



Comune di Orbetello



INTERVENTO DI ADEGUAMENTO INFRASTRUTTURALE DELL'APPRODO DI TALAMONE FINALIZZATO ALLA SUA RIQUALIFICAZIONE IN PORTO TURISTICO

[Domanda di Concessione D.M. ai sensi del D.P.R. 509/1997]

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Proponente



Progettazione



Arch. Vittoria Biego
Ing. Alberto Marconi

Titolo elaborato

STUDIO METEOMARINO

Elaborato

A.2315.24 | PFTE | REL

SM

Scala

Data

Novembre 2024

Revisione	Data	Preparato	Controllato	Approvato

INDICE

1. PREMESSA	2
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	2
2.1. Fetch geografico ed efficace.....	4
3. CONDIZIONI METEOMARINE DI LARGO	8
3.1. Regime dei venti	8
3.2. Regime delle onde e relativa analisi statistica degli eventi estremi.....	10
3.3. Analisi dei livelli	13
4. STUDIO DELLA PROPAGAZIONE ONDOSA LARGO-RIVA	13
4.1. Stati di mare di ingresso oggetto di simulazione	13
4.2. Modello di calcolo utilizzato	14
4.3. Definizione della griglia di calcolo	15
4.4. Periodo di simulazione e passo di integrazione.....	20
4.5. Risultati delle simulazioni.....	20
5. STUDIO DELLA PENETRAZIONE ONDOSA ALL'INTERNO DEL BACINO PORTUALE 28	
5.1. Stati di mare di riferimento per la simulazione.....	29
5.2. Modello di calcolo utilizzato	29
5.3. Definizione della griglia di calcolo	30
5.4. Linea di generazione e condizioni al contorno.....	30
5.5. Parametri di riflessione.....	37
5.6. Periodo di simulazione e passo di integrazione.....	39
5.7. Risultati delle simulazioni.....	40
6. CONCLUSIONI	48

1. PREMESSA

Il presente elaborato costituisce lo Studio Meteomarinario del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica (PFTE) dell'intervento di *Adeguamento infrastrutturale dell'approdo di Talamone finalizzato alla sua riqualificazione in porto turistico*, della cui redazione la scrivente Acquatecno è stata incaricata dal Proponente "Associazione consortile Il Molo di Talamone", nell'ambito della presentazione di Domanda di Concessione Demaniale Marittima ai sensi del D.P.R. 509/1997.

La finalità del presente documento consiste nell'offrire una caratterizzazione completa ed esaustiva delle condizioni meteomarine al largo del porto di Talamone, unitamente agli esiti dello studio di propagazione ondosa largo-riva e di penetrazione ondosa all'interno del bacino portuale.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'approdo di Talamone ricade nell'omonima frazione del Comune di Orbetello (GR), nella Regione Toscana. Più nel dettaglio, è ubicato in corrispondenza della propaggine meridionale dei Monti dell'Uccellina, costituendo allo stesso tempo l'estremità settentrionale del golfo di Talamone, nel Mar Tirreno Settentrionale.



Figura 1. Inquadramento geografico

L'approdo di Talamone, per la sua conformazione morfologica, è protetto naturalmente dai venti e mari del I, III e IV quadrante, mentre una diga foranea di lunghezza pari a circa 295 m protegge il bacino portuale da quelli del II quadrante, come ben evidente in figura seguente.

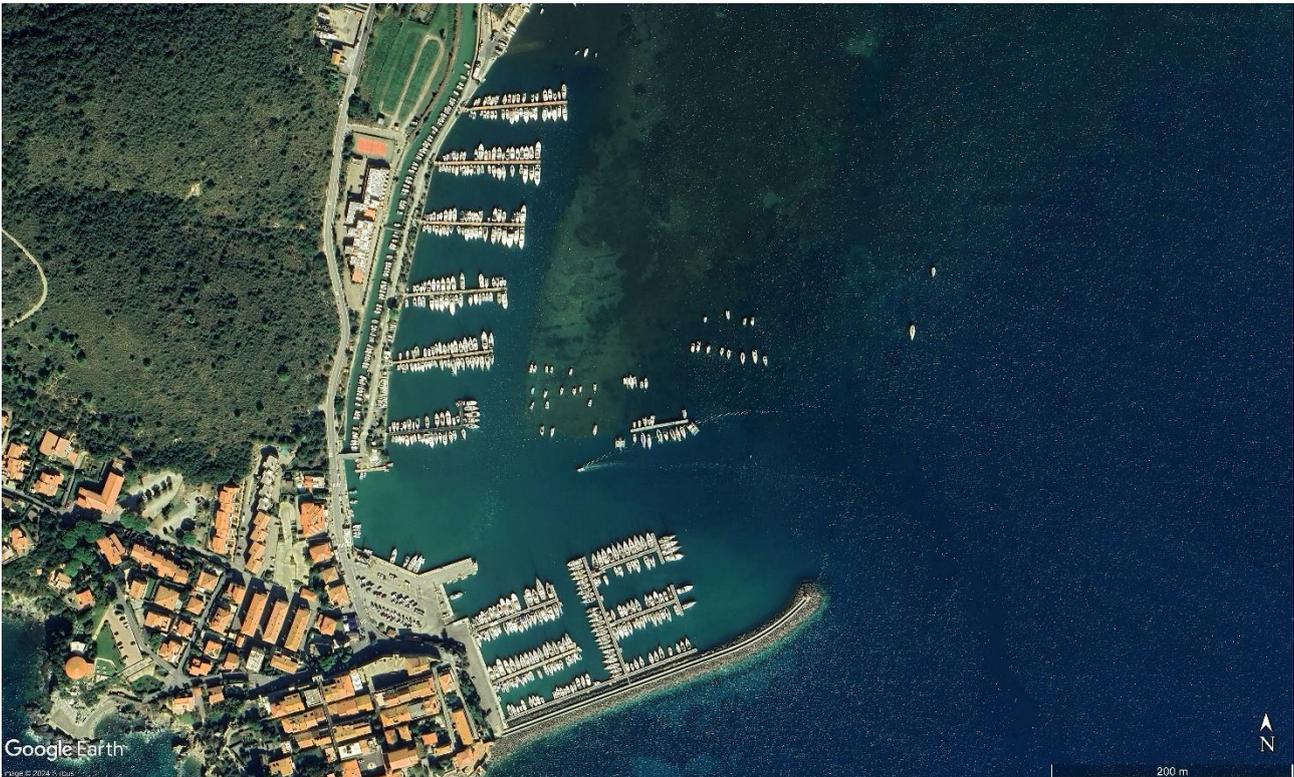


Figura 2. Porto di Talamone

L'esposizione al moto ondoso del porto di Talamone è ben sintetizzata dall'analisi del fetch geografico ed efficace, riassunta nel seguito.

2.1. Fetch geografico ed efficace

Una rappresentazione preliminare delle condizioni di esposizione geografica al moto ondoso del paraggio considerato, vale a dire nel tratto di mare al largo del porto di Talamone, è possibile a valle dell'analisi del fetch geografico ed efficace. Il primo fornisce un'indicazione, per ciascuna direzione di provenienza considerata, della lunghezza del tratto di mare su cui il vento può esercitare la propria azione di generazione del moto ondoso, assumendo comunque come fattore limitante la massima estensione delle perturbazioni tipicamente riscontrabili nel Mediterraneo. I valori così ottenuti, se opportunamente corretti e ragguagliati tenendo in considerazione l'interazione con le direzioni contigue, consentono di pervenire alla definizione del cosiddetto fetch efficace, in Figura 3 è riportato il fetch geografico (tracciato con passo angolare pari a 5°).

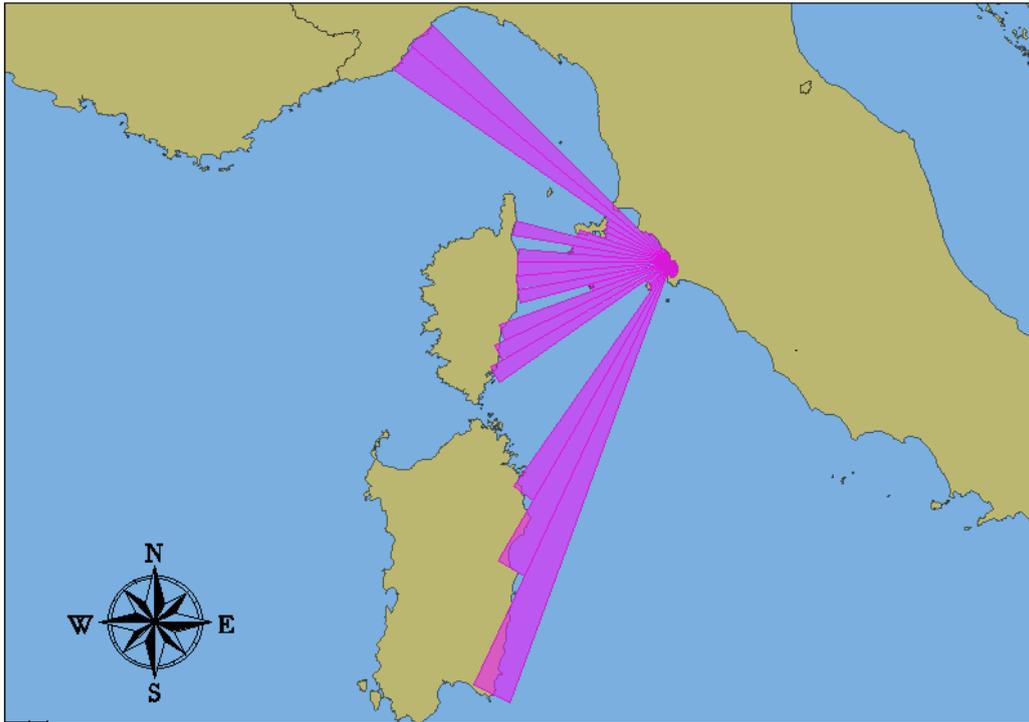


Figura 3: Fetch geografico del porto di Talamone

Come è evidente dalla figura mostrata sopra, il paraggio risulta essere esposto a un settore compreso tra 205°N e 315°N, fatta eccezione per i settori 220-235°N e 290-305°N in cui viene garantito uno schermo rispettivamente dall' isola del Giglio e dall' isola d'Elba. A Ovest (240-285 °N) il fetch geografico è limitato dalla costa della Corsica che si colloca ad una distanza di circa 130 km. In direzione Sud-Ovest il fetch risulta invece limitato dalla costa Orientale della Sardegna.

Per considerare la porzione di mare che contribuisce effettivamente alla generazione di moto ondoso risulta necessario determinare il fetch efficace, questo è funzione del fetch geografico e permette di tenere in considerazione, per una data direzione di generazione media θ_j , anche i contributi delle direzioni comprese tra il settore $\theta_j \pm 90^\circ$ (tale valore di 90° è suggerito dal metodo di Seymour).

Il valore del fetch efficace per una determinata direzione è infatti funzione dei valori dei fetch geografici relativi alle direzioni contigue a quella considerata, tenendo conto di un'opportuna legge di trasferimento, che tiene conto sia della proiezione geometrica della direzione considerata, sia della riduzione energetica associata alla distanza angolare tra la direzione principale e quella contigua (secondo un'assegnata funzione di dispersione laterale).

In particolare, il fetch efficace viene ricavato tramite la seguente relazione:

$$F_{eff}(\theta_j) = \frac{\sum_{i=j-90}^{j+90} F_i \cos^{n+1}(\theta_i - \theta_j)}{\sum_{i=j-90}^{j+90} \cos^n(\theta_i - \theta_j)}$$

In cui:

- $F_{eff}(\theta_j)$ è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione θ_j ;
- F_i è la lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione θ_i ;
- θ_j è la direzione media di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;
- θ_i è la direzione i-esima relativa ad un settore di 180° considerato nell'intorno della direzione θ_j ;
- n è il termine esponenziale (posto pari a 2).

Si mostra in Figura 4 di seguito il fetch efficace risultante dall'applicazione del metodo di cui sopra.

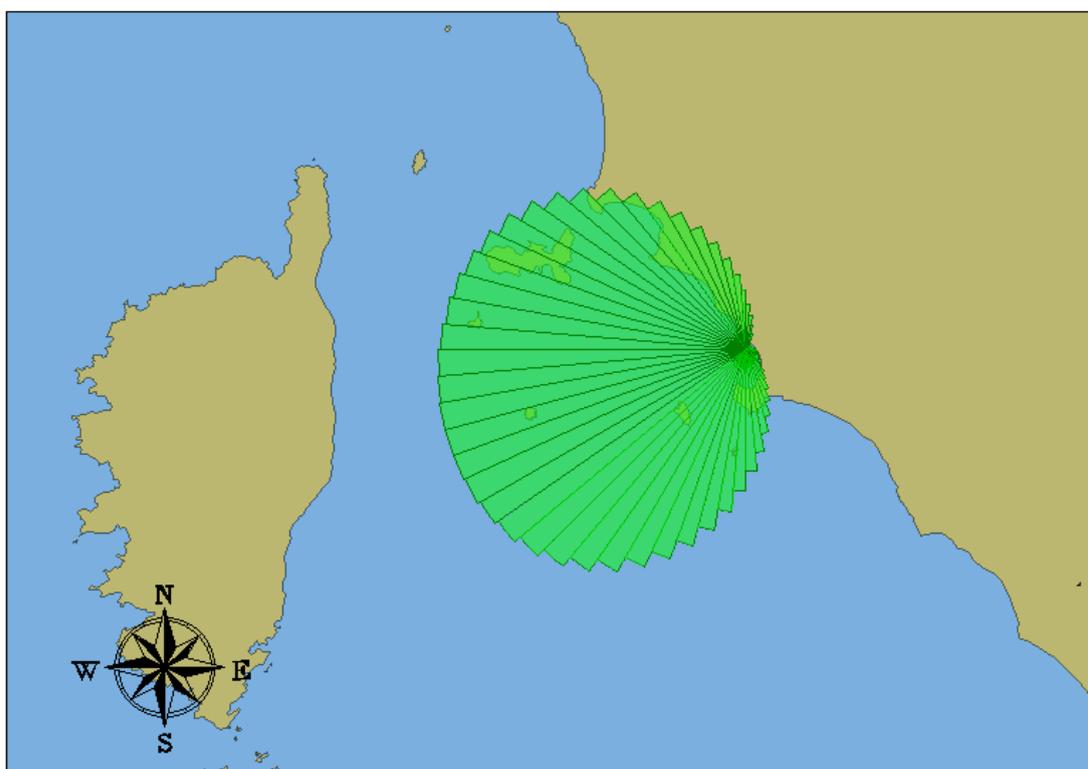
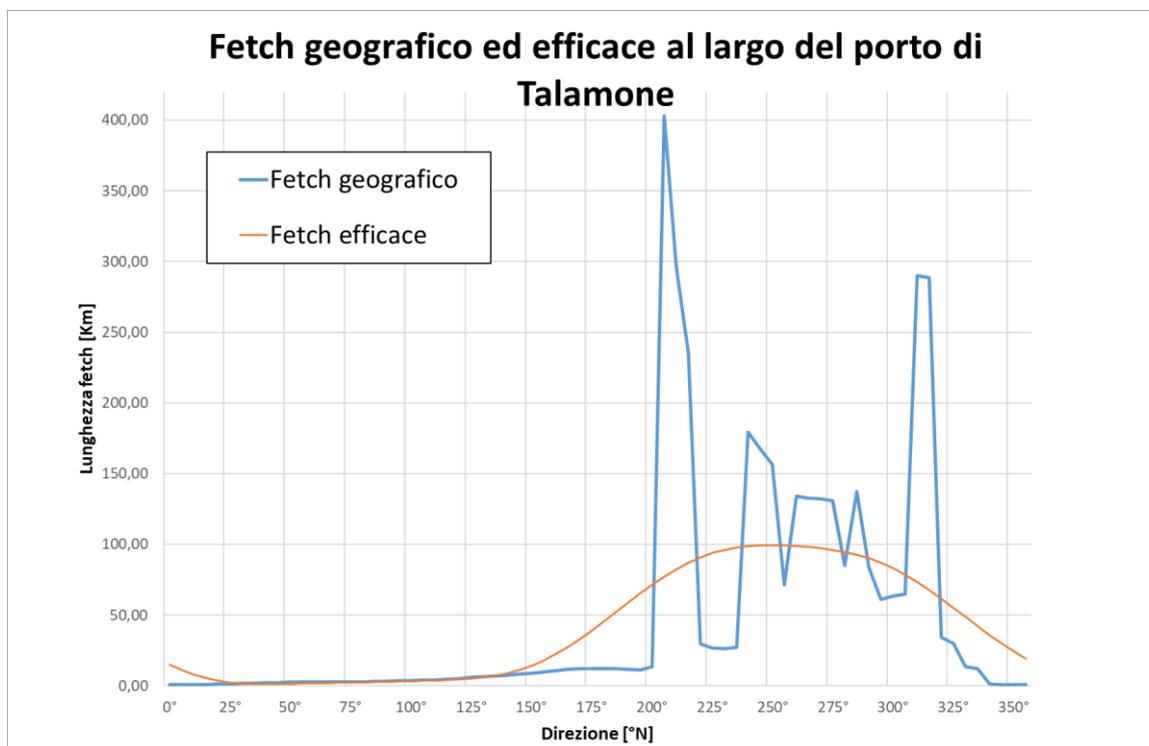


Figura 4: Fetch efficace del porto di Talamone

Dall'applicazione risulta che la massima estensione del fetch efficace è pari a 100 km in corrispondenza della direzione di libeccio-ponente (nello specifico corrispondente alla direttrice 250°N), per la quale il fetch geografico assumeva invece un valore pari a 156 km. È necessario evidenziare come i settori dapprima schermati dalle isole del Giglio e dell' Elba ($220\text{-}235^\circ\text{N}$ e $290\text{-}305^\circ\text{N}$), presentino anch'essi un potenziale di generazione ondosa, per via dei contributi dei settori a questi adiacenti.

