COMUNE DI GENOVA

aster
AZIENDA SERVIZI TERRITORIALI COMUNE DI GENOVA

UFFICIO PROGETTAZIONE A.S.TER

TITOLO: **PROGETTAZIONE DEFINITIVA PER L'AMPLIAMENTO E LA REALIZZAZIONE DI NUOVE SPIAGGE TRA IL CONFINE OCCIDENTALE DI GENOVA E CAPO CREVARI**

LIVELLO DI PROGETTAZIONE: **PROGETTO DEFINITIVO**

REV.	DATA	DESCRIZIONE DELLA REVISIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
00	Ott. 2003	PRIMA EMISSIONE	Prof. P. Aminti	Ing. P. Bellingeri	Arch. A. Airenti

AMMINISTRAZIONE PROPONENTE:
COMUNE DI GENOVA

OGGETTO:

RELAZIONE MODELLO MATEMATICO

Allegato alla nota n. 850 del 24 FEB. 2004
Il Dirigente dell'Ufficio

R 06

SCALA: -

RESP. UNICO DI PROCEDIMENTO:
Ing. Stefano Pinasco

RESP. UFFICIO PROGETTAZIONE:
Arch. Annamaria Airenti

COORDINATORE PROGETTO:
Ing. Paolo Bellingeri

GRUPPO DI PROGETTO:
Ing. P. Bellingeri
Ing. G. Berriolo
Ing. P. Bocca
Ing. S. Giordano

COLLABORATORI:
Tec. Cad. Gigliola Genta
Ing. R. Pioli

CONSULENZA GEOLOGICA:
Dott. Geol. G. Andreola

REDAZIONE MODELLO MATEMATICO E FISICO
Prof. P. Aminti - Università Firenze

STUDI SEDIMENTOLOGICI E GRANULOMETRICI
Prof. Fierro-Dott. Ferrari -DIPTERIS

RILIEVO BATIMETRICO
Nuova Idrocart

COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:
Ing. R. Burlando

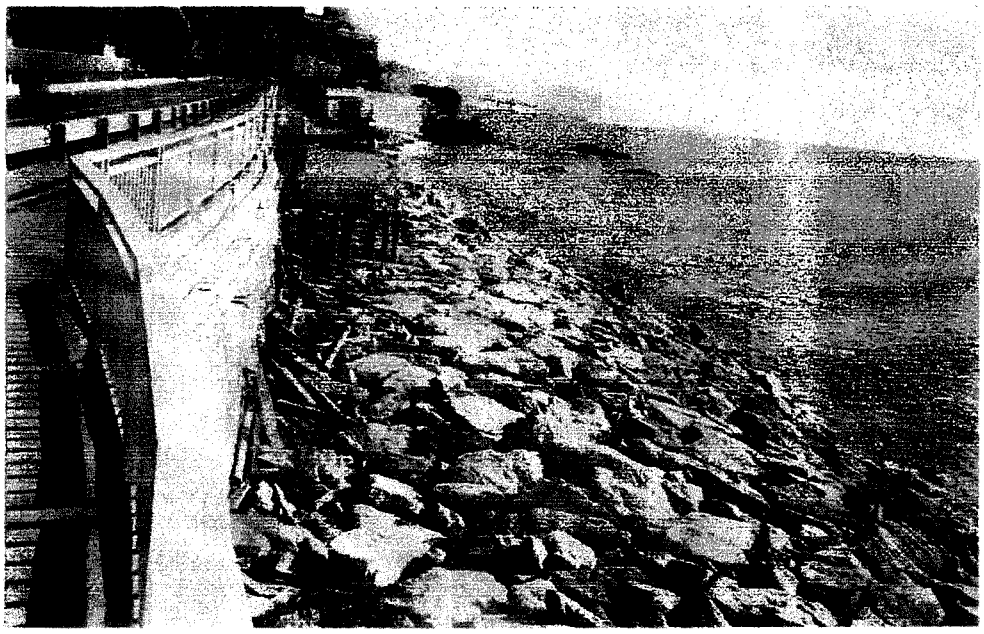
ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI GENOVA
Dott. Ing. PAOLO BELLINGERI
N. 7702

NOME FILE:	NOME LAYOUT:	FILE STAMPA:
	-	EC46. ctb

CODICE COMMESSA	DOC.N.	SCALA DI STAMPA	FORMATO	FOGLIO
00EC046	DCR06	-	-	- DI -

UNIVERSITA' degli STUDI di FIRENZE
Dipartimento di Ingegneria Civile

STUDIO SU MODELLO NUMERICO DELLA DINAMICA EVOLUTIVA DELLA SPIAGGIA DI VESIMA



RELAZIONE FINALE

Firenze, Maggio 2003

STUDIO SU MODELLO NUMERICO DELLA DINAMICA EVOLUTIVA DELLA SPIAGGIA DI VESIMA ED ANALISI DEGLI EFFETTI DELLE OPERE DI DIFESA DELLA COSTA

1. PREMESSA

Le prove su modello numerico sono state effettuate, su incarico della AS.Ter, Azienda Servizi Territoriali del Comune di Genova, con l'obiettivo di approfondire le conoscenze sulla dinamica della spiaggia emersa e sommersa del litorale di Genova Vesima, fra il limite occidentale del Comune e lo Scoglio Nave, verificandone il comportamento dopo la realizzazione del ripascimento, protetto con strutture semiaffioranti per limitarne la mobilità trasversale, previsto nel progetto preliminare.

I rilievi batimetrici eseguiti da IDROCART e lo studio meteomarino per il tratto di litorale oggetto dello studio sono stati forniti direttamente da AS.Ter.

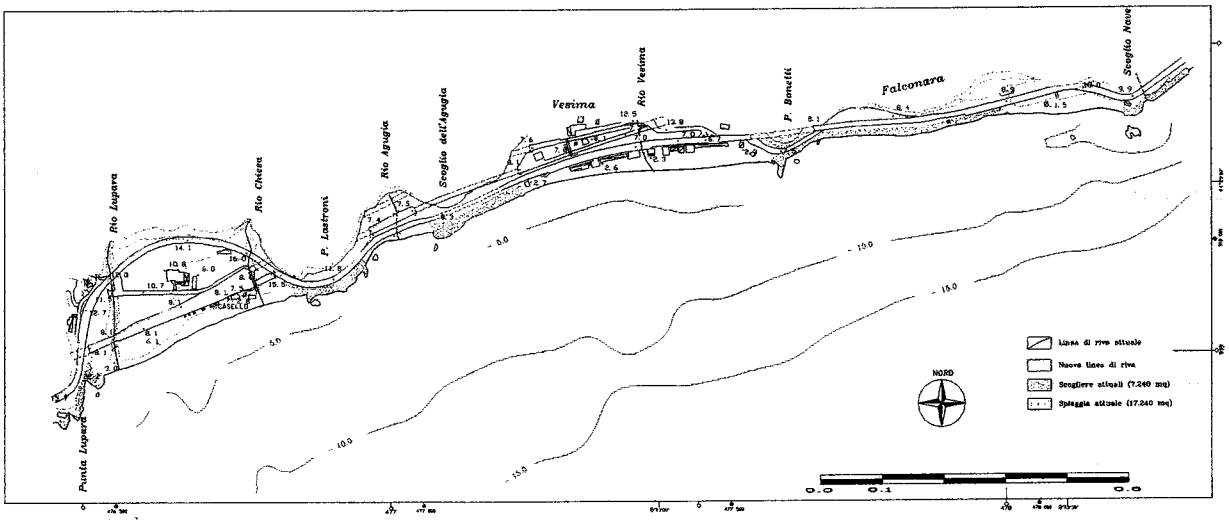


Figura 1 – Planimetria della zona esaminata.

2. METODOLOGIA DI INDAGINE

Individuazione delle onde di prova

Le onde di prova considerate per il presente studio con il modello numerico MIKE 21 sono state individuate sulla base dello studio meteomarino precedentemente effettuato e fornito direttamente dal Committente.

Si riporta di seguito la Tabella con i dati relativi agli stati di mare che sono stati considerati come i più significativi per la caratterizzazione del clima ondoso al largo della fascia costiera esaminata.

Tabella 1 – Eventi ondosi caratterizzanti il clima meteomarino.

	Hso [m]	Tp [s]	Dir,o [°N]
onda1	3.0	8.0	140
onda2	3.0	8.0	180
onda3	4.0	9.0	220

Le prove con il modello numerico MIKE21 sono state condotte, su tutte le configurazioni geometriche, per le tre condizioni di mare considerate rappresentative delle mareggiate che caratterizzano il clima ondoso sul litorale di Vesima.

Le direzioni delle onde al largo scelte per le prove su modello sono riportate in Figura 2.



Figura 2 – Provenienza stimata delle onde al largo sul tratto di litorale esaminato.

Batimetria

Per la modellizzazione della batimetria sono stati utilizzati i dati ottenuti dal rilievo eseguito dettagliatamente fino alla profondità di 20 m nel 2003 da IDROCART, per conto di AS.Ter di Genova, sempre nell'ambito del presente studio (Fig.3). Per i fondali maggiori di 20 m, in mancanza di rilievi specifici, la batimetria è stata ricostruita utilizzando i dati della carta nautica della zona.

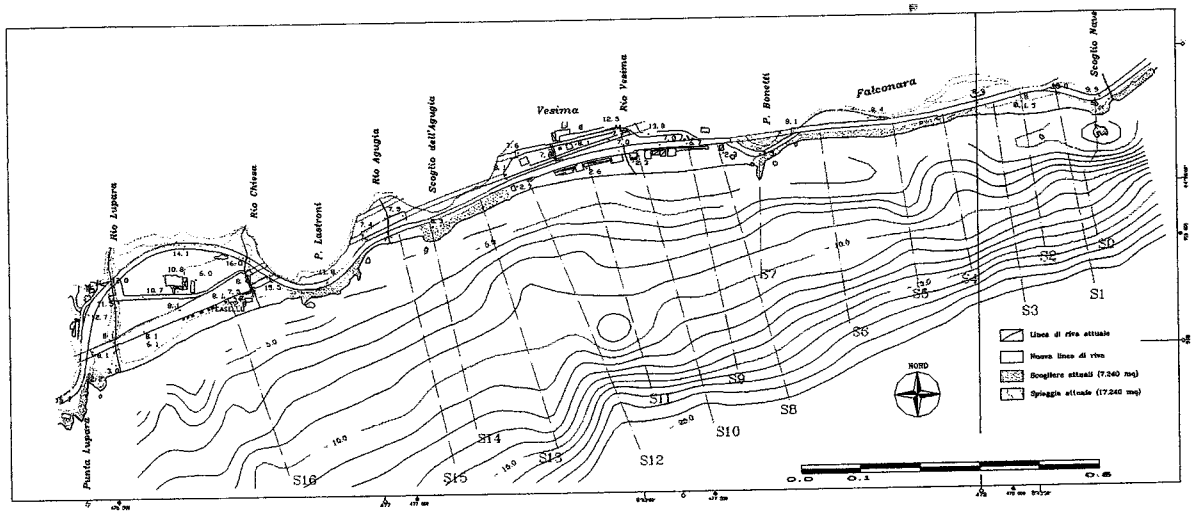


Figura 3 – Planimetria della zona in esame con indicazione dei profili rilevati da IDROCART.

Dalla serie di punti rilevati, disposti irregolarmente sul dominio in esame, la batimetria è stata costruita su maglia regolare XYZ tramite l'apposita routine di utilità presente nel sistema di modellazione; la batimetria ottenuta, opportunamente ricontrollata è stata georeferenziata in coordinate Gauss-Boaga.

La modellazione numerica con il codice di calcolo Mike21 è stata impostata costruendo una griglia di calcolo per ogni onda di prova (Fig.4); le dimensioni di ciascuna griglia sono riportate nella Tabella seguente.

