



Università di Genova

4 Aprile 2012

Sulla Morfodinamica Mareale

Gruppo di ricerca: G. Seminara, M. Bolla Pittaluga, C.de Capitani, S. Lanzoni, N.Tambroni, M.Toffolon



*Dipartimento di Ingegneria
delle Costruzioni,
dell'Ambiente e del Territorio,
Genova*

Le lagune



Le strutture morfologiche principali di una laguna

rete di canali

fondali (velme e barene)



✓ BARENE

- colonizzate da vegetazione alofila;
- sommerse solo nella fase di alta marea



✓ VELME e BASSIFONDI

- privi di vegetazione;
- normalmente sommersi, emergono solo con marea eccezionalmente basse



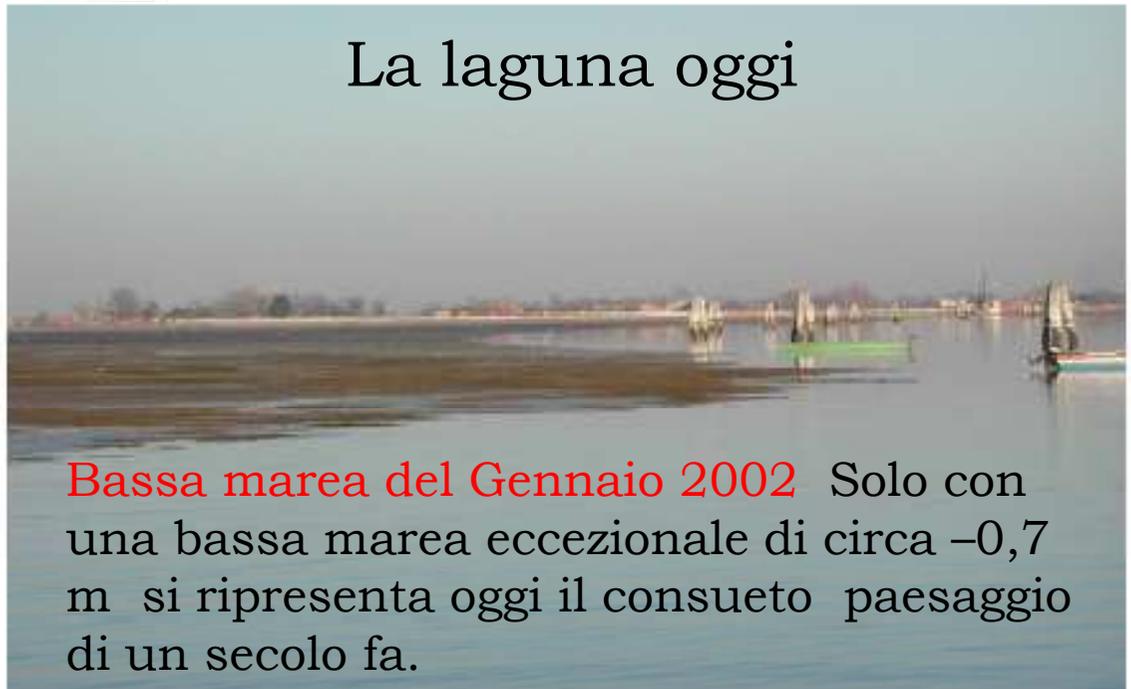
Il degrado morfologico della laguna di Venezia

Fine 1800



La foto (archivio Alinari) mostra che **il fondale lagunare in bassa marea si prosciugava.**

La laguna oggi



Bassa marea del Gennaio 2002 Solo con una bassa marea eccezionale di circa $-0,7$ m si ripresenta oggi il consueto paesaggio di un secolo fa.

MEDIAMENTE LA LAGUNA PERDE 700000 m³ DI SEDIMENTI ALL'ANNO!!! (DATI MAGISTRATO ALLE ACQUE DI VENEZIA)

La trasformazione morfologica della laguna: le evidenze principali

Progressiva diminuzione delle aree barenali

da circa 110 Km² nel 1790 a 30 Km² alla fine del XX secolo

Confronto tra la prima batimetria (1810)

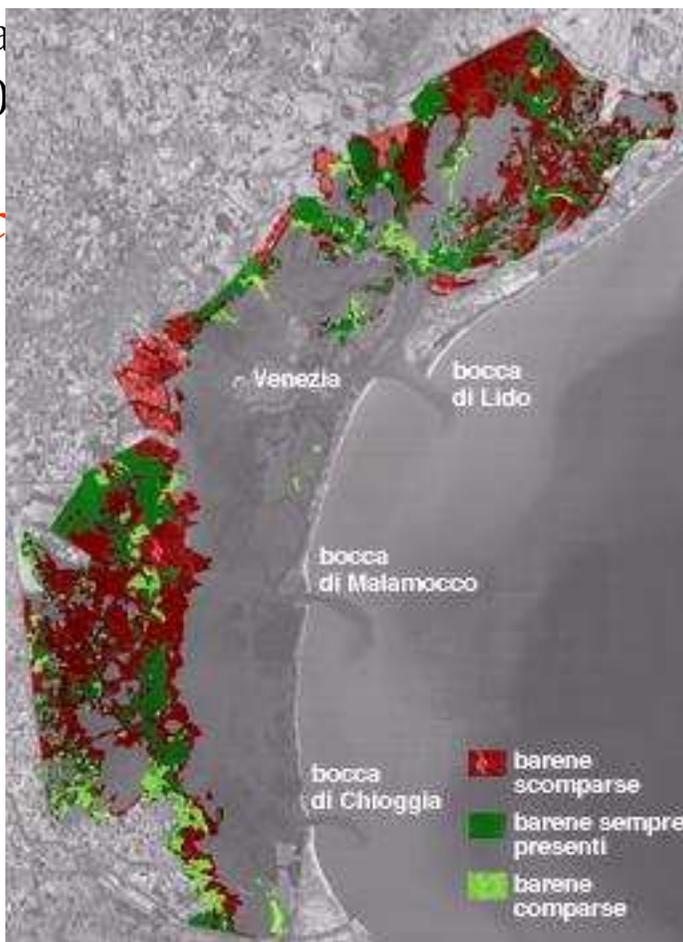
e la batimetria attuale.

La
30

li è cresciuta nello scorso secolo di 60 cm, 40 cm e
i Malamocco, Lido e Chioggia.

Crollo di un tratto di bordo di barena

I c



Le cause dell'evoluzione recente della Laguna di Venezia

Interventi sulla laguna dal Medioevo ad oggi:

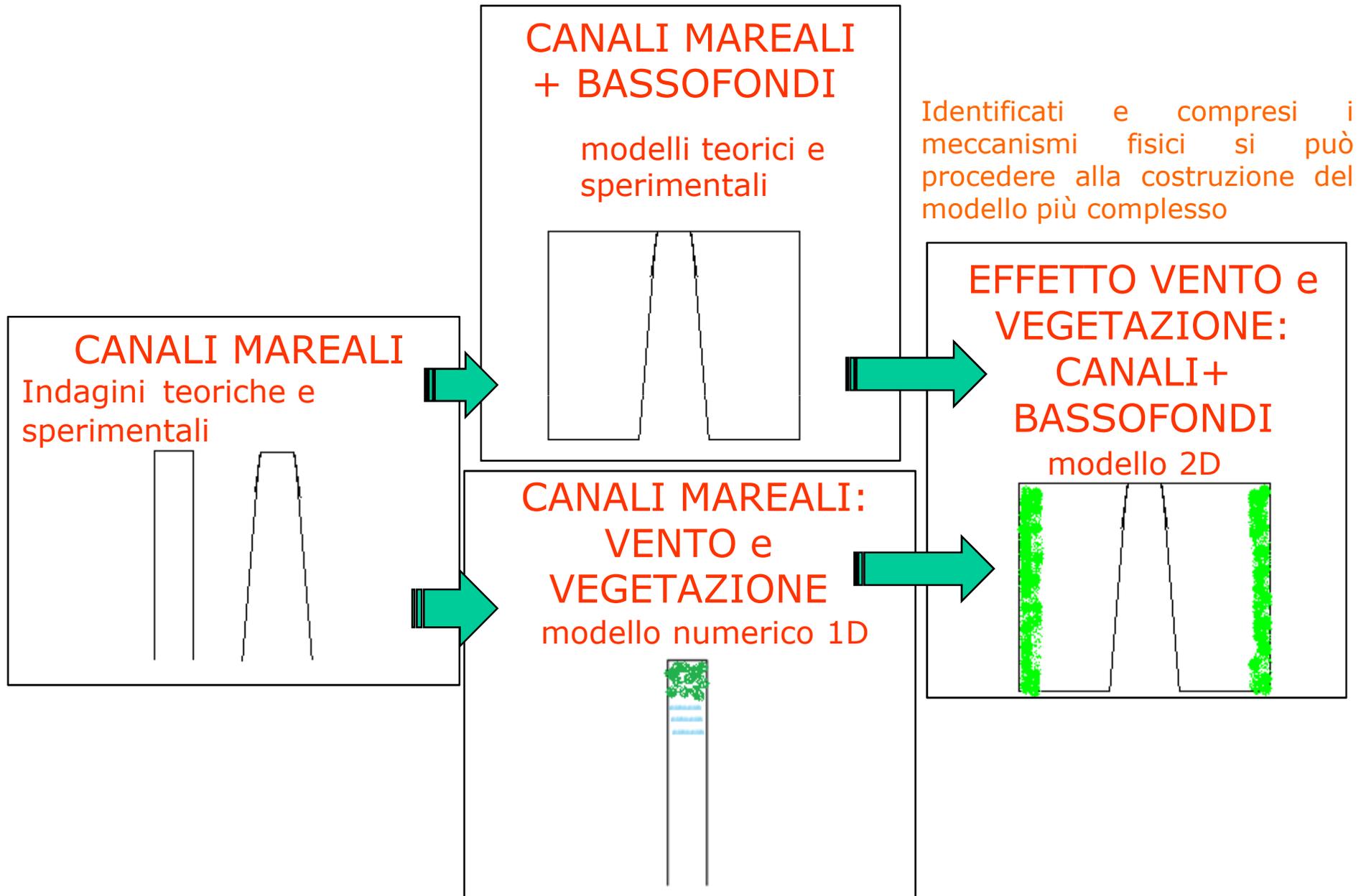
- diversione dei corsi d'acqua;
- costruzione di moli alle bocche;
- fenomeni antropici (scavo di canali, realizzazione di aree emerse);

+

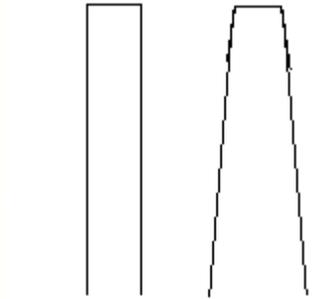
Subsidenza ed eustatismo

Cosa ci si aspetta in futuro ?

Lo studio della morfodinamica lagunare richiede sinergia fra modelli teorico-sperimentali di crescente complessità

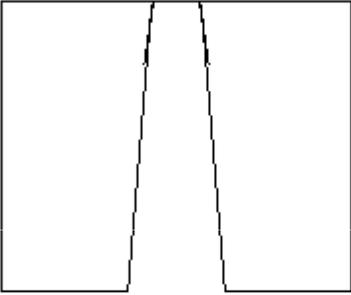


CANALI MAREALI
Indagini teoriche e
sperimentali



**CANALI MAREALI
+ BASSOFONDI**

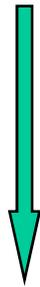
modelli teorici e
sperimentali



**CANALI MAREALI:
VENTO e
VEGETAZIONE**
modello numerico 1D



1 - Equilibrio di Canali Mareali



Teoria

Schuttelaars & de Swart, JGR, 1996
Lanzoni and Seminara, JGR 2002
Seminara et al. JFM 2010



Indagini Sperimentali

Tambroni, Bolla & Seminara
JGR, 2005

Cosa abbiamo
imparato ?

IL MODELLO FISICO

LABORATORIO DEL DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA AMBIENTALE -GENOVA



| PARAMETRI IDRODINAMICI | ESP.1 | ESP.2 |
|------------------------------|---------|--------|
| • Profondità media iniziale | 0.082 m | 0.09 m |
| • Ampiezza di marea relativa | 0.32 | 0.36 |
| • Periodo dell'onda di marea | 180 s | 120 s |

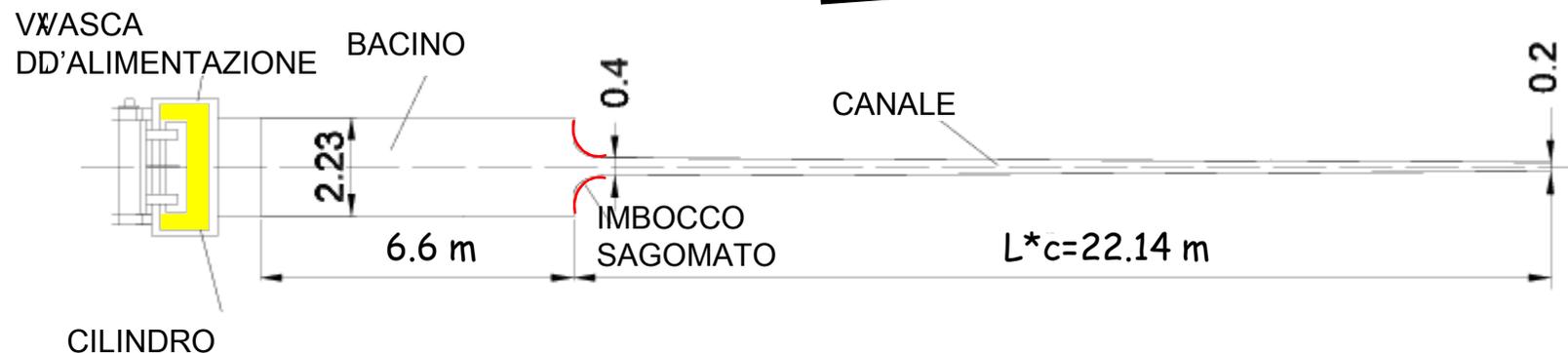
SEDIMENTI (gusci di noce frantumati)

