COMUNE DI FINALE LIGURE

PROGETTO DEFINITIVO DEGLI INTERVENTI DI CONTRASTO ALL'EROSIONE COSTIERA DEL LITORALE DI VARIGOTTI

2° LOTTO

STUDIO METEOMARINO E VERIFICA DELLA STABILITÀ DELL'OPERA FISSA DI PROGETTO

11

data

Settembre 2021

A	PRIMA STESURA	Settembre 2021

STUDIO SIRITO

Savona

Ing. Giorgio Sirito
Ing. Roberto Sirito
Geom. Vittorio Sirito

Consulente:

Ing. Alberto Albert
CTO PMSC SA

STUDIO METEOMARINO E VERIFICA DELLA STABILITÀ DELL'OPERA RIGIDA DI PROGETTO

INDICE

PARTE PRIMA
IL REGIME ANEMOMETRICO ED I FETCH

1. IL REGIME ANEMOMETRICO DEL MAR LIGURE 1
1.1. - Condizioni generali 1
1.2. - La dinamica di alcune importanti situazioni tipiche 1
1.3 - I venti del "Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea" (2004) 3
2. ESPOSIZIONE MARITTIMA 7
3. I FETCH 7
3.1. - Settore di traversia, Fetch geografici 7
3.2. - I Fetch efficaci 9

PARTE SECONDA
LE ONDE AL LARGO

4. ANALISI DELLE FONTI DI DATI 11
4.1. Dati Atlante delle onde e del vento nel Mediterraneo (ISMAR - Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea - 2004) 12
4.2. - Dati boa di La Spezia (RON) 18
4.3. - Dati boa Côte d'Azur e nodo modello CEP (METEO FRANCE) 19
4.4. - Dati Hindcast (Oceanweather) 21
4.5. - Dati KNMI 22
4.6. - Boa di Capo Mele 24
5. RAFFRONTO FRA LE ROSE DEL MOTO ONDOSO ANNUALE 24

PARTE TERZA
VERIFICHE IDRAULICHE E DI STABILITA' DELL'OPERA FISSA DI PROGETTO

6. – IMPOSTAZIONE PROGETTUALE DEL 2° LOTTO DI INTERVENTO 28
6.1. - Premessa 28
6.2. – Impostazione progettuale del 2° lotto di intervento 29
6.3. – Ubicazione della secca sommersa 30
7. ANALISI DEL CLIMA ONDOSO E SIMULAZIONI SOTTO COSTA CON MODELLAZIONE MATEMATICA 32
7.1. – Onde al largo di progetto ed onde rifratte su fondale di profondità 15m 32
7.2. – Propagazione del moto ondoso sotto costa 33
7.3. – Raffronto tra la situazione attuale e quella di progetto 34
7.4. – Conclusioni sulle simulazioni sotto costa e previsione di monitoraggio 35
7.5. – Stima del *run-up* a valle della dorsale sommersa 43
8. VERIFICA DELLA STABILITA' DELL'OPERA RIGIDA DI PROGETTO 43

STUDIO METEOMARINO

PARTE PRIMA
IL REGIME ANEMOMETRICO ED I FETCH

1. IL REGIME ANEMOMETRICO DEL MAR LIGURE

1.1. - Condizioni generali

Il Mar Ligure é uno dei bacini italiani su cui l'influenza dei sistemi montuosi, che fanno da contorno, risulta determinante sull'andamento delle masse d'aria in evoluzione su tale area e soprattutto negli strati più bassi.

Le depressioni sottovento ai rilievi orografici sono qui periodicamente ricorrenti sotto la classica denominazione di CICLOGENESI SUL GOLFO LIGURE. La media annuale di questi casi è di circa 50 con un massimo in Dicembre-Gennaio ed un minimo in Settembre. Su 100 casi, ossia in 2 anni, si hanno i seguenti valori di persistenza:

43,4% dura fino a 24 ore
30,4% " 2 giorni
16,2% " 3 "
6,7% " 4 "
2,7% " 5 "
0,4% " 6 "
0,2% " 7 "

Queste ciclogenesi danno luogo ad una fenomenologia tipica in cui il campo del vento assume aspetti particolarmente complessi, considerandone le fasi evolutive su scala regionale.

1.2. - La dinamica di alcune importanti situazioni tipiche

Le più importanti situazioni tipiche, sono illustrate sulle cartine da fig. 2 a fig. 9. In queste cartine e stata messa in particolare evidenza l'orografia alpina ed appenninica e le correnti aeree sono state simboleggiate da apposite freccette.

1.2.1

Sulla cartina 2 un nucleo di bassa pressione (B) sulla Valle del Rodano richiama masse di aria del 2° quadrante. Il flusso, di tipo sciroccale, ossia da Sud-Est sul Tirreno e sull'Adriatico, modifica la propria traiettoria nell'ambito del Golfo di Genova, dove confluiscono, da Nord e da Nord-Est, correnti di provenienza adriatica, che hanno imboccato la Pianura Padana. Al largo del Golfo di Genova queste correnti confluiscono con i venti di Scirocco e Levante, provenienti dalle coste della Toscana e dalla Riviera Ligure di Levante, per poi proseguire da Est verso la Valle del Rodano, sede del nucleo depressionario, che quasi sempre tende a portarsi in direzione del Golfo Ligure.

1.2.2

Sulla cartina 3 l'elemento motore di questa situazione é costituito da un campo depressionario sulla Francia. Esso infatti richiama masse di aria umida dai bacini occidentali italiani, lasciando indisturbato l'Adriatico, almeno nella fase iniziale, per cui non sussistono correnti settentrionali dall'entroterra ligure, come nel caso precedente. Sono queste le situazioni tipiche in cui il Golfo Ligure è temporaneamente battuto dal Sud-Est, moderato, ma talvolta anche forte, in cui l'altezza significativa Hs dell'onda può raggiungere i 3 metri. L'impatto di queste correnti contro i rilievi montuosi dell'entroterra ligure può provocare abbondanti precipitazioni. A Sud delle Alpi

Marittime queste correnti piegano da Est e poi da Sud-Est, prima di imboccare la Valle del Rodano, come si può dedurre anche dai diagrammi anemometrici di Sanremo e Bordighera.

1.2.3

Sulla cartina 4 un vasto e spesso profondo campo di basse pressioni a Nord dell'Arco Alpino, di provenienza atlantica ed in fase di movimento verso Levante, determina sul Golfo Ligure un notevole flusso di correnti da Sud-Ovest. Sono correnti particolarmente violente sul costone di Capo Mele per effetto orografico. Esse tendono a piegare da Sud-Sud-Ovest e, al limite, da Sud tra Capo Noli e Genova, specie se a ridosso dell'Appennino Ligure si forma una piccola depressione sottovento, che interessa le Langhe. Queste correnti tra Sud-Ovest e Sud superano la Pianura Padana e vanno oltre le Alpi centro-orientali, sotto 1 'azione del nucleo depressionario sopra citato.

Sono queste le situazioni dinamicamente più importanti e provocano le più grosse mareggiate sui litorali prospicienti il Golfo di Genova (mareggiate di Libeccio).

1.2.4

Il campo delle correnti nei bassi strati sulla Liguria è, come già accennato, fortemente influenzato dalla imponente orografia delle Alpi Occidentali. Depressioni sottovento sono qui frequenti, specie in presenza di correnti atlantiche, che penetrano nel Mediterraneo attraverso il varco tra i Pirenei e le Cevenne o lungo la Valle del Rodano per piegare poi da Ovest e da Sud-Ovest verso la Corsica ed il Golfo Ligure e proseguire verso l'Adriatico in conformità all'andamento delle correnti a quote più elevate. Parte di questo flusso dalla Valle del Rodano (mistral) investe la Sardegna da Nord-Ovest (maestrale) e raggiunge il bacino tirrenico (cartina 5).

Nella fase iniziale della ciclogenesi sul Golfo Ligure é frequente il caso in cui un nucleo depressionario, sottovento alle Alpi, sia già in atto sulla zona delle Langhe (vedi cartina 5). Analogamente, sottovento all'Appennino Tosco-Emiliano un'altra depressione si può formare sull'Adriatico Settentrionale, sotto 1 'azione delle correnti da Sud-Ovest, come simboleggiato in figura 5. Lungo le coste liguri di Ponente fortissimi venti di Sud-Ovest, sono in grado di provocare forti mareggiate, tuttavia tra Noli e Genova questi venti tendono ad attenuarsi, presentandosi davanti alla costa dal settore tra Sud-Sud-Ovest e Sud.

Al largo e verso la costa toscana le correnti sono ancora da Sud-Ovest. E' il caso della classica "libecciata" sulla Riviera Ligure di Levante e sulle coste toscane.

1.2.5

La cartina 6 mostra la ciclogenesi in pieno sviluppo sul Golfo Ligure. Sulla costa ligure il vento spira ora tra Nord e Nord-Est, mentre sulla Toscana e sul Tirreno Settentrionale è da Sud-Est. Sul mare di Corsica soffia da Ponente e Libeccio. Nelle sue fasi evolutive la depressione ligure tende a spostarsi più frequentemente verso Sud-Est, interessando l'area tirrenica, ma può anche trasferirsi verso l'Adriatico, inglobando il nucleo ciclonico ivi presente o portarsi verso il mare di Corsica, spinto da correnti da Nord-Est dall'Adriatico Settentrionale verso il Golfo Ligure. Vento forte di "bora" può soffiare in questi casi sul Golfo di Trieste. Queste correnti da Nord-Est possono perdurare più giorni, specie se sotto l'azione di un campo anticiclonico stabile a Nord ed a Levante dell'Arco Alpino.

1.2.6

La cartina 7 illustra il caso più frequente in cui la depressione ligure si sposta verso Sud- Est, interessando l'area tirrenica, mentre continuano a spirare i venti, da moderati a forti, da Nord sulla Riviera di Ponente e da Nord-Est sulla Riviera di Levante. Ampie schiarite con buona visibilità accompagnano questa evoluzione, caratterizzata ovviamente da un aumento della pressione atmosferica.

1.2.7

Nel tipo di evoluzione, illustrato sulla cartina 8, il nucleo ciclonico originario delle Langhe o del Golfo Ligure, si é trasferito nella zona adriatica, specie se era qui presente la già citata area ciclonica sottovento all'Appennino Tosco-Emiliano. Questa evoluzione é sovente accompagnata da irruzione di aria fredda dai valichi alpini, evidenziata sulle carte del tempo da un fronte freddo che attraversa la Pianura Padana fino alle Venezie. Sulla costa ligure i venti moderati spirano dal settore tra Nord-Ovest e Nord-Est, ma a componente prevalente da Nord tra Genova e Capo Mele (Tramontana).

1.2.8

Nella situazione illustrata sulla cartina 9, lo spostamento del nucleo ciclonico dal Golfo Ligure verso il Mare di Corsica prevede quasi sempre un campo di alta pressione a Nord ed a Levante dell'Arco Alpino, in contrasto con un campo depressionario sul Mediterraneo Occidentale. In questo caso persistono sulla Liguria moderate correnti da Nord-Est in fase di attenuazione, man mano che il minimo dal mare di Corsica si sposta verso il Mare di Sardegna o più oltre, verso Sud. Sull'Adriatico Settentrionale e sulla Toscana le correnti da Sud-Est tendono a ruotare da Est e successivamente da Nord-Est nel caso in cui si consolidi il campo anticiclonico a Nord ed a Levante dell'Arco Alpino o che si sposti verso le Regioni Balcaniche.

1.3 - I venti del "Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea" (2004)

L'Atlante è il risultato del "progetto Medatlas", realizzato dal 1999 al 2004 da un consorzio istituito fra Francia, Italia e Grecia, con l'obiettivo di ottenere dati statistici sul regime delle onde in specifici punti del Mar Mediterraneo, intervallati di circa 50 Km.
Le elaborazioni statistiche dei dati hanno permesso di definire il clima dei venti di ogni sito, definito per mezzo delle statistiche stagionali dei più significativi parametri del vento, in particolare la velocità e la direzione del vento a 10 metri al di sopra del livello medio mare.
Nella **Figura 3** alla pagina seguente, si riporta dall'Atlante un esempio di rappresentazione spaziale della velocità e direzione del vento.
L'esempio considera i venti di velocità superiore ai 6 *m/s* e di frequenza superiore al 10%. La lunghezza delle frecce indica la frequenza.

