AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

SOCIETA' DI PROGETTO: APM TERMINALS VADO LIGURE S.p.A.

MAERSK

GLF GRANDI LAVORI FINCOSIT

PROGETTAZIONE:

TECHNITAL S.p.A

RESPONSABILE:

Dott. Ing. Guido Fiorini

PROGETTO ESECUTIVO

ELABORATO N° :

MI010P-PE-R-B-R-1019-C0

TITOLO ELABORATO

RELAZIONE DI VERIFICA-SCREENING PER MODIFICHE AL PROGETTO DEFINITIVO – ALLEGATO 2 –

DATA			
15 LUGLIO 2013	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
SIGLA	A. MONARCA	A. LIZZADRO / F. ANGELOTTI	G. FIORINI
REVISIONE 1			
REVISIONE 2			
REVISIONE 3			

NOME FILE

MI010P-PE-R-B-R-1019-C0 Allegato 2.doc

A TERMINE DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO CON DIVIETO DI RIPRODURLO RENDENDOLO NOTO A TERZI ANCHE PARZIALMENTE SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE

AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

PROGETTO ESECUTIVO

RELAZIONE DI VERIFICA-SCREENING PER MODIFICHE AL PROGETTO DEFINITIVO

ALLEGATO 2
ANALISI DEGLI EFFETTI SUL LITORALE IN TERMINI DI MOTO ONDOSO

INDICE

1. PREMESSA 8
2. IL PARAGGIO D'INTERESSE 10
3. I LIVELLI DEL MARE 13
4. LE CONDIZIONI ANEMOMETRICHE 18
   4.1. Le condizioni frequenti di vento 18
   4.2. Le condizioni estreme di vento 23
5. IL MOTO ONDOSO AL LARGO 25
   5.1. I dati di moto ondoso disponibili 25
   5.2. Le condizioni frequenti di moto ondoso al largo 30
      5.2.1. Il clima di moto ondoso al largo 30
      5.2.2. Caratteristiche delle mareggiate del paraggio d'interesse 34
   5.3. Gli eventi estremi di moto ondoso al largo 44
      5.3.1. Metodologia utilizzata 44
      5.3.2. Definizione degli eventi estremi al largo 47
      5.3.3. Correlazione altezza d'onda-periodo 55
      5.3.4. Analisi degli eventi estremi - conclusioni 58
6. IL MODELLO MATEMATICO SWAN DI PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DAL LARGO A SOTTOCOSTA 62
7. LE CONFIGURAZIONI D'INTERVENTO ESAMINATE 66
8. CONDIZIONI METEOMARINE DI RIFERIMENTO PER LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE 70
9. PROPAGAZIONE DELLE ONDE SUL LITORALE CON DIGA FORANEA ESTESA – SITUAZIONE DI ESERCIZIO DELLA PIATTAFORMA 71
   9.1. Risultati delle simulazioni di propagazione delle onde nell'area del litorale 71
   9.2. Differenze nell'area del litorale tra le onde con la soluzione del progetto definitivo e le onde con il progetto esecutivo 78
10. PROPAGAZIONE DELLE ONDE SUL LITORALE CON PIATTAFORMA COMPLETATA E DIGA FORANEA ESISTENTE – FASE COSTRUTTIVA 85
   10.1. Risultati delle simulazioni di propagazione delle onde nell'area del litorale 85
   10.2. Differenze nell'area del litorale tra le onde con la soluzione del progetto definitivo e le onde con il progetto esecutivo 92
11. CONCLUSIONI 99

APPENDICE 1 - Pubblicazioni e studi di riferimento 101
APPENDICE 2 - Quality statement: UK Met Office Wave Model archive 103
APPENDICE 3 - Mathematical model SWAN (Simulating Waves Nearshore) 106

ELENCO FIGURE

FIG. 1-1 – Varianti da apportare alla soluzione del progetto definitivo: planimetria di progetto della nuova disposizione dei cassoni della piastra di Vado Ligure 9
Fig. 2-1 - Ubicazione del paraggio di Vado ligure 11
Fig. 2-2 - Le batimetrie nella zona di Vado Ligure 12
Fig. 3-1 - Genova: escursioni di marea nel periodo Agosto '98-Novembre '00 14
Fig. 3-2 - Imperia: escursioni di marea nel periodo Agosto '98-Novembre '00 14
Fig. 3-3 - Esempio di scomposizione della registrazione di marea nelle componenti meteorologica ed astronomica (stazione di Genova, anno 2006) 16
Fig. 4-1 - Vado Ligure, rosa dei venti - Dati orari, 1986-1997 19
Fig. 4-2 - Punto UKMO - rosa dei venti. Dati triorari, 1987-2008 21
Fig. 5-1 - Dati di moto ondoso KNMI - estensione delle aree di rilievo dei dati 29
Fig. 5-2 - Ubicazione dei punti di misura delle onde 29
Fig. 5-3 - Settore di traversia che interessa Vado Ligure 31
Fig. 5-4 - Rosa del moto ondoso al largo di Vado, nel punto di coordinate 44°N; 8,73°E, ottenuta con i dati UKMO 1987 - 2008 32
Fig. 5-5 - Distribuzione direzionale degli eventi (triorari) di moto ondoso con H_s maggiore di 2 m – dati UKMO 1987-2008 36
Fig. 5-6 - Distribuzione direzionale degli eventi (triorari) di moto ondoso (mare vivo) con H_s maggiore di 2 m – dati UKMO 1987-2008 37
Fig. 5-7 - Distribuzione direzionale degli eventi (triorari) di moto ondoso (swell) con H_s maggiore di 2 m – dati UKMO 1987-2008 38
Fig. 5-8 - Distribuzione direzionale delle mareggiate con $H_{s\ colmo}$ maggiore di 2 m relativamente al settore di maggiore interesse 45-150°N – dati UKMO 1987-2008 39
Fig. 5-9 - Mareggiata dell' 1 marzo 1993 – $H_{s\ colmo}$= 4,1 m e Dir.=105°N 40
Fig. 5-10 - Mareggiata del 23 dicembre 1994 – $H_{s\ colmo}$= 2,7 m e Dir.=54°N 41
Fig. 5-11 - Mareggiata del 14 dicembre 2001 – $H_{s\ colmo}$= 3,6 m e Dir.=99-135°N 43
Fig. 5-12 - Statistica delle onde estreme al largo del paraggio di Vado Ligure, riferita al settore di traversia 50 – 100 °N – Soglia H_s=1 m 50
Fig. 5-13 - Statistica delle onde estreme al largo del paraggio di Vado Ligure, riferita al settore di traversia 100-150 °N – Soglia H_s=1 m 52
Fig. 5-14 - Statistica delle onde estreme al largo del paraggio di Vado Ligure, riferita al settore di traversia 150-190 °N – Soglia H_s=1 m 54
Fig. 5-15 - Correlazione H_s-T_z , dati UKMO 87-08 -Altezze d'onda maggiori di 1 m omnidirezionali 56
Fig. 5-16 - Correlazione H_s-T_z , dati UKMO 87-08 - Altezze d'onda maggiori di 1 m per il settore 50-100°N 56

Fig. 5-17 - Correlazione H_s-T_z , dati UKMO 87-08 -Altezze d'onda maggiori di 1 m per il settore 100-150°N 57
Fig. 5-18 - Correlazione H_s-T_z , dati UKMO 87-08 - Altezze d'onda maggiori di 1 m per il settore 150-190°N 57
FIG. 6-1: Schematizzazione del dominio di calcolo con una griglia a maglia curvilinea 64
FIG. 6-2: Batimetria applicata alla maglia di calcolo della FIG. 6-1 65
FIG. 7-1: Schematizzazioni e batimetrie (m s.m.m.) per la configurazione di Progetto Definitivo e della variante del Progetto Esecutivo – diga estesa (piattaforma in esercizio) 68
FIG. 7-2: Schematizzazioni e batimetrie (m s.m.m.) per la configurazione di Progetto Definitivo e della variante del Progetto Esecutivo – diga esistente (fase costruttiva) 69
Fig. 9-1 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 90° N e Tr=1 anno: Hs=1,6 m , Tp=6,2 sec** 72
Fig. 9-2 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 120° N e Tr=1 anno: Hs=2,1 m , Tp=7,0 sec** 73
Fig. 9-3 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 150° N e Tr=1 anno: Hs=2,2 m , Tp=7,2 sec** 74
Fig. 9-4 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 90° N e Tr=5 anni: Hs=2,3 m , Tp=7,3 sec** 75
Fig. 9-5 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 120° N e Tr=5 anni: Hs=3,1 m , Tp=8,6 sec** 76
Fig. 9-6 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 150° N e Tr=5 anni: Hs=3,2 m , Tp=8,7 sec** 77
FIG. 9-7 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea estesa - **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 90° N e Tr=1 anno: Hs=1,6 m , Tp=6,2 sec** 79
FIG. 9-8 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **120° N e Tr=1 anno: Hs=2,1 m , Tp=7,0 sec** 80
FIG. 9-9 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea estesa -

Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **150° N e Tr=1 anno: Hs=2,2 m , Tp=7,2 sec** 81
FIG. 9-10 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **90° N e Tr=5 anni: Hs=2,3 m , Tp=7,3 sec** 82
FIG. 9-11 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **120° N e Tr=5 anni: Hs=3,1 m , Tp=8,6 sec** 83
FIG. 9-12 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea estesa - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **150° N e Tr=5 anni: Hs=3,2 m , Tp=8,7 sec** 84
Fig. 10-1 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 90° N e Tr=1 anno: Hs=1,6 m , Tp=6,2 sec** 86
Fig. 10-2 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 120° N e Tr=1 anno: Hs=2,1 m , Tp=7,0 sec** 87
Fig. 10-3 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 150° N e Tr=1 anno: Hs=2,2 m , Tp=7,2 sec** 88
Fig. 10-4 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 90° N e Tr=5 anni: Hs=2,3 m , Tp=7,3 sec** 89
Fig. 10-5 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 120° N e Tr=5 anni: Hs=3,1 m , Tp=8,6 sec** 90
Fig. 10-6 - Propagazione dell'onda in corrispondenza del litorale a nord dell'intervento- **Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da 150° N e Tr=5 anni: Hs=3,2 m , Tp=8,7 sec** 91
FIG. 10-7 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **90° N e Tr=1 anno: Hs=1,6 m , Tp=6,2 sec** 93
FIG. 10-8 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **120° N e Tr=1 anno: Hs=2,1 m , Tp=7,0 sec** 94
FIG. 10-9 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea esistente -

Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **150° N e Tr=1 anno: Hs=2,2 m , Tp=7,2 sec** 95
FIG. 10-10 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **90° N e Tr=5 anni: Hs=2,3 m , Tp=7,3 sec** 96
FIG. 10-11 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **120° N e Tr=5 anni: Hs=3,1 m , Tp=8,6 sec** 97
FIG. 10-12 - Differenze delle Hs (in m) con la soluzione del progetto definitivo e la soluzione del progetto esecutivo con diga foranea esistente - Caratteristiche dell'onda al largo proveniente da **150° N e Tr=5 anni: Hs=3,2 m , Tp=8,7 sec** 98

ELENCO TABELLE

Tab. 3.1 - Valori massimi annuali della marea meteorologica 15
Tab. 3.2 - Risultati dell'analisi statistica dei livelli estremi 17
Tab. 4.1 - Frequenze di occorrenza delle velocità e direzione del vento a Vado Ligure (1986-1997) 20
Tab. 4.2 - Frequenze di occorrenza delle velocità e direzione del vento al largo – dati UKMO (1987-2008) 22
Tab. 4.3 - Valori della velocità del vento (m/s) in funzione del tempo di ritorno - dati dell'anemometro di Vado Ligure alla quota di 220 m sul l.m.m. 23
Tab. 4.4 - Valori della velocità del vento (m/s) in funzione del tempo di ritorno - dati dell'anemometro di Vado Ligure riportati alla quota di 10 m sul l.m.m. 23
Tab. 4.5 - Valori della velocità del vento (m/s) in funzione del tempo di ritorno - dati nel punto al largo UKMO 24
Tab. 5.1 - Clima d'onda ottenuto con i dati UKMO per il periodo 1987-2008 33
Tab. 5.2 - Statistica degli eventi estremi, settore 50°-100°N 59
Tab. 5.3 - Statistica degli eventi estremi, settore 100°-150°N 60
Tab. 5.4 - Statistica degli eventi estremi, settore 150°-190°N 61
Tab. 8.1 - Caratteristiche del moto ondoso al largo considerate per le simulazioni 70

1. PREMESSA

Nella fase di progetto esecutivo della stessa opera portuale, si rende necessario/opportuno proporre delle varianti alla configurazione di progetto definitivo già approvata che consistono (vedi FIG. 1-1):

- nell'inserimento di una schiera di cassoni pieni all'estremità lato mare della piattaforma,
- nell'estensione verso mare dell'area in rilevato a terra della piattaforma e quindi nello spostamento verso mare dei cassoni reggispinta (dell'area in rilevato) per una lunghezza di circa 50 m, con conseguente riduzione dell'area a giorno su pali, fondati su cassoni.

Nel presente rapporto sono esposti i risultati e criteri adottati nelle analisi eseguite riguardo alla valutazione del moto ondoso sul litorale a nord dell'area d'intervento, con riferimento in particolare al tratto tra la foce del torrente Segno e la foce del torrente Quiliano (di fronte all'abitato di Zinola), per la situazione modificata di Progetto Esecutivo e la situazione di Progetto Definitivo già approvata dalla Regione Liguria.

Questa analisi comparativa tra la configurazione d'intervento del progetto definitivo e quella del progetto esecutivo ha lo scopo di evidenziare le eventuali differenze in termini di distribuzione del moto ondoso lungo il litorale d'interesse e quindi dei conseguenti effetti in termini di variazioni dell'evoluzione morfologica della spiaggia emersa e sommersa a nord dell'intervento.

Le differenze in termini di distribuzioni di moto ondoso sono state valutate tra la configurazione del progetto definitivo e quella del progetto esecutivo:

- per la situazione di piattaforma completata e in esercizio che prevede anche il completamento dell'estensione della diga foranea esistente,
- per una fase costruttiva nella quale si ipotizza una situazione caratterizzata dalla fine della costruzione della piattaforma (per la quale si possono riscontrare ragionevol-

mente gli effetti più significativi in termini di onde sul litorale) e dalla presenza della diga foranea ancora nella configurazione esistente.

-

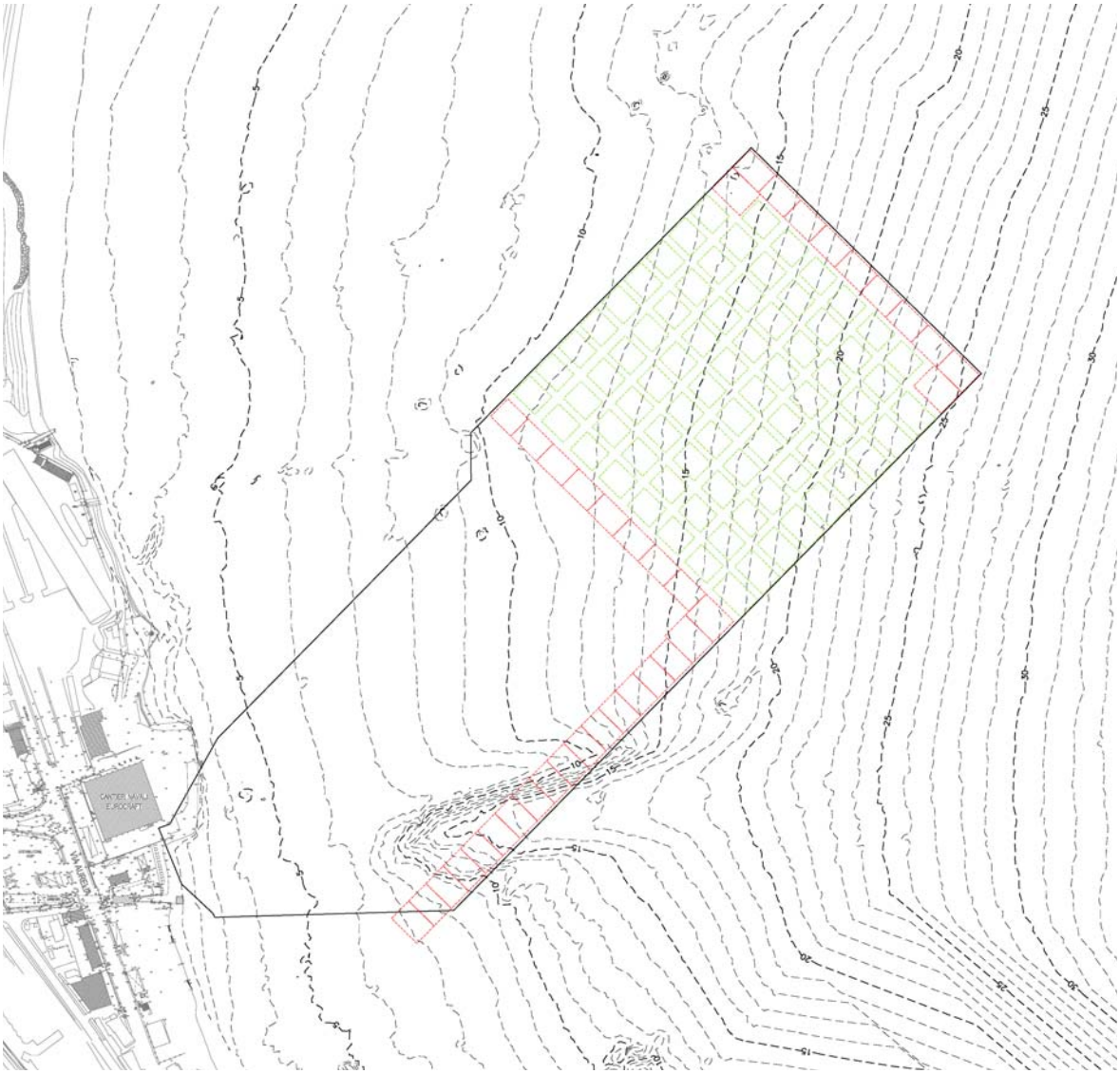


FIG. 1-1 – VARIANTI DA APPORTARE ALLA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO: PLANIMETRIA DI PROGETTO DELLA NUOVA DISPOSIZIONE DEI CASSONI DELLA PIASTRA DI VADO LIGURE

2. IL PARAGGIO D'INTERESSE

Il paraggio di Vado è ubicato nella riviera di Ponente della costa ligure. La localizzazione del sito di indagine è rappresentata nella seguente Fig. 2-1.

L'esposizione della zona d'intervento è compresa tra 50° e 190°N con un settore di massimo fetch proveniente da sud e sud-est caratterizzato da valori di 150-200 km. Per le altre possibili direzioni di provenienza il fetch geografico si mantiene inferiore a 100 km.

Il sito risulta naturalmente protetto nei confronti degli eventi ondosi di maggiore intensità, provenienti da Libeccio, per effetto dell'azione schermante offerta da Capo Vado. Il sito risulta esposto direttamente solo agli eventi provenienti dal secondo quadrante, e, parzialmente dal primo che, come si è visto, non presenta fetch particolarmente estesi.

Il paraggio di Vado Ligure è caratterizzati da una batimetria, tipica delle coste liguri, per cui si raggiungono profondità superiori ai 50 e talora ai 100 m a ridotta distanza dalla costa (Fig. 2-2).

Già dalla semplice analisi di tale batimetria si può quindi intuire come le onde provenienti dal largo non subiscano rilevanti modificazioni delle loro grandezze fondamentali (altezza, periodo di picco e direzione di propagazione dell'onda) fintantoché non raggiungono zone molto prossime a riva.

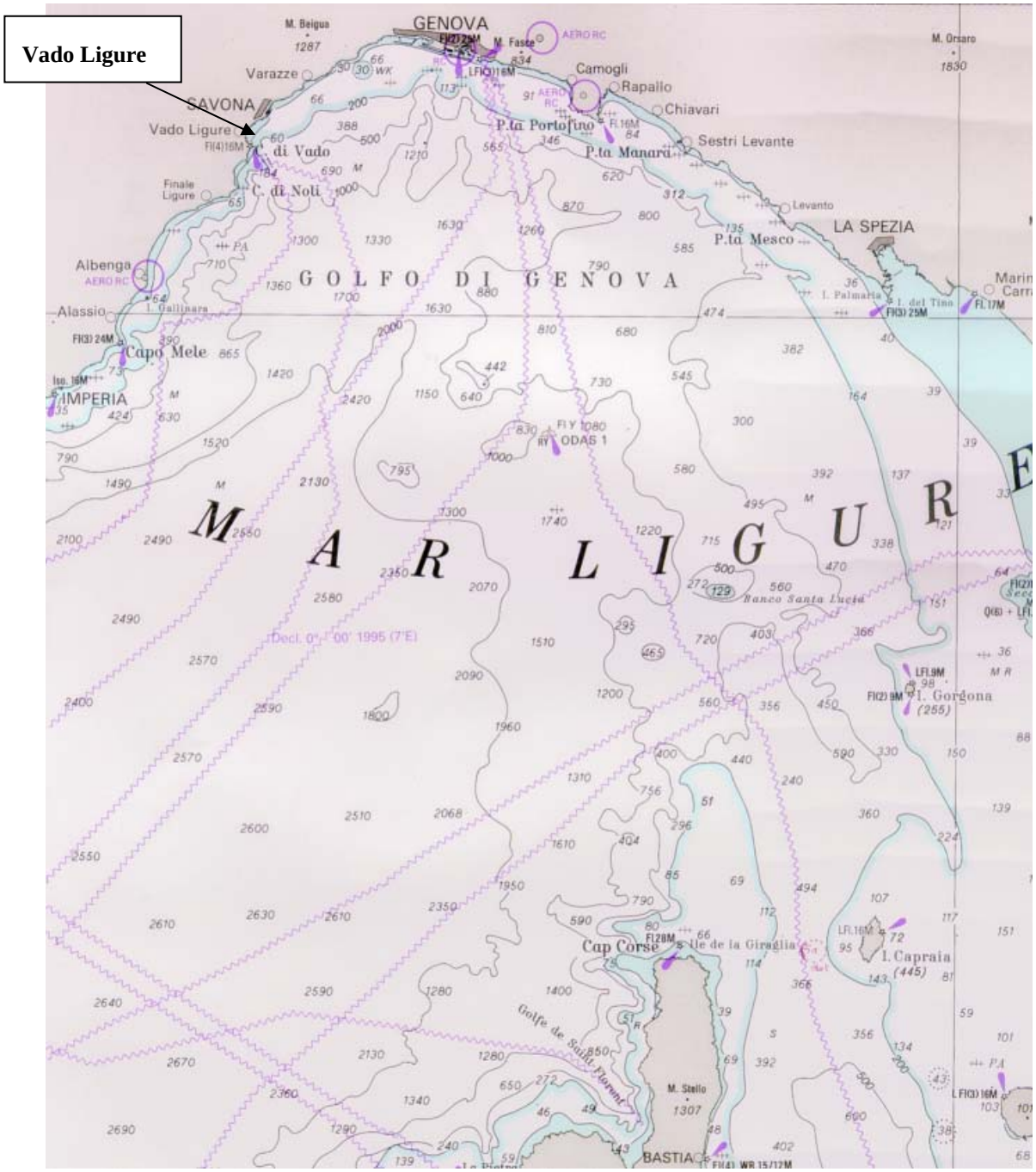


FIG. 2-1 - UBICAZIONE DEL PARAGGIO DI VADO LIGURE

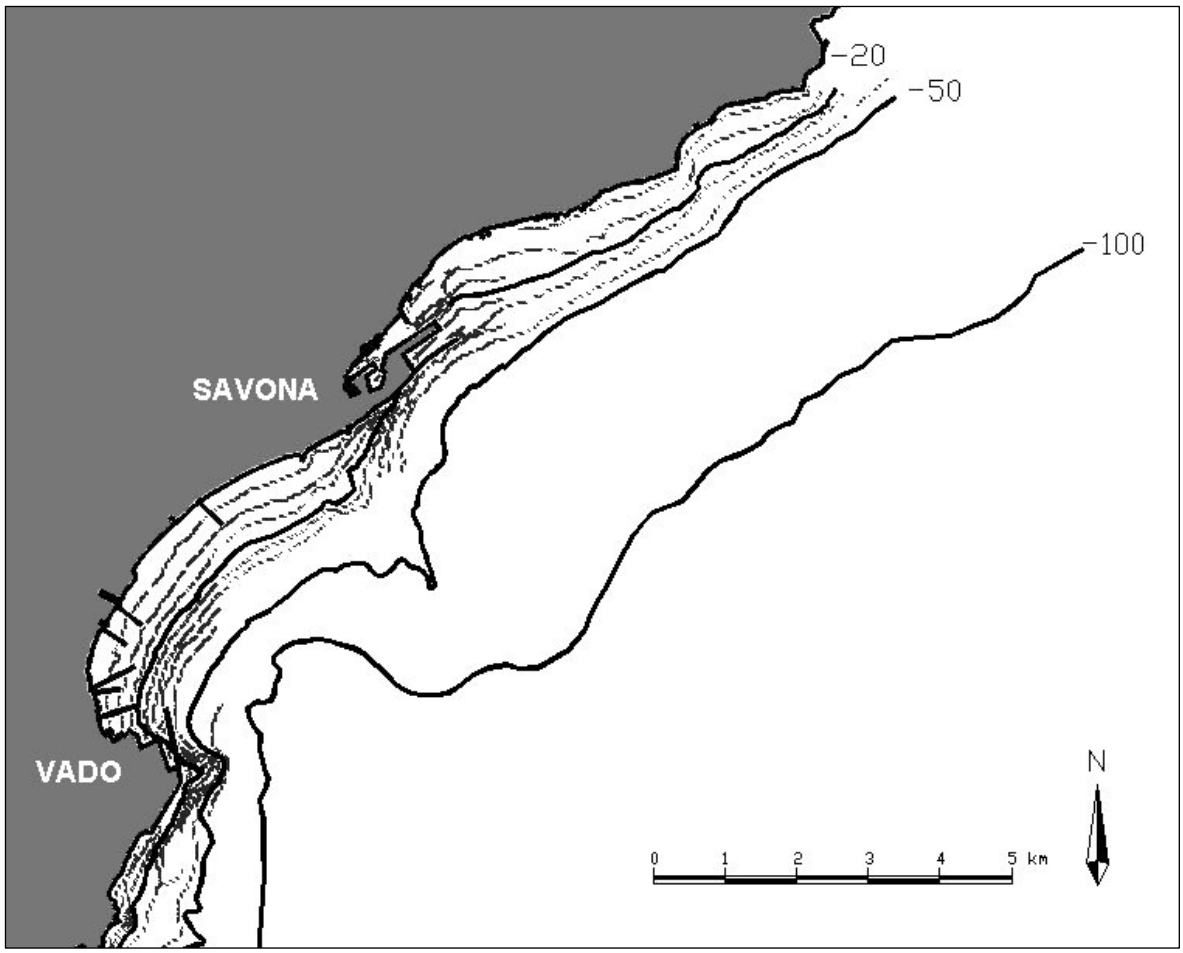


FIG. 2-2 - LE BATIMETRIE NELLA ZONA DI VADO LIGURE

3. I LIVELLI DEL MARE

Nel Golfo di Genova l'ampiezza di marea è modesta, come dimostrano i dati mareografici delle stazioni di Genova ed Imperia forniti dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale dei Servizi Tecnici Nazionali ora confluiti nell'APAT (Agenzia per l'Ambiente ed il Territorio) per il periodo 1998-2008. A titolo di esempio si riportano in Fig. 3-1 e Fig. 3-2 i livelli misurati ad Imperia e Genova nel periodo Agosto 98 - Novembre 2000.

I valori massimi di marea registrati nel periodo sono pari a +0,5 m per il sito di Genova e a +0,43 m per quello di Imperia. I valori minimi sono, rispettivamente, di –0,33 m e –0,36 m.

Le variazioni del livello marino definiscono un segnale complesso, che può considerarsi il risultato delle interazioni tra due componenti fondamentali: la marea astronomica, di natura periodica e causata dalle forze di attrazione combinate della luna e del sole, e la cosiddetta componente meteorologica, aleatoria e dovuta agli effetti indotti sulla superficie marina dalle variazioni delle condizioni atmosferiche. Con riferimento ai porti marittimi, i fenomeni meteorologici in grado di influenzare il livello del mare sono essenzialmente le variazioni di pressione atmosferica ed il vento, i cui effetti, in generale, non possono essere identificati separatamente.

Per poter eseguire un'analisi statistica della componente meteorologica del segnale di marea, e fare quindi previsioni di livello legate al tempo di ritorno, le registrazioni di marea sono state elaborate al fine di separare le due componenti astronomica e meteorologica. L'elaborazione è stata effettuata sulla serie storica delle registrazioni disponibili per il mareografo di Genova, relative al periodo 1998 – 2008. I dati hanno formato orario e sono riferiti allo 0 IGM.

La marea meteorologica, $\eta_m(t)$, può essere determinata eliminando dal segnale registrato, $\eta(t)$, le oscillazioni dovute alle componenti di frequenza tipiche della banda diurna della marea astronomica, $\eta_a(t)$. Gli effetti meteorologici, infatti, influenzano largamente

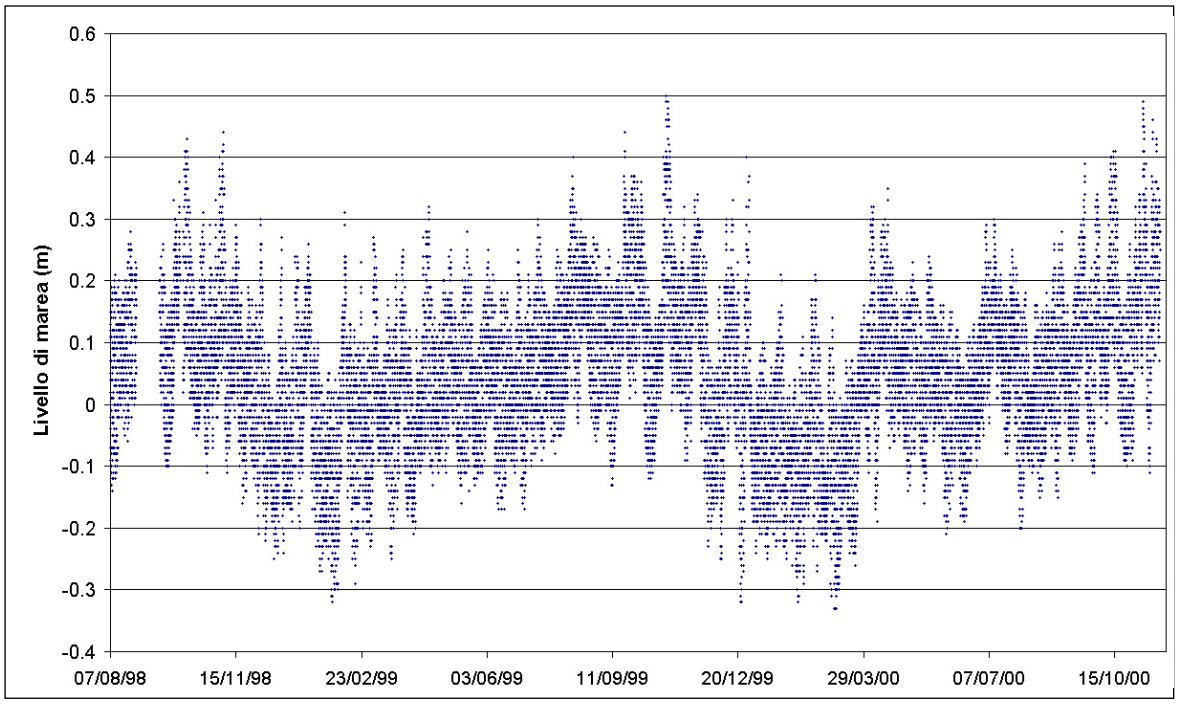


FIG. 3-1 - GENOVA: ESCURSIONI DI MAREA NEL PERIODO AGOSTO '98-NOVEMBRE '00

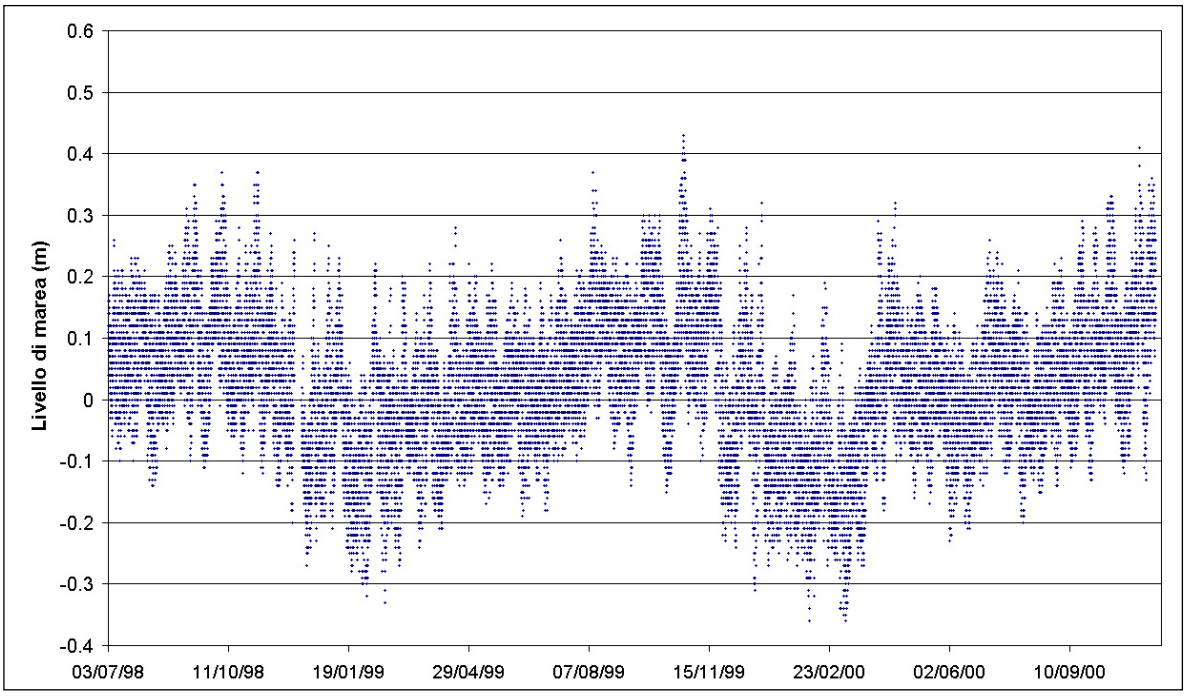


FIG. 3-2 - IMPERIA: ESCURSIONI DI MAREA NEL PERIODO AGOSTO '98-NOVEMBRE '00

le componenti armoniche sub-mareali dello spettro di frequenza del livello marino comprese nella banda limitata dalle componenti mareali diurna e mensile. Pertanto la componente meteorologica $\eta_m(t)$ è stata determinata applicando al mareogramma rilevato $\eta(t)$ un opportuno filtro orario passa-basso, in grado di trattenere le componenti semidiurna e diurna della marea lasciando passare i contributi associabili a frequenze più basse. La marea astronomica è costituita dalla differenza tra il mareogramma registrato e quello residuo ottenuto applicando il filtro passa-basso, ovvero il mareogramma meteorologico. Nella Fig. 3-3 si riporta a titolo di esempio il risultato dell'elaborazione per l'anno 2006.

Nella Tab. 3.1 sono riportati, per i diversi anni di registrazione considerati, i valori massimi della componente meteorologica della marea.

TAB. 3.1 - VALORI MASSIMI ANNUALI DELLA MAREA METEOROLOGICA

Anno	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
$\eta_{m,max}$ **(m)**	0,27	0,33	0,40	0,30	0,46	0,44	0,37	0,29	0,33	0,32	0,28

L'analisi statistica di tali valori estremi è stata effettuata adattando la distribuzione di probabilità di Gumbel e la distribuzione Tipo III di Pearson. I risultati dell'elaborazione sono riportati nella tabella Tab. 3.2, con riferimento a valori del tempo di ritorno pari a 1, 5, 10, 20, 50 e 100 anni.

