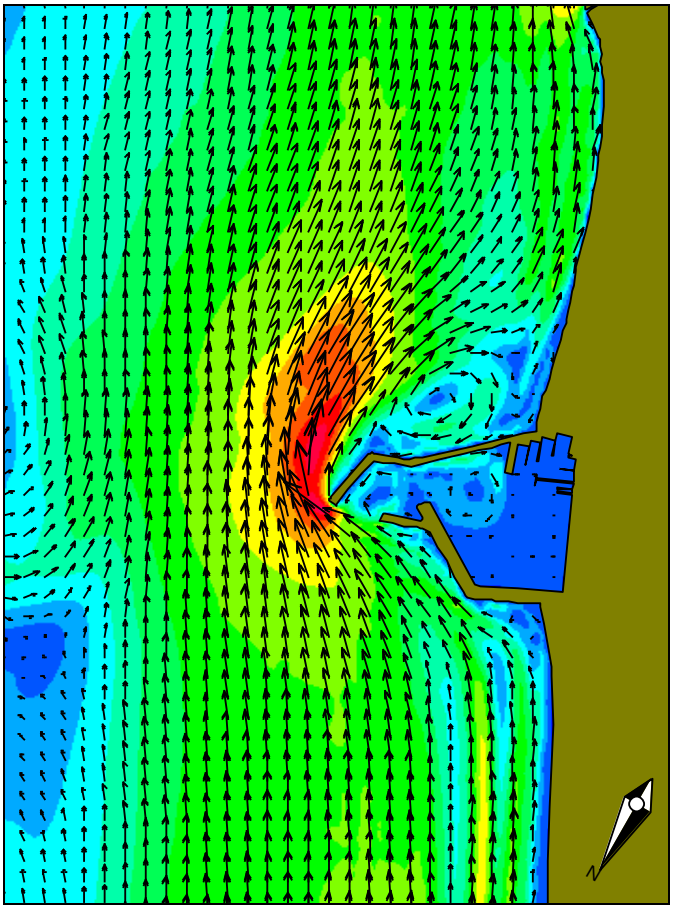
INTECNO-DHI WATER & ENVIRONMENT

MED INGEGNERIA

ENTE PORTO DI GIULIANOVA

ANALISI E STUDI A SUPPORTO DEL PIANO REGOLATORE PORTUALE DI GIULIANOVA



IMPATTO DELLE NUOVE OPERE SUI LITORALI ADIACENTI ED INTERRIMENTO DELL'IMBOCCATURA

DATA:	APRILE 2003	
COMMESSA:	MED-177-GIULIANOVA	
FILE:	MED177-ALL 6.doc	
REDAZIONE:	ING. PAOLO ATZENI	
REVISIONE:	ING. MARCO GONELLA	
APPROVAZIONE:	ING. MARCO GONELLA	

INDICE

1. Premessa 1

2. Scenari di modellizzazione 3

3. Propagazione locale del moto ondoso 5

3.1 Descrizione del modulo PMS del codice di calcolo MIKE 21 5

3.2 Griglia di calcolo 7

3.3 Dati di input 8

3.4 Risultati della propagazione locale 9

3.4.1 Situazione attuale 9
3.4.2 Layout A 14
3.4.3 Layout B 18
3.4.4 Layout C 22

4. Circolazione Idraulica 26

4.1 Descrizione del modulo HD del codice di calcolo MIKE 21 26

4.2 Applicazione del modulo HD del codice di calcolo MIKE21 30

4.2.1 Griglia di calcolo 30
4.2.2 Forzanti di input 30
4.2.3 Risultati del modello di circolazione idraulica 31
4.2.4 Verifica del layout A 42
4.2.5 Verifica del layout B 44
4.2.6 Verifica del layout C 48

4.3 Considerazioni sulla circolazione idraulica 56

5. Studio evolutivo dei litorali adiacenti e del fondale limitrofo al porto 63

5.1 Descrizione dei moduli LITDRIFT e LITLINE del codice di calcolo LITPACK 64

5.1.1 LITDRIFT 64
5.1.2 LITLINE 66

5.2 Analisi dell'evoluzione della linea di costa 67

5.3 Analisi degli scenari di intervento: evoluzione della linea di riva 72

5.4 Considerazioni sull'evoluzione dei litorali limitrofi 83

6. Trasporto solido nel campo bidimensionale 84

6.1 Scelta delle onde di simulazione 85

6.2 Applicazione del MIKE21 PMS per il calcolo della propagazione dei sei eventi 88

6.2.1 PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO LAYOUT ATTUALE 89
6.2.2 PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO LAYOUT A 90
6.2.3 PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO LAYOUT B 92
6.2.4 PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO LAYOUT C 93

6.3 Circolazione idrodinamica indotta dai sei eventi ondosi 95

6.3.1 IDRODINAMICA LAYOUT ATTUALE 96
6.3.2 IDRODINAMICA LAYOUT A 97
6.3.3 IDRODINAMICA LAYOUT B 99
6.3.4 IDRODINAMICA LAYOUT C 100
6.4 Trasporto solido 102

6.5 Descrizione del MIKE21 ST 102

6.6 Applicazione del modulo ST 110

6.7 Griglie di calcolo 111

6.8 Analisi dei risultati della dinamica morfologica 112

6.8.1 LAYOUT 00 113
6.8.2 LAYOUT A 117
6.8.3 LAYOUT B 123
6.8.4 LAYOUT C 127

7. Integrazione alle verifiche modellistiche del layout del porto 131

7.1 Configurazione di progetto 131

7.2 Propagazione locale del moto ondoso 132

7.3 Circolazione idrodinamica indotta dai sei eventi ondosi 134

7.4 Trasporto solido 136

7.4.1 Risultati delle simulazioni 136
7.5 Evoluzione della linea di riva 139

8. Conclusioni 141

1. PREMESSA

Nell'ambito dello sviluppo del Piano Regolatore Portuale per il porto di Giulianova è stata avviata l'attività di verifica delle soluzioni proposte per l'amplia mento e la regolamentazione del porto. La verifica è stata affrontata dal raggruppamento temporaneo costituito da Intecno-DHI e da MED INGEGNERIA mediante l'ausilio della modellazione matematica. Essa rappresenta, attualmente, lo strumento più idoneo per lo studio di una vasta serie di fenomeni da tener in conto per la valutazione delle modificazioni indotte dall'inserimento di una nuova configurazione portuale.

Le ipotesi progettuali studiate sono quattro, ovvero una che è rappresentata dalla situazione attuale e tre che presentano le possibili alternative di sviluppo.

A partire dalle analisi delle forzanti meteomarine si è modificato il modello simulando l'inserimento di ognuna delle ipotesi di layout proposte per lo sviluppo del PRP e effettuando le stesse analisi fatte per la situazione attuale.

L'analisi è stata condotta per quattro diverse fenomenologie: dinamica costiera, agitazione interna, navigabilità dell'imboccatura e morfodinamica delle spiagge adiacenti al porto.

Per ognuno di questi elementi è stato utilizzato un differente codice di calcolo.

Il modello matematico utilizzato per la modellazione bidimensionale è il MIKE21 sviluppato dal *Danish Hydraulic Institute* che vanta una pluridecennale esperienza di applicazioni in tutto il mondo. Esso è basato sulla risoluzione alle differenze finite su griglia strutturata ed è costituito da differenti moduli che implementano le numerose equazioni che governano gran parte dei fenomeni idraulici riscontrabili in un determinato sistema marino. In questo studio sono stati utilizzati il PMS che calcola i campi di moto ondoso in presenza di strutture, l'HD che calcola i campi di velocità indotti dalle forzanti climatiche, l'ST che permette il calcolo della capacità di trasporto sedimentario in determinate condizioni di moto ondoso e di circolazione idraulica.

Per l'analisi della variazione delle linee di costa è stato invece applicato il codice LITPACK che, sempre sviluppato dal *Danish Hydraulic Institute,* permette di calcolare il trasporto litoraneo e quindi di valutare le possibili variazioni della linea di riva durante un determinato clima ondoso.

Lo studio ha dato delle precise indicazioni riguardo alle quattro ipotesi progettuali evidenziando i vantaggi e gli svantaggi di ognuno dei layout. Alla luce delle considerazioni fatte per tutti i layout è stata scelta una delle quatto configurazioni come quella ottimale per quanto riguarda i fattori principali della valutazione di tipo prettamente idraulico. Tali fattori possono essere riassunti in:

- impatto delle nuove opere sul litorale;
- sedimentazione;
- evoluzione dei litorali;

2. SCENARI DI MODELLIZZAZIONE

Sono stati proposti tre differenti layout progettuali per la pianificazione ed il futuro sviluppo del porto di Giulianova.

Gli obbiettivi principali dei tre lay-out sono la risoluzione di una serie di problematiche che insistono sul porto nello stato attuale.

Dal punto di vista prettamente idraulico marittimo, si ha il grosso problema dell'agitazione interna che attualmente limita l'utilizzo della maggior parte del banchinamento del molo sud e non permette l'ingresso in sicurezza delle imbarcazioni.

Un altro aspetto idraulico molto importante che si lega ad una problematica più di tipo ambientale è la circolazione interna che già attualmente risente di uno scarso ricambio idrico e pertanto, viste le prospettive di sviluppo ed ampliamento delle attività portuali, necessita di particolare attenzione.

Ultimo, ma non meno importante, anzi per alcuni aspetti più strategico, è l'aspetto di impatto sui litorali adiacenti che deve opportunamente essere preso in considerazione per conservare l'attuale equilibrio delle spiagge.

Una prima ipotesi di intervento è quella di realizzare un allungamento del molo sud in modo da proteggere l'imboccatura dal settore principale di traversia. Per semplicità di lettura si denomina tale layout con la lettera A.

Il secondo layout (denominato B) prevede invece l'allungamento del molo nord, aumentandone l'aggetto verso mare e chiudendo l'imboccatura con un braccio raccordato con una curva orientata verso Sud. Anche in questo modo si permette una schermatura delle ondazioni provenienti dal settore principale di traversia.

Un terzo layout, "C", prevede invece l'allungamento del molo nord e la risagomatura del molo sud in modo tale da non aumentare l'aggetto vero mare, ma realizzando un sistema di moli convergenti. con imboccatura orientata verso Nord-Est. In questo caso l'attenuazione del moto ondoso è garantita dalla espansione dell'avamporto e da un braccio di chiusura del bacino interno.

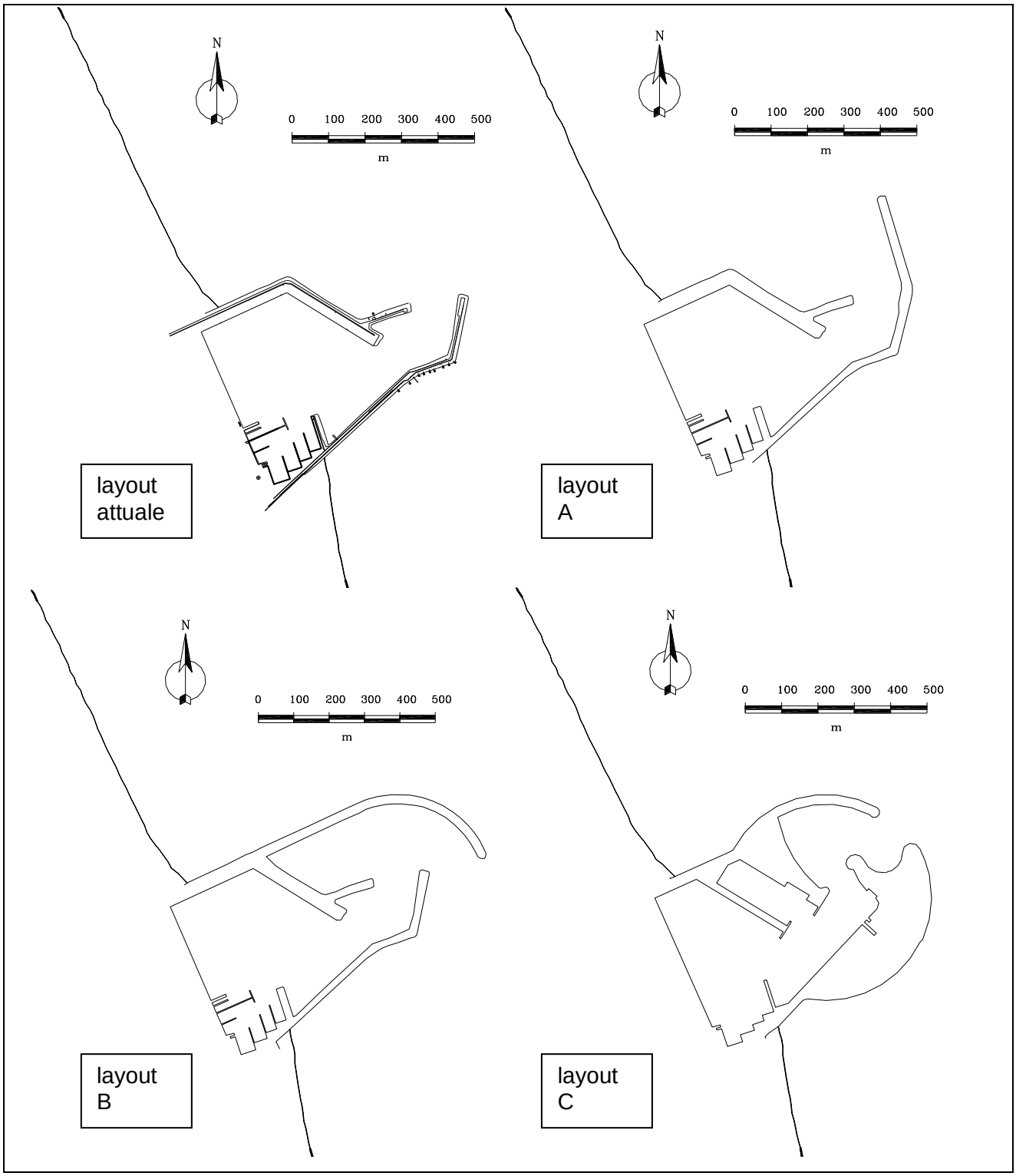


Figura 1 - Layout di progetto

3. PROPAGAZIONE LOCALE DEL MOTO ONDOSO

Il modello locale del moto ondoso è stato costruito con il codice MIKE 21 PMS (Parabolic Mild Slope Equation) che tiene conto dei fenomeni di rifrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento e diffrazione.

3.1 Descrizione del modulo PMS del codice di calcolo MIKE 21

Il modulo PMS è basato sull'approssimazione parabolica dell'equazione ellittica delle onde (Elliptic Mild Slope Equation) che consente di rappresentare i fenomeni di rifrazione, interazione con il fondo, diffrazione e riflessione per onde lineari che si propagano su un fondo con batimetria gradatamente variabile. L'approssimazione parabolica è ottenuta assumendo una direzione principale di propagazione dell'onda (direzione x) e trascurando i termini diffrattivo e di riflessione lungo tale direzione. Recenti miglioramenti alle equazioni di base consentono di rappresentare con l'approssimazione parabolica onde che si propagano con ampi angoli di incidenza rispetto alla direzione principale assunta per l'analisi. L'equazione parabolica è infine in grado di tenere conto, per mezzo della sovrapposizione lineare, della dispersione direzionale e di frequenza delle onde.

L'equazione parabolica risolta nel codice di calcolo è la seguente:

$$\frac{\partial A}{\partial x}+\frac{\sigma_1}{\omega c_g}\frac{\partial}{\partial y}\left(cc_g\frac{\partial A}{\partial y}\right)+\frac{\sigma_2}{\omega c_g}\frac{\partial^2}{\partial y\partial x}\left(cc_g\frac{\partial A}{\partial y}\right)$$
$$+\left[i(k_0-\beta_1 k)+\frac{1}{2c_g}\frac{\partial c_g}{\partial x}+\frac{W}{2c_g}\right]A=0$$

nella quale:

$$\sigma_1=i\left(\beta_2-\beta_3\frac{k_0}{k}\right)+\beta_3\left(\frac{1}{k^2}\frac{\partial k}{\partial x}+\frac{1}{2kc_g}\frac{\partial c_g}{\partial x}\right),$$
$$\sigma_2=-\frac{\beta_3}{k}$$

ed i simboli rappresentano le seguenti grandezze:

A(x, y): ampiezza dell'onda;
c: velocità di fase;
c_g: velocità di gruppo;
k: numero d'onda;
k_n: numero d'onda medio lungo la direzione y;
β_1, β_2, β_3: coefficienti dell'approssimazione parabolica;
ω: frequenza;
W: coefficiente complesso di dissipazione dell'energia per attrito sul fondo e frangimento;
i: unità immaginaria;
x, y: coordinate cartesiane.

Nel codice, per la soluzione numerica dell'equazione, sono implementate tre diverse tecniche di approssimazione basate sui differenti valori dei coefficienti di approssimazione β_1, β_2, β_3, rispondenti alle equazioni di Padé e di Kirby. La formulazione dell'attrito sul fondo è risolta con una legge quadratica, mentre il frangimento è basato sull'equazione di Battjes e Janssen.

L'equazione parabolica viene risolta con il metodo di Crank-Nicolson alle differenze finite, utilizzando griglie di calcolo rettangolari. Come per il modello NSW anche in PMS vengono calcolati gli sforzi tangenziali trasmessi dal moto ondoso, che vengono utilizzati come condizione forzante del modello idrodinamico. Le componenti degli sforzi tangenziali (radiation stress) sono calcolate con le seguenti formule ricavate sulla base della teoria lineare:

$S_{xx} = \frac{1}{2}\rho g m_o \left(G + \cos^2\theta(1+G)\right)$, per la componente normale della spinta dell'onda;

$S_{yy} = \frac{1}{2}\rho g m_o \left(G + sen^2\theta(1+G)\right)$, per la componente laterale della spinta dell'onda;

$S_{xy} = \frac{1}{2}\rho g m_o \left(sen2\theta\frac{1}{2}(1+G)\right)$, per la componente tangenziale della spinta dell'onda;

nelle quali:

$G = 2kh / senh(2kh)$;

$m_o = \frac{1}{16} H_s^2$, momento di ordine zero dello spettro di energia.

I gradienti dei termini S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} rientrano nelle equazioni di conservazione della quantità di moto del sistema di de St.Venant risolto dal modulo idrodinamico.

3.2 Griglia di calcolo

La griglia di calcolo messa a punto per il modello di propagazione locale del moto ondoso è costituita da 600 celle nella direzione x e 840 celle lungo la direzione y per un totale di 504'000 celle. L'origine degli assi è nel punto di coordinate UTM33 e= 417061.87, n= 4736334.45 e l'asse y è orientato di 150°N.

La dimensione delle maglie della griglia è stata scelta in funzione della necessità di discretizzazione della geometria delle opere, in funzione della possibilità di discretizzare la lunghezza d'onda al frangimento con almeno 5 o 7 punti per lunghezza d'onda. Considerando onde di altezza minima di circa 1 metro si hanno lunghezze dell'ordine dei 20÷30 m che possono essere correttamente implementate nel modello.

Per l'esecuzione delle simulazioni sono state impostate 4 differenti griglie di calcolo in cui ognuna rappresenta un differente layout proposto per la sistemazione del porto. Sostanzialmente vengono cambiati i contorni geometrici del porto e le batimetrie dell'interno.

3.3 Dati di input

Le simulazioni sono effettuate in riferimento a 6 onde tipiche, scelte in base all'analisi del flusso di energia long-shore, definito con le formulazioni dello Shore Protection Manual per le condizioni di frangimento.

Le onde di input sono state impostate in prima analisi come onde monocromatiche in modo da poter mettere in evidenza gli effetti di diffrazione prodotti dalle opere a mare, quindi al fine di calcolare i campi di radiation stress e le condizioni di livello e portata da impostare sul modello idrodinamico, sono state considerate onde irregolari e direzionali sulla base di uno spettro di tipo JONSWAP con una dispersione angolare di 30° parametri di forma γ pari a 3.3, σ_a pari a 0.07 e σ_b paria a 0.09.

La scelta delle sei onde è fatta considerando il flusso energetico netto lungo riva di tutto il clima, quindi scegliendo da tutta la rosa onde provenienti da differenti direzioni principali il cui flusso netto sia equivalente al flusso di tutto il clima.

	Onde a LARGO				***Onde SOTTOCOSTA (-10m)***				
	Hs	Tm	L0	MWD	Hs	Tm	Tp	L	MWD
A	2.25	5.50	55.5	0	2.23	5.50	6.0	47.9	0.4
B	4.25	8.50	160.7	0	3.42	8.50	9.3	93.9	10.6
C	3.75	7.50	125.1	20	2.69	7.50	8.2	81.3	38.7
D	1.75	7.50	125.1	90	1.49	7.50	8.2	81.2	83.1
E	1.75	8.50	160.7	120	1.43	8.50	9.3	93.9	106.1
F	1.75	8.50	160.7	140	1.43	8.50	9.3	93.9	119.3

Tabella 1 – Onde di input per il modello di propagazione locale del moto ondoso e per il modello di circolazione idraulica

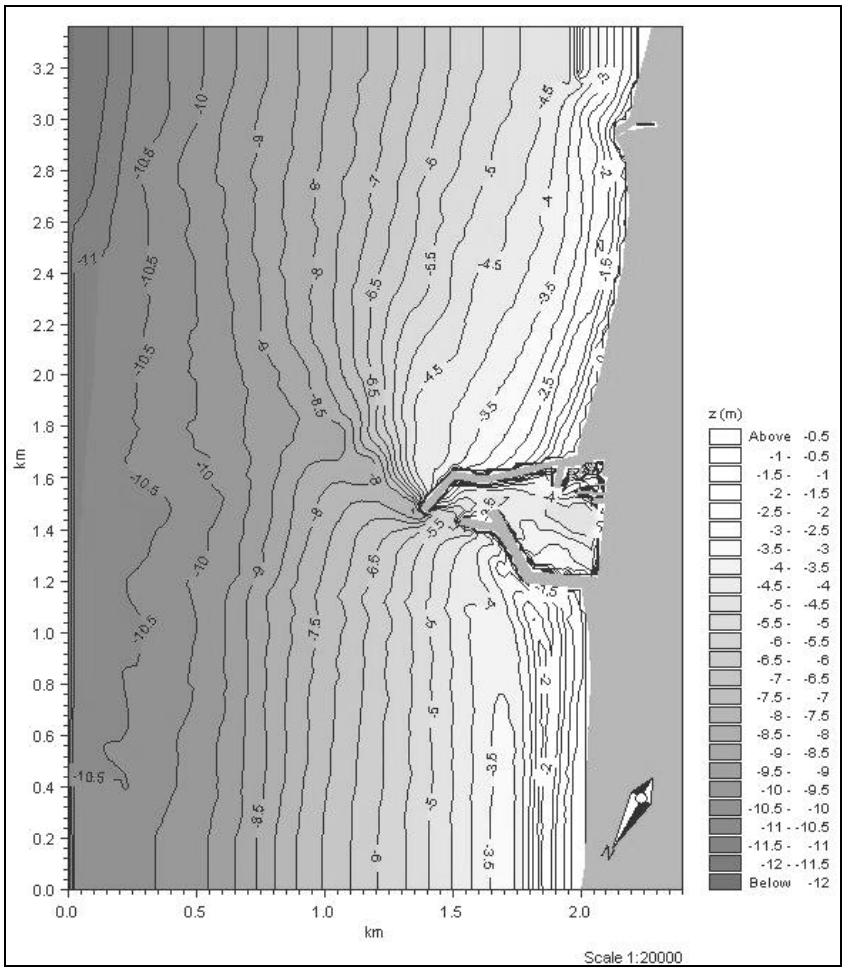


Figura 2 – Batimetria del modello di traslazione delle onde sottocosta per il layout attuale.

3.4 Risultati della propagazione locale

La propagazione locale del moto ondoso, fatta con onde di input monocromatiche, mette in evidenza le trasformazioni che l'onda assume per effetto delle caratteristiche del fondale e per effetto della presenza delle opere foranee. Con l'approssimarsi alla spiaggia si nota innanzitutto la tendenza dei fronti d'onda a disporsi parallelamente alla riva, facendo ruotare la loro direzione di provenienza verso la normale alla linea di costa.

3.4.1 Situazione attuale

Dall'osservazione delle simulazioni fatte con il porto attuale si nota come il molo sud, in presenza di eventi ondosi provenienti dal primo quadrante determini un evidente cono d'ombra.

Tale situazione può far presumere (come poi è stato verificato con il modello di circolazione idraulica) che, in caso di ondazioni dal I quadrante, si hanno condizioni di setup molto deboli a ridosso del molo sud, mentre si hanno dei livelli di setup maggiori al di fuori del cono d'ombra del molo.

Questo fenomeno determina molto probabilmente delle correnti dovute alla pendenza motrice locale che vanno ad interagire con le correnti più esterne indotte dal moto ondoso.

Le ondazioni provenienti dal II quadrante, a causa dell'aggetto del molo sud, vengono diffratte dalla stessa testata del molo determinando un cono d'ombra, di dimensioni minori rispetto a quello che si ha a Sud con le mareggiate dal I quadrante.

A questo si aggiunga che, mediamente, le ondazioni dal II quadrante hanno lunghezze e periodi maggiori, pertanto i fenomeni diffrattivi sono più marcati. In sostanza l'ostacolo viene aggirato di più.

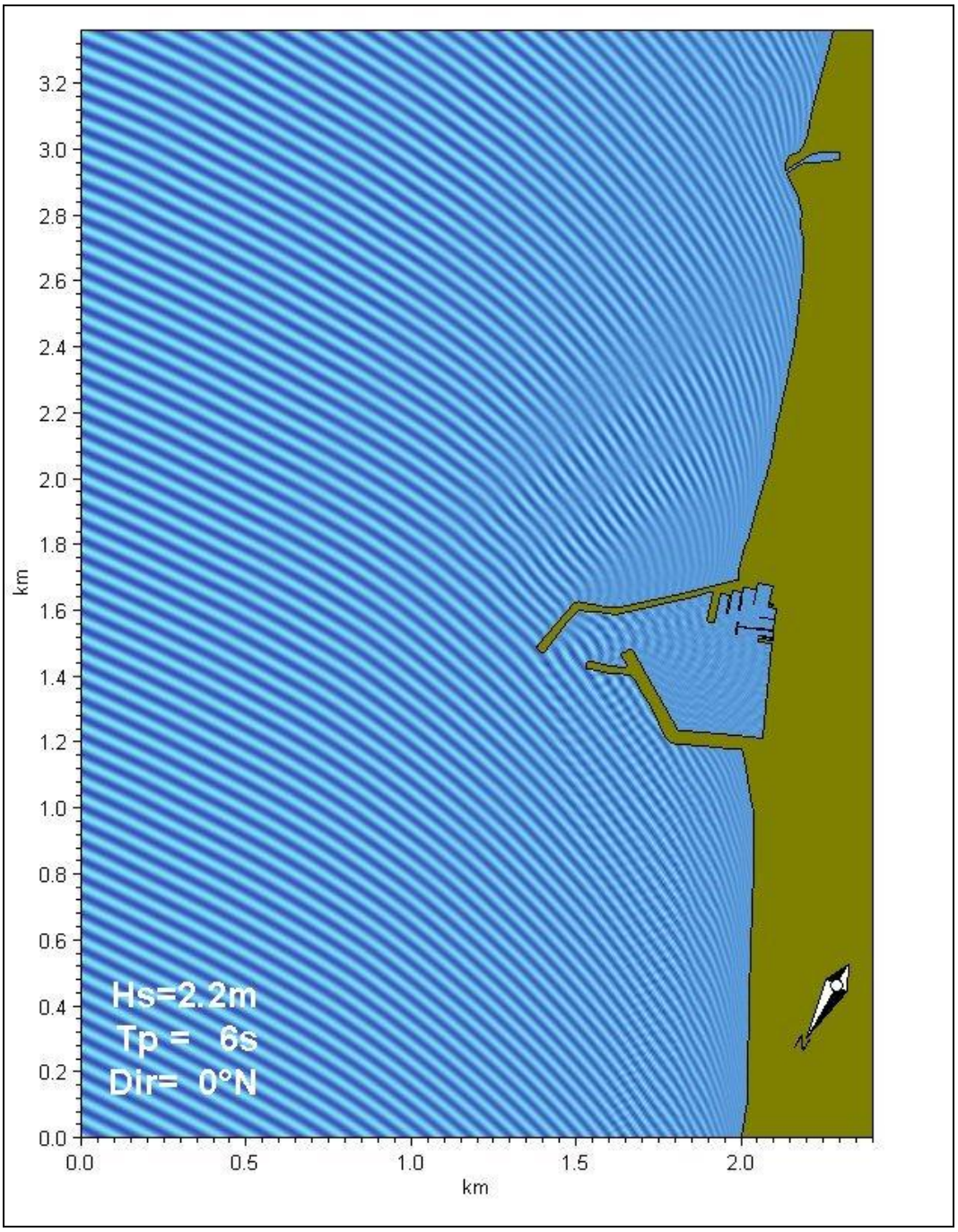


Figura 3 – Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =2.2 m, Tp=6 s, Dir=0°N con il porto in condizioni attuali

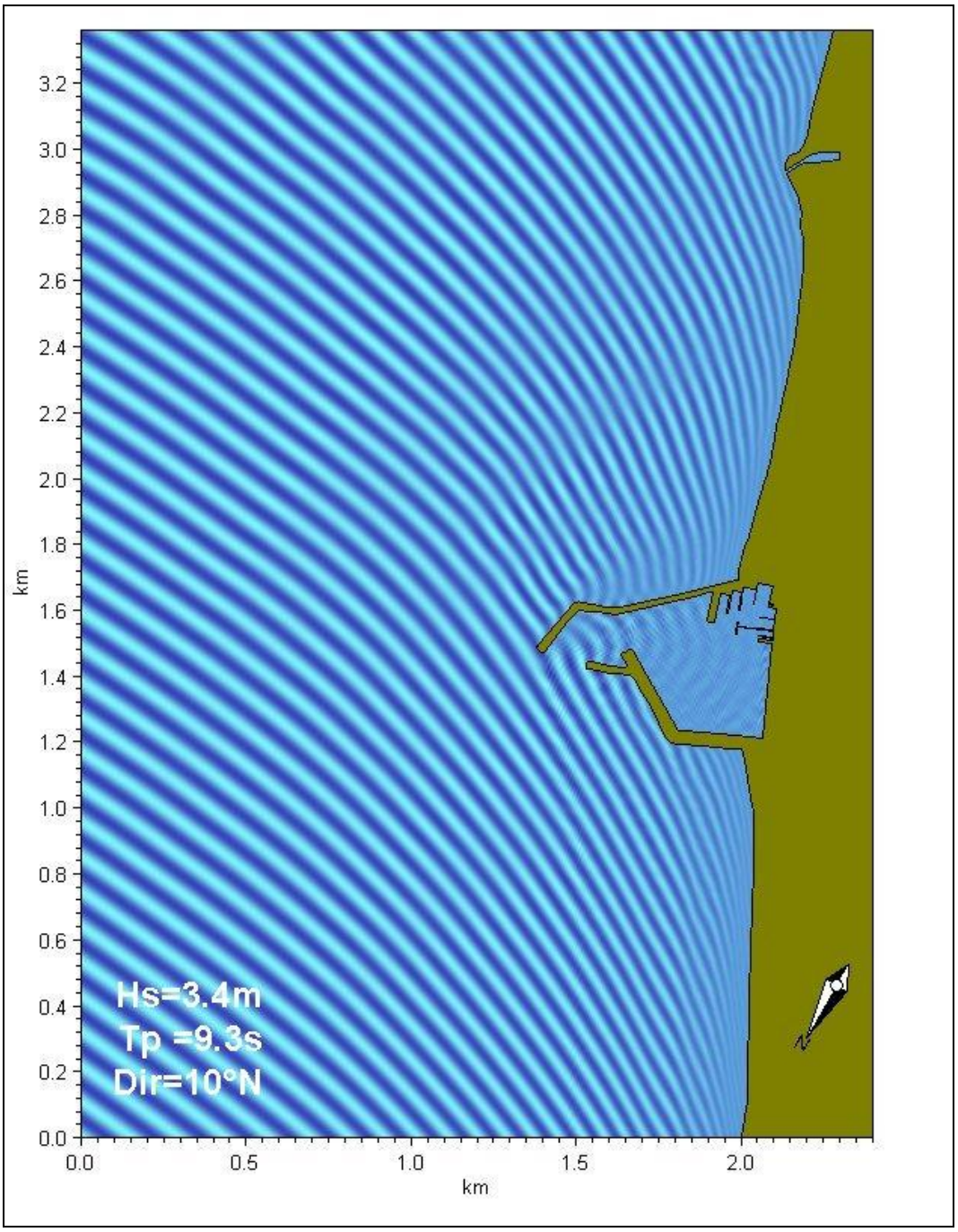


Figura 4 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =3.4 m, Tp=9.3 s, Dir=10°N con il porto in condizioni attuali

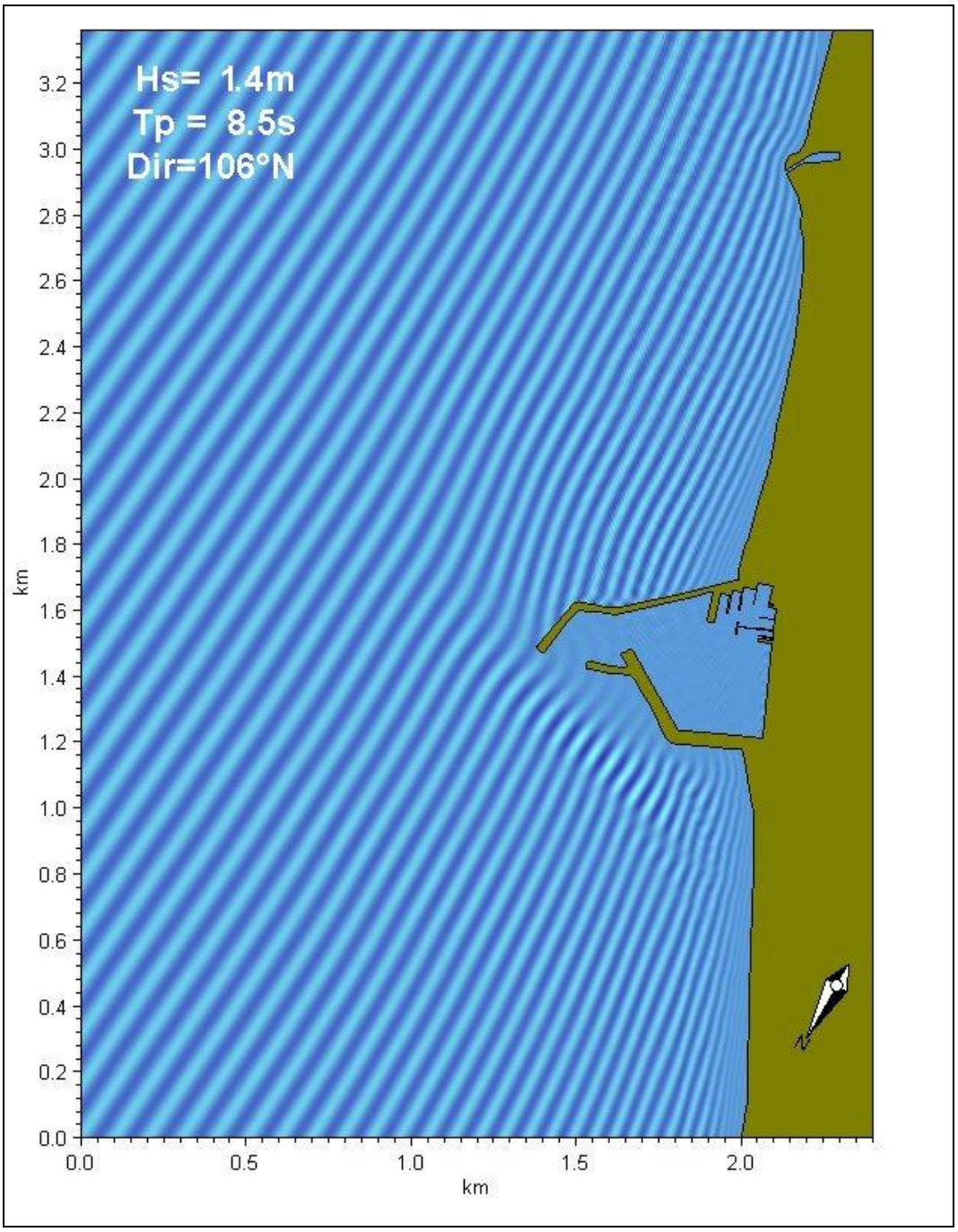


Figura 5 – Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =1.4 m, Tp=8.5 s, Dir=106°N con il porto in condizioni attuali

Si noti anche che le mareggiate del I quadrante sono in grado di penetrare all'interno del porto rendendo praticamente inutilizzabile la banchina del molo sud.

3.4.2 Layout A

Con il layout A si nota un comportamento analogo del moto ondoso a ridosso del molo sud, mentre il versante nord presenta un cono di diffrazione leggermente maggiore, tuttavia l'influenza del prolungamento del molo sud è limitata alla sola zona di avamporto, si nota infatti che a ridosso del molo nord le ondazioni sono dello stesso ordine di grandezza sia nel caso del porto attuale che nel caso del layout A.

La penetrazione del moto ondoso rispetto al layout 0 è notevolmente ridotta grazie alla nuova opera di difesa. Preme ricordare che comunque il codice di calcolo PMS non permette di simulare la riflessione delle onde pertanto, per quanto riguarda l'agitazione interna si rimanda alla verifica dei layout con il modello di agitazione interna.

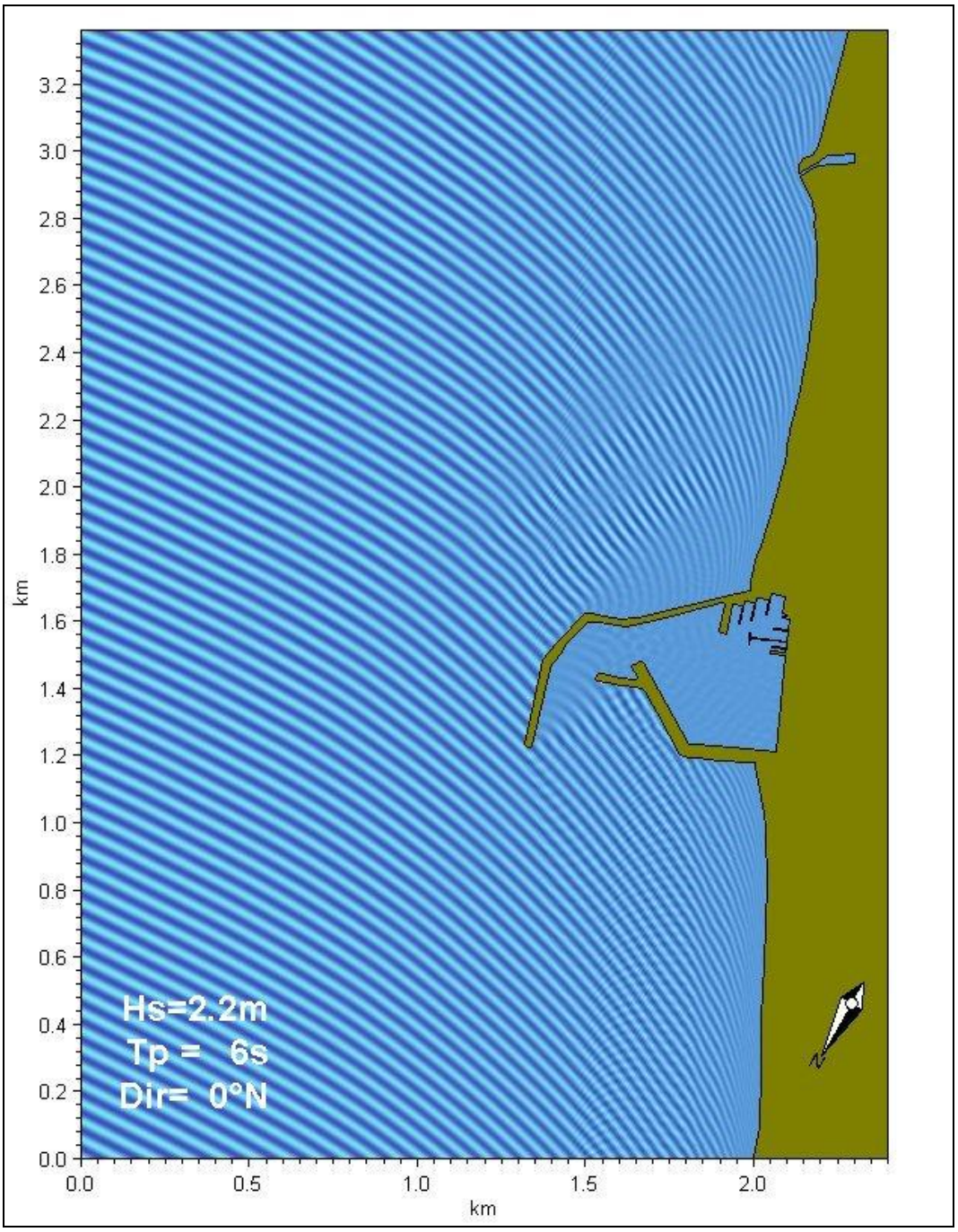


Figura 6 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =2.3 m, Tp=6 s, Dir=0°N con il layout A

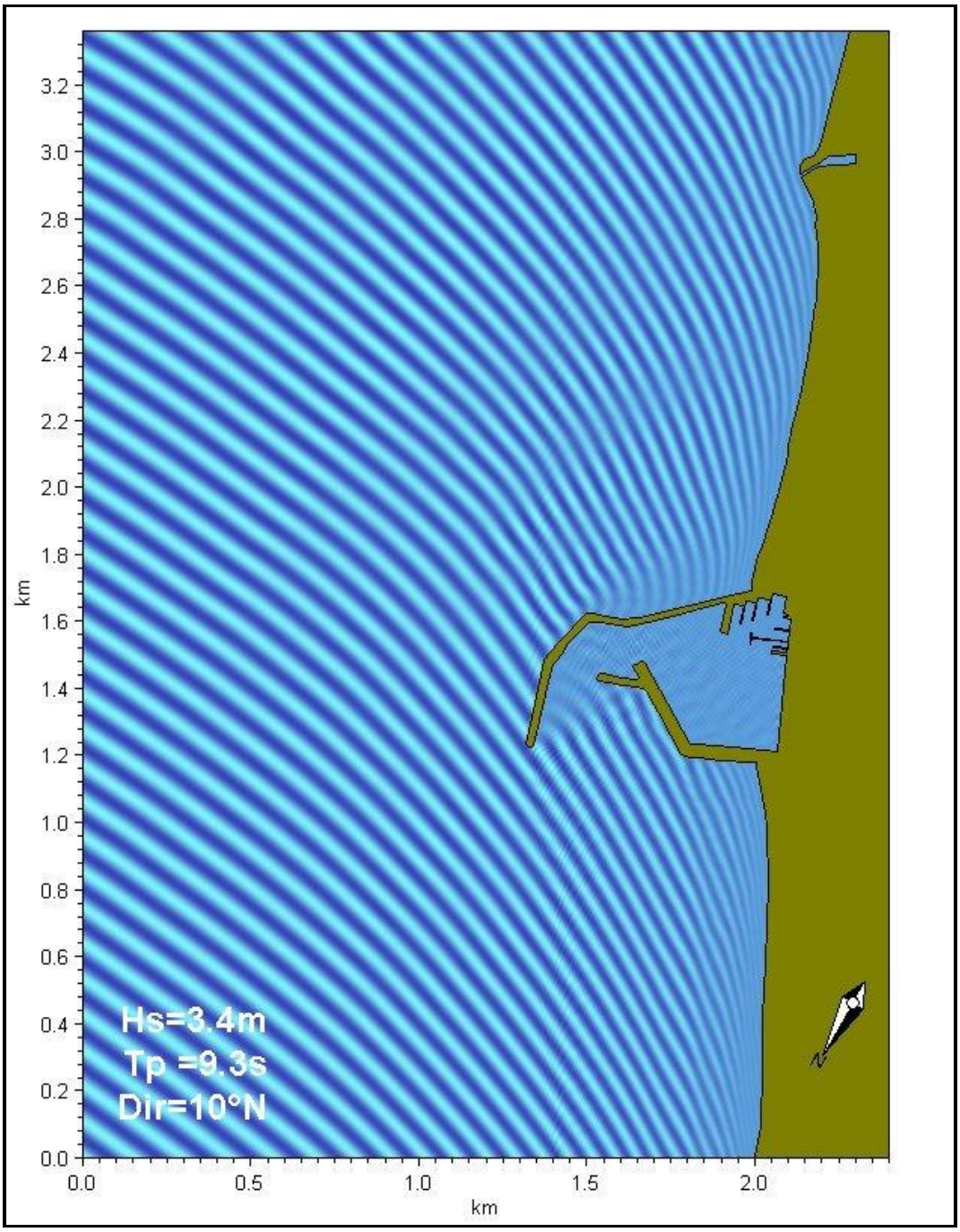


Figura 7 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =3.4 m, Tp=9.3 s, Dir=10°N con il layout A

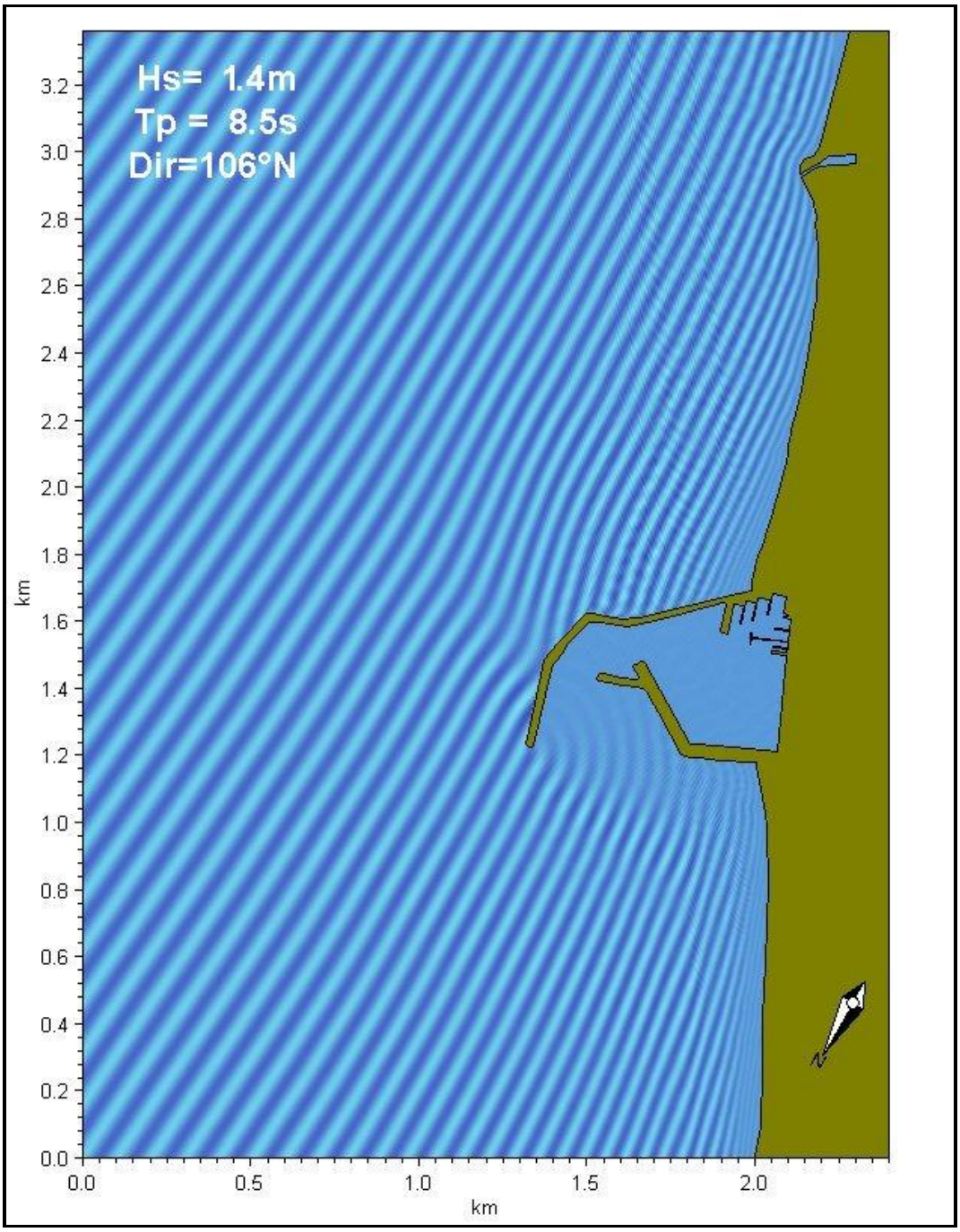


Figura 8 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =1.4 m, Tp=8.5 s, Dir=106°N con il layout A

3.4.3 Layout B

Il layout B si presenta decisamente come un'opera più impattante nei confronti dei litorali in quanto l'aggetto dell'opera nord determina un cono diffrattivo maggiore rispetto alla situazione attuale e con il molo sud allungato. Questo fenomeno è molto evidente per le ondazioni del I quadrante, in particolare quelle con direzione media di propagazione prossima al Nord.

