



COMUNE DI CASTIGLIONE DELLA PESCAIA



**MARINA DI PUNTA ALA S.P.A.**  
 LOCALITA' IL PORTO SNC  
 PUNTA ALA - CASTIGLIONE DELLA PESCAIA (GR)  
 42°48',48 N - 10°44',22 E

# AMPLIAMENTO DEL PORTO TURISTICO DI PUNTA ALA STRALCIO FUNZIONALE OPERE CIVILI MARITTIME

## B.06

### PROGETTO DEFINITIVO

RILIEVI, INDAGINI E STUDI SPECIALISTICI

AGITAZIONE ONDOSA

20 012 DR B 006 0

Committente

Marina di Punta Ala S.p.a.  
 sede legale:  
 Castiglione della Pescaia (GR)  
 Loc. Il Porto - Punta Ala

Progettazione opere marittime:

  
 MODIMAR s.r.l. Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA  
 06.3269461 - www.modimar.it

  
 Modimar Project S.r.l.  
 Via Asmara 72 - 00199 Roma

Progettazione:

Ing. Marco TARTAGLINI  
 Ing. Marco DEL BIANCO  
 Ing. Andrea SANZONE

ELABORATO REDATTO DA:  
 A-MARE

Gruppo di lavoro:

Ing. Alessio CAMUSI  
 Ing. Valerio TRULLI  
 Dott.ssa Sara SCRIMIERI

 **AM3 SPIN-OFF**  
 ADVANCED MODELS AND METHODS  
 IN MARITIME ENGINEERING

Consulenza geotecnica:

AGiS Ingegneria s.r.l.  
 Ing. Giuseppe IORIO



UNIVERSITÀ  
 DEGLI STUDI  
 FIRENZE  
**DICEA**  
 DIPARTIMENTO  
 DI INGEGNERIA CIVILE  
 E AMBIENTALE

**A-MARE**  
 ACQUE MARE AMBIENTE ENERGIA  
 Laboratorio Congiunto

05.04.2024	0	EMISSIONE	AM3 Spin Off	M.T.	
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:



**AM3 SPIN-OFF**  
ADVANCED MODELS AND METHODS  
IN MARITIME ENGINEERING



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE  
**SPIN-OFF APPROVATO**

MARINA DI  PUNTA ALA

STUDIO SULL'AGITAZIONE  
INTERNA DEL PORTO  
A SEGUITO DELLA NUOVA  
CONFIGURAZIONE DELLE OPERE  
PREVISTE PER L'AMPLIAMENTO DEL  
MARINA DI PUNTA ALA

**INTEGRAZIONE RELAZIONE DEL 25.02.15**  
**CAP. 3 AGITAZIONE ONDOSA INTERNA**  
**AL PORTO**

**AM3 SPIN-OFF s.r.l.**  
SPIN-OFF ACCADEMICO  
DELL' UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI FIRENZE

am3.unifi.spinoff@gmail.com  
www.am3spinoff.com

Via Madonna del Piano, 6  
50019 Sesto Fiorentino (FI)  
P. IVA / C.F. 06375900484

**AM3 Spin-off s.r.l.**

*Advanced Models and Methods in Maritime Engineering*

Via Madonna del Piano, 6  
50019 Sesto Fiorentino (FI)  
P.IVA 06375900484 REA FI 623251

**Firenze, 07/05/2019**

## INDICE

---

Premessa al presente lavoro.....	6
3. Agitazione ondosa interna al porto .....	7
3.1. MODELLO DI BOUSSINESQ.....	7
3.1.1. <i>Impostazioni del modello</i> .....	7
3.2. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI RELATIVE ALLE CONDIZIONI DI COMFORT .....	15
3.2.1. <i>Prima ipotesi di progetto</i> .....	16
3.2.1. <i>Seconda ipotesi di progetto</i> .....	18
3.2.1. <i>Terza ipotesi di progetto</i> .....	19
3.3. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI RELATIVE ALLE CONDIZIONI DI SICUREZZA .....	20
3.3.1. <i>Prima ipotesi di progetto</i> .....	20
3.3.2. <i>Seconda ipotesi di progetto</i> .....	22
3.3.3. <i>Terza ipotesi di progetto</i> .....	24
3.4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI RELATIVE ALLE CONDIZIONI LIMITE .....	26
3.4.1. <i>Prima ipotesi di progetto</i> .....	27
3.4.2. <i>Seconda ipotesi di progetto</i> .....	29
3.4.3. <i>Terza ipotesi di progetto</i> .....	31
3.5. CONFRONTO DEI RISULTATI FRA LE TRE IPOTESI DI PROGETTO .....	33
3.6. ONDE DA GRECALE .....	37
3.6.1. <i>Impostazioni del modello</i> .....	37
3.6.2. <i>Risultati delle simulazioni relative alle condizioni di sicurezza</i> .....	40
3.6.3. <i>Risultati delle simulazioni relative alle condizioni limite</i> .....	43
Conclusioni.....	46
Riferimenti bibliografici .....	48



## INDICE DELLE FIGURE

---

Figura 1 - Fondali di progetto dei bacini interni, forniti dal Committente. .... 8

Figura 2 - Fondali forniti dal Committente, da filo banchina fino a 1.80m da essa alla profondità di -2.10 e loro raccordo per mezzo di una scogliera con pendenza 1:2 con il fondale esistente. Ricci di testata rappresentati in ciano in Fig.1..... 9

Figura 3 - Fondali forniti dal Committente, da filo banchina fino a 1.80m da essa alla profondità di -4.0m e loro raccordo per mezzo di una scogliera con pendenza 3:4 fino al fondale esistente o di progetto. Opere interne al porto rappresentate in arancione in Fig.1. 9

Figura 4 - Fondali forniti dal Committente, da filo banchina sul fondale di progetto, senza scogliera a protezione del piede della banchina. Opere interne al porto rappresentate in verde in Fig.1..... 9

Figura 5 - Mappa dei punti utilizzati per la costruzione dei modelli digitali dei fondali (dati da Carta Nautica e rilievo di dettaglio) ..... 10

Figura 6 – Batimetria Griglia 250°N. .... 11

Figura 7 – Batimetria Griglia 300°N. .... 11

Figura 8 – Starti assorbenti utilizzati per la griglia: a) 250°N e b) 300°N. .... 12

Figura 9 – Linea di generazione (linea blu): a) 250°N e b) 300°N. .... 13

Figura 10 – Ipotesi di progetto delle opere interne al bacino portuale e coefficienti di riflessione indicati dal Committente..... 14

Figura 12 – Andamento della superficie del mare: onda 1, griglia 250°N, prima ipotesi di progetto. .... 16

Figura 13 – Andamento della superficie del mare: onda 4, griglia 300°N, prima ipotesi di progetto. .... 16

Figura 14 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 1 (Hs=1.2m, Tp=7.7s, Dir=260°N), griglia 250°N, prima ipotesi di progetto. .... 17

Figura 15 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 4 (Hs=0.7m, Tp=5.4s, Dir=300°N), griglia 300°N, prima ipotesi di progetto. .... 17

Figura 16 – Andamento della superficie del mare: onda 1 (Hs=1.2m, Tp=7.7s, Dir=260°N), griglia 250°N, seconda ipotesi di progetto..... 18

Figura 17 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 1 (Hs=1.2m, Tp=7.7s, Dir=260°N), griglia 250°N, seconda ipotesi di progetto. .... 18

Figura 18 – Andamento della superficie del mare: onda 1 (Hs=1.2m, Tp=7.7s, Dir=260°N), griglia 250°N, terza ipotesi di progetto. .... 19

Figura 19 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 1(Hs=1.2m, Tp=7.7s, Dir=260°N), griglia 250°N, terza ipotesi di progetto. .... 19





Figura 20 – Andamento della superficie del mare: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , prima ipotesi di progetto. .... 20

Figura 21 – Andamento della superficie del mare: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , prima ipotesi di progetto. .... 21

Figura 22 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , prima ipotesi di progetto. .... 21

Figura 23 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , prima ipotesi di progetto. .... 22

Figura 24 – Andamento della superficie del mare: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto. .... 22

Figura 25 – Andamento della superficie del mare: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto. .... 23

Figura 26 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto. .... 23

Figura 27 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto. .... 24

Figura 28 – Andamento della superficie del mare: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , terza ipotesi di progetto. .... 24

Figura 29 – Andamento della superficie del mare: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , terza ipotesi di progetto. .... 25

Figura 30 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , terza ipotesi di progetto. .... 25

Figura 31 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , terza ipotesi di progetto. .... 26

Figura 32 – Andamento della superficie del mare: onda 3, griglia  $250^\circ N$  ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), prima ipotesi di progetto. .... 27

Figura 33 – Andamento della superficie del mare: onda 6 ( $H_s=4.4m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=303^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , prima ipotesi di progetto. .... 27

Figura 34 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 3 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , prima ipotesi di progetto. .... 28

Figura 35 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 6 ( $H_s=4.4m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=303^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , prima ipotesi di progetto. .... 28

Figura 36 – Andamento della superficie del mare: onda 3 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto. .... 29

Figura 37 – Andamento della superficie del mare: onda 6 ( $H_s=4.4m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=303^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto. .... 29

Figura 38 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 3 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto. .... 30



Figura 39 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 6 (Hs=4.4m, Tp=9.0s, Dir=303°N), griglia 300°N, seconda ipotesi di progetto. .... 30

Figura 40 – Andamento della superficie del mare: onda 3 (Hs=3.3m, Tp=9.2s, Dir=256°N), griglia 250°N, terza ipotesi di progetto. .... 31

Figura 41 – Andamento della superficie del mare: onda 6 (Hs=4.4m, Tp=9.0s, Dir=303°N), griglia 300°N, terza ipotesi di progetto. .... 31

Figura 42 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 3 (Hs=3.3m, Tp=9.2s, Dir=256°N), griglia 250°N, terza ipotesi di progetto. .... 32

Figura 43 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 6 (Hs=4.4m, Tp=9.0s, Dir=303°N), griglia 300°N, terza ipotesi di progetto. .... 32

Figura 44 – Localizzazione dei punti analizzati. .... 33

Figura 45 – Confronto dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni di comfort. .... 34

Figura 46 – Analisi comparativa dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni di sicurezza. Tabella 9 – Valore dell'altezza d'onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell'AIPCN per le condizioni limite)..... 35

Figura 47 – Analisi comparativa dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni limite. .... 36

Figura 48 - Mappa dei punti utilizzati per la costruzione dei modelli digitali dei fondali..... 37 e griglia di calcolo..... 37

Figura 49 – Batimetria griglia 45°N..... 38

Figura 50 – Strati assorbenti griglia 45°N e linea di generazione..... 38

Figura 51 – Mappa dei coefficienti di porosità nella prima ipotesi di progetto, griglia 45°N. 39

Figura 52 – Andamento della superficie del mare: onda 8 (Hs=0.6m, Tp=5s, Dir=45°N), griglia 45°N: a) Ipotesi 1, b) Ipotesi 2 e c) Ipotesi 3..... 40

Figura 53 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 8 (Hs=0.6m, Tp=5s, Dir=45°N), griglia 45°N a) Ipotesi 1, b) Ipotesi 2 e c) Ipotesi 3. .... 41

Figura 54 – Analisi comparativa dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni di sicurezza. .... 42

Figura 55 – Andamento della superficie del mare: onda 7 (Hs=1.0m, Tp=5s, Dir=45°N), griglia 45°N: a) Ipotesi 1, b) Ipotesi 2 e c) Ipotesi 3..... 43

Figura 56 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 7 (Hs=1.0m, Tp=5s, Dir=45°N), griglia 45°N a) Ipotesi 1, b) Ipotesi 2 e c) Ipotesi 3. .... 44

Figura 57 – Analisi comparativa dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni limite. .... 45

## INDICE DELLE TABELLE

---

Tabella 1 – Caratteristiche griglia di calcolo utilizzate .....	10
Tabella 2 – Parametri caratteristici delle onde incidenti: valori estratti dalle simulazioni numeriche e relativi ai fondali di 20m antistanti l’area portuale. ....	13
Tabella 3 – Caratteristiche delle onde considerate nello studio dell’agitazione ondosa relative alla condizione di comfort. ....	15
Tabella 4 – Caratteristiche delle onde considerate nello studio dell’agitazione ondosa relative alla condizione di sicurezza. ....	20
Tabella 5 – Caratteristiche delle onde considerate nello studio dell’agitazione ondosa relative alla condizione limite.....	26
Tabella 6 – Coordinate dei punti estratti .....	33
Tabella 7 – Valore dell’altezza d’onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell’AIPCN per le condizioni di comfort).....	34
Tabella 8 – Valore dell’altezza d’onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell’AIPCN per le condizioni di sicurezza).....	35
Tabella 10 - Parametri caratteristici delle onde da vento selezionate .....	37
Tabella 11 – Caratteristiche della griglia di calcolo utilizzata.....	37
Tabella 12 – Valore dell’altezza d’onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell’AIPCN per le condizioni di sicurezza) .....	42
Tabella 13 – Valore dell’altezza d’onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell’AIPCN per le condizioni limite).....	45

## PREMESSA AL PRESENTE LAVORO

---

Con determina del 29.09.2019 la Marina di Punta Ala S.p.A. ha incaricato la società AM3 Spin-off s.r.l. (nel seguito detta AM3) della redazione dello Studio di agitazione interna a seguito della definizione competa delle nuove opere per l'ampliamento del Porto Turistico di Punta Ala. Sono state analizzate tre diverse ipotesi progettuali, riguardanti le tipologie costruttive delle banchine interne. Il suddetto studio si pone, ad integrazione del precedente "Studio meteomarinico e studio numerico dell'interazione tra le nuove opere previste per l'ampliamento del Marina di Punta Ala e le dinamiche marine", redatto da AM3 nel 2014.

L'obiettivo principale del presente lavoro è quello di eseguire tale valutazione integrativa con le stesse modalità di cui al Capitolo 3 del documento del 2014, senza ripetere gli studi di cui ai Capitoli 1, 2, 4 e 5 dello stesso documento.

Per l'esecuzione di quanto richiesto il Committente ha messo a disposizione, la planimetria del porto a seguito dell'ampliamento ed alcune sezioni tipo esplicative, le quali riportano:

- Tipologia delle opere esterne e delle banchine interne, evidenziando le scogliere in massi naturali, cassoni in calcestruzzo armato e blocchi artificiali sovrapposti in calcestruzzo non armato;
- I fondali di progetto dei bacini interni;
- I fondali filo banchina ed il loro raccordo con i fondali di progetto.
- 

La metodologia di lavoro è suddivisa nelle fasi seguenti:

1. implementazione del modello di simulazione numerica ed inserimento della geometria modificata del porto;
2. conduzione delle simulazioni sui tre diversi stati di progetto con 8 diversi attacchi ondososi per ciascuna configurazione per un totale di 24 simulazioni;
3. analisi dei dati e redazione del rapporto dello studio numerico.

Tutte le fasi sono state concertate di continuo con il Committente.

Questa relazione costituisce l'elaborato tecnico finale descrittivo dello studio condotto.

## 3. AGITAZIONE ONDOSA INTERNA AL PORTO

---

Come per il precedente studio redatto nel 2014 la simulazione dell'agitazione interna al porto è stata eseguita tramite il modulo Boussinesq Waves (BW) del codice di calcolo MIKE21, che consente di stimare i valori di altezza in tutti i punti del dominio di calcolo nonché di valutare i relativi coefficienti di disturbo in relazione alle diverse tipologie costruttive delle banchine interne in esame.

### 3.1. MODELLO DI BOUSSINESQ

Il modello MIKE21 BW è basato sulla soluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq in due dimensioni attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni differenziali sono discretizzate su una griglia staggered rettangolare. Le equazioni sono risolte in una o due dimensioni in termini di superficie libera e velocità di corrente mediate lungo la verticale. Il modello è in grado di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti, quali shoaling, rifrazione, diffrazione e riflessione e inoltre include i termini non lineari e la dispersione in frequenza. MIKE21 BW può tenere in conto della porosità per la simulazione della riflessione parziale ed è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia dell'onda (ad esempio un contorno off-shore o una spiaggia). L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può avvenire direttamente da linee di generazione interne.

Il principale campo di applicazione di questo modello è l'analisi delle dinamiche del moto ondoso nei porti e nelle aree costiere in genere. L'output principale è il campo di agitazione residua (wave disturbance), che è la variabile di riferimento più importante per la progettazione di un porto in fase di definizione del layout ottimale.

#### 3.1.1. Impostazioni del modello

I dati batimetrici sono stati elaborati con il programma "batimetry editor" del sistema MIKE21. Inoltre, sia la geometria modificata del porto che le batimetrie interne e fronte mare, sono state integrate ed implementate tenendo conto delle planimetrie fornite dal Committente.

In particolare, sono stati digitalizzati i fondali di progetto dei bacini interni al porto (Figura 1) ed i fondali filo banchina ed il loro raccordo con i fondali di progetto e/o esistenti (Figura 2, Figura 3 e Figura 4).



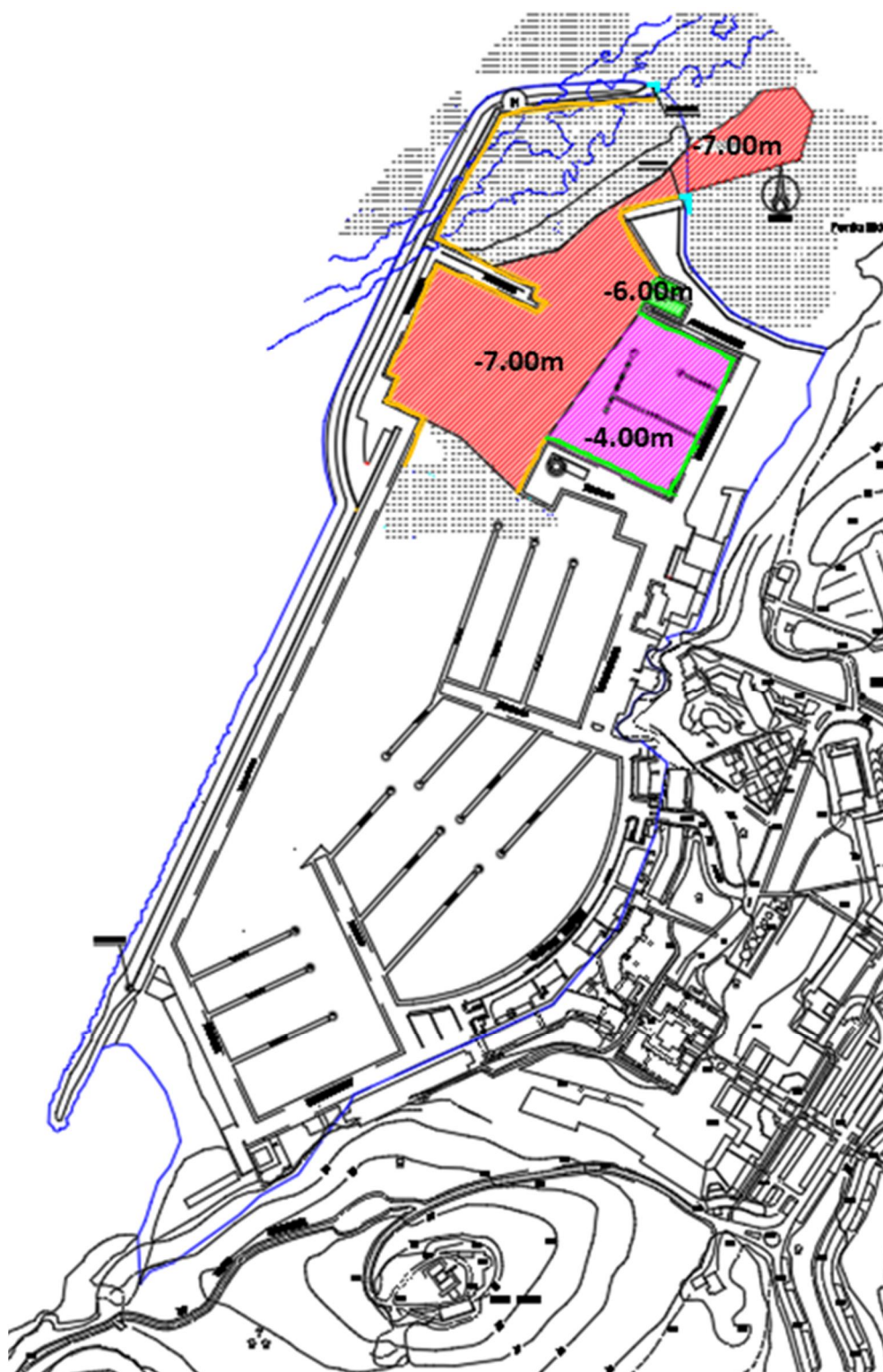


Figura 1 - Fondali di progetto dei bacini interni, forniti dal Committente.

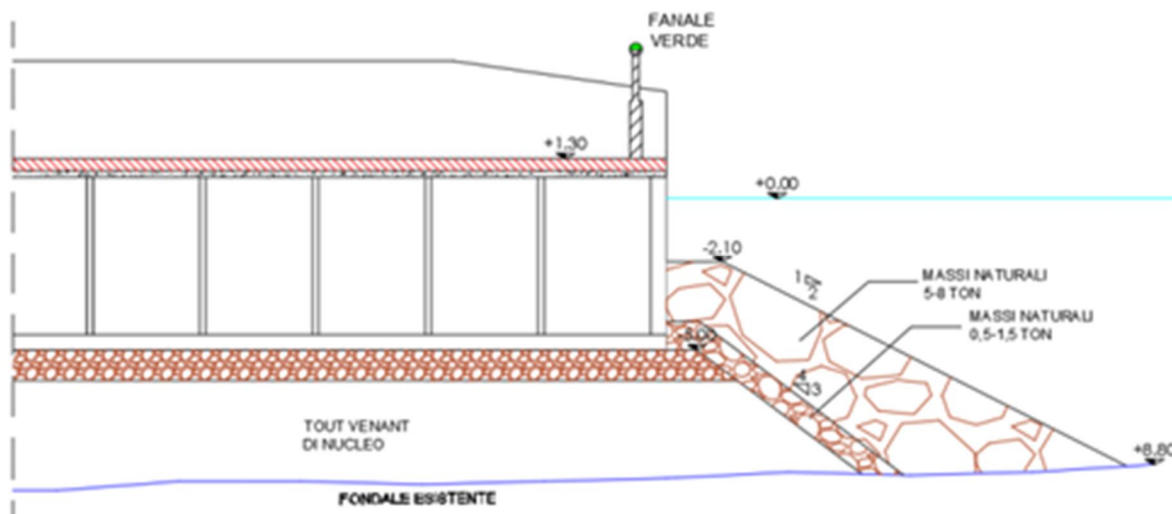


Figura 2 - Fondali forniti dal Committente, da filo banchina fino a 1.80m da essa alla profondità di - 2.10 e loro raccordo per mezzo di una scogliera con pendenza 1:2 con il fondale esistente. Ricci di testata rappresentati in ciano in Fig.1.