Tabella 2 – Dimensioni delle griglie di calcolo per le tre onde di prova.

	Dir,o [°N]	Dimensione [km] X x Y
Onda 1	140	~ 3.0x3.7
Onda 2	180	~ 3.6x2.3
Onda 3	220	~ 3.6x2.8

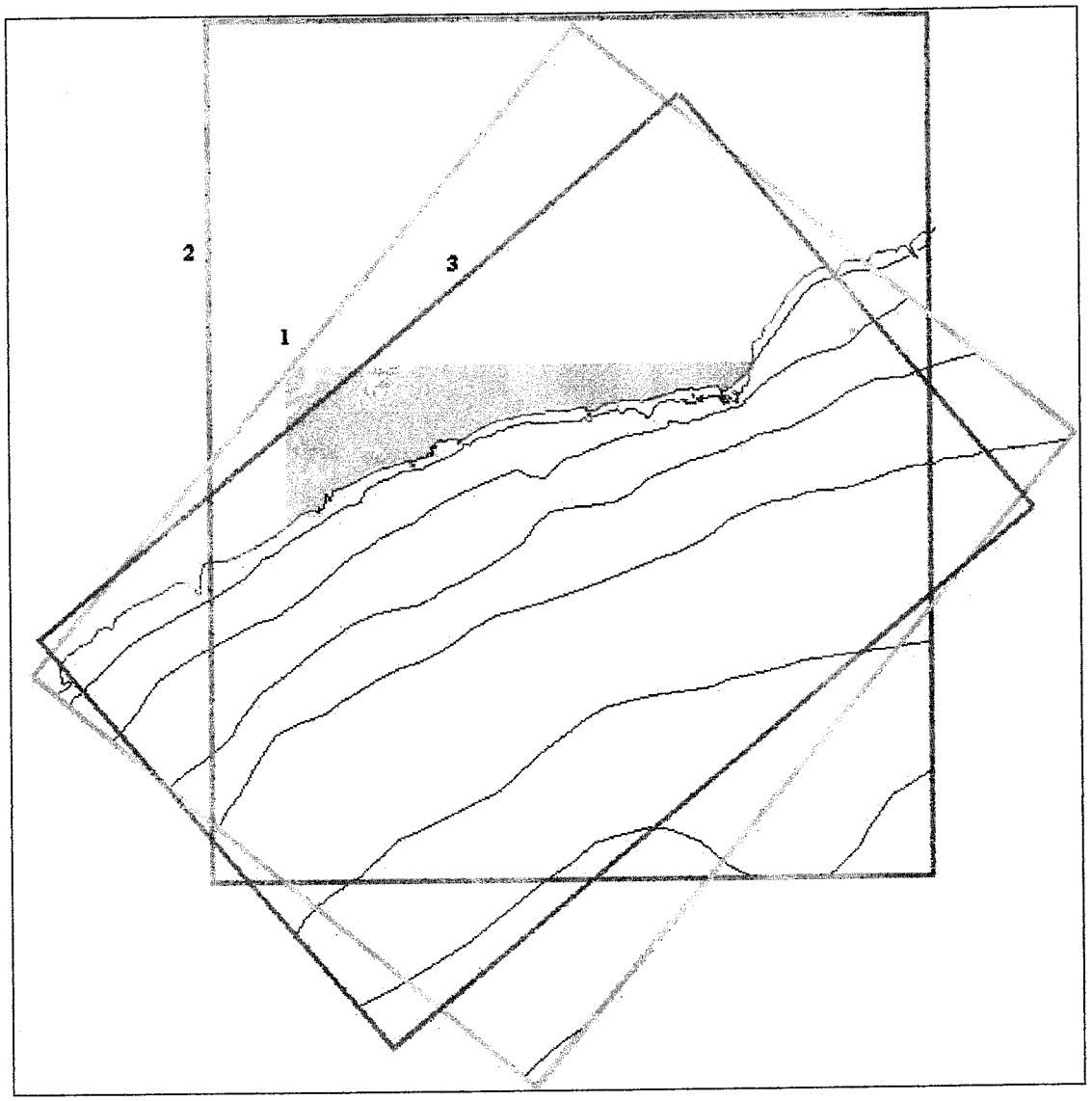


Figura 4 – Planimetria della zona in esame con indicazione delle tre griglie di calcolo.

La spaziatura griglia per i moduli d'onda ed idrodinamico è di 5x5 metri nelle due direzioni.

Analisi dello stato attuale

La batimetria relativa allo stato attuale è riportata in Figura 5.

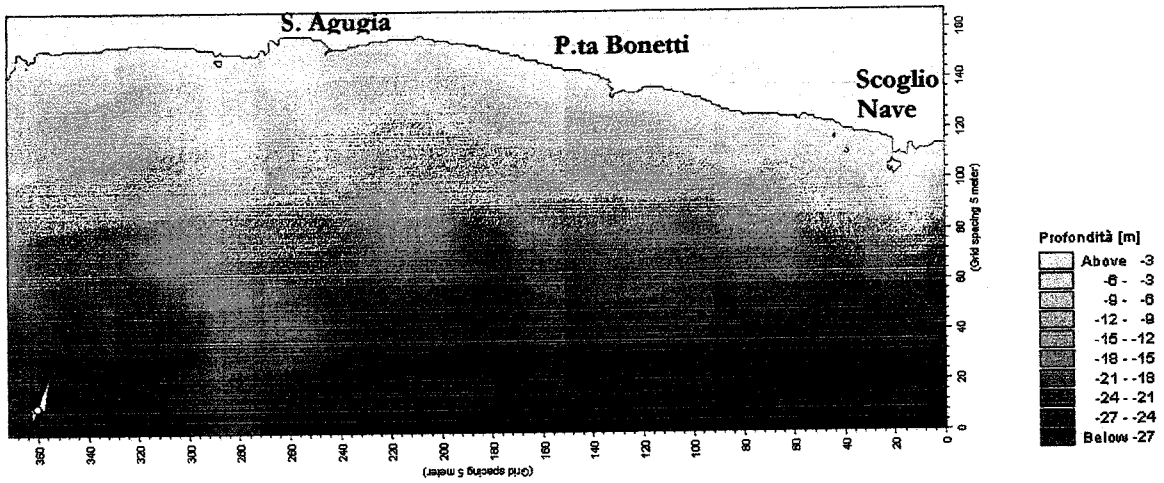


Figura 5 – Batimetria ricostruita per il modulo idrodinamico (stato attuale)

Per quanto riguarda le informazioni sulla sedimentologia, è stato fatto riferimento allo studio eseguito presso l'Università di Genova (DIP.TE.RIS, Dipartimento per lo studio del Territorio e sue Risorse) che ha fornito le analisi sedimentologiche effettuate sui campioni prelevati nei punti evidenziati in Figura 6.

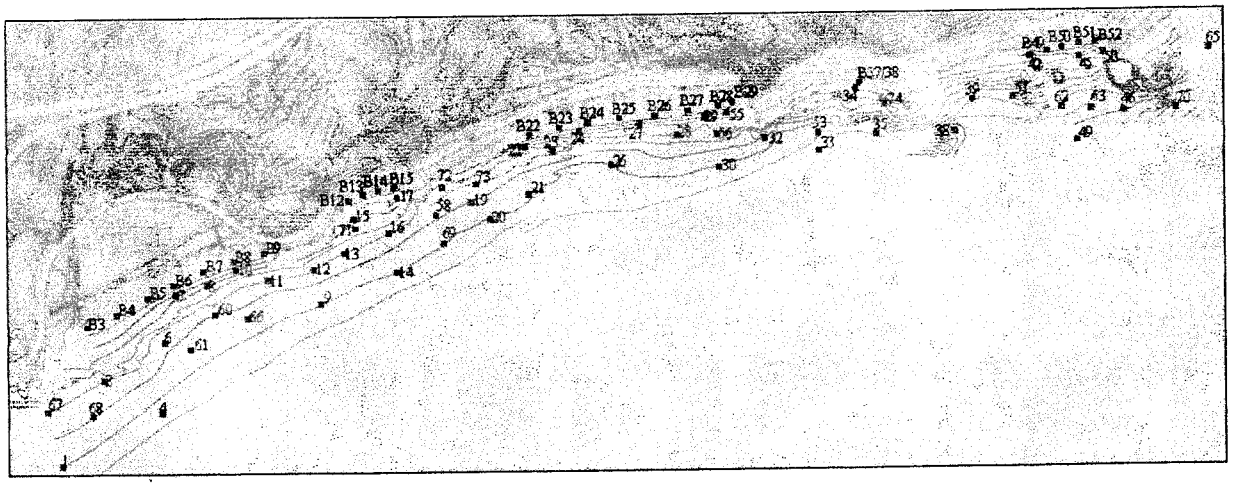


Figura 6 – Planimetria della zona di intervento con i punti di prelievo sedimentologico.

Per ciascun campione sono stati forniti i parametri sedimentologici caratterizzanti il materiale presente sul fondo; ai fini dell'utilizzo nel modello numerico sono stati utilizzati i valori del diametro medio (D_{50}) ed i valori di dispersione ricavati come differenza fra D_{84} e D_{16}. Con tali informazioni è stata ricostruita la mappa relativa alle granulometrie presenti allo stato attuale (Fig.7).

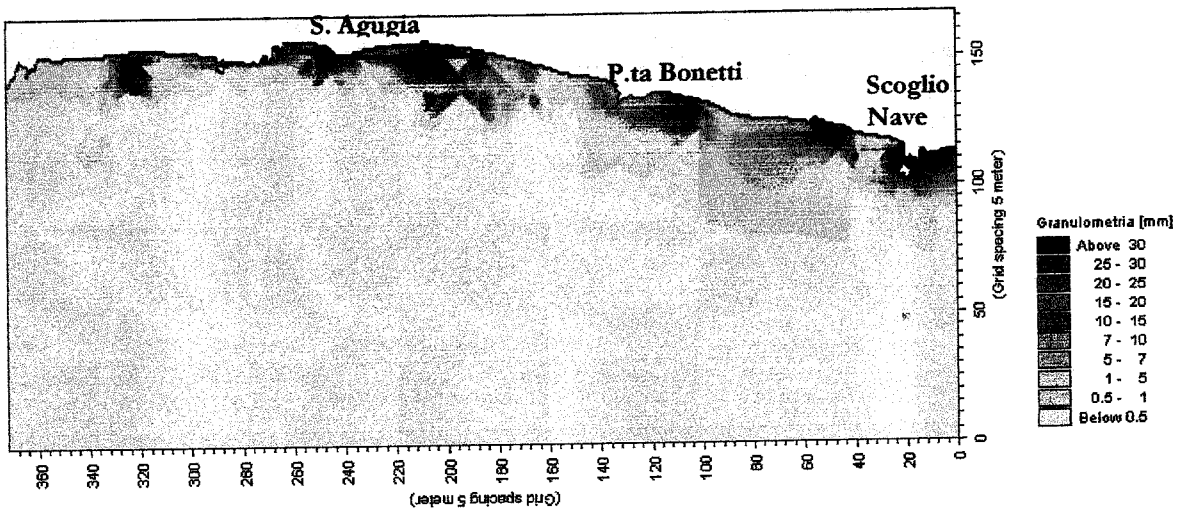


Figura 7 – Carta granulometrica relativa allo stato attuale.

Ipotesi progettuale per la protezione del tratto in esame

L' intervento progettato prevede la costruzione della spiaggia artificiale con ghiaia e ciottoli per un avanzamento medio della linea di riva pari a circa 15 m con pendenza lato mare 1:5 (come risulta mediamente dalle prove effettuate su modello fisico presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile di Firenze). Tale spiaggia, ricostruita con i volumi indispensabili per evitare le azioni di riflessione ed a garantire gli spazi strettamente necessari per la realizzazione dei servizi per la balneazione, è protetta con strutture semiaffioranti per consentire una limitata mobilità trasversale dei sedimenti di alimentazione di tutta la successione di spiagge artificiali (Fig.8).