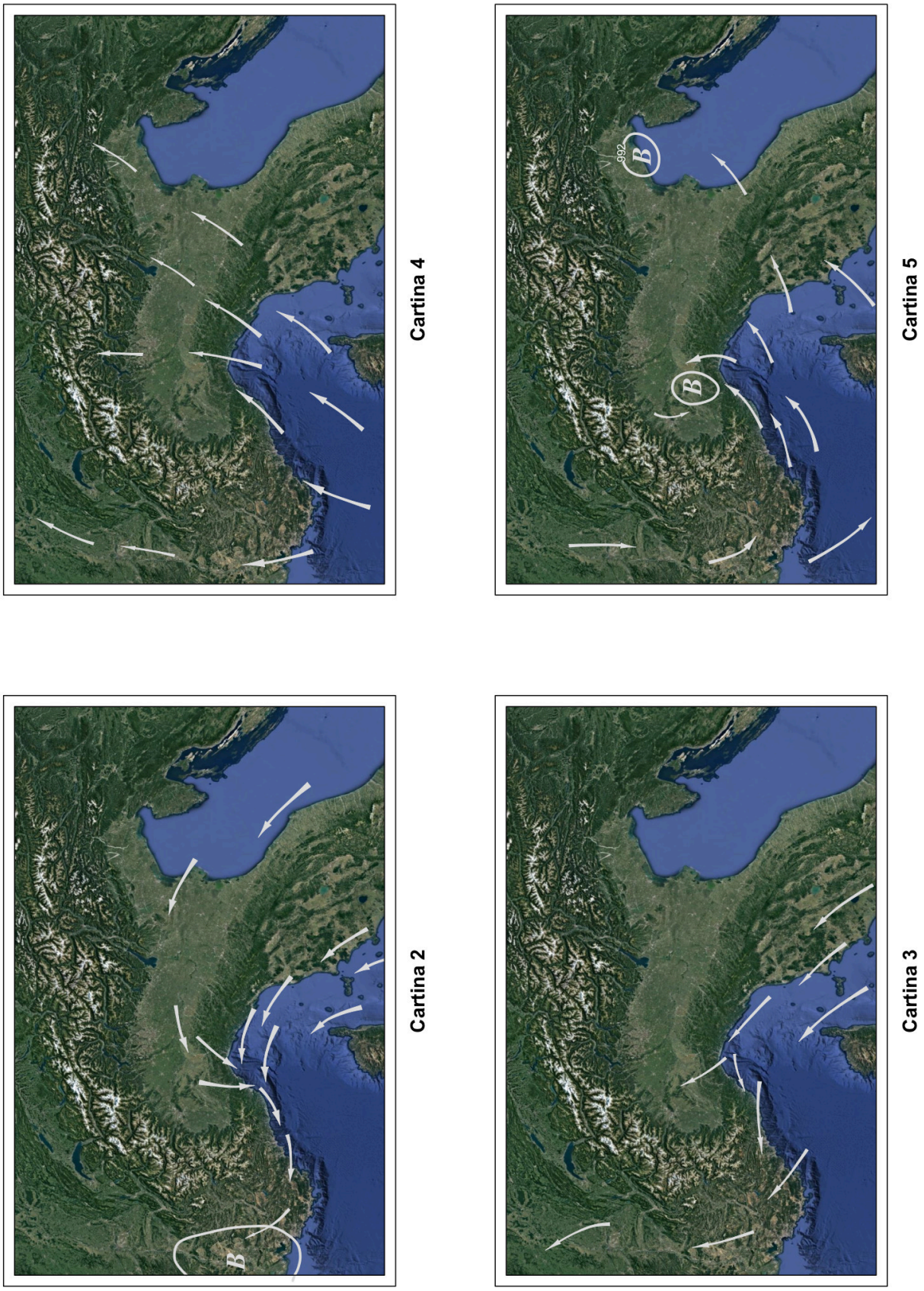


Fig. 1 – La dinamica di alcune importanti situazioni tipiche: cartine 2-3-4-5

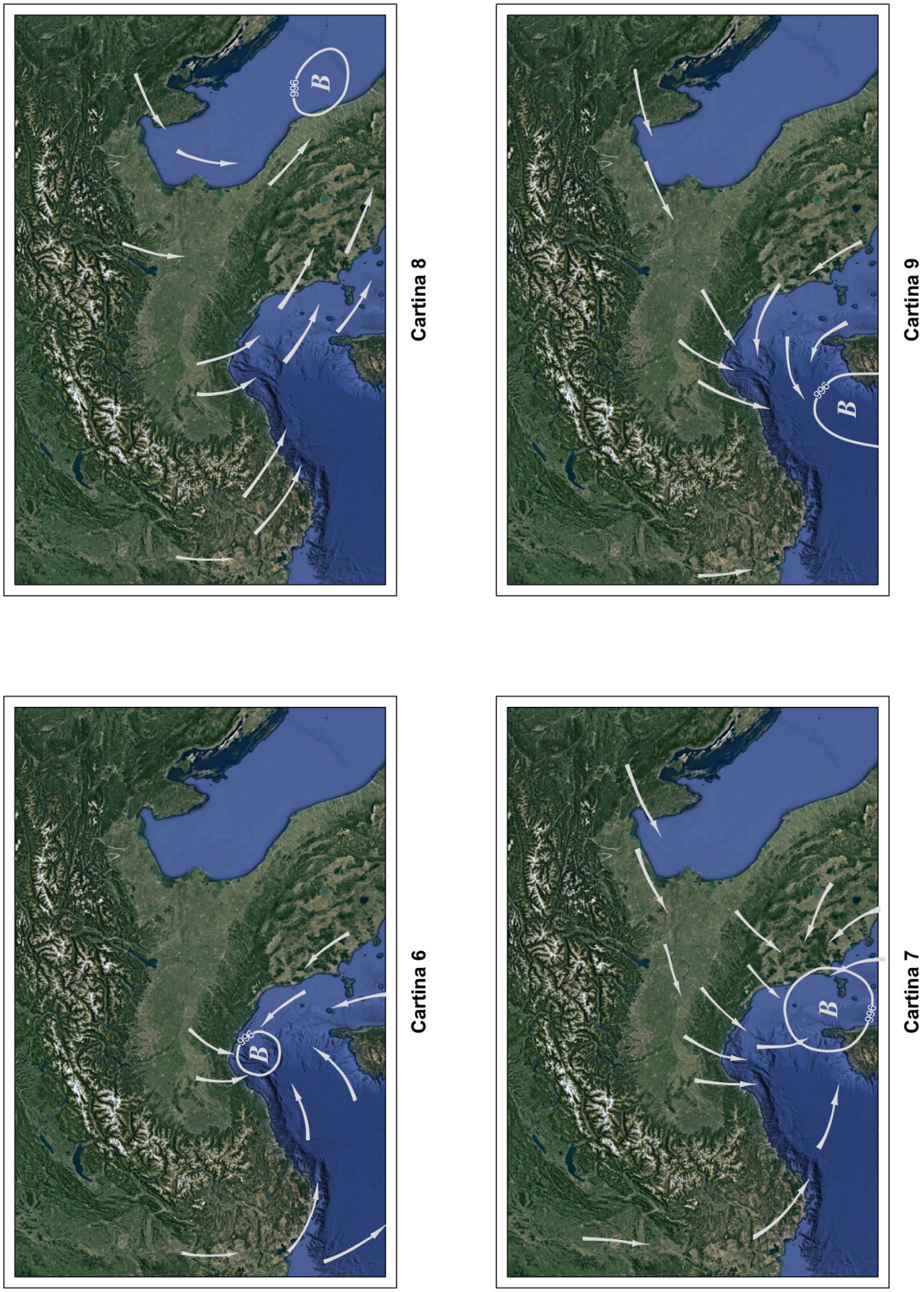


Fig. 2 – La dinamica di alcune importanti situazioni tipiche: cartine 6-7-8-9

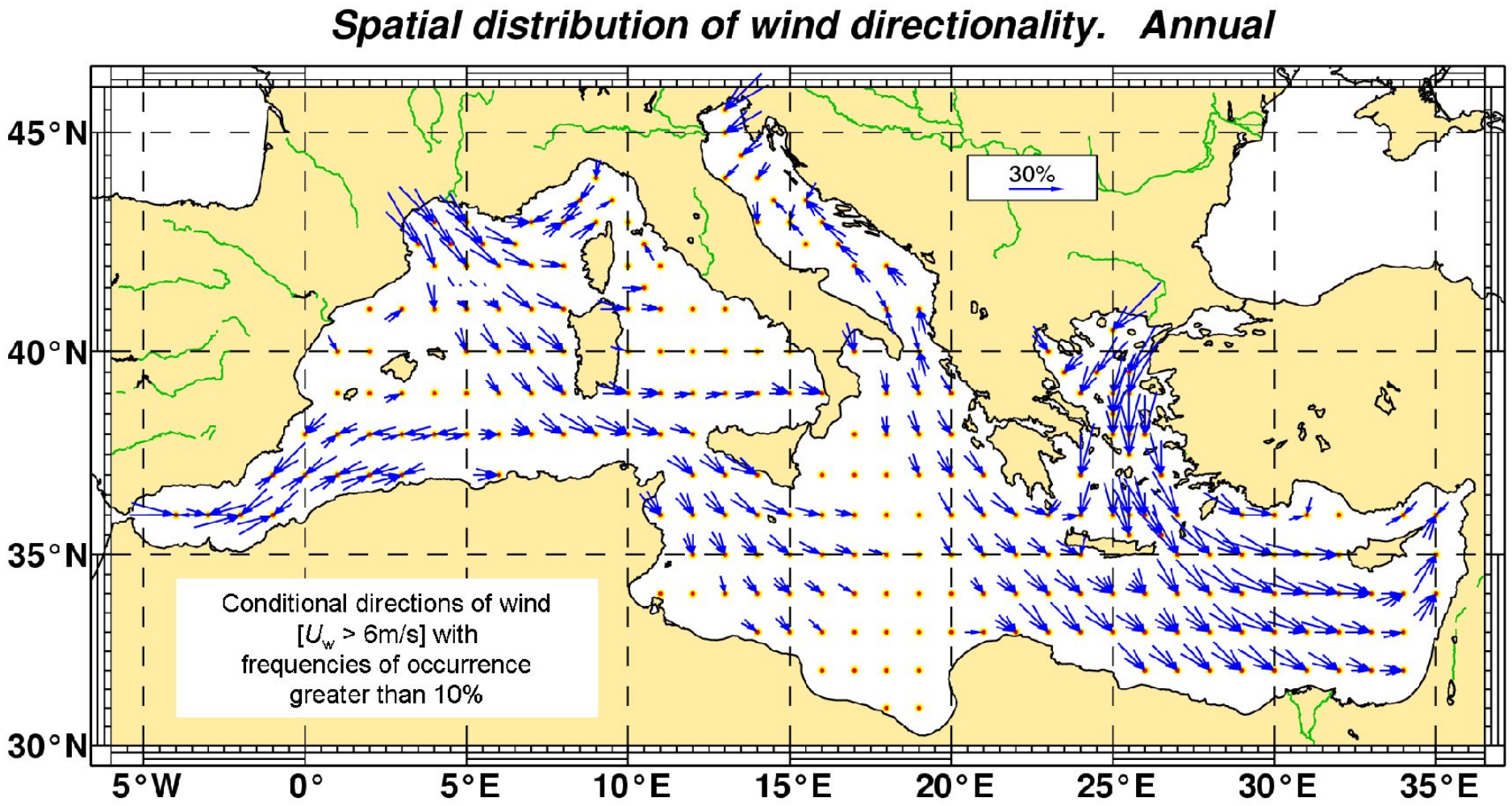


Fig. 3 – Distribuzione spaziale della velocità e direzione dei venti (atlante dei venti e delle onde del Mediterraneo - WEAO)

2. ESPOSIZIONE MARITTIMA

Il litorale di Finale Ligure è parte del tratto della costa del Ponente Ligure che da Capo Mele a Voltri si mantiene mediamente frontale alla direzione di provenienza del mare di Scirocco, ma con variazioni locali continue, determinate dai Capi, dalle Punte e dagli Estuari dei corsi d'acqua maggiori, che incidono notevolmente sull'influenza costiera del mare dominante di Libeccio che, molto angolato con la linea di costa determina il senso prevalente del trasporto delle sabbie verso Levante.

3. I FETCH

Il presente capitolo è finalizzato alla definizione dei Fetch, vale a dire le distanze di mare libero, nelle diverse direzioni, lungo le quali si può formare l'onda che va ad investire la costa di interesse ed è così articolato:

- definizione del settore di traversia;
- definizione dei Fetch geografici delle diverse provenienze;
- definizione dei Fetch efficaci.

3.1. - Settore di traversia, Fetch geografici

Con la scorta della carta nautica I.I.M. N° 340 di cui si riporta stralcio ridotto alla scala 1:4.000.000 alla **Tav.3** ed in **Figura 4**, si individua il settore di traversia del litorale di Finale Ligure limitato nel 2° e nel 3° quadrante, con un modesto sforamento nel 1°, tra le congiungenti al Capo Mele ad Ovest (direzione 220°) ed alla Punta di Portofino ad Est (77°), per un'ampiezza del settore di 143°.
Determiniamo i Fetch geografici interni al settore di traversia suddividendo ancora il settore in tre parti, tracciando le direzioni al Capo dell'Argentiera (183°) ed a Capo Corso (145°).
Lungo le bisettrici dei tre sottosettori si ottengono quindi i Fetch geografici rispettivamente di Libeccio-Mezzogiorno da 202° limitato dalla costa dell'Algeria (860 km), di Mezzogiorno-Scirocco da 164° limitato dalla Corsica (173 km) e di Scirocco da 120° limitato dal promontorio di Piombino (201 km).
La distribuzione dei Fetch geografici individua un settore di traversia del moto ondoso molto esposto con onda prevalente dal settore di SW, provenienza delle mareggiate di Libeccio-Mezzogiorno.
Il Fetch geografico massimo che viene preso in considerazione è comunque 500 km, con una riduzione quindi del Fetch di quest'ultima provenienza principale.

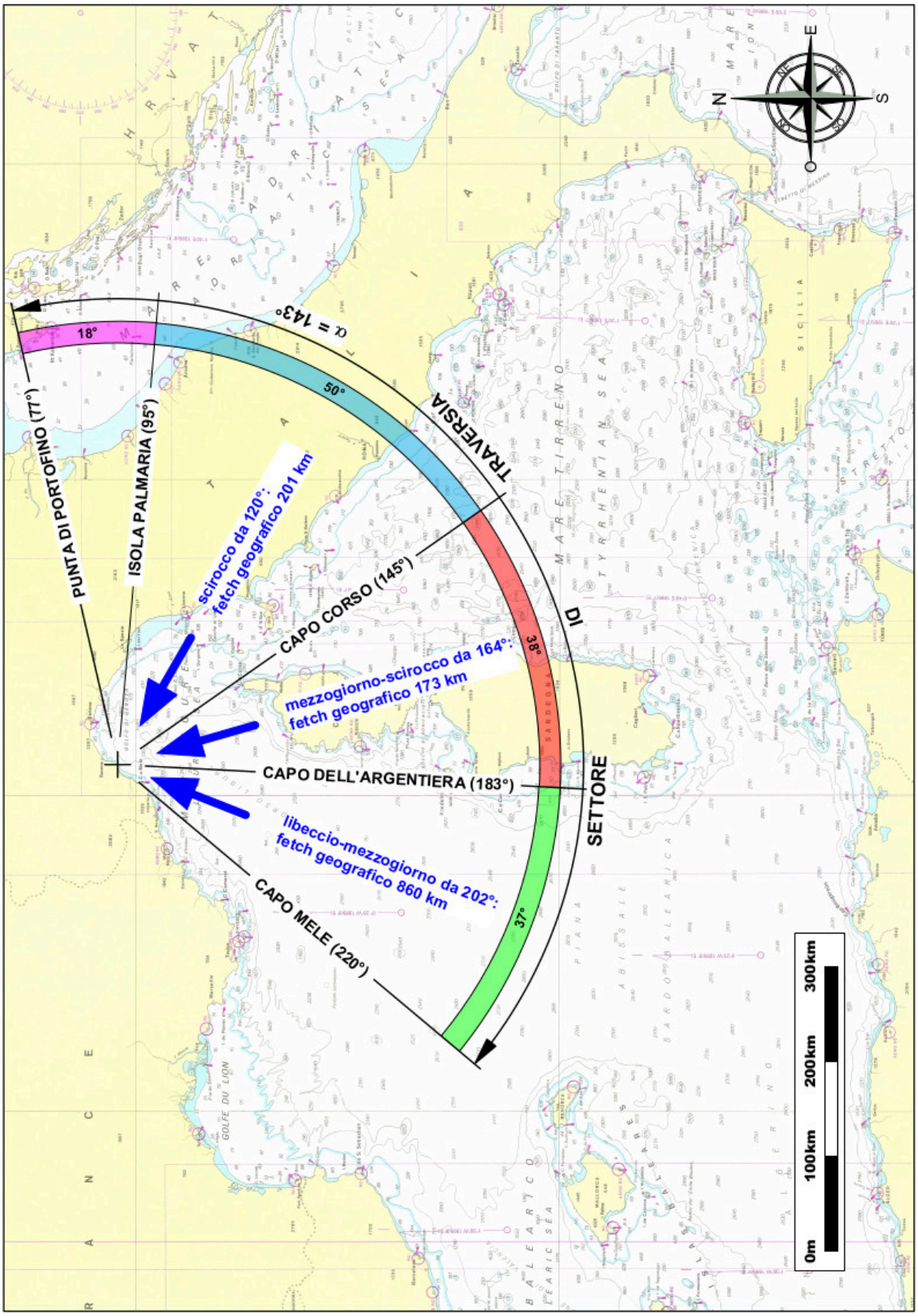


Fig. 4 – Settore di traversia

3.2. - I Fetch efficaci

L'estensione della porzione di mare sulla quale si esplica "effettivamente" l'azione di trasferimento energetico dal vento al moto ondoso è detta fetch efficace o effettivo.
Il valore del fetch efficace relativo ad una determinata direzione è funzione anche dell'estensione dei fetch geografici associati alle direzioni contigue; in questo modo i fetch efficaci tengono conto del fatto che alla generazione del moto ondoso contribuiscono, oltre alla superficie marina individuata nella direzione media ϕ_w lungo la quale spira il vento, anche le porzioni di mare calcolate dalle direzioni comprese in un settore di $\pm\theta$ rispetto alla direzione media di azione del vento.
Il calcolo dei fetch efficaci puo' essere eseguito in base alla seguente relazione:

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

nella quale i simboli che compaiono rappresentano i seguenti parametri:

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

L'equazione (1) deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretsheneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville 1954, Seymour 1977, Smith 1991). Detto procedimento di fatto impone che la distribuzione dello spettro di energia del moto ondoso abbracci un settore di $\pm 90°$ rispetto a ciascuna direzione di vento considerata e che ogni direzione, compresa in tale settore, fornisca un contributo energetico proporzionale al quadrato del coseno dell'angolo che essa forma con la direzione in cui spira il vento.
Per il calcolo della relazione esistente tra la direzione del vento e quella del moto ondoso generato, si fa riferimento al criterio introdotto da Donelan.
Nell'ipotesi che:

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

si puo affermare che la direzione media fÀ del moto ondoso relativa alla direzione media di provenienza del vento β e' individuata come il valore che rende massima la funzione:

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

quindi imponendo le condizioni $f'(\beta) = 0$ e $f''(\beta) = 0$ è possibile individuare per ogni fetch efficace associato ad una determinata direzione di provenienza del vento la relativa direzione del moto ondoso generato.

Ciò premesso, i valori dei fetch geografici ed efficaci ottenuti per il paraggio in esame sono riportati nella **Tabella 1**.
Nel grafico seguente (**Figura 5**), i fetch sono rappresentati sotto forma di diagramma polare.

Direzione (°)	Fetches geografici (km)	Fetches efficaci (km)
70	65	71
80	82	88
90	100	114
100	150	137
110	163	158
120	201	176
130	216	195
140	500	216
150	157	239
160	168	264
170	179	276
180	367	280
190	500	272
200	500	248
210	500	221
220	26	183

Tab. 1 – Valori dei fetch geografici ed efficaci del paraggio Finale Ligure

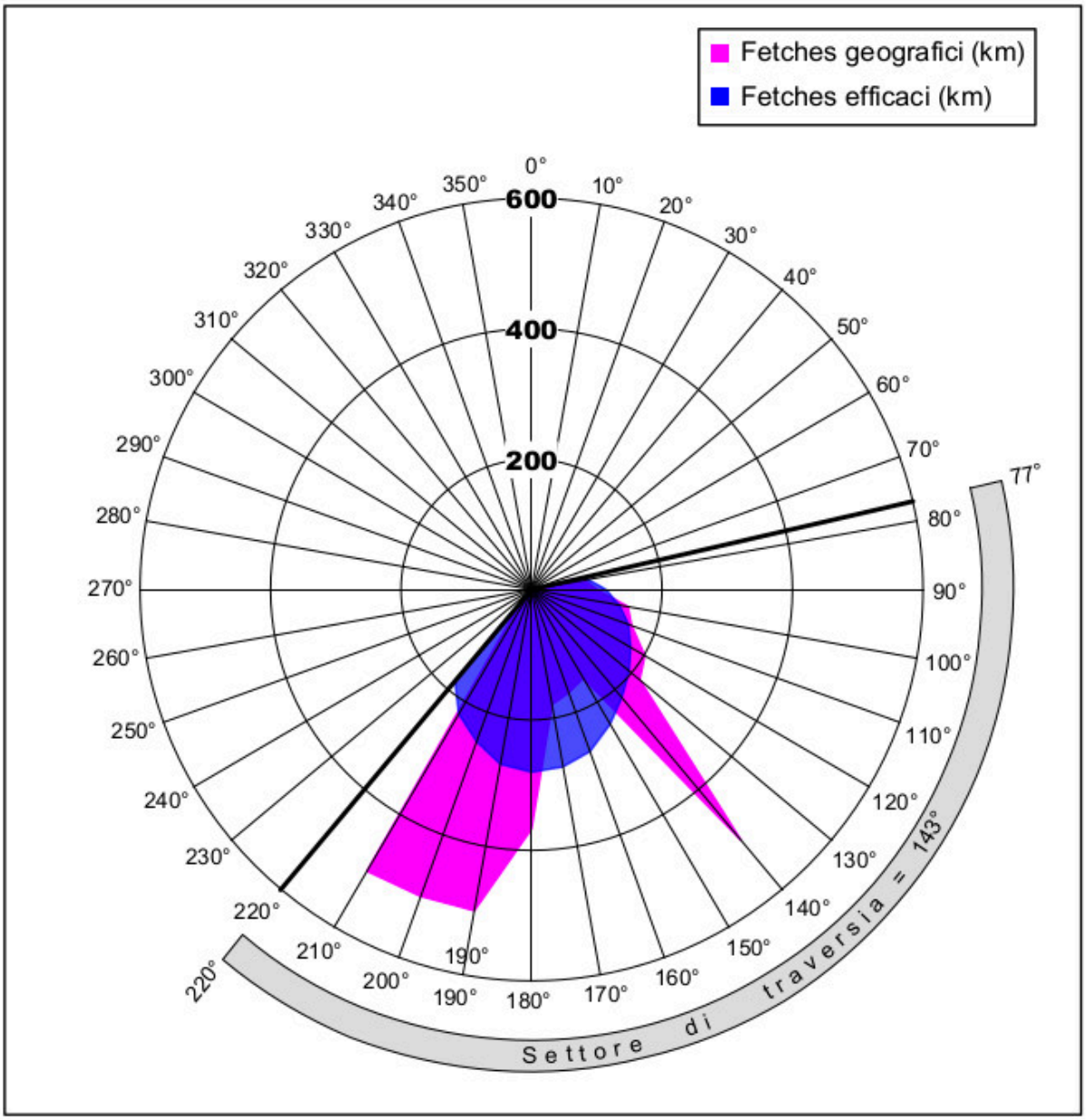


Fig. 5 – Diagramma polare dei fetch

PARTE SECONDA

LE ONDE AL LARGO

PARTE SECONDA
LE ONDE AL LARGO

4. ANALISI DELLE FONTI DI DATI

In questo studio si analizzano le condizioni del clima meteomarino nel Mar Ligure, con l'obiettivo di definire le condizioni del moto ondoso al largo di Finale Ligure.