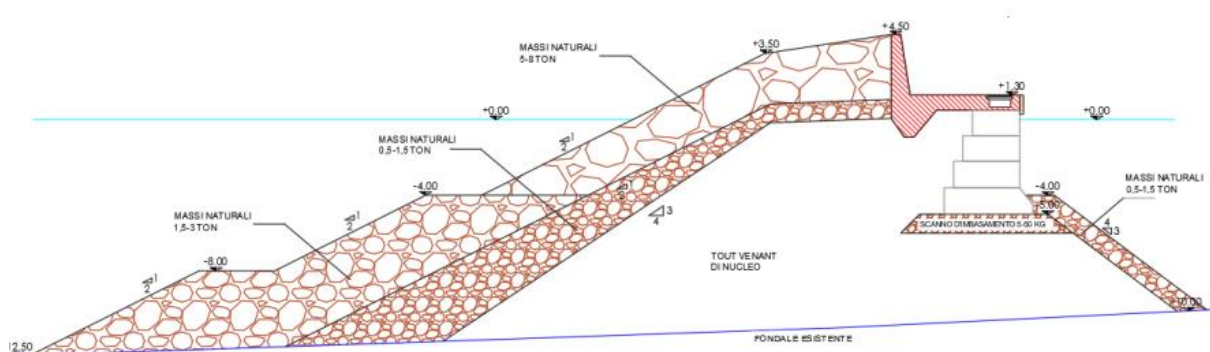


Figura 3 - Fondali forniti dal Committente, da filo banchina fino a 1.80m da essa alla profondità di - 4.0m e loro raccordo per mezzo di una scogliera con pendenza 3:4 fino al fondale esistente o di progetto. Opere interne al porto rappresentate in arancione in Fig.1.

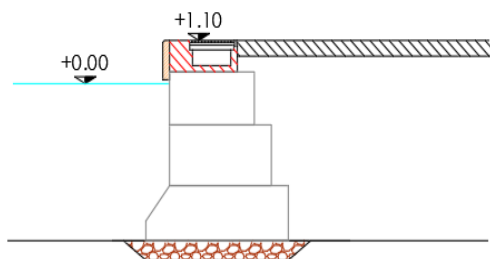


Figura 4 - Fondali forniti dal Committente, da filo banchina sul fondale di progetto, senza scogliera a protezione del piede della banchina. Opere interne al porto rappresentate in verde in Fig.1.



In Figura 5 sono visibili sia la distribuzione dei dati batimetrici elaborati che la dimensione e l'orientamento delle griglie di calcolo utilizzate nella nuova configurazione ampliata del Marina di Punta Ala.

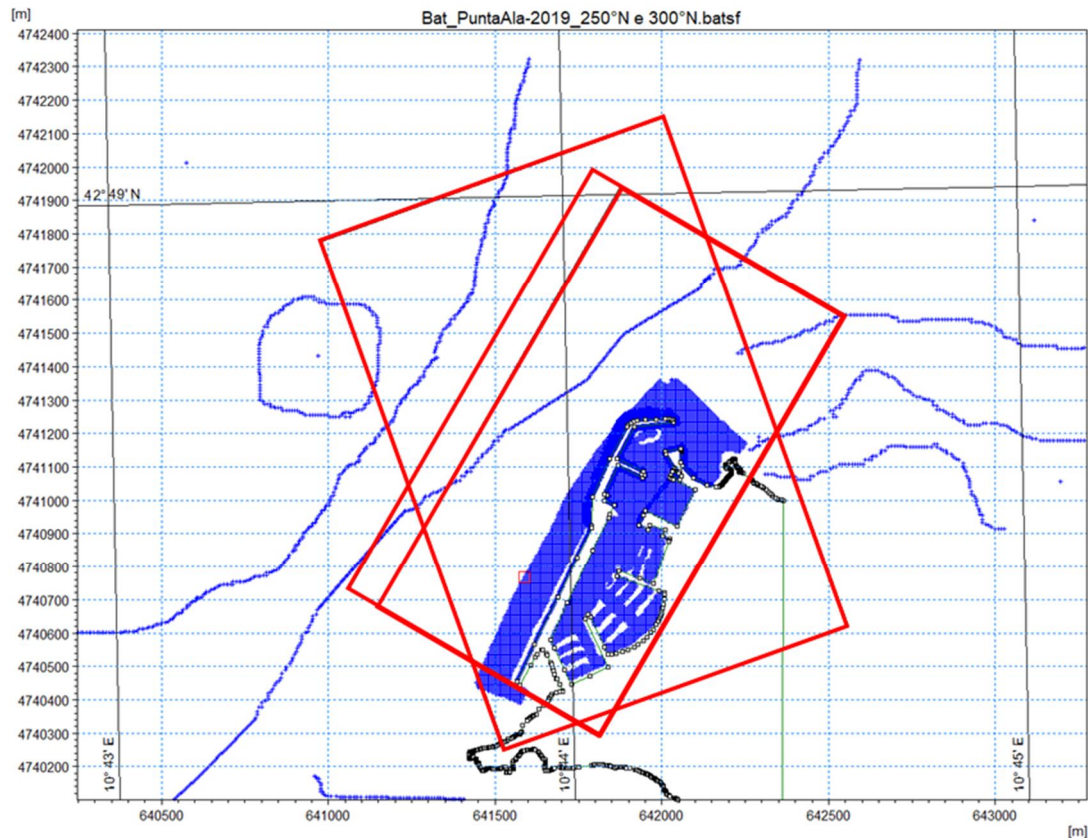


Figura 5 - Mappa dei punti utilizzati per la costruzione dei modelli digitali dei fondali (dati da Carta Nautica e rilievo di dettaglio)

Le caratteristiche geometriche delle griglie di calcolo utilizzate nelle simulazioni numeriche di agitazione del bacino portuale sono riportate in Tabella 1.

**Tabella 1 – Caratteristiche griglia di calcolo utilizzate**

n.	Onda	Griglia	Dimensioni [m]		Passo [m]	
			Lx	Ly	Dx	Dy
1	Onde 1-2-3	250°N	1622	1094	2	2
2	Onda 4	300°N	1456	770	2	2
3	Onde 5-6	300°N	1456	870	2	2

All'interno del bacino portuale la batimetria è stata modificata come indicato dal Committente (Figura 1), impostando un valore di -7m presso l'imboccatura portuale, e valori di -6m e -4m nelle zone di cantiere e del primo bacino.

In Figura 6 sono riportate le batimetrie ed il layout della nuova configurazione ampliata del Marina di Punta Ala, per le onde simulate sulla griglia orientata a 250°N e in Figura 7 per le onde simulate sulla griglia orientata a 300°N.

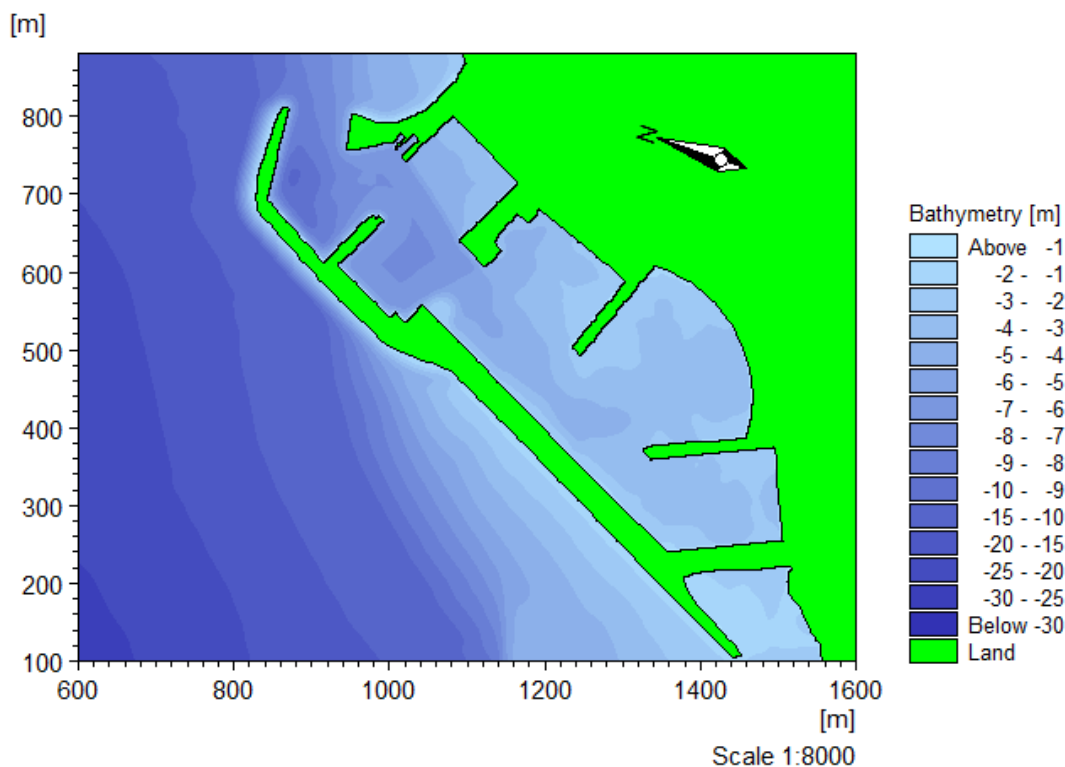


Figura 6 – Batimetria Griglia 250°N.

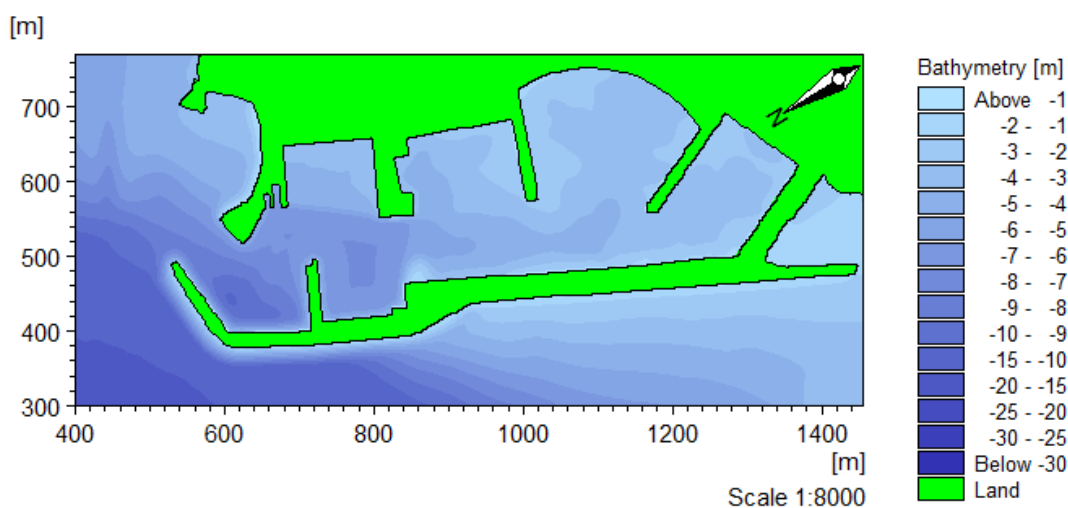


Figura 7 – Batimetria Griglia 300°N.

Come per il precedente studio, in corrispondenza di aree che non interferiscono con la propagazione dell'onda e l'ingresso delle stesse nel bacino portuale, è stata impostata una terra fittizia per ridurre i tempi di calcolo delle simulazioni. Inoltre, lungo i confini del dominio di calcolo sono stati introdotti appositi strati assorbenti che assorbono l'energia delle onde che si propagano verso l'esterno del dominio stesso (Figura 8).

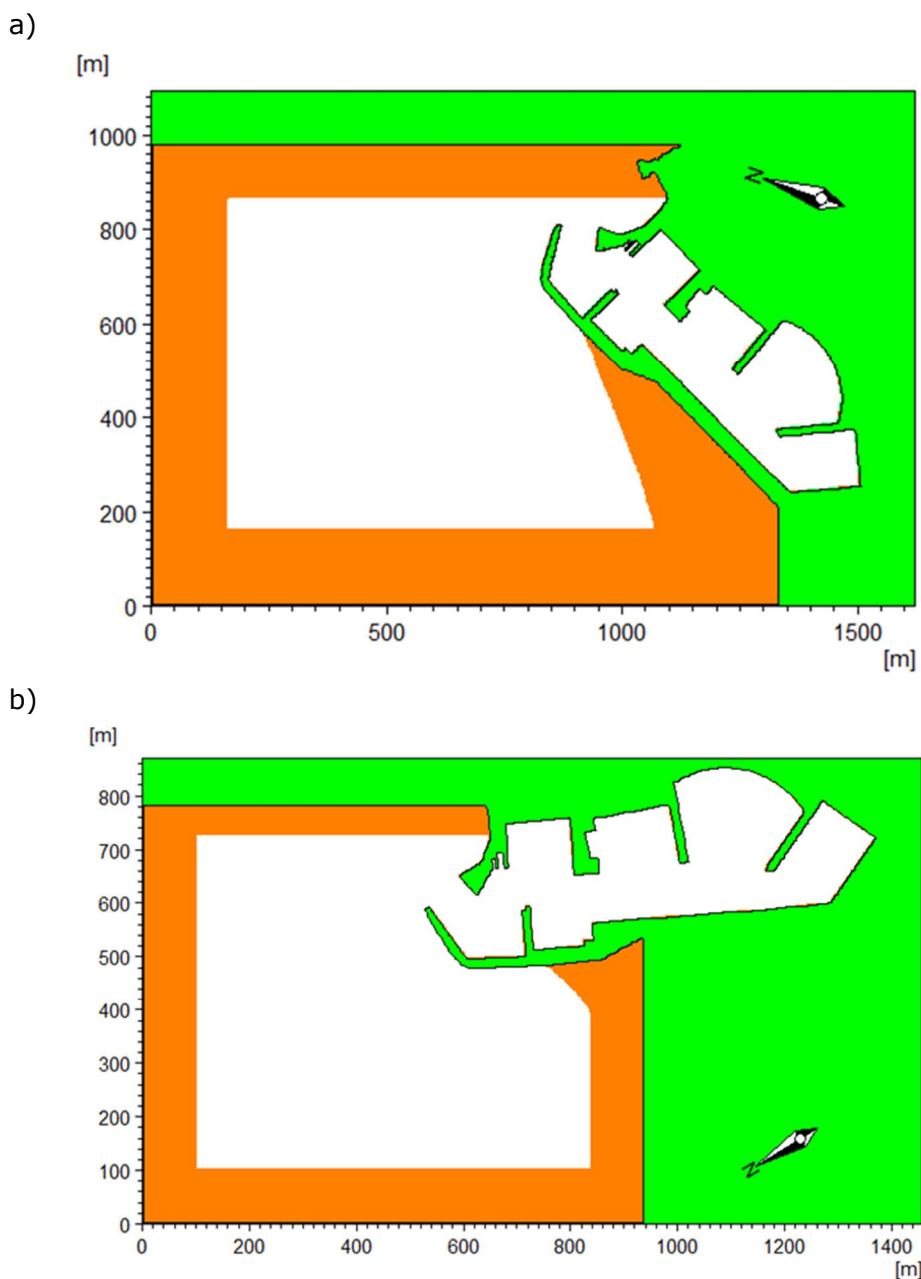


Figura 8 – Starti assorbenti utilizzati per la griglia: a) 250°N e b) 300°N.

Le onde propagate nel modulo MIKE 21 BW sono onde direzionali irregolari e sono state introdotte nel sistema attraverso una linea di generazione interna al dominio di calcolo (linea di colore blu in Figura 9), creata con un tool del programma che genera un vettore tempo variante di densità di flusso e pendenza della superficie libera. Lo spettro utilizzato per la generazione delle onde è di tipo Jonswap.

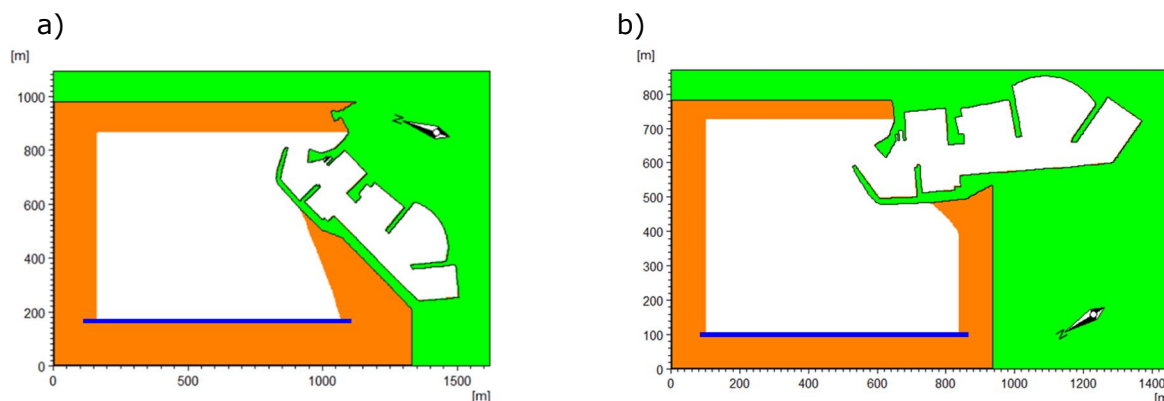


Figura 9 – Linea di generazione (linea blu): a) 250°N e b) 300°N.

In Tabella 2 sono sintetizzati i moti ondosi utilizzati per il modello di agitazione portuale interna estratti nel precedente lavoro (vedi Capitolo 2 dello “*Studio meteomarinario e studio numerico dell’interazione tra le nuove opere previste per l’ampiamiento del Marina di Punta Ala e le dinamiche marine*”, redatto da AM3 nel 2014).

**Tabella 2 – Parametri caratteristici delle onde incidenti: valori estratti dalle simulazioni numeriche e relativi ai fondali di 20m antistanti l’area portuale.**

Onda	Settore	H <sub>mo</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir [°N]	Condizione
<b>ONDA 1</b> freq=5gg/anno	<b>170°N-240°N</b>	1.2	7.7	260	comfort
<b>ONDA 2</b> Tr=5anni		2.5	9.0	242	sicurezza
<b>ONDA 3</b> Tr=50anni		3.3	9.2	256	limite
<b>ONDA 4</b> freq=5gg/anno	<b>280°N-300°N</b>	0.7	5.4	300	comfort
<b>ONDA 5</b> Tr=5anni		3.3	8.0	302	sicurezza
<b>ONDA 6</b> Tr=50anni		4.4	9.0	303	limite

In corrispondenza delle strutture è stato definito un coefficiente di porosità (Kp) del materiale che regola i fenomeni di riflessione (Kr) tenendo conto di ciascuna ipotesi di progetto indicata dal Committente (Figura 10), in particolare la presenza o meno di celle antirisacca sulle pareti verticali delle banchine o del cassone di testata.

Il coefficiente di porosità impostato per le simulazioni numeriche è definito per ogni tratto in funzione delle caratteristiche medie dell’onda incidente e della profondità d’acqua antistante la struttura (vedi ad esempio Figura 11).



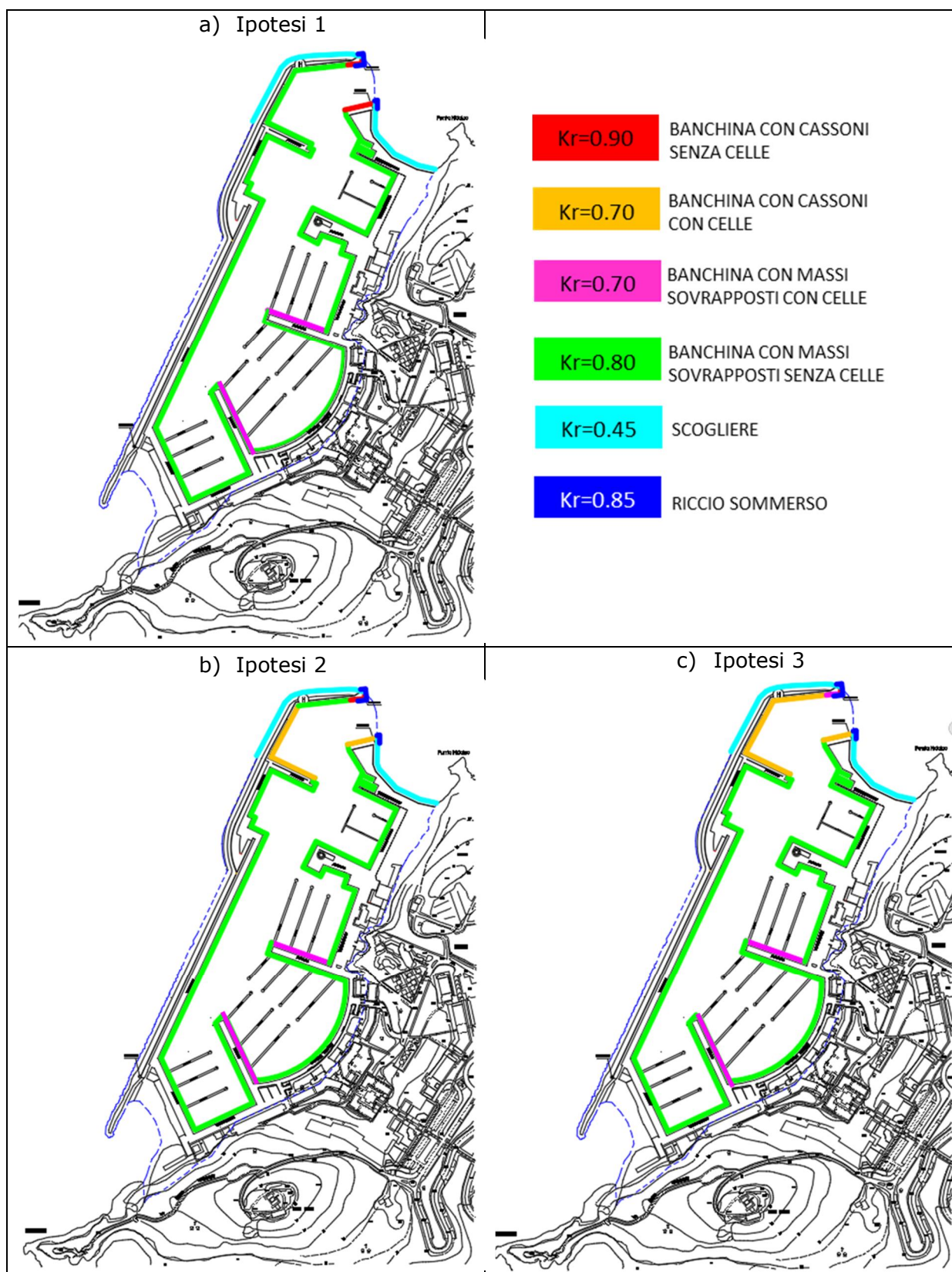


Figura 10 – Ipotesi di progetto delle opere interne al bacino portuale e coefficienti di riflessione indicati dal Committente.

