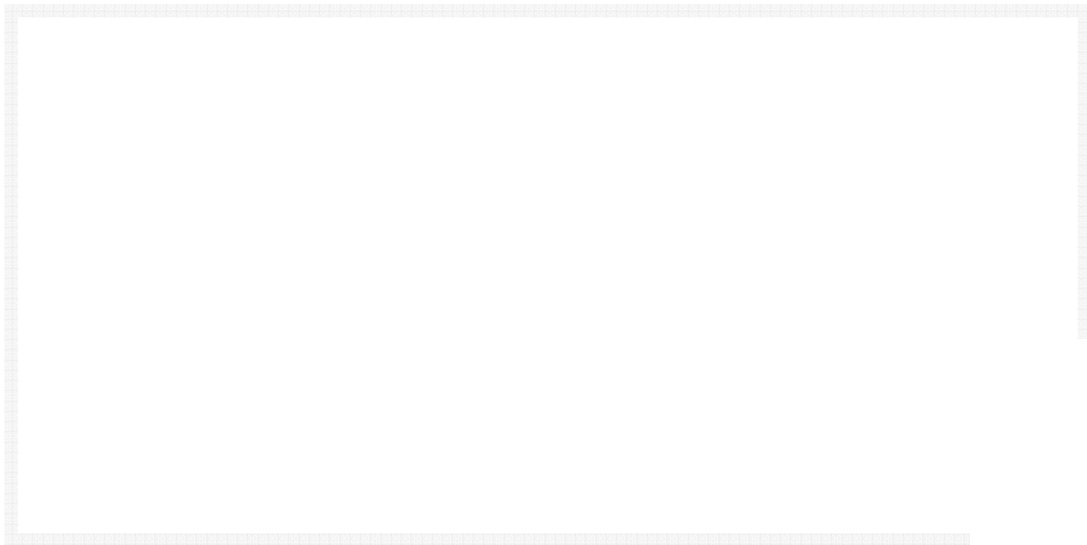


Brindisi LNG

Valutazione dell'ubicazione dello scarico



Relazione EX 5671
Pubblicazione 1.0
Dicembre 2007

DICHIARAZIONE DI NON RESPONSABILITÀ

Il presente documento è stato tradotto al meglio delle nostre competenze e conoscenze dal testo originale in lingua inglese, con lo scopo di fornire il più alto livello di accuratezza. Comunque, in caso di discrepanze, si deve considerare il testo originale in lingua inglese, soprattutto per quanto concerne i dati tecnici.

Sommario

Brindisi LNG

Valutazione dell'ubicazione dello scarico

Relazione EX 5671

Dicembre 2007

La Brindisi LNG S.p.A. prevede di costruire un nuovo terminale GNL nel Porto di Brindisi. Secondo il progetto la portata di acqua marina prevista per il processo di rigassificazione del GNL sarà di 25.000m³/h. L'acqua di mare scaricata sarà di 6°C, più fredda rispetto all'ambiente. La BrLNG ha preso in considerazione quattro opzioni per lo scarico dell'acqua di riscaldamento esausta.

Opzione A – uno scarico in superficie sulla facciata ovest verso il retro della bonifica. Questa opzione rappresenta il percorso più semplice e più breve.

Opzione B – un diffusore sommerso posizionato verso il retro della bonifica. Questa soluzione può migliorare la miscelazione grazie ad un maggiore trascinamento di acqua calda.

Opzione C – uno scarico in superficie sulla facciata nordovest verso il fronte della bonifica. Questa soluzione può fornire una migliore miscelazione complessiva con le acque all'interno del porto.

Opzione D – un diffusore sommerso posizionato a una certa distanza dalla facciata nordoccidentale verso il fronte della bonifica. Questa soluzione può migliorare la miscelazione grazie ad un maggiore trascinamento.

Il presente studio utilizza un modello numerico idrodinamico tridimensionale convalidato del Porto Esterno di Brindisi per analizzare le quattro opzioni proposte per lo scarico dell'acqua fredda, relativamente a diversi possibili scenari.

Secondo lo studio, dal punto di vista del ricircolo e della dispersione termica, le quattro opzioni differiscono in misura molto ridotta. Tutte producono un cambiamento di temperatura alla presa BrLNG di circa -0.5°C

Si consiglia quindi l'adozione dell'Opzione C, sulla base di un'efficacia di miscelazione dell'acqua fredda con l'acqua del porto, e di considerazioni più ampie tra cui:

- la ridotta visibilità dello scarico e;
- il mantenimento dell'accesso alla facciata ovest della bonifica e al canale di presa PE.

Indice

<i>Titolo</i>	<i>i</i>
<i>Informazioni sul Documento</i>	
<i>Sommario</i>	<i>iii</i>
<i>Indice</i>	<i>v</i>

1.	Introduzione	i
1.1.	Antefatto.....	1
1.1	Obiettivo.....	1
1.2	Piano della relazione.....	1
2.	Condizioni del sito	2
2.1	Velocità del vento	2
2.2	Maree e correnti	2
2.3	Temperatura dell'acqua marina	2
2.4	Onde.....	2
3.	Caratteristiche degli scarichi	3
3.1	Scarichi esistenti nel Porto di Brindisi	3
3.2	Presa BrLNG proposta e opzioni di sbocco	3
3.2.1	Opzione A – scarico alla superficie sulla facciata ovest della bonifica .	5
3.2.2	Opzione B – scarico sul fondo vicino alla facciata ovest della bonifica.....	5
3.2.3	Opzione C – scarico alla superficie sulla facciata nordovest della bonifica ..	5
3.2.4	Opzione D – scarico sul fondo vicino alla facciata nordovest della bonifica.....	5
4.	Creazione del Modello Termico 3D	6
4.1	Comportamento generale dello scarico freddo	6
4.2	Il sistema TELEMAT	6
4.3	Layout del modello.....	7
4.3.1	Maglia del Modello a Elementi Finiti.....	7
4.3.2	Batimetria del Modello	7
4.3.3	Layout delle strutture delle prese	8
4.4	Forzatura del modello.....	8
4.5	Parametri del modello.....	9
4.6	Rappresentazione degli scarichi secondo il modello	9
5.	Risultati	10
5.1	Introduzione.....	10
5.2	Temperatura in eccesso alla presa BrLNG	10
5.3	Comportamento generale dello scarico dell'acqua fredda	10
6.	Conclusioni e raccomandazioni	12
7.	Riferimenti	13

Indice - continuazione

Tabelle

Tabella 1	Parametri del modello	9
Tabella 2	Configurazioni di scarico provate	10
Tabella 3	Temperatura in eccesso modellata alla presa BrLNG (°C)	10

Figure

Figura 1	Porto Esterno di Brindisi con indicazione delle prese e degli sbocchi esistenti
Figura 2	Porto Esterno di Brindisi con indicazione della posizione proposta per la presa BrLNG e le opzioni per gli sbocchi
Figura 3	Maglia e dominio del modello a elementi finiti TELEMAC-3D
Figura 4	Maglia del modello a elementi finiti TELEMAC-3D (localizzata per lo sviluppo BrLNG proposto)
Figura 5	Batimetria del modello a elementi finiti TELEMAC-3D
Figura 6	Batimetria del modello a elementi finiti TELEMAC-3D (localizzata per lo sviluppo BrLNG proposto)
Figura 7	Serie temporale delle temperature in eccesso alla presa BrLNG
Figura 8	Prova 1, Campi termici modellati (superficie e fondo) per l'Opzione A
Figura 9	Prova 2, Campi termici modellati (superficie e fondo) per l'Opzione B
Figura 10	Prova 3, Campi termici modellati (superficie e fondo) per l'Opzione C
Figura 11	Prova 4, Campi termici modellati (superficie e fondo) per l'Opzione D

Appendice

Appendice 1	Il Modello Numerico TELEMAC-3D
-------------	--------------------------------

1. Introduzione

1.1. ANTEFATTO

La Brindisi LNG S.p.A. prevede di costruire un nuovo Terminale GNL nel Porto di Brindisi. Il terminale sarà concepito per una distribuzione nominale iniziale di 6,0 MMTPA. Come vettore di riscaldamento per vaporizzare il GNL sarà utilizzata l'acqua di mare in vaporizzatori di ruscellamento open rack. Secondo il progetto la portata di acqua marina prevista per il processo di rigassificazione del GNL sarà di 25.000m³/h. L'acqua di mare scaricata sarà di 6°C, più fredda rispetto all'ambiente.

Il presente rapporto esamina il possibile ricircolo dell'acqua di processo esausta proveniente dall'impianto secondo quattro opzioni e diversi scenari possibili.

Opzione A – l'acqua fredda proveniente dal terminale BrLNG viene scaricata attraverso uno scarico in superficie sulla facciata ovest verso il retro della bonifica. Questa opzione rappresenta il percorso più semplice e breve.

Opzione B – l'acqua fredda proveniente dal terminale BrLNG viene scaricata attraverso un diffusore sommerso posizionato verso il retro della bonifica. Questa soluzione può migliorare la miscelazione grazie ad un maggiore trascinamento di acqua calda.

Opzione C – l'acqua fredda proveniente dal terminale BrLNG viene scaricata attraverso uno scarico in superficie sulla facciata nordovest verso il fronte della bonifica. Questa soluzione può fornire una migliore miscelazione complessiva con le acque all'interno del porto.

Opzione D – l'acqua fredda proveniente dal terminale BrLNG viene scaricata attraverso un diffusore sommerso posizionato a una certa distanza dalla facciata nordovest verso il fronte della bonifica. Questa soluzione può migliorare la miscelazione grazie ad un maggiore trascinamento.

La Figura 1 mostra il layout del Porto Esterno di Brindisi, con la posizione delle prese e degli sbocchi esistenti (e le relative caratteristiche di scarico). L'impianto proposto dalla BrLNG, comprese le quattro opzioni di scarico BrLNG descritte sopra, è mostrato nella figura 2.

1.2 OBIETTIVI

Il presente studio ha lo scopo di valutare il funzionamento delle opzioni (da A a D) relativamente a:

1. la valutazione di eventuali problemi di ricircolo termico causati alla presa BrLNG;
2. la scelta della posizione migliore per lo scarico.

1.3 PRINCIPI GENERALI DELLA RELAZIONE

La Sezione 2 delinea le condizioni del sito in termini di flussi, venti, correnti e onde. La Sezione 3 descrive le caratteristiche delle prese e degli scarichi all'interno del Porto di Brindisi, sia quelli in essere che quelli pianificati (BrLNG). La Sezione 4 descrive presupposti e creazione del modello 3D. La Sezione 5 descrive i risultati del modello 3D e l'interpretazione e l'analisi rispetto agli obiettivi. La Sezione 6 presenta le conclusioni e le raccomandazioni ricavate dal presente studio.

2. *Condizioni del sito*

Nel 2003 la HR Wallingford ha eseguito un'indagine dettagliata dei processi fisici operanti nel porto di Brindisi (Riferimento 1). Lo studio prende in considerazione i livelli dell'acqua, le condizioni ondose e i fattori che governano le correnti intorno a Brindisi. Lo studio è inoltre supportato da un rilievo idrografico che raccoglie informazioni sulla batimetria del porto, sulla temperatura dell'acqua marina, sui solidi sospesi, sulle correnti e le onde (Riferimento 1). Un altro studio dell'Agosto 2003 analizza la persistenza e le condizioni di vento estremo nel porto di Brindisi (Riferimento 3).

Nei riferimenti di cui sopra si possono reperire informazioni più dettagliate sulle condizioni intorno al sito, ma gli aspetti importanti per gli studi termici presenti sono sintetizzati qui sotto.

2.1 VELOCITÀ DEL VENTO

Le Condizioni del Vento a Brindisi non sono di solito forti, con velocità inferiori a 7 nodi per il 50% del tempo. La direzione del vento è solitamente dai settori nordovest o sudest (per più di 50% del tempo), con venti generalmente trascurabili per il 10-20% dell'anno (Riferimento 3).

2.2 MAREE E CORRENTI

Le correnti all'interno del Porto Esterno di Brindisi sono solitamente deboli, con un'escursione media della marea in primavera di soli 0,3 m. Durante due giorni del mese di Febbraio 2003 (con condizioni di marea primaverile approssimativamente medie e venti molto deboli), sono stati raccolti dati sulle correnti in sette punti distribuiti su tutta la colonna d'acqua, attraverso un ciclo di marea pressoché completo (Riferimento 1). La velocità massima osservata mediata sulla verticale è stata di 0,21 m/s. Due giorni di misure continue in-situ della corrente all'incirca in prossimità dell'ormeggio metaniero hanno dato una misura di velocità massima mediata sulla verticale di 0,027 m/s, confermando l'opinione, per quanto la durata delle misure sia stata relativamente breve, che le correnti siano generalmente deboli.

Le correnti nel porto sono prodotte dal vento, da gradienti di densità (indotti dagli scarichi termici della centrale elettrica Brindisi Nord e dall'impianto della Polimeri Europa (PE), e dalle maree.

2.3 TEMPERATURA DELL'ACQUA MARINA

Misure sul campo recentemente fornite dalla BrLNG ed eseguite tra il 1989 e il 1995 mostrano un'escursione termica dell'acqua marina da un minimo mensile medio di 9,9 °C a Febbraio a un massimo mensile medio di 29,3 °C ad Agosto. Le temperature minime e massime mensili variano da 8,0 °C nel Febbraio 1991 e 1992 a 30,0 °C nell'Agosto 1992 e 1994. In qualsiasi momento possono verificarsi variazioni locali dovute ai diversi sbocchi termici in funzione nel porto, dettagli dei quali sono forniti sotto.

2.4 ONDE

Le mura del porto forniscono una certa protezione dalle onde dell'Adriatico. Ciononostante, il presente studio non prende in considerazione l'effetto delle onde in

quanto queste aumenterebbero comunque il mescolamento per qualsiasi posizione dello sbocco, producendo un effetto positivo sulla dispersione.

3. *Caratteristiche degli Scarichi*

3.1 SCARICHI ESISTENTI NEL PORTO DI BRINDISI

La Figura 1 mostra la posizione e le caratteristiche delle prese e degli scarichi esistenti e pianificati (con l'esclusione della presa e dello scarico BrLNG) all'interno del Porto Esterno di Brindisi. Segue una breve descrizione degli stessi.

Centrale Brindisi Nord – Si trova sulla costa sud del Porto Esterno. L'acqua ambientale viene prelevata con una portata di $10,5\text{m}^3/\text{s}$ e scaricata con la stessa portata ad una temperatura di 8°C più elevata.

Polimeri Europa (PE) – L'acqua ambientale viene prelevata attraverso due canali a ovest dello stabilimento BrLNG con una portata di $28,43\text{m}^3/\text{s}$ e viene scaricata ad una temperatura di 3°C più alta da quattro sbocchi:

- Policentrica Ovest: $3,42\text{m}^3/\text{s}$, all'interno del Porto Esterno,
- Policentrica Nord Ovest: $0,06\text{m}^3/\text{s}$, all'esterno del porto (vicino a Capo di Torre Cavallo),
- Policentrica Est: $12,11\text{m}^3/\text{s}$, all'esterno del porto (vicino a Capo di Torre Cavallo),
- Policentrica Sud: $12,83\text{m}^3/\text{s}$, all'esterno del porto (vicino a Capo di Torre Cavallo).

I valori di cui sopra sono stati rilevati dalle registrazioni degli scarichi del 2005, presentate dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
[<http://aia.minambiente.it/DomandeAIADocumenti.aspx?st=5&id=133>].

Ai fini del modellamento, i tre scarichi all'esterno del porto sono stati trattati come uno scarico unico, dal momento che non è molto probabile che l'emissione di uno qualsiasi degli scarichi possa ricircolare nel porto e in prossimità delle prese.

La presa PE serve diverse società distinte. Ciononostante, gli unici dettagli disponibili sono quelli relativi alla PE e alla Basell. Queste società prelevano solo $10,15\text{m}^3/\text{s}$ (dati del 2005/6). Siamo quindi partiti dal presupposto che anche l'acqua restante scaricata attraverso gli sbocchi di cui sopra sia aspirata dalla presa PE. Per questa ragione il prelievo della presa PE è stato valutato in $28,43\text{m}^3/\text{s}$.

In tutti gli scenari di valutazione della posizione dello sbocco, le prese e gli sbocchi PE sono stati chiusi, dal momento che questo è stato considerato il caso peggiore dal punto di vista del probabile ricircolo dello scarico BrLNG.

3.2 PRESA BRLNG PROPOSTA E OPZIONI DI SBOCCO

La BrLNG prevede di prelevare $25.000\text{m}^3/\text{h}$ (circa $6,94\text{m}^3/\text{s}$) di acqua marina nel terminale GNL proposto, e scaricherà acqua di riscaldamento esausta più fredda di 6°C , con la stessa portata.

La relazione descrive le opzioni prese in considerazione per l'ubicazione dello scarico BrLNG e il modellamento numerico eseguito per individuare la posizione più idonea. Tutte le posizioni prese in considerazione sono illustrate nella Figura 2.

3.2.1 *Opzione A – scarico alla superficie sulla facciata ovest della bonifica*

In questa Opzione l'acqua fredda viene scaricata in superficie attraverso il rivestimento della facciata ovest della bonifica. Lo scarico è in superficie e viene emesso attraverso una tubatura o un canale di scarico. Con questa posizione il percorso dall'ORV alla facciata ovest della bonifica è il più breve possibile e l'opzione è probabilmente la meno costosa.

La profondità locale dell'acqua in prossimità dello scarico è di circa 3 m, il che significa che il volume di acqua marina ambientale immediatamente disponibile per la miscelazione con lo scarico freddo è limitato. Questo condurrà probabilmente al ritrascinamento di acqua di riscaldamento parzialmente diluita, che inibirà la diluizione iniziale dell'acqua fredda.

3.2.2 *Opzione B – scarico sul fondo vicino alla facciata ovest della bonifica*

In questa opzione l'acqua fredda viene scaricata attraverso un diffusore posizionato sul fondo del mare tra la facciata ovest della bonifica e il canale di presa PE. Questo è il percorso più breve per uno scarico sommerso in questa parte del porto. Uno scarico sommerso può essere più efficiente nel fornire una miscelazione iniziale dell'acqua fredda con il volume d'acqua circostante.

Come nel caso dell'opzione A, la profondità locale dell'acqua in prossimità del diffusore è di circa 3 m, il che significa che il volume di acqua marina ambientale immediatamente disponibile per la miscelazione con l'acqua fredda è limitato. Questo condurrà probabilmente al ritrascinamento di acqua di riscaldamento parzialmente diluita, che inibirà la diluizione iniziale dell'acqua fredda.

3.2.3 *Opzione C – scarico in superficie sulla facciata nordovest della bonifica*

Nell'opzione C l'acqua fredda proveniente dall'impianto BrLNG sarà scaricata all'estremità della bonifica BrLNG, sulla facciata nordovest, più vicino all'estremità del canale di presa PE rispetto all'Opzione A. Questa opzione comprende un canale superficiale fino al punto di scarico più lungo (rispetto alle Opzioni A & B di cui sopra), aumentando leggermente la possibilità di evaporazione per riscaldamento. Nella valutazione non si è tuttavia tenuto conto di questa piccola differenza. Questa posizione dovrebbe offrire una miscelazione migliore con la presa PE. Comunque è anche più vicino alla presa BrLNG e può quindi presentare un maggior rischio di ricircolo.

La profondità locale dell'acqua in prossimità dello scarico è di circa 5 m, il che può inibire la diluizione iniziale dell'acqua fredda. Questa posizione è, però, più profonda rispetto alle Opzioni A & B.

3.2.4 *Opzione D – scarico sul fondo vicino alla facciata nordovest della bonifica*

Nell'Opzione D l'acqua fredda proveniente dall'impianto BrLNG viene scaricata attraverso un diffusore sul fondo del mare tra la facciata nordovest della bonifica e l'estremità del canale di presa PE. Questa posizione dovrebbe anche offrire una migliore miscelazione con la presa PE rispetto alle Opzioni A & B.

La profondità locale dell'acqua in prossimità dello scarico è di circa 5 m, il che può inibire la diluizione iniziale dell'acqua fredda. Questa posizione è, però, più profonda delle Opzioni A & B e la miscelazione iniziale può essere migliore che per lo scarico in superficie dell'Opzione C.

4. Creazione del Modello Termico 3D

4.1 COMPORTAMENTO GENERALE DELLO SCARICO FREDDO

In ciascuna opzione la dispersione dell'acqua di riscaldamento esausta può opportunamente essere divisa in tre fasi: campo vicino, campo medio e campo lontano. I processi fisici dominanti sono diversi per ciascuna delle fasi.

In campo vicino, il comportamento dello scarico è governato dal momento e dalla spinta di galleggiamento (negativa) iniziali. I processi rilevanti da studiare per questa area iniziale del pennacchio sono la dissipazione del momento e della spinta di galleggiamento tramite l'interazione dello scarico con le acque ambientali. È importante che l'acqua raffreddata venga introdotta nei modelli in campo medio e lontano in una maniera che sia coerente con il comportamento in campo vicino. Il campo vicino può essere caratterizzato da un comportamento a getto o a pennacchio a seconda che la velocità di scarico dell'effluente sia alta o bassa rispetto all'acqua ambientale. Quale che sia la natura dello scarico iniziale, il momento dell'effluente viene infine assorbito nell'acqua ambientale e l'effluente comincia a muoversi con l'acqua ambientale come un pennacchio in campo medio.

In campo medio la spinta di galleggiamento continua a causare la diffusione orizzontale del pennacchio sopra il fondo marino, con trascinamento forzato, trasporto da parte delle correnti e ulteriore diluizione dell'acqua fredda. Si rende quindi necessario un approccio tridimensionale alla ricerca del movimento del pennacchio, dell'interazione con i flussi di marea e dell'equilibrio termico, solitamente con l'impiego di un modello computerizzato multi-strato.

In campo lontano la differenza di temperatura tra il pennacchio e l'acqua ambientale diventa così piccola che la spinta di galleggiamento diventa trascurabile. In effetti, l'acqua fredda viene poi convogliata per avvezione come parametro dinamicamente neutro e qualunque temperatura negativa in eccesso viene dispersa gradualmente nell'atmosfera e dalle correnti residue. Per quanto gli effetti del galleggiamento del pennacchio siano da considerarsi insignificanti in campo lontano, il processo di dispersione può ancora essere fondamentalmente tridimensionale se vi sono correnti significative prodotte dal vento o in presenza di una stratificazione naturale. Le correnti generate dal vento tendono a variare considerevolmente in verticale, e possono invertirsi con la profondità in caso di vento onshore o offshore.

Gli aspetti fondamentali che regolano la dispersione in campo medio e in campo lontano sono:

- o Il movimento dei pennacchi in campo vicino/medio/lontano sotto l'influsso delle correnti ambientali di marea e prodotte dal vento.
- o La dispersione di allontanamento dall'area e qualsiasi successivo accumulo in campo lontano.

4.2 IL SISTEMA TELEMATAC

Usando il sistema a elementi finiti TELEMATAC 3-D è stato creato un modello numerico tridimensionale, originariamente sviluppato dall'LNHE di Parigi. Il sistema TELEMATAC fa uso di una griglia non strutturata di elementi triangolari, senza direzioni di preferenza, per rappresentare l'estensione areale del modello. Gli elementi possono essere rimpiccioliti per risolvere in grande dettaglio aspetti dell'area principale, mentre la copertura di un'area estesa è resa possibile dall'impiego di elementi grandi nelle aree esterne. In questo modo è possibile creare un modello che simula sia la dispersione in campo medio intorno allo scarico che l'accumulo di calore in campo lontano dell'area nel suo complesso.