Direzione media settore di traversia (°N)	Fetch geografico (Km)	Fetch efficace (Km)	Direzione media settore di traversia (°N)	Fetch geografico (Km)	Fetch efficace (Km)
0°	0,724	14,81	180°	12,382	45,63
5°	0,742	11,02	185°	12,318	52,24
10°	0,767	7,92	190°	11,835	58,87
15°	0,889	5,50	195°	11,381	65,37
20°	1,139	3,72	200°	13,732	71,57
25°	1,551	2,52	205°	403,167	77,34
30°	1,813	1,81	210°	296,162	82,57
35°	2,009	1,48	215°	235,544	87,13
40°	2,363	1,40	220°	29,404	90,95
45°	2,495	1,45	225°	26,673	93,98
50°	2,631	1,55	230°	26,207	96,24
55°	2,672	1,67	235°	27,352	97,81
60°	2,69	1,81	240°	179,33	98,80
65°	2,734	1,95	245°	167,475	99,31
70°	2,801	2,10	250°	156,784	99,44
75°	2,882	2,27	255°	71,332	99,27
80°	2,999	2,45	260°	133,939	98,86
85°	3,137	2,64	265°	132,968	98,22
90°	3,293	2,85	270°	132,075	97,34
95°	3,499	3,09	275°	130,866	96,18
100°	3,791	3,35	280°	85,404	94,69
105°	4,044	3,63	285°	137,525	92,76
110°	4,372	3,95	290°	83,61	90,31
115°	4,759	4,29	295°	61,144	87,21
120°	5,227	4,67	300°	63,404	83,39
125°	5,876	5,16	305°	64,888	78,82
130°	6,37	5,91	310°	289,952	73,60
135°	6,965	7,06	315°	288,625	67,84
140°	7,606	8,77	320°	34,503	61,68
145°	8,276	11,11	325°	30,313	55,28
150°	9,07	14,17	330°	13,495	48,78
155°	9,958	17,92	335°	12,047	42,29
160°	10,881	22,36	340°	1,158	35,96
165°	11,832	27,45	345°	1,031	29,93
170°	12,383	33,10	350°	0,91	24,33
175°	12,401	39,20	355°	0,769	19,27



3. CONDIZIONI METEOMARINE DI LARGO

Ai fini della definizione, per gli scopi di cui presente Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica (PFTE), delle condizioni meteomarine di largo si è fatto riferimento, in larga parte, alle elaborazioni contenute nello Studio Meteomarinario del vigente Piano Regolatore Portuale, redatto dalla scrivente Acquatecno. Nel caso specifico, quest'ultimo fondava, a sua volta, sulle analisi elaborate in sede di sviluppo della progettazione relativa ai lavori di completamento della diga sopraflutto di alcuni anni prima.

3.1. Regime dei venti

Tale analisi è basata sui dati anemometrici (velocità e direzione di provenienza) raccolti dal Centro Meteorologico dell'Aeronautica Militare nella stazione meteo di Pianosa (1968 ÷ 1978), ritenuta sufficientemente rappresentativa anche del paraggio in esame.

La tabella seguente reca il regime annuale dei venti, ovvero la frequenza di accadimento percentuale degli stati di vento suddivisi per classi di direzione di provenienza e intensità (in scala Beaufort).

Tabella 1. Regime annuale dei venti

DIR (*N)	CLASSI DI ALTEZZA VELOCITA' DEL VENTO Vv (Forza Beaufort)												TOT.	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12
10		0.35	0.75	0.98	0.65	0.19	0.12	0.08	0.02	0.00				3.14
20		0.43	0.68	0.86	0.49	0.20	0.16	0.05	0.01					2.88
30		0.43	0.63	0.67	0.74	0.46	0.22	0.07	0.01					3.22
40		0.41	0.52	0.91	1.11	0.44	0.12	0.02	0.01					3.54
50		0.38	0.38	0.42	0.18	0.03	0.00	0.01						1.41
60		0.36	0.38	0.28	0.10	0.02	0.03							1.16
70		0.46	0.41	0.29	0.11	0.04	0.00	0.00						1.31
80		0.53	0.71	0.45	0.20	0.06	0.04							1.99
90		0.52	0.71	0.72	0.32	0.08	0.04	0.01						2.40
100		0.45	0.73	0.56	0.30	0.06	0.06		0.01					2.17
110		0.55	0.86	0.61	0.32	0.08	0.08	0.01						2.48
120		0.50	0.76	0.75	0.25	0.09	0.04	0.00						2.38
130		0.53	0.75	0.46	0.26	0.14	0.10	0.03	0.01					2.28
140		0.62	0.77	0.73	0.46	0.18	0.10	0.04	0.01					2.91
150		0.70	0.72	0.74	0.57	0.26	0.11	0.02	0.00					3.14
160		0.83	1.19	1.01	0.63	0.30	0.12	0.05	0.00					4.13
170		0.70	1.03	1.12	0.73	0.33	0.20	0.07	0.02					4.21
180		0.71	1.28	1.40	1.04	0.41	0.19	0.08	0.00					5.12
190		0.22	0.34	0.46	0.33	0.20	0.10	0.01						1.66
200		0.69	0.74	0.55	0.22	0.07	0.03	0.01						2.30
210		0.43	0.51	0.35	0.25	0.05	0.03							1.63
220		0.28	0.34	0.19	0.13	0.03	0.00	0.00						0.99
230		0.20	0.16	0.14	0.05	0.02	0.00							0.58
240		0.11	0.11	0.06	0.04	0.00	0.00							0.33
250		0.11	0.09	0.04	0.03	0.02								0.27
260		0.09	0.06	0.06	0.03	0.00	0.00							0.25
270		0.09	0.06	0.05	0.04	0.00								0.27
280		0.13	0.04	0.03	0.04	0.00	0.03				0.00			0.26
290		0.07	0.07	0.07	0.05	0.04	0.05	0.02	0.01					0.37
300		0.11	0.12	0.09	0.12	0.15	0.16	0.04	0.02					0.82
310		0.17	0.19	0.15	0.17	0.15	0.11	0.06	0.01	0.00				1.02
320		0.17	0.24	0.30	0.31	0.18	0.14	0.06	0.01					1.39
330		0.27	0.46	0.43	0.45	0.23	0.14	0.04	0.00	0.00				2.03
340		0.64	1.20	1.15	1.26	0.50	0.16	0.02	0.02	0.01	0.00			4.95
350		0.50	1.04	1.40	1.33	0.34	0.09	0.03	0.02					4.75
360		0.19	0.37	0.91	1.62	0.54	0.19	0.04	0.02					3.88
Calma	22.40													22.40
TOT.	22.40	13.94	19.38	19.41	14.94	5.89	2.94	0.88	0.22	0.02	0.01			100.00
Tot. cumul.		36.34	55.72	75.13	90.07	95.96	98.90	99.75	99.97	99.99	100.00	100.00	100.00	

	<p style="text-align: center;">INTERVENTO DI ADEGUAMENTO INFRASTRUTTURALE DELL'APPRODO DI TALAMONE FINALIZZATO ALLA SUA RIQUALIFICAZIONE IN PORTO TURISTICO</p> <p style="text-align: center;"><i>[Domanda di Concessione D.M. ai sensi del D.P.R. 509/1997]</i></p>
Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica	
SM – Studio meteomarinò	

Analizzando la distribuzione delle frequenze annuali è possibile evidenziare che i venti caratterizzati da intensità superiore a 24 nodi presentano una percentuale di accadimento maggiore per i settori 130-180°N e 310-350°N.

3.2. Regime delle onde e relativa analisi statistica degli eventi estremi

A partire dai dati di vento sopra illustrati, applicando modellistica numerica di ricostruzione indiretta del moto ondoso basata sul metodo SMB (*Sverdrup-Munk-Bretschneider*), si perviene alla seguente tabella recante il regime ondoso annuale al largo. Più nel dettaglio, in tabella è riportata la frequenza annuale degli stati di mare suddivisi per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza al largo.

Tabella 2. Regime annuale delle onde

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<2.5	2.5+0.5	0.5+1.0	1.0+1.5	1.5+2.0	2.0+2.5	2.5+3.0	3.0+3.5	3.5+4.0	4.0+4.5	4.5+5.0	5.0+5.5	5.5+6.0	6.0+6.5		>=6.5
10	0.78	0.12	0.01													0.91
20	0.05	0.00														0.05
30	0.22	0.16	0.07													0.45
40	0.01															0.01
50	0.01															0.01
60	0.04	0.07	0.04	0.00												0.16
70	0.84	0.16	0.08													1.08
80	0.38	0.05														0.42
90	0.35	0.04														0.39
100	1.38	0.29	0.03	0.01												1.71
110	0.31	0.05	0.00													0.37
120	0.28	0.02														0.31
130	0.40	0.08	0.01													0.47
140	0.53	0.22	0.06	0.00												0.82
150	1.54	0.10	0.01													1.65
160	3.50	0.37	0.08													3.94
170	4.53	0.62	0.19													5.34
180	4.43	0.91	0.34	0.04												5.73
190	3.57	2.03	1.39	0.39	0.04											7.43
200	4.52	3.13	2.85	1.31	0.53	0.21	0.07	0.01	0.00							12.44
210	3.13	1.70	1.65	0.71	0.39	0.15	0.11	0.01	0.00							7.86
220	2.43	0.46	0.43	0.20	0.03	0.02	0.00									3.58
230	1.23	0.20	0.17	0.10	0.03	0.01	0.00									1.74
240	0.42	0.08	0.09	0.01	0.01											0.63
260	0.47	0.14	0.12	0.02												0.76
260	0.48	0.08	0.05			0.01										0.62
270	0.37	0.06	0.09	0.06	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01		0.00					0.69
280	0.43	0.19	0.30	0.29	0.18	0.11	0.09	0.02	0.01	0.00						1.84
290	1.11	0.73	0.92	0.54	0.27	0.18	0.06	0.01	0.01							3.83
300	2.86	2.19	1.68	0.45	0.12	0.02	0.01	0.00								7.34
310	3.31	2.71	1.54	0.14	0.04	0.02										7.76
320	2.21	1.11	0.61	0.07	0.01											4.01
330	2.70	1.16	0.59	0.05												4.50
340	3.19	1.55	0.47													5.21
350	2.90	1.07	0.21													4.17
360	1.70	0.21	0.05													1.96
TOT.	56.83	22.05	13.93	4.41	1.68	0.78	0.38	0.08	0.04	0.00	0.00					100.00
Tot cumul.	78.68	92.81	97.03	98.71	99.48	99.86	99.95	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Di seguito è riportata la rosa delle onde recante la distribuzione direzionale della frequenza di accadimento degli stati di mare ricostruiti di cui sopra, caratterizzati da altezza d'onda significativa $H_s > 0,5$ m.

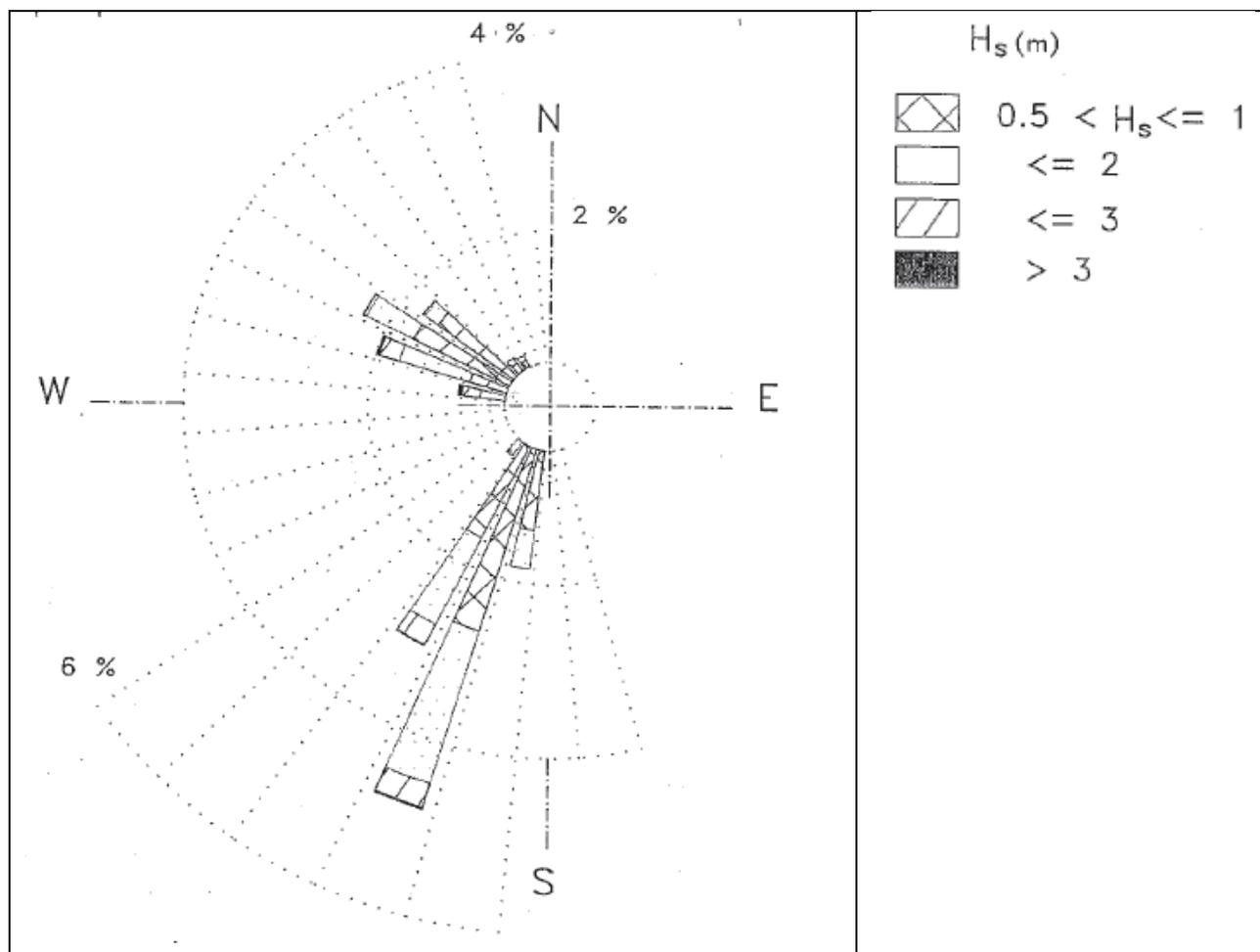


Figura 5. Rosa delle onde

La trattazione è integrata delle analisi statistiche finalizzate alla determinazione degli eventi estremi di moto ondoso, riportata nel seguito. A tal scopo si è proceduto ad eseguire un'elaborazione statistica delle onde estreme in acqua profonda al fine di ricavare, mediante regolarizzazione della serie degli eventi estremi secondo note funzioni probabilistiche, le caratteristiche del moto ondoso da associare a differenti ed assegnati tempi di ritorno. A tale scopo la serie ondometrica delle altezze d'onda significative ricostruite è stata elaborata impiegando le distribuzioni di probabilità di Weibull e di Gumbel secondo il metodo proposto da Goda, individuando quale soglia di selezione degli eventi estremi l'altezza d'onda di 2,0 m.

I risultati dell'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso ottenuti per il settore di traversia 150-230°N sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 3. Risultati dell'analisi statistica degli eventi estremi

Tempo di ritorno	Hs
[anni]	[m]
5	3,6

10	4,0
25	4,4
50	4,7
100	5,1

3.3. Analisi dei livelli

Un aspetto rilevante ai fini della progettazione è senza dubbio l'analisi delle variazioni del livello del mare.

In definitiva, sommando i contributi di marea astronomica e meteorologica, si perviene ai seguenti dislivelli totali rispetto al livello medio del mare.

- max innalzamento: + 65 cm;
- max abbassamento: -47 cm.

Considerando che, in generale, non si verifica la piena concomitanza dei fenomeni di natura meteorologica e astronomica, si ritiene che i valori di cui sopra possono essere ridotti del 25%, pervenendo in ogni caso a una stima cautelativa.

4. STUDIO DELLA PROPAGAZIONE ONDOSA LARGO-RIVA

Al fine di pervenire alla definizione del campo d'onda all'interno del bacino portuale di Talamone, è stato sviluppato lo studio della propagazione ondosa da largo a riva o, meglio, al piede delle opere foranee o comunque in corrispondenza dell'imboccatura portuale, ad oggetto gli stati di mare definiti al largo di cui al paragrafo precedente.

I risultati del presente studio costituiscono poi i valori di ingresso per lo studio della penetrazione ondosa all'interno del bacino portuale, oggetto del paragrafo successivo.

Per la simulazione numerica bidimensionale è stato utilizzato il modello matematico MIKE 21, sviluppato dal *Danish Hydraulic Institute* (DHI). Esso è basato sulla risoluzione alle differenze finite su griglia strutturata o flessibile, ed è costituito da differenti moduli che implementano le equazioni che governano gran parte dei fenomeni idraulici di interesse. Più nel dettaglio, nel caso in esame è stato utilizzato il modello MIKE21 SW (*Spectral Wave*), che consente di simulare la propagazione ondosa in prossimità dell'area di studio tenendo conto di vari fenomeni quali *shoaling*, diffrazione, rifrazione, riflessione semplice e l'amplificazione ondosa indotta dal vento che spira all'interno di essa.

4.1. Stati di mare di ingresso oggetto di simulazione

Quali stati di mare (altezza d'onda significativa, periodo d'onda, direzione di provenienza) di ingresso per le simulazioni di propagazione ondosa largo-riva sono stati utilizzati i dati ricavati dallo studio meteomarinario di

largo illustrato al paragrafo precedente. In particolare è stata analizzata una forzante ondosa proveniente da Libeccio (210°N), ed un vento che spira da Sud (170°N). Sono stati studiati eventi di moto ondoso assimilabili al tempo di ritorno 50 anni per la simulazione degli eventi estremi, ed un tempo di ritorno 5 anni per lo studio dell'operabilità del porto. Le velocità del vento simulate sono state di 20 m/s per un vento assimilabile a un evento di burrasca (scala Beaufort 8) e 30 m/s per un evento di tempesta violenta (scala Beaufort 11), entrambi di durata 2 ore. Nella tabella seguente sono riportate gli stati di mare di ingresso impiegati.

Tabella 4. Stati di mare di ingresso di riferimento

T_R	H_s	T_p	Dir
[anni]	[m]	[s]	[°N]
5	2,8	7,7	210
50	4,7	9,4	210

4.2. Modello di calcolo utilizzato

Il codice numerico MIKE21 Spectral Waves (SW) viene utilizzato per valutare le trasformazioni del moto ondoso in aree costiere ed off-shore sia per hind-cast che per forecast. Il modello è in grado di simulare:

- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra le onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alla batimetria;
- diffrazione;
- riflessione semplice.

Il modello MIKE 21 SW è basato sulla risoluzione numerica nel dominio e nel tempo dell'equazione di bilancio dell'azione delle onde, di seguito riportata.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla_x \cdot (c_g A) + \nabla_y \cdot (c_g A) + \nabla_\theta \cdot (c_g A) = S$$

Il modello utilizza una formulazione parametrica direzionalmente disaccoppiata e una formulazione completamente spettrale. La formulazione parametrica direzionalmente disaccoppiata si basa su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'azione ondosa. La parametrizzazione viene effettuata

nel dominio delle frequenze introducendo lo zeroth, ed il primo momento dello spettro delle onde come variabili dipendenti. La formulazione completamente spettrale si basa sull'equazione di conservazione dell'onda come descritto da Komen et al. (1994) e Young (1999), in cui lo spettro di frequenza direzionale dell'azione dell'onda è la variabile dipendente. Il modulo SW comprende anche due formulazioni per il tempo. Una formulazione quasi stazionaria ed una non stazionaria, in quella quasi stazionaria la variabile tempo viene rimossa come variabile indipendente e viene associata una soluzione stazionaria ad ogni passo temporale. Quando viene utilizzata la soluzione stazionaria non è possibile inserire il vento come forzante.