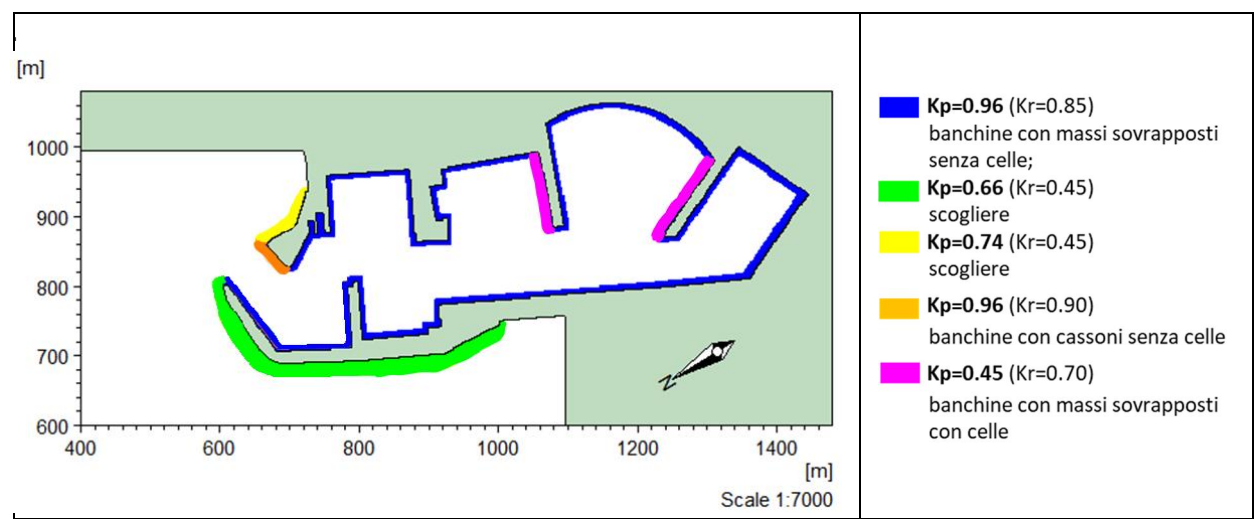


Figura 11 – Mappa dei coefficienti di porosità nella prima ipotesi di progetto, griglia 300°N.

Come per lo studio eseguito da AM3 nel 2014 tutte le simulazioni sono state condotte considerando un intervallo di tempo pari a 2 ore con passo temporale di integrazione pari a 0.05s.

### 3.2. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI RELATIVE ALLE CONDIZIONI DI COMFORT

Le condizioni di confort, sicurezza e condizione limite sono state assunte in conformità alle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici" AIPCN-PIANC (2002).

Lo studio di agitazione relativo alle condizioni di confort è stato svolto con riferimento alle onde caratterizzate da una frequenza non superiore a 5 giorni all'anno e propagate a costa con il modello ONDA 3.0 (vedi Paragrafo 2.1.1 dello studio redatto da AM3 nel 2014). Al fine di verificare questa condizione il valore di altezze d'onda residue all'interno del bacino portuale deve essere inferiore a 0.15m Le onde simulate sono riportate in Tabella 3.

**Tabella 3 – Caratteristiche delle onde considerate nello studio dell'agitazione ondosa relative alla condizione di confort.**

	Settore	CONDIZIONI A LARGO			CONDIZIONI SUL CONTORNO		
		Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]
<b>ONDA 1</b> freq=5gg/anno	<b>170°-240°N</b>	2.0	7.7	240	1.2	7.7	260
<b>ONDA 4</b> freq=5gg/anno	<b>280°-300°N</b>	0.7	5.4	300	0.7	5.4	300

### 3.2.1. Prima ipotesi di progetto

I risultati ottenuti per la prima ipotesi di progetto (Figura 10 a) dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso, in termini di agitazione ondosa all'interno del bacino portuale, sono riportati di seguito.

L'andamento della superficie del mare in un certo istante temporale è riportato Figura 12 per l'onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $Dir=260^\circ\text{N}$ ) e in Figura 13 per l'onda 4 ( $H_s=0.7\text{m}$ ,  $T_p=5.4\text{s}$ ,  $Dir=300^\circ\text{N}$ ). Tali immagini sono utili ad evidenziare l'ingresso dell'onda nel bacino portuale.

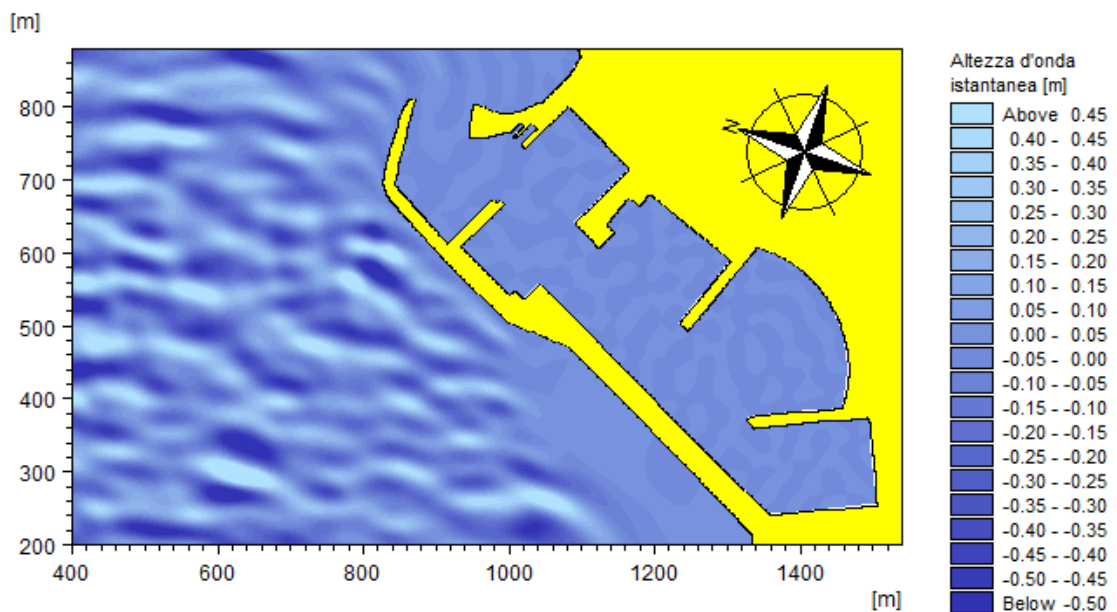


Figura 12 – Andamento della superficie del mare: onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $Dir=260^\circ\text{N}$ ), griglia  $250^\circ\text{N}$ , prima ipotesi di progetto.

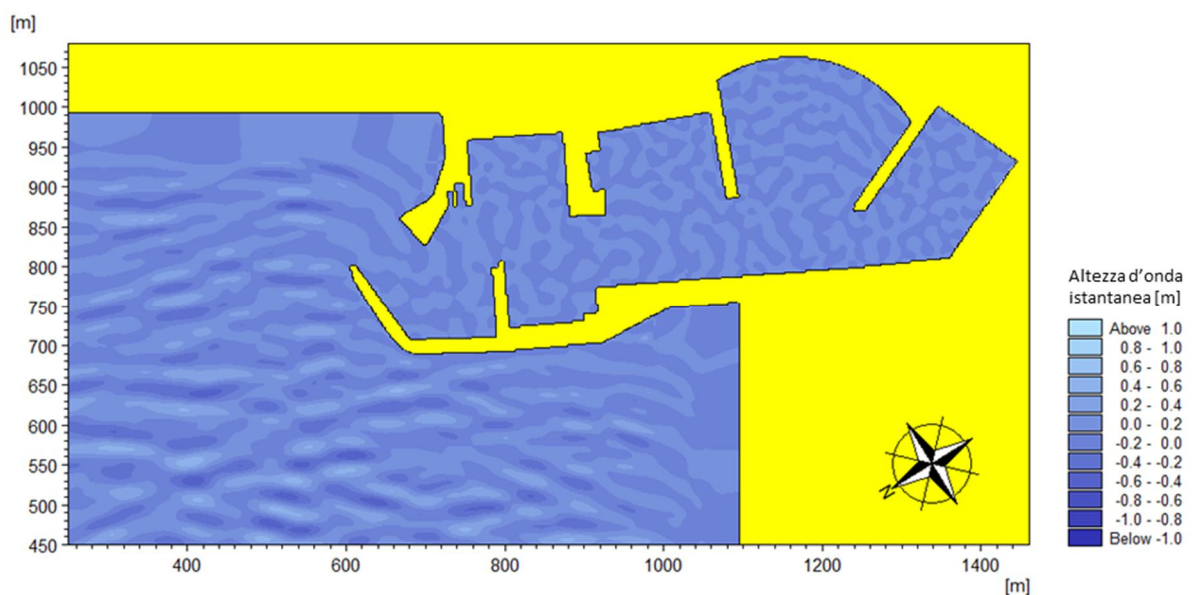


Figura 13 – Andamento della superficie del mare: onda 4 ( $H_s=0.7\text{m}$ ,  $T_p=5.4\text{s}$ ,  $Dir=300^\circ\text{N}$ ), griglia  $300^\circ\text{N}$ , prima ipotesi di progetto.



I valori stimati di altezza d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale sono riportate in Figura 14 per l'onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $\text{Dir}=260^\circ\text{N}$ ) e in Figura 15 per l'onda 4 ( $H_s=0.7\text{m}$ ,  $T_p=5.4\text{s}$ ,  $\text{Dir}=300^\circ\text{N}$ ). Sono queste le immagini che ci permettono di capire se la condizione di comfort è rispettata o meno. In questo caso i risultati delle simulazioni mostrano che tale condizione di comfort è rispettata in tutto lo specchio acqueo per entrambi i settori di provenienza analizzati

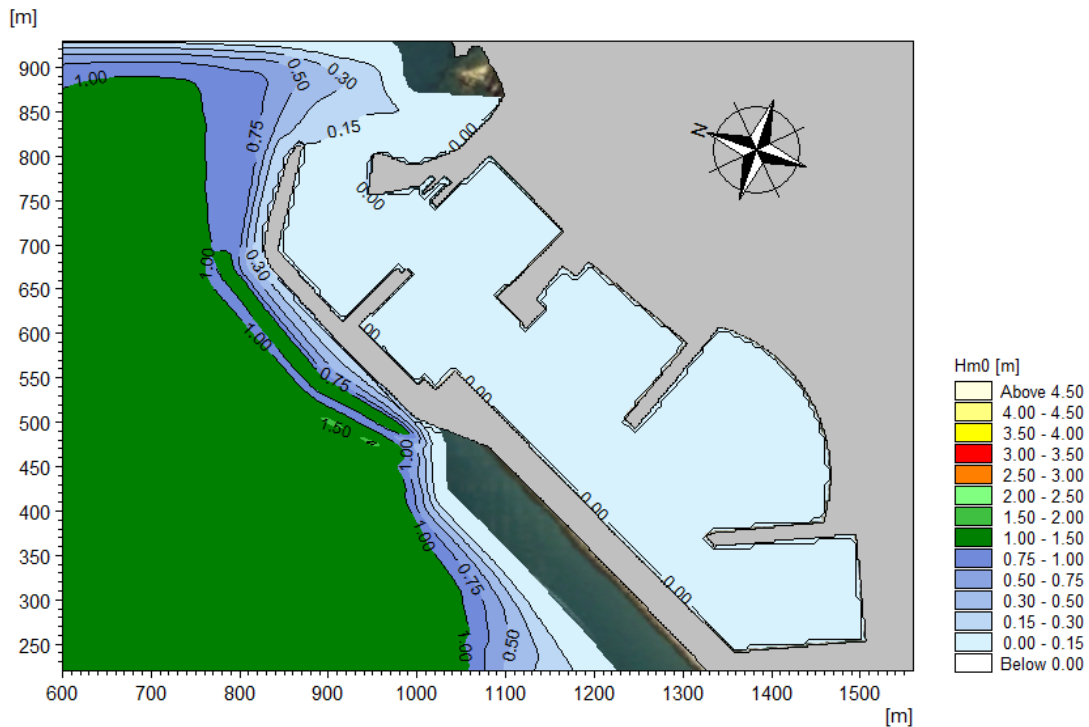


Figura 14 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $\text{Dir}=260^\circ\text{N}$ ), griglia  $250^\circ\text{N}$ , prima ipotesi di progetto.

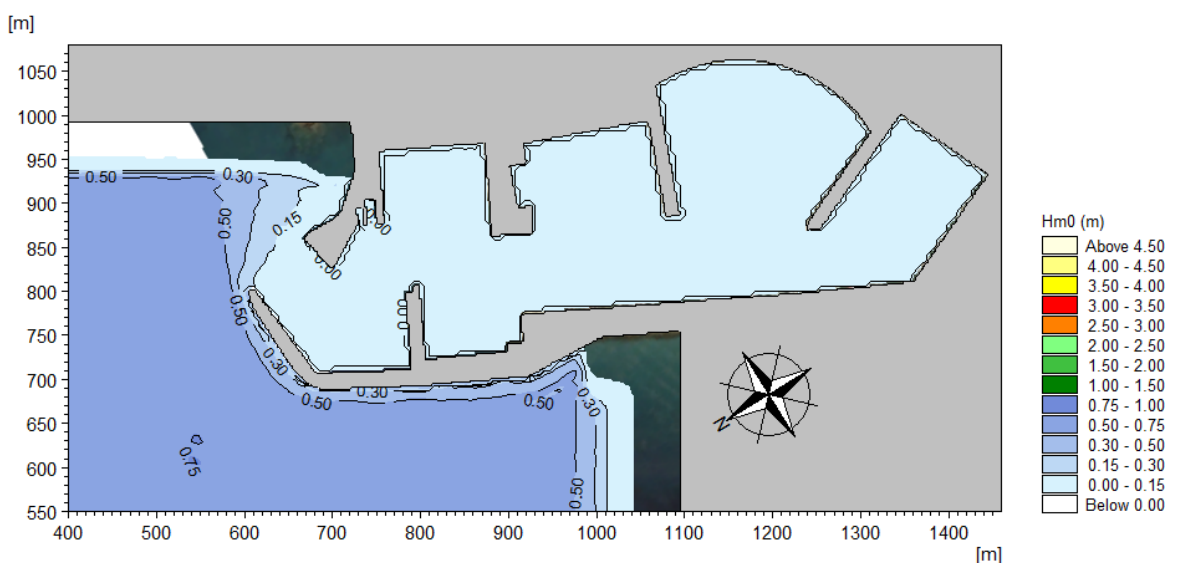


Figura 15 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 4 ( $H_s=0.7\text{m}$ ,  $T_p=5.4\text{s}$ ,  $\text{Dir}=300^\circ\text{N}$ ), griglia  $300^\circ\text{N}$ , prima ipotesi di progetto.

### 3.2.1. Seconda ipotesi di progetto

I risultati ottenuti per la seconda ipotesi di progetto (Figura 10 b), dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso, in termini di agitazione ondosa all'interno del bacino portuale, sono riportati di seguito.

Dato che, sotto le condizioni di moto ondoso provenienti dal settore  $280^{\circ}$ - $300^{\circ}$ N (onda 4:  $H_s=0.7\text{m}$ ,  $T_p=5.4\text{s}$ ,  $Dir=300^{\circ}$ N), già la prima ipotesi di progetto mostra un pieno rispetto delle condizioni di comfort (vedi Figura 15) è stato scelto di non effettuare le simulazioni per le altre due ipotesi dove sono presenti tratti antiriflettenti più lunghi.

L'andamento della superficie del mare e la distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $Dir=260^{\circ}$ N), sono riportati in Figura 16 e in Figura 17.

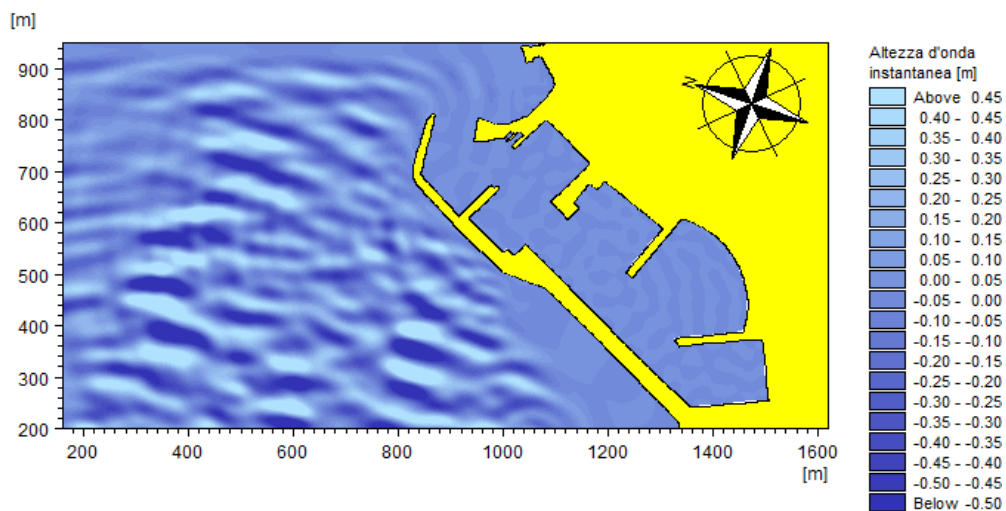


Figura 16 – Andamento della superficie del mare: onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $Dir=260^{\circ}$ N), griglia  $250^{\circ}$ N, seconda ipotesi di progetto.

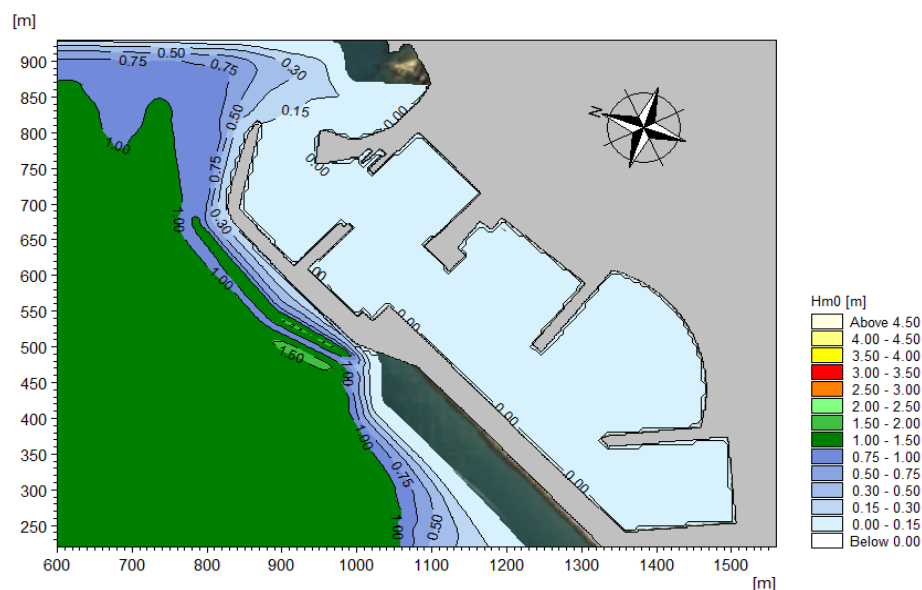


Figura 17 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $Dir=260^{\circ}$ N), griglia  $250^{\circ}$ N, seconda ipotesi di progetto.

### 3.2.1. Terza ipotesi di progetto

I risultati ottenuti per la terza ipotesi di progetto (Figura 10 c), dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso, in termini di agitazione ondosa all'interno del bacino portuale, sono riportati nelle figure seguenti.

Come per l'ipotesi 2 non è necessario simulare l'onda 4 in quanto già la prima ipotesi di progetto risulta soddisfare le condizioni di comfort.

L'andamento della superficie del mare e la distribuzione dell'altezza d'onda significativa per l'onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $Dir=260^\circ\text{N}$ ), sono riportati in Figura 18 e in Figura 19.

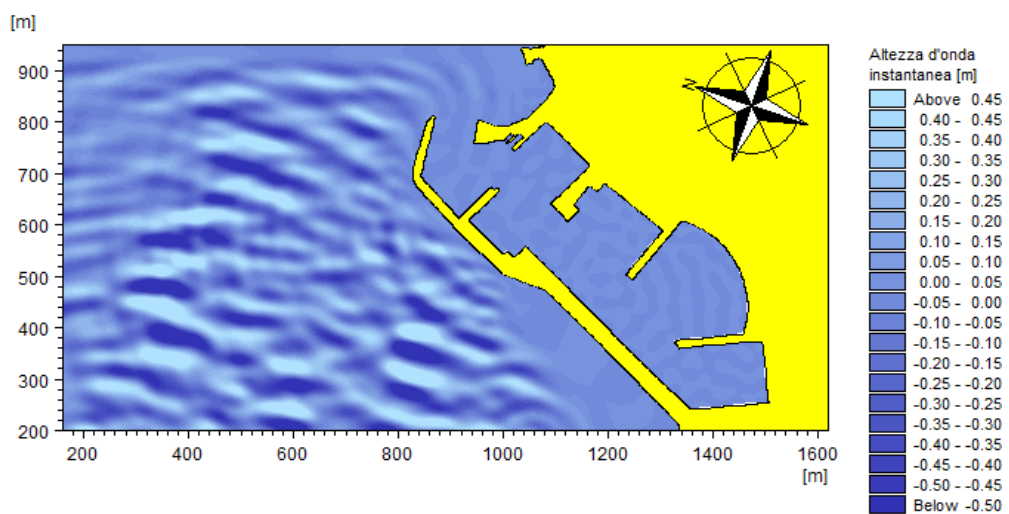


Figura 18 – Andamento della superficie del mare: onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $Dir=260^\circ\text{N}$ ), griglia  $250^\circ\text{N}$ , terza ipotesi di progetto.

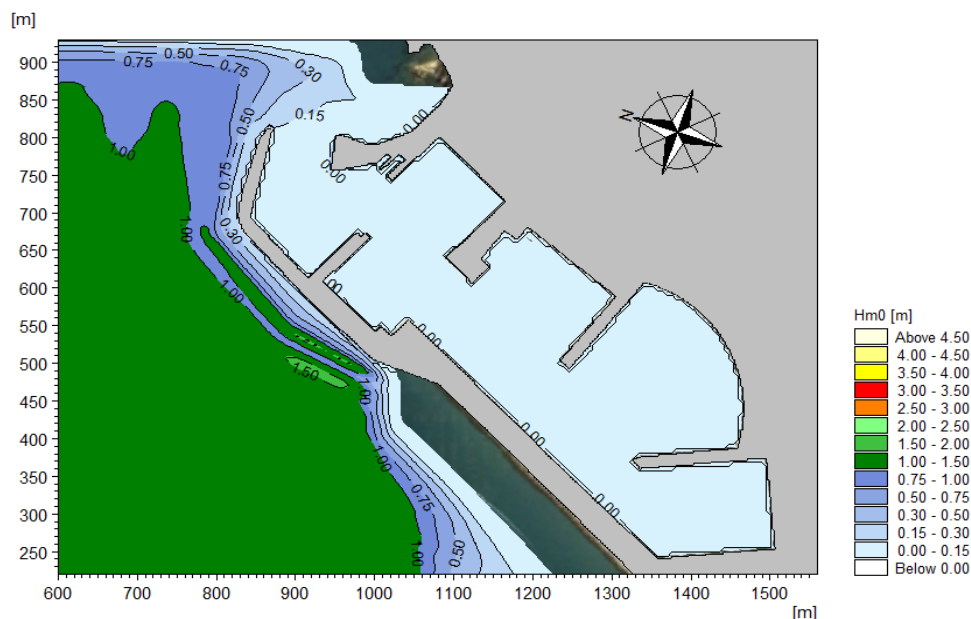


Figura 19 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 1 ( $H_s=1.2\text{m}$ ,  $T_p=7.7\text{s}$ ,  $Dir=260^\circ\text{N}$ ), griglia  $250^\circ\text{N}$ , terza ipotesi di progetto.

