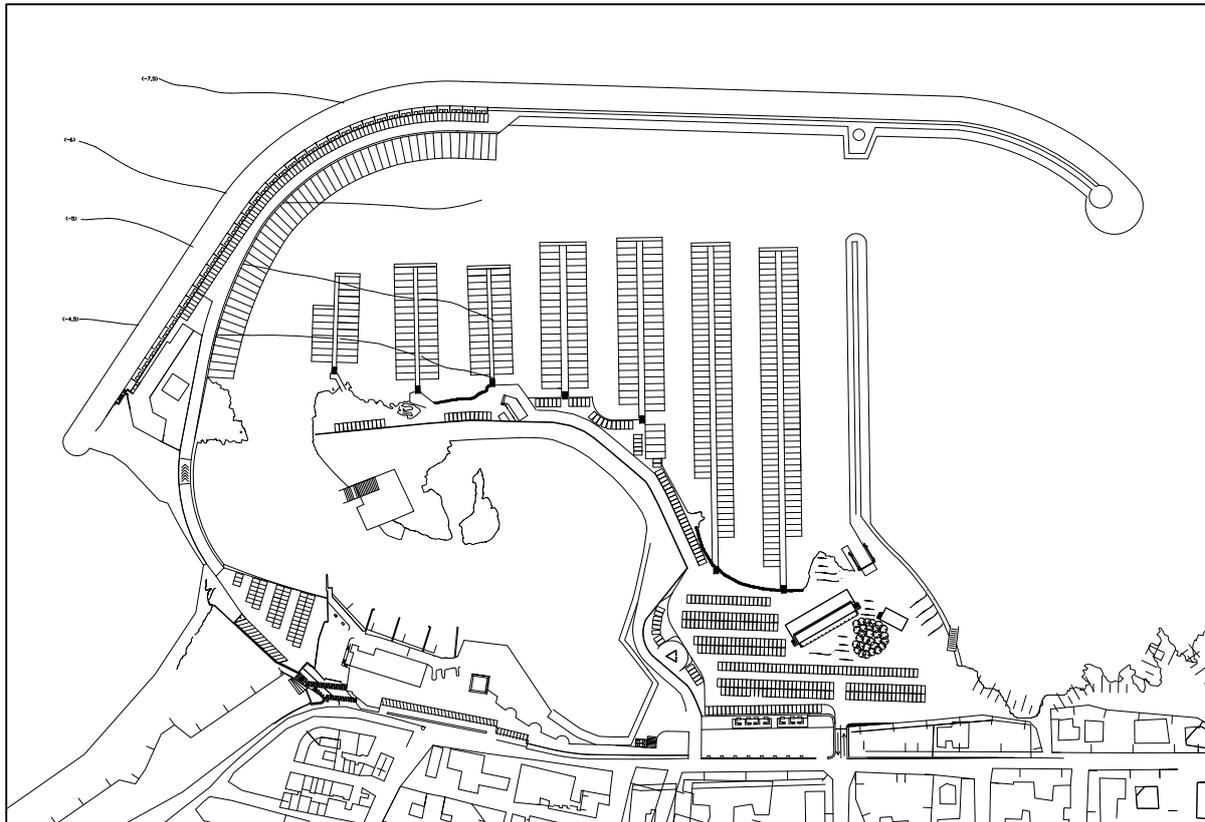


# REGIONE PUGLIA

PORTO DI SAN FOCA S.P.A.  
Porto Turistico-Stazionamento

PROGETTO DEFINITIVO PER L'AMPLIAMENTO E COMPLETAMENTO  
DEL PORTO DI SAN FOCA ADEGUATO ALLE RISULTANZE DELLE  
PROVE SUL MODELLO FISICO REALIZZATO DAL POLITECNICO DI BARI



## RELAZIONE FINALE

Realizzazione di modelli fisici necessari alla verifica di realizzabilità di progetti  
relativi ai porti turistici previsti nella programmazione regionale

### PROGETTISTI

Ing. Antonio Candido

Ing. Donato Candido

Ing. Luigi Del Grosso

Ing. Franco Gallo



SETTEMBRE 2018

TAV. G10

Rev.

# ACCORDO DI PROGRAMMA QUADRO

*“Realizzazione di interventi a sostegno dello Sviluppo Locale”*

tra la



REGIONE PUGLIA

e il



Politecnico  
di Bari

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECH)  
Laboratorio di Ingegneria Costiera (LIC)

per la

**“Realizzazione di modelli fisici necessari alla verifica di realizzabilità di progetti relativi ai porti turistici previsti nella programmazione regionale (APQ Sviluppo Locale, APQ Italia Navigando, P.O. FESR 2007-2013)”**

**Porto turistico di San Foca – Melendugno (LE)**

## Relazione Finale

Bari, aprile 2018

# INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>MODELLO REALIZZATO .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIZIONE SINTETICA DELLE PROVE ESEGUITE NELLO STUDIO.....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>APPARECCHIATURE SPERIMENTALI IMPIEGATE.....</b>	<b>42</b>
4.1	GENERATORE DI MOTO ONDOSI .....	42
4.2	MISURATORI DEL MOTO ONDOSI .....	43
4.3	MISURATORI DELLE CORRENTI.....	44
4.4	RILEVATORI TOPOGRAFICI E BATIMETRICI.....	45
<b>5</b>	<b>METODOLOGIE UTILIZZATE PER I RILIEVI.....</b>	<b>48</b>
5.1	MISURE DEL MOTO ONDOSI .....	48
5.2	MISURE DELLE CORRENTI.....	51
5.3	RILIEVI TOPOGRAFICI .....	52
5.4	RILIEVI FOTOGRAFICI E VIDEO .....	52
<b>6</b>	<b>PROVE EFFETTUATE E LORO ANALISI.....</b>	<b>53</b>
6.1	PROVE MODELLO 3D – GRUPPO 1.....	54
6.1.1	Realizzazione del modello	54
6.1.2	Rilievi topografici	54
6.1.3	Analisi dell'evoluzione del moto ondoso e agitazione ondosa interna	61
6.1.4	Analisi delle correnti	73
6.2	PROVE MODELLO 3D – GRUPPO 2.....	77
6.2.1	Realizzazione del modello	77
6.2.2	Analisi dell'evoluzione del moto ondoso e agitazione ondosa interna	78
6.2.3	Analisi delle correnti	89
6.3	PROVE MODELLO 3D – GRUPPO 3.....	94
6.3.1	Realizzazione del modello	94
6.3.2	Analisi dell'evoluzione del moto ondoso e agitazione ondosa interna	108
6.3.3	Analisi delle correnti	119
<b>7</b>	<b>CONSIDERAZIONI E CONCLUSIONI .....</b>	<b>125</b>
7.1	MOTO ONDOSI .....	126
7.2	CORRENTI .....	135
7.3	OVERTOPPING .....	136
7.4	STABILITÀ .....	137

8.1	ULTERIORI PROVE EFFETTUATE E LORO ANALISI .....	138
8.1.1	Prove Modello 3D – Gruppo 3. Agitazione ondosa interna	138
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>146</b>
	<b>ALLEGATI E LORO CONTENUTO .....</b>	<b>149</b>
	A1 – MOTO ONDOSO .....	149
	A2 – CORRENTI .....	151
	A3 – FOTO E VIDEO .....	153

# 1 PREMESSA

Il presente studio è stato effettuato dal Laboratorio di Ingegneria Costiera (di seguito chiamato LIC) del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (di seguito chiamato DICATECh) del Politecnico di Bari su commissione della Regione Puglia (di seguito chiamata committente), con sede in Bari – Lungomare Nazario Sauro n. 33.

L'oggetto dello studio, le modalità di svolgimento delle prove e gli aspetti amministrativi del rapporto di lavoro sono regolati dalla Convenzione stipulata tra i due Enti nell'ambito dell'Accordo di Programma Quadro (APQ) "SVILUPPO LOCALE" di cui alla Delibera CIPE 41/2012 e alle Determine di Giunta Regionale n. 2973/2011 e 2481/2012.

Lo scopo della Convenzione è la "Realizzazione di modelli fisici necessari alla verifica di realizzabilità di progetti relativi ai porti turistici previsti nella programmazione regionale (APQ Sviluppo Locale, APQ Italia Navigando, P.O. FESR 2007-2013; RUP prof. Michele Mossa)" – Porto turistico di San Foca – Melendugno (LE).

Nella presente Relazione Finale è riportata la descrizione delle attività svolte, delle diverse prove effettuate sul modello ed i relativi risultati. Nello specifico, sono stati effettuati studi dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all'interno che all'esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza dell'imboccatura del porto e dell'imboccatura del bacino portuale interno e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità delle opere di difesa portuale con riferimento a tre configurazioni come di seguito elencate:

- stato attuale delle opere con ondate provenienti da 53,5°N;
- stato attuale delle opere con ondate provenienti da 93,5°N;
- stato di progetto delle opere con ondate provenienti da 93,5°N.

In particolare, nel seguito, sarà descritto il Modello 3D realizzato, le caratteristiche delle principali strumentazioni utilizzate e le prove eseguite con i relativi risultati.

## 2 Modello realizzato

Il presente studio, eseguito allo scopo di confrontare i fenomeni idrodinamici nella configurazione attualmente esistente e nella configurazione di cui al progetto fornitoci dal Comune di Melendugno, è stato realizzato mediante sperimentazione su modello fisico tridimensionale in similitudine di *Froude* (Hughes, 1993) e scala delle lunghezze  $\lambda_L = 1:30$ . Secondo tale analogia, nel modello e nel prototipo viene rappresentato in maniera inalterata il rapporto tra le forze inerziali del fluido e le forze gravitazionali. La scala di riduzione delle principali grandezze fisiche, fissata la scala di riduzione geometrica, risulta infatti imponendo l'uguaglianza dei numeri di *Froude* (*Fr*) che caratterizzano il modello ed il prototipo:

$$\frac{Fr_m}{Fr_p} = 1$$

ovvero

$$\frac{\frac{V_m}{\sqrt{h_m g}}}{\frac{V_p}{\sqrt{h_p g}}} = 1$$

in cui *V* rappresenta la velocità, *h* la profondità, *g* l'accelerazione di gravità, i pedici *m* e *p* si riferiscono rispettivamente al modello e al prototipo.

Le scale di riduzione delle principali grandezze in gioco, conseguenti alla scala geometrica  $\lambda_L$  scelta, sono riportate nella successiva tab. 2.1.

Grandezza fisica	Rapporto di scala	
Lunghezza ed altezza	$\lambda_L$	$\frac{1}{30}$
Velocità	$\lambda_L^{0,5}$	$\frac{1}{\sqrt{30}} = \frac{1}{5,477}$
Tempo	$\lambda_L^{0,5}$	$\frac{1}{\sqrt{30}} = \frac{1}{5,477}$
Volume	$\lambda_L^3$	$\frac{1}{30^3} = \frac{1}{27.000}$
Massa	$\lambda_L^3$	$\frac{1}{30^3} = \frac{1}{27.000}$
Forza	$\lambda_L^3$	$\frac{1}{30^3} = \frac{1}{27.000}$

Tab. 2.1: rapporti di scala per le principali grandezze fisiche oggetto di studio.

Il modello è stato realizzato nella vasca per studi di dinamica costiera del LIC, avente lunghezza 90 m, larghezza 50 m e profondità 1,20 m. La vasca, come si dirà in seguito, è dotata di un sistema di generazione del moto ondoso in grado di riprodurre stati di mare con una lunghezza massima del fronte d'onda di 28,80 m.

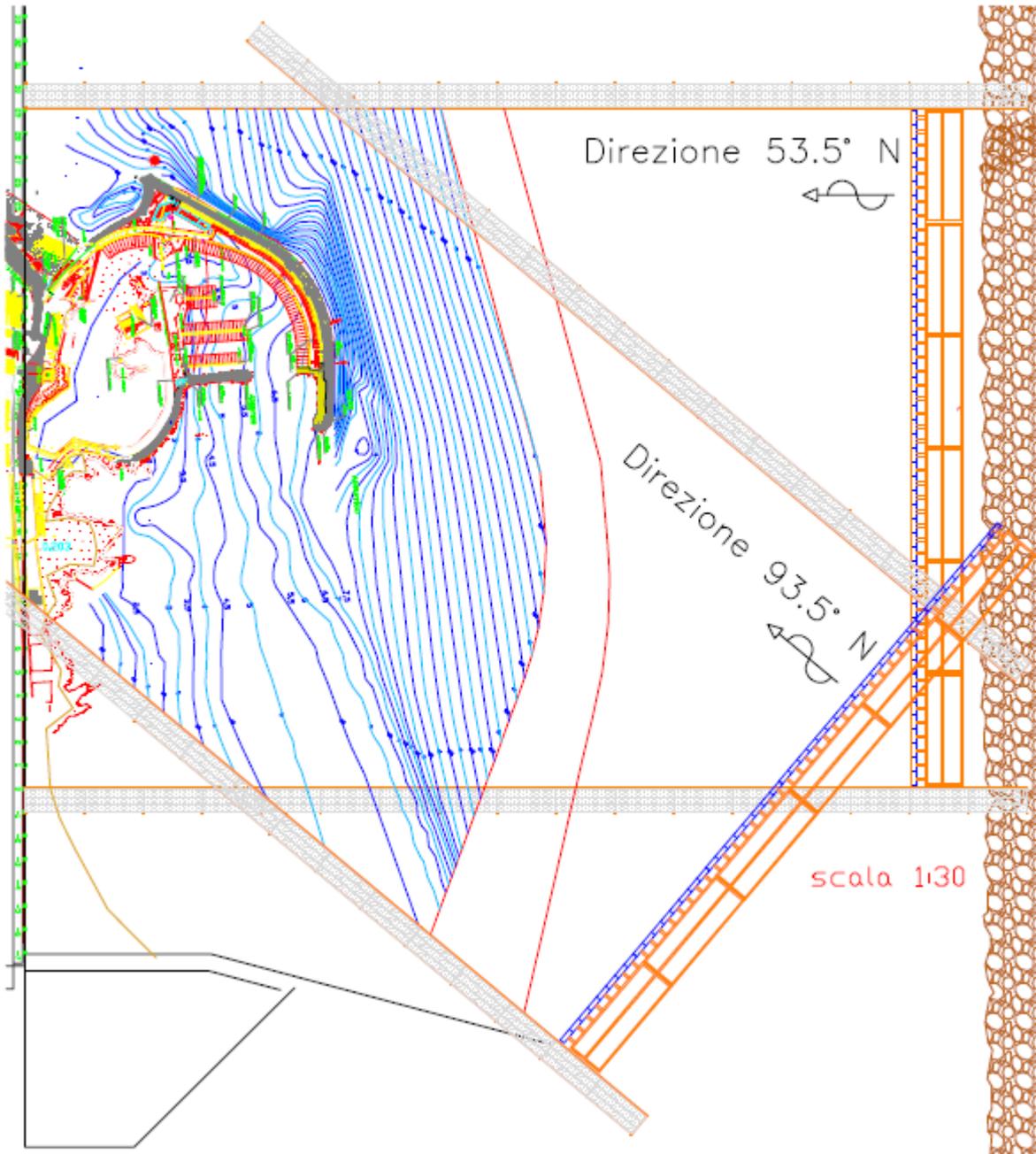
Il modello, a fondo fisso, riproduce un tratto di litorale della lunghezza di circa 900 m (in scala prototipo), comprensivo dell'area portuale vera e propria e di una porzione di costa ad essa adiacente, con un'estensione di circa 600 m tra la linea di riva e la più profonda delle batimetriche riprodotte a scala di modello.

Sul modello fisico sono state simulate due condizioni meteomarine tali da avere, alla generazione sul fondale di -24 m (scala prototipo), fronti d'onda provenienti da 53,5° N e 93,5° N, caratteristiche rispettivamente di mareggiate provenienti da Grecale e da Levante. Nelle successive fig.2.1 e fig.2.2 si riportano, rispettivamente, la planimetria del modello nella configurazione attuale del porto di San Foca e quella relativa alla configurazione di progetto. Per ognuna di esse sono rappresentate entrambe le configurazioni di direzione dei fronti d'onda.

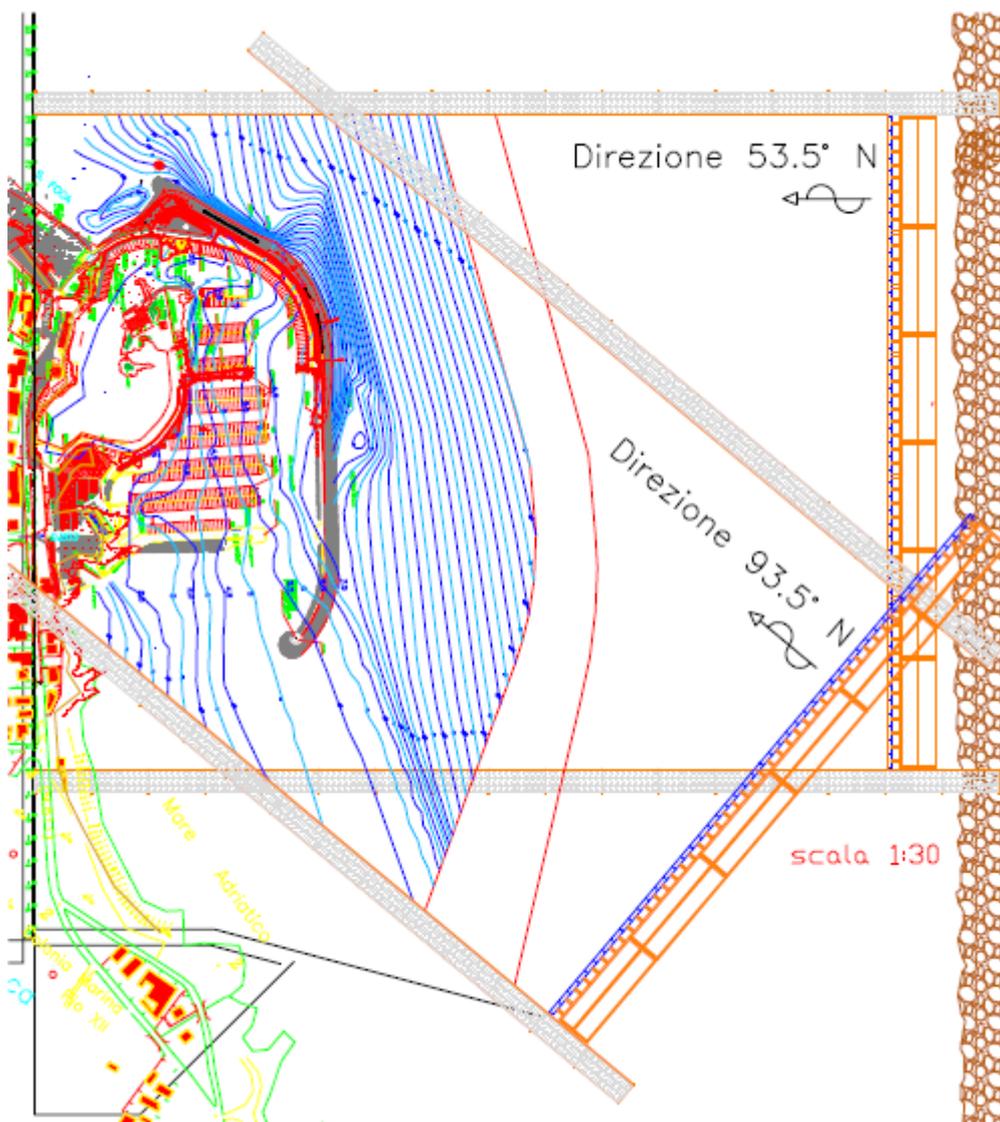
Dovendo eseguire le prove sperimentali con un battente d'acqua di 0,80 m in vasca e considerando che il generatore di moto ondoso è posizionato sul fondo della vasca stessa, ne consegue che la generazione delle onde avviene, come innanzi detto, su un fondale di 24,0 m di profondità (scala prototipo). La pratica comune, adottata per il presente modello, è quella di raccordare il fondale di generazione alle prime batimetriche riprodotte, mediante una rampa di transizione con pendenza costante 1:10 che produca, lungo la sua larghezza, le stesse dissipazioni di energia che avverrebbero, in maniera più lenta e graduale, lungo il normale percorso caratterizzato dalla pendenza naturale del fondale.

Poiché la lunghezza del tratto di sezione orizzontale tra il generatore di moto ondoso e la rampa di transizione deve essere  $D_1 \geq 3+5h$  (con  $h$ =profondità alla generazione) affinché il moto ondoso generato si sviluppi correttamente (Dean & Dalrymple, 1991; Biesel & Suquet, 1951), e dovendo assicurare una lunghezza minima di sezione di batimetria riprodotta tra la rampa di transizione e l'opera foranea di protezione  $D_2 > 3+5L$  (con  $L$  = lunghezza d'onda) affinché si sviluppino correttamente i fenomeni di shoaling e breaking dell'onda incidente dovuti alla batimetria, si è scelto di far corrispondere la prima batimetria riprodotta, alla -17m, ma limitatamente alla metà di sinistra del modello (per un osservatore che dalla costa osservi il generatore). Essendo infatti le batimetriche relative ai fondali più bassi orientate a circa 130°N, la realizzazione dell'intera batimetria -17m avrebbe comportato l'intersezione del piede della rampa di transizione con il generatore, quando posizionato nella configurazione di generazione a 93,5°N. Di conseguenza si è scelto di realizzare la restante parte della rampa con la sommità curva che, dalla -17m, sale fino alla batimetria -5.5m.

Dovendo mantenere la pendenza costante, la larghezza di questa parte di rampa aumenta di conseguenza (Fig. 2.1 e 2.2).



**Fig. 2.1: planimetria del modello del porto di San Foca – Melendugno (LE) nella sua configurazione attuale.**



**Fig. 2.2: planimetria del modello del porto di San Foca – Melendugno (LE) nella configurazione progettuale.**

Dalle figure è possibile osservare come, per questioni legate ai limiti fisici della vasca, la configurazione con direzione di generazione di  $93,5^{\circ}N$  è stata possibile, come si dirà più avanti, soltanto rinunciando ad un modulo (della lunghezza pari a 4,8m) del generatore di moto ondoso, per il quale il relativo fronte d'onda è passato dai 28,8m ai 24,0m.

Per la realizzazione del modello ci si è avvalsi di una batimetria con risoluzione di 0.5m (chiaramente visibile nelle figure sopra) e di un rilievo topografico per la parte emersa, sia relativamente alla costiera nel tratto interessato e sia relativamente alle opere di approdo. Inoltre ci si è avvalsi di una serie di sezioni relative alle opere foranee del molo di sopraflutto e del molo di sottoflutto. Il suddetto materiale è stato fornito dalla Regione Puglia e dal Comune di Melendugno.

La conoscenza dello stato dei luoghi sufficiente ad una corretta realizzazione del modello, però, si è avuta soltanto con il sopralluogo da parte del personale del LIC impiegato nello studio in oggetto, avvenuto nel luglio del 2016. In quella occasione, infatti, il suddetto

personale ha potuto effettuare un rilievo topografico mediante la propria strumentazione GPS, individuando e rilevando una serie di punti sensibili non riportati sul rilievo fornito dal Comune di Melendugno (Figg. 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6). Al contempo, è stato eseguito un ragguardevole rilievo fotografico costituito da quasi 600 fotografie ad alta risoluzione, fondamentali per la riproduzione fisica di particolari la cui influenza, nei fenomeni idraulici, risulta spesso di notevole importanza. Naturalmente è affidata alla sensibilità e all'esperienza del progettista del modello il riconoscimento degli stessi e la scelta del grado di accuratezza con cui riprodurli nel modello.



**Fig. 2.3: particolare del rilievo GPS della scogliera naturale.**



**Fig. 2.4: particolare del rilievo GPS del molo di sopraflutto.**



**Fig. 2.5: particolare del rilievo GPS del molo di protezione del porticciolo interno.**



**Fig. 2.6: particolare del rilievo GPS di un tratto del porticciolo interno.**

Il progetto del modello ha richiesto in prima fase l'individuazione della migliore posizione planimetrica in vasca, sulla base del modello preesistente, al fine di contenere il più possibile i lavori necessari alla sua realizzazione, ma tenendo conto, allo stesso tempo, delle direzioni di moto ondoso stabilite nel programma dei test.

Stabilita la posizione planimetrica, sono stati sovrapposti il modello digitale della struttura esistente (la base in calcestruzzo su cui era posata la sabbia di fondo del precedente modello), ricostruito mediante un precedente rilievo con Laser Scanner, e il modello digitale del fondale da costruire. La sovrapposizione dei due profili, tracciati lungo una fitta serie di sezioni, eseguita in CAD, ha portato alla scelta del battente d'acqua più conveniente individuato in 0,80m indicati precedentemente. Sono state altresì individuate e quantificate le superfici comprese tra i due profili, distinte tra sterro e riporto, e calcolati di conseguenza i relativi volumi rispettivamente da demolire e da sopraelevare.

La figura 2.7 mostra un'istantanea dei lavori di demolizione di una porzione della struttura preesistente.



**Fig. 2.7: fase di costruzione del modello: demolizione modello preesistente.**

Completate le operazioni di demolizione, si è passati alla sopraelevazione, a cominciare dalla parte a terra del lungomare. In particolare, è stato realizzato un cordolo ad una quota costante indicativa pari a 10cm s.l.m.m. (dimensioni modello), necessario a creare un piano orizzontale di servizio per l'accesso del personale impiegato nelle misure. Detto cordolo è stato realizzato anche allo scopo di creare una base di appoggio verticale sul quale è stata successivamente riprodotta la scogliera naturale in calcestruzzo. Il suddetto cordolo è stato realizzato mediante mattoni in calcestruzzo cellulare SIPOREX opportunamente tagliati e sagomati e posati secondo le indicazioni ottenute per mezzo della stazione totale (Fig. 2.8). La posa è avvenuta mediante semplice incollaggio dei mattoni sul sottostante basamento in calcestruzzo preesistente. Visti gli scopi, a differenza di quanto fatto per la realizzazione delle curve batimetriche e delle opere di protezione, come si dirà più avanti, la posa è stata eseguita con una precisione piuttosto sommaria, sia planimetricamente che altimetricamente. Il riempimento necessario per la realizzazione del suddetto piano orizzontale è stato eseguito con una parte del materiale di risulta proveniente dalla precedente demolizione.



**Fig. 2.8: fase costruzione del modello: realizzazione parte emersa.**

Successivamente si è proceduto con il tracciamento delle curve batimetriche. In particolare sono state tracciate tutte le batimetriche a quota intera dalla -1m alla -7m (profondità in corrispondenza dell'imboccatura del porto), più alcune batimetriche intermedie laddove il fondale presentava cambi di pendenza significativi, con particolare riferimento alla -7.5m, la cui importanza è caratterizzata sia dal fatto di essere la profondità su cui è imbasato il conoide di testata del molo di sopraflutto, e sia dal fatto che, immediatamente al largo, il fondale assume una conformazione piuttosto regolare, con una pendenza che si mantiene pressoché costante almeno fino all'ultima batimetrica riprodotta in modello, motivo per cui, immediatamente dopo la -7.5m, si è ritenuto sufficiente realizzare semplicemente le batimetriche -10m e, appunto, -17m.

Le suddette batimetriche sono state dunque materializzate mediante dei cordoli in calcestruzzo che ne hanno riprodotto l'andamento planimetrico (figg. 2.9 e 2.10), e per i quali le relative quote sono state determinate, nel sistema di riferimento locale, con l'ausilio della stazione totale impostata in modo da fornire valori negativi al di sotto del livello del pelo libero dell'acqua e valori positivi al di sopra. In particolare si è scelto di ottenere un'elevata precisione nelle quote delle batimetriche, per le quali si è accettato un errore massimo pari a  $\pm 2\text{mm}$ , corrispondente a  $\pm 60\text{mm}$  in scala prototipo.



**Fig. 2.9: fase di costruzione del modello: materializzazione delle batimetriche. Vista da sud.**

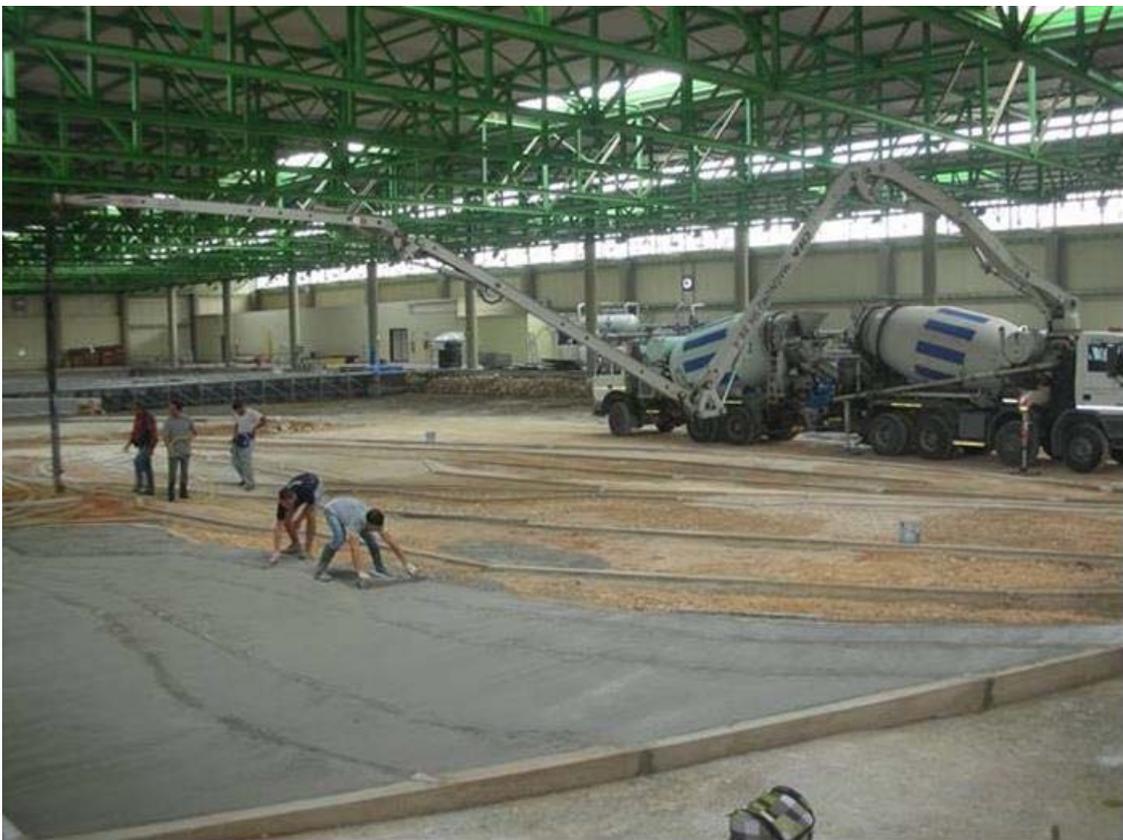


**Fig. 2.10: fase di costruzione del modello: materializzazione delle batimetriche. Vista da sud.**

Realizzati i suddetti cordoli/batimetriche, si è proceduto con il riempimento degli spazi tra gli stessi mediante uno strato variabile di stabilizzato di cava, opportunamente compattato e livellato fino ad un'altezza tale da garantire uno spessore non inferiore a 5cm al successivo strato finale di calcestruzzo.

Il completamento del fondale si è ottenuto, appunto, con il getto di calcestruzzo, avvenuto mediante un'autopompa dotata di un braccio della lunghezza sufficiente a coprire completamente l'area del modello (Fig. 2.11). Man mano che avanzava il getto, il calcestruzzo veniva livellato utilizzando i cordoli come guida, in modo da ottenere una pendenza costante tra le batimetriche materializzate (Figg. 2.12 e 2.13).

In ultimo, è stato eseguito il getto lungo la rampa di collegamento con il fondo vasca, per la quale è stata preventivamente posta in opera una rete metallica elettrosaldata (Figg. 2.14 e 2.15).



**Fig. 2.11: Operazioni di getto di calcestruzzo.**



**Fig. 2.12: Livellamento del calcestruzzo tra le batimetriche. Vista da sud**



**Fig. 2.13: Livellamento del calcestruzzo tra le batimetriche. Vista da nord**



**Fig. 2.14: Completamento della rampa di collegamento con il fondo vasca.**



**Fig. 2.15: Completamento della rampa di collegamento con il fondo vasca.**

Completato il fondale in calcestruzzo, si è proceduto con il tracciamento planimetrico del tratto di costa ricadente nel modello da realizzare, per proseguire con le opere di protezione del porto. Le figure 2.16 e 2.17 mostrano rispettivamente le operazioni di tracciamento della costiera a terra e un particolare della costiera tracciata, mentre le figure 2.18 e 2.19 mostrano un momento durante il tracciamento della parte del porto caratterizzata dagli scogli Papuscia e Saraceno e un particolare del tracciamento eseguito.

Naturalmente detti contorni rappresentano la traccia delle scogliere e delle opere (con particolare riferimento alle opere foranee) in corrispondenza del livello medio mare. Per la parte emersa è stata utilizzata la topografia disponibile di cui si è detto in precedenza. Per la parte sommersa, invece, in particolare per le opere foranee, sono state utilizzate le sezioni trasversali fornite anch'esse dal Comune di Melendugno, mentre sono state utilizzate le fotografie scattate durante il sopralluogo per quanto riguarda la scogliera naturale.



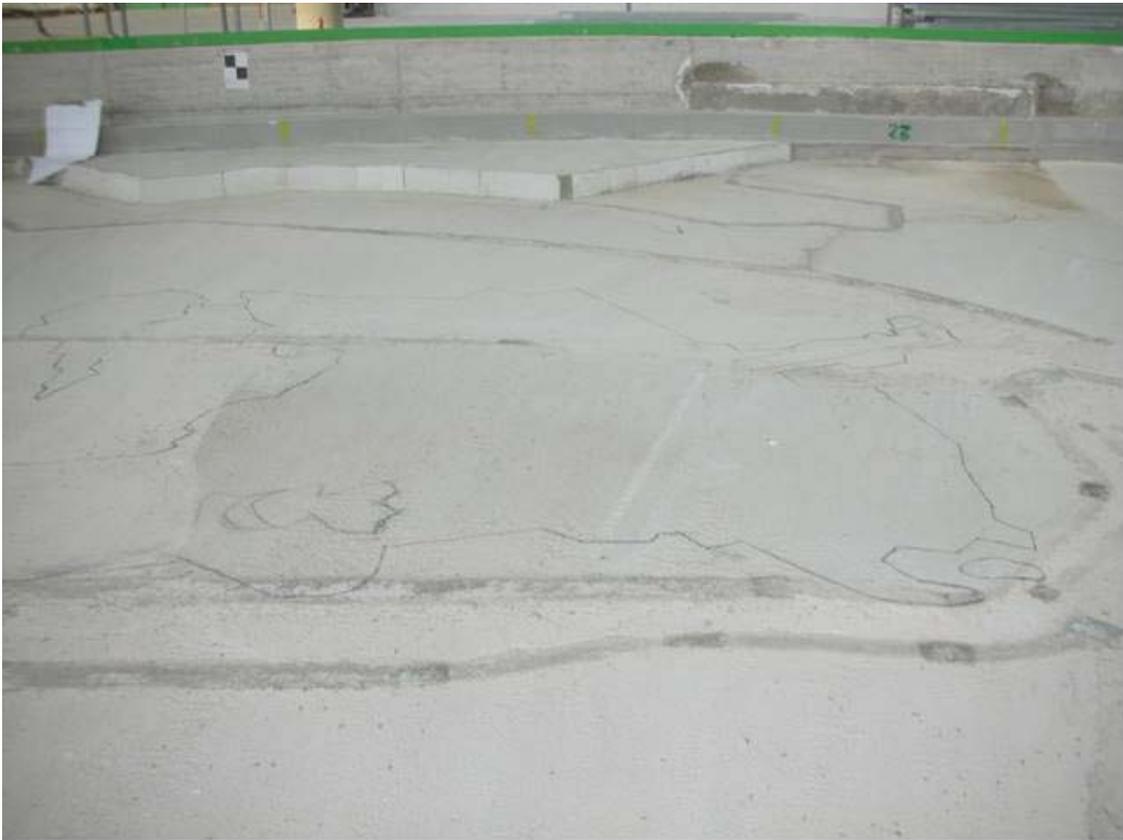
**Fig. 2.16: Operazioni di tracciamento della costiera a terra.**



**Fig. 2.17: Un particolare della costiera tracciata.**



**Fig. 2.18: Operazioni di tracciamento degli scogli Papuscia e Saraceno.**



**Fig. 2.19: Un particolare degli scogli Papuscia e Saraceno tracciati sul fondale.**

Si è, così, proceduto con la realizzazione della scogliera naturale, a partire da quella relativa alla terraferma, per la quale è stato utilizzato un calcestruzzo con un dosaggio di acqua sufficiente a renderlo lavorabile, ma al contempo tale da permettere di realizzare pendenze molto elevate, al limite anche negative, tipiche delle falesie, con presenza di solchi di battente e piattaforme di erosione che caratterizzano la costiera in esame, soprattutto nella parte di litorale a sud del porto, laddove la conformazione della costa presenta un'alternanza di piccoli promontori e baie caratterizzate da *pocket beach* (Figg. 2.20, 2.21, 2.22 e 2.23). E' bene specificare, come si dirà più avanti, che non essendo il presente studio finalizzato ad un'analisi morfologica delle suddette spiagge, ma avendo la necessità di evitare una eccessiva e incontrollata riflessione dell'energia ondosa incidente contro le scogliere interne delle suddette baie, si è deciso comunque di realizzare le suddette spiagge, utilizzando però, in luogo della sabbia, la stessa ghiaia utilizzata per il nucleo delle opere foranee. Nel complesso va sottolineato il fatto che la ricostruzione della scogliera, sia sotto l'aspetto morfologico che sotto l'aspetto topografico, è stata eseguita con un dettaglio ed una precisione che soltanto un modello fisico permette di ottenere. In particolare va messo in evidenza come le grandi dimensioni del modello contribuiscano in maniera importante al raggiungimento di standard altrimenti impossibili da ottenere.



**Fig. 2.20: Realizzazione del primo tratto della scogliera naturale.**



**Fig. 2.21: Realizzazione della scogliera naturale. Una vista da nord**



Fig. 2.22: Realizzazione della scogliera naturale. Una vista da sud



Fig. 2.23: Realizzazione della scogliera naturale. Un particolare della scogliera retrostante di una *pocket beach*

Completata la scogliera naturale a sud, a partire dallo scoglio Sarparea si è provveduto a realizzare la banchina di collegamento con lo scoglio Papuscia.

Si tratta di una tipologia di banchina con opera muraria verticale in cemento armato, per la quale la filtrazione tra l'esterno e l'interno dello specchio acqueo protetto risulta trascurabile in quanto strettamente limitata al solo imbasamento sottostante in pietrame con massi di 1<sup>a</sup> categoria, di spessore piuttosto ridotto. In queste condizioni si è scelto di bloccare completamente la filtrazione realizzando la banchina mediante incollaggio di mattoni in calcestruzzo cellulare SIPOREX opportunamente sagomati, direttamente sul fondale, a vantaggio della facilità e precisione nella messa in opera, oltre che della gestione del modello grazie ad una maggiore portanza, sufficiente a rendere la banchina praticabile per il personale impegnato nelle misure (Figg. 2.24 e 2.25). Inoltre, il blocco totale della filtrazione è stato considerato anche a vantaggio di sicurezza relativamente alle performances della barriera in massi naturali presente sul lato esterno della banchina.

In particolare sono state disposte due file di mattoni lungo il bordo interno ed esterno della banchina, e si è provveduto a riempire il volume interno con materiale stabilizzato, sul quale è stato eseguito un getto di calcestruzzo dello spessore di circa 5cm fino al piano di estradosso della banchina.

Dal rilievo effettuato con il GPS durante il sopralluogo si è potuto osservare che le quote della banchina lungo il bordo del porticciolo vanno da un minimo di circa 0,83m s.l.m.m. nelle vicinanze del piazzale ubicato nella zona di interesse archeologico, ad un massimo di circa 0,94m s.l.m.m. in corrispondenza dell'innesto sullo scoglio Papuscia. Trattandosi dunque di quote piuttosto piccole, che diventano determinanti in occasione di eventi con agitazione ondosa interna significativa. Si è ritenuto di avere gran cura in fase di realizzazione della banchina, in particolare per le quote, per la quale sono stati accettati errori massimi in quota pari a  $\pm 1$ mm, corrispondenti a  $\pm 30$ mm in scala prototipo.

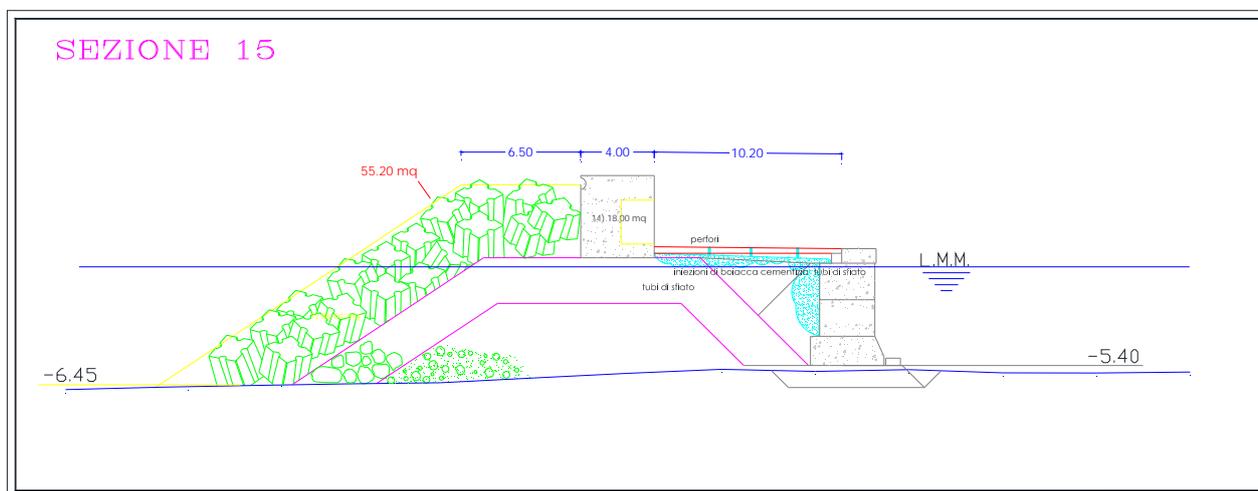


**Fig. 2.24:** Realizzazione della banchina di collegamento con lo scoglio Papuscia. Vista da terra.



**Fig. 2.25:** Realizzazione della banchina di collegamento con lo scoglio Papuscia. Vista da mare

Per quanto riguarda la banchina del molo di sopraflutto, analogamente a quanto detto per la banchina di collegamento tra lo scoglio Sarparea e lo scoglio Papuscia, anche in questo caso la filtrazione risulta trascurabile in quanto limitata al solo strato di imbasamento in pietrame di 1^ categoria sottostante alla parete verticale in cemento armato, così come indicato nella sezione fornitaci dal Comune di Melendugno, riportata in figura 2.26.



**Fig. 2.26: Una sezione del molo di sopraflutto esistente (misure in scala prototipo).**

Restano valide, pertanto, le stesse considerazioni relativamente alle scelte costruttive per le quali si è deciso di adottare la stessa tecnica (Figg. 2.27, 2.28 e 2.29), anche relativamente alla precisione impostata per le quote.

Completato il piano della banchina, pensato anch'esso per poter essere praticato più o meno agevolmente durante le fasi dei test, lungo il bordo esterno della stessa è stato realizzato il muro paraonde mediante mattoni tagliati ad una larghezza di 13.3cm (4.0m in scala prototipo), incollati alla superficie della banchina (Figg. 2.30 e 2.31). La quota della superficie superiore del muro, fissata in 16,7cm (5,0m in scala prototipo) secondo le sezioni ricevute dal Comune, è stata ottenuta assumendo ancora una volta un errore massimo pari a  $\pm 1\text{mm}$ , corrispondenti a  $\pm 30\text{mm}$  in scala prototipo.

Infine si è provveduto a rendere perfettamente liscia la superficie superiore della banchina (Fig. 2.32) e ad impermeabilizzare, mediante applicazione di guaina liquida, le superfici dei mattoni in SIPOREX a diretto contatto con l'acqua, comprese le superfici del muro paraonde, al fine di evitarne rigonfiamenti per imbibizione (Fig. 2.33).



**Fig. 2.27: Realizzazione della banchina del molo di sopraflutto. Sistemazione dei mattoni di bordo.**



**Fig. 2.28: Realizzazione della banchina del molo di sopraflutto. Riempimento con stabilizzato.**



**Fig. 2.29: Realizzazione della banchina del molo di sopraflutto. Getto di calcestruzzo finale.**



**Fig. 2.30: Realizzazione del muro paraonde. Vista da mare**



**Fig. 2.31: Realizzazione del muro paraonde. Vista da terra**



**Fig. 2.32: Rifinitura della superficie superiore della banchina del molo di sopraflutto**



**Fig. 2.33: Applicazione della guaina liquida lungo le superfici del muro paraonde**

Come da prassi ormai consolidata, durante l'esecuzione dei lavori di costruzione del modello, quando si era prossimi al completamento dei lavori, questo Politecnico ha invitato i tecnici progettisti, profondi conoscitori dello stato dei luoghi, ad un sopralluogo presso il LIC finalizzato all'individuazione di eventuali dettagli mancanti in quanto non riportati nel materiale informativo consegnato allo stesso Politecnico.

Con il sopralluogo avvenuto in data 12/10/2016 da parte dei progettisti e di alcuni amministratori locali, presenti anche alcuni componenti tecnici della Regione Puglia, emerse la mancanza dei condotti di ricircolo semisommersi, che mettono in comunicazione il mare aperto in corrispondenza dello scoglio Sarparea con il porticciolo. Il dettaglio risultò di non poco conto, considerato il fatto che si trattasse di uno studio di fenomeni idrodinamici, per cui furono prontamente apportate le dovute modifiche per la realizzazione dei suddetti condotti (Fig. 2.34 e 2.35). Sulla base delle indicazioni, dunque, i condotti furono realizzati con tubi in PVC aventi diametro interno pari a 2.8cm ed interasse pari a 8.0cm, posati in modo orizzontale, con la direttrice superiore a quota +0.5cm.



**Fig. 2.34: Fase iniziale della posa dei condotti di ricircolo del porticciolo**



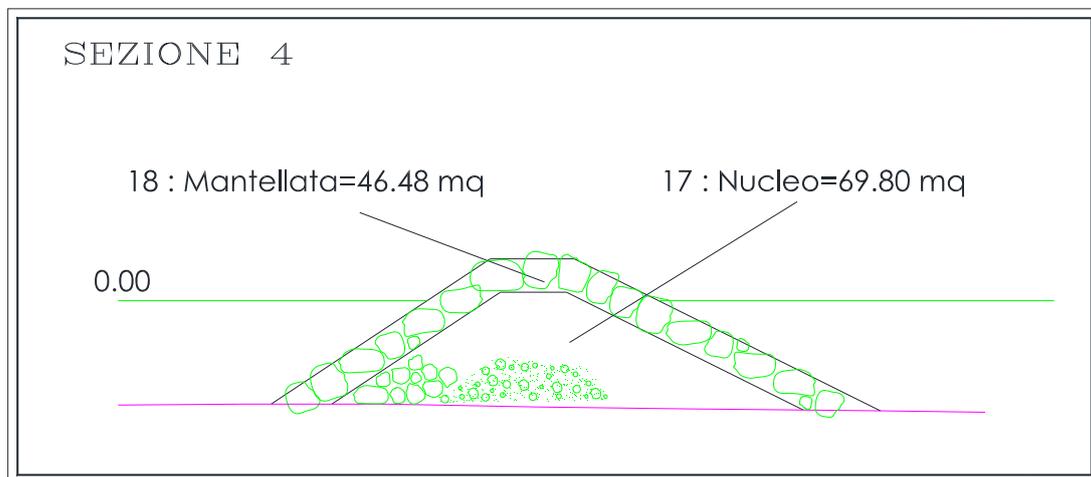
**Fig. 2.35: Fase finale della posa dei condotti di ricircolo del porticciolo**

Completati i lavori di realizzazione delle strutture fisse, si è passati alla realizzazione delle opere foranee.

Il molo di sopraflutto, della lunghezza complessiva di circa 420m (par. A.7 Relazione Tecnica), è caratterizzato da una banchina posta sul lato interno, a sviluppo planimetrico curvilineo che, a partire dallo scoglio del Sale, termina con un setto ortogonale allineato al molo di sottoflutto, definendo così l'imboccatura del porto. Superato il setto, l'opera prosegue senza la presenza della banchina fino al conoide di testata imbasato su un fondale di circa 7.5m.

L'opera, come mostrato nella precedente figura 2.26, è caratterizzata da un nucleo in massi naturali di 1<sup>a</sup> categoria, uno strato filtro in massi naturali di 2<sup>a</sup> categoria e una mantellata realizzata con cubi modificati in cls tipo "ANTIFER", con pendenza della scarpata esterna di 3 su 2 ( $\cotg\alpha=1.5$ )

Il molo di sottoflutto, che dalla banchina di collegamento tra lo scoglio Sarparea e lo scoglio Papuscia si estende, lungo la direzione Nord-Est, per circa 75m, è caratterizzato invece da un'opera foranea costituita da un nucleo in massi naturali di 1<sup>a</sup> categoria e una mantellata in massi naturali di 2<sup>a</sup> categoria, con una pendenza della scarpata di 2 su 1 ( $\cotg\alpha=2$ ) sul lato esterno e in corrispondenza della testata, e di 3 su 2 ( $\cotg\alpha=1,5$ ) sul lato interno (fig. 2.36).



**Fig. 2.36: Una sezione centrale del molo di sottoflutto (misure in scala prototipo)**

La scelta dei massi con cui simulare, nel modello fisico, le opere foranee dipende da una serie di parametri.

In linea di massima potrebbe essere sufficiente utilizzare massi aventi lo stesso peso specifico dei massi in prototipo e scalarne geometricamente le dimensioni.

Dovendo comunque soddisfare il criterio di similitudine di Froude, la necessità di riprodurre i flussi attraverso la struttura pone una problematica legata alla incompatibilità del suddetto criterio con quello di Reynolds che, in presenza di fenomeni di questo tipo, assume maggiore importanza. Se, d'altra parte, si riesce a mantenere il valore del numero di Reynolds sufficientemente grande ( $Re_D > 30.000$ ), tale da assicurare la formazione di flussi turbolenti attraverso la struttura, in particolare attraverso i massi di mantellata e strato filtro (Dai and Kamel, 1969), allora le forze possono essere scalate semplicemente mediante il criterio di similitudine di Froude.

Per evitare, dunque, gli effetti scala dovuti alla viscosità, il fattore di scala per i massi dello strato filtro e, ancor più del nucleo, dovrebbero essere basati sul principio della permeabilità per il quale esistono diversi metodi (Hudson et al., 1979; Jensen and Klinting, 1983; Van Gent, 1995). In particolare, per operare la riduzione di scala del nucleo, si potrebbe adottare la procedura proposta da Burcharth et al. (1999) che si fonda sulla conoscenza della distribuzione di pressione indotta nel nucleo di un opera a gettata a scala di prototipo dalle onde incidenti su di essa. Tale conoscenza permette, infatti, di stimare il campo di moto all'interno del nucleo e, quindi, di valutare in modo più realistico la velocità del flusso da utilizzare nella procedura di riduzione. La procedura si fonda sulla valutazione dell'oscillazione di pressione all'interno del nucleo, ovvero:

$$p_{max}(x) = p_{0,max} \exp\left(-\delta \frac{2\pi}{L'} x\right)$$

ove  $x$  è la coordinata orizzontale ( $x = 0$  corrisponde all'interfaccia tra lo strato filtro ed il nucleo),  $p_{0,max}$  è la pressione di riferimento in corrispondenza dell'inizio del nucleo ( $x=0$ ),  $\delta$  è un coefficiente di smorzamento e  $L'$  è la lunghezza d'onda all'interno del nucleo.

D'altra parte, però, alla luce delle scelte fatte in fase di realizzazione delle banchine, come precedentemente descritto, avendo ritenuto di trascurare la filtrazione, il suddetto approccio ci è sembrato inutile. Si è pertanto proceduto con la riduzione in scala semplicemente su base geometrica, sia per i massi del nucleo, che per quelli dello strato filtro.

### **Nucleo**

Come detto in precedenza, il nucleo delle opere foranee del porto di San Foca è costituito da massi naturali di 1<sup>a</sup> categoria, aventi peso compreso tra  $0,99 \div 9,81$  kN.

Considerando, a scala di prototipo, un peso medio efficace (*mean effective weight*) pari a  $W_{em}=5,40$  kN si può definire il peso ( $W_{50}$ )<sub>p</sub>:

$$(W_{50})_p = 1.163 W_{em} = 6.27 \text{ kN}$$

corrispondente alla dimensione del setaccio con un passante pari al 50% ( $D_{50}$ ) che, considerando il lato del cubo di volume equivalente ( $D_n$ ), risulta pari a:

$$(D_{n50})_p = \left[ \frac{(W_{50})_p}{F_s \gamma} \right]^{1/3} = 0,706 \text{ m}$$

avendo considerato un fattore di forma  $F_s=0,7$  e un peso specifico dei massi pari a  $\gamma=25,50$  kN/m<sup>3</sup> (CIRIA, 2007).

Applicando una riduzione secondo la similitudine geometrica ( $\lambda_L=L_m/L_p=D_m/D_p=\lambda_D$ ), alla scala del modello ( $\lambda_D = 1/30$ ) si ottiene (Hughes, 1993):

$$(D_{n50})_m = (D_{n50})_p \lambda_D = 24 \text{ mm}$$

dalla quale si deduce anche il peso corrispondente alla dimensione del setaccio con un passante pari al 50% in scala modello:

$$(W_{50})_m = F_s \gamma (D_{n50})_m^3 = 0,23 \text{ N}$$

### **Strato filtro del molo di sopraflutto e mantellata del molo di sottoflutto**

Lo strato filtro del molo di sopraflutto e la mantellata del molo di sottoflutto del porto di San Foca sono costituiti da massi naturali di 2<sup>a</sup> categoria, aventi un peso compreso tra 9,82 ÷ 29,43 kN.

Considerando, a scala di prototipo, un peso medio efficace (*mean effective weight*) pari a  $W_{em}=19,62$  kN si può definire il peso ( $(W_{50})_p$ ):

$$(W_{50})_p = 1,099 W_{em} = 21,56 \text{ kN}$$

corrispondente alla dimensione del setaccio con un passante pari al 50% ( $D_{50}$ ) che, considerando il lato del cubo di volume equivalente ( $D_n$ ), risulta pari a:

$$(D_{n50})_p = \left[ \frac{(W_{50})_p}{F_s \gamma} \right]^{1/3} = 1,065 \text{ m}$$

avendo considerato un fattore di forma  $F_s=0,7$  e un peso specifico dei massi pari a  $\gamma=25,50$  kN/m<sup>3</sup> (CIRIA, 2007).

Applicando una riduzione secondo la similitudine geometrica ( $\lambda_L=L_m/L_p=D_m/D_p=\lambda_D$ ), alla scala del modello ( $\lambda_D = 1/30$ ) si ottiene:

$$(D_{n50})_m = (D_{n50})_p \lambda_D = 35 \text{ mm}$$

dalla quale si deduce anche il peso corrispondente alla dimensione del setaccio con un passante pari al 50% in scala modello:

$$(W_{50})_m = F_s \gamma (D_{n50})_m^3 = 0,80 \text{ N}$$

### ***Mantellata del molo di sopraflutto***

Come indicato al par. 7.1 della Relazione Tecnica del progetto fornitaci dalla Regione Puglia, la mantellata del molo di sopraflutto è costituita da cubi modificati in cls tipo "ANTIFER" del volume  $V=6.33$  m<sup>3</sup>, con peso specifico  $\gamma_c=22,56$  kN/m<sup>3</sup>, per un peso  $W=142,82$  kN, a cui corrisponde un diametro nominale  $D_n$ :

$$D_n = \sqrt[3]{V} = 1,850 \text{ m}$$

La riduzione in scala geometrica dei massi di mantellata va eseguita tenendo conto della densità relativa di galleggiamento  $\Delta$ , che dovrebbe conservare lo stesso valore del prototipo:

$$\Delta = \frac{\rho_a}{\rho_w} - 1$$

Per compensare la differenza della densità dell'acqua dolce usata per la sperimentazione in modello rispetto a quella dell'acqua di mare, bisogna evidentemente intervenire sul peso del masso di armatura in modello, in modo da riprodurre correttamente la stabilità (Hughes, 1993). In sostanza bisogna imporre l'uguaglianza del numero di stabilità  $N_s$  nel modello e nel prototipo:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n}$$

In cui  $H_s$  rappresenta l'altezza d'onda significativa.