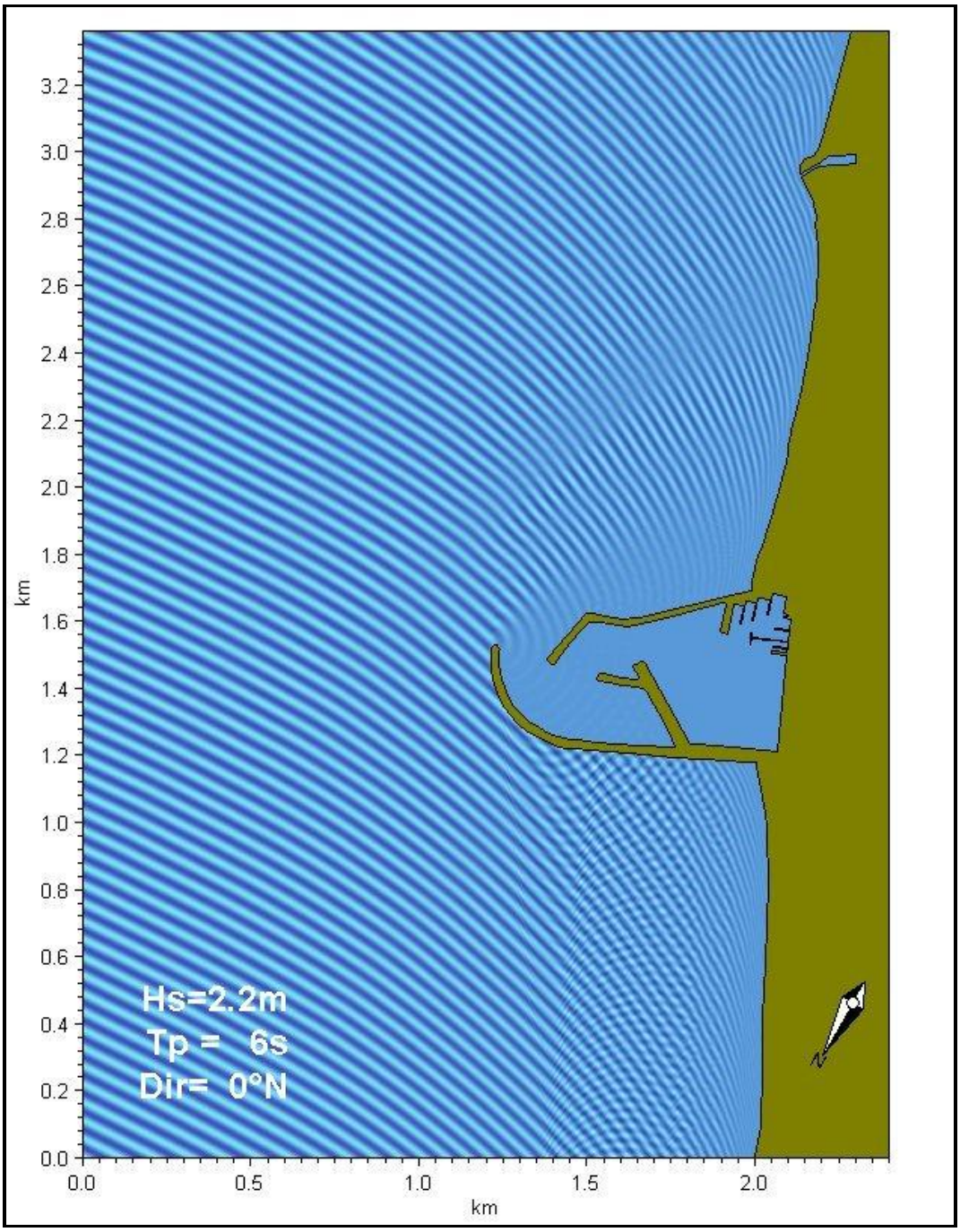


Figura 9 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =2.2 m, Tp=6 s, Dir=0°N con il layout B

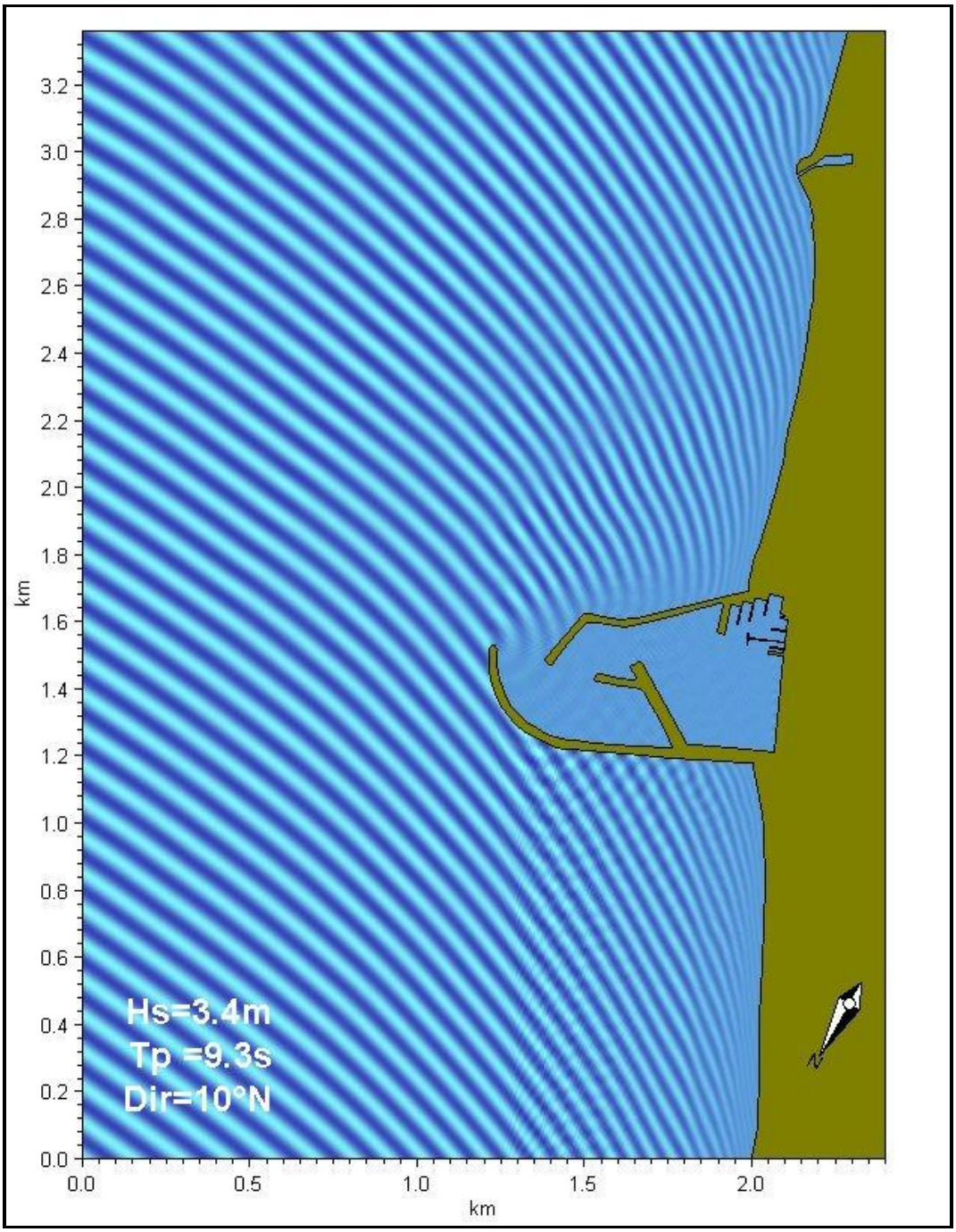


Figura 10 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =3.4 m, Tp=9.3 s, Dir=10°N con il layout B

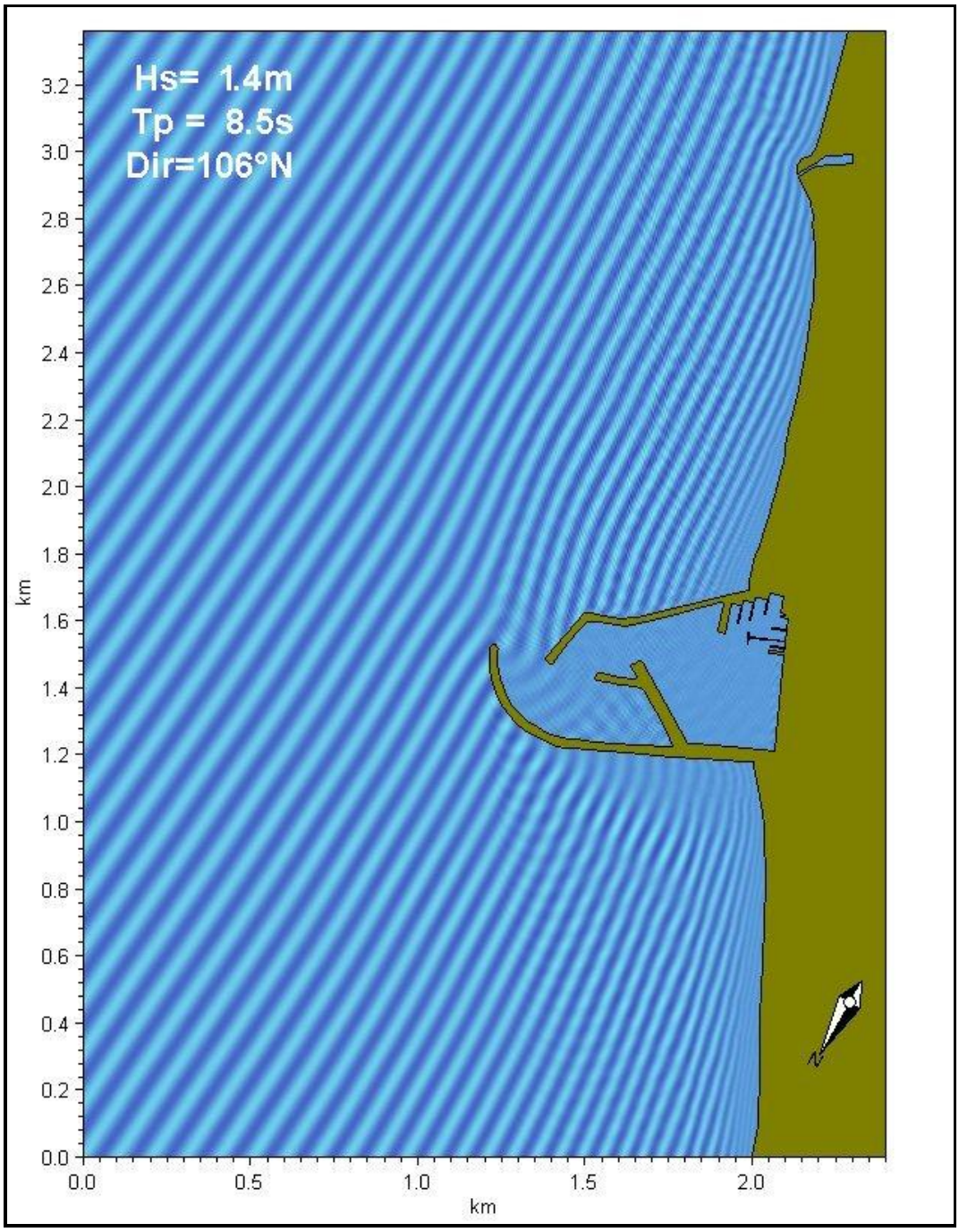


Figura 11 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =1.4 m, Tp=8.5 s, Dir=106°N con il layout B

Per quanto riguarda la penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino portuale si nota come questa interessi solamente l'avamporto mentre rimane praticamente calma la zona più interna.

3.4.4 Layout C

Osservando i fenomeni di diffrazione delle onde del primo quadrante indotti dalle strutture del layout C si nota come questi siano molto simili alle gli effetti determinati dal layout attuale. Il cono diffrattivo presente nell'area sud infatti ha un'estensione di circa 400 m, tuttavia grazie alla forma arrotondata dell'opera di difesa esterna si ha un graduale accompagnamento delle onde verso riva.

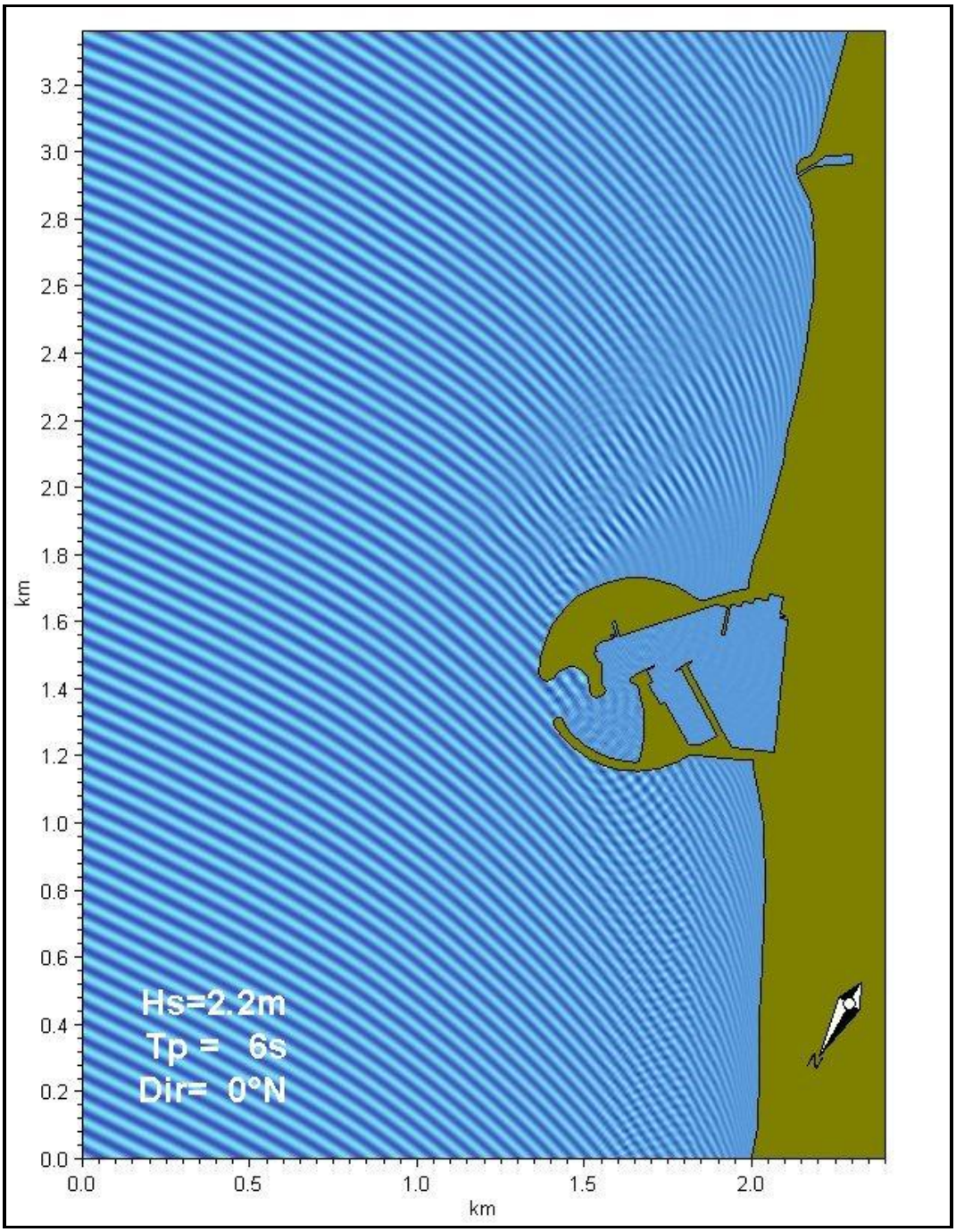


Figura 12 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =2.2 m, Tp=6 s, Dir=0°N con il layout C

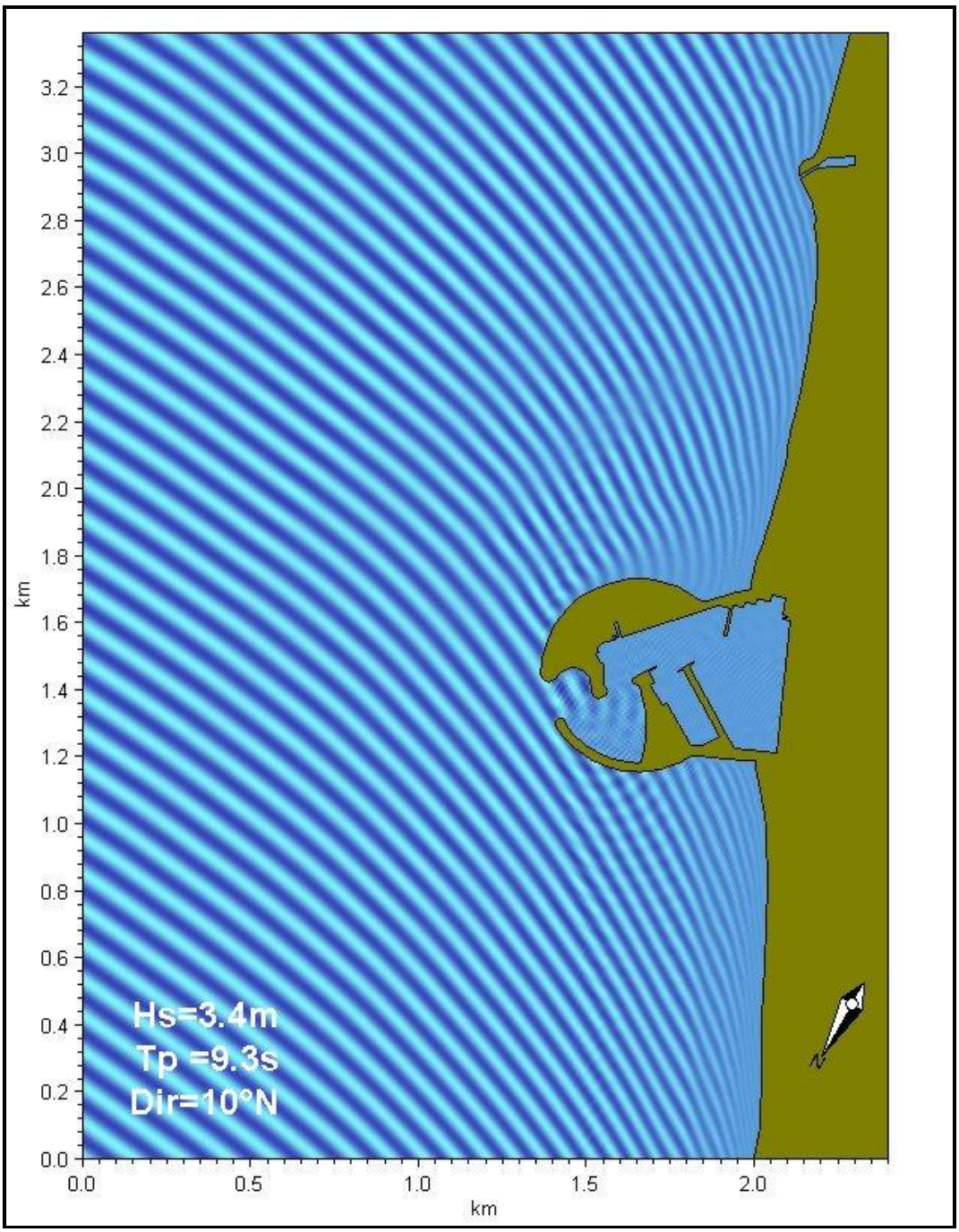


Figura 13 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =3.4 m, Tp=9.3 s, Dir=10°N con il layout C

Tale fenomeno permette un minor gradiente di livello di set up tra la zona più lontana e la zona più prossima alla radice del molo, pertanto la formazione di correnti di ritorno meno accentuate.

I fenomeni di penetrazione ondosa all'interno sono molto attenuati, ma data la particolare geometria dell'imboccatura il modello PMS non consente di mettere in evidenza i fenomeni di riflessione parziale che si ritiene siamo molto importanti per questo layout.

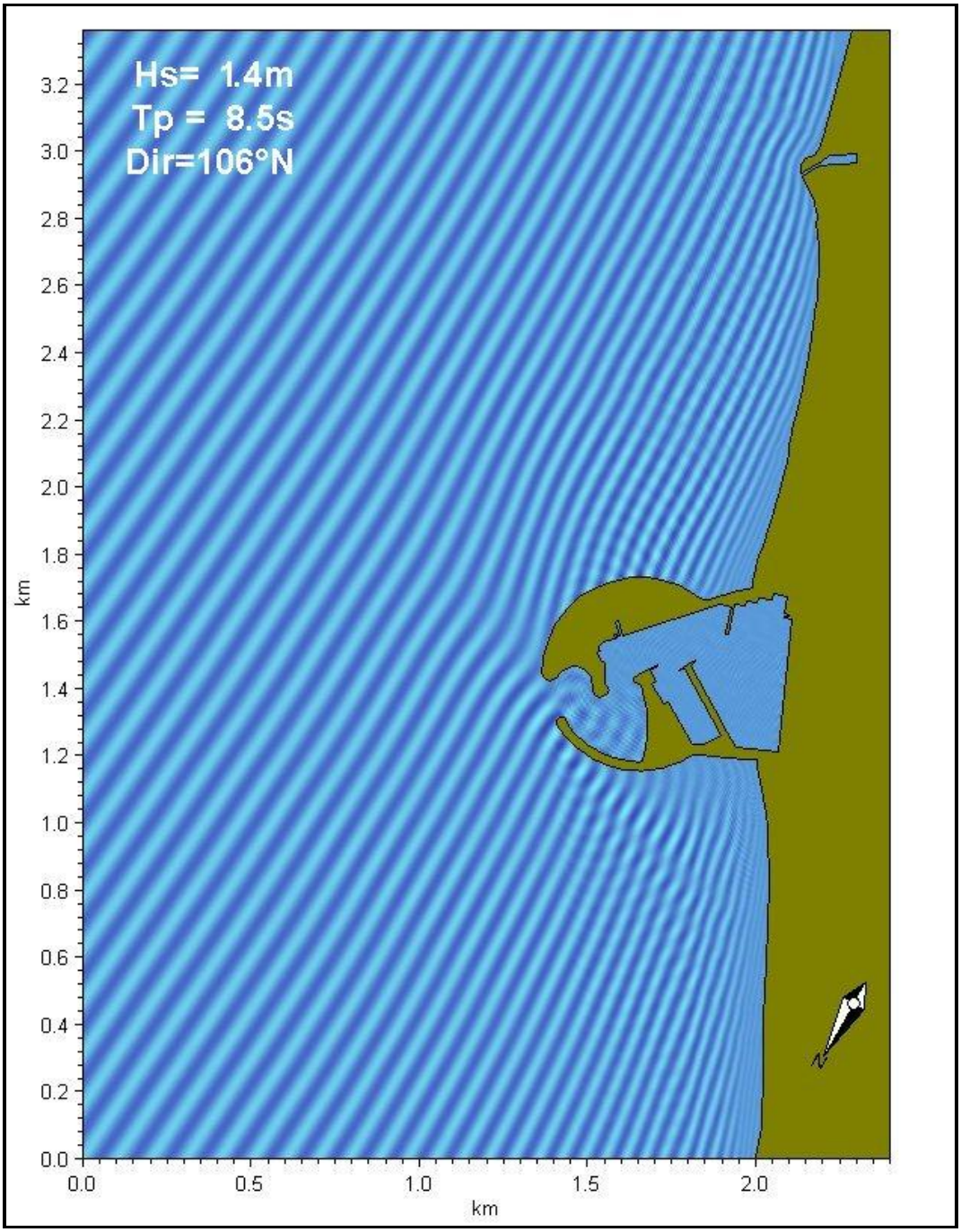


Figura 14 - Campo di moto ondoso ottenuto con il PMS per un'onda di Hs =1.4 m, Tp=8.5 s, Dir=106°N con il layout B

Anche con le onde provenienti dal II quadrante non si hanno effetti di particolare rilievo.

4. CIRCOLAZIONE IDRAULICA

Il modello di circolazione idraulica è stato costruito con il codice di calcolo MIKE 21 HD (HydroDynamic Module) che permette, di calcolare le correnti costiere indotte dalle forzanti meteomarine come il moto ondoso, il vento ed eventuali immissioni di portata, ad esempio attraverso un corso d'acqua.

4.1 Descrizione del modulo HD del codice di calcolo MIKE 21

Il modulo idrodinamico HD del modello MIKE 21 risolve le equazioni complete del moto di de St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema di de St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right) + gh\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}$$
$$-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy})\right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial x}p_a$$
$$+\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y.

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}$$
$$-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{yy}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xy}\right)\right]-\Omega p-fVV_y+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial y}p_a$$
$$+\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}\right)$$

nelle quali:

h(x,y,t)	=	profondità dell'acqua;
ζ(x,y,t)	=	quota del pelo libero;
p,q(x,y,t)	=	portate unitarie nelle direzioni x e y;
C(x,y)	=	coefficiente di scabrezza di Chezy;
g	=	accelerazione di gravità;
f(V)	=	fattore d'attrito del vento;
$V,V_x,V_y(x,y,t)$	=	velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;
Ω(x,y)	=	parametro di Coriolis;
p_a (x,y,t)	=	pressione atmosferica;
ρ_w	=	densità dell'acqua;
x,y	=	coordinate spaziali;
t	=	tempo;
$\tau_{xx},\tau_{xy},\tau_{yy}$	=	componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;
S_{xx},S_{xy},S_{yy}	=	componenti del radiation stress.

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y. La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(E\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(E\frac{\partial p}{\partial y}\right)$$ (nella direzione x);

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hE\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hE\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$ (nella direzione x);

tali due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_S^2\Delta^2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_S è una costante compresa tra 0.25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hE\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{2}hE\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right)$$

Il flusso attraverso la frontiera del modello e l'innalzamento del livello marino dovuti al moto ondoso vengono calcolati utilizzando le componenti di radiation stress ottenute a partire dai risultati del modello del moto ondoso.

La stima di tali grandezze viene effettuata risolvendo due equazioni di conservazione della quantità di moto, monodimensionali (in quanto sulla frontiera e quindi lungo una linea) e in condizioni stazionarie:

1. bilancio tra l'innalzamento del livello marino (wave setup) e le componenti del radiation stress:

$$\rho g h\frac{\partial s}{\partial x} = -\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right),$$

assumendo V_x=0, cioè che il flusso è ortogonale alla frontiera e l'onda incide normalmente rispetto alla linea di riva;

2. bilancio tra le forze di attrito sul fondo e le componenti di radiation stress:

$$\frac{\rho g V_y^2}{M^2 h^{\frac{1}{3}}} = -\left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right),$$

assumendo $\partial s / \partial y = 0$ e cioè che non ci siano variazioni della superficie del pelo libero nella direzione ortogonale a quella di propagazione del moto ondoso.

Nelle equazioni precedenti:

s = innalzamento del pelo libero;
h = profondità;
M = coefficiente di scabrezza secondo Manning.

Anche se la simulazione idrodinamica è variabile nel tempo il campo di sforzi tangenziali prodotti dal moto ondoso è assunto come stazionario, così come le condizioni al contorno da esso generate.

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria (m^3/s/m) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m^3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizioni iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" si verifica che la situazione ottenuta sia di effettiva stazionarietà.

Le equazioni del modello sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).

4.2 Applicazione del modulo HD del codice di calcolo MIKE21

4.2.1 Griglia di calcolo

La griglia di calcolo copre la stessa area di competenza del PMS, quindi si ha lo stesso orientamento dell'asse y rispetto al Nord e la stessa dimensione dei contorni. Per il modello idrodinamico tuttavia, al fine di ottimizzare i tempi di calcolo si è impostata una dimensione maggiore della maglia, utilizzando celle di 15 m di lato.

La griglia pertanto è costituita da 160 celle lungo la x e 225 celle lungo la y per un totale di 36'000 celle. Per la verifica dei quattro layout sono state costruite, così come fatto per il modello PMS, quattro differenti griglie in cui vengono modificate la geometria dei contorni planimetrici del porto e, laddove è previsto un dragaggio, della batimetria.

4.2.2 Forzanti di input

Le forzanti meteomarine implementate per le simulazioni sono costituite essenzialmente dal moto ondoso. Le onde prese in considerazione sono le stesse simulate con il modello di propagazione locale e sono state estratte dalla serie completa delle onde trasferite da largo verso riva.

Le caratteristiche delle ondazioni prese in considerazione sono riportate nella Tabella 1.

Per quanto riguarda il possibile afflusso di portata da parte dei due corsi d'acqua limitrofi (Torrente Salinello e Torrente Tordino) si ritiene, anche per esperienze pregresse, che tali portate influiscano in maniera trascurabile sulla circolazione globale indotta dalle onde, pertanto esse non vengono implementate nel modello.

Le condizioni di moto ondoso vengono simulate impostando due tipi di condizione: una sui contorni e una all'interno del dominio di calcolo. Le condizioni al contorno sono rappresentate, in termini di livello e di portata e vengono calcolate dai campi di radiation stress che si ottengono con il modello PMS utilizzando un'onda direzionale e irregolare. Generalmente si impone una condizione di livello nel contorno di valle ed una condizione di portata nel contorno di monte, considerando il flusso diretto come la direzione principale di propagazione dell'onda.

4.2.3 Risultati del modello di circolazione idraulica

In prima analisi sono state effettuate le simulazioni con il porto nelle condizioni attuali in modo da poter determinare qual è la dinamica del litorale e la sua interazione con le strutture portuali.

Come si nota dal campo della velocità con un'onda proveniente da Nord (Figura 15) vi è la formazione di una corrente litoranea da Nord verso Sud che si sviluppa per una larghezza di circa 700÷800 m con velocità massime dell'ordine dei 0.7 m/s.

Tale corrente incontra il molo nord del porto deviando la sua direzione per contornare il molo nord e attraversare la bocca del porto e proseguire lambendo la testata del molo sud. Da qui la corrente, a causa della sua inclinazione, determina la formazione di un vortice anticiclonico a ridosso del molo sud. Come anticipato in precedenza con la descrizione dei risultati del modello di propagazione del moto ondoso, vi è, a causa della differenza di livello, la formazione di una corrente di pendenza che va dalla spiaggia sud verso la radice del molo sud. Tale corrente alimenta il vortice precedentemente descritto. La corrente principale si ridispone parallelamente a riva con direzione verso Sud solamente a circa 300 dalla radice del molo. Si può quindi evidenziare che la formazione di tale vortice interessa una zona abbastanza ampia e con tale vortice si può individuare una delle cause dell'accumulo di sedimenti nella spiaggia meridionale.

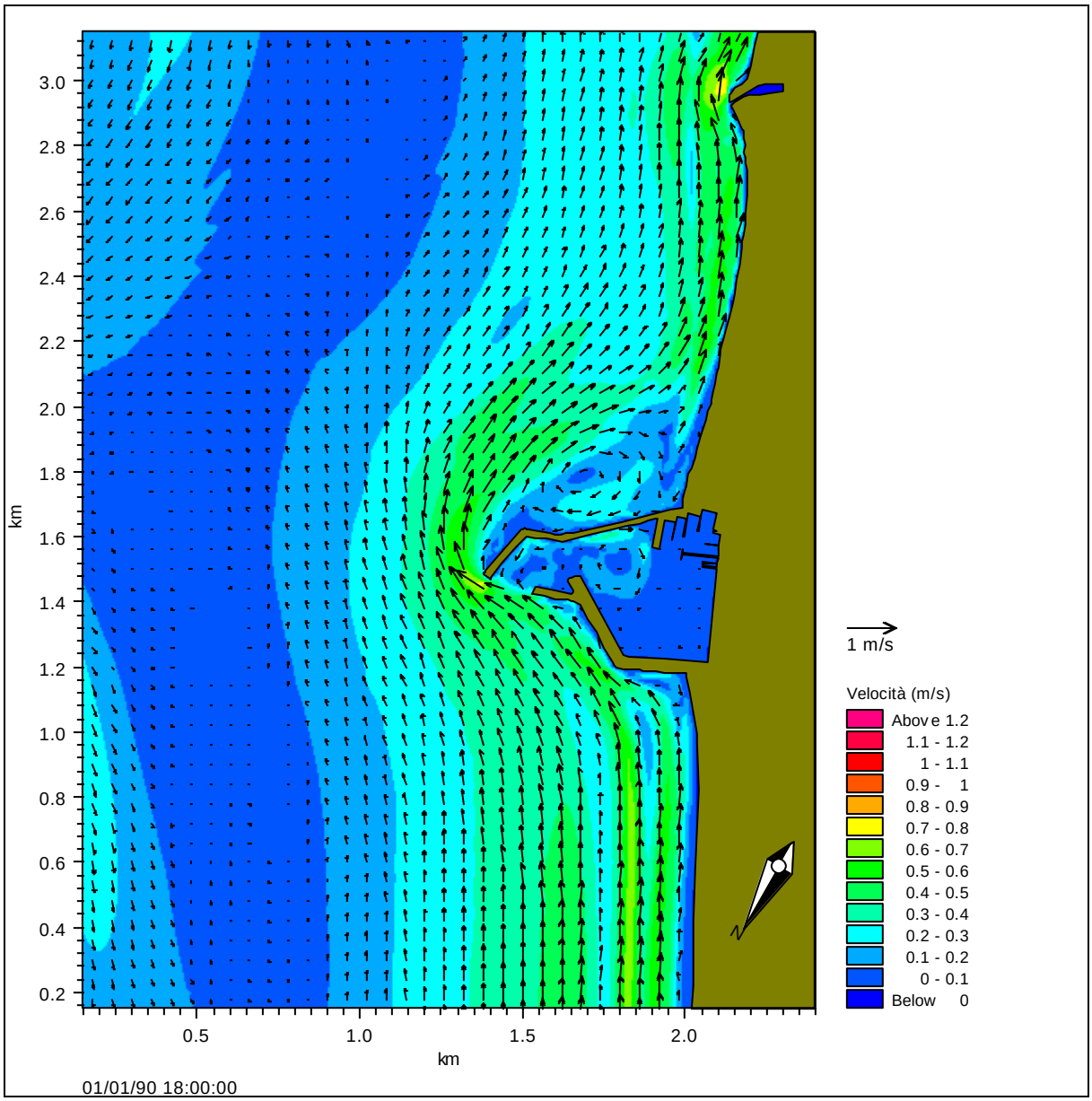


Figura 15 – Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 2.23 m periodo di picco di 6 s e direzione media di propagazione 0°N con il porto in condizioni attuali

Per quanto riguarda l'imboccatura del porto e le correnti che interagiscono con essa durante tale condizione ondosa si nota che vi è una leggera ingressione all'interno del porto bilanciata comunque da una piccola corrente in uscita. Tali correnti sono dell'ordine di poche decine di centimetri al secondo pertanto non si può considerare tale situazione causa di eventuali insabbiamenti dell'imboccatura.

Il fenomeno è tipicamente noto come by-pass in quanto la corrente esterna non viene deviata in maniera sostanziale all'interno del porto, ma anzi, oltrepassa la bocca quasi completamente. Dal

punto di vista del bilancio sedimentario tale fenomeno è un grande vantaggio in quanto rende l'opera marittima quasi neutra dal punto di vista dell'impatto sulla dinamica costiera.

Le cause di tale fenomeno possono essere ricondotte sia alla presenza del canyon sottomarino, che in parte è stato generato dalla presenza del molo sud sia alla geometria della opere foranee che permettono tale tipo di passaggio.

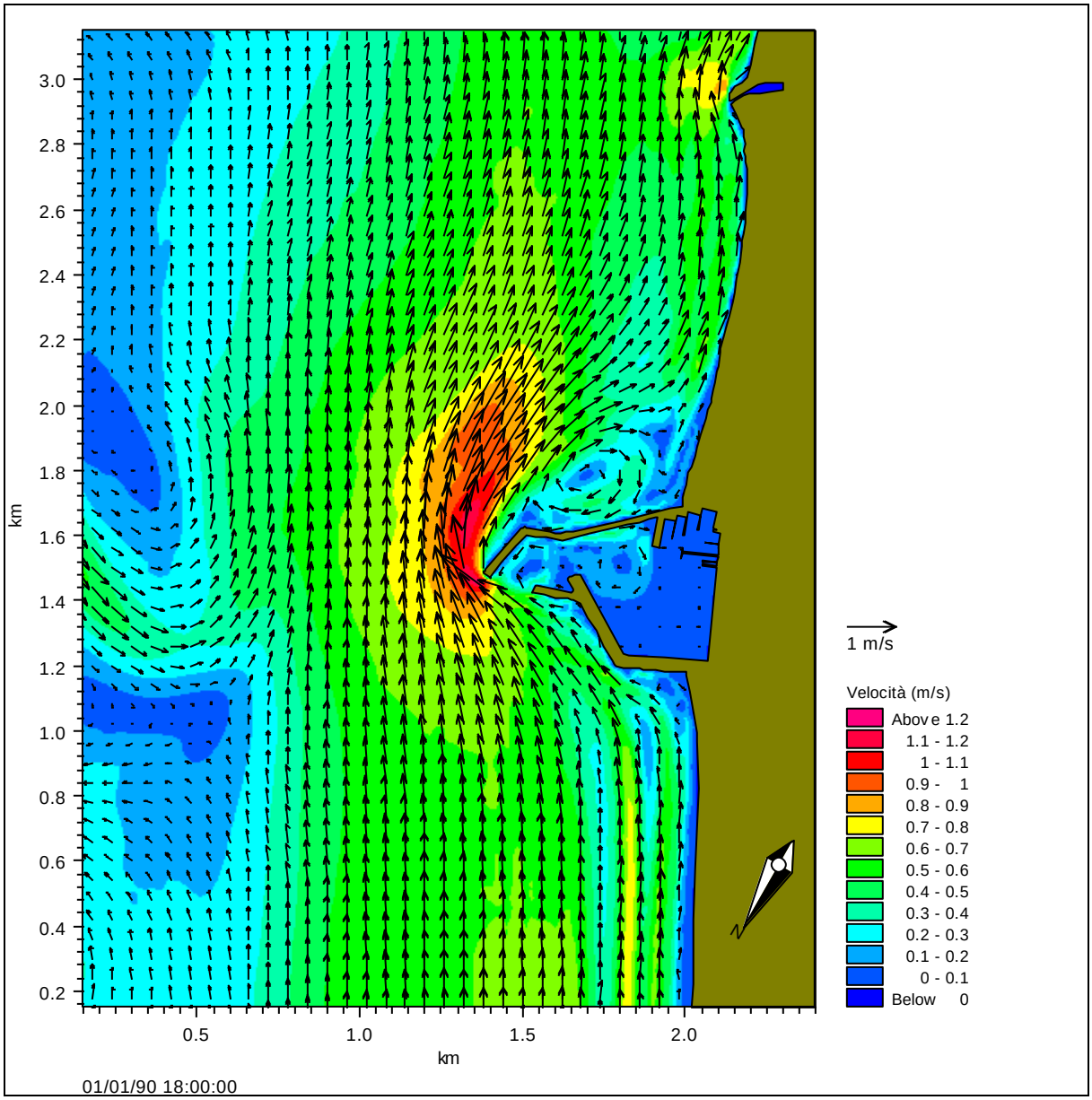


Figura 16 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 3.42 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 10°N con il porto in condizioni attuali

Anche con l'onda con altezza significativa maggiore e con direzione leggermente più inclinata rispetto alla riva (Hs = 3.4 m Tp= 9.3 s dir= 10°N) si ha lo stesso tipo di dinamica costiera rilevata con l'onda precedente. Si noti però che, vista l'entità dell'onda, le velocità massime, in particolare in corrispondenza della testata del molo sud, sono decisamente maggiori con punte dell'ordine del metro al secondo.

A ridosso del molo sud vi è sempre la formazione del vortice anticiclonico con l'evidenza di un punto di ristagno tra il secondo ed il terzo segmento del molo stesso.

I prossimità dell'imboccatura la corrente va da una parte all'altra dei moli con velocità dell'ordine di 0.7 m/s by-passando l'entrata del porto.

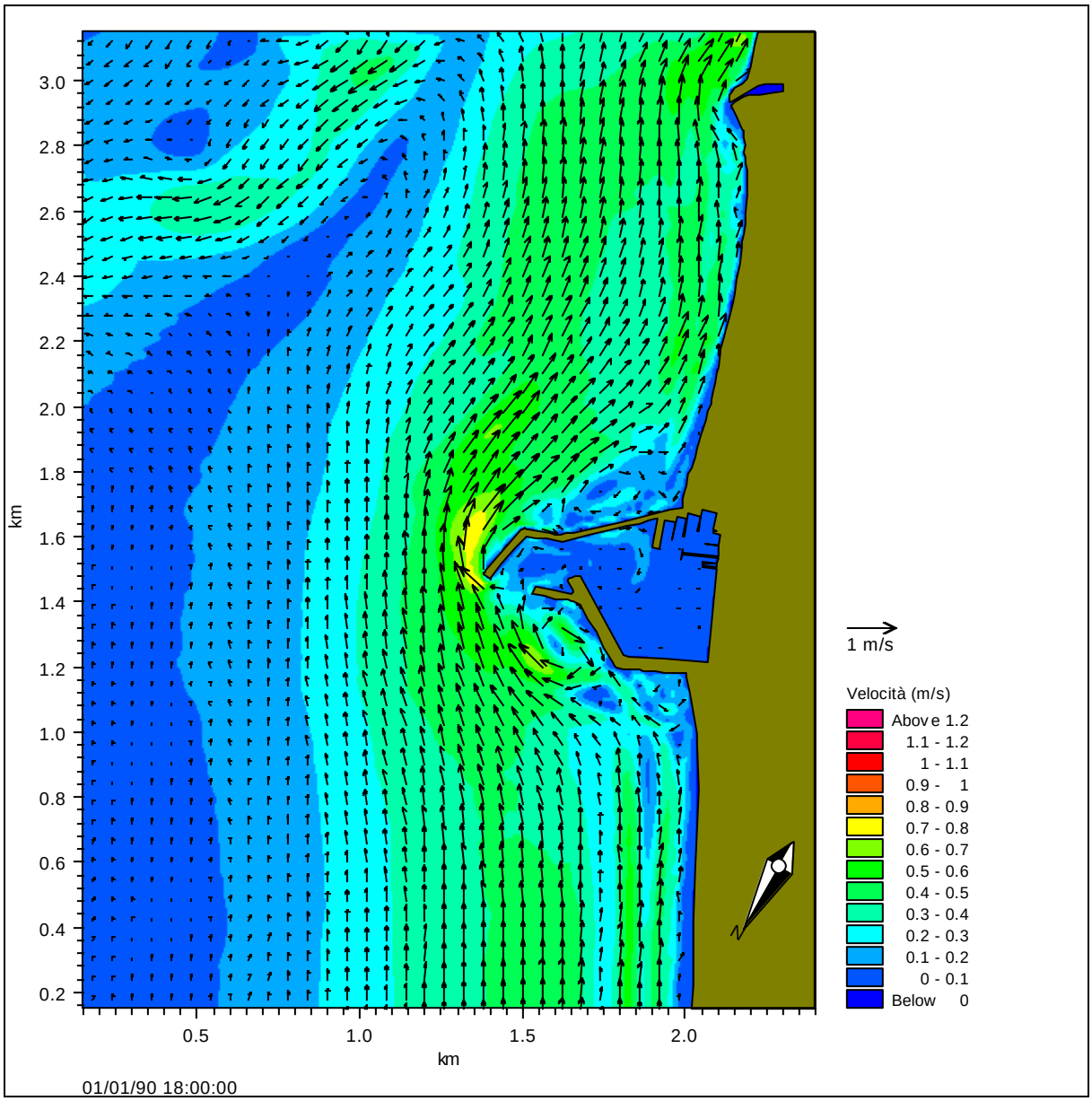


Figura 17 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 2.7 m periodo di picco di 8.2 s e direzione media di propagazione 38°N con il porto in condizioni attuali

Con onde del I quadrante, con fronti maggiormente inclinati, come l'onda con Hs=2.7, Tp = 8.2 s e direzione 38°N (circa l'onda di Grecale) il comportamento delle correnti è molto simile alle onde descritte sopra, tuttavia, a causa dell'angolo di incidenza, le correnti parallele alla riva sono leggermente più lente e si ha la formazione di un vortice anticiclonico anche a ridosso del secondo e del terzo braccio del molo nord.

Anche con tali onde la corrente by-passa la struttura portuale senza determinare ingressioni all'interno del porto degne di rilevo.

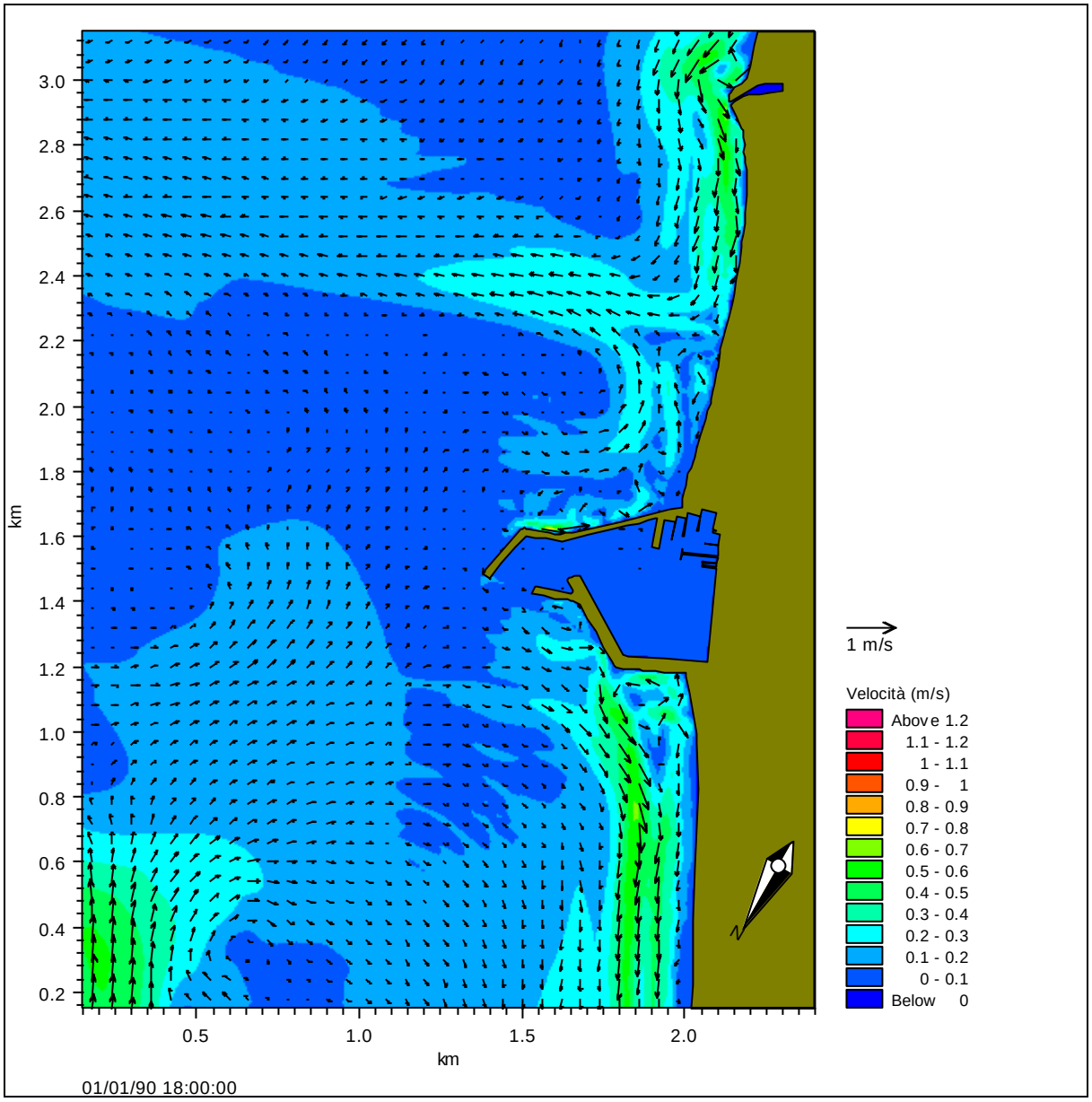


Figura 18- Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 1.5 m periodo di picco di 8.2 s e direzione media di propagazione 83°N con il porto in condizioni attuali

Le onde, sempre del I quadrante, ma molto prossime alla direzione orientale, e comunque provenienti da sinistra (generalmente la convenzione da destra o da sinistra è fatta con l'osservatore rivolto verso la costa e con le spalle rivolte a largo) generano una corrente diretta da Sud verso Nord. In particolare l'onda scelta per la simulazione (altezza significativa di 1.5 m periodo di picco di 8.2 s e direzione media di propagazione 83°N) non induce delle correnti degne di rilievo.

Si ha una fascia costiera molto limitata di circa 200 metri con correnti di circa 0.5 m/s nei tratti nord e sud. in prossimità del porto la corrente si riduce quasi fino ad annullarsi. In prossimità della bocca si ha una corrente praticamente assente a causa della scarsa interazione dell'onda con il fondale ivi presente.

Si noti, nella spiaggia sud, la formazione di una corrente di ritorno dell'ordine dei 0.2 ÷0.3 m/s. A ridosso dei moli le correnti assumono un carattere turbolento senza privilegiare alcuna particolare direzione.

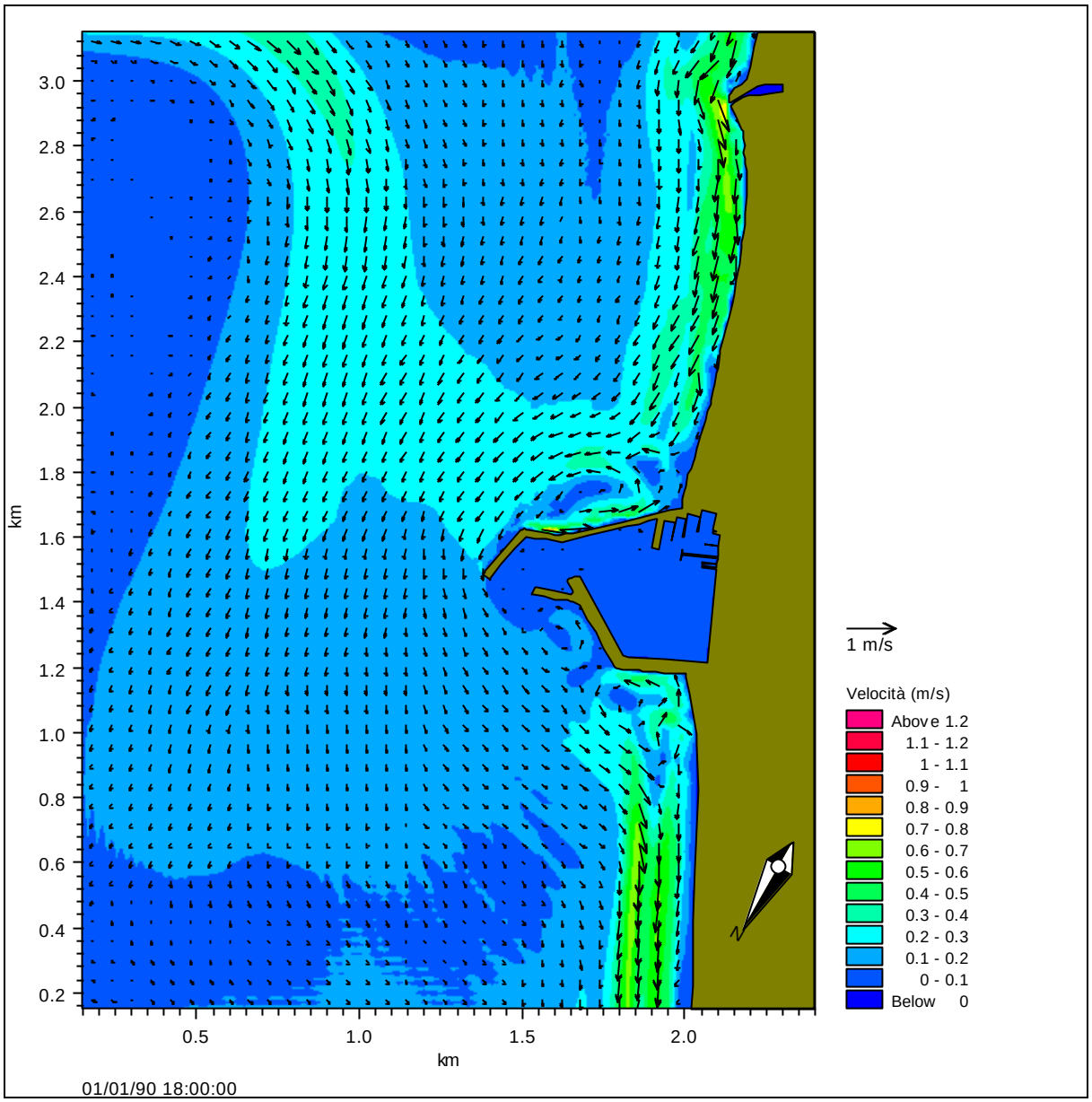


Figura 19 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 1.4 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 106°N con il porto in condizioni attuali

Con onde decisamente più inclinate come l'onda che induce le correnti rappresentate nel campo di velocità della Figura 19 (altezza significativa di 1.4 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 106°N con il porto in condizioni attuali) si ha una corrente litoranea diretta da Sud verso Nord.

La fascia della corrente costiera è molto limitata (circa 200 m) a causa del fatto che si tratta di un'onda medio bassa che non frange se non molto vicino alla linea di riva. Le correnti massime si sviluppano in corrispondenza alla barra sabbiosa e sono mediamente di 0.7 m/s. In prossimità del porto non si hanno fenomeni di particolare rilievo eccezion fatta per la dinamica che si sviluppa lungo il molo sud. Lungo il molo, infatti, si genera una corrente diretta verso la radice che determina, con la corrente che corre lungo riva, un punto di convergenza in prossimità della radice stessa.

Questo è con molta probabilità il fenomeno che determina maggiormente l'accumulo di materiali ivi presente. La bocca, con queste condizioni ondametriche risulta ridossata dalla testata del molo sud pertanto sono quasi totalmente assenti delle correnti direttamente indotte dal moto ondoso.

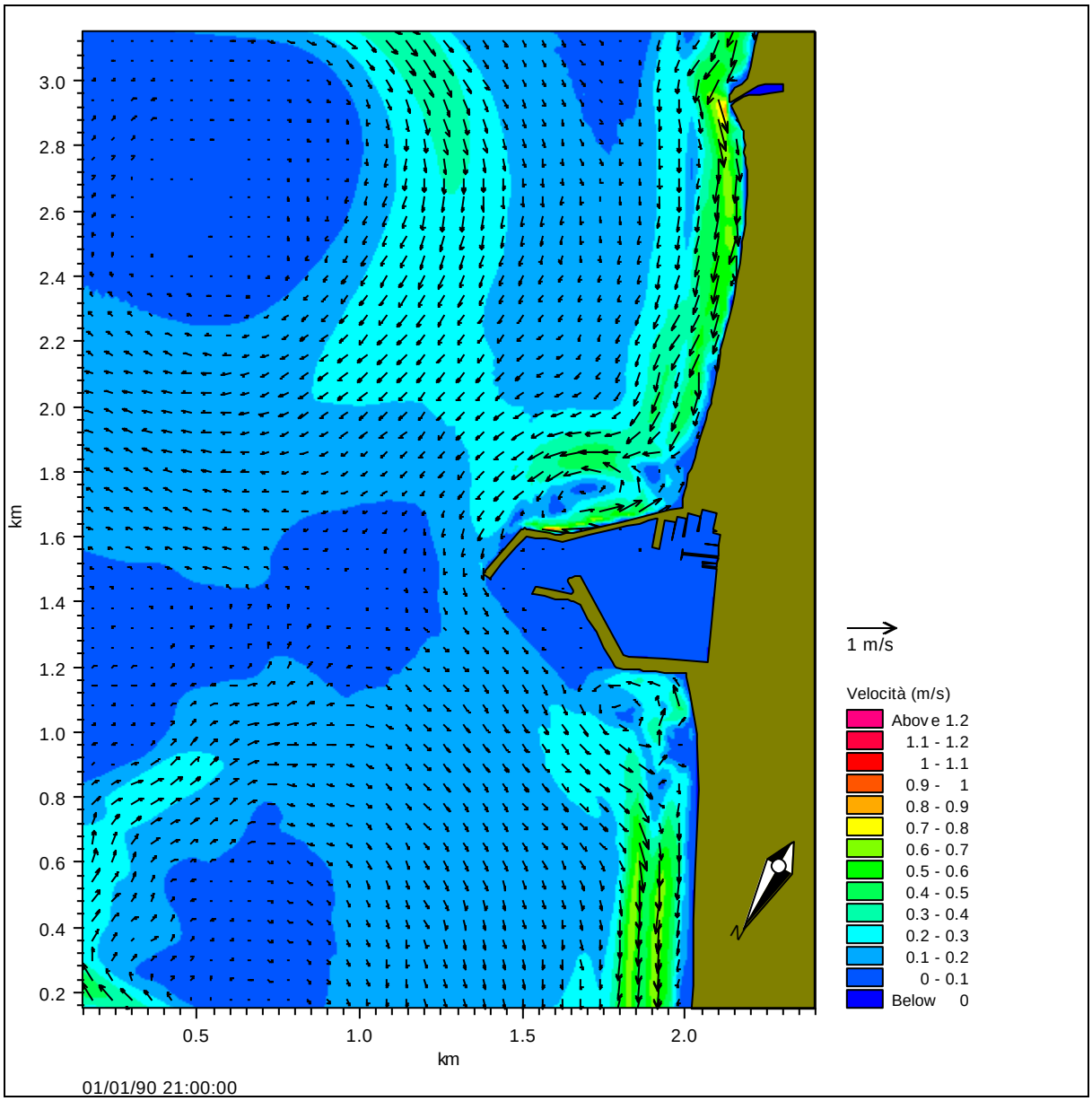


Figura 20 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 1.4 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 119°N con il porto in condizioni attuali

L'onda da 119°N si comporta sostanzialmente in maniera identica all'onda precedente con la formazione di una corrente di circa 0.7 m/s da Sud verso Nord, con qualche vorticosità a ridosso delle strutture e con una corrente praticamente nulla in corrispondenza dell'imboccatura del porto.

In base a queste prime simulazioni con il porto in condizioni attuali e con le onde rappresentative del clima annuale, si può definire un comportamento globale del sistema litorale-porto rispetto al tipo di condizione ondametrica.

Questo viene associato all'osservazione delle fenomenologie riscontrate nel tempo. Una di queste è ad esempio la presenza molto ridotta di sedimentazione all'interno del bacino portuale o la lieve tendenza delle spiagge all'accrescimento.

Un primo elemento da tenere in considerazione è la bimodalità del moto ondoso che determina una bimodalità che si riscontra anche dal punto di vista sedimentario.

Come evidenziato dall'analisi delle serie storiche delle onde, vi è una parte delle onde del clima annuale che proviene da destra ed una parte di onde che provengono da sinistra. Mediamente è possibile osservare che le onde provenienti da destra e quindi dal primo quadrante sono prevalentemente onde di vento e quindi con periodi molto variabili e, generalmente con altezze d'onda grandi e lunghezze piccole. Le onde provenienti da sinistra sono invece più basse ma con periodi più lunghi, sostanzialmente si tratta di onde di swell. Si ha inoltre una differente percentuale di apparizione di tali onde: le onde di vento sono meno frequenti, ma più alte e con periodi minori, pertanto con una capacità morfologica maggiore delle onde di swell, malgrado queste ultime siano più frequenti.

L'interazione con il litorale pertanto determina un flusso netto di sedimenti da Nord verso Sud.

Mediante le simulazioni fatte, è possibile spiegare anche per quale motivo vi sia un accrescimento sia del litorale a Nord che di quello a Sud.