Per determinare il livello estremo complessivo, occorre sommare al valore massimo stimato del contributo meteorologico un valore rappresentativo delle più elevate altezze di marea astronomica. A tale proposito sono stati individuati, per l'intero periodo 1998 – 2008 e relativamente a ciascun giorno mareale, i valori delle più elevate alte maree astronomiche. Facendo la media di tali dati si è stimata la marea astronomica di riferimento per il calcolo dei livelli estremi complessivi, che è risultata pari a +0,12 m. I valori estremi complessivi del livello marino sono indicati anch'essi in Tab. 3.2.

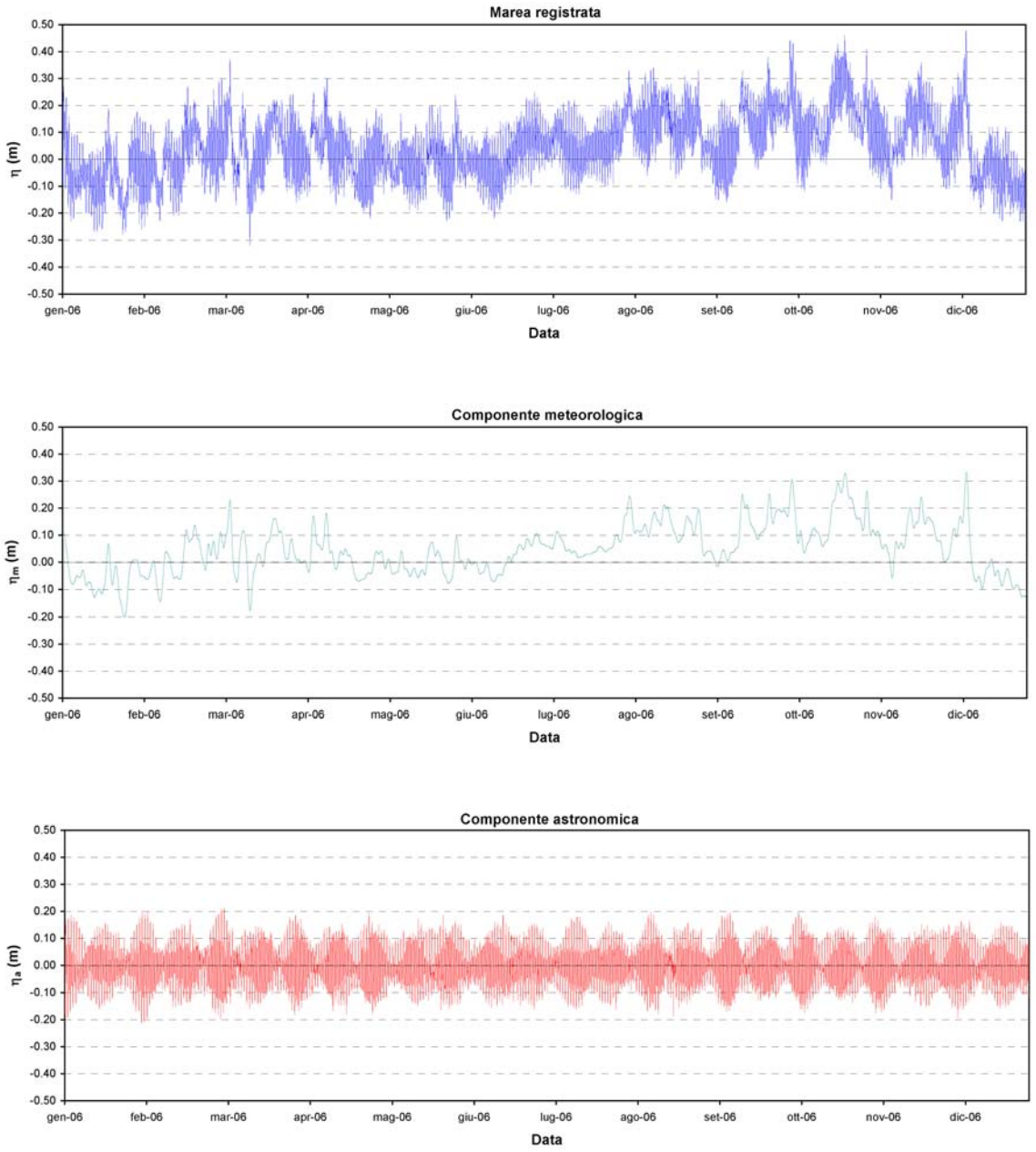


FIG. 3-3 - ESEMPIO DI SCOMPOSIZIONE DELLA REGISTRAZIONE DI MAREA NELLE COMPONENTI METEOROLOGICA ED ASTRONOMICA (STAZIONE DI GENOVA, ANNO 2006)

TAB. 3.2 - RISULTATI DELL'ANALISI STATISTICA DEI LIVELLI ESTREMI

T_r (anni)	M. Meteorologica (m)		M. Astronomica (m)	Livello marino (m)
	Pearson (tipo III)	Gumbel		
1	0,26	0,26	0,12	0,38 / 0,38
5	0,40	0,41	0,12	0,52 / 0,53
10	0,43	0,46	0,12	0,55 / 0,58
20	0,46	0,50	0,12	0,58 / 0,62
50	0,50	0,56	0,12	0,62 / 0,68
100	0,53	0,61	0,12	0,65 / 0,73

4. LE CONDIZIONI ANEMOMETRICHE

4.1. Le condizioni frequenti di vento

La disponibilità di serie storiche di dati di vento molto lunghe riguardano una stazione a terra in prossimità dell'intervento, proprio a Vado Ligure. I dati di Vado Ligure che si riferiscono al periodo 1986-1997, che come si può notare nel seguito sono stati selezionati per definire le condizioni di vento sottocosta, sono stati ottenuti dalla stazione ubicata in corrispondenza della postazione Capo Vado 1 sita in località Scoglio bianco (Lat. Nord 44°15'30", Long. Est 8°26'58") che si trova proprio vicino al porto di Vado, oggi gestita dall'ARPAL Liguria. L'anemometro è ubicato ad una quota piuttosto alta di 220 m sul l.m.m. (quota del terreno 200 m e l'anemometro posizionato a 20 m da terra) ed ha registrato i dati con cadenza semioraria. Si ritiene che questo anemometro sia in grado di fornire dati rappresentativi delle condizioni locali.

Sono stati poi raccolti i dati di vento (con cadenza trioraria) ricostruiti presso il Centro Meteorologico di Bracknell con riferimento al periodo 1987-2008, che vengono utilizzati per definire le condizioni di vento al largo e sulla base delle quali il Centro Meteorologico di Bracknell ha ricostruito le condizioni d'onda al largo. I dati raccolti sono stati elaborati al fine di ottenere le condizioni di vento nel paraggio d'interesse, con riferimento sia alle condizioni frequenti che a quelle estreme (vedi paragrafo seguente).
Nelle Fig. 4-1 e Fig. 4-2 sono mostrate la rose dei venti dedotte dalle due serie anemometriche e nelle Tab. 4.1, Tab. 4.2 le percentuali di occorrenza per classi di velocità e direzioni del vento. Si fa notare che i dati registrati all'anemometro di Vado Ligure sono stati riportati alla quota di 10 m sul l.m.m., utilizzando la nota formula di letteratura $u_{10}=u_z\,(10/z)^{1/7}$.

Le velocità del vento dell'UKMO risultano un po' più basse rispetto a quelle registrate all'anemometro di Vado Ligure. Anche le direzioni di provenienza del vento risentono per l'anemometro di Vado Ligure dei fenomeni legati alla particolare orografia del sito d'interesse.

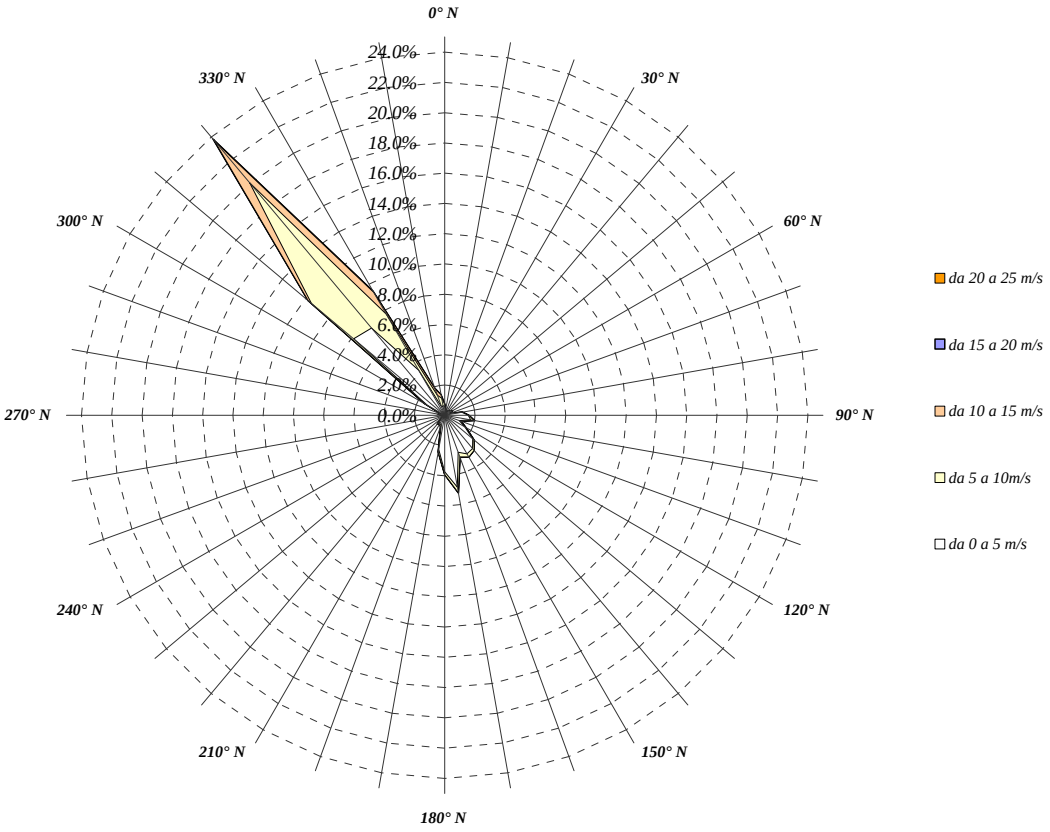


FIG. 4-1 - VADO LIGURE, ROSA DEI VENTI - DATI ORARI, 1986-1997

TAB. 4.1 - FREQUENZE DI OCCORRENZA DELLE VELOCITÀ E DIREZIONE DEL VENTO A VADO LIGURE (1986-1997)

VV (m/s)	≥ 0	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 25	≥ 30	≥ 35	Tot.
DIREZIONE °N	< 5	< 10	< 15	< 20	< 25	< 30	< 35	< 40	
5	**0.583**	**0.149**	**0.014**	**0.005**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.751**
15	**0.378**	**0.030**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.409**
25	**0.197**	**0.011**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.209**
35	**0.246**	**0.011**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.258**
45	**0.392**	**0.010**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.404**
55	**0.436**	**0.009**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.445**
65	**0.598**	**0.007**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.607**
75	**0.368**	**0.014**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.382**
85	**1.156**	**0.031**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.189**
95	**1.552**	**0.044**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.598**
105	**1.736**	**0.218**	**0.050**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.011**
115	**1.027**	**0.114**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.145**
125	**1.548**	**0.085**	*0.000*	**0.003**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.636**
135	**2.417**	**0.095**	**0.003**	*0.000*	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.516**
145	**2.871**	**0.158**	**0.003**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.033**
155	**2.941**	**0.246**	**0.003**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.190**
165	**2.604**	**0.328**	**0.025**	**0.007**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.965**
175	**4.827**	**0.376**	**0.013**	**0.002**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**5.219**
185	**3.737**	**0.181**	**0.007**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**3.926**
195	**2.270**	**0.189**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**2.460**
205	**0.671**	**0.121**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.791**
215	**0.650**	**0.061**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.711**
225	**0.526**	**0.174**	**0.059**	**0.003**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.761**
235	**0.299**	**0.023**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.324**
245	**0.113**	**0.006**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.121**
255	**0.055**	**0.005**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.061**
265	**0.102**	**0.008**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.112**
275	**0.209**	**0.008**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.219**
285	**0.383**	**0.046**	**0.004**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.432**
295	**0.246**	**0.025**	**0.002**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**0.273**
305	**1.322**	**0.224**	**0.033**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.578**
315	**7.862**	**3.623**	**0.291**	**0.012**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**11.788**
325	**7.519**	**12.529**	**3.588**	**0.166**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**23.802**
335	**3.429**	**4.289**	**1.658**	**0.101**	**0.001**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**9.478**
345	**0.561**	**0.849**	**0.449**	**0.029**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.888**
355	**0.648**	**0.504**	**0.217**	**0.012**	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	**1.381**
Tot.	**56.480**	**24.799**	**6.442**	**0.351**	**0.002**	**0.000**	**0.000**	**0.000**	**88.074**

4.580% **eventi di calme**

7.346% **eventi di direzione indeterminata**

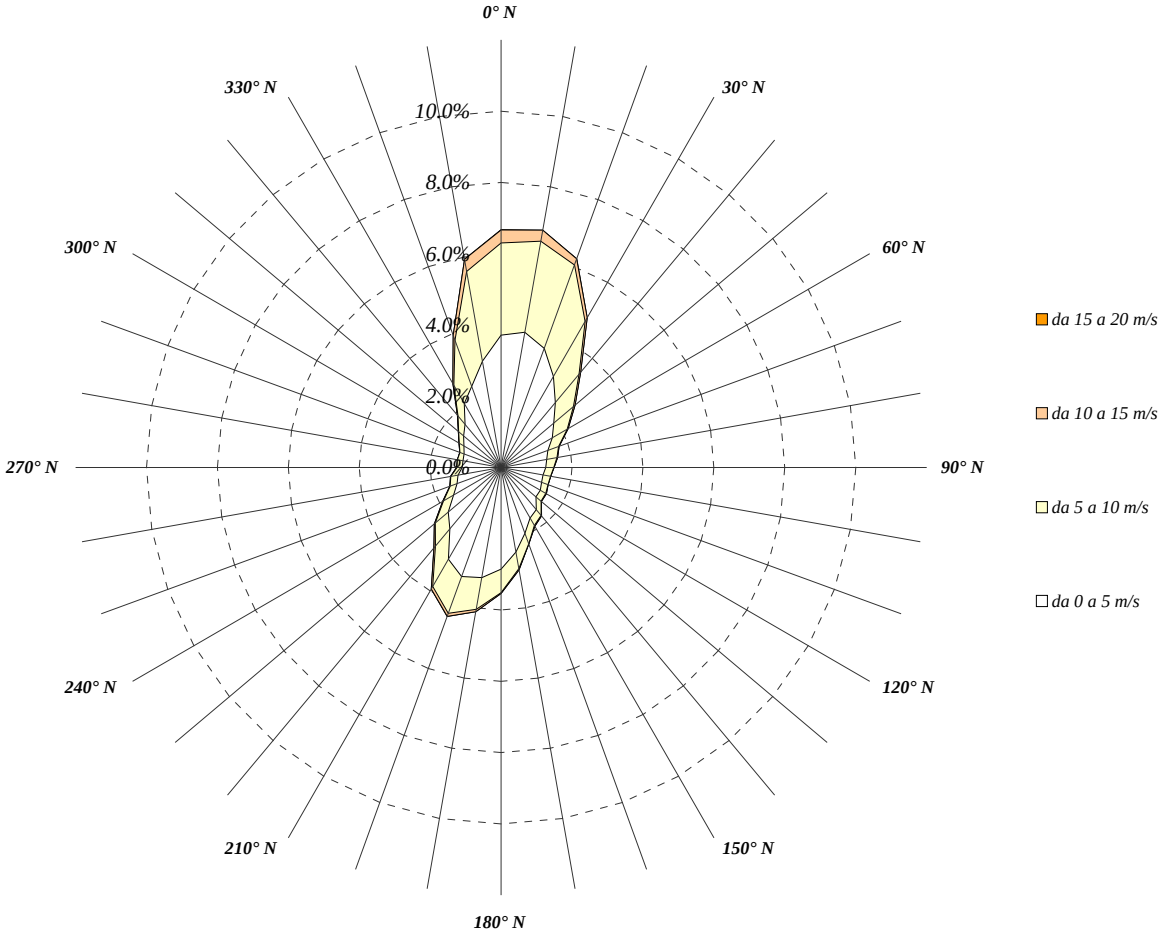


FIG. 4-2 - PUNTO UKMO - ROSA DEI VENTI. DATI TRIORARI, 1987-2008

TAB. 4.2 - FREQUENZE DI OCCORRENZA DELLE VELOCITÀ E DIREZIONE DEL VENTO AL LARGO – DATI UKMO (1987-2008)

VV (m/s)	≥ 0	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20	≥ 25	≥ 30	≥ 35	Tot.
DIREZIONE °N	< 5	< 10	< 15	< 20	< 25	< 30	< 35	< 40	
5	3.714	2.586	0.364	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	6.677
15	3.856	2.593	0.314	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	6.765
25	3.555	2.495	0.180	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	6.234
35	2.951	1.784	0.119	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.853
45	2.379	1.039	0.070	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.488
55	1.941	0.718	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.721
65	1.668	0.482	0.032	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	2.183
75	1.402	0.321	0.016	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	1.743
85	1.307	0.291	0.018	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	1.617
95	1.255	0.230	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.496
105	1.200	0.212	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.419
115	1.214	0.191	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.410
125	1.274	0.179	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.470
135	1.279	0.193	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.484
145	1.542	0.209	0.021	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	1.773
155	1.633	0.244	0.021	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	1.899
165	1.964	0.308	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	2.285
175	2.409	0.471	0.037	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.917
185	2.851	0.661	0.021	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	3.536
195	3.135	0.902	0.072	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	4.110
205	3.254	1.099	0.095	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	4.452
215	2.970	0.887	0.077	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	3.940
225	2.253	0.627	0.063	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	2.954
235	1.947	0.478	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.460
245	1.545	0.333	0.021	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	1.901
255	1.319	0.212	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.538
265	1.235	0.207	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.447
275	1.099	0.142	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.255
285	1.088	0.163	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.253
295	1.111	0.126	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.240
305	1.207	0.154	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.372
315	1.377	0.180	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.575
325	1.584	0.310	0.019	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	1.915
335	2.076	0.590	0.051	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	2.721
345	2.428	1.374	0.147	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	3.955
355	3.033	2.553	0.349	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	5.938
Tot.	72.056	25.542	2.327	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000

4.2. Le condizioni estreme di vento

Per la definizione dei valori estremi della velocità del vento sottocosta è stato elaborato il set di dati registrati all'anemometro di Vado Ligure presentato nel paragrafo precedente, mediante la distribuzione di probabilità di Gumbel con riferimento all'elaborazione dei massimi annuali.
Nelle tabelle riportate di seguito sono presentati i risultati delle elaborazioni svolte. I valori della velocità del vento di Vado Ligure indicati in Tab. 4.3 fanno riferimento alla quota di 220 m sul l.m.m., mentre quelli indicati in Tab. 4.4 sono riferiti alla quota di 10 m sul l.m.m..

TAB. 4.3 - VALORI DELLA VELOCITÀ DEL VENTO (M/S) IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO - DATI DELL'ANEMOMETRO DI VADO LIGURE ALLA QUOTA DI 220 M SUL L.M.M.

Tempo di ritorno (anni)			
2	**10**	**50**	**100**
28	32	36	37

TAB. 4.4 - VALORI DELLA VELOCITÀ DEL VENTO (M/S) IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO - DATI DELL'ANEMOMETRO DI VADO LIGURE RIPORTATI ALLA QUOTA DI 10 M SUL L.M.M.

Tempo di ritorno (anni)			
2	**10**	**50**	**100**
18	21	23	24

Per la definizione dei valori estremi della velocità del vento al largo è stato elaborato il set di dati dell'UKMO presentato nel paragrafo precedente, mediante la distribuzione di probabilità di Gumbel con riferimento all'elaborazione dei massimi annuali.

Nella tabella riportata di seguito sono presentati i risultati delle elaborazioni svolte.

TAB. 4.5 - VALORI DELLA VELOCITÀ DEL VENTO (M/S) IN FUNZIONE DEL TEMPO DI RITORNO - DATI NEL PUNTO AL LARGO UKMO

Tempo di ritorno (anni)			
2	**10**	**50**	**100**
17	19	22	23

5. IL MOTO ONDOSO AL LARGO

5.1. I dati di moto ondoso disponibili

I dati che più si prestano ad una definizione delle caratteristiche meteomarine di un paraggio d'interesse sono riportati di seguito, insieme ad un commento inerente la relativa affidabilità ed una giustificazione circa il loro eventuale utilizzo nell'ambito del presente studio:

- Misurazioni di moto ondoso: rappresentano l'informazione migliore che possa essere utilizzata per la definizione delle condizioni marine esistenti al largo del sito in esame. La loro effettiva utilità e validità è legata al tipo di dati disponibili, alla durata del periodo di misurazione e, naturalmente, all'ubicazione dell'ondametro. Tali dati possono essere di tipo direzionale (all'altezza d'onda è associata la direzione di propagazione) o non direzionale.

I dati disponibili relativamente alla costa ligure sono quelli:

- misurati dall'ENEL e dall'Università di Genova, al largo di Nervi, nel periodo 1978-1982;
- quelli dell'ondametro di Vado Ligure, installato da poco (2007) e per cui sono disponibili i dati relativi al periodo 08/07 – 04/08;
- quelli dell'ondametro di Nizza relativi al periodo 2002-2007;
- quelli della Rete Ondametrica Nazionale di La Spezia, misurati dal 1989 ad oggi.

I primi due set di dati sono misurati in punti abbastanza vicini all'area in esame (quello di Vado in particolare) ma, oltre ad essere del tipo "non direzionale", coprono un periodo di tempo piuttosto breve ed hanno frequenti interruzioni. Ciononostante sono state comunque reperite le registrazioni dell'ondametro di Vado, allo scopo di confrontarle con gli altri set di dati.

L'ondametro di Nizza si trova su fondali di 190 m, nel punto di coordinate (43° 38,30' N; 7° 13,70' E) ed è direzionale. Il campione limitato di dati registrato è piuttosto esiguo e non sufficiente per un analisi degli estremi.

I dati della R.O.N., pur essendo direzionali, affidabili e con quasi 20 anni di registrazioni, risultano poco utili per ricavarne informazioni relative al paraggio di Vado Ligure data la notevole distanza e, soprattutto, la sostanziale differenza nell'esposizione geografica.

- Ricostruzione del moto ondoso dai dati di vento e di moto ondoso del Meteorological Office: i dati del MET OFFICE, ricostruiti a partire dalle carte sinottiche del tempo secondo il metodo di Bracknell, adottato dall'European Wave Model, forniscono, in corrispondenza dei nodi di una griglia, i dati triorari di vento e di moto ondoso dedotti attraverso l'applicazione del già citato metodo.

I valori di altezza significativa dell'onda vengono desunti dallo spettro dell'energia, quindi calcolati nel "dominio della frequenza". L'altezza significativa fornita è dunque quella che viene indicata come Hm_0 e che viene calcolata dal momento spettrale di ordine 0, che in pratica rappresenta l'energia dello spettro. Essa è in generale diversa da quella che viene indicata come Hs e che viene calcolata nel "dominio del tempo" attraverso l'analisi zero crossing; ai fini pratici però in acque profonde le differenze tra le due non sono sostanziali, quindi i valori forniti vengono assunti come Hs.

Tali informazioni sono considerate in generale dagli addetti ai lavori nell'ambito internazionale abbastanza affidabili (soprattutto per quanto riguarda il clima di moto ondoso). A questo va aggiunto la notevole mole di dati disponibili normalmente che consente di ricavare delle estrapolazioni affidabili. Si allega (vedi Appendice 2) a riguardo il 'Quality statement' del Met Office che presenta le caratteristiche degli strumenti che vengono utilizzati per la ricostruzione delle onde e le modalità di analisi.

Il nodo della griglia più vicino al sito in esame ha le coordinate 44° N e 8.74° E, ed è quello che è stato considerato negli studi dell'Università di Padova, in quanto ubicato in una posizione adeguata per lo studio delle onde al largo del sito d'interesse.

L'Università di Padova aveva acquisito i dati in questo punto per il periodo 1987-1998. Nello stesso punto della griglia sono stati acquisiti da Technital anche i dati relativi all'ultimo decennio 1998-2007, in modo da disporre di un ampio campione di dati (20 anni di dati complessivamente).

- Dati di moto ondoso del K.N.M.I. (Istituto Reale Meteorologico dei Paesi Bassi): tali dati, pur presentando il pregio di essere ampiamente diffusi, a basso costo e spesso riferiti a punti in alto mare, hanno il grosso inconveniente di essere stimati e non misurati, cosa che ne penalizza notevolmente l'affidabilità sia in termini di altezza d'onda sia di direzione di provenienza.
  La notevole estensione dell'area di provenienza dei dati è un altro aspetto che ne mina notevolmente l'affidabilità, potendo appartenere alcune stime a punti anche molto distanti da quello in studio, con il rischio che il moto ondoso attribuito alla zona d'interesse risulti, in realtà, rappresentativo di altre zone, sottoposte a condizioni marine ed anemometriche ben diverse, per intensità e settore di provenienza, da quelle effettivamente esistenti in prossimità del sito in esame.
  Nel nostro caso si è fatto riferimento ai dati KNMI disponibili, relativi al periodo 1961 – 1980, nell'ambito del territorio di mare delimitato a sud dai punti di coordinate (43°N; 8°E) e (43°N; 10°E) e delimitato a Nord dalla costa ligure (vedi AREA 1 in Fig. 5-1).
  Sono state elaborate circa 17.000 osservazioni, ridotte a circa 15.000 dopo aver eliminato i dati non completi e non affidabili. Sono state inoltre apportate le "correzioni" secondo le indicazioni di Soares, Jardine e Hogben□Lumb per rendere congruente il dato visivo (Hv) con l'altezza d'onda significativa (Hs).

In sintesi sono stati analizzati di seguito i seguenti dati:

- dati dell'UKMO, ricostruiti con il modello European Wave Model nel punto di coordinate 44° N e 8,74° E, relativi al ventennio 1987-2008 acquisiti dal Centro Meteorologico di Bracknell;
- i dati dell'ondametro direzionale di Nizza, ubicato nel punto di coordinate (43° 38,30' N; 7° 13,70' E), relativi al periodo 2002 – 2007;

– i dati KNMI relativi al periodo 1961-1980 osservati nell'ambito del territorio di mare delimitato dalle coordinate (43°N; 8°E) e (43°N; 10°E);

In Fig. 5-2 sono ubicati i punti di misura del moto ondoso, con riferimento ai dati precedentemente elencati.

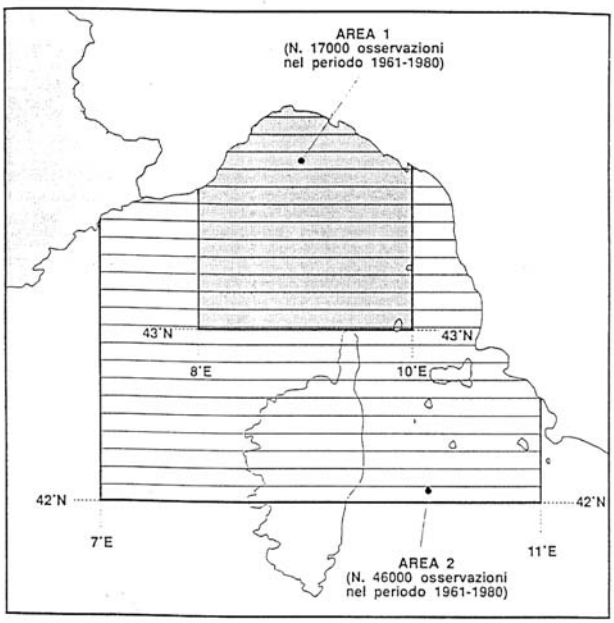


FIG. 5-1 - DATI DI MOTO ONDOSO KNMI - ESTENSIONE DELLE AREE DI RILIEVO DEI DATI

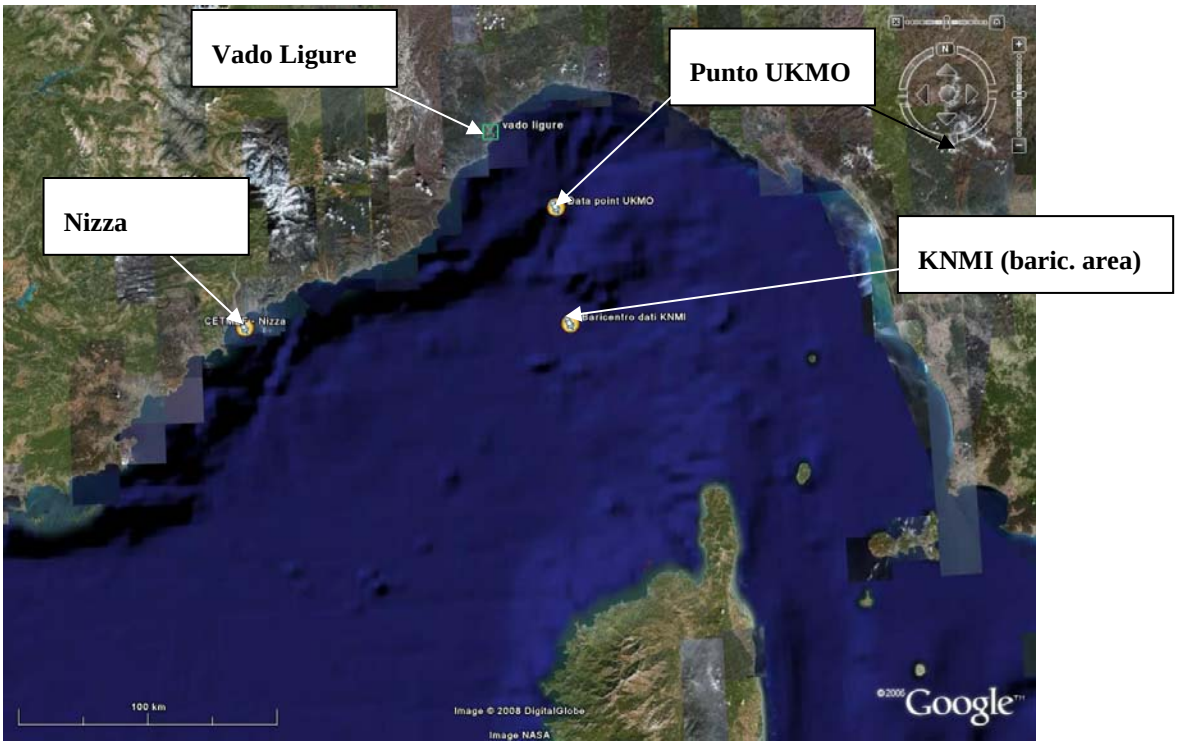


FIG. 5-2 - UBICAZIONE DEI PUNTI DI MISURA DELLE ONDE

5.2. Le condizioni frequenti di moto ondoso al largo

5.2.1. Il clima di moto ondoso al largo

Il porto di Vado Ligure ed il litorale compreso tra il Porto di Vado e il Porto di Savona sono interessati dalle onde provenienti dal settore 50-190°N, come è possibile dedurre dalla ubicazione e conformazione del paraggio d'interesse riportato in Fig. 5-3.

Nella relazione meteo marina del progetto definitivo sono stati analizzati i set di dati d'onda individuati nel capitolo precedente e per i dettagli a riguardo si rimanda ala relazione suddetta. Come detto in precedenza i dati del Centro Meteorologico di Bracknell sono considerati in generale dagli addetti ai lavori nell'ambito internazionale abbastanza affidabili (soprattutto per quanto riguarda il clima di moto ondoso). A questo va aggiunto la notevole mole di dati disponibili normalmente che consente di ricavare delle estrapolazioni affidabili. Si allega (vedi Appendice 2) a riguardo il 'Quality statement' del Met Office che presenta le caratteristiche degli strumenti che vengono utilizzati per la ricostruzione delle onde e le modalità di analisi.

Pertanto a questi dati dell'UKMO, anche in relazione alla estensione della serie storica (circa 20 anni), si è fatto riferimento per la definizione del clima di moto ondoso al largo. I dati dell'UKMO relativi al periodo 1987-2008, sono costituiti da registrazioni triorarie che sono stati elaborati in modo da ottenere il clima delle onde in forma di tabelle delle frequenze, organizzate secondo classi di direzione intervallate di 10° e di altezza d'onda con ampiezza 0,5 m.

In Fig. 5-4 è riportato il clima di moto ondoso ricostruito elaborando il ventennio di dati disponibile. Nel grafico è stato riportato anche il settore di traversia di interesse (50 °N-190°N), in modo da evidenziare con più facilità le direzioni di provenienza delle onde di interesse per Vado Ligure.

In Tab. 5.1 sono presentati i valori delle frequenze di occorrenza per determinate altezze d'onda significative e direzioni di provenienza.