Imponendo dunque l'uguaglianza  $N_s^{(m)}=N_s^{(p)}$  si ottiene la scala di riduzione del diametro:

$$\lambda_D = \lambda_L \frac{\rho_w^{(m)} \rho_a^{(p)} - \rho_w^{(p)}}{\rho_w^{(p)} \rho_a^{(m)} - \rho_w^{(m)}}$$

Assumendo i seguenti valori di densità:

$$\rho_w^{(m)} = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_w^{(p)} = 1.026 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_a^{(m)} = \rho_a^{(p)} = 2.300 \text{ kg/m}^3$$

e stabilita la scala delle lunghezze  $\lambda_L=1/30$ , si ottiene una scala dei diametri  $\lambda_D=1/31,41$  che, moltiplicata per il diametro nominale del masso in dimensione prototipo, fornisce il diametro nominale del masso in dimensione modello:

$$(D_n)_m = (D_n)_p \lambda_D = 59 \text{ mm}$$

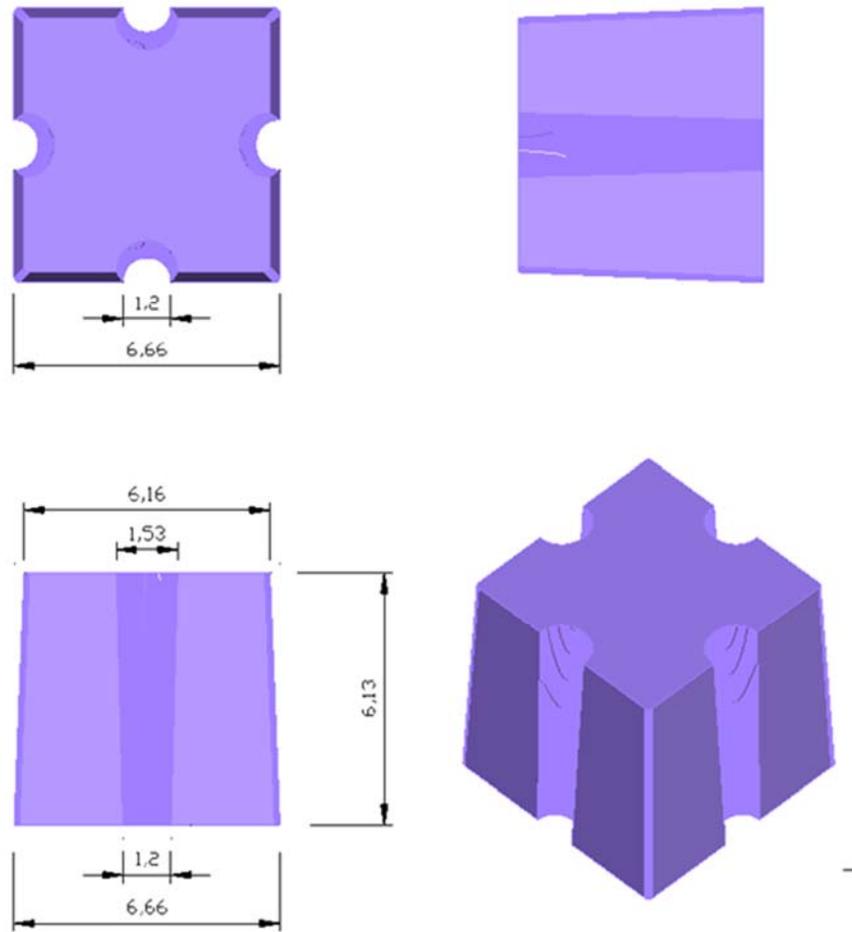
a cui corrisponde un volume  $V^{(m)}=204\text{cm}^3$  e un peso  $W^{(m)}=4,61 \text{ N}$ .

Nella successiva fig. 2.37 si riporta il disegno del masso realizzato in scala, utilizzato nel presente studio, con le relative misure espresse in cm.

I modelli sono stati realizzati, su specifiche del LIC, dall'azienda "*Paolo Avella Engineering S.r.l.*" specializzata nella creazione di modelli e stampi per fonderie.

Dovendo realizzare un numero di massi considerevole, il risultato finale è stato raggiunto al termine di una fase piuttosto elaborata, nella quale sono state eseguite numerose prove finalizzate all'individuazione della tecnica e del materiale più idonei ad assicurare, al prodotto finale, le caratteristiche fisiche richieste, nel rispetto dei costi di realizzazione.

Il modello finale è stato ottenuto con una miscela di resine all'interno della quale sono stati inseriti elementi in materiale metallico (Freitas et al., 2013), opportunamente tarati in modo da raggiungere un peso finale, al termine del processo di essiccazione, molto prossimo al peso teorico calcolato, come precedentemente descritto.



**Fig. 2.37: schema del modello del masso “Antifer” utilizzato nel presente studio.**

Nelle successive fig. 2.38 e 2.39 si riporta una vista del modello del masso “Antifer” finito e degli stampi usati per la realizzazione dei vari pezzi necessari per il modello del porto.



**Fig. 2.38: modello fisico del masso “Antifer” realizzato.**



**Fig. 2.39: fase di realizzazione degli stampi per i modelli “Antifer”.**

Acquisito il materiale necessario, si è provveduto alla realizzazione delle opere foranee secondo le indicazioni riportate nel materiale informatico fornitoci dalla Regione Puglia.

Le figure 2.40 e 2.41 mostrano alcune fasi dei lavori di realizzazione rispettivamente del molo di sottoflutto e del molo di sopraflutto.

Naturalmente i lavori sono stati eseguiti con la massima cura soprattutto nelle quote delle barriere.

Come è possibile osservare nella parte alta della figura 2.41, all'estremità nord del modello, in aderenza alla radice del molo di sopraflutto, è stata realizzata una barriera emersa in massi naturali di dimensioni notevolmente superiori rispetto ai massi naturali utilizzati per la mantellata del molo di sottoflutto, avente lo scopo di assorbire l'energia del moto ondoso che, teoricamente, raggiungerebbe la spiaggia “Le fontanelle” non riprodotta in modello, evitando così la formazione di indesiderate riflessioni che potessero andare ad alterare il regime ondoso incidente sul molo di sopraflutto.

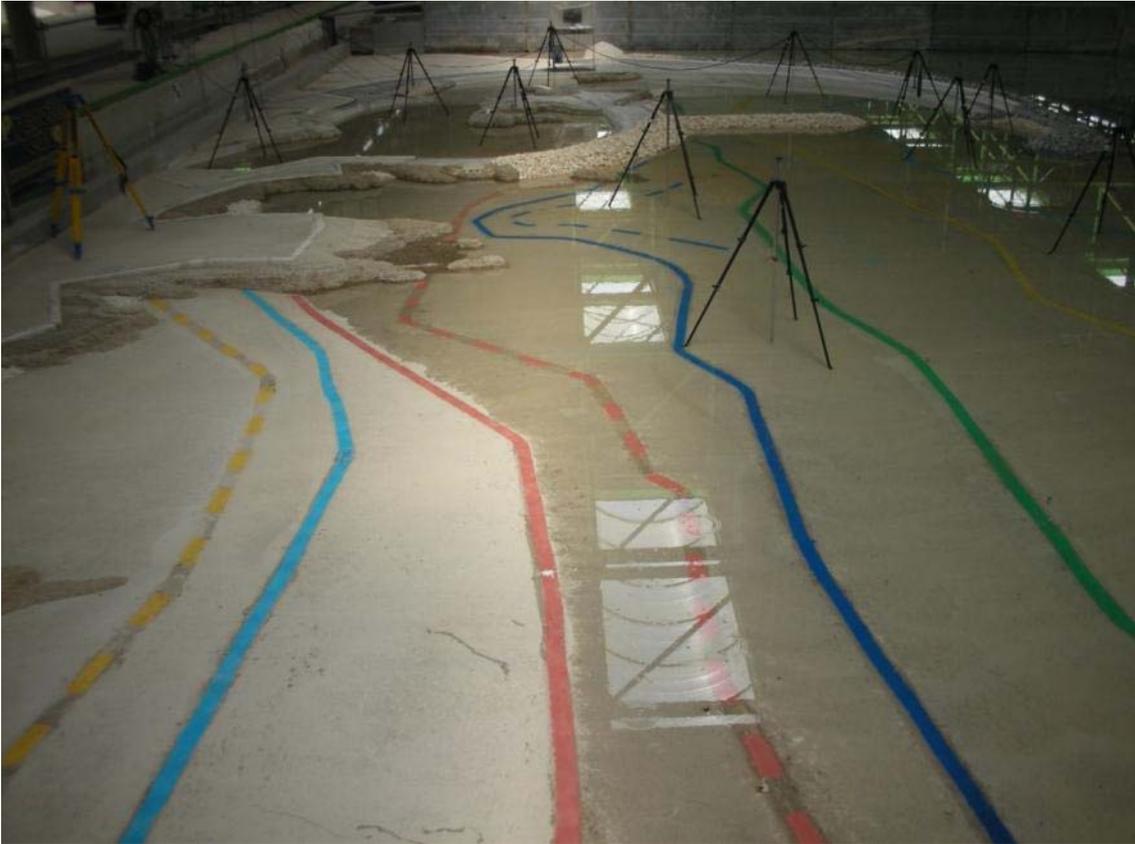


**Fig. 2.40: fase di costruzione del modello: realizzazione del molo di sottoflutto.**



**Fig. 2.41: fase costruzione del modello: completamento del molo di sopraflutto, con posa in opera dei blocchi artificiali "Antifer".**

In ultimo, si è provveduto alla colorazione delle batimetriche riprodotte, con il doppio obiettivo di avere sempre un riferimento indicativo immediato sulle quote di qualunque punto del fondale del modello (le batimetriche sono state anche contraddistinte dall'indicazione delle relative quote in scala prototipo) e di verificare, in ultima battuta, la correttezza della loro realizzazione durante le fasi di riempimento della vasca, così come ben visibile dall'immagine riportata in figura 2.42.



**Fig. 2.42: fase di riempimento della vasca: è possibile constatare la correttezza della batimetria del fondale realizzato.**

### 3 DESCRIZIONE SINTETICA DELLE PROVE ESEGUITE NELLO STUDIO

Come riportato in premessa, l'oggetto della Convenzione di Ricerca stipulata tra il DICATECh ed il committente è la "Realizzazione di modelli fisici necessari alla verifica di realizzabilità di progetti relativi ai porti turistici previsti nella programmazione regionale (APQ Sviluppo Locale, APQ Italia Navigando, P.O. FESR 2007-2013)" Porto turistico di San Foca – Melendugno (LE)".

Come si specificherà dettagliatamente nel seguito, sul Modello 3D sono state effettuate le seguenti prove:

**Modello 3D – Gruppo 1** - Configurazione attuale delle opere con fronti d'onda provenienti da  $53,5^\circ$  N: studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all'interno che all'esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza dell'imboccatura dell'avamporto e dell'imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

**Modello 3D – Gruppo 2** - Configurazione attuale delle opere con fronti d'onda provenienti da  $93,5^\circ$  N: studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all'interno che all'esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza dell'imboccatura dell'avamporto e dell'imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

**Modello 3D – Gruppo 3** - Configurazione di progetto delle opere con fronti d'onda provenienti da  $93,5^\circ$  N: studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all'interno che all'esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza della nuova imboccatura dell'avamporto e dell'imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

Nella sottostante tab. 3.1 si riporta un prospetto riepilogativo delle prove effettuate con indicati i valori del tirante idrico in vasca, dell'altezza significativa, del periodo di picco e della

durata temporale di ogni attacco ondoso inviato nel corso delle varie prove, sia in scala modello che in scala prototipo.

PROSPETTO PROVE ESEGUITE													
Prova													
	Hs	Tp	T <sub>R</sub>	Dir	Durata		Hs	Tp	T <sub>R</sub>	Dir	Durata	Durata	
	(m)	(s)	(anni)	(°)	(h)	min	(m)	(s)	(anni)	(°)	(h)	(g)	
1/1	0,0847	1,181	5 (giorni)	0,00	0	20	2,54	6,47	5 (giorni)	53,50	1,83	0,08	
1/2	0,1163	1,532	2	0,00	0	20	3,49	8,39	2	53,50	1,83	0,08	
1/3	0,1297	1,532	5	0,00	0	20	3,89	8,39	5	53,50	1,83	0,08	
1/4	0,1370	1,532	10	0,00	0	20	4,11	8,39	10	53,50	1,83	0,08	
1/5	0,1617	1,745	50	0,00	0	20	4,85	9,56	50	53,50	1,83	0,08	
2/1	0,0822	1,181	5 (giorni)	40,00	0	20	2,47	6,47	5 (giorni)	93,50	1,83	0,08	
2/2	0,1312	1,532	2	40,00	0	20	3,94	8,39	2	93,50	1,83	0,08	
2/3	0,1473	1,746	5	40,00	0	20	4,42	9,56	5	93,50	1,83	0,08	
2/4	0,1594	1,746	10	40,00	0	20	4,78	9,56	10	93,50	1,83	0,08	
2/5	0,1903	1,989	50	40,00	0	20	5,71	10,89	50	93,50	1,83	0,08	
3/1	0,0822	1,181	5 (giorni)	40,00	0	20	2,47	6,47	5 (giorni)	93,50	1,83	0,08	
3/2	0,1312	1,532	2	40,00	0	20	3,94	8,39	2	93,50	1,83	0,08	
3/3	0,1473	1,746	5	40,00	0	20	4,42	9,56	5	93,50	1,83	0,08	
3/4	0,1594	1,746	10	40,00	0	20	4,78	9,56	10	93,50	1,83	0,08	
3/5	0,1903	1,989	50	40,00	0	20	5,71	10,89	50	93,50	1,83	0,08	

**Tab. 3.1: tabella riepilogativa delle prove eseguite.**

Gli attacchi ondosi da inviare sul modello, tutti con spettri di densità di energia di tipo JONSWAP, sono stati desunti sia da apposito studio sul clima meteomarinario relativo al paraggio oggetto di studio fornito dalla committenza, sia da apposito modello matematico di propagazione del moto ondoso effettuato presso il LIC.

Nel seguito della relazione verranno descritte le prove innanzi elencate nella successione indicata.

## 4 APPARECCHIATURE SPERIMENTALI IMPIEGATE

In questo paragrafo sono riportate le principali caratteristiche delle apparecchiature e delle strumentazioni utilizzate per la generazione del moto ondoso e per il rilievo dei dati.

### 4.1 Generatore di moto ondoso

Il generatore di moto ondoso utilizzato per le prove sul Modello 3D è costituito da 48 pale, della larghezza di 0,60 m ciascuna e, pertanto, in grado di generare un fronte d'onda di 28,80 m (fig. 4.1.1).



Fig. 4.1.1: generatore di moto ondoso per modelli 3D.

Nel generatore di moto ondoso ciascuna pala è spostata da un motore elettrico che trasmette il movimento alla stessa grazie ad una cremagliera, un pignone ed una scatola di cambio. La scatola di cambio ha un elemento eccentrico che permette alla cremagliera e al pignone di ingranare con un trascurabile passo morto.

Per il controllo di retroazione vi è un trasduttore di posizione. I segnali di comando ai motori sono inviati da un'unità di controllo installata su ogni modulo. L'hardware per la generazione del moto ondoso è costituito da un computer con processore Pentium da 133 MHz, RAM da 28 MB, disco fisso da 30 GB, schermo SVGA da 17", con server avanzato Microsoft Windows NTV3.51. Il computer, mediante software, genera i segnali che alimentano le singole pale del generatore.

Il Software utilizzato è l'HR WaveMaker<sup>®</sup>, un programma sintetizzatore d'onda creato e sviluppato dall'HR Wallingford Ltd.

## 4.2 Misuratori del moto ondoso

Per il rilievo del moto ondoso sono state utilizzate sonde resistive, costituite essenzialmente da una coppia di elettrodi paralleli in acciaio inossidabile montati su un treppiede e collegati ad un condizionatore di segnale.

Nella figura 4.2.1 è riportato il cavalletto di sostegno della sonda con la stessa installata e il sistema di acquisizione dati con relativo computer.



**Fig. 4.2.1: sonda resistiva e computer di acquisizione**

Inoltre, nella zona portuale interna sono stati utilizzati sensori di livello ad ultrasuoni (USS) in numero di quattro, a causa dei bassissimi tiranti idrici che rendono impossibili le operazioni di taratura delle sonde resistive.

Le sonde ultrasoniche, come mostrato nelle sottostanti immagini in fig. 4.2.2, sono state montate anch'esse su appositi cavalletti tripodi di sostegno dotati di asta cilindrica in grado di scorrere verticalmente di quantità note, in modo da effettuare agevolmente le operazioni di taratura.



Fig. 4.2.2: sensore ad ultrasuoni USS

### 4.3 Misuratori delle correnti

Per il rilievo delle correnti si sono utilizzati due apparecchi ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), strumenti di misura che, se pur intrusivi, consentono di effettuare misure puntuali delle componenti di velocità.

Nello specifico, per le misure in oggetto si è impiegata una sonda 2D *side-looking* (fig. 4.3.1) della NORTEK, che dà una buona affidabilità nelle misure di correnti in piccole profondità, quale è il caso dell'imboccatura della zona portuale interna.



Fig. 4.3.1: particolare della sonda ADV di tipo 2D- *side looking*. Fig. 4.3.2: particolare della sonda ADV di tipo 3D- *down looking*.

La sonda consente di effettuare misure puntuali delle due componenti di velocità nel piano orizzontale; il trasmettitore emette, infatti, l'onda acustica secondo la direzione orizzontale e il segnale riflesso viene rilevato da due ricevitori che "guardano lateralmente", anch'essi contenuti nello stesso piano orizzontale.

Inoltre, si è utilizzata una sonda 3D *down-looking* (fig. 4.3.2), anch'essa della NORTEK, in grado di misurare anche la componente verticale della velocità. Tale tipo di sonda viene normalmente utilizzata in condizioni di tiranti idrici più alti, quale è il caso dell'imboccatura dell'avamposto. Entrambe le sonde sono state montate in accoppiata con un rilevatore di moto ondoso, di tipo resistivo per la sonda 3D *down-looking*, di tipo ultrasonico per la sonda 2D *side-looking*, al fine di poter disporre di misure contemporanee di velocità ed altezza d'onda utili ad effettuare operazioni di correlazione.

Il software di gestione di entrambe le sonde ADV permette di impostare agevolmente le dimensioni del volume di controllo, scegliendo tra tre valori degli assi dell'ellissoide di misura: 9 mm, 6 mm, 3 mm.

La massima frequenza di campionamento con cui è consentito effettuare l'acquisizione è di 200 Hz, mentre i valori massimi di velocità che la sonda riesce a misurare sono pari a +/- 520 cm/s per ciascuna delle due componenti contenute nel piano orizzontale. E' importante sottolineare che la sonda ADV permette anche di riconoscere il verso delle componenti del vettore velocità secondo il fissato sistema di direzioni orientate.

#### 4.4 Rilevatori topografici e batimetrici



Fig. 4.3.1: teodolite elettronico

I rilievi topografici sono stati effettuati per mezzo di una stazione totale ad alta precisione, modello PinPoint R500 della Leica (fig. 4.3.1).

Le varie misure sono state effettuate utilizzando la suddetta stazione totale e un prisma ottico fissato su un'asta, dotata di livella sferica per assicurarne la verticalità in fase di rilievo. Con tale apparecchiatura sono stati determinati i dati planimetrici e altimetrici indispensabili per realizzare la batimetria del modello e per il posizionamento delle strutture.



Fig. 4.3.2: laser scanner Z+F IMAGER 5006h

Inoltre, si è utilizzato un laser scanner, tipo Z+F IMAGER 5006h (Fig. 4.3.2). Si tratta di uno strumento a tecnologia “differenza di fase” per il quale il valore piuttosto ridotto della portata (c.a. 79 m) è compensato da un’elevatissima velocità di acquisizione (più di 1.000.000 di punti al secondo) e da un’accuratezza sub-millimetrica.

Le principali caratteristiche dello strumento sono riportate in figura 4.3.3.

Sistema Laser			
Classe del Laser	3R (ISO EN 60825-1)		
Divergenza Raggio	0.22 mrad		
Diametro Raggio	3 mm. (a 0.1 m )		
Portata	79 m		
Distanza minima	0.4 m		
Intervallo di risoluzione	0.1 mm		
Capacità di acquisizione	Max. 1.016.027 pixel/sec.		
Errore lineare	<1 mm.		
Intervallo di rumore	nero 10%	grigio 20%	bianco 100%
Intervallo di rumore, 10m	1.2 mm rms	0.7 mm rms	0.4 mm rms
Intervallo di rumore, 25m	2.6 mm rms	1.5 mm rms	0.7 mm rms
Intervallo di rumore, 50m	6.8 mm rms	3.5 mm rms	1.8 mm rms
Temperatura prodotta	Trascurabile		

Caratteristiche generali	
Scansione verticale	Rotazione completa dello specchio
Scansione orizzontale	Rotazione attorno all’asse verticale
Angolo di campo verticale	310°
Angolo di campo orizzontale	360°
Risoluzione verticale	0.0018°
Risoluzione orizzontale	0.0018°
Accuratezza verticale	0.007° rms
Accuratezza orizzontale	0.007° rms
Velocità di rotazione	max. 50rps (3,000 rpm)

Prestazioni		Durata scansione		
Risoluzione angolare	pixel/360° orizzontale e verticale	Less quality 50 rps	Normal quality 25 rps	High quality 12,5 rps
Preview	1,250	0:13 <sub>min</sub>	0:25 <sub>min</sub>	0:50 <sub>min</sub>
Middle	5,000	0:50 <sub>min</sub>	1:40 <sub>min</sub>	3:20 <sub>min</sub>
High	10,000	1:41 <sub>min</sub>	3:22 <sub>min</sub>	6:44 <sub>min</sub>
Super high	20,000	3:22 <sub>min</sub>	6:44 <sub>min</sub>	13:28 <sub>min</sub>
Ultra high	40,000	---	13:38 <sub>min</sub>	26:36 <sub>min</sub>

Fig. 4.3.3: principali caratteristiche del laser scanner Z+F IMAGER 5006h

Inoltre, è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico per mezzo del 3DEYE. Si tratta di un sistema realizzato da MicroGeo srl, caratterizzato da un'asta telescopica in fibra di carbonio, in grado di raggiungere la massima estensione di 10m, sulla cui sommità è installata una Gimball a 2 assi mediante la quale è possibile ottenere, da remoto, la stabilizzazione e il puntamento della fotocamera montata (fig. 4.3.4). La fotocamera è dotata di un sensore CMOS Exmor R® da 7,76 mm (1/2,3"), con una risoluzione di 18.2 MPX e da un obiettivo Sony G, con zoom ottico 10 x.



**Fig. 4.3.4: il 3DEYE usato per il rilievo fotogrammetrico**

## 5 METODOLOGIE UTILIZZATE PER I RILIEVI

### 5.1 Misure del moto ondoso

Gli attacchi ondosi sono stati generati impostando tutti i parametri necessari per riprodurre in vasca spettri d'onda monodimensionali di tipo JONSWAP.

Le misure di altezza d'onda, effettuate in opportuni punti della vasca, consentono di analizzare l'evoluzione del moto ondoso in avvicinamento alla riva, valutare la riflessione delle strutture e il set-up e l'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale.

#### Modalità operative di rilievo

L'acquisizione dei valori di altezza del moto ondoso è stata effettuata, come già accennato, mediante l'impiego sia di sonde resistive che di sonde ultrasoniche montate su dei tripodi poggiati al fondo (cfr. fig. 4.2.1 e fig. 4.2.2).

Il criterio generale utilizzato per il posizionamento delle sonde è stato quello di disporre una nella zona offshore del modello, ad una distanza di circa 12 m dal generatore di moto ondoso, in modo da rilevare le altezze d'onda nella zona offshore e, quindi, verificare che lo spettro di densità di energia relativo allo stato di mare in vasca corrispondesse a quello impostato con il software di generazione. Le altre sono state posizionate lungo un transetto di misura ubicato in posizione all'incirca centrale rispetto alla parte terminale del molo di sopraflutto compresa tra il setto ortogonale e il conoide di testata; in particolare, alcune sono state poste nella zona subito a monte ed altre a valle della suddetta parte terminale del molo di sopraflutto, così come indicato nel dettaglio nei successivi paragrafi, e comunque in modalità tale da fornire i dati significativi per analizzare l'evoluzione del modo ondoso e il livello medio mare in presenza degli attacchi ondosi. Altre ancora sono state disposte all'interno della zona di avamposto e nella parte di bacino che in futuro sarà protetta per via dell'allungamento del molo di sopraflutto secondo le indicazioni progettuali fornite dalla committenza.

Infine, si sono posizionate quattro sonde di livello del tipo ultrasonico, denominate "USS01", "USS02", "USS03" e "USS04", nella zona portuale interna caratterizzata da bassi fondali, in modo da valutare l'agitazione ondosa anche nella parte più interna del bacino portuale.

Con ogni sonda si sono acquisiti, nel corso degli attacchi ondosi, 30.000 dati con una frequenza di campionamento di 25 Hz; ciascuna misurazione, pertanto, è durata 1.200 secondi pari a 20 minuti.

La scelta di acquisire un tale numero di dati è stata dettata dalla necessità di disporre di un numero sufficiente di valori di altezza d'onda che fosse potenza di due (requisito fondamentale per la elaborazione degli spettri di densità di energia attraverso l'algoritmo

FFT con base 2) e che consentisse analisi statistiche nel dominio del tempo per poter ricavare le principali grandezze caratteristiche del moto ondoso ( $H_{1/3}$ ,  $T_{1/3}$ ,  $H_{RMS}$ , ecc.) mentre la scelta della frequenza di campionamento di 25 Hz è stata dettata dalla necessità di rispettare la condizione di *Nyquist* secondo cui:

$$f_{NY} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} > f_{max}$$

essendo  $f_{NY}$  la frequenza di Nyquist,  $\Delta t$  l'intervallo di campionamento (pari a 0,04 s),  $f_{max}$  la frequenza massima dello spettro.

### **Taratura delle sonde resistive**

Il software di acquisizione delle altezze d'onda fornisce in uscita valori analogici di tensione centrati su 0 (zero) volt; tale segnale viene successivamente convertito in un segnale digitale.

Nella fase di taratura delle sonde resistive, effettuata all'inizio di ogni prova, il software fa corrispondere al livello medio del mare non perturbato un valore in uscita prossimo a "0 volt"; poiché la funzione di calibrazione di ciascuna sonda è di tipo lineare, è necessario disporre di almeno tre coppie di valori ( $h$ ; volt), nelle quali  $h$  rappresenta, per una stessa sonda, l'elevazione rispetto al livello di zero.

Partendo dalla suddetta configurazione iniziale, ciascuna sonda è stata posizionata in due o più differenti punti di immersione posti sia sopra che sotto il livello convenzionalmente assunto come "livello di zero"; ai suddetti punti il software ha associato i nuovi valori di volt, sia superiori che inferiori a "0". I cavalletti di sostegno delle sonde, muniti di appropriati sistemi di regolazione, hanno consentito di effettuare agevolmente gli spostamenti necessari lungo l'asse verticale.

Ultimata la fase di taratura e verificata l'entità dei valori assunti dall'indice di *Goodness of Fit*, che esprime la bontà di adattamento della retta di interpolazione ai punti impostati, le sonde sono state riportate nella condizione iniziale, corrispondente alla quota di acquisizione zero.

Le escursioni verticali di ciascuna sonda durante la fase di taratura, sia al di sopra che al di sotto del relativo "livello di zero", sono state stabilite di volta in volta commisurandole ai valori dei tiranti idrici disponibili, evitando che la parte immersa degli elettrodi risultasse troppo corta nei livelli di minor immersione.

## Taratura delle sonde ultrasoniche

La curva di taratura dello strumento, utile ad associare univocamente ai valori di tensione rilevati dallo strumento le corrispondenti elevazioni del pelo libero dell'acqua, viene valutata prima di cominciare le rilevazioni, in fase di calibrazione dello strumento.

Tale curva presenta due caratteristiche fondamentali:

- è una linea retta, per cui tra elevazioni e tensioni intercorre una relazione lineare;
- la retta non passa per l'origine, ossia esiste uno scostamento dovuto al fatto che i sensori ad ultrasuoni presentano una cosiddetta "zona cieca" a partire dalla estremità inferiore del sensore.

La curva di taratura è regolata dalla seguente relazione:

$$H = -mV + C$$

in cui H è la distanza del pelo libero dell'acqua dalla sonda, V il corrispondente valore di tensione misurato dallo strumento, m e C sono rispettivamente il coefficiente angolare e l'intercetta della retta di taratura.

Al fine della sua valutazione si è provveduto ad associare i corrispondenti valori di tensione di output rispettivamente alla posizione 0 cm (pelo libero in quiete), +3 (elevazione di 6 cm) e alla posizione -3 (elevazione -6 cm).

## Elaborazione dei dati acquisiti

Per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali relativi alle altezze d'onda, è stato impiegato un codice di calcolo appositamente creato in ambiente LabView®, installato su di un PC portatile dedicato appositamente alla gestione della fase di acquisizione dei dati, accoppiato ad una scheda di acquisizione della "National Instruments" (che permette la simultanea acquisizione di sedici strumenti), avente la funzione di convertire il segnale analogico di tensione in uscita dalla centralina di gestione delle sonde in segnale digitale.

Per ciascuno dei 30.000 valori di altezza d'onda campionati dalle sonde nel corso delle differenti acquisizioni, il software ha fornito in uscita la serie storica delle altezze d'onda acquisite, essendo note le curve di taratura.

Disponendo delle serie storiche è possibile effettuare il calcolo delle grandezze caratteristiche del moto ondoso, quali altezza significativa, set-up o set-down. Inoltre, avendo implementato sul calcolatore l'algoritmo F.F.T. con linguaggio di programmazione MATLAB®, si sono ricavati gli spettri di densità di energia che consentono un'analisi delle grandezze misurate nel dominio della frequenza.

In particolare, il calcolatore restituisce in uscita i valori di densità di energia corrispondenti a 8.192 frequenze distribuite, con intervallo costante, in un *range* di frequenze che va da 0 a 12,5 Hz, essendo quest'ultimo pari alla metà del valore della frequenza di campionamento.

Successivamente si è effettuato lo *smoothing* dello spettro, suddividendo l'intervallo di frequenze 0-12,5 Hz in 1.024 bande di 8 frequenze ciascuna ed associando, al valore intermedio delle frequenze di ciascuna banda, la somma delle densità di energia relative alle frequenze afferenti alla banda stessa. Valori di densità di energia inferiori al 10% rispetto al valore corrispondente alla frequenza di picco sono stati attribuiti a rumore di fondo.

Completate le suddette operazioni, è stato possibile determinare i valori di altezza significativa associata a ciascuno spettro attraverso il calcolo dell'area sottesa dalla curva di densità di energia (ossia il momento di ordine zero  $m_0$  della stessa); con la seguente relazione:

$$m_0 = \frac{H_s^2}{16}$$

I risultati delle analisi effettuate sulle misure relative al moto ondoso saranno esposti, per ogni singola prova, nel seguito.

## 5.2 Misure delle correnti

Come detto nel precedente paragrafo 4.3, le misure di velocità delle correnti sono state effettuate in corrispondenza dell'imboccatura dell'avamposto e dell'imboccatura del bacino interno utilizzando, rispettivamente, un ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) di tipo 3D *down-looking* e 2D *side-looking*.

### Modalità operative di rilievo

Le misurazioni sono state effettuate lungo la verticale di ciascuno dei due strumenti utilizzati al fine di poter ricostruire dei profili verticali di velocità. Nello specifico, in corrispondenza dell'imboccatura dell'avamposto, caratterizzata da un maggiore tirante idrico, sono stati rilevati i valori di velocità in otto punti, distanziati tra loro di una quantità  $\Delta = 2$  cm, a partire da una profondità  $z = -21$  cm dal pelo libero fino ad una profondità  $z = -7$  cm dal pelo libero, mentre in corrispondenza dell'imboccatura del bacino interno sono stati rilevati i valori di velocità in quattro punti, a partire da una profondità  $z = -7$  cm dal pelo libero fino ad una profondità  $z = -2$  cm dal pelo libero.

Ogni acquisizione è stata estesa ad un intervallo di tempo della durata di 180 secondi, con una frequenza di campionamento di 25 Hz, per un ammontare complessivo di 4.500 dati rilevati. Al fine di poter avere acquisizioni simultanee con i valori delle altezze d'onda, i segnali analogici in uscita dai due strumenti sono stati acquisiti con la stessa scheda di acquisizione della "National Instruments" descritta nel precedente paragrafo e gestiti con lo stesso programma di acquisizione.

### **5.3 Rilievi topografici**

Il rilievo con l'utilizzo del laser scanner è stato condotto mediante una serie di nove scansioni eseguite da altrettanti punti di stazionamento, con una impostazione "risoluzione angolare/qualità" di tipo "High/High" (Fig. 4.3.3).

Per le successive elaborazioni è stato utilizzato il software *JRC 3D Reconstructor*, creato dal Centro di Ricerca di Ispra della Comunità Europea e sviluppato da *Gexcel*. Il software permette, in un ambiente unico, la visualizzazione e il filtraggio dei dati laser, la registrazione di più scansioni e l'unione in un unico modello, la creazione di superfici attraverso la triangolazione della nuvola di punti, la creazione di sezioni secondo piani per i quali è possibile stabilire qualsiasi orientamento, nonché l'esportazione di tutti gli oggetti creati, in ambiente CAD.

Il rilievo con il 3DEYE è stato eseguito mediante l'acquisizione di 127 scatti, eseguiti da una altezza di circa 10m rispetto al fondale del modello, impostati in modo da ottenere un overlap del 70% sia lungo l'ascissa che lungo l'ordinata.

L'elaborazione è stata condotta mediante il software commerciale PhotoScan Professional, prodotto da Agisoft.

### **5.4 Rilievi fotografici e video**

In corrispondenza di numerose prove effettuate, è stata eseguita una serie di fotografie e filmati video digitali. I filmati e le foto effettuate, catalogati con riferimento all'attacco ondosso e al tipo di opera o di attività esaminata, saranno riportati in allegato alla Relazione Finale descrittiva dei risultati conclusivi delle attività di studio e sperimentazione.

## 6 PROVE EFFETTUATE E LORO ANALISI

Come già detto nel precedente paragrafo 3, sul modello 3D sono state effettuate le seguenti prove:

**Modello 3D – Gruppo 1** - Configurazione attuale delle opere con fronti d'onda provenienti da  $53,5^\circ$  N: studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all'interno che all'esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza dell'imboccatura dell'avamporto e dell'imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

**Modello 3D – Gruppo 2** - Configurazione attuale delle opere con fronti d'onda provenienti da  $93,5^\circ$  N: studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all'interno che all'esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza dell'imboccatura dell'avamporto e dell'imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

**Modello 3D – Gruppo 3** - Configurazione di progetto delle opere con fronti d'onda provenienti da  $93,5^\circ$  N: studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all'interno che all'esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza della nuova imboccatura dell'avamporto e dell'imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

Nella sottostante tab. 6.1 è riportato il prospetto delle prove eseguite, nel quale è indicato il numero identificativo della prova, l'altezza significativa dell'attacco ondoso generato espressa in centimetri, il relativo periodo di picco espresso in secondi, la durata dell'attacco in ore, la data e i rilievi effettuati. Nella colonna finale sono riportate, sotto la voce "Documentazione", le riprese fotografiche ed i video effettuati durante la prova.

PROSPETTO DELLE PROVE ESEGUITE						
PROVA N.	DATA	Hs (cm)	Tp (s)	DURATA	PROVE E RILIEVI ESEGUITI	DOCUMENTAZIONE
Lavori di realizzazione del modello nella configurazione attuale del porto						
<b>PROVE CON CONFIGURAZIONE ATTUALE DELLE OPERE CON FRONTI D'ONDA PROVENIENTI DA 53,5° N</b>						
1/1	dal 24/05/2017 al 25/05/2017	8,47	1,181	20' + 30'	Rilievo moto ondoso e correnti	Foto e Filmato
1/2	dal 24/05/2017 al 25/05/2017	11,63	1,532	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
1/3	dal 24/05/2017 al 25/05/2017	12,97	1,532	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
1/4	dal 24/05/2017 al 25/05/2017	13,70	1,532	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
1/5	dal 24/05/2017 al 25/05/2017	16,17	1,745	20' + 30'	Rilievo moto ondoso e correnti	Foto e Filmato
Spostamento del battionda e delle guide laterali con rotazione relativa di 40°						
<b>PROVE CON CONFIGURAZIONE ATTUALE DELLE OPERE CON FRONTI D'ONDA PROVENIENTI DA 93,5° N</b>						
2/1	dal 23/10/2017 al 08/11/2017	8,22	1,181	20' + 30'	Rilievo moto ondoso e correnti	Foto e Filmato
2/2	dal 23/10/2017 al 08/11/2017	13,12	1,532	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
2/3	dal 23/10/2017 al 08/11/2017	14,73	1,746	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
2/4	dal 23/10/2017 al 08/11/2017	15,94	1,746	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
2/5	dal 23/10/2017 al 08/11/2017	19,03	1,989	20' + 30'	Rilievo moto ondoso e correnti	Foto e Filmato
Lavori di realizzazione delle strutture portuali di progetto						
<b>PROVE CON CONFIGURAZIONE DI PROGETTO DELLE OPERE CON FRONTI D'ONDA PROVENIENTI DA 93,5° N</b>						
3/1	dal 20/12/2017 al 21/12/2017	8,22	1,181	20' + 30'	Rilievo moto ondoso e correnti	Foto e Filmato
3/2	dal 20/12/2017 al 21/12/2017	13,12	1,532	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
3/3	dal 20/12/2017 al 21/12/2017	14,73	1,746	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
3/4	dal 20/12/2017 al 21/12/2017	15,94	1,746	20'	Rilievo moto ondoso	Foto e Filmato
3/5	dal 20/12/2017 al 21/12/2017	19,03	1,989	20' + 30'	Rilievo moto ondoso e correnti	Foto e Filmato

Tab. 6.1: prospetto delle prove eseguite.

## 6.1 Prove Modello 3D – Gruppo 1

### 6.1.1 Realizzazione del modello

Per la realizzazione del modello si è utilizzata, come già detto, l'analogia di Froude, con scala geometrica indistorta delle lunghezze pari a  $\lambda_L = 1/30$ .

Nella zona di generazione del moto ondoso, il livello dell'acqua in vasca è stato impostato ad una quota pari a 0,80 m, corrispondente a 24,0 m nel prototipo.

La descrizione dei lavori inerenti alla realizzazione del modello nella configurazione attuale delle opere è riportata nel precedente paragrafo 2 "Realizzazione del Modello".

### 6.1.2 Rilievi topografici

Terminati i lavori di realizzazione del modello, e comunque prima di iniziare il riempimento della vasca, sono stati eseguiti dei rilievi topografici che hanno permesso di ottenere il DTM del modello realizzato.

In particolare è stato eseguito un rilievo mediante laser scanner, ed un rilievo fotogrammetrico mediante strumentazione 3DEYE.

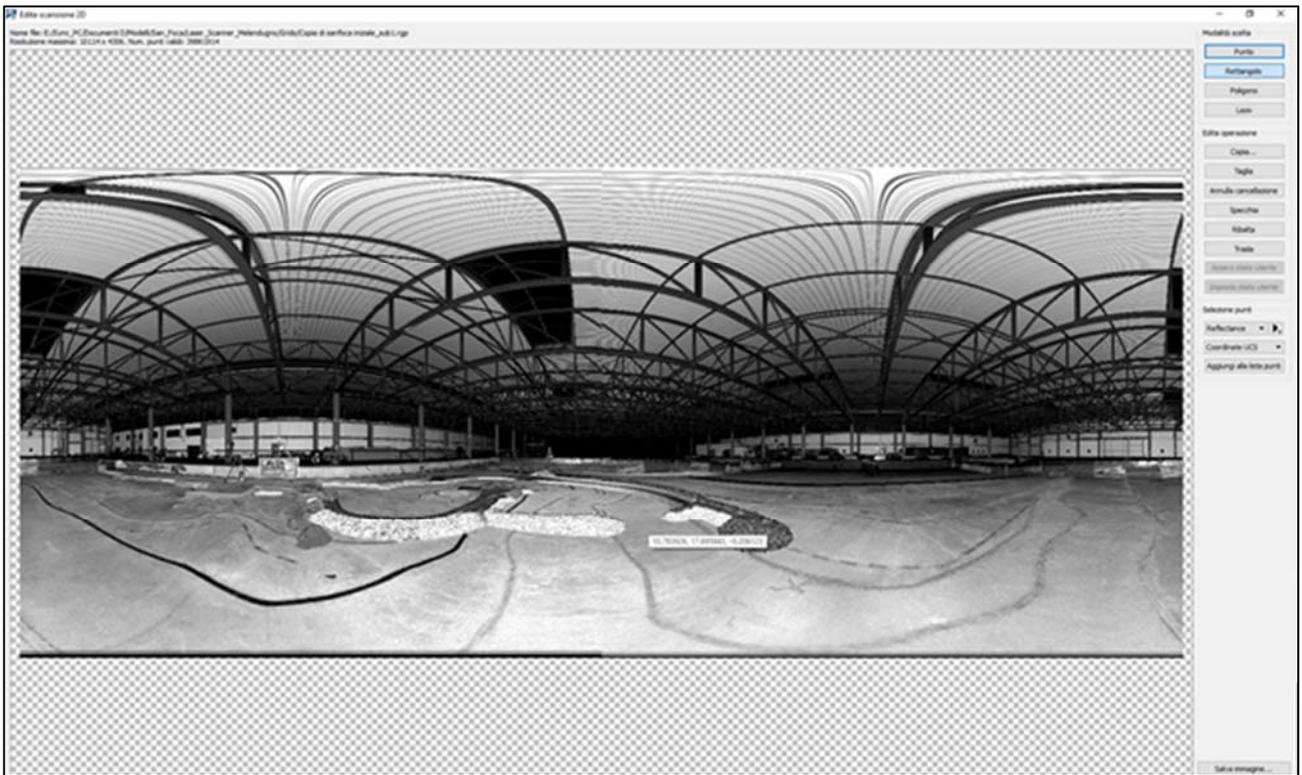
Il rilievo con il laser scanner è stato condotto secondo la metodologia esposta nel precedente paragrafo 5.3 “Rilievi topografici”. In particolare, l’allineamento delle nove scansioni è stato effettuato in maniera manuale mediante riconoscimento di punti omologhi (i target di seguito descritti) nel confronto tra coppie di nuvole di punti. L’errore rilevato è risultato inferiore ai 2 mm per ognuna delle coppie di nuvole di punti allineate.

Al termine dell’allineamento, si è provveduto a riferire le nuvole di punti allineate, secondo un sistema di riferimento locale. L’operazione è stata condotta con l’ausilio di una serie di target per i quali erano note le coordinate nel suddetto sistema di riferimento, opportunamente dislocati all’interno del laboratorio, caratterizzati da una griglia a maglia quadrata ad elevato contrasto cromatico (bianco e nero) così da facilitare l’individuazione univoca del punto centrale (fig. 6.1.2.1).



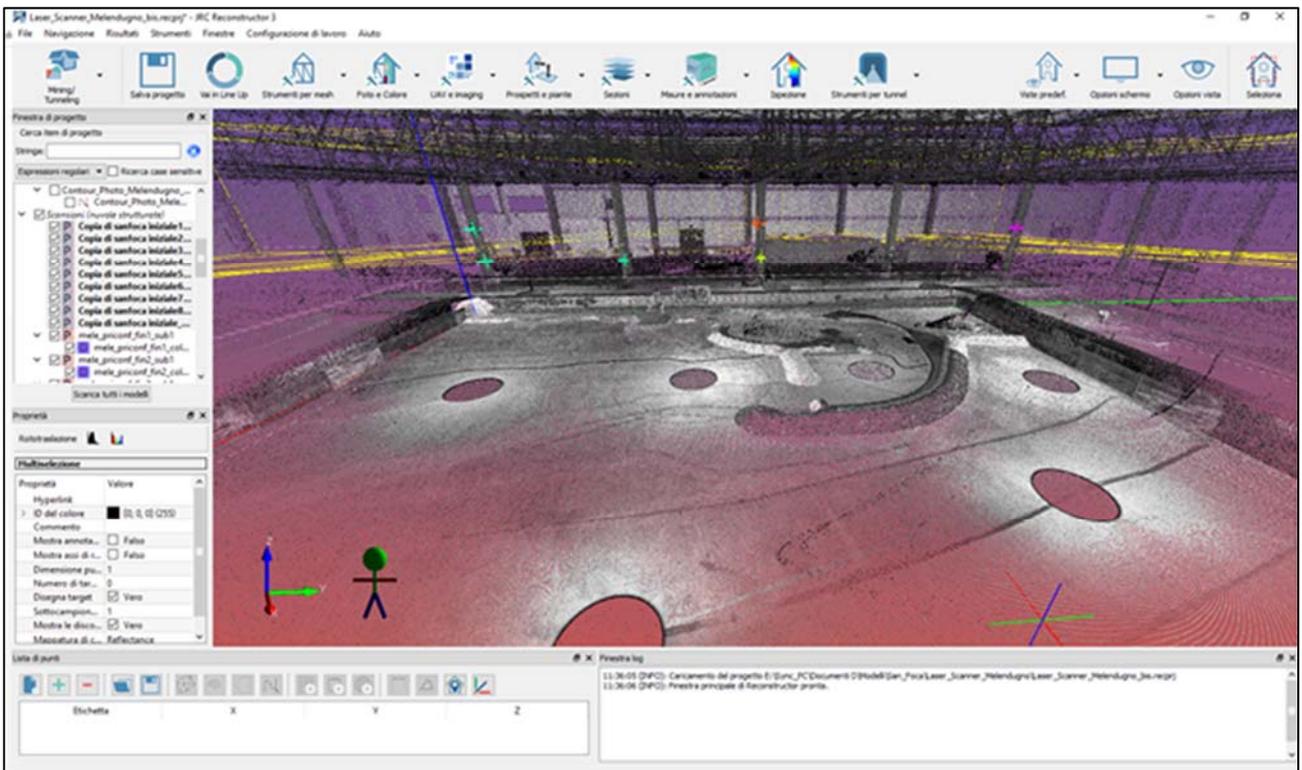
**Fig. 6.1.2.1: un’immagine a riflettanza in cui si vedono alcuni target utilizzati**

Il software consente di misurare distanze, aree e volumi sul modello generato e permette di leggere, sulle immagini bidimensionali panoramiche a riflettanza (l’immagine in figura 6.1.2.2 è relativa ad una delle nove scansioni), le coordinate di qualsiasi punto nel sistema di riferimento adottato per il modello stesso.



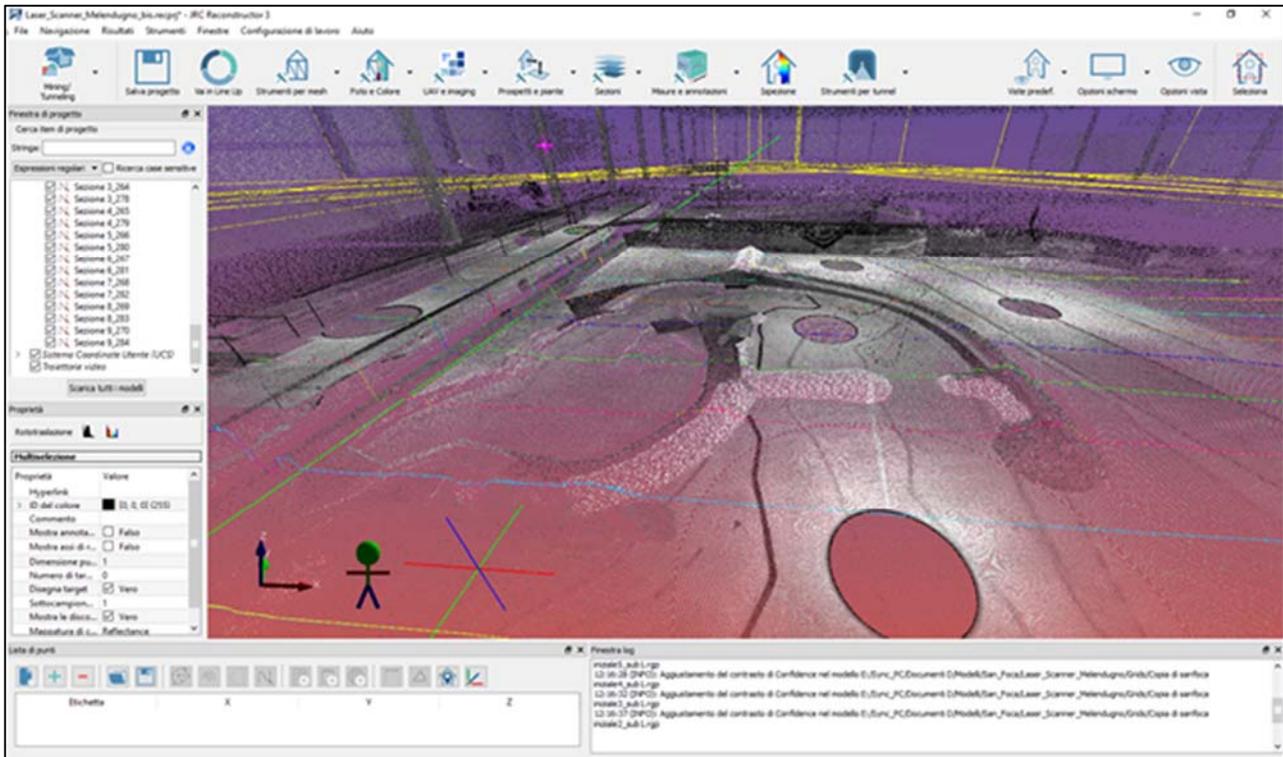
**Fig. 6.1.2.2: un'immagine panoramica 2D a riflettanza di una delle nove scansioni**

Il rilievo ha permesso così di ottenere nove nuvole di punti strutturate, caratterizzate da circa 40 milioni di punti per ogni nuvola. La figura 6.1.2.3 mostra le suddette nuvole di punti, per ognuna delle quali è chiaramente visibile il punto di stazione.



**Fig. 6.1.2.3: il modello digitale completo con le nove nuvole di punti strutturate**

Naturalmente il software consente di generare una serie di sezioni orizzontali o verticali, esportabili in ambiente CAD per le successive elaborazioni. La figura 6.1.2.4 mostra le nuvole di punti strutturate, con le sezioni generate lungo piani verticali paralleli all'asse delle ascisse, con interasse di 2m.



**Fig. 6.1.2.4: una vista delle nuvole di punti strutturate e delle sezioni verticali generate**

Il rilievo con il 3DEYE è stato eseguito secondo la metodologia esposta nel precedente paragrafo 5.3 “Rilievi topografici”, mediante l’acquisizione di 127 scatti, eseguiti da una altezza di circa 10m rispetto al fondale del modello, impostati in modo da ottenere un overlap del 70% sia lungo l’ascissa che lungo l’ordinata. L’immagine in fig. 6.1.2.5 mostra le posizioni planimetriche degli scatti e il numero di fotografie, indicate nella *color bar*, in cui sono visibili i relativi punti del modello.

L’elaborazione è stata condotta mediante il software commerciale PhotoScan Professional, prodotto da Agisoft.

Importate le fotografie (Fig. 6.1.2.6), il software consente di generare la nuvola sparsa e, a seguire, la nuvola densa, la mesh e la texturizzazione della mesh (Fig. 6.1.2.7). Infine è possibile generare il DEM (*Digital Elevation Model*) (Fig. 6.1.2.8) e l’ortofoto.