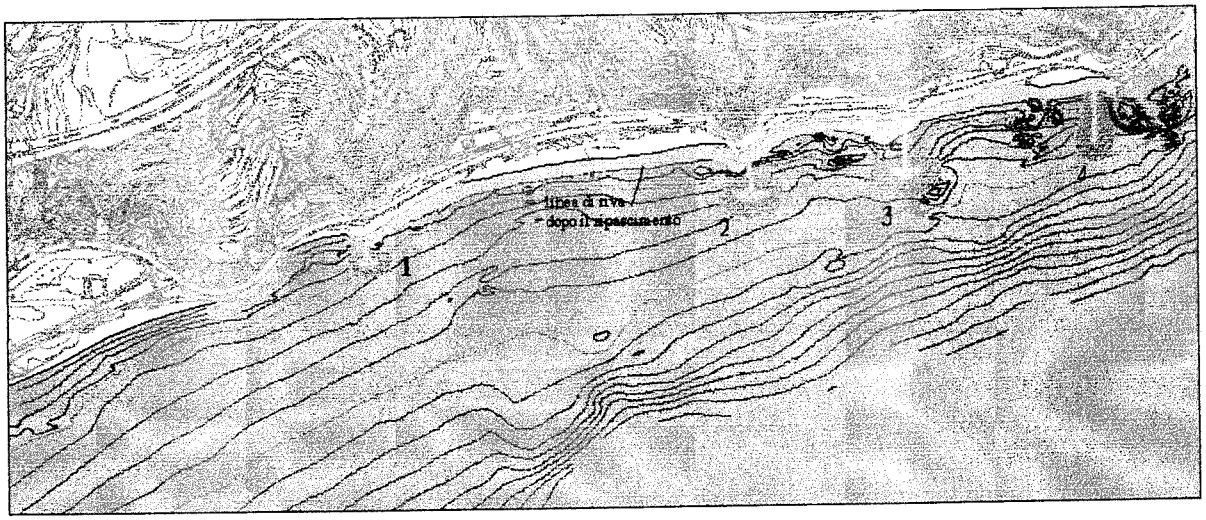


Figura 8 – Planimetria di progetto..

Lo scoglio Nave, all'estremo di Levante del tratto considerato, è reso praticamente invalicabile ai sedimenti anche più grossolani con la realizzazione di un pennello (4) che si spinge fino alla profondità di circa 10m e si completa con un setto sommerso che raggiunga i –12m.

In corrispondenza delle secche semiaffioranti esistenti di fronte al litorale di Falconara ed al piccolo pennello di Punta Bonetti vengono realizzate due nuove strutture collegate a terra a circa 60m dall'attuale piede della scogliera esistente e realizzate con un cumulo di scogli naturali affioranti su un fronte di circa 50m (2 e 3). All'altro estremo, in prossimità dello Scoglio dell'Agugia, la realizzazione di una struttura dello stesso tipo ha lo scopo di contenere gli effetti della riflessione del moto ondoso prodotti dalla costa rocciosa ed incrementati dalla scogliera posta a protezione della SS. Aurelia (1).

Tali opere poggiano tutte su un fondale in parte sabbioso ed in parte di rocce emergenti fino a raggiungere la profondità di oltre -4.0 m; in Figura 9 è riportata la batimetria ricostruita della configurazione di progetto per il modello idrodinamico.

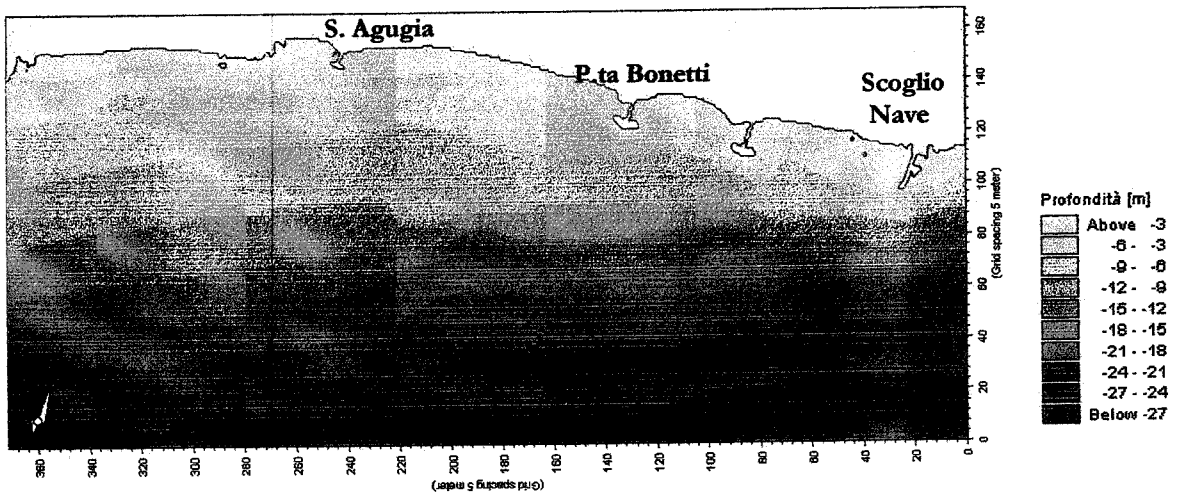


Figura 9 – Batimetria ricostruita per il modello idrodinamico (configurazione di progetto)

Anche la carta sedimentologica relativa alla configurazione di progetto è stata modificata in funzione della costruzione della spiaggia artificiale in ghiaia: la sedimentologia dei fondali è stata variata inserendo, lungo la linea di battigia e per una fascia di ampiezza pari a circa 15m, una granulometria più grossolana di quella attualmente presente.

La carta granulometrica ricostruita è riportata in Figura 10.

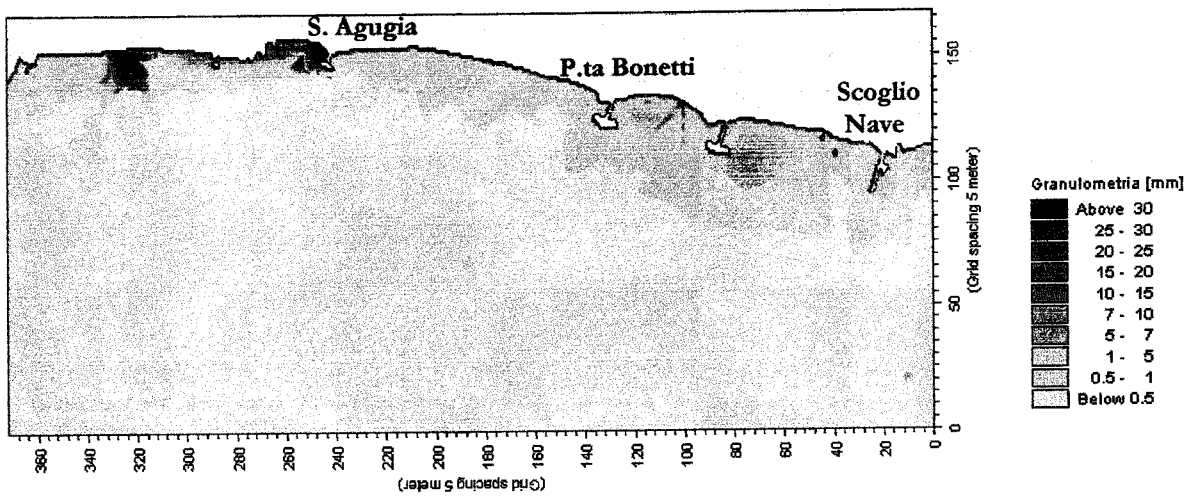


Figura 10 – Carta granulometrica relativa alla configurazione di progetto.

3. RISULTATI DELLO STUDIO SU MODELLO

3.1 Analisi della propagazione d'onda

Si riportano di seguito i risultati del modulo d'onda spettrale per le tre onde provate nel dominio di applicazione dove sono illustrate le variazioni di altezza e direzione subite dalle onde nella fase di propagazione a costa per effetto di rifrazione e shoaling.

Attacco ondoso al largo da 140°N

L'onda al largo da 140° N è quella che, per l'orientazione del tratto di costa preso in esame, si presenta quasi frontale e che pertanto, nel trasferimento sottocosta, risente molto poco della rifrazione dovuta all'abbassamento dei fondali (Fig.11).

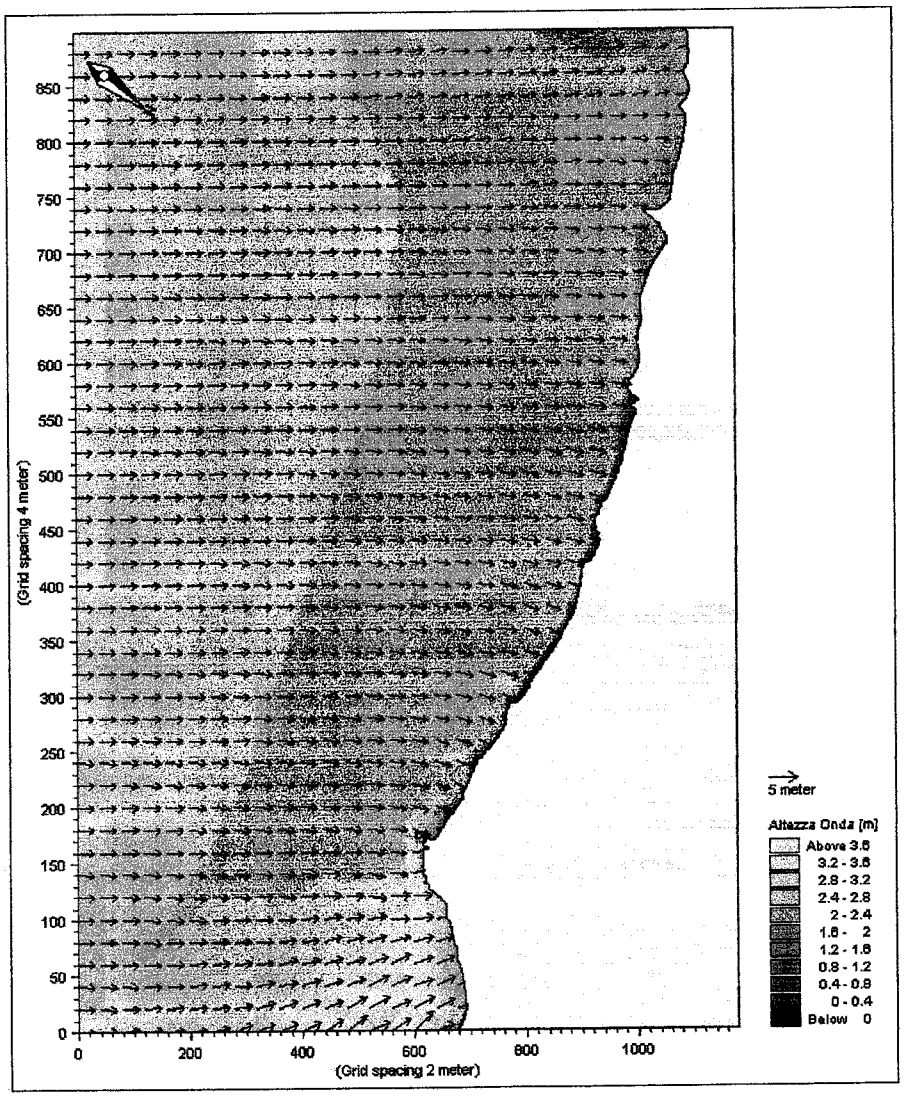


Figura 11 – Risultati del modulo d'onda spettrale per attacco ondoso al largo da 140°N.

