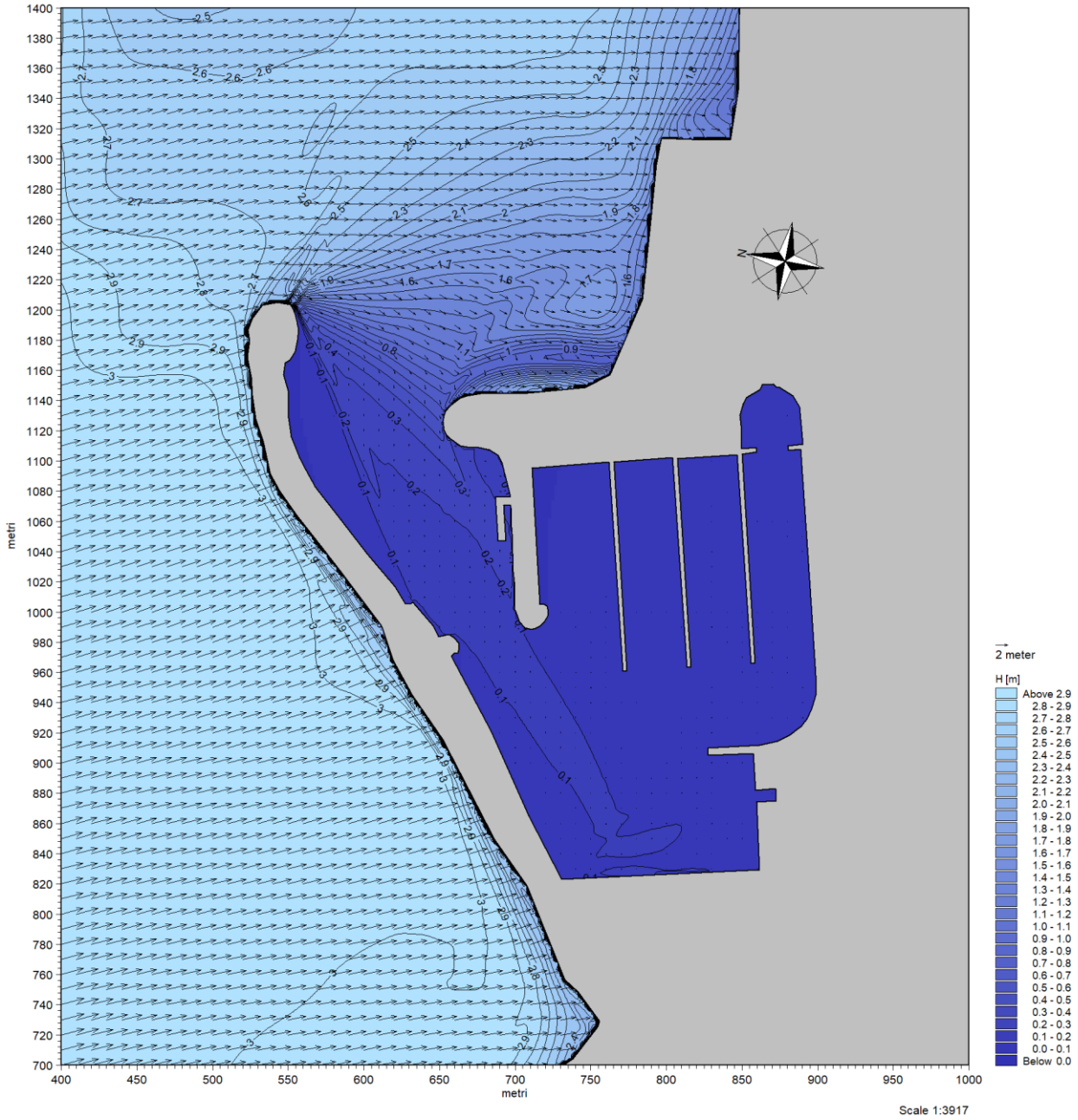


Figura 26: Onda con Tempo di Ritorno di 50 anni e direzione di propagazione al largo 295°N.



