

Forte Village Resort - Opere di protezione e stabilizzazione morfologica della spiaggia

Analisi modellistiche integrative allo studio meteomarinò



Progetto Esmeralda S.r.l.

Relazione integrativa

Dicembre 2023

This report has been prepared under the DHI Business Management System
certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Forte Village Resort - Opere di protezione e stabilizzazione morfologica della spiaggia

Analisi modellistiche integrative allo studio meteomarinò

Committente Progetto Esmeralda S.r.l.
Referente del Committente ing. Domenico Bagalà



Spiaggia antistante il Forte Village Resort (Pula, CA)

Project manager	Andrea Pedroncini
Quality supervisor	Andrea Crosta
Autore	Andrea Pedroncini

Codice progetto - elaborato	22803601-03-00100
Data di approvazione	4.12.2023
Emissione	1.0
Classificazione	Aperta

INDICE

1	Premessa	1
2	Analisi di dettaglio degli effetti dell'intervento – modellazione dell'evoluzione della linea di riva – attività integrative	2
2.1	Descrizione del modello numerico adottato	2
2.2	Principali assunzioni e limiti del modello. Interpretazione dei risultati	3
2.3	Scelta del periodo di simulazione	4
2.4	Configurazione geometrica di riferimento	7
2.5	Risultati del modello di evoluzione della linea di riva.....	8
3	Sintesi e conclusioni.....	9
4	Riferimenti	12

ALLEGATI

ALLEGATO A

Littoral Process FM
Descrizione tecnica

1 Premessa

Oggetto della presente relazione sono le attività modellistiche integrative rispetto al contenuto dell'elaborato DHI “*Relazione meteomarina e analisi del trasporto di sedimenti nell'ambito del Progetto Definitivo*” [1] predisposto a supporto della progettazione degli interventi di ripascimento protetto del litorale antistante il “Forte Village Resort”, nel Comune di Pula (CA).

Gli Enti che si sono espressi sul Progetto Definitivo proposto (Regione Sardegna – Servizio Valutazione Impatti e Incidenze Ambientali, Regione Sardegna – Servizio Tutela del Paesaggio, ARPAS) hanno comunicato una serie di osservazioni e richieste di integrazioni al progetto.

All'interno della Relazione Integrativa [2] sono riportati, puntualmente per ciascuna nota degli Enti, tutti i chiarimenti e le integrazioni predisposti dal Proponente. Il presente elaborato, che si configura come allegato alla Relazione Integrativa, si focalizza esclusivamente sugli aspetti che hanno richiesto l'esecuzione di **ulteriori attività di modellazione numerica**, addizionali rispetto a quanto già predisposto. In particolare, l'integrazione delle attività modellistiche ha previsto:

- la predisposizione del modello di evoluzione della linea di riva nel tratto oggetto di intervento e delle spiagge adiacenti assumendo una nuova linea di riva univocamente definita e corrispondente ad un volume iniziale di ripascimento pari a circa 19'000 m³;
- l'allungamento dell'intervallo temporale oggetto della simulazione dell'evoluzione della linea di riva (nello Studio Meteomarino del Progetto Definitivo erano state effettuate tre simulazioni dell'evoluzione della linea di riva, ciascuna in riferimento ad un determinato periodo rappresentativo della lunghezza non superiore all'anno) fino a sei anni consecutivi.

Le nuove attività modellistiche permettono di supportare puntualmente il riscontro ad alcune osservazioni di Regione Sardegna e di ARPAS. In particolare, le nuove simulazioni permettono di meglio precisare:

- la funzione e gli effetti del pennello semitrasparente previsto (punto 4 del parere di Regione Sardegna);
- gli impatti attesi dell'intervento proposto in riferimento alle spiagge adiacenti, considerando un volume di ripascimento iniziale ben definito e pari a 19'000 m³ (punto 6 del parere di Regione Sardegna);
- gli effetti dell'intervento per il tratto di litorale antistante il resort e per le spiagge adiacenti su un intervallo temporale di diversi anni, contemplando una variabilità di condizioni ondose (Libeccio e Scirocco) ancora più rappresentativa del clima meteomarino locale (punto 7 del parere di Regione Sardegna);
- l'eventuale necessità di una reiterazione nel tempo del ripascimento (punto 9 del parere di Regione Sardegna);
- l'eventuale necessità di ripascimenti compensativi nelle spiagge adiacenti (dal parere ARPAS).

Si precisa che le attività modellistiche a supporto del progetto sono state predisposte utilizzando i software sviluppati da DHI e largamente impiegati a scala nazionale ed internazionale a supporto della progettazione di interventi di difesa costiera. In particolare, per la simulazione delle dinamiche costiere nel paraggio in esame è stato impiegato il modello monodimensionale di trasporto solido litoraneo LITDRIFT, del pacchetto LITPACK, ed i moduli bidimensionali MIKE 21 SW – *Spectral Waves*, MIKE 21 HD – *Hydrodynamics* e MIKE 21 ST – *Sand Transport*, per la simulazione bidimensionale rispettivamente dei campi d'onda, dell'idrodinamica locale e della capacità di trasporto sedimentario. La simulazione dell'evoluzione della linea di riva in presenza

del ripascimento e delle opere previste ad ulteriore protezione, oggetto delle integrazioni qui illustrate, è stata predisposta con l'ausilio del modello monodimensionale LITLINE [3], sempre facente parte del pacchetto LITPACK. L'effetto degli interventi previsti su onda, corrente e trasporto sedimentario è stato inoltre testato con nuove simulazioni del pacchetto bidimensionale MIKE 21.

2 Analisi di dettaglio degli effetti dell'intervento – modellazione dell'evoluzione della linea di riva – attività integrative

Come anticipato in premessa al documento, le attività di seguito illustrate si configurano come un'integrazione al cap.8 della *“Relazione meteomarina e analisi del trasporto di sedimenti nell'ambito del Progetto Definitivo”* [1].

Per chiarezza espositiva, ed in analogia con quanto già predisposto nel documento citato, si riportano preliminarmente gli obiettivi dell'analisi, la descrizione del modello numerico adottato, le principali assunzioni ed i limiti dello stesso e gli scenari considerati.

L'obiettivo della modellazione dell'evoluzione della linea di riva, attraverso modellistica di tipo mono-dimensionale, è la stima delle tendenze evolutive in corrispondenza dell'arenile oggetto di intervento e delle spiagge adiacenti, con particolare attenzione alla quantificazione dei potenziali effetti indotti dalla configurazione progettuale proposta per la stabilizzazione della spiaggia antistante il Forte Village Resort.

Come illustrato nella Relazione meteomarina [1], il trasporto sedimentario nell'area è complesso e fortemente influenzato da fenomeni prettamente bi-dimensionali, dovuti sia alle caratteristiche batimetriche locali, sia alla variabilità del fondale dal punto di vista della composizione del substrato, con frequenti affioramenti rocciosi. La complessità dei *pattern* di circolazione e di trasporto va naturalmente tenuta in considerazione nella valutazione delle previsioni modellistiche sulle tendenze evolutive dell'area.

2.1 Descrizione del modello numerico adottato

Il modello applicato è il LITLINE di DHI [3], un modello monodimensionale che simula gli effetti sulla costa dei gradienti del trasporto litoraneo e calcola l'evoluzione della linea di riva risolvendo l'equazione di continuità dei sedimenti con la tecnica delle differenze finite.

Il modello si basa sulla teoria ad una linea, in cui si assume che il profilo trasversale possa arretrare e avanzare rigidamente, mantenendo tuttavia la propria geometria. Pertanto, con questo modello, la morfologia costiera è descritta dalla posizione della linea di riva e da uno o più profili di riferimento.

LITLINE permette inoltre di introdurre nel calcolo sia l'effetto di strutture (ad esempio pennelli trasversali, scogliere radenti o distaccate) sia l'effetto di eventuali apporti puntuali o distribuiti di sedimento. I dati in ingresso al modello sono:

- posizione della linea di riva;
- profili trasversali (spiaggia emersa e sommersa);
- clima ondoso in testata ad ogni profilo di riferimento: altezza, periodo e direzione dell'onda;
- livelli marini ed eventuali correnti di marea;
- posizione e dimensioni di eventuali strutture.

L'estensione del modello è tale da comprendere sia il tratto di litorale oggetto degli interventi, sia le spiagge adiacenti potenzialmente impattate dagli stessi. Con riferimento alla Figura 2-1, per il tratto oggetto di modellazione è stato considerato quale profilo trasversale rappresentativo il profilo "B".

La linea di riva è in grado di variare in continuo durante la simulazione, adattandosi alle condizioni d'onda via via modellate.



Figura 2-1 Posizione dei cinque profili trasversali individuati nello Studio meteoamarino [1] come rappresentativi per il calcolo del trasporto sedimentario *longshore* di lungo periodo (base: immagine Google Earth Pro)

Ad integrazione di quanto già riportato in [1], le simulazioni sono state predisposte considerando un volume di ripascimento iniziale ben definito e pari a 19'000 m³ (punto 6 del parere di Regione Sardegna) e gli effetti dell'intervento per il tratto di litorale antistante il resort e per le spiagge adiacenti sono simulati su un intervallo temporale di diversi anni, contemplando una variabilità di condizioni ondose (Libeccio e Scirocco) ancora più rappresentativa del clima meteoamarino locale (punto 7 del parere di Regione Sardegna).