Attacco ondoso al largo da 180°N

Questo attacco ondoso, subisce nell'approssimarsi a costa, d una discreta rifrazione e giunge nella zona di studio con direzione pari a circa 140°N ed altezza compresa fra 2.0 e 2.4 m; gli effetti in termini di correnti generate sottocosta sono però differenti nei due tratti rispettivamente ad est ed a ovest di Punta Bonetti dato che più o meno in prossimità della Punta stessa la costa presenta un cambio di orientazione (Fig.12, cfr. risultati del modulo idrodinamico Figg.14 -15).

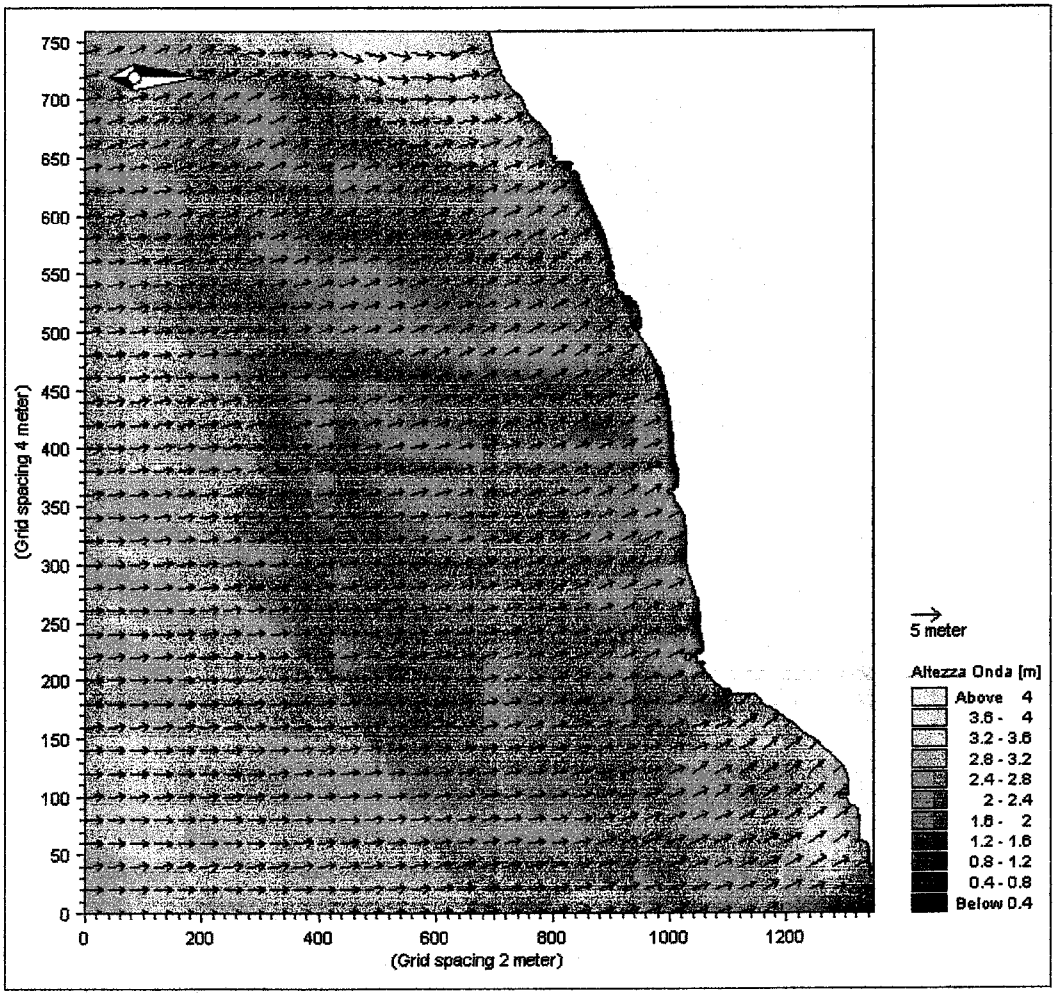


Figura 12 – Risultati del modulo d'onda spettrale per attacco ondoso al largo da 180°N.

Attacco ondoso al largo da 220°N

Le onde provenienti da questa direzione, che sono le più alte e le più persistenti, risentono in maniera piuttosto consistente della rifrazione dovuta al cambiamento della batimetria nell'approssimarsi a riva e la direzione di propagazione diventa su tutta l'area considerata quella corrispondente a 180°N; l'attenuazione in termini di altezza d'onda è più o meno la stessa su tutto il litorale studiato dove si hanno valori compresi tra 2.4 ed 2.8 m (Fig.13).

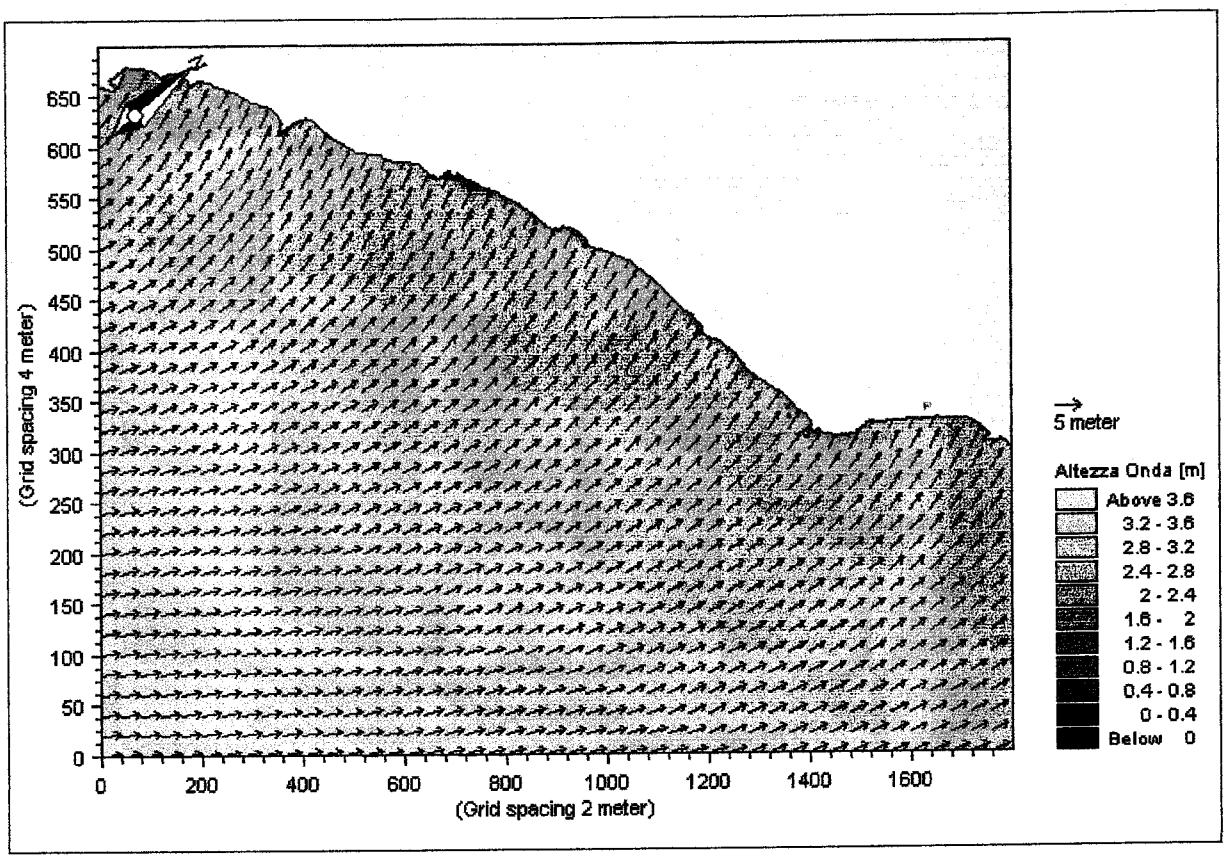


Figura 13 – Risultati del modulo d'onda spettrale per attacco ondoso al largo da 220°N.

3.2 Esame dei risultati del modulo idrodinamico

Stato attuale

Le prove su modello sono state eseguite per i tre stati di mare individuati come prevalenti: i risultati del modello idrodinamico, che fornisce la ricostruzione del campo di correnti indotte dal moto ondoso, sono riportati in forma grafica per tutti gli attacchi ondosi e di seguito vengono analizzati e messi a confronto tali risultati con i vettori velocità rappresentati, nella scala specificata, sullo sfondo che descrive la batimetria (Fig.14). I particolari ingranditi evidenziano il tratto di costa compreso fra lo Scoglio Nave e Scoglio dell'Agugia.

Attacco ondoso al largo da 140°N

Oltre la zona delle secche intorno sulla batimetrica a –5m, fra lo scoglio Nave e Punta Bonetti si evidenzia la presenza di vortici che generano un flusso di corrente sotto costa diretto da levante verso ponente su tutto il litorale.

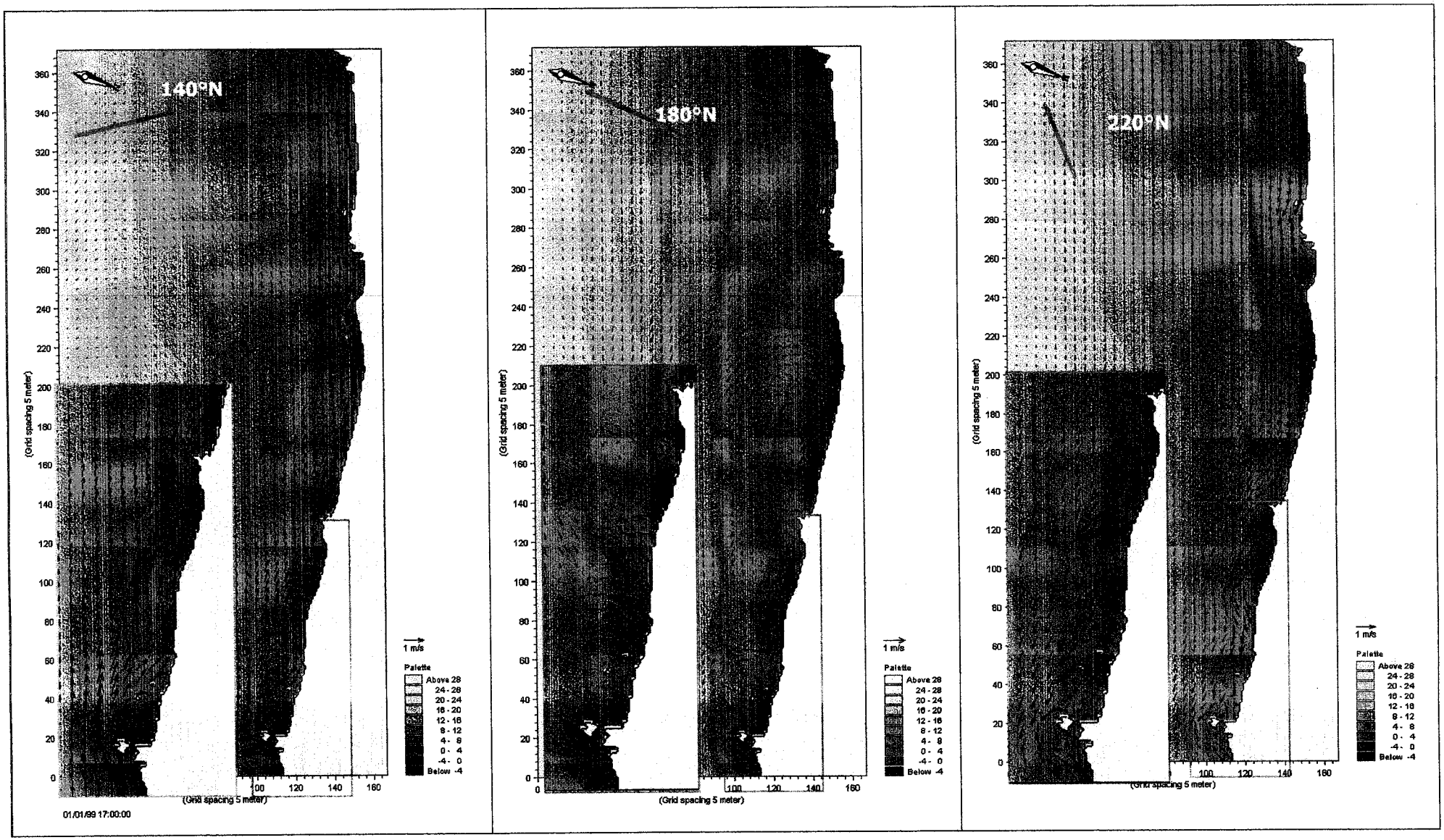


Figura 14– Risultati del modulo idrodinamico del modello MIKE21 per attacco ondoso al largo da 140°-180°-220°N: stato attuale.