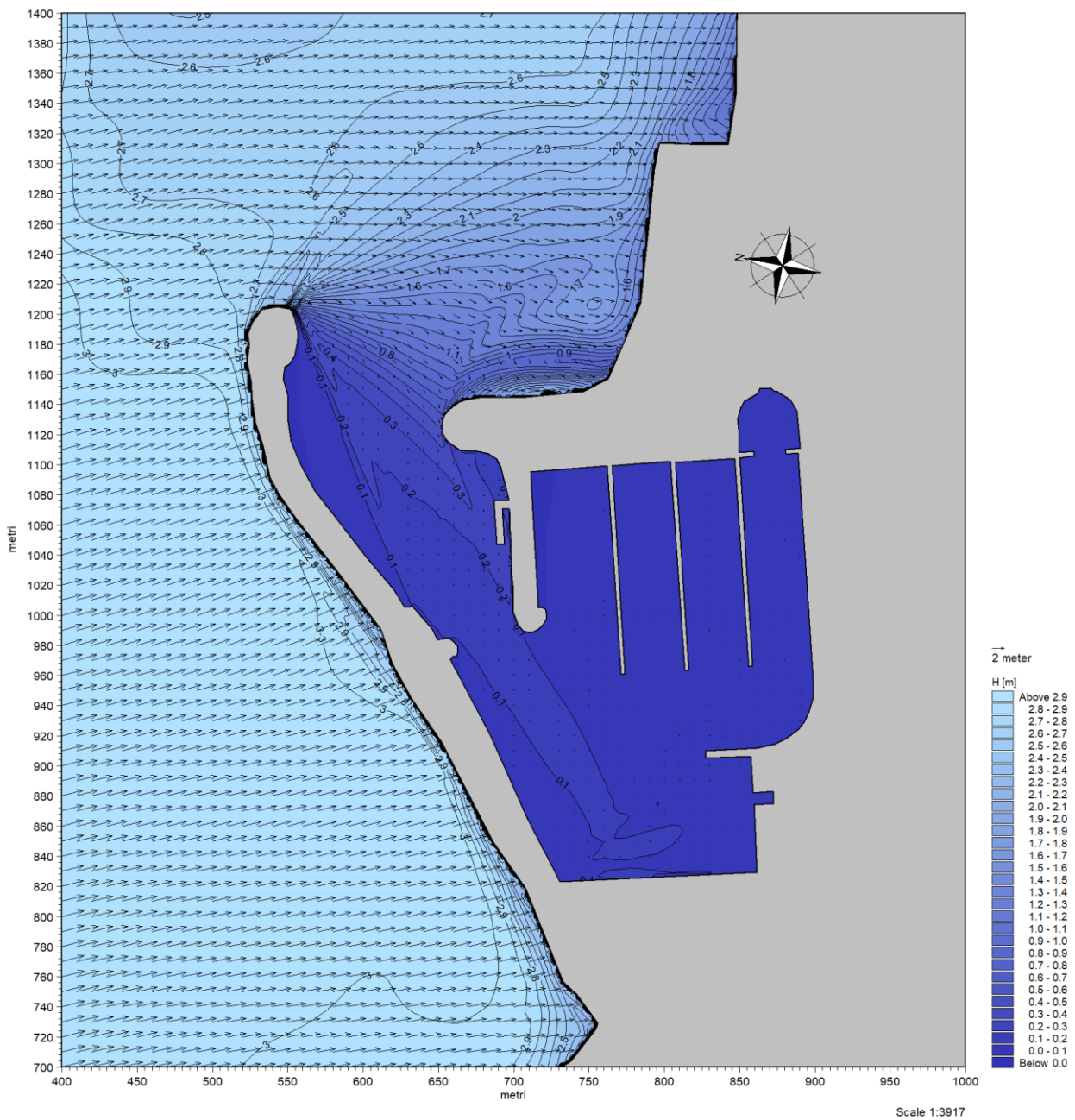


Figura 27: Onda con Tempo di Ritorno di 100 anni e direzione di propagazione al largo 295°N.