Come visto sopra, infatti, le correnti dirette da Nord a Sud (indotte dalle onde provenienti da destra) sono in grado di by-passare l'aggetto delle opere di difesa e quindi vi è la possibilità per il trasporto solido di ridistribuire i sedimenti, oltre che nella spiaggia nord, anche in quella sud.

Questo non avviene, invece, con le ondazioni da sinistra che permettono solo un accumulo a ridosso del molo sud senza ridistribuirlo verso Nord, in quanto, la ridotta dimensione della zona dei surf, e quindi della zona attiva per il trasporto solido, non è sufficientemente estesa da permettere un aggiramento della testata del molo.

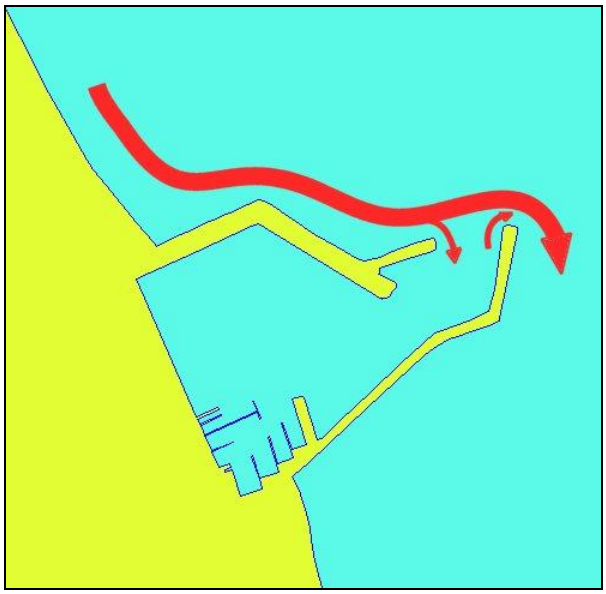


Figura 21 – Direzioni principali della corrente con ondazioni dal settore settentrionale per il porto in condizioni attuali.

Dai rilievi recenti si è inoltre rilevato come l'insabbiamento del porto sia stato molto limitato.Dalle informazioni ottenute presso l'Ente Porto si è infatti appreso che nell'ultimo ventennio si sono dragati circa 20.000 m^3 di materiale, che è una quantità sostanzialmente molto modesta. Questo effetto viene rilevato anche nelle simulazioni: infatti solamente delle piccole correnti con relative piccole velocità riescono a penetrare all'interno del porto.

A questo proposito preme ricordare che nel periodo in cui il porto aveva i moli molto meno aggettanti e configurati alla stregua di moli convergenti (dal 1935 a metà degli anni '50) vi era un'ingressione di materiale sedimentario molto maggiore.

Questo fenomeno era molto probabilmente causato dalla minore profondità alla quale erano fondate le testate dei moli. In quelle condizioni infatti la zona di trasporto attivo che si generava per gli eventi ondosi provenienti dalle due direzioni principali era in grado di interessare tutta l'imboccatura e quindi di far entrare una grande quantità di sedimenti.

A scopo di esempio, per la ricostruzione di questo comportamento, è stata eseguita con il modello idrodinamico una simulazione delle correnti con il porto nelle citate condizioni pregresse e con un'onda dal primo quadrante.

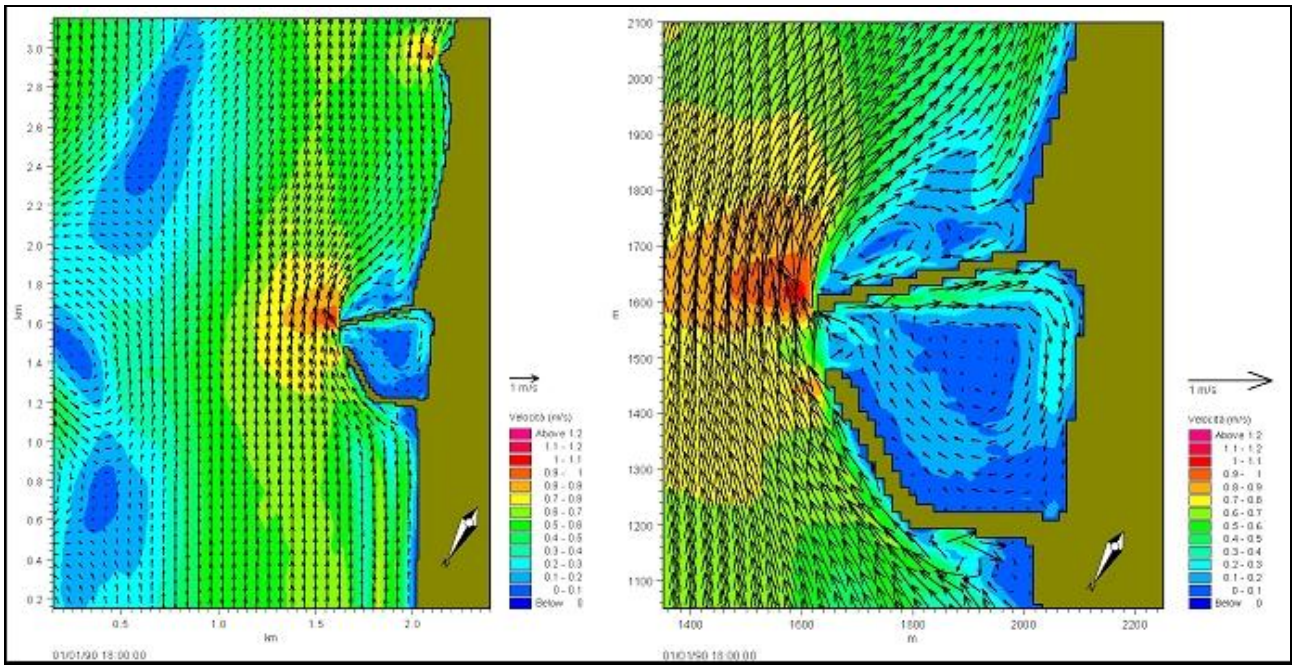


Figura 22 – Campo delle velocità indotto da un'onda di 3.4 m Tp = 9.3 s e dire 10°N con il porto come si presentava negli anni '50

Come si vede dai campi di velocità si ha una forte corrente che entra all'interno del porto lambendo il versante interno del molo sud. La corrente che esce è invece di entità molto inferiore e perciò non è in grado di far fuoriuscire i sedimenti entrati.

A ciò si aggiunga che all'interno del porto, non essendoci delle condizioni di moto ondoso tali da mettere in sospensione il materiale, più difficilmente vi è la possibilità di trasporto del materiale da parte delle correnti.

Le simulazioni con il porto in condizioni attuali, fino a qui descritte, possono essere prese come base di partenza per la verifica dei layout portuali previsti per il piano regolatore.

4.2.4 Verifica del layout A

Il layout A, mostra una notevole variazione della tipologia portuale attualmente presente a Giulianova. La presenza dell'allungamento del braccio del molo sud infatti apporta una notevole variazione dell'idrodinamica locale del sito.

Con le ondazioni provenienti dal I quadrante infatti si determina tra il nuovo prolungamento e il secondo braccio del molo nord un vortice di dimensioni importanti che può essere causa di

sedimentazioni dell'imboccatura. Per quanto riguarda l'insabbiamento del bacino interno, si dovrebbe stare abbastanza tranquilli in quanto non si notano delle particolari correnti che si spingono all'interno del porto.

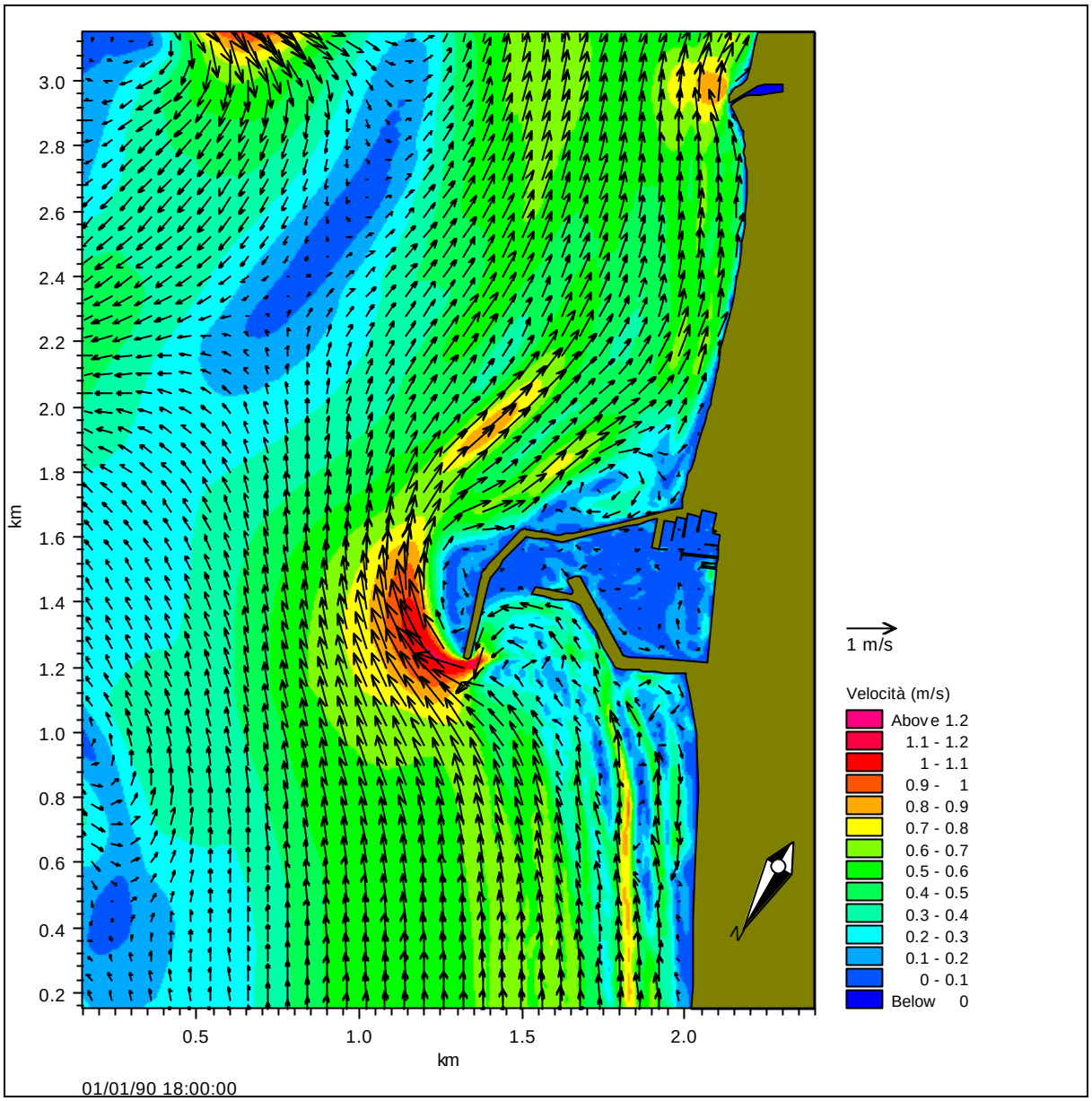


Figura 23 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 3.42 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 10°N con il layout A

La maggior alterazione che il layout A introduce nella dinamica locale è il quasi totale bloccaggio delle correnti che, attualmente, by-passano l'imboccatura per permettere di distribuire i sedimenti nel tratto del litorale a Sud del Porto.

La frazione dei sedimenti che vengono veicolati oltre la testata del prolungamento hanno così buona probabilità di venire dispersi verso largo attraverso il canyon sottomarino ed essere quindi sottratti al bilancio di materiale dell'unità morfologica di litorale.

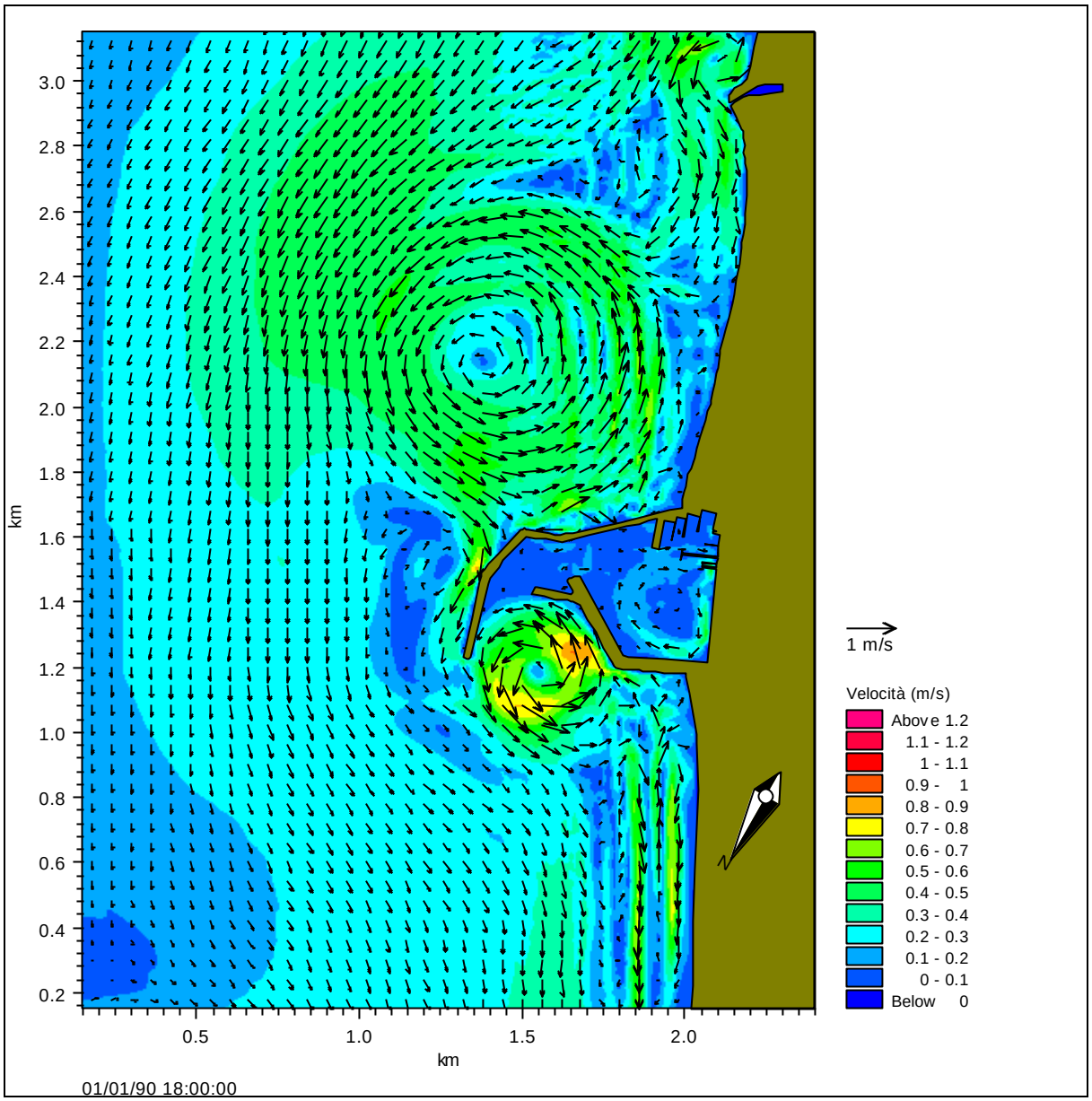


Figura 24- Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 1.4 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 119°N con il layout A

4.2.5 Verifica del layout B

Il layout B è definibile in qualche modo come l'antitesi del layout A. Esso tuttavia apporta degli effetti negativi alla dinamica locale che sono assimilabili a quelli del layout A.

Il prolungamento del molo nord apporta una variazione piuttosto importante dell'aggetto dell'opera, tale situazione pertanto è da vedere in maniera negativa per il fatto che, raggiungendo l'opera una maggiore profondità, essa interessa di fatto quasi totalmente la zona attiva del trasporto interrompendo in maniera netta la deriva sedimentaria litoranea.

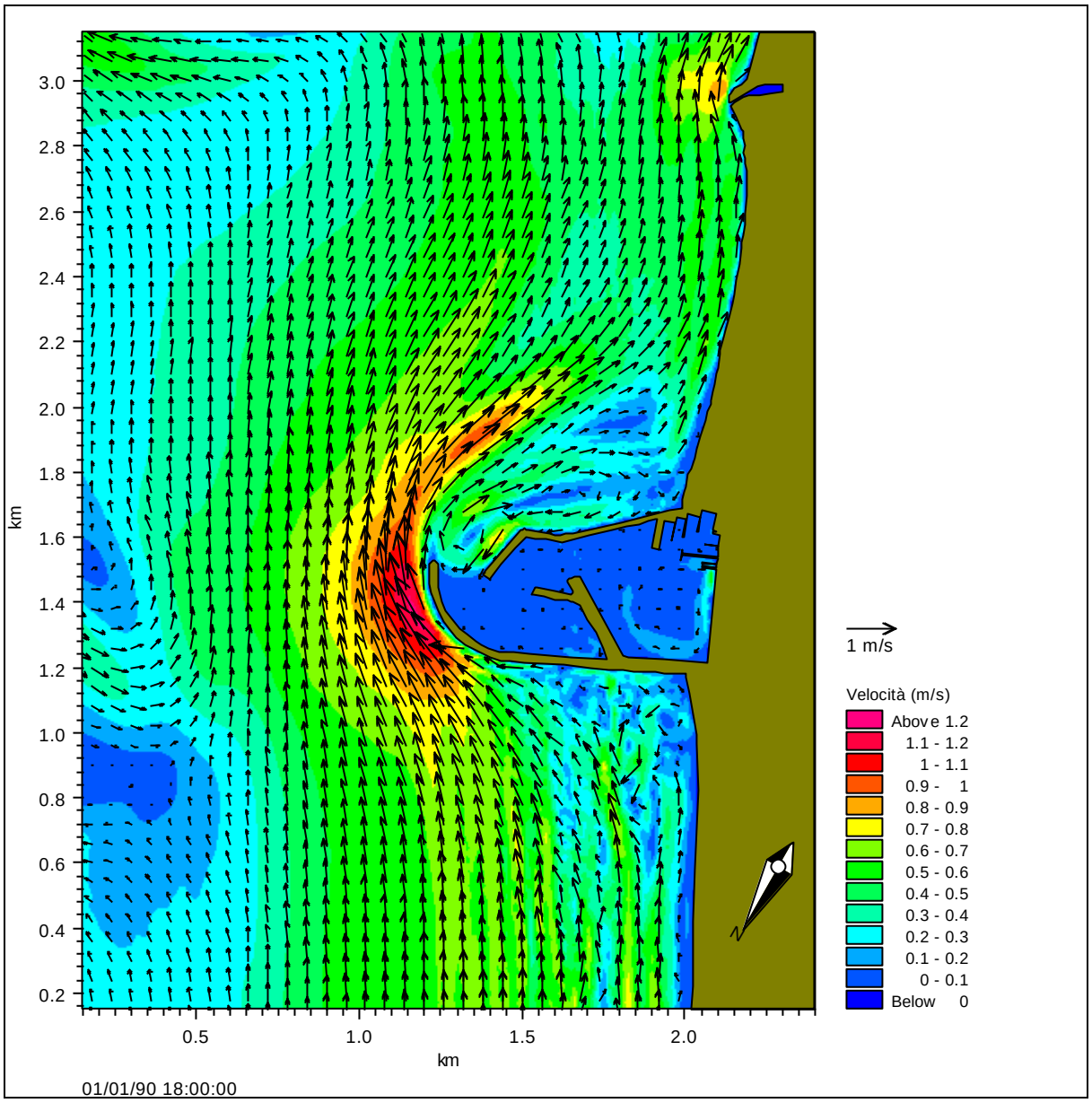


Figura 25 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 3.42 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 10°N con il layout B

Dalle simulazioni si evince come il trasporto venga deviato verso largo dal molo nord. Questo, alla stregua della dinamica che si presentava con il layout A, non dà la possibilità di una ridistribuzione

dei sedimenti nel litorale sud e pertanto, come si vedrà dalle simulazioni effettuate con il modello morfologico, si corre il rischio di mandare in erosione il litorale sud.

L'aggetto eccessivo del molo nord, inoltre, determina un maggiore accumulo del materiale facendo crescere la spiaggia in maniera eccessiva.

Dal punto di vista dell'insabbiamento dell'imboccatura l'inclinazione del molo verso Sud potrebbe bloccare i sedimenti provenienti dal trasporto indotto dalle ondazioni del II quadrante, con la possibilità di causare un insabbiamento della bocca. Per quanto riguarda invece l'insabbiamento del bacino interno non si dovrebbero riscontrare problemi di sorta.

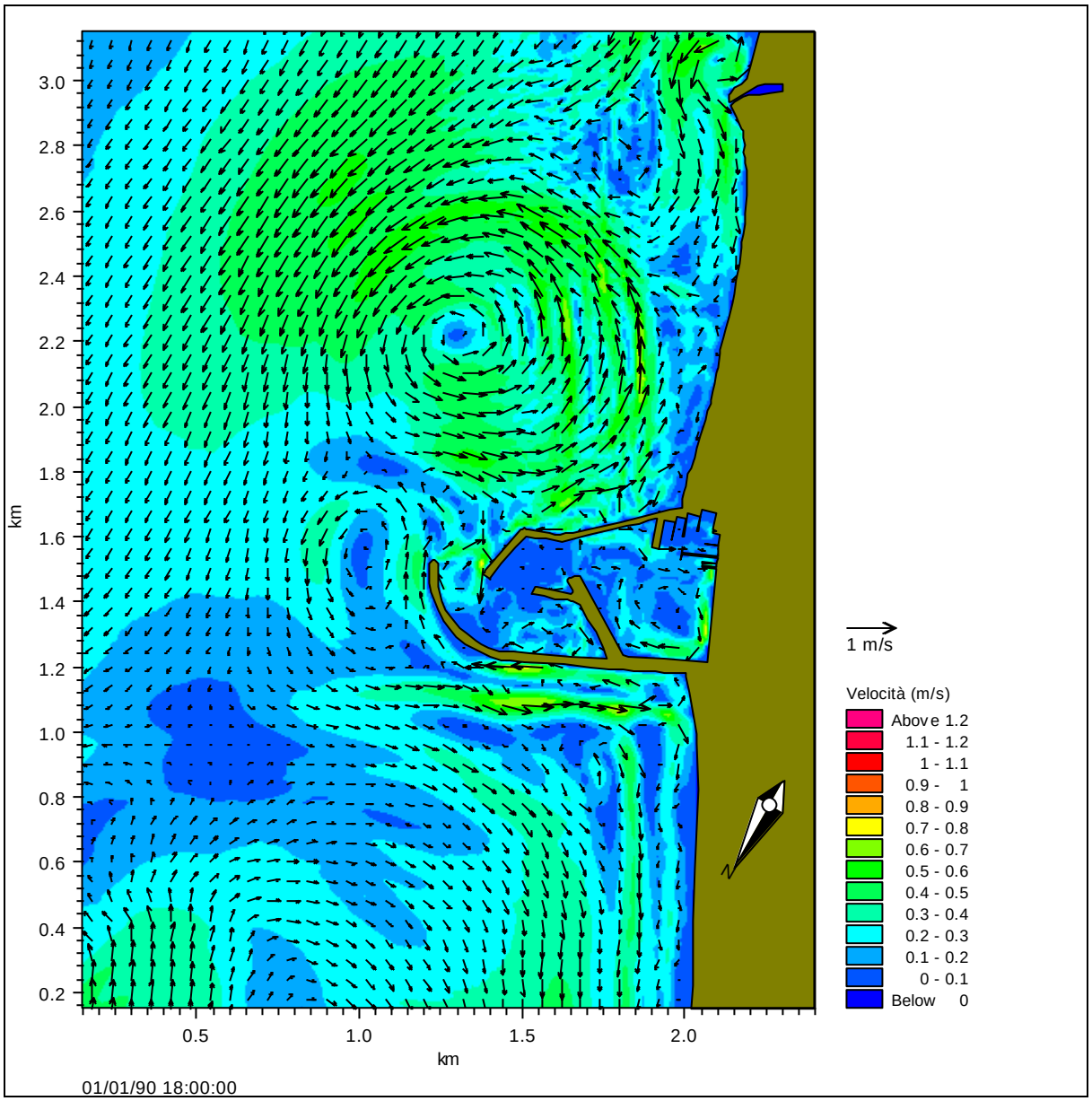


Figura 26 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 1.4 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 119°N con il layout B

È doveroso aggiungere che sia il layout A che il layout B prevedono la presenza del prolungamento di uno dei due moli con un braccio orientato in direzione circa parallela alla riva. Come è noto da recenti studi supportati da modellazioni fisiche e matematiche una spiaggia si comporta come un ottimo contorno assorbente per onde di gravità, tuttavia le sub-armoniche a bassa frequenza vengono riflesse dalla spiaggia e quindi possono entrare in risonanza tra la spiaggia stessa e l'opera di difesa, determinando effetti morfologici difficilmente prevedibili.

4.2.6 Verifica del layout C

Le simulazioni hanno mostrato che il layout C è la soluzione più conservativa dal punto di vista della dinamica litoranea.

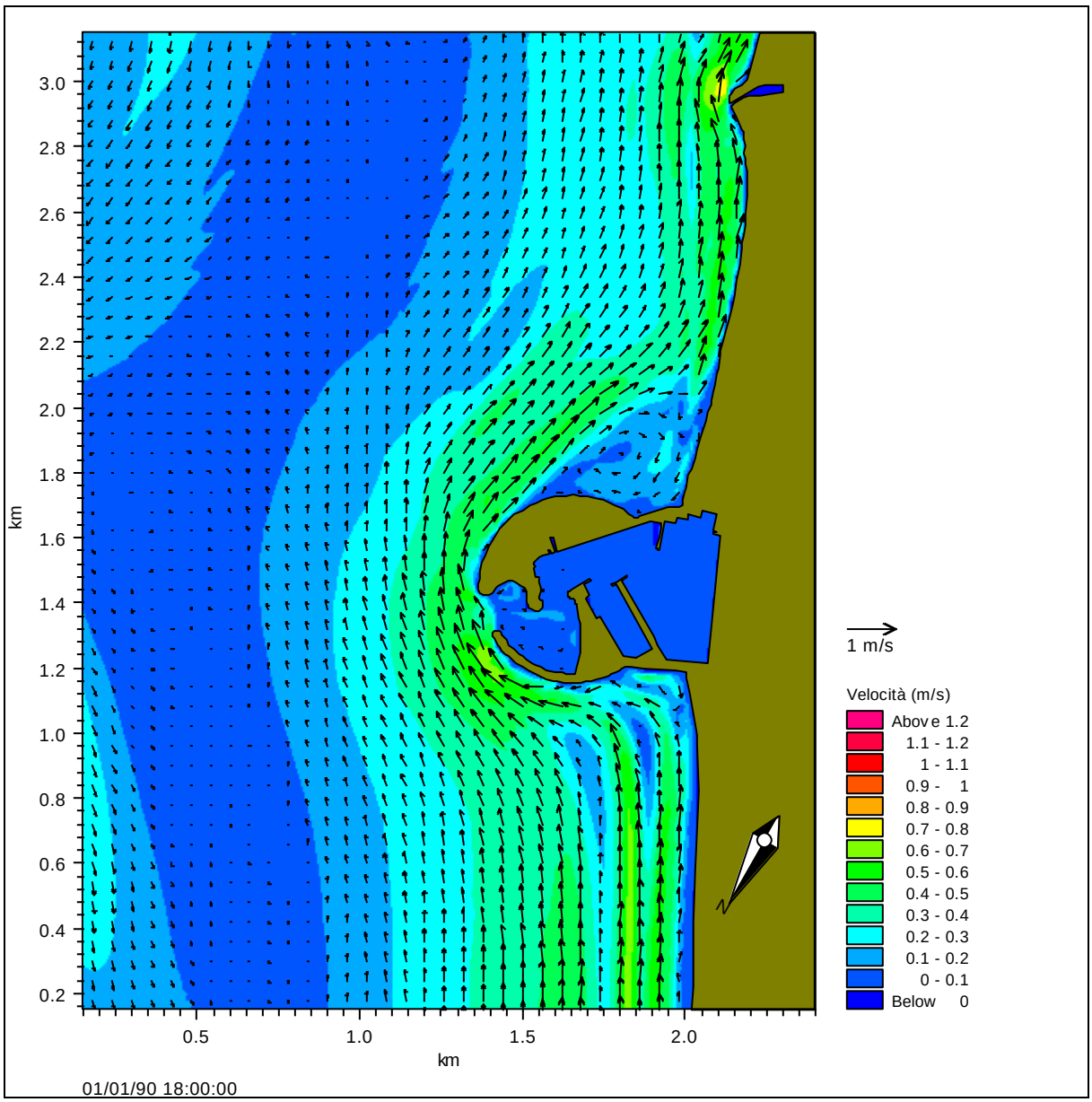


Figura 27 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 2.2 m periodo di picco di 6 s e direzione media di propagazione 0°N con il porto previsto dal layout C

La dinamica litoranea che si determina con il layout C e onde da Nord mostra come vi sia una corrente con velocità dell'ordine dei 0.7 m/s diretta da Nord verso Sud lungo i litorali.

In presenza del porto la corrente principale devia seguendo il profilo del molo nord e attraversa l'imboccatura portuale con velocità dello stesso ordine di grandezza.

A tergo del molo sud vi è la formazione di un vortice anticiclonico che interessa la spiaggia per circa 300 m a partire dalla radice del molo. Tale vortice è molto simile a quello che si sviluppa con il porto attuale se non per il fatto che interessa un'area leggermente inferiore per la presenza dell'ingrossamento del molo. Questo facilita certamente una maggiore circolazione dell'acqua nella zona più prossima alla riva.

Con il layout C non si rileva alcun tipo di inconveniente relativamente all'imboccatura. Infatti, grazie alla sagoma circolare, le correnti hanno una direzione tangenziale che non lascia spazio a ingressioni di deflusso attraverso l'imboccatura.

Si noti comunque che la corrente tangenziale all'imboccatura potrebbe, in condizioni di mare proveniente da Nord (e quindi con onde molto inclinate rispetto alla normale a riva), causare la formazione di una barra da una testata all'altra del molo.

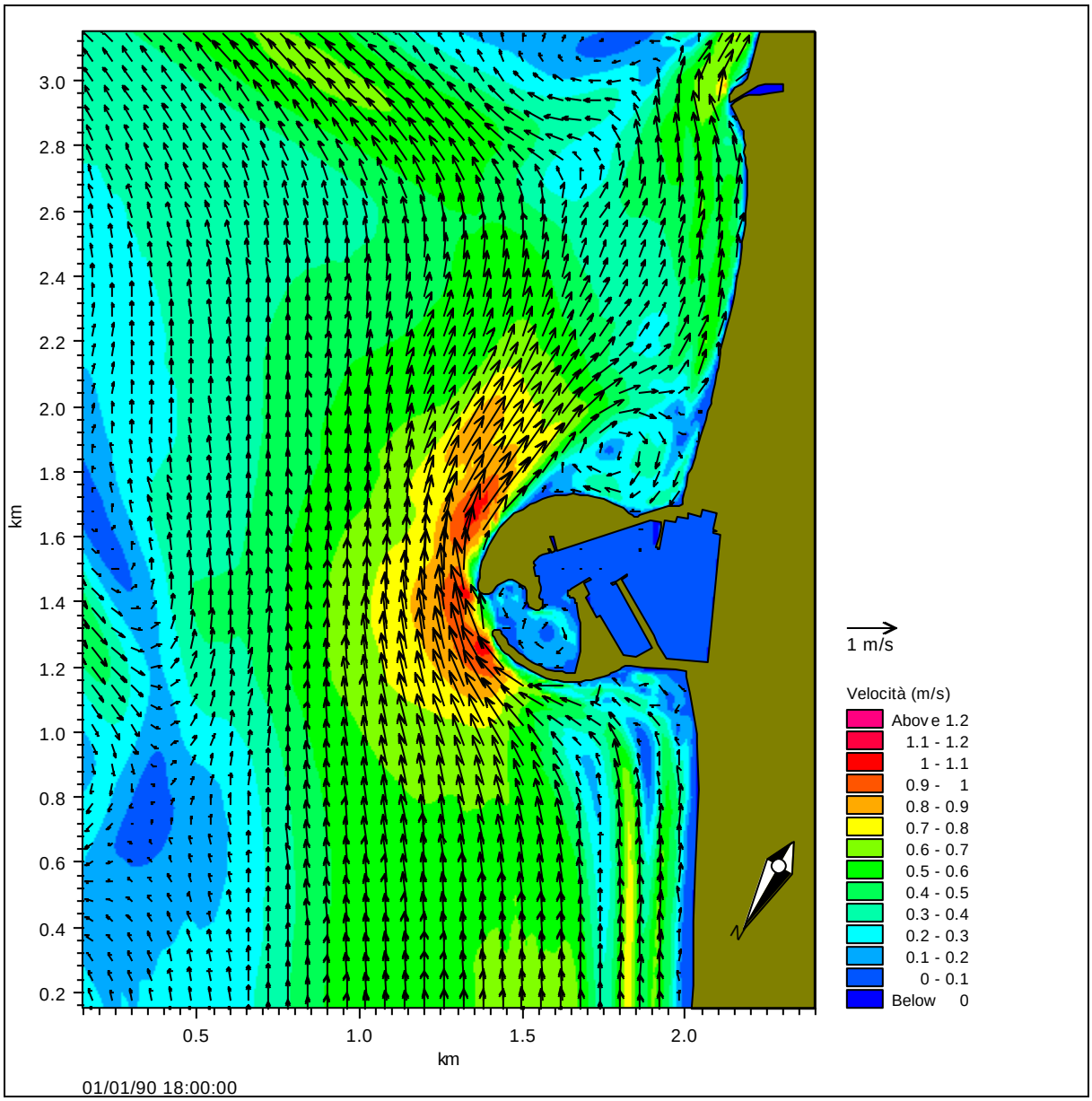


Figura 28 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 3.4 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 10°N con il porto previsto dal layout C

Con l'onda da 10°N e Hs di 3.4 m e layout C la circolazione mantiene il carattere che ha in condizioni attuali mostrando una corrente di circa 0.7÷0.8 m/s, mentre in corrispondenza dell'imboccatura raggiunge circa 1 m/s.

Tali velocità permettono il passaggio del materiale da una parte all'altra del porto evitando possibili insabbiamenti e quindi la possibile formazione di una barra sabbiosa lungo la congiungente delle due testate.

Per quanto riguarda l'entrata del porto si possono notare alcune correnti nella zona dell'avamporto. Queste sono però sostanzialmente indotte dalla corrente esterna per scambio di quantità di moto tra la massa d'acqua esterna, che è in movimento, e quella interna che risulta essere a velocità molto minore se non ferma.

Dal lato sud del porto vi è sempre la formazione di un vortice anticiclonico che tuttavia, sia per la direzione del moto ondoso, meno inclinato rispetto al caso precedente, che per l'altezza dell'onda, risulta essere di minori dimensioni e con velocità maggiori.

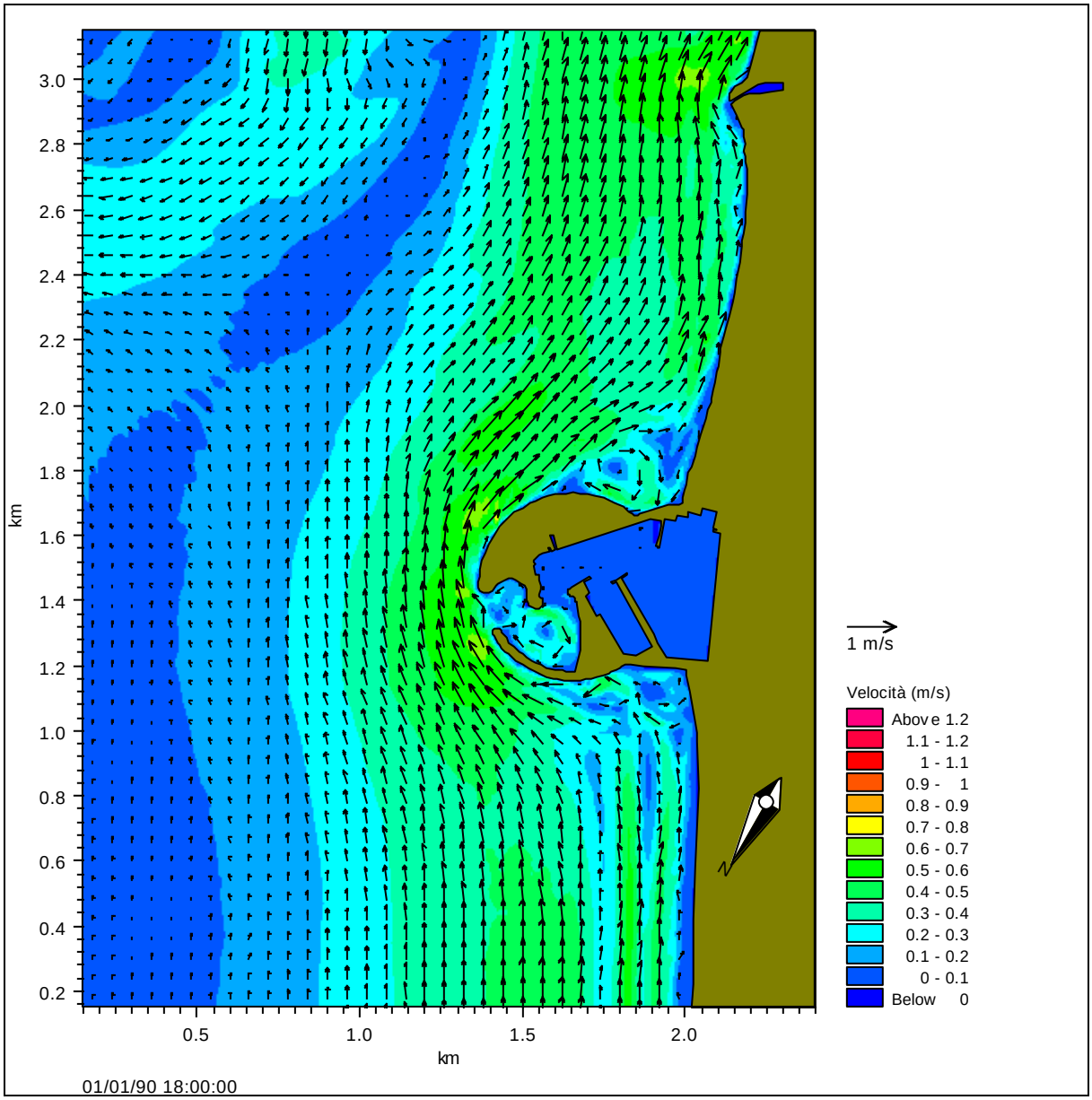


Figura 29 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 2.7 m periodo di picco di 8.2 s e direzione media di propagazione 38°N con il porto previsto dal layout C

Anche con l'onda da 38°N si ha una circolazione da Nord verso Sud. La circolazione è praticamente molto simile a quelle precedenti, con una corrente da Nord verso Sud, il by-pass dell'imboccatura e una formazione vorticosa in prossimità del molo sud.

Le velocità vanno da 0.3 m/s fino a 0.8 m/s in corrispondenza dell'imboccatura.
In questa simulazione si nota anche un vortice all'interno dell'avamporto. Si ritiene che questo sia dovuto principalmente allo scambio di quantità di moto con l'esterno e a delle ondazioni residue che penetrano all'interno per dissiparsi contro la spiaggia assorbente.

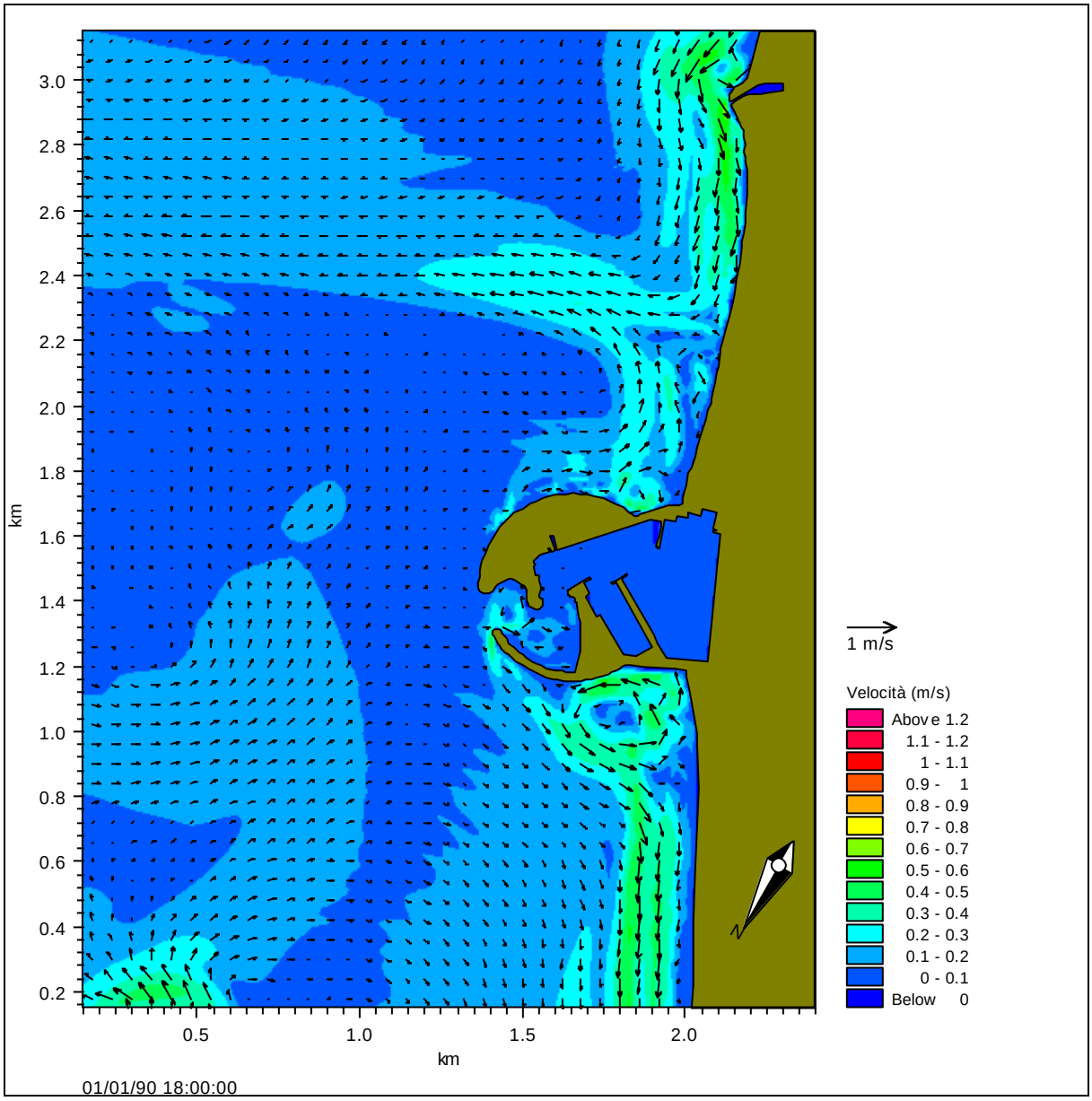


Figura 30 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 1.5 m periodo di picco di 8.2 s e direzione media di propagazione 83°N con il porto previsto dal layout C

L'onda da 83°N così come si è fatto presente per il porto attuale mostra una corrente diretta principalmente da Sud verso Nord. L'altezza limitata dell'onda, infatti, determina una zona attiva e trasporto molto minore delle altre onde che provengono dal I quadrante. Pertanto le testate del porto risultano al di fuori dell'onda: la fascia di trasporto attivo è di circa 250÷300 m mentre il porto aggetta circa 500 m.

Come visto con la stessa onda ma con il porto in condizioni attuali vi è la formazione di una corrente di rip nel litorale sud.

A Nord, tra la spiaggia e il molo si instaura una circolazione di tipo ciclonico indotta dalla corrente principale. Si ritiene che tale vortice non possa determinare delle variazioni degne di nota a parte il fatto che, con le maggiori ondazioni da tale direzione, esso permetterà di ridistribuire gli eventuali sedimenti depositati a ridosso della scogliera.

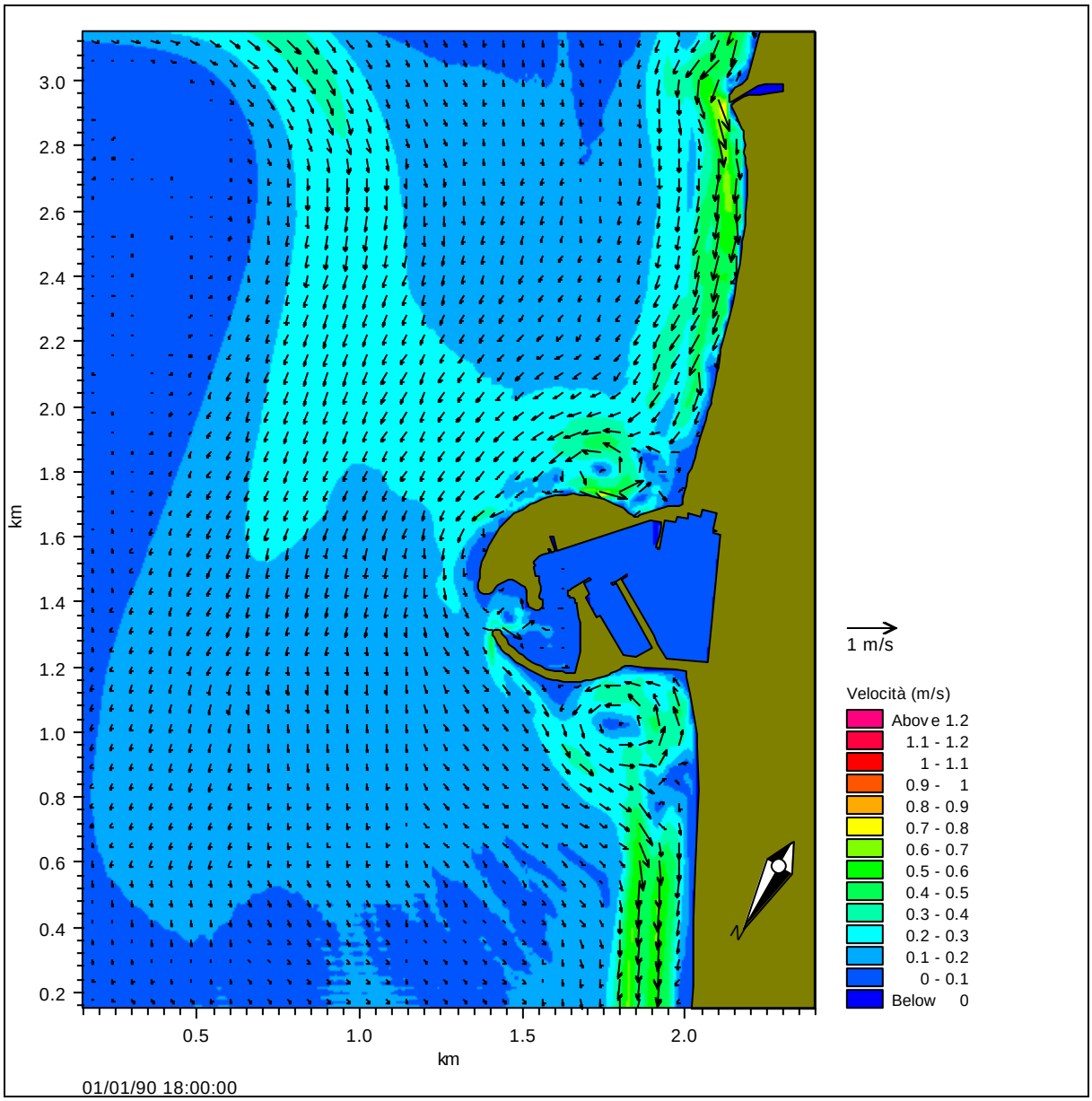


Figura 31 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 1.4 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 106°N con il porto previsto dal layout C

Con le onde provenienti dal II quadrante si ha una corrente lungo riva diretta da Sud verso Nord.

Con l'onda da 106°N si ha una zona attiva di trasporto di circa 300 m, la formazione di un vortice a Nord del porto con circolazione ciclonica, indotto dalla corrente esterna, che raggiunge velocità massime di circa 0.4 m/s in corrispondenza della radice del molo e di circa 0.6 m/s in corrispondenza della spiaggia.

Nel lato sud la presenza del porto determina un piccola circolazione ciclonica che lambisce la scogliera garantendo una buona circolazione idraulica.

Di fronte all'imboccatura si ha una debole corrente che va dalla testata sud alla testata nord delle opere di difesa. La bassa velocità di tale corrente è spiegata dalla bassa altezza dell'onda che frange a profondità inferiori.

La circolazione indotta dall'onda proveniente da 119°N risulta molto simile alla circolazione descritta sopra.

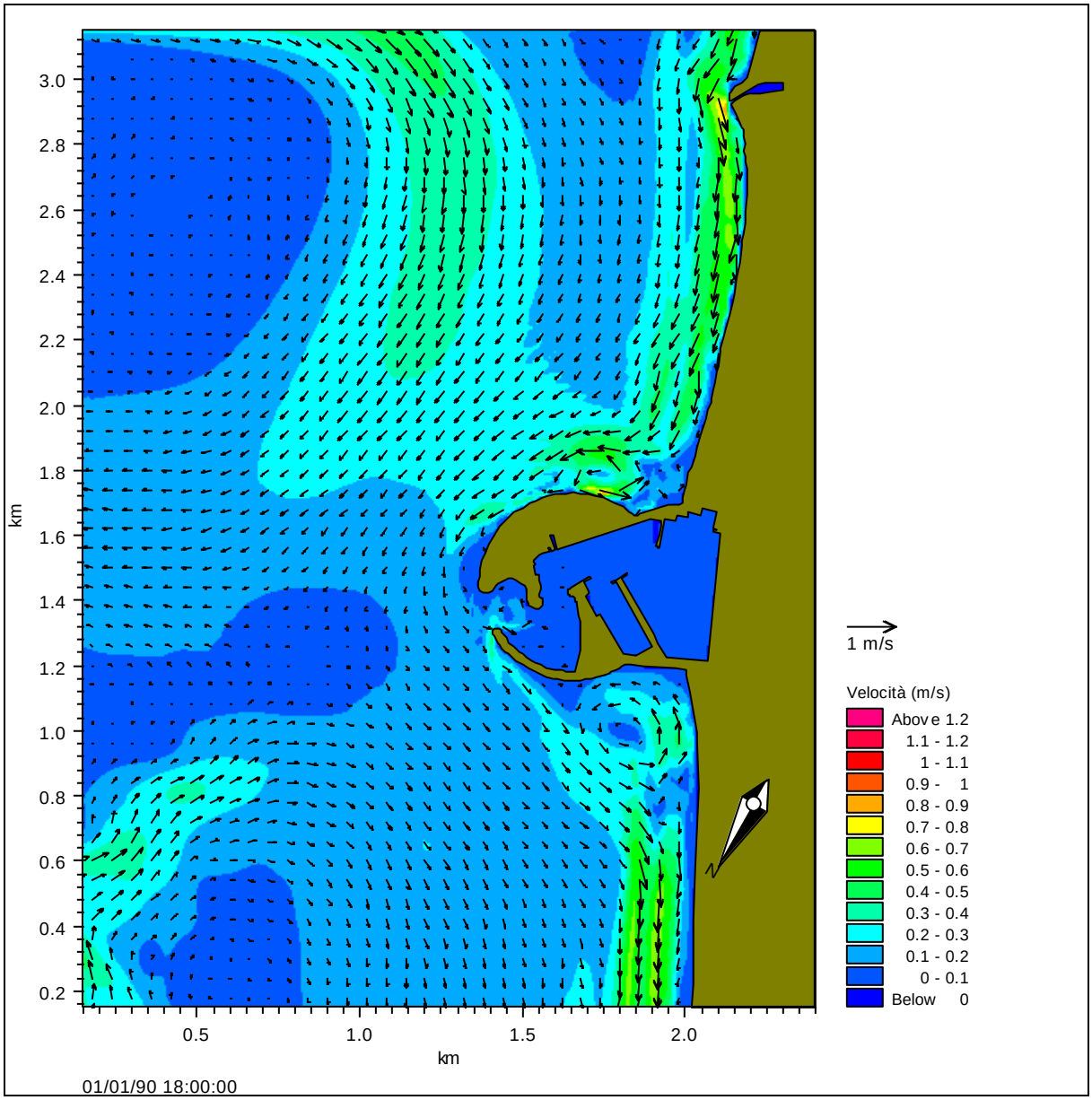


Figura 32 - Campo delle velocità indotte da un'onda con altezza significativa di 1.4 m periodo di picco di 9.3 s e direzione media di propagazione 119°N con il porto previsto dal layout C

4.3 Considerazioni sulla circolazione idraulica

Dalle simulazioni di circolazione idraulica, indotte dal moto ondoso, è stato possibile dedurre che attualmente il porto non si comporta come un ostacolo insuperabile nei confronti del trasporto litoraneo, ma permette il passaggio di una certa quantità di materiale da Nord verso Sud e in parte anche da Sud verso Nord.

Il motivo per cui la dinamica è sostanzialmente in equilibrio è dovuto al fatto che l'aggetto del porto verso largo è limitato. Il clamoroso canyon che nel corso degli anni si è sviluppato a partire dalla testata del molo sud, ben messo in evidenza anche dalle recenti batimetrie, è una riprova della forte interazione che le correnti hanno con la struttura.

Questo significa che alla profondità alla quale si fondano le testate dei moli, le maggiori ondazioni sono ancora in grado di movimentare il materiale che si trova sul fondo.

Tale considerazione dovrebbe rappresentare un punto fermo nello sviluppo del layout portuale, ovvero, non sarebbe consigliabile portare i moli a profondità maggiori perché si correrebbe il rischio di ridurre, se non di bloccare del tutto, il trasporto che attualmente avviene da una parte all'altra del porto garantendo quell'equilibrio di sedimenti che permette alle spiagge meridionale e settentrionale di godere di "buona salute" dal punto di vista morfologico.

Per questo motivo, viste le necessità di una nuova configurazione portuale, richieste dalla prospettiva di sviluppo diportistico e relative al miglioramento del comfort interno (quindi dell'agitazione) e della navigabilità dell'imboccatura, si è pensato ad una soluzione che potesse permettere naturalmente la conservazione di tale by-pass di sedimenti. Tale soluzione non vuole essere una alternativa ai layout proposti dal Gruppo di Progettazione per il PRP, ma serve alla modellistica come banco di prova per meglio evidenziare e capire l'internazione delle forzanti marine con il sistema delle opere di difesa del porto (Figura 33).