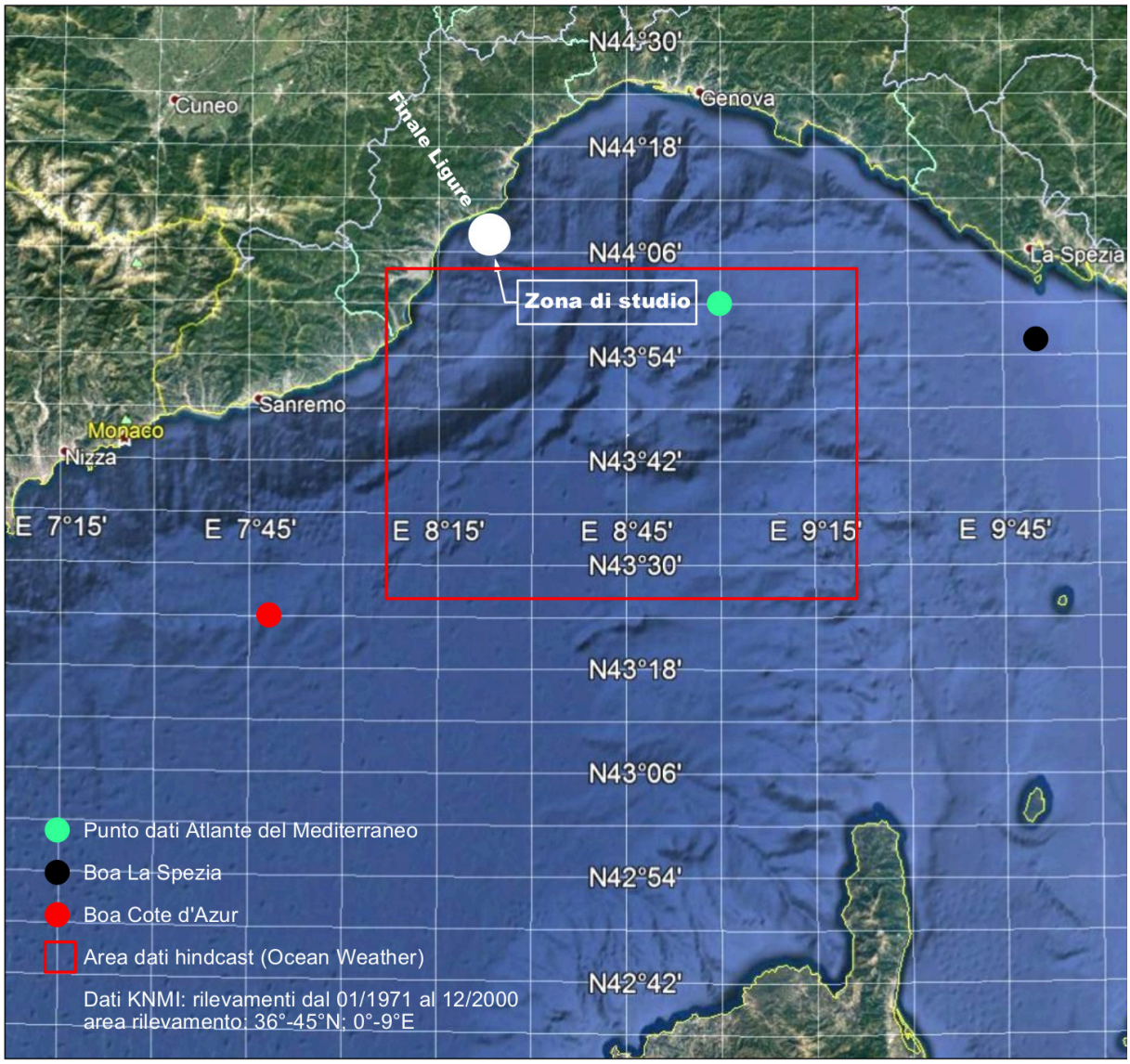


Figura 6 - Ubicazione geografica dell'area di studio e fonti di dati analizzate

Nel caso specifico abbiamo potuto analizzare cinque distinte fonti di dati di clima meteomarino al fine di definire quella che permetta una miglior descrizione del clima stesso nella zona di studio.

Le cinque fonti di dati di clima sono le seguenti:

- ***Atlante delle onde e del vento del Mediterraneo (ISMAR-WEAO)***
- ***Dati Boa direzionale di La Spezia (RON)***

- ***Dati composizione boa Cote d'Azur e nodo modello CEP (METEO FRANCE)***
- ***Dati Hindcast (OCEANWEATHER)***
- ***Dati visuali KNMI***

Il punto di riferimento ISMAR-WEAO, il posizionamento dei due PUNTI BOA e l'estensione delle aree dei dati KNMI ed OCEANWEATHER sono riportati in **Figura 6**.
Nei paragrafi successivi sono rappresentate le rose del moto ondoso annuale per ciascuna delle quattro fonti.

4.1. Dati Atlante delle onde e del vento nel Mediterraneo (ISMAR - Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea - 2004)

"L'Atlante delle onde e del vento del Mediterraneo", edito nel 2004, raccoglie i dati di 10 anni elaborati dal WEAO Research Cell (Wester Europe Armaments Organisation), con la collaborazione di sei Istituti di ricerca localizzati in Francia, Italia e Grecia fra cui, per l'Italia, ISMAR e THETIS.
Viene fornito gratuitametne dagli istituti sviluppatori. Detto Atlante fornisce per il Mediterraneo i valori integrati delle seguenti variabili: velocità e direzione del vento, altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione di provenienza del moto ondoso.
I dati dell'Atlante vengono calcolati in base ai risultati del modello atmosferico del ECMWF che vengono inseriti come forzanti nel codice di calcolo di generazione delle onde da vento (WAM). Successivamente viene effettuata una calibrazione attraverso le variabili altezza d'onda significativa e velocità del vento, telerilevate entrambe da satellite (Topex e ERS 1-2).
Dall'Atlante si riporta nella pagina successiva, la distribuzione spaziale della velocità e direzione delle onde (**Figura 7**).
Nella compilazione dell 'Atlante, sono stati esaminati e discussi tutti i dati disponibili, le osservazioni visuali dalle navi in navigazione, le misurazioni registrate dalle boe, le misure altimetriche effettuate dai satelliti, i cartelli meteorologici ed i modelli dei centri meteo-oceanografici.

4.1.1 Osservazioni visuali

In presenza di altre fonti più affidabili, sono state innanzitutto scartate le osservazioni visuali, sia perché limitate alle rotte marittime, sia perché non strumentali e quindi discrezionali, sia per la tendenza delle navi ad evitare le tempeste.

4.1.2. - Boe ondametriche

I dati più affidabili sono risultati quelli registrati e trasmessi dalle boe, con errori dell' ordine di pochi punti percentuali. Pur verificandosi una sottostima delle altezze d'onda maggiori, per la tendenza della boa a scivolare intorno alle alte creste, questa fonte di informazione è stata utilizzata nell'Atlante, pur tenendo conto che la vicinanza delle boe alla costa (generalmente ubicate su fondali di 80 - 100 metri) non sono molto rappresentative delle condizioni del mare al largo, soprattutto nella complicata geometria del Mediterraneo, suddiviso in diversi sub-bacini.

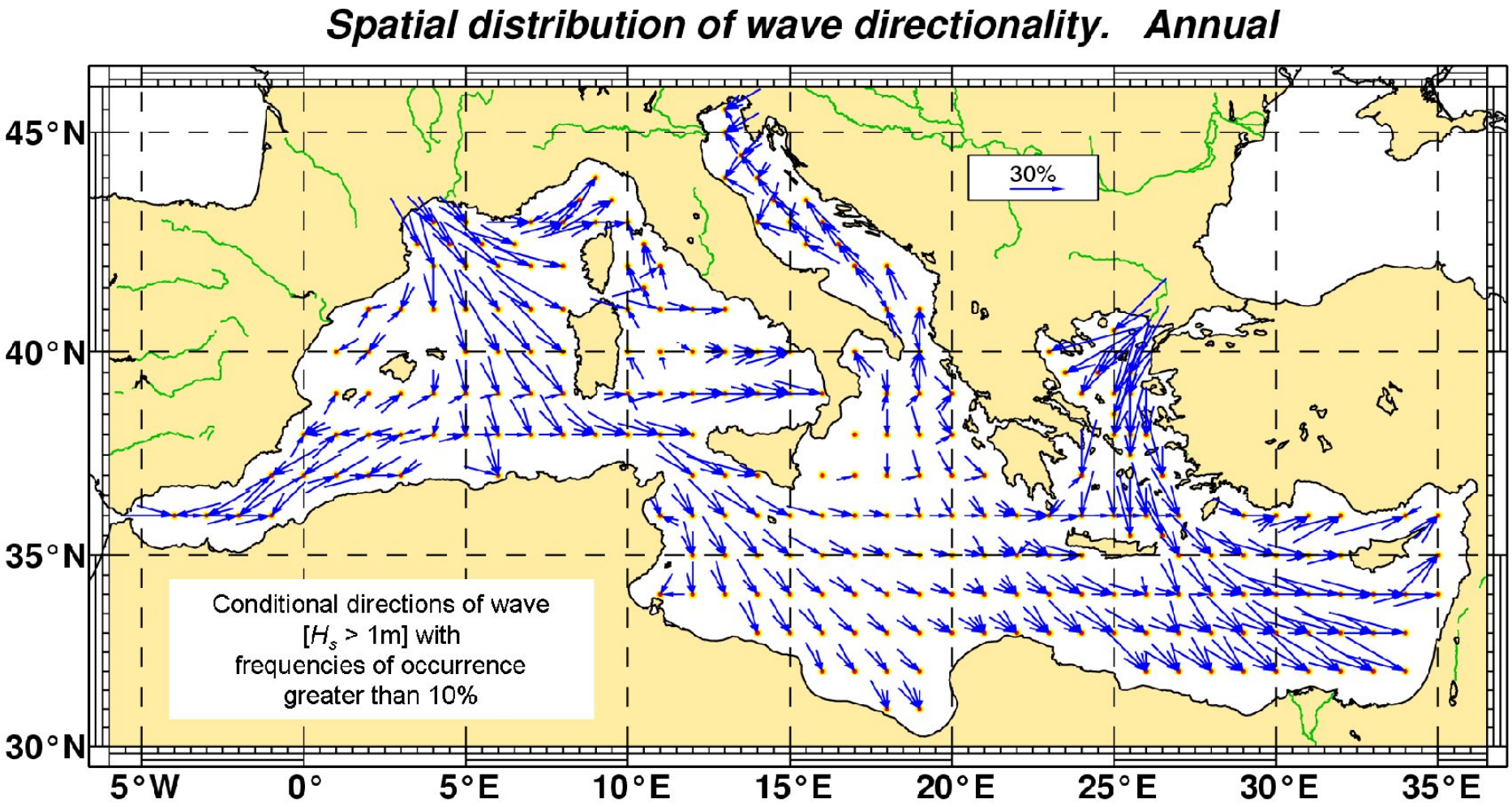


Figura 7 - Distribuzione spaziale della altezza Hs e distribuzione delle onde (atlante dei venti e delle onde del Mediterraneo - WEAO)

4.1.3 - Dati satellitari

Sono fomiti da altimetri radar satellitari, in grado di misurare sia l'altezza d'onda, sia la velocità del vento. I dati sono stati calibrati e validati con il confronto dei dati dei diversi satelliti e con i dati delle boe, per cui i risultati sono affidabili, sebbene non esenti da errori strumentali che incidono soprattutto sulle altezze d'onda minori.

- Modelli meteorologici e delle onde

Esistono numerose Istituzioni che elaborano modelli atmosferici e delle onde, che coprono tutto il globo, ma che perdono accuratezza nei bacini interni quali il Mediterraneo, per cui alcune di queste Istituzioni sono specializzate ad elaborare i dati "locali" di questi bacini.

Le condizioni richieste dagli estensori dell' Atlante per ottenere una maggiore attendibilità sono state:

- la disponibilità di dati almeno decennale, per l'intero Mediterraneo
- la libera disponibilità dei dati

La verifica delle condizioni e dell'accuratezza dei dati ha portato a scegliere il modello ECMWF (European Centre for Medium - range Wether Forecast - Reading - U.K.) come *fonte dati ufficiale utilizzata nell 'Atlante ed in particolare, per quanto riguarda le onde, il modello WAM,* modello avanzato di terza generazione, che utilizza i campi di vento, determinandone in ogni punto velocità e direzione e modella correttamente i complessi processi di trasferimento di energia dal vento all' onda, di dissipazione di energia, di scambio conservativo di energia fra le onde.

Peraltro il modello non è privo di inesattezze, ad esempio è meno attendibile per le piccole onde, a causa della insufficiente attendibilità dei rilevamenti dei venti deboli e risente delle irregolarità dei venti nell'avvicinarsi alla costa, per l'influenza dell'orografia e delle brezze.

Il modello ha inoltre la tendenza a sottostimare i picchi di tempesta, conseguenza anche questa, della sottostima della velocità dei venti.

4.1.4 - Conclusioni: i dati dell'Atlante

Gli estensori dell' Atlante, esaminate le qualità e difetti dei dati, hanno concluso che nessuna delle fonti di dati, da sola, è sufficiente per caratterizzare il clima delle onde nel Mediterraneo o per assicurare precisione.

Per cui i dati delle boe, molto precisi ma validi per un 'area ristretta, sono stati utilizzati unicamente per validare i dati satellitari.

Questi ultimi per calibrare i risultati di vento e onde del modello di previsione.

Da questi ultimi risultati calibrati si sono derivati i dati statistici tabellati per ciascuno dei "nodi" prescelti, nodi indicati sulla ***Figura 8****.*



Figura 8 - Distribuzione dei punti di calcolo dei dati statistici del regime dei venti e delle onde

Nella **Tabella 2** che segue sono riportate dall'Atlante le frequenze di accadimento Rs/direzione, per il punto 44ºN, 9ºE, sito dinanzi a Genova.
Dai dati della **Tabella 2** è stata derivata la relativa rosa delle onde di **Figura 9**.

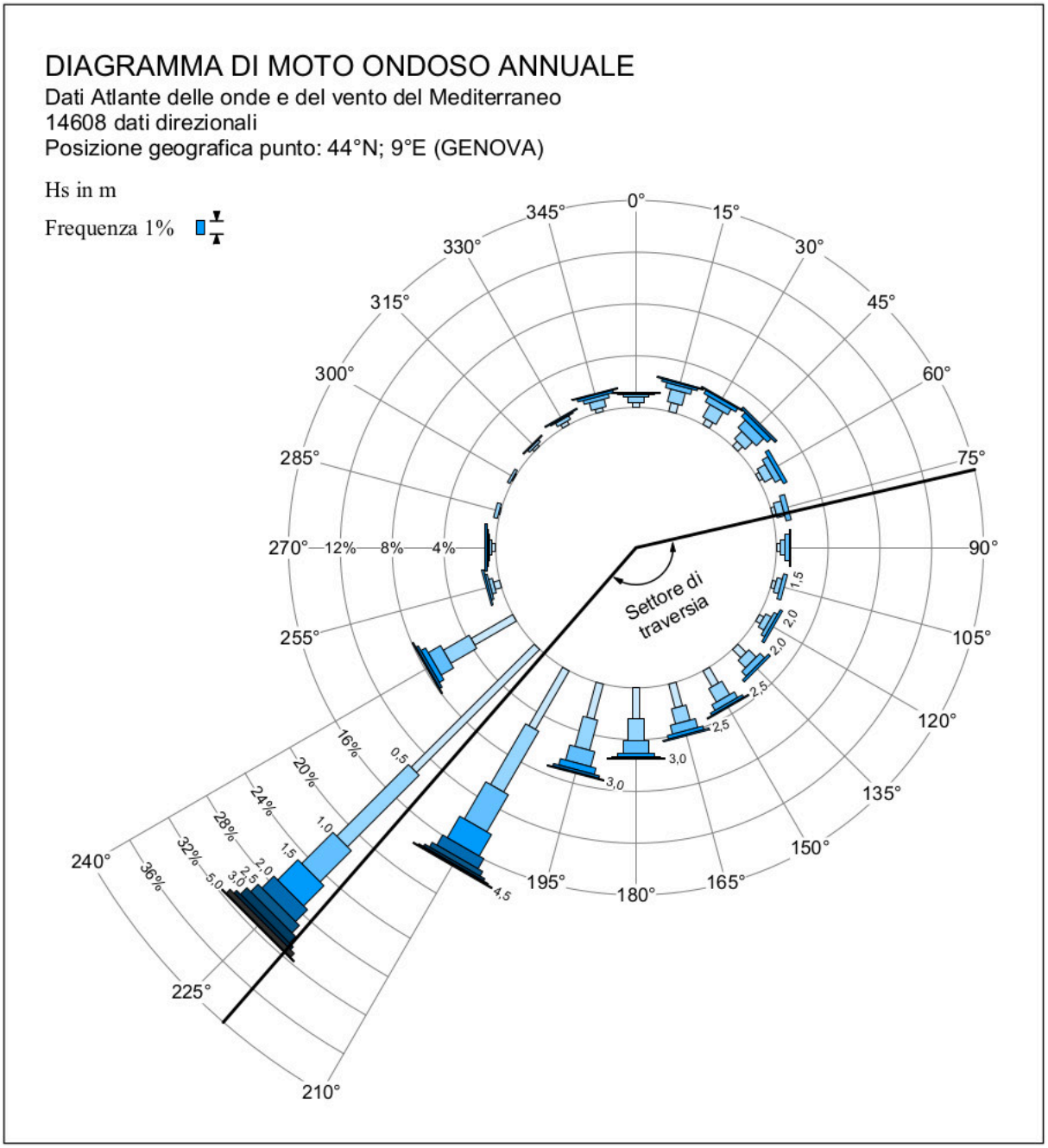


Figura 9 - Rosa del moto ondoso annuale. Dati Atlante delle onde e del vento del Mediterraneo

th_wave-hs(m)	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-5	5-6	6-7.5	7.5-9	9-10	Total
0	4	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	12
15	7	10	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	24
30	5	11	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25
45	5	8	8	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	27
60	3	7	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
75	3	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
90	3	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
105	3	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
120	4	5	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
135	9	8	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
150	14	12	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	34
165	19	12	7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	42
180	24	17	9	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	55
195	28	24	12	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	72
210	52	54	33	19	9	4	2	1	1	0	0	0	0	175
225	134	78	34	22	13	8	7	3	4	1	0	0	0	304
240	37	23	11	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	78
255	5	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
270	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8
285	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
300	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
315	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
330	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
345	3	6	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Total	372	308	161	81	36	15	9	4	5	1	0	0	0	992

Tabella 2 - Atlante delle onde e del vento del Mediterraneo (WEAO), punto 44°N, 9° E (Genova): 14608 dati direzionali - Frequenze
Bivariate frequency table of hs and th_wave
(44N, 9E)
Months: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
Totalnumber of observations: 14608

4.2. - Dati boa di La Spezia (RON)

La boa direzionale di La Spezia, appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (RON) è posizionata nel punto di coordinate 43.928º N di latitudine e 9.827 E di Longitudine. Il periodo di registrazione si estende dal 1º Luglio 1989 al 31 Dicembre 2001, per un periodo complessivo di 12 anni e mezzo.

La distribuzione per settori del moto ondoso annuale a partire dai dati della boa di La Spezia è rappresentata in **Figura 10**.