### 3.3. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI RELATIVE ALLE CONDIZIONI DI SICUREZZA

Lo studio di agitazione relativo alle condizioni di sicurezza è stato svolto con riferimento alle onde caratterizzate da un periodo di ritorno di 5 anni e propagate a costa con il modello ONDA 3.0 (vedi Paragrafo 2.1.1 dello studio redatto da AM3 nel 2014).

Al fine di verificare questa condizione il valore di altezze d’onda residue all’interno del bacino portuale deve essere inferiore a 0.30m (raccomandazioni AIPCN-PIANC). Le onde scelte per le simulazioni sono riportate in Tabella 4.

**Tabella 4 – Caratteristiche delle onde considerate nello studio dell’agitazione ondosa relative alla condizione di sicurezza.**

	Settore	CONDIZIONI A LARGO			CONDIZIONI SUL CONTORNO		
		Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]
<b>ONDA 2</b> Tr=5anni	<b>170°-240°N</b>	4.2	9	240	2.5	9	242
<b>ONDA 5</b> Tr=5anni	<b>280°-300°N</b>	3.2	8	300	3.3	8	302

#### 3.3.1. Prima ipotesi di progetto

I risultati ottenuti per la prima configurazione di progetto (Figura 10 a), dalle simulazioni delle onde relative alle condizioni di sicurezza sono riportati di seguito.

L’andamento della superficie del mare in un certo istante temporale è riportato in Figura 20 per l’onda 2 (Hs=2.5m, Tp=9.0s, Dir=242°N) e in Figura 21 per l’onda 5 (Hs=3.3m, Tp=8.0s, Dir=302°N).

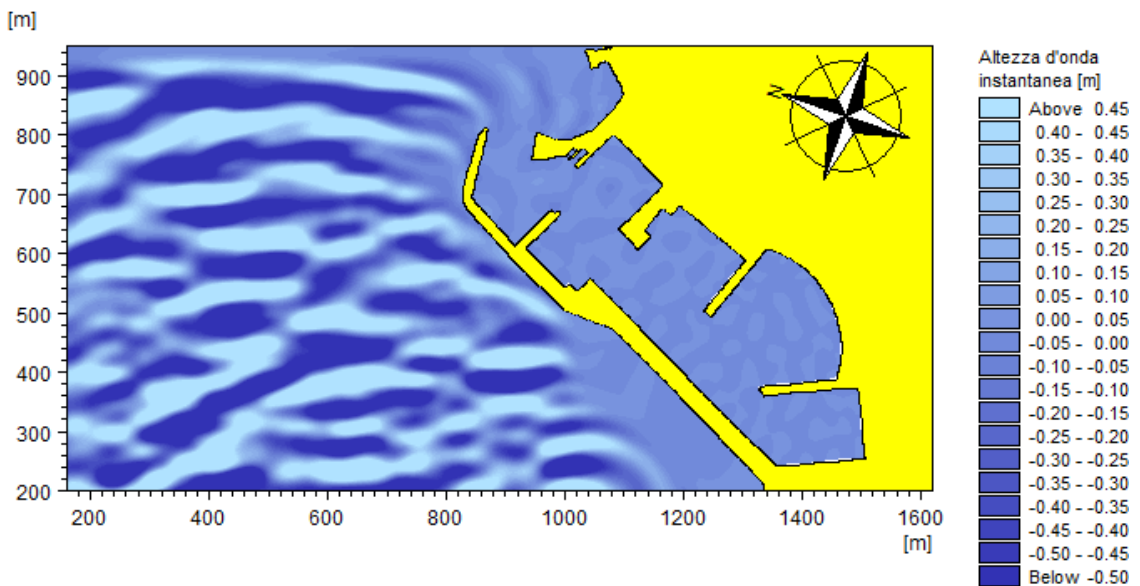


Figura 20 – Andamento della superficie del mare: onda 2 (Hs=2.5m, Tp=9.0s, Dir=242°N), griglia 250°N, prima ipotesi di progetto.



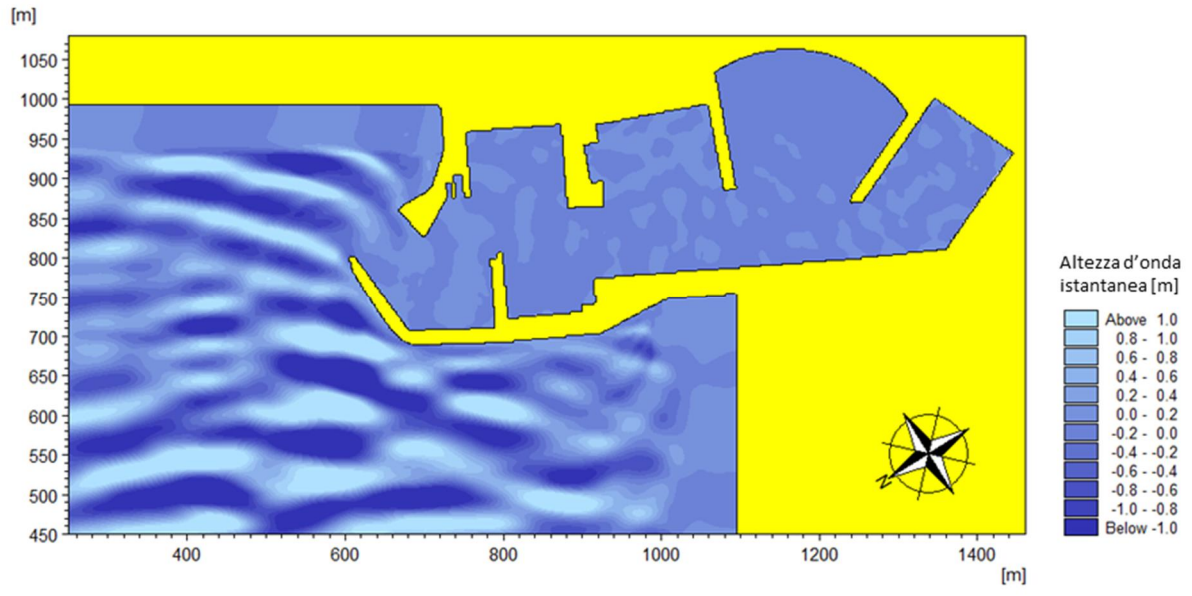


Figura 21 – Andamento della superficie del mare: onda 5 ( $H_s=3.3\text{m}$ ,  $T_p=8.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=302^\circ\text{N}$ ), griglia  $300^\circ\text{N}$ , prima ipotesi di progetto.

Le altezze d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale sono riportate in Figura 22 per l'onda 2 ( $H_s=2.5\text{m}$ ,  $T_p=9.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=242^\circ\text{N}$ ) e in Figura 23 per l'onda 5 ( $H_s=3.3\text{m}$ ,  $T_p=8.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=302^\circ\text{N}$ ).

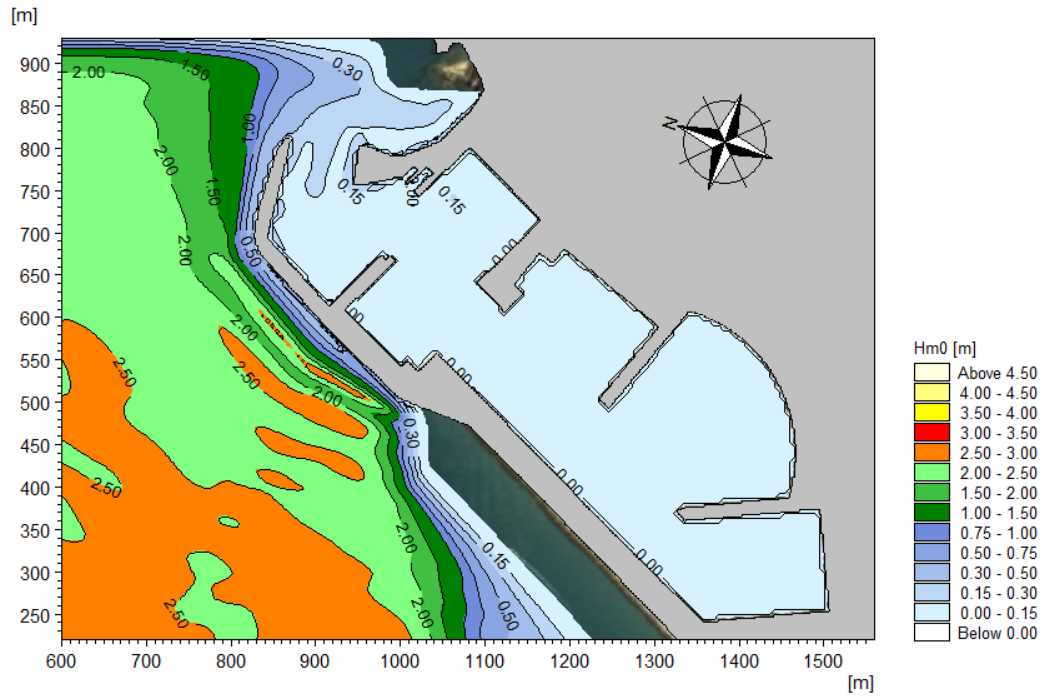


Figura 22 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 2 ( $H_s=2.5\text{m}$ ,  $T_p=9.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=242^\circ\text{N}$ ), griglia  $250^\circ\text{N}$ , prima ipotesi di progetto.

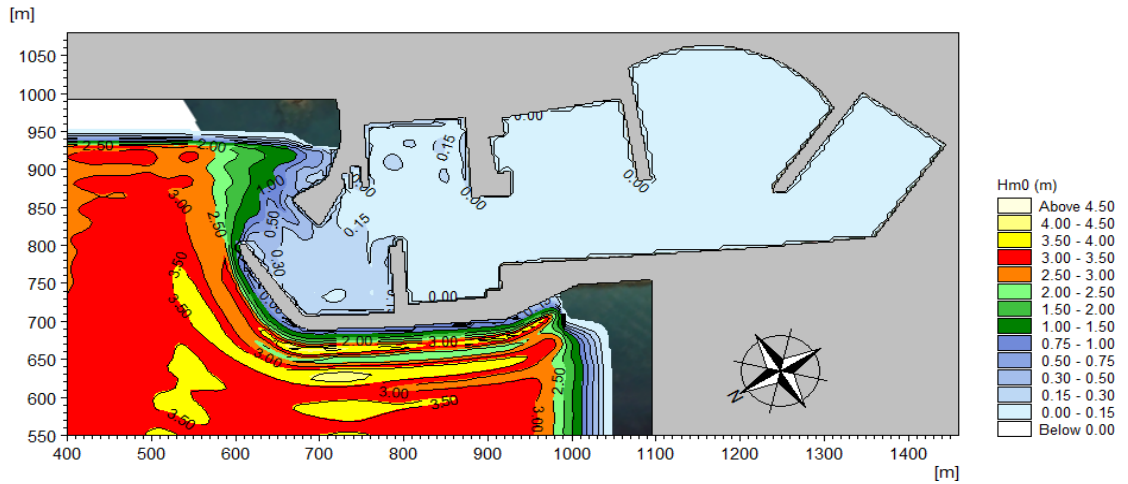


Figura 23 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , prima ipotesi di progetto.

I valori di agitazione nell'avamposto hanno valori diversi a seconda della direzione di provenienza dell'onda. L'onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), proveniente dal settore meridionale, causa agitazioni inferiori a 30 cm anche all'imboccatura, mentre con l'onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), proveniente dal Canale di Piombino, è possibile notare presso l'imboccatura del porto, valori compresi fra 30 e 50 cm, ma lungo tutti tratti con banchine anche nell'avamposto non vengono superati i limiti suggeriti per la condizione di sicurezza.

### 3.3.2. Seconda ipotesi di progetto

Sulla base del risultato non totalmente soddisfacente ottenuto con l'onda 5, è stata studiata la seconda ipotesi di progetto, caratterizzata da banchine con cassoni (m) nella zona di imboccatura del bacino portuale (Figura 10 b). In Figura 24 e in Figura 25 sono riportati l'andamento della superficie del mare in un certo istante temporale per l'onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), e l'onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), rispettivamente.

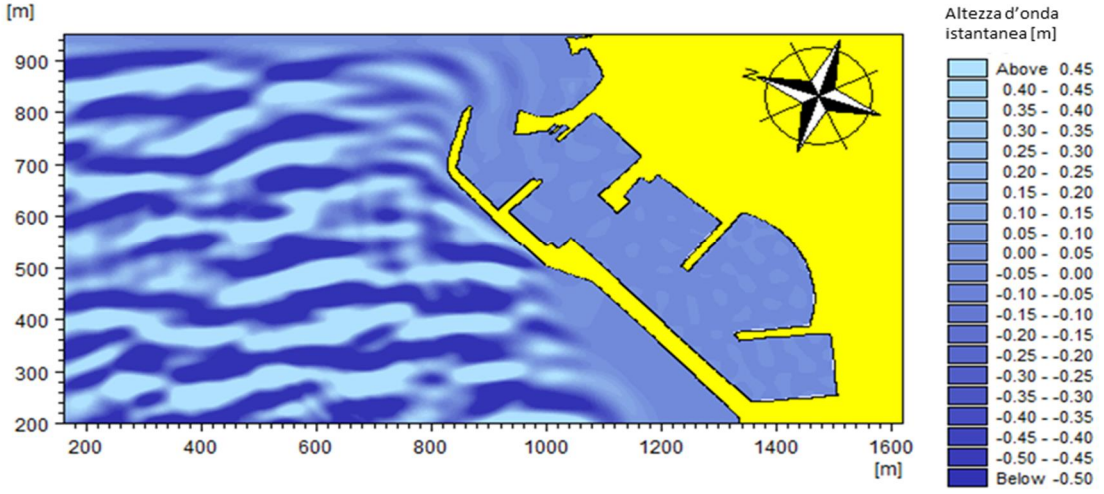


Figura 24 – Andamento della superficie del mare: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto.

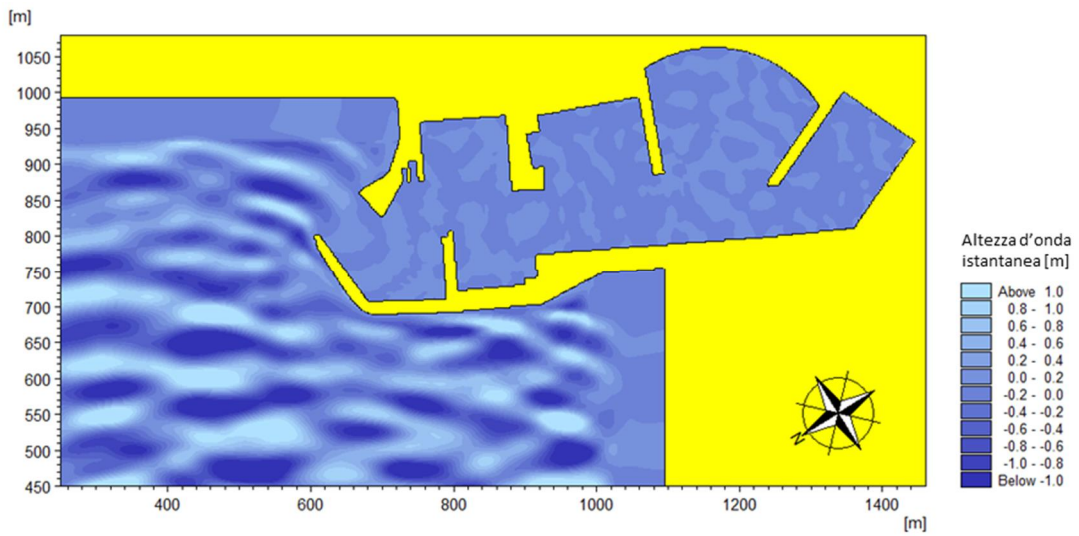


Figura 25 - Andamento della superficie del mare: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto.

In Figura 26 e in Figura 27 sono riportate le altezze d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale per l'onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), e l'onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), rispettivamente.

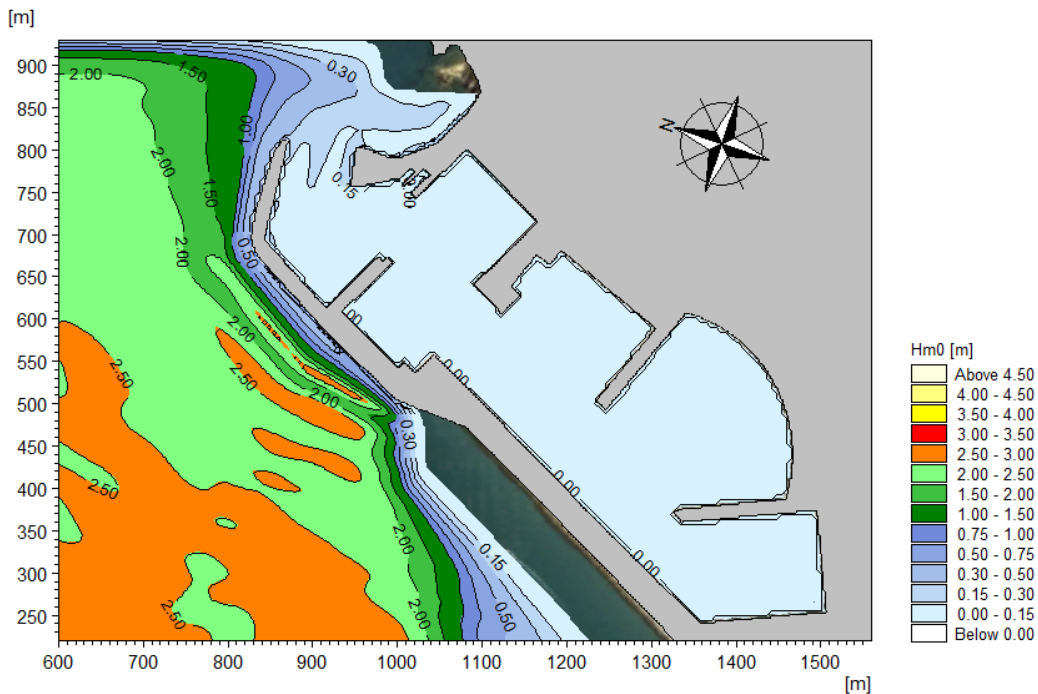


Figura 26 - Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto.



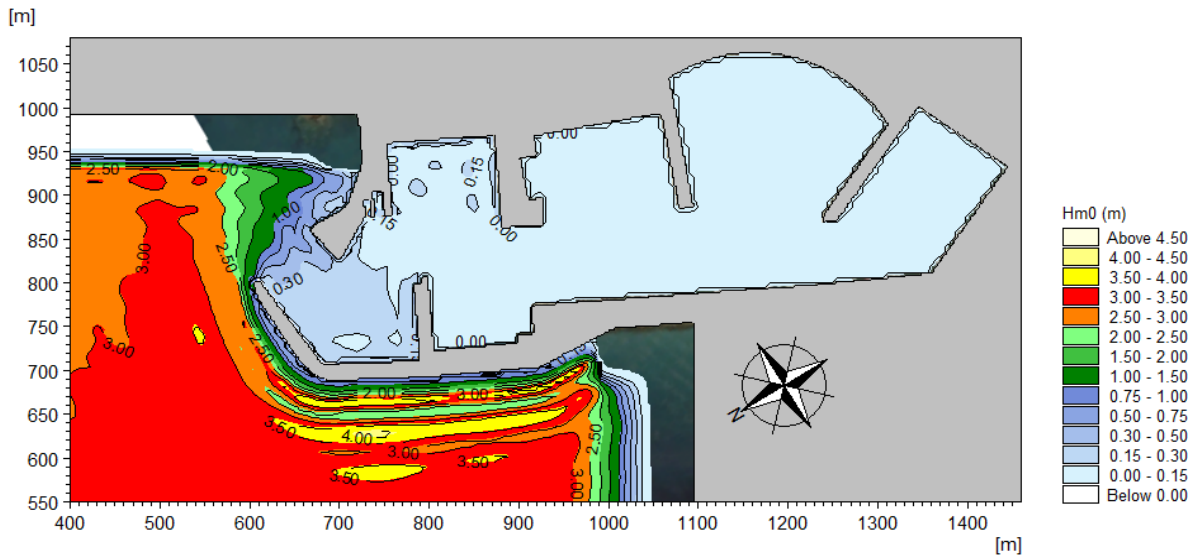


Figura 27 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , seconda ipotesi di progetto.

La condizione di sicurezza è totalmente rispettata in tutto lo specchio acqueo per l'onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), mentre per l'onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), limitatamente all'imboccatura del porto e all'avamposto, si osservano valori pari a circa 0.30m, mostrando una apprezzabile riduzione dell'agitazione rispetto alla prima ipotesi di progetto.

### 3.3.3. Terza ipotesi di progetto

I risultati ottenuti per la terza ipotesi di progetto (Figura 10 c), dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso, in termini di agitazione ondosa all'interno del bacino portuale, sono riportati nelle figure seguenti.

In Figura 28 e in Figura 29 sono riportati l'andamento della superficie del mare in un certo istante temporale per l'onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), e l'onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), rispettivamente.

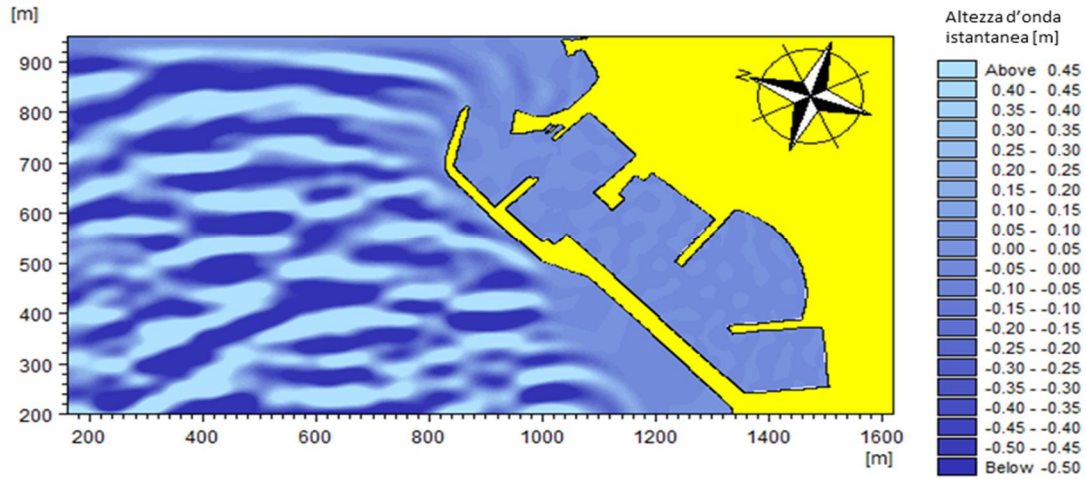


Figura 28 – Andamento della superficie del mare: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , terza ipotesi di progetto.

