



# Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Centrale

## Porto di Ancona

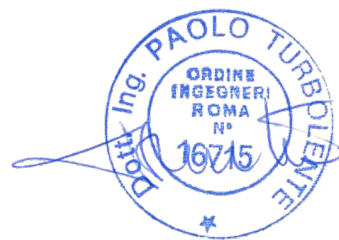


### STUDIO SPECIALISTICO IDRAULICO - MARITTIMO

### DETERMINAZIONE DEI LIVELLI DI AGITAZIONE ONDOSA

### DEL BANCHINAMENTO DEL FRONTE ESTERNO DEL MOLO CLEMENTINO

Committente	Progettazione
Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Centrale R.U.P. Ing. Gianluca Pellegrini	 Dott. Ing. Paolo Turbolente Dott. Ing. Cecilia Evangelista



Titolo elaborato	Elaborato
RELAZIONE TECNICA ILLUSTRATIVA	A.2248   ST   RI
	<b>RI</b>
	Scala

Data Maggio 2018	Preparato C.Evangelista	Controllato P.Turbolente	Approvato R.Marconi
Revisione	Data		

## SOMMARIO

1. INTRODUZIONE.....	2
2. STUDIO DELLA AGITAZIONE INTERNA .....	4
2.1. Definizione delle condizioni d'onda incidenti .....	4
2.2. Definizione della griglia di calcolo .....	6
2.3. Generazione del moto ondoso .....	6
2.4. Definizione dei parametri di riflessione .....	8
2.5. Periodo di simulazione e passo di integrazione.....	10
2.6. Condizioni simulate.....	10
2.7. Analisi dei risultati delle condizioni di moto ondoso ordinario .....	10
2.8. Analisi dei risultati delle condizioni di moto ondoso estremo .....	17
2.9. Verifiche per la sicurezza e l'operatività degli accosti.....	20
3. CONCLUSIONI.....	22
BIBLIOGRAFIA.....	25
APPENDICE: MIKE 21 BOUSSINESQ WAVE MODULE .....	26

ALLEGATO 1: Relazione Idraulico – Marittima (2006)

ALLEGATO 2: Studio di agitazione interna (2014)

## 1. INTRODUZIONE

L'Acquatecno S.r.l. è stata incaricata dall'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Centrale di effettuare uno studio specialistico idraulico – marittimo, finalizzato alla determinazione dei livelli di agitazione ondosa residua all'interno della Darsena Fincantieri del Porto commerciale di Ancona (Figura 1), al fine di verificare le condizioni di esercizio degli ormeggi del nuovo banchinamento del Molo Clementino.



*Figura 1. Darsena Fincantieri del Porto di Ancona. Immagine presa da Google Earth.*

A tale scopo, sono stati presi in considerazione i seguenti scenari di riferimento per le condizioni ondose :

- uno scenario cosiddetto “frequente”, rappresentativo del clima ondoso ordinario e quindi delle condizioni medie di esercizio degli ormeggi;
- uno scenario cosiddetto “estremo”, rappresentativo degli eventi ondosi più intensi, utile per la determinazione dei livelli massimi raggiunti dal pelo libero davanti ed al di sotto della banchina, al fine di determinare le eventuali sollecitazioni sulle strutture.

La determinazione dei campi di moto ondoso è stata effettuata in riferimento a due diverse configurazioni geometriche del layout portuale, caratterizzate la prima dalla sola realizzazione del

Molo Clementino sulla base dello stato attuale e la seconda comprensiva anche degli interventi di prolungamento della diga di sottoflutto, programmati dal vigente Piano Regolatore Portuale.

Come richiesto dalla Committente Autorità Portuale, per entrambe le configurazioni suddette è stata presa in considerazione una conformazione batimetrica dei fondali che tiene già in conto gli interventi di dragaggio programmati che prevedono un approfondimento a quota -10 m s.l.m.m. nell'intera darsena Fincantieri.

Questo documento costituisce la relazione illustrativa della metodologia attuata, delle tecniche di elaborazione dei dati e descrive quindi i risultati finali delle analisi svolte.

## 2. STUDIO DELLA AGITAZIONE INTERNA

Le condizioni di agitazione residua all'interno del bacino portuale sono state ottenute utilizzando il modello numerico Mike 21 BW (Boussinesq Waves), costituito da un codice di calcolo basato sulla risoluzione numerica, nel dominio del tempo, delle Equazioni di Boussinesq attraverso la tecnica delle differenze finite. Questo codice rende possibile la modellazione di diversi fenomeni fisici tra cui quelli dipendenti dalla variazione dei fondali all'esterno del porto, come la rifrazione e quelli dovuti alla presenza di opere emergenti, ovvero riflessione e diffrazione.

Nei paragrafi seguenti si descrivono le impostazioni utilizzate sia in relazione alle condizioni ondose incidenti sia alle impostazioni del modello in termini di definizione del dominio di simulazione che di settaggio dei parametri idraulici di riferimento.

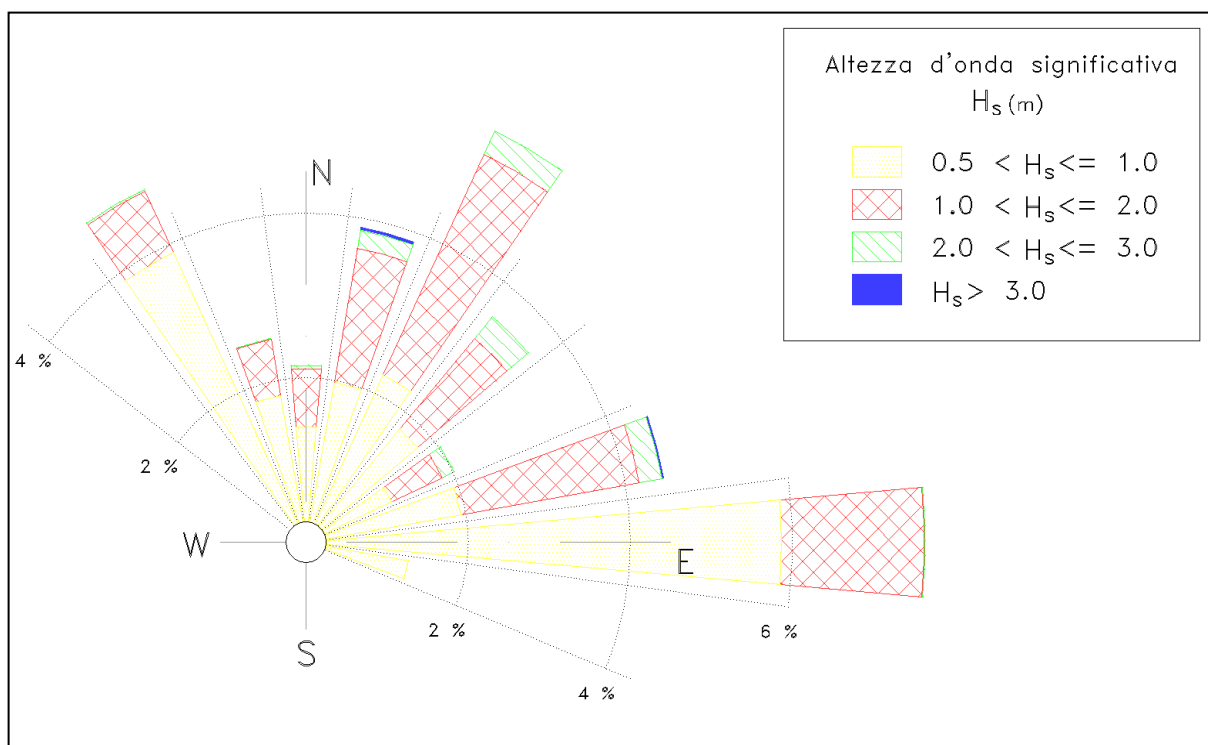
### 2.1. Definizione delle condizioni d'onda incidenti

Per definire le condizioni rappresentative del clima di moto ondoso ordinario, sono stati considerati i dati dello studio meteo – marino presente nella Relazione Idraulico – Marittima, redatta nel 2006 per l'Autorità Portuale di Ancona, da parte del gruppo di progettazione ACQUATECNO S.r.l. e MODIMAR S.r.l. (Allegato 1). Più precisamente è stata utilizzata la tabella, di clima annuale, della distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di altezza significativa e direzioni di provenienza, relativa al punto P1, ubicato in corrispondenza dell'imboccatura portuale, per il periodo di riferimento gennaio 2002 – dicembre 2004. Di seguito si riporta la rosa del clima ondoso ordinario (Figura 2) ottenuta, da cui sono state selezionate tre direzioni medie di provenienza, rappresentative di settori di 30°:

- La direzione media 330° N è la più critica poiché penetra in maniera diretta nell'imboccatura del porto; a tale direzione corrispondono altezze significative di 1.0 m e 2.0 m.
- La direzione media 0° N, scelta per tener conto di fenomeni diffrattivi dovuti alla diga emergente di sopraflutto, con altezze significative di 1.0 m e 2.0 m.
- La direzione media 30° N è stata considerata per portare in conto eventi più intensi, di altezza significativa di 1.5 m e 3.0 m.

Per quanto riguarda l'evento estremo, data la disponibilità di un numero maggiore di dati, si è fatto riferimento allo studio di agitazione interna del Porto di Ancona redatto a cura del Prof. Ing. Mancinelli del 2014 (Allegato 2), messo a disposizione della Scrivente da parte della Committente Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Centrale. In riferimento ai risultati dell'analisi statistica degli estremi relativa al periodo marzo 1999 – marzo 2006, si è individuata quale onda

estrema, quella caratterizzata da un periodo di ritorno pari a 50 anni proveniente dalla direzione 330° N, rappresentativa della condizione di penetrazione più critica.



**Figura 2.** Rosa del clima ordinario annuale nel punto P1.

La Tabella 1 rappresenta una sintesi delle sette onde scelte, con relativo periodo di picco, calcolato mediante le leggi di correlazione statistica tra periodo di picco e altezza d'onda significativa, presenti nella relazione del 2006 sopracitata. Nella fattispecie, per il calcolo di  $T_p$  è stata considerata la seguente relazione (Mathiesen et al., 1994) come anche utilizzato nell'Atlante delle Onde Italiane:

$$T_p = a \cdot (H_s)^b$$

dove  $a$  e  $b$  sono i parametri ricavati dalle correlazioni statistiche, diversi per i tre settori di provenienza (Tabella 2).

**Tabella 1.** *Caratteristiche delle onde simulate.*

SCENARIO	ONDA	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]
Ordinario	1	330	1.0	5.0
Ordinario	2	330	2.0	6.3
Ordinario	3	0	1.0	5.2
Ordinario	4	0	2.0	6.7
Ordinario	5	30	1.5	6.0
Ordinario	6	30	3.0	7.7
Estremo	7	330	5.5	10.5

**Tabella 2.** *Coefficienti di correlazione statistica.*

DIR [°N]	a	b
290-360	4.62	0.44
0-70	5.21	0.36
70-130	5.94	0.33

## 2.2. Definizione della griglia di calcolo

Per le simulazioni è stata definita una griglia di calcolo rettangolare, a maglie quadrate, con discretizzazione pari a 4 m in entrambe le direzioni, al fine di garantire un minimo di 7 nodi della griglia per ogni lunghezza d'onda. L'area è composta da 630 nodi in direzione x e 355 nodi in direzione y. Alla griglia è stata associata una rotazione nulla rispetto al Nord, in modo da avere una rotazione della direzione di propagazione rispetto all'asse y di massimo 30° N.

Si precisa che per la simulazione dell'onda estrema è stato necessario estendere la griglia di calcolo verso Nord di una lunghezza pari a 300 m, al fine di allontanare ulteriormente l'area di simulazione soggetta ad "effetti di bordo", garantendo così una piena attendibilità dei risultati ottenuti. L'area di calcolo risulta pertanto composta da 630 punti in direzione x e 435 in direzione y.

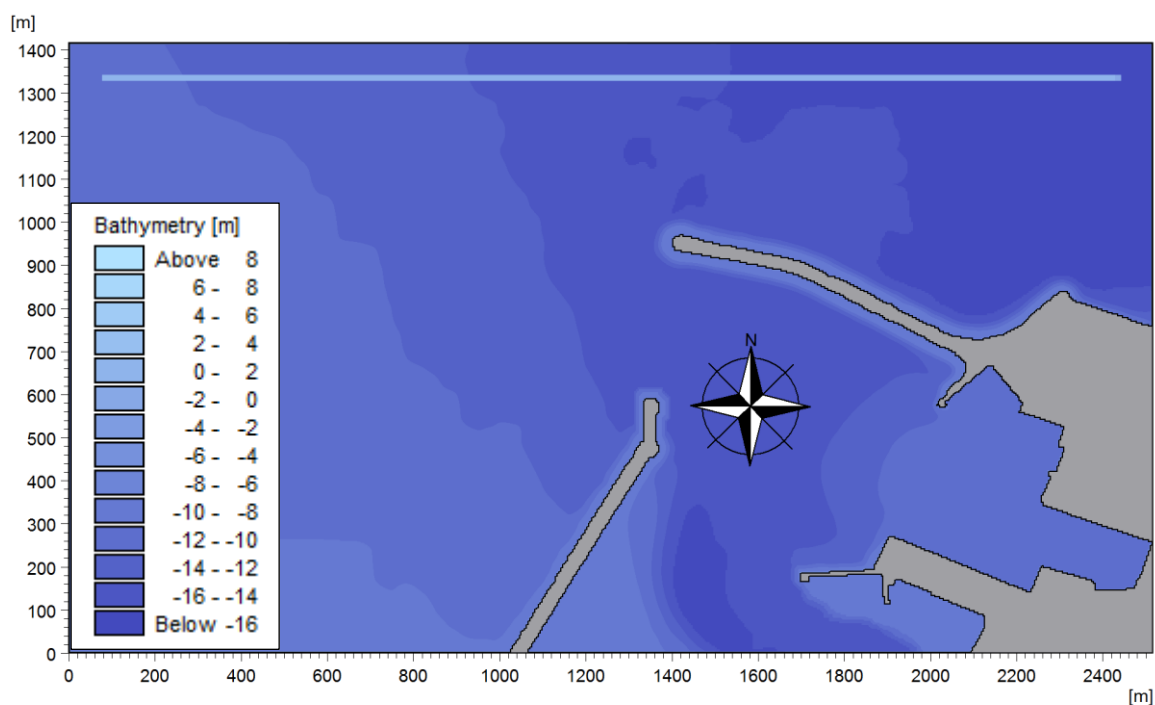
## 2.3. Generazione del moto ondoso

Le condizioni di moto ondoso simulate sono quelle descritte precedentemente nel paragrafo 2.1. Le onde sono state introdotte nel modello tramite una linea di generazione interna alla griglia di calcolo, posta parallelamente all'asse x, ad una distanza adeguata rispetto alle opere portuali.

Lungo l'intera frontiera del dominio di calcolo è stata introdotta una "corona di terra" per far sì che non vi fosse alcuna propagazione attraverso i bordi dell'area di calcolo. Al fine di evitare fenomeni di

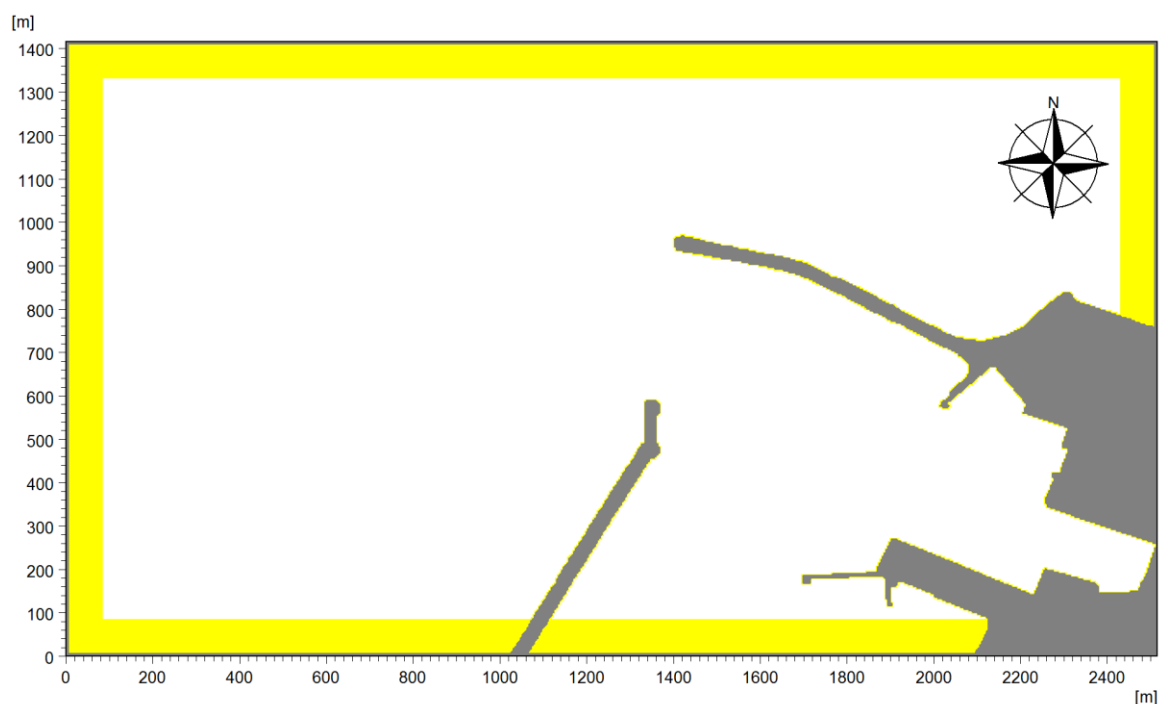
riflessione ondosa inesistenti lungo il perimetro della griglia, è stato realizzato un contorno assorbente di spessore almeno pari alla lunghezza d'onda massima simulata. La Figura 3 rappresenta la batimetria e la linea di generazione, la Figura 4 riporta gli strati assorbenti.

Come specificato sopra, per le simulazioni relative all'evento estremo, è stato necessario apportare alcune variazioni; data la maggiore lunghezza d'onda è stato considerato uno spessore maggiore dello strato assorbente.



*Figura 3. Batimetria con linea di generazione.*





*Figura 4. Strati assorbenti.*

#### 2.4. Definizione dei parametri di riflessione

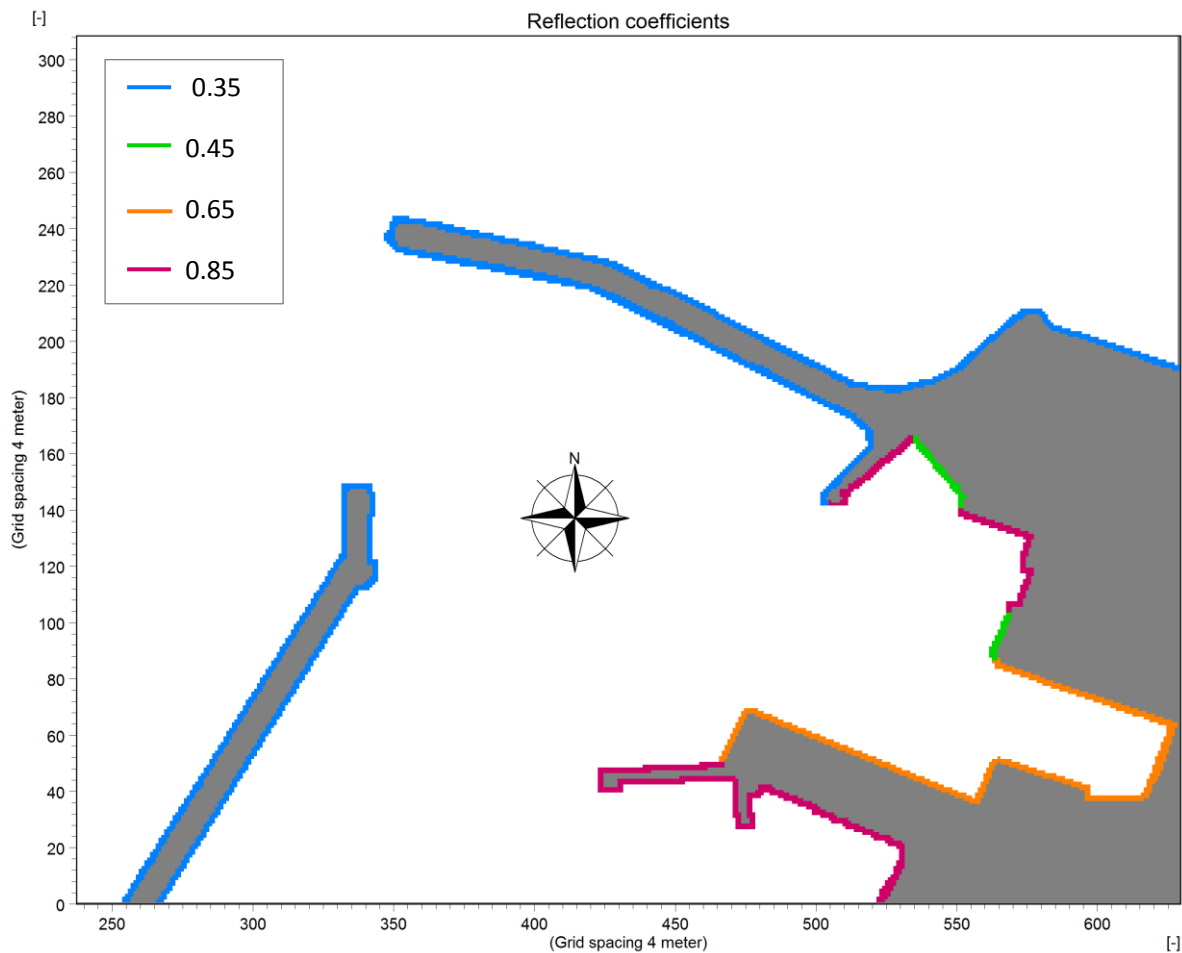
Per ottenere una maggiore accuratezza dei risultati delle simulazioni numeriche, si è deciso di associare ai diversi tipi di opera presenti nel Porto di Ancona differenti valori dei coefficienti di riflessione. Sono state pertanto individuate quattro classi di opere:

- Opere totalmente riflettenti;
- Opere con celle antiriflettenti;
- Banchinamenti interni in massi naturali;
- Opere di difesa esterna in massi artificiali.

Anche nel presente studio, analogamente a quanto effettuato nella Relazione Idraulico – Marittima redatta nel 2006 per il Porto di Ancona, da parte del gruppo di progettazione ACQUATECNO S.r.l. e MODIMAR S.r.l. (Allegato 1), si è fatto riferimento ai valori suggeriti dal CEM03, di cui alla Tabella VI-5-14, per le ultime tre classi di opere, e alla Figura VI-5-20 per le opere totalmente riflettenti.

Pertanto al primo gruppo di opere è stato assegnato un valore di  $R$  pari a 0.85, per le opere anti riflettenti invece si è scelto un valore del coefficiente pari a 0.65. Alle opere di difesa esterna in massi artificiali è stato associato un valore di  $R$  pari a 0.35, mentre per banchinamenti interni in massi

naturali è stato scelto un coefficiente di 0.45 (Figura 5). Sulla base di tali coefficienti il modello calcola il relativo valore di porosità. In Tabella 3 si riportano i valori dei coefficienti complessivamente adottati.



**Figura 5.** *Mapa dei coefficienti di riflessione assegnati alle opere.*

**Tabella 3.** *Coefficienti di riflessione per le opere emergenti.*

TIPOLOGIA DI OPERE	R
Opere totalmente riflettenti	0.85
Opere con celle antiriflettenti	0.65
Banchinamenti interni in massi naturali	0.45
Opere di difesa esterna con massi artificiali	0.35

### **2.5. Periodo di simulazione e passo di integrazione**

Il codice di calcolo Mike 21 BW richiede l'impostazione di un periodo rappresentativo della durata dell'evento da simulare ed un passo di integrazione. Il periodo deve essere tale da consentire il completo sviluppo del moto ondoso all'interno del porto, pertanto per l'area in esame è stato scelto un periodo di simulazione paria ad un'ora. Il passo di integrazione deve essere scelto in modo che il numero di Courant, parametro che determina la stabilità del modello, si mantenga inferiore all'unità. Nel caso in esame è stato scelto uno step temporale pari a 0.20 s per le simulazioni delle onde ordinarie, e 0.05 s per l'evento estremo.

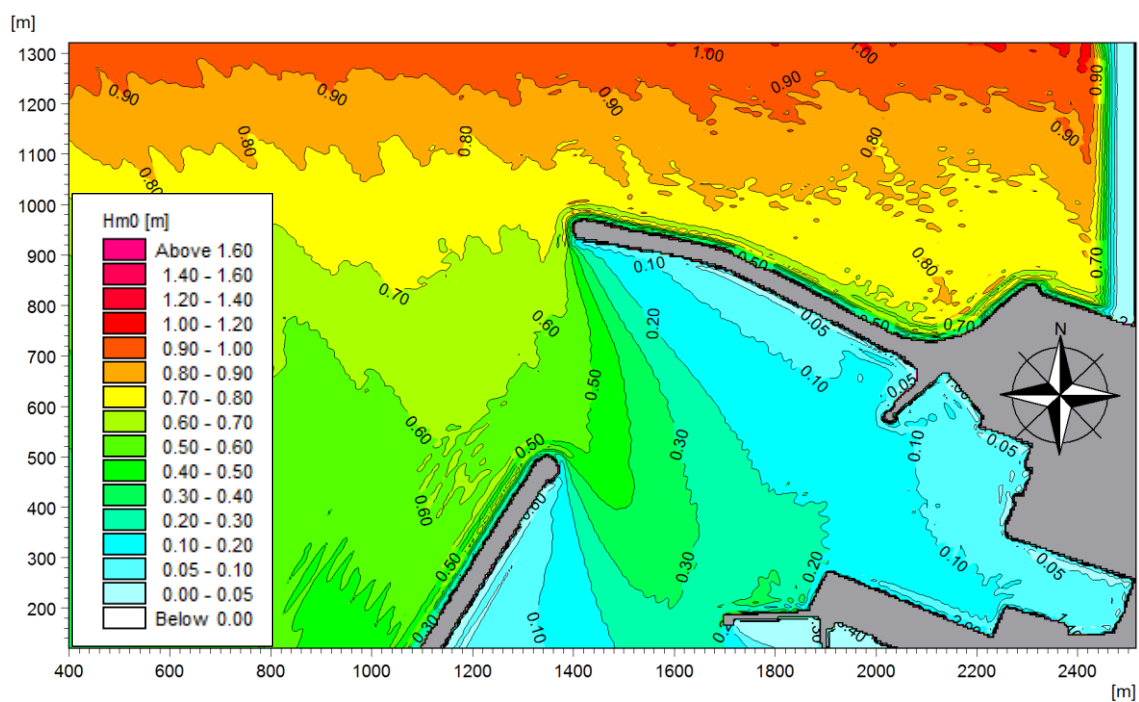
### **2.6. Condizioni simulate**

Le simulazioni sono state effettuate in due diversi scenari: uno transitorio e l'altro definitivo, previsto dal Piano Regolatore Portuale. In entrambi i casi è stato previsto, all'interno della Darsena Fincantieri, un approfondimento del fondale fino a -10 m. A valle di considerazioni e simulazioni di prova è stato ritenuto più cautelativo effettuare le simulazioni definitive senza tener conto dell'escursione di marea. Nel caso dell'onda estrema, come si vedrà nel paragrafo successivo, è stata considerata a posteriori la condizione più critica per la banchina, ovvero il massimo valore di innalzamento del livello ottenuto, considerando marea astronomica, meteorologica e variazioni stagionali e a lungo termine. A tal fine si è fatto riferimento quindi ai valori di marea indicati nella Relazione Idraulico – Marittima del 2006 sopra menzionata.

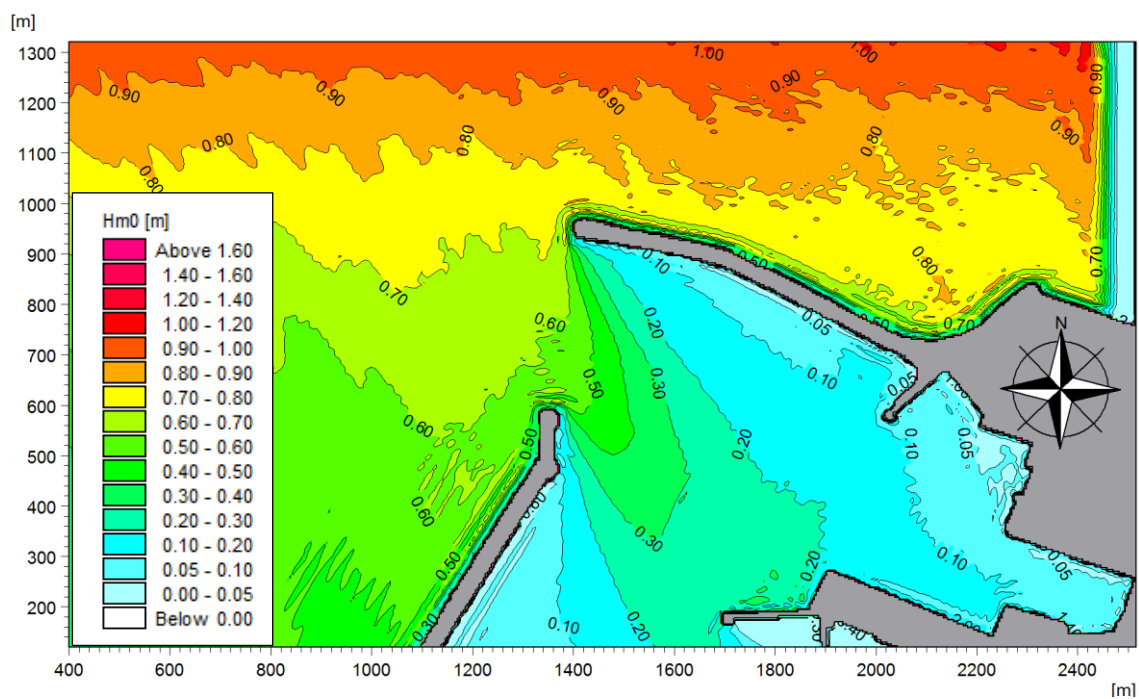
### **2.7. Analisi dei risultati delle condizioni di moto ondoso ordinario**

Di seguito sono rappresentati gli output in termini di altezza d'onda significativa per le condizioni "frequenti" di moto ondoso. Fatta eccezione per l'onda 2, ritroviamo in banchina un'altezza significativa sempre compresa tra 0.05 m e 0.20 m (Figura 6, Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11). L'onda 2, rappresentativa come detto delle condizioni di penetrazione più critiche, determina infatti livelli maggiori di agitazione ondosa residua davanti alla banchina, che risultano compresi tra 0.30 m e 0.40 m (Figura 7). Con riferimento alle due configurazioni simulate, con e senza il prolungamento della diga di sottoflutto, non si notano significative differenze nei livelli di agitazione ottenuti all'interno del bacino portuale, né davanti la nuova banchina del molo Clementino.

Si ritiene opportuno chiarire che l'effetto di bordo visibile in tutti gli output di altezza d'onda significativa, sul margine Est della griglia, è dovuto alla presenza dello strato assorbente; avendo posto la linea di generazione del moto ondoso a distanza opportuna dalle opere portuali, ciò non influenza in alcun modo l'attendibilità dei risultati.

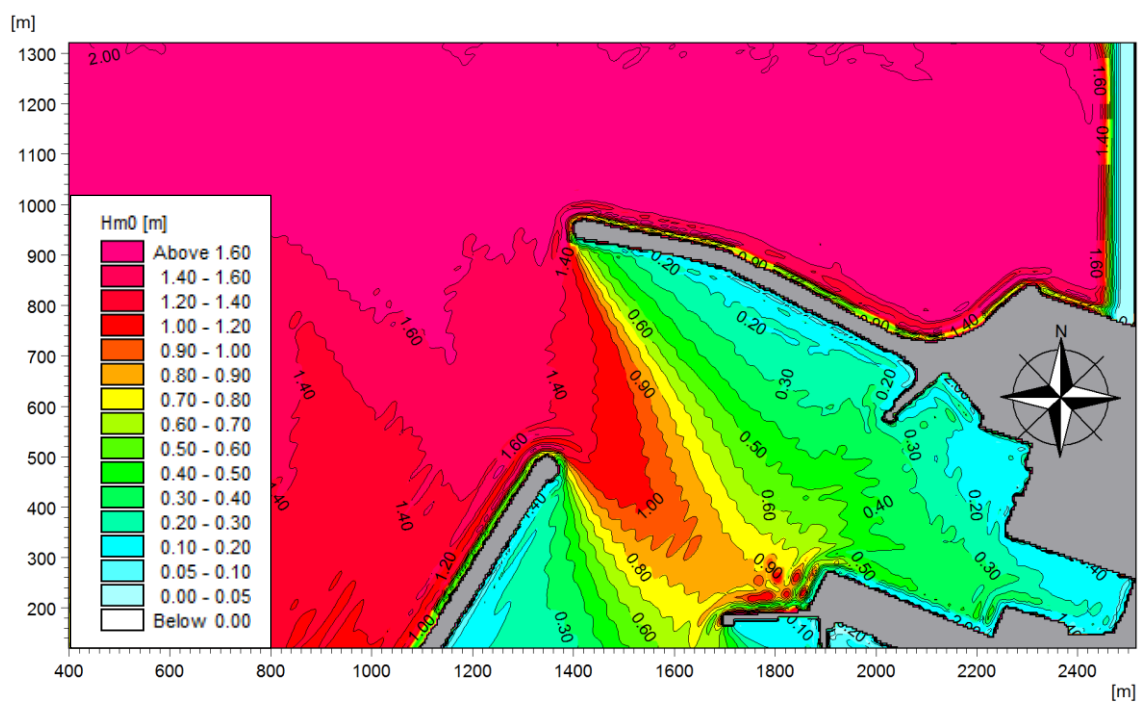


a)

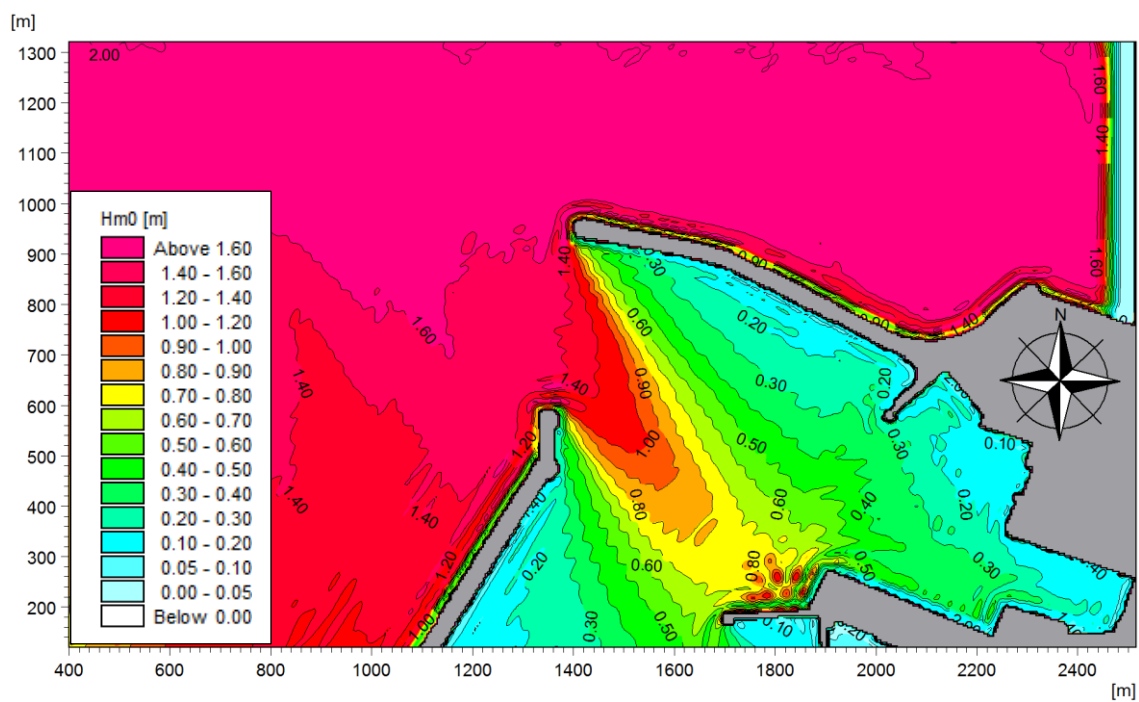


b)

**Figura 6.** Valori di  $h_s$  per l'onda 1:  $H_s = 1.0\text{ m}$ ,  $T_p = 5.0\text{ s}$ ,  $DIR = 330^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.

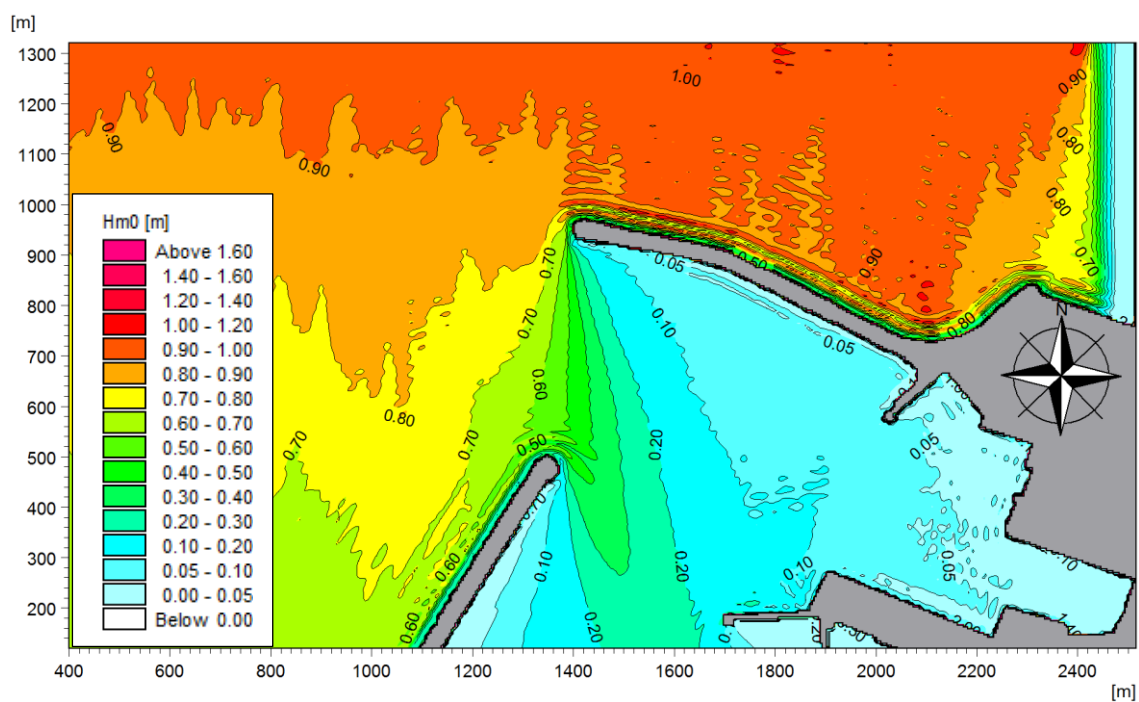


a)

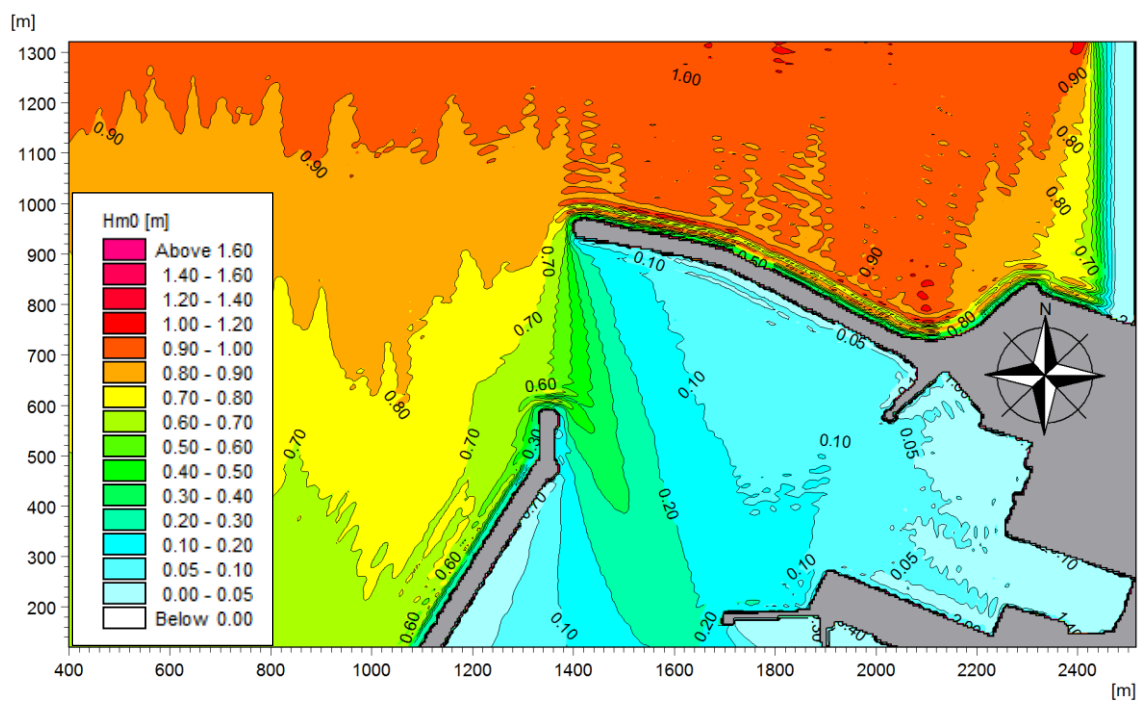


b)

**Figura 7.** Valori di  $H_s$  per l'onda 2:  $H_s = 2.0$  m,  $T_p = 6.3$  s,  $DIR = 330^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.

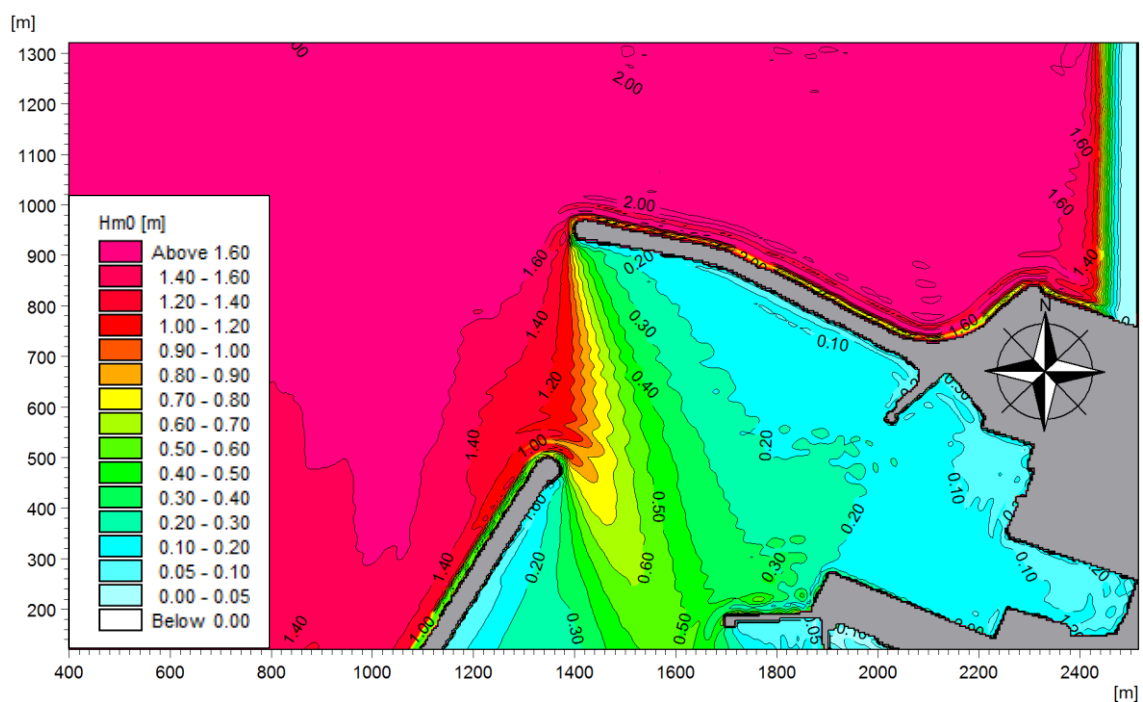


a)

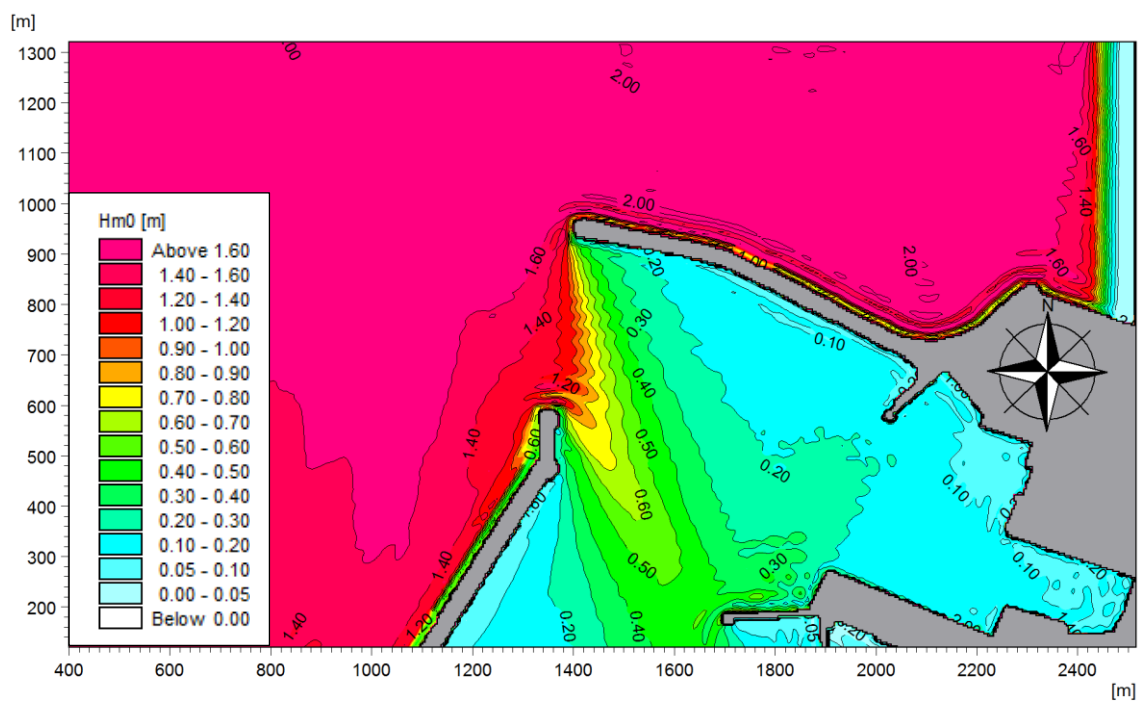


b)

**Figura 8.** Valori di  $H_s$  per l'onda 3:  $H_s = 1.0$  m,  $T_p = 5.2$  s,  $DIR = 0^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.

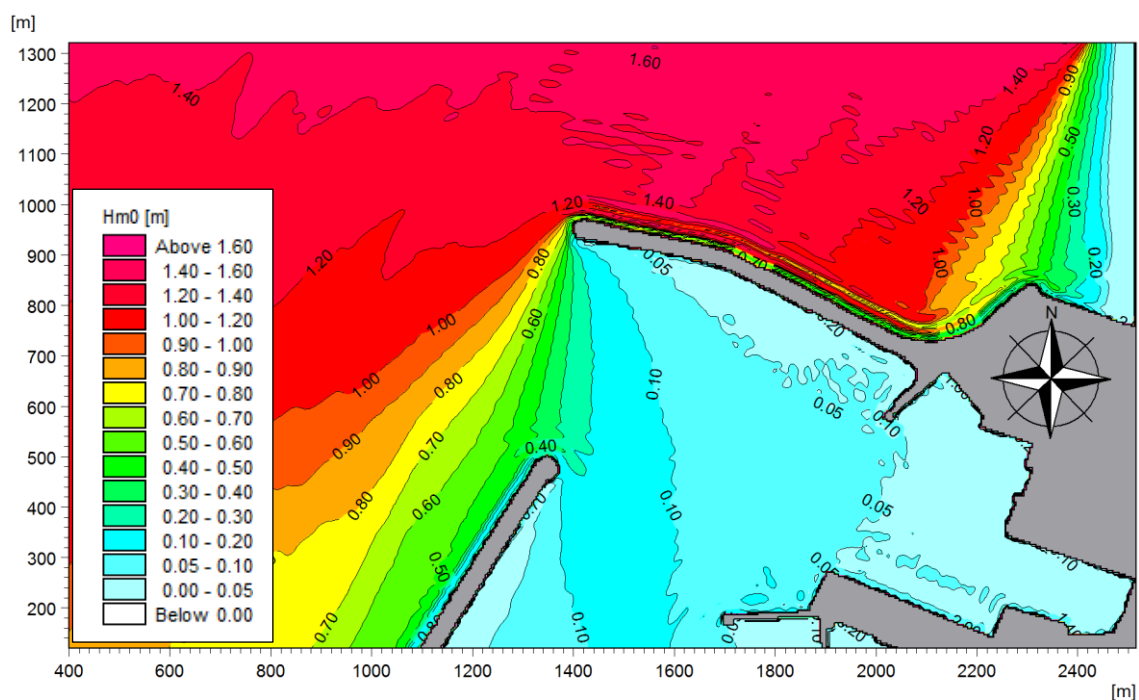


a)

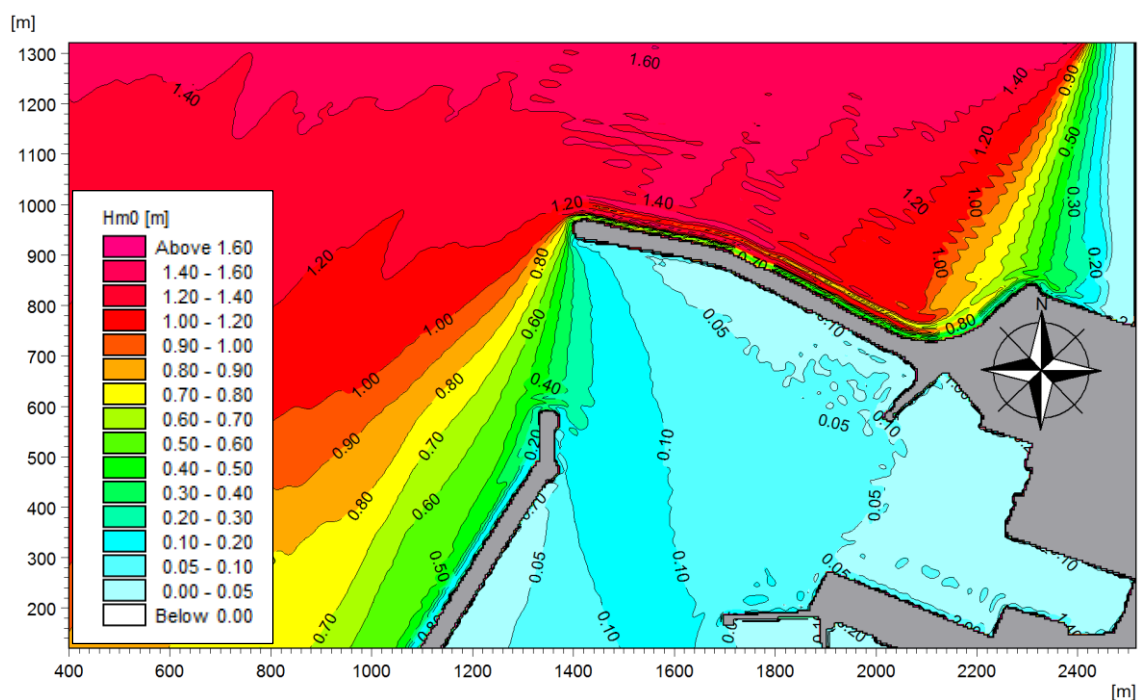


b)

**Figura 9.** Valori di  $H_s$  per l'onda 4:  $H_s = 2.0$  m,  $T_p = 6.7$  s,  $DIR = 0^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.



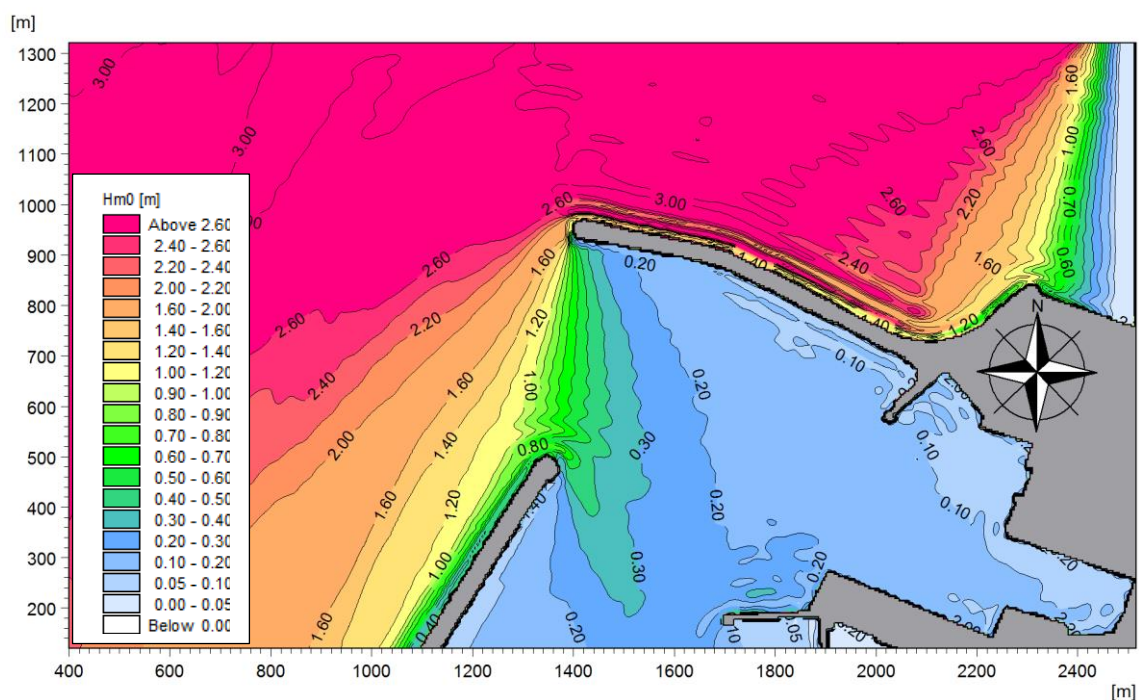
a)



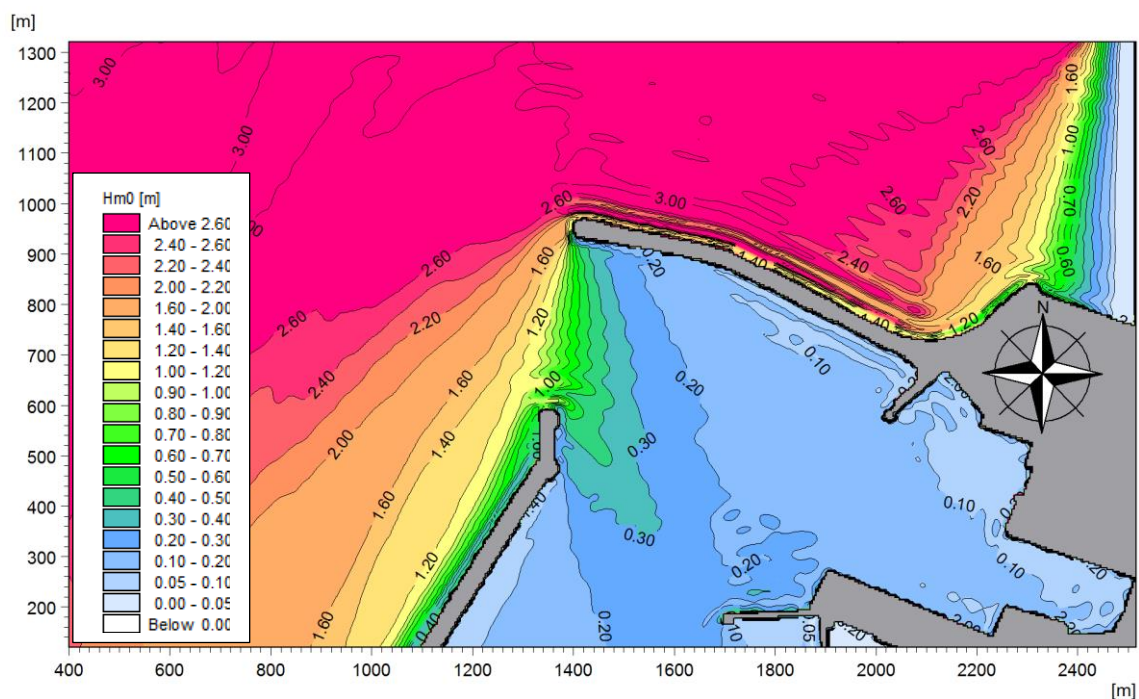
b)

**Figura 10.** Valori di  $H_s$  per l'onda 5:  $H_s = 1.5$  m,  $T_p = 6.0$  s,  $DIR = 30^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.





a)



b)

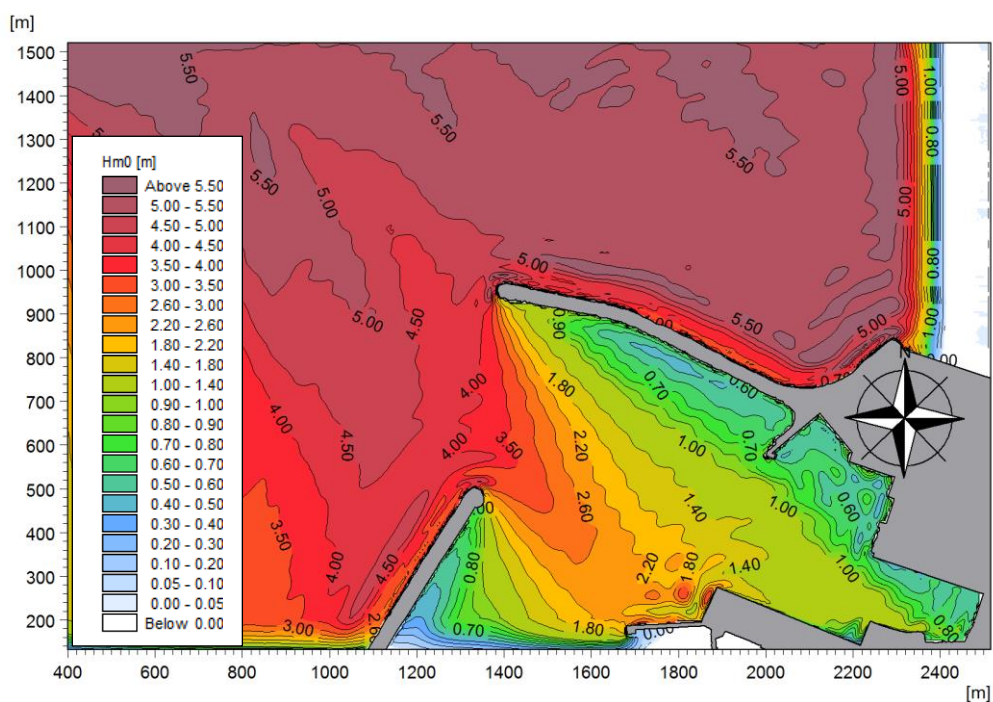
Figura 11. Valori di  $H_s$  per l'onda 6:  $H_s = 3.0$  m,  $T_p = 7.7$  s,  $DIR = 30^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.

## **2.8. Analisi dei risultati delle condizioni di moto ondoso estremo**

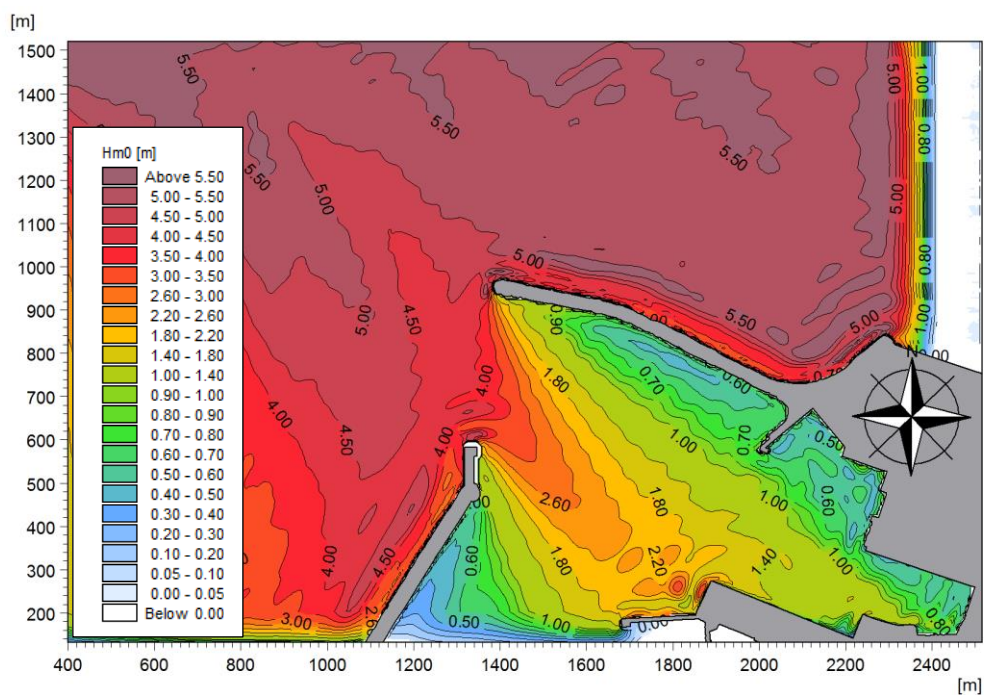
Per quanto riguarda l'onda estrema con periodo di ritorno pari a 50 anni, i livelli di agitazione ondosa residua davanti la banchina risultano decisamente più elevati rispetto a quelli determinati per le condizioni ordinarie, essendo compresi tra 1.00 m e 1.40 m (Figura 12). Anche in questo caso non si riscontrano significative differenze tra la configurazione transitoria e quella definitiva.

In questo caso si è ritenuto opportuno inserire anche l'output di Surface Elevation per quantificare la variazione della superficie libera rispetto al livello medio mare. In entrambe le configurazioni si ha un sovrizzo massimo del livello, davanti la banchina, di 0.75 m (Figura 13). Facendo riferimento ai valori estremi di innalzamento massimo del livello marino determinati nello studio meteomarino di riferimento pari a circa 0.70 m, calcolati tenendo conto di una riduzione del 25 % della combinazione dei massimi assoluti delle singole componenti (astronomica e meteorologica), si può ragionevolmente considerare tale valore come concomitante con gli eventi estremi di moto ondoso esaminati, in considerazione della generale interconnessione tra fenomeni atmosferici di bassa pressione e la genesi di vento persistente e le conseguenti mareggiate.

In tale scenario estremo, si può stimare quindi che all'innalzamento massimo di circa 0.75 m (sempre riferito all'onda significativa) corrisponde il raggiungimento della quota pari a circa + 1.45 m s.l.m.m. con conseguenti sollecitazioni sull'intradosso dell'impalcato di banchina posto a quota +1.15 m s.l.m.m..

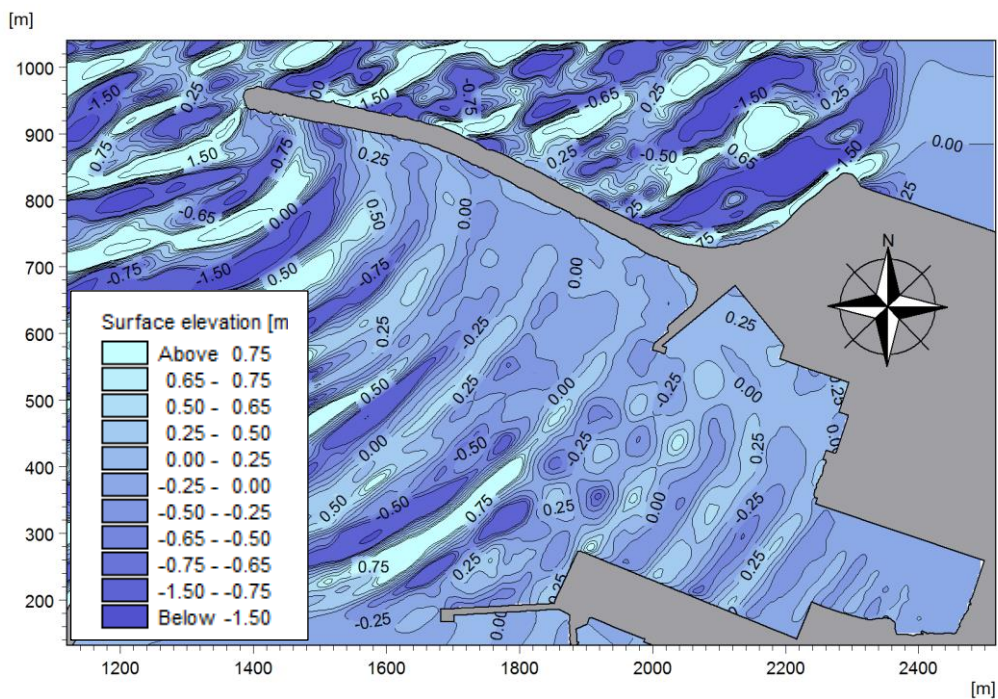


a)

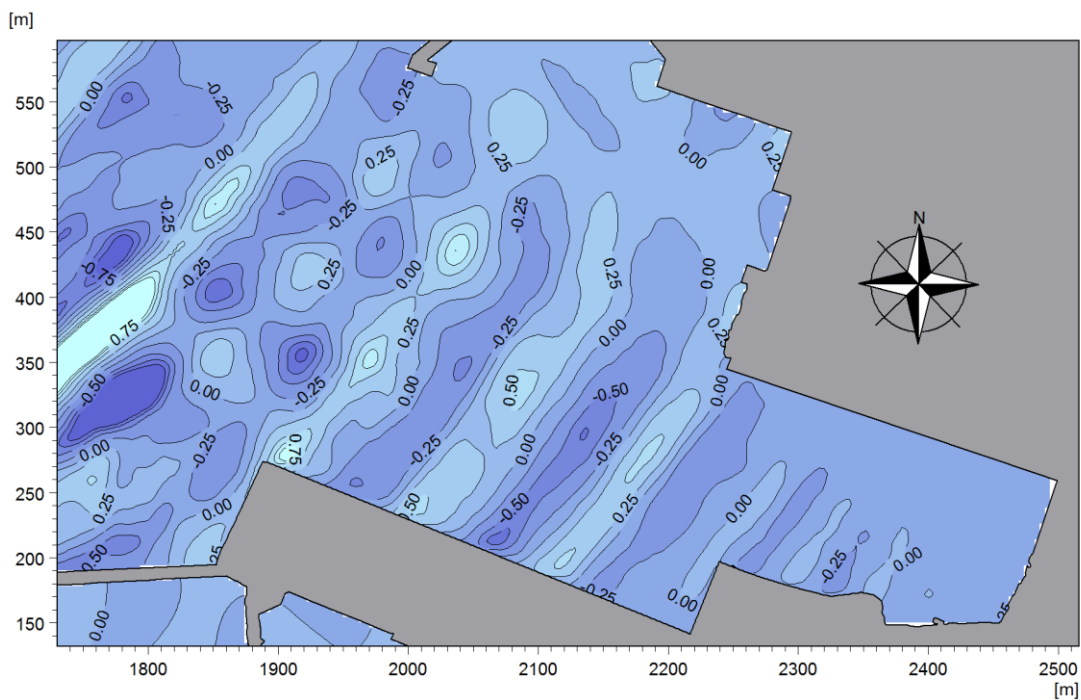


b)

**Figura 12.** Valori di  $H_s$  per l'onda 7:  $H_s = 5.5$  m,  $T_p = 10.5$  s,  $DIR = 330^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.



a)



b)

**Figura 13.** a) Innalzamento della superficie libera rispetto al livello medio mare dovuto all'onda estrema;  
b) dettaglio del sovralzso davanti alla banchina.

## 2.9. Verifiche per la sicurezza e l'operatività degli accosti

Per la sicurezza e l'operatività degli accosti, si è fatto riferimento alle indicazioni del manuale Terminals (TU Delft, 1987), individuando i seguenti livelli di riferimento:

- Condizione limite di sicurezza; per onde caratterizzate da un periodo  $T < 6$  s, i livelli di agitazione massima ammissibile sono 0.50 m e 0.30 m, rispettivamente nelle condizioni di direzione dell'onda parallela all'asse longitudinale della nave e di onda al traverso. Tali altezze limite si riducono rispettivamente a 0.30 m e 0.15 m per onde aventi un periodo  $T > 6$  s.
- Condizioni limite di operatività; al fine di garantire l'operatività delle manovre di carico e scarico, i livelli di agitazione massima ammissibile sono 0.30 m e 0.15 m, rispettivamente nelle condizioni di direzione dell'onda parallela all'asse longitudinale della nave e di onda al traverso, a prescindere dal periodo dell'onda.<sup>1</sup>

Ciò premesso, per la verifica dell'operatività della banchina relativa alle onde di clima ordinario sono state calcolate le curve di downtime, rappresentanti il numero medio di ore all'anno in cui una certa soglia di altezza d'onda significativa, per l'agibilità della banchina, viene superata. Per la costruzione delle curve sono state considerate le frequenze di accadimento delle onde nel punto P1 davanti all'imboccatura del porto, divise per classi di direzioni medie di provenienza e di altezze d'onda significative. Il codice Mike 21 BW permette di calcolare, per una determinata area del bacino portuale, in questo caso quella antistante la banchina di progetto, la statistica dei coefficienti di disturbo, definiti dal rapporto tra l'altezza d'onda incidente sull'opera e quella in un punto all'esterno del porto. Fissando delle altezze di soglia in banchina, sono state quindi calcolate le corrispondenti altezze d'onda esterne, tramite i coefficienti di disturbo medi, e le loro frequenze in seguito trasformate in ore annue.

La Figura 14 rappresenta la curva di downtime complessiva ed il contributo di ciascuna delle onde provenienti dalle tre direzioni. Risulta evidente che il maggior contributo di agitazione è dato dalle onde provenienti dalla direzione  $330^\circ$  N, in quanto penetrano direttamente nell'imboccatura.

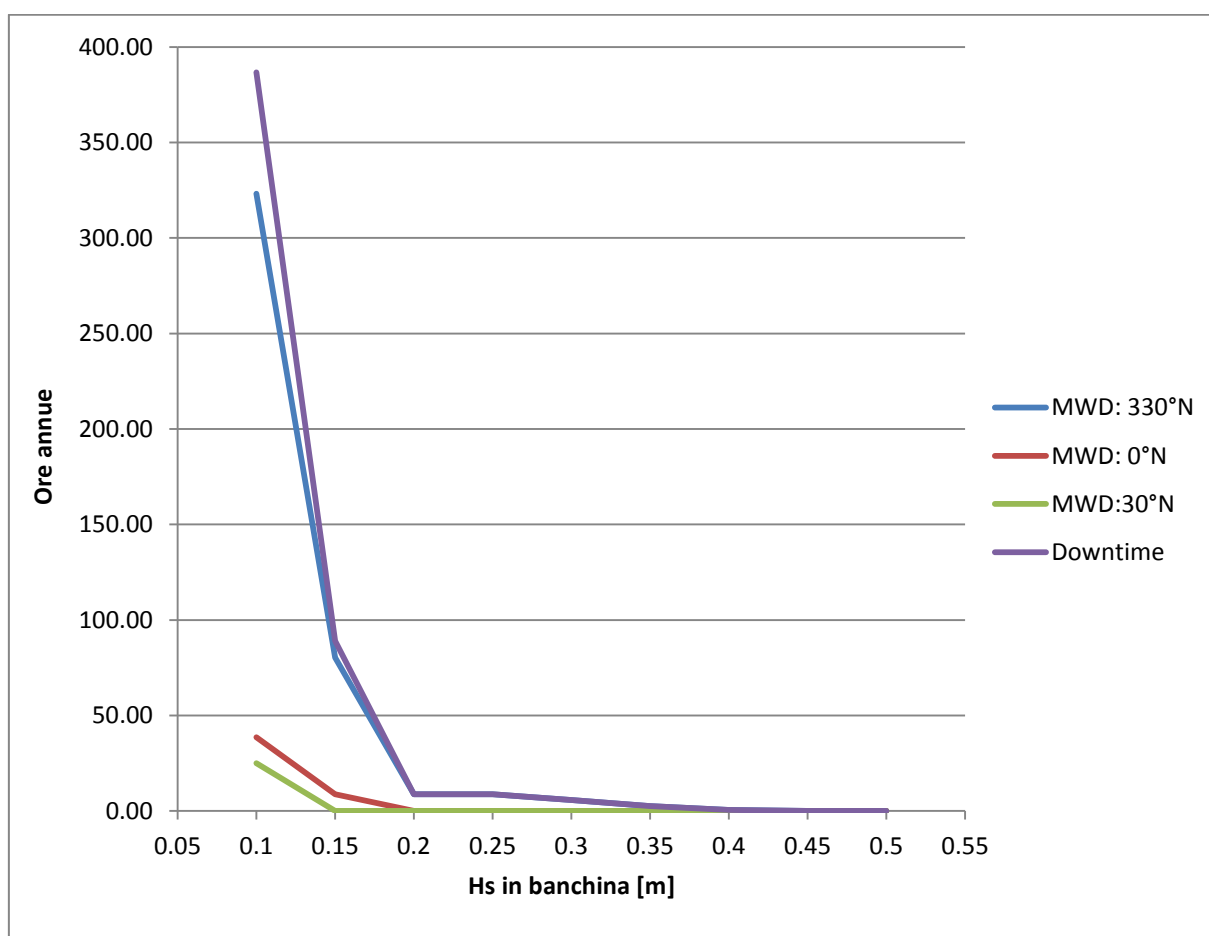
---

<sup>1</sup> È opportuno tenere in considerazione che i valori indicati per il limite di operatività sono ricavati dal TU Delft Terminals, facente riferimento a navi mercantili e quindi ad operazioni di carico e scarico mediante gru e/o apparecchiature di supporto.

Facendo riferimento ai valori di altezza d'onda significativa in banchina riportati nei paragrafi 2.7 - 2.8 e alle curve di downtime, e considerando l'assenza della condizione di onda al traverso data la disposizione della banchina rispetto all'imboccatura del porto ed i fenomeni diffrattivi, risulta che:

- La condizione limite di sicurezza 0.30 m ( $T > 6$  s) viene raggiunta e superata nello scenario estremo e nella condizione di moto ondoso ordinario riferita all'onda 2.
- La condizione limite di sicurezza 0.50 m ( $T < 6$  s) non viene raggiunta in nessun caso.
- La condizione limite di operatività 0.30 m (per tutti i periodi d'onda) viene raggiunta e superata soltanto nel caso dell'onda 2 per lo 0.06 % dell'anno, ovvero per meno di 6 ore all'anno.

Non sono state riscontrate differenze significative tra la configurazione transitoria e quella definitiva, prevista dal Piano regolatore Portuale.



**Figura 14.** Curve di downtime per la nuova banchina del Molo Clementino.

### 3. CONCLUSIONI

Il presente studio è stato redatto al fine di determinare l'agitazione ondosa residua all'interno della Darsena Fincantieri del Porto commerciale di Ancona e verificare le condizioni di esercizio degli ormeggi del nuovo banchinamento del Molo Clementino.

Le condizioni di onda incidente frequenti sono state determinate sulla base dei dati di clima annuale riportati nella Relazione Idraulico – Marittima redatta nel 2006 per il Porto di Ancona, da parte del gruppo di progettazione ACQUATECNO S.r.l. e MODIMAR S.r.l. (Allegato 1). Sulla base di questi sono state individuate tre direzioni di interesse, 330°N, 0°N e 30°N, ciascuna delle quali rappresentata da due diversi periodi d'onda, per un totale di sei eventi di moto ondoso ordinario. Per la condizione estrema invece si è fatto riferimento allo studio di agitazione interna del Porto di Ancona del Prof. Ing. Mancinelli del 2014 (Allegato 2), messo a disposizione dalla Committente Autorità Portuale, individuando un singolo evento estremo caratterizzato da un periodo di ritorno di 50 anni, altezza d'onda significativa pari a 5.5 m e periodo di picco 10.5 s. Tutte le onde sono state simulate in due configurazioni: la prima caratterizzata soltanto dalla presenza della banchina di progetto, la seconda comprensiva anche dell'intervento di prolungamento della diga di sottoflutto, in conformità a quanto previsto dal Piano Regolatore Portuale.

Per le simulazioni è stato utilizzato il modello di calcolo Mike 21 BW, basato sulla risoluzione numerica, nel dominio del tempo, delle equazioni di Boussinesq bidimensionali (Madsen et al., 1997), attraverso uno schema implicito alle differenze finite.

Dall'analisi dei risultati, si evince che le onde 1, 3, 4 e 5 comportano un'agitazione residua minima in banchina compresa tra 0.05 m e circa 0.10 m. L'onda 6, proveniente da 30°N, ma caratterizzata da una intensità maggiore, produce un'altezza d'onda in banchina pari circa a 0.20 m. La condizione più critica è rappresentata dall'onda 2, caratterizzata da 2.00 m di altezza d'onda significativa, periodo di picco pari a 6.3 s e direzione di provenienza 330°N diretta nell'imboccatura portuale. Tale onda induce un'agitazione residua in banchina compresa tra i valori 0.30 m e 0.40 m. Facendo riferimento alle indicazioni di cui al paragrafo 2.9 è risultato che le condizioni limite per l'operatività della banchina vengono raggiunte e superate soltanto nel caso dell'onda 2 per lo 0.06 % dell'anno, ovvero per un totale di meno di 6 ore annue. Infine, la condizione limite per gli ormeggi in sicurezza, per onde caratterizzate da  $T > 6$  s, viene raggiunta e superata nel caso dell'onda 2 e dello scenario di moto ondoso estremo, quella riferita alle onde aventi un periodo  $T < 6$  s invece non viene mai raggiunta.

Al fine di verificare che le condizioni d'onda incidenti sulla banchina fossero compatibili con le caratteristiche geometriche e strutturali della stessa, per l'onda estrema è stato determinato anche il sovrizzo massimo della superficie libera rispetto al livello medio mare che è risultato essere pari a + 1.45 m s.l.m.m., a fronte della quota + 1.15 m s.l.m.m. dell'intradosso dell'impalcato. Quest'ultimo risulta pertanto soggetto ad una sollecitazione data dalla sottospinta idraulica, da tenere in conto nel dimensionamento delle strutture di banchina.



## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.	Darsena Fincantieri del Porto di Ancona. Immagine presa da Google Earth.....	2
Figura 2.	Rosa del clima ordinario annuale nel punto P1.....	5
Figura 3.	Batimetria con linea di generazione.....	7
Figura 4.	Strati assorbenti.....	8
Figura 5.	Mappa dei coefficienti di riflessione assegnati alle opere.....	9
Figura 6.	Valori di $h_s$ per l'onda 1: $H_s = 1.0$ m, $T_p = 5.0$ s, $DIR = 330^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.....	11
Figura 7.	Valori di $H_s$ per l'onda 2: $H_s = 2.0$ m, $T_p = 6.3$ s, $DIR = 330^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.....	12
Figura 8.	Valori di $H_s$ per l'onda 3: $H_s = 1.0$ m, $T_p = 5.2$ s, $DIR = 0^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.....	13
Figura 9.	Valori di $H_s$ per l'onda 4: $H_s = 2.0$ m, $T_p = 6.7$ s, $DIR = 0^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.....	14
Figura 10.	Valori di $H_s$ per l'onda 5: $H_s = 1.5$ m, $T_p = 6.0$ s, $DIR = 30^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.....	15
Figura 11.	Valori di $H_s$ per l'onda 6: $H_s = 3.0$ m, $T_p = 7.7$ s, $DIR = 30^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.....	16
Figura 12.	Valori di $H_s$ per l'onda 7: $H_s = 5.5$ m, $T_p = 10.5$ s, $DIR = 330^\circ N$ ; a) configurazione transitoria, b) configurazione definitiva.....	18
Figura 13.	a) Innalzamento della superficie libera rispetto al livello medio mare dovuto all'onda estrema; b) dettaglio del sovrizzo davanti alla banchina.....	19
Figura 14.	Curve di downtime per la nuova banchina del Molo Clementino.....	21

## BIBLIOGRAFIA

Coastal Engineering Manual, Part VI, 2002.

Velsink, H.. *Terminals (Havens en scheepvaartwegen)*, Delft University of Technology, 1987.

DHI. Mike 21 BW – Boussinesq Wave Module, Short Description. *Mike 21 wave modelling*, 2007.

DHI. Mike 21 BW – Boussinesq Wave Module, Step-by-step training guide. *Mike 21 wave modelling*, 2007.

Madsen et al.. *Boussinesq type equations with high accuracy in dispersion and non-linearity*, 1997.

## **APPENDICE: MIKE 21 BOUSSINESQ WAVE MODULE**

Il codice di calcolo MIKE 21 BW è un potente strumento per la modellazione dell'agitazione ondosa all'interno dei porti; grazie all'implementazione delle dinamiche costiere nella "surf" zone, il suo utilizzo viene esteso all'ingegneria costiera. Il modello comprende i seguenti moduli:

- 2DH Boussinesq wave model;
- 1DH Boussinesq wave model.

In entrambi i casi il modello usa una formulazione avanzata per quanto riguarda la dispersione delle frequenze, rendendo possibile la propagazione di onde direzionali non lineari da acque profonde a costa.

MIKE 21 BW è inoltre in grado di modellare i seguenti fenomeni:

- Rifrazione;
- Diffrazione;
- Shoaling;
- Frangimento;
- Attrito al fondo;
- Riflessione parziale;
- Trasmissione;
- Moving shoreline;
- Interazioni non lineari tra fronti d'onda;
- Spreading direzionale;
- Spreading delle frequenze.

Le applicazioni del 2DH Boussinesq wave model includono:

- Determinazione del disturbo dovuto all'azione di onde di swell e wind sea;
- Studi di risonanza per l'effetto di onde a bassa frequenza;
- Modellazione della surf-zone per il calcolo del run-up e della circolazione indotta;
- Modellazione della propagazione e modellazione di transitori, quali onde generate da imbarcazioni e tsunamis.

**Equazioni di Boussinesq per il 2DH Boussinesq wave model**

MIKE 21 BW risolve numericamente, nel dominio del tempo, le equazioni avanzate di Boussinesq (enhanced Boussinesq equations) in termini di superficie libera e componenti di velocità di corrente integrate lungo la verticale, mediante la tecnica alle differenze finite su maglia quadrata. La risoluzione è basata sull'ipotesi di Boussinesq, ovvero che le condizioni di corrente non varino lungo la verticale. Di seguito si riportano le equazioni di Boussinesq:

Equazione di continuità

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

Equazione del moto lungo x

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(P^2/h)}{\partial x} + \frac{\partial(PQ/h)}{\partial y} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_1 = 0$$

Equazione del moto lungo y

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/h)}{\partial y} + \frac{\partial(PQ/h)}{\partial x} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial y} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_2 = 0$$

Dove:

- $P$  è il flusso [ $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ ] in direzione x;
- $Q$  è il flusso [ $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ ] in direzione y;
- $t$  è il tempo [s];
- $h$  è la profondità totale [m] ( $d + \xi$ );
- $d$  è la profondità [m];
- $\xi$  è elevazione della superficie al di sopra del datum [m];
- $g$  è l'accelerazione gravitazionale [ $\text{m}/\text{s}^2$ ];
- $n$  è la porosità;
- $C$  è il numero di Chezy [ $\text{m}^{0.6}/\text{s}$ ];
- $\alpha$  è il coefficiente di resistenza per il flusso laminare in mezzi porosi;

- $\beta$  è il coefficiente di resistenza per il flusso turbolento in mezzi porosi;
- $\psi_1$  e  $\psi_2$  sono i termini di dispersione di Boussinesq;
- $R_{xx}$  e  $R_{xy}$  sono i termini che includono il frangimento, modellato con la teoria dei rollers.

### **Soluzione numerica per il 2DH Boussinesq wave model**

Le equazioni differenziali sono discretizzate, nel dominio dello spazio, su griglie rettangolari; i termini scalari sono definiti nei nodi della griglia, mentre le componenti dei flussi sono definite a metà tra i nodi adiacenti. Ad eccezione dei termini convettivi la discretizzazione alle differenze finite è di tipo centrato. L'integrazione nel tempo utilizza l'algoritmo ADI (Alternating Direction Implicit) schema implicito centrato.

### **Dati di input del modello**

I dati di input necessari possono dividersi in tre gruppi:

- Dati di base :
  1. Bathymetry;
  2. Type of model and equations;
  3. Numerical parameters;
  4. Type of boundaries;
  5. Time step and length of simulation;
- Dati di calibrazione:
  1. Initial condition;
  2. Boundary data;
  3. Internal wave generation data;
  4. Wave breaking;
  5. Bottom friction;
  6. Wave absorbing;
  7. Moving shoreline;
  8. Wave partial reflection/transmission;
- Dati di output:
  1. Deterministic output;
  2. Phase-averaged output;
  3. Wave disturbance output;

4. Hot start output;
5. Moving shoreline output.

### **Dati di output del modello**

Vi sono cinque diversi tipi di output:

- Deterministic parameters;
- Phase – averaged parameters;
- Wave disturbance parameters (solo 2DH);
- Hot start parameters (solo 2DH);
- Moving shoreline parameters (solo 1DH).

Gli output deterministici consistono fondamentalmente in time series di componenti di velocità integrate sulla profondità e livello di superficie libera. I phase-averaged output includono principalmente altezza significativa, valori medi delle componenti dei flussi, valori massimi e minimi dell'altezza d'onda. Al terzo gruppo appartengono altezza d'onda significativa, coefficiente di disturbo, e la possibilità di avere una statistica dei coefficienti di disturbo in zone predefinite dell'area di studio. L'opzione hot start permette di effettuare simulazioni a partire da risultati di simulazioni precedenti (non nella condizione iniziale di mare calmo). L'ultimo gruppo comprende gli output relativi al run – up.

# ALLEGATO 1



AUTORITA' PORTUALE DI  
ANCONA

**Variante al P.R.P. del porto di Ancona**  
( Legge 28 gennaio 1994, n°84 )  
**“PIANO DI SVILUPPO DEL PORTO”**

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

ACQUATECNO S.r.l.:  
MODIMAR S.r.l:

Ing. Paolo Turbolente, Ing. Rodolfo Piscopia, Ing. Alessandro Iannotta  
Prof. Ing. Alberto Noli, Prof. Ing. Leopoldo Franco, Ing. Giancarlo Milana

Il Segretario Generale  
Dott. Vincenzo Mucci

visto: Il Presidente  
Giovanni Montanari

*Adozione - Variante al Piano Regolatore Portuale*

---

**Relazione Idraulico Marittima**

---

---

data:

---



# INDICE

<b>PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>STUDIO METEO-MARINO .....</b>	<b>4</b>
1 INTRODUZIONE.....	5
2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL PARAGGIO .....	6
2.1 <i>I fetch geografici ed efficaci.....</i>	6
3 DEFINIZIONE DEL CLIMA DI MOTO ONDOSO .....	11
3.1 <i>Ondametro di Ancona - descrizione della stazione di misura R.O.N. ....</i>	12
3.1.1 Clima di moto ondoso al largo di Ancona .....	13
3.1.2 Correlazione tra l'altezza ed il periodo d'onda.....	18
4 STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTO COSTA .....	20
4.1 <i>Griglia di calcolo.....</i>	21
4.2 <i>Condizioni al contorno ed ipotesi di calcolo .....</i>	23
4.3 <i>Analisi dei risultati.....</i>	33
5 VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO (MAREE, SOVRALZI) .....	34
5.1 <i>Marea astronomica.....</i>	34
5.2 <i>Marea meteorologica.....</i>	35
5.3 <i>Variazioni stagionali ed a lungo termine.....</i>	36
5.4 <i>Valori estremi.....</i>	36
5.5 <i>Correnti.....</i>	37
6 REGIME DEI VENTI.....	38
7 APPENDICE 1.....	41
7.1 <i>Descrizione del modello di propagazione inversa spettrale MEROPE.....</i>	41
7.2 <i>Descrizione del modello ENIF.....</i>	43
<b>STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSA INTERNA .....</b>	<b>45</b>
1 INTRODUZIONE.....	46
2 STUDIO DELLA AGITAZIONE INTERNA DEL BACINO PORTUALE .....	47
2.1 <i>Definizione delle condizioni d'onda incidenti .....</i>	49
2.2 <i>Definizione della configurazione geometrica e dei coefficienti di riflessione.....</i>	50
2.3 <i>Elaborazione della griglia di calcolo ed approssimazione della soluzione del campo d'onda .....</i>	53

---

2.4	<i>Analisi dei risultati</i> .....	55
3	ONDE DI LUNGO PERIODO.....	60
4	CONCLUSIONI.....	98
5	APPENDICE 2 – MODELLO NUMERICO NEWAVE.....	99
5.1	<i>Modello agli elementi finiti</i> .....	99
5.2	<i>Espressione della mild slope equation tramite l'equazione dell'iconale e dell'energia (o del trasporto)</i> .....	100
5.3	<i>Formulazione variazionale per la definizione del modello agli elementi finiti</i> .....	100
5.4	<i>Condizioni al contorno</i> .....	101
5.5	<i>Bibliografia</i> .....	102

## PREMESSA

L'A.T.I. (Acquatecno S.r.l. – Modimar S.r.l.) è stata incaricata dall'Autorità Portuale di Ancona per effettuare gli studi di idraulica marittima necessari per l'approvazione della variante al Piano Regolatore portuale del porto di Ancona da parte del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il presente documento costituisce la relazione conclusiva dei sopra menzionati studi, ed è diviso in due parti:

- lo STUDIO METEO MARINO, riportante
  - le caratteristiche del moto ondoso a largo
  - la trasposizione delle caratteristiche del moto ondoso a largo in prossimità dell'imboccatura portuale
- lo STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSI INTERNA, riportante:
  - i risultati della risposta del bacino portuale nella configurazione della variante al Piano Regolatore rispetto alle forzanti di moto ondoso frequenti;
  - i risultati della risposta del bacino portuale nella configurazione della variante al Piano Regolatore rispetto alle forzanti di moto ondoso di lungo periodo;

La relazione espone i criteri seguiti per la verifica della configurazione di Variante al Piano Regolatore Portuale.

# STUDIO METEO-MARINO

## 1 Introduzione

La presente relazione riguarda lo studio idraulico-marittimo e gli studi specialistici volti a definire il clima d'onda in prossimità del porto di Ancona.

Situato alle pendici di tre colli, Guasco, S. Cataldo ed Astagno, poco a nord del Monte Conero, parco naturale presso la città, nel tratto centrale della costa marchigiana, il porto di Ancona è un grande porto commerciale protetto da due grandi moli ed inoltre è anche il primo porto pescherecci dell'Adriatico con circa 385 imbarcazioni da pesca.

Il porto, infine, offre un comodo collegamento con i Paesi del bacino Adriatico e del Mediterraneo orientale (Croazia, Albania, Grecia, Turchia, Montenegro).

Per la caratterizzazione del clima di moto ondoso si è fatto riferimento alle misure eseguite dalla boa ondometrica direzionale, ubicata al largo di Ancona, che fa parte della Rete Ondometrica Nazionale gestita dall'APAT.

L'analisi delle caratteristiche del moto ondoso al largo del sito in esame consente di definire alcuni dei principali parametri progettuali quali ad esempio l'onda di "progetto", cui fare riferimento per il dimensionamento delle opere a mare.

Successivamente, al fine di caratterizzare il clima d'onda sotto costa e più in particolare nella zona prospiciente l'imboccatura portuale, è stato utilizzato il modello matematico di rifrazione inversa spettrale MEROPE (sviluppato dalla MODIMAR S.r.l. e riportato nel dettaglio in appendice). Si tratta di un modello di rifrazione inversa spettrale di tipo lagrangiano, basato sul metodo introdotto da Abernety e Gilbert (1978) che permette la propagazione da largo a riva della serie storica registrata dalla boa.

L'analisi dei dati di vento disponibili e dell'escursione del livello marino, finalizzata all'ottimizzazione dell'orientamento e delle destinazioni d'uso degli specchi portuali e delle strutture di ormeggio, completa il quadro informativo necessario per la definizione dei parametri progettuali delle opere di difesa portuale.

## 2 Inquadramento geografico del paraggio

Per la corretta analisi dei parametri di progetto di un'opera marittima è necessario definire preliminarmente le condizioni di “esposizione geografica” del sito di intervento rispetto ai possibili fattori meteomarini come vento, moto ondoso, correnti e maree.

### 2.1 I fetch geografici ed efficaci

Una prima caratterizzazione delle potenziali condizioni di esposizione al moto ondoso viene condotta in funzione della “traversia geografica” che rappresenta la massima estensione della superficie marina da cui possono arrivare gli stati di mare. Per il calcolo della traversia geografica, ponendosi al largo del sito in esame e “materializzando” il cosiddetto “punto di interesse”, vengono delimitati con un sistema di coordinate polari i distinti settori che dal punto di interesse “traguardano” i margini delle coste opposte al punto di interesse (che rappresentano gli estremi della superficie marina).

Si è soliti suddividere la traversia (fetch) geografica in un settore principale (caratterizzato dalle massime estensioni geografiche cui risultano solitamente associate le mareggiate più intense) ed un settore secondario (caratterizzato da estensioni geografiche più contenute solitamente contraddistinte da stati di mare minori).

Per *fetch efficace* si intende la “traversia” o lunghezza della porzione di mare sulla quale si esplica “effettivamente” l'azione del vento responsabile della generazione del moto ondoso. In bacini semichiusi di estensione limitata come il Mar Adriatico, l'individuazione dei *fetch* efficaci può essere eseguita facendo ricorso alla traversia (fetch) geografica.

Il valore del *fetch* efficace relativo ad una determinata direzione è funzione anche dei valori dei *fetch* geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata; in questo modo i *fetch* efficaci tengono conto del fatto che alla generazione del moto ondoso oltre alla superficie marina individuata nella direzione media  $\phi_w$  lungo la quale spira il vento contribuiscono anche le porzioni di mare dalle direzioni comprese in un settore di  $\pm\theta$  rispetto alla direzione media di azione del vento. Di conseguenza la lunghezza dei *fetch* efficaci risulta essere diversa da quella dei *fetch* geografici. Il calcolo dei *fetch* efficaci può essere eseguito in base alla seguente relazione:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i=\phi_w-\theta}^{\phi_w+\theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)} \quad (2.1.1)$$

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

$F_{e,w}$	lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione $\phi_w$ ;
$F_i$	lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione $i$ -esima $\phi_i$ ;
$\phi_w$	direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;
$\phi_w - \theta \leq \phi_i \leq \phi_w + \theta$	direzione $i$ -esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di $2 \cdot \theta$ considerato nell'intorno della direzione $\phi_w$ ;
$\theta$	ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso (il metodo di Saville prevede un valore di $\theta = \pm 45^\circ$ mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di $\theta = \pm 90^\circ$ );
$n$	termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume $n = 2$ ).

L'equazione (2.1.1) deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991).

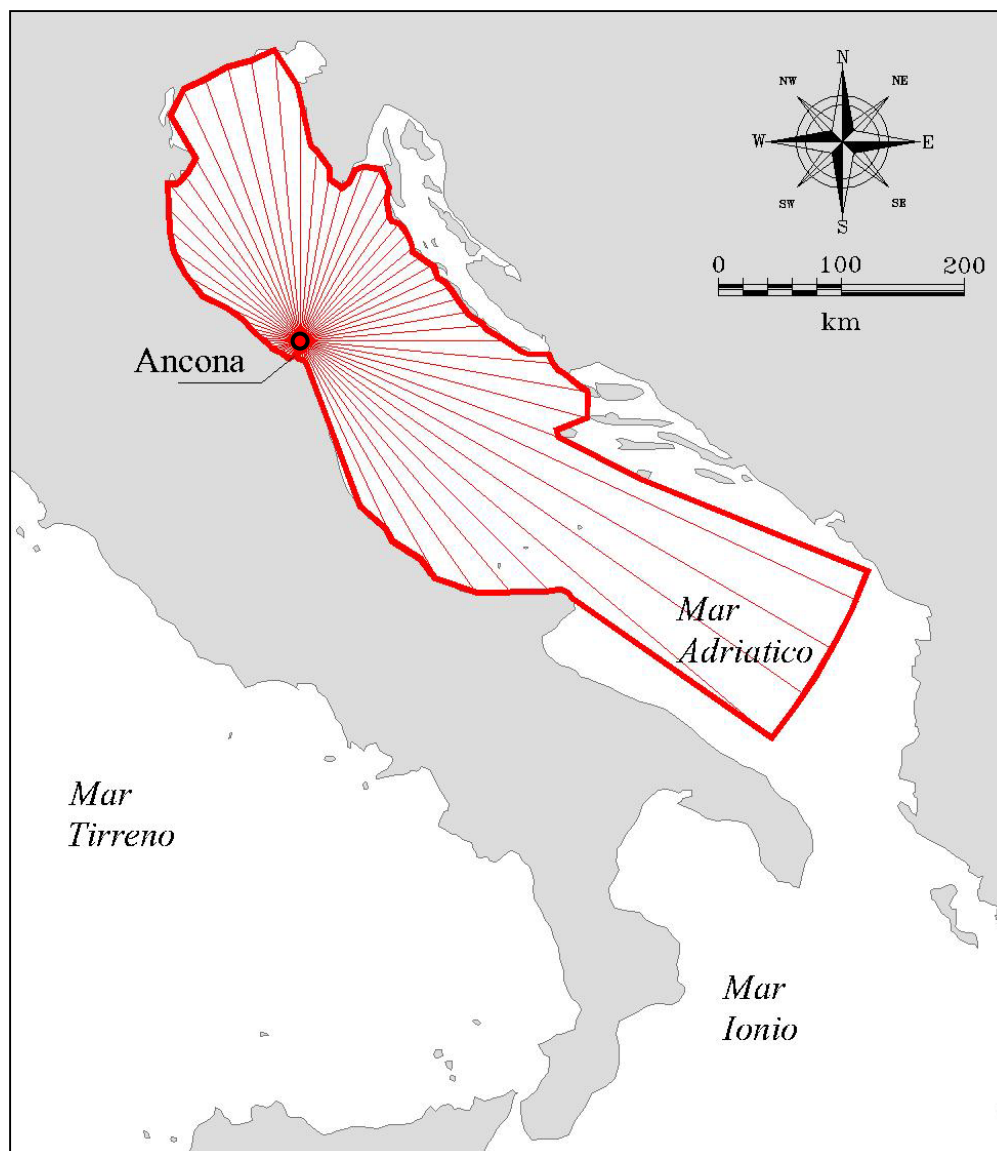
Il settore di traversia geografico al largo del monte Cònero, nel punto ove è posizionata la boa ondometrica, è delimitato dal promontorio del Gargano a sud, e risulta limitato ad est dalla costa Croata ed a nord dalla costa che si estende dal Veneto alla Slovenia. Il paraggio è esposto al mare aperto per il settore complessivo compreso tra  $290^\circ$  e  $130^\circ$ N; i valori più elevati della lunghezza del fetch geografico si hanno per il settore di scirocco.

Nel diagramma polare di fig. 2.1.1 sono indicati graficamente i valori dei fetch geografici relativi al punto di analisi. La tabella 2.1.1 riporta gli stessi valori in forma numerica.

Considerato che nel Mar Adriatico le perturbazioni cicloniche hanno estensioni massime dell'ordine dei 500 km, i fetch geografici sono stati limitati a tale dimensione.

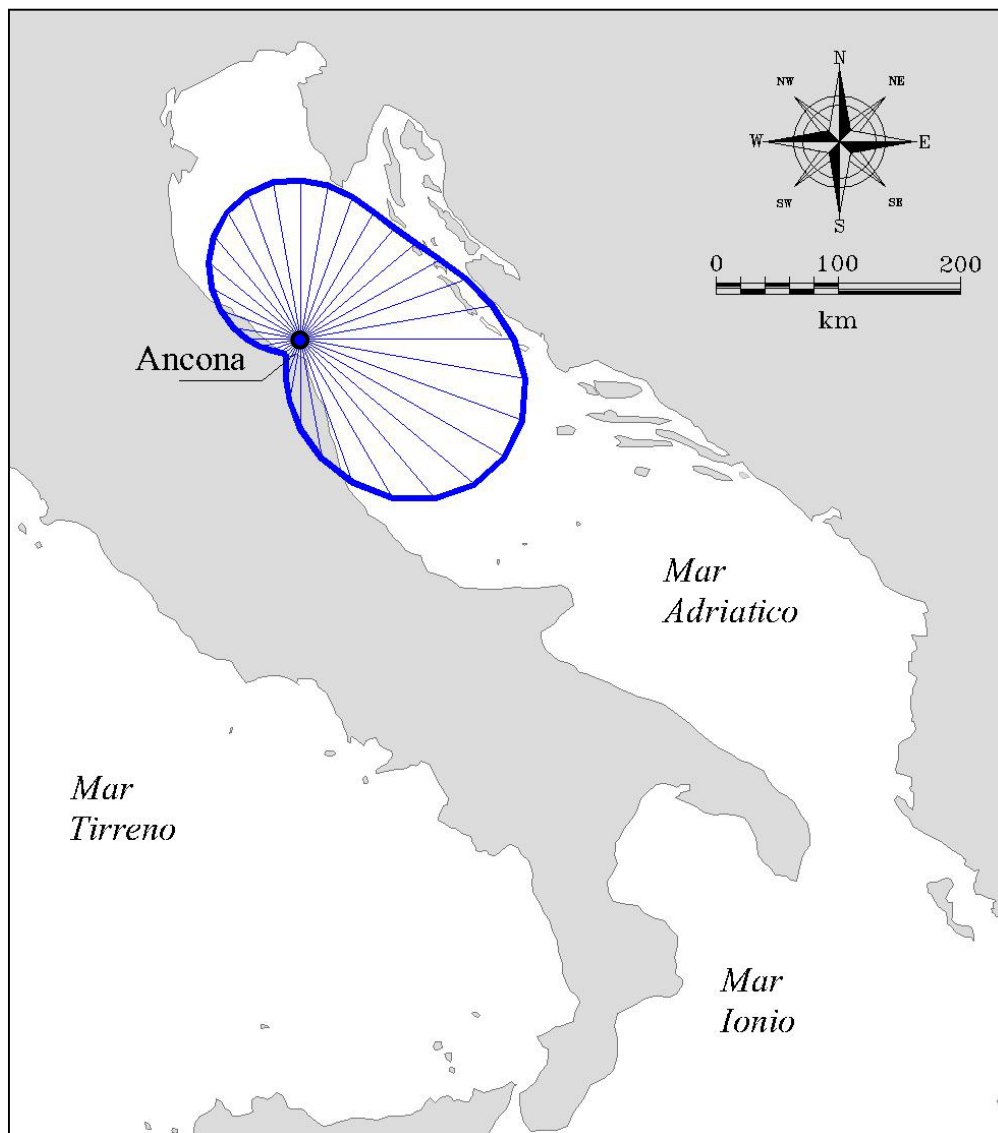
I fetch efficaci ottenuti utilizzando il modello ENIF (vedi appendice) per il calcolo automatico dell'equazione 2.2.1 sono riportati graficamente nel diagramma polare di fig. 2.1.2 e numericamente nella tabella 2.1.1 e nel grafico di fig. 2.1.3. Il fetch efficace massimo ottenuto risulta pari a circa 193 km ed è riferito al settore di scirocco ( $110^\circ$  Nord). L'applicazione del modello numerico suddetto consente inoltre di definire la legge

di deviazione tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso generato (fig. 2.1.4).



**Figura 2.1.1 – Fetch geografici al largo di Ancona.**



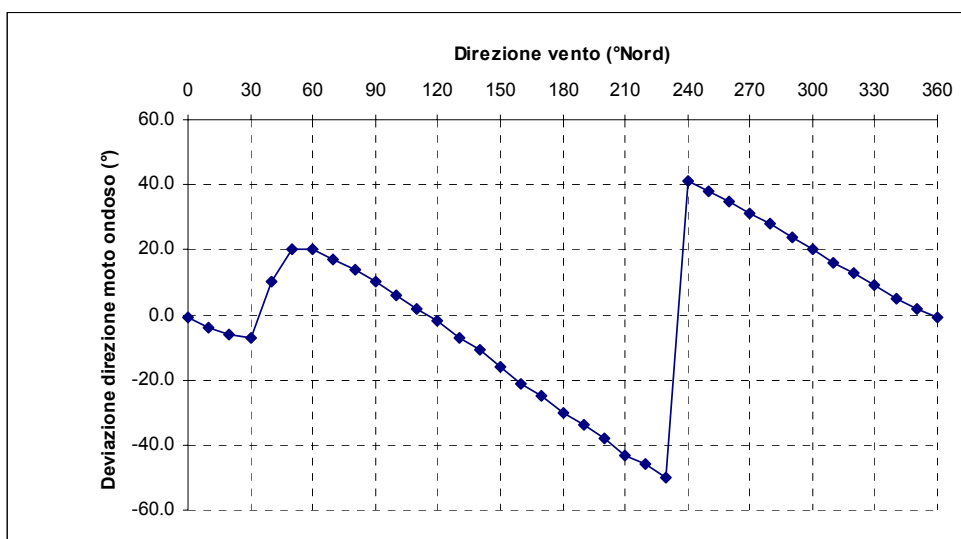


**Figura 2.1.2 – Fetch efficaci al largo di Ancona.**

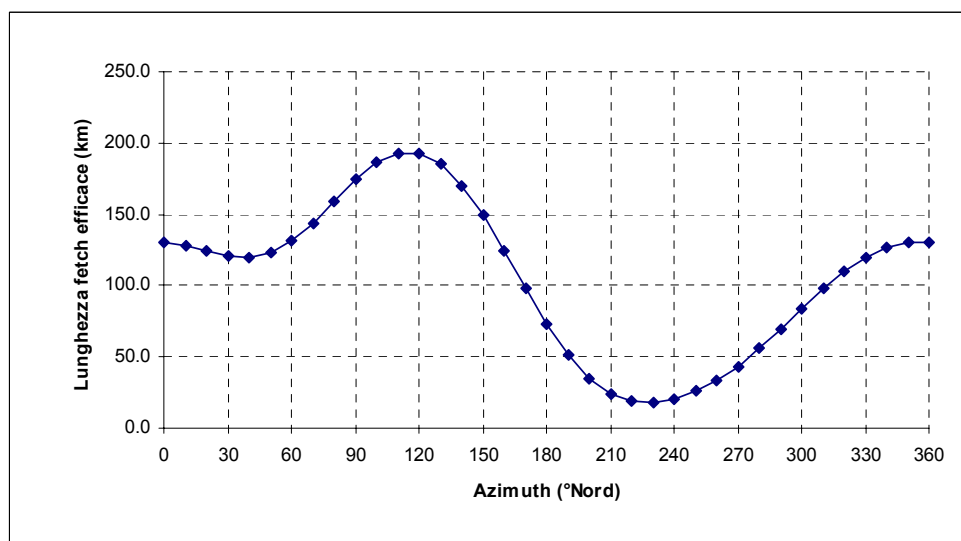
**Fetch geografici ed efficaci al largo di Ancona**

Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)	Direzione media settore di traversia (°Nord)	Fetch Geografico (km)	Fetch Efficace (km)	Deviazione direzione vento-mare (°)
0	192.76	130.19	-1.0	180	14.26	72.94	-30.0
10	133.43	127.76	-4.0	190	13.43	51.13	-34.0
20	150.81	123.95	-6.0	200	12.06	34.53	-38.0
30	144.39	120.35	-7.0	210	15.80	23.98	-43.0
40	124.44	119.27	10.0	220	16.89	18.90	-46.0
50	119.06	122.69	20.0	230	17.22	18.05	-50.0
60	123.52	131.15	20.0	240	18.42	20.58	41.0
70	128.58	143.98	17.0	250	21.20	25.82	38.0
80	137.12	159.37	14.0	260	24.63	33.42	35.0
90	167.47	174.51	10.0	270	28.54	43.41	31.0
100	236.82	186.50	6.0	280	36.77	55.66	28.0
110	223.85	193.11	2.0	290	48.05	69.47	24.0
120	498.40	192.88	-2.0	300	107.48	83.84	20.0
130	500.00	185.13	-7.0	310	138.57	97.74	16.0
140	265.02	170.21	-11.0	320	167.39	110.10	13.0
150	221.14	149.35	-16.0	330	211.53	119.97	9.0
160	141.99	124.53	-21.0	340	226.21	126.71	5.0
170	15.71	98.20	-25.0	350	230.95	130.06	2.0

**Tabella 2.1.1 - Fetch geografici ed efficaci al largo di Ancona.**



**Figura 2.1.3 – Valori dei fetch efficaci in funzione della direzione.**



**Figura 2.1.4 – Legge di deviazione tra la direzione media del vento e la direzione media del moto ondoso generato.**

### 3 Definizione del clima di moto ondoso

La principale “forzante” cui fare riferimento nella progettazione di un’opera marittima è rappresentata dal moto ondoso incidente l’opera stessa. A tal scopo è indispensabile analizzare il regime del moto ondoso ed estrapolare da questo le caratteristiche principali delle mareggiate estreme.

Nel caso in esame, per pervenire a tale conoscenza, data la vicinanza e rappresentatività della stazione RON, si è proceduto con l’acquisizione ed analisi delle registrazioni effettuate alla boa ondometrica ubicata al largo di Ancona (v. figura 3.1).



**Figura 3.1 – Inquadramento geografico con l’indicazione della boa ondometrica utilizzata e dei punti scelti per la propagazione sotto costa.**

### 3.1 Ondametro di Ancona - descrizione della stazione di misura R.O.N.

La stazione ondometrica di Ancona (figura 3.1.1), che fa parte della Rete Ondometrica Nazionale, è costituita da una boa ondometrica direzionale (dapprima del tipo Datawell Wavec MKI e poi del tipo TRIAXYS), posizionata su fondali di circa -70 m s.l.m. a circa 40 km dalla costa.

Si evidenzia che la serie storica analizzata in questo documento si estende da gennaio 01/01/2002 al 31/12/2004 in quanto l'analisi dei dati del triennio precedenti ha sollevato perplessità in relazione alla loro affidabilità. Il rendimento complessivo dell'ondametro (percentuale degli eventi triorari misurati rispetto a quelli teorici) è pari al 76.47%. Nella tabella 3.1.1 sono riportati i rendimenti mensili ed il numero di stati di mare, registrati con cadenza trioraria, relativi all'ondametro di Ancona.

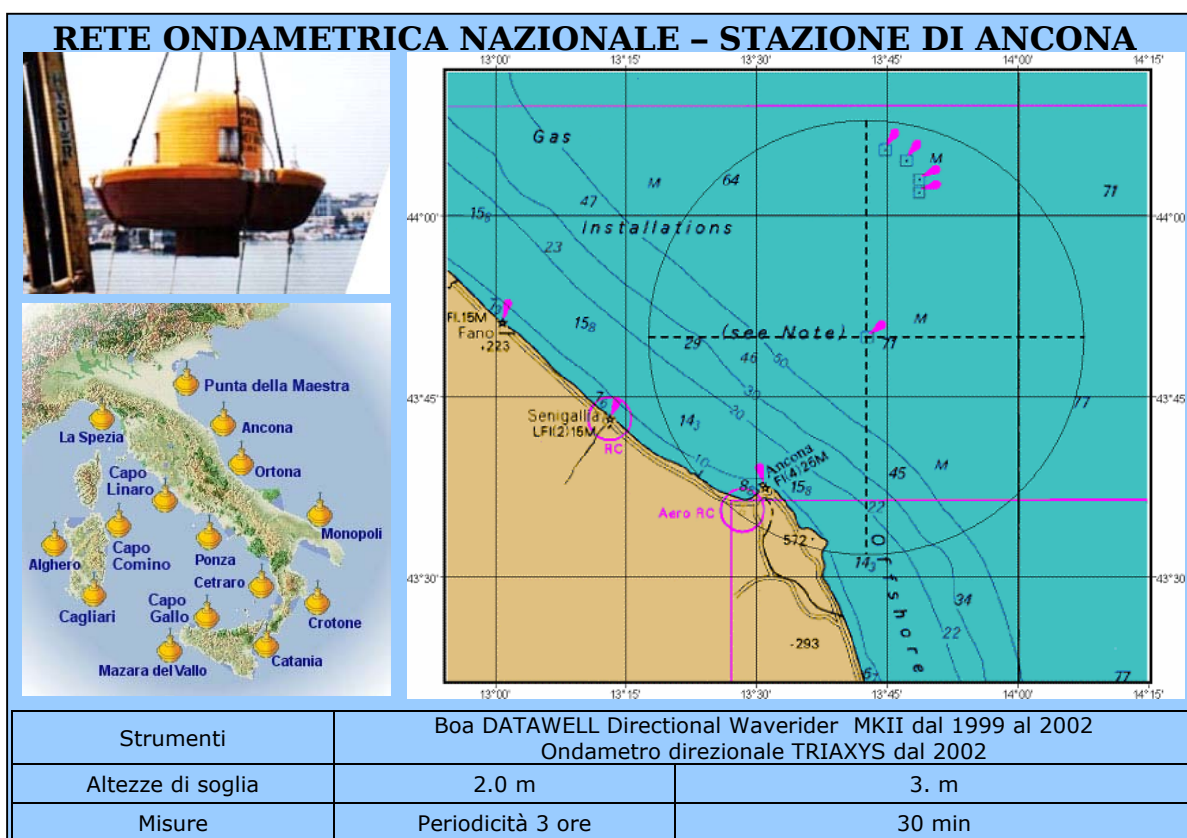


Figura 3.1.1 – Caratteristiche della stazione ondometrica di Ancona.

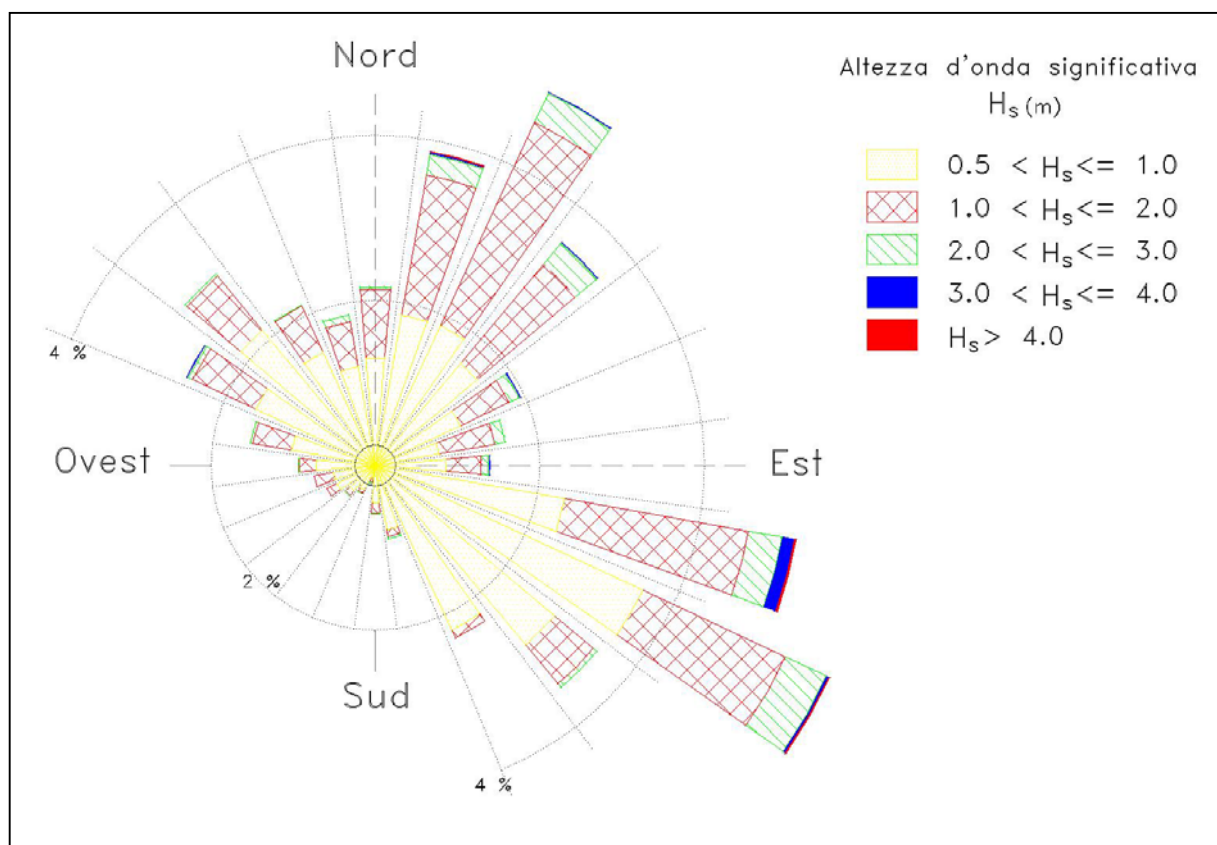
Tabella 3.1.1 – Rendimento dell'ondametro di Ancona

Anno	Mese	Numero Eventi	Rend (%)	Anno	Mese	Numero Eventi	Rend (%)
2002	1	234	94.355	2004	7	198	79.84
	2	210	93.75		8	225	90.73
	3	229	92.339		9	234	97.50
	4	231	96.25		10	241	97.18
	5	241	97.177		11	223	92.92
	6	195	81.25		12	138	55.65
	7	136	54.839		1	206	83.07
	8	77	31.048		2	88	37.93
	9	172	71.667		3	210	84.68
	10	138	55.645		4	235	97.92
	11	218	90.833		5	243	97.98
	12	238	95.968		6	233	97.08
2003	1	34	13.71	7	243	97.98	
	2	60	26.786	8	237	95.57	
	3	193	77.823	9	232	96.67	
	4	220	91.667	10	31	12.50	
	5	223	89.919	11	182	75.83	
	6	209	87.083	12	48	19.36	
Numero totale eventi registrati:							6705
Rendimento complessivo ondametro:							76.47%

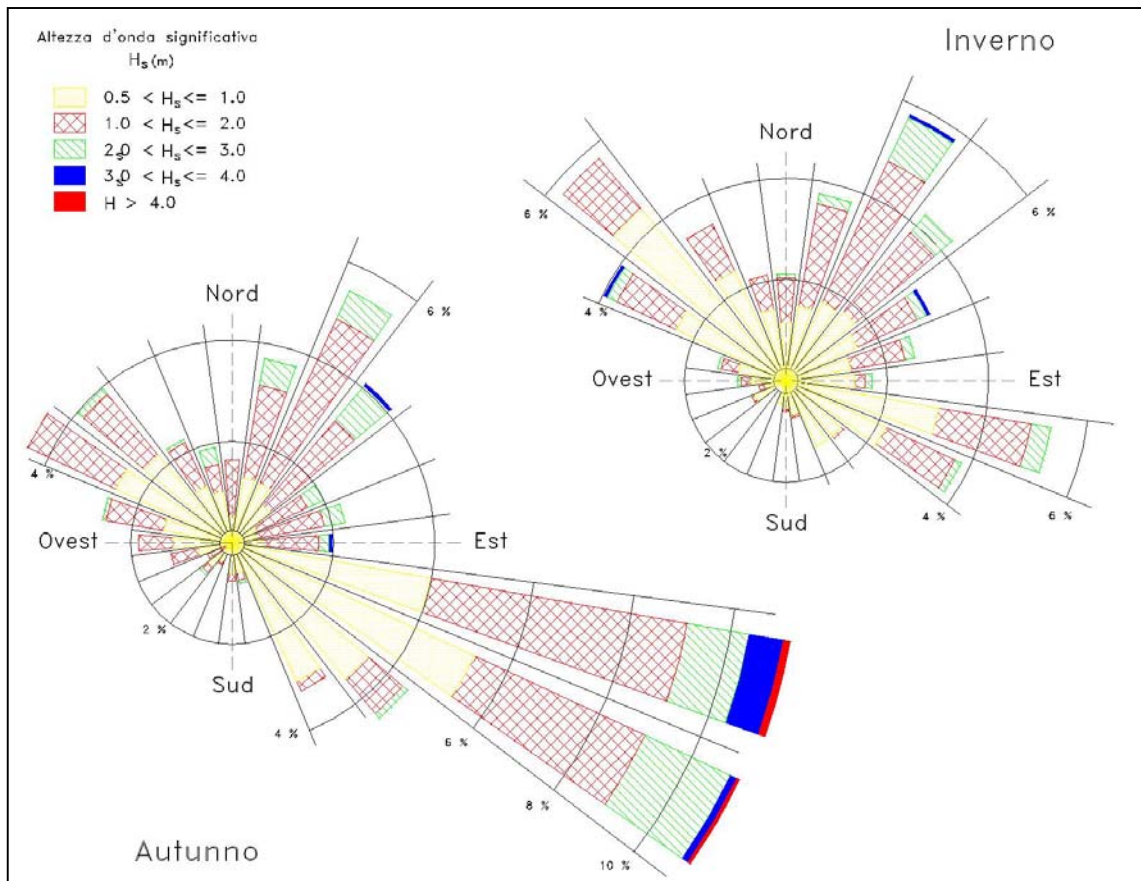
### 3.1.1 Clima di moto ondoso al largo di Ancona

Al fine di individuare la frequenza di accadimento di ogni singola classe di eventi, gli stati di mare registrati dalla boa ondometrica sono stati suddivisi in base al valore dell'altezza d'onda significativa ed alla direzione di provenienza. Tale suddivisione è stata eseguita sia per tutti gli eventi della serie, sia considerando separatamente gli eventi stagionali.

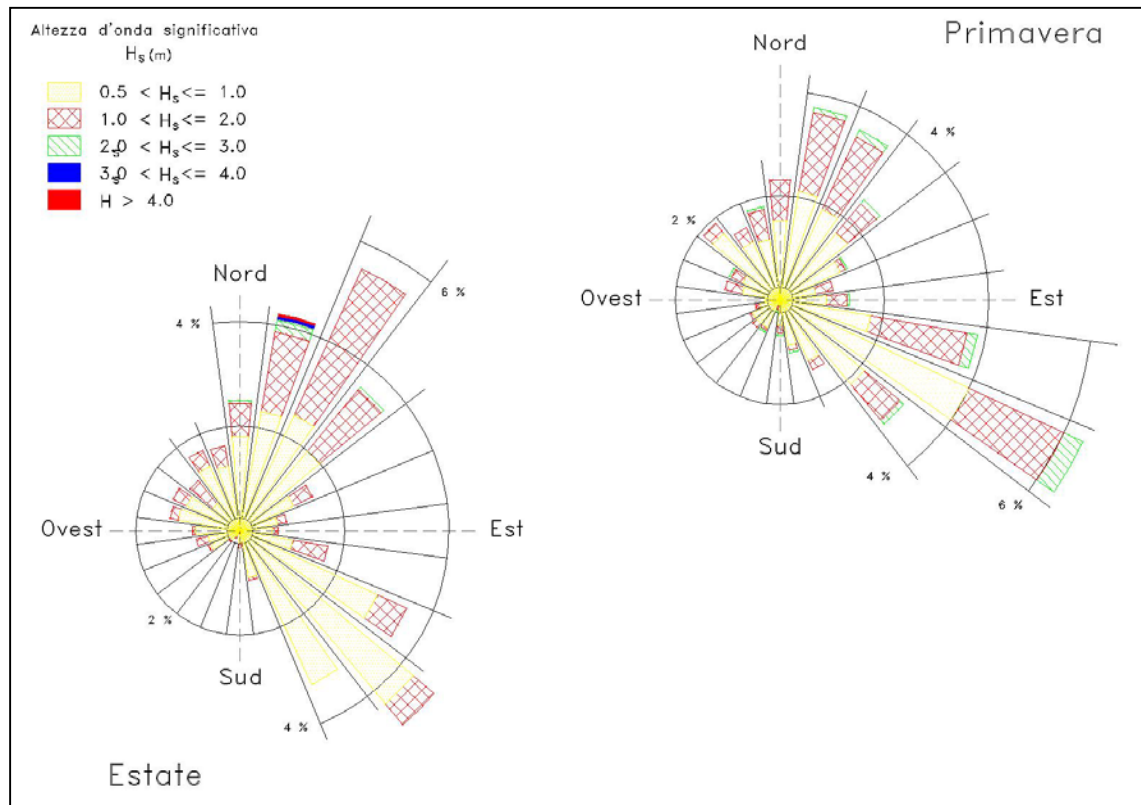
Nella figura 3.1.2 e nelle figure 3.1.3 e 3.1.4 sono riportate rispettivamente la rosa annuale e quelle stagionali del clima di moto ondoso relative alla boa di Ancona (in settori di ampiezza di 15°). La tabella 3.1.2 riporta per il clima annuale gli stessi risultati in forma numerica.