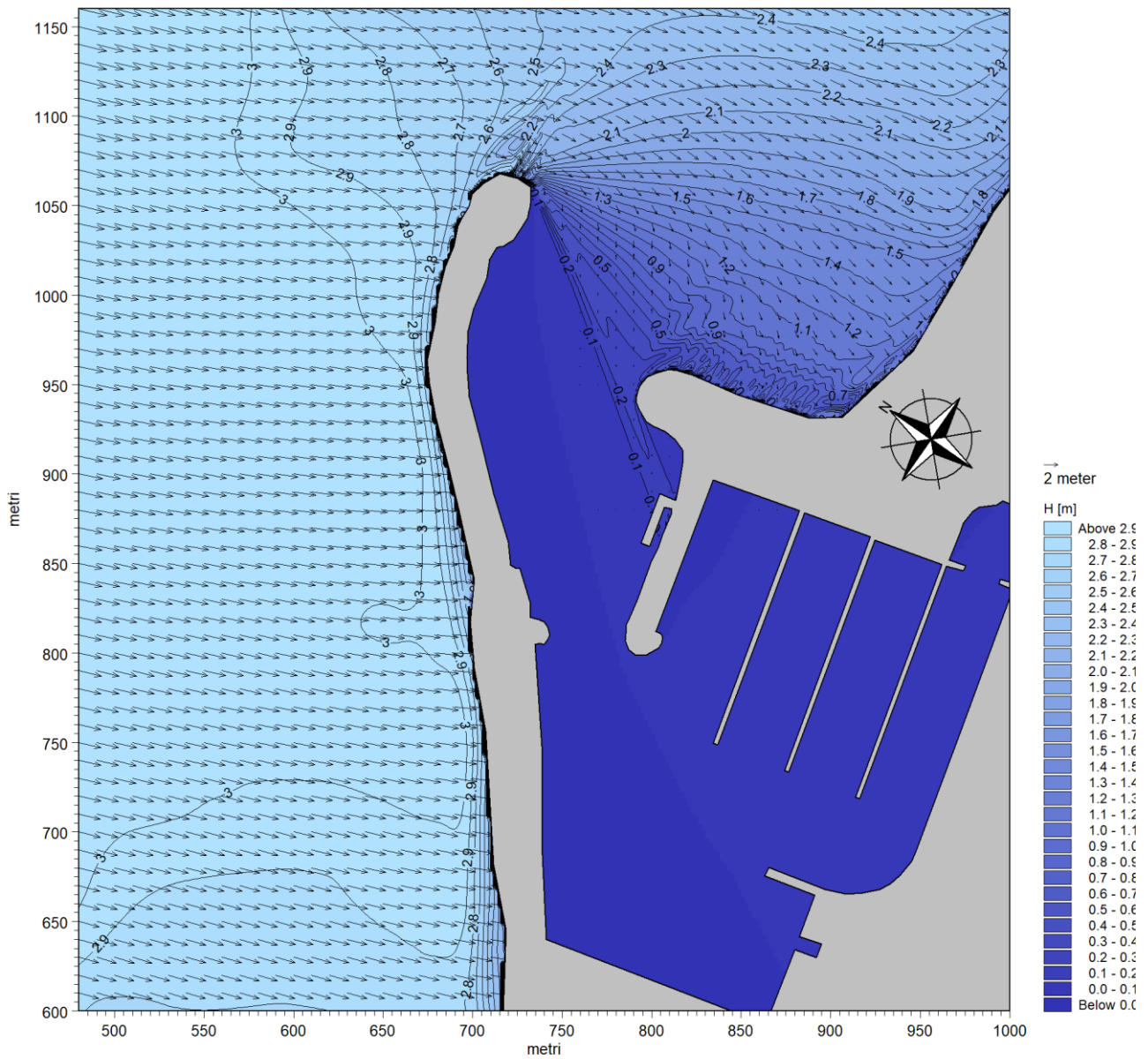


Figura 28: Onda con Tempo di Ritorno di 25 anni e direzione di propagazione al largo 325°N.