2.2 Principali assunzioni e limiti del modello. Interpretazione dei risultati

L'evoluzione della linea di costa è calcolata sulla base di una capacità di trasporto corrispondente alla piena disponibilità dei sedimenti lungo il profilo attivo. Tale profilo è assunto rimanere costante nella forma, pertanto l'erosione o l'accumulo di sedimenti determinano una traslazione rigida dello stesso, in avanti o indietro a seconda che prevalgano le tendenze all'accrescimento o all'arretramento dell'arenile sulla base del bilancio tra tratti di costa adiacenti.

Le variazioni della linea di riva sono principalmente determinate da gradienti longitudinali nella capacità di trasporto sedimentario in funzione della variabilità del moto ondoso, dell'orientazione locale dell'arenile e/o della presenza di strutture. Tale assunzione è da ritenersi assolutamente ragionevole per molti tratti di costa aperta, laddove nel lungo periodo il profilo trasversale è in equilibrio dinamico con il moto ondoso e con la composizione dei sedimenti. Il sito in esame, tuttavia, presenta una diffusa esposizione del substrato roccioso, proprio in corrispondenza della spiaggia sommersa antistante il Forte Village Resort. La presenza del substrato roccioso affiorante è in grado di determinare una riduzione del trasporto sedimentario e, contestualmente, la generazione di gradienti locali nel trasporto effettivo, potenzialmente in grado di indurre modifiche locali al fondale che un modello mono-dimensionale non è in grado di rappresentare.

Gli impatti delle strutture nel modello sono rappresentati attraverso un cosiddetto “effetto blocco” sul trasporto litoraneo, che dipende sia dalla dimensione e posizione delle strutture rispetto alla zona dei frangenti “*surf zone*”, sia dalla distribuzione del trasporto sedimentario lungo il profilo trasversale. Per schemi di difesa complessi, nei quali le strutture possono determinare effetti legati anche all'interazione tra le strutture stesse, si possono determinare *pattern* di circolazione e di corrispondente trasporto sedimentario fortemente bi-dimensionali, che possono non essere rappresentati adeguatamente con un modello ad una linea. La modellazione 2D effettuata nell'ambito dello Studio meteomarinario [1] a verifica dello schema di difesa “ottimizzato” ha chiaramente evidenziato la presenza, localmente, di una circolazione e di un andamento del trasporto sedimentario complessi, fortemente bi-dimensionali.

In virtù della combinazione della presenza del substrato roccioso affiorante in alcune aree del dominio di calcolo e della relativa complessità dello schema di difesa ipotizzato, con non trascurabili effetti 2D, i risultati dell'evoluzione della linea di riva dovrebbero essere interpretati con la dovuta attenzione. Risulta infatti che:

- gli effettivi ratei di trasporto litoraneo risultano più bassi rispetto a quelli modellati, in virtù della presenza del substrato roccioso affiorante. Il modello tende quindi, con tutta probabilità, a sovrastimare le variazioni della linea di riva per gli scenari meteomarini considerati;
- i risultati della modellazione 2D dello schema di difesa proposto (sezione 7 dello Studio meteomarinario) indicano chiaramente che il trasporto litoraneo non sarà bloccato se non parzialmente dalle strutture. Anche in questo caso, è possibile che il modello ad una linea tenda a sovrastimare gli effetti delle opere sul trasporto litoraneo e, conseguentemente, gli impatti delle stesse sulle spiagge adiacenti.

Fatte queste doverose precisazioni, il modello di evoluzione della linea di riva si configura comunque uno strumento utilissimo per fornire indicazioni sulle potenziali variazioni dell'arenile in un'ottica di “*worst-case scenario*”.

2.3 Scelta del periodo di simulazione

Lo Studio meteomarinario del Progetto Definitivo ha previsto, attraverso l'acquisizione dei dati al largo del Mediterranean Wind Wave Model (MWM), l'utilizzo di oltre 40 anni di serie temporali moto ondoso (1979-2020), le quali sono state propagate verso costa ed utilizzate per quantificare, tra l'altro, il trasporto nelle due direzioni (sud-ovest e nord-est), la profondità di chiusura e l'orientazione di equilibrio.

Il trasporto litoraneo è prevalentemente generato dal moto ondoso. La Figura 2-2 evidenzia un chiaro trend di capacità di trasporto netto diretto verso sud-ovest (valori positivi, per onde generate da venti di Scirocco) nel periodo compreso tra il 1988 ed il 2008, a cui fa seguito un periodo di transizione nel quale i ratei di trasporto e la direzione del trasporto netto risultano decisamente variabili, fino quasi ad annullarsi nell'ultima decade simulata (2010-2020). Tale risultato evidenzia pertanto significative variazioni nei trend di trasporto da un anno all'altro, variazioni che sono senz'altro da tenere in opportuna considerazione nella quantificazione dei potenziali impatti della realizzazione dello schema di difesa proposto.

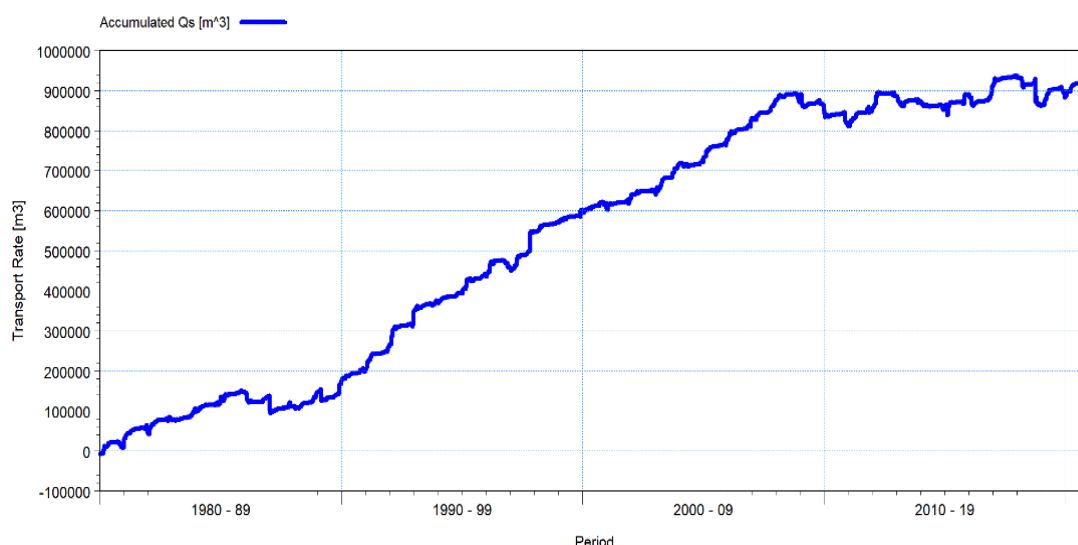


Figura 2-2 Trasporto netto cumulato per il profilo di riferimento “B”

La nuova modellazione dell'evoluzione della linea di riva ha voluto rappresentare un periodo recente nel quale coesistessero periodi con trasporto netto diretto verso sud-ovest (largamente prevalenti) e periodi caratterizzati da trasporto netto diretto verso nord-est (più rari ma con frequenza crescente). Il periodo individuato corrisponde ai sei anni compresi tra il 2015 ed il 2020.

La nuova simulazione integra quanto già predisposto nell'ambito dello Studio meteomarinario [1], nel quale l'evoluzione della linea di riva era stata simulata non su un periodo continuativo di più anni ma per periodi di durata annuale od inferiore, comunque rappresentativi di scenari di trasporto netto frequente (verso sud-ovest) e più raro ma comunque non trascurabile (verso nord-est).

Il grafico di Figura 2-3 riporta l'andamento del trasporto netto potenziale nel periodo selezionato per la simulazione dell'evoluzione della linea di riva (2015-2020), attraverso un confronto tra i valori ottenuti dall'applicazione del modello Litdrift e quelli ottenuti con il modello Litline. Come si può osservare, il modello Litline, a seguito di opportuna calibrazione, è in grado di riprodurre accuratamente gli stessi ratei di trasporto ricavati dal modello Litdrift che, a differenza del primo, quantifica il trasporto associato alla singola onda, ed è pertanto da considerarsi un target di riferimento per il calcolo del *longshore transport*.

Come si può osservare dal grafico, il periodo selezionato è caratterizzato da una prevalenza di trasporto positivo (diretto verso sud-ovest) con presenza di un anno (il 2018) nel quale si è verificata un'inversione nel trasporto netto (negativo, diretto verso nord-est).

In Figura 2-5 è invece riportata la rosa del moto ondoso in un punto antistante il tratto di costa di interesse in riferimento al periodo simulato 2015-2020. Le classi sono indicate in Hrms (equivalente al rapporto tra Hs e la radice quadrata di 2; tale parametro è utilizzato in ingresso dal modello Litline).