L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può essere effettuata utilizzando delle boundaries aperte dove poter inserire il moto ondoso di interesse, oppure inserendo delle boundaries chiuse ed immettere la forzante del vento. L'output principale di MIKE21 SW è il campo d'onda residua all'interno della zona di studio.

4.3. Definizione della griglia di calcolo

Per la propagazione da largo dell'onda si è costruita una *mesh* di calcolo irregolare (flexible mesh) con passo di discretizzazione dx e dy pari a 100m a largo ed un passo di 5 m l'ungo l'intera area portuale, la boundary aperta dove è stata inserita l'onda di progetto si trova lungo la batimetrica – 110 m s.l.m. per assicurarsi che non risenta dei fondali. Nelle figure seguenti sono riportate la griglia di calcolo costruita, le batimetrie e la condizione al contorno utilizzata.



Figura 6. Griglia di calcolo MIKE21 SW

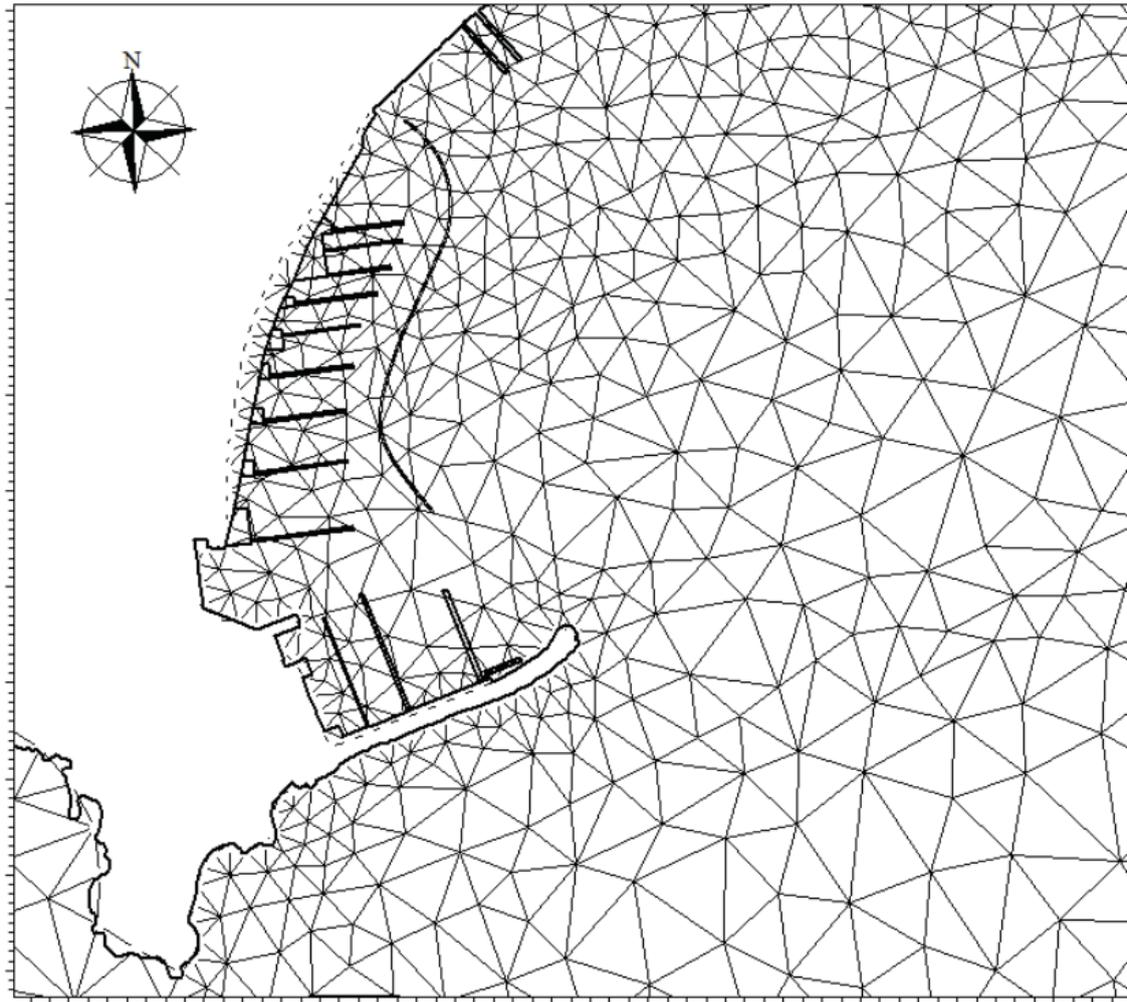


Figura 7. Dettaglio griglia di calcolo in prossimità del porto

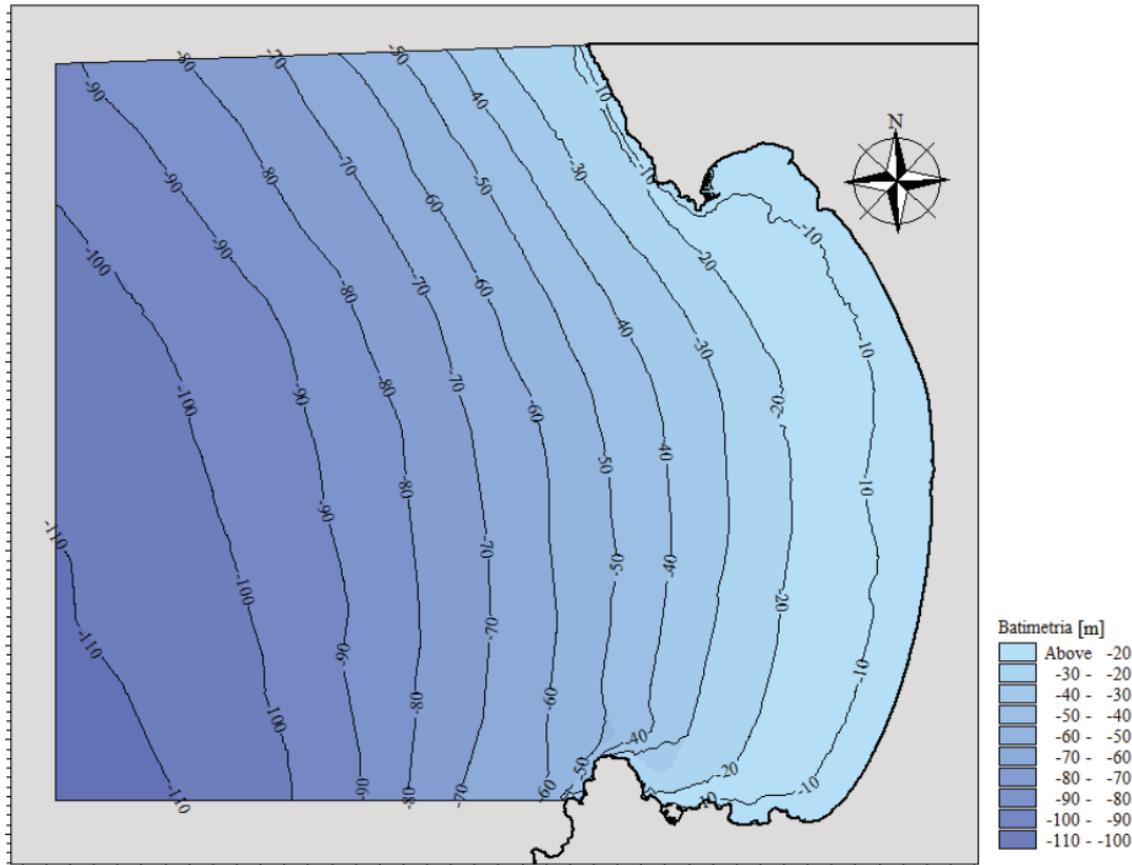


Figura 8. Batimetria

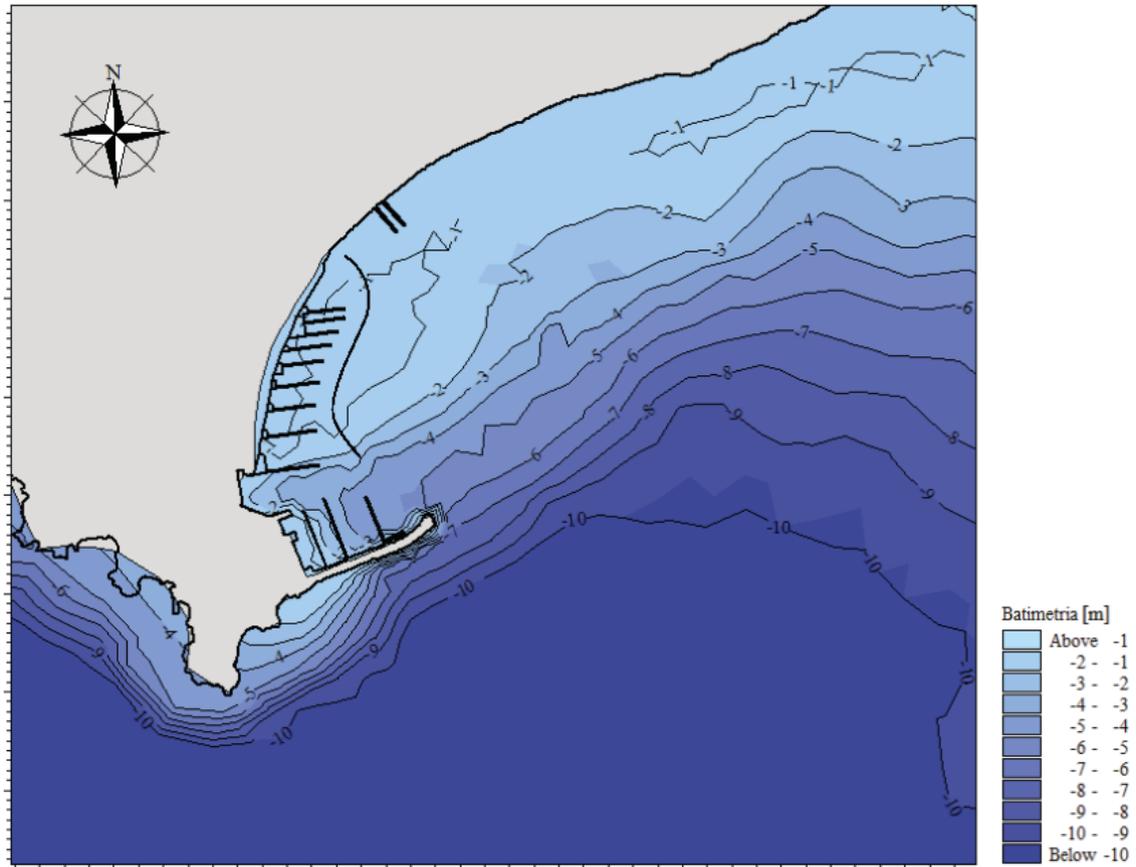


Figura 9. Dettaglio batimetria in corrispondenza del porto

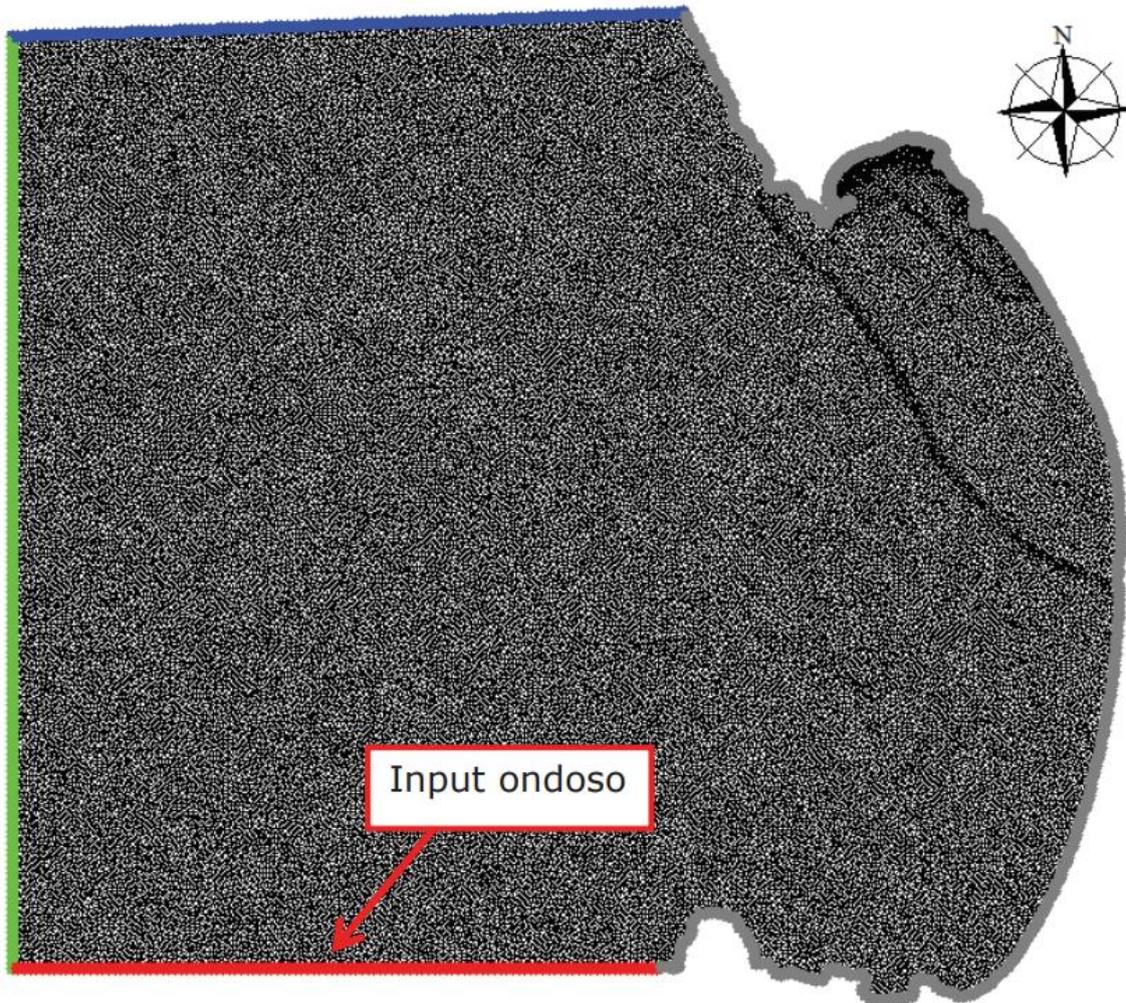


Figura 10. Condizioni al contorno MIKE 21 SW

4.4. Periodo di simulazione e passo di integrazione

Il periodo di simulazione è stato scelto in modo tale da poter garantire l'intero sviluppo del moto ondoso. Questo periodo è strettamente legato alle dimensioni del dominio di calcolo, dovendo simulare un'area vasta, si è scelto un intervallo di tempo pari ad un'ora per la propagazione ondosa da largo ai pressi dell'imboccatura portuale, questo risulta sufficiente per lo sviluppo del moto ondoso in tutto il dominio di calcolo.

Il passo successivo è stato impostare un time step sufficiente a garantire la stabilità del modello, nel caso in esame si è scelto pari ad un secondo.

4.5. Risultati delle simulazioni

I risultati dell'applicazione del modello numerico MIKE21 SW (*Spectral Waves*), mostrati nelle figure successive, sono riportati in via tabellare di seguito.

Tabella 5. Stati di mare oggetto di simulazione

Tr[anni]		Hs[m]	Tp[s]	Dir[°N]
5	Largo	2.80	7.70	210
	In prossimità del porto	2.30	7.70	216
50	Largo	4.70	9.40	210
	In prossimità del porto	3.80	9.40	217

Scala Beaufort		Hs[m]	Tp[s]	Dir[°N]
8 (20m/s)	In prossimità del porto	1.20	3.80	181
11 (30m/s)	In prossimità del porto	1.95	4.50	181