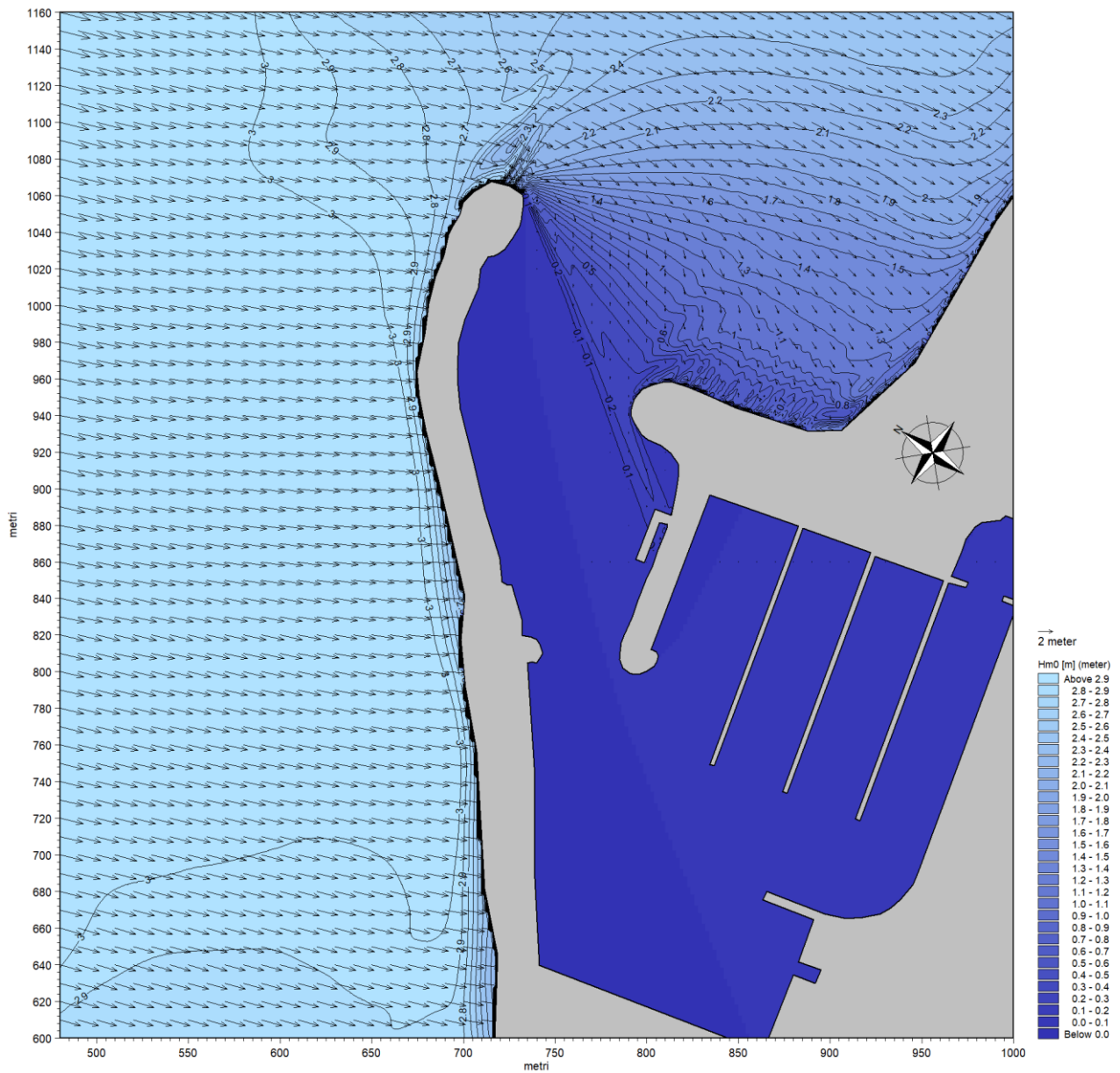


Figura 29: Onda con Tempo di Ritorno di 50 anni e direzione di propagazione al largo 325°N.