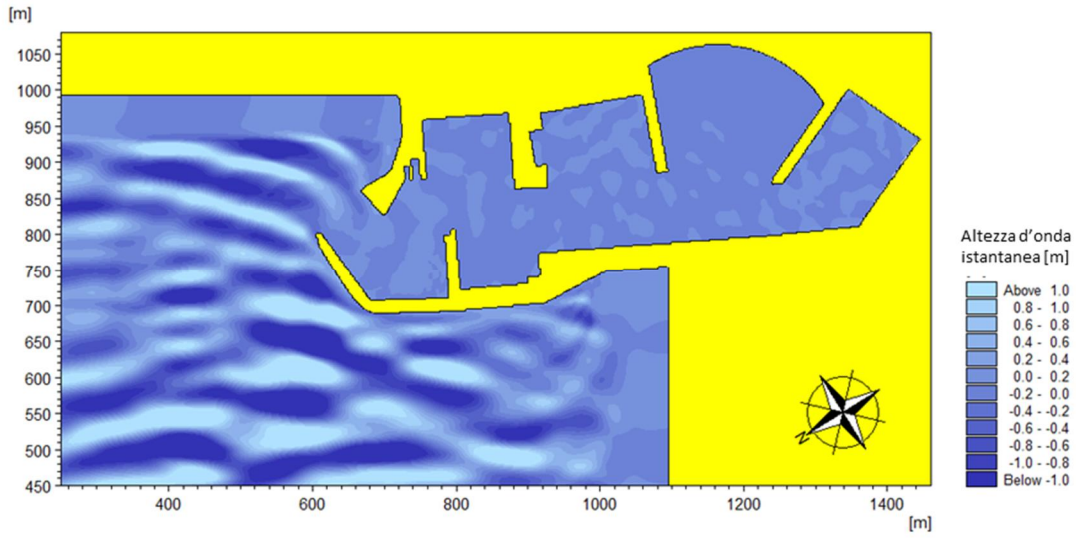


Figura 29 – Andamento della superficie del mare: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , terza ipotesi di progetto.

In Figura 30 e in Figura 31 sono riportate le altezze d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale per l'onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), e l'onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), rispettivamente.

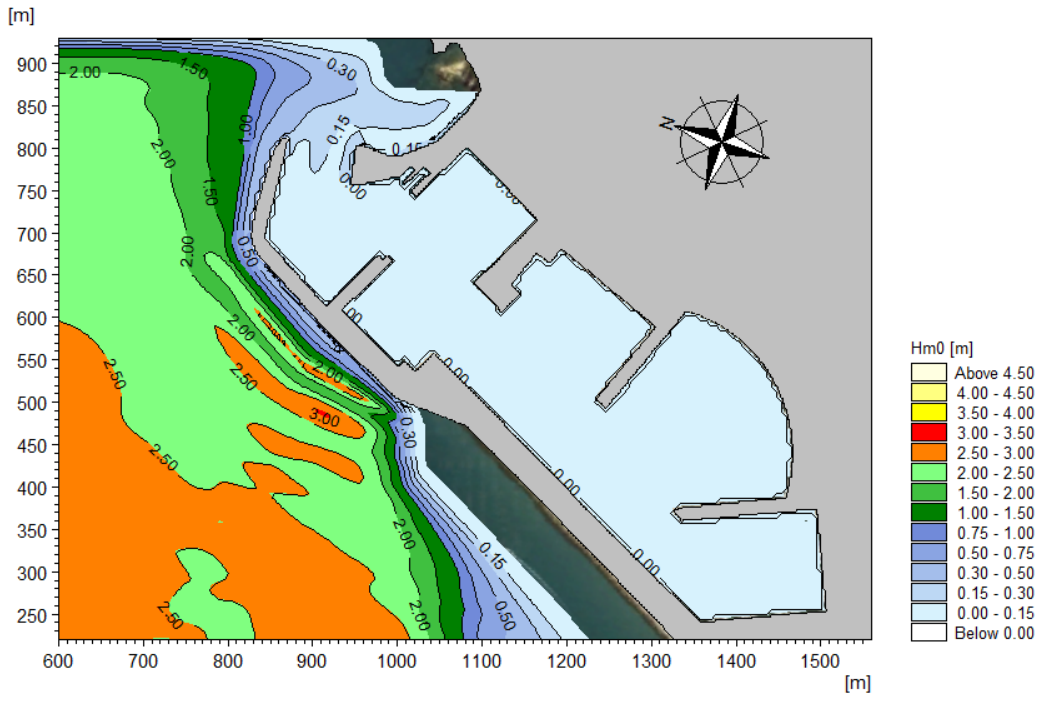


Figura 30 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , terza ipotesi di progetto.

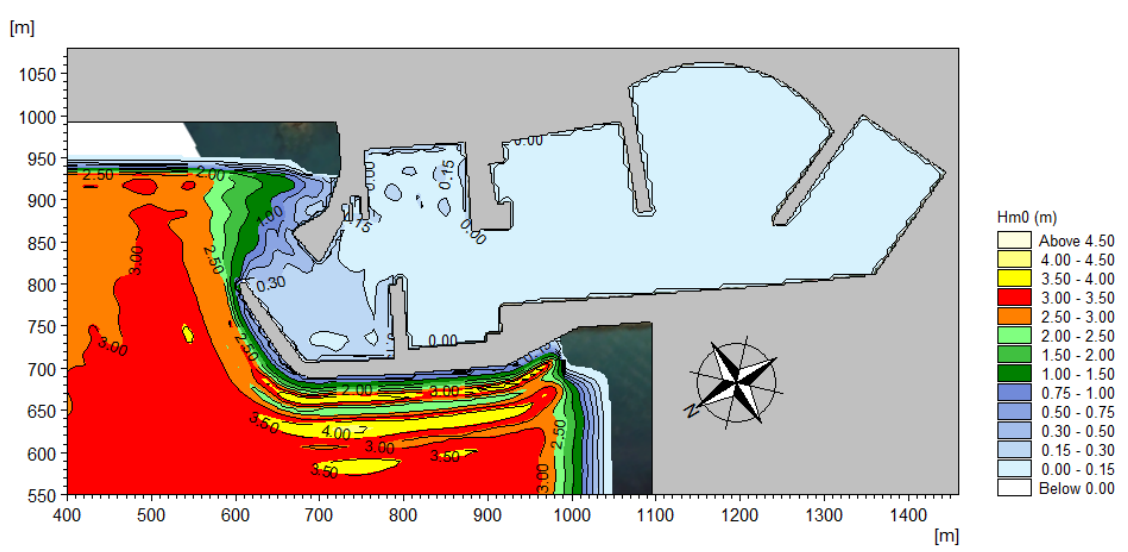


Figura 31 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , terza ipotesi di progetto.

La condizione di sicurezza è rispettata in tutto lo specchio acqueo per l'onda 2 ( $H_s=2.5m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=242^\circ N$ ), mentre per l'onda 5 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=8.0s$ ,  $Dir=302^\circ N$ ), non si evidenziano significativi miglioramenti presso l'imboccatura del porto rispetto alla precedente ipotesi di progetto.

### 3.4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI RELATIVE ALLE CONDIZIONI LIMITE

Lo studio di agitazione relativo alle condizioni limite è stato svolto con riferimento alle onde caratterizzate da un periodo di ritorno di 50 anni e propagate a costa con il modello ONDA 3.0 (vedi Paragrafo 2.1.1 dello studio redatto da AM3 nel 2014).

Al fine di verificare questa condizione il valore di altezze d'onda residue all'interno del bacino portuale deve essere inferiore a 0.50m (raccomandazioni AIPCN-PIANC). Le onde simulate sono riportate in Tabella 5.

**Tabella 5 – Caratteristiche delle onde considerate nello studio dell'agitazione ondosa relative alla condizione limite.**

	Settore	CONDIZIONI A LARGO			CONDIZIONI SUL CONTORNO		
		Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]
<b>ONDA 3</b> <b>Tr=50anni</b>	<b>170°-240°N</b>	5.3	9.2	240	3.3	9.2	256
<b>ONDA 6</b> <b>Tr=50anni</b>	<b>280°-300°N</b>	4.1	9	300	4.4	9	303

### 3.4.1. Prima ipotesi di progetto

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per la prima ipotesi di progetto (Figura 10 a) dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso per lo studio della condizione limite.

L'andamento della superficie del mare è riportato in Figura 32 per l'onda 3 ( $H_s=3.3\text{m}$ ,  $T_p=9.2\text{s}$ ,  $\text{Dir}=256^\circ\text{N}$ ), e in Figura 33 per l'onda 6 ( $H_s=4.4\text{m}$ ,  $T_p=9.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=303^\circ\text{N}$ ).

I risultati dell'andamento della superficie del mare evidenziano la forte diffrazione dell'onda presso la testata della diga di sopraflutto.

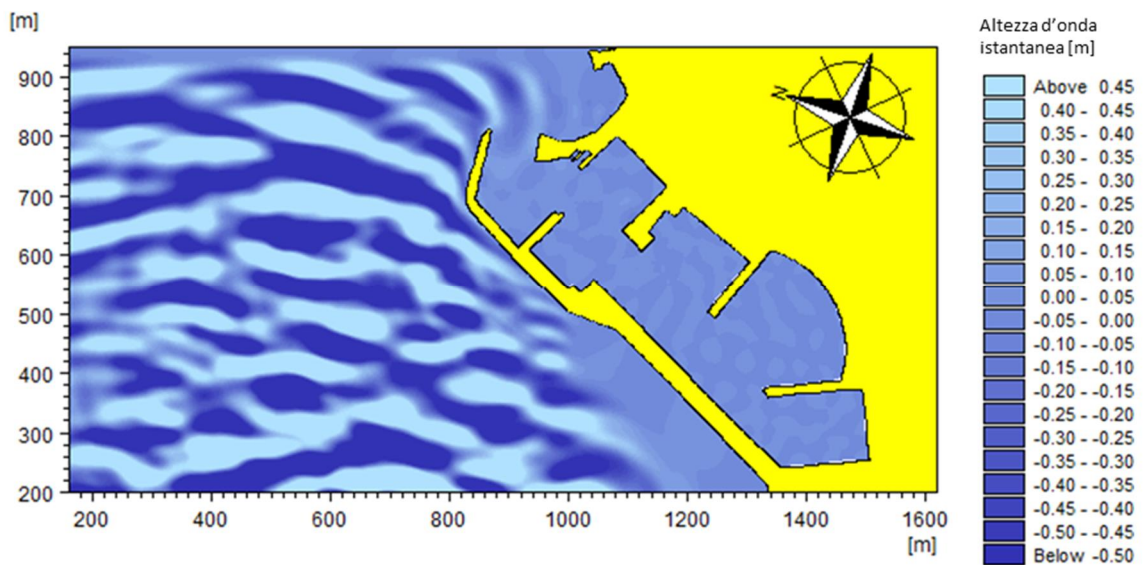


Figura 32 – Andamento della superficie del mare: onda 3, griglia  $250^\circ\text{N}$  ( $H_s=3.3\text{m}$ ,  $T_p=9.2\text{s}$ ,  $\text{Dir}=256^\circ\text{N}$ ), prima ipotesi di progetto.

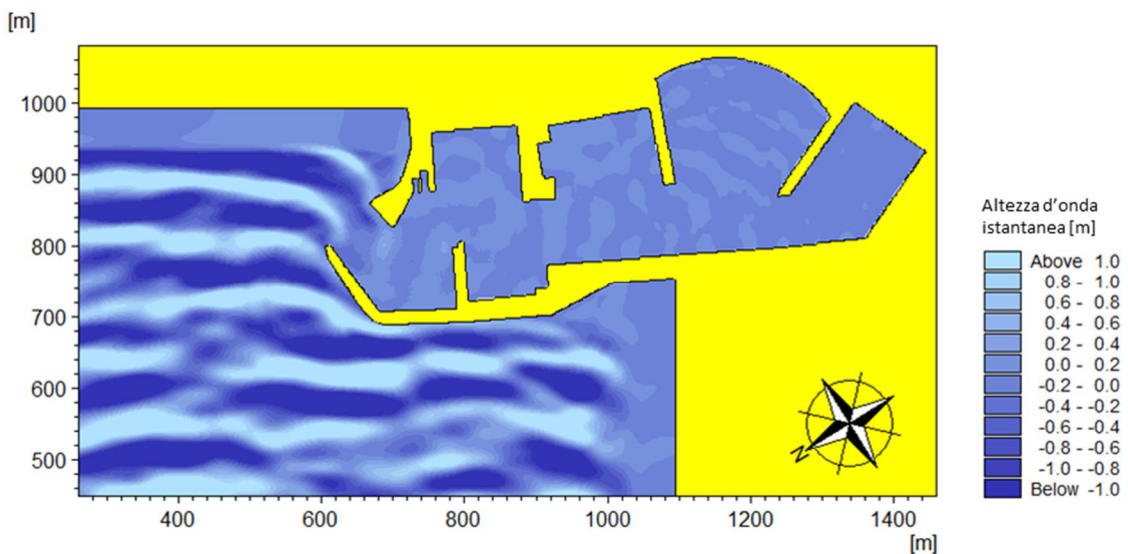


Figura 33 – Andamento della superficie del mare: onda 6 ( $H_s=4.4\text{m}$ ,  $T_p=9.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=303^\circ\text{N}$ ), griglia  $300^\circ\text{N}$ , prima ipotesi di progetto.



In Figura 34, che rappresenta l'altezza d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale per l'onda 3 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), si può osservare che la condizione limite è ampiamente rispettata.

In Figura 35 relativa all'altezza d'onda significativa nel caso dell'onda 6 ( $H_s=4.4m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=303^\circ N$ ), si osservano valori pari a 0.50m su alcuni tratti di banchina e su aree interne dell'avamposto.

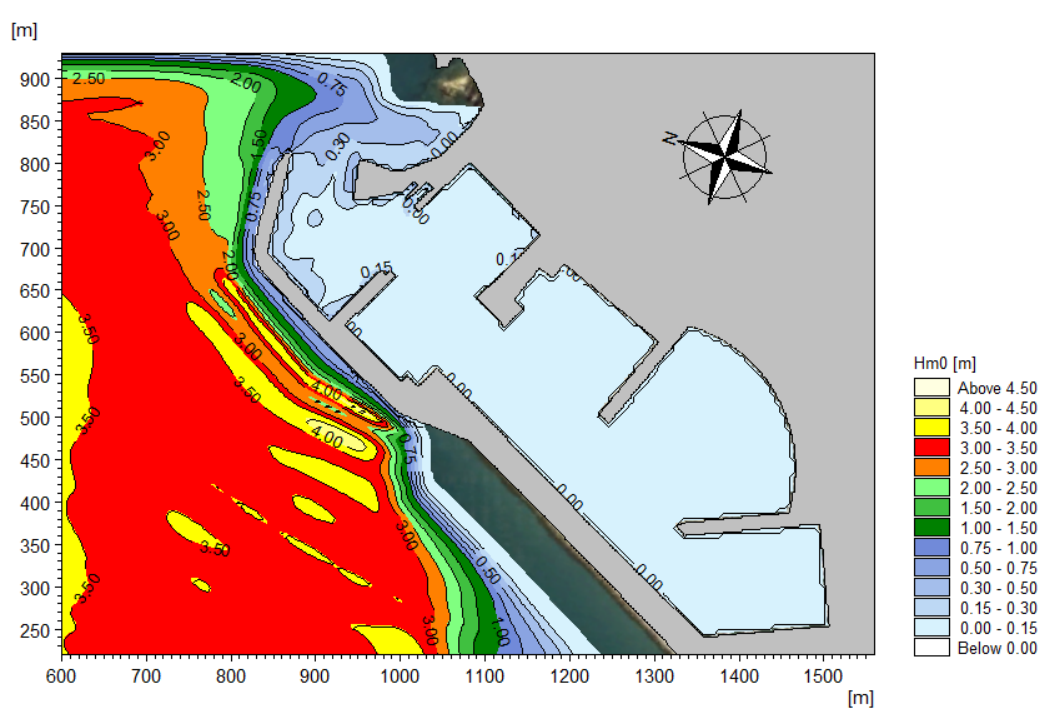


Figura 34 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 3 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , prima ipotesi di progetto.

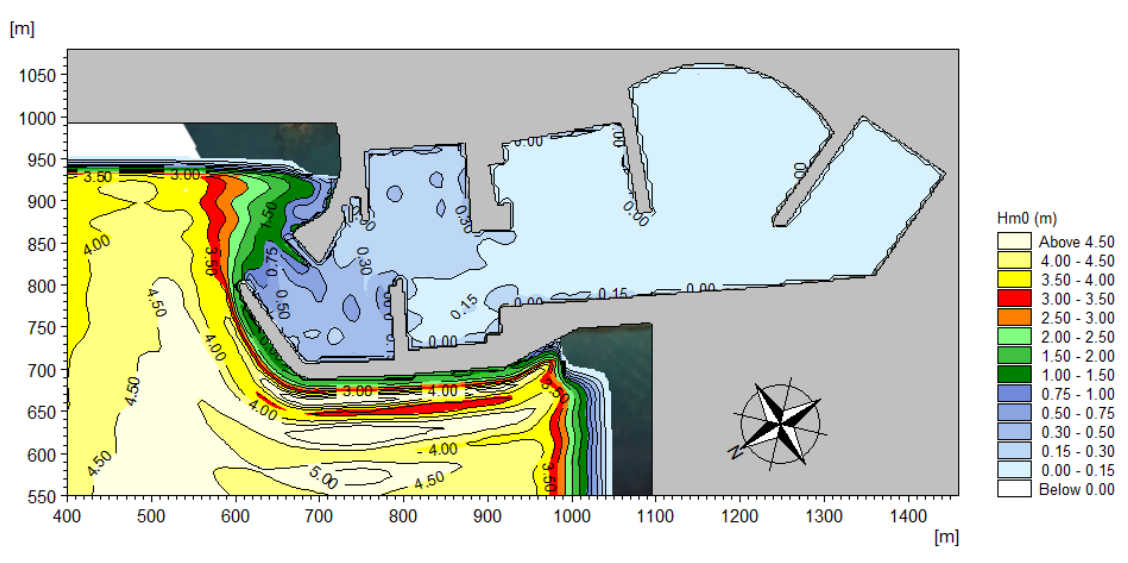


Figura 35 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 6 ( $H_s=4.4m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=303^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , prima ipotesi di progetto.

### 3.4.2. Seconda ipotesi di progetto

I risultati ottenuti per la seconda ipotesi di progetto (Figura 10 b) sono riportati di seguito. L'andamento della superficie del mare è riportato in Figura 36 per l'onda 3 (Hs=3.3m, Tp=9.2s, Dir=256°N), e in Figura 37 per l'onda 6 (Hs=4.4m, Tp=9.0s, Dir=303°N).

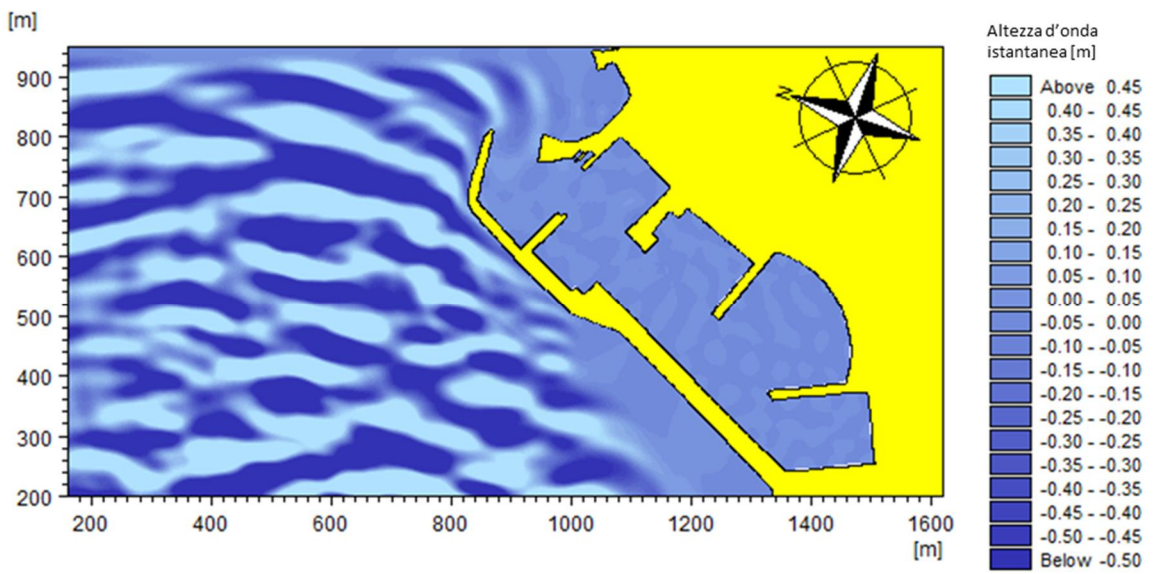


Figura 36 – Andamento della superficie del mare: onda 3 (Hs=3.3m, Tp=9.2s, Dir=256°N), griglia 250°N, seconda ipotesi di progetto.

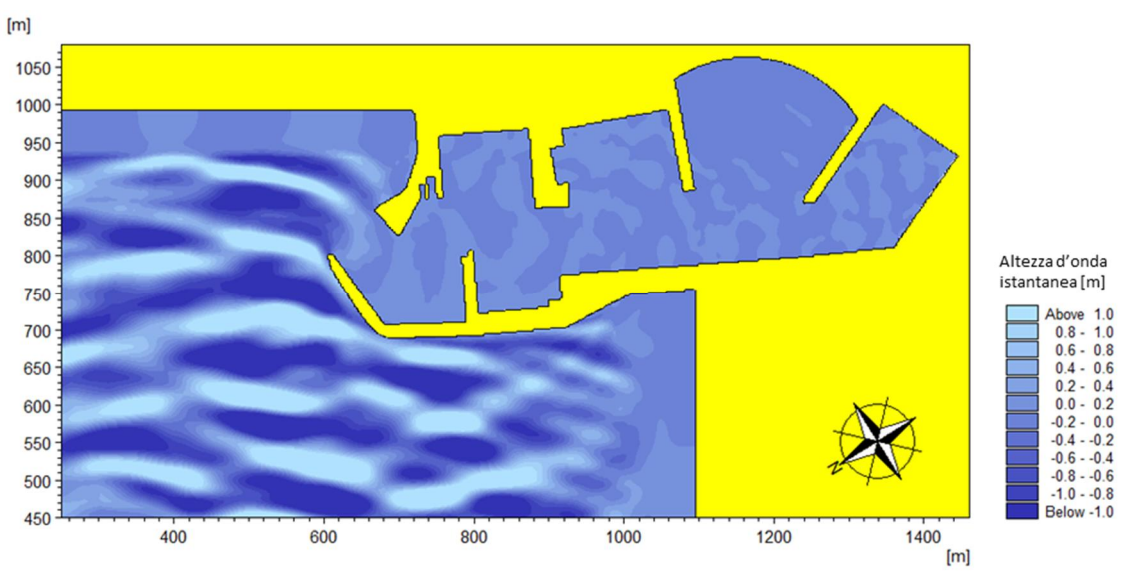


Figura 37 – Andamento della superficie del mare: onda 6 (Hs=4.4m, Tp=9.0s, Dir=303°N), griglia 300°N, seconda ipotesi di progetto.