Attacco ondoso al largo da 180°N

Con l'onda al largo proveniente da 180° N la distribuzione delle correnti nell'area di interesse rimane del tutto simile alla precedente sugli alti fondali: al largo infatti la corrente, anche se di intensità minore è ancora diretta da ponente verso levante e giunge sulla zona delle secche molto smorzata. Oltre questa fascia però si individuano due zone: dallo scoglio Nave fino a Punta Bonetti sono presenti ampie zone vorticose che danno luogo ad un flusso di corrente diretto da levante verso ponente, mentre ad ovest di Punta Bonetti anche sottocosta la corrente litoranea appare diretta in senso opposto. Le due correnti confluiscono in un unico flusso proprio nei pressi di Scoglio dell'Agugia.

Attacco ondoso al largo da 220°N

L'attacco ondoso da 220°N risente in maniera marginale delle variazioni di fondale presenti sulle secche e, pertanto, il flusso di corrente che si genera su tutta l'area è diretto da ponente verso levante. Sottocosta la corrente appare piuttosto intensa su tutta l'area esaminata, si sviluppa quasi totalmente in direzione parallela alla riva, fatta eccezione per le zone in cui risente delle presenza di sporgenze naturali o artificiali come lo scoglio dell'Agugia, Punta Bonetti e lo scoglio Nave dove subisce delle locali deviazioni.

Ipotesi progettuale di protezione della spiaggia

I risultati del modello idrodinamico relativamente all'ipotesi progettuale illustrata e per le tre situazioni di mare esaminate sono riportati in forma grafica in Figura 15.

Attacco ondoso al largo da 140°N

L'inserimento delle opere provoca modifiche solo nelle immediate vicinanze: sottocosta, pur rimanendo sostanzialmente uguale l'andamento delle correnti generate da questo stato di mare, si nota una discreta attenuazione dell'intensità delle correnti soprattutto nelle zone subito oltre lo scoglio Nave, verso ponente, dove, allo stato attuale era rilevabile una tendenza alla formazione di vortici, che risultano ora di minore estensione e contenuti fra le strutture.

Attacco ondoso al largo da 180°N

Relativamente al campo idrodinamico l'inserimento delle strutture di protezione della spiaggia ricostruita conferma, anche per questo attacco ondoso, i risultati precedenti mettendo in risalto

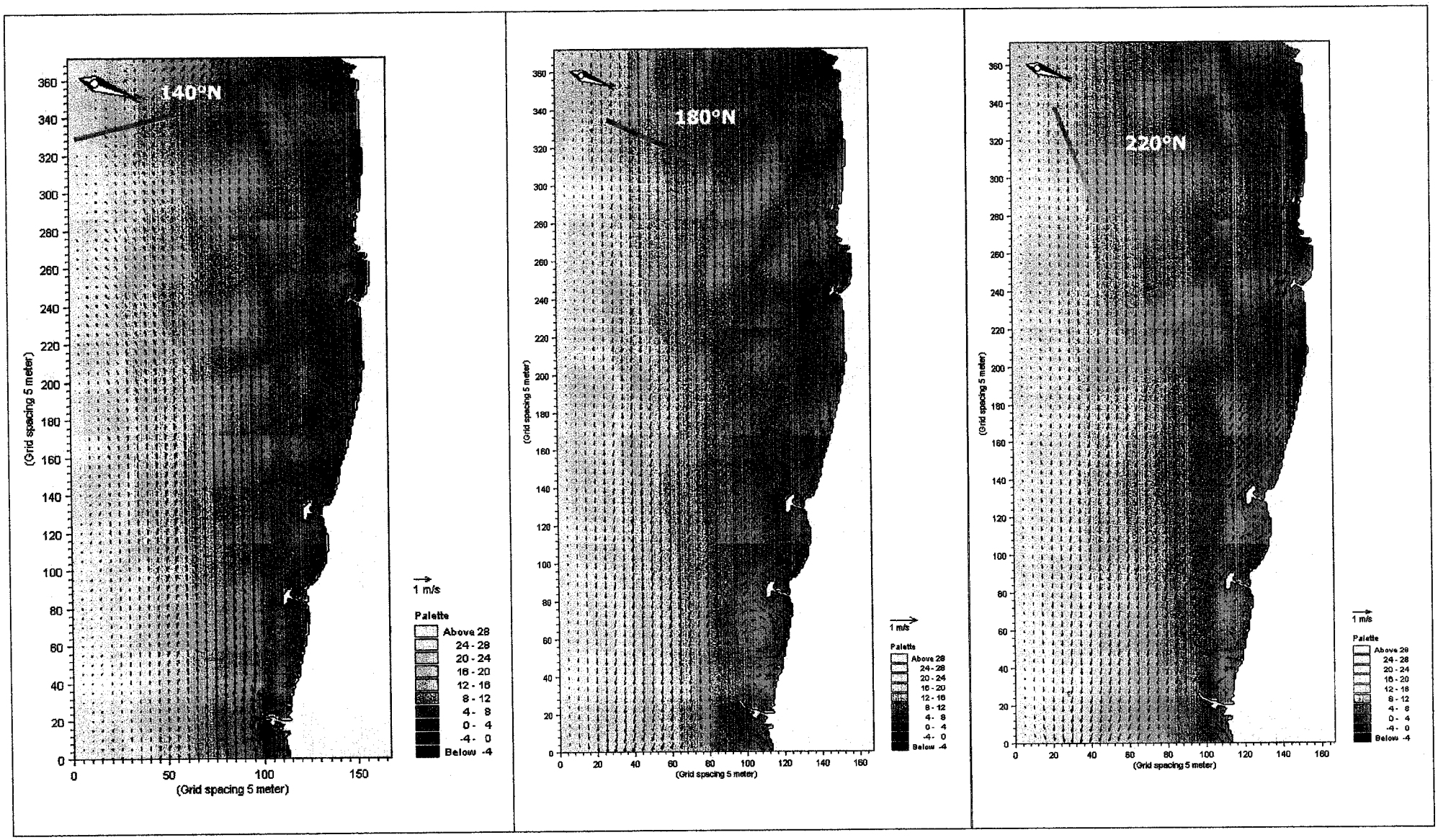


Figura 15– Risultati del modulo idrodinamico del modello MIKE21 per attacco ondoso al largo da 140°-180° 220°N: stato di progetto.

l'evidente attenuazione del regime di corrente che si instaura su tutta la fascia sottocosta interessata pur conservando la tendenza presente allo stato attuale.

Attacco ondoso al largo da 220°N

Per questo attacco ondoso in cui il flusso di corrente va da ovest verso est la realizzazione delle opere provoca cambiamenti di una qualche entità solo in prossimità delle stesse: in particolare le spiagge delimitate dalle tre opere più ad ovest mostrano una discreta attenuazione della corrente litoranea fino oltre la testata delle stesse.

3.3 Esame dei risultati del modulo di trasporto dei sedimenti

I risultati del modello di trasporto sono stati sintetizzati attraverso mappe in cui i vettori rappresentano in scala il flusso in $m^3/(giorno \times m)$ e le aree a diverso colore indicano le zone di accumulo (marrone) e le zone in erosione (giallo).

Stato attuale

Attacco ondoso al largo da 140°N

Il trasporto dei sedimenti in prossimità della costa è diretto verso ovest e le variazioni dei fondali sono concentrate sulla fascia compresa fra la battigia e la profondità di 10-15m; si osservano aree con tendenza al deposito continuamente alternate ad aree soggette ad erosione. Sono evidenti alcune aree dove si verifica una estesa tendenza ad approfondimento dei fondali (aree 2, 3 e 4) I fondali interessati arrivano fino alla distanza di circa 60 m dalla riva (Fig.16).

Attacco ondoso al largo da 180°N

Il trasporto solido è diretto prevalentemente verso est. La presenza di vortici in prossimità della riva provoca delle locali inversioni della direzione del flusso sotto costa. In corrispondenza della linea di riva sono osservabili estese tendenze all'erosione con trasporto dei materiali verso la fascia immediatamente al largo (a distanza dell'ordine di 10 m). Nelle aree 2 e 3 si osservano ampie aree, estese fino alla profondità di 50 m, dove prevale la tendenza all'erosione (Fig.17).

Attacco ondoso al largo da 220°N

Il trasporto è nettamente diretto verso est. In prossimità della linea di riva sono presenti prevalentemente aree di deposito, così come si osserva un'ampia area di deposito in prossimità

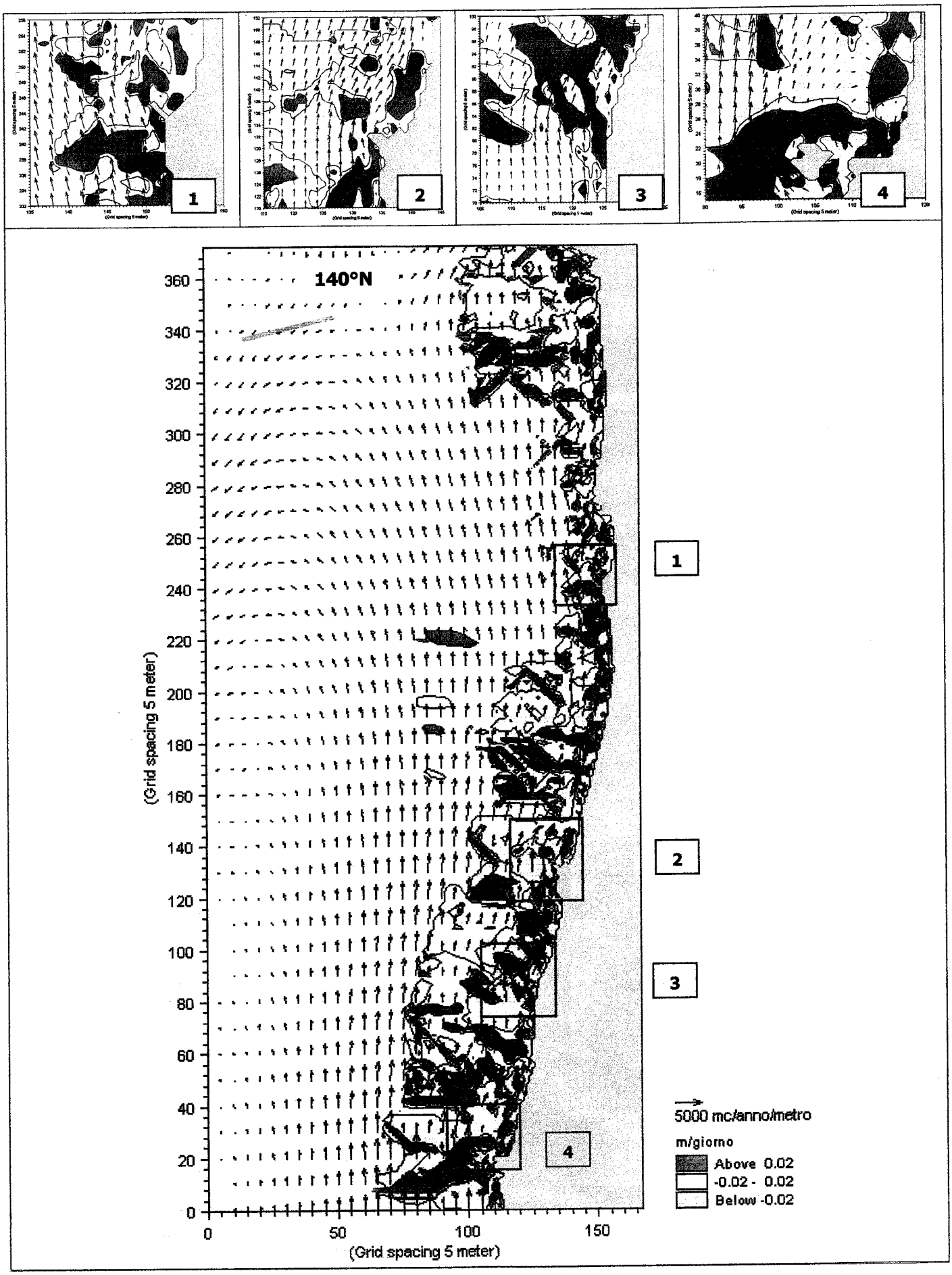


Figura 16– Risultati del modello Mike21: flusso e trasporto dei sedimenti per attacco ondoso al largo da 140°N: stato attuale.