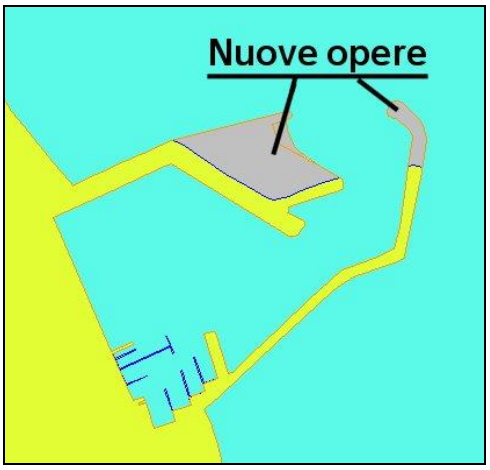


Figura 33 – Layout D

Con l'imboccatura orientata a Nord e i risultati delle simulazioni idrodinamiche e di trasporto indicano che tale soluzione risulterebbe gravosa dal punto di vista del trasporto solido, soprattutto di quello verso Sud che risulta essere dominante. Infatti la presenza del prolungamento del molo sud si comporta come un punto di deviazione delle correnti.

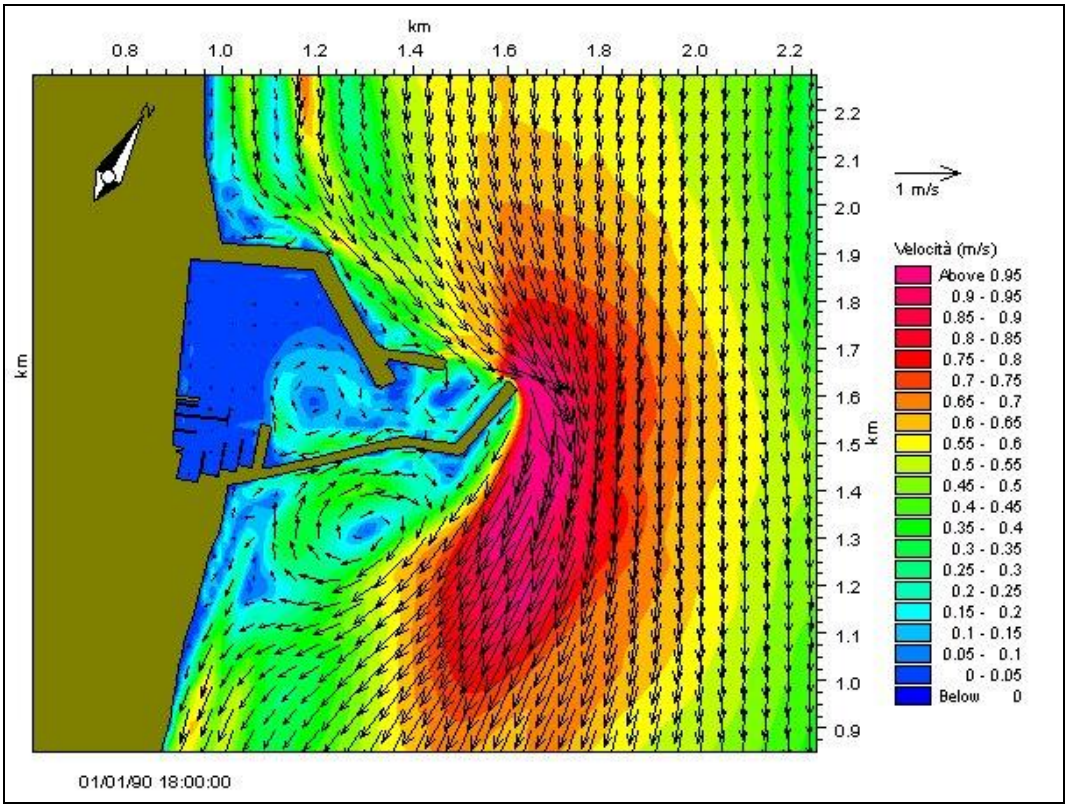


Figura 34 – Campi di velocità con il porto in condizioni attuali e ondazione dal settore settentrionale

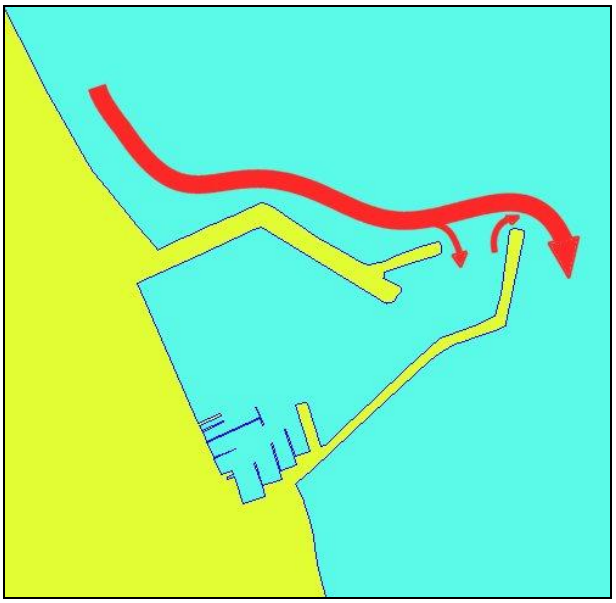


Figura 35 – Direzioni principali della corrente con ondazioni dal settore settentrionale per il porto in condizioni attuali.

Come mostra la figura sopra, il modello idrodinamico ha messo in evidenza (con un'ondazione dal primo quadrante) che attualmente vi è una forte corrente che by-passa la testata del molo sud e solamente una piccola componente di questa corrente viene richiamata all'interno dell'imboccatura.

Allo stesso tempo vi è anche una corrente dal bacino, diretta verso l'esterno, "risucchiata" dalla corrente principale. Questo fenomeno è quello che ha portato alla sedimentazione di circa 20000 m^3 di materiale in 20 anni: quantità estremamente ridotta.

Il comportamento della configurazione D è molto simile a quello attuale, tuttavia la corrente che entra all'interno del bacino non è di bassa entità in quanto si sviluppa in condizioni di mare leggermente differenti.

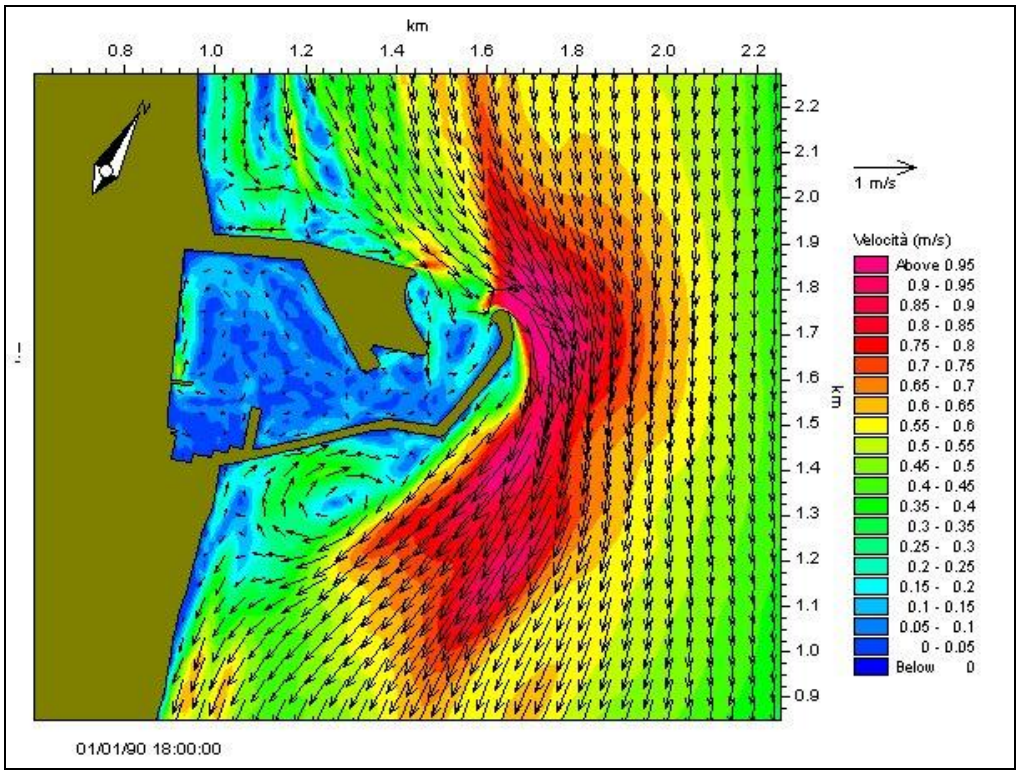


Figura 36 - Campi di velocità con il porto secondo il layout D e ondazione dal settore settentrionale

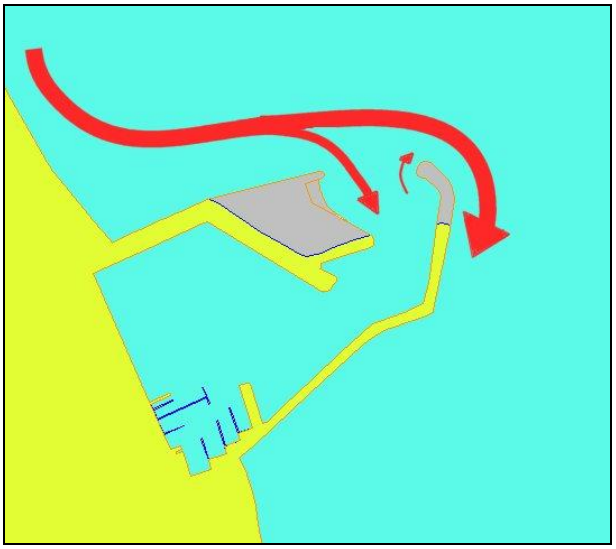


Figura 37 - Direzioni principali della corrente con ondazioni dal settore settentrionale per il porto secondo il layout D

Con tale tipo di imboccatura si correrebbe quindi il rischio di aumentare l'insabbiamento, determinando pertanto un peggioramento delle condizioni attuali.

Un'eventuale soluzione con il molo sud ancora più allungato (layout A) accentuerebbe i problemi del layout D, mentre la soluzione con il prolungamento del molo nord (layout B) è anch'essa da scartare in quanto, prevede un sensibile incremento dell'aggetto verso il largo che porterebbe ad una gravosa riduzione del materiale che passa da Nord verso Sud.

La soluzione più indicata per un sito come quello di Giulianova è pertanto una tipologia di porto con i moli convergenti (layout C). Questi infatti consentono alla corrente di contornare al meglio la sagoma del porto trovando delle discontinuità disposte soltanto parallelamente alla direzione prevalente del flusso litoraneo.

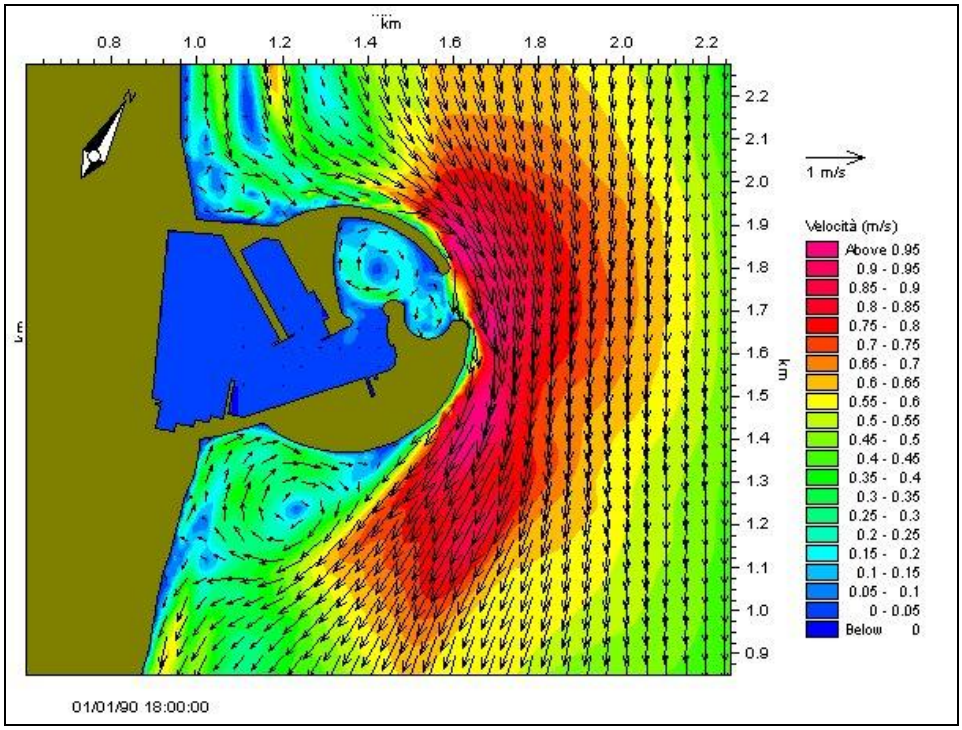


Figura 38 - Campi di velocità con il porto secondo il layout C e ondazione dal settore settentrionale

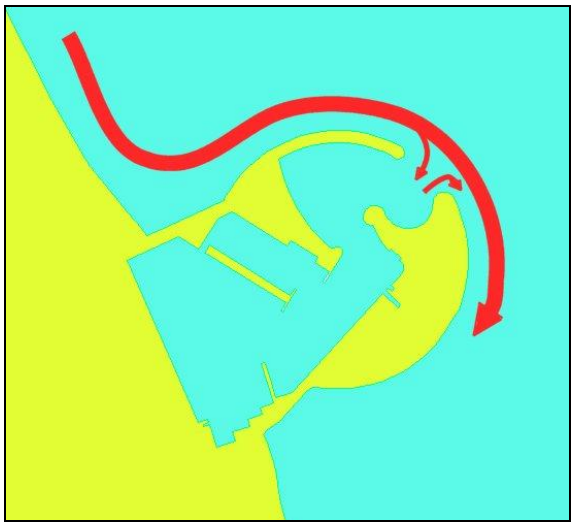


Figura 39 - Direzioni principali della corrente con ondazioni dal settore settentrionale per il layout C.

Ovviamente vi sono anche delle correnti che possono entrare attraverso l'imboccatura, ma sono certamente molto deboli e compensate da quelle che vengono risucchiate fuori dalla corrente esterna.

Nella tabella del Danish Hydraulic Institute, vengono riassunti i vantaggi e gli svantaggi delle varie configurazioni portuali

Type	Extension of Port relative to Width of Littoral Zone	Type of Coast	Problems/Impact		Mitigation Measures					
			Sedi-men-tation	Coastal Impact	Opti-mise Lay-out	Artificial Bypass	Nourish-ment	Active Coast or Shore protect.	Passive Coast Protec-tion	
Double Break-Water	Less	1M to 1E	Small	Small	No	No	No	No	Yes	
		2M to 2E	Mod.	Mod.	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Layout 0 / C
		3M to 3E	Sign.	Mod.	No	Yes	Yes	Yes	Yes	
		4M to 4E	Sign.	Mod	No	Yes	Yes	No	Yes	
		5M to 5E	Mod.	Des.	No	No	No	No	Yes	
	Wider	1M to 1E	Small	Small	No	No	No	No	Yes	
		2M to 2E	Small	Mod.	No	Yes	Yes	Yes	Yes	
		3M to 3E	Mod.	Sign.	No	Yes	Yes	Yes	Yes	
		4M to 4E	Mod.	Sign.	No	Yes	Yes	No	Yes	
		5M to 5E	Small	Des.	No	No	No	No	Yes	
Single Break-Water	Less	1M to 1E	Sign.	Mod.	Yes	No	No	Yes	Yes	
		2M to 2E	Large	Mod.	Yes	No	No	Yes	Yes	Layout A
		3M to 3E	Large	Sign.	Yes	No	No	Yes	Yes	
		4M to 4E	Sign.	Sign.	Yes	Yes	Yes	No	Yes	
		5M to 5E	Small	Des.	Yes	No	No	No	Yes	
	Wider	1M to 1E	Small	Small	No	No	No	No	Yes	
		2M to 2E	Mod.	Mod.	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Layout B
		3M to 3E	Sign.	Large	No	Yes	Yes	Yes	Yes	
		4M to 4E	Sign.	Large	No	Yes	Yes	No	Yes	
		5M to 5E	Small	Des.	No	No	No	No	Yes	
Off-Shore	Always Wider	1M to 1E	Mod.	Mod.	Yes	No	No	Yes	Yes	
		2M to 2E	Mod.	Sign.	No	Yes	Yes	Yes	Yes	
		3M to 3E	Mod.	Sign.	No	Yes	Yes	Yes	Yes	
		4M to 4E	Mod.	Mod.	No	Yes	Yes	No	Yes	
		5M to 5E	Small	Des.	No	No	No	No	Yes	

Legend:	Problem	Small	Moderate	Significant	Large	Des.
	Text	Small	Mod.	Sign.	Large	*)

Tabella 2 – Tabella riepilogativa dei vantaggi e svantaggi delle varie configurazioni portuali

Anche in base a tali considerazioni, di tipo generale, appare in definitiva che una soluzione come il layout D non è così conservativa, dal punto di vista idrodinamico, come sembrerebbe in prima analisi. Lo è invece la soluzione a moli convergenti C.

Di conseguenza l'impatto minore sui litorali è dato dalla soluzione a moli convergenti che possono permettere alla dinamica globale di mantenere l'attuale equilibrio e quindi di garantire la tendenza evolutiva attuale, senza che si possa attribuire in futuro alcun eventuale fenomeno erosivo lungo il litorale allo sviluppo della configurazione portuale attuale.

A riguardo della soluzione "C" si ritiene, infine, che la forma circolare assegnata ai moli esterni dal layout attualmente proposto sia tale da permettere l'accompagnamento delle onde nel fenomeno diffrattivo verso la riva garantendo sempre una buona circolazione di carattere tridimensionale.

Lo stesso modello bidimensionale mette in evidenza come vi sia comunque una circolazione indotta a ridosso della struttura.

5. STUDIO EVOLUTIVO DEI LITORALI ADIACENTI E DEL FONDALE LIMITROFO AL PORTO

Nell'ambito dello studio per la progettazione delle modifiche del porto di Giulianova è stata svolta un'analisi dell'effetto delle varie soluzioni proposte sull'evoluzione del litorale adiacente con l'impiego del codice di calcolo di evoluzione morfologica ad una linea LITPACK.

Attraverso questo modello, composto di diversi moduli, si è potuta ricostruire l'evoluzione del litorale sul medio periodo, ossia entro i prossimi 10 anni, al fine di verificare i possibili effetti delle diverse ipotesi progettuali.

Attraverso l'applicazione del modulo LITDRIFT, che permette di simulare la distribuzione e l'entità del trasporto solido dovuto alle correnti longitudinali, è stata svolta innanzitutto un'analisi del trasporto sedimentario presente nell'area, che costituisce la principale forzante nell'evoluzione della linea di costa.

In base ai dati pregressi esistenti si può osservare infatti come la situazione nell'area circostante il porto di Giulianova sia in sostanziale equilibrio. Lo scopo del lavoro è quindi di verificare che la nuova soluzione adottata non comporti un peggioramento dell'attuale tendenza evolutiva della costa, determinando possibili situazioni di erosione.

Una volta ricostruite le condizioni di trasporto sedimentario presenti nell'area si è applicato il modulo LITLINE con il quale si può calcolare la posizione della costa determinata dall'azione di un dato clima ondoso. Il modello è basato su una teoria mono-dimensionale che assume costante il profilo cross-shore durante i processi di erosione/accrescimento.

L'evoluzione morfologica della costa è quindi descritta dalla sua posizione, in direzione cross-shore, e dal profilo di spiaggia per una data posizione lungo riva.

Il codice di calcolo LITPACK, prodotto dal Danish Hydraulic Institute, è un programma modulare che contiene diversi codici per la simulazione dell'idrodinamica costiera, dei fenomeni di moto ondoso e di trasporto solido, finalizzato al calcolo del bilancio sedimentario di medio-lungo periodo. Adotta una serie di formulazioni ed una schematizzazione di tipo monodimensionale dei processi.

I principali processi litoranei, tra loro interconnessi, che possono essere studiati sono:

- il trasporto di sedimenti (in ciascun sito specifico può essere determinato l'andamento del profilo verticale dei sedimenti trasportati in sospensione);
- le correnti parallele alla linea di riva ed il wave setup;
- il trasporto litoraneo di sedimenti (può essere simulato sia lo spostamento dei sedimenti dovuto alle correnti longitudinali che a quelle trasversali di ritorno, prendendo in considerazione, ove presenti, le opere longitudinali o trasversali realizzate per proteggere la spiaggia);
- l'evoluzione planimetrica della linea di costa;
- l'evoluzione del profilo batimetrico.

Il programma è strutturato in moduli ciascuno dei quali presenta le seguenti caratteristiche:

- **STP** (“Deterministic Noncohesive Sediment Transport Model”): per il calcolo del trasporto dei sedimenti non coesivi dovuto a onde frangenti e non e a correnti;
- **LITDRIFT** (“Longshore Current and Littoral Drift”): simula la distribuzione e l'entità del trasporto solido litoraneo dovuto a onde e correnti;
- **LITLINE** (“Coastline Evolution”): simula l'evoluzione planimetrica della linea di costa eseguendo un bilancio di sedimenti, considerando l'influenza di eventuali opere trasversali e le immissioni di sedimenti da corsi d'acqua o i ripascimenti artificiali;
- **LITTREN** (“non equilibrium trench sedimentation model”): per il calcolo delle variazioni batimetriche, delle condizioni idrodinamiche e del trasporto sedimentario in aree dove il carico sospeso non è in equilibrio con l’idrodinamica locale;
- **LITPROF** (“profile evolution model”): determina l'evoluzione del profilo batimetrico della costa risolvendo un'equazione di continuità dei sedimenti sul fondo.

5.1 Descrizione dei moduli LITDRIFT e LITLINE del codice di calcolo LITPACK

Nell’ambito dello studio eseguito sono stati applicati i moduli LITDRIFT e LITLINE di LITPACK.

5.1.1 LITDRIFT

Il modulo LITDRIFT combina il modulo STP, per il calcolo del trasporto sedimentario ed un modulo idrodinamico per il calcolo della corrente lungo costa.
Il calcolo della distribuzione lungo un profilo della corrente litoranea, dell’altezza d’onda e del setup

si basa sulla risoluzione dell'equazione del bilancio del momento in direzione parallela e trasversale alla costa, espressa da:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{S}_{xx}}{\partial x} = g(D+b)\frac{\partial b}{\partial x}$$

dove si ha:

S_{xx} - radiation stress in direzione perpendicolare a costa,

D - profondità della colonna d'acqua,

b - variazione del livello della superficie libera indotta dal moto ondoso,

ρ - densità dell'acqua di mare,

g - accelerazione di gravità

Il modello include gli effetti dovuti a onde regolari ed irregolari, l'influenza delle correnti di marea, lo stress del vento, l'attrito del fondo e tutti i processi di trasformazione delle onde come rifrazione, shoaling e frangimento.

Il trasporto sedimentario è calcolato attraverso il codice STP (Sediment Transport Program), basato sulle locali condizioni di moto ondoso, correnti e caratteri sedimentari. Questo modello descrive la variazione nel tempo della distribuzione del carico sedimentario di fondo e sospeso all'interno di un periodo d'onda, dovuto alla combinazione di onde e correnti, includendo anche l'effetto del frangimento quando rilevante.

Il trasporto totale annuo Q_{annual} è dato dalla somma dei contributi di ciascuna onda incidente definita nel clima ondoso annuo, si ha quindi che:

$$Q_{annual} = \sum_{i=1}^{NSETS} Q_s(i) \cdot duration(i)$$

dove NSETS è il numero totale di onde incidenti in un anno.

Il risultato fornito dal LITDRIFT consiste in una descrizione deterministica della distribuzione del trasporto sedimentario longitudinale, lungo un profilo perpendicolare a costa, insieme ad una dettagliata descrizione del budget sedimentario.

5.1.2 LITLINE

Il modulo LITLINE simula l'evoluzione della linea di costa in un assegnato periodo sulla base del trasporto solido litoraneo, delle opere marittime presenti, delle immissioni di sedimento e dei ripascimenti artificiali presenti nell'area di studio.

Il calcolo di LITLINE è basato su un sistema di coordinate nel quale l'asse x è parallelo o sub parallelo alla linea di riva e l'asse y è diretto verso il largo.
Il codice risolve l'equazione di continuità per il volume dei sedimenti espressa da:

$$\frac{\partial y_c(x)}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}(x)}\frac{\partial Q(x)}{\partial x} + \frac{Q_{sou}(x)}{h_{act}(x)\Delta x}$$

dove si ha:

$y_c(x)$ - distanza della costa dall'asse x,
t - tempo,
$h_{act}(x)$ - altezza di spiaggia attiva,
Q(x) - trasporto di sedimenti lungo la spiaggia espresso in volume,
x - posizione lungo l'asse x,
Δx - passo di discretizzazione lungo l'asse x,
$Q_{sou}(x)$ - termine sorgente espresso in volume/Δx.

In ogni punto di calcolo il valore del trasporto Q(x,α), dove α rappresenta l'inclinazione della linea di spiaggia nel punto x, è calcolato interpolando i valori contenuti in una tabella costruita richiamando automaticamente il modulo LITDRIFT per un numero finito di eventi che descrivono l'intero clima ondoso.
Durante l'evoluzione della spiaggia è possibile considerare anche la presenza di strutture: barriere frangiflutti, moli, pennelli e barriere radenti.

La presenza di un molo determina due principali effetti sul trasporto sedimentario lungo costa:

1. la corrente litoranea e quindi il trasporto sono totalmente o parzialmente bloccati dal molo in funzione della sua lunghezza rispetto alla profondità di chiusura del profilo;
2. la struttura determina un effetto di diffrazione sulle onde nella zona sottoflutto che va a modificarne l'altezza e la direzione, creando una zona d'ombra.

Di conseguenza nel caso di inserimento di moli il codice di calcolo blocca la quota parte di trasporto intercettato dal molo e modifica il trasporto a tergo dello stesso modificando l'altezza d'onda per effetto della diffrazione all'interno della zona d'ombra.
Viene considerato anche il by-pass di sedimenti al di là della struttura, attraverso la rifrazione e lo shoaling alla profondità di frangimento.

Per quanto riguarda le approssimazioni concettuali e numeriche nel calcolo della diffrazione per le barriere frangiflutti e i moli, bisogna sempre considerare il fatto che LITPACK è essenzialmente un modello monodimensionale, mentre la diffrazione è un fenomeno prettamente bidimensionale, che è quindi valutato con numerose limitazioni concettuali che devono essere tenute presenti quando si utilizzano queste strutture all'interno del modello.

5.2 Analisi dell'evoluzione della linea di costa

Il tratto di litorale preso in esame va dalla foce del Torrente Salinello, a Nord, fino a quella del Torrente Tordino, a Sud, e comprende quindi circa 3.2 km di costa a Nord del porto e circa 1.3 km a Sud.

L'analisi dell'attuale andamento evolutivo dell'area è stato svolto sulla base delle linee di costa relative agli anni 1984, 1994, derivate da rilievo aerofotogrammetrico e 2001, da rilievo topografico.

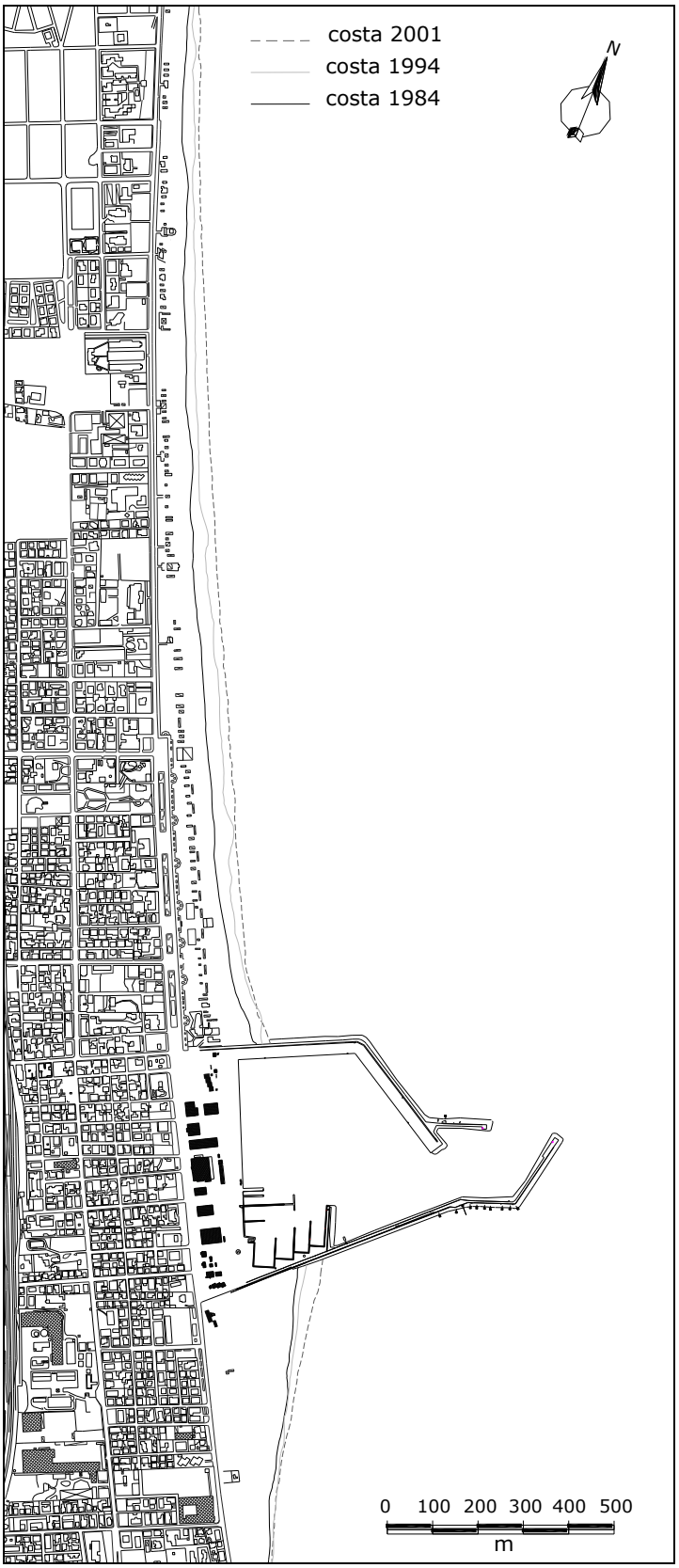


Figura 40 – Particolare dell'area di studio

Ai fini della rappresentazione nel modello, la linea di costa è stata discretizzata su una griglia con passo di 10 m. La posizione di ciascun punto è misurata rispetto da una linea di base di riferimento, che rappresenta l'asse x del sistema ed ha orientamento parallelo alla direzione media del litorale nel tratto esaminato. Nel caso specifico la normale alla linea di base è orientata a 67°N.

Dal confronto delle suddette linee di costa, mostrate in Figura 40, si sono ricostruiti gli spostamenti della riva negli intervalli di tempo 1984-1994 e 1984-2001 lungo l'area indagata, ad esclusione del tratto interno al porto (Figura 41).

Come si può osservare dal grafico, in entrambi i periodi considerati si è avuto nell'area un generale avanzamento della linea di costa, con tassi medi di circa 1.5 m/anno e un massimo di circa 4 m a Nord del porto, nel primo periodo. Nell'intervallo di tempo globale la velocità di avanzamento massima scende invece a 3 m/anno, mentre a Sud l'avanzamento è molto modesto e, verso la foce del Fiume Tordino si rilevano tratti in apparente erosione. A Sud della foce, infatti, inizia un sistema di barriere frangiflutti emerse a protezione del litorale che presenta problemi di erosione.

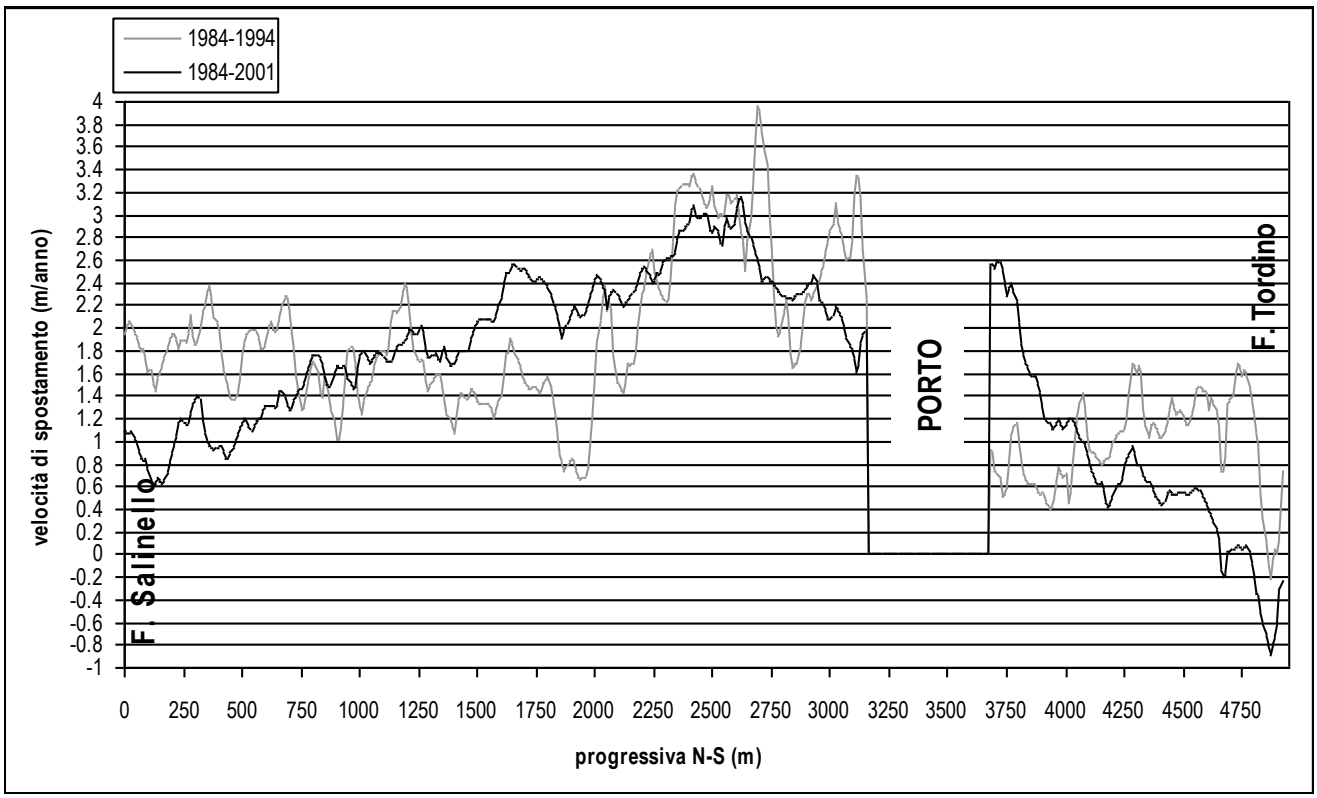


Figura 41 - Velocità di spostamento (m/anno) nei periodi 1984-1994 e 1984-2001

Analizzando l'evoluzione della linea di costa dal 1984 al 2001 e considerando una profondità di chiusura di 8 m, che rappresenta la profondità fino alla quale avvengono i maggiori fenomeni di

trasporto solido litoraneo (come è stato verificato con l'applicazione dle modulo LITODRIFT), si è potuto stimare il bilancio dei volumi di sabbia interessati dalla dinamica costiera per il tratto in esame in questo intervallo di tempo (Figura 42).

In questo periodo, infatti, si è avuto un accumulo di sedimenti che a Nord del porto può essere valutato in circa 35.000 m^3/anno, mentre a Sud in circa 10.000 m^3/anno.

Dal rilievo batimetrico effettuato nel 2001 si nota inoltre la presenza di un marcato canyon sottomarino di fronte all'imboccatura portuale, prodotto e mantenuto dalle correnti di ritorno (rip currents) che si formano, in corrispondenza della testata del molo sud, in occasione delle mareggiate più intense.

Attraverso questo canyon si ha quindi una discreta perdita di sedimenti che vengono dispersi verso largo dalla corrente di ritorno. Tale perdita è stata valutata in circa 5.000 m^3/anno.

Sommando i diversi contributi così quantificati si può stimare che il trasporto totale netto che si ha nell'area intorno al porto di Giulianova sia di circa 50.000 m^3/anno.

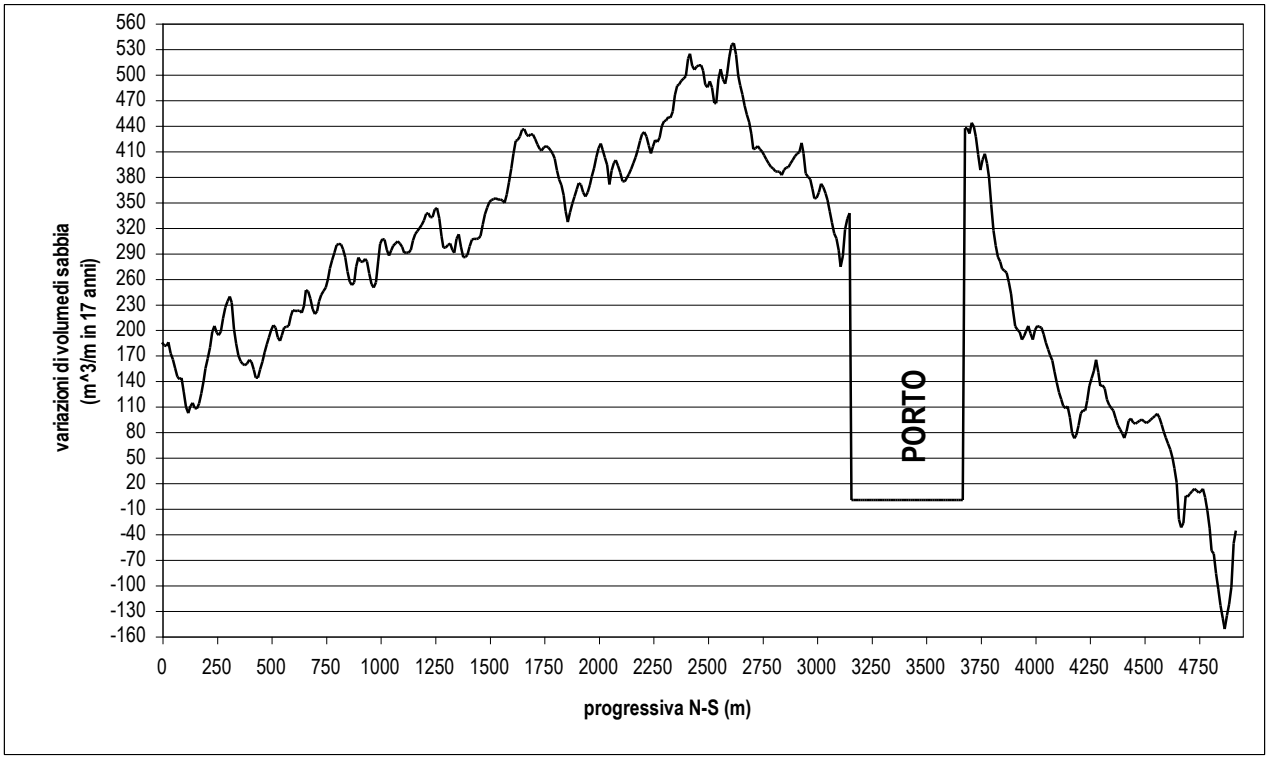


Figura 42 – Bilancio della variazione dei volumi di materiale solido per il periodo 1984-2001

Le valutazioni fatte sul bilancio dei sedimenti, in funzione degli spostamenti della linea di riva, sono state utilizzate nella fase di calibrazione del modulo di calcolo LITDRIFT, al fine di riprodurre l'entità di trasporto litoraneo stimata.

I parametri ottenuti in fase di calibrazione sono stati successivamente inseriti nel modulo LITLINE che permette di valutare l'evoluzione della linea di costa in funzione del clima ondoso e quindi dell'entità di trasporto presente.

I dati di input per il modello del trasporto litoraneo LITDRIFT sono costituiti da:

- clima ondoso rappresentativo di un anno;
- profilo medio rappresentativo dell'area, estratto dal rilievo batimetrico svolto nel 2001;
- diametro medio dei sedimenti (D_{50}) lungo il profilo.

I dati relativi al clima ondoso sono quelli ottenuti dalla traslazione delle onde da largo verso riva ottenuta mediante l'applicazione del modello di rifrazione spettrale diretta (NSW) descritta nei capitoli precedenti.
Il risultato ottenuto è mostrato nella seguente figura, in cui è riportata la componente del trasporto verso Nord, quella verso Sud e il trasporto netto.

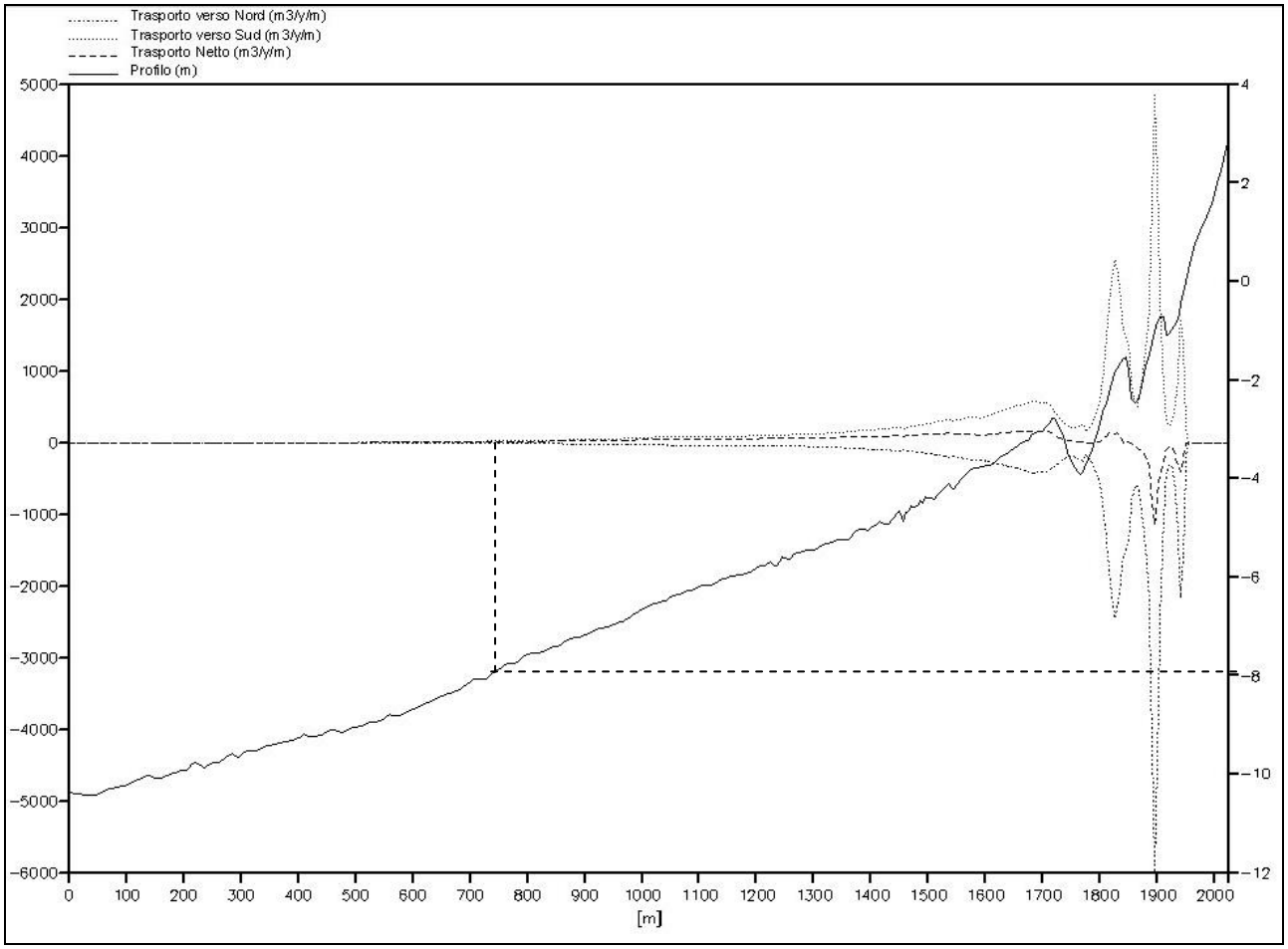


Figura 43 – Risultato complessivo del LITDRIFT

5.3 Analisi degli scenari di intervento: evoluzione della linea di riva

Nell'applicazione del modulo di analisi dell'evoluzione della linea di costa (LITLINE) inizialmente si è proceduti alla calibrazione del modello attraverso i dati pregressi esistenti (Figura 40).

Il LITLINE è stato impostato con i parametri derivanti dalla calibrazione del modello di trasporto litoraneo LITDRIFT, dopo di che si è agito sull'orientazione della linea di costa, e quindi del clima incidente, e sugli altri parametri di calibrazione, per riprodurre i dati a disposizione.

Si sono prese in considerazione le linee di costa relative agli anni 1984, 1994 e 2001. Il modello è quindi stato tarato per riprodurre, con la presenza dell'attuale porto, l'evoluzione della linea di costa in questi periodi. Questo passo è di fondamentale importanza per definire i parametri con cui

eseguire le successive analisi di previsione dell'evoluzione della linea di riva nel medio termine con le diverse soluzioni progettuali considerate.

Bisogna sottolineare ancora una volta che il codice di calcolo utilizzato è un modello ad una linea, nella cui schematizzazione non è possibile rappresentare nella totalità i fenomeni che caratterizzano l'interazione tra il porto e la dinamica litoranea.

Tuttavia l'applicazione del modello, opportunamente calibrato, è in grado di rappresentare con una buona approssimazione l'andamento del trasporto longitudinale e può quindi fornire una valida previsione della possibile evoluzione della linea di riva in funzione dei diversi layout di progettazione presi in esame.

Per effetto della schematizzazione ad una linea, nella modellizzazione i moli del porto sono assunti paralleli, e non convergenti, e rappresentati perpendicolarmente alla linea di base del sistema,

Nella successiva Figura 44 viene riportata la schematizzazione adottata per rappresentare i moli nei diversi casi esaminati.

L'effetto che il sistema portuale ha sul trasporto litoraneo si esplica essenzialmente nella possibilità di by-pass dei sedimenti da un lato all'altro del porto e quindi, sostanzialmente, nella modifica al regime di deriva litoranea attuale.

Oltre che cercare, quindi, di rappresentare nel modo più significativo possibile i moli portuali e la differenza che si ha tra i vari layout, si è anche agito sui parametri numerici che consentono di rappresentare la capacità di passaggio dei sedimenti attorno al porto per poter simulare al meglio l'azione dei due moli nelle dinamiche litorali, ed evidenziare i diversi effetti delle varie soluzioni progettuali.

Nell'impostazione del modello per il caso C si è dunque scelto di diminuire il tasso di perdita di sedimenti al largo nell'area portuale, in corrispondenza del piccolo canyon sottomarino, poiché, come evidenziato nel modello idrodinamico, la particolare struttura circolare dei moli favorisce in realtà il passaggio dei sedimenti dal lato sopraflutto a quello sottoflutto, con una minore perdita al largo, stimata in 3.000m^3/anno.

Il risultato della calibrazione del modello LITLINE ottenuto è mostrato in Figura 45. Nell'impostare i parametri di calcolo, si è introdotta una perdita di sedimenti in corrispondenza dell'imboccatura

portuale, pari a 5'000m^3/anno, come derivato dall'analisi dell'evoluzione della linea di costa, sopra illustrata. La profondità di chiusura è stata impostata a 8 m e la configurazione dei moli è quella mostrata in Figura 44.

Come si può osservare vi è una buona congruenza tra i dati reali e quelli ottenuti dalla simulazione, con uno scostamento medio di 5m sui 17 anni di simulazione.

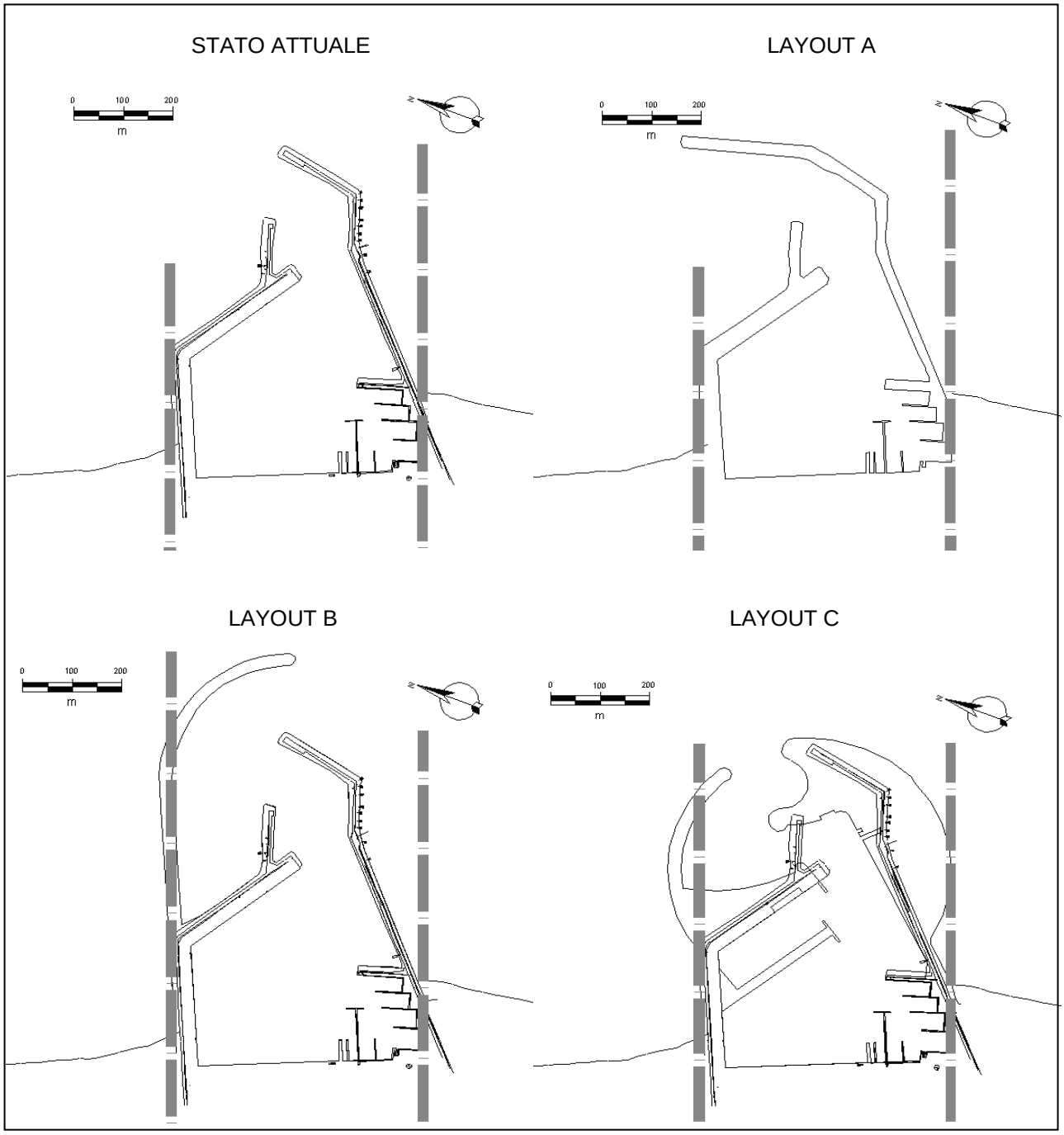


Figura 44 – Schematizzazione dei moli nel modello LITLINE per i diversi layout progettuali

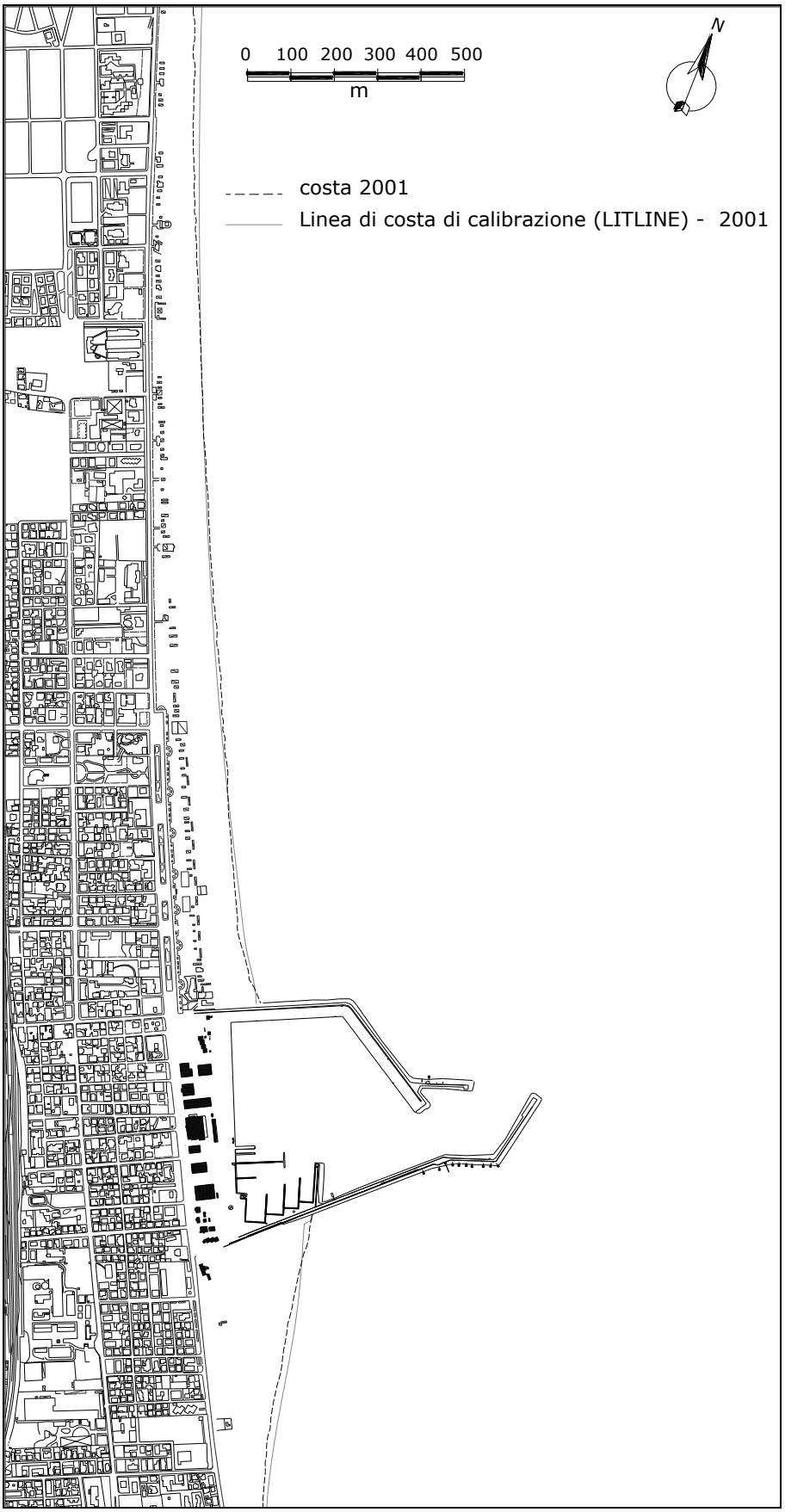


Figura 45 - Evoluzione della linea di costa dal 1984 al 2001 ottenuta con il modello LITLINE

Il modello così calibrato è stato applicato nell'analisi dell'evoluzione della linea di riva sul medio termine, cioè al 2011, dopo 10 anni dall'ipotetica realizzazione delle soluzioni progettuali.