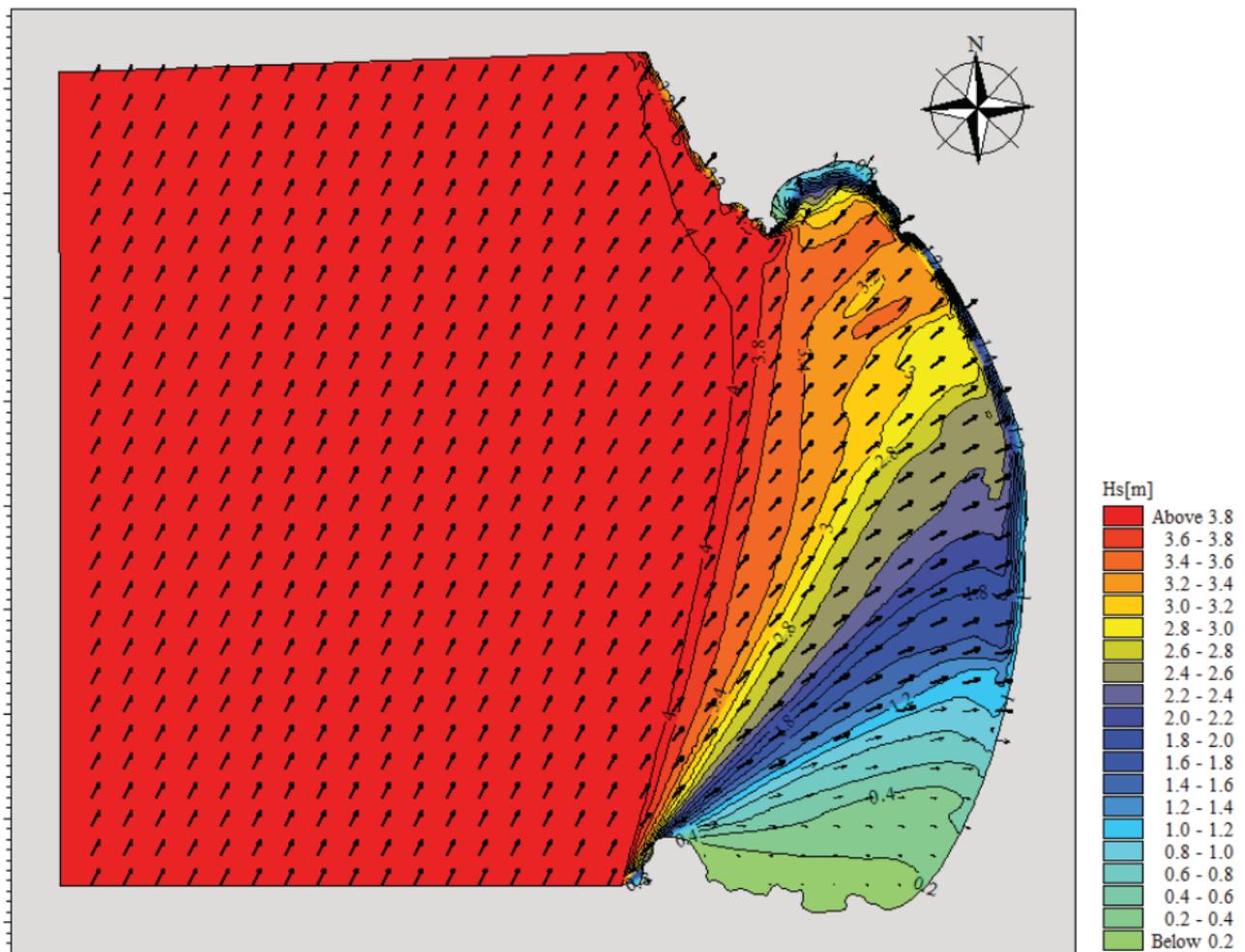


Figura 11. Hs=4,70 m, Tp=9,40 s, Dir=210°N

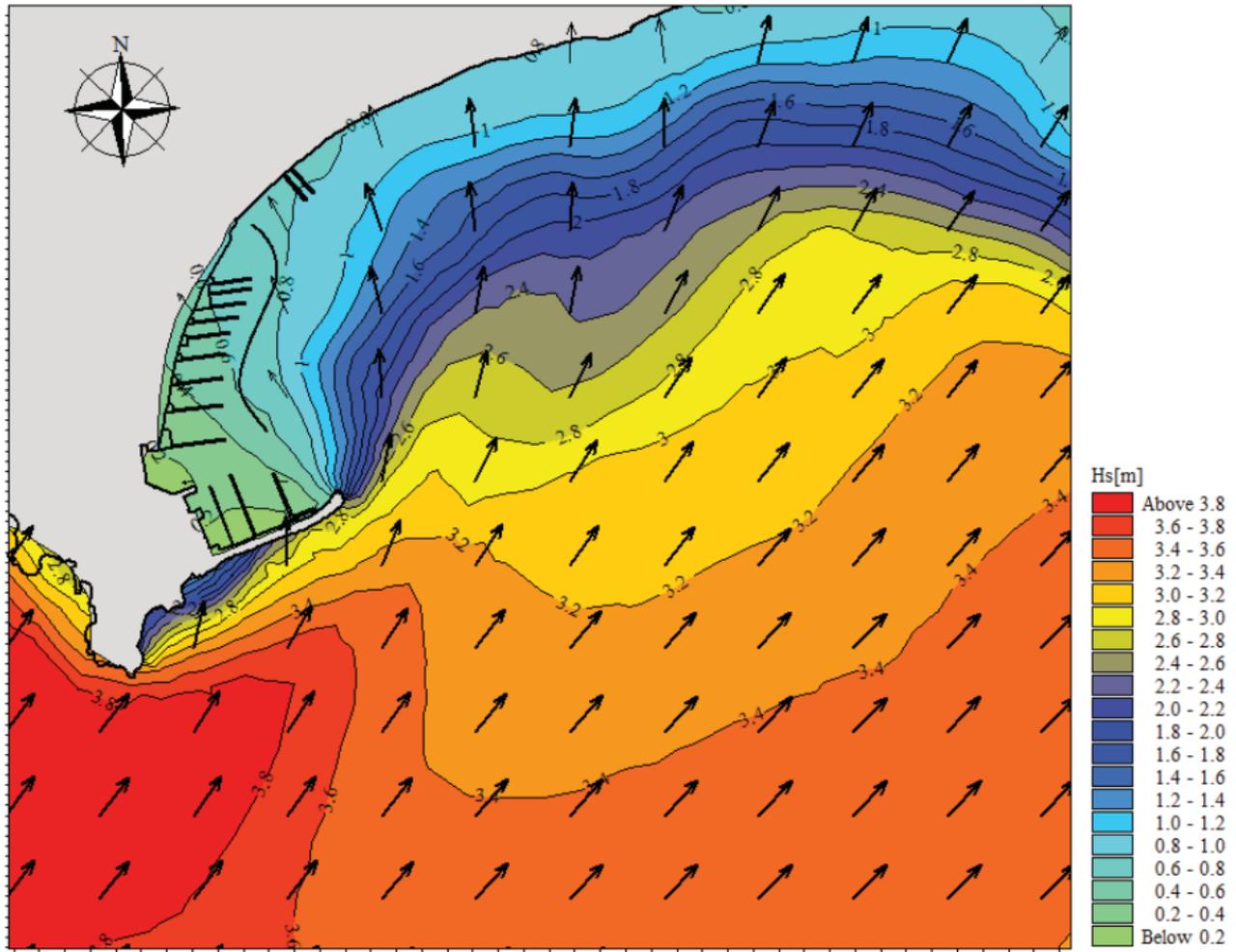


Figura 12. Hs=4,70 m, Tp=9,40 s, Dir=210°N (dettaglio)

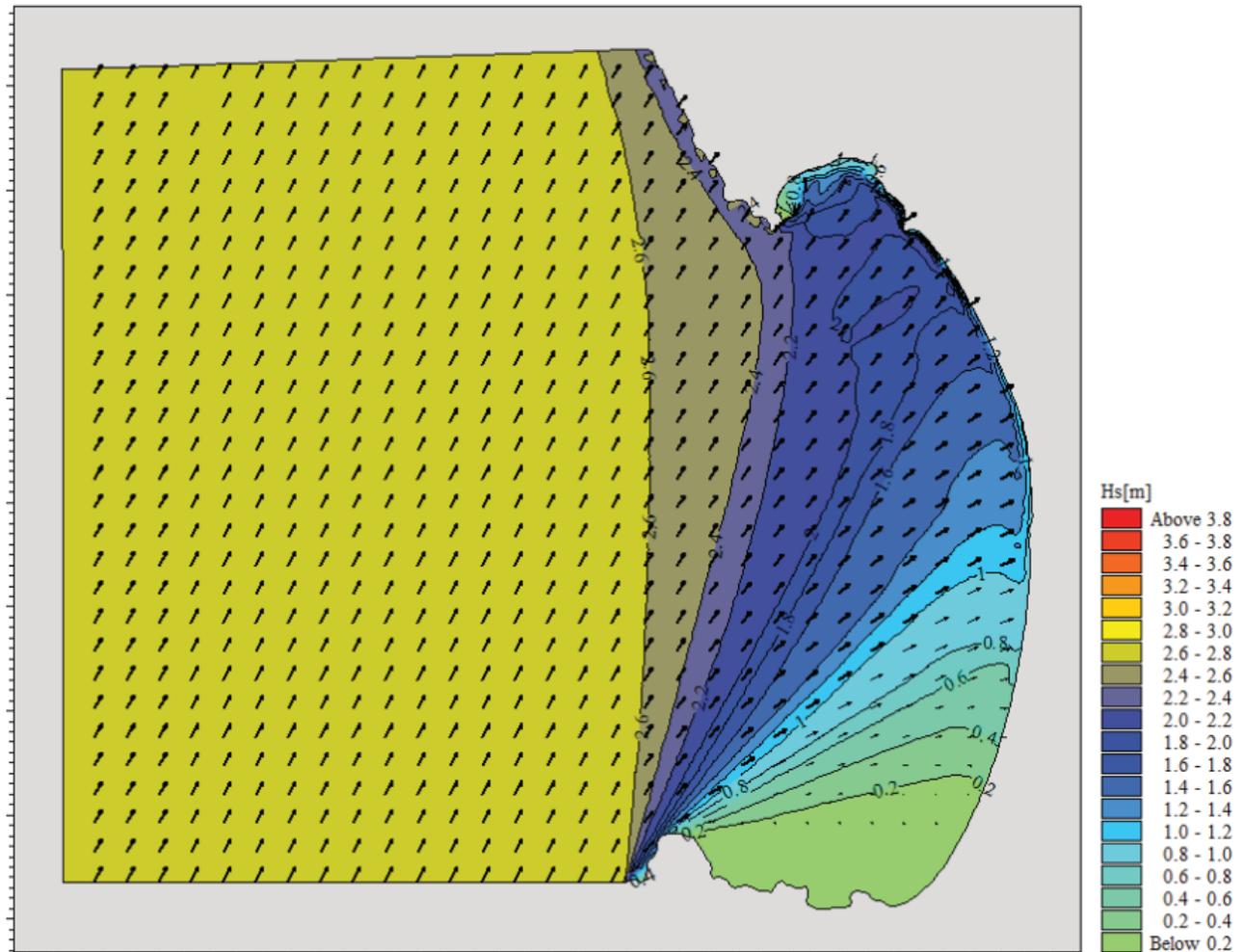


Figura 13. Hs=2,80 m, Tp=7,70 s, Dir=210°N

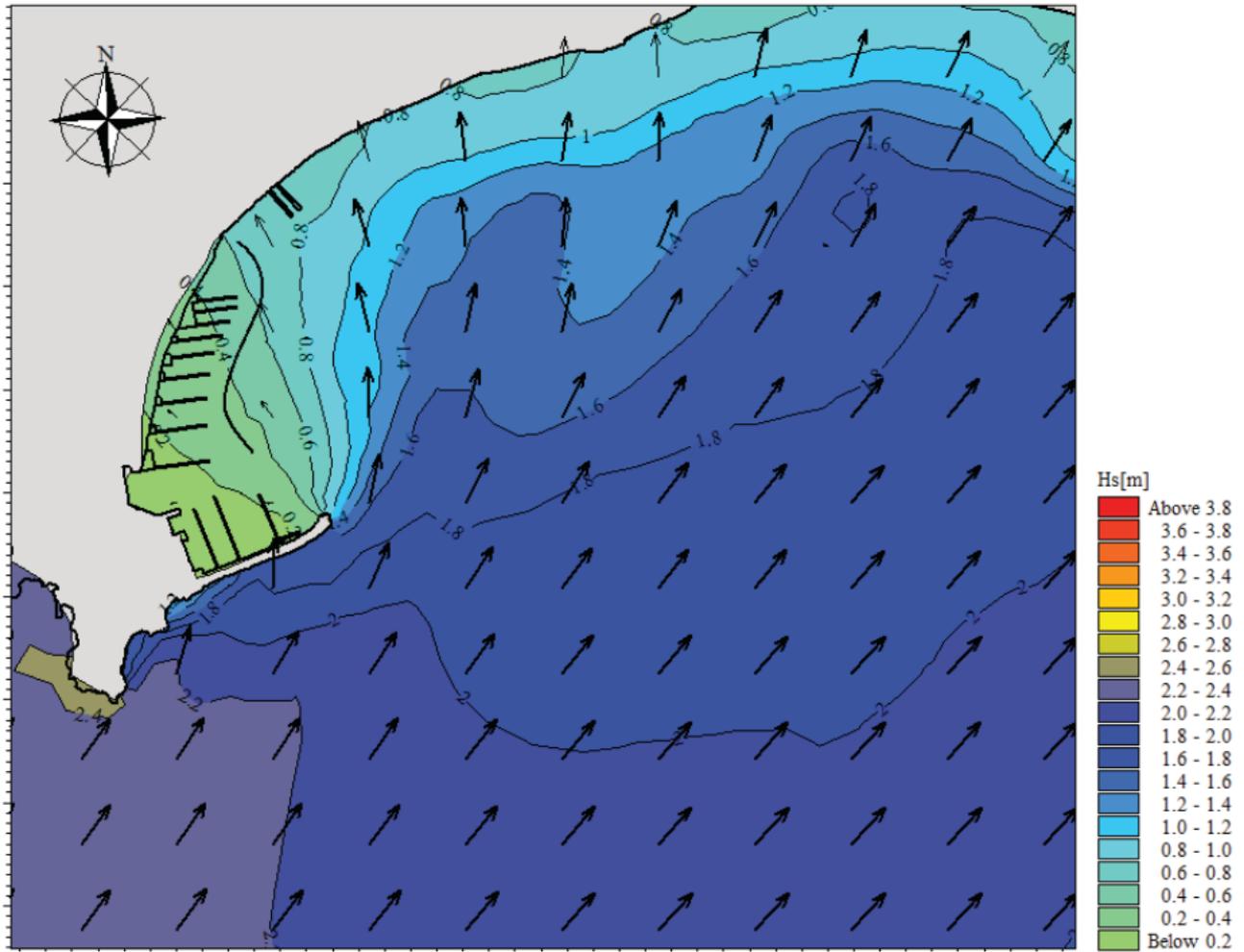


Figura 14. Hs=2,80 m, Tp=7,70 s, Dir=210°N (dettaglio)