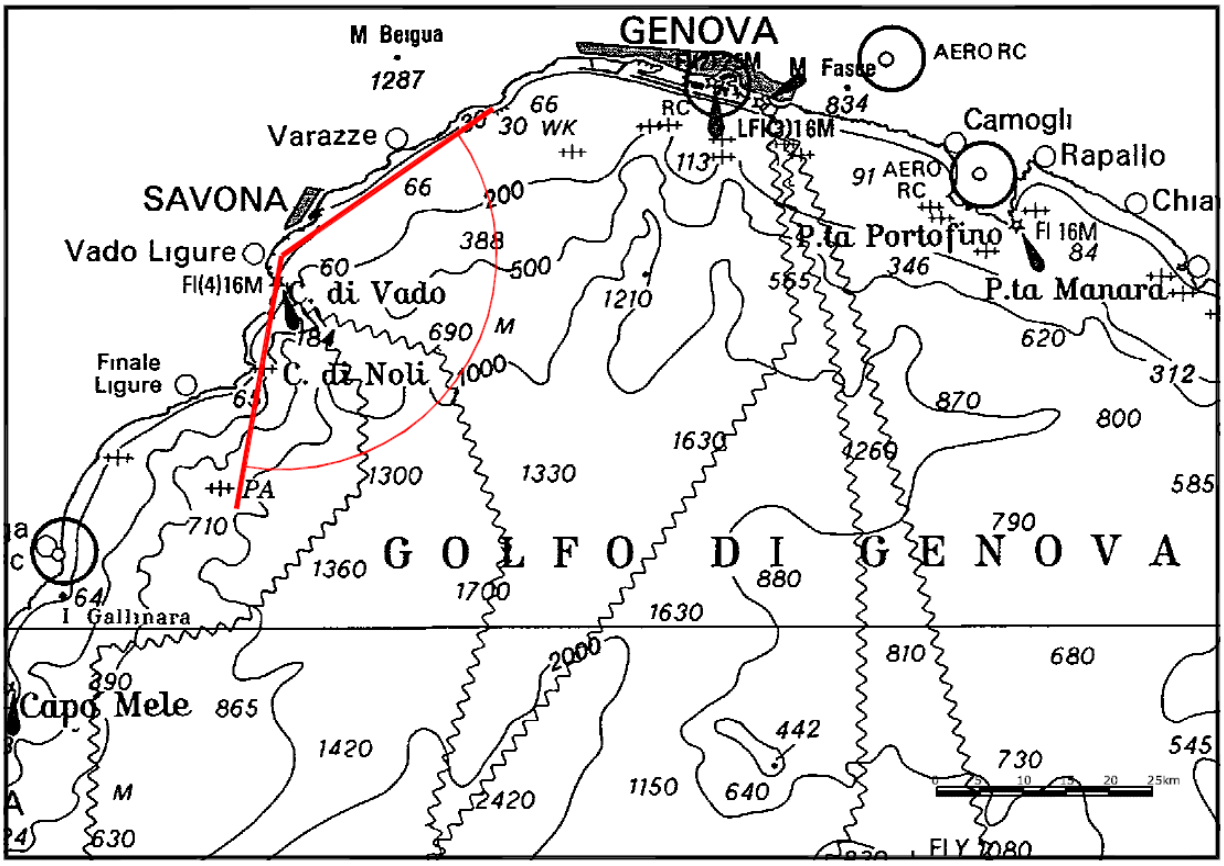


FIG. 5-3 - SETTORE DI TRAVERSIA CHE INTERESSA VADO LIGURE

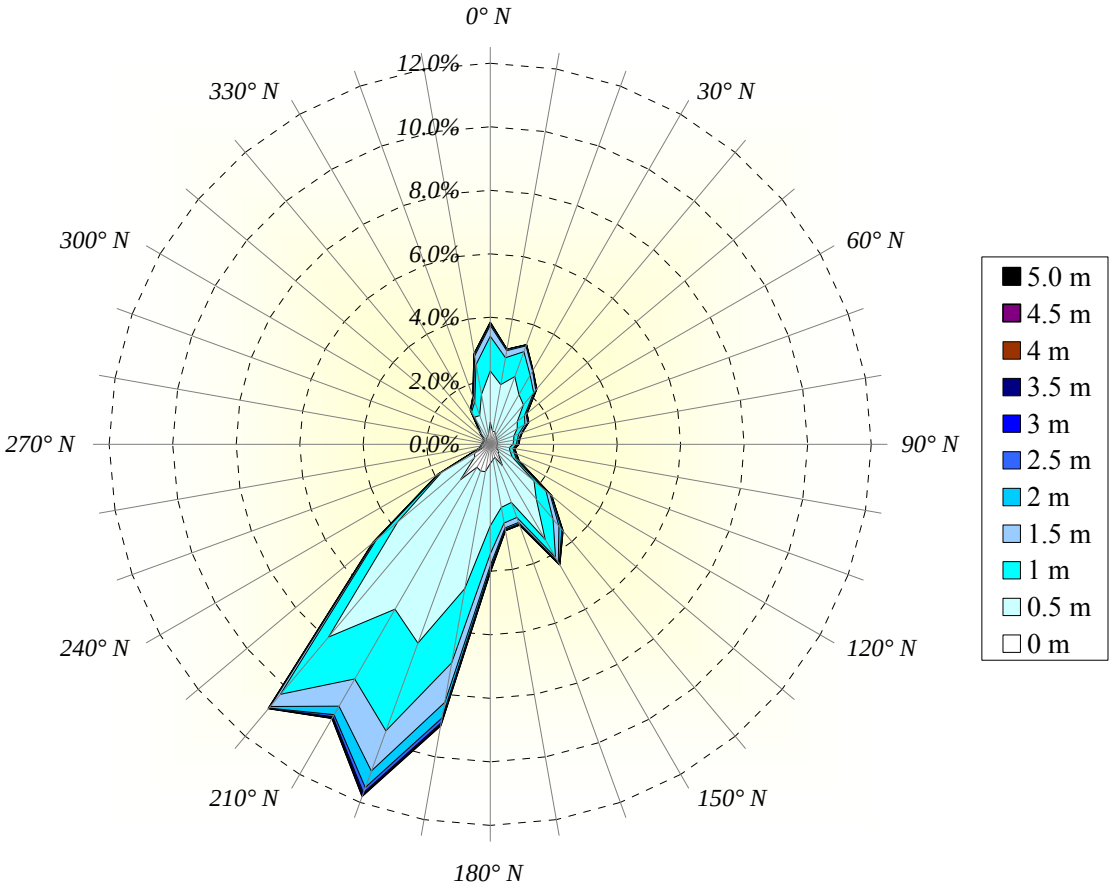


FIG. 5-4 - ROSA DEL MOTO ONDOSO AL LARGO DI VADO, NEL PUNTO DI COORDINATE 44°N; 8,73°E, OTTENUTA CON I DATI UKMO 1987 - 2008

TAB. 5.1 - CLIMA D'ONDA OTTENUTO CON I DATI UKMO PER IL PERIODO 1987-2008

Hs (m)	≥ 0	≥ 0.25	≥ 0.75	≥ 1.25	≥ 1.75	≥ 2.25	≥ 2.75	≥ 3.25	≥ 3.75	≥ 4.25	≥ 4.75	Tot.
DIREZIONE °N	< 0.25	< 0.75	< 1.25	< 1.75	< 2.25	< 2.75	< 3.25	< 3.75	< 4.25	< 4.75	< 5.25	
5	0.694	1.614	1.092	0.345	0.065	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.832
15	0.415	1.495	0.860	0.223	0.039	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.036
25	0.424	1.843	0.836	0.193	0.033	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.331
35	0.328	1.479	0.704	0.154	0.019	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.686
45	0.303	1.319	0.506	0.100	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.271
55	0.252	0.866	0.289	0.068	0.019	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.500
65	0.251	0.729	0.282	0.098	0.037	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.398
75	0.228	0.568	0.163	0.084	0.018	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.065
85	0.226	0.522	0.121	0.046	0.019	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.939
95	0.235	0.482	0.109	0.042	0.019	0.011	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.899
105	0.196	0.417	0.112	0.033	0.007	0.002	0.002	0.002	0.004	0.000	0.000	0.774
115	0.224	0.445	0.131	0.039	0.028	0.004	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.876
125	0.240	0.559	0.159	0.056	0.026	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	1.044
135	0.336	1.463	0.505	0.161	0.046	0.016	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	2.530
145	0.401	1.861	0.818	0.289	0.138	0.030	0.016	0.004	0.000	0.000	0.000	3.557
155	0.776	2.681	0.661	0.168	0.058	0.014	0.009	0.007	0.000	0.000	0.000	4.373
165	0.440	1.510	0.501	0.166	0.040	0.019	0.019	0.002	0.002	0.000	0.000	2.700
175	0.489	1.526	0.503	0.154	0.044	0.030	0.007	0.002	0.000	0.000	0.000	2.754
185	0.606	1.959	0.887	0.370	0.105	0.063	0.018	0.011	0.002	0.000	0.000	4.019
195	0.878	3.736	2.376	1.263	0.494	0.159	0.054	0.012	0.011	0.007	0.002	8.992
205	0.890	5.770	2.945	1.344	0.552	0.175	0.067	0.025	0.011	0.005	0.000	11.783
215	0.836	5.158	2.541	0.986	0.310	0.077	0.035	0.014	0.002	0.000	0.000	9.959
225	1.458	6.464	2.358	0.499	0.063	0.014	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	10.858
235	0.647	3.163	0.866	0.112	0.026	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	4.817
245	0.566	1.207	0.098	0.012	0.007	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.894
255	0.217	0.119	0.014	0.009	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.364
265	0.170	0.100	0.016	0.007	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.294
275	0.165	0.077	0.016	0.005	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.266
285	0.144	0.070	0.011	0.002	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.231
295	0.156	0.065	0.012	0.012	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.249
305	0.126	0.063	0.026	0.004	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.224
315	0.121	0.109	0.023	0.014	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.273
325	0.186	0.233	0.060	0.011	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.491
335	0.223	0.760	0.189	0.047	0.018	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.240
345	0.258	0.711	0.454	0.109	0.044	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.582
355	0.315	1.276	0.957	0.272	0.061	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.896
Tot.	14.418	52.416	22.199	7.497	2.400	0.706	0.231	0.086	0.032	0.012	0.002	100.00

5.2.2. Caratteristiche delle mareggiate del paraggio d'interesse

Le mareggiate più frequenti provengono dalle direzioni 210°N e 0 - 30°N, che sono al di fuori del settore di interesse.

Per evidenziare le caratteristiche degli eventi di moto ondoso più significativi occorsi nel ventennio sono presentati in Fig. 5-5÷Fig. 5-7 i diagrammi polari degli eventi di moto ondoso triorari con Hs superiore a 2 m rispettivamente per l'onda risultante, di mare vivo e di swell. Nella Fig. 5-8 è presentato il diagramma polare delle mareggiate con H_s al colmo superiore a 2 m.

Si fa notare che nel settore d'interesse ed in particolare quello delimitato da 50-150°N (essendo le direzioni d'onda da 150 a 190°N schermate dalla diga foranea esistente) si possono individuare 3 mareggiate più significative con H_s al colmo superiore a 2,5 m:

1. Mareggiata dell' 1 marzo 1993 – $H_{s\ colmo}$= 4.1 m e Dir.=105°N
2. Mareggiata del 23 dicembre 1994 – $H_{s\ colmo}$= 2.7 m e Dir.=54°N
3. Mareggiata del 14 dicembre 2001 – $H_{s\ colmo}$= 3.6 m e Dir.=135°N

Nel settore 100-150°N si sono verificate altre mareggiate con Hs al colmo superiore a 2,5 m ma con direzioni prossime a 150°N e pertanto di minore interesse in quanto vengono schermate dalla diga foranea esistente con riferimento alla possibilità che interessino il porto di Vado Ligure in fase di esercizio della nuova piattaforma.

Le registrazioni delle suddette 3 mareggiate (altezza d'onda e direzione), distinguendo la componente di mare vivo e di swell, sono riportate in Fig. 5-9÷Fig. 5-11.

La mareggiata 1. è quella di intensità maggiore (Hs superiore a 4 m) ed è caratterizzata da una direzione di 105°N con una predominante componente da mare vivo. La mareggiata 2. rappresenta l'unico evento relativo al primo quadrante di una certa intensità ed è caratterizzata da una componente significativa di mare vivo. Queste sono le uniche 2

mareggiate d'interesse che si sono verificate nel ventennio 1987-2008 che interessano il nostro paraggio.

La mareggiata 3. invece, occorsa nel dicembre 2001, è caratterizzata da una predominante componente da swell con direzione estremamente variabile tra 50 e 150°N. L'onda risultante in effetti presenta un valore al colmo (Hs=3,6 m) che nelle sei ore passa da 99° a 135°N. Rimangono a riguardo alcune perplessità in merito alle caratteristiche di queste mareggiata a cui non si riesce ad assegnare in modo preciso una direzione di provenienza.

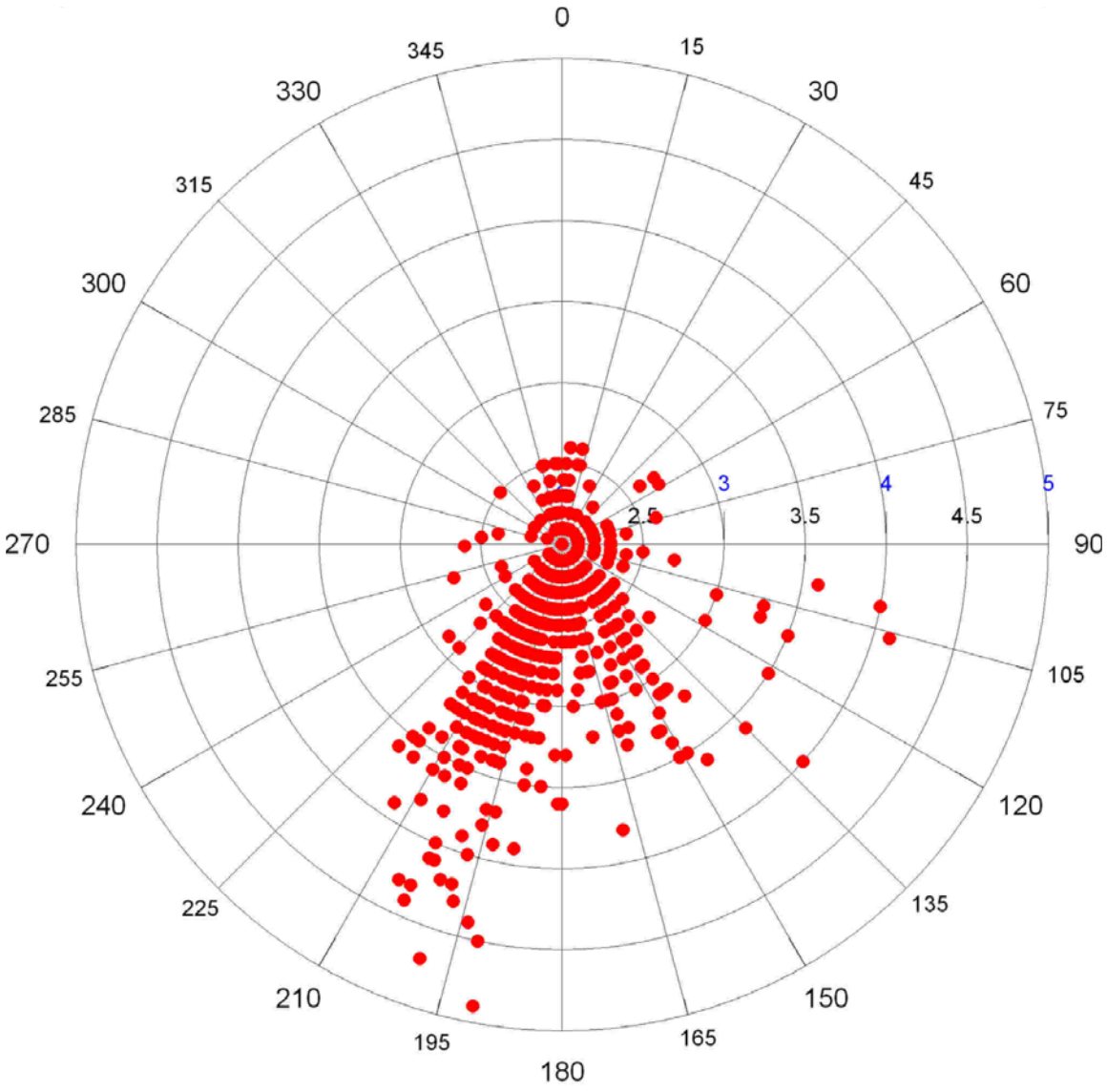


FIG. 5-5 - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI (TRIORARI) DI MOTO ONDOSO CON H_S MAGGIORE DI 2 M – DATI UKMO 1987-2008

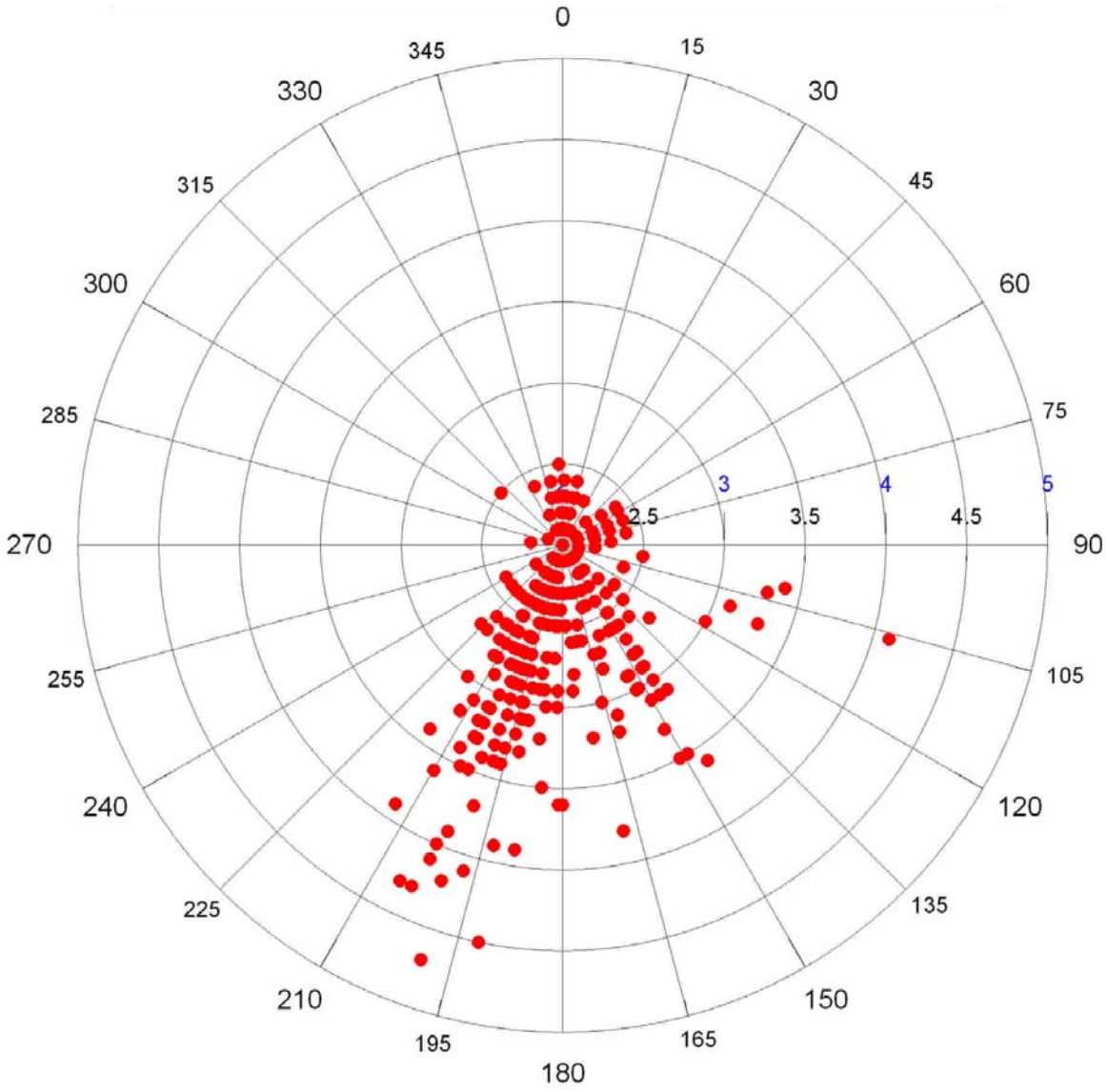


FIG. 5-6 - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI (TRIORARI) DI MOTO ONDOSO (MARE VIVO) CON H_S MAGGIORE DI 2 M – DATI UKMO 1987-2008

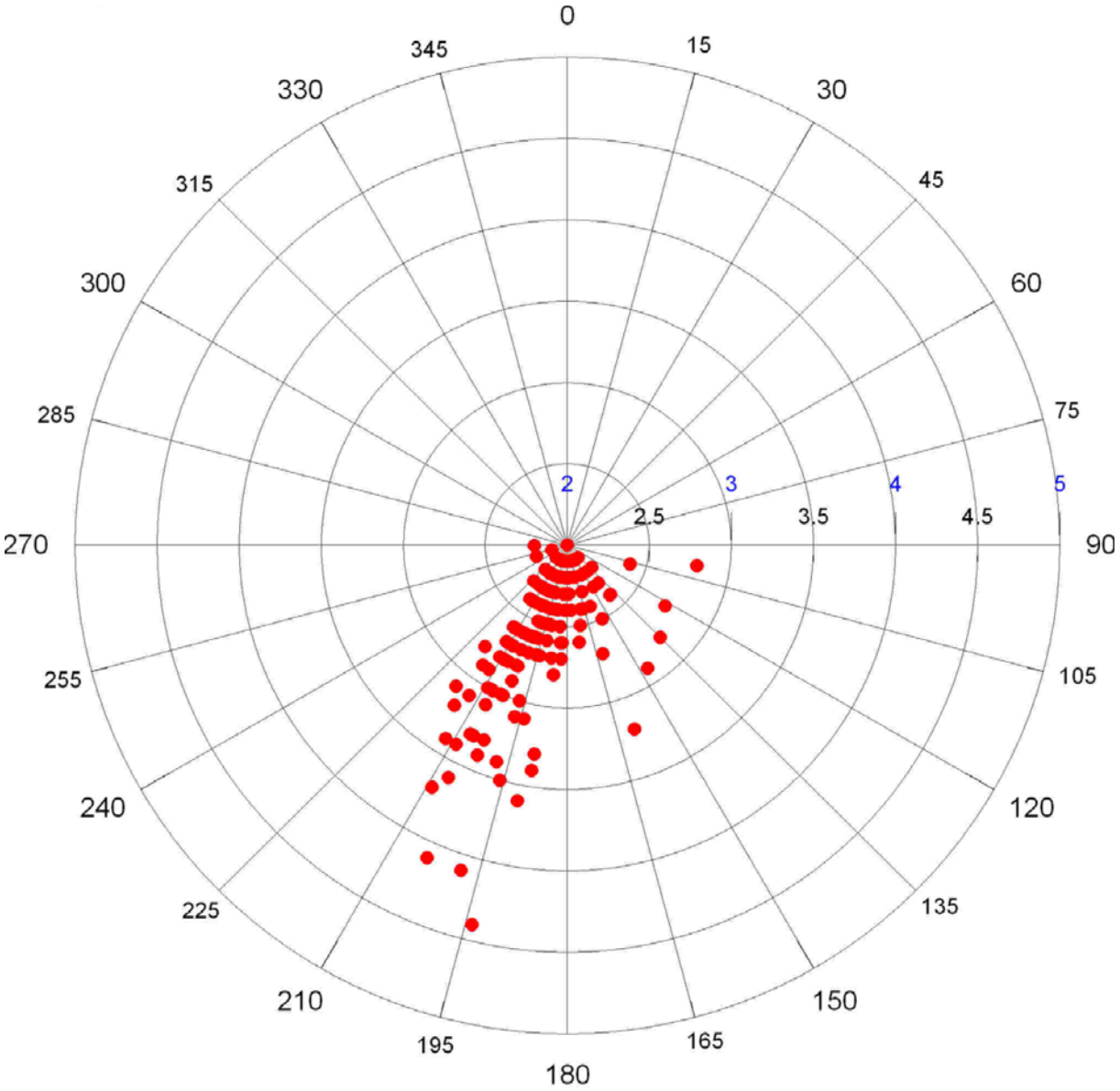


FIG. 5-7 - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DEGLI EVENTI (TRIORARI) DI MOTO ONDOSO (SWELL) CON H_S MAGGIORE DI 2 M – DATI UKMO 1987-2008

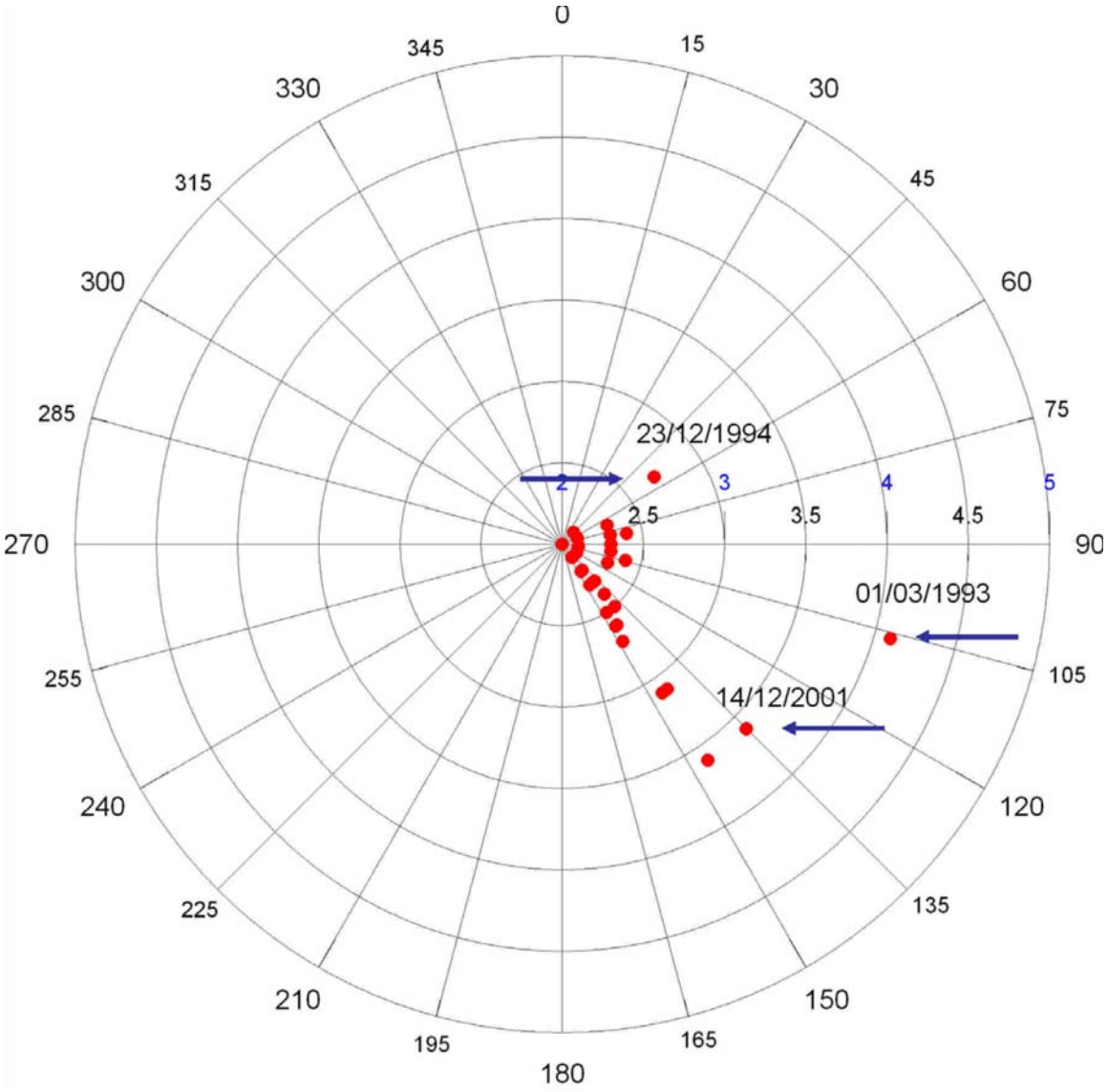
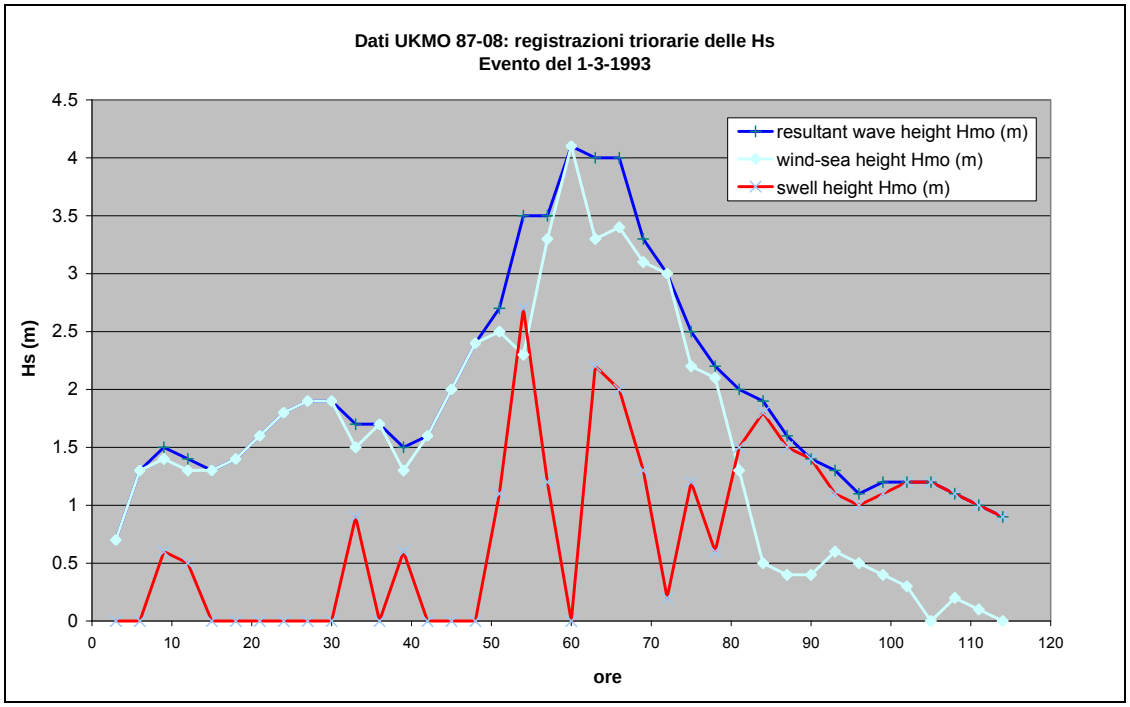


FIG. 5-8 - DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELLE MAREGGIATE CON $H_{S\ COLMO}$ MAGGIORE DI 2 M RELATIVAMENTE AL SETTORE DI MAGGIORE INTERESSE 45-150°N – DATI UKMO 1987-2008



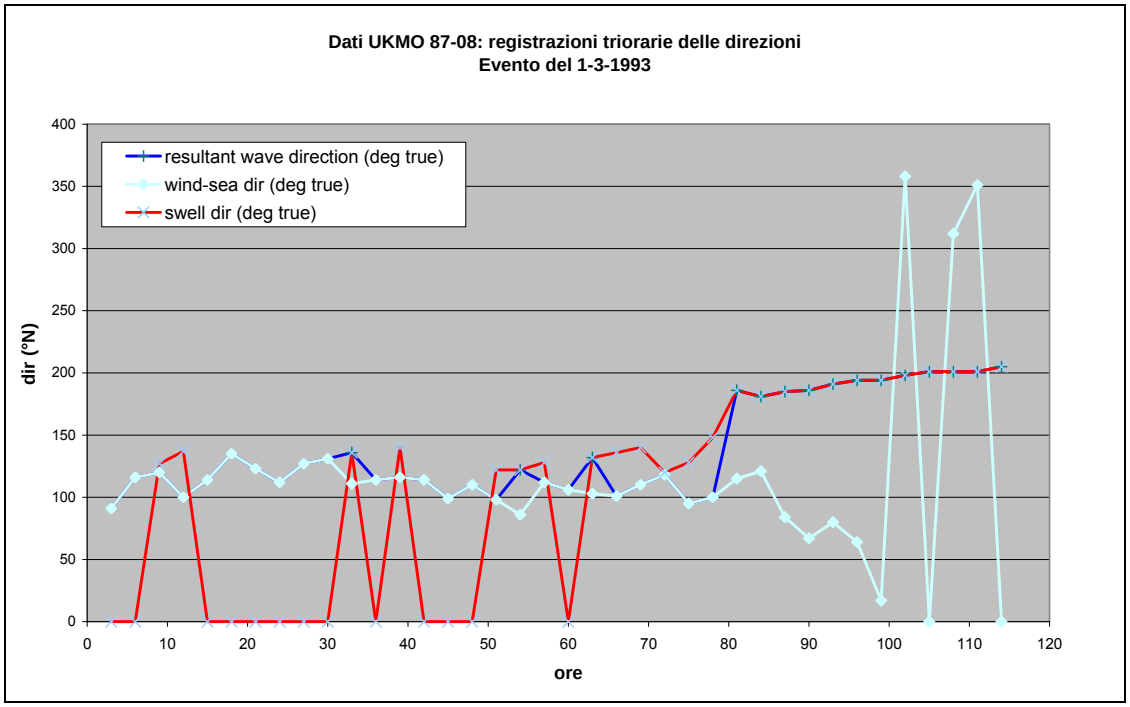
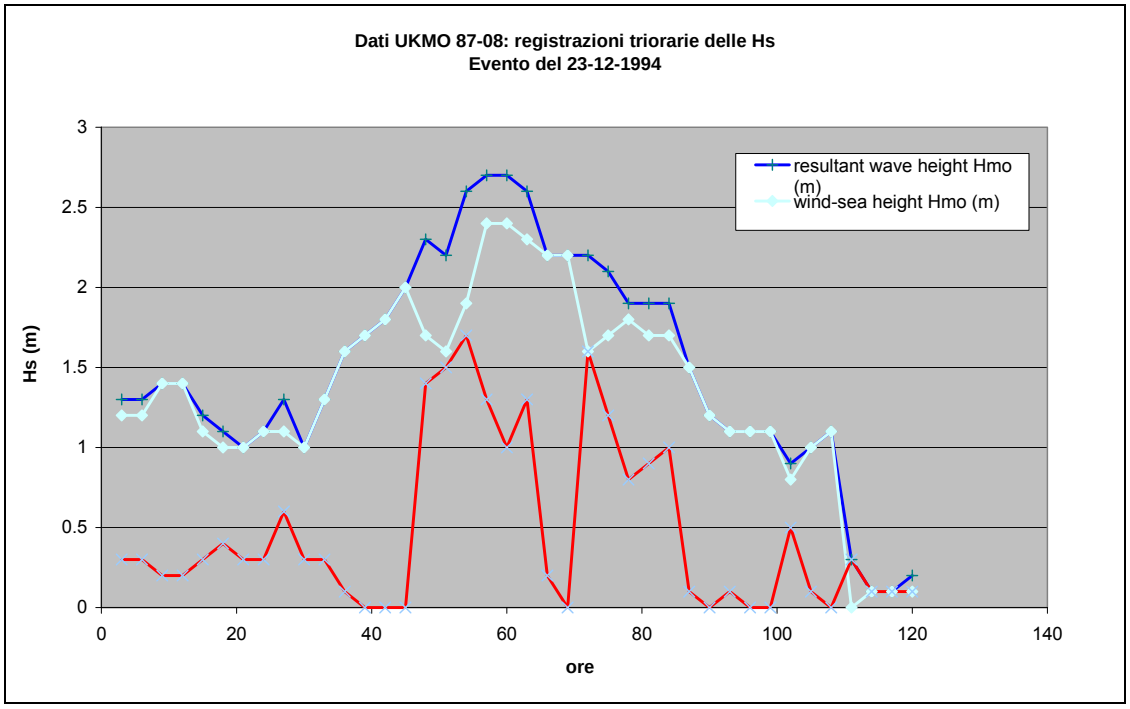


FIG. 5-9 - MAREGGIATA DELL' 1 MARZO 1993 – $H_{S\,COLMO}$= 4,1 M E DIR.=105°N



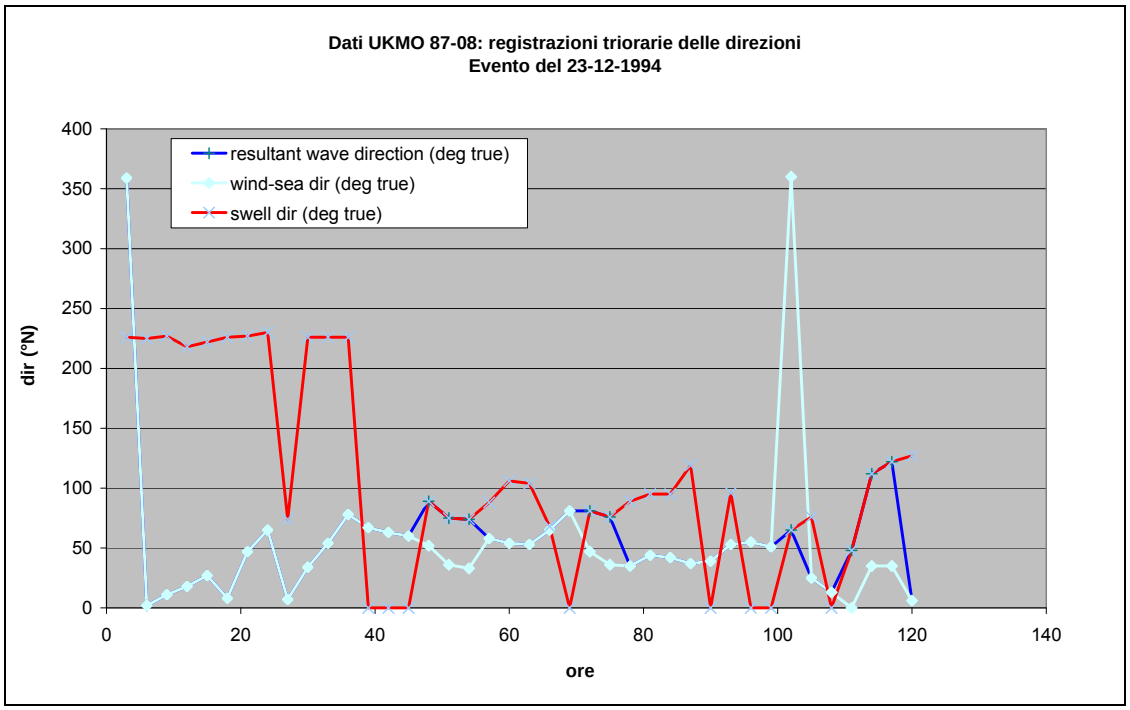
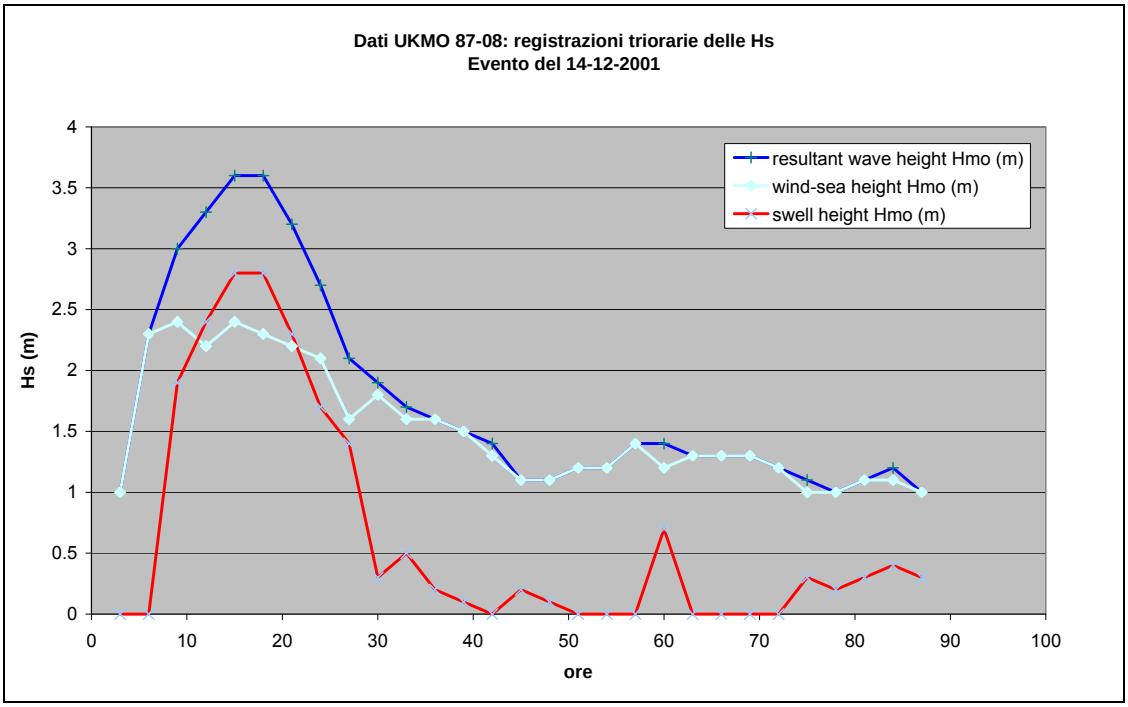


FIG. 5-10 - MAREGGIATA DEL 23 DICEMBRE 1994 – $H_{S\ COLMO}$= 2,7 M E DIR.=54°N


Dati UKMO 87-08: registrazioni triorarie delle Hs
Evento del 14-12-2001
resultant wave height Hmo (m)
wind-sea height Hmo (m)
swell height Hmo (m)
Hs (m)
ore
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

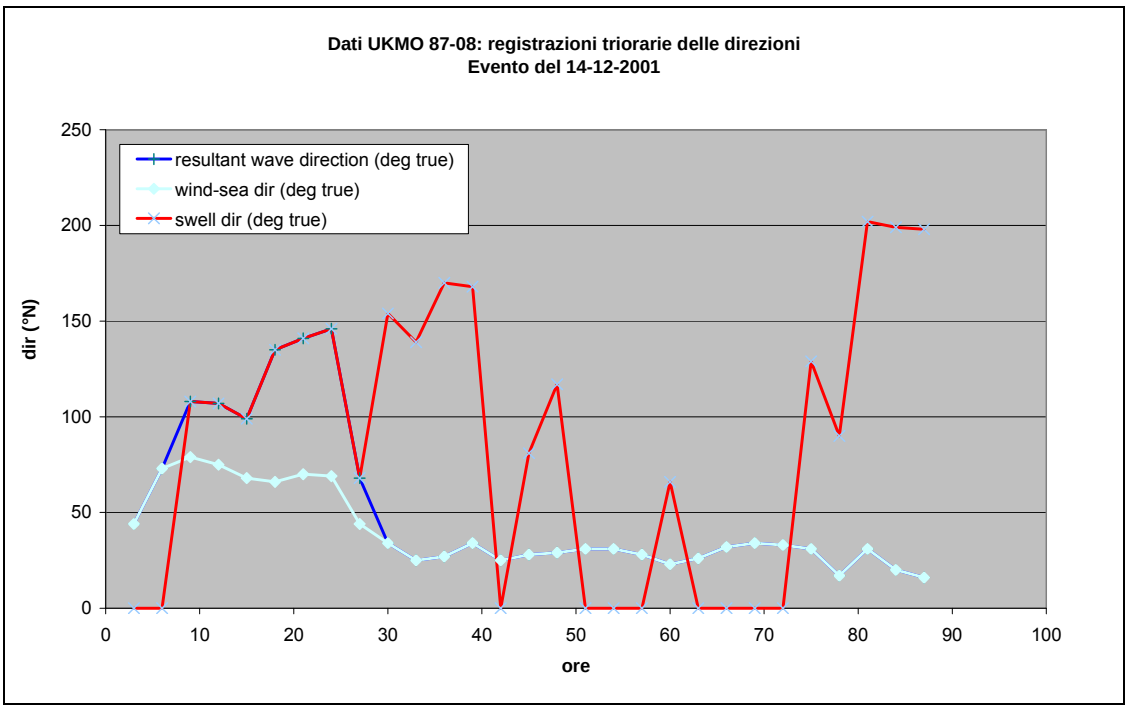

Dati UKMO 87-08: registrazioni triorarie delle direzioni
Evento del 14-12-2001
resultant wave direction (deg true)
wind-sea dir (deg true)
swell dir (deg true)
dir (°N)
ore
0
50
100
150
200
250
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

FIG. 5-11 - MAREGGIATA DEL 14 DICEMBRE 2001 – $H_{S\ COLMO}$= 3,6 M E DIR.=99-135°N

5.3. Gli eventi estremi di moto ondoso al largo

5.3.1. Metodologia utilizzata

La statistica degli eventi estremi è stata effettuata utilizzando un codice di calcolo che permette di elaborare la serie dei dati di moto ondoso al largo e di analizzare opportunamente gli eventi statisticamente più significativi, al fine di individuare le caratteristiche progettuali di maggiore importanza per il dimensionamento e la verifica delle strutture portuali.