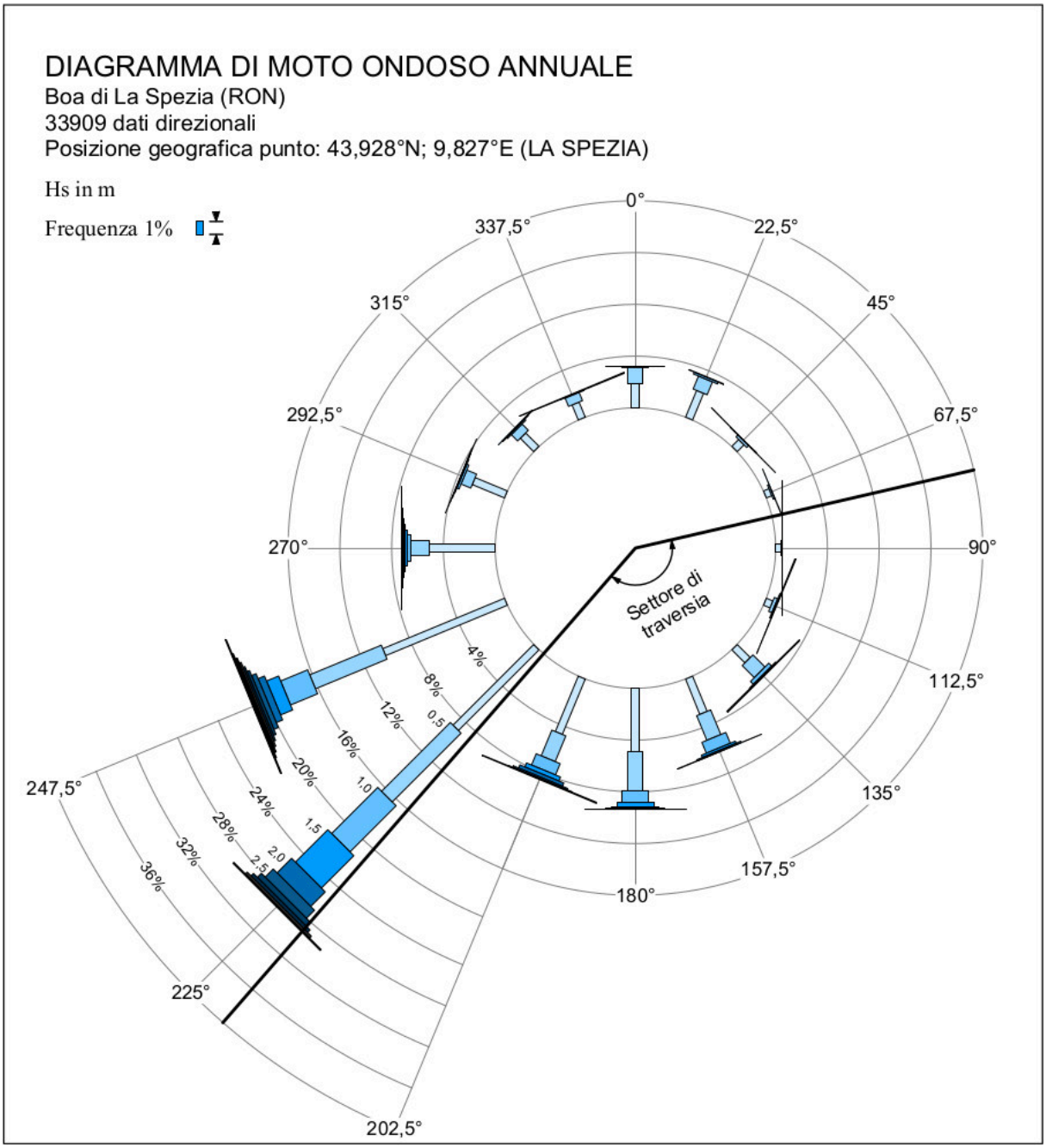


Figura 10 - Rosa del moto ondoso annuale. Dati boa direzionale di La Spezia. Periodo dal 1º Luglio 1989 al 31 Dicembre 2001

4.3. - Dati boa Côte d'Azur e nodo modello CEP (METEO FRANCE)

L'insieme dei dati forniti dalla Meteo France è costituito da dati strumentali registrati dalla Boa "Cote d'Azur" ubicata al largo di Sanremo e dai dati di tipo hindcast del modello CEP (Meteo France).

La boa scalare della Cote d'Azur è situata in un punto di coordinate 43.4º N di latitudine e 7.8º E di longitudine, con profondità 2300m (**Figura 4**).
Il punto utilizzato dal modello CEP è posto accanto alla boa della Cote d'Azur, con coordinate geografiche 43,5º N di latitudine e 8º E di longitudine, e quindi in acque profonde. Il periodo di registrazione considerato in questo studio è compreso tra il 17 Marzo 1999 al 31 Marzo 2004, corrispondente ad un intervallo di tempo pari a 5 anni.
I dati hindcast (cioè di tipo predittivo a posteriori) sono stati ottenuti dal Dipartimento di Clima Meteomarino della Meteo France mediante un modello di predizione del moto ondoso (CEP).
I dati strumentali dalla boa hanno una maggior precisione sulle misure ottenute con altri metodi, ma la registrazione non è continua, a causa di vuoti (o intervalli di tempo senza registrazione) di notevole importanza, ed inoltre non contengono informazione sulla direzione di provenienza delle onde.
I dati del modello CEP, invece, presentano un insieme temporalmente continuo di valori, malgrado la affidabilità degli stessi dipenda dalla bontà del modello predittivo e, a sua volta, quest'ultimo dipenda dall'affidabilità dei dati di vento disponibili.

4.3.1 - Composizione dei dati della boa Côte d'Azur con i dati CEP

Dal momento che i dati della boa non contengono informazioni sulla direzione del moto ondoso e che i dati CEP sono poco precisi sui valori di altezza d'onda e periodo, esistono diverse metodologie che consentono di ottenere un campione di dati in acque profonde con informazione direzionale.

Tra le possibili metodologie, la maggior parte basate sulla ricerca di una correlazione tra i valori di altezza d'onda sperimentali con valori del moto ondoso che devono essere corretti (fonti di dati direzionali), si evidenziano le seguenti:

- Informazioni raccolte nella letteratura scientifica (es.: Cartwright, 1964; Jardin, 1979; Nordenstrom, 1984).
- Correlazione diretta (simultanea) tra le variabili.
- Confronto del regime medio scalare di ciascuna delle variabili.

Di questi tre metodi, il secondo ed il terzo sono soliti fornire risultati migliori. L'ultimo è il più comune, dal momento che per stabilire una correlazione diretta (simultanea) è necessario disporre di registri di dati temporalmente simultanei. Inoltre, per poter ottenere una correlazione con massima flessibilità è necessario che entrambe le fonti di dati si trovino spazialmente vicine, cosa non sempre possibile a causa del fatto che la rete di boe è piuttosto limitata.
In questo caso, poichè la boa scalare della Côte d'Azur ed il nodo CEP sono situati a poca distanza l'una dall'altro e le loro registrazioni sono simultanee in un dato intervallo di tempo, è stato possibile effettuare un'analisi dei valori di altezza d'onda "ora per ora" di entrambe le fonti di informazione.

Mediante la composizione dei dati di entrambe le fonti per intervalli di tempo simultanei, è stato ottenuto un insieme con dati della boa (Hs e Tp) ed informazioni direzionali ricavate dal nodo CEP. A partire da questo nuovo campione è stato quindi definito il regime di moto ondoso in acque profonde, come se si trattasse di una boa direzionale reale.

4.3.2 - Distribuzione settoriale del moto ondoso

La distribuzione settoriale del moto ondoso, in settori di 22.5º, è rappresentata graficamente nella corrispondente rosa del moto ondoso (**Figura 11**) costruita a partire dall'insieme dei dati. In Tabella 3 è riportato, invece, il numero di osservazioni classificate per settori di incidenza del moto ondoso e per valori di altezza d'onda significativa Hs.

Hs (m)	**0.0-0.5**	**0.5-1.0**	**1.0-1.5**	**1.5-2.0**	**2.0-2.5**	**2.5-3.0**	**3.0-3.5**	**3.5-4.0**	**4.0-4.5**	**4.5-5.0**	**5.0-5.5**	**%**	**TOTALE**
Settore													
N	23	14	12	10	4	2	1	0	0	0	0	1.02	**66**
NNE	31	43	42	13	6	1	1	0	0	0	0	2.13	**137**
NE	62	63	47	13	10	1	1	1	0	0	0	3.07	**198**
ENE	67	68	46	31	18	5	1	0	0	0	0	3.66	**236**
E	75	65	42	37	26	13	6	1	2	0	0	4.14	**267**
ESE	91	61	66	41	29	9	10	6	0	1	0	4.87	**314**
SE	126	62	84	40	20	4	0	1	0	1	0	5.24	**338**
SSE	168	101	71	36	21	5	1	0	0	0	0	6.25	**403**
S	263	146	82	42	24	14	2	2	1	0	0	8.94	**576**
SSW	317	189	144	79	62	29	12	5	4	0	1	13.06	**842**
SW	603	450	214	100	60	15	13	2	5	1	1	22.71	**1464**
WSW	419	354	311	146	99	20	7	3	1	0	0	21.10	**1360**
W	16	26	25	11	11	3	2	0	0	0	0	1.46	**94**
WNW	12	16	13	9	6	0	2	0	0	0	0	0.90	**58**
NW	12	14	10	10	2	0	0	0	0	0	0	0.74	**48**
NNW	16	14	9	3	1	1	1	0	0	0	0	0.70	**45**
%	35.70	26.16	18.90	9.63	6.19	1.89	0.93	0.33	0.20	0.05	0.03	100	
TOTALE	**2301**	**1686**	**1218**	**621**	**399**	**122**	**60**	**21**	**13**	**3**	**2**		**6446**

Tabella 3. Tabella della presentazione settoriale del moto ondoso (annuale). Composizione boa scalare della Cote d'Azur e nodo modello CEP

Le frequenze di presentazione settoriale del moto ondoso in acque profonde, definite come la percentuale di presentazione dei dati par ciascuno dei settori, sono raccolte nella **Tabella 4**.

Settore	%
N	1.02
NNE	2.13
NE	3.07
ENE	3.66
E	4.14
ESE	4.87
SE	5.24
SSE	6.25

Settore	%
S	8.94
SSW	13.06
SW	22.71
WSW	21.10
W	1.46
WNW	0.90
NW	0.74
NNW	0.70

Tabella 4. Frequenze di presentazione settoriale del moto ondoso (in %)

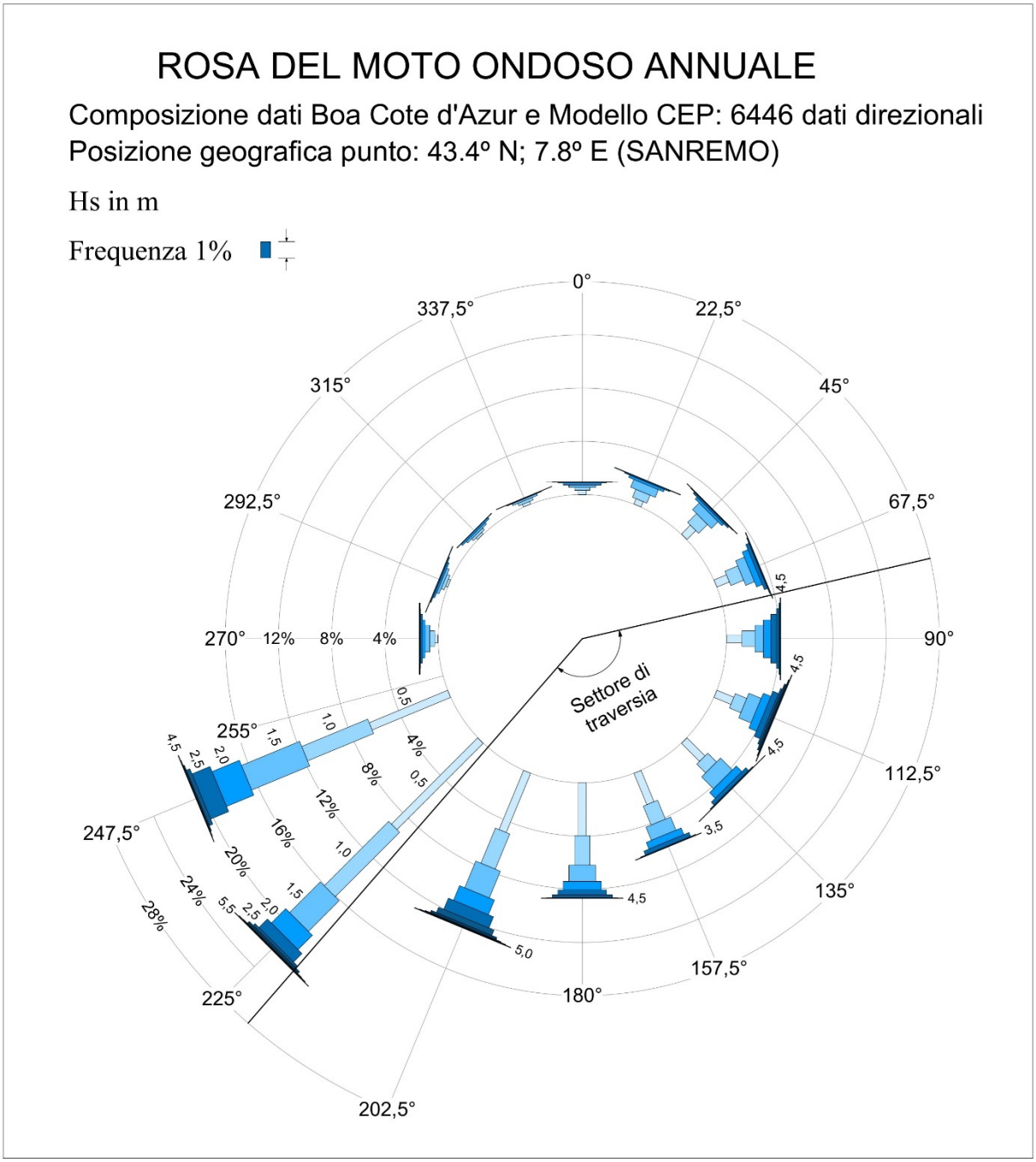


Figura 11 - Rosa del moto ondoso annuale. Composizione boa scalare della Cote d'Azur e nodo modello CEP. Periodo dal 17 Marzo 1999 al 31 Marzo 2004

4.4. - Dati Hindcast (Oceanweather)

I dati di moto ondoso forniti dalla ditta Oceanweather Inc. (U.S.A.) sono ottenuti mediante un metodo di predizione a posteriori di tipo Hindcast. Il nodo utilizzato, corrispondente al G2040753, è situato nel punto di coordinate 43.75º N di latitudine e 8.75º E di longitudine, che rappresenta il nodo centrale della griglia di analisi dei dati che si estende da punto di coordinate 43.44º N, 8.12º E al punto di coordinate 44.06º N, 9.37º E. Il periodo della serie di dati è compreso tra Gennaio del 1990 e Dicembre del 1999, coprendo un arco di tempo complessivo di 10 anni.

La distribuzione per settori del moto ondoso annuale a partire dai dati Hindcast (OCEANWEATHER INC.) è rappresentata in **Figura 12**.

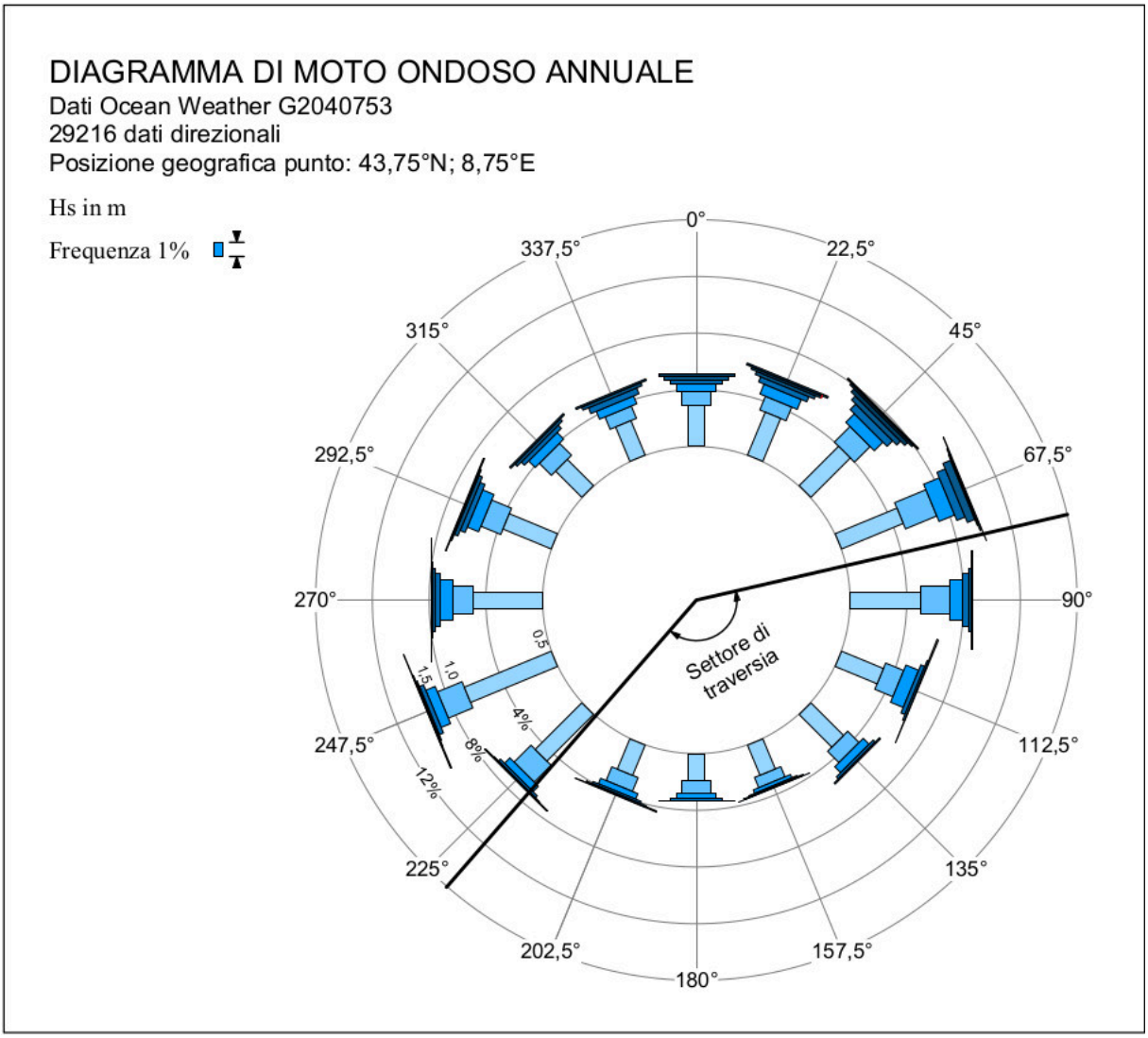


Figura 12 - Rosa del moto ondoso annuale. Dati Hindcast (Ocean Weather), nodo G2040753. Periodo da Gennaio del 1990 a Dicembre del 1999

4.5. - Dati KNMI

I dati di clima meteomarino forniti dalla KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorogisch Institut) sono dati di tipo visuale raccolti dalle navi in transito nel Mar Mediterraneo per un periodo di 30 anni, dal 1971 al 2000. L'area di raccolta dati considerata per questo studio si estende dal punto di coordinate 36º N, 0º E al punto di coordinate 45º N, 9º E.