**Figura 3.1.2 – Rosa della distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso annuali al largo di Ancona.**



**Figura 3.1.3 – Rosa della distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso autunnali e invernali al largo di Ancona.**



**Figura 3.1.4 – Rosa della distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso primaverili ed estivi al largo di Ancona.**

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza.  
Ancona largo - Periodo di riferimento gennaio 2002 - dicembre 2004

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25÷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	0.39	0.73	0.98	0.63	0.27	0.04	0.03	0.01								3.09
20	0.51	0.69	1.37	0.97	0.42	0.15	0.07					0.01				4.19
30	0.43	0.63	1.33	1.21	0.64	0.21	0.06	0.01								4.52
40	0.31	0.51	1.00	1.01	0.40	0.22	0.07	0.01								3.55
50	0.36	0.45	1.13	0.52	0.31	0.12	0.03									2.92
60	0.45	0.34	0.76	0.25	0.12	0.10		0.01								2.04
70	0.40	0.46	0.55	0.16	0.19	0.06										1.83
80	0.34	0.45	0.51	0.34	0.19	0.10	0.01	0.01								1.97
90	0.51	0.51	0.48	0.12	0.09	0.03										1.73
100	0.54	0.85	1.06	0.72	0.31	0.16	0.01									3.65
110	0.67	1.18	2.12	1.03	0.55	0.25	0.15	0.16	0.01	0.03	0.01					6.17
120	0.81	1.67	2.34	1.01	0.46	0.16	0.21									6.67
130	0.84	2.12	1.98	0.40	0.16	0.07	0.03									5.61
140	0.84	2.07	1.98	0.24	0.03											5.16
150	1.07	2.48	1.51	0.07												5.13
160	0.60	1.45	0.75	0.03	0.01											2.83
170	0.70	0.76	0.40	0.04	0.01	0.03										1.95
180	0.39	0.45	0.27	0.04	0.01											1.16
190	0.28	0.36	0.19	0.03	0.01	0.01										0.89
200	0.33	0.25	0.12	0.04	0.01	0.01										0.78
210	0.18	0.27	0.22	0.01		0.01										0.70
220	0.22	0.28	0.24	0.04	0.01	0.01										0.82
230	0.19	0.43	0.34	0.04												1.01
240	0.39	0.33	0.27	0.10	0.01											1.10
250	0.22	0.42	0.43	0.16	0.03											1.27
260	0.24	0.52	0.28	0.06												1.10
270	0.33	0.67	0.51	0.10	0.06		0.01									1.69
280	0.36	0.75	0.58	0.13	0.03											1.85
290	0.52	1.00	0.81	0.33	0.09	0.03										2.77
300	0.46	1.18	1.10	0.49	0.15	0.03	0.01	0.01								3.45
310	0.43	1.19	1.34	0.43	0.13	0.03										3.56
320	0.57	1.09	1.34	0.40	0.09	0.01										3.50
330	0.46	1.34	1.07	0.39	0.06	0.01										3.34
340	0.34	0.97	0.81	0.31	0.07	0.03										2.54
350	0.49	0.87	0.78	0.22	0.06	0.01	0.04									2.48
360	0.45	0.92	0.97	0.42	0.18	0.01										2.95
TOT.	16.61	30.62	31.93	12.56	5.22	1.97	0.76	0.25	0.01	0.03	0.01	0.01				100.00
Tot. cumul.		47.23	79.16	91.72	96.94	98.91	99.67	99.93	99.94	99.97	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	

Numero eventi validi : 6705

**Tabella 3.1.2 - Clima annuale: eventi di moto ondoso triorari classificati per altezza e direzione.**



Dall'analisi dei risultati (in particolare tab. 3.1.2) si evince che:

- al largo di Ancona gli stati di mare più frequenti e caratterizzati da altezze d'onda più elevate provengono dal settore di traversia levante-scirocco ( $80^{\circ}$ - $170^{\circ}$ N) che quindi può essere assunto quale settore di traversia principale;
- la percentuale degli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda inferiore a 0,5 m è pari a circa il 47%;
- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0,5 m provengono per il 40% circa dal settore di traversia principale e per il rimanente 60% dalle altre direzioni;
- gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda superiore a 0,5 m e provenienti dal settore di traversia principale hanno per circa il 97% altezza d'onda comunque inferiore a 2,5 m;
- il moto ondoso più intenso ( $H_s > 3.0$  m) proviene in prevalenza dalla sola direzione  $110^{\circ}$ N con una frequenza di accadimento pari a circa 0.2%, anche se piccole percentuali di accadimento si riscontrano per varie direzioni del I° quadrante e le altezze d'onda maggiori (superiori a 5.0 m) sono state registrate per il settore di tramontana ( $20^{\circ}$ N);
- nel settore di traversia principale ( $110^{\circ}$ N) si sono verificate altezze d'onda significativa superiori a 4,5 m;
- il clima di moto ondoso presenta un carattere “trimodale” e non presenta sensibili variazioni stagionali; i tre distinti settori di traversia individuabili sono nell'ordine di importanza:  $70^{\circ}$ - $130^{\circ}$  N (levante-scirocco),  $0^{\circ}$ - $70^{\circ}$  N (grecale),  $290^{\circ}$ - $360^{\circ}$  N (maestrone-tramontana).

Queste caratteristiche climatiche risultano sostanzialmente confermate anche analizzando i dati ondometrici su base stagionale, riscontrando quindi una certa omogeneità dell'esposizione climatica del moto ondoso.

Ovviamente si riscontra una minore frequenza di accadimento delle mareggiate estreme in primavera ed estate.

Si nota che la breve durata del periodo di misura non consente un'analisi statistica degli eventi estremi per estrapolazioni a lungo termine, ma le frequenze di superamento riportate in tab. 3.1.2 indicano che l'altezza d'onda significativa di picco mareggiata con tempo di ritorno annuale ha un valore prossimo a 4.5 m al largo.

### 3.1.2 Correlazione tra l'altezza ed il periodo d'onda

Gli eventi di moto ondoso sono stati suddivisi in base al valore dell'altezza d'onda significativa e del periodo al fine di individuare la frequenza di accadimento di ogni singola classe di eventi. Nella tabella 3.2.2 è riportata la distribuzione percentuale degli eventi in base al periodo di picco ed all'altezza d'onda.

Al fine di individuare la legge di dipendenza tra il periodo di picco delle onde  $T_P$  e l'altezza d'onda significativa  $H_s$ , per i tre settori di provenienza del moto ondoso, si è fatto riferimento alla seguente relazione (Mathiesen et al., 1994) come anche utilizzato nell'Atlante delle Onde Italiane.

$$T_P = a \cdot (H_s)^b \tag{3.2.1}$$

ove i parametri  $a$  e  $b$  sono stati ricavati dall'analisi di correlazione statistica dei dati registrati dalla boa ondometrica

Nella figure 3.2.4÷3.2.6 sono riportati, per i tre settori di traversia, gli eventi della serie storica, diagrammati in funzione del periodo  $T_P$  e dell'altezza d'onda  $H_s$ , e la legge di dipendenza utilizzata.

Ripartizione percentuale per classi di altezze d'onda significative e periodo di picco Ancona largo - Periodo di riferimento gennaio 2002 - dicembre 2004									
Hs (m)	CLASSI DI PERIODO MEDIO $T_p$ (s)							Tot	Tot. cumul.
	$T_p < 4$	$4 \leq T_p < 6$	$6 \leq T_p < 8$	$8 \leq T_p < 10$	$10 \leq T_p < 12$	$12 \leq T_p < 14$	$T_p > 14$		
0.25 <	12.07	4.16	0.33	0.01	0.01		0.03	16.61	16.61
0.25 ÷ 0.75	43.64	5.43	0.43	0.10	0.06	0.01		49.68	66.29
0.75 ÷ 1.25	11.60	8.77	0.40	0.01				20.79	87.08
1.25 ÷ 1.75	0.43	7.10	0.48					8.01	95.09
1.75 ÷ 2.25		2.45	0.39					2.83	97.93
2.25 ÷ 2.75		0.97	0.43					1.40	99.33
2.75 ÷ 3.25		0.19	0.30					0.49	99.82
3.25 ÷ 3.75		0.01	0.10					0.12	99.94
3.75 ÷ 4.25									99.94
4.25 ÷ 4.75			0.04					0.04	99.99
4.75 ÷ 5.25									99.99
>5.25			0.01					0.01	100.00
Tot.	67.74	29.08	2.92	0.13	0.07	0.01	0.03	100	
Tot. cumul.	67.74	96.82	99.75	100.00	100.00	100.00	100.00		

**Tabella 3.2.2 – Eventi di moto ondoso classificati per altezza d'onda e periodo  
Distribuzione percentuale.**

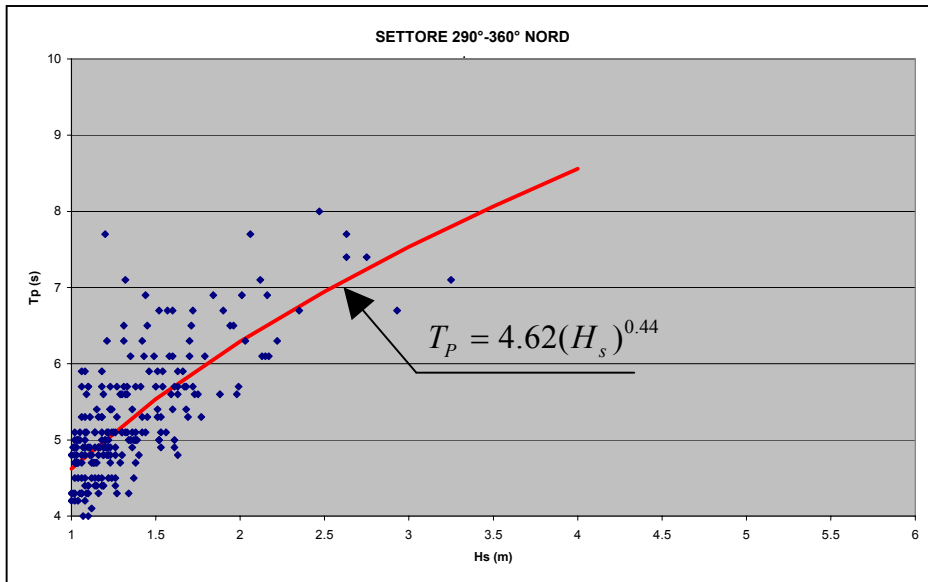


Figura 3.2.4-SETTORE 290°-360°N:correlazione statistica tra periodo di picco ed altezza d'onda significativa.

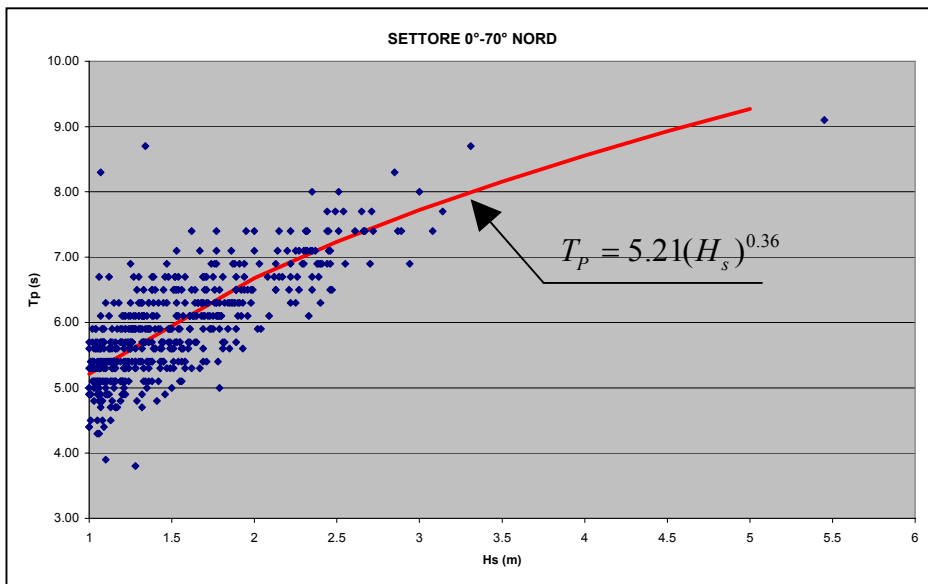


Figura 3.2.5- SETTORE 0°-70°N: correlazione statistica tra periodo di picco ed altezza d'onda significativa.

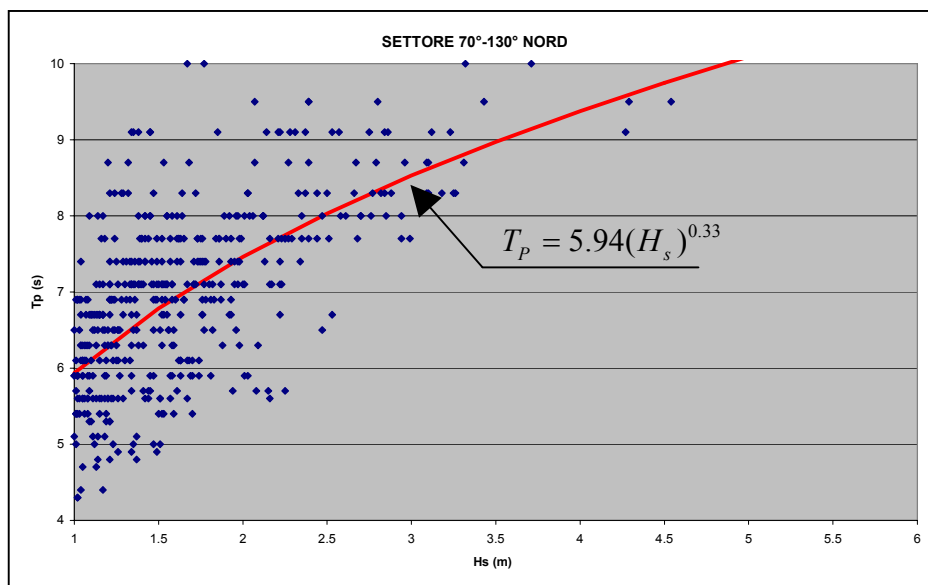


Figura 3.2.6- SETTORE 70°-130°N: correlazione statistica tra periodo di picco ed altezza d'onda significativa.

## 4 Studio della propagazione del moto ondoso sotto costa

Per definire le condizioni di moto ondoso nella zona prospiciente l'imboccatura portuale di Ancona è stato eseguito uno studio di propagazione del moto ondoso da largo a riva. A tal fine è stato necessario in primo luogo scegliere il modello numerico più appropriato per lo studio in questione. La scelta del modello numerico viene normalmente effettuata a valle di un'analisi dei principali fenomeni fisici che condizionano l'evoluzione delle onde durante la propagazione. Tale analisi si basa fondamentalmente su un'attenta lettura della conformazione batimetrica dei fondali e delle relative condizioni al contorno che per il porto di Ancona risultano funzione anche delle direzioni di provenienza del moto ondoso al largo.

In particolare, per quanto riguarda gli stati di mare generati in mare aperto è possibile definire delle condizioni al contorno (contorno di largo) espresse in termini di altezza, direzione e periodo caratteristici del moto ondoso incidente. Peraltro per tali settori si può ragionevolmente ritenere che l'influenza in termini percentuali dei meccanismi generativi del moto ondoso ad opera del vento che intervengono nella propagazione largo-riva possano essere, nel caso in esame, trascurati poiché la zona di evoluzione del moto ondoso su bassi fondali risulta di estensione notevolmente inferiore rispetto a quella, posta in mare aperto, dove le onde vengono generate.

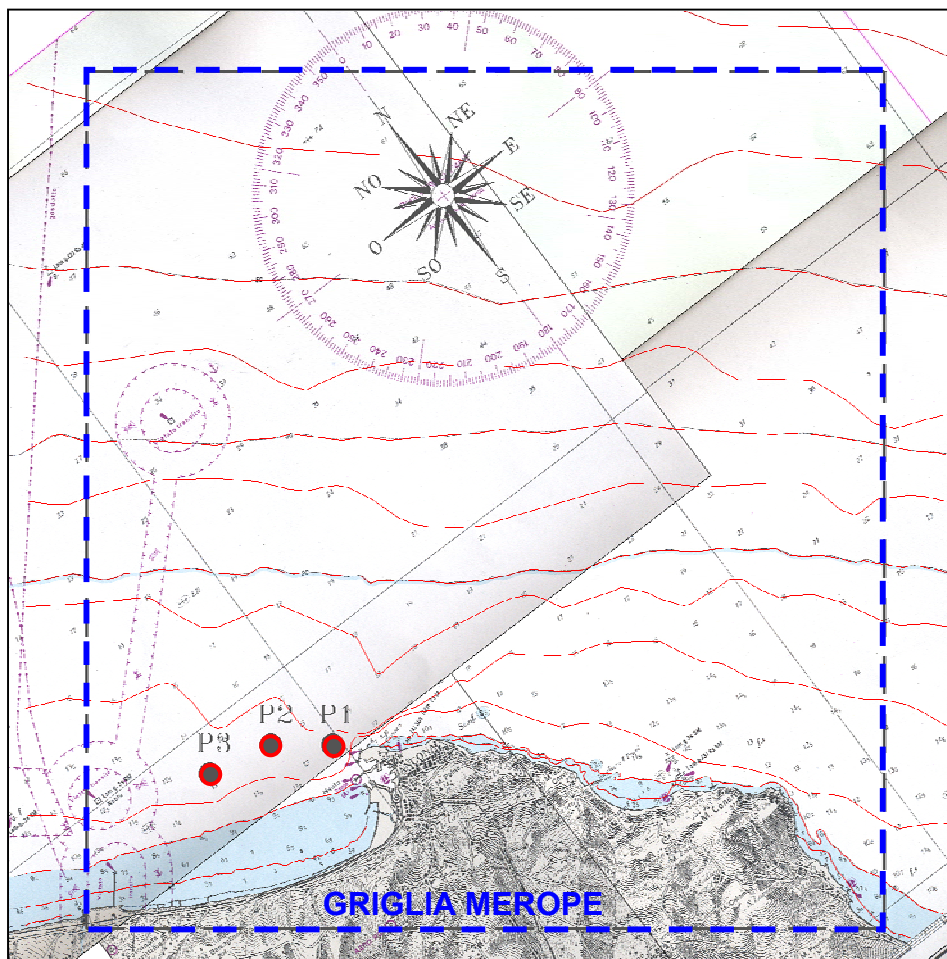
Per quanto riguarda i meccanismi che possono alterare la propagazione delle onde sui fondali via via decrescenti che "collegano" il mare aperto alla zona di intervento, la regolarità dell'andamento delle linee batimetriche, che caratterizzano il litorale in esame, permette di ritenere che essi siano costituiti in modo dominante dalla rifrazione e dallo shoaling e che possano essere ritenuti trascurabili i processi diffrattivi (diffrazione esterna ed interna).

Per quanto riguarda i processi dissipativi (attrito sul fondo e frangimento), nel caso in esame, si può affermare che la loro importanza diventa rilevante solo nella zona esterna all'area portuale su profondità inferiori a 10÷15 m.

Sulla base delle considerazioni appena effettuate si è scelto di propagare sotto costa la serie ondometrica registrata alla boa RON di Ancona attraverso il modello numerico di propagazione inversa spettrale MEROPE.

## 4.1 Griglia di calcolo

Nella figura 4.1.1 è riportata la corografia dell'area interessata dalle simulazioni numeriche, i confini della griglia di calcolo utilizzata per l'applicazione del modello Merope ed i punti di inversa spettrale scelti per la propagazione sotto costa.



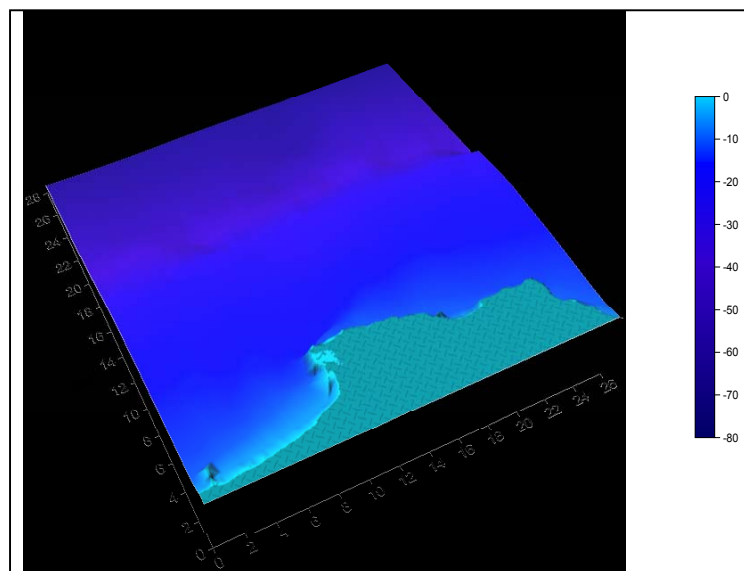
**Figura 4.1.1-Corografia ed ubicazione della griglia di calcolo per il modello Merope con localizzazione dei punti di inversa spettrale prescelti all'ingresso del porto di Ancona.**

La griglia di calcolo è stata ottenuta partendo dalla digitalizzazione, sottoforma di polilinee in Autocad, delle batimetriche di base fornite dal "raster" della carta nautica N 36 (scala 1:100000), da Ancona a Pesaro, edita dall'Istituto Idrografico della Marina Militare.

Tali batimetriche sono state opportunamente digitalizzate allo scopo di ottenere un insieme opportuno di punti "sparsi", cioè non disposti su un grigliato regolare, sull'area di interesse. Ciascun punto è caratterizzato dalle coordinate  $x,y,z$ , dove  $x$  ed  $y$  rappresentano la posizione planimetrica del punto e la  $z$  il valore della profondità locale riferita al livello medio marino. Tali punti, contenuti in un file, sono stati quindi utilizzati

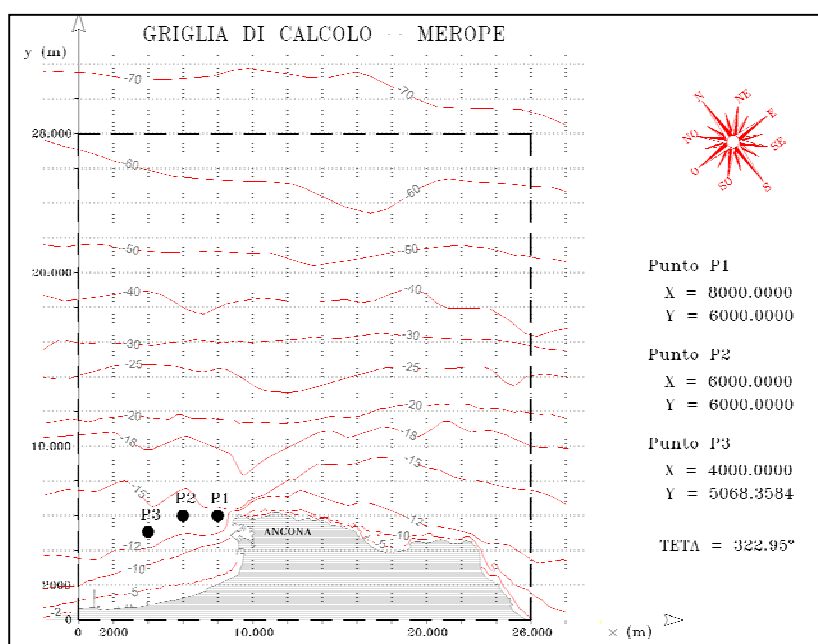
come dati di ingresso per il programma SURFER 8 mediante il quale è stata costruita la griglia di calcolo a maglia regolare, necessaria per il modello Merope.

Utilizzando tali dati è stato possibile effettuare un'adeguata modellazione digitale del fondale (vedi figura 4.1.2) all'interno di una vasta area che comprende la zona interessata dagli studi.



**Figura 4.1.2- Rappresentazione 3D, effettuata attraverso il programma SURFER, della batimetria di calcolo fornita in ingresso al modello di calcolo Merope.**

Per il modello MEROPE è stata realizzata una griglia di calcolo con maglie quadrate di lato  $Dx=Dy=100m$  che copre un'area di forma rettangolare con lati di 26 km e 28 km. In fig. 4.1.3 è riportata la griglia di calcolo, le curve batimetriche digitalizzate attraverso la carta nautica e la posizione dei punti P1, P2 e P3 in corrispondenza dei quali è stata effettuata l'applicazione del codice di calcolo.

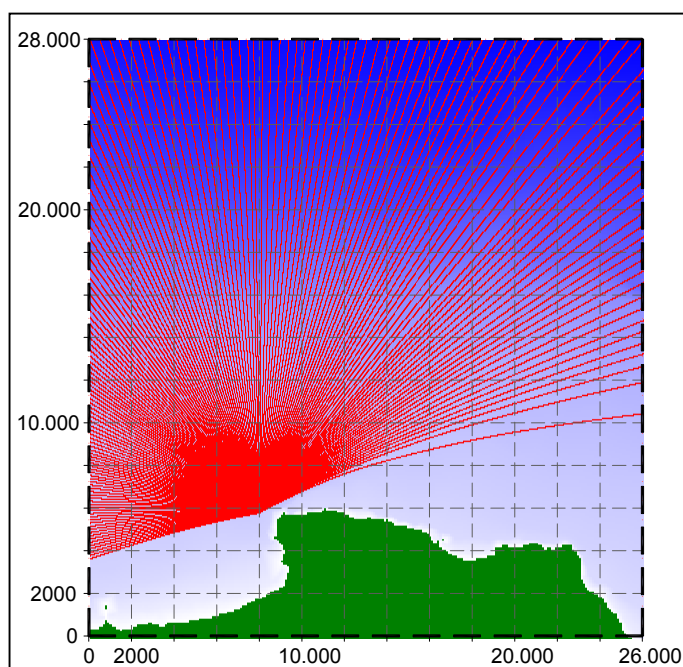


**Figura 4.1.3- Modello Merope: griglia di calcolo ed ubicazione dei tre punti d'inversa spettrale**

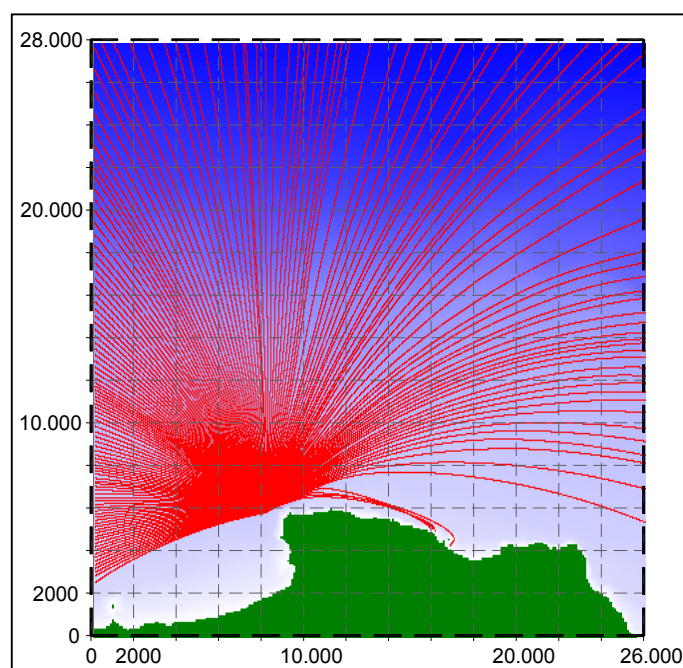
## 4.2 Condizioni al contorno ed ipotesi di calcolo

Per ogni punto scelto sono stati calcolati 20 piani d'onda d'inversa per altrettanti periodi compresi tra 2 e 22 secondi, tracciando una serie di raggi (ortogonali ai fronti d'onda), spaziate di  $0.5^\circ$ , sino a coprire l'intero settore (geografico) di traversia.

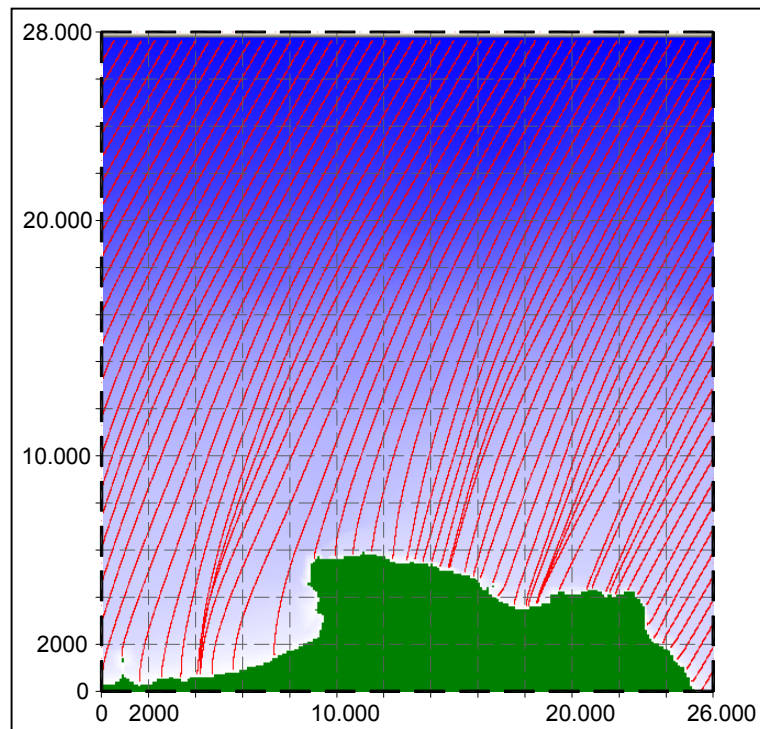
Nelle figure 4.2.1÷4.2.4 sono riportati a titolo di esempio i piani d'onda per  $T= 6, 12$  s calcolati sia con il metodo della propagazione inversa (propagazione dal punto P1) che con il metodo della propagazione diretta (propagazione da largo per due direzioni di provenienza).



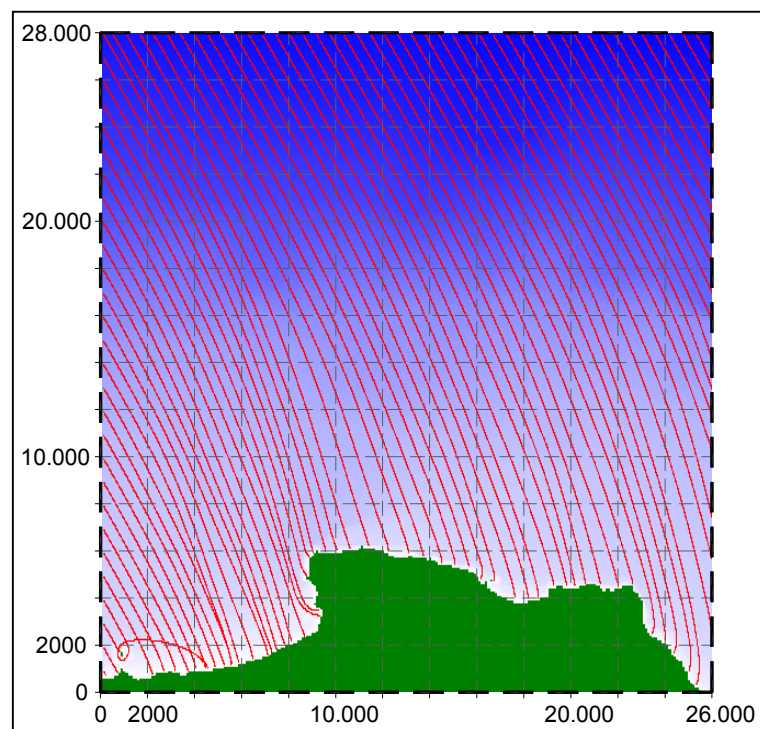
**Figura 4.2.1 – Griglia di calcolo e tracciamento inverso del piano d'onda dal punto P1 per  $T=6.0$  s.**



**Figura 4.2.2 – Griglia di calcolo e tracciamento inverso del piano d'onda dal punto P1 per  $T=12$  s.**



**Figura 4.2.3 – Griglia di calcolo e tracciamento diretto del piano d'onda dal largo per  $T=12s$  e direzione di provenienza  $70^\circ$  Nord.**



**Figura 4.2.4 – Griglia di calcolo e tracciamento diretto del piano d'onda dal largo per  $T=12s$  e direzione di provenienza  $10^\circ$  Nord.**

I 4000 piani d'onda inversi (20x200) hanno consentito di costruire un data-base mediante il quale è stata propagata nei punti d'inversa P1, P2 e P3 l'intera serie storica registrata alla boa ondometrica di Ancona.



Per i punti di inversa spettrale P1, P2 e P3 le figure 4.2.5÷4.2.7 riportano in forma grafica l'andamento del coefficiente K ( $K = K_r \cdot K_s$  con  $K_r$  coefficiente di rifrazione e  $K_s$  coefficiente di shoaling) rispetto alla direzione di incidenza al largo e la corrispondenza tra le direzioni del moto ondoso al largo e i corrispondenti valori di direzione calcolati a riva.

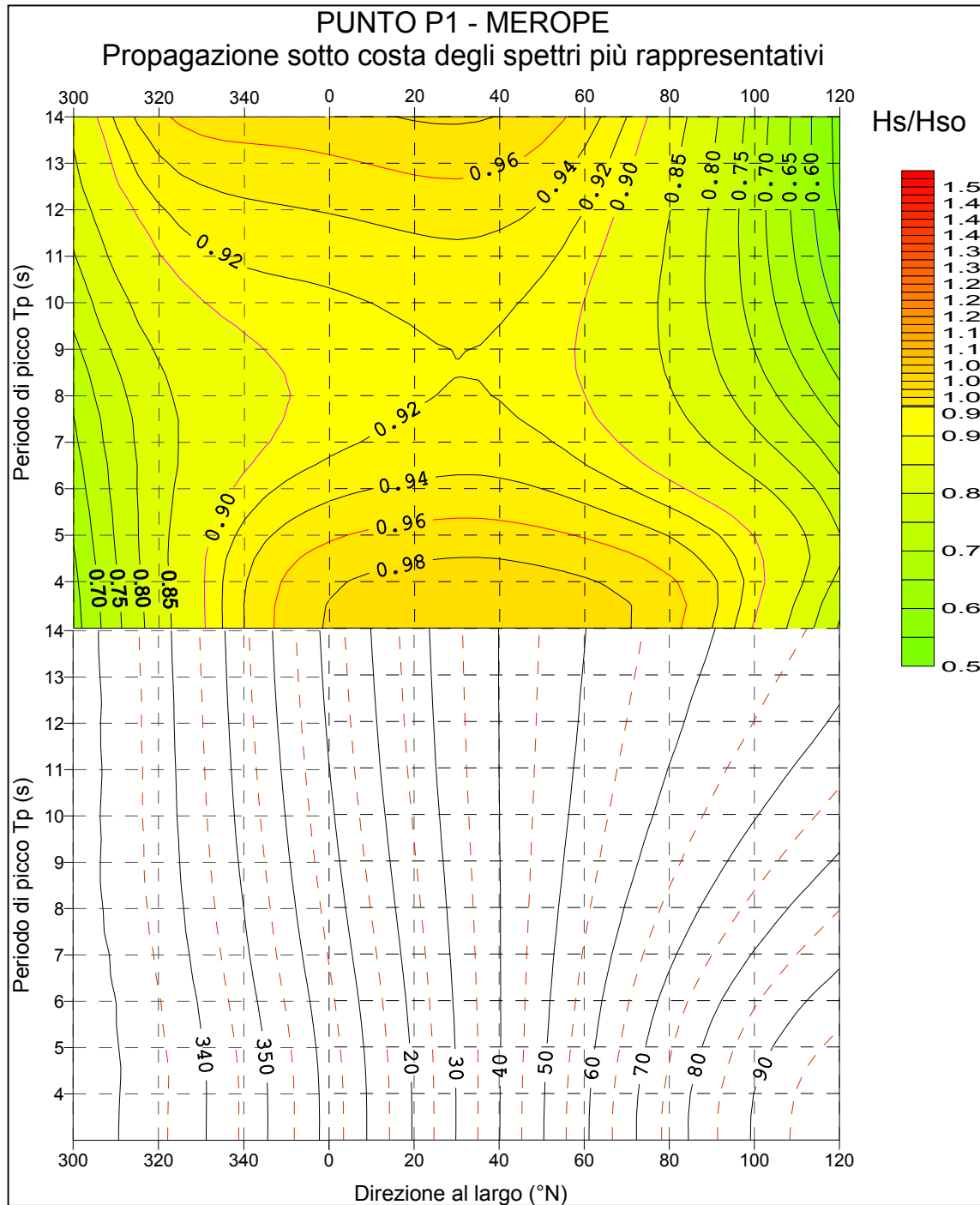
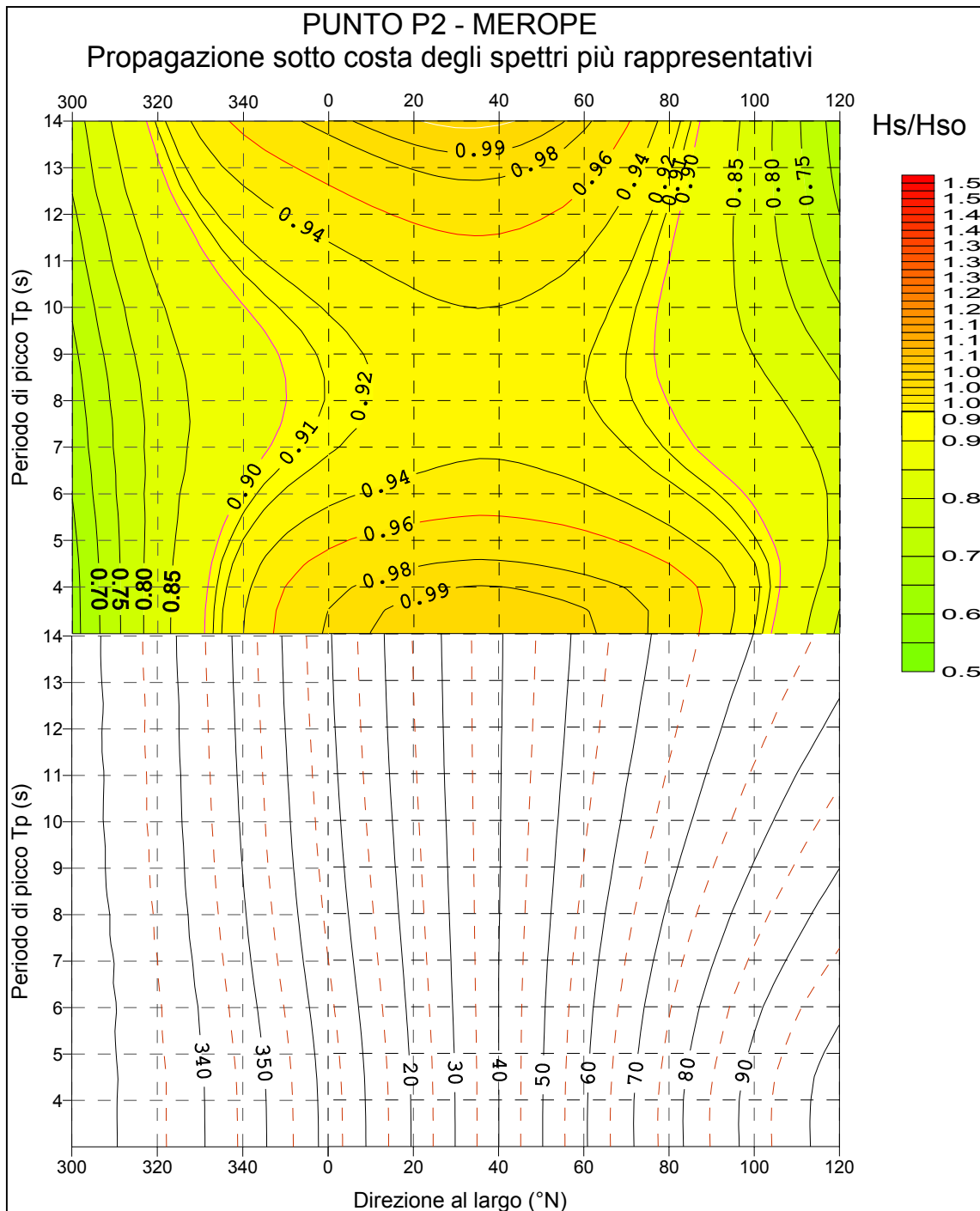
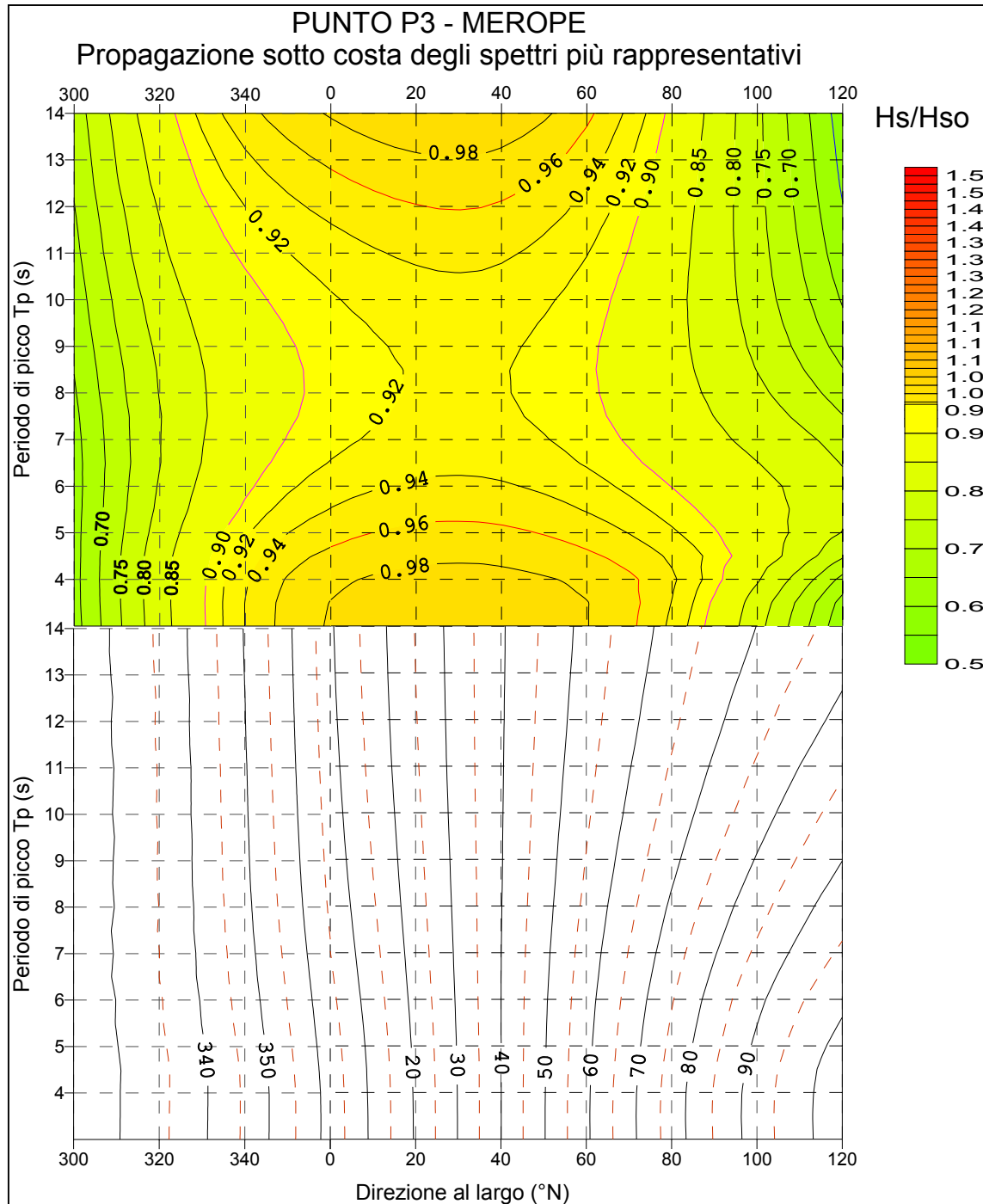


Figura 4.2.5 – Punto di inversa spettrale P1



**Figura 4.2.6 – Punto di inversa spettrale P2**



**Figura 4.2.7 – Punto di inversa spettrale P3**

Dall'esame dei grafici sopra riportati si evidenzia un'attenuazione più marcata per le altezze d'onda provenienti da levante e da maestrale rispetto a quelle provenienti dal settore tramontana-grecale. I valori maggiori del coefficiente  $k$  (compresi tra 0.92 e 1.00) si hanno per onde provenienti da grecale (20°-40° N).

Nelle figure 4.2.8÷4.2.11 sono riportate rispettivamente le rose annuali del clima di moto ondoso a riva (punti P1, P2 e P3) e l'inquadratura geografica con clima d'onda annuale al largo e sottocosta (punto P1) per il paraggio in esame. Le tabelle 4.2.1÷4.2.3 riportano gli stessi risultati in forma numerica.

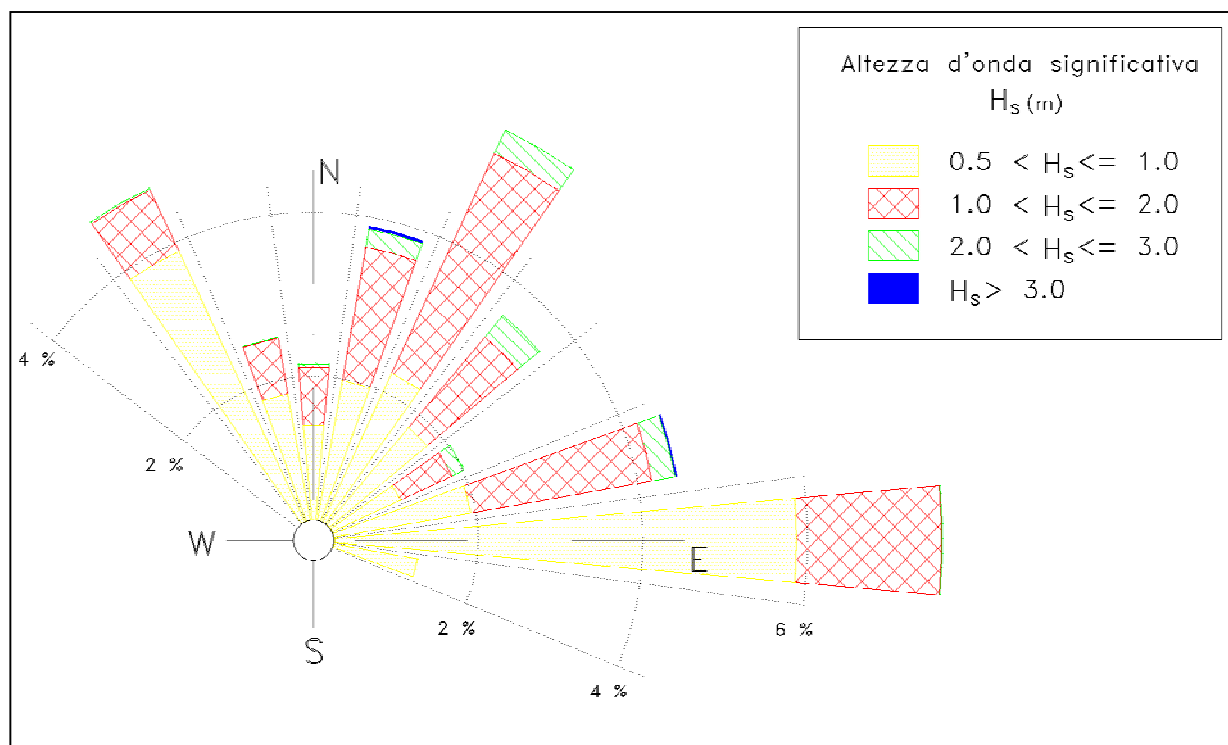


Figura 4.2.8-Rosa della distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso a riva – Punto (P1).

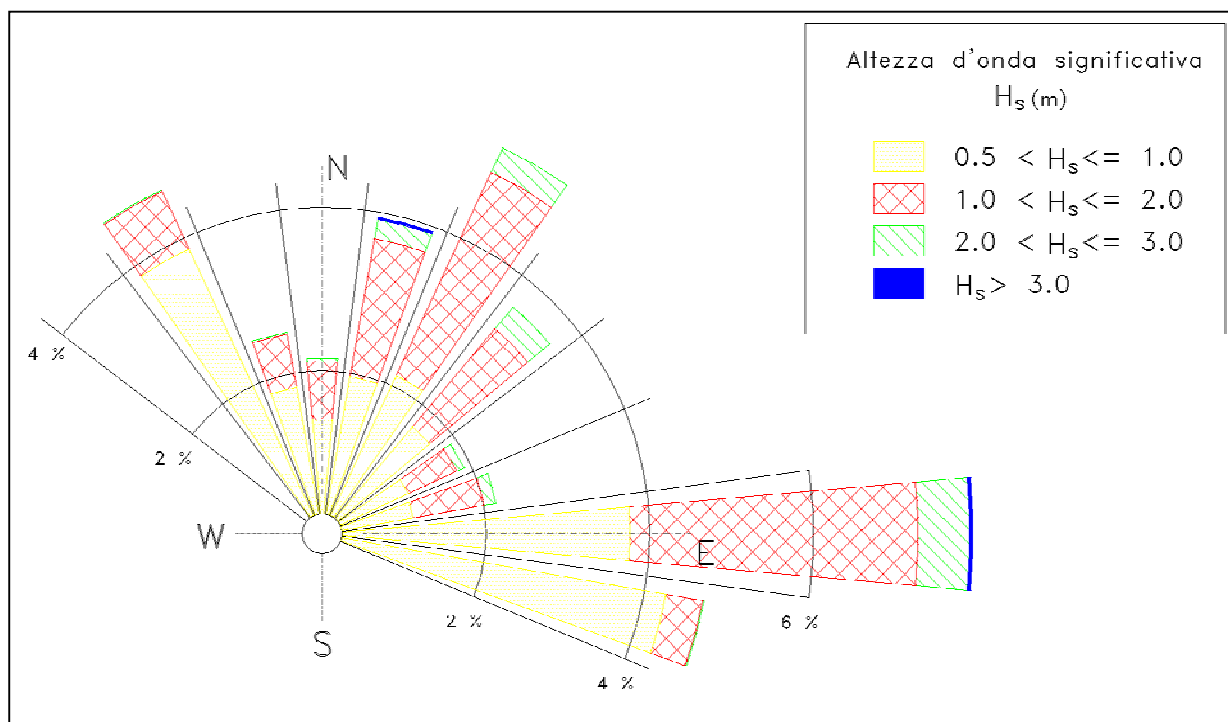


Figura 4.2.9-Rosa della distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso a riva – Punto (P2).

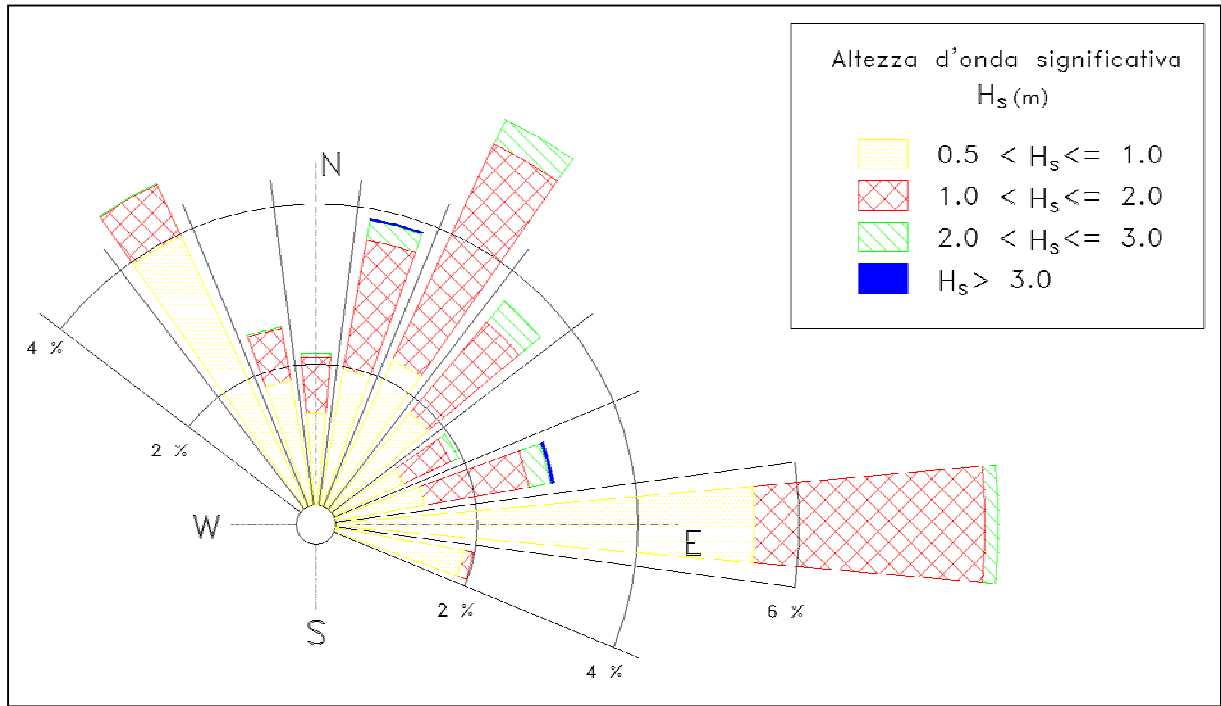


Figura 4.2.10-Rosa della distribuzione direzionale degli eventi di moto ondoso a riva – Punto (P3).

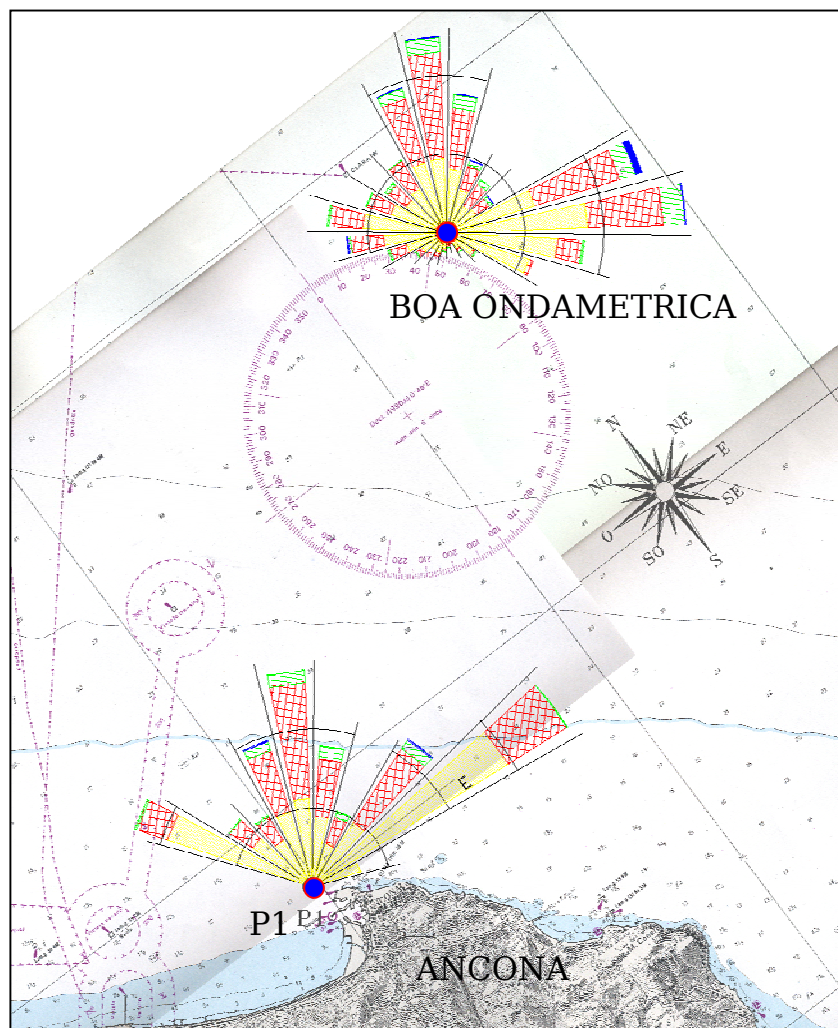


Figura 4.2.11- Inquadramento geografico e clima d'onda annuale al largo e sotto costa.

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza.

Ancona punto P1 - Periodo di riferimento gennaio 2002 - dicembre 2004

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	< 25	.25+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	0.63	0.96	1.08	0.63	0.18	0.04										3.52
20	0.72	0.76	1.51	1.11	0.30	0.18	0.01	0.01			0.01					4.63
30	0.58	0.70	1.51	1.32	0.69	0.16	0.04									5.02
40	0.48	0.66	1.30	0.99	0.39	0.28	0.07									4.18
50	0.67	0.51	1.09	0.51	0.24	0.13										3.16
60	4.66	0.49	0.81	0.31	0.16	0.03	0.01									6.49
70	1.54	0.61	0.96	0.45	0.31	0.10	0.01									4.00
80	1.47	0.79	1.66	1.45	0.63	0.21	0.03	0.01								6.27
90	2.80	2.26	4.08	1.12	0.12											10.39
100	4.80	5.37	2.61	0.01												12.79
110	6.48	0.94														7.42
120	0.12															0.12
130																
140																
150																
160																
170																
180																
190																
200																
210																
220																
230																
240																
250																
260																
270																
280																
290																
300																
310	1.03															1.03
320	7.20	1.65	0.52	0.04												9.41
330	3.16	3.18	3.06	0.54	0.04	0.03										10.01
340	1.02	2.07	1.42	0.51	0.03											5.05
350	0.85	1.26	0.93	0.30	0.07	0.03										3.45
360	0.55	1.02	0.99	0.36	0.09	0.03										3.04
TOT.	38.78	23.25	23.55	9.67	3.27	1.24	0.19	0.03			0.01					100.00
Tot. cumul.	62.03	85.58	95.25	98.52	99.76	99.96	99.99	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

Numero eventi validi : 6671

Tabella 4.2.1- *Clima annuale: eventi di moto ondoso classificati per altezza e direzione -distribuzione percentuale – Punto (P1).*

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza.  
Ancona punto P2 - Periodo di riferimento gennaio 2002 - dicembre 2004

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25+.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	0.55	0.96	1.08	0.63	0.16	0.04										3.43
20	0.73	0.73	1.48	1.12	0.34	0.19	0.01	0.01				0.01				4.66
30	0.52	0.67	1.47	1.30	0.63	0.16	0.06									4.83
40	0.46	0.64	1.33	1.02	0.39	0.25	0.07									4.18
50	0.52	0.46	1.00	0.51	0.22	0.12										2.85
60	1.03	0.55	0.79	0.30	0.15	0.07	0.01									2.92
70	4.15	0.55	0.70	0.37	0.16	0.07	0.03									6.06
80	1.48	0.58	0.79	0.43	0.25	0.12	0.07	0.01	0.01							3.78
90	1.54	1.23	2.32	1.78	0.76	0.37	0.10		0.01							8.14
100	3.46	3.37	4.05	0.97	0.13	0.01										12.01
110	8.14	4.75	1.45	0.04												14.39
120	0.87															0.87
130																
140																
150																
160																
170																
180																
190																
200																
210																
220																
230																
240																
250																
260																
270																
280																
290																
300																
310	0.60															0.60
320	7.44	1.47	0.46	0.04												9.41
330	3.43	3.18	3.06	0.51	0.06	0.01										10.25
340	1.17	1.95	1.39	0.46	0.03											5.01
350	0.82	1.39	0.96	0.28	0.09	0.03										3.58
360	0.61	0.94	1.00	0.34	0.09	0.03										3.03
TOT.	37.57	23.46	23.37	10.15	3.49	1.51	0.37	0.03	0.03			0.01				100.00
Tot. cumul.	61.03	84.40	94.54	98.04	99.55	99.93	99.96	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00		

Numero eventi validi : 6671

Tabella 4.2.2- *Clima annuale: eventi di moto ondoso classificati per altezza e direzione -distribuzione percentuale – Punto (P2).*

Distribuzione percentuale degli eventi ondosi, per classi di Hs e direzione di provenienza.  
Ancona punto P3 - Periodo di riferimento gennaio 2002 - dicembre 2004

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA Hs (m)														TOT.	
	<.25	.25÷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	0.52	0.97	1.05	0.63	0.16	0.04										3.39
20	0.73	0.72	1.53	1.14	0.33	0.19	0.01	0.01				0.01				4.69
30	0.58	0.72	1.54	1.39	0.73	0.13	0.07									5.19
40	0.52	0.66	1.38	0.90	0.31	0.30	0.06									4.14
50	1.15	0.54	1.03	0.52	0.27	0.12	0.01									3.66
60	4.00	0.40	0.76	0.28	0.13	0.03										5.62
70	1.39	0.51	0.88	0.39	0.30	0.03	0.03									3.54
80	1.38	0.76	1.21	0.81	0.48	0.28	0.04	0.04								5.02
90	3.27	2.61	3.66	1.63	0.49	0.07										11.74
100	10.19	4.32	3.19	0.28	0.04											18.04
110	2.64	0.28	0.03													2.95
120																
130																
140																
150																
160																
170																
180																
190																
200																
210																
220																
230																
240																
250																
260																
270																
280																
290																
300																
310	0.57															0.57
320	7.42	1.50	0.46	0.03												9.42
330	3.61	3.16	3.12	0.43	0.06	0.01										10.40
340	1.20	1.87	1.48	0.48	0.03											5.07
350	0.78	1.36	0.93	0.28	0.09	0.04										3.49
360	0.69	0.94	0.99	0.34	0.09	0.01										3.07
TOT.	40.67	21.35	23.27	9.57	3.54	1.29	0.24	0.06				0.01				100.00
Tot. cumul.		62.02	85.29	94.86	98.40	99.69	99.93	99.99	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	

Numero eventi validi : 6670

Tabella 4.2.3- **Clima annuale: eventi di moto ondoso classificati per altezza e direzione -distribuzione percentuale – Punto (P3).**



### 4.3 Analisi dei risultati

Dall'analisi dei risultati ottenuti è evidente che in prossimità dell'imboccatura del porto di Ancona, su fondali di circa -15 m s.l.m., il clima di moto ondoso rimane sostanzialmente invariato presentando un carattere trimodale con eventi più intensi provenienti dal settore di tramontana-grecale ( $10^{\circ}$ - $60^{\circ}$ N) e da levante ( $80^{\circ}$ - $90^{\circ}$  N).

In dettaglio si osserva che:

- la traversia si restringe al settore compreso tra tramontana e levante ( $320^{\circ}$ - $100^{\circ}$ N);
- gli eventi con maggiore intensità ( $H_s > 2.0$  m) provengono in prevalenza dal primo quadrante ( $10^{\circ}$ - $80^{\circ}$  N, in particolare per P1 dalle direzioni  $20^{\circ}$ N,  $40^{\circ}$ N ed  $80^{\circ}$ N) con una frequenza di superamento pari a circa lo 1.4% ed altezze d'onda non superiori a 5.0 m
- le onde di grecale ( $30^{\circ}$ - $50^{\circ}$ N) non subiscono sostanziali rotazioni nella loro propagazione verso costa con un'attenuazione inferiore al 10%;
- le onde di tramontana, nella loro propagazione da largo, tendono a raggiungere l'imboccatura portuale ruotando a grecale mediamente di circa  $10^{\circ}$ ;
- le onde di maestrale ( $310^{\circ}$ - $330^{\circ}$ N) tendono a raggiungere l'imboccatura portuale ruotando a tramontana mediamente di circa  $30^{\circ}$  con forti attenuazioni dell'altezza d'onda;
- le onde provenienti dal settore  $80^{\circ}$ - $110^{\circ}$ N tendono a raggiungere l'imboccatura portuale con una direzione media di  $70^{\circ}$ N, ruotando di circa  $20^{\circ}$  a levante;
- le onde di levante ( $70^{\circ}$ - $110^{\circ}$ N) tendono a subire una leggera rotazione a grecale, giungendo sotto costa con una direzione media di  $65^{\circ}$  N.

In conclusione, il moto ondoso a largo proveniente da tramontana-grecale, a causa della rifrazione e dello shoaling, propagandosi verso costa tende a ruotare a grecale, giungendo a ridosso delle opere con una deviazione dalla direzione di largo di circa  $10^{\circ}$ ; gli eventi di levante (a largo) vengono invece ridotti e ruotati, durante la propagazione verso l'imboccatura portuale, a grecale.

## 5 Variazioni del livello marino (maree, sovralti)

La conoscenza delle massime variazioni quasi-statiche del livello marino, dovute a cause diverse (principalmente marea astronomica e "meteorologica"), è necessaria per molteplici scopi quali la corretta progettazione delle quote da assegnare alle opere di difesa. In generale per quanto riguarda le variazioni a breve termine, periodiche e non, occorre distinguere gli effetti della marea astronomica da quelli della marea "meteorologica" (indotta essenzialmente dall'azione del vento e dalle variazioni di pressione atmosferica). Nella zona del Mar Adriatico, ove ricade il paraggio costiero in esame, le escursioni del livello del mare sono di fatto modeste.

### 5.1 Marea astronomica

La componente oscillatoria meglio conosciuta è la marea astronomica, generata dall'attrazione gravitazionale della luna (70%) e del sole (30%).

Per la stima della componente oscillatoria della marea astronomica, le ampiezze ed i tempi di marea sono prevedibili, per alcuni porti principali italiani tra cui quello in esame, in funzione delle "Tavole di Marea" pubblicate annualmente dall'Ufficio Idrografico della Marina Militare.

Nella tabella seguente sono riportate le costanti armoniche del porto di Ancona, fondamentali per caratterizzare in modo appropriato le oscillazioni di marea astronomica:

	Ampiezza H(cm)	Fase $\phi(^{\circ})$	Pulsazione $\omega(^{\circ}/h)$	
M <sub>2</sub>	6.6	332	28.98	lunare semidiurna principale
S <sub>2</sub>	3.5	347	30.00	solare semidiurna principale
N <sub>2</sub>	1.2	326	28.44	lunare semidiurna ellittica principale
K <sub>2</sub>	1.0	347	30.08	lunisolare declinazione semidiurna
K <sub>1</sub>	13.2	88	15.04	lunisolare declinazione diurna
O <sub>1</sub>	4.1	74	13.94	lunare diurna principale
P <sub>1</sub>	4.4	88	14.96	solare diurna principale

dove le prime quattro componenti, indicate con l'indice 2, sono semidiurne e le tre successive (indice 1) sono diurne. Per classificare il tipo di marea il CEM () ha introdotto il parametro R definito come:

$$R = \frac{H(K_1) + H(O_1)}{H(M_2) + H(S_2)}$$

nel caso di  $R < 0.25$  la marea può essere classificata di tipo semidiurno, per  $R$  compreso tra 0.25 e 1.5 è di tipo misto e per  $R$  maggiore di 1.50 è di tipo diurno. Nel nostro caso  $R = 1.71$  e quindi la marea ad Ancona è classificata di tipo diurno: l'andamento temporale presenta un massimo (alta marea) ed un minimo (bassa marea) durante il giorno.

Le escursioni di marea astronomica sono contraddistinte da una periodicità bimensile distinta nelle fasi di sizigie (luna piena e nuova) e di quadratura. Nei periodi sizigiali si verificano i massimi dislivelli positivi e negativi che raggiungono rispettivamente valori di circa +0.20 m e -0.32 m rispetto al livello medio marino (massimo dislivello assoluto pari a circa 0,52 m). Nelle fasi di quadratura l'escursione è al massimo limitata a  $\pm 0,15$  m s.l.m;

## 5.2 Marea meteorologica

Per la definizione della marea meteorologica si distinguono:

- **effetto barico**: considerata una condizione di minimo barico (legata al passaggio dei centri di bassa pressione caratterizzanti i cicloni) pari a 975 mb ed una condizione di massimo barico (legata al passaggio dei centri di alta pressione caratterizzanti gli anticicloni) pari a 1043 mb, rispetto ad una condizione media di 1013 mb ne consegue (da un punto di vista prettamente statico) un effetto di sovrizzo marino massimo pari a +0.38 m ed un abbassamento massimo del livello marino pari a -0.30 m;
- **sovrizzo di vento**: l'effetto di innalzamento dei livelli sottocosta indotto dall'azione di venti foranei spiranti verso la costa è definito in funzione dell'estensione della piattaforma continentale; nel caso in esame si può considerare lungo la direzione SE (scirocco) un'estensione della piattaforma continentale di circa 350 km delimitata all'incirca dall'isobata -200 m s.l.m. Il calcolo del sovrizzo di vento può essere effettuato con la nota relazione implicita:

$$S = \frac{K_p \cdot L_p \cdot U^2}{g(D - d - S)} \ln\left(\frac{D}{d + S}\right) \quad (1)$$

Ponendo:

- $D=200$  m - la profondità limite assunta per la piattaforma continentale;
- $L_p=350000$  m - l'estensione della piattaforma continentale;

- $d=15.0$  m - la profondità ove si calcola il sovrizzo (posta in corrispondenza dell'imboccatura portuale);
- $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>;
- $k_p=3 \times 10^{-6}$ ;
- $U=15$  m/s la velocità del vento persistente in condizioni estreme

La relazione implicita fornisce un valore di 0.33 m sotto costa (alla profondità di -15 m s.l.m.).

Eseguendo il calcolo anche per profondità inferiori si osserva che il sovrizzo segue una legge esponenziale con un massimo lungo la linea di riva ( $d=0.50$  m) pari a  $s = 0.63$  m.

### 5.3 Variazioni stagionali ed a lungo termine

Possono inoltre essere considerate altre piccolissime oscillazioni stagionali dovute a differenze di densità (max 5 cm, min -3 cm) e variazioni a lungo termine dovute a fenomeni di eustatismo: le attuali proiezioni prevedono un progressivo innalzamento del livello marino dovuto all'incremento della temperatura terrestre (effetto serra) stimabile in circa 30 cm nei prossimi 50 anni. Valutazioni meno pessimistiche considerano possibili incrementi di livello di poco superiori a quelli registrati nell'ultimo millennio (dell'ordine di 10 cm al secolo).

### 5.4 Valori estremi

In definitiva è possibile calcolare il massimo sovrizzo lungo riva sommando tutti i diversi contributi di oscillazione del livello marino ma, considerando che in generale non si verifica la piena concomitanza per i sovrizzi di carattere meteorologico ed astronomico, si può cautelativamente assumere una riduzione del 75% per il dislivello massimo generato contemporaneamente dal sovrizzo meteorologico ed astronomico.

E' quindi possibile assumere un innalzamento massimo del livello marino pari a:

$$\text{sovrizzo}_{max} = +0.05m (+0.30 m) + (+0.38m + 0.20m + 0.33m) \times 0.75 = 0.73m \text{ (1.03m tra 50 anni).}$$

Per quanto riguarda i massimi abbassamenti risulta invece:

$$\text{abbassamento}_{max} = +0.05m (+0.30 m) + (-0.32m - 0.30m - 0.1m(\text{setdown})) \times 0.75 = -0.50m \text{ (-0.20m tra 50 anni).}$$

## 5.5 Correnti

L'analisi d'insieme (riferita alla rappresentazione grafica in figura 5.5.1 estratta da "Atlante Tematico d'Italia" TCI, CNR) mostra che, al largo del promontorio del Conero, i flussi delle correnti di gradiente (o di densità) propri della circolazione d'insieme del Mediterraneo sono condizionati dai fenomeni di emersione ed inabissamento di acque profonde che interessano la zona tra la Croazia e le Marche; dette correnti intermedie in prossimità della costa anconetana non risultano significative.

La conformazione batigrafica del sito in esame, associata alla limitata escursione dei livelli di marea astronomica, lascia prevedere valori trascurabili delle possibili correnti di marea. In definitiva il regime delle correnti marine nel paraggio costiero in esame ha effetti irrilevanti sulla dinamica dei sedimenti costieri, dominata invece dalle correnti litoranee, comprese tra la linea dei frangenti e la riva, indotte dall'azione del moto ondoso frangente.

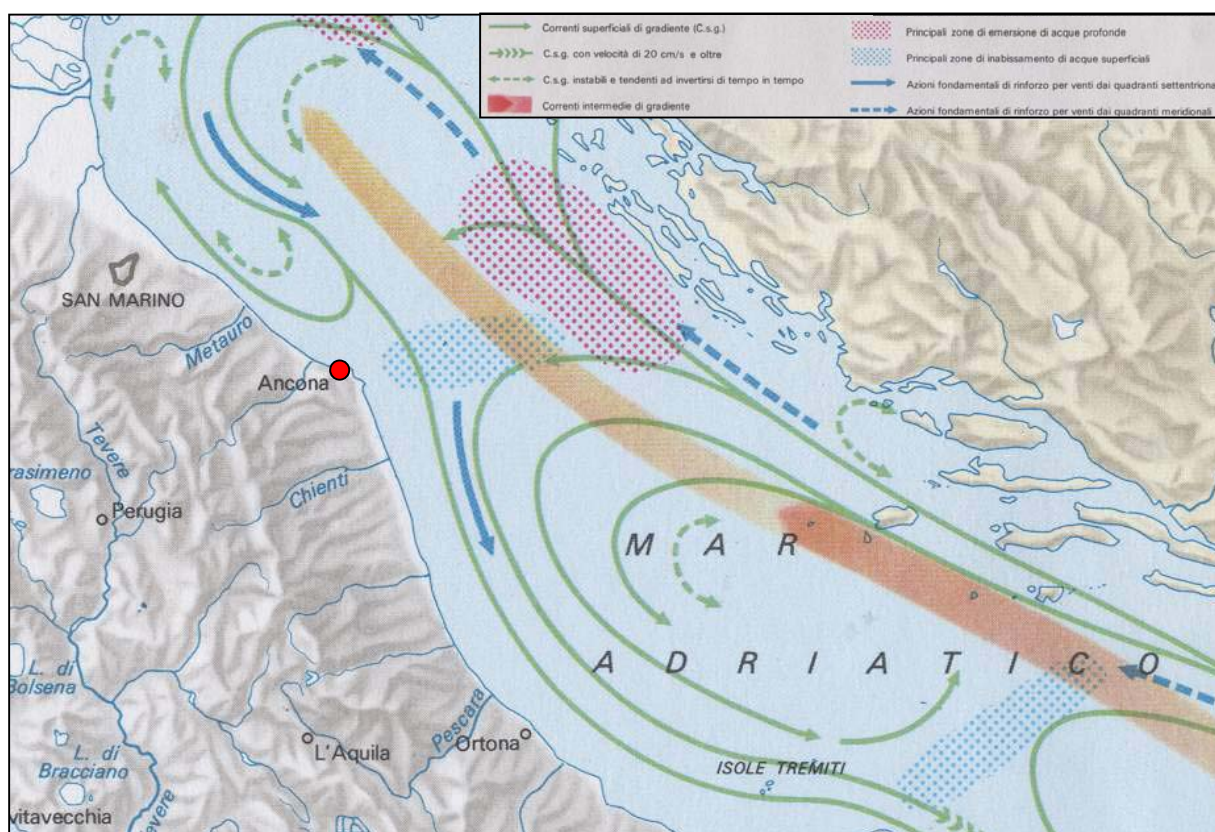


fig. 5.5.1 - Distribuzione delle correnti d'insieme

## 6 Regime dei venti

Per un'analisi esaustiva del regime dei venti si è fatto riferimento alla tavola tematica pubblicata dal TCI-CNR ove sono riportate le "rose dei venti" delle stazioni gestite dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (CNMCA).

Dalla figura 6.1 si evince che il settore di traversia ove si esplicano i fenomeni di generazione delle mareggiate che possono interessare il litorale in esame è dominato dai venti di tramontana. In particolare si è fatto riferimento ai dati della Stazione Meteo di Ancona gestita dall'Aeronautica Militare (I.T.A.V.-C.N.M.C.A: Ispettorato Trasmissioni e Assistenza al Volo – Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica).

I valori delle frequenze di accadimento annuali ripartite per classi di velocità e direzione sono stati riassunti nella tabella 6.1.

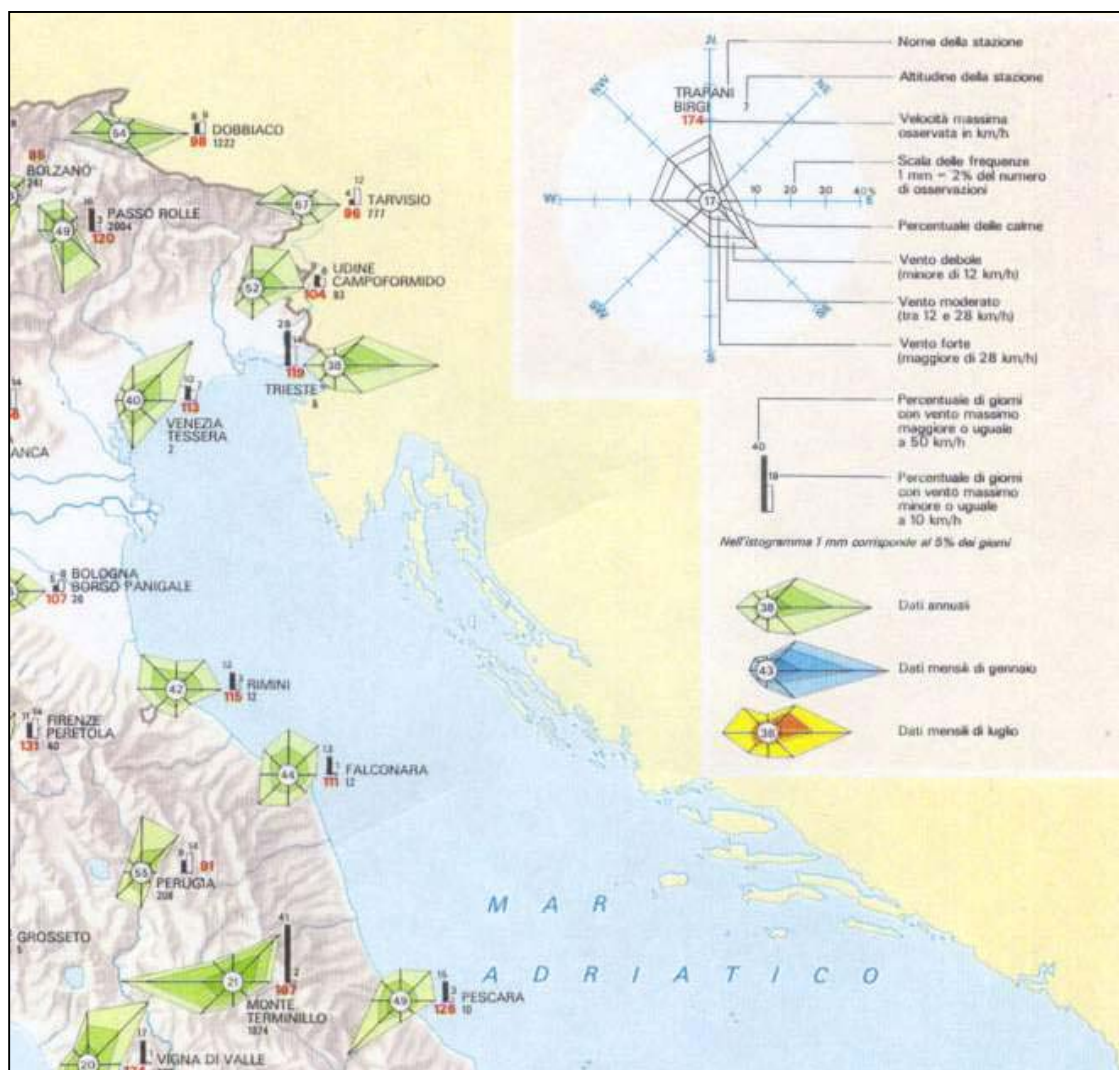


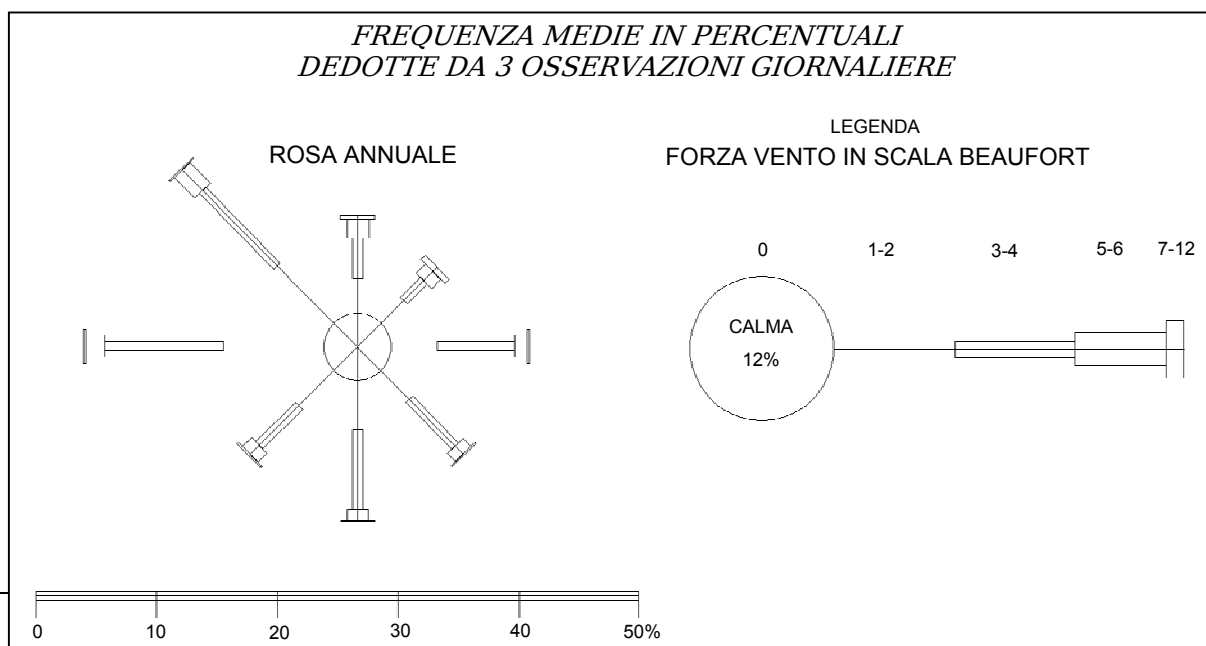
figura 6.1 - Regime di esposizione ai venti per il mar adriatico centro-settentrionale.

ELABORAZIONI DI DATI METEOROLOGICI - COLLABORAZIONE SERVIZIO METEOROLOGICO A.M. - ENEL  
 STAZIONE METEOROLOGICA A.M. 190 ANCONA LAT. 43 37 LONG. 13 31 ALT. 103 M  
 PERIODO DI OSSERVAZIONE DAL 1/1951 AL 12/1977  
 DIREZIONE E VELOCITA' DEL VENTO  
 NUMERO DELLE OSSERVAZIONI 78587  
 DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE ANNUALI

SETTORI		CLASSI DI VELOCITA'						
N.	GRADI	0 - 1	2 - 4	5 - 7	8 - 12	13 - 23	24 - 99	TOTALE
1	0.0 - 22.5		5.10	9.27	9.65	9.34	1.92	35.27
2	22.5 - 45.0		4.86	6.65	5.25	4.22	0.60	21.58
3	45.0 - 67.5		7.01	8.21	5.93	3.43	0.31	24.88
4	67.5 - 90.0		7.54	8.26	4.81	1.68	0.04	22.34
5	90.0 - 112.5		8.30	12.26	8.10	2.56	0.08	31.30
6	112.5 - 135.0		8.39	14.73	13.20	3.32	0.09	39.74
7	135.0 - 157.5		8.59	12.44	9.87	3.11	0.10	34.12
8	157.5 - 180.0		14.60	25.68	15.72	3.64	0.03	59.66
9	180.0 - 202.5		13.62	25.23	15.57	2.63	0.06	57.10
10	202.5 - 225.0		14.48	17.36	8.67	2.84	0.15	43.51
11	225.0 - 247.5		24.45	30.83	15.05	3.95	0.07	74.35
12	247.5 - 270.0		26.59	35.58	17.32	3.90	0.07	83.47
13	270.0 - 292.5		16.94	28.57	16.48	4.82	0.24	67.04
14	292.5 - 315.0		10.91	21.32	18.96	10.04	0.72	61.95
15	315.0 - 337.5		9.74	17.93	20.47	14.94	1.59	64.67
16	337.5 - 360.0		7.97	17.10	19.99	16.16	2.88	64.10
VARIABILI			0.03	0.11	0.19	0.13	0.00	0.46
0 - 1 NODO		214.45						214.45
TOTALE		214.45	189.10	291.54	205.24	90.73	8.95	1000.00

Tabella 6.1: stazione meteorologica di Ancona - distribuzione delle frequenze annuali

Viene inoltre riportata di seguito la rosa dei venti esemplificativa, edita dall'Istituto Idrografico della Marina Militare, per la stazione di Monte Cappuccini (Ancona) elaborata, per il calcolo delle frequenze medie, dalle annate 1930÷42, 1946÷58, 1960÷63 per un numero di anni pari a 30.



I dati così raccolti mostrano che:

- ***i venti regnanti*** (associati a maggiori frequenze di accadimento) provengono dal settore libeccio-ponente (circa il 16% dal settore  $225^{\circ}\div 270^{\circ}\text{N}$ ) e dal settore di maestrale-tramontana (circa il 13% dal settore  $315^{\circ}\div 360^{\circ}\text{N}$ );
- ***i venti dominanti*** (più intensi), sono quelli provenienti dal settore di maestrale-tramontana (circa lo 0.65% dal settore  $315^{\circ}\div 20^{\circ}\text{N}$ ) con classi di velocità superiori a 24 nodi e circa il 5% con classi di velocità superiori a 13 nodi dallo stesso settore.



## 7 Appendice 1

### 7.1 Descrizione del modello di propagazione inversa spettrale MEROPE

Propagandosi verso "riva" su fondali via via decrescenti, le onde subiscono una serie di trasformazioni geometriche e perdite di energia che alla fine conducono al loro frangimento (ciò avviene quando l'onda, deformata, diviene molto alta rispetto alla sua lunghezza e perciò "instabile" o comunque intercetta fondali bassi «incompatibili» con la sua altezza).

Prescindendo, perchè comunque trascurabili, dalle perdite di energia che (fuori dalla zona dei frangenti) sono dovute all'attrito del fondo e, per fondi permeabili, alla percolazione; nonchè dagli effetti indotti dalle correnti, dal vento e dalle riflessioni del fondo, le modifiche delle caratteristiche ondose durante la propagazione verso riva sono indotte essenzialmente dai fenomeni di rifrazione e di shoaling.

Il primo fenomeno (rifrazione) consiste in una trasformazione tridimensionale dovuta a variazioni di fondale lungo i fronti d'onda che comportano variazioni planimetriche di questi e, conseguentemente, a variazioni delle altezze d'onda per effetto della conservazione del flusso di energia fra "ortogonali" vicine.

Il secondo fenomeno (shoaling) è una trasformazione bidimensionale delle onde dovuta al solo effetto del fondale nella direzione di propagazione. L'effetto "fondale" modifica la celerità di gruppo e di conseguenza provoca dapprima una riduzione e poi un sostanziale aumento di altezza delle onde allorché queste avanzano su profondità di fondali decrescenti.

La simulazione di detti fenomeni può essere eseguita in modo efficace con il metodo della "rifrazione inversa spettrale". Tale metodo fornisce risultati quantitativi esattamente nel punto di interesse, al contrario del metodo classico della rifrazione diretta. Il relativo modello matematico è stato sviluppato seguendo le indicazioni di Abernety e Gilbert (1978).

La differenza più appariscente rispetto al metodo tradizionale dei piani d'onda (rifrazione diretta) è rappresentata dalla costruzione dei raggi con un verso contrario a quello della propagazione delle onde. Tale impostazione fu introdotta da Dorrestein nel 1960: si costruisce un ventaglio di raggi relativi ad un dato periodo d'onda, che hanno tutti origine nel luogo della costa (o in prossimità) dove si desidera conoscere i risultati, partendo ognuno con una diversa direzione  $\phi$ . Si ricava quindi la direzione  $\Theta$  che i raggi possiedono quando raggiungono la regione di acque profonde.

Riportate in diagramma le molteplici coppie di valori  $\Theta-\phi$  trovate, si ricava per ogni  $\Theta$

il gradiente  $\frac{\delta\phi}{\delta\Theta}$  da introdurre nella formula che conduce poi alle altezze sotto costa:

$$K_r = \sqrt{\frac{C_0}{C} \cdot \frac{\delta\phi}{\delta\Theta}}$$

Rispetto al metodo convenzionale, si ha il vantaggio che i risultati sono ottenuti direttamente per il luogo che interessa, sulla costa, senza il problema di dover interpolare tra raggi calcolati da una parte o dall'altra del punto. Inoltre, un unico diagramma di rifrazione (per ciascun periodo) rappresenta i raggi relativi a tutte le direzioni di provenienza del moto ondoso al largo.

Dal punto di vista pratico, la costruzione inversa dei raggi non presenta problemi e si applica la stessa equazione della traiettoria del raggio del metodo convenzionale, con lievi modifiche di segni. Con la tecnica della proiezione inversa, non sarebbe necessario neppure conoscere il percorso dei singoli raggi poiché basta avere il diagramma di rifrazione  $\phi-\Theta$  definito con incrementi di frequenza e  $\Theta$  sufficientemente piccoli per riassumere tutti gli effetti della topografia sull'altezza e direzione delle onde nella loro propagazione verso un punto della costa. Si nota in genere che le curve  $\phi-\Theta$ , dolci per valori alti delle frequenze, presentano discontinuità notevoli per le frequenze minori con conseguenti singolarità nel valore di  $K_r$ .

Ciò significa che questa tecnica (così come quella convenzionale) ha il difetto che la funzione altezza d'onda diventa indeterminata proprio in un campo di frequenze e direzioni di interesse non trascurabile. In pratica questo comporta che nel percorso dei raggi compaiono singolarità (caustiche) non giustificabili fisicamente, come per i piani d'onda tradizionali. Il fatto che usando spaziature sufficientemente grandi dei raggi questi difetti non siano evidenziati, non esclude l'insufficienza del metodo.

E' stato mostrato che a queste difficoltà si può ovviare abbandonando l'ipotesi che al largo il fronte d'onda si presenti con direzione d'onda e frequenza ben precise ed uniformi (onde monocromatiche), e considerando funzioni spettrali sia per la direzione che per la frequenza. Va mantenuta invece l'ipotesi di uniformità di fase.

L'importanza fondamentale dell'introduzione dello spettro d'energia bidimensionale associata a quello di proiezione inversa dei raggi, è che, a differenza del metodo tradizionale e di quello di Dorrestein, dà luogo a risultati univoci ed ovunque finiti, eliminando le singolarità già evidenziate.

## 7.2 Descrizione del modello ENIF

Per il calcolo dei fetch efficaci si fa riferimento ad una relazione, derivata dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretshneider, 1947) e successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, S.P.M. 1984, Smith 1991), di seguito riportata nella sua forma più generale:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

dove:

- $\phi_w$  direzione media (riferita al nord geografico) di possibile provenienza del vento responsabile del fenomeno di generazione del moto ondoso lungo la traversia;
- $\phi_i \leq \phi_w \pm \theta$  direzione i-esima (riferita al nord geografico) relativa ad un settore di  $2 \cdot \theta$  considerato nell'intorno della direzione  $\phi_w$ . Il metodo classico di Saville prevede un valore di  $\theta=45^\circ$  mentre la metodologia sviluppata da Seymour fa riferimento ad un valore di  $\theta=90^\circ$ .
- $F_{e,w}$  lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $\phi_w$
- $F_i$  lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima  $\phi_i$  (si fa riferimento alla lunghezza calcolata su base cartografica) eventualmente assunta come valore medio relativo ad un settore di  $15^\circ$  nell'intorno della direzione i-esima  $\phi_i$  (metodo proposto dal C.E.R.C. nel software package A.C.E.S.)
- n termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente si assume  $n=2$ )

Per il calcolo della relazione esistente tra la direzione del vento e quella del moto ondoso generato, si fa riferimento al criterio introdotto da Donelan. Nell'ipotesi che:

- la direzione media del moto ondoso corrisponde alla direzione della componente spettrale associata al periodo di picco;
- il moto ondoso generato dal vento è ben definito e rappresentabile tramite le relazioni introdotte dalla campagna oceanografica JONSWAP (JOint North Sea WAVE Project, Hasselmann 1976).

Si può affermare che la direzione media  $b$  del moto ondoso relativa alla direzione media di provenienza del vento  $\phi_w$  è individuata come il valore che rende massima la funzione:

$$f(\phi_w) = F_{e, \phi_w}^{0.28} \cdot (\cos \phi_w)^{0.44}$$

quindi per  $f'(\beta) = 0$  e  $f''(\beta) < 0$ .

Il programma ENIF sviluppato dalla Modimar effettua il calcolo dei fetch efficaci e della correlazione del vento e quella del moto ondoso generato.

# STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSA INTERNA

## 1 Introduzione

Il presente studio di agitazione interna è stato elaborato per verificare, nel dettaglio, il livello di agitazione residua agli accosti nella configurazione derivante dalle nuove disposizioni dei banchinamenti interni del porto storico definiti nella variante al Piano Regolatore del porto di Ancona.

A tal fine, sono state considerate le condizioni di moto ondoso caratteristiche di uno scenario statistico frequente, indicativo delle peggiori condizioni di utilizzo dello specchio acqueo.

Si è così potuto dimostrare che la nuova configurazione di variante delle opere portuali relative al porto storico non costituisce un elemento critico per l'agitazione interna residua, e, al contempo, risulta soddisfacente rispetto alle condizioni di sicurezza all'ormeggio in condizioni di normale esercizio.

Infine è stata analizzata anche la risposta della nuova configurazione portuale rispetto alle forzanti ondose di lungo periodo. Sono stati quindi prodotti i diagrammi di amplificazione relativi ai diversi ormeggi esistenti nel porto, ricavandone un risultato, ancora una volta, compatibile con il normale esercizio all'interno del bacino portuale.

Il presente documento costituisce la relazione finale ad illustrazione dei principali risultati ottenuti durante lo studio suddetto. Pertanto, nel seguito si descriveranno sia la metodologia adottata, sia le tecniche d'elaborazione dati, che è stata svolta dagli Ingg. Iannotta e Piscopia, sia i risultati ottenuti dalle analisi.

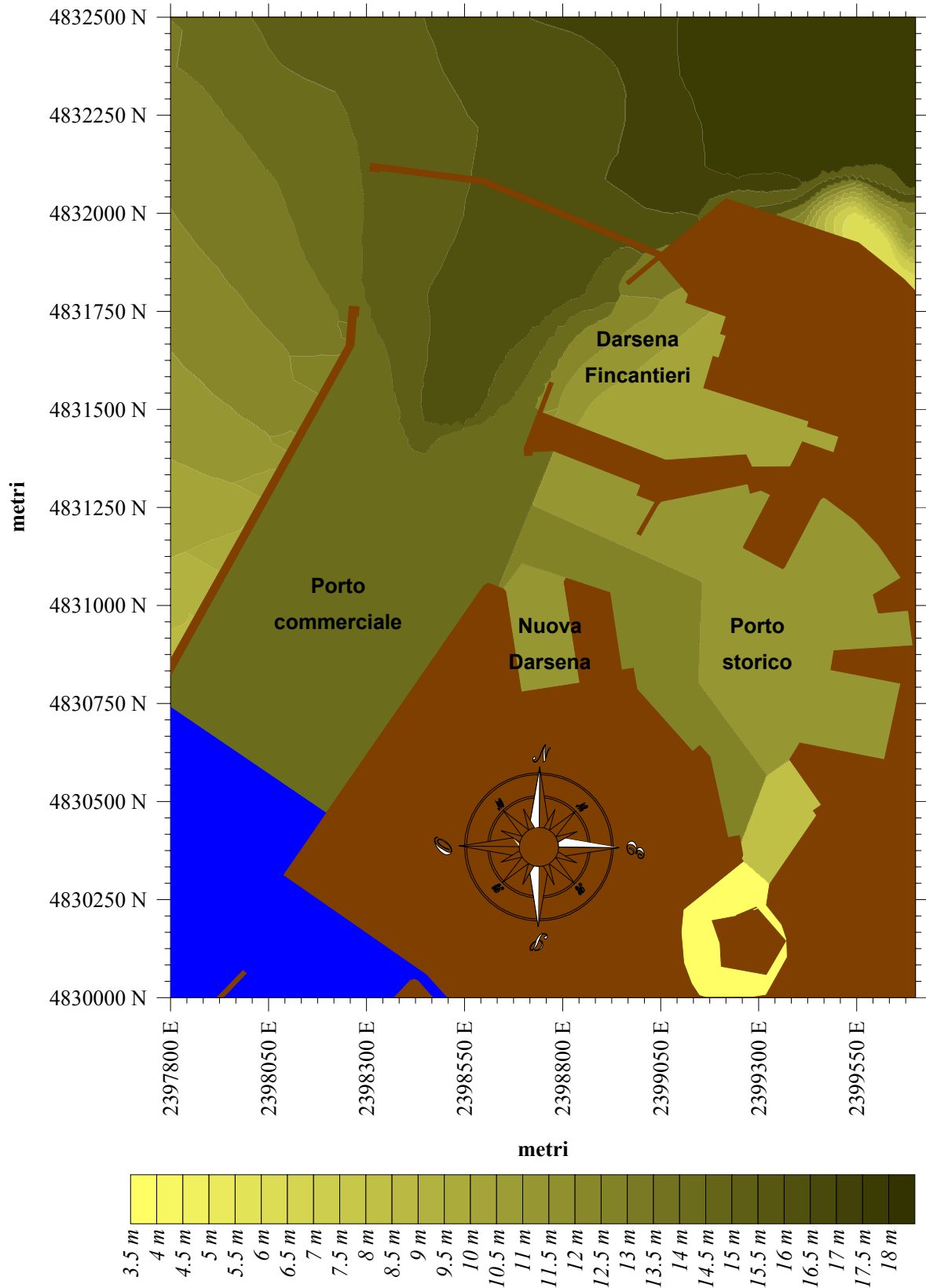
## **2 Studio della agitazione interna del bacino portuale**

Per definire le condizioni di agitazione ondosa all'interno dello specchio acqueo del Porto di Ancona è stata eseguita la propagazione del moto ondoso all'interno delle infrastrutture portuali, ricorrendo all'utilizzo di un modello matematico agli elementi finiti, chiamato NEWAVE, che risolve l'equazione di mild-slope per onde monocromatiche. Mediante tale modello si è potuto correttamente tenere conto sia degli effetti indotti dalle variazioni dei fondali antistanti il porto, come la rifrazione, la diffrazione interna, lo shoaling e l'eventuale frangimento delle onde, sia gli effetti indotti dalla presenza d'ostacoli emergenti, come la diffrazione esterna e la riflessione.

Lo studio di agitazione residua all'interno del porto di Ancona è stato condotto considerando la penetrazione del moto ondoso proveniente da  $330^\circ$  N, direzione che comporta la peggiore condizione di penetrazione all'interno del porto.

Le caratteristiche dell'agitazione ondosa residua del porto sono state studiate con la conformazione del porto riportata in 1.1.Figura 1, derivante dalle modifiche introdotte dalla variante al Piano Regolatore Portuale; si è voluto, quindi, verificare il comfort in termini di agitazione residua presso gli ormeggi del porto, in particolare di quelli del porto storico, la cui configurazione è stata parzialmente rimodellata dalla variante al Piano Regolatore stesso.

Nel seguito si indicano i dettagli delle simulazioni svolte con il codice numerico NEWAVE ed i risultati ottenuti.



**Figura 1** Configurazione delle strutture portuali dell'area settentrionale secondo la variante al Piano Regolatore del porto di Ancona.



## 2.1 Definizione delle condizioni d'onda incidenti

Per la definizione delle caratteristiche del moto ondoso si è fatto riferimento ai risultati dello studio di trasposizione largo-riva, i cui risultati sono riportati nella relazione idraulico-marittima. In particolare, è stato calcolato lo spettro di moto ondoso in condizioni stazionarie in un punto prossimo all'imboccatura portuale, di profondità pari a 15 m s.l.m.m.

Le simulazioni numeriche sono state effettuate utilizzando onde armoniche di caratteristiche tali da rappresentare gli stati di mare di onde irregolari definiti dallo scenario statistico riportato di seguito:

- la direzione media di provenienza della mareggiata, ai fini della verifica di agitazione interna, è stata fissata pari a  $330^\circ$  N; tale direzione è stata considerata, secondo il principio di cautela e in accordo con i risultati del clima ondoso sotto costa, in quanto rappresenta la situazione più gravosa rispetto alla configurazione portuale della variante al Piano Regolatore, comportando una penetrazione diretta del moto ondoso all'interno dell'imboccatura portuale;
- l'altezza d'onda, sempre e in accordo con i risultati del clima ondoso all'imboccatura portuale ed in favore di sicurezza, è stata posta pari a 3 metri, valore limite della classe d'altezza d'onda immediatamente superiore alla classe massima rilevata nel periodo di osservazione dei dati riportati nello studio meteo marino e di propagazione;
- il periodo dell'onda armonica è stato fissato pari ad 8 secondi, valore ricavato usando la correlazione tra periodo di picco ed altezza d'onda significativa relativa alla boa di Pescara riportata nell'Atlante delle Onde; tale valore risulta molto prossimo a quello ricavato in base ai risultati climatici in costa riportati nella relazione idraulico-marittima.

Le caratteristiche dell'onda incidente sopra definita sono poi state assegnate lungo il contorno di generazione del modello NEWAVE, rappresentato da una linea retta poste all'esterno dell'imboccatura portuale a profondità di 15 m s.l.m.m.. Tale retta di generazione interna al dominio di calcolo risulta orientata ortogonalmente alla direzione di provenienza dell'onda. Dunque, per generare un'onda progressiva di assegnate caratteristiche, durante la simulazione numerica, in corrispondenza di tale retta è stato imposto il valore del potenziale delle velocità del moto ondoso. Per maggiori sul modello numerico dettagli si veda l'appendice.

## 2.2 Definizione della configurazione geometrica e dei coefficienti di riflessione

Le simulazioni numeriche con il modello matematico sono state condotte in base allo schema planimetrico riportato in Figura 1. Al fine di ottenere un risultato accurato è fondamentale determinare le caratteristiche riflettenti dei contorni della griglia di calcolo. A tal proposito si sono considerate le diverse tipologie di opere interne utilizzate per delimitare gli specchi acquei della porto e dei circostanti bacini.

I coefficienti di riflessione dei contorni ( $R$ ) sono stati scelti valutandoli in base alle formule riportate in letteratura. In particolare, per valutare la riflettanza dell'opera mista, si è ricorso alla seguente formulazione:

$$R = a\xi^2 / (b + \xi^2)$$

dove  $a$  e  $b$  sono dei coefficienti sperimentali, che assumono valori diversi a seconda della tipologia e delle caratteristiche dell'opera riflettente, e  $\xi$  rappresenta il cosiddetto parametro di "surf" che, per onde regolari, è espresso come

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H}{gT^2}}}$$

in cui  $\alpha$  è la pendenza del paramento lato mare dell'opera riflettente,  $H$  è l'altezza d'onda e  $T$  è il periodo dell'onda armonica. Per onde irregolari, l'altezza d'onda  $H$  viene sostituita con quella significativa mentre il periodo  $T$  è sostituito, a seconda delle formulazioni, con quello medio o con quello di picco.

Per valutare il coefficiente di riflessione delle opere a gettata, tra i diversi coefficienti riportati in letteratura (Figura 2) sono stati utilizzati quelli derivati dalle prove di laboratorio su strutture a gettata, armate con massi artificiali, effettuate da Allsop e Hettiarachi (1988), in considerazione della natura cautelativa dei risultati ottenuti in questo caso rispetto a quelli forniti dalla formulazione di Davidson, estesa a valori piccoli del parametro di surf. Ancora, i risultati forniti dalla espressione di Benoit e Teisson sono stati ritenuti, in questo caso, eccessivamente cautelativi.

Pertanto il coefficiente di riflessione dell'opera di difesa esterna è stato posto pari a 0.30. Invece, alle strutture a parete verticale è stato assegnato un coefficiente di riflessione pari a 0.85, valore dedotto in base alle indicazioni del CEM (Figura 3). Infine, alle banchina con celle antiriflettenti è stato assegnato, in via cautelativa, un coefficiente di riflessione pari a 0.65.

I valori del coefficiente di riflessione per i diversi contorni delimitanti la griglia di calcolo adottati per svolgere le simulazioni in questo studio sono riassunti nella tabella 1 e illustrati nella Figura 4.

**Table VI-5-14**  
**Wave Reflection coefficients for Non-Overtopped Sloping Structures Based on Seelig (1983) Equation**

Head-on waves

$$C_r = \frac{a \xi^2}{(b + \xi^2)} \quad \xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H}{gT^2}}} \quad (VI-5-38)$$

For irregular wave  $H$  is replaced by  $H_s$ ,  $T$  is replaced either by  $T_p$  ( $\xi_{op}$ ) or  $T_m$  ( $\xi_{om}$ ).

Fitted coefficients in Eq VI-5-38

Author	Structure	$a$	$b$
Seelig (1983) $2.5 \leq \xi \leq 6$	Impermeable, smooth, straight slopes, regular waves	1.0	5.5
Allsop and Hettiarachchi (1988) range of $\xi$ or $\xi_{op}$ shown in Figure VI-5-18	Dolosse, regular waves ( $\xi$ ) Slope 1:1.5, 1:2, 1:3	0.56	10.0
	Cobs, regular waves ( $\xi$ ) Slope 1:1.5, 1:2, 1:3	0.50	6.54
	Tetrapods and Stabit, irregular waves ( $\xi_{om}$ ) Slope 1:1.33, 1:1.5, 1:2	0.48	9.62
	Shed and Diode, irregular waves ( $\xi_{om}$ ) Slope 1:1.33, 1:1.5, 1:2	0.49	7.94
Allsop (1990) $3 \leq \xi_{om} \leq 6$	Smooth and impermeable	0.96	4.8
	1-layer rock and stone underlayer on impermeable slope (P=1)	0.64	7.22
	2-layer rock and stone underlayer on impermeable slope (P=1)	0.64	8.85
Benoit and Teisson (1994) $2.7 \leq \xi_{op} \leq 7$	2-layer rock armor $H_s : 0.03 - 0.09m, T_p = 1.3s, d = 0.4m$ Slope 1:1.33, 1:1.5, 1:2	0.6	6.6
Davidson et al. (1994) $8 \leq \xi_{op} \leq 50$	Field measurement on rock slope 1:1.1 Water depth $h$ in meters		
	$h > 3.25$	0.65	25
	$2.5 \leq h \leq 3.25$	0.60	35
	$h < 2.5$	0.64	80

**Figura 2** Coefficienti di riflessione per strutture a gettata non sormontabili (CEM03).

$$C_r = \begin{cases} 0.79 + 0.11 \frac{R_c}{H_s} & \frac{R_c}{H_s} \leq 1.0 \\ 0.90 & \frac{R_c}{H_s} > 1.0 \end{cases} \quad (VI-5-40)$$

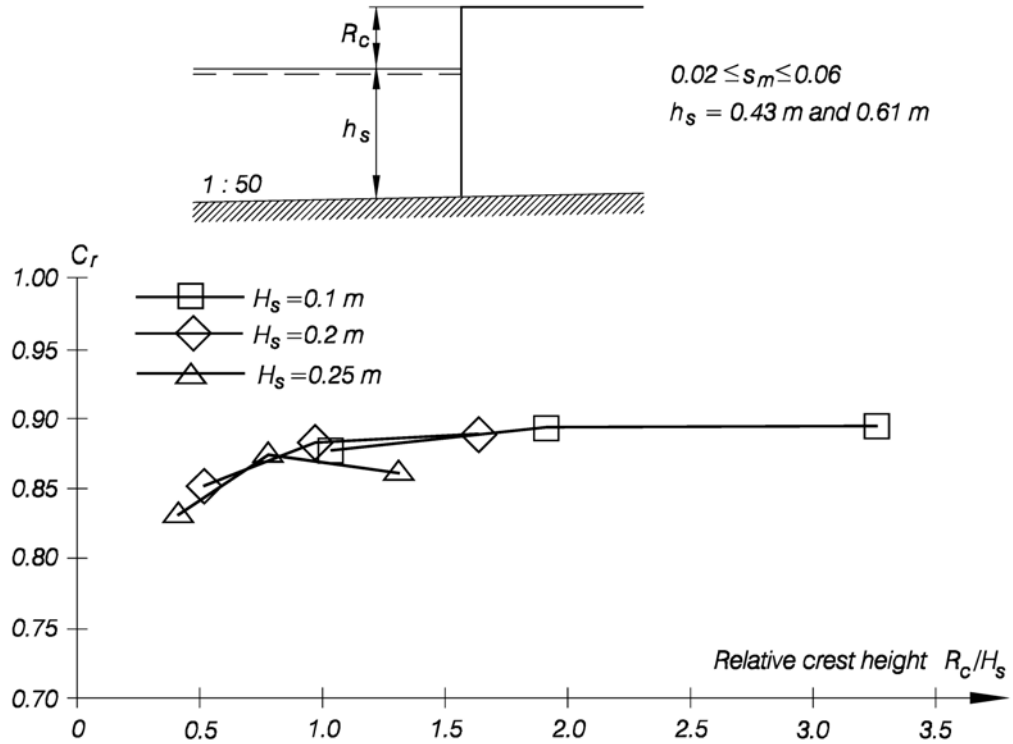
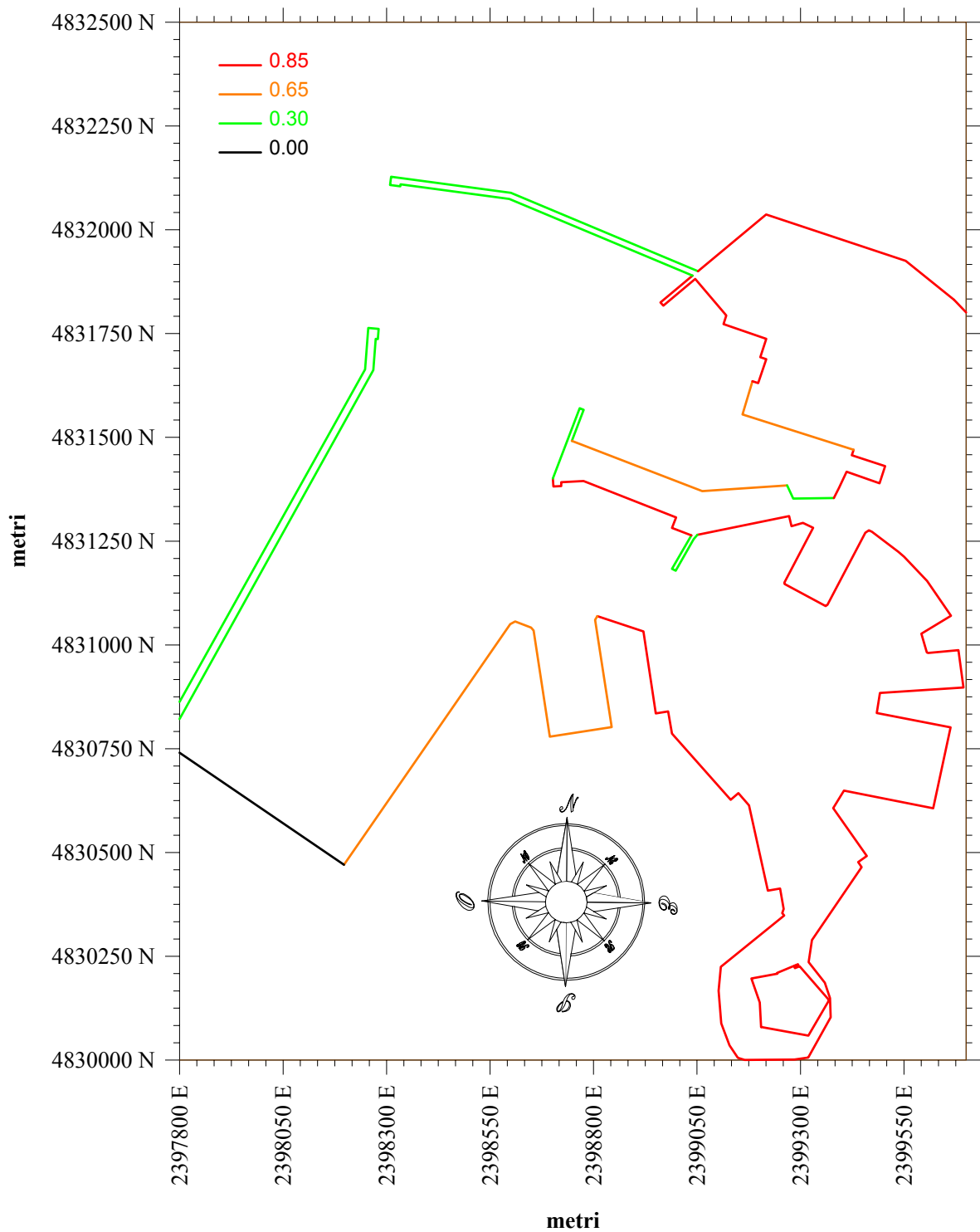


Figura 3 Coefficienti di riflessione per strutture a parete verticale su fondali sabbiosi (CEM03).

TIPOLOGIA DELLE OPERE AL CONTORNO	R
Opere a parete verticale totalmente riflettenti	0.85
Cassoni con celle antiriflettenti	0.65
Banchinamenti interni in massi naturali	0.45
Opere di difesa esterna in massi artificiali	0.35

tabella 1 Definizione dei coefficienti di riflessione delle strutture emergenti.



**Figura 4** Schema planimetrico della configurazione portuale del Piano Regolatore di Ancona, assegnazione coefficienti di riflessione delle strutture emergenti e dei contorni totalmente assorbenti.

### 2.3 Elaborazione della griglia di calcolo ed approssimazione della soluzione del campo d'onda

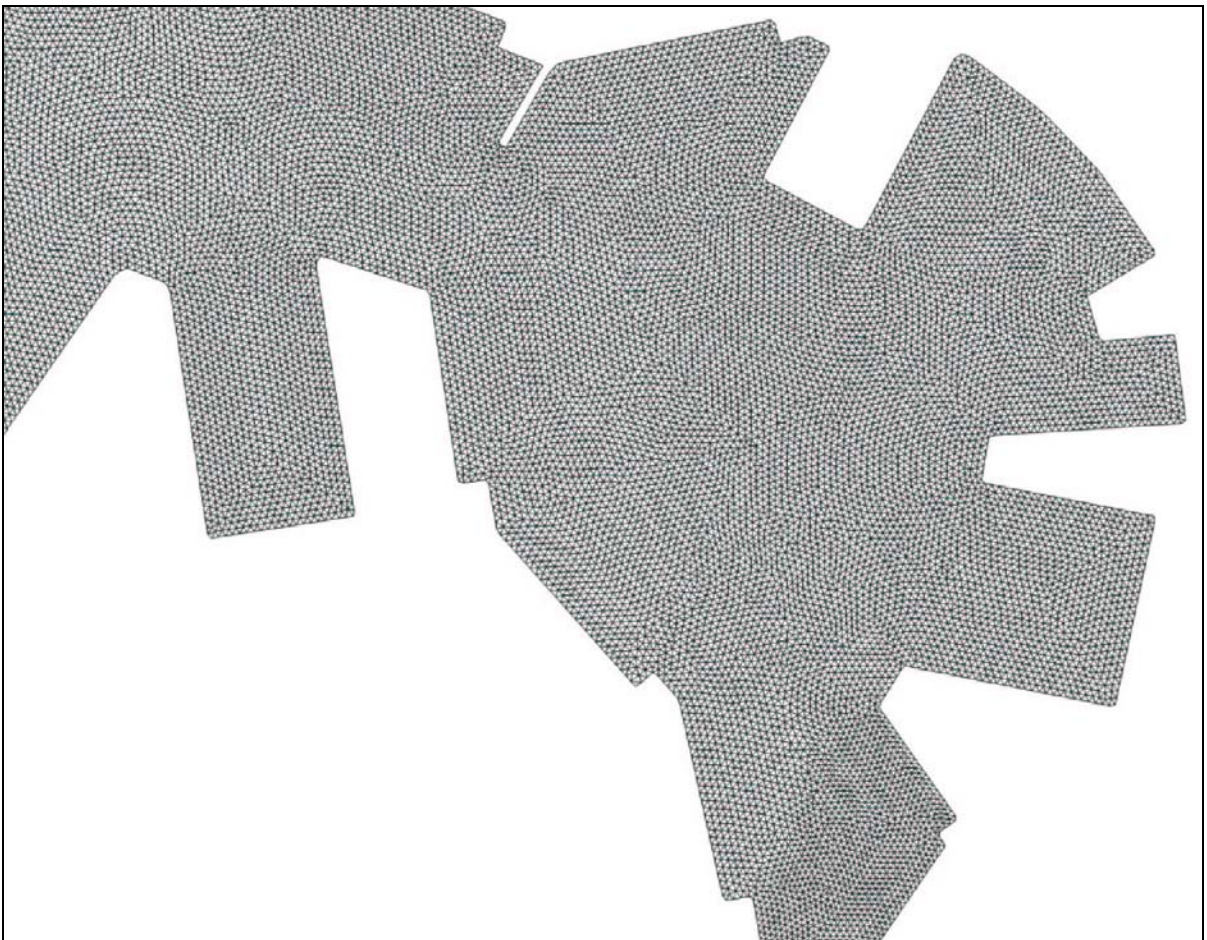
La griglia di calcolo è stata costruita ponendo la dimensione massima degli elementi triangolari minore o al limite uguale a un decimo della lunghezza d'onda locale calcolata

tramite la relazione di dispersione; si è così ottenuta una mesh con un numero di nodi pari a 93.623, un numero di elementi pari a 184.499 ed una larghezza di banda del sistema risolvibile pari a 401.

Per ciò che concerne il calcolo per la risoluzione del sistema lineare derivante dalla formulazione variazionale della mild slope equation, va detto che alcuni fenomeni tipicamente non lineari, quali la parziale riflessione ed il frangimento, sono stati trattati tramite un calcolo iterativo del succitato sistema nei potenziali nodali delle velocità. La convergenza data dal seguente criterio:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N_e} (H_i^t - H_i^{t-1}) \left[ \sum_{i=1}^{N_e} H_i^{t-1} \right]^{-1} < 0.01$$

in cui  $H_i^t$  è il valore dell'altezza d'onda associato all' $i$ -esimo elemento all'iterazione  $t$ , calcolato come valore medio sui nodi dell'elemento stesso, mentre  $H_i^{t-1}$  è lo stesso valore calcolato all'iterazione precedente  $t-1$ .



**Figura 5** Dettaglio della mesh agli elementi finiti per l'area del porto storico

## 2.4 Analisi dei risultati

I risultati ottenuti con il modello numerico corrispondente allo stato di mare considerato nella Figura 6 sull'intero dominio di calcolo e nella Figura 7 nel dettaglio dello specchio acqueo corrispondente al porto storico e alla darsena Fincantieri.

È possibile visualizzare, inoltre, i valori numerici delle altezze d'onda relative alle aree d'ormeggio consultando la tabella 2, a sua volta corredata dalla Figura 8 per l'ubicazione delle aree d'ormeggio.

I risultati delle simulazioni mostrano chiaramente l'attenuazione dell'energia durante la propagazione all'interno delle aree portuali.

Come è possibile notare dalla figura di dettaglio, la Nuova Darsena risulta maggiormente esposta alla propagazione del moto ondoso. Infatti, per la condizione di moto ondoso provata, all'interno della darsena si ha la formazione di un campo di moto ondoso stazionario con ventri di altezza prossima ai 3 m. All'interno del porto storico, gli attracchi delle banchine più vicini a tale Darsena, in particolare quella del Molo Nord e le numero 20-21-22 presentano le condizioni di agitazione interna residua peggiori, ricevendo la prima le onde riflesse dalla Nuova Darsena e le seconde le onde diffratte immediatamente a valle della Darsena stessa. Tra le banchine interne al porto storico, la numero 15, per la sua posizione prospiciente all'imboccatura del porto storico stesso, subisce condizioni di agitazione peggiori delle altre.

Le rimanenti banchine all'interno del bacino del porto presentano altezze d'onda medie compatibili con un ormeggio in condizioni di sicurezza.

Va rilevato, comunque, che le condizioni dell'onda incidente adottate per il presente studio sono di natura cautelativa e corrispondono, come è possibile verificare dalla tabella delle frequenze relative al punto P1 riportate nello studio meteomarino, ad una frequenza di accadimento inferiore al 3‰. Poiché il modello adottato è di natura lineare, è possibile ricavare i valori di agitazione media residua presso le aree d'ormeggio per classi d'altezza d'onda inferiori tramite la tabella 3, riportante gli stessi valori d'altezza d'onda presso le aree d'ormeggio normalizzati rispetto all'onda incidente.