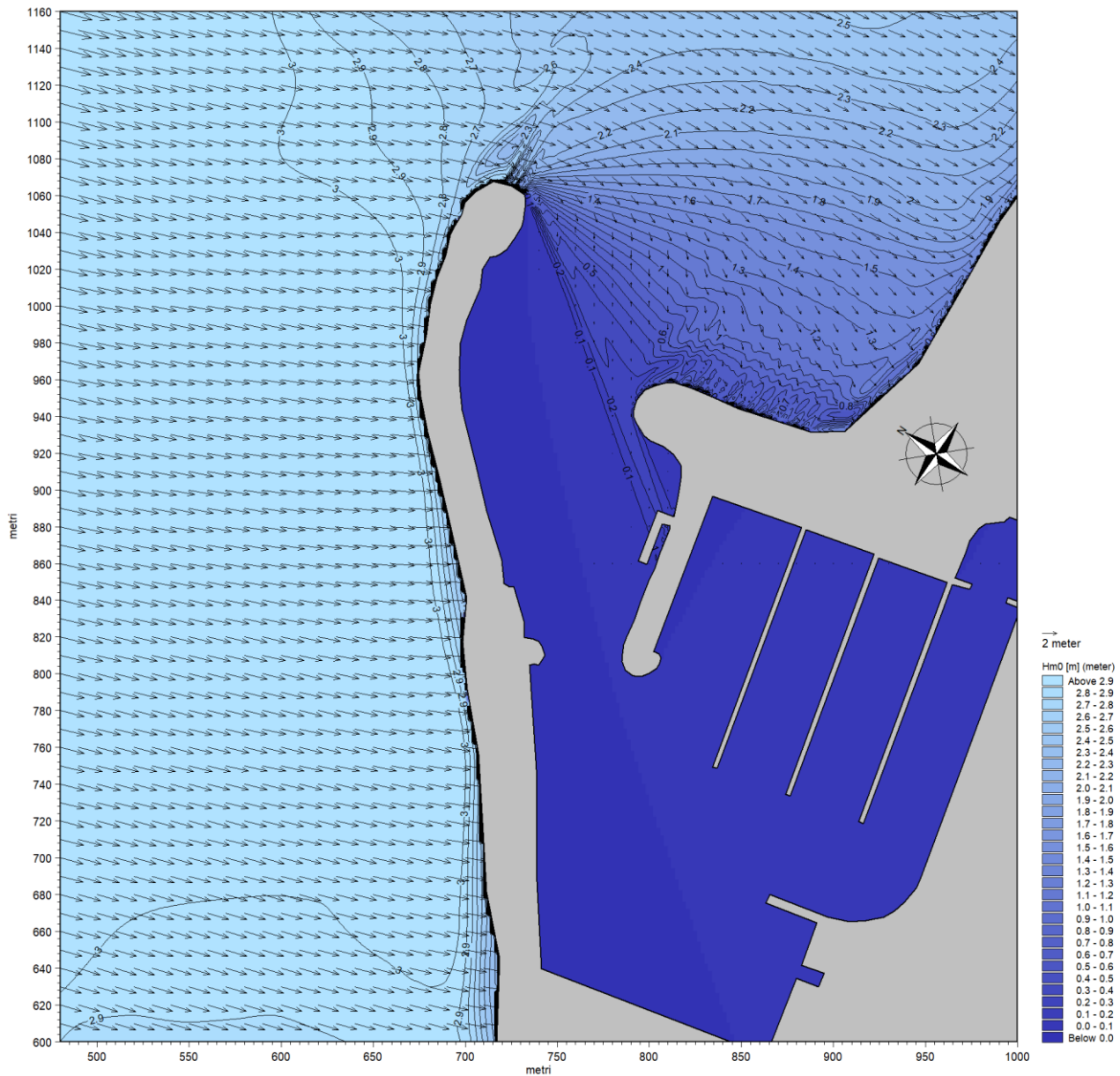


Figura 30: Onda con Tempo di Ritorno di 100 anni e direzione di propagazione al largo 325°N.