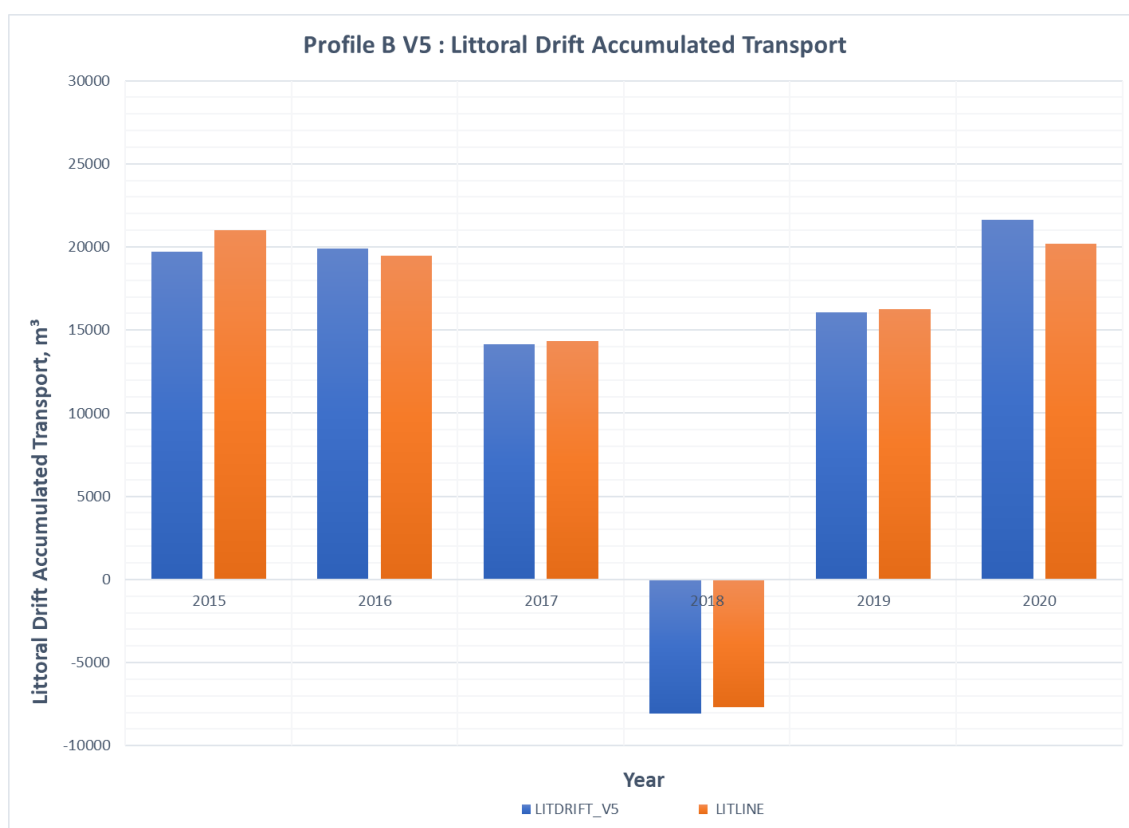


Figura 2-3 Confronto tra il trasporto potenziale netto simulato con il modello Litdrift e quello simulato con il modello Litline per gli anni compresi tra il 2015 ed il 2020 in riferimento al profilo B

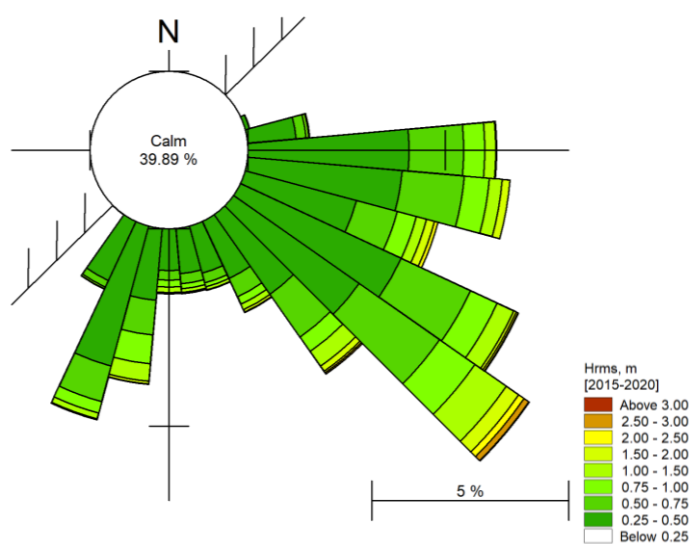


Figura 2-4 Rosa del moto ondoso in un punto antistante il tratto di costa di interesse in riferimento al periodo 2015-2020. Le classi sono indicate in Hrms (equivalente al rapporto tra Hs e la radice quadrata di 2); tale parametro è utilizzato in ingresso dal modello Litline

2.4 Configurazione geometrica di riferimento

La configurazione iniziale fa riferimento ad una nuova linea di riva univocamente definita e corrispondente ad un volume iniziale di ripascimento pari a circa 19'000 m³. In Figura 2-5 è riportata la nuova linea di riva post ripascimento iniziale, caratterizzata da due salienti a tergo delle due isole più sottocosta e dall'aggiramento del pennello semitrasparente con il ripascimento.



Figura 2-5 Configurazione iniziale della linea di riva con due salienti a tergo delle due isole più sottocosta e aggiramento del pennello semitrasparente con il ripascimento. Il volume di ripascimento iniziale corrisponde a circa 19'000 m³

Il layout di progetto è rappresentato nel modello di evoluzione della linea di riva da semplici strutture, che comprendono (Figura 2-6):

- un pennello (permeabile) al limite orientale del tratto di costa oggetto di intervento;
- le due isole laterali e l'isola più grande centrale.



Figura 2-6 Strutture considerate nel modello di evoluzione della linea di riva

2.5 Risultati del modello di evoluzione della linea di riva

La previsione di evoluzione della linea di riva in riferimento allo schema di difesa proposto per i sei anni presi a riferimento nella simulazione è illustrata in Figura 2-7. La linea di costa iniziale prevede già la presenza di due salienti a tergo delle isole più prossime a riva e l'aggiramento del pennello semitrasparente con il volume di ripascimento iniziale (complessivamente pari a 19'000 m³).

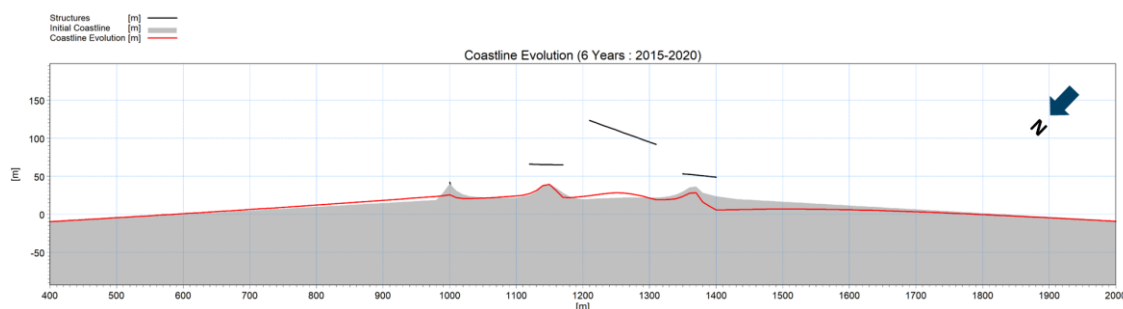


Figura 2-7 Evoluzione della linea di riva a sei anni. La linea di costa iniziale prevede già la presenza di due salienti a tergo delle isole più prossime a riva e l'aggiramento del pennello semitrasparente con il volume di ripascimento iniziale

L'analisi dei risultati dell'evoluzione della linea di riva evidenzia un comportamento della linea di riva già emerso dalle simulazioni di periodi più brevi:

- un locale accrescimento a monte del pennello permeabile a nord-est, per un tratto di circa 300 metri. L'accrescimento è massimo (circa 1m/anno in media) immediatamente a monte del pennello e decresce progressivamente allontanandosi dallo stesso verso nord-est;
- una sostanziale stabilità della linea di riva tra il pennello semitrasparente e la prima isola, ivi compreso il mantenimento pressoché inalterato del saliente previsto già durante il ripascimento iniziale;
- la formazione di un terzo saliente, molto più smussato degli altri due, nel tratto di litorale a tergo dell'isola centrale, posta ad una distanza maggiore dalla riva rispetto alle isole laterali. Il tasso medio di accrescimento del saliente è pari a circa 1.5m/anno in media;
- un limitato arretramento in corrispondenza dell'isola posta più a sud-ovest, nell'ordine di circa 1m/ anno in media;
- un arretramento a sud-ovest della terza isola, per un tratto di circa 300 metri. L'arretramento è massimo (circa 2.5m/anno in media) immediatamente a valle della terza isola e decresce progressivamente allontanandosi dalla stessa verso sud-ovest;
- l'arretramento si annulla completamente circa 300m a sud-ovest della terza isola. Da lì in avanti il litorale non presenta alcuna modifica alla linea di riva rispetto alla condizione attuale. Si ricorda, peraltro, che tale tratto di litorale, al pari di quello antistante Forte Village, si presenta oggi in moderata erosione (circa 2m/anno in media, come si può osservare in Figura 2-8, che riporta la posizione delle linee di riva 2000, 2006 e 2020 dal Web GIS del Portale delle Coste di ISPRA [4]).

Si precisa inoltre che le tendenze evolutive simulate con il modello numerico, riportate sotto forma di valori medi di avanzamento / arretramento sull'intero periodo considerato, presentano una non trascurabile variabilità interannuale per via delle differenti condizioni meteomarine e del trasporto litoraneo netto. Va tuttavia sottolineato che, pur nella variabilità interannuale delle condizioni meteomarine, le tendenze evolutive presentano un progressivo rallentamento nell'ultimo periodo simulato, da associarsi al raggiungimento di una condizione più prossima all'equilibrio rispetto a

quella ad inizio simulazione (con intervento appena eseguito) o alla condizione attuale (di moderata erosione [4]).