TELEMATAC risolve le equazioni di moto su diversi piani usando l'approssimazione idrostatica per collegare pressione densità e profondità dell'acqua. Il modello comprende il moto verticale

dominante, generato dalla convergenza/divergenza alla superficie o negli strati inferiori, mentre il trasferimento verticale turbolento è rappresentato parametricamente. Per mettere in relazione la densità con la salinità e la temperatura si risolve un'equazione di stato.

La sollecitazione ventosa è collegata alla velocità del vento fornita tramite un coefficiente di resistenza scelto dal modello o dall'utente. Il modello è in grado di rappresentare i principali processi fisici di distribuzione del galleggiamento, soppressione dello scambio turbolento per stratificazione e scorrimento delle correnti prodotte dai venti. L'estensione verticale del modello è rappresentato in "coordinate sigma", vale a dire, i piani del modello sono collocati a proporzioni fisse della profondità locale dell'acqua.

Il modello risolve le equazioni di moto e di conservazione della massa, del calore e della salinità dell'acqua in modo da fornire i valori per le tre componenti di velocità, temperatura e salinità (e un certo numero di quantità collegate se richiesto) a ciascun nodo e a ciascun livello nella maglia per ciascun passo temporale. I passi temporali sono tipicamente compresi tra alcuni secondi e alcuni minuti. Durante la soluzione i risultati sono memorizzati a intervalli in un file di output per la visualizzazione e l'analisi.

Le condizioni limite possono essere fornite alle estremità aperte del modello sotto forma di livelli e/o velocità dell'acqua, insieme ai valori di salinità e di temperatura. La scelta della rappresentazione dei limiti è un aspetto importante nel funzionamento e nella verifica del modello.

TELEMAC-3D è stato usato dalla HR Wallingford in numerosi studi precedenti di dispersione termica, ed è stato confrontato con misure sul campo di pennacchi termici. È stato impiegato estensivamente dalla HR Wallingford nel modellamento delle acque stratificate per salinità intorno a Hong Kong e, in questa applicazione, è stato confrontato con un'estesa serie di dati ricavati da misure sulla corrente, la marea e la salinità. Il confronto è stato eseguito usando misure quantitative di accordo con i dati ed è stata accettata dal Ministero di Protezione Ambientale del Governo di Hong Kong. La validità di TELEMAC 3-D è stata dimostrata anche dai suoi autori attraverso il confronto con diversi altri tipi di flusso 3D.

La formulazione del modello TELEMAC è descritta in dettaglio nell'Appendice 1.

4.3 LAYOUT DEL MODELLO

4.3.1. *Maglia del Modello a Elementi Finiti*

Il modello per il presente studio copre una superficie di circa 80 km², comprendente il Porto Esterno, il Porto Medio e il Porto Interno. Il limite esterno del modello si trova a circa 5 Km dall'area di interesse, spaziando da Punta Penne a nord a Punta della Contessa a sud. La maglia del modello sull'intero dominio è mostrata nella Figura 3 e l'area di principale interesse è mostrata in dettaglio nella Figura 4.

La risoluzione della maglia nel modello passa da 1000 m al limite esterno fino a 2 m nelle anguste strutture del canale di scarico, alle due entrate del canale di presa PE. La maglia contiene in tutto circa 10.000 elementi, con 8 piani in verticale equispaziati lungo la colonna d'acqua.

4.3.2. *Batimetria del Modello*

I dettagli della linea costiera esistente e la batimetria per il modello sono stati ricavati dalla Admiralty Chart 1418, integrati da un rilievo batimetrico locale eseguito dalla HR Wallingford (Riferimento 1) e da un rilievo batimetrico più dettagliato della FUGRO (Riferimento 2).

La linea costiera esistente e la batimetria sono state aggiornate per mostrare lo sviluppo proposto dalla BrLNG e due altri sviluppi significativi nelle vicinanze (illustrati nel sito web del Porto di Brindisi) come indicato sotto:

- o Comprende il layout della bonifica BrLNG (Disegno 3269-XX-DG-2Z00 001 rev4b).
- o Comprende Capo Bianco – Bonifica Nuova Area POL Marina Militare, dragaggio e nuovo frangiflutti tra Pedagna Grande e Isolotto Giorgio Treviso.
- o Comprende Costa Morena Est – completamento della bonifica e del dragaggio.

Il dato verticale per la batimetria del modello è la Chart Datum locale (CD). La batimetria per lo studio delle correnti è mostrata nelle Figure 5 (area completa del modello) e 6 (area di interesse locale).

4.3.3. *Layout delle strutture delle prese*

La rappresentazione delle strutture delle prese esistenti è stata attentamente considerata in modo da rappresentare efficacemente gli effetti locali sul flusso e, quindi, la possibile miscelazione e il trascinamento dello scarico BrLNG.

Canali di Presa PE

Il modello comprende entrambi i canali di presa PE, che si trovano a ovest dell'impianto BrLNG. La geometria della sezione trasversale del canale orientale è stata ricavata da informazioni rese disponibili nel Settembre 2004. Per il canale occidentale i dati disponibili erano limitati, perciò le uniche sezioni trasversali disponibili (all'estremità verso il mare) sono state considerate rappresentative della geometria dell'intero canale. Il canale orientale è stato rappresentato nel modello come un rettangolo di 18,5 m di larghezza per 4 m di profondità all'ingresso, con il pavimento che sale a 2 m dopo 65 m. Il canale occidentale è stato rappresentato come un rettangolo di 15,8 m di larghezza per 4 m di profondità, che sale ad incontrare il canale orientale alla confluenza.

Entrate ai Canali di Scarico PE

Le informazioni fornite alla BrLNG mostrano sul fondo la struttura di un canale di scarico di 10 m di larghezza per 2,5 m di profondità all'estremità verso il mare del ramo orientale del canale di presa. Per quanto non siano disponibili i particolari di progetto per il ramo occidentale, le foto eseguite come parte degli studi precedenti (Riferimento 1) mostrano che le strutture presenti alle bocche dei due canali sono simili. I due canali di scarico sono quindi rappresentati nel modello come strette feritoie verticali, ciascuna con una sezione trasversale di 2,5 m² di superficie. Questa sezione trasversale garantisce al flusso la giusta grandezza attraverso la bocca del canale di presa.

4.4 FORZATURA DEL MODELLO

Le forze che determinano il flusso nella baia comprendono le maree, i venti e i gradienti di densità (dovuti a sbocchi di acqua calda o fredda). Le maree sono comprese nel modello applicando un livello d'acqua costante nello spazio e variabile nel tempo ai nodi lungo il limite verso il mare. Una serie temporale è stata ricavata dai livelli dell'acqua rilevati a Brindisi nell'ultima settimana del Febbraio 2003, interpolata prima di essere inclusa nel modello (come eseguita nel Riferimento 1). Questi approssimano una marea primaverile media, con escursione media di 0,3 m.

Il vento usato nelle diverse esecuzioni del modello è costante nello spazio ed è applicato ad ogni nodo dello strato superficiale, con un coefficiente di resistenza per specificare l'effetto del vento sul movimento dell'acqua.

Come indicato sopra, sono inoltre stati inclusi nelle esecuzioni del modello i flussi di acqua e calore in uscita e i flussi di prelievo. Va notato che le prese e gli sbocchi PE non sono stati simulati nelle esecuzioni del modello descritte nella presente relazione.

4.5 PARAMETRI DEL MODELLO

La tabella seguente fornisce una sintesi dei principali parametri impiegati:

Tabella 1 Parametri del modello

Intervalli di tempo	5 s
Durata dell'esecuzione	~ 3 maree (43 ore)
Numero di piani	8
Modello di turbolenza orizzontale	Viscosità del vortice costante
Coefficiente di viscosità orizzontale del vortice	$10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Coefficiente di diffusione orizzontale della temperatura	$10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Coefficiente di Coriolis	$9,47 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
Coefficiente d'attrito (lunghezza della rugosità)	0,01 m

4.6 RAPPRESENTAZIONE DEGLI SCARICHI SECONDO IL MODELLO

Gli scarichi di acqua calda sono tutti rappresentati all'interno del modello come sbocchi costieri. L'acqua calda viene introdotta lungo una fila orizzontale di nodi a ciascuno sbocco, con le velocità calcolate e applicate in modo da dare nel modello la corretta velocità di flusso e aumento di temperatura.

Le prese sono rappresentate in maniera simile, con le velocità applicate lungo una fila di nodi per trarre, dal modello, la corretta portata del flusso d'acqua.

Le opzioni per lo sbocco dell'acqua fredda sono rappresentate come segue:

- **Scarichi delle opzioni A e C** – sono rappresentati da due nodi computazionali adiacenti al fondo marino.
- **Scarichi delle opzioni B e D** – sono rappresentati da due nodi computazionali adiacenti al litorale.

5. Risultati

5.1 INTRODUZIONE

I quattro scenari provati sono indicati nella Tabella 2.

Tabella 2 Configurazioni di scarico provate

Prova	Scenario
1	Opzione A – in superficie sulla facciata ovest della bonifica
2	Opzione B – sul fondo a una certa distanza dalla facciata ovest della bonifica
3	Opzione C – in superficie sulla facciata nordovest della bonifica
4	Opzione D – sul fondo a una certa distanza dalla facciata nordovest della bonifica

5.2 TEMPERATURA IN ECCESSO ALLA PRESA BrLNG

Questa semplicissima misura dei risultati forniti dai diversi scenari serve a valutare il cambiamento della temperatura alla presa BrLNG come risultato dello scarico dell'acqua fredda. La Figura 7 mostra la serie temporale delle temperature alla presa BrLNG per ciascuna simulazione di 43 ore alla superficie del mare e sul fondo. Queste mostrano che ci vogliono circa 25 ore per ottenere lo stato pienamente sviluppato dello scarico freddo alla presa BrLNG, dopo di che tutte le opzioni forniscono una riduzione simile di temperatura di circa 0,5 °C. La Tabella 3 mostra la temperatura in eccesso alla superficie, sul fondo e mediata sulla verticale alla presa BrLNG sull'ultima marea di ciascuna simulazione. Va notato che le variazioni di temperatura sono presentate con due cifre decimali non tanto per una maggiore accuratezza della previsione quanto per indicare il senso delle variazioni.

Tabella 3 Temperature in eccesso modellate alla presa BrLNG (°C)

Prova	Scenario	Superficie	Fondo	Media
1	Opzione A	-0,40	-0,39	-0,39
2	Opzione B	-0,46	-0,46	-0,46
3	Opzione C	-0,49	-0,49	-0,47
4	Opzione D	-0,47	-0,47	-0,47

I risultati mostrano meno di 0,1 °C di differenza tra tutte le opzioni, indicando che (entro i limiti di accuratezza del modello) non vi è nulla che possa far preferire un'opzione ad un'altra dal punto di vista del ricircolo.

5.3 COMPORTAMENTO GENERALE DELLO SCARICO DELL'ACQUA FREDDA

La dispersione termica dello scarico dell'acqua fredda è ampiamente simile per ciascun caso in prova. Alcune differenze di minore importanza sono annotate sotto, ma tutte le distribuzioni dei cambiamenti di temperatura sono considerate sostanzialmente simili.

Opzione A – La distribuzione termica sul fondo e in superficie per questa configurazione è mostrata nella Figura 8. In superficie l'acqua fredda si diffonde principalmente a est lungo il fronte della bonifica e verso le isole. Sul fondo si prevede una diffusione dell'acqua fredda simile ma più estesa. Una lingua di acqua fredda si estende dal punto di scarico verso nordovest nell'acqua più profonda del porto entrando nell'area del canale di prelievo PE. Una certa quantità di acqua al fondo procede attorno al molo PE e verso la presa della Centrale Elettrica Brindisi Nord. La massima temperatura in eccesso (il valore negativo più alto) va da -4°C a -6°C nel canale di scarico e nei canali di prelievo PE.

Opzione B – Mostra uno schema simile di temperature in eccesso sul fondo e in superficie (vedere Figura 9). Sul fondo, l'area del pennacchio da -2 °C a -4 °C è leggermente più estesa lungo il fronte della bonifica BrLNG. Il pennacchio sul fondo si estende anche leggermente oltre verso sudovest e verso la presa della centrale elettrica Brindisi Nord.

Opzione C – Il pennacchio in superficie ha un aspetto simile a quello dell'Opzione B, ma il pennacchio sul fondo non si diffonde così lontano nelle acque più profonde. Comunque, le estremità del pennacchio della temperatura in eccesso sul fondo si estendono leggermente più in là verso nord. La Figura 10 mostra la distribuzione termica di questa configurazione sul fondo e in superficie.

Opzione D – Sia in superficie che sul fondo fornisce una diffusione del pennacchio molto simile a quella dell'Opzione C, come mostrato dalla Figura 11.

6. Conclusioni e raccomandazioni

I risultati del modello indicano che in tutte le opzioni può verificarsi un certo ricircolo di acqua fredda alla presa BrLNG, ma per tutte le condizioni provate la temperatura di ricircolo è dell'ordine di $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Un ricircolo di questa entità è da considerarsi relativamente modesto, data l'escursione termica del sito e la natura prudente della valutazione. Comunque, la HR Wallingford non può commentarne l'impatto sulle condizioni operative dell'impianto.

Chiaramente lo studio ha esaminato solamente una gamma limitata di condizioni ed è possibile che condizioni diverse possano dar luogo ad un ricircolo maggiore. Ciononostante, si è tentato di identificare le condizioni di un peggiore caso in termini di ricircolo. In particolare, le simulazioni sono state eseguite con la presa chiusa della Polimeri Europa (PE). È probabile che, quando è in funzione, questa presa aspiri acqua dalla presa BrLNG, riducendo quindi il rischio di ricircolo.

Nel complesso, si può concludere che l'opzione C (scarico in superficie sulla facciata nordovest della bonifica) è preferibile in quanto:

- La maggiore lunghezza del canale fino al punto di scarico (non simulato) consente una maggiore evaporazione per riscaldamento e maggiori possibilità che prima dello scarico vengano liberate delle bolle d'aria (riducendo la visibilità dello scarico nel porto).
- Lascia libero lo spazio tra la bonifica BrLNG e il canale di prelievo PE consentendone quindi l'uso a scopi di manutenzione e/o per attività/sviluppi futuri da parte di altri.

7. Riferimenti

1. HR Wallingford, 2003. Brindisi LNG Marine Investigations Field survey. Report EX4782.
2. FUGRO, 2003. Final Report: Brindisi LNG Project. Bathymetric and Seabed Survey.
3. HR Wallingford 2003 Brindisi Extreme Winds and Wind Persistence. Report EX4856.

Figure

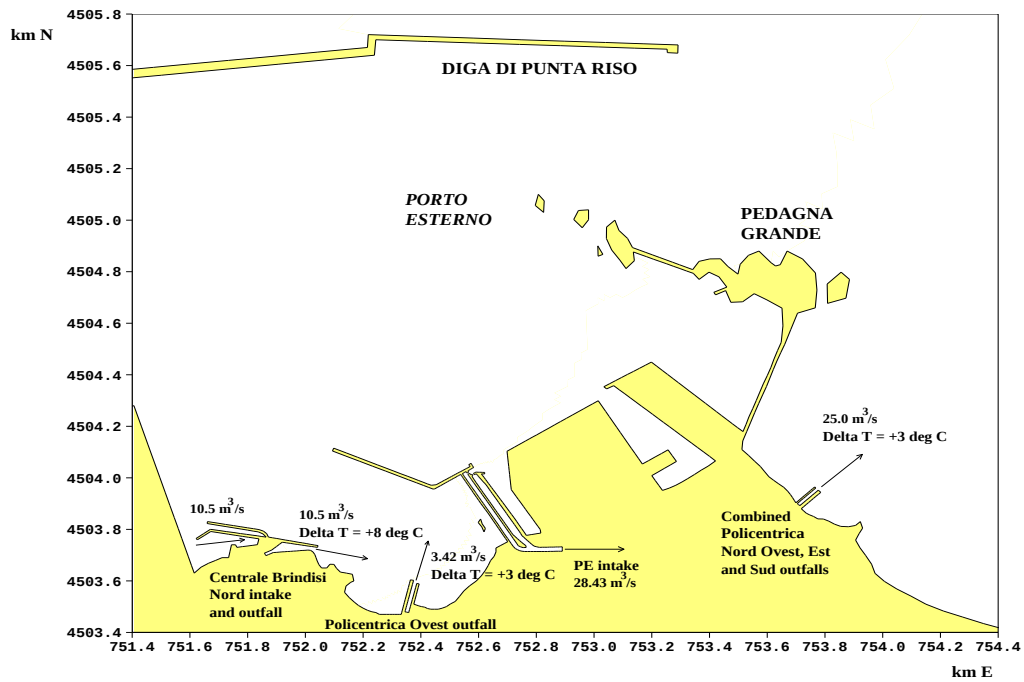


Figura 1 Porto Esterno di Brindisi con indicazione delle prese e degli sbocchi esistenti

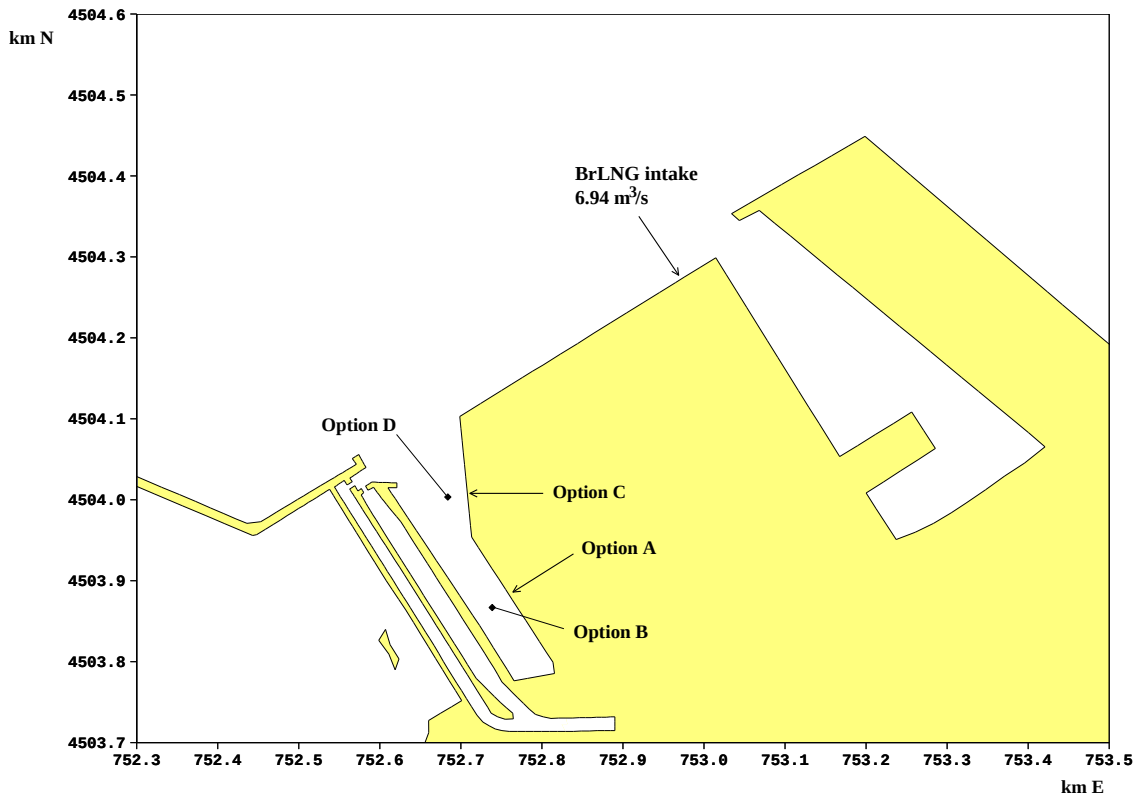


Figura 2 Porto Esterno di Brindisi con indicazione della posizione proposta per la presa BrLNG e le opzioni per gli sbocchi