Innanzitutto si è preso in considerazione l'attuale porto (Figura 46), per ottenere lo scenario di riferimento con il quale poter confrontare i risultati ottenuti con le tre ipotesi progettuali, al fine di individuare la soluzione ottimale.

Dall'analisi compiuta emerge che, con l'attuale configurazione portuale, l'evoluzione della costa nei prossimi 10 anni seguirà sostanzialmente l'attuale trend. Si evidenzia infatti un avanzamento del litorale a Nord del porto con tassi massimi di circa 2.5 m/anno. Nel lato sud si rileva invece un maggiore avanzamento, rispetto all'attuale, imputabile ad un riorientamento della linea di costa verso una condizione di equilibrio con la componente della deriva litorale diretta verso Nord.

Nella fase successiva il codice è stato applicato ai diversi scenari di progetto.

Come si può osservare dalla Figura 1 entrambe le ipotesi A e B comportano la presenza di un molo la cui gettata verso il largo è maggiore rispetto la configurazione attuale.

In particolare nel caso A l'ultimo tratto del molo sud si trova ad una profondità che varia tra i 5.7 m, alla testata, e gli 8 m, in corrispondenza dell'attuale testata dove è presente il canyon sottomarino.

Nel caso B, invece, il molo nord arriva ad una profondità di quasi 8 m.

Entrambe le soluzioni, quindi, determinano un cambiamento nei processi di trasporto dei sedimenti intorno al porto, rispetto alla situazione attuale e quindi una variazione delle dinamiche di evoluzione della linea di costa, a causa della diminuzione della capacità di trasporto dei sedimenti dal lato sopraflutto a quello sottoflutto.

Rispetto all'evoluzione che si avrebbe con l'attuale porto sia la configurazione A che la B portano ad un maggior accumulo di sedimenti a ridosso del molo nord, essendo il trasporto netto annuo diretto verso Sud. In particolare quest'effetto è più pronunciato con la configurazione B, poiché il molo nord presenta una gettata maggiore.

Questo è stato verificato dall'analisi condotta con il modello (Figura 47 e Figura 48), in cui si può osservare un pronunciato avanzamento della spiaggia a ridosso del molo nord, fino ad un massimo di 7 m nel caso B.

In entrambi i casi la linea di costa sud tende a riorientarsi per raggiungere uno stato di equilibrio con la componente della deriva litorale proveniente da Sud.

Nel caso C invece l'aggetto massimo dei moli a mare e l'orientazione dell'imboccatura non subiscono alcun cambiamento rispetto alla situazione attuale. Il molo nord viene allungato in modo da ottenere una configurazione a moli convergenti.

Questa soluzione, quindi, non determina delle modificazioni significative della capacità di trasporto dei sedimenti dal lato sopraflutto a quello sottoflutto del porto, ma anzi, la forma circolare delle opere esterne può favorire il "by-pass" di sedimenti riducendo la corrente di rip che disperde il materiale verso il largo, come evidenziato nelle simulazioni idrodinamiche. Per questo motivo, come già anticipato in precedenza, nell'impostazione del modello di analisi dell'evoluzione costiera si è ridotta la componente di dispersione del sedimento al largo in corrispondenza dell'imboccatura, stimando una perdita di circa 3.000m^3/anno. L'ordine di grandezza è quindi molto simile e infatti, come si può osservare dalla Figura 49, l'andamento evolutivo è essenzialmente invariato rispetto allo stato attuale.

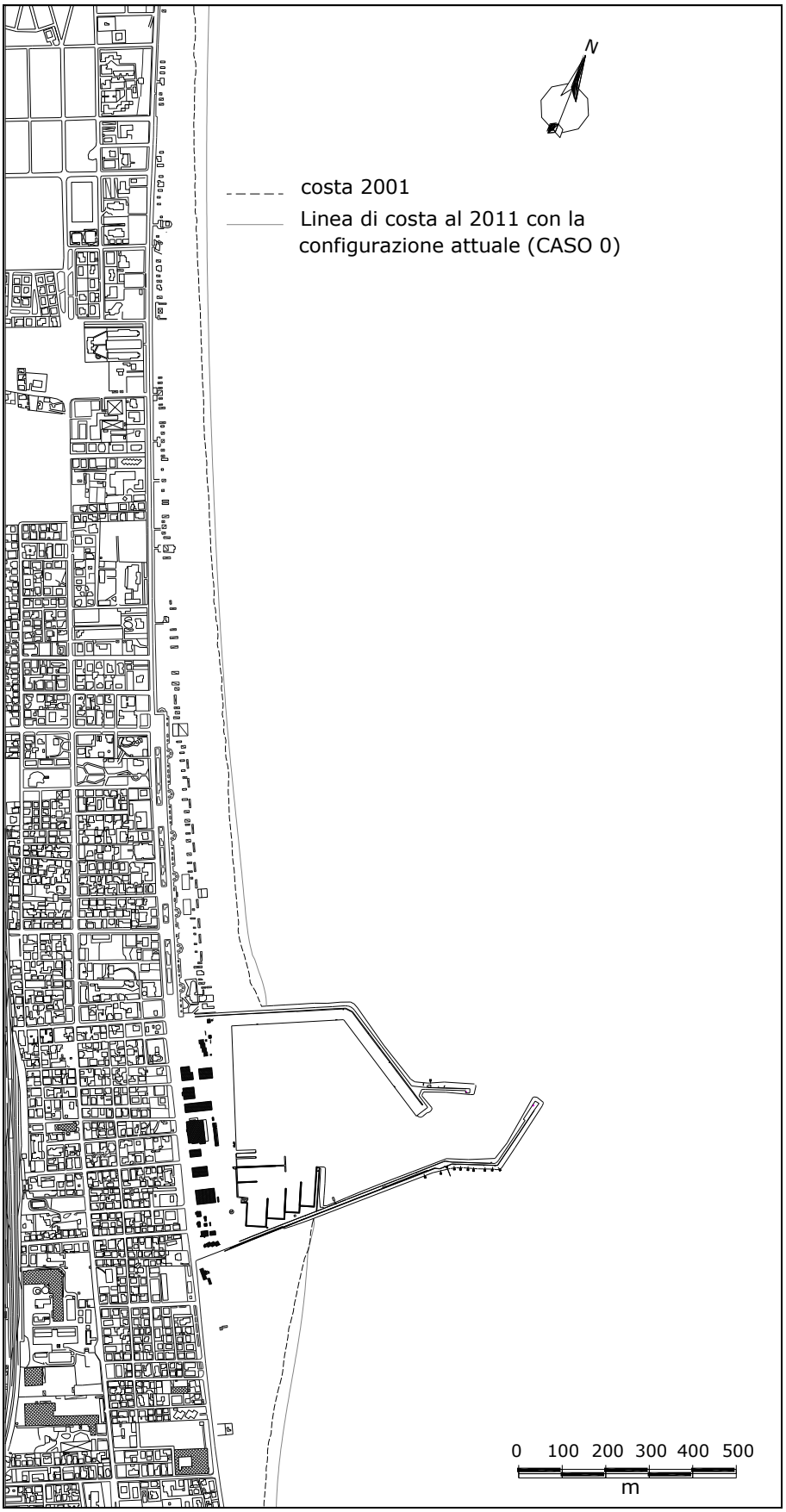


Figura 46 – Evoluzione della linea di costa con la configurazione attuale (CASO 0)

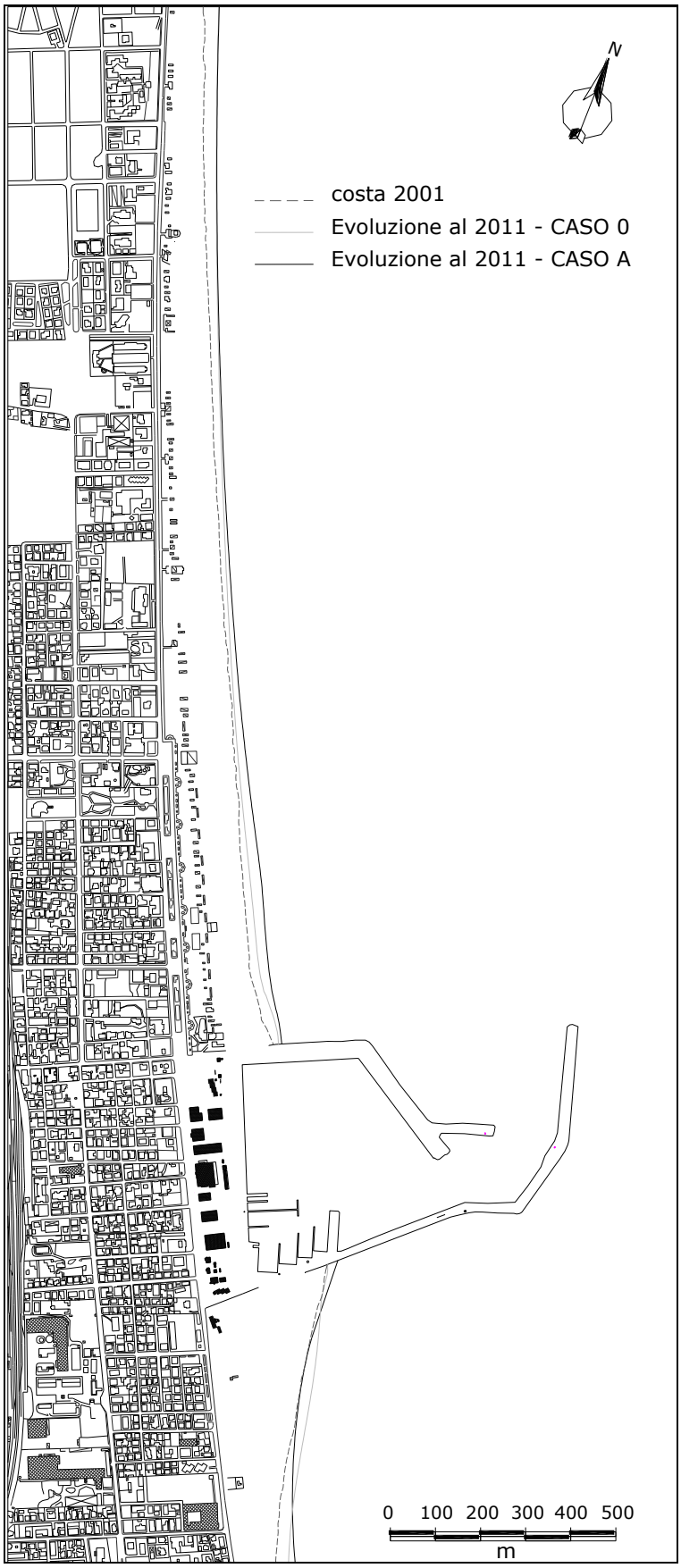


Figura 47 - Confronto dell'evoluzione prevista entro i prossimi 10 anni, nel caso A e nel caso attuale

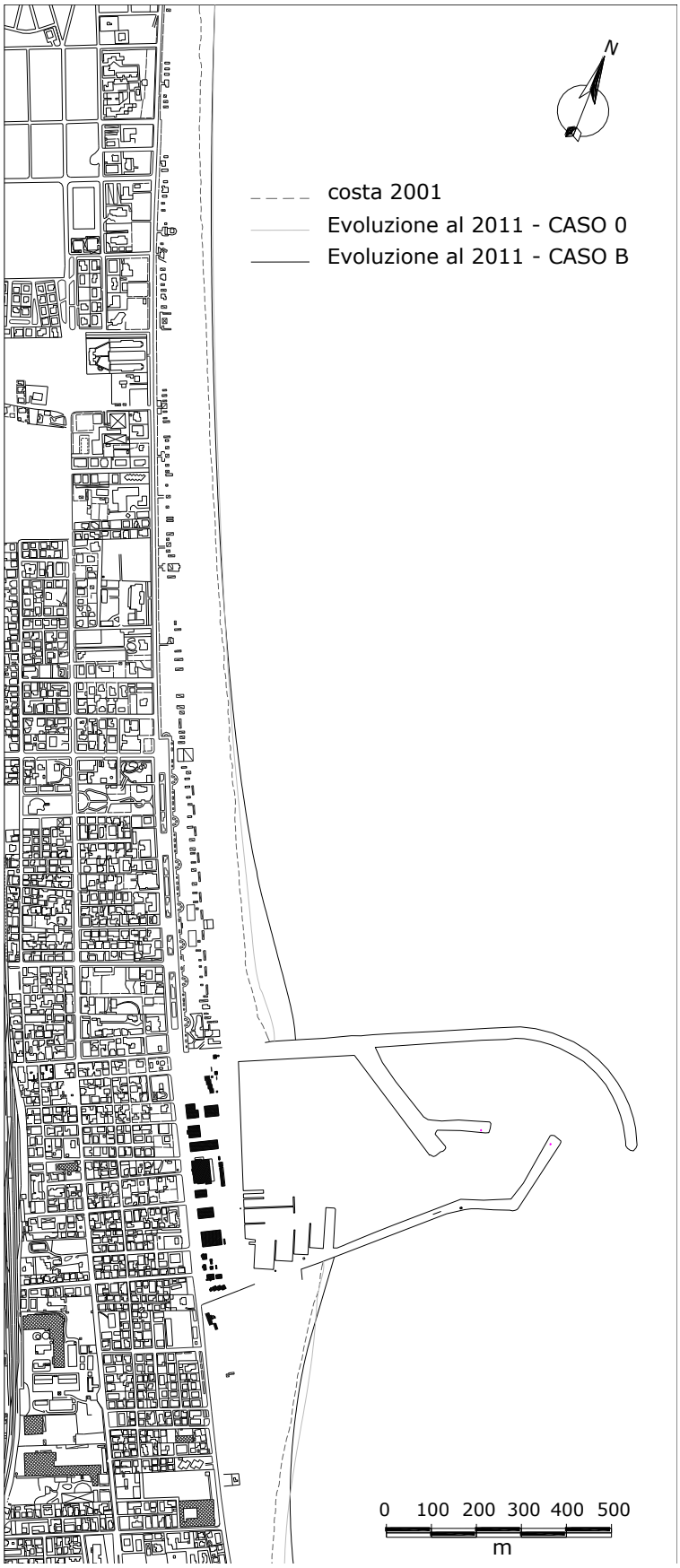


Figura 48 - Confronto dell'evoluzione prevista entro i prossimi 10 anni, nel caso B e nel caso attuale

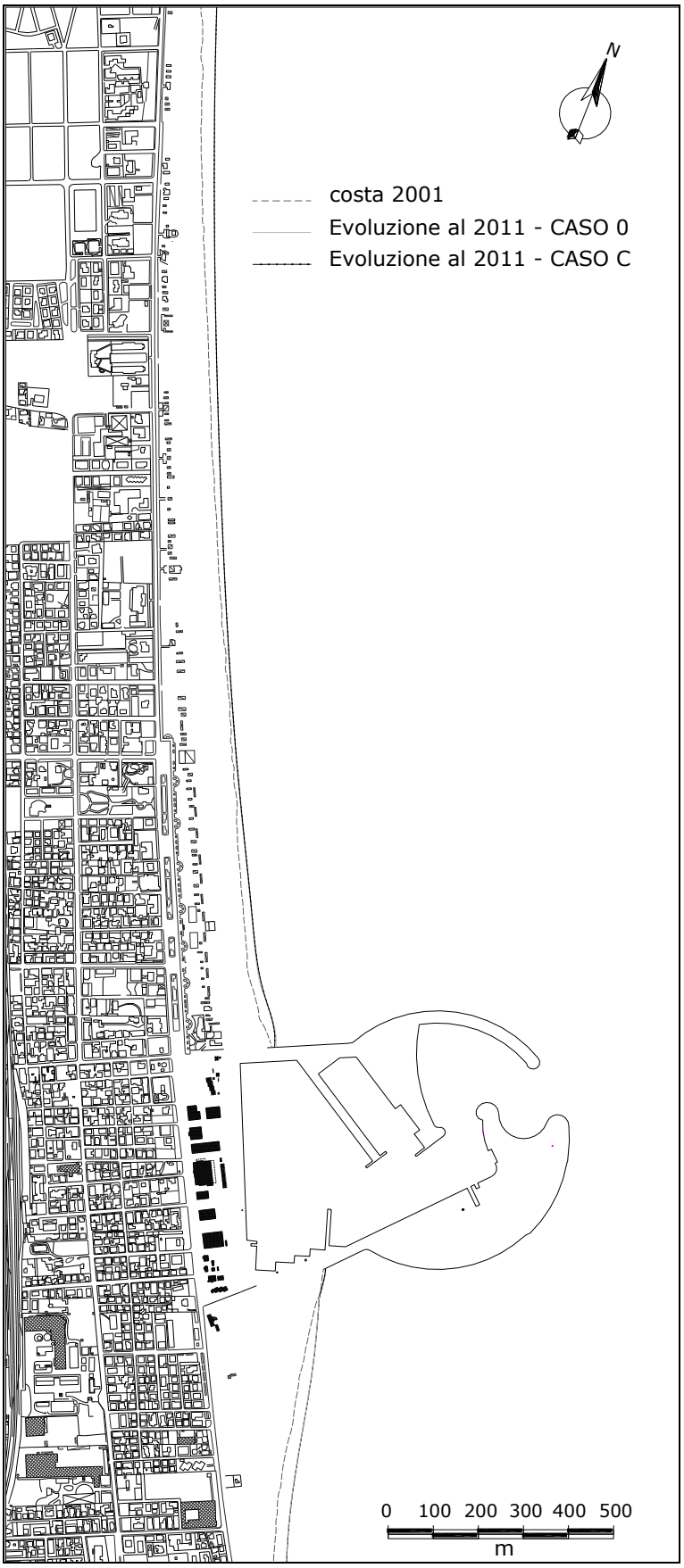


Figura 49 - Confronto dell'evoluzione prevista entro i prossimi 10 anni, nel caso C e nel caso attuale

5.4 Considerazioni sull'evoluzione dei litorali limitrofi

Dall'analisi dei dati relativi all'evoluzione del litorale adiacente il porto di Giulianova nel periodo dal 1984 al 2001 è stato possibile stimare che il trasporto solido litoraneo netto presente nell'area è pari a circa 50.000 m^3/anno ed è diretto verso Sud.

L'attuale conformazione del porto ha determinato un accumulo di materiale nel tratto a Nord del porto stimabile in circa 35.000 m^3/anno, con un by-pass di sedimenti attorno ai moli di 15.000 m^3/anno.

Di questi 15.000 m^3, circa 5.000 m^3 sono dispersi verso il largo a causa delle correnti di ritorno che si formano in corrispondenza della testata del molo sud, come rilevato dalla presenza di un piccolo canyon in quest'area.

Il trend evolutivo determinato da questo budget sedimentario presenta una sostanziale stabilità del litorale sia a Nord che a Sud del porto.

Queste premesse costituiscono la base delle analisi compiute con l'applicazione del codice di calcolo LITPACK al fine di verificare la tendenza evolutiva sul medio termine determinata dalle diverse soluzioni progettuali prese in esame.

L'analisi compiuta ha permesso di evidenziare che la soluzione progettuale C (Figura 1) non comporterà in futuro variazioni sostanziali dell'attuale tendenza evolutiva del litorale adiacente al porto di Giulianova. Nel medio termine, infatti, le previsioni dell'evoluzione ottenuta con la configurazione attuale e con il layout C non mostrano differenze rilevanti e si mantengono entrambe sui tassi di avanzamento attuali.

Le soluzioni A e B, d'altro canto, comportano l'instaurarsi di una diversa dinamica litorale, poiché prevedono entrambe un maggiore aggetto dei moli, rispettivamente, sud e nord.

Ciò determinerebbe, si, un avanzamento della linea di riva a Nord del porto, dovuto al fatto che il trasporto litoraneo netto è diretto verso Sud ma, di conseguenza, si avrebbe un deficit sedimentario nel tratto meridionale con un riorientamento della linea di costa alla ricerca di un nuovo stato di equilibrio con le mutate condizioni idrodinamiche.

6. TRASPORTO SOLIDO NEL CAMPO BIDIMENSIONALE

Al fine di meglio definire le caratteristiche del trasporto solido nel paraggio litoraneo del Porto di Giulianova è stata impostata una metodologia di calcolo del trasporto solido non più basata solamente sulla capacità di trasporto lungo un determinato profilo di spiaggia, ma che tiene conto di tutto il campo bidimensionale. Mediante il modulo *Sediment Transport* del codice di calcolo MIKE21 del *Danish Hydaulic Institute*, sono state eseguite una serie di simulazioni che hanno consentito di verificare le quantità che erano state determinate precedentemente con il modello ad una linea LITPACK. In questo modo, operando sulla capacità di trasporto e sulla reale movimentazione di sedimenti che è stato possibile determinare grazie ai rilevi passati delle linee di costa è stato tarato il modello sedimentario.

Bisogna tenere presente che comunque non si tratta di un modello a fondo mobile pertanto non è in grado di quantificare l'accumulo o l'erosione che si verifica durante l'arco di un anno, ma fornisce la capacità globale di trasportare i sedimenti.

L'applicazione del modulo ST è direttamente legata ai moduli di propagazione del moto ondoso e al modulo di circolazione idraulica pertanto ogni singola simulazione viene accoppiata anche ad una simulazione con PMS e una simulazione con HD descritte ampiamente nella fase precedente del lavoro.

Il primo passo è stato la scelta di una rosa di onde rappresentative dell'intero clima ondoso, una volta scelte tali onde sono state simulate con i moduli PMS, HD ed ST e quindi, associata ad esse una percentuale di occorrenza che tenesse conto di tutte le onde, è stato desunto un comportamento della dinamica sedimentologica per tutto l'anno.

La metodologia è stata applicata ai quattro scenari di progetto.

6.1 Scelta delle onde di simulazione

Al fine di rappresentare correttamente l'intero clima ondoso dal punto di vista sedimentologico sono possibili tre principali tipi di approccio:

a) Utilizzare l'intera serie storica rilevata;
b) utilizzare l'intera rosa delle onde, in cui ogni onda viene dotata di un peso pari alla percentuale di occorrenza;
c) considerare delle onde che siano rappresentative dell'intera serie in termini di capacità di trasporto solido lungo riva.

Il primo caso è certamente il più completo e permette di valutare molto correttamente tutti i fenomeni dinamici indotti dal moto ondoso, tuttavia appare molto impegnativo in quanto potrebbe essere necessario considerare un numero di onde che risulterebbe molto oneroso per la capacità computazionale dell'elaboratore.
Il secondo metodo è più facilmente applicabile in quanto consente di accorpare in classi un certo numero di onde simili per direzione, periodo e altezza. Ad ogni classe d'onda viene quindi assegnata una frequenza di occorrenza in funzione del numero di eventi appartenenti a quella determinata classe. Questo metodo viene ad esempio utilizzato laddove le elaborazioni siano dirette e non necessitino eccessivi e gravosi passaggi per ottenere la risoluzione del fenomeno che si sta studiando; ad esempio nelle applicazioni dei modelli di evoluzione ad una linea come il LITPACK.

L'ultimo caso, ovvero quello di considerare un numero molto ristretto di onde, è necessario allorquando si abbia la necessità di applicare modelli molto più complessi e completi. Un tipico esempio è il caso dell'applicazione del MIKE21 ST nel quale è necessario applicare una modellizzazione del moto ondoso (MIKE21 PMS), quindi applicare le equazioni per la determinazione delle correnti marine indotte (MIKE 21 HD), quindi applicare il codice di calcolo per il trasporto solido (MIKE21 ST) per la determinazione del trasporto solido ed infine integrare i risultati per verificare il comportamento globale delle onde nel sito in oggetto di studio.

In questo caso è stato applicato l'ultimo metodo descritto definendo una serie di onde rappresentative per la stima del trasporto solido.

Il metodo utilizzato per la scelta delle onde può essere così riassunto:

1) Raggruppamento delle onde a largo in differenti settori di circa 20÷30°. Si hanno pertanto sei settori che rappresentano l'intero settore di traversia del sito:
   a) primo settore da 350 a 20°N;
   b) secondo settore da 20 a 40°N
   c) terzo settore da 40 a 60°N
   d) quarto settore da 70 a 90°N
   e) quinto settore da 90 a 110°N
   f) sesto settore da 110 a 140°N

2) Calcolo della componente di flusso di energia long-shore P_{ls} per ogni evento. Ciò è basato sulla teoria che il trasporto dei sedimenti long-shore è proporzionale al flusso di energia lungo riva dell'onda.
   a) $H^2 \; T \; \sin(2(Dir_i - Dir_N)) \; freq$

dove *H* è l'altezza d'onda significativa a largo in metri;
T è il periodo medio in secondi;
Dir_i è la direzione dell'onda incidente al largo in gradi rispetto al Nord;
Dir_N è la direzione della normale alla linea media di riva e viene posto a 65°N;
freq è la frequenza di occorrenza dell'onda

Tale metodo differisce lievemente dal metodo utilizzato per la taratura con il modulo LITDRIFT che utilizza tutte le onde della serie, sostanzialmente il risultato e lo stesso.

3) Calcolo del momento di primo ordine della relazione tra il flusso di energia e l'altezza significativa (P_{ls}; H_s). Questo è considerato come l'altezza d'onda rappresentativa H_{rep}.

   Matematicamente può essere calcolato come:

$$H_{rep} = \frac{\int H \, P_{ls} \, dH}{\int P_{ls} \, dH} \cong \frac{\Delta H \sum H_i \; P_{lsi}}{\Delta H \sum P_{lsi}} = \frac{\sum H_i \; P_{lsi}}{\sum P_{lsi}}$$

4) Scelta dell'onda con l'altezza più simile all'onda con H_{rep}. Se tale altezza si presenta con differenti periodi e direzioni è consigliabile scegliere quella che determina il maggior contributo in termini di P_{ls}.

5) Calcolo della frequenza di occorrenza equivalente per dare alla singola onda scelta lo stesso P_{ls} di tutto il gruppo di onde rappresentato:

$$f_{rep} = \frac{\sum P_{lsi}}{H_{rep}^2 \, T_{rep} \, Sin(2\,(Dir_{rep} - Dir_N))}$$

Utilizzando questo tipo di procedura si ottiene la seguente rosa di sei eventi significativi che, riprodotti con la frequenza fittizia f_{rep} rappresentano l'intero clima annuale.

Evento	Sectore rappresentato	H_{rep} (m) Calcolato	H_s (m) a largo	Tm (s) a largo	MWD (°N) a largo	frequenza equivalente	Giorni all'anno
1L (F)	070 - 090	1.82	1.75	6.5	80	0.632	2.3
2L (E)	090 - 110	1.91	1.75	6.5	100	5.306	19.4
3L (D)	110 - 140	1.99	1.75	6.5	110	5.115	18.7
1R (C)	060 - 040	2.67	2.75	7.5	40	0.662	2.4
2R (B)	040 - 020	2.82	2.75	6.5	20	1.912	7.0
3R (A)	020 - 350	2.76	2.75	6.5	0	3.613	13.2
						totale	63.0

Tabella 3 – schematizzazione del clima medio annuo mediante la scelta di sei onde rappresentative

Nella Tabella 3 è schematizzato correttamente il clima medio annuo che si verifica nel paraggio di Giulianova. È bene riprodotto il fatto che le onde da Est e dal II quadrante sono più frequenti ma con altezze d'onda minori e periodi maggiori. Le onde del I quadrante sono invece meno frequenti ma con altezze maggiori. Si noti anche che mediamente le onde dal secondo quadrante hanno periodi maggiori delle onde del primo. Questo è indice del fatto che le onde del II quadrante sono onde di swell mentre le onde del primo sono onde di mare vivo e pertanto queste ultime hanno una maggiore capacità di trasporto.

6.2 Applicazione del MIKE21 PMS per il calcolo della propagazione dei sei eventi

Così come fatto in occasione della prima fase del lavoro sono state propagate le onde mediante l'applicazione del modello PMS (parabolic Mild Slope) (cfr. § 6.1) Utilizzando le onde riportate in Tabella 3.

L'applicazione è stata fatta considerando i quattro scenari di modellazione descritti precedentemente. Sostanzialmente rispetto alle onde simulate in precedenza non vi sono variazioni significative del comportamento del moto ondoso, tuttavia le simulazioni sono state rifatte al fine di determinare quantitativamente i campi di radiation stress indispensabili per la valutazione delle conrrenti indotte dal moto ondoso e per la quantificazione delle esatte altezze d'onda che permettono di mettere in sospensione i sedimenti e quindi di valutare correttamente i tassi di trasporto durante l'applicazione del modulo ST.

Di seguito vengono riportati i risultati delle simulazioni.

6.2.1 PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO LAYOUT ATTUALE

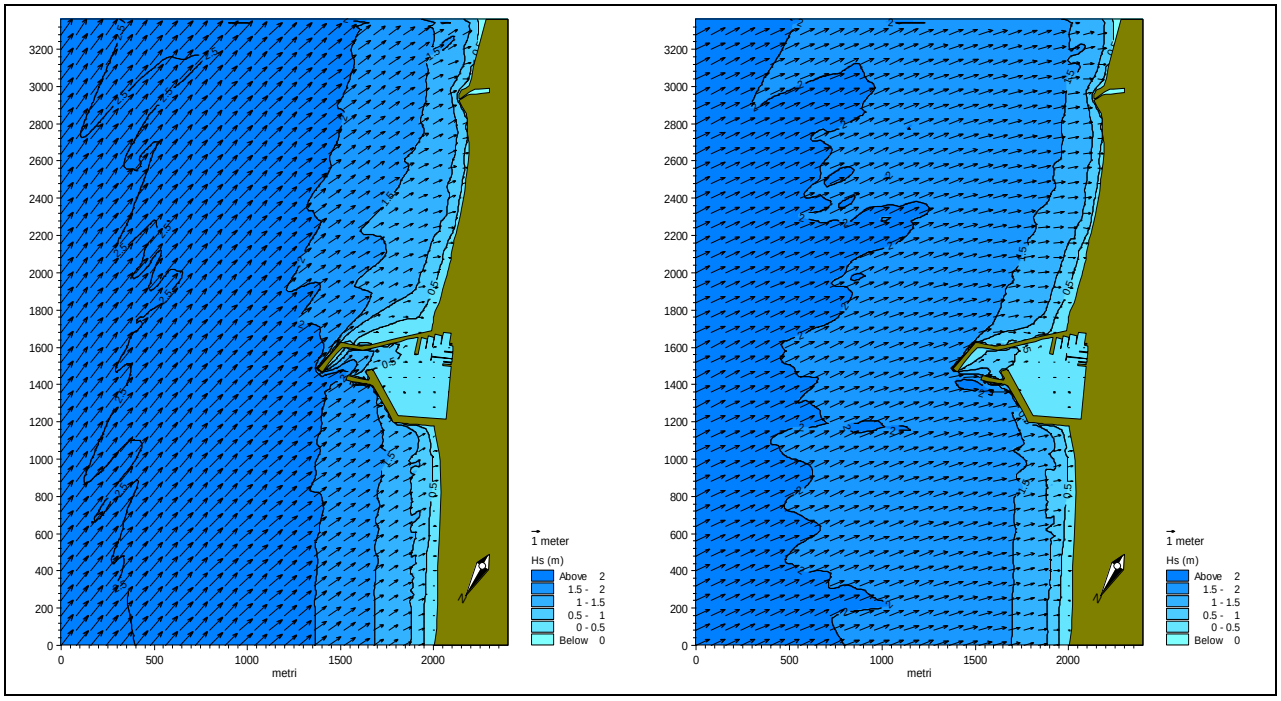


Figura 50 – Campi di moto ondoso con il porto in condizioni attuali per l'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

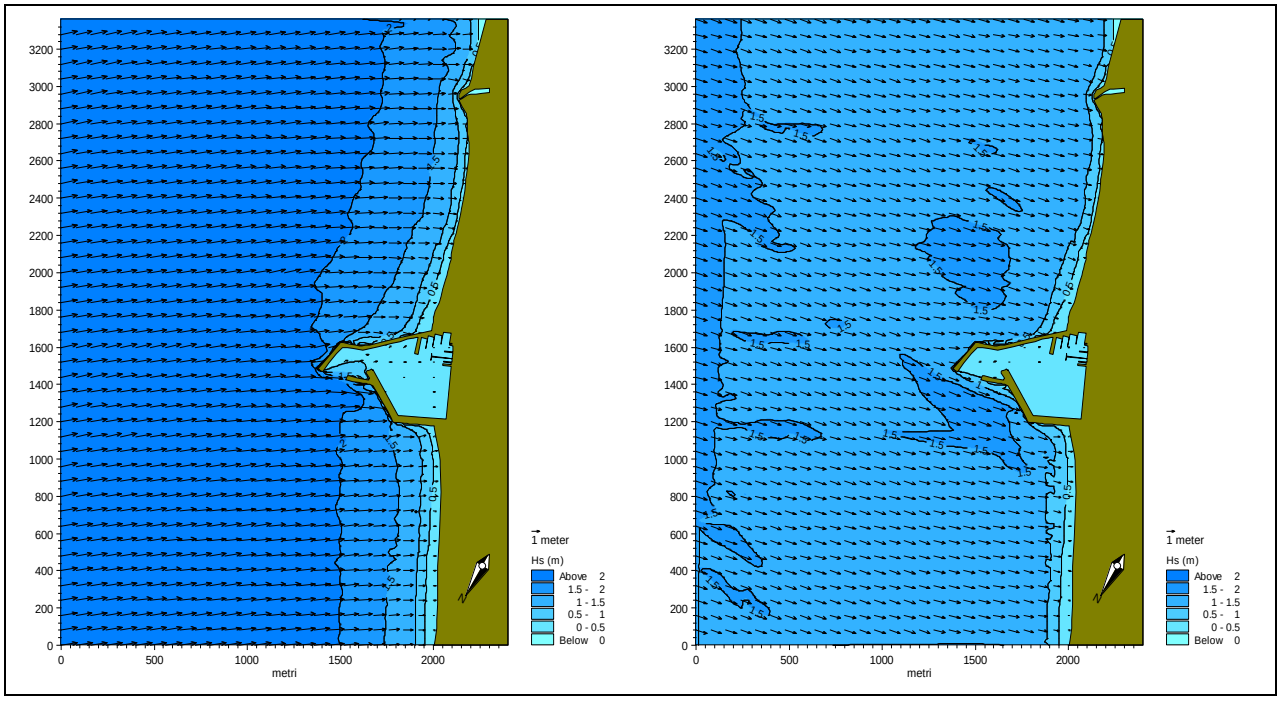


Figura 51 - Campi di moto ondoso con il porto in condizioni attuali per l'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

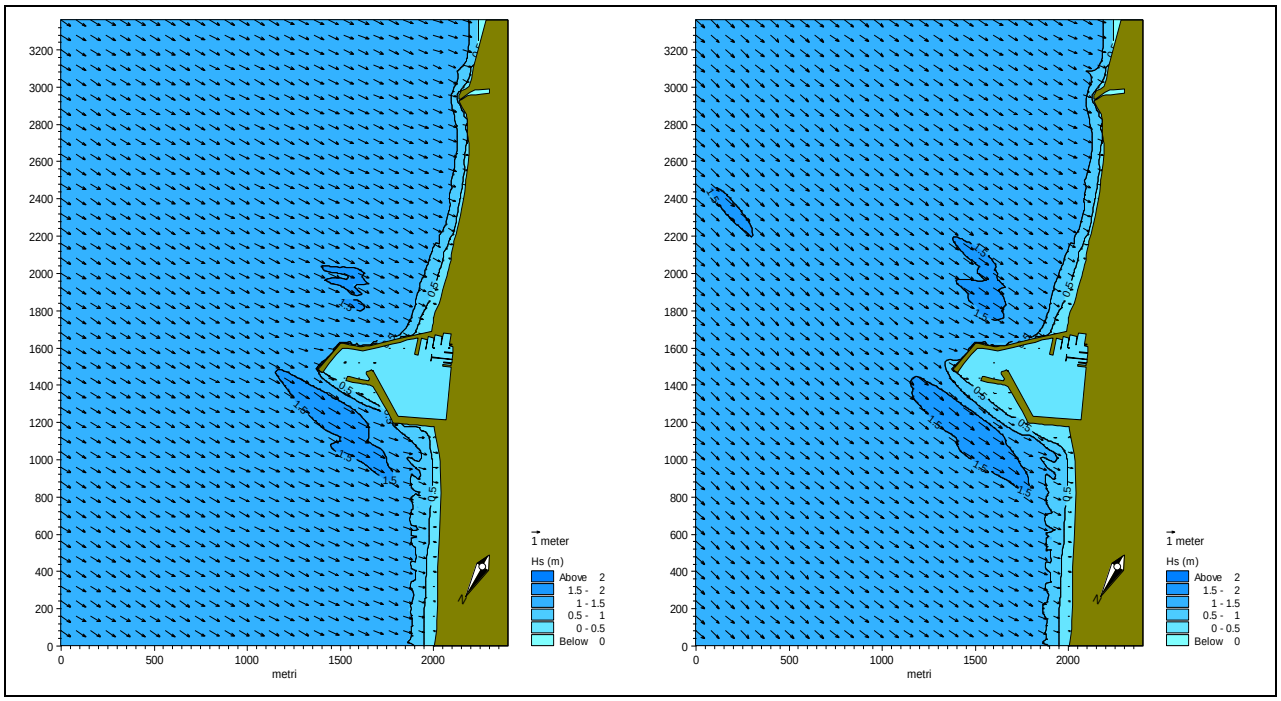


Figura 52 - Campi di moto ondoso con il porto in condizioni attuali per l'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.5 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

6.2.2 PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO LAYOUT A

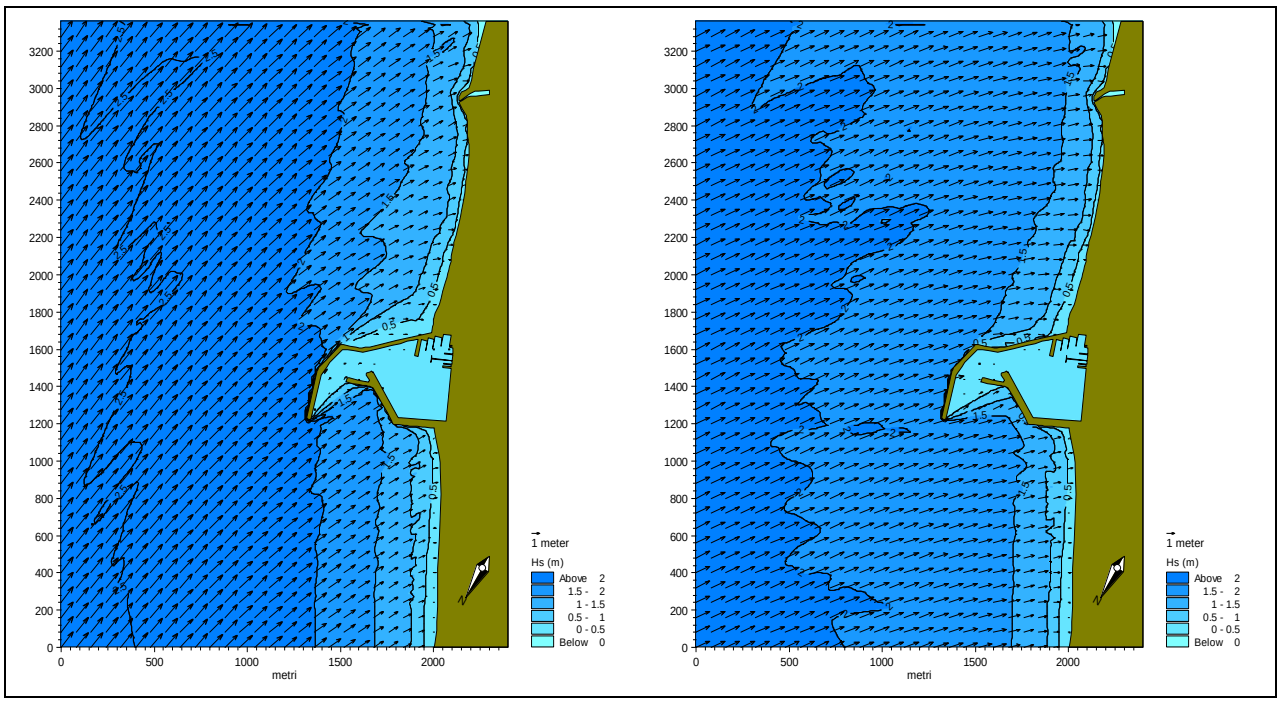


Figura 53 - Campi di moto ondoso con il porto con layout A per l'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

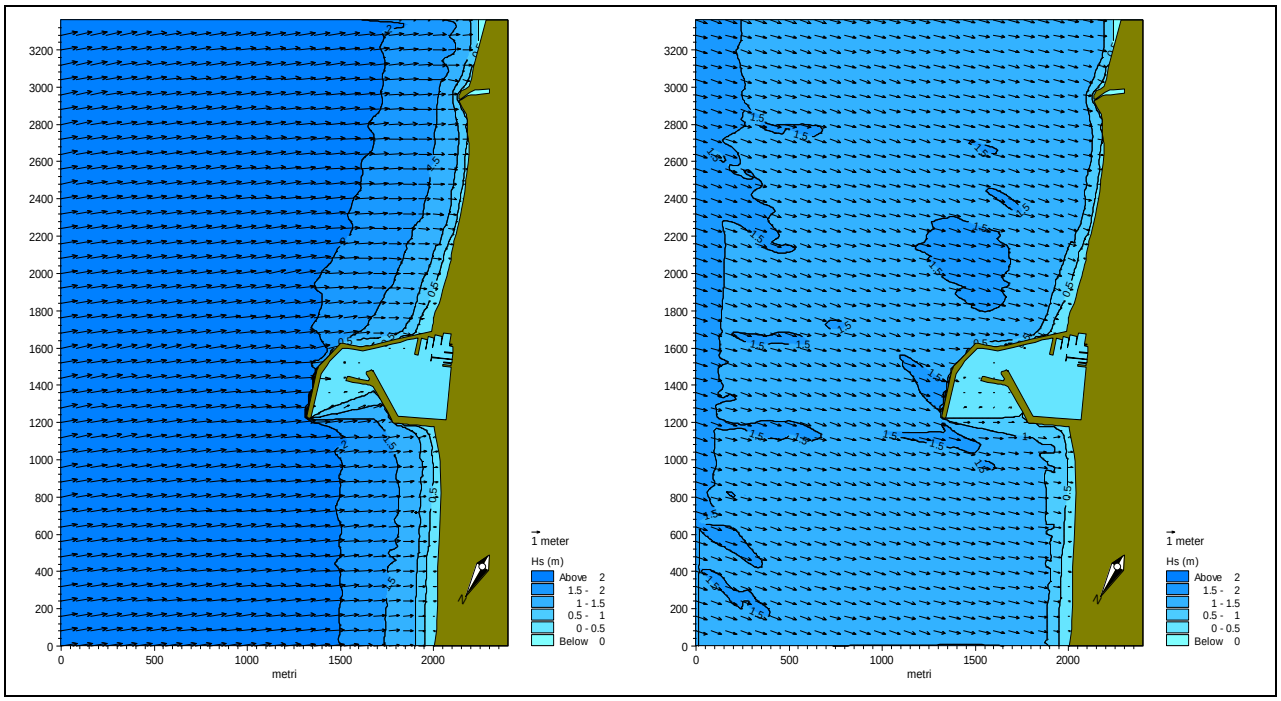


Figura 54 - Campi di moto ondoso con il porto con layout A per l'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

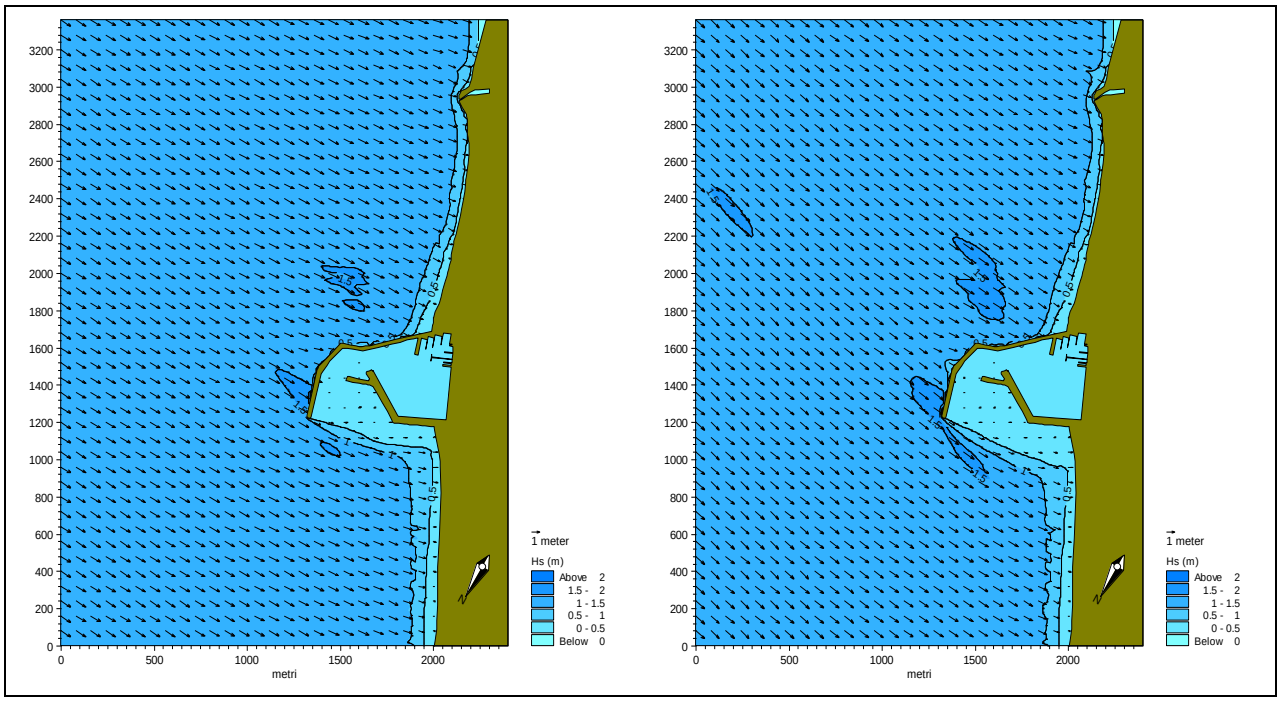


Figura 55 - Campi di moto ondoso con il porto con layout A per l'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.5 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

6.2.3 PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO LAYOUT B

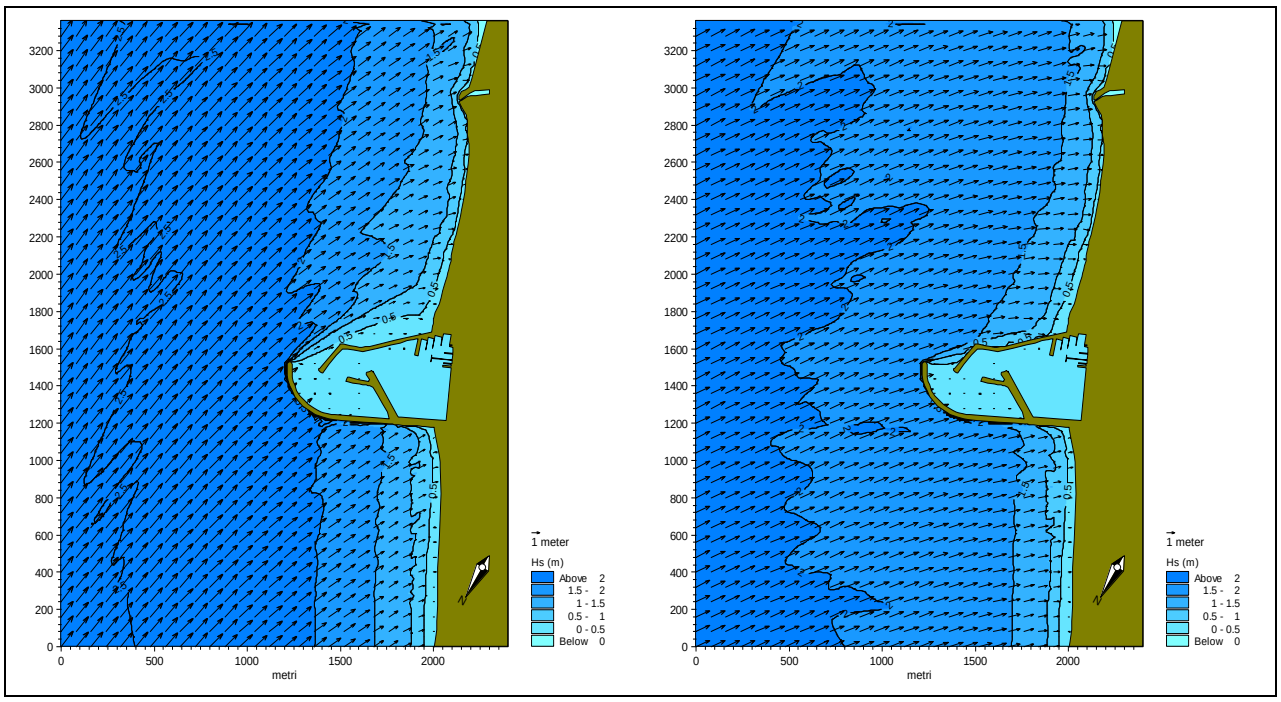


Figura 56 - Campi di moto ondoso con il porto con layout B per l'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

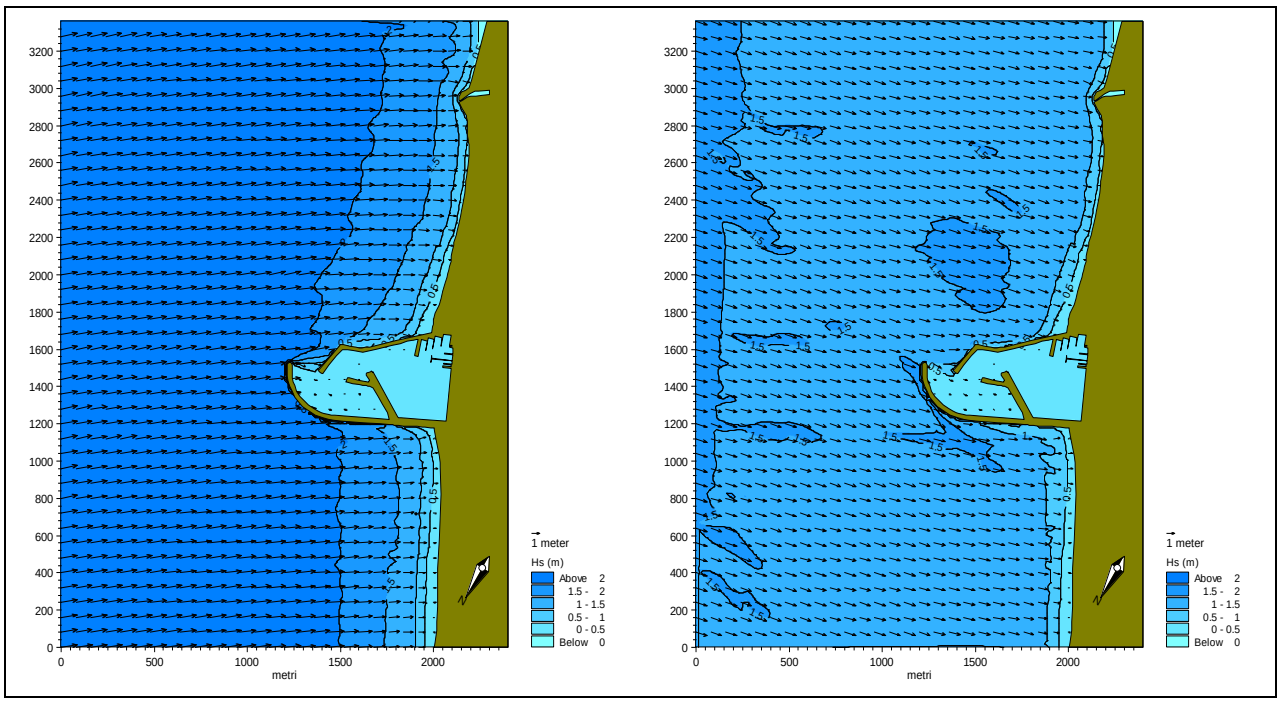


Figura 57 - Campi di moto ondoso con il porto con layout B per l'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