Nella Tabella 5 che segue sono riportate le frequenze di accadimento annuali Hs/direzione, da cui è stata ricavata la distribuzione per settori del moto ondoso annuale riportata in **Figura 13**.

th_wave-hs	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	Total
0-45	566	423	89	25	6	1	0	0	1109
45-90	804	544	80	16	3	1	0	0	1448
90-135	1048	377	53	9	1	0	0	0	1488
135-180	454	124	13	1	0	0	0	0	593
180-225	397	252	43	8	1	0	0	0	700
225-270	669	611	222	74	17	2	0	0	1596
270-315	404	529	215	84	26	6	1	0	1265
315-360	587	717	289	140	51	14	3	1	1801
Total	4929	3576	1004	358	105	24	5	1	10000

Tabella 5. Dati visuali KNMI. Periodo dal 1971 al 2000 – Frequenze di accadimento annuali
Numero totale di osservazioni: 920.471

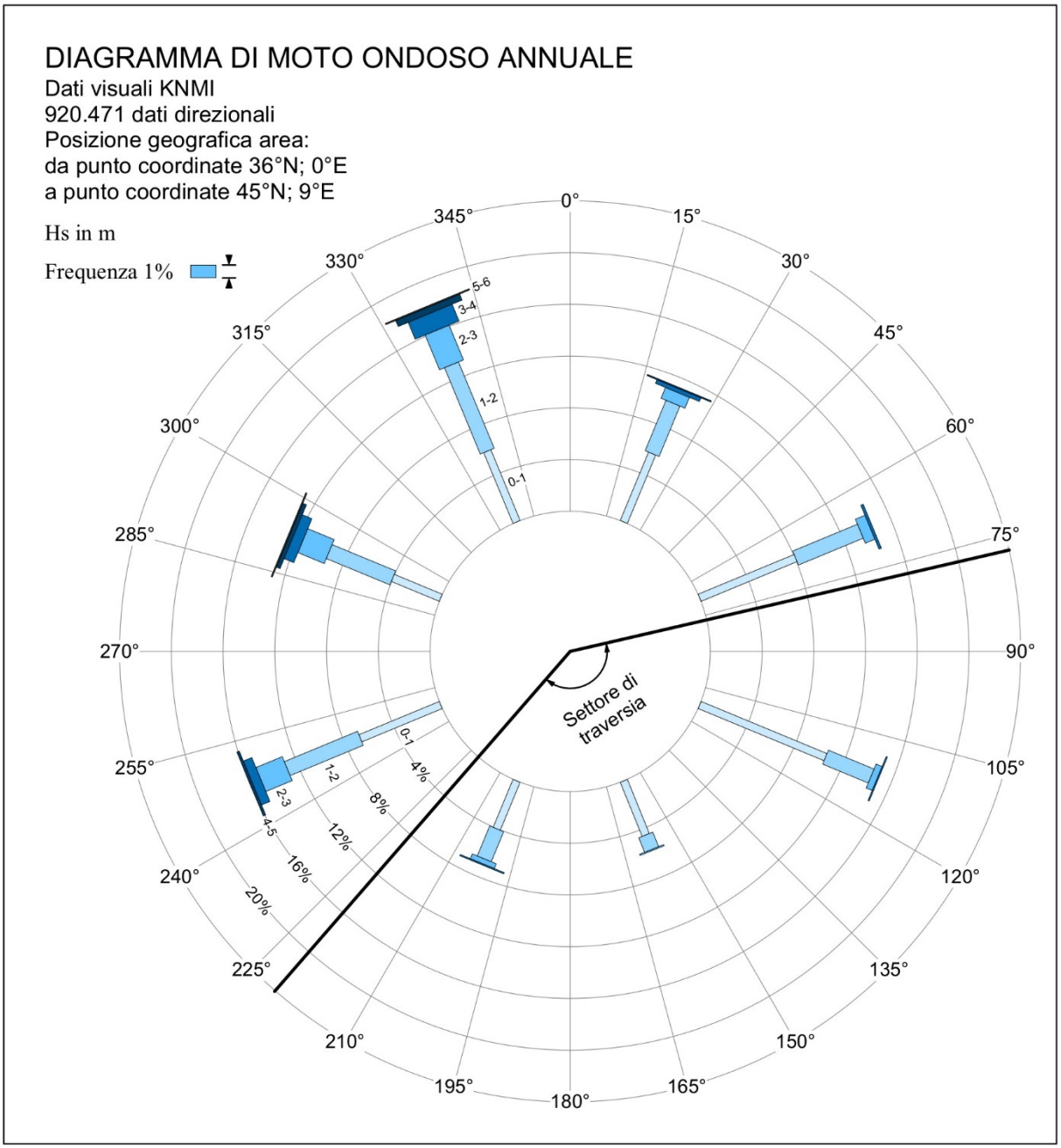


Figura 13 - Rosa del moto ondoso annuale. Dati visuali KNMI. Periodo dal 1961 al 1980

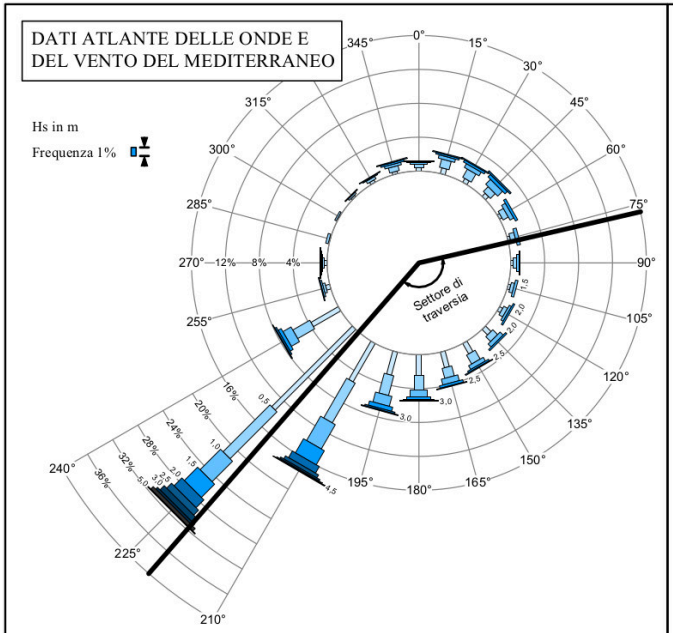
4.6. - Boa di Capo Mele

La boa di Capo Mele consiste in una boa operativa ed una seconda boa di back-up, ospitata nella base logistica presso il porto di Andora, che sostituisce la boa principale in caso di manutenzione.
E' installata dinanzi a Capo Mele, a 4 km dalla costa, alle coordinate 43° 57' 27,64" N, 8° 10' 11,78" E, in fondale di 80 metri.
La stazione metereologica di Capo Mele è la stazione metereologica di riferimento per il servizio meteorologico dell'aeronautica Militare e per l'Organizzazione Mondiale della Meteorologia, relativa all'omonimo promontorio, che assume dalla boa i dati del mare.
I dati della boa vengono inviati tramite la stazione di ricezione dell'aeronautica di Capo Mele, al Servizio Meteorologico dell'aeronautica Militare, all'ARPAL di Genova ed al Servizio Mareografico dell'ISPRA.
La Boa è stata installata e resa funzionante dal 23 Febbraio 2012.
I dati registrati si possono visualizzare sul sito ARPAL – Rete Ondametrica Ligure (R.O.L.) – Archivio storico, dal 23 Febbraio 2012 ad oggi, che riporta le registrazioni effettuate ogni mezz'ora, fra cui altezza d'onda significativa, direzione media spettrale, altezza massima, periodo, periodo di picco.
Peraltro la serie di dati presenta vuoti per periodi piuttosto lunghi e non può essere utilizzata per elaborazioni statistiche utili al presente studio.

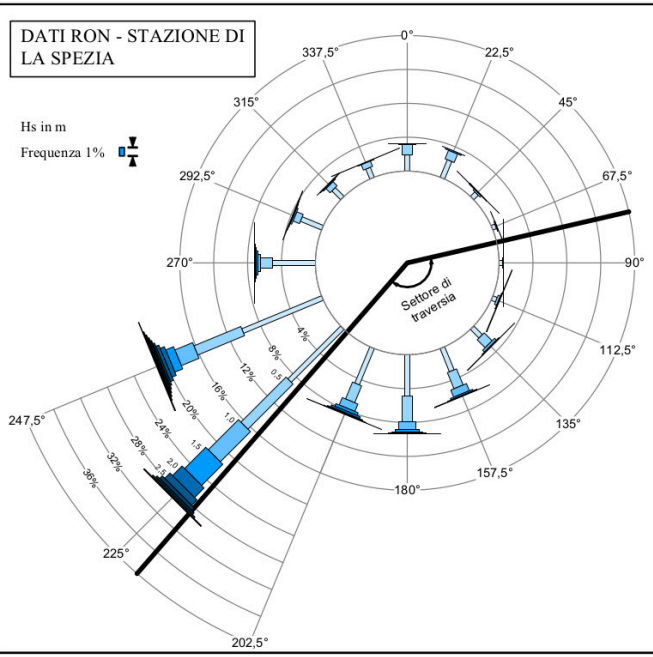
5. RAFFRONTO FRA LE ROSE DEL MOTO ONDOSO ANNUALE

Sulle **Figure 13** e **14** sono riportate le rose delle onde elaborate al capitolo precedente per un raffronto.
Il raffronto mostra che la rosa dei mari costruita a partire dalle osservazioni KNMI risulta quella maggiormente rispondente alla realtà in termini di frequenza delle mareggiate dal 3° e 4° settore; le rosa dello "Atlante delle onde del Mediterraneo" (WEAO) e della Boa Cote d'Azur, in particolare, riportano una bassissima percentuale di eventi provenienti dal 3° settore che non corrisponde a quanto si osserva, dato che il paraggio è spesso battuto dai mari di Levante.
Pertanto questa rosa, già esposta alla **Figura 13** di pagina 23, è stata ulteriormente ingrandita per una più agevole consultazione sulla Tavola grafica N°2, dove è messa in evidenza l'altezza dell'onda significativa massima osservata, nel settore di traversia, di metri 4,00÷5,00.

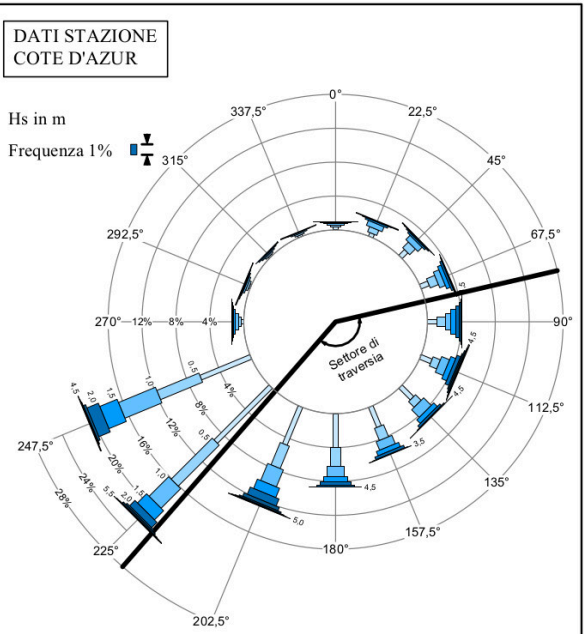
DATI ATLANTE DELLE ONDE E DEL VENTO DEL MEDITERRANEO



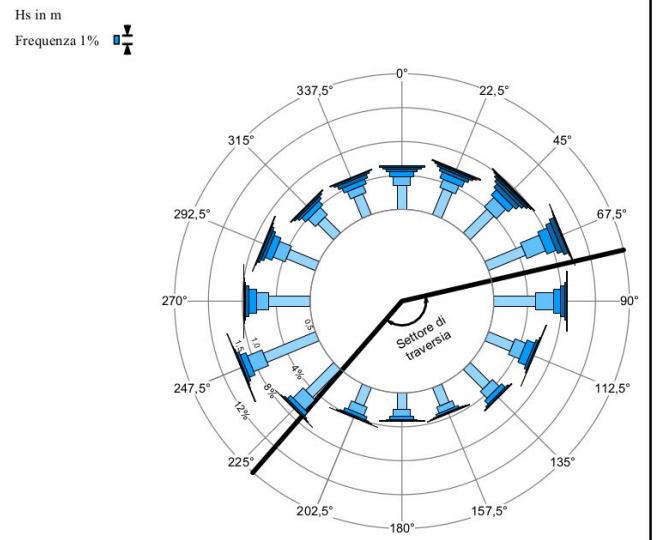
DATI RON - STAZIONE DI LA SPEZIA



DATI STAZIONE COTE D'AZUR



DATI OCEAN WEATHER



DATI KNMI

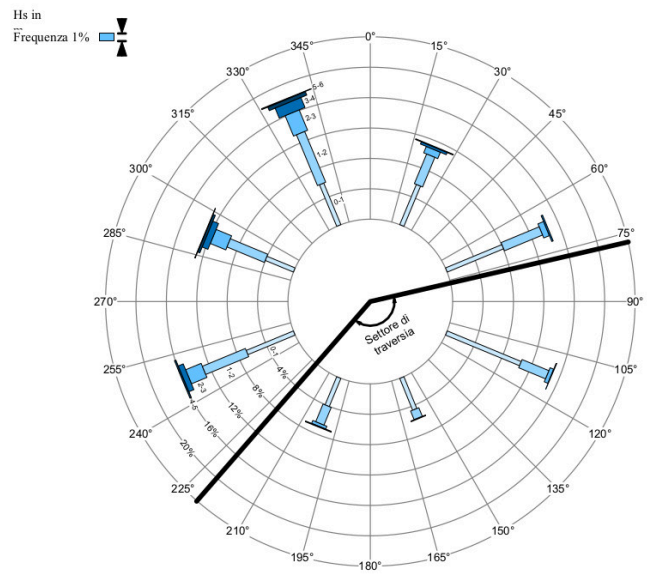


Figura 14 – Raffronto fra le rose del moto ondoso annuale

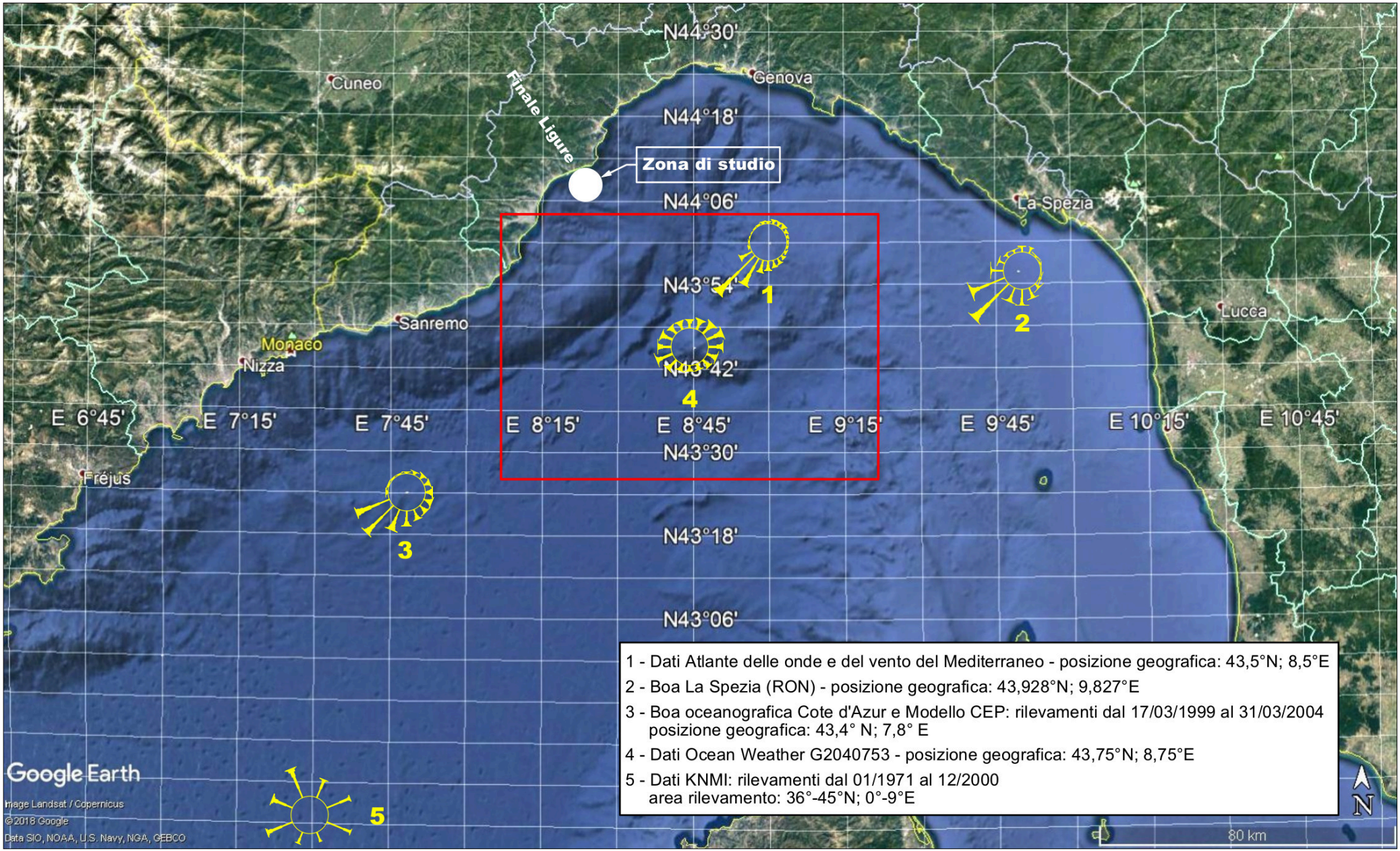


Figura 15 – Raffronto fra le rose del moto ondoso annuale

PARTE TERZA

VERIFICHE IDRAULICHE E DI STABILITA' DELL'OPERA FISSA DI PROGETTO

PARTE TERZA
VERIFICHE IDRAULICHE E DI STABILITA' DELL'OPERA FISSA DI PROGETTO

6. – IMPOSTAZIONE PROGETTUALE DEL 2° LOTTO DI INTERVENTO

6.1. - Premessa

Il litorale di Varigotti, orientato per oltre 2/3 della sua estensione in direzione W/E, è esposto alle mareggiate provenienti dal II e III quadrante. A causa della conformazione del fondale, le onde di Levante e Scirocco investono la costa con fronti d'onda marcatamente inclinati rispetto alla linea di riva (ad eccezione dell'estremità di Ponente dove la costa cambia direzione), a differenza delle onde di Libeccio che si presentano quasi frontali alla spiaggia subendo una evidente rotazione (25°circa) nella loro propagazione dal largo verso costa (alla profondità del fondale di -15m).

La mareggiata del Dicembre 2019, che ha causato ingenti danni agli edifici, di notevole valore storico ed architettonico, ed alla fognatura del Borgo Saraceno, ha colpito frontalmente la spiaggia di Varigotti (180°). Pur non avendo dati specifici di questo evento, si sa per certo che nello stesso anno si sono verificate frequenti mareggiate di Levante e Scirocco, che hanno colpito duramente la zona di Levante della spiaggia, che in quell'occasione versava in una situazione di forte erosione, privando di fatto le strutture del Borgo Saraceno della loro difesa naturale dalle mareggiate di Libeccio.
La presenza del Molo di Varigotti genera una evidente diffrazione dei fronti d'onda da Levante e Scirocco creando una inversione del trasporto solido litoraneo in prossimità della zona che è stata maggiormente colpita, ubicata approssimativamente ad una distanza di 150m dal Molo.

L'Amministrazione di Finale Ligure si è subito attivata realizzando un intervento di somma urgenza consistente in una scogliera di protezione provvisoria costituita da big-bag riempiti di sabbia e massi naturali di 3° categoria che verrà smantellata in occasione dei lavori del presente appalto.

Successivamente, grazie ad un primo finanziamento di € 2.474.322,80 da parte della Protezione Civile ha appaltato un primo intervento di difesa del litorale di Varigotti (1° lotto) attraverso un ripascimento strutturale di 42.000 mc circa attualmente in corso. Con questo intervento sono stati versati finora 25.000mc di ghiaia cui seguirà un ulteriore versamento di 18.000mc di inerti alla ripresa dei lavori dopo il termine della stagione balneare.

Recentemente la Protezione Civile ha stanziato un ulteriore finanziamento di € 2.000.000,00 per l'ultimazione della messa in sicurezza del litorale di Varigotti (2° lotto), la cui progettazione è oggetto del presente studio.