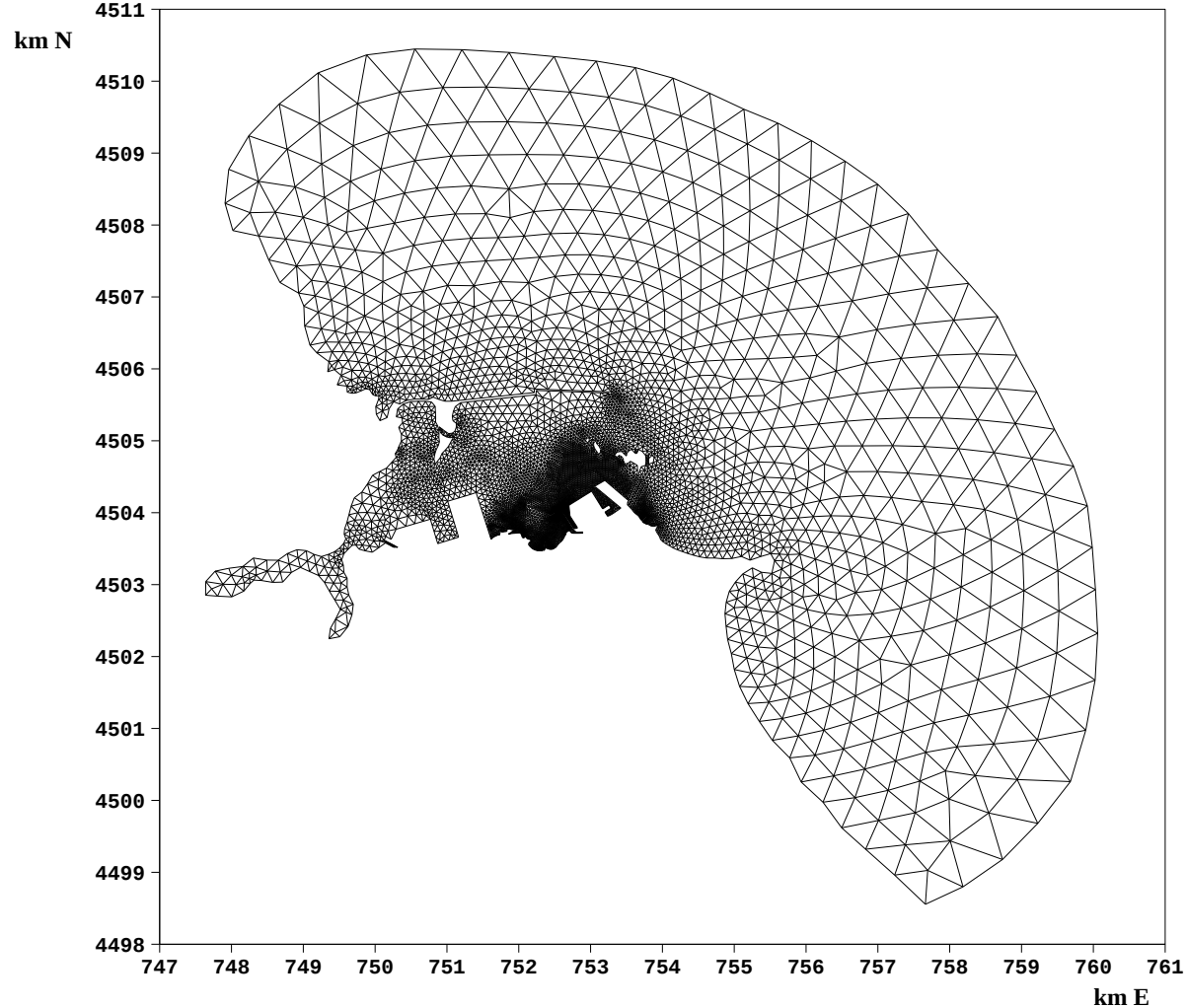


Figura 3 Maglia e dominio del modello a elementi finiti TELEMAC-3D

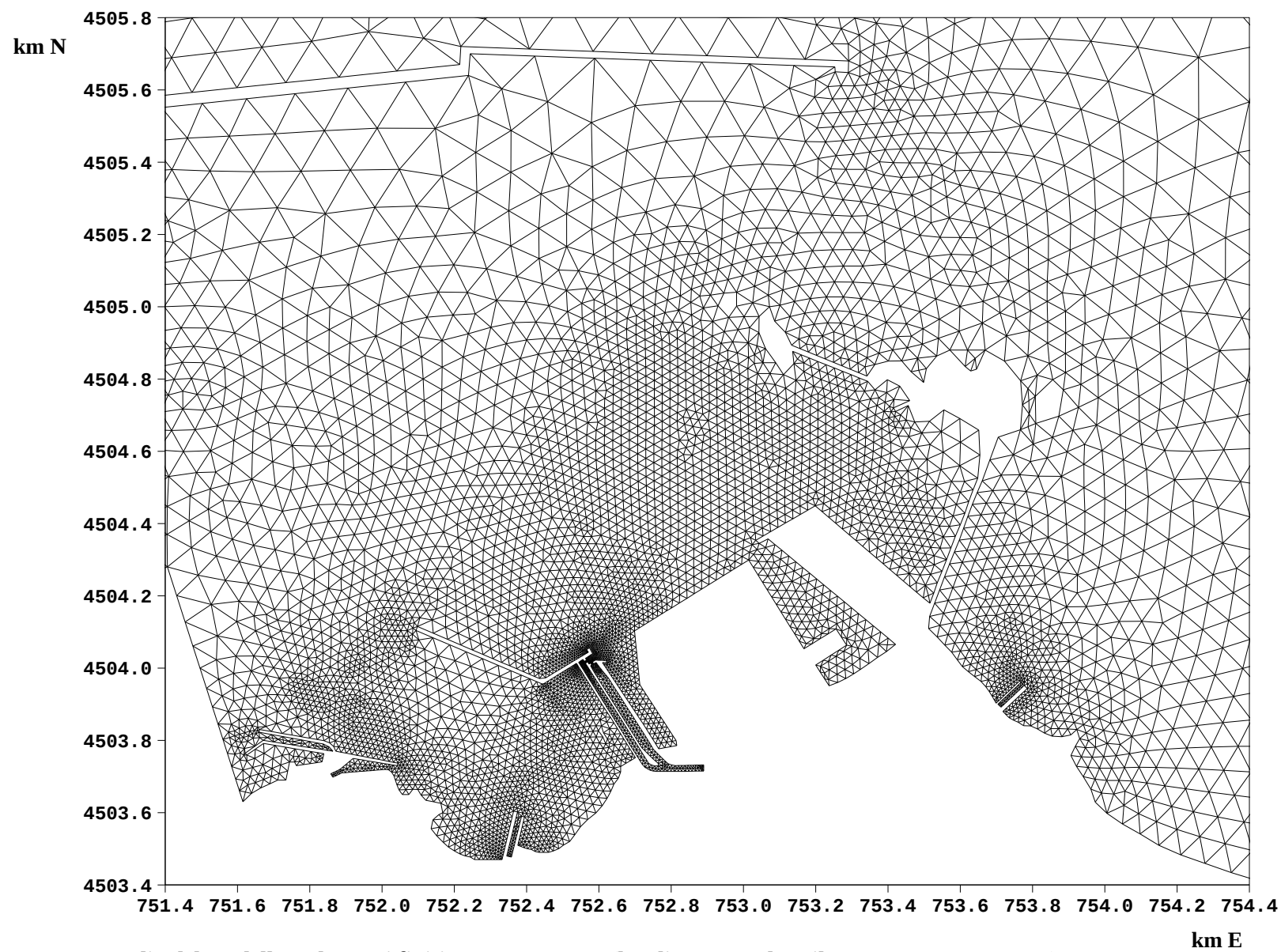


Figura 4 Maglia del modello a elementi finiti TELEMAC-3D (localizzata per lo sviluppo BrLNG proposto)

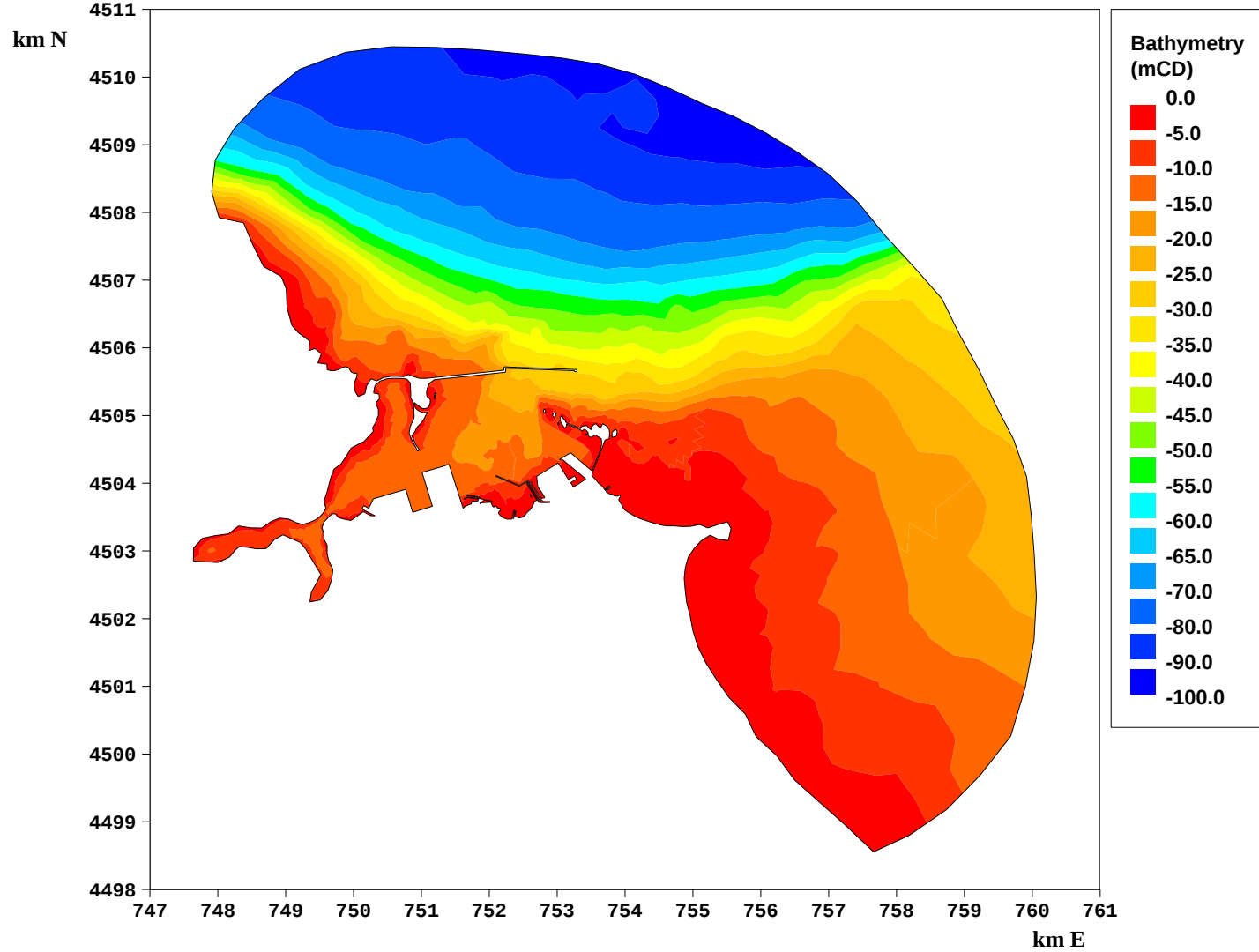


Figura 5 Batimetria del modello a elementi finiti TELEMAC-3D

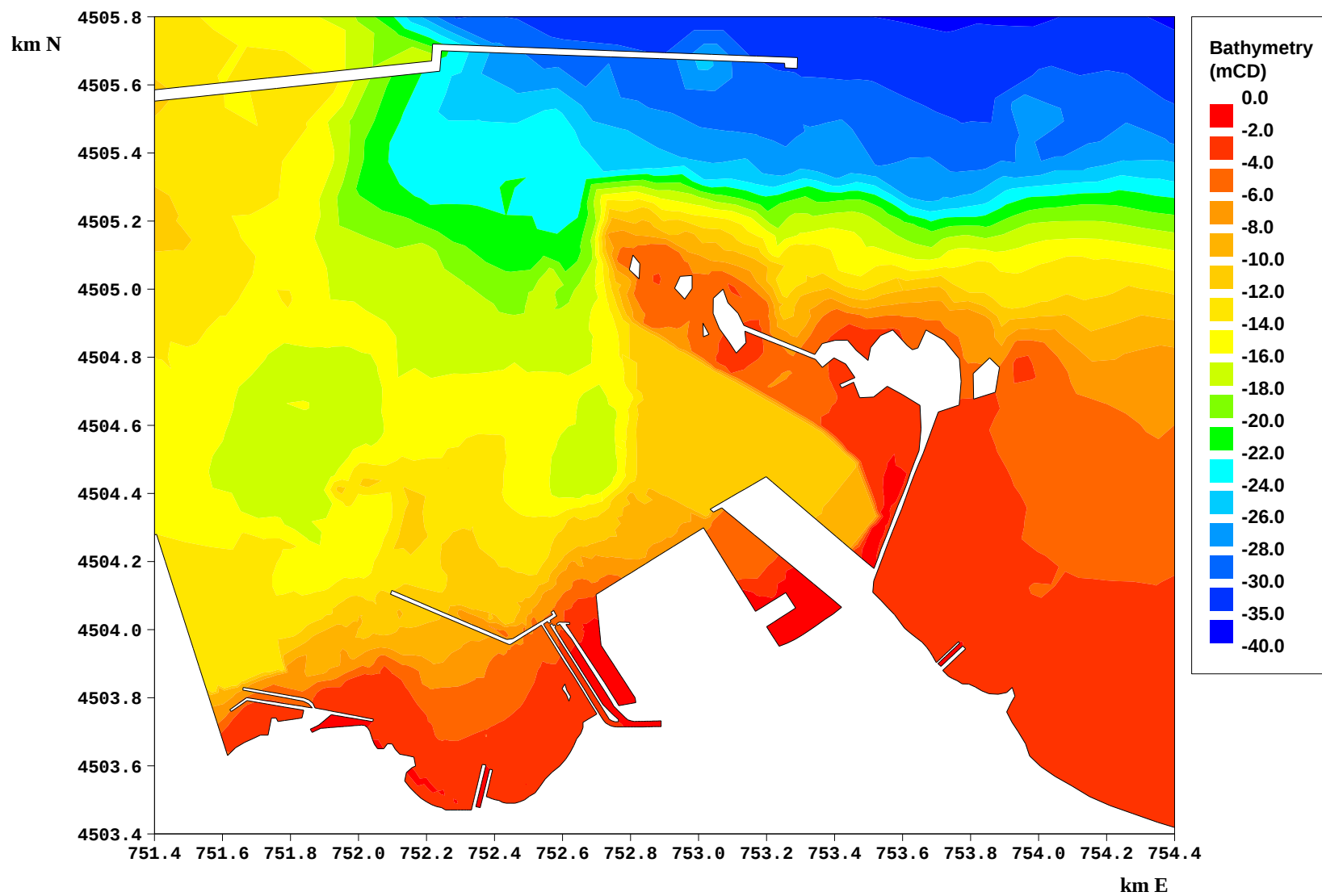


Figura 6 Batimetria del modello a elementi finiti TELEMAC-3D (localizzata per lo sviluppo BrLNG proposto)