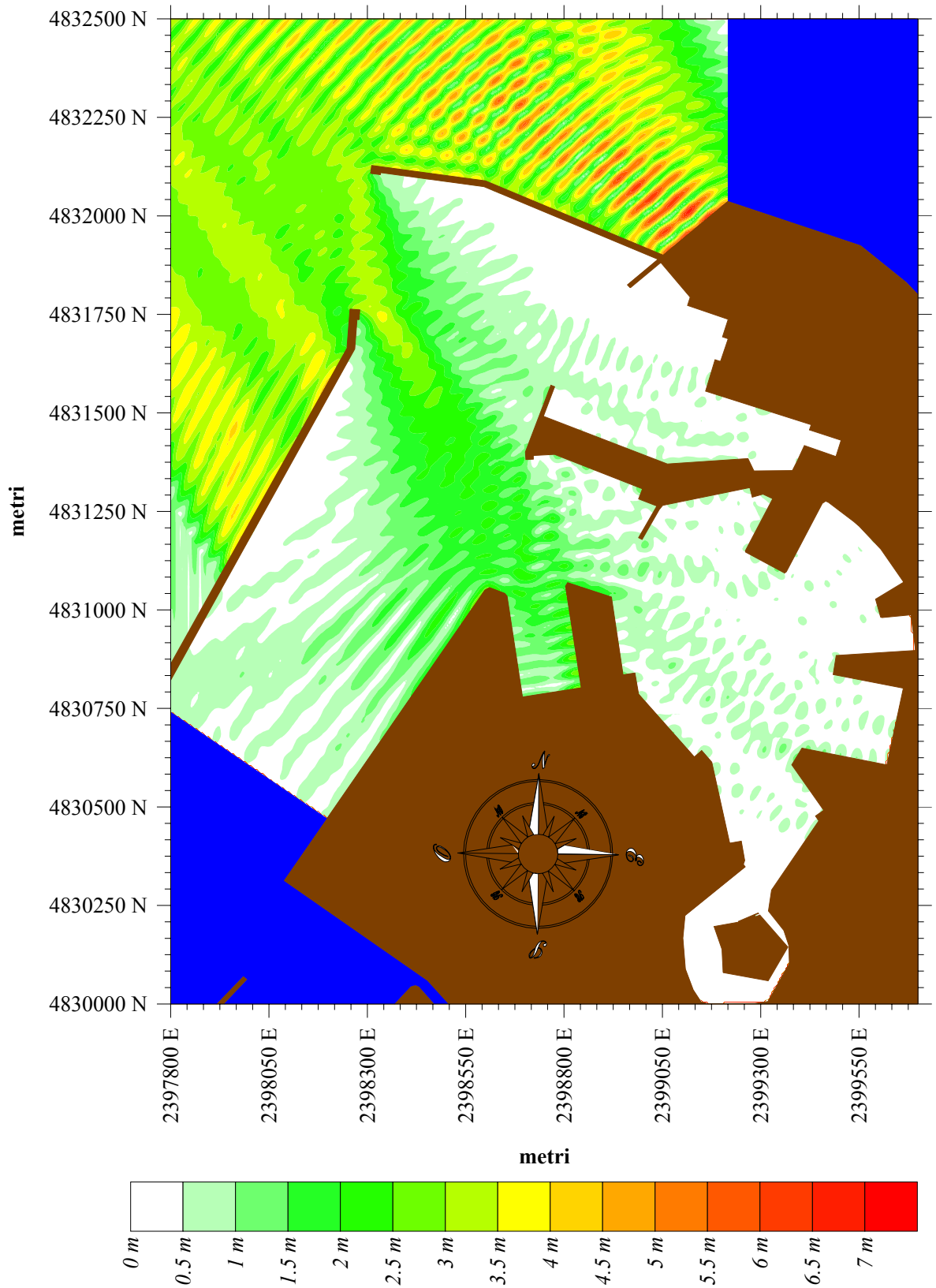
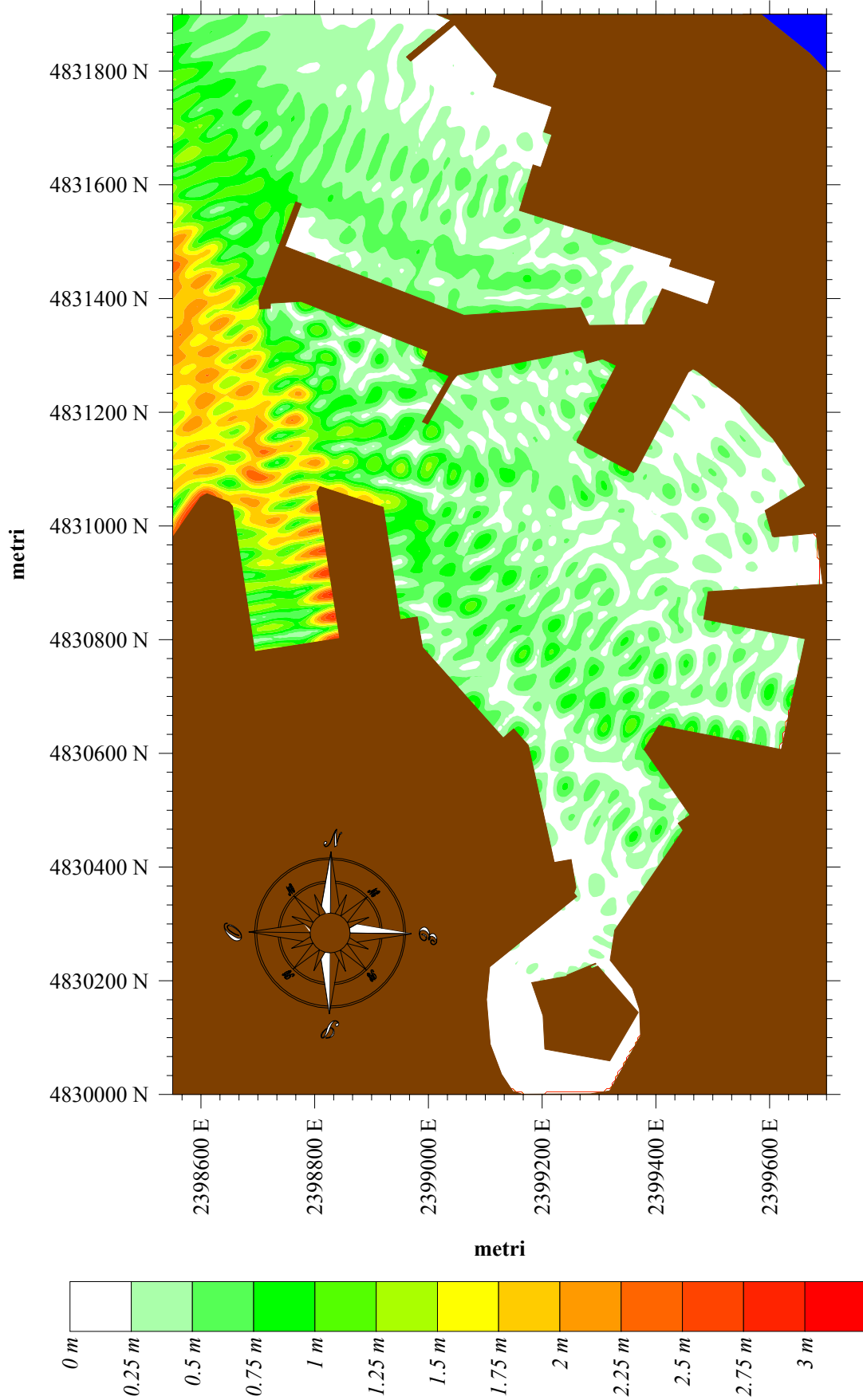
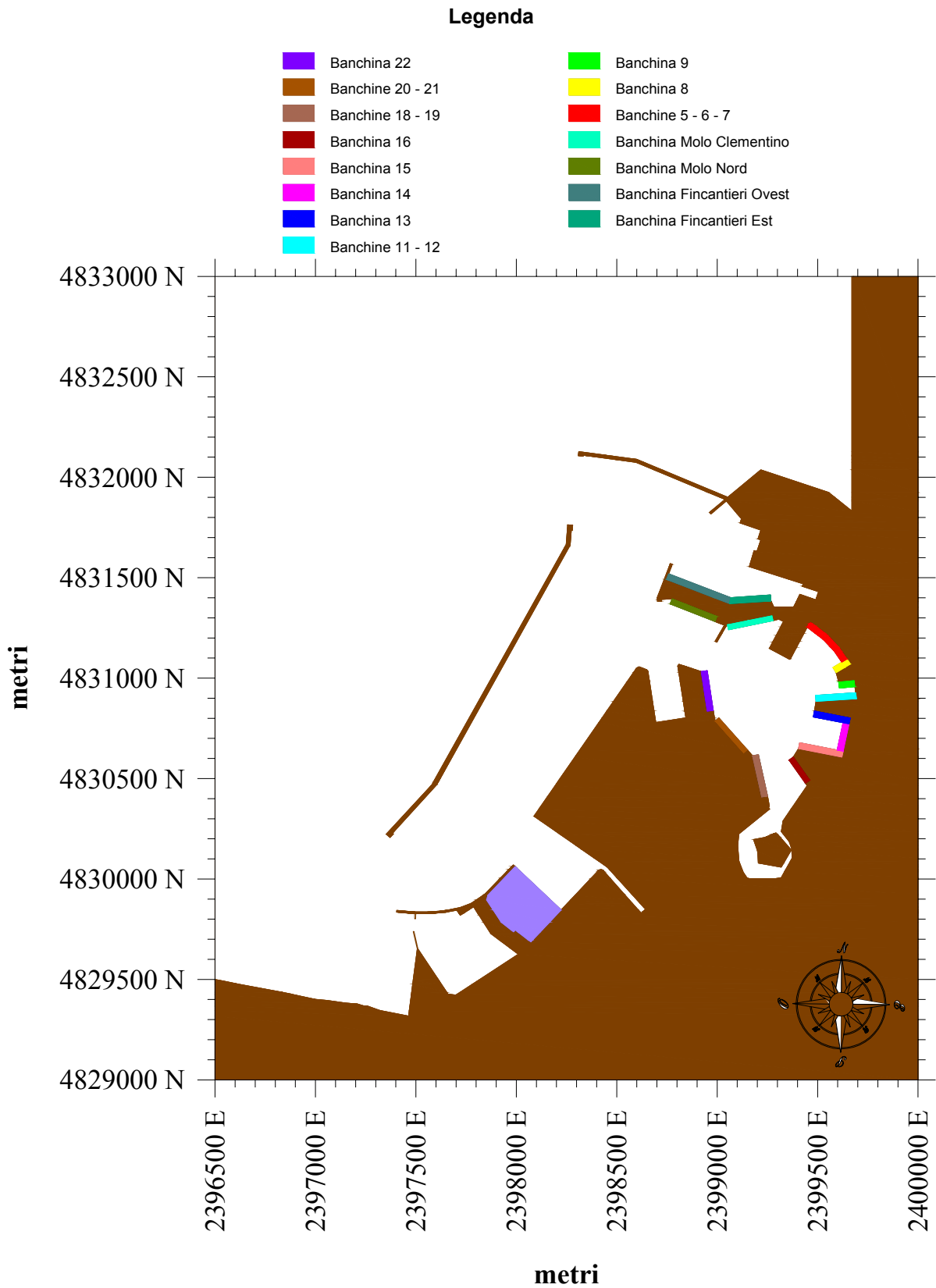


Figura 6 Campo d'onda per  $H_s = 3\text{ m}$ ,  $T_p = 8\text{ s}$ ,  $D = 330^\circ\text{ N}$





**Figura 7** Dettaglio del campo d'onda relativo allo specchio acqueo del porto storico e della darsena Fincantieri per  $H_s = 3m$ ,  $T_p = 8 s$ ,  $D = 330^\circ N$



**Figura 8** Ubicazione delle aree di restituzione dell'altezza d'onda media nel dominio di calcolo

Area di restituzione	area $m^2$	$H_m$ $m$
Banchina 22	~6700	0.67
Banchine 20 - 21	~5700	0.51
Banchine 18 - 19	~7000	0.32
Banchina 16	~3900	0.47
Banchina 15	~6900	0.60
Banchina 14	~4400	0.38
Banchina 13	~5660	0.36
Banchine 11-12	~6300	0.18
Banchina 9	~2400	0.20
Banchina 8	~2500	0.20
Banchine 5 - 6 - 7	~8100	0.20
Banchina Clementino	~5700	0.47
Banchina Molo Nord	~6200	0.56
Banchina Fincantieri Ovest	~10400	0.38
Banchina Fincantieri Est	~6200	0.45

**tabella 2** Altezze d'onda medie sulle diverse aree prospicienti le banchine del porto di Ancona.

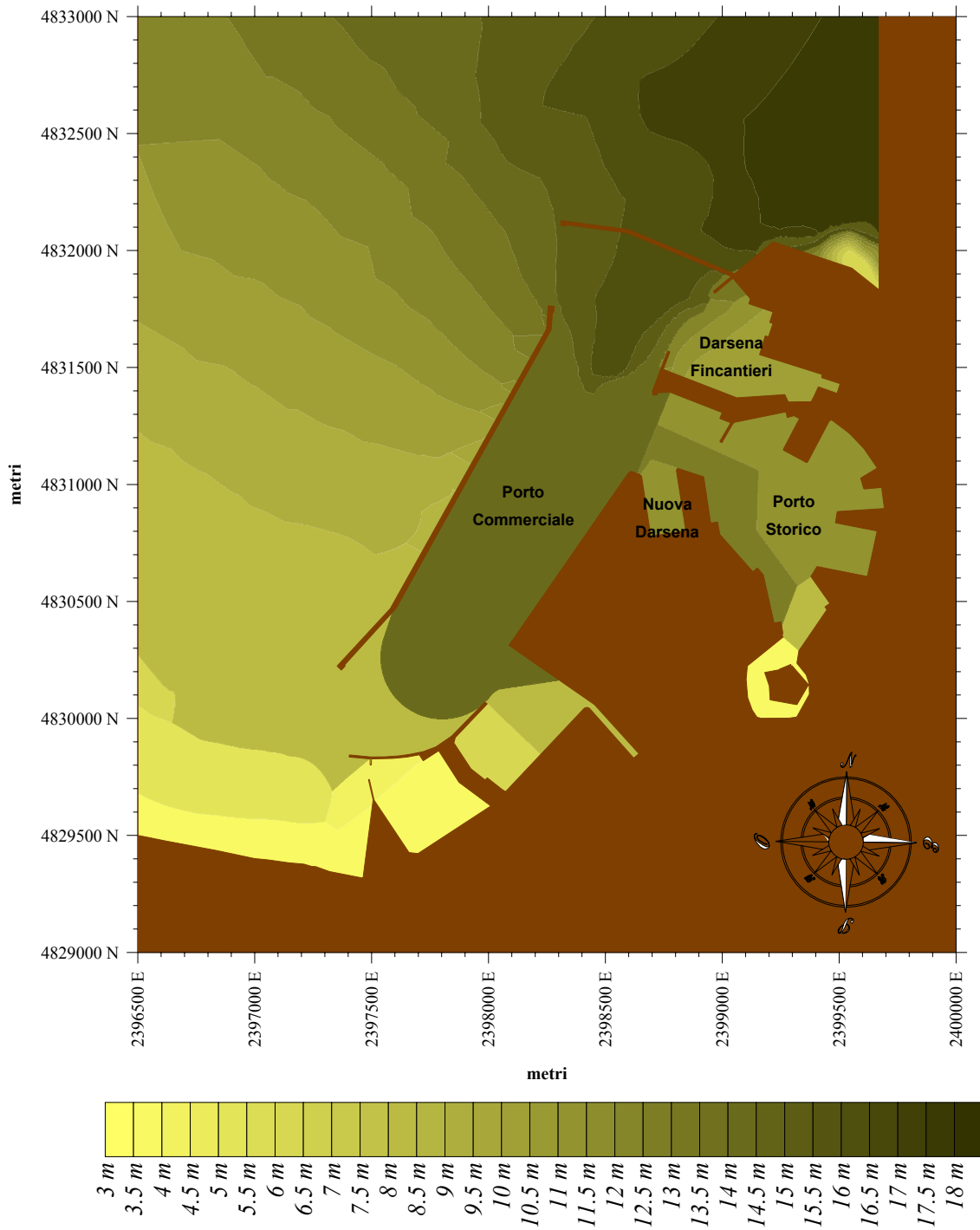
Area di restituzione	area $m^2$	$H_m / H_i$
Banchina 22	~6700	0.22
Banchine 20 - 21	~5700	0.17
Banchine 18 - 19	~7000	0.11
Banchina 16	~3900	0.16
Banchina 15	~6900	0.20
Banchina 14	~4400	0.13
Banchina 13	~5660	0.12
Banchine 11-12	~6300	0.06
Banchina 9	~2400	0.07
Banchina 8	~2500	0.07
Banchine 5 - 6 - 7	~8100	0.07
Banchina Clementino	~5700	0.16
Banchina Molo Nord	~6200	0.19
Banchina Fincantieri Ovest	~10400	0.13
Banchina Fincantieri Est	~6200	0.15

**tabella 3** Altezze d'onda medie normalizzate rispetto all'altezza d'onda incidente sulle diverse aree prospicienti le banchine del porto di Ancona.

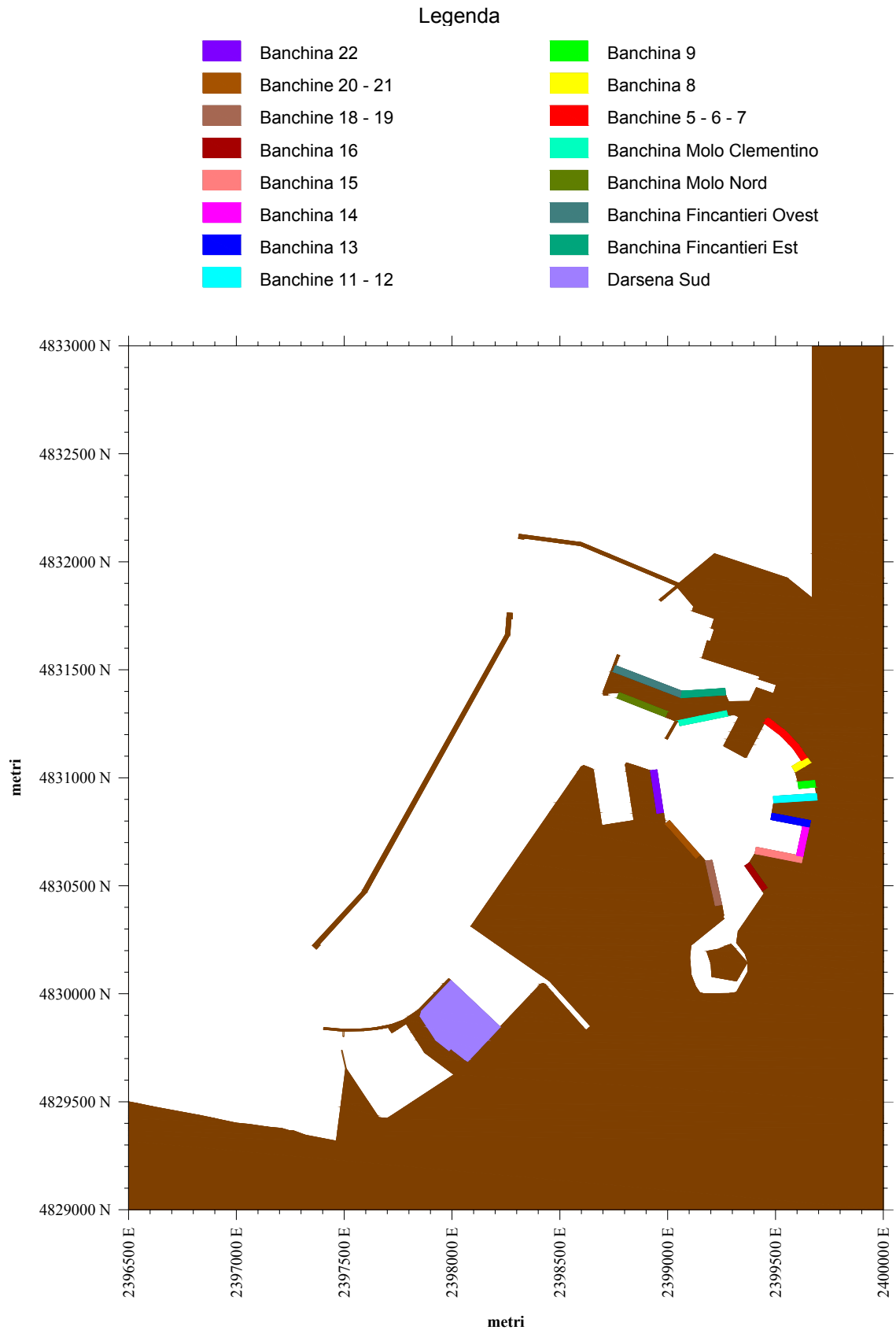
### 3 Onde di lungo periodo

Per lo studio della risposta delle strutture portuali rispetto a forzanti di lungo periodo si è proceduto alla determinazione dei diagrammi di amplificazione per ciascuna banchina. In particolare, sono state eseguite 33 simulazioni sull'intera area portuale (vedi Figura 9), con periodi forzanti compresi tra 30 e 990 secondi e direzione media di provenienza pari a 330°N.

I risultati conseguiti tramite le simulazioni non evidenziano la formazione di importanti strutture di risonanza all'interno del bacino storico, come è anche possibile notare nel diagramma di amplificazione (Figura 11) relativo alle aree di ormeggio indicate nella Figura 10. Nella tabella 4 sono riportati i valori medi dei coefficienti di amplificazione dell'agitazione residua lungo le stesse banchine. Risulta evidente, dai valori riportati, che non esistono criticità legate alla risonanza del bacino, essendo i coefficienti di amplificazione mai superiori all'unità. Inoltre, va sottolineato che, a favore di sicurezza, il modello numerico è stato applicato senza tenere in considerazione le perdite di energia del moto ondoso per effetto degli attriti al fondo. Pertanto si ritengono i risultati conseguiti largamente cautelativi.



**Figura 9** Configurazione delle strutture portuali dell'intero porto di Ancona secondo la variante al Piano Regolatore Portuale



**Figura 10** Ubicazione delle aree di restituzione dei coefficienti di amplificazione medi nel dominio di calcolo

BACINO	Darsena Sud	Banchina 22	Banchine 20 - 21	Banchine 18 - 19	Banchina 16	Banchina 15	Banchina 14	Banchina 13	Banchine 11-12	Banchina 9	Banchina 8	Banchine 5 - 6 - 7	Banchina Clementino	Banchina Molo Nord	Banchina Fincantieri Ovest	Banchina Fincantieri Est
Area (m <sup>2</sup> )	~74400	~6700	~5700	~7000	~3900	~6900	~4400	~5660	~6300	~2400	~2500	~8100	~5700	~6200	~10400	~6200
Periodi (s)	H/H0															
30	0.1	0.21	0.26	0.1	0.2	0.17	0.18	0.13	0.27	0.25	0.14	0.12	0.15	0.2	0.23	0.46
60	0.34	0.24	0.11	0.07	0.1	0.11	0.19	0.12	0.15	0.19	0.1	0.08	0.07	0.18	0.78	0.91
90	0.25	0.05	0.1	0.06	0.07	0.06	0.09	0.07	0.06	0.08	0.07	0.07	0.17	0.35	0.44	0.39
120	0.31	0.08	0.06	0.01	0.02	0.07	0.09	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.13	0.1	0.52	0.61
150	0.69	0.57	0.23	0.27	0.31	0.43	0.51	0.47	0.67	0.72	0.73	0.73	0.74	0.64	0.32	0.73
180	0.8	0.42	0.12	0.46	0.52	0.51	0.55	0.5	0.41	0.42	0.4	0.39	0.53	0.95	0.63	1.46
210	1.62	0.22	0.15	0.34	0.37	0.4	0.43	0.41	0.37	0.38	0.36	0.36	0.25	0.69	0.28	0.52
240	1.28	0.1	0.13	0.21	0.23	0.27	0.28	0.27	0.26	0.27	0.26	0.26	0.09	0.4	0.43	0.66
270	1.04	0.08	0.14	0.19	0.2	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.08	0.3	0.88	1.25
300	0.96	0.14	0.22	0.26	0.27	0.33	0.34	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.15	0.35	1.26	1.67
330	0.85	0.23	0.33	0.37	0.39	0.45	0.46	0.45	0.46	0.47	0.46	0.46	0.25	0.42	1.44	1.81
360	0.75	0.27	0.36	0.42	0.44	0.47	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.29	0.42	1.37	1.66
390	0.71	0.24	0.32	0.38	0.39	0.4	0.41	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.25	0.34	1.11	1.31
420	0.82	0.21	0.28	0.34	0.35	0.34	0.35	0.34	0.33	0.34	0.33	0.33	0.22	0.27	0.96	1.11
450	1.07	0.2	0.27	0.33	0.33	0.32	0.33	0.32	0.31	0.32	0.31	0.31	0.21	0.24	0.95	1.08
480	1.28	0.25	0.32	0.39	0.39	0.38	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.25	0.24	0.97	1.09
510	1.27	0.35	0.45	0.53	0.54	0.52	0.52	0.52	0.5	0.5	0.5	0.5	0.36	0.29	0.99	1.09
540	1.14	0.47	0.58	0.69	0.7	0.67	0.67	0.67	0.65	0.65	0.65	0.65	0.48	0.34	0.98	1.08
570	0.97	0.56	0.69	0.8	0.81	0.78	0.78	0.77	0.76	0.76	0.75	0.75	0.57	0.39	0.97	1.05
600	0.84	0.62	0.74	0.84	0.85	0.82	0.83	0.82	0.8	0.8	0.8	0.8	0.62	0.42	0.93	1
630	0.79	0.62	0.73	0.83	0.83	0.81	0.81	0.81	0.79	0.79	0.79	0.79	0.63	0.42	0.87	0.93
660	0.81	0.59	0.69	0.77	0.77	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74	0.73	0.73	0.6	0.41	0.8	0.86
690	0.87	0.52	0.6	0.67	0.67	0.65	0.66	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64	0.53	0.37	0.72	0.77
720	0.94	0.44	0.5	0.55	0.55	0.54	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53	0.53	0.44	0.32	0.63	0.67
750	0.99	0.35	0.39	0.43	0.43	0.42	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41	0.41	0.35	0.25	0.54	0.57
780	1.03	0.27	0.3	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.28	0.2	0.43	0.46
810	1.06	0.25	0.28	0.3	0.3	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.25	0.18	0.34	0.36
840	1.09	0.29	0.31	0.34	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.29	0.21	0.25	0.27
870	1.12	0.36	0.39	0.41	0.42	0.41	0.41	0.41	0.4	0.41	0.4	0.4	0.36	0.27	0.18	0.19
900	1.14	0.44	0.48	0.51	0.51	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.44	0.34	0.14	0.14
930	1.17	0.53	0.57	0.61	0.61	0.6	0.6	0.6	0.59	0.59	0.59	0.59	0.53	0.42	0.15	0.16
960	1.2	0.62	0.66	0.7	0.7	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68	0.68	0.62	0.5	0.21	0.21
990	1.23	0.7	0.75	0.79	0.79	0.78	0.78	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77	0.71	0.57	0.28	0.28

tabella 4 Coefficienti di amplificazione per le aree di restituzione del porto di Ancona riportate in Figura 10.

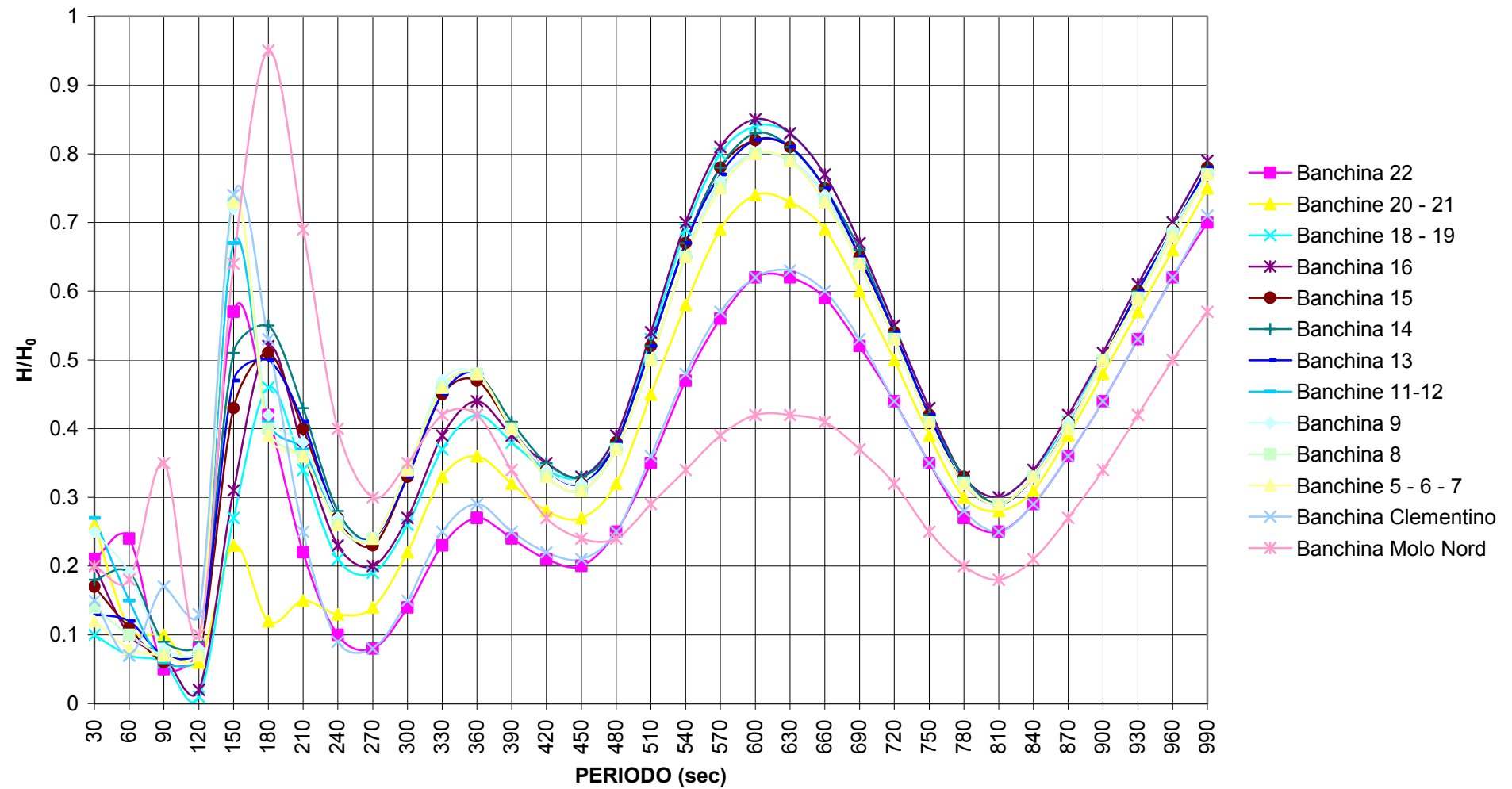
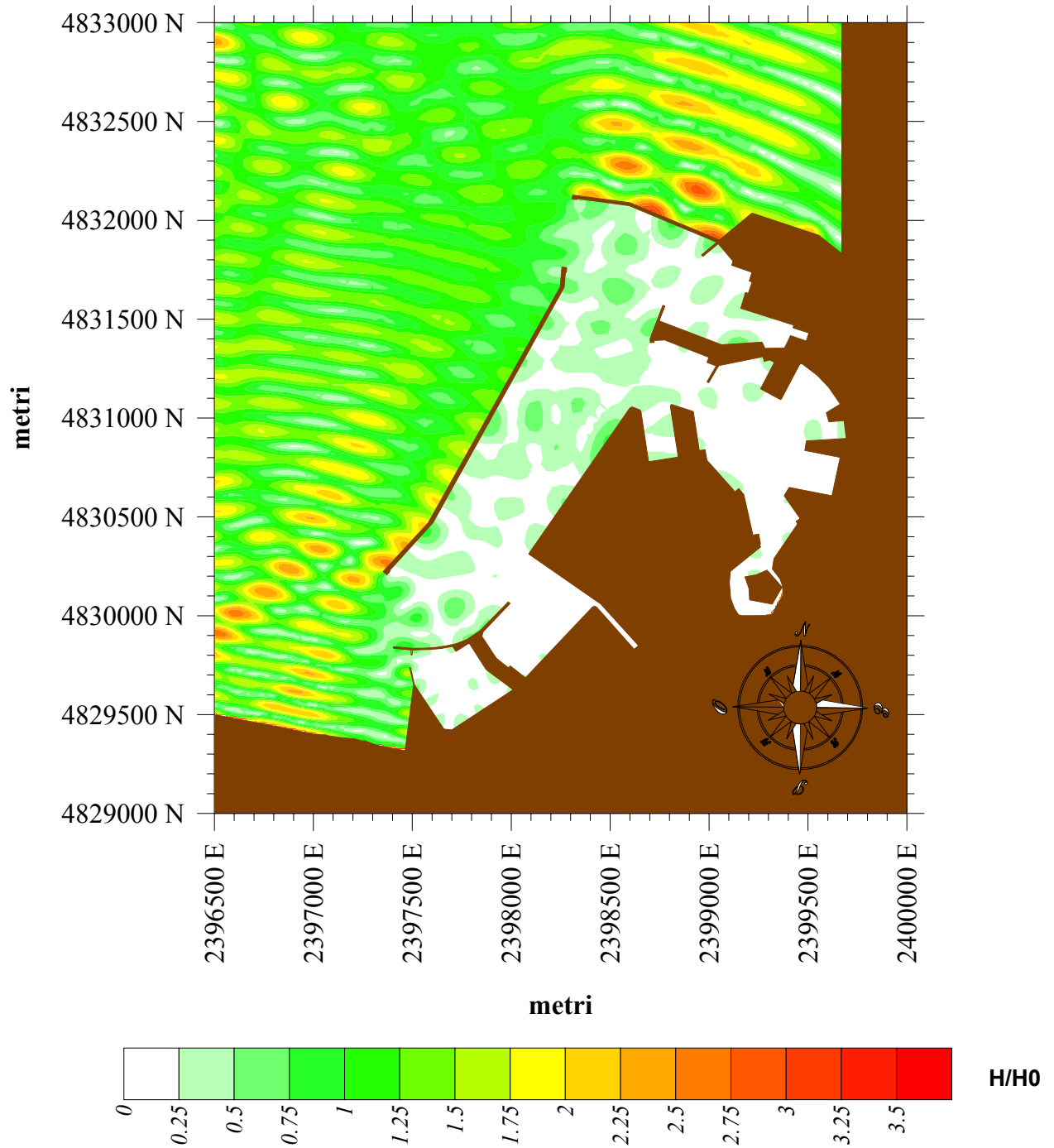
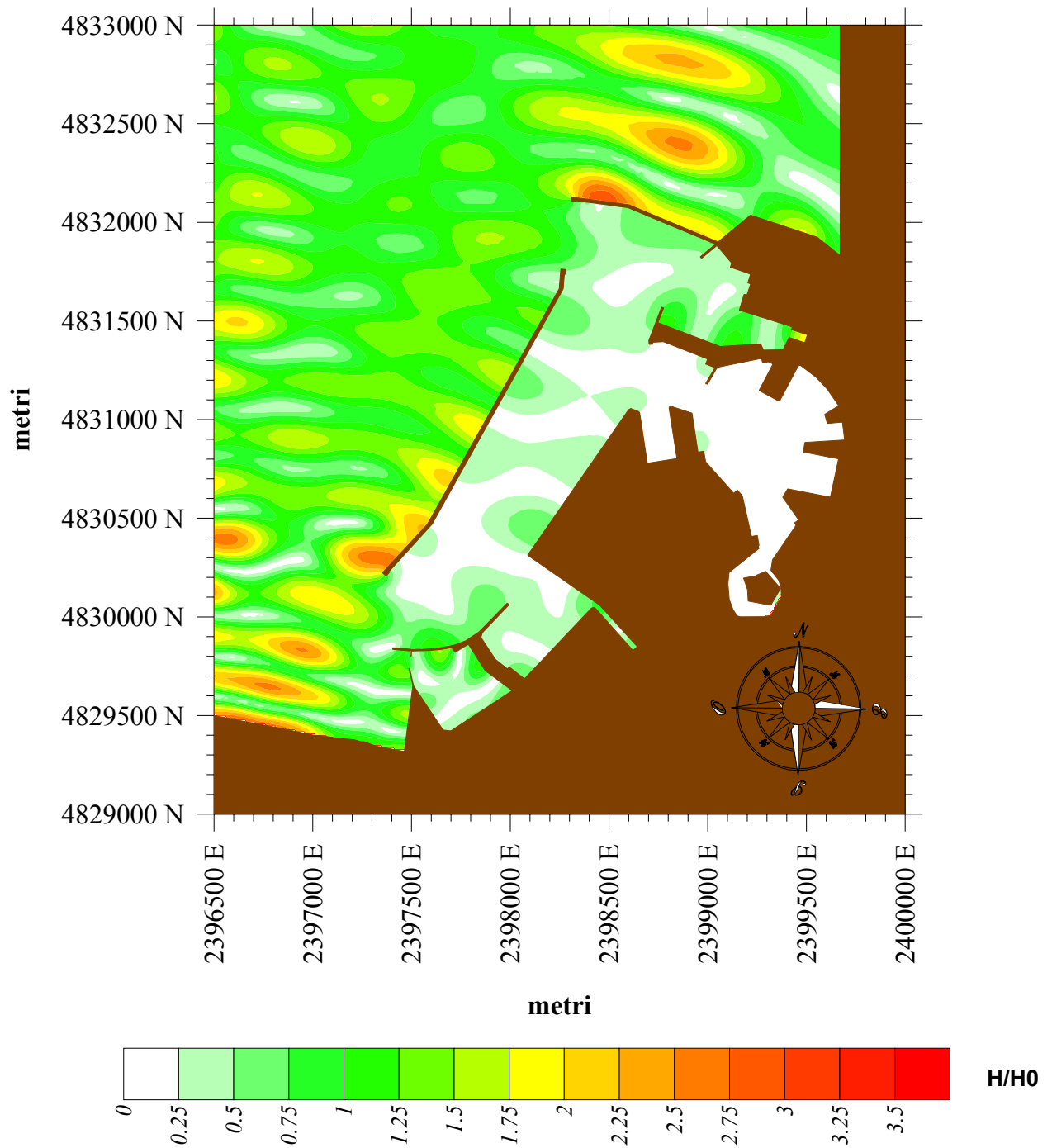


Figura 11 Diagramma di amplificazione per le aree di restituzione del porto di Ancona riportate in Figura 10





**Figura 12** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 30 secondi



**Figura 13** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 60 secondi

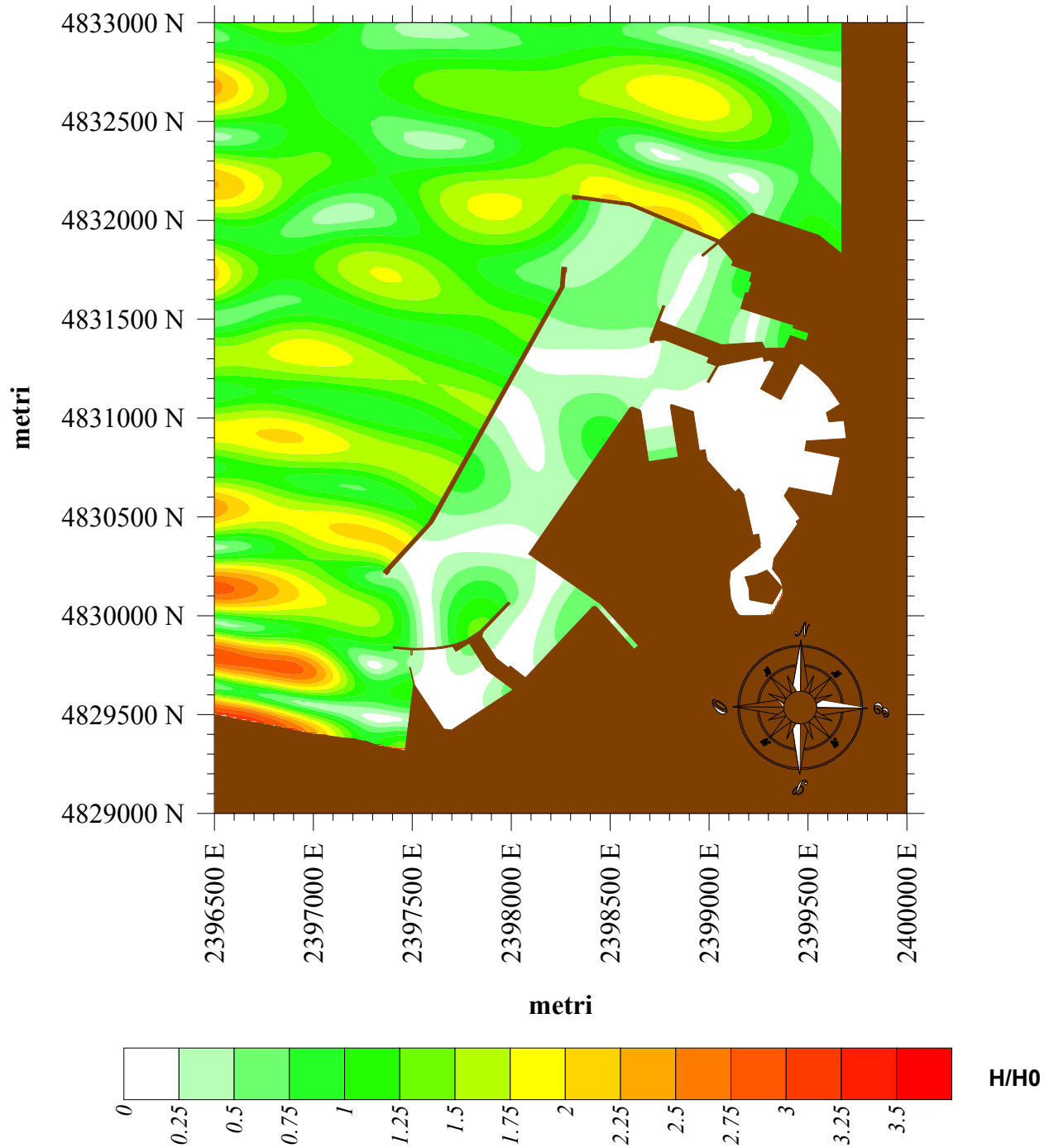


Figura 14 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 90 secondi

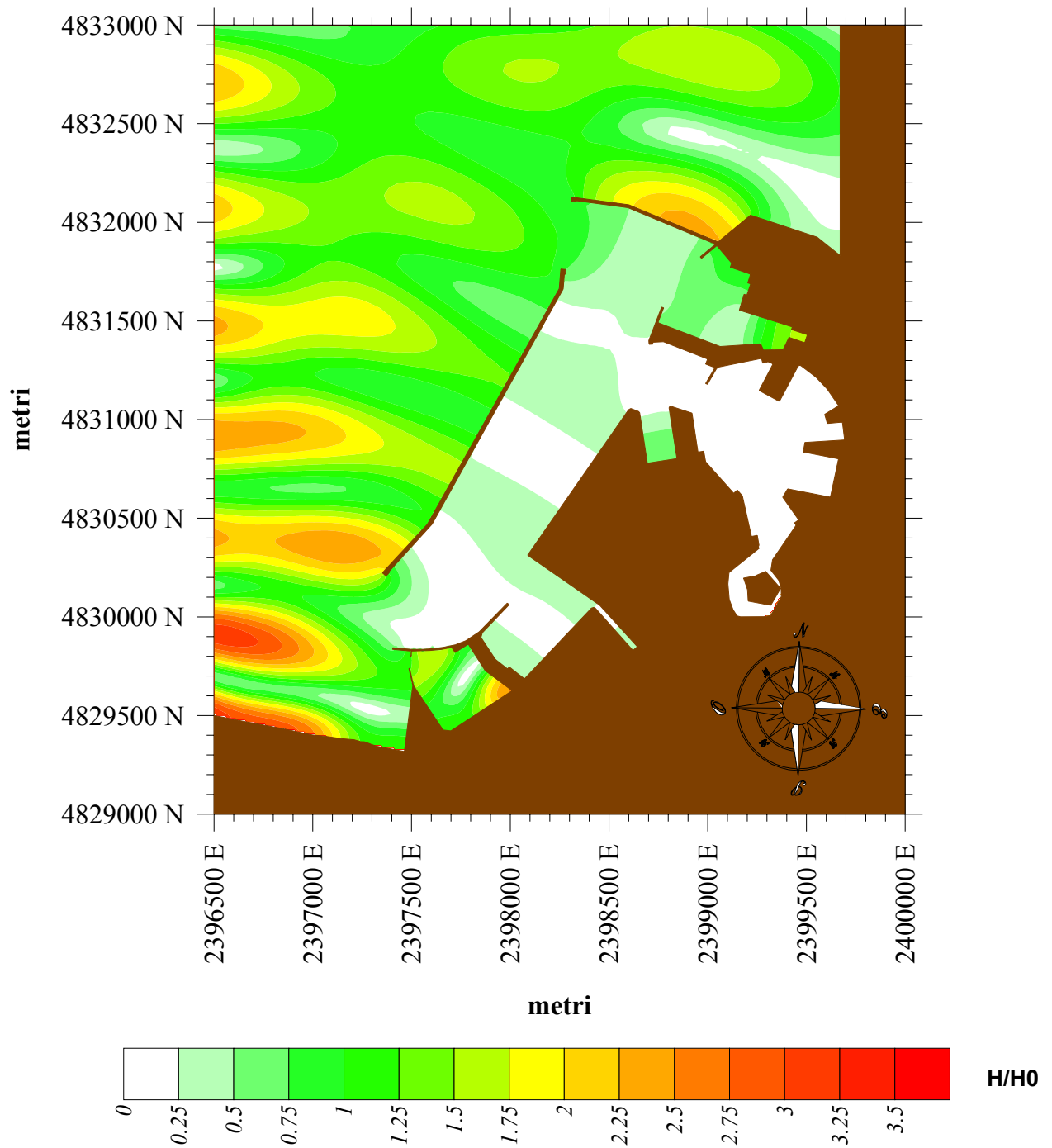
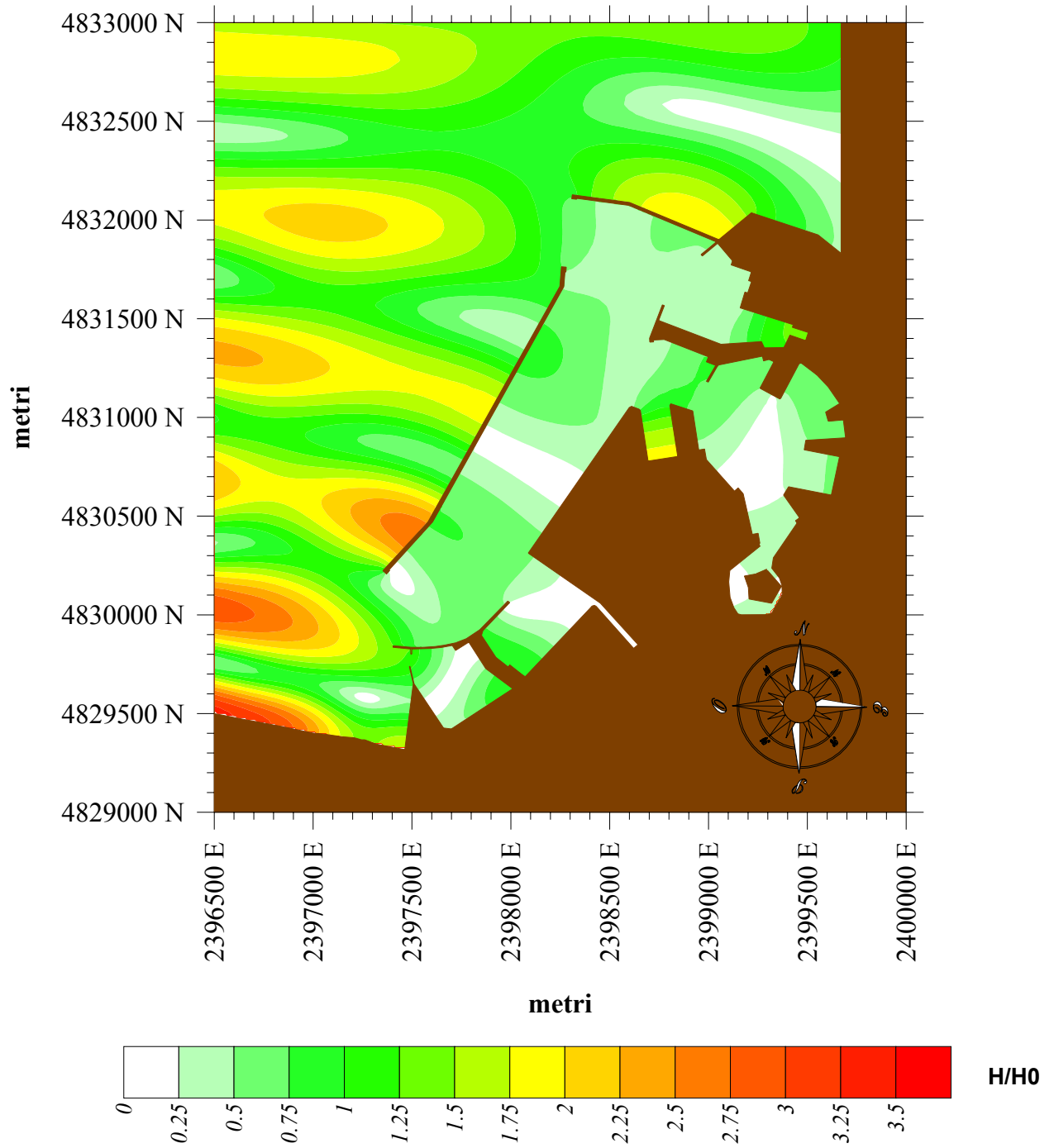
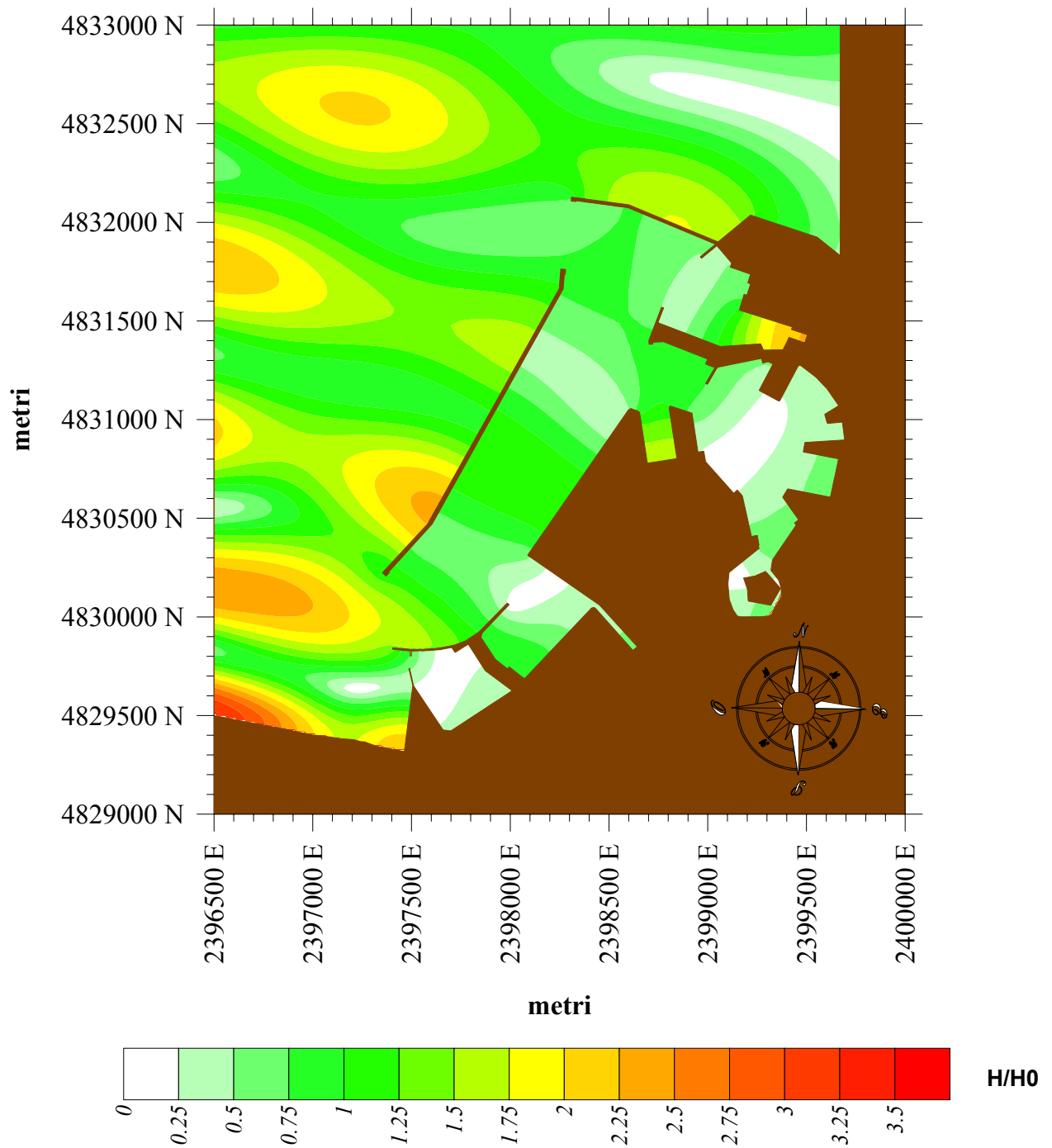


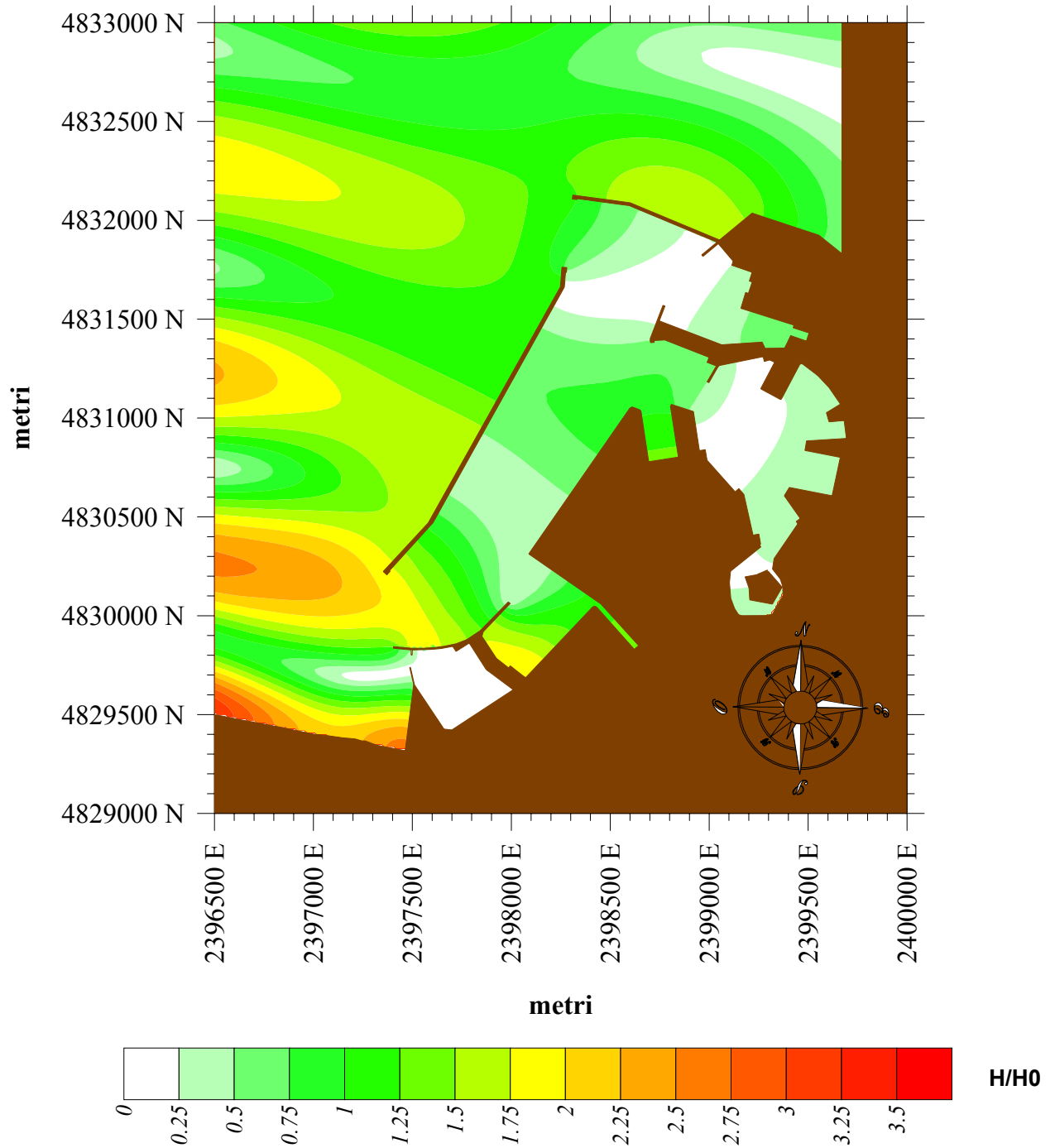
Figura 15 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 120 secondi



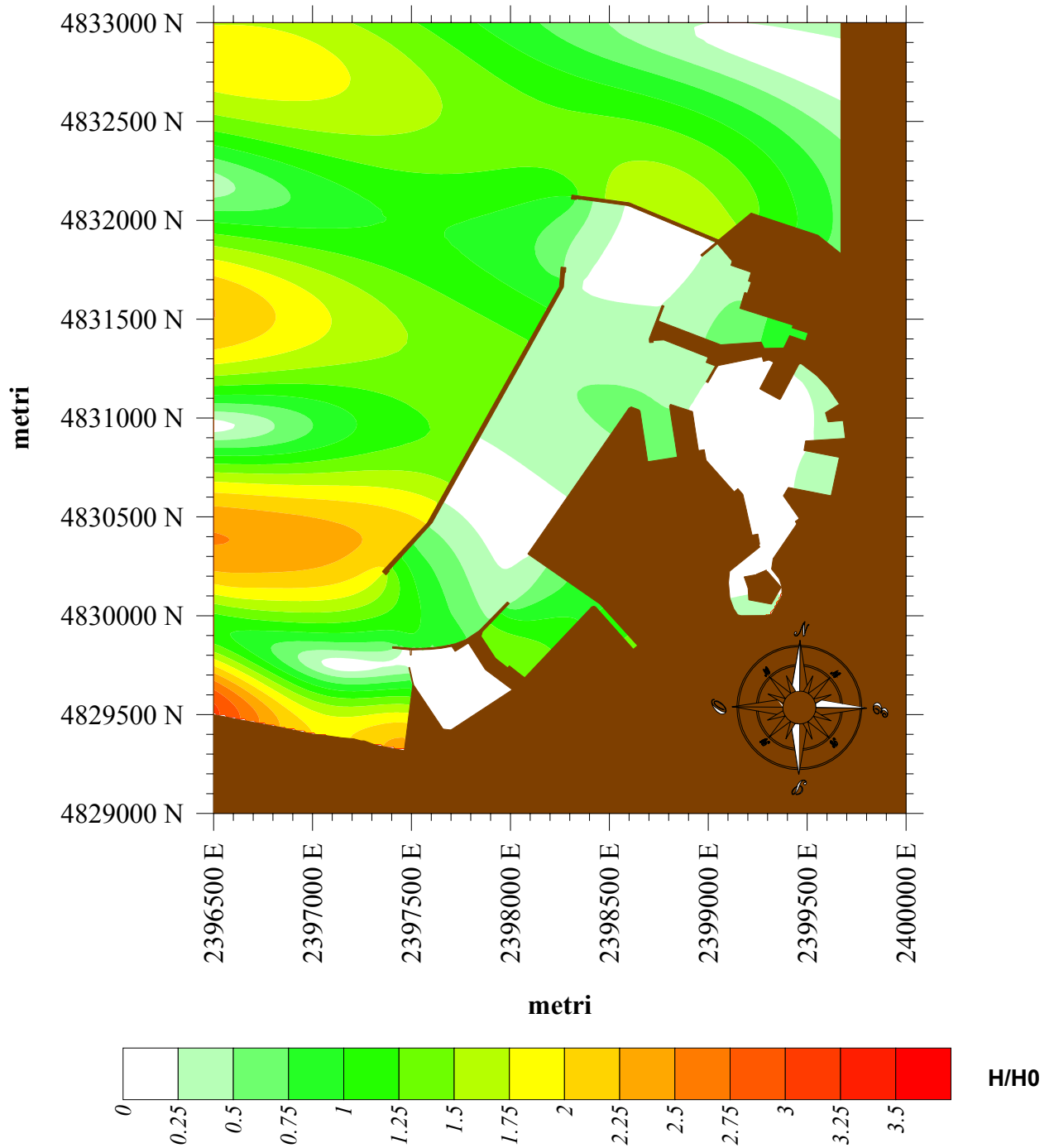
**Figura 16** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 150 secondi



**Figura 17** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 180 secondi



**Figura 18** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 210 secondi



**Figura 19** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 240 secondi



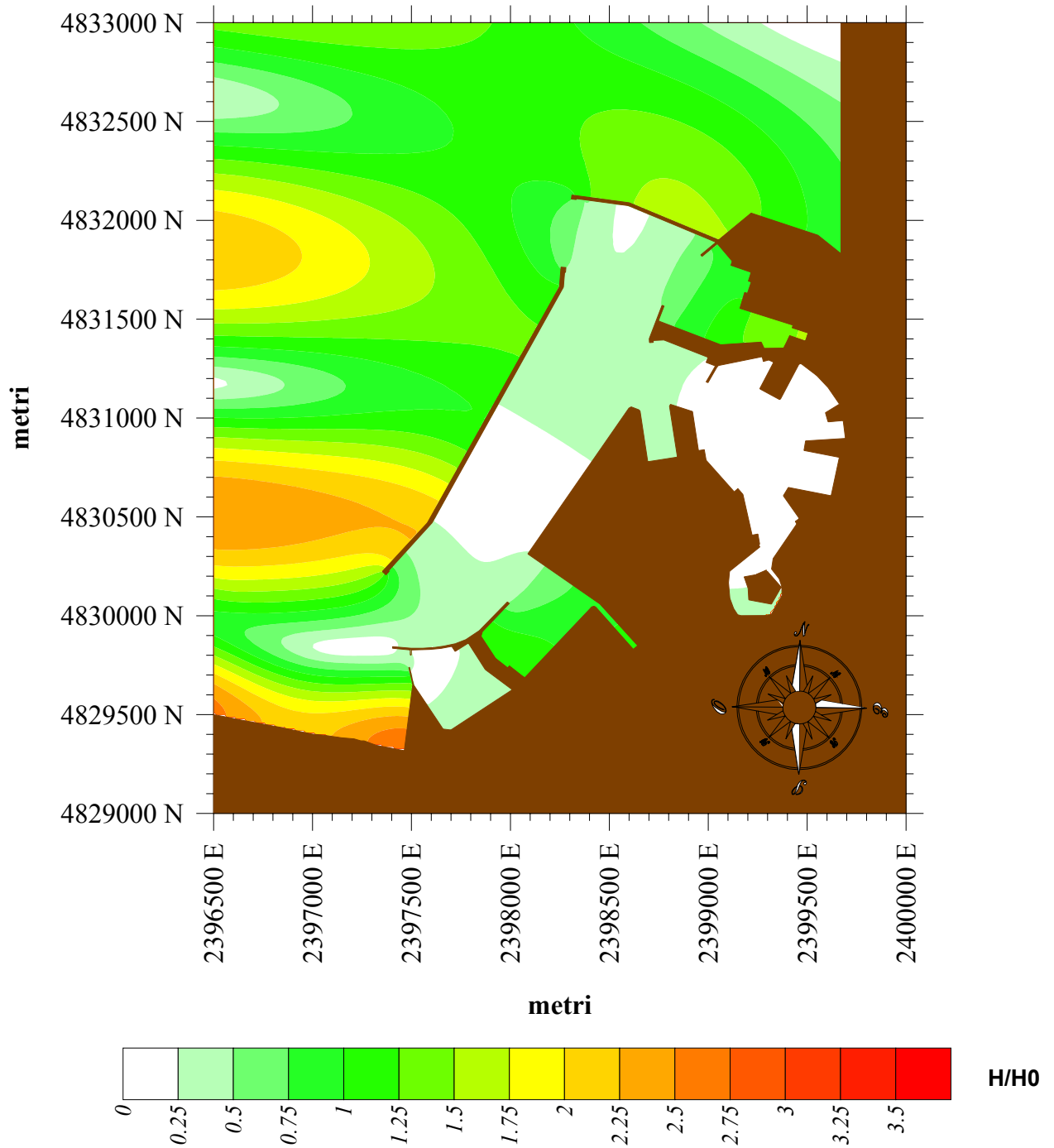


Figura 20 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 270 secondi

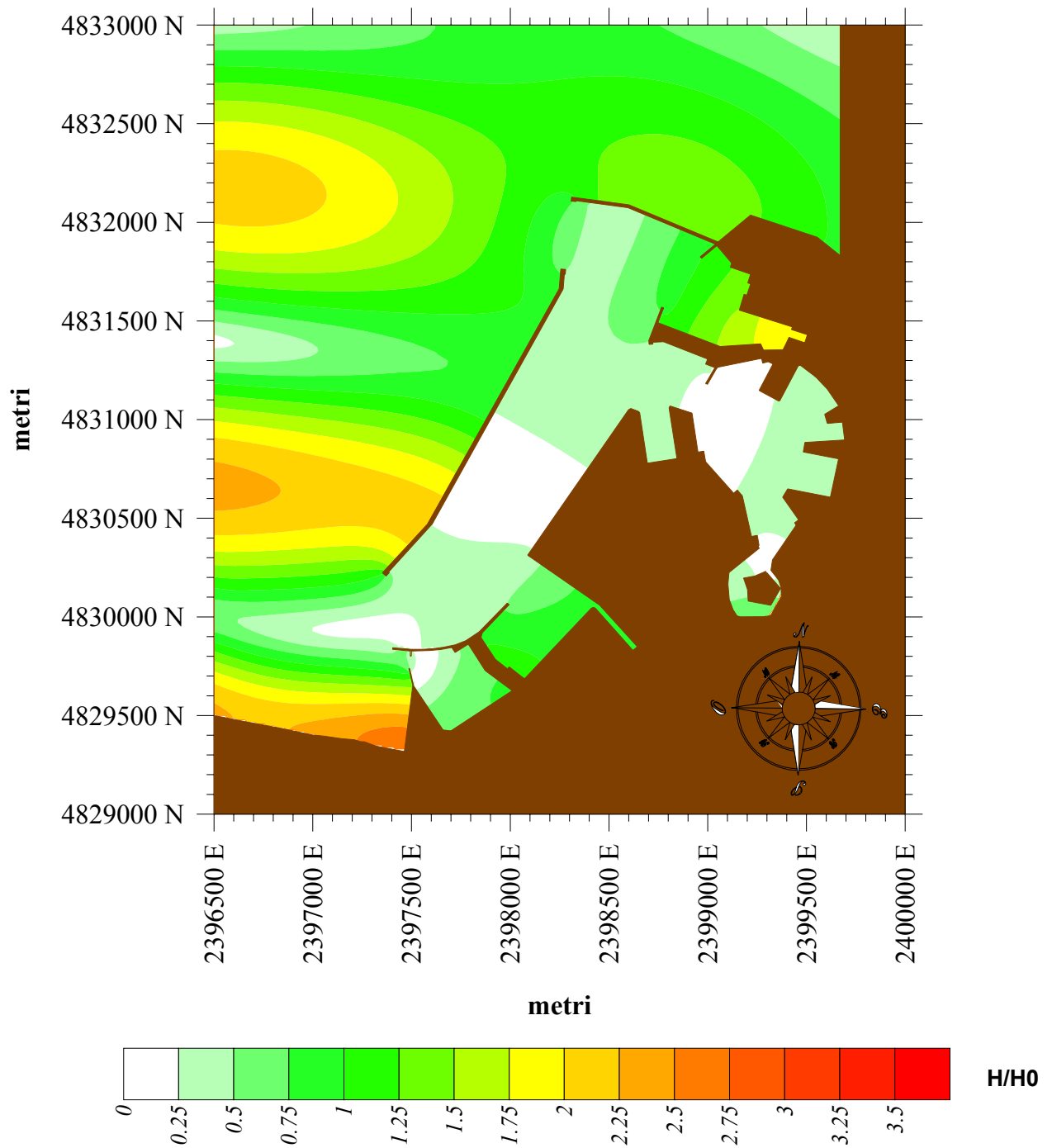


Figura 21 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 300 secondi

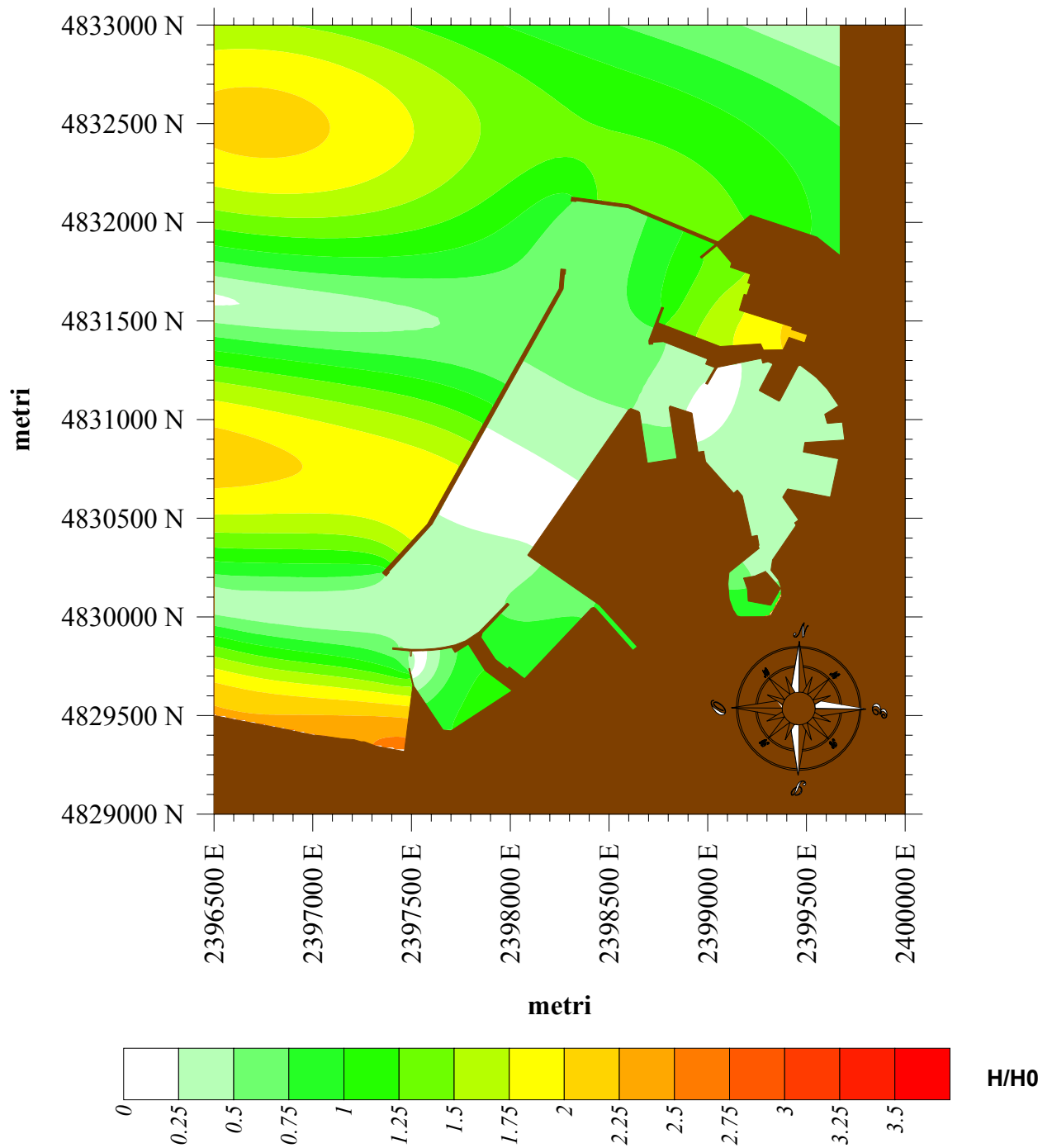


Figura 22 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 330 secondi

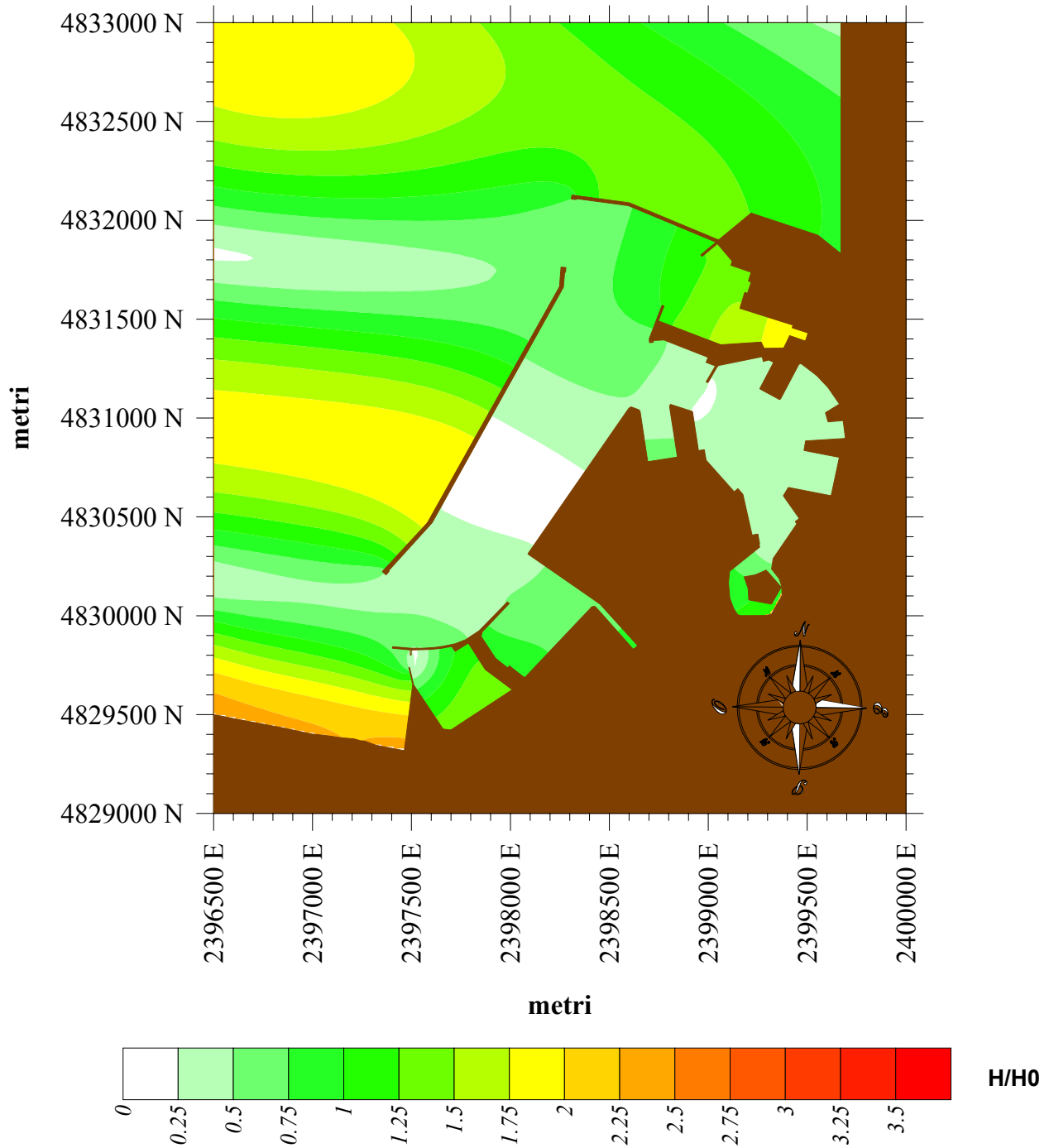
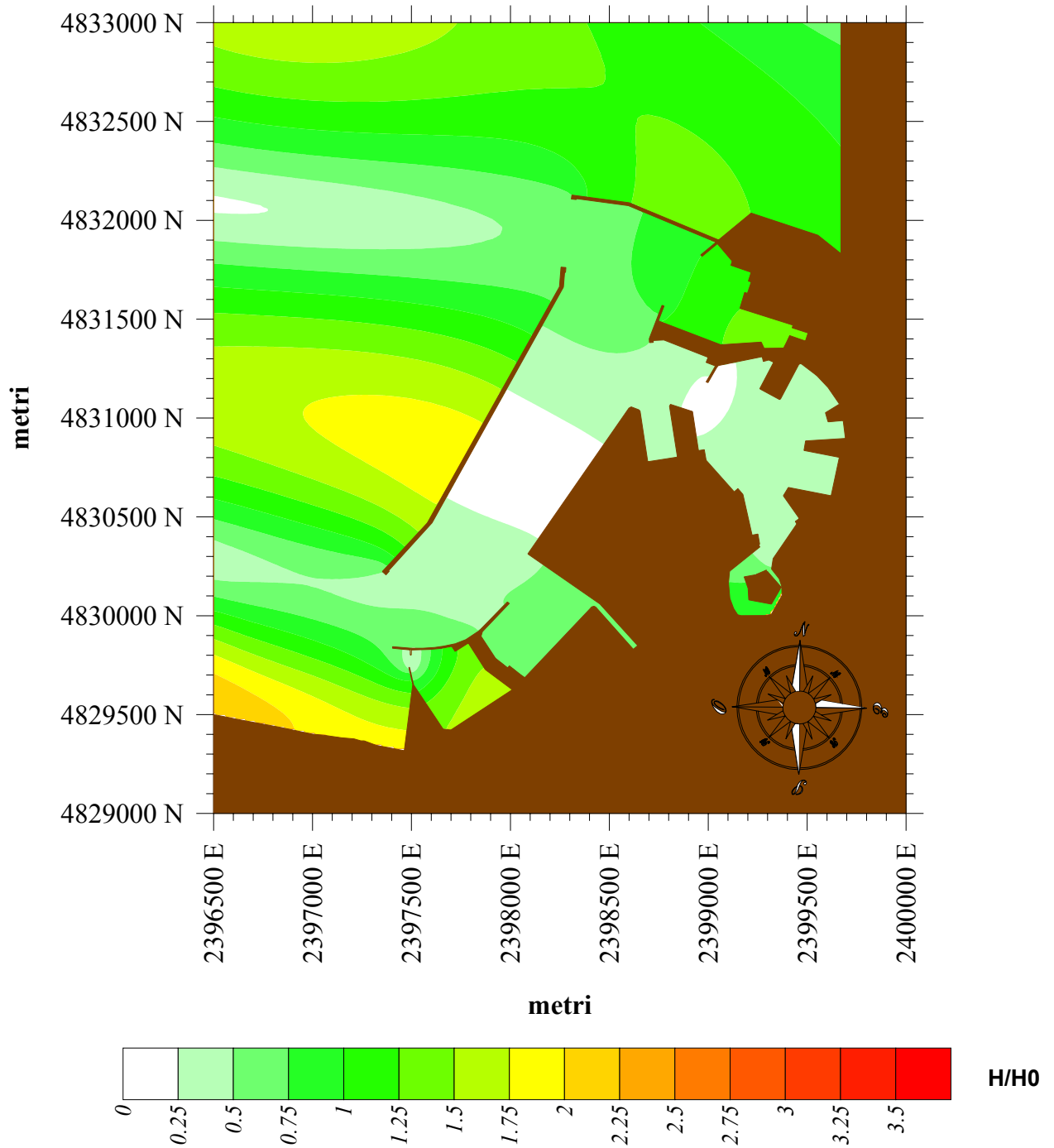
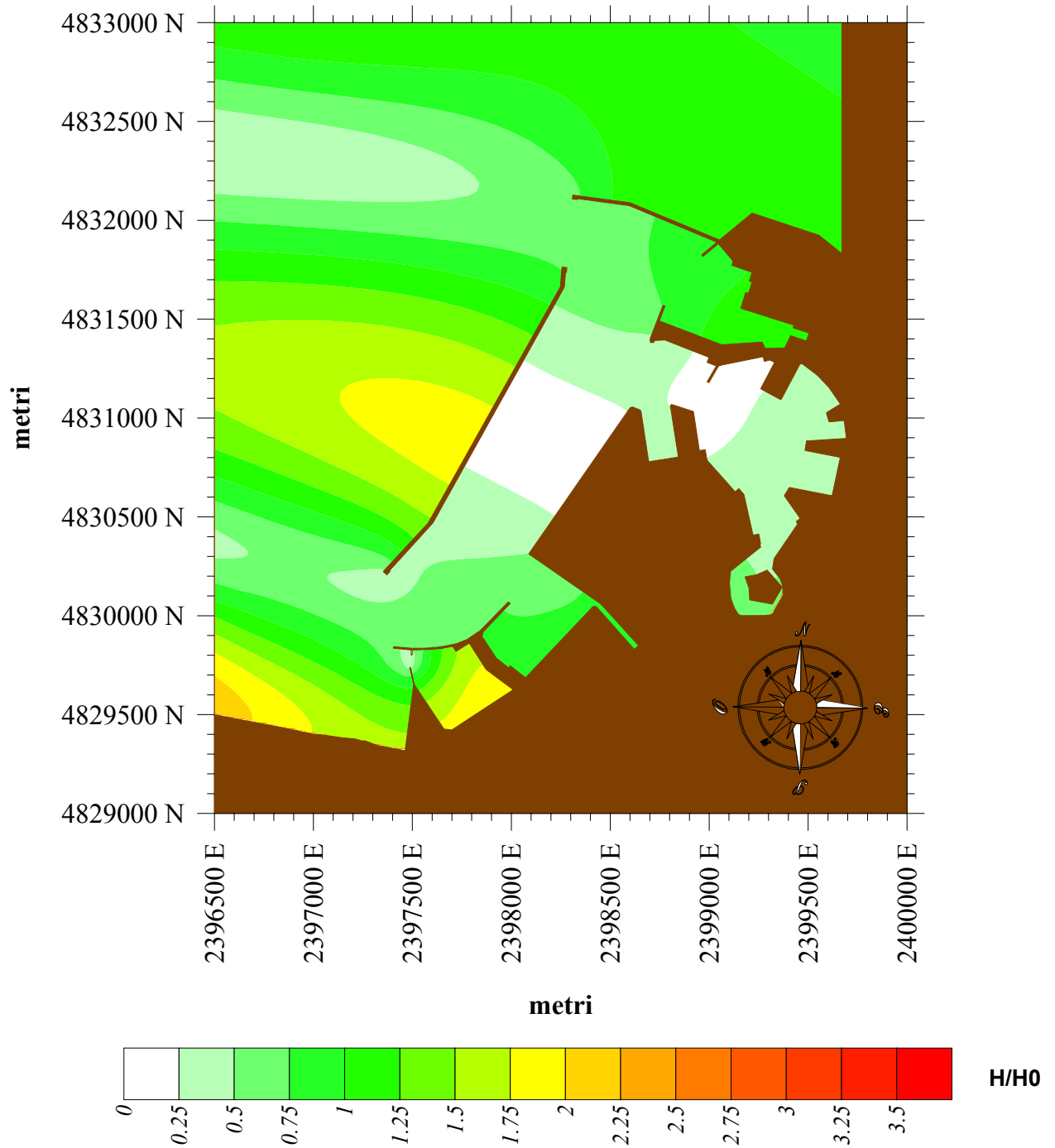


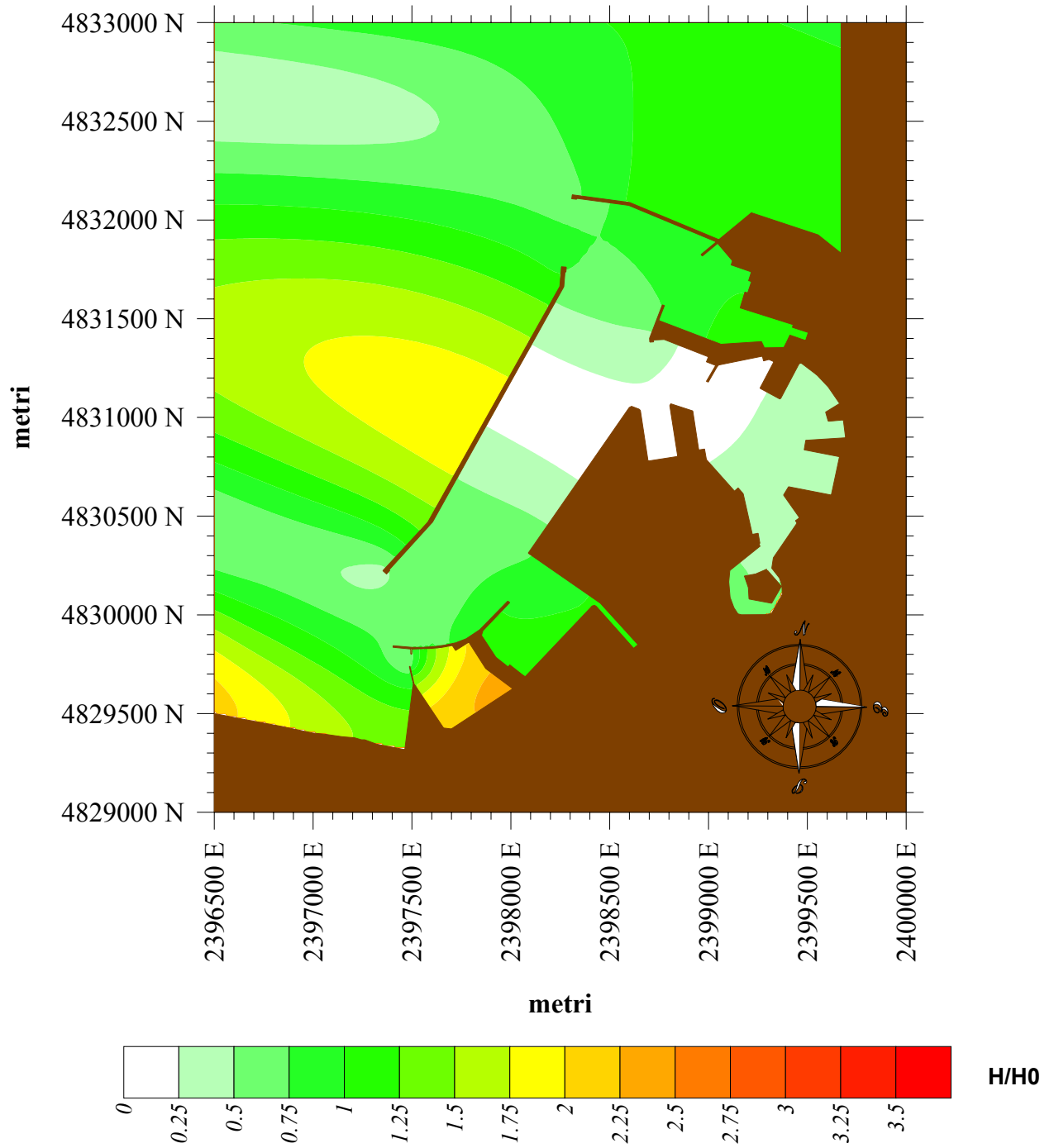
Figura 23 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 360 secondi



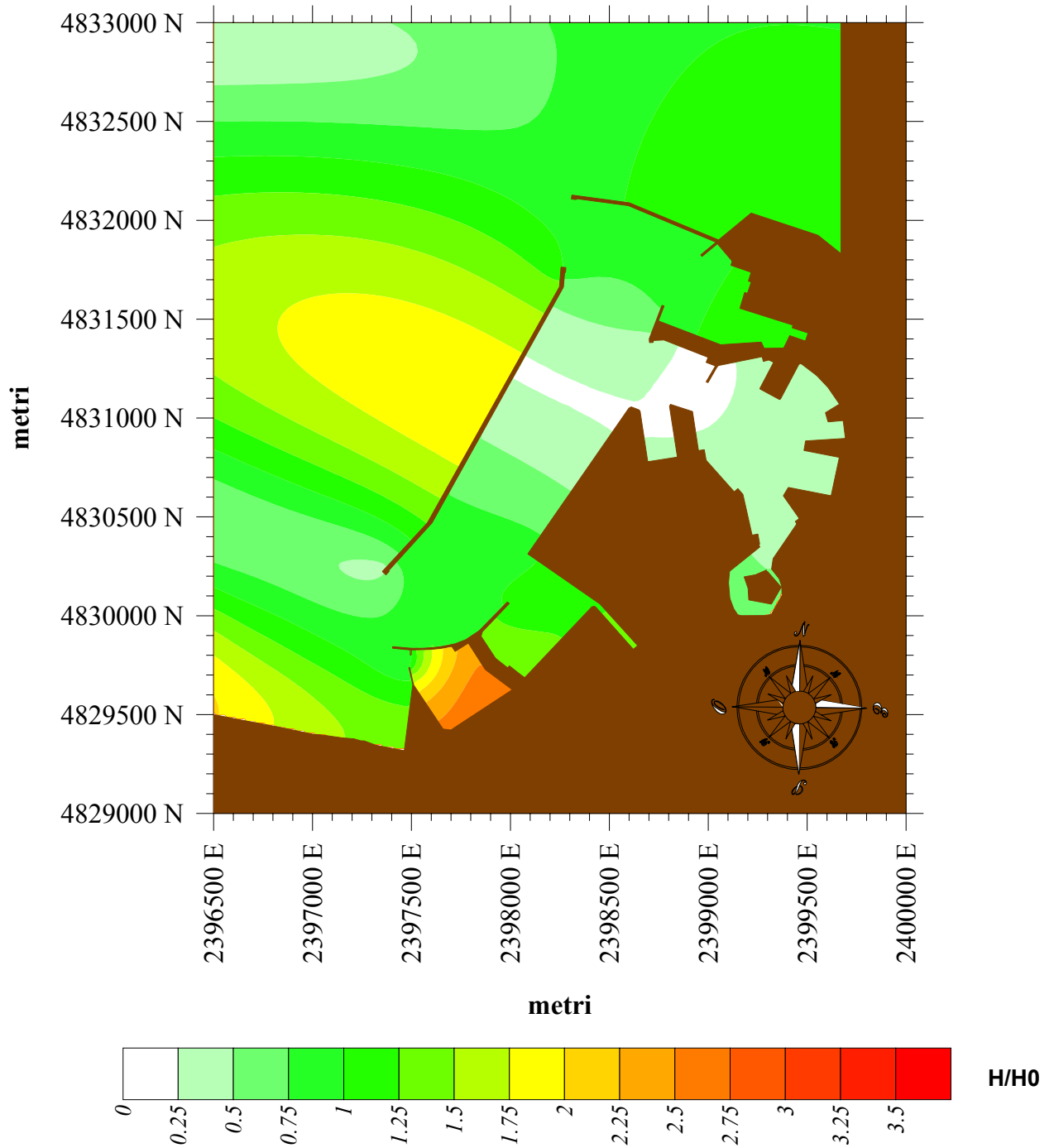
**Figura 24** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 390 secondi



**Figura 25** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 420 secondi

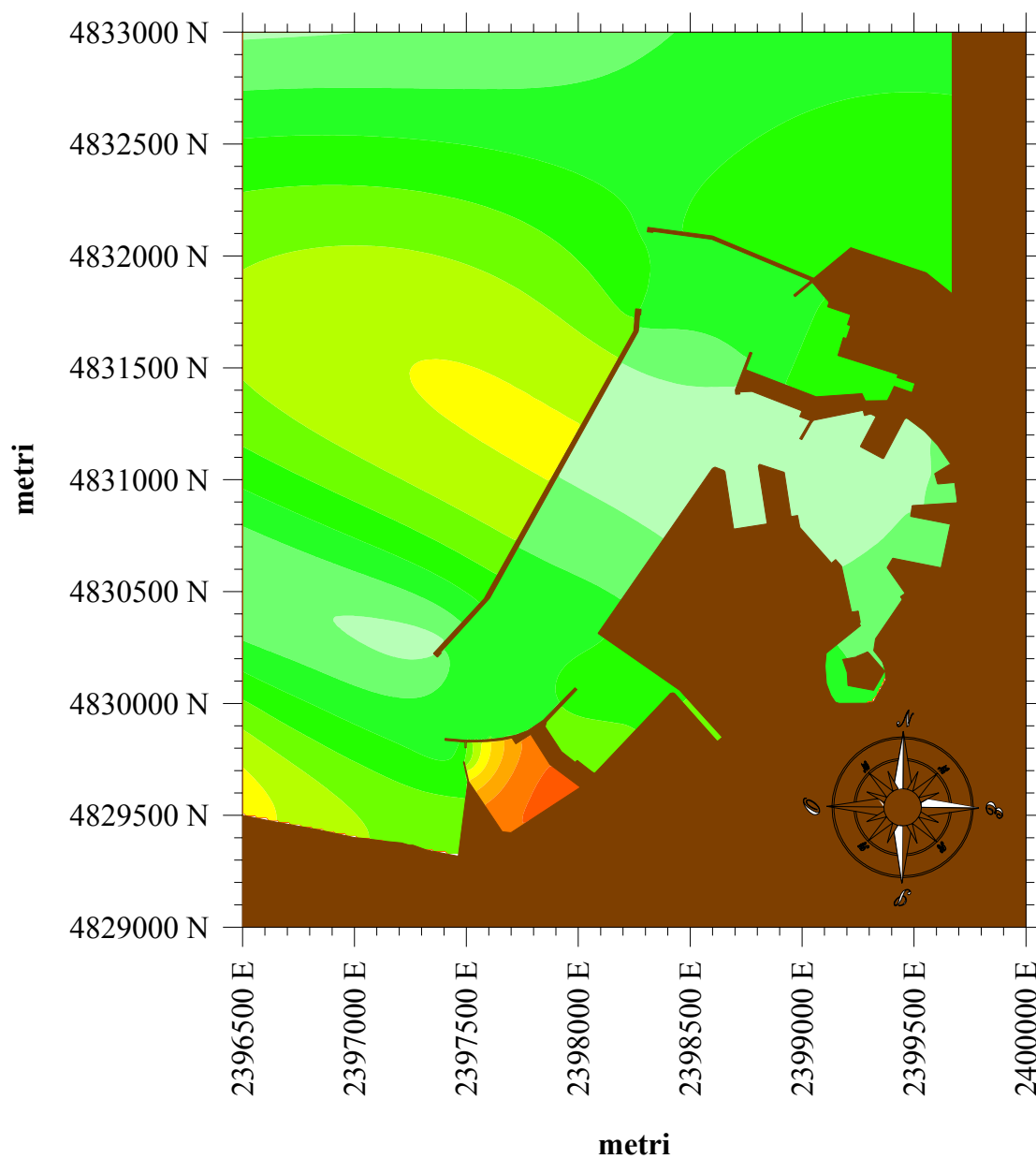


**Figura 26** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 450 secondi

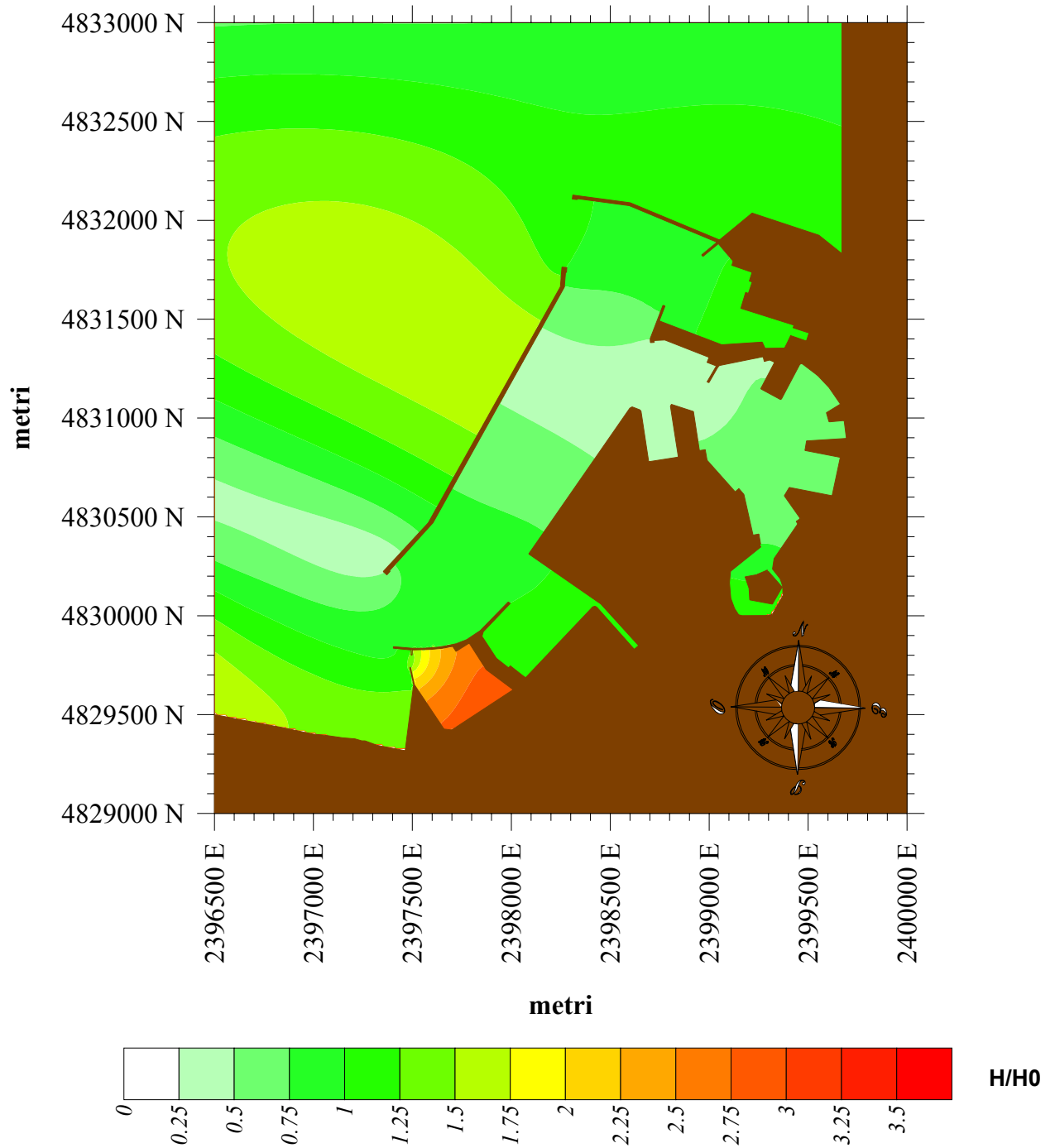


**Figura 27** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 480 secondi

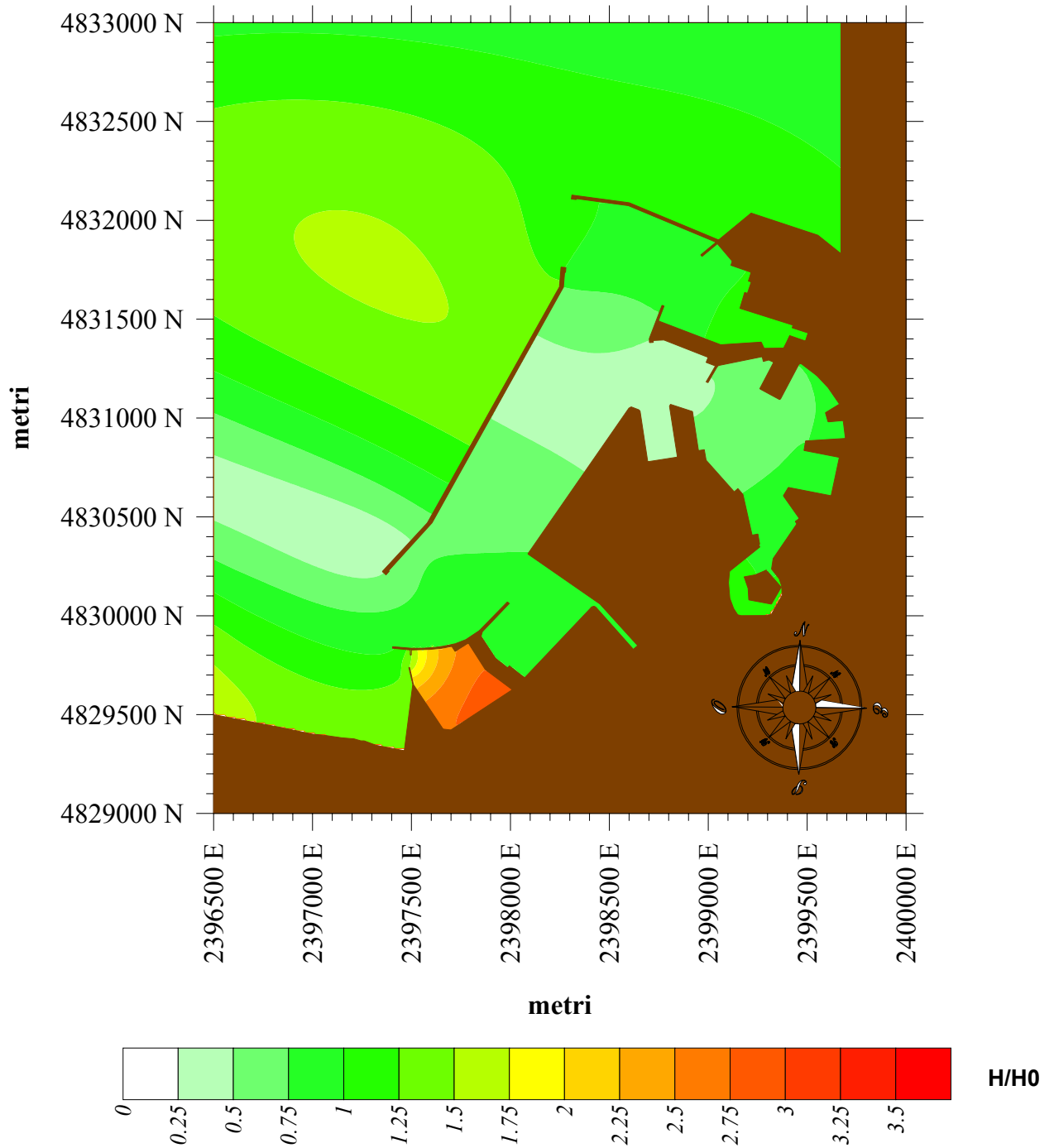


H/H<sub>0</sub>

**Figura 28** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 510 secondi



**Figura 29** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 540 secondi



**Figura 30** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 570 secondi

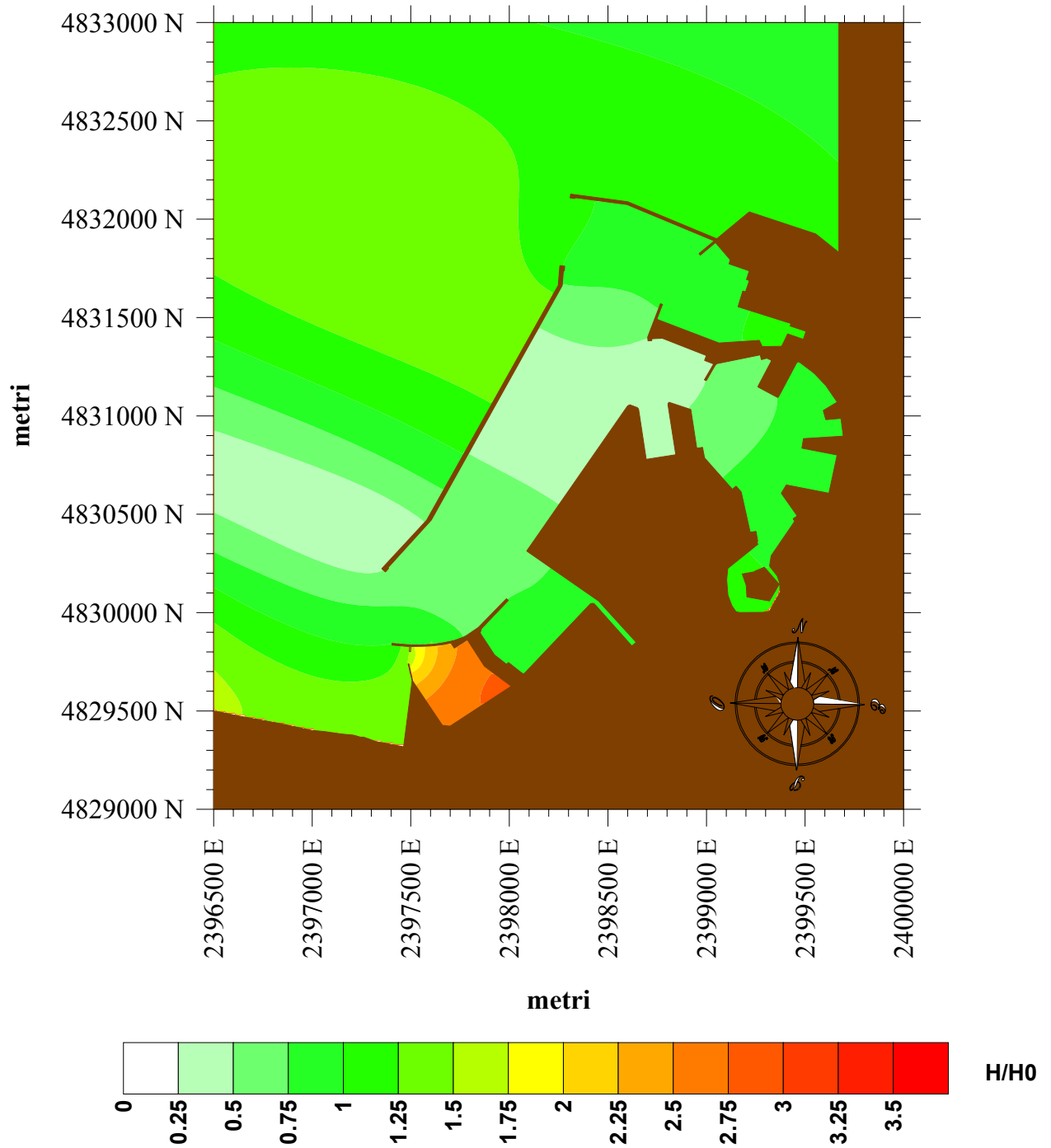
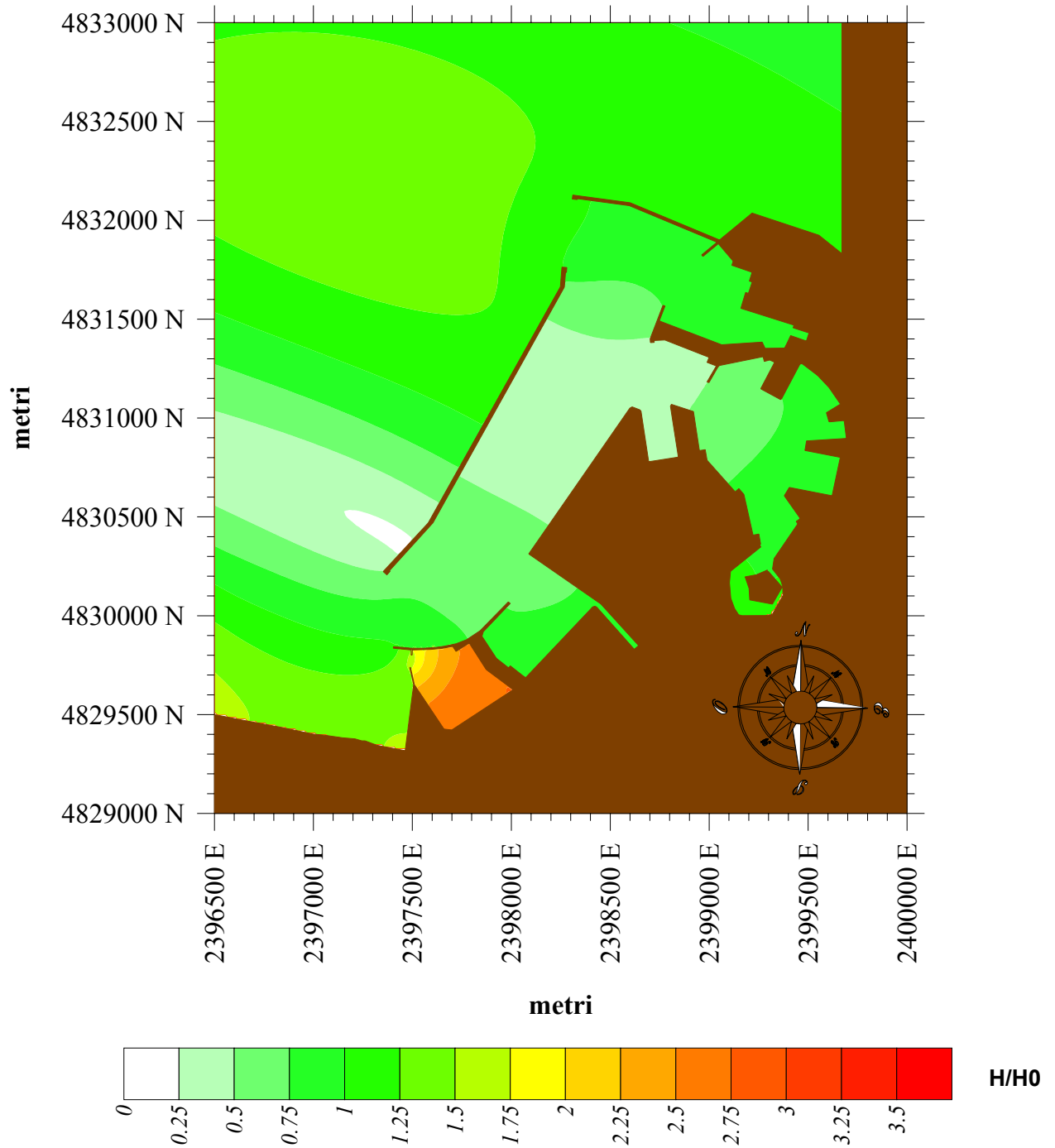
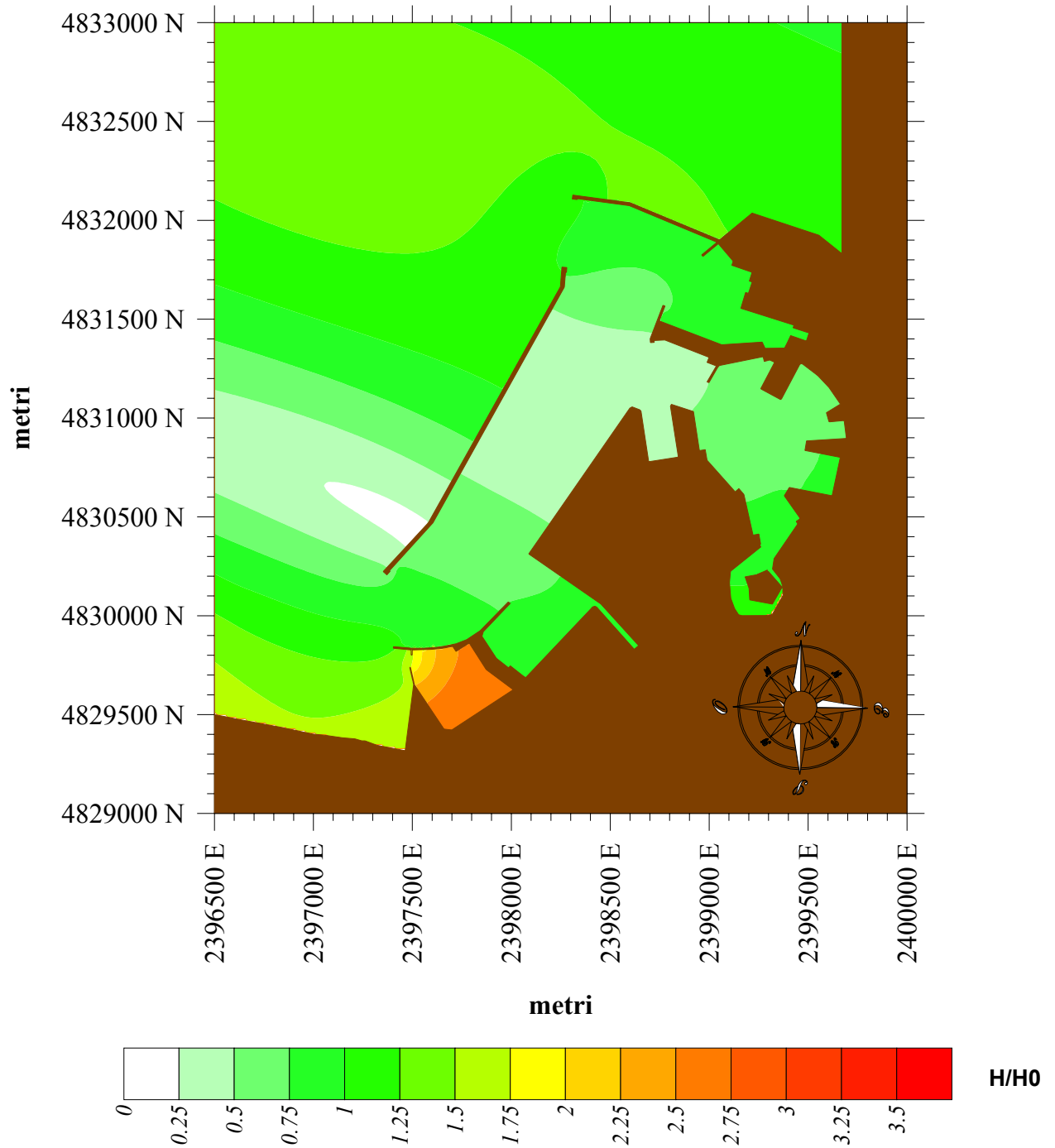


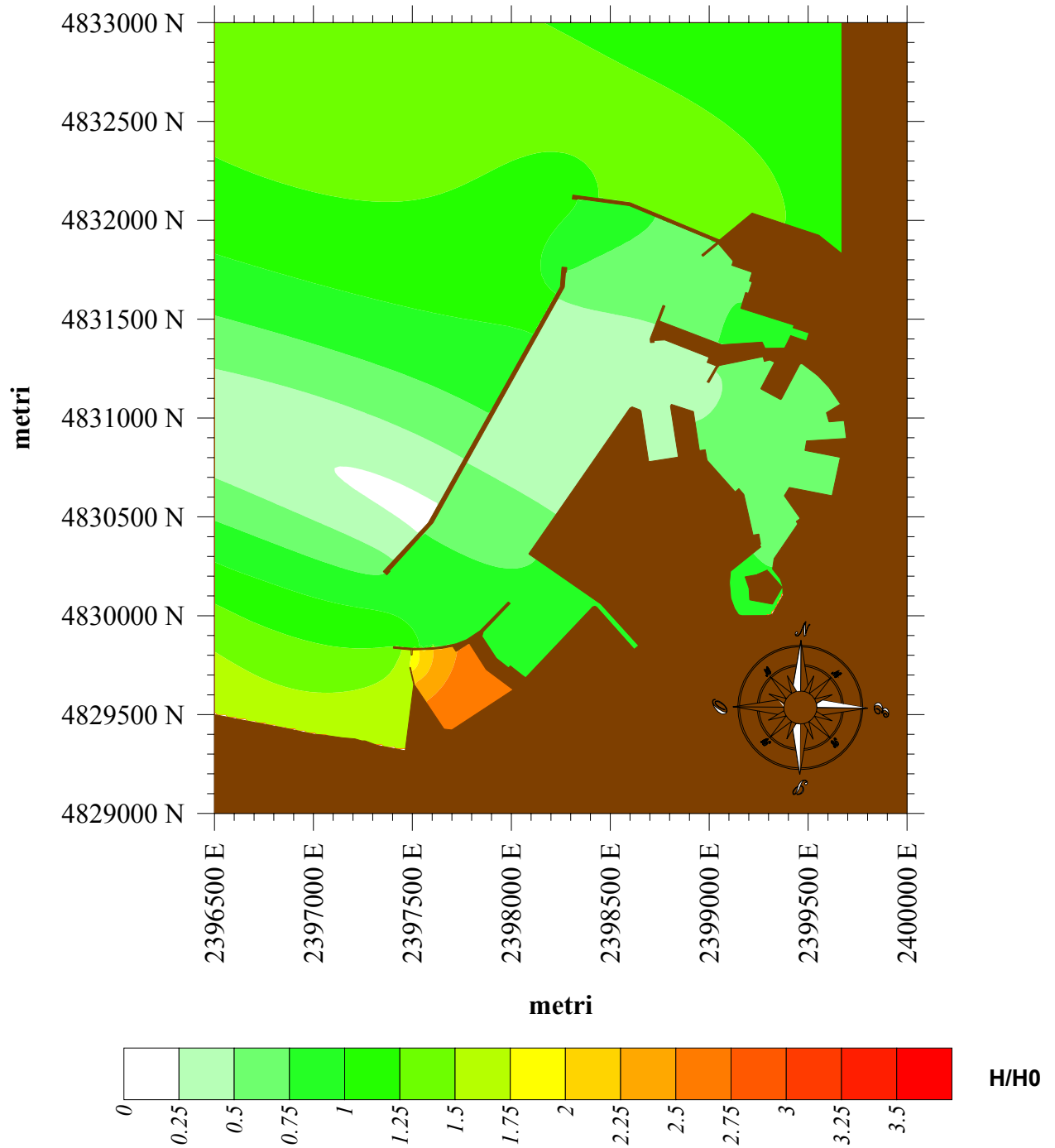
Figura 31 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 600 secondi



**Figura 32** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 630 secondi



**Figura 33** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 660 secondi



**Figura 34** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 690 secondi

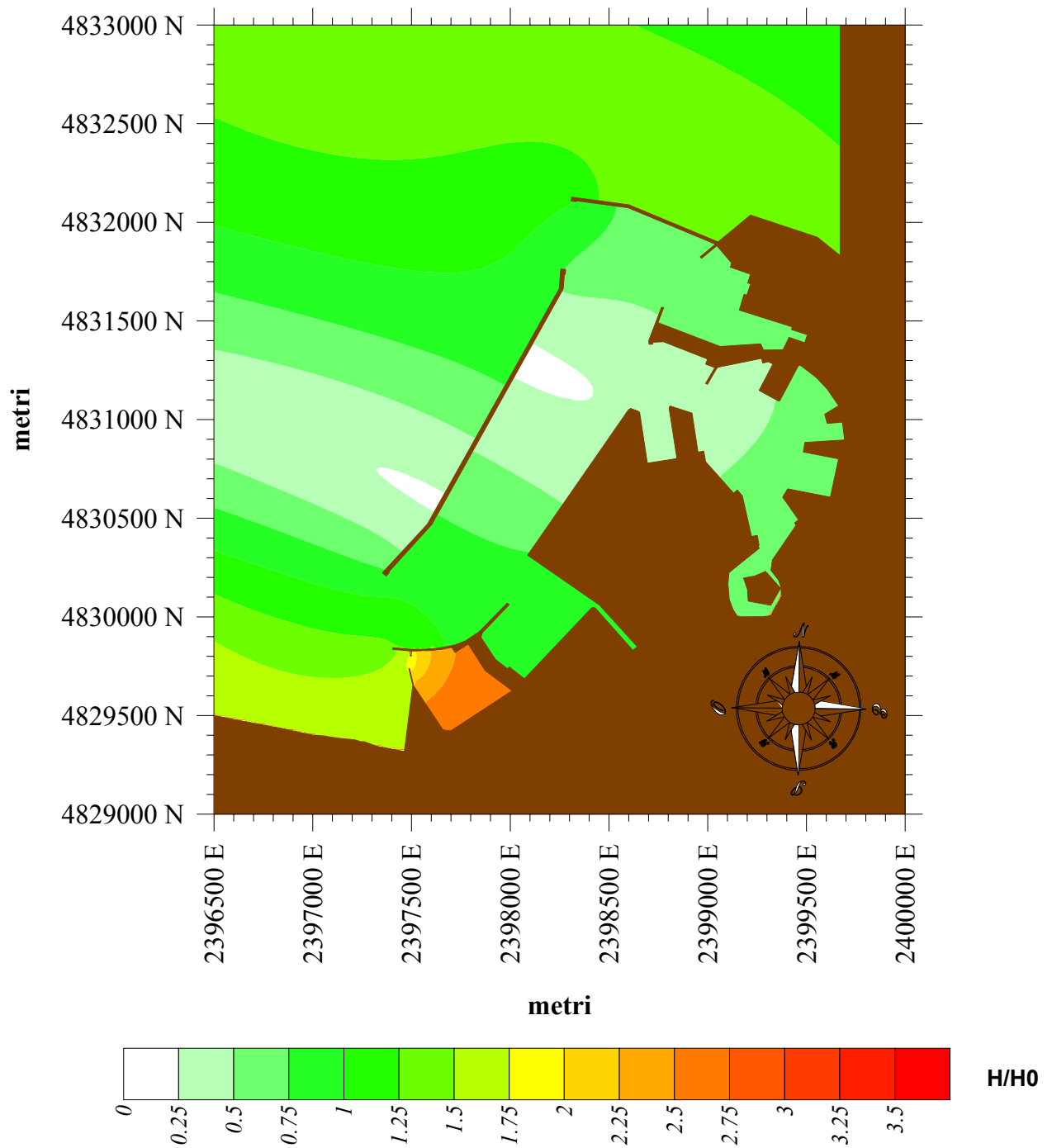


Figura 35 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 720 secondi



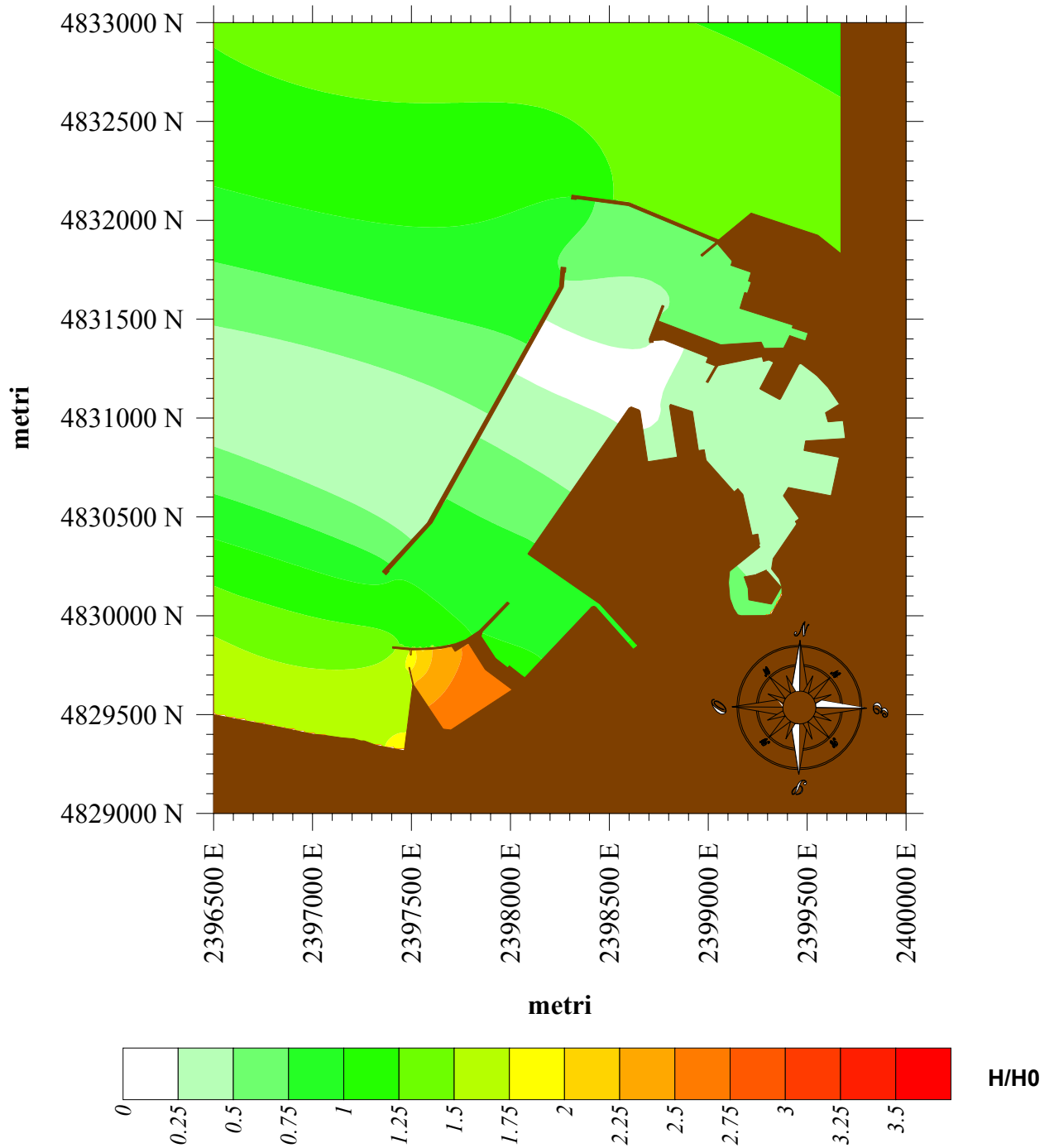


Figura 36 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 750 secondi

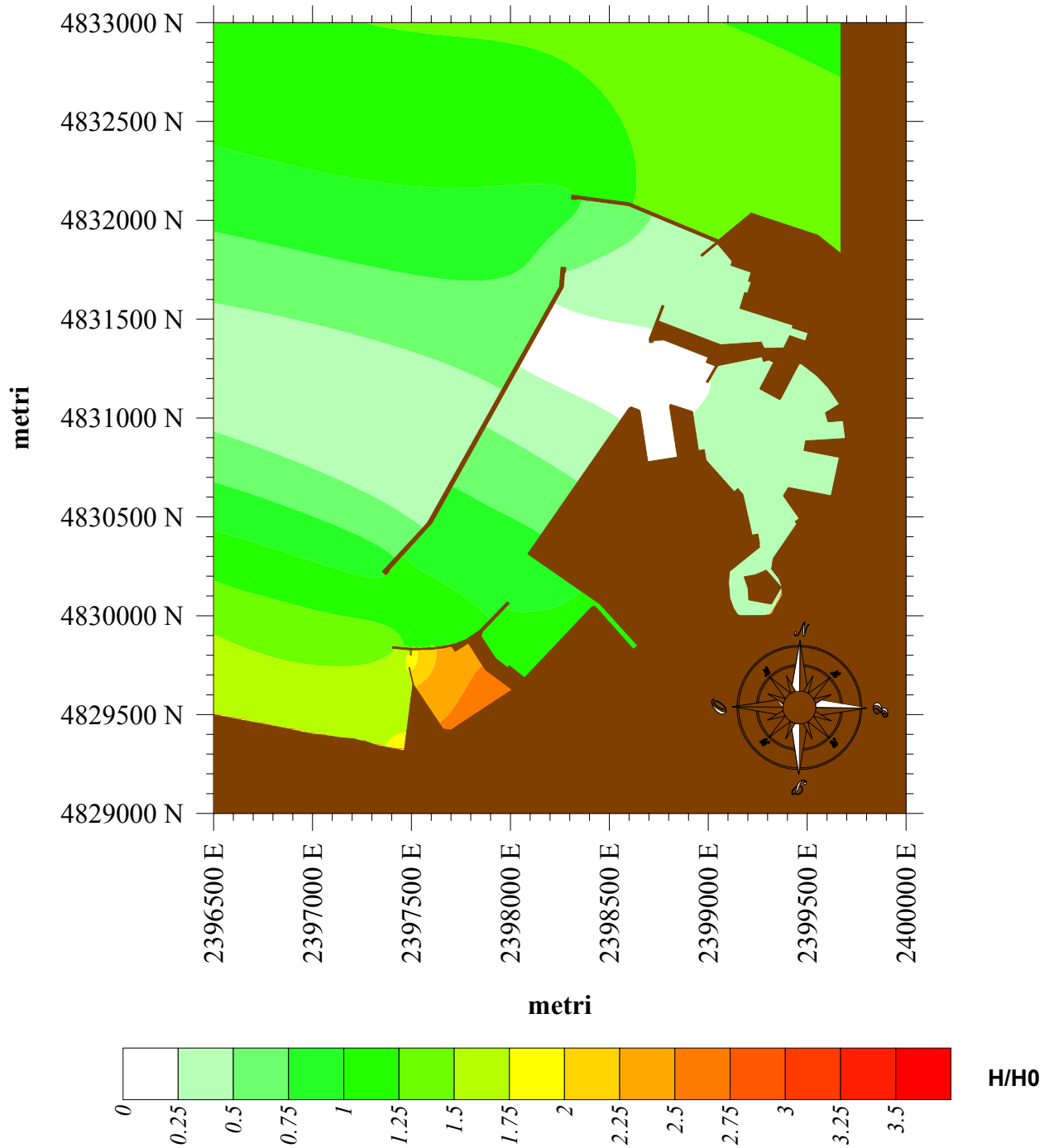
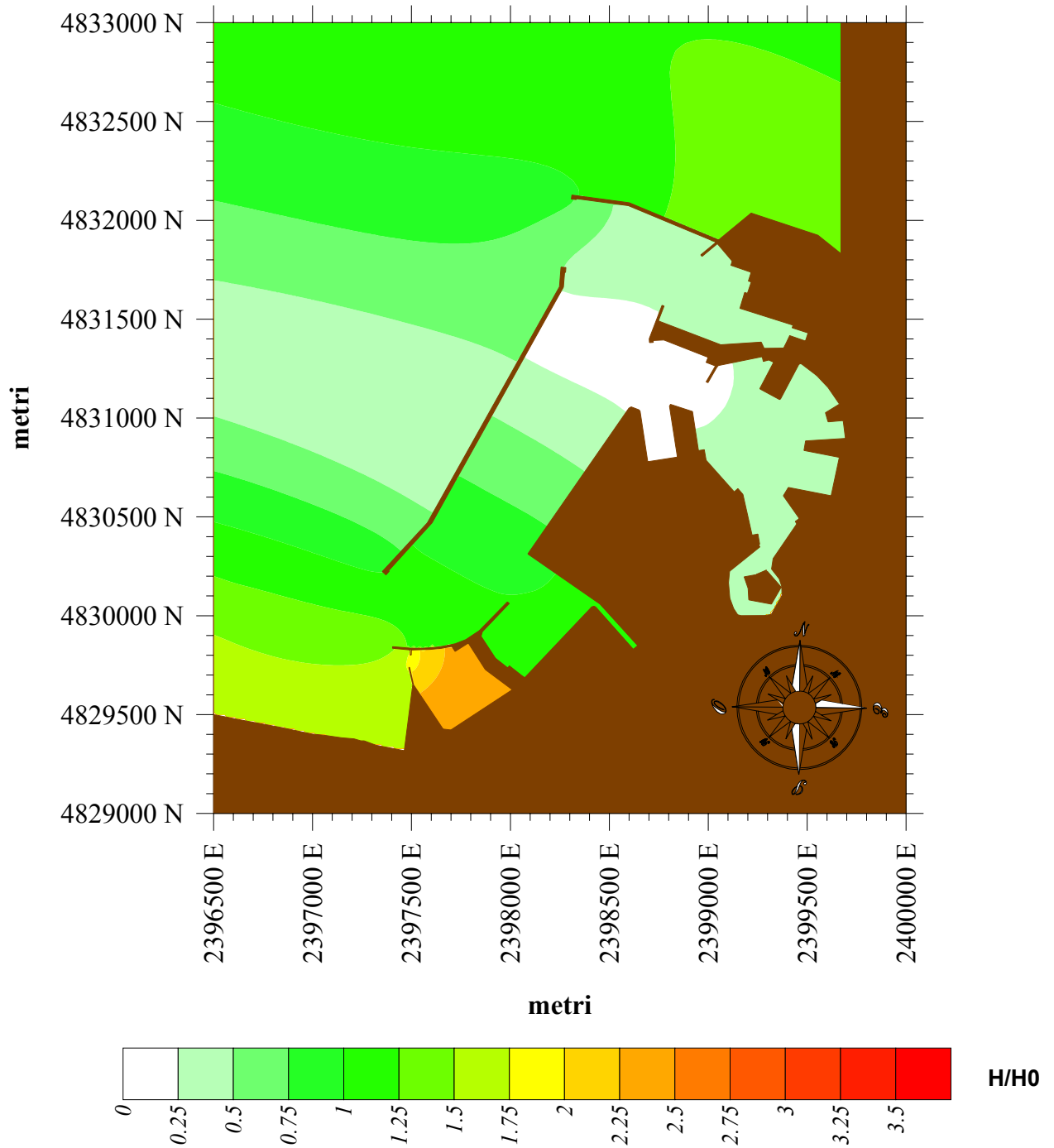
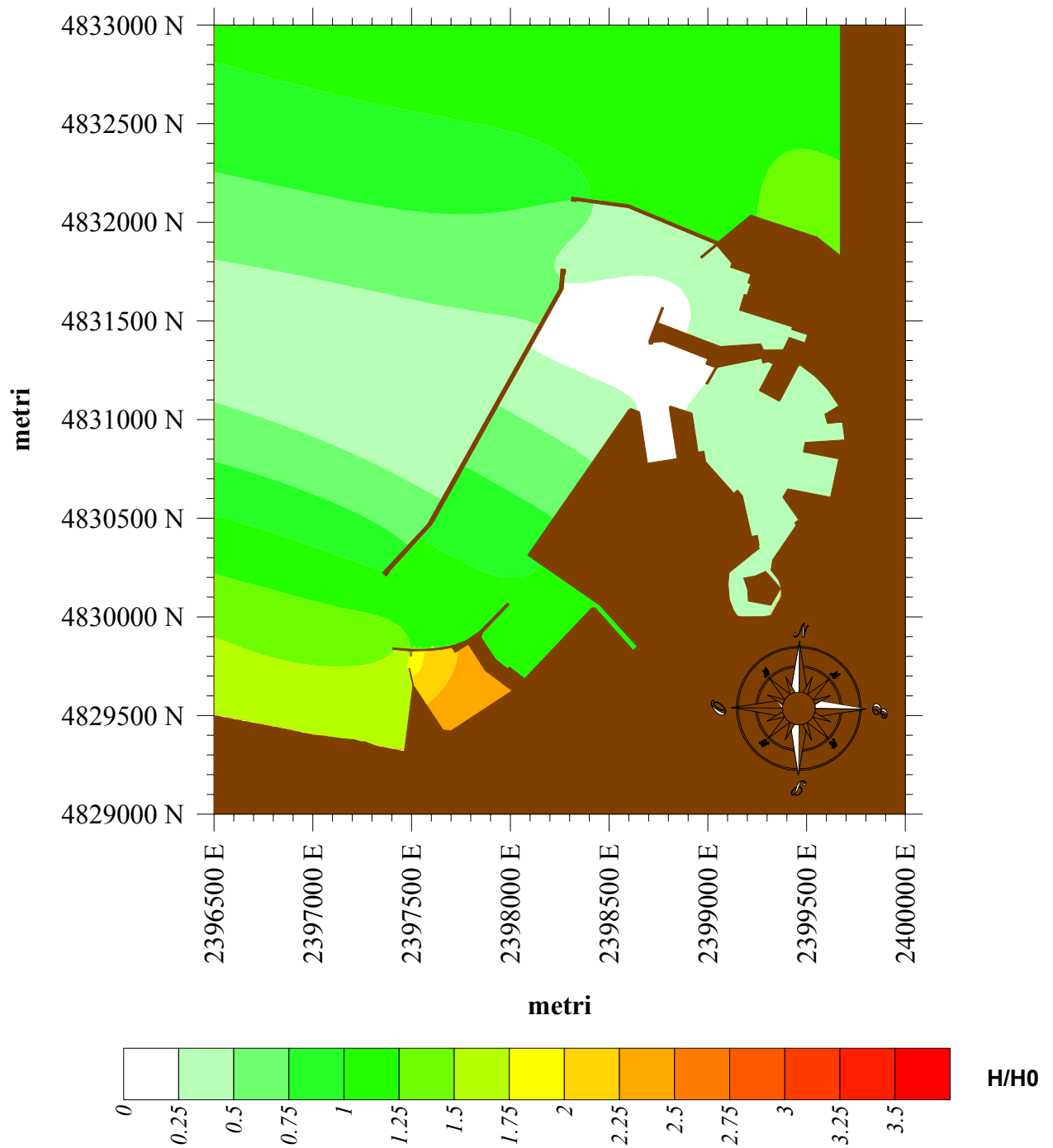