### 4.3 Utilizzo dei risultati

Per la verifica del dimensionamento delle opere in progetto si fa riferimento ad un'onda estrema, definita come onda di progetto, avente un tempo di ritorno assegnato.

Il tempo di ritorno ( $T_R$ ) dell'evento di moto ondoso di progetto è funzione della vita minima di progetto dell'opera ( $V_P$ ) e della massima probabilità di danneggiamento ammissibile ( $P_F$ ) nel periodo di vita operativa, ed è ricavabile dalla seguente relazione:

$$T_R = \frac{V_P}{-\ln(1 - P_F)}$$

Per la determinazione dei valori di  $V_P$  e di  $P_F$  ci si è avvalsi delle “Istruzioni Tecniche per la Progettazione delle Dighe Frangiflutti” del Ministero dei Lavori Pubblici che raccolgono in due tabelle i valori utili per la scelta dei suddetti parametri (e che sono concettualmente equivalenti, nella declinazione specifiche per le opere portuali, a quanto previsto dalle Norme Tecniche di Costruzione). Tali tabelle sono riportate di seguito.

Tabella 17: Vita minima di progetto (anni) per opere o strutture di carattere definitivo.

Tipo di infrastruttura	Livello di sicurezza		
	1	2	3
Uso generale	25	50	100
Uso specifico	15	25	50

Per “uso generale” si intendono opere di carattere generale, ossia non associate ad una specifica installazione industriale o deposito.

Per “uso specifico” si intendono le opere a servizio di installazioni industriali particolari o associate a depositi naturali transitori (porti industriali, piattaforme di carico e scarico, piattaforme petrolifere, ecc.).

Il “livello di sicurezza 1” si riferisce ad opere od installazioni di interesse locale o ausiliario e comportanti un basso rischio di perdite di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difesa costiera, opere minori in porti o marina, pavimentazioni, scarichi locali, installazioni commerciali, edifici, ecc.).

Il “livello di sicurezza 2” si riferisce ad opere od installazioni di interesse generale comportanti un moderato rischio di perdite di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (opere di grandi porti minori, scarichi a mare di grandi città, ecc.).

Il “livello di sicurezza 3” si riferisce ad opere od installazioni di interesse internazionale o per la protezione dalle inondazioni comportanti un elevato rischio di perdite di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difese di centri urbani o industriali, ecc.).

In questo caso è stato scelto un valore della vita di progetto pari a 25 anni, corrispondente ad un’opera di “uso generale” con “livello di sicurezza 1”.

Tabella 18: Massima probabilità di danneggiamento ammissibile  $P_F$  nel periodo di vita dell’opera.

Tipo di danneggiamento	Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
		Limitato	Elevato
Danneggiamento incipiente	Bassa	0.50	0.30
	Media	0.30	0.20
	Alta	0.25	0.15
Distruzione totale	Bassa	0.20	0.15
	Media	0.15	0.10
	Alta	0.10	0.05

Il rischio di danneggiamento incipiente o di totale distruzione può essere adottato come rischio ammissibile a seconda delle caratteristiche deformative e la facilità di riparazione della struttura. Per opere rigide o fragili senza la possibilità di riparazione, deve essere adottato il rischio di distruzione totale. Per opere flessibili, semi-rigide, o in generale riparabili può essere adottato un rischio di danneggiamento incipiente.

In questo caso il valore della massima probabilità di danneggiamento è stato scelto pari a 0.30, corrispondente ad un tipo di “danneggiamento incipiente”, con “ripercussione economica media” e “rischio per la vita umana limitato”.

Sulla base di questi valori ed utilizzando la relazione sopra riportata, il tempo di ritorno calcolato in base alla formulazione indicata è di 70 anni. Le verifiche saranno quindi effettuate con riferimento ai dati puntuali estratti in corrispondenza delle opere in progetto estratte dai campi d’onda ricostruiti con la modellazione e facendo riferimento, per cautela, ad una media tra i valori ottenuti per 50 e 100 anni di tempo di ritorno.