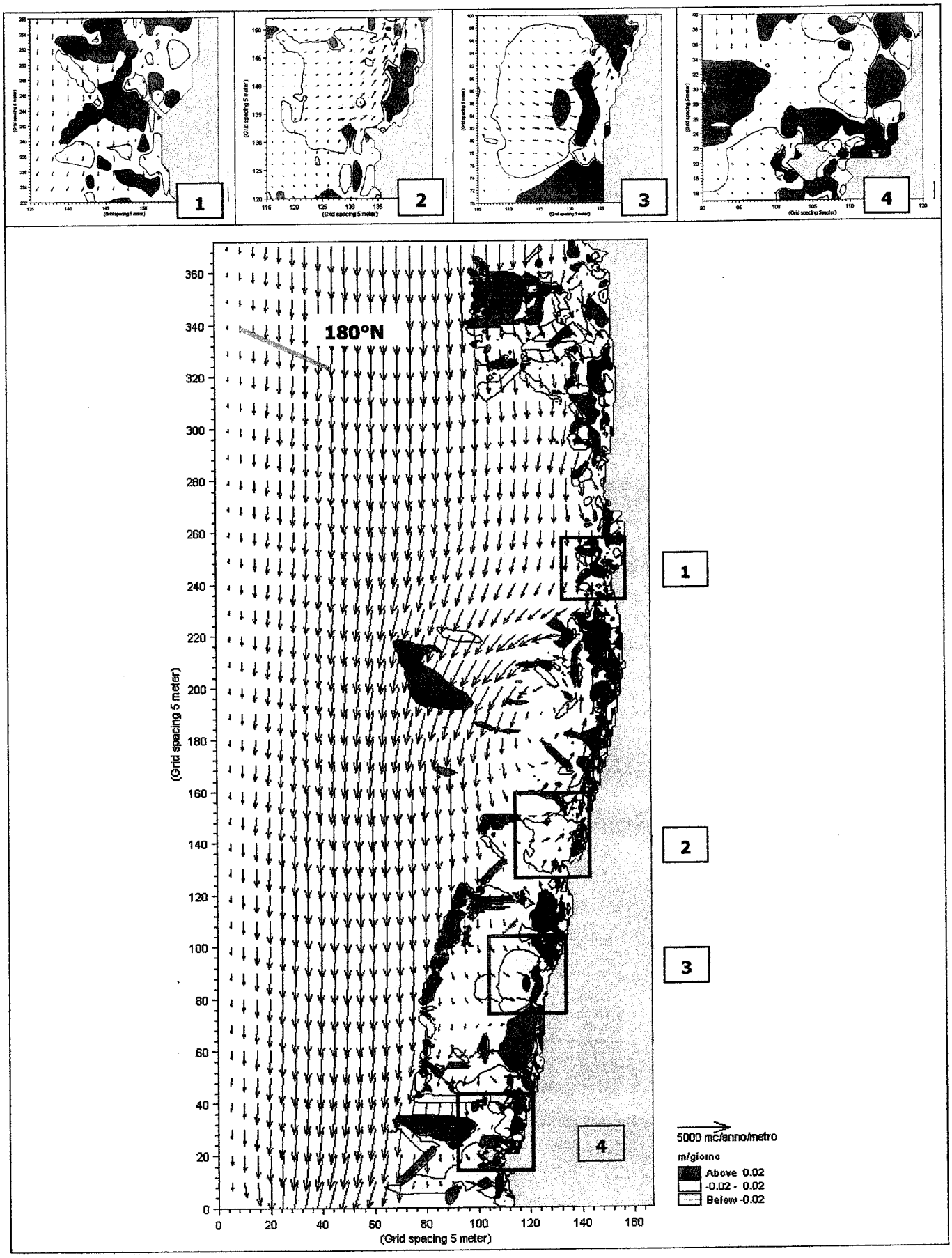


Figura 17– Risultati del modello Mike21: flusso e trasporto dei sedimenti per attacco ondoso al largo da 180°N: stato attuale.

dello Scoglio Nave. In corrispondenza dell'area 3 si trova ancora una ampia zona dove prevale l'approfondimento del fondo fino alla distanza di oltre 50 m da riva (Fig.18).

Ipotesi progettuale di protezione della spiaggia

Le relazioni di trasporto solido utilizzate dal modello numerico non permettono di modellare esattamente il trasporto della ghiaia, con la conseguenza che le stime di trasporto risultanti dalla simulazione possono essere anche molto maggiori che nella situazione reale. Con questa premessa, nell'interpretazione dei risultati dei modelli relativi allo stato di progetto si deve tener conto che in realtà la mobilità dei materiali, ed il conseguente trasporto sulla fascia di circa 10 m dalla linea di riva, risulteranno inferiori ai valori ottenuti dal modello.

Il modello evidenzia comunque che le opere progettate esercitano un'influenza prevalentemente locale, ossia interferiscono con la dinamica dei sedimenti solo in prossimità della riva, mentre non risultano interferenze apprezzabili con la circolazione generale della zona che pertanto risulta invariata. Il modello indica quindi che gli effetti del progetto sono da ritenere pressoché nulli all'esterno della zona di intervento, perciò le analisi dettagliate relative ai tre diversi attacchi ondosi simulati sono state eseguite focalizzando l'attenzione sulle aree in prossimità delle opere progettate.

Attacco ondoso al largo da 140°N

Il pennello 1, all'estremità ovest della zona di intervento, provoca una deviazione della corrente litoranea verso il largo spostando leggermente verso fondali maggiori la zona di deposito. Si osserva poi che è presente un evidente trasporto di materiale da est verso ovest e che la nuova scogliera è in grado di intercettare solo il materiale movimentato antro una fascia di circa 10 m. I pennelli 2 e 3 riducono sensibilmente la mobilità dei materiali nell'intorno e risultano conseguentemente molto ridotte le aree con tendenza all'erosione. Il pennello allo Scoglio Nave inoltre provoca una deviazione della corrente litoranea verso il largo con un conseguente incremento della mobilità dei sedimenti oltre la testata, ed un aumento sia della zona in erosione che di quella in deposito. Ne risulta comunque un effetto globale sostanzialmente nullo (Fig.19).

Attacco ondoso al largo da 180°N

I pennelli 1, 2 e 3 interagiscono efficacemente con il trasporto dei sedimenti provocando una riduzione locale della velocità di trasporto ed un accumulo sopraflutto su una fascia estesa circa 50 m oltre la linea di riva. L'erosione localizzata in prossimità della battigia, che risulta evidente

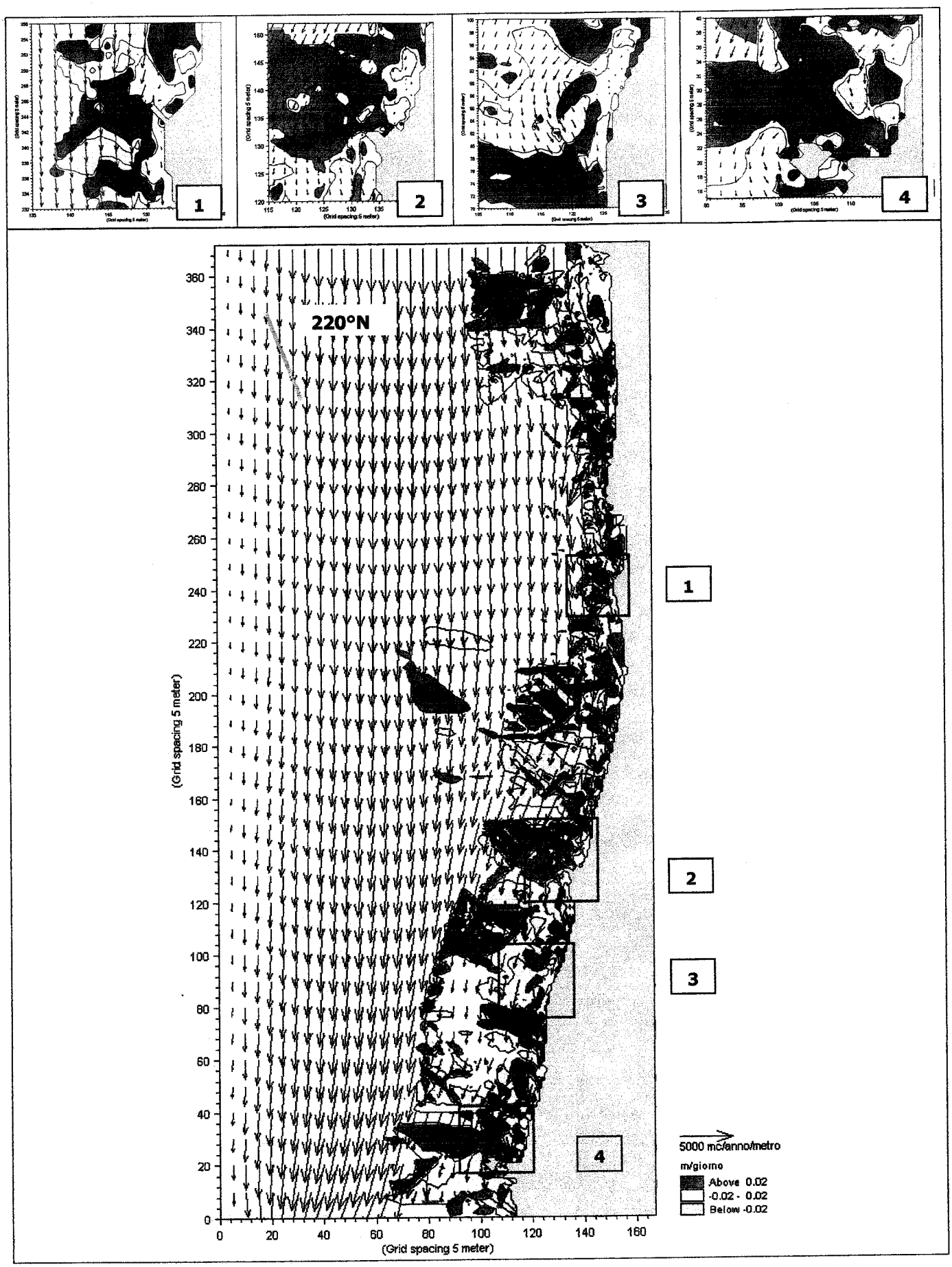


Figura 18– Risultati del modello Mike21: flusso e trasporto dei sedimenti per attacco ondoso al largo da 220°N: stato attuale.