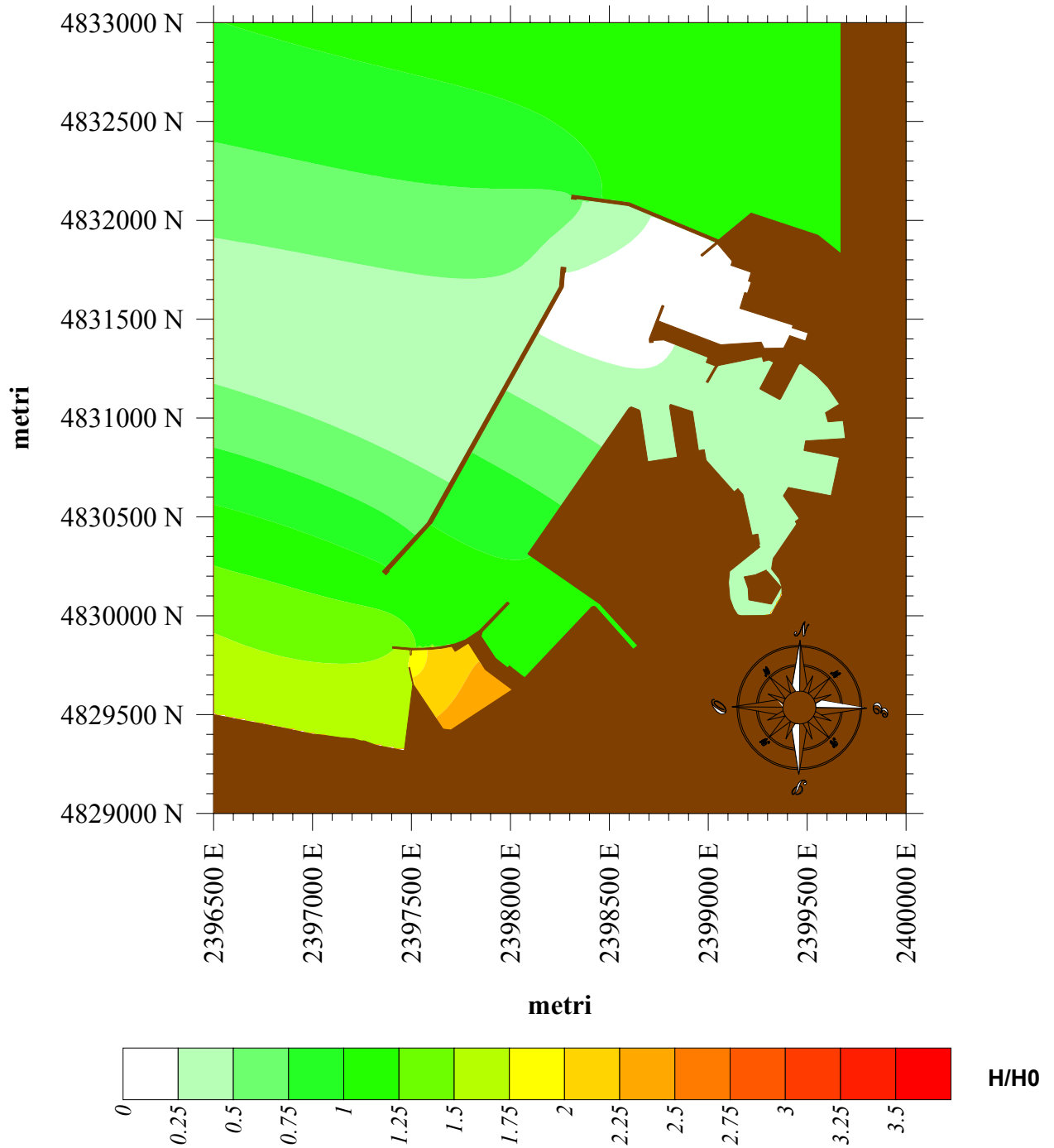
Figura 37 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 780 secondi



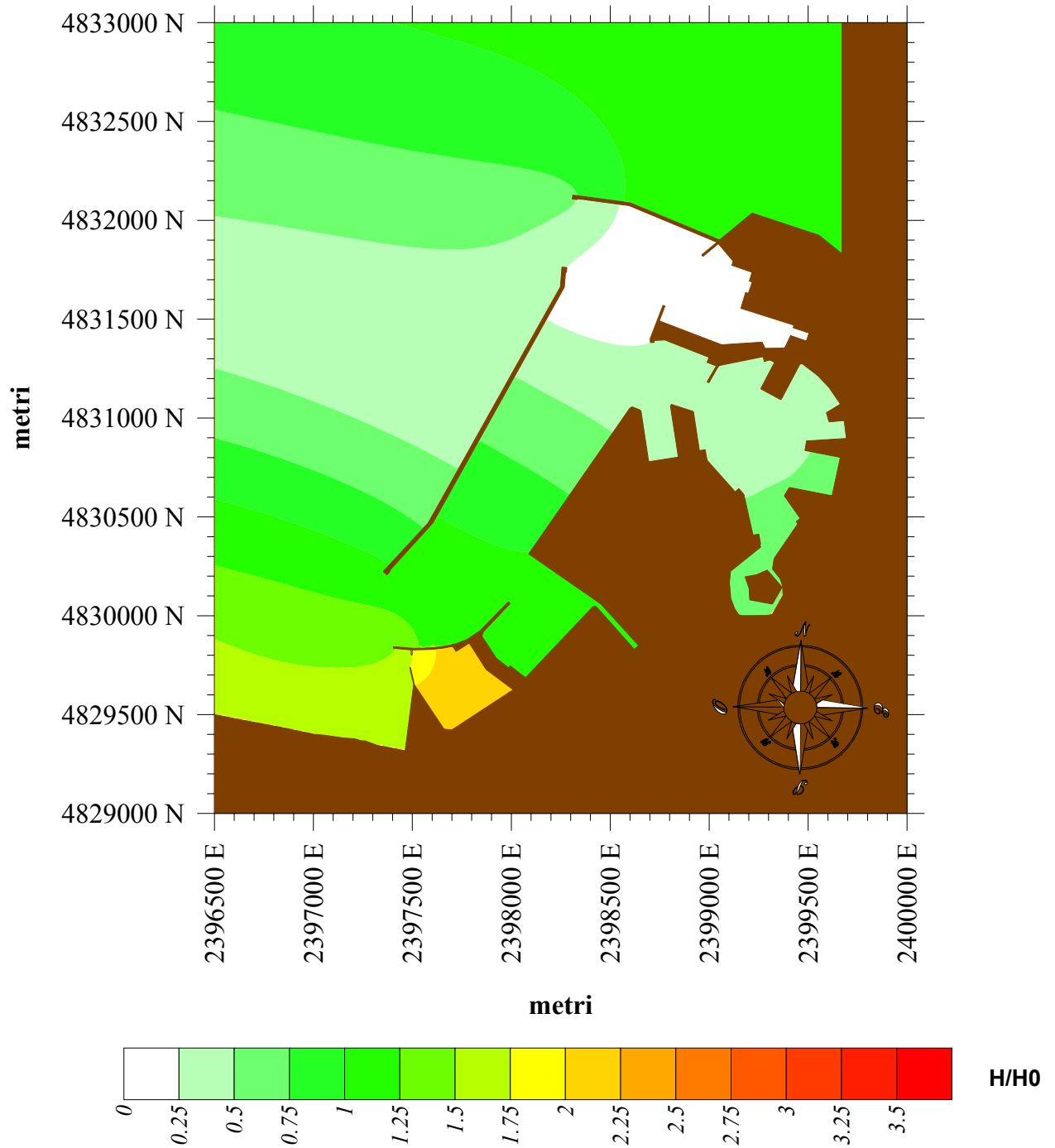
**Figura 38** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 810 secondi



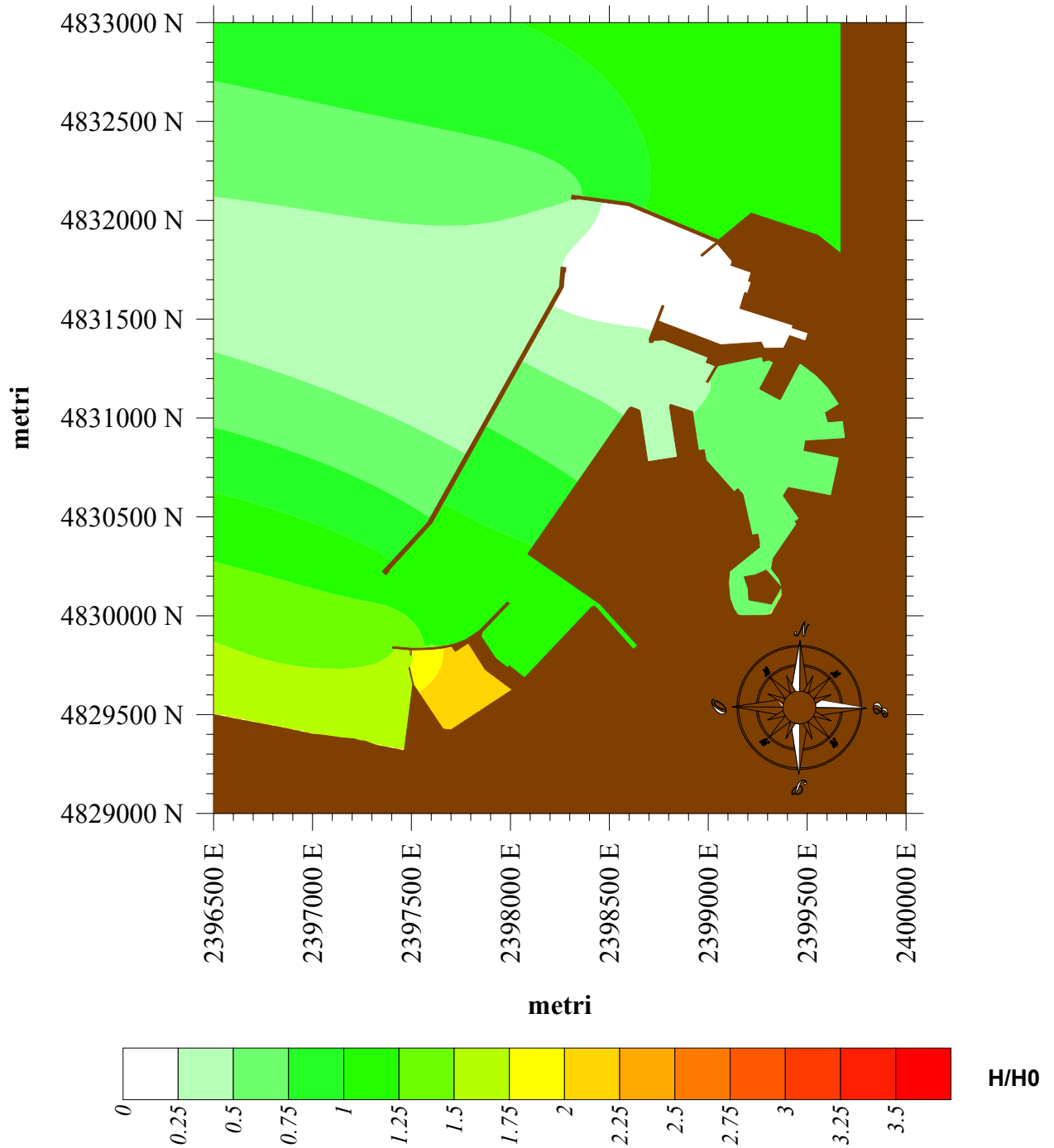
**Figura 39** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 840 secondi



**Figura 40** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 870 secondi



**Figura 41** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 900 secondi



**Figura 42** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 930 secondi

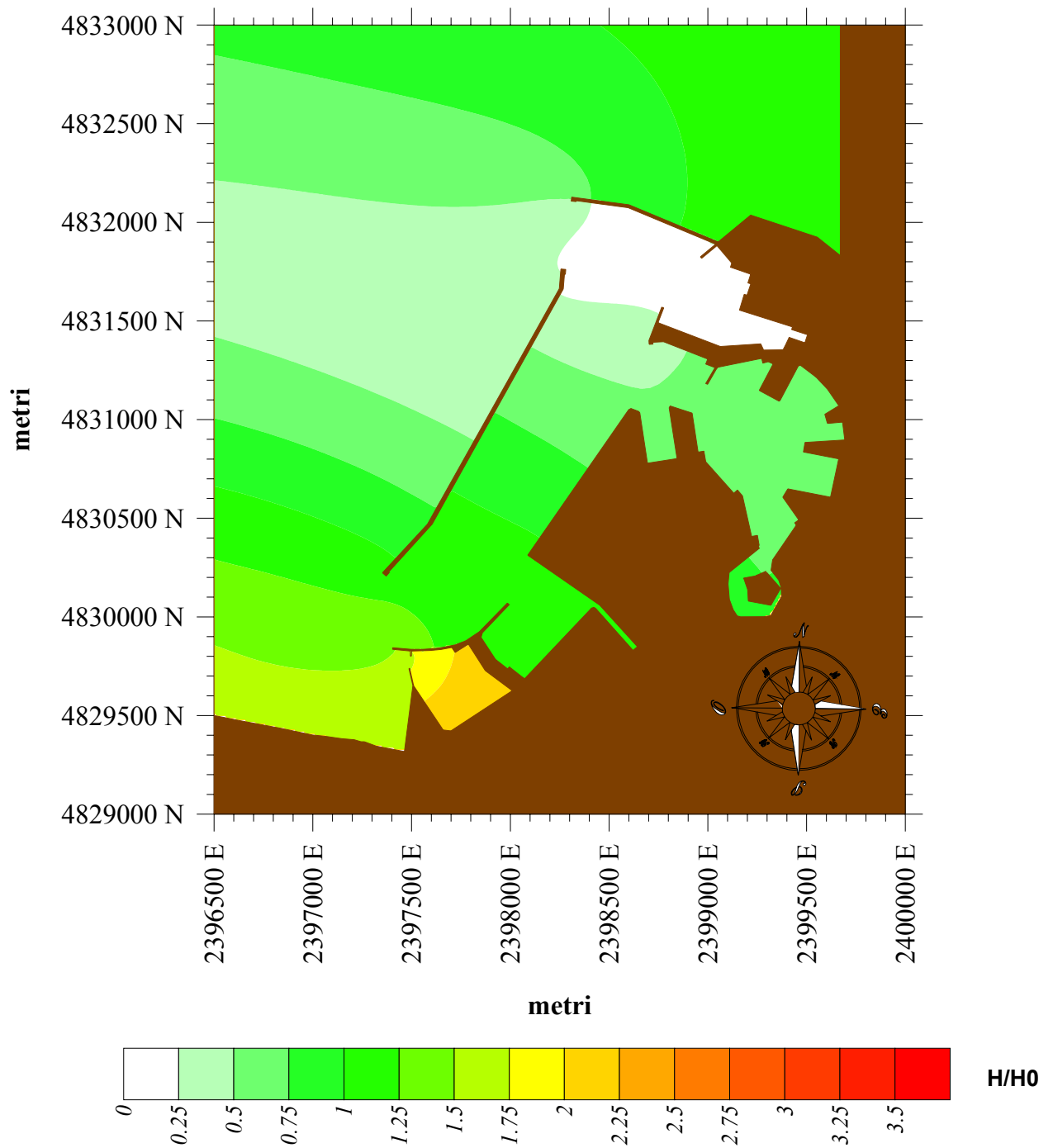
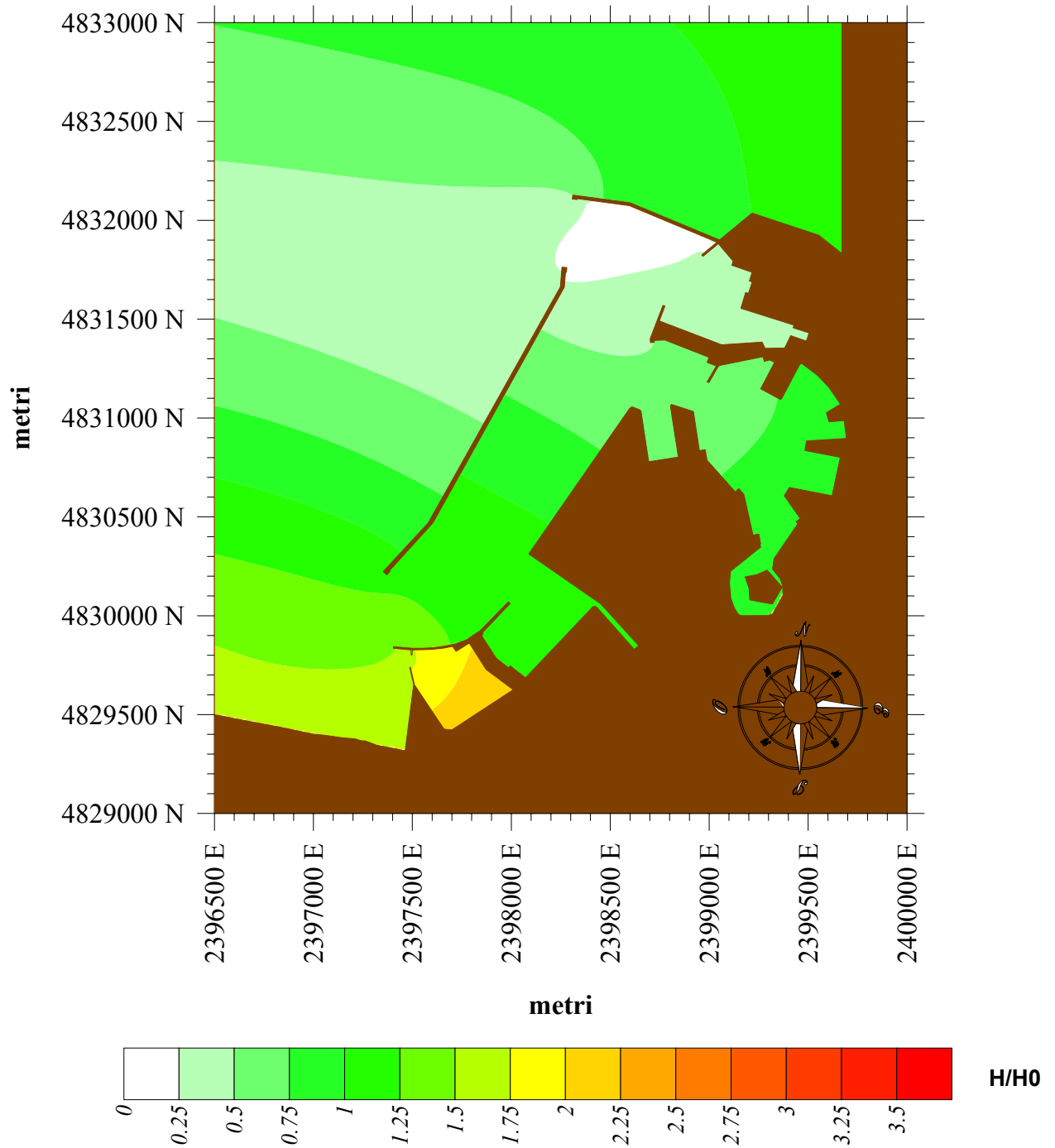


Figura 43 Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 960 secondi





**Figura 44** Campo d'onda normalizzato relativo ad un periodo di 990 secondi

## 4 Conclusioni

Il presente studio per la verifica delle caratteristiche dell'agitazione residua lungo le strutture portuali del bacino storico del porto di Ancona modificate secondo la variante al Piano Regolatore Portuale di Ancona evidenzia, in generale, condizioni di agitazione interna nel porto non critiche, in quanto la forzante ondosa nel bacino storico viene abbattuta dalla presenza delle realizzande opere foranee. I valori delle altezze d'onda medie per le aree d'ormeggio considerate risultano più alti in corrispondenza delle banchine prossime alla Nuova Darsena (banchine 20-21-22 e banchina Molo Nord) e lungo la banchina 15: in tali casi i livelli di agitazione interna presentano valori piuttosto elevati per condizioni d'onda incidente corrispondenti ad una frequenza d'accadimento inferiore al 3‰; tuttavia prendendo in considerazione eventi con frequenze di accadimento più alte, i valori di agitazione interna per le sopra menzionate banchine riducono a livelli compatibili con ormeggi in condizioni di sicurezza.

A differenza degli ormeggi del porto storico la Nuova Darsena risulta maggiormente esposta alla propagazione del moto ondoso e meno protetta dalle realizzande opere foranee: infatti, per lo stato di mare preso in considerazione, all'interno della darsena si ha la formazione di un campo di moto ondoso stazionario con ventri di altezza prossima ai 3 m.

Soddisfacente, infine, risulta la risposta del bacino storico rispetto alle forzanti di lungo periodo, in quanto i coefficienti di amplificazione relativi ai diversi ormeggi presentano valori tutti inferiori all'unità in condizioni di assenza di attrito di fondo.

## 5 Appendice 2 – modello numerico NEWAVE

Una vasta categoria di problemi, legata alla progettazione di opere marittime, richiede la conoscenza del campo d'onda in prossimità della costa. Tra di essi si possono ricordare la definizione delle azioni sulle strutture, il calcolo dell'agitazione all'interno dei bacini portuali, la progettazione dei canali d'accesso ai porti.

I primi modelli usati per studiare la propagazione delle onde marine sono stati basati sulla teoria dei raggi o approssimazione dell'ottica geometrica. Nonostante l'introduzione in tali modelli della possibilità di simulare effetti di riflessione e diffrazione dovuta a strutture emergenti e di superare, con opportuni artifici il problema delle caustiche generate da topografia convessa, la loro applicabilità rimane limitata a regioni costiere con batimetrie regolari e comunque ove gli effetti di diffrazione e riflessione dovuti al fondale siano trascurabili.

Un importante contributo per la risoluzione di questi problemi si è avuto con la formulazione, da parte di Berkhoff (1972, 1976), di una equazione bidimensionale, basata sulla teoria irrotazionale lineare, nella quale è possibile tener conto degli effetti combinati di rifrazione, diffrazione e riflessione dovuti sia alle variazioni di fondale che alla presenza di strutture emergenti. L'equazione, denominata mild slope, è di tipo ellittico e permette lo studio di onde periodiche lineari.

### 5.1 Modello agli elementi finiti

NEWAVE è un programma rientrante nella famiglia di modelli che adottano la time independent mild slope equation – di forma ellittica – per lo studio di propagazione del moto ondoso. Tale modello è stato implementato usando la tecnica degli elementi finiti.

La succitata equazione di “mild slope”, nella sua forma ellittica indipendente dal tempo può essere esplicitata come segue:

$$\nabla(c c_g \nabla \varphi) + \omega^2 \frac{c_g}{c} \varphi = \psi \quad (6.1.1)$$

dove  $c$  e  $c_g$  sono rispettivamente la celerità di fase e la celerità di gruppo,  $\varphi$  il potenziale delle velocità complesso, e  $\omega$  la pulsazione e  $\psi$  il termine per la generazione dell'onda all'interno del dominio di calcolo. Tale termine può essere esplicitato nella seguente forma:

$$\psi = 2 c_g i \omega \tilde{\varphi} \delta(x) \quad (6.1.2)$$

dove  $\delta(x)$  è la funzione di Green e  $\varphi$  il potenziale imposto sulla linea di generazione

È possibile inoltre introdurre fenomeni dissipativi, quali il frangimento e l'attrito di fondo, tramite la seguente iterazione della mild slope equation:

$$\nabla(cc_g \nabla \varphi) + \omega^2 \frac{c_g}{c} \left(1 + i \frac{f}{k}\right) \varphi = \psi \quad (13.1.3)$$

ove  $f$  è il termine dissipativo che viene aggiornato ad ogni iterazione, calcolato in base alla probabilità che l'onda ha, localmente, di frangere.

## 5.2 Espressione della mild slope equation tramite l'equazione dell'iconale e dell'energia (o del trasporto)

La modalità secondo la quale la mild slope equation esprime sia i fenomeni di trasformazione legati al fondale e alle strutture esterne, sia i fenomeni dissipativi può essere espressa tramite le due seguenti forme:

$$(\nabla S)^2 = k^2 + \frac{\nabla^2 a}{a} + \frac{\nabla(cc_g)}{cc_g} \frac{\nabla a}{a} \quad (6.2.1)$$

$$\nabla(cc_g a^2 \nabla S) = -f c_g \omega a^2 \quad (6.2.2)$$

La prima equazione, detta dell'iconale, esprime la dipendenza della funzione di fase  $S$  (e quindi della direzione dell'onda) dalle variazioni del fondale (termine  $k^2$ , essendo  $k$  il numero d'onda correlato con il tirante idrico locale tramite la relazione di dispersione  $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ ), dalla diffrazione dovuta a strutture emergenti (termine  $\nabla^2 a/a$ ) e dalla diffrazione dovuta al fondale (termine  $\nabla(cc_g)/cc_g \times \nabla^2 a/a$ ). La seconda equazione, detta dell'energia o del trasporto, esprime la conservazione nello spazio dell'energia. Nel caso in cui il termine a secondo membro di tale equazione si presenti diverso da zero, c'è la possibilità di esprimere sia termini dissipativi (attrito e frangimento) che termini generativi. Essendo, infatti, la divergenza del trasporto non nulla, il flusso di energia attraverso due sezioni contigue non risulta più invariante.

## 5.3 Formulazione variazionale per la definizione del modello agli elementi finiti

Al fine di implementare il modello in termini di elementi finiti, è necessario reimpostare la problematica espressa dall'equazione di mild slope in termini di minimo dell'energia potenziale. Tramite la formulazione variazionale debole (Reddy, 1985), si giunge alla definizione della seguente forma:

$$\iint_{\Omega} \left[ cc_g (\nabla \varphi)^2 - \omega^2 \frac{c_g}{c} \left(1 + \frac{f}{k}\right) \varphi^2 + 2\varphi c_g i\omega \tilde{\varphi} \delta(x) \right] d\Omega + \int_{\partial\Omega_R} cc_g b \varphi^2 d(\partial\Omega_R) = 0 \quad (6.3.1)$$

essendo  $\Omega$  il dominio e  $\partial\Omega$  la frontiera dello stesso. Tale formulazione permette di costruire la matrice del sistema risolvete ed il vettore dei termini noti.

#### 5.4 Condizioni al contorno

Il modello presentato richiede che il dominio di calcolo sia circondato da contorni riflettenti o assorbenti. L'imposizione di tale condizione richiede che sia rispettato il seguente vincolo sui contorni:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} + b \varphi = 0 \quad (6.4.1)$$

essendo  $n$  il versore normale al contorno e  $b = b_1 + ib_2$  il coefficiente di riflessione complesso i cui termini, assumendo che non ci sia differenza di fase onda incidente e onda riflessa, possono essere espressi come segue:

$$b_1 = 0 \quad (6.4.2)$$

$$b_2 = -k \cos(\delta) \frac{1-R}{1+R} \quad (6.4.3)$$

essendo  $R$  il coefficiente di riflessione reale (della struttura, della costa o del contorno aperto) e  $\delta$  l'angolo formato dalla normale del contorno nel punto di calcolo e la direzione dell'onda incidente.

Nel caso di totale riflessione la suddetta condizione al contorno assume la forma canonica:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (6.4.4)$$

Per la valutazione della direzione dell'onda si procede ad un calcolo iterativo si alla convergenza dei valori dell'altezza d'onda usando la relazione proposta da *Beltrami et al.* (2001) nel caso di totale assorbimento, mentre viene adottata la relazione proposta da *Steward e Panchang* (2001) per coefficienti di riflessione reale  $0 < R < 1$ . Si ha perciò:

$$\delta = \arctan \frac{\frac{\partial S}{\partial y}}{\frac{\partial S}{\partial x}} \quad (6.4.5)$$

nel caso di contorno a totale assorbimento, mentre, nel caso di  $0 < R < 1$ , è necessario risolvere la seguente relazione implicita, in cui  $n$  il versore normale al contorno piano ed  $s$  il versore tangente a quest'ultimo

$$\tan \delta - \frac{\frac{1}{k} \frac{\partial \arg(\varphi)}{\partial s}}{\frac{1}{k} \frac{\partial \arg(\varphi)}{\partial n} + \frac{2R[\cos(k\beta)]}{1 + 2R \cos(k\beta) + R^2} \cos \delta} = 0 \quad (6.4.6)$$

## 5.5 Bibliografia

1. Beltrami, G.M. – Bellotti, G. – De Girolamo, P. – Sammarco, P. (2001)  
*Inclusion of wave breaking and total absorption in a mild slope equation FEM model*  
ASCE j. of Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng.
2. Berkhoff, J.C.W. (1972)  
*Computation of combined refraction-diffraction*  
Proc. 13th Int. Conf. Coastal Engineering, Vancouver, Canada
3. Berkhoff, J.C.W. (1976)  
*Mathematical models for simple harmonic linear water wave models; wave refraction and diffraction.*  
Ph. thesis, Delft University of technology, April
4. Chen, H.S. – Mei, C.C. (1974)  
*Oscillations and wave forces in a man made harbour in the open sea*  
Rep. 190, R.M. Parson Lab. Water Resour. And Hydr., MIT, Cambridge, Mass.
5. De Girolamo, P. (1989)  
*Modelli irrotazionali lineari: frangimento del moto ondoso e calcolo delle spinte totali*  
Tesi di dottorato, Università degli studi di Roma “La Sapienza”
6. De Girolamo, P. – Bellotti, G. – Beltrami, G. M. (2003)  
*Internal generation in 2D fully elliptic mild slope equation FEM models*  
ASCE j. of waterways, Port, Coastal and Ocean eng.
7. De Girolamo, P. – Sammarco P. (1993)  
*Analisi teorica di un modello ad elementi finiti per la risoluzione della mild slope equation con l'inclusione di un termine dissipativo*  
Atti di costruzioni marittime n. 2, DITS, Università di Roma “La Sapienza”
8. Mei, C.C. (1983)  
*The applied dynamics of ocean surface waves*  
World scientific, Singapore
9. Steward D.R. – Panchang, V.G. (2001)  
*Improved coastal boundary condition for surface water waves*  
ASCE j. of waterways, Port, Coastal and Ocean eng. N.28

# ALLEGATO 2

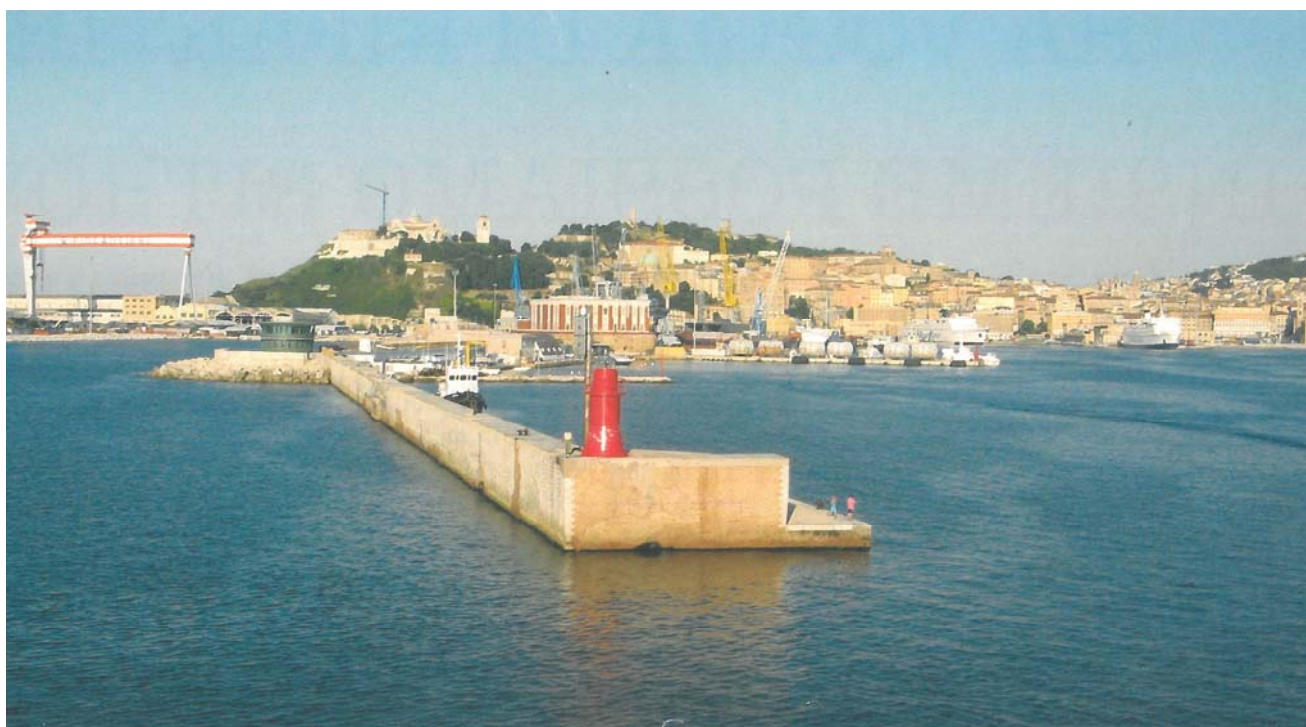


Università Politecnica delle Marche  
Facoltà di Ingegneria  
Dip.ICEA – Sez. Idraulica e Infrastrutture Viarie



Autorità Portuale  
di Ancona

# CONVENZIONE PER LO STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA INTERNA AL NUOVO PORTO DI ANCONA



## RELAZIONE

Il Commissario dell'Autorità Portuale  
RODOLFO GIAMPIERI

Il Responsabile  
Prof. Ing. ALESSANDRO MANCINELLI

Ancona, lì 12 giugno 2014



## **GRUPPO DI LAVORO**

Il gruppo di lavoro della Sezione Idraulica e infrastrutture viarie del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona per il presente studio è costituito da:

Prof. Ing. ALESSANDRO MANCINELLI

Responsabile

Dott. Ing. SARA CORVARO

Dott. Ing. CARLO LORENZONI

## Indice

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>1. SINTESI DEGLI STUDI.....</b>	<b>2</b>
<b>2. INDICAZIONI RICAVATE DALLE VERIFICHE DI NAVIGABILITÀ .....</b>	<b>4</b>
<b>3. CARATTERISTICHE METEOMARINE NEL PARAGGIO PORTUALE ANCONITANO.....</b>	<b>7</b>
3.1 Dati ondametrici registrati dal sito della R.O.N. al largo di Ancona .....	7
3.2 Regime ondoso medio al largo di Ancona .....	13
3.3 Analisi delle onde estreme.....	29
3.4 Analisi delle condizioni anemometriche del paraggio costiero anconitano .....	41
<b>4. MODELLO PER LO STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA INTERNA AL PORTO.....</b>	<b>46</b>
4.1 Codice di calcolo MIKE 21 BW .....	46
4.2 Configurazione batimetrica dei fondali.....	48
4.3 Definizione dell'area da modellare e del passo di integrazione temporale .....	51
4.4 Condizioni al contorno .....	54
4.5 Caratteristiche delle strutture portuali .....	55
4.6 Condizione iniziale.....	57
4.7 Condizioni ondose simulate.....	57
<b>5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DI AGITAZIONE ONDOSA INTERNA AL PORTO.....</b>	<b>64</b>
5.1 Configurazione attuale Molo Nord .....	66
5.2 Configurazione con parziale demolizione (100m) del Molo Nord .....	91
5.3 Configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato).....	116
<b>6. ESAME DEI RISULTATI .....</b>	<b>141</b>
<b>7. CONDIZIONI DI OPERATIVITÀ .....</b>	<b>151</b>
7.1 Vento.....	152
7.2 Onde .....	153
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>157</b>

## **INTRODUZIONE**

I contenuti della “Convenzione per lo studio dell’agitazione ondosa interna al nuovo Porto di Ancona” stipulata tra l’Autorità Portuale di Ancona e la “Sezione di Idraulica e infrastrutture viarie” del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura (DICEA) della Facoltà di Ingegneria dell’Università Politecnica delle Marche di Ancona sono i seguenti:

a) determinare l’agitazione ondosa all’interno dell’area portuale con modello numerico basato sulle soluzioni numeriche delle equazioni di Boussinesq, applicabile per simulazioni di propagazione di onde lunghe in acque basse ed intermedie, condizioni tipiche degli specchi acquei portuali. Il suddetto codice di calcolo sarà applicato alle direzioni del moto ondoso, settentrionali ed orientali, comprese nel settore di traversia del Porto, per un totale di 15 condizioni di moto ondoso (con altezze, periodi e direzioni diverse), per ciascuna delle configurazioni da provare;

b) le simulazioni saranno effettuate con la configurazione finale delle opere foranee e con quella che presenta il molo nord parzialmente demolito secondo le indicazioni emerse dai risultati dello studio di navigabilità;

c) determinare le condizioni di operatività della banchina n. 23 in termini di frequenza di accadimento di condizioni di vento e di moto ondoso (eventualmente anche di altri parametri ambientali), oltre soglie prefissate, che possano sollecitare le unità navali ormeggiate e le attrezzature di banchina, ostacolando le operazioni di trasbordo dei contenitori.

Gli studi, in sintesi, dovranno permettere all’Autorità Portuale di definire l’eventuale demolizione di un tratto del Molo Nord attuale, in risposta alle richieste del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, relativamente a tale questione.

## **1. SINTESI DEGLI STUDI**

L'Autorità Portuale ha finanziato e fatto eseguire, in precedenza, presso la Società Centro Studi di Tecnica Navale (CETENA) di Genova, le prove di navigabilità per la simulazione dell'ingresso e uscita con diverse tipologie di navi e varie condizioni meteomarine, nelle condizioni di Molo Nord attuale e stesso molo parzialmente demolito. Dai risultati di tale verifiche di navigabilità sono emerse delle indicazioni, che sono state prese a riferimento nel presente studio.

Il modello dell'agitazione ondosa interna al porto è stato costruito sulla configurazione finale delle opere foranee del Porto di Ancona e sulla batimetria ottenuta dai rilievi effettuati dall'Istituto Idrografico della Marina (IIM) di Genova nel 2011, integrata dalle previsioni di dragaggio della Variante al P.R.P. del Porto di Ancona (Piano di sviluppo).

Sono state raccolte anche le caratteristiche delle navi che ormeggiano nella banchina n. 23 della cosiddetta Nuova Darsena del Porto, che verranno utilizzate per le fasi successive del presente studio.

Le suddette informazioni sono state fornite e messe a disposizione dalla Autorità Portuale.

Per quanto riguarda le caratteristiche meteomarine di interesse per il paraggio del Porto di Ancona, sono disponibili i seguenti dati:

- le misure ondamiche direzionali, rilevate dalla boa della Rete Ondametrica Nazionale (RON) posta al largo di Ortona (Pe), nel periodo 1989-2006, registrate dall'ISPRA (ex APAT, ex Servizio idrografico e mareografico nazionale);
- le misure ondamiche direzionali, rilevate dalla boa della Rete Ondametrica Nazionale (RON) posta al largo di Ancona, nei periodi 1999-2006 e 2009-2014, registrate dall'ISPRA (ex APAT, ex Servizi Tecnici Nazionali, in particolare Servizio idrografico e mareografico nazionale);
- le misure ondamiche direzionali e non direzionali, rilevate dalle boe dell'ex Istituto di Idraulica dell'Università di Ancona, per conto della Regione Marche, nel periodo 1989-1990, poste al largo di Marina di Montemarciano (An) ed Ancona;
- le stime ondamiche a vista effettuate dalle navi in transito nell'Adriatico centro-settentrionale, rilevate nel periodo 1961-1995, registrate dall'Istituto Meteorologico Reale Olandese (KNMI) dei Paesi Bassi;
- le ricostruzioni del campo di moto ondoso, nel Mare Adriatico, effettuate dal Centro Meteorologico Europeo (ECMWF) di Reading (UK) con il modello numerico WAM a partire dai campi di vento, ugualmente disponibili, calcolati con il modello

meteorologico, dello stesso centro meteorologico, sulla base del campo barico generale, relativamente al periodo 1990-2009;

- i dati delle registrazioni di vento delle stazioni ITAV, poi ENAV, di Monte Cappuccini di Ancona dal 1951 fino al 1978 (ora dismessa), di Falconara Marittima dal 1960 fino al 1996 e di Grottammare dal 1967 al 1977 (ora dismessa), ai quali è stato anche applicato il metodo S.M.B di ricostruzione del moto ondoso;
- i dati dell'Istituto Idrografico della Marina (IIM) di Genova, riguardanti indicazioni di maree e correnti superficiali, risultati di elaborazioni su misure del vento e su osservazioni a vista dello stato del mare dalla stazione meteorologica (ora dismessa) di Monte Cappuccini di Ancona, nei periodi 1930-1942, 1946-1958 e 1960-1963;-
- i dati ondametrici non direzionali, rilevati dalla società API, dalla piattaforma fuoricosta dell'API al largo di Falconara Marittima, per complessivi 18 mesi suddivisi in tre diversi periodi negli anni 1981-82-83,
- le misure ondametriche non direzionali eseguite sulle piattaforme AGIP in periodi vari;
- le misure di livelli di marea, vento, oltre ad altri parametri meteorologici, rilevate dalla stazione della Rete Mareografica Nazionale (RMN) nel paraggio del Porto di Ancona, nel periodo 1986-2013 (marea) e 2000-2013 (vento), registrate dall'ISPRA (ex APAT, ex Servizi tecnici nazionali, in particolare Servizio idrografico e mareografico nazionale);
- i rilievi anemometrici effettuati dalla Marina Dorica di Ancona, nel porto turistico anconitano, relativamente agli ultimi otto anni;
- i rilievi anemometrici effettuati dall'Istituto Tecnico Nautico, nel Porto di Ancona, relativamente al periodo 1980-1995 (su nastro registratore cartaceo).

Da questi dati considerati, sono stati scelti e selezionati quelli ritenuti più attendibili per le applicazioni di ingegneria marittima del presente studio, privilegiando, ove possibile, misure dirette, disponibili nel paraggio anconitano e con una sufficiente serie storica, in grado di risultare adeguata ai fini statistici.

Di seguito, vengono descritti, con maggior dettaglio, le caratteristiche meteomarine che sono state scelte, fra tutte quelle suddette.

## **2. INDICAZIONI RICAVATE DALLE VERIFICHE DELLA NAVIGABILITÀ**

Si riporta una sintesi delle “Conclusioni e raccomandazioni” indicate dalle prove di navigabilità effettuate presso il Laboratorio del Centro Studi di Tecnica Navale (CETENA) a Genova.

Lo studio in questione “ha esaminato le simulazioni di manovra in tempo reale di tre tipologie di unità navali di grandi dimensioni (una nave mercantile tipo portarinfuse, considerata in condizione di pieno carico e di zavorra, una nave traghetto ed una nave da crociera) in ingresso nel Porto di Ancona, all’interno del layout relativo all’attuazione del nuovo Piano Regolatore, nelle due ipotesi di Molo Nord attuale e considerando la demolizione di 100 m.

Le simulazioni si sono quindi svolte nelle due configurazioni da studiare sia in condizioni di calma sia in presenza di agenti meteomarini vari, mettendo a confronto i risultati ottenuti per ciascuna nave a parità di condizioni.”

Nelle prove “le simulazioni di ingresso sono iniziate da circa un miglio di distanza dall’imboccatura (punto di imbarco del Pilota), e si sono concluse in prossimità della Nuova Darsena, senza arrivare fino all’accosto vero e proprio alla banchina di destinazione, analogamente si sono svolte le simulazioni di uscita, nel percorso inverso.

Le condizioni meteomarine valutate nello studio sono classificabili in gravose ed estreme, a seconda dell’intensità degli agenti meteomarini considerati (velocità del vento e caratteristiche del mare). Queste condizioni sono state caratterizzate in termini di direzione ed intensità di mare, vento e corrente”.

“In particolare è stato scelto un range di velocità del vento rispettivamente di 25 nodi per la nave portarinfuse (la meno manovriera, con 4 rimorchiatori in ausilio) e la nave da crociera, e 30 nodi per la nave traghetto (senza ausilio di rimorchiatori), considerando Maestrale, Tramontana e Grecale.” A questi venti, tutti provenienti dai quadranti settentrionali, è stata associata, nelle due configurazioni prese in esame, l’agitazione ondosa di altezza 1,5 m o 2 m e periodo variabile fra 7 s e 9 s in corrispondenza dell’imboccatura, opportunamente adattata, cioè ridotta in altezza, all’interno del porto.

“Nella mappa del porto utilizzata per la navigazione è stata schematizzata l’area complessiva utilizzando le batimetriche attuali; solo la zona compresa tra il Molo Nord e la Nuova Darsena è stata dragata alla quota di -12 m, profondità necessaria per la manovra della nave portarinfuse in partenza in condizione di zavorra” e secondo le indicazioni previste in fase di completamento delle opere di ampliamento del Porto di Ancona.

“La corrente, rilevabile solo al di fuori del porto, è diretta verso NE (45°N) ed è stata considerata variabile in intensità fra 1 e 3 nodi.”

Le simulazioni di manovra “sono state eseguite avvalendosi del pilotaggio in tempo reale del Capo Pilota Mauro Menghini in una sessione di prove svoltesi dal 19 al 22 Novembre 2013.”

È stato rilevato che tutte le manovre sono state eseguite in condizioni molto gravose o estreme (vento da 25 o 30 nodi) e sono da considerarsi in ogni caso al limite della fattibilità, indipendentemente dalla loro riuscita al simulatore.” Ciò è stato giustificato dal fatto che, l’obiettivo principale della navigabilità in questione, riguarda la verifica dell’ “agibilità nautica del Porto nel nuovo layout di PRP”, focalizzando soprattutto l’attenzione al confronto, a parità di condizioni, tra “due configurazioni leggermente diverse del Molo Nord.” Quindi, anche problematiche diverse, come l’ “eventualità di avarie nel funzionamento delle macchine o degli organi di governo, così come di rotture dei cavi dei rimorchiatori, utilizzati sempre al massimo delle loro possibilità, non è stata ipotizzata.”

In definitiva, si è potuto rilevare che “tutte le manovre sono di fatto riuscite, sia nella configurazione del Molo Nord integrale, corrispondente a quella attuale, sia in quella di Molo Nord demolito di 100 m. Ciò che differenzia notevolmente le manovre eseguite nelle due ipotesi è il grado di sicurezza con cui queste sono state svolte.”

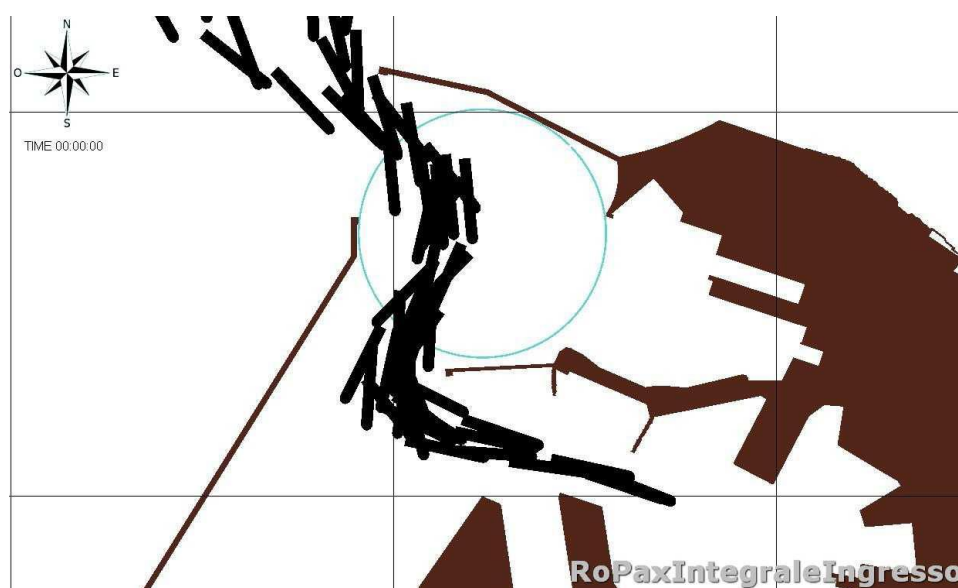
“Come si evidenzia dall’analisi delle traiettorie delle tre unità navali confrontata nelle due ipotesi, la manovra della nave nel caso di molo Nord attuale risulta maggiormente impegnativa (traiettoria a zig-zag molto accentuata), essendo necessario utilizzare maggiormente macchina, timoni ed eventualmente rimorchiatori; nel caso invece di molo Nord demolito di 100 m, la manovra è più fluida e l’utilizzo della macchina e timone è meno esasperato (traiettoria a zig-zag maggiormente sinuosa”, con spigoli più addolciti).

“Si veda a questo proposito l’inviluppo di tutte le manovre compiute ad esempio dalla nave traghetto nella configurazione integrale del Molo Nord, mostrata in Figura 2.1, e quello relativo alle manovre nella configurazione di Molo Nord demolito di 100 m, mostrata in Figura 2.2. Come si può notare, in Figura 2.1 la nave passa molto vicino alla testata del Molo Nord” attuale e del molo di sopraflutto in fase di realizzazione, “mentre nella Figura 2 successiva la nave passa ad una distanza maggiore, e pertanto più in sicurezza.

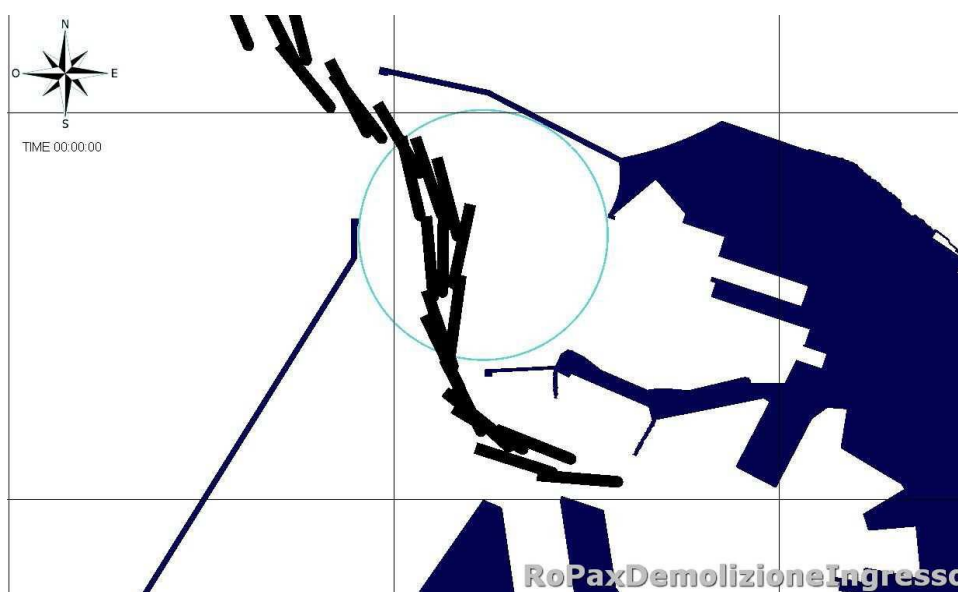
A seguito di queste considerazioni, si può affermare che il margine di sicurezza nella fase evolutiva con nave in posizione prossima al Molo Nord diminuisce maggiormente coi venti provenienti dal IV quadrante (Maestrale). I venti provenienti dal I quadrante (Grecale) invece tendono ad allontanare la nave dal suddetto Molo. Infine, nel caso di venti da

Tramontana e Grecale la demolizione del Molo permette alla nave di sopravventarsi rispetto alle testate della Nuova Darsena, mentre con la configurazione attuale del Molo Nord la nave è costretta a sottoventarsi, di conseguenza riducendo le distanze di sicurezza.

In conclusione, si può dire che nella configurazione di PRP studiata la riduzione del Molo Nord di 100 m permetterebbe a tutte e tre le tipologie di nave prese in considerazione una manovra più fluida e più sicura, senza essere costretti ad utilizzare macchine, timone e rimorchiatori all'estremo, ed è, pertanto, la preferibile.”



*Figura 2.1 – Inviluppo di tutte le manovre eseguite con nave traghetti nella configurazione di Molo Nord non demolito*



*Figura 2.2 – Inviluppo di tutte le manovre eseguite con nave traghetti nella configurazione di Molo Nord demolito di 100 m*



### **3. CARATTERISTICHE METEOMARINE NEL PARAGGIO PORTUALE ANCONITANO**

#### **3.1 Dati ondametrici registrati dal sito della R.O.N. al largo di Ancona**

Dal 9 marzo 1999 al 14 luglio 2002 lo strumento di misura per il sito ondametrico di Ancona, appartenente alla R.O.N. del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (poi APAT, ora ISPRA) è stato la boa, del tipo Directional Waverider, della società olandese Datawell. Essa era stata ancorata inizialmente, nel 1999, su una profondità di oltre 50 metri, in posizione di coordinate geografiche  $43^{\circ}37'13''N$  e  $13^{\circ}51'04''E$ , circa 12 miglia marine ad Est-NordEst del promontorio del Monte Conero. Per problemi dovuti a frequenti disormeggi della boa, probabilmente dovuti all'intensa attività di pesca nel paraggio ed all'estrema vicinanza con le rotte dei traghetti che incrociano per la Grecia o l'Albania, il sito della stazione di misura è stato spostato alla fine del mese di Maggio 2000 su una profondità di circa 70 metri, in posizione di coordinate geografiche  $43^{\circ}50'30''N$  e  $13^{\circ}42'50''E$ , circa 15 miglia marine a Nord-NordEst del porto di Ancona nei pressi (circa 500 metri a NordEst) dell'isola artificiale di Clara Ovest della società A.G.I.P. (si veda lo schema planimetrico in Figura 3.1).

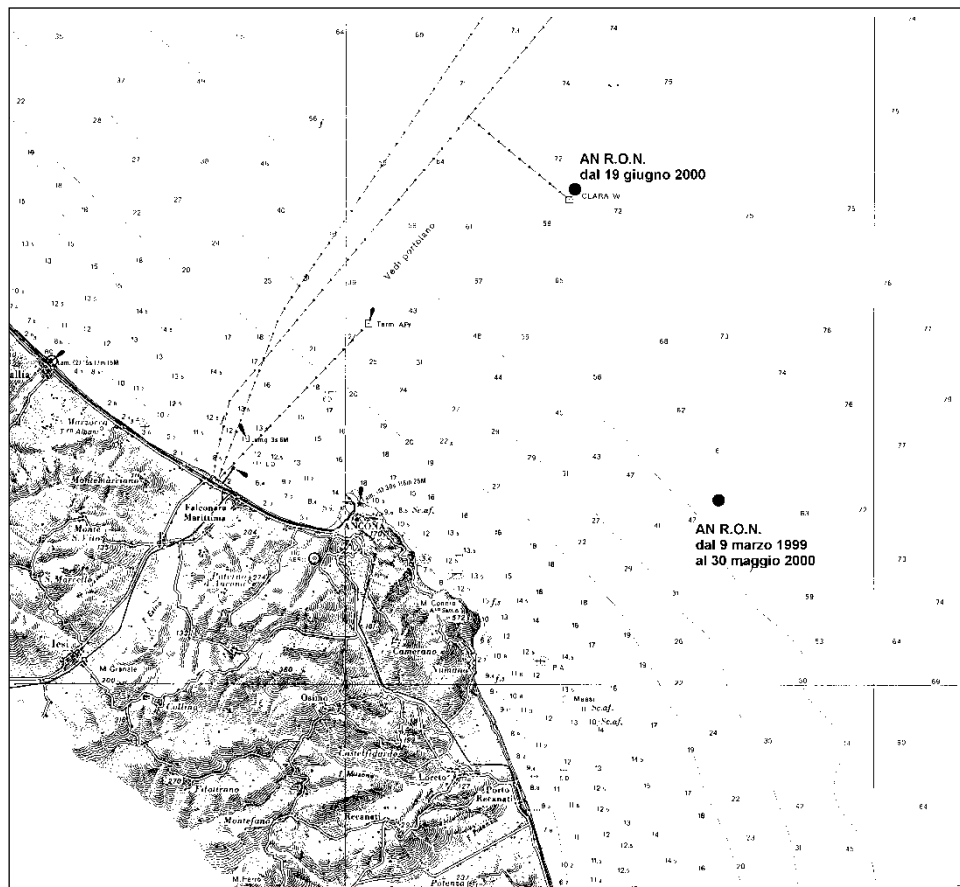


Figura 3.1 - Posizione geografica della stazione di misura gestita dalla R.O.N. al largo di Ancona

Riguardo alle misure della stazione ondometrica nel paraggio di Ancona, si dispone delle registrazioni dei dati ondosi per una prima fase di oltre 7 anni, pur con alcuni periodi di interruzione, rilevati nel periodo dal 9 marzo 1999 al 31 maggio 2006. Per garantire un'opportuna omogeneità climatologica le elaborazioni sono state effettuate sui 7 anni di osservazione dal 9 marzo 1999 al 9 marzo 2006.

In seguito ad una prima ristrutturazione della rete, avvenuta nel 2002, con la generale sostituzione degli strumenti di misura della Rete con le boe Triaxys, fabbricati dalla ditta canadese Axys Technologies Inc., le registrazioni delle misure hanno subito, tra il 14 luglio ed il 17 ottobre dell'anno 2002, varie interruzioni, che non hanno permesso di considerare una misura continua in questo lungo periodo; questo periodo "disturbato" è stato il più lungo occorso durante tale prima fase di osservazione.

Sono stati rilevati i principali dati statistici (si tratta di altezza d'onda significativa, periodo di picco, periodo medio e direzione media delle onde) degli stati di mare in continuo su base semioraria (cioè dati consecutivi degli stati di mare ogni 30 minuti). I valori ondosi sono dedotti dall'analisi spettrale degli stati di mare, quindi generalmente l'altezza d'onda significativa di riferimento è indicata con Hs oppure Hm0.

Fino al luglio dello stesso 2002, le registrazioni dei dati sono avvenute su base trioraria (cioè un dato completo sulle caratteristiche dello stato di mare lungo mezzora di tempo ogni tre ore), consentendo le registrazioni semiorarie in continuo solo in condizioni di moto ondoso intenso, con altezza d'onda significativa superiore ad una soglia di 3m. Invece, da agosto-settembre dello stesso anno 2002, le registrazioni dei dati sono avvenute in continuo, quindi su base semioraria, indipendentemente dalle condizioni del mare.

Precisamente nel citato periodo di osservazione di 2557 giorni (7 anni) si hanno a disposizione dati statistici relativamente a 43427 stati di mare considerati validi. Di questi 43427 stati di mare 8595 sono stati rilevati dalla boa Directional Waverider (8417 stati di mare triorari sui 9784 complessivamente rilevabili) con una percentuale di funzionamento pari all'86%. I restanti 34832 stati di mare sono stati rilevati dalla boa Triaxys in continuo (ogni 30 minuti) però con una minore percentuale di funzionamento sul periodo di tempo di osservazione, risultata pari al 58,5%. Complessivamente per i 7 anni di osservazione si è rilevata una percentuale di funzionamento generale pari ad oltre il 72,1%.

La conoscenza dell'andamento cronologico delle altezze significative del moto ondoso ha consentito di individuare, per l'intero periodo di osservazione di 7 anni, sia il regime ondoso medio (clima) che tutti gli eventi di mareggiata, i cui valori massimi sono stati utilizzati nell'analisi statistica degli eventi estremi per la determinazione del periodo di

ritorno più probabile relativamente alle altezze d'onda raggiunte dalle mareggiate provenienti da predefiniti settori direzionali.

Dall'esame dell'insieme cronologico dei dati statistici a disposizione, si ricava che, nell'intero periodo di osservazione della boa (7 anni complessivi) sono stati rilevati ben 497 eventi di mareggiata indipendenti tra loro, di diversa durata, in cui le onde hanno raggiunto almeno un metro di altezza d'onda significativa (133 di essi hanno raggiunto i 2 metri, 37 hanno raggiunto i 3 metri, 5 eventi hanno superato i 4 metri ed in due soli casi si sono superati i 5 m di altezza d'onda significativa). Da notare che i due eventi ondosi che hanno superato i 5m sono avvenuti rispettivamente nel novembre 2002 per una mareggiata da scirocco-levante e nel settembre 2004 per una mareggiata da bora, mentre quelli con valori sopra i 4m sono avvenuti nell'aprile 2005 per un evento da libeccio, quindi non di traversia per i siti costieri in esame, gli altri due nel novembre 1999 e nel gennaio 2001, entrambi provenienti dal settore direzionale di greco-levante.

Dall'esame della rappresentazione cronologica delle altezze d'onda medie mensili, riportata in Figura 3.2, si nota che i mesi con altezza media più alta sono quelli invernali da novembre a febbraio, che generalmente il valore medio dell'altezza significativa si mantiene sopra i 60 cm da settembre-ottobre fino ad aprile-maggio. Nei mesi estivi tale valore, generalmente, non viene raggiunto e quasi sempre le medie mensili si mantengono attorno ai 40-50 cm. Inoltre, si può notare che in ogni internata viene raggiunta, per almeno due o tre mesi, la soglia media di almeno 90 centimetri.

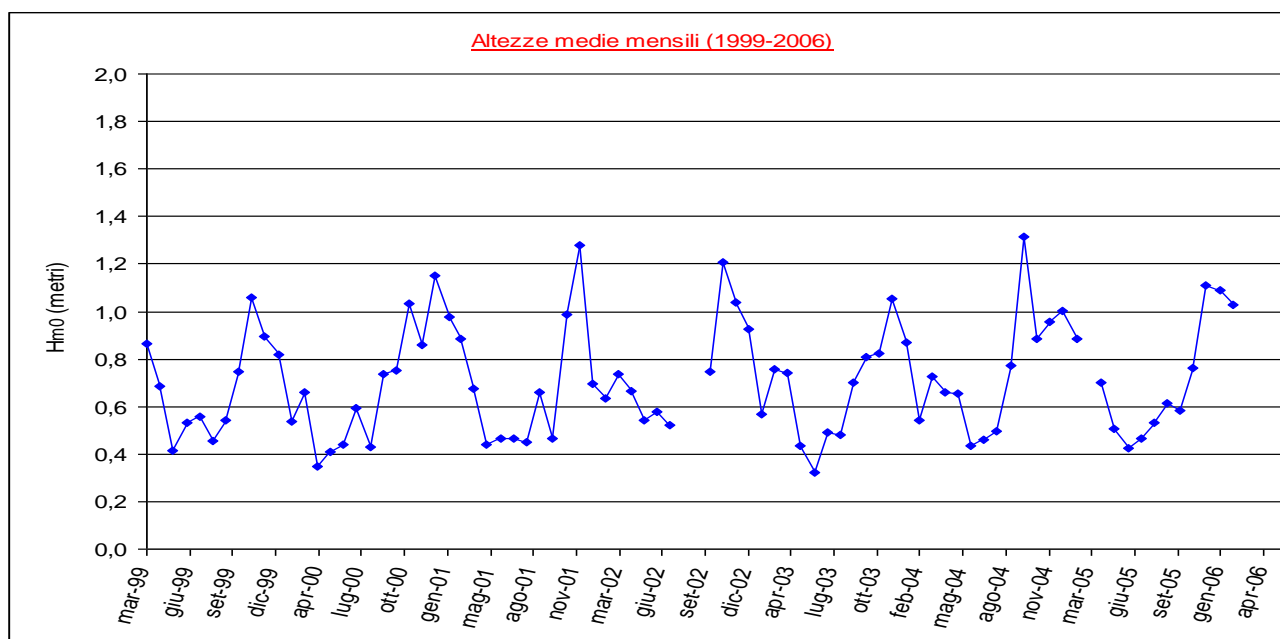


Figura 3.2 - Andamento cronologico delle altezze d'onda significative medie mensili rilevate su base trioraria dalla boa ondometrica della R.O.N. al largo di Ancona dal marzo 1999 al marzo 2006

Dal punto di vista ondametrico, le stagioni calme (altezze d'onda medie inferiori a 60 cm) sono durate in genere circa 5 mesi (nel 1999 da maggio a settembre, nel 2000 da aprile ad agosto, nel 2001 da maggio a settembre e così via). In particolare i mesi più calmi risultano spesso essere quelli di primavera (aprile, maggio e giugno). I mesi estivi veri e propri non sono risultati sempre così calmi (medie mensili anche oltre i 60-70 cm).

Dal punto di vista ondametrico la stagione invernale '99-'00 è stata breve (solo da ottobre a gennaio l'altezza d'onda media mensile è stata superiore a 70 cm). In questo periodo è stato raggiunto il picco di oltre 100 cm nel novembre '99.

Al contrario l'inverno '00-'01 è risultato particolarmente lungo, da settembre a marzo l'altezza d'onda media mensile si è mantenuta sopra i 70 cm. La stagione invernale '01-'02 ha presentato caratteristiche simili a quelle del '99-'00: breve durata ma forti mareggiate (è stato raggiunto il picco di quasi 130 cm nel dicembre del 2001).

L'inverno '02-'03 non è risultato particolarmente lungo ma discretamente intenso; mentre la stagione invernale '03-'04 ha avuto una simile durata ma di minor intensità, si è superata la media mensile di 90 cm di altezza d'onda solo in dicembre.

L'invernata '04-'05 è risultata particolarmente lunga (da settembre ad aprile) ed anche intensa (in ottobre la media ha superato i 130cm); come la stagione invernale '05-'06 che è iniziata a novembre e da dicembre fino a febbraio la media mensile di altezza d'onda si è mantenuta oltre i 100 cm.

Le differenze riscontrate fra le stagioni ondose invernali delle annate descritte è indice della variabilità meteo-marina del paraggio anconetano e di tutto il medio Adriatico.

Va comunque rilevato che la citata carenza di dati in certi periodi può aver influito sul suddetto risultato descritto alterando un poco tale climatologia mensile ondosa.

Tra il 2004 ed il 2009, la Rete Ondametrica Nazionale ha subito una lunga fase di stallo parziale e di completa riorganizzazione sotto il controllo di un nuovo ente, l'ISPRA, nato nel frattempo, a cui sono passate le competenze della gestione della Rete stessa. Tra il 2004 ed il 2008 tutti gli strumenti di misura ondametrici della RON, distribuiti su tutti i mari italiani, sono stati recuperati e mantenuti a terra, quindi ovviamente in condizioni non operative e non funzionanti. In particolare, la boa di Ancona fu portata a terra alla fine del Maggio 2006.

Nell'ambito della completa riorganizzazione dell'ISPRA, furono sostituiti gli strumenti di misura, affidandosi, in questo caso, alle nuove boe oceanografiche "Axys Watchkeeper", di produzione canadese, della ditta Axys Technologies Inc. A partire dall'estate 2009,

furono riprese le attività in mare della RON. Nel giro di meno di un anno furono varate le 15 boe ondometriche della Rete e ripresero i rilevamenti ondosi e le registrazioni dei dati. Il primo sito su cui fu posizionato nuovamente lo strumento di misura fu quello di Civitavecchia, il 16 luglio 2009. Il secondo sito dotato nuovamente di strumento di rilevamento ondoso fu proprio quello di Ancona, il cui varo (e conseguente ripresa delle misure e registrazioni) avvenne il 28 ottobre del 2009.

A partire da tale data, ha avuto avvio la seconda fase delle osservazioni ondometriche per il sito al largo di Ancona.

La modalità di registrazione dati è ancora semioraria ed i parametri ondometrici sono ancora quelli della prima fase di osservazioni, integrati da una serie di parametri fisici, il cui rilevamento è possibile dai nuovi strumenti messi a mare.

Al momento si dispone della raccolta dei dati statistici sintetici ondosi fino al mese di marzo del 2014. Come già fatto per la prima fase delle osservazioni, anche in questo caso, al fine di garantire una opportuna omogeneità climatologica ondosa, sono stati presi in considerazione, per le elaborazioni riguardanti i presenti studi, i dati che coprono un periodo di annate complete. In particolare, si è scelto, in tal caso, di far riferimento ai dati dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013, per un totale di 4 anni interi di osservazione.

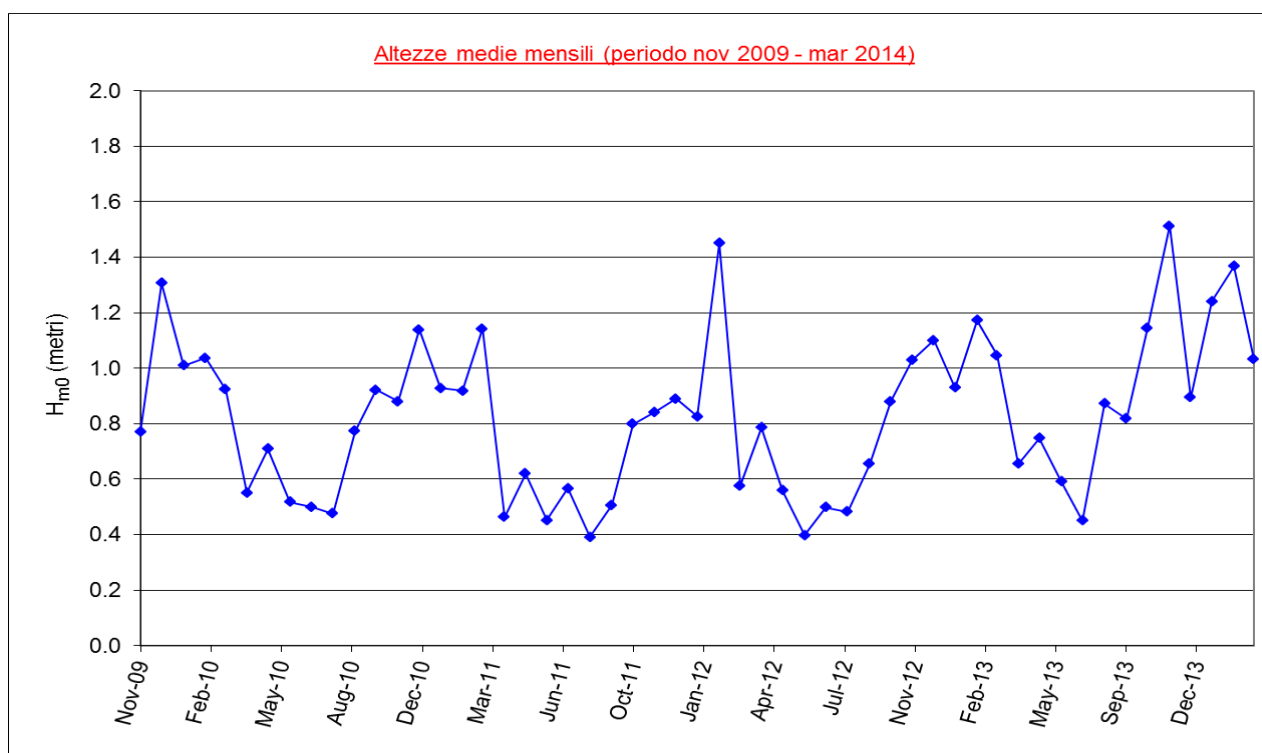
Precisamente, nel citato periodo di osservazione di 1461 giorni (4 anni), si hanno a disposizione dati statistici relativamente a 60694 stati di mare considerati validi, su 70128 valori rilevabili. Quindi, complessivamente, per i 4 anni di osservazione si è rilevata una percentuale di funzionamento generale pari ad oltre l' 86,5%. A partire dalla metà del 2013, fino ai dati disponibili più recenti, si sono riscontrati i periodi più frequenti di mancato funzionamento di questa seconda fase di osservazione, probabilmente legati a problemi di trasmissione-radio dei dati acquisiti dallo strumento in mare aperto.

Dall'esame dell'insieme cronologico dei dati statistici a disposizione, si ricava che, nell'intera seconda fase di osservazione della boa (4 anni complessivi) sono stati rilevati ben 612 eventi di mareggiata indipendenti tra loro, di diversa durata, in cui le onde hanno raggiunto almeno un metro di altezza d'onda significativa (115 di essi hanno raggiunto i 2 metri, 35 hanno raggiunto i 3 metri, 9 eventi hanno superato i 4 metri ed in cinque casi si sono superati i 5 m di altezza d'onda significativa). Da notare che i cinque eventi ondosi che hanno superato i 5m sono avvenuti per due mareggiate provenienti dal settore direzionale di greco-levante, per altre due mareggiate da scirocco-levante e per una mareggiata da bora, mentre gli altri 4 eventi ondosi con valori di altezza significativa sopra

i 4m sono avvenuti per due volte a causa di eventi da greco-levante, per una mareggiata da scirocco-levante e per un'altra da bora.

Ad una prima analisi delle mareggiate, pur se, per tale seconda fase di osservazione (4 anni, 2009-2013), si è potuto contare su un maggior numero di dati (semiorari), almeno sotto i 3m di altezza d'onda, si può certamente notare una maggior frequenza media annuale delle mareggiate, praticamente per ogni fascia di altezza d'onda, rispetto a quella riscontrata nella prima fase delle osservazioni (7 anni, 1999-2006). Inoltre, hanno assunto una importanza notevolmente più rilevante, fra gli eventi ondosi più intensi (con altezza d'onda di almeno 4m), quelli provenienti dal settore direzionale di greco-levante, rispetto a quelli "tradizionali" provenienti da scirocco-levante e da bora.

La rappresentazione cronologica delle altezze d'onda medie mensili, relativamente a questa seconda fase di osservazione, è riportata in Figura 3.3.



*Figura 3.3 - Andamento cronologico delle altezze d'onda significative medie mensili rilevate su base semioraria dalla boa ondometrica della R.O.N. al largo di Ancona dal novembre 2009 al marzo 2014*

In tal caso, si possono notare diversi picchi mensili invernali con altezza media anche più alta di 130 cm, sicuramente più frequenti che nella prima fase di osservazione. L'invernata (ondosa) 2010-2011 è risultata particolarmente tranquilla, con medie mensili inferiori ai 90 cm, salvo la breve ed intensa parentesi del mese di febbraio 2011, con un picco medio mensile addirittura oltre i 140 cm. l'estate 2013 e la successiva invernata

sono risultate particolarmente intense, in confronto con le rispettive stagioni precedenti, ma alcuni di tali dati potrebbero essere risultati anche alterati dalla succitata carenza di valori validi riscontrata proprio in tale periodo, specie per i mesi del 2014.

Resta, comunque, il fatto che le differenze riscontrate fra le stagioni ondose, invernali ed estive, delle diverse annate è indice della variabilità meteo-marina del paraggio anconetano e di tutto il medio Adriatico.

### **3.2 Regime ondoso medio al largo di Ancona**

Il clima o regime ondoso medio in un paraggio marino individua la fenomenologia ondosa completa nella zona di mare cui si riferisce, caratterizzandone l'esposizione alle condizioni ondose provenienti dal largo. Generalmente il regime ondoso viene ricavato in condizioni di profondità infinita, in cui il moto delle onde è direttamente collegato al vento agente in superficie che lo ha generato e non risulta alterato dagli effetti di rifrazione, morfologia dei fondali, batimetria, acclività e diminuzione del fondale. Il successivo trasferimento su profondità finite viene effettuato adottando modelli matematici basati su schemi di onde regolari o irregolari spettrali, da cui è possibile poi individuare le altezze delle onde significative alle varie posizioni sottocosta.

L'esposizione di un paraggio marino è data dall'intensità delle agitazioni ondose che possono raggiungerlo per effetto dell'azione dei venti provenienti dal largo. Il settore di traversia è l'angolo comprendente le direzioni da cui possono provenire gli eventi ondosi da vento dal largo e si suddivide nella traversia principale, da cui provengono le onde più violente, e nella traversia secondaria, che include tutte le direzioni meno pericolose.

L'andamento significativo del regime ondoso medio o clima generale nel paraggio di Ancona è stato ricostruito utilizzando tutti i dati registrati nel periodo preso in esame.

Ai fini della ricostruzione del regime climatico ondoso, oltre alla distribuzione della frequenza (assoluta o percentuale) dei valori di altezza d'onda significativa, si può considerare anche la distribuzione (assoluta o percentuale) del flusso (o potenza) energetico  $F$ , che rappresenta l'energia delle onde che nell'unità di tempo passa attraverso una superficie verticale normale alla direzione di propagazione dell'onda di larghezza unitaria e altezza pari alla profondità del fondale nel punto in cui esso viene calcolato, che è funzione sia dell'altezza d'onda che del periodo ondoso. In particolare, il flusso energetico ondoso medio viene valutato proporzionalmente al quadrato dell'altezza d'onda significativa spettrale ed al periodo medio relativi a ciascuna registrazione, quindi  $F = f(H^2, T)$ , secondo la relazione seguente:

$$\bar{F} = \cos t \cdot H_{m0}^2 \cdot T_m \quad [kgf / (s \cdot m)]$$

dove  $H_{m0}$  è l'altezza d'onda significativa media spettrale,  $T_m$  è il periodo medio e  $\cos t$  è un termine costante che viene preventivamente calcolato. Per ogni classe di altezza d'onda, il flusso energetico assoluto si ottiene come somma dei flussi di ciascun evento appartenente alla classe presa in considerazione. La potenza complessiva è la somma di tutti i flussi di energia per metro di lunghezza di cresta degli stati di mare compresi negli intervalli temporali e dei parametri ondosi prescelti. La potenza media per metro di lunghezza di cresta è il rapporto tra la potenza e il numero di dati totali considerati.

Le tabelle dalla Tabella 3.1 alla Tabella 3.3 contengono le raccolte della distribuzione di frequenza percentuale dei dati ondosi triorari per l'intero periodo della prima fase di osservazione (7 anni, dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006), rispettivamente suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di periodi di picco, classi di altezze d'onda significative e di periodi medi, classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza. Infine, la Tabella 3.4 contiene la raccolta della distribuzione di frequenza percentuale dei flussi energetici relativamente ai dati ondosi triorari per l'intero periodo della stessa prima fase di osservazione, suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza.

*Tabella 3.1 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-T_P$  per i dati ondosi triorari (di numero 15244) dei sette anni di osservazione dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006*

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TP (sec)	Classi di HMO (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
< 2,0	0.2493	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2493
2,0 - 2,5	1.9549	0.0066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.9614
2,5 - 3,0	6.3894	0.4133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.8027
3,0 - 3,5	6.9798	2.6633	0.0066	0	0	0	0	0	0	0	0	9.6497
3,5 - 4,0	5.9761	5.904	0.0918	0	0	0	0	0	0	0	0	11.9719
4,0 - 4,5	3.6933	7.3406	0.8003	0.0066	0	0	0	0	0	0	0	11.8407
4,5 - 5,0	1.9942	5.4513	2.0205	0.0984	0	0	0	0	0	0	0	9.5644
5,0 - 5,5	1.64	4.0869	3.0241	0.4461	0.0262	0	0	0	0	0	0	9.2233
5,5 - 6,0	1.7909	1.8696	2.3681	1.0102	0.1115	0.0066	0	0	0	0	0	7.1569
6,0 - 6,5	1.7253	1.2398	1.5613	1.4301	0.4723	0.0262	0	0	0	0	0	6.455
6,5 - 7,0	1.3514	0.6691	0.9512	1.0037	0.551	0.1837	0.0262	0.0066	0	0	0	4.7428
7,0 - 7,5	1.5744	0.492	0.5248	0.6429	0.5379	0.387	0.0787	0.0066	0	0	0	4.2443
7,5 - 8,0	0.7019	0.2558	0.1246	0.223	0.1312	0.1443	0.0656	0.0131	0.0066	0	0	1.6662
8,0 - 8,5	1.2989	0.4067	0.2165	0.2034	0.2624	0.1706	0.105	0.0197	0.0066	0	0	2.6896
8,5 - 9,0	1.6137	0.1837	0.0918	0.059	0.0787	0.0525	0.0459	0.0131	0	0	0	2.1385
9,0 - 9,5	2.4272	0.1574	0.0853	0.0066	0.0459	0.0328	0.0197	0.0197	0	0	0.0066	2.8011
9,5 - 10,0	0.7806	0.059	0.0656	0.0131	0.0197	0.0131	0.0131	0	0.0066	0	0	0.9709
>10,0	4.2181	1.2792	0.2952	0.0525	0.0066	0	0.0066	0.0066	0	0.0066	0	5.8712
TOTALE	46.3592	32.4784	12.2278	5.1955	2.2435	1.0168	0.3608	0.0853	0.0197	0.0066	0.0066	100



Tabella 3.2 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-T_M$  per i dati ondosi triorari (di numero 15244) dei sette anni di osservazione dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TM (sec)	Classi di H <sub>M0</sub> (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
<2,0	0.0131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0131
2,0- 2,5	1.6269	0.0066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.6334
2,5- 3,0	3.5424	1.3579	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.9003
3,0- 3,5	5.1758	4.1918	0.0853	0	0	0	0	0	0	0	0	9.4529
3,5- 4,0	12.7591	7.9572	1.0496	0.0131	0	0	0	0	0	0	0	21.7791
4,0- 4,5	9.3479	6.8748	2.6633	0.1378	0.0066	0	0	0	0	0	0	19.0304
4,5- 5,0	4.5329	4.1525	2.7093	0.7872	0.0722	0	0	0	0	0	0	12.254
5,0- 5,5	2.2566	3.3653	2.8142	1.4498	0.2755	0.0853	0	0	0	0	0	10.2467
5,5- 6,0	1.5022	2.027	1.6728	1.6269	0.7019	0.0918	0.0066	0	0	0	0	7.6292
6,0- 6,5	1.0955	1.1152	0.7347	0.7413	0.7085	0.3411	0.0262	0.0066	0	0	0	4.7691
6,5- 7,0	0.9906	0.6166	0.1837	0.2952	0.2427	0.2296	0.1902	0.0066	0	0	0	2.7552
7,0- 7,5	0.6822	0.3083	0.1115	0.0853	0.1837	0.1902	0.0853	0.0394	0.0066	0	0.0066	1.699
7,5- 8,0	0.656	0.1837	0.059	0.0328	0.0394	0.0459	0.0394	0.0197	0.0066	0	0	1.0824
8,0- 8,5	0.5576	0.0525	0.0131	0.0066	0.0066	0.0131	0.0131	0.0066	0	0.0066	0	0.6757
8,5- 9,0	0.3149	0.059	0.0197	0	0	0.0131	0	0.0066	0.0066	0	0	0.4198
9,0- 9,5	0.3018	0.0197	0.0131	0.0131	0	0	0	0	0	0	0	0.3477
9,5-10,0	0.2493	0.0262	0.0066	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2821
>10,0	0.7544	0.164	0.0918	0.0066	0.0066	0.0066	0	0	0	0	0	1.0299
TOTALE	46.3592	32.4784	12.2278	5.1955	2.2435	1.0168	0.3608	0.0853	0.0197	0.0066	0.0066	100

Tabella 3.3 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-D_{MT}$  per i dati ondosi triorari (di numero 15244) dei sette anni di osservazione dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI DIREZIONE E DI ALTEZZA D'ONDA												
DMT (gradi Nord)	Classi di H <sub>M0</sub> (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
0	1.7121	1.0758	0.3674	0.164	0.0131	0	0	0	0	0	0	3.3325
10	1.2398	1.3382	0.6298	0.2296	0.0984	0.0656	0.0131	0.0066	0	0	0	3.6211
20	1.0365	1.3251	0.9184	0.5904	0.2558	0.0918	0.0394	0.0197	0	0	0.0066	4.2837
30	0.9578	1.1021	0.7872	0.5379	0.2624	0.0918	0.059	0	0	0	0	3.7982
40	0.715	0.9184	0.7806	0.551	0.3346	0.1115	0.0262	0	0	0	0	3.4374
50	0.6232	0.715	0.3608	0.2952	0.1443	0.0984	0.0262	0	0	0	0	2.2632
60	0.656	0.5707	0.2427	0.1378	0.1246	0.0656	0.0197	0.0066	0	0	0	1.8237
70	0.7872	0.5182	0.2558	0.2362	0.0984	0.059	0.0394	0.0131	0.0066	0	0	2.0139
80	0.8331	0.5314	0.3674	0.1574	0.059	0.0262	0.0197	0	0	0	0	1.9942
90	0.9512	0.7806	0.2952	0.1902	0.0525	0.0197	0.0066	0.0066	0	0	0	2.3025
100	1.2858	1.1808	0.6494	0.3149	0.1115	0.0262	0	0	0	0	0	3.5686
110	1.9942	2.0401	0.9578	0.4002	0.2755	0.1246	0.0722	0.0197	0.0131	0.0066	0	5.904
120	2.5912	2.4862	0.8594	0.3018	0.1115	0.0787	0.0197	0	0	0	0	6.4484
130	2.9848	1.9089	0.4526	0.1706	0.0394	0.0394	0.0066	0.0066	0	0	0	5.6088
140	2.9061	1.6597	0.3018	0.0197	0.0066	0.0197	0.0131	0.0066	0	0	0	4.9331
150	2.8405	1.2726	0.1443	0.0262	0.0197	0.0066	0	0	0	0	0	4.3099
160	1.9549	0.8725	0.0853	0.0262	0.0066	0	0	0	0	0	0	2.9454
170	1.3907	0.5314	0.0525	0.0131	0.0131	0	0	0	0	0	0	2.0008
180	0.761	0.2886	0.0328	0.0066	0	0	0	0	0	0	0	1.089
190	0.6429	0.2099	0.0262	0.0131	0.0066	0	0	0	0	0	0	0.8987
200	0.4658	0.1837	0.0787	0.0066	0.0066	0.0066	0	0	0	0	0	0.7478
210	0.4133	0.2427	0.0525	0.0131	0.0066	0	0	0	0	0	0	0.7282
220	0.3805	0.2099	0.0262	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6166
230	0.5182	0.2755	0.0525	0.0131	0.0066	0	0	0	0	0	0	0.8659
240	0.5904	0.2886	0.059	0	0.0066	0	0	0	0	0	0	0.9446
250	0.7544	0.2755	0.0984	0.0066	0	0	0	0	0	0	0	1.1349
260	0.656	0.3346	0.0328	0.0394	0	0.0066	0	0	0	0	0	1.0693
270	0.8266	0.4592	0.0787	0.0459	0.0066	0	0	0	0	0	0	1.417
280	1.0299	0.6626	0.2296	0.0394	0	0.0066	0	0	0	0	0	1.968
290	1.3776	1.0299	0.492	0.0787	0.0197	0.0197	0	0	0	0	0	3.0176
300	1.5678	1.3382	0.6691	0.1574	0.0525	0.0066	0	0	0	0	0	3.7917
310	1.8368	1.6137	0.4592	0.0918	0.0262	0.0131	0	0	0	0	0	4.0409
320	1.9155	1.4104	0.3214	0.0722	0.0066	0	0	0	0	0	0	3.7261
330	1.8368	1.0758	0.2952	0.0656	0.0066	0.0066	0	0	0	0	0	3.2865
340	1.6072	0.8987	0.3674	0.0787	0.0394	0.0066	0	0	0	0	0	2.9979
350	1.7187	0.8528	0.3477	0.105	0.0262	0.0197	0	0	0	0	0	3.0701
TOTALE	46.3592	32.4784	12.2278	5.1955	2.2435	1.0168	0.3608	0.0853	0.0197	0.0066	0.0066	100

**Tabella 3.4 - Distribuzione delle frequenze percentuali del flusso energetico, riferito ad un metro di lunghezza di cresta, per i dati ondosi triorari dei sette anni di osservazione dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006**

DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEL FLUSSO ENERGETICO DELLE ONDE PER METRO DI LUNGHEZZA DI CRESTA (=cos*HMO <sup>2</sup> *TM)(in Kg/(s*m))												
DMT (gradi Nord)	Classi di HMO (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
0	0.1928	0.5349	0.6044	0.5805	0.1056	0	0	0	0	0	0	2.0181
10	0.1289	0.7669	1.0247	0.8179	0.6444	0.6554	0.192	0.1349	0	0	0	4.3651
20	0.1129	0.7636	1.6138	2.2137	1.7371	0.9769	0.6313	0.4014	0	0	0.3163	8.7671
30	0.1006	0.6497	1.3869	2.0297	1.7575	0.9888	0.9383	0	0	0	0	7.8515
40	0.0647	0.5244	1.397	2.202	2.3466	1.2193	0.4255	0	0	0	0	8.1795
50	0.061	0.4091	0.6047	1.0983	0.9543	1.0892	0.4106	0	0	0	0	4.6272
60	0.0609	0.3283	0.4525	0.5266	0.8621	0.7666	0.3341	0.1647	0	0	0	3.4959
70	0.071	0.3271	0.4643	0.9014	0.6837	0.6345	0.6168	0.3179	0.2009	0	0	4.2175
80	0.0724	0.3338	0.673	0.6313	0.3558	0.2327	0.3701	0	0	0	0	2.6691
90	0.0873	0.4582	0.4931	0.7424	0.3635	0.2381	0.1005	0.1556	0	0	0	2.6387
100	0.1379	0.7313	1.3039	1.2063	0.8495	0.3043	0	0	0	0	0	4.5332
110	0.242	1.1992	2.0576	1.6628	2.0966	1.5393	1.333	0.4801	0.4208	0.3072	0	11.3386
120	0.3025	1.4276	1.6508	1.2996	0.9235	0.9418	0.3339	0	0	0	0	6.8797
130	0.3524	1.0146	0.7773	0.6893	0.3048	0.4672	0.1017	0.1616	0	0	0	3.8691
140	0.3413	0.8196	0.5218	0.0814	0.0618	0.2347	0.2526	0.1436	0	0	0	2.4568
150	0.3096	0.6052	0.2098	0.1193	0.1288	0.0835	0	0	0	0	0	1.456
160	0.2206	0.4018	0.1385	0.0991	0.0582	0	0	0	0	0	0	0.9183
170	0.1324	0.2497	0.0713	0.0482	0.0877	0	0	0	0	0	0	0.5894
180	0.0678	0.168	0.0406	0.0264	0	0	0	0	0	0	0	0.3029
190	0.0652	0.1214	0.0498	0.0482	0.0539	0	0	0	0	0	0	0.3385
200	0.0385	0.1268	0.1587	0.0244	0.0523	0.113	0	0	0	0	0	0.5137
210	0.0321	0.1447	0.0882	0.0423	0.0511	0	0	0	0	0	0	0.3583
220	0.0356	0.1122	0.0466	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1944
230	0.0495	0.1255	0.081	0.0409	0.0384	0	0	0	0	0	0	0.3352
240	0.057	0.1566	0.1068	0	0.0431	0	0	0	0	0	0	0.3635
250	0.0678	0.1454	0.1698	0.0211	0	0	0	0	0	0	0	0.4041
260	0.0686	0.1707	0.0498	0.1379	0	0.0798	0	0	0	0	0	0.5068
270	0.0854	0.2687	0.1105	0.17	0.0376	0	0	0	0	0	0	0.6721
280	0.1191	0.36	0.3543	0.1325	0	0.0763	0	0	0	0	0	1.0422
290	0.1518	0.4668	0.77	0.2655	0.1107	0.2176	0	0	0	0	0	1.9824
300	0.171	0.6837	1.0561	0.5297	0.3397	0.0683	0	0	0	0	0	2.8485
310	0.1972	0.7866	0.6931	0.3248	0.1745	0.1345	0	0	0	0	0	2.3107
320	0.2074	0.6647	0.5197	0.2489	0.0433	0	0	0	0	0	0	1.684
330	0.1863	0.5138	0.513	0.2544	0.0474	0.0596	0	0	0	0	0	1.5745
340	0.1584	0.4311	0.5616	0.303	0.2506	0.0684	0	0	0	0	0	1.7732
350	0.171	0.447	0.5454	0.3943	0.1691	0.1975	0	0	0	0	0	1.9243
TOTALE	4.9209	17.439	21.3605	19.9141	15.733	11.3871	6.0404	1.9599	0.6217	0.3072	0.3163	100

Dal punto di vista grafico in Figura 3.4 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale del moto ondoso triorario rilevato dalla boa ondometrica posta al largo di Ancona nella prima fase dei 7 anni di osservazioni, secondo il dato direzionale di provenienza media suddiviso per intervalli di 10°.

Nella Figura 3.5 è riportata la distribuzione direzionale delle frequenze percentuali del flusso energetico per metro di lunghezza di cresta delle stesse onde (dei 7 anni fra il 1999 ed il 2006), suddivise negli stessi settori direzionali di 10°.

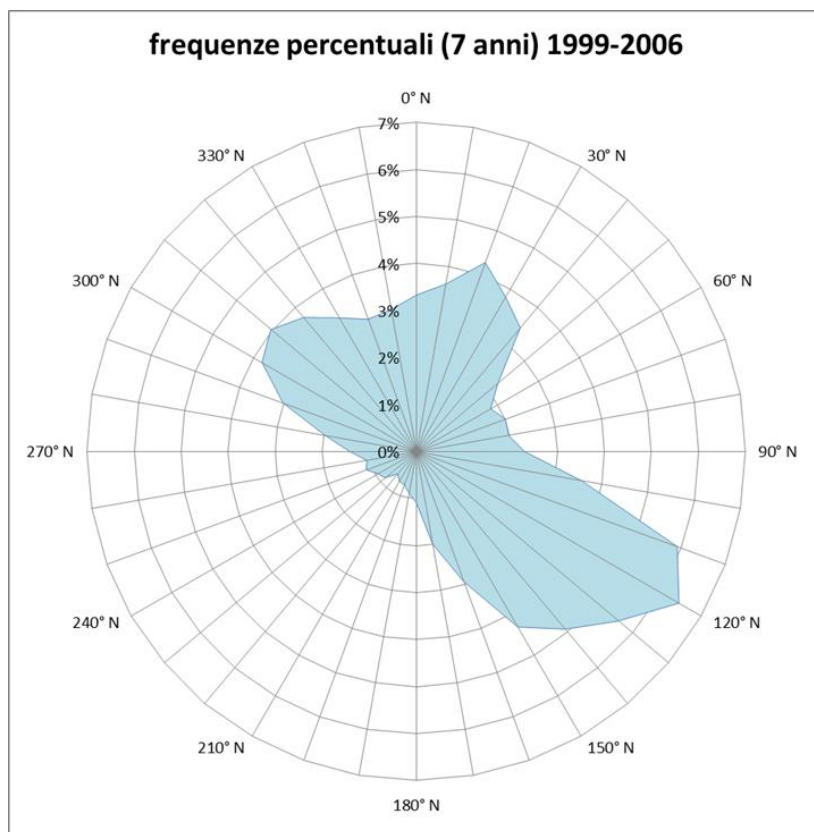


Figura 3.4 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei dati ondosi triorari registrati dalla stazione di rilievo della RON al largo di Ancona nei 7 anni dal 10 marzo '99 al 9 marzo '06

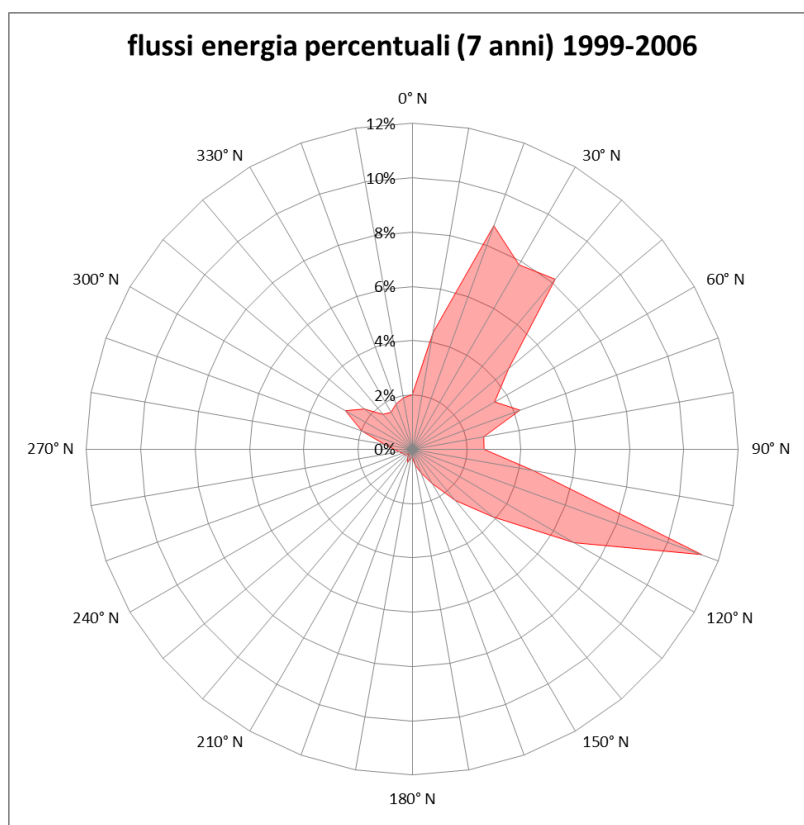


Figura 3.5 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei flussi energetici per metro di lunghezza di cresta dei dati ondosi triorari, registrati dalla stazione di misura ondometrica della RON al largo di Ancona nei 7 anni dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006

Dall'analisi di tali andamenti ed anche dal grafico di confronto delle suddette distribuzioni direzionali delle serie complessive dei dati, riportato in Figura 3.6, si può evidenziare una serie di caratteristiche legate alla fenomenologia climatologica ondosa del mare Adriatico: risulta infatti che gli eventi ondosi provengono più frequentemente (mari regnanti) dai settori attorno a EstSudEst (scirocco-levante), a Nord-NordEst (bora-greco) e a NordOvest (maestro), mentre i casi più violenti (mari dominanti, per esempio con altezze significative maggiori e relativi flussi energetici più intensi) interessano soprattutto le direzioni da scirocco-levante e da bora-greco, ed in misura minore le rimanenti direzioni da maestro-tramontana, greco-levante e quelle al di fuori della traversia costiera del paraggio centrale adriatico anconitano.

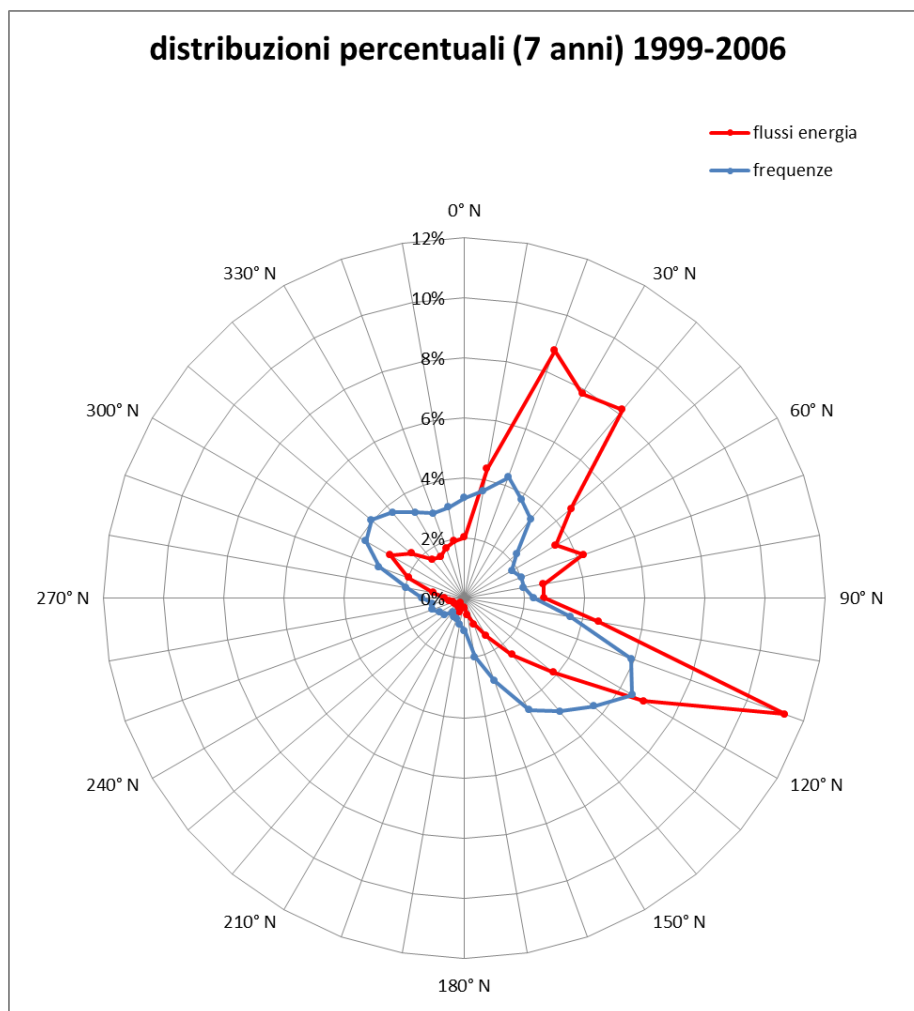


Figura 3.6 - Distribuzione direzionale percentuale di confronto fra la frequenza ed il flusso di energia per metro di lunghezza di cresta delle onde registrate dalla stazione di misura della RON al largo di Ancona nei 7 anni dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006

Una analoga raccolta di tabelle e grafici è stata effettuata anche per la seconda fase delle osservazioni ondametriche, relativamente, quindi, ai dati ondosi acquisiti nei 4 anni che vanno dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013.

In particolare, la serie di tabelle dalla Tabella 3.5 alla Tabella 3.7 contengono le raccolte della distribuzione di frequenza percentuale dei dati ondosi triorari per l'intero periodo della seconda fase di osservazione (4 anni, dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013), rispettivamente suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di periodi di picco, classi di altezze d'onda significative e di periodi medi, classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza. Infine, la Tabella 3.8 contiene la raccolta della distribuzione di frequenza percentuale dei flussi energetici relativamente ai dati ondosi triorari per l'intero periodo della stessa seconda fase di osservazione, suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza.

Ad una sommaria rapida analisi iniziale di confronto, sembra che nella seconda fase di osservazione (4 anni, fra il 2009 ed il 2013), l'ondosità media sia diventata più intensa rispetto a quella dei succitati primi 7 anni di osservazione (fra il 1999 ed il 2006). Infatti, l'altezza d'onda media, per dati omogenei (triorari per i primi 7 anni, semiorari per i secondi 4 anni) è risultata passare dai circa 0,701m nella prima fase (7 anni, fra il 1999 ed il 2006) ai 0,809 m nella seconda fase (4 anni, fra il 2009 ed il 2013).

*Tabella 3.5 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-T_P$  per i dati ondosi triorari (di numero 10131) dei quattro anni di osservazione dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013*

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TP (sec)	Classi di $H_{m0}$ (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
< 2,0	1.2338	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2338
2,0 - 2,5	6.0705	0.1184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.1889
2,5 - 3,0	7.2648	1.3227	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.5875
3,0 - 3,5	7.6695	4.2839	0.0099	0	0	0	0	0	0	0	0	11.9633
3,5 - 4,0	4.7182	6.4456	0.3553	0	0	0	0	0	0	0	0	11.5191
4,0 - 4,5	2.7441	7.6794	1.5201	0.0197	0	0	0	0	0	0	0	11.9633
4,5 - 5,0	1.2832	4.6294	2.1716	0.0494	0	0	0	0	0	0	0	8.1335
5,0 - 5,5	1.0266	3.1389	3.2376	0.918	0	0	0	0	0	0	0	8.321
5,5 - 6,0	1.4905	1.7669	2.1913	1.3227	0.2073	0	0	0	0	0	0	6.9786
6,0 - 6,5	1.0068	0.7502	1.53	1.3029	0.5034	0.0691	0	0	0	0	0	5.1624
6,5 - 7,0	1.2733	0.8193	1.3819	1.5497	1.2832	0.2961	0.0197	0	0	0	0	6.6232
7,0 - 7,5	0.9278	0.4343	0.5922	0.7206	0.6515	0.4146	0.1678	0.0099	0	0	0	3.9187
7,5 - 8,0	0.4047	0.227	0.2172	0.2468	0.2369	0.1777	0.079	0.0099	0.0099	0	0	1.6089
8,0 - 8,5	0.8785	0.4343	0.2369	0.4343	0.1974	0.2961	0.1481	0.0987	0.0296	0.0099	0	2.7638
8,5 - 9,0	0.7107	0.227	0.0888	0.0592	0.1579	0.0494	0.1283	0.0494	0.0296	0.0296	0	1.53
9,0 - 9,5	1.0364	0.2073	0.1579	0.0592	0.0395	0.0197	0.0395	0.0494	0.0197	0.0395	0.0099	1.678
9,5 - 10,0	0.3751	0.2172	0.0691	0.0494	0.0395	0.0296	0.0395	0.0296	0.0099	0	0	0.8588
>10,0	0.5824	0.1481	0.1283	0.0494	0	0.0099	0.0099	0.0099	0	0.0296	0	0.9673
TOTALE	40.6969	32.8497	13.8881	6.7812	3.3166	1.3622	0.6317	0.2566	0.0987	0.1086	0.0099	100

Tabella 3.6 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-T_M$  per i dati ondosi triorari (di numero 10131) dei quattro anni di osservazione dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TM <sub>0</sub> (sec)	Classi di HMO (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
<2,0	0.0099	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0099
2,0 - 2,5	9.239	0.0691	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.3081
2,5 - 3,0	23.3837	8.5184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31.9021
3,0 - 3,5	6.8009	15.1022	1.1253	0	0	0	0	0	0	0	0	23.0283
3,5 - 4,0	0.9476	6.6528	5.952	0.1184	0	0	0	0	0	0	0	13.6709
4,0 - 4,5	0.2369	1.9149	4.58	2.7243	0.0099	0	0	0	0	0	0	9.466
4,5 - 5,0	0.0691	0.4244	1.5793	2.6651	1.4214	0	0	0	0	0	0	6.1593
5,0 - 5,5	0.0099	0.1283	0.4935	0.8489	1.3424	0.6219	0	0	0	0	0	3.4449
5,5 - 6,0	0	0.0197	0.1382	0.3553	0.4343	0.5429	0.3356	0.0099	0	0	0	1.8359
6,0 - 6,5	0	0.0197	0.0197	0.0691	0.0987	0.1579	0.1875	0.1283	0.0395	0	0	0.7206
6,5 - 7,0	0	0	0	0	0.0099	0.0395	0.079	0.0888	0.0494	0.079	0	0.3455
7,0 - 7,5	0	0	0	0	0	0	0.0197	0.0296	0.0099	0.0197	0.0099	0.0888
7,5 - 8,0	0	0	0	0	0	0	0.0099	0	0	0.0099	0	0.0197
8,0 - 8,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,5 - 9,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,0 - 9,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,5 - 10,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>10,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALE	40.6969	32.8497	13.8881	6.7812	3.3166	1.3622	0.6317	0.2566	0.0987	0.1086	0.0099	100

Tabella 3.7 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-D_{MT}$  per i dati ondosi triorari (di numero 10131) dei quattro anni di osservazione dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013

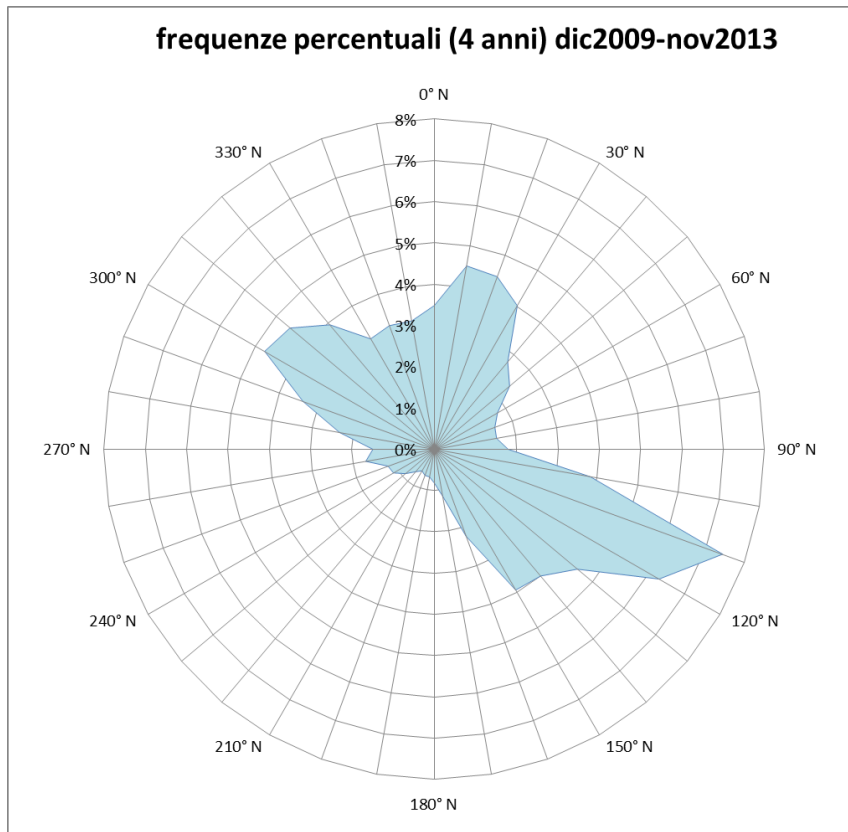
DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI DIREZIONE E DI ALTEZZA D'ONDA												
DMT (gradi Nord)	Classi di HMO (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	>5,0	
0	1.3128	1.066	0.6811	0.2369	0.1481	0.0395	0	0	0	0	0	3.4844
10	1.3918	1.1845	0.9377	0.5922	0.2665	0.0691	0.0395	0.0296	0	0	0	4.5109
20	0.9871	1.0266	0.8884	0.7107	0.5034	0.1875	0.0987	0.0395	0.0099	0	0	4.4517
30	1.0167	0.839	0.7897	0.6811	0.4442	0.1678	0.0592	0	0	0.0197	0	4.0174
40	0.5824	0.7008	0.5528	0.4146	0.3455	0.0987	0.0395	0	0	0.0296	0	2.7638
50	0.7107	0.5034	0.4639	0.2863	0.2369	0.1184	0.0296	0.0197	0.0099	0	0	2.3788
60	0.5725	0.5725	0.2369	0.1481	0.0888	0.0691	0.0395	0	0.0296	0.0099	0	1.7669
70	0.7304	0.4146	0.0987	0.1382	0.0296	0.079	0.0197	0.0197	0.0197	0.0099	0	1.5596
80	0.6021	0.4146	0.2172	0.1481	0.0592	0.0197	0.0197	0.0296	0.0197	0	0	1.53
90	0.76	0.5626	0.2961	0.0987	0.0494	0	0	0	0	0.0197	0	1.7866
100	1.2733	1.2832	0.7897	0.3553	0.0987	0.0296	0	0.0099	0	0	0	3.8397
110	1.7767	2.5861	1.372	0.8291	0.4738	0.2172	0.1481	0.0296	0	0	0	7.4326
120	2.0136	2.5664	0.839	0.4343	0.1579	0.0987	0.0987	0.0592	0	0.0197	0	6.2876
130	2.1123	1.7076	0.4047	0.1875	0.0395	0.0494	0	0.0099	0	0	0.0099	4.5208
140	2.0827	1.5991	0.2665	0.0494	0	0	0	0	0.0099	0	0	4.0075
150	2.3591	1.372	0.1875	0.0099	0.0099	0	0	0	0	0	0	3.9384
160	1.2338	0.9278	0.079	0	0	0	0	0	0	0	0	2.2406
170	0.7699	0.3553	0.0197	0	0.0099	0	0	0	0	0	0	1.1549
180	0.5725	0.1875	0.0494	0	0.0099	0	0	0	0	0	0	0.8193
190	0.4244	0.1678	0.079	0.0099	0	0	0	0	0	0	0	0.6811
200	0.4639	0.1481	0.0395	0.0099	0.0099	0	0	0	0	0	0	0.6712
210	0.2863	0.2369	0.0691	0.0099	0	0	0	0	0	0	0	0.6021
220	0.4146	0.227	0.0592	0.0099	0	0	0	0	0	0	0	0.7107
230	0.5626	0.2566	0.0888	0	0.0099	0	0	0	0	0	0	0.918
240	0.6317	0.4047	0.1086	0	0	0	0	0	0	0	0	1.145
250	0.7502	0.2961	0.1481	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1944
260	1.1647	0.3948	0.1283	0	0	0	0	0	0	0	0	1.6879
270	0.8982	0.4244	0.1481	0.0099	0	0.0099	0	0	0	0	0	1.4905
280	1.2141	0.8291	0.1777	0.0888	0.0197	0	0	0	0	0	0	2.3295
290	1.4905	1.1746	0.4442	0.1974	0.0494	0.0197	0.0099	0	0	0	0	3.3856
300	1.6583	1.8754	0.7403	0.3356	0.0888	0.0395	0.0099	0	0	0	0	4.7478
310	1.8359	1.8557	0.5725	0.2566	0.0296	0.0099	0.0099	0	0	0	0	4.5701
320	1.5793	1.6681	0.5528	0.0888	0.0395	0	0.0099	0	0	0	0	3.9384
330	1.372	1.1351	0.4343	0.1184	0.0099	0.0099	0	0.0099	0	0	0	3.0895
340	1.6681	0.9278	0.3751	0.1481	0.0494	0.0197	0	0	0	0	0	3.1882
350	1.4214	0.9575	0.5528	0.1777	0.0395	0.0099	0	0	0	0	0	3.1586
TOTALE	40.6969	32.8497	13.8881	6.7812	3.3166	1.3622	0.6317	0.2566	0.0987	0.1086	0.0099	100

Tabella 3.8 - Distribuzione delle frequenze percentuali del flusso energetico, riferito ad un metro di lunghezza di cresta, per i dati ondosi triorari (di numero 10131) dei quattro anni di osservazione dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013

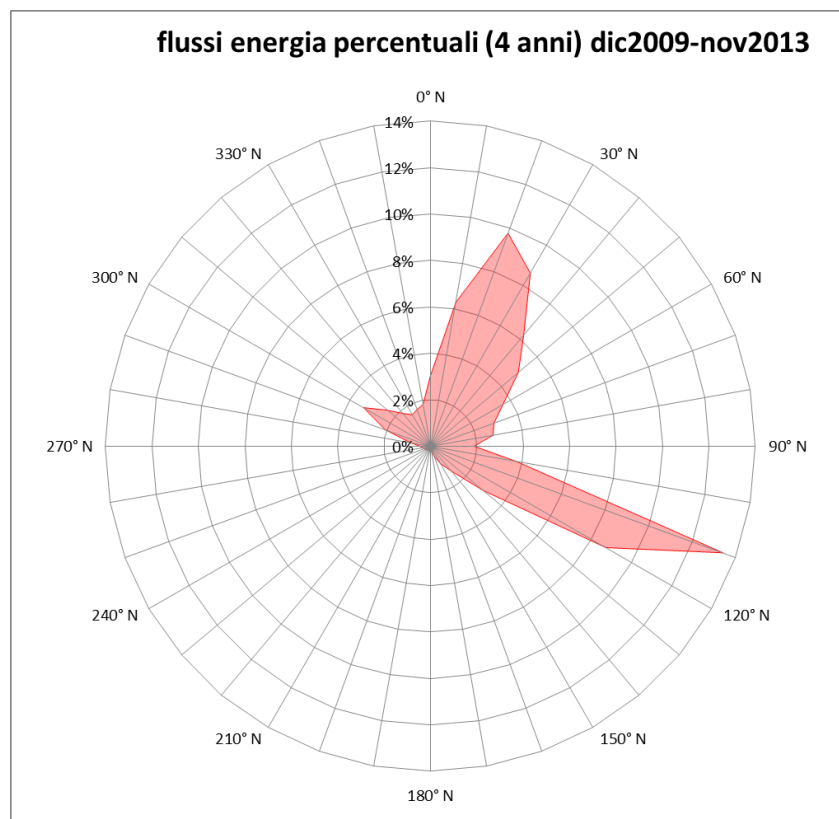
DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEL FLUSSO ENERGETICO DELLE ONDE PER METRO DI LUNGHEZZA DI CRESTA (=cost*HMO^2*TM)(in Kgf/(s*m))												
DMT (gradi Nord)	Classi di HMO (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	0,5-1,0	1,0-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	> 5,0	
0	0.0887	0.4024	0.8401	0.628	0.7488	0.3297	0	0	0	0	0	3.0378
10	0.0736	0.4482	1.2282	1.6338	1.3348	0.5126	0.5128	0.5515	0	0	0	6.2955
20	0.0533	0.4211	1.1748	1.9449	2.5422	1.5239	1.2695	0.6286	0.2156	0	0	9.7739
30	0.0574	0.3335	1.0651	2.0565	2.3208	1.4586	0.7526	0	0	0.5657	0	8.6101
40	0.0284	0.2966	0.7441	1.2104	1.7761	0.7539	0.4898	0	0	0.9509	0	6.2501
50	0.0452	0.2074	0.578	0.8344	1.2429	1.0484	0.3961	0.371	0.218	0	0	4.9414
60	0.0296	0.2293	0.3451	0.3827	0.5075	0.5551	0.5278	0	0.745	0.2854	0	3.6075
70	0.0361	0.1693	0.1266	0.4032	0.1629	0.6712	0.249	0.3557	0.4654	0.2762	0	2.9156
80	0.0293	0.1652	0.2809	0.4307	0.2996	0.1744	0.2344	0.5838	0.5372	0	0	2.7355
90	0.0517	0.2077	0.4176	0.2898	0.2612	0	0	0	0	0.6521	0	1.8801
100	0.0863	0.5333	1.0974	1.0401	0.5639	0.2678	0	0.169	0	0	0	3.7578
110	0.1302	1.1658	2.0069	2.7219	2.7683	2.0431	2.0497	0.5335	0	0	0	13.4193
120	0.1473	1.0169	1.1499	1.4138	0.9187	0.8753	1.3325	1.1773	0	0.6988	0	8.7306
130	0.1467	0.5906	0.5274	0.5452	0.1957	0.3887	0	0.1688	0	0	0.3985	2.9616
140	0.144	0.5149	0.3436	0.1217	0	0	0	0	0.2717	0	0	1.3958
150	0.1554	0.402	0.2358	0.0397	0.0406	0	0	0	0	0	0	0.8736
160	0.0743	0.2765	0.0896	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4404
170	0.0432	0.1009	0.0177	0	0.0482	0	0	0	0	0	0	0.21
180	0.0288	0.0496	0.0534	0	0.0505	0	0	0	0	0	0	0.1822
190	0.0166	0.0615	0.0782	0.031	0	0	0	0	0	0	0	0.1873
200	0.0304	0.0477	0.0421	0.0208	0.0446	0	0	0	0	0	0	0.1856
210	0.0151	0.0675	0.085	0.0298	0	0	0	0	0	0	0	0.1975
220	0.0192	0.0755	0.0659	0.0236	0	0	0	0	0	0	0	0.1842
230	0.0274	0.0789	0.0966	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0.2529
240	0.0324	0.1221	0.1113	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2658
250	0.0431	0.091	0.1534	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2875
260	0.0707	0.1294	0.1531	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3531
270	0.0543	0.1372	0.1479	0.0291	0	0.0819	0	0	0	0	0	0.4504
280	0.0778	0.2695	0.1842	0.2373	0.0949	0	0	0	0	0	0	0.8636
290	0.1052	0.4261	0.5335	0.5048	0.214	0.1531	0.1377	0	0	0	0	2.0744
300	0.1143	0.6364	0.8602	0.8358	0.4239	0.3357	0.1207	0	0	0	0	3.3271
310	0.1333	0.6068	0.634	0.6991	0.1325	0.1022	0.1062	0	0	0	0	2.4142
320	0.1146	0.5578	0.6475	0.2296	0.1674	0	0.1287	0	0	0	0	1.8456
330	0.088	0.3724	0.4753	0.2881	0.0437	0.083	0	0.2189	0	0	0	1.5695
340	0.111	0.3276	0.4499	0.4203	0.2287	0.1513	0	0	0	0	0	1.6888
350	0.0853	0.3318	0.6695	0.4508	0.1915	0.1047	0	0	0	0	0	1.8337
TOTALE	2.588	11.8706	17.7097	19.4969	17.374	11.6145	8.3076	4.758	2.453	3.4291	0.3985	100

Dal punto di vista grafico in Figura 3.7 è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale del moto ondoso triorario rilevato dalla boa ondometrica posta al largo di Ancona nella seconda fase dei 4 anni di osservazioni (fra il 2009 ed il 2013), secondo il dato direzionale di provenienza media suddiviso per intervalli di 10°.