La Figura 38 rappresenta le altezze d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale per l'onda 3 ( $H_s=3.3\text{m}$ ,  $T_p=9.2\text{s}$ ,  $\text{Dir}=256^\circ\text{N}$ ): si può osservare che anche con questa configurazione la condizione limite è ampiamente rispettata, e quindi non si hanno sostanziali modifiche rispetto alla configurazione precedente.

La Figura 39 è relativa all'onda 6 ( $H_s=4.4\text{m}$ ,  $T_p=9.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=303^\circ\text{N}$ ): si può osservare invece che con questa seconda ipotesi, la condizione limite non è rispettata parzialmente solo presso l'imboccatura. Tuttavia, tale ipotesi di progetto presenta rispetto alla prima un apprezzabile riduzione di agitazione in tutto l'avamposto.

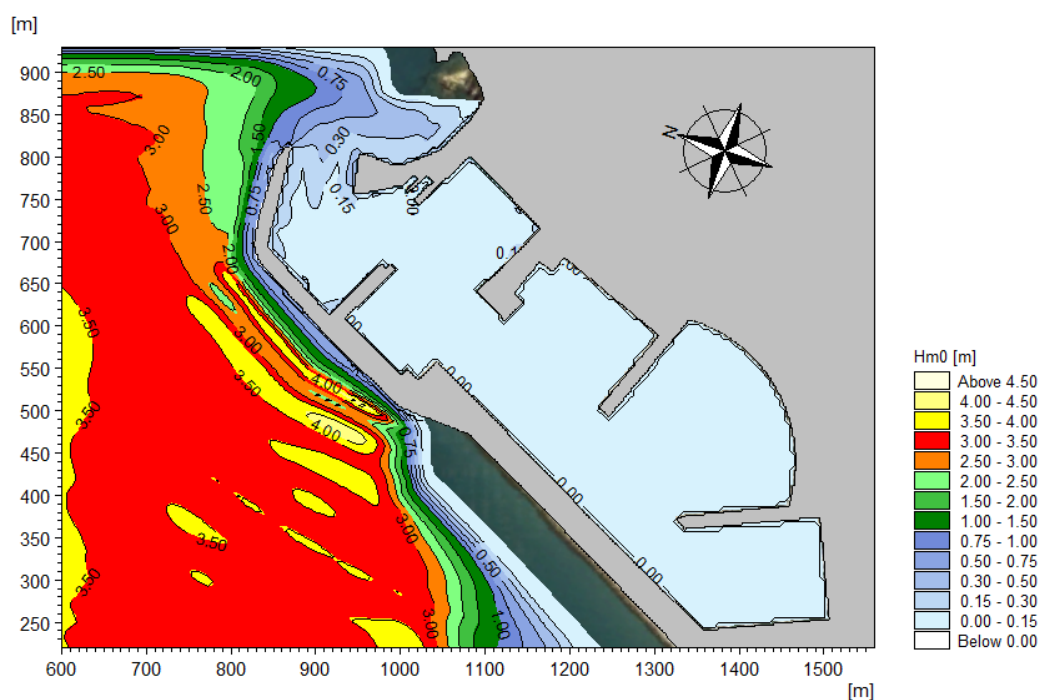


Figura 38 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 3 ( $H_s=3.3\text{m}$ ,  $T_p=9.2\text{s}$ ,  $\text{Dir}=256^\circ\text{N}$ ), griglia  $250^\circ\text{N}$ , seconda ipotesi di progetto.

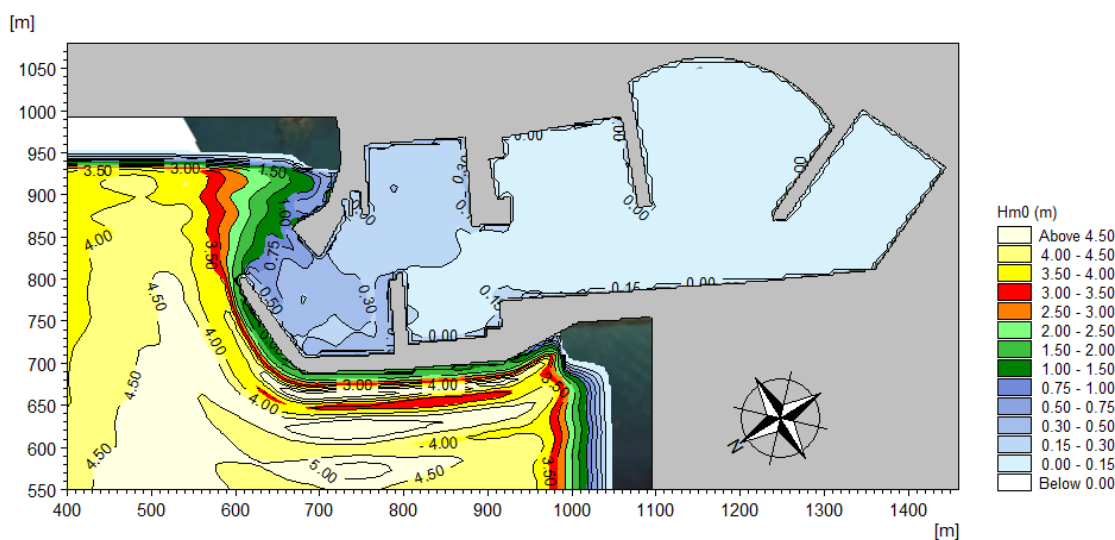


Figura 39 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 6 ( $H_s=4.4\text{m}$ ,  $T_p=9.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=303^\circ\text{N}$ ), griglia  $300^\circ\text{N}$ , seconda ipotesi di progetto.



### 3.4.3. Terza ipotesi di progetto

I risultati ottenuti per la terza ipotesi di progetto (Figura 10 c) sono riportati di seguito. L'andamento della superficie del mare è riportato in Figura 40 per l'onda 3 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), e in Figura 41 per l'onda 6 ( $H_s=4.4m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=303^\circ N$ ).

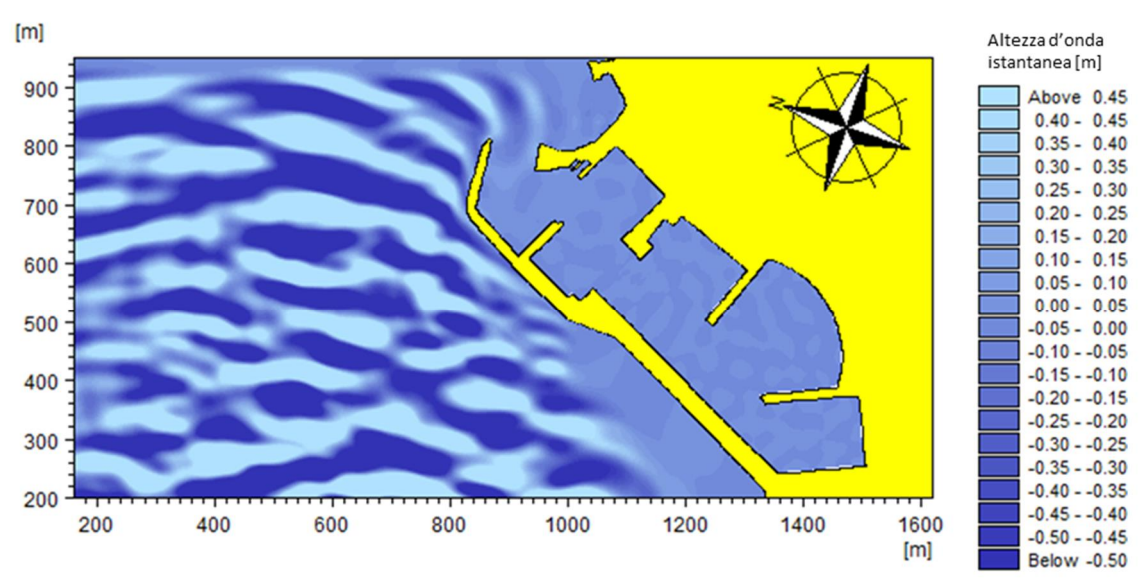


Figura 40 – Andamento della superficie del mare: onda 3 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), griglia  $250^\circ N$ , terza ipotesi di progetto.

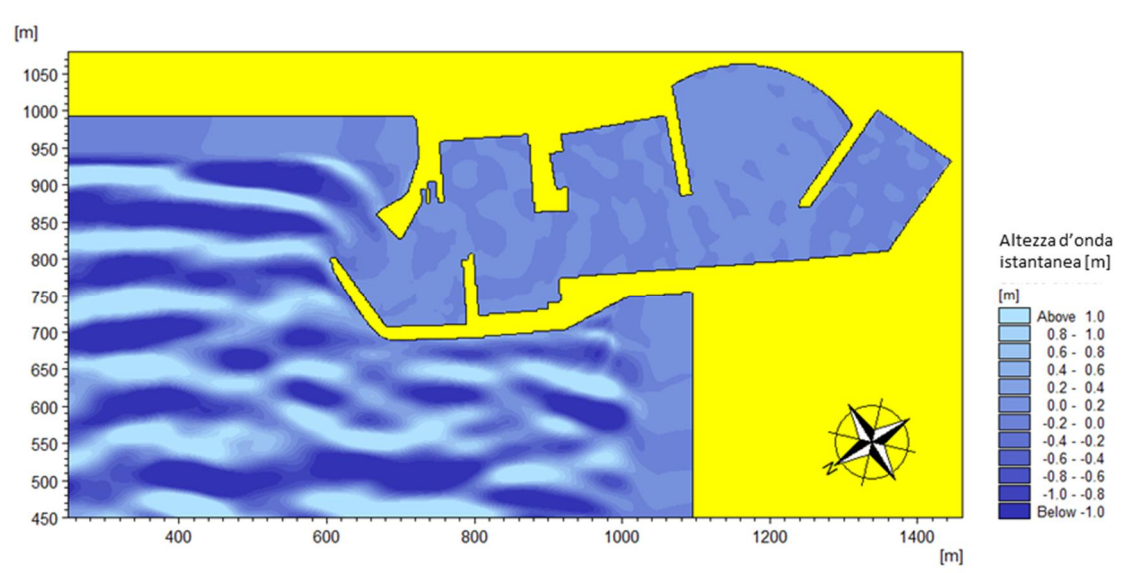


Figura 41 – Andamento della superficie del mare: onda 6 ( $H_s=4.4m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=303^\circ N$ ), griglia  $300^\circ N$ , terza ipotesi di progetto.

In Figura 42 ed in Figura 43 sono riportate le altezze d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale, rispettivamente per l'onda 3 ( $H_s=3.3m$ ,  $T_p=9.2s$ ,  $Dir=256^\circ N$ ), e per l'onda 6 ( $H_s=4.4m$ ,  $T_p=9.0s$ ,  $Dir=303^\circ N$ ).

Anche per questa ipotesi di progetto si può osservare che la condizione limite è ampiamente rispettata per entrambe le onde simulate, sebbene per la sola l'onda 6 si osservano valori pari a 0.50m limitatamente all'imboccatura del porto.

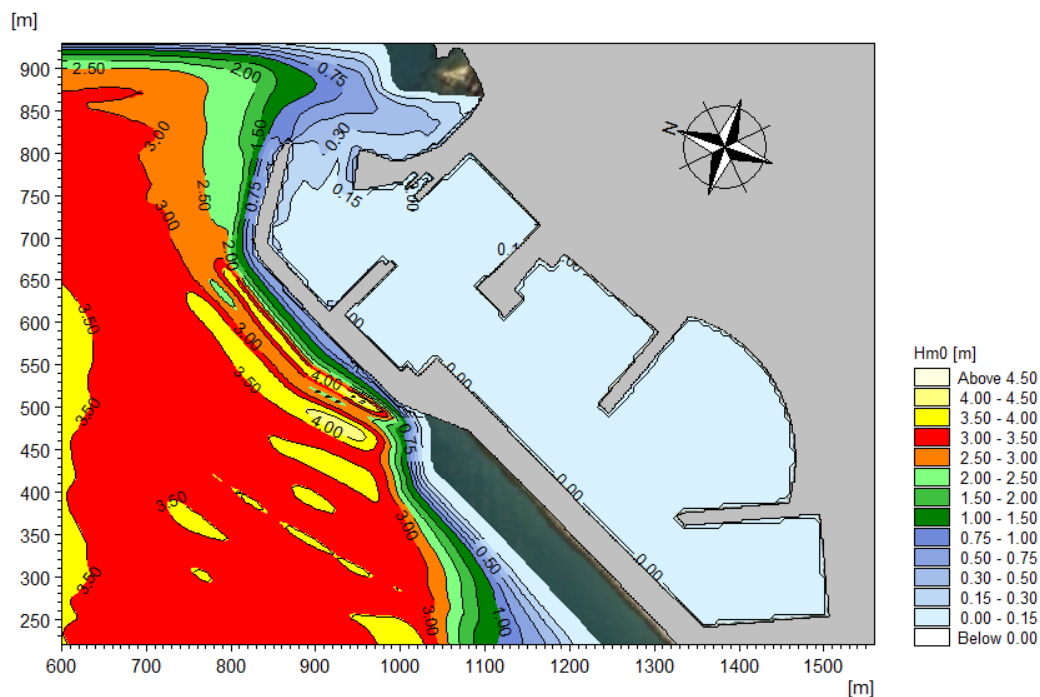


Figura 42 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 3 ( $H_s=3.3\text{m}$ ,  $T_p=9.2\text{s}$ ,  $\text{Dir}=256^\circ\text{N}$ ), griglia  $250^\circ\text{N}$ , terza ipotesi di progetto.

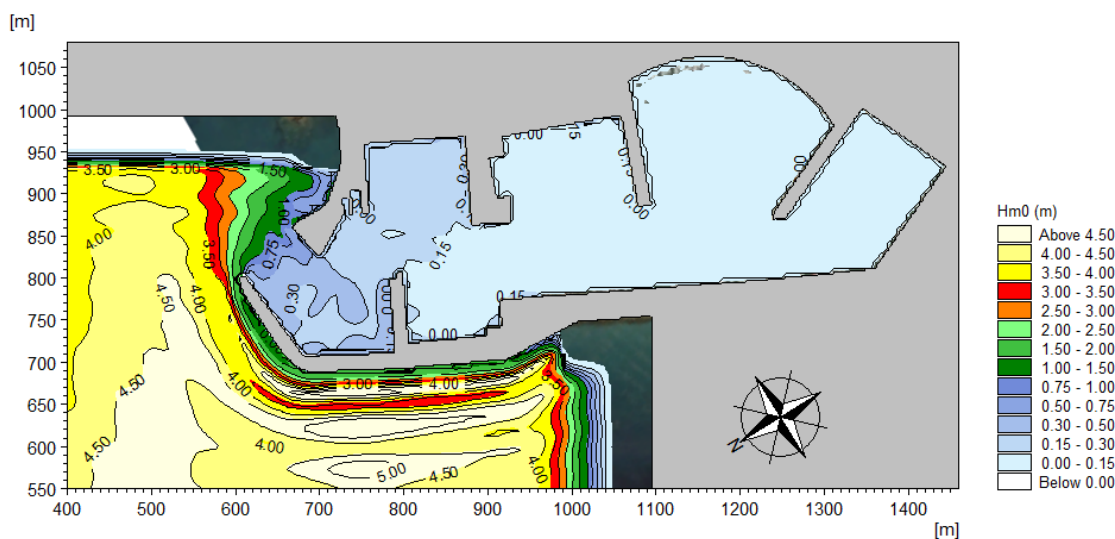


Figura 43 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 6 ( $H_s=4.4\text{m}$ ,  $T_p=9.0\text{s}$ ,  $\text{Dir}=303^\circ\text{N}$ ), griglia  $300^\circ\text{N}$ , terza ipotesi di progetto.

### 3.5. CONFRONTO DEI RISULTATI FRA LE TRE IPOTESI DI PROGETTO

Dal confronto dei risultati della distribuzione dell'altezza d'onda significativa nelle tre ipotesi di progetto è possibile notare un lieve miglioramento nella seconda e nella terza ipotesi di progetto rispetto alla prima. Al fine di valutare numericamente questo miglioramento, sono stati estratti i valori di altezza d'onda ricostruiti dal modello e calcolato il coefficiente di disturbo definito come rapporto fra l'altezza d'onda presente in punto interno al bacino portuale e quella incidente ( $H_{m0}/H_{inc}$ ) in 14 punti (Tabella 6) all'imboccatura e all'interno del bacino portuale (Figura 44).

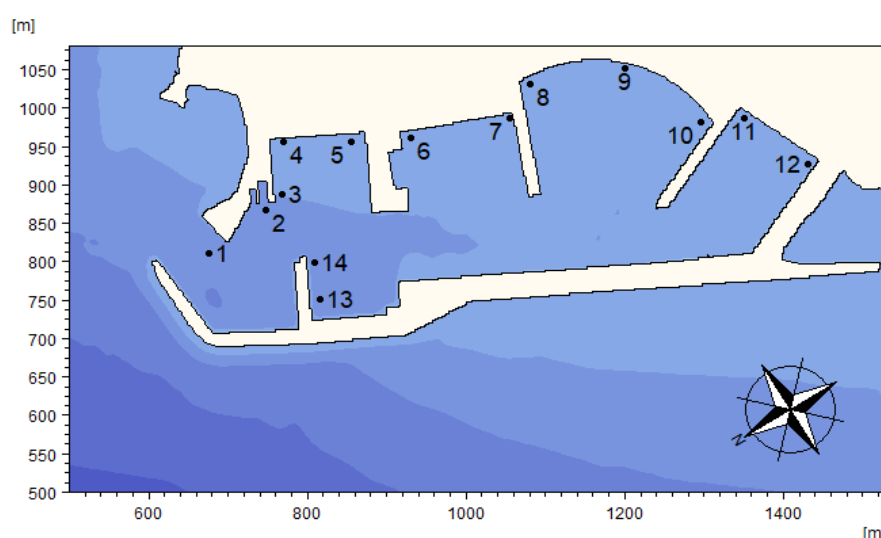


Figura 44 – Localizzazione dei punti analizzati.

**Tabella 6 – Coordinate dei punti estratti**

PUNTO	COORDINATE UTM-WGS84		PUNTO	COORDINATE UTM-WGS84	
1	642009.24	4741172.49	8	641997.26	4740711.75
2	642021.45	4741082.69	9	641954.58	4740597.83
3	642027.88	4741053.82	10	641846.46	4740550.56
4	642087.31	4741017.72	11	641823.29	4740500.42
5	642044.81	4740944.11	12	641731.33	4740461.14
6	642011.64	4740876.65	13	641887.27	4741081.25
7	641970.79	4740755.90	14	641931.34	4741062.44

Dai risultati riportati in Tabella 7, Tabella 8 e Tabella 9, rispettivamente per le condizioni di comfort, di sicurezza e limite è possibile osservare che i valori di altezza d'onda estratti nei punti interni al bacino portuale sono sempre inferiori ai limiti dell'AIPCN per tutte e tre le ipotesi di progetto. L'unico punto che non rispetta i limiti dell'AIPCN è quello situato presso l'imboccatura (p.to 1 in Figura 44). Infatti si osserva che per la prima ipotesi di progetto, limitatamente alla zona dell'imboccatura, il valore di altezza d'onda supera di poco il limite dell'AIPCN nelle condizioni di sicurezza (con l'onda 5 si registra  $H_{m0}=0.32m$ ), mentre risulta essere superiore nelle condizioni limite (con

l'onda 6 si registra  $H_{m0}=0.73m$ ), (Figura 46 e Figura 47). Inoltre, solo nel caso dell'onda 6 i valori estratti all'imboccatura (p.to 1) mostrano una riduzione di circa il 36% del valore di altezza d'onda per l'ipotesi 2 (0.47m) e del 40% per l'ipotesi 3 (0.44m), rispetto all'ipotesi 1.

**Tabella 7 – Valore dell'altezza d'onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell'AIPCN per le condizioni di comfort)**

CONDIZIONI DI COMFORT ( $H_{m0}<0.15m$ )												
P.to	Onda 1 – $H_s=1.2m$ , $T_p=7.7s$ , $Dir=260^\circ N$						Onda 4 – $H_s=0.7m$ , $T_p=5.4s$ , $Dir=300^\circ N$					
	$H_{m0}$ [m]			$H_{m0}/H_{inc}$ [-]			$H_{m0}$ [m]			$H_{m0}/H_{inc}$ [-]		
	<u>Hp 1</u>	<u>Hp 2</u>	<u>Hp 3</u>	<u>Hp 1</u>	<u>Hp 2</u>	<u>Hp 3</u>	<u>Hp 1</u>	<u>Hp 2*</u>	<u>Hp 3*</u>	<u>Hp 1</u>	<u>Hp 2*</u>	<u>Hp 3*</u>
1	0.08	0.05	0.04	0.07	0.04	0.03	0.04	-	-	0.06	-	-
2	0.08	0.06	0.05	0.07	0.05	0.04	0.03	-	-	0.04	-	-
3	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.04	0.02	-	-	0.03	-	-
4	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.04	0.03	-	-	0.05	-	-
5	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	-	-	0.04	-	-
6	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.02	-	-
7	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	-	-	0.02	-	-
8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.01	-	-
9	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.01	-	-
10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.02	-	-
11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.01	-	-
12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.02	-	-
13	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	-	-	0.02	-	-
14	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	-	-	0.03	-	-

\*le ipotesi 2 e 3 non sono state simulate per l'onda 4 poiché i risultati estratti per l'ipotesi 1 hanno evidenziato valori già nettamente inferiori ai limiti suggeriti dall'AIPCN.

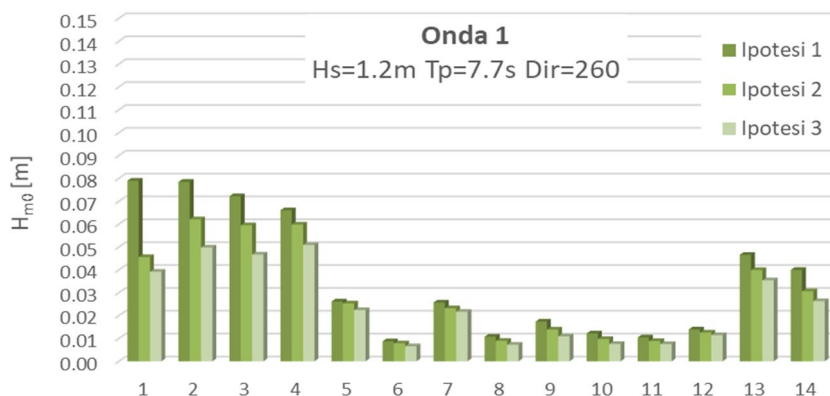


Figura 45 – Confronto dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni di comfort.