Figura 2-8 Ricostruzione della posizione della linea di riva anno 2000, 2006 e 2020 (dal Web GIS del Portale delle Coste ISPRA (<https://sinaccloud.isprambiente.it/portal/apps/sites/#/coste>))

I risultati della modellazione permettono, con opportune assunzioni, una stima di massima dei volumi di sedimento necessari per inibire la tendenza all'arretramento della spiaggia a sud-ovest. In particolare:

- il calcolo della superficie di arenile "A" in arretramento a sud-ovest della terza isola fornisce una stima pari a circa 2'500 m²;
- considerando, come riportato nello Studio meteomarinò [1] (sezione 5.4) una profondità di chiusura indicativamente pari a 4.5m ed ipotizzando una quota di spiaggia emersa contribuente alle dinamiche evolutive pari a + 1.5m s.l.m.m, l'altezza complessiva "h" attiva del profilo di spiaggia può essere assunta pari a 6m;
- sotto l'ipotesi, ampiamente conservativa, di traslazione rigida del profilo trasversale, il volume complessivo massimo di arretramento potenziale per tale tratto di litorale è pertanto dato da $A \times h = 2'500 \times 6 = 15'000 \text{ m}^3$;
- il volume massimo annuo necessario per inibire le dinamiche di arretramento (in atto anche in assenza dell'intervento proposto) risulta pertanto pari a circa 2'500 m³.

3 Sintesi e conclusioni

A beneficio della chiarezza espositiva, si riporta a seguire un estratto delle conclusioni dello Studio meteomarinò del Progetto Definitivo, integrate con le risultanze delle nuove analisi modellistiche.

Tali analisi sono state predisposte in risposta alle osservazioni e richieste di integrazione da parte degli Enti che si sono espressi sul Progetto Definitivo proposto (Regione Sardegna – Servizio Valutazione Impatti e Incidenze Ambientali, Regione Sardegna – Servizio Tutela del Paesaggio, ARPAS).

La non trascurabilità del trasporto sedimentario longitudinale, comunque mediamente superiore ai 10,000 m³/anno nella zona di interesse, unitamente alla presenza di un'intensa e complessa

circolazione in corrispondenza del resort, in un'area caratterizzata dall'ampia presenza del substrato roccioso affiorante, hanno suggerito l'opportunità di privilegiare, nella definizione degli schemi progettuali volti a perseguire una maggiore e stabile ampiezza della superficie utile dell'arenile, interventi volti a ridurre l'energia ondosa incidente, responsabile della generazione delle forti correnti localizzate. Le caratteristiche degli interventi sono state pertanto definite in modo da prevedere:

- **un cospicuo volume di ripascimento**, funzionale a incrementare la profondità di spiaggia e ridurre la frequenza con la quale la risalita dell'onda è in grado di raggiungere le infrastrutture di retrospiaggia, limitando così il conseguente innesco di fenomeni di riflessione e scavo al piede;
- a protezione del ripascimento stesso, e al fine di ridurre l'energia ondosa incidente, la realizzazione di **opere parallele a costa**, poste ad opportuna distanza dalla battigia in modo da mitigare l'effetto di incremento di livello marino dovuto al frangimento (wave setup) e massimizzare il beneficio in termini di minore trasmissione del moto ondoso.

Il layout finale prescelto, c.d. "ottimizzato" è stato oggetto di verifica in riferimento agli effetti sulle dinamiche evolutive della linea di riva a tergo delle opere ed in corrispondenza delle spiagge adiacenti, mediante la predisposizione di opportuna modellistica monodimensionale finalizzata alla simulazione dell'evoluzione della linea di riva.

È importante sottolineare che lo schema di difesa prevede un importante ripascimento strutturale iniziale, che contribuisce significativamente a minimizzare il rischio di impatti negativi sulle spiagge adiacenti. A seguito del ripascimento, infatti, sarà minimizzato l'effetto "trappola" e la sabbia che formerà i salienti previsti sarà interamente disponibile proprio dai volumi iniziali "aggiunti" al bilancio sedimentario.

All'interno della Relazione Integrativa [2] sono riportati, puntualmente per ciascuna nota degli Enti, tutti i chiarimenti e le integrazioni predisposti dal Proponente. Il presente elaborato, che si configura come allegato alla Relazione Integrativa, si focalizza esclusivamente sugli aspetti che hanno richiesto l'esecuzione di **ulteriori attività di modellazione numerica**, integrative rispetto a quanto già predisposto. In particolare, l'integrazione delle attività modellistiche ha previsto:

- la predisposizione del modello di evoluzione della linea di riva nel tratto oggetto di intervento e delle spiagge adiacenti assumendo una nuova linea di riva univocamente definita e corrispondente ad un volume iniziale di ripascimento pari a circa 19'000 m³;
- l'allungamento dell'intervallo temporale oggetto della simulazione dell'evoluzione della linea di riva (nello Studio Meteomarino del Progetto Definitivo erano state effettuate tre simulazioni dell'evoluzione della linea di riva, ciascuna in riferimento ad un determinato periodo rappresentativo della lunghezza non superiore all'anno) fino a sei anni consecutivi.

Le nuove attività modellistiche permettono di supportare puntualmente il riscontro ad alcune osservazioni di Regione Sardegna e di ARPAS. In particolare, le nuove simulazioni permettono di meglio precisare:

- la funzione e gli effetti del pennello semitrasparente previsto (punto 4 del parere di Regione Sardegna);
- gli impatti attesi dell'intervento proposto in riferimento alle spiagge adiacenti, considerando un volume di ripascimento iniziale ben definito e pari a 19'000 m³ (punto 6 del parere di Regione Sardegna);
- gli effetti dell'intervento per il tratto di litorale antistante il resort e per le spiagge adiacenti su un intervallo temporale di diversi anni, contemplando una variabilità di condizioni ondose (Libeccio e Scirocco) ancora più rappresentativa del clima meteomarino locale (punto 7 del parere di Regione Sardegna);

- l'eventuale necessità di una reiterazione nel tempo del ripascimento (punto 9 del parere di Regione Sardegna);
- l'eventuale necessità di ripascimenti compensativi nelle spiagge adiacenti (dal parere ARPAS).

L'analisi dei risultati delle tendenze evolutive evidenzia un comportamento della linea di riva già emerso dalle simulazioni di periodi più brevi:

- un locale accrescimento a monte del pennello permeabile a nord-est, per un tratto di circa 300 metri. L'accrescimento è massimo (circa 1m/anno in media) immediatamente a monte del pennello e decresce progressivamente allontanandosi dallo stesso verso nord-est;
- una sostanziale stabilità della linea di riva tra il pennello semitrasparente e la prima isola, ivi compreso il mantenimento pressoché inalterato del saliente previsto già durante il ripascimento iniziale;
- la formazione di un terzo saliente, molto più smussato degli altri due, nel tratto di litorale a tergo dell'isola centrale, posta ad una distanza maggiore dalla riva rispetto alle isole laterali. Il tasso medio di accrescimento del saliente è pari a circa 1.5m/anno in media;
- un limitato arretramento in corrispondenza dell'isola posta più a sud-ovest, nell'ordine di circa 1m/ anno in media;
- un arretramento a sud-ovest della terza isola, per un tratto di circa 300 metri. L'arretramento è massimo (circa 2.5m/anno in media) immediatamente a valle della terza isola e decresce progressivamente allontanandosi dalla stessa verso sud-ovest;
- l'arretramento si annulla completamente circa 300m a sud-ovest della terza isola. Da lì in avanti il litorale non presenta alcuna modifica alla linea di riva rispetto alla condizione attuale. Si ricorda, peraltro, che tale tratto di litorale, al pari di quello antistante Forte Village, si presenta oggi in moderata erosione (circa 2m/anno in media, come si può osservare dal Web GIS del Portale delle Coste di ISPRA [4]).

Si precisa inoltre che le tendenze evolutive simulate con il modello numerico, riportate sotto forma di valori medi di avanzamento / arretramento sull'intero periodo considerato, presentano una non trascurabile variabilità interannuale per via delle differenti condizioni meteomarine e del trasporto litoraneo netto. Va tuttavia sottolineato che, pur nella variabilità interannuale delle condizioni meteomarine, le tendenze evolutive presentano un progressivo rallentamento nell'ultimo periodo simulato, da associarsi al raggiungimento di una condizione più prossima all'equilibrio rispetto a quella ad inizio simulazione (con intervento appena eseguito) o alla condizione attuale (di moderata erosione [4]).

Per quanto precedentemente illustrato sulle assunzioni del modello ad una linea e sulla presenza del substrato roccioso affiorante, il volume di ripascimento "manutentivo" per la spiaggia a sud-ovest è da considerarsi con ogni probabilità sovrastimato ed assimilabile ad un "worst case".

L'ordine di grandezza del volume in gioco ($2'500 \text{ m}^3$ / anno al massimo), in ogni caso, risulta senz'altro gestibile nell'ambito delle operazioni che già oggi vengono effettuate annualmente per la ricarica dell'arenile antistante Forte Village.

4 Riferimenti

- [1] DHI, “Forte Village Resort - Opere di protezione e stabilizzazione morfologica della spiaggia - Relazione meteomarina e analisi del trasporto di sedimenti nell'ambito del Progetto Definitivo,” 2022.
- [2] “Opere di protezione della spiaggia antistante il "Forte Village Resort". Procedimento per il rilascio del Provvedimento ambientale unico regionale (P.A.U.R.). L.R. 2/2021 e Delib. G.R. 11/75 del 2021. N. Reg. PAUR 23/22. RELAZIONE INTEGRATIVA,” Integrazioni in seguito alla Conferenza Istruttoria del 22.06.2023, richieste con nota - 24480 del 11/08/2023, Dicembre 2023.
- [3] DHI, “LITPACK - Littoral Processes, Scientific Documentation,” 2023, Hørsholm.
- [4] ISPRA, “Portale delle Coste,” <https://sinacloud.isprambiente.it/portal/apps/sites/#/coste>.