La metodologia in uso, attualmente ritenuta lo schema di analisi più efficiente ed accurato a disposizione (proposta da Goda nel 1988), è quella detta della **serie di durata parziale sopra soglia** o, seguendo la terminologia anglosassone, del metodo **P.O.T.** (**P**eaks **O**ver **T**reshold).

Questo metodo consente di estrarre dalla serie temporale dei dati di moto ondoso quei valori che siano, contemporaneamente, descrittivi del fenomeno fisico e mutuamente indipendenti. L'individuazione di questi eventi indipendenti, definiti "mareggiate", eseguita in base a opportuni criteri di scelta, consente di poterli analizzare dal punto di vista statistico come un processo di variabili aleatorie equidistribuite ed indipendenti, la realizzazione delle quali è governata da un contatore casuale. Si può così ipotizzare che il numero atteso di eventi che rispondono ai criteri fissati sia rappresentabile statisticamente mediante una distribuzione di Poisson - esponenziale. Se risulta applicabile questo schema, si può dimostrare che la valutazione delle condizioni estreme equivale ad ipotizzare una distribuzione del primo tipo, più nota come distribuzione di Gumbel, o una distribuzione di Weibull a 3 parametri, cioè in altri termini è possibile per via analitica individuare la legge statistica che descrive la distribuzione degli estremi d'onda.

Il primo passo nella **P.O.T analysis** è dunque l'individuazione dell'evento indipendente "mareggiata", cioè di una successione temporale di stati di mare che:

- hanno altezza d'onda superiore ad un prefissato valore di soglia H_0, che persiste al di sopra di tale valore per una durata prestabilita;
- hanno direzione contenuta all'interno di un determinato intervallo (di solito +/- 30° rispetto alla direzione media di provenienza).

Ognuno di questi eventi viene rappresentato dal suo valore al colmo, definito "picco di mareggiata".

Successivamente vengono individuati i parametri incogniti che permettono di adattare le distribuzioni teoriche prescelte ai dati sperimentali.

Sia Goda (1988) che Mathiesen (1994) consigliano di utilizzare come funzioni di distribuzione la funzione di Gumbel

$$F(x)= \exp\{-\exp[-(x-B)/A]\} \qquad (1)$$

o la distribuzione Weibull a tre parametri:

$$F(x)=1-\exp\{ -[(x-B)/A]^k\} \qquad (2)$$

con k = 0,75; 1.0; 1,4; e 2.0

e in cui A è il parametro di locazione, B il parametro di scala e k il parametro di forma.

Questi parametri vengono calcolati per mezzo di una parameter analysis, che viene condotta introducendo le seguenti variabili ridotte:

Gumbel:

$$y(m) = -\ln[-\ln F(x)] \qquad (3)$$

Weibull

$$y(m) = \{-\ln [1-F(x)] \}^{1/k} \qquad (4)$$

in modo che tra il valore della variabile x e quello della variabile ridotta y sussista una relazione lineare del tipo:

$$x = A\,y + B \qquad (5)$$

Risolvendo quest'ultima equazione con il metodo dei minimi quadrati si ottiene il valore dei parametri A e B, quindi si identifica la legge di distribuzione.

Il valore dell'altezza d'onda corrispondente ad un assegnato periodo di ritorno si ottiene dall'equazione (5), nella quale la variabile ridotta y viene calcolata a partire dalle equazioni (3) e (4), nelle quali la probabilità di non superamento F(x) viene riscritta in termini di tempo di ritorno Tr, secondo la relazione:

$$F(x)=1-[1/(\lambda Tr)] \qquad (6)$$

In cui λ è il numero medio di mareggiate sopra soglia osservate in 1 anno.

I valori delle altezze d'onda estreme corrispondenti ad assegnati periodi di ritorno secondo una delle 5 equazioni (Gumbel, Weibull (0,75), Weibull (1,0), Weibull (1,4) e Weibull (2,0)) soffrono ancora di incertezze legate alla scelta della distribuzione, nel senso che la scelta di una distribuzione piuttosto che un'altra, che è a discrezione del progettista, può introdurre un errore.

Il programma utilizzato per l'analisi degli estremi fornisce i valori dell'altezza d'onda corrispondente ad un assegnato periodo di ritorno, per ciascuna delle 5 distribuzioni, già depurati da questo errore. Il metodo seguito per effettuare questa correzione è quello proposto da Goda (2000), che fornisce una formulazione empirica per calcolare l'errore sulla stima della variabile x, dovuto al fatto che non se ne conosce la vera distribuzione:

$$x_{corr} = x - Zn\,\sigma_x \qquad (7)$$

in cui:

x_{corr} è il valore della variabile corretto;

x è il valore della variabile calcolato secondo la metodologia sinora illustrata;

σ_x è la deviazione standard del campione

Zn rappresenta l'errore tra il valore vero e quello calcolato, normalizzato rispetto alla deviazione standard

Le formule empiriche per il calcolo di Zn variano da distribuzione a distribuzione e sono piuttosto complesse, quindi per brevità si rimanda al testo originale per ulteriori approfondimenti (Goda Y., "On the methodology of selecting design wave height", Proc. 21st Coastal Engineering Conference, Malaga 1988).

Dopo aver calcolato il valore di H_s corrispondente ad un assegnato tempo di ritorno, occorre associare a tale onda un valore del periodo, espresso dal periodo di zero crossing T_z. In generale è consigliabile non effettuare un'analisi diretta sui periodi e quindi associare i valori H_s-T_z corrispondenti allo stesso T ma ricavare tramite i dati sperimentali il valore ottimale dei parametri a e b da inserire in una formula del tipo (Mathiesen et al., 1994):

$$Tz = a\, H_s^{\,b} \qquad (8)$$

5.3.2. Definizione degli eventi estremi al largo

Per estrapolare gli eventi estremi con periodi di ritorno elevati (50, 100 fino a 1000 anni) è stata presa in considerazione la serie storica dei dati dell'UKMO, costituita da una sequenza di registrazioni triorarie, riferite al punto di coordinate 44°N; 8,73°E e relative al periodo 1989 – 2008. I primi 2 anni del campione (1987 e 1988 con cadenza diversa esaoraria) presentano ampi periodi di dati mancanti e pertanto non sono stati considerati per l'analisi degli estremi.

Il settore di traversia di interesse è individuato dalle direzioni 50 °N- 190°N. Esso è stato suddiviso in 3 sotto-settori, caratterizzati da caratteristiche di esposizione, quindi da caratteristiche ondametriche simili:

- settore 50°N – 100°N
- settore 100°N – 150°N
- settore 150°N – 190°N

Per tutti i settori l'analisi statistica degli estremi è stata svolta assumendo, con la metodologia operativa precedentemente descritta, varie soglie : H_0 pari a: 1 , 1,5 e 1,75 m.

A riguardo si fa notare che la soglia di 1 m scelta per filtrare le altezze d'onda da inserire nell'analisi è suggerita da diversi autori per definire l'evento "mareggiata", quindi per creare un campione di dati che siano descrittivi del fenomeno e al tempo stesso indipendenti (V. "Atlante delle onde nei mari Italiani", APAT- Università degli Studi di Roma Tre). L'uso di una soglia più alta determina normalmente una sottostima dei valori estremi di altezza d'onda. Anche nel nostro caso la soglia di 1 m è risultata più cautelativa.

Una volta elaborate le serie parziali, elaborate secondo il metodo P.O.T. e con riferimento alla soglia individuata, sono stati calcolati per ogni settore i valori delle altezze d'onda associati a diversi periodi di ritorno, utilizzando le seguenti distribuzioni statistiche:

- Gumbell
- Weibull (k=0,75)
- Weibull (k=1,0)
- Weibull (k=1,4)
- Weibull (k=2,0)

I risultati ottenuti per i 3 settori sono illustrati nei paragrafi che seguono.

Si precisa che i valori estremi ottenuti si riferiscono ad uno stato di mare triorario.

Settore 50°N-100°N

La statistica degli eventi estremi è stata svolta con riferimento alla serie parziale elaborata secondo il metodo P.O.T. e assumendo una soglia H_0 pari a 1, 1,5 e 1,75. Per il dettaglio di tutte le elaborazioni si rimanda alla relazione meteomarina del progetto definitivo. Nel presente rapporto vengono riportati in Fig. 5-12 i risultati dell'analisi per la soglia H_0 pari ad 1 m che ha fornito i valori più alti di altezza d'onda.

Nella tabella di Fig. 5-12 sono riportati Hs e Ic che rappresentano, rispettivamente, l'altezza d'onda significativa, in m, corrispondente al tempo di ritorno assegnato, e l'intervallo di confidenza della distribuzione.

Nella tabella in Fig. 5-12 sono riportati inoltre i parametri r, A e B. Il parametro r è il coefficiente di correlazione, che è un indicatore della bontà del fit dei dati alla distribuzione statistica; i parametri A e B invece sono rispettivamente il parametro di locazione e il parametro di scala, che identificano la legge di distribuzioni statistica degli estremi della variabile Hs secondo le equazioni (1) e (2).

La distribuzione statistica prescelta per rappresentare le onde estreme del settore in questione è quella di Weibull con parametro k = 1,0.

Sempre in Fig. 5-12 sono illustrate le curve di distribuzione dei valori estremi di Gumbel e di Weibull con riferimento alla soglia H_0 di 1 m..

T (anni)	Gumbel		Weibull k = 0,75		Weibull k = 1,00		Weibull k = 1,40		Weibull k = 2,00	
	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)
1	1.7	0.1	1.6	0.2	1.6	0.2	1.7	0.2	1.8	0.1
2	1.9	0.2	1.8	0.3	1.9	0.3	2.0	0.2	2.0	0.2
5	2.2	0.2	2.2	0.4	2.3	0.5	2.4	0.4	2.3	0.3
10	2.4	0.3	2.5	0.6	2.6	0.6	2.6	0.5	2.5	0.3
15	2.6	0.3	2.7	0.7	2.8	0.7	2.7	0.6	2.7	0.4
20	2.7	0.3	2.8	0.7	2.9	0.8	2.8	0.6	2.7	0.4
25	2.7	0.4	2.9	0.8	3.0	0.9	2.9	0.7	2.8	0.4
50	2.9	0.4	3.2	1.0	3.3	1.1	3.1	0.8	3.0	0.5
100	3.1	0.5	3.6	1.1	3.6	1.3	3.4	1.0	3.1	0.6
150	3.3	0.6	3.8	1.3	3.8	1.5	3.5	1.1	3.2	0.7
250	3.4	0.6	4.0	1.4	4.1	1.7	3.7	1.2	3.4	0.8
500	3.6	0.7	4.4	1.6	4.4	2.0	3.9	1.4	3.5	0.9
1000	3.8	0.8	4.8	1.9	4.7	2.3	4.1	1.6	3.7	1.0

coeff.corr.	0.98	0.91	0.96	0.98	0.99

A:	0.32	0.24	0.40	0.62	0.88
B:	1.39	1.29	1.17	1.01	0.79

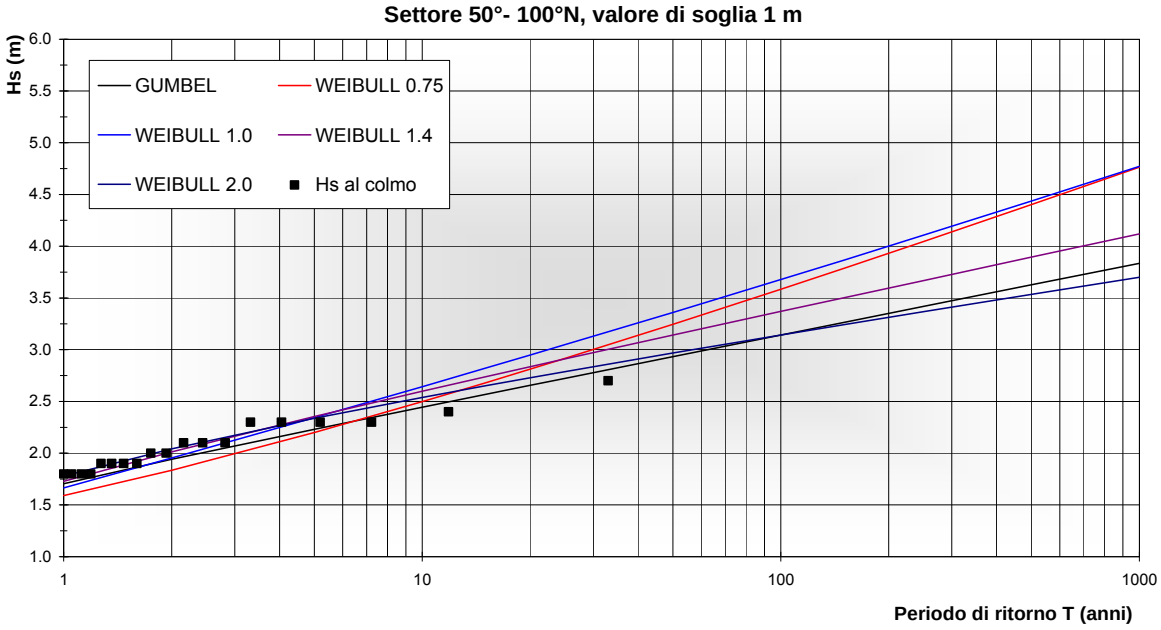


FIG. 5-12 - STATISTICA DELLE ONDE ESTREME AL LARGO DEL PARAGGIO DI VADO LIGURE, RIFERITA AL SETTORE DI TRAVERSIA 50 – 100 °N – SOGLIA H_S=1 M

Settore 100°N-150°N

La statistica degli eventi estremi è stata svolta con riferimento alla serie parziale elaborata secondo il metodo P.O.T. e assumendo una soglia H_0 pari a 1, 1,5 e 1,75. Per il dettaglio di tutte le elaborazioni si rimanda alla relazione meteomarina del progetto definitivo. Nel presente rapporto vengono riportati in Fig. 5-13 i risultati dell'analisi per la soglia H_0 pari ad 1 m che ha fornito i valori più alti di altezza d'onda.

Nella tabella in Fig. 5-13 sono riportati inoltre i parametri r, A e B. Il parametro r è il coefficiente di correlazione, che è un indicatore della bontà del fit dei dati alla distribuzione statistica; i parametri A e B invece sono rispettivamente il parametro di locazione e il parametro di scala, che identificano la legge di distribuzioni statistica degli estremi della variabile Hs secondo le equazioni (1) e (2).

La distribuzione statistica prescelta per rappresentare le onde estreme del settore in questione è quella di Weibull con parametro k = 1,0.

Sempre in Fig. 5-13 sono illustrate le curve di distribuzione dei valori estremi di Gumbel e di Weibull con riferimento alla soglia H_0 di 1 m..

T (anni)	Gumbel		Weibull k = 0,75		k = 1,00		k = 1,40		k = 2,00	
	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)
1	2.2	0.2	2.0	0.3	2.1	0.3	2.2	0.2	2.2	0.2
2	2.5	0.2	2.4	0.4	2.5	0.4	2.6	0.3	2.5	0.3
5	2.9	0.3	3.0	0.6	3.1	0.7	3.0	0.5	2.9	0.3
10	3.2	0.4	3.5	0.8	3.5	0.9	3.3	0.6	3.2	0.4
15	3.4	0.4	3.8	0.9	3.8	1.0	3.5	0.7	3.3	0.5
20	3.5	0.4	4.0	1.0	4.0	1.1	3.7	0.7	3.4	0.5
25	3.6	0.5	4.2	1.1	4.1	1.2	3.8	0.8	3.5	0.5
50	3.9	0.5	4.7	1.3	4.6	1.5	4.1	0.9	3.7	0.6
100	4.2	0.6	5.3	1.5	5.0	1.8	4.4	1.1	3.9	0.8
150	4.4	0.7	5.6	1.7	5.3	2.0	4.5	1.2	4.0	0.8
250	4.7	0.8	6.1	1.9	5.7	2.2	4.8	1.4	4.2	0.9
500	5.0	0.9	6.6	2.1	6.1	2.6	5.0	1.6	4.4	1.0
1000	5.3	1.0	7.2	2.4	6.6	2.9	5.3	1.8	4.6	1.2

coeff.corr.	0.98	0.98	1.00	0.99	0.96

A:	0.45	0.36	0.59	0.88	1.22
B:	1.39	1.21	1.06	0.84	0.56

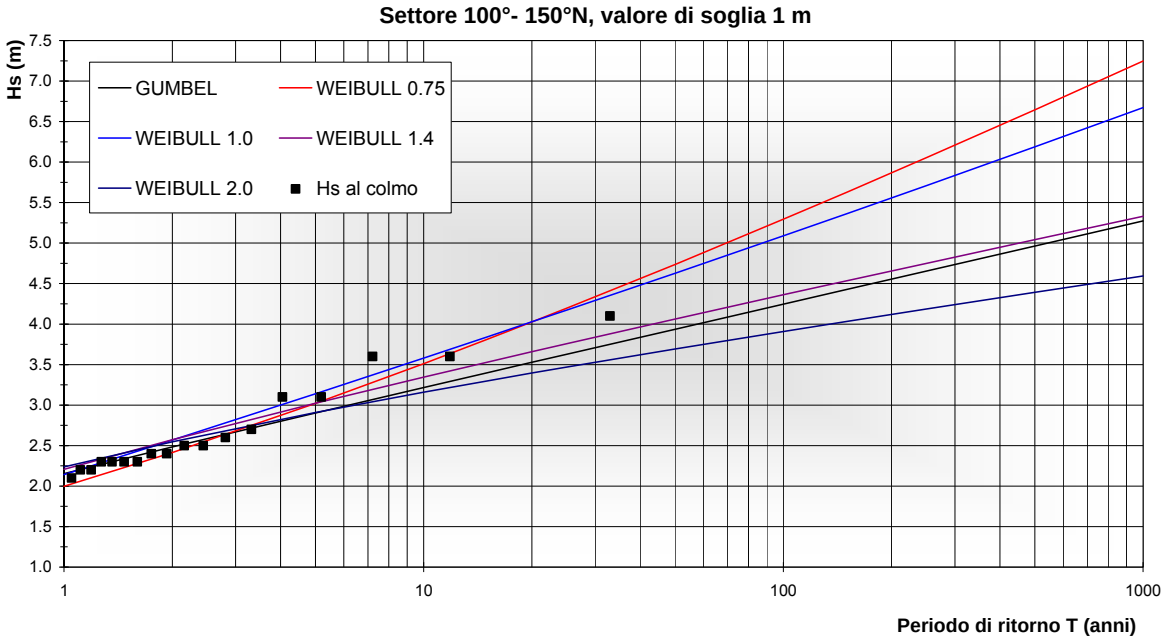


FIG. 5-13 - STATISTICA DELLE ONDE ESTREME AL LARGO DEL PARAGGIO DI VADO LIGURE, RIFERITA AL SETTORE DI TRAVERSIA 100-150 °N – SOGLIA H_S=1 M

Settore 150°N-190°N

La statistica degli eventi estremi è stata svolta con riferimento alla serie parziale elaborata secondo il metodo P.O.T. e assumendo una soglia H_0 pari a 1, 1,5 e 1,75. Per il dettaglio di tutte le elaborazioni si rimanda alla relazione meteomarina del progetto definitivo. Nel presente rapporto vengono riportati in Fig. 5-14 i risultati dell'analisi per la soglia H_0 pari ad 1 m che ha fornito i valori più alti di altezza d'onda.

Nella tabella di Fig. 5-14 sono riportati Hs e Ic che rappresentano, rispettivamente, l'altezza d'onda significativa, in m, corrispondente al tempo di ritorno assegnato, e l'intervallo di confidenza della distribuzione.

Nella tabella in Fig. 5-14 sono riportati inoltre i parametri r, A e B. Il parametro r è il coefficiente di correlazione, che è un indicatore della bontà del fit dei dati alla distribuzione statistica; i parametri A e B invece sono rispettivamente il parametro di locazione e il parametro di scala, che identificano la legge di distribuzioni statistica degli estremi della variabile Hs secondo le equazioni (1) e (2).

La distribuzione statistica prescelta per rappresentare le onde estreme del settore in questione è quella di Weibull con parametro k = 1,0.

Sempre in Fig. 5-14 sono illustrate le curve di distribuzione dei valori estremi di Gumbel e di Weibull con riferimento alla soglia H_0 di 1 m..

T (anni)	Gumbel		Weibull k = 0.75		Weibull k = 1.00		Weibull k = 1.40		Weibull k = 2.00	
	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)	Hs (m)	Ic (m)
1	2.2	0.2	2.0	0.3	2.2	0.3	2.2	0.2	2.3	0.2
2	2.5	0.2	2.4	0.4	2.6	0.5	2.6	0.3	2.6	0.3
5	3.0	0.3	3.0	0.6	3.2	0.7	3.1	0.5	3.0	0.4
10	3.3	0.4	3.5	0.8	3.7	0.9	3.5	0.6	3.3	0.4
15	3.5	0.4	3.8	1.0	3.9	1.1	3.6	0.7	3.4	0.5
20	3.6	0.5	4.0	1.0	4.1	1.2	3.8	0.8	3.5	0.5
25	3.7	0.5	4.2	1.1	4.3	1.3	3.9	0.8	3.6	0.6
50	4.1	0.6	4.8	1.3	4.7	1.6	4.2	1.0	3.9	0.7
100	4.4	0.7	5.3	1.6	5.2	1.9	4.5	1.2	4.1	0.8
150	4.6	0.7	5.6	1.8	5.5	2.1	4.7	1.3	4.2	0.9
250	4.8	0.8	6.1	2.0	5.9	2.3	4.9	1.5	4.4	1.0
500	5.1	0.9	6.7	2.2	6.4	2.7	5.2	1.7	4.6	1.1
1000	5.5	1.0	7.3	2.5	6.9	3.1	5.6	1.9	4.8	1.2

coeff.corr.	0.99	0.95	0.99	0.99	0.98

A:	0.47	0.37	0.61	0.93	1.30
B:	1.43	1.26	1.09	0.86	0.55

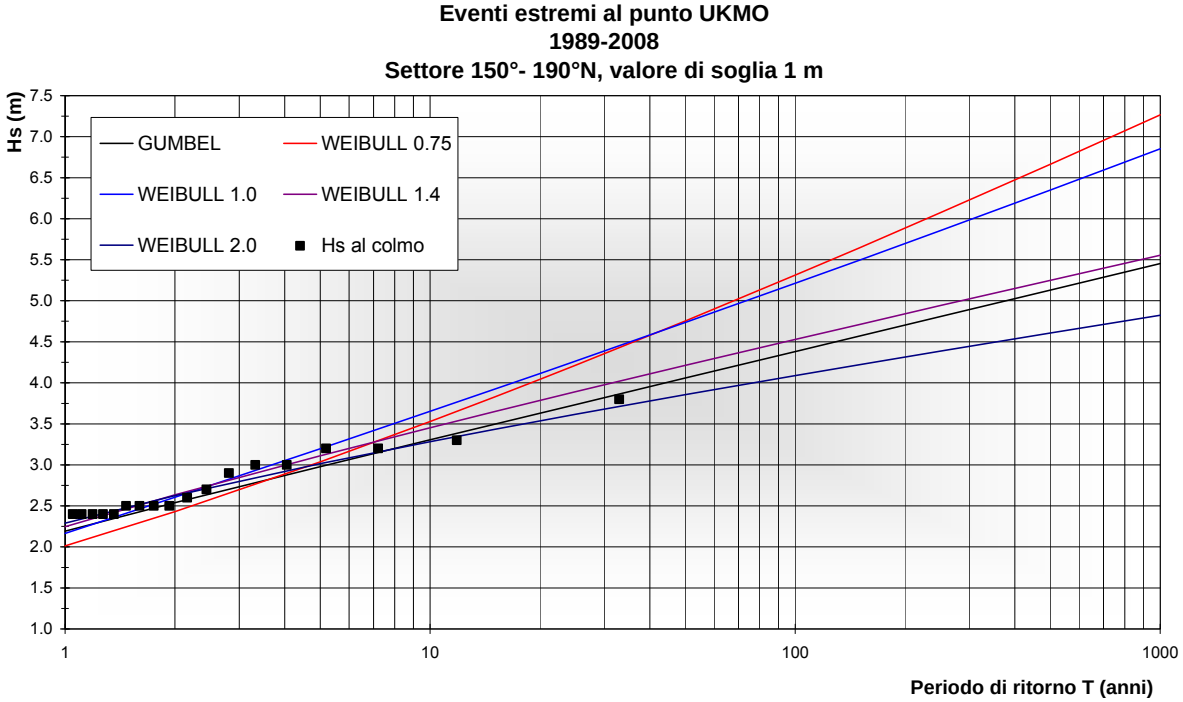


FIG. 5-14 - STATISTICA DELLE ONDE ESTREME AL LARGO DEL PARAGGIO DI VADO LIGURE, RIFERITA AL SETTORE DI TRAVERSIA 150-190 °N – SOGLIA H_S=1 M

5.3.3. Correlazione altezza d'onda-periodo

La correlazione tra altezza d'onda significativa e periodo è stata determinata utilizzando la nota relazione:
$Tz = a\ H_s^b$

I coefficienti a e b sono stati determinati attraverso il metodo dei minimi quadrati, utilizzando le coppie di valori di Tz ed Hs acquisiti dall'UKMO.

Sono così stati individuati i seguenti valori dei suddetti coefficienti:

- a=3,8
- b=0,5

Questi valori sono in linea con i valori normalmente validi per il Mediterraneo e con quelli ottenuti nell'ambito di studi precedenti.

Se si applicano poi le note relazioni tra Tz, Ts e Tp: Tz=0,78*Tp (Carter et al.),Tz=0,83*Ts (Sapkaya), e quindi Tp= 1,28*Tz
si ottiene Tp=4,8*Hs ^0,5.

Nelle figure seguenti sono presentate le correlazioni altezza d'onda (Hs) periodo (Tz) relativamente a tutte le direzioni ed a ai 3 settori d'interesse. Nei grafici sono anche distinti i valori d'altezza d'onda di mare vivo, da swell ed i valori risultanti. Le correlazioni ottenute fanno riferimento evidentemente ai valori di altezza d'onda-periodo risultanti e per mare vivo.