- Densità 1480 Kg/m³
- Diametro medio 0.3 mm

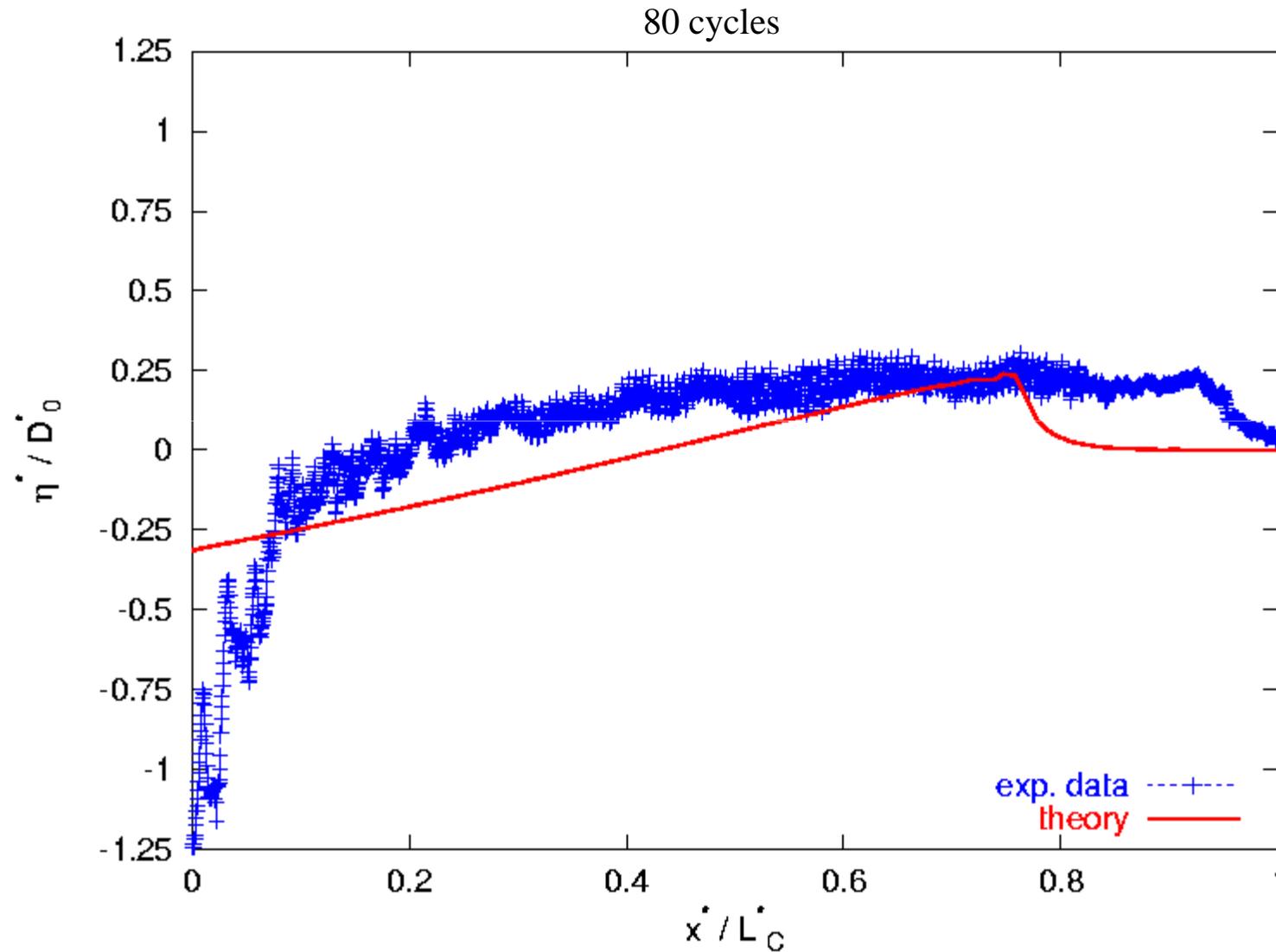
Esperimenti a fondo mobile su:

1. CANALE A LARGHEZZA COSTANTE

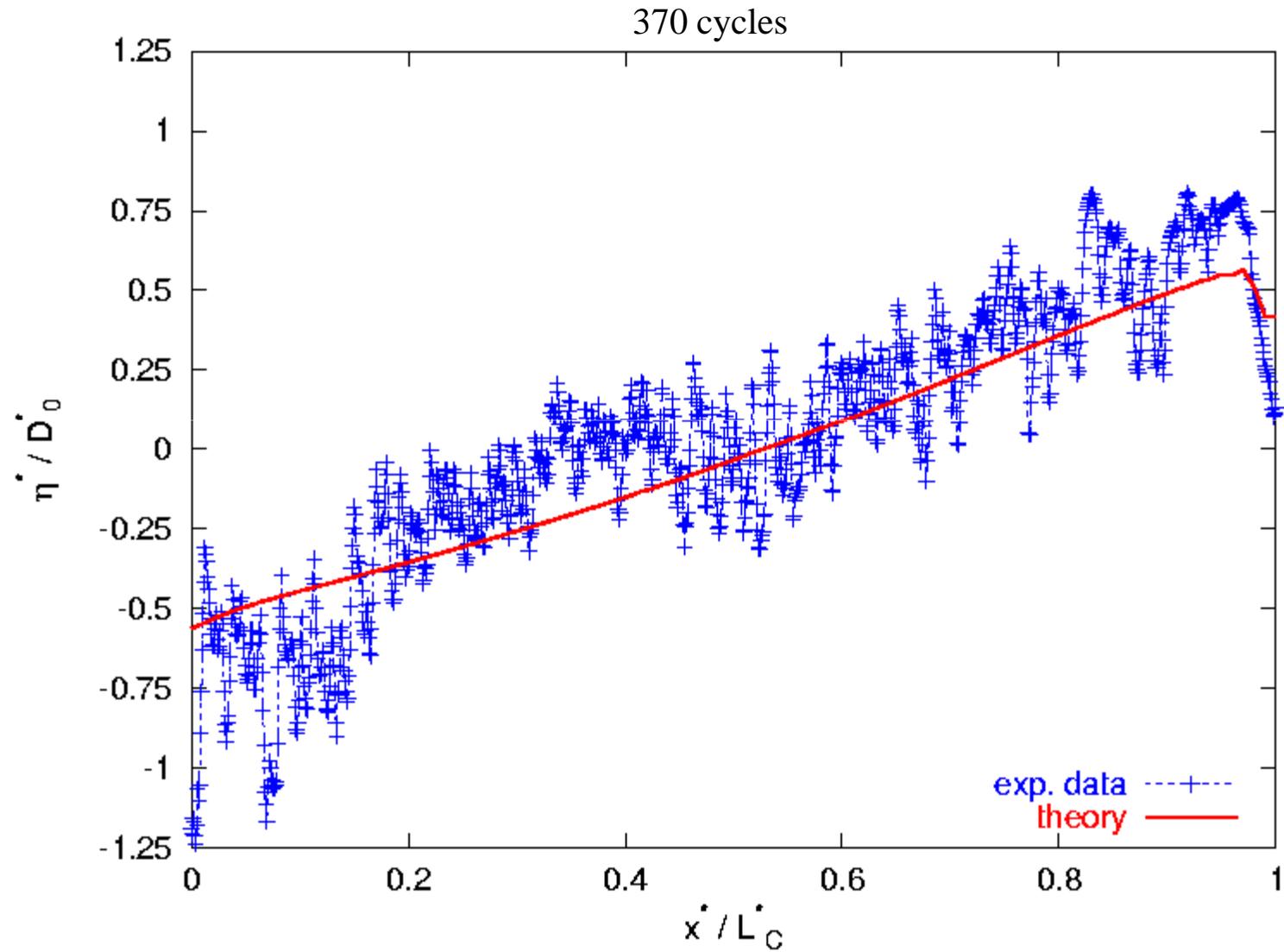
2. CANALE CONVERGENTE



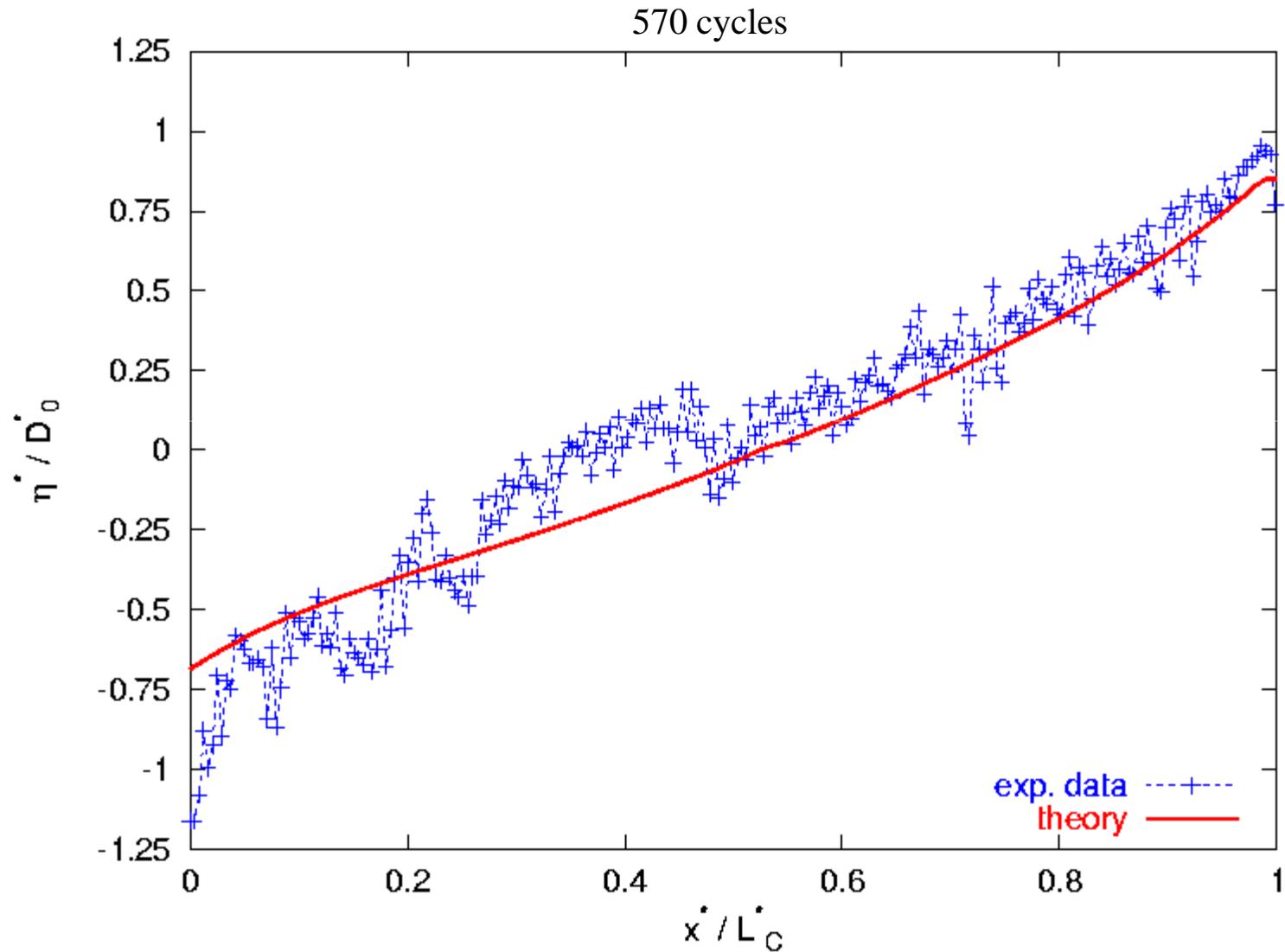
ESPERIMENTO 1: EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DEL FONDO DEL CANALE



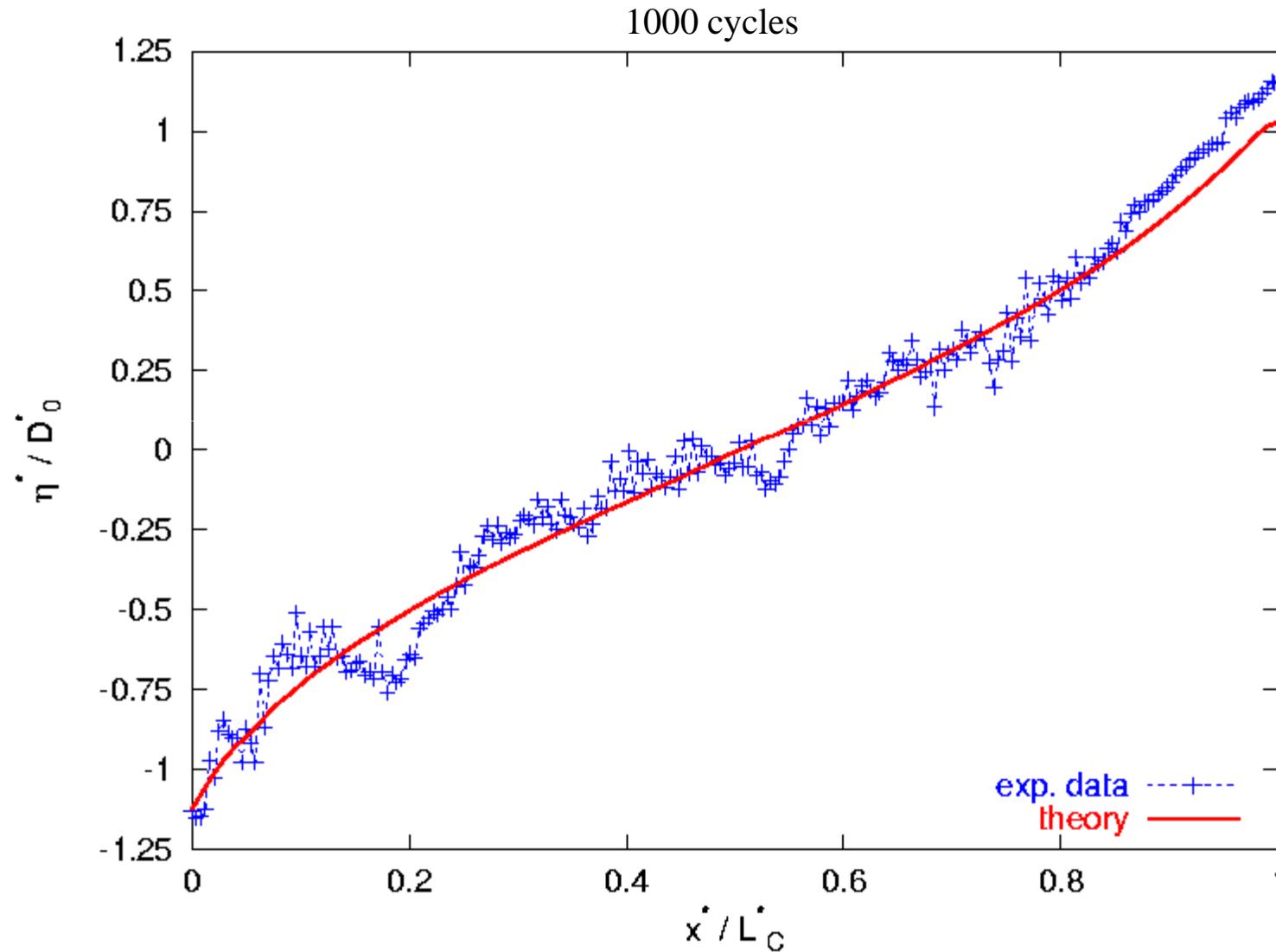
ESPERIMENTO 1: EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DEL FONDO DEL CANALE