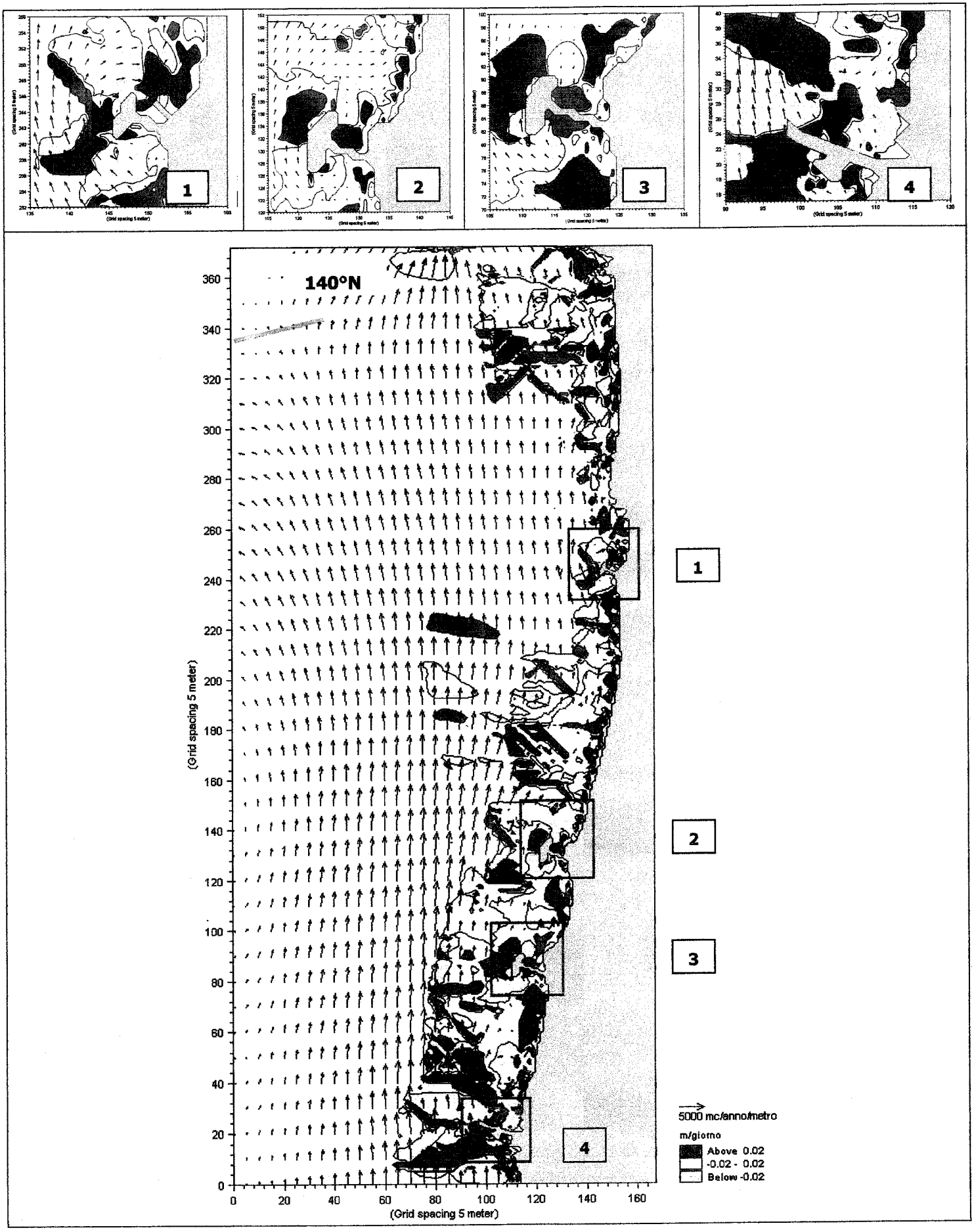


Figura 19– Risultati del modello Mike21: flusso e trasporto dei sedimenti per attacco ondoso da 140°N: stato di progetto.

nei particolari della Figura 20, non è significativa per quanto riportato nelle osservazioni generali. Il pennello allo scoglio Nave, anche in questo caso, incrementa la mobilità dei sedimenti in prossimità della testata ma risulta anche idoneo a provocare accumuli in prossimità della linea di riva. Tenendo conto che il pennello è parzialmente sommerso si può ritenere che il trasporto oltre la testata sia rappresentato prevalentemente dalla frazione più fine mentre i sedimenti più grossolani presenti in questa zona saranno trattenuti ad est del pennello.

Attacco ondoso al largo da 220°N

I pennelli 1, 2 e 3 provocano una netta riduzione del trasporto sulla fascia vicina alla linea di riva, più evidente per il pennello 3. In corrispondenza del pennello allo scoglio Nave la zona di deposito fino a circa 200 m dalla riva, presente allo stato attuale, rimane sostanzialmente invariata anche con la presenza del pennello, che comunque risulta efficiente a ridurre il trasporto nella fascia di circa 15 m dalla battigia, ossia dove saranno posati i materiali del ripascimento artificiale (Fig.21).

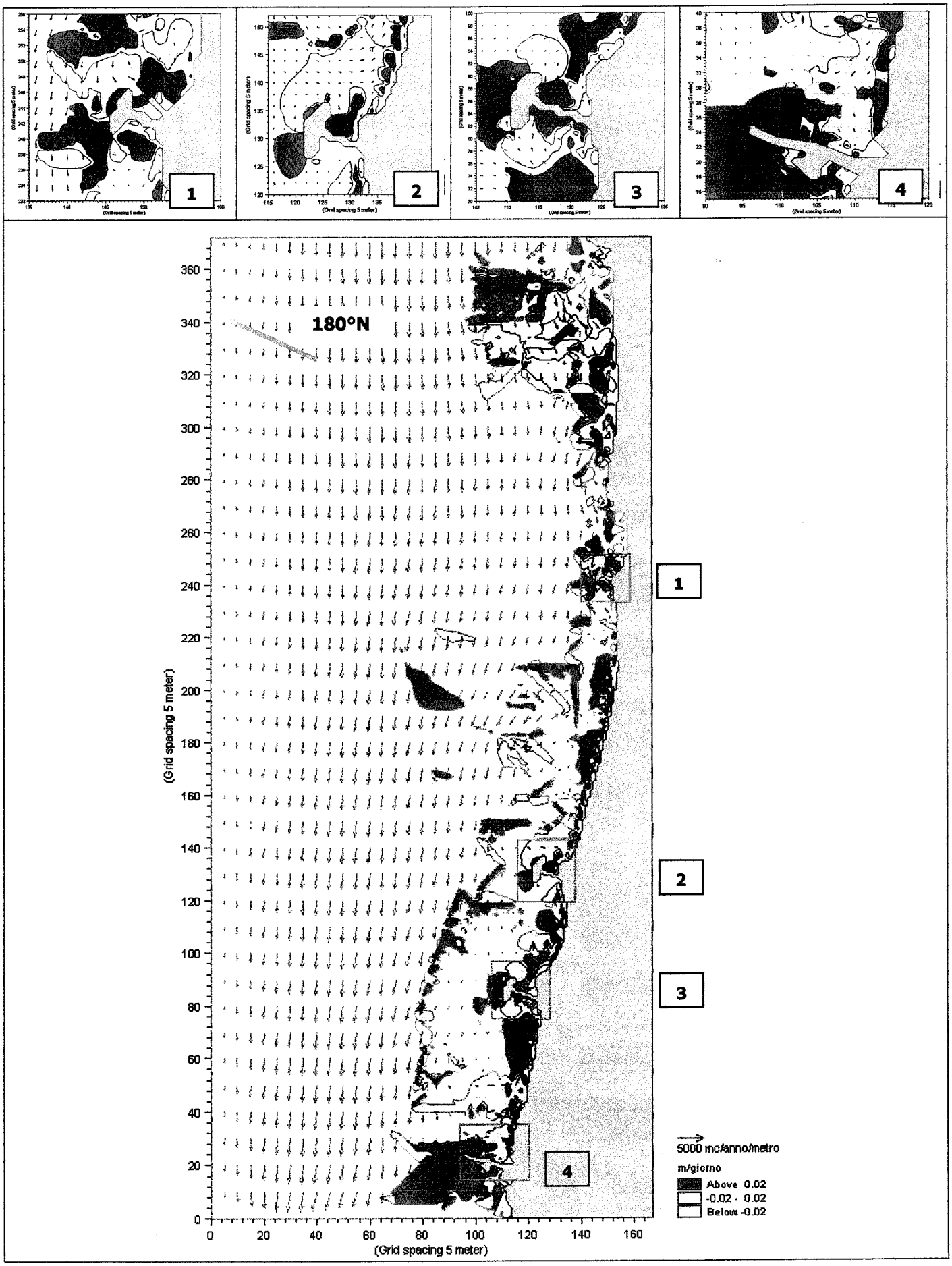


Figura 20– Risultati del modello Mike21: flusso e trasporto dei sedimenti per attacco ondoso da 180°N: stato di progetto.

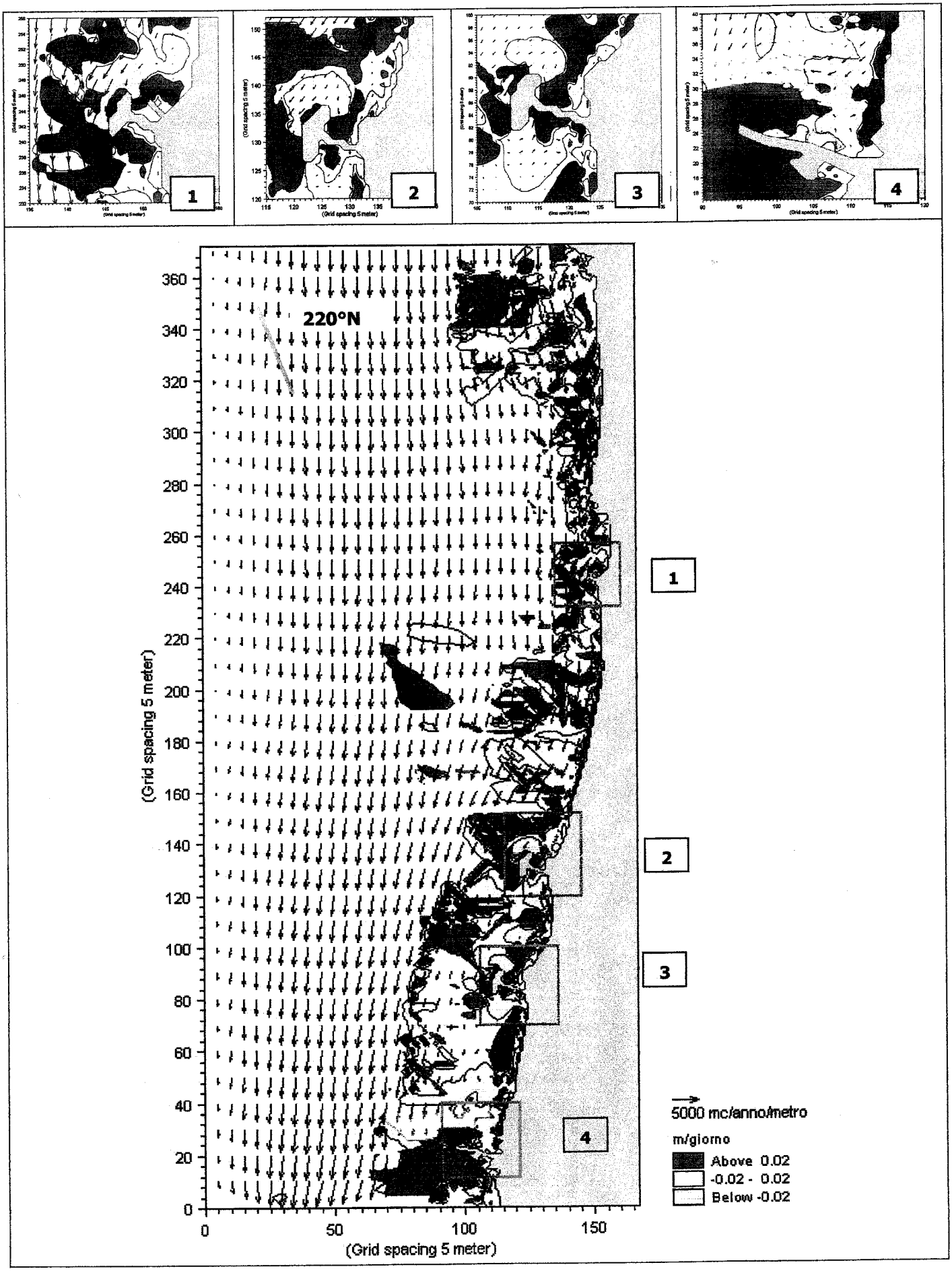


Figura 21– Risultati del modello Mike21: flusso e trasporto dei sedimenti per attacco ondoso da 220°N: stato di progetto.

4. CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI

Alla luce dei risultati ottenuti dalla simulazione con il modello MIKE 21 relativamente alla fascia di litorale oggetto di studio si può sottolineare che:

- le opere progettate per la protezione della spiaggia appaiono idonee a ridurre la mobilità dei sedimenti vicino a costa, soprattutto i sedimenti grossolani riportati, che per le loro dimensioni si muoveranno in una fascia di 10-20 m da riva, come evidenziato anche dallo studio su modello fisico;
- le dimensioni dei pennelli 1, 2 e 3 risultano tali da evidenziare una netta interferenza con i sedimenti in tutte le condizioni di attacco ondoso provate: per il pennello 1 si ha una sostanzialmente diversa distribuzione delle zone di deposito ed erosione in relazione all'attacco ondoso da 140°N rispetto a quelli da 180°N e 220°N mentre, in prossimità dei pennelli 2 e 3, si ha sempre accumulo sul lato ovest;
- il pennello allo scoglio Nave risulta posizionato su un tratto di costa dove la dinamica dei sedimenti risulta relativamente di maggiore intensità, con modifiche dei fondali che si estendono, per tutti gli attacchi ondosi simulati, oltre i 200 m da riva e pertanto, tenendo conto che il pennello è lungo solo circa 100m, esso interferisce limitatamente con il flusso dei sedimenti, specialmente con quelli fini che si muovono a distanza maggiore dalla riva. Allo scopo di estendere il rallentamento del flusso dei sedimenti fini oltre tale distanza da riva potrebbe essere ulteriormente allungato il tratto sommerso.

Complessivamente quindi l'intervento simulato non modifica in modo apprezzabile il sistema di circolazione globale dell'area di studio e pertanto risultano trascurabili gli effetti sui tratti di costa limitrofi.

Firenze, Maggio 2003

Il Responsabile Scientifico
Prof. Ing. P.L.Aminti

Il Direttore del Dipartimento
Prof. Ing. L. Becchi

Lo studio è stato condotto dagli Ingg. Lorenzo Cappietti, Annaclaudia Venturini, Maria Grazia Tecchi con la responsabilità scientifica del Prof P.L.Aminti.

ALLEGATO

Il Codice di calcolo MIKE 21

Il Codice MIKE 21

Descrizione del modello numerico

Il modulo spettrale

Per la determinazione del campo di moto sotto costa nel dominio di calcolo è stato impiegato il modulo NSW (NearShore Spectral Wind-Wave) del codice di modellazione MIKE 21 che risolve numericamente le equazioni di conservazione dei momenti di ordine zero e del primo ordine dello spettro di energia delle onde:

$$\frac{\partial(c_{gx}m_0)}{\partial x}+\frac{\partial(c_{gy}m_0)}{\partial y}+\frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta}=T_0$$

$$\frac{\partial(c_{gx}m_1)}{\partial x}+\frac{\partial(c_{gy}m_1)}{\partial y}+\frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta}=T_1$$

dove

$m_0(x,y,\theta)$ sono i momenti di ordine zero delle azioni dello spettro:

$m_1(x,y,\theta)$ sono i momenti del primo ordine delle azioni dello spettro:

c_{gx} e c_{gy} sono le componenti rispettivamente lungo x e lungo y della celerità di gruppo c_g;

c_θ è la velocità di propagazione che rappresenta il cambiamento di azione lungo la direzione θ;

x e y sono le coordinate cartesiane;

θ è la direzione di propagazione delle onde;

T_0 e T_1 sono i termini sorgenti.

I termini di sinistra delle equazioni mettono in conto gli effetti di rifrazione e shoaling, mentre i termini T_0 e T_1 tengono conto degli effetti di generazione locale del vento e della dissipazione di energia dovuta all'attrito al fondo ed al frangimento. Gli effetti delle correnti sono inclusi in questi fenomeni.

Il modulo idrodinamico

Il calcolo delle correnti indotte dalle onde e del livello medio marino, è stato eseguito con un modello idrodinamico che integra numericamente le equazioni di continuità e della quantità di moto mediate sulla verticale, in cui i termini forzanti sono quelli di radiation stresses ottenuti del primo modulo.

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

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}-\frac{E}{\rho}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}\right)-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{yx}}{\partial y}\right)-fq=0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}-\frac{E}{\rho}\left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 q}{\partial y^2}\right)-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}\right)+fp=0$$

nelle quali i simboli rappresentano:

$h(x,y,t)=d(x,y)+\zeta(x,y,t)$ la profondità (m);

$d(x,y)$ profondità relativa al livello del mare calmo (m);

$\zeta(x,y,t)$ l'elevazione superficiale (m);

$p,q(x,y,t)$ i flussi (m3/s/m) nelle direzioni x e y rispettivamente $(p=uh,\ q=vh)$, con u e v velocità mediate sulla profondità nelle direzioni x e y (m/s);

$C(x,y)$ il coefficiente di resistenza di Chezy dimensionale (m1/2/s)

g l'accelerazione di gravità (m/s2);

E il coefficiente di viscosità turbolenta (m2/s);

ρ la densità dell'acqua (kgm/m3);

Sxx, Sxy, Syy le componenti del tensore degli stress radianti, dati da:

$$S_{xx}=E^*\left[n\left(\cos^2\theta+1\right)-\frac{1}{2}\right]\ ;\quad S_{yx}=S_{xy}=\frac{E^*}{2}n\,sen2\theta\ ;\quad S_{yy}=E^*\left[n\left(sen^2\theta+1\right)-\frac{1}{2}\right]$$

nelle quali:

$E^* = \frac{1}{8}\rho g H^2$ energia del moto ondoso per unità di superficie, con H altezza d'onda;

$n = \frac{c_g}{c} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{senh2kd}\right)$;

θ direzione di propagazione del moto ondoso.

Queste 3 equazioni vengono integrate numericamente nel dominio dello spazio e del tempo tramite uno schema implicito alle differenze. In questo modo si ottiene per ogni direzione e per ogni linea della griglia di calcolo un sistema di equazioni tridiagonali, la cui soluzione è ottenuta, impiegando l'algoritmo Double Sweep, una forma molto veloce ad accurata dell'algoritmo di eliminazione di Gauss.

Il modulo del trasporto dei sedimenti

Il modulo utilizzato si basa sulla teoria di Bijker (1967) secondo cui il trasporto totale qt è composto da una componente di trasporto al fondo (bed-load transport) qb e da una componente in sospensione qs (suspended load transport):

$q_t = q_b + q_s = q_b \cdot (1 + 1.83Q) \quad (m^3/s/m)$ dove Q è un fattore adimensionale dato da:

$Q = I_1 ln\left(\frac{33\eta}{r}\right) + I_2$

η è la profondità, r è la scabrezza e I1,I2 sono integrali di Einstein da calcolare sulla base dei parametri $A = r/\eta$ e $Z_* = w/k \cdot U_{f,wc}$ in cui w è la settling velocity dei sedimenti in sospensione (dipendente dalla temperatura dell'acqua), k è la costante di Von Karman e Uf,wc è la velocità di attrito nel caso di presenza di onde e correnti.

La scabrezza r, è relazionata al coefficiente dimensionale di Chezy C con la seguente espressione:

$C = 18 \cdot log\left(\frac{12 \cdot h}{r}\right)$

Quando si vogliono tenere in considerazione gli effetti combinati di onde e correnti, di fondamentale importanza è una corretta determinazione della velocità di attrito, poiché si deve tenere conto opportunamente delle interazioni non lineari che avvengono tra la corrente e il flusso generato dal movimento ondoso; in questo caso utilizziamo:

$$U_{f,wc} = U_{f,c} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\xi \frac{\hat{u}_b}{V} \right)^2} = \frac{\sqrt{g}V}{C} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\xi \frac{\hat{u}_b}{V} \right)^2}$$

Uf,c è la velocità di attrito associata con la sola corrente, V è la velocità della corrente mediata sulla verticale, $\hat{u}_b$ è la massima velocità orbitale al fondo indotta dalle onde, ξ è un fattore adimensionale che può essere espresso in termini del wave friction factor fw e del numero di Chezy C:

$$\xi = C\sqrt{\frac{f_w}{2g}}$$

Il wave friction factor fw è calcolato secondo Swart (1974) come:

$$f_w = \exp\left[-5.977 + 5.213 \left(\frac{a_b}{r} \right)^{-0.194} \right] \quad 1.47 < \frac{a_b}{r} < 3000$$

$$f_w = 0.32 \qquad \frac{a_b}{r} \le 0.47$$

$a_b = \frac{\hat{u}_b \cdot T}{2\pi}$ è l'ampiezza del moto orbitale indotto dall'onda nel fondale $\hat{u}_b$ e quindi ab sono valutati usando la teoria lineare.

q_b viene calcolato come:

$$q_b = B \cdot d_{50} \cdot U_{f,c} \cdot exp\left(-\frac{0.27 \Delta d_{50} g}{\mu \cdot U_{f,wc}^2} \right)$$

B è un coefficiente adimensionale, molto importante per calibrare il trasporto al fondo, approssimativamente il suo valore varia da 1 a 5 rispettivamente fuori o dentro la surf zone. $\Delta = s - 1 = (\rho_s / \rho) - 1$ è la densità relativa dei sedimenti e $\mu = (C / C^1)^{3/2}$ è il così detto ripple factor dove $C^1 = 18 \cdot log(12 \cdot \eta / d_{90})$ è il coefficiente dimensionale di Chezy relativo alla caratteristiche del materiale grossolano nella composizione dei sedimenti.

E' utile osservare come l'influenza dell'agitazione ondosa al calcolo del trasporto di sedimento, sia dato per entrambi i contributi di bed-load e suspended-load, tramite il parametro Uf,wc; questo evidenzia la grande importanza di una corretta formulazione della velocità di attrito in presenza di onde e correnti.

Numericamente i valori delle componenti qtx e qty del vettore trasporto di sedimento totale qt, sono calcolate sulla base dei risultati dei moduli d'onda e idrodinamico, nella stessa griglia di calcolo di quest'ultimo e ad intervalli temporali pari a $n \cdot \Delta t_{hd}$ dove Δt_{hd} è il time step utilizzato nel modello idrodinamico e n è un intero compreso tra 1 e il numero di passi temporali del modulo idrodinamico.

Nel caso in questione, i termini forzanti (radiation stresses) del modello idrodinamico sono indipendenti dal tempo quindi dopo una prima fase transitoria, anche il flusso calcolato diventa stazionario una volta arrivato all'ultimo time step. Nel caso in cui interessi il trasporto di sedimento legato a questa situazione stazionaria è sufficiente eseguire il terzo modulo solo sugli ultimi risultati di quello idrodinamico.