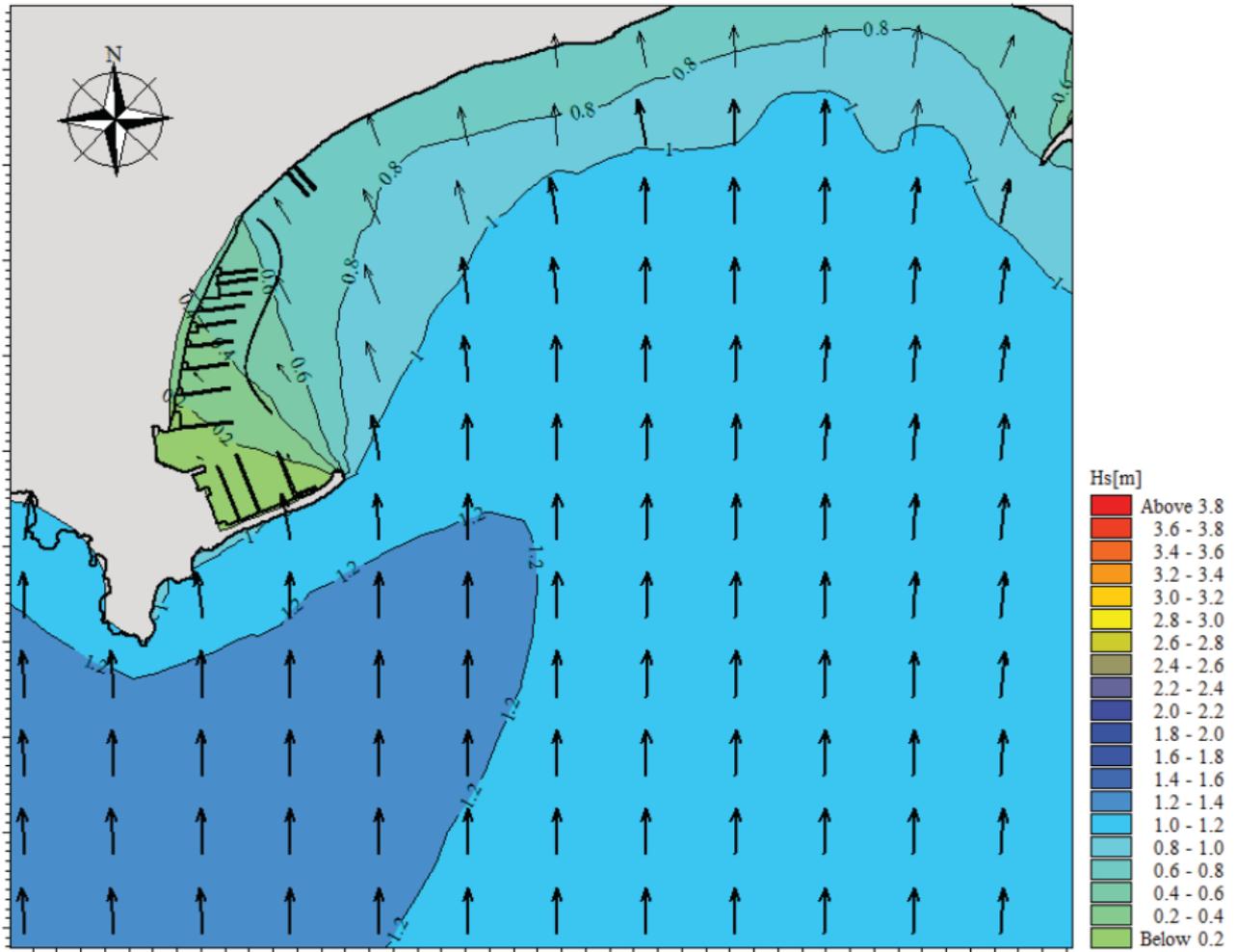


Figura 15. Velocità vento=20 m/s, Dir=170°N, Durata=2 h

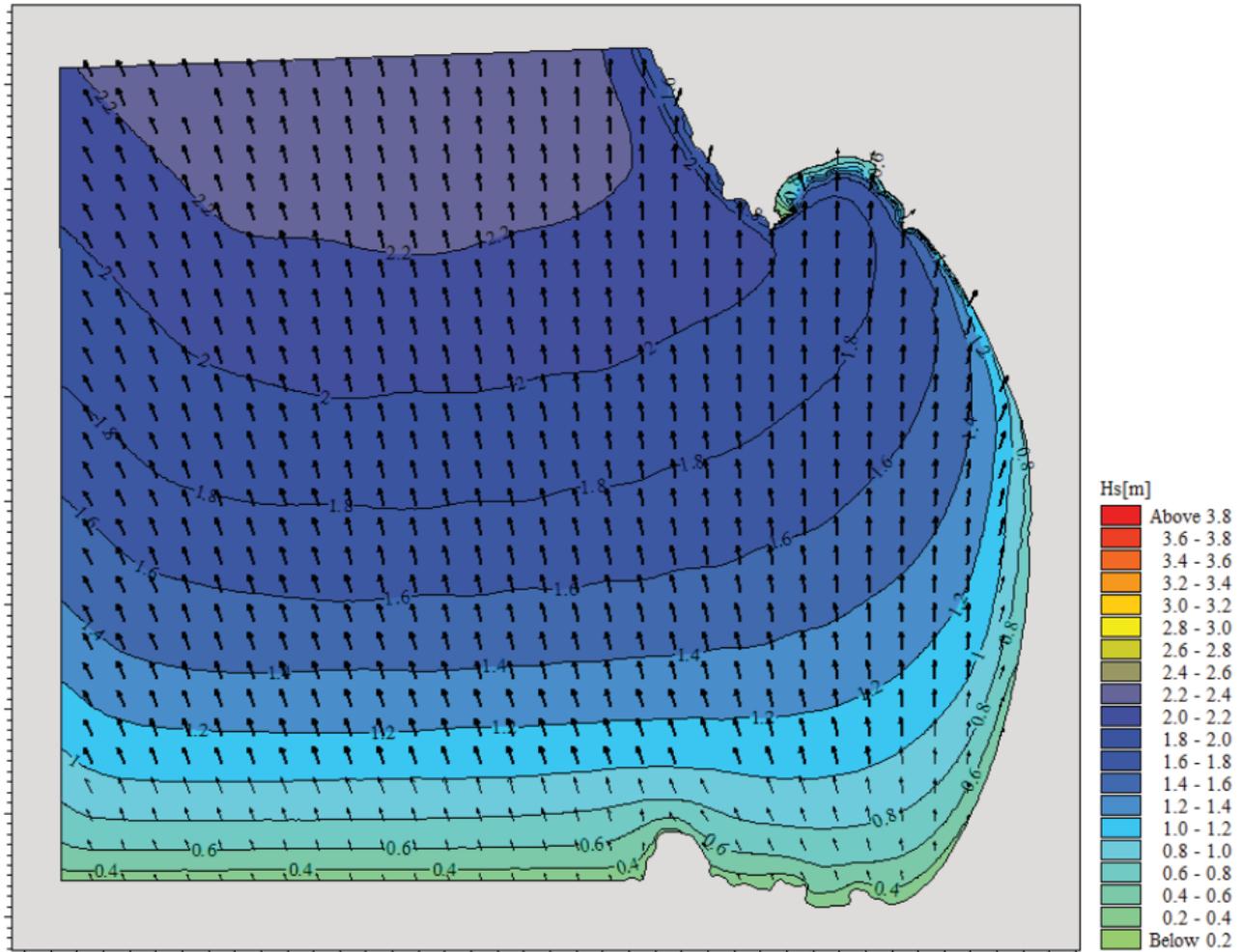


Figura 16. Velocità vento=30 m/s, Dir=170°N, Durata=2 h

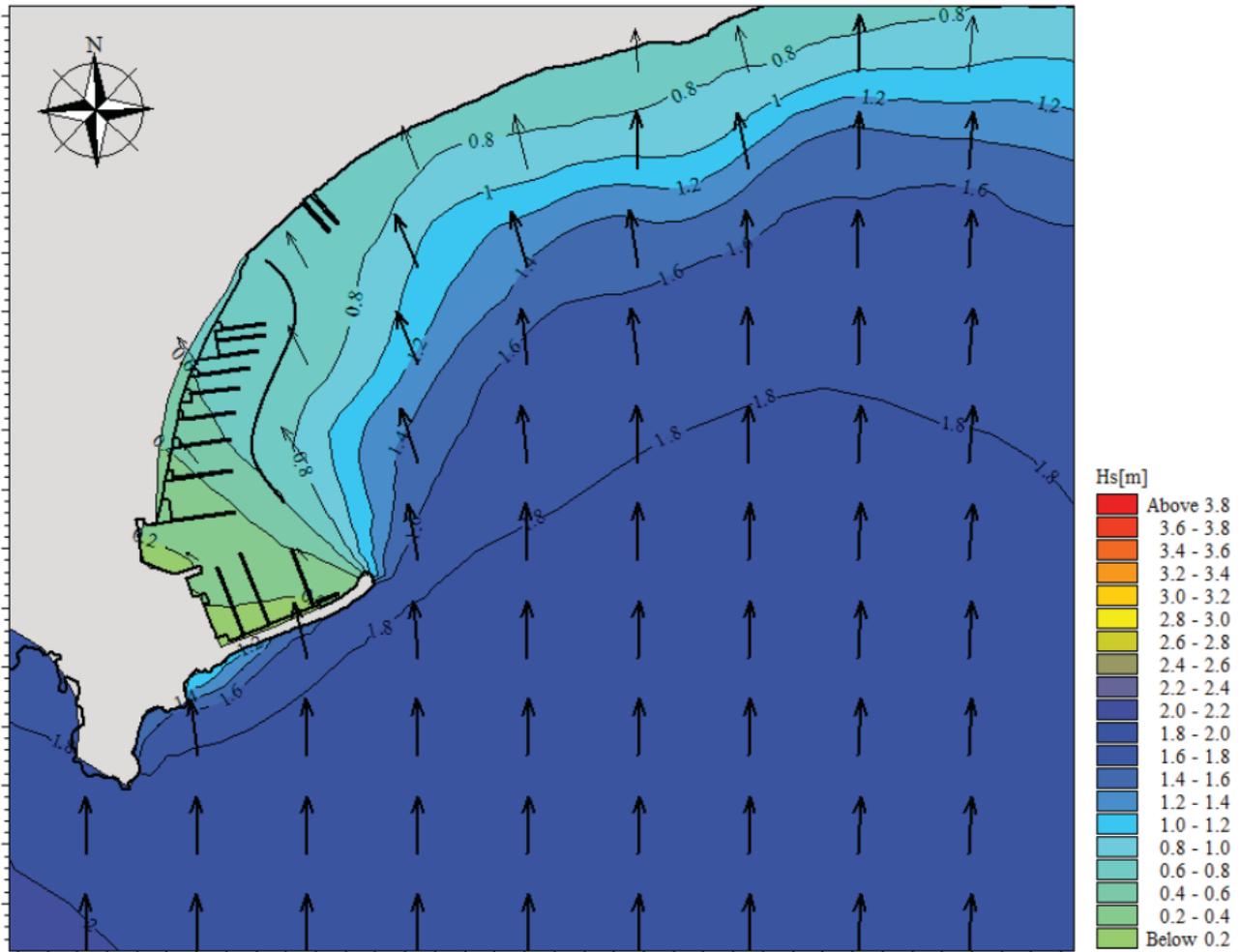


Figura 17. Velocità vento=30 m/s, Dir=170°N, Durata=2 h

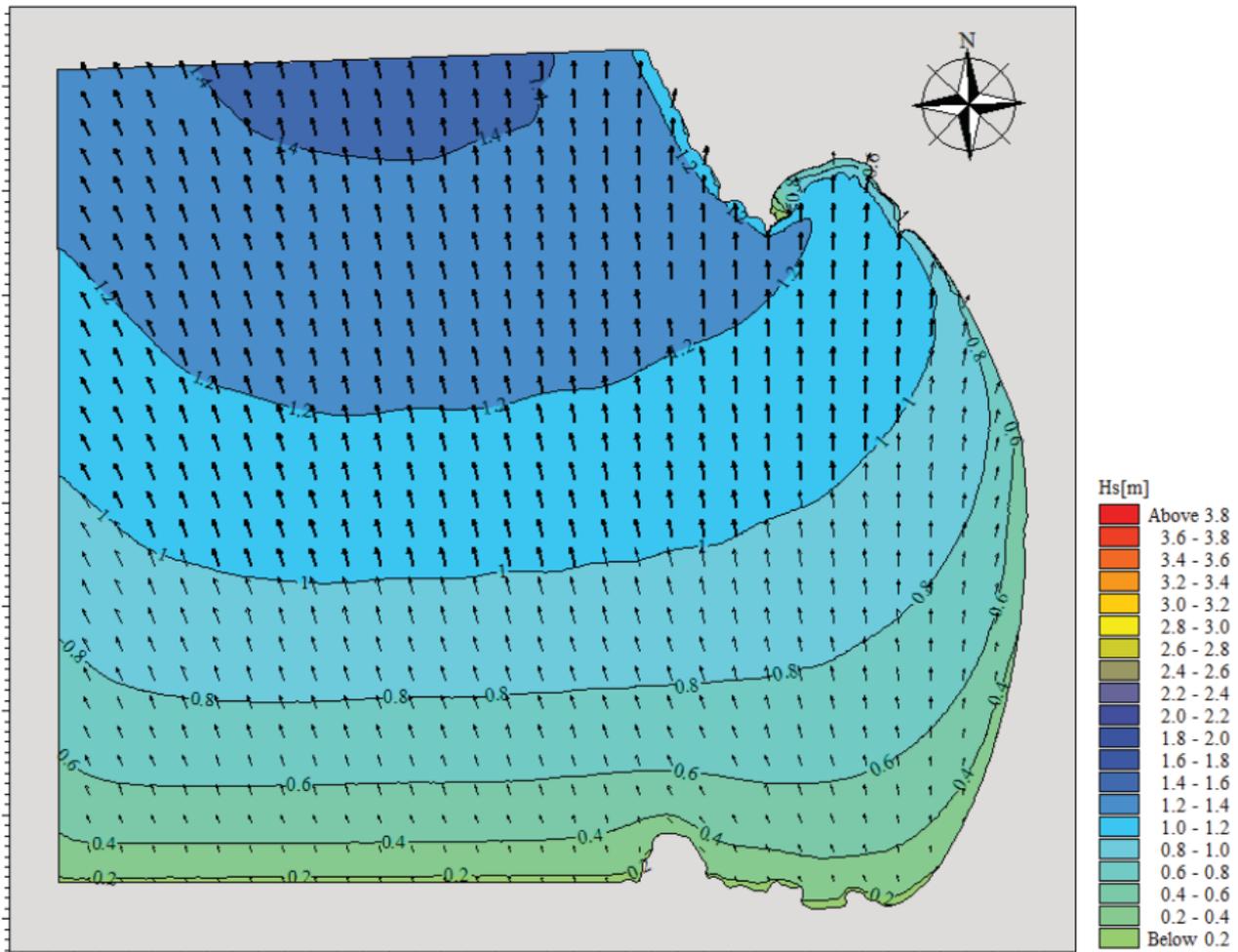


Figura 18. Velocità vento=20 m/s, Dir=170°N, Durata=2 h

5. STUDIO DELLA PENETRAZIONE ONDOSA ALL'INTERNO DEL BACINO PORTUALE

I risultati dello studio di propagazione da largo a riva di cui al precedente paragrafo, estratti in corrispondenza dell'imboccatura del porto di Talamone, sono stati impiegati quali dati di ingresso per il presente studio della penetrazione ondosa all'interno del bacino portuale.

Nel caso specifico, per la simulazione numerica bidimensionale è stato impiegato il modello matematico MIKE 21 BW (*Boussinesq Wave*), sviluppato dal *Danish Hydraulic Institute* (DHI), che consente di simulare l'agitazione ondosa all'interno di aree portuali tenendo conto di vari fenomeni quali, *shoaling*, diffrazione, rifrazione, attrito con il fondo, riflessione parziale e trasmissione degli spettri d'onda.

5.1. Stati di mare di riferimento per la simulazione

Per la definizione di moto ondoso (altezza, periodo, direzione di provenienza) in ingresso al porto di Talamone sono stati utilizzati i dati di moto ondoso ricavati dal precedente studio di propagazione del moto ondoso estratti in prossimità del porto per poter poi simulare la penetrazione degli stessi all'interno del bacino portuale.

Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche del moto ondoso utilizzato.

Tabella 6. Stati di mare di riferimento

Scala Beaufort	Tr[anni]	Hs[m]	Tp[s]	Dir[°N]
	5	2.30	7.70	216
	50	3.80	9.40	217
8 (20m/s)		1.20	3.80	181
11 (30m/s)		1.95	4.50	181

La penetrazione all'interno del dominio di calcolo viene eseguita dal modello considerando l'intero spettro in termini di direzione e frequenza, utilizzando in particolare onde direzionali irregolari con spettro JONSWAP medio. Nel caso in esame è stata simulato anche la presenza di un innalzamento del livello medio mare di +0.65 m.

5.2. Modello di calcolo utilizzato

Il modello MIKE21 BW (*Boussinesq Wave*) è basato sulla risoluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq in due dimensioni (Madsen et al., 1997) attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza che è introdotta nelle equazioni del moto considerando gli effetti delle accelerazioni verticali sulla distribuzione di pressione.

Le equazioni di Boussinesq sono risolte in riferimento ad una formulazione basata sul flusso di quantità di moto con un miglioramento nella descrizione della dispersione lineare. Queste equazioni di Boussinesq estese rendono il modello adatto alla simulazione di onde direzionali che viaggiano da acque profonde ad acque basse. La profondità massima rappresentabile con le equazioni di Boussinesq estese è pari a circa mezza lunghezza d'onda, mentre con la formulazione classica si scende a circa lo 0,22.

Tale modello è in grado di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti. Questi includono:

- Shoaling;
- Rifrazione;
- Diffrazione;
- Attrito con il fondo;

- Frangimento;
- Riflessione parziale;
- Trasmissione di spettri d'onda (direzione e frequenza) che si propagano in batimetrie complesse.

Mike 21 BW include la possibilità di considerare la porosità delle strutture per la simulazione della riflessione parziale e la trasmissione attraverso pali o frangiflutti. Inoltre è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia ondosa.

L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo è stata eseguita mediante una linea di generazione del moto ondoso. L'output principale del BW è il campo di agitazione residua all'interno del bacino di studio.

5.3. Definizione della griglia di calcolo

Le griglie di calcolo all'interno dell'area di studio sono state costruite mediante delle *mesh* di calcolo utilizzando un passo di discretizzazione dx e dy di 4m in quanto tale modello necessita di almeno 7 punti di calcolo per ogni lunghezza d'onda. In tutte le simulazioni si hanno 450 punti in direzione x e 550 punti in direzione y , l'origine degli assi della griglia costruita per la simulazione del moto ondoso ha coordinate Gauss-Boaga 2535155 E, 4713270 N ed una rotazione di 40° in modo tale da poter avere i fronti d'onda in ingresso ortogonali al contorno della mesh, mentre la griglia utilizzata per la simulazione delle onde generate del vento ha coordinata Gauss-Boaga 1675218E, 4712514N, in questo caso la griglia non è stata ruotata in quanto i fronti d'onda provengono da 180° N.

5.4. Linea di generazione e condizioni al contorno

Le onde sono state introdotte nel dominio attraverso una linea di generazione interna ad esso per la quale sono stati elaborati i vettori tempovarianti di densità e di flusso, e pendenza della superficie libera. Si è costruito uno strato assorbente lungo i contorni del dominio in modo da poter assorbire l'energia ondosa lungo i punti in cui l'onda non può propagarsi, evitando così la generazione di fenomeni di riflessione ondosa inesistenti, lo spessore di questo strato è stato scelto pari a due lunghezze d'onda. La linea di generazione, batimetria di dettaglio e contorni assorbenti, sia nella configurazione di stato attuale sia di progetto, sono riportate nelle figure che seguono.

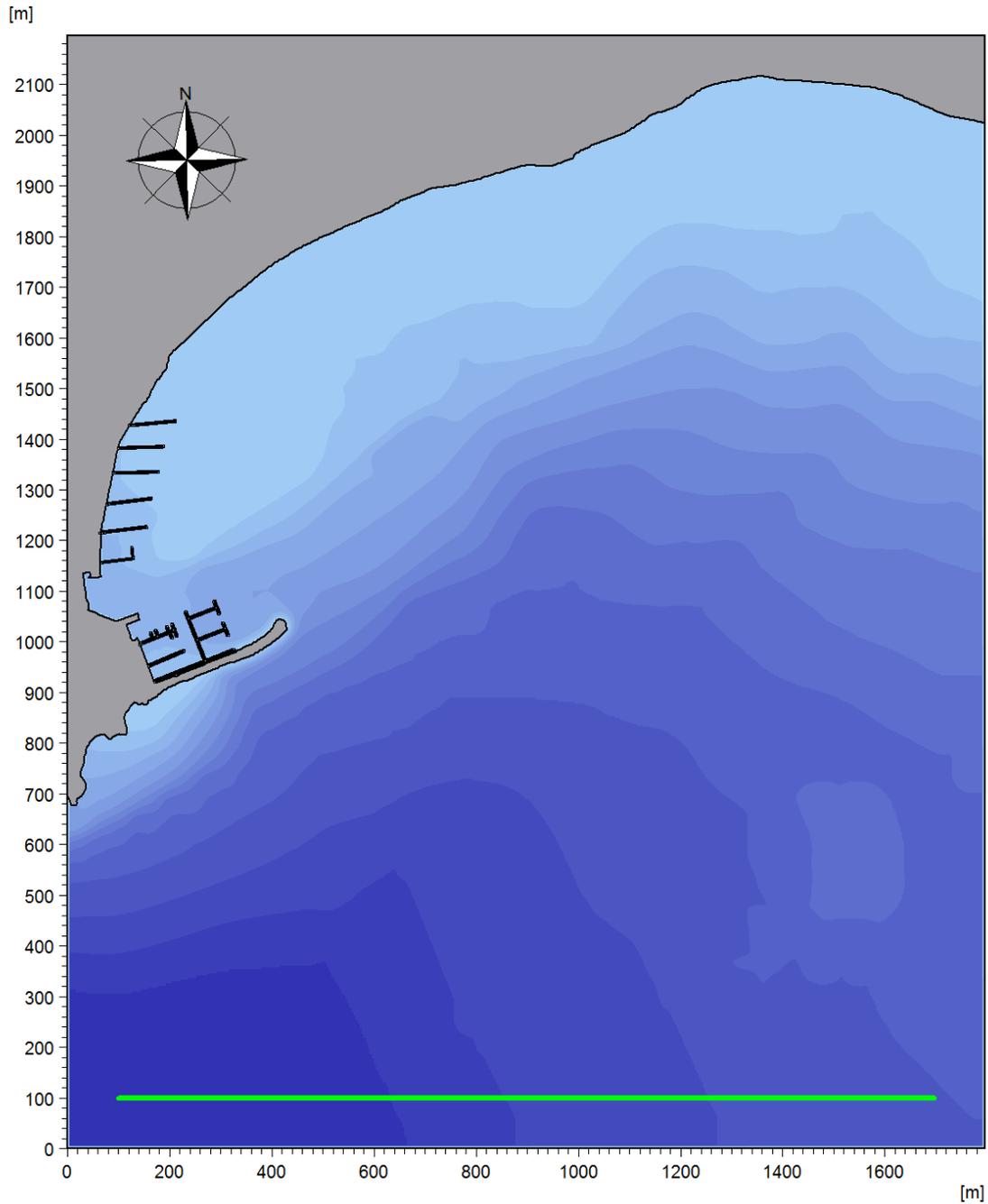


Figura 19. Linea di generazione del moto ondoso (configurazione di stato attuale)

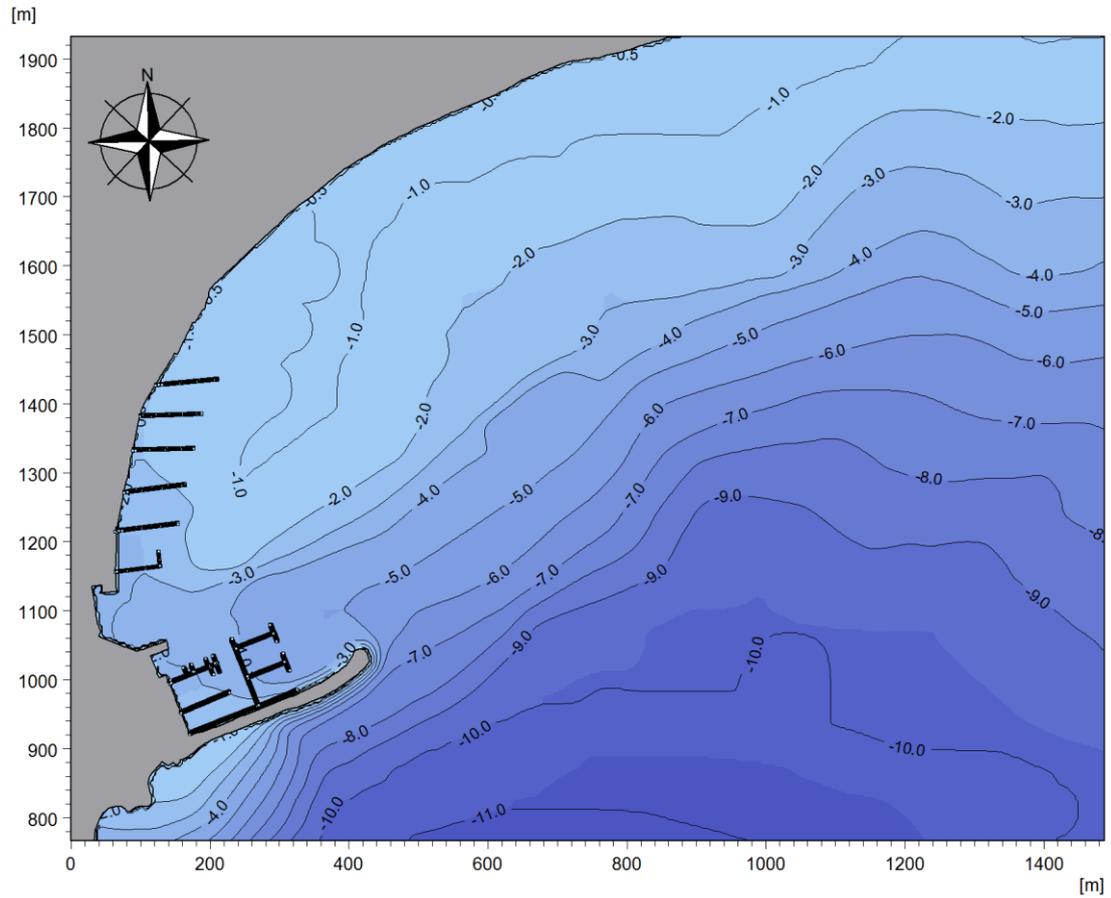


Figura 20. Batimetria di dettaglio (configurazione di stato attuale)