ALLEGATI

ALLEGATO A

Littoral Process FM

Descrizione tecnica

LITPACK

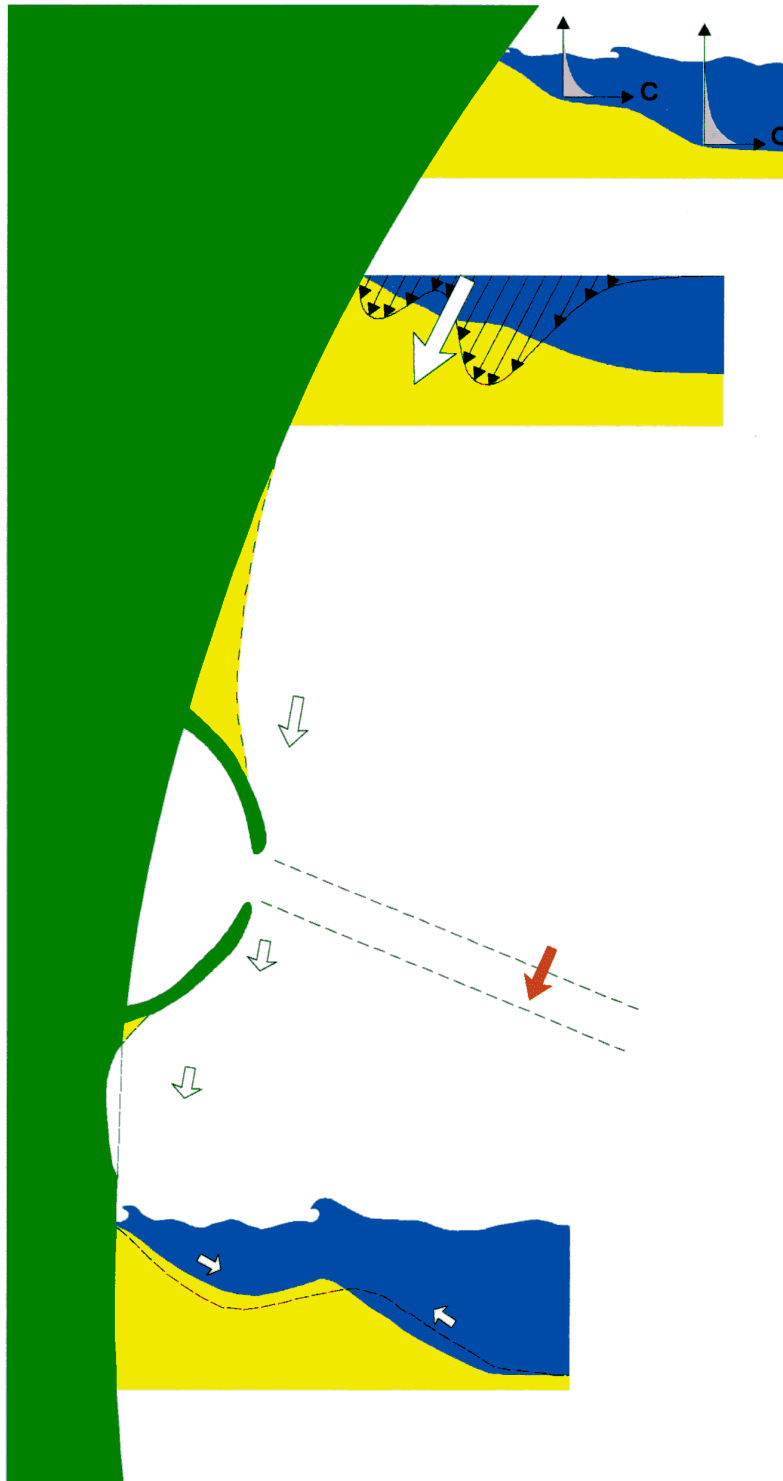
An Integrated Modelling System for
Littoral Processes and Coastline Kinetics



A Short Description

LITPACK

- FOR FOR MODELLING OF COASTAL PROCESSES



Noncohesive sediment
transport in combined
waves and current
STP

Littoral drift along
a uniform beach
with an arbitrary
coastal profile
LITDRIFT

Coastline development
due to changes in
transport capacity
LITLINE

Channel backfilling due to
nonequilibrium sediment
transport mechanisms
LITTREN

Profile development
due to cross-shore
transport
LITPROF

LITPACK

LITPACK – LITTORAL TRANSPORT AND COASTLINE KINETICS

Introduction

LITPACK is a 'stand-alone' deterministic numerical modelling system, describing the major processes in the nearshore zone.

LITPACK integrates DHI's proven numerical models for coastal sediment transport and coastline development, in a single package suitable for a wide range of coastal engineering applications.

The individual modules of LITPACK simulate particular coastal processes, with the linking between modules being performed by an automatic control module. This allows rapid simulation of complex coastal problems, without loss of detail in the individual modules.

All LITPACK modules apply a fully deterministic approach. This allows consideration of many, and sometimes dominating, factors which are not available to semi-empirical formulations. For example the simulation of a complex multi-barred profile, with varying grain size distribution, is prone to gross error when using an energy flux approach.

The processes covered by the individual modules can broadly be described as:

- | | |
|----------|---------------------------------------------------------|
| STP | - Non-cohesive sediment transport in waves and currents |
| LITDRIFT | - Longshore current and littoral drift |
| LITLINE | - Coastline evolution |
| LITTREN | - Trench sedimentation |
| LITPROF | - Cross-shore profile development |

General Overview

A short description of applications, basic equations and solution techniques for each of the LITPACK modules is presented on the following pages.

The Sediment Transport Module, STP

The computational module STP calculates the non-cohesive sediment transport in combined waves and currents.

The STP Module is integrated in the other LITPACK modules and forms the basis for all sediment transport calculations in LITPACK – and in DHI's 2D modelling system, MIKE 21, as well!

STP solves the vertical sediment diffusion equation on an intra-wave period grid to provide a detailed description of the non-cohesive sediment transport for breaking/non-breaking waves and current.

STP accounts for:

- Waves and currents at arbitrary angles
- Breaking/non-breaking waves
- Plane/ripple-covered bed
- Uniform/graded bed material
- Effect of bed slope
- Effect of streaming

Application Areas

STP is the basis for all sediment transport modelling within LITPACK, but can also be applied for investigating harbour siltation and intake problems.

Basic Equations

The 'intra-wave period' sediment transport model STP forms the basic sediment transport description for combined wave and current action in all the LITPACK modules.

In combined waves and current the turbulent interaction in the near bed boundary layer is of importance for the bed shear stresses as well as for the eddy viscosity distribution. The basis for the sediment transport description is the model for turbulent wave-current boundary layers of Fredsøe (1984). The boundary layer is composed of two regions:

Close to the bed the turbulence and the shear stress in the wave boundary layer vary within the wave period, giving rapidly changing bed concentration and turbulent diffusion coefficients.

Outside the wave boundary layer the mean velocity is described by a log-profile. The increased turbulence level in the wave boundary layer retards the mean current, an effect which is expressed through an apparent wave roughness, k_w , which is larger than the natural bed roughness k .

The total sediment load is split into bed load and suspended load, which are calculated separately. The transport of non-cohesive material as bed load is calculated according to the model presented by Engelund and Fredsøe (1976). Through subsequent developments this model has been extended to cover combined waves and current, and conditions in the surf zone. The bed load transport is determined as a function of the bed shear stress through the dimensionless bed shear stress, θ :

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

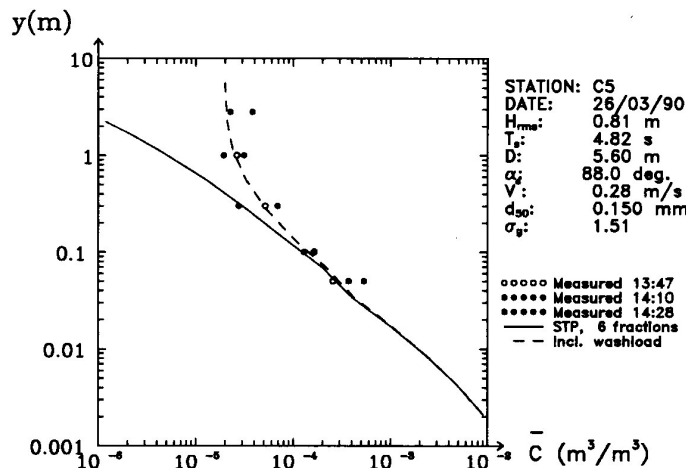
The bed load transport is assumed to correspond to the instantaneous bed shear stress under unsteady conditions, e.g. under wave action.

The suspended load transport, q_s , is described through the sediment concentration C , which is determined from the vertical turbulent diffusion equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right] + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

ϵ_s is taken to be equal to the turbulent eddy viscosity of the flow field. The near-bed boundary condition is given as bed concentration C_b at the level $z = 2d$. C_b is determined as a function of θ using the dynamic considerations of Bagnold (1954), that a certain sediment concentration is required near the bed in order to transfer the shear stress to the bed through grain-grain interaction.