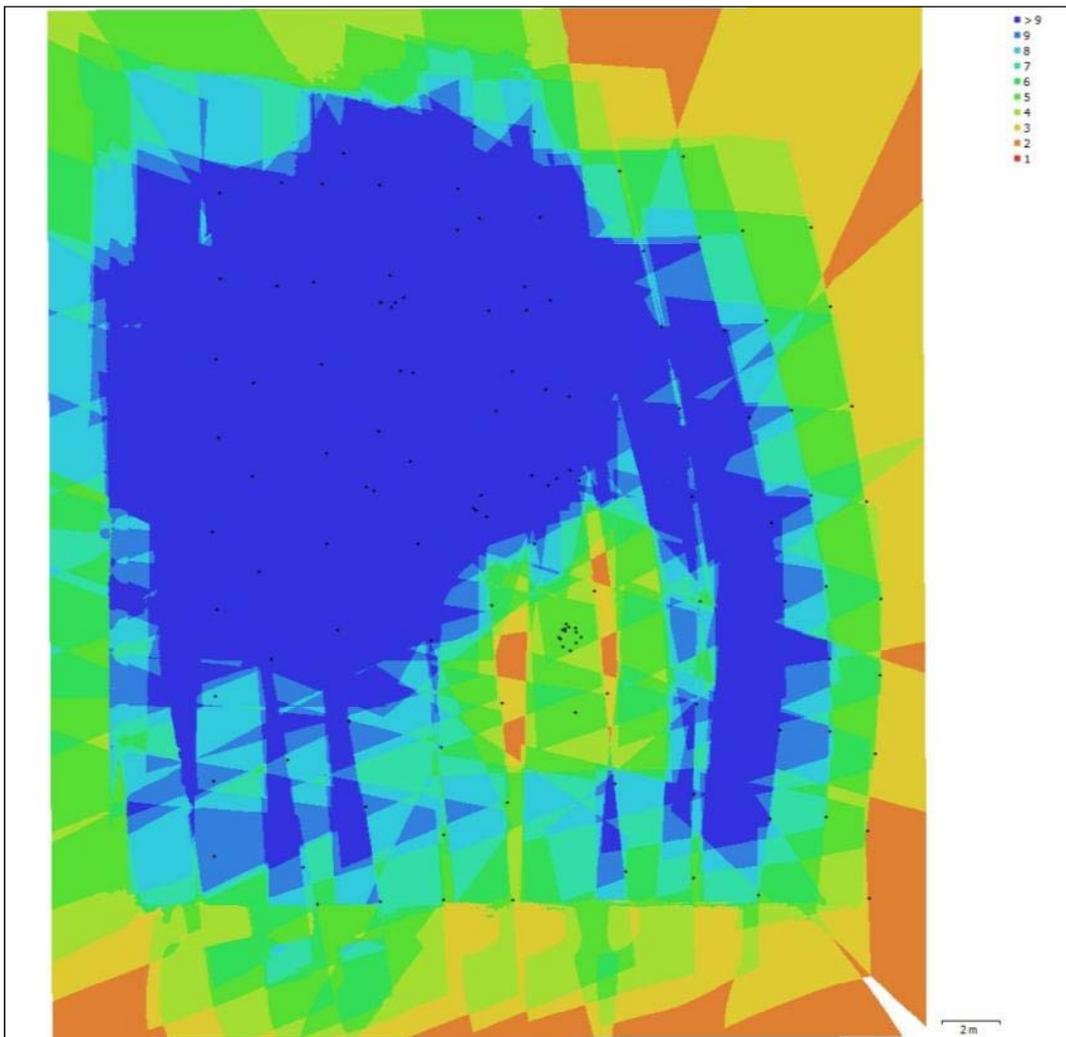


Fig. 6.1.2.5: rappresentazione delle posizioni di scatto e dell'overlap

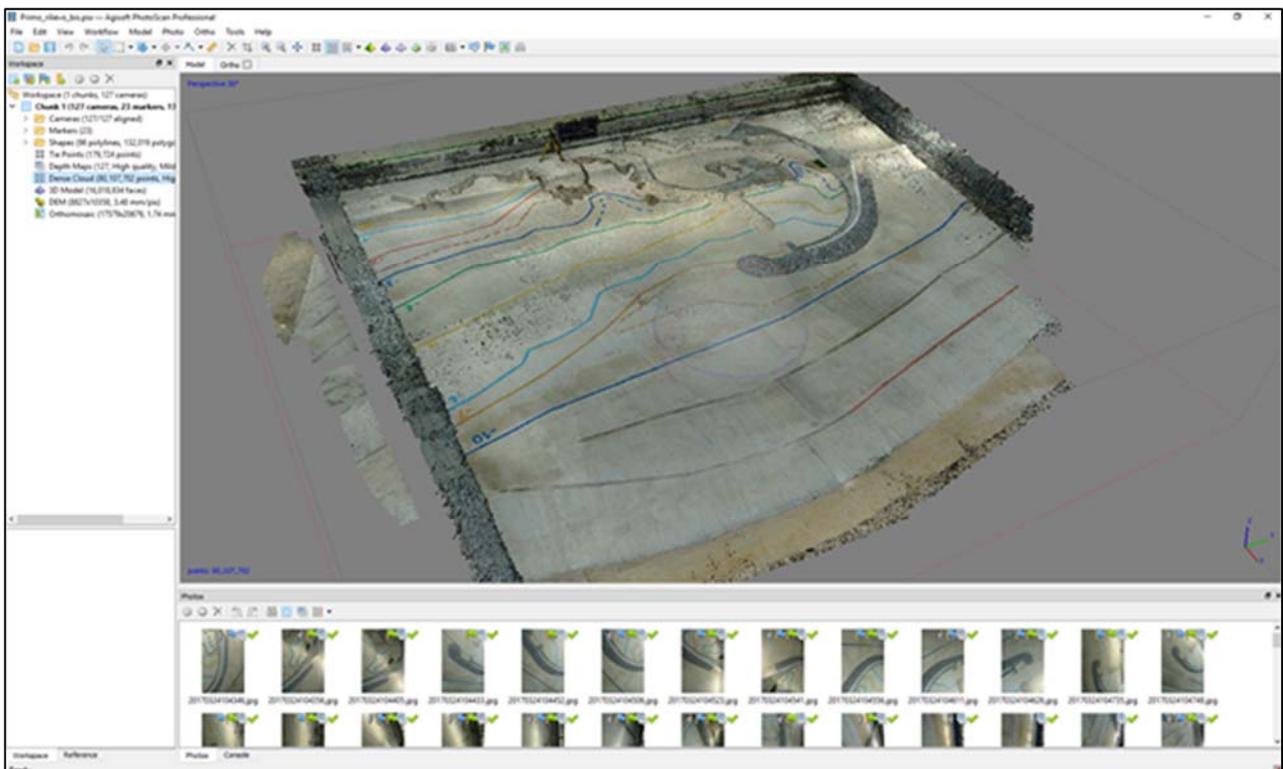
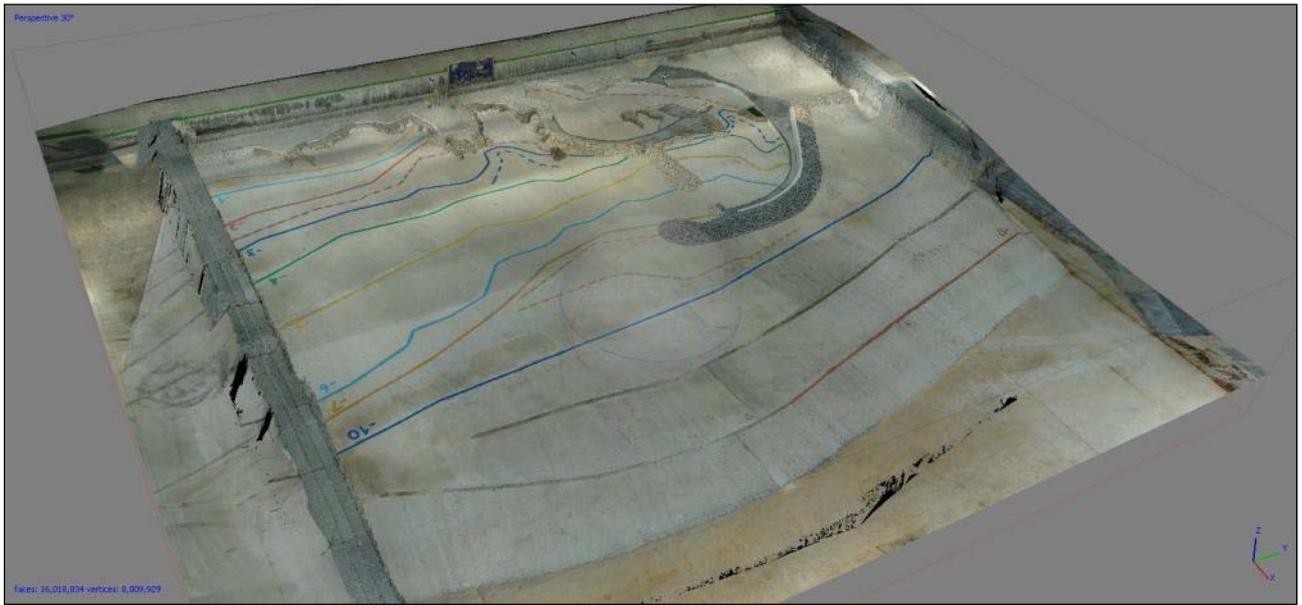
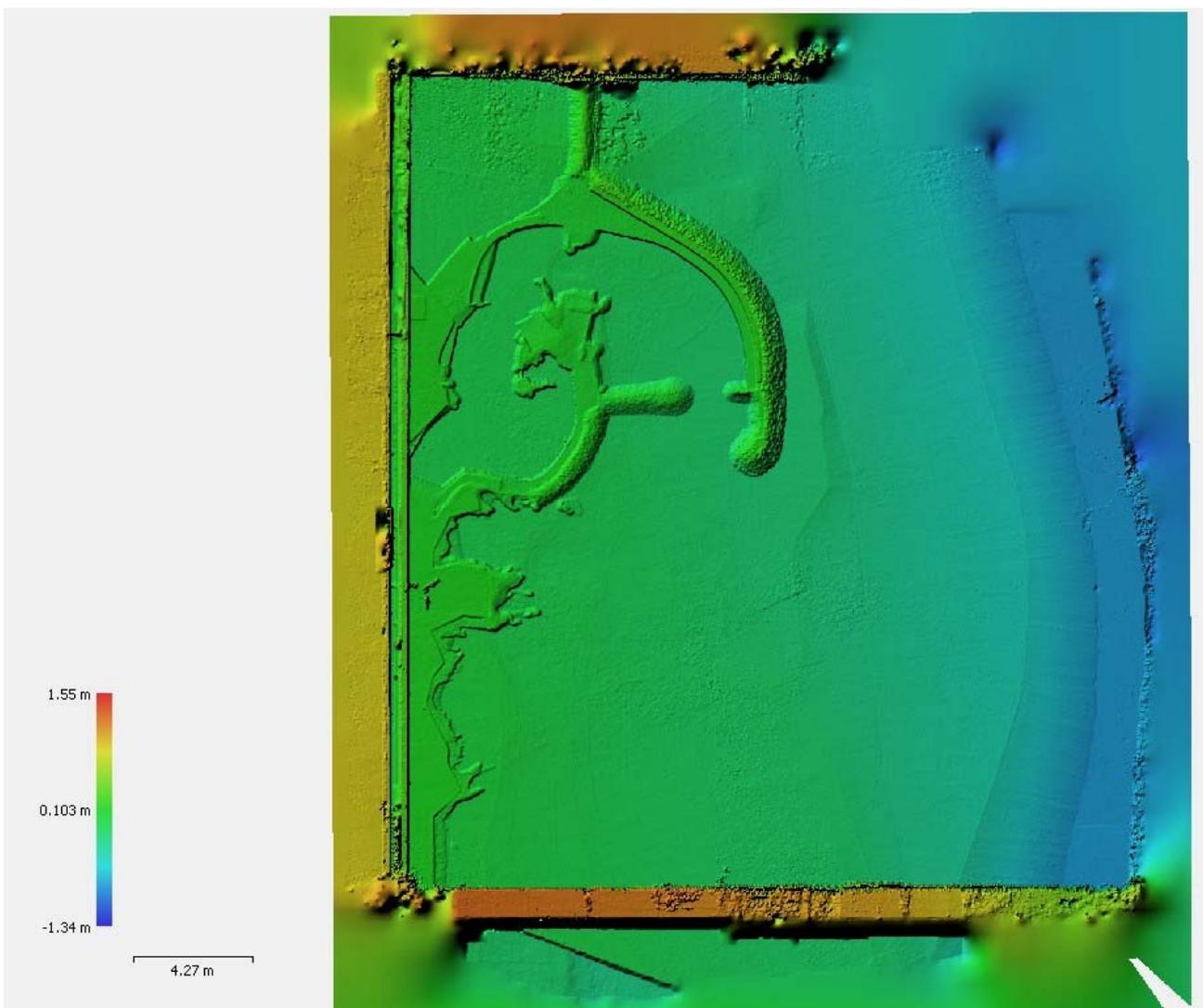


Fig. 6.1.2.6: Pannello di controllo del PhotoScan: la generazione della nuvola densa



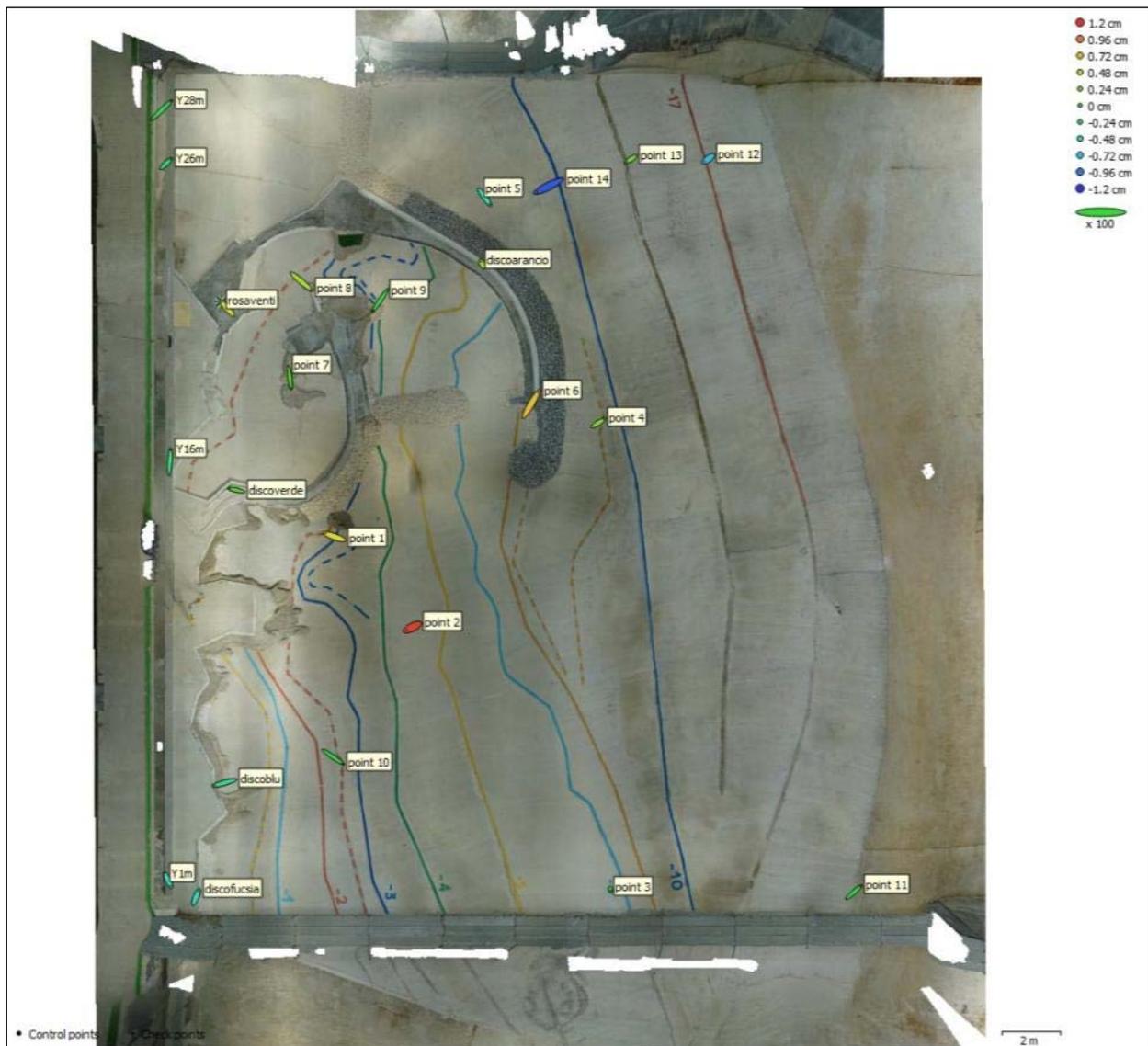
**Fig. 6.1.2.7: la mesh texturizzata**



**Fig. 6.1.2.8: il DEM generato**

La nuvola densa generata è stata resa strutturata mediante l'utilizzo di 23 GCP (*Ground Control Point*), preventivamente rilevati sul modello mediante la stazione totale e successivamente riconosciuti sulla nuvola di punti. L'errore totale finale è risultato pari a 0.007938m corrispondenti a 0.264 pix.

L'immagine in figura 6.1.2.9 mostra la collocazione dei GCP sul modello, rappresentati da un ellisse il cui colore ne indica l'errore lungo l'asse z (i relativi valori sono indicati nella color bar) e la cui forma ne indica l'errore lungo x e y



**Fig. 6.1.2.9: una vista della mesh con i GCP**

Infine è stata generata la *Contour Map* (una mappa topografica con la rappresentazione delle curve di livello) dalla quale è possibile osservare in modo immediato la qualità del modello digitale ottenuto dal presente rilievo. L'immagine in figura 6.1.2.10 mostra infatti un'ottima sovrapposizione delle curve batimetriche ricostruite dal software (per alcune delle quali è indicata la relativa quota), con le curve batimetriche materializzate sul modello fisico

ed evidenziate cromaticamente come precedentemente descritto. La qualità della sovrapposizione si apprezza maggiormente se si tiene conto del fatto che le curve batimetriche evidenziate, distano tra loro di soli 33mm in quota (fino alla -7m, in quanto, come si è detto in precedenza, la successiva è la -10 m).

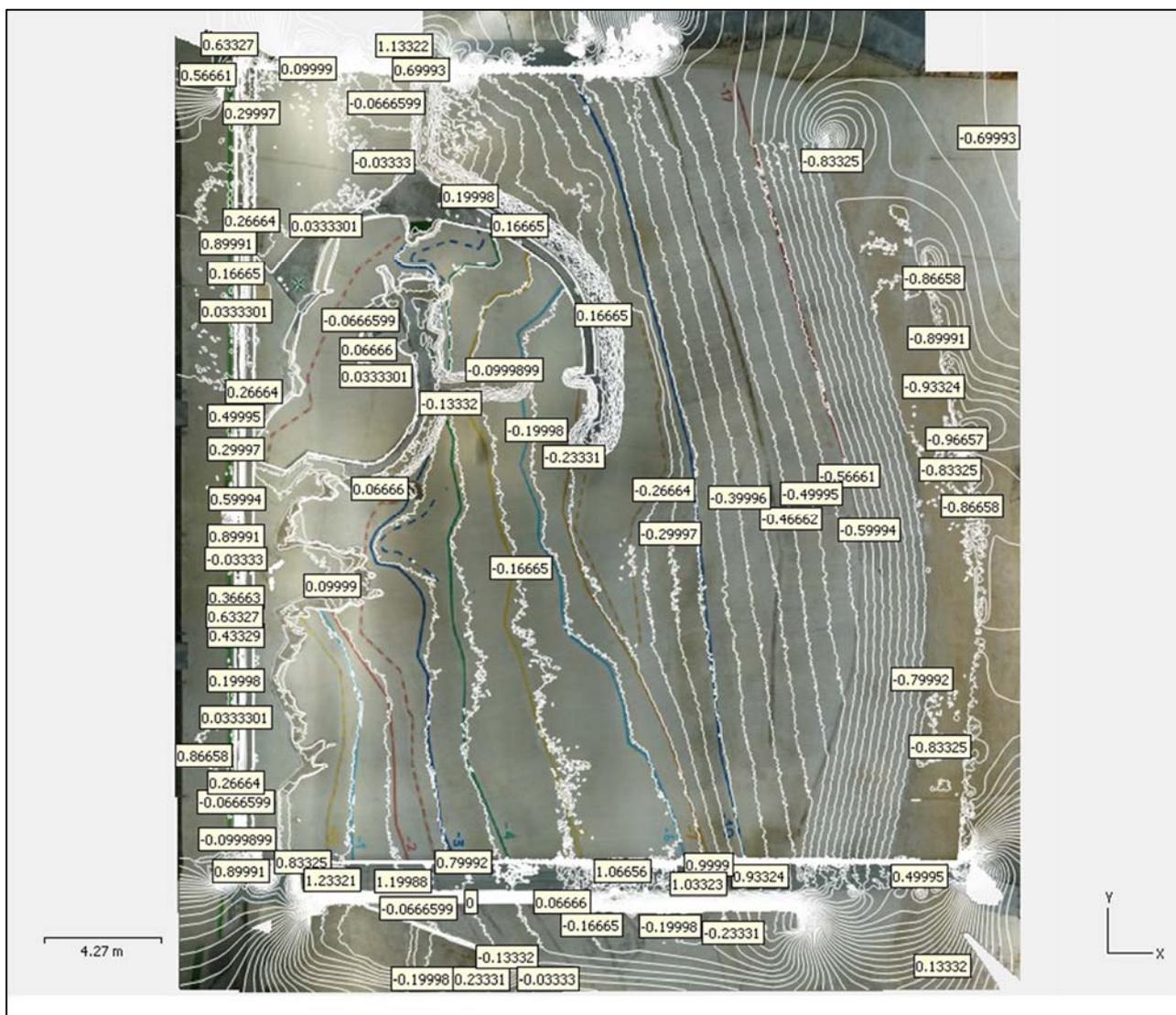
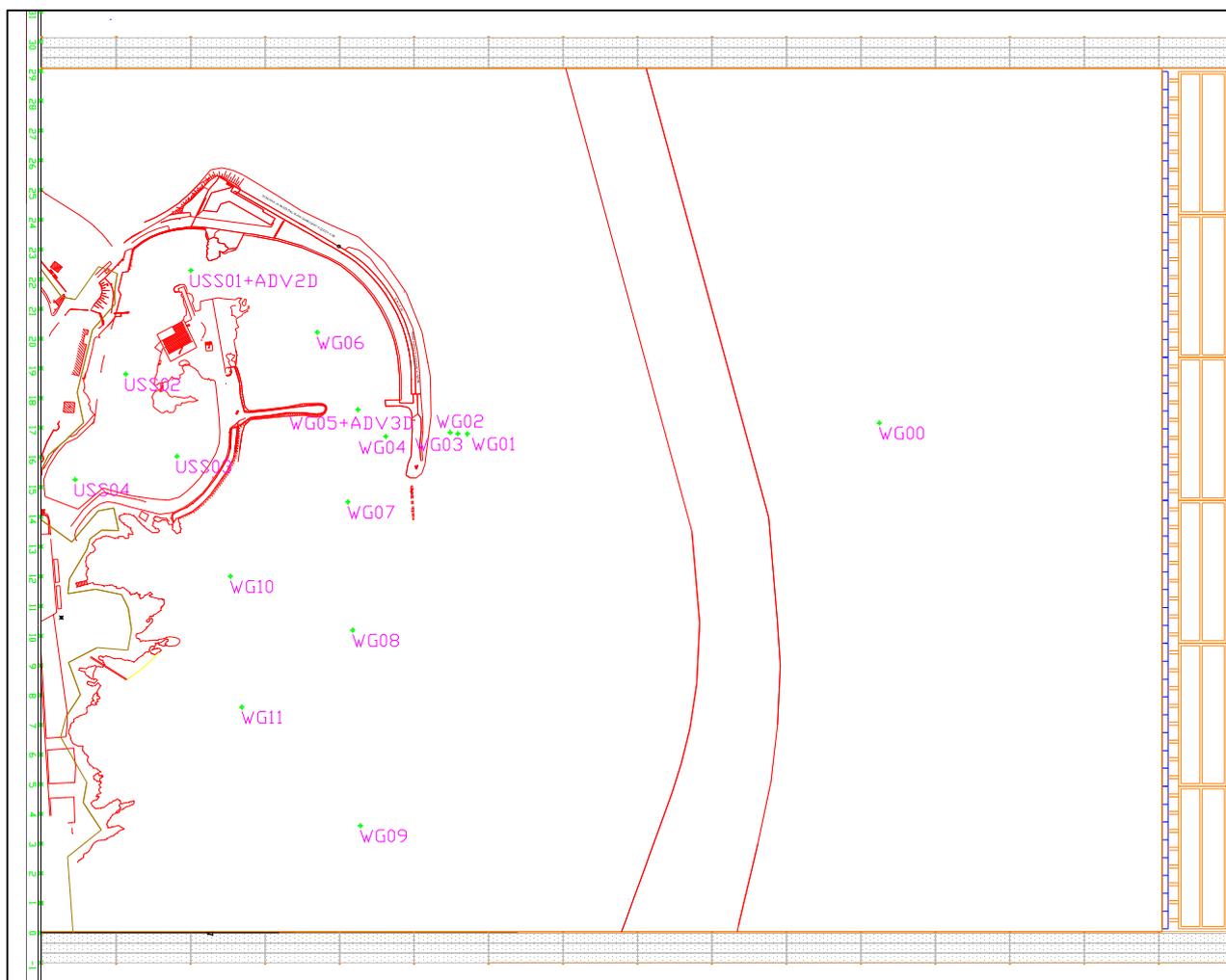


Fig. 6.1.2.10: la *Contour Map* generata

### 6.1.3 Analisi dell'evoluzione del moto ondoso e agitazione ondosa interna

Durante le prove 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 e 1/5, caratterizzate da un valore al largo di altezza significativa e periodo di picco in scala modello rispettivamente pari a  $H_s=8,47$  cm –  $T_p=1,181$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  giorni),  $H_s=11,63$  cm –  $T_p=1,532$  s (tempo di ritorno  $T_R=2$  anni),  $H_s=12,97$  cm –  $T_p=1,532$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  anni),  $H_s=13,70$  cm –  $T_p=1,532$  s (tempo di ritorno  $T_R=10$  anni),  $H_s=16,17$  cm –  $T_p=1,745$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni), (in scala prototipo pari rispettivamente a  $H_s=2,54$  m –  $T_p=6,47$  s,  $H_s=3,49$  m –  $T_p=8,39$  s,  $H_s=3,89$  m –  $T_p=8,39$  s,  $H_s=4,11$  m –  $T_p=8,39$  s,  $H_s=4,85$  m –  $T_p=9,56$  s), sono stati eseguiti i rilievi di moto ondoso.

Le misure sono state effettuate in diversi punti la cui ubicazione planimetrica è riportata nella sottostante fig. 6.1.2.1, utilizzando sonde resistive (WG) per la zona off-shore e per la zona dell'avamposto, mentre per la zona portuale interna sono state utilizzate delle sonde di misura ad ultrasuoni (USS), a causa dei bassi tiranti idrici presenti in tale zona e la conseguente impossibilità di effettuare le operazioni di taratura delle sonde resistive. Per entrambi i tipi di misuratori la frequenza di campionamento è stata di 25 Hz, con un numero totale di dati acquisiti per ciascun punto pari a 30.000.



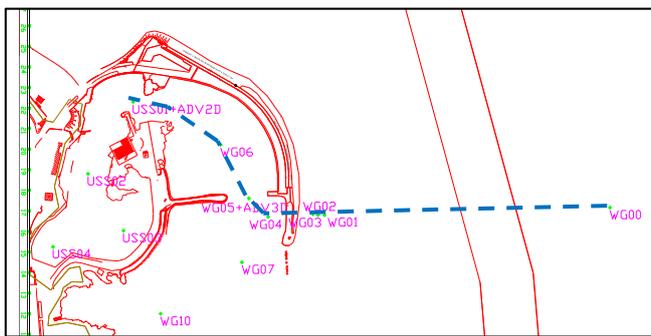
**Fig.6.1.2.1: planimetria del porto con l'ubicazione e numerazione delle sonde di misure.**

Il criterio generale utilizzato per il posizionamento delle sonde è stato quello di disporre una nella zona offshore del modello, ad una distanza di circa 12 m dal generatore di moto ondoso, in modo da rilevare le altezze d'onda nella zona offshore e, quindi, verificare che lo spettro di densità di energia relativo allo stato di mare generato in vasca corrispondesse a quello impostato con il software di generazione. Le altre sono state posizionate lungo un transetto di misura ubicato in posizione all'incirca centrale rispetto alla parte terminale del molo di sopraflutto, compresa tra il setto ortogonale e il conoide di testata; in particolare, alcune sono state poste nella zona subito a monte ed altre a valle della suddetta parte

terminale del molo di sopraflutto, in modo tale da fornire i dati significativi necessari per analizzare l'evoluzione del modo ondoso di volta in volta generato. Altre ancora sono state disposte all'interno della zona di avamposto e nella parte di bacino che in futuro sarà protetta per via dell'allungamento del molo di sopraflutto secondo le indicazioni progettuali fornite dalla committenza.

Infine, si sono posizionate quattro sonde di livello del tipo ultrasonico, denominate "USS01", "USS02", "USS03" e "USS04", nella zona portuale interna caratterizzata da bassi fondali, in modo da valutare l'agitazione ondosa anche nella parte più interna del bacino portuale.

Nella successiva fig.6.1.2.3 si riportano, per brevità di esposizione, gli spettri di densità di energia con riferimento all'attacco ondoso caratterizzato da  $H_s=16,17$  cm –  $T_p=1,745$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni) (in scala prototipo rispettivamente  $H_s=4,85$  m –  $T_p=9,56$  s)



**Fig.6.1.2.2:** indicazione del trassetto virtuale utilizzato per l'analisi dell'evoluzione del moto ondoso dal largo verso l'interno del porto.

relativi alle sonde posizionate lungo un trassetto virtuale (fig. 6.1.2.2) che, partendo dalla sonda ubicata in prossimità del generatore di moto ondoso (WG00), congiunge le sonde disposte subito a monte della parte terminale del molo di sopraflutto (WG01, WG02 e WG03), per poi continuare subito a valle di questo (WG04), congiungere la sonda

ubicata all'attuale imboccatura del porto (WG05) e la sonda ubicata nella parte centrale dell'avamposto (WG06) e terminare in corrispondenza della prima sonda ultrasonica (USS01) posizionata in corrispondenza dell'entrata nella parte più interna del porto. Per una migliore lettura dei grafici, i valori di densità di energia spettrale relativi alle sonde ubicate al di qua del molo di sottoflutto e nella parte dell'avamposto (WG04, WG05, WG06 e USS01) sono stati amplificati di 100 volte rispetto a quelli relativi alle sonde esterne.

Si può innanzitutto osservare come lo spettro rilevato dalla sonda resistiva "WG00" nella zona offshore riproduca, con buona fedeltà, lo spettro di densità di energia monodimensionale di tipo JONSWAP impostato col software di generazione.

Lo spettro d'onda, procedendo dal largo verso riva, subisce modificazioni a causa delle variazioni di profondità (*shoaling*), per effetto delle perdite di energia per attrito sul fondo e all'interfaccia acqua-aria e, in questo caso, per effetto del frangimento che subiscono le onde. In particolare, si osserva che nel passaggio dalla zona offshore alla zona di risalita del fondale si sia verificato un abbattimento di energia in corrispondenza della frequenza di picco  $f_p=0,573$  Hz (sonda "WG01"). E' possibile notare, anche, come siano già insorte delle non linearità sulla prima armonica della frequenza di picco, di valore pari a  $2f_p=1,146$  Hz e

sulla seconda armonica della frequenza di picco, di valore pari a  $3f_p=1,719$  Hz (sonde “WG02” e “WG03”). Inoltre, è possibile osservare la comparsa di due componenti alle basse frequenze in corrispondenza del valore  $f=0,182$  Hz e del valore  $f=0,109$  Hz.

Esaminando gli spettri delle sonde posizionate al di qua del molo di sopraflutto, è possibile osservare come, man mano che ci si spinge nella parte più riparata del porto, l'energia tenda a trasferirsi sempre più verso le basse frequenze per via dell'insorgere dei fenomeni di riflessione e risonanza dovuti alla presenza delle strutture portuali, fino ad arrivare alla prima sonda ultrasonica (USS01) ubicata all'ingresso del bacino portuale interno, dove l'energia originaria relativa alla frequenza di picco si è trasferita alle frequenze  $f = 0,182$  Hz,  $f = 0,109$  Hz e  $f = 0,036$  Hz.

Per completezza, nella successiva fig.6.2.1.4 si riportano gli spettri di densità di energia riferiti alle ulteriori sonde ultrasoniche (USS02, USS03 e USS04) posizionate nella parte più interna del bacino portuale. Al fine di agevolare le operazioni di confronto con gli spettri riportati nella precedente fig.6.2.1.3, si è riproposto lo spettro della sonda USS01.

Da un esame della figura è possibile vedere come anche per le sonde ubicate nella parte più interna del porto l'energia originaria posizionata in corrispondenza della frequenza di picco si sia trasferita tutta alle basse frequenze, i cui valori numerici sono gli stessi della sonda US001 indicati nel precedente capoverso. Da un punto di vista del contenuto energetico, la componente più significativa risulta essere quella relativa a  $f = 0,182$  Hz ( $T = 5,49$  sec.; in scala prototipo  $T = 30,07$  sec.), il cui valore maggiore si registra per la sonda USS04, ossia quella più interna.

Infine, nella sottostante tab.6.1.2.1 sono riportati i valori di altezza significativa relativi a tutte le sonde investigate e a tutti gli attacchi ondosi simulati. Tali valori sono anche riportati nei grafici delle successive fig.6.1.2.5, fig.6.1.2.6, fig.6.1.2.7, fig.6.1.2.8 e fig.6.1.2.9 sotto forma di mappe di agitazione ondosa. Da una lettura della tabella e dei grafici si evince come la massima altezza significativa misurata nella parte più interna del porto sia stata pari a  $0,381$  m (in scala prototipo) riferita all'attacco ondoso con tempo di ritorno  $T_R=10$  anni ed alla sonda USS02.

Sonda	T <sub>R</sub> 5 gg		T <sub>R</sub> 2 an		T <sub>R</sub> 5 an		T <sub>R</sub> 10 an		T <sub>R</sub> 50 an	
	Dir 53,5°N		Dir 53,5°N		Dir 53,5°N		Dir 53,5°N		Dir 53,5°N	
	H <sub>s,mod</sub> [cm]	H <sub>s,prot</sub> [m]								
WG00	9.350	2.805	11.988	3.596	13.091	3.927	13.709	4.113	17.526	5.254
WG01	5.918	1.775	9.941	2.982	10.693	3.208	10.743	3.223	16.339	4.904
WG02	5.802	1.741	10.374	3.112	11.076	3.323	10.852	3.256	14.904	4.474
WG03	6.064	1.819	7.115	2.135	7.579	2.274	7.728	2.318	9.416	2.824
WG04	0.854	0.256	1.292	0.388	1.363	0.409	1.433	0.430	1.483	0.444
WG05	0.851	0.255	1.050	0.315	1.118	0.335	1.142	0.343	1.367	0.414
WG06	0.415	0.125	0.570	0.171	0.595	0.179	0.597	0.179	0.728	0.214
WG07	3.891	1.167	5.116	1.535	5.258	1.577	5.468	1.640	6.112	1.834
WG08	7.957	2.387	10.309	3.093	11.194	3.358	11.720	3.516	13.264	3.974
WG09	13.415	4.025	17.669	5.301	18.420	5.526	18.987	5.696	17.903	5.374
WG10	8.442	2.533	11.119	3.336	11.592	3.477	11.949	3.585	11.260	3.374
WG11	7.199	2.160	7.993	2.398	8.140	2.442	7.940	2.382	8.067	2.424
USS01	0.577	0.173	0.818	0.245	0.596	0.179	0.744	0.223	1.115	0.334
USS02	0.207	0.062	1.104	0.331	1.219	0.366	1.271	0.381	0.811	0.244
USS03	0.211	0.063	0.485	0.145	0.519	0.156	0.522	0.157	0.783	0.234
USS04	0.178	0.053	0.381	0.114	0.360	0.108	0.329	0.099	0.990	0.294

Tab.6.1.2.1: valori delle altezze significative H<sub>s</sub> misurate nei vari punti di misura sia in scala modello che in scala prototipo.

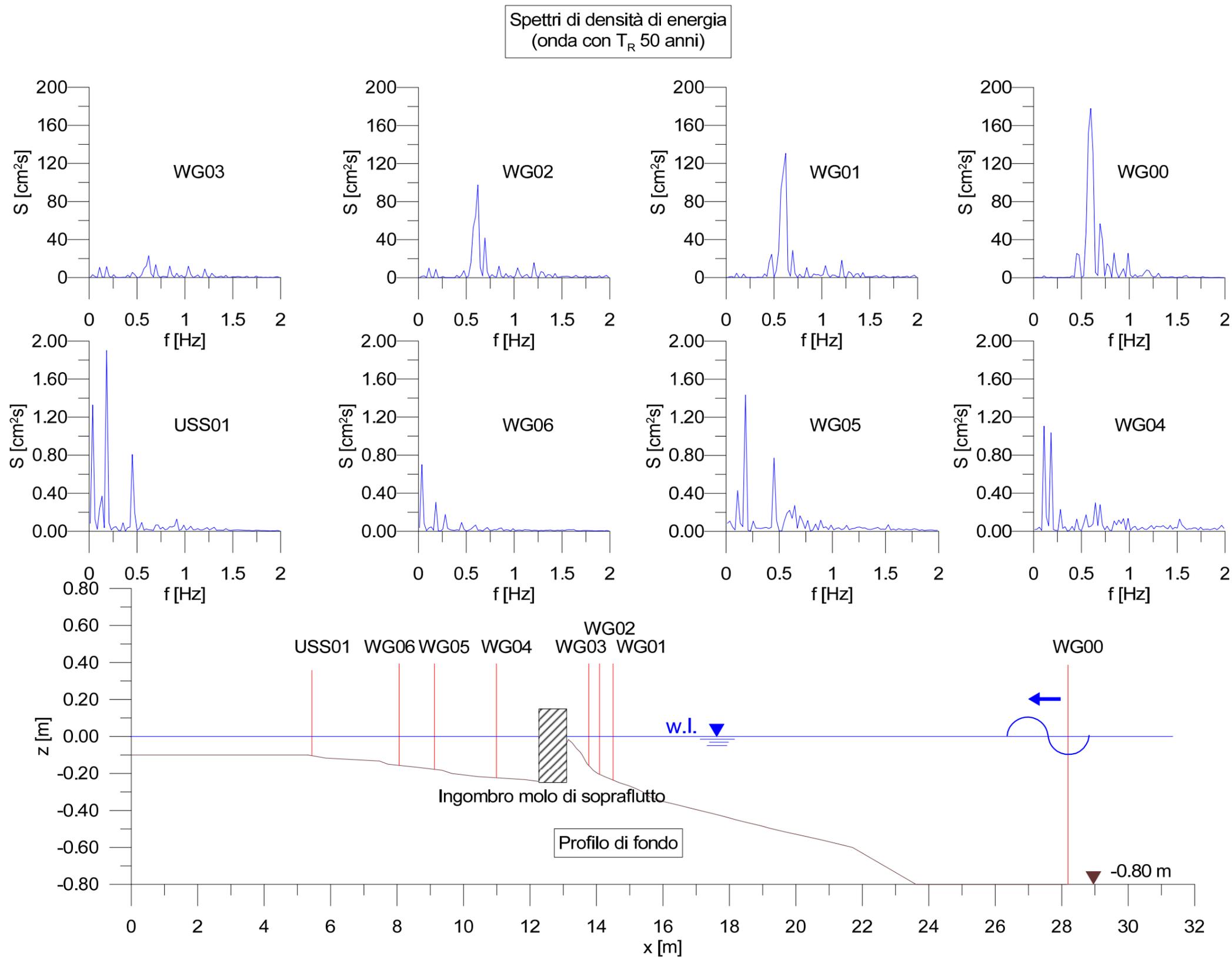


Fig.6.1.2.3: evoluzione dello spettro nel passaggio dagli alti fondali ai fondali medio – bassi. Si mette in evidenza che, per gli spettri riportati nei quattro grafici inferiori, la scala delle ordinate è stata modificata.

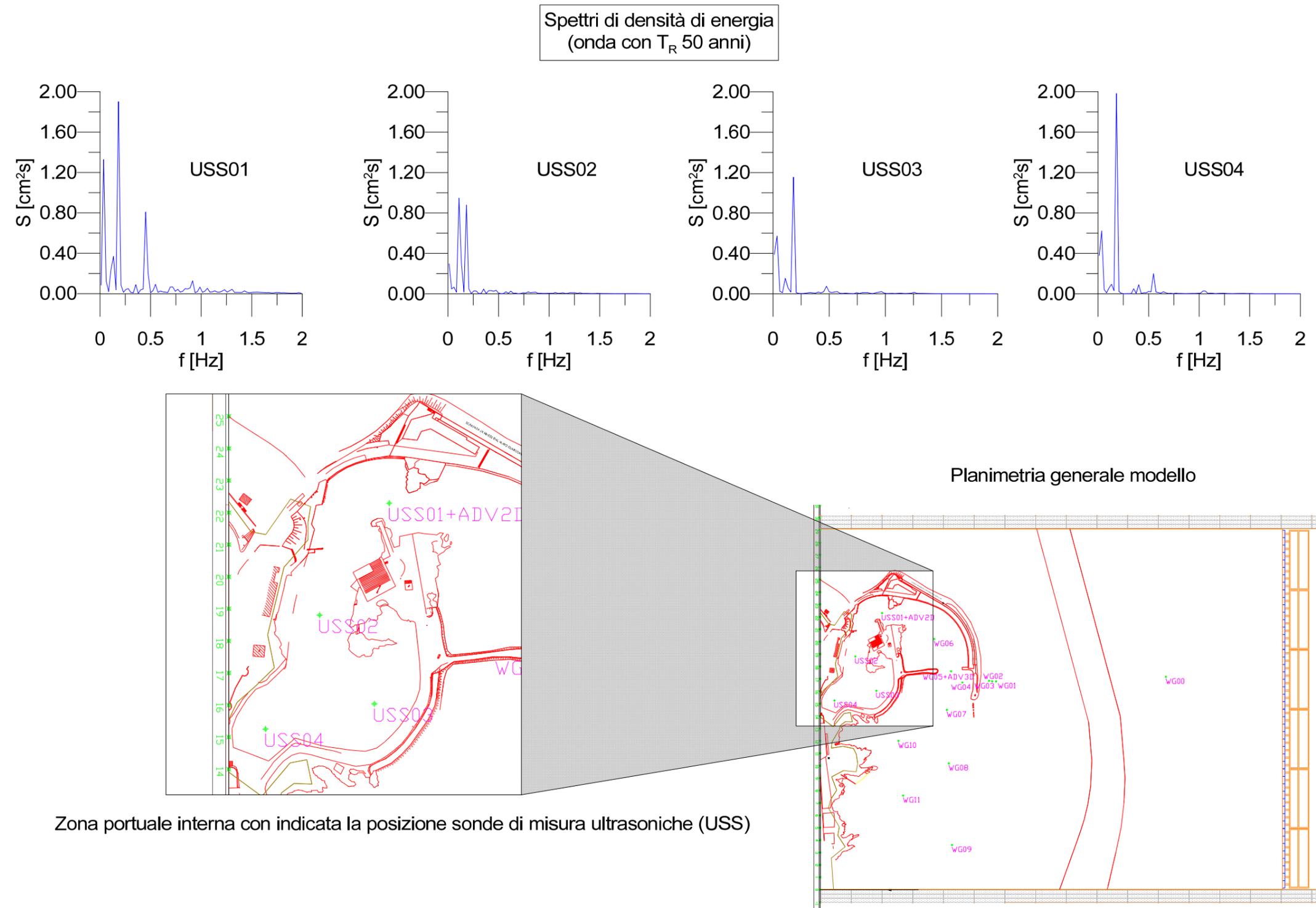


Fig.6.1.2.4: spettri di densità di energia delle sonde ubicate nella parte interna del bacino portuale.

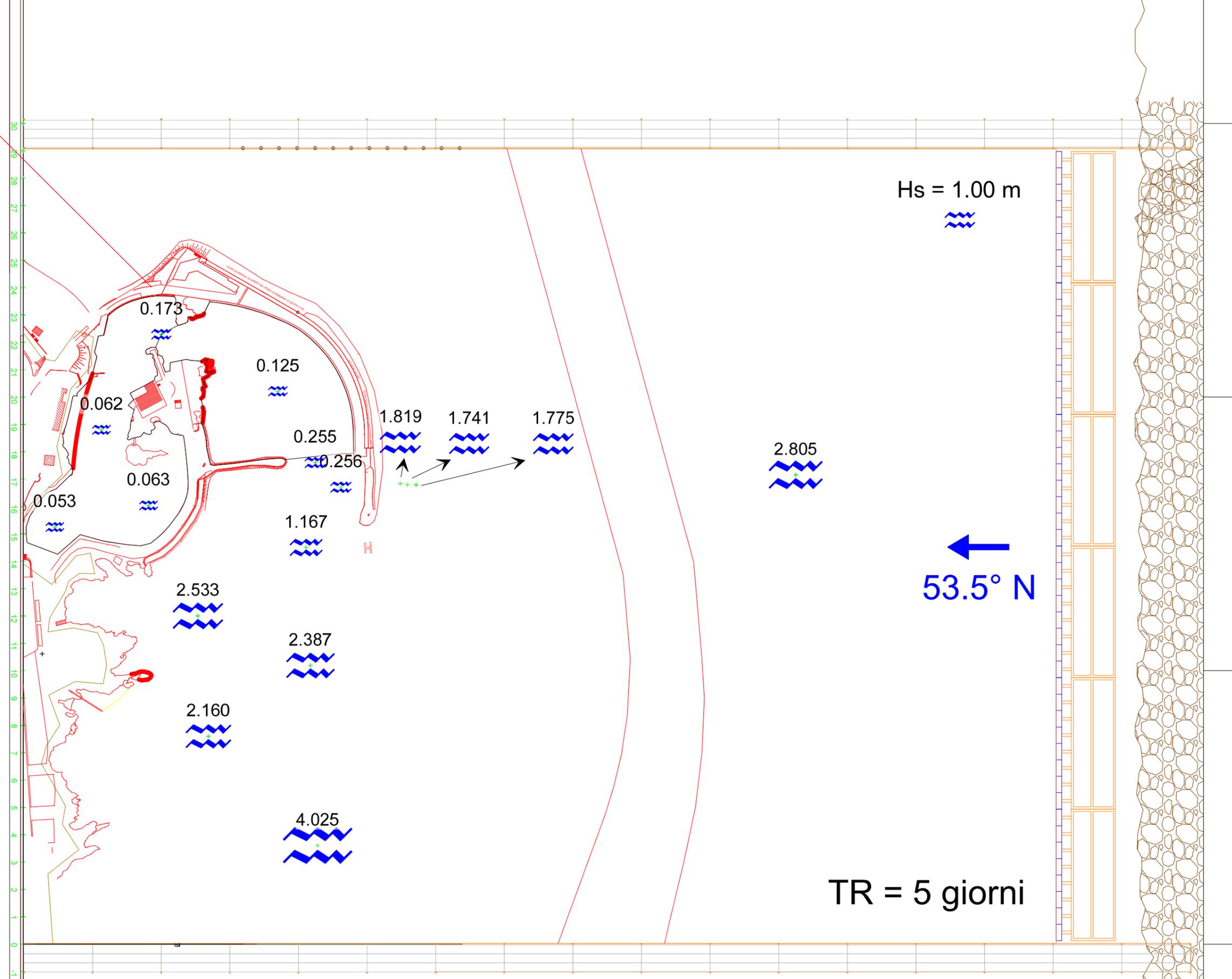


Fig.6.1.2.5: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 5 giorni (valori in scala prototipo espressi in metri).

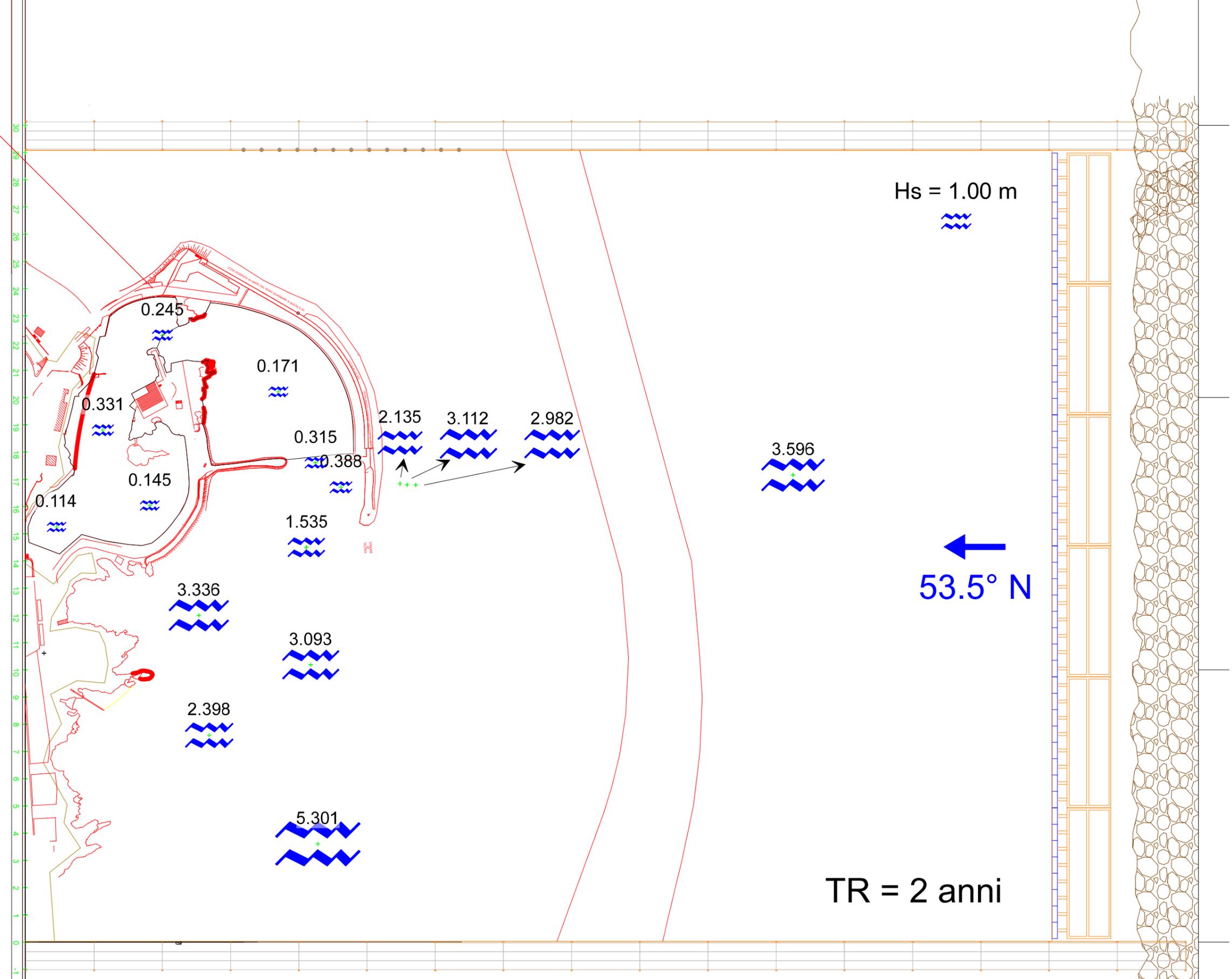


Fig.6.1.2.6: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 2 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

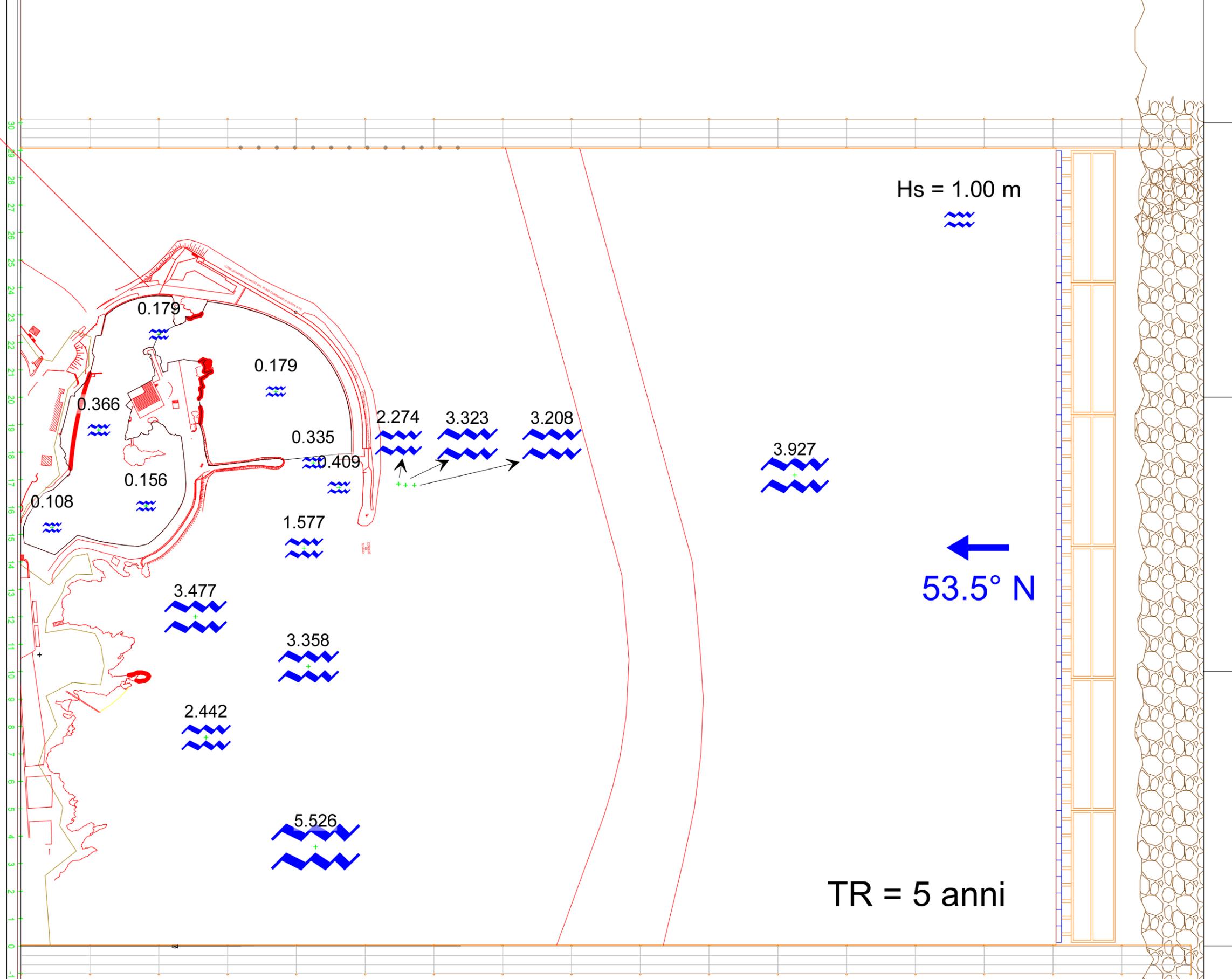


Fig.6.1.2.7: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 5 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

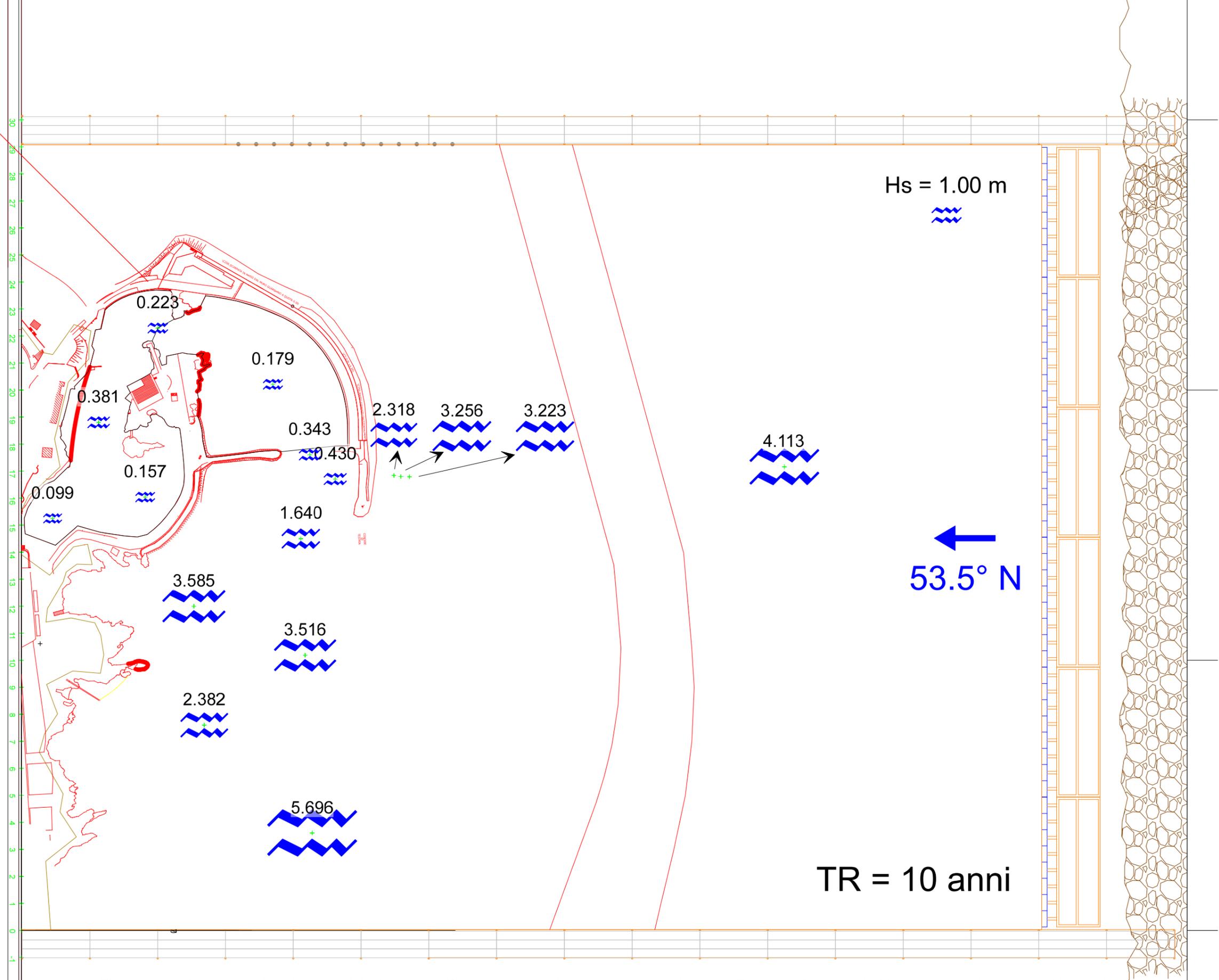


Fig.6.1.2.8: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 10 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

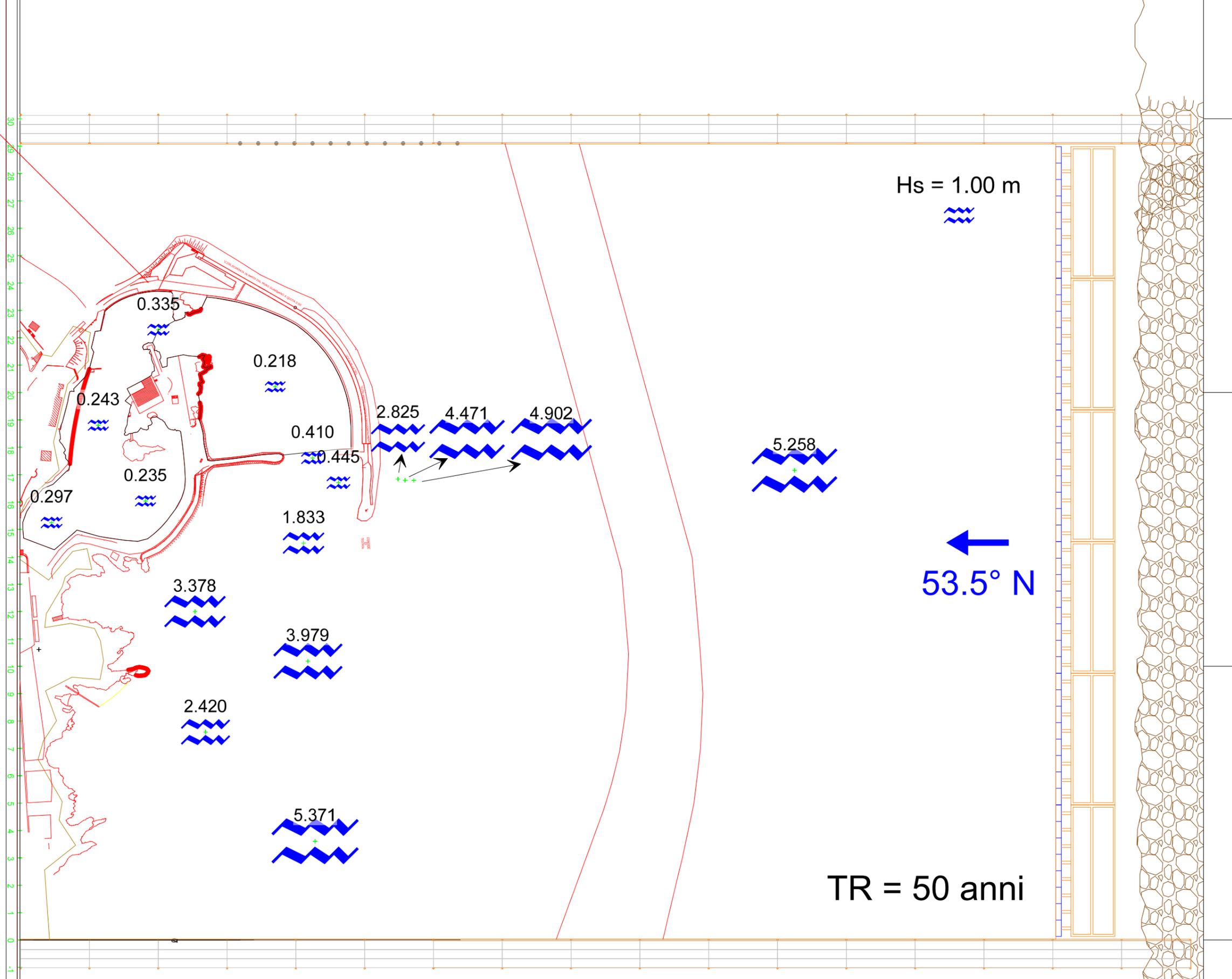


Fig.6.1.2.9: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 50 anni (valori in scala prototipo espressi in metri)

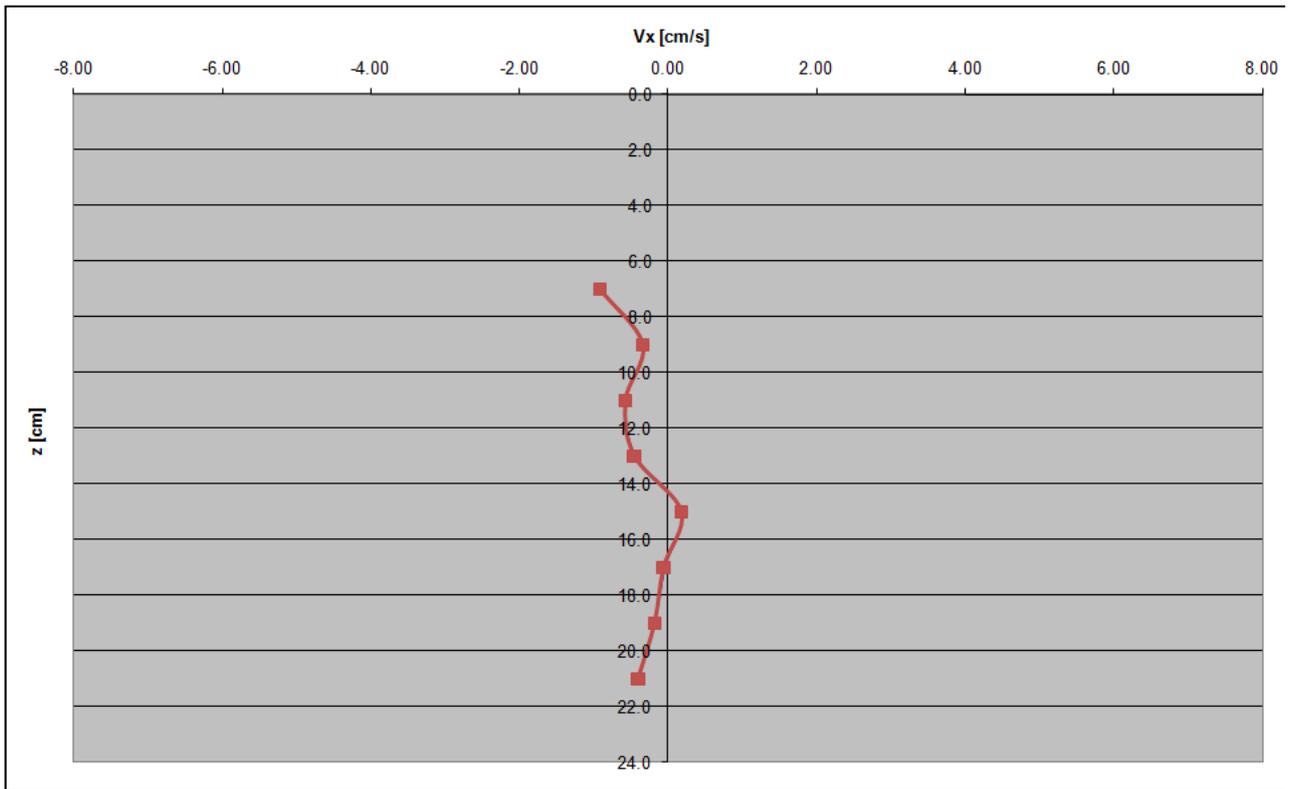
#### 6.1.4 Analisi delle correnti

Durante le prove 1/1 e 1/5, caratterizzate da un valore al largo di altezza significativa e periodo di picco in scala modello rispettivamente pari a  $H_s=8,47$  cm –  $T_p=1,181$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  giorni) e  $H_s=16,17$  cm –  $T_p=1,745$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni), (in scala prototipo pari rispettivamente a  $H_s=2,54$  m –  $T_p=6,47$  s e  $H_s=4,85$  m –  $T_p=9,56$  s), sono stati eseguiti i rilievi correntometrici. Come già detto nel precedente par.4.3, le misure sono state effettuate in corrispondenza dell'attuale imboccatura del porto mediante un correntometro ADV 3D in configurazione *down – looking* ed in corrispondenza dell'imboccatura alla parte più interna del bacino portuale mediante un correntometro ADV 2D in configurazione *side – looking*. In entrambi i casi le misure sono state effettuate lungo una verticale ubicata all'incirca in mezzeria della imboccatura. Nella sottostante tab.6.1.3.1 si riportano per entrambe le verticali il numero di punti di misura indagati e la relativa distanza dal pelo libero.