Nella Figura 3.8 è riportata la distribuzione direzionale delle frequenze percentuali del flusso energetico per metro di lunghezza di cresta delle stesse onde (dei 4 anni fra il 2009 ed il 2013), suddivise negli stessi settori direzionali di 10°.



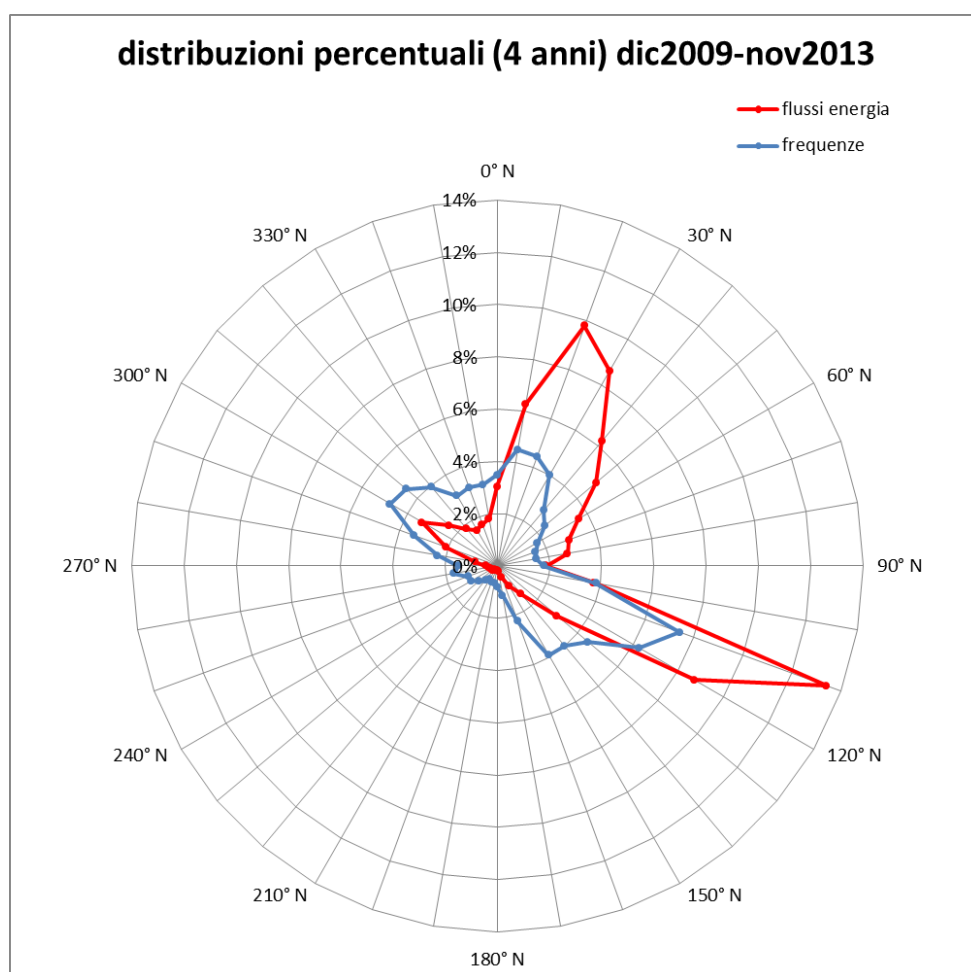
*Figura 3.7 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei dati ondosi triorari registrati dalla stazione di rilievo della RON al largo di Ancona nei 4 anni dal 1 dic. 1999 al 30 nov. 2006*



*Figura 3.8 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei flussi energetici per metro di lunghezza di cresta dei dati ondosi triorari, registrati dalla stazione di misura ondometrica della RON al largo di Ancona nei 4 anni dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013*



In Figura 3.9 è riportato il grafico di confronto delle suddette distribuzioni direzionali delle frequenze e del flusso energetico per metro di lunghezza di cresta delle serie triorarie dei dati della seconda fase di osservazioni (4 anni, fra il 2009 ed il 2013). Dalla analisi di tali andamenti, si confermano, sostanzialmente, le caratteristiche della fenomenologia climatologica ondosa, dal punto di vista della distribuzione direzionale, del paraggio adriatico anconitano già osservate per la prima fase delle osservazioni.



*Figura 3.9 - Distribuzione direzionale percentuale di confronto fra la frequenza ed il flusso di energia per metro di lunghezza di cresta delle onde registrate dalla stazione di misura ondometrica della RON al largo di Ancona nei 4 anni dal 1 dicembre 2009 al 30 dicembre 2013*

Invece, come già osservato per i dati medi di altezza d'onda, il fatto che l'intensità ondosa risulti essere aumentata dai primi 4 anni di osservazione (fra il 1999 ed il 2006) ed i secondi 4 anni di misure (fra il 2009 ed il 2013), è confermato dalle frequenze marginali delle classi di altezza d'onda presentati nelle citate tabelle. Infatti, diminuisce la frequenza delle classi di onde più basse (dal 46,3% al 40,7%), mentre aumenta per le classi più alte.

In definitiva, complessivamente, il regime ondoso medio al largo del paraggio adriatico anconitano, per i complessivi 11 anni (dei periodi 1999-2006 e 2009-2013) risulta descritto con i valori delle tabelle ed i grafici delle distribuzioni direzionali riportati di seguito.

In particolare, la serie di tabelle dalla Tabella 3.9 alla Tabella 3.11 contengono le raccolte della distribuzione di frequenza percentuale dei dati ondosi triorari per l'intero periodo di 11 anni delle due fasi di osservazione (7 anni, dal 10 marzo 1999 al 9 marzo 2006, e 4 anni, dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2013), rispettivamente suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di periodi di picco, classi di altezze d'onda significative e di periodi medi, classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza. Infine, la Tabella 3.12 contiene la raccolta della distribuzione di frequenza percentuale dei flussi energetici relativamente ai dati ondosi triorari per l'intero periodo di 11 anni delle due fasi di osservazione, suddivisi per classi di altezze d'onda significative e di settori direzionali di provenienza.

*Tabella 3.9 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-T_P$  per i dati ondosi triorari (di numero 25375) degli 11 anni di osservazione dei periodi 1999-2006 e 2009-2013*

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TP (sec)	Classi di $H_{m0}$ (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
< 2,0	0.6424	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6424
2,0 - 2,5	3.598	0.0512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.6493
2,5 - 3,0	6.7389	0.7764	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.5153
3,0 - 3,5	7.2552	3.3103	0.0079	0	0	0	0	0	0	0	0	10.5734
3,5 - 4,0	5.4739	6.1202	0.197	0	0	0	0	0	0	0	0	11.7911
4,0 - 4,5	3.3143	7.4759	1.0877	0.0118	0	0	0	0	0	0	0	11.8897
4,5 - 5,0	1.7103	5.1232	2.0808	0.0788	0	0	0	0	0	0	0	8.9931
5,0 - 5,5	1.3951	3.7084	3.1094	0.6345	0.0158	0	0	0	0	0	0	8.8631
5,5 - 6,0	1.6709	1.8286	2.2975	1.135	0.1498	0.0039	0	0	0	0	0	7.0857
6,0 - 6,5	1.4384	1.0443	1.5488	1.3793	0.4847	0.0433	0	0	0	0	0	5.9389
6,5 - 7,0	1.3202	0.7291	1.1232	1.2217	0.8433	0.2286	0.0236	0.0039	0	0	0	5.4936
7,0 - 7,5	1.3163	0.469	0.5517	0.6739	0.5833	0.398	0.1143	0.0079	0	0	0	4.1143
7,5 - 8,0	0.5833	0.2443	0.1616	0.2325	0.1734	0.1576	0.0709	0.0118	0.0079	0	0	1.6433
8,0 - 8,5	1.131	0.4177	0.2246	0.2956	0.2365	0.2207	0.1222	0.0512	0.0158	0.0039	0	2.7192
8,5 - 9,0	1.2532	0.201	0.0906	0.0591	0.1103	0.0512	0.0788	0.0276	0.0118	0.0118	0	1.8956
9,0 - 9,5	1.8719	0.1773	0.1143	0.0276	0.0433	0.0276	0.0276	0.0315	0.0079	0.0158	0.0079	2.3527
9,5 - 10,0	0.6187	0.1222	0.067	0.0276	0.0276	0.0197	0.0236	0.0118	0.0079	0	0	0.9261
>10,0	2.7665	0.8276	0.2286	0.0512	0.0039	0.0039	0.0079	0.0079	0	0.0158	0	3.9133
TOTALE	44.0985	32.6266	12.8906	5.8286	2.6719	1.1547	0.469	0.1537	0.0512	0.0473	0.0079	100

Tabella 3.10 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-T_M$  per i dati ondosi triorari (di numero 25375) degli 11 anni di osservazione dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI PERIODO E DI ALTEZZA D'ONDA												
TM <sub>0</sub> (sec)	Classi di HMO (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
< 2,0	0.0118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0118
2,0 - 2,5	4.666	0.0315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.6975
2,5 - 3,0	11.464	4.2167	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.6808
3,0 - 3,5	5.8246	8.5478	0.5005	0	0	0	0	0	0	0	0	14.8729
3,5 - 4,0	8.0434	7.4365	3.0069	0.0552	0	0	0	0	0	0	0	18.5419
4,0 - 4,5	5.7103	4.8946	3.4286	1.1704	0.0079	0	0	0	0	0	0	15.2118
4,5 - 5,0	2.7507	2.664	2.2581	1.5369	0.6108	0	0	0	0	0	0	9.8207
5,0 - 5,5	1.3596	2.0729	1.8877	1.2099	0.7015	0.2995	0	0	0	0	0	7.531
5,5 - 6,0	0.9025	1.2256	1.0601	1.1192	0.5951	0.2719	0.1379	0.0039	0	0	0	5.3163
6,0 - 6,5	0.6581	0.6778	0.4493	0.4729	0.465	0.268	0.0906	0.0552	0.0158	0	0	3.1527
6,5 - 7,0	0.5951	0.3704	0.1103	0.1773	0.1498	0.1537	0.1458	0.0394	0.0197	0.0315	0	1.7931
7,0 - 7,5	0.4099	0.1852	0.067	0.0512	0.1103	0.1143	0.0591	0.0355	0.0079	0.0079	0.0079	1.0562
7,5 - 8,0	0.3941	0.1103	0.0355	0.0197	0.0236	0.0276	0.0276	0.0118	0.0039	0.0039	0	0.6581
8,0 - 8,5	0.335	0.0315	0.0079	0.0039	0.0039	0.0079	0.0079	0.0039	0	0.0039	0	0.4059
8,5 - 9,0	0.1892	0.0355	0.0118	0	0	0.0079	0	0.0039	0.0039	0	0	0.2522
9,0 - 9,5	0.1813	0.0118	0.0079	0.0079	0	0	0	0	0	0	0	0.2089
9,5 -10,0	0.1498	0.0158	0.0039	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1695
>10,0	0.4532	0.0985	0.0552	0.0039	0.0039	0.0039	0	0	0	0	0	0.6187
TOTALE	44.0985	32.6266	12.8906	5.8286	2.6719	1.1547	0.469	0.1537	0.0512	0.0473	0.0079	100

Tabella 3.11 – Distribuzione delle frequenze percentuali di  $H_{m0}-D_{MT}$  per i dati ondosi triorari (di numero 25375) degli 11 anni di osservazione dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI PER CLASSI DI DIREZIONE E DI ALTEZZA D'ONDA												
DMT (gradi Nord)	Classi di HMO (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
0	1.5527	1.0719	0.4926	0.1931	0.067	0.0158	0	0	0	0	0	3.3931
10	1.3005	1.2768	0.7527	0.3744	0.1655	0.067	0.0236	0.0158	0	0	0	3.9764
20	1.0167	1.2059	0.9064	0.6384	0.3547	0.13	0.0631	0.0276	0.0039	0	0.0039	4.3507
30	0.9813	0.997	0.7882	0.5951	0.335	0.1222	0.0591	0	0	0.0079	0	3.8857
40	0.6621	0.8315	0.6897	0.4966	0.3389	0.1064	0.0315	0	0	0.0118	0	3.1685
50	0.6581	0.6305	0.402	0.2916	0.1813	0.1064	0.0276	0.0079	0.0039	0	0	2.3094
60	0.6227	0.5714	0.2404	0.1419	0.1103	0.067	0.0276	0.0039	0.0118	0.0039	0	1.801
70	0.7645	0.4768	0.1931	0.197	0.0709	0.067	0.0315	0.0158	0.0118	0.0039	0	1.8325
80	0.7409	0.4847	0.3074	0.1537	0.0591	0.0236	0.0197	0.0118	0.0079	0	0	1.8089
90	0.8749	0.6936	0.2956	0.1537	0.0512	0.0118	0.0039	0.0039	0	0.0079	0	2.0966
100	1.2808	1.2217	0.7054	0.331	0.1064	0.0276	0	0.0039	0	0	0	3.6768
110	1.9074	2.2581	1.1232	0.5714	0.3547	0.1616	0.1025	0.0236	0.0079	0.0039	0	6.5143
120	2.3606	2.5182	0.8512	0.3547	0.13	0.0867	0.0512	0.0236	0	0.0079	0	6.3842
130	2.6365	1.8286	0.4335	0.1773	0.0394	0.0433	0.0039	0.0079	0	0	0.0039	5.1744
140	2.5773	1.6355	0.2877	0.0315	0.0039	0.0118	0.0079	0.0039	0.0039	0	0	4.5635
150	2.6483	1.3123	0.1616	0.0197	0.0158	0.0039	0	0	0	0	0	4.1616
160	1.667	0.8946	0.0828	0.0158	0.0039	0	0	0	0	0	0	2.664
170	1.1429	0.4611	0.0394	0.0079	0.0118	0	0	0	0	0	0	1.6631
180	0.6857	0.2483	0.0394	0.0039	0.0039	0	0	0	0	0	0	0.9813
190	0.5557	0.1931	0.0473	0.0118	0.0039	0	0	0	0	0	0	0.8118
200	0.465	0.1695	0.0631	0.0079	0.0079	0.0039	0	0	0	0	0	0.7172
210	0.3626	0.2404	0.0591	0.0118	0.0039	0	0	0	0	0	0	0.6778
220	0.3941	0.2167	0.0394	0.0039	0	0	0	0	0	0	0	0.6542
230	0.536	0.268	0.067	0.0079	0.0079	0	0	0	0	0	0	0.8867
240	0.6069	0.335	0.0788	0	0.0039	0	0	0	0	0	0	1.0246
250	0.7527	0.2837	0.1182	0.0039	0	0	0	0	0	0	0	1.1586
260	0.8591	0.3586	0.0709	0.0236	0	0.0039	0	0	0	0	0	1.3163
270	0.8552	0.4453	0.1064	0.0315	0.0039	0.0039	0	0	0	0	0	1.4463
280	1.1034	0.7291	0.2089	0.0591	0.0079	0.0039	0	0	0	0	0	2.1123
290	1.4227	1.0877	0.4729	0.1261	0.0315	0.0197	0.0039	0	0	0	0	3.1645
300	1.6039	1.5527	0.6975	0.2286	0.067	0.0197	0.0039	0	0	0	0	4.1734
310	1.8365	1.7103	0.5044	0.1576	0.0276	0.0118	0.0039	0	0	0	0	4.2522
320	1.7813	1.5133	0.4138	0.0788	0.0197	0	0.0039	0	0	0	0	3.8108
330	1.6512	1.0995	0.3507	0.0867	0.0079	0.0079	0	0.0039	0	0	0	3.2079
340	1.6315	0.9103	0.3704	0.1064	0.0433	0.0118	0	0	0	0	0	3.0739
350	1.6	0.8946	0.4296	0.134	0.0315	0.0158	0	0	0	0	0	3.1054
TOTALE	44.0985	32.6266	12.8906	5.8286	2.6719	1.1547	0.469	0.1537	0.0512	0.0473	0.0079	100

Tabella 3.12 - Distribuzione delle frequenze percentuali del flusso energetico, riferito ad un metro di lunghezza di cresta, per i dati ondosi triorari (di numero 25375) degli 11 anni di osservazione dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEL FLUSSO ENERGETICO DELLE ONDE PER METRO DI LUNGHEZZA DI CRESTA (=cos <sup>2</sup> *HMO <sup>2</sup> *TM)(in Kgf/(s*m))												
DMT (gradi Nord)	Classi di HMO (metri)											TOTALE
	0,0-0,5	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	
0	0.1487	0.4787	0.7043	0.6007	0.3783	0.1398	0	0	0	0	0	2.4505
10	0.1055	0.6318	1.111	1.1638	0.9372	0.5948	0.328	0.3116	0	0	0	5.1836
20	0.0876	0.6184	1.4277	2.0997	2.0785	1.2089	0.9019	0.4977	0.0914	0	0.1822	9.194
30	0.0822	0.5156	1.2504	2.0411	1.9963	1.188	0.8595	0	0	0.2399	0	8.1731
40	0.0493	0.4278	1.1201	1.7815	2.1047	1.0219	0.4528	0	0	0.4032	0	7.3613
50	0.0543	0.3236	0.5933	0.9864	1.0767	1.0719	0.4044	0.1573	0.0924	0	0	4.7604
60	0.0476	0.2864	0.4069	0.4656	0.7118	0.6769	0.4162	0.0949	0.3159	0.121	0	3.5432
70	0.0562	0.2602	0.3211	0.6901	0.4629	0.6501	0.4608	0.3339	0.3131	0.1171	0	3.6654
80	0.0541	0.2623	0.5067	0.5462	0.332	0.208	0.3126	0.2475	0.2278	0	0	2.6972
90	0.0722	0.352	0.4611	0.5505	0.3201	0.1371	0.0579	0.0896	0	0.2765	0	2.3171
100	0.116	0.6473	1.2164	1.1358	0.7284	0.2888	0	0.0717	0	0	0	4.2044
110	0.1946	1.185	2.0361	2.1119	2.3814	1.7529	1.6369	0.5027	0.2424	0.1769	0	12.2208
120	0.2367	1.2534	1.4384	1.348	0.9215	0.9136	0.7574	0.4992	0	0.2963	0	7.6645
130	0.2652	0.8348	0.6713	0.6282	0.2585	0.4339	0.0586	0.1647	0	0	0.169	3.4843
140	0.2576	0.6904	0.4462	0.0985	0.0356	0.1352	0.1455	0.0827	0.1152	0	0	2.0069
150	0.2442	0.519	0.2208	0.0855	0.0914	0.0481	0	0	0	0	0	1.209
160	0.1585	0.3487	0.1178	0.0571	0.0335	0	0	0	0	0	0	0.7156
170	0.0946	0.1866	0.0486	0.0278	0.0709	0	0	0	0	0	0	0.4285
180	0.0512	0.1178	0.046	0.0152	0.0214	0	0	0	0	0	0	0.2517
190	0.0446	0.096	0.0618	0.0409	0.031	0	0	0	0	0	0	0.2744
200	0.035	0.0933	0.1093	0.0229	0.049	0.0651	0	0	0	0	0	0.3745
210	0.0249	0.112	0.0869	0.037	0.0294	0	0	0	0	0	0	0.2901
220	0.0286	0.0966	0.0548	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0.1901
230	0.0401	0.1057	0.0876	0.0235	0.0433	0	0	0	0	0	0	0.3003
240	0.0466	0.142	0.1087	0	0.0248	0	0	0	0	0	0	0.3221
250	0.0573	0.1224	0.1628	0.0121	0	0	0	0	0	0	0	0.3547
260	0.0695	0.1532	0.0936	0.0794	0	0.0459	0	0	0	0	0	0.4417
270	0.0722	0.2129	0.1264	0.1102	0.0217	0.0347	0	0	0	0	0	0.5781
280	0.1016	0.3216	0.2822	0.1769	0.0402	0.0439	0	0	0	0	0	0.9665
290	0.132	0.4495	0.6697	0.367	0.1545	0.1902	0.0584	0	0	0	0	2.0214
300	0.147	0.6636	0.9731	0.6595	0.3754	0.1817	0.0512	0	0	0	0	3.0514
310	0.1701	0.7104	0.6681	0.4835	0.1567	0.1208	0.045	0	0	0	0	2.3545
320	0.1681	0.6194	0.5739	0.2407	0.0959	0	0.0546	0	0	0	0	1.7526
330	0.1446	0.4538	0.497	0.2687	0.0458	0.0695	0	0.0928	0	0	0	1.5724
340	0.1383	0.3872	0.5142	0.3527	0.2413	0.1036	0	0	0	0	0	1.7374
350	0.1347	0.3981	0.598	0.4183	0.1786	0.1582	0	0	0	0	0	1.8859
TOTALE	3.9317	15.0777	19.8124	19.7371	16.4287	11.4835	7.0017	3.1464	1.3982	1.6309	0.3512	100

Graficamente, in Figura 3.10, è rappresentata la distribuzione direzionale della frequenza percentuale del moto ondoso triorario rilevato dalla boa ondometrica posta al largo di Ancona negli 11 anni relativi alle due fasi di osservazione (i 7 anni, fra il 1999 ed il 2006, ed i 4 anni, fra il 2009 ed il 2013), secondo il dato direzionale di provenienza media suddiviso per intervalli di 10°. Nella Figura 3.11 è riportata la distribuzione direzionale delle frequenze percentuali del flusso energetico per metro di lunghezza di cresta delle stesse onde degli 11 anni complessivi dei due periodi (1999-2006 e 2009-2013), suddivise negli stessi settori direzionali di 10°.

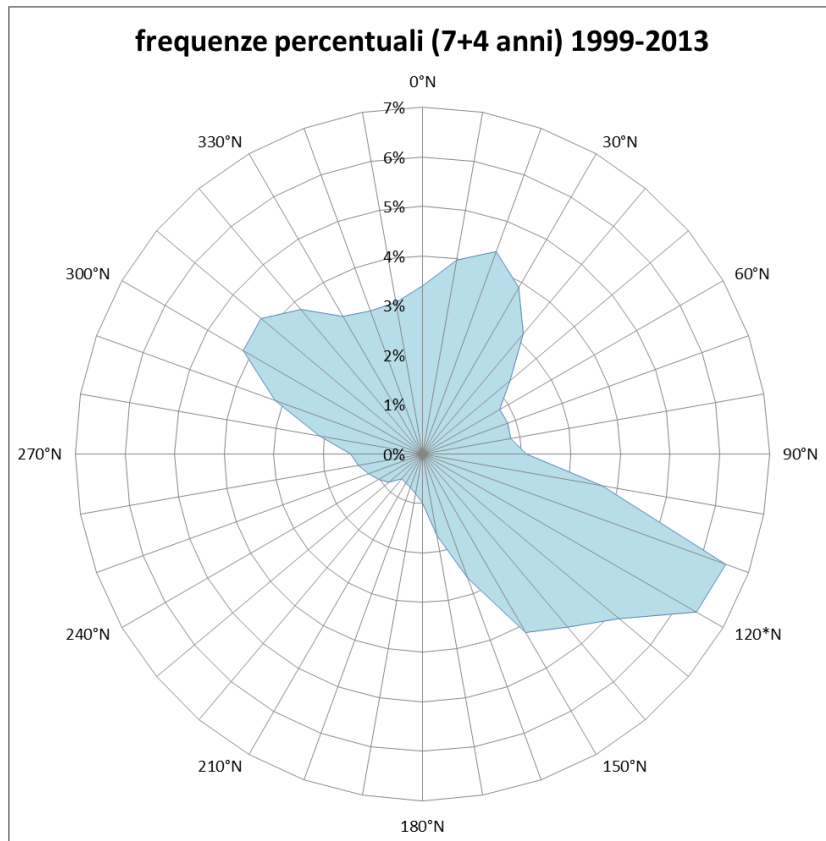


Figura 3.10 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei dati ondosi triorari registrati dalla stazione della RON al largo di Ancona negli 11 anni dei periodi 1999-2006 e 2009-2013

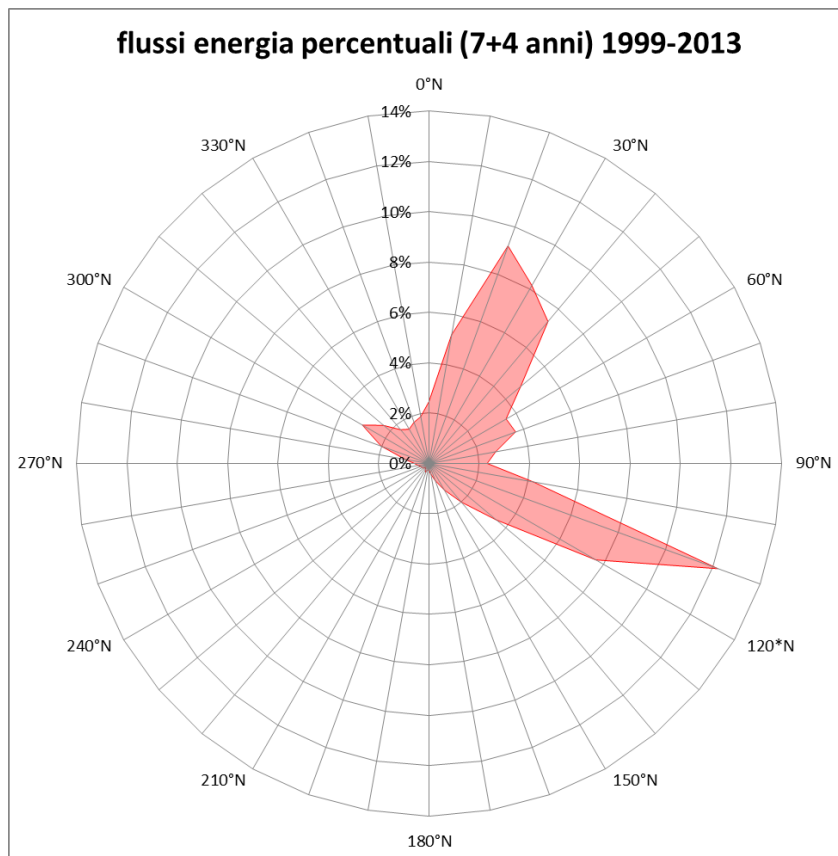


Figura 3.11 - Distribuzione direzionale delle frequenze percentuali dei flussi energetici per metro di lunghezza di cresta dei dati ondosi triorari rilevati al largo di Ancona in 11 anni nel periodo '99-'13

In Figura 3.12 è riportato il grafico di confronto delle suddette distribuzioni direzionali delle frequenze e del flusso energetico per metro di lunghezza di cresta delle serie priorarie dei dati di entrambe le fasi di osservazione di 11 anni (7 anni, fra il 1999 ed il 2006 e 4 anni, fra il 2009 ed il 2013).

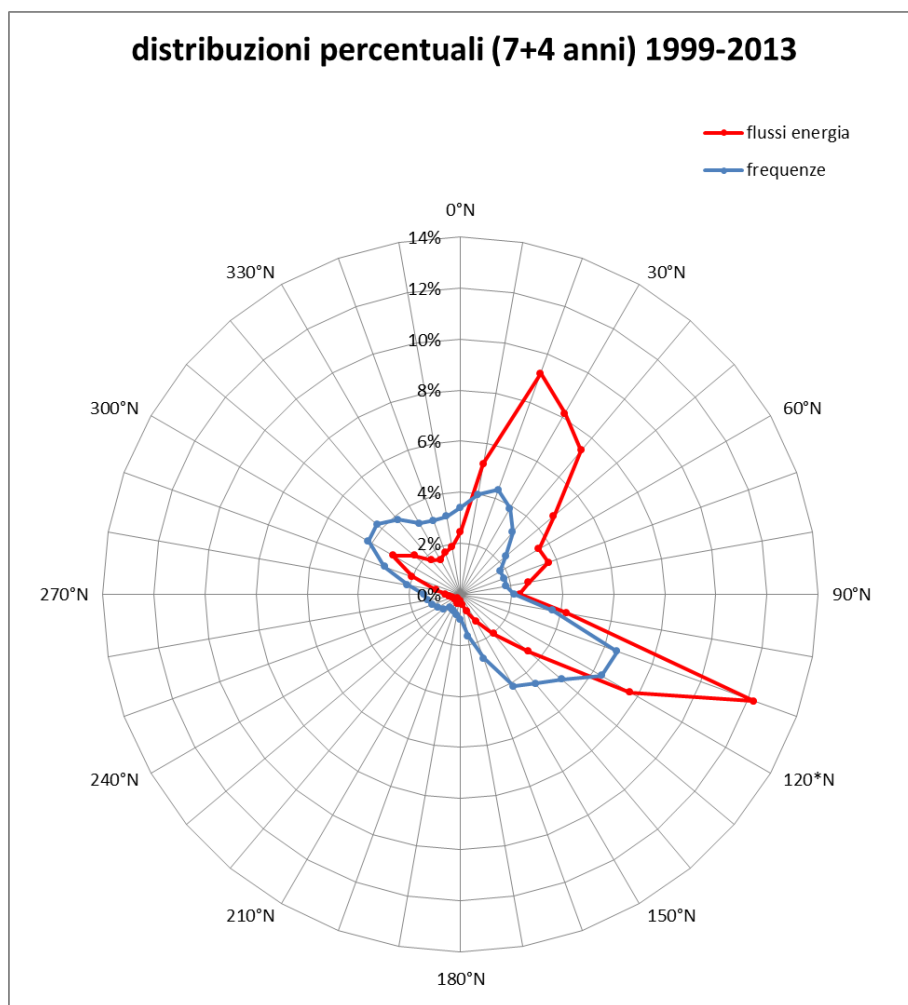


Figura 3.12 - Distribuzione direzionale percentuale di confronto fra la frequenza ed il flusso di energia per metro di lunghezza di cresta delle onde registrate dalla stazione di misura ondometrica della RON al largo di Ancona negli 11 anni di osservazioni dei due periodi 1999-2006 e 2009-2013

Inoltre, si può anche rilevare che, nella propagazione ondosa dal largo al limite del reticolo di studio adottato per il Porto di Ancona, gli effetti di shoaling e rifrazione risultano molto limitati, sia in variazione direzionale che in diminuzione dell'intensità ondosa, non producendo, praticamente, variazioni significative delle classi di suddivisione della citata distribuzione di frequenza dei dati. Per cui, si ritiene opportuno, anche a favore di sicurezza, considerare, al margine del reticolo di studio, le stesse condizioni ondose descritte per il largo.

### **3.3 Analisi delle onde estreme**

L'onda di progetto deve essere rappresentativa delle condizioni ambientali che possono considerarsi pericolose ai fini della stabilità delle strutture marittime. In generale, l'onda di progetto può essere sia un'onda significativa sia un'onda caratteristica dello stato di mare ( $H_{1/10}$ ,  $H_{1/100}$ ,  $H_{1/250}$ ).

Il rischio da associare all'onda di progetto si specifica generalmente, attraverso il periodo di ritorno  $T_r$  degli stati di mare che la contengono e dalla loro probabilità di accadimento durante la vita prevista dell'opera.

Le fasi da affrontare in un'analisi volta alla previsione dei massimi valori che l'altezza d'onda può assumere in un determinato arco temporale, si possono così riassumere:

- selezione dei dati omogenei ed indipendenti tra quelli disponibili;
- individuazione del modello probabilistico che meglio rappresenta i dati selezionati;
- determinazione del massimo valore d'altezza d'onda atteso in un fissato arco di tempo;
- calcolo dell'intervallo di confidenza associato al valore atteso.

Nei seguenti paragrafi viene illustrata la procedura standardizzata adottata per l'analisi statistica dei valori estremi delle altezze d'onda significative, che viene applicata alla serie di dati ondosi rilevati dalla boa ondometrica della R.O.N., situata al largo di Ancona, per il primo periodo di osservazione, quello di sette anni fra il 10 marzo 1999 ed il 9 marzo 2006.

#### *3.3.1 Selezione dei dati da analizzare e metodologia adottata*

La selezione dei dati da elaborare è probabilmente l'aspetto più importante dell'analisi statistica dei valori estremi. In generale i modelli di analisi richiedono che il campione da elaborare venga estratto dall'intera serie di dati e che debba essere rappresentativo dell'intera popolazione da cui è estratto.

Nel 1990 la "Section on Maritime Hydraulics of the International Association for Hydraulic Research" ha organizzato un "Working Group on Extreme Wave Statistics" le cui conclusioni sono state pubblicate da Mathiesen et al. nel 1994. Tale gruppo di lavoro raccomanda di utilizzare, per le elaborazioni delle altezze d'onda estreme, il metodo "delle serie tronche" o "di durata parziale sopra una soglia" (P.O.T.) proposto da Goda, come illustrato nella relativa pubblicazione del 1988.

L'elaborazione delle altezze d'onda estreme descritta nella presente relazione viene effettuata seguendo il procedimento suddetto.

L'uso di questo metodo richiede che i massimi scelti siano tra loro indipendenti. La scelta della soglia dovrebbe essere basata su informazioni fisiche e meteorologiche: ad esempio l'analisi meteorologica delle carte del tempo potrebbe condurre a determinare il numero medio annuale degli eventi significativi di tempesta  $N_\alpha$  che interessano la zona in esame. Il gruppo di lavoro raccomanda che, per ottenere una buona significatività, la soglia di troncamento per l'elaborazione dei dati estremi con il metodo P.O.T. sia scelta in modo tale che il numero medio dei dati all'anno superiori alla soglia sia uguale o poco meno ad  $N_\alpha$ . Dalle analisi meteorologiche effettuate per le fasce costiere italiane risulta che  $N_\alpha$  sia pari circa a 25-30, con i valori più alti relativamente alle fasce costiere estreme (nord)occidentali.

### 3.3.2 Scelta della legge probabilistica

Non esistono giustificazioni teoriche per scegliere una legge di distribuzione di probabilità rispetto ad un'altra, di solito si utilizzano quelle che meglio interpretano i dati sperimentali. Spesso, per interpolare le altezze d'onda significative, viene utilizzata la distribuzione di Weibull a tre parametri. Tale legge è data dall'espressione:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\frac{(x-a)}{b}\right]^c \quad (2.2)$$

dove  $x(>a)$  è la variabile statistica ed i parametri sono detti:

a = parametro locale

b = parametro di scala

c = parametro di forma (di valore compreso tra 0,75 e 2).

La corrispondente funzione di distribuzione tronca per il metodo P.O.T. è data dalla:

$$F_T(x) = \frac{[F(x) - F(x_0)]}{[1 - F(x_0)]} = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(x-a)}{b}\right]^c + \left[\frac{(x_0-a)}{b}\right]^c\right\} \quad (2.3)$$

dove  $F_T(x)$  è la probabilità di non superamento per le serie tronche, o distribuzione tronca per i picchi di tempesta sopra la soglia, o punto di troncamento,  $x_0$ .

Se il fattore di forma della distribuzione tronca di Weibull a tre parametri è valutato essere prossimo ad 1, un adattamento accettabile può essere fornito dalla distribuzione di Gumbel per le serie tronche. La distribuzione di Gumbel è data da:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left[\frac{-(x-a)}{b}\right]\right] \quad (2.4)$$

dove  $x$  è la variabile statistica, ed i parametri sono detti: a parametro locale e b parametro di scala. La corrispondente distribuzione tronca per il metodo P.O.T. è data dall'espressione:



$$F_T(x) = \frac{\exp\{-\exp[-(x-a)/b]\} - \exp\{-\exp[-(x_0-a)/b]\}}{1 - \exp\{-\exp[-(x_0-a)/b]\}} \quad (2.5)$$

Riguardo alla scelta di una legge di distribuzione di probabilità rispetto ad un'altra, in assenza di altre giustificazioni teoriche, Goda [1988] suggerisce di tentare l'adattamento dei dati ondosi estremi con le leggi di distribuzione tronca di Gumbel e di Weibull a tre parametri (per diversi valori del parametro c), scegliendo poi quella che fornisce il miglior adattamento ai dati, che può essere indicato dal valore dell'indice di regressione della legge di distribuzione rispetto ai dati sperimentali, che deve risultare quanto più possibile prossimo all'unità.

### 3.3.3 *Analisi statistica delle onde estreme con i dati della boa R.O.N. di Ancona*

L'intero procedimento descritto nei paragrafi precedenti è stato utilizzato per l'elaborazione degli eventi ondosi estremi dei dati rilevati e registrati dalla boa della R.O.N. posta al largo di Ancona fra il 10 marzo 1999 ed il 9 marzo 2006. Di volta in volta, per le elaborazioni, è stata considerata la serie dei dati aventi direzione di provenienza compresa rispettivamente nei seguenti settori di interesse:

285°N – 315°N;	315°N – 345°N;	345°N – 15°N;
15°N – 45°N;	45°N – 75°N;	75°N – 105°N;
105°N – 135°N;	0°N – 360°N (intero settore omnidirezionale).	

avendo posto, nella loro individuazione, la maggior attenzione su quelli compresi nella traversia del paraggio marino di Ancona.

Dall'andamento cronologico delle altezze d'onda sono state individuate le mareggiate più intense rilevate dalla boa ondometrica direzionale al largo di Ancona durante il periodo di tempo preso in considerazione (in cui si aveva la disponibilità di registrazioni). Fra queste sono stati selezionati tutti gli eventi ondosi indipendenti in cui era stata raggiunta o superata l'altezza d'onda di un metro (soglia scelta per indicare un evento di mareggiata) e compresi volta per volta in ognuno dei suddetti settori direzionali. Come valore rappresentativo di ogni evento indipendente è stata considerata la massima altezza d'onda significativa raggiunta dal picco della mareggiata. Il numero della frazione dei dati da elaborare con il metodo P.O.T. va poi ulteriormente ridotto considerando solo quelli con valore di altezza d'onda superiore ad un prefissato valore della soglia di troncamento.

Per ogni settore direzionale considerato la serie dei dati ondosi estremi così determinati è stata elaborata statisticamente secondo la procedura sopra indicata ed utilizzando le leggi analitiche di Gumbel e di Weibull a tre parametri per tentare l'adattamento della distribuzione probabilistica al campione statistico. Poi per ogni caso (di elaborazione)

diverso viene scelta quella fra esse che assicuri la migliore interpolazione della serie dei dati estremi sperimentali analizzati per le eventuali valutazioni probabilistiche dei prevedibili eventi ondosi futuri e dei relativi tempi di ritorno associati.

A tal riguardo è stato scelto per la soglia di troncamento un unico valore indipendentemente dal settore direzionale considerato e dal numero di mareggiate estreme individuabili in ognuno di essi. La procedura è stata applicata con un valore della soglia di troncamento pari a 1,5 metri.

Di seguito sono riportate le tabelle riassuntive da Tabella 3.13 a Tabella 3.16 dei dati ai picchi delle mareggiate individuate durante i 7 anni di osservazione considerati ed i grafici dalla Figura 3.13 alla Figura 3.20 in cui sono riportati gli andamenti della legge probabilistica di miglior adattamento con la nuvola dei dati sperimentali per ciascun settore direzionale analizzato. Nella Figura 3.21 e nella Tabella 3.17 sono invece riportati, in forma grafica ed in forma numerica, in maniera sintetica per tutti i settori direzionali di provenienza presi in esame, i principali risultati dell'elaborazione statistica in termini di legami analitici risultati fra altezza d'onda e tempo di ritorno dell'evento ondoso.

Tabella 3.13 - Valori al picco delle mareggiate dei settori direzionali 315°N-345°N e 345°N-15°N

n° mareggiata	data	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	11/06/1999 21:30	1.43	4.94	6.25	317.43
2	19/06/1999 12:30	1.37	5.56	6.45	334.70
3	07/07/1999 09:30	1.08	4.05	4.88	327.73
4	18/11/1999 09:30	2.54	6.07	6.90	331.97
5	13/12/1999 12:30	1.91	5.29	6.06	335.24
6	27/03/2000 18:30	1.04	4.00	4.26	319.27
7	09/07/2000 06:30	2.65	6.40	7.41	336.04
8	15/07/2000 06:30	1.13	4.34	4.55	341.80
9	16/07/2000 09:30	1.15	4.20	4.88	343.13
10	28/07/2000 21:30	1.18	4.64	5.41	336.38
11	04/08/2000 21:30	1.23	4.71	5.56	339.38
12	05/08/2000 21:30	1.18	4.05	4.35	321.62
13	18/06/2001 06:30	1.32	4.65	5.56	321.67
14	12/11/2001 00:30	1.39	5.07	5.13	327.72
15	02/12/2001 15:30	1.07	4.15	4.65	334.90
16	06/01/2002 12:30	1.34	4.47	5.00	317.17
17	17/01/2002 12:30	1.79	5.15	6.06	337.60
18	24/02/2002 12:30	1.06	3.91	4.26	331.18
19	19/05/2002 03:30	1.09	4.18	4.35	316.03
20	05/07/2003 06:00	1.32	5.37	4.88	325.47
21	25/08/2003 15:30	1.41	6.01	6.90	341.20
22	05/11/2003 10:00	1.44	4.88	5.56	335.77
23	16/12/2003 06:00	2.44	5.56	5.88	336.01
24	07/04/2004 17:00	1.24	5.90	6.25	325.02
25	20/04/2004 14:00	1.19	5.92	4.44	323.56
26	23/05/2004 06:00	1.63	5.75	5.00	319.41
27	13/06/2004 10:30	2.61	6.82	7.41	343.27
28	12/07/2004 11:30	1.13	5.57	4.55	333.37
29	13/07/2004 04:30	1.43	5.09	4.44	342.09
30	26/08/2004 18:00	1.96	5.99	6.67	328.92
31	09/11/2004 04:30	1.43	4.00	6.10	341.20
32	21/11/2004 09:00	1.20	3.60	4.50	324.90
33	11/02/2006 15:00	1.18	4.70	28.60	338.20
34	17/02/2006 18:30	1.51	15.06	28.57	340.89
35	15/03/2006 01:30	1.02	4.10	28.60	338.90
1	07/07/1999 21:30	1.09	4.70	5.71	355.71
2	10/09/1999 12:30	1.08	4.60	5.13	10.00
3	17/12/1999 00:30	1.76	5.59	6.90	8.40
4	31/12/1999 15:30	1.74	4.91	5.56	351.29
5	02/01/2000 21:30	1.17	4.10	4.00	356.20
6	02/03/2000 09:30	3.02	6.51	7.14	5.96
7	13/07/2000 06:30	1.74	4.86	5.71	345.88
8	16/07/2000 00:30	1.09	4.23	4.88	354.94
9	30/07/2000 15:30	1.13	4.73	5.88	13.17
10	22/12/2000 18:30	1.28	4.54	5.26	12.02
11	18/02/2001 09:30	1.18	4.26	4.44	2.43
12	17/09/2001 06:30	1.84	5.62	6.45	5.87
13	03/11/2001 18:30	1.04	4.57	5.56	12.89
14	29/11/2001 15:30	1.45	4.77	5.56	11.84
15	05/01/2002 06:30	1.43	4.57	5.56	11.62
16	11/03/2002 06:30	1.65	5.21	6.06	12.40
17	25/04/2002 06:30	1.06	4.35	5.26	7.44
18	03/06/2002 03:30	1.09	3.99	4.44	8.87
19	29/06/2002 06:30	1.68	5.46	5.41	348.58
20	24/10/2002 13:00	1.11	5.24	5.88	13.35
21	04/11/2002 10:30	2.02	5.68	7.14	14.81
22	08/11/2002 18:30	1.54	5.11	5.88	8.97
23	01/12/2002 23:30	1.36	4.85	4.65	13.72
24	15/05/2003 05:00	1.77	5.75	4.88	7.99
25	21/05/2003 12:00	1.96	5.57	5.71	5.15
26	15/08/2003 01:00	1.35	5.61	6.25	352.14
27	31/08/2003 21:30	2.45	6.18	6.90	12.15
28	10/09/2003 19:00	1.76	5.31	5.88	8.86
29	11/09/2003 20:00	2.08	6.37	6.67	14.48
30	25/10/2003 00:30	1.46	5.36	6.25	10.30
31	25/04/2004 00:30	2.81	6.84	8.00	10.49
32	13/05/2004 06:00	1.77	5.71	6.25	4.12
33	29/05/2004 17:00	1.83	5.55	6.25	4.50
34	03/07/2004 04:00	1.53	5.95	6.45	14.51
35	27/07/2004 11:30	2.15	6.30	6.67	356.41
36	18/09/2004 13:30	1.12	5.49	4.35	350.39
37	24/09/2004 22:00	3.97	7.60	8.70	13.17
38	19/11/2004 21:00	2.82	5.40	7.10	352.60
39	03/01/2005 06:30	1.60	4.10	5.40	14.30
40	05/02/2005 21:00	1.28	4.00	5.40	8.60
41	01/10/2005 08:30	2.11	5.78	6.67	13.58
42	08/01/2006 20:30	1.04	3.70	5.10	6.10
43	13/01/2006 16:00	1.08	3.60	4.20	2.00

Tabella 3.14 - Valori al picco delle mareggiate del settore direzionale 15°-45°N

n° mareggiata	data	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	3/18/1999 6:30	3.08	6.58	6.90	37.93
2	4/3/1999 15:30	1.00	4.14	4.55	25.18
3	7/9/1999 3:30	1.36	4.84	6.06	37.79
4	7/24/1999 12:30	1.67	5.26	6.06	28.99
5	10/6/1999 6:30	1.94	5.15	5.71	24.54
6	11/19/1999 19:00	3.59	7.10	8.33	28.68
7	11/25/1999 15:30	1.07	4.54	6.06	25.24
8	1/17/2000 0:30	1.45	5.44	6.45	27.48
9	1/19/2000 9:30	2.71	6.35	6.67	16.19
10	1/23/2000 18:30	2.85	6.45	8.00	15.31
11	2/21/2000 12:30	1.24	4.96	5.26	26.12
12	5/30/2000 9:30	1.93	5.84	7.41	40.97
13	7/31/2000 0:30	1.08	5.62	4.88	37.43
14	1/14/2001 9:30	2.77	6.51	7.69	40.70
15	2/11/2001 15:30	1.92	5.28	6.25	23.69
16	2/14/2001 15:30	1.25	5.08	6.06	40.57
17	2/19/2001 9:30	1.51	5.16	6.06	23.69
18	2/24/2001 18:30	1.74	5.57	5.88	35.41
19	2/26/2001 15:30	2.80	6.63	8.00	33.25
20	3/6/2001 12:30	1.23	5.18	5.00	41.89
21	3/31/2001 9:30	2.19	5.89	7.14	33.67
22	4/17/2001 15:30	1.61	5.31	6.06	26.60
23	5/7/2001 15:30	1.03	4.67	5.41	20.57
24	8/11/2001 12:30	2.79	6.62	7.14	19.50
25	9/9/2001 18:30	1.26	4.74	5.56	43.40
26	9/10/2001 6:30	1.10	4.11	4.65	32.90
27	11/10/2001 6:30	2.31	6.07	7.41	31.02
28	11/20/2001 18:30	1.66	5.15	6.25	23.02
29	11/23/2001 18:30	2.73	6.05	6.67	27.51
30	12/1/2001 3:30	1.46	5.39	6.06	21.97
31	12/16/2001 23:00	3.77	7.31	8.70	23.48
32	12/18/2001 9:30	2.39	5.94	6.45	44.81
33	12/24/2001 6:30	1.93	6.03	6.67	31.63
34	12/27/2001 12:00	3.46	6.86	7.41	24.26
35	12/31/2001 15:30	2.51	5.93	6.67	19.77
36	1/3/2002 18:30	2.51	6.06	7.41	32.75
37	1/15/2002 15:30	1.38	4.80	5.13	17.39
38	3/4/2002 6:30	1.01	4.80	4.88	43.27
39	3/27/2002 3:30	1.49	5.22	5.88	39.47
40	4/5/2002 6:30	1.63	5.39	6.06	21.80
41	4/9/2002 18:30	2.29	5.95	6.90	31.23
42	4/21/2002 12:30	1.16	5.06	5.71	18.60
43	6/6/2002 9:30	2.85	7.46	8.33	26.06
44	11/6/2002 2:30	2.11	6.10	6.45	36.41
45	12/19/2002 4:00	2.35	6.13	7.41	19.67
46	1/1/2003 6:30	2.17	5.81	6.67	23.25
47	3/16/2003 7:00	3.42	6.78	7.41	32.36
48	3/18/2003 13:00	1.29	5.35	5.13	27.89
49	3/19/2003 4:00	1.34	5.18	5.26	39.50
50	4/8/2003 1:30	1.49	5.18	5.56	30.00
51	4/18/2003 6:00	1.04	5.11	4.44	22.92
52	5/23/2003 12:00	1.11	5.11	4.76	30.09
53	8/1/2003 22:00	1.37	5.33	5.41	21.74
54	9/13/2003 0:00	1.06	5.40	4.00	28.45
55	9/13/2003 15:00	1.00	5.34	4.88	44.67
56	9/14/2003 0:00	2.30	5.92	6.90	42.36
57	9/24/2003 16:30	2.31	6.11	5.71	39.59
58	10/15/2003 9:00	2.03	5.94	6.67	20.14
59	12/8/2003 12:00	3.61	7.08	8.00	36.35
60	12/15/2003 22:30	1.78	5.58	6.06	23.77
61	1/19/2004 2:30	2.55	6.41	6.67	30.83
62	1/22/2004 0:30	2.73	6.07	6.67	31.92
63	1/24/2004 4:30	1.48	5.30	4.88	20.52
64	1/30/2004 4:30	2.27	5.80	5.71	15.94
65	3/9/2004 4:00	2.13	6.06	6.67	30.08
66	3/27/2004 8:30	1.16	5.46	5.88	18.56
67	4/12/2004 10:30	1.44	6.08	6.67	31.57
68	4/14/2004 14:00	1.07	4.60	4.55	17.03
69	5/17/2004 12:00	1.85	5.69	5.88	21.26
70	5/24/2004 7:00	1.66	5.39	6.06	26.75
71	6/4/2004 9:00	1.38	5.69	5.71	18.97
72	7/28/2004 7:00	1.42	5.44	5.88	23.14
73	9/5/2004 0:00	1.14	6.26	5.13	25.21
74	9/6/2004 6:00	1.40	5.85	5.26	42.27
75	9/9/2004 9:30	1.44	5.68	5.71	19.96
76	9/17/2004 13:30	1.69	5.74	6.25	35.38
77	9/24/2004 18:30	5.45	7.00	9.10	17.00
78	11/8/2004 19:00	3.18	5.80	6.90	16.30
79	11/16/2004 18:00	1.74	4.30	5.90	27.40
80	1/26/2005 7:00	3.70	7.43	8.70	23.73
81	2/2/2005 0:30	1.96	4.70	6.50	43.40
82	2/4/2005 18:00	1.87	4.60	6.50	27.30
83	2/15/2005 3:30	3.71	6.45	6.67	22.49
84	4/21/2005 12:30	1.65	4.40	6.10	27.30
85	5/8/2005 19:00	1.27	4.20	5.40	44.60
86	5/20/2005 1:00	1.44	4.00	5.40	30.30
87	6/7/2005 23:00	2.80	6.28	6.90	27.53
88	8/4/2005 10:30	2.16	5.84	5.71	15.26
89	12/18/2005 0:00	2.13	4.80	6.30	15.00
90	1/5/2006 11:00	1.24	4.90	5.88	31.00
91	2/6/2006 14:00	3.13	5.90	7.70	38.10
92	2/12/2006 1:00	1.07	14.47	33.33	16.50
93	2/21/2006 21:30	1.11	5.00	28.60	40.00
94	2/24/2006 5:30	2.22	5.30	6.50	40.30
95	2/27/2006 17:30	2.35	5.20	6.50	15.40
96	3/6/2006 15:30	3.29	6.10	8.00	39.80

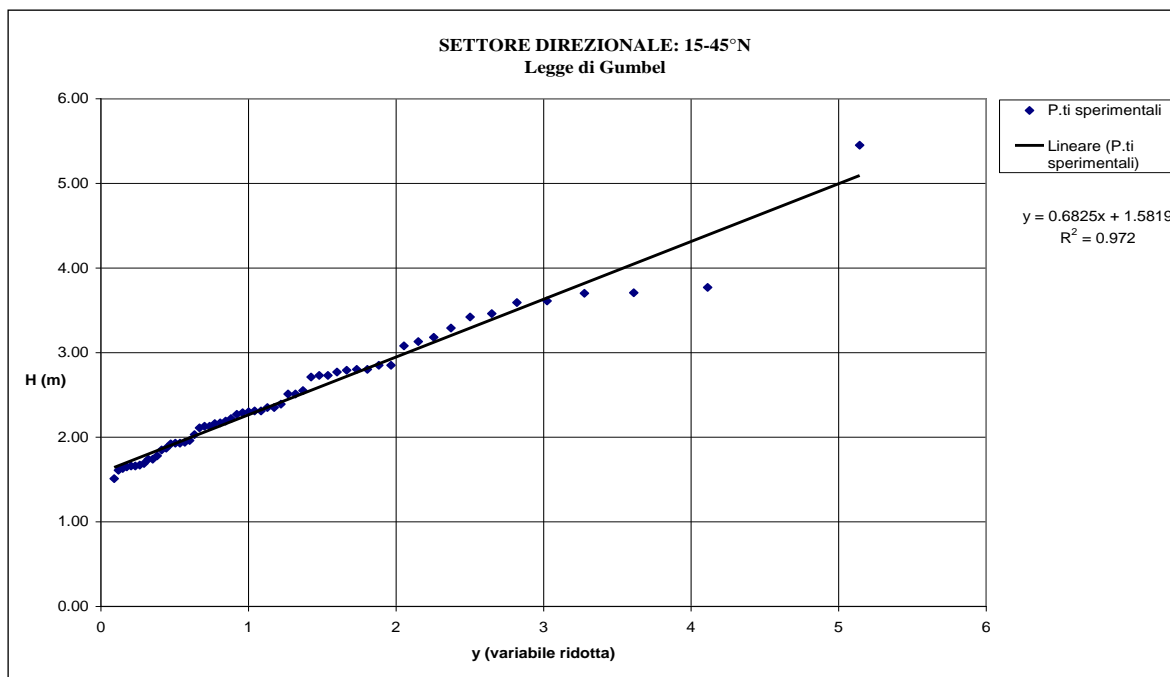
Tabella 3.15 - Valori al picco delle mareggiate dei settori direzionali 45°-75°N e 75°N-105°N

n° mareggiata	data	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	02/09/1999 03:30	2.12	5.79	6.45	45.44
2	04/10/1999 12:30	1.40	5.32	6.06	69.00
3	19/10/1999 00:30	1.85	5.28	6.06	65.93
4	07/11/1999 13:30	4.47	7.46	8.00	73.78
5	16/11/1999 00:30	2.34	5.89	6.45	66.27
6	05/12/1999 18:30	3.02	6.71	7.14	70.16
7	05/03/2000 06:30	2.34	6.15	7.14	63.32
8	18/03/2000 00:30	1.20	4.91	5.56	57.26
9	20/03/2000 03:30	1.09	4.27	4.55	68.15
10	08/09/2000 06:30	1.72	5.34	6.06	72.07
11	17/11/2000 18:30	2.06	6.78	7.41	68.55
12	20/12/2000 12:30	1.55	5.30	5.71	63.93
13	01/04/2001 09:30	1.67	5.48	6.45	60.81
14	12/04/2001 06:30	1.62	4.89	5.00	73.66
15	14/04/2001 06:30	1.89	5.36	5.88	46.29
16	12/05/2001 15:30	1.22	4.78	5.71	52.55
17	01/06/2001 09:30	1.34	4.68	4.76	46.06
18	02/11/2001 18:30	1.89	5.60	6.90	54.35
19	13/11/2001 14:00	3.86	7.23	8.00	48.09
20	07/12/2001 19:00	3.82	7.20	8.33	45.20
21	14/12/2001 01:00	3.65	7.07	7.69	68.08
22	22/02/2002 06:30	2.39	6.23	6.67	50.86
23	25/03/2002 03:30	3.14	6.79	7.69	61.61
24	07/12/2002 01:30	2.64	6.00	6.06	56.36
25	25/12/2002 08:00	1.27	4.46	4.76	64.70
26	03/03/2003 15:30	2.08	5.84	6.67	74.85
27	22/03/2003 06:30	1.23	5.21	5.71	63.79
28	23/03/2003 05:30	1.89	5.82	6.06	54.00
29	04/04/2003 12:30	2.55	6.36	7.14	47.33
30	03/09/2003 08:30	1.39	5.65	6.06	51.07
31	04/09/2003 04:00	1.40	5.37	5.88	48.40
32	18/10/2003 01:30	1.17	4.60	5.56	73.67
33	27/10/2003 04:30	2.23	6.07	6.06	70.53
34	11/11/2003 04:00	1.28	5.18	5.71	67.85
35	12/02/2004 07:00	2.23	6.25	6.45	73.13
36	14/05/2004 11:30	1.04	5.05	5.00	48.51
37	17/05/2004 23:00	1.01	5.33	4.35	47.89
38	14/06/2004 12:30	1.39	5.54	4.88	52.29
39	10/09/2004 05:00	1.08	5.37	6.06	60.85
40	16/09/2004 17:00	1.19	4.88	4.44	56.26
41	30/12/2004 00:00	3.13	6.69	7.41	47.42
42	14/02/2005 03:00	1.45	4.20	5.40	52.70
43	18/02/2005 13:00	1.09	4.00	5.30	48.50
44	18/09/2005 04:30	2.74	6.02	6.90	67.03
45	24/11/2005 05:00	1.96	6.39	6.06	60.64
46	09/12/2005 23:00	3.40	6.60	6.90	59.36
47	12/01/2006 10:00	1.34	4.40	5.40	56.40
48	12/03/2006 19:30	3.76	6.60	8.30	66.30
1	10/04/1999 06:30	1.93	5.65	7.14	86.66
2	22/04/1999 09:30	1.67	5.94	6.90	101.55
3	17/05/1999 03:30	1.09	4.48	5.56	79.91
4	16/07/1999 09:30	1.05	4.34	5.41	88.39
5	16/10/1999 03:30	1.42	4.89	5.88	97.54
6	04/11/1999 09:30	1.43	4.82	5.00	77.68
7	21/11/1999 06:30	2.54	6.25	6.90	80.31
8	15/03/2000 21:30	2.01	5.50	6.45	87.02
9	17/03/2000 03:30	1.06	4.51	5.00	79.72
10	26/08/2000 12:30	1.14	4.53	4.76	82.46
11	21/09/2000 00:30	2.69	6.97	8.00	104.01
12	03/10/2000 03:30	1.22	4.91	4.44	81.51
13	04/10/2000 06:30	1.40	6.29	8.33	87.83
14	13/11/2000 21:30	2.09	6.38	7.41	102.95
15	16/11/2000 03:30	1.22	5.47	6.90	78.27
16	31/12/2000 09:30	2.45	6.06	6.45	76.45
17	30/01/2001 08:00	4.69	7.68	8.00	75.12
18	04/02/2001 09:30	1.11	5.39	5.88	89.12
19	13/03/2001 15:30	1.95	7.04	8.00	76.33
20	15/02/2002 21:30	2.03	5.39	5.88	81.01
21	28/02/2002 06:30	1.04	5.39	6.25	104.48
22	02/03/2002 09:30	1.50	6.63	7.14	99.04
23	03/03/2002 03:30	1.17	6.35	6.67	101.91
24	29/03/2002 03:30	1.03	4.66	5.41	89.23
25	27/04/2002 21:30	1.23	5.19	6.06	78.72
26	17/10/2002 21:30	1.72	6.38	7.14	96.76
27	22/10/2002 06:00	2.08	6.19	7.41	103.21
28	29/10/2002 09:00	1.25	4.82	5.41	93.81
29	04/12/2002 13:30	3.64	6.72	7.69	86.20
30	06/04/2003 18:00	1.97	5.74	6.45	78.40
31	21/04/2003 15:30	1.15	5.30	4.26	96.17
32	14/07/2003 05:00	1.76	5.23	5.71	101.51
33	08/09/2003 21:30	1.66	5.94	6.45	97.33
34	29/10/2003 22:30	1.48	6.44	6.67	103.07
35	08/11/2003 15:00	2.19	6.64	7.41	104.92
36	24/11/2003 19:00	1.14	5.29	5.71	97.61
37	10/12/2003 00:00	2.72	6.80	9.09	102.98
38	17/12/2003 12:00	1.08	5.13	5.71	81.39
39	12/03/2004 01:00	2.62	6.98	8.33	95.92
40	31/10/2004 17:30	2.54	6.10	8.30	103.60
41	12/11/2004 05:00	1.65	4.10	4.90	81.70
42	24/11/2004 14:30	1.10	4.10	5.70	88.30
43	15/01/2005 01:00	1.26	4.00	5.10	80.10
44	19/01/2005 14:00	3.35	7.12	7.69	93.25
45	22/01/2005 06:00	1.08	4.00	5.00	80.50
46	03/10/2005 15:30	2.03	5.90	6.90	104.92
47	08/10/2005 09:30	2.26	6.15	6.90	98.56
48	03/12/2005 14:30	1.92	7.06	6.90	99.96
49	01/01/2006 01:30	1.76	5.10	6.90	92.70
50	03/01/2006 13:00	2.20	4.80	5.60	75.90
51	12/02/2006 06:30	1.04	10.64	28.57	95.59
52	15/02/2006 18:30	1.19	19.47	33.33	101.02

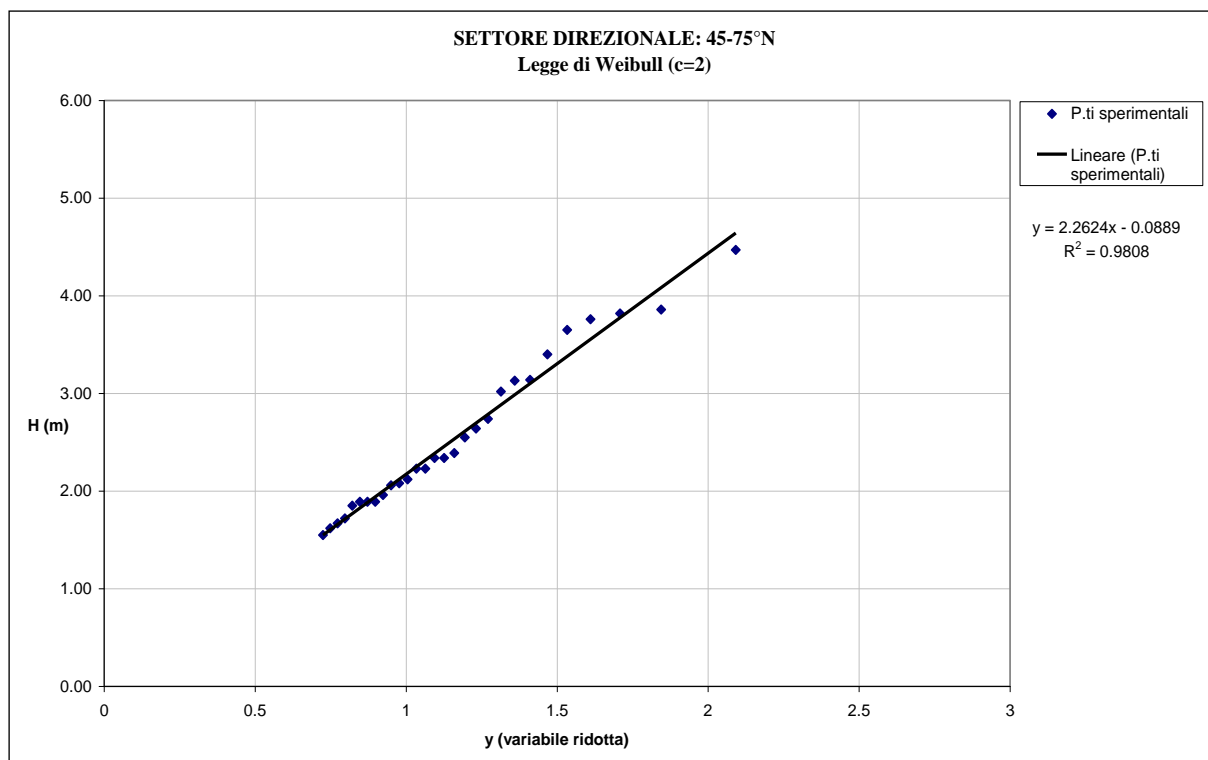
Tabella 3.16 - Valori al picco delle mareggiate dei settori direzionali 105°N-135°N e 285°N-315°N

n° mareggiata	data&ora del dato max	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	27/03/1999 12:30	2.21	6.87	7.69	106.66
2	16/04/1999 03:30	3.03	7.72	9.09	108.32
3	14/05/1999 15:30	1.21	4.43	5.13	115.51
4	16/09/1999 06:30	1.26	4.51	5.13	126.40
5	20/09/1999 19:00	3.07	6.92	8.00	132.61
6	21/10/1999 14:00	3.55	7.38	8.00	126.00
7	25/10/1999 18:30	1.73	6.09	6.25	118.47
8	15/12/1999 03:30	1.08	5.53	6.45	115.29
9	27/03/2000 09:30	1.03	5.24	6.67	126.21
10	29/03/2000 12:30	2.68	7.02	8.33	106.74
11	07/05/2000 18:30	1.03	4.90	6.06	122.32
12	04/07/2000 15:30	1.06	4.86	5.71	131.54
13	27/08/2000 18:30	1.37	4.88	5.71	134.56
14	31/08/2000 21:30	1.28	5.40	6.90	118.30
15	30/09/2000 18:00	3.24	7.36	8.33	119.27
16	13/10/2000 18:30	2.66	7.63	8.00	126.43
17	06/11/2000 20:30	3.82	12.04	8.70	117.85
18	21/11/2000 15:30	1.53	6.19	6.67	123.20
19	24/11/2000 18:30	1.87	6.12	6.90	117.75
20	09/12/2000 18:30	1.17	5.57	6.25	115.53
21	25/12/2000 09:30	2.22	7.22	8.00	117.08
22	29/12/2000 12:30	1.11	6.15	10.00	118.11
23	03/01/2001 06:30	1.56	6.64	7.69	116.27
24	07/01/2001 18:30	2.81	7.42	8.33	114.60
25	25/01/2001 21:30	1.76	6.09	7.14	106.45
26	08/02/2001 15:30	1.42	6.45	7.41	110.15
27	28/02/2001 09:30	2.99	6.69	7.14	133.45
28	04/03/2001 03:30	1.29	7.34	8.70	113.88
29	04/03/2001 12:30	1.11	5.93	9.09	130.27
30	09/03/2001 09:30	1.94	6.98	7.69	108.10
31	17/03/2001 15:30	2.25	7.11	8.00	109.14
32	25/03/2001 15:30	1.58	6.16	7.41	132.38
33	30/03/2001 06:30	2.10	5.96	7.41	114.57
34	08/04/2001 00:30	1.68	6.93	8.00	118.46
35	16/04/2001 18:30	1.10	4.51	5.00	133.26
36	15/05/2001 15:30	1.38	5.17	5.88	126.76
37	23/06/2001 06:30	1.06	5.00	5.71	133.09
38	23/09/2001 18:30	1.51	5.85	6.90	116.38
39	21/10/2001 03:30	1.65	5.65	6.06	119.80
40	29/12/2001 18:30	1.23	5.26	6.67	116.48
41	06/02/2002 21:30	1.86	6.22	7.41	122.96
42	06/03/2002 09:30	2.44	7.03	7.69	111.68
43	15/03/2002 06:30	1.24	5.86	6.90	111.59
44	12/04/2002 12:30	2.33	7.60	8.33	133.67
45	03/05/2002 21:30	1.59	6.20	6.45	120.69
46	08/05/2002 18:30	2.01	5.92	7.14	113.53
47	12/11/2002 02:00	1.29	5.52	6.06	124.32
48	16/11/2002 13:00	5.23	8.61	9.52	115.85
49	18/11/2002 12:30	2.95	7.48	8.70	109.22
50	25/11/2002 20:00	3.77	7.58	8.70	106.07
51	28/12/2002 16:00	1.58	6.76	7.14	119.27
52	03/01/2003 04:00	1.39	5.88	6.90	110.92
53	02/04/2003 22:30	2.03	6.59	7.14	111.71
54	10/04/2003 21:30	1.76	6.77	7.14	111.83
55	28/04/2003 14:30	1.05	5.68	7.69	121.75
56	29/04/2003 22:00	1.13	4.74	5.00	126.24
57	30/04/2003 19:30	1.35	5.24	5.56	122.41
58	29/08/2003 21:30	2.01	6.64	7.41	111.90
59	28/09/2003 22:00	1.19	5.38	5.71	121.33
60	01/11/2003 15:30	2.72	7.17	8.00	122.70
61	28/11/2003 03:30	2.33	7.31	8.00	127.00
62	04/12/2003 11:30	1.23	5.29	5.56	120.00
63	12/01/2004 23:30	1.40	6.13	6.45	113.43
64	07/03/2004 15:00	3.18	7.83	8.70	109.90
65	24/03/2004 08:30	1.86	7.78	9.09	124.98
66	17/04/2004 03:30	1.76	6.75	7.41	120.26
67	30/04/2004 09:00	1.84	6.59	7.14	109.58
68	04/05/2004 07:00	2.85	7.01	7.69	110.22
69	25/08/2004 20:00	1.02	5.84	4.88	106.44
70	14/09/2004 20:00	1.31	5.45	4.88	119.81
71	10/11/2004 00:00	2.81	5.50	7.10	133.20
72	25/11/2004 06:30	1.06	4.71	5.56	108.68
73	25/11/2004 13:30	1.02	3.80	6.30	130.30
74	26/12/2004 10:30	3.81	7.40	9.10	114.20
75	16/04/2005 15:30	2.09	6.20	7.70	110.40
76	25/04/2005 03:00	2.01	5.70	8.00	106.50
77	26/11/2005 14:30	2.42	7.59	9.52	113.81
78	30/11/2005 12:00	1.06	6.00	6.67	119.35
79	05/12/2005 13:00	1.22	5.83	6.45	110.49
80	05/12/2005 22:00	1.07	5.66	5.71	108.94
81	27/12/2005 18:00	1.21	3.80	4.70	124.20
82	09/02/2006 11:00	1.49	4.40	28.60	124.30
83	16/02/2006 04:30	1.00	4.30	28.60	118.40
84	16/02/2006 11:00	1.07	4.40	28.60	121.20
85	03/03/2006 09:30	1.30	13.32	28.57	118.96
86	04/03/2006 11:30	1.33	4.40	28.60	131.30
87	09/03/2006 00:00	1.05	4.20	28.60	120.00

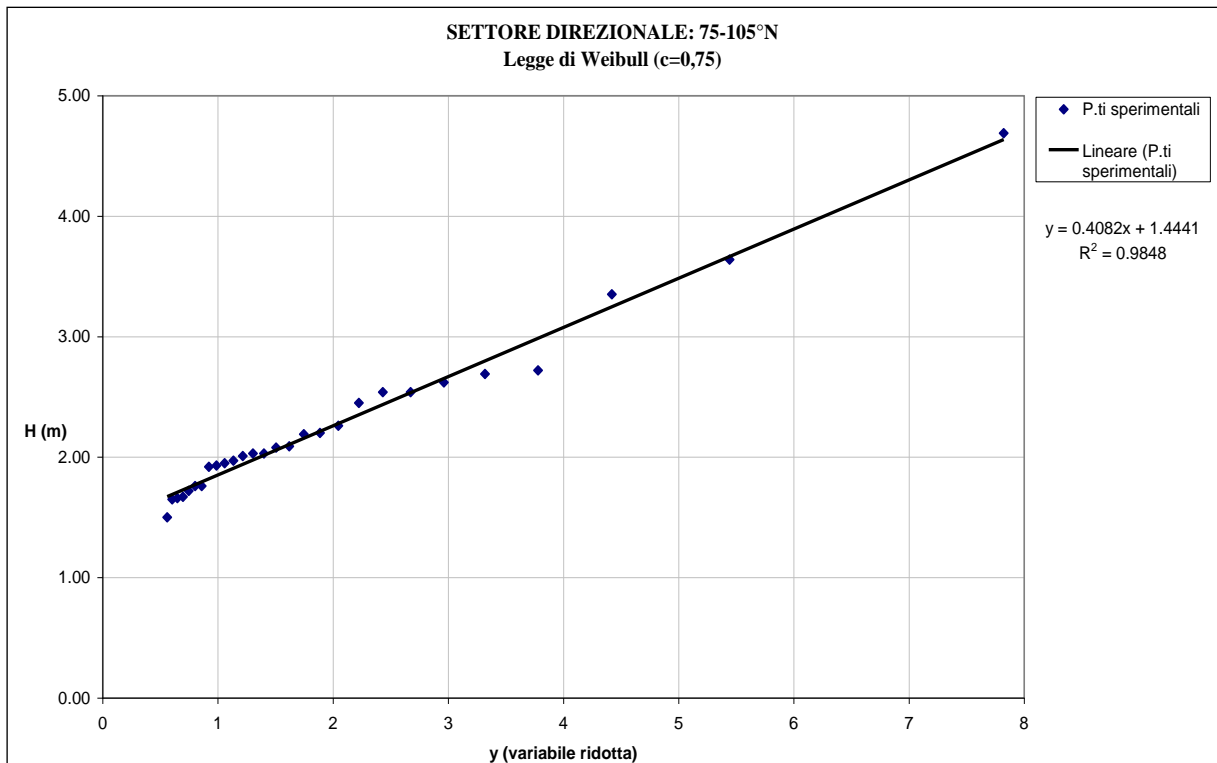
n° mareggiata	data	Hm0	Tm	Tp	Dmt
1	23/03/1999 06:30	1.81	5.07	5.56	307.49
2	18/04/1999 09:30	1.75	5.15	6.45	306.39
3	22/06/1999 03:30	2.87	6.10	7.14	292.75
4	10/07/1999 09:30	1.12	4.15	4.76	286.28
5	26/07/1999 06:30	1.00	3.77	3.92	307.03
6	29/07/1999 06:30	1.43	4.73	5.56	301.78
7	21/08/1999 06:30	1.35	4.42	5.00	296.64
8	12/11/1999 12:30	1.13	4.39	4.65	295.34
9	23/11/1999 03:30	1.97	5.28	5.71	296.01
10	11/12/1999 06:30	1.61	5.05	5.71	314.25
11	01/01/2000 09:30	1.15	3.91	3.92	298.08
12	11/01/2000 12:30	1.32	4.34	4.88	300.88
13	14/01/2000 15:30	1.59	4.71	5.41	297.45
14	26/01/2000 12:30	1.28	4.32	4.88	305.35
15	03/02/2000 09:30	1.02	3.84	4.65	301.09
16	20/02/2000 09:30	1.33	4.18	4.65	313.44
17	19/11/2000 15:30	2.11	5.47	5.88	305.85
18	27/11/2000 03:30	2.33	5.87	6.06	297.13
19	30/12/2000 03:30	2.68	6.26	7.14	289.36
20	05/01/2001 03:30	1.74	5.26	5.88	291.64
21	22/04/2001 21:30	1.22	4.28	4.88	309.86
22	20/07/2001 21:30	2.16	5.65	6.90	300.98
23	02/09/2001 12:30	1.13	4.05	4.88	311.53
24	05/09/2001 09:30	2.04	5.50	6.45	294.23
25	15/09/2001 12:30	1.69	4.96	5.88	298.21
26	26/09/2001 18:30	1.32	4.44	5.00	304.05
27	04/11/2001 12:30	1.01	4.14	4.88	307.38
28	19/11/2001 09:30	1.57	4.98	5.41	306.33
29	28/11/2001 12:30	1.44	4.64	5.13	303.13
30	03/12/2001 06:30	1.12	4.13	4.76	310.64
31	21/12/2001 09:30	1.15	4.38	5.00	303.84
32	08/01/2002 06:30	1.18	4.29	5.13	297.68
33	16/01/2002 06:30	1.06	4.20	4.76	299.16
34	25/01/2002 00:30	1.84	5.50	6.90	290.63
35	21/04/2002 00:30	1.19	4.37	4.76	289.82
36	03/12/2002 03:00	1.48	4.94	6.06	307.44
37	13/12/2002 15:30	1.76	5.24	6.06	293.44
38	16/12/2002 04:30	1.41	4.88	5.41	295.90
39	22/04/2003 10:00	1.43	5.10	5.13	313.08
40	10/09/2003 08:30	1.39	5.51	5.00	288.02
41	29/09/2003 14:30	1.29	5.24	5.56	297.93
42	06/10/2003 06:00	2.84	6.84	7.14	304.13
43	08/10/2003 07:30	2.44	6.01	6.67	309.93
44	09/11/2003 12:30	1.60	5.78	5.88	305.74
45	29/11/2003 17:00	1.45	5.05	4.88	305.68
46	13/12/2003 15:00	1.36	5.01	5.13	312.47
47	15/12/2003 04:30	1.49	4.79	5.00	306.29
48	10/01/2004 03:30	1.19	4.81	4.35	313.20
49	10/01/2004 15:30	1.33	5.23	5.26	301.60
50	15/01/2004 10:30	3.18	6.97	7.41	307.81
51	28/01/2004 11:30	1.79	5.59	5.71	308.41
52	13/04/2004 17:00	1.02	4.95	4.17	298.92
53	24/07/2004 23:30	1.27	5.55	4.26	297.70
54	14/08/2004 10:30	1.03	5.20	4.65	314.86
55	21/08/2004 19:00	1.62	5.01	5.56	313.37
56	12/11/2004 00:00	1.56	4.10	5.10	293.80
57	17/11/2004 09:00	1.01	3.10	4.20	295.60
58	20/11/2004 17:00	1.01	3.40	4.40	287.80
59	23/12/2004 13:00	3.06	31.00	33.30	291.80
60	01/01/2005 11:30	1.47	4.10	5.30	294.50
61	17/01/2005 07:30	1.64	4.30	5.90	295.90
62	06/02/2005 10:30	1.00	3.40	4.30	312.70
63	10/02/2005 09:30	1.16	3.80	5.00	286.10
64	01/12/2005 05:00	1.47	4.88	4.55	309.53
65	06/12/2005 10:30	2.09	5.46	5.71	296.17
66	07/12/2005 11:00	1.52	4.57	4.55	288.90
67	28/12/2005 03:30	1.82	4.50	5.40	285.30
68	30/12/2005 05:30	1.69	4.50	5.60	291.50
69	07/01/2006 01:00	1.39	4.00	5.00	308.50
70	10/01/2006 06:30	1.39	3.90	5.00	299.10
71	11/01/2006 13:30	1.16	3.50	5.00	285.50
72	14/01/2006 07:30	1.04	3.90	4.80	293.20



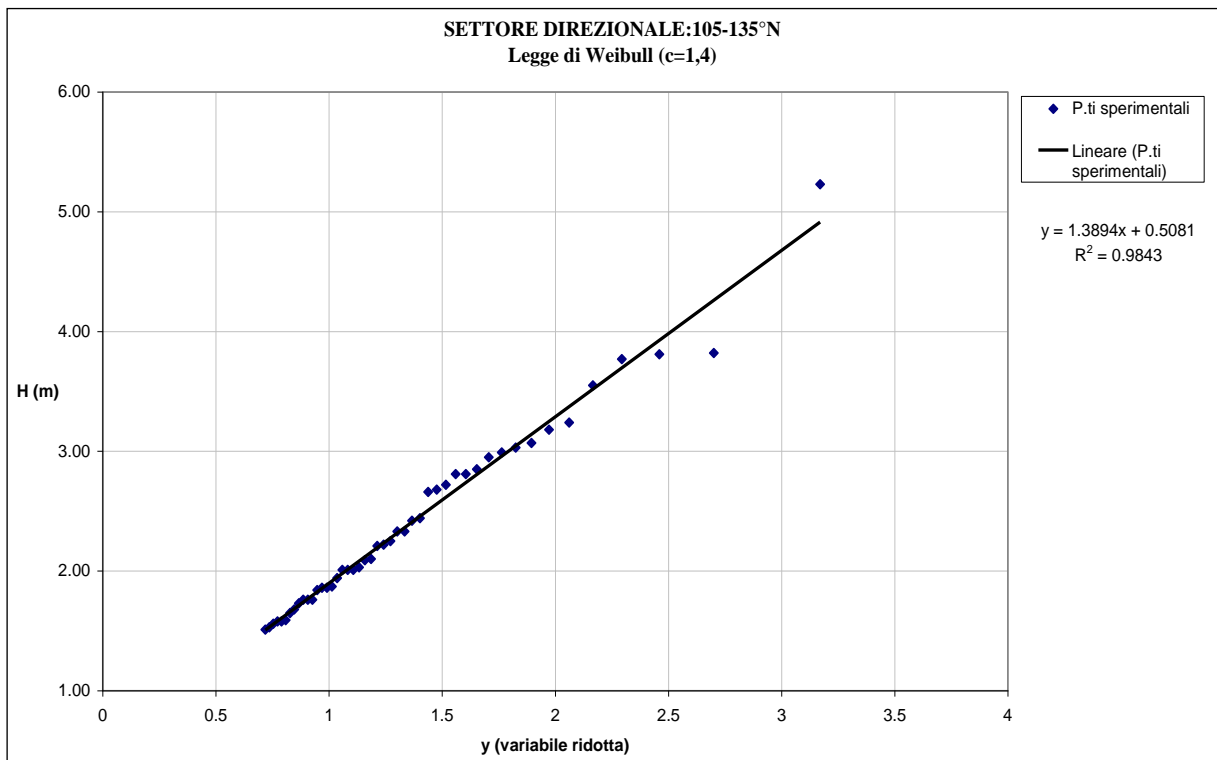
*Figura 3.13 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 15°N-45°N.*



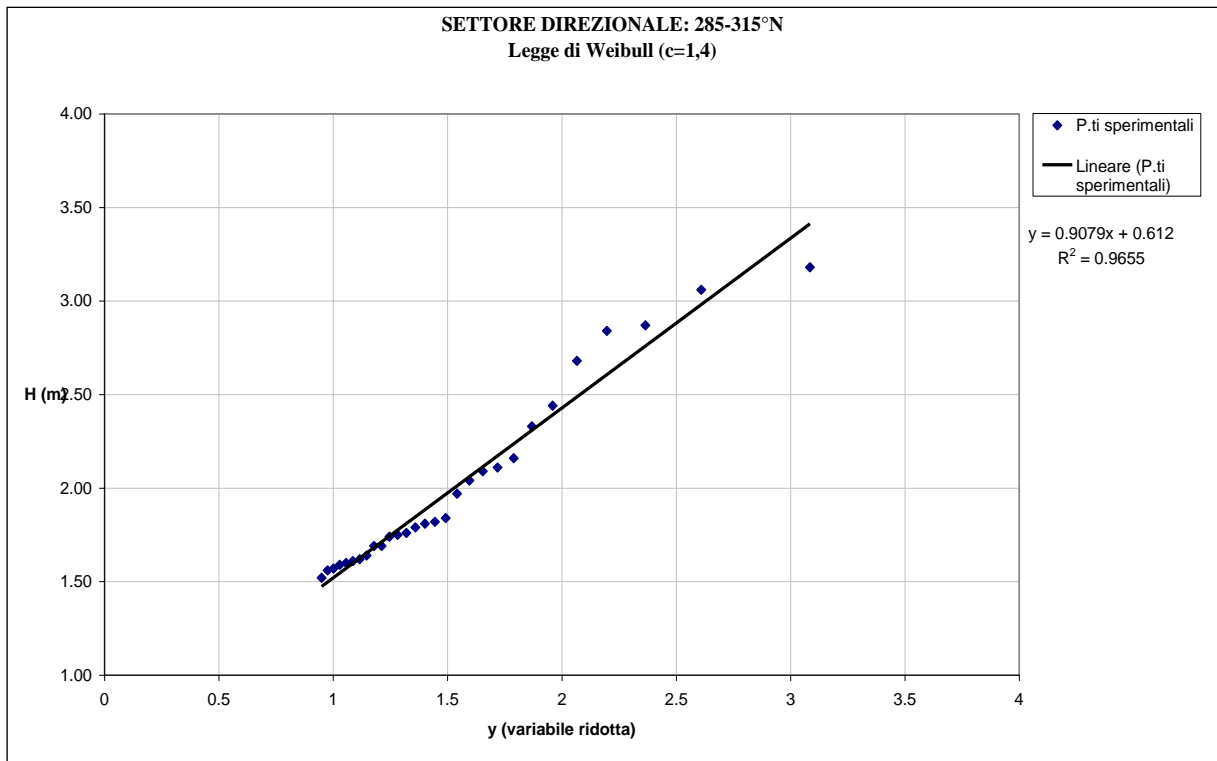
*Figura 3.14 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 45°N-75°N.*



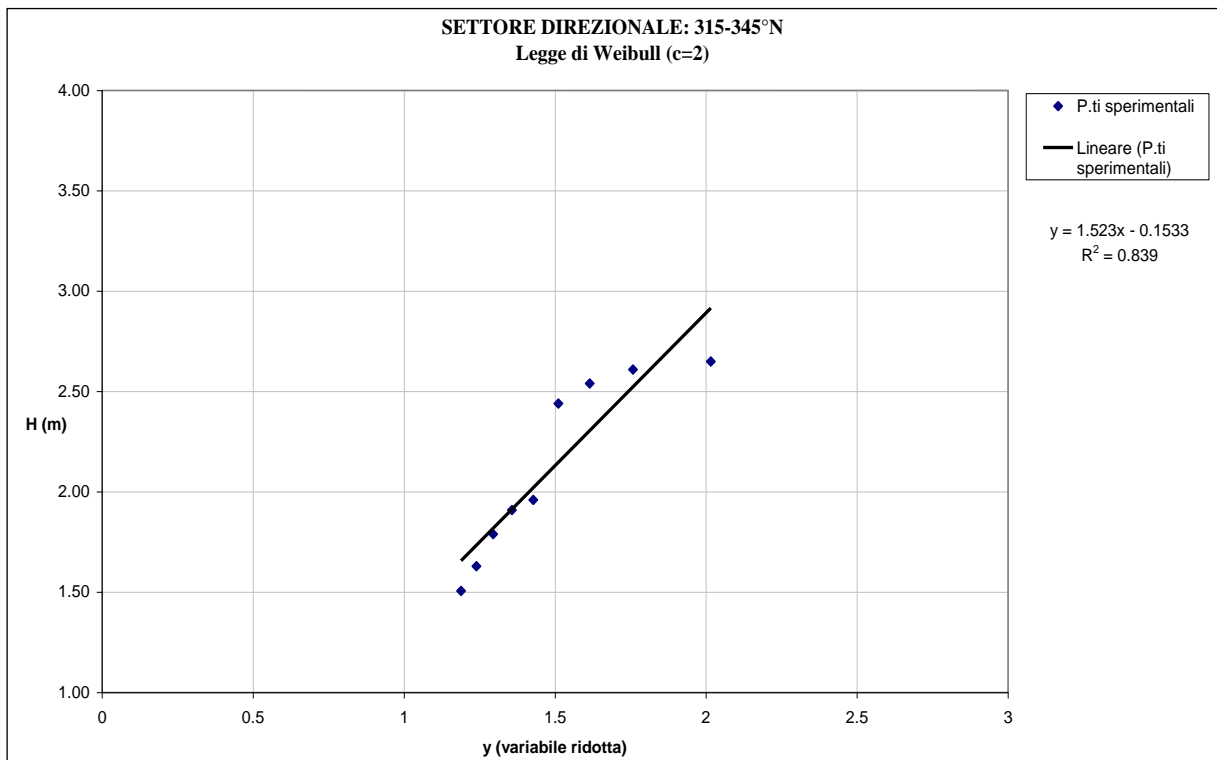
*Figura 3.15 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 75°N-105°N.*



*Figura 3.16 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 105°N-135°N*

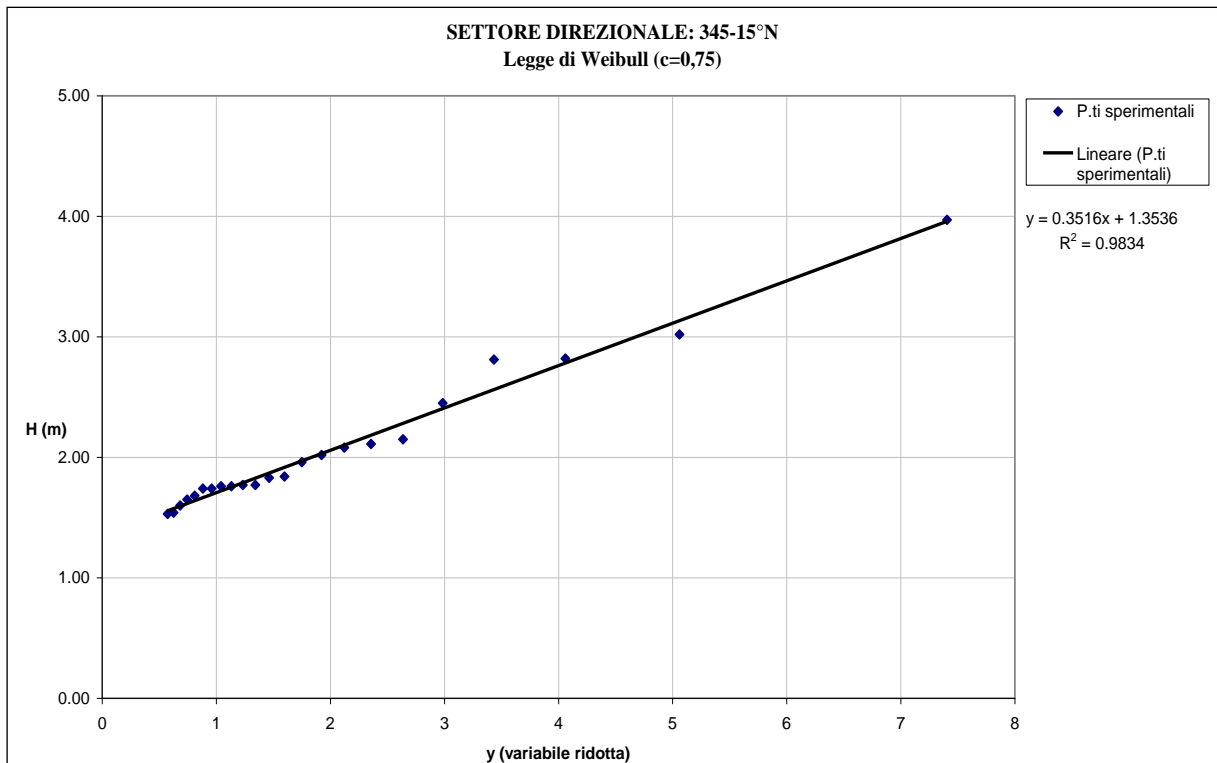


*Figura 3.17 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 285°N-315°N*

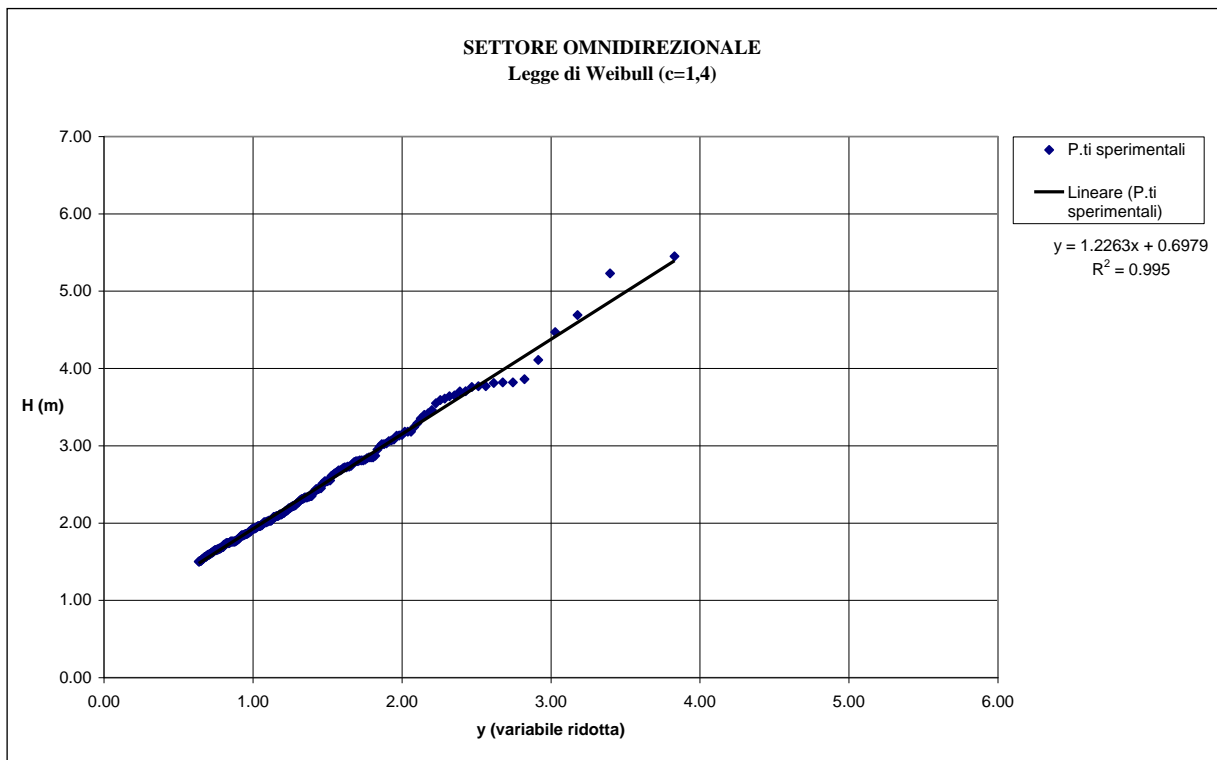


*Figura 3.18 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 315°N-345°N*





*Figura 3.19 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore direzionale 345°N-15°N.*



*Figura 3.20 - Dati sperimentali e legge probabilistica di miglior adattamento per il settore omnidirezionale.*

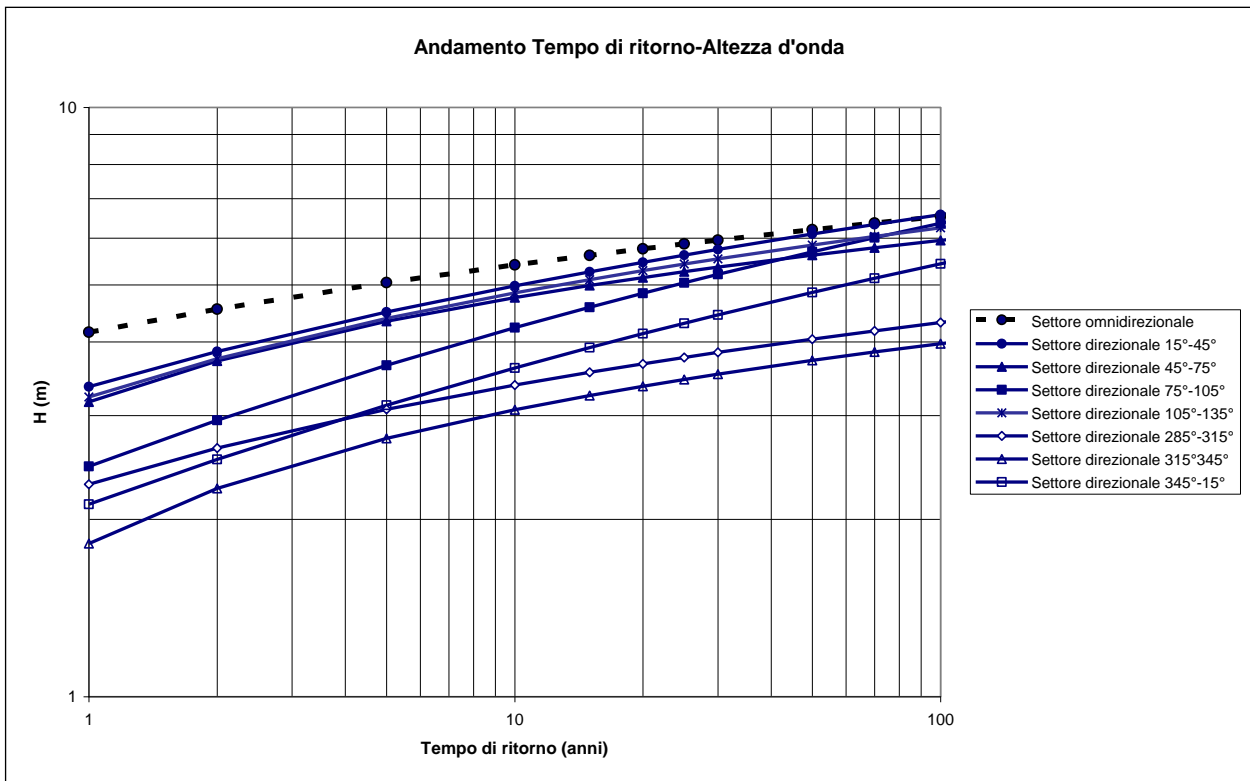


Figura 3.21 - Risultati dell'elaborazione in termini di tempo di ritorno da associare alle mareggiate.

Tabella 3.17 - Risultati dell'elaborazione per i settori direzionali e legge di migliore adattamento.

Settore 15°-45°		
Gumbel		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	3.356	3.358
2	3.849	3.852
5	4.491	4.495
10	4.973	4.978
15	5.255	5.260
20	5.454	5.460
25	5.609	5.615
30	5.735	5.741
50	6.089	6.096
70	6.322	6.329
100	6.569	6.576
140	6.802	6.810
150	6.850	6.858
200	7.049	7.057
300	7.330	7.338
500	7.684	7.692
1000	8.164	8.173

Settore 45°-75°		
Weibull (c=2)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	3.050	3.164
2	3.577	3.714
5	4.176	4.338
10	4.579	4.757
15	4.799	4.986
20	4.950	5.143
25	5.063	5.261
30	5.154	5.356
50	5.402	5.614
70	5.558	5.777
100	5.720	5.946
140	5.869	6.100
150	5.899	6.132
200	6.022	6.260
300	6.192	6.438
500	6.400	6.654
1000	6.672	6.937

Settore 75°-105°		
Weibull (c=0.75)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	2.474	2.460
2	2.978	2.944
5	3.714	3.651
10	4.315	4.228
15	4.683	4.581
20	4.950	4.837
25	5.161	5.040
30	5.335	5.207
50	5.834	5.687
70	6.171	6.010
100	6.535	6.359
140	6.884	6.694
150	6.956	6.764
200	7.260	7.056
300	7.724	7.501
500	8.255	8.011
1000	9.032	8.757

Settore 105°-135°		
Weibull (c=1.4)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	3.198	3.226
2	3.712	3.746
5	4.345	4.386
10	4.798	4.844
15	5.054	5.103
20	5.232	5.283
25	5.368	5.421
30	5.478	5.533
50	5.782	5.840
70	5.978	6.039
100	6.183	6.246
140	6.374	6.440
150	6.413	6.479
200	6.574	6.642
300	6.812	6.883
500	7.075	7.149
1000	7.445	7.523

Settore 285°-315°		
Weibull (c=1.4)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	2.275	2.292
2	2.621	2.643
5	3.045	3.073
10	3.347	3.379
15	3.518	3.552
20	3.636	3.672
25	3.727	3.764
30	3.801	3.839
50	4.003	4.044
70	4.133	4.176
100	4.270	4.315
140	4.397	4.443
150	4.422	4.469
200	4.529	4.578
300	4.678	4.728
500	4.862	4.915
1000	5.107	5.164

Settore 315°-345°		
Weibull (c=2)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	1.744	1.819
2	2.158	2.257
5	2.619	2.744
10	2.924	3.067
15	3.091	3.243
20	3.204	3.363
25	3.290	3.454
30	3.358	3.526
50	3.543	3.722
70	3.661	3.846
100	3.781	3.973
140	3.892	4.091
150	3.915	4.114
200	4.007	4.211
300	4.141	4.354
500	4.287	4.508
1000	4.489	4.722

Settore 345°-15°		
Weibull (c=0.75)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	2.129	2.122
2	2.552	2.528
5	3.174	3.124
10	3.683	3.613
15	3.995	3.912
20	4.222	4.130
25	4.402	4.302
30	4.550	4.445
50	4.976	4.853
70	5.263	5.129
100	5.573	5.426
140	5.871	5.712
150	5.933	5.772
200	6.193	6.021
300	6.589	6.401
500	7.043	6.837
1000	7.708	7.475

Settore OmniDir		
Weibull (c=1.4)		
TR	H	H <sub>corr</sub>
1	4.157	4.154
2	4.551	4.547
5	5.047	5.044
10	5.409	5.404
15	5.615	5.610
20	5.759	5.754
25	5.870	5.865
30	5.960	5.955
50	6.208	6.203
70	6.369	6.364
100	6.538	6.532
140	6.696	6.690
150	6.728	6.722
200	6.861	6.855
300	7.046	7.040
500	7.277	7.271
1000	7.586	7.579

### **3.4 Analisi delle condizioni anemometriche del paraggio costiero anconitano**

Sono state analizzate diverse serie di dati anemometrici disponibili nel tratto costiero anconitano, sempre tenendo presente lo scopo principale del presente studio, consistente, in questa parte, nell'indagine delle condizioni anemologiche ed anemometriche del particolare paraggio costiero del Porto di Ancona.

Diversi enti, pubblici o privati, possiedono anemometri che rilevano le caratteristiche ventose nei pressi del sito di interesse, costituito dal Porto di Ancona. Alcuni hanno archivi o raccolte di dati molto datate, mentre le più recenti sono di difficile, o non rapida, accessibilità, quali, ad esempio, enti militari, ecc. In parecchi altri casi manca completamente un archivio consultabile ed elaborabile, in quanto le misure di vento, regolarmente effettuate, non vengono registrate. Sono state, inoltre, escluse le raccolte di dati disponibili in formato cartaceo, che risultano difficilmente elaborabili con poco tempo a disposizione. Non sono stati considerati idonei, per una valida elaborazione statistica, quelli con brevi periodi di registrazione. Sono stati pure esclusi quelli acquisiti in siti ritenuti non idonei, ponendo la maggior attenzione all'esposizione ai venti presenti sottocosta e sul Porto di Ancona, che costituisce il sito di interesse per il presente studio.

In definitiva, per gli scopi del presente studio, si è scelto di considerare come idonei e di analizzare i dati del vento raccolti dalla stazione anemometrica di Ancona della RMN (Rete Mareografica Nazionale), attualmente gestita dall'ISPRA (Istituto per la Protezione Ambientale, ex APAT, ex Istituto Idrografico e Mareografico Nazionale).

Tale Rete gestisce oltre 30 stazioni mareografiche distribuite lungo le coste italiane. Oltre al rilievo dei livelli marini, le stazioni di misura sono dotate, nelle vicinanze del mareografo, anche di altri strumenti per il rilevamento di molti parametri fisici ambientali locali. Una ventina di esse, tra cui quella di Ancona, sono provviste di anemometro direzionale.

Mentre la stazione mareografica di Ancona è posizionata nel porto storico-commerciale, presso la Banchina 4, l'anemometro locale, riferibile alla stessa RMN, è situato su un palo, posto nei pressi della testata del molo di sottoflutto di protezione del porto turistico Marina Dorica, circa un miglio marino a Sud dell'imboccatura del Porto di Ancona.

La quota dello strumento anemometrico è a 10 m sul l.m.m., nel rispetto delle convenzioni internazionali sulle modalità dei rilevamenti anemometrici sul mare.

Come per qualsiasi altro caso di anemometro, la morfologia del territorio naturale e le forme delle costruzioni artificiali presenti nella zona circostante il sito di posizionamento dello strumento di misura risultano condizionare inevitabilmente le caratteristiche

anemologiche rilevate, specialmente l'intensità e la direzione del vento rilevabili. In particolare, il citato anemometro di Ancona, della RMN, gode della proprietà di risultare praticamente liberamente esposto ai settori direzionali nord-occidentali, che costituiscono proprio quelli di maggior interesse agli scopi del presente studio di analisi.

Inoltre, il citato anemometro della RMN presenta la disponibilità di un archivio di valori misurati di vento di 13 annate, dal 2001 al 2013, quasi perfettamente complete, di rilievi anemometrici registrati. Tale archivio è disponibile in comodo formato informatico digitale, sul sito dell'ente gestore della Rete.

I dati anemometrici di interesse resi disponibili dalla RMN, sono i valori di intensità e direzione (di provenienza) del vento mediati su un periodo di tempo di 10 minuti. Quindi, con tale genere di dati disponibili (valori medi in intervalli di tempo di 10 minuti), non si è in grado di risalire alle caratteristiche di dettaglio delle raffiche del vento.

Il campionamento è orario, nel senso che viene fornito un valore delle caratteristiche anemometriche per ogni ora. In particolare, il dato orario si riferisce agli ultimi 10 minuti di ogni ora, dai 50' ai 60' di ciascuna ora.

L'intensità del vento è fornita in  $m/s$ , mentre la direzione (di provenienza) è fornita in gradi rispetto al Nord.

Vengono fornite e rese disponibili pure le distribuzioni delle frequenze dei dati di campionamento orario, per ciascun anno solare, suddivise per classi di intensità e di direzione del vento.

La distribuzione delle frequenze dei campioni di vento, viene effettuata per le seguenti classi di intensità: le condizioni di calma sono considerate per le intensità fino a  $0,5m/s$ , la classe  $0,5-1m/s$ , la classe  $1-2m/s$ , le classi  $2-4m/s$ ,  $4-6m/s$ ,  $6-8m/s$ , così via, ogni  $2m/s$  fino a  $16m/s$ , la classe più intensa che comprende tutti i valori (medi in 10') superiori a  $16m/s$ .

Le classi direzionali, corrispondenti ai settori direzionali di provenienza del vento, sono ampie  $15^\circ$  a partire dal settore settentrionale centrato sulla direzione di  $0^\circ N$ . l'angolo giro risulta, così, suddiviso in 24 settori direzionali.

Per gli scopi del presente studio, sono state assemblate le distribuzioni delle frequenze dei valori anemometrici (di intensità e direzione), suddivise per le suddette classi di intensità e direzione del vento, ottenendo un'unica distribuzione di frequenza dei dati anemometrici per l'intero periodo di 13 anni, a partire dal 1 gennaio 2001 al 31 dicembre 2013.

Complessivamente, nei 13 anni citati, sulla base di un numero totale di misure orarie attese pari a 113952, è risultata mancante una percentuale di misure di poco inferiore all'1%, quindi la percentuale di funzionamento e di registrazione dei dati ventosi è risultata di oltre il 99%.

Avendo dedotto tale frazione dei dati mancanti dall'insieme dei dati acquisiti, alla serie dei dati validi rimanenti è stata assegnata la (nuova) percentuale del 100%.

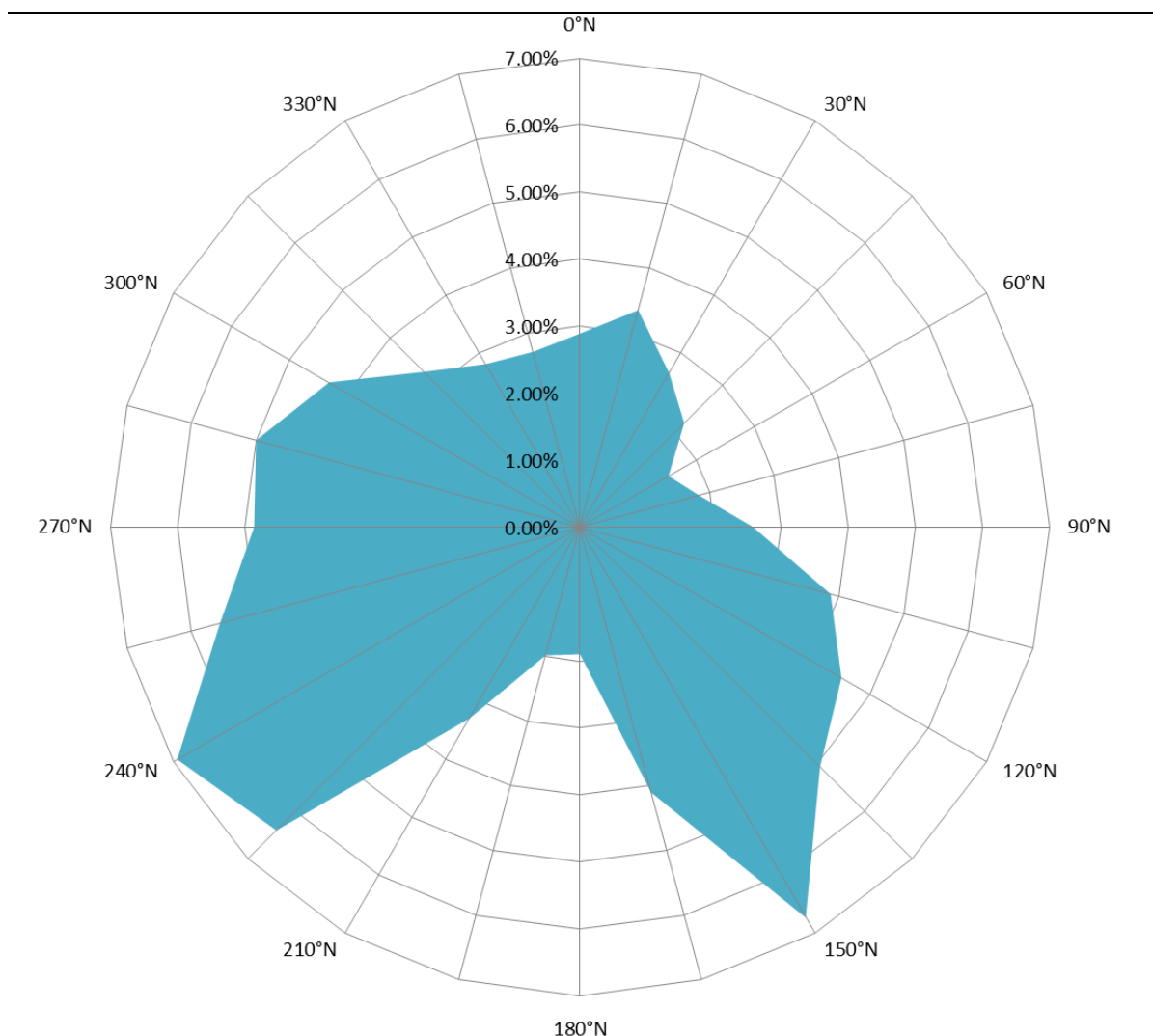
Di questa serie di dati validi, la percentuale di calma (intensità inferiore a 0,5m/s) è risultata complessivamente, nei 13 anni 2001-2013, pari al 9,6265%. Il rimanente 90,3735% dei dati è stato distribuito secondo le classi di intensità e di direzione prima richiamate. Tale distribuzione è riportata nella Tabella 3.18.

*Tabella 3.18 - Distribuzione delle frequenze percentuali dei dati degli eventi anemometrici, su base oraria, registrati nei 13 anni di osservazione dal 1 gennaio 2001 al 31 dicembre 2013*

DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE PERCENTUALI DEI DATI DI VENTO PER CLASSI DI INTENSITA' E DI DIREZIONE											
Direzione (gradi Nord)	Classi di intensità anemometrica (metri/secondo)										TOTALE
	0,5-1,0	1,0-2,0	2,0-4,0	4,0-6,0	6,0-8,0	8,0-10,0	10,0-12,0	12,0-14,0	14,0-16,0	> 16,0	
0	0.2166	0.8538	0.9281	0.4322	0.2312	0.1350	0.0723	0.0200	0.0000	0.0000	2.8893
15	0.1712	0.7290	1.4294	0.3956	0.2730	0.2060	0.1149	0.0323	0.0015	0.0000	3.3530
30	0.1411	0.3464	1.1542	0.4920	0.2593	0.1753	0.0601	0.0254	0.0023	0.0008	2.6568
45	0.1242	0.2700	1.0228	0.5276	0.1589	0.0678	0.0177	0.0062	0.0015	0.0000	2.1968
60	0.1488	0.2700	0.7914	0.2569	0.0462	0.0085	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000	1.5241
75	0.2506	0.3461	0.7833	0.3531	0.0695	0.0232	0.0085	0.0008	0.0000	0.0000	1.8350
90	0.4479	0.5372	0.8805	0.5901	0.1071	0.0170	0.0015	0.0008	0.0000	0.0000	2.5821
105	0.9801	1.0582	1.0295	0.6899	0.0964	0.0146	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	3.8695
120	1.3793	1.3099	1.1957	0.5105	0.0986	0.0085	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	4.5032
135	1.1128	1.1248	1.6161	0.9739	0.2203	0.0146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.0625
150	0.7446	0.9087	2.4600	2.1441	0.4266	0.0455	0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	6.7333
165	0.5501	0.6126	1.3175	1.1416	0.3981	0.0763	0.0069	0.0000	0.0000	0.0000	4.1032
180	0.5206	0.4833	0.5908	0.2632	0.0362	0.0038	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000	1.8995
195	0.4548	0.5259	0.6924	0.2274	0.0678	0.0116	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	1.9807
210	0.4101	0.7187	1.2937	0.6933	0.1558	0.0231	0.0038	0.0000	0.0000	0.0000	3.2986
225	0.4155	0.9095	2.8558	1.6975	0.3891	0.0966	0.0346	0.0062	0.0000	0.0000	6.4048
240	0.3462	1.0720	3.0915	1.7847	0.4319	0.1543	0.0485	0.0077	0.0015	0.0000	6.9385
255	0.3424	0.9925	2.0662	1.4522	0.5264	0.1319	0.0425	0.0062	0.0008	0.0000	5.5610
270	0.3601	0.9393	1.5333	1.1601	0.5579	0.2374	0.0617	0.0100	0.0015	0.0000	4.8613
285	0.3346	0.7919	1.2859	1.1294	0.7177	0.5049	0.1864	0.0431	0.0077	0.0015	5.0031
300	0.3332	0.7278	1.0791	1.0215	0.6105	0.3699	0.1324	0.0370	0.0085	0.0015	4.3213
315	0.3263	0.7010	1.0338	0.7517	0.2938	0.1310	0.0270	0.0077	0.0054	0.0008	3.2785
330	0.2708	0.6447	0.9419	0.5644	0.2469	0.1041	0.0262	0.0100	0.0008	0.0000	2.8097
345	0.2654	0.7440	0.8239	0.4696	0.2483	0.1219	0.0239	0.0092	0.0016	0.0000	2.7076
TOTALE	10.6472	17.6175	31.8969	19.7222	6.6676	2.6828	0.8782	0.2233	0.0332	0.0046	90.3735

Le frequenze marginali della stessa distribuzione, suddivise per classi di settori direzionali, è stata riportata graficamente, su una opportuna rosa dei venti, nella Figura 3.22.

In tale rappresentazione direzionale si può notare che le direzioni di provenienza meridionali, di libeccio e scirocco, risultano le più frequenti per tale sito di misura. Ciò sembra giustificabile dalla frequente presenza (e persistenza) notturna delle brezze di terra per il libeccio e dall'incanalamento delle correnti di vento lungo la Valle del Fosso Miano per la morfologia del territorio più prossimo al sito di misura anemometrica per lo scirocco.



*Figura 3.22 - Distribuzione direzionale della frequenza percentuale dei dati anemometrici registrati dalla stazione di misura della RMN al porto turistico di Ancona nei 13 anni del periodo di osservazione dal 2001 al 2013*

Infine, le frequenze marginali della stessa distribuzione, considerando, in questo caso, quelle suddivise per le suddette classi di intensità anemometrica, è stata riportata graficamente, su un opportuno grafico statistico di frequenza cumulativa dei venti, nella Figura 3.23 e, per il dettaglio dei valori di frequenza maggiori, nella Figura 3.24.

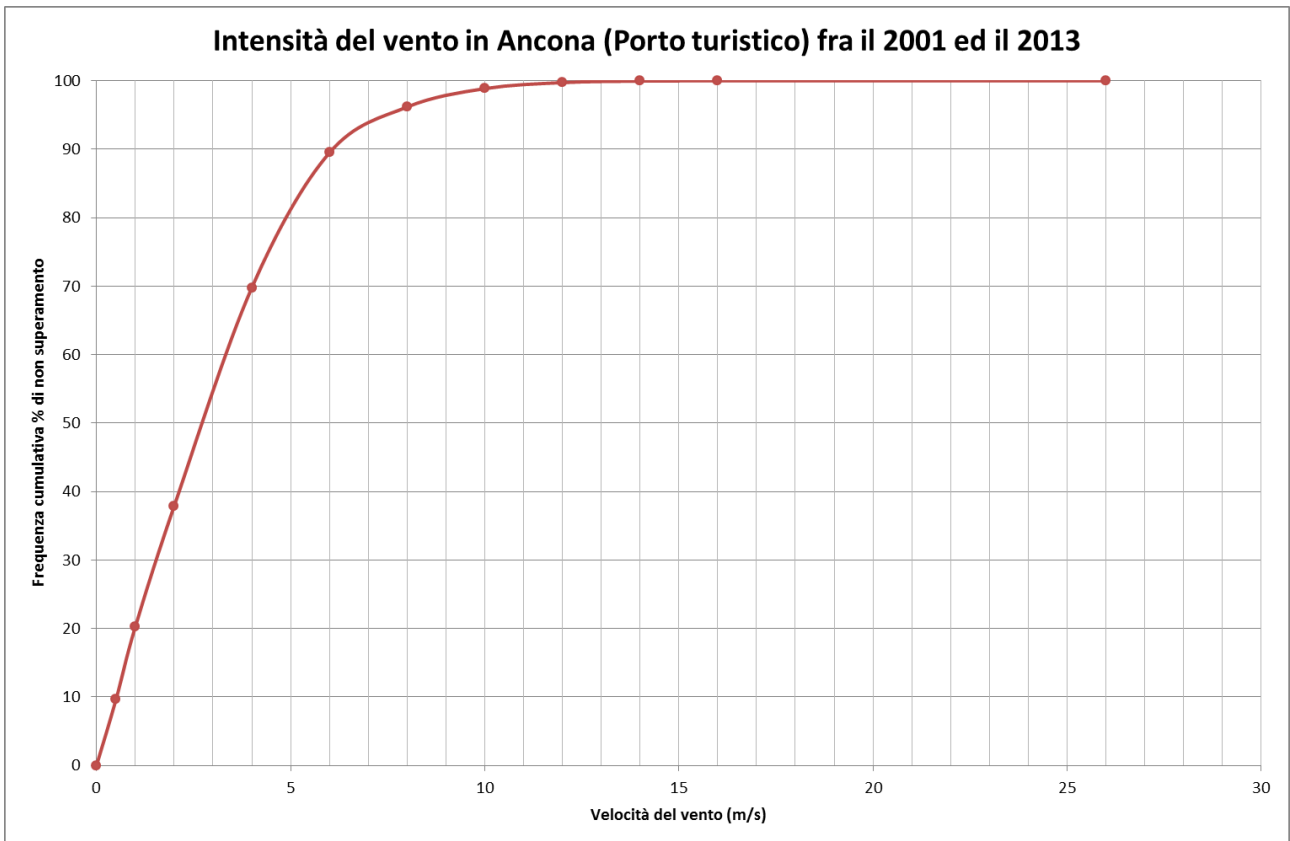


Figura 3.23 – Andamento della frequenza cumulativa percentuale in funzione dell'intensità del vento dei dati anemometrici registrati dalla stazione della RMN di Ancona nel periodo 2001-2013

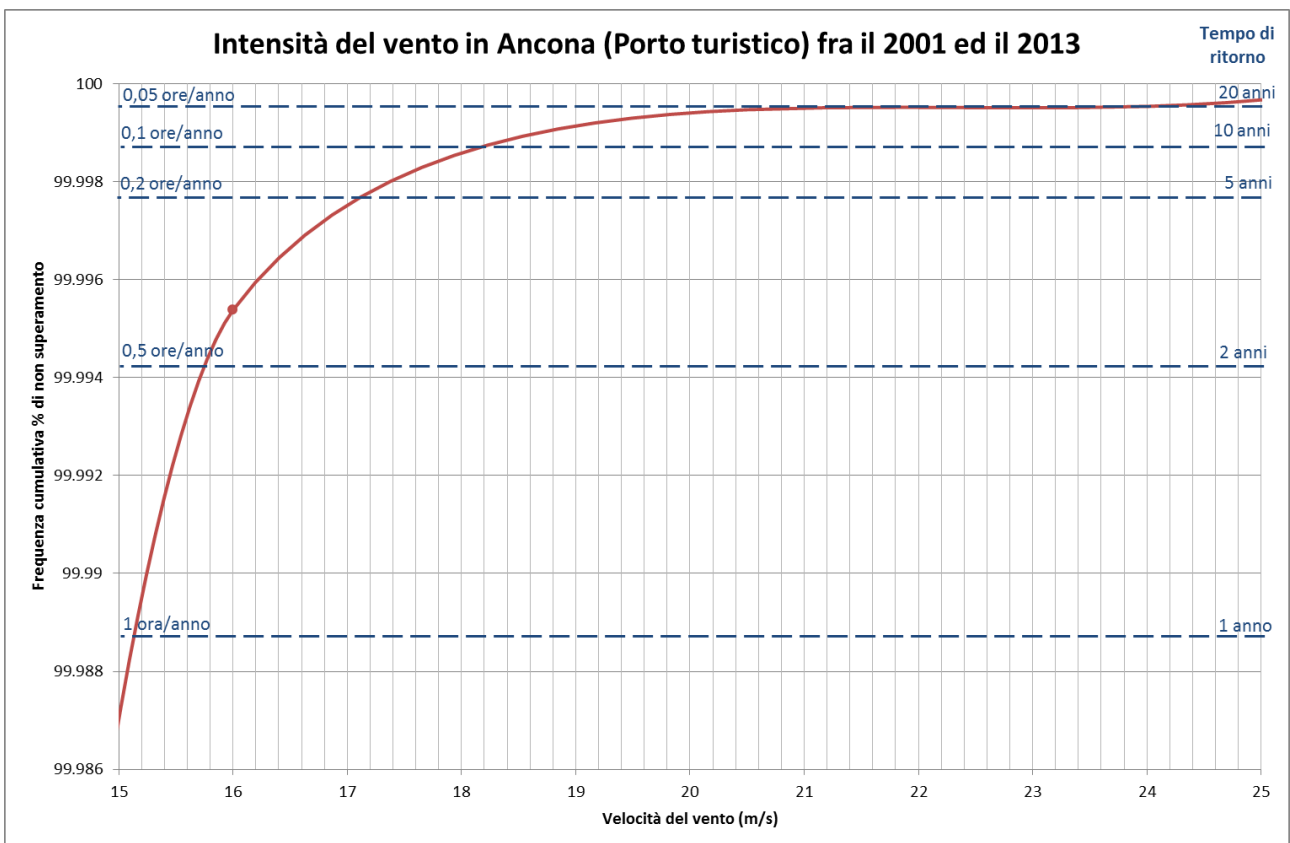


Figura 3.24 – Andamento di dettaglio dei valori maggiori della frequenza cumulativa percentuale in funzione dell'intensità del vento dei dati anemometrici registrati ad Ancona nel periodo 2001-2013

#### **4. MODELLO PER LO STUDIO DELL'AGITAZIONE ONDOSA INTERNA AL PORTO**

La validità di una soluzione progettuale che prevede una variazione della configurazione delle strutture di un bacino portuale (nel caso in studio tale variazione è rappresentata dalla parziale demolizione dell'attuale Molo Nord del Porto di Ancona), dipende principalmente dal grado di protezione offerto, in presenza di moto ondoso, dalle strutture portuali nei riguardi delle imbarcazioni sia in fase di accesso al porto che in condizioni di ormeggio.

Per analizzare il moto ondoso trasmesso dalle acque libere all'interno del bacino portuale, attraverso l'imboccatura, occorre studiare un problema di propagazione del moto ondoso in acque basse o intermedie in presenza di tutti i fenomeni di modifica del moto ondoso, quali rifrazione, frangimento, riflessione e diffrazione, ecc.