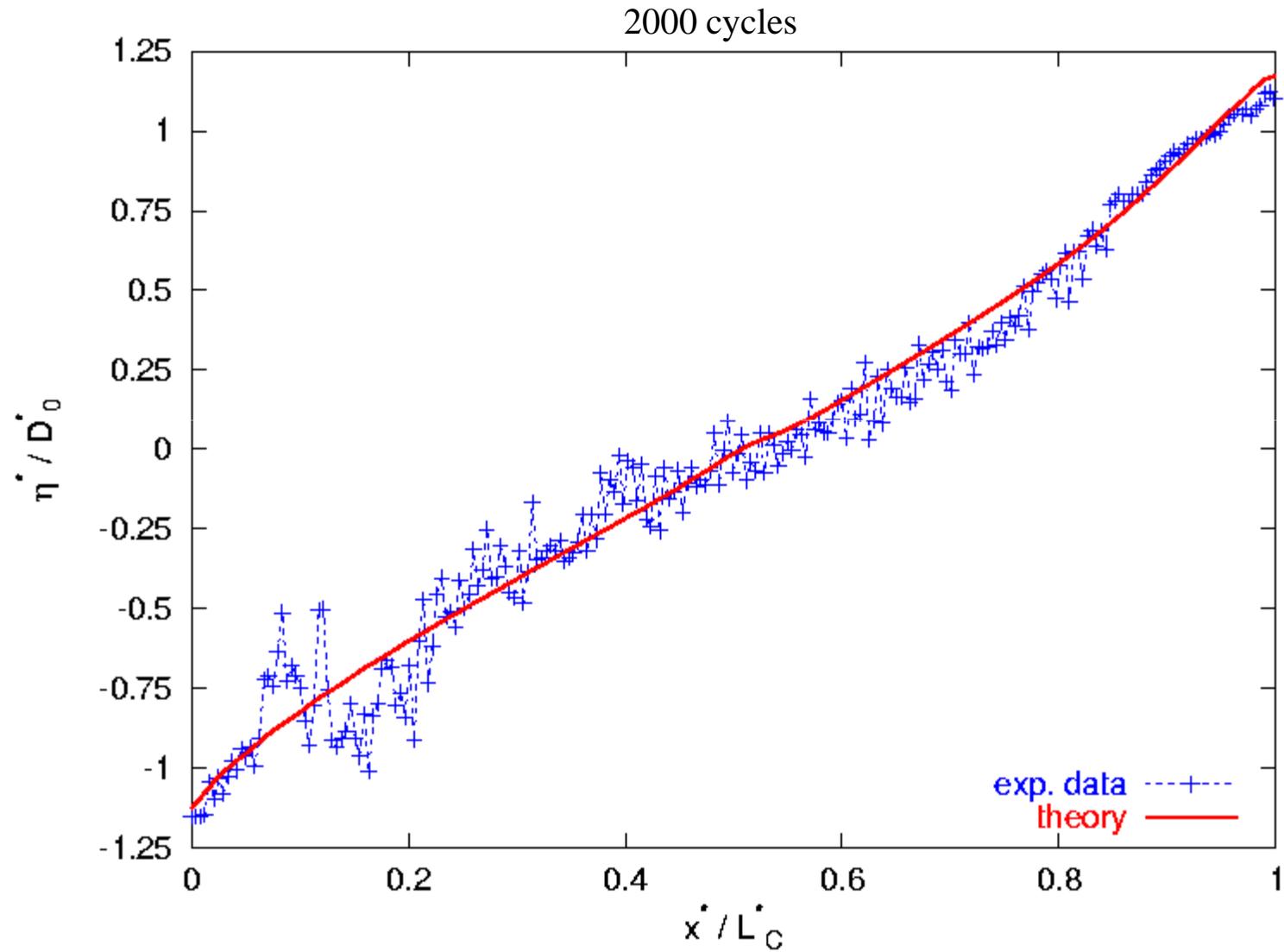
ESPERIMENTO 1: EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DEL FONDO DEL CANALE



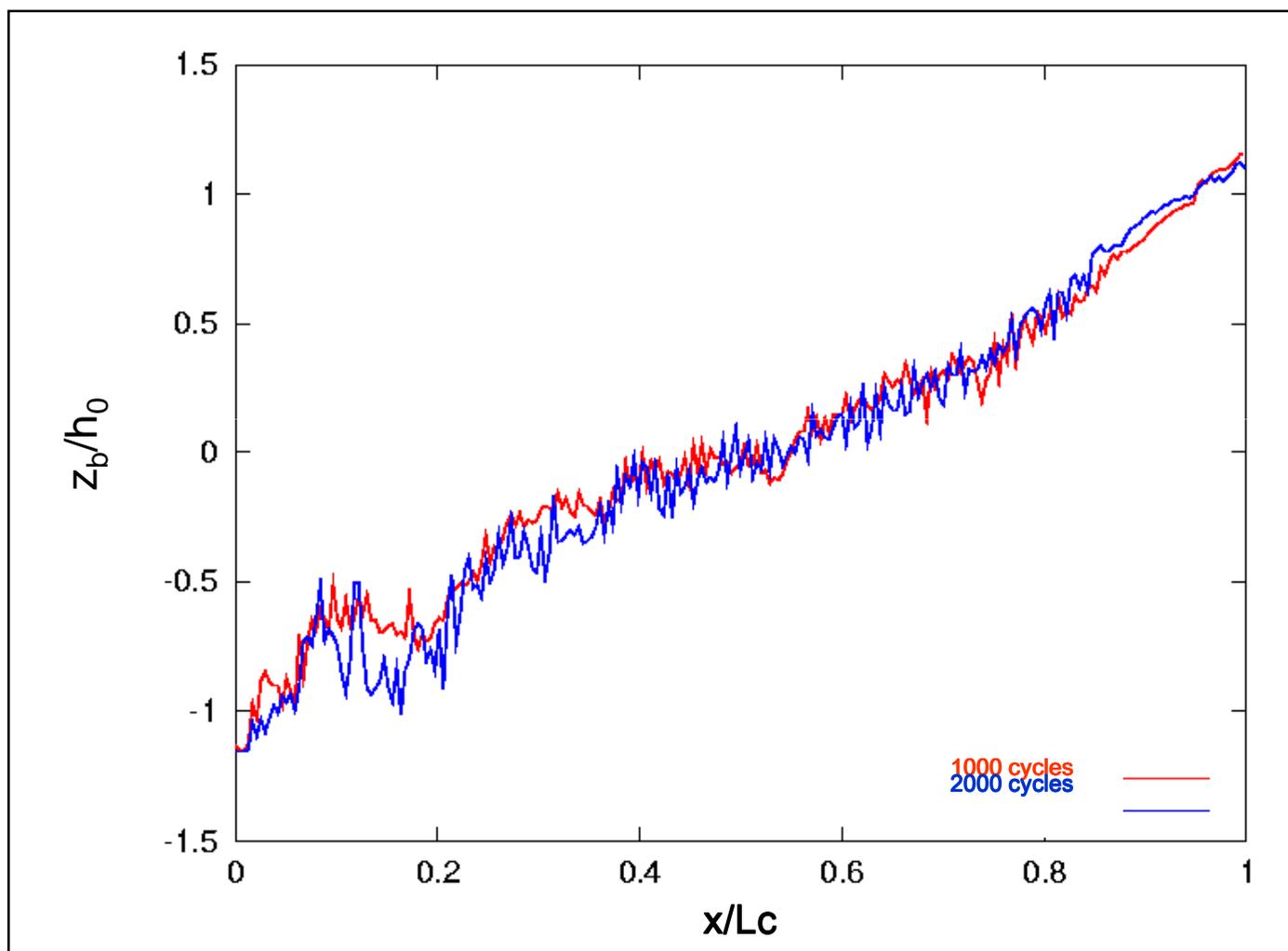
ESPERIMENTO 1: EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DEL FONDO DEL CANALE



ESPERIMENTO 1: EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DEL FONDO DEL CANALE



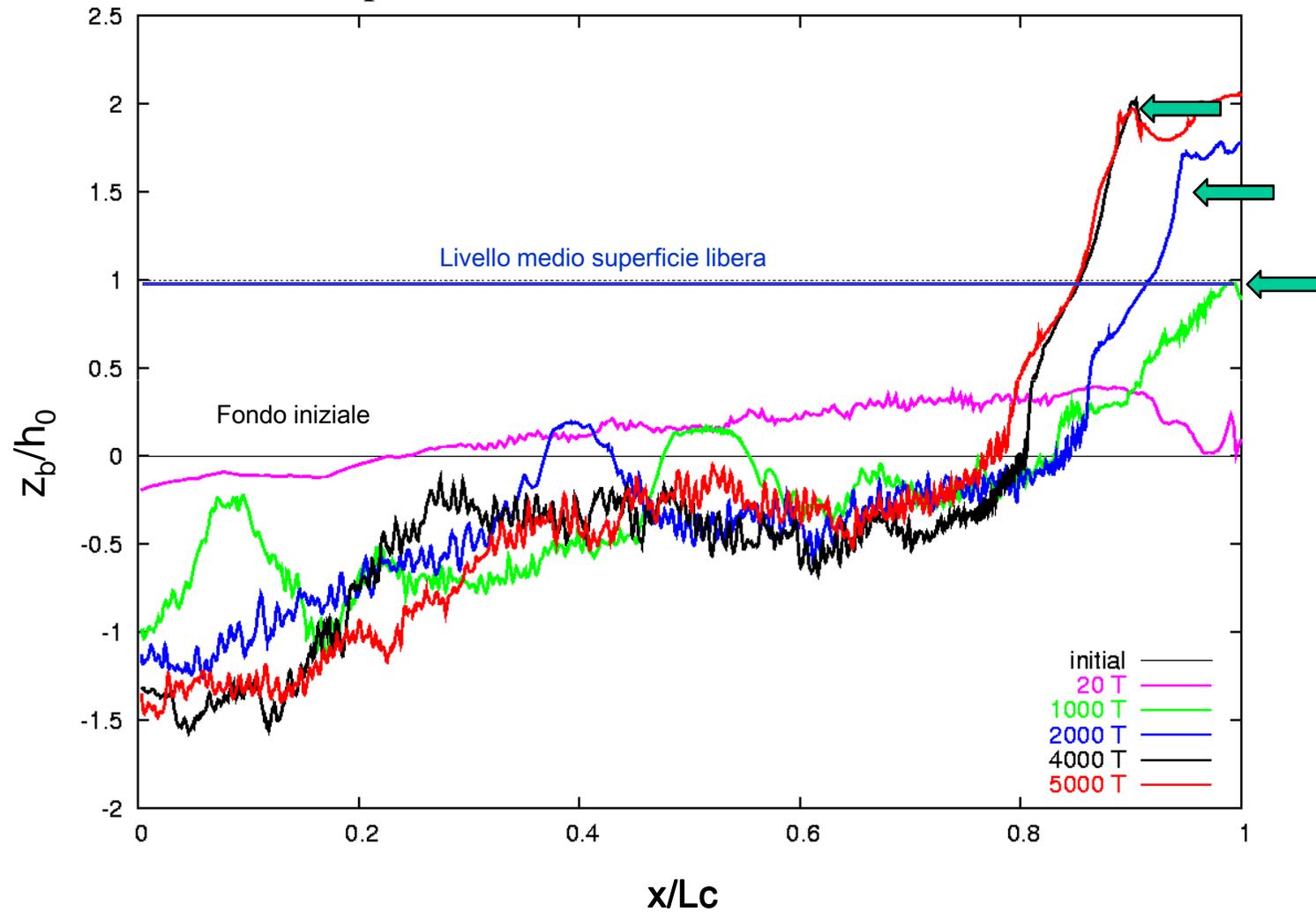
ESPERIMENTO 1: EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DEL FONDO DEL CANALE



Il confronto tra i profili del fondo a 1000 e 2000 cicli mareali suggerisce che la configurazione raggiunta è vicina all'equilibrio.