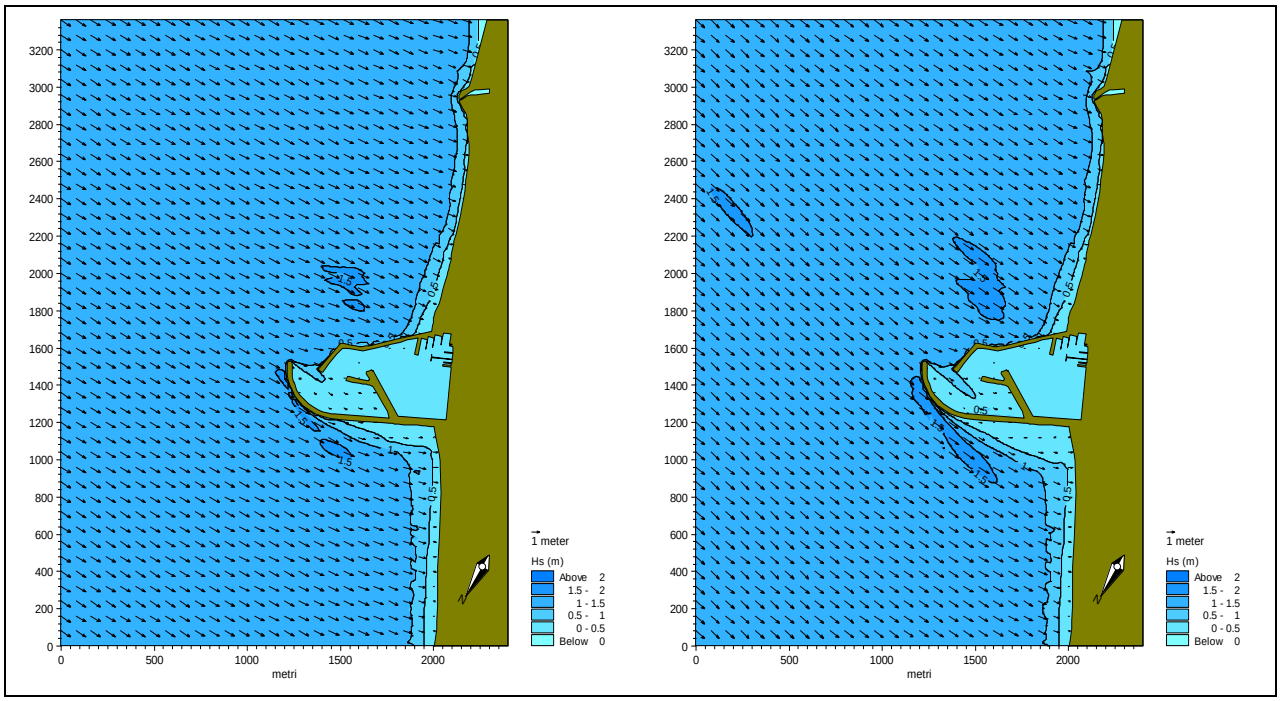


Figura 58 - Campi di moto ondoso con il porto con layout B per l'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.5 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

6.2.4 PROPAGAZIONE MOTO ONDOSO LAYOUT C

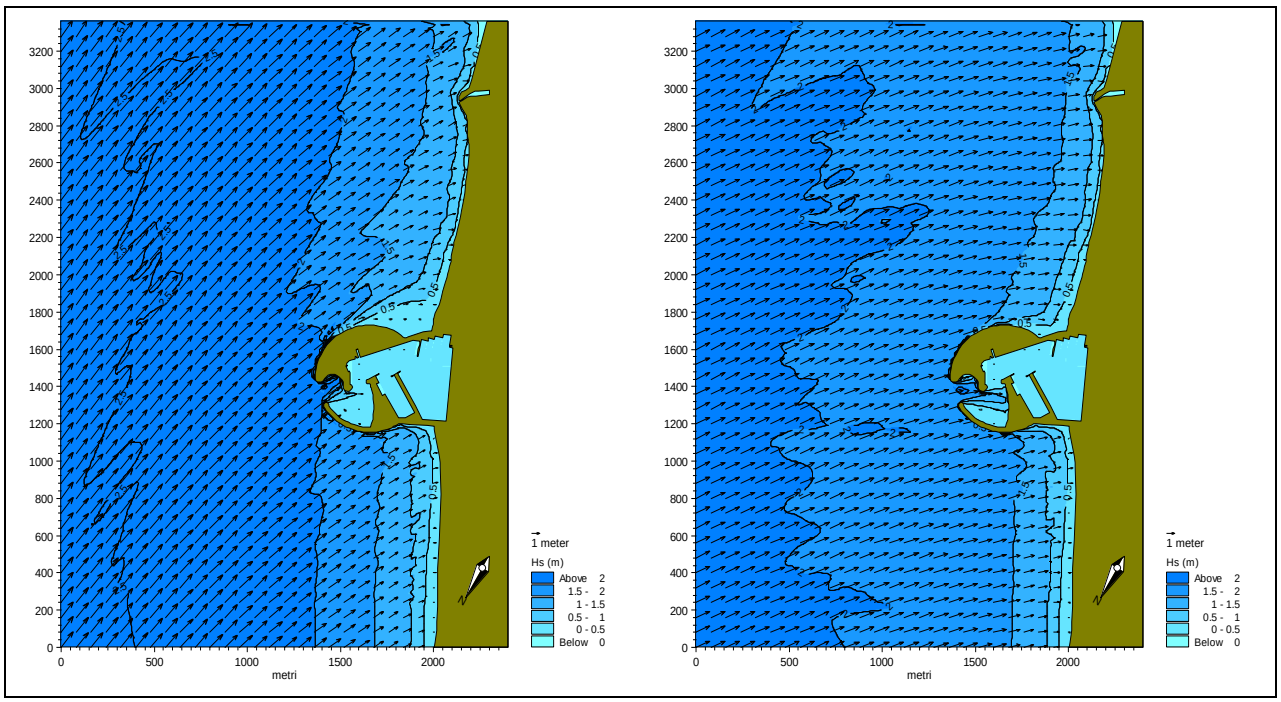


Figura 59 - Campi di moto ondoso con il porto con layout C per l'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

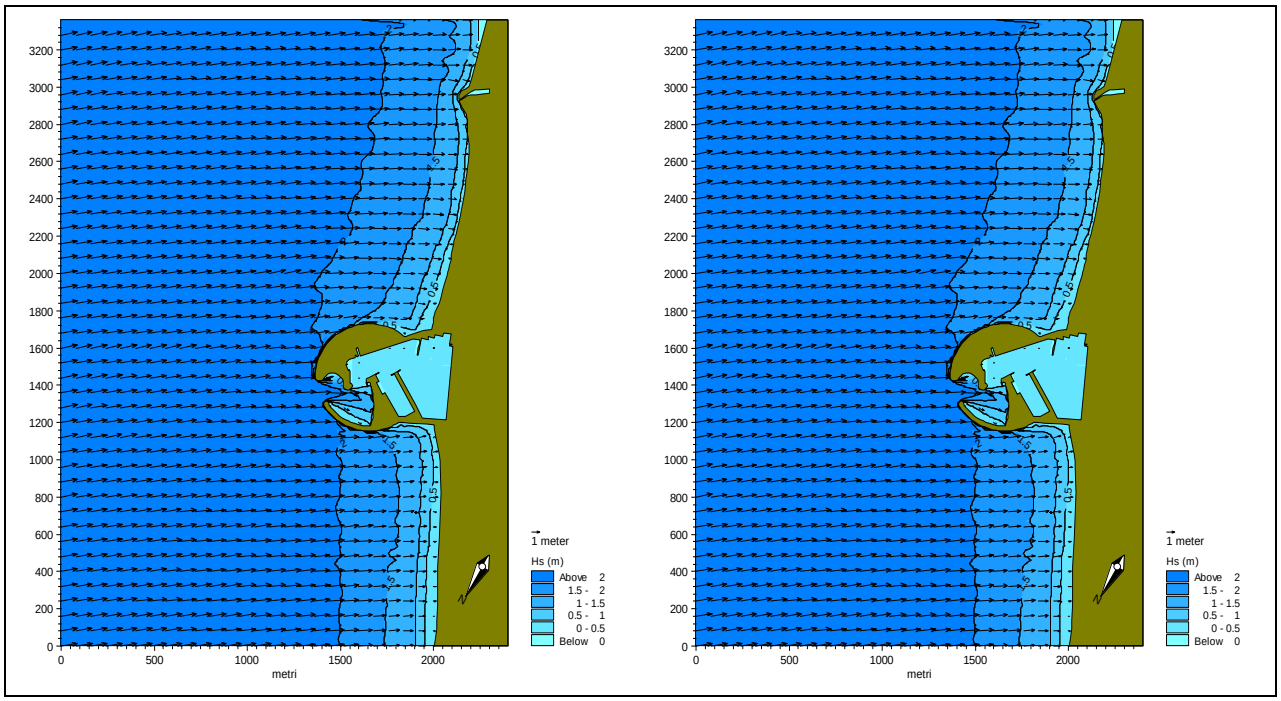


Figura 60 - Campi di moto ondoso con il porto con layout C per l'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

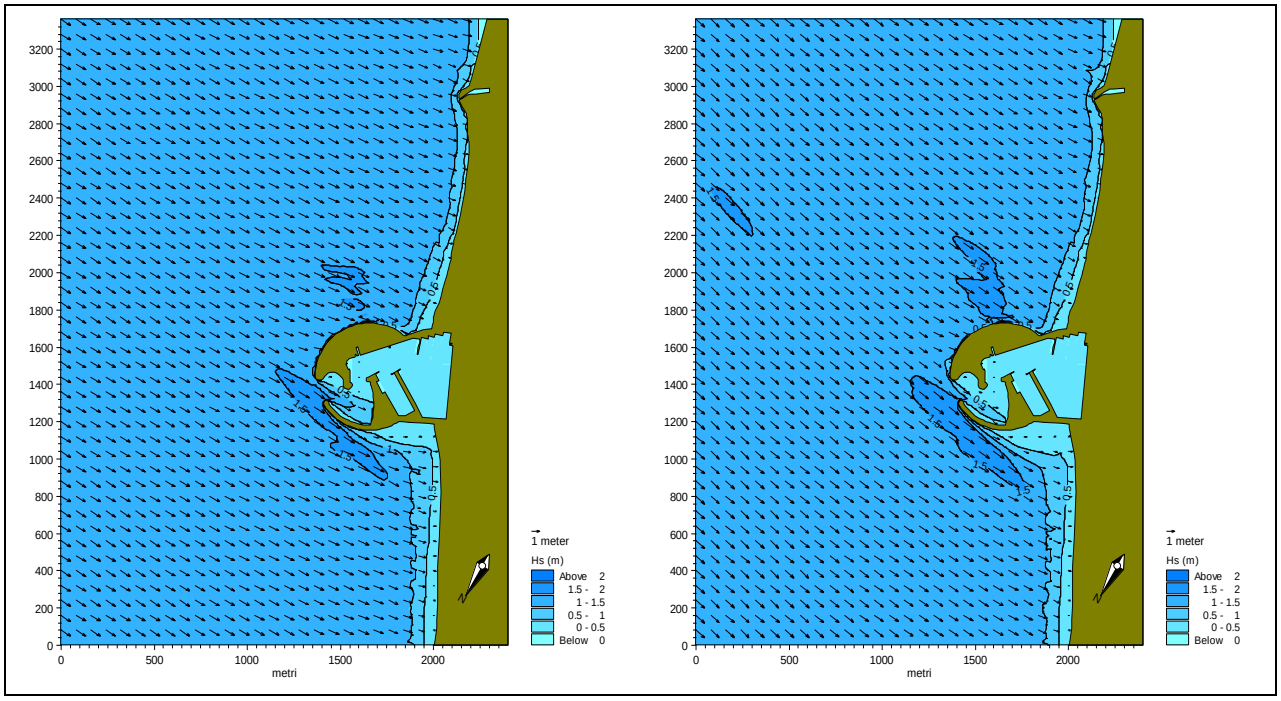


Figura 61 - Campi di moto ondoso con il porto con layout C per l'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.5 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

6.3 Circolazione idrodinamica indotta dai sei eventi ondosi

La circolazione idraulica indotta dal moto ondoso viene calcolata mediante l'applicazione del modulo HD del MIKE21 così come già fatto per le applicazioni precedenti nel porto di Giulianova. Le onde simulate sono le stesse utilizzate per la propagazione con il modello parabolico. Anche gli scenari di modellizzazione sono gli stessi utilizzati per il modello delle onde, ma in questo caso, al fine di ottimizzare i tempi di calcolo è stata utilizzata una griglia con maglia di dimensione superiore ovvero di 12 m anziché di 4 m.

Di seguito vengono riportati i risultati della modellazione idrodinamica. Tali risultati, così come osservato per i risultati del modello Parabolico di propagazione del moto ondoso non differiscono in maniera qualitativa dai risultati ottenuti con le onde simulate precedentemente, è stato necessario comunque simularle al fine di ottenere in maniera quantitativa i valori delle correnti associati alle onde descritte sopra.

6.3.1 IDRODINAMICA LAYOUT ATTUALE

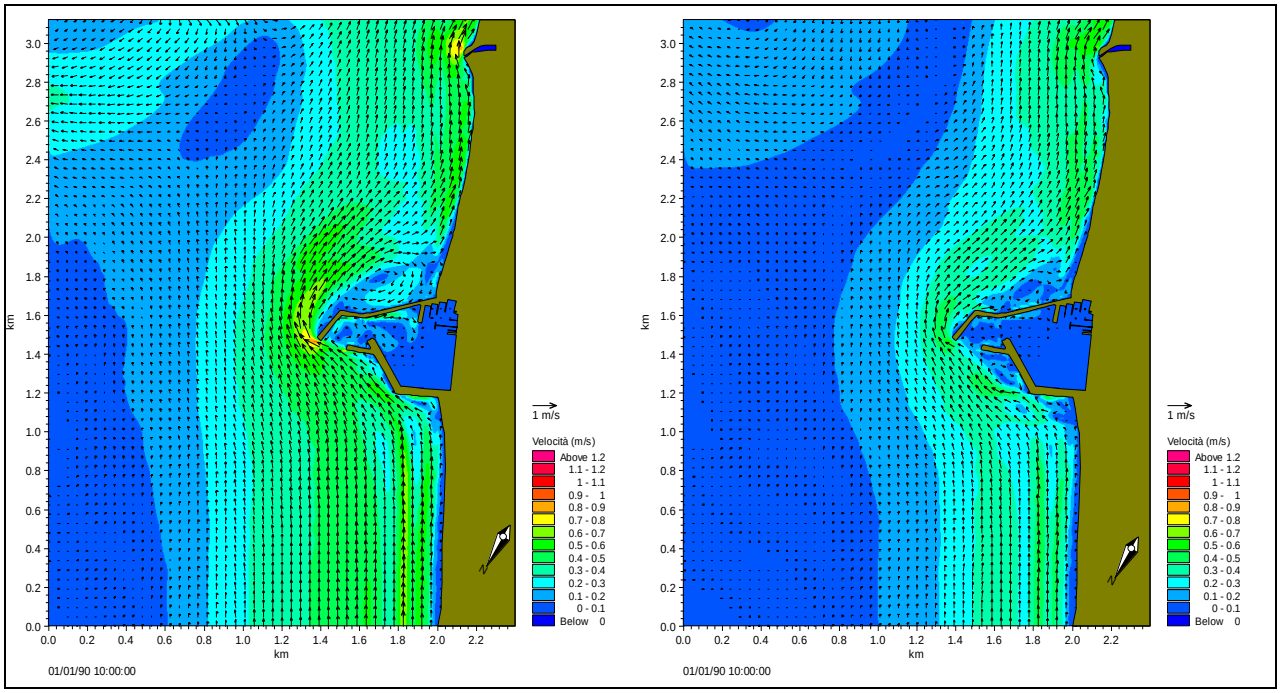


Figura 62 - Campi di velocità con il porto con layout attuale generati dall'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra).

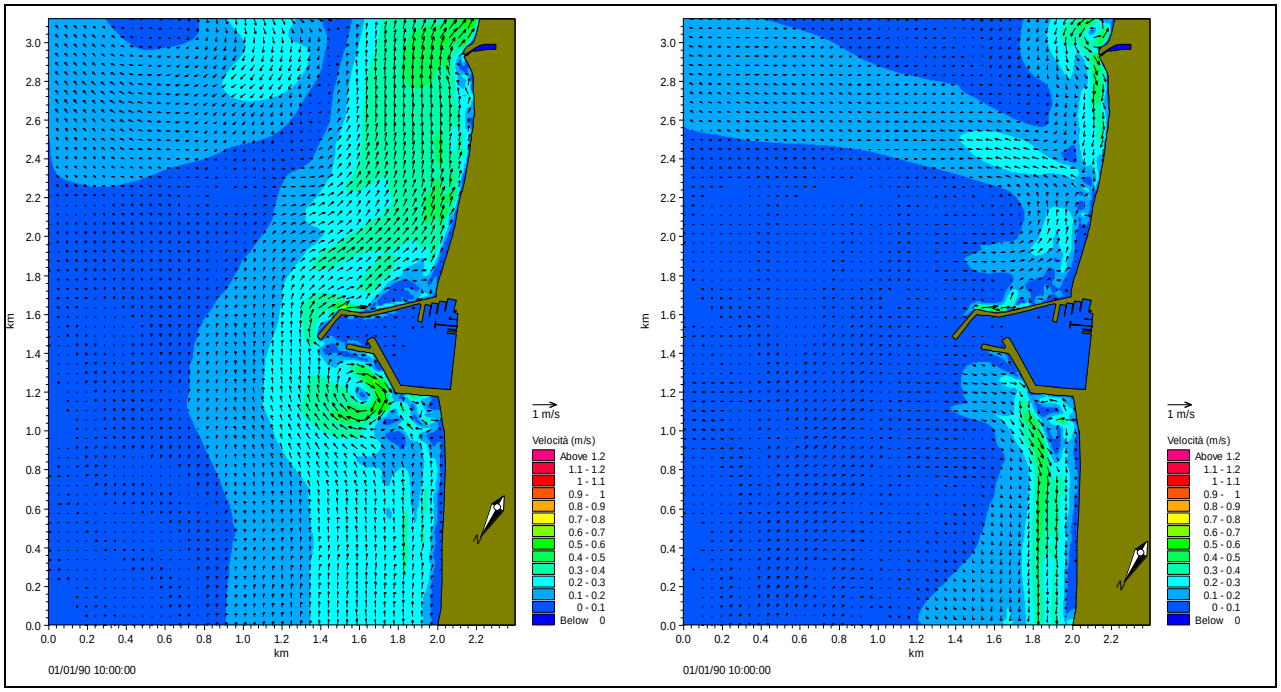


Figura 63 - Campi di velocità con il porto con layout attuale generati dall'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra).

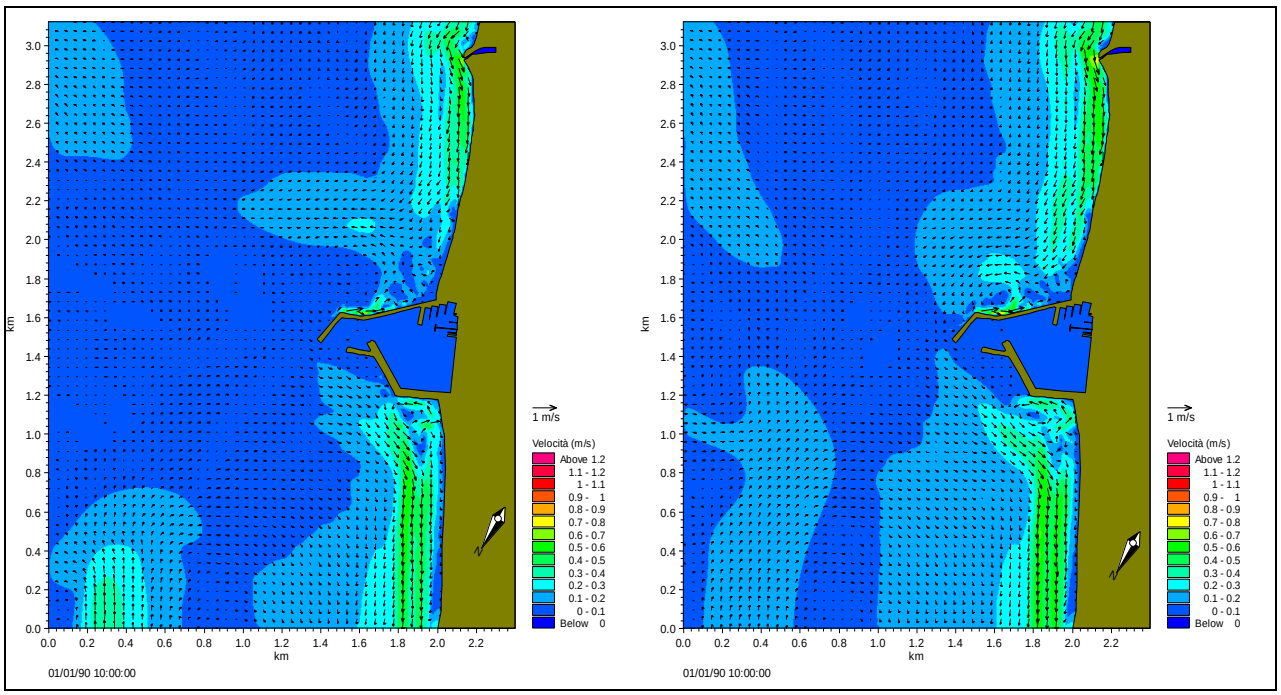


Figura 64 - Campi di velocità con il porto con layout attuale generati dall'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.50 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra).

6.3.2 IDRODINAMICA LAYOUT A

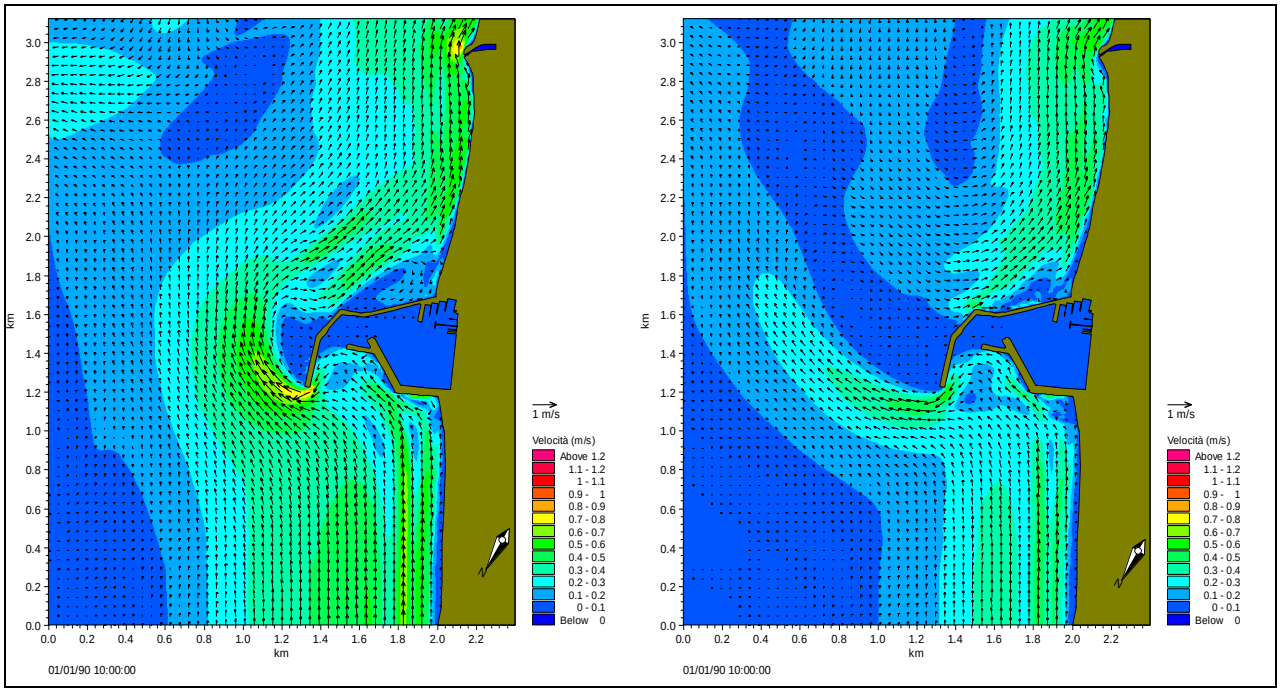


Figura 65 - Campi di velocità con il porto con layout A generati dall'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra).

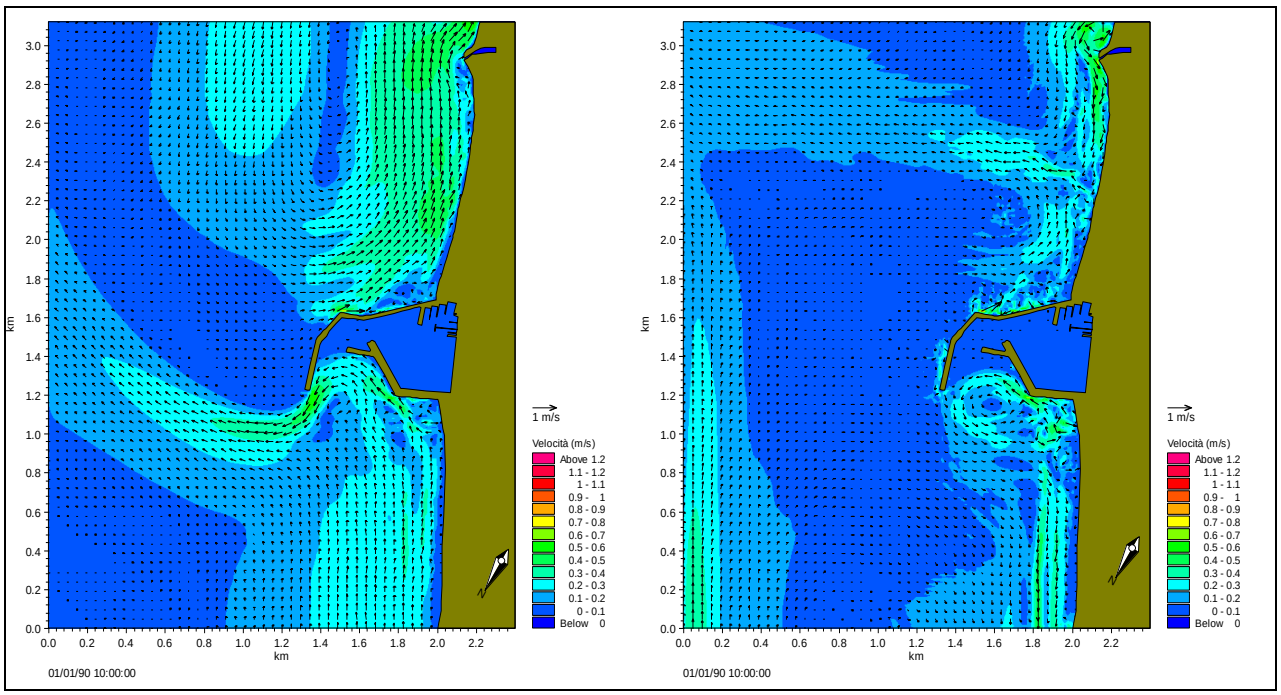


Figura 66 - Campi di velocità con il porto con layout A generati dall'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra).

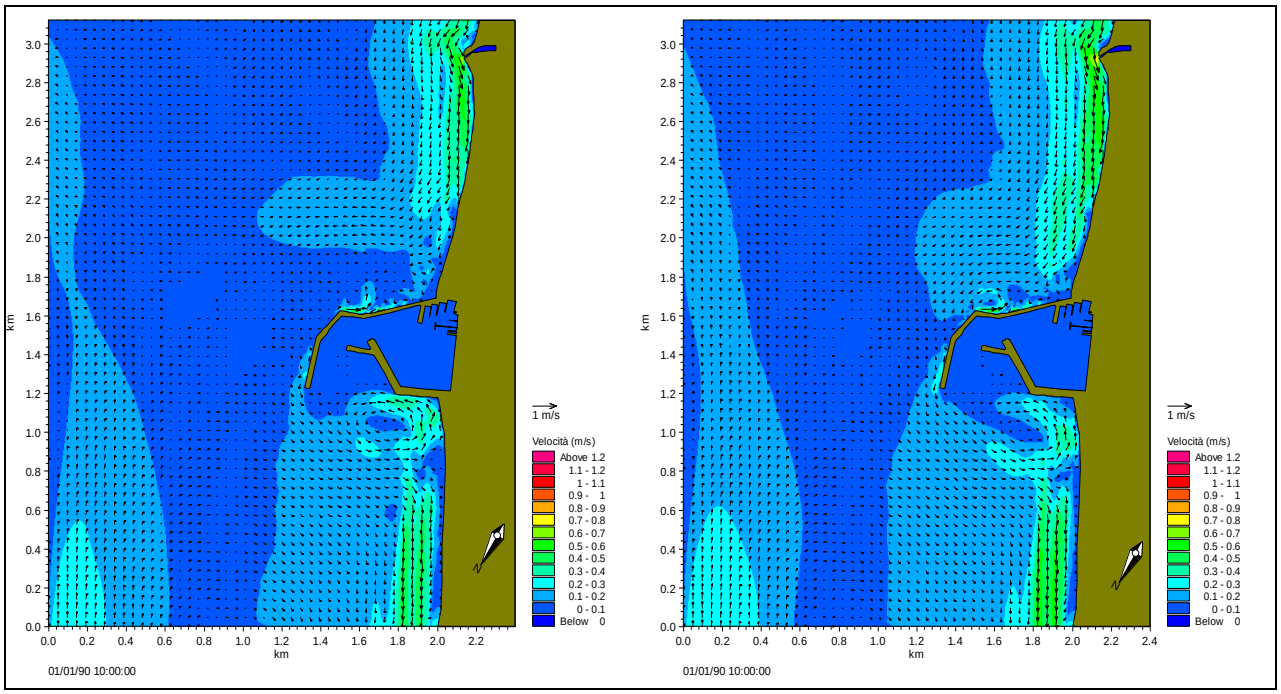


Figura 67 - Campi di velocità con il porto con layout A generati dall'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.50 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra).

6.3.3 IDRODINAMICA LAYOUT B

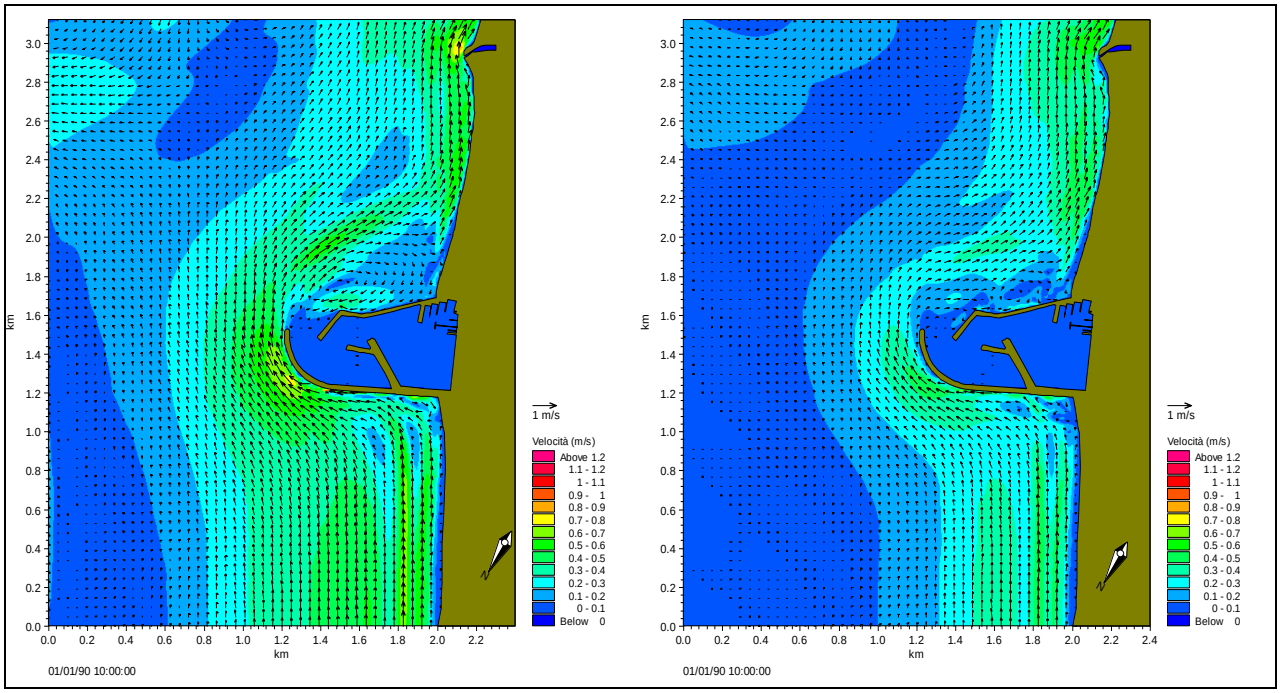


Figura 68 - Campi di velocità con il porto con layout B generati dall'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra).

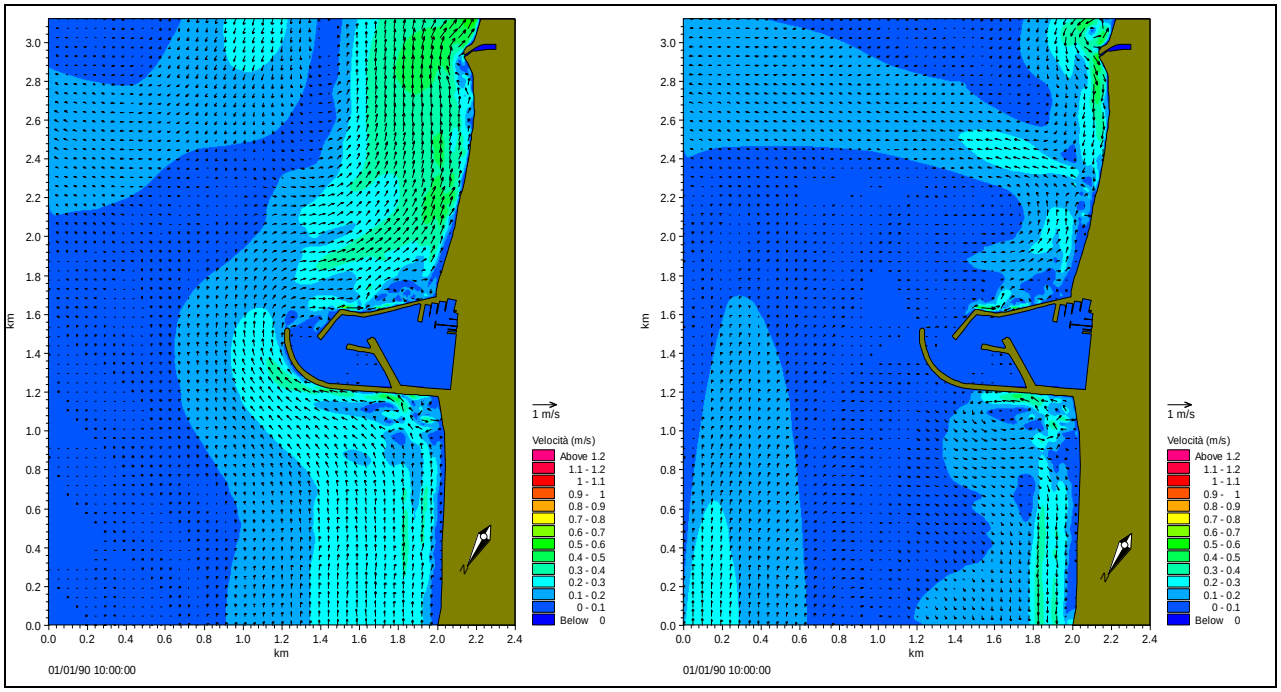


Figura 69 - Campi di velocità con il porto con layout B generati dall'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra).

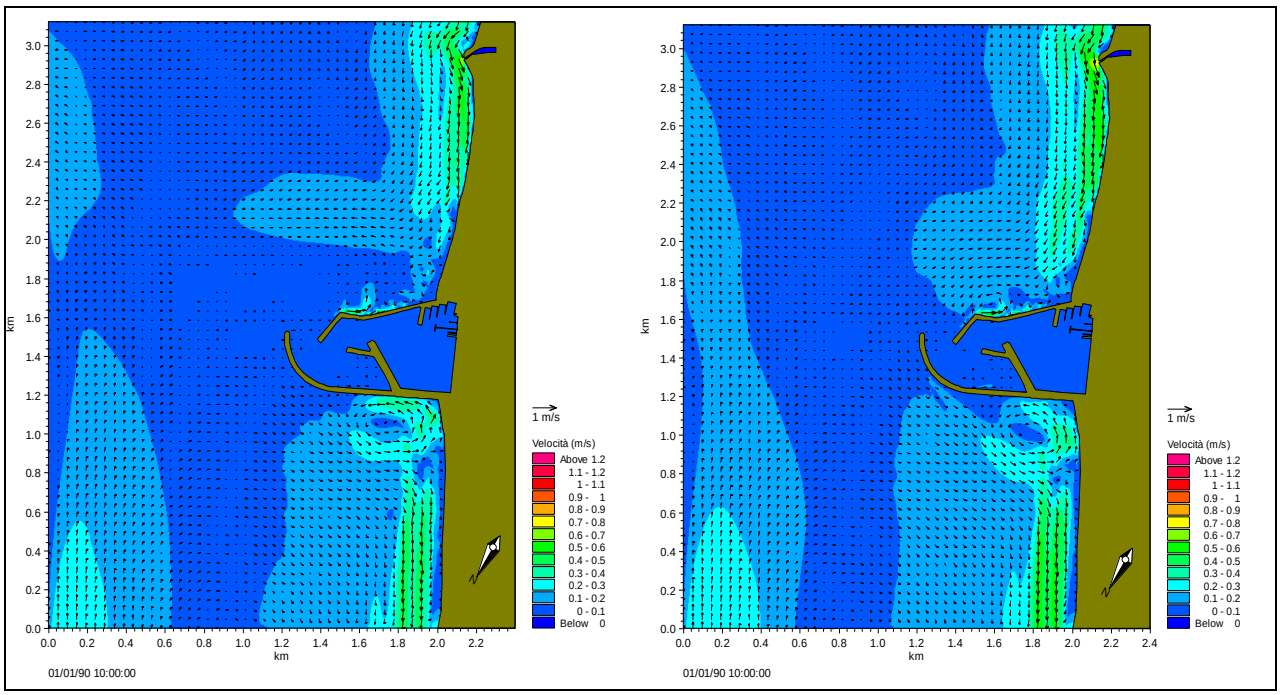


Figura 70 - Campi di velocità con il porto con layout B generati dall'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.50 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra).

6.3.4 IDRODINAMICA LAYOUT C

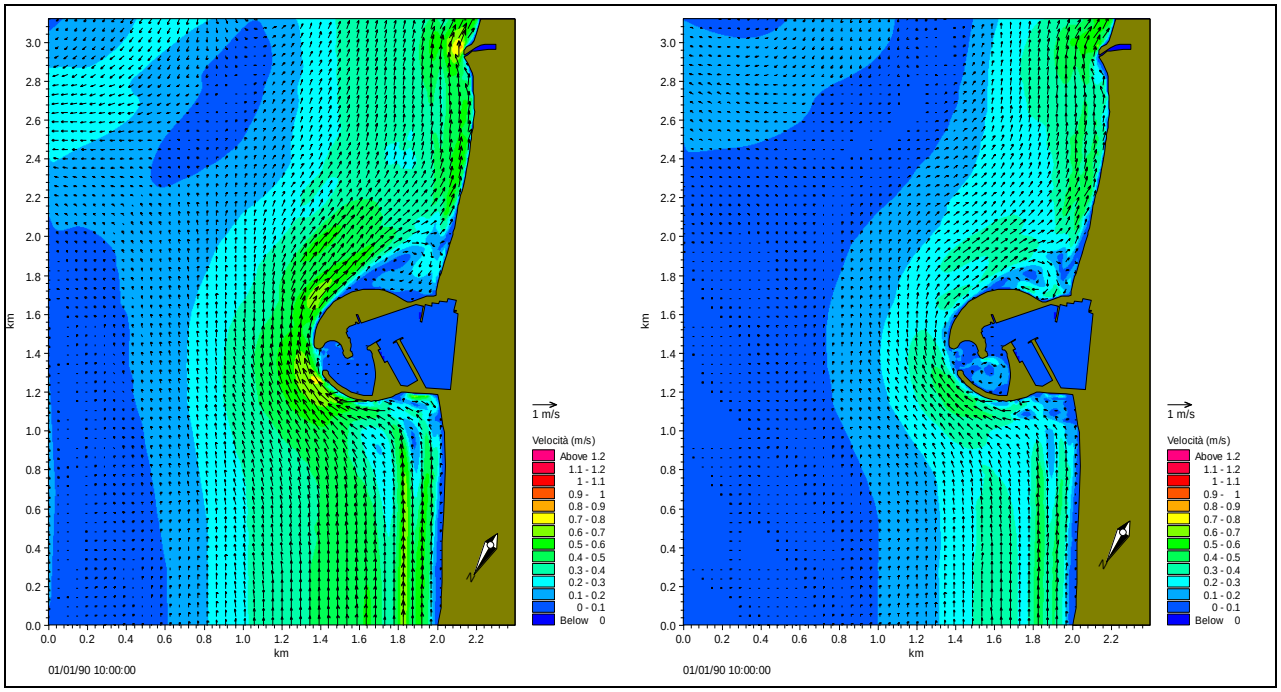


Figura 71 - Campi di velocità con il porto con layout C generati dall'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra).

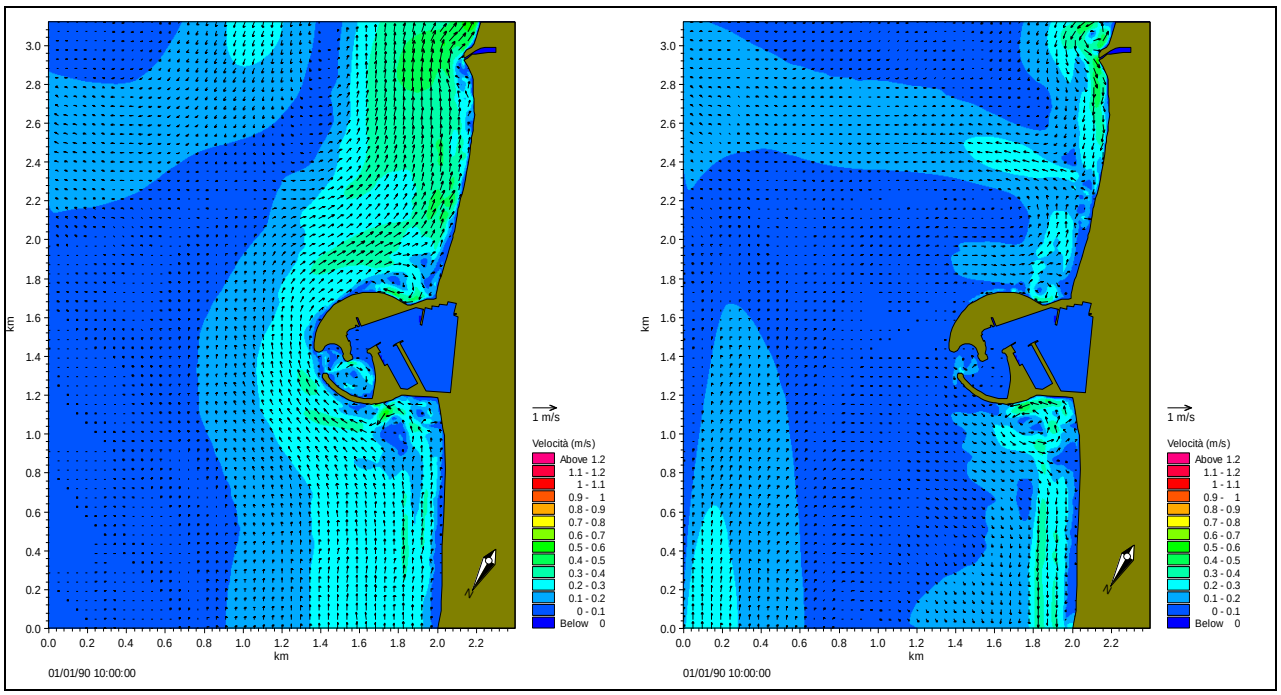


Figura 72 - Campi di velocità con il porto con layout C generati dall'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra).

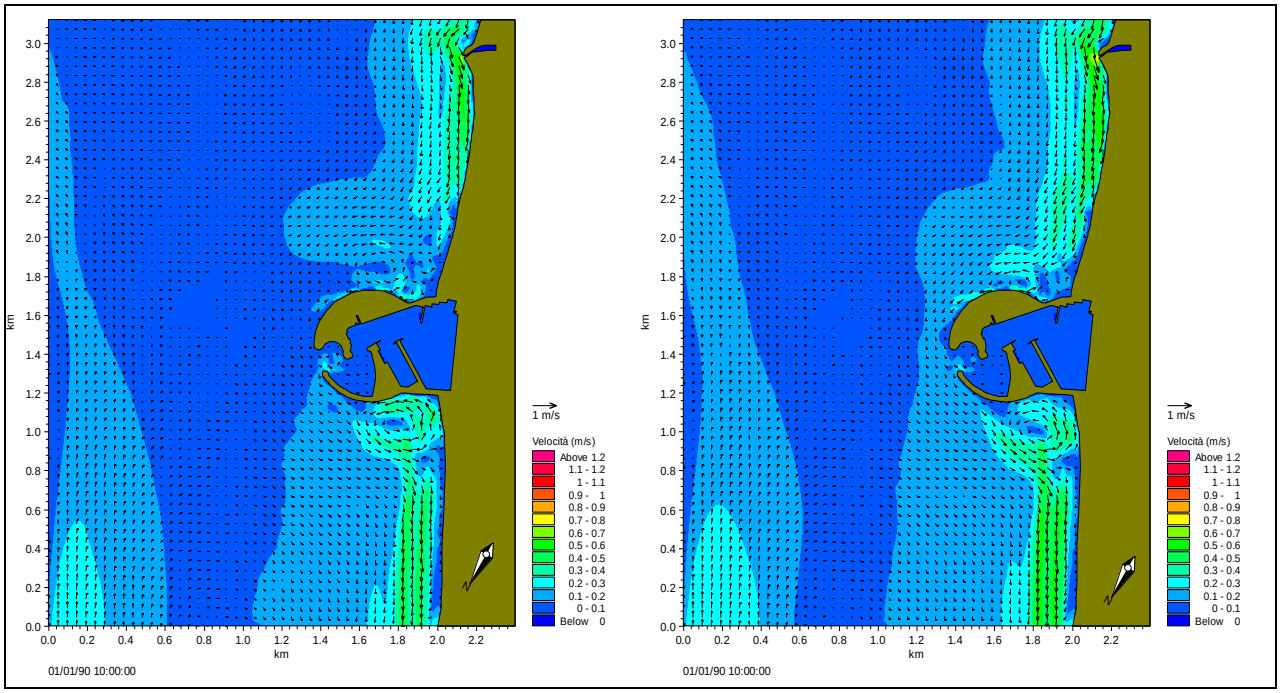


Figura 73 - Campi di velocità con il porto con layout C generati dall'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.50 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra).

6.4 Trasporto solido

Mediante il modello di trasporto solido ST (Sediment Transport) del codice di calcolo MIKE21 è possibile definire la capacità del trasporto solido dei materiali non coesivi basato sulle correnti litoranee indotte dalle onde e sulla sospensione dei materiali causata dalle stesse onde.

In seguito viene riportata una breve descrizione del modulo ST del MIKE21 del Danish Hydraulic Institute.

6.5 Descrizione del MIKE21 ST

Il modulo di trasporto solido MIKE 21 ST calcola il tasso di trasporto solido di materiali non coesivi ed il valore istantaneo iniziale di modificazione del fondo per effetto dell'azione combinata di onde e correnti. Il modello è "a fondo fisso", nel senso che non viene presa in considerazione la modificazione della batimetria dovuta all'erosione ed al ripascimento calcolati punto per punto con il modello. I valori di trasformazione del fondo forniti dal modello vanno quindi considerati solo come "valori iniziali": essi risultano tuttavia fortemente indicativi del grado di capacità modellante delle condizioni locali del mare.

Il modulo MIKE 21 ST consente di simulare il trasporto solido in condizioni di corrente pura o per l'azione combinata di onde e correnti, tenendo conto in tal caso di qualunque angolo di incidenza delle onde rispetto alle correnti e di onde frangenti. Le caratteristiche sedimentologiche del materiale di fondo possono essere variabili da punto a punto o uniformi. Si può tenere conto di fondo piano o della presenza di ripples.

Il trasporto solido è calcolato, in presenza di onde e correnti, per mezzo del modulo di calcolo STP, che implementa un algoritmo di calcolo deterministico basato sul modello di trasporto solido di *Engelund e Fredsøe [1976]*. Il modulo STP risolve il problema idrodinamico locale e calcola separatamente il contributo al trasporto dei sedimenti trascinati sul fondo e di quelli movimentati in sospensione.

Vengono trattati nel seguito separatamente gli aspetti di calcolo dell'idrodinamica, del trasporto al fondo e del trasporto in sospensione.

Idrodinamica. Il modulo STP determina il moto dovuto alle onde ed alle correnti con un unico algoritmo che richiede come dati in input la profondità dell'acqua, le caratteristiche dell'onda, la velocità della corrente e l'angolo tra la direzione di propagazione del moto ondoso e la velocità della corrente.

Se sono presenti come elementi forzanti le sole correnti, la descrizione idrodinamica è eseguita in modo molto semplice utilizzando la classica distribuzione logaritmica della velocità ed una distribuzione parabolica del parametro di viscosità "eddy viscosity" ε_c:

$$\varepsilon_c = \kappa U_f y \left(1 - \frac{y}{D}\right)$$

dove:

U_f è la velocità di attrito;

ρ è la densità dell'acqua;

K è la costante universale di Von Karman;

y è l'altezza sul fondo;

D è la profondità dell'acqua.

Nel caso si presentino contemporaneamente moto ondoso e correnti, il modello prende in considerazione l'interazione non lineare tra la turbolenza generata dalla corrente e dal moto ondoso all'interno dello strato limite. Il moto orbitale vicino al fondo produce un considerevole aumento dei valori istantanei dello sforzo di taglio ed un forte aumento della distribuzione del parametro di eddy viscosity all'interno dello strato limite.

Calcolato l'andamento dello strato limite nel tempo tramite la relazione *[Fredsøe, 1984]*:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{z\left(1 + z - e^z\right)}{e^z\left(z-1\right)+1}\frac{1}{U_0}\frac{dU_0}{dt} + \frac{30\kappa}{k}\frac{\sqrt{\kappa^2 U_0^2 + z^2 U_{f0}^2 + 2\kappa z U_{f0} U_0 \cos\gamma}}{e^z\left(z-1\right)+1}$$

dove:

z è un parametro collegato allo spessore dello strato limite δ, $\delta = \frac{k}{30}\left(e^z - 1\right)$

t è il tempo;

U_0 è la velocità orbitale vicino al fondo;

U_{f0} è la velocità di attrito relativa al flusso medio all'interno dello strato limite;

y è l'angolo tra la direzione della corrente e quella del moto ondoso;

k è la scabrezza sul fondo;

al di sopra dello strato limite l'eddy viscosity ε_{wc} può essere calcolato utilizzando un profilo logaritmico di velocità:

$$\varepsilon_{wc} = \kappa U_{fc} y \left(1 - \frac{y}{D}\right)$$

e all'interno dello strato limite con la relazione:

$$\varepsilon_{wc} = \kappa U_f y \left[1 - \frac{y}{\delta}\left(1 - \frac{U_{fc}}{U_f}\right)\right]$$

dove:

U_{f0} è lo sforzo di attrito relativo alla corrente $U_{fc} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U_f^2 \cos\phi dt}$ con *T* periodo dell'onda e $\cos\phi$ dato dalla relazione $\cos\phi = \frac{U_0 \kappa \cos\gamma + U_{f0} z}{U_f z}$.

Nel caso di onde frangenti, il moto dovuto all'onda genera turbolenza non solo all'interno dello strato limite. La turbolenza più intensa è prodotta nell'onda che si rompe vicino alla superficie. Si assume che la distribuzione totale di energia per ciascuna onda sia uguale alla perdita di energia di un salto idraulico di altezza pari a quella dell'onda; la distribuzione di questa energia è fornita da *Deigaard et al. [1986]*. Tale modello è combinato con quello di *Fredsøe [1984]* per determinare le caratteristiche idrodinamiche del movimento nella zona di frangimento. All'eddy viscosity ε_{wc} è quindi aggiunto il contributo ε_B secondo la relazione:

$$\varepsilon = \begin{cases} \sqrt{\varepsilon_{wc}^2 + \varepsilon_B^2} & per\ y > D/30 \\ \sqrt{\varepsilon_{wc}^2 + \varepsilon_B^2 \left(\frac{y}{D/30}\right)^{3.08}} & per\ y \le D/30 \end{cases}.$$

Il calcolo del parametro ε_B è eseguito mediante l'integrazione nel tempo e nello spazio dell'equazione di variazione dell'energia cinetica turbolenta:

$$\frac{\partial k'}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\varepsilon_B}{\sigma_k}\frac{\partial k'}{\partial y}\right) + \frac{P}{\rho} - c_d \frac{k'^{3/2}}{\lambda}$$

$$\lambda = \begin{cases} c_d^{0.25}\kappa y \ \ per\ y \le \dfrac{0.07D}{c_d^{0.25}} \\ 0.07D \ \ per\ y > \dfrac{0.07D}{c_d^{0.25}} \end{cases}$$

$$\varepsilon_B = \lambda\sqrt{k'}$$

dove:

k' è l'energia cinetica turbolenta;

σ_k è una costante pari ad 1;

c_d è una costante pari a 0.08;

P è la produzione di energia cinetica turbolenta;

λ è la lunghezza di mescolamento.

<u>Trasporto di fondo</u>. Il movimento dei grani che costituiscono il fondale dipende dal valore istantaneo dello sforzo di attrito sul fondo: il valore medio del trasporto di fondo in condizioni non stazionarie (in presenza di onde) viene quindi calcolato sulla base del valore istantaneo dello sforzo di attrito e poi mediato nel tempo.

Calcolata la velocità di attrito sul fondo U_f come *[Fredsøe, 1984]*:

$$\left[\frac{U_f}{\kappa} ln\left(\frac{\delta + k/30}{k/30}\right)\right]^2 = \left[\frac{U_{f0}}{\kappa} ln\left(\frac{\delta + k/30}{k/30}\right) + U_0 \cos\gamma\right]^2 + \left(U_0 sen\gamma\right)^2$$

il valore istantaneo del trasporto sul fondo $\Phi_b(t)$ è ottenuto risolvendo le relazioni proposte da *Engelund e Fredsøe [1976]:*

$$\theta(t) = \frac{U_f^2(t)}{(s-1)gd}$$

$$p(t) = \left[1 + \left(\frac{\pi\beta/6}{\theta(t) - \theta_c}\right)^4\right]^{-\frac{1}{4}}$$

$$\Phi_b(t) = 5p(t)\left(\sqrt{\theta(t)} - 0.7\sqrt{\theta_c}\right)$$

dove:

θ è il parametro di Shields;

s: è la densità relativa del sedimento;

d: è il diametro medio del sedimento;

g: è l'accelerazione di gravità;

θ_c è il calore critico del parametro di Shields;

p: è la percentuale delle particelle costituenti il fondale che sono in movimento;

β parametro dato dalla relazione $\beta = \frac{30\kappa^2}{k}\frac{U_{lm}}{\omega}$ con U_{lm} massima velocità orbitale e ω frequenza dell'onda.