La soluzione di questo problema complesso è generalmente affidata a due tipi di soluzioni approssimate: la modellazione di tipo fisico e quella di tipo numerico. La possibilità di disporre di entrambe rappresenta ovviamente la condizione ottimale, in quanto ognuna delle due, presa singolarmente, presenta pregi e difetti. Lo studio mediante modello fisico offre il vantaggio di una soluzione più simile al vero, ma presenta possibili errori legati ad effetti scala e/o di laboratorio e comporta un notevole investimento economico. Dall'altra parte l'utilizzo della modellazione matematica offre la possibilità sia di un minor costo dello studio, con operazioni di lavoro da eseguire "a tavolino", che di modificare più facilmente le condizioni da provare, semplificando il confronto tra soluzioni (progettuali) diverse. Tuttavia tutti i modelli matematici presentano comunque una soluzione approssimata, più o meno raffinata, a causa della schematizzazione utilizzata per risolvere le equazioni matematiche descrittive della fisica del problema.

Lo studio dell'agitazione ondosa interna al futuro Porto di Ancona, effettuato nella presente Convenzione, è stato condotto mediante utilizzo del modello matematico di tipo commerciale MIKE 21 BW.

##### **4.1 Codice di calcolo MIKE 21 BW**

Il codice di calcolo MIKE 21 è stato realizzato dal Danish Hydraulic Institute Water & Environment sulla base di esperienze di applicazioni di modelli numerici di simulazione sviluppati su un periodo di oltre 20 anni.

E' un software per la simulazione delle correnti a pelo libero con schema bidimensionale, applicabile in uguale maniera all'ambiente fluviale e a quello marino. Il



MIKE 21 può essere usato per la simulazione di fenomeni legati all'idraulica in fiumi, laghi, estuari, baie, aree costiere e mari, potendo considerare il trasporto solido, la qualità delle acque, la propagazione delle onde, lo spargimento di oli, il trasporto di sedimenti e altro.

Il codice MIKE 21 ha una struttura modulare con quattro ambienti di applicazione principali, che comprendono i relativi moduli di applicazione: nel nostro studio è stato utilizzato il modulo BW (*Boussinesq Wave*) per determinare la propagazione in acque basse ed intermedie di onde irregolari corte o lunghe, condizione tipica delle aree portuali.

Il codice MIKE 21 BW contiene due sotto-moduli di calcolo basati sulla soluzione numerica delle equazioni di Boussinesq per la determinazione e l'assegnazione di onde dinamiche nei porti e nelle aree costiere. Queste equazioni includono la non linearità e la dispersione di frequenza.

Fondamentalmente, la dispersione di frequenza è introdotta nell'equazione della quantità di moto tenendo in considerazione gli effetti dell'accelerazione verticale sulla distribuzione della pressione. Entrambi i sotto-moduli risolvono le equazioni di Boussinesq usando una formulazione di flussi con sviluppo lineare delle caratteristiche di dispersione. Le equazioni di Boussinesq modificate (originariamente derivate da Madsen et al, 1991; Madsen e Sørensen, 1992) costruiscono i moduli adatti per la simulazione della propagazione di treni di onde direzionali che si propagano da acque profonde ad acque basse.

In questo modello sono ben descritte la generazione e la distribuzione di basse frequenze di energia dovute alle principali trasformazioni delle onde. Il modello è capace di riprodurre gli effetti combinati di più fenomeni d'onda in ambito costiero e nell'ingegneria portuale includendo rifrazione, diffrazione e riflessione parziale di onde corte irregolari e onde lunghe di ampiezza limitata che si propagano su batimetrie complesse.

MIKE 21 BW include la porosità per la simulazione di parziale riflessione e/o trasmissione attraverso banchine e frangiflutti e la generazione interna di onde unidirezionali e direzionali. Gli strati assorbenti sono applicati quando è richiesto il completo assorbimento dell'energia delle onde.

MIKE 21 è affiancato da numerose procedure o "utility", quale ad esempio, il modulo MIKE ZERO ( Pre e Post Processing) sviluppato per alleggerire il lavoro di inserimento dei dati di input, l'analisi e la presentazione dei risultati delle simulazioni.

L'applicazione del codice di calcolo richiede la definizione preliminare dei seguenti dati di ingresso per il corretto funzionamento del modello:

- la batimetria della zona;

- le condizioni al contorno;
- le caratteristiche delle strutture portuali;
- la condizione iniziale;
- le caratteristiche delle onde incidenti.

I paragrafi che seguono, sono dedicati alla definizione di tali caratteristiche di ingresso per l'applicazione del modello di calcolo.

#### **4.2 Configurazione batimetrica dei fondali**

Il primo passo per l'utilizzo del MIKE 21 è rappresentato dalla definizione della batimetria dell'area da modellare e conseguentemente si è proceduto alla raccolta di tutte le informazioni disponibili riguardanti la zona di mare sottocosta antistante il Porto di Ancona, che costituiranno l'area da simulare nel modello.

È stato possibile raccogliere dati sia in formato cartaceo che in formato digitale. I dati in formato cartaceo sono rappresentati dalla cartografia nautica dell'Istituto Idrografico della Marina, dalla analogo cartografia inglese e dalla planimetria degli escavi di dragaggio dei fondali previsti nel "Piano di sviluppo del Porto di Ancona", che consiste nella Variante del P.R.P. I dati in formato digitale sono rappresentati dal più recente rilievo disponibile, quello effettuato dall'Istituto Idrografico della Marina nell'ottobre del 2011, relativo all'intera area portuale circostante le strutture attualmente presenti, dalla zona del bacino dei cantieri navali della Fincantieri a quella del bacino turistico, compreso il porto storico, i cui dati sono stati messi a disposizione dalla Autorità Portuale. La rappresentazione grafica del rilievo descritto è riportato in Figura 4.1.

Per quanto riguarda i dati cartacei si è proceduto con la scansione e la georeferenziazione delle carte nautiche e successivamente con una digitalizzazione dei punti batimetrici riportati su di esse. Data la limitata estensione della zona rilevata nel 2011, che non era in grado di coprire completamente l'intera area di studio per l'applicazione sul modello, tale serie di dati è stata integrata con i dati batimetrici relativi ad un precedente rilievo dello stesso Istituto Idrografico della Marina, effettuato nel 1996, riportati sulla cartografia nautica dello stesso istituto, facendo riferimento, in particolare, alla carta nautica n. 209, "Porto di Ancona", aggiornata al Gennaio 2014 (vedi Figura 4.2).

Si è proceduto, ovviamente, ad una interpolazione di tutti i citati dati acquisiti.

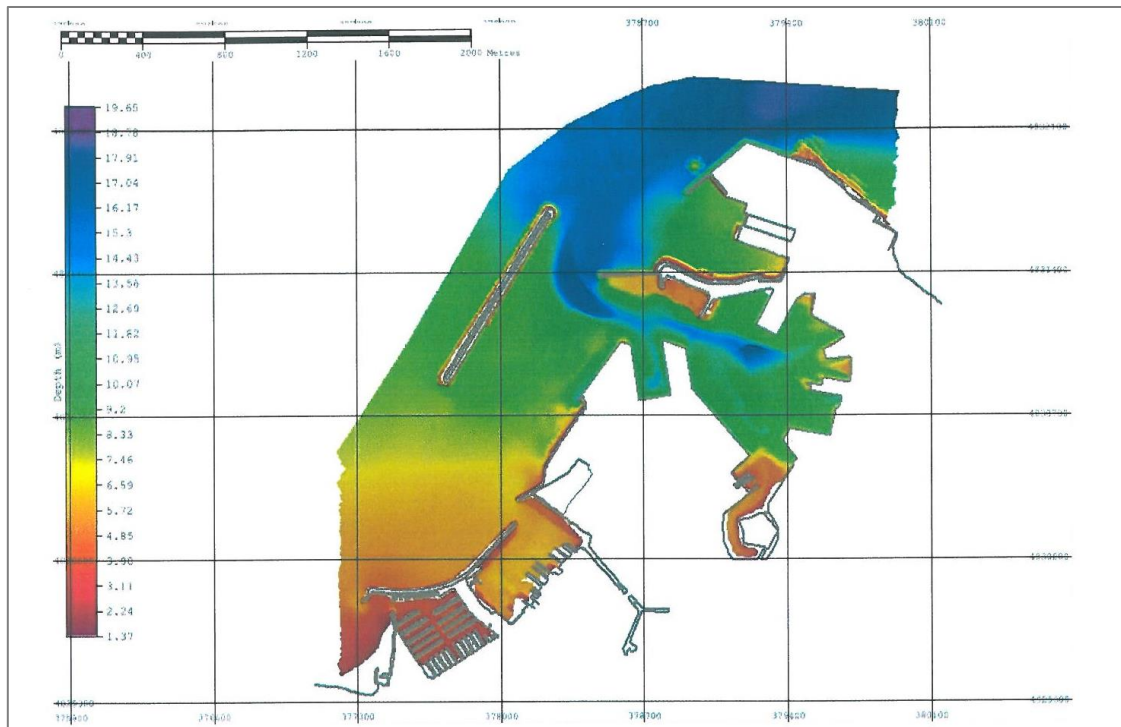


Figura 4.1 - Configurazione morfologica dei fondali nella zona portuale di Ancona ricavata dai rilievi dell'Istituto Idrografico della Marina Militare nel 2011

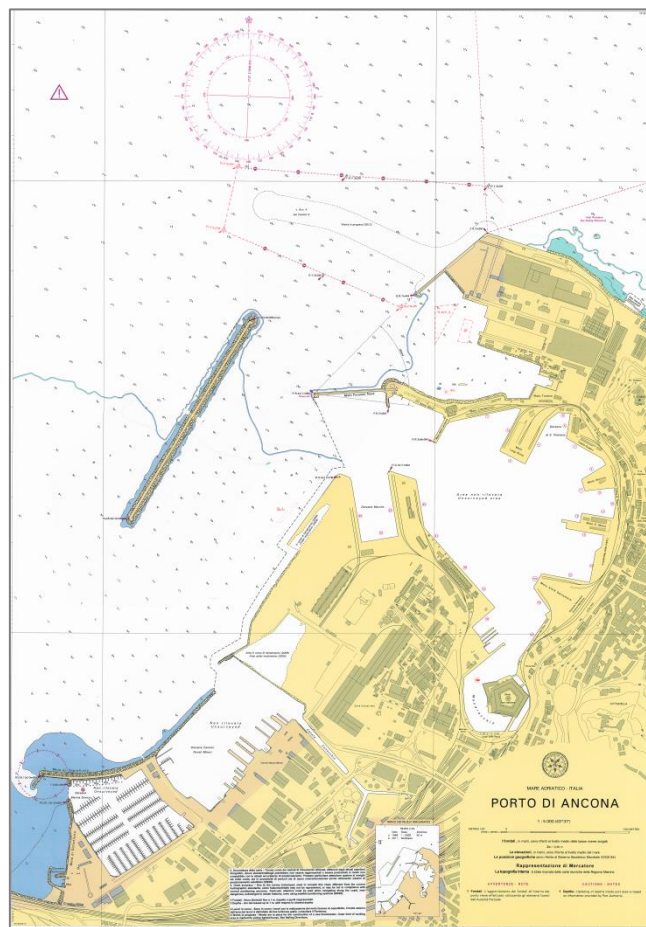


Figura 4.2 – Carta nautica n.209 dell'IIM della zona portuale di Ancona

Dalla combinazione di queste due serie di dati batimetrici è stato ottenuto lo schema batimetrico dei fondali dell'area portuale, considerato come quello "attuale" rappresentato in Figura 4.3.

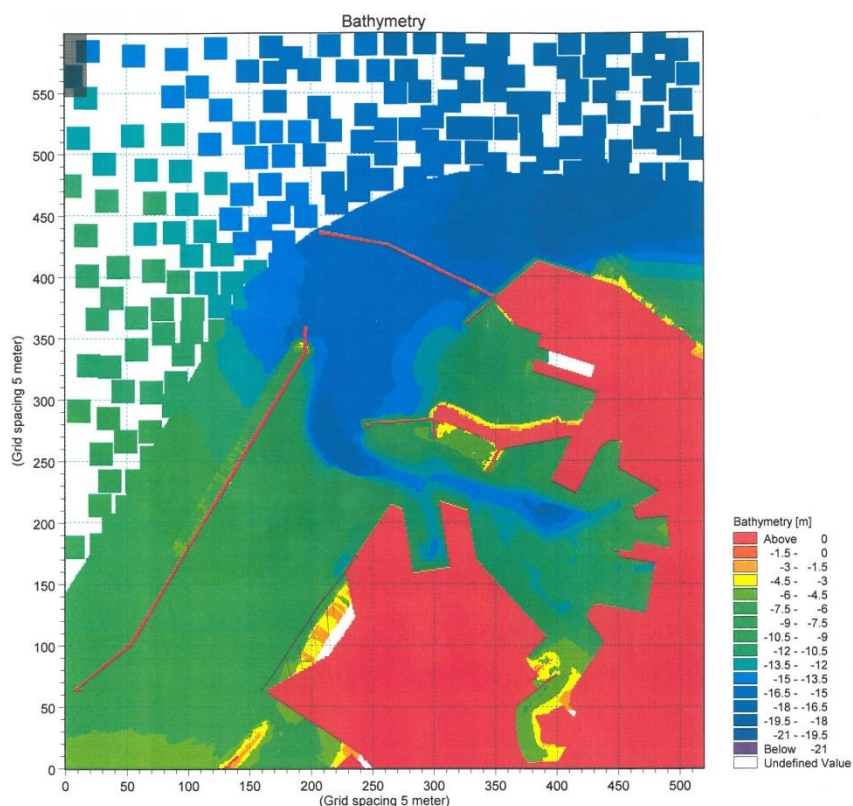


Figura 4.3 – Batimetria dei fondali "attuali" considerata nella rappresentazione portuale

Nelle aree degli specchi acquei dell'avamposto e di ingresso al porto interno, che interessano la propagazione delle onde in avvicinamento alle banchine da esaminare (Nuova Darsena e Banchina Marche), la batimetria è stata parzialmente modificata secondo le indicazioni fornite dalle previsioni di dragaggio dei fondali del "Piano di sviluppo del Porto di Ancona", corrispondente alla Variante del P.R.P. Tale adattamento della batimetria ha riguardato soprattutto lo specchio di mare antistante la Banchina Marche, quello della Nuova Darsena e quello antistante la Banchina n. 22. In via cautelativa è stato mantenuto il valore di profondità del fondale fornito dal rilievo dell'IIM del 2011, laddove fosse stato maggiore di quello previsto dal piano di dragaggio del "Piano di sviluppo del Porto di Ancona".

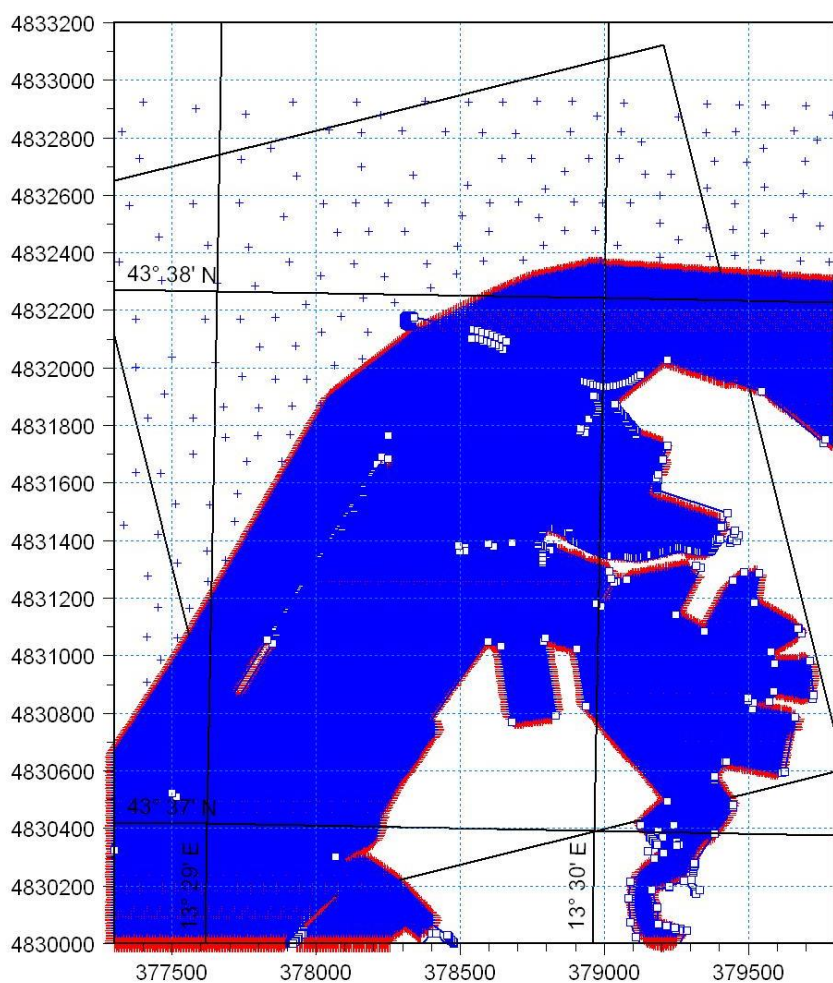
Un ulteriore adattamento dei fondali si è reso necessario per rappresentare l'area della configurazione portuale modificata, nel caso della parziale demolizione dell'attuale Molo Nord, in particolare nella zona che interessa proprio l'area della superficie del fondale che corrisponde all'impronta di tale tratto di molo in esame.

Come si può notare i dati a disposizione sono caratterizzati da una disomogeneità abbastanza evidente tra i diversi insiemi, la quale deve essere tenuta presente in sede di interpolazione per la costruzione del reticolo di calcolo.

#### **4.3 Definizione dell'area da modellare e del passo di integrazione temporale**

Dalla combinazione delle suddette serie di dati batimetrici è stato ottenuto lo schema morfologico dei fondali dell'area portuale da simulare nel modello di studio dell'agitazione ondosa interna al porto.


Nella scelta dell'area da modellare con il codice di calcolo MIKE 21 BW si deve tener conto: della zona di interesse, dell'inclinazione del modello rispetto ai treni di onde incidenti e del tipo di condizioni al contorno. L'area di studio è stata scelta orientando il modello a  $345^\circ\text{N}$ , in modo tale da privilegiare le simulazioni con attacchi ondosi che provengono dalle direzioni di apertura della nuova imboccatura del Porto di Ancona (Figura 4.4).



*Figura 4.4 – Area del modello utilizzata per le simulazioni con il codice di calcolo MIKE 21 BW (inclinazione di  $345^\circ\text{N}$ )*

La scelta della dimensione della griglia spaziale e del passo di integrazione temporale dipende dalle condizioni ondose che si vogliono simulare e dalla profondità dell'acqua nell'area del modello. In sintesi si deve tener presente che:

- il rapporto tra la massima profondità dell'acqua e la lunghezza d'onda in acque profonde deve essere inferiore a 0.22 per poter applicare le equazioni classiche di Boussinesq ed inferiore a 0.55 per l'applicazione delle equazioni modificate;
- la dimensione (m) della griglia spaziale deve tener conto della più piccola lunghezza d'onda; per molte applicazioni 2DH sono sufficienti 7-10 punti griglia per lunghezza d'onda;
- il passo temporale deve tener conto del più piccolo periodo d'onda; generalmente per le equazioni classiche sono richiesti 8-10 passi temporali per periodo d'onda, mentre 25-35 passi per periodo d'onda sono necessari se si devono utilizzare le equazioni modificate;
- il numero di Courant deve essere inferiore ad 1. Per una efficiente determinazione del numero di Courant si può usare il MIKE 21 BW Model Setup Planner incluso nel On-line Help. Nella Figura 4.5 viene riportato un esempio di applicazione svolto nel presente studio.

**MIKE 21 BW Model Setup Planner**


**Define your model**

Max. water depth (m)	17
Min. water depth (m)	5
Model extent in X-direction (m)	3000
Model extent in Y-direction (m)	4000
Percentage of water points (%)	75
Max. distance for waves to propagate (m)	4000
Time required for calculation of statistics (minutes prototype time)	20
Computational points per CPU second <sup>2)</sup>	100000
Spectral peak period (s)	12

Exclude wave breaking/moving shoreline  
 Include wave breaking/moving shoreline

**Calculate simulation period**

**A: Total simulation time**

Total time required for simulation (minutes prototype time) <sup>3)</sup>

**Reset and clear all**

**Legend:**

**Notes:**

1) The MIKE 21 BW Model Setup Planner is based on the step-by-step procedure shown [here](#).

2) The computational points per CPU second can be found at the end of the run log file.

3) Includes the travel time of the first wave and the time required for calculation of wave statistics.

4) The spatial resolution may be OK in case of wave breaking/moving shoreline. Make sure the ratio L/dx is 20-40 for T<sub>p</sub> (see check/evaluation box).

**Calculate and check/evaluate T<sub>min</sub>, dx and dt <sup>1)</sup>**

**B: Calculate default upper limits**

	Classical eq.	Enhanced eq.
Min. wave period, T <sub>min</sub> (s)	7.04	4.67
Max. spatial resolution, dx (m)	6.56	3.95
Max. time step, dt (s)	0.508	0.133

**C: Update upper limits using T<sub>min</sub> and check/evaluation**

**Own suggestion**

Min. wave period, T <sub>min</sub> (s)	7.04	4.67
Spatial resolution <sup>4)</sup> , dx (m)	5	3.95
Time step, dt (s)	0.35	0.133

**Check/evaluation of selected T<sub>min</sub>, dx and dt**

Max. ratio h/L <sub>0</sub> for T <sub>min</sub>	0.2194	0.4987
Max. ratio h/L <sub>0</sub> for T <sub>p</sub>	0.0222	0.0222
Min. ratio L/dx for T <sub>min</sub>	9.1962	7.0112
Min. ratio L/dx for T <sub>p</sub>	16.425	20.791
Ratio T/dt for T <sub>min</sub>	20.114	35.112
Ratio T/dt for T <sub>p</sub>	34.285	90.225
Max. Courant Number	0.9044	0.4350
Estimated CPU time (hours)	4.7263	19.916
Estimated RAM (MB)	49.326	75.379

Figura 4.5- MIKE 21 BW Model Setup Planner

Nel caso oggetto della presente Convenzione il rispetto di tutte le condizioni precedentemente elencate ha condotto alla scelta di un passo temporale pari a 0.35s. Il reticolo di calcolo per il modello numerico è stato definito da una maglia quadrata di passo  $\Delta x = \Delta y = 5m$ . La maglia di calcolo è costituita da 420 celle in larghezza e 520 in altezza, per una estensione totale dell'area di 2100mx2600m.

La nuova griglia di calcolo è stata realizzata tramite l'applicazione "Bathymetry" di MIKE ZERO a partire dai dati del reticolo ottenuti in precedenza e tenendo conto dalla disomogeneità dei dati di profondità dei fondali. La Figura 4.6 mostra la batimetria ricavata per la configurazione attuale del Molo Nord, mentre la Figura 4.7 mostra la batimetria relativa alla configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m).

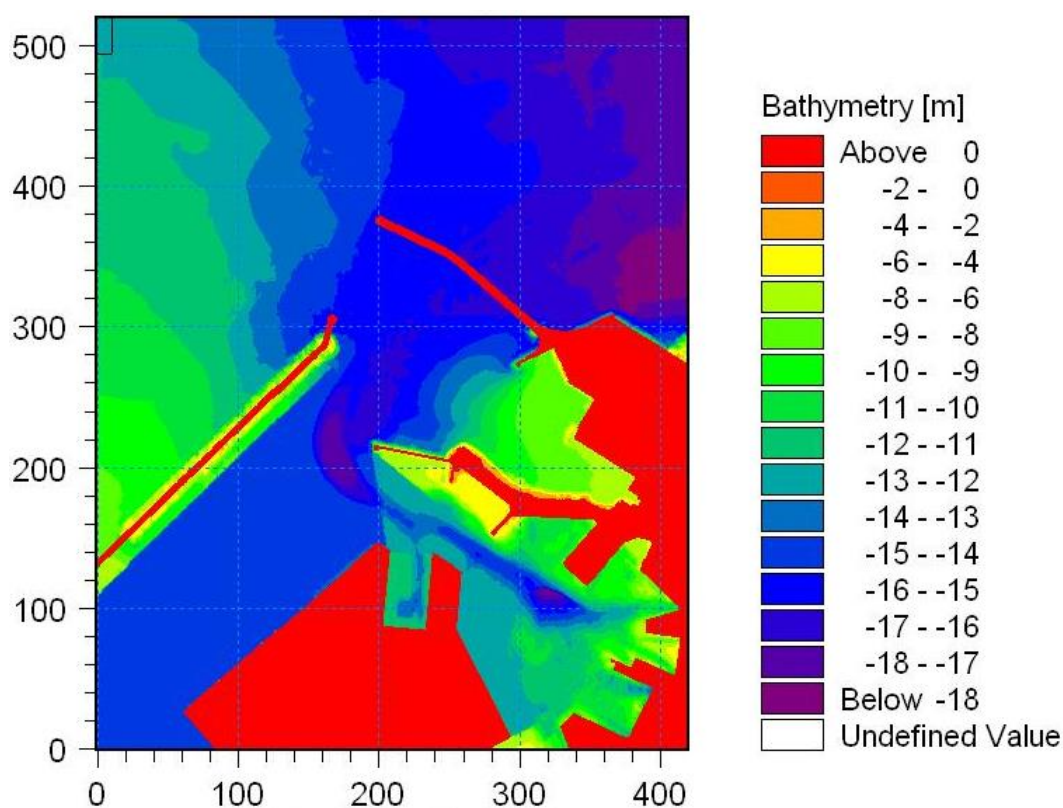


Figura 4.6 – Configurazione morfologica dei fondali adattato utilizzata per le simulazioni dell'analisi dell'agitazione ondosa interna al Porto di Ancona, per la configurazione attuale del Molo Nord, con il modello MIKE 21 BW.

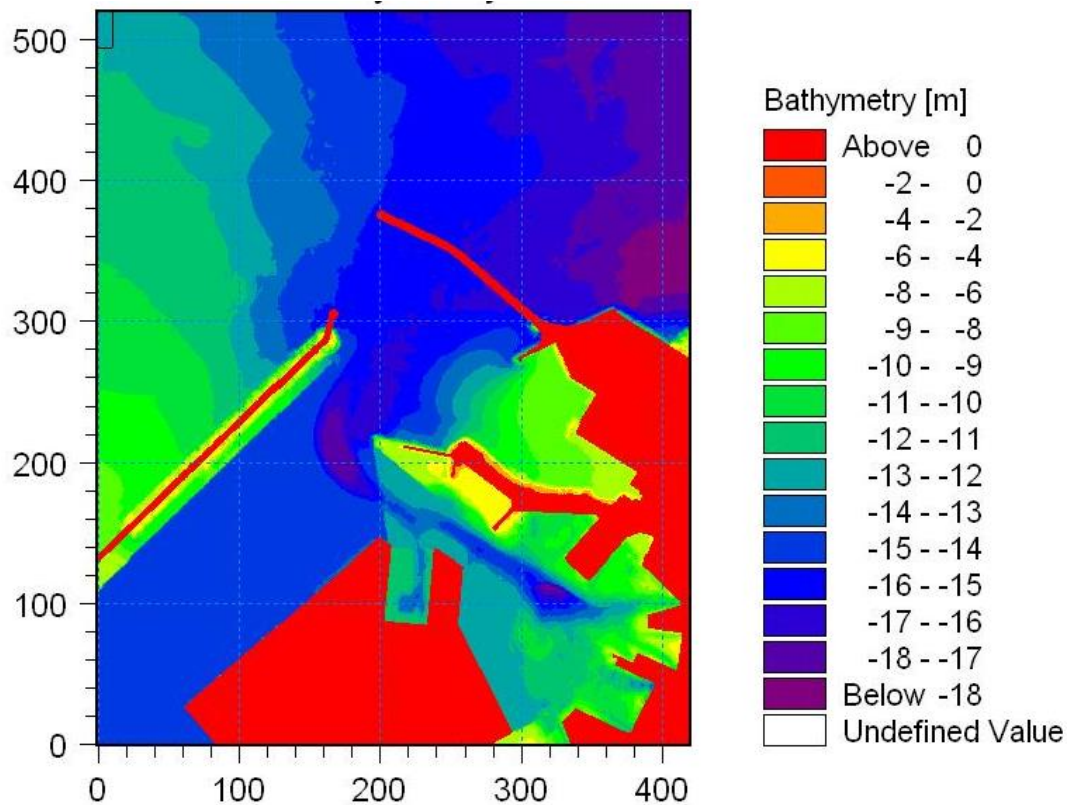


Figura 4.7– Configurazione morfologica dei fondali adattato utilizzata per le simulazioni dell’analisi dell’agitazione ondosa interna al Porto di Ancona, per la configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m), con il modello MIKE 21 BW

#### **4.4 Condizioni al contorno**

Il codice MIKE 21 BW può schematizzare i limiti del dominio di calcolo come contorni aperti o come contorni chiusi. I contorni aperti sono posti generalmente in corrispondenza di una linea di delimitazione in acqua, mentre quelli chiusi sono posti al limite tra acqua e terra. Il modello considera il contorno aperto come completamente riflettente e quindi non in grado di simulare la condizione “radiativa”, cioè del contorno del modello capace di assorbire le onde in uscita dall’area di simulazione. Il contorno chiuso è invece capace di modellare la condizione di assorbimento tramite la definizione di una fascia di strati assorbenti disposti lungo il bordo del modello, in cui viene simulata la dissipazione del flusso per filtrazione attraverso un mezzo poroso.

Nello studio oggetto della presente Convenzione si è scelto di utilizzare per l’area da modellare un contorno chiuso reso assorbente da un numero di 20 strati (“Sponge” layer), come mostrato nella Figura 4.8.



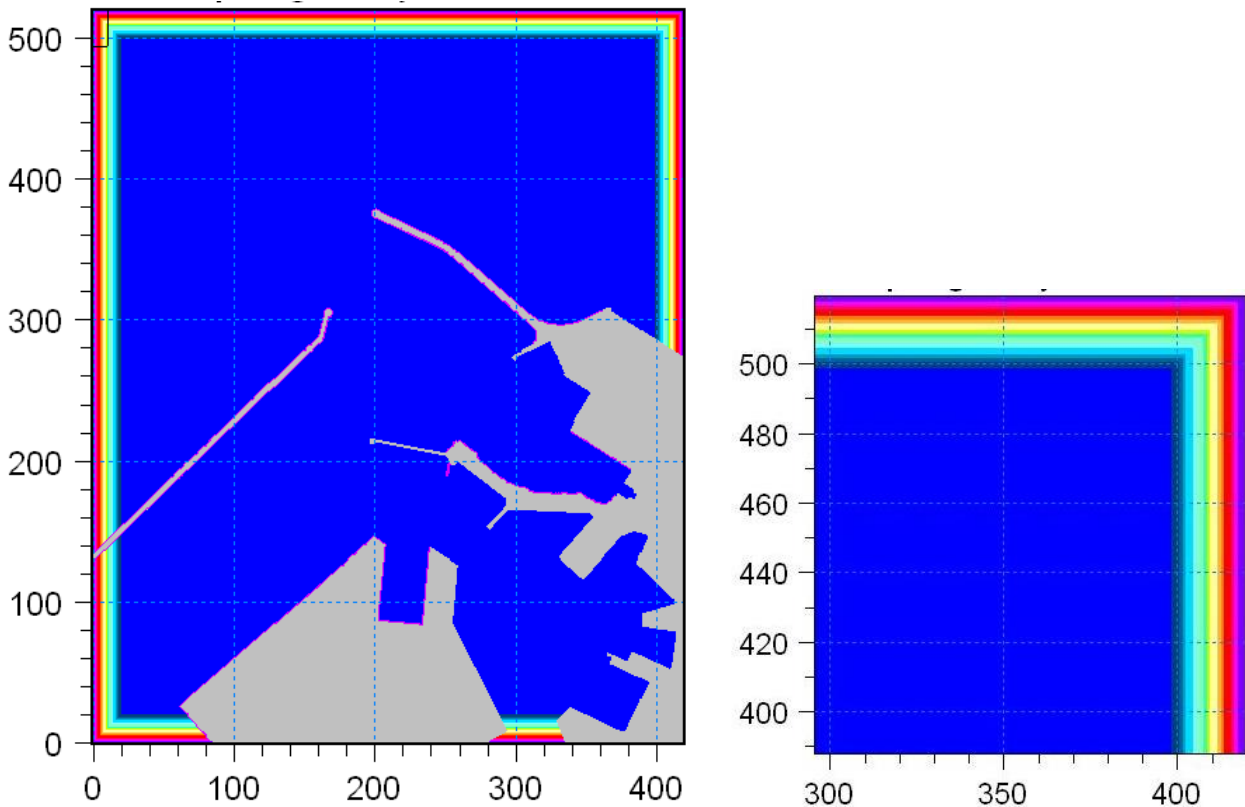


Figura 4.8 - Mappa degli strati assorbenti nei contorni fluidi del modello ("Sponge layer")

#### **4.5 Caratteristiche delle strutture portuali**

In maniera simile al trattamento della condizione di assorbimento lungo i contorni chiusi, il modello può simulare il comportamento di strutture costiere o portuali riflettenti o parzialmente assorbenti tramite l'inserimento lungo il bordo delle strutture di una serie di strati porosi. Il coefficiente di porosità deve essere scelto in modo di riprodurre il desiderato grado di riflessione delle strutture.

In base alla configurazione tipologica e strutturale delle opere portuali presenti e di quelle previste nei lavori di ampliamento del Porto di Ancona, in particolare del loro fronte acqueo, è stato possibile assegnare a ciascuna di esse un grado di assorbimento o riflessione ondosa rispetto all'onda incidente.

Tale comportamento delle strutture portuali, in relazione agli attacchi ondosi gravanti, è fondamentale per impostare le condizioni dei contorni terrestri degli specchi acquei da modellare negli studi di agitazione ondosa interna.

Nel caso del Porto di Ancona, nella configurazione da analizzare, al termine dei previsti lavori di ampliamento del porto, sono state adottate 3 diverse tipologie strutturali da trattare in modo distinto fra loro, ma omogeneo all'interno della stessa tipologia, ai fini del predetto comportamento di riflessione/assorbimento ondoso.

In particolare, sono stati modellati i seguenti tre gruppi: il gruppo delle banchine e delle opere a parete verticale senza sistemi di smorzamento della capacità di riflessione ondosa, il gruppo delle sponde dei moli aventi paramenti costituiti da opere a gettata di massi, infine il gruppo delle banchine con parete contraddistinta da sistemi, sia pur diversi, ma aventi un comportamento cosiddetto antiriflettente.

Lo schema planimetrico dei tre gruppi di opere portuali è rappresentato in Figura 4.9. Valori inferiori di porosità corrispondono ad un maggior grado di riflessione dell'onda.

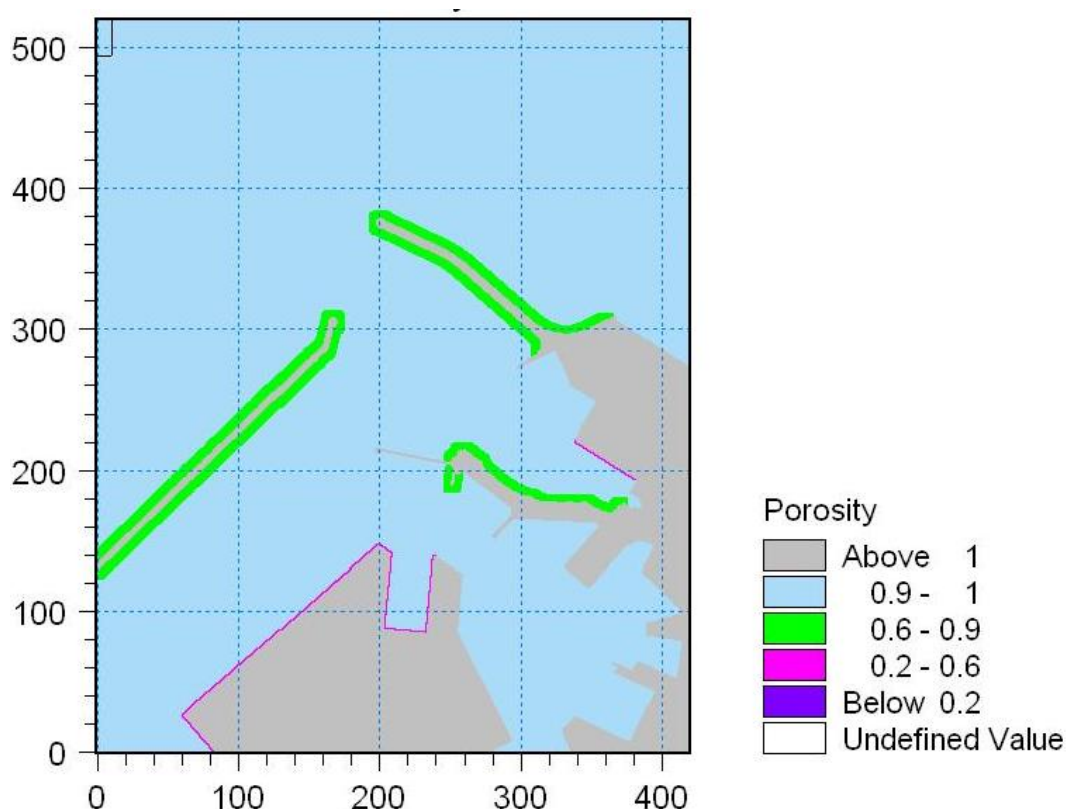


Figura 4.9 – Mappa di porosità delle opere portuali.

Al primo gruppo (rappresentate con il contorno rimasto in grigio nella planimetria schematica di figura) sono state associate il tratto terminale dell'attuale Molo Nord e la gran parte delle banchine interne del bacino storico e di quello dei cantieri navali Fincantieri.

Al secondo gruppo (rappresentate con il bordo di contorno in verde nella planimetria schematica di figura) appartengono le due dighe di sopraflutto (in fase di realizzazione) e di sottoflutto (parzialmente realizzata) ed il paramento a scogliera del lato esterno del Molo Nord attuale nel tratto che radice, in corrispondenza del bacino dei cantieri navali della Fincantieri, giunge fino alla cosiddetta rotonda che ospita la sede a torre del Corpo dei Piloti e degli Ormeggiatori del porto.

Al terzo gruppo (rappresentate con il bordo di contorno in magenta nella planimetria schematica di figura) appartengono essenzialmente le banchine della Nuova Darsena (con celle di assorbimento), quelle della Banchina Marche (parzialmente realizzata) e la nuova banchina di allestimento dei cantieri navali Fincantieri.

Al primo gruppo è stato assegnato un coefficiente di riflessione del 100% (condizione di riflessione totale), alle opere del secondo gruppo si è assegnata una riflessione del 60%, mentre al terzo gruppo si è attribuito il coefficiente di riflessione del 90%.

#### **4.6 Condizione iniziale**

La condizione iniziale scelta è quella di superficie libera in quiete, trascurando le oscillazioni dovute ai dislivelli delle maree astronomiche e/o delle sopraelevazioni meteorologiche, in quanto entrambe di entità modesta nel paraggio anconitano, specie per le direzioni di esposizione dell'imboccatura portuale (aperta a NordOvest).

Nello studio oggetto della presente Convenzione si è scelto di disporre la linea di generazione ondosa in corrispondenza della linea batimetrica  $-16m$  perché caratterizzata da una maggiore regolarità e parallelismo rispetto alla linea di costa.

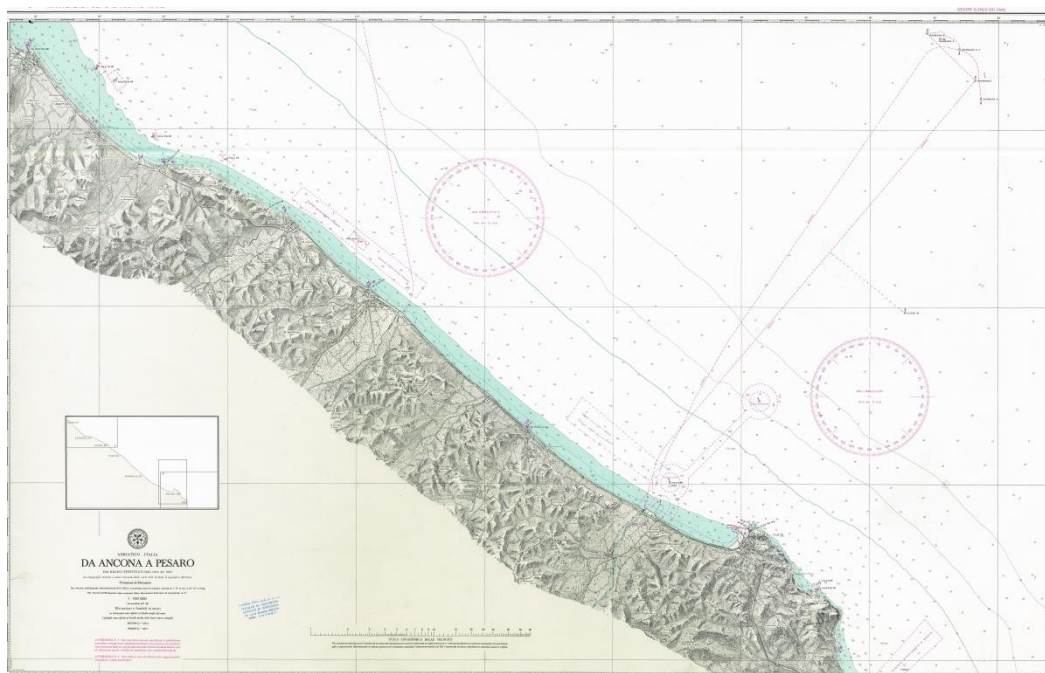
#### **4.7 Condizioni ondose simulate**

La prevista imboccatura del Porto di Ancona risulta esposta soprattutto alle direzioni nordoccidentali. Le direzioni di provenienza più pericolose risultano, quindi, quelle da NordOvest, che sono caratterizzate da *fetches* relativamente limitati, in quanto provenienti, sul sito del Porto di Ancona, dal litorale settentrionale marchigiano (vd. la carta nautica della Figura 4.10) caratterizzato da una costa bassa, con spiagge sabbioso-ghiaiose e fondali degradanti con debole pendenza.

La climatologia anemometrica ed ondosa, localmente sottocosta, specialmente da tali direzioni, caratterizzati, come suddetto, da *fetches* anche particolarmente limitati, può essere diversa da quella del sito ondometrico al largo.

Quindi le caratteristiche delle onde, da simulare come attacchi ondosi nel modello di agitazione interna portuale, sono state desunte, oltre che facendo riferimento ai dati statistici desumibili dalle misure ondometriche al largo, anche esaminando la ricostruzione di tali eventi ondosi locali sottocosta, direttamente dal vento, utilizzando metodi di calcolo (ricostruzione del moto ondoso dal vanto) diffusi nelle Costruzioni Marittime. In tal modo si riescono a trattare anche quegli eventi anemometrici che avvengono localmente sottocosta, talvolta anche con particolare intensità, provenienti da tali direzioni nord-

occidentali, in tale paraggio costiero anconetano. Questo tipo di eventi anemometrici, anche di importante intensità, pur verificandosi con una certa frequenza, sono difficilmente riscontrabili al largo (la boa ondometrica si trova a circa 16 miglia dalla riva), in quanto rimangono tipicamente confinati in pochissime miglia sottocosta (entro distanze dell'ordine da 2-3 miglia fino a 5-10 miglia).



*Figura 4.10 – Carta nautica dell'IIM da Pesaro ad Ancona*

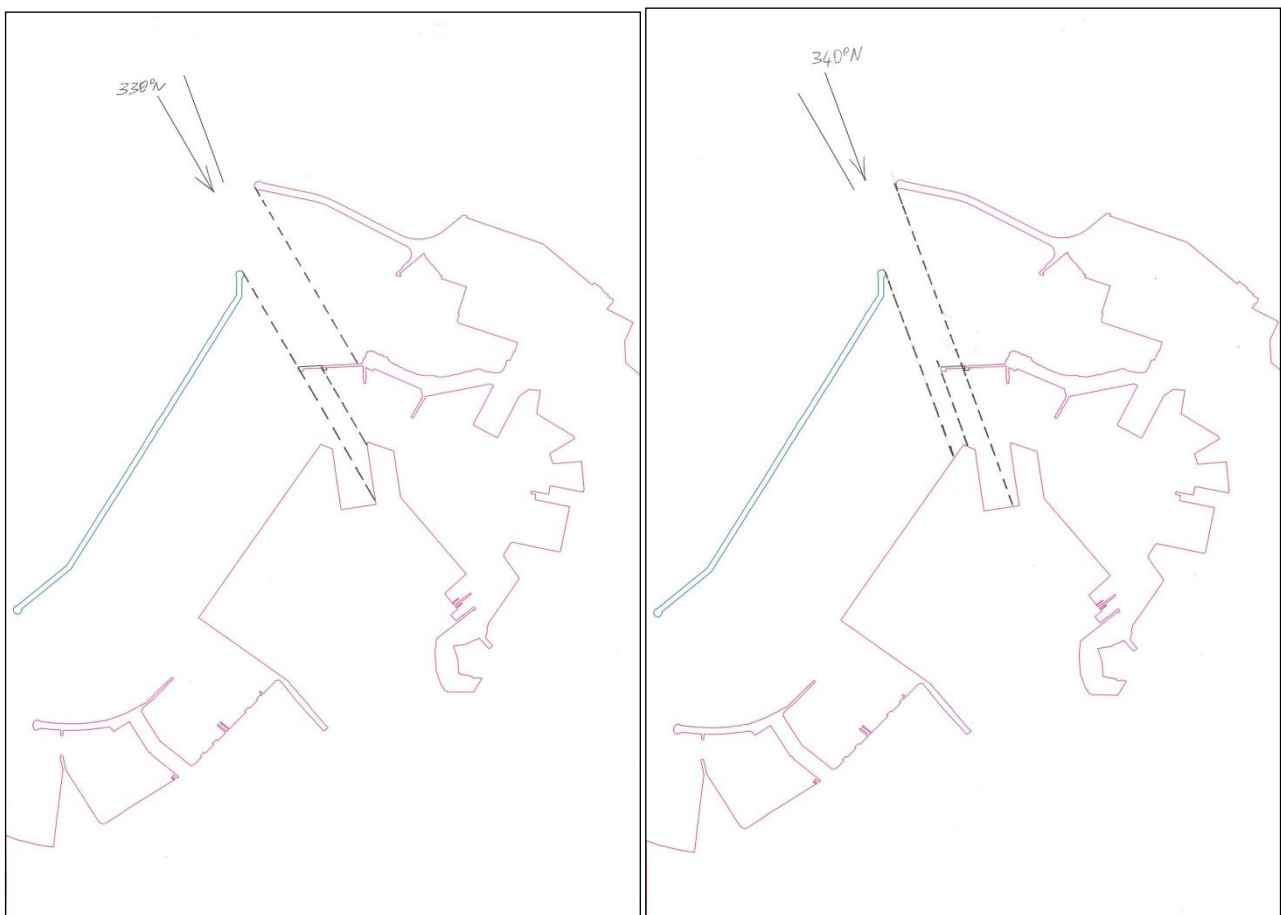
All'esame delle caratteristiche anemometriche del sito portuale anconetano, è stato dedicato il paragrafo 3.4, al quale si rimanda per la descrizione dei dettagli su tale specifico argomento.

Nel presente paragrafo vengono invece specificate le caratteristiche degli attacchi ondosi analizzati per le simulazioni di agitazione ondosa interna al porto, tramite modello numerico.

Le direzioni di attacco ondoso all'imboccatura, per le quali la parziale demolizione del Molo Nord attuale risulta avere una influenza geometrica diretta (cioè quelle direzioni che sono in grado di incidere direttamente, senza subire troppe riduzioni di intensità per effetto dello smorzamento dovuto alla diffrazione ondosa delle opere portuali esterne, sul tratto di molo eventualmente da demolire), risultano quelle comprese nel settore da 321°N a 346°N.

Analizzando le direzioni di provenienza ondosa, individuandole e distinguendole ad intervalli di 10°, quelle che sono state riconosciute più significative ed importanti, quindi da

testare con particolare attenzione sul modello, risultano quelle da 330°N e 340°N. In particolare, la direzione che risulta in grado di impattare direttamente sulla Banchina n.23 della cosiddetta Nuova Darsena (quella indicata da analizzare nei Contenuti principali degli studi di Convenzione), in assenza della protezione offerta dal tratto di Molo Nord in discussione, è proprio quella da 330°N (vedi schema grafico di Figura 4.11, pannello di sinistra). In pratica, l'eventuale demolizione del tratto di Molo Nord in discussione, risulta "scoprire" la Banchina n.23 agli attacchi ondosi provenienti da 330°N. L'altra direzione di attacco ondoso individuata, proveniente da 340°N, risulta comunque in grado di incidere direttamente la Banchina n.24 della Nuova Darsena stessa (limitrofa a quella indicata nei Contenuti della Convenzione), sempre in assenza della protezione offerta dal tratto di Molo Nord attuale da demolire (vedi schema grafico di Figura 4.8, pannello di destra). Complessivamente, quindi, le due



*Figura 4.11 - Effetto della demolizione dei 100m del Molo Nord sulle banchine portuali interne del Porto di Ancona per gli attacchi ondosi che mostrano la pericolosità più diretta*

direzioni di provenienza ondosa individuate, 330°N e 340°N, risultano “scoprire” all’agitazione ondosa diretta, l’intero specchio acqueo (e le relative banchine) della Nuova Darsena.

All’analisi dell’agitazione ondosa per tali direzioni di provenienza, che sono state ritenute più direttamente pericolose, per effetto della parziale demolizione del Molo Nord, è stata aggiunta l’analisi prodotta dalle direzioni di attacco ondoso limitrofe al settore considerato come riferimento principale (320°N e 350°N). Inoltre, per completare l’analisi dell’agitazione ondosa gravante sulle principali banchine del futuro Porto di Ancona, è stato aggiunto anche lo studio degli effetti di quelle direzioni (da 0°N e da 10°N) che risultano incidere in modo diretto la restante parte della Banchina Marche, in fase di previsto completamento, pur se la parziale demolizione in discussione non produce grandi cambiamenti nell’attacco ondoso su tali opere.

Alle suddette direzioni, ritenute di importanza maggiore per l’analisi in questione, è stato anche aggiunto l’esame di alcune direzioni diverse, provenienti dai settori nord-orientali (bora-greco), a completamento del settore di traversia del Porto di Ancona e soprattutto facendo riferimento al settore di traversia principale del porto, che comprende le ondate più importanti ed intense che arrivano nel paraggio anconetano.

Per quello che riguarda l’individuazione dei periodi ondosi delle ondate da esaminare mediante il modello di agitazione ondosa, sono state considerate le misure ondometriche della boa della RON al largo di Ancona. In particolare, facendo riferimento ai dati del periodo 1999-2006, sono stati evidenziati, all’interno dell’intero insieme generale dei dati, i periodi delle onde provenienti dal settore 315°N-15°N, che, in pratica, corrisponde a quello di traversia a cui risulta maggiormente esposta la futura imboccatura portuale e che comprende proprio tutte le direzioni principali, da esaminare con maggior attenzione per gli scopi del presente lavoro, individuate in precedenza (320°N, 330°N, 340°N, 350°N, 0°N, 10°N). Figura 4.12 e nella Figura 4.13 sono riportati, evidenziati in nero, i dati dei periodi ondosi del settore indicato sopra, all’interno di tutti i dati omnidirezionali, indicati in grigio, per quanto riguarda rispettivamente il dato del periodo di picco e di quello medio, mostrati rispetto all’altezza d’onda significativa.

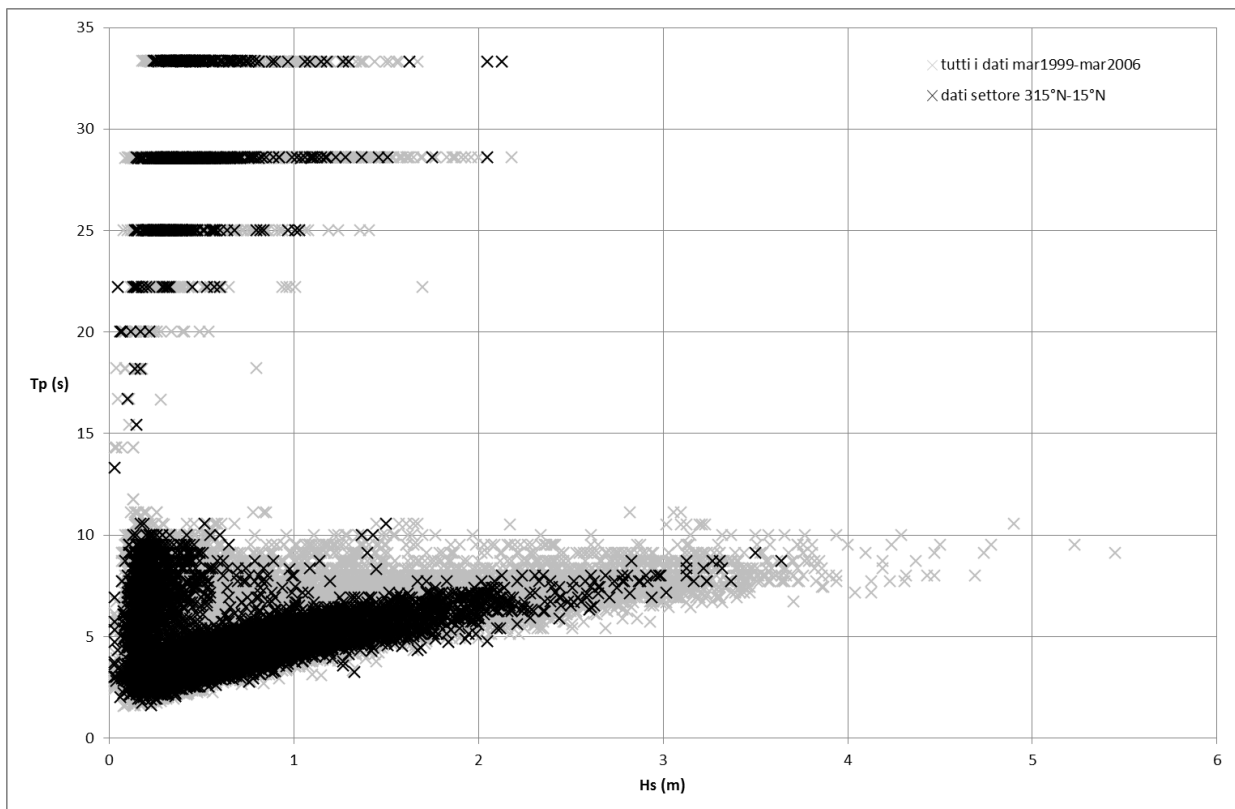


Figura 4.12– Periodi ondosi di picco rispetto all'altezza significativa per i dati della boa ondometrica della RON al largo di Ancona con evidenziati quelli del settore 315°N-15°N

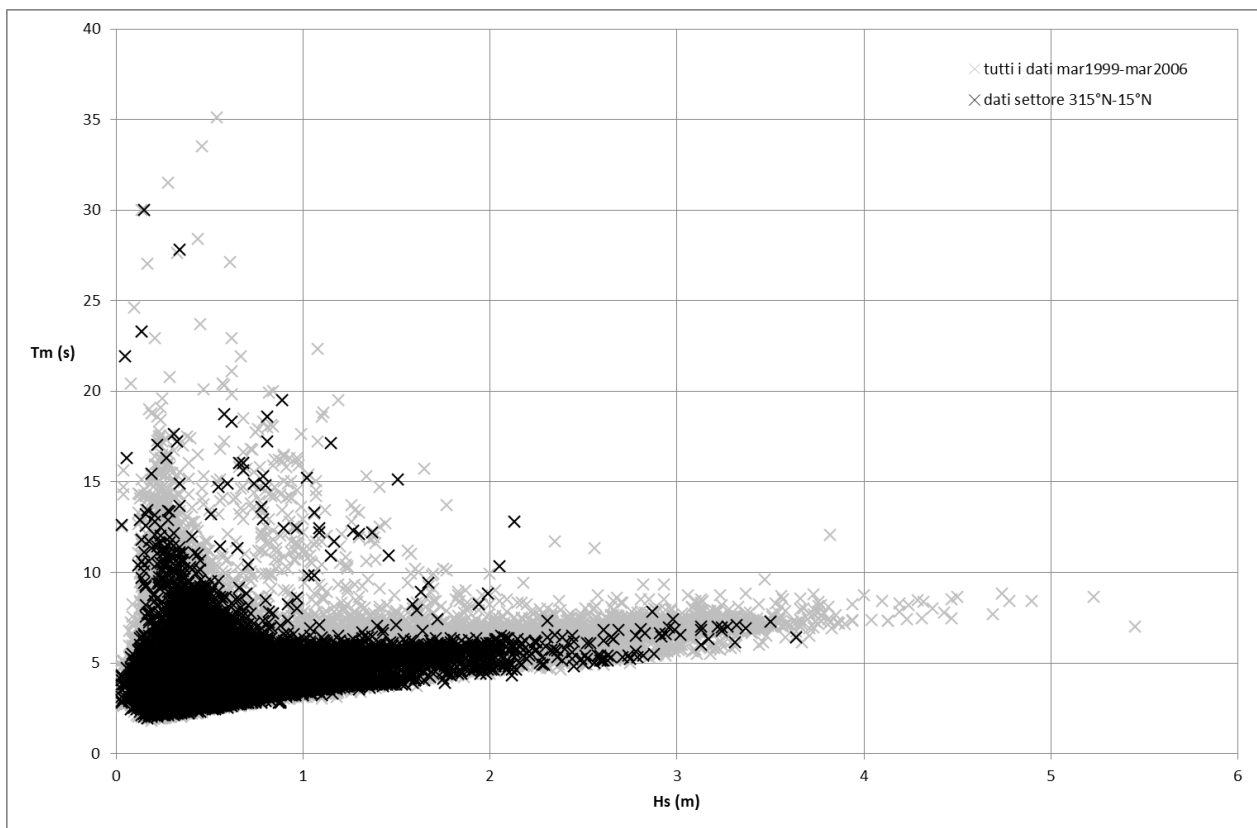


Figura 4.13 – Periodi ondosi medi rispetto all'altezza significativa per i dati della boa ondometrica della RON al largo di Ancona con evidenziati quelli del settore 315°N-15°N

Risulta evidente che, facendo riferimento a dati di ondatazioni abbastanza intense, caratterizzate da altezze d'onda superiori a 2-3 metri, del settore individuato come principale da studiare per la nuova imboccatura del Porto di Ancona e la parziale demolizione del Molo Nord, i valori più frequenti del periodo di picco (caratteristica che serve come dato di ingresso nell'applicazione del modello di agitazione ondosa) si avvicinano a circa 7.5 s ed i periodi più alti al valore di circa 9 s. Per cui tali due valori del periodo di picco sono stati scelti come i principali da applicare per le ondatazioni da esaminare sul modello di agitazione ondosa interna al porto provenienti dal settore nord-occidentale.

I valori dei periodi ondosi, individuati come sopra riportato, trovano anche conferma dalla valutazione di tali caratteristiche utilizzando i metodi di ricostruzione delle ondatazioni a partire dai dati di vento, relativamente ai citati eventi anemometrici intensi, che avvengono localmente sottocosta, specie dalle direzioni nord-occidentali.

Per le applicazioni del modello con le ondatazioni nord-orientali, che però risultano secondarie per gli scopi principali del presente studio, sono stati proposti periodi ondosi più lunghi di quelli delle ondatazioni nord-occidentali, nel rispetto delle caratteristiche climatologiche ondose del paraggio medio-adriatico, che indicano periodi ondosi crescenti, parallelamente all'aumento delle corrispondenti distanze di *fetch*, per le ondatazioni provenienti dai quadranti orientali e meridionali, rispetto a quelli delle onde che provengono dai quadranti settentrionali e nord-occidentali.

Nell'individuazione dei suddetti periodi ondosi, si è anche tenuto conto dei periodi di oscillazione libera del bacino della Nuova Darsena, il quale presenta, infatti, una forma geometrica particolarmente regolare, che facilita la possibilità dell'esaltarsi delle onde residue interne, in condizioni di risonanza. Tali periodi, propri dei bacini, legati alle loro dimensioni, sono stati valutati per la Nuova Darsena, di forma rettangolare, sia in direzione trasversale, assunto come bacino "chiuso", sia lungo la direzione longitudinale, trattandolo come bacino "semi-chiuso". Sono state valutate le condizioni di oscillazione libera fondamentali e dei modi principali, come riportato in seguito nel paragrafo 7.

Le analisi con il modello di cui sopra, vengono proposte in termini di coefficienti di diffrazione, per cui non risulta necessario, in questa fase, indicare le altezze d'onda significative di ingresso per le prove, risultando a priori il valore unitario, da cui discendono i valori del suddetto coefficiente di diffrazione.

Ponendo poi l'attenzione alla possibilità di estendere l'analisi del modello ad applicazioni di onde di lungo periodo, spesso le più critiche per la funzionalità e la



sicurezza di una nave all'ormeggio, è stata cominciata una ricerca storico-oceanografica per l'individuazione dell'effettivo verificarsi o meno di eventi ondosi nel campo delle oscillazioni di infragravità (con periodi dell'ordine di 30-300 secondi) nel medio-adriatico, lato occidentale. Al momento, l'esito della ricerca è risultato negativo, o perlomeno limitato all'individuazione di oscillazioni di sessa, di periodo ancora maggiore, ma di entità talmente modesta in altezza (dell'ordine di pochi centimetri), da risultare irrilevante ai fini degli scopi del presente studio. Una possibile giustificazione dell'assenza di tali oscillazioni di infragravità, specie provenienti dai quadranti nord-occidentali, i più pericolosi per l'esposizione della imboccatura portuale in studio, può trovarsi nel fatto che, come detto sopra, tale bocca risulta aperta ad un lungo susseguirsi delle spiagge sabbioso-ghiaiose del litorale settentrionale marchigiano e romagnolo, caratterizzate da una costa bassa, con fondali degradanti dolcemente e con debole, se non debolissima, pendenza e quindi c'è l'assoluta mancanza di rilevanti asperità o variazioni batimetriche, che potrebbero, al contrario, essere causa della generazione di onde di infragravità.

## **5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI DI AGITAZIONE ONDOSA INTERNA AL PORTO**

I risultati delle simulazioni effettuate con il codice MIKE 21 BW consistono essenzialmente sulla distribuzione in ogni nodo della griglia di calcolo del valore mediato sulla verticale della profondità totale dell'acqua e delle componenti di flusso nelle due direzioni di moto.

I risultati vengono rappresentati graficamente in mappe planimetriche dell'elevazione della superficie libera del mare calcolata all'istante finale di una simulazione, risultando tale rappresentazione grafica utile per avere un'idea qualitativa generale dei fenomeni di riflessione e diffrazione che le onde subiscono per la presenza della struttura portuale.

Questi dati possono essere ulteriormente elaborati per avere dell'informazioni più idonee, anche dal punto di vista quantitativo, alla rappresentazione del problema in studio.

In particolare per l'analisi dell'agitazione ondosa nelle configurazioni testate del Porto di Ancona, è stata ricavata, come risultato, la distribuzione planimetrica del coefficiente di diffrazione  $K_d$  nella zona portuale.

Il coefficiente di diffrazione nei punti del reticolo di calcolo viene calcolato come rapporto tra l'altezza significativa nel punto e quella calcolata fuori dall'imboccatura portuale, in corrispondenza della linea di generazione ondosa ad una profondità media di 16 m. Ricordando il significato statistico dell'onda significativa, la mappa del coefficiente di diffrazione può essere calcolata in diversi istanti della simulazione. Nel caso in esame, dopo aver testato la stabilità del valore dell'altezza significativa, si è calcolato il coefficiente in questione al termine della simulazione. Esse possono essere interpretate come la rappresentazione del disturbo d'onda nell'area del modello per la presenza delle strutture portuali e sono in grado di fornire un'idea immediata del grado di protezione offerto dalla configurazione planimetrica del porto rispetto alle diverse condizioni ondose.

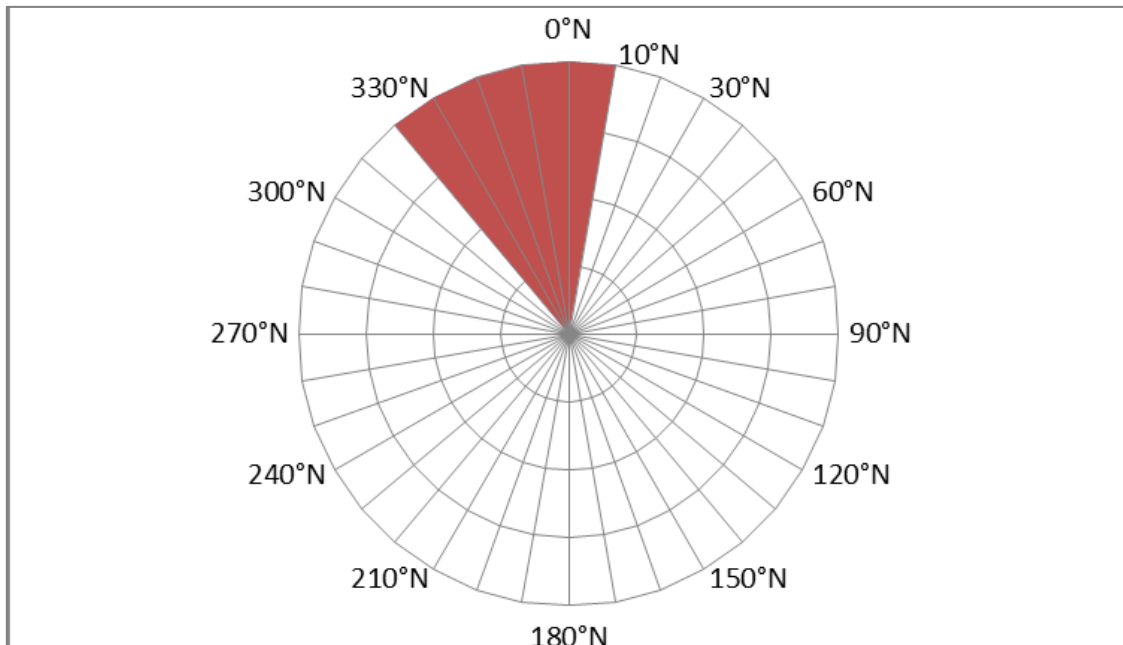
Le mappe prodotte per le diverse condizioni ondose di prova e per le soluzioni da porre a confronto (configurazione attuale del Molo Nord, configurazione con parziale demolizione del Molo Nord per un tratto di 100 m) sono riportate dalla Figura 5.1 alla Figura 5.50. Inoltre è stata studiata la configurazione con parziale demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto, (assenza del tratto inclinato rispetto all'asse della diga previsto per deviare la corrente e quindi il trasporto dei sedimenti verso il largo).

Vengono presentati gli schemi direzionali delle condizioni ondose provate (in termini di direzione di provenienza e periodo ondoso di picco) e le agitazioni ondose nella

configurazione attuale del Molo Nord, ordinate dalla Figura 5.1 alla Figura 5.25. Con la stessa sequenza si riportano i grafici relativi alla configurazione del Molo Nord demolito di 100 m in discussione, dalla Figura 5.26 alla Figura 5.50; e quelli relativi alla configurazione del Molo Nord demolito di 100m e parziale costruzione della diga di sottoflutto (dalla Figura 5.51 alla Figura 5.75).

## **5.1. Configurazione attuale Molo Nord**

### *5.1.1 Simulazioni con periodo di picco pari a $T_P=7.5s$*



*Figura 5.1 - Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate (320°N - 330°N - 340°N - 350°N - 0°N - 10°N) per il periodo di picco pari a  $T_P=7.5s$*

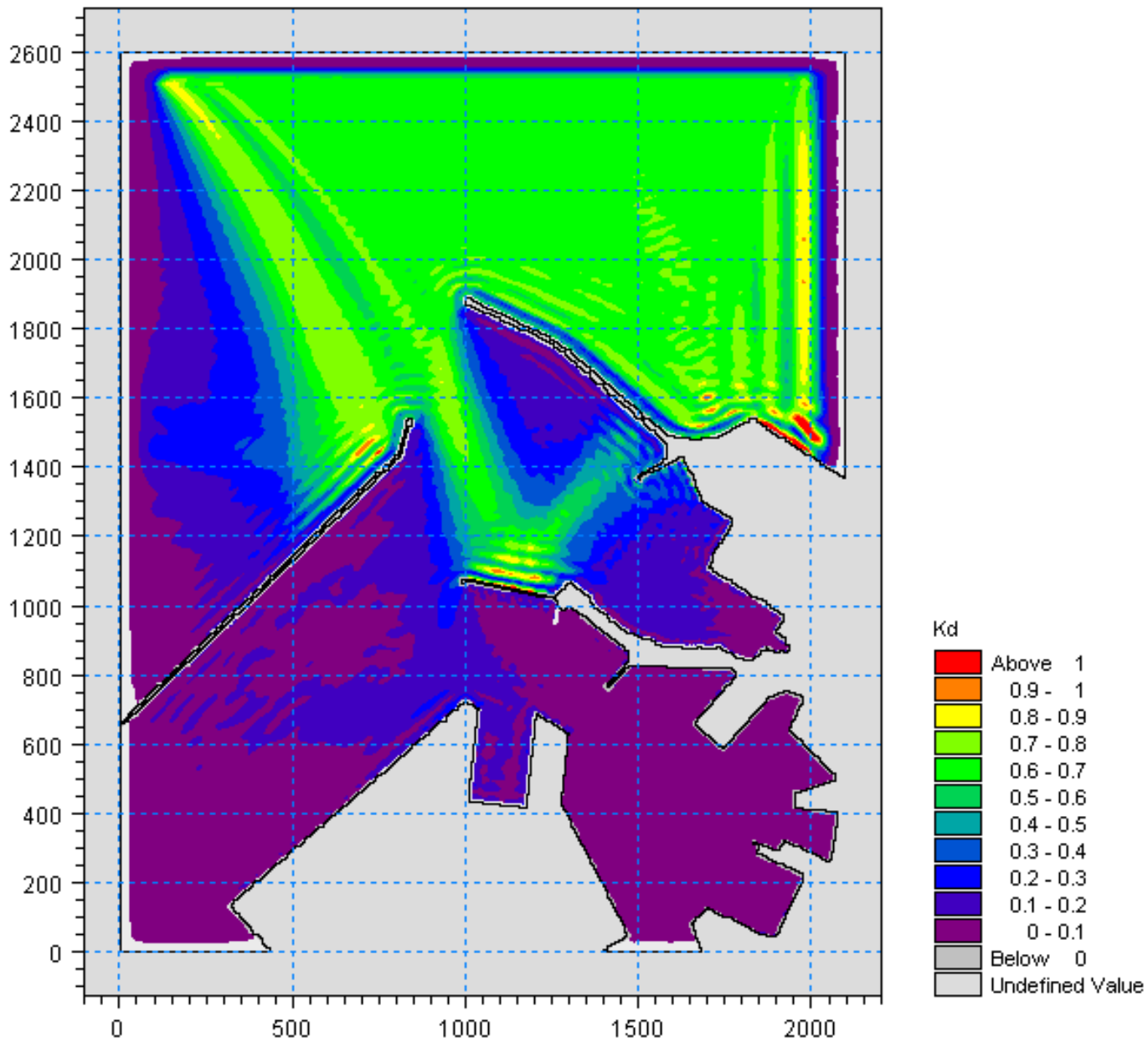


Figura 5.2 - Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 320°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

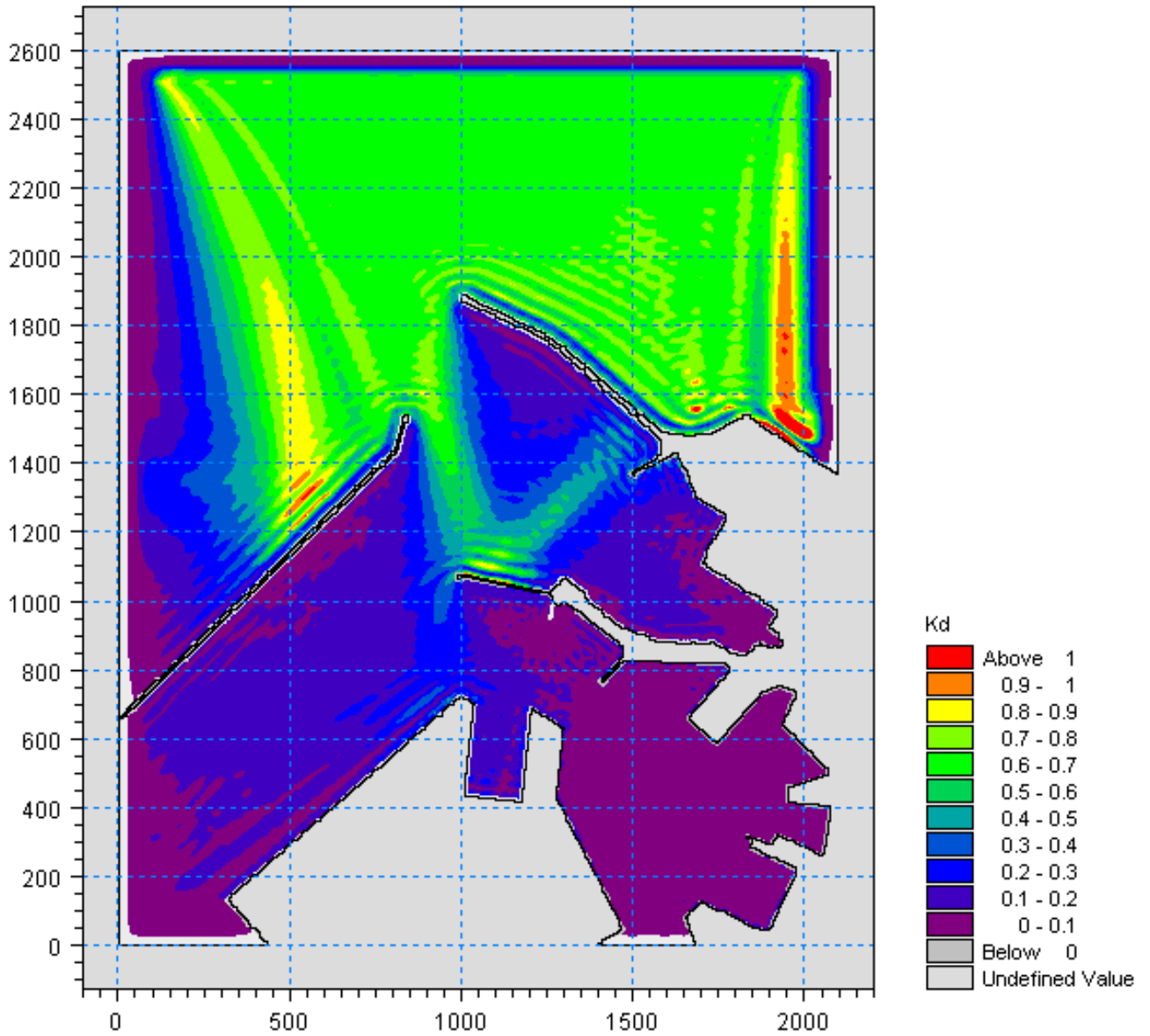


Figura 5.3 - Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $330^\circ N$  con periodo  $T_P=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

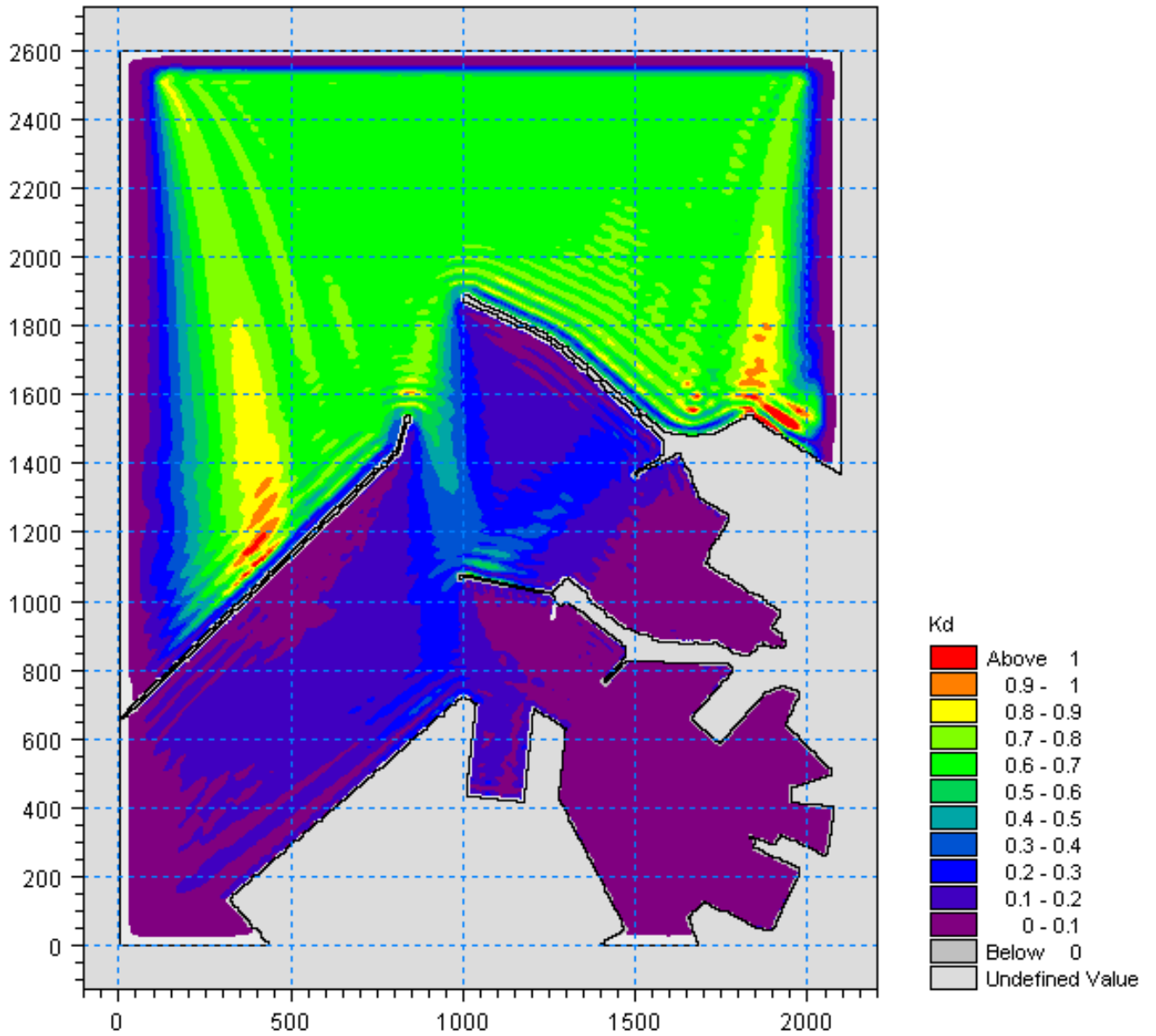


Figura 5.4 - Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $340^\circ N$  con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

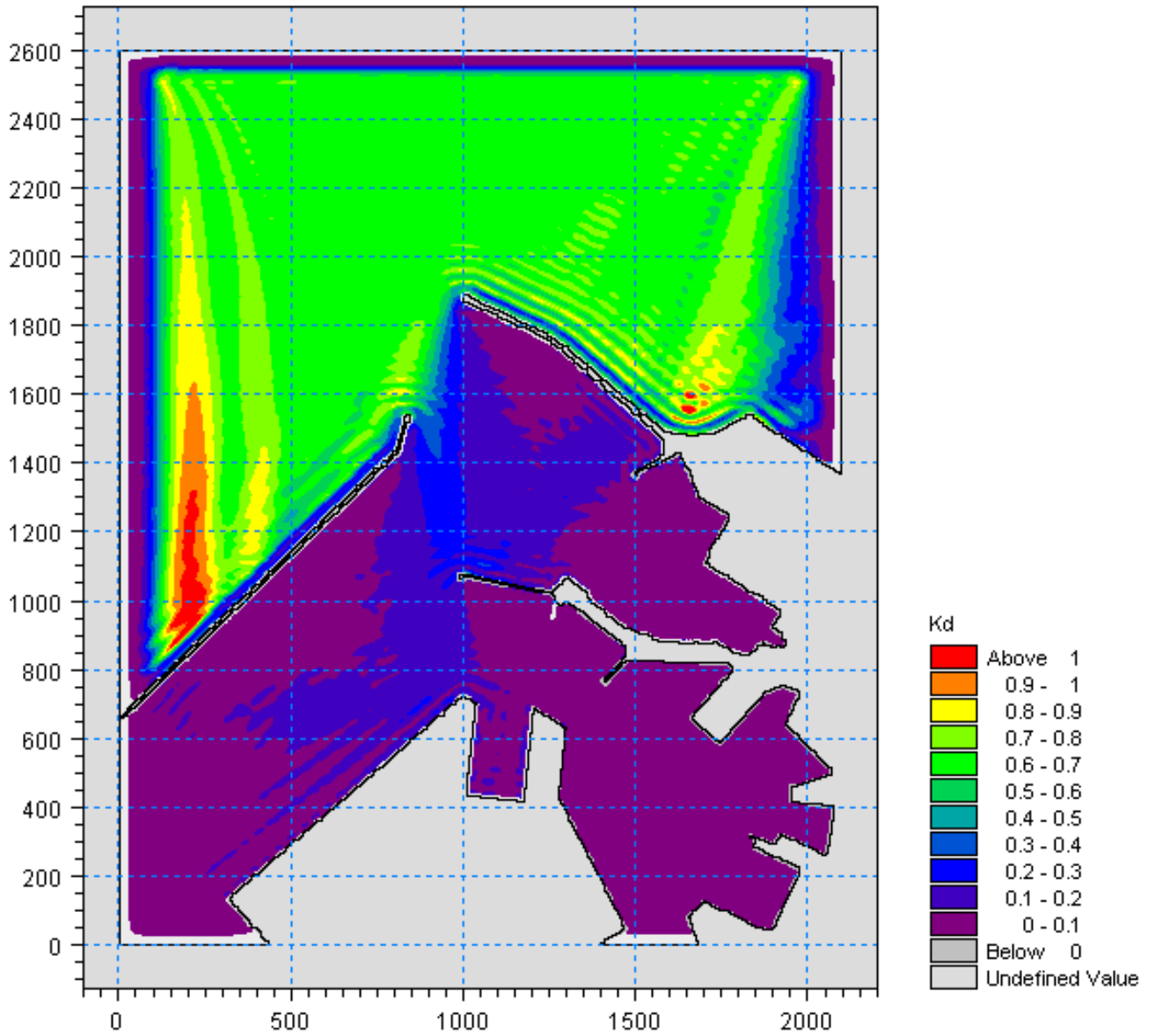


Figura 5.5 - Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $350^\circ N$  con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord



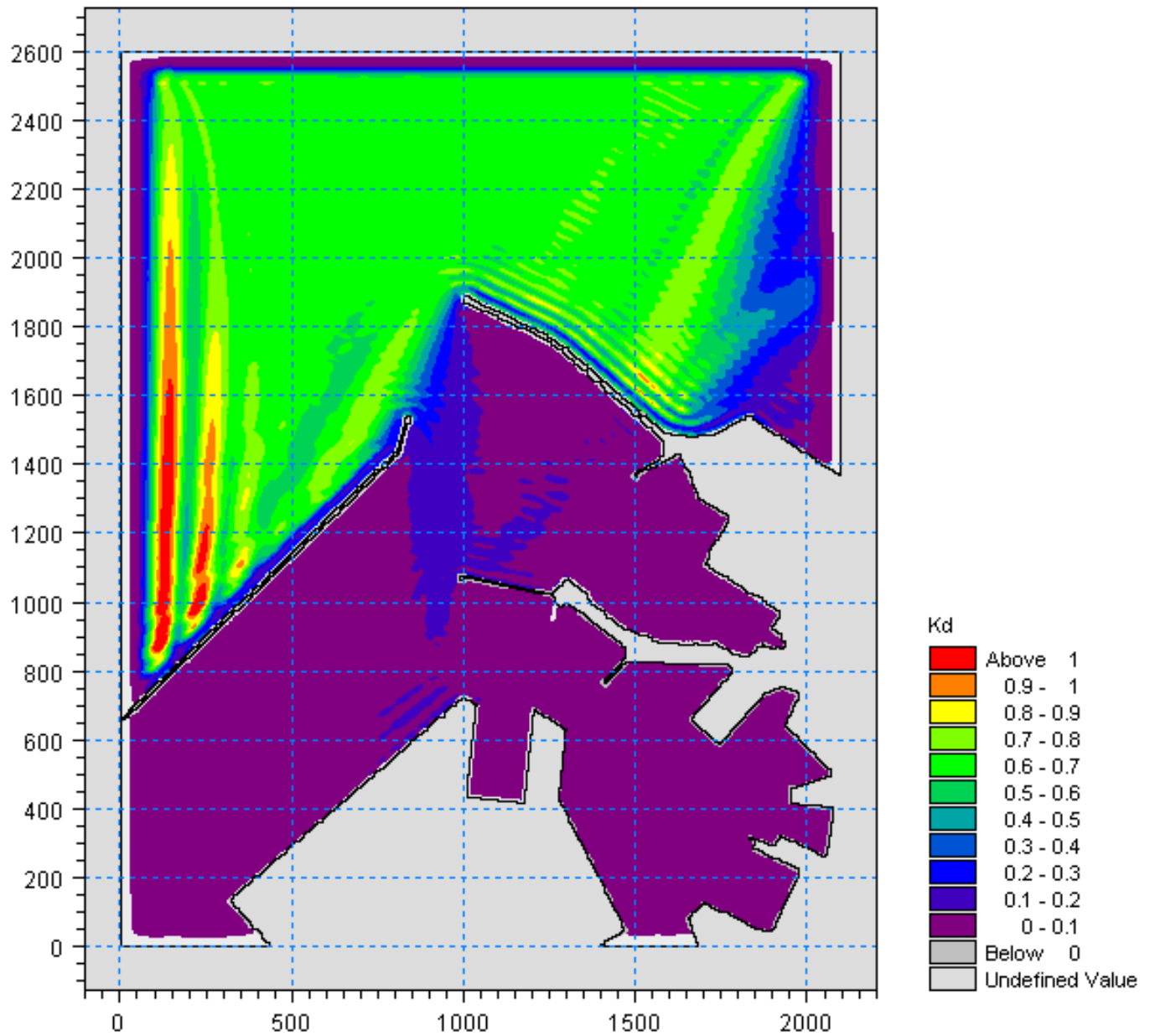


Figura 5.6 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 0°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

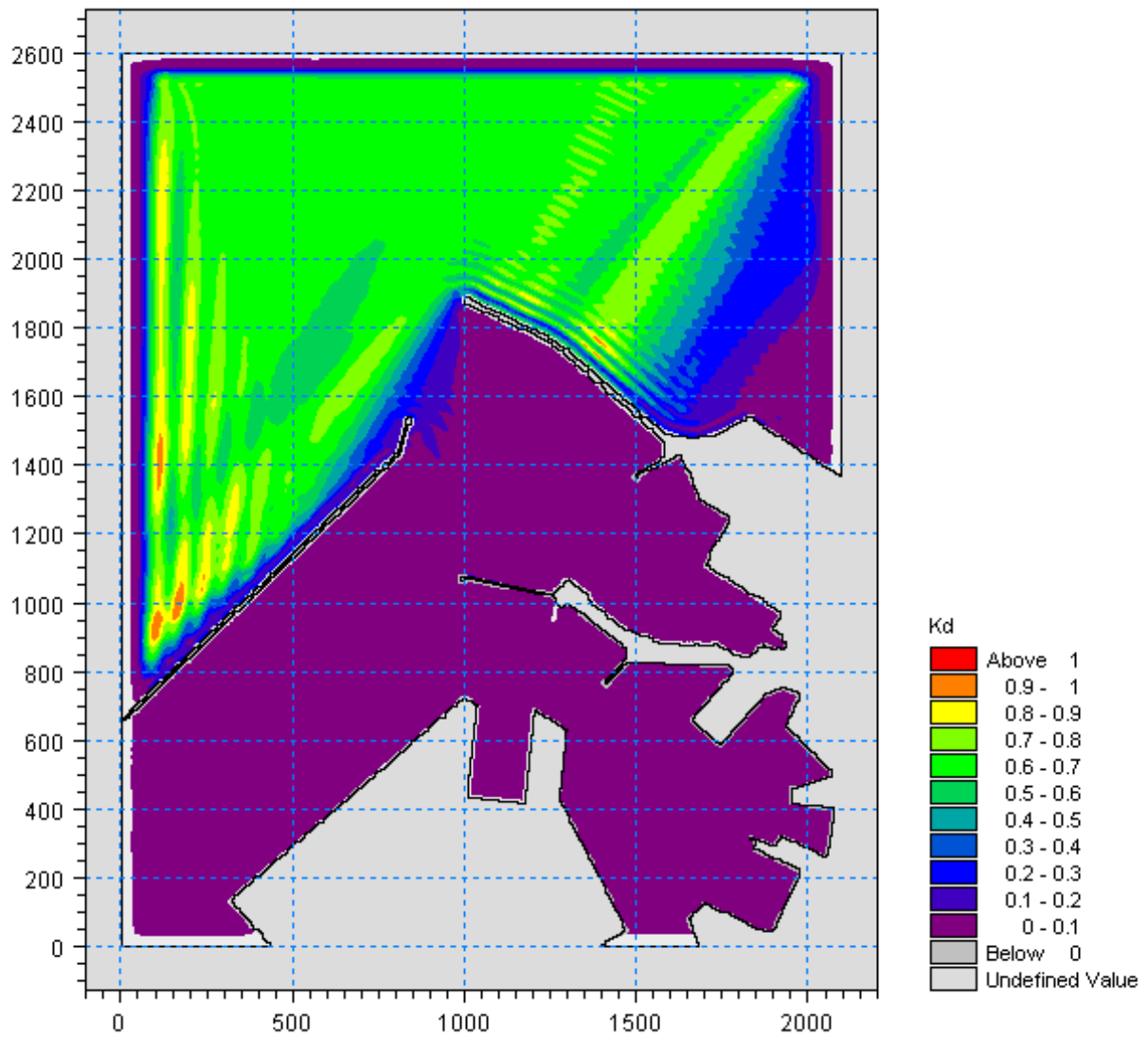


Figura 5.7 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $10^{\circ}N$  con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

5.1.2 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P = 9.0s$

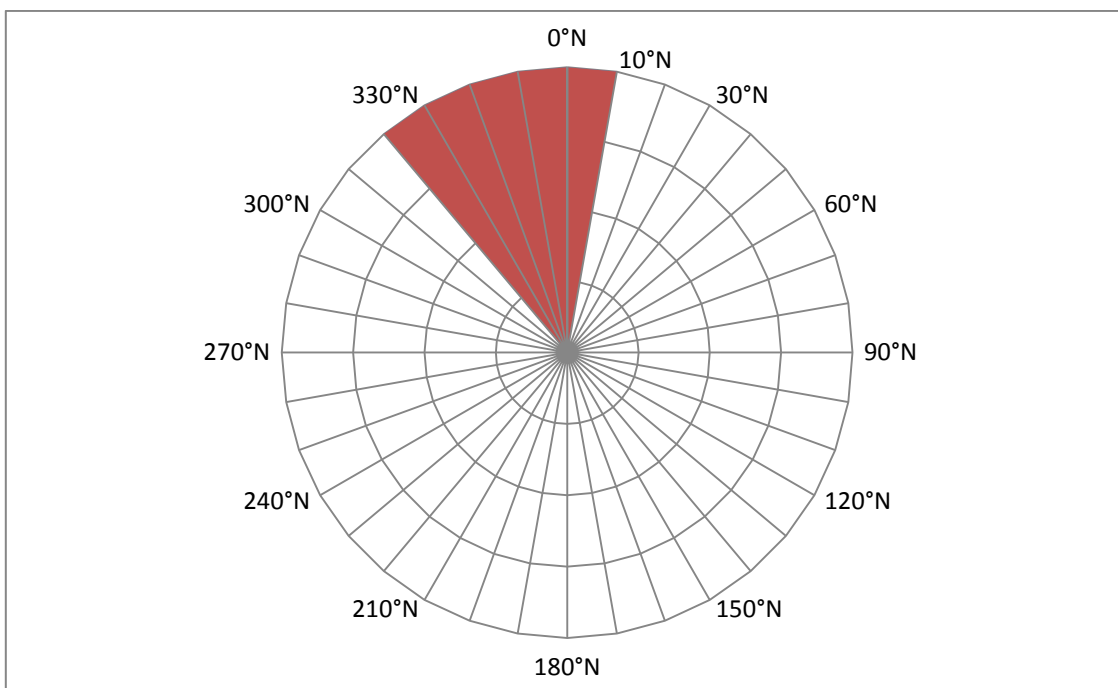


Figura 5.8 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $320^{\circ}N - 330^{\circ}N - 340^{\circ}N - 350^{\circ}N - 0^{\circ}N - 10^{\circ}N$ ) per il periodo di picco  $T_P=9s$

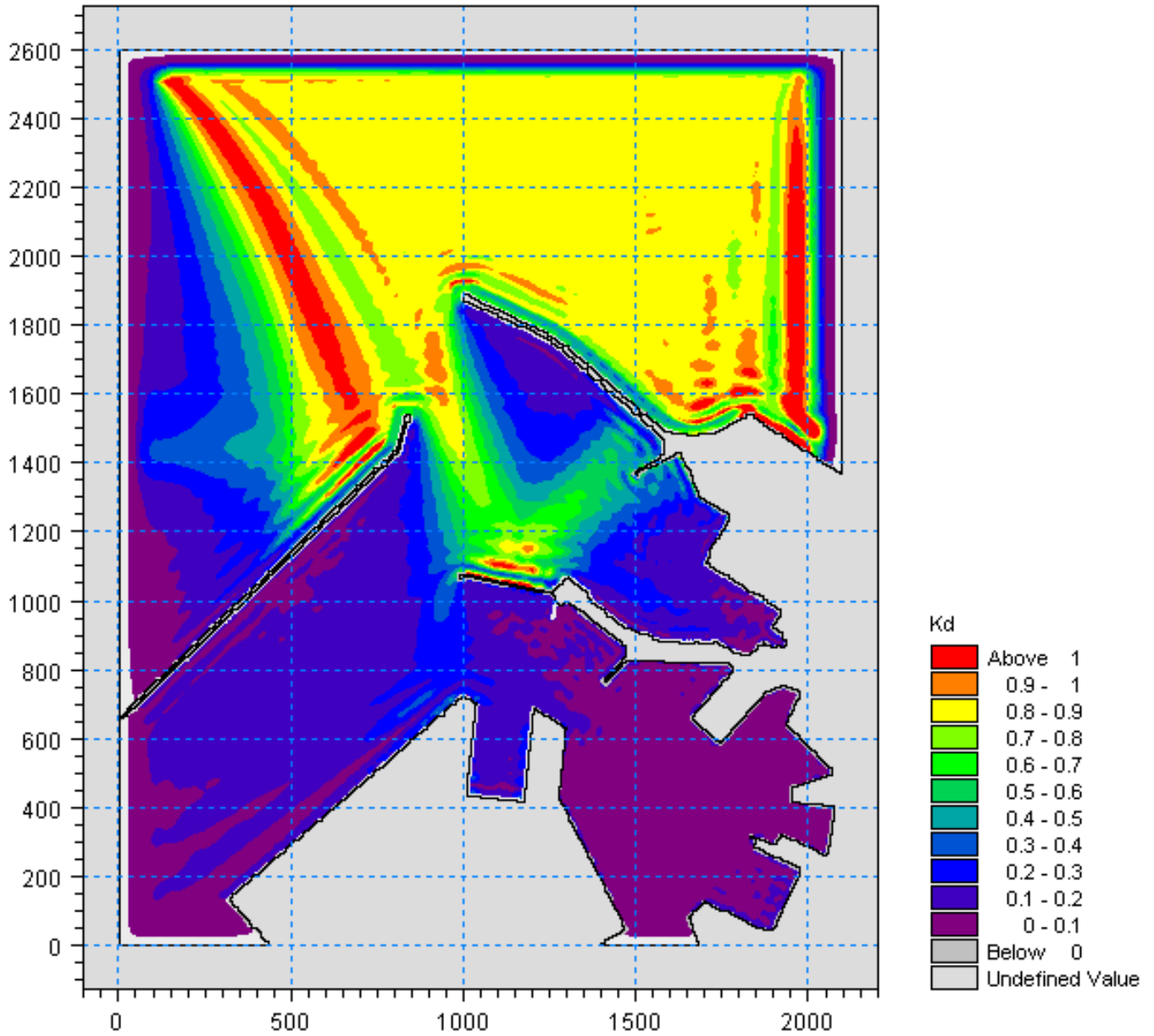


Figura 5.9 - Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 320°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

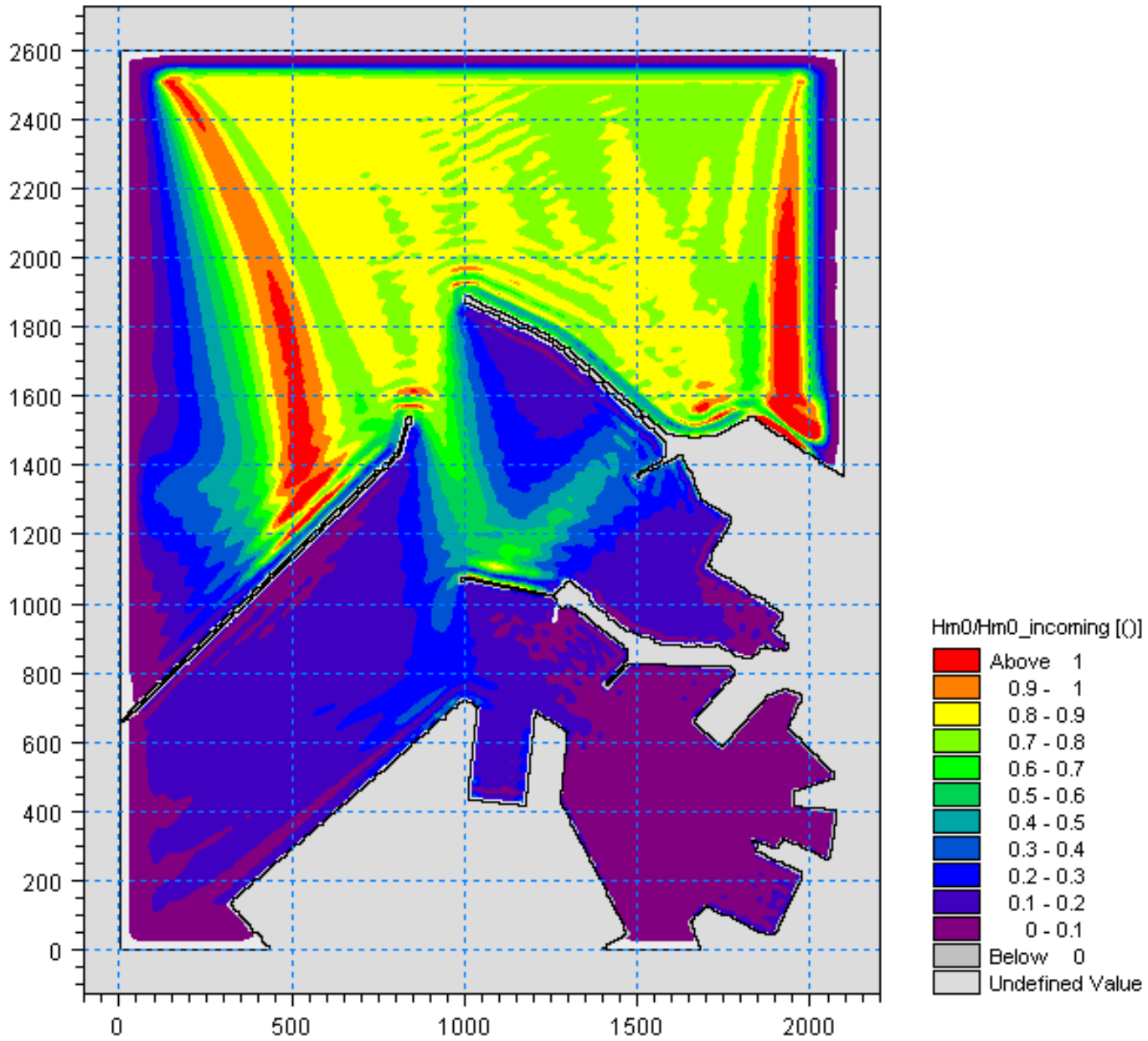


Figura 5.10 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $330^{\circ}N$  con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

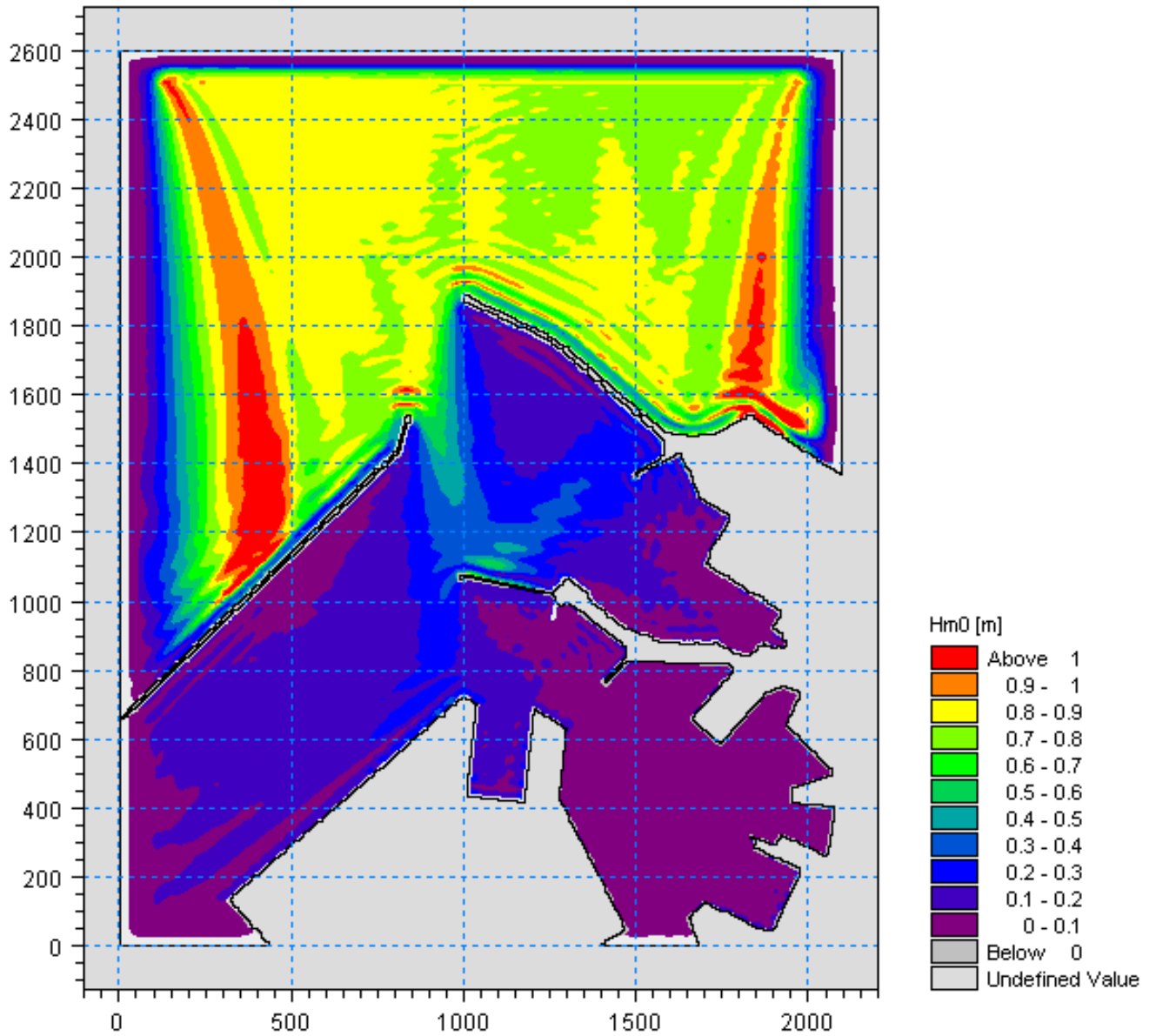


Figura 5.11 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 340°N con periodo  $T_P=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

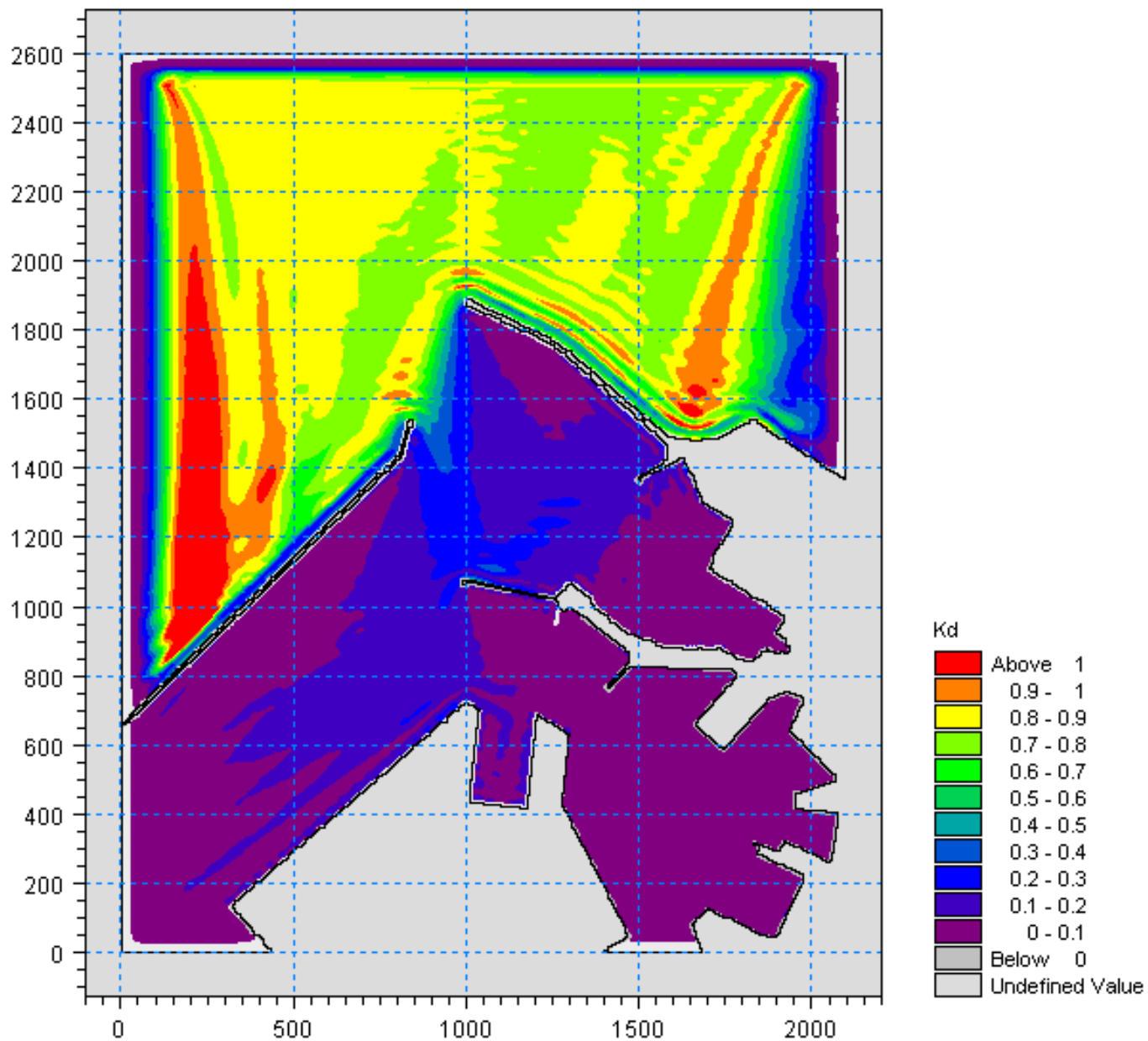


Figura 5.12 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $350^{\circ}\text{N}$  con periodo  $T_P=9\text{s}$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

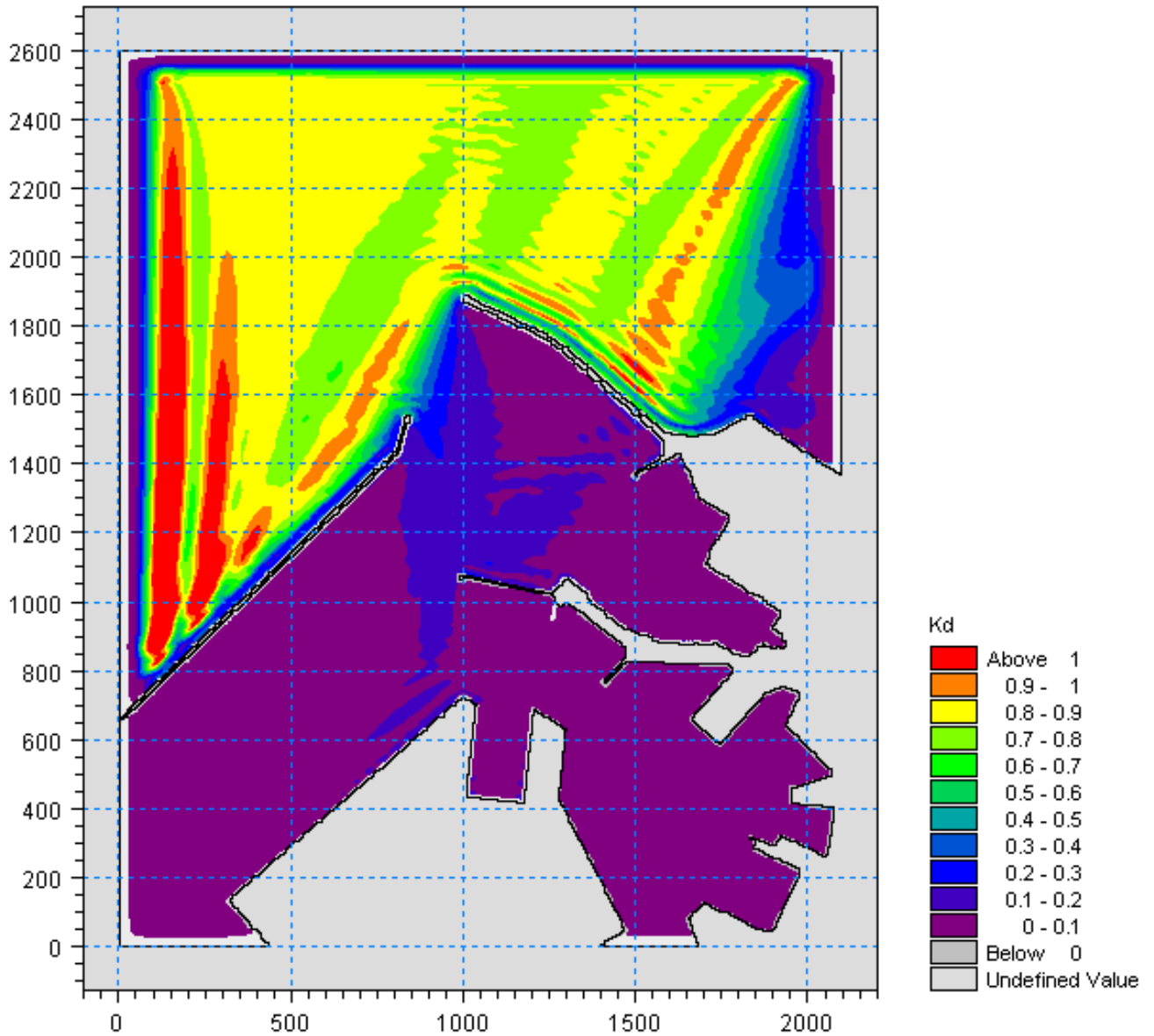


Figura 5.13 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^\circ N$  con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord



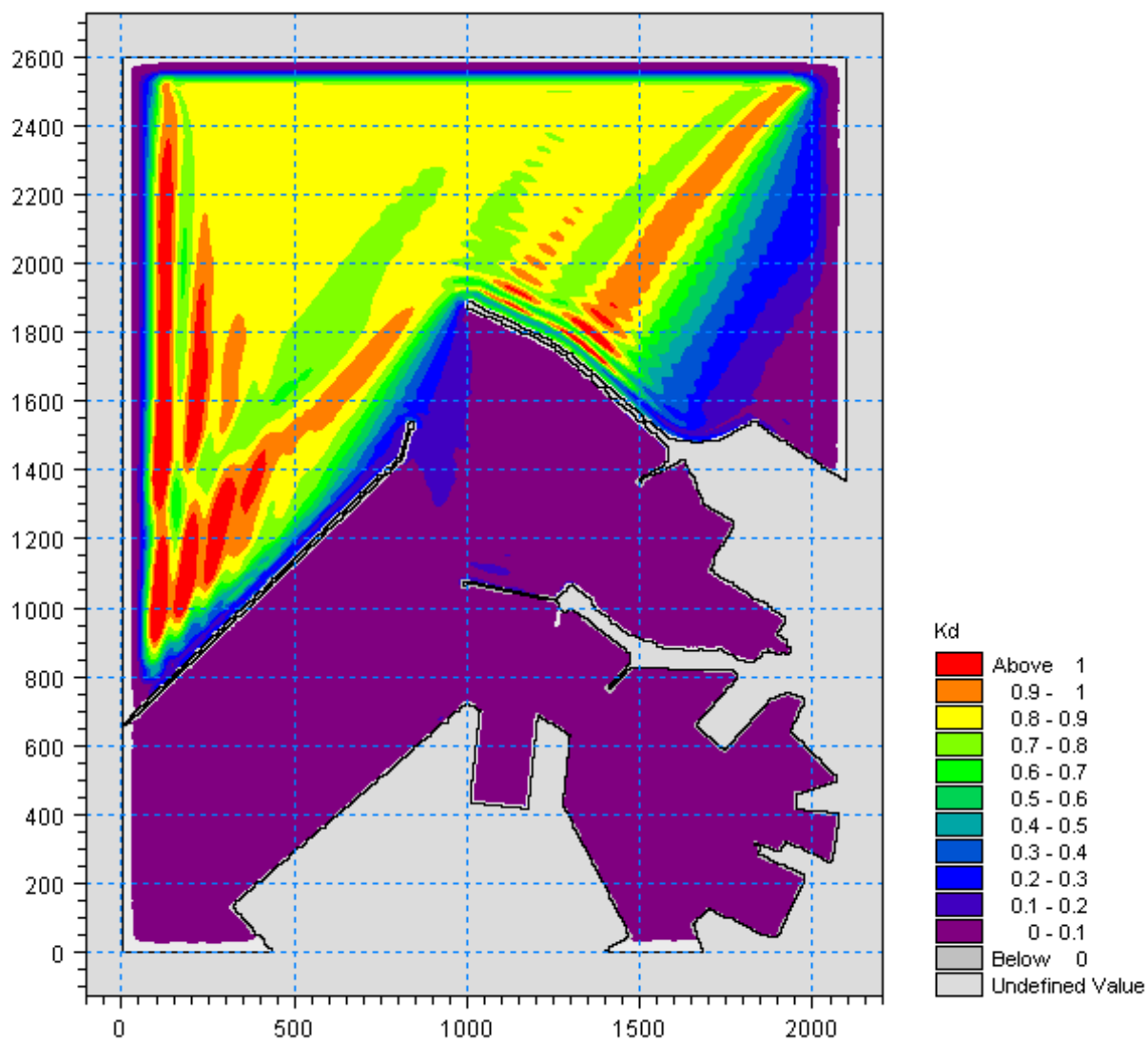


Figura 5.14 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 10°N con periodo  $T_P=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

5.1.3 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=10.5s$

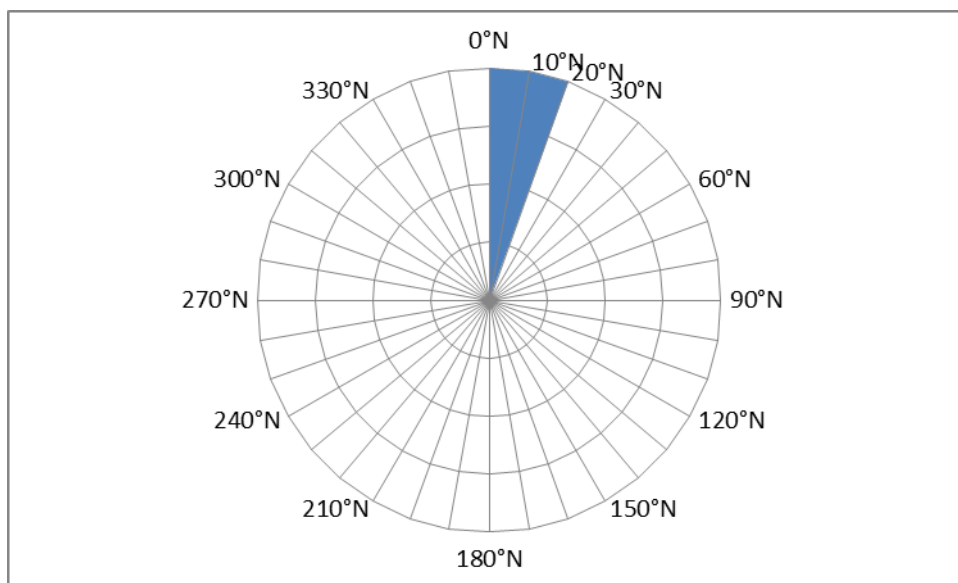


Figura 5.15 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $0^\circ N - 10^\circ N - 20^\circ N$ ) per il periodo di picco  $T_P=10.5s$

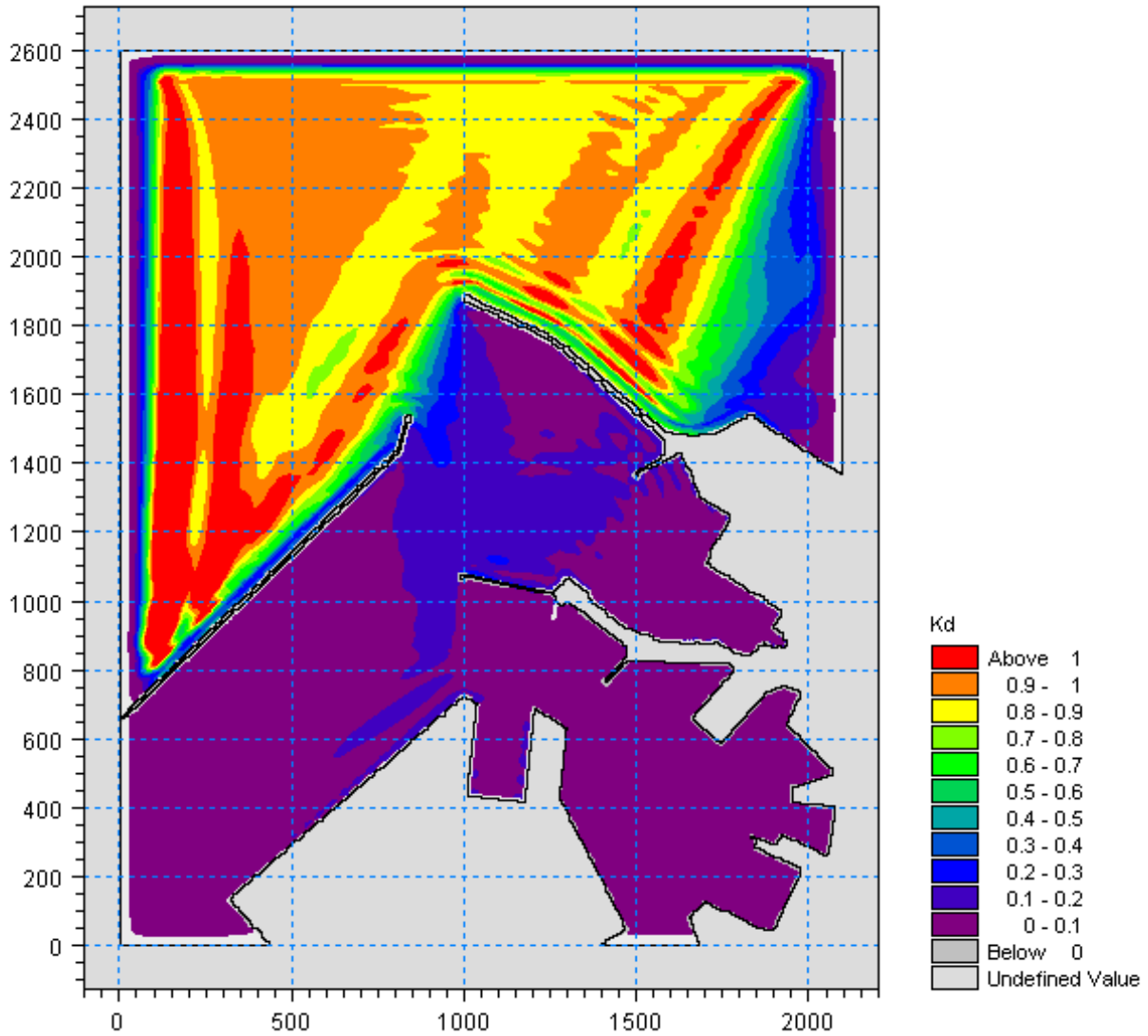


Figura 5.16 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^{\circ}N$  con periodo  $T_p=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

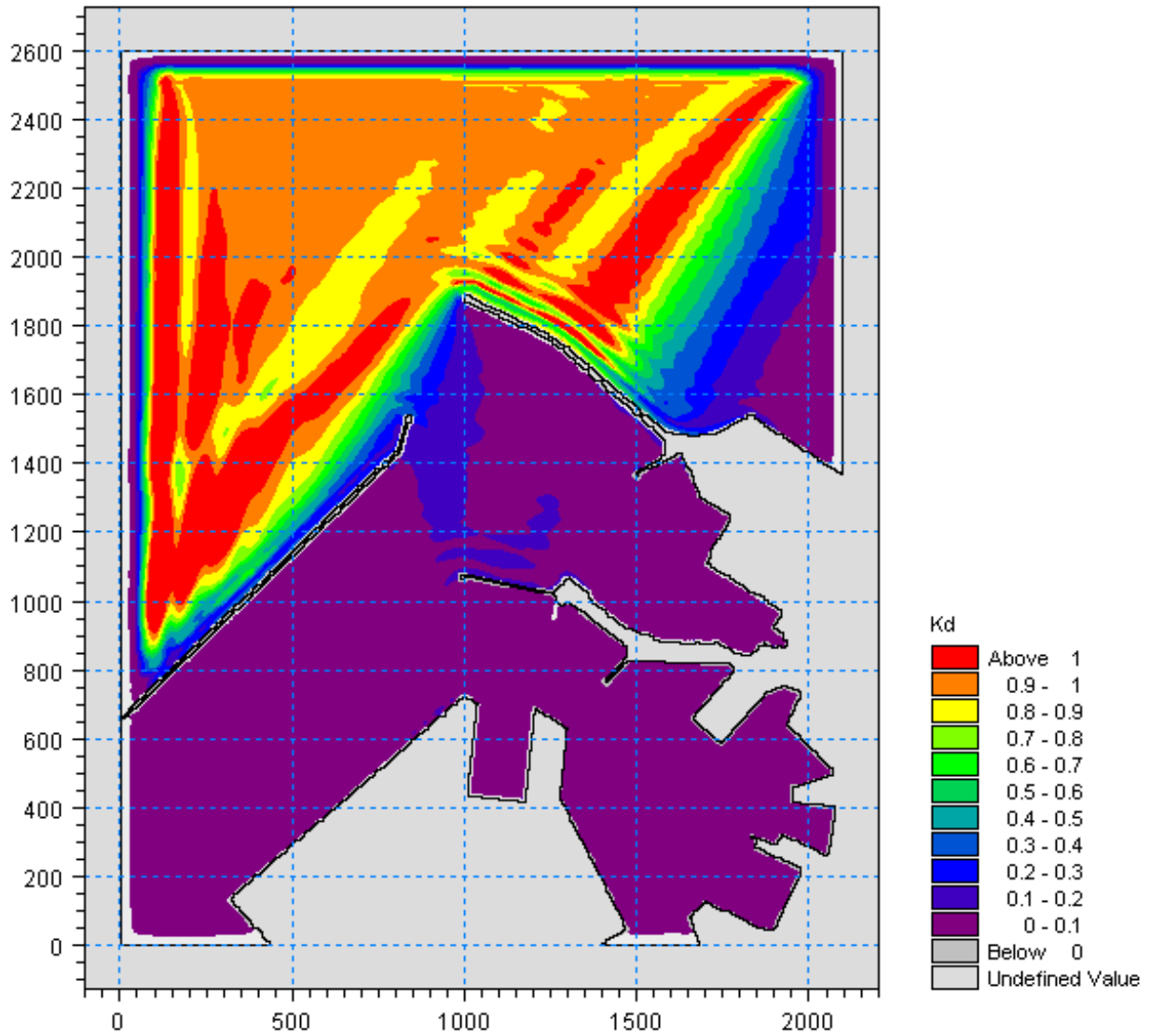


Figura 5.17 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $10^{\circ}N$  con periodo  $T_P=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