The bed concentration, C_b , is only valid for the plane bed case, i.e. sheet flow, which is found for θ larger than about 0.8. At smaller θ -values the bed is covered by wave ripples. The sediment transport model by Fredsøe et. al (1985) has been modified to take the effect of wave ripples into account. The modification involves the bed concentration, turbulent diffusion and the bed roughness. The values of C_b and ϵ are based directly on the laboratory measurements of Nielsen (1979). The roughness is expressed through the ripple dimensions as given by Raudkivi (1988). The sediment transport model converges gradually towards a plane bed description with increasing bed shear stress or mean current velocity.



Vertical mean sediment concentration profile calculated by STP, compared to full scale field measurements

Inside the surf zone, the wave energy is dissipated due to breaking, and the production of turbulence is very intense. This has been taken into account by use of a one-equation turbulence model (Deigaard et. al. (1986)).

STP also has the possibility to solve the intra-wave period vertical sediment diffusion equation for asymmetric waves, including the effects of Lagrangian drift, induced streaming and density driven currents. Inside the breaker zone, the undertow profile is also dependent on the shoreward flux of water in the surface roller.

The suspended sediment transport q_s is calculated as the product of sediment concentration and the mean circulation current averaged over the wave period T (Hedegaard et al. (1988)):

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D C U_{mean} dy dt$$

The suspended sediment follows the water, and the sediment transport shall be based on the Lagrangian flow velocity.

U_{mean} is thus taken as the sum of the Eulerian circulation current U and the Lagrangian drift velocity U_D obtained from the flow model.

Symbol List

s	: relative sediment density
g	: acceleration of gravity
d	: grain size
U_f	: shear velocity
t	: time
z	: vertical coordinate (zero at the bed)
ϵ_s	: turbulent diffusion coefficient
w	: settling velocity of the sediment.

Solution Technique

The equations are solved using interpolation and finite difference techniques with time-variables defined on an intra-wave period staggered grid and space-variables defined on a non-equidistant vertical grid.

Input

The following basic input is required in STP:

- Water depth and bed slope
- Wave properties; height, period and angle
- Current velocity and direction
- Sediment properties; size, gradation, fall velocity.

Output

The following output can be obtained from STP:

- Time averaged values of the profiles of eddy viscosity, concentration, velocity and the suspended sediment transport in two directions
- Total bed load and suspended load in two directions
- Time-varying profiles of eddy viscosity, concentration and velocity in two directions
- Time-varying values of bed velocity, friction velocity, Shields parameter and bed concentration.

References

Bagnold, R.A., "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear". Proceeding Royal Society, London (A), 49, 1954.

Deigaard, R., Fredsøe, J. and Hedegaard, I.B. (1986a) "Suspended sediment in the surf zone". J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 1.

Engelund, F. and Fredsøe, J. (1976) "A sediment transport model for straight alluvial channels", Nordic Hydrology, 7.

Fredsøe, J. (1984) "The turbulent boundary layer in combined wave-current motion". J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. HY8.

Fredsøe, J., Andersen, O.H. and Silberg, S. (1985) "Distribution of suspended sediment in large waves", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6.

Hedegaard, I.B. (1985) "Wave generated ripples and resulting sediment transport in waves". Inst. Hydrodynamics and Hydraulic Engng., Tech. Univ. of Denmark, Ser. Paper 36.

Nielsen, P. (1970) "Some basic concepts of wave sediment transport". Int. Hydrodynamics

and Hydraulic Engineering. Tech. Univ. of Denmark. Ser. Paper 20.

Raudkivi, Arved J. (1988) "The roughness heights under waves". J. Hydraulic Research, Vol. 26, No. 5.

Svendsen, I.A., Schäffer, H.A. and Buhr Hansen, J. (1987) "The interaction between the undertow and the boundary layer flow on a beach". J. Geophysical Research Vol. 92, No. C11.

Zyserman, J. and Fredsøe, J. (1988) "The effect of rip-currents on the longshore sediment transport". 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engng., Hannover.

LITPACK

THE LONGSHORE CURRENT AND LITTORAL DRIFT MODULE, LITDRIFT

The LITDRIFT Module combines STP with a coastal hydrodynamic module to give a deterministic description of the littoral drift.

LITDRIFT provides a powerful tool for sediment budget analysis, which is of paramount importance to all coastal morphology studies.

The LITDRIFT Module simulates the cross-shore distribution of wave height, set-up and longshore current for an arbitrary coastal profile. It provides a detailed deterministic description of the cross-shore distribution of the longshore sediment transport for an arbitrary bathymetry for both regular and irregular sea states.

LITDRIFT accounts for:

- Regular/irregular waves
- Water levels
- Tidal currents
- Wind shear stresses
- Non-uniform bottom friction
- Wave refraction and shoaling
- Breaking
- Non-uniform sediment distribution.

LITDRIFT has the possibility to transfer a wave climate from deeper waters to a point in the profile, generating the output as a normal database for input in LITDRIFT or STP.

Application Areas

LITDRIFT can be applied to the study of coastal processes, e.g.:

- Littoral transport distribution
- Bypass of sediments
- Annual drift calculations.

Basic Equations

The hydrodynamic model LITDRIFT includes a description of propagation, shoaling and breaking of waves, calculation of the driving forces due to radiation stress gradients, momentum balance for the cross-shore and longshore direction giving the wave set-up and the longshore current velocities. The model can be applied on complex coastal profiles with longshore bars. In the case of a longshore bar the broken waves can reform in the trough onshore of the bar. The waves can be treated as regular or irregular, and the effect of directional spreading can be included in the description.

It is assumed in the model that the conditions are uniform along the straight coast.

The equation for shore-parallel momentum balance determines the longshore current velocity profile:

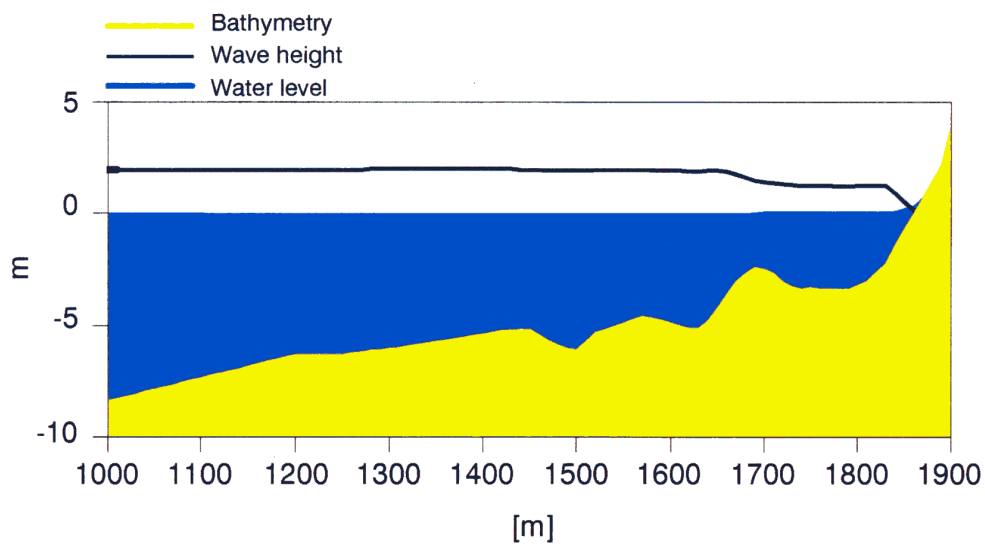
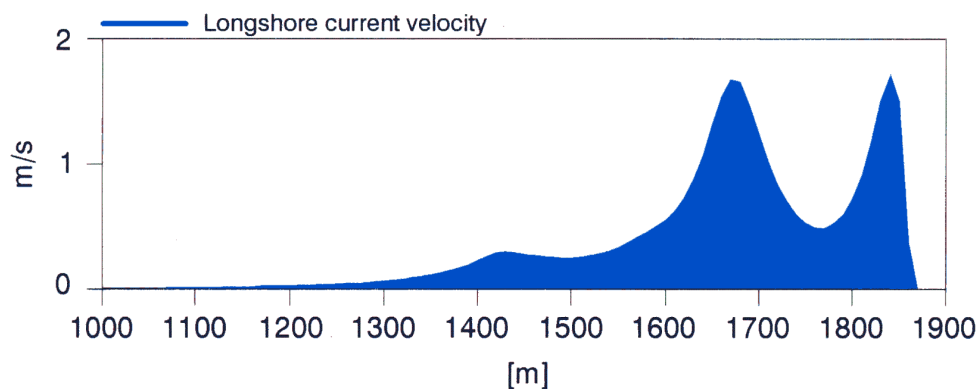
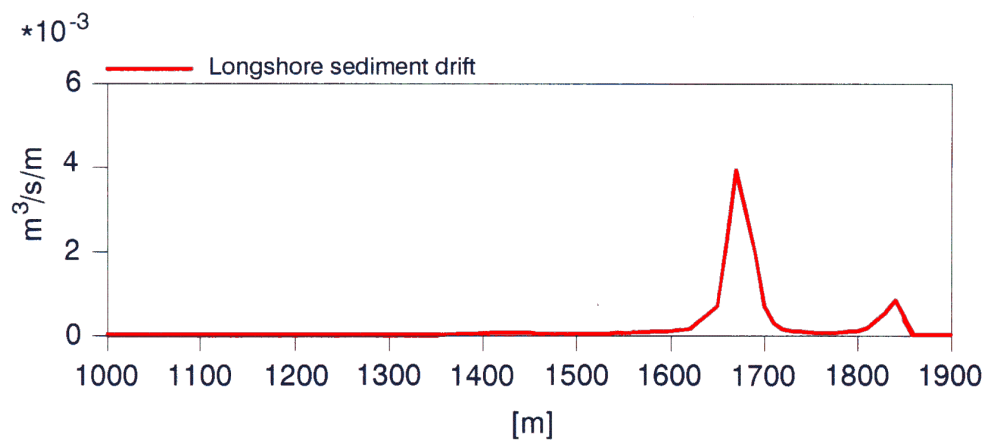
$$\tau_b - \frac{d}{dy} \left[\rho E D \frac{du}{dy} \right] = - \frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur}$$

The relation between u and τ_b is established by the model of Fredsøe (1984).