Il ripascimento strutturale è un intervento in linea con le previsioni progettuali del progetto preliminare 2011 del potenziamento delle spiagge dell'intero litorale del Comune di Finale Ligure, redatto dello Studio Sirito, che per la spiaggia di Varigotti prevedeva un ripascimento strutturale di 80.000mc ed è stato approvato, per quel tratto di litorale, dalla Regione Liguria con Decreto Regione Liguria Giunta Regionale n°103 del 12/01/2012.

Tuttavia le fasi di progettazione e direzione lavori del 1° lotto hanno permesso di approfondire alcuni aspetti di carattere naturalistico e di dinamica costiera.
La relazione naturalistica redatta dai dott. Paolo Bernat e dott. Andrea Molinari hanno approfondito la conoscenza del sito SIC della beach-rock evidenziando la presenza *al suo limite inferiore di una grande varietà di micro-habitat che ospitano una elevata biodiversità*.
L'osservazione delle dinamiche costiere durante i lavori di ripascimento hanno evidenziato un problema di erosione localizzato davanti al Borgo Saraceno anche in occasione di mareggiate non eccezionali di Levante e Scirocco.

Quanto sopra suggerisce l'opportunità di adottare un approccio leggermente diverso rispetto alle impostazioni del progetto preliminare.

In primo luogo, a seguito dei rilievi di dettaglio della beach-rock, ai fini di tutelarne il ciglio al suo limite inferiore, appare conveniente ridurre la quantità di inerti da versare rispetto agli 80.000mc del progetto preliminare, tenuto conto che un ripascimento di 80.000mc provocherebbe un avanzamento medio della linea di riva di 10m circa. Considerando che il piede della spiaggia andrà naturalmente a formarsi ad una distanza di ulteriori 7/8 metri dalla linea di riva, gli inerti versati a ripascimento potrebbero avvicinarsi pericolosamente al limite inferiore della beach-rock che in alcune zone dista solamente 20m circa dalla attuale linea di riva.

In secondo luogo si evidenzia come la spiaggia di Varigotti sia nel suo insieme una spiaggia in equilibrio che subisce un'oscillazione marcata soltanto alle due estremità di Ponente e di Levante.

A Ponente la spiaggia si forma naturalmente con le mareggiate di Levante e Scirocco ma sparisce con le mareggiate di Libeccio che investono il muraglione dell'Aurelia protetto da una scogliera. Questa è una zona dove non è mai esistita una spiaggia stabile da quando la discarica a mare della Fiorita ha cessato la sua attività, a causa del diverso orientamento che il litorale assume in questa zona, inclinato rispetto alla direzione di provenienza delle mareggiate di Libeccio, né manufatti di rilievo da difendere, fatta eccezione l'unico stabilimento presente, i Bagni La Ruggia, costruito in muratura a poca distanza dal mare e protetto da alcuni scogli di grandi dimensioni.
A Levante invece si assiste ad un arretramento evidente della spiaggia antistante il Borgo Saraceno in occasione di mareggiate di Levante e di Scirocco anche di modesta entità, per i motivi precedentemente analizzati.

I ripascimenti realizzati con i lavori di 1° lotto, attualmente sospesi per la stagione balneare, hanno dato risultati soddisfacenti in termini di equilibrio della spiaggia a seguito delle modeste mareggiate che si sono verificate nella stagione estiva, anche se è necessario aspettare mareggiate più importanti e l'ultimazione dei lavori per valutare l'efficacia dell'intervento.

6.2. – Impostazione progettuale del 2° lotto di intervento

Per quanto esposto al paragrafo precedente, l'impostazione progettuale dei lavori di 2° lotto prevede la riduzione del volume di ripascimento, dagli 80.000mc previsti nel progetto preliminare 2011 a 50.000mc circa, e la realizzazione di una opera rigida puntuale per la difesa dell'abitato del Borgo Saraceno che consiste in una sopraelevazione di 1,5m del fondale al largo della beach-rock per un'estensione di 160m x 40m (5.800mq).

L'opera fissa ipotizzata è un'opera sperimentale finalizzata alla riduzione dell'energia del moto ondoso incidente per mareggiate di altezza d'onda al largo superiore a 3m (3,4m è la massima onda annuale dello studio Regione Liguria), e mantenendo inalterata la dinamica costiera per le mareggiate più frequenti. Rispetto alle tradizionali opere fisse (isole, dighe, pennelli…) questa soluzione non altera in modo apprezzabile la direzione del fronte dell'onda incidente evitando erosioni localizzate della spiaggia ai lati della struttura rigida, e creerà presumibilmente un tombolo appena accennato di fronte alla struttura in occasione di mareggiate importanti.
Con questa opera verrà anche attenuato l'effetto diffrattivo del Molo di Varigotti.

6.3. – Ubicazione della secca sommersa

La secca di progetto è ubicata quindi nella zona di Levante della cella litorale di Varigotti, nel tratto di fondale di lunghezza 160m da Vico Mendaro a Levante e Vico della Caserma a Ponente estendendosi verso mare a partire da una distanza di sicurezza dal ciglio della beach-rock di 20m dalla batimetrica massima di -4,5m alla minima di -6,5m, andando a riempire in parte la depressione del fondale esistente.

La posizione della secca è centrata rispetto alla zona più vulnerabile da difendere, dove è presente la scogliera provvisoria di protezione dell'abitato.

Si riporta in **Figura 16** la Planimetria di progetto della spiaggia di Levante in cui è riportato il rilievo della spiaggia eseguito dallo Studio Sirito nei mesi di Aprile-Maggio 2020 ed il rilievo batimetrico eseguito da Geocoste s.r.l. nel mese di Aprile 2020, visibile con maggiore dettaglio sulla **Tavola 18** di progetto.

Il ripascimento indicato in figura comprende sia il ripascimento di 1° lotto in corso (42.000mc circa), sia il ripascimento di 2° lotto (5.000mc circa) per un totale di 47.000mc cui corrisponde un avanzamento teorico della linea di riva di 6/7m circa.

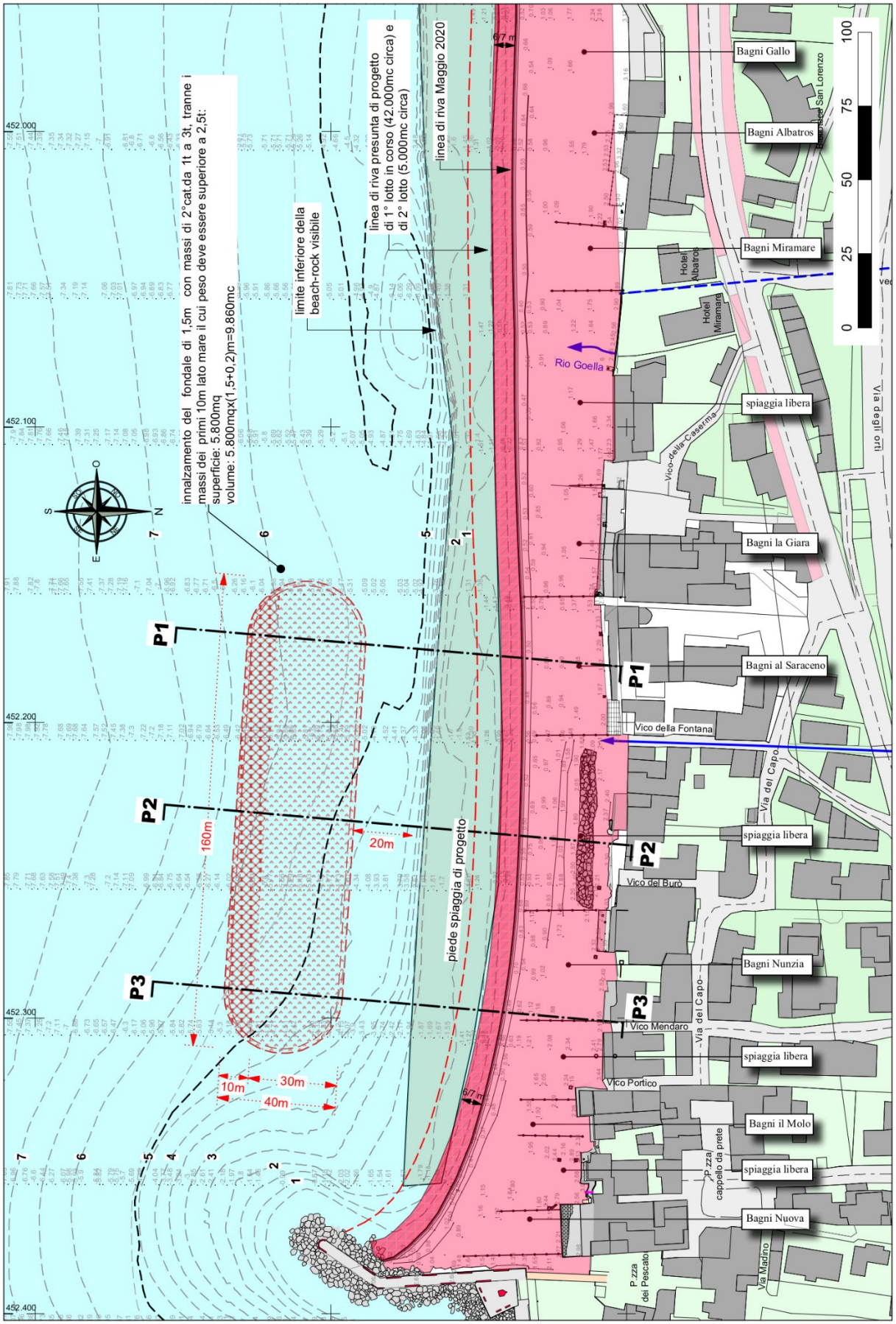


Figura 16 – Planimetria di progetto davanti al Borgo Saraceno

7. ANALISI DEL CLIMA ONDOSO E SIMULAZIONI SOTTO COSTA CON MODELLAZIONE MATEMATICA

7.1. – Onde al largo di progetto ed onde rifratte su fondale di profondità 15m

Le onde al largo assunte per le verifiche sono desunte dallo studio effettuato dalla Regione Liguria in collaborazione con l'Università di Genova sulla "*Mappatura della pericolosità da inondazione marina nelle aree costiere della Regione Liguria*" nel 2014, pubblicato sul sito della Regione, ai sensi del D.Lgs. 49/2010 e della Direttiva 2007/60/CE "Direttiva Alluvioni".

Il litorale di Finale Ligure si trova nella Zona 3, compresa tra il Capo di Vado Ligure e Capo Mele, per la quale "*sono disponibili i dati dedotti da Boccotti e quelli ricostruiti da MEDATLAS-2 (posizione 44.1°N 8.9°E) e da UKMO (posizione 44°N 8.7 °E). Per questa zona vengono utilizzate le curve di Boccotti riferite ai settori di ampiezza 30 gradi, come nella Zona 2, considerando anche i settori da 45°N a 135°N interessanti per la Zona 3*".

Sulla **Tabella 9** che segue si cita la Tabella 4 dello studio regionale, con i valori di altezza d'onda, periodo e direzione, associati ai diversi periodi di ritorno, derivati dalle elaborazioni di Boccotti.

ZONA 3 DA CAPO DI VADO A CAPO MELE **Settori di provenienza:** levante, scirocco, mezzogiorno, libeccio (al largo)						
dir °N	TR (anni)					
	1		50		100	
	H(m)	Tp (s)	H(m)	Tp (s)	H(m)	Tp (s)
60	2.9	7.7	6.2	11.3	6.8	11.7
90	2.0	6.4	4.6	9.7	5.0	10.1
120	1.7	5.9	4.0	9.0	4.4	9.4
150	2.5	7.1	5.4	10.5	5.8	10.9
180	3.1	7.9	6.0	11.0	6.5	11.5
210	3.4	8.3	7.8	12.6	8.5	13.2

Tabella 6. Tabella 4 dello studio regionale – Onde al largo

Lo studio regionale ha sviluppato anche la modellazione matematica della propagazione dell'onda dal largo verso riva fino all'isobata di -15m, i cui risultati sono riportati sull'Allegato 1 dello studio "*Caratteristiche del moto ondoso sotto costa*" in punti visibilie sulla cartografia regionale denominati punti "Mike".

Sulla **Tabella 9** che segue si riporta uno stralcio dell'Allegato 1 sopra citato relativamente al Punto "Mike" 142 di nostro interesse ubicato sui fondali antistanti il Molo di Varigotti Tr=50 anni visibile sulle **Figure N°17** e **N°18**.

TR=50 anni	Hs(m)						Tp(s)						Dir(°)					
Punto Mike	60°	90°	120°	150°	180°	210°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	60°	90°	120°	150°	180°	210°
142	4,2	4,0	3,7	5,1	5,5	6,3	11,2	9,6	9,0	10,4	10,9	12,5	96,9	106,4	126,9	151,4	172,9	187,5

Tabella 9. Estratto dell'Allegato 1 dello studio regionale – Risultati nei punti "Mike"

E' stata riscontrata una notevole differenza tra il periodo Tp(s) calcolato con le procedure di *hindcasting* MIKE e riportate da Regione Liguria rispetto a quanto rilevato direttamente dalle boe e calcolato da DAGNINO-ALBERT durante alcune mareggiate storiche e specialmente

nel 2018 dove vi erano state caratteristiche di ricorrenza più che trentennali; per questo motivo nelle simulazioni che seguono verrà adottato un periodo d'onda medio di picco Tp pari a 8 secondi.

L'onda d'alto fondale, calcolata alle H16.00 del 29.10.18 di altezza pari a 7,31m e con periodo pari a 8,3s, corrisponde, in base alla distribuzione di Gumbell dei dati storici della boa della Spezia e del KNMI, ad un periodo di ritorno (Tr) pari rispettivamente a 40 anni ed a 30anni.

Occorre quindi effettuare una considerazione generale riguardo alla scelta dei dati progettuali in quanto i dati rilevati al vero, BOA SP e KNMI, mostrano per frequenze cinquantennali altezze notevolmente superiori.

I valori delle altezze d'onda riportati, da noi considerati dati certi in quanto frutto di rilevazioni dirette, se utilizzati per il dimensionamento delle strutture, porterebbero ad incrementi notevoli delle dimensioni degli elementi progettati (con rivolti estetici) ed incrementi di costi non trascurabili (dato l'incremento del materiale da conferire).

E' però difficile convincere un'amministrazione sul considerare altezze più cautelative quando vi sono dati ufficiali meno gravosi.

In definitiva è stato ritenuto opportuno effettuare un compromesso ovvero utilizzare i dati MIKE, risultato di un'estesa indagine ufficiale della Regione Liguria ancorchè affetti da sovrastima nell'individuazione dei periodi di picco, che potrebbero risultare "deboli" rispetto ad ondazioni con periodi di ricorrenza cinquantennale (richiesto dalla normativa in vigore) rilevati nel Golfo Ligure da fonti altrettanti ufficiali ma scevre da calcolazioni statistiche di varia origine.

I progettisti, in questo modo, informano l'Amministrazione che le scelte progettuali delle onde di dimensionamento sono giustificate da documenti ufficiali Regione Liguria ma, a loro parere, sono sottostimate rispetto al periodo di ritorno di progetto.

7.2. – Propagazione del moto ondoso sotto costa

A partire dai dati Regione Liguria su profondità 15m riportati sulla Tabella 9 si è proceduto alla simulazione del moto ondoso con il codice di calcolo CELERIS[1] per le onde provenienti dalle direzioni 210° (Libeccio) e 150° (Scirocco), che ha permesso di calcolare l'inviluppo delle onde nella loro progressione verso la costa.

Le schematizzazioni delle simulazioni eseguite sono riportate sulle **Figure N°17 e 18** in cui è indicato il punto "Mike" 142 utilizzato per l'*input* al contorno delle onde e l'ubicazione delle Sezioni e dei punti di lettura dei risultati. Le simulazioni sono state eseguite sia per la configurazione dello stato attuale sia per quella di progetto.

Come visibile sulle figure, CELERIS è stato impostato simulando le ondazioni di SW e di SE con i dati del punto "Mike" 142.

Sono state sviluppate due analisi progettuali così descritte:

[1] 1- Tavakkol, S., & Lynett, P. (2017). Celeris: A GPU-accelerated open source software with a Boussinesq-type wave solver for real-time interactive simulation and visualization. Computer Physics Communications, 217, 117-127.
2- Tavakkol, S., & Lynett, P. (2017). Opportunities for Interactive, Physics-Driven Wave Simulation Using the Boussinesq-Type Model, Celeris. Coastal Engineering Proceedings, 1(35), 11.

a) raffronto tra la situazione attuale e quella di progetto per più ondazioni al fine di verificare il rateo di abbattimento raggiunto dal moto ondoso sotto costa dopo aver superato il tratto di bassofondo di progetto;

b) calcolo della situazione di progetto con l'onda cinquantennale al fine di verificare la stabilità dei massi durante il passaggio dei treni d'onda.

7.3. – Raffronto tra la situazione attuale e quella di progetto

Le simulazioni sono state eseguite su due configurazioni distinte in cui l'opera fissa di progetto ha le stesse dimensioni geometriche ma una diversa ubicazione: la prima ipotesi progettuale, superata, prevede la scogliera di progetto ad una distanza minima dal ciglio della beach-rock di 10m, la seconda ad una distanza minima di 20m.

L'opportunità di allontanare l'opera dal ciglio della beach-rock è emersa durante la videoconferenza di presentazione del progetto agli Uffici Ecosistema Costiero e VIA della Regione Liguria tenutasi in data 13/9/2021. In quell'occasione la regione Liguria esponeva le sue perplessità riguardo alla vicinanza dell'opera alla beach-rock, per la possibile formazione di correnti al fondo che potrebbero determinare un'azione erosiva al piede della beach rock in corrispondenza della zona di intervento; proponeva pertanto ai progettisti di studiare due alternative: o approfondire le indagini sulle correnti indotte dalle opere, oppure allontanare di ulteriori 10 metri dal ciglio della beach-rock l'opera di progetto.
Si decide di approfondire la seconda alternativa, procedendo a verificarne l'efficacia sotto l'aspetto di attenuazione dell'energia incidente il tratto di spiaggia da difendere.

Per entrambe le configurazioni, denominate rispettivamente "Soluzione1-10m" e Soluzione2-20m", sono state eseguite più simulazioni sia per la direzione SW che SE in modo tale da verificare il rateo di abbattimento raggiunto grazie alla frangenza indotta dalla diminuzione artificiale del fondo procurata dalla dorsale di progetto.

Nelle **Figure dalla N°19 alla N°22** si riportano i piani d'onda e le sezioni con gli inviluppi delle onde, nelle due configurazioni di stato di fatto e di progetto "Soluzione2-20m" per le condizioni al contorno, su fondale di -15m, delle mareggiate rispettivamente di SW Hs=3.0m, SW Hs=6.3m, SE Hs=3.0m e SE 5.1m che rappresentano le periodicità di circa un anno e cinquanta anni rispettivamente.

Nella **Tabella 10** che segue si possono visualizzare i risultati di tutte le simulazioni eseguite.