ESPERIMENTO 2: EVOLUZIONE DEL PROFILO LONGITUDINALE DEL FONDO DEL CANALE

Durata esperimento= 5000 cicli mareali



Il canale progressivamente riduce la propria lunghezza

Tali risultati suggeriscono alcune riflessioni

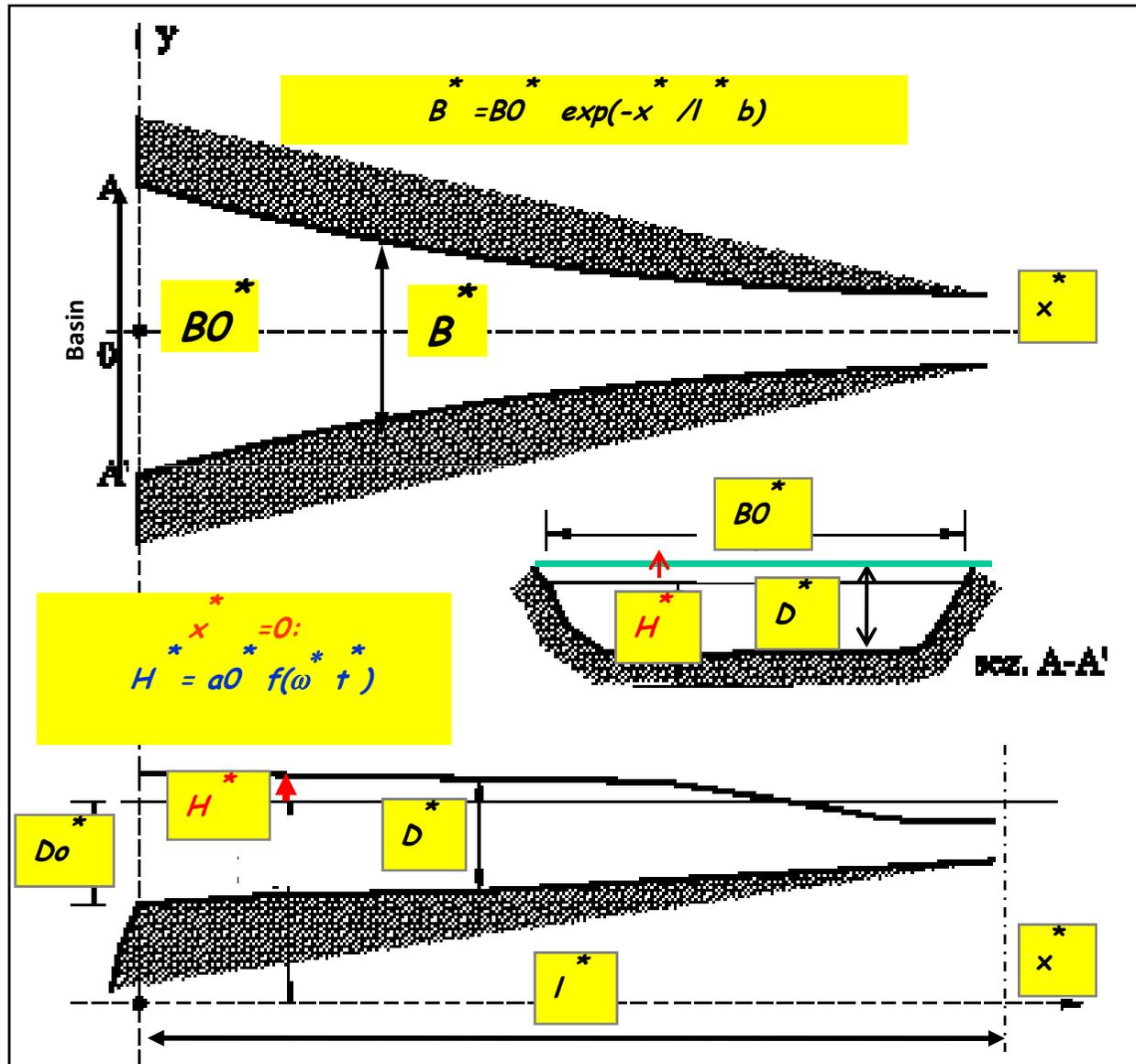
I canali mareali **all'equilibrio**
hanno una lunghezza caratteristica?

Date le caratteristiche dei sedimenti, le condizioni all'imbocco ed il grado di convergenza del canale,
si puo' predirne la lunghezza d'equilibrio?

Un approccio **completamente analitico** valido per i canali mareali **'corti'** tipicamente osservati nelle lagune consente di dare una risposta a tali domande.

(Seminara, Lanzoni, Tambroni & Toffolon, JFM , 2010)

Si consideri un canale mareale a sezione convergente verso monte secondo una legge esponenziale



Nota:
se
 $l^* b \rightarrow \infty$

Canale
a sezione
costante

IDRODINAMICA:

Continuità+Conservazione della quantità di moto

Condizioni al contorno

All'imbocco: Marea forzante

Presso la linea di riva:

Peculiarità della regione a monte del canale soggetta a periodica emersione-immersione:

- contorno mobile**
- caratterizzato da profondità che tendono ad annullarsi**

Una soluzione analitica
per
Canali 'corti' e sottoposti ad oscillazioni di
marea piccole

Piccole oscillazioni
mareali

$$\epsilon \ll 1$$

Corti

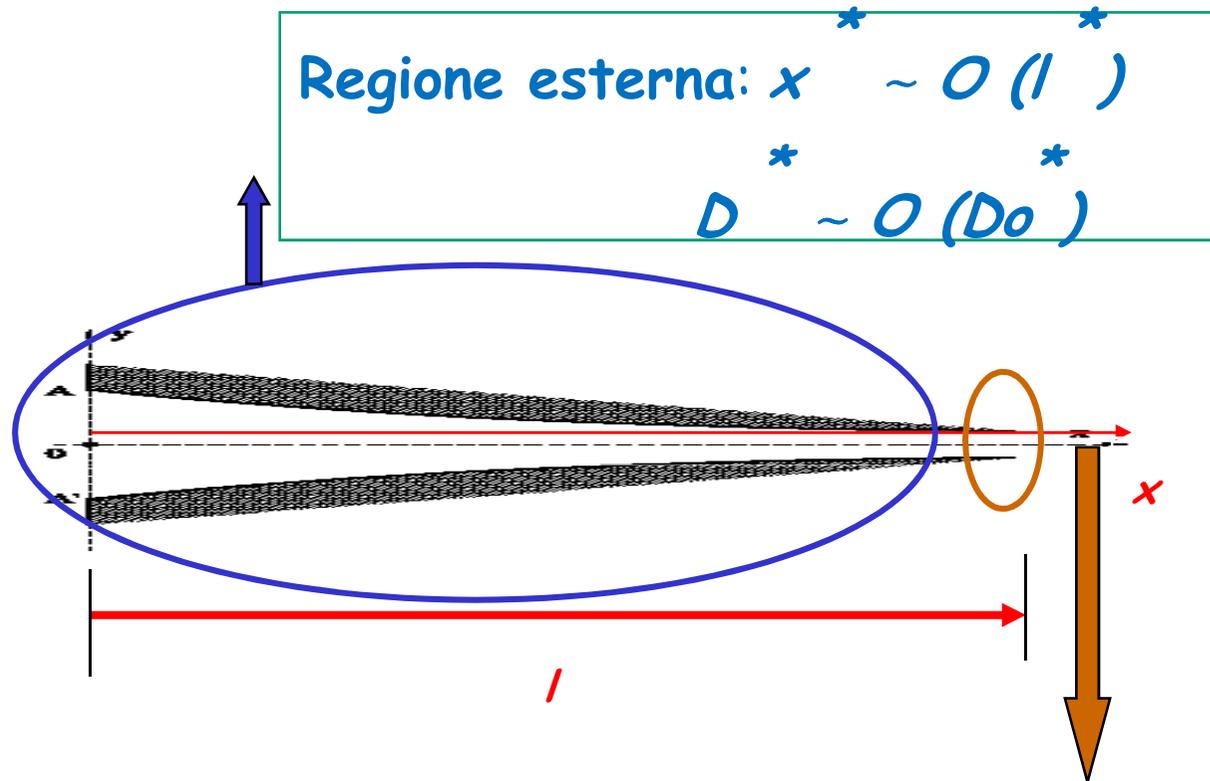
$$\lambda = \Lambda \epsilon$$

$$\Lambda \sim O(1)$$

Una soluzione analitica per canali 'corti', convergenti e sottoposti ad oscillazioni di marea piccole

Applicazione del metodo delle "matched asymptotic expansions"

Distinzione tra regione Esterna ed Interna



Region interna: $x^* - l \sim O(\epsilon l)$
 $D^* \sim O(\epsilon D_0^*)$

$\epsilon = a_0/D$ o ampiezza relativa dell'onda di marea all'imbocco

Equazione d'evoluzione del fondo (Exner)

$$B \frac{\partial(cD)}{\partial t} + B(1-p) \frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial(Bq_s)}{\partial x} = 0$$

η quota del fondo media nella direzione trasversale locale ed istantanea

c concentratione di sedimenti media nella sezione

p porosità dei sedimenti

q_s flusso totale di sedimenti per unità di larghezza

La nozione di
equilibrio morfodinamico
Dipende dalla scala temporale considerata

Alla scala del periodo di marea T:

$$\frac{\partial (B \int_t^{t+T} q_s dt)}{\partial x} = 0$$

ovvero il flusso netto di sedimenti nel ciclo di marea deve mantenersi costante

In particolare, in assenza di un apporto fluviale a monte, esso deve essere identicamente nullo per soddisfare la condizione al contorno a monte:


$$B \langle q_s \rangle = B \left[\frac{1}{T} \int_t^{t+T} q_s dt \right] = 0$$

se un' onda forzante arbitraria (periodica a media nulla)
si impone all'imbocco

la non linearità della legge del trasporto implica che una
forte condizione è necessaria:

il flusso di sedimenti deve annullarsi ad ogni
istante.

Pertanto $|U|$ non deve superare il suo valore critico U_{cr}

$$U_{cr} = C \sqrt{\tau_{cr}^* (s - 1) g d_s}$$

Nota: C è la conduttanza $\approx D^{1/6}$

La lunghezza d'equilibrio:

$$l_{eq0}^* = -l_b^* \ln \left[1 - \frac{l_\infty^*}{l_b^*} \right]$$

se $l_b^* \rightarrow \infty$ (canale non convergente):

$$l_{eq}^* \rightarrow l_\infty^*$$

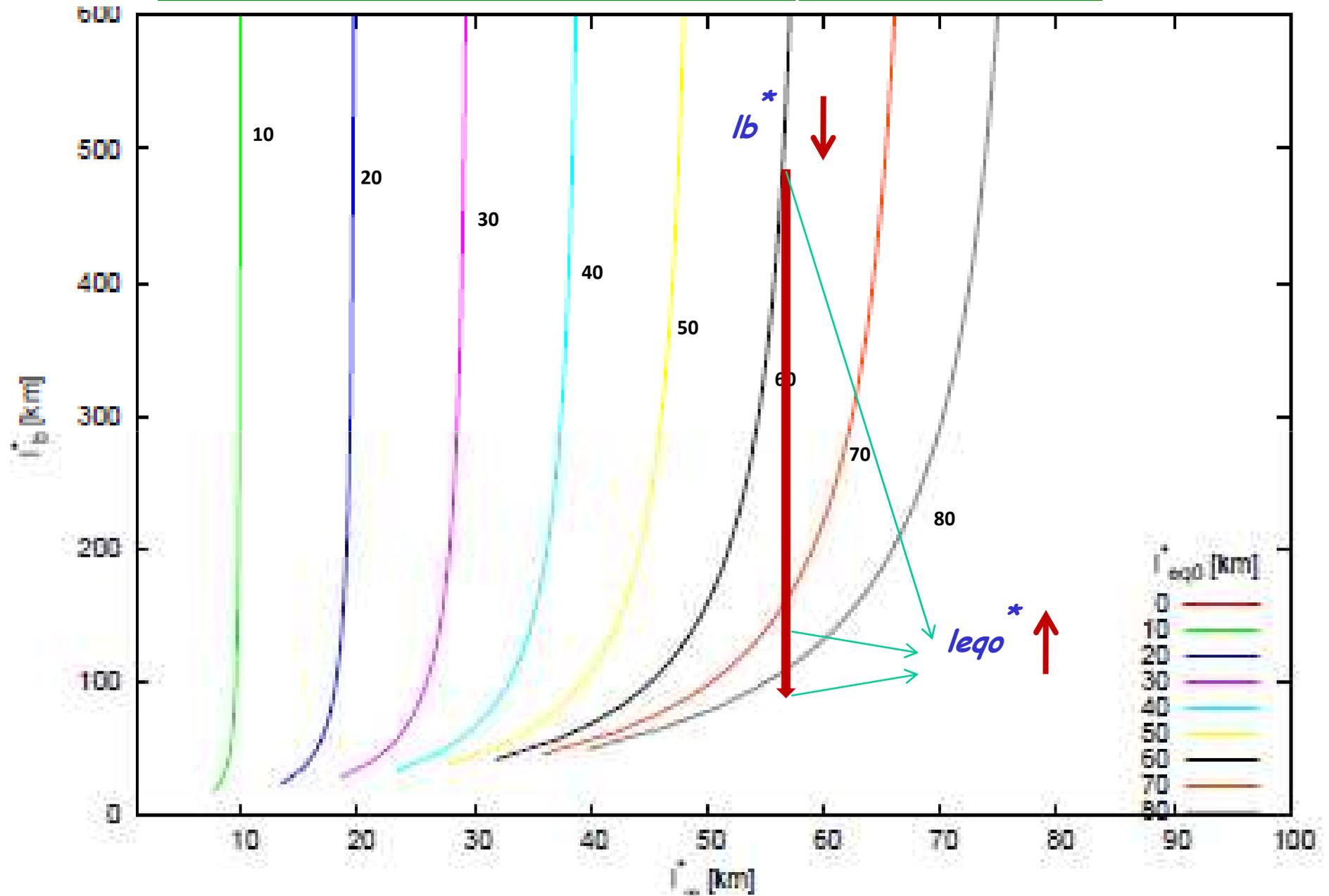
$$l_\infty^* = \frac{U_{cr}^* D_0^*}{a_0^* \omega_0^* |f_{max}|}$$

*La lunghezza d'equilibrio scala con
la distanza percorsa in un quarto di periodo da una
particella che si muove a velocità pari al rapporto tra la
velocità critica d'incipiente trasporto e l'ampiezza
relativa dell'onda di marea*

Implicazione 1

“ Gran Laguna fa gran porto ”

se l_b^* diminuisce, l_{eq}^* aumenta



Profilo d'equilibrio del fondo al primo ordine

$$D_0(x) = \frac{l_b^*}{l_\infty^*} \left[1 - \exp \left[\frac{l_{eq0}^*}{l_b^*} (x - 1) \right] \right]$$