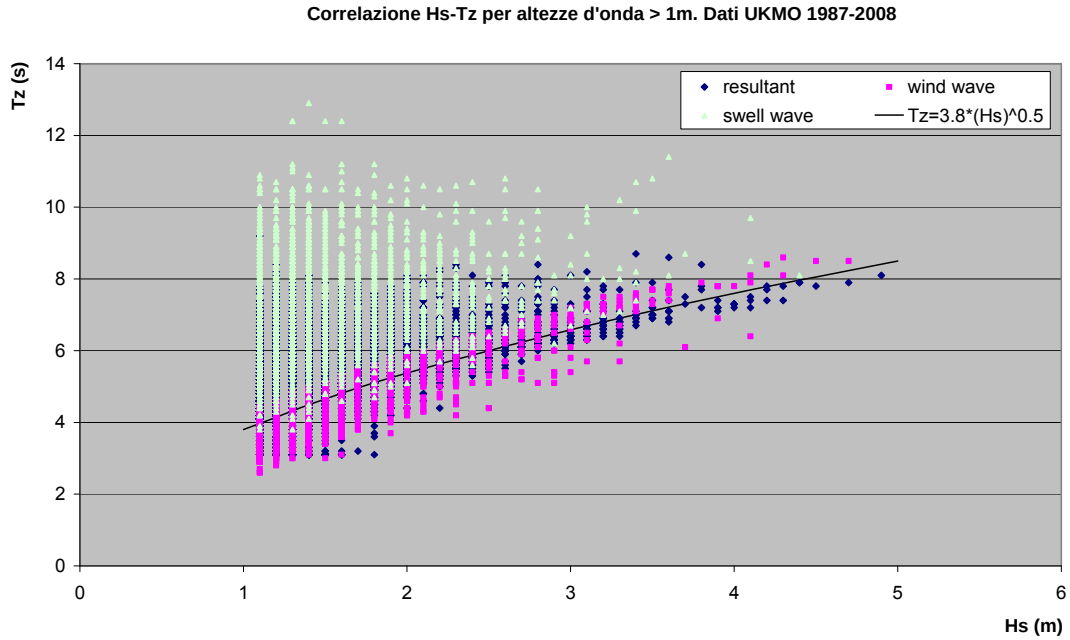


FIG. 5-15 - CORRELAZIONE H_S-T_Z , DATI UKMO 87-08 -ALTEZZE D'ONDA MAGGIORI DI 1 M OMNIDIREZIONALI

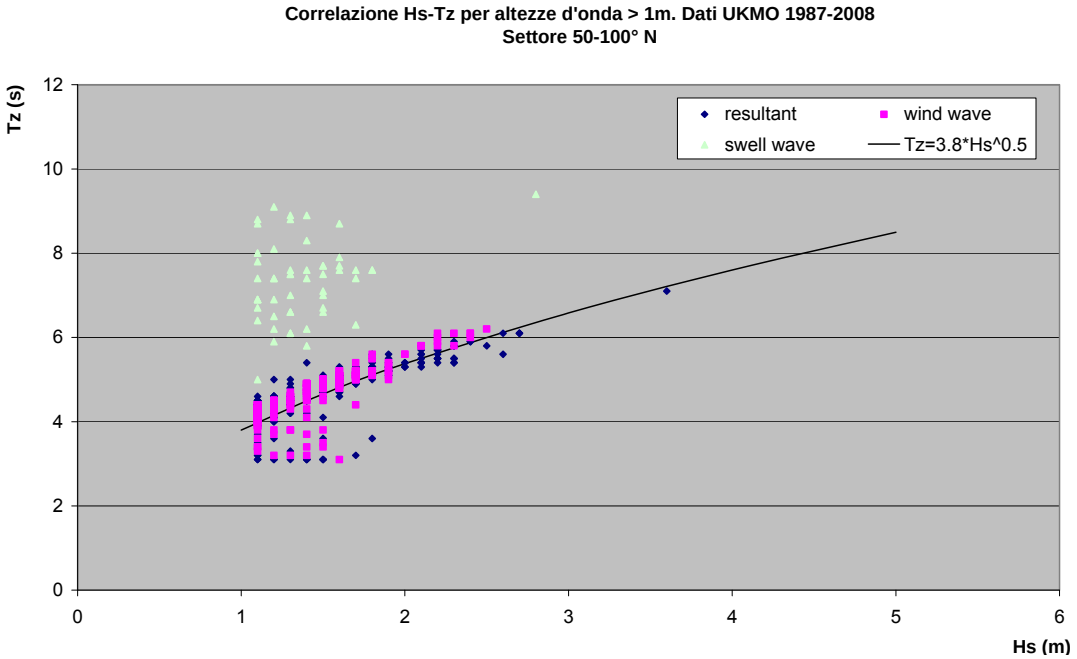


FIG. 5-16 - CORRELAZIONE H_S-T_Z , DATI UKMO 87-08 - ALTEZZE D'ONDA MAGGIORI DI 1 M PER IL SETTORE 50-100°N

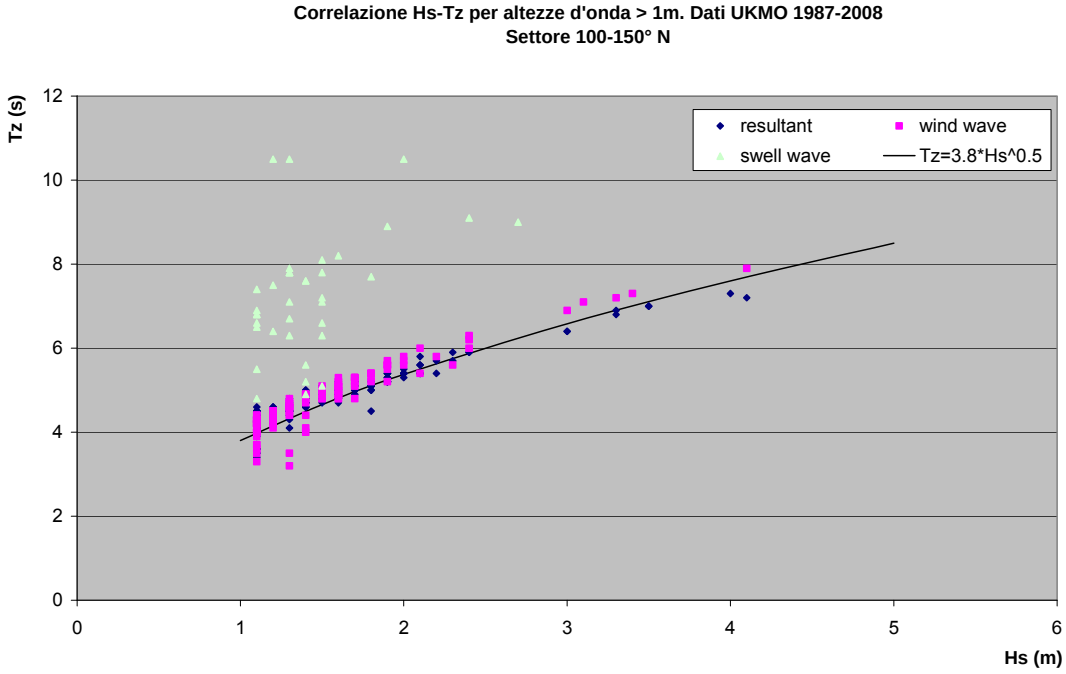


FIG. 5-17 - CORRELAZIONE H_S-T_Z , DATI UKMO 87-08 -ALTEZZE D'ONDA MAGGIORI DI 1 M PER IL SETTORE 100-150°N

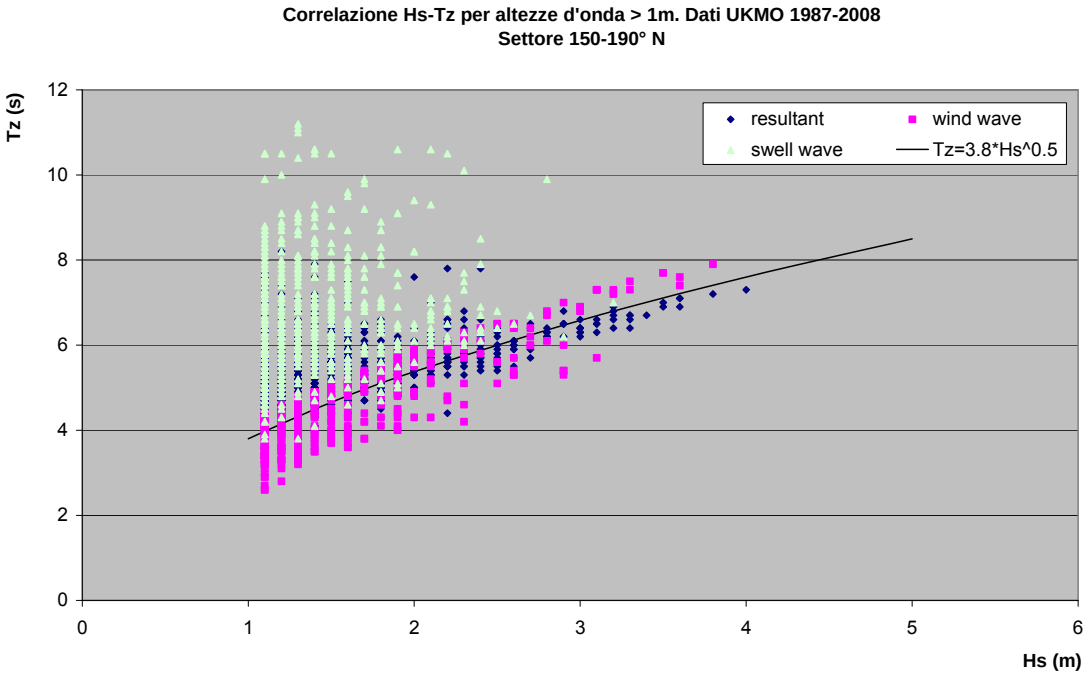


FIG. 5-18 - CORRELAZIONE H_S-T_Z , DATI UKMO 87-08 - ALTEZZE D'ONDA MAGGIORI DI 1 M PER IL SETTORE 150-190°N

5.3.4. Analisi degli eventi estremi - conclusioni

Lo studio condotto ha permesso di definire le caratteristiche del moto ondoso al largo del sito in esame per i 3 settori di provenienza in cui esso è stato suddiviso. Sulla base della serie di dati dell'UKMO relativi al periodo 1989-2008, sono stati calcolati gli eventi estremi, per tempi di ritorno compresi tra 1 e 1000 anni, e per i settori 50°N - 100°N, e 100°N -150°N e 150°N -190°N.

La scelta tra le cinque curve probabilistiche adottate per interpolare le serie parziali degli eventi estremi è stata effettuata assumendo di volta in volta quella caratterizzata dal coefficiente di correlazione più elevato, e, a parità di coefficiente di correlazione, scegliendo i valori considerati maggiormente cautelativi. I risultati, settore per settore, sono descritti nel seguito.

Le mareggiate più gravose sono quelle provenienti dai settori da 100-150°N e da 150-190°N . Queste mareggiate, tuttavia, data la loro inclinazione rispetto al molo foraneo previsto nel Piano Regolatore, riescono a penetrare all'interno dello specchio acqueo portuale per effetto dei fenomeni di diffrazione intorno al molo e risultano di entità più bassa in corrispondenza delle nuove opere (vedi a riguardo i capitoli seguenti).

Le onde dal settore 50-100°N, sebbene di entità più modesta, interessano le nuove opere direttamente con pochi effetti di schermatura della diga foranea.

<u>Settore 50°N-100°N</u>

Gli eventi estremi, calcolati per i vari tempi di ritorno, sono riassunti nella Tab. 5.2, nella quale è riportato, per completezza, oltre al valore del periodo Tz associato al moto ondoso, anche il valore del periodo di picco T_p calcolato per mezzo della relazione Tp=1,28 Tz, comunemente utilizzata in letteratura.

Il periodo zero crossing è espresso dalla relazione $T_z = 3,8*(H_s)^{0.5}$ che, si è visto, bene interpreta la serie ondametrica ricostruita.

L'altezza dell'onda estrema, per i diversi periodi di ritorno, è stata valutata assumendo, tra le diverse curve probabilistiche, quella di Weibull a parametro 1,0.

TAB. 5.2 - STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI, SETTORE 50°-100°N

Tr (anni)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)
1	1,6	4,8	6,2
2	1,9	5,2	6,7
5	2,3	5,8	7,3
10	2,6	6,1	7,8
15	2,8	6,4	8,1
20	2,9	6,5	8,3
25	3,0	6,6	8,4
50	3,3	6,9	8,8
100	3,6	7,2	9,2
150	3,8	7,4	9,5
250	4,1	7,7	9,8
500	4,4	8,0	10,2
1000	4,7	8,2	10,5

Settore 100°N-150°N

I risultati dell'indagine statistica svolta per gli eventi estremi con riferimento al settore 100°N – 150°N sono riportati nella seguente Tab. 5.3.

Anche in questo caso la relazione H_s-T_z è espressa da $T_z = 3,8*(H_s)^{0.5}$.
La curva che rappresenta la distribuzione probabilistica degli eventi estremi del settore prescelta è quella di Weibull con k=1,0, che, a parità di coefficiente di correlazione r, fornisce i valori più cautelativi.

TAB. 5.3 - STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI, SETTORE 100°-150°N

Tr (anni)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)
1	2,1	5,5	7,0
2	2,5	6,0	7,7
5	3,1	6,7	8,6
10	3,5	7,1	9,1
15	3,8	7,4	9,5
20	4,0	7,6	9,7
25	4,1	7,7	9,9
50	4,6	8,2	10,4
100	5,0	8,5	10,9
150	5,3	8,7	11,2
250	5,7	9,1	11,6
500	6,1	9,4	12,0
1000	6,6	9,8	12,5

Settore 150°N-190°N:

Per rappresentare la distribuzione probabilistica delle onde estreme di questo settore è stata scelta la distribuzione di Weibull a parametro 1,0, che presentava i valori più cautelativi.

Le altezza d'onda ottenute con tale curva in corrispondenza dei vari tempi di ritorno sono riportate in Tab. 5.4.

La relazione $T_z = 3,8*(H_s)^{0.5}$ risulta valida anche per tale settore.

TAB. 5.4 - STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI, SETTORE 150°-190°N

Tr (anni)	Hs (m)	Tz (s)	Tp (s)
1	2,2	5,6	7,2
2	2,6	6,1	7,9
5	3,2	6,8	8,7
10	3,7	7,3	9,3
15	3,9	7,5	9,6
20	4,1	7,7	9,9
25	4,3	7,8	10,0
50	4,7	8,3	10,6
100	5,2	8,7	11,1
150	5,5	8,9	11,4
250	5,9	9,2	11,8
500	6,4	9,6	12,3
1000	6,9	9,9	12,7

6. IL MODELLO MATEMATICO SWAN DI PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DAL LARGO A SOTTOCOSTA

Lo SWAN, modello matematico non stazionario di terza generazione per la propagazione del moto ondoso, consente di valutare la trasformazione dell'onda dal largo a sottocosta riproducendo i seguenti fenomeni fisici:

- rifrazione e shoaling per effetto di correnti e variazione dei fondali;
- generazione ondosa per effetto del vento;
- effetti dissipativi per effetto del frangimento e dell'attrito sul fondo.

Si fa notare che anche gli effetti del fenomeno di diffrazione possono essere simulati con il modello SWAN, attraverso l'applicazione dello 'spreading direzionale'.

Il codice di calcolo è stato messo a punto dal laboratorio idraulico di Deltares ed è stato utilizzato con successo in numerosi casi dalla Technital. In appendice 3 è riportata una descrizione di dettaglio del modello SWAN. Il modello SWAN bene si presta a riprodurre i fenomeni più significativi presenti nel nostro caso per la propagazione delle onde: ovvero rifrazione e shoaling, effetti dissipativi di attrito sul fondo, diffrazione nella zona delle nuove opere.

Le attività svolte pertanto per valutare le condizioni ondose sul litorale a nord del porto di vado Ligure sono le seguenti:

- messa a punto delle schematizzazioni nel dominio di calcolo che include le nuove opere (piattaforma, diga foranea, porto turistico, vedi a riguardo i dettagli riportati nel cap. 7) del progetto definitivo e della variante del progetto esecutivo, per la situazione che considera la configurazione estesa della diga foranea e la configurazione esistente della diga foranea (in FIG. 6-1 è presentata la schematizzazione a maglia curvilinea del dominio di calcolo che include le nuove opere con riferimento alla configurazione estesa della diga foranea),
- riproduzione dei fondali per un'area sufficientemente ampia ad inglobare queste opere e il litorale a nord d'interesse evitando gli effetti di bordo. Per la definizione delle batimetrie è stato fatto riferimento ai rilievi batimetrici più recenti delle aree

della piattaforma e delle aree prospicienti la diga foranea e alle batimetrie d'insieme desunte dalla carta Nautica 1:30.000 del Litorale di Savona (in FIG. 6-2 è presentata la batimetria nel dominio di calcolo presentato in FIG. 6-1);

- inserimento delle condizioni di input al modello relative alle caratteristiche meteo-marine al largo del paraggio;
- esecuzione delle simulazioni di propagazione delle onde sottocosta, nell'area costiera d'interesse, nell'area della piattaforma e a nord delle nuove opere.
- definizione delle condizioni ondose nell'area della piattaforma e sul litorale.

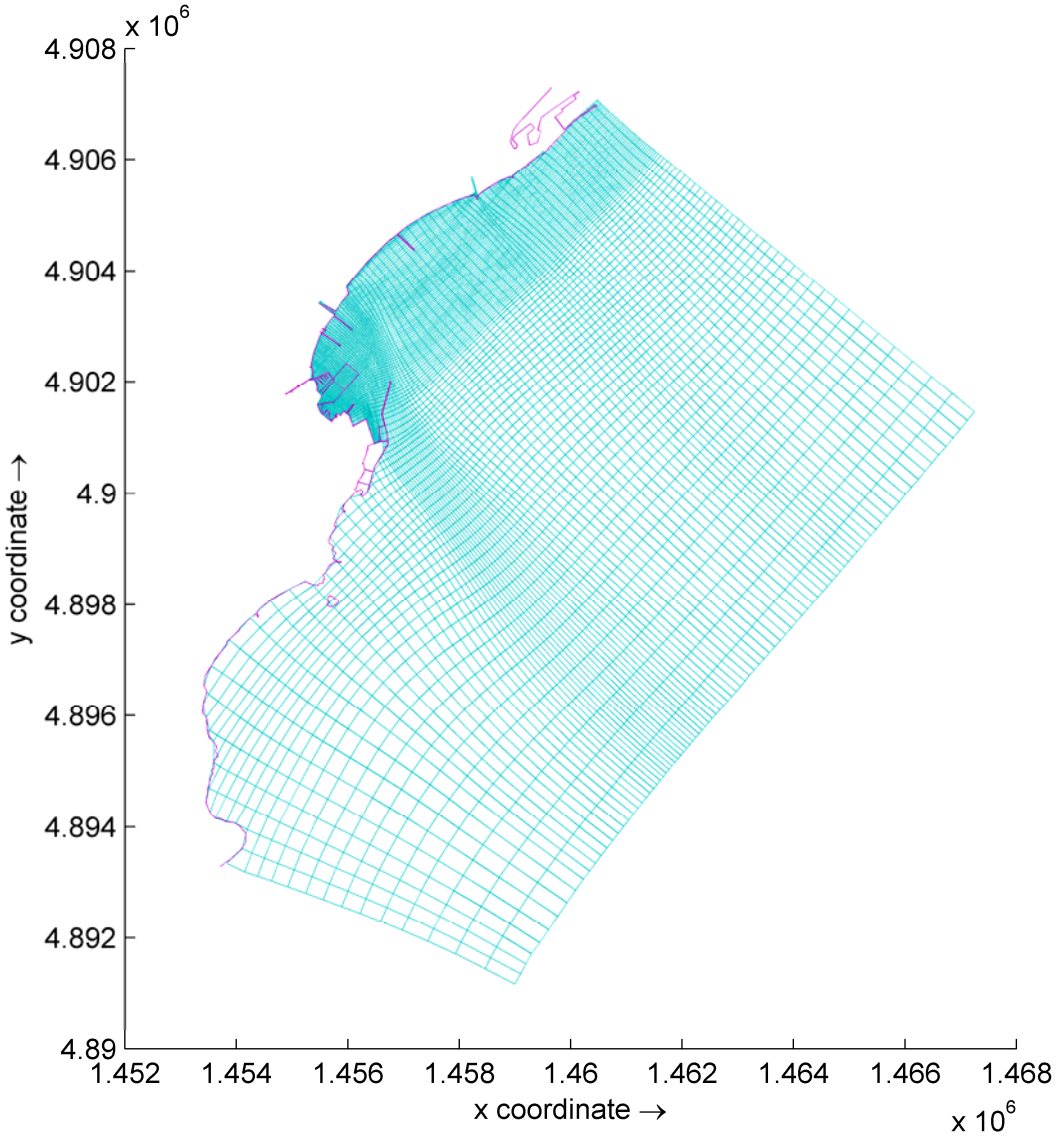


FIG. 6-1: SCHEMATIZZAZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO CON UNA GRIGLIA A MAGLIA CURVILINEA

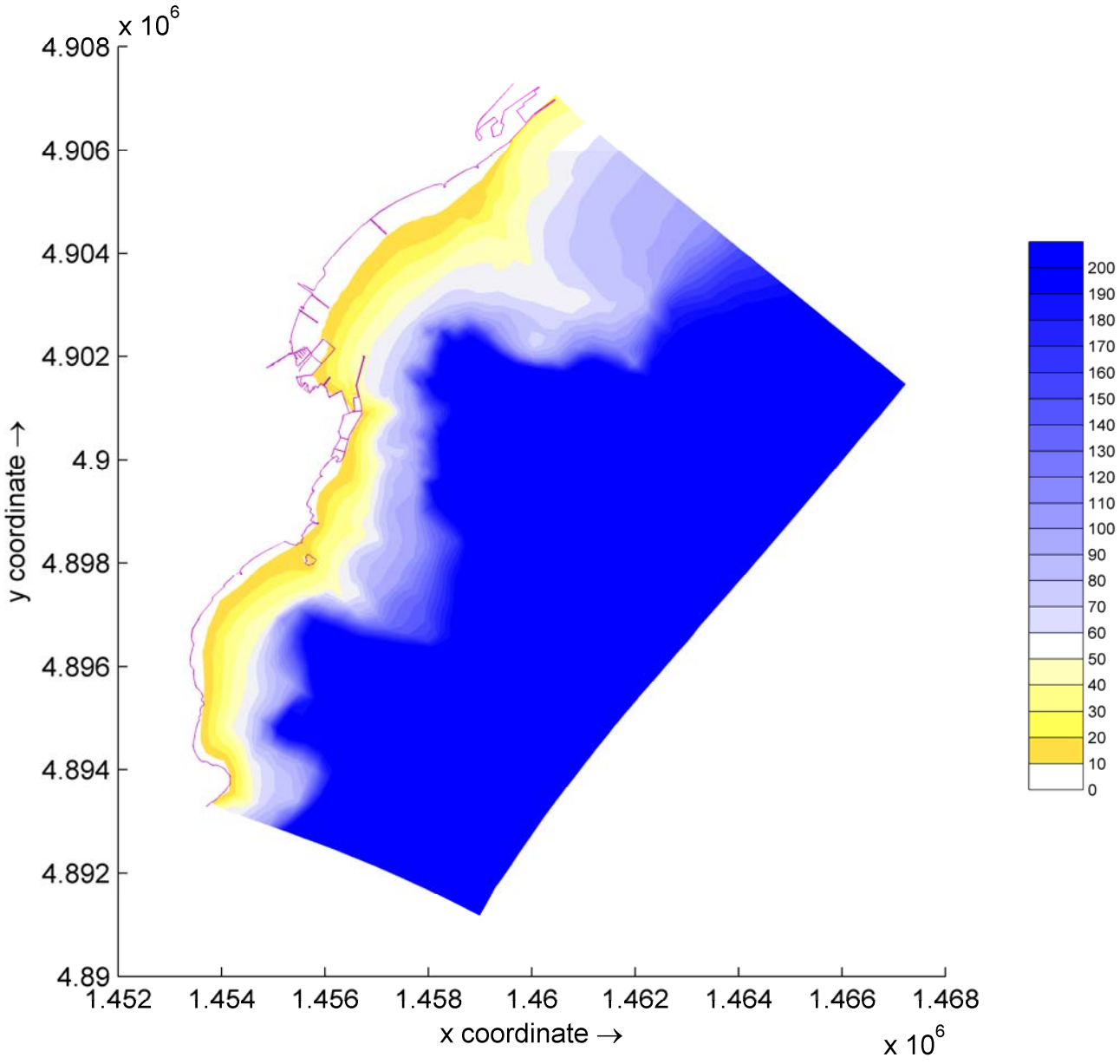


FIG. 6-2: BATIMETRIA APPLICATA ALLA MAGLIA DI CALCOLO DELLA FIG. 6-1

7. LE CONFIGURAZIONI D'INTERVENTO ESAMINATE

Per l'analisi degli effetti dei nuovi interventi sul moto ondoso nell'area litoranea a nord degli interventi è stata studiata e messa a confronto la variante della configurazione del Progetto Esecutivo con la configurazione di Progetto Definitivo:

- sia per la situazione di esercizio della piattaforma (per cui è prevista anche l'estensione della diga foranea),
- che per una fase costruttiva nella quale si ipotizza una situazione caratterizzata dalla fine della costruzione della piattaforma (per la quale si possono riscontrare ragionevolmente gli effetti più significativi in termini di onde sul litorale) e dalla presenza della diga foranea ancora nella configurazione esistente.

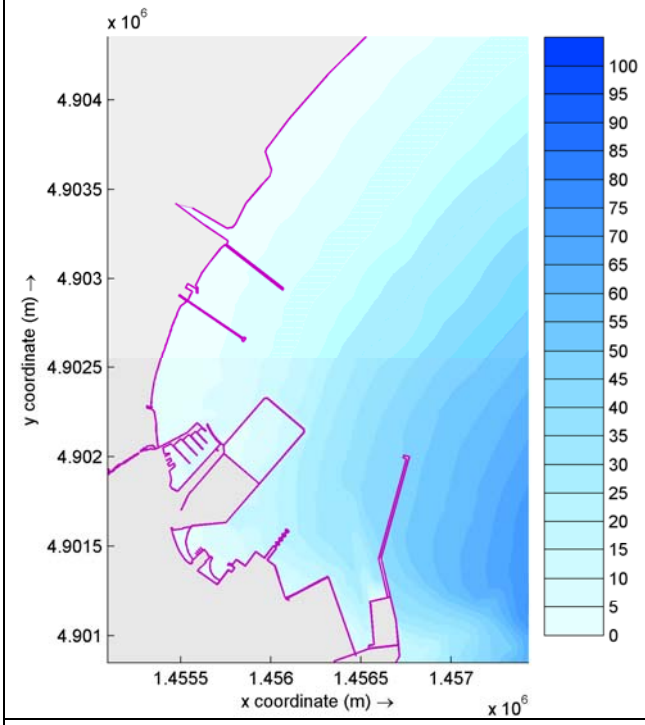
La configurazione di variante del progetto esecutivo prevede le seguenti modifiche alla nuova piastra multifunzionale così come approvata nel Progetto Definitivo:

- l'inserimento di una schiera di cassoni pieni sul lato più esterno della zona a giorno della piastra,
- l'avanzamento dell'area di rilevato a terra di circa 50 m mediante l'inserimento di due schiere di cassoni chiusi.

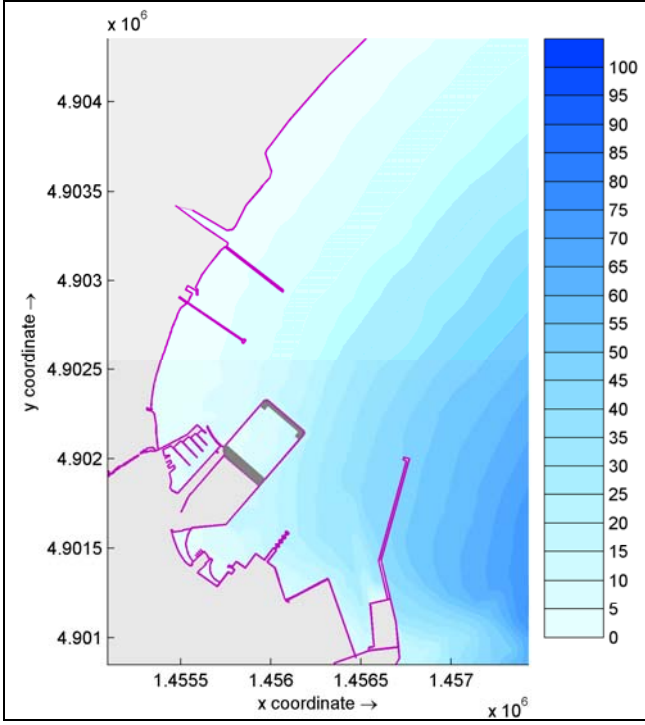
Le schematizzazioni del dominio e delle batimetriche delle configurazioni analizzate (la variante del Progetto Esecutivo e la configurazione di riferimento, in esercizio e in fase costruttiva) sono rappresentate in FIG. 7-1 e FIG. 7-2.

Nelle configurazioni del definitivo e dell'esecutivo esaminate per la situazione di esercizio della piattaforma (vedi FIG. 7-1), è stata considerata anche la realizzazione di tutte le opere accessorie, quali la nuova diga foranea del porto, prolungata rispetto all'attuale e con la testata posta secondo un allineamento verso nord-est, ed il nuovo porto turistico, sito immediatamente a nord della piattaforma e ad essa contermine. La nuova diga foranea comporta un allargamento del bacino portuale ed una maggiore protezione dell'area in cui verrà realizzata la piattaforma, mentre il porto turistico occupa lo spazio tra il lato nord della piattaforma e la foce del Torrente Segno.

Nelle configurazioni del definitivo e dell'esecutivo della piattaforma esaminate invece per la fase costruttiva (vedi FIG. 7-2), non è stata considerata l'estensione della diga foranea; è stata invece considerata completata la piattaforma, al fine di massimizzare le eventuali differenze in termini di distribuzione del moto ondoso (principalmente quello provocato da onde provenienti dal II quadrante) lungo il litorale a nord delle nuove opere.



Configurazione di Progetto Definitivo
Piattaforma in esercizio



Configurazione di Variante del progetto
Piattaforma in esercizio

FIG. 7-1: SCHEMATIZZAZIONI E BATIMETRIE (M S.M.M.) PER LA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO DEFINITIVO E DELLA VARIANTE DEL PROGETTO ESECUTIVO – DIGA ESTESA (PIATTAFORMA IN ESERCIZIO)

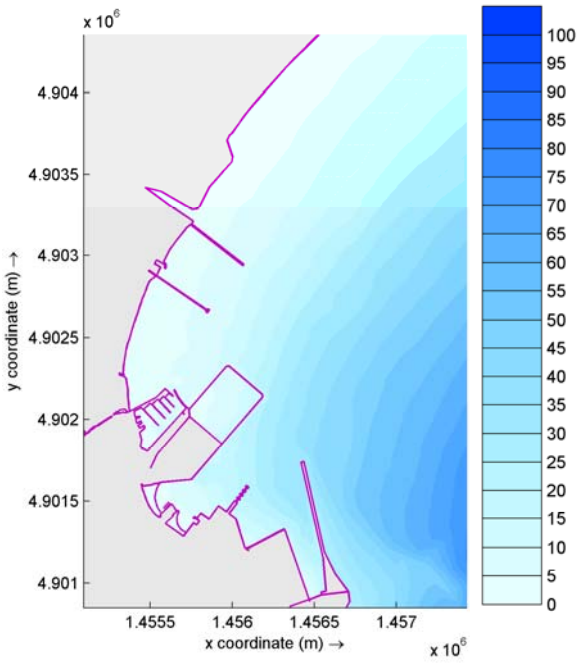
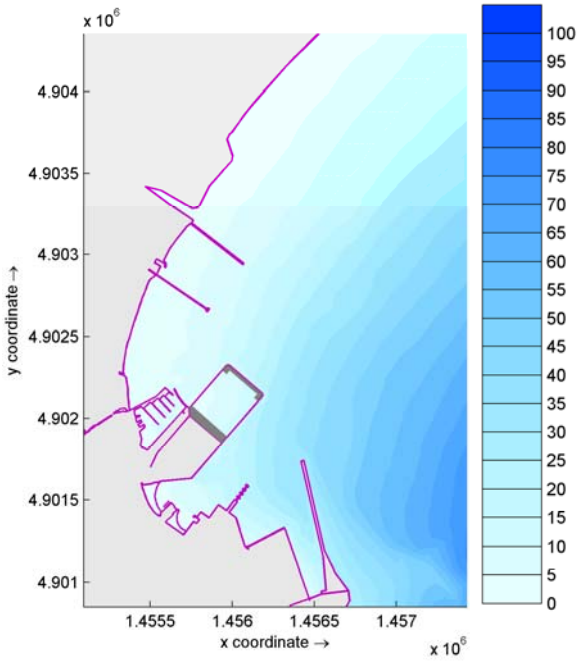
	Configurazione di Progetto Definitivo Fase costruttiva (piattaforma completata e diga foranea esistente)
	Configurazione di Variante del progetto Fase costruttiva (piattaforma completata e diga foranea esistente)

FIG. 7-2: SCHEMATIZZAZIONI E BATIMETRIE (M S.M.M.) PER LA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO DEFINITIVO E DELLA VARIANTE DEL PROGETTO ESECUTIVO – DIGA ESISTENTE (FASE COSTRUTTIVA)

8. CONDIZIONI METEOMARINE DI RIFERIMENTO PER LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE

Le simulazioni condotte con il modello matematico SWAN hanno consentito di valutare le onde in corrispondenza del litorale a nord delle nuove opere, ed in particolare tra la foce del Segno e la foce del Quiliano.

Considerato che l'entità dell'escursione del livello del mare e delle correnti indotte sono modesti si è ritenuto per la propagazione delle onde verso costa di considerare come livello di riferimento il l.m.m. e di non considerare l'interazione onde-correnti.

Ai fini della determinazione degli effetti del moto ondoso sul litorale sono state considerate altezze onda al largo con ricorrenza frequente e con riferimento alle direzioni di maggiore interesse per il caso in esame. In particolare è stata considerato l'evento di moto ondoso rappresentativo, avente tempo di ritorno 1 anno e un evento più estremo caratterizzato da un tempo di ritorno 5 anni. Nella Tab. 8.1 sono sintetizzate le condizioni ondose al largo considerate per l'analisi della propagazione verso costa.

TAB. 8.1 - CARATTERISTICHE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO CONSIDERATE PER LE SIMULAZIONI

TR=1 anno			**TR=5 anni**		
Dir	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp
(°N)	(m)	(m)	(°N)	(m)	(m)
90	1,6	6,2	90	2,3	7,8
120	2,1	7,0	120	3,1	9,1
150	2,2	7,2	150	3,2	9,3

A queste condizioni di moto ondoso sono stati associati i valori della velocità del vento al largo per i tempi di ritorno di 1 e 5 anni dedotti dall'analisi statistica dei dati ricostruiti nel punto al largo dell'UKMO.

9. PROPAGAZIONE DELLE ONDE SUL LITORALE CON DIGA FORANEA ESTESA – SITUAZIONE DI ESERCIZIO DELLA PIATTAFORMA

9.1. Risultati delle simulazioni di propagazione delle onde nell'area del litorale

Nelle Fig. 9-1÷Fig. 9-6 è riportato il confronto dei risultati delle simulazioni effettuate per la configurazione d'intervento del progetto definitivo (n° 6 simulazioni) e quelle per la configurazione d'intervento del progetto esecutivo (n° 6 simulazioni).

Dai risultati ottenuti si può affermare che la presenza della diga foranea (nella situazione estesa come da Piano Regolatore) esercita una protezione significativa dell'area portuale e pertanto del litorale a nord dell'intervento, per le condizioni di moto ondoso tipiche degli eventi da scirocco (150°N). Per gli eventi di moto ondoso provenienti da 150° N, il moto ondoso in particolare nel tratto di litorale tra il Torrente Segno e il torrente Quiliano viene attenuato per effetto appunto della protezione della diga foranea, nonostante che al largo per tale provenienza delle onde si abbiano i valori più alti di altezza significativa nell'ambito delle condizioni d'interesse per il paraggio in esame.

Gli effetti della diga foranea in termini di protezione del bacino portuale e del litorale immediatamente a nord si fanno sentire meno per le condizioni di moto ondoso da 120° N e ancora di più da 90°N (da levante). Pertanto per queste direzioni di moto ondoso si possono riscontrare differenze apprezzabili, nell'area del bacino portuale e del litorale a nord, sebbene entro valori comunque contenuti, tra le onde ottenute per la configurazione del definitivo e la configurazione dell'esecutivo. Si evidenzia a riguardo che anche per queste due direzioni di moto ondoso (90° e 120°N) le differenze maggiori di altezza d'onda sono limitate alla zona della piattaforma, in particolare nell'area adiacente a tergo della schiera di cassoni pieni sul lato più esterno della zona a giorno della piastra (così come previsti nella variante del progetto esecutivo).

Nell'area del litorale a nord gli effetti della variante del progetto esecutivo rispetto alle opere del definitivo risultano assai modesti e addirittura sul litorale a nord del torrente Quiliano del tutto trascurabili.