Direzione / N° Sezione	Altezza onda (m) alla isobata -15m	Altezza (m) / Periodo (s) ante dorsale (A)	Altezza (m) / Periodo (s) post dorsale "Soluzione1-10m"	Altezza (m) / Periodo (s) post dorsale "Soluzione2-20m" (B)	Rateo abbattimento altezza d'onda (1-B/A) (%)
SW (185°) / 1	2.50	2.10 – 7	1.95 – 7	1.90 – 7	10
	3.00	2.30 – 7	2.40 – 7	2.10 – 7	9
	5.00	4.25 – 8	4.15 – 8	3.95 – 8	7
	6.30	5.20 - 8	4.50 - 8	4.25 - 8	18
SW (185°) / 2	2.50	2.45 – 7	2.05 – 7	2.05 – 7	16
	3.00	2.80 – 7	2.25 – 7	2.30 – 7	18
	5.00	5.00 – 8	3.90 – 8	3.75 – 8	25
	6.30	5.60 - 8	4.70 - 8	5.10 - 8	9
SW (185°) / 3	2.50	2.40 – 7	1.95 – 7	2.00 – 7	17
	3.00	2.55 – 7	2.05 – 7	2.10 – 7	18
	5.00	5.70 – 8	4.55 – 8	3.55 – 8	38
	6.30	6.25 / 8	4.95 - 8	5.00 - 8	20
SE (150°) / 4	3.00	2.30 – 7	1.90 – 7	2.05 – 7	11
	5.10	4.70 – 8	4.05 – 8	3.55 – 8	24
SE (150°) / 4	3.00	2.60 – 7	2.25 – 7	2.80 – 7	incr.8
	5.10	3.25 – 8	1.80 – 8	4.55 – 8	incr.40

Tabella 10. Risultati delle simulazione e calcolo del rateo di abbattimento dell'altezza d'onda a monte dell'opera di difesa rispetto alla configurazione dello stato di fatto (ante dorsale) – Raffronto "Soluzione1-10m" con "Soluzione2-20m".

7.4. – Conclusioni sulle simulazioni sotto costa e previsione di monitoraggio

Dall'osservazione dei risultati delle simulazioni riportati sulla **Tabella 10** è possibile trarre le seguenti deduzioni:

- le tre sezioni disposte lungo il percorso delle onde di SW, in posizione ortogonale alla dorsale (Sez.1 a ponente, Sez.2 al centro e Sez.3 a levante della struttura di progetto), mostrano un abbattimento del 15% per onde di 3.0m ed un abbattimento del 20% per le onde più alte;
- l'abbattimento medio generale per le onde di SW su tutta la dorsale è del 17%;
- le due sezioni disposte lungo il percorso delle onde di SE, in posizione inclinata alla dorsale (Sez.4 nel centro e Sez.5 a levante della struttura di progetto), mostrano un abbattimento del 11% per onde di 3.0m ed un abbattimento del 24% per le onde più alte in corrispondenza della Sez.4, ma un incremento dell'8% per onde di 3.0m e del 40% per le onde più alte in corrispondenza della Sezione 5;
- non si osservano fenomeni rifrattivi di rilievo indotti dalla struttura ai suoi lati che possano indurre fenomeni erosivi localizzati della spiaggia.

La scelta progettuale di installare una dorsale sommersa di 1.5m, così da innalzare il fondo del mare ed innescare la frangenza delle onde in transito, ha mostrato la sua efficacia sia da SW che da SE.

Il rateo medio di abbattimento per le onde annuali, prossime a 2.5m/3.0m, è risultato per entrambe le direzioni prossimo al 13% mentre il rateo per le ondazioni cinquantennali è risultato del 16% da SW e del 24% da SE.

I ratei di abbattimento presentati considerano i valori delle tre sezioni di SW e di una solamente di SE. Lo spostamento verso il largo del bassofondo qui analizzato, non riesce ad influire sulle ondazioni di SE nella Sezione 5 (a Levante dell'opera rigida) che raggiungono la costa indisturbate, solamente deviate dalla diffrazione del molo.

Per quest'ultima ragione, al fine di proteggere il più possibile il Borgo Saraceno, è stata ulteriormente spostata la dorsale sommersa di 10 metri verso Levante, in modo da ottenere lo stesso abbattimento del moto ondoso proveniente da SE come per la "Soluzione1-10m", rappresentato alla 4° colonna della Sezione 5, cioè pari a circa il 13% per l'onda di 3.0m e 45% per l'onda di 5.1m.

La configurazione definitiva di progetto è riportata in **Figura 16**.

Si considerano pertanto soddisfacenti le scelte progettuali previste e sviluppate.

Al fine di avere maggiori garanzie sulla preservazione degli habitat marini della beach-rock, la Regione Liguria ha sottolineato la necessità di un **monitoraggio** post operam della beach-rock rock nel tratto a tergo della struttura di progetto, che dovrà consistere in un controllo sulla geometria del fondale antistante per l'individuazione di un'eventuale erosione al piede, ed un controllo naturalistico sulla conservazione della biocenosi marina.

Sebbene le modalità del monitoraggio verranno concordate con l'Ufficio Ecosistema Costiero della Regione Liguria, si propone, per il controllo plano-altimetrico del fondale, l'esecuzione di N°3 rilievi da eseguirsi nel primo anno successivo alla realizzazione dell'intervento, N°2 rilievi nel secondo anno e N°1 rilievo nel terzo anno, da sospendere al quarto anno se non saranno evidenziati fenomeni erosivi di rilievo. Ciascun rilievo di controllo potrebbe consistere nell'esecuzione di N°4 sezioni poste opportunamente lungo lo sviluppo longitudinale del tratto interessato, con la battuta planoaltimetrica di N°7 punti per sezione, di cui n°2 punti al ciglio superiore ed inferiore della beach-rock, n°3 punti del fondale compreso tra la beach-rock e la scogliera e n°2 punti al ciglio ed al piede della scogliera.

In questo modo sarà possibile verificare, auspicando che in 36 mesi vi siano ondazioni prossime alle medie ventennali sia in accadimento che in altezza, come il sito avrà reagito a questa modellazione artificiale.

I risultati potranno essere utili alla Regione Liguria per l'approfondimento sulla funzionalità di questo approccio progettuale sperimentale, soprattutto riguardo all'impatto sull'ambiente circostante.

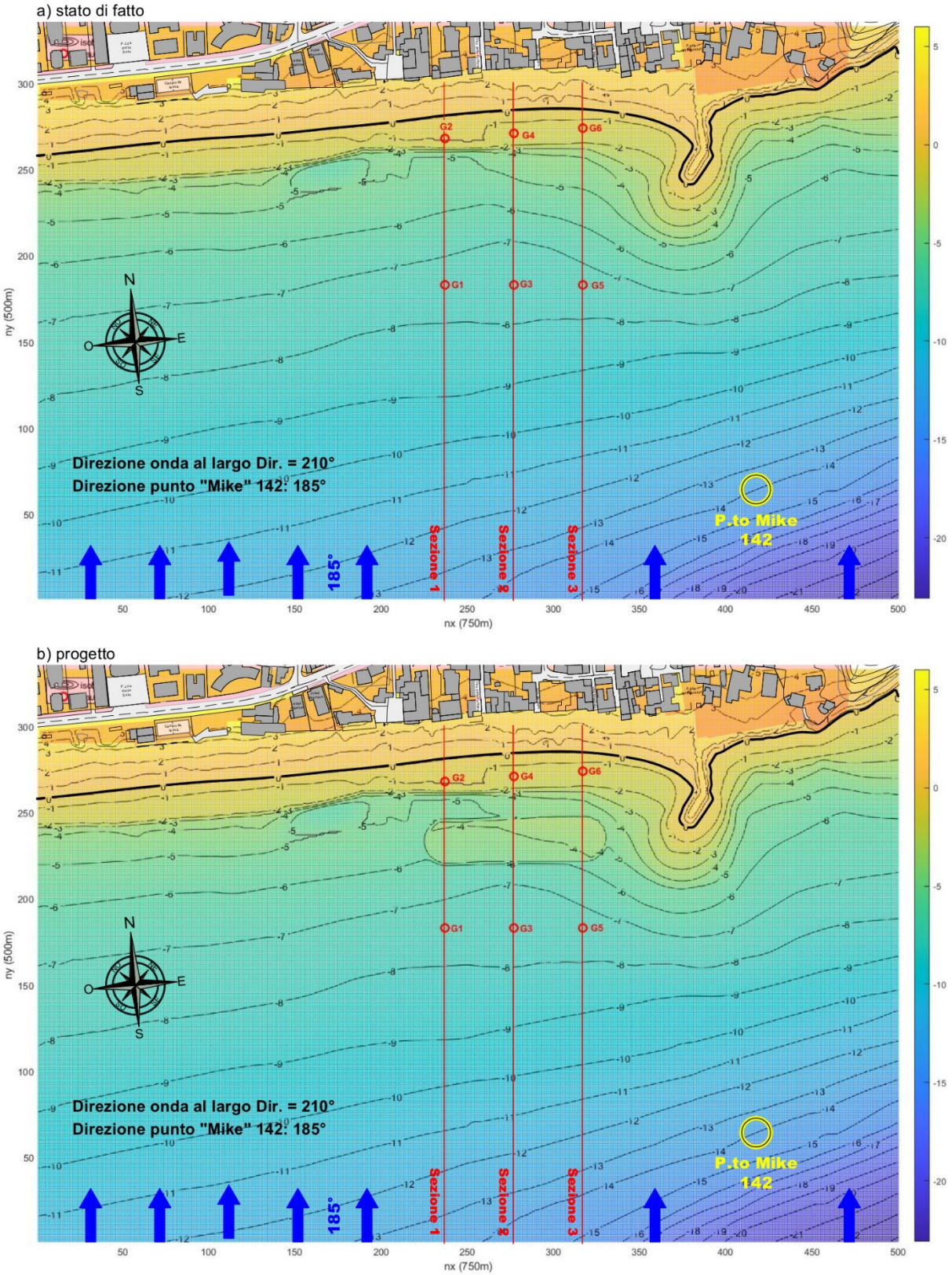


Figura 17 – Schematizzazione di calcolo per le onde di Libeccio

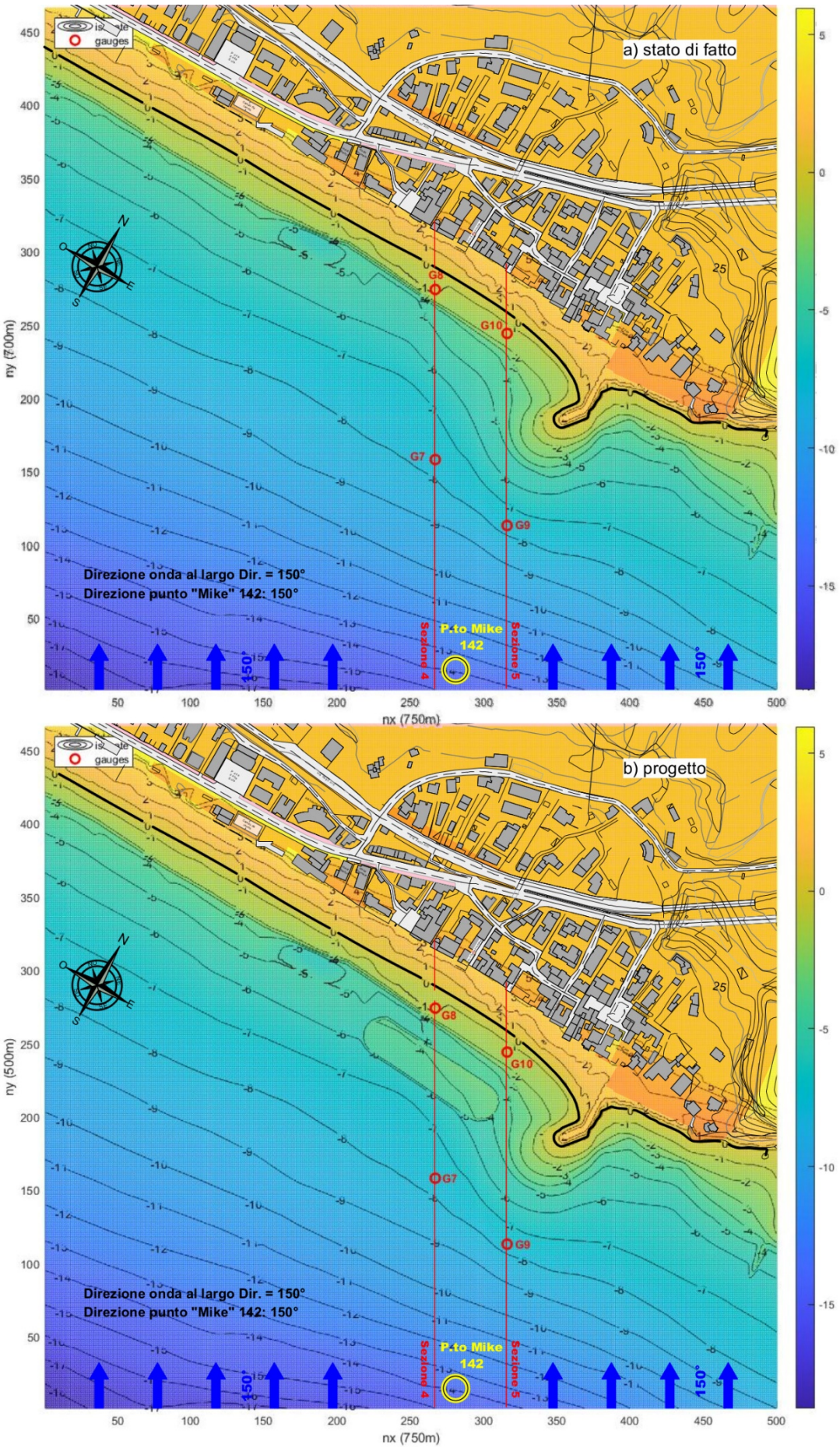


Figura 18 – Schematizzazione di calcolo per le onde di Scirocco

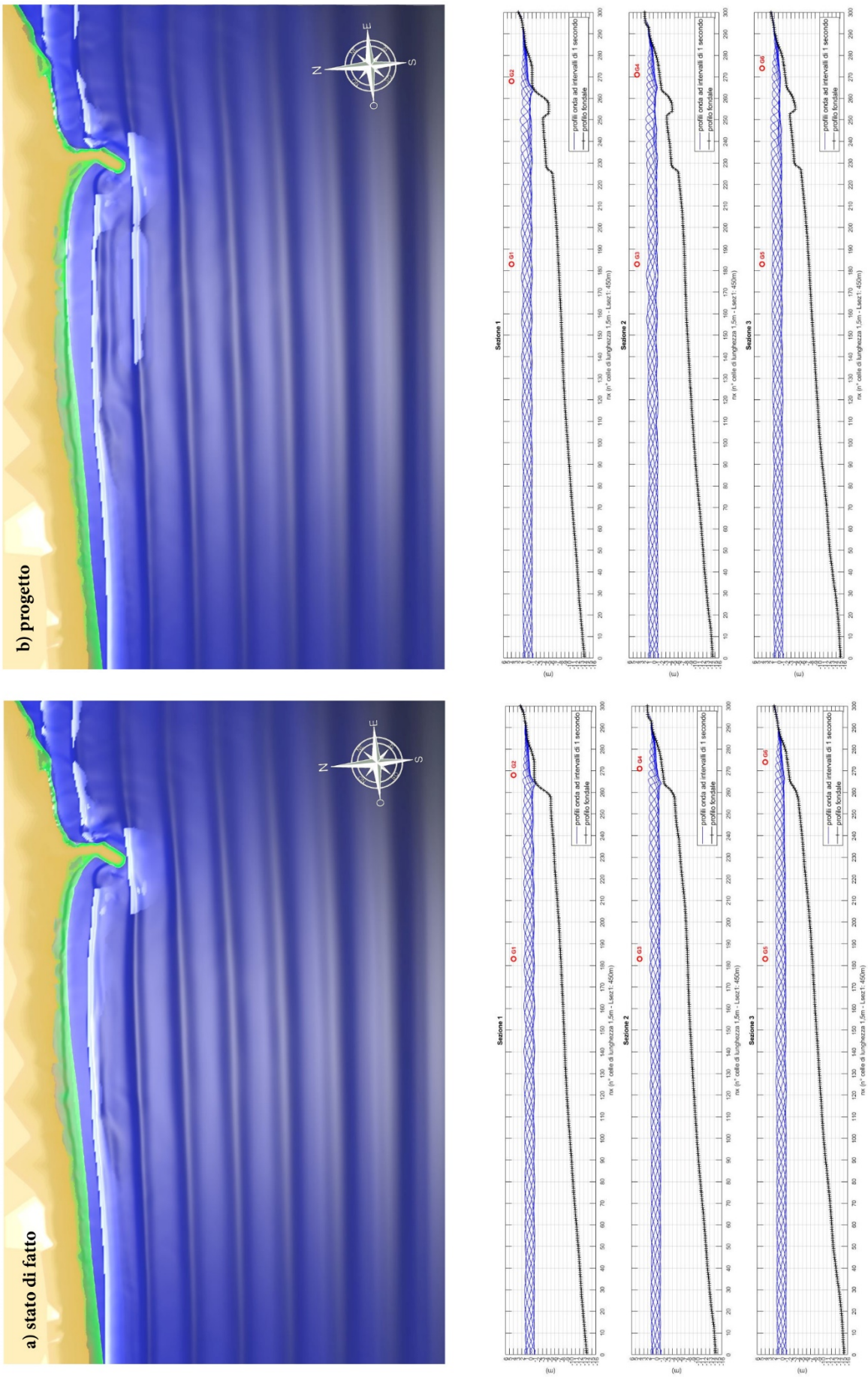


Figura 19 – Piani d'onda e sezioni stato di fatto e progetto con onda al contorno Hs=3.0m, Tp=7s, dir.185°