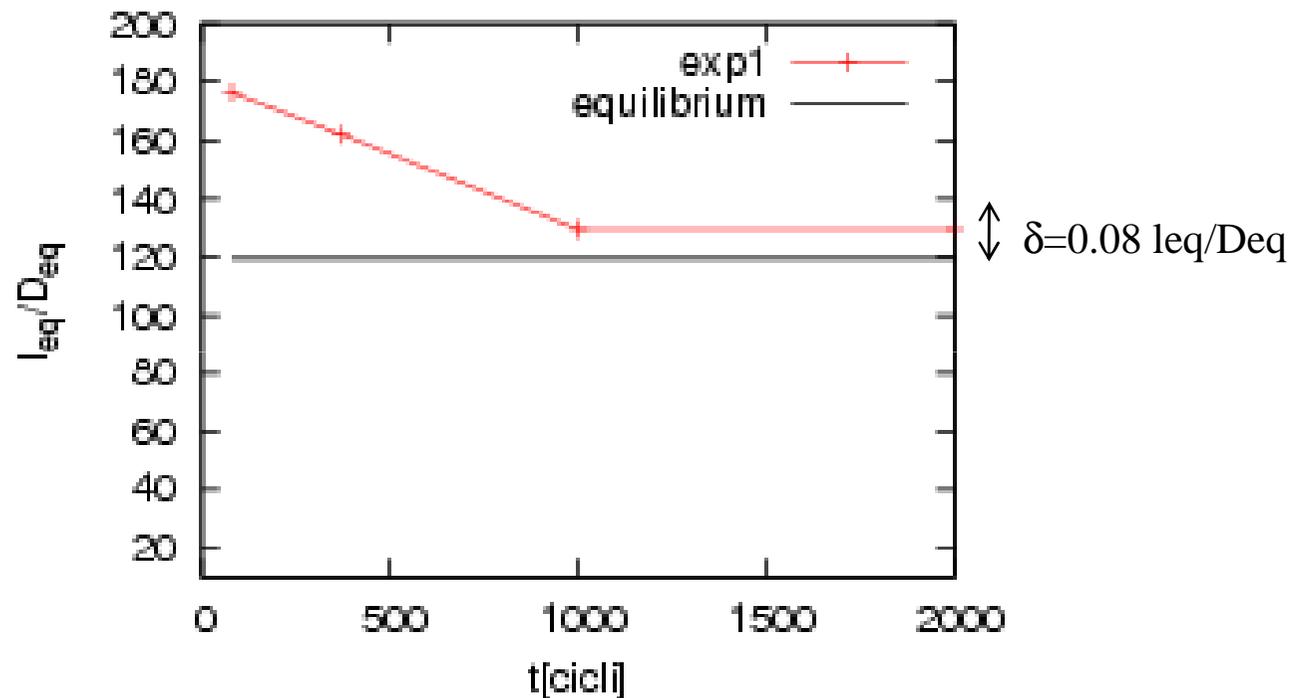
se $l_b^* \rightarrow \infty$ (canale non convergente)

$$D_0(x) \rightarrow (1 - x)$$

La concavità nel profilo del fondo è indotta dalla convergenza del canale

Come si confrontano tali
risultati con le osservazioni in
laboratorio ?

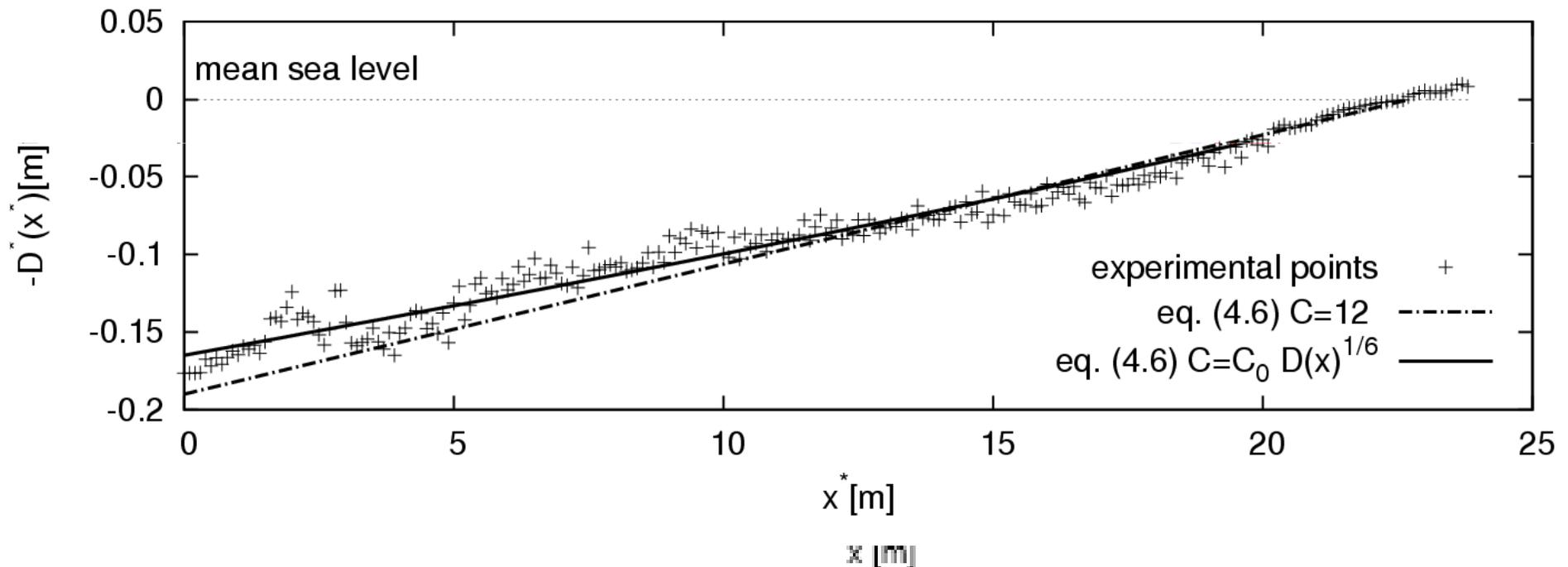
Confronto tra le lunghezze e profondità
d'equilibrio predette da Seminara et al. (2010)
e le **osservazioni sperimentali** di Tambroni et al. (2005)



Il sistema è all'equilibrio!!

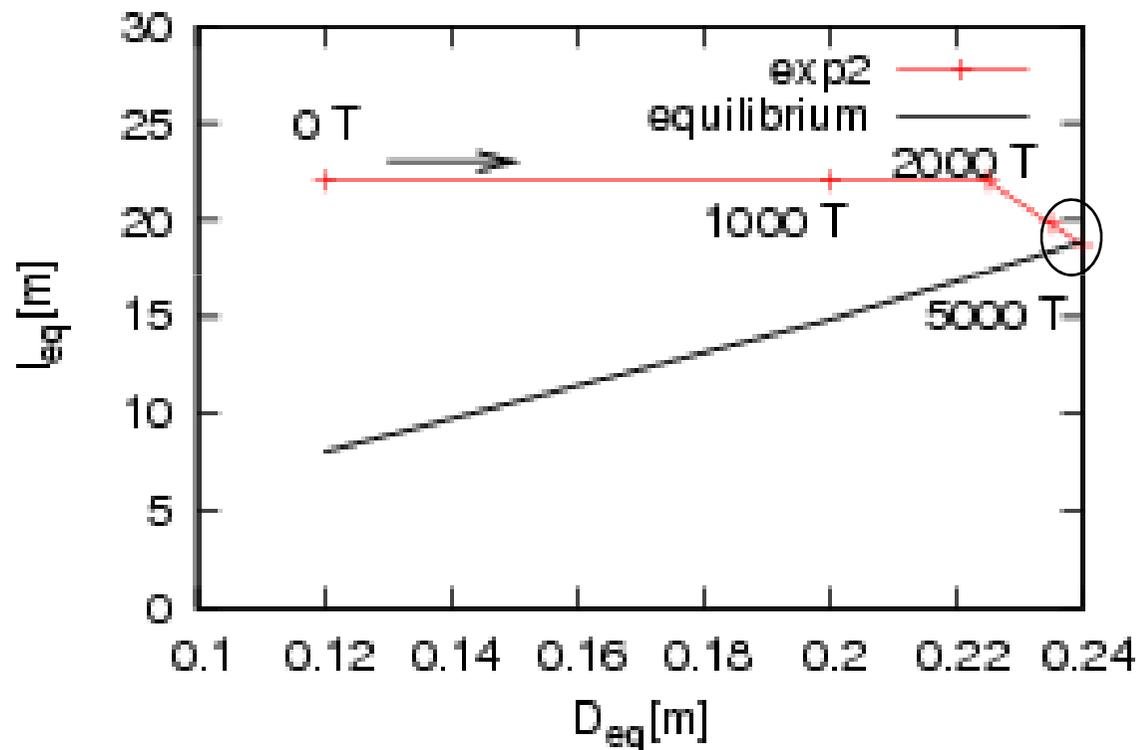
Confronto tra il **profilo d'equilibrio predetto** da Seminara et al. (2010) e le **osservazioni sperimentali** di Tambroni et al. (2005)

$a_0=0.02378\text{m}$; $L_{eq}=22.88\text{m}$; $U_{cr}=0.1\text{ m/s}$; $C_{avg}=12$; $T=180\text{s}$; $\theta_{cr}=0.05$



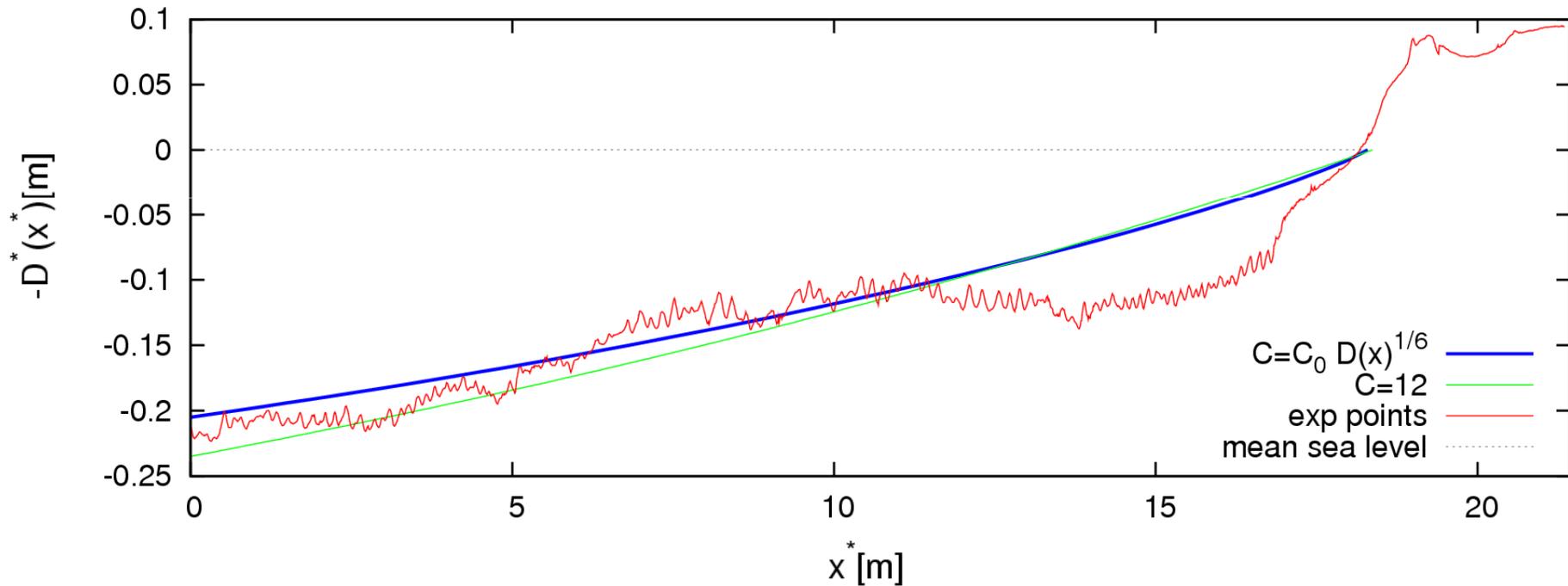
variazioni longitudinali della scabrezza relativa del fondo
 inducono una **concavità** nel profilo del fondo

Confronto tra il
profilo d'equilibrio predetto da Seminara et al. (2010)
e le osservazioni sperimentali di Tambroni et al. (2005)



Il sistema è all'equilibrio!!

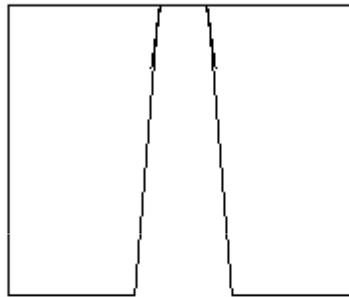
Confronto tra il
profilo d'equilibrio predetto da Seminara et al. (2010)
e le osservazioni sperimentali di Tambroni et al. (2005)



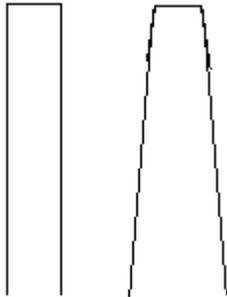
In che modo la presenza di
aree laterali adiacenti al
canale influenza la lunghezza
d'equilibrio del canale?