**Tabella 8 – Valore dell’altezza d’onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell’AIPCN per le condizioni di sicurezza)**

P.to	CONDIZIONI DI SICUREZZA ( $H_{m0} < 0.30m$ )											
	Onda 2 – $H_s=2.5m, T_p=9.0s, Dir=242^\circ N$						Onda 5 – $H_s=3.3m, T_p=8.0s, Dir=302^\circ N$					
	$H_{m0} [m]$			$H_{m0}/H_{inc} [-]$			$H_{m0} [m]$			$H_{m0}/H_{inc} [-]$		
	Hp 1	Hp 2	Hp 3	Hp 1	Hp 2	Hp 3	Hp 1	Hp 2	Hp 3	Hp 1	Hp 2	Hp 3
1	0.10	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03	<u>0.32</u>	0.27	0.26	0.10	0.08	0.08
2	0.11	0.09	0.08	0.05	0.04	0.03	0.15	0.15	0.15	0.04	0.04	0.04
3	0.11	0.09	0.08	0.04	0.03	0.03	0.14	0.14	0.14	0.04	0.04	0.04
4	0.09	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.13	0.13	0.13	0.04	0.04	0.04
5	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.11	0.11	0.11	0.03	0.03	0.03
6	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.07	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02
7	0.06	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02	0.10	0.10	0.10	0.03	0.03	0.03
8	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01
9	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.05	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01
10	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01
11	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01
12	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01
13	0.06	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.09	0.09	0.09	0.03	0.03	0.03
14	0.06	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.08	0.08	0.09	0.02	0.02	0.03

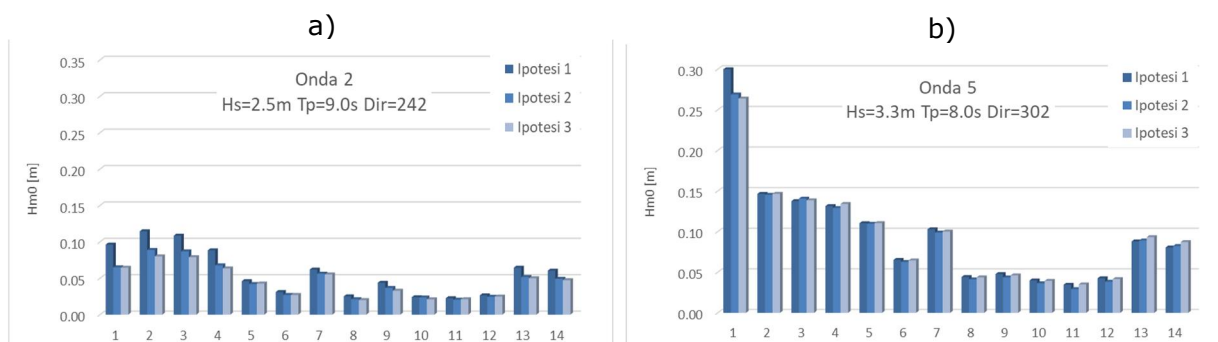


Figura 46 – Analisi comparativa dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni di sicurezza.

Tabella 9 – Valore dell’altezza d’onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell’AIPCN per le condizioni limite)

P.to	CONDIZIONI LIMITE ( $H_{m0} < 0.50m$ )											
	Onda 3 – $H_s=3.3m$ , $T_p=9.2s$ , $Dir=256^\circ N$						Onda 6 – $H_s=4.4m$ , $T_p=9.0s$ , $Dir=303^\circ N$					
	$H_{m0}$ [m]			$H_{m0}/H_{inc}$ [-]			$H_{m0}$ [m]			$H_{m0}/H_{inc}$ [-]		
	$H_p 1$	$H_p 2$	$H_p 3$	$H_p 1$	$H_p 2$	$H_p 3$	$H_p 1$	$H_p 2$	$H_p 3$	$H_p 1$	$H_p 2$	$H_p 3$
1	0.13	0.11	0.11	0.04	0.03	0.03	<u>0.73</u>	0.47	0.44	0.17	0.11	0.10
2	0.16	0.12	0.10	0.05	0.04	0.03	0.26	0.22	0.21	0.06	0.05	0.05
3	0.11	0.12	0.10	0.03	0.04	0.03	0.25	0.22	0.21	0.06	0.05	0.05
4	0.11	0.09	0.08	0.03	0.03	0.03	0.21	0.21	0.20	0.05	0.05	0.04
5	0.09	0.08	0.08	0.03	0.02	0.02	0.20	0.20	0.19	0.05	0.05	0.04
6	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.12	0.12	0.11	0.03	0.03	0.03
7	0.06	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02	0.17	0.16	0.16	0.04	0.04	0.04
8	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.07	0.07	0.06	0.02	0.02	0.01
9	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.07	0.07	0.08	0.02	0.02	0.02
10	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.07	0.07	0.07	0.02	0.02	0.02
11	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.07	0.07	0.06	0.02	0.02	0.01
12	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.07	0.08	0.07	0.02	0.02	0.02
13	0.08	0.07	0.06	0.02	0.02	0.02	0.15	0.14	0.15	0.04	0.03	0.03
14	0.09	0.08	0.06	0.03	0.02	0.02	0.15	0.13	0.14	0.03	0.03	0.03

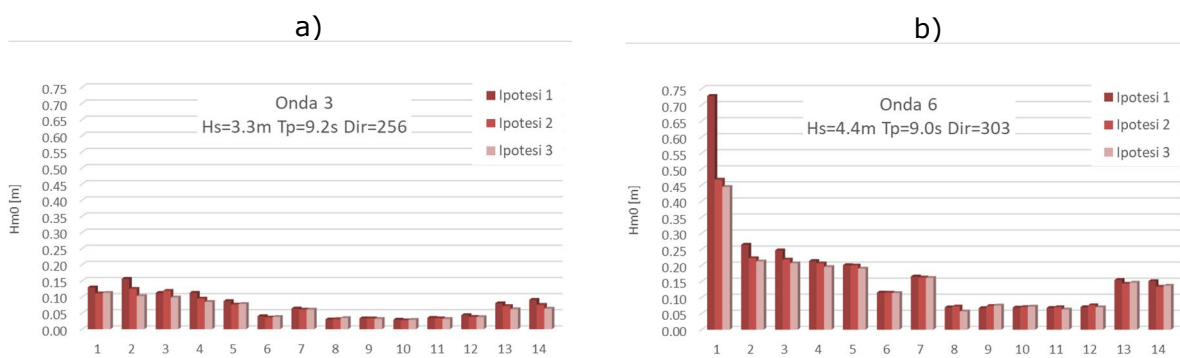


Figura 47 – Analisi comparativa dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni limite.

### 3.6. ONDE DA GRECALE

Facendo riferimento allo "Studio dell'agitazione interna del Porto di Punta Ala" condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale di Firenze nel 2010, e allo "Studio meteomarinario e studio numerico dell'interazione tra le nuove opere previste per l'ampiamiento del Marina di Punta Ala e le dinamiche marine", eseguito da AM3 nel 2014, le onde simulate per il settore da grecale sono quelle riportate in Tabella 10. Per entrambe le onde i periodi di picco sono stati incrementati e posti pari a 5s, al fine di essere più cautelativi nello studio di agitazione portuale.

**Tabella 10 - Parametri caratteristici delle onde da vento selezionate**

	Settore	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dir [°N]
<b>ONDA 7</b> <b>Tr=50anni</b>	45°N	1.0	5	4.2	45
<b>ONDA 8</b> <b>Tr=5anni</b>	45°N	0.6	5	4.2	45

#### 3.6.1. Impostazioni del modello

Le caratteristiche geometriche della griglia di calcolo utilizzata nelle simulazioni numeriche di agitazione del bacino portuale della seconda configurazione di progetto per le onde da grecale sono riportate in Tabella 11 e in Figura 48.

**Tabella 11 - Caratteristiche della griglia di calcolo utilizzata.**

n.	Onda	Griglia	Dimensioni [m]		Passo [m]	
			Lx	Ly	Dx	Dy
<b>1</b>	Onde 7-8	45°N	734	1430	2	2

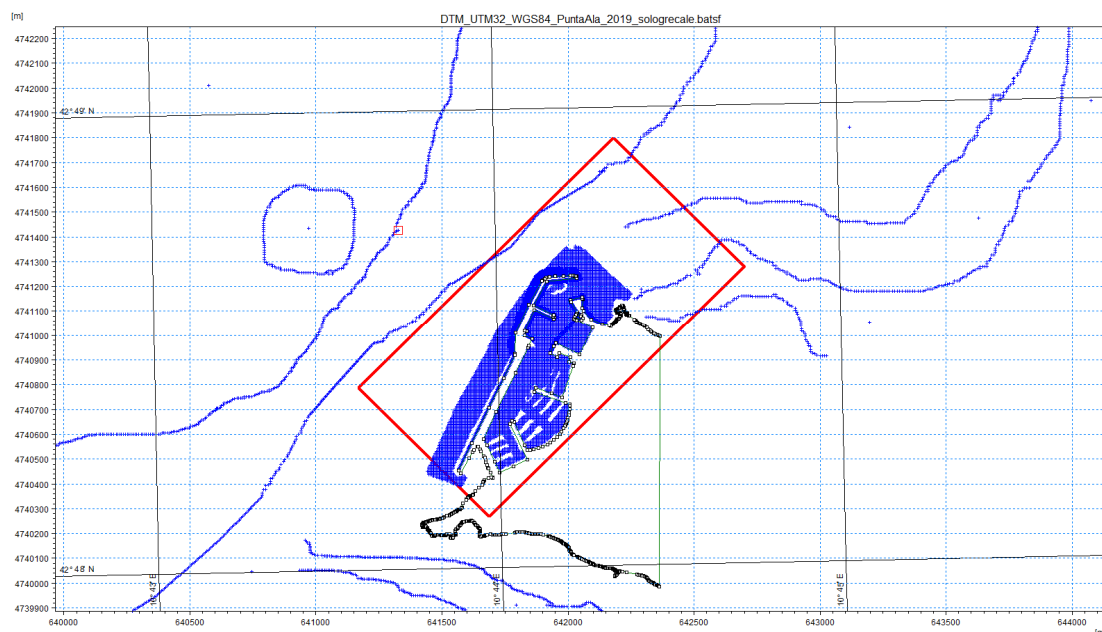


Figura 48 - Mappa dei punti utilizzati per la costruzione dei modelli digitali dei fondali e griglia di calcolo

Come nelle altre griglie di calcolo utilizzate in corrispondenza di aree che non interferiscono con la propagazione dell'onda e l'ingresso delle stesse nel bacino portuale è stata impostata una terra fittizia per ridurre i tempi di calcolo delle simulazioni. La batimetria utilizzata nelle simulazioni per le onde da grecale è riportata in Figura 49.

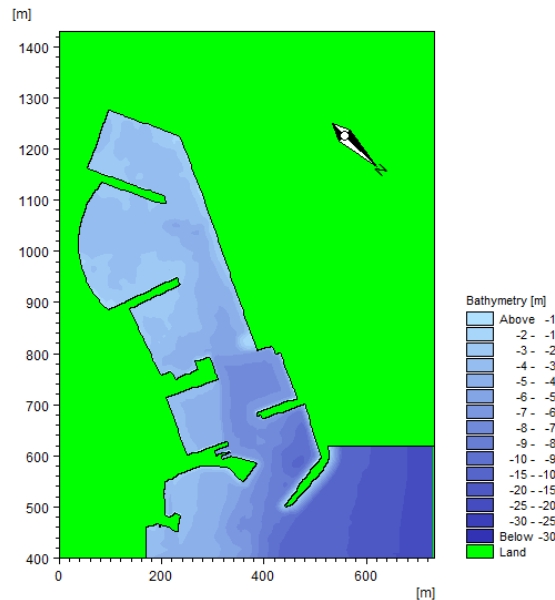


Figura 49 – Batimetria griglia 45°N

Gli strati assorbenti introdotti in corrispondenza dei confini del dominio di calcolo e la linea di generazione interna al dominio di calcolo da cui sono state propagate le onde selezionate (linea di colore blu), sono riportati in Figura 50.

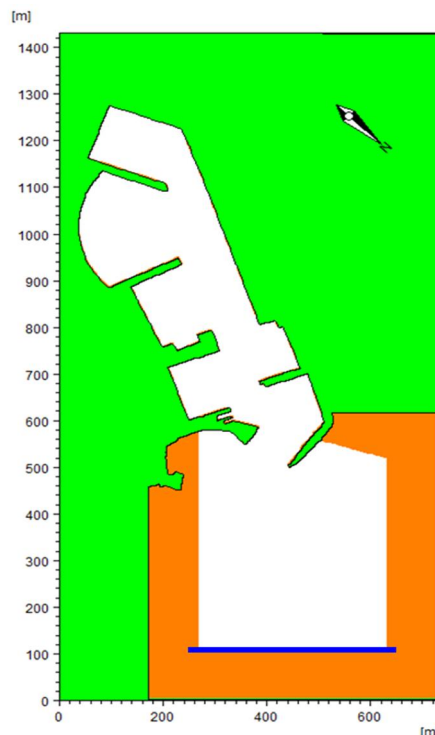


Figura 50 – Strati assorbenti griglia 45°N e linea di generazione



I valori del coefficiente di riflessione adottati per ciascuna tipologia di struttura portuale sono i medesimi indicati in Figura 10 e sono riportati in Figura 51.

Per le simulazioni condotte è stato considerato un intervallo di tempo pari a 2 ore e un passo temporale di integrazione pari a 0.025s.

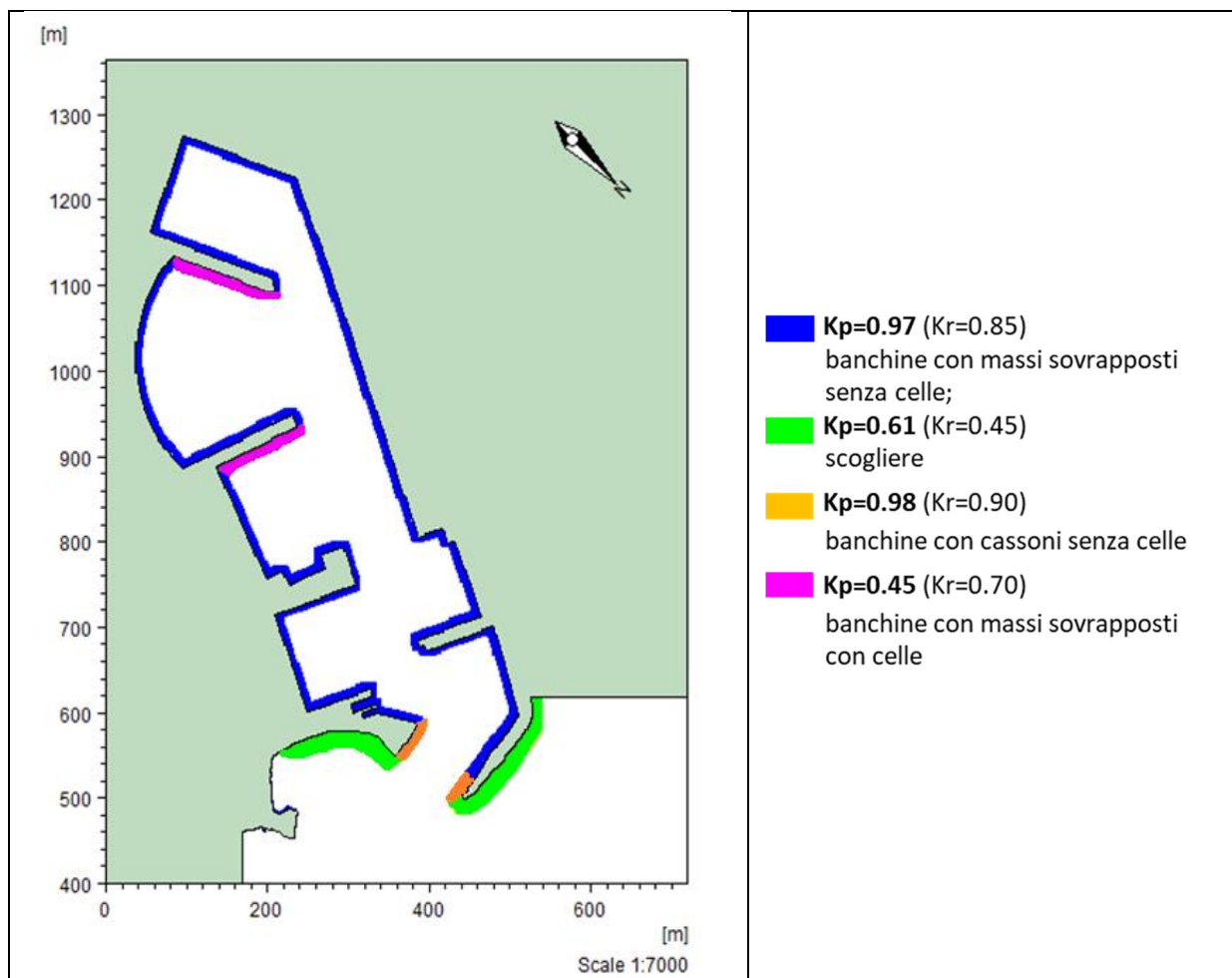


Figura 51 – Mappa dei coefficienti di porosità nella prima ipotesi di progetto, griglia 45°N.

### 3.6.2. Risultati delle simulazioni relative alle condizioni di sicurezza

Lo studio di agitazione relativo alle condizioni di sicurezza è stato svolto con riferimento all'onda 8, i cui parametri sono riportati in Tabella 10 (vedi paragrafo 3.3. dello studio redatto da AM3 nel 2014). Al fine di verificare questa condizione il valore di altezze d'onda residue all'interno del bacino portuale deve essere inferiore a 0.30m. L'andamento della superficie del mare in un certo istante temporale è riportato in Figura 52 per tutte e tre le ipotesi di progetto.

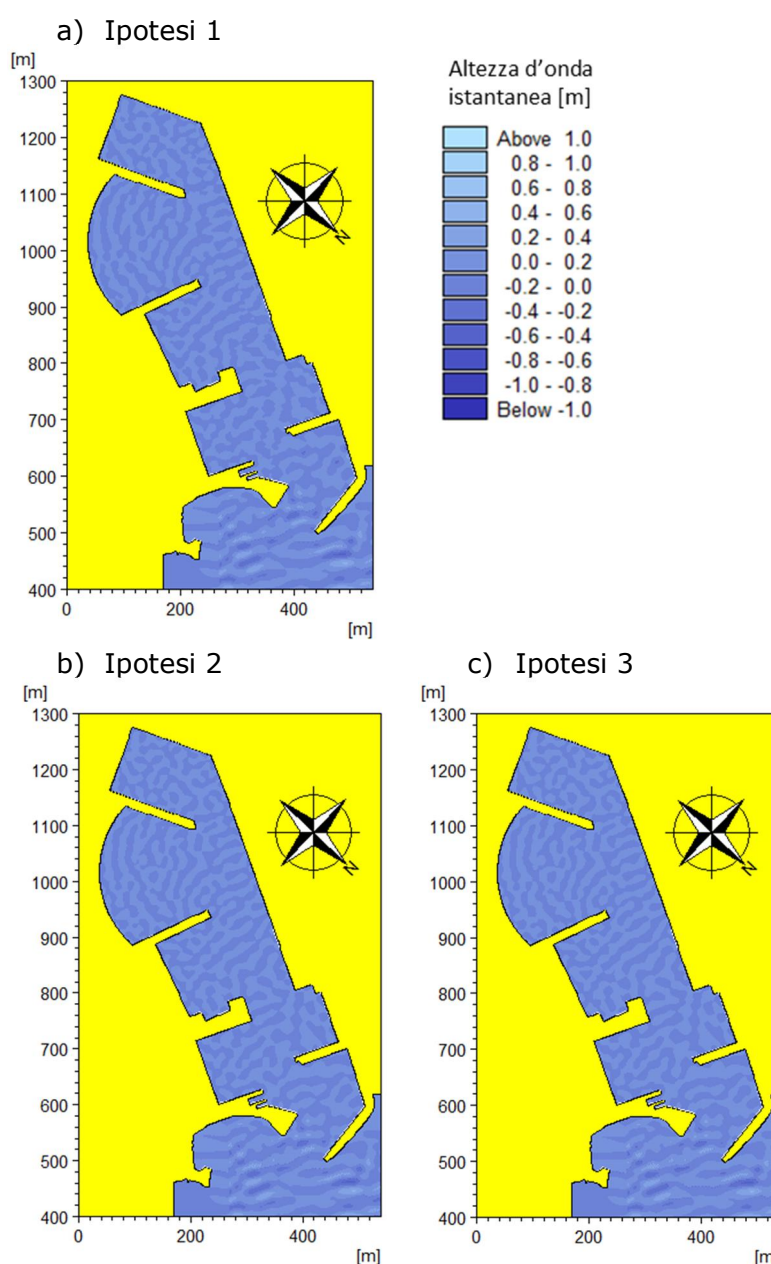
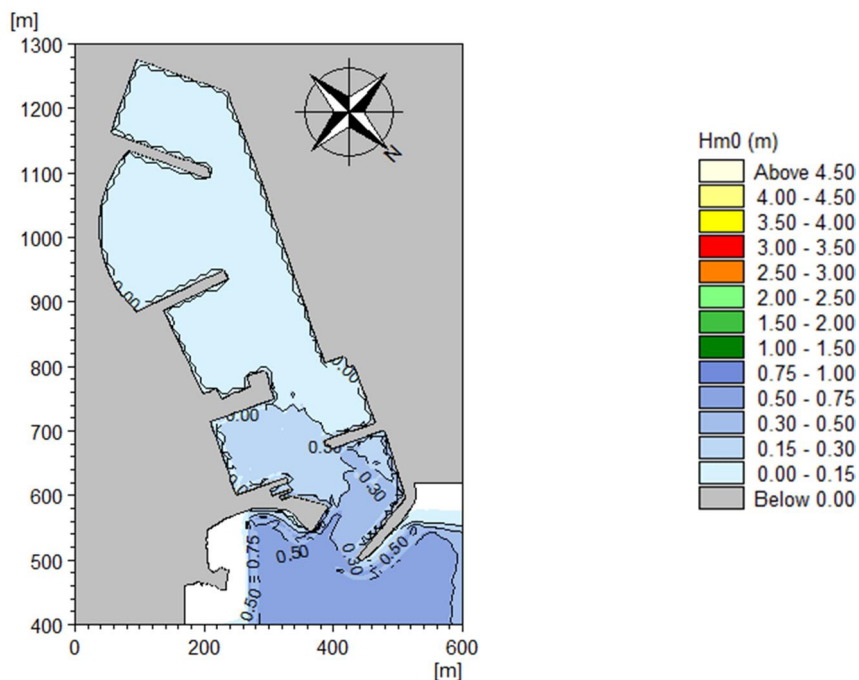


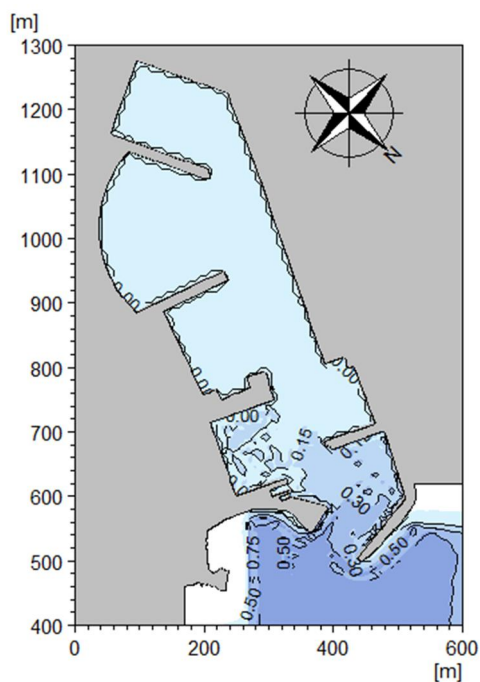
Figura 52 – Andamento della superficie del mare: onda 8 ( $H_s=0.6m$ ,  $T_p=5s$ ,  $Dir=45^\circ N$ ), griglia  $45^\circ N$ : a) Ipotesi 1, b) Ipotesi 2 e c) Ipotesi 3.