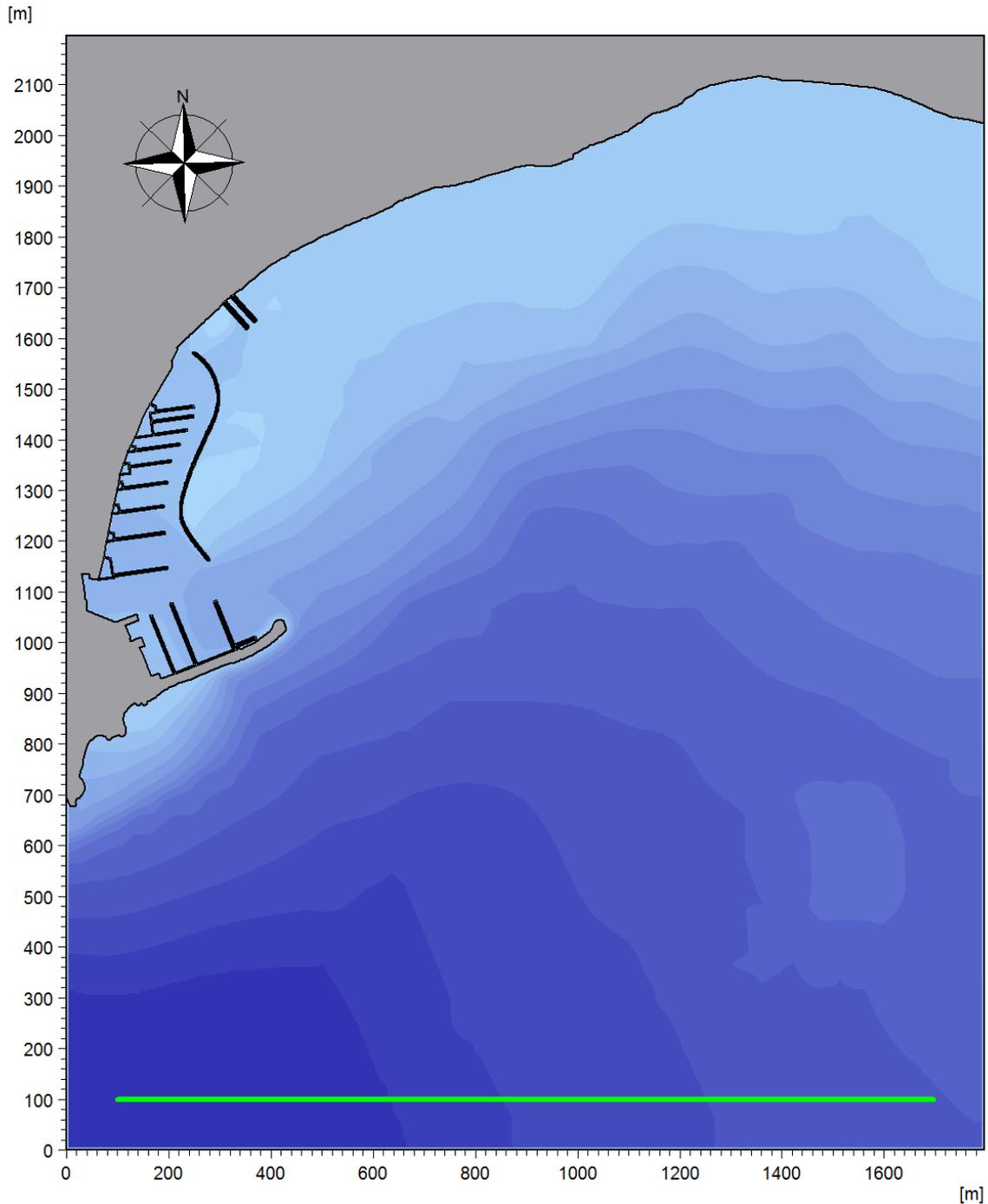


Figura 21. Linea di generazione del moto ondoso (configurazione di progetto)

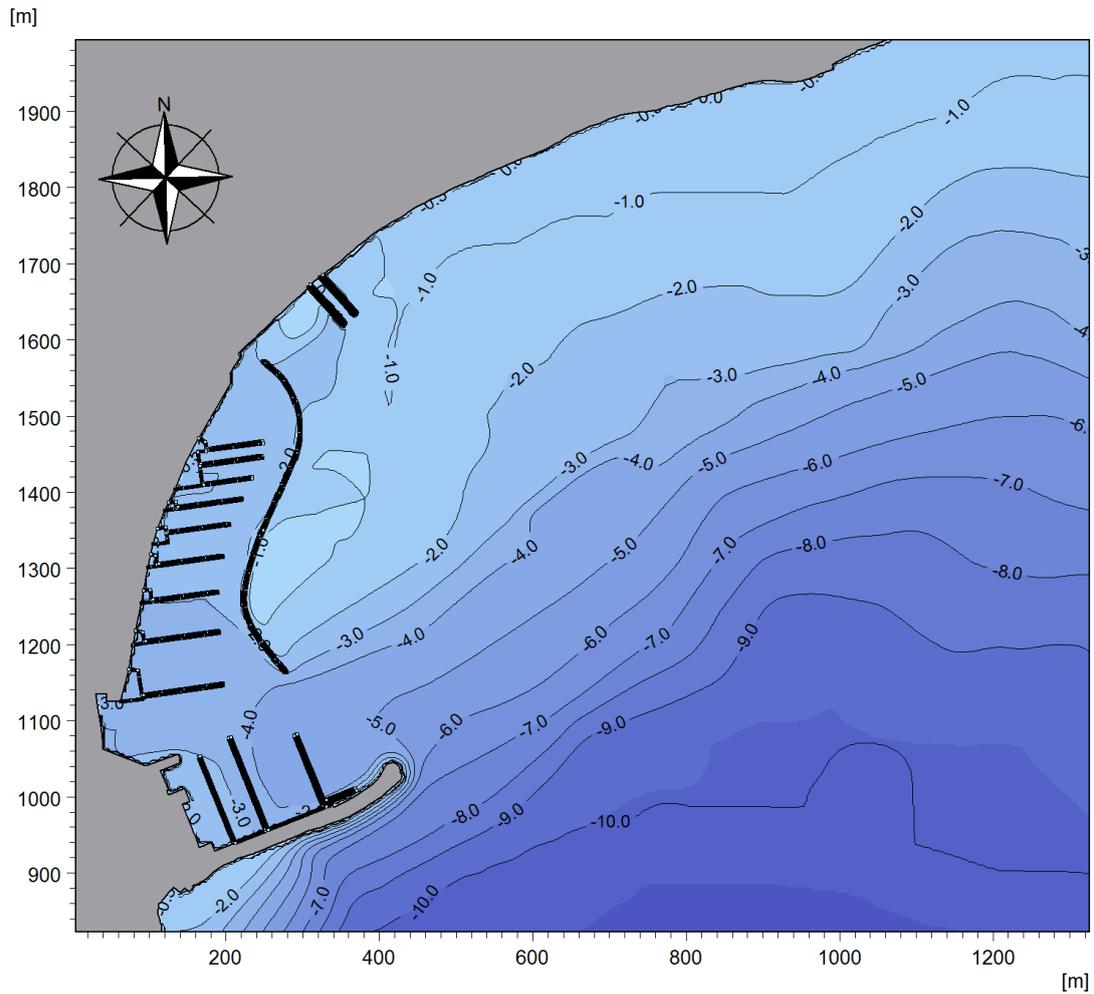


Figura 22. Batimetria di dettaglio (configurazione di progetto)

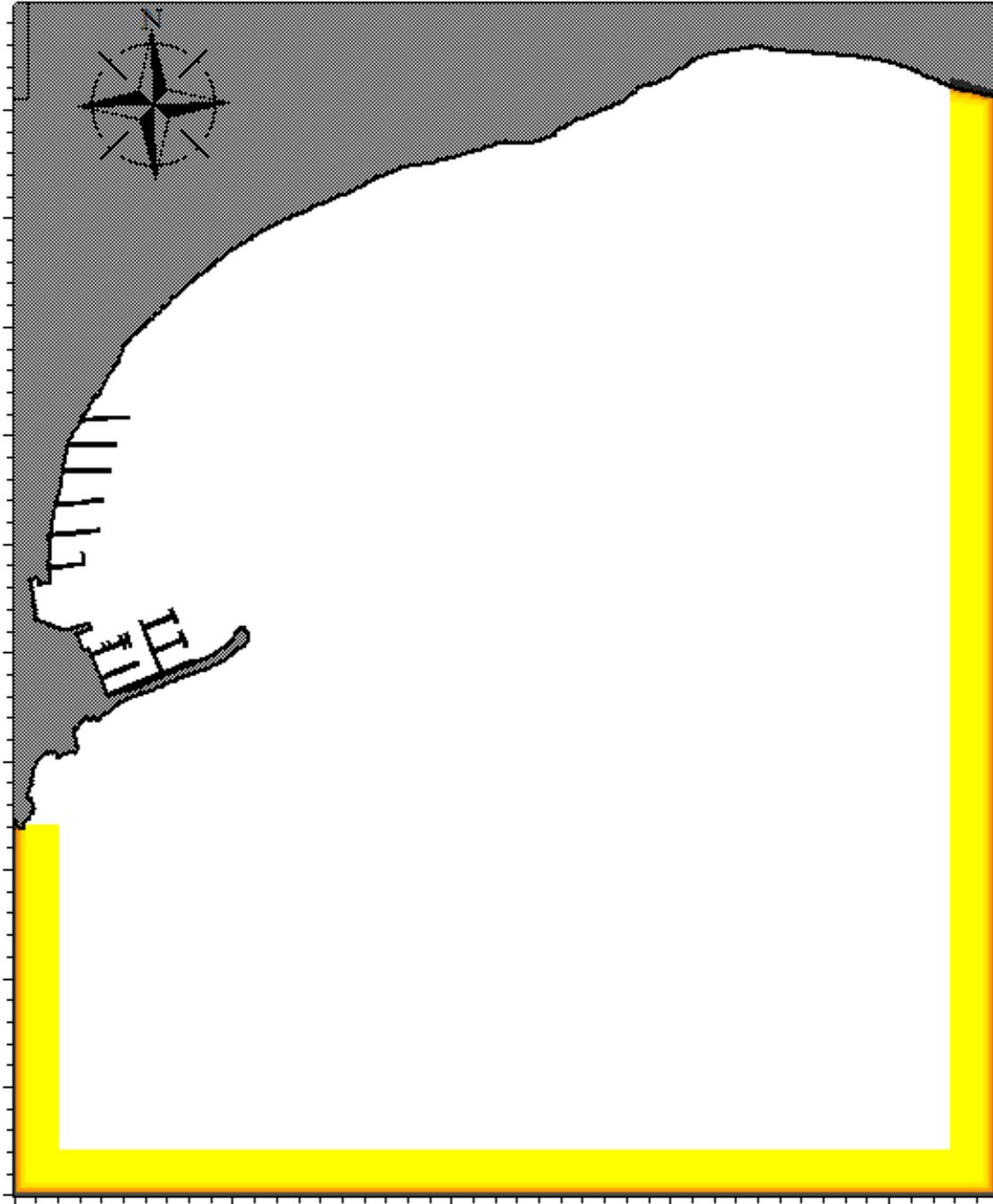


Figura 23. Contorno assorbente (configurazione di stato attuale)

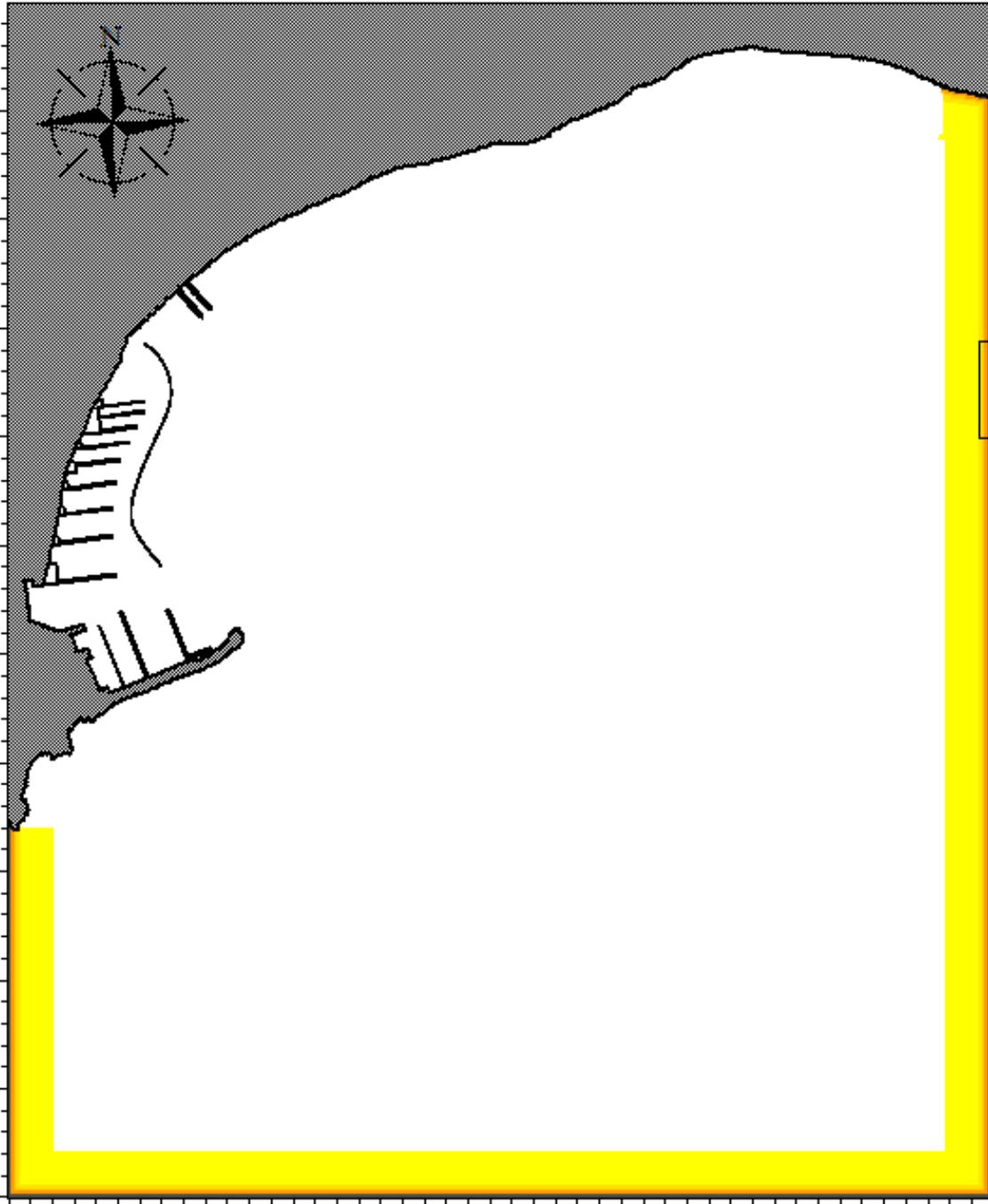


Figura 24. Contorno assorbente (configurazione di progetto)

5.5. Parametri di riflessione

In corrispondenza di tutti gli elementi rigidi del dominio, sono stati definiti dei coefficienti di porosità del materiale che regolano i fenomeni di riflessione dovuto alla presenza delle strutture. Questi coefficienti sono definiti per ogni tratto in funzione delle caratteristiche medie dell'onda incidente e della profondità d'acqua antistante la struttura.

Sulla base delle tipologie di opere presenti nel dominio di simulazione, sono stati adottati i parametri di riflessione riportati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, in funzione di questi si sono stimati i coefficienti di porosità richiesti dal modello numerico.

Tabella 7. Coefficienti di riflessione

Tipologia opera	Coefficienti di riflessione
Parete verticale	1
Scogliera	0,35
Spiaggia	0,25

Nelle figure seguenti in verde si evidenziano le opere a scogliera, in rosso le opere verticali ed in blu la spiaggia.