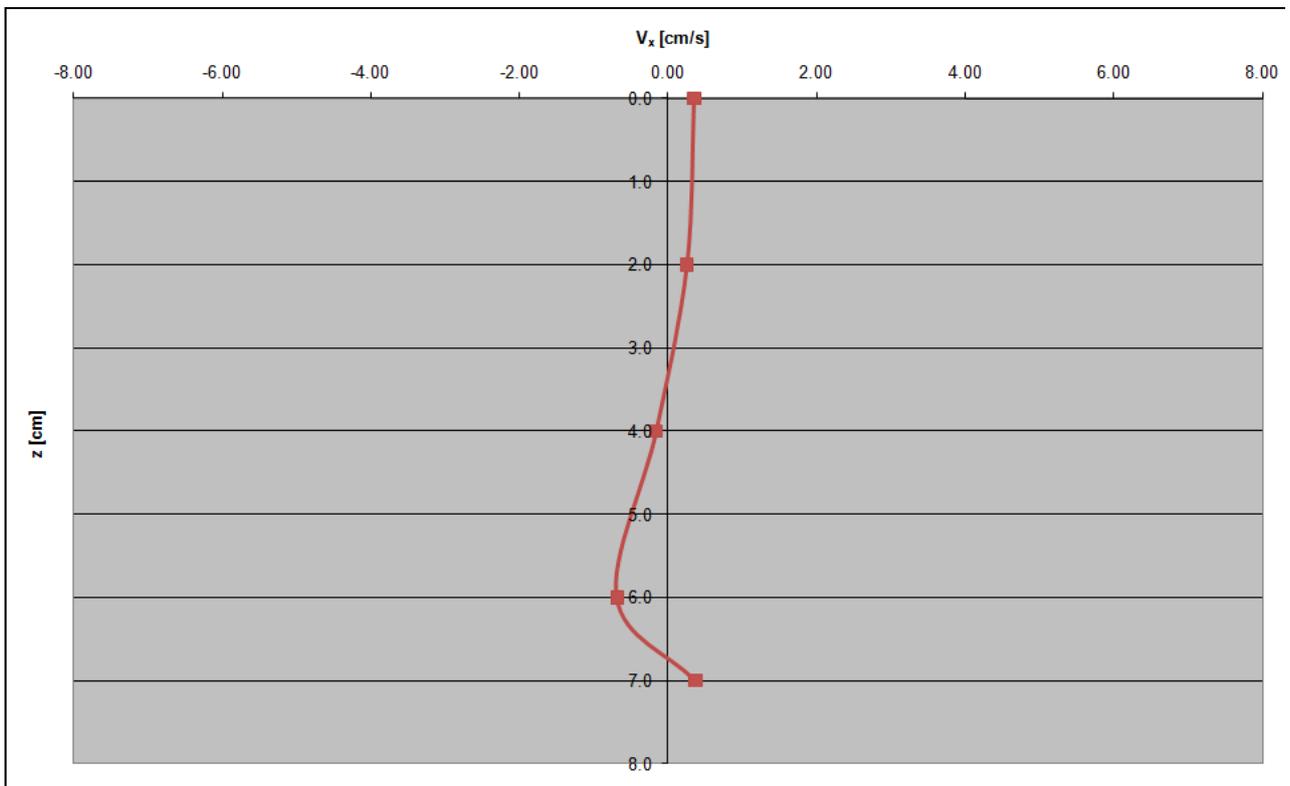
Punto di misura	ADV 3D z [cm]	ADV 2D z [cm]
pos1	-21	-07
pos2	-19	-06
pos3	-17	-04
pos4	-15	-02
pos5	-13	00
pos6	-11	
pos7	-09	
pos8	-07	

Tab.6.1.3.1: punti di misura investigati durante i rilievi correntometrici e relative distanza dal pelo libero.

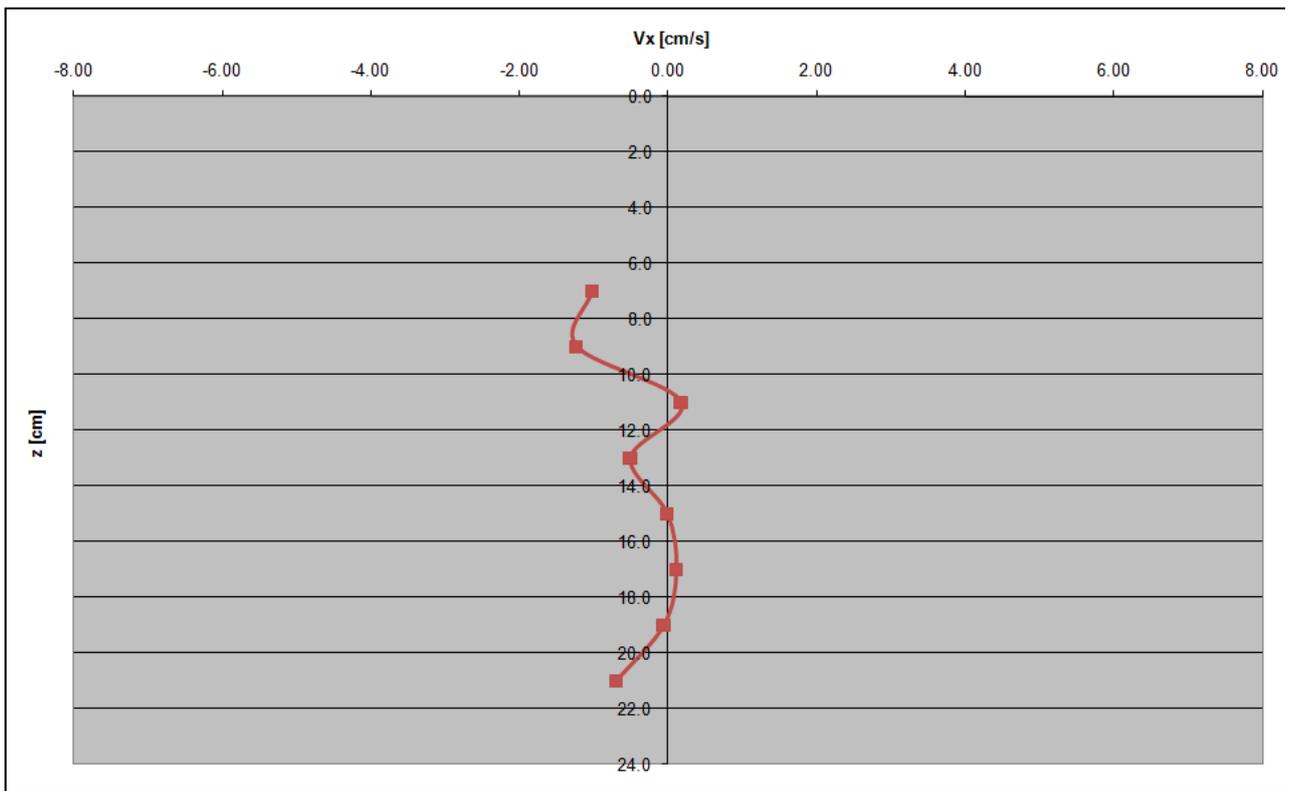
Le misure sono state effettuate con una frequenza di campionamento di 25 Hz, con un numero totale di dati acquisiti per ciascun punto pari a 4.500. Per quanto riguarda la verticale relativa all'imboccatura principale (ADV 3D), non è stato possibile acquisire ulteriori punti verso il pelo libero in quanto l'agitazione ondosa, soprattutto con l'attacco ondosso con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni, era tale da provocare l'emersione dello strumento durante il passaggio dei cavi delle onde con conseguente interruzione della misura. In entrambi i casi gli strumenti sono stati orientati in maniera tale che la componente di velocità  $V_x$  fosse diretta nel verso di entrata attraverso la imboccatura (segno positivo) o uscita (segno negativo). Nelle successive figure si riportano i profili verticali della componente media di velocità  $V_x$  ottenuti effettuando per ciascun punto di misura una media aritmetica dei 4.500 dati acquisiti.



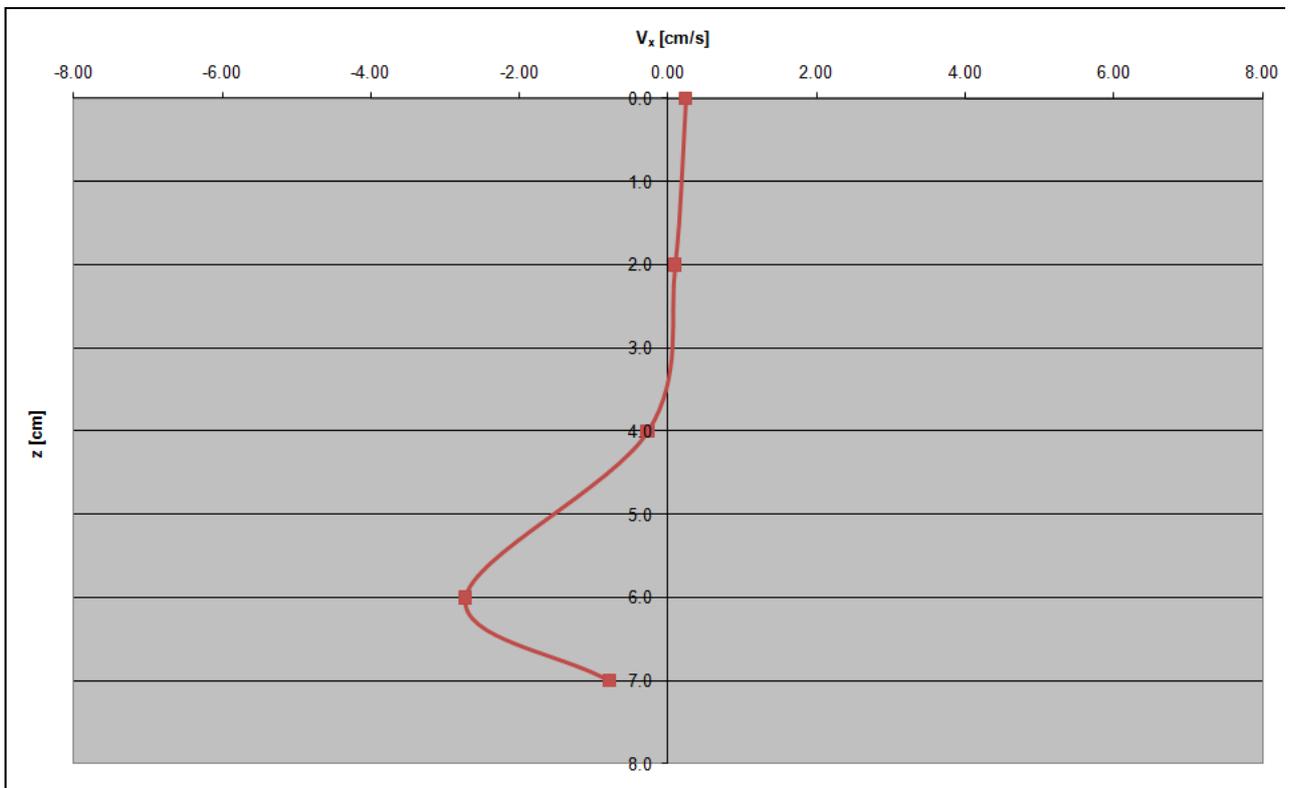
**Fig.6.1.3.1:** profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura principale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorni); i valori sono in scala modello.



**Fig.6.1.3.2:** profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura parte più interna del bacino portuale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorni); i valori sono in scala modello.



**Fig.6.1.3.3:** profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura principale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni); i valori sono in scala modello.



**Fig.6.1.3.4:** profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura parte più interna del bacino portuale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni); i valori sono in scala modello.

Utilizzando i profili verticali della componente media di velocità  $V_x$  relativi alla imboccatura principale, si sono costruiti i solidi di portata al fine di effettuare una stima dei tempi di ricambio idrico all'interno del bacino portuale. Non avendo la misura completa fino al pelo libero per quanto prima detto, si è fatta l'ipotesi di bilanciamento dei flussi in entrata con quelli in uscita. Nell'ipotesi di livello pari al medio mare, dividendo il volume di acqua racchiuso nel bacino portuale per il valore di portata così calcolato, è possibile ottenere una stima del tempo di ricambio.

Nella sottostante tab.6.1.2.2 si riportano, per ciascuno dei due attacchi ondosi investigati, i valori di portata in scala modello (il segno meno indica in questo caso portata uscente), il volume dello specchio acqueo contenuto nel bacino portuale in scala modello ipotizzando il livello pari a quello medio mare, il tempo di ricambio sia in scala modello che in scala prototipo.

<b>Attacco ondoso con <math>T_R = 5</math> giorni</b>			
<b><math>Q_{tot}</math></b> <b>[cm<sup>3</sup>/s]</b>	<b>W</b> <b>[cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>T_{ric}</math> modello</b> <b>[min]</b>	<b><math>T_{ric}</math> prototipo</b> <b>[ore]</b>
-1.153,84	5.816.000	84,01	7,67
<b>Attacco ondoso con <math>T_R = 50</math> anni</b>			
<b><math>Q_{tot}</math></b> <b>[cm<sup>3</sup>/s]</b>	<b>W</b> <b>[cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>T_{ric}</math> modello</b> <b>[min]</b>	<b><math>T_{ric}</math> prototipo</b> <b>[ore]</b>
-1.401,37	5.816.000	69,17	6,31

**Tab.6.1.2.2: stima del tempo di ricambio del bacino portuale con riferimento agli attacchi ondosi con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorno e  $T_R = 50$  anni.**

## 6.2 Prove Modello 3D – Gruppo 2

### 6.2.1 Realizzazione del modello

Ultimati i test con direzione del moto ondoso da  $53,5^{\circ}\text{N}$  nella configurazione attuale delle opere, si è provveduto a realizzare i lavori necessari a modificare la direzione di generazione del moto ondoso, portandola a  $93,5^{\circ}\text{N}$ . In particolare l'operazione comporta il riposizionamento del generatore di moto ondoso e delle passerelle laterali di confinamento. Per quanto riguarda il generatore di moto ondoso, trattandosi di strumentazione estremamente delicata, nonché costosa, l'operazione va eseguita nel rispetto dei più elevati canoni di sicurezza. Essa consta, in particolare, dello smontaggio dei singoli moduli che, a causa delle spinte significative, necessitano di essere saldamente ancorati al fondo della vasca e mutuamente vincolati tra di loro.

Individuato con la massima precisione il nuovo allineamento per mezzo della stazione totale, si provvede a sollevare ogni singolo modulo, preventivamente imbracato, mediante un'autogru telescopica in grado di riposizionare il modulo stesso nella nuova posizione. L'operazione viene completata, man mano che si riposizionano i singoli moduli, mediante successivi spostamenti millimetrici che consentano il perfetto allineamento dell'intero sistema, nonché il perfetto mutuo accostamento dei singoli moduli. Infine si controlla la perfetta orizzontalità del sistema e ci si assicura della libertà di movimentazione delle singole pale, talvolta impedita da eventuali asperità del fondale.

Come detto in precedenza, a causa di problemi legati alla presenza della rampa di accesso ai mezzi nella vasca, nonché alla conformazione delle curve batimetriche, il nuovo allineamento ha comportato la rinuncia ad uno dei sei moduli di generatore a disposizione, passando così dai 28,8m di lunghezza del fronte d'onda generato nella direzione  $53,5^{\circ}\text{N}$ , ai 24,0m nella direzione  $93,5^{\circ}\text{N}$ .

Il completamento delle operazioni necessarie alla rotazione della direzione di generazione del moto ondoso avviene con il successivo riposizionamento delle passerelle laterali, aventi il duplice scopo di confinare il moto ondoso generato, evitando così la deformazione dei fronti d'onda, e di consentire l'accesso laterale al modello, oltre che al generatore di moto ondoso.

Anche le passerelle, come il generatore, a causa delle notevoli spinte esercitate dal moto ondoso, necessitano di un accurato ancoraggio al fondo della vasca, ovvero al fondale del modello. Inoltre il confinamento del moto ondoso viene assicurato da robustissimi pannelli metallici, anch'essi saldamente ancorati alle passerelle.

L'operazione, dunque, consta dello smontaggio dei pannelli e delle passerelle, e del loro riposizionamento lungo i due nuovi allineamenti.

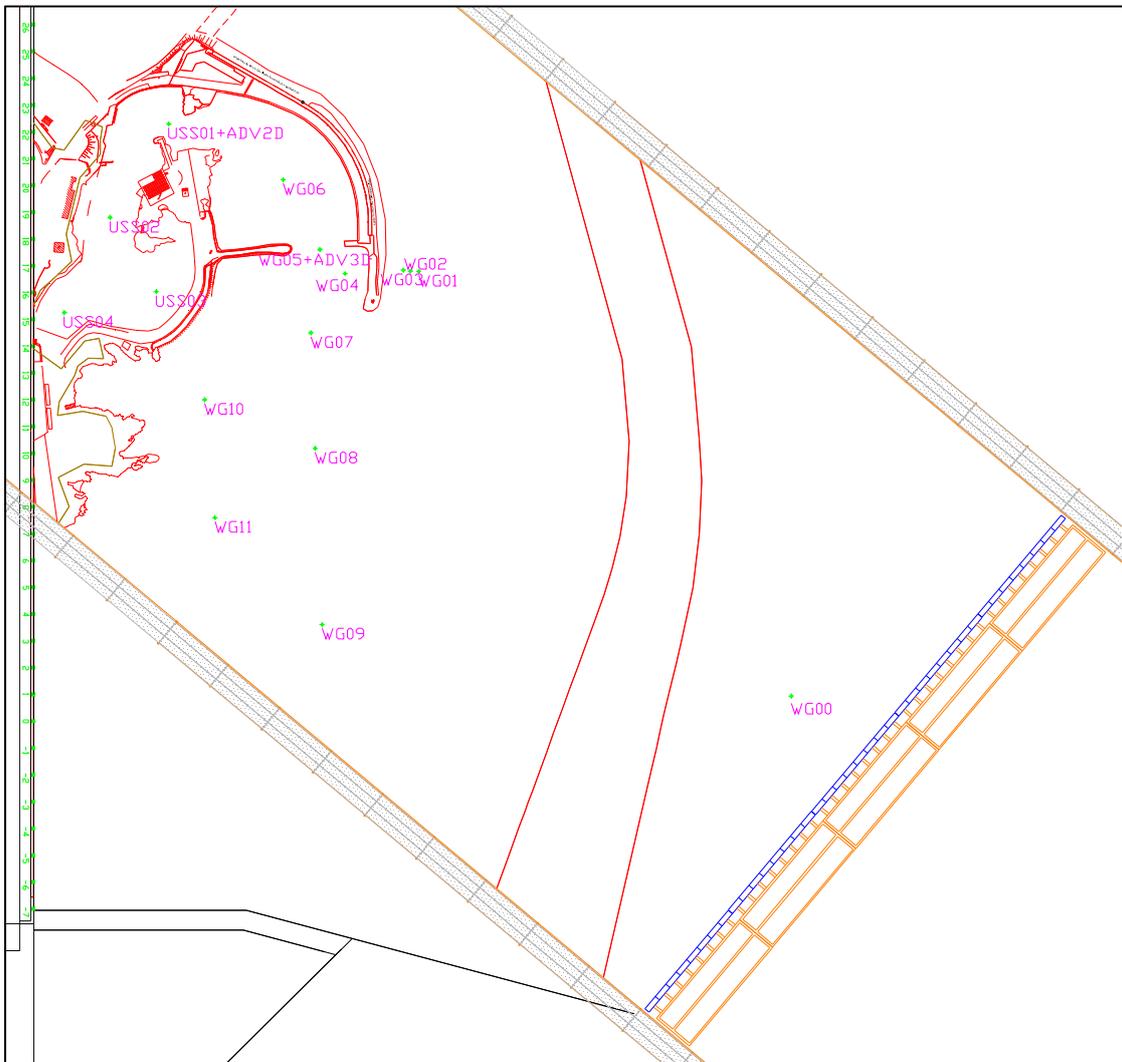
Come è possibile osservare dalle planimetrie delle precedenti figure 2.1 e 2.2, la rotazione del sistema nella nuova direzione di generazione, se da un lato ha permesso di studiare una situazione molto prossima a quella relativa alle mareggiate provenienti da scirocco (direzione al largo), dall'altro ha comportato la riduzione del tratto di litorale a sud ricadente all'interno dell'area interessata dal moto ondoso incidente.

Naturalmente tale scelta è stata fatta solo dopo aver verificato che, nella successiva configurazione di progetto delle opere, caratterizzata da un significativo allungamento del molo di sopraflutto in direzione sud, il conoide di testata fosse sufficientemente distante dalla passerella di confinamento da evitare che fosse interessato da indesiderati effetti di bordo e, comunque, tale per cui gli effetti della passerella non fossero eccessivamente influenti sul moto ondoso e sulle correnti in ingresso al porto.

### **6.2.2 Analisi dell'evoluzione del moto ondoso e agitazione ondosa interna**

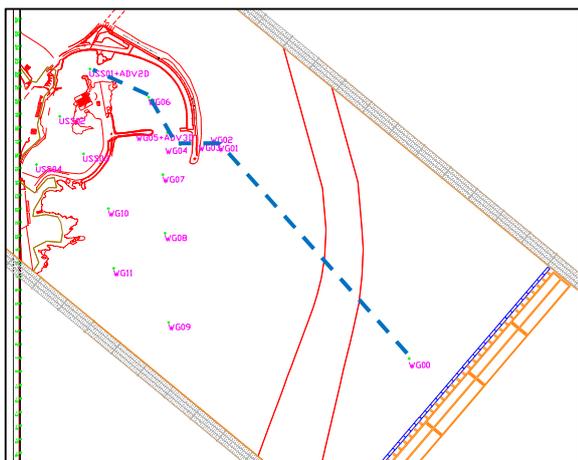
Durante le prove 2/1, 2/2, 2/3, 2/4 e 2/5, caratterizzate da un valore al largo di altezza significativa e periodo di picco in scala modello rispettivamente pari a  $H_s=8,22$  cm –  $T_p=1,181$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  giorni),  $H_s=13,12$  cm –  $T_p=1,532$  s (tempo di ritorno  $T_R=2$  anni),  $H_s=14,73$  cm –  $T_p=1,746$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  anni),  $H_s=15,94$  cm –  $T_p=1,746$  s (tempo di ritorno  $T_R=10$  anni),  $H_s=19,03$  cm –  $T_p=1,989$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni), (in scala prototipo pari rispettivamente a  $H_s=2,47$  m –  $T_p=6,47$  s,  $H_s=3,94$  m –  $T_p=8,39$  s,  $H_s=4,42$  m –  $T_p=9,56$  s,  $H_s=4,78$  m –  $T_p=9,56$  s,  $H_s=5,71$  m –  $T_p=10,89$  s), sono stati eseguiti i rilievi di moto ondoso.

Le misure sono state effettuate negli stessi punti di misura della configurazione precedente (si veda la sottostante fig. 6.2.2.1), ad eccezione della sonda ubicata in corrispondenza del generatore di moto ondoso (WG00) che, per effetto della rotazione che questo ha subito per il cambio di direzione, ha dovuto essere riposizionata in modo tale da essere ubicata sempre in corrispondenza della mezzeria del battionde, al fine di fornire una misura tale da poter verificare che lo spettro di densità di energia relativo allo stato di mare in vasca corrispondesse a quello impostato con il software di generazione. Anche in questo caso la frequenza di campionamento per tutte le sonde è stata di 25 Hz, con un numero totale di dati acquisiti per ciascun punto pari a 30.000.



**Fig.6.2.2.1: planimetria del porto con l'ubicazione e numerazione delle sonde di misura.**

Nella successiva fig.6.2.2.3 si riportano, anche in questo caso per brevità di esposizione, gli



**Fig.6.2.2.2: indicazione del transetto virtuale utilizzato per l'analisi dell'evoluzione del moto ondoso dal largo verso l'interno del porto.**

spettri di densità di energia con riferimento all'attacco ondoso caratterizzato da  $H_s=19,03$  cm –  $T_p=1,989$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni) (in scala prototipo rispettivamente  $H_s=5,71$  m –  $T_p=10,89$  s) relativi alle le sonde posizionate lungo un transetto virtuale (fig. 6.2.2.2) che, analogamente a quanto visto per la configurazione precedente, partendo dalla sonda ubicata in prossimità del generatore di moto ondoso (WG00), congiunge le sonde disposte subito a monte della parte terminale del molo di sopraflutto (WG01, WG02 e

WG03), per poi continuare subito a valle di questo (WG04), congiungere la sonda ubicata all'attuale imboccatura del porto (WG05) e la sonda ubicata nella parte centrale

dell'avamposto (WG06) e terminare in corrispondenza della prima sonda ultrasonica (USS01) posizionata in corrispondenza dell'entrata nella parte più interna del porto. Per una migliore lettura dei grafici, i valori di densità di energia spettrale relativi alle sonde ubicate al di qua del molo di sottoflutto e nella parte dell'avamposto (WG04, WG05, WG06 e USS01) sono stati amplificati di 10 volte rispetto a quelli relativi alle sonde esterne.

Si può innanzitutto osservare come lo spettro rilevato dalla sonda resistiva "WG00" nella zona offshore riproduca, con buona fedeltà, lo spettro di densità di energia monodimensionale di tipo JONSWAP impostato col software di generazione.

Lo spettro d'onda, procedendo dal largo verso riva, anche in questo caso subisce modificazioni a causa delle variazioni di profondità (*shoaling*), per effetto delle perdite di energia per attrito sul fondo e all'interfaccia acqua-aria e, in questo caso, per effetto del frangimento che subiscono le onde. In particolare, si osserva che nel passaggio dalla zona offshore alla zona di risalita del fondale si sia verificato un abbattimento di energia in corrispondenza della frequenza di picco  $f_p=0,503$  Hz (sonda "WG01"). E' possibile anche notare come siano già insorte non linearità sulla prima armonica della frequenza di picco, di valore pari a  $2f_p=1,006$  Hz e sulla seconda armonica della frequenza di picco, di valore pari a  $3f_p=1,509$  Hz (sonde "WG02" e "WG03"). Inoltre, è possibile osservare la comparsa di due componenti alle basse frequenze in corrispondenza del valore  $f=0,231$  Hz e del valore  $f=0,158$  Hz.

Esaminando gli spettri delle sonde posizionate a valle del molo di sopraflutto, è possibile osservare come, man mano che ci si spinge nella parte più riparata del porto, l'energia tenda a trasferirsi sempre più verso le basse frequenze per via dell'insorgere dei fenomeni di riflessione e risonanza dovuti alla presenza delle strutture portuali, fino ad arrivare alla prima sonda ultrasonica (USS01) ubicata all'ingresso del bacino portuale interno, dove l'energia originaria relativa alla frequenza di picco si è tutta trasferita alla frequenza  $f=0,036$  Hz ( $T = 27,77$  s; in scala prototipo  $T = 152,16$  s).

Per completezza, nella successiva fig.6.2.2.4 si riportano gli spettri di densità di energia riferiti alle ulteriori sonde ultrasoniche (USS02, USS03 e USS04) posizionate nella parte più interna del bacino portuale. Al fine di agevolare le operazioni di confronto con gli spettri riportati nella precedente fig.6.2.2.3, si è riproposto lo spettro della sonda USS01.

Da un esame della figura è possibile vedere come anche per le sonde ubicate nella parte più interna del porto, l'energia originaria in corrispondenza della frequenza di picco si è trasferita tutta alle basse frequenze (agli stessi valori di frequenza della sonda USS01 indicati nel precedente capoverso). Da un punto di vista del contenuto energetico, il valore maggiore si registra per la sonda USS04, ossia quella più interna.

Infine, nella sottostante tab.6.2.2.1 sono riportati i valori di altezza significativa relativi a tutte le sonde investigate e a tutti gli attacchi ondosi simulati. Tali valori sono anche riportati nei grafici delle successive fig.6.2.2.5, fig.6.2.2.6, fig.6.2.2.7, fig.6.2.2.8 e fig.6.2.2.9 sotto forma di mappe di agitazione ondosia.

Da una lettura della tabella e dei grafici si evince come la massima altezza significativa misurata nella parte più interna del porto sia stata pari a 0,967 m (in scala prototipo) riferita all'attacco ondosio con tempo di ritorno  $T_R=5$  anni ed alla sonda USS01.

Sonda	$T_R$ 5 gg		$T_R$ 2 an		$T_R$ 5 an		$T_R$ 10 an		$T_R$ 50 an	
	Dir 93,5°N		Dir 93,5°N		Dir 93,5°N		Dir 93,5°N		Dir 93,5°N	
	$H_{s,mod}$ [cm]	$H_{s,prot}$ [m]								
WG00	8.014	2.404	14.260	4.278	14.795	4.439	16.404	4.921	19.837	5.95
WG01	3.597	1.079	7.810	2.343	9.931	2.979	9.698	2.909	12.682	3.80
WG02	3.529	1.059	7.324	2.197	8.302	2.491	8.425	2.527	10.769	3.23
WG03	4.950	1.485	7.982	2.394	8.504	2.551	8.643	2.593	9.563	2.86
WG04	0.771	0.231	1.306	0.392	1.604	0.481	1.701	0.510	1.898	0.56
WG05	0.952	0.286	1.614	0.484	2.060	0.618	2.089	0.627	2.073	0.62
WG06	0.600	0.180	1.004	0.301	1.259	0.378	1.312	0.394	1.417	0.42
WG07	5.710	1.713	9.026	2.708	8.571	2.571	8.455	2.537	8.549	2.56
WG08	6.260	1.878	11.623	3.487	12.834	3.850	12.845	3.854	10.853	3.25
WG09	12.858	3.857	16.739	5.022	15.436	4.631	15.492	4.648	15.077	4.52
WG10	7.472	2.242	11.357	3.407	11.588	3.476	11.892	3.567	11.670	3.50
WG11	4.339	1.302	5.565	1.669	6.586	1.976	6.842	2.052	6.040	1.81
USS01	1.164	0.349	2.040	0.612	3.223	0.967	3.217	0.965	2.993	0.89
USS02	0.294	0.088	0.661	0.198	0.868	0.260	0.814	0.244	0.910	0.27
USS03	0.280	0.084	0.411	0.123	0.747	0.224	0.740	0.222	0.586	0.17
USS04	0.200	0.060	0.539	0.162	1.041	0.312	1.001	0.300	0.654	0.19

**Tab.6.2.2.1: valori delle altezze significative  $H_s$  misurate nei vari punti di misura sia in scala modello che in scala prototipo.**

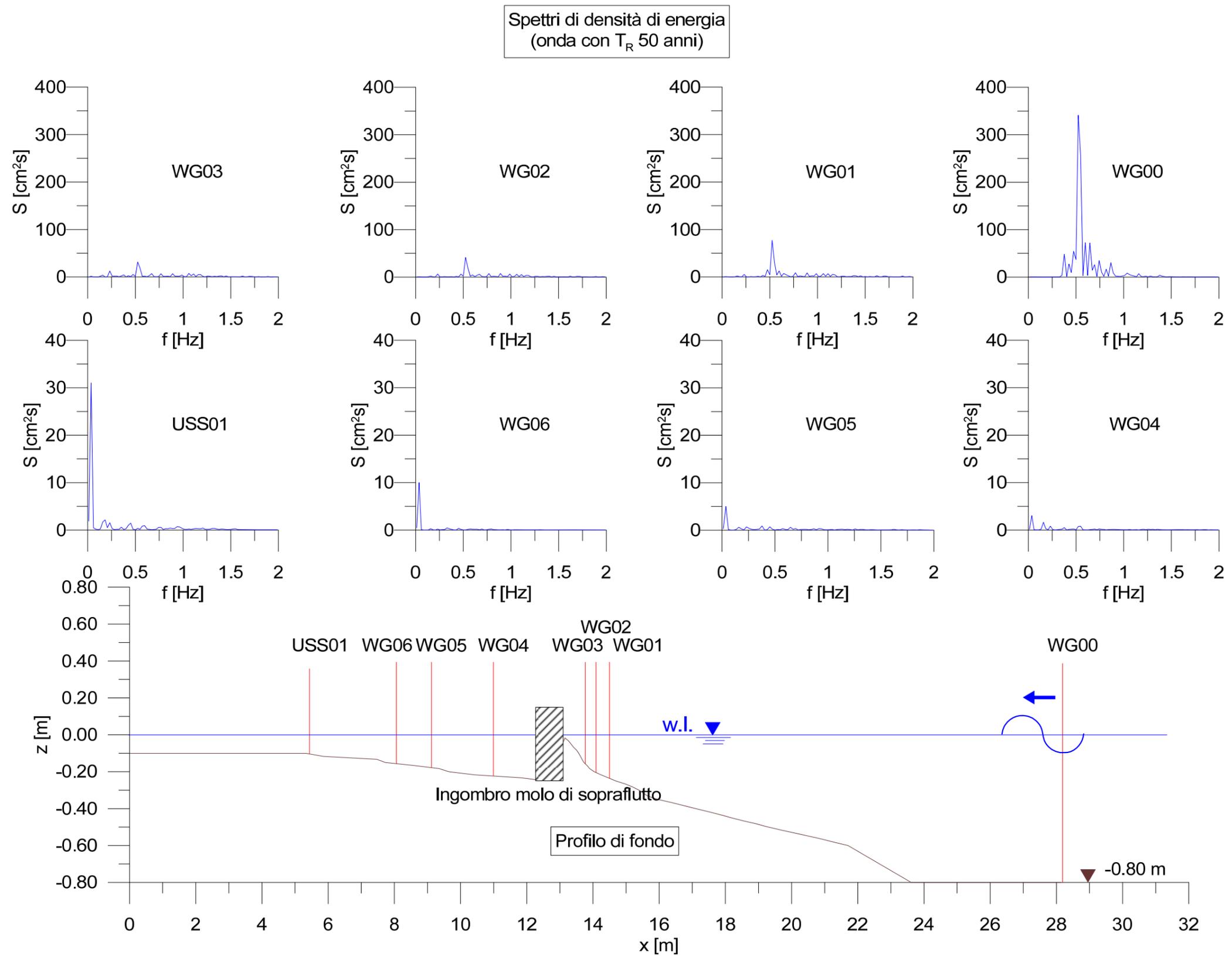
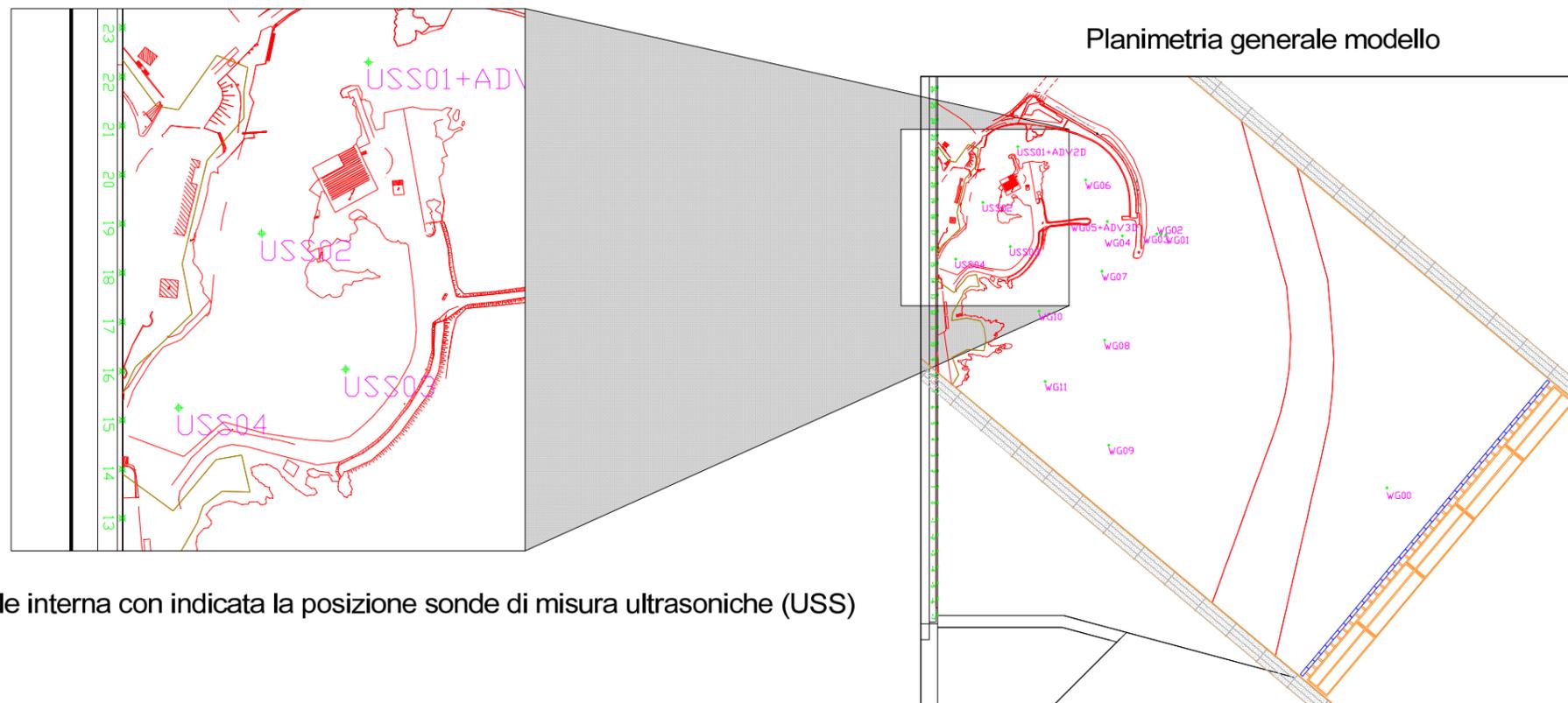
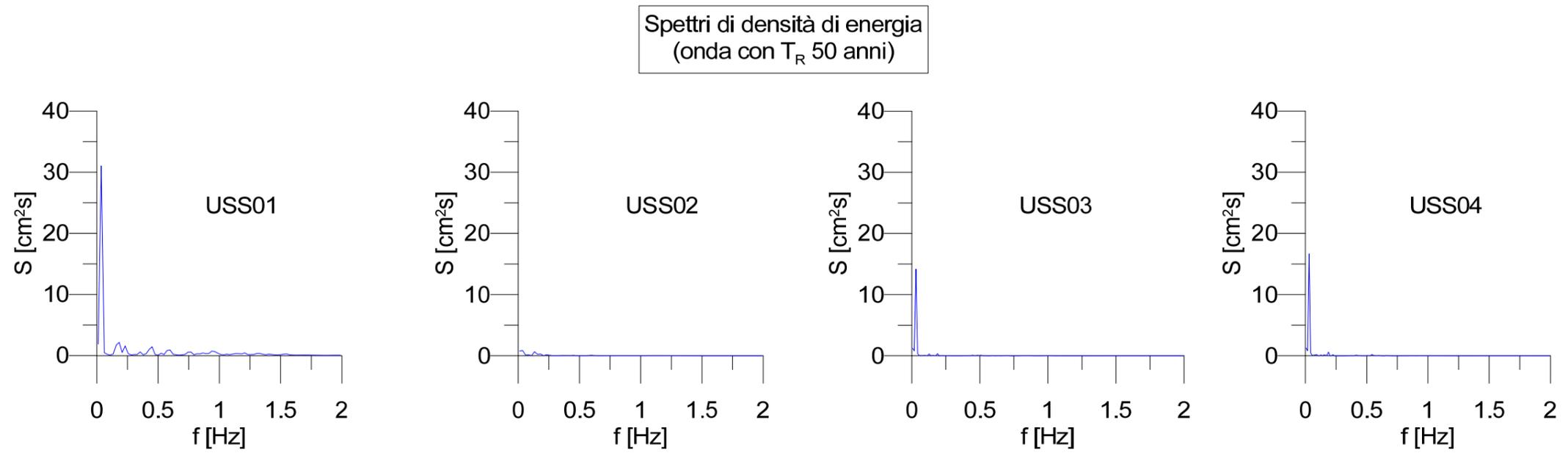


Fig.6.2.2.3: evoluzione dello spettro nel passaggio dagli alti fondali ai fondali medio – bassi. Si mette in evidenza che, per gli spettri riportati nei quattro grafici inferiori, la scala delle ordinate è stata modificata



Zona portuale interna con indicata la posizione sonde di misura ultrasoniche (USS)

Fig.6.2.2.4: spettri di densità di energia delle sonde ubicate nella parte interna del bacino portuale.

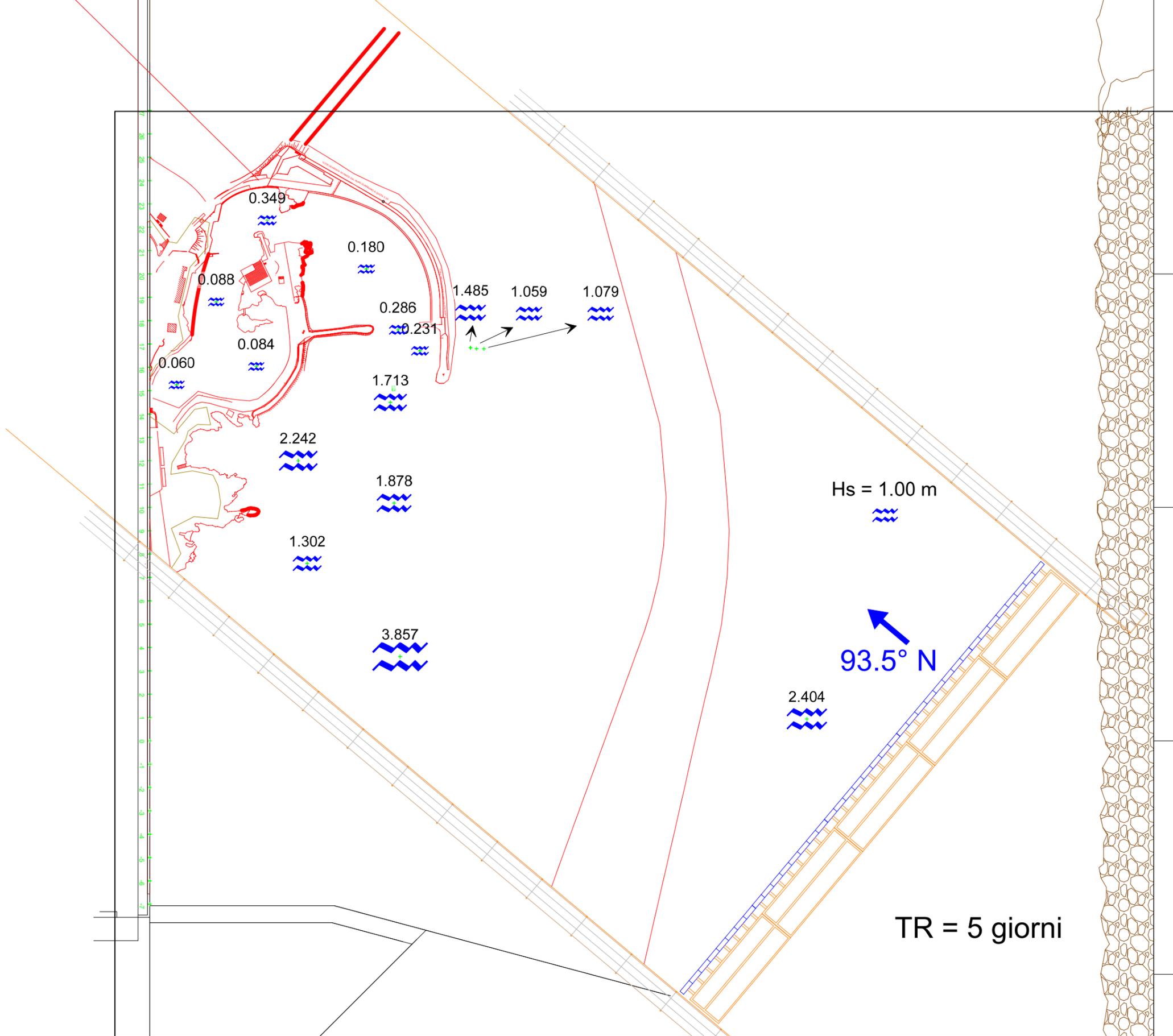


Fig.6.2.2.5: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 5 giorni (valori in scala prototipo espressi in metri).