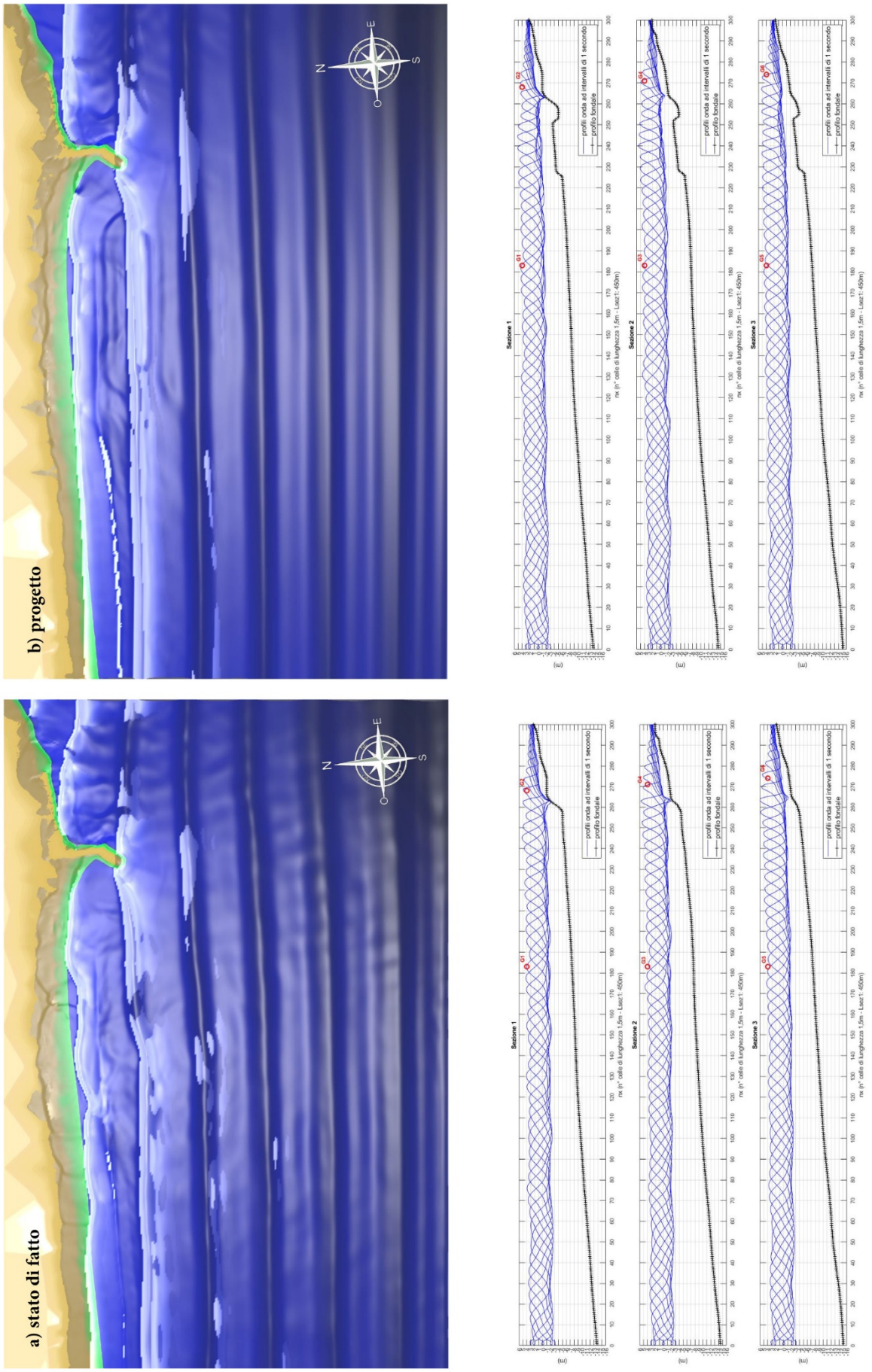


Figura 20 – Piani d'onda e sezioni stato di fatto e progetto con onda al contorno Hs=6.3m, Tp=8s, dir.185°

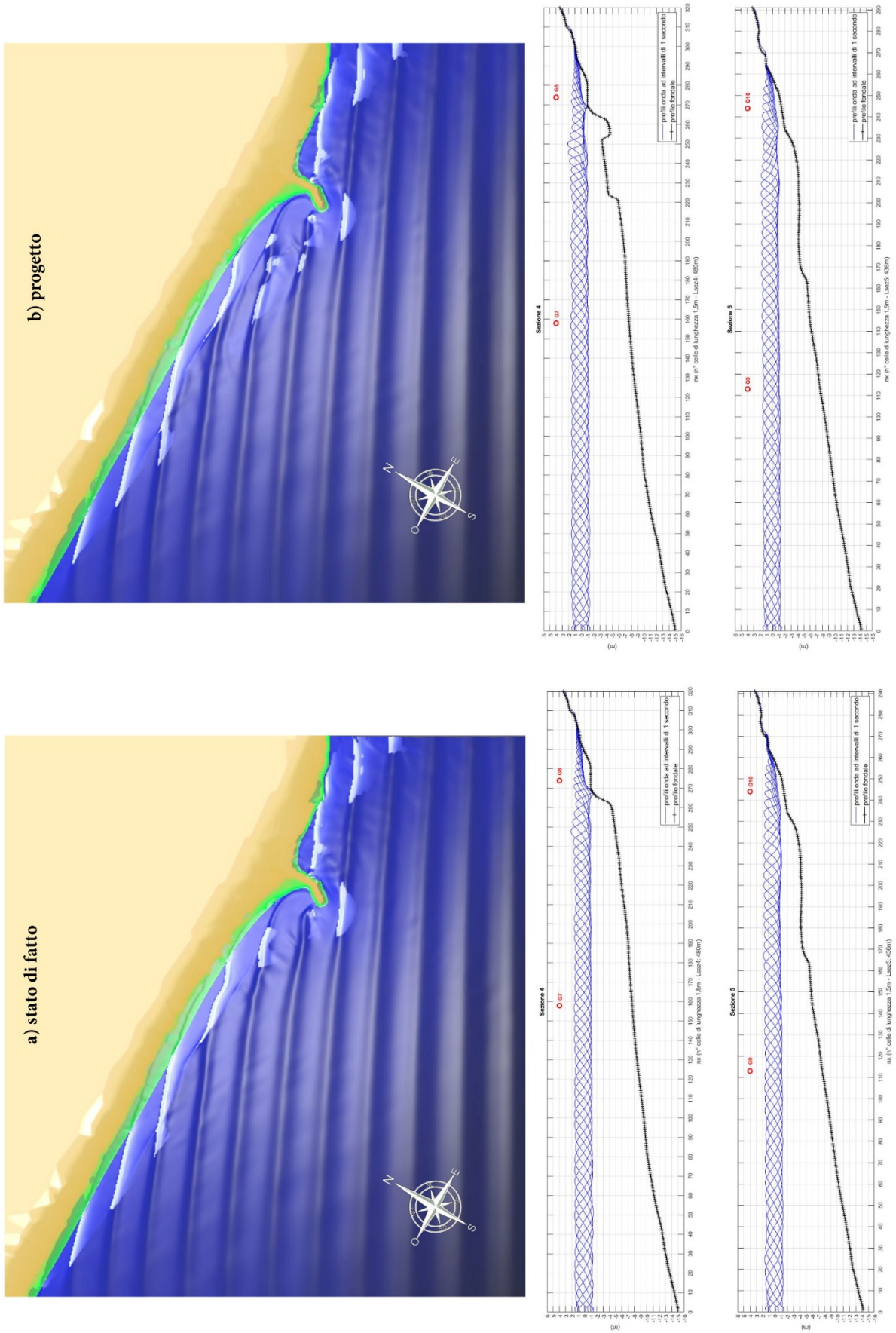


Figura 21 – Piani d'onda e sezioni stato di fatto e progetto con onda al contorno Hs=3.0m, Tp=7s, dir.150°

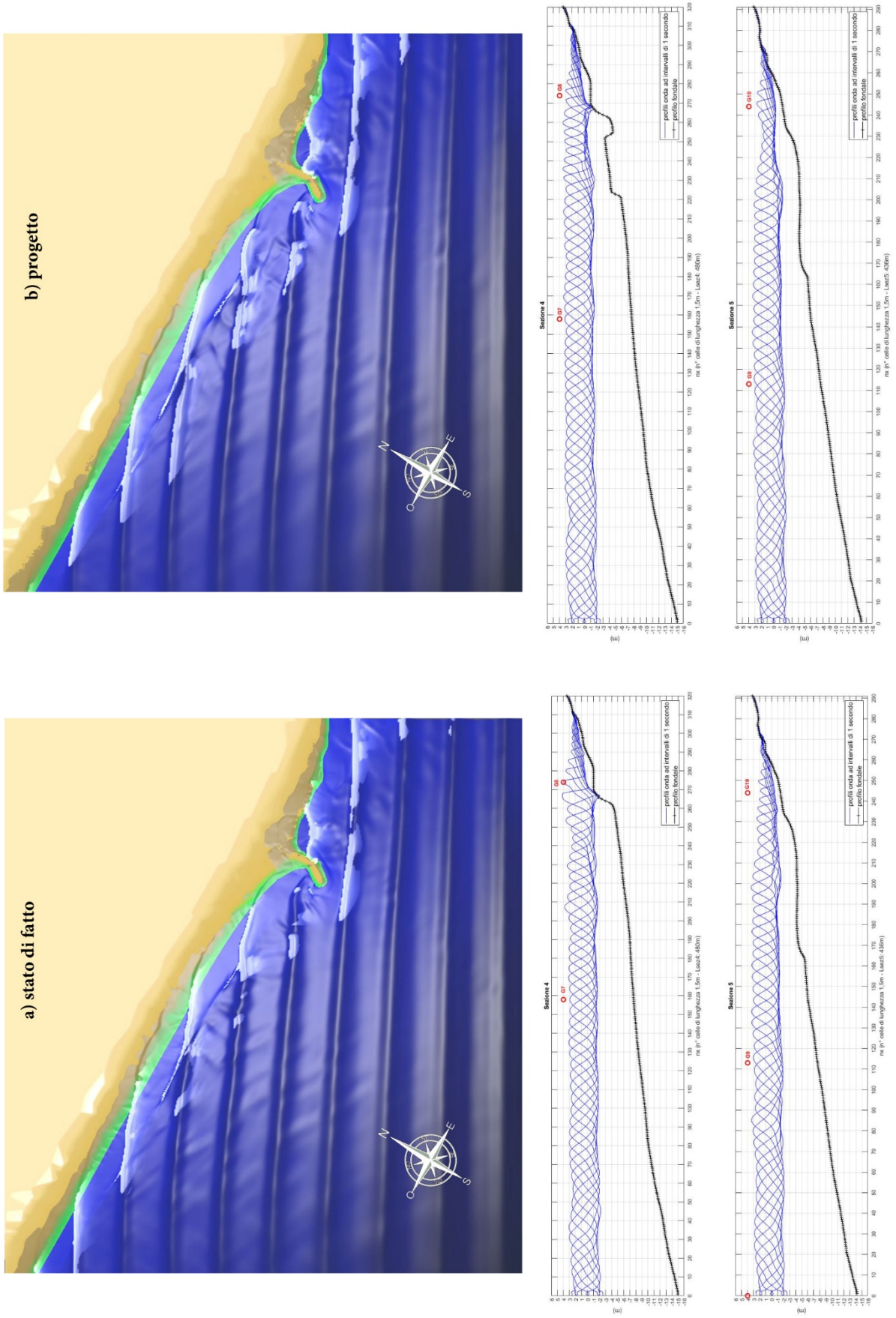


Figura 22 – Piani d'onda e sezioni stato di fatto e progetto con onda al contorno Hs=5.1m, Tp=8s, dir.150°

7.5. – Stima del *run-up* a valle della dorsale sommersa

E' stata sviluppata un'analisi sul valore del *run-up* ovvero sul valore della quota verticale complessiva raggiunta dalle onde durante la frangenza effettuando un confronto tra lo stato attuale e quello progettuale, in corrispondenza della Sezione 2 di progetto.

La morfologia della spiaggia non ha permesso di utilizzare, insieme alle altre formule, i valori dello SPM in quanto sarebbero stato il frutto di pericolose e soggettive estrapolazioni.

Si è preferito effettuare il calcolo ed il confronto del *run-up* utilizzando la formulazione adottata dalla Regione Liguria (i.e. Holman) ed i dati elaborati da Celeris.

Nella **Tabella 11** seguente sono stati riportati i valori calcolati.

	Run-up attuale	**Run-up progetto**
Regione Liguria	3.2m	2.1m
Celeris	3.0m	2.5m

Tabella 11. Valori di run-up calcolati in corrispondenza della Sezione 2 di progetto

E' evidente la buona corrispondenza tra i valori calcolati con la formulazione Regione Liguria pertanto risulta altrettanto evidente la diminuzione della estensione dell'ondata teorica verso la costa.

Con il profilo attuale e futuro della battigia le ondazioni raggiungeranno le seguenti progressive, facendo riferimento alla Sezione 2 riportata in **Tavola ….** di progetto ed utilizzando i valori calcolati da Celeris:

- Attuale: 36.42 – 23.67 = 12.7 m
- Progetto: 42.12 – 27.85 = 14.3 m

E' quindi evidente il minor avanzamento dell'onda di progetto sulla spiaggia nonostante l'attività di ripascimento con una pendenza minore che agevolerebbe l'avanzamento verso terra.

8. VERIFICA DELLA STABILITA' DELL'OPERA RIGIDA DI PROGETTO

Lo studio e la simulazione del paraggio tramite il codice di calcolo CELERIS ha permesso di calcolare l'inviluppo delle onde nella loro progressione verso la costa così come spiegato ed illustrato nel capitolo precedente.

Al fine di potere verificare il dimensionamento del corpo del bassofondo al fine di evitare il movimento dei massi naturali che lo costituiscono è stato necessario individuare le ondazioni più gravose.

Sono state individuate in quelle provenienti da SW che sul fronte a mare del bassofondo, sulla batimetria di -5.5m, hanno un'altezza di 6.0m ed un periodo di 8.0s.

In letteratura sono abbondanti le formule empiriche per il dimensionamento dei moli frangiflutti ma non vi sono formulazioni consolidate per il dimensionamento di manufatti frangiflutti sommersi.

Nel nostro caso vi è l'idea progettuale di generare un bassofondo artificiale che, portando le onde al frangimento, decresca l'energia delle grosse ondazioni proteggendo il litorale e diminuendo il rateo di migrazione dei sedimenti in sospensione.

Il dimensionamento dei massi costituenti l'opera rigida di progetto (bassofondo) è stato eseguito utilizzando le onde "stream" calcolate da Dean per il dimensionamento di strutture semisommerse. CERC-SR-1- Dean.

Sono stati individuati da verificare i massi superiori del fronte a mare del bassofondo, posti con il culmine a -4.25m LAT.

Nel foglio allegato (**Figura 23**) sono state riportate le verifiche dove, considerando:

- H = altezza onda incidente sull'apice della struttura considerata così come calcolato da Celeris (m);
- T = periodo onda incidente (s);
- h = fondale sull'apice della struttura considerata;
- L = lunghezza d'onda di H in alto fondale (m);
- L0 = lunghezza d'onda di H sull'apice della struttura considerata (m);

è stato calcolato il profilo d'onda con:

- la soprelevazione del profilo al variare della posizione su L/2;
- la velocità orbitale orizzontale (m/s);
- l'accelerazione orbitale orizzontale (m/s^2);

considerando quindi le forze agenti secondo la teoria di Morrison, forze di *drag* e massa aggiunta su una struttura ferma in acqua, è stata calcolata:

- la forza complessiva agente sul generico masso al variare della posizione dell'onda;
- la forza reagente allo scivolamento, considerando un opportuno coefficiente di attrito roccia-roccia bagnata;
- il coefficiente di sicurezza allo scivolamento, considerando che le norme considerano sufficienti valori maggiori dell'unità.

Nel complesso sono stati considerati massi di 2a categoria con peso minimo pari a 2,5 t, che presentano coefficienti di sicurezza al rotolamento maggiori di 1.

Questo dimensionamento, considerando:

- la possibile sottostima delle onde in alto fondale sulla periodicità cinquantennale;
- le indeterminatezze del calcolo pur considerando il sofisticato codice utilizzato;
- le tolleranze insite nel posizionamento degli imbasamenti e delle rocce che purtroppo, anche con le tecnologie moderne, non riescono a riprodurre fedelmente le sezioni definite progettualmente;

è stato ritenuto comunque adeguato perchè nella verifica di stabilità non è stato tenuto conto dell'effetto ulteriore di stabilità fornito dall'adiacenza di più file di massi che aumentano notevolmente la stabilità di forma.

Ad ulteriore incremento della stabilità del bassofondo, è stato deciso a livello progettuale di posare nei primi 10 metri di entrambi le fila che compongono ilbassofondo (1.800mq circa) massi di 2° cat. del peso minimo di 2,5t.

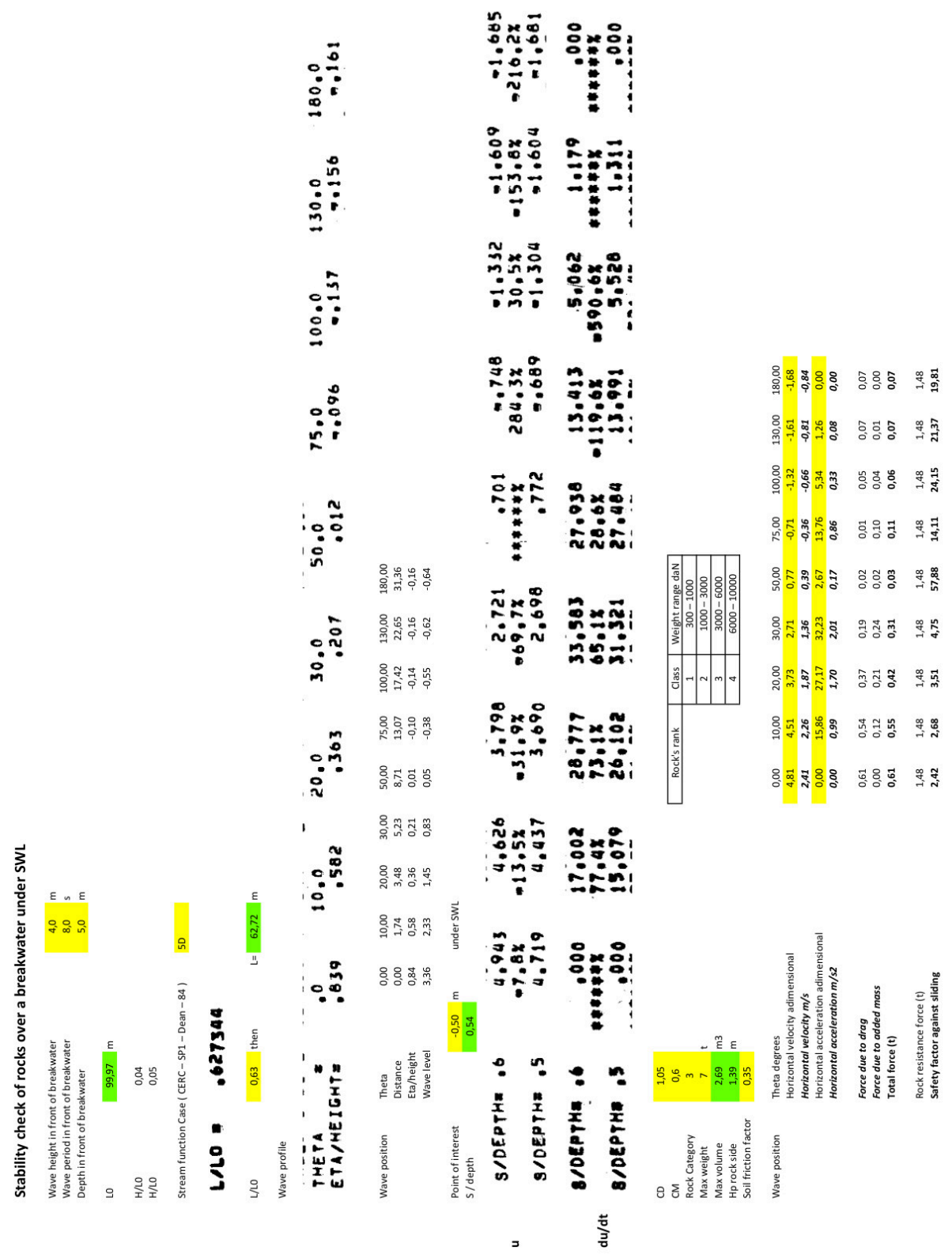


Figura 23 – Foglio di calcolo di verifica dei massi dell'opera rigida di progettoeseguita utilizzando la teoria di Morrison con le onde "stream" calcolate da Dean (CERC-SR-1)