Le altezze d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale sono riportate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..** Per tutte e tre le ipotesi progettuali, la condizione di sicurezza è rispettata il bacino portuale, fatta eccezione per l'imboccatura e l'avamposto, dove per la prima ipotesi si registrano valori leggermente superiori al valore limite.

a) Ipotesi 1



b) Ipotesi 2



c) Ipotesi 3

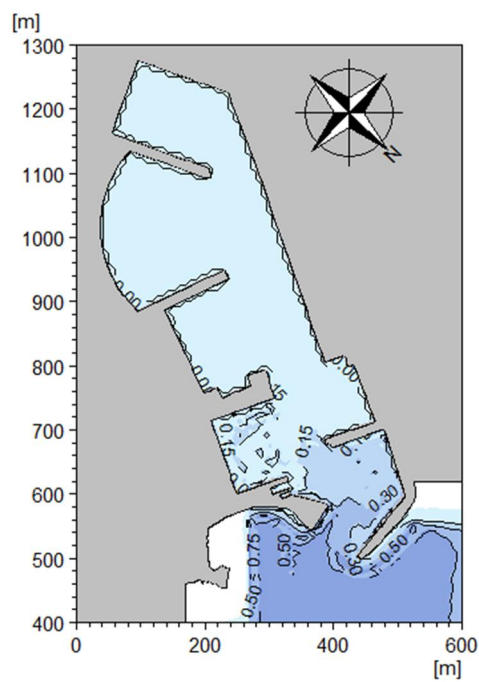


Figura 53 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 8 ( $H_s=0.6\text{m}$ ,  $T_p=5\text{s}$ ,  $\text{Dir}=45^\circ\text{N}$ ), griglia  $45^\circ\text{N}$  a) Ipotesi 1, b) Ipotesi 2 e c) Ipotesi 3.

Anche per l'onda 8 sono stati estratti i valori di altezza d'onda e coefficiente di disturbo ( $H_{m0}/H_{inc}$ ) negli stessi 14 punti precedenti di Tabella 6 e Figura 44. Dai risultati riportati in Tabella 12 e Figura 54 è possibile osservare che solo nel primo punto posto all'imboccatura del porto si registrano altezze d'onda residue con valori leggermente superiori ai limiti dell'AIPCN-PIANC.

**Tabella 12 – Valore dell'altezza d'onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell'AIPCN per le condizioni di sicurezza)**

CONDIZIONI DI SICUREZZA ( $H_{m0} < 0.30m$ )						
Onda 8 – $H_s=0.6m$ , $T_p=5s$ , $Dir=45^\circ N$						
P.to	$H_{m0}$ [m]			$H_{m0}/H_{inc}$ [-]		
	Ipotesi 1	Ipotesi 2	Ipotesi 3	Ipotesi 1	Ipotesi 2	Ipotesi 3
1	<u>0.48</u>	<u>0.43</u>	<u>0.42</u>	0.81	0.71	0.70
2	0.20	0.14	0.14	0.34	0.24	0.23
3	0.16	0.13	0.13	0.27	0.22	0.21
4	0.16	0.13	0.13	0.27	0.22	0.21
5	0.17	0.14	0.13	0.28	0.23	0.22
6	0.06	0.05	0.05	0.10	0.09	0.08
7	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04
8	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06
9	0.04	0.03	0.03	0.06	0.06	0.06
10	0.05	0.05	0.04	0.08	0.08	0.07
11	0.05	0.05	0.05	0.09	0.08	0.08
12	0.04	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06
13	0.11	0.08	0.08	0.18	0.14	0.13
14	0.13	0.10	0.09	0.21	0.16	0.15

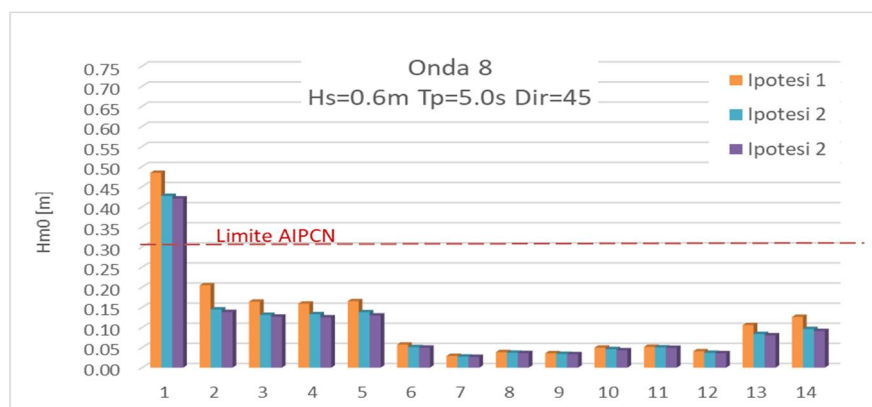


Figura 54 – Analisi comparativa dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni di sicurezza.



### 3.6.3. Risultati delle simulazioni relative alle condizioni limite

Lo studio di agitazione relativo alle condizioni limite è stato svolto con riferimento all'onda 7, i cui parametri sono riportati in Tabella 10 (vedi paragrafo 3.4. dello studio redatto da AM3 nel 2014). Al fine di verificare questa condizione il valore di altezze d'onda residue all'interno del bacino portuale deve essere inferiore a 0.50m (raccomandazioni AIPCN-PIANC). L'andamento della superficie del mare in un certo istante temporale è riportato in Figura 55, per tutte e tre le ipotesi di progetto.

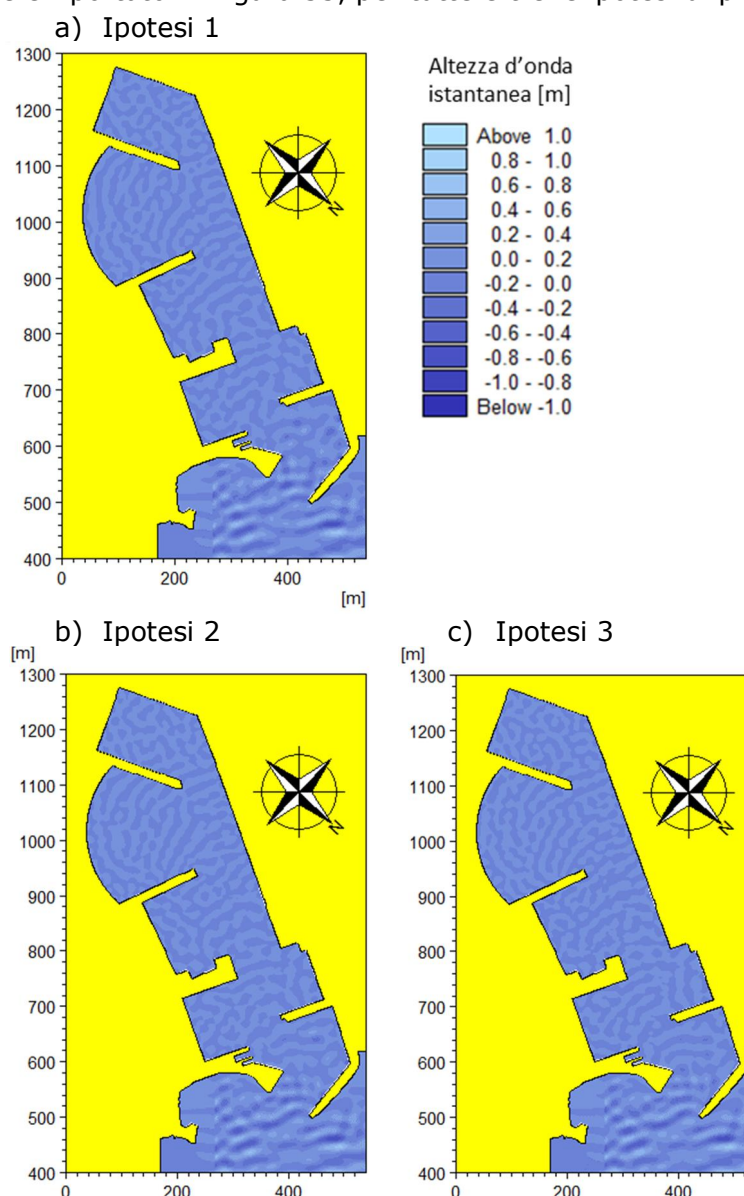


Figura 55 – Andamento della superficie del mare: onda 7 ( $H_s=1.0\text{m}$ ,  $T_p=5\text{s}$ ,  $\text{Dir}=45^\circ\text{N}$ ), griglia  $45^\circ\text{N}$ : a) Ipotesi 1, b) Ipotesi 2 e c) Ipotesi 3.

Le altezze d'onda significativa nei pressi e all'interno del bacino portuale sono riportate in Figura 56. Per tutte e tre le ipotesi progettuali, la condizione limite è rispettata in tutto lo specchio acqueo, ad eccezione di un'area limitata presso l'imboccatura del porto.

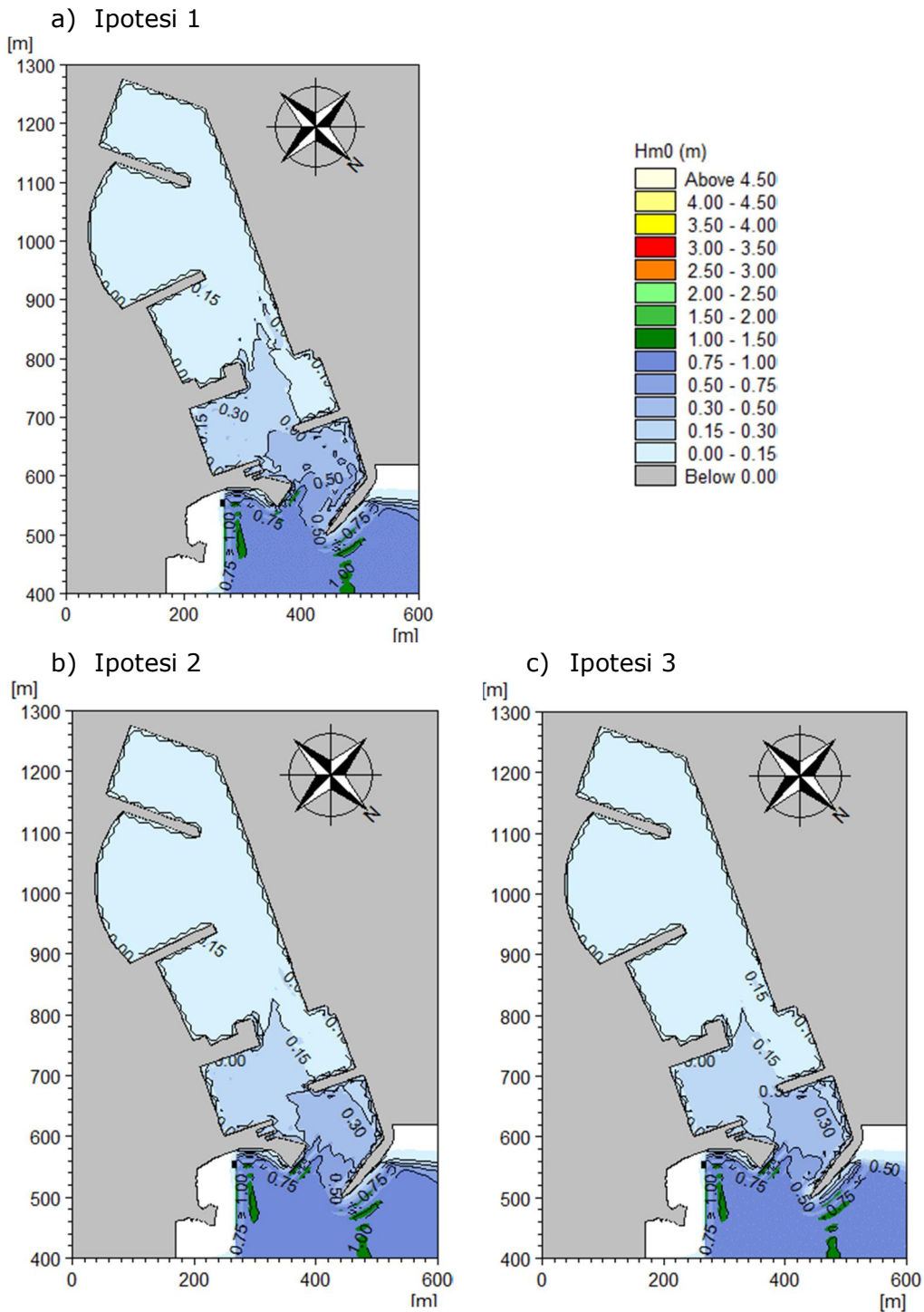


Figura 56 – Distribuzione dell'altezza d'onda significativa: onda 7 ( $H_s=1.0m$ ,  $T_p=5s$ ,  $Dir=45^\circ N$ ), griglia 45°N a) Ipotesi 1, b) Ipotesi 2 e c) Ipotesi 3.

Anche per l'onda 7 sono stati estratti i valori di altezza d'onda e coefficiente di disturbo ( $H_{m0}/H_{inc}$ ) negli stessi 14 punti precedenti di Tabella 6 e Figura 44. Dai risultati riportati in Tabella 13 e Figura 57 è possibile osservare che solo il punto all'imboccatura supera il limite di 0.5m. I risultati ottenuti per le onde da grecale, sia per la condizione di sicurezza che per quella limite, permettono di affermare che già la prima ipotesi progettuale è in grado di garantire l'ormeggio delle imbarcazioni in sicurezza in tutto lo specchio acqueo.

**Tabella 13 – Valore dell'altezza d'onda e del coefficiente di disturbo nei punti estratti (i valori sottolineati sono superiori ai limiti dell'AIPCN per le condizioni limite)**

CONDIZIONI LIMITE ( $H_{m0} < 0.50m$ )						
Onda 7 – $H_s=1.0m$ , $T_p=5s$ , $Dir=45^\circ N$						
P.to	$H_{m0} [m]$			$H_{m0}/H_{inc} [-]$		
	Ipotesi 1	Ipotesi 2	Ipotesi 3	Ipotesi 1	Ipotesi 2	Ipotesi 3
1	<u>0.70</u>	<u>0.68</u>	<u>0.69</u>	0.70	0.68	0.69
2	0.25	0.21	0.20	0.25	0.21	0.20
3	0.24	0.21	0.20	0.24	0.21	0.20
4	0.26	0.21	0.19	0.26	0.21	0.19
5	0.24	0.19	0.19	0.24	0.19	0.19
6	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06
7	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
8	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04
9	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
10	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06
11	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06
12	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04
13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11
14	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14

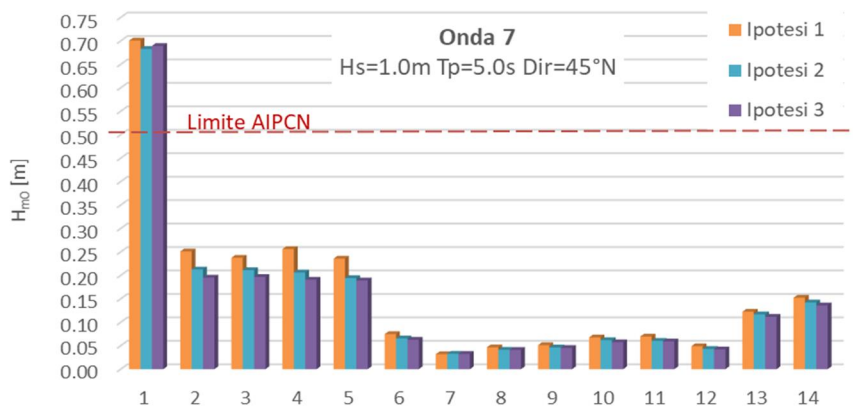


Figura 57 – Analisi comparativa dei risultati fra le tre ipotesi di progetto per le condizioni limite.

## CONCLUSIONI

---

Lo studio descritto in questa relazione tecnica è stato condotto ad integrazione del precedente *“Studio meteomarinico e studio numerico dell’interazione tra le nuove opere previste per l’ampiamiento del Marina di Punta Ala e le dinamiche marine”*, redatto da AM3 nel 2014.

Lo studio dell’agitazione interna è stato finalizzato all’analisi della propagazione delle onde all’interno del bacino portuale nell’ottica di verificare, con il modello numerico, la rispondenza della soluzione che dovrà essere sviluppata a livello progettuale alle indicazioni fornite nelle *“Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici”*, AIPCN – PIANC, 2002. Come per il precedente studio redatto da AM3 nel 2014, è stato utilizzato il modulo Boussinesq Waves (BW) del codice di calcolo MIKE21, che consente di simulare la propagazione ondosa all’interno dell’area portuale e quindi di stimare i valori di altezza in tutti i punti del dominio di calcolo nonché i relativi coefficienti di disturbo.

Sono state considerate tre differenti ipotesi, relative alle diverse tipologie costruttive delle banchine interne, forniteci dal committente. Per i moti ondosi incidenti sono stati utilizzati quelli analizzati nel precedente studio del 2014.

I risultati delle simulazioni di agitazione portuale dimostrano che i valori delle altezze d’onda residue all’interno del bacino portuale sono sempre inferiori ai limiti (condizione di comfort, sicurezza e limite) del AIPCN-PIANC per tutte e tre le ipotesi di progetto prese in esame. Valori leggermente più alti dei limiti sono presenti solo presso l’imboccatura ed in qualche tratto dell’avamposto dove non sono previsti ormeggi permanenti. In particolare, analizzando ciascuna condizione è stato possibile notare quanto segue:

- Per le condizioni di comfort ( $H_{m0} < 0.15m$ ), tutte le ipotesi progettuali studiate sotto l’azione di onde con frequenza non superiore a 5 giorni all’anno (onda 1 e onda 2 in Tabella 10) mostrano valori nettamente inferiori ai limiti del AIPCN-PIANC in tutto il bacino portuale.
- Per le condizioni di sicurezza ( $H_{m0} < 0.30m$ ), tutte le ipotesi progettuali sono state studiate sotto l’azione di onde con periodo di ritorno di 5 anni. I risultati dello studio mostrano valori di altezza d’onda interna differenti a seconda del settore di provenienza. Infatti, le onde provenienti dal settore meridionale, non presentano problemi per tutte e tre le ipotesi progettuali investigate, mentre quelle provenienti dal Canale di Piombino, mostrano, solo per la prima ipotesi di progetto, altezze d’onda residue aventi valori di poco superiori ai limiti suggeriti da AIPCN ( $H_{m0} = 0.32m$ ) in una zona limitata all’imboccatura del porto.



- Per le condizioni limite ( $H_{m0} < 0.50\text{m}$ ), le tre ipotesi progettuali studiate sotto l'azione di onde con periodo di ritorno pari a 50 anni, mostrano, presso l'imboccatura, valori superiori al limite del AIPCN solo per la prima ipotesi di progetto e per le onde provenienti dal settore  $300^\circ$  N ( $H_{m0} = 0.73\text{m}$ ). Tali valori presentano una riduzione di circa il 36% del valore di altezza d'onda per l'ipotesi 2 ( $H_{m0} = 0.47\text{m}$ ) e del 40% per l'ipotesi 3 ( $H_{m0} = 0.44\text{m}$ ).

Come per il precedente studio redatto da AM3 nel 2014, le onde da grecale sono state analizzate, poiché possono penetrare direttamente nel porto creando problemi di agitazione interna in particolare alle imbarcazioni ormeggiate dietro la diga foranea attuale. Nello studio di agitazione portuale sono state selezionate due onde da vento, mediante il metodo SMB, con tempo di ritorno pari a 5 e 50 anni e direzione di provenienza pari a  $45^\circ$ N. Le condizioni di sicurezza e limite sono rispettate in tutto lo specchio acqueo interno al porto; valori più elevati sono presenti solo in un'area limitata presso l'imboccatura non dove non sono previsti ormeggi.

**AM3 Spin-off s.r.l.**  
*Advanced Models and Methods in Maritime Engineering*  
 Via Madonna del Piano, 6  
 50019 Sesto Fiorentino (FI)  
 P.IVA 06375900484 REA FI 623251

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

---

### Studi condotti dalla Marina di Punta Ala SpA

*Università degli studi di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (2010) - Studio dell'agitazione interna del porto di Punta Ala.*

*Università degli studi di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (2012) - Modellistica numerica per la valutazione degli effetti indotti sulla costa con la modifica dell'imboccatura del Porto di Punta Ala.*

*AM3 Spin-off srl (2014) - Studio meteomarinario e studio numerico dell'interazione tra le nuove opere previste per l'ampiamiento del Marina di Punta Ala e le dinamiche marine.*

*Pranzini E. (2010) Dinamica dei sedimenti nell'intorno del porto di Punta Ala (Grosseto)*

### Articoli e testi scientifici utilizzati per lo studio

AIPCN-PIANC: Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici"(2002)

*Noli A. e Mita M. (2005) - PODIS - Progetto Operativo Difesa Suolo -Difesa delle Coste e Salvaguardia dei Litorali - Analisi delle caratteristiche meteo-marine al largo e a riva e valutazione dei processi evolutivi costieri. A cura del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio-Direzione Generale per la Difesa del Suolo-Progetto Operativo Difesa Suolo. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato S.p.A. - Salario.*

*Battjes J. A. e Janssen J.P.F.M. (1978) - Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., Hamburg, ASCE ed., 1, pp. 569-587.*

*Berkhoff J.W.C. (1972) - Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng., Vancouver, ASCE ed., pp. 471-490.*

*Cappietti, L. (2003) - Interazione onda-corrente. PhD thesis, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Firenze, pp. 140.*

*Hirsch C. (1991) - Numerical Computation of Internal and External Flows. John Wiley and Sons, New York.*

*Kirby J.T. (1986) - Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. Coastal Eng., 10: 355-378.*

*Kirby J.T. e Dalrymple R.A. (1986) - A parabolic equation for for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. J. Fluid Mech., 136: 453-466.*

*Putnam J.A. e Johnson J.W. (1949) - The dissipation of wave energy by bottom friction. Trans. Am. Geoph. Union, 30: 67-74.*

*Radder A.C. (1979) - On the parabolic equation method for water wave propagation. J. Fluid Mech., 95: 159-176.*



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE  
SPIN-OFF APPROVATO

*Swart, D.H. (1974) – Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydraulics Laboratory, Publication 131.*

*Kofoed-Hansen H., Kerper D.R., Sørensen O.R. e Kirkegaard J. (2005) – Simulation of long wave agitation in ports and harbours using a time-domain Boussinesq model. Proc. 5th Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, Madrid, Spain.*

*Kofoed-Hansen H., Sloth P., Sørensen O.R. e Fuchs J. (2000)- Combined numerical and physical modeling of seiching in exposed new marina. Proc. 27th International Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia.*