CANALI MAREALI + BASSOFONDI

modelli teorici e
sperimentali



CANALI MAREALI Indagini teoriche e sperimentali



CANALI MAREALI: VENTO e VEGETAZIONE modello numerico 1D



2 - Equilibrio di Canali Mareali: l'effetto dei bassifondi

- MODIFICANO L'IDRODINAMICA DELLA PROPAGAZIONE DELL'ONDA DI MAREA NEL CANALE
- SCAMBIANO SEDIMENTI CON IL CANALE:
 - bassifondi dominati dall'azione della marea (inerodibili)
 - bassifondi in presenza di vento (erodibili)

Teoria

Seminara et al. JFM 2010

Indagini Sperimentali

De Capitani et al. 2010

IL MODELLO FISICO

DICAT LABORATORIO - GENOVA



PARAMETRI IDRODINAMICI:

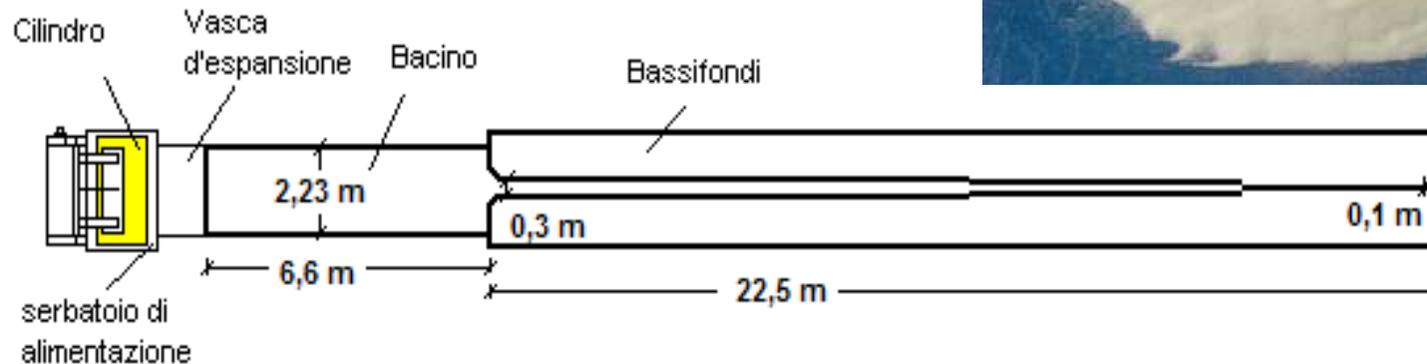
- Profondità media iniziale 0.055 m
- Ampiezza relativa dell'onda di marea 0.272
- Periodo onda di marea 180 s

SEDIMENTI (particelle di policarbonato)

- Densità 1270 kg/m³
- Diametro medio 0.15 mm

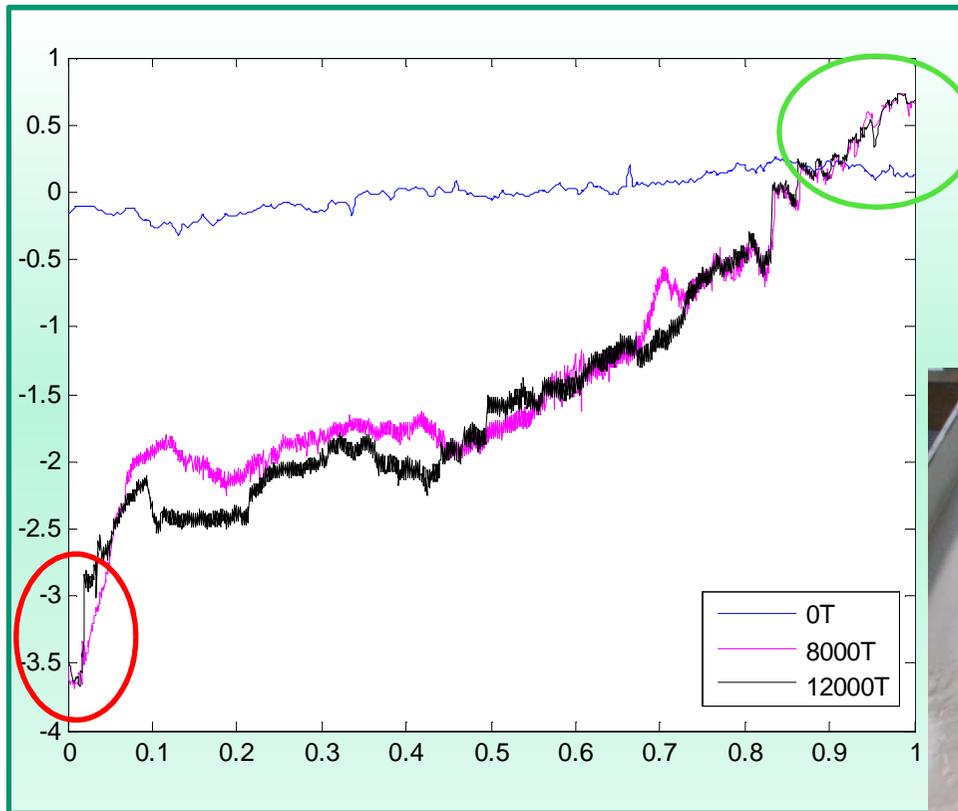


CANALE RETTILINEO CONVERGENTE CON AREE LATERALI



il ruolo dei bassifondi: osservazioni sperimentali

La presenza delle aree laterali modifica il profilo d'equilibrio del canale mareale: la profondità all'imbocco aumenta (Canestrelli et al., 2007; Tambroni & Seminara 2008; Seminara et al. 2010)

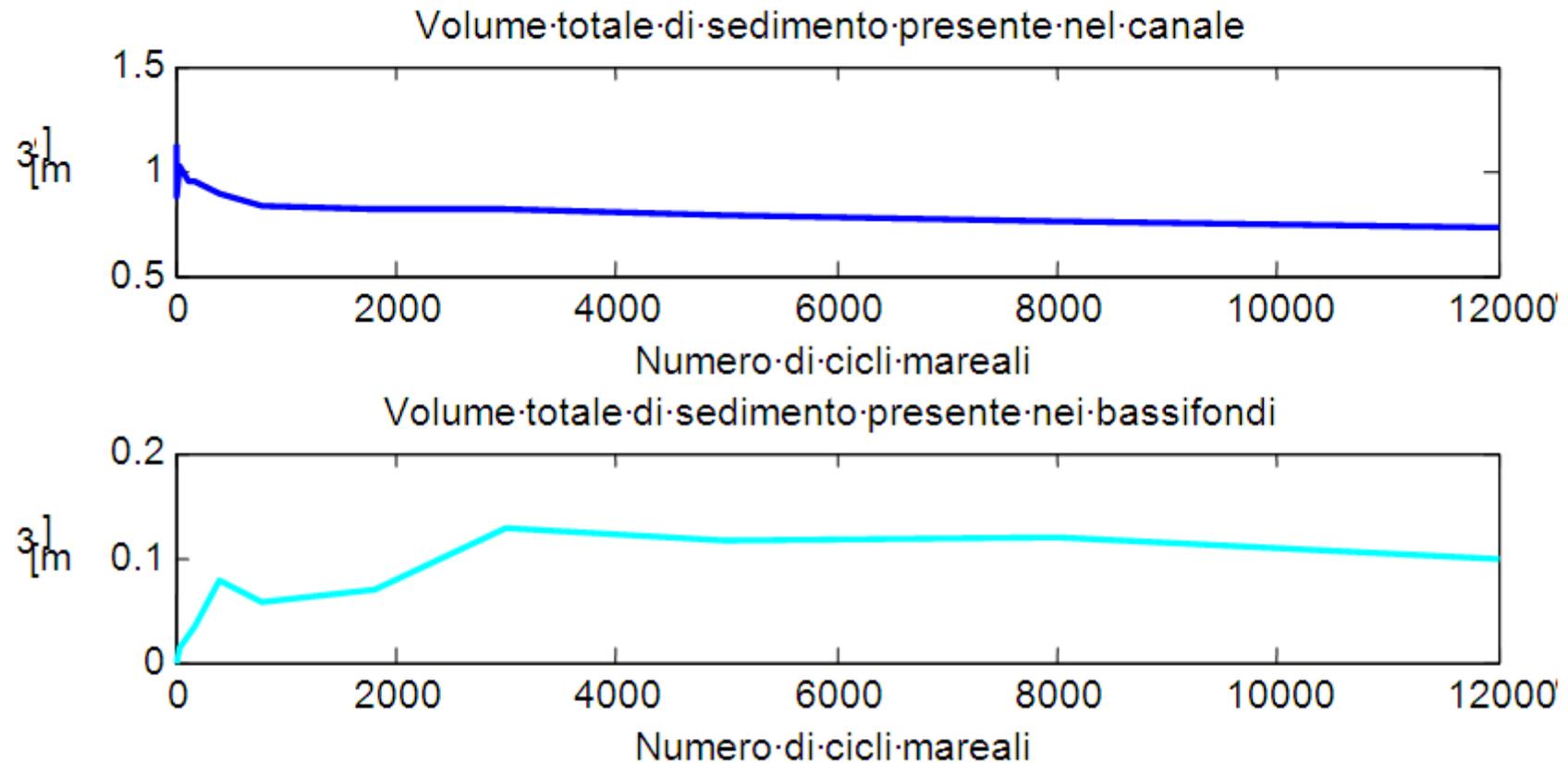


Deposito di sedimenti in corrispondenza dell'estremità interna del canale



Il sistema è all'equilibrio?

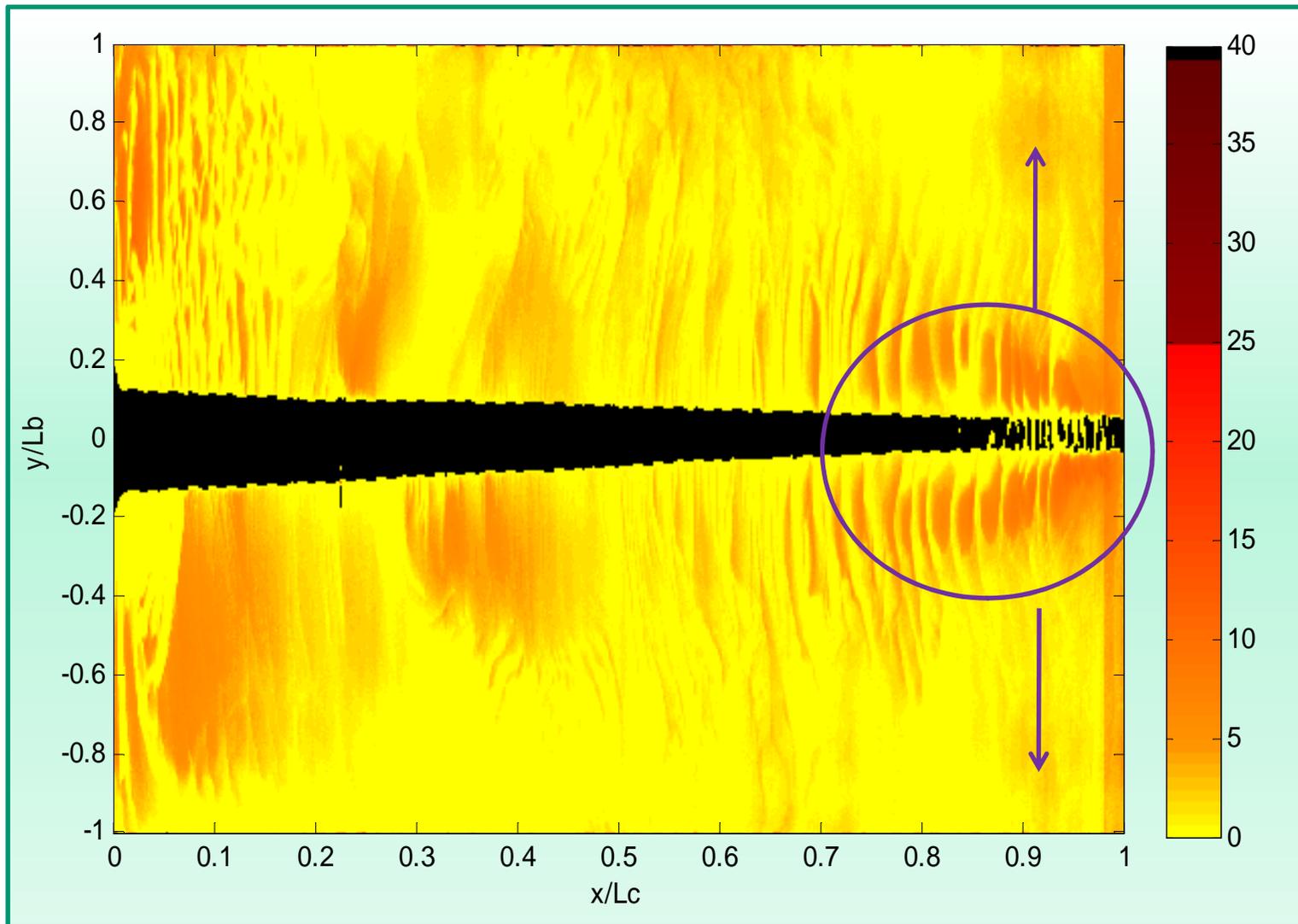
Scambio di sedimenti tra canale e bassifondi



Circa un terzo del materiale eroso dal fondo del canale risulta essere depositato sui bassifondi

il ruolo dei bassifondi: osservazioni sperimentali

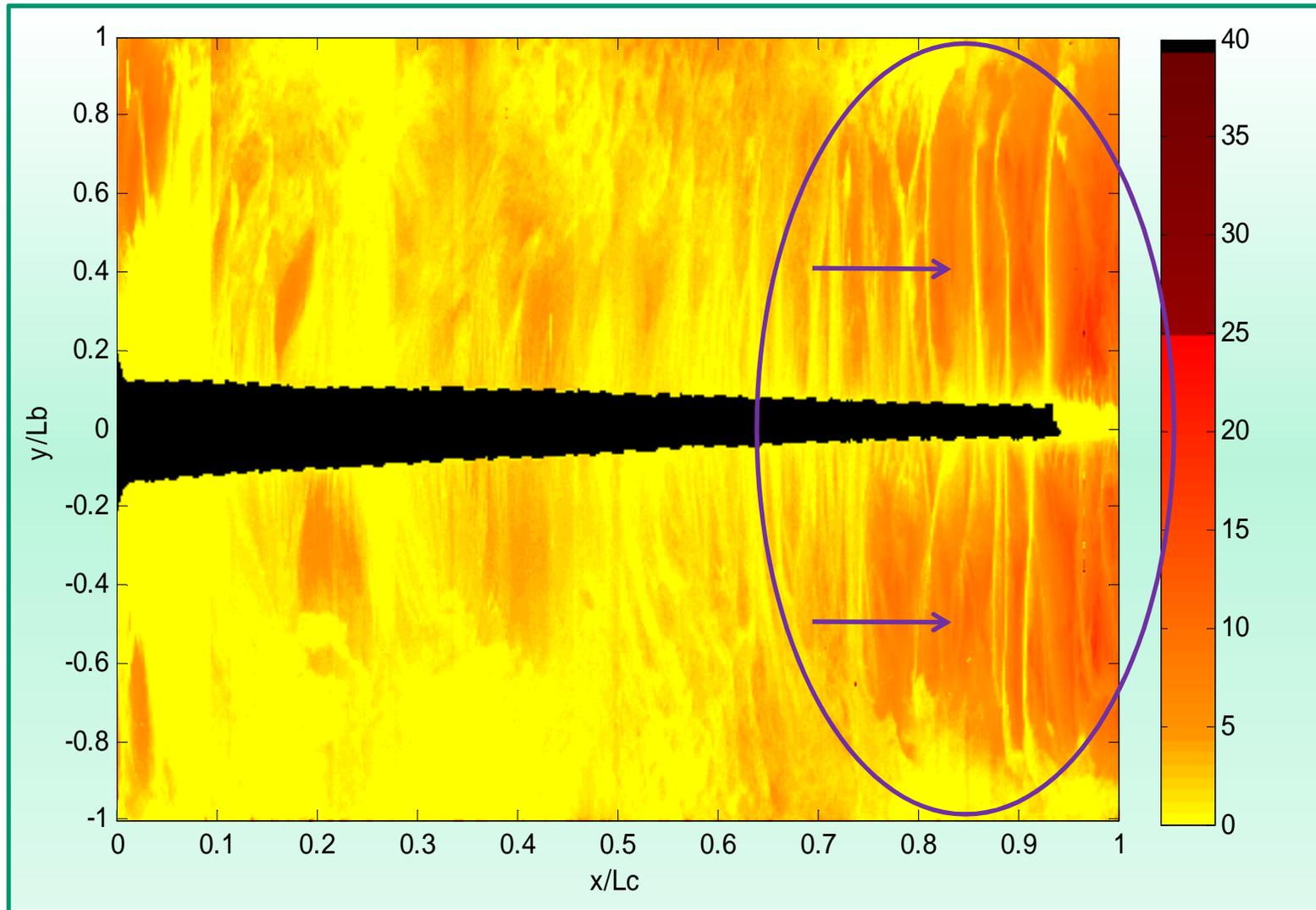
Evoluzione del deposito di sedimenti sulle aree laterali