Figura 25. Coefficienti di riflessione (configurazione di stato attuale)

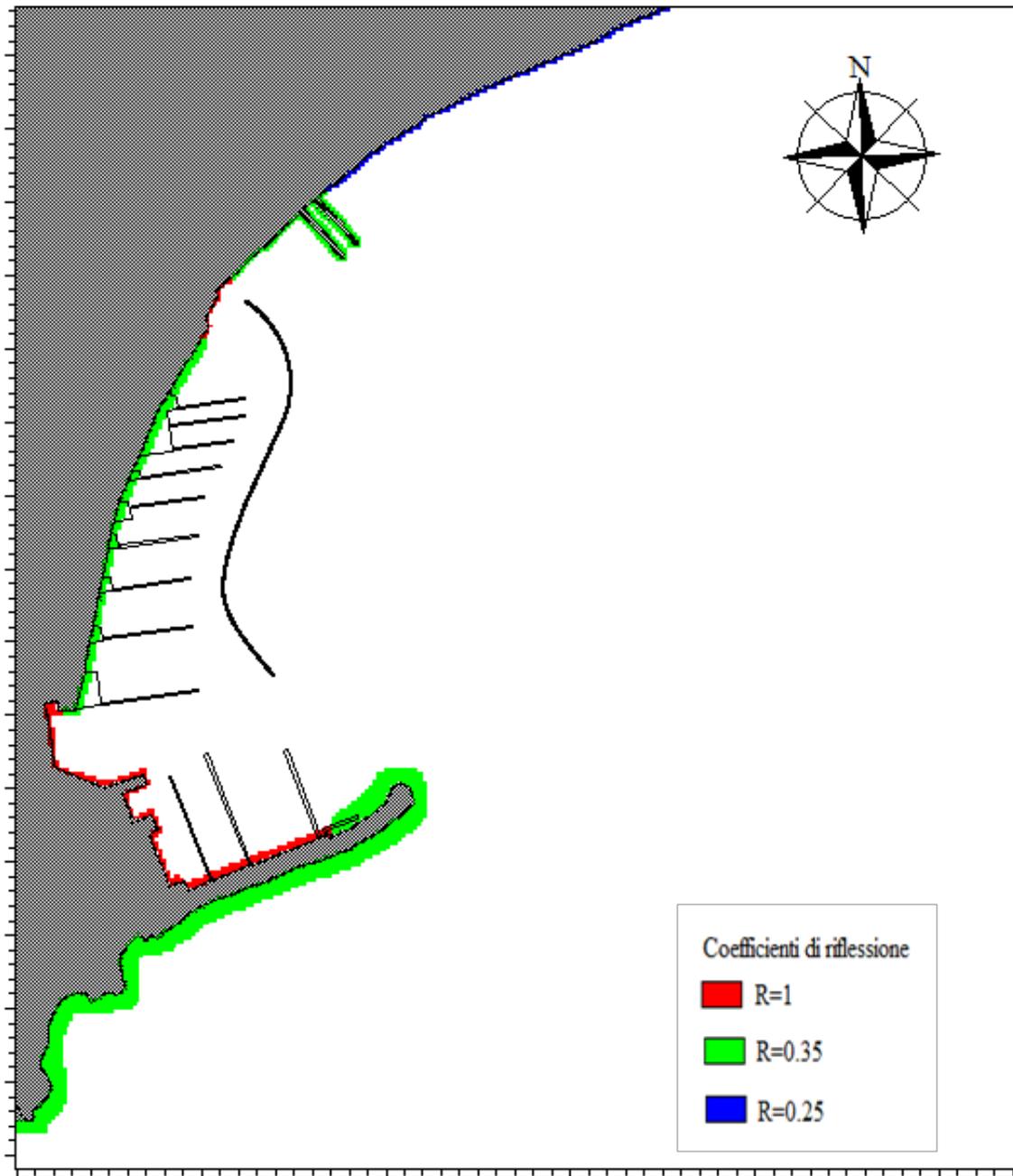


Figura 26. Coefficienti di riflessione (configurazione di progetto)

5.6. Periodo di simulazione e passo di integrazione

In aggiunta ai parametri descritti precedentemente, il modello numerico BW ha bisogno di un periodo di simulazione e di un passo temporale di integrazione. Il periodo di simulazione deve essere tale da consentire il completo sviluppo del moto ondoso all'interno di tutto il dominio di calcolo, nel caso in esame, dopo un'accurata analisi, si è utilizzato come tempo di simulazione un'ora in quanto questa è sufficiente per avere uno sviluppo completo del moto ondoso.

Il passo temporale di integrazione è fondamentale per la stabilità del modello stesso ed è sia funzione della risoluzione spaziale che del numero di Courant, e sia del periodo delle onde utilizzate. Nel caso in esame è stato utilizzato un passo temporale di integrazione pari a 0,1 s.

5.7. Risultati delle simulazioni

I risultati dello studio, mostrati nelle figure seguenti, rappresentano il campo di valori di altezza significativa (H_s) e altezza relativa (rapporto tra altezza d'onda nel generico punto e altezza d'onda incidente) a fronte di ciascuno degli stati di mare di input, sia per la configurazione di stato attuale che per la configurazione di progetto. I valori rappresentati corrispondono all'ultimo step del periodo di simulazione che rappresenta la condizione di mare completamente sviluppato. Nelle figure sono riportati anche gli esiti delle simulazioni in termini di coefficiente di disturbo, che è dato dalla seguente relazione:

$$C_d = \frac{H_i}{H_s}$$

Dove con H_i si intende l'altezza d'onda incidente (in ingresso nel dominio) e con H_s si intende l'altezza d'onda estratta in ciascun punto del dominio.

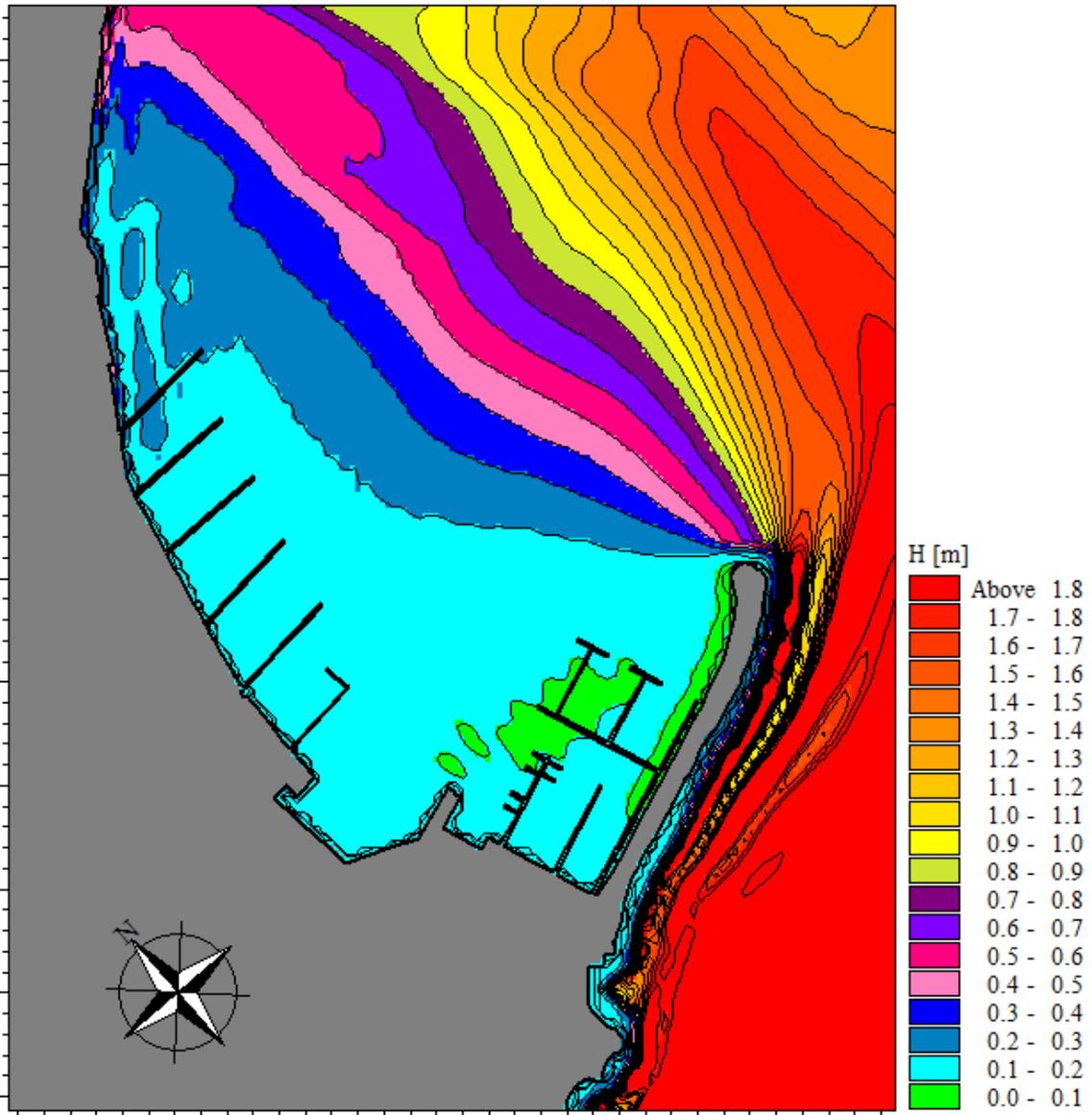


Figura 27. Hs=2,90 m, Tp=7,70 m, Dir=216°N (Tr=5 anni) – Agitazione ondosa residua – Configurazione di stato attuale

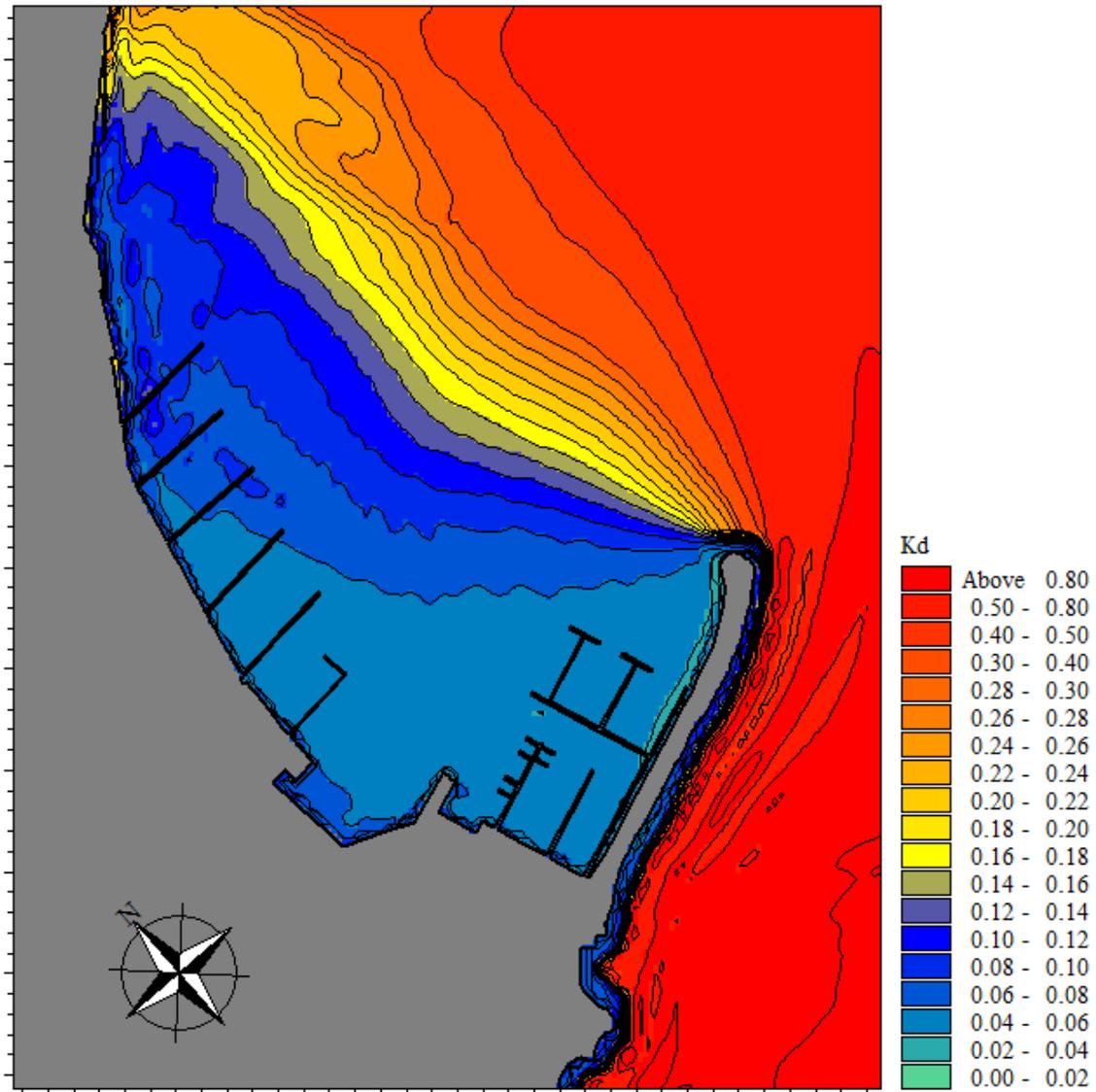


Figura 28. Hs=2,90 m, Tp=7,70 m, Dir=216°N (Tr=5 anni) – Coefficiente di disturbo – Configurazione di stato attuale

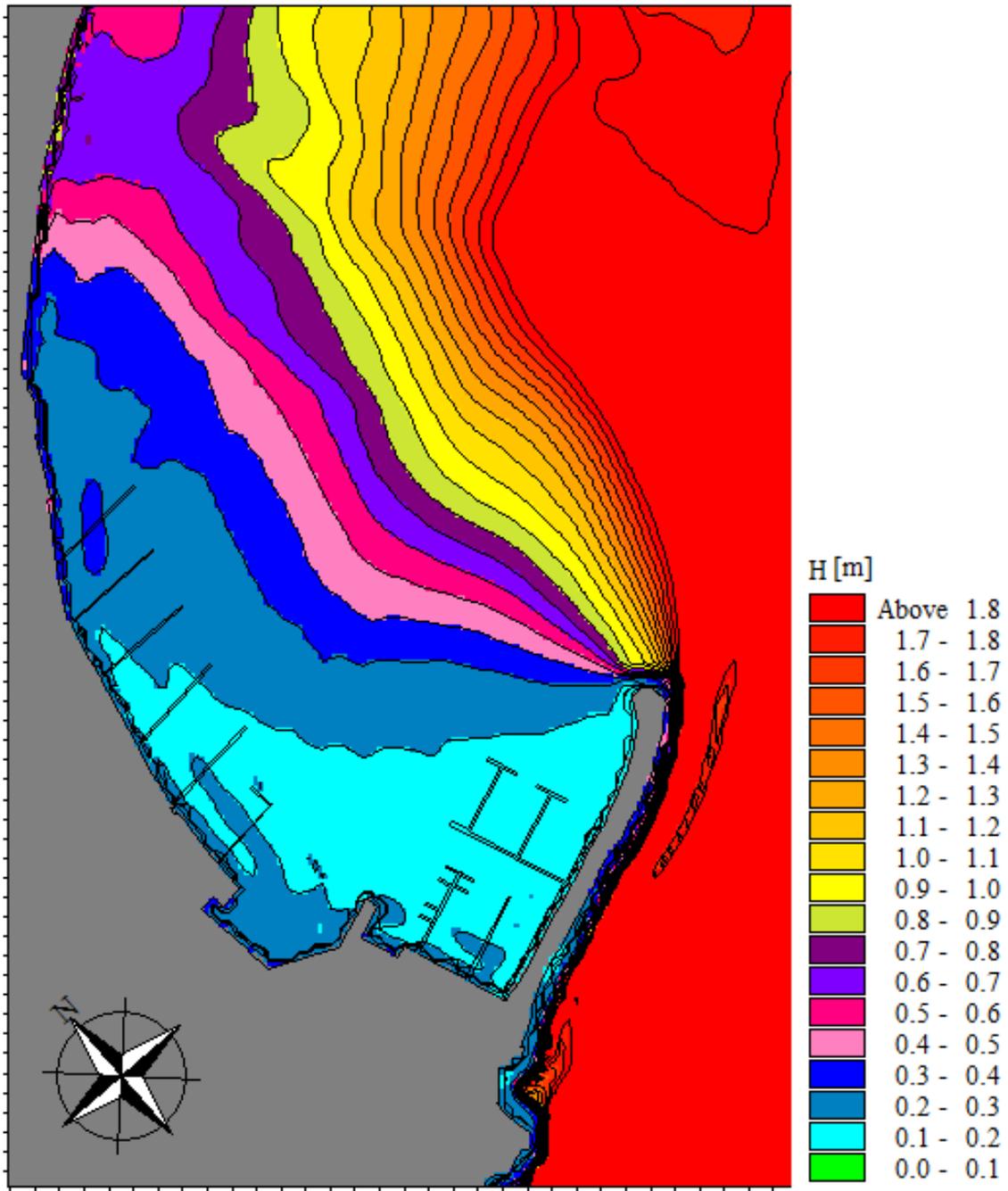


Figura 29. Hs=3,80 m, Tp=9,40 m, Dir=217°N (Tr=50 anni) – Agitazione ondosa residua – Configurazione di stato attuale

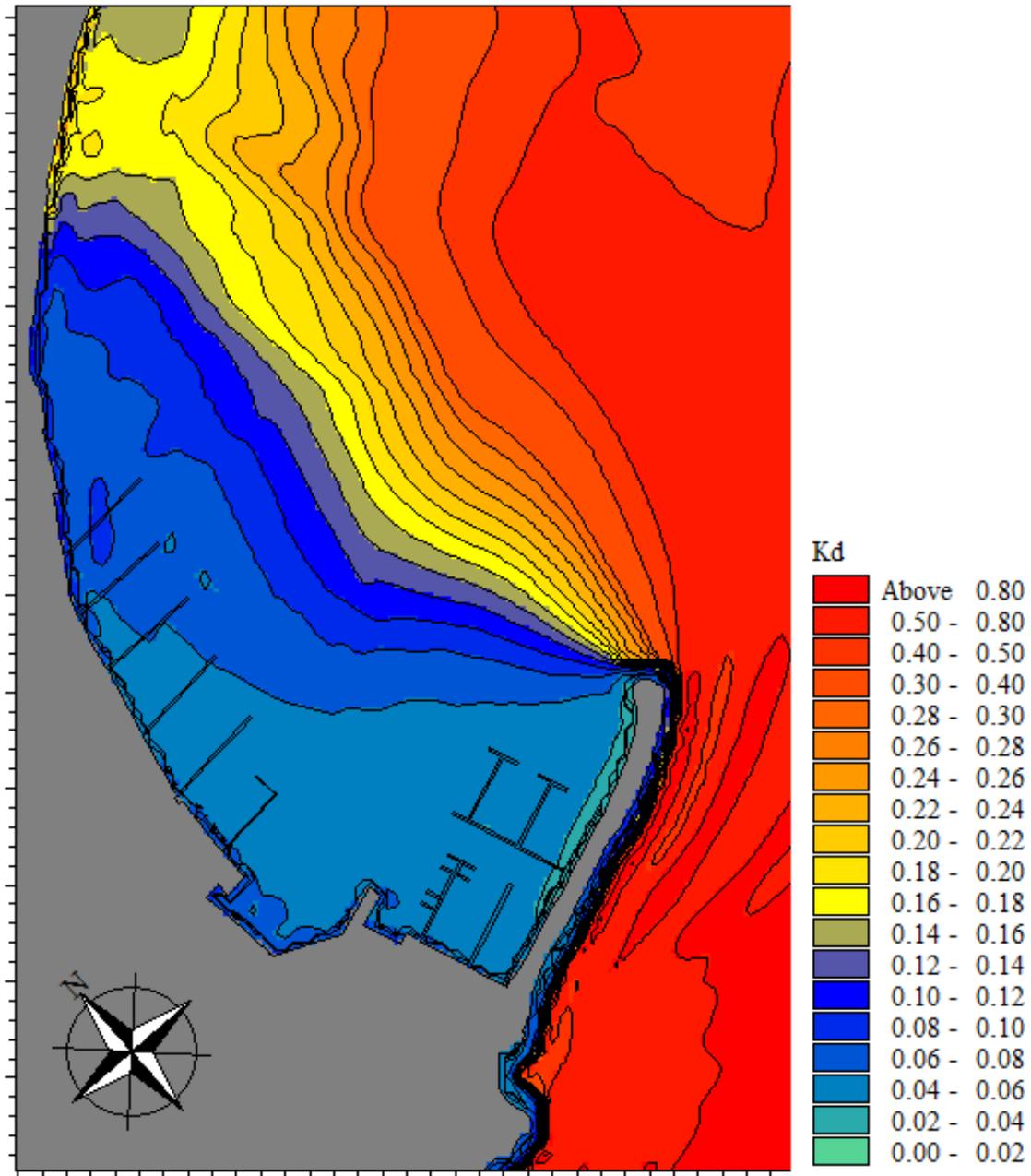


Figura 30. $H_s=3,80$ m, $T_p=9,40$ m, $Dir=217^\circ N$ ($Tr=50$ anni) – Coefficiente di disturbo – Configurazione di stato attuale