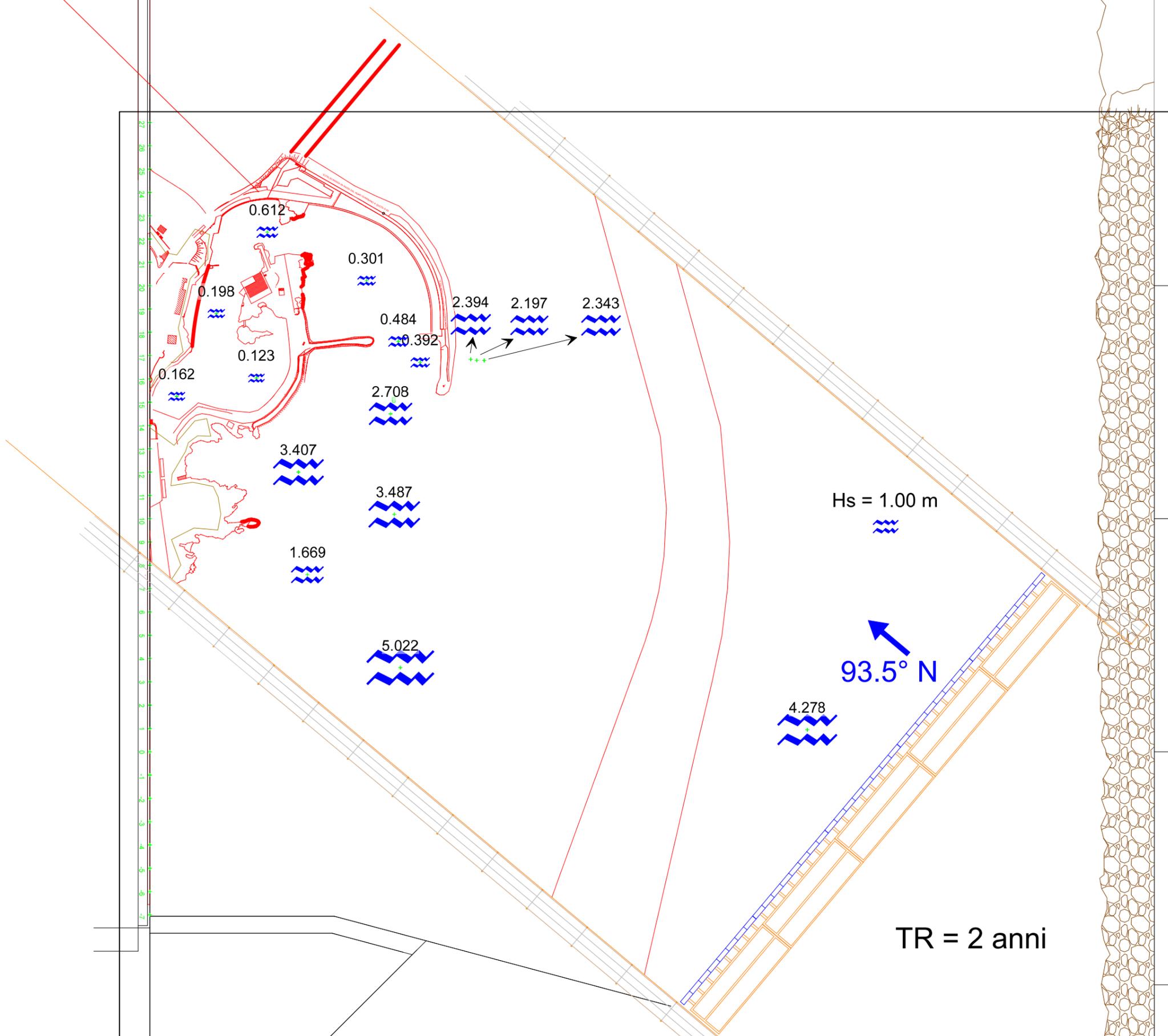


Fig.6.2.2.6: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 2 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

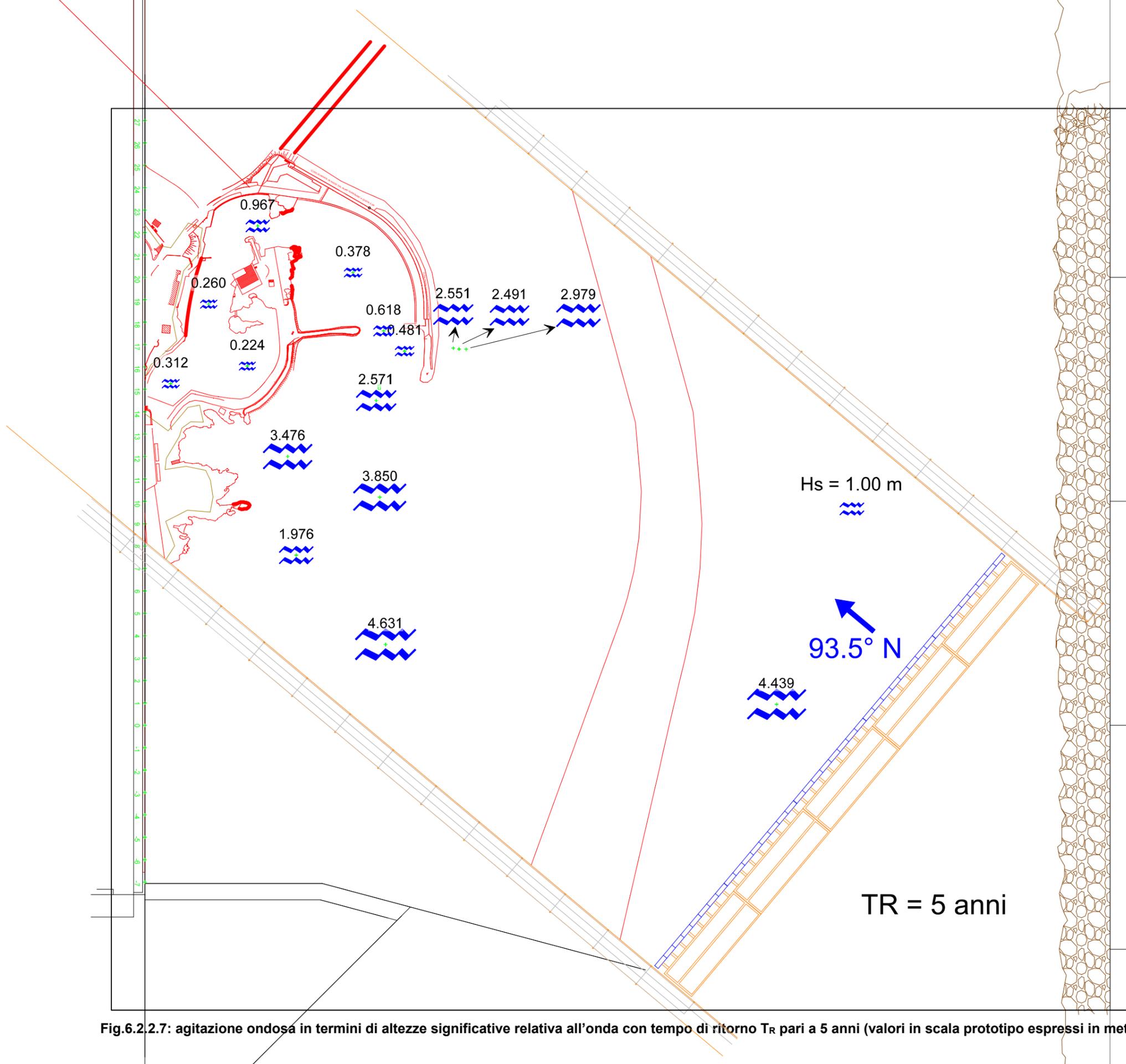


Fig.6.2.2.7: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 5 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

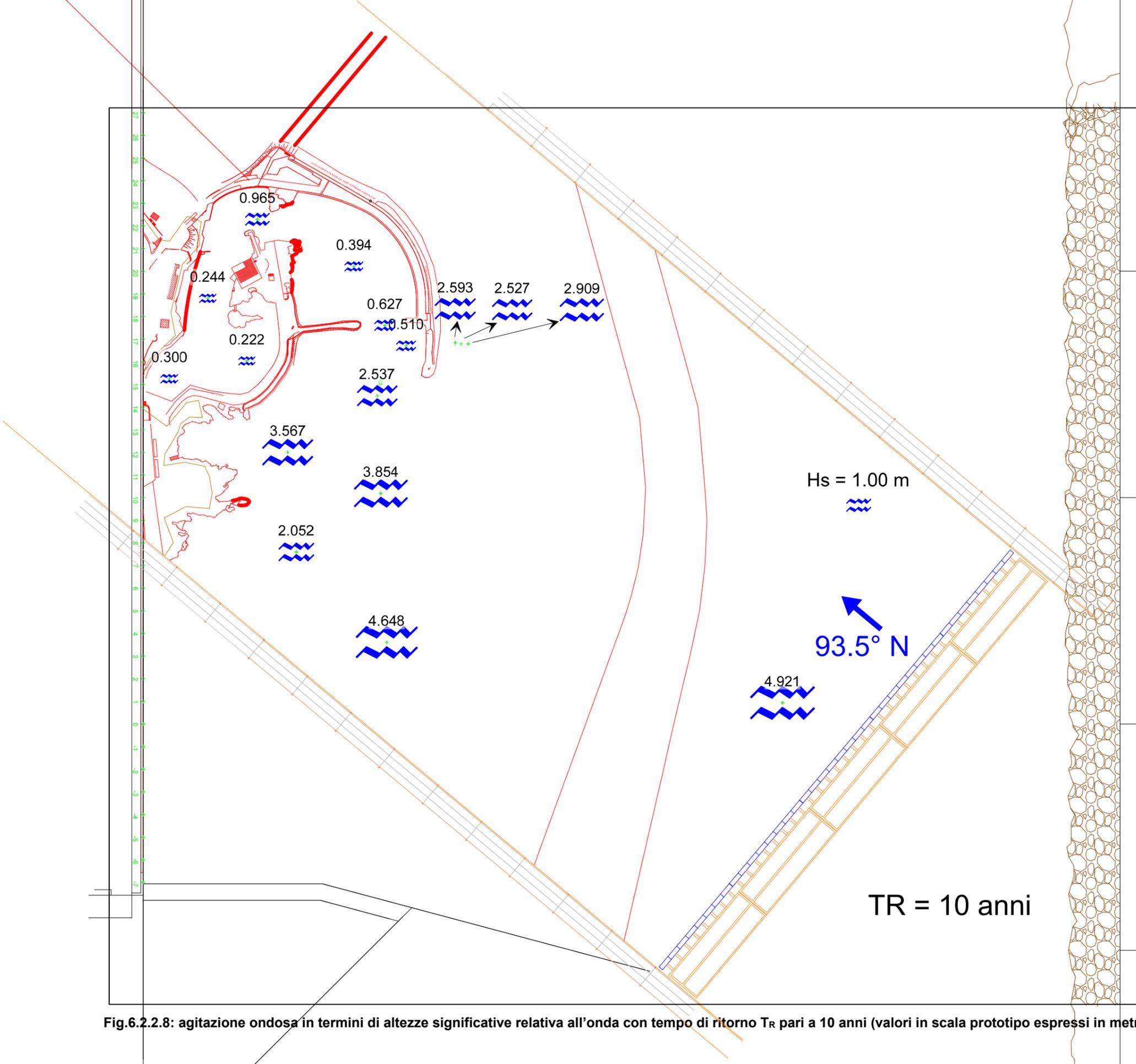


Fig.6.2.2.8: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 10 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

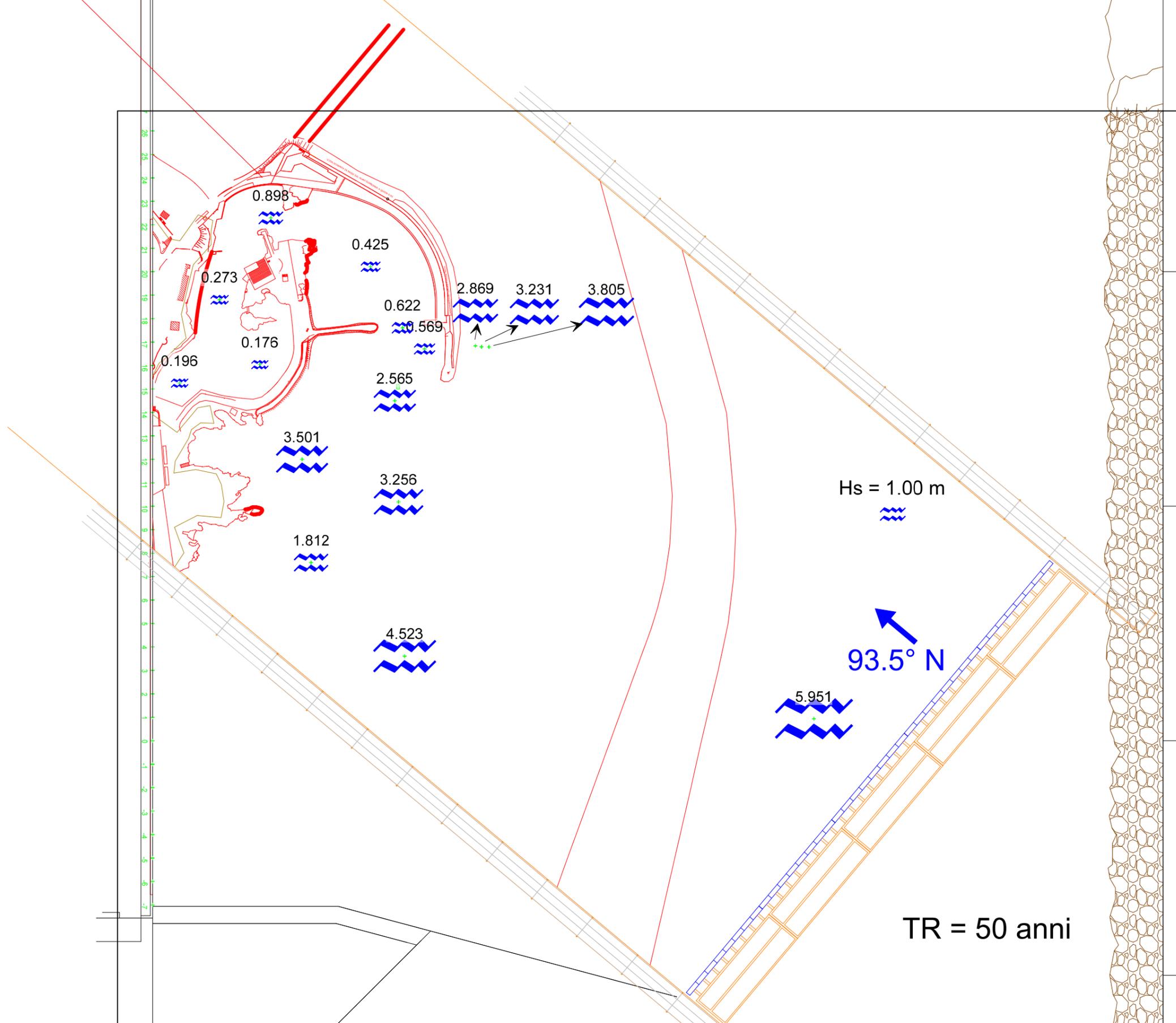


Fig.6.2.2.9: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 50 anni (valori in scala prototipo espressi in metri)

### 6.2.3 Analisi delle correnti

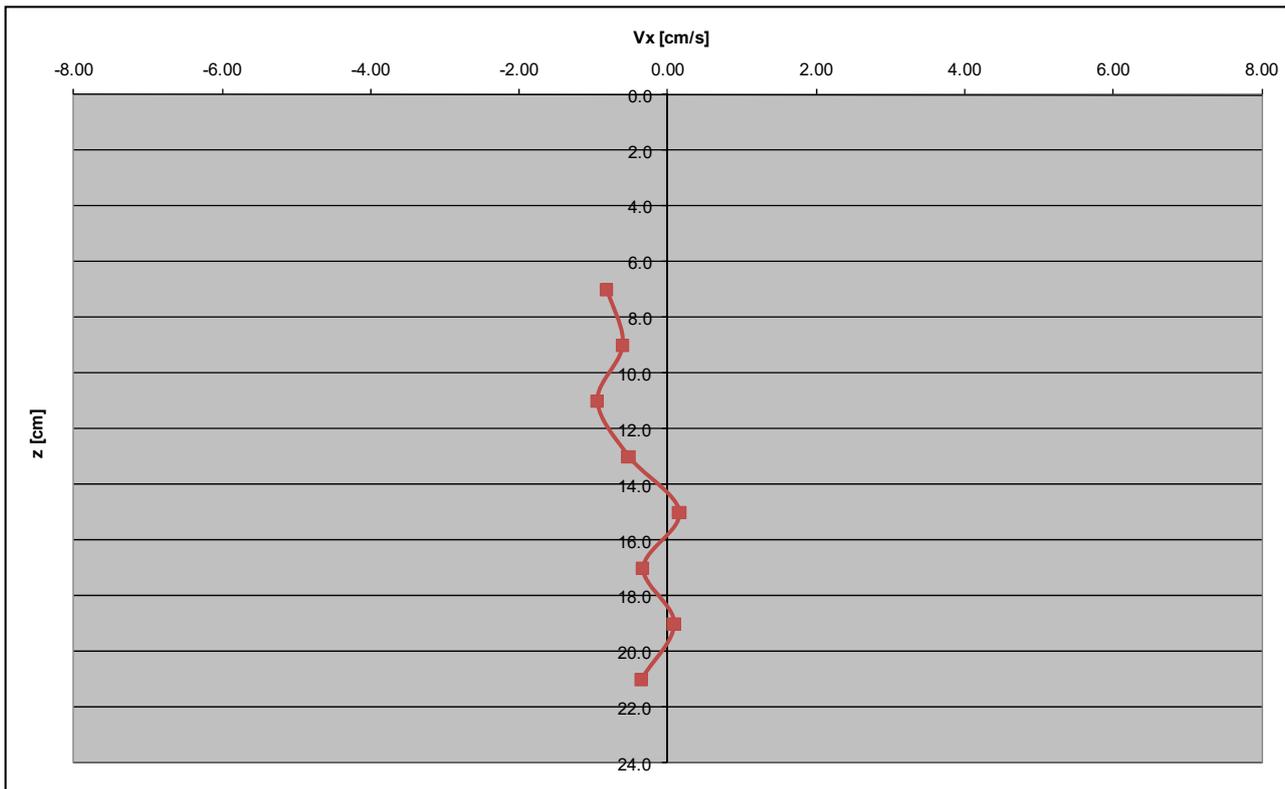
Durante le prove 2/1 e 2/5, caratterizzate da un valore al largo di altezza significativa e periodo di picco in scala modello rispettivamente pari a  $H_s=8,22$  cm –  $T_p=1,181$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  giorni) e  $H_s=19,03$  cm –  $T_p=1,989$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni), (in scala prototipo pari rispettivamente a  $H_s=2,47$  m –  $T_p=6,47$  s e  $H_s=5,71$  m –  $T_p=10,89$  s), sono stati eseguiti i rilievi correntometrici. Come già detto nel precedente par.4.3, le misure sono state effettuate in corrispondenza dell'attuale imboccatura del porto mediante un correntometro ADV 3D in configurazione *down – looking* ed in corrispondenza dell'imboccatura alla parte più interna del bacino portuale mediante un correntometro ADV 2D in configurazione *side – looking*. In entrambi i casi le misure sono state effettuate lungo una verticale ubicata all'incirca in mezzeria della imboccatura. Nella sottostante tab.6.2.3.1 si riportano per entrambe le verticali il numero di punti di misura indagati e la relativa distanza dal pelo libero.

Punto di misura	ADV 3D z [cm]	ADV 2D z [cm]
pos1	-21	-07
pos2	-19	-06
pos3	-17	-04
pos4	-15	-02
pos5	-13	
pos6	-11	
pos7	-09	
pos8	-07	

Tab.6.2.3.1: punti di misura investigati durante i rilievi correntometrici e relative distanza dal pelo libero.

Le misure sono state effettuate con una frequenza di campionamento di 25 Hz, con un numero totale di dati acquisiti per ciascun punto pari a 4.500. Per quanto riguarda la verticale relativa all'imboccatura principale (ADV 3D), non è stato possibile acquisire ulteriori punti verso il pelo libero in quanto l'agitazione ondosa, soprattutto con l'attacco ondosso con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni, era tale da provocare l'emersione dello strumento durante il passaggio dei cavi delle onde con conseguente interruzione della misura. In entrambi i casi gli strumenti sono stati orientati in maniera tale che la componente di velocità  $V_x$  fosse diretta nel verso di entrata attraverso la imboccatura (segno positivo) o uscita (segno negativo).

Nelle successive figure si riportano i profili verticali della componente media di velocità  $V_x$  ottenuti effettuando per ciascun punto di misura una semplice media aritmetica dei 4.500 dati acquisiti.



**Fig.6.2.3.1: profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura principale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorni); i valori sono in scala modello.**

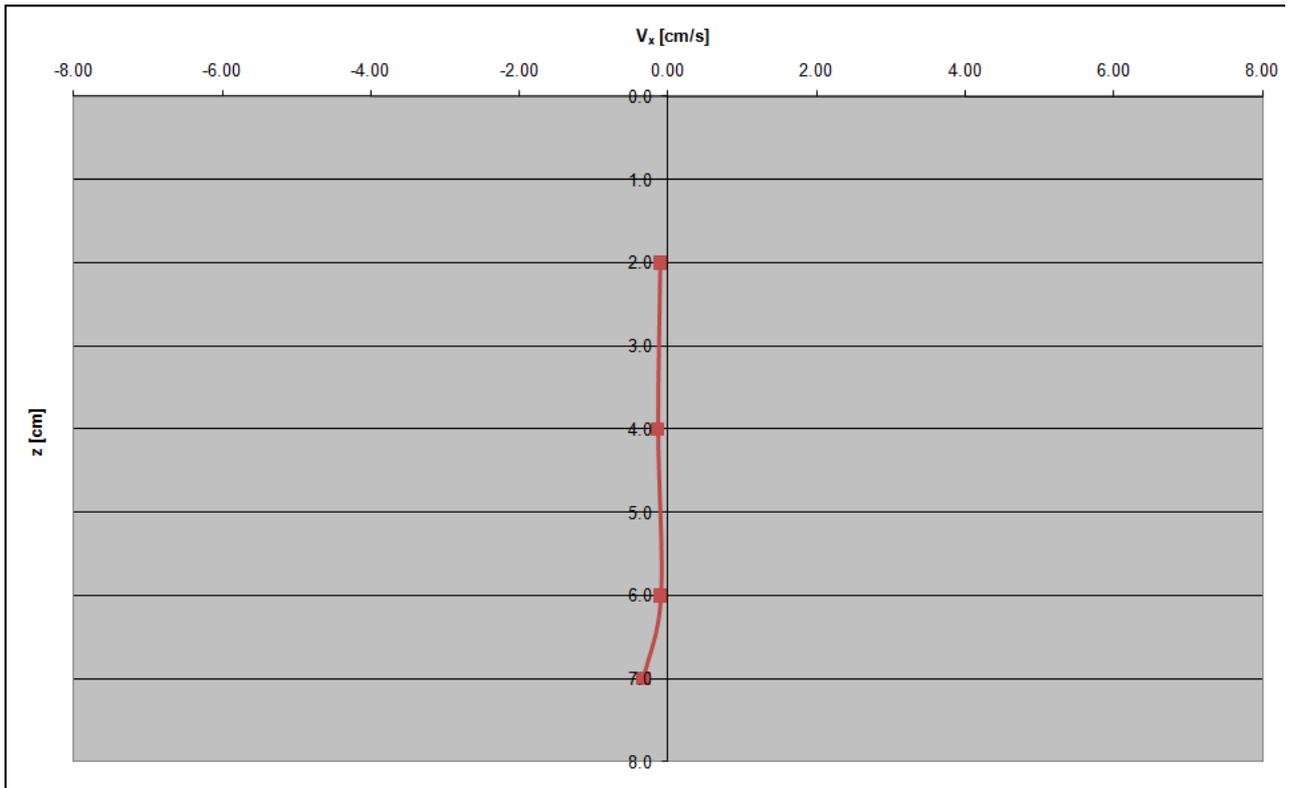


Fig.6.2.3.2: profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura parte più interna del bacino portuale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorni); i valori sono in scala modello.

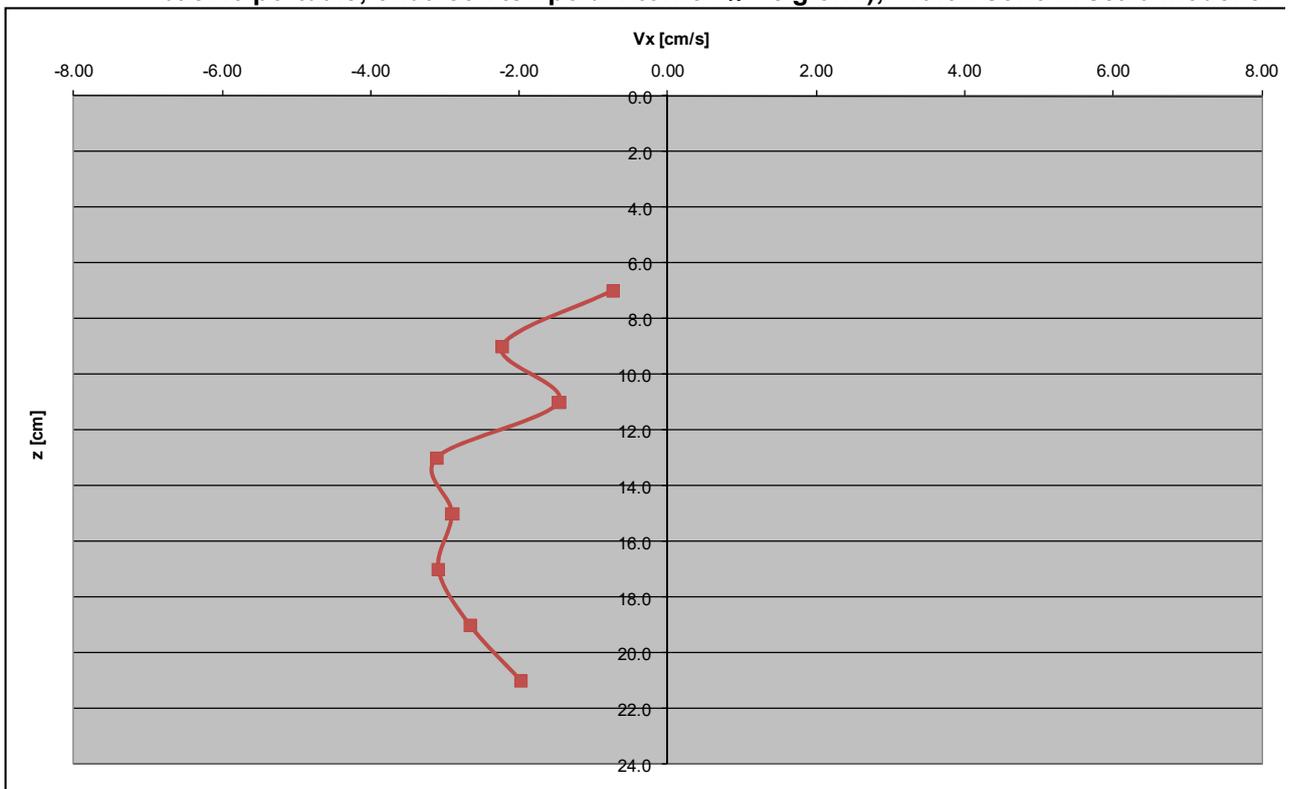
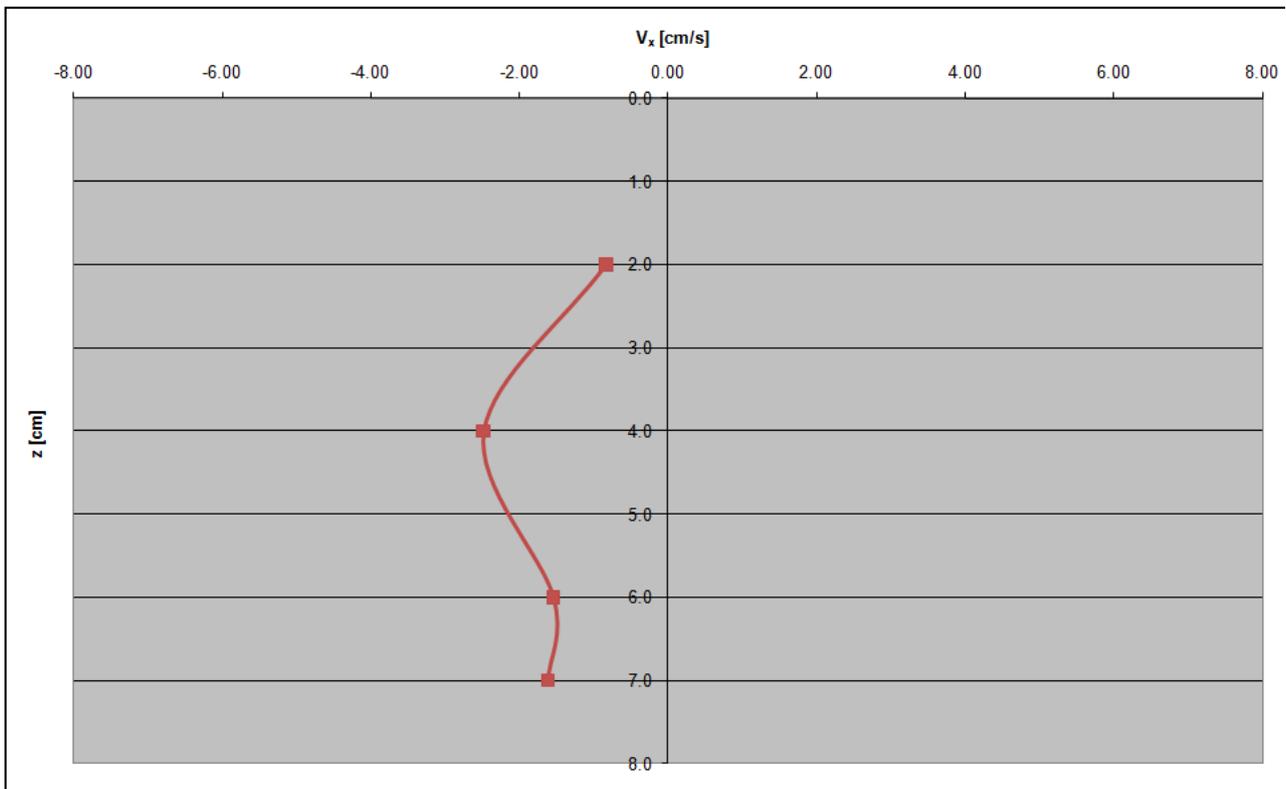


Fig.6.2.3.3: profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura principale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni); i valori sono in scala modello.



**Fig.6.2.3.4: profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura parte più interna del bacino portuale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni); i valori sono in scala modello.**

Anche in questo caso, utilizzando i profili verticali della componente media di velocità  $V_x$  relativi alla imboccatura principale, si sono costruiti i solidi di portata al fine di effettuare una stima dei tempi di ricambio idrico all'interno del bacino portuale. Non avendo la misura completa fino al pelo libero per quanto prima detto, si è fatta l'ipotesi di bilanciamento dei flussi in entrata con quelli in uscita. Nell'ipotesi di livello pari al medio mare, dividendo il volume di acqua racchiuso nel bacino portuale per il valore di portata così calcolato è possibile ottenere una stima del tempo di ricambio.

Nella sottostante tab.6.2.3.2 si riportano i valori di portata in scala modello (il segno meno indica in questo caso portata uscente), il volume dello specchio acqueo contenuto nel bacino portuale in scala modello ipotizzando il livello pari a quello medio mare, il tempo di ricambio sia in scala modello che in scala prototipo.

<b>Attacco ondosso con <math>T_R = 5</math> giorni</b>			
<b><math>Q_{tot}</math></b> <b>[cm<sup>3</sup>/s]</b>	<b>W</b> <b>[cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>T_{ric}</math> modello</b> <b>[min]</b>	<b><math>T_{ric}</math> prototipo</b> <b>[ore]</b>
-1.426,83	5.816.000	67,94	6,20
<b>Attacco ondosso con <math>T_R = 50</math> anni</b>			
<b><math>Q_{tot}</math></b> <b>[cm<sup>3</sup>/s]</b>	<b>W</b> <b>[cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>T_{ric}</math> modello</b> <b>[min]</b>	<b><math>T_{ric}</math> prototipo</b> <b>[ore]</b>
-7.161,67	5.816.000	13,54	1,24

**Tab.6.2.3.2: stima del tempo di ricambio del bacino portuale con riferimento agli attacchi ondososi con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorno e  $T_R = 50$  anni.**

## 6.3 Prove Modello 3D – Gruppo 3

### 6.3.1 Realizzazione del modello

Completati i test con la direzione di generazione 93,5°N nella configurazione attuale delle opere, mantenendo il generatore di moto ondoso e le passerelle laterali di chiusura nelle medesime posizioni si è provveduto a realizzare i lavori relativi alla configurazione di progetto delle opere.

Per quanto riguarda i due nuovi moli (il nuovo molo di sottoflutto e la modifica/prolungamento del molo di sopraflutto esistente), in particolare, ci si è avvalsi delle indicazioni dei progettisti ad integrazione dei disegni di progetto, che hanno fornito informazioni in merito ai materiali utilizzati, per i quali si aggiungono, rispetto a quanto utilizzato per le opere esistenti, uno stabilizzato caratterizzato da massi del peso compreso tra 0,05 ÷ 1,47 kN e massi naturali di 3<sup>a</sup> categoria. Il primo è stato utilizzato per la realizzazione del nucleo delle due nuove opere foranee, mentre il secondo è stato utilizzato per costituire la mantellata del nuovo molo di sottoflutto.

La riduzione in scala dei due nuovi materiali è stata eseguita sulla base del medesimo approccio utilizzato precedentemente per gli altri materiali utilizzati in modello.

#### ***Nucleo delle nuove opere foranee***

Come detto in precedenza, il nucleo delle nuove opere foranee previste nel progetto del nuovo porto di San Foca (il nuovo molo di sottoflutto e la modifica/prolungamento del molo di sopraflutto esistente) è costituito da materiale stabilizzato caratterizzato da massi del peso compreso tra 0,05 ÷ 1,47 kN.

Considerando, a scala di prototipo, un peso medio efficace (*mean effective weight*) pari a  $W_{em}=0,77$  kN si può definire il peso  $(W_{50})_p$ :

$$(W_{50})_p = 1,3275 W_{em} = 1,02 \text{ kN}$$

corrispondente alla dimensione del setaccio con un passante pari al 50% ( $D_{50}$ ) che, considerando il lato del cubo di volume equivalente ( $D_n$ ), risulta pari a:

$$(D_{n50})_p = \left[ \frac{(W_{50})_p}{F_s \gamma} \right]^{1/3} = 0,385 \text{ m}$$

avendo considerato un fattore di forma  $F_s=0,7$  e un peso specifico dei massi pari a  $\gamma=25,50$  kN/m<sup>3</sup> (CIRIA, 2007).

Applicando una riduzione secondo la similitudine geometrica ( $\lambda_L=L_m/L_p=D_m/D_p=\lambda_D$ ), alla scala del modello ( $\lambda_D = 1/30$ ) si ottiene (Hughes, 1993):

$$(D_{n50})_m = (D_{n50})_p \lambda_D = 13 \text{ mm}$$

dalla quale si deduce anche il peso corrispondente alla dimensione del setaccio con un passante pari al 50% in scala modello:

$$(W_{50})_m = F_s \gamma (D_{n50})_m^3 = 0,04 \text{ N}$$

### ***Mantellata del nuovo molo di sottoflutto***

Come detto in precedenza, la mantellata del molo di sottoflutto previsto nel progetto del nuovo porto di San Foca è costituita da massi naturali di 3<sup>a</sup> categoria, del peso compreso tra 29,44 ÷ 58,86 kN.

Considerando, a scala di prototipo, un peso medio efficace (*mean effective weight*) pari a  $W_{em}=44,15$  kN si può definire il peso  $(W_{50})_p$ :

$$(W_{50})_p = 1,054 W_{em} = 46,53 \text{ kN}$$

corrispondente alla dimensione del setaccio con un passante pari al 50% ( $D_{50}$ ) che, considerando il lato del cubo di volume equivalente ( $D_n$ ), risulta pari a:

$$(D_{n50})_p = \left[ \frac{(W_{50})_p}{F_s \gamma} \right]^{1/3} = 1,376 \text{ m}$$

avendo considerato un fattore di forma  $F_s=0,7$  e un peso specifico dei massi pari a  $\gamma=25,50$  kN/m<sup>3</sup> (CIRIA, 2007).

La riduzione in scala geometrica dei massi di mantellata va eseguita tenendo conto della densità relativa di galleggiamento  $\Delta$ , che dovrebbe conservare lo stesso valore del prototipo:

$$\Delta = \frac{\rho_a}{\rho_w} - 1$$

Per compensare la differenza della densità dell'acqua dolce usata per la sperimentazione in modello rispetto a quella dell'acqua di mare, bisogna evidentemente intervenire sul peso del masso di armatura in modello, in modo da riprodurre correttamente la stabilità (Hughes, 1993). In sostanza bisogna imporre l'uguaglianza del numero di stabilità  $N_s$  nel modello e nel prototipo:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n}$$

in cui  $H_s$  rappresenta l'altezza d'onda significativa.

Imponendo dunque l'uguaglianza  $N_s^{(m)} = N_s^{(p)}$  si ottiene la scala di riduzione del diametro:

$$\lambda_D = \lambda_L \frac{\rho_w^{(m)} \rho_a^{(p)} - \rho_w^{(p)}}{\rho_w^{(p)} \rho_a^{(m)} - \rho_w^{(m)}}$$

Assumendo i seguenti valori di densità:

$$\rho_w^{(m)} = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_w^{(p)} = 1.026 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_a^{(m)} = \rho_a^{(p)} = 2.600 \text{ kg/m}^3$$

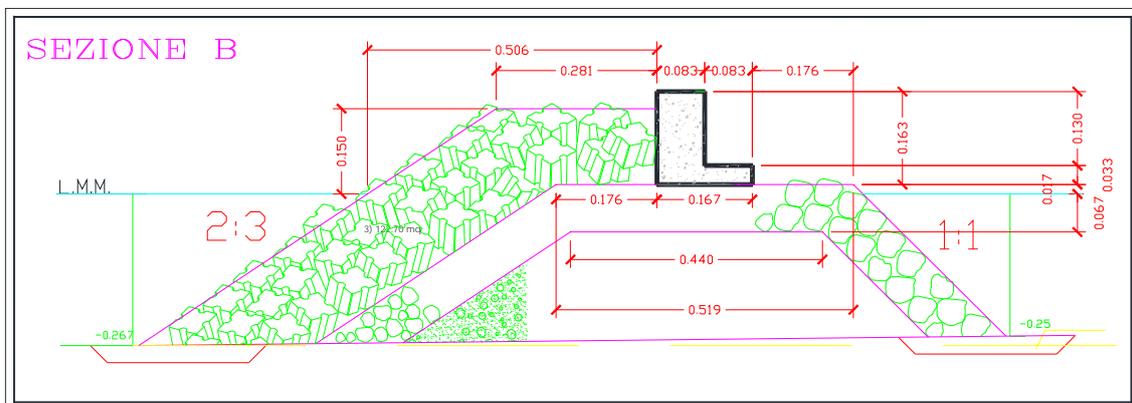
e stabilita la scala delle lunghezze  $\lambda_L = 1/30$ , si ottiene una scala dei diametri  $\lambda_D = 1/31,29$  che, moltiplicata per il diametro nominale del masso in dimensione prototipo, fornisce il diametro nominale del masso in dimensione modello:

$$(D_{n50})_m = (D_{n50})_p \lambda_D = 44 \text{ mm}$$

dalla quale si deduce anche il peso corrispondente alla dimensione del setaccio con un passante pari al 50% in scala modello:

$$(W_{50})_m = F_s \gamma (D_{n50})_m^3 = 1,52 N$$

La prima operazione è consistita nel salpamento completo del tratto terminale del molo di sopraflutto caratterizzato dalla tipologia di opera “a gettata”, per la successiva realizzazione del nuovo tratto di opera caratterizzata dalla presenza di un piano carrabile in cls con relativo muro paraonde, dalla presenza di un nucleo composto dallo stabilizzato descritto in precedenza, uno strato filtro costituito da massi naturali di 1^ e 2^ categoria, una mantellata sul lato esterno, avente una pendenza della scarpata di 3 su 2 ( $\cotg\alpha=1,5$ ) composta dai massi Antifer e da una mantellata sul lato interno avente una pendenza della scarpata di 1 su 1 ( $\cotg\alpha=1$ ), facente parte dello stesso strato filtro, per il quale sono utilizzati i soli massi naturali di 2^ categoria (fig. 6.3.1.1).



**Fig. 6.3.1.1: una sezione del nuovo tratto di molo di sopraflutto, con l'indicazione delle misure in scala modello (le quote al piede sono in scala prototipo)**

Detto molo è caratterizzato da un primo tratto rettilineo della lunghezza di circa 260m in prototipo, a partire dal setto ortogonale in corrispondenza dell'imboccatura presente nella configurazione attuale delle opere, e prosegue con un tratto curvilineo (Fig. 2.56) della lunghezza complessiva di circa 135m in scala prototipo, che termina con il conoide di testata che viene così a trovarsi imbasato nelle immediate vicinanze della batimetrica -5m (scala prototipo). Tracciato l'allineamento della nuova opera, con l'ausilio di una livella laser (per un migliore controllo delle quote) è stato realizzato innanzitutto il nucleo, interrotto lungo la

scarpata interna, dal setto a parete verticale in corrispondenza della nuova imboccatura (Fig. 6.3.1.2).

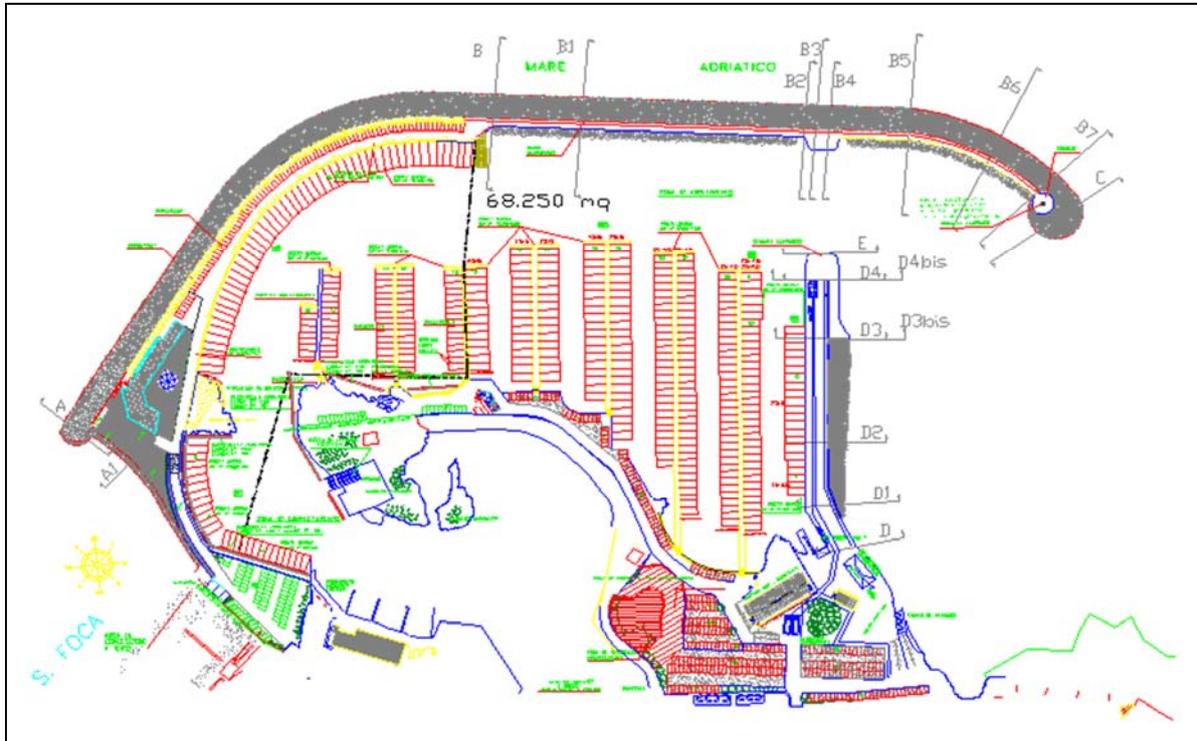


Fig. 6.3.1.2: planimetria della configurazione di progetto



Fig. 6.3.1.3: lavori di costruzione del nucleo del nuovo molo di sopraflutto

Completato il nucleo, è stato sistemato lo strato filtro con particolare attenzione alla scarpata del lato interno, per la quale il suddetto strato diventa mantellata, scomparendo, di fatto, i massi di 1<sup>a</sup> categoria (Fig. 6.3.1.4).



**Fig. 6.3.1.4: lavori di costruzione dello strato filtro del nuovo molo di sopraflutto**

Sulla superficie del nuovo strato realizzato, sono state sistemate le casseforme per il getto di calcestruzzo finalizzato alla realizzazione del piano carrabile (Fig. 6.3.1.5), sul quale è stato successivamente realizzato il muro paraonde mediante mattoni in calcestruzzo cellulare SIPOREX opportunamente sagomati (Fig. 6.3.1.6).



**Fig. 6.3.1.5: lavori di costruzione del piano carrabile del nuovo molo di sopraflutto**



**Fig. 6.3.1.6: un particolare del muro paraonde del nuovo molo di sopraflutto**

Infine si è provveduto alla sistemazione dei massi Antifer per la costituzione della mantellata esterna del molo (Fig. 6.3.1.7).



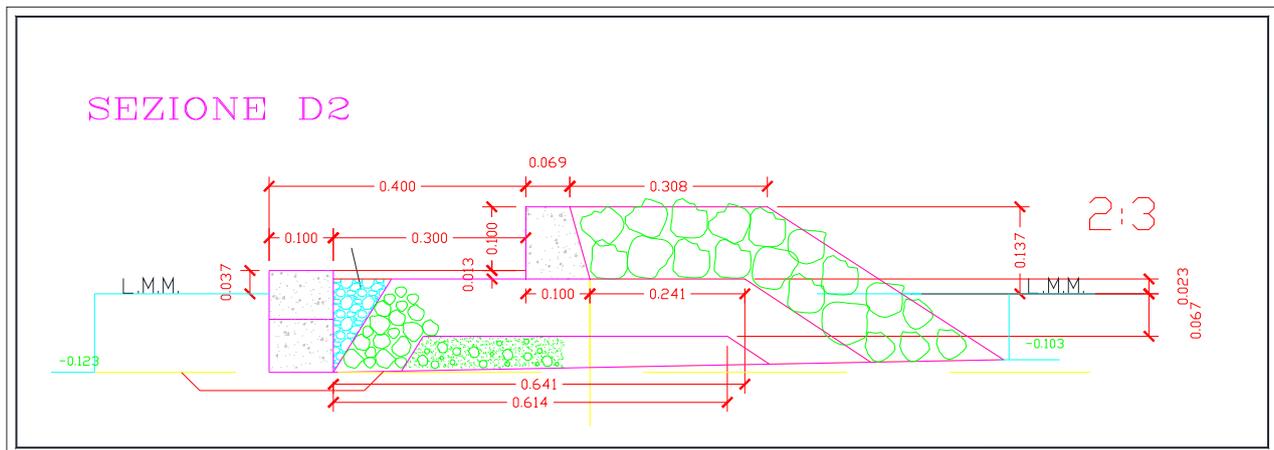
**Fig. 6.3.1.7: posa in opera dei massi di mantellata del nuovo molo di sopraflutto**

Completato il nuovo molo di sopraflutto, si è provveduto alla realizzazione del nuovo molo di sottoflutto, dopo averne effettuato il corretto tracciamento, nel rispetto delle indicazioni dei progettisti a completamento di quanto riportato sul progetto.

L'opera è costituita da una banchina carrabile sulla quale è previsto un muro paraonde a sezione trapezoidale lungo il bordo esterno, a ridosso del quale è presente la mantellata in massi naturali di 3<sup>a</sup> categoria, con pendenza della scarpata di 3 su 2 ( $\cotg\alpha=1.5$ ) e con la quota di berma al livello della sommità del muro di coronamento (Fig. 6.3.1.8).

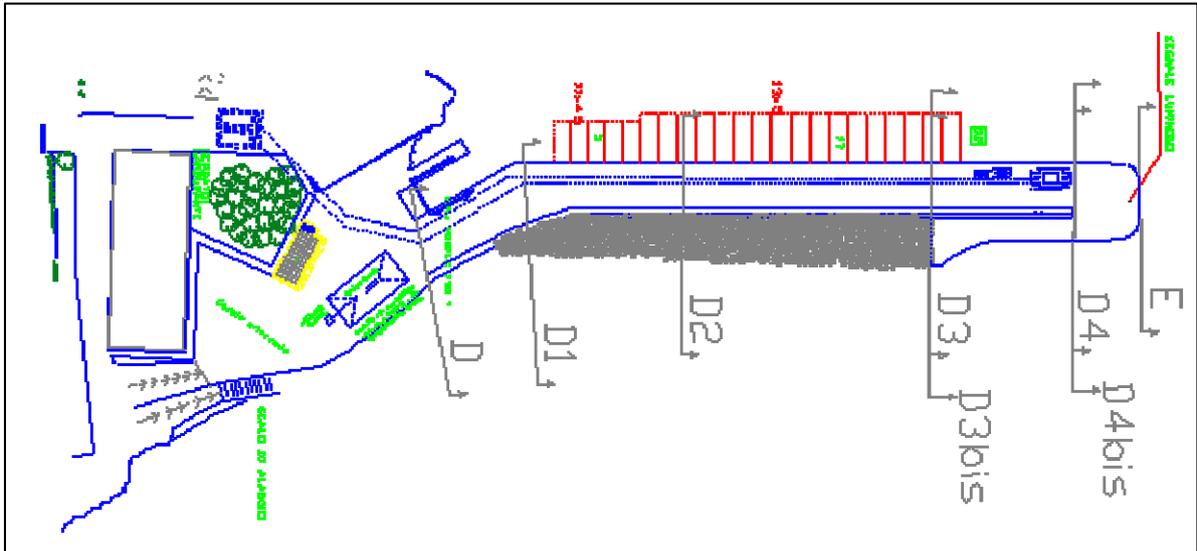
Il lato interno dell'opera in esame è a parete verticale, motivo per cui, sulla base delle medesime considerazioni fatte precedentemente in merito alla ridotta filtrazione tra l'esterno

e l'interno dello specchio acqueo protetto (anche in questo caso strettamente limitata al solo imbasamento sottostante in pietrame con massi di 1<sup>a</sup> categoria, di spessore piuttosto ridotto), si è scelto di bloccare completamente la filtrazione realizzando la banchina mediante incollaggio di mattoni in calcestruzzo cellulare SIPOREX opportunamente sagomati, direttamente sul fondale, a vantaggio della facilità e precisione nella messa in opera, oltre che della gestione del modello grazie ad una maggiore portanza, sufficiente a rendere la banchina praticabile per il personale impegnato nelle misure. Completano la sezione un nucleo in materiale stabilizzato di cava (descritto in precedenza) ed uno strato filtro in massi naturali di 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> categoria.



**Fig. 6.3.1.8: una sezione mediana del nuovo molo di sottoflutto, con l'indicazione delle misure in scala modello (la posizione planimetrica delle sezione è riportata nella successiva figura 2.63)**

Come è possibile osservare dalla planimetria riportata in figura 6.3.1.9, la parte terminale del molo presenta un dente che si estende fino alla larghezza della parte emersa della mantellata, oltre il quale l'opera diventa a parete verticale anche dal lato esterno per i restanti 55m (scala prototipo) circa di distanza dall'estremità del molo.



**Fig. 6.3.1.9: planimetria del nuovo molo di sottoflutto**

Le immagini in figura 6.3.1.10 e 6.3.1.11 mostrano rispettivamente i lavori di posa in opera del muro di coronamento a sezione trapezia e i lavori di sistemazione della superficie della banchina.



**Fig. 6.3.1.10: posa in opera del muro di coronamento**



**Fig. 6.3.1.11: completamento della superficie della banchina**

Alla radice del molo di sottoflutto, immediatamente a nord, è stata realizzata, secondo le indicazioni del progetto, la vasca del travel lift che permette il sollevamento ed il varo delle imbarcazioni, mentre immediatamente a sud, in continuità con la linea esterna del muro di coronamento, alla stessa quota dello stesso, rispondendo a specifiche richieste dei progettisti è stata realizzata una parete verticale della larghezza di circa 3,3cm (1m in scala prototipo), prolungata fino allo scalo di alaggio, finalizzata alla protezione del piazzale retrostante dall'azione del moto ondoso incidente (Fig. 6.3.1.12).

E' da mettere altresì in evidenza che, rispondendo ancora a specifiche richieste dei progettisti, l'opera foranea a ridosso del muro di coronamento del molo, contrariamente a quanto inizialmente previsto (Fig. 6.3.1.9), segue parzialmente la curva planimetrica del muro, aumentando di fatto la sua lunghezza e, di conseguenza, la lunghezza di banchina protetta.



**Fig. 6.3.1.12: completamento della superficie della banchina**

Proseguendo in direzione nord rispetto al molo di sottoflutto, si è provveduto a modificare il tratto di costa secondo le indicazioni del progetto, con la realizzazione dell'arco di collegamento con lo scoglio Sarparea, protetto con una barriera radente in massi naturali di 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> categoria, e con l'allargamento della banchina di collegamento con lo scoglio Papuscia (Fig. 6.3.1.13).



**Fig. 6.3.1.13: completamento del tratto di costa a nord del molo di sottoflutto**

In ultimo si è provveduto alla modifica della scogliera di protezione del porticciolo interno (Fig. 6.3.1.14) ed alla sostituzione del setto ortogonale al molo di sopraflutto, attualmente costituito da massi naturali nella parte inferiore e da massi in calcestruzzo (cubi Antifer e parallelepipedi) nella parte superiore, allineato con l'attuale molo di sottoflutto, con un setto delle medesime caratteristiche geometriche, ma realizzato a parete verticale (Fig. 6.3.1.15).



**Fig. 6.3.1.14: scogliera di protezione del porticciolo interno modificata**



**Fig. 6.3.1.15: nuovo setto a parete verticale in sostituzione dell'attuale a gettata in corrispondenza dell'imboccatura relativa alla configurazione attuale delle opere**

L'immagine in figura 6.3.1.16 mostra il complesso delle nuove opere realizzate sul modello.

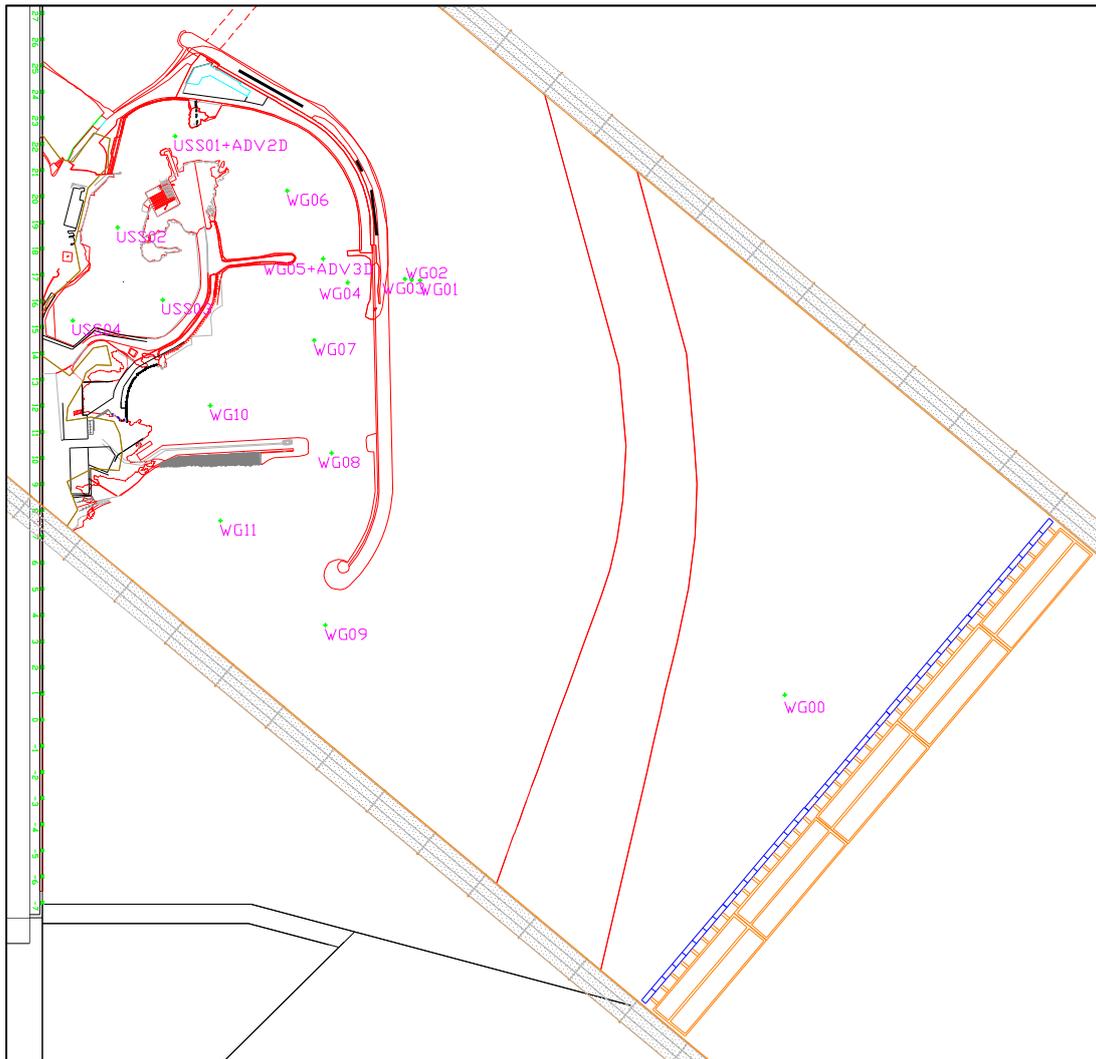


Fig. 6.3.1.16: una vista generale delle nuove opere realizzate in modello

### 6.3.2 Analisi dell'evoluzione del moto ondoso e agitazione ondosa interna

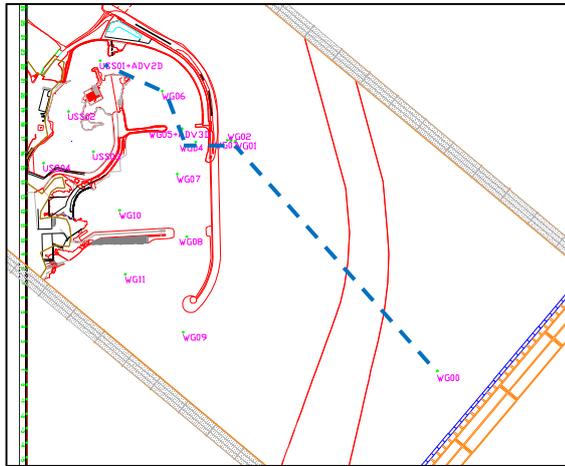
Durante le prove 3/1, 3/2, 3/3, 3/4 e 3/5, caratterizzate da un valore al largo di altezza significativa e periodo di picco in scala modello rispettivamente pari a  $H_s=8,22$  cm –  $T_p=1,181$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  giorni),  $H_s=13,12$  cm –  $T_p=1,532$  s (tempo di ritorno  $T_R=2$  anni),  $H_s=14,73$  cm –  $T_p=1,746$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  anni),  $H_s=15,94$  cm –  $T_p=1,746$  s (tempo di ritorno  $T_R=10$  anni),  $H_s=19,03$  cm –  $T_p=1,989$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni), (in scala prototipo pari rispettivamente a  $H_s=2,47$  m –  $T_p=6,47$  s,  $H_s=3,94$  m –  $T_p=8,39$  s,  $H_s=4,42$  m –  $T_p=9,56$  s,  $H_s=4,78$  m –  $T_p=9,56$  s,  $H_s=5,71$  m –  $T_p=10,89$  s), sono stati eseguiti i rilievi di moto ondoso.