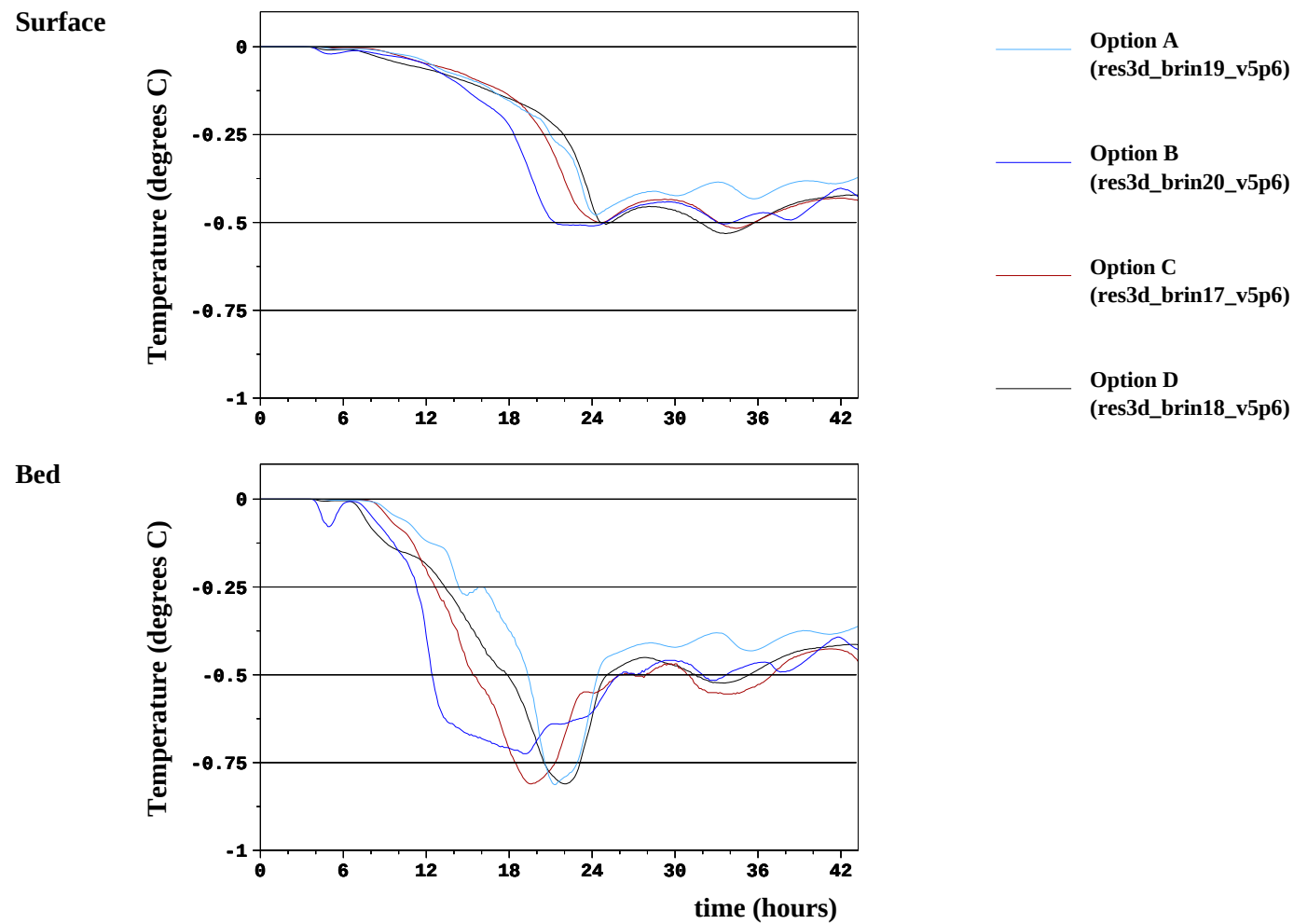


Figura 7 Serie temporale delle temperature in eccesso alla presa BrLNG

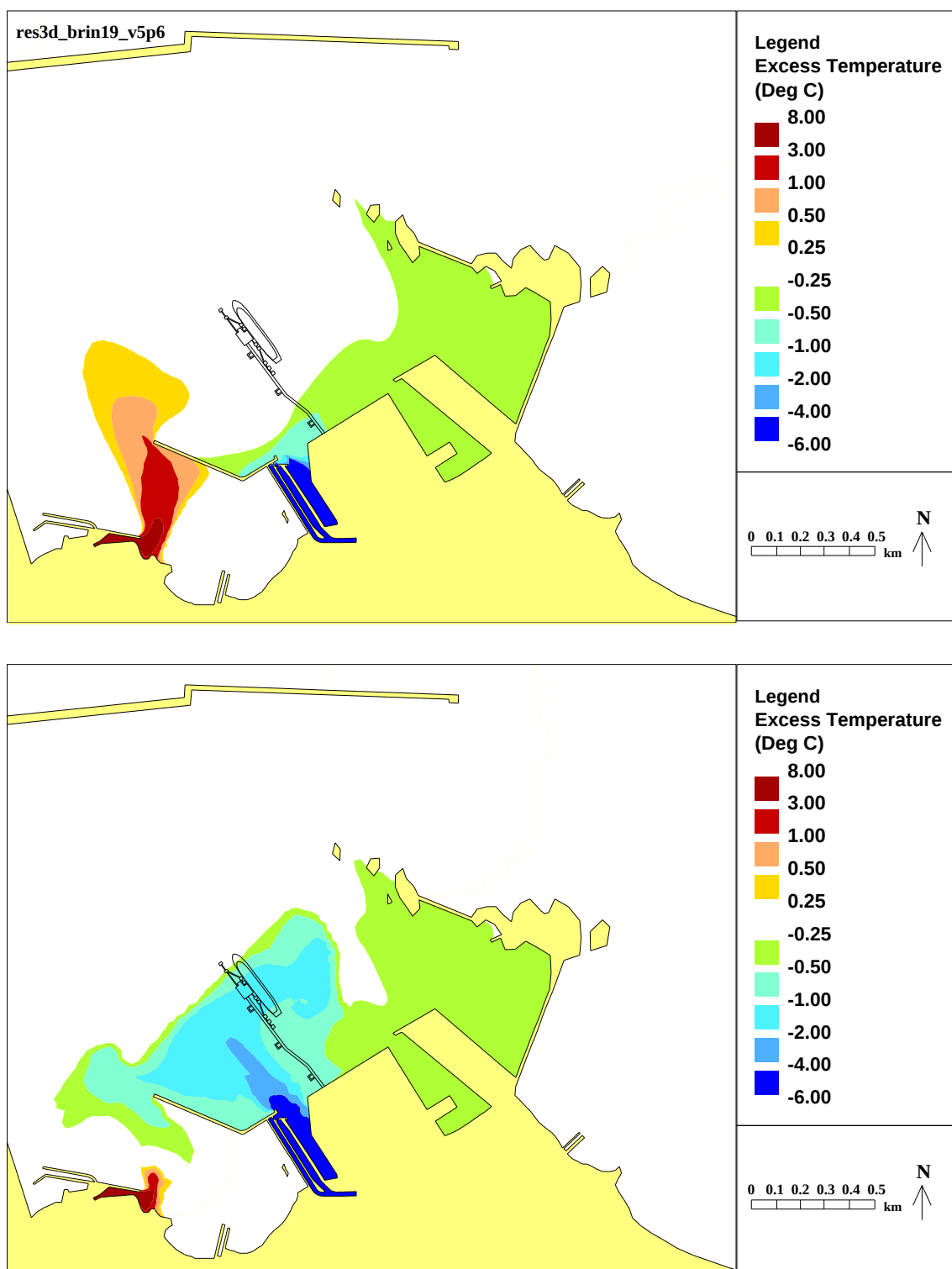


Figura 8 Prova 1, Campi termici modellati (superficie e fondo) per l'Opzione A

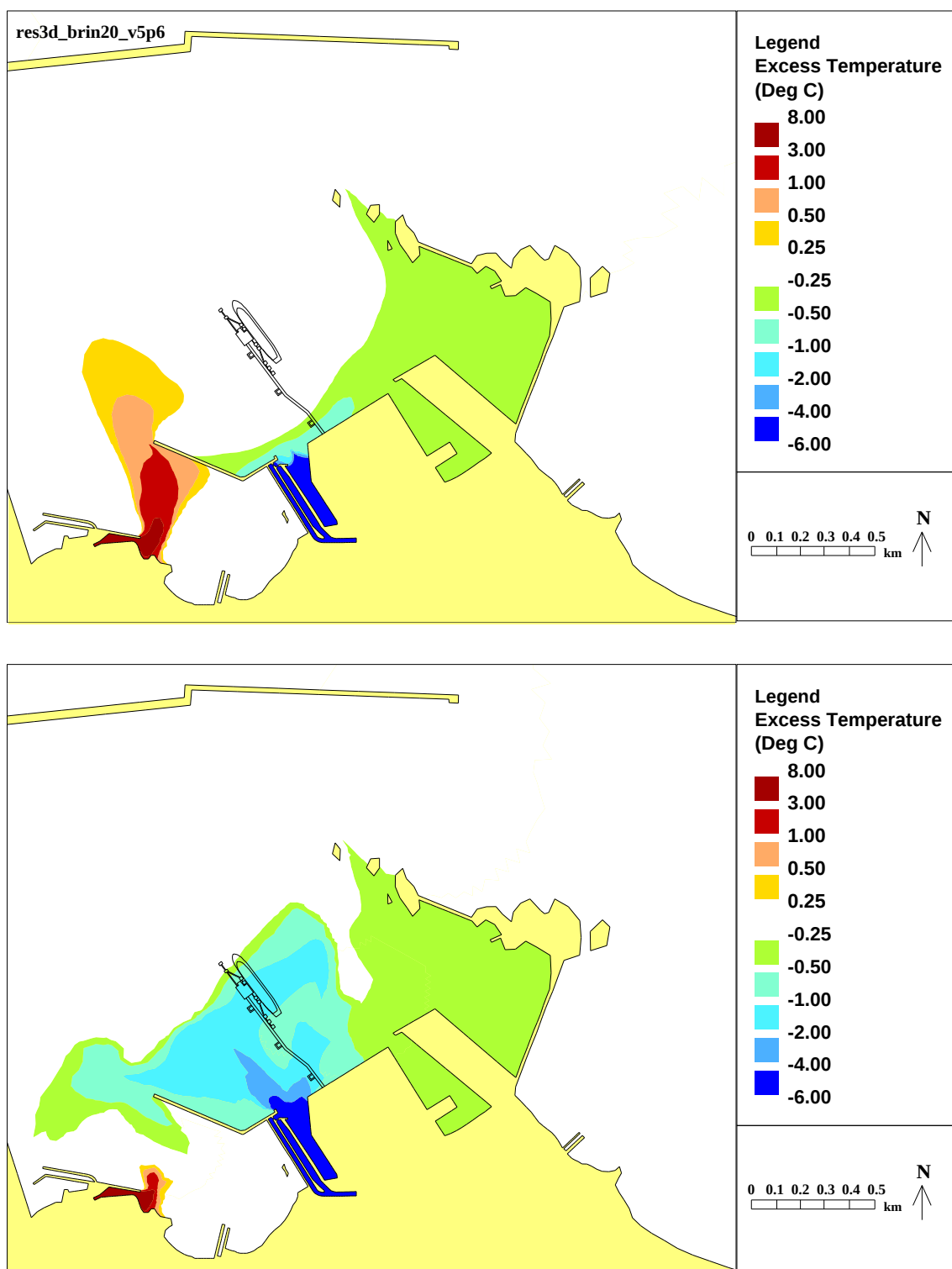


Figura 9 Prova 2, Campi termici modellati (superficie e fondo) per l'Opzione B

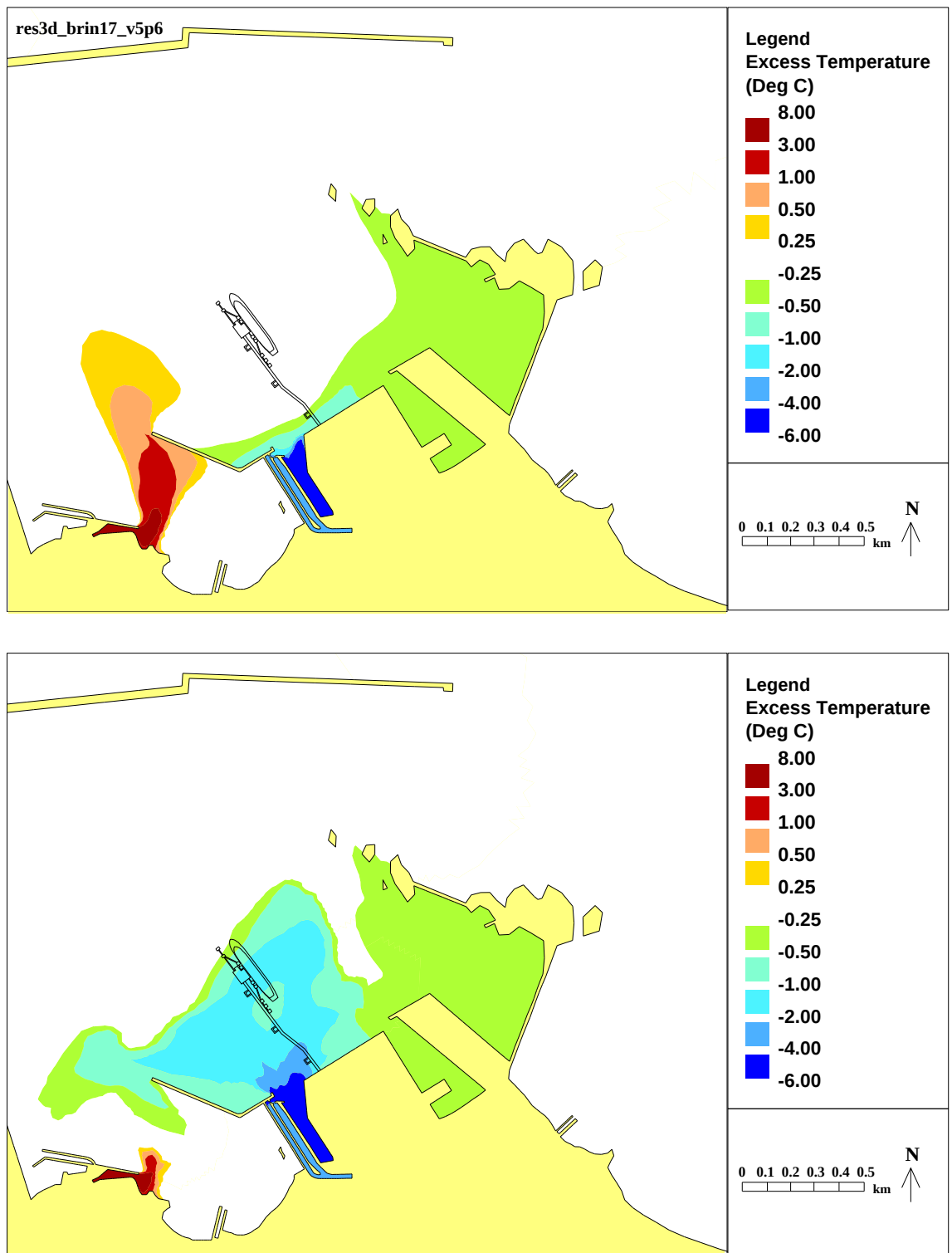


Figura 10 Prova 3, Campi termici modellati (superficie e fondo) per l'Opzione C

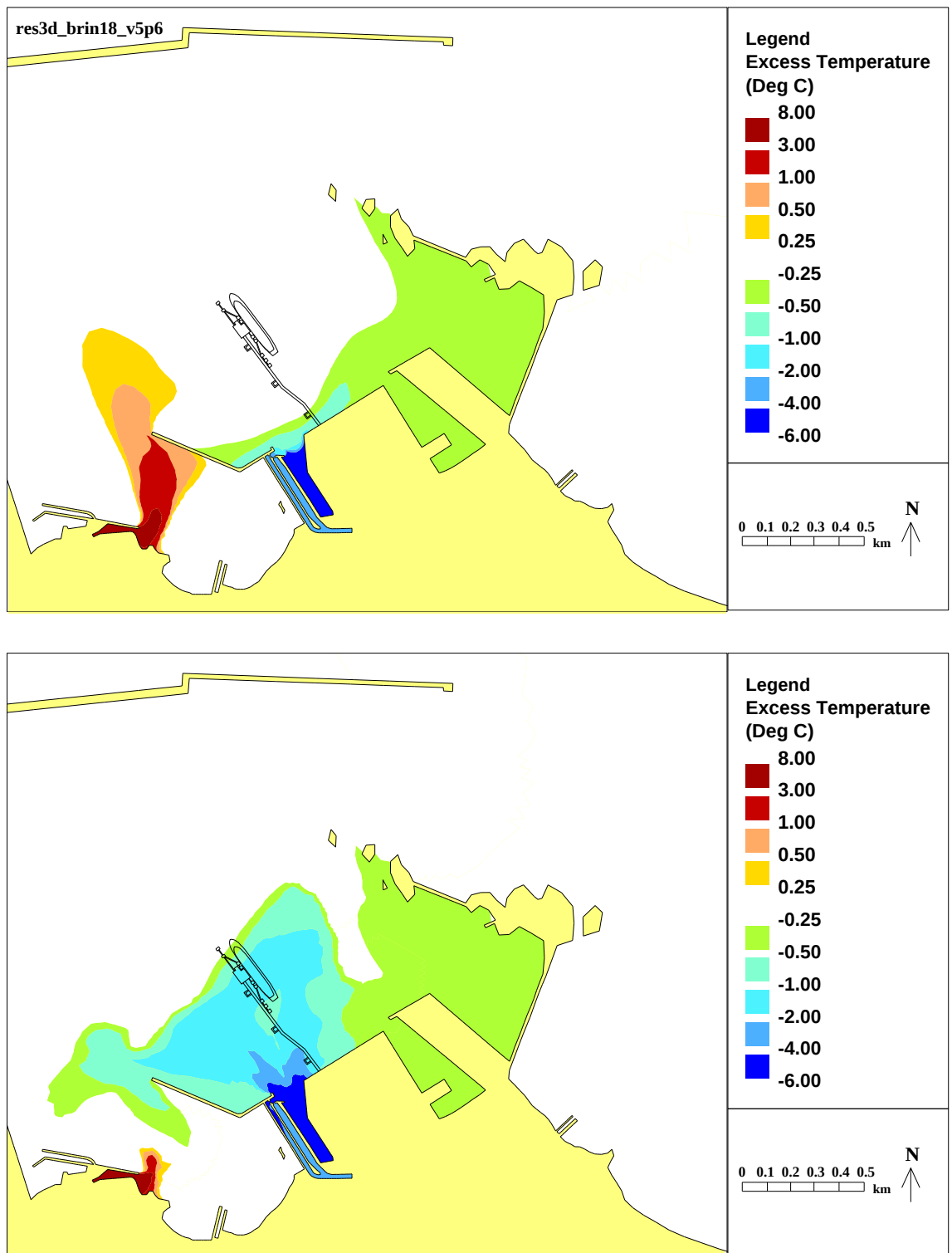


Figura 11 Prova 4, Campi termici modellati (superficie e fondo) per l'Opzione D

Appendice

Appendice 1 Il Modello Numerico TELEMACH-3D

In questa Appendice si descrive il programma TELEMACH-3D usato nella soluzione delle equazioni del momento e di trasporto.

Le equazioni 3D per le acque basse sono date come:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + 2\omega v \sin \phi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - 2\omega u \sin \phi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$p = \rho_0 g (S - z) + \rho_0 g \int_z^S \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{HT} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{HT} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{zT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \quad (5)$$

dove T può essere la temperatura o la salinità o qualsiasi altra variabile.

Operator-Splitting

La procedura di Operator-Splitting si basa sul principio che le parti iperboliche e paraboliche delle equazioni di Navier-Stokes devono essere trattate separatamente per poter usare metodi numerici opportunamente adattati a ciascuna parte. Ciò comporta che la parte iperbolica, vale a dire i termini di avvezione, è trattata usando il metodo delle caratteristiche, e la parte parabolica, vale a dire i termini di diffusione, usando elementi finiti.

Data la soluzione a $t=t^n$, calcoliamo la soluzione a $t^{n+1}=t^n+\Delta t$. Il metodo numerico risolve le equazioni tramite la decomposizione in passi sequenziali (cioè si scindono gli operatori) e ciascun operatore numerico è trattato con il metodo appropriato. La soluzione comporta tre passi: avvezione, diffusione, e il passo superficie libera -continuità-pressione. Le derivate temporali sono quindi scritte come segue:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f^{n+1} - f^{\text{diff}}}{\Delta t} + \frac{f^{\text{diff}} - f^{\text{adv}}}{\Delta t} + \frac{f^{\text{adv}} - f^n}{\Delta t} \quad (6)$$

per cui f può essere u , v o T e

f^{n+1}	soluzione a t^{n+1}
f^{diff}	risultato del passo di diffusione
f^{adv}	risultato del passo di avvezione
f^n	soluzione a t^n

Il Passo di Avvezione: Nel passo di avvezione, l'equazione

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

viene risolta usando il metodo delle caratteristiche descritto nella sezione seguente.

Il Passo di Diffusione: Nel passo di diffusione, l'equazione

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (8)$$

viene trattata usando il metodo a elementi finiti con funzioni di forma lineari su elementi prismatici. I risultati del passo di avvezione generano le condizioni iniziali.

Per il trasporto di una variabile T il calcolo comporta solo questi due passi. L'idrodinamica richiede inoltre

Il Passo Superficie Libera -Continuità-Pressione: nel quale sono risolte le equazioni

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (10)$$

$$p = \rho_0 g(S - z) + \rho_0 g \int_z^S \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

Il movimento della superficie libera viene calcolato usando il programma a elementi finiti TELEMAC-2D (Galland et al., 1991) che risolve le equazioni integrate sulla verticale. In questa particolare applicazione non si richiede il pieno potenziale del programma, in quanto i termini diffusivi e avvevativi non si trovano in questa forma delle equazioni integrate.

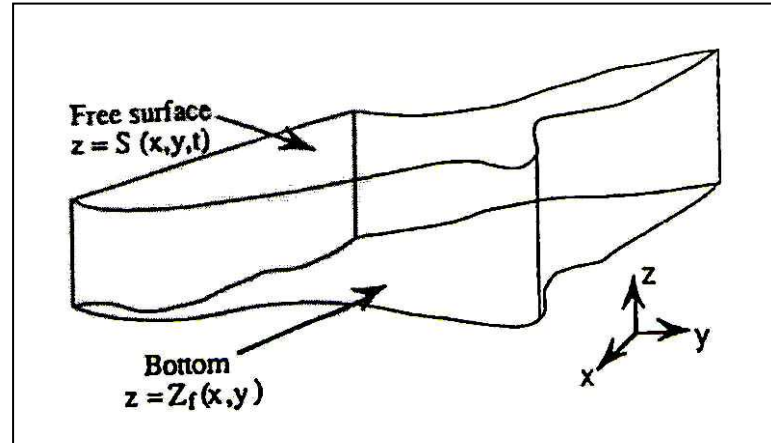


Figura 1 Dominio del Calcolo

Una volta che si conoscano le velocità orizzontali, la pressione e la superficie libera, le velocità verticali possono essere calcolate risolvendo l'equazione di continuità.

Il principale vantaggio di questo metodo è la stabilità. Il metodo intero è stabile se tutti i passi frazionari sono stabili. Lo svantaggio maggiore è che l'accuratezza temporale del metodo è solo del primo ordine, anche se in ciascun passo frazionario vengono applicati metodi numerici del secondo ordine come lo schema Crank-Nicholson. Questo comportamento è associato alla non-commutatività dei passi frazionari diversi, Malcherek, 1995.

Discretizzazione spaziale e trasformazione σ

Il dominio da studiare è limitato da un fondo definito come $z = Z_f(x, y)$, da una superficie libera $z = S(x, y)$ e sui lati da un cilindro verticale.

Il dominio spaziale è discretizzato usando elementi prismatici finiti con lati quadrangolari verticali. L'interpolazione è tale che è lineare quando ristretta a triangoli prismatici o quadrangoli. Infatti il calcolo non è eseguito tanto sui prismi reali quanto su un prisma di riferimento di forma molto più semplice. Notare che dal momento che i prismi di TELEMAT-3D hanno lati verticali quadrangolari la mappatura è più semplice se i prismi fossero veramente tridimensionali. Le funzioni base sui prismi di riferimento isoparametrici sono espresse come segue (Dhatt e Touzot, 1983):

$$\psi_1 = (1 - \alpha - \beta) \left(\frac{1 - \gamma}{2} \right) \quad (13)$$

$$\psi_2 = \alpha \left(\frac{1 - \gamma}{2} \right) \quad (14)$$

$$\psi_3 = \beta \left(\frac{1 - \gamma}{2} \right) \quad (15)$$

$$\psi_4 = (1 - \alpha - \beta) \left(\frac{1 + \gamma}{2} \right) \quad (16)$$

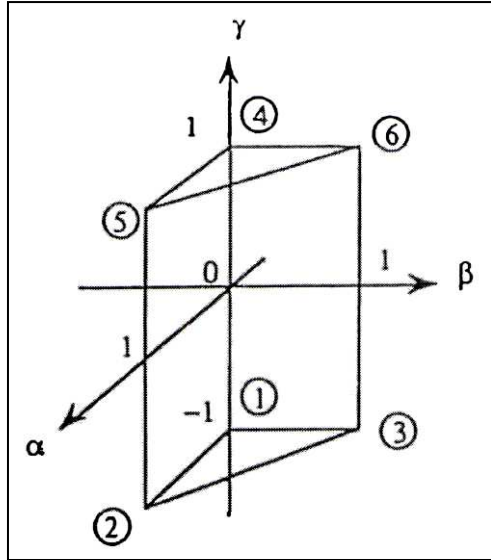


Figura 2 Prisma di riferimento (i numeri circolettati rappresentano la numerazione locale)

$$\psi_5 = \alpha \left(\frac{1+\gamma}{2} \right) \quad (17)$$

$$\psi_6 = \beta \left(\frac{1+\gamma}{2} \right) \quad (18)$$

Poiché si usano prismi con lati verticali quadrangolari, la proiezione orizzontale 2D della maglia produce dei triangoli, uno dei tipi di elementi finiti usati da TELEMAT-2D. Notare che, dal momento che TELEMAT-2D può usare anche quadrangoli, si sarebbe potuto impiegare come elemento finito per TELEMAT-3D un mattone. È tuttavia più facile trasformare i domini complicati in una maglia con i triangoli che con i quadrangoli.

La maglia 3D viene generata riproducendo la maglia orizzontale 2D lungo la verticale. Quindi, per ogni punto M (x, y) della maglia 2D, si definiscono diversi punti N (x, y, z) per i quali:

$$z = Z_f(x, y) + \Theta(S(x, y, t) - Z_f(x, y)) \quad \text{with} \quad 0 \leq \Theta \leq 1 \quad (19)$$

La scelta dei valori di Θ è fatta dall'utente, senza alcun requisito speciale tranne che il fondo corrisponde a $\Theta = 0$ e la superficie libera a $\Theta = 1$ (Figura 3).

A causa della superficie libera, la maglia 3D e quindi la coordinata z di qualsiasi punto della maglia dipende dal tempo. È comunque possibile lavorare su una maglia non dipendente dal tempo usando un cambiamento di variabili. Un metodo classico è quello di passare da z a z^* secondo la trasformazione σ :

$$z^* = \bar{S} \frac{z - Z_f(x, y)}{S(x, y, t) - Z_f(x, y)} \quad (20)$$

dove $\bar{S}$ è una costante positiva data. La maglia corrispondente sarà chiamata maglia σ , e consisterà dei nodi $N^*(x, y, z^* = \Theta \bar{S})$.

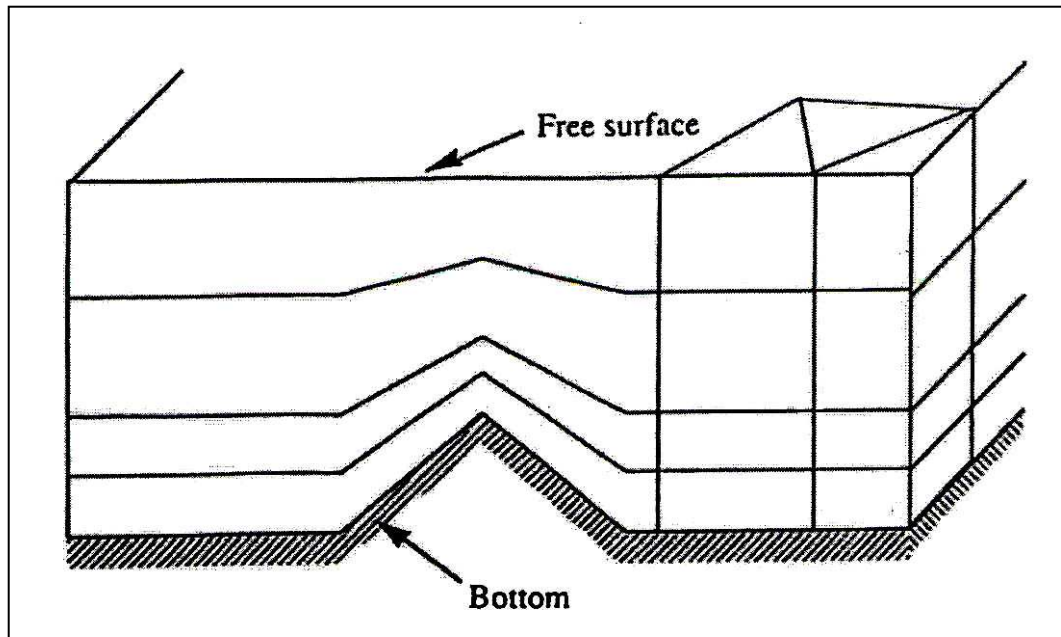


Figura 3 Vista schematica di una maglia consistente di 5 piani ($\Theta = 0, 1/6, 1/3, 2/3, 1$)

Il movimento della superficie libera

Dal momento che si presume una pressione idrostatica, la velocità verticale w è necessaria solo per il passo di avvezione. Infatti, è w^* ad essere necessario. Conviene quindi calcolare w^* direttamente risolvendo l'equazione di continuità per la maglia σ .

Espressa nella serie di coordinate (x, y, z^*, t) l'equazione di continuità è:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)_{x,y} + \left(\frac{\partial(hu)}{\partial x}\right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)_{x,z^*,t} + h\left(\frac{\partial w^*}{\partial z^*}\right)_{x,y,t} = 0 \quad (21)$$

La velocità verticale, w^* , è nota sul fondo e in libera superficie dove è o uguale a zero nel caso di un limite impermeabile o a qualsiasi valore stabilito, nel caso di un afflusso o efflusso al fondo o alla superficie libera. Il secondo caso è quello che si verifica, per esempio, nello studio dei pennacchi termici.

L'equazione [21] integrata lungo la verticale tra 0 e z^* e tra z^* e $\bar{S}$ dà:

$$z^* \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)_{x,y} + \int_0^{z^*} \left[\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x}\right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)_{x,z^*,t} \right] dz^* + h[w^*(z^*) - w^*(0)] = 0 \quad (22)$$

e

$$(z^* - \bar{S}) \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)_{x,y} + \int_{\bar{S}}^{z^*} \left[\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x}\right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)_{x,z^*,t} \right] dz^* + h[w^*(z^*) - w^*(\bar{S})] = 0 \quad (23)$$

Occorre ricordare che $w^*(0)$ e $w^*(\bar{S})$ sono noti. Combinando 22 e 23 otteniamo l'equazione 24 che soddisfa entrambe le condizioni limite a $z^* = 0$ e $z^* = \bar{S}$:

$$\begin{aligned} h\bar{S}w^*(z^*) = & h(\bar{S} - z^*)w^*(0) + hz^*w^*(\bar{S}) \\ & + z^* \int_0^{\bar{S}} \left[\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x} \right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y} \right)_{x,z^*,t} \right] dz^* \\ & - \bar{S} \int_0^{z^*} \left[\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x} \right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y} \right)_{x,z^*,t} \right] dz^* \end{aligned} \quad (24)$$

Va anche notato che, differentemente dalle equazioni 22 o 23, non è necessaria alcuna discretizzazione temporale per risolvere 24. A parte il vantaggio di simulare correttamente il movimento della superficie libera, la maglia σ consente calcoli rapidi e semplici grazie alla sua regolarità.

Il passo di avvezione

Nel passo di avvezione è necessario risolvere la seguente equazione:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (25)$$

Sulla curva caratteristica definita da

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v \quad \frac{\partial z}{\partial t} = w \quad (26)$$

l'equazione di avvezione può essere scritta come

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (27)$$

Il problema si risolve con una formulazione inversa (Benque et al. 1980), vale a dire che la curva caratteristica inizia dal nodo $(x_i^{n+1}, y_i^{n+1}, z_i^{n+1}, t^{n+1})$ al passo temporale da calcolarsi. A ritroso nel tempo incrocia il livello temporale t^n al punto base $(x_i^b, y_i^b, z_i^b, t^n)$. Il punto base può quindi essere calcolato integrando le equazioni differenziali delle caratteristiche. Usando la regola trapezoidale:

$$x_i^b = x_i - \frac{1}{2}(u_i^b + u_i^{n+1})\Delta t \quad (28)$$

$$y_i^b = y_i - \frac{1}{2}(v_i^b + v_i^{n+1})\Delta t \quad (29)$$

$$z_i^b = z_i - \frac{1}{2}(w_i^b + w_i^{n+1})\Delta t \quad (30)$$

Sfortunatamente le velocità al punto base e, quindi, al nuovo passo temporale non sono note ed è necessario applicare una procedura iterativa.

TELEMAC-3D usa uno schema predittore-correttore. Nel predittore i punti base delle caratteristiche vengono calcolati usando le velocità u_i^n . Dopo che tutti i passi frazionari sono stati eseguiti, il correttore calcola i punti base delle caratteristiche da:

$$x_i^b = x_i - ((1-\theta)u_i^n + \theta u_i^{n+1})\Delta t \quad (31)$$

$$y_i^b = y_i - ((1-\theta)v_i^n + \theta v_i^{n+1})\Delta t \quad (32)$$

$$z_i^b = z_i - ((1-\theta)w_i^n + \theta w_i^{n+1})\Delta t \quad (33)$$

Nella maggior parte dei casi il punto base della curva caratteristica non intersecherà la maglia in corrispondenza di un nodo. Il valore alla base della caratteristica deve quindi essere interpolato dai nodi circostanti usando uno schema di interpolazione o un'approssimazione a elementi finiti (Li e Chen, 1989).