270 cycles

il ruolo dei bassifondi: osservazioni sperimentali

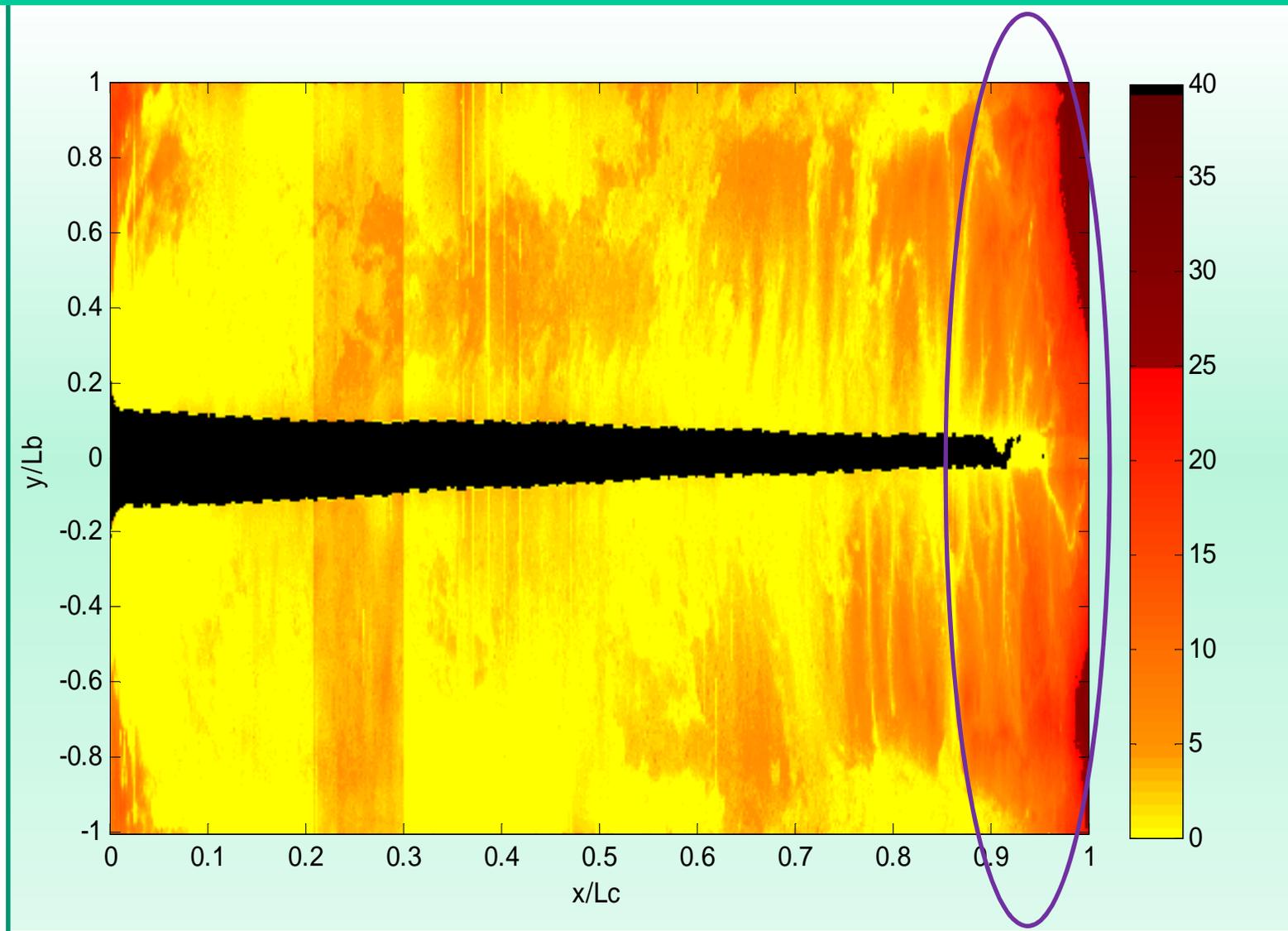
Evoluzione del deposito di sedimenti sulle aree laterali



800 cycles

il ruolo dei bassifondi: osservazioni sperimentali

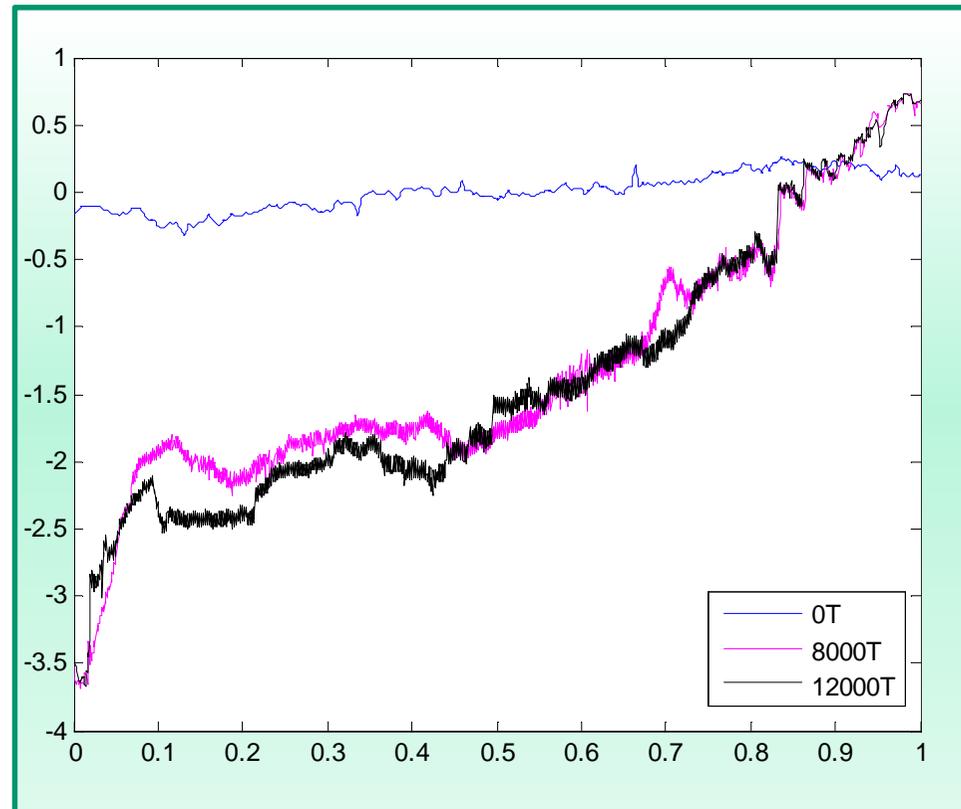
Evoluzione del deposito di sedimenti sulle aree laterali



12000 cycles

il ruolo dei bassifondi: osservazioni sperimentali

La presenza delle aree laterali modifica il profilo d'equilibrio del canale mareale: la profondità all'imbocco aumenta (Canestrelli et al., 2007; Tambroni & Seminara 2008; Seminara et al. 2010)

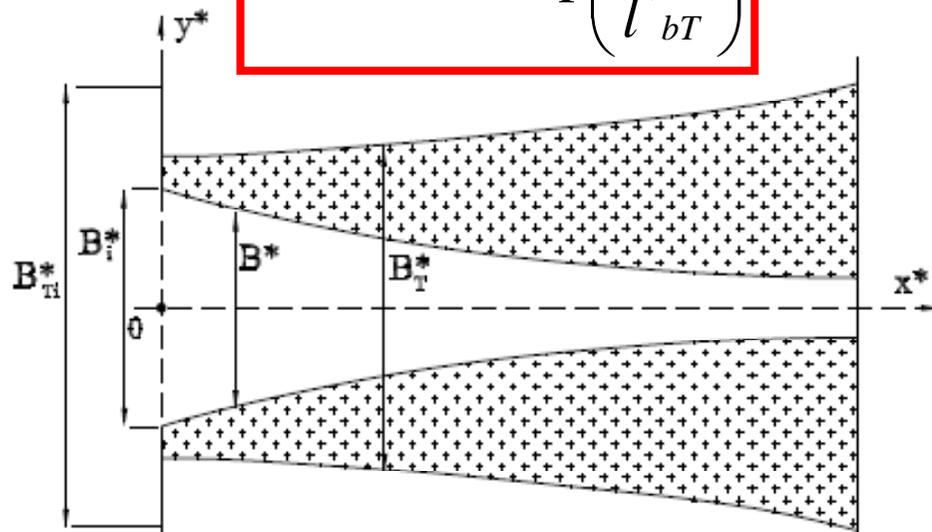


Il sistema è all'equilibrio?

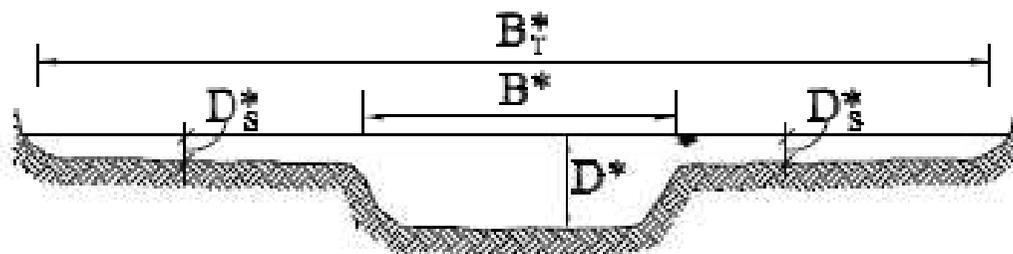
Il ruolo dei bassifondi sul profilo d'equilibrio del canale

$$B_T^* = B_{Ti}^* \exp\left(\frac{x^*}{l_{bT}^*}\right)$$

$$\varphi = \frac{B_T^*}{B^*}$$



$$\varphi = \varphi_i \exp\left[x^* \left(\frac{1}{l_{bT}^*} + \frac{1}{l_b^*}\right)\right]$$



Si considera il solo
effetto d'invaso
dei bassifondi !

Effetti sulla lunghezza d'equilibrio del canale

$$\frac{l_{eq}^*}{l_{bT}^*} = \ln \left(1 + \frac{l_{\infty}^*}{\varphi_i l_{bT}^*} \right)$$

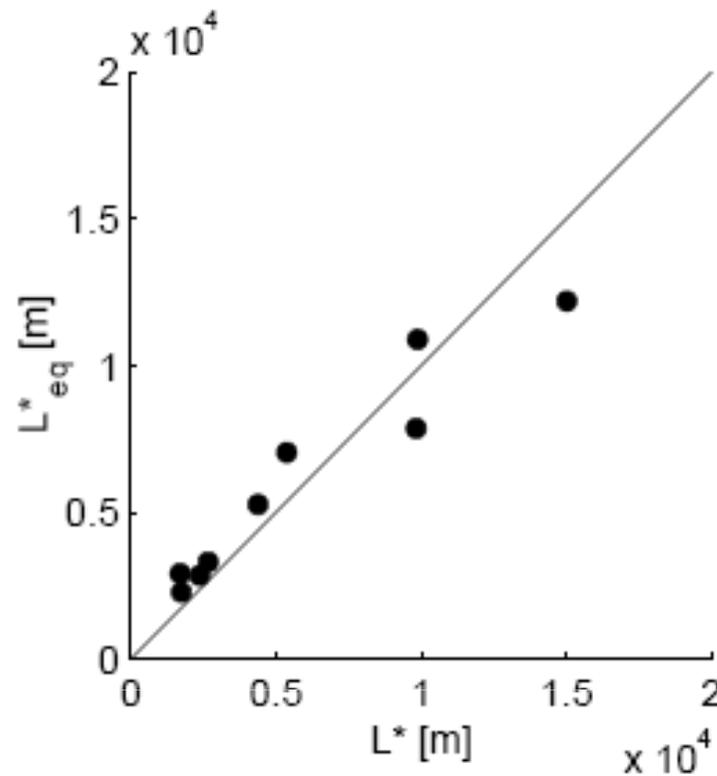
Se $l_{bT}^* \rightarrow \infty$: bassifondi non convergenti adiacenti ad un canale mareale convergente.

$$l_{eq}^* \rightarrow l_{\infty}^* / \varphi_i$$

I **bassifondi** inducono una diminuzione della lunghezza d'equilibrio del canale, tanto maggiore quanto la loro estensione è maggiore.