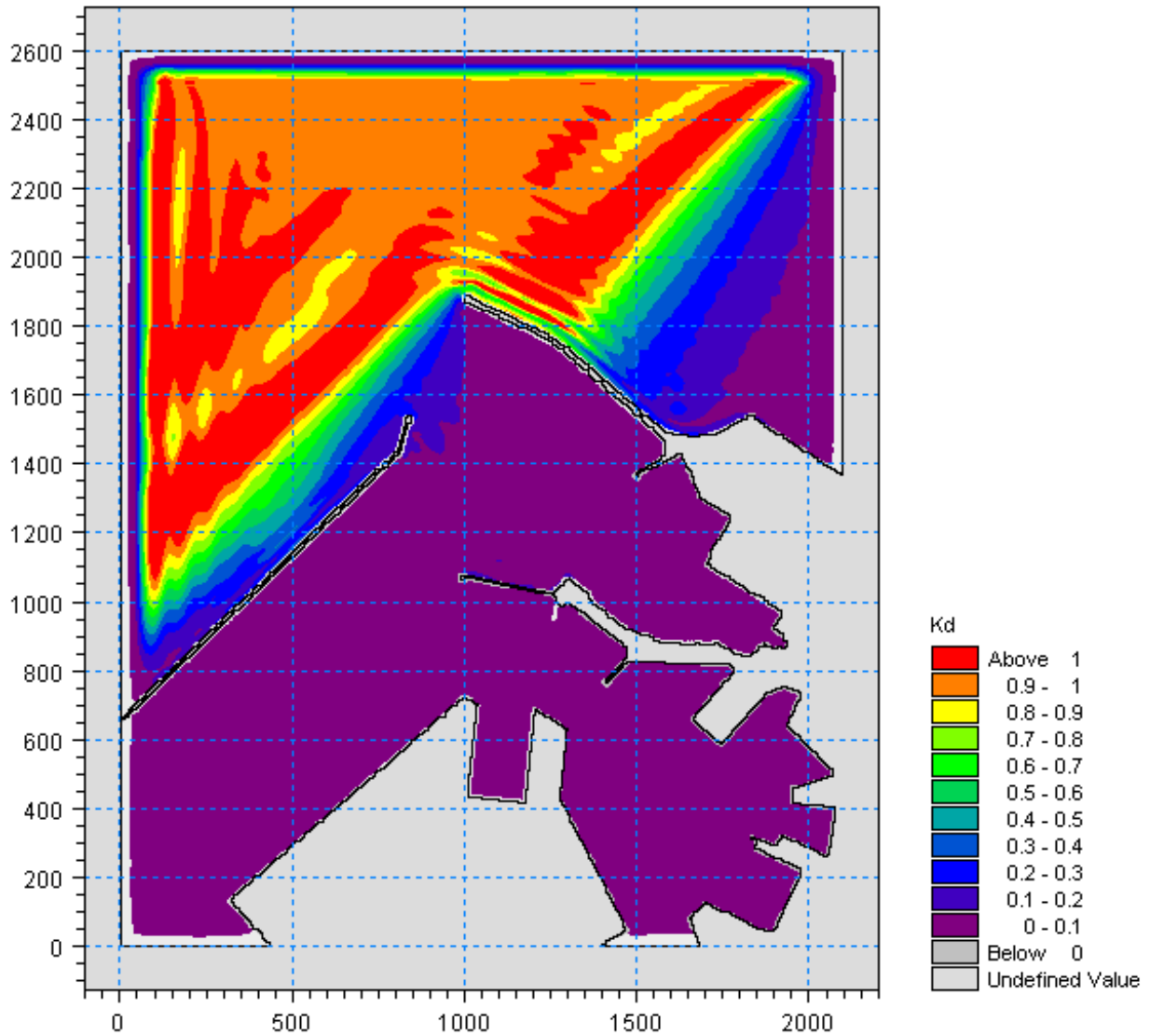


Figura 5.18 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $20^\circ N$  con periodo  $T_p=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

5.1.4 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=12s$

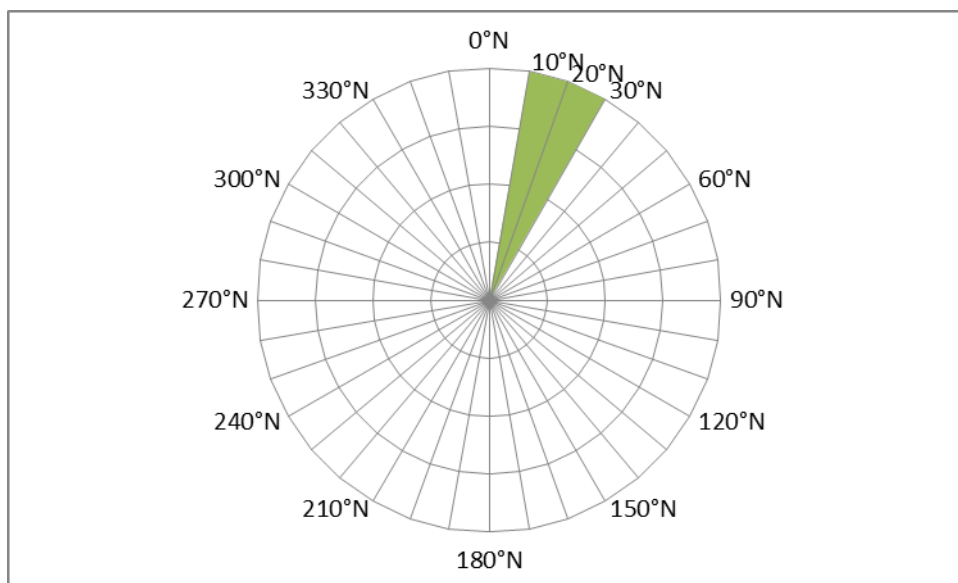


Figura 5.19 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $10^\circ N - 20^\circ N - 30^\circ N$ ) per il periodo di picco  $T_P=12s$

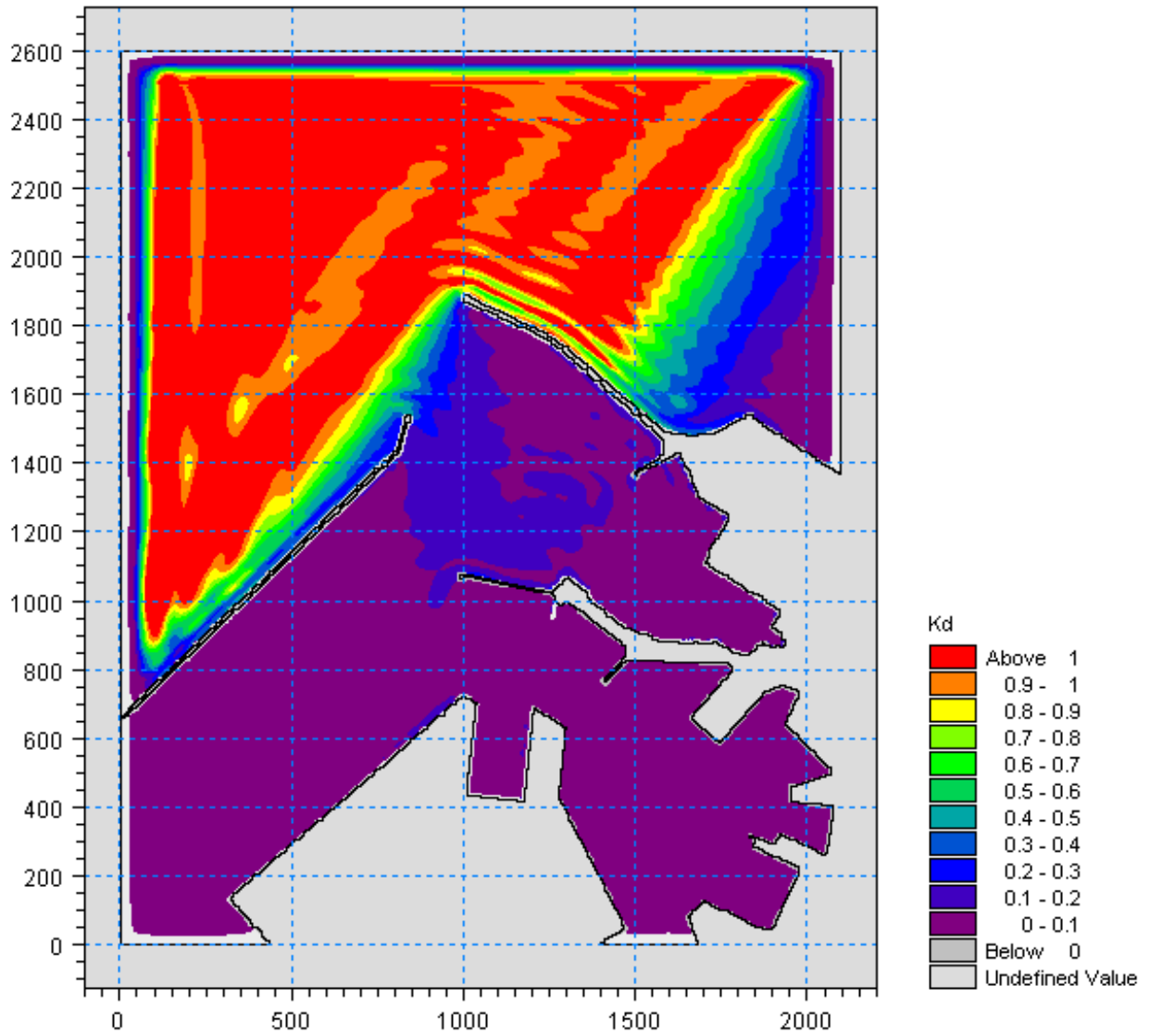


Figura 5.20 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $10^\circ N$  con periodo  $T_P=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

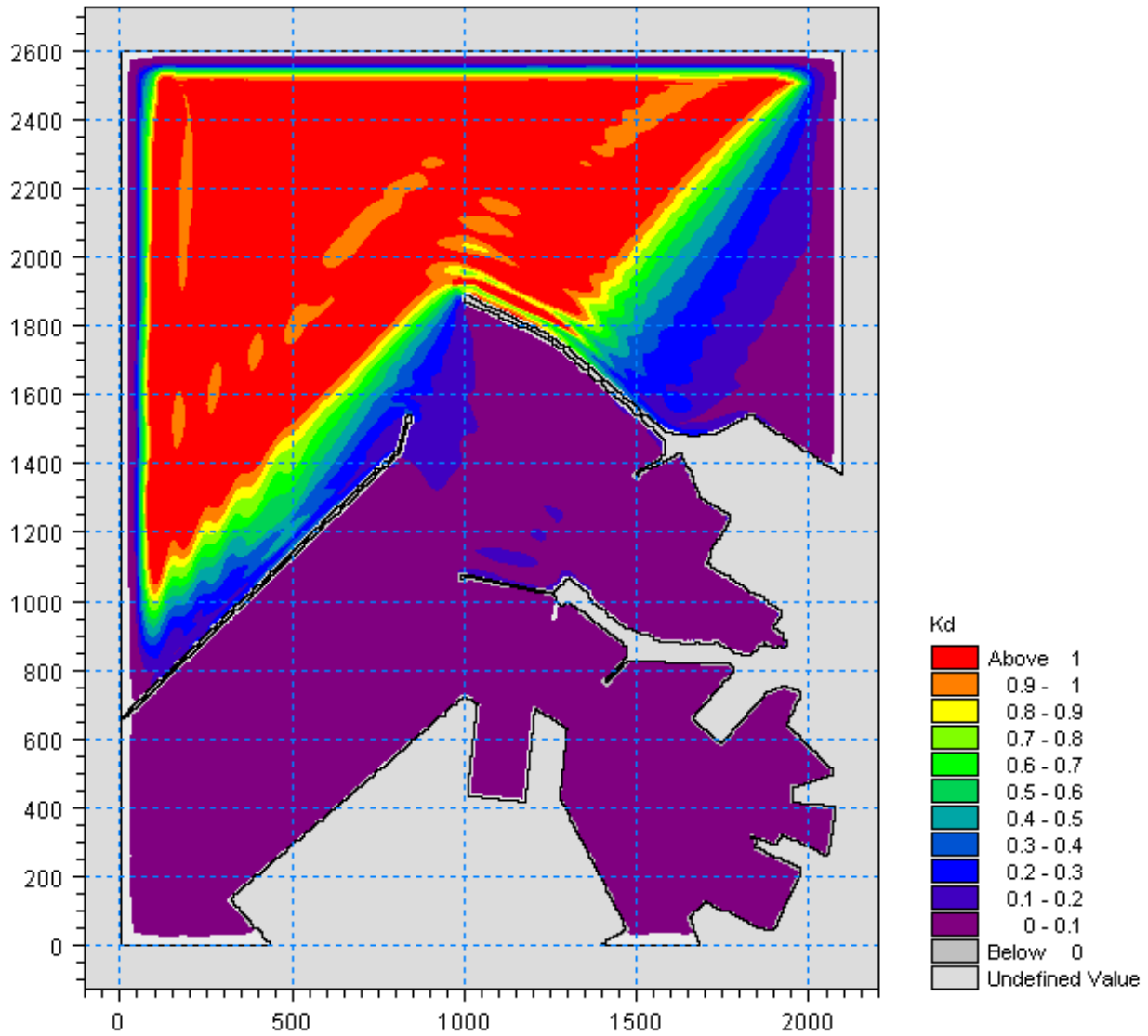


Figura 5.21 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 20°N con periodo  $T_P=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord



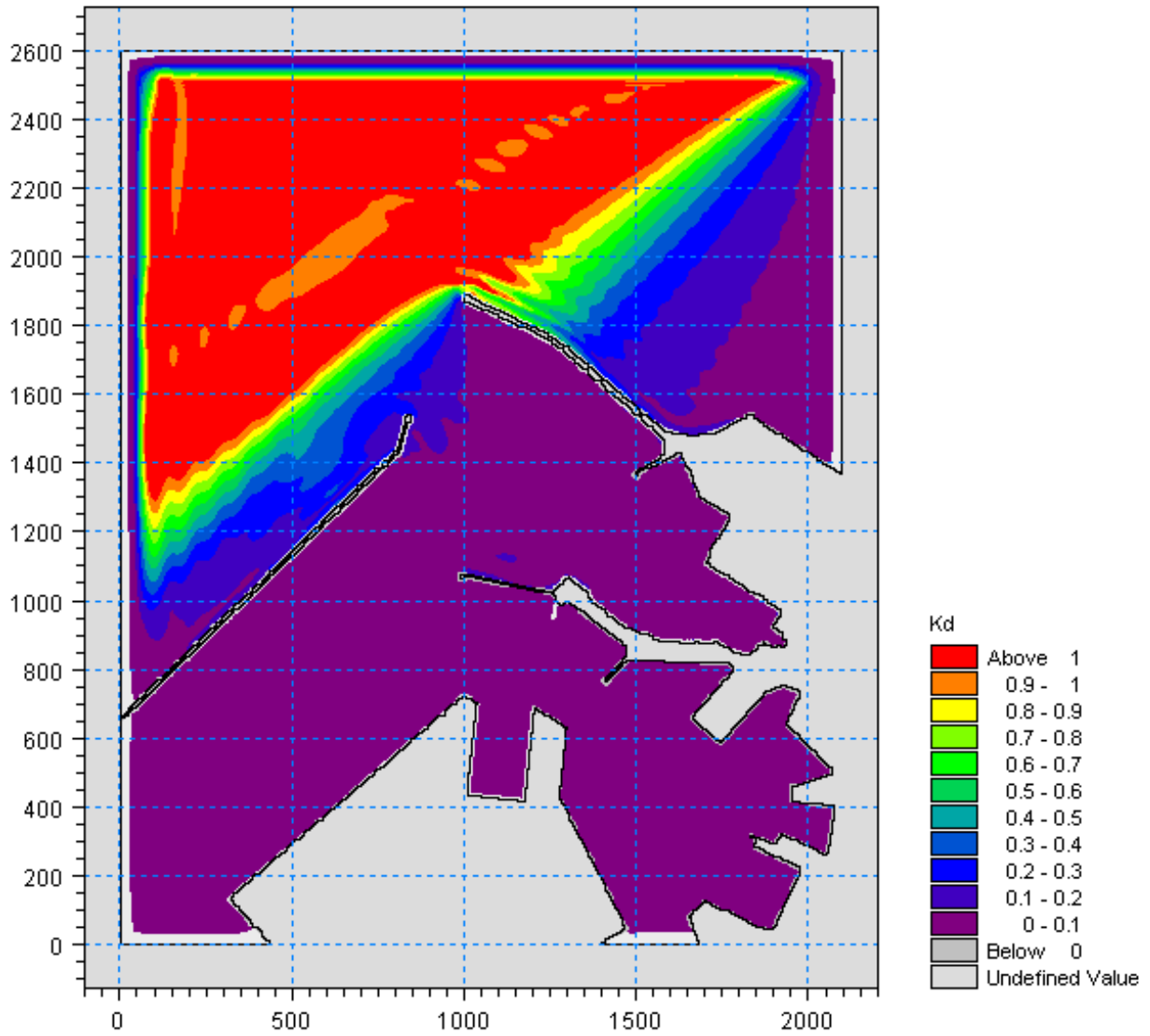


Figura 5.22 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $30^\circ N$  con periodo  $T_p=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

5.1.5 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=30s$

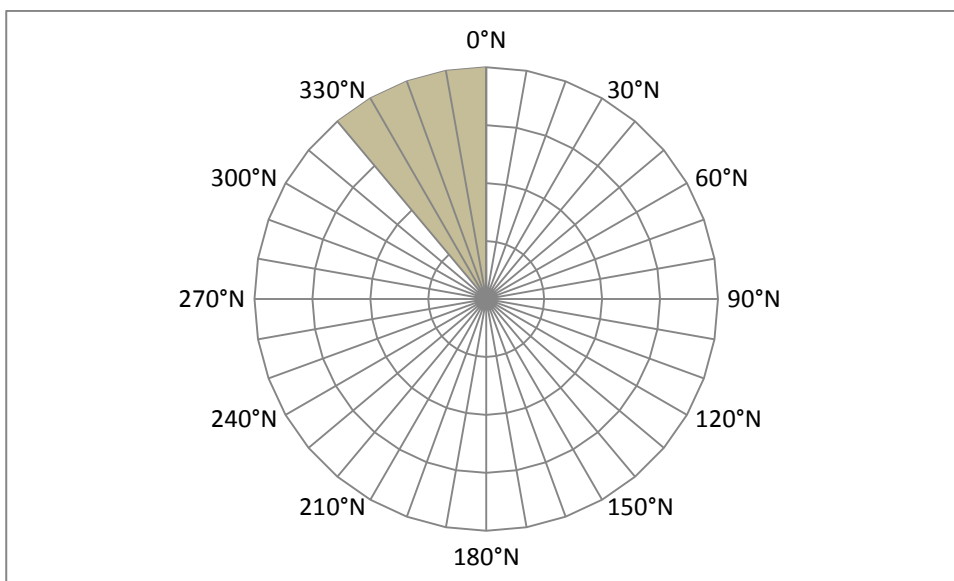


Figura 5.23 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $330^\circ\text{N} - 0^\circ\text{N}$ ) per il periodo di picco  $T_P=30s$

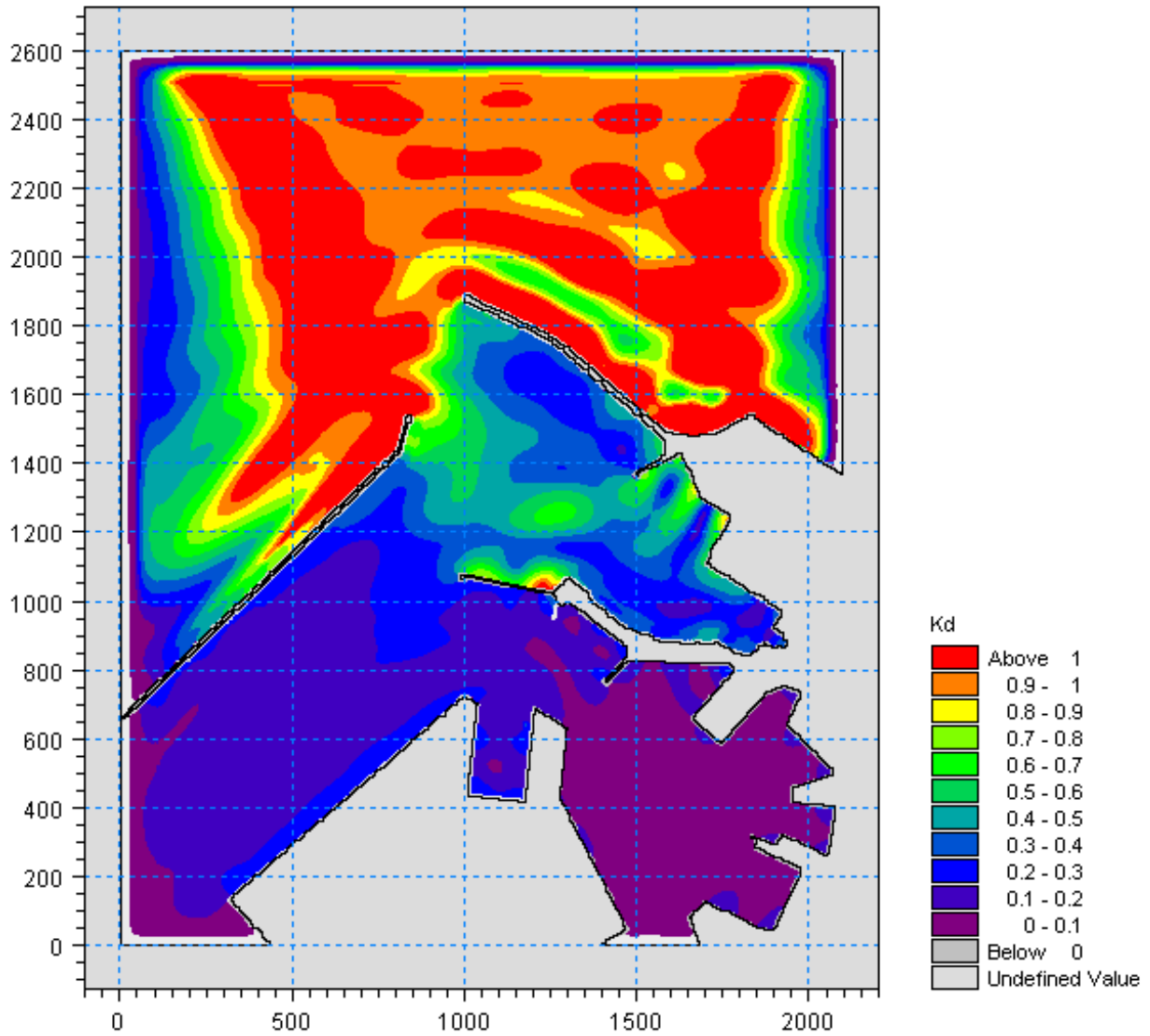


Figura 5.24 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $330^\circ\text{N}$  con periodo  $T_P=30\text{s}$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

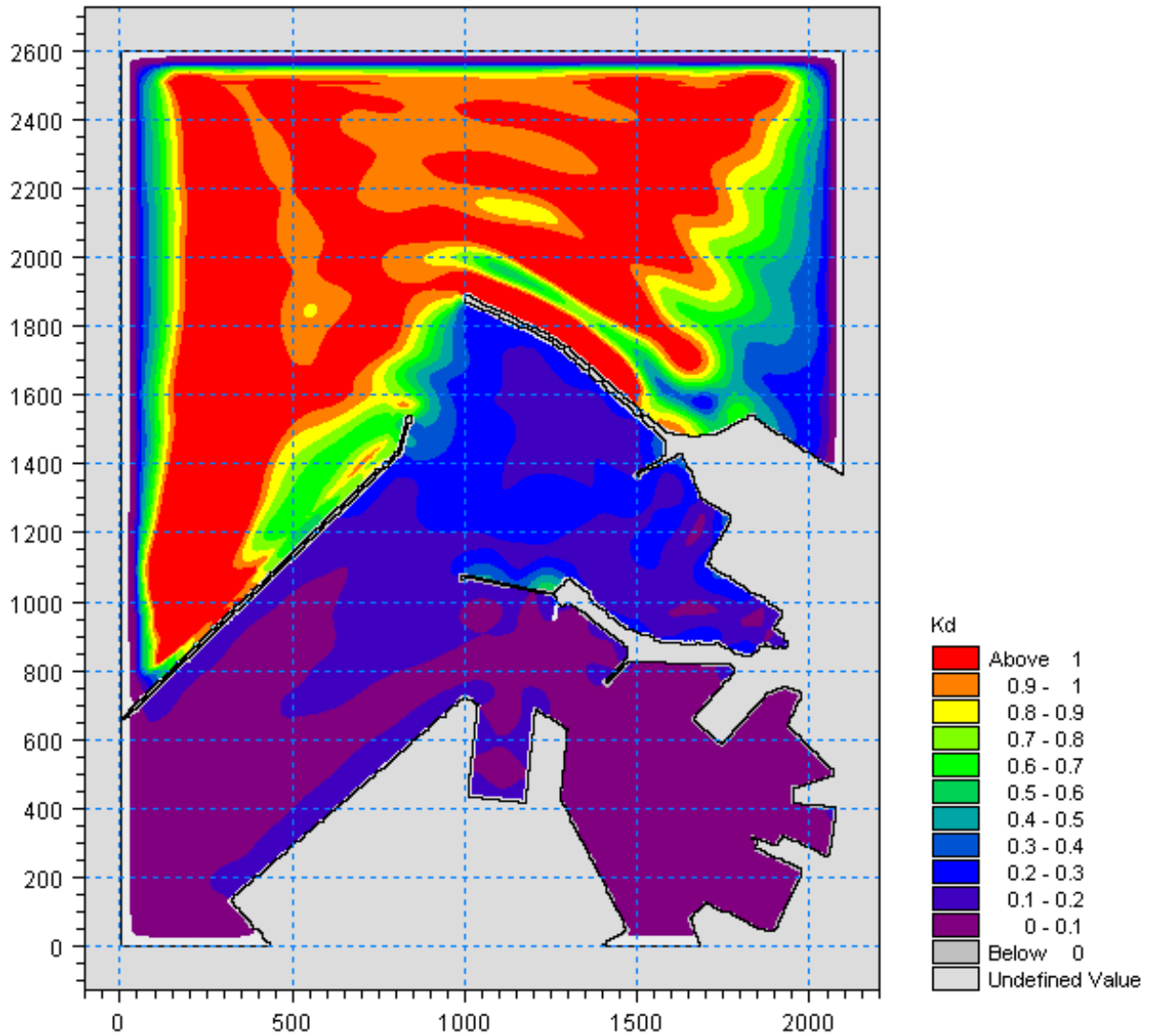


Figura 5.25 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^\circ N$  con periodo  $T_p=30s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione attuale del Molo Nord

## 5.2 Configurazione con parziale demolizione (100m) del Molo Nord

### 5.2.1 Simulazioni con periodo di picco pari a $T_p=7.5s$

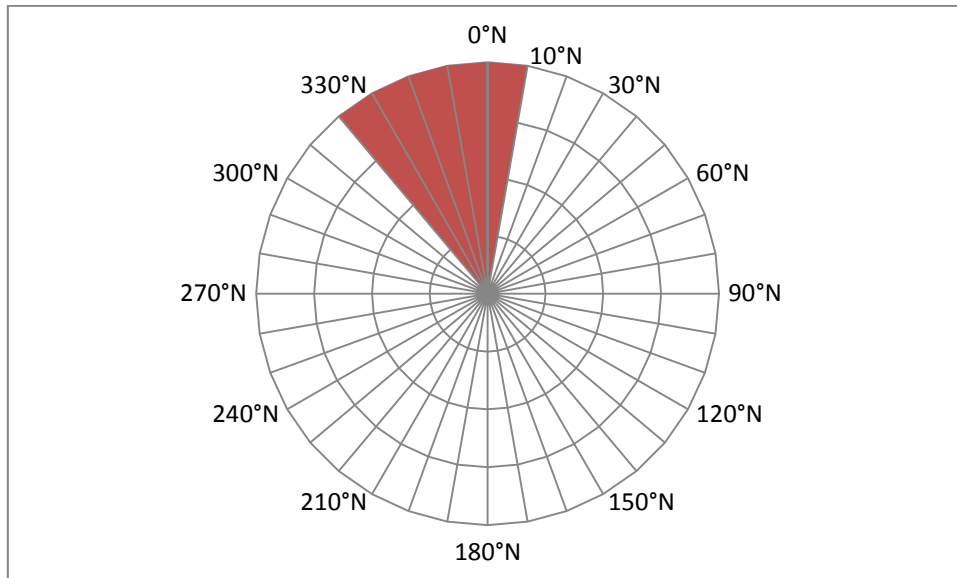


Figura 5.26 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate (320°N - 330°N - 340°N - 350°N - 0°N - 10°N) per il periodo di picco  $T_p=7.5s$

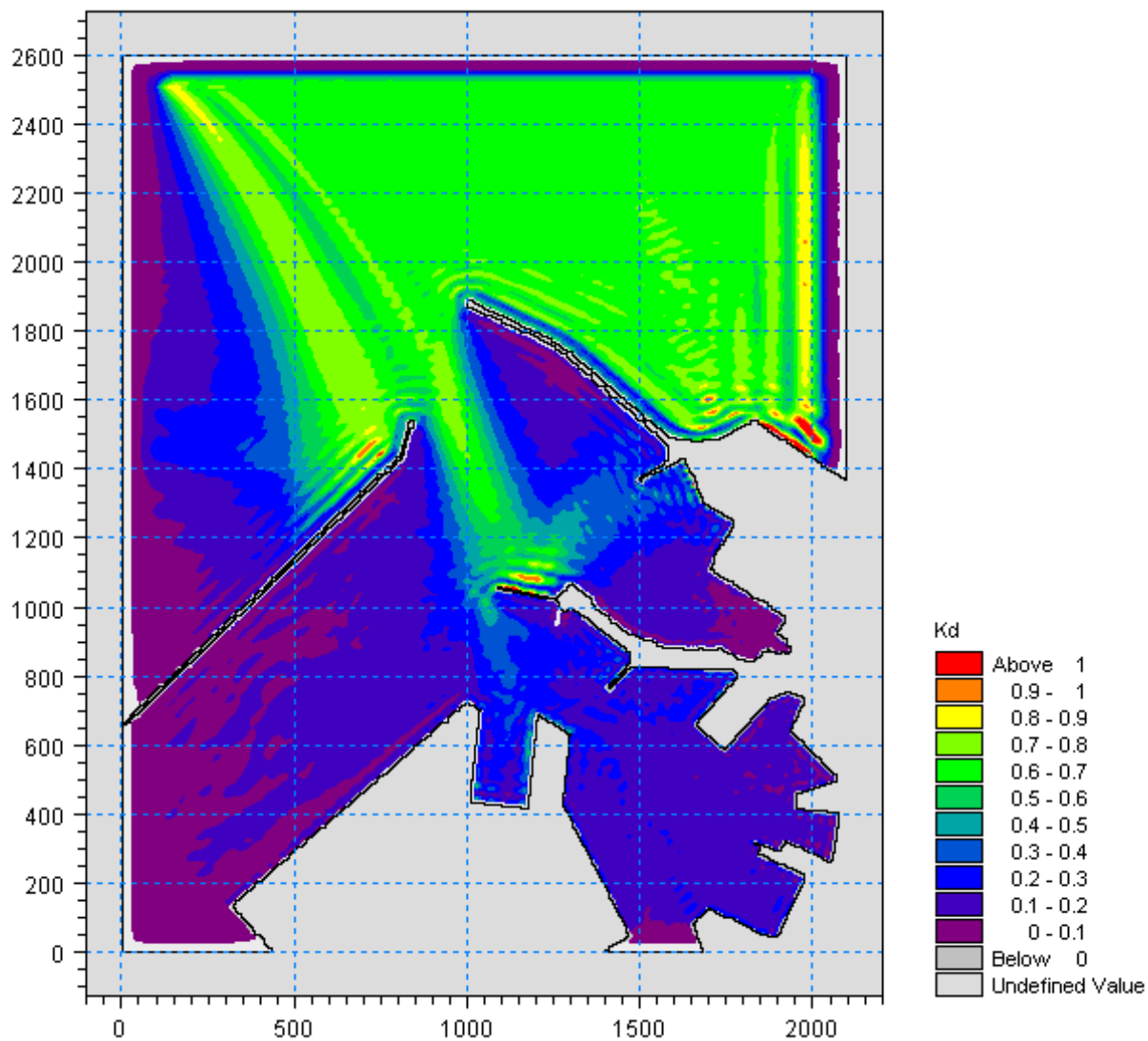


Figura 5.27 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 320°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con parziale demolizione (100m) del Molo Nord

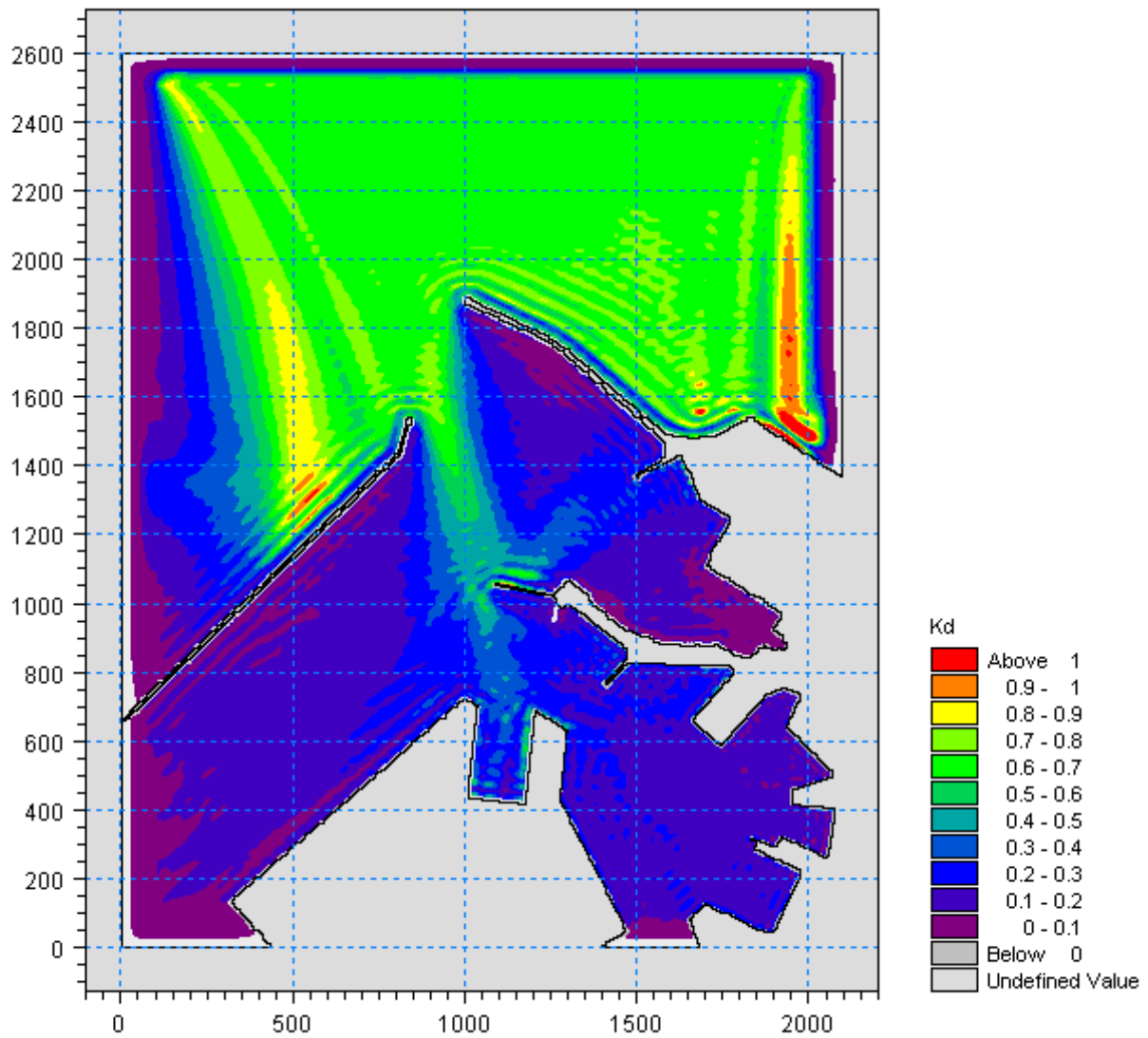


Figura 5.28 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 330°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con parziale demolizione (100m) del Molo Nord

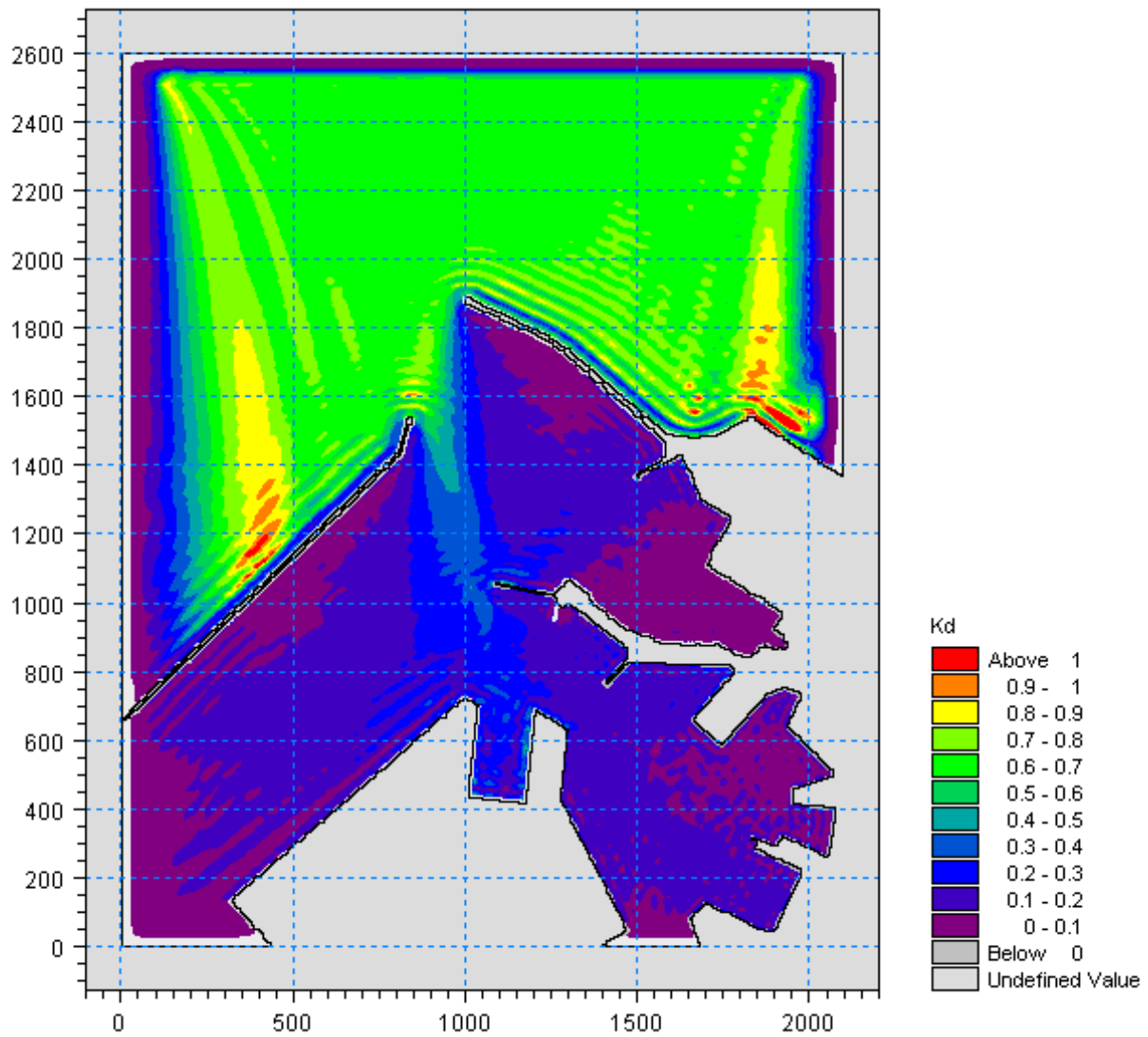


Figura 5.29 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 340°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con parziale demolizione (100m) del Molo Nord



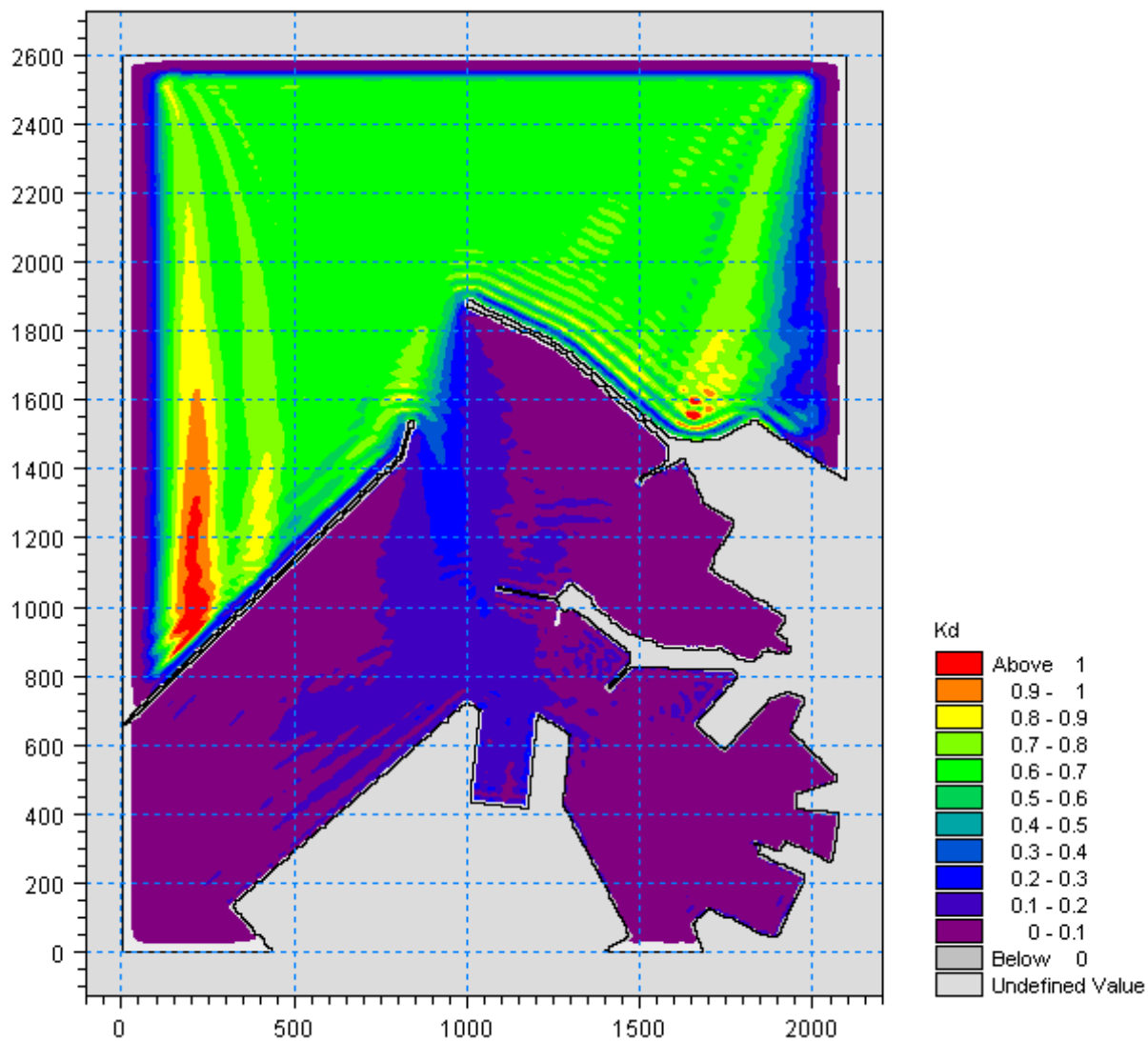


Figura 5.30 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 350°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

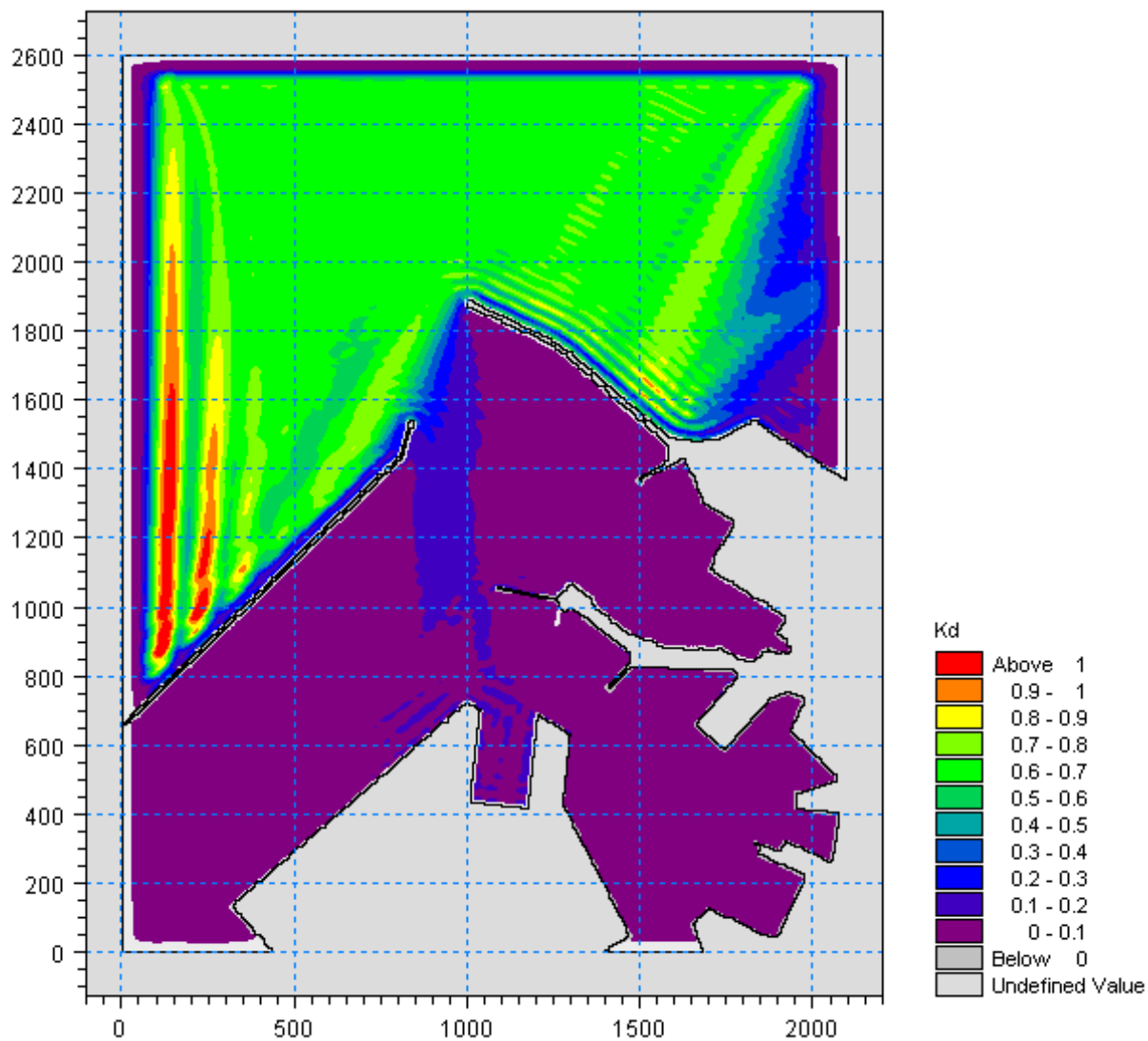


Figura 5.31 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^\circ N$  con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

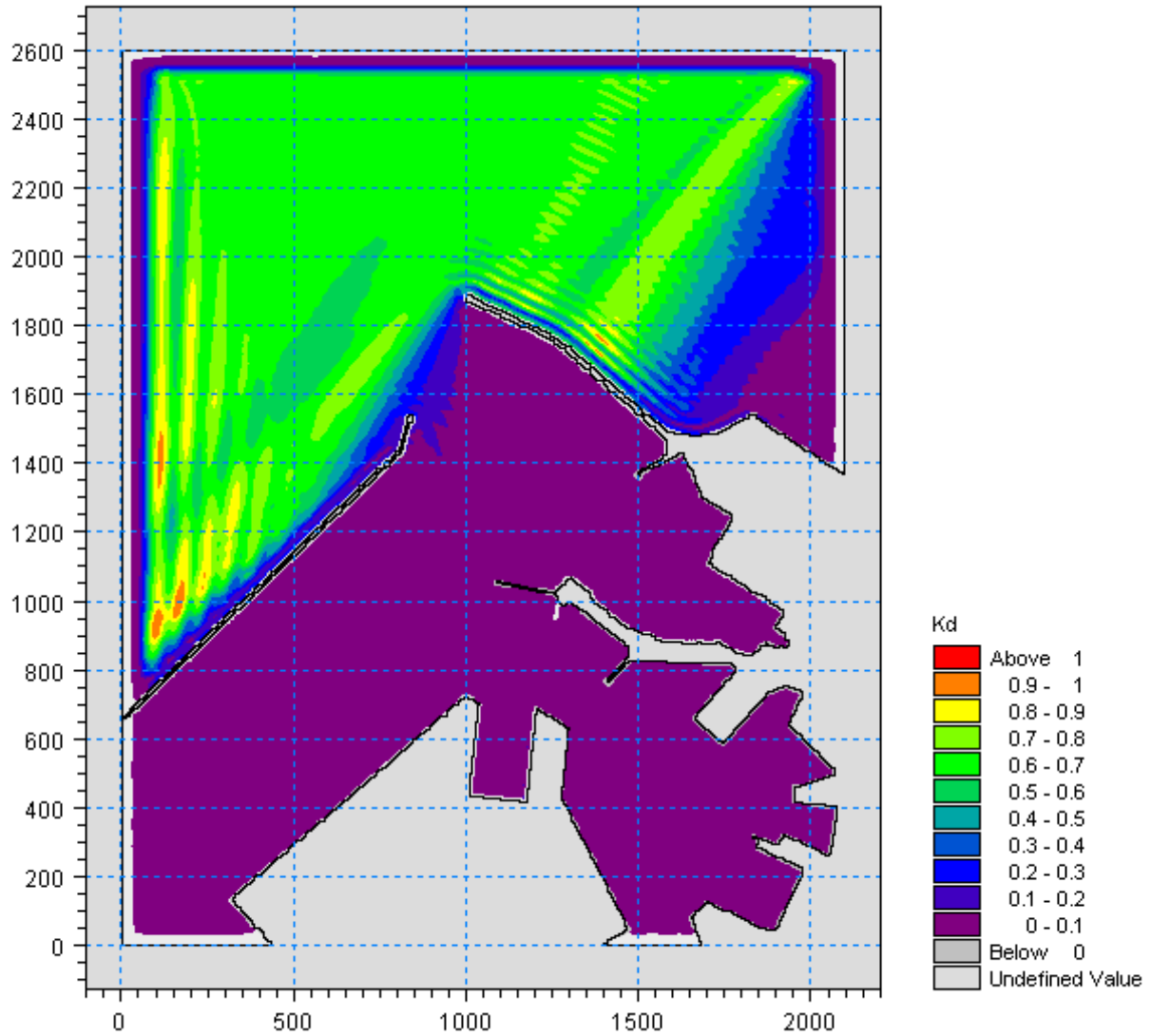


Figura 5.32 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 10°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con parziale demolizione (100m) del Molo Nord

5.2.2 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=9s$

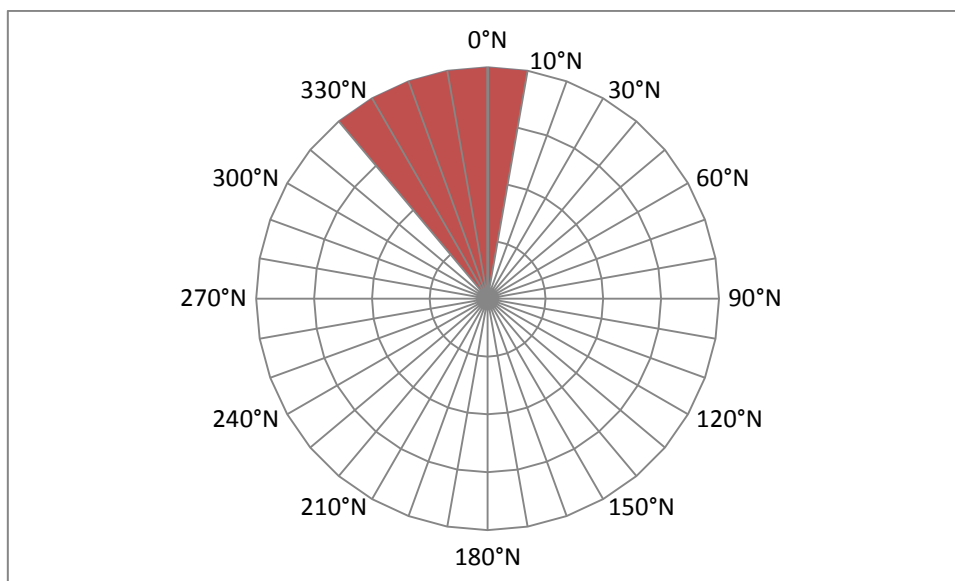


Figura 5.33 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $320^\circ N - 330^\circ N - 340^\circ N - 350^\circ N - 0^\circ N - 10^\circ N$ ) per il periodo di picco  $T_P=9s$

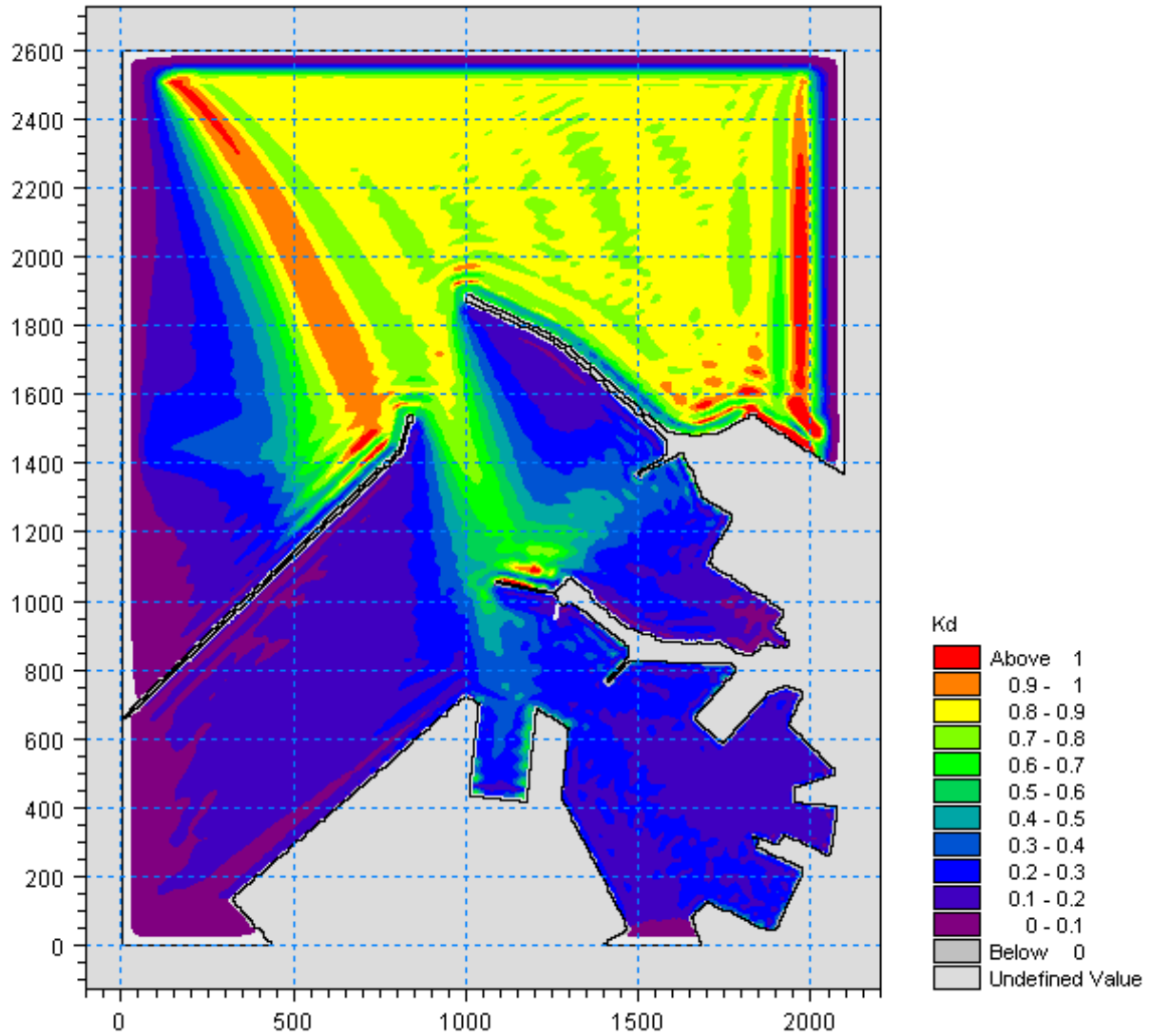


Figura 5.34 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 320°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

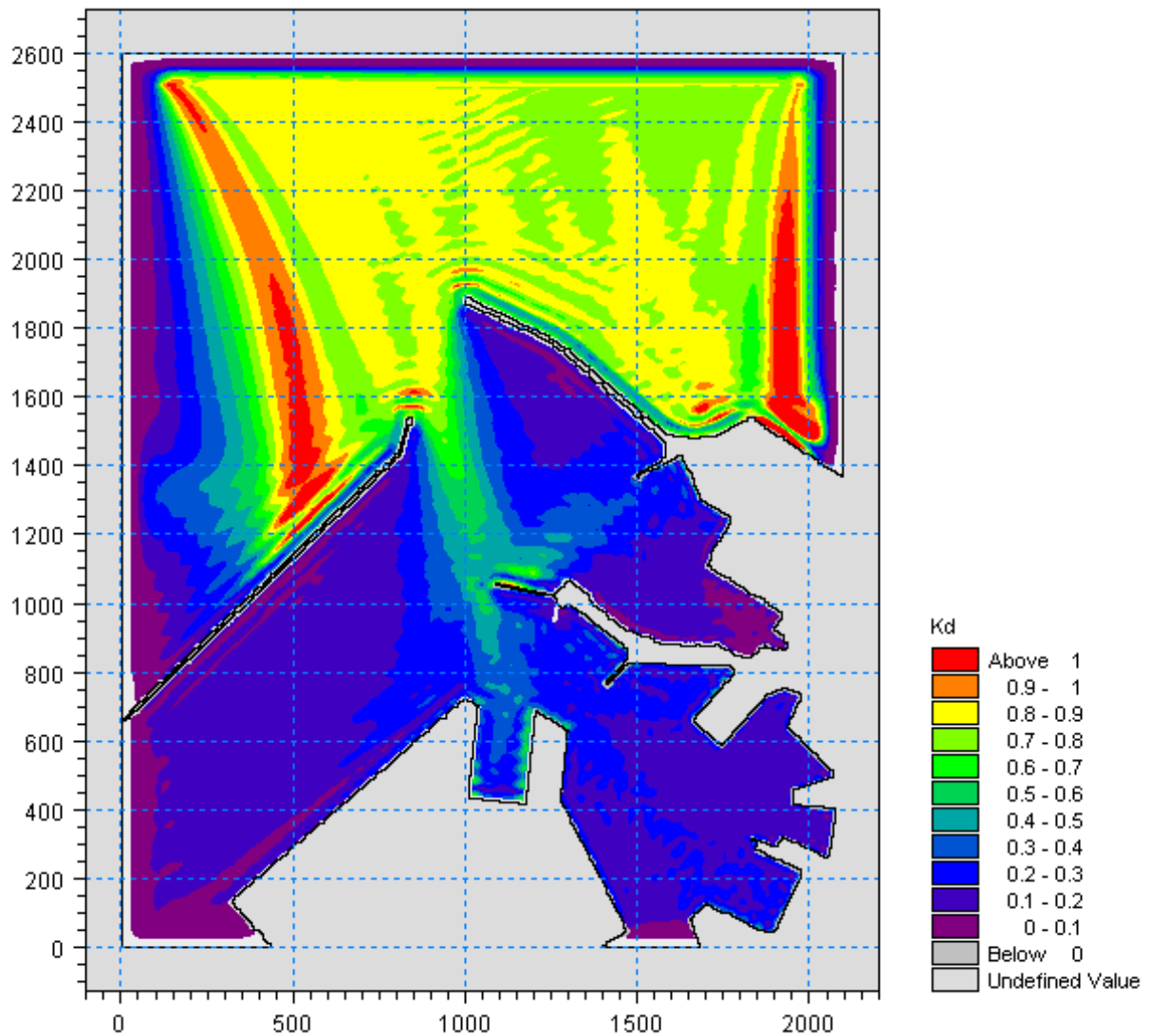


Figura 5.35 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 330°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

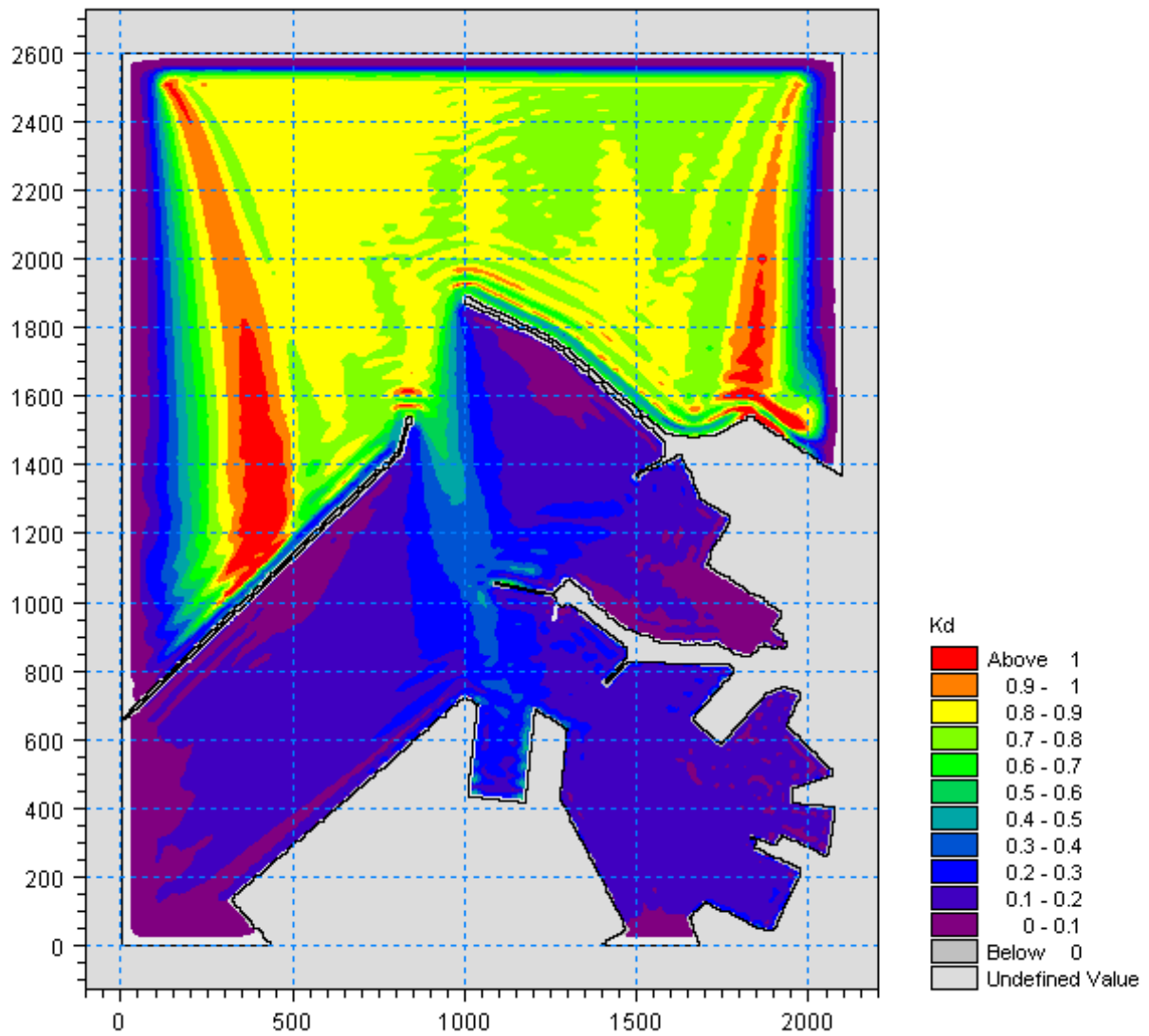


Figura 5.36 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 340°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

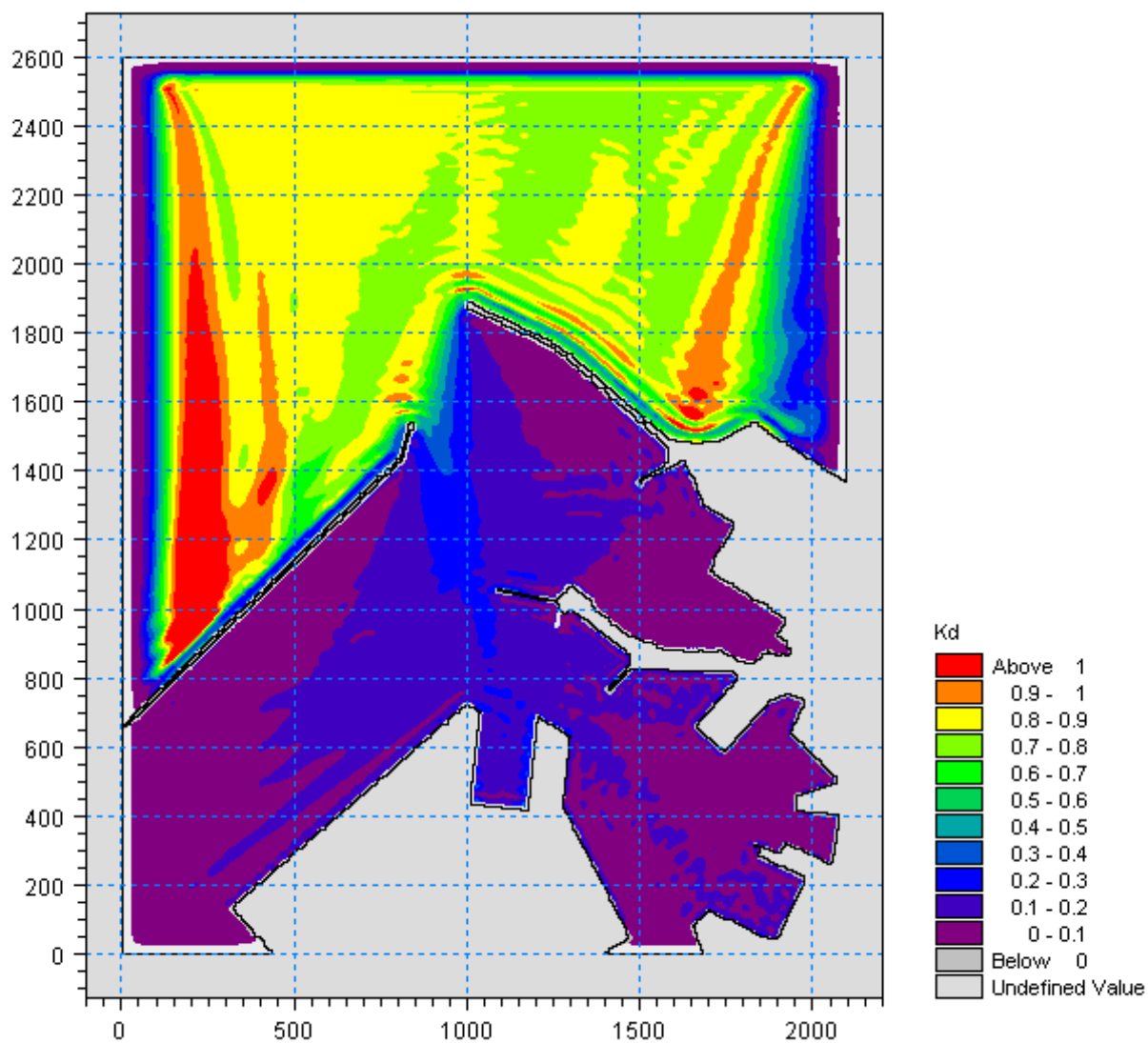


Figura 5.37 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 350°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)



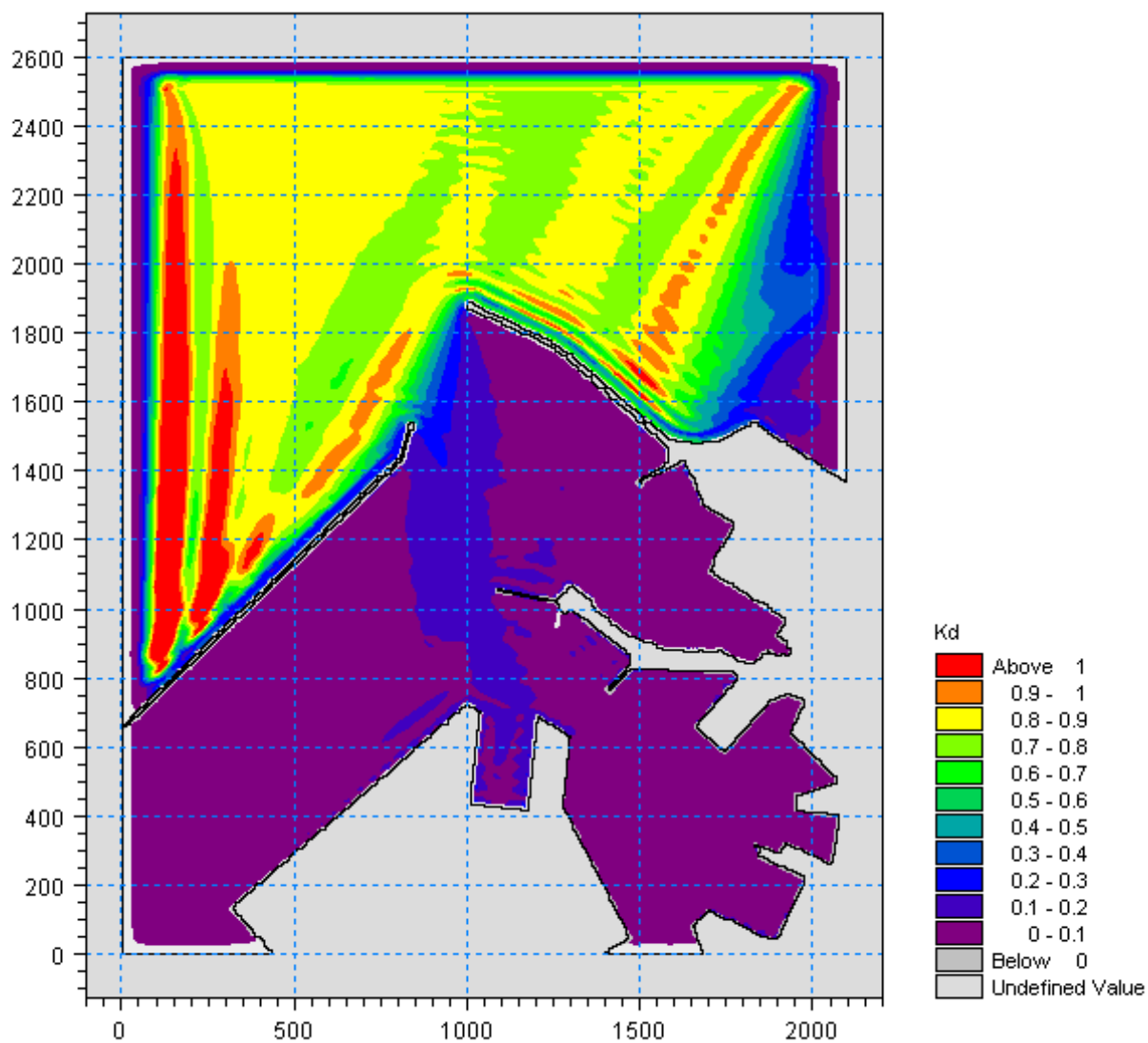


Figura 5.38 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^\circ N$  con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

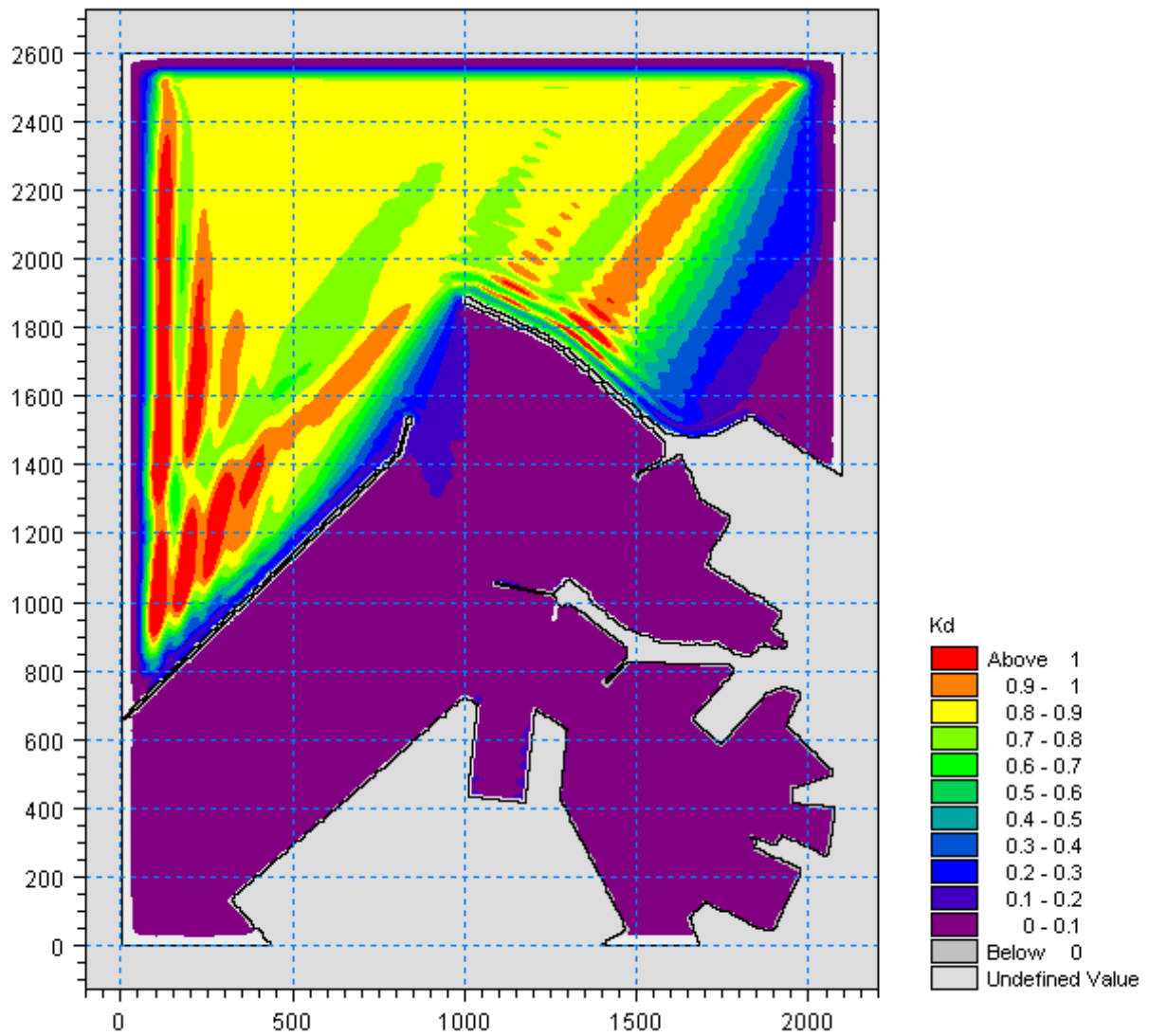


Figura 5.39 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 10°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

### 5.2.3 Simulazioni con periodo di picco pari a $T_P=10.5s$

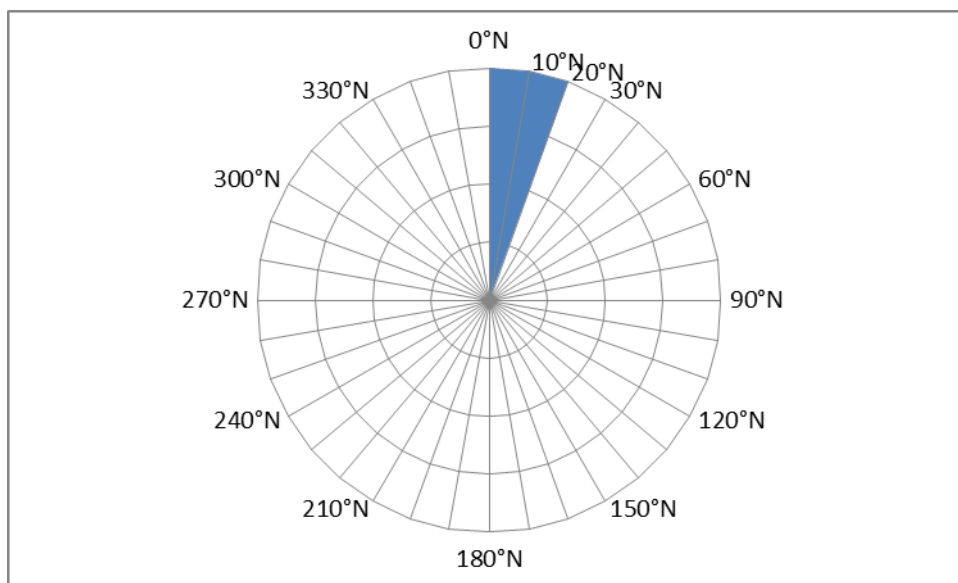


Figura 5.40 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $0^\circ N - 10^\circ N - 20^\circ N$ ) per il periodo di picco  $T_P=10.5s$

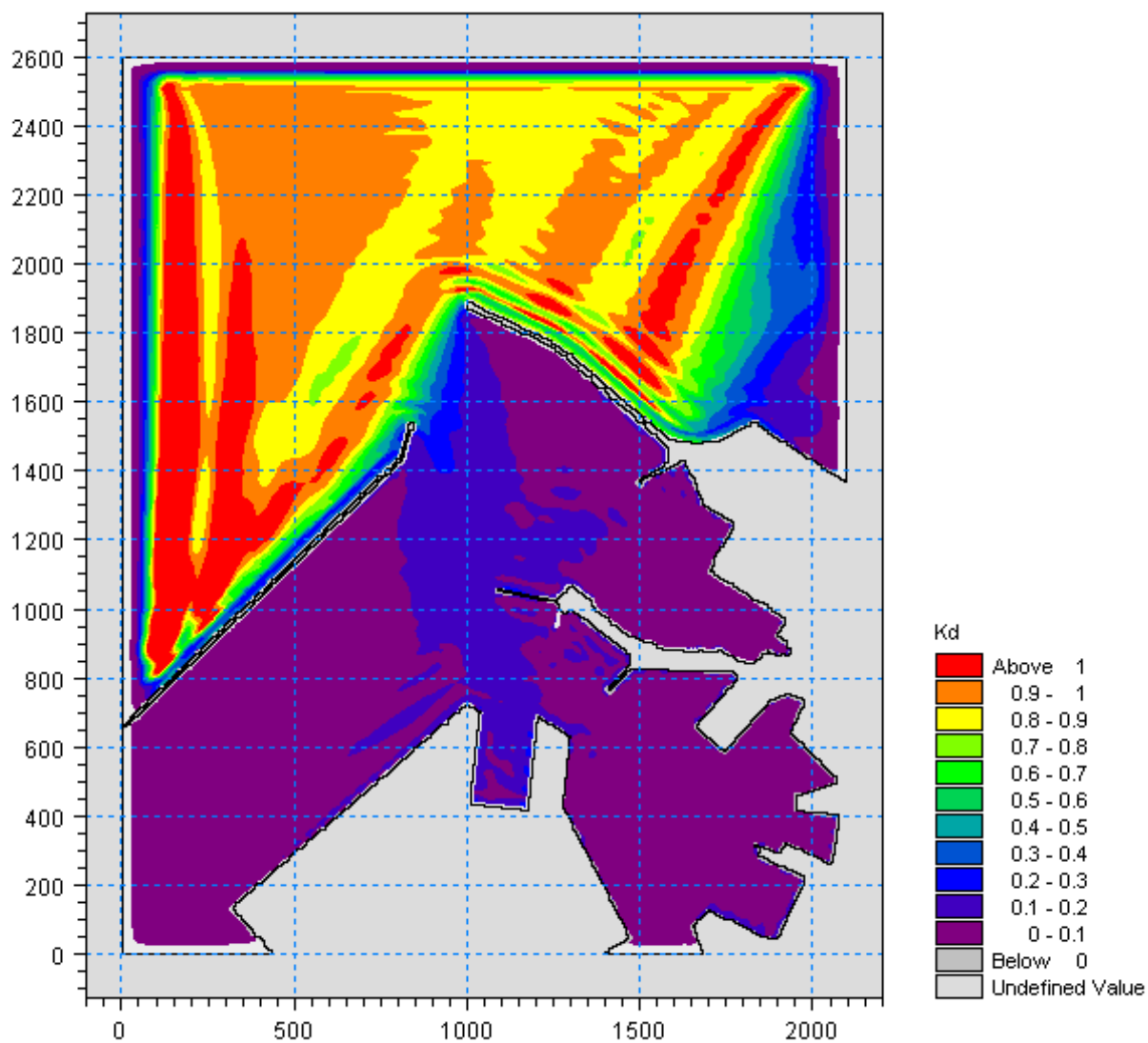


Figura 5.41 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 0°N con periodo  $T_p=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

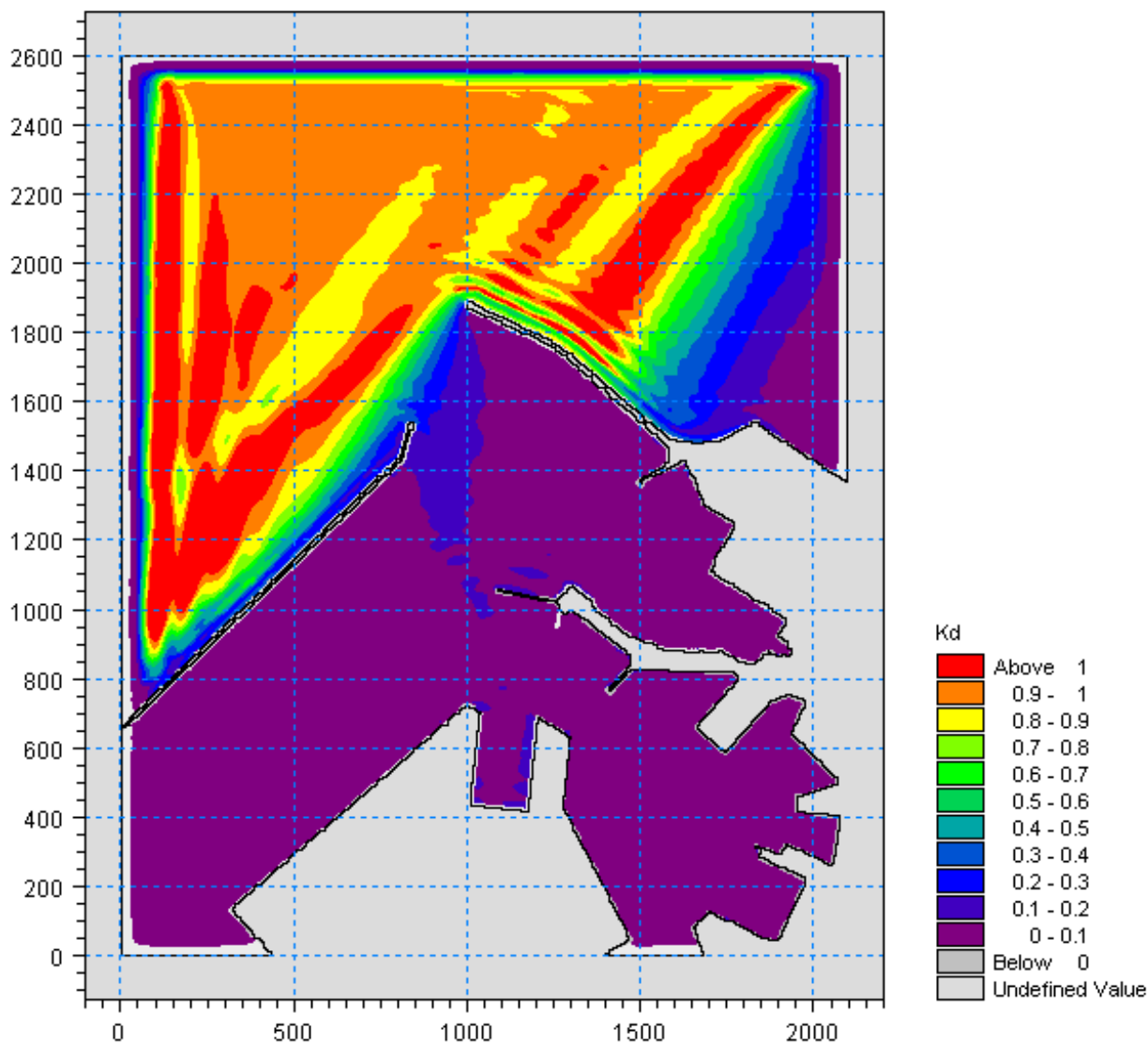


Figura 5.42 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 10°N con periodo  $T_p=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

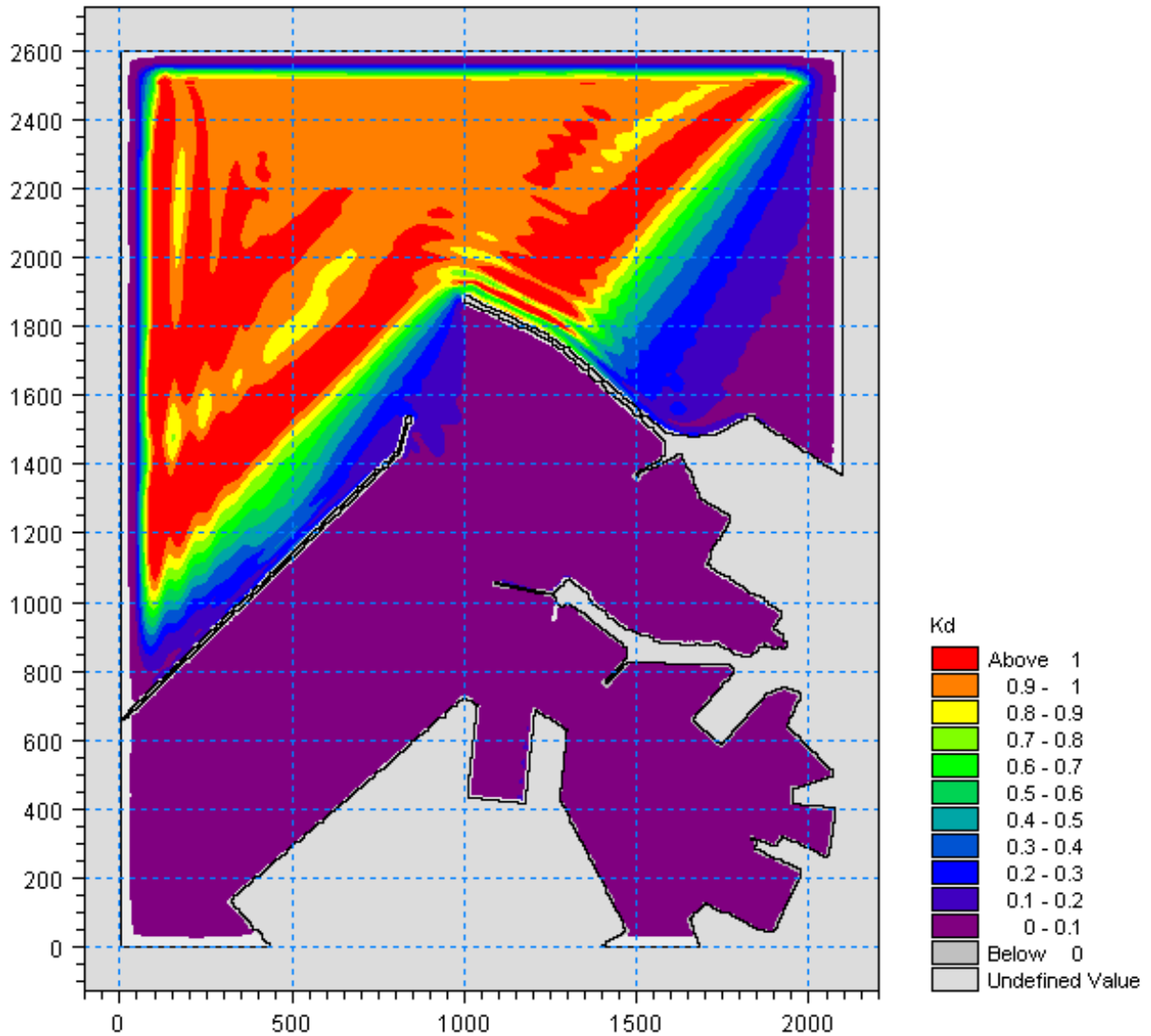


Figura 5.43 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $20^\circ N$  con periodo  $T_p=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

5.2.4 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=12s$

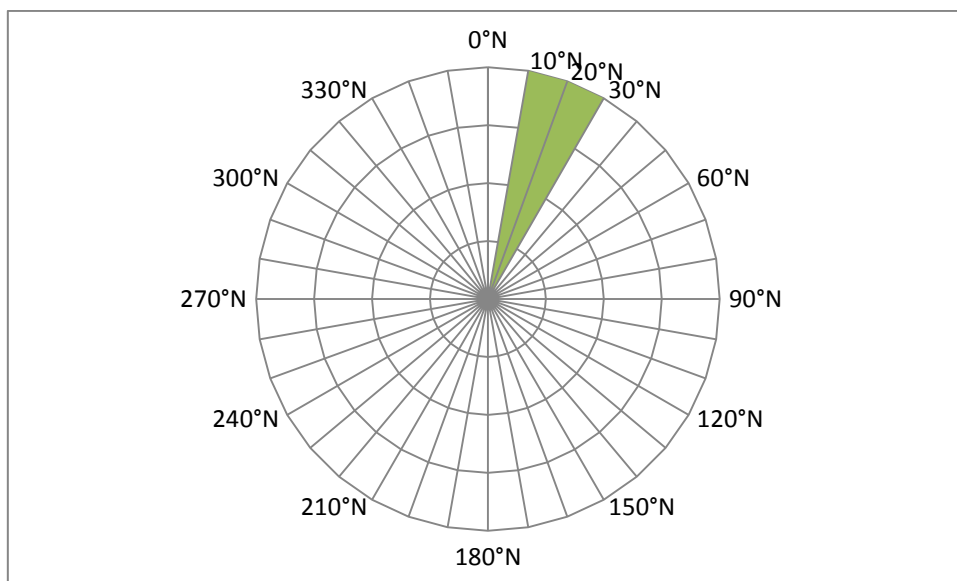


Figura 5.44 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $10^\circ\text{N} - 20^\circ\text{N} - 30^\circ\text{N}$ ) per il periodo di picco  $T_P=12s$

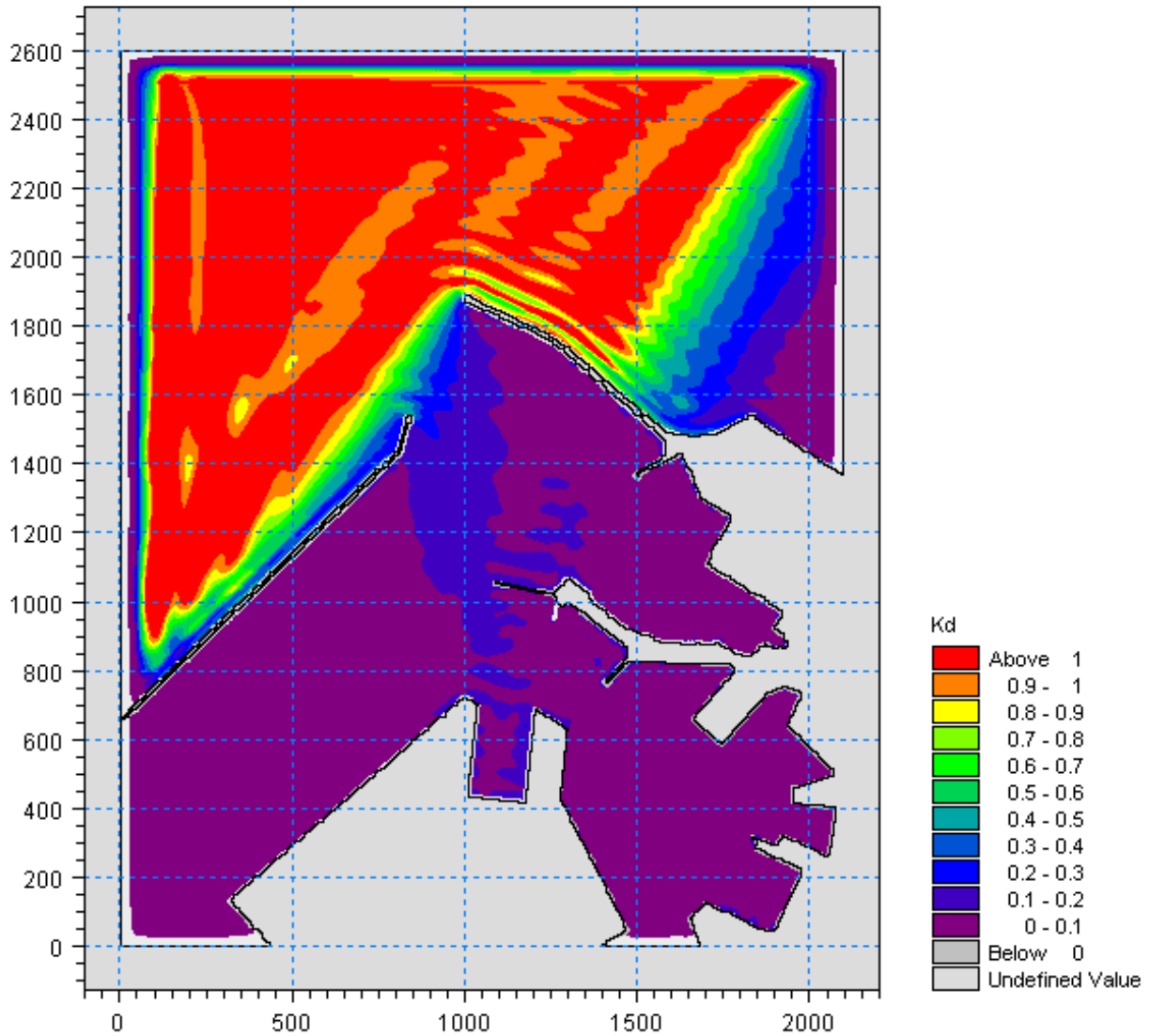


Figura 5.45 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $10^\circ N$  con periodo  $T_p=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)



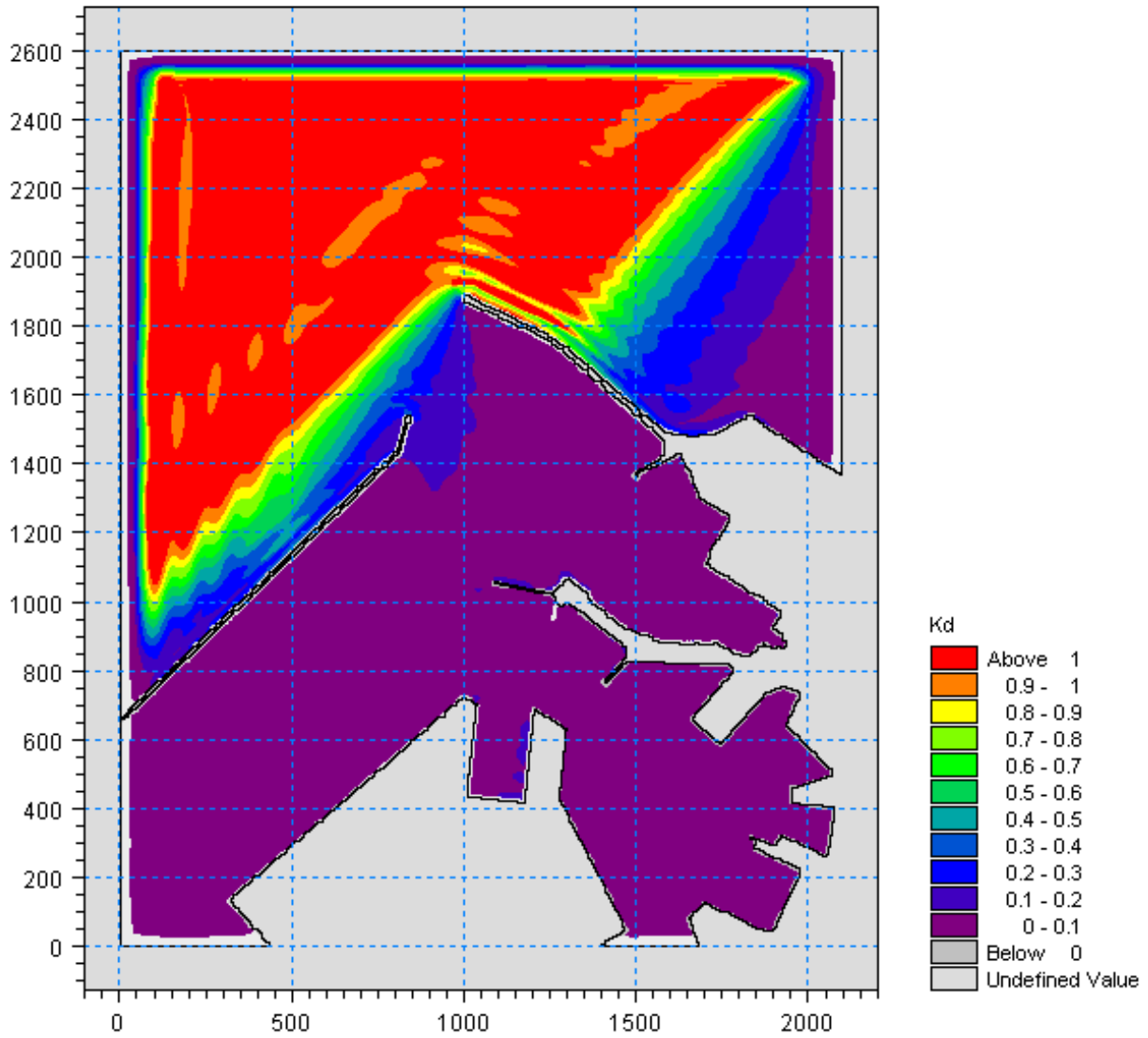


Figura 5.46 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 20°N con periodo  $T_p=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

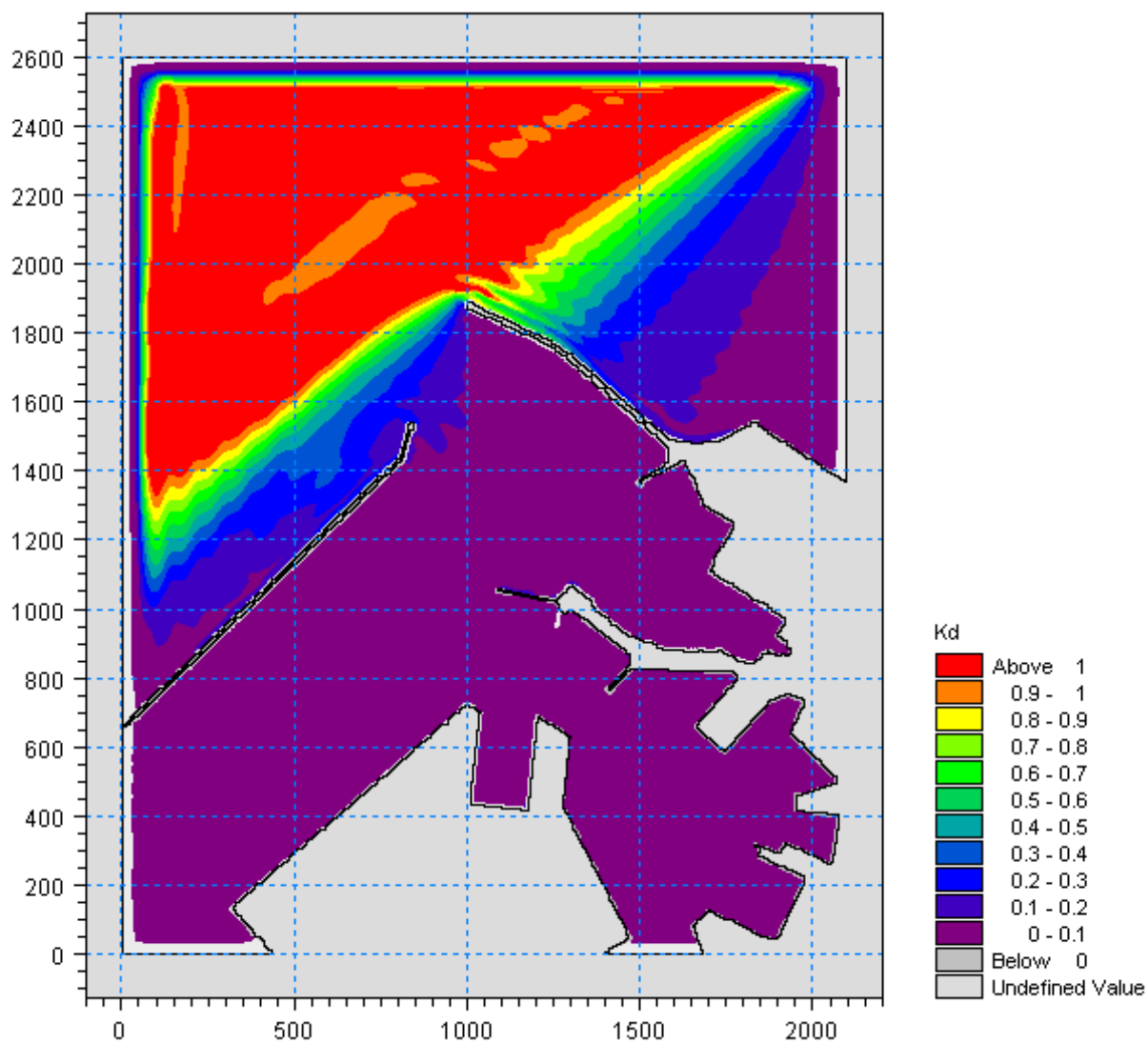


Figura 5.47 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $30^\circ N$  con periodo  $T_p=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

5.2.5 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=30s$

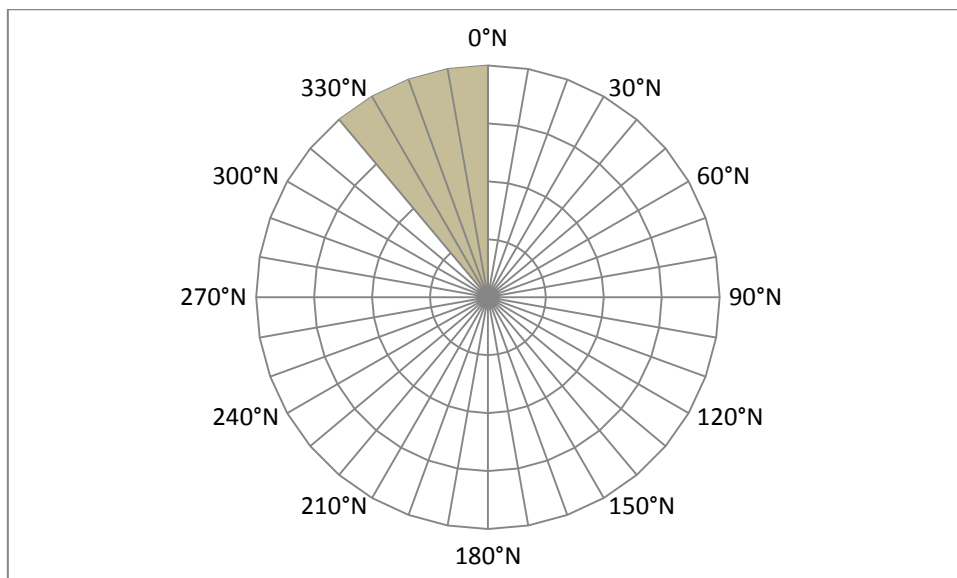


Figura 5.48 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $330^\circ N - 0^\circ N$ ) per il periodo di picco  $T_P=30s$

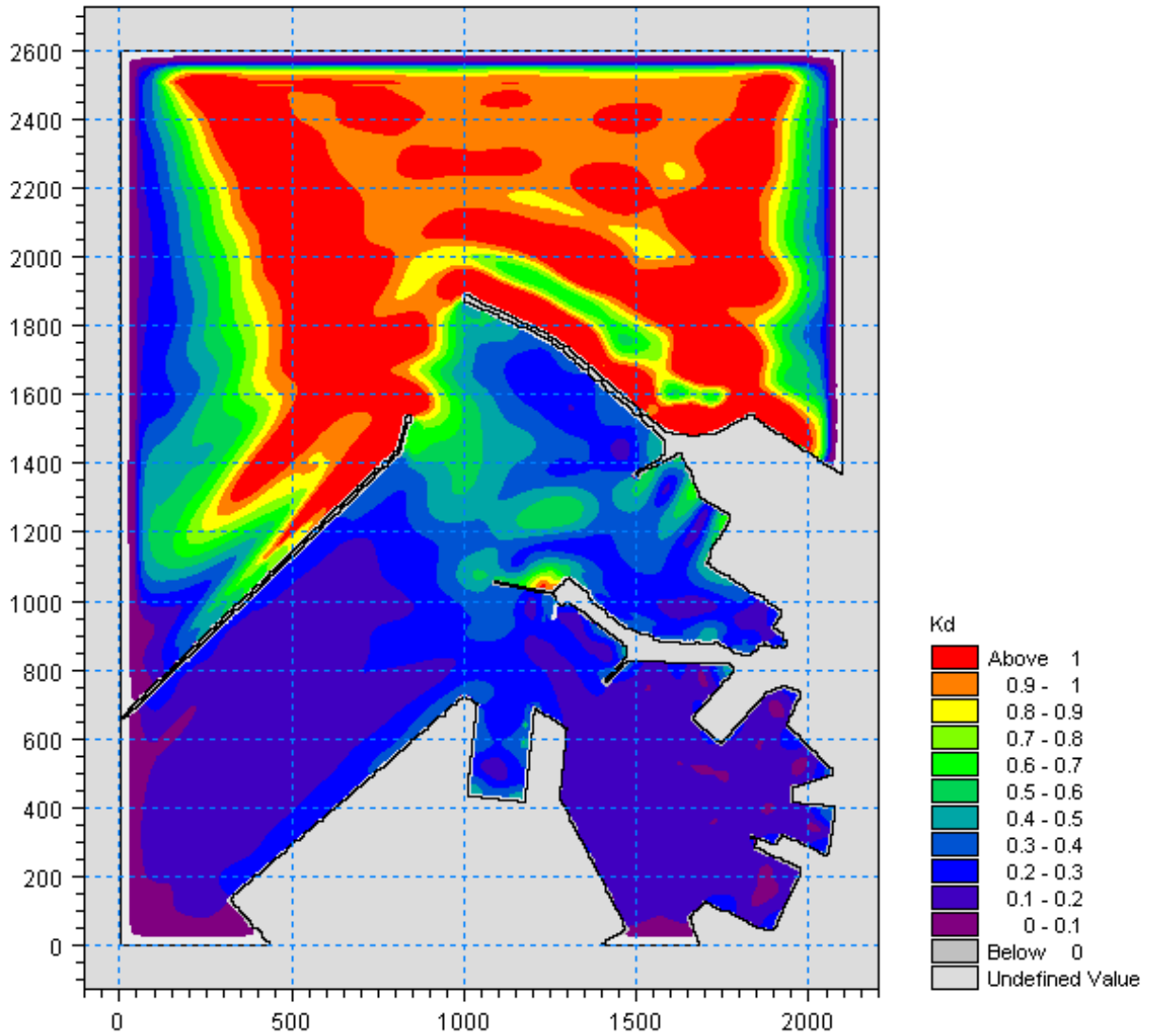


Figura 5.49 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $330^\circ\text{N}$  con periodo  $T_p=30\text{s}$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con parziale demolizione (100m) del Molo Nord

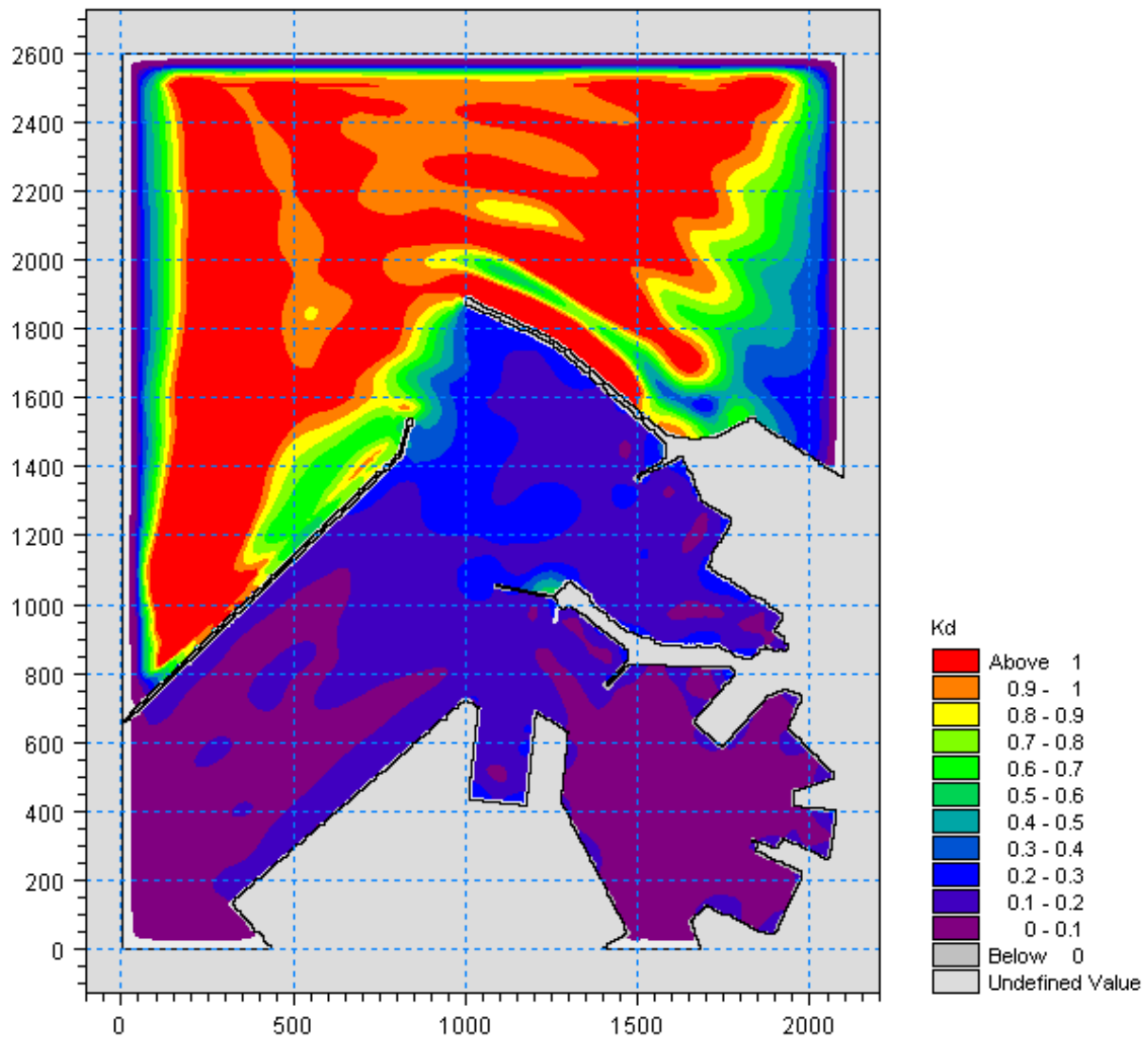
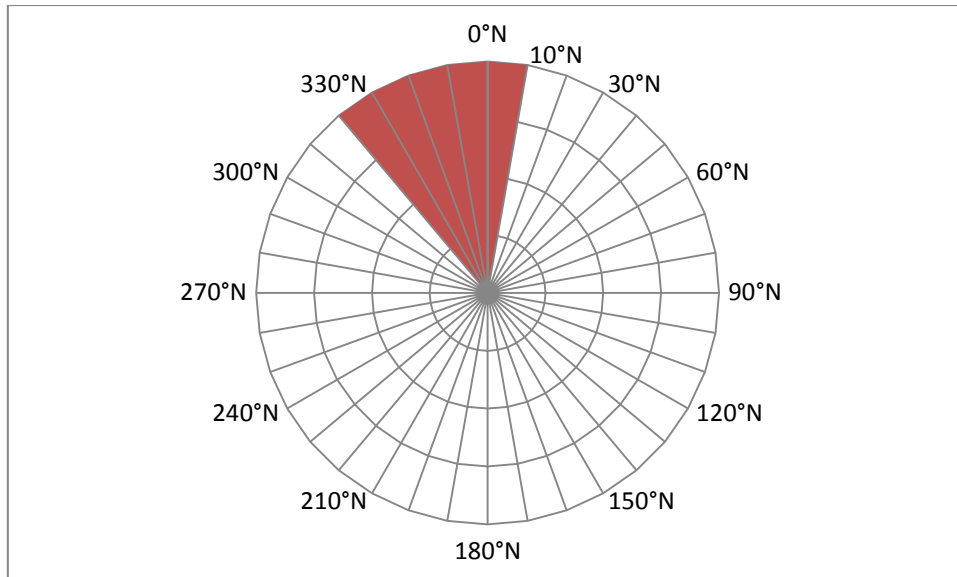


Figura 5.50 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 0°N con periodo  $T_p=30s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con parziale demolizione (100m) del Molo Nord

**5.3. Configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)**

*5.3.1 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=7.5s$*



*Figura 5.51 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate (320°N - 330°N - 340°N - 350°N - 0°N - 10°N) per il periodo di picco  $T_P=7.5s$*

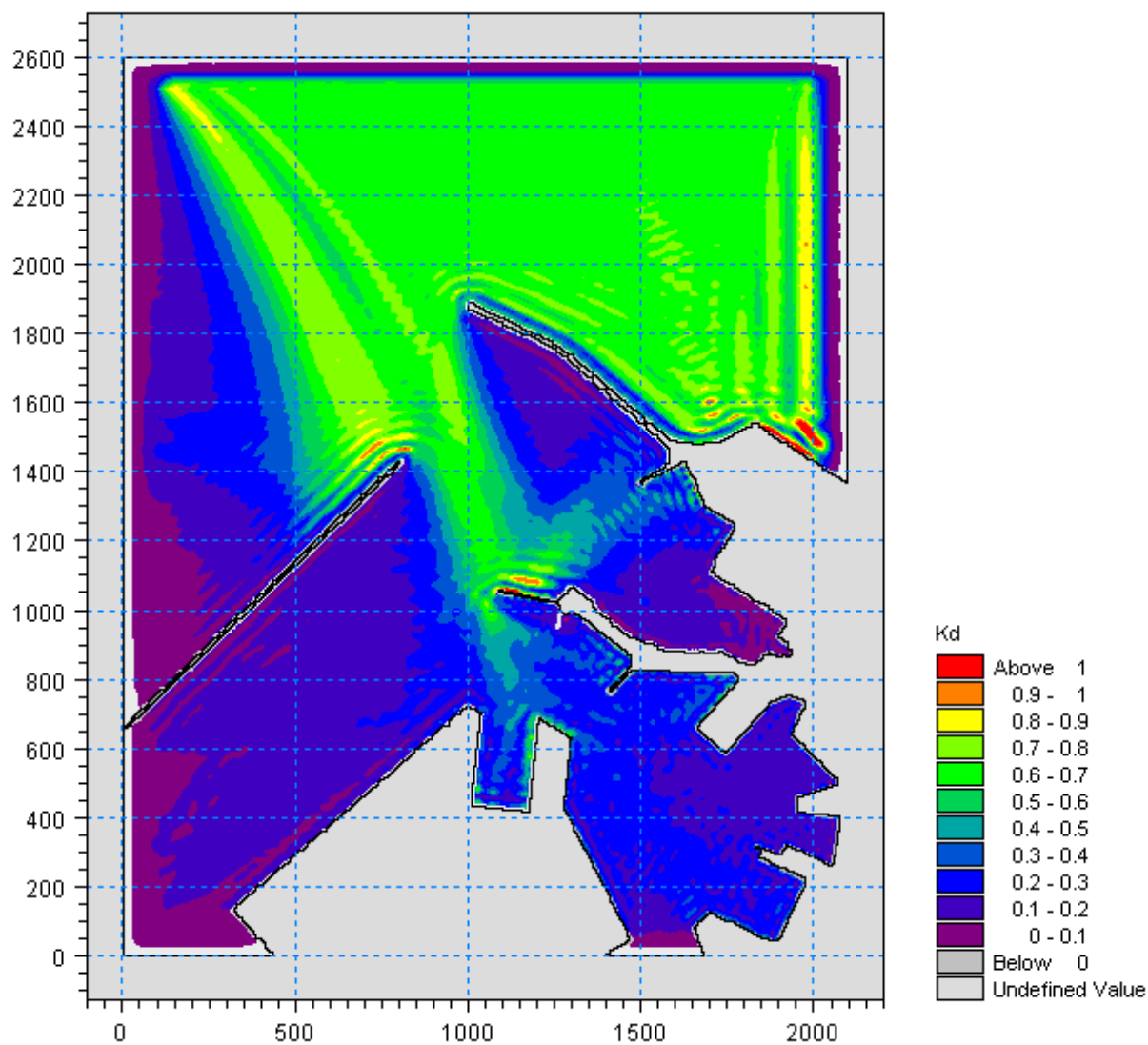


Figura 5.52 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 320°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

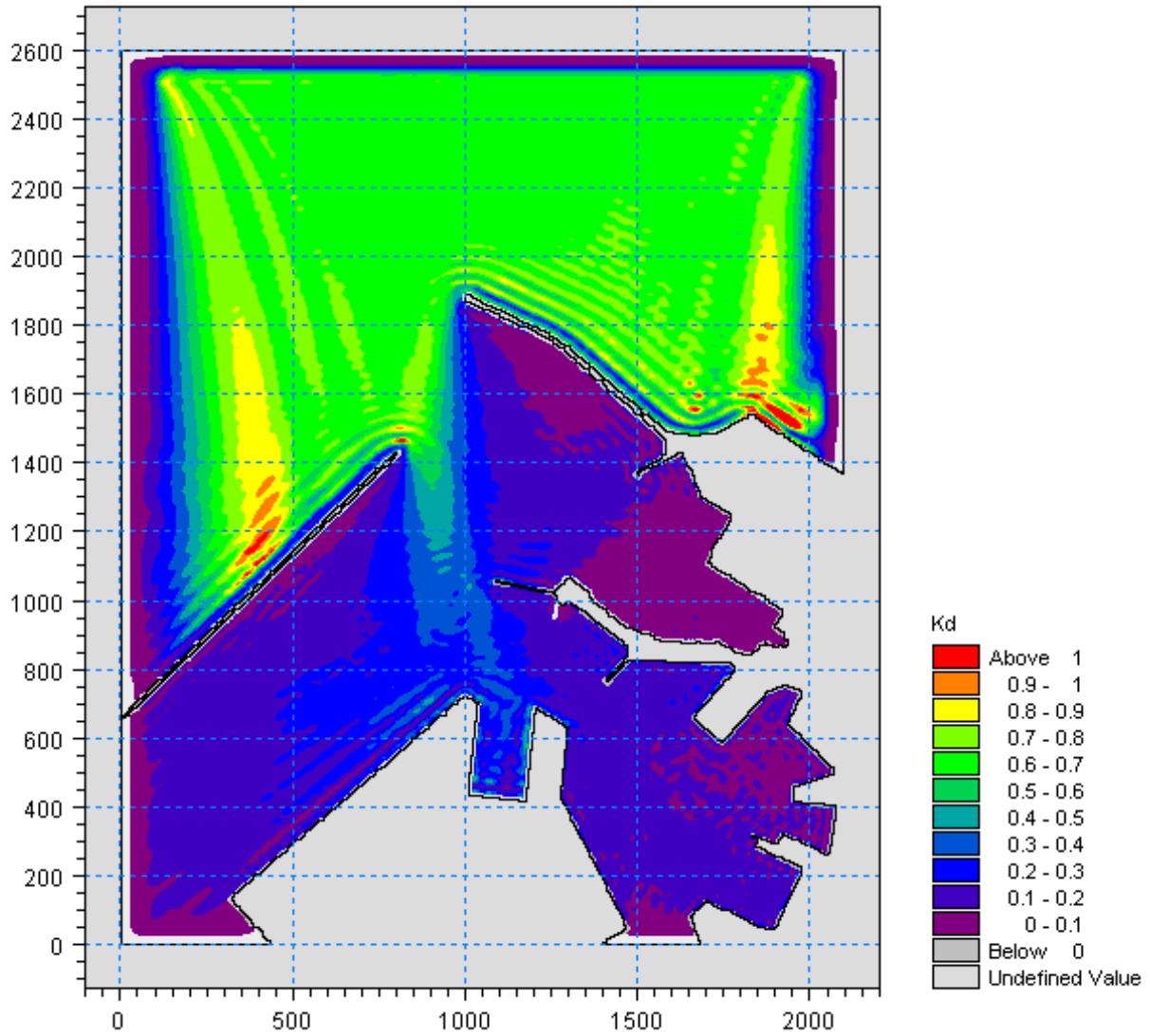


Figura 5.53 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 330°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)



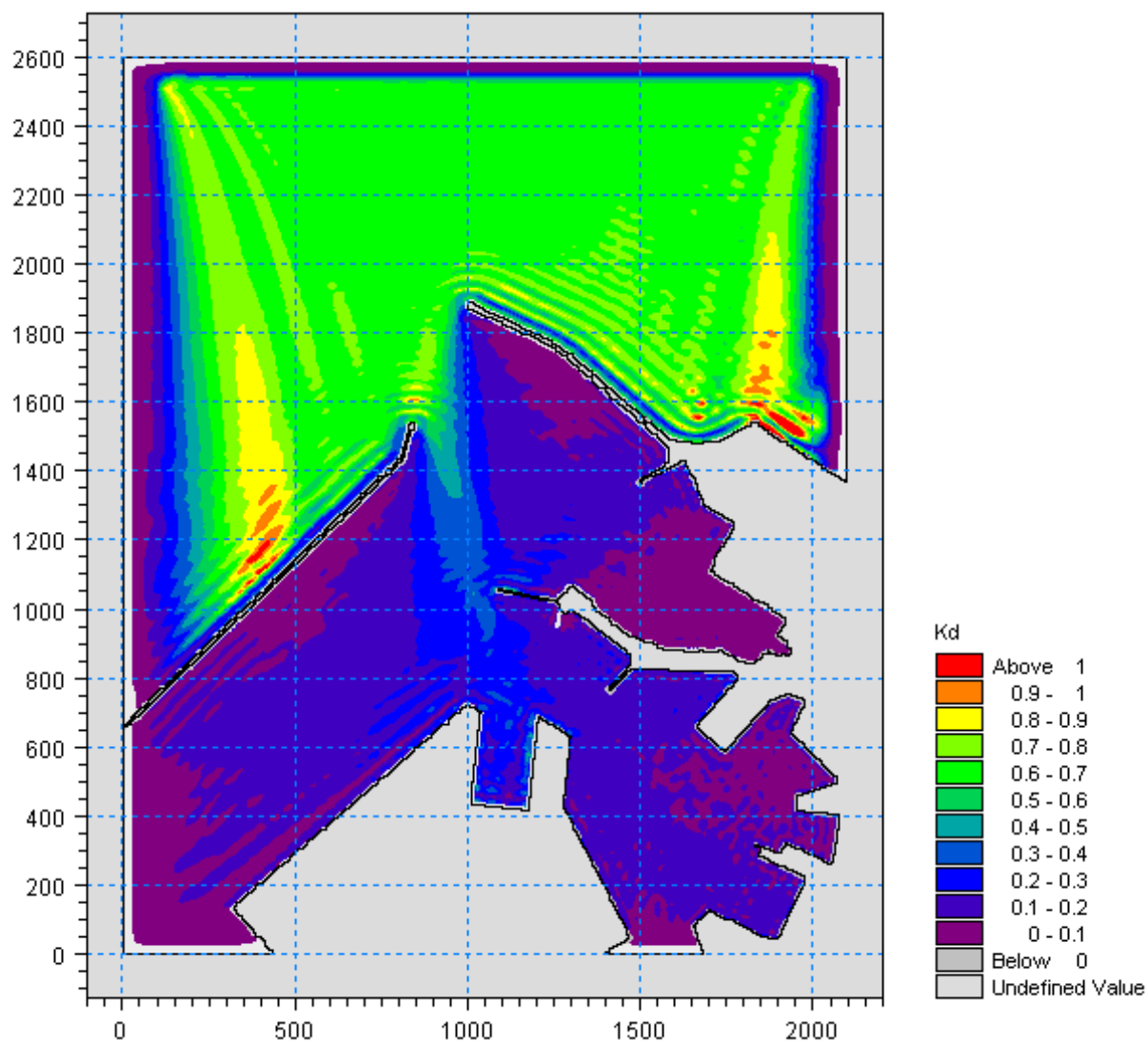


Figura 5.54 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $340^\circ\text{N}$  con periodo  $T_p=7.5\text{s}$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