Quando il valore f_i^b alla base della curva caratteristica è noto, il valore al nuovo passo temporale t^{n+1} è dato come:

$$f_i^{n+1} = f_i^b \quad (34)$$

TELEMAC-3D risolve l'equazione di avvezione come la maglia trasformata σ . Ciascuna variabile f sulla maglia reale è data sulla maglia σ come:

$$f(x, y, z, t) = f(x, y, z^*(x, y, z, t), t) \quad (35)$$

Quindi, le derivate del primo ordine si trasformano secondo:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial t} \quad (36)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial x} \quad (37)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial y} \quad (38)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial z}, \quad (39)$$

ove le derivate al membro sinistro delle equazioni sono nella maglia reale, mentre quelle al membro destro sono nella maglia trasformata σ . L'equazione di avvezione sulla maglia trasformata σ è quindi data come:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + \left(\frac{\partial z^*}{\partial t} + u \frac{\partial z^*}{\partial x} + v \frac{\partial z^*}{\partial y} + w \frac{\partial z^*}{\partial z} \right) \frac{\partial f}{\partial z^*} = 0 \quad (40)$$

impostando

$$w^* = \frac{dz^*}{dt} = \frac{\partial z^*}{\partial t} + u \frac{\partial z^*}{\partial x} + v \frac{\partial z^*}{\partial y} + w \frac{\partial z^*}{\partial z} \quad (41)$$

questa equazione si riduce a

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w^* \frac{\partial f}{\partial z^*} = 0 \quad (42)$$

Il passo di diffusione

Nel passo di diffusione, l'equazione

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial f}{\partial z} \right) + Q_f \quad (43)$$

si risolve usando i risultati del passo di avvezione come condizione iniziale. La derivata temporale è approssimata usando uno schema Crank-Nicholson:

$$\begin{aligned} \frac{f^{\text{diff}} - f^{\text{adv}}}{\Delta t} = & \theta \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial f^{n+1}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial f^{n+1}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial f^{n+1}}{\partial z} \right) \right) \\ & + (1-\theta) \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial f^n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial f^n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial f^n}{\partial z} \right) \right) + Q_f \end{aligned} \quad (44)$$

Il passo di diffusione era stato originariamente risolto sulla maglia reale usando un approccio Galerkin standard con la semplificazione che i prismi senza triangoli orizzontali sono rimpiazzati da prismi dello stesso volume con triangoli orizzontali. Sfortunatamente questa semplificazione conduce a risultanti inaccettabilmente scadenti, in presenza di ampi gradienti sul fondo.

Quindi, il passo di diffusione viene ora risolto nella maglia σ ove la trasformazione alla maglia σ è data come:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} v_x \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial z^*}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z^*} v_x \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} v_y \left(\frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial y} \right) + \frac{\partial z^*}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z^*} v_y \left(\frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial z^*}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(v_z \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (45)$$

La procedura ed integrazione per parti Galerkin standard conduce alla formulazione ora impiegata in TELEMAT-3D.

Il passo superficie libera-continuità-pressione

Arrivati a questo punto abbiamo trattato gli operatori di avvezione e diffusione. Tramite l'integrazione delle equazioni del momento e di continuità lungo la verticale (tra il fondo e la superficie libera) otteniamo le classiche equazioni delle acque basse senza i termini avvevativi e diffusivi. Ricordiamo che questo è possibile perché presumiamo che la pressione sia idrostatica. Questo conduce a:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial y} + R = 0 \quad (46)$$

$$\frac{\bar{u}_{n+1} - \bar{u}_{diff}}{\Delta t} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g \frac{\partial Z_f}{\partial x} = F_x \quad (47)$$

$$\frac{\bar{v}_{n+1} - \bar{v}_{diff}}{\Delta t} + g \frac{\partial h}{\partial y} = -g \frac{\partial Z_f}{\partial y} + F_y \quad (48)$$

con

$h = S - Z_f$	altezza dell'acqua
R	termine sorgente, dovuto a qualsiasi afflusso o efflusso di acqua al fondo o alla superficie libera
$\bar{u}_{n+1}$	velocità media lungo x a t_{n+1}
$\bar{v}_{n+1}$	velocità media lungo y a t_{n+1}
$\bar{u}_{diff}$	velocità u_{diff} (risultato della diffusione) mediata lungo la verticale
$\bar{v}_{diff}$	velocità v_{diff} (risultato della diffusione) mediata lungo la verticale
F_x, F_y	termini di galleggiamento

Le velocità medie sono calcolate secondo la formula:

$$\bar{u} = \frac{1}{(S - Z_f)} \int_{Z_f}^S u dz \quad (49)$$

Il termine sorgente R vale:

$$R = \frac{h}{S} [w^*(\bar{s}) - w^*(0)] \quad (50)$$

I termini di galleggiamento sono dati da:

$$F_x = \frac{g}{S - Z_f} \int_{Z_f}^S \frac{\partial}{\partial x} \int_z^S \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz dz' \quad (51)$$

$$F_y = \frac{g}{S - Z_f} \int_{Z_f}^S \frac{\partial}{\partial y} \int_z^S \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz dz' \quad (52)$$

È ben noto che il calcolo dei termini di galleggiamento sulle maglie strutturate σ deve essere eseguito con grande attenzione per evitare correnti di densità numeriche (Janjic, 1977, Mesinger, 1982, Arakawa e Suarez, 1983, Haney, 1991). L'integrazione verticale del termine di pressione usando la regola trapezoidale conduce a:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= g \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{z_f} \Delta \rho dz \\ &= g \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^{N-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \Delta \rho dz \\ &= g \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{1}{2} (z_{i+1} - z_i) (\Delta \rho_{i+1} + \Delta \rho_i) \right] \end{aligned}$$

L'applicazione della regola del prodotto dà il seguente termine di pressione:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{g}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{\partial}{\partial x} (z_{i+1} - z_i) (\Delta \rho_{i+1} + \Delta \rho_i) + (z_{i+1} - z_i) \frac{\partial}{\partial x} (\Delta \rho_{i+1} + \Delta \rho_i) \right] \quad (53)$$

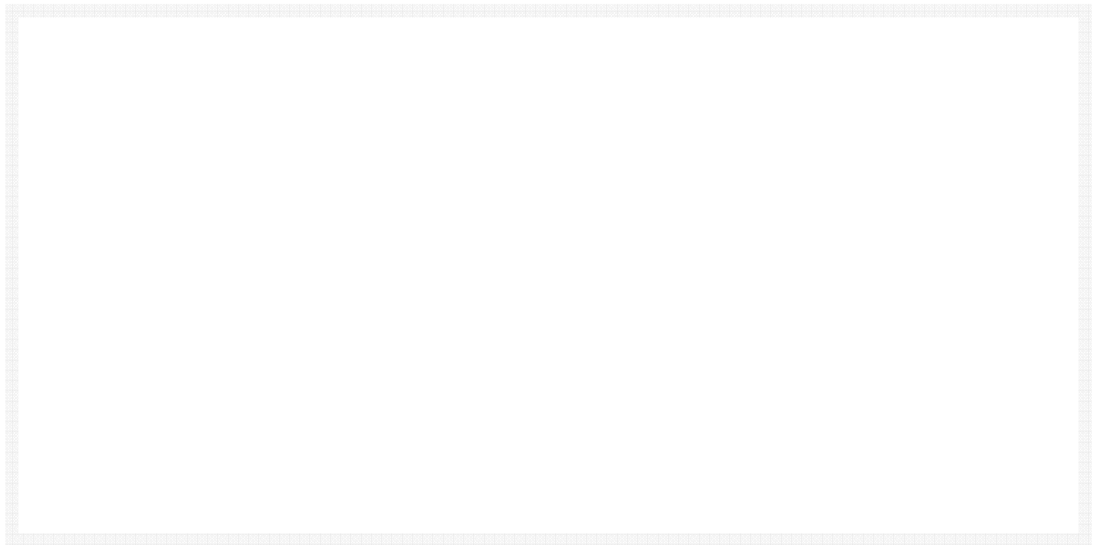
che deve essere mediato lungo la verticale.

Le equazioni integrate delle acque basse sono risolte da TELEMAC-2D usando metodi a elementi finiti. Come menzionato sopra, uno degli elementi finiti disponibili è il triangolo. Questo programma è stato scritto sfruttando anche metodi del tipo Elemento per Elemento (vale a dire: nessun montaggio di matrici, prodotti vettoriali di una matrice vettorizzabile...). Il suo costo computazionale è tra 0,05 e 0.1 s per passo temporale per mille punti su un computer vettoriale. Viene attualmente usato in applicazioni di ingegneria oceanografica e fluviale (Hervouet, 1991 e 1992, Labadie, 1991). Va notato che non abbiamo bisogno di usare tutte le potenzialità di TELEMAC-2D in quanto nelle equazioni integrate non vi sono termini diffusivi e avvevativi.

TELEMAC-2D produce la superficie libera S a t_{n+1} , il che consente di calcolare la pressione p_{n+1} e i componenti orizzontali della velocità u_{n+1} . w_{n+1} viene quindi trovato risolvendo l'equazione di continuità.

Brindisi LNG

Discharge location assessment



Report EX 5671
Release 1.0
December 2007

Document Information

Project	Brindisi LNG
Report title	Discharge location assessment
Client	BrLNG
Client Representative	Alex Forrest
Project No.	EBR4228
Report No.	EX 5671
Project Manager	Chris Hutchings
Project Director	Colin Skipper

Document History

Date	Release	Prepared	Approved	Authorised	Notes
10/12/07	1.0	CJH	CTM		

© HR Wallingford Limited

HR Wallingford accepts no liability for the use by third parties of results or methods presented in this report. The Company also stresses that various sections of this report rely on data supplied by or drawn from third party sources. HR Wallingford accepts no liability for loss or damage suffered by the client or third parties as a result of errors or inaccuracies in such third party data.

Summary

Brindisi LNG

Discharge location assessment

Report EX 5671
December 2007

Brindisi LNG SpA plans to build a new LNG Terminal in Brindisi Harbour. The design flowrate of seawater for regassification of LNG will be 25,000m³/h. The discharged seawater will be 6°C cooler than ambient. BrLNG considered four options for discharging the spent heating water

Option A – a surface discharge on the west face towards the rear of the reclamation. This is the simplest and shortest route option.

Option B – a submerged diffuser located towards the rear of the reclamation. This may improve mixing through increased entrainment of warm water.

Option C – a surface discharge on the northwest face towards the front of the reclamation. This may provide better overall mixing with waters within the harbour.

Option D – a submerged diffuser located off the northwest face towards the front of the reclamation. This may improve mixing through increased entrainment.

This study uses a validated three-dimensional hydrodynamic numerical model of Brindisi Outer Harbour to investigate the four proposed options for discharging cold water, for a variety of possible scenarios.

The study found that from a thermal recirculation and dispersion perspective, there was very little to separate the four options. All gave a change in temperature at the BrLNG intake of about -0.5°C

Therefore, Option C is recommended on the basis of similar mixing to other options of the cold water with harbour waters, and, wider considerations including:

- reduced visibility of the discharge and;
- retaining access to the west face of the reclamation and the PE intake channel.

Contents

<i>Title page</i>	<i>i</i>
<i>Document Information</i>	<i>ii</i>
<i>Summary</i>	<i>iii</i>
<i>Contents</i>	<i>v</i>
1. Introduction	1
1.1. Background.....	1
1.1 Objective.....	1
1.2 Report outline	1
2. Site conditions	2
2.1 Wind speeds.....	2
2.2 Tides and currents.....	2
2.3 Seawater temperature	2
2.4 Waves	2
3. Discharge Characteristics	3
3.1 Existing discharges in Brindisi Harbour.....	3
3.2 Proposed BrLNG Intake, and outfall options	3
3.2.1 Option A – discharge at surface on reclamation west face	4
3.2.2 Option B – discharged at sea bed near reclamation west face	4
3.2.3 Option C – discharge at surface on NW face of reclamation.....	4
3.2.4 Option D – discharge at sea bed near NW face of reclamation	4
4. 3D Thermal Model Set Up.....	5
4.1 General behaviour of the cold discharge	5
4.2 The TELEMAC system	5
4.3 Model layout.....	6
4.3.1 Finite Element Model Mesh.....	6
4.3.2 Model Bathymetry	6
4.3.3 Layout of intake structures.....	7
4.4 Model forcing	7
4.5 Model parameters	8
4.6 Model Representation of the discharges.....	8
5. Results	9
5.1 Introduction	9
5.2 excess temperature at the bRLng intake.....	9
5.3 General behaviour of the cold water discharge	9
6. Conclusions and recommendations	11
7. References	12

Contents continued

Tables

Table 1	Model parameters.....	8
Table 2	Discharge configurations tested.....	9
Table 3	Modelled excess temperature at the BrLNG intake (°C)	9

Figures

Figure 1	Brindisi Outer Harbour showing existing intakes and outfalls
Figure 2	Brindisi Outer Harbour showing proposed BrLNG intake location and outfall options
Figure 3	TELEMAC-3D finite element model domain and mesh
Figure 4	TELEMAC-3D finite element model mesh (local to BrLNG proposed development)
Figure 5	TELEMAC-3D finite element model bathymetry
Figure 6	TELEMAC-3D finite element model bathymetry (local to BrLNG proposed development)
Figure 7	Time-series excess temperature at BrLNG intake
Figure 8	Test 1, Modelled temperature fields (surface and bed) for Option A
Figure 9	Test 2, Modelled temperature fields (surface and bed) for Option B
Figure 10	Test 3, Modelled temperature fields (surface and bed) for Option C
Figure 11	Test 4, Modelled temperature fields (surface and bed) for Option D

Appendix

Appendix 1	The Numerical Model TELEMAC-3D
------------	--------------------------------

1. Introduction

1.1. BACKGROUND

Brindisi LNG SpA plan to build a new LNG Terminal in Brindisi Harbour. The terminal will be designed for an initial nominal sendout of 6.0 MMTPA. Seawater will be used in Open-Rack Vaporisers (ORV) as a heating medium to vaporise LNG. The design flow rate of this seawater is assumed to be 25,000m³/hr. The discharged seawater will be 6°C cooler than ambient.

This report investigates possible recirculation of spent process water from the plant for four options, under a variety of possible scenarios.

Option A – discharging cold water from BrLNG terminal through a surface discharge on the west face towards the rear of the reclamation. This is the simplest and shortest route option.

Option B – discharging cold water from BrLNG terminal through a submerged diffuser located towards the rear of the reclamation. This may improve mixing through increased entrainment of warm water.

Option C – discharging cold water from BrLNG terminal through a surface discharge on the northwest face towards the front of the reclamation. This may provide better overall mixing with waters within the harbour.

Option D – discharging cold water from BrLNG terminal through a submerged diffuser located off the northwest face towards the front of the reclamation. This may improve mixing through increased entrainment.

Figure 1 shows the layout of Brindisi Outer Harbour, with locations of existing intakes and outfalls (with their discharge characteristics). The proposed BrLNG Plant, including the four BrLNG discharge options described above, is shown in Figure 2.

1.1 OBJECTIVE

The objective of this study was to appraise the operation of the options (A to D), specifically to:

1. Assess any likely thermal recirculation problems caused to the BrLNG intake.
2. Determine the best location for the discharge.

1.2 REPORT OUTLINE

Section 2 outlines the site conditions in terms of flows, winds, currents, and waves. Section 3 describes the intake and discharge characteristics within Brindisi Harbour, both existing and planned (BrLNG). Section 4 describes the 3D model set-up and assumptions. Section 5 describes the 3D model results and the interpretation and analysis against the objectives. Section 6 presents conclusions and recommendations from this study.

2. *Site conditions*

In 2003 HR Wallingford undertook a detailed investigation into the physical processes operating in Brindisi harbour (Reference 1). This study considered water levels, wave conditions and factors governing flows in the waters around Brindisi. The study was also supported by a hydrographic survey, in which information on the harbour bathymetry, seawater temperature, suspended solids, currents and waves was collected (Reference 1). A further study in August 2003 investigated extreme wind conditions and wind persistence in Brindisi harbour (Reference 3).

More detailed information on the conditions around the site can be found in these references, but factors relevant to the present thermal studies are summarised below.

2.1 WIND SPEEDS

Wind Conditions at Brindisi are generally not strong, with wind speeds less than 7 knots for 50% of the time. Wind direction is generally from the NW or SE sectors (over 50% of the time), with negligible winds generally for 10-20% of the year (Reference 3).

2.2 TIDES AND CURRENTS

Currents within Brindisi Outer Harbour (Porto Esterno) are generally weak, with a mean spring tide range of only 0.3m. During two days in February 2003 (under approximately mean spring tide conditions with very slight winds), data on currents throughout the water column were collected at seven locations, through approximately one tidal cycle (Reference 1). The maximum observed depth-averaged current speed was 0.21m/s. Two days of continuous in-situ current measurements at the approximate site of the LNG vessel berth lead to a maximum measured depth-averaged current speed of 0.027m/s, supporting the view that currents are generally weak, albeit for a relatively short duration of measurements.

Flows in the harbour are driven by winds, density gradients (induced by thermal discharges from the Brindisi Nord power station and Polimeri Europa (PE) facility), and tides.

2.3 SEAWATER TEMPERATURE

Field measurements recently provided by BrLNG, taken between 1989 and 1995, show the seawater temperature to vary between a mean monthly minimum of 9.9°C in February to a mean monthly maximum of 29.3°C in August. Monthly minimum and maximum temperatures range from 8.0°C in February 1991 and 1992, to 30.0°C in August of 1992 and 1994. At any given time, there may also be local variations due to a number of active thermal outfalls that operate in the harbour, details of which are given below.

2.4 WAVES

The harbour walls provide some sheltering from waves in the Adriatic. However, waves were not considered in this study of outfall location as they would predominantly act to increase mixing for all locations, giving a positive effect on dispersion.

3. *Discharge Characteristics*

3.1 EXISTING DISCHARGES IN BRINDISI HARBOUR

Figure 1 shows the locations and characteristics of the existing and planned intakes and discharges (excluding the BrLNG intake and discharge) within Brindisi Outer Harbour. These are described briefly below.

Centrale Brindisi Nord - This is situated on the southern coast of the Porto Esterno. Ambient water is taken in at a rate of $10.5\text{m}^3/\text{s}$ and is discharged 8°C warmer at the same rate.

Polimeri Europa (PE) – Ambient water is withdrawn through two intake channels to the west of the BrLNG Plant at a rate of $28.43\text{m}^3/\text{s}$ and is discharged 3°C warmer from four outfalls:

- Policentrica Ovest: $3.42\text{m}^3/\text{s}$, within the Porto Esterno
- Policentrica Nord Ovest: $0.06\text{m}^3/\text{s}$, outside the harbour (near Capo di Torre Cavallo)
- Policentrica Est: $12.11\text{m}^3/\text{s}$, outside the harbour (near Capo di Torre Cavallo)
- Policentrica Sud: $12.83\text{m}^3/\text{s}$, outside the harbour (near Capo di Torre Cavallo)

The values above were taken from 2005 discharge records presented by the Ministry of the Environment and Protection of Land and Sea.

[<http://aia.minambiente.it/DomandeAIADocumenti.aspx?st=5&id=133>].

For the purposes of the modelling, the three discharges outside of the harbour are lumped into a single discharge, as none of the discharges is likely to recirculate into the harbour and the vicinity of the intakes.

The PE intake serves several different companies. However, details are only available for PE and Basell. Between them, these companies withdraw only $10.15\text{m}^3/\text{s}$ (2005/6 data). Therefore we have assumed that the remaining water discharged through the outfalls above is also drawn in at the PE intake. Thus the PE intake is taken to be operating at $28.43\text{m}^3/\text{s}$.

For all outfall location assessment scenarios, the PE intakes and outfalls were switched off, as this was considered to be a worst case in terms of likely recirculation of the BrLNG discharge.

3.2 PROPOSED BRLNG INTAKE, AND OUTFALL OPTIONS

BrLNG plan to withdraw $25,000\text{m}^3/\text{h}$ (approximately $6.94\text{m}^3/\text{s}$) of seawater into the proposed LNG terminal, and will discharge spent heating water 6°C cooler, at the same rate.

The report describes the options considered for location of the BrLNG discharge and the numerical modelling carried out to assess the most suitable location. All locations considered are shown in Figure 2.

3.2.1 Option A – discharge at surface on reclamation west face

For this Option, the cold water will be discharged at the surface through the revetment on the west face of the reclamation. The discharge is at the surface and delivered through a pipe or culvert. This location gives the shortest route from the ORV's to the west face of the reclamation and is likely to be the least cost option.

The local water depth in the vicinity of the discharge is around 3m, which means that the volume of ambient seawater immediately available for mixing with the cold discharge is limited. This is likely to result in the re-entrainment of partially diluted heating water, which will inhibit the initial dilution of the cold water.

3.2.2 Option B – discharged at sea bed near reclamation west face

For this Option, cold water is discharged through a diffuser on the sea bed located between the west face of the reclamation and the PE intake channel. This is the shortest route to a sub-surface discharge in this part of the harbour. A sub-surface discharge may be more effective in providing initial mixing of the cold water with the surrounding water body.

As for Option A, the local water depth in the vicinity of the diffuser is around 3m, which means that the volume of ambient seawater immediately available for mixing with the cold discharge is limited. This is likely to result in the re-entrainment of partially diluted heating water, which will inhibit the initial dilution of the cold water

3.2.3 Option C – discharge at surface on NW face of reclamation

For Option C, cold water from the BrLNG Plant will be discharged at the edge of the BrLNG reclamation, on the northwest face, closer to the end of the PE intake channel than Option A. This option includes a longer surface channel to the discharge point (than in Options A & B above), allowing potential for slightly more evaporative warming. However, this small difference has not been included in the assessment. This location is considered to offer potential for better mixing with the PE intake. However, it is also closer to the BrLNG intake and therefore may pose a greater risk of recirculation.

The local water depth in the vicinity of the discharge is around 5m, which may inhibit the initial dilution of the cold water. However, this location is closer to deeper water than Options A&B.

3.2.4 Option D – discharge at sea bed near NW face of reclamation

For Option D, cold water from the BrLNG Plant will be discharged through a diffuser at the sea bed between the northwest face of the reclamation and the end of the PE intake channel. This location is also considered to offer potential for better mixing with the PE intake than Options A&B.

The local water depth in the vicinity of the discharge is around 5m, which may inhibit the initial dilution of the cold water. However, this location is closer to deeper water than Options A&B and the initial mixing may be better than that for the surface discharge in Option C.

4. *3D Thermal Model Set Up*

4.1 GENERAL BEHAVIOUR OF THE COLD DISCHARGE

The dispersal of spent heating water from each option can be conveniently divided into three stages: the near-, mid- and far-fields. These are characterised by different dominant physical processes.

In the near-field, the initial momentum and (negative) buoyancy of the discharge govern its behaviour. The dissipation of momentum and buoyancy by the interaction of the discharge with the ambient waters characterises the important processes to be studied for this initial area of the plume. It is important to introduce the cooled water into any mid- and far-field models in a way that is consistent with its near-field behaviour. The near field can be characterised by jet-like or plume-like behaviour depending on whether the effluent is discharged at high or low speed relative to the ambient water. Whatever the detail of the initial discharge, the momentum of the effluent is eventually absorbed into the ambient water and the effluent starts to move with the ambient water as a mid-field plume.

In the mid-field, buoyancy forces continue to cause horizontal spreading of the plume over the bed, and forced entrainment, transport by currents and further dilution of the cold water occurs. A three-dimensional approach to investigation of the plume movement, interaction with tidal flows and thermal balance is therefore required, typically involving the use of a multi-layer computer model.

In the far-field, the temperature contrast between the plume and the ambient water becomes so small that buoyancy forces are negligible. Effectively, the cold water is then advected as a dynamically neutral parameter and any excess negative temperature is gradually dispersed to the atmosphere and by residual currents. Although the buoyancy effects of the plume are regarded as insignificant in the far-field, the dispersion process might still be essentially three-dimensional if there are significant wind-driven currents or if there is natural stratification. Wind-driven currents tend to vary considerably in the vertical, and might reverse with depth in the case of an onshore or offshore wind.

The key issues governing the mid- and far-field dispersion will be:

- The movement of the near-/mid-/far-field plumes under the influence of the ambient tidal and wind-driven currents.
- The dispersion away from the area and any subsequent build up in the far-field.