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga estesa

Variante da Progetto Esecutivo – Diga estesa

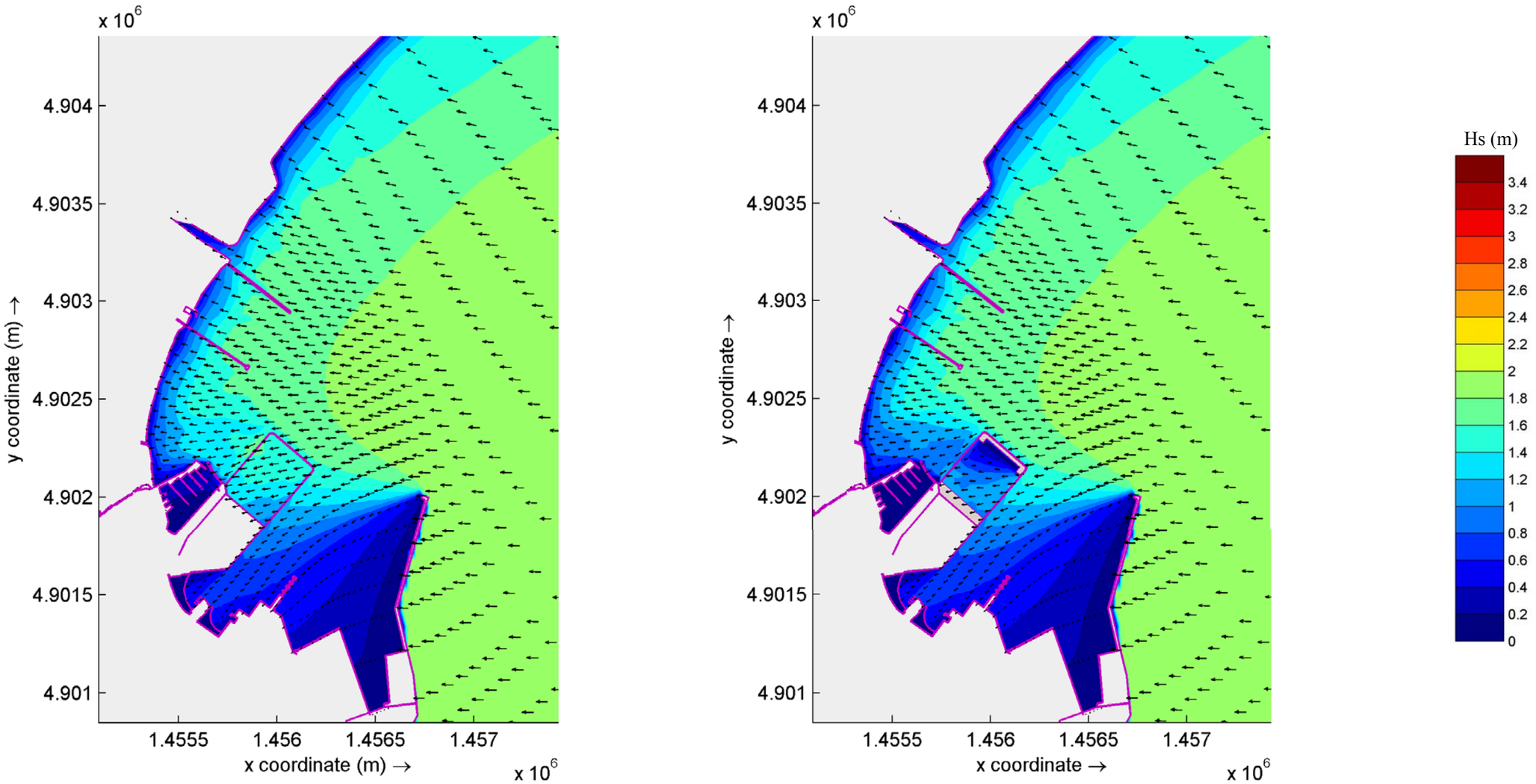


FIG. 9-1 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 90° N E TR=1 ANNO: HS=1,6 M , TP=6,2 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea estesa

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea estesa

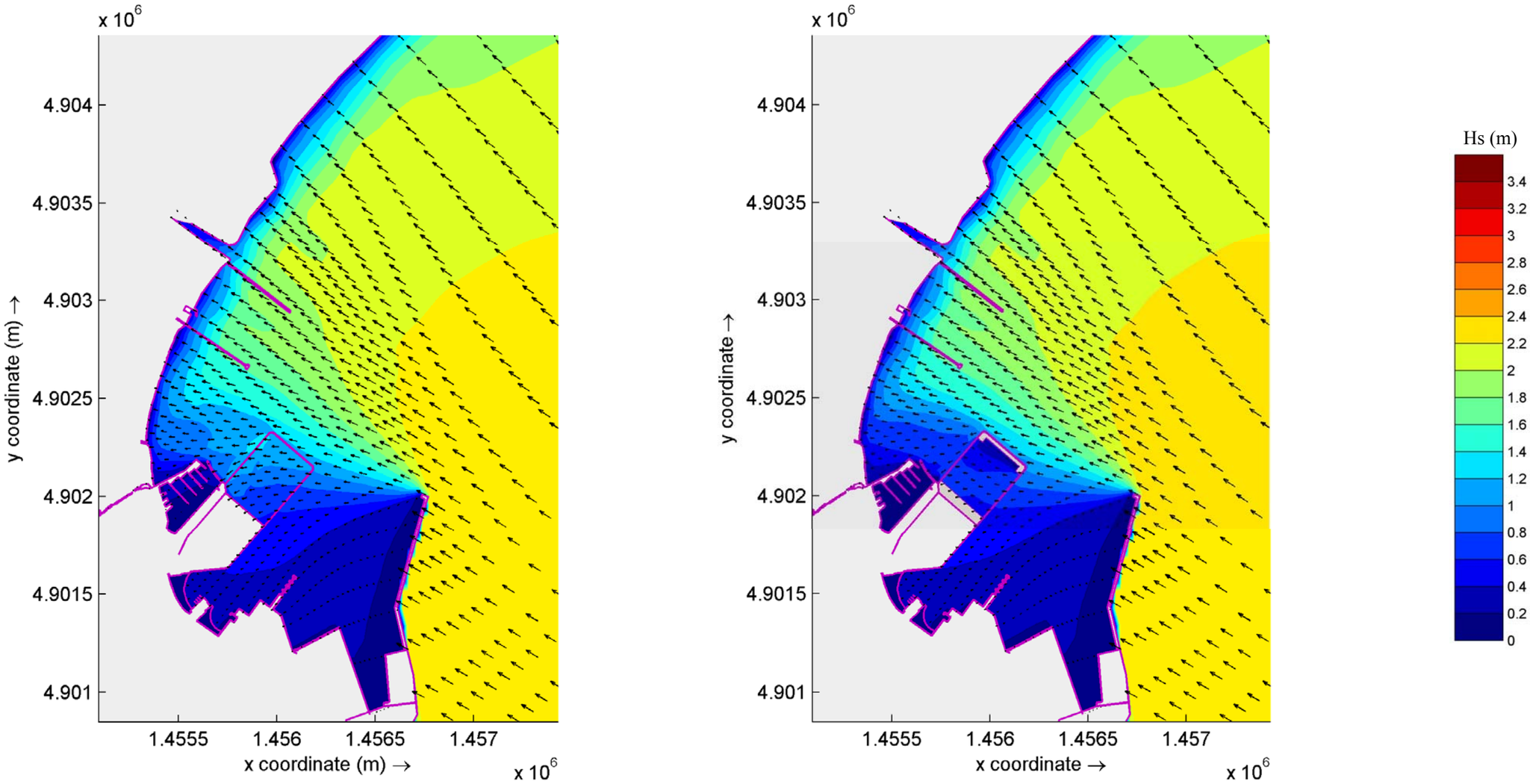


FIG. 9-2 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 120° N E TR=1 ANNO: HS=2,1 M , TP=7,0 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea estesa

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea estesa

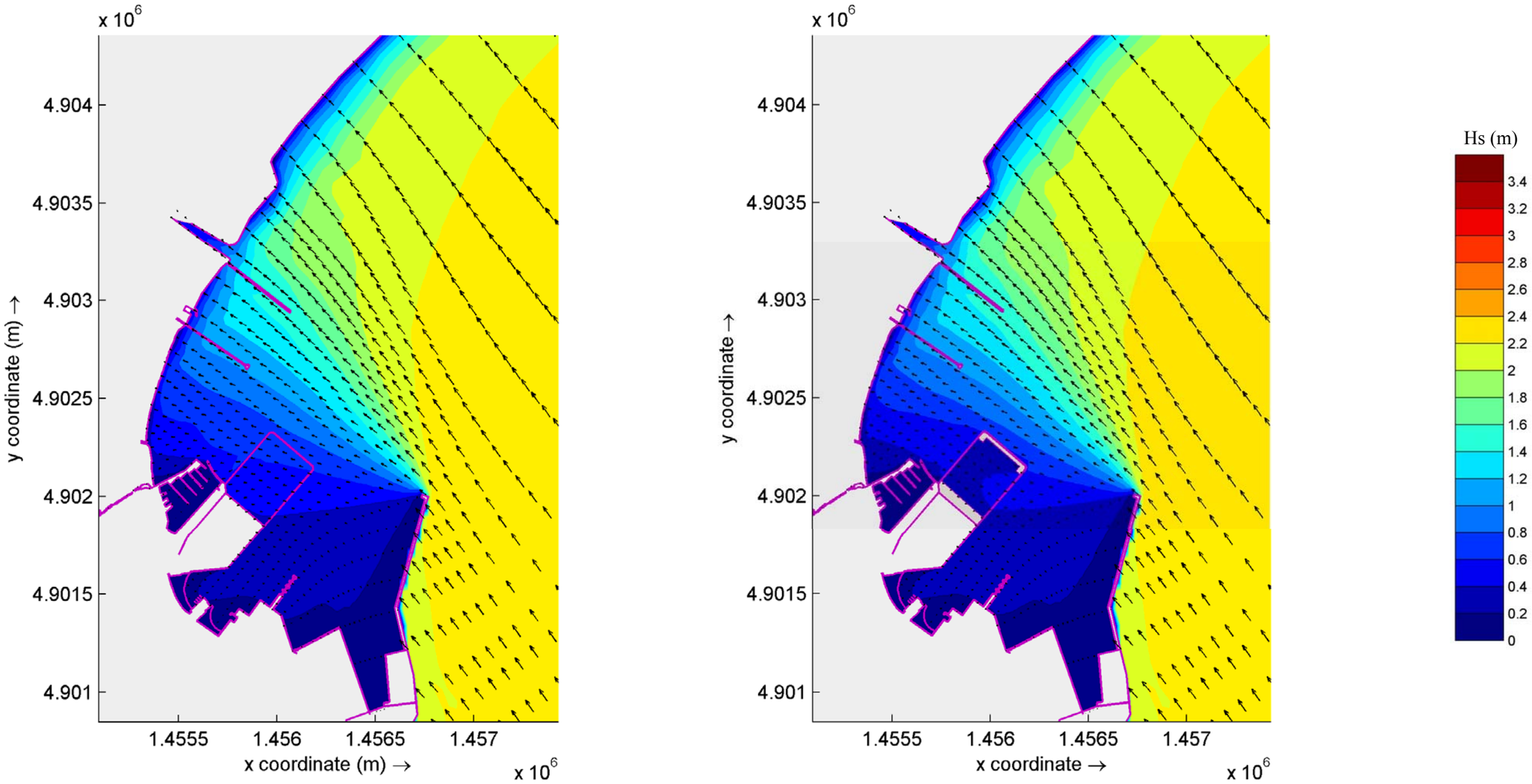


FIG. 9-3 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 150° N E TR=1 ANNO: HS=2,2 M , TP=7,2 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea estesa

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea estesa

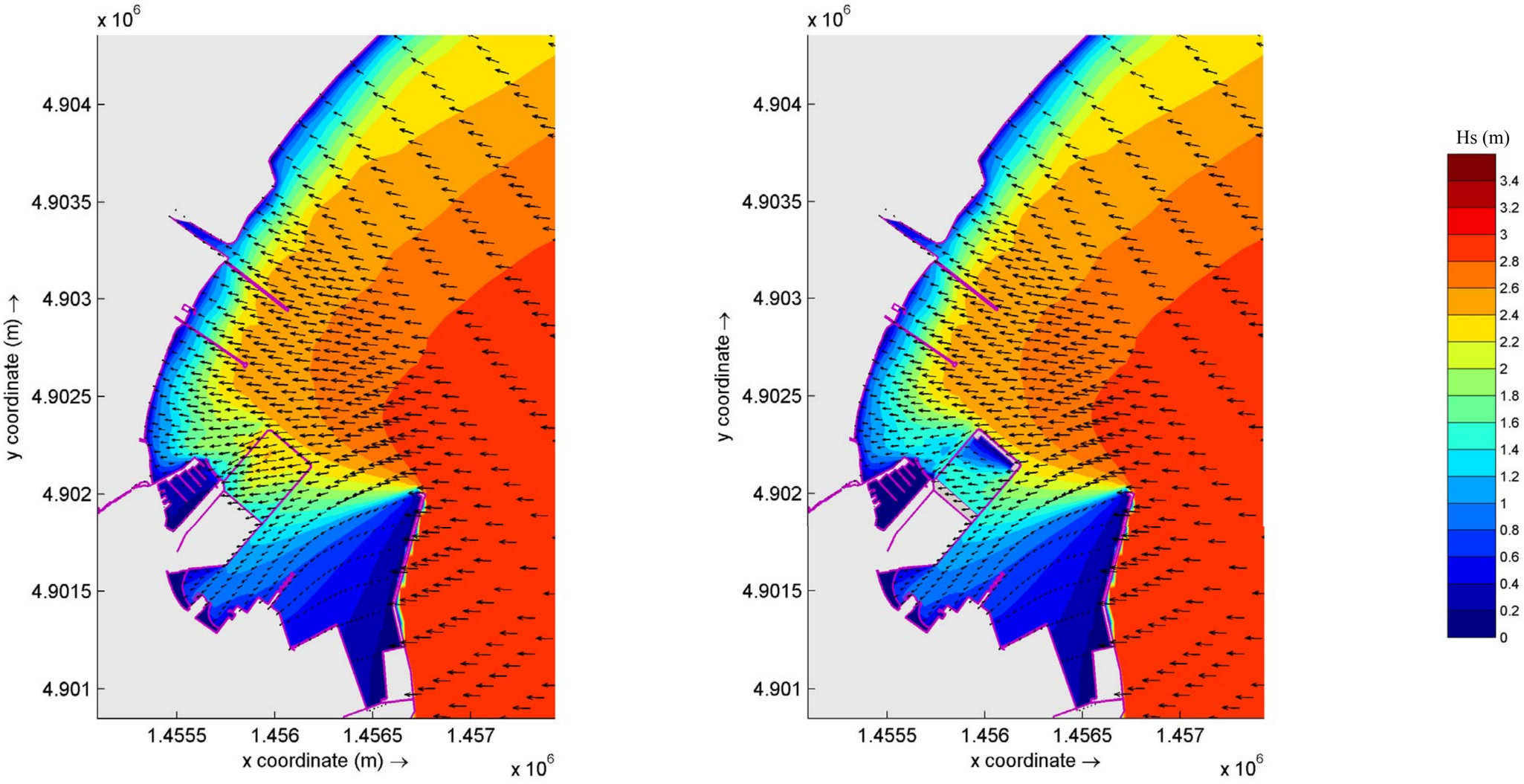


FIG. 9-4 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 90° N E TR=5 ANNI: HS=2,3 M , TP=7,3 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea estesa

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea estesa

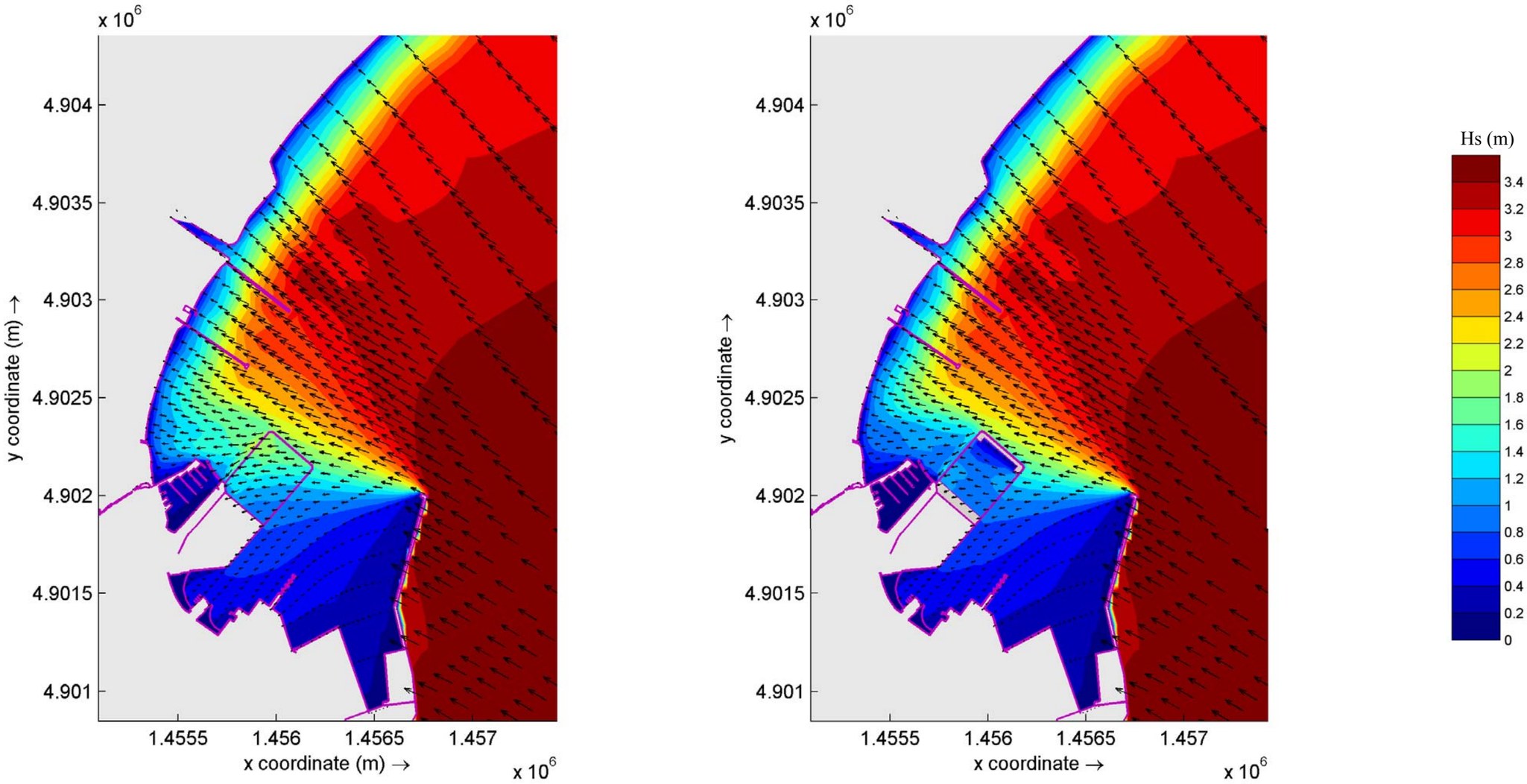


FIG. 9-5 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 120° N E TR=5 ANNI: HS=3,1 M , TP=8,6 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea estesa

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea estesa

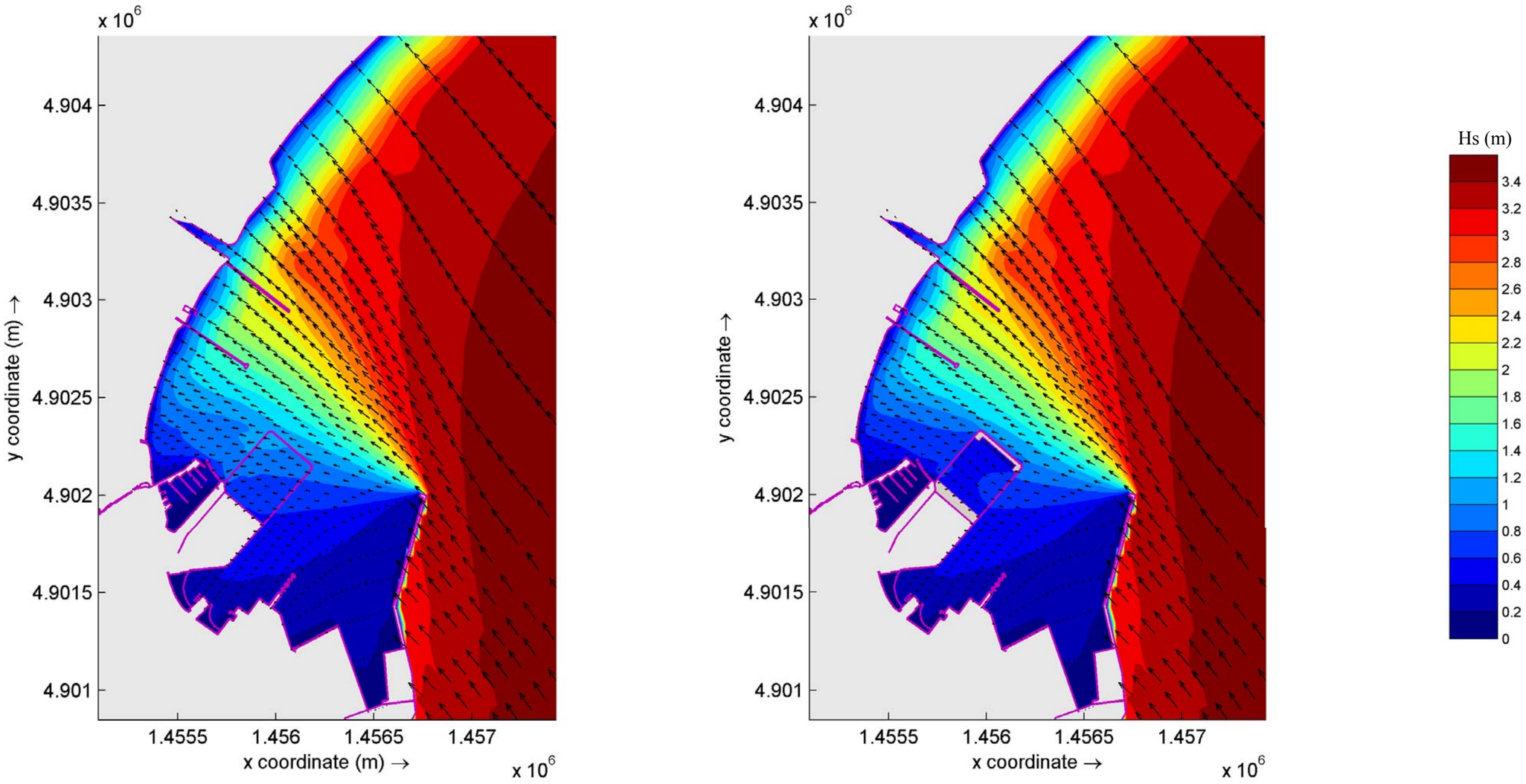


FIG. 9-6 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 150° N E TR=5 ANNI: HS=3,2 M , TP=8,7 SEC**

9.2. Differenze nell'area del litorale tra le onde con la soluzione del progetto definitivo e le onde con il progetto esecutivo

Ai fini della definizione del quadro comparativo (per le due configurazioni d'intervento) di moto ondoso di fronte al litorale sono stati elaborati i risultati delle simulazioni per ottenere delle immagini sintetiche che riportano la differenza nell'area del litorale tra le onde ottenute per la configurazione del progetto definitivo e le onde ottenute con la configurazione del progetto esecutivo.

Nelle figure FIG. 9-7÷FIG. 9-12 sono riportate per le 6 condizioni ondose simulate le differenze di altezza d'onda significativa ottenute con la configurazione del definitivo e con la configurazione dell'esecutivo.

Le immagini evidenziano chiaramente le aree del litorale che risentono della riduzione della distribuzione delle onde per effetto delle varianti previste nella configurazione del progetto esecutivo.

Per le onde provenienti da scirocco (150°N), sia quelle con tempo di ritorno più frequente (1 anno) che per quelle con tempo di ritorno meno ricorrente (5 anni), la distribuzione del moto ondoso sul litorale a nord e nell'area del bacino portuale risulta trascurabile.

Per le onde provenienti da 120°N e da 90 °N, si è riscontrata una riduzione apprezzabile dell'altezza d'onda nell'area della piattaforma ed in particolare a tergo della schiera di cassoni pieni sul lato più esterno della zona a giorno della piastra (così come previsti nella variante del progetto esecutivo). Sul litorale a nord in prossimità del Torrente Segno e del molo di sottoflutto del porto turistico, le differenze in termini di riduzione dell'altezza d'onda significativa indotte dalle varianti dell'esecutivo sono comunque poco significative (si osserva una riduzione dell'altezza d'onda al massimo di 30 cm); sul litorale più a nord le differenze sono addirittura trascurabili.

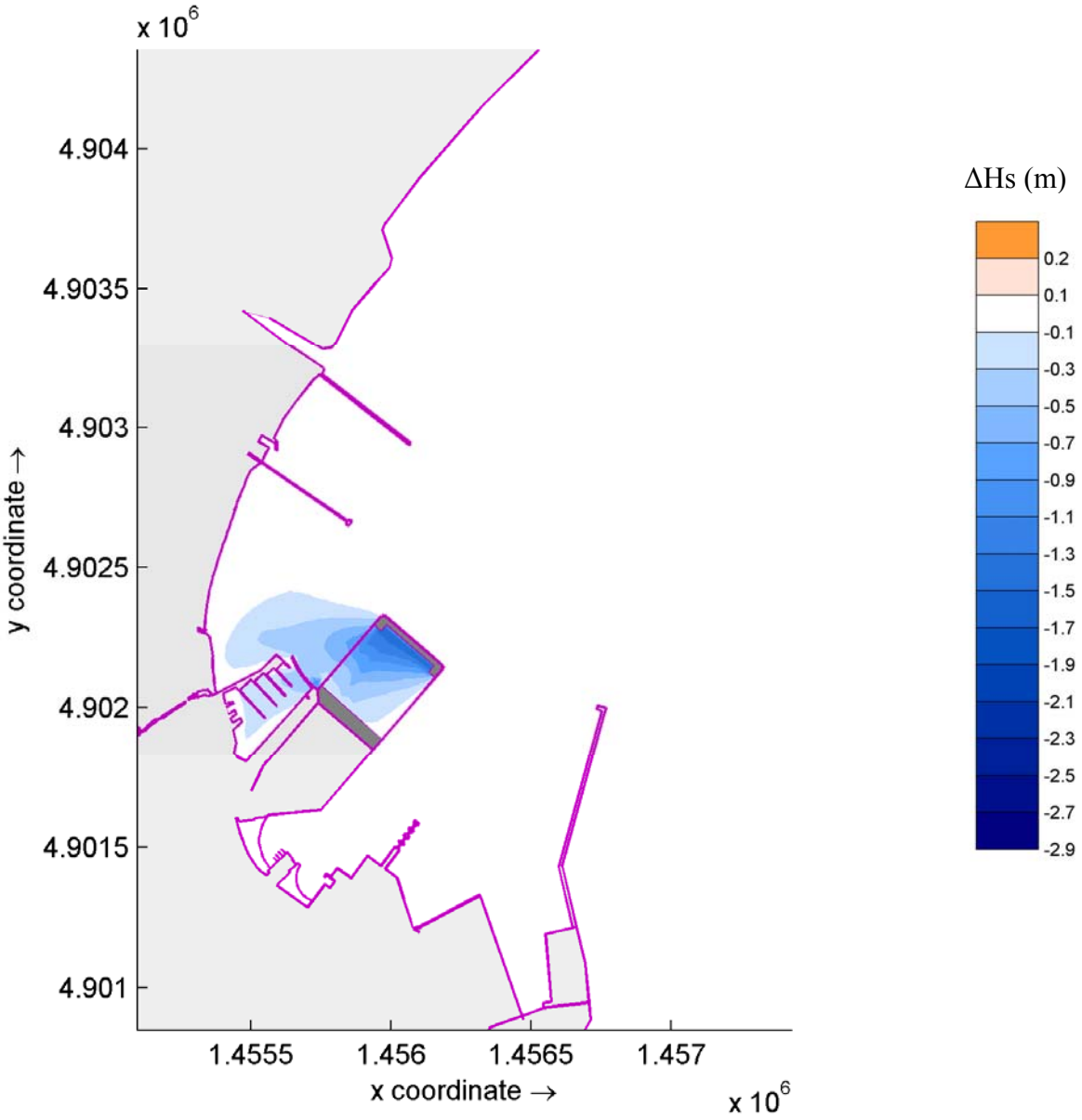


FIG. 9-7 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESTESA - **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 90° N E TR=1 ANNO: HS=1,6 M , TP=6,2 SEC**

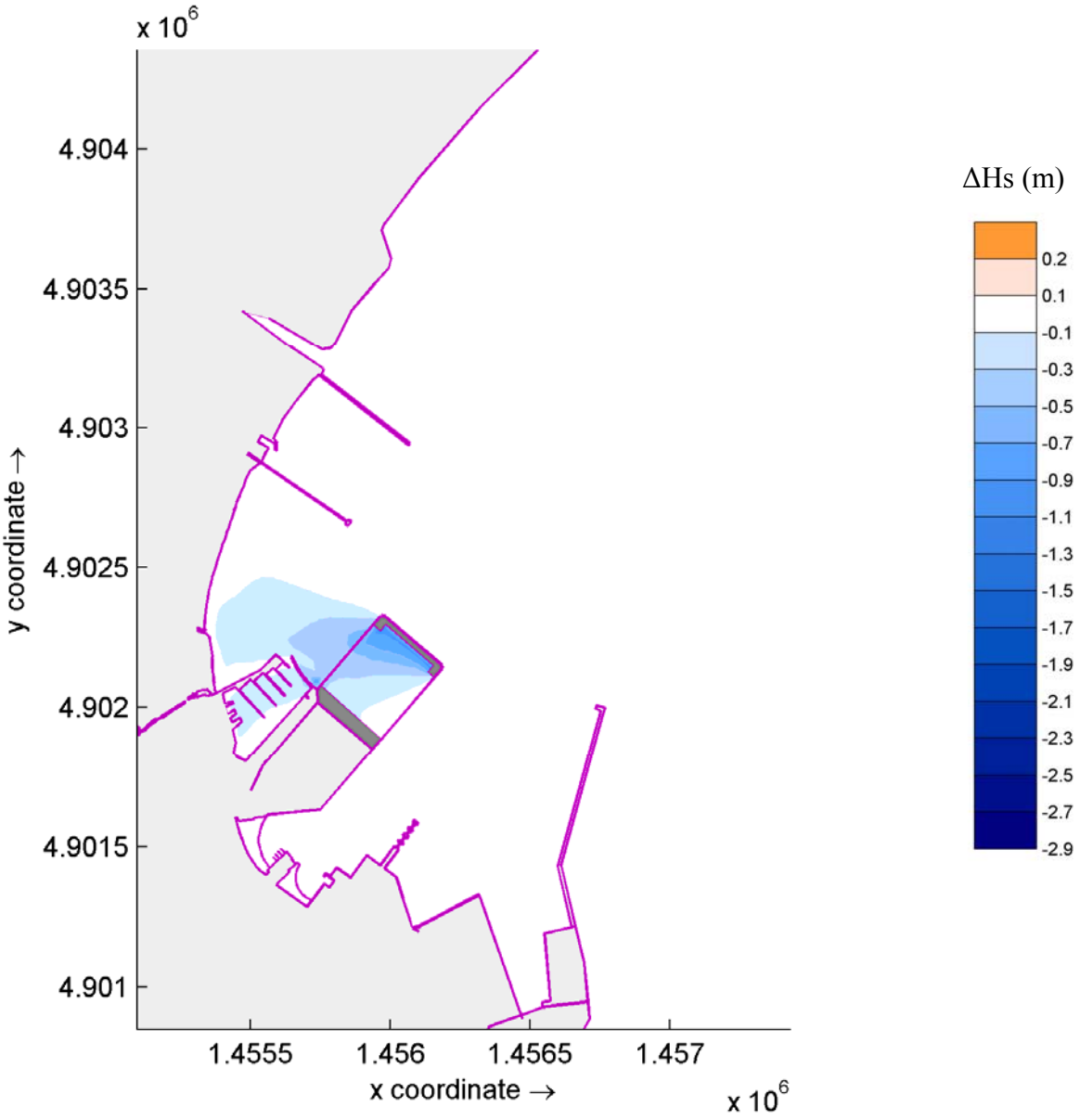


FIG. 9-8 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **120° N E TR=1 ANNO: HS=2,1 M , TP=7,0 SEC**

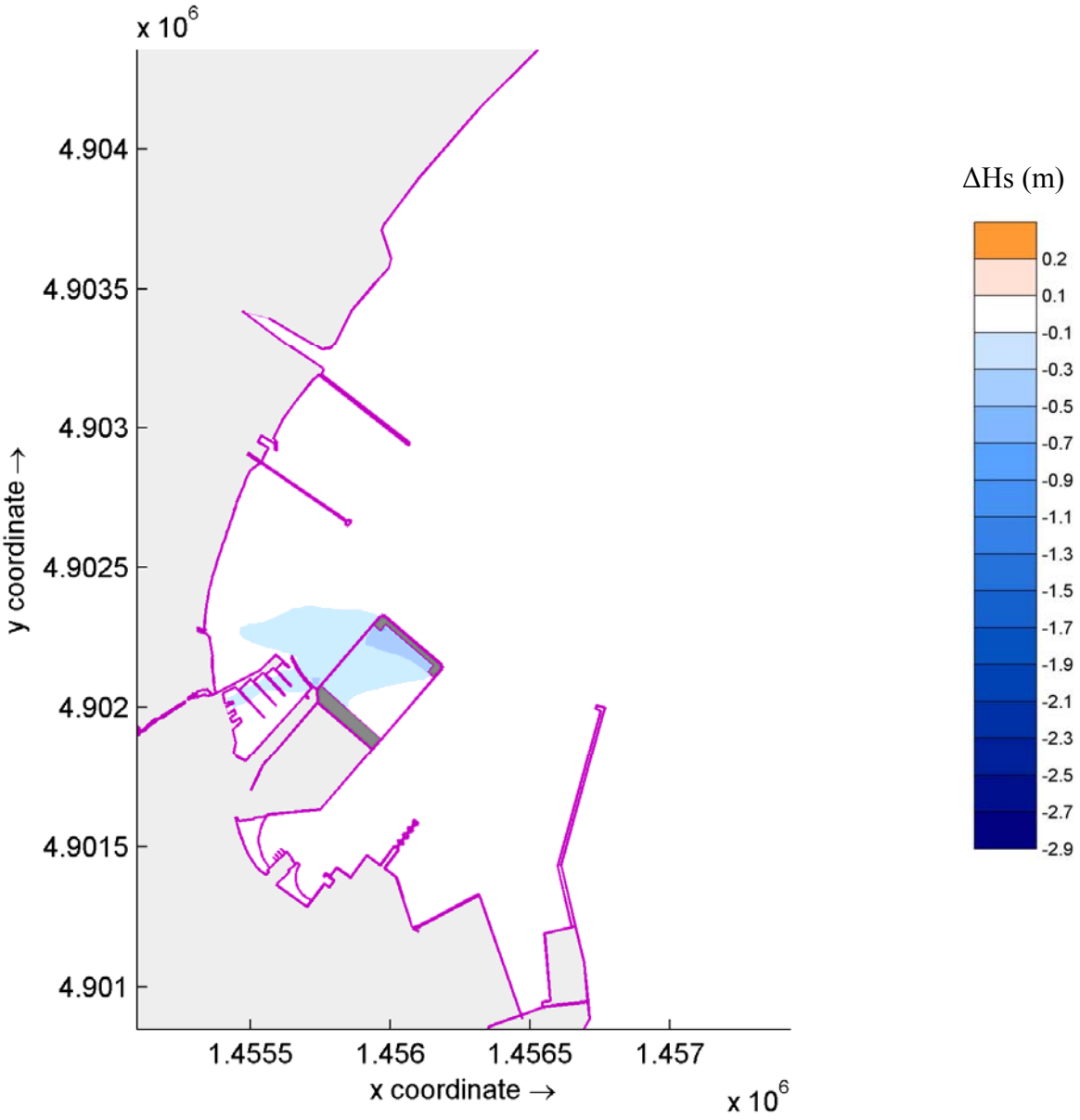


FIG. 9-9 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **150° N E TR=1 ANNO: HS=2,2 M , TP=7,2 SEC**

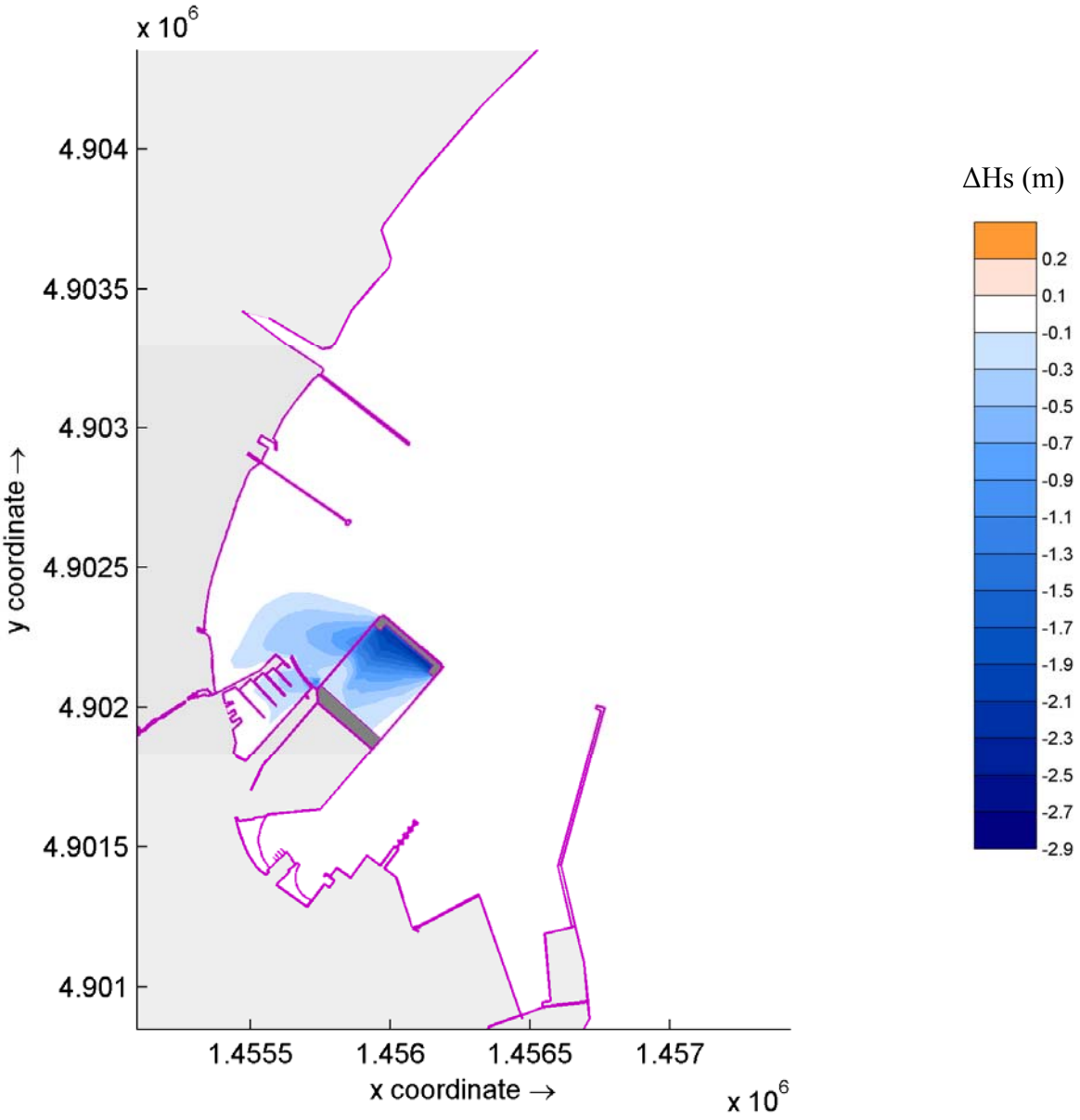


FIG. 9-10 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **90° N E TR=5 ANNI: HS=2,3 M , TP=7,3 SEC**