Nota $\Phi_b(t)$, l'integrazione nel tempo del trasporto solido di fondo è eseguita come segue:

$$\Phi_{b1} = \frac{1}{T}\int_0^T \Phi_b(t)\cos[\phi(t)]dt$$

$$\Phi_{b2} = \frac{1}{T}\int_0^T \Phi_b(t)sen[\phi(t)]dt$$

$$q_{b1} = \Phi_{b1}\sqrt{(s-1)gd^3}$$

$$q_{b2} = \Phi_{b2}\sqrt{(s-1)gd^3}$$

dove:

$\phi(t)$ è la direzione del flusso istantaneo;

Φ_{b1} e Φ_{b2} sono i valori adimensionali del trasporto di fondo rispettivamente nella direzione principale della corrente ed in quella trasversale;

q_{b1} e q_{b2} sono il trasporto di fondo rispettivamente nella direzione parallela ed in quella trasversale alla corrente.

<u>Trasporto in sospensione</u>. La concentrazione dei sedimenti in sospensione *c* è determinata tramite l'integrazione dell'equazione verticale di diffusione *[Fredsøe et al., 1985]*, che lega la variazione locale della concentrazione di sedimento in sospensione alla diffusione turbolenta ed alla deposizione sul fondo:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon\frac{\partial c}{\partial y}\right) + w\frac{\partial c}{\partial y}$$

dove:

ε è il coefficiente di diffusione turbolenta, pari al parametro eddy viscosity;

w è la velocità di sedimentazione delle particelle sospese.

La condizione al contorno sul fondo è fornita dal valore istantaneo della concentrazione sul fondale c_b *[Engelund e Fredsøe, 1976]*:

$$c_b(t) = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{1}{\lambda(t)}\right)^3}$$

dove $\lambda(t)$ è dato da:

$$\lambda(t) = \left(\frac{\theta(t) - \theta_c - \frac{\pi}{6}\beta p(t)}{0.027 s \theta(t)} \right)^{0.5}$$

In superficie la condizione al contorno corrisponde con un flusso di sedimenti nullo attraverso la superficie del mare:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} + wc = 0$$

Il trasporto totale in sospensione è quindi calcolato mediante l'integrazione verticale del prodotto tra la velocità del flusso e la concentrazione dei sedimenti. Posta pari ad U_1 la velocità nella direzione principale della corrente ed U_2 la velocità nella direzione trasversale valgono le relazioni *[Fredsøe, 1984]*:

per y < $\delta(t)$:

$$U_1(t,y) = U_f \frac{1}{\kappa} ln\left(\frac{y}{k/30}\right) cos\,\phi$$

$$U_2(t,y) = U_f \frac{1}{\kappa} ln\left(\frac{y}{k/30}\right) sen\,\phi$$

per $\delta(t)$ < y <δ_m (δ_m è il valor medio di δ):

$$U_1(t,y) = U_{f0}\frac{1}{\kappa}ln\left(\frac{y}{k/30}\right) + U_{lm}sen(\omega t)\cos\gamma$$

$$U_2(t,y) = U_{lm}sen(\omega t)sen\gamma$$

per $\delta(t) < y$ e $\delta_m < y$

$$U_1(t,y) = U_{fc}\frac{1}{\kappa}ln\left(\frac{y}{k/30}\right) + U_{lm}sen(\omega t)\cos\gamma$$

$$U_2(t,y) = U_{lm}sen(\omega t)sen\gamma$$

In condizioni non stazionarie (moto ondoso) deve essere eseguita l'integrazione nel tempo:

$$\overline{U_1}(y) = \frac{1}{T}\int_0^T U_1(t,y)dt$$

$$\overline{U_2}(y) = \frac{1}{T}\int_0^T U_2(t,y)dt$$

$$\overline{U_1}(y)\bar{c}(y) = \frac{1}{T}\int_0^T U_1(t,y)c(t,y)dt$$

$$\overline{U_2}(y)\bar{c}(y) = \frac{1}{T}\int_0^T U_2(t,y)c(t,y)dt$$

$$q_{s1} = \int_{2d}^{D}\overline{U_1}(y)\bar{c}(y)dy$$

$$q_{s2} = \int_{2d}^{D}\overline{U_2}(y)\bar{c}(y)dy$$

dove q_{s1} e q_{s2} sono le quantità di sedimenti trasportati in sospensione rispettivamente lungo la direzione della corrente e lungo la direzione trasversale.

I dati necessari per in modello STP possono essere suddivisi in due gruppi: parametri riguardanti l'idrodinamica locale e parametri riguardanti i sedimenti.

Le grandezze che descrivono l'idrodinamica sono:

- parametri relativi al moto ondoso:
- altezza d'onda (poiché il modello simula onde regolari, nel caso di onde irregolari è utilizzata l'altezza quadratica media);
- periodo d'onda (nel caso di onde irregolari è considerato il periodo di zero-crossing);
- onda frangente o non frangente;

- profondità dell'acqua (viene considerato il valore medio in un periodo d'onda);
- parametri relativi alle correnti:
- velocità della corrente mediata sulla verticale;
- angolo tra la direzione della corrente e la direzione di propagazione del moto ondoso.

I sedimenti sono caratterizzati da:

- diametro dei grani in mm (nel caso di sedimenti non uniformi deve essere inserito il diametro medio d_{50});
- velocità di sedimentazione.

Sono infine richiesti alcuni parametri riguardanti le caratteristiche di scabrezza del fondale: la densità dei sedimenti relativa a quella dell'acqua, il valore critico adimensionale del parametro di Shields e la presenza o meno del fenomeno "wave ripples".

I risultati forniti in output sono:

caratteristiche delle wave ripples: altezza massima, scabrezza equivalente, eddy viscosity addizionale nella zona in prossimità del fondo, una misura del contributo addizionale alla concentrazione di sedimenti sul fondo;
caratteristiche del trasporto di sedimenti: profilo della concentrazione media e del trasporto in sospensione, i valori totali del materiale trasportato in sospensione nelle direzioni x e y e nella direzione di propagazione dell'onda, i valori complessivi del materiale trasportato (sospeso+fondo);
caratteristiche della velocità: profilo della velocità media e velocità in prossimità del fondo, profilo del valore medio del parametro eddy viscosity.

L'applicazione del modulo STP richiede elaborazioni piuttosto onerose, specialmente a causa della necessità di integrare le formulazioni all'interno del periodo dell'onda. Pertanto un'applicazione contestuale all'esecuzione dei calcoli di trasporto sarebbe scarsamente gestibile. Per ottimizzare le operazioni vengono quindi costruite a priori delle "tabelle di trasporto solido", applicando il modulo STP ad una serie di numerosi casi possibili ottenuti facendo variare le condizioni al contorno del fenomeno di trasporto (altezza d'acqua, altezza dell'onda, velocità della corrente, granulometria del materiale di fondo ecc.) nel range di variazione delle caratteristiche osservato in sito. Nel corso dell'applicazione di MIKE 21 ST per ogni punto di calcolo, a seconda del valore locale delle grandezze di interesse, il dato di trasporto solido viene ottenuto interpolando i valori contenuti nelle tabelle costruite con il modulo STP.

Il tasso iniziale di variazione del fondo viene infine determinato risolvendo l'equazione di continuità del materiale solido al fondo sulla base del valor medio del trasporto locale calcolato sullo step temporale di integrazione:

$$\frac{\partial z}{\partial x}+\frac{1}{1-n}\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{1}{1-n}\frac{\partial q_y}{\partial y}=0,$$

nella quale i simboli hanno il seguente significato:

z (x, y, t): livello del fondo;

q_x (x, y, t): componente lungo x del trasporto solido medio nello step di calcolo;

q_y (x, y, t): componente lungo y del trasporto solido medio nello step di calcolo;

n: porosità del materiale di fondo;

t: tempo.

L'equazione è risolta su uno schema alle differenze finite applicato ad una griglia di calcolo rettangolare. La discretizzazione delle equazioni differenziali è effettuata con lo schema modificato di Lax-Wendroff con la condizione di stabilità di Courant-Friedrichs-Lewy, che assicura l'accuratezza al secondo ordine.

6.6 Applicazione del modulo ST

L'applicazione del modulo ST è basato sulla combinazione dei risultati del modulo idrodinamico (HD) con i risultati del modulo di propagazione del moto ondoso (PMS). Le simulazioni sono state impostate considerando i risultati HD e PMS di ogni onda della Tabella 3. Tali simulazioni consento pertanto di ottenere il contributo di trasporto solido per effetto dell'onda. i risultati così ottenuti sono quindi significativi di un solo tipo di onda.

Per ottenere le capacità di trasporto solido che si verificano mediamente in un anno è necessario pertanto effettuare un'integrazione di tutte le onde simulate tenendo conto della percentuale di apparizione degli eventi riprodotti. Come nel caso in esame, essendo oneroso modellare tutte le possibili onde riportate nella tabella delle occorrenze, è necessario considerare estrarre delle onde cosi come definito nel §6.1 e quindi applicare ad esse una percentuale di apparizione fittizia che tenga conto di tutto il settore rappresentato dall'onda estratta.

Le percentuali utilizzate sono quelle fittizie calcolate per le onde e riportate nella Tabella 3, la percentuale di calma è dedotta dalla differenza tra il 100% degli eventi e la somma delle percentuali di occorrenza fittizia delle sei onde simulate. Peraltro, facendo riferimento alla metodologia utilizzata per la definizione delle onde morfologiche si nota che la percentuale di calma dedotta per l'integrazione del clima è la stessa che è stata rilevata dalla effettiva tabella di occorrenza.

6.7 Griglie di calcolo

Le griglie di calcolo sono quelle definite per l'applicazione del modello idrodinamico.
Esse sono costituite da 200 celle nella direzione x e 280 celle lungo la direzione y per un totale di 56'000 celle. L'origine degli assi è nel punto di coordinate UTM33 e= 417061.87, n= 4736334.45 e l'asse y è orientato di 150°N.

Per l'esecuzione delle simulazioni sono state impostate 4 differenti griglie di calcolo in cui ognuna rappresenta un differente layout proposto per la sistemazione del porto. Sostanzialmente tra le varie griglie che rappresentano i differenti layout vengono cambiati i contorni geometrici del porto e le batimetrie dell'interno.

6.8 Analisi dei risultati della dinamica morfologica

Considerando separatamente tutte le ondazioni provenienti dal primo quadrante, quindi le prime tre onde dalla Tabella 3 si ottiene un flusso di sedimenti diretto verso Sud, mentre con le rimanti onde si ha un flusso di sedimenti diretto verso Nord, come è facile intuire.

I tassi di trasporto nelle due direzioni principali descritte, sono differenti pertanto integrando tutti i campi di trasporto che si verificano nel sistema si otterrà un trasporto netto.

Ogni campo di trasporto è condizionato non solamente dalla direzione dell'onda ma anche dalla forma e dall'interazione che il porto ha con la dinamica costiera.

Preme precisare che il modello ST è comunque un modello morfologico a fondo fisso, ovvero la batimetria e quindi la griglia di calcolo non vengono alterate durante la simulazione. Pertanto il campo di trasporto non è quantitativamente il reale flusso di sedimenti, ma da un ordine di grandezza della capacità di trasporto che l'azione combinata di onde e correnti permettono di innescare. Per una migliore lettura di tali risultati sono stati plottati separatamente i campi di trasporto che si hanno con le ondazioni da destra (ovvero dal I quadrante) e con le ondazioni da sinistra (dal II quadrante) facendo riferimento ad un osservatore che guarda il porto da mare nella direzione della normale alla linea di costa

6.8.1 LAYOUT 00

Integrando i vari campi di trasporto solido si ottiene il campo di trasporto solido medio dovuto all'intero clima annuale. Si tratta quindi del trasporto netto che si ha durante un anno medio.
Come si nota dalla Figura 74 il trasporto netto è orientato verso Sud come si è già anticipato con lo studio idrodinamico e di evoluzione dei litorali riportati nella relazione sulla modellistica.

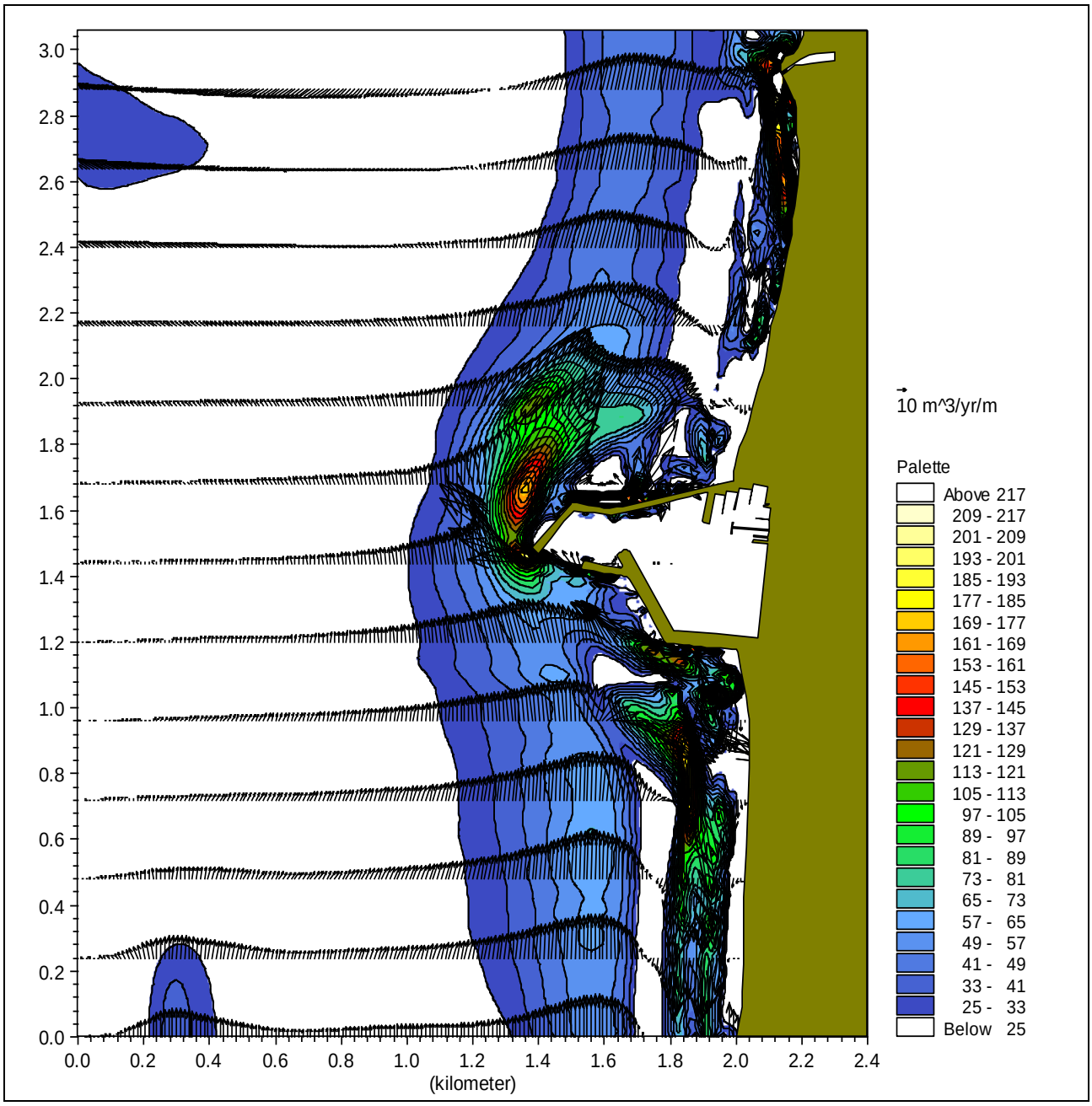


Figura 74 – Campo di trasporto solido con il clima totale per lo scenario di modellazione con il layout attuale

Nonostante si possa effettivamente notare le caratteristiche del trasporto che by-passa l'opera portuale nella figura con il trasporto netto non è facile distinguere la bimodalità del moto.
Con le seguenti figure si riportano i risultati dell'applicazione del modello ST fatto separatamente per le onde da sinistra e per le onde da destra, ovvero per quelle che inducono un trasporto principale rispettivamente verso Sud e verso Nord.

Da queste immagini è possibile dedurre interessanti osservazioni.

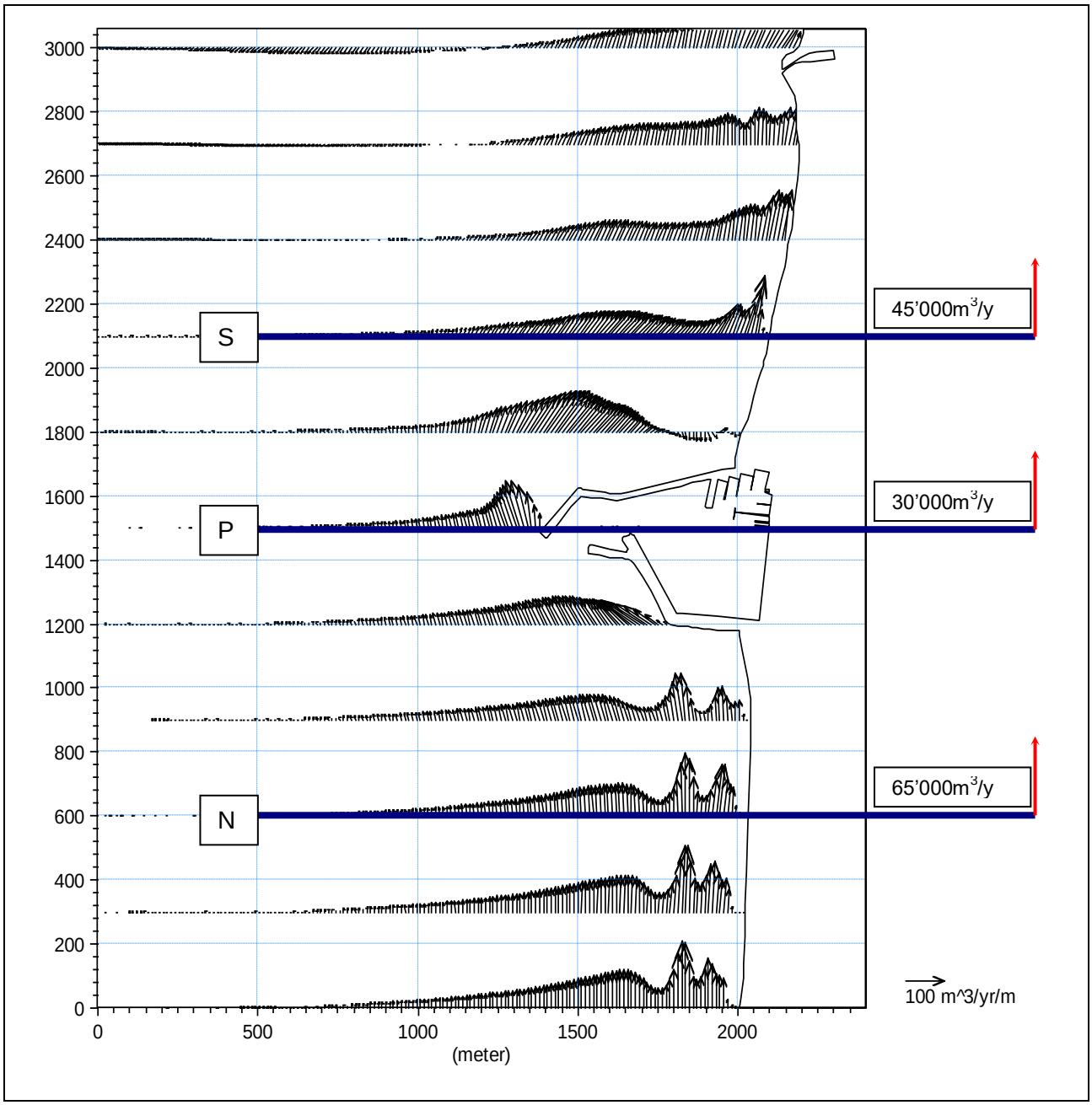


Figura 75 – Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori settentrionali con il porto con layout attuale.

Come si nota dalla Figura 75 nel versante nord si ha un trasporto molto regolare tipico delle spiagge con trugolo e barra. Il tasso di trasporto che risulta da Nord nella sezione N (Nord) è di circa 65'000 m^3/anno. Come si può vedere dal grafico del risultato il tipo di andamento a monte della sezione N è pressoché identico pertanto è molto verosimile che vi sia effettivamente una movimentazione di sedimenti di quell'ordine di grandezza.

Proseguendo verso Sud nella sezione P (Porto) si ha una capacità di trasporto di circa 30'000 m^3/anno che in parte passano verso Sud e in parte si disperdono nel canyon sottomarino. Facendo la differenza tra le capacità di trasporto delle sezioni N e P si nota un deficit di 35'000 m^3/anno. Questo volume, molto probabilmente rimane intrappolato a Nord del porto. Questo a conferma del valore di sedimentazione rilevato dal confronto delle linee di riva nei diversi anni.

Per quanto riguarda la sezione S (Sud) si ha una capacità di trasporto di circa 45'000 m^3/anno di cui una parte è effettivamente il materiale che by-passa la bocca del porto mentre il resto ha origine dalla ridistribuzione del materiale proveniente da Sud.

Il risultato del ST con il clima delle onde da Sud permette di mettere in evidenza come il trasporto sia nettamente inferiore e sopratutto come vada ad interessare una fascia costiera di larghezza inferiore. Questo è dovuto al fatto che le onde da Sud hanno altezze inferiori e quindi, frangendo più verso riva determinano una fascia attiva più stretta.

Nella sezione N si è calcolato una capacità di trasporto verso Nord di circa 40'000 m^3/anno tuttavia il trasporto effettivo che su può ipotizzare è nettamente inferiore infatti, se si osservano le sezioni a monte della N, non vi sono delle grandi capacità di trasporto e quindi non vi sono dei grandi apporti di materiale. Molto probabilmente quindi la capacità di 40'000 m^3/anno permette esclusivamente la ridistribuzione verso Nord dei materiali (i 35'000 m^3/anno) che vengono apportati dalle mareggiate da Nord. Questo spiega anche perché i 35'000 m^3/anno non sono totalmente accumulati a ridosso della radice del molo nord ma sono distribuiti lungo un tratto di litorale molto più esteso.

Nella sezione P il trasporto è praticamente nullo in quanto, come accennato precedentemente, la fascia attiva non è sufficientemente larga da permettere il passaggio dei sedimenti da una parta all'altra del porto.

Nella sezione S il trasporto è dell'ordine dei 20'000 m^3/anno e dato che nelle sezioni a monte vi è una capacità maggiore e nella sezione a valle una capacità minore è ipotizzabile un certo deposito di materiale che viene quindi ridistribuito verso Sud dalle ondazioni da Nord come detto sopra.

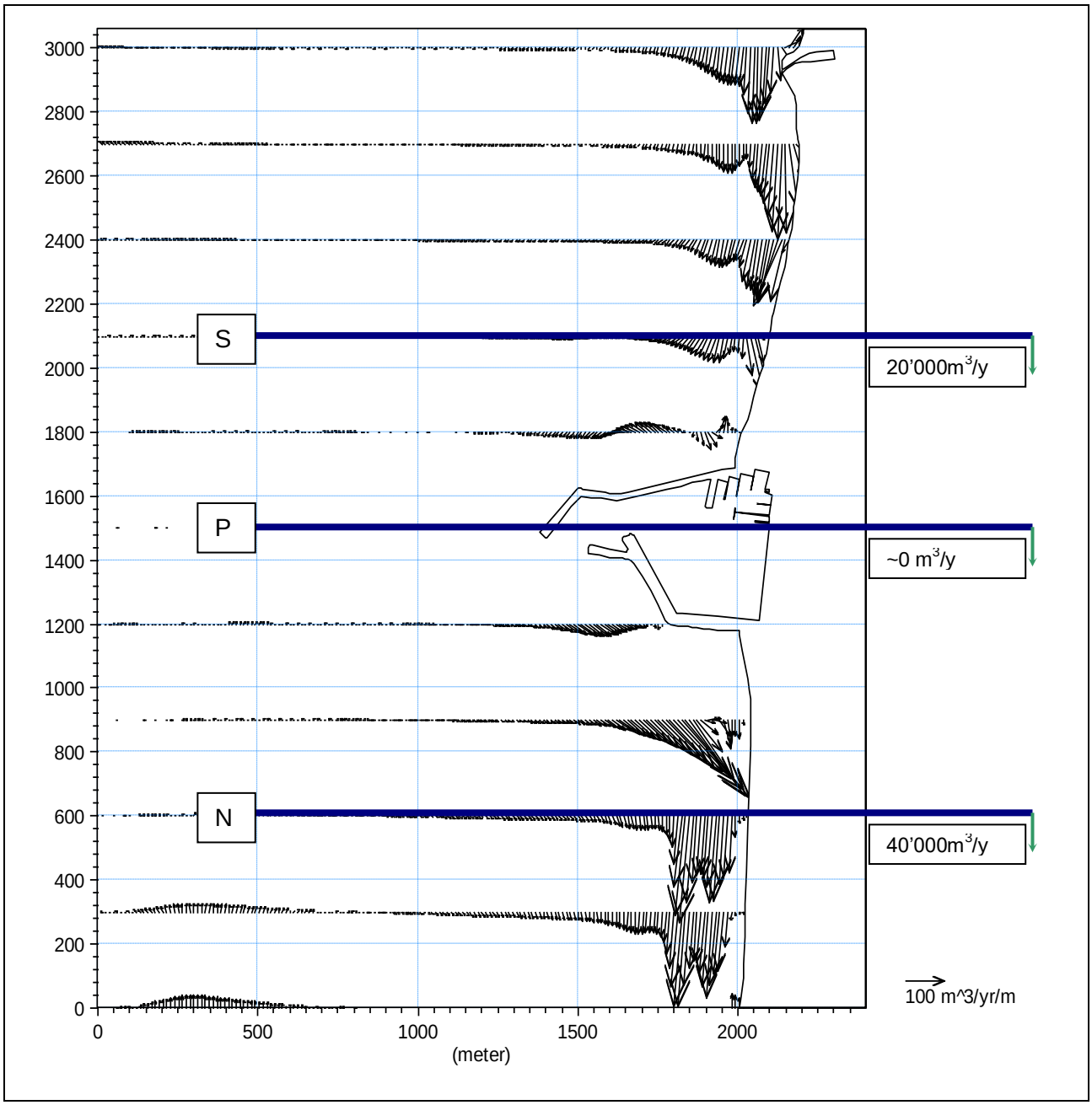


Figura 76 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori meridionali con il porto con layout attuale.

6.8.2 LAYOUT A

Il comportamento del trasporto solido per il layout A appare solo in parte simile a quello del layout attuale infatti se si osserva la Figura 77 si può facilmente notare come in corrispondenza della

testata del nuovo braccio del molo sud vi sia una sensibile modificazione della direzione del trasporto solido.

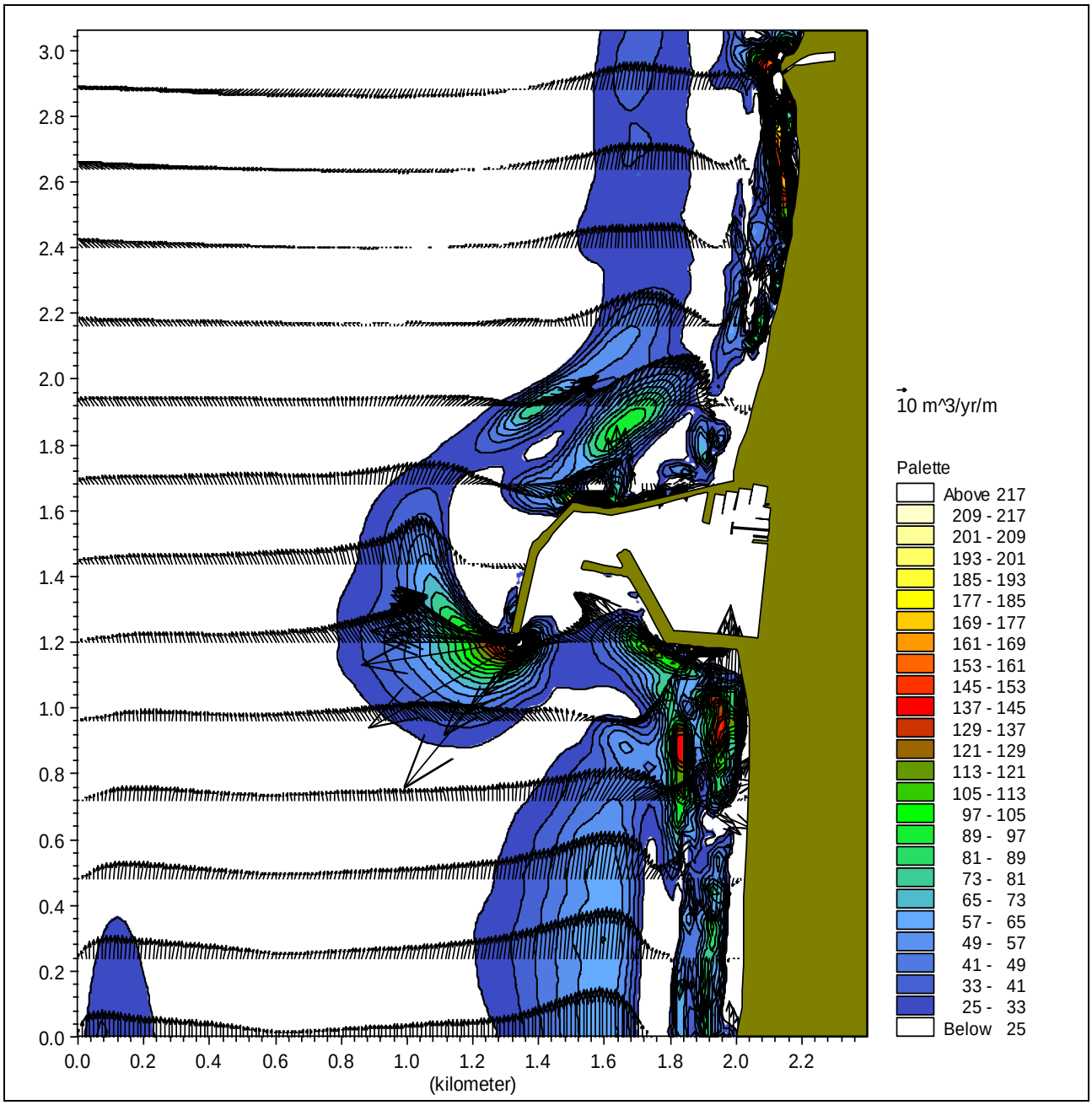


Figura 77 - Campo di trasporto solido con il clima totale per lo scenario di modellazione con il layout A

L'analisi dei campi di trasporto plottati separatamente per le onde da Nord e per le onde da Sud mette in evidenza come vi sia una capacità di trasporto di circa 60'000 m^3/anno nella sezione N che risulta in linea con il comportamento con il layout attuale

Anche nella sezione S il comportamento della dinamica è molto simile, ma il reale trasporto in tale sezione è molto diverso in quanto nella sezione P le cose cambiano notevolmente.

Dall'osservazione dei capi di trasporto differenziati in base alla direzione dell'onda si nota che il trasporto nella sezione N è di circa 60'000m^3/anno che verosimilmente viene effettivamente trasportato verso Sud visto l'andamento che si ha nelle sezioni successive. Nella sezione P il trasporto è molto ridotto rispetto alla situazione attuale, ovvero è dell'ordine dei 10'000 m^3/anno a causa della conformazione del nuovo braccio del molo sud quindi certamente gran parte dei 65'000 m^3/anno che arrivano da Nord hanno la possibilità di depositarsi a ridosso del molo nord.

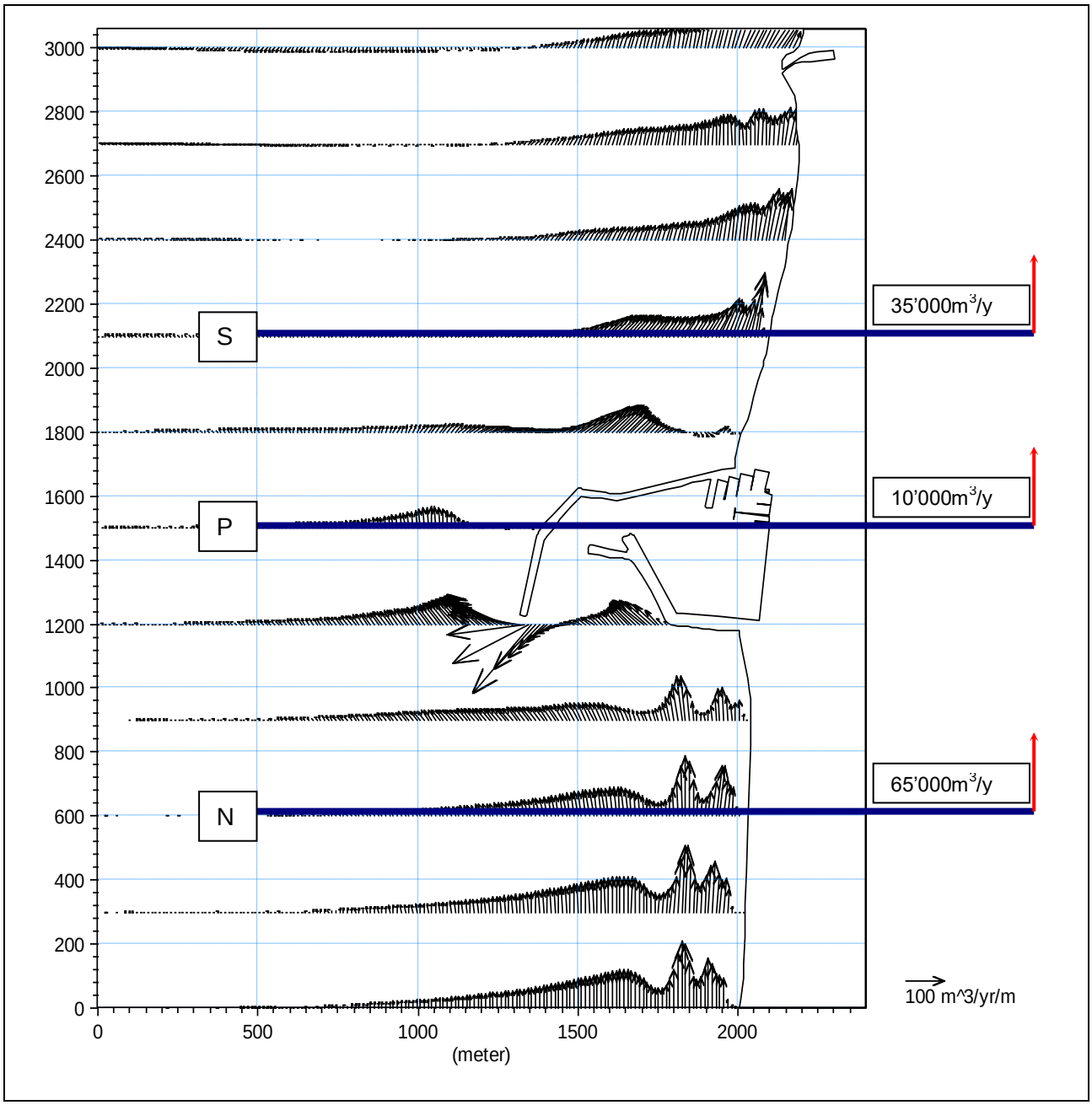


Figura 78 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori settentrionali con il porto con layout A.

Inoltre si nota come il colmo del trasporto si verifichi a circa 200 m dal paramento esterno del molo il che significa che probabilmente l'eventuale materiale trasportato in tale zona non riesce a riproporsi nel versante sud del porto.

In quest'ultima zona (sezione S) si ha un trasporto di 35'000 m^3/anno che significa che, al massimo, solamente 10'000 m^3/anno (sezione P) verranno ridistribuiti ma che una buona parte

dovrà essere asportata dalla costa, quindi con una pericolosa possibilità di mandare in arretramento la linea di riva.

Il fenomeno della diffrazione del prolungamento del molo sud si fa sentire in particolare per le onde che arrivano dai settori meridionali infatti si ha che nella sezione N la capacità di trasporto risulta di 24'000 m^3/anno, inferiore a quella che si ha nella situazione con layout attuale.

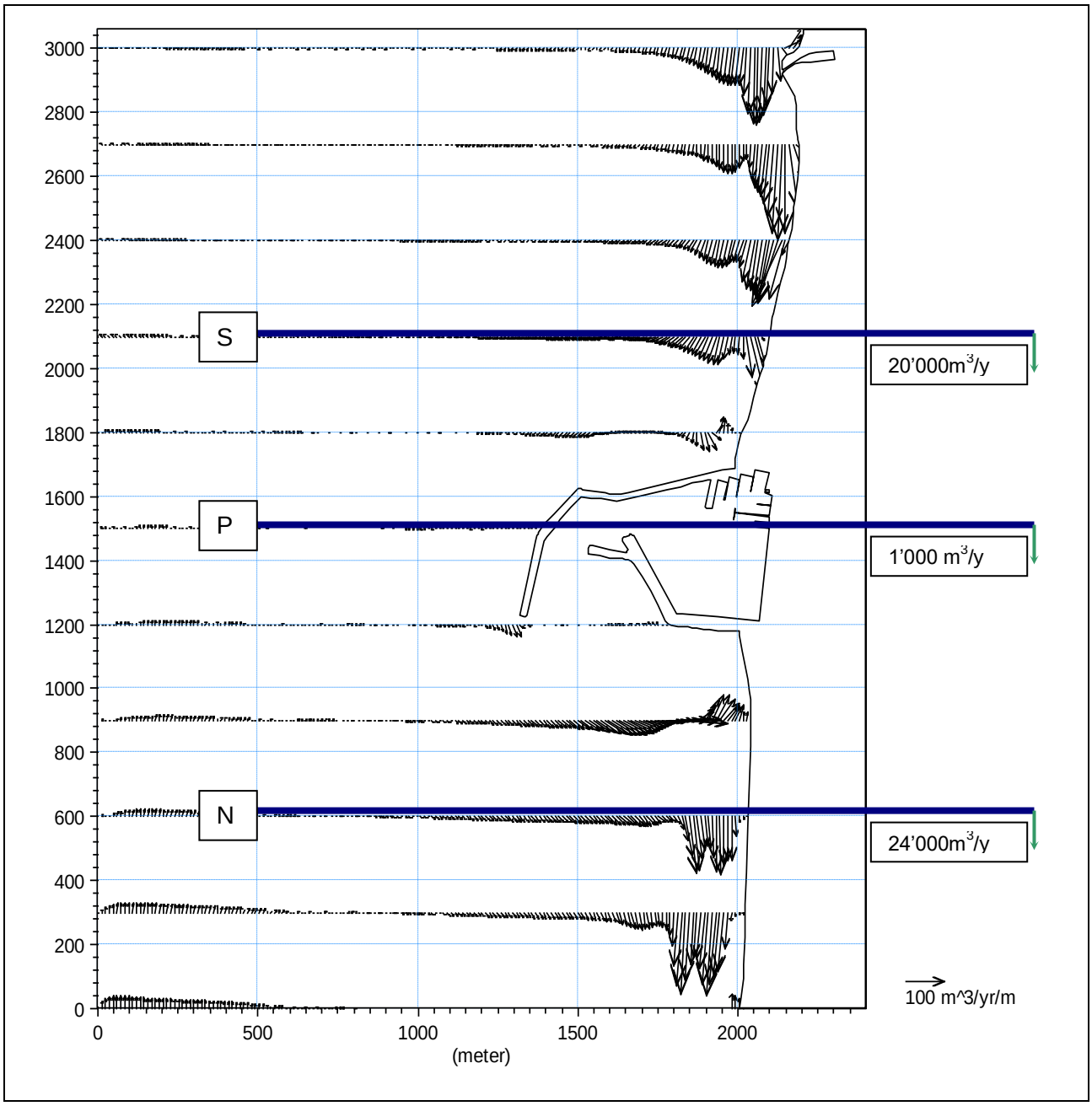


Figura 79 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori meridionali con il porto con layout A.

Quindi vi è una bassa capacità di ridistribuzione dei sedimenti che si depositano a Nord. Nella sezione P il trasporto verso Nord è molto limitato (circa 1'000 m^3/anno) ma si presume che sia sostanzialmente dovuto ad effetti localizzati a ridosso della scogliera del molo e che possano difficilmente essere considerati per il bilancio globale. Nella sezione S il trasporto verso Nord è di circa 20'000 m^3/anno e visto che nelle sezioni a monte si ha un andamento maggiore è facile che vi sia un consistente deposito di materiale, fermo restante il fatto che più a Sud vi è l'apporto solido del T.Tordino e il bloccaggio dei sedimenti da parte delle scogliere di difesa.

6.8.3 LAYOUT B

Anche per il layout B si ha un comportamento del trasporto nel versante nord molto simile a quello del layout A con un andamento del trasporto netto verso Sud nella zona più esterna della fascia costiera ed un andamento verso Nord nella zona più vicina a riva.

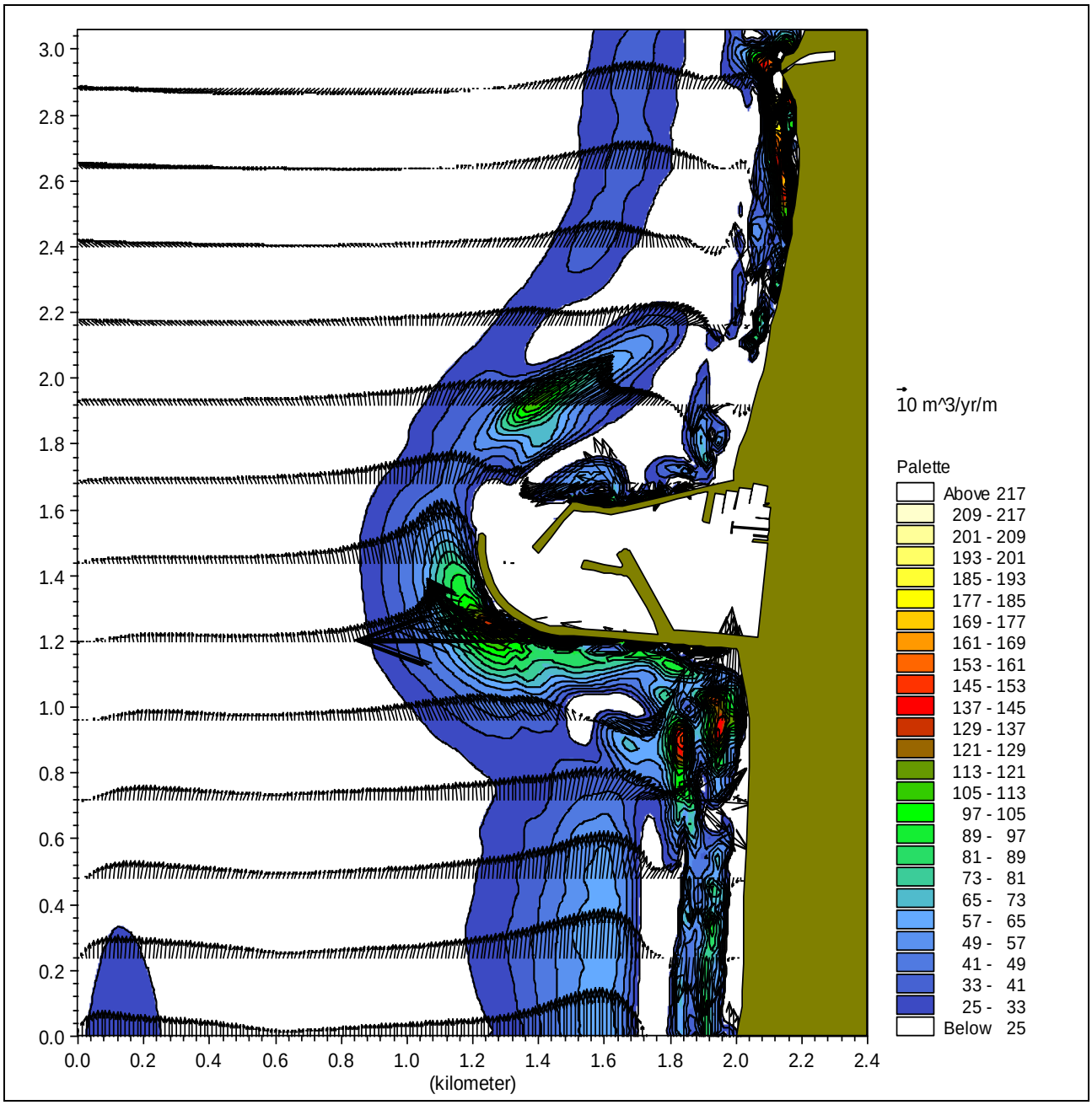


Figura 80 - Campo di trasporto solido con il clima totale per lo scenario di modellazione con il layout B

Il calcolo del trasporto fatto separatamente per le onde provenienti da destra (quindi da Nord) mette alla luce come vi sia nella sezione N un trasporto verso Sud di circa 62'000m^3/anno. Nella sezione P il trasporto arriva a dei valori di circa 20'000m^3/anno tuttavia tale trasporto è in una posizione molto esterna rispetto alla fascia costiera e quindi è ipotizzabile una notevole perdita di sedimenti verso largo. Per quanto riguarda la sezione S si ha una capacità di trasporto di circa 30'000 m^3/anno che fa presumere, come visto per il layout A, che non essendoci un consistente apporto di materiali dalle sezioni a monte, potrebbe innescarsi un pericoloso processo di erosione e quindi di arretramento della linea di riva.

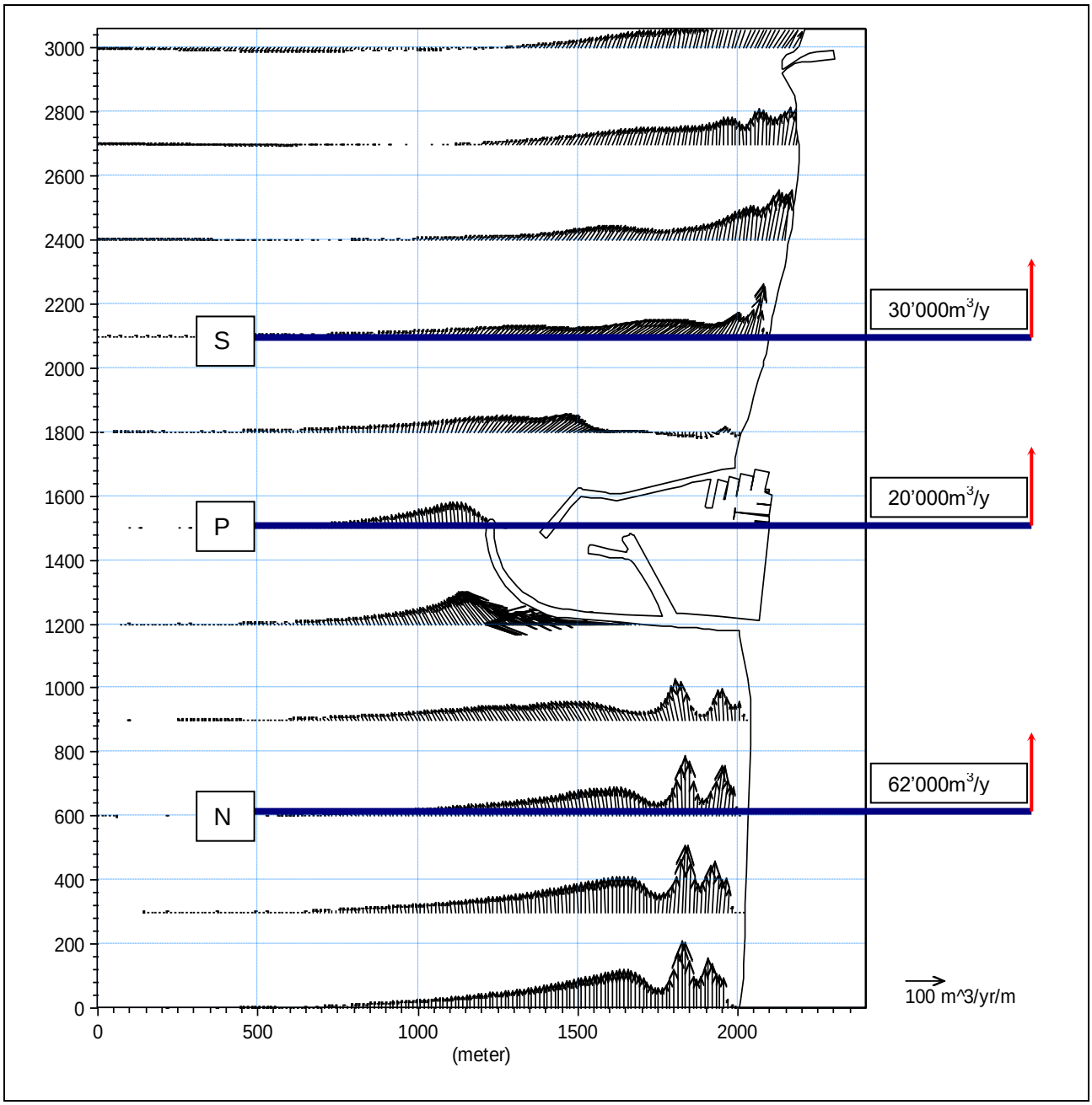


Figura 81 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori settentrionali con il porto con layout B

Nel risultato ottenuto per le onde provenienti da Sud si verifica, nel tratto a nord del porto, un fenomeno analogo a quello che si verifica nel caso del layout A, infatti dei 62'000 m^3/anno che vengono portati da Nord, dei quali se ne deposita gran parte a ridosso del molo nord, ben pochi riescono e venire ridistribuiti verso i litorali nord infatti la capacità di portata è dell'ordine dei 25'000 m^3/anno nella sezione N, e ancora inferiore nella sezione subito a monte dove si suppone si depositi la maggior parte di quei 60 mila che provengono da Nord.

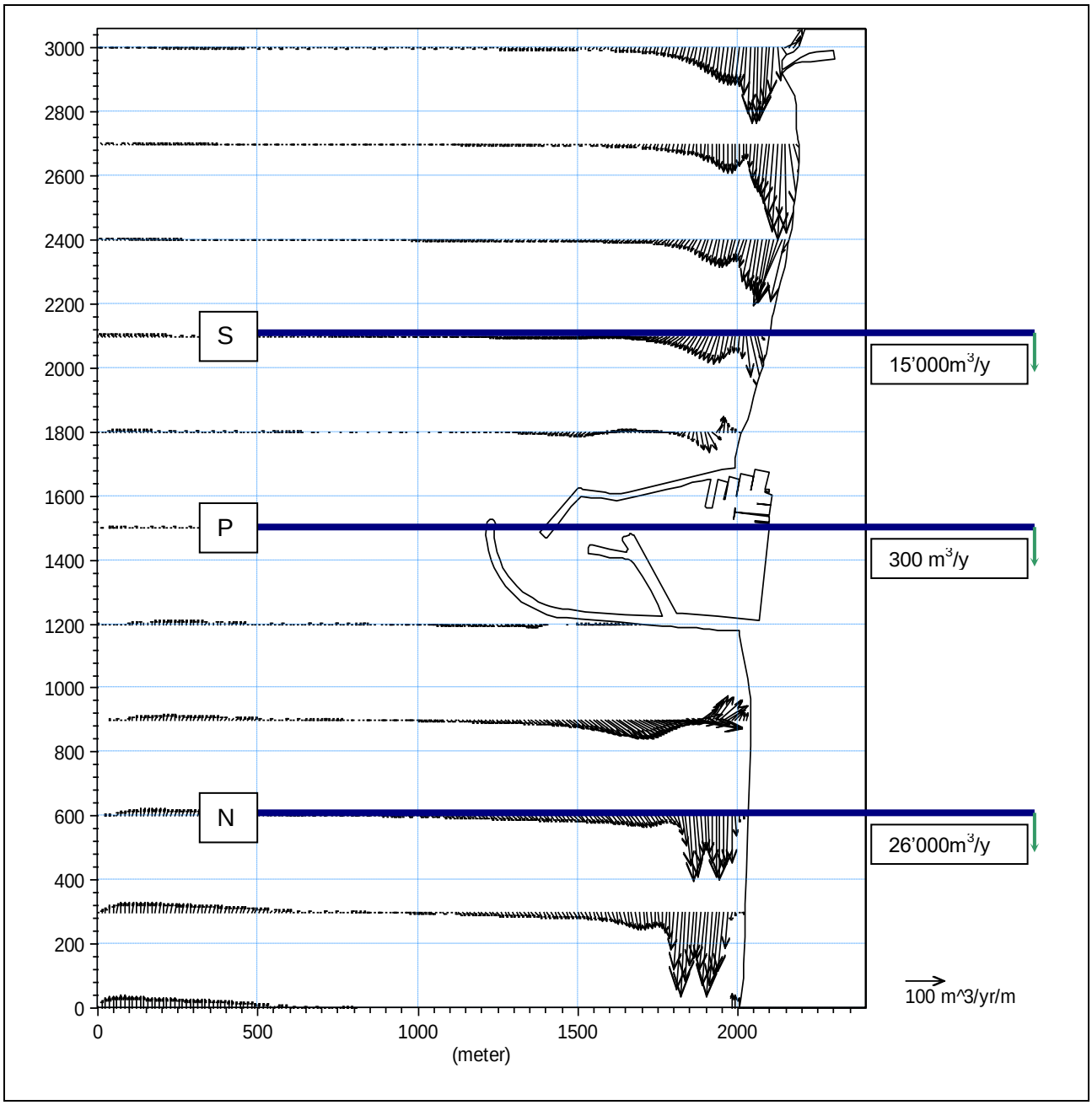


Figura 82 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori meridionali con il porto con layout B.

In corrispondenza della sezione P il modello rileva una capacità di trasporto di circa 300 m^3/anno che posso essere ragionevolmente trascurati sia per il valore molto basso sia per il fatto che si sviluppa in una zona esterna alla fascia attiva. Nella sezione S il trasporto è di 15'000 m^3/anno. Anche qui si ha una notevole interferenza tra le opere e le correnti costiere indotte dalle onde pertanto anche la capacità di trasporto viene meno facendo rilevare un valore molto ridotto. Nella

sezione a monte della S si verificano invece delle maggiori capacità di trasporto che probabilmente permettono l'accumulo dei sedimenti del T.Tordino nel versante meridionale del porto.