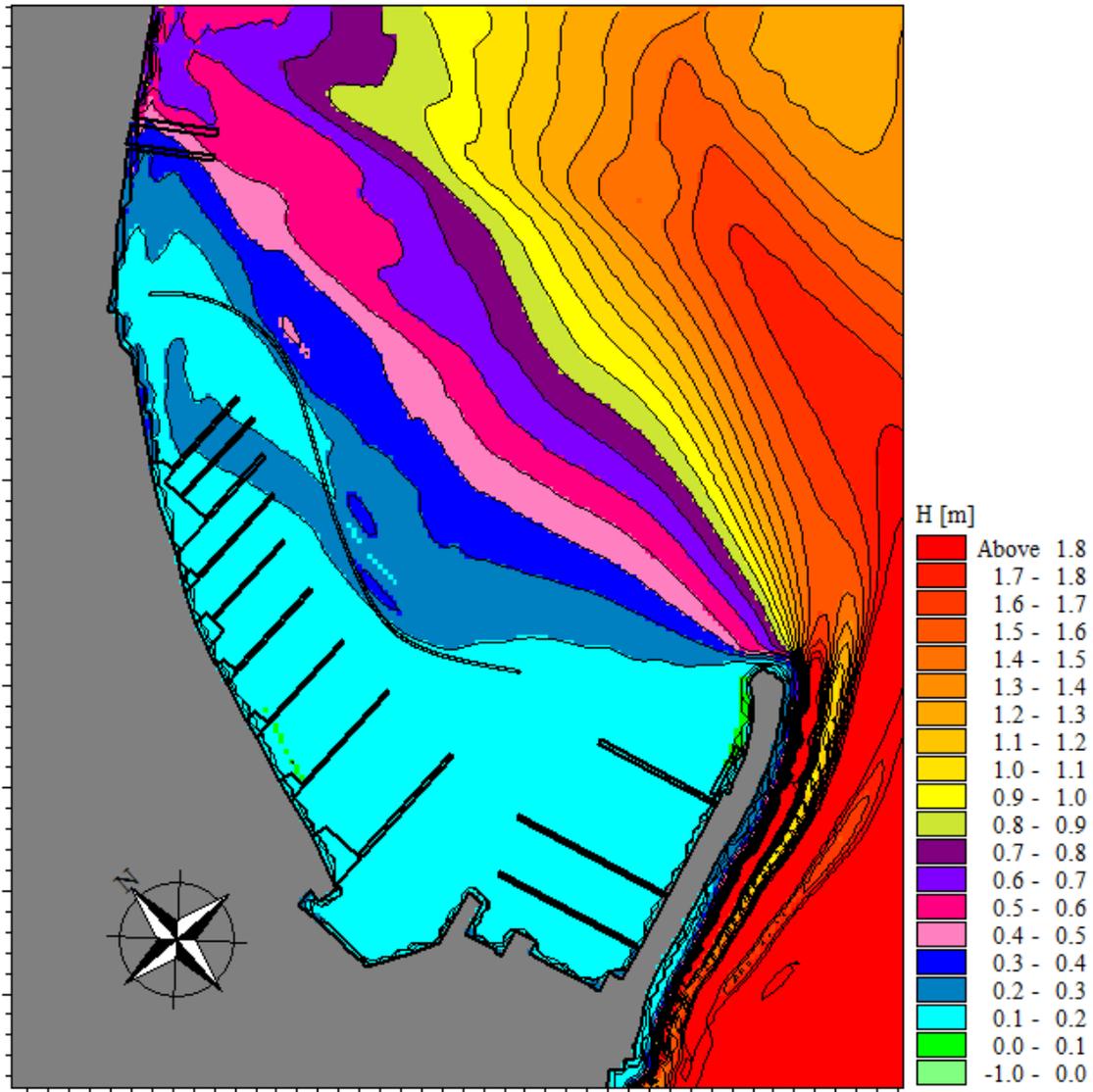


Figura 31. $H_s=2,90$ m, $T_p=7,70$ m, $Dir=216^\circ N$ ($Tr=5$ anni) – Agitazione ondosa residua – Configurazione di progetto

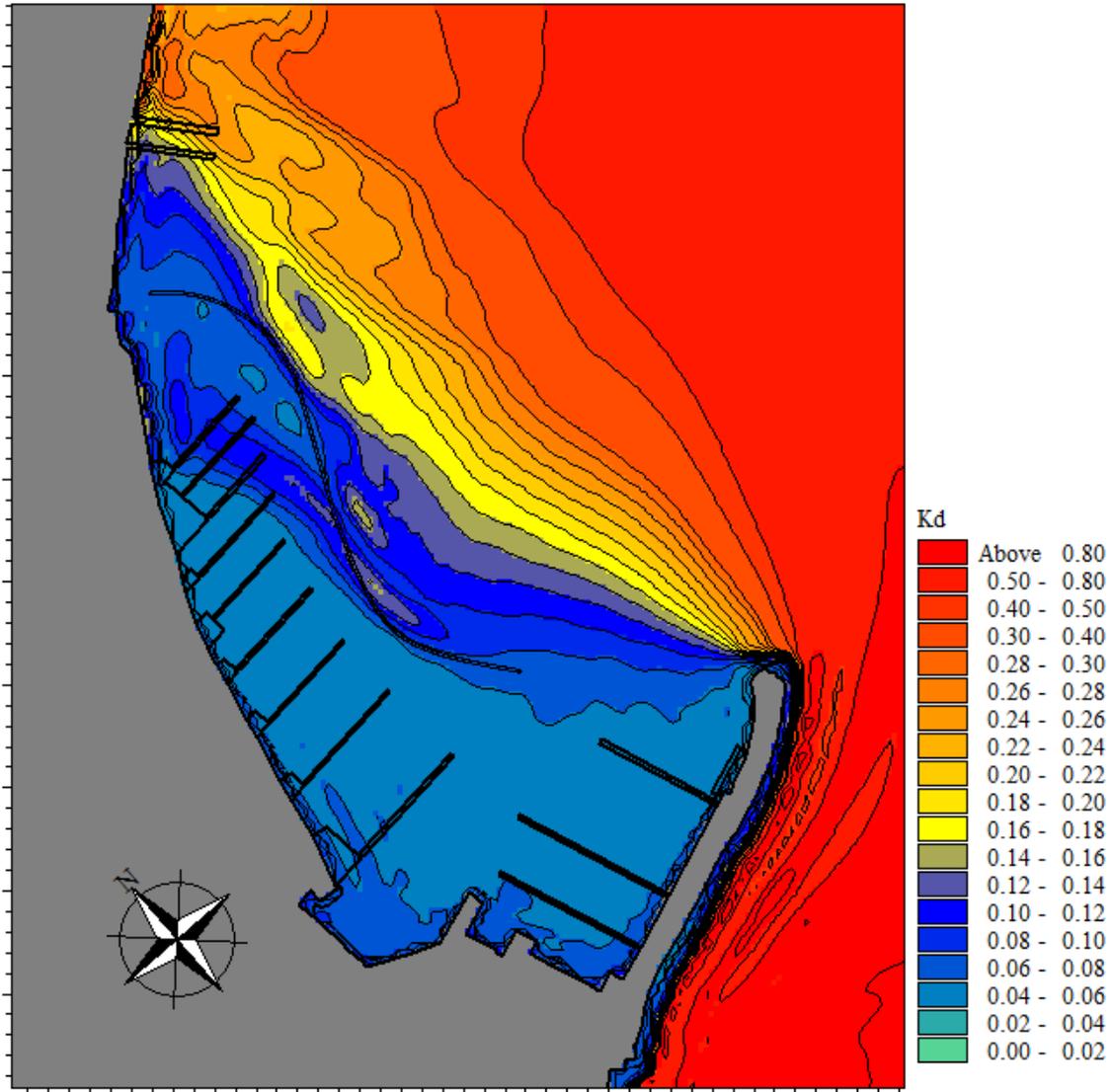


Figura 32. $H_s=2,90$ m, $T_p=7,70$ m, $Dir=216^\circ N$ ($Tr=5$ anni) – Coefficiente di disturbo – Configurazione di progetto

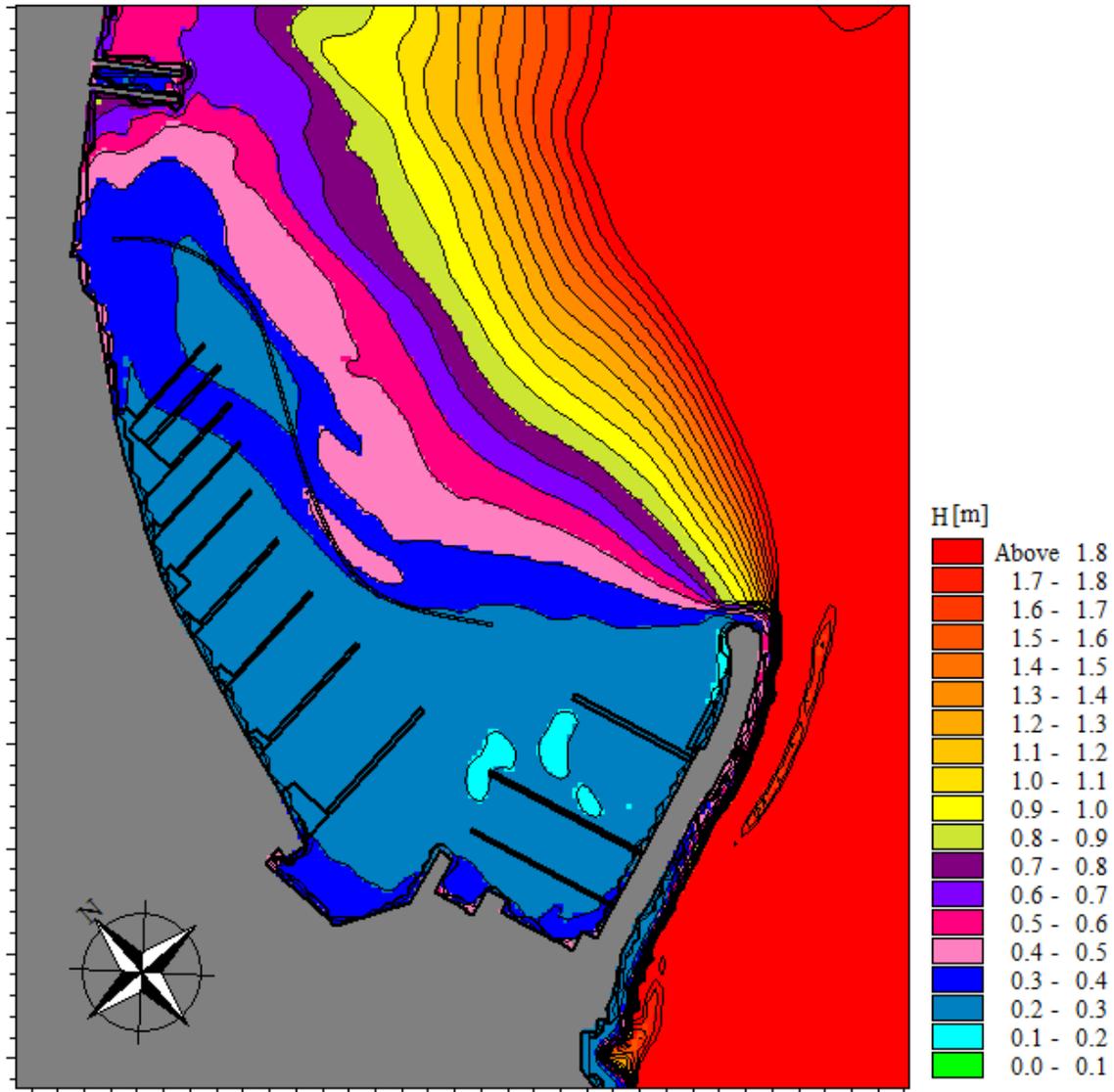


Figura 33. Hs=3,80 m, Tp=9,40 m, Dir=217°N (Tr=50 anni) – Agitazione ondosa residua – Configurazione di progetto

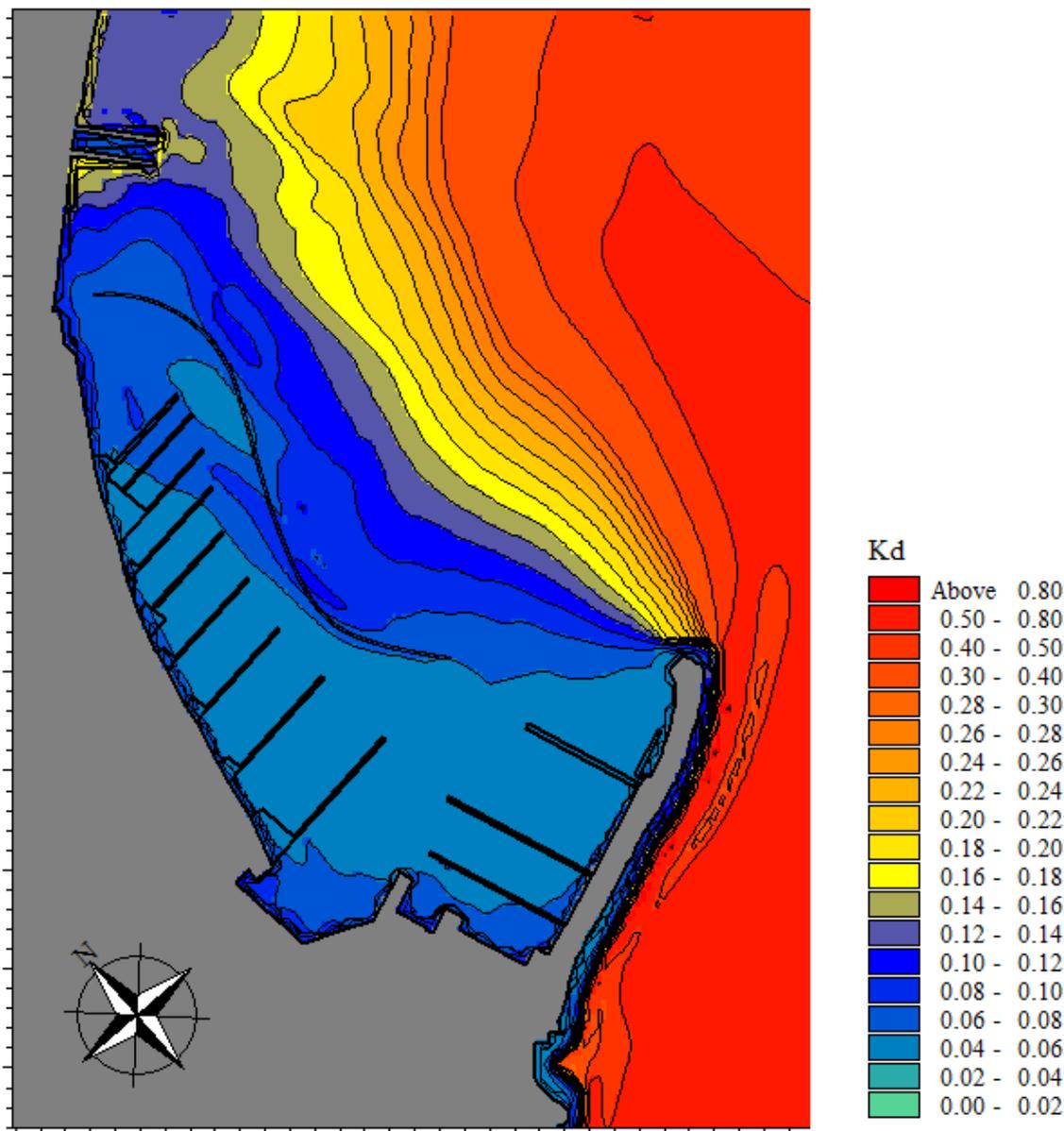


Figura 34. Hs=3,80 m, Tp=9,40 m, Dir=217°N (Tr=50 anni) – Coefficiente di disturbo – Configurazione di progetto

6. CONCLUSIONI

Il presente studio meteomarinario ha analizzato anzitutto le condizioni meteomarine di largo (onde e vento), dopodiché si è proceduto a propagare da largo a riva gli stati di mare interesse (Tr=5 anni e Tr=50 anni), estraendo i risultati circa in corrispondenza dell'imboccatura portuale. Infine è stato implementato il modello numerico per la simulazione della penetrazione ondosa all'interno del bacino portuale, che ha restituito, per ciascuna delle condizioni in esame, il campo d'onda residuo all'interno di quest'ultimo.

Per le verifiche della compatibilità dell'agitazione residua all'interno del porto, in corrispondenza degli ormeggi destinati alle unità da diporto è possibile fare riferimento alle "Raccomandazioni tecniche per la

	<p style="text-align: center;">INTERVENTO DI ADEGUAMENTO INFRASTRUTTURALE DELL'APPRODO DI TALAMONE FINALIZZATO ALLA SUA RIQUALIFICAZIONE IN PORTO TURISTICO [Domanda di Concessione D.M. ai sensi del D.P.R. 509/1997]</p>
Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica	
SM – Studio meteomarinario	

progettazione dei porti turistici”, emesse dal PIANC nel febbraio 2002 e recepite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

In particolare, le citate linee guida raccomandano che, per i porti turistici, l’agitazione ondosa residua in banchina sia contenuta entro i seguenti limiti.

- per “*condizioni limite*”, $H_s < 0,50$ m
- per “*condizioni di sicurezza*”, $H_s < 0,30$ m.

Dai risultati delle simulazioni di agitazione ondosa all’interno del bacino portuale di Talamone si evince che, sia per la configurazione di stato attuale che di progetto, a fronte di un’onda avente tempo di ritorno 5 anni ($H_s=2.90\text{m}$; $T_p=7.70\text{s}$; $Dir=210^\circ\text{N}$) si riscontra una agitazione media residua del bacino dell’ordine di circa 0,10-0,20 m con picchi di 0,30 m.

A fronte di un’onda avente tempo di ritorno 50 anni ($H_s=4.70\text{m}$; $T_p=9.40\text{s}$; $Dir=210^\circ\text{N}$) si ha un’agitazione media all’interno del bacino dell’ordine di 0,20-0,30 m, con picchi di 0,40m.

Ne segue, sia in condizioni ordinarie che estreme, una perfetta compatibilità del bacino portuale di Talamone con la destinazione a “porto turistico”.