Having computed the longshore current points are selected which are representative for the littoral drift. The sediment transport calculations automatically carried out by the STP-module, are made to reflect the local conditions with respect to the energy dissipation, the percentage of non-breaking waves and the rms of the wave heights, cf. Deigaard et al. (1988).

The total sediment transport is dominated by transport contributions from areas where wave breaking occurs. The point selection procedure therefore gives preference to points in this area. In case of a bar-profile, the sediment calculation points will thus be located on the bars, where waves are breaking.

LITDRIFT gives the distribution of sediment transport across the profile, which is integrated



Calculated Sediment Transport, Velocity, Wave Height and Water Level along a Profile

LITPACK

to obtain the total longshore sediment transport rate.

By including a hydrodynamic database, LITDRIFT calculates the net/gross littoral transport for a section of coastline over a specific design period. Important factors, such as the linking of the water level and the profile to the incident sea state are included.

Symbol List

- τ_b : bed shear stress due to the longshore current
- ρ : density of water
- E : momentum exchange coefficient
- D : water depth
- u : longshore current velocity
- y : shore-normal coordinate
- s_{xy} : shear component of the radiation stress
- τ_w and $\tau_{cur.}$: driving forces due to wind and coastal current.

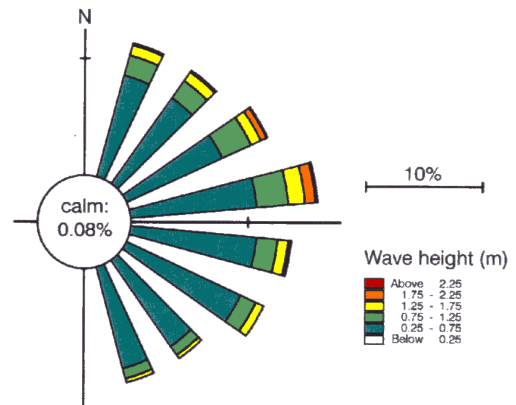
Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid.

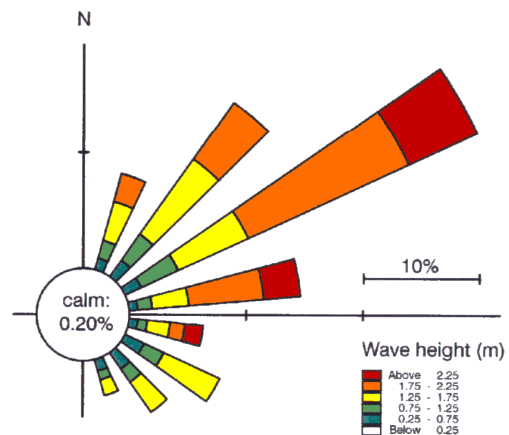
Input

The following basic input is required in LITDRIFT:

- Cross-shore profile bathymetry with the values of bed roughness and grain properties (size, fall- velocity and gradation) given at each grid point
- Water level
- Wave properties; height, period and angle
- Tidal current velocity.



Annual Wave Climate



Corresponding Littoral Drift Scaled by Gross Climate

Output

The following output can be obtained from LITDRIFT:

- Cross-shore distribution of water level, longshore current, wave height and wave angle, water flux, bed load and suspended transport, total load and cumulative total load transport
- Cross-shore distribution of total annual littoral drift
- Total net- and gross transport rates.

References

Deigaard, R., Fredsøe, J., Hedegaard, I.B., Zyserman, J.A., Andersen, O.H., (1988) "Littoral Drift Model for Natural Environments", 21st Int. Conf. On Coastal Engng., Málaga.

Foster, T., Mangor, K. and Skou, A. "Controlling Parameters on Littoral Transport and Coastline Development". The 7th Symposium on Coastal and Ocean management, California, July 8-12, 1991.

Foster, T.M. and Skou, A.J. "LITPACK on Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics". 3rd International Software Exhibition for Environmental Science & Engineering, Como, Italy, September 1992.

Skou, A., Hedegaard, I.B., Fredsøe, J., and Deigaard, R. "Applications of Mathematical Models for Coastal Sediment Transport and Coastline Development". Proceedings of COPEDEC III, Mombasa, Kenya, September 16-20, 1991.

LITPACK

THE COASTLINE EVOLUTION MODULE, LITLINE

LITLINE is a powerful and reliable tool for the design and optimisation of many coastal engineering projects.

Based upon the results from LITDRIFT, LITLINE simulates the coastal response to gradients in the longshore sediment transport capacity resulting from natural features and a wide variety of coastal structures.

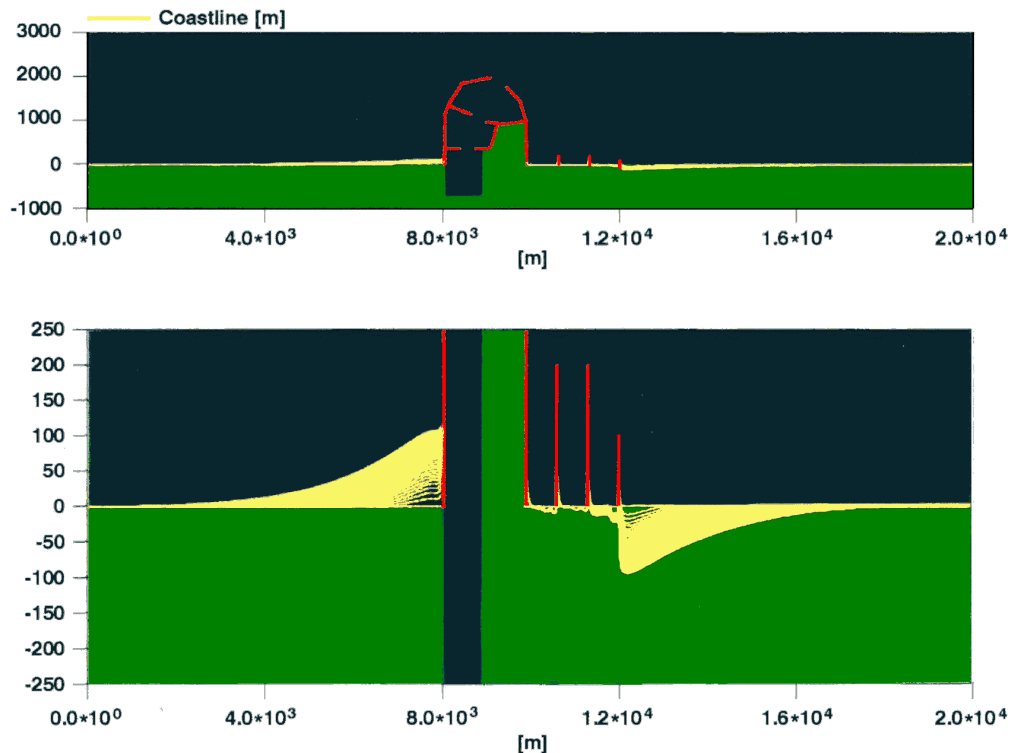
LITLINE calculates the coastline evolution by solving a continuity equation for the sediment in the littoral zone. The influence of structures, sources and sinks are included.

LITLINE accounts for

- Structures (groynes, jetties, revetments and offshore breakwaters)
- Sources and sinks
- Diffraction of waves
- Depth contours
- Active depth and dunes.

Application Areas

The evolution of the coastline can be calculated, either based on a yearly net littoral drift or from a time series of wave events. The latter option offers the capability of studying coastline movements during a winter season (for instance maximum retreat) or coastline changes on a coast with monsoon climate.



*Development of coastline near harbour during 30 years
Upper Figure: True scale, Lower Figure: Distorted scale*

Basic Equations

Based upon the results from the LITDRIFT, LITLINE simulates the coastal response to gradients in the longshore sediment transport capacity resulting from natural features and a wide variety of coastal structures.

The model solves the continuity equation for the coastline:

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

The changes to the transport conditions caused by coastal structures are modelled by introducing appropriate internal boundary conditions. Besides blocking the transport, large structures change the transport relations close to the structure due to the sheltering effect from the structure itself. This effect is automatically included by introducing modified transport relations close to the structure.

With jetties and breakwaters the influence of diffraction on the wave climate is included.

Symbol List

- y_c : distance from the baseline to the coastline
 t : time
 h_{act} : height of the active cross-shore profile
 Q : long-shore transport of sediment expressed in volumes
 x : long-shore position
 Δx : long-shore discretization step
 Q_{sou} : source/sink term expressed in volume/ Δx .

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid. The sediment transport rates are found by interpolation in a transport table previously generated for the particular site.