4.2 THE TELEMAC SYSTEM

A three-dimensional numerical model was set up using the TELEMAC-3D finite element system, developed originally by LNHE Paris. TELEMAC uses an unstructured grid of triangular elements, with no preferred direction, to represent the areal extent of the model. The elements can be made small to resolve features in the main area of interest in great detail, while coverage of a wide area is made possible by use of large elements in the outer areas. In this way a model can be set up that simulates both the mid-field dispersion around the discharge and the far-field build up of heat in the area at large.

TELEMAC solves the equations of motion at several planes using the hydrostatic approximation to relate the pressure to the density and water depth. The dominant

vertical motion, generated by convergence/divergence in the surface or lower layers is included in the model and turbulent vertical transfer is represented parametrically. An equation of state is solved to relate the density to the salinity and temperature.

Wind stress is related to the supplied wind speed by a user- or model-supplied drag coefficient. The model is able to represent the important physical processes of buoyant spreading, suppression of turbulent exchange by stratification, and shear of wind-driven currents. The vertical extent of the model is represented in 'sigma co-ordinates', that is, the model planes are at fixed proportions of the local water depth.

The model solves the equations of motion and water mass, heat and salt conservation to provide values for three components of velocity, temperature and salinity (and a number of related quantities if desired) at each node and each level in the mesh at each time step. Time steps are typically between a few seconds and a few minutes. At intervals through the solution the results are stored in an output file for display and further analysis.

Boundary conditions can be supplied at the open edges of the model in the form of water levels and/or velocities, together with salinities and temperatures. Choice of representation of the boundaries is an important element in the operation and verification of the model.

TELEMAC-3D has been used by HR Wallingford in numerous previous thermal dispersion studies, and has been verified against field measurements of thermal plumes. It has been extensively used by HR Wallingford in modelling the salinity-stratified waters around Hong Kong and has been verified in this application against an extensive data set of current, tide and salinity measurements. This verification was carried out using quantitative measures of agreement with data and was accepted by the Hong Kong Government's Environmental Protection Department. TELEMAC-3D was also validated by its authors against a number of other types of 3D flow.

The formulation of the TELEMAC model is described in detail in Appendix 1.

4.3 MODEL LAYOUT

4.3.1 *Finite Element Model Mesh*

The model for the present study covers an area of approximately 80km² including Porto Esterno, Porto Medio and Porto Interno. The outer model boundary is approximately 5km from the area of interest, arcing from Punta Penne in the north to Punta della Contessa in the south. The model mesh over the whole domain is shown in Figure 3 and the detail in the area of key interest is shown in Figure 4.

The mesh resolution in the model ranges from 1000m at the outer model boundary, down to 2m in the narrow culvert structures at the two entrances to the PE intake channel. The mesh contains approximately 10,000 elements in total, with 8 planes in the vertical evenly spaced through the water column.

4.3.2 *Model Bathymetry*

For the model, details of the existing coastline and bathymetry were taken from Admiralty Chart 1418, supplemented by an initial local bathymetric survey by HR Wallingford (Reference 1) and a more detailed bathymetric survey by FUGRO (Reference 2).

The existing coastline and bathymetry were updated to show the proposed BrLNG development and two other significant developments in the vicinity (shown on the Brindisi Port web site¹) as detailed below:

- Include the BrLNG reclamation layout (Drawing 3269-XX-DG-2Z00 001 rev4b)
- Include Capo Bianco – Nuova area POL Marina Militare reclamation, dredging and new breakwater between Pedagna Grande and Isolotto Giorgio Treviso
- Include Costa Morena Est – completion of the reclamation and dredging

The vertical datum for the model bathymetry is local Chart Datum (CD). The bathymetry is shown for the current study in Figures 5 (full model area) and 6 (local area of interest).

4.3.3 *Layout of intake structures*

The representation of the existing intake structures was considered carefully in order to represent well the local effects on flow and thus possible mixing with and entrainment of the BrLNG discharge.

PE Intake Channels

The model includes both the PE intake channels, which lie to the west of the BrLNG facility. The cross-sectional geometry of the eastern channel was taken from information made available in September 2004. Sparse data existed for the western channel, so the only cross-sections available (at the seaward end) were assumed to be representative of this channel's geometry. The eastern channel was represented in the model as a rectangular channel 18.5m wide by 4m deep at the entrance, with the channel floor rising to 2m after 65m. The western channel was represented as a rectangular channel 15.8m wide by 4m deep, rising to meet the eastern channel at the confluence.

Entrances to PE Culverts

The information provided to BrLNG shows a culvert structure at the bed, 10m wide by 2.5m deep at the seaward-end of the easternmost branch of the intake channel. Although no design details are available for the westernmost branch, photos taken as part of the previous studies (Reference 1) show that a similar structure appears to be present at the mouths of both channels. The two culverts were therefore represented as narrow vertical slots in the model, each with a cross-sectional area of 25m². This cross-section ensured the correct magnitude of flows through the mouth of the intake channel.

4.4 **MODEL FORCING**

Forces determining flow in the bay include tides, winds and density gradients (due to warm or cold water outfalls). Tides are included in the model by applying a spatially-constant, time-varying water level to the nodes along the seaward boundary. A time series of levels was taken from the surveyed water levels at Brindisi in the final week of February 2003, which was smoothed before inclusion in the model (as was undertaken in Reference 1). These approximated a mean spring tide, with a mean range of 0.3m.

The wind used in the various model runs is a spatially-constant wind, and is applied to every node in the surface layer of the model, with a drag coefficient to specify the effect of the wind on water movement.

¹ http://www.porto.br.it/newbpi/index.php?option=com_content&task=view&id=602&Itemid=221

Existing outflows of water and heat, and intake flows were also included in the model runs as discussed above. Note that the PE intakes and outfalls were not simulated in the model runs described in this report.

4.5 MODEL PARAMETERS

A summary of the main parameters used are given in the following table:

Table 1 Model parameters

Timestep	5s
Run duration	~3 tides (43hrs)
Number of planes	8
Horizontal turbulence model	Constant eddy viscosity
Coefficient for horizontal eddy viscosity	$10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Coefficient for horizontal temperature diffusion	$10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Coriolis coefficient	$9.47 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
Friction coefficient (roughness length)	0.01m

4.6 MODEL REPRESENTATION OF THE DISCHARGES

The warm water discharges are all represented as shoreline outfalls within the model. The warm water is introduced along a horizontal line of nodes at each outfall, with velocities calculated and applied to give the correct flow rate and heat increase in the model.

Intakes are represented in a similar way, with velocities applied along a line of nodes to withdraw the correct flow rate of water from the model.

The cold water outfall options are represented as follows:

- **Option A and C discharges** – are represented by two adjacent computational nodes at the bed.
- **Option B and D discharges** – are represented by two adjacent computational nodes at the shoreline

5. Results

5.1 INTRODUCTION

The four scenarios tested are shown in Table 2.

Table 2 Discharge configurations tested

Test	Scenario
1	Option A – surface on western face of reclamation
2	Option B – bed off western face of reclamation
3	Option C – surface on northwestern face of reclamation
4	Option D – bed off northwestern face of reclamation

5.2 EXCESS TEMPERATURE AT THE BrLNG INTAKE

This simplest measure of performance for the various scenarios is to assess the change in temperature at the BrLNG intake as a result of the cold water discharge. Figure 7 shows the time series of temperatures at the BrLNG intake over each 43-hour model simulation period at the sea surface and sea bed. These show that it takes some 25 hours to achieve the fully developed state of the cold discharge at the BrLNG intake, after which all options give a similar reduction in temperature of about 0.5°C. Table 3 shows the excess temperature at the surface, at the bed and averaged over the depth at the BrLNG intake over the last tide of each simulation. Note that temperature changes are presented to two decimal places to indicate the sense of changes, rather than to indicate the accuracy of predictions.

Table 3 Modelled excess temperature at the BrLNG intake (°C)

Test	Scenario	Surface	Bed	Average
1	Option A	-0.40	-0.39	-0.39
2	Option B	-0.46	-0.46	-0.46
3	Option C	-0.47	-0.49	-0.47
4	Option D	-0.47	-0.47	-0.47

The results show less than 0.1°C difference between all options, indicating that (within the accuracy of the model) there is nothing to choose between them from a recirculation perspective.

5.3 GENERAL BEHAVIOUR OF THE COLD WATER DISCHARGE

The thermal dispersion of the cold water discharge is largely similar for each test case. Some minor differences are noted below, but all distributions of temperature changes are considered to be essentially similar.

Option A – The thermal distribution at the bed and surface is shown for this configuration in Figure 8. At the surface the cold water mainly spreads east along the reclamation frontage and towards the islands. At the bed, a similar but more extensive spread of the cold water is predicted. A tongue of cold water extends from the discharge

point northwest into the deeper water of the harbour and cold water enters the PE intake channel area. Some water at the bed progresses around the PE jetty and towards the Brindisi Nord power station intake. The maximum excess temperature (largest negative value) is in the range -4°C to -6°C in the discharge channel and PE intake channels.

Option B – Shows a similar pattern of excess temperature at the bed and surface (see Figure 9). At the bed, the -2°C to -4°C plume area is slightly more extensive along the BrLNG reclamation frontage. The bed plume also extends slightly further to the southwest and towards the Brindisi Nord power station intake.

Option C – Has a similar surface plume pattern to Option B but the bed plume at -2°C to -4°C does not spill so far into the deeper water. However, the extremities of the bed excess temperature plume extend slightly further to the north. The thermal distribution at the bed and surface is shown for this configuration in Figure 10.

Option D – Gives a very similar spread of the plume in both the surface and bed levels to Option C, as shown in Figure 11.

6. *Conclusions and recommendations*

The model results indicate that there may be some recirculation of cool water at the BrLNG intake for all options, but for all the conditions tested the recirculation temperature is of order -0.5°C .

This amount of recirculation is considered to be relatively small, given the range of temperatures encountered at the site and the conservative nature of the assessment. However, HR Wallingford cannot comment on its impact for plant operating conditions.

Clearly the study has only examined a limited range of conditions and it is possible that other conditions could give rise to enhanced recirculation. However, an attempt has been made to identify worst case conditions in terms of recirculation. In particular, the simulations have been carried out with the Polimera Europa (PE) intake switched off. When operational, this intake is likely to draw water away from the BrLNG intake, thus reducing the recirculation risk.

Overall, it is concluded that Option C (surface discharge in the northwest face of the reclamation) is preferred as:

- the longer channel to the point of discharge (not simulated) allows for greater evaporative warming and more opportunity for air bubbles to be released before discharge (reducing the discharge's visibility once in the harbour)
- it leaves the gap between the BrLNG reclamation and the PE intake channel free for maintenance and/or future activities/development by others.

7. *References*

1. HR Wallingford, 2003. Brindisi LNG Marine Investigations Field survey. Report EX4782.
2. FUGRO, 2003. Final Report: Brindisi LNG Project. Bathymetric and Seabed Survey.
3. HR Wallingford 2003 Brindisi Extreme Winds and Wind Persistence. Report EX4856.

Figures

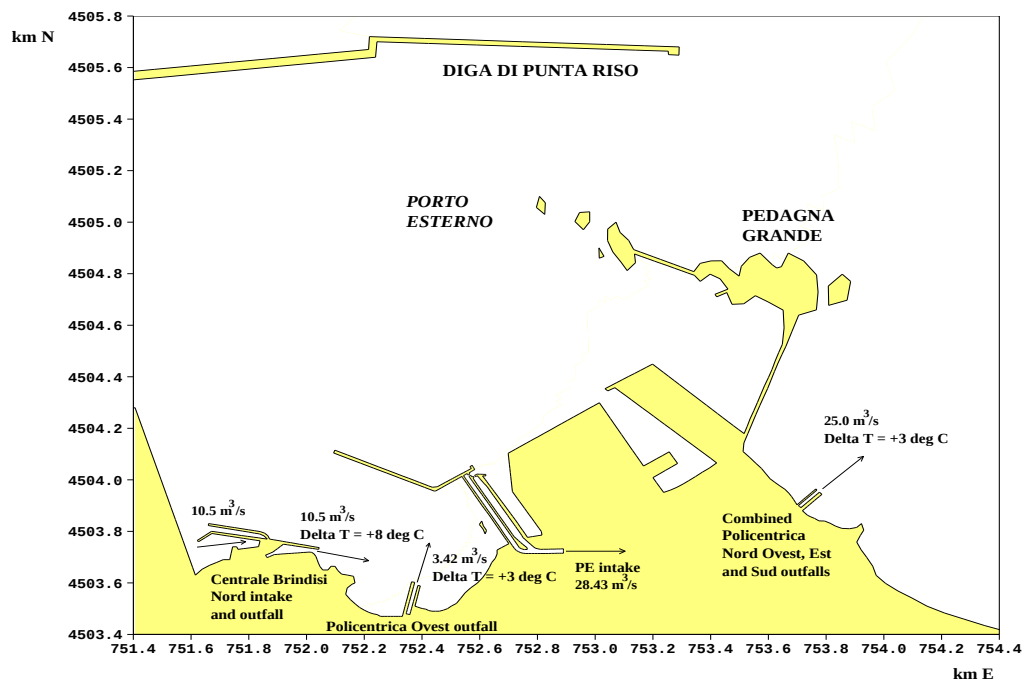


Figure 1 Brindisi Outer Harbour showing existing intakes and outfalls

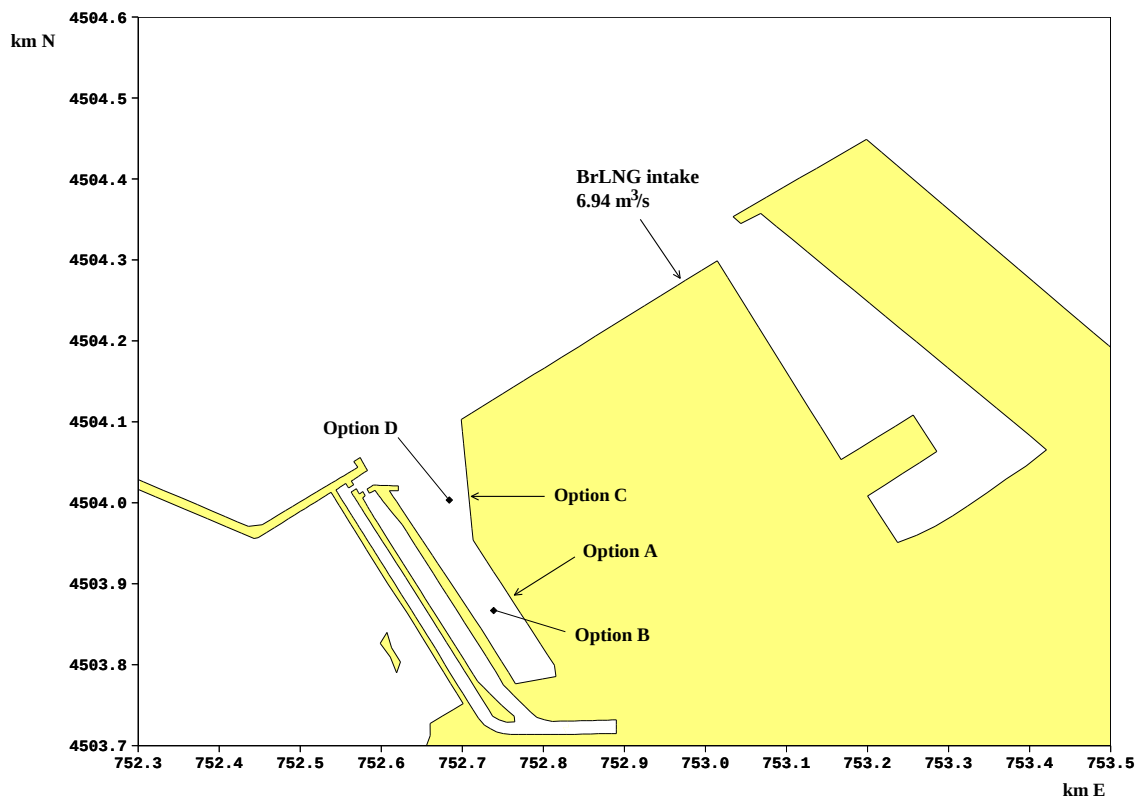


Figure 2 Brindisi Outer Harbour showing proposed BrLNG intake location and outfall options

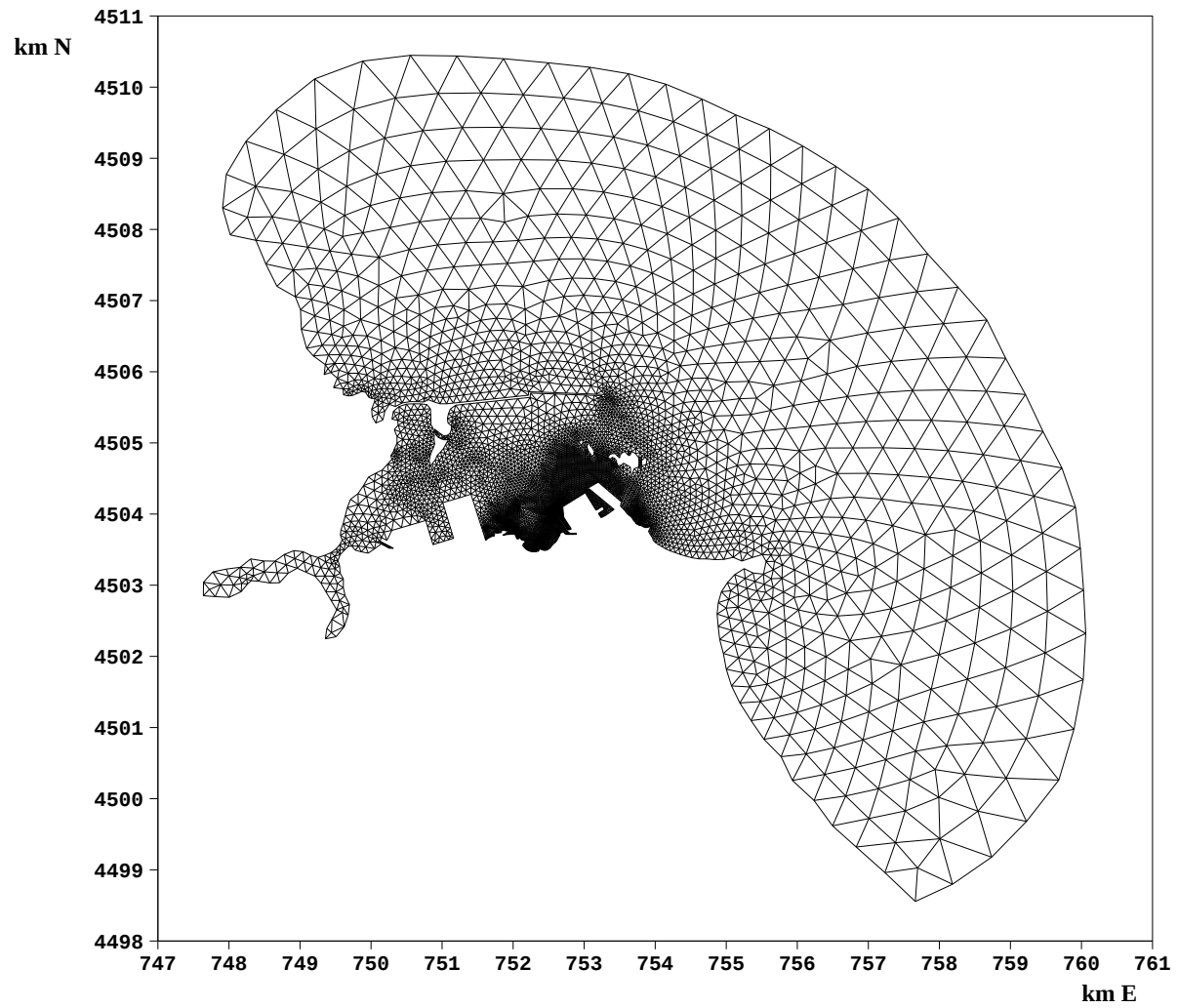


Figure 3 TELEMAC-3D finite element model domain and mesh

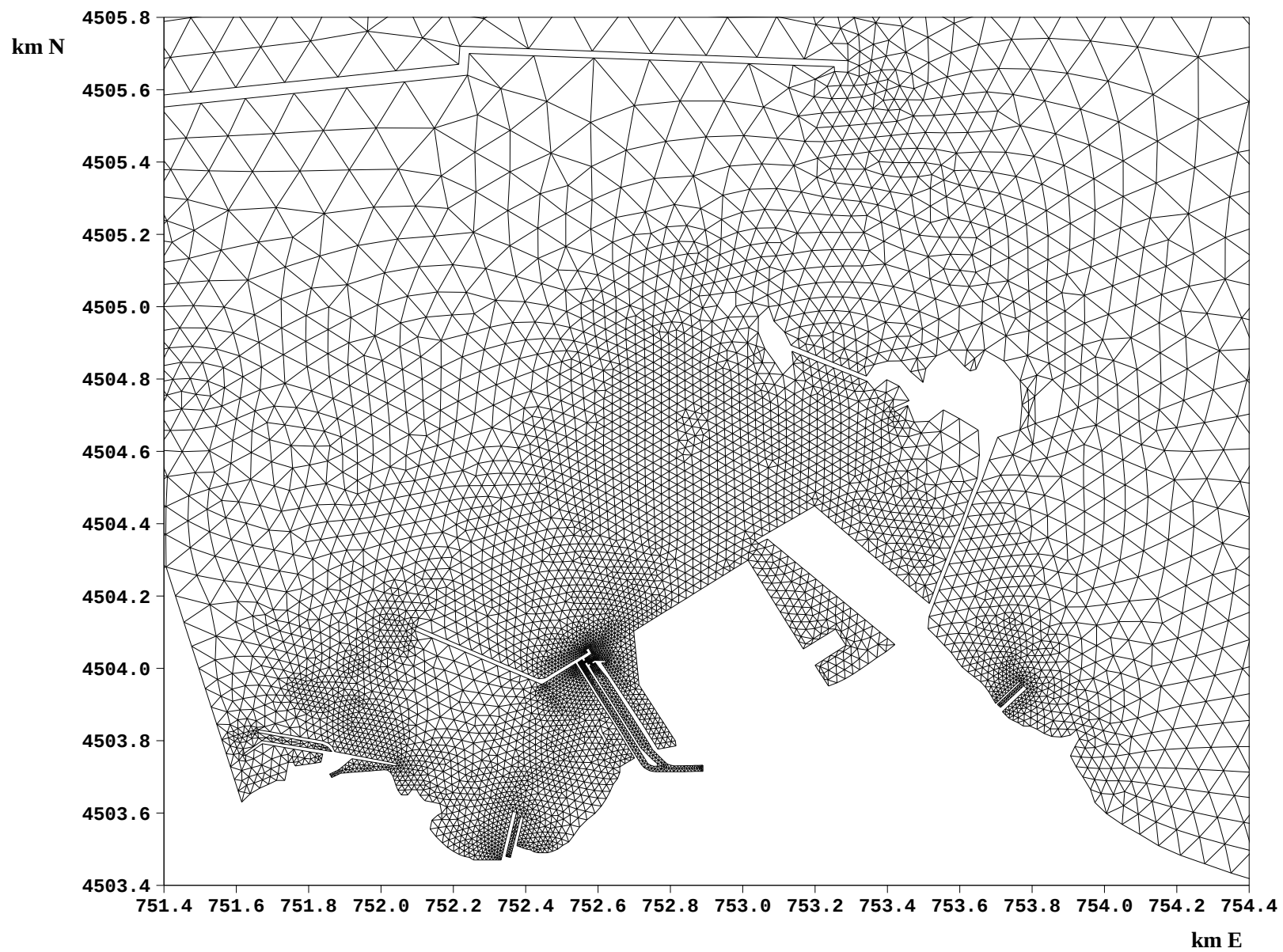


Figure 4 TELEMAC-3D finite element model mesh (local to BrLNG proposed development)