Le misure sono state effettuate negli stessi punti di misura della configurazione precedente (si veda la sottostante fig. 6.3.2.1). Anche in questo caso la frequenza di campionamento per tutte le sonde è stata di 25 Hz, con un numero totale di dati acquisiti per ciascun punto pari a 30.000.



**Fig.6.3.2.1: planimetria del porto nella configurazione di progetto con l'ubicazione e numerazione delle sonde di misure.**

Nella successiva fig.6.3.2.3 si riportano, anche in questo caso per brevità di esposizione, gli spettri di densità di energia con riferimento all'attacco ondoso caratterizzato da  $H_s=19,03$  cm –  $T_p=1,989$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni) (in scala prototipo rispettivamente  $H_s=5,71$  m –  $T_p=10,89$  s) relativi alle le sonde posizionate lungo un transetto virtuale (fig. 6.3.2.2) che, analogamente a quanto visto per la configurazione precedente, partendo dalla sonda ubicata in prossimità del generatore di moto ondoso (WG00), congiunge le sonde disposte subito a monte della parte terminale del molo di sopraflutto (WG01, WG02 e WG03), per poi continuare subito a valle di questo (WG04), congiungere la sonda ubicata in corrispondenza dell'attuale imboccatura del porto (WG05) e la sonda ubicata nella parte centrale dell'avamposto (WG06) e terminare in corrispondenza della prima



**Fig.6.3.2.2: indicazione del transetto virtuale utilizzato per l'analisi dell'evoluzione del moto ondoso dal largo verso l'interno del porto.**

sonda ultrasonica (USS01) posizionata in corrispondenza dell'entrata nella parte più interna del porto. Per una migliore lettura dei grafici, i valori di densità di energia spettrale relativi alle sonde ubicate a valle del molo di sottoflutto e nella parte dell'avamposto (WG04, WG05, WG06 e USS01) sono stati amplificati di 100 volte rispetto a quelli relativi alle sonde esterne.

Si può innanzitutto osservare come lo spettro rilevato dalla sonda resistiva "WG00" nella zona offshore riproduca, con buona fedeltà, lo

spettro di densità di energia monodimensionale di tipo JONSWAP impostato col software di generazione.

Lo spettro d'onda, procedendo dal largo verso riva, subisce modificazioni a causa delle variazioni di profondità (*shoaling*), per effetto delle perdite di energia per attrito sul fondo e all'interfaccia acqua-aria e, in questo caso, per effetto del frangimento che subiscono le onde. In particolare, si osserva che nel passaggio dalla zona offshore alla zona di risalita del fondale si sia verificato un abbattimento di energia in corrispondenza della frequenza di picco  $f_p=0,503$  Hz (sonda "WG01"). E' possibile notare anche come siano già insorte delle non linearità sulla prima armonica della frequenza di picco, di valore pari a  $2f_p=1,006$  Hz e sulla seconda armonica della frequenza di picco, di valore pari a  $3f_p=1,509$  Hz (sonde "WG02" e "WG03"). Inoltre, è possibile osservare la comparsa di tre componenti alle basse frequenze in corrispondenza del valore  $f=0,231$  Hz, del valore  $f=0,158$  Hz e del valore  $f=0,036$  Hz.

Esaminando gli spettri delle sonde posizionate a valle del molo di sopraflutto, è possibile osservare come, man mano che ci si spinge nella parte più riparata del porto, l'energia tenda a trasferirsi sempre più verso le basse frequenze per via dell'insorgere dei fenomeni di riflessione e risonanza dovuti alla presenza delle strutture portuali, fino ad arrivare alla prima sonda ultrasonica (USS01) ubicata all'ingresso del bacino portuale interno, dove l'energia originaria relativa alla frequenza di picco si è trasferita alle frequenze  $f = 0,231$  Hz.,  $f = 0,158$  Hz.,  $f = 0,085$  Hz. e  $f = 0,036$  Hz.

Per completezza, nella successiva fig.6.3.2.4 si riportano gli spettri di densità di energia riferiti alle ulteriori sonde ultrasoniche (USS02, USS03 e USS04) posizionate nella parte più interna del bacino portuale. Al fine di agevolare le operazioni di confronto con gli spettri riportati nella precedente fig.6.3.2.3, si è riproposto lo spettro della sonda USS01.

Da un esame della figura è possibile vedere come anche per le sonde ubicate nella parte più interna del porto l'energia originaria posizionata in corrispondenza della frequenza di picco si sia trasferita tutta alle basse frequenze, in corrispondenza dei valori  $f = 0,158$  Hz,  $f=0,085$  Hz e  $f = 0,036$  Hz. Da un punto di vista del contenuto energetico, la componente più significativa risulta essere quella relativa a  $f = 0,036$  Hz ( $T = 27,77$  s; in scala prototipo  $T = 152,15$  s), il cui valore maggiore si registra per la sonda USS04, ossia quella più interna. Infine, nella sottostante tab.6.3.2.1 sono riportati i valori di altezza significativa relativi a tutte le sonde investigate e a tutti gli attacchi ondosi simulati. Tali valori sono anche riportati nei grafici delle successive fig.6.3.2.5, fig.6.3.2.6, fig.6.3.2.7, fig.6.3.2.8 e fig.6.3.2.9 sotto forma di mappe di agitazione ondosa.

Da una lettura della tabella e dei grafici si evince come la massima altezza significativa misurata nella parte più interna del porto sia stata pari a 0,263 m (in scala prototipo) riferita all'attacco ondoso con tempo di ritorno  $T_R=5$  anni ed alla sonda USS01.

Sonda	$T_R$ 5 gg		$T_R$ 2 an		$T_R$ 5 an		$T_R$ 10 an		$T_R$ 50 an	
	Dir 93,5°N pro		Dir 93,5°N pro		Dir 93,5°N pro		Dir 93,5°N pro		Dir 93,5°N pro	
	$H_{s,mod}$ [cm]	$H_{s,prot}$ [m]								
WG00	7.936	2.381	13.322	3.997	14.375	4.312	16.427	4.928	18.975	5.692
WG01	4.353	1.306	7.660	2.298	8.618	2.585	10.241	3.072	11.407	3.422
WG02	4.741	1.422	6.901	2.070	8.124	2.437	8.128	2.438	8.953	2.686
WG03	5.885	1.765	7.048	2.115	8.071	2.421	8.762	2.629	10.002	3.000
WG04	0.384	0.115	0.453	0.136	0.475	0.143	0.582	0.175	0.658	0.197
WG05	0.390	0.117	0.577	0.173	0.528	0.158	0.616	0.185	0.613	0.184
WG06	0.359	0.108	0.487	0.146	0.442	0.133	0.528	0.158	0.525	0.157
WG07	0.455	0.136	0.651	0.195	0.614	0.184	0.657	0.197	0.794	0.238
WG08	1.326	0.398	1.555	0.467	1.521	0.456	1.287	0.386	1.347	0.404
WG09	12.512	3.754	14.087	4.226	14.517	4.355	13.742	4.122	12.661	3.798
WG10	0.795	0.239	1.379	0.414	1.469	0.441	1.694	0.508	1.715	0.515
WG11	3.993	1.198	4.094	1.228	4.048	1.214	4.919	1.476	5.758	1.722
USS01	0.580	0.174	0.753	0.226	0.875	0.263	0.603	0.181	0.665	0.200
USS02	0.203	0.061	0.266	0.080	0.253	0.076	0.265	0.080	0.395	0.119
USS03	0.222	0.067	0.212	0.064	0.198	0.059	0.257	0.077	0.277	0.083
USS04	0.173	0.052	0.216	0.065	0.213	0.064	0.223	0.067	0.224	0.067

**Tab.6.3.2.1: valori delle altezze significative  $H_s$  misurate nei vari punti di misura sia in scala modello che in scala prototipo.**

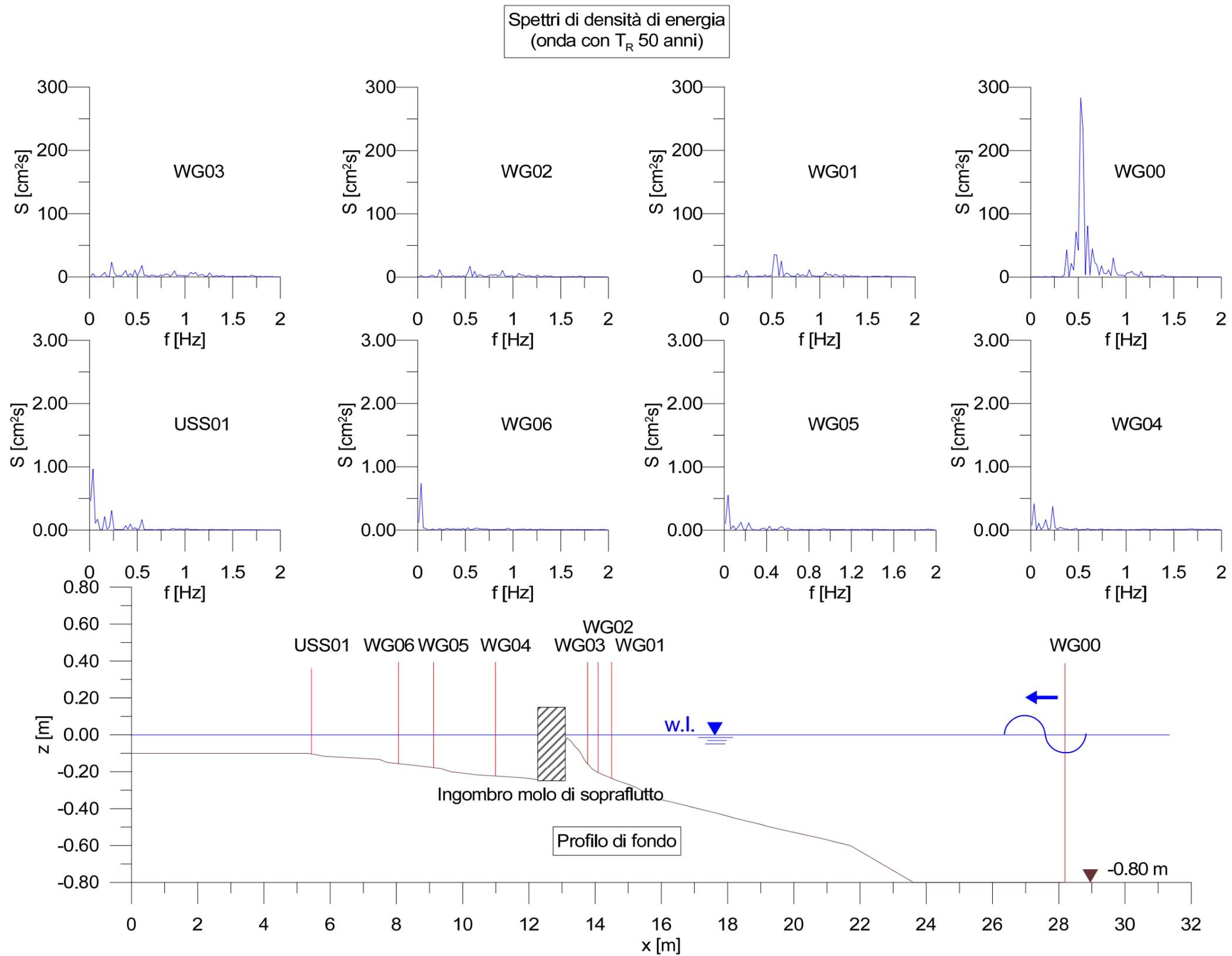


Fig.6.3.2.3: evoluzione dello spettro nel passaggio dagli alti fondali ai fondali medio – bassi. Si mette in evidenza che, per gli spettri riportati nei quattro grafici inferiori, la scala delle ordinate è stata modificata

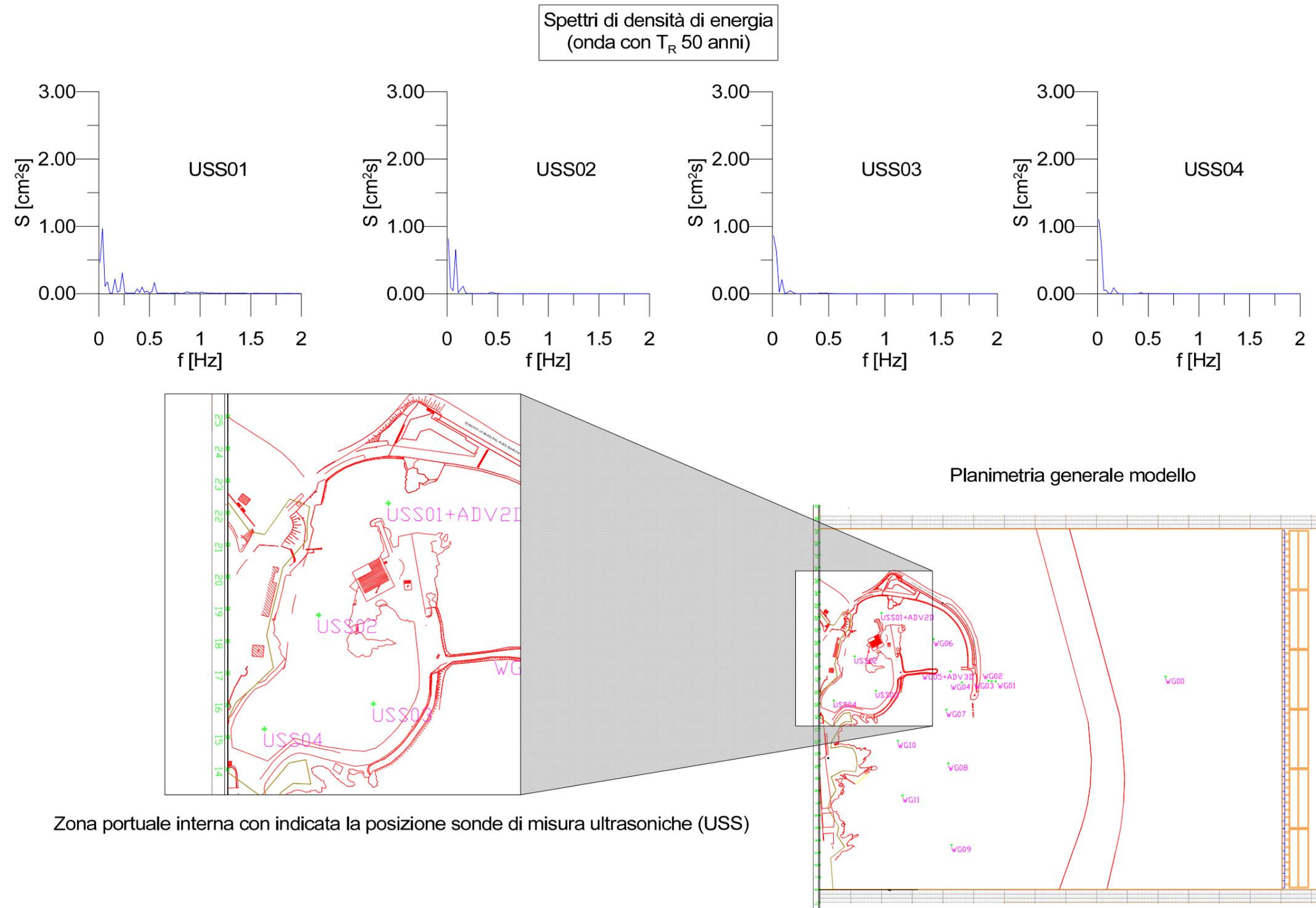


Fig.6.3.2.4: spettri di densità di energia delle sonde ubicate nella parte interna del bacino portuale.

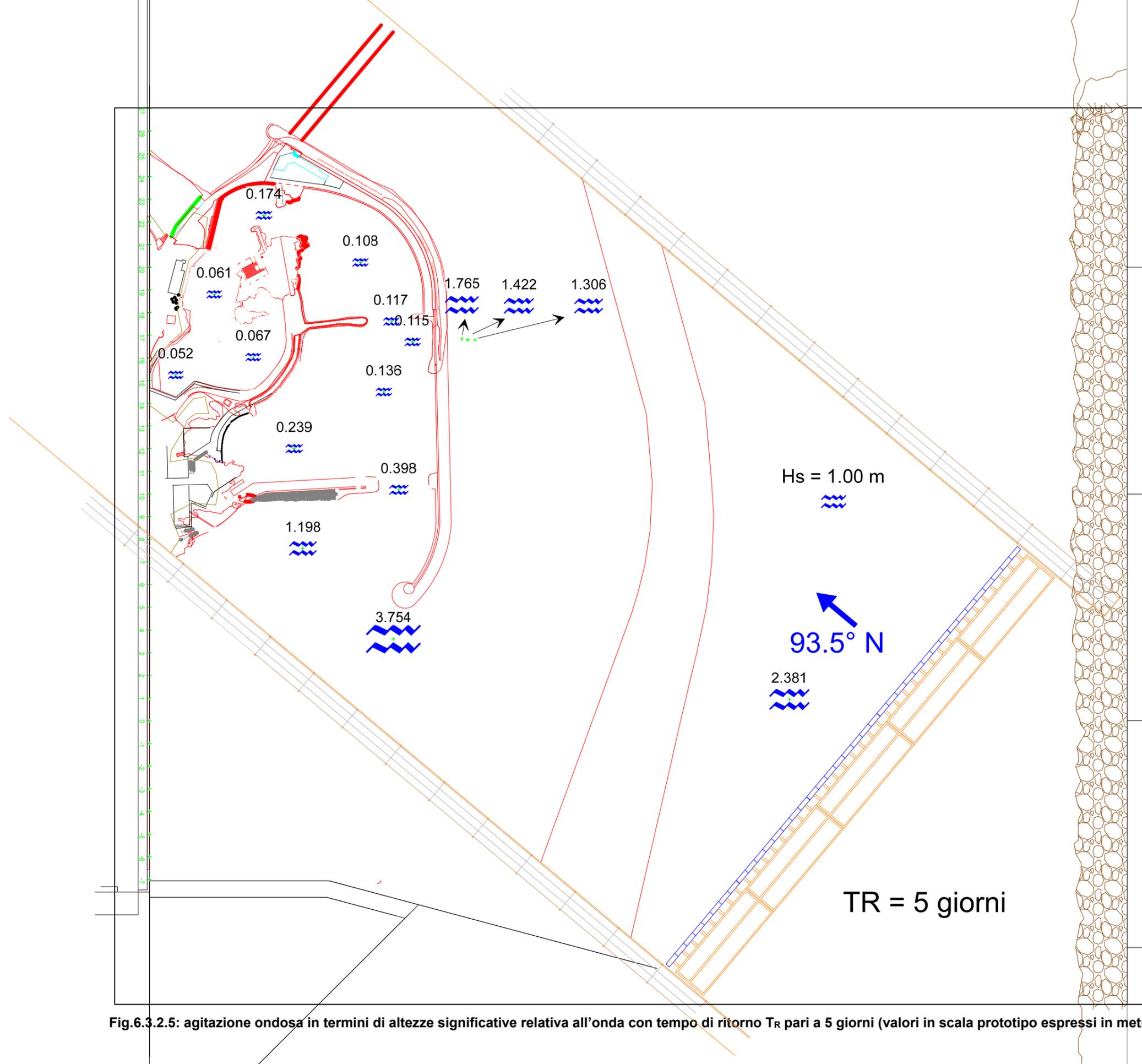


Fig.6.3.2.5: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 5 giorni (valori in scala prototipo espressi in metri).

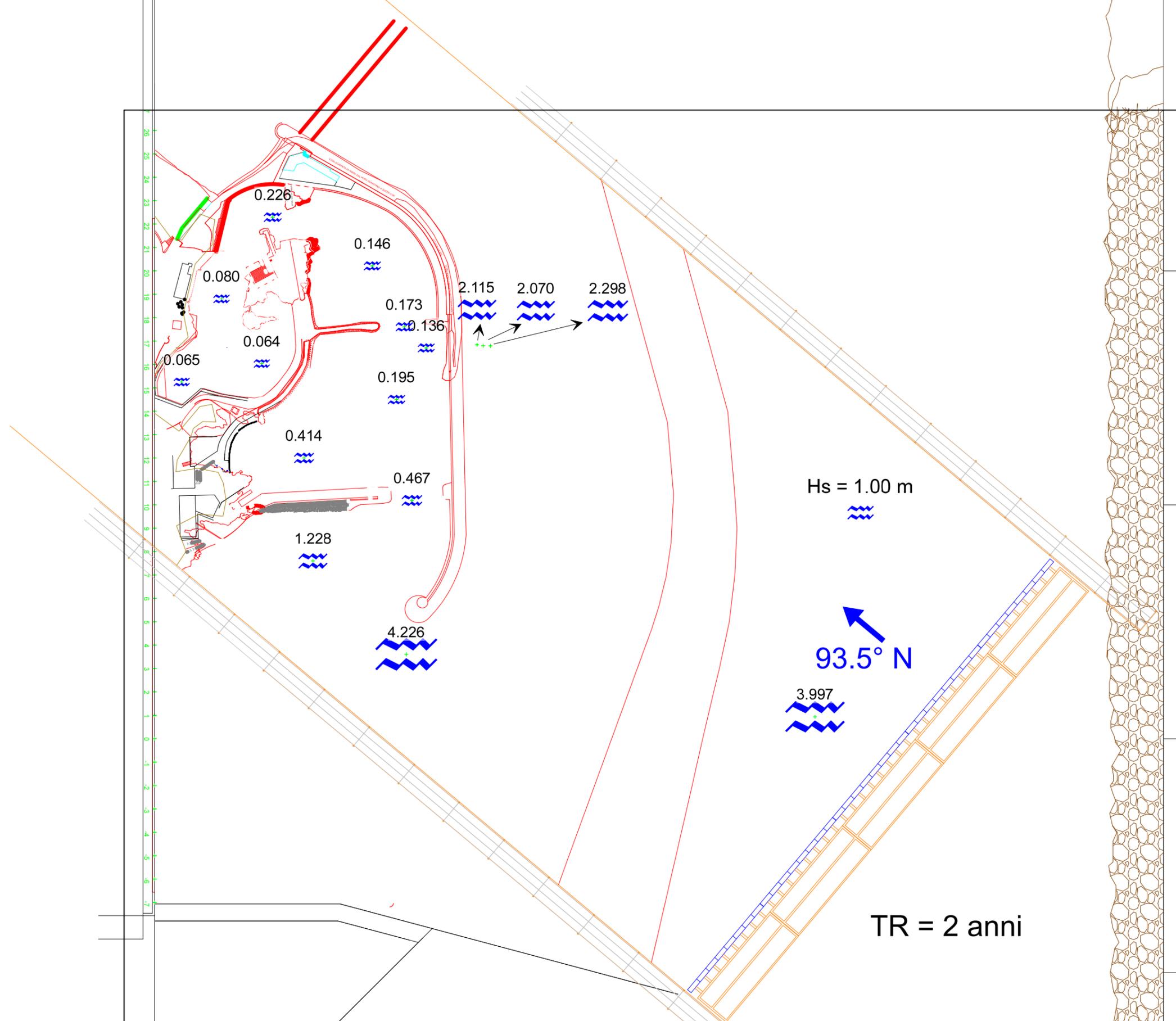


Fig.6.3.2.6: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 2 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

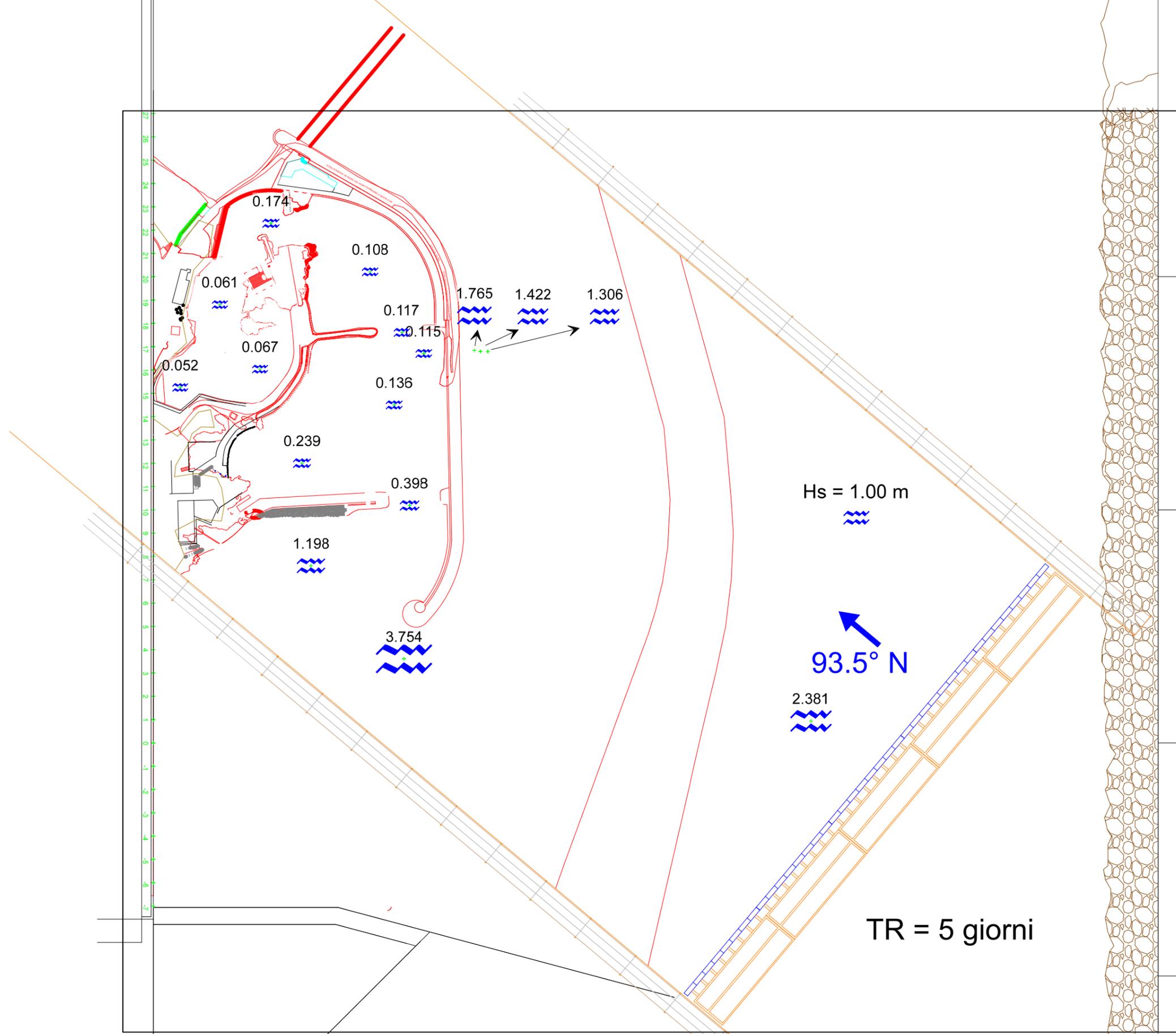


Fig.6.3.2.7: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 5 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

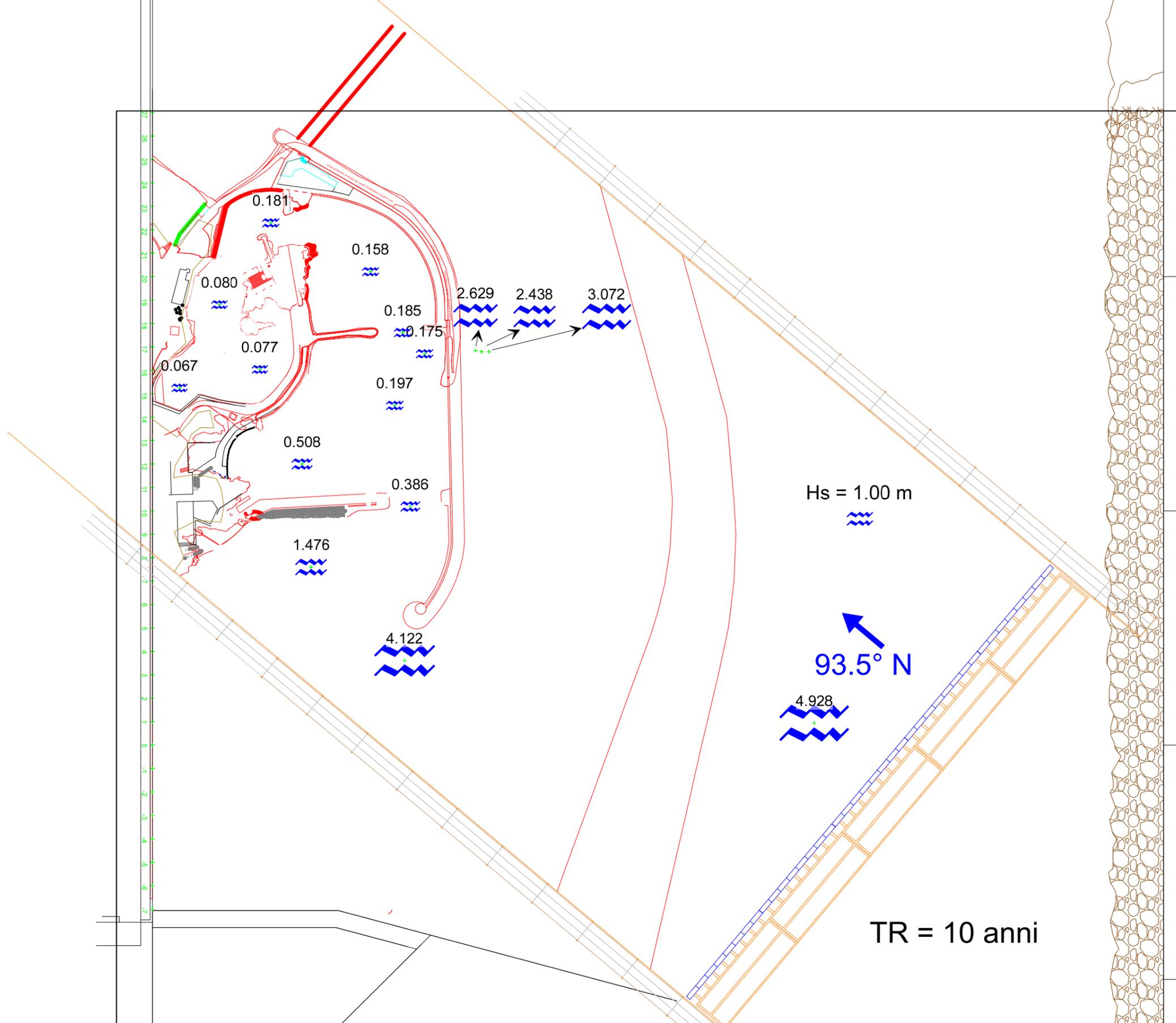


Fig.6.2.2.8: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 10 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

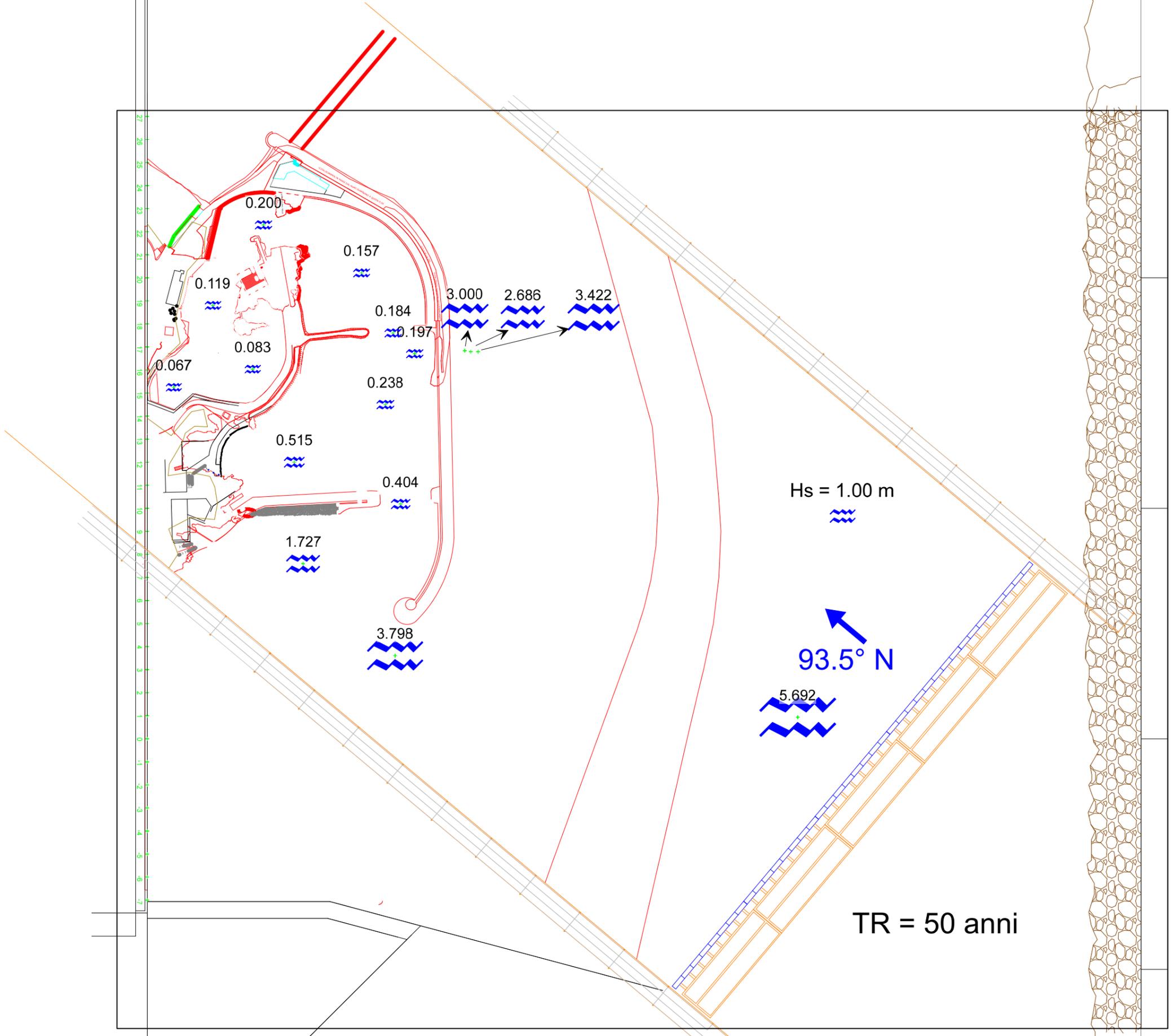


Fig.6.2.2.9: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 50 anni (valori in scala prototipo espressi in metri)

### 6.3.3 Analisi delle correnti

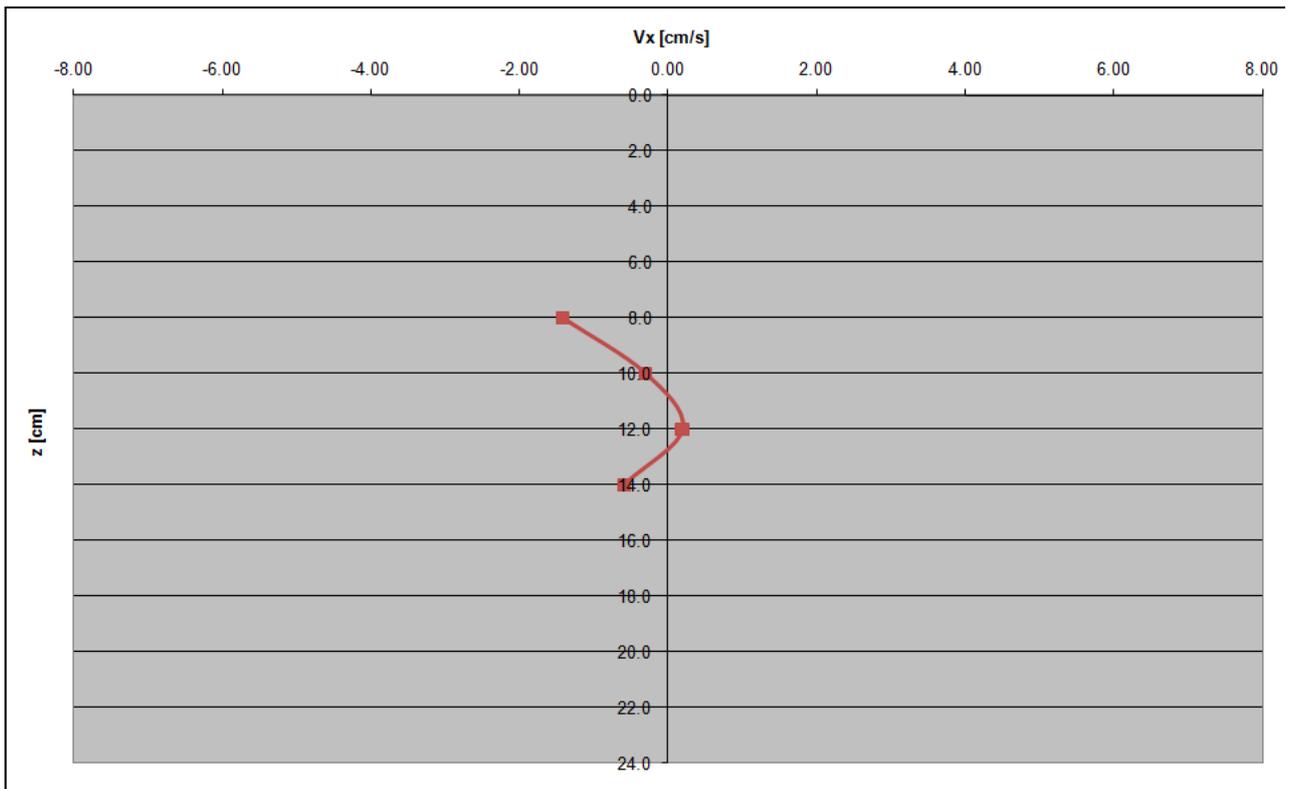
Durante le prove 3/1 e 3/5, caratterizzate da un valore al largo di altezza significativa e periodo di picco in scala modello rispettivamente pari a  $H_s=8,22$  cm –  $T_p=1,181$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  giorni) e  $H_s=19,03$  cm –  $T_p=1,989$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni), (in scala prototipo pari rispettivamente a  $H_s=2,47$  m –  $T_p=6,47$  s e  $H_s=5,71$  m –  $T_p=10,89$  s), sono stati eseguiti i rilievi correntometrici. Rispetto alle misure effettuate nella configurazione precedente, si sono effettuati rilievi anche in corrispondenza della nuova imboccatura del porto mediante un ulteriore correntometro ADV 3D in configurazione *down – looking*, investigando anche in questo caso una verticale ubicata all'incirca in mezzeria della suddetta nuova imboccatura. Nella sottostante tab.6.3.3.1 si riportano per tutte le verticali indagate il numero di punti di misura e la relativa distanza dal pelo libero.

Punto di misura	ADV 3D nuova imb. z [cm]	ADV 3D z [cm]	ADV 2D z [cm]
pos1	-14	-21	-07
pos2	-12	-19	-06
pos3	-10	-17	-04
pos4	-08	-15	-02
pos5		-13	
pos6		-11	
pos7		-09	
pos8		-07	

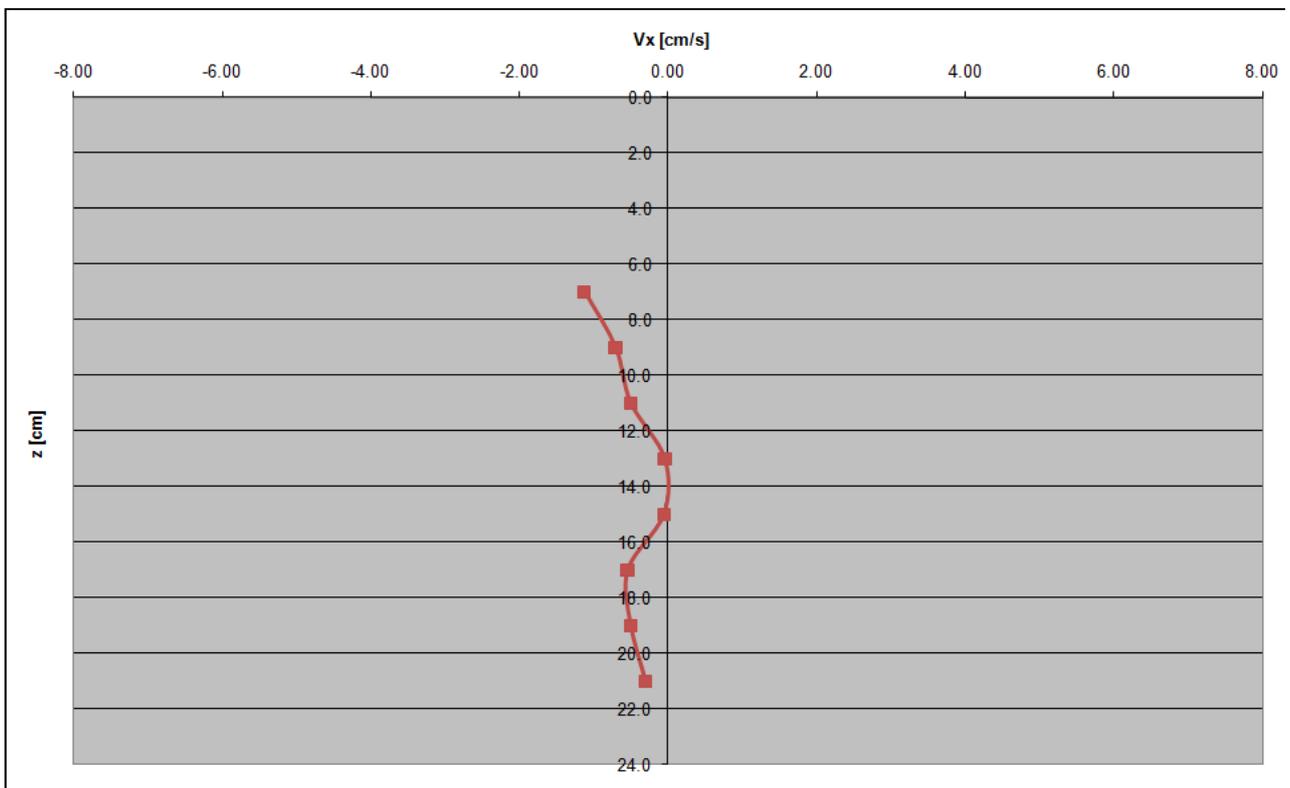
Tab.6.2.3.1: punti di misura investigati durante i rilievi correntometrici e relative distanza dal pelo libero.

Le misure sono state effettuate con una frequenza di campionamento di 25 Hz, con un numero totale di dati acquisiti per ciascun punto pari a 4.500. Per quanto riguarda la verticale relativa all'imboccatura principale (ADV 3D), non è stato possibile acquisire ulteriori punti verso il pelo libero in quanto l'agitazione ondosa, soprattutto con l'attacco ondosso con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni, era tale da provocare l'emersione dello strumento durante il passaggio dei cavi delle onde con conseguente interruzione della misura. In entrambi i casi gli strumenti sono stati orientati in maniera tale che la componente di velocità  $V_x$  fosse diretta nel verso di entrata attraverso la imboccatura (segno positivo) o uscita (segno negativo).

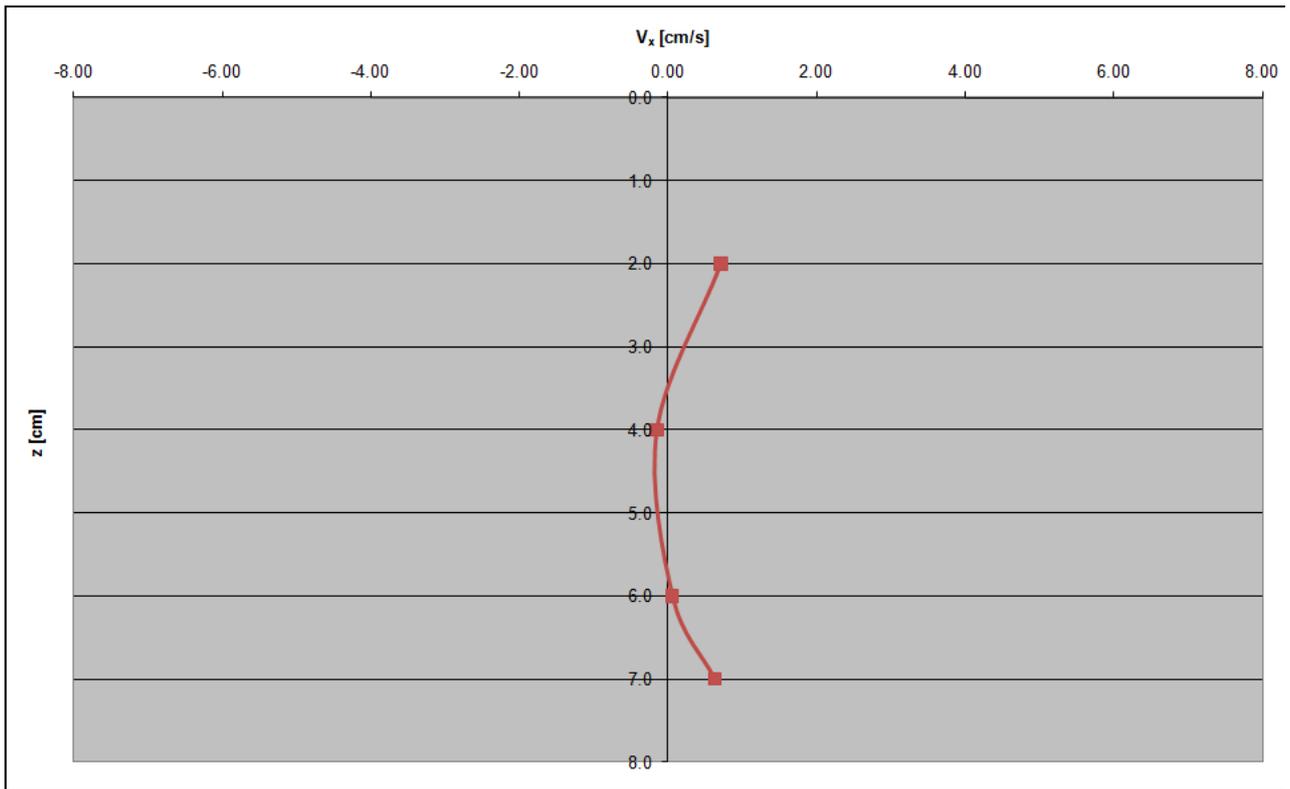
Nelle successive figure si riportano i profili verticali della componente media di velocità  $V_x$  ottenuti effettuando per ciascun punto di misura una semplice media aritmetica dei 4.500 dati acquisiti.



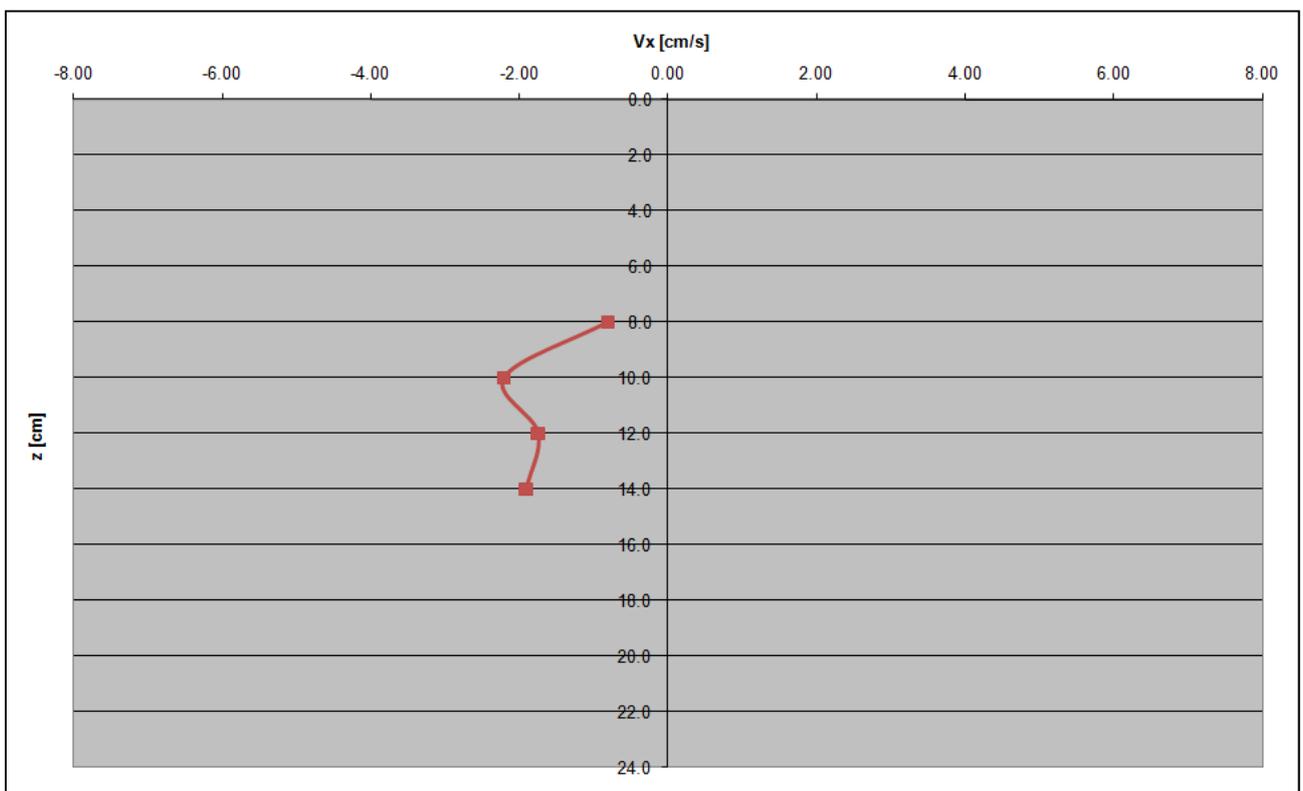
**Fig.6.3.3.1: profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (nuova imboccatura principale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorni); i valori sono in scala modello.**



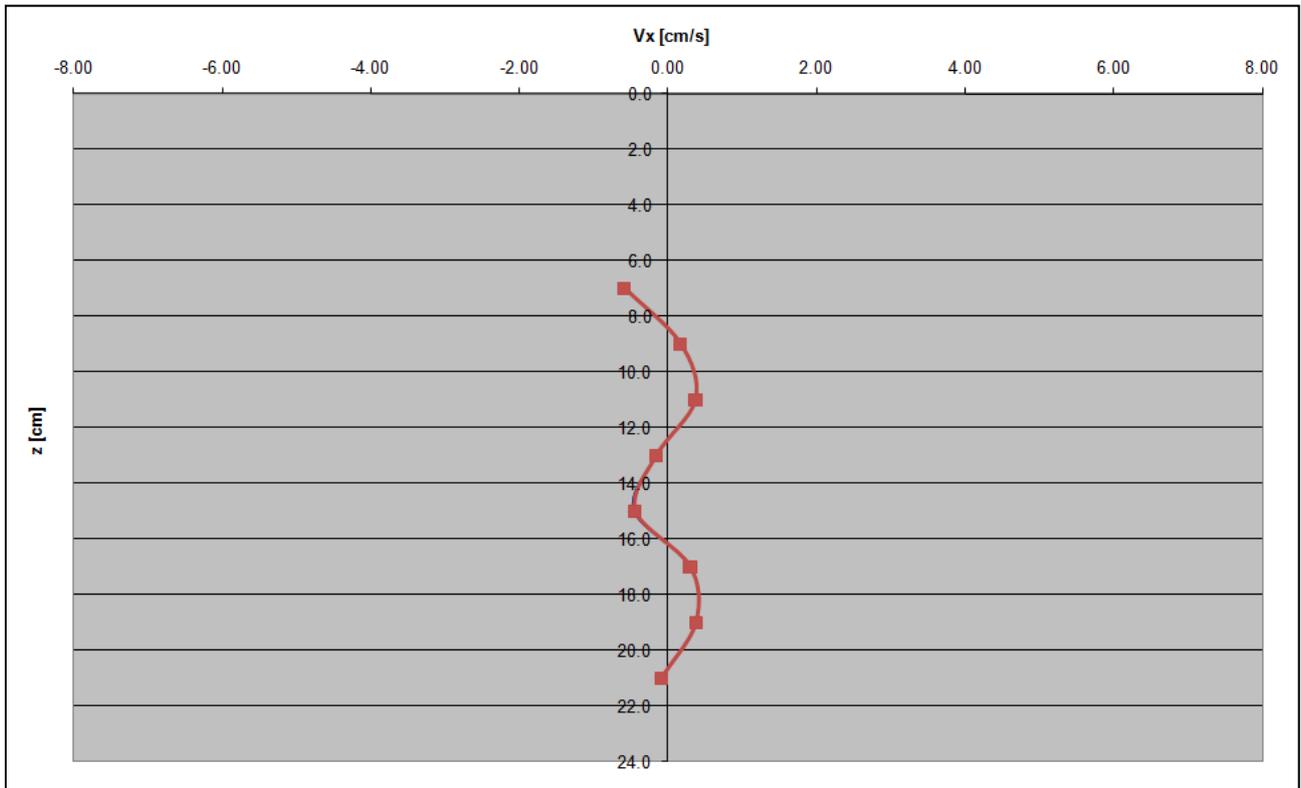
**Fig.6.3.3.2: profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (vecchia imboccatura principale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorni); i valori sono in scala modello.**



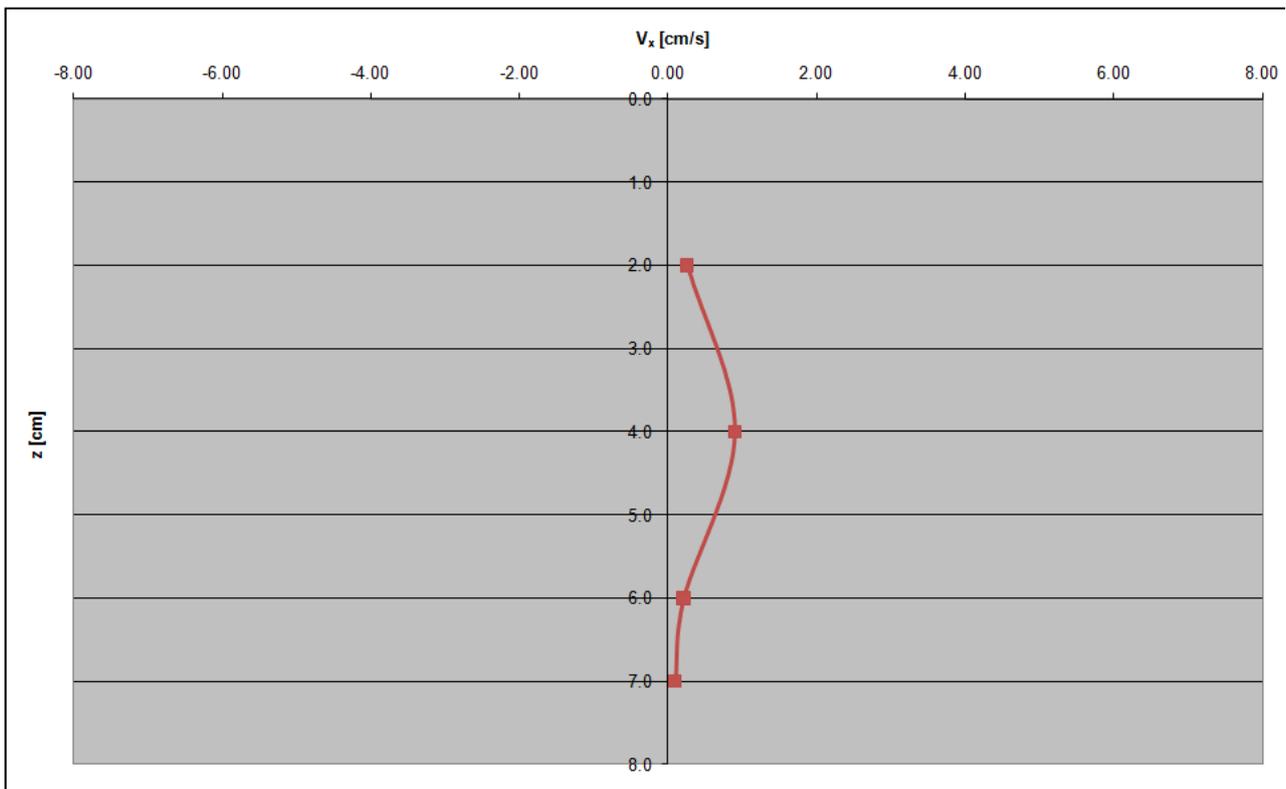
**Fig.6.3.3.3:** profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura parte più interna del bacino portuale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorni); i valori sono in scala modello.