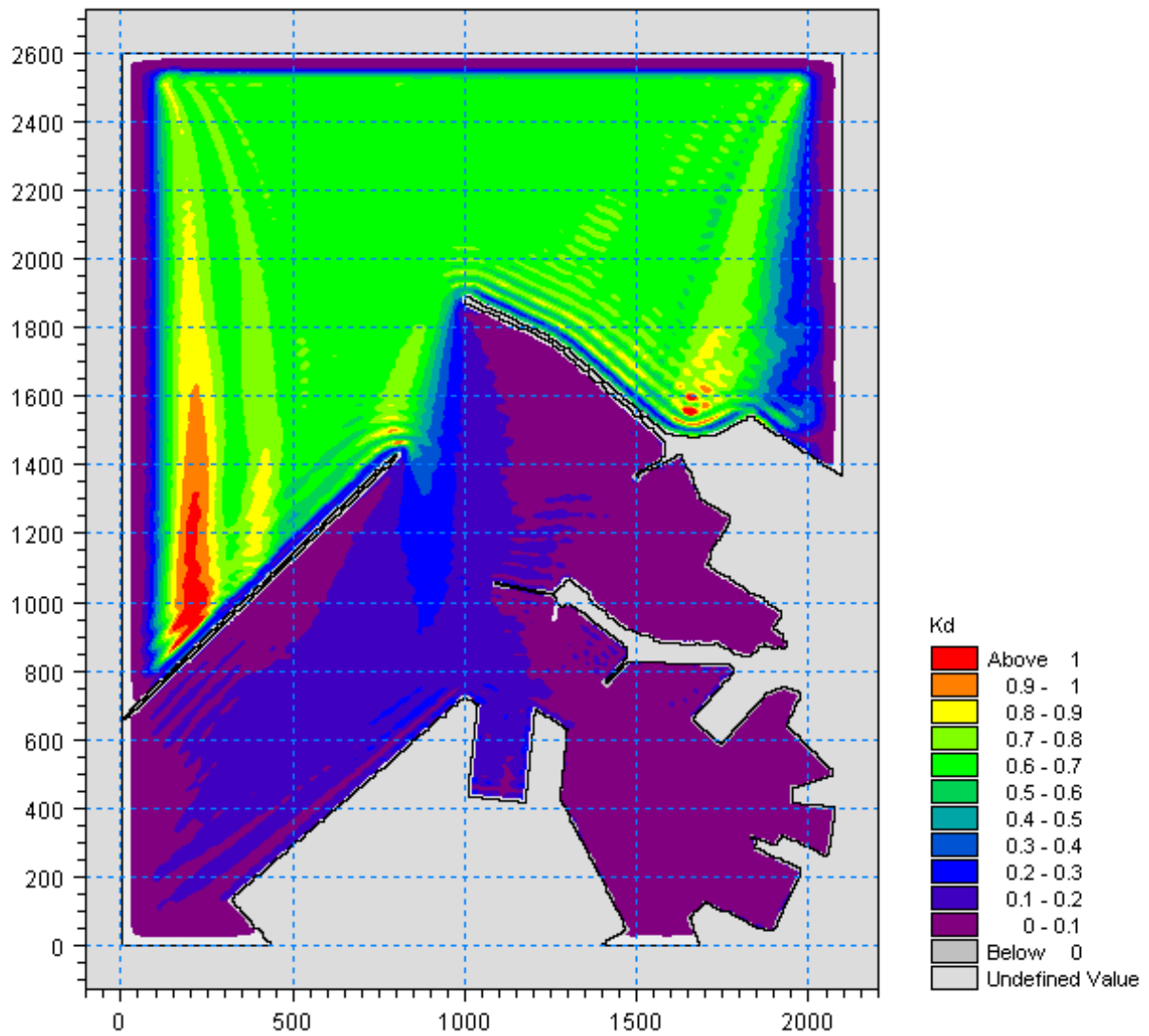


Figura 5.55 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 350°N con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

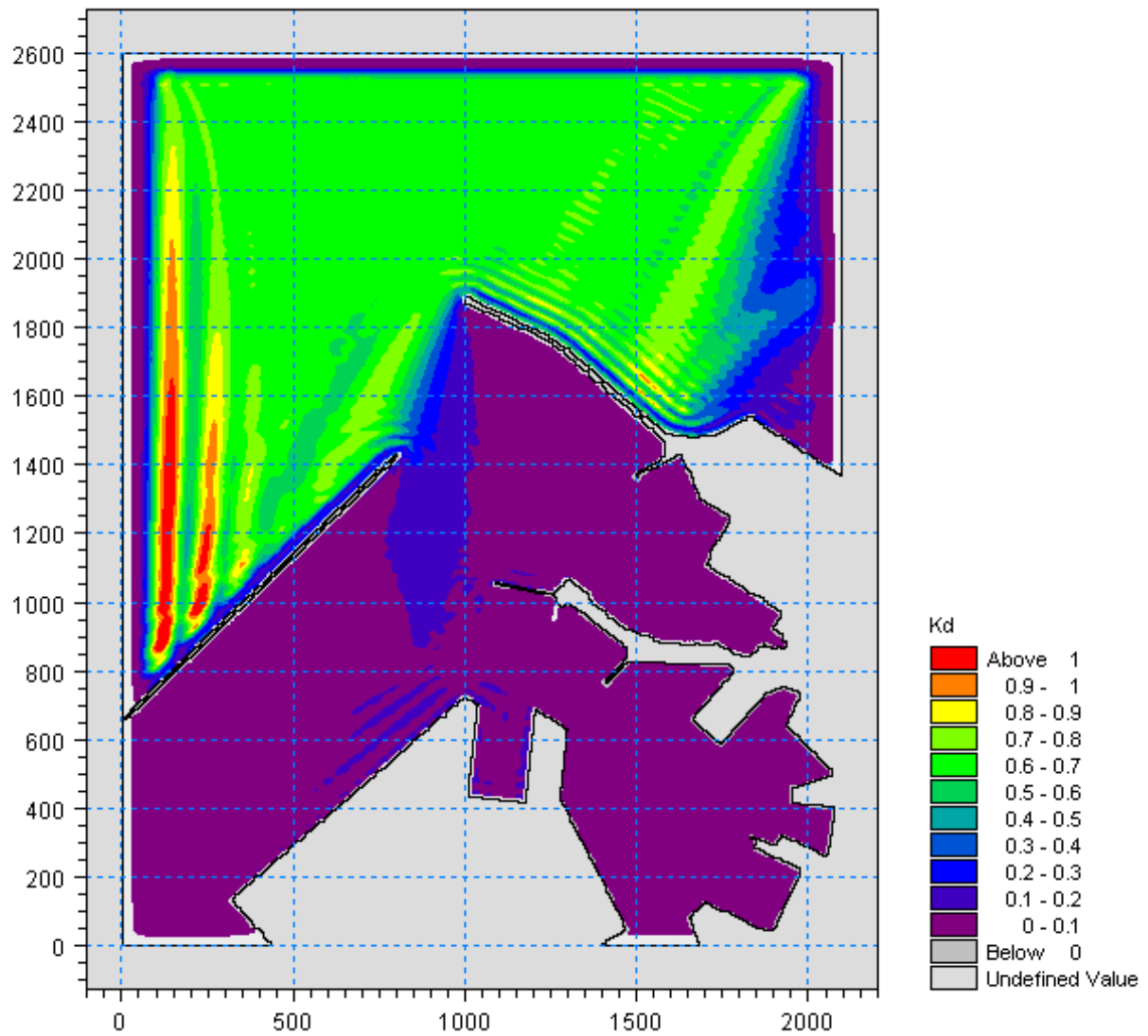


Figura 5.56 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^\circ N$  con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

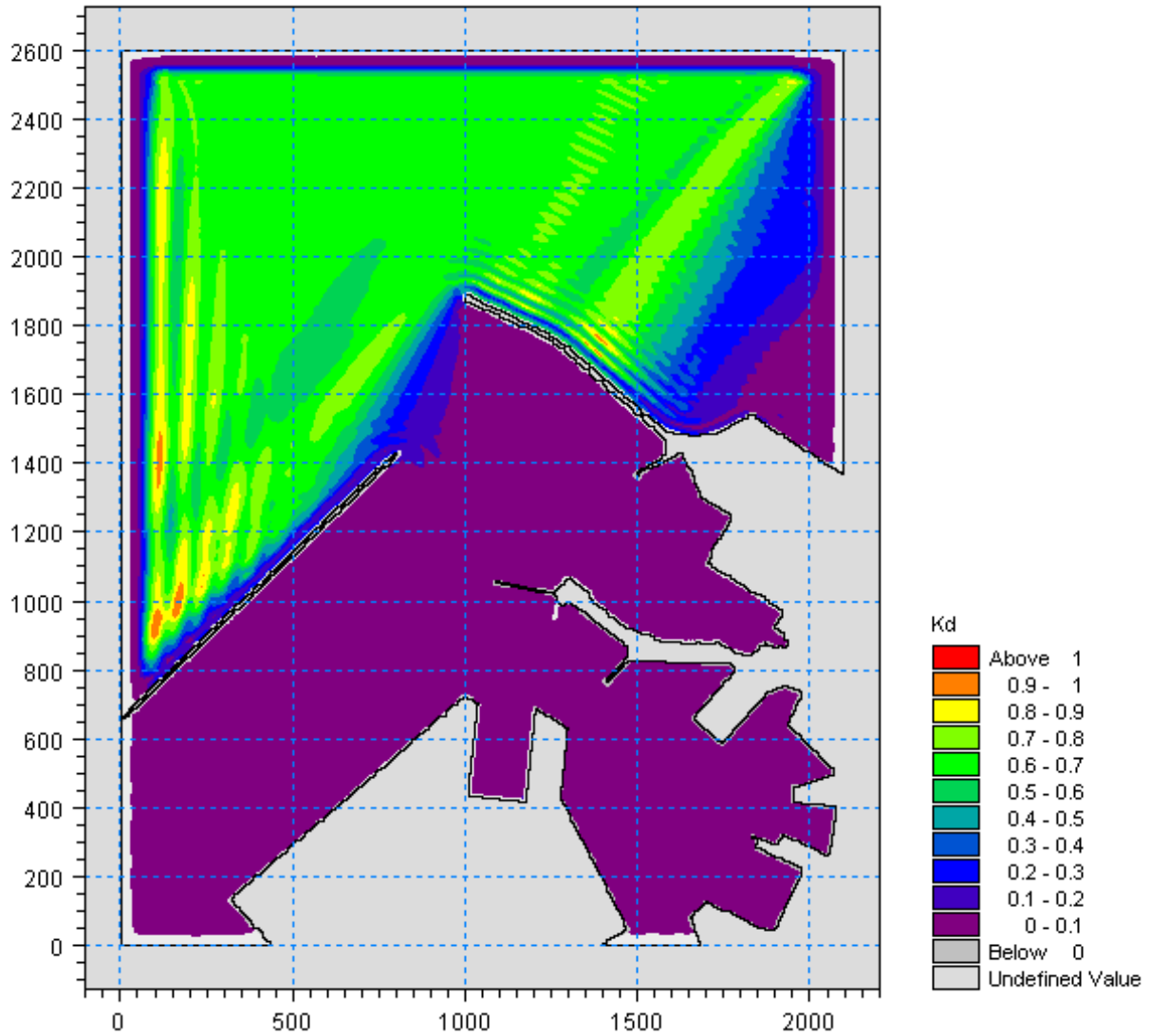


Figura 5.57 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $10^\circ N$  con periodo  $T_p=7.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

5.3.2 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=9s$

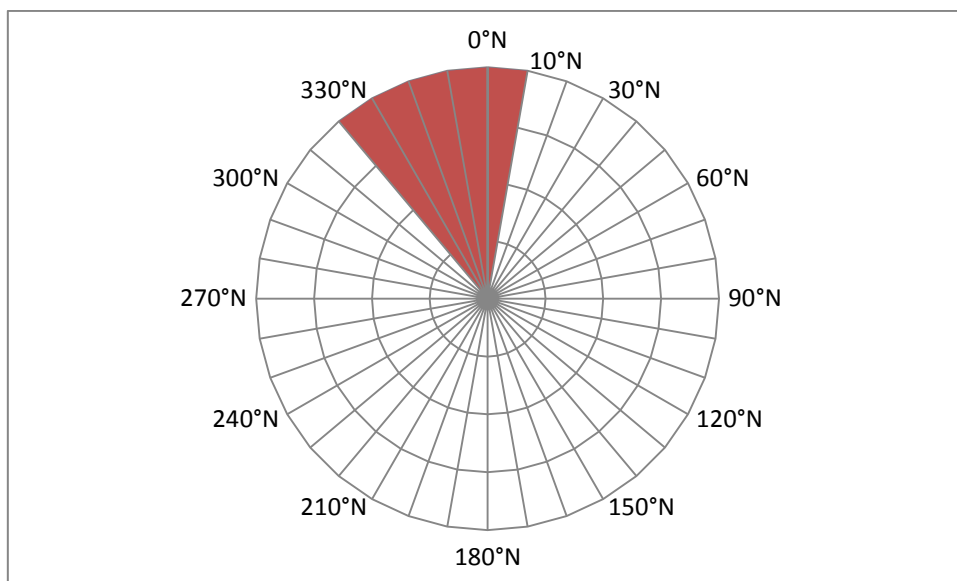


Figura 5.58 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $320^\circ N - 330^\circ N - 340^\circ N - 350^\circ N - 0^\circ N - 10^\circ N$ ) per il periodo di picco  $T_P=9s$

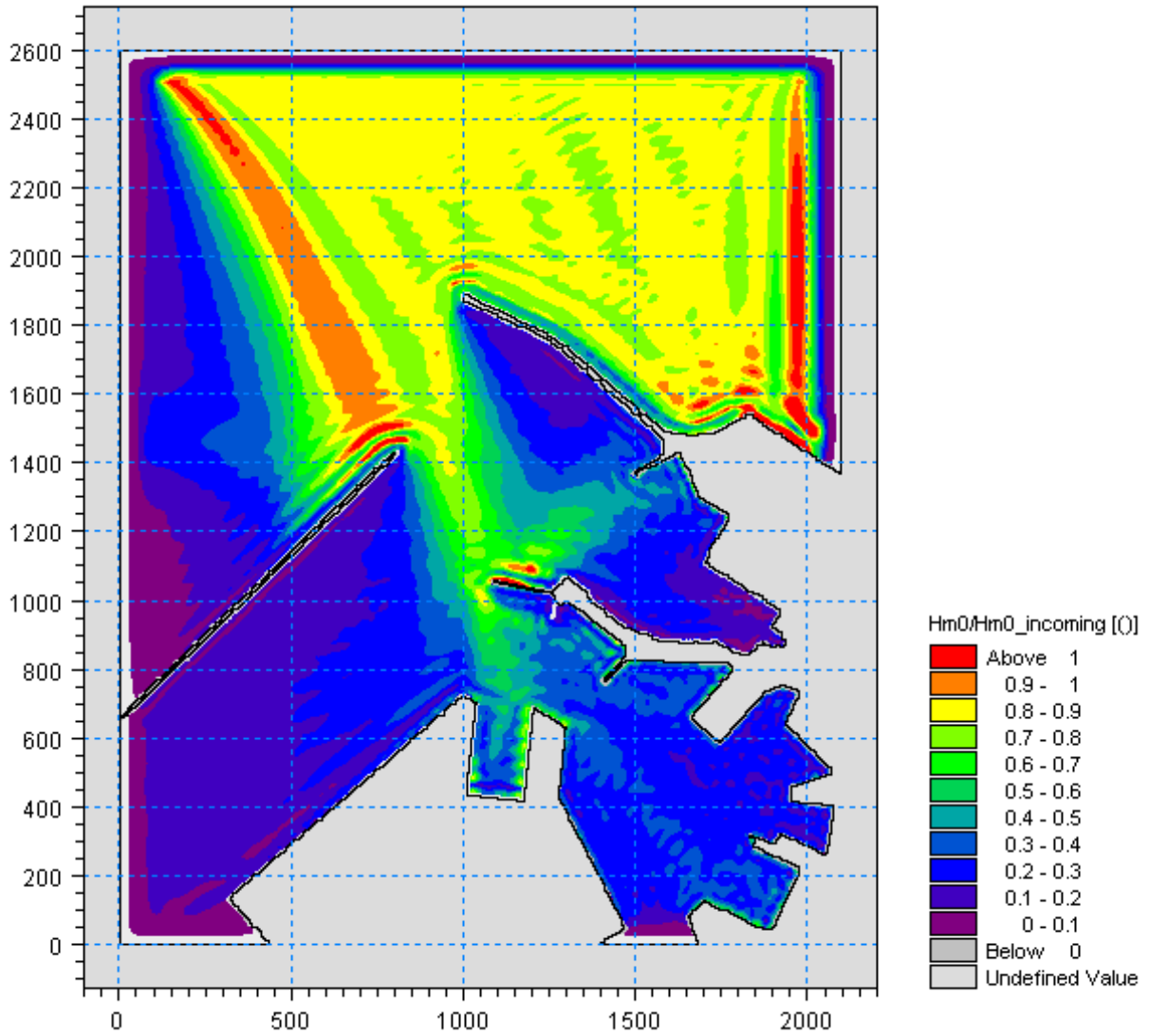


Figura 5.59 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 320°N con periodo  $T_P=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

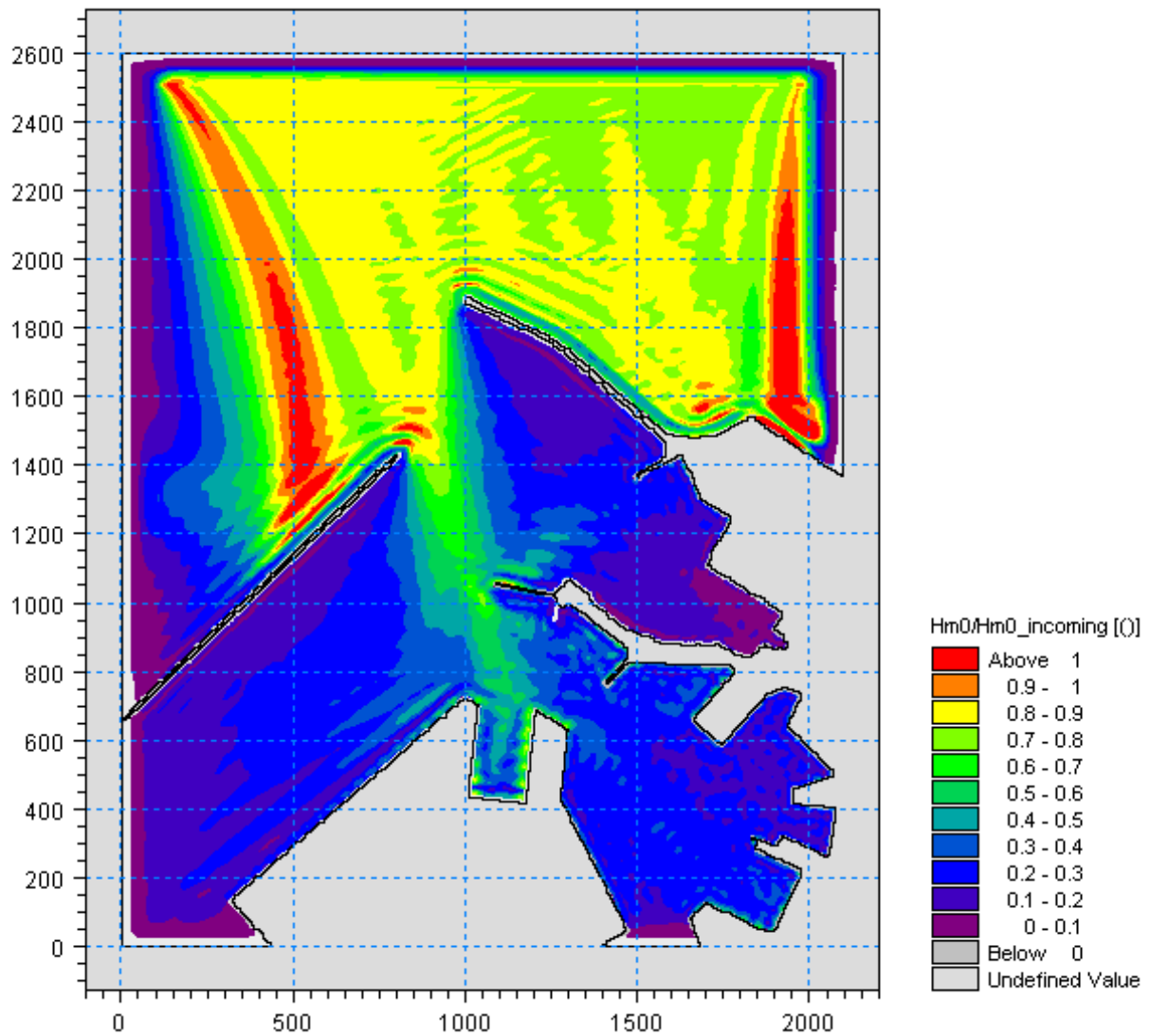


Figura 5.60 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 330°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

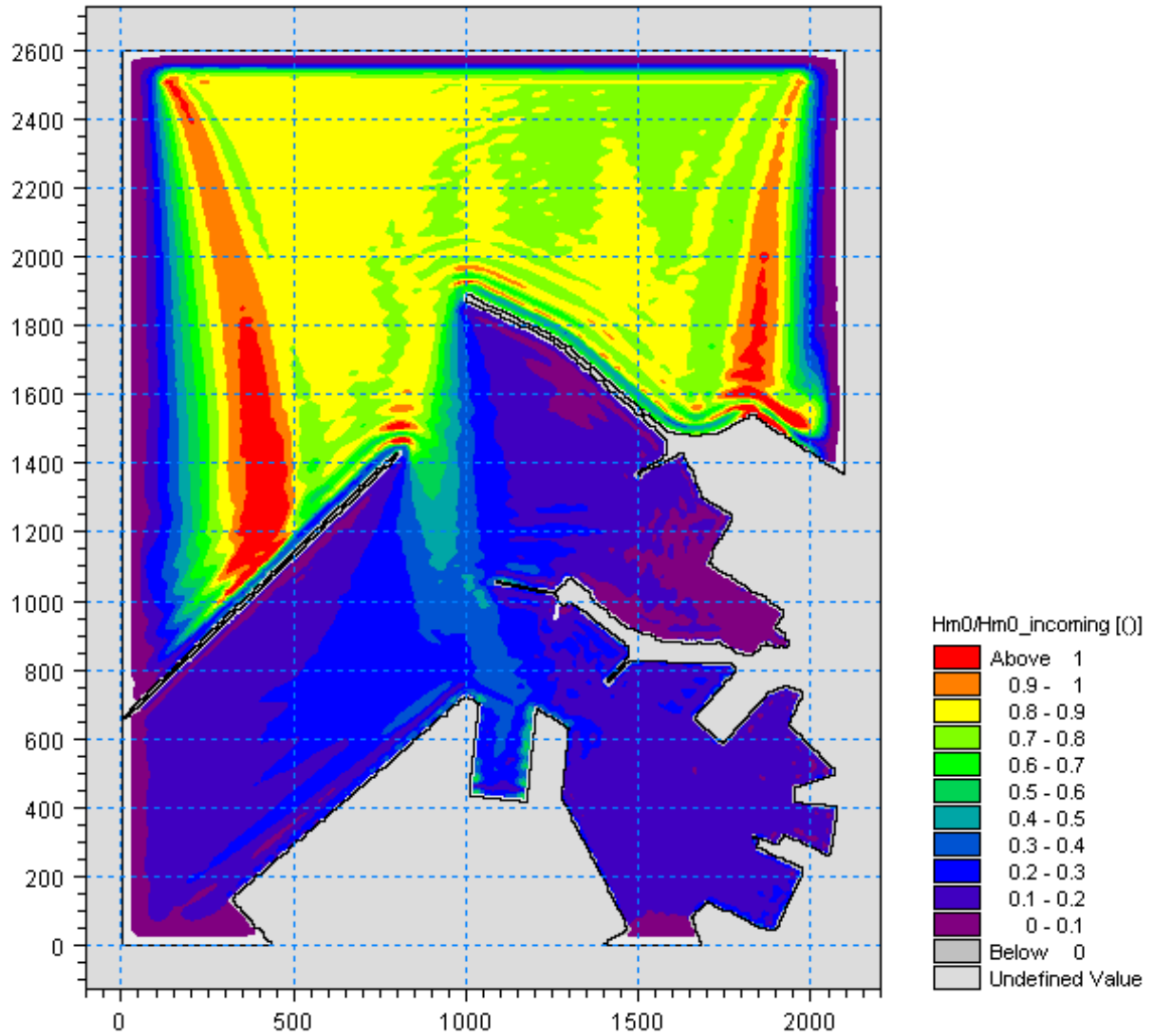


Figura 5.61 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 340°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)



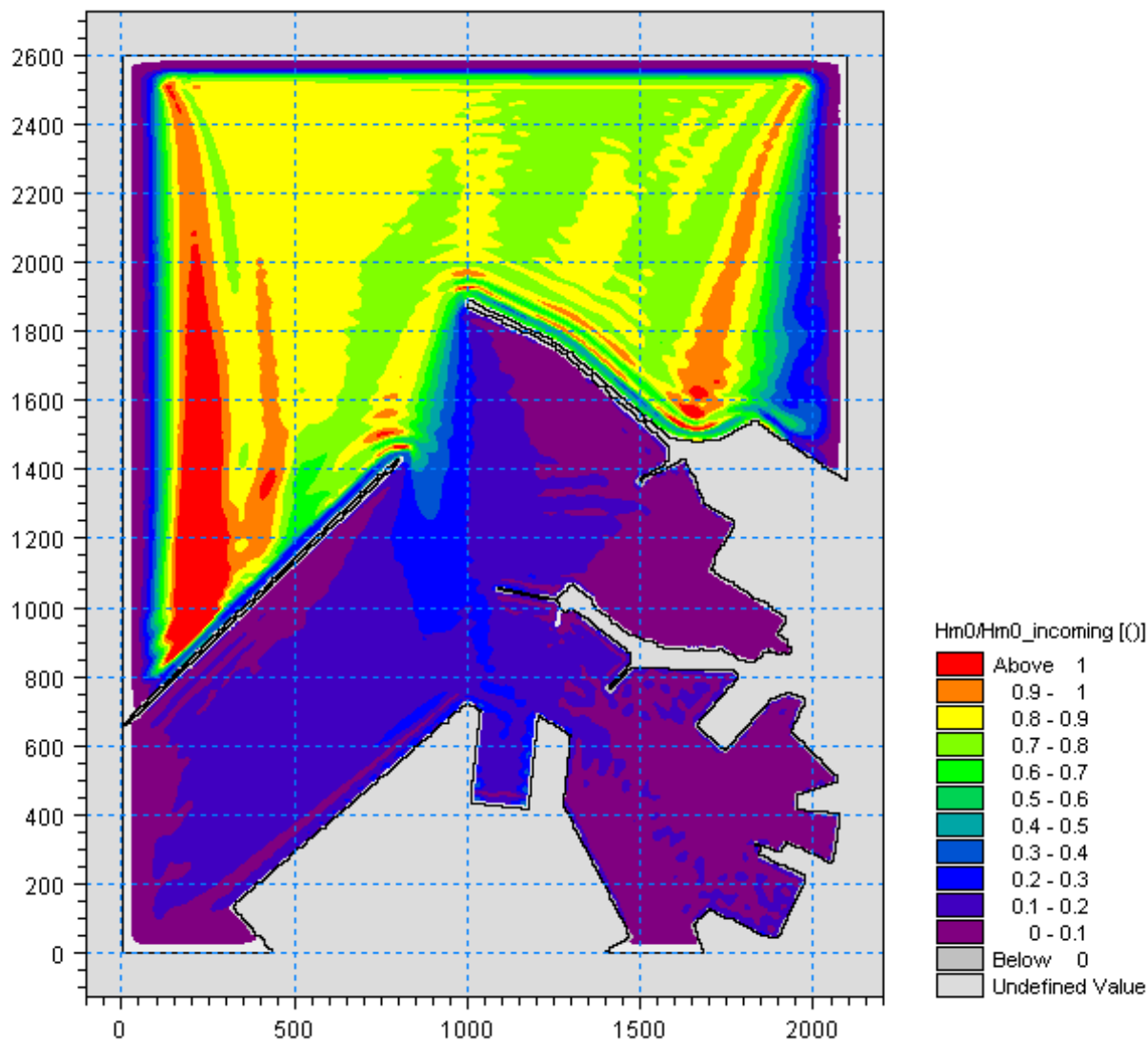


Figura 5.62 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $350^{\circ}N$  con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

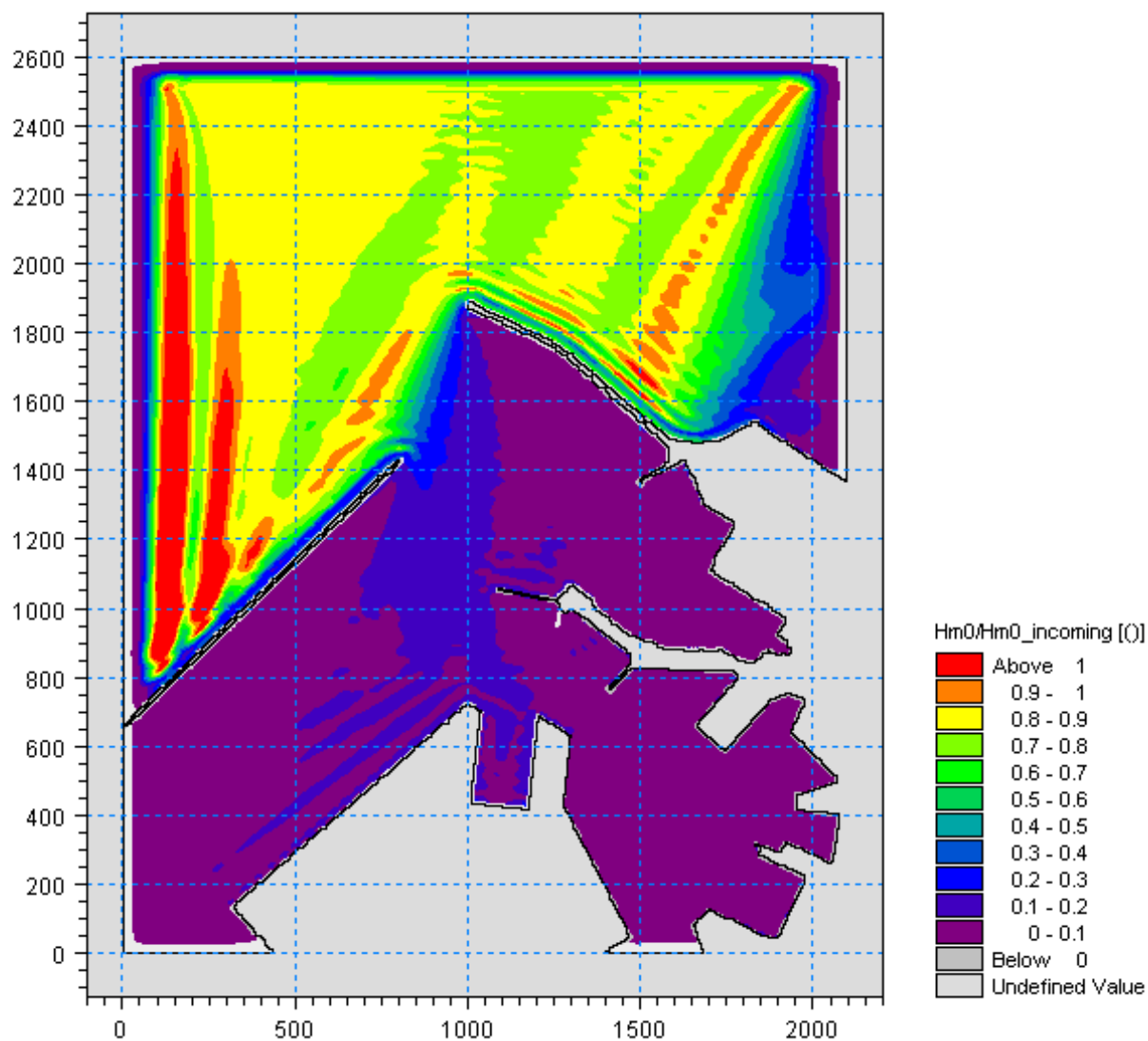


Figura 5.63 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^{\circ}N$  con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

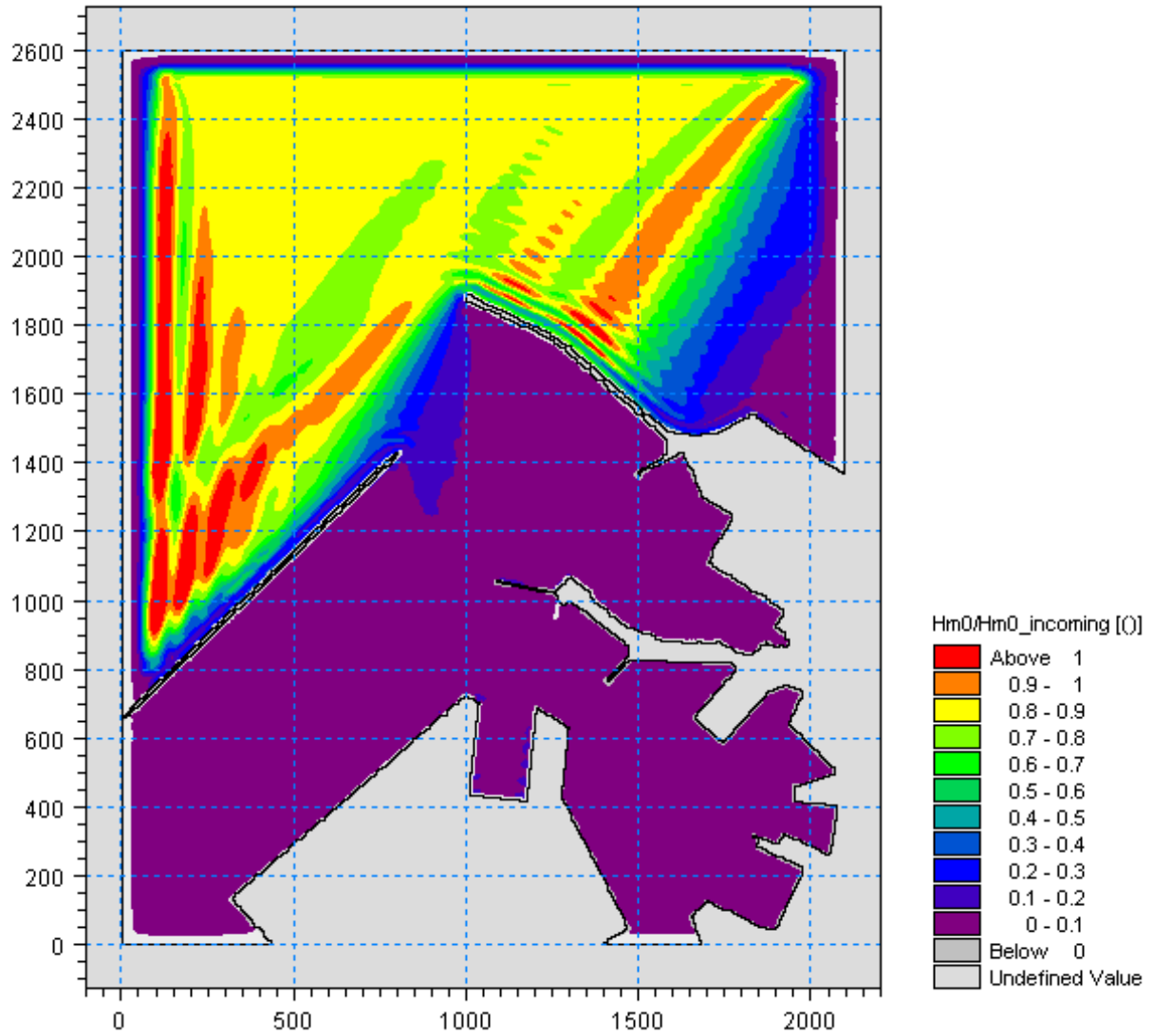


Figura 5.64 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 10°N con periodo  $T_p=9s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

5.3.3 Simulazioni con periodo di picco pari a  $T_P=10.5s$

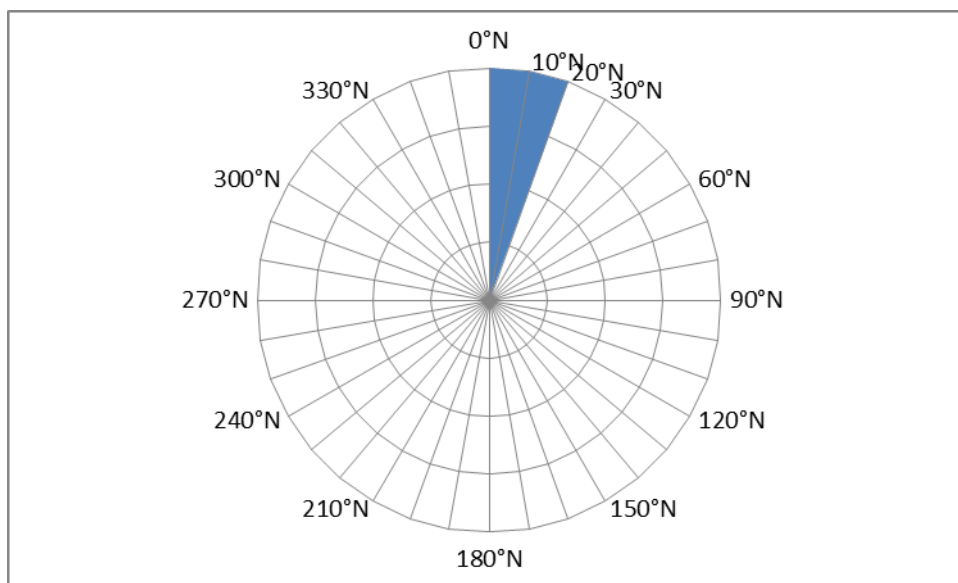


Figura 5.65 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $0^\circ N - 10^\circ N - 20^\circ N$ ) per il periodo di picco  $T_P=10.5s$

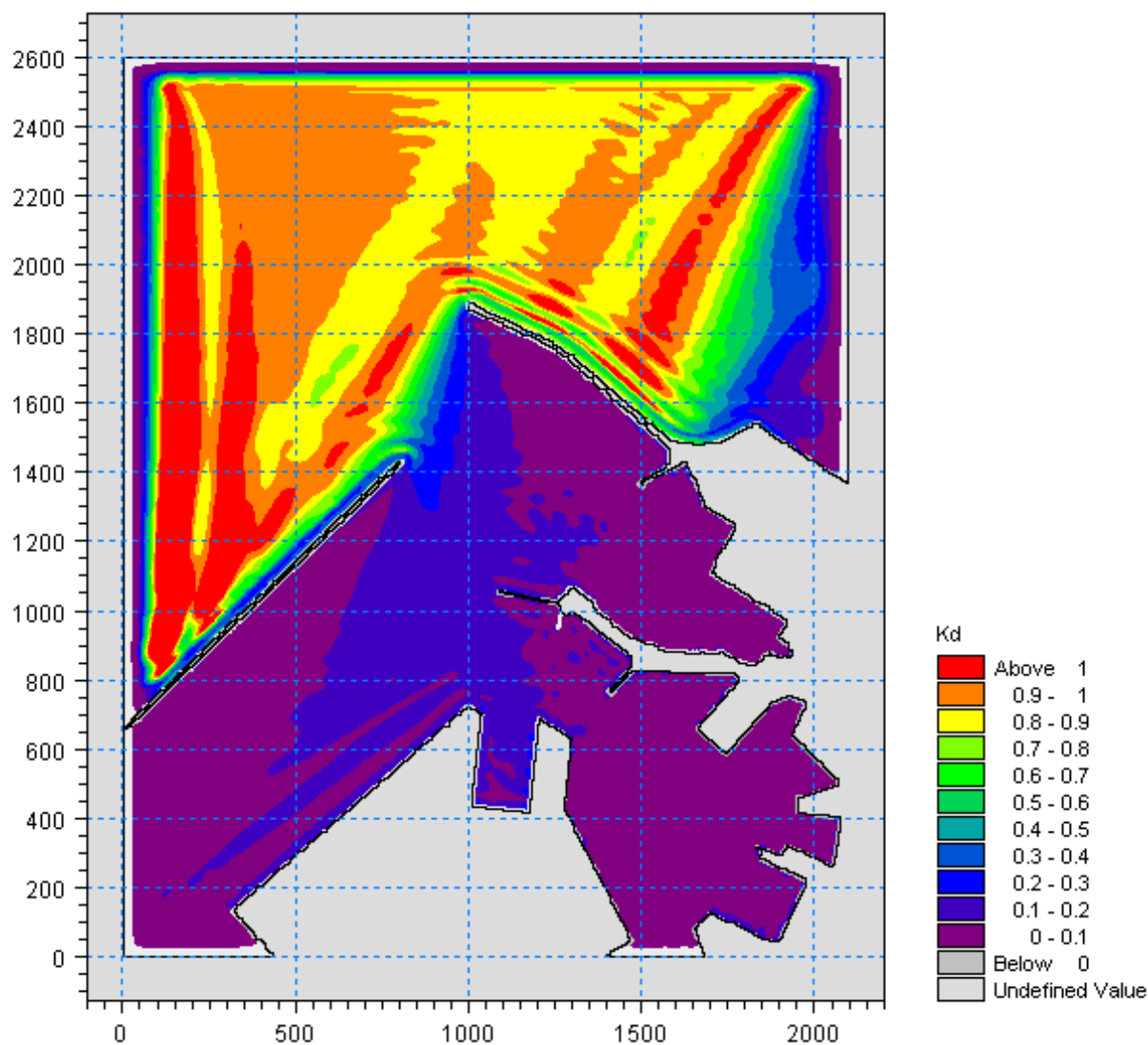


Figura 5.66 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^{\circ}N$  con periodo  $T_p=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

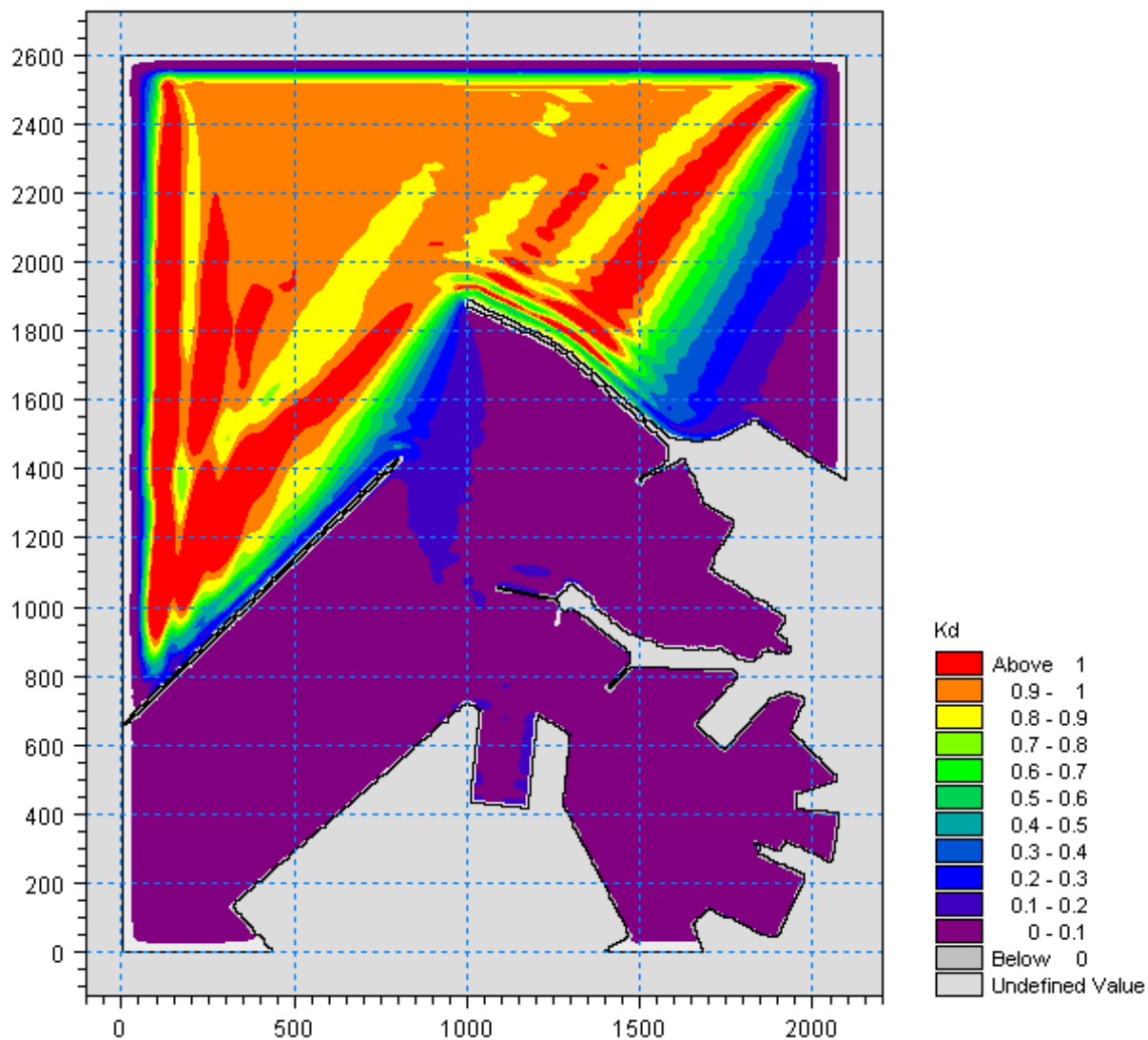


Figura 5.67 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $10^{\circ}N$  con periodo  $T_p=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

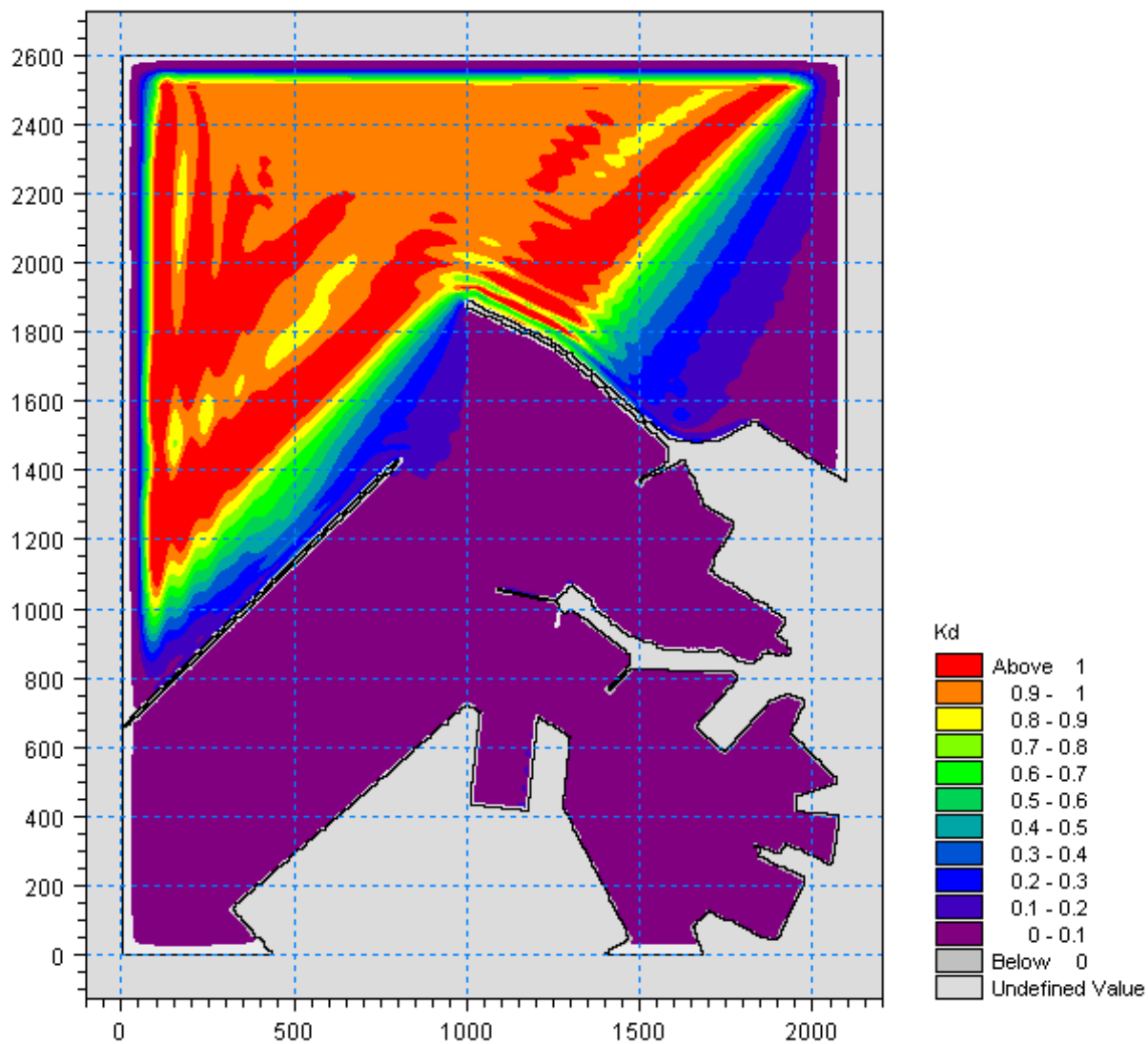


Figura 5.68 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $20^{\circ}N$  con periodo  $T_p=10.5s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

### 5.3.4 Simulazioni con periodo di picco pari a $T_P=12s$

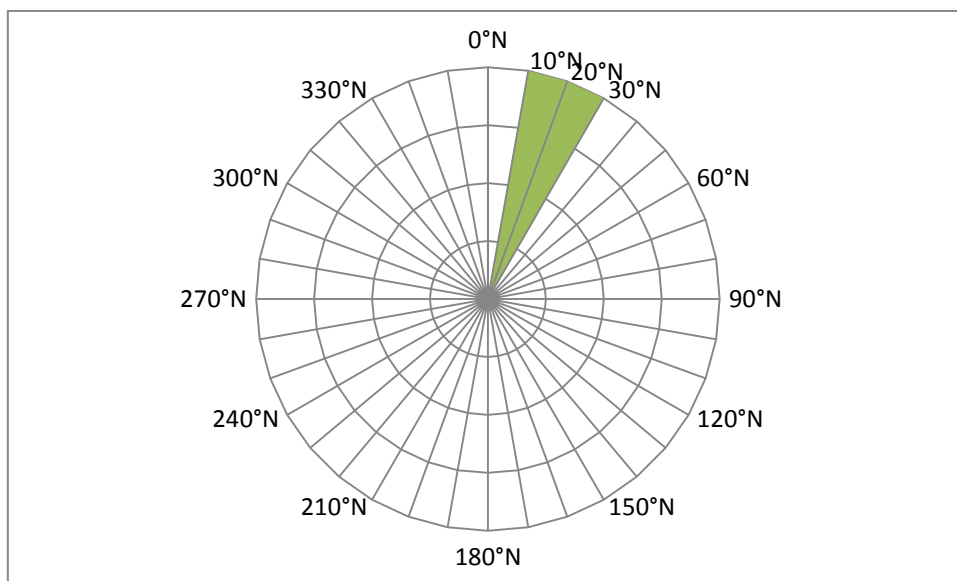


Figura 5.69 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $10^{\circ}N - 20^{\circ}N - 30^{\circ}N$ ) per il periodo di picco  $T_P=12s$



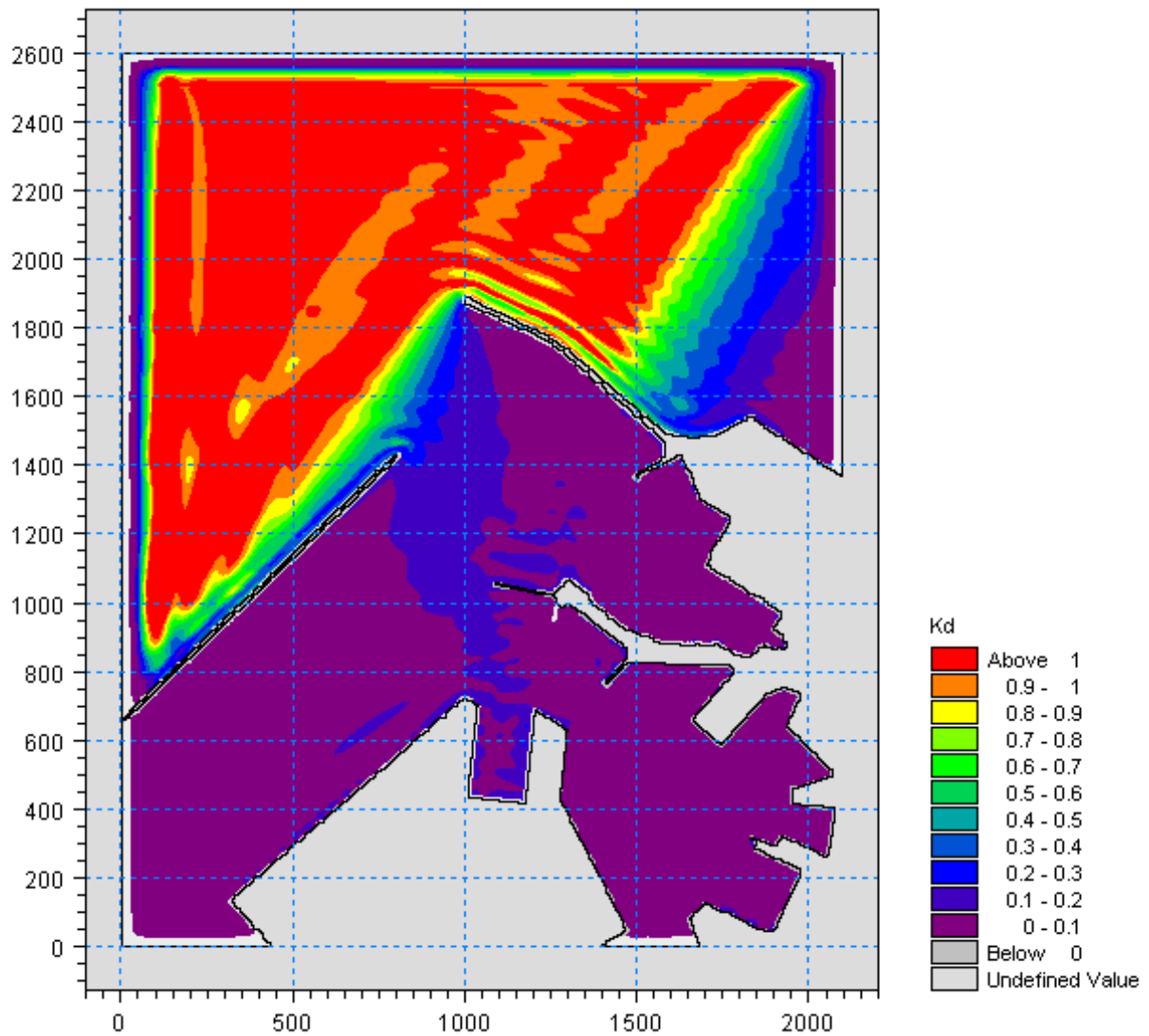


Figura 5.70 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $10^{\circ}N$  con periodo  $T_p=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

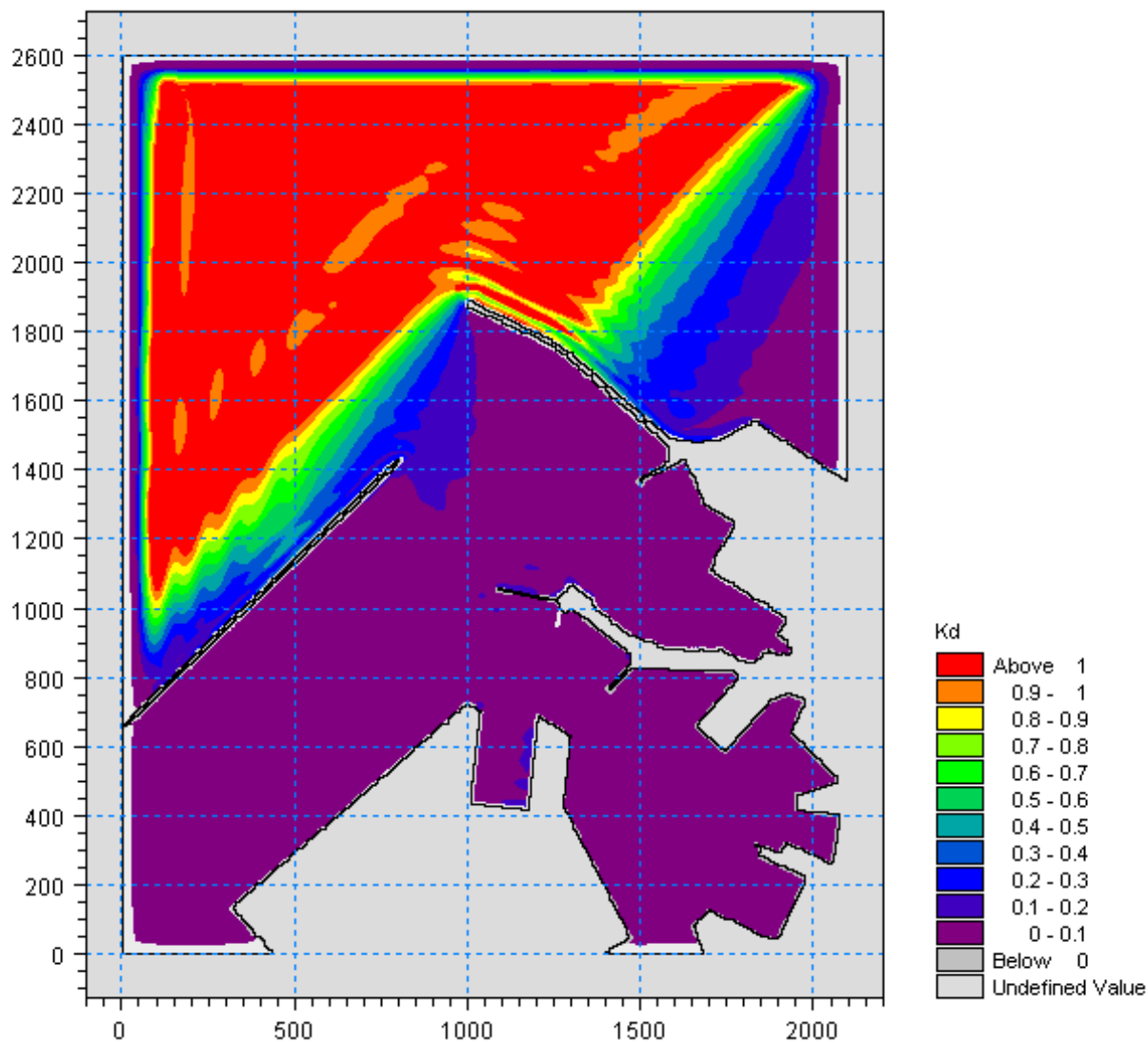


Figura 5.71 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 20°N con periodo  $T_p=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

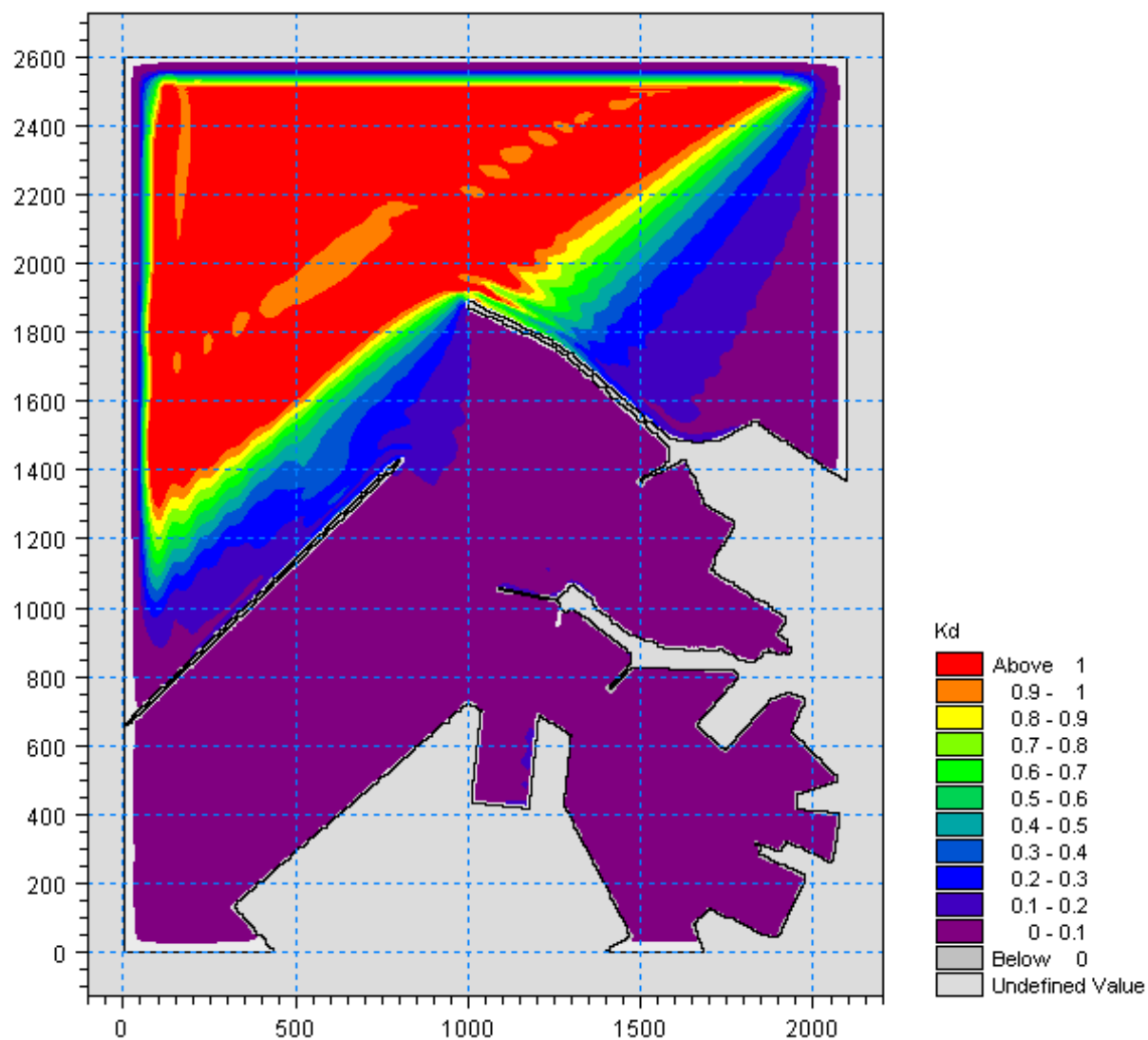


Figura 5.72 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $30^\circ N$  con periodo  $T_p=12s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

### 5.3.5 Simulazioni con periodo di picco pari a $T_p=30s$

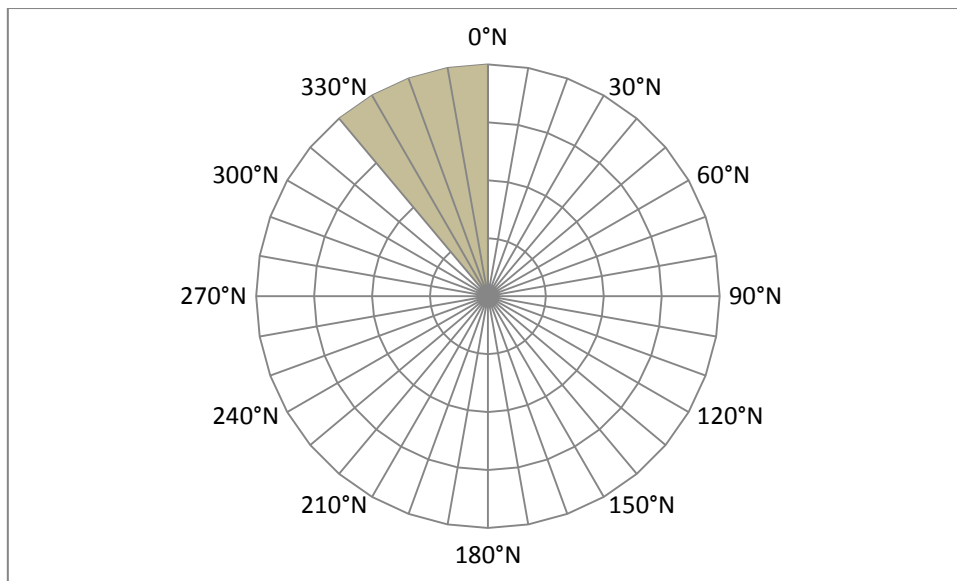


Figura 5.73 – Schema con le direzioni ondose di provenienza considerate ( $330^\circ\text{N} - 0^\circ\text{N}$ ) per il periodo di picco  $T_p=30s$

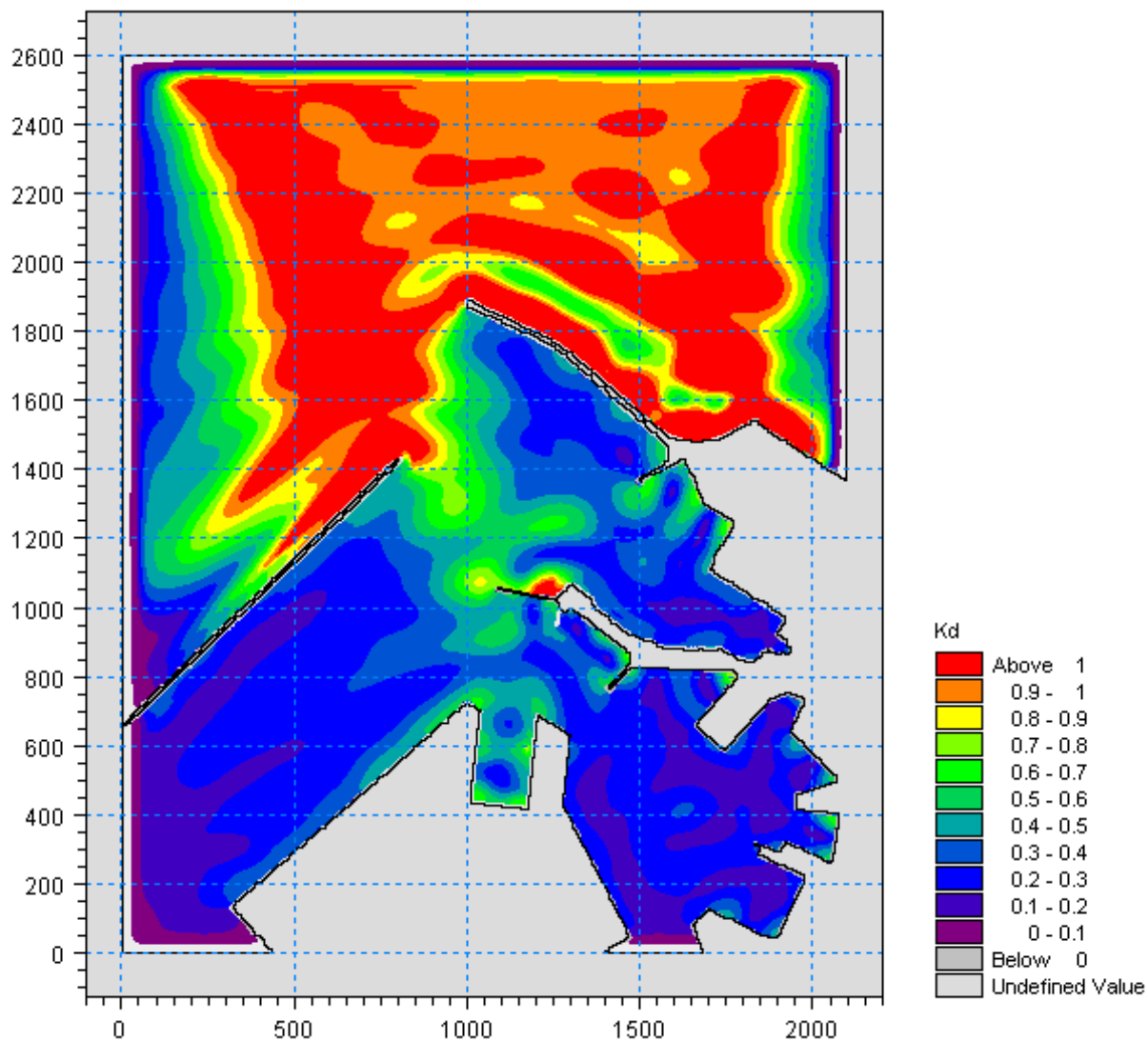


Figura 5.74 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da 330°N con periodo  $T_p=30s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

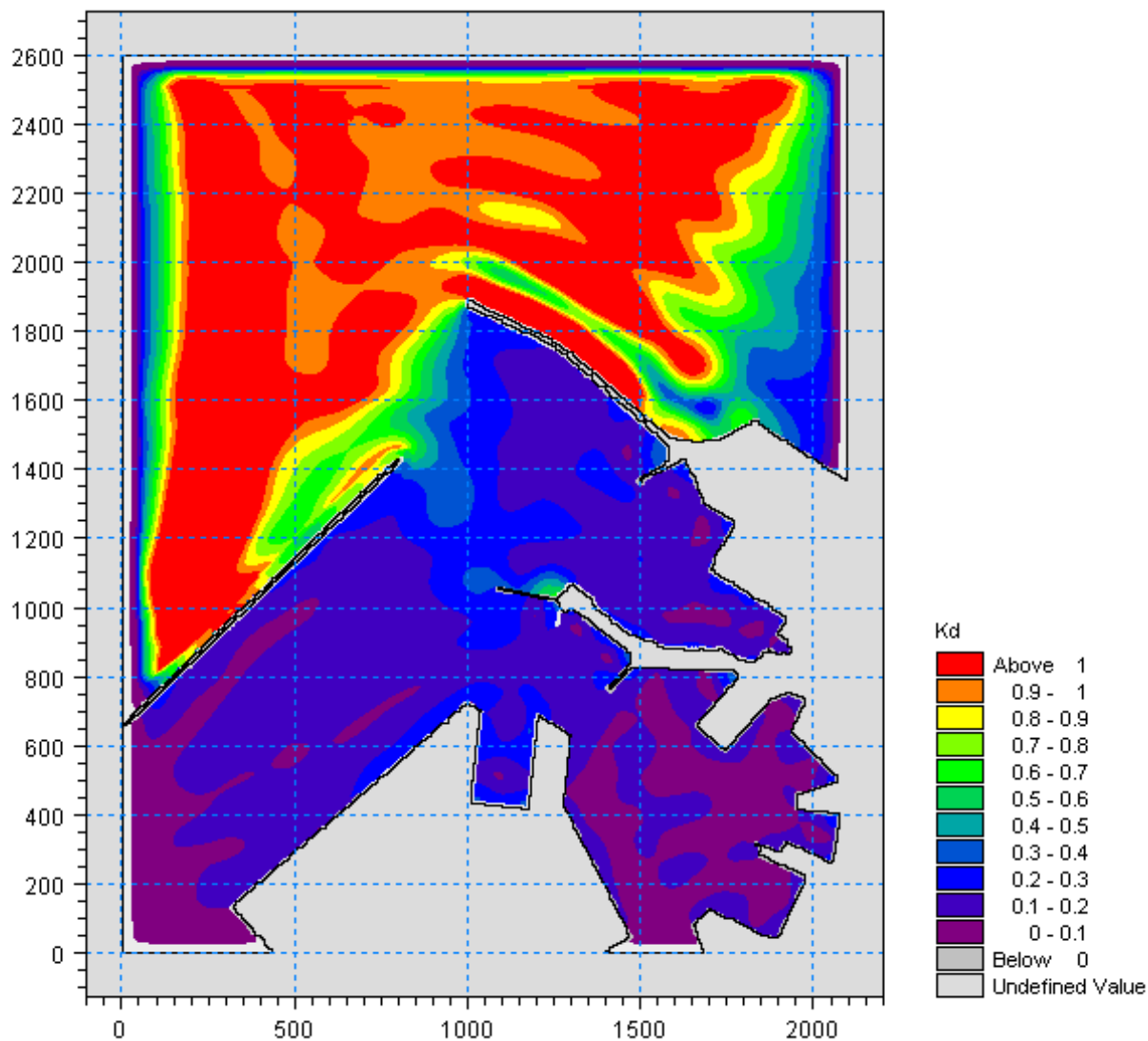


Figura 5.75 – Valori del coefficiente di diffrazione per l'attacco ondoso proveniente da  $0^{\circ}N$  con periodo  $T_p=30s$  nella zona portuale di Ancona per la configurazione con demolizione del Molo Nord (100m) e parziale realizzazione della diga di sottoflutto (assenza tratto terminale inclinato)

## 6. ESAME DEI RISULTATI

Il porto di Ancona nella nuova configurazione prevista (soluzione D del P.R.P.), avrà l'imboccatura posizionata alla profondità di 14m e con l'asse spostato verso il largo di circa 800 m rispetto all'imboccatura attuale.

Le opere foranee, come verificato nelle simulazioni effettuate, garantiscono il completo abbattimento delle onde provenienti dal settore di traversia principale (bora-greco), mentre per la traversie secondarie la nuova imboccatura potrebbe essere attraversata da onde locali con venti provenienti da ovest, nord-ovest e *fetches* paralleli alla linea di costa. Nello studio sono state quindi studiate le onde provenienti dalle direzioni 330°N-340°N per le quali l'effetto della parziale demolizione del Molo Nord risulta essere più significativa soprattutto per le banchine della Nuova Darsena. Le simulazioni sono state effettuate anche per le direzioni di provenienza limitrofe (320°N e 350°N). Pertanto, dai risultati delle simulazioni riportati nel paragrafo 5, si sono valutati i coefficienti di diffrazione  $K_d$  negli specchi acquei prospicienti la Nuova Darsena (banchine 23, 24, 25) e la Banchina Marche (banchine 26 e 27-30). I coefficienti di diffrazione  $K_d$  associati ad ogni banchina sono stati ottenuti mediando i valori di  $K_d$  dei punti della griglia appartenenti allo specchio acqueo di lunghezza pari a quella della banchina in esame e per una larghezza di 30m. I valori medi di  $K_d$ , per le diverse direzioni di provenienza delle onde (ogni 10°), i diversi periodi dell'onda testati ( $T_P=7.5s$ ,  $T_P=9.0s$ ,  $T_P=10.5s$ ,  $T_P=12.0s$ ) e per le tre diverse configurazioni planimetriche delle opere portuali sono riportati dalla Tabella 6.1 alla Tabella 6.4 per la configurazione attuale del Molo Nord e dalla Tabella 6.5 alla Tabella 6.8 per la configurazione con Molo Nord parzialmente demolito.

Tabella 6.1 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda con periodo di picco di 7.5s. Configurazione attuale del Molo Nord

$K_d$	$T_P=7.5s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
<b>Banchina 23</b>	0.12	0.16	0.13	0.09	0.06	0.04
<b>Banchina 24</b>	0.10	0.13	0.11	0.07	0.05	0.03
<b>Banchina 25</b>	0.12	0.16	0.13	0.09	0.06	0.03
<b>Banchina 26</b>	0.18	0.27	0.24	0.16	0.10	0.06
<b>Banchina 27-30</b>	0.09	0.13	0.13	0.10	0.07	0.04

Tabella 6.2 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda con periodo di picco di 9.0s. Configurazione attuale del Molo Nord

$K_d$	$T_p=9.0s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.19	0.19	0.15	0.11	0.07	0.05
Banchina 24	0.15	0.15	0.13	0.09	0.06	0.04
Banchina 25	0.17	0.17	0.14	0.10	0.07	0.04
Banchina 26	0.28	0.30	0.26	0.18	0.12	0.08
Banchina 27-30	0.14	0.16	0.14	0.11	0.08	0.05

Tabella 6.3 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda con periodo di picco di 10.5s. Configurazione attuale del Molo Nord

$K_d$	$T_p=10.5s$		
	0° N	10° N	20° N
Banchina 23	0.09	0.06	0.05
Banchina 24	0.08	0.05	0.04
Banchina 25	0.07	0.05	0.04
Banchina 26	0.13	0.09	0.06
Banchina 27-30	0.09	0.07	0.05

Tabella 6.4 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda con periodo di picco di 12.0s. Configurazione attuale del Molo Nord

$K_d$	$T_p=12.0s$		
	10° N	20° N	30° N
Banchina 23	0.14	0.10	0.09
Banchina 24	0.12	0.08	0.07
Banchina 25	0.10	0.07	0.06
Banchina 26	0.11	0.07	0.06
Banchina 27-30	0.09	0.06	0.06

Tabella 6.5 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda con periodo di picco di 7.5s. Configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m)

$K_d$	$T_p=7.5s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.32	0.37	0.28	0.18	0.11	0.06
Banchina 24	0.21	0.25	0.20	0.13	0.08	0.05
Banchina 25	0.23	0.29	0.23	0.15	0.09	0.06
Banchina 26	0.16	0.24	0.21	0.15	0.09	0.05
Banchina 27-30	0.11	0.14	0.13	0.10	0.07	0.04

Tabella 6.6 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda con periodo di picco di 9.0s. Configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m)

$K_d$	$T_p=9.0s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.41	0.43	0.33	0.22	0.14	0.09
Banchina 24	0.31	0.30	0.23	0.16	0.10	0.07
Banchina 25	0.31	0.32	0.25	0.17	0.11	0.07
Banchina 26	0.16	0.26	0.22	0.16	0.10	0.07
Banchina 27-30	0.09	0.17	0.15	0.12	0.08	0.06



Tabella 6.7 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda con periodo di picco di 10.5s. Configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m)

$K_d$	$T_p=10.5s$		
	0° N	10° N	20° N
<b>Banchina 23</b>	0.17	0.11	0.08
<b>Banchina 24</b>	0.13	0.09	0.07
<b>Banchina 25</b>	0.12	0.08	0.06
<b>Banchina 26</b>	0.11	0.08	0.06
<b>Banchina 27-30</b>	0.09	0.07	0.05

Tabella 6.8 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda con periodo di picco di 12.0s. Configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m)

$K_d$	$T_p=12.0s$		
	0° N	10° N	20° N
<b>Banchina 23</b>	0.14	0.10	0.08
<b>Banchina 24</b>	0.11	0.08	0.07
<b>Banchina 25</b>	0.10	0.07	0.06
<b>Banchina 26</b>	0.09	0.07	0.06
<b>Banchina 27-30</b>	0.08	0.06	0.05

Nel settore 320°N-350°N la configurazione con Molo Nord parzialmente demolito produce un aumento del coefficiente di diffrazione  $K_d$  per le banchine della Nuova Darsena (banchine 23, 24 e 25) ed una lieve riduzione di  $K_d$  per la Banchina Marche (banchine 26, 27-30). In particolare, per la banchina 23 si ha un aumento di  $K_d$  di 2.0-2.6 volte, mentre per le banchine 24 e 25 l'aumento risulta via via sempre più lieve. La direzione di provenienza dell'onda 330°N è quella che produce un più alto valore del coefficiente di diffrazione  $K_d=0.43$  sulla banchina 23, banchina maggiormente esposta nel caso di demolizione del Molo Nord. Le onde che provengono dai settori nord-orientali (0°N, 10°N, 20°N, 30°N) producono, nella configurazione di Molo Nord parzialmente demolito, valori di  $K_d$  che si mantengono inferiori a 0.2 anche tenendo conto delle onde lunghe.

Tutti i commenti sopra riportati si riferiscono alla configurazione finale delle opere foranee con il Molo Nord allo stato attuale o parzialmente demolito.

Dalla Tabella 6.9 alla Tabella 6.10 sono anche riportati i valori del coefficiente di diffrazione  $K_d$  medio e del relativo valore dello scarto quadratico medio per tutte e tre le configurazioni planimetriche delle opere portuali testate. Si osservano valori dello scarto quadratico medio abbastanza contenuti, in particolare per la condizione più gravosa che si presenta nel caso di onde con direzione di provenienza 330°N,  $T_p=9s$  e Molo Nord parzialmente demolito si ha un valore dello scarto quadratico medio di 0.10.

Tabella 6.9 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi con relativi valori dello scarto quadratico medio per le diverse banchine, direzioni di provenienza dell'onda e periodi d'onda. Configurazione attuale del Molo Nord

$K_d$	$T_p=7.5s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.12 ± 0.03	0.16 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.09 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.01
Banchina 24	0.10 ± 0.04	0.13 ± 0.06	0.11 ± 0.05	0.07 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.03 ± 0.01
Banchina 25	0.12 ± 0.03	0.16 ± 0.04	0.13 ± 0.03	0.09 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.03 ± 0.01
Banchina 26	0.18 ± 0.04	0.27 ± 0.07	0.24 ± 0.06	0.16 ± 0.04	0.10 ± 0.02	0.06 ± 0.01
Banchina 27-30	0.09 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.10 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.04 ± 0.01

$K_d$	$T_p=9.0s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.19 ± 0.05	0.19 ± 0.05	0.15 ± 0.04	0.11 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.05 ± 0.01
Banchina 24	0.15 ± 0.07	0.15 ± 0.07	0.13 ± 0.06	0.09 ± 0.04	0.06 ± 0.03	0.04 ± 0.02
Banchina 25	0.17 ± 0.05	0.17 ± 0.05	0.14 ± 0.04	0.10 ± 0.03	0.07 ± 0.02	0.04 ± 0.01
Banchina 26	0.28 ± 0.05	0.30 ± 0.06	0.26 ± 0.05	0.18 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.08 ± 0.01
Banchina 27-30	0.14 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.11 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.05 ± 0.01

$K_d$	$T_p=10.5s$		
	0° N	10° N	20° N
Banchina 23	0.09 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.01
Banchina 24	0.08 ± 0.03	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.01
Banchina 25	0.07 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01
Banchina 26	0.13 ± 0.02	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 27-30	0.09 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.00

$K_d$	$T_p=12.0s$		
	10° N	20° N	30° N
Banchina 23	0.14 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.09 ± 0.02
Banchina 24	0.12 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.02
Banchina 25	0.10 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 26	0.11 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 27-30	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.00	0.06 ± 0.00

Tabella 6.10 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi con relativi valori dello scarto quadratico medio per le diverse banchine, direzioni di provenienza dell'onda e periodi d'onda. Configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m)

$K_d$	$T_p=7.5s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.32 ± 0.09	0.37 ± 0.11	0.28 ± 0.08	0.18 ± 0.05	0.11 ± 0.03	0.06 ± 0.02
Banchina 24	0.21 ± 0.09	0.25 ± 0.11	0.20 ± 0.09	0.13 ± 0.06	0.08 ± 0.03	0.05 ± 0.02
Banchina 25	0.23 ± 0.07	0.29 ± 0.08	0.23 ± 0.06	0.15 ± 0.04	0.09 ± 0.02	0.06 ± 0.01
Banchina 26	0.16 ± 0.03	0.24 ± 0.05	0.21 ± 0.05	0.15 ± 0.03	0.09 ± 0.02	0.05 ± 0.01
Banchina 27-30	0.11 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.10 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.04 ± 0.01

$K_d$	$T_p=9.0s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.41 ± 0.09	0.43 ± 0.10	0.33 ± 0.08	0.22 ± 0.05	0.14 ± 0.03	0.09 ± 0.02
Banchina 24	0.31 ± 0.11	0.30 ± 0.13	0.23 ± 0.11	0.16 ± 0.07	0.10 ± 0.05	0.07 ± 0.03
Banchina 25	0.31 ± 0.08	0.32 ± 0.10	0.25 ± 0.08	0.17 ± 0.05	0.11 ± 0.03	0.07 ± 0.02
Banchina 26	0.16 ± 0.05	0.26 ± 0.04	0.22 ± 0.04	0.16 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.07 ± 0.01
Banchina 27-30	0.09 ± 0.01	0.17 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.01

$K_d$	$T_p=10.5s$		
	0° N	10° N	20° N
Banchina 23	0.17 ± 0.04	0.11 ± 0.02	0.08 ± 0.02
Banchina 24	0.13 ± 0.05	0.09 ± 0.03	0.07 ± 0.02
Banchina 25	0.12 ± 0.03	0.08 ± 0.02	0.06 ± 0.01
Banchina 26	0.11 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 27-30	0.09 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.00

$K_d$	$T_p=12.0s$		
	10° N	20° N	30° N
Banchina 23	0.14 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.08 ± 0.02
Banchina 24	0.11 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.02
Banchina 25	0.10 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 26	0.09 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 27-30	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.00	0.05 ± 0.00

La Tabella 6.11 si riferisce invece alla situazione di parziale realizzazione della diga sottoflutto (assenza del tratto terminale inclinato).

Tabella 6.11 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  medi con relativi valori dello scarto quadratico medio per le diverse banchine, direzioni di provenienza dell'onda e periodi d'onda. Configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m) e diga di sottoflutto parzialmente costruita

$K_d$	$T_p=7.5s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.41 ± 0.11	0.46 ± 0.13	0.31 ± 0.09	0.17 ± 0.04	0.10 ± 0.02	0.06 ± 0.02
Banchina 24	0.27 ± 0.12	0.32 ± 0.14	0.23 ± 0.10	0.13 ± 0.06	0.07 ± 0.03	0.05 ± 0.02
Banchina 25	0.28 ± 0.09	0.36 ± 0.10	0.27 ± 0.07	0.15 ± 0.04	0.09 ± 0.02	0.05 ± 0.01
Banchina 26	0.21 ± 0.05	0.33 ± 0.08	0.29 ± 0.07	0.18 ± 0.04	0.10 ± 0.02	0.06 ± 0.01
Banchina 27-30	0.14 ± 0.02	0.19 ± 0.03	0.19 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.05 ± 0.01

$K_d$	$T_p=9.0s$					
	320° N	330° N	340° N	350° N	0°N	10°N
Banchina 23	0.58 ± 0.14	0.57 ± 0.14	0.39 ± 0.09	0.23 ± 0.06	0.13 ± 0.03	0.09 ± 0.02
Banchina 24	0.39 ± 0.18	0.40 ± 0.18	0.28 ± 0.13	0.17 ± 0.08	0.10 ± 0.05	0.07 ± 0.03
Banchina 25	0.40 ± 0.13	0.42 ± 0.13	0.30 ± 0.09	0.18 ± 0.05	0.11 ± 0.03	0.07 ± 0.02
Banchina 26	0.32 ± 0.05	0.39 ± 0.07	0.31 ± 0.06	0.20 ± 0.04	0.12 ± 0.02	0.07 ± 0.01
Banchina 27-30	0.19 ± 0.02	0.25 ± 0.03	0.22 ± 0.03	0.16 ± 0.02	0.10 ± 0.01	0.06 ± 0.01

$K_d$	$T_p=10.5s$		
	0° N	10° N	20° N
Banchina 23	0.17 ± 0.04	0.11 ± 0.02	0.08 ± 0.02
Banchina 24	0.13 ± 0.05	0.09 ± 0.03	0.07 ± 0.02
Banchina 25	0.12 ± 0.03	0.08 ± 0.02	0.06 ± 0.01
Banchina 26	0.13 ± 0.02	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 27-30	0.12 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.05 ± 0.00

$K_d$	$T_p=12.0s$		
	10° N	20° N	30° N
Banchina 23	0.14 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.08 ± 0.02
Banchina 24	0.11 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.02
Banchina 25	0.10 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 26	0.09 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Banchina 27-30	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.00	0.05 ± 0.00

Le simulazioni effettuate per riprodurre condizioni di onde infragravitiche ( $T_p=30s$ ) rivelano che con onde di provenienza 330°N il coefficiente  $K_d$  per la banchina 23 si è ridotto a 0.33 nelle condizioni di Molo Nord parzialmente demolito. Si osserva invece che sotto l'azione di onde infragravitiche i valori di  $K_d$  aumentano per la banchina 24 ( $K_d=0.38$ ) e per la Banchina Marche ( $K_d=0.33$  per la banchina 26 e  $K_d=0.26$  per le restanti banchine). Dalla Tabella 6.12 alla Tabella 6.14 si riportano i valori dei coefficienti di diffrazione  $K_d$  e del relativo scarto quadratico medio per le tre configurazioni planimetriche delle opere portuali testate per l'onda con  $T_p=30s$ .

Tabella 6. 12 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  con relativi valori dello scarto quadratico medio per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda e  $T_p=30s$ . Configurazione attuale del Molo Nord

$K_d$	$T_p=30s$	
	330° N	0° N
<b>Banchina 23</b>	0.20 ± 0.03	0.11 ± 0.01
<b>Banchina 24</b>	0.23 ± 0.03	0.13 ± 0.02
<b>Banchina 25</b>	0.19 ± 0.04	0.11 ± 0.02
<b>Banchina 26</b>	0.24 ± 0.02	0.14 ± 0.01
<b>Banchina 27-30</b>	0.24 ± 0.01	0.14 ± 0.01

Tabella 6. 13 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  con relativi valori dello scarto quadratico medio per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda e  $T_p=30s$ . Configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m)

$K_d$	$T_p=30s$	
	330° N	0° N
<b>Banchina 23</b>	0.33 ± 0.06	0.18 ± 0.03
<b>Banchina 24</b>	0.38 ± 0.05	0.21 ± 0.03
<b>Banchina 25</b>	0.31 ± 0.06	0.18 ± 0.03
<b>Banchina 26</b>	0.33 ± 0.01	0.18 ± 0.01
<b>Banchina 27-30</b>	0.26 ± 0.01	0.14 ± 0.01

Tabella 6. 14 - Coefficienti di diffrazione  $K_d$  con relativi valori dello scarto quadratico medio per le diverse banchine e direzioni di provenienza dell'onda e  $T_p=30s$ . Configurazione del Molo Nord parzialmente demolito (100m) e diga di sottoflutto parzialmente costruita

$K_d$	$T_p=30s$	
	330° N	0° N
<b>Banchina 23</b>	0.51 ± 0.09	0.23 ± 0.04
<b>Banchina 24</b>	0.57 ± 0.07	0.26 ± 0.03
<b>Banchina 25</b>	0.48 ± 0.09	0.22 ± 0.05
<b>Banchina 26</b>	0.50 ± 0.02	0.24 ± 0.01
<b>Banchina 27-30</b>	0.36 ± 0.02	0.19 ± 0.01

Per un esame più dettagliato delle condizioni ondose si sono costruiti i grafici dalla Figura 6.1 alla Figura 6.6 delle condizioni ondose nella nuova darsena, in cui le altezze significative di ingresso del porto di Ancona sono confrontate, per le diverse direzioni (320°N-10°N), con quelle ottenute dalle simulazioni alla banchina 23 in funzione della frequenza di accadimento e riportati nel paragrafo 3 della presente Relazione.

Dai grafici è possibile ottenere, fissata la direzione di provenienza dell'onda, l'altezza d'onda davanti alla banchina 23 (curva verde) in relazione all'altezza d'onda incidente all'imboccatura (curva rossa), con relativa frequenza di accadimento annuale (espressa in percentuale). Per agevolare la lettura delle figure vengono riportati anche tre riferimenti temporali (curve tratteggiate in grigio) corrispondenti a 2, 3 e 30 giorni all'anno.

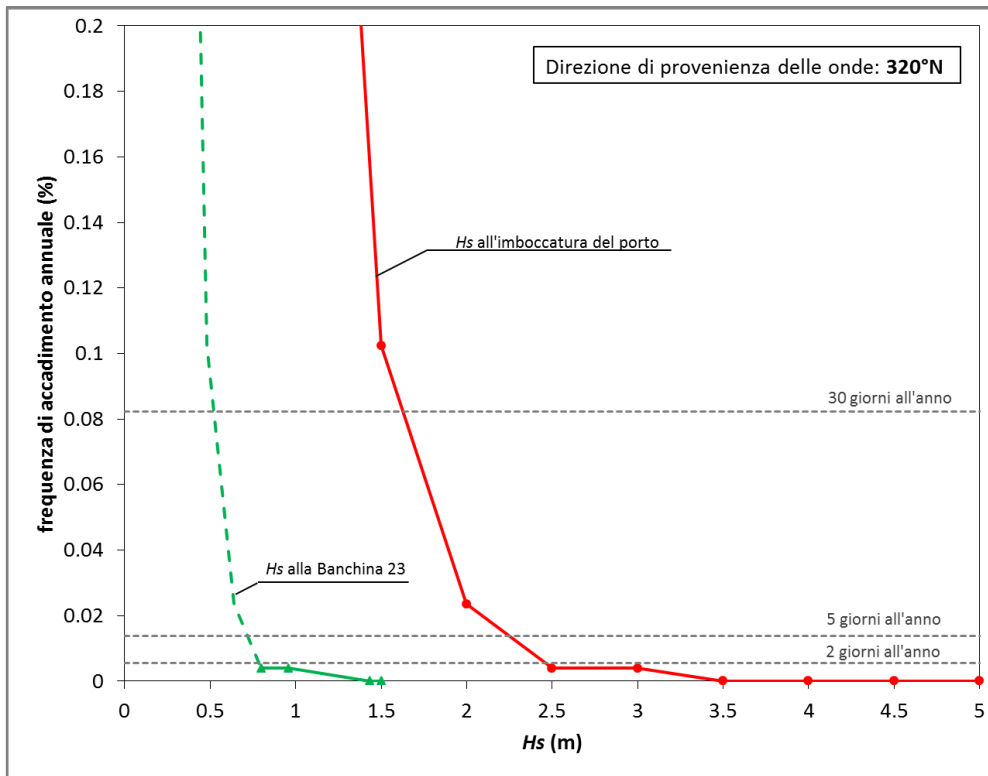


Figura 6.1 – Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa in ingresso del porto (curva rossa) e all'interno del porto nella banchina 23 (curva verde) ottenuta dalle simulazioni di agitazione ondosa interna portuale. Direzione di provenienza delle onde 320°N

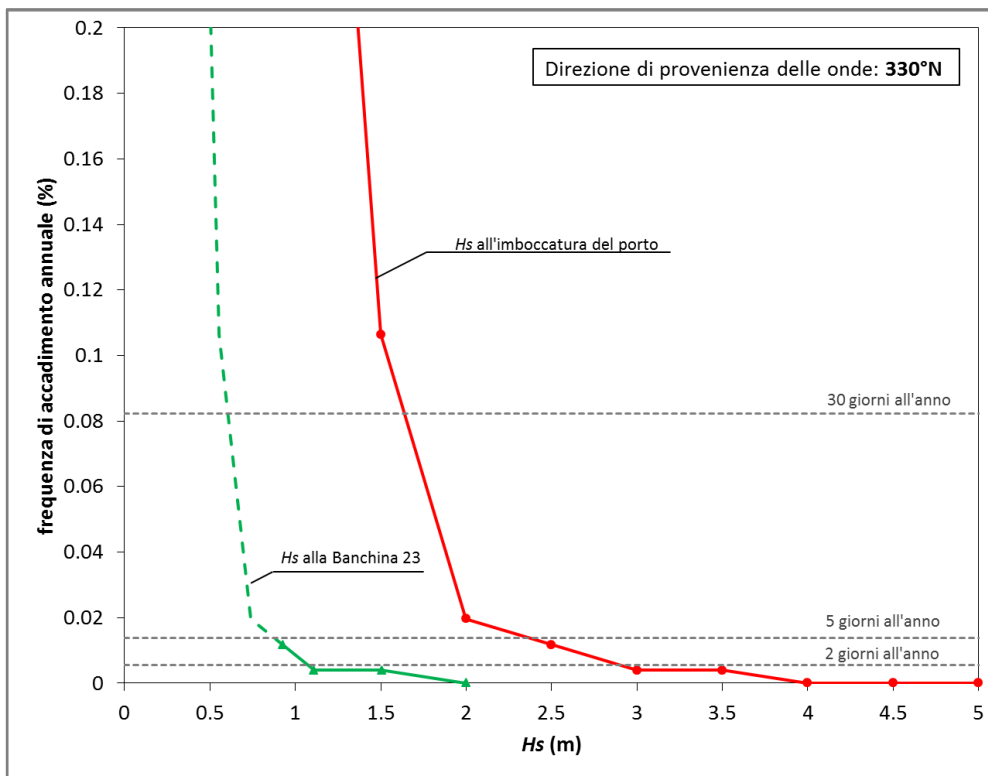


Figura 6.2 – Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa in ingresso del porto (curva rossa) e all'interno del porto nella banchina 23 (curva verde) ottenuta dalle simulazioni di agitazione ondosa interna portuale. Direzione di provenienza delle onde 330°N

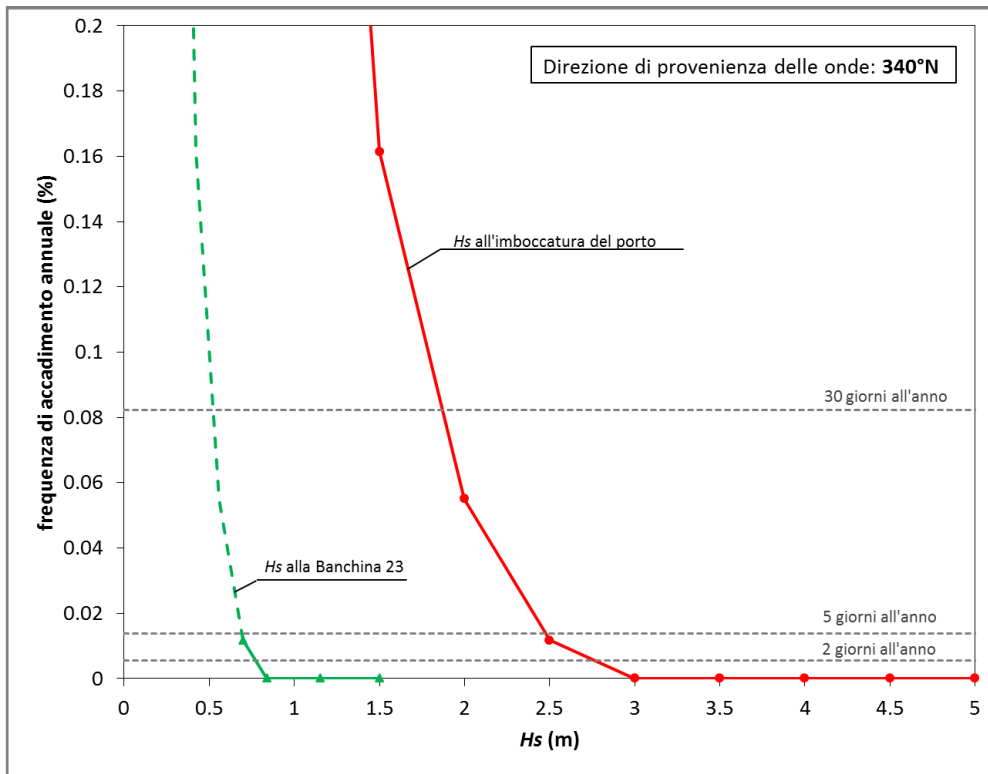


Figura 6.3 – Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa in ingresso del porto (curva rossa) e all'interno del porto nella banchina 23 (curva verde) ottenuta dalle simulazioni di agitazione ondosa interna portuale. Direzione di provenienza delle onde 340°N

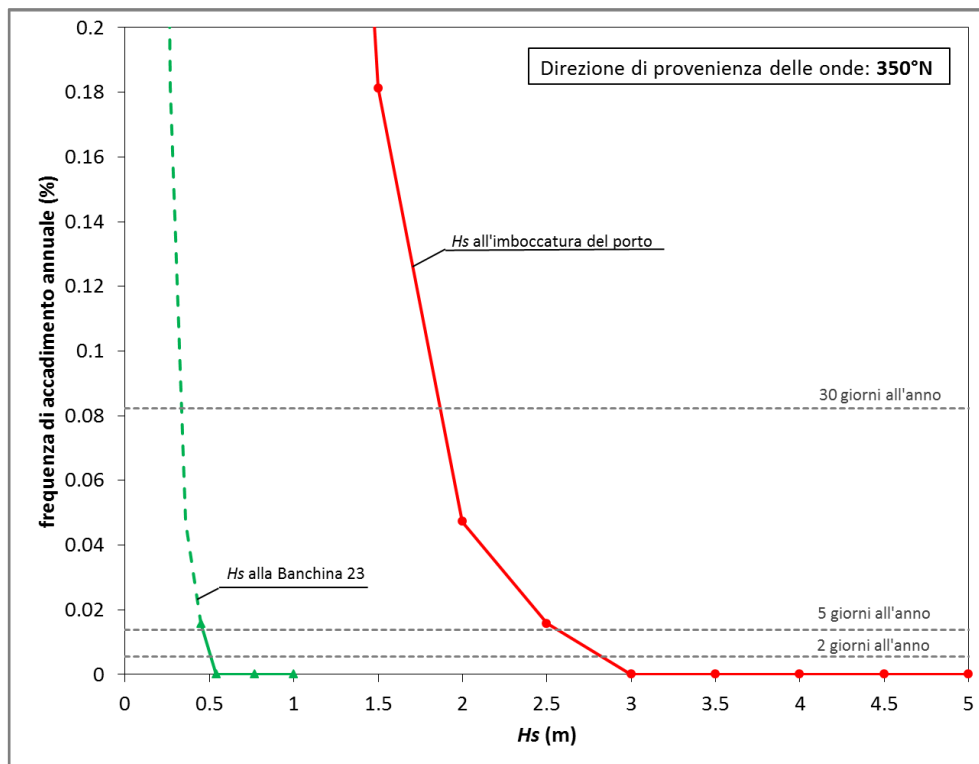


Figura 6.4 – Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa in ingresso del porto (curva rossa) e all'interno del porto nella banchina 23 (curva verde) ottenuta dalle simulazioni di agitazione ondosa interna portuale. Direzione di provenienza delle onde 350°N

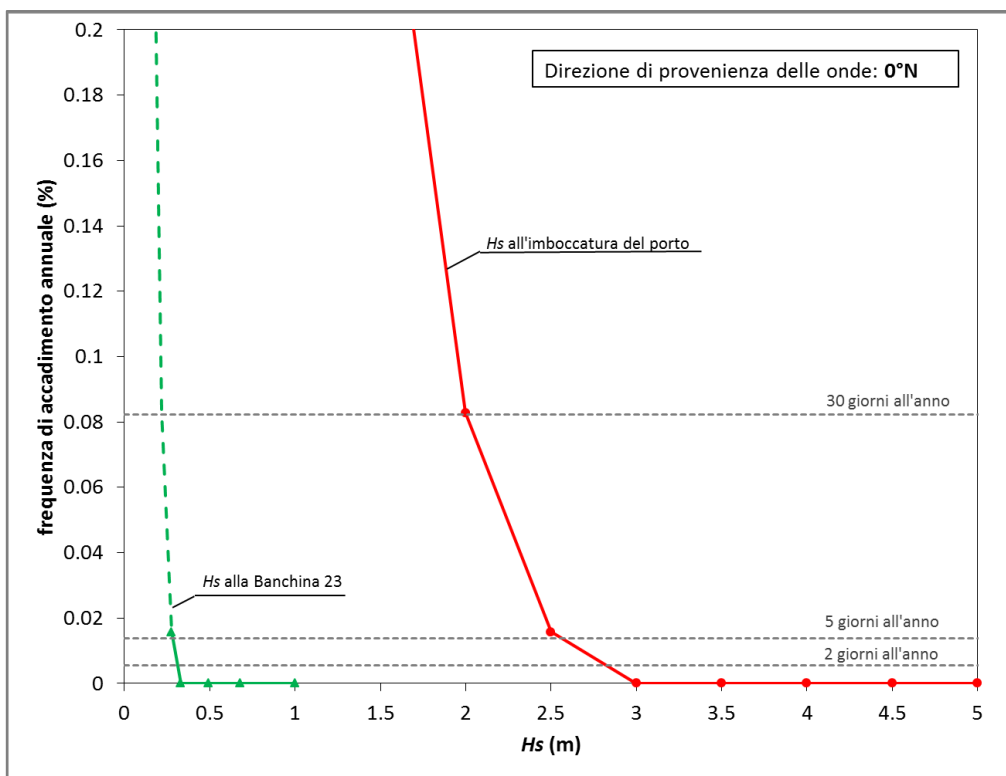


Figura 6.5 – Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa in ingresso del porto (curva rossa) e all'interno del porto nella banchina 23 (curva verde) ottenuta dalle simulazioni di agitazione ondosa interna portuale. Direzione di provenienza delle onde 0°N

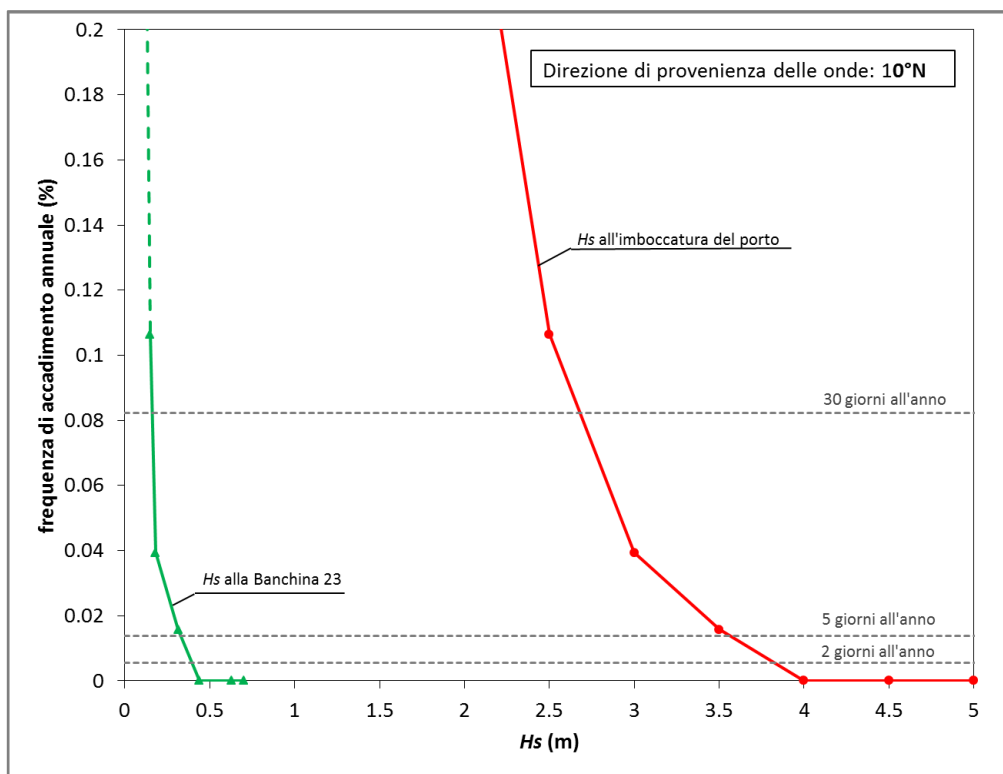


Figura 6.6 – Frequenza di accadimento dell'altezza d'onda significativa in ingresso del porto (curva rossa) e all'interno del porto nella banchina 23 (curva verde) ottenuta dalle simulazioni di agitazione ondosa interna portuale. Direzione di provenienza delle onde 10°N



## **7. CONDIZIONI DI OPERATIVITÀ**

Il movimento delle navi ormeggiate alle banchine portuali dipende dal vento, dalle correnti, dalle onde, dalle sesse, dalle maree, dal passaggio di altre navi e dalle operazioni di movimentazione delle merci. Il moto di una nave ormeggiata alla banchina ha sei gradi di libertà, rendendo di non facile determinazione gli spostamenti e le forze trasmesse ai cavi di ormeggio. Tre gradi di libertà corrispondono alle tre traslazioni (una verticale, due sul piano orizzontale) e tre componenti di rotazione della nave; i modi non sono indipendenti ma sono eccitati in modo accoppiato. Se assumiamo un sistema di riferimento cartesiano con l'asse  $x$  diretto dalla poppa alla prua e passante per il baricentro della nave, l'asse  $y$  sul piano dell'acqua e l'asse  $z$  diretto verso l'alto, possiamo individuare i tre moti di traslazione: longitudinale lungo l'asse delle  $x$  (*surging*) trasversale o di deriva lungo l'asse delle  $y$  (*swaying*) e verticale lungo l'asse delle  $z$  (*heading*). Le tre rotazioni corrispondono al beccheggio, rotazione intorno all'asse delle  $y$  (*pitching*), al rollio, rotazione intorno all'asse  $x$  (*rolling*), imbardata, rotazione intorno all'asse delle  $z$  (*yawing*).

L'ampiezza dei movimenti della nave all'ormeggio, eccitati dalle forzanti naturali sopra richiamate, determinano le condizioni di operatività e di sicurezza all'ormeggio della banchina, che variano in relazione alle dimensioni della nave, dei sistemi utilizzati per l'attracco e per la movimentazione delle merci.

Per una nave porta contenitori le raccomandazioni riassunte nei rapporti dell'AIPCN prevedono ad esempio che le condizioni di piena efficienza delle operazioni di scarico-carico merci (100%) sono ammissibili con spostamenti longitudinali (*surging*) di 1m, trasversali (*swaying*) di 0.6m e verticali (*heading*) di 0.8m e con rotazioni intorno all'asse delle  $z$  (*yawing*) di 1°, rotazioni di beccheggio (*pitching*) sempre di 1° e rotazioni di rollio (*rolling*) sino a 3°.

L'efficienza delle operazioni si riduce al 50% se i parametri sopra riportati passano, rispettivamente a 2m, 1.2m, 1.2m, 1.5°, 2° e 6°.

Nella Tabella 7.1 sono riportati i valori di traslazioni e rotazioni raccomandati.

Superati questi valori si debbono interrompere tutte le operazioni e in caso di crescita ulteriore il Comandante della nave dovrà decidere se disormeggiare la nave. Queste ultime sono condizioni estreme che si raggiungono generalmente con eventi con tempo di ritorno molto elevato se la zona di attracco non è adeguatamente protetta dalle opere portuali.

Nel porto di Ancona i fattori naturali che producono il movimento delle navi all'ormeggio sono essenzialmente solo due, vento e onde, poiché la corrente di circolazione viene

deviata verso il largo dalla diga di sottoflutto, le oscillazioni di marea sono trascurabili e data la forma articolata e con due aperture non vi sono sesse (la verifica è stata effettuata negli studi allegati).

Tabella 7.1 - Valori limite raccomandati per la traslazione e rotazione della nave all'ormeggio

Type de navire	Equipement de manutention	Cavalement (m)	Embarquée (m)	Pilonnement (m)	Lacet (°)	Tangage (°)	Roulis (°)
Bateaux de pêche	Grue monte-charge	0,15	0,15				
	(Dé)chargement vertical	1,0	1,0	0,4	3	3	3
	Pompe aspirante	2,0	1,0				
Caboteurs, nav. charge	Equipement embarqué	1,0	1,2	0,6	1	1	2
	Grue de quai	1,0	1,2	0,8	2	1	3
Ferries, nav. rouliers	Rampe latérale <sup>2</sup>	0,6	0,6	0,6	1	1	2
	Rampe de tempête	0,8	0,6	0,8	1	1	4
	Passerelle	0,4	0,6	0,8	3	2	4
	Rampe ferroviaire	0,1	0,1	0,4	-	1	1
Cargos		2,0	1,5	1,0	3	2	5
Porte-conteneurs	Rendement 100 %	1,0	0,6	0,8	1	1	3
	Rendement 50 %	2,0	1,2	1,2	1,5	2	6
Vraquiers	Grues	2,0	1,0	1,0	2	2	6
	Monte-charge / rotopelle	1,0	0,5	1,0	2	2	2
	Courroie transporteuse	5,0	2,5		3		
Pétrolier	Bras de chargement	3,0 <sup>3</sup>	3,0				
Méthanier	Bras de chargement	2,0	2,0		2	2	2

## 7.1 Vento

Per quanto riguarda i limiti del vento da cui dipendono le attività in banchina, poiché condizionano l'operatività dei mezzi, tenendo conto della movimentazione dei contenitori, in letteratura sono riportate le seguenti indicazioni (dove  $v$  è la velocità del vento):

- condizioni di operatività normale  $v < 65 \text{ km/h}$  (18.0m/s)
- stato di allerta  $v \geq 65 \text{ km/h}$  (18.0m/s)  
(si bloccano le operazioni di carico e scarico dei contenitori vuoti, si movimentano solo quelli pieni)
- stato di preallarme  $v \geq 72 \text{ km/h}$  (20.0m/s)  
(si movimentano solo contenitori pieni)
- stato di allarme  $v \geq 80 \text{ km/h}$  (22.2m/s)  
(fermo operativo totale)

Gli stessi criteri valgono anche per le operazioni di movimentazione dei contenitori nei piazzali.

I porti con grandi movimentazioni si dotano di sistemi di allarme basati su reti di anemometri che misurano la velocità del vento che è un moto molto variabile nello spazio e nel tempo e richiede quindi delle procedure di misura appropriate.

Gli operatori di Ancona hanno confermato i dati sopra riportati:

*Ancona Merci:*

portainer: a 60km/h un allarme acustico avvisa l'operatore di mettere in sicurezza il carico e se stesso, a 70km/h si blocca;

semovente: a 80km/h un allarme acustico avvisa l'operatore di mettere in sicurezza il carico e se stesso, non si blocca mai.

*ACT:*

semovente: a 24.4m/s (circa 90 km/h) un allarme acustico avvisa l'operatore di mettere in sicurezza il carico e se stesso, non si blocca mai.

Le condizioni di blocco dell'operatività del porto per il raggiungimento dei limiti di velocità sono di solito più gravose del moto ondoso che viene attenuato dalle opere foranee.

## **7.2 Onde**

Il moto delle navi ormeggiate si incrementa proporzionalmente con l'altezza d'onda, ma è anche fortemente condizionato dal periodo dell'onda: le onde di lungo periodo producono moti superiori alle onde di breve periodo (onde da vento), sebbene siano molto condizionanti le dimensioni delle navi, sia le caratteristiche dei sistemi di ormeggio (elasticità dei cavi). I cavi di ormeggio si oppongono in modo efficiente ai movimenti longitudinali e trasversali ed insieme ai *fenders* al movimento di rollio. Possono contribuire ad allungare i periodi di risonanza dei moti longitudinali e trasversali e di rotazione intorno all'asse z, questi moti presentano spettri con frequenze nel campo delle onde lunghe (inferiori a 0.05Hz). Lo studio delle onde lunghe è quindi importante poiché in condizioni di risonanza alcuni movimenti della nave possono essere amplificati.

La procedura di verifica effettuata nel presente studio è stata quindi la seguente:

- 1) determinazione delle altezze d'onda per onde di 7.5s, 9.0s, 10.5s, 12.0s per le direzioni di provenienza comprese nelle traversie secondarie e principale nelle condizione di Molo Nord attuale e parzialmente demolito;

- 2) determinazione delle possibili onde lunghe che possano mettere in crisi gli ormeggi alla nuova darsena e nella nuova banchina rettilinea (confronto dei risultati);
- 3) studio delle condizioni di operatività delle banchine sia in condizioni medie che estreme.

Lo studio dei casi descritti al punto 1) sono riportati nei capitoli 5 e 6 della presente relazione.

### 7.2.1. Onde lunghe

Trascurando le onde di marea e gli tsunami, poco probabili nell'Adriatico centrale, lo studio si focalizza sulle onde lunghe chiamate infragravitative o *surf beat* che hanno frequenze tipiche di 0.004-0.04Hz e ampiezze di pochi cm al largo, ma che può aumentare avvicinandosi verso costa.

Le onde infragravitative sono associate al moto dei gruppi di onde (sia di tipo "*wind sea*" che "*swell*") che a causa delle interazioni non lineari di due o più onde corte (dette primarie) con frequenze diverse, eccitano subarmoniche dette forzate o legate che si muovono con il gruppo con una differenza di fasi di 180° con l'involuppo del gruppo. L'energia delle onde legate cresce con l'altezza delle onde primarie e con la riduzione delle profondità. I possibili meccanismi di generazione delle onde lunghe vicino alla costa studiati in letteratura sono in realtà di tre tipi:

- Rilascio delle onde legate (subarmoniche);
- Posizione variabile del punto di frangimento;
- Persistenza dei gruppi nella zona dei frangenti che causano sollevamento e abbassamenti delle masse d'acqua sulla linea di costa.

Anche se esistono modelli in grado di contenere tutti i meccanismi di generazione, molti autori hanno evidenziato che la sorgente maggiore per la generazione di onde infragravitative sia il primo.

In acque basse le onde legate non sono distrutte, ma sono rilasciate come onde libere, chiamate anche *surf beat* che vengono riflesse dalla costa e si propagano verso il largo o rimangono intrappolate sulla costa in forma di *edge waves*.

Bowers (1992) ha fornito due formule per determinare l'altezza di un'onda legata prodotta da uno spettro unidirezionale ( $H_u$ ) e l'altezza di un *surf beat* ( $H'$ ).

Nel primo caso si ha:

$$H_u = 0.074 \frac{H_s^2 T_p^2}{h^2},$$

nel secondo

$$H' = k \frac{H_s^{1.11} T_p^{1.25}}{h^{0.25}}, \quad k \cong 0.0041 - 0.0066,$$

dove  $H_s$  è l'altezza significativa associata ad uno spettro monodirezionale con periodo di picco  $T_p$ ,  $h$  è la profondità.

Utilizzando i valori di altezza d'onda significativa nel paraggio di Ancona si ottengono i valori seguenti:  $H_u=0.31\text{m}$  e  $H'=0.19\text{m}$ , considerando che l'imboccatura del porto è posto ad una profondità  $h$  di 14m e assumendo il coefficiente  $k$  pari a 0.0066 (valore cautelativo). Per considerare un possibile periodo da associare a queste altezze, in mancanza di qualsiasi misura o dato sperimentale, si è valutato il periodo di oscillazione per la nuova darsena che ha una forma rettangolare, e quindi soggetta ad onde di tipo stazionario con periodi che possono entrare in risonanza con quelli delle onde lunghe. Il problema non riguarda la banchina rettilinea (dalla banchina 26 alla 30) che si trova in un bacino aperto e che ha di fronte la diga di sottoflutto realizzata in gettata di massi, essendo quindi in grado di dissipare quasi interamente le onde incidenti, di conseguenza annullando quasi totalmente la riflessione.

La nuova darsena con le banchine 23, 24 e 25, ha dimensioni di 150mx250m ed una profondità di 11m. Le oscillazioni longitudinali e trasversali sono attutite in parte dalle camerette di dissipazione, le quali sono però poco efficienti nei confronti di onde di lungo periodo.

Per calcolare i periodi propri di oscillazione nelle direzioni longitudinale e trasversale, si adotta la formula:

$$T_n = \frac{4L}{(1 + 2n)\sqrt{gh}} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Nel lato di 150m i due modi principali hanno periodi di  $T_0=29.0\text{s}$  e  $T_1=14.5\text{s}$ ; nel lato dei 250m i due periodi di oscillazione sono pari a  $T_0=96.0\text{s}$  e  $T_1=32.0\text{s}$ .

Tali valori sono indicativi, poiché non tengono conto delle perdite di carico concentrate e distribuite che accompagnano il moto delle onde.

Nelle simulazioni numeriche sono stati quindi provati i periodi di 12s e 30s che possono rappresentare le oscillazioni più pericolose per le navi ormeggiate.

I grafici riportati dalla *Figura 6.1* alla *Figura 6.6* evidenziano che se assumessimo come limite di operatività al 50% per la banchina 23, che risulta essere la più esposta alle condizioni ondose di traversie secondaria dalla demolizione del Molo Nord, si otterrebbe

che il limite di altezza d'onda di 1.2m sarebbe superato per circa 2 giorni nell'anno medio con un valore massimo dell'altezza pari a 1.5m-1.7m. Senza la demolizione del Molo Nord, l'altezza massima raggiungibile alla banchina 23 sarebbe di 0.8m e l'altezza di 0.7m è superata per 1.4 giorni all'anno.

## **CONCLUSIONI**

Lo studio ha preso in esame le condizioni di agitazione ondosa all'interno del porto di Ancona nelle seguenti condizioni planimetriche corrispondenti alle fasi realizzative delle opere foranee:

1. Configurazione con completa realizzazione delle opere della soluzione D prevista dagli studi allegati al P.R.P.;
2. Configurazione con completa realizzazione delle diga di sopraflutto e sottoflutto previste dagli studi allegati al P.R.P. (soluzione D) e parziale demolizione (100m) del Molo Nord attuale;
3. Configurazione con completa realizzazione delle diga di sopraflutto e parziale realizzazione della diga di sottoflutto, (assenza del tratto inclinato rispetto all'asse della diga previsto per deviare la corrente e quindi il trasporto dei sedimenti verso il largo) previsto nella soluzione D e parziale demolizione (100m) del Molo Nord attuale.

Le due configurazioni 1) e 2) sono accoppiate al Molo Nord nella dimensione attuale e Molo Nord parzialmente demolito per agevolare e ridurre i tempi di manovra delle navi in ingresso e uscita dal porto.

Tutte le configurazioni sono state provate con onde incidenti di periodo di picco di 7.5s, 9.0s, 10.5s, 12.0s e 30s formando uno spettro di indagine molto ampio considerando che le direzioni di provenienza sono state suddivise in settori di 10° a partire dalla direzione 320°N fino a 30°N.

Nelle direzioni del I quadrante le simulazioni sono state interrotte a 30°N (per le onde più lunghe), poiché i valori del coefficiente di diffrazione e quindi dell'altezza d'onda significativa all'interno del porto erano già trascurabili alle banchine della Nuova Darsena e della Banchina Marche, e tenendo conto di direzioni maggiormente inclinate (>30°N) rispetto alla nuova imboccatura i valori sarebbero ulteriormente diminuiti.

La conclusione principale è che la nuova imboccatura permette di disporre di un ampio bacino di manovra (avamposto) in grado di far transitare navi sino ai 300-320m di lunghezza, il molo di sopraflutto e di sottoflutto forniscono, nella configurazione finale, una completa copertura delle onde della traversia principale (bora-greco, levante-scirocco),

riducendo le altezze d'onda in prossimità della banchina 23 a valori inferiori a 0.8m per tutti i giorni dell'anno, anche con la demolizione del Molo Nord di 100m, garantendo l'operatività al 100% per queste direzioni di provenienza del moto ondoso, salvo raggiungere i limiti per velocità massima del vento.

La demolizione del Molo Nord ha per la Banchina Marche un effetto positivo e le altezze d'onda risultano inferiori rispetto alla condizione di Molo Nord allo stato attuale per le direzioni di provenienza della traversia principale.

Per quanto riguarda le ondazioni secondarie rispetto a cui è posizionato l'asse della nuova imboccatura va osservato che la demolizione parziale del Molo Nord produce un lieve aumento dell'agitazione ondosa alla Nuova Darsena (le condizioni alla Banchina Marche migliorano con la demolizione del Molo Nord), che rimane comunque al di sotto dei valori accettabili. Alla banchina 23 il limite di altezza d'onda di 1.2m (che corrisponde alla operatività al 50% per movimentazione dei contenitori) verrebbe superato in media per 2 giorni all'anno ed il valore massimo dell'altezza d'onda sarebbe pari a 1.5m-1.7m. In queste ultime condizioni estreme il limite di operatività sarebbe comunque raggiunto prima per eccesso di velocità del vento.

La costruzione dell'ultimo tratto di diga sottoflutto può essere programmata secondo la disponibilità finanziaria poiché l'influenza sull'agitazione interna è minima, mentre è fondamentale la sua costruzione per far deviare la corrente di circolazione ed i sedimenti in sospensione verso il largo.

La configurazione planimetrica del porto non produce fenomeni di risonanza pericolosi per la presenza di eventuali onde lunghe, che presentano comunque altezza trascurabili.

Il miglioramento della manovrabilità delle navi con la parziale demolizione del Molo Nord aumenterebbe la sicurezza e ridurrebbe i tempi di sosta senza penalizzare l'operatività del porto.