Input

The following basic input is required in LITLINE:

- Longshore relative coastline alignment together with dune properties, profile description, active depth and depth contour angles at each grid point
- Cross-shore profile bathymetries
- Data base with wave properties (wave height, -period and angle), tidal current and water levels
- Position and size of structures
- Position and magnitudes of sources/sinks
- Database of transport rates (previously generated)

Output

The results of the simulation are the coastline position, longshore sediment transport rates and the depth in front of revetments, if they are present. The accumulated volume of material deposited and bypassed is also given.

LITPACK

THE TRENCH SEDIMENTATION MODULE, LITTREN

LITTREN finds applications in areas where the suspended load is not in equilibrium with the local hydrodynamics, for example channel back-filling and intake intrusion problems.

LITTREN accounts for

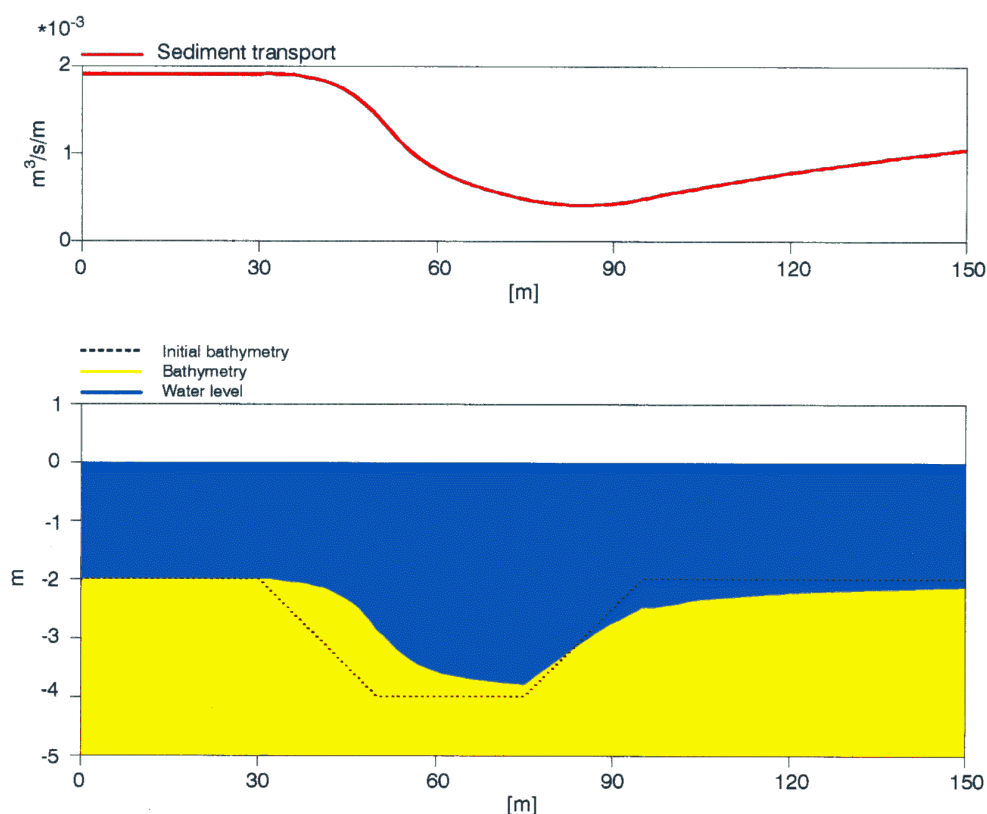
- Non-equilibrium sediment transport in combined waves and currents.
- Full morphological feed back between bed level change, waves, currents and sediment transport.
- Current and wave 'refraction' over the channel.

Basic Equations

Based upon the standard STP formulation, LITTREN links a one-dimensional wave – current model to a non-equilibrium formulation of the vertical sediment diffusion equation.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w \frac{\partial c}{\partial z}$$

Bed load transport and the near bed concentration include gravity effects, which are found to be important. In cases where the channel direction is similar to the persistent current direction, gravity effects are the dominating back-filling mechanism.



Example of Simulated Trench Sediment

The change in bed level is found by the bottom sediment continuity equation:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{1}{(1-n)} \frac{\partial q}{\partial x}$$

n : porosity of the bed
q : sediment flux
x : horizontal coordinate.

Solution Technique

The module includes a morphological subroutine using a modified Lax-Wendroff solution to the bottom sediment continuity equation.

This allows continuous interaction between the morphology and hydrodynamics, thereby avoiding an overly conservative solution based upon initial values.

Input

The following basic input is required in LITTREN:

- Bathymetry profile perpendicular to the trench alignment
- Arbitrary time series of wave/current magnitudes and directions and water levels
- Grain diameter and fall velocity.

Output

The outcome of the simulation is the bathymetry of the trench profile, total change in bed level and total-load transport rates along the trench profile.

List of Symbols

c : concentration of sediment
t : time
 ϵ_s : eddy viscosity
w : sediment fall velocity
z : bed level

THE PROFILE DEVELOPMENT MODULE, LITPROF

LITPROF describes cross-shore profile changes by solving the bottom sediment continuity equation, based on the sediment transport rates calculated by STP.

LITPROF being a time-domain model, includes the effects of changing morphology on the wave climate and transport regime. This enables a simulation of profile development for a time-varying incident wave field.

LITPROF accounts for the following effects:

- Shoaling of waves
- Breaking waves
- Transport, including the effects of undertow, Lagrangian drift, streaming and bed slope
- Structures (submerged breakwater and/or revetment).

Application Areas

LITPROF can be applied to investigate storm profile development and the response of beach nourishment to storm conditions. Furthermore, a profile envelope for various wave conditions may be obtained forming the basis for estimating burial depths for pipelines.

Basic Equations

A sediment transport table based on STP calculations are used as the basis for the morphological module (Hedegaard et al. (1988), describing the development of the coastal profile. The bed level change is described by the continuity equation for the sediment:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{1-n} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

The boundary condition is that the sediment transport is zero at the coastline.

The morphological model cannot be based directly on the sediment transport rates calculated from the local wave parameters, because it is not physically correct to expect an immediate, local response of the sediment transport to varying hydrodynamic conditions (Roelvink and Stive (1988)). Today no theory exists that can describe the actual cross shore variation of the sediment transport, and a heuristic transformation of the sediment transport calculated from the local conditions has been applied. The transformation reflects that the circulation current does not adjust immediately to the driving forces, but develops gradually. The peak of sediment transport is therefore shifted shorewards relative to the maximum of the driving forces. The transformation, giving the sediment transport, q_{sl} , used for the profile modelling, is expressed as a response function:

$$\frac{\partial q_{sl}}{\partial x} = \frac{q_s - q_{sl}}{L}$$

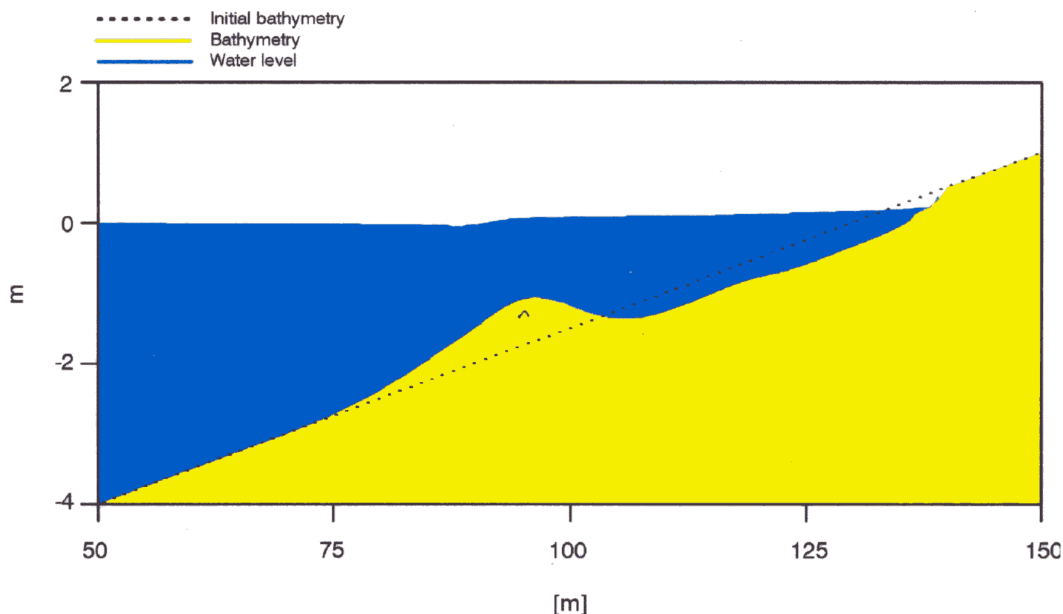
Symbol List

- h : bed level
n : porosity of the bed material.

The length scale L is proportional to the local water depth.

Solution Technique

The equations are solved using finite difference techniques with variables defined on a space-staggered equidistant horizontal grid.



Example of Bar Development in Profile

Input

The following basic input is required in LITPROF:

- Cross-shore profile bathymetry
- Arbitrary time-series of wave height and water level
- Data base of transport rates (previously generated).

Output

The main results from LITPROF are

- Profile response to various conditions
- Fate of nourished material
- Profile response to structures
- Profile envelope.

References

Hedegaard, I.B., Deigaard, R. (1988) "A model for cross-shore sediment transport and coastal profile development". Proc. IAHR. 2nd Int. Symp. On Wave Research and Coastal Engineering, Hannover.

Roelvink, J.A. and M.J.F. Stive (1988) "Large scale tests of cross-shore sediment transport on the upper shoreface". Proc. IAHR. Symposium on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone, Copenhagen.