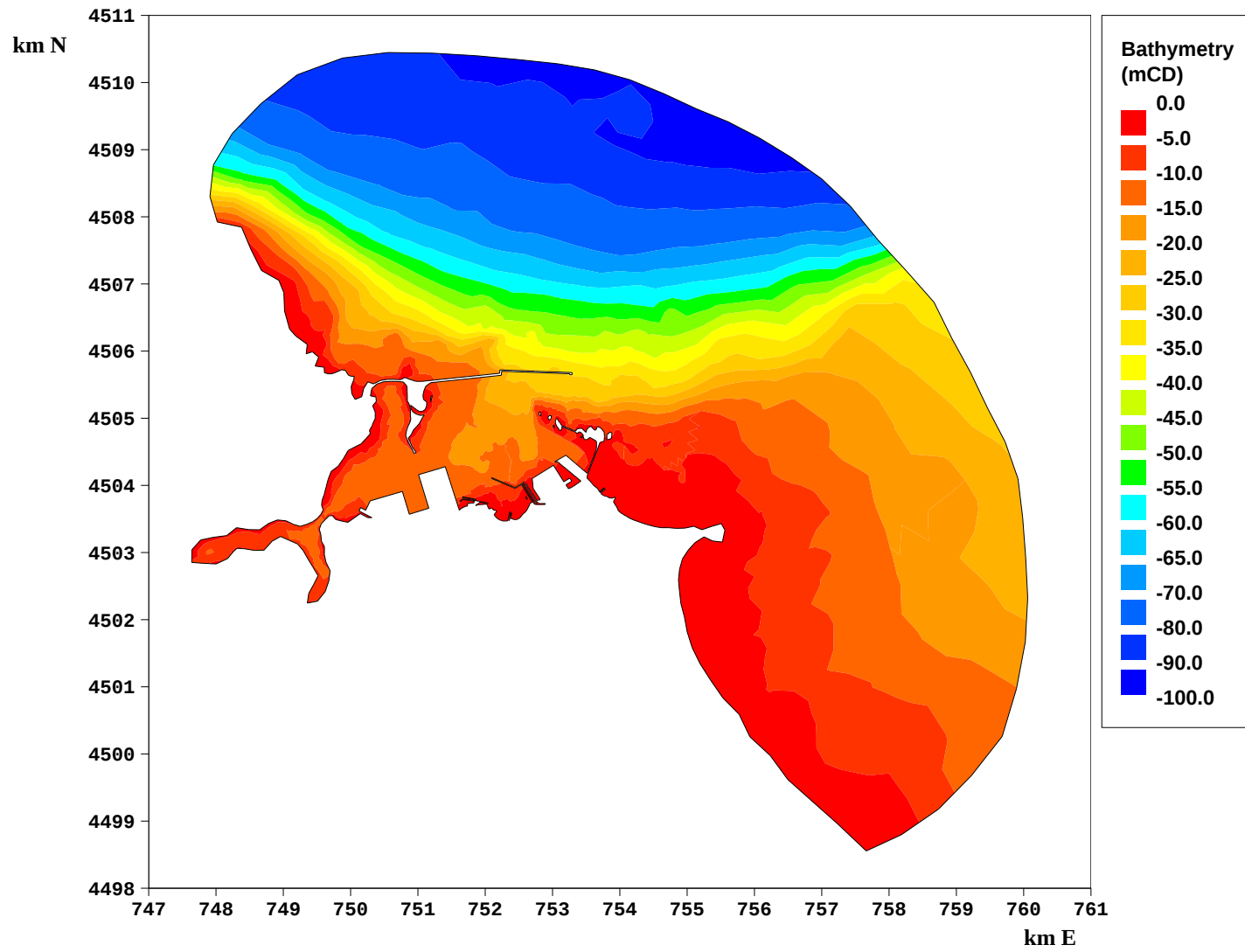


Figure 5 TELEMAC-3D finite element model bathymetry

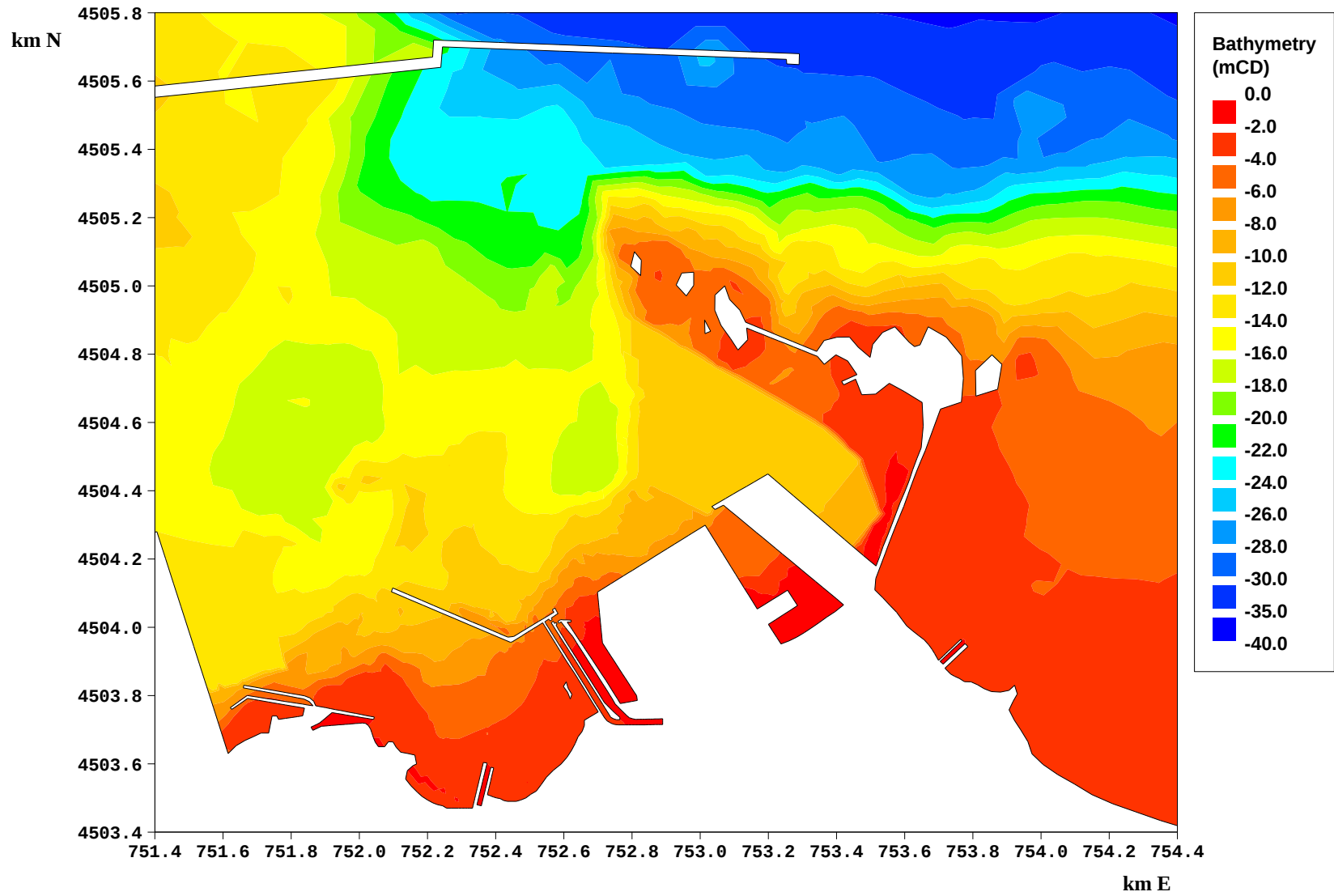


Figure 6 TELEMAC-3D finite element model bathymetry (local to BrLNG proposed development)