**Fig.6.3.3.4: profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (nuova imboccatura principale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni); i valori sono in scala modello.**



**Fig.6.2.3.3: profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (vecchia imboccatura principale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni); i valori sono in scala modello.**



**Fig.6.2.3.4:** profilo verticale della componente di velocità  $V_x$  (imboccatura parte più interna del bacino portuale; onda con tempo di ritorno  $T_R = 50$  anni); i valori sono in scala modello.

Anche in questo caso, utilizzando i profili verticali della componente media di velocità  $V_x$  relativi alla nuova imboccatura principale, si sono costruiti i solidi di portata al fine di effettuare una stima dei tempi di ricambio idrico all'interno del bacino portuale. Non avendo la misura completa fino al pelo libero per quanto prima detto, si è fatta l'ipotesi di bilanciamento dei flussi in entrata con quelli in uscita. Dividendo il volume di acqua racchiuso nel bacino portuale, nell'ipotesi di livello pari al livello medio mare, per il valore di portata così calcolato è possibile ottenere una stima del tempo di ricambio.

Nella sottostante tab.6.3.3.2 si riportano i valori di portata in scala modello (il segno meno indica in questo caso portata uscente), il volume dello specchio acqueo contenuto nel bacino portuale in scala modello ipotizzando il livello pari a quello medio mare, il tempo di ricambio sia in scala modello che in scala prototipo.

<b>Attacco ondosato con <math>T_R = 5</math> giorni</b>			
$Q_{tot}$ [cm <sup>3</sup> /s]	W [cm <sup>3</sup> ]	$T_{ric}$ modello [min]	$T_{ric}$ prototipo [ore]
-1.024,37	10.500.000	107,84	15,60
<b>Attacco ondosato con <math>T_R = 50</math> anni</b>			
$Q_{tot}$ [cm <sup>3</sup> /s]	W [cm <sup>3</sup> ]	$T_{ric}$ modello [min]	$T_{ric}$ prototipo [ore]

-2.939,43	10.500.000	59,54	5,43
-----------	------------	-------	------

**Tab.6.3.3.2: stima del tempo di ricambio del bacino portuale con riferimento agli attacchi ondosi con tempo di ritorno  $T_R = 5$  giorno e  $T_R = 50$  anni.**

## 7 Considerazioni e conclusioni

Come si è detto nel par. 6 e successivi, le prove effettuate sono state suddivise in tre Gruppi Omogenei (“Gruppo 1”; “Gruppo 2”; “Gruppo 3”), relativi ad altrettante configurazioni sperimentali esaminate, che si differenziano per la diversa configurazione delle opere portuali e per la diversa angolazione dei fronti d’onda generati.

**Modello 3D – Gruppo 1** - Configurazione attuale delle opere con fronti d’onda provenienti da 53,5° N: studio dell’agitazione ondosa all’interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all’interno che all’esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza dell’imboccatura dell’avanporto e dell’imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

**Modello 3D – Gruppo 2** - Configurazione attuale delle opere con fronti d’onda provenienti da 93,5° N: studio dell’agitazione ondosa all’interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all’interno che all’esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza dell’imboccatura dell’avanporto e dell’imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

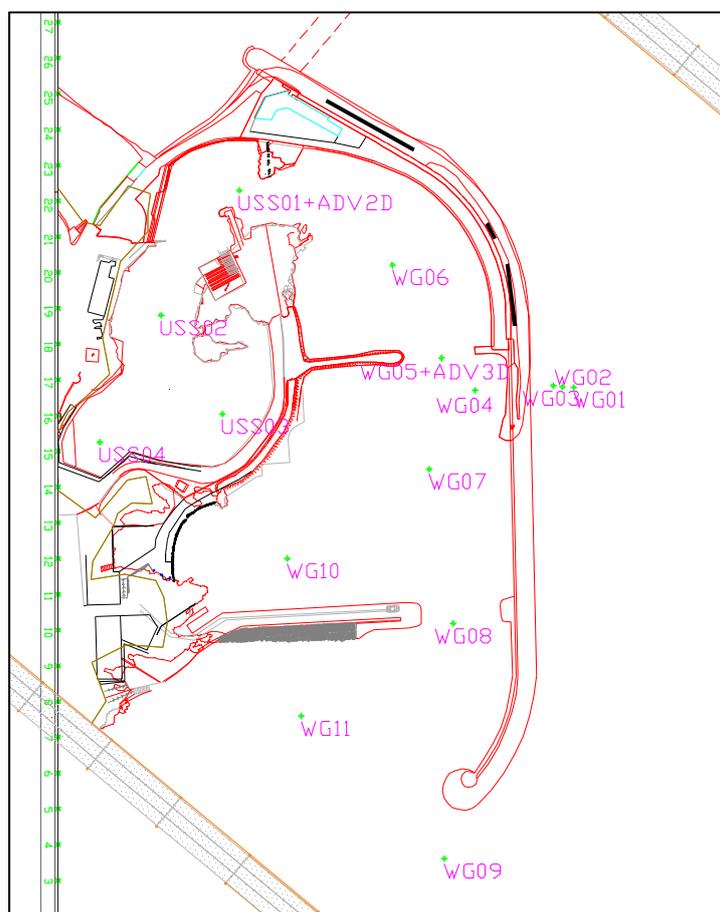
**Modello 3D – Gruppo 3** - Configurazione di progetto delle opere con fronti d’onda provenienti da 93,5° N: studio dell’agitazione ondosa all’interno del bacino portuale con effettuazione di rilievi del moto ondoso in diversi punti ubicati sia all’interno che all’esterno del bacino portuale, rilievi correntometrici in corrispondenza della nuova imboccatura dell’avanporto e dell’imboccatura del bacino portuale interno; studio del comportamento idraulico della barriera foranea di sopraflutto e realizzazione di fotografie ed osservazioni sulla stabilità.

Di seguito si riportano alcune considerazioni sintetiche sui risultati delle prove effettuate con le diverse configurazioni, per quanto riguarda l’attenuazione dell’agitazione ondosa all’interno della zona portuale, i tempi di ricambio idrico, l’overtopping dei moli di sopraflutto e sottoflutto, la loro stabilità.

## 7.1 Moto ondoso

Nelle successive figg. 7.1.1, 7.1.2, 7.1.3, 7.1.4, 7.1.5, 7.1.6 e 7.1.7 si riportano i valori di altezza d'onda significativa in scala prototipo misurati in corrispondenza dell'attuale avamposto (sonde WG04, WG05 e WG06) e della parte più interna del porto (sonde USS01, USS02, USS03 e USS04) con riferimento alle prove del Gruppo 2 (configurazione attuale del porto con fronti d'onda provenienti da 93,5° N: istogrammi azzurri) e del Gruppo 3 (configurazione di progetto con fronti d'onda provenienti da 93,5° N: istogrammi rossi) per tutti gli attacchi ondosi simulati, al fine di valutare l'effetto delle nuove opere di progetto sull'agitazione ondosa interna al bacino portuale.

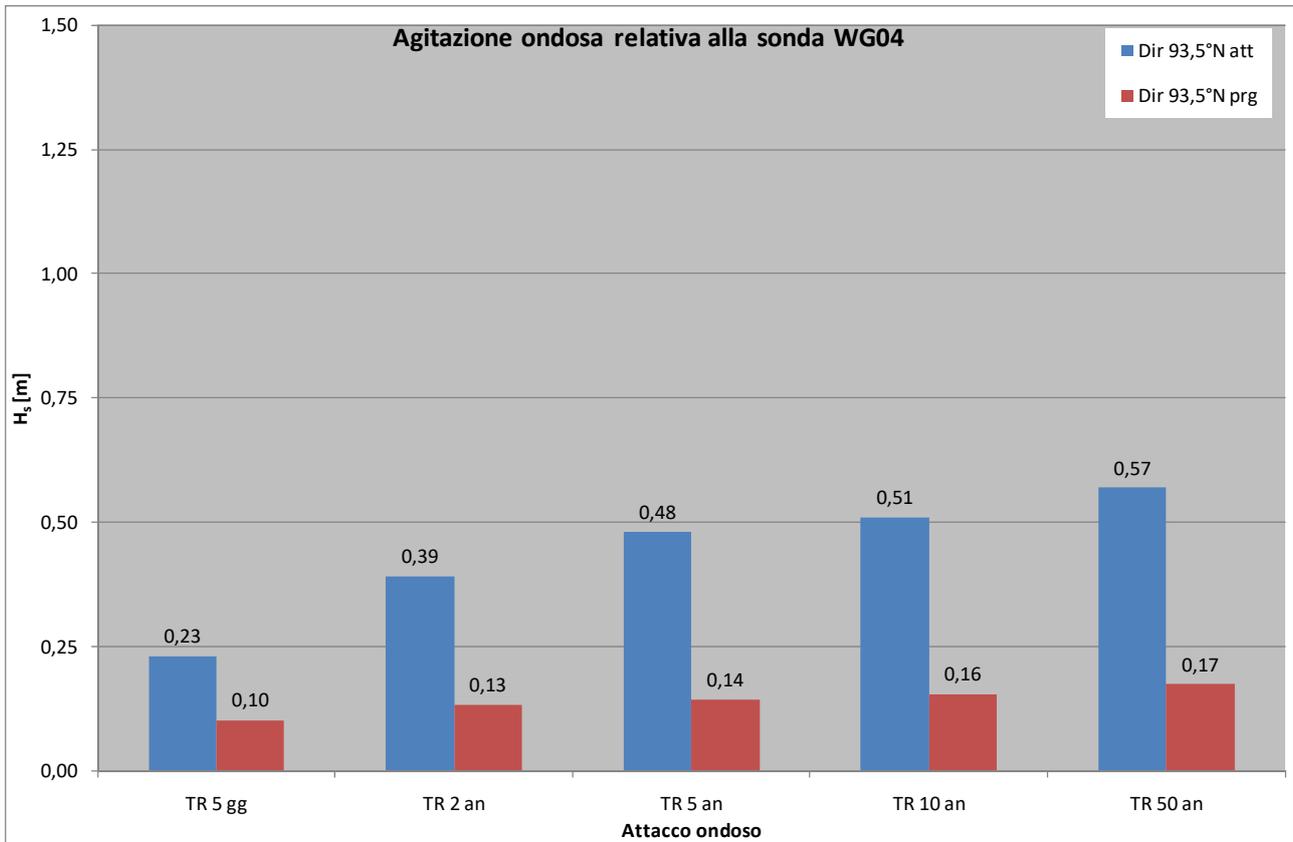
Nella sottostante fig. 7.1.1 si riporta nuovamente la planimetria del porto con la ubicazione e la numerazione delle sonde utilizzate al fine di agevolare la lettura dei confronti proposti nelle successive immagini.



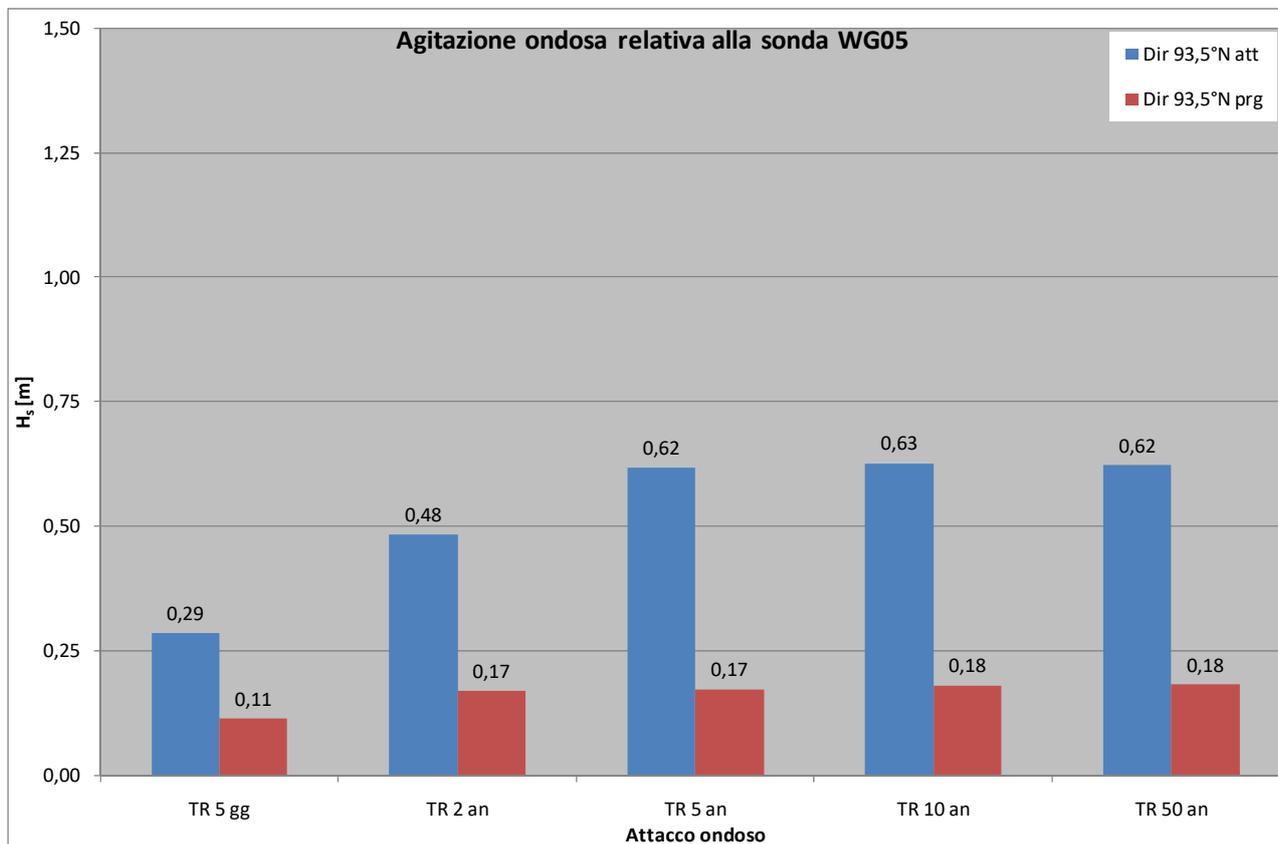
**Fig. 7.1.1: planimetria del porto con l'ubicazione e numerazione delle sonde di misura.**

Da un'analisi delle figure è possibile notare come la riduzione dell'agitazione ondosa, con riferimento all'attuale avamposto (sonde WG04, WG05 e WG06), vari, in funzione dei diversi attacchi ondosi simulati, da un minimo del 47,42% ad un massimo del 71,92%, mentre, con

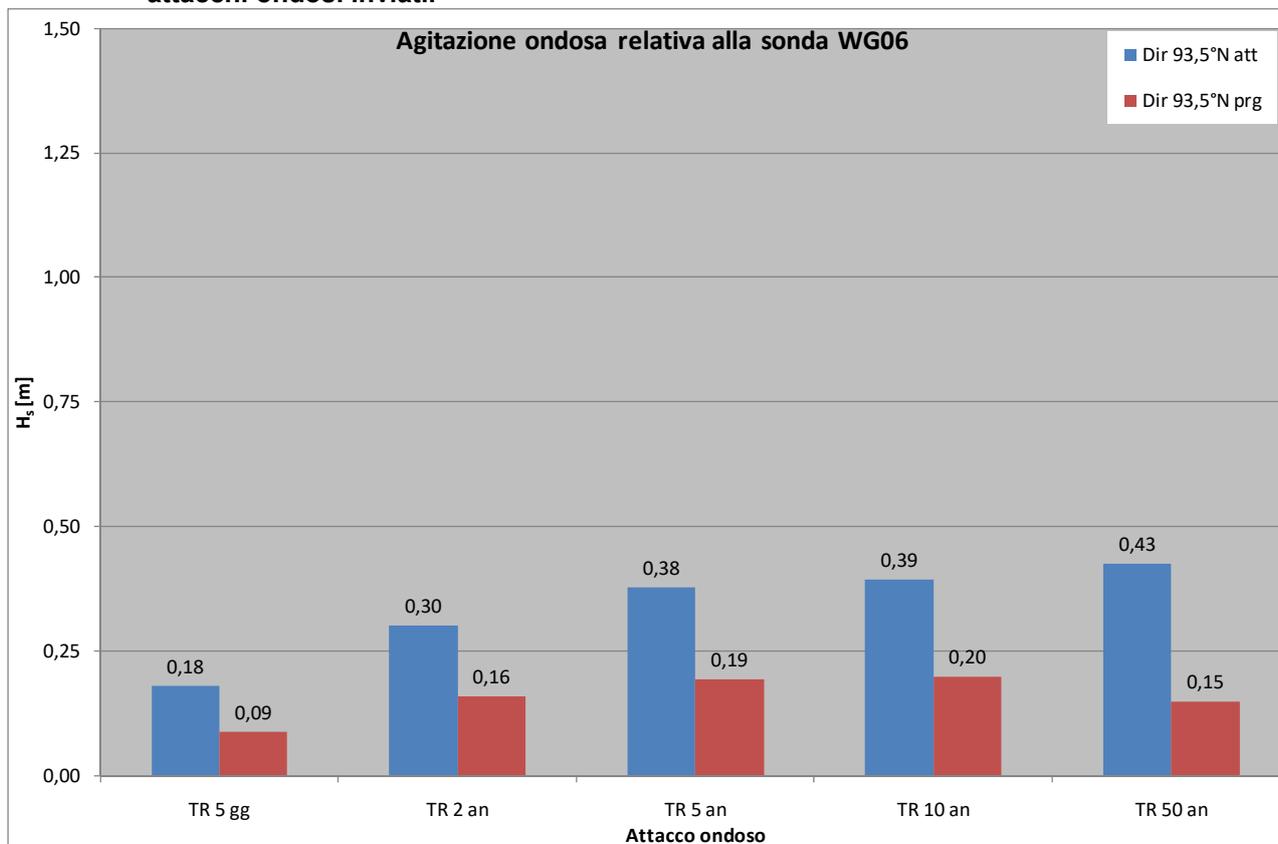
riferimento alla parte più interna del porto (sonde USS01, USS02, USS03 e USS04), essa risulta essere variabile da un minimo del 41,79% ad un massimo del 81,20%, sempre in funzione dei diversi attacchi ondosi simulati.



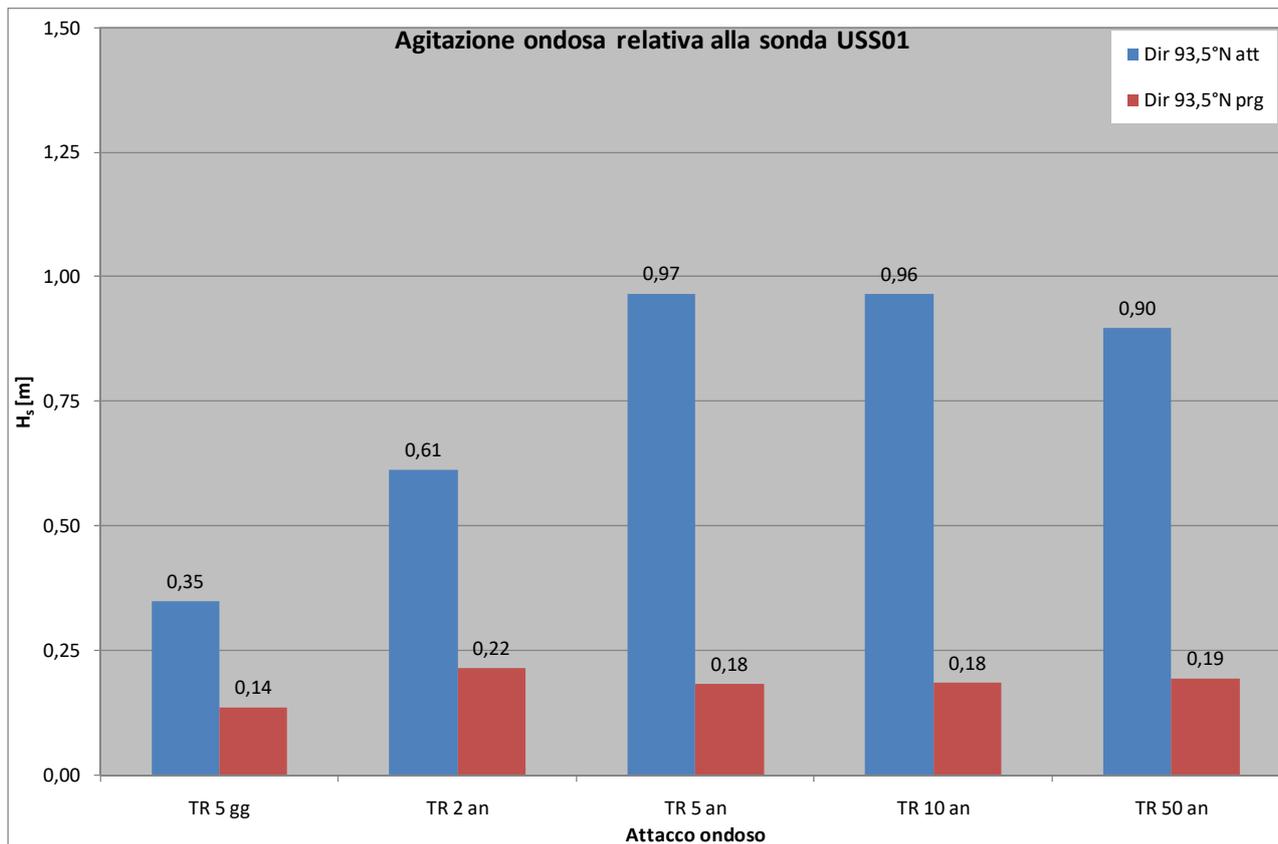
**Fig. 7.1.2: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura WG04 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**



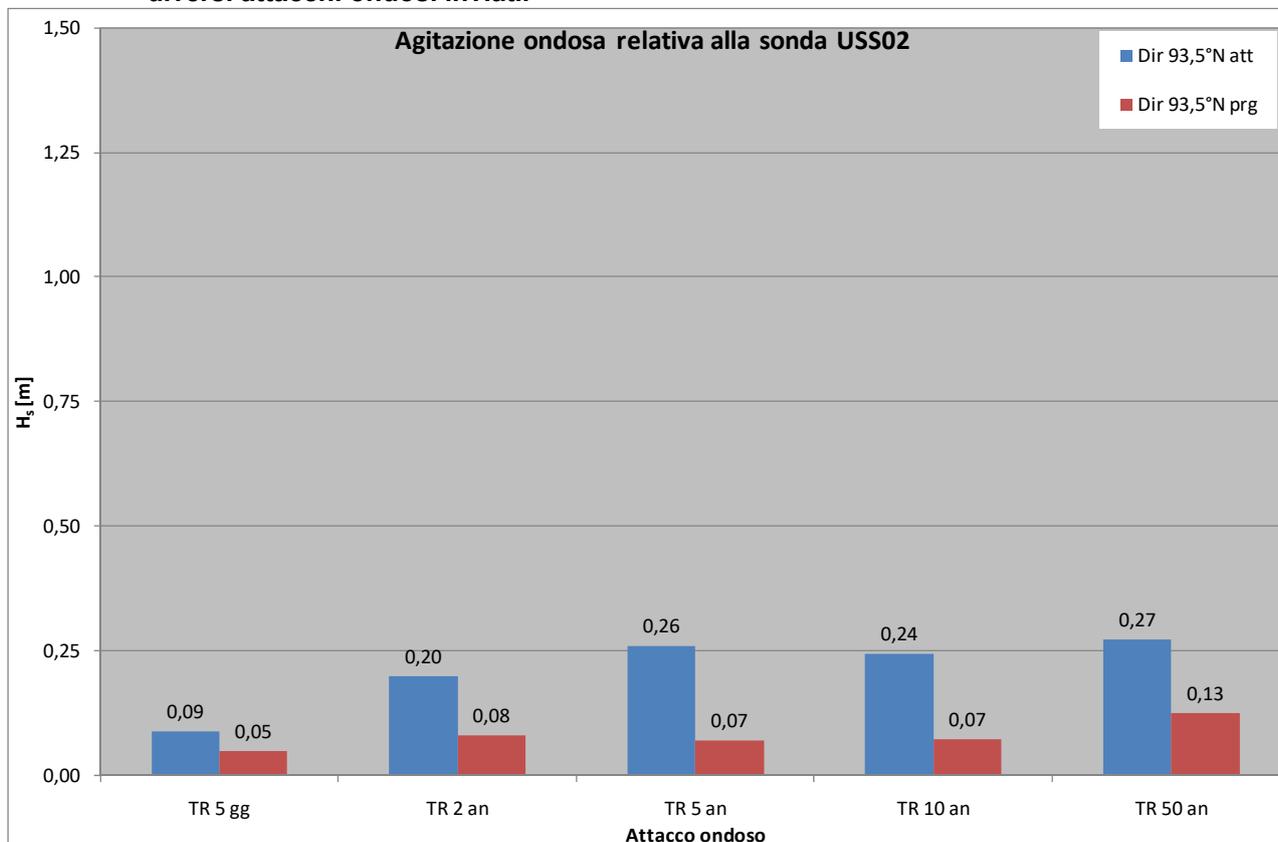
**Fig. 7.1.3:** confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura WG05 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.



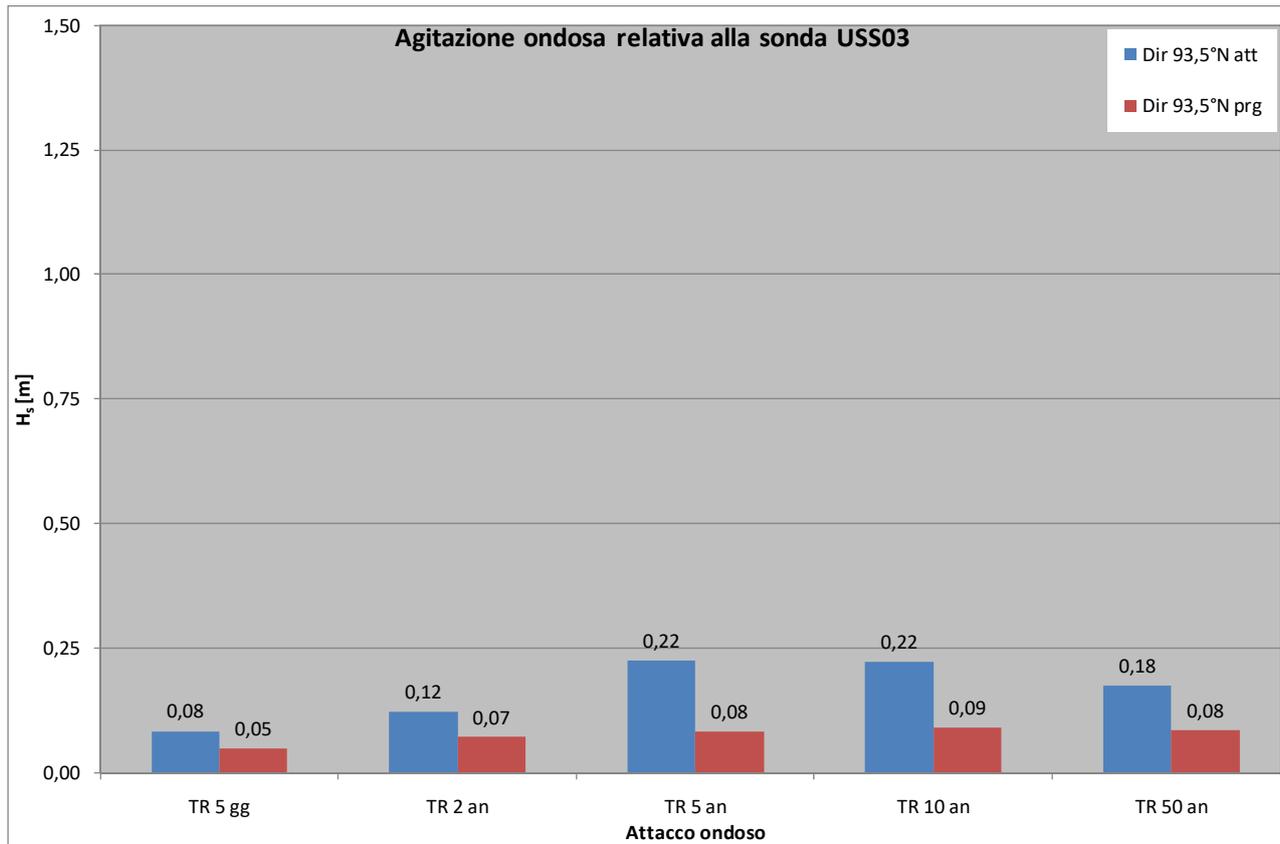
**Fig. 7.1.4:** confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura WG06 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.



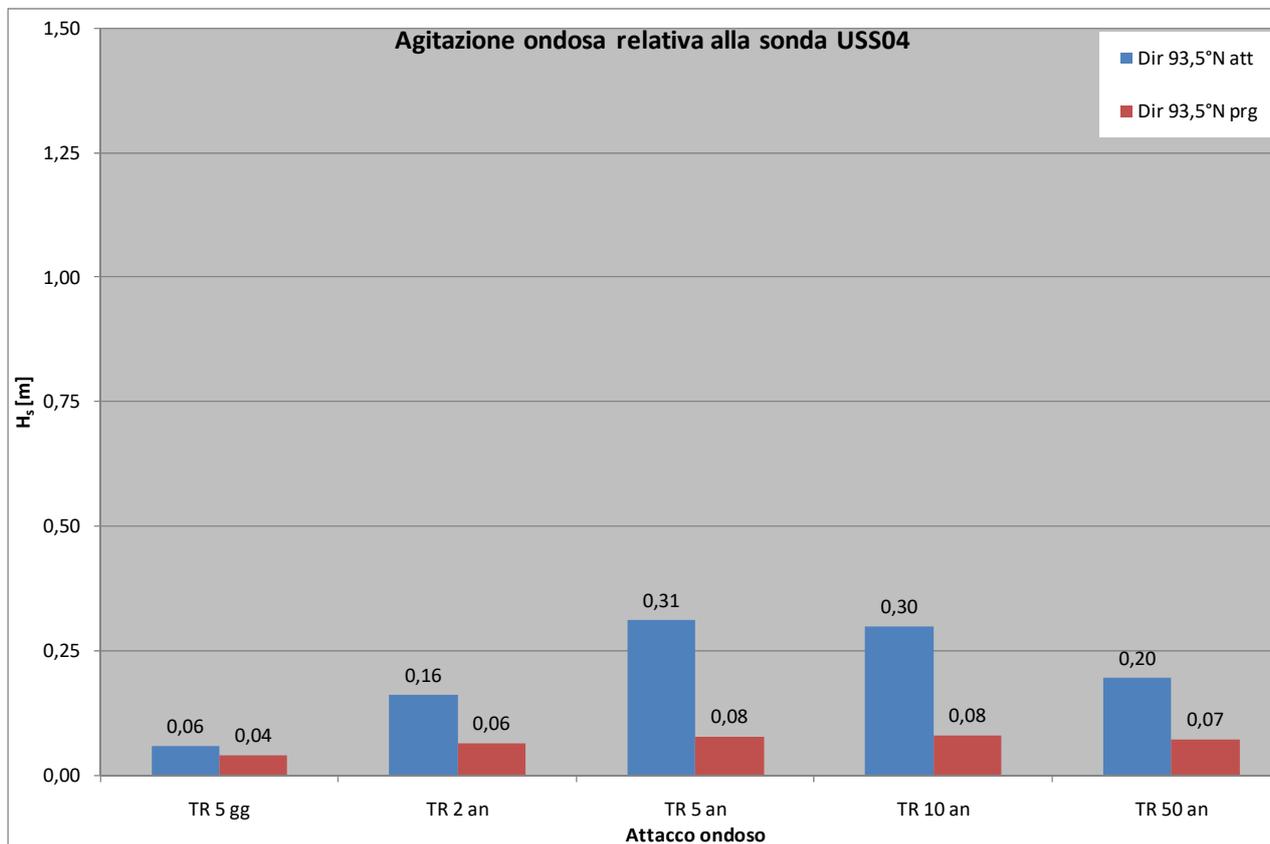
**Fig. 7.1.5: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura USS01 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**



**Fig. 7.1.6: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura USS02 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**



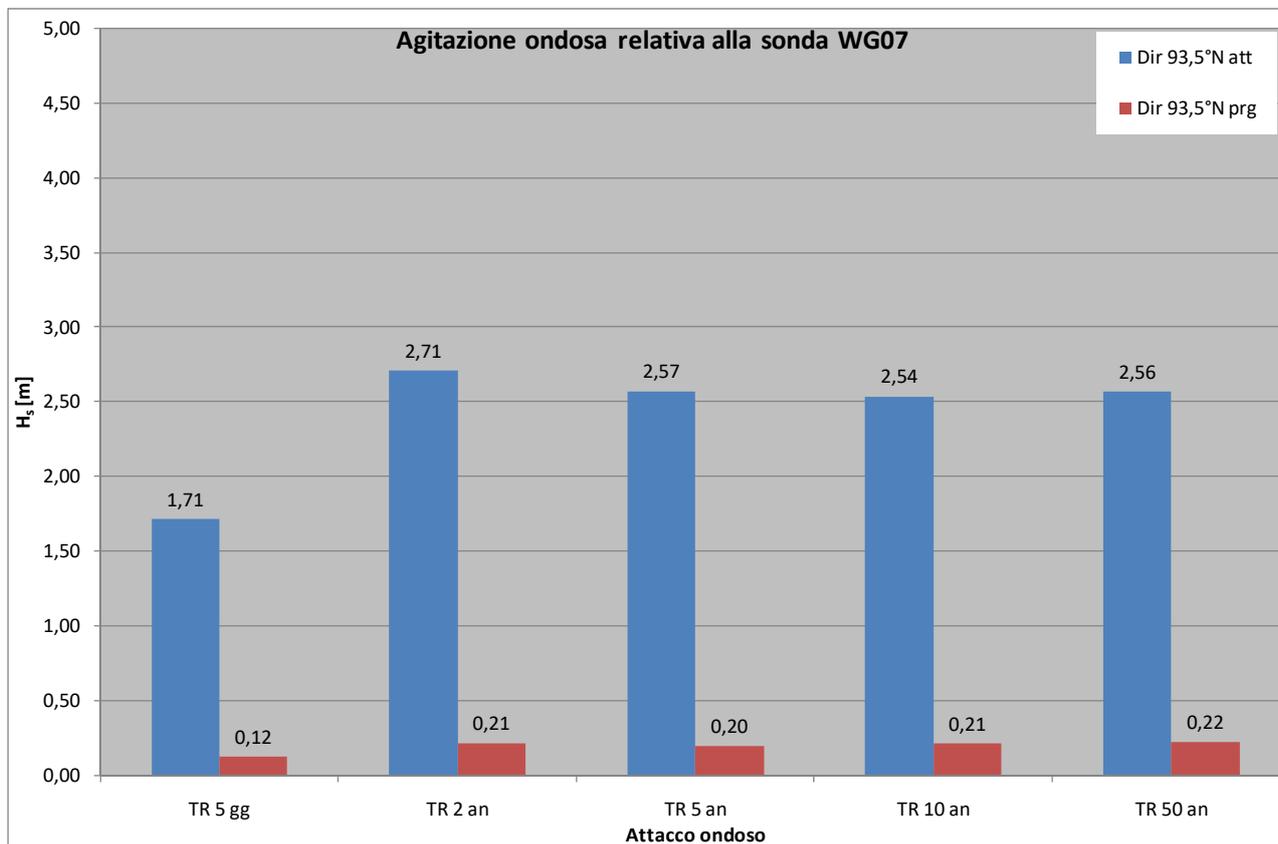
**Fig. 7.1.7: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura USS03 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**



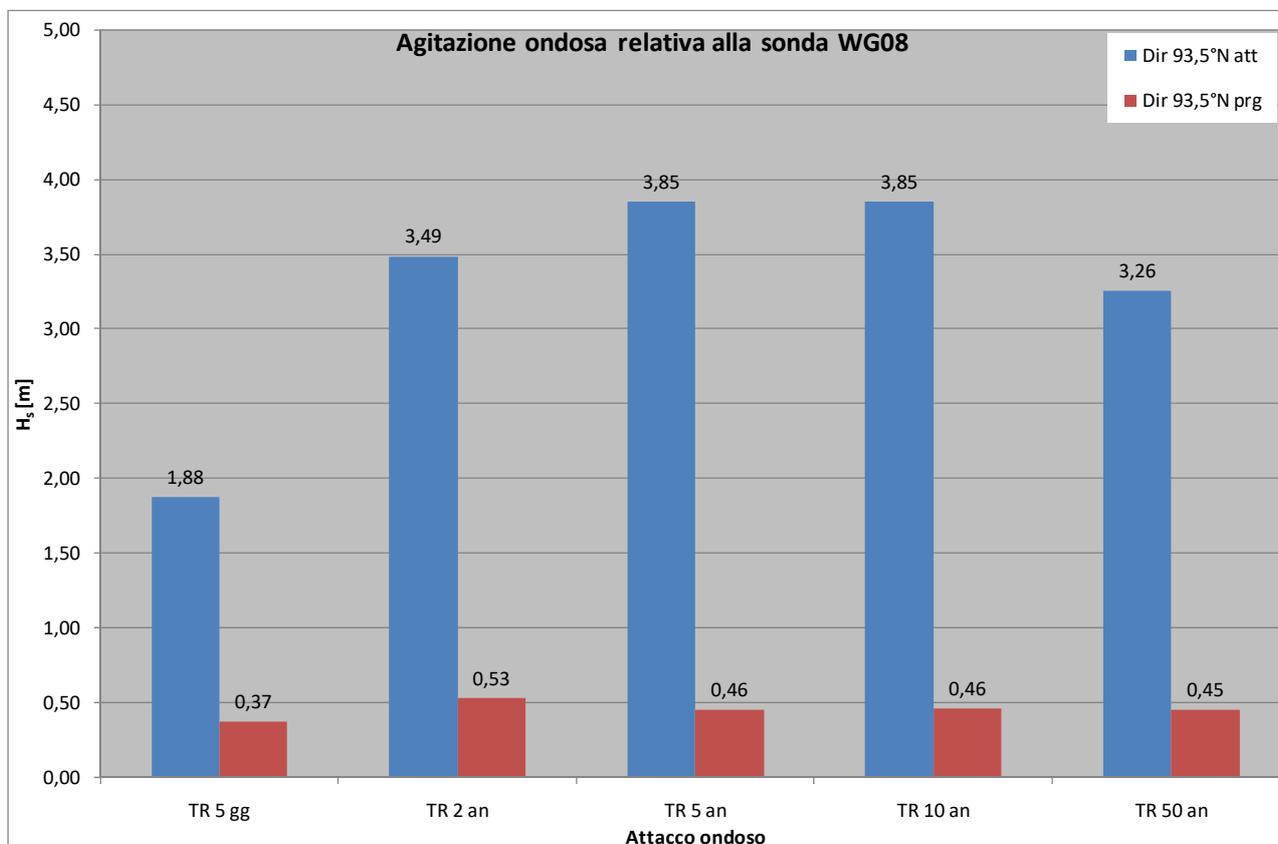
**Fig. 7.1.8: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura USS04 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**

Inoltre, al fine di valutare l'effetto di protezione offerto dal prolungamento del molo di sopraflutto sul nuovo avamposto, oggi direttamente esposto ai diversi attacchi ondosi incidenti il paraggio, si riportano, nelle successive figg. 7.1.8, 7.1.9, 7.1.10 e 7.1.11, i valori di altezza d'onda significativa in scala prototipo misurati in corrispondenza delle sonde ubicate in tale zona (sonde WG07, WG08, WG10 e WG11) sempre con riferimento alle prove del Gruppo 2 (configurazione attuale del porto con fronti d'onda provenienti da 93,5° N: istogrammi azzurri) e del Gruppo 3 (configurazione di progetto con fronti d'onda provenienti da 93,5° N: istogrammi rossi) per tutti gli attacchi ondosi simulati.

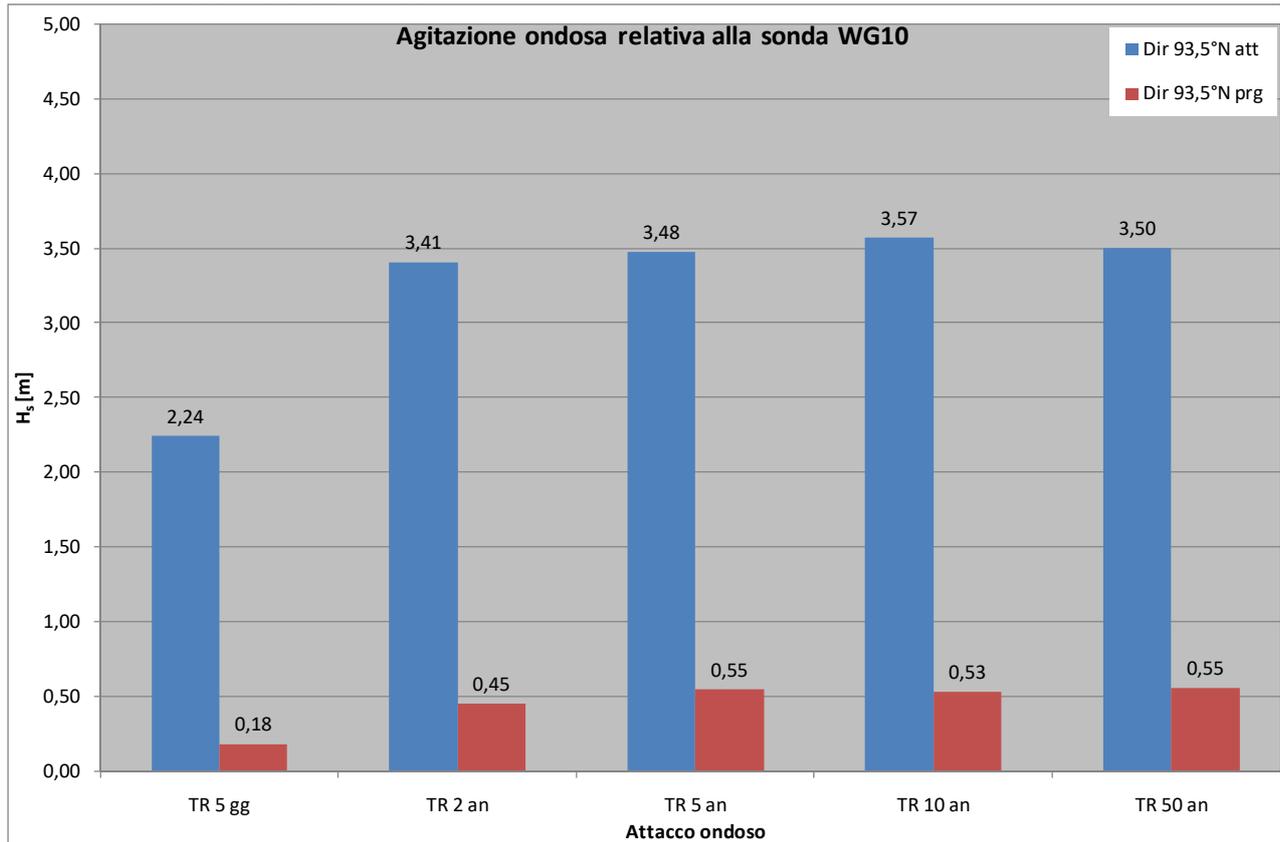
Da un'analisi delle figure è possibile notare come la riduzione dell'agitazione ondosa vari da un minimo del 34,00% ad un massimo del 92,38%, sempre in funzione dei diversi attacchi ondosi simulati.



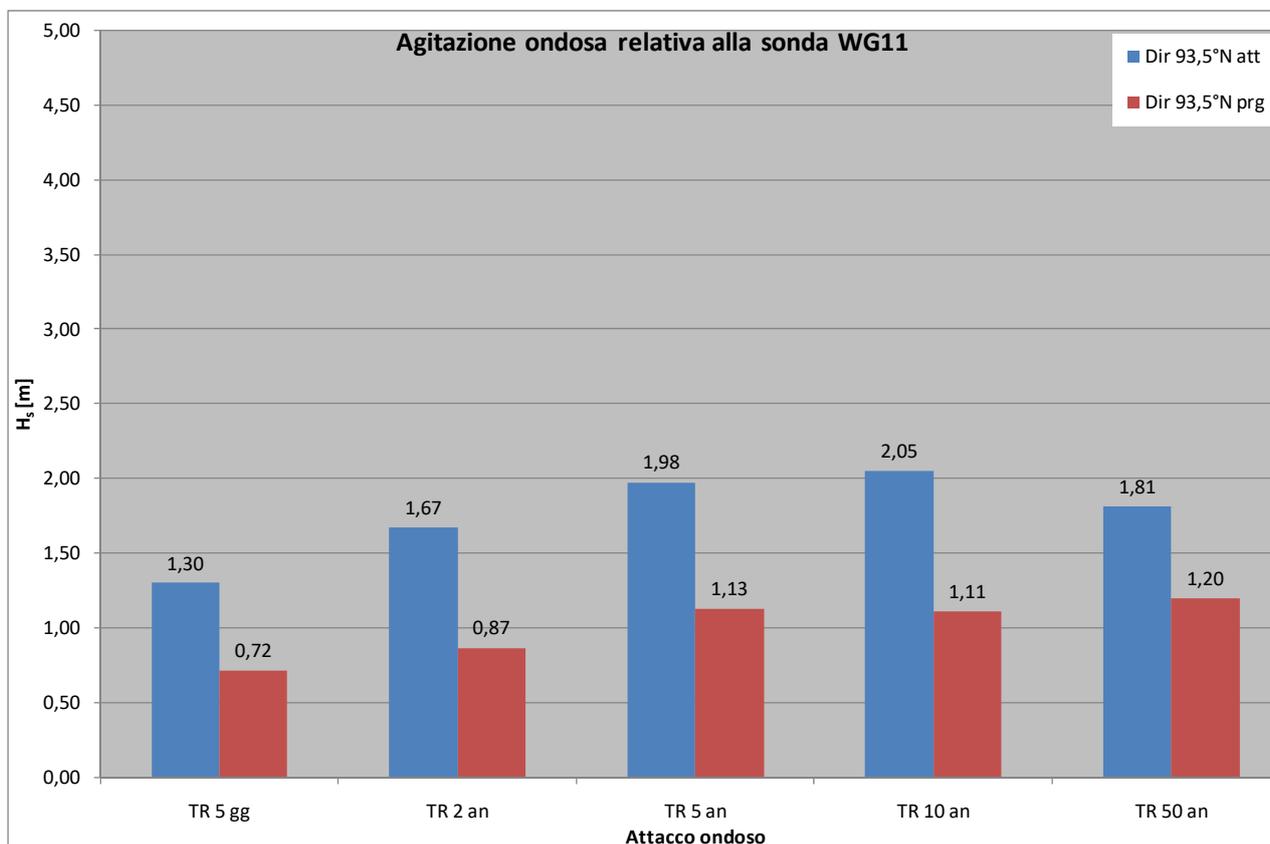
**Fig. 7.1.9: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura WG07 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**



**Fig. 7.1.10: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura WG08 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**



**Fig. 7.1.11: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura WG10 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**



**Fig. 7.1.12: confronto tra le altezze significative (in scala prototipo) misurate in corrispondenza della sonda di misura WG11 con riferimento alle prove del Gruppo 2 e del Gruppo 3 per i diversi attacchi ondosi inviati.**

L'Associazione Internazionale Permanente dei Congressi di Navigazione (A.I.P.C.N.) ha sviluppato un documento denominato *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*, approvato dalla III Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. con voto n. 212 del 27/02/2002, in cui sono contenute le prescrizioni con cui redigere i progetti di cui al D.M. del 14 aprile 1998 (G.U. n. 98 del 29 aprile 1998) che riguarda la "Approvazione dei requisiti per la redazione dei progetti da allegare ad istanze di concessione demaniale marittima per la realizzazione di strutture dedicate alla nautica da diporto".

Nelle Raccomandazioni tecniche i valori raccomandati della altezza d'onda significativa ammissibile all'interno del porto sono:

- condizione di "comfort" (particolarmente importante nel caso di porti in cui si prevede la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni):  $H_s = 0,15$  m per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;
- condizione di "sicurezza":  $H_s = 0,30$  m per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;
- condizione "limite":  $H_s = 0,50$  m per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

Da un esame delle figure precedentemente riportate è possibile osservare come, relativamente all'attacco ondoso con tempo di ritorno pari a 5 giorni (TR 5 gg), nella configurazione di progetto in nessuno punto indagato in corrispondenza dell'avamposto e della parte più interna del porto venga superato il valore di comfort  $H_s = 0,15$  m; solo in corrispondenza della parte interna più prossima alla nuova imboccatura del futuro avamposto (sonda WG10) si registra un valore di altezza significativa  $H_s = 0,18$  m.

Per quanto riguarda l'attacco ondoso con tempo di ritorno pari a 5 anni (TR 5 an), da un esame delle figure è possibile osservare come anche in questo caso il valore di sicurezza  $H_s = 0,30$  m non venga mai superato in nessuno dei punti investigati, eccezion fatta per la parte interna più prossima alla nuova imboccatura del futuro avamposto (sonda WG10), dove si registra un valore di altezza significativa  $H_s = 0,55$  m.

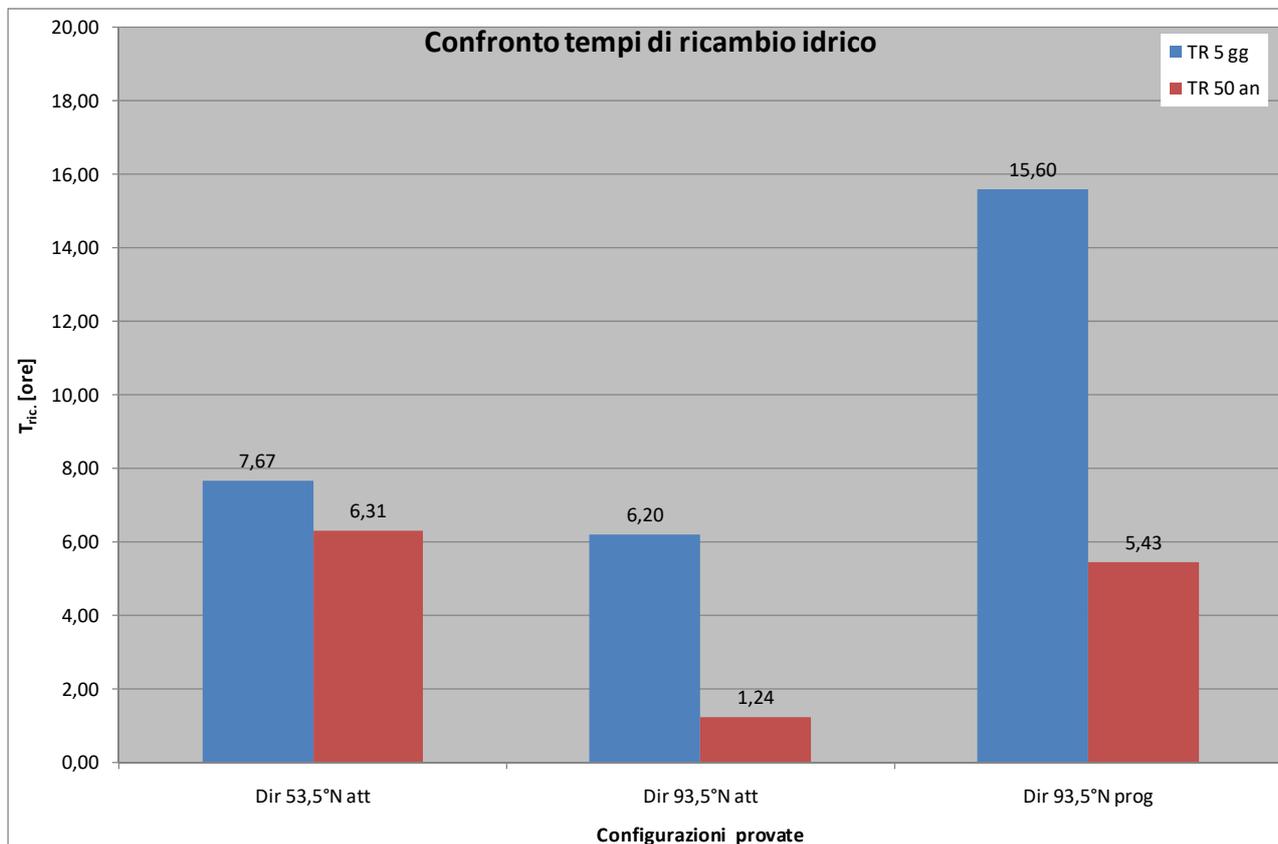
Infine, con riferimento all'attacco ondoso con tempo di ritorno pari a 50 anni (TR 50 an), da un esame delle figure è possibile evincere come anche in questa condizione il valore limite  $H_s = 0,50$  m non venga mai superato in nessuno dei punti investigati, eccezion fatta per la parte interna più prossima alla nuova imboccatura del futuro avamposto (sonda WG10), dove si registra un valore di altezza significativa  $H_s = 0,55$  m.

## **7.2 Correnti**

Nella sottostante fig.7.2.1 si riportano i tempi di ricambio idrico del bacino portuale in scala prototipo con riferimento alle tre configurazioni portuali esaminate e relativamente agli attacchi ondosi con tempo di ritorno di 5 giorni (TR 5 gg) e di 50 anni (TR 50 an), per i quali sono stati effettuati i rilievi correntometrici.

Da un esame della figura è possibile osservare come nella configurazione attuale delle opere le ondazioni provenienti da  $93,5^\circ\text{N}$  determinino tempi di ricambio del bacino portuale inferiori a quelli relativi alle ondazioni provenienti da  $53,5^\circ\text{N}$ , in quanto l'attuale imboccatura portuale è più esposta ai fronti d'onda da  $93,5^\circ\text{N}$ , i quali determinano correnti all'imboccatura più intense.

La realizzazione delle opere di progetto, determinando di fatto quasi un raddoppio dello specchio acqueo racchiuso all'interno del bacino portuale, ha come conseguenza un aumento dei tempi di ricambio; tale aumento, a parità di provenienza delle ondazioni ( $93,5^\circ\text{N}$ ) risulta più marcato nel caso di attacchi ondosi con tempo di ritorno di 5 giorni (TR 5 gg) essendo le correnti indotte dal moto ondoso meno intense rispetto al caso di attacchi ondosi con tempo di ritorno di 50 anni (TR 50 an).



**Fig. 7.2.1: confronto tra i diversi tempi di ricambio idrico in scala prototipo per le diverse configurazioni testate e con riferimento agli attacchi ondosi caratterizzati dal più piccolo e dal più grande tempo di ritorno tra quelli inviati sul modello.**

### 7.3 Overtopping

Sono state effettuate delle osservazioni qualitative sul fenomeno di overtopping sia della barriera foranea di sopraflutto che di sottoflutto per le diverse configurazioni studiate e per tutti gli attacchi ondosi inviati sul modello.

Con riferimento al molo di sopraflutto, nella configurazione di progetto si è osservato che, a partire dall'attacco ondoso con tempo di ritorno di 5 anni (TR 5 an), iniziano fenomeni di sormonto della struttura, confinati solo alle onde più elevate dell'attacco ondoso. Tali fenomeni, al crescere del contenuto energetico dell'attacco ondoso inviato sul modello, diventano via via più frequenti e consistenti in termini di quantità d'acqua tracimata. Peraltro, tale comportamento si è riscontrato anche nella configurazione attuale delle opere.