6.8.4 LAYOUT C

come è stato asserito nello studio idrodinamico della relazione sulla modellistica, il comportamento morfodinamico del sistema con il layout C è molto differente da quelli con layout A e B mentre risulta più simile al layout attuale.

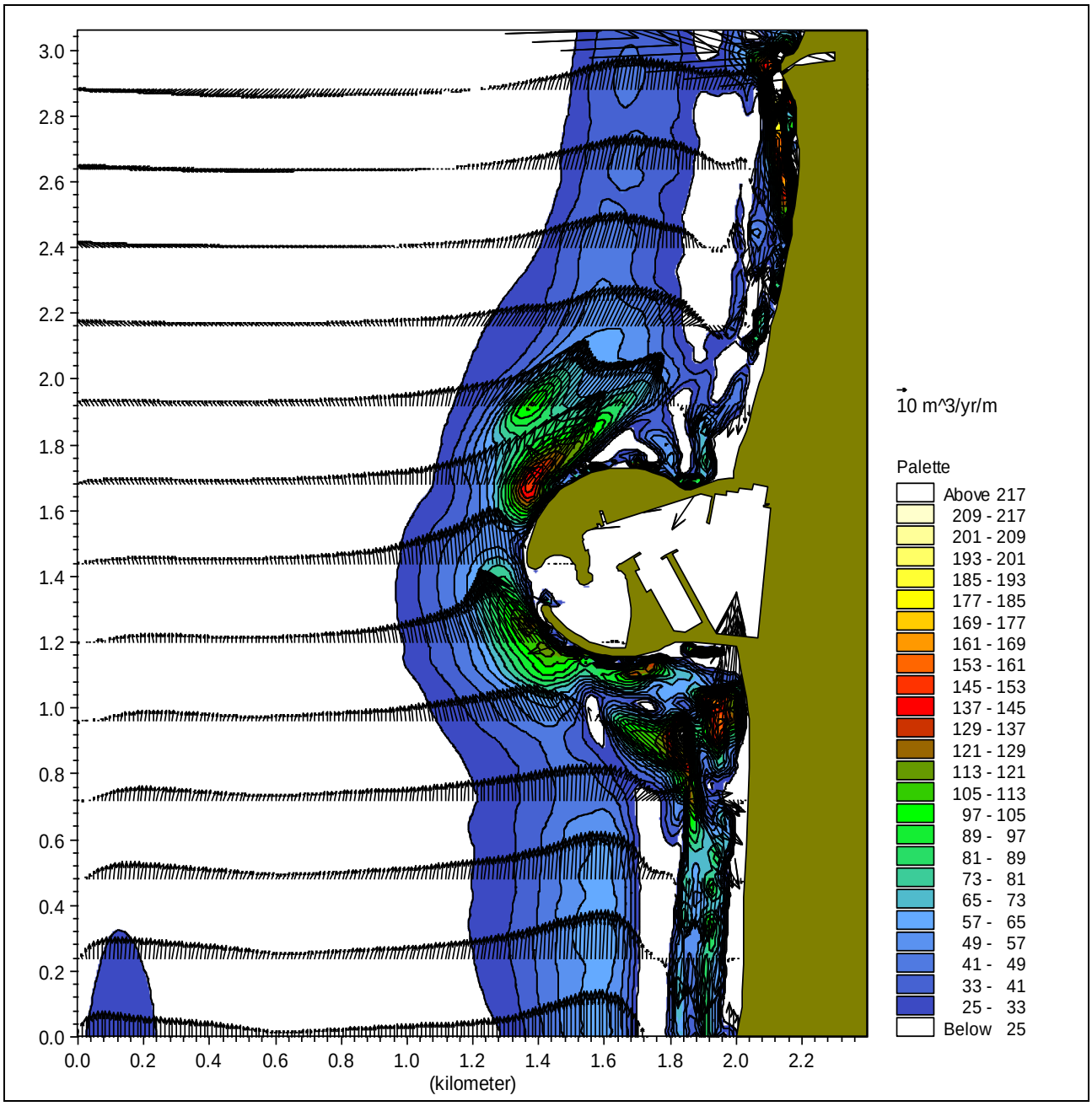


Figura 83 - Campo di trasporto solido con il clima totale per lo scenario di modellazione con il layout C

L'analisi dei risultati delle onde da Nord mostra come vi sia una capacità di trasporto nella sezione N pari a 65'000 m^3/anno che diventano, nella sezione P, circa 22'000 m^3/anno in una fascia costiera ancora attiva e non molto aggettante. Questo significa che gran parte di quei 61 mila avranno la possibilità di depositarsi nel tratto di litorale nord ma che circa 20 mila avranno la possibilità di transitare attraverso l'imboccatura del porto. Di questi 20 mila una parte andrà dispersa comunque verso largo mentre un'altra parte potrà raggiungere la spiaggia a Sud del porto. Da qui una parte verrà ridistribuita lungo la spiaggia ed un'altra si propagherà verso Sud.

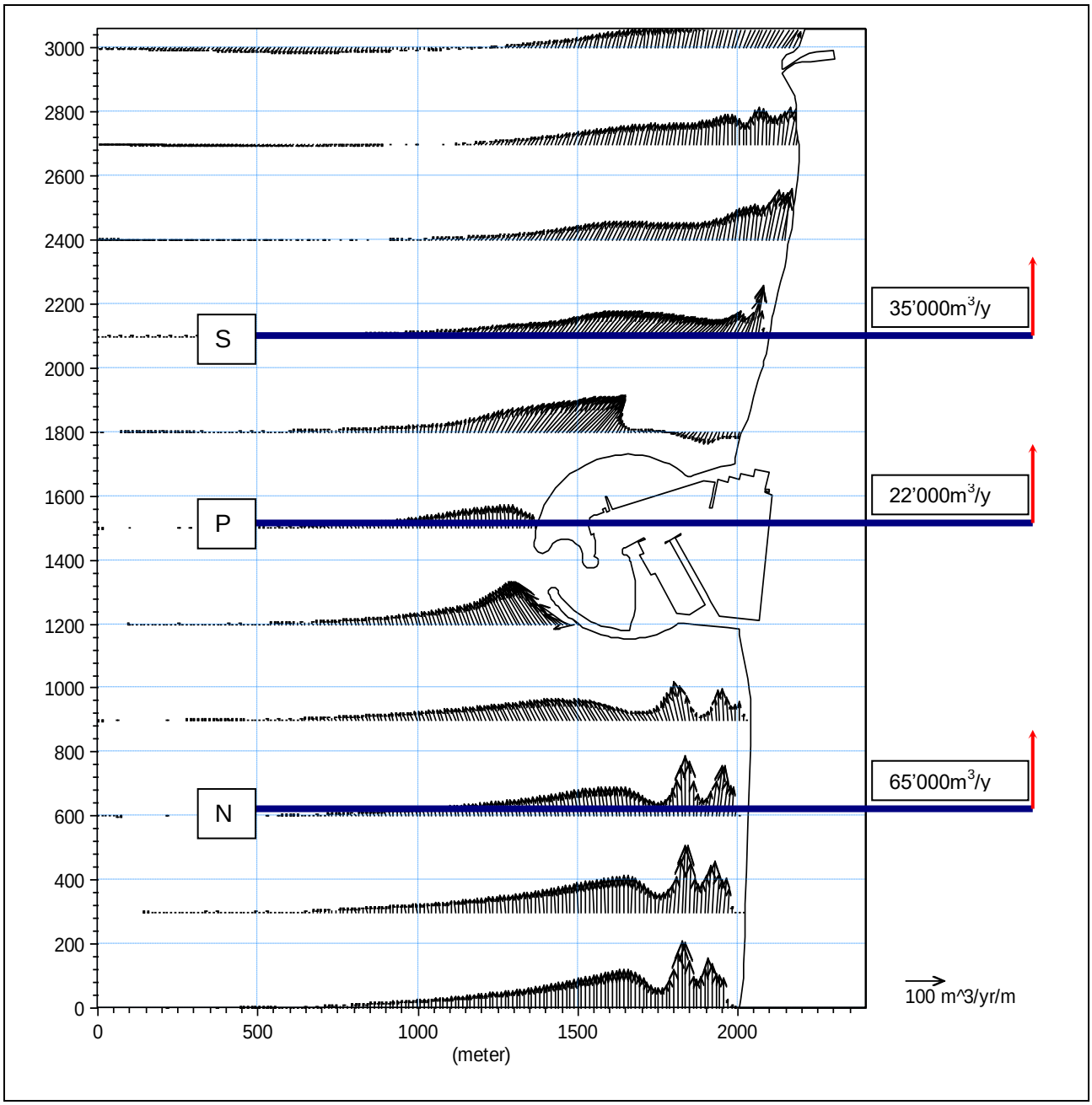


Figura 84 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori settentrionali con il porto con layout C

Durante le mareggiate da Sud il trasporto lungo la sezione N è di circa 35'000 m^3/anno e come per il layout attuale permette la ridistribuzione dei sedimenti lungo la spiaggia Nord con il notevole vantaggio di non avere un unico eccessivo accumulo di sedimenti a ridosso del molo Nord. Attraverso la bocca del porto invece il trasporto è praticamente trascurabile con 1'000 m^3/anno, mentre attraverso la sezione S il trasporto verso Nord è di circa 20'000 m^3/anno e permette di

ridistribuire i sedimenti che si depositano con le mareggiate da Nord e i sedimenti dell'apporto solido del T.Tordino.

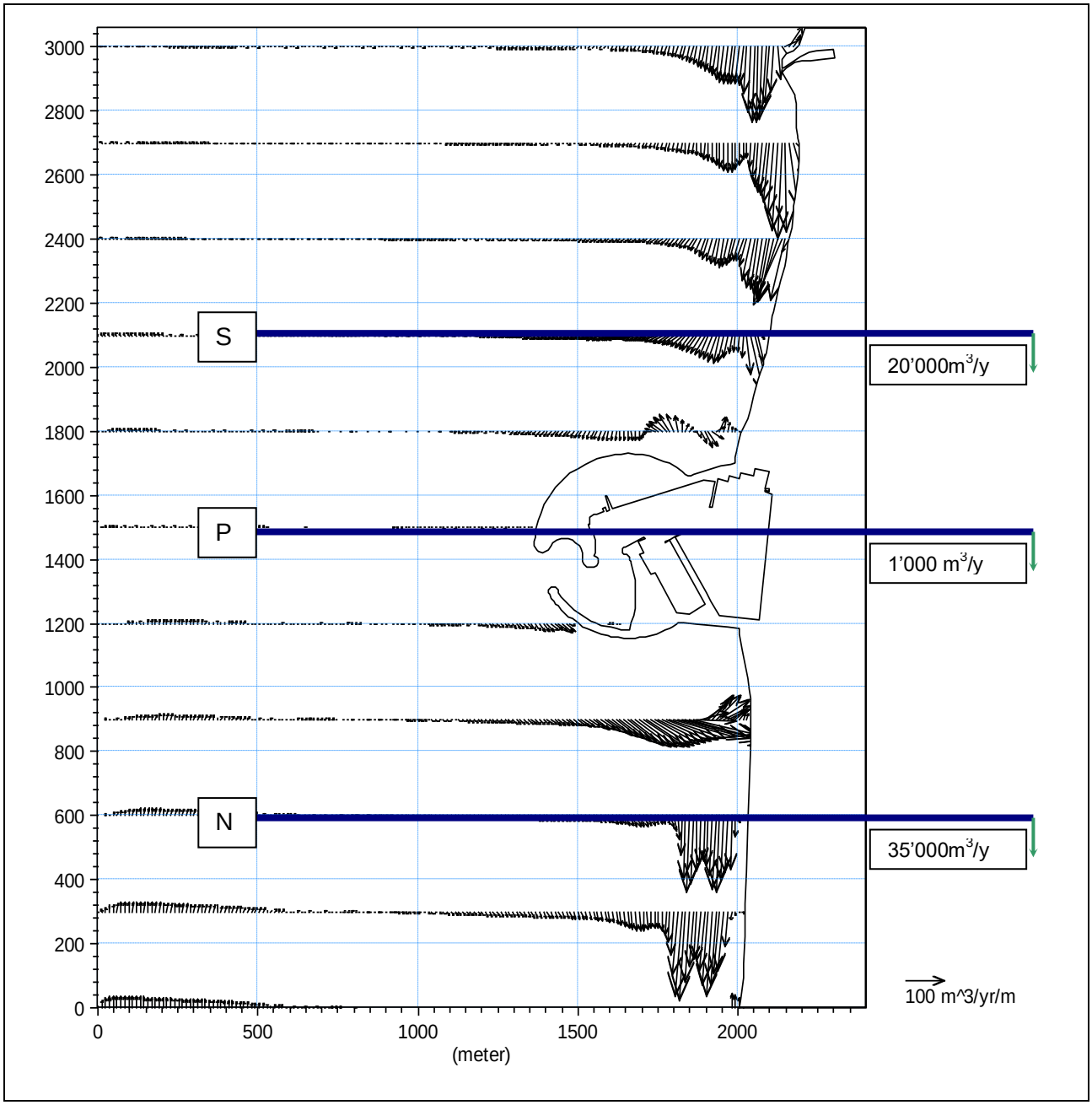


Figura 85 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori meridionali con il porto con layout C

Come è possibile notare dal confronto dei risultati per ciascuna situazione di progetto il bilancio dei sedimenti non è sempre lo stesso. Ciò è dovuto essenzialmente alla differente interazione delle opere esterne del porto con la dinamica costiera.

7. INTEGRAZIONE ALLE VERIFICHE MODELLISTICHE DEL LAYOUT DEL PORTO

Dopo l'analisi dei layout attuale, e dei layout di progetto, il gruppo di progettazione ha optato per la scelta di un ulteriore layout differente dai sopraccitati per la conformazione del molo sud.

Il nuovo layout non modifica l'agitazione interna e tanto meno la qualità delle acque, tuttavia la differente conformazione dei moli potrebbe innescare delle circolazioni differenti dal punto di vista idrodinamico nell'intorno dell'opera foranea.

Si rende pertanto necessario verificare la risposta del nuovo layout dal punto di vista della dinamica litoranea.

7.1 Configurazione di progetto

La configurazione di progetto scelta per il piano regolatore portuale di Giulianova differisce ulteriormente rispetto ai tre layout studiati fino ad ora. La configurazione planimetrica scelta è molto simile al layout C studiato nelle fasi precedenti del lavoro, ma differisce in maniera sostanziale per l'assenza del terrapieno di forma circolare.

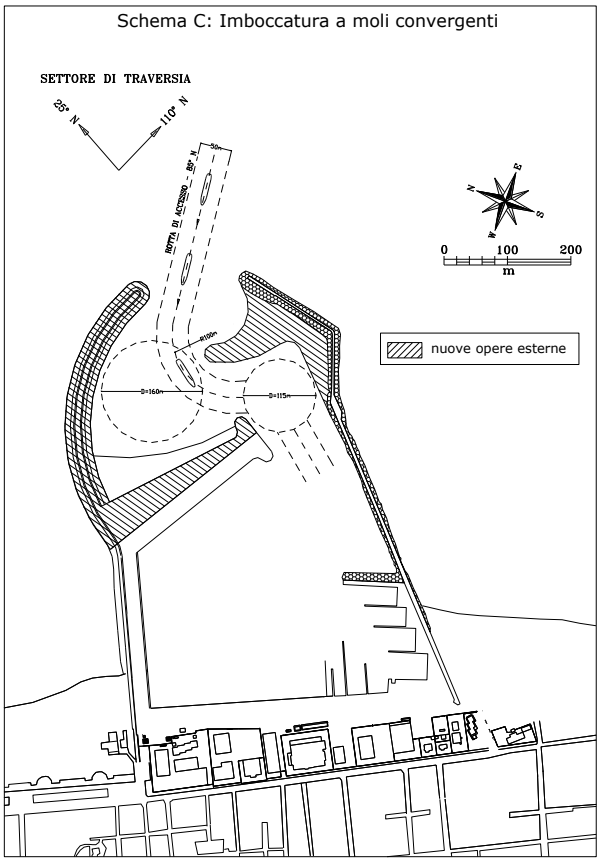


Figura 86 – Layout di progetto scelto per il Piano Regolatore Portuale di Giulianova

Per quanto riguarda la sistemazione interna del porto, non vi sono sostanziali variazioni rispetto alle sistemazioni ipotizzate precedentemente tranne per il fatto che in tale configurazione non si prevede il banchinamento interno del molo sud.

7.2 Propagazione locale del moto ondoso

Come per gli altri layout studiati è stato fatto il calcolo della propagazione locale del moto ondoso. Come è possibile osservare il moto ondoso calcolato per il layout di progetto non differisce in maniera sostanziale dal campo di moto ondoso che si genera, sotto le stesse condizioni meteomarine per il layout C. Dal confronto dei risultati ottenuti con le due configurazioni portuali si può notare come i due campi di moto siano simili ad eccezione per la zona che nel layout C veniva occupata dal terrapieno a ridosso del molo sud.

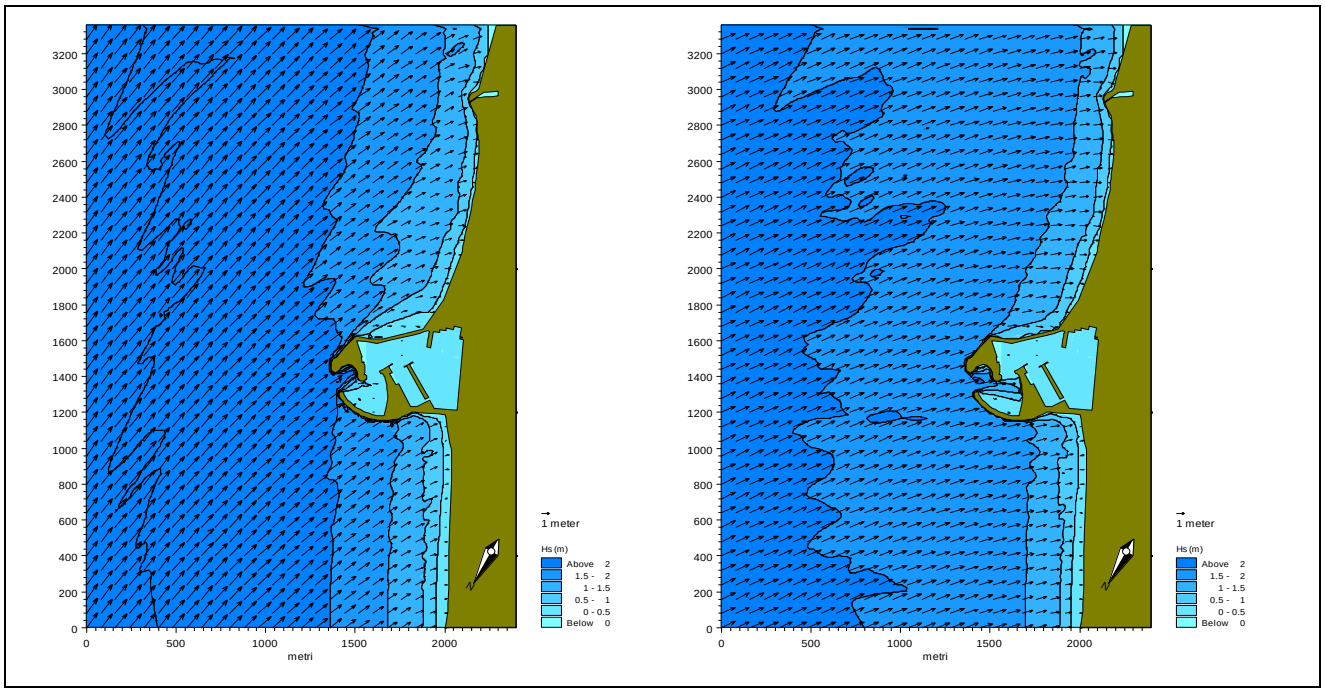


Figura 87 - Campi di moto ondoso con il porto in configurazione di progetto per l'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

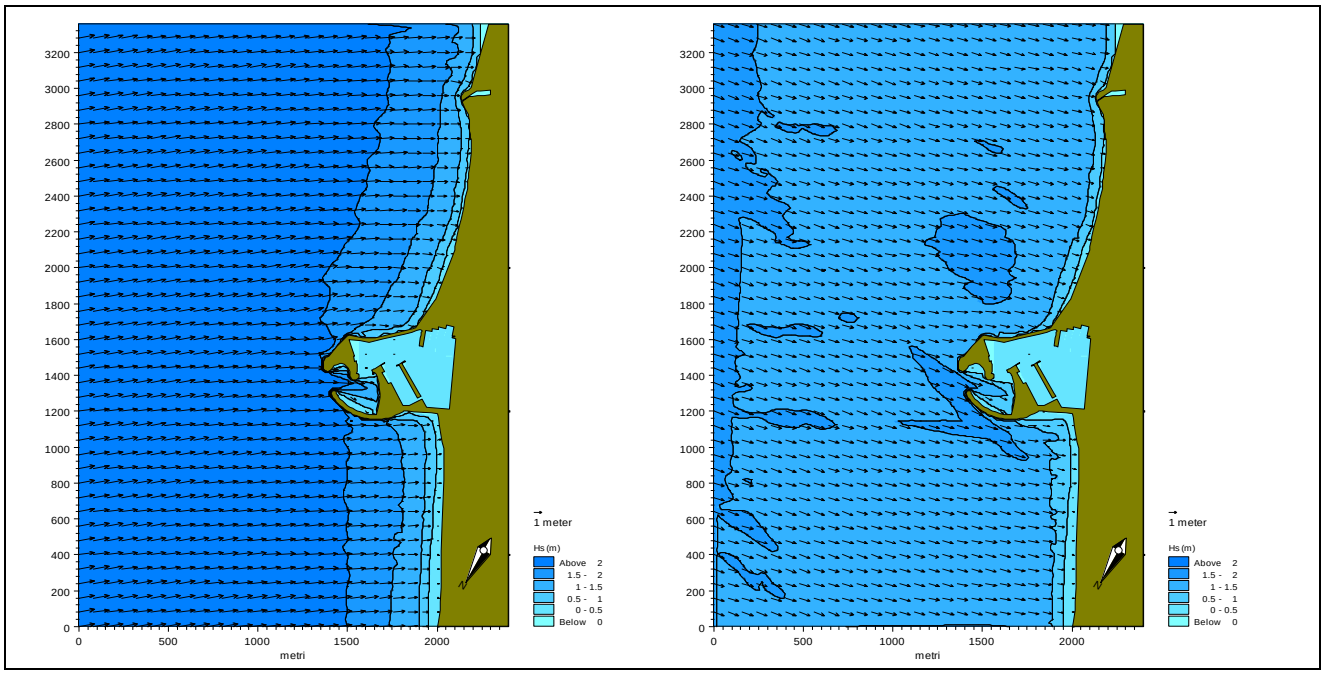


Figura 88 - Campi di moto ondoso con il porto in configurazione di progetto per l'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

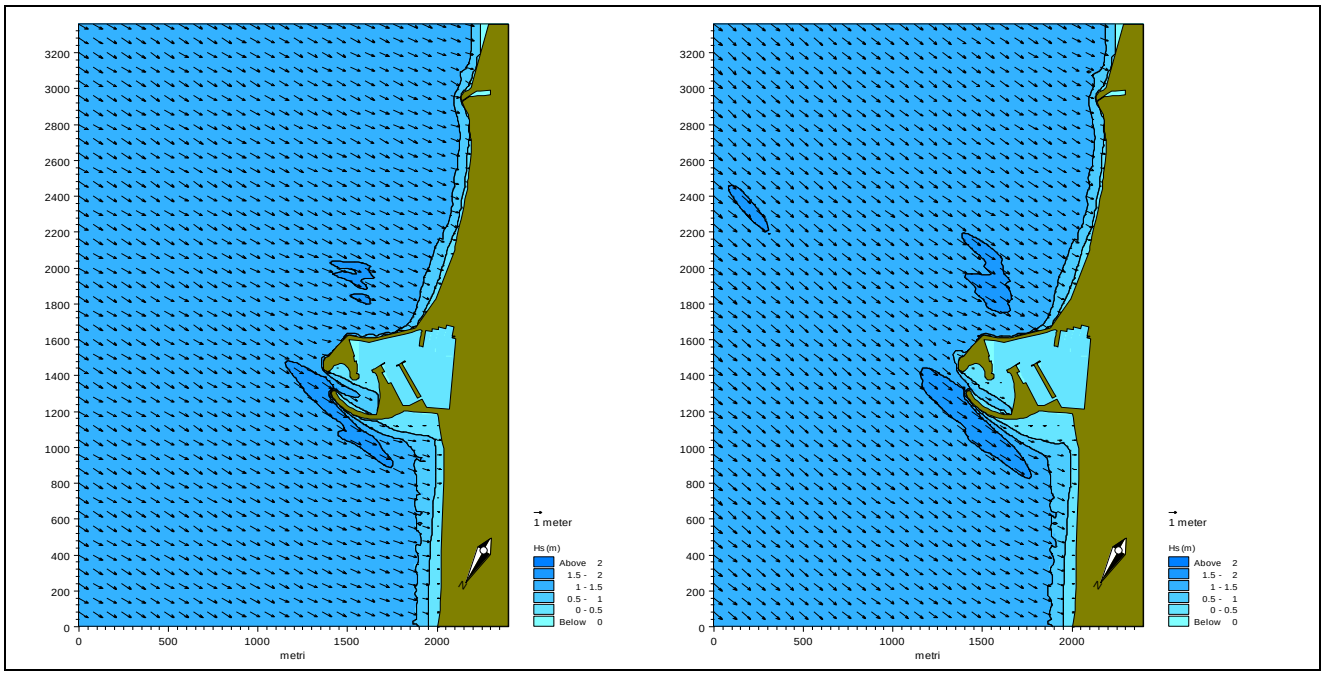


Figura 89 - Campi di moto ondoso con il porto in configurazione di progetto per l'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e per l'onda con Hs=1.5 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra). La scala cromatica rappresenta l'altezza d'onda significativa e i vettori la direzione di propagazione del fronte.

7.3 Circolazione idrodinamica indotta dai sei eventi ondosi

Anche per il modello di circolazione idraulica indotta dal moto ondoso in presenza del layout di progetto non vi sono sostanziali variazioni rispetto ai campi di velocità che si sono trovati per il layout C. L'unica variazione visibile risulta infatti la zona prossima al molo sud laddove si generano dei vortici leggermente differenti da quelli esaminati per layout C. Tuttavia sia per la dimensione di tali vortici che per il carattere prettamente localizzato di tali fenomeni i risultati ottenuti per i due casi sono da considerarsi equivalenti.

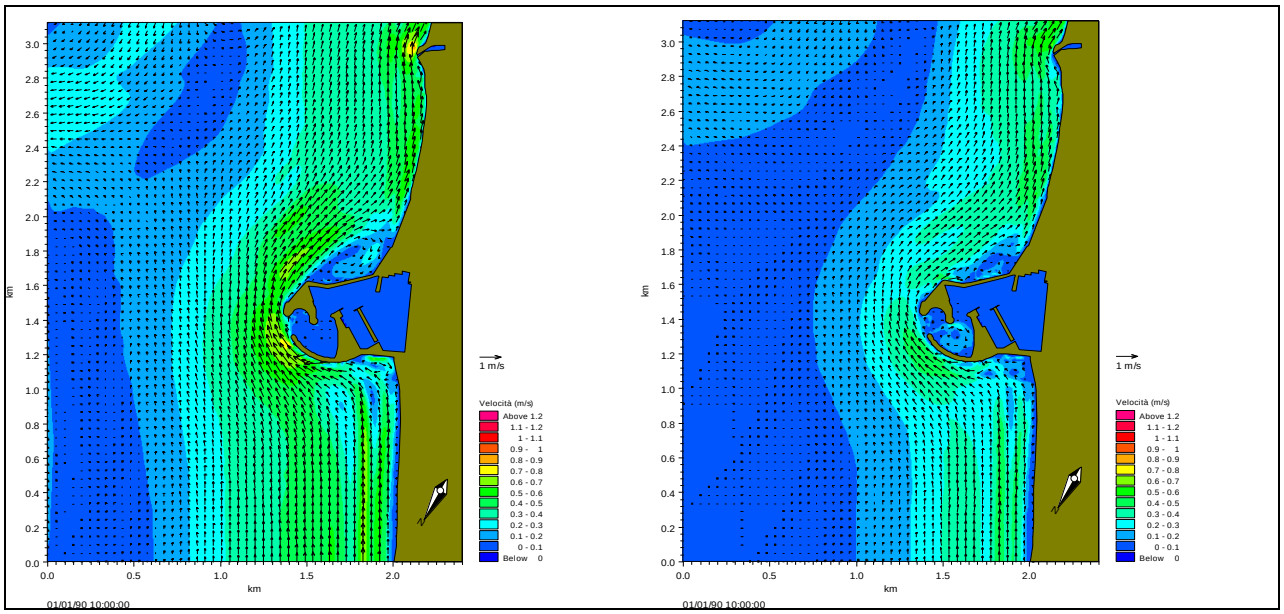


Figura 90 - Campi di velocità con il porto con layout di progetto generati dall'onda con Hs=2.6 m Tm = 6.5 s e Dir=2.2°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=2.05 m Tm=6.5 s e Dir =34.8°N (a destra).

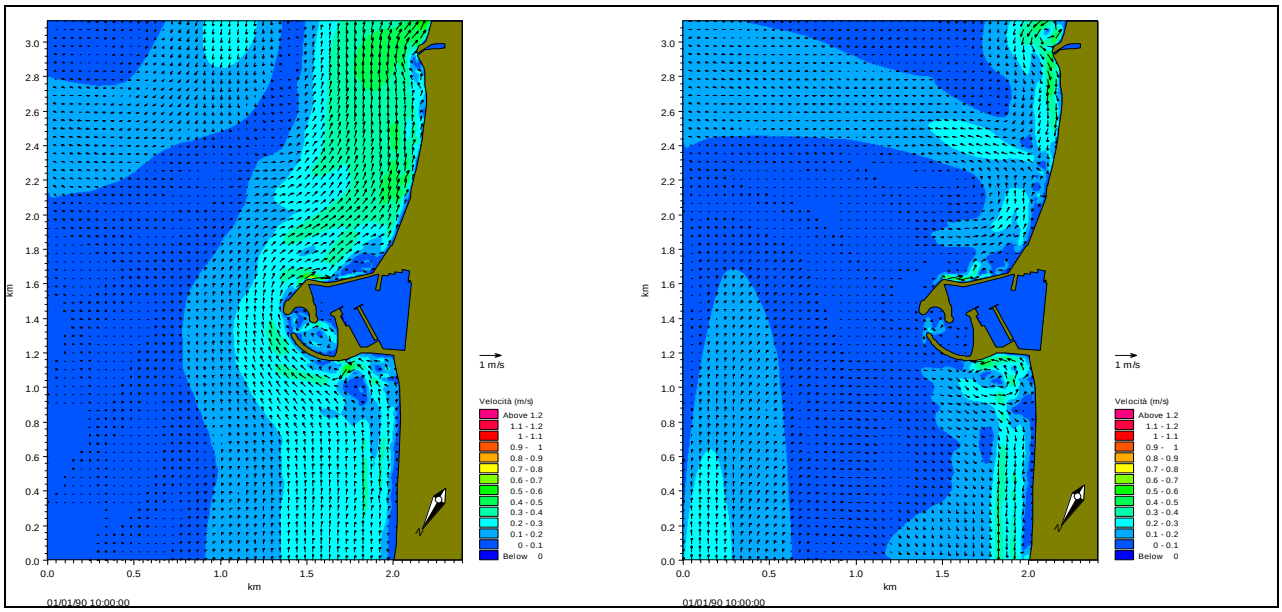


Figura 91 - Campi di velocità con il porto con layout di progetto generati dall'onda con Hs=2.2 m Tm = 7.5 s e Dir=50°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.51 m Tm=6.5 s e Dir =77.3°N (a destra).

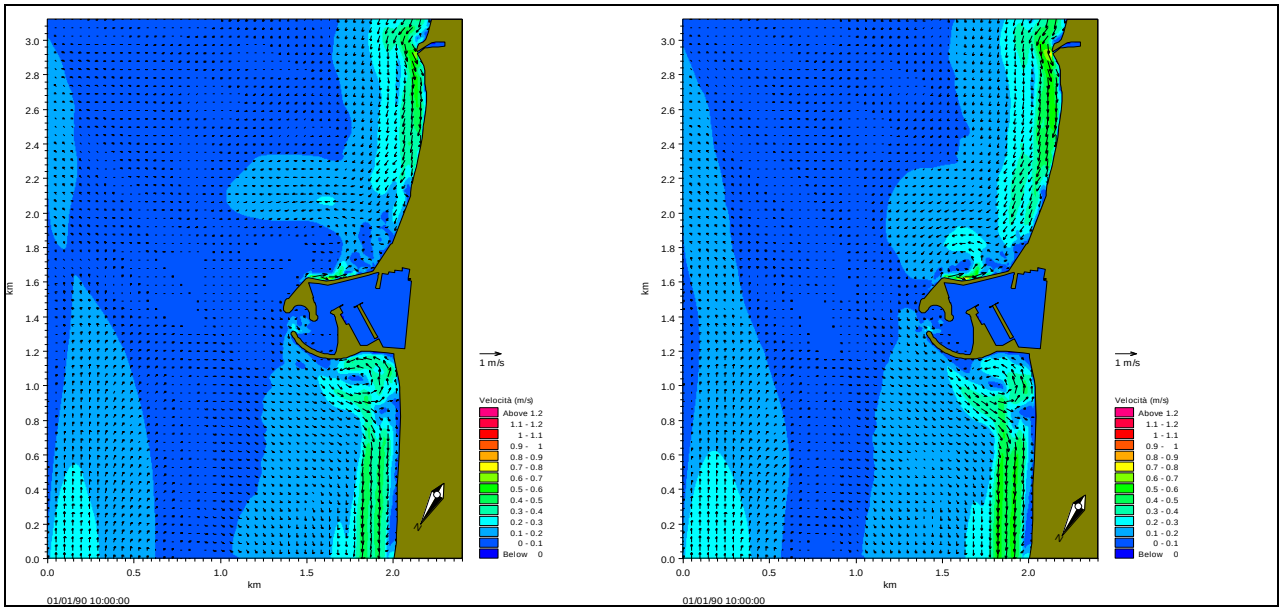


Figura 92 - Campi di velocità con il porto con layout di progetto generati dall'onda con Hs=1.46 m Tm = 6.5 s e Dir=91.8°N (a sinistra) e dall'onda con Hs=1.50 m Tm=6.5 s e Dir =104°N (a destra).

7.4 Trasporto solido

Il layout di progetto è stato verificato anche dal punto di vista dell'interazione delle opere con la capacità di trasporto al livello bidimensionale. Anche qui, come visto in precedenza per il modello di propagazione del moto ondoso e per la circolazione idraulica le variazioni rispetto al layout C sono trascurabili.

7.4.1 Risultati delle simulazioni

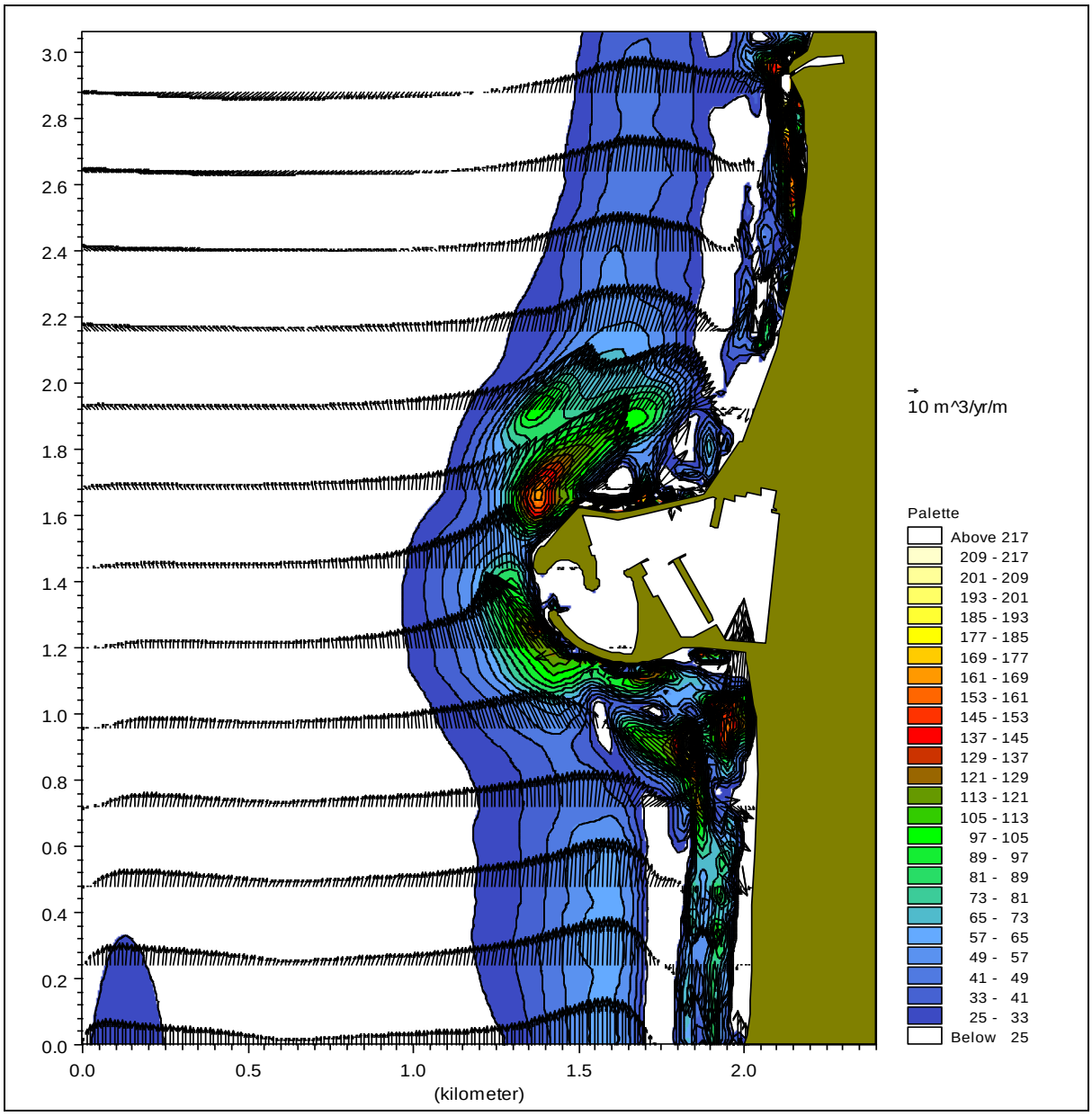


Figura 93 - Campo di trasporto solido con il clima totale per lo scenario di modellazione con il layout di progetto

L'analisi dei risultati delle onde da Nord mostra, come si evinceva anche dall'analisi del Layout C, vi sia una capacità di trasporto nella sezione N pari a 65'000 m^3/anno che diventano, nella sezione P, circa 22'000 m^3/anno in una fascia costiera ancora attiva e non molto aggettante. Questo significa che gran parte di quei 61 mila avranno la possibilità di depositarsi nel tratto di litorale nord ma che circa 20 mila avranno la possibilità di transitare attraverso l'imboccatura del porto. Di questi 20 mila una parte andrà dispersa comunque verso largo mentre un'altra parte potrà raggiungere la spiaggia a Sud del porto. Da qui una parte verrà ridistribuita lungo la spiaggia ed un'altra si propagherà verso Sud.

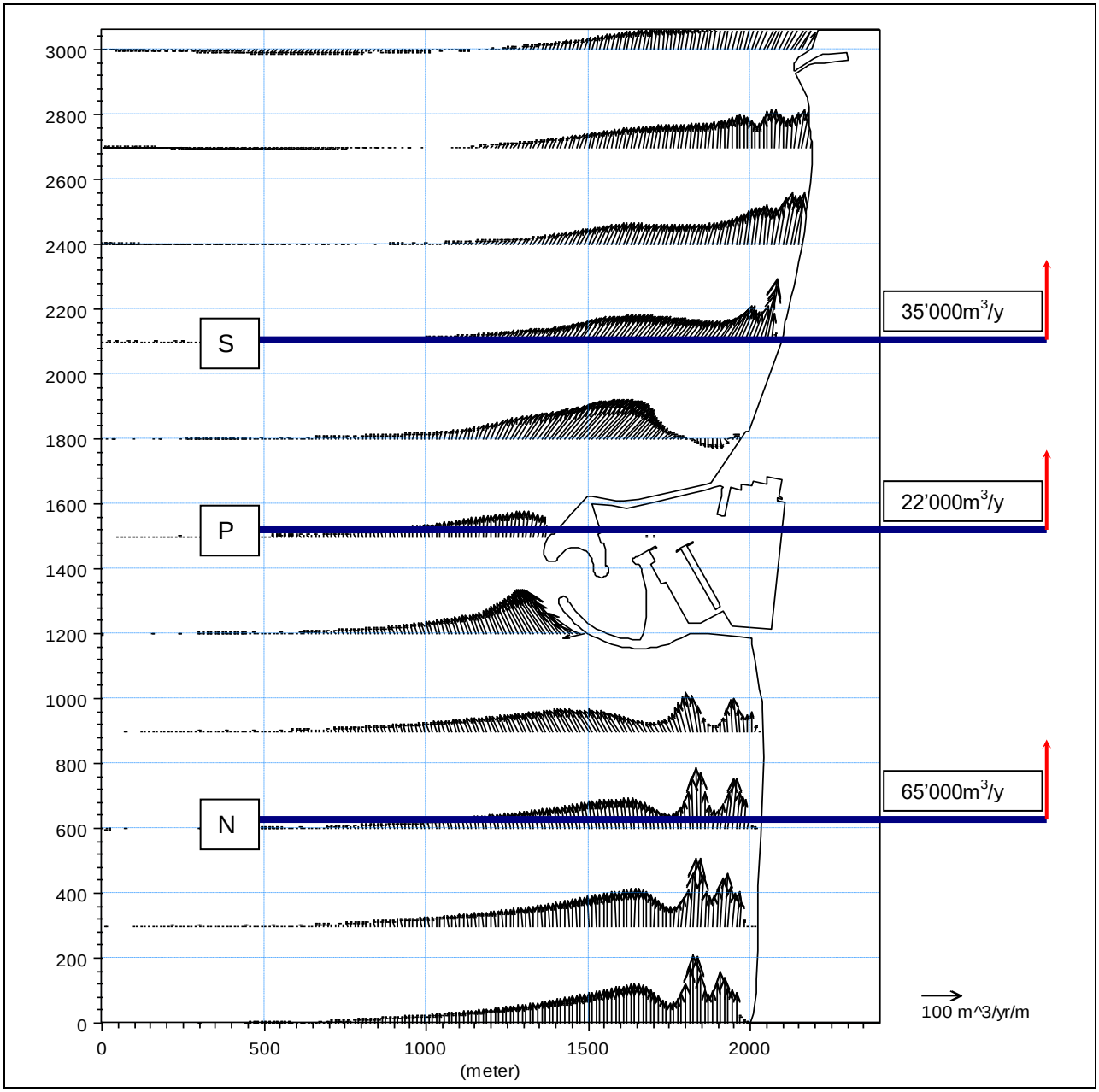


Figura 94 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori settentrionali con il porto con layout di progetto

Durante le mareggiate da Sud il trasporto lungo la sezione N è di circa 35'000 m^3/anno e come per il layout attuale permette la ridistribuzione dei sedimenti lungo la spiaggia Nord con il notevole vantaggio di non avere un unico eccessivo accumulo di sedimenti a ridosso del molo Nord. Attraverso la bocca del porto invece il trasporto è praticamente trascurabile con 1'000 m^3/anno, mentre attraverso la sezione S il trasporto verso Nord è di circa 20'000 m^3/anno e permette di ridistribuire i sedimenti che si depositano con le mareggiate da Nord e i sedimenti dell'apporto solido del T.Tordino.

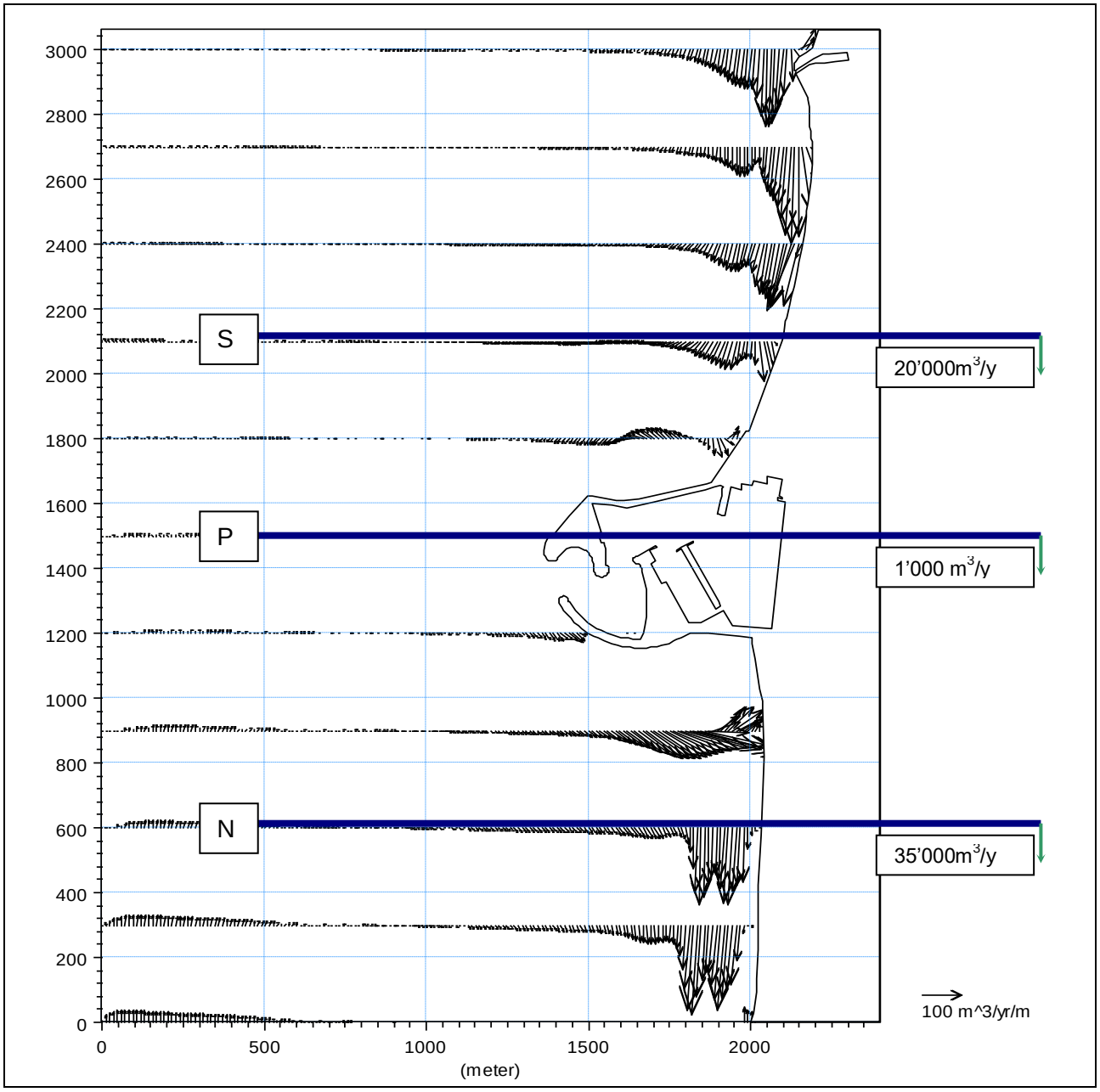
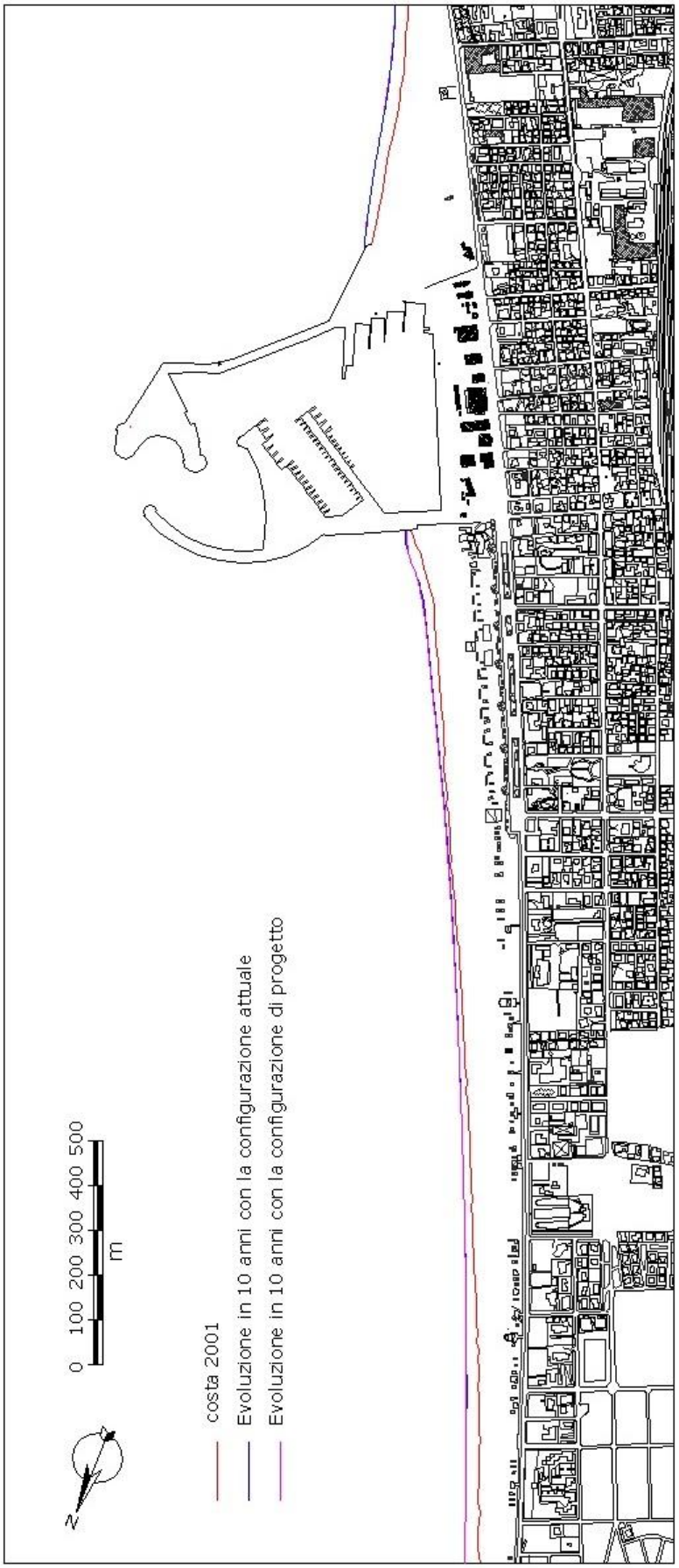


Figura 95 - Campo di trasporto solido generato dalle onde provenienti dai settori meridionali con il porto con layout di progetto

7.5 Evoluzione della linea di riva

Per quanto riguarda l'evoluzione della linea di riva, non sono state fatte ulteriori simulazioni per definire la futura configurazione delle spiagge adiacenti in quanto il modello utilizzato non tiene conto delle forme planimetriche dei moli ma esclusivamente del suo aggetto che, per il porto scelto per il PRP, non varia rispetto all'aggetto dei moli del layout C. Peraltro anche nelle simulazioni fatte in campo bidimensionale i trasporti lungo riva non variano confrontando il layout definitivo con il layout C. Nonostante ciò, per completezza, si ritiene utile riportare il risultato della simulazione di previsione dell'evoluzione della linea di riva ottenuta per iI layout C ma con il porto nella configurazione definitiva.


N
0 100 200 300 400 500
m
costa 2001
Evoluzione in 10 anni con la configurazione attuale
Evoluzione in 10 anni con la configurazione di progetto

8. CONCLUSIONI

Lo studio condotto a supporto del Piano Regolatore Portuale di Giulianova ha permesso di dare delle precise indicazioni per la redazione del suddetto Piano.
Con tali dati si è potuto analizzare il sistema ambiente-porto, mediante appositi modelli di calcolo.
Dal punto di vista della dinamica e dell'evoluzione litoranea si è dedotto che:

- attualmente il porto non si comporta come un ostacolo insormontabile per il trasporto solido litoraneo, consentendo alle spiagge adiacenti al porto di non subire i processi di erosione che caratterizzano gran parte dalle spiagge del medio-alto Adriatico;
- la soluzione che più si addice alla configurazione morfologica e climatica è un porto a moli convergenti che consenta, come nella situazione attuale, il by-pass dei sedimenti da un versante all'altro del porto;
- la prevista evoluzione dei litorali, fatta con tutti e quattro i layout, mostra che solamente con un porto che consenta il by-pass dei sedimenti si potrà garantire una buona stabilità dei litorali, in particolare il layout B che risulta quello maggiormente aggettante potrebbe innescare un eccessivo accumulo di materiale a Nord e una dannosa erosione a Sud;
- le circolazioni indotte dalle onde potrebbero innescare dei processi di sedimentazione dell'imboccatura portuale (limitandone ulteriormente l'accesso) nel caso di prolungamento dell'uno o dell'altro molo in quanto diventerebbero una trappola di sedimenti, la soluzione C risulta invece un buon compromesso tra il probabile insabbiamento della bocca e il by-pass dei sedimenti.
- la soluzione definitiva scelta per il PRP che prevede una configurazione simile al layout C ma con l'assenza del terrapieno semicircolare nel molo sud, si comporta idraulicamente alla stregua del layout C, pertanto le considerazioni e gli studi fatti per l'uno sono validi anche per l'altro.

Dagli studi fatti è possibile quindi indicare il layout C, o comunque quello scelto per il Piano Regolatore Portuale, come quello che rende ottimali tutti gli elementi presi in considerazione.

Dal punto di vista della dinamica è infatti quello che meglio risponde alle correnti litoranee indotte dal moto ondoso permettendo il by-pass del sedimento che si può constatare attualmente. Anche per quanto riguarda l'evoluzione delle spiagge adiacenti si può considerare il tale layout come l'unico che permette di mantenere l'attuale trend evolutivo.