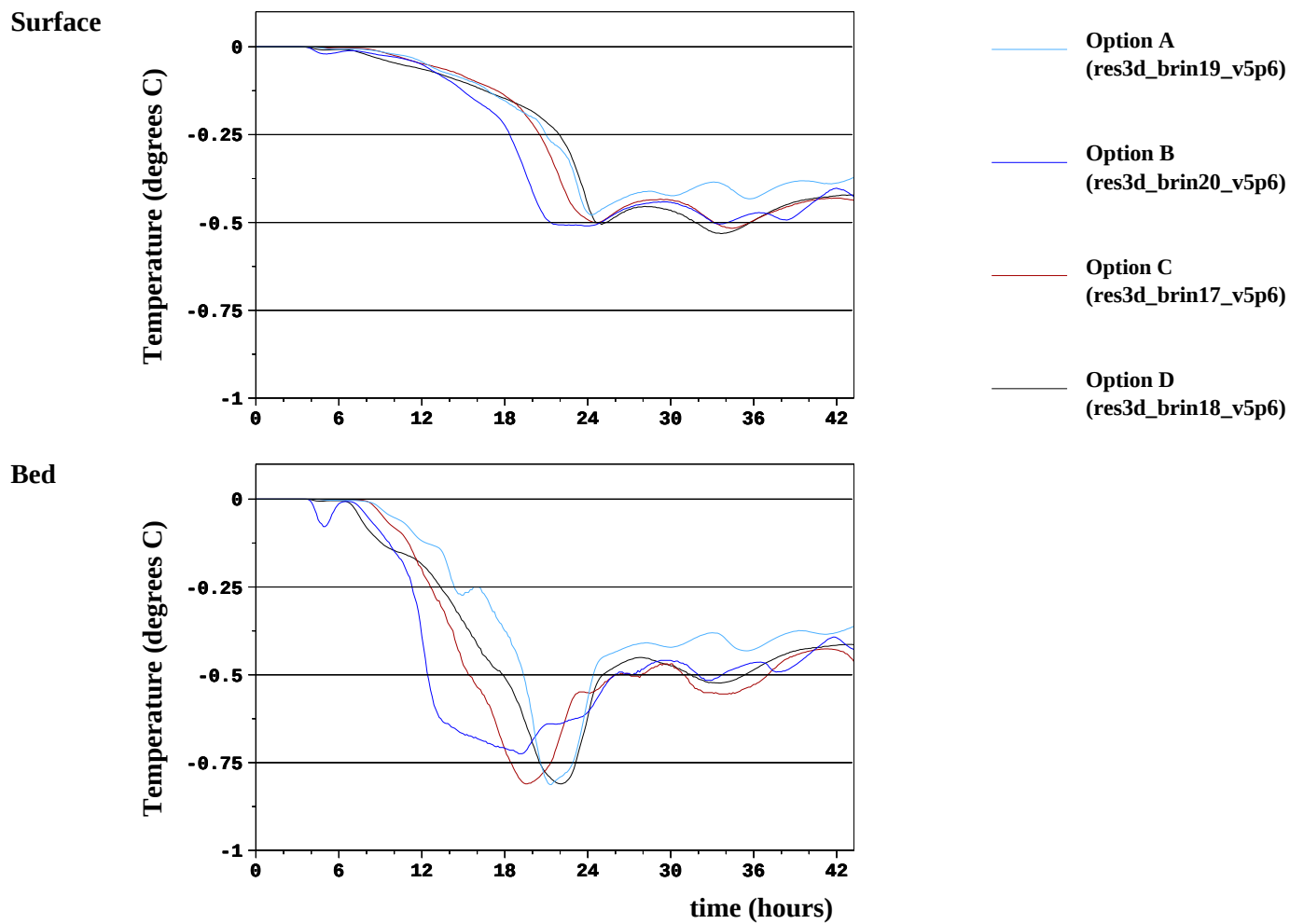


Figure 7 Time-series excess temperature at BrLNG intake

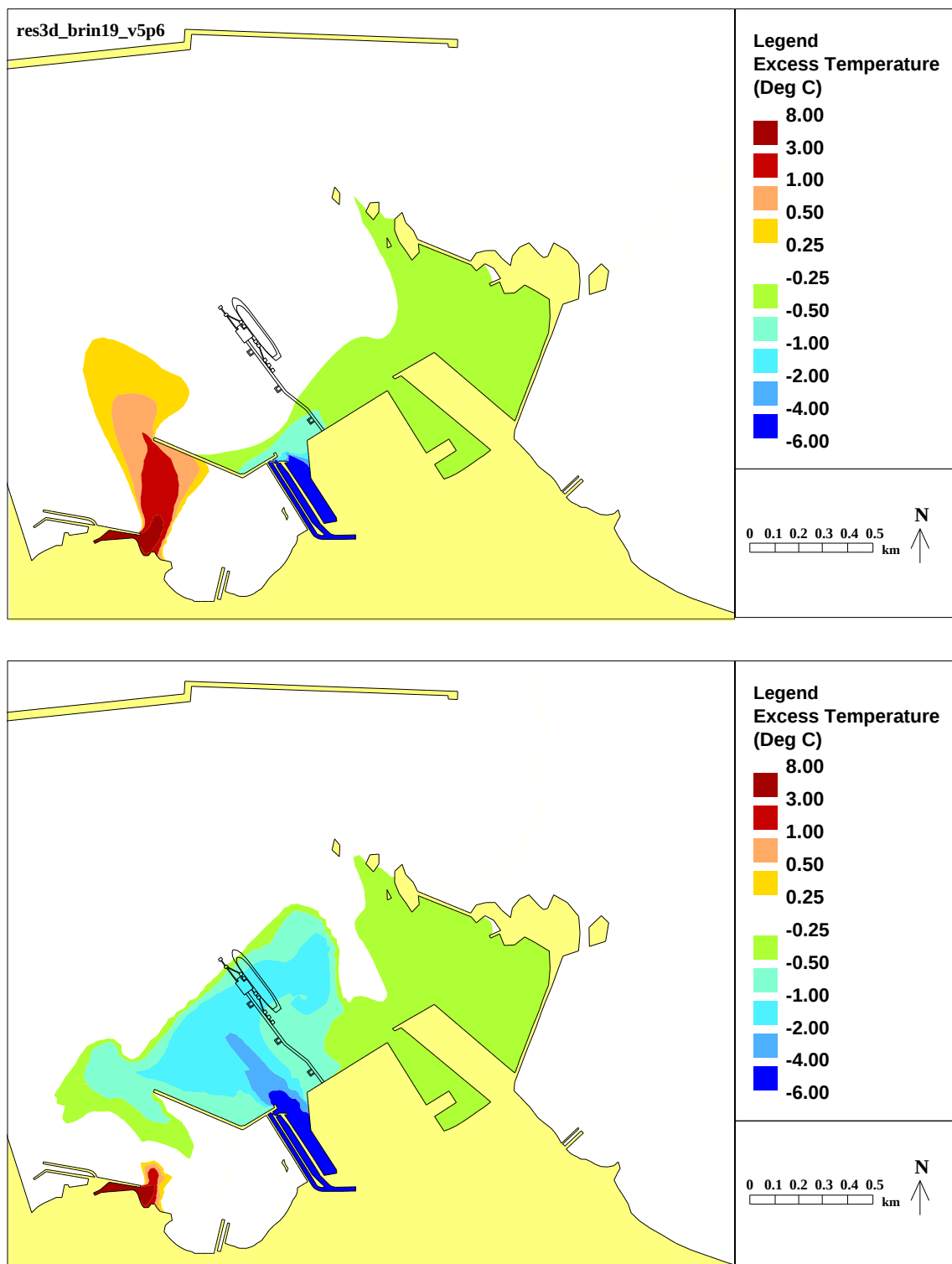


Figure 8 Test 1, Modelled temperature fields (surface and bed) for Option A

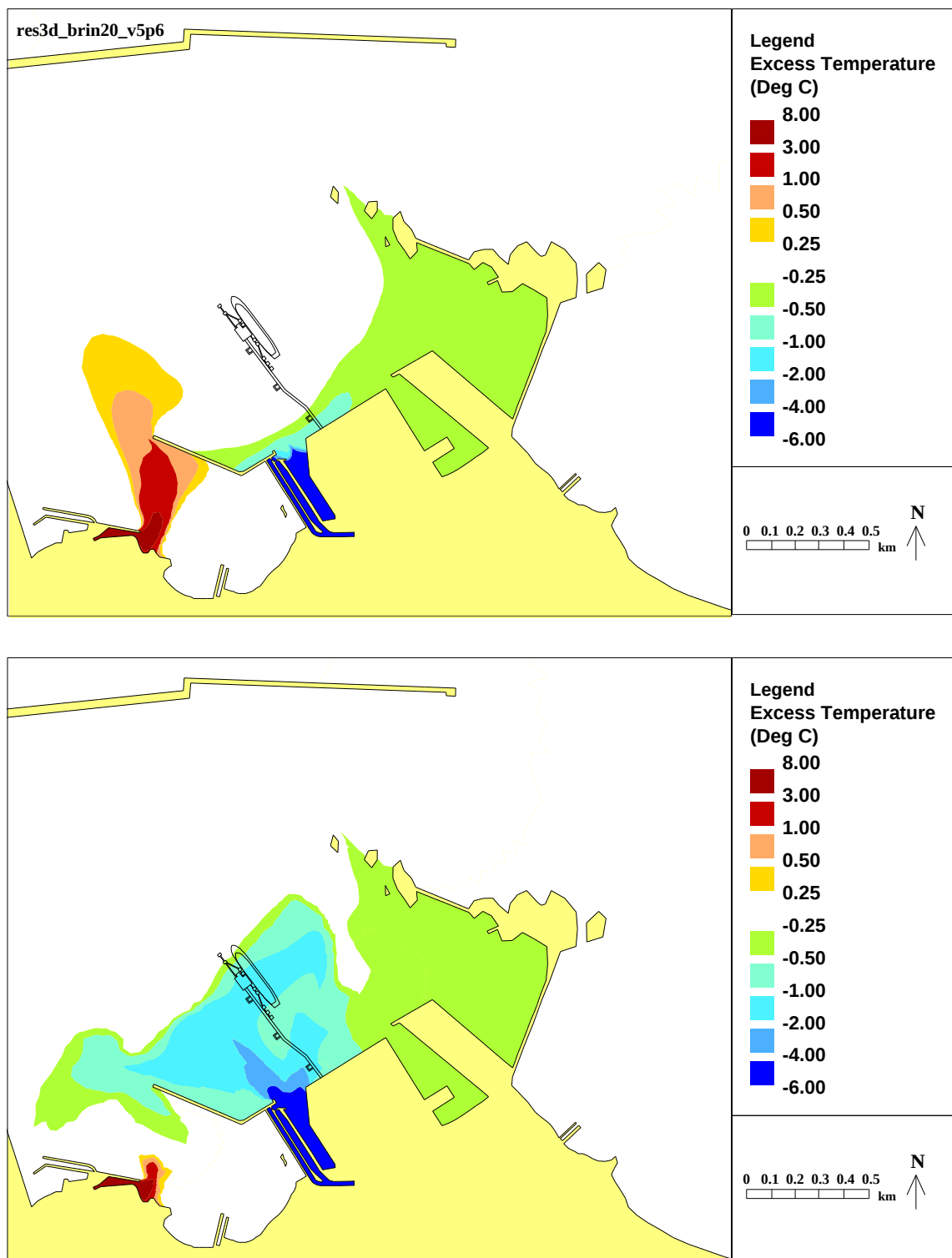


Figure 9 Test 2, Modelled temperature fields (surface and bed) for Option B

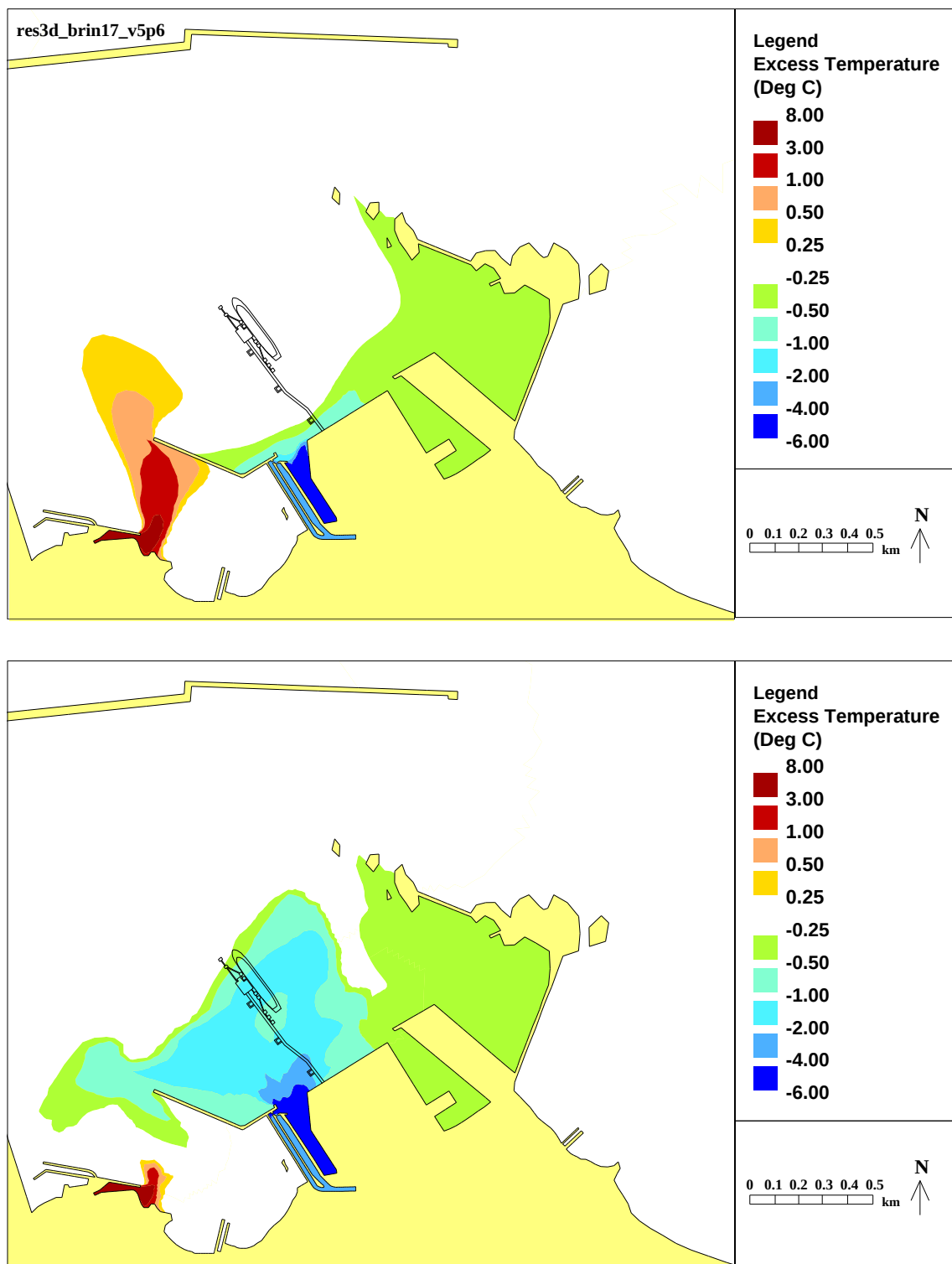


Figure 10 Test 3, Modelled temperature fields (surface and bed) for Option C

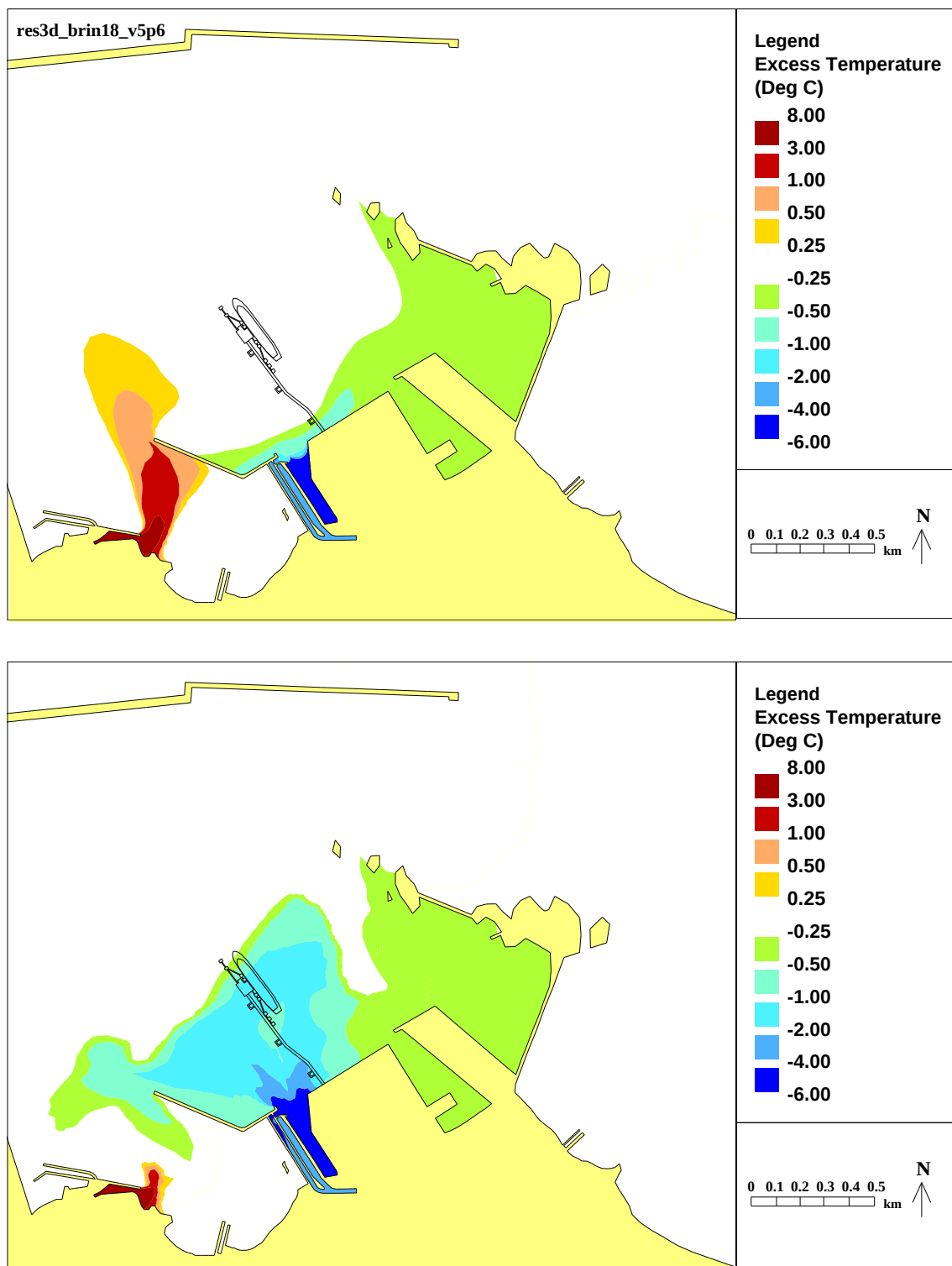


Figure 11 Test 4, Modelled temperature fields (surface and bed) for Option D

Appendix

Appendix 1 The Numerical Model TELEMAC-3D

In this Appendix the TELEMAC-3D code used in the solution of the momentum and transport equations is described.

The 3D-shallow water and transport equations are given as:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + 2\omega v \sin \phi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - 2\omega u \sin \phi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$p = \rho_0 g (S - z) + \rho_0 g \int_z^S \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{HT} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_{HT} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{zT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \quad (5)$$

where T can be the temperature or salinity or any other variable.

Operator-Splitting

Operator-Splitting is based on the principal that the hyperbolic and the parabolic parts of the Navier-Stokes-equations should be treated separately in order to use well adapted numerical methods for each part. This implies that the hyperbolic part i.e., the advection terms are treated using characteristic methods, and the parabolic part i.e., the diffusion terms using finite elements.

Given the solution at $t=t^n$, we compute the solution at $t^{n+1}=t^n+\Delta t$. The numerical method solves the equations by means of a decomposition into sequential steps (i.e., we split the operators) and each numerical operator is treated by the appropriate method. The solution involves three steps: the advection step, the diffusion step, and the free surface-continuity-pressure step. The time derivatives are thus written as follows:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f^{n+1} - f^{\text{diff}}}{\Delta t} + \frac{f^{\text{diff}} - f^{\text{adv}}}{\Delta t} + \frac{f^{\text{adv}} - f^n}{\Delta t} \quad (6)$$

whereby f can be u , v or T and

f^{n+1}	solution at t^{n+1}
f^{diff}	result of the diffusion step
f^{adv}	result of the advection step
f^n	solution at t^n

The Advection Step: In the advection step, the equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

is solved using the method of characteristics described in the following section.

The Diffusion Step: In the diffusion step, the equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_H \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_H \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (8)$$

is treated using FEM with linear shape functions on prismatic elements. The results from the advection step generate the initial conditions.

For the transport of a variable T the calculation involves only these two steps. The hydrodynamics further requires

The Free Surface-Continuity-Pressure Step: in which the equations

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (10)$$

$$p = \rho_0 g (S - z) + \rho_0 g \int_z^S \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

are solved. The movement of the free surface is calculated using the FEM-code TELEMAC-2D (Galland et al, 1991) which solves the depth-integrated equations. In this particular application the full potential of the code is not required, since diffusive and advective terms are not found in this form of the integrated equations.

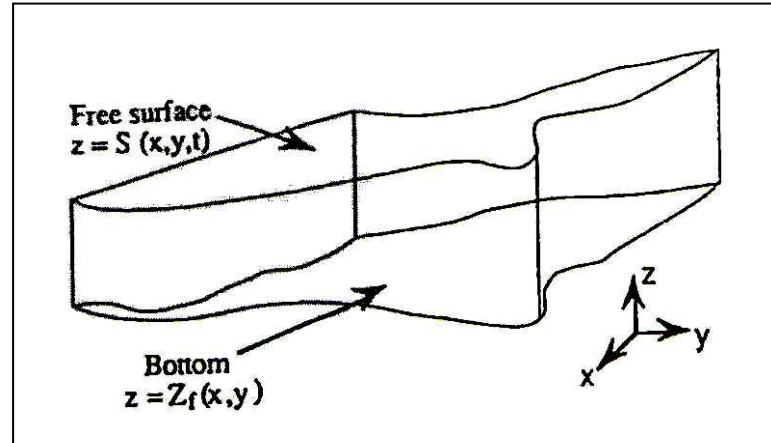


Figure 1 Computation Domain

Once the horizontal velocities, the pressure and the free surface are known, the vertical velocities can be calculated by solving the continuity equation.

Stability is the most important advantage of this method. The entire method is stable if all the fractional steps are stable. The greatest disadvantage is the fact that the method is only of first order accuracy in time even if second order numerical methods like the Crank-Nicholson-scheme are applied in each fractional step. This behaviour is associated with the non-commutativity of the different fractional steps Malcherek, 1995.

Space discretization and σ - transformation

The domain to be studied is bounded by a bottom defined as $z = Z_f(x, y)$, a free surface $z = S(x, y)$ and on the sides by a vertical cylinder.

The spatial domain is discretized using prismatic finite elements with vertical quadrangular sides. The interpolation is such that it is linear when restricted to prismatic triangles or quadrangles. In fact computation is hardly ever done on the real prisms since a transformation is made to a reference prism of a much simpler shape. Note that since the prisms in TELEMAC-3D have vertical quadrangular sides the mapping is simpler than if the prisms were truly three-dimensional. The basis functions on the isoparametric reference prisms are expressed as follows (Dhatt and Touzot, 1983):

$$\psi_1 = (1 - \alpha - \beta) \left(\frac{1 - \gamma}{2} \right) \quad (13)$$

$$\psi_2 = \alpha \left(\frac{1 - \gamma}{2} \right) \quad (14)$$

$$\psi_3 = \beta \left(\frac{1 - \gamma}{2} \right) \quad (15)$$

$$\psi_4 = (1 - \alpha - \beta) \left(\frac{1 + \gamma}{2} \right) \quad (16)$$

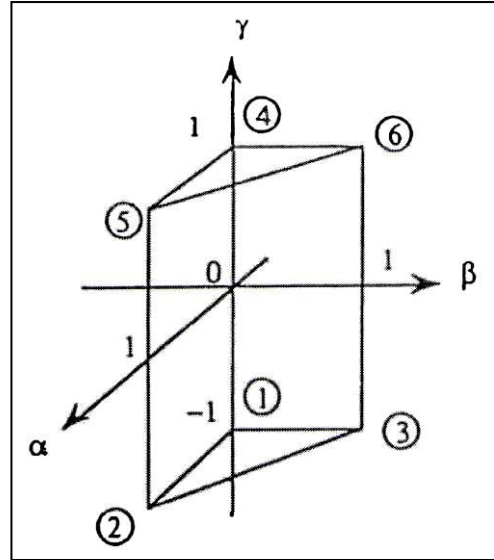


Figure 2 Reference prism (circled numbers show the local numbering)

$$\psi_5 = \alpha \left(\frac{1+\gamma}{2} \right) \quad (17)$$

$$\psi_6 = \beta \left(\frac{1+\gamma}{2} \right) \quad (18)$$

Because prisms with vertical quadrangular sides are used, the horizontal 2D projection of the mesh results in triangles, one of the finite element types used by TELEMACH-2D. Note that since TELEMACH-2D can also use quadrangles, a brick could have been used as a finite element for TELEMACH-3D. It is, however, easier to mesh complicated domains with triangles than with quadrangles.

The 3D mesh is generated by reproducing the 2D horizontal mesh along the vertical. Thus, for every point $M(x, y)$ of the 2D mesh, we define several points $N(x, y, z)$ for which:

$$z = Z_f(x, y) + \Theta(S(x, y, t) - Z_f(x, y)) \quad \text{with} \quad 0 \leq \Theta \leq 1 \quad (19)$$

The choice of the Θ values is made by the user, with no special requirements except that the bottom corresponds to $\Theta = 0$ and the free surface to $\Theta = 1$ (Figure 3).

Due to the free surface, the 3D mesh and thus the co-ordinate z of any point in the mesh is time-dependent. It is, however, possible to work on a mesh independent of time when a change of variables is used. One classical method is to switch from z to z^* according to the σ - transformation:

$$z^* = \bar{S} \frac{z - Z_f(x, y)}{S(x, y, t) - Z_f(x, y)} \quad (20)$$

where $\bar{S}$ is a given positive constant. The corresponding mesh will be called afterwards the σ - mesh, which consists of the nodes $N^*(x, y, z^* = \Theta \bar{S})$.

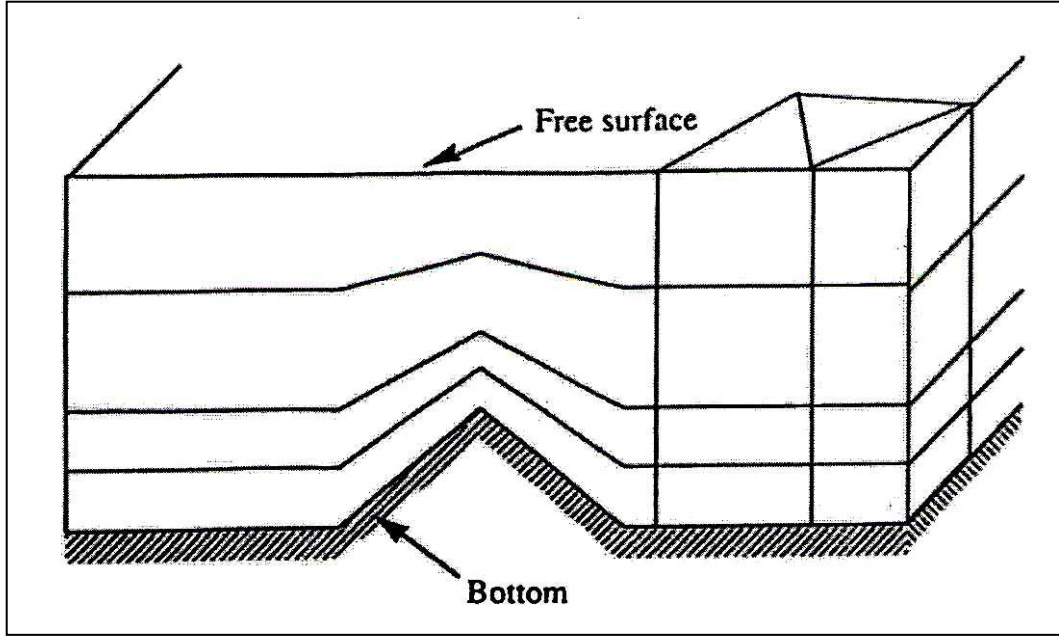


Figure 3 Schematic view of a mesh consisting of 5 planes ($\Theta = 0, 1/6, 1/3, 2/3, 1$)

The movement of the free surface

Since hydrostatic pressure is assumed, the vertical velocity w is only needed for the advection step. What is in fact required is w^* . Therefore, it is advantageous to compute w^* directly by solving the continuity equation in the σ -mesh.

Expressed in the set of co-ordinates (x, y, z^*, t) , the continuity equation is:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)_{x,y} + \left(\frac{\partial(hu)}{\partial x}\right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)_{x,z^*,t} + h\left(\frac{\partial w^*}{\partial z^*}\right)_{x,y,t} = 0 \quad (21)$$

The vertical velocity, w^* , is known at the bottom and at the free surface where it is either equal to zero in case of an impermeable boundary or to any set value in the case of an inflow or outflow at the bottom or at the free surface. The latter case is encountered, for instance, in the study of thermal plumes.

Equation [21] integrated along the vertical between 0 and z^* and between z^* and $\bar{S}$ yields:

$$z^* \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)_{x,y} + \int_0^{z^*} \left[\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x}\right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)_{x,z^*,t} \right] dz^* + h[w^*(z^*) - w^*(0)] = 0 \quad (22)$$

and

$$(z^* - \bar{S}) \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)_{x,y} + \int_{\bar{S}}^{z^*} \left[\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x}\right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y}\right)_{x,z^*,t} \right] dz^* + h[w^*(z^*) - w^*(\bar{S})] = 0 \quad (23)$$

Recall that $w^*(0)$ and $w^*(\bar{S})$ are known. By combining 22 and 23, we obtain equation 24 which satisfies both boundary conditions at $z^* = 0$ and $z^* = \bar{S}$:

$$\begin{aligned} h\bar{S}w^*(z^*) &= h(\bar{S} - z^*)w^*(0) + hz^*w^*(\bar{S}) \\ &+ z^* \int_0^{\bar{S}} \left[\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x} \right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y} \right)_{x,z^*,t} \right] dz^* \\ &- \bar{S} \int_0^{z^*} \left[\left(\frac{\partial(hu)}{\partial x} \right)_{y,z^*,t} + \left(\frac{\partial(hv)}{\partial y} \right)_{x,z^*,t} \right] dz^* \end{aligned} \quad (24)$$

Note also that no time discretization is required to solve 24 contrary to 22 or 23. Apart from the advantage of correctly simulating free surface movement, the σ -mesh allows fast and simple computations due to its regularity.

The advection step

In the advection step the following equation has to be solved:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (25)$$

On the characteristic curve defined by

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u \quad \frac{\partial y}{\partial t} = v \quad \frac{\partial z}{\partial t} = w \quad (26)$$

the advection equation can be written as

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0 \quad (27)$$

The problem is solved with an inverse formulation (Benque et al. 1980) i.e. the characteristic curve starts from the node $(x_i^{n+1}, y_i^{n+1}, z_i^{n+1}, t^{n+1})$ at the time step to be calculated. Backward in time it crosses the time level t^n at the base point $(x_i^b, y_i^b, z_i^b, t^n)$. The base point can then be calculated by integrating the differential equations of the characteristics. Using the trapezoidal rule:

$$x_i^b = x_i - \frac{1}{2}(u_i^b + u_i^{n+1})\Delta t \quad (28)$$

$$y_i^b = y_i - \frac{1}{2}(v_i^b + v_i^{n+1})\Delta t \quad (29)$$

$$z_i^b = z_i - \frac{1}{2}(w_i^b + w_i^{n+1})\Delta t \quad (30)$$

Unfortunately the velocities at the base point and, therefore, at the new time step are not known and an iterative procedure must be applied.

In TELEMAC-3D a predictor-corrector-scheme is used. In the predictor, the base points of the characteristics are calculated using the velocities u_i^n . After all of the fractional steps are executed, the corrector calculates the base points of the characteristics from:

$$x_i^b = x_i - \left((1-\theta)u_i^n + \theta u_i^{n+1} \right) \Delta t \quad (31)$$

$$y_i^b = y_i - \left((1-\theta)v_i^n + \theta v_i^{n+1} \right) \Delta t \quad (32)$$

$$z_i^b = z_i - \left((1-\theta)w_i^n + \theta w_i^{n+1} \right) \Delta t \quad (33)$$

In most cases the base point of the characteristic curve will not intersect the mesh at a node. The value at the base of the characteristic must, therefore, be interpolated from the surrounding nodes using an interpolation scheme or a FEM approximation (Li and Chen, 1989).

When the value f_i^b at the base of the characteristic curve is known, the value at the new time step t^{n+1} is given as:

$$f_i^{n+1} = f_i^b \quad (34)$$

TELEMAC-3D solves the advection equation as the σ –transformed mesh. Each variable f on the real mesh is given on the σ –mesh as:

$$f(x, y, z, t) = f(x, y, z^*(x, y, z, t), t) \quad (35)$$

Therefore, first order derivatives transform according to:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial t} \quad (36)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial x} \quad (37)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial y} \quad (38)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial z}, \quad (39)$$

where derivatives on the left hand side of the equations are in the real, and on the right hand side in the σ –transformed mesh. Therefore, the advection equation on the σ – transformed mesh is given as:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + \left(\frac{\partial z^*}{\partial t} + u \frac{\partial z^*}{\partial x} + v \frac{\partial z^*}{\partial y} + w \frac{\partial z^*}{\partial z} \right) \frac{\partial f}{\partial z^*} = 0 \quad (40)$$

setting

$$w^* = \frac{dz^*}{dt} = \frac{\partial z^*}{\partial t} + u \frac{\partial z^*}{\partial x} + v \frac{\partial z^*}{\partial y} + w \frac{\partial z^*}{\partial z} \quad (41)$$

this equation reduces to

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w^* \frac{\partial f}{\partial z^*} = 0 \quad (42)$$

The diffusion step

In the diffusion step, the equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial f}{\partial z} \right) + Q_f \quad (43)$$

is solved using the results from the advection step as the initial condition. The time derivative is approximated using a Crank-Nicolson-scheme:

$$\begin{aligned} \frac{f^{\text{diff}} - f^{\text{adv}}}{\Delta t} = & \theta \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial f^{n+1}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial f^{n+1}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial f^{n+1}}{\partial z} \right) \right) \\ & + (1-\theta) \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_x \frac{\partial f^n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_y \frac{\partial f^n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial f^n}{\partial z} \right) \right) + Q_f \end{aligned} \quad (44)$$

The diffusion step was originally solved on the real mesh using a standard Galerkin approach with the simplification that prisms without horizontal triangles are replaced by prisms of the same volume with horizontal triangles. Unfortunately this simplification leads to unacceptably bad results when large bottom gradients are present.

Therefore, the diffusion step is now solved in the σ –mesh where the transformation to the σ –mesh is given as:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} v_x \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial z^*}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z^*} v_x \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} v_y \left(\frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial y} \right) + \frac{\partial z^*}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z^*} v_y \left(\frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial z^*}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(v_z \frac{\partial f}{\partial z^*} \frac{\partial z^*}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (45)$$

The standard Galerkin procedure and integration by parts leads to the formulation now used in the TELEMAC-3D.

The free surface-continuity-pressure step

At this point, the advection and diffusion operators have been treated. By integration of the momentum and continuity equations along the vertical (between the bottom and the free surface) we obtain the classical shallow water equations without the advective and diffusive terms. Recall that this is possible because we suppose that the pressure is hydrostatic. This results in:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial y} + R = 0 \quad (46)$$

$$\frac{\bar{u}_{n+1} - \bar{u}_{diff}}{\Delta t} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g \frac{\partial Z_f}{\partial x} = F_x \quad (47)$$

$$\frac{\bar{v}_{n+1} - \bar{v}_{diff}}{\Delta t} + g \frac{\partial h}{\partial y} = -g \frac{\partial Z_f}{\partial y} + F_y \quad (48)$$

with

$h = S - Z_f$	water height
R	source term due to any inlet or outlet of water at the bottom or at the free surface
$\bar{u}_{n+1}$	mean velocity along x at t_{n+1}
$\bar{v}_{n+1}$	mean velocity along y at t_{n+1}
$\bar{u}_{diff}$	velocity u_{diff} (diffusion result) averaged along vertical
$\bar{v}_{diff}$	velocity v_{diff} (diffusion result) averaged along vertical
F_x, F_y	buoyancy terms

Mean velocities are computed according to the formula:

$$\bar{u} = \frac{1}{(S - Z_f)} \int_{Z_f}^S u dz \quad (49)$$

The source term R reads:

$$R = \frac{h}{S} [w^*(\bar{s}) - w^*(0)] \quad (50)$$

Buoyancy terms are given by:

$$F_x = \frac{g}{S - Z_f} \int_{Z_f}^S \frac{\partial}{\partial x} \int_z^S \frac{\Delta p}{\rho_0} dz dz' \quad (51)$$

$$F_y = \frac{g}{S - Z_f} \int_{Z_f}^S \frac{\partial}{\partial y} \int_z^S \frac{\Delta p}{\rho_0} dz dz' \quad (52)$$

It is well known that the calculation of the buoyancy terms on σ -structured meshes has to be done very carefully in order to avoid numerical density currents (Janjic, 1977, Mesinger, 1982, Arakawa and Suarez, 1983, Haney, 1991). The vertical integration of the pressure term using the trapezoidal rule leads to:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= g \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{S_f} \Delta p dz \\ &= g \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^{N-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \Delta p dz \\ &= g \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{1}{2} (z_{i+1} - z_i) (\Delta p_{i+1} + \Delta p_i) \right] \end{aligned}$$

Application of the product rule yields the following pressure term:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{g}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{\partial}{\partial x} (z_{i+1} - z_i) (\Delta p_{i+1} + \Delta p_i) + (z_{i+1} - z_i) \frac{\partial}{\partial x} (\Delta p_{i+1} + \Delta p_i) \right] \quad (53)$$

which has to be vertically averaged.

The integrated shallow water equations are solved in the TELEMAC-2D using finite element methods. As mentioned, one of the finite elements available is the triangle. That code has been written by also taking advantage of Element by Element methods (that is: no assembly of matrices, vectorizable matrix vector products...). Its computing cost is between 0.05 and 0.1 s per time step per thousand points on a vector computer. It is currently used in applications in ocean and river engineering (Hervouet, 1991 and 1992, Labadie, 1991). Note that we do not have to use the full potentiality of TELEMAC-2D since we do not have diffusive and advective terms in the integrated equations.

TELEMAC-2D yields the free surface S at t_{n+1} , which allows us to compute the pressure p_{n+1} and the horizontal components of the velocity u_{n+1} . w_{n+1} is then found by solving the continuity equation.