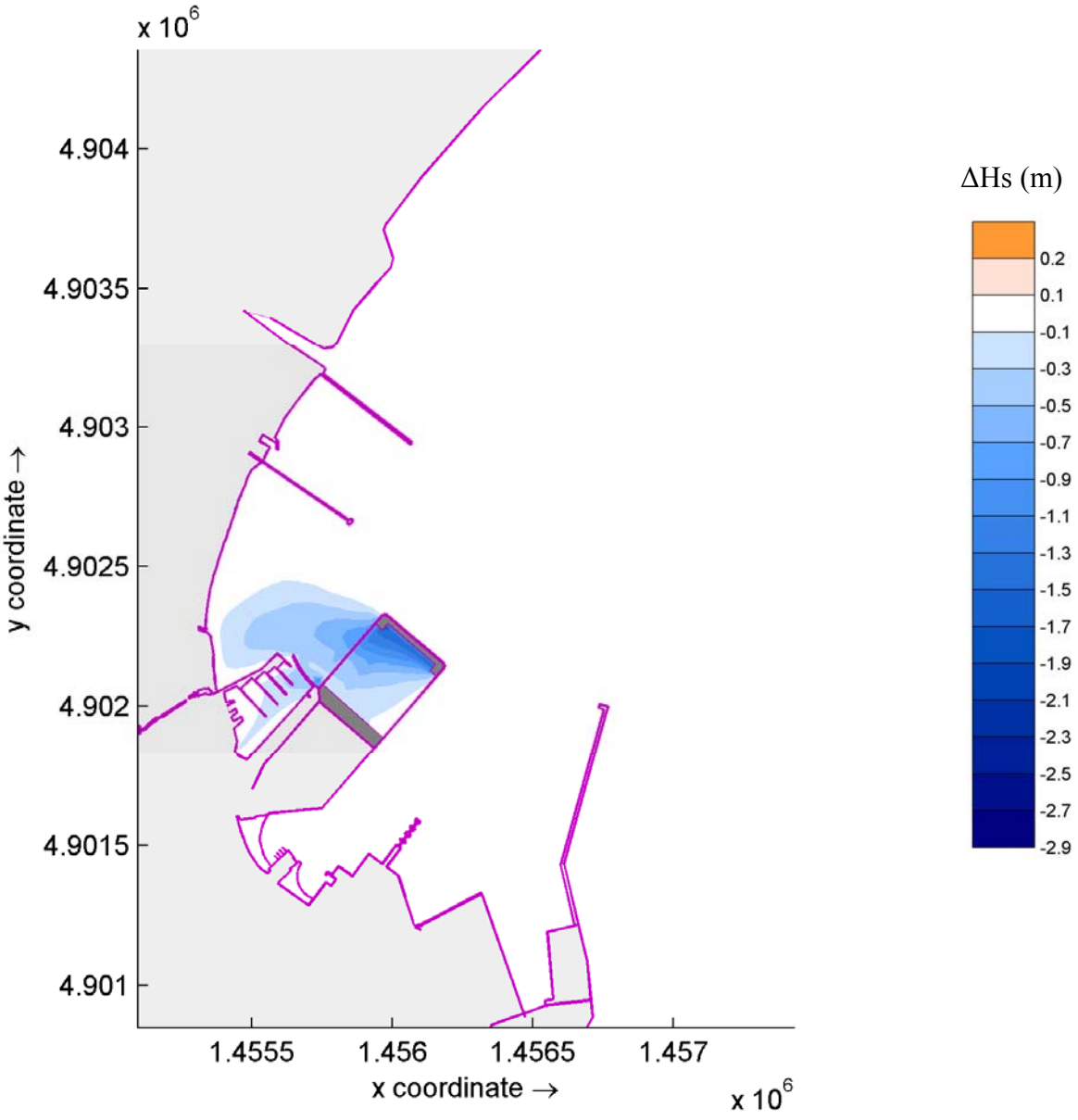


FIG. 9-11 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **120° N E TR=5 ANNI: HS=3,1 M , TP=8,6 SEC**

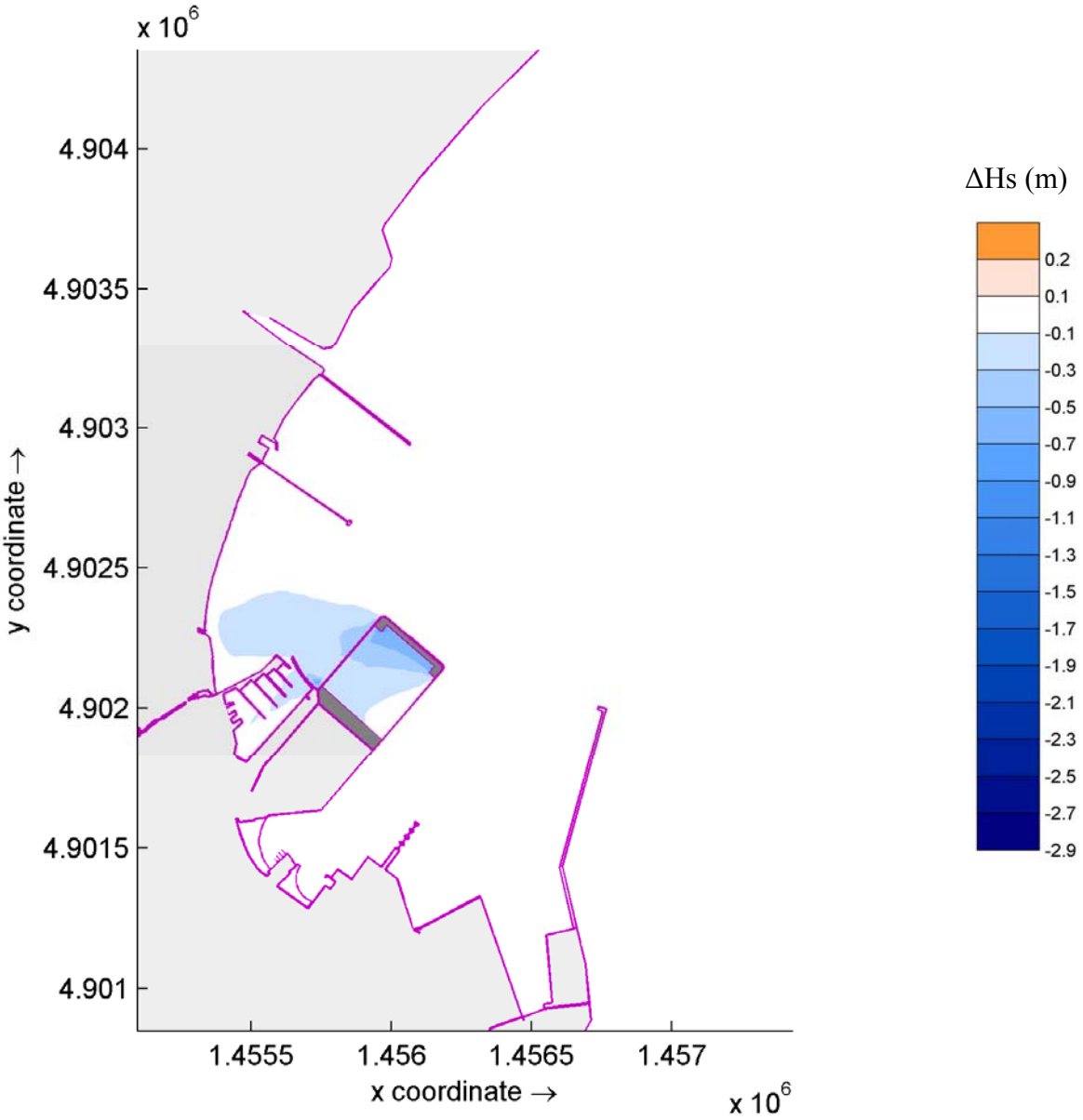


FIG. 9-12 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESTESA - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **150° N E TR=5 ANNI: HS=3,2 M , TP=8,7 SEC**

10. PROPAGAZIONE DELLE ONDE SUL LITORALE CON PIATTAFORMA COMPLETATA E DIGA FORANEA ESISTENTE – FASE COSTRUTTIVA

10.1. Risultati delle simulazioni di propagazione delle onde nell'area del litorale

Nelle Fig. 10-1÷Fig. 10-6 è riportato il confronto dei risultati delle simulazioni effettuate per la configurazione d'intervento del progetto definitivo (n° 6 simulazioni) e quelle per la configurazione d'intervento del progetto esecutivo (n° 6 simulazioni) in fase costruttiva .

Dai risultati ottenuti si può affermare che la diga foranea esistente esercita una modesta protezione dell'area portuale per tutte le direzioni di moto ondoso d'interesse relative al secondo quadrante. Mentre si ricorda che la presenza della diga foranea (nella situazione estesa come da Piano Regolatore, vedi capitolo precedente) esercita una protezione significativa dell'area portuale, in particolare per le condizioni di moto ondoso tipiche degli eventi da scirocco (150°N).

Nel caso della diga foranea esistente, il litorale immediatamente a nord delle nuove opere con riferimento in particolare al tratto compreso tra il torrente Segno e il pontile della presa d'acqua di mare della centrale elettrica, viene protetto dalla piattaforma stessa (anche per la direzione da scirocco : 150°N) e pertanto il moto ondoso su questo tratto di litorale risulta di più bassa entità rispetto a quello del tratto costiero più a nord.

Nella configurazione di variante del progetto esecutivo la schiera di cassoni sulla testata della piattaforma esercita un'ulteriore protezione rispetto alla configurazione del definitivo, sebbene localizzata con effetti di modesta entità sul litorale. Pertanto le differenze maggiori di altezza d'onda, sia per le onde con tempo di ritorno 1 anno che 5 anni, sono limitate alla zona della piattaforma ed in particolare nell'area adiacente a tergo della schiera di cassoni pieni sul lato più esterno della zona a giorno della piastra (così come previsti nella variante del progetto esecutivo). Nell'area del litorale a nord gli effetti della variante del progetto esecutivo rispetto alle opere del definitivo risultano assai modesti e addirittura sul litorale a nord del torrente Quiliano del tutto trascurabili.

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea esistente

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea esistente

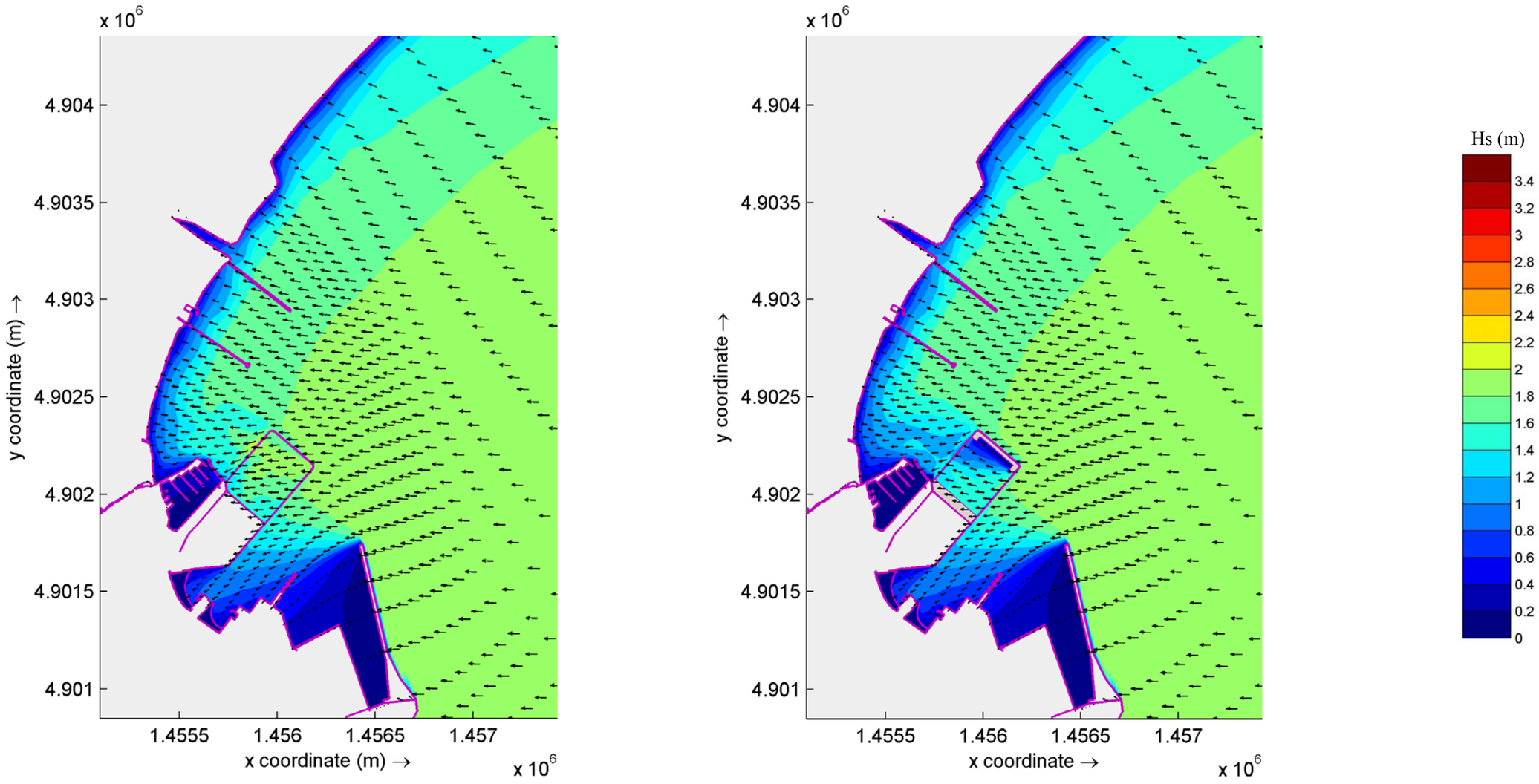


FIG. 10-1 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 90° N E TR=1 ANNO: HS=1,6 M , TP=6,2 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea esistente

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea esistente

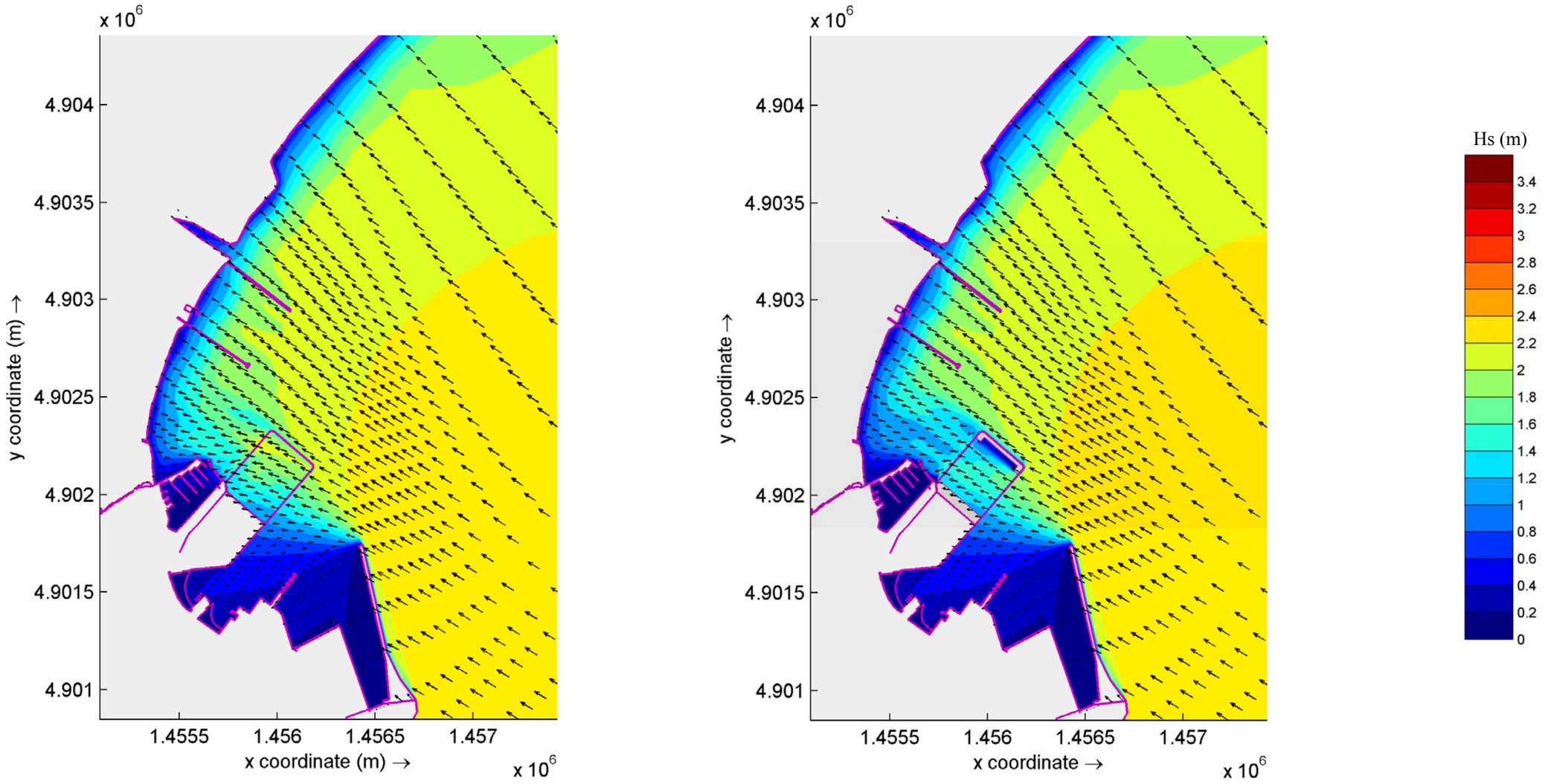


FIG. 10-2 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 120° N E TR=1 ANNO: HS=2,1 M , TP=7,0 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea esistente

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea esistente

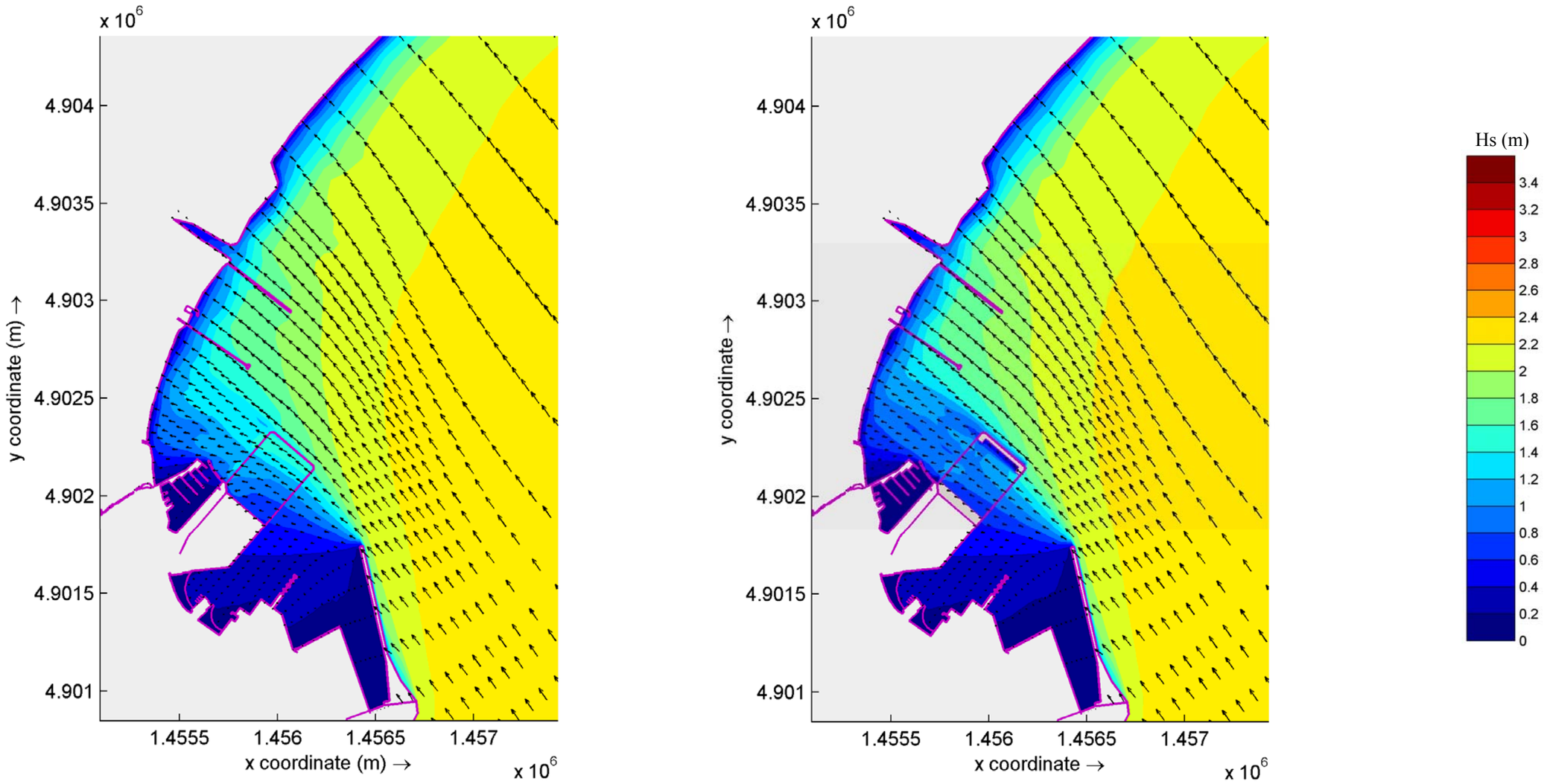


FIG. 10-3 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 150° N E TR=1 ANNO: HS=2,2 M , TP=7,2 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea esistente

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea esistente

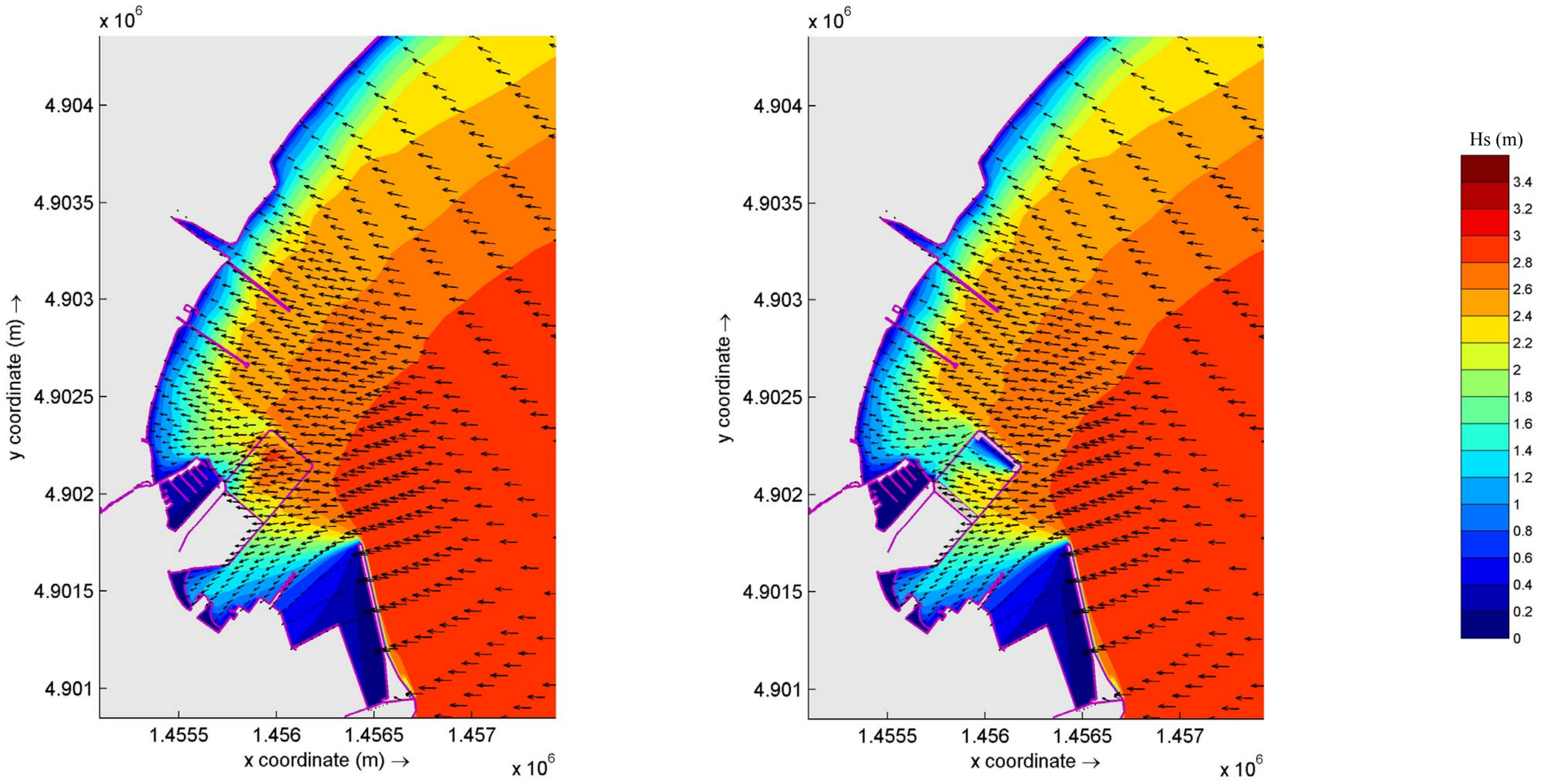


FIG. 10-4 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 90° N E TR=5 ANNI: HS=2,3 M , TP=7,3 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea esistente

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea esistente

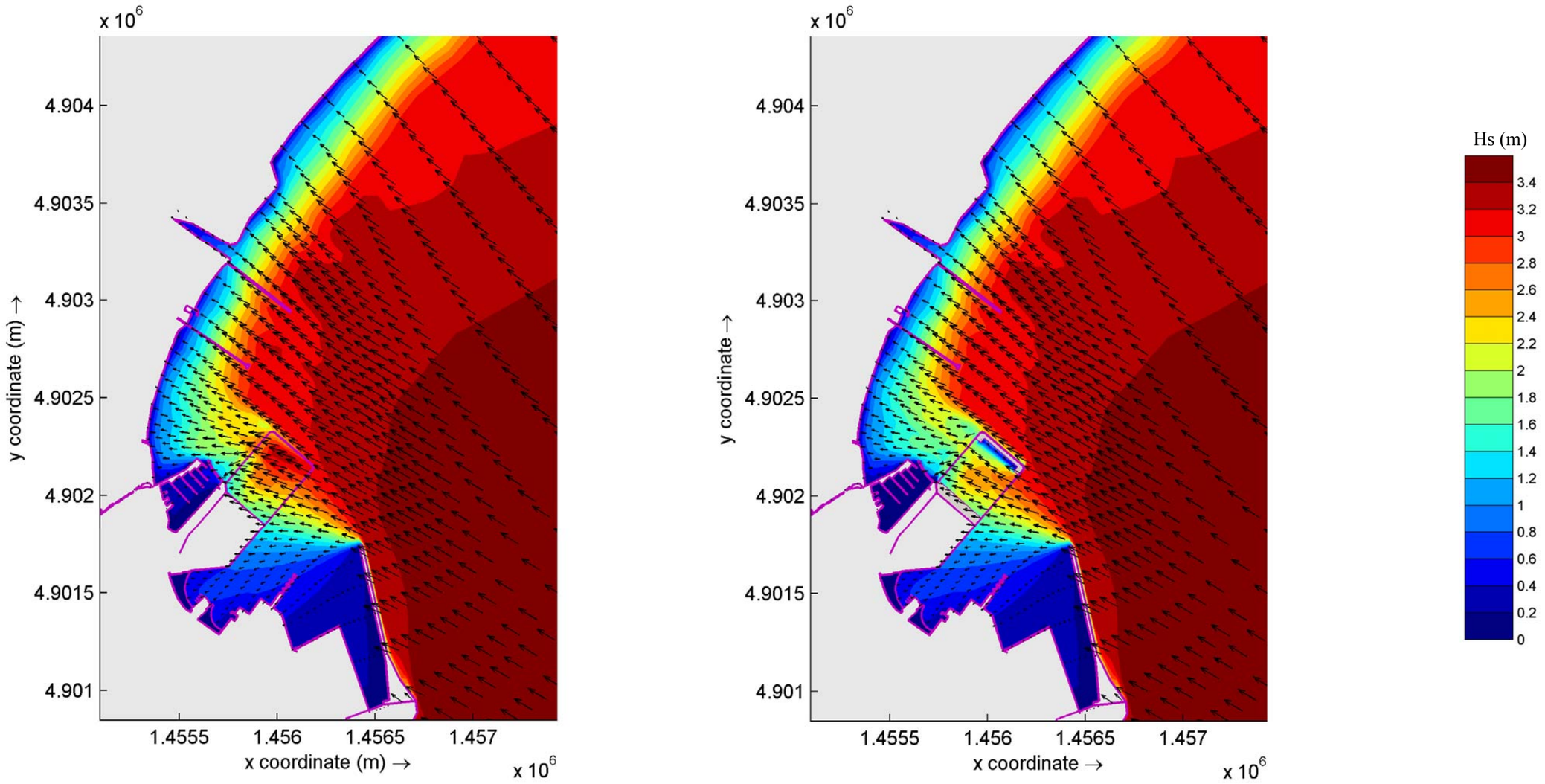


FIG. 10-5 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 120° N E TR=5 ANNI: HS=3,1 M , TP=8,6 SEC**

Piattaforma da Progetto Definitivo – Diga foranea esistente

Variante da Progetto Esecutivo – Diga foranea esistente

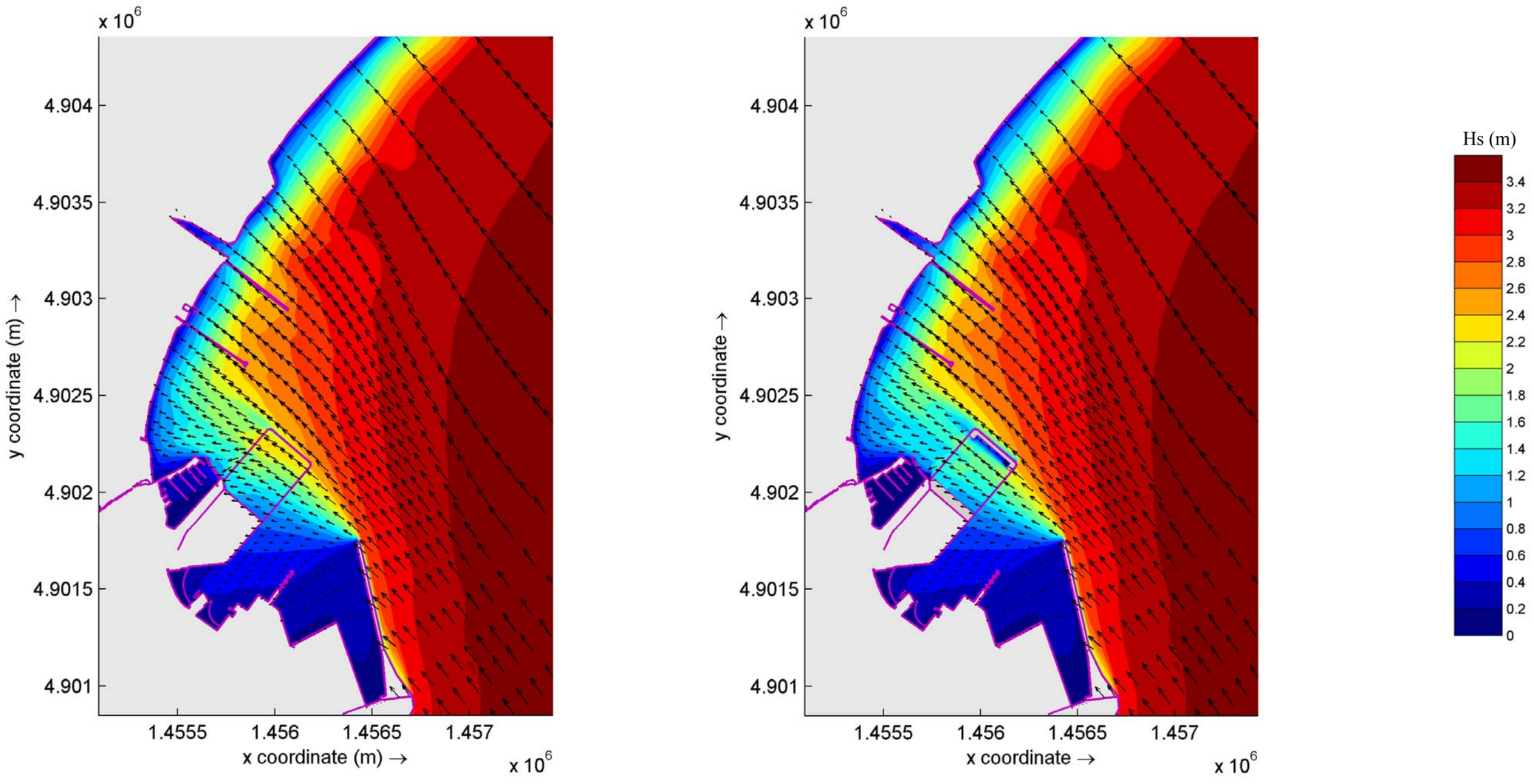


FIG. 10-6 - PROPAGAZIONE DELL'ONDA IN CORRISPONDENZA DEL LITORALE A NORD DELL'INTERVENTO- **CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA 150° N E TR=5 ANNI: HS=3,2 M , TP=8,7 SEC**

10.2. Differenze nell'area del litorale tra le onde con la soluzione del progetto definitivo e le onde con il progetto esecutivo

Ai fini della definizione del quadro comparativo (per le due configurazioni d'intervento) di moto ondoso di fronte al litorale sono state elaborati i risultati delle simulazioni per ottenere delle immagini sintetiche che riportano la differenza nell'area del litorale tra le onde ottenute per la configurazione del progetto definitivo e le onde ottenute con la configurazione del progetto esecutivo, in presenza della diga foranea esistente.

Nelle figure FIG. 9-7÷FIG. 10-12 sono riportate per le 6 condizioni ondose simulate le differenze di altezza d'onda significativa ottenute con la configurazione del definitivo e con la configurazione dell'esecutivo in fase di costruzione, che considera la piattaforma completata e la diga foranea esistente.

Le immagini evidenziano chiaramente le aree del litorale che risentono della riduzione della distribuzione delle onde per effetto delle varianti previste nella configurazione del progetto esecutivo.

Per le tutte le direzioni d'interesse delle onde (del 2° quadrante), si è riscontrata una riduzione apprezzabile dell'altezza d'onda nell'area della piattaforma (anche per la direzione da scirocco: 150°N) ed in particolare a tergo della schiera di cassoni pieni sul lato più esterno della zona a giorno della piastra (così come previsti nella variante del progetto esecutivo).

Sul litorale a nord in prossimità del Torrente Segno e del molo di sottoflutto del porto turistico, le differenze in termini di riduzione dell'altezza d'onda significativa indotte dalle varianti dell'esecutivo sono poco significative (si osserva una riduzione dell'altezza d'onda al massimo di 30 cm); sul litorale più a nord le differenze sono addirittura trascurabili.