Per quanto concerne il nuovo molo di sottoflutto, la prosecuzione del muro paraonde oltre la radice del molo stesso fino alla zona dove è ubicato lo scalo di alaggio, eseguita su richiesta dei progettisti, si è dimostrata certamente efficace in quanto, in sua assenza, tale zona sarebbe interessata da notevoli allagamenti anche con gli attacchi ondosi di piccola entità. Tuttavia, si è osservato che, in occasione degli attacchi ondosi più alti (TR 10 an e TR 50 an), si manifestano dei locali scavalcamenti del suddetto muro paraonde da parte delle onde (si veda la fig.7.3.1).



**Fig. 7.3.1: scavalco, da parte delle onde più alte, della parte centrale della prosecuzione del muro paraonde del molo di sottoflutto (attacco ondosu TR 50 anni).**

Pertanto, in fase esecutiva, è auspicabile che tale muro venga ulteriormente alzato e/o venga posta in opera una scogliera radente ad ulteriore difesa della zona.

## **7.4 Stabilità**

Sulla base di osservazioni puramente qualitative del fenomeno, lo studio effettuato non ha mostrato particolari criticità relativamente alla stabilità idraulica delle opere foranee sia con riferimento alla configurazione attuale delle opere che di progetto.

La mantellata del molo di sopraflutto, costituita da cubi Antifer in cls., ha mostrato alcuni isolati fenomeni di instabilità verificatisi inizialmente con i primi attacchi ondosi generati immediatamente dopo la realizzazione del modello. Tale circostanza è imputabile al fatto che la struttura ha subito un assestamento che ne ha determinato la successiva stabilità.

Per quanto riguarda invece la mantellata del molo di sottoflutto, non si sono verificati fenomeni di instabilità nella configurazione attuale delle opere, per la quale sono stati utilizzati massi naturali di 2<sup>a</sup> categoria. Nella configurazione di progetto tale stabilità è apparsa ancor più evidente in considerazione del fatto che la mantellata è stata realizzata con massi di 3<sup>a</sup> categoria.

## 8.1 Ulteriori prove effettuate e loro analisi

Durante l'esecuzione delle prove relative al "Gruppo 3", ossia quelle inerenti alla configurazione di progetto delle opere con fronti d'onda provenienti da  $93,5^\circ$  N, in corrispondenza del bacino antistante la zona di ubicazione della gru mobile da 150 tonn, in adiacenza alla radice del nuovo molo di sottoflutto, si sono osservati visivamente valori dell'agitazione ondosa più elevati rispetto a quelli misurati nelle zone adiacenti in corrispondenza del nuovo avamposto.

Pertanto, al fine di meglio indagare su quanto osservato visivamente, si è deciso di effettuare ulteriori misurazioni dell'agitazione ondosa ubicando, nella zona antistante il suddetto bacino, una sonda di misura del tipo ultrasonica ed effettuando acquisizioni di moto ondoso per tutti e cinque gli attacchi ondosi relativi alla suddetta configurazione.

Nella presente relazione vengono illustrati i risultati di tali ulteriori prove.

Le metodologie utilizzate per le misure sono identiche a quelle utilizzate nelle prove già svolte e ampiamente descritte nella Relazione Finale, così come le caratteristiche della strumentazione utilizzata.

Nel seguito si riportano i risultati delle ulteriori misure di moto ondoso effettuate nella zona antistante l'ubicazione della gru mobile da 150 tonn.

### 8.1.1 Prove Modello 3D – Gruppo 3. Agitazione ondosa interna

Sono state ripetute le prove 3/1, 3/2, 3/3, 3/4 e 3/5, caratterizzate da un valore al largo di altezza significativa e periodo di picco in scala modello rispettivamente pari a  $H_s=8,22$  cm –  $T_p=1,181$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  giorni),  $H_s=13,12$  cm –  $T_p=1,532$  s (tempo di ritorno  $T_R=2$  anni),  $H_s=14,73$  cm –  $T_p=1,746$  s (tempo di ritorno  $T_R=5$  anni),  $H_s=15,94$  cm –  $T_p=1,746$  s (tempo di ritorno  $T_R=10$  anni),  $H_s=19,03$  cm –  $T_p=1,989$  s (tempo di ritorno  $T_R=50$  anni), (in scala prototipo pari rispettivamente a  $H_s=2,47$  m –  $T_p=6,47$  s,  $H_s=3,94$  m –  $T_p=8,39$  s,  $H_s=4,42$  m –  $T_p=9,56$  s,  $H_s=4,78$  m –  $T_p=9,56$  s,  $H_s=5,71$  m –  $T_p=10,89$  s), durante le quali sono stati eseguiti i rilievi di moto ondoso in corrispondenza della zona antistante l'ubicazione della gru mobile da 150 tonn. Le misure sono state effettuate utilizzando la sonda ultrasonica USS03. Al fine di poter effettuare dei confronti, nella sottostante tab.8.1.1.1 sono riportati i valori di altezza significativa misurati con la suddetta sonda ultrasonica (USS03bis) unitamente ai valori misurati con tutte le altre sonde relativamente

alle prove del “Gruppo 3”. Tali valori sono anche riportati nei grafici delle successive fig.8.1.1.1, fig. 8.1.1.2, fig. 8.1.1.3, fig. 8.1.1.4 e fig. 8.1.1.5 sotto forma di mappe di agitazione ondosa.

Sonda	T <sub>R</sub> 5 gg		T <sub>R</sub> 2 an		T <sub>R</sub> 5 an		T <sub>R</sub> 10 an		T <sub>R</sub> 50 an	
	Dir 93,5°N pro		Dir 93,5°N pro		Dir 93,5°N pro		Dir 93,5°N pro		Dir 93,5°N pro	
	H <sub>s,mod</sub> [cm]	H <sub>s,prot</sub> [m]								
WG00	7.936	2.381	13.322	3.997	14.375	4.312	16.427	4.928	18.975	5.692
WG01	4.353	1.306	7.660	2.298	8.618	2.585	10.241	3.072	11.407	3.422
WG02	4.741	1.422	6.901	2.070	8.124	2.437	8.128	2.438	8.953	2.686
WG03	5.885	1.765	7.048	2.115	8.071	2.421	8.762	2.629	10.002	3.000
WG04	0.384	0.115	0.453	0.136	0.475	0.143	0.582	0.175	0.658	0.197
WG05	0.390	0.117	0.577	0.173	0.528	0.158	0.616	0.185	0.613	0.184
WG06	0.359	0.108	0.487	0.146	0.442	0.133	0.528	0.158	0.525	0.157
WG07	0.455	0.136	0.651	0.195	0.614	0.184	0.657	0.197	0.794	0.238
WG08	1.326	0.398	1.555	0.467	1.521	0.456	1.287	0.386	1.347	0.404
WG09	12.512	3.754	14.087	4.226	14.517	4.355	13.742	4.122	12.661	3.798
WG10	0.795	0.239	1.379	0.414	1.469	0.441	1.694	0.508	1.715	0.515
WG11	3.993	1.198	4.094	1.228	4.048	1.214	4.919	1.476	5.758	1.727
USS01	0.580	0.174	0.753	0.226	0.875	0.263	0.603	0.181	0.665	0.200
USS02	0.203	0.061	0.266	0.080	0.253	0.076	0.265	0.080	0.395	0.119
USS03	0.222	0.067	0.212	0.064	0.198	0.059	0.257	0.077	0.277	0.083
USS04	0.173	0.052	0.216	0.065	0.213	0.064	0.223	0.067	0.224	0.067
USS03bis	2.989	0.897	2.513	0.754	2.800	0.840	3.060	0.918	2.566	0.770

**Tab.8.1.1.1: valori delle altezze significative H<sub>s</sub> misurate nei vari punti di misura sia in scala modello che in scala prototipo con aggiunti i valori relativi all'ulteriore punto investigato.**

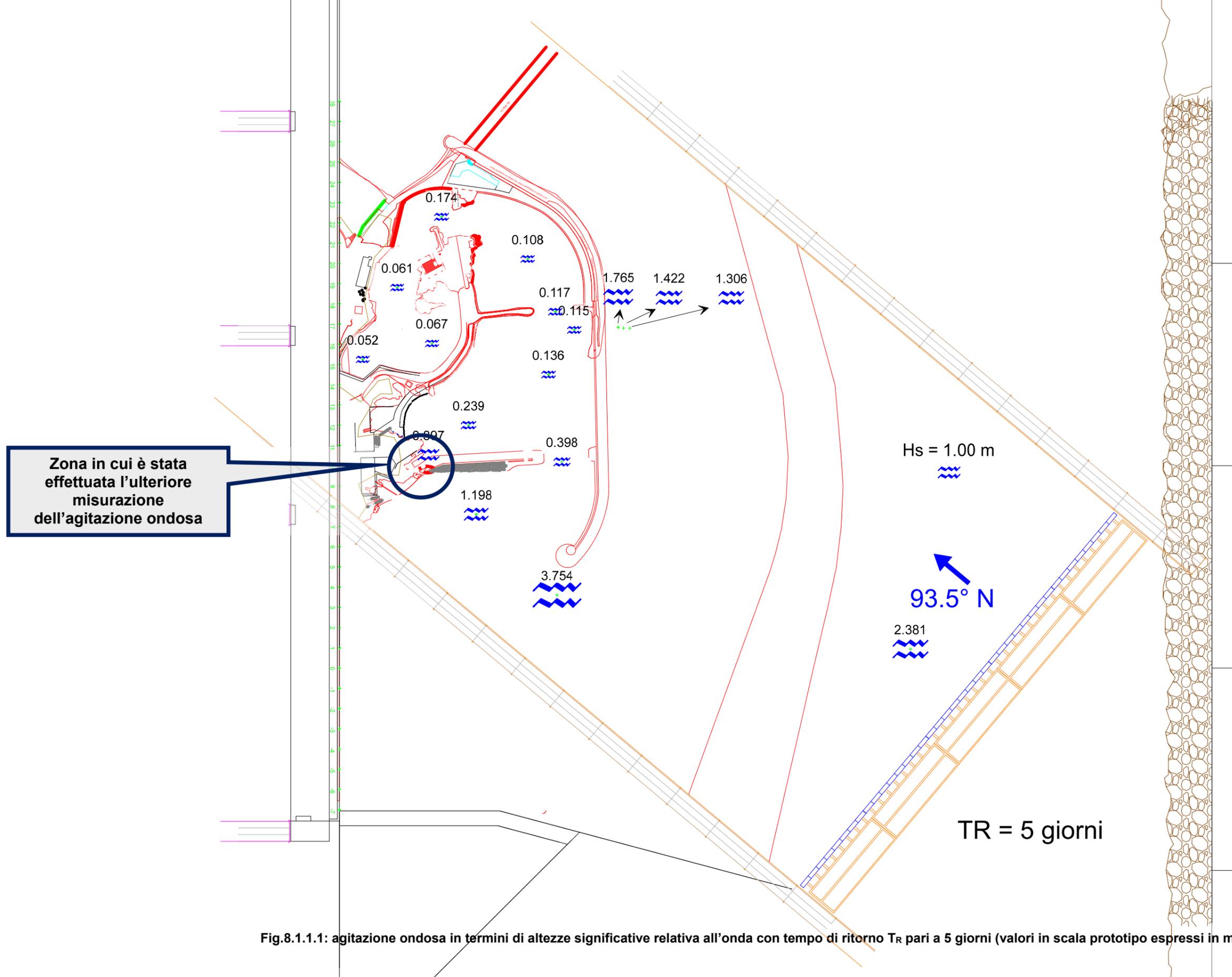


Fig.8.1.1.1: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 5 giorni (valori in scala prototipo espressi in metri).

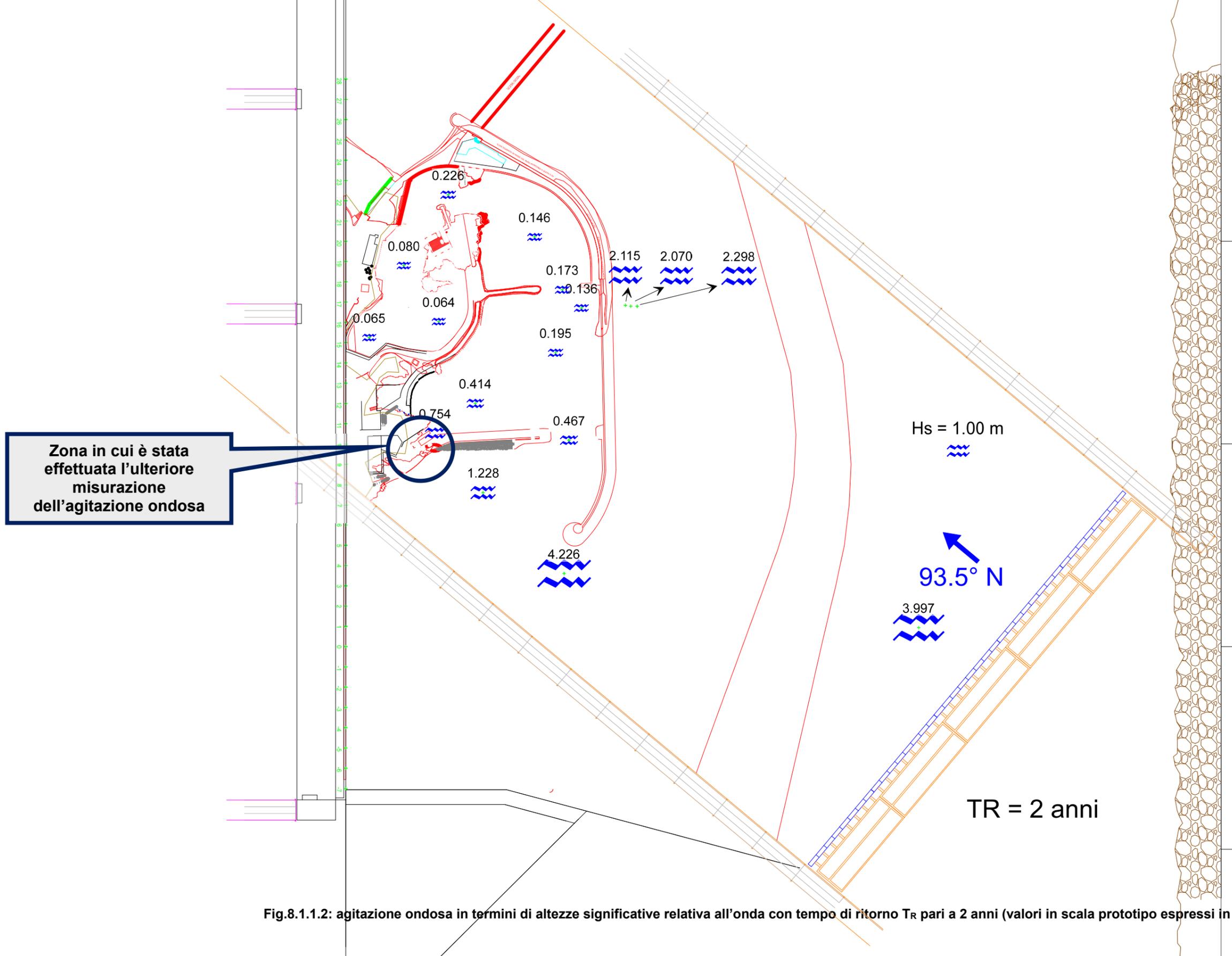
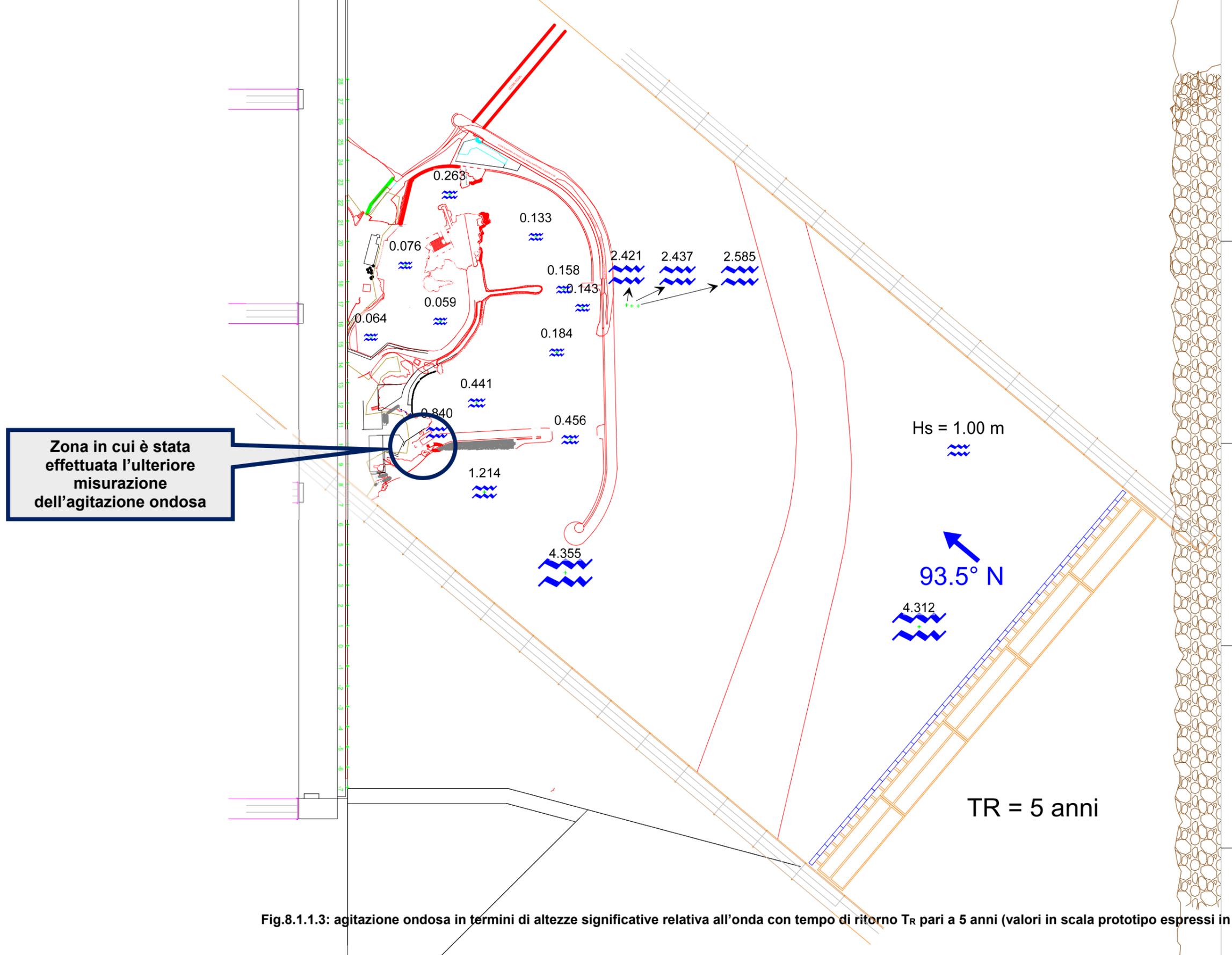


Fig.8.1.1.2: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 2 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).



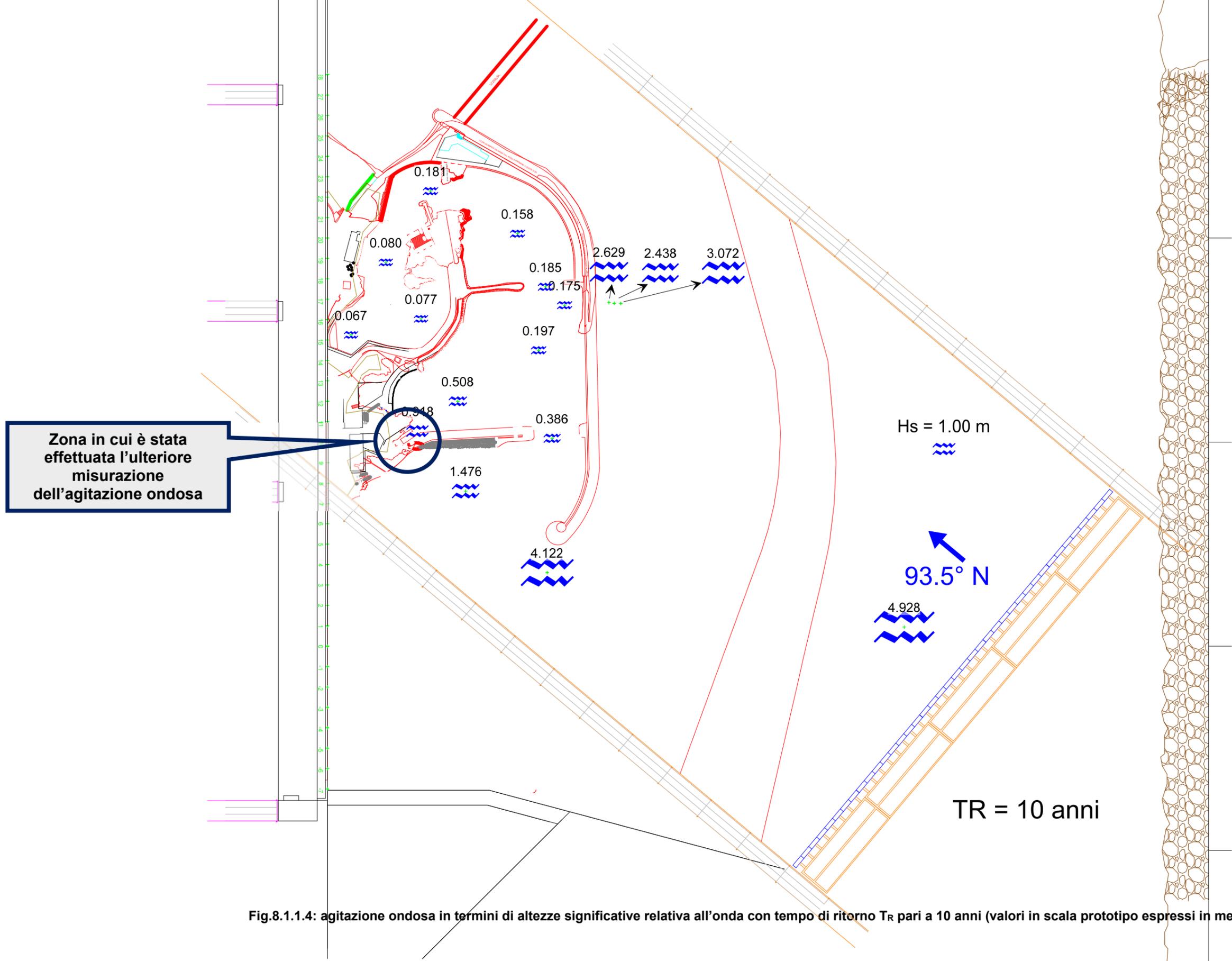


Fig.8.1.1.4: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 10 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

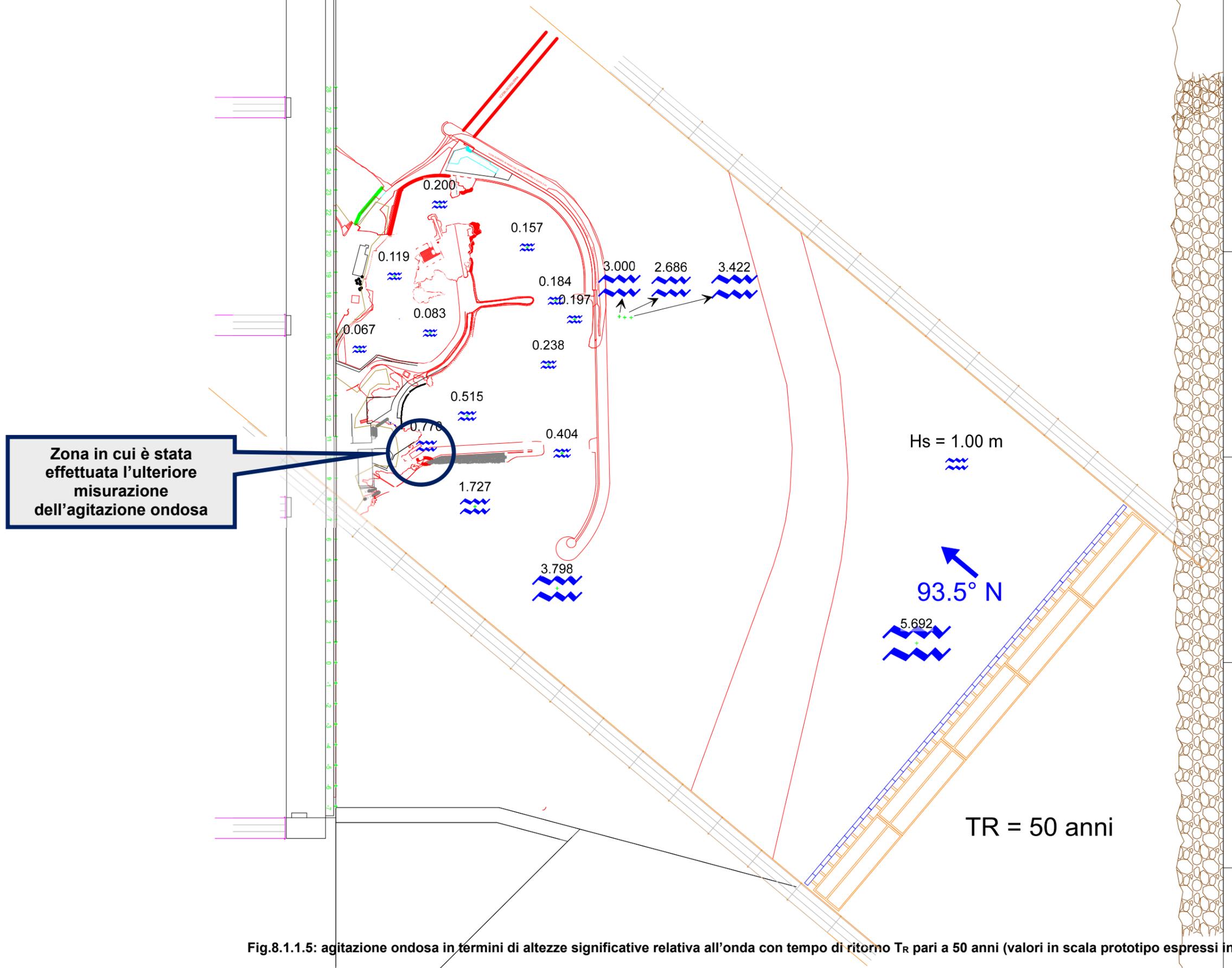


Fig.8.1.1.5: agitazione ondosa in termini di altezze significative relativa all'onda con tempo di ritorno  $T_R$  pari a 50 anni (valori in scala prototipo espressi in metri).

Da una lettura della tabella e dei grafici si evince come i valori di altezza significativa misurati nella ulteriore zona investigata siano sensibilmente superiori rispetto ai valori acquisiti nei punti adiacenti in corrispondenza del nuovo avamposto. In particolare, in corrispondenza dell'attacco ondoso con tempo di ritorno pari a 10 anni si registra il massimo valore di altezza significativa  $H_s = 0,918$  m.

Inoltre, non è da trascurare il valore  $H_s = 0,897$  m relativo all'attacco ondoso con tempo di ritorno pari a 5 giorni, soprattutto alla luce delle *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*, approvato dalla III Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. con voto n. 212 del 27/02/2002, in cui è definito il livello di confort  $H_s = 0,150$  m per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno. Pertanto, si consiglia a tecnici progettisti di porre in atto delle soluzioni tecniche (tipo cassoni assorbenti o similari) tese alla riduzione dell'agitazione ondosa in tale punto stante la particolare vulnerabilità di tale zona.

## 9 Bibliografia

**Associazione Internazionale Permanente dei Congressi di Navigazione (A.I.P.C.N.) (2002).** “*Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*”, approvate dalla III Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. con voto n. 212 del 27/02/2002.

**Elvira Armenio, Francesca De Serio, Michele Mossa (2017).** Analysis of data characterizing tide and current fluxes in coastal basins. HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES, vol. 21, p. 3441-3454, ISSN: 1027-5606, doi: 10.5194/hess-21-3441-2017

**Biesel, F. and Suquet, F. (1951).** “*Les appareils generateurs de houle en laboratoire*”. La Houille Blanche, 6, 2, 4 and 5. Laboratory Wave Generating Apparatus English version Project report 39 St Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minnesota University Minneapolis [1953].

**Burcharth, H.F.; Liu, Z.; Troch P. (1999).** “*Scaling of core material in rubble mound breakwater model tests*”. Proceedings of the 5th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Cape Town, South Africa.

CIRIA, CUR, CETMEF (2007). “*The Rock Manual*”. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London

**Bruno Maria Francesca, Molfetta Matteo Gianluca, Mossa Michele, Nutricato Raffaele, Morea Alberto, Chiaradia Maria Teresa (2016).** Coastal Observation through Cosmo-SkyMed High- Resolution SAR Images. JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, vol. Part: 2, p. 795-799, ISSN: 0749-0208, doi: 10.2112/SI75-160.1

**Dai, Y.B. and Kamel, A.M. (1969).** “*Scale effect tests for rubble mound breakwaters*”. U. S. Army Engineer Waterway Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, Research Report H-69-2.

**Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1991).** “*Water wave mechanics for engineers and scientists*”. Advanced series on Ocean Engineering, 2.

Freitas, P., Trigo-Teixeira, A. and Araújo, M.A.V.C. (2013): “*Hydraulic stability of antifer block armour layers*”. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, LNEC – Lisbon, Portugal.

**De Padova, Diana, Brocchini, Maurizio, Buriani, Federica, Corvaro, Sara, De Serio, Francesca, Mossa, Michele, Sibilla, Stefano (2018).** Experimental and Numerical Investigation of Pre- Breaking and Breaking Vorticity within a Plunging Breaker. WATER, vol. 10, 387, ISSN: 2073- 4441, doi: 10.3390/w10040387

- De Serio, Francesca, Mossa, Michele** (2018). Meteo and Hydrodynamic Measurements to Detect Physical Processes in Confined Shallow Seas. *SENSORS*, vol. 18, ISSN: 1424-8220, doi: 10.3390/s18010280
- De Serio Francesca, Mossa Michele** (2016). Assessment of classical and approximated models estimating regular waves kinematics. *OCEAN ENGINEERING*, vol. 126, p. 176-186, ISSN: 0029- 8018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.09.005
- De Serio Francesca, Mossa Michele** (2016). Environmental monitoring in the Mar Grande basin (Ionian Sea, Southern Italy). *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH INTERNATIONAL*, ISSN: 0944-1344, doi: 10.1007/s11356-015-4814-y
- De Serio F, Mossa M** (2013). A laboratory study of irregular shoaling waves. *EXPERIMENTS IN FLUIDS*, vol. 54, ISSN: 0723-4864, doi: 10.1007/s00348-013-1536-0
- De Serio F, Mossa M** (2013). Experimental study of wave undertow and turbulence with LDA and ADV measurements. *TECNICHE PER LA DIFESA DALL'INQUINAMENTO*, vol. 34, p. 743-755, ISSN: 2282-5517
- De Padova Diana, Mossa Michele, Sibilla Stefano** (2015). SPH numerical investigation of the velocity field and vorticity generation within a hydrofoil-induced spilling breaker. *ENVIRONMENTAL FLUID MECHANICS*, vol. 16, p. 267-287, ISSN: 1567-7419, doi: 10.1007/s10652-015-9433-0
- Hudson, R.Y., Herrmann, F.A., Sager, R.A., Whalin, R.W., Keulegan, G.H., Chatham, C.E. and Hales, L.Z. (1979)**. “*Coastal Hydraulic Models*”, Special report No. 5, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Hughes, S.A. (1993)**: “*Physiscal models and laboratory techniques in coastal engineering*” World Scientific.
- Jensen, O.J. and Klinting, P. (1983)**. “*Evaluation of scale effects in hydraulic models by analysis of laminar and turbulent flows*”. *Coastal Engineering*, 7, 319-329.
- Molfetta M. G., Petrillo A. F., Pratola L. e Rinaldi A. (2008)**. “*Non-linearity phenomena in the evolution of the sea states passing from deep to shallow waters*”; atti del 2<sup>nd</sup> International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (Coastlab08), 2-5 luglio 2008, Bari.
- Mossa M** (2014). Alcune considerazioni sull’erosione costiera. Il caso della regione pugliese. *SCIENZE E RICERCHE*, vol. 1, p. 25-33, ISSN: 2283-5873.
- Petrillo A. F. (1988)**. “*Evoluzione delle onde di mare su basi fondali sabbiosi con pendenza variabile*”; IX Congresso Nazionale dell’Associazione Italiana di Meccanica Teorica ed Applicata. Bari, 4–7 ottobre 1988.

**Van Gent, M.R.A. (1995).** *“Wave interaction with permeable coastal structures”*  
Communications on hydraulic and geotechnical engineering, Faculty of Civil Engineering,  
TU Delft, The Netherlands, ISSN 0169-6548.

# ALLEGATI E LORO CONTENUTO

## A1 – MOTO ONDOSO

Le serie storiche delle misure di moto ondoso effettuate nelle varie prove, così come riportate nel quadro riepilogativo di tab. 6.1 del paragrafo 6, sono contenute su supporto informatico all'interno della cartella denominata "ONDE". I dati riportati sono le elevazioni del pelo libero rispetto al livello medio mare assunto come zero. I dati sono così organizzati: sono riportate le cartelle relative ai vari gruppi di prove effettuate (fig. A1.1) e, all'interno di queste, sono riportati i files in formato \*.xlsx denominati con il nome della prova a cui le misure si riferiscono (es: "Prova 3-1.xls" all'interno della cartella "GRUPPO 3" sta a significare che i dati si riferiscono alle misure effettuate durante la prova 3/1 nell'ambito delle prove del Gruppo 3).

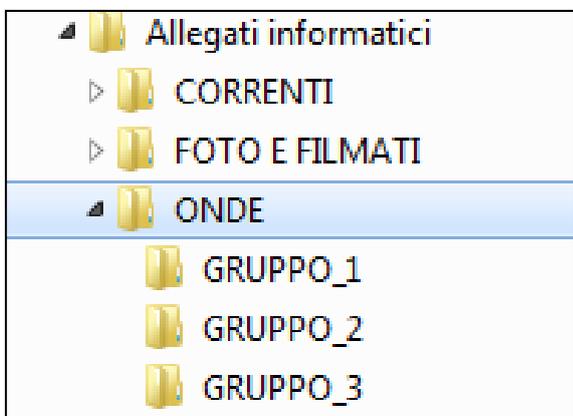


Fig.A1.1: disposizione delle varie cartelle contenenti i files di misura.

Ciascun file contiene due fogli, uno denominato "schema sonde" con riportato uno sketch relativo alla ubicazione planimetrica delle sonde utilizzate ed il loro nome, il secondo denominato con il valore di altezza significativa al largo in scala modello di competenza e riportante nella prima colonna il tempo di acquisizione e tante colonne quante sono state le sonde utilizzate per quella prova e riportanti le altezze d'onda

misurate in scala modello in cm.

Nella fig. A1.2 è riportato un esempio di file di misura, in particolare il file "Prova 1-1.xls" all'interno della cartella "Prove Gruppo 1", con evidenziato il foglio "Hs=8,47 cm (TR5gg)", ossia le serie storiche  $h = h(t)$  delle sonde denominate WG01-WG02-WG03- WG04- WG05- WG06- WG07- WG08- WG09- WG10- WG11-USS01-USS02-USS03-USS04 relative all'attacco ondoso con altezza significativa al largo  $H_s=8,90$  cm in scala modello (TR5gg) effettuate durante la prova 1/1 nell'ambito delle prove del "GRUPPO 1".

Nella successiva fig. A1.3 viene riportato, sempre per il medesimo file, il foglio denominato "schema sonde" nel quale è possibile osservare lo sketch riportante l'ubicazione delle sonde utilizzate per quella acquisizione ed il loro nome.

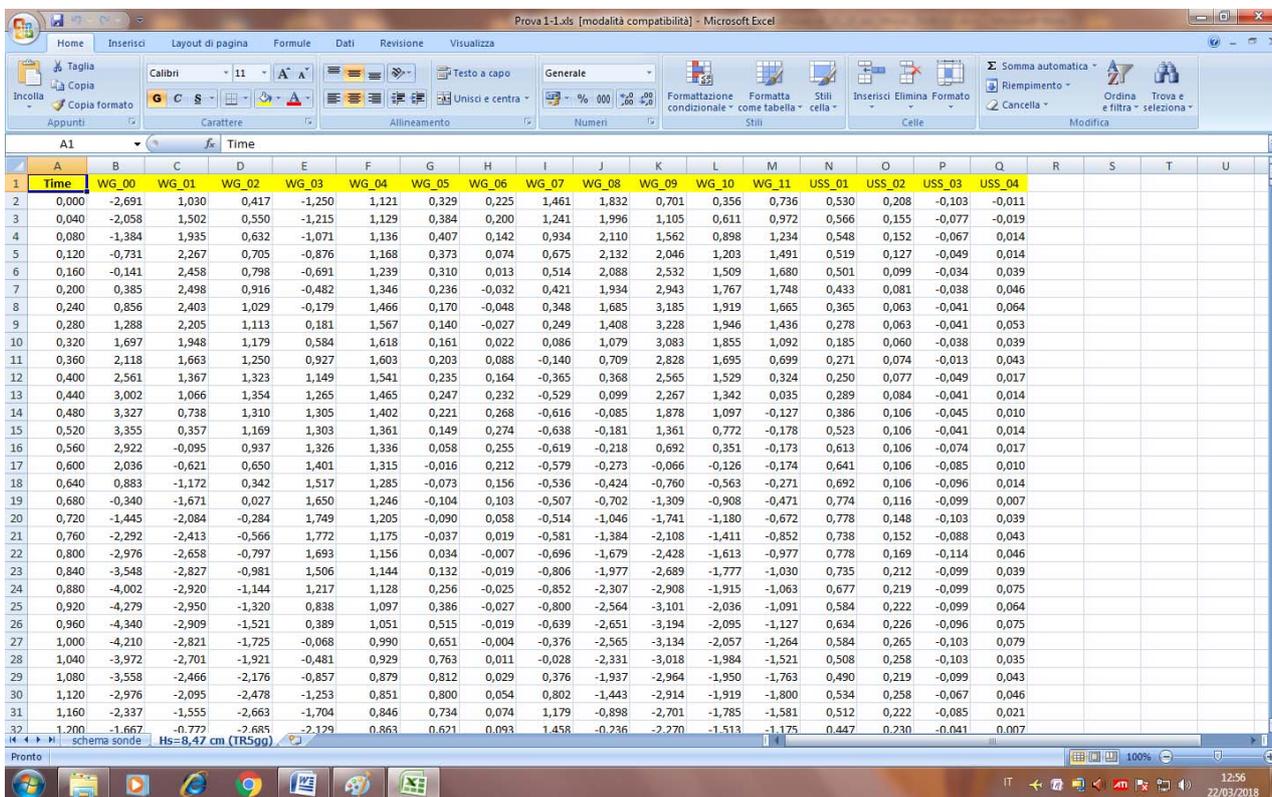


Fig.A1.2: esempio di file di misura in cui sono riportate le serie storiche h(t).

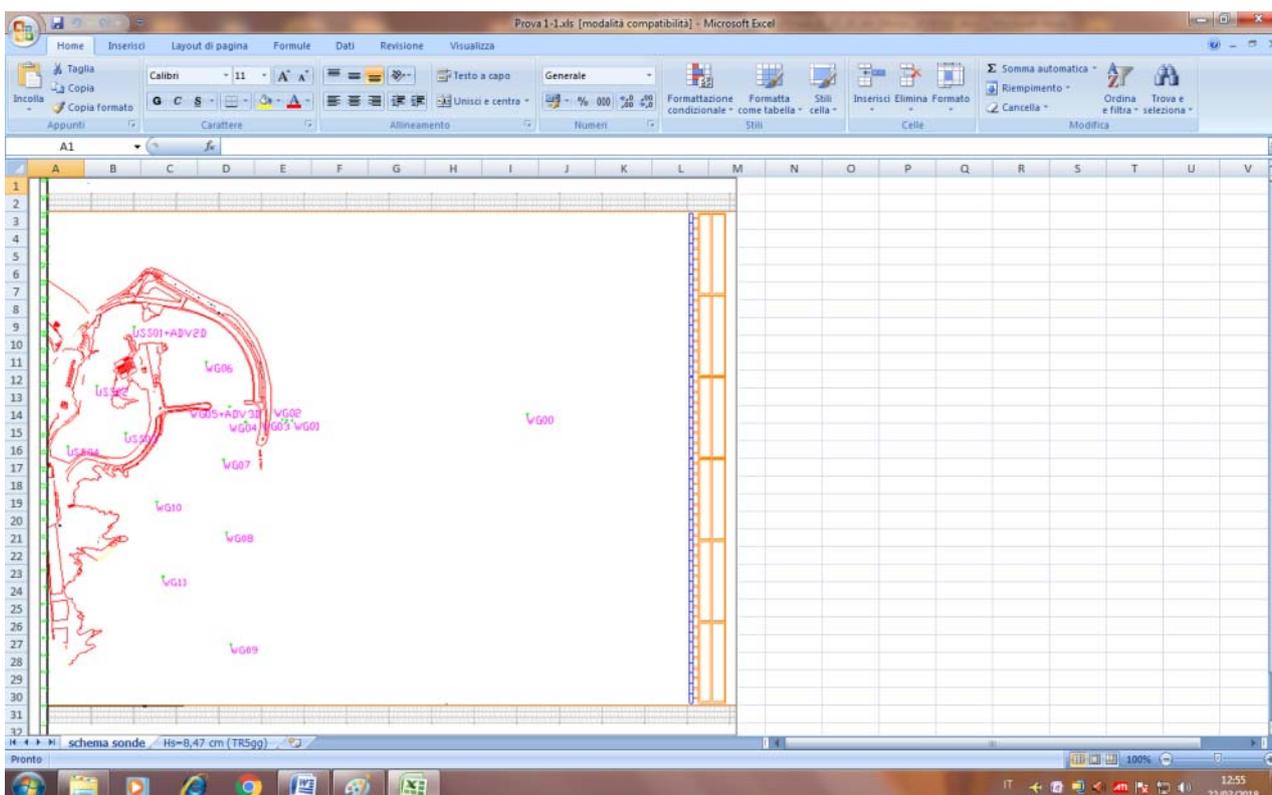


Fig.A1.3: esempio di file di misura nel quale è riportato lo schema delle sonde e il loro nome.

## A2 – CORRENTI

Le serie storiche  $V = V(t)$  relative alle misure delle due componenti di velocità  $V_x$  e  $V_y$  (con l'ADV 2D) e relative alle tre componenti di velocità  $V_x$ ,  $V_y$  e  $V_z$  (con l'ADV 3D) effettuate nelle varie prove, così come riportate nel quadro riepilogativo di tab. 6.1 del paragrafo 6, sono contenute su supporto informatico all'interno della cartella denominata "CORRENTI".

I dati sono così organizzati: sono riportate le cartelle relative ai vari gruppi di prove effettuate, le sottocartelle relative agli attacchi ondosi investigati (fig. A2.1) e, all'interno di ciascuna di queste, sono riportati i files in formato \*.xlsx denominati con il nome della sonda utilizzata

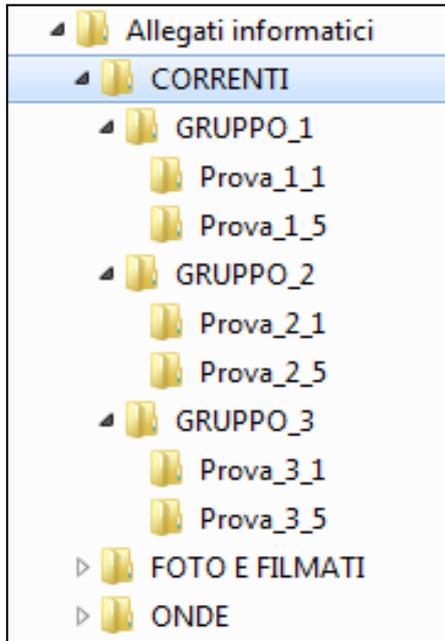


Fig. A2.1 - Disposizione delle varie cartelle contenenti i files di misura.

(identificativa del punto di misura, atteso che l'ADV\_2D è stato utilizzato in corrispondenza dell'imboccatura alla parte più interna del bacino portuale, il primo ADV\_3D è stato utilizzato in corrispondenza dell'attuale imboccatura del porto, il secondo ADV\_3D\_IMB è stato utilizzato in corrispondenza della nuova imboccatura del porto) e della quota rispetto al pelo libero del punto di misura lungo la verticale indagata (es: "ADV3D\_z-13.xls" all'interno della cartella "GRUPPO 2" nella sottocartella "Prova\_2\_1" sta a significare che i dati si riferiscono alle misure effettuate durante la prova 2/1 nell'ambito delle prove del Gruppo 2 in corrispondenza dell'attuale imboccatura del porto nel punto di misura posizionato ad una profondità dal pelo libero pari a  $z = -13$  cm).

Ciascun file contiene due fogli, uno denominato "punti di misura investigati" con riportato uno sketch relativo alla ubicazione planimetrica delle sonde utilizzate ed il loro nome, il secondo denominato "dati" e riportante nella prima colonna il tempo di acquisizione e tante colonne quante sono state le componenti di velocità acquisite espresse in cm/s in scala modello.

Nella sottostante fig. A2.2 si riporta, a titolo di esempio, il file di misura "ADV3D\_z-13.xlsx" all'interno della sottocartella "Prova\_1\_5" nella cartella "Gruppo\_1", mentre nella successiva fig. A2.3 viene riportato, sempre per il medesimo file, il foglio denominato "schema sonde" nel quale è possibile osservare lo sketch riportante l'ubicazione delle sonde utilizzate per quella acquisizione ed il loro nome

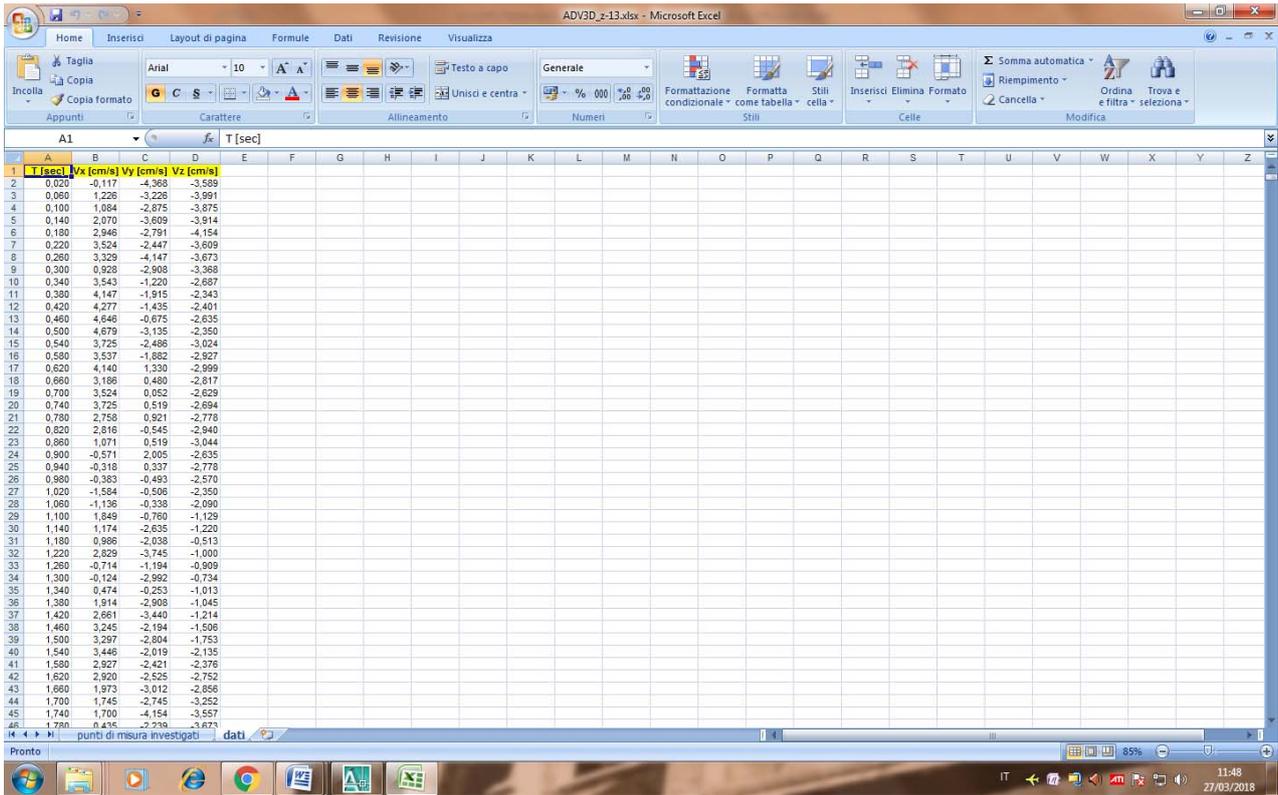
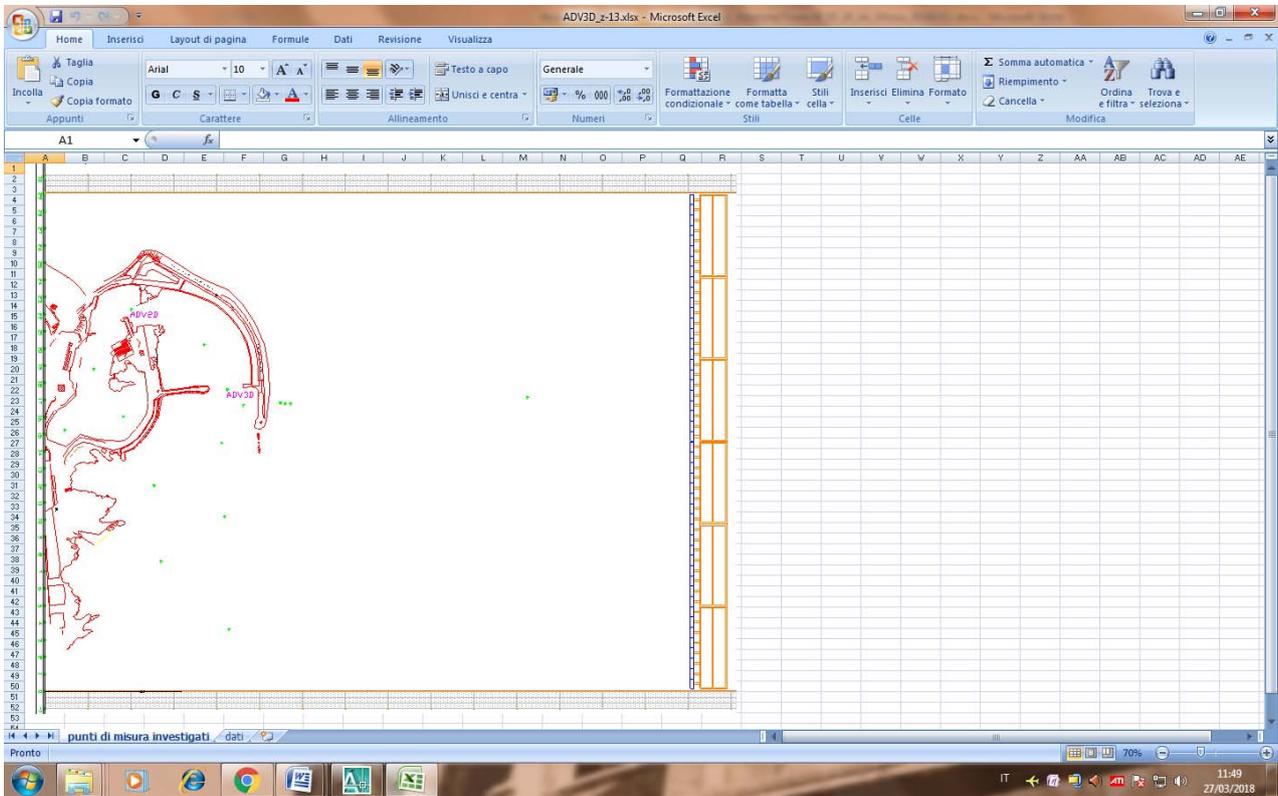


Fig. A2.2 - Esempio di file di misura in cui sono riportate le serie storiche  $V_x(t)$ ,  $V_y(t)$  e  $V_z(t)$ .



## A3 – FOTO E VIDEO

Nella cartella “Foto Lavori Melendugno”, sono contenute dieci sottocartelle contenenti le foto delle varie fasi lavorative, svolte in ordine cronologico, che documentano la costruzione in vasca del Modello 3D del Porto di Melendugno (LE).

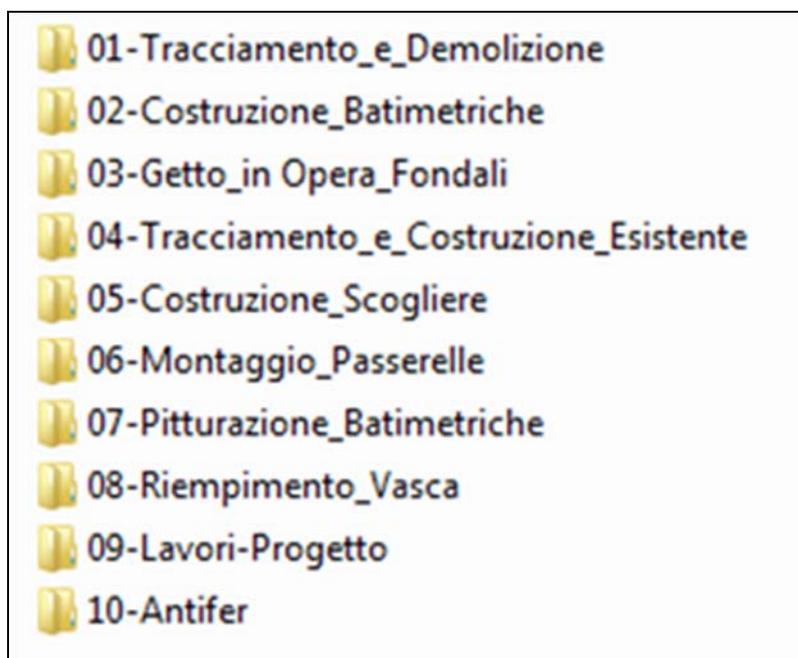


Fig. A2.1: disposizione delle varie cartelle contenenti i files relativi alle foto ed ai filmati

Ogni “Gruppo” contiene poi una o più sottocartelle con i filmati e le foto relative ai vari attacchi ondosi simulati.

### 01-Tracciamento\_e\_Demolizione

Tracciamento delle aree da demolire, in parte o in toto, del basamento esistente per la successiva realizzazione del nuovo fondale.

### 02-Costruzione\_Batimetriche

Costruzione delle principali batimetriche significative sommerse ed emerse.

### 03-Getto\_in Opera\_Fondali

Getto in opera dei fondali, sommersi ed emersi, realizzati in calcestruzzo che congiunge le varie batimetriche.

### 04-Tracciamento\_e\_Costruzione\_Esistente

Tracciamento e costruzione del “porto esistente”, con realizzazione del litorale roccioso ed opere fisse che influiscono sull'idrodinamica costiera.

#### 05-Costruzione\_Scogliere

Costruzione delle scogliere sottoflutto e sopraflutto, con successiva posa in opera degli “Antifer” su quest’ultima.

#### 06-Montaggio\_Passerelle

Montaggio di moduli con annesse pedane e lamiere zincate, utili al “confinamento ondoso” del tratto costiero oggetto di studio.

#### 07-Pittura\_Batimetriche

Pittura di vari colori delle diverse curve di livello.

#### 08-Riempimento\_Vasca

Riempimento vasca, previo posizionamento delle sonde e collegamento dei cavi ai relativi pc necessari all’acquisizione dati durante le mareggiate.

#### 09-Lavori-Progetto

Lavori per la costruzione del “porto di progetto” con annesse scogliere, e posa in opera degli “Antifer”.

#### 10-Antifer

“Antifer” in contenitori per la realizzazione in serie degli stessi.

Bari, 19/4/2018

**IL RESPONSABILE SCIENTIFICO del LIC del DICATECh del POLITECNICO DI BARI e RUP**



(Prof. ing. Michele MOSSA)