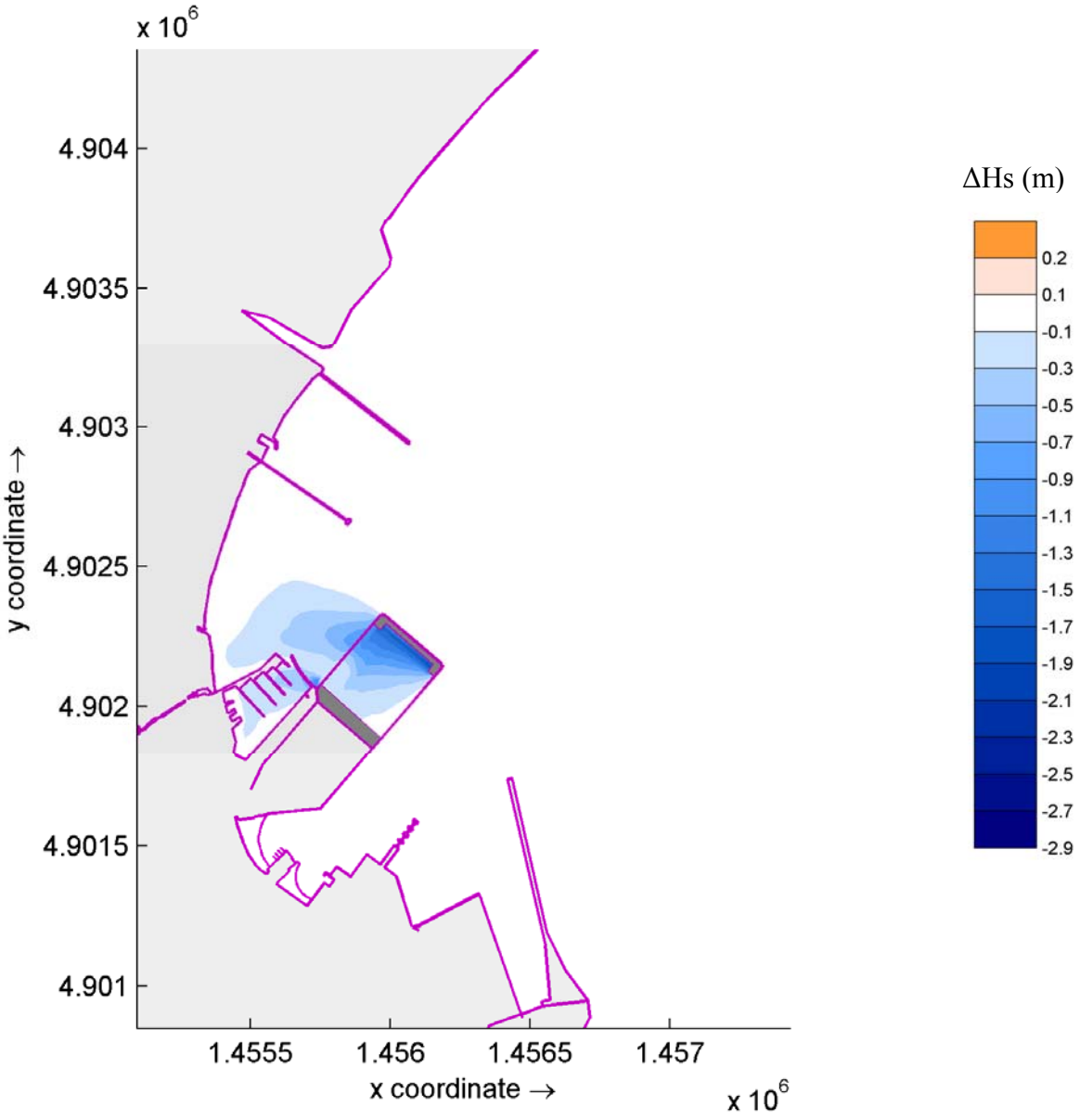


FIG. 10-7 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **90° N E TR=1 ANNO: HS=1,6 M , TP=6,2 SEC**

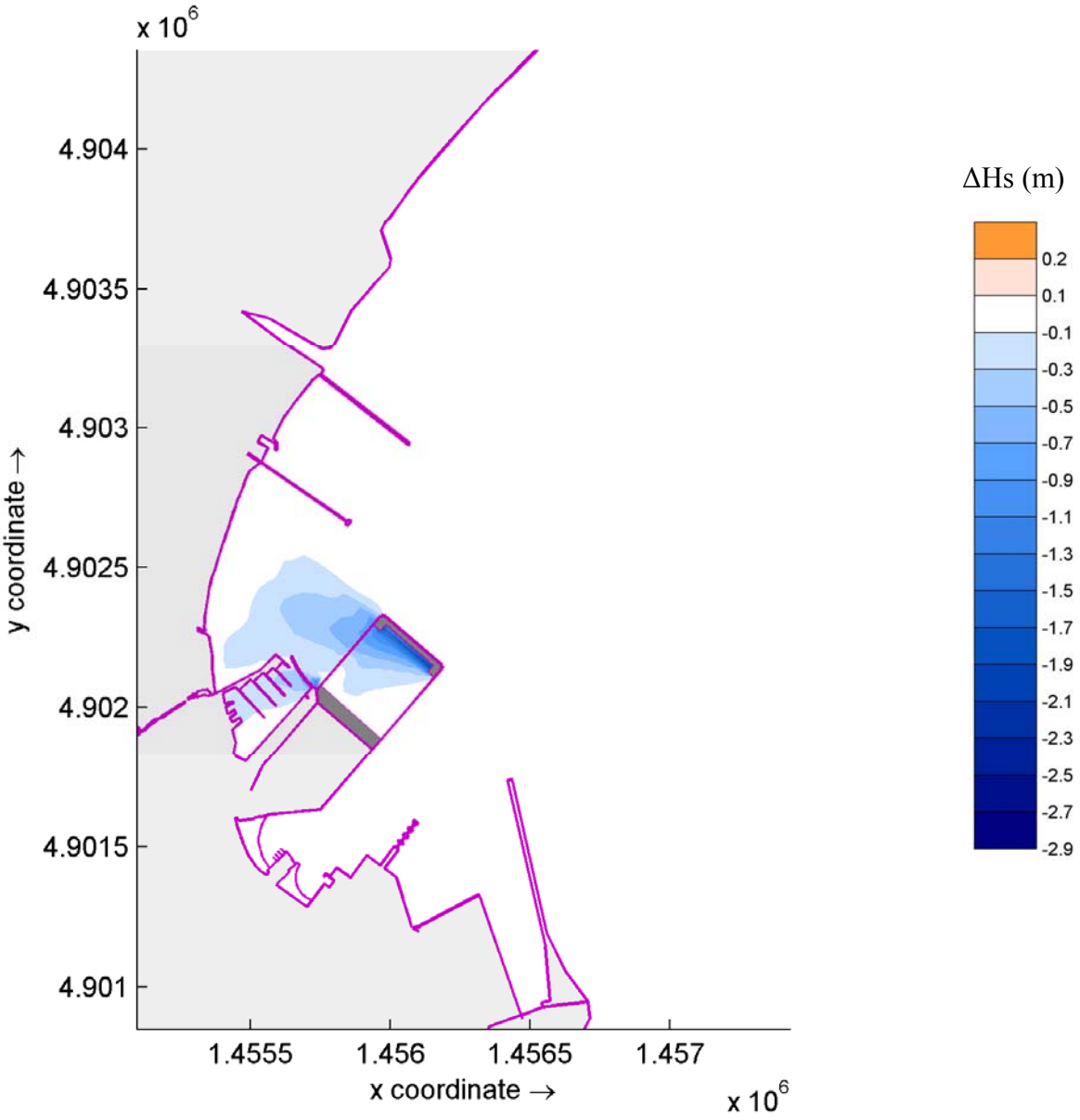


FIG. 10-8 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **120° N E TR=1 ANNO: HS=2,1 M , TP=7,0 SEC**

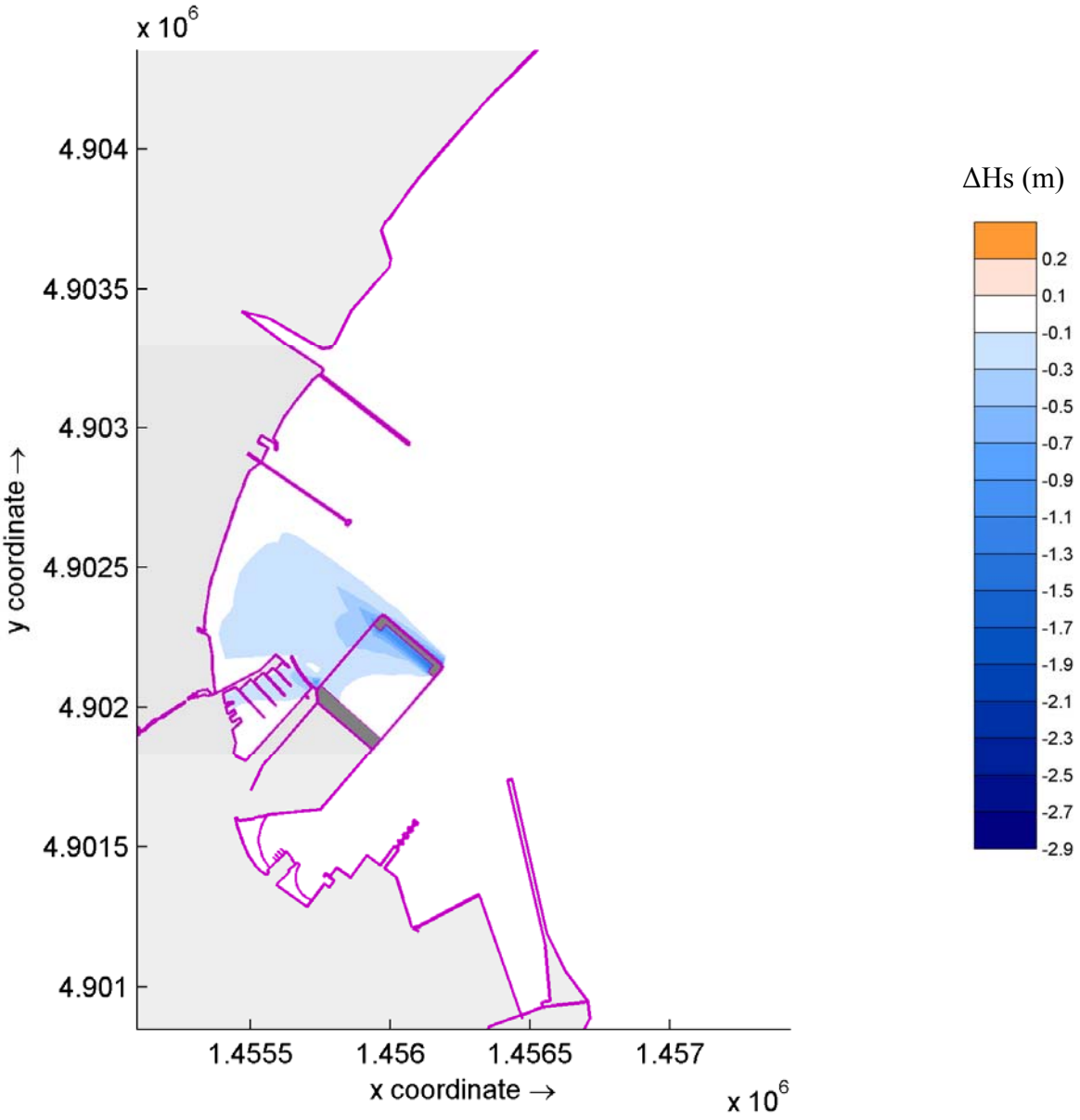


FIG. 10-9 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **150° N E TR=1 ANNO: HS=2,2 M , TP=7,2 SEC**

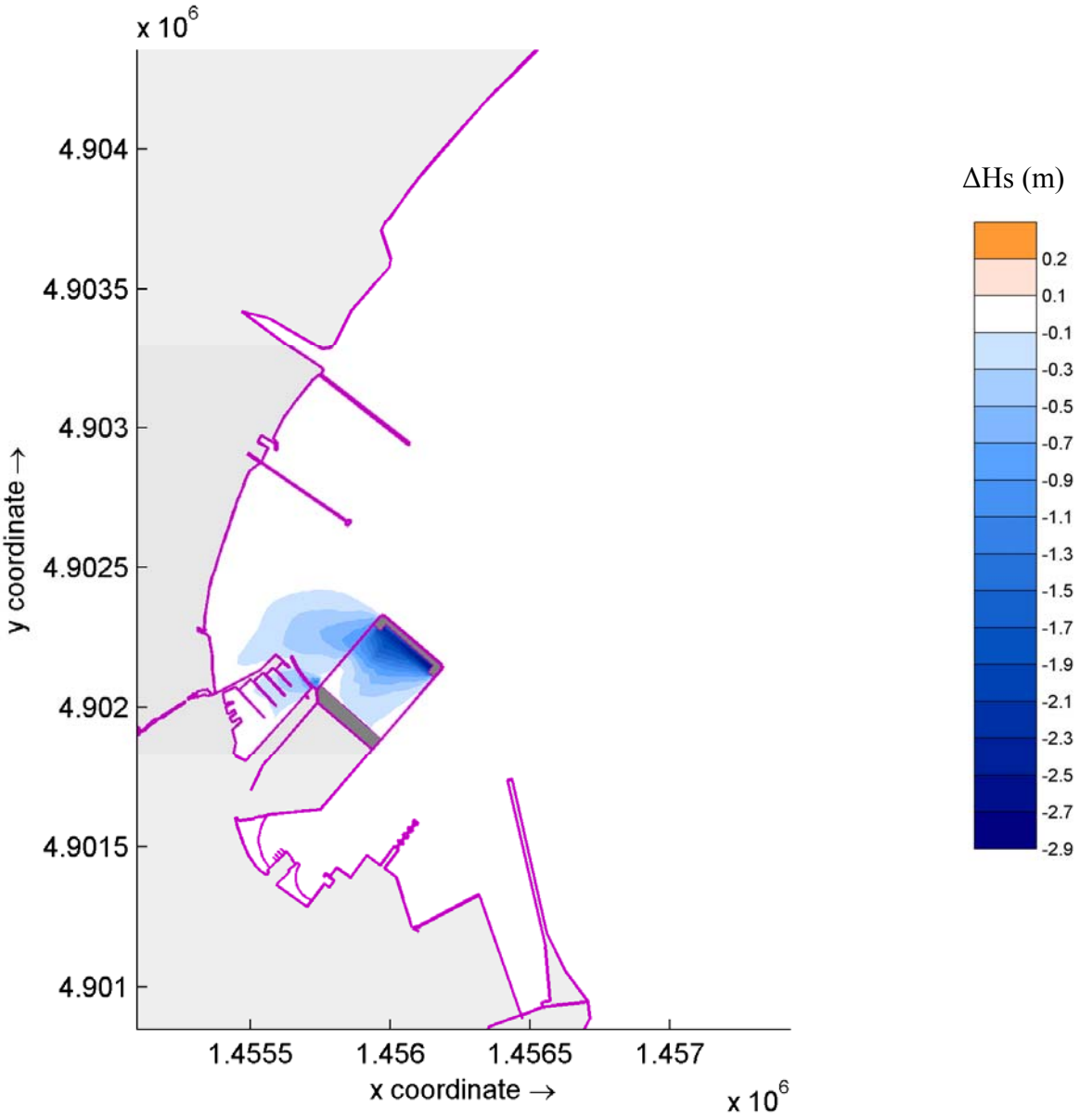


FIG. 10-10 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **90° N E TR=5 ANNI: HS=2,3 M , TP=7,3 SEC**

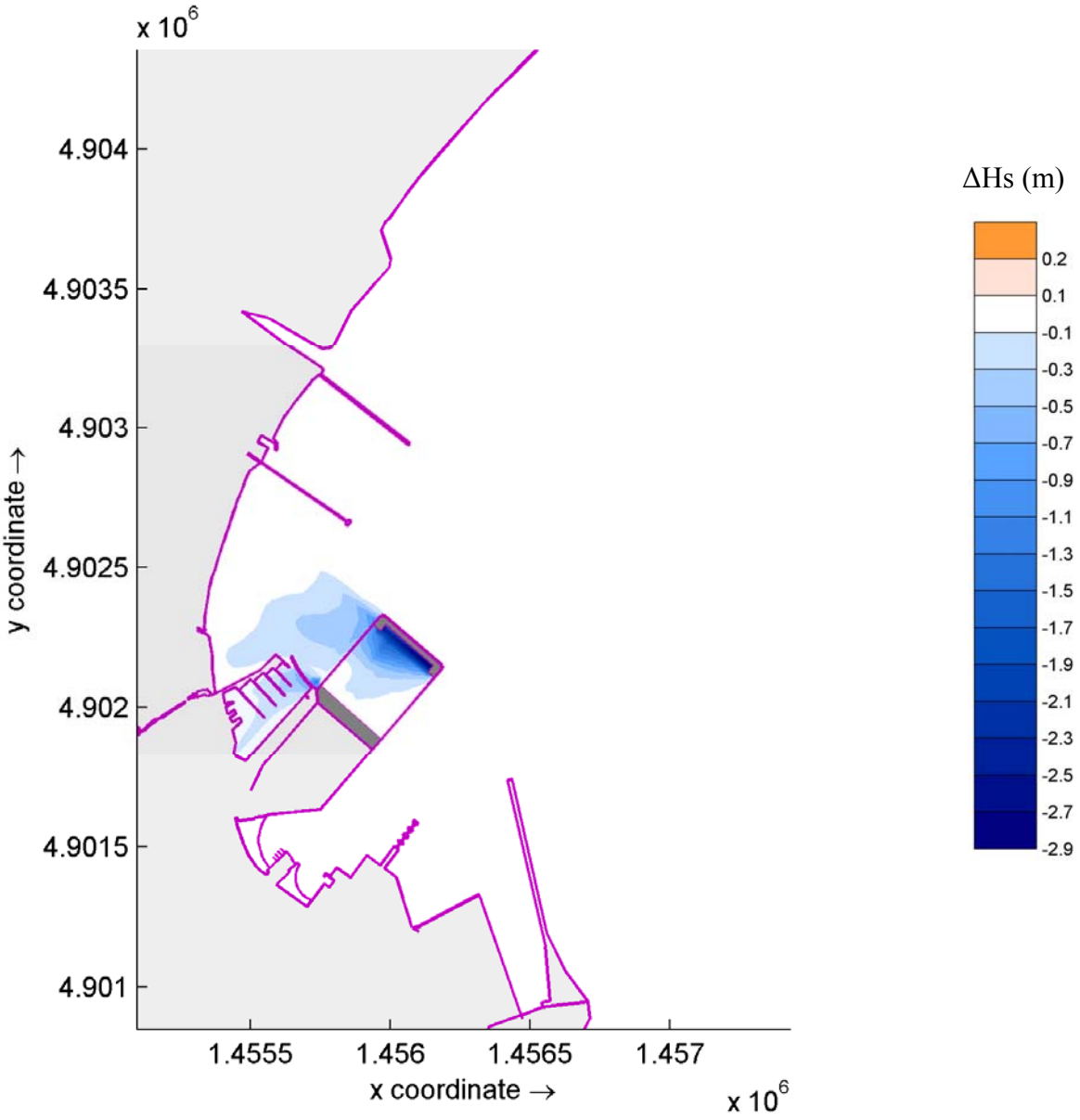


FIG. 10-11 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **120° N E TR=5 ANNI: HS=3,1 M , TP=8,6 SEC**

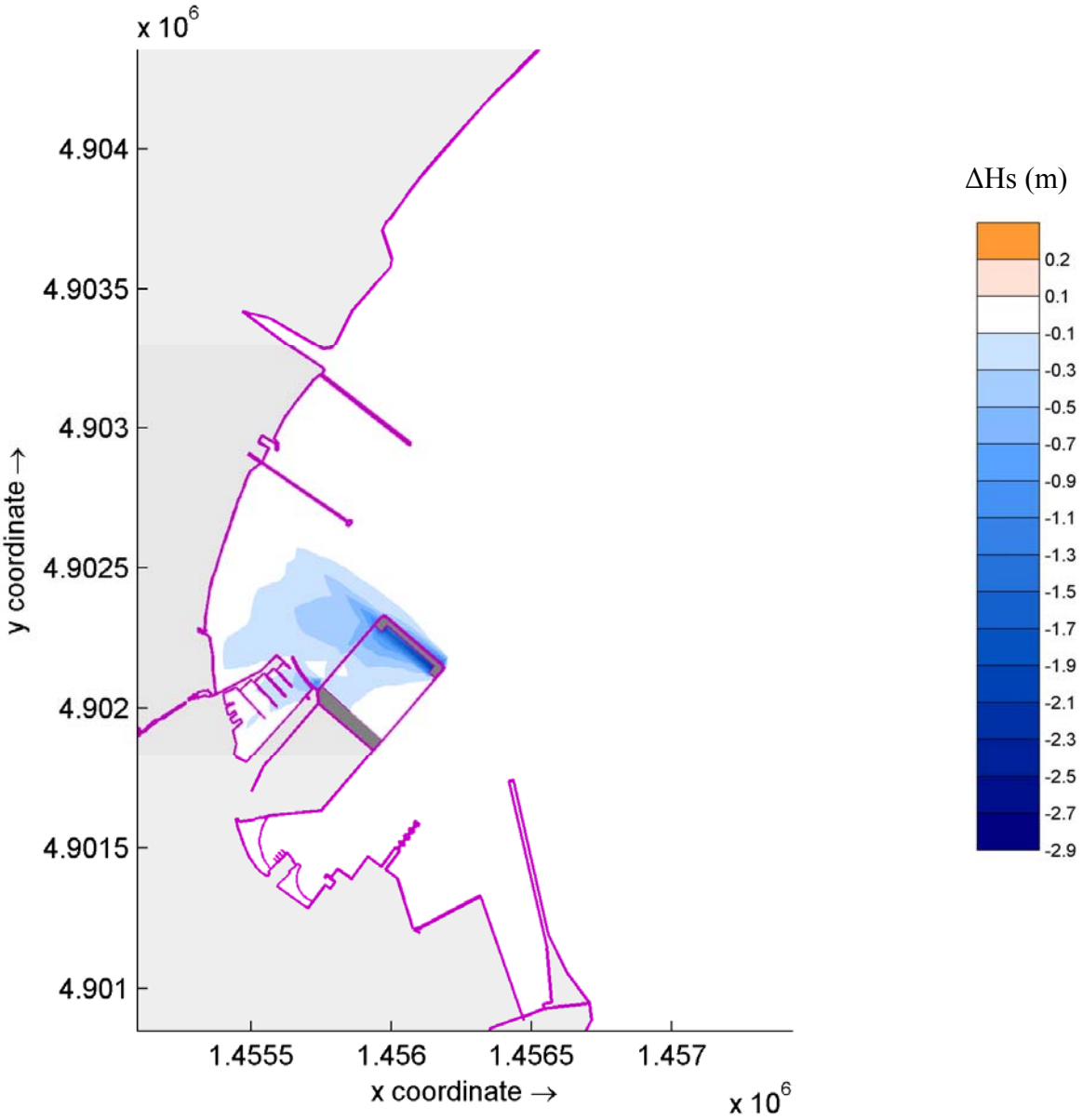


FIG. 10-12 - DIFFERENZE DELLE HS (IN M) CON LA SOLUZIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO E LA SOLUZIONE DEL PROGETTO ESECUTIVO CON DIGA FORANEA ESISTENTE - CARATTERISTICHE DELL'ONDA AL LARGO PROVENIENTE DA **150° N E TR=5 ANNI: HS=3,2 M , TP=8,7 SEC**

11. CONCLUSIONI

Le simulazioni condotte con il modello matematico SWAN hanno consentito di valutare le onde in corrispondenza del litorale a nord delle nuove opere, ed in particolare tra la foce del Segno e la foce del Quiliano, con riferimento alla situazione modificata di Progetto Esecutivo e alla situazione di Progetto Definitivo già approvata dalla Regione Liguria.

Gli effetti in termini di moto ondoso sul litorale della variante dell'esecutivo rispetto al definitivo sono stati valutati:

- sia per la situazione di piattaforma completata e in esercizio che prevede anche il completamento dell'estensione della diga foranea esistente,
- sia per una fase costruttiva nella quale si ipotizza una situazione caratterizzata dalla fine della costruzione della piattaforma (per la quale si possono riscontrare ragionevolmente gli effetti più significativi in termini di onde sul litorale) e dalla presenza della diga foranea ancora nella configurazione esistente.

Ai fini della determinazione degli effetti del moto ondoso sul litorale sono state considerate altezze d'onda al largo con ricorrenza frequente e con riferimento alle direzioni di maggiore interesse per il caso in esame: da levante (90°N), 120 °N e da scirocco (150°N). In particolare è stato considerato l'evento di moto ondoso avente tempo di ritorno 1 anno e un evento più estremo caratterizzato da un tempo di ritorno 5 anni.

I risultati ottenuti dalle simulazioni hanno evidenziato effetti apprezzabili, in termini di variazione del moto ondoso tra la configurazione del definitivo e dell'esecutivo, solo nell'area della piattaforma, a tergo della schiera di cassoni pieni sul lato più esterno della zona a giorno della piastra (così come previsti nella variante del progetto esecutivo).

Sul litorale in prossimità del Torrente Segno e del molo sottoflutto del porto turistico, le riduzioni dell'altezza d'onda significativa, sia per eventi con tempo di ritorno 1 anno che 5 anni, indotte dalle varianti dell'esecutivo sono sempre poco significative (al di sotto dei 30 cm); sul litorale ancora più a nord, e quindi anche in corrispondenza della

pontile della presa d'acqua di mare della centrale elettrica, le differenze sono addirittura trascurabili.

Le suddette variazioni di moto ondoso sul litorale tra la configurazione di variante dell'esecutivo e del definitivo sono state ottenute sia per la situazione in esercizio della piattaforma con diga foranea estesa, sia per una situazione in fase di costruzione che prevede la piattaforma completata e la diga foranea esistente (pertanto non ancora estesa come da Piano Regolatore).

Considerato che il moto ondoso rappresenta la principale forzante meteo marina responsabile delle dinamiche del litorale, si può dedurre che le modifiche sull'evoluzione costiera indotte dalle varianti dell'esecutivo siano marginali e per la zona più a nord trascurabili. Alla luce delle marginali variazioni sopra evidenziate che si ritiene debbano essere considerate valide su ampia scala visto il significativo livello di incertezza normalmente alla base delle analisi di dinamica costiera, si ritiene comunque necessario raccomandare come d'altra parte già previsto nello Studio d'Impatto Ambientale, una sistematica attività di monitoraggio per valutare eventuali situazioni di criticità a livello locale di evoluzione del litorale, con lo scopo a sua volta di adottare tempestivamente i necessari provvedimenti.

APPENDICE 1 - Pubblicazioni e studi di riferimento

Le varie analisi svolte hanno considerato anche il contributo di studi specialistici redatti in passato per il paraggio in esame.

Tra le varie pubblicazioni e studi consultati si citano i principali:

- 'Studio meteomarino' svolto da Technital nell'ambito di un progetto di un porto turistico tra Noli e Spotorno, per conto di Spotornoli S.r.l. nel 1993;
- Studi meteomarini dei paraggi di Vado Ligure e Savona – Configurazione del Piano Regolatore Portuale (2002) redatto dall'Università di Padova;
- Studi meteomarini inerenti alle variazioni previste rispetto al P.R.P. 2002 del Porto di Vado (2007) redatto dall'Università di Padova;
- 'Studi ambientali dell'area costiera di Vado Ligure': indagine eseguita nell'ambito del progetto per la valutazione di impatto ambientale della centrale termoelettrica di Vado, svolta dall'ENEA nel 1989;
- 'Il vento e lo stato del mare lungo le coste italiane e dell'Adriatico' (1984) a cura dell'Istituto Idrografico della Marina;
- 'Studio meteomarino per l'Ente Autonomo Porto di Savona' redatto dal Prof. Benassai (1978);
- 'Sulla previsione delle caratteristiche delle perturbazioni ondose e sulle azioni esercitate sull'antemurale' nell'ambito dello studio meteomarino svolto per il dimensionamento della diga a parete verticale di Genova Voltri;
- **'**Studio preliminare idraulico marittimo' nell'ambito del project financing relativo alla realizzazione e gestione opere di ampliamento del porto turistico redatto da DEAM nel Luglio 2008

APPENDICE 2 - Quality statement: UK Met Office Wave Model archive

The Met Office Wave Model Archive consists of the hindcast fields of winds and waves produced during the operation of the atmospheric and wave model forecast suite. To produce the best possible analysis of surface wind, all available reports of surface pressure, wind speed and direction (from ships, buoys, platforms and land stations) are subjected to a range of consistency checks before being assimilated into the model's analysis. The resulting wind field is then used to modify the wave field derived from earlier timesteps. For each of the 16 directional and 13 frequency bands, the changes in wave energy are computed at each gridpoint, using the local wind as energy input, and allowing for propagation, dissipation and transfer between spectral bands. The model is a so-called 'Second Generation' model, where the spectral shape is empirically defined and then allowed to evolve over time. For further details see Golding (1983) and Francis (1985). There are two versions of the wave model, both in operation since 1986 - one covers the Global oceans and the other European waters.

The **Global Wave Model** initially operated with an assumed fixed depth (200m) on a lat/long grid. The analysed fields of wind and 1-dimensional spectra (ie energy within each spectral band, plus a mean direction for that band) have been archived, initially at 12-hour intervals and subsequently (since June 1988) at 6-hour intervals. The spatial resolution was initially approx 150km (13.8k gridpoints). This was improved in June 1991, to approx 90km (37.3k gridpoints), and yet again in May 1999 to a resolution of around 55km, with depth-dependency. The enhanced resolution now allows sheltered seas (eg Persian Gulf, Caspian Sea) to be covered by the model and narrow waterways (eg Straits of Taiwan) are now handled more realistically.

Nested within the Global Wave Model, and taking boundary conditions from it, is a **European Waters Wave Model**. This is a depth-dependent second-generation model operating on a lat/long grid with spacing approx 25km (8.5k gridpoints). The model covers West European waters to 14degW between 30.5N and 66.7N and also covers the Mediterranean and Baltic Seas; the Black Sea was added in 1993. Wind and wave hindcast values were archived initially at 6-hour intervals and since June 1988 at 3-hour intervals.

Output at each timestep consists of wind speed and direction, plus **either**:
1-dimensional spectrum (energy and mean direction in each of the 13 spectral bands) **or** the conventional integrated variables derived from the spectrum (ie significant wave height, period and direction for both windsea and swell, together with resultant height and period).

The archived timeseries can be supplied at specified gridpoints. A range of analysis software has been developed to meet the needs of users who require data to be summarised in a convenient manner.

Since the winds are taken from the lowest level of the Atmospheric Model, they represent conditions approx 20m above mean sea level.

As with any operational model, there have been many small-scale improvements incorporated over the years. Most of these are introduced for computational reasons, to improve the efficiency of the calculations, but some are more fundamental, particularly the incorporation of wave height data from the ERS-1 satellite into the Global Wave model analysis with effect from June 1993 (see Foreman et al, 1994). Further detail (and dates) of the more significant changes to the model's operation are available on request. Over the years there have been occasional interruptions to the operational routine due to mainframe malfunction. Consequently, there are some periods of missing data in the archive, most of them of 12 hours duration or less.

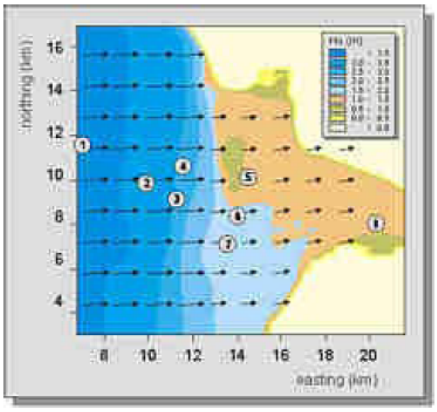
APPENDICE 3 - Mathematical model SWAN (Simulating Waves Nearshore)

Introduction

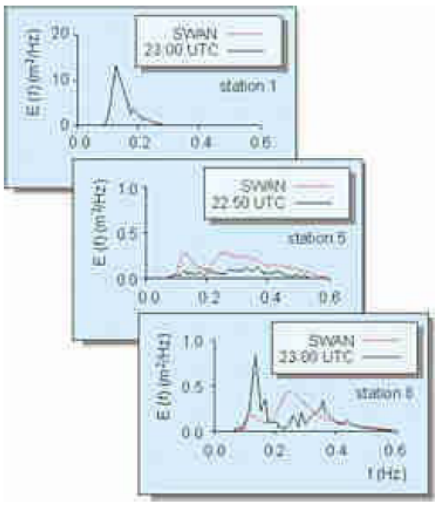
In many engineering studies, knowledge of the operational or of the extreme wave conditions in coastal waters (which may include estuaries, tidal inlets, barrier islands with tidal flats, channels etc.) is required. To obtain realistic estimates of random, short-crested wind-generated waves in such conditions for a given bottom topography, wind field, water level and current field, the numerical wave model SWAN can be used. This SWAN model is a third-generation stand-alone (phase-averaged) wave model for the simulation of waves in waters of deep, intermediate and finite depth. It is also suitable for use as a wave hindcast model.

In order to enable an efficient and a direct coupling between e.g. circulation models (wave driven currents) and sediment transport models (stirring by wave breaking), the SWAN model is presently also integrated under the numerical Delft3D model. SWAN can be applied to:

- Nearshore wave modelling for harbour and offshore installation design
- Coastal development and management
- Wave hindcasting



Computed significant wave height pattern and mean direction of energy transport (denoted with vectors) in the Haringvliet (a branch of the Rhine estuary in the south-west of the Netherlands).



Computed wave spectra at 23.00 UTC and observations (scattered around 23.00 UTC) on October 12, 1982 at three stations (1, 5 and 8). Note the differences in energy density scale in the panels.

Processes

SWAN simulates the following physical phenomena:

- Wave propagation in time and space, shoaling, refraction due to current and depth, frequency shifting due to currents and nonstationary depth.
- Wave generation by wind.
- Nonlinear wave-wave interactions (both quadruplets and triads).
- Whitecapping, bottom friction, and depth-induced breaking.
- Blocking of waves by current.

Note that diffraction is not explicitly modelled in SWAN but diffraction effects can be simulated by applying directional spreading of the waves. Reflections are also not included in SWAN. In strongly diffracting situations or situations with significant reflection effects the SWAN model should be coupled with the WL | Delft Hydraulics wave penetration model PHAROS. This coupling has recently been implemented for use in wave disturbance modelling in harbours.

Technical specifications

The SWAN model is a non-stationary third-generation wave model (see e.g. Holthuijsen et al., 1993; Ris, 1997; citation on the references page) and is the successor of the stationary second-generation hiswa model (Holthuijsen et al., 1989). The HISWA model is at present widely used but it has some disadvantages:

- Wave propagation is limited to a directional sector of less than 120° (so strong refraction cannot be accommodated)
- The computational grid has to be orientated in the mean wave direction, which is operationally inconvenient
- It is parametric in frequency such that multi-modal wave fields cannot be simulated and
- The modification and addition of physical processes is rather difficult due to the highly parameterized formulations that are used. These limitations are to a large extent overcome by the new SWAN model.

The non-stationary SWAN model is based on the discrete spectral action balance equation and is fully spectral (over the total range of wave frequencies and over the entire 360°). This latter implies that short-crested random wave fields propagating simultaneously from widely different directions can be accommodated. The wave propagation is based on linear wave theory (including the effect of currents). The processes of wind generation, dissipation and nonlinear wave-wave interactions are represented explicitly with state-of-the-art third-generation formulations. (It is noted that for reasons of economy, more simple first- and second-generation formulations are also optionally available.) The SWAN model can also be applied as a stationary model (stationary mode). This is considered acceptable for most coastal applications because the travel time of the waves from the seaward boundary to the coast is relatively small compared to the time scale of variations in incoming wave field, the wind or the tide.

To avoid excessive computing time and to achieve a robust model in practical applications, fully implicit propagation schemes (in time and space) have been implemented. The SWAN computations can be made on a regular and a curvi-linear grid in a Cartesian co-ordinate system. Nested runs can be made with the regular grid option.

SWAN provides many output quantities including two-dimensional spectra, significant wave height and mean wave period, average wave direction and directional spreading, root-mean-square of the orbital near-bottom motion and wave-induced force (based on the radiation-stress gradient).

The SWAN model has successfully been validated and verified in several laboratory and (complex) field cases (see e.g. Ris, 1997).

The SWAN model was developed at Delft University of Technology, Delft (the Netherlands) and where it is undergoing further enhancements. It is specified as the new standard for nearshore wave modelling and coastal protection studies. WL | Delft Hydraulics has integrated the SWAN model in several models and is applying SWAN in its consultancy projects. The SWAN model has been released under public domain.

References

Holthuijsen, L.H., Booij, N. and T.H.C. Herbers, 1989: A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engineering*, **13**, 23-54.

Holthuijsen, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993: A spectral wave model for the coastal zone, *Proc. of 2nd Int. Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, New Orleans, USA, 630-641.

Ris, R.C., 1997: Spectral modelling of wind waves in coastal areas, (Ph.D. Dissertation Delft University of Technology, Department of Civil Engineering), Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, Delft, The Netherlands.