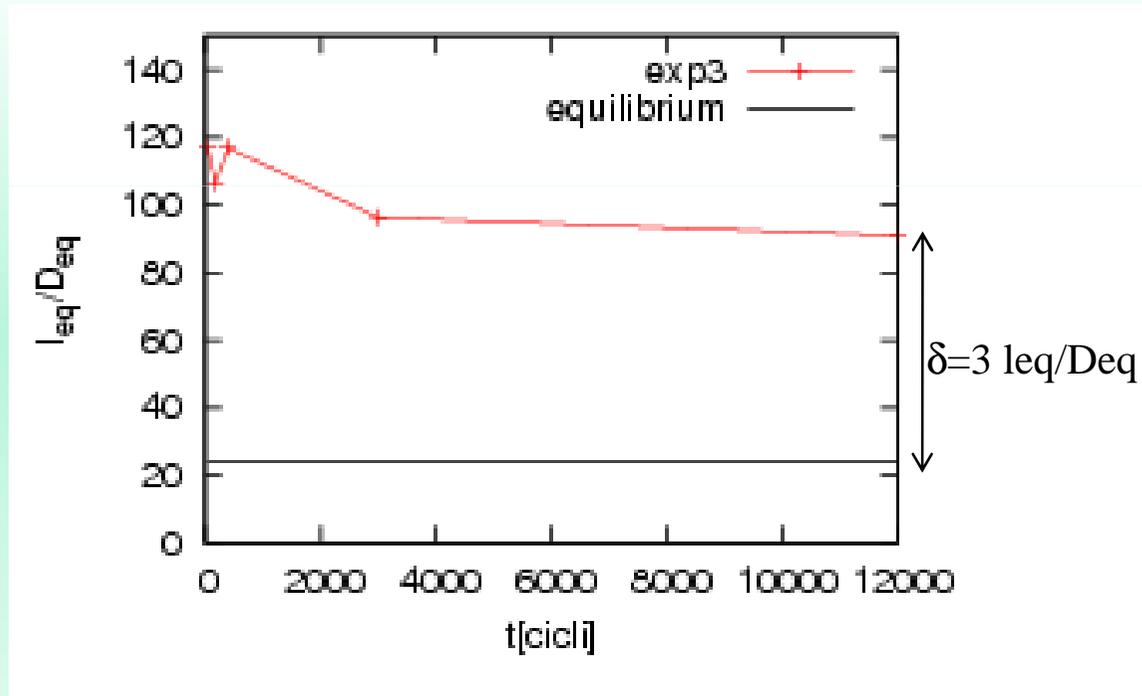
Come si
confrontano
tali risultati
con le
osservazioni in
campo?

Confronto tra
risultati teorici
ed osservazioni
di campo
relative ad
alcuni canali
della laguna di
Venezia



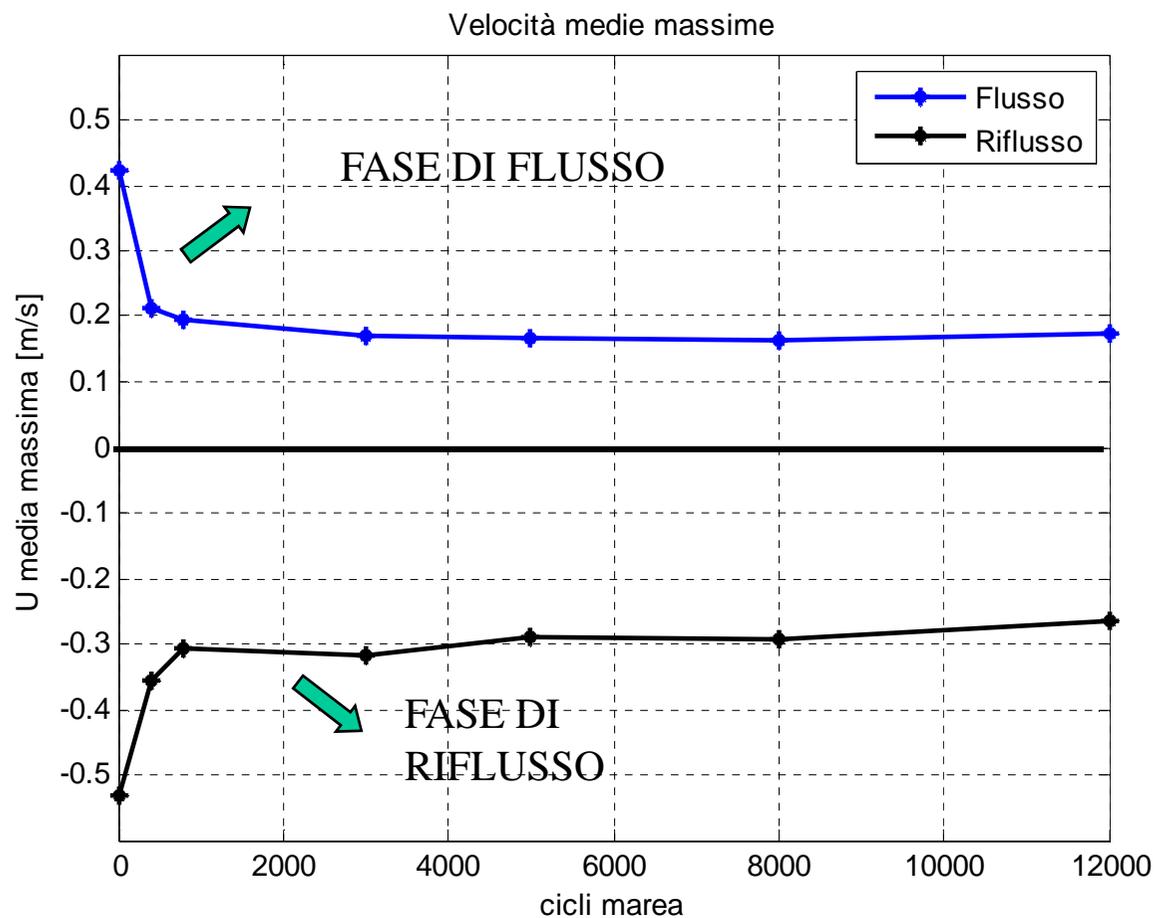
| <i>channel</i> | D_t^* [m] | L^* [m] | L_b^* [m] | D_{avg}^* [m] | φ_t | L_{bT}^* [m] |
|----------------|-------------|-----------|-------------|-----------------|-------------|----------------|
| S.Lorenzo | 5.5 | 5375 | 4025 | 4.05 | 1 | 4722 |
| S. Felice | 7.0 | 15011 | 5302 | 5.48 | 1 | 10604 |
| Riga | 5.0 | 2668 | 6849 | 4.01 | 1 | 1292 |
| dei Bari | 6.5 | 9826 | 6858 | 5.00 | 1 | 4572 |
| Gaggian | 5.5 | 4381 | 3070 | 4.60 | 1 | 2558 |
| Scanello | 4.5 | 1698 | 924 | 2.99 | 1 | 1155 |
| Riga1 | 4.8 | 1744 | 3157 | 3.82 | 1 | 751 |
| Riga2 | 5.2 | 2379 | 3893 | 4.33 | 1 | 988 |

Come si confrontano tali risultati con le osservazioni in laboratorio?



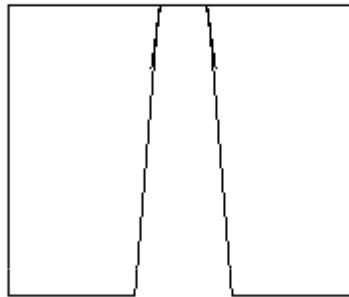
Il sistema non è ancora all'equilibrio!!

Le velocità massime misurate sono ancora superiori al valore critico (circa 0.08 m/s) !!!

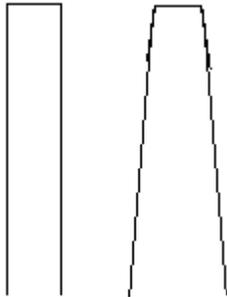


CANALI MAREALI + BASSOFONDI

modelli teorici e
sperimentali



CANALI MAREALI Indagini teoriche e sperimentali



CANALI MAREALI: VENTO e VEGETAZIONE modello numerico 1D



MECCANISMI CHE REGOLANO L'EVOLUZIONE A LUNGO
TERMINE DELLE BARENE (Tambroni & Seminara, submitted JGR)

Eustatismo e
subsidenza

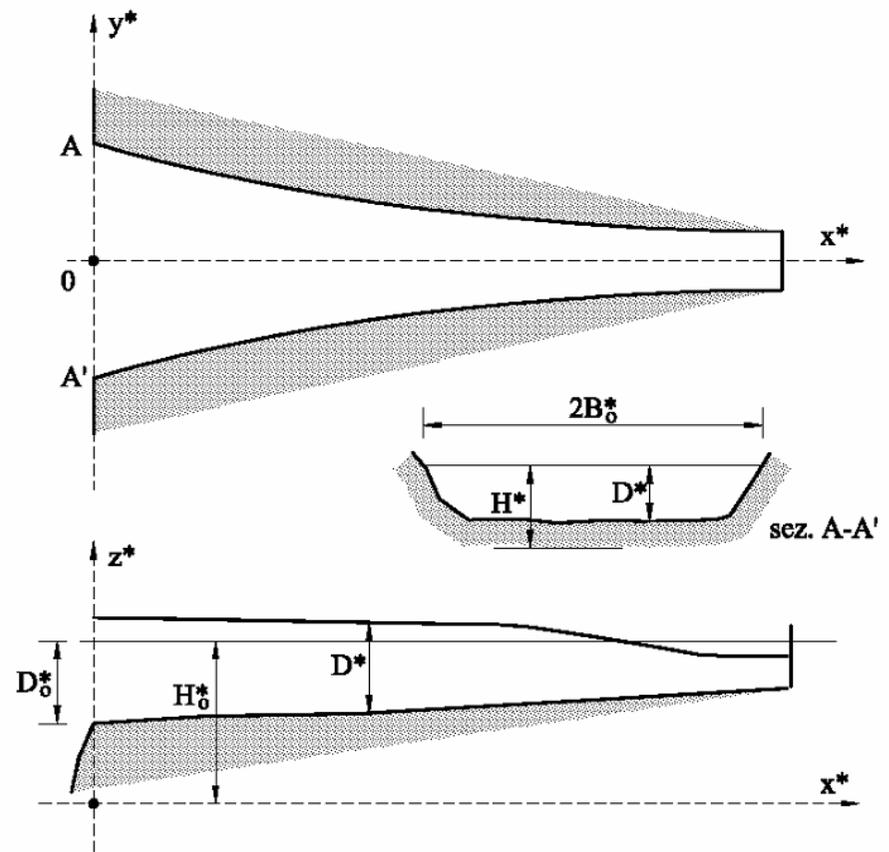
Disponibilità di
sedimenti



Morfodinamica di canali mareali, Modello Lanzoni e Seminara, *JGR* 2002

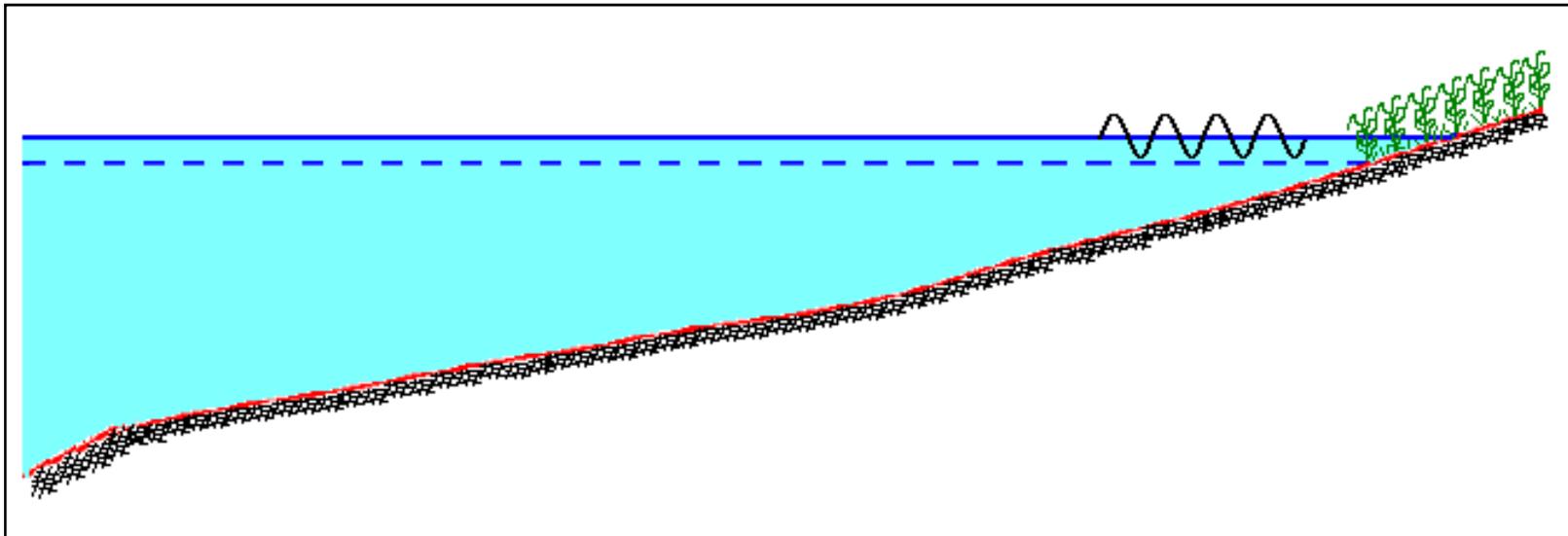
Caratteristiche principale:

- modello numerico 1D : De S.Venant + Exner.
- Onda di marea forzante all'imbocco e canale chiuso all'altra estremità



Nuovi Ingredienti:

- i) VEGETAZIONE
- ii) INNALZAMENTO DEL LIVELLO DEL MEDIO MARE
- iii) VENTO



1. Modellazione della vegetazione

CRESCITA DI VEGETAZIONE

Non appena il fondo emerge, si consente la crescita di vegetazione (utilizzando la legge di dipendenza della produttività di biomassa dalla profondità locale osservata per la Spartina da Morris et al., 2002)

EFFETTI DELLA VEGETAZIONE

OSTACOLO ALLA RISOSPENSIONE

In presenza di vegetazione, si assume che i sedimenti che entrano nella barena siano intercettati dalla vegetazione e depositino completamente nella barena, senza lasciarla successivamente.

PRODUZIONE DI SEDIMENTI

La produzione di sedimenti organici viene modellata in funzione della biomassa $B(\text{kg}/\text{m}^2)$ locale (Randerson, 1979)

1. Morfologia, vegetazione e innalzamento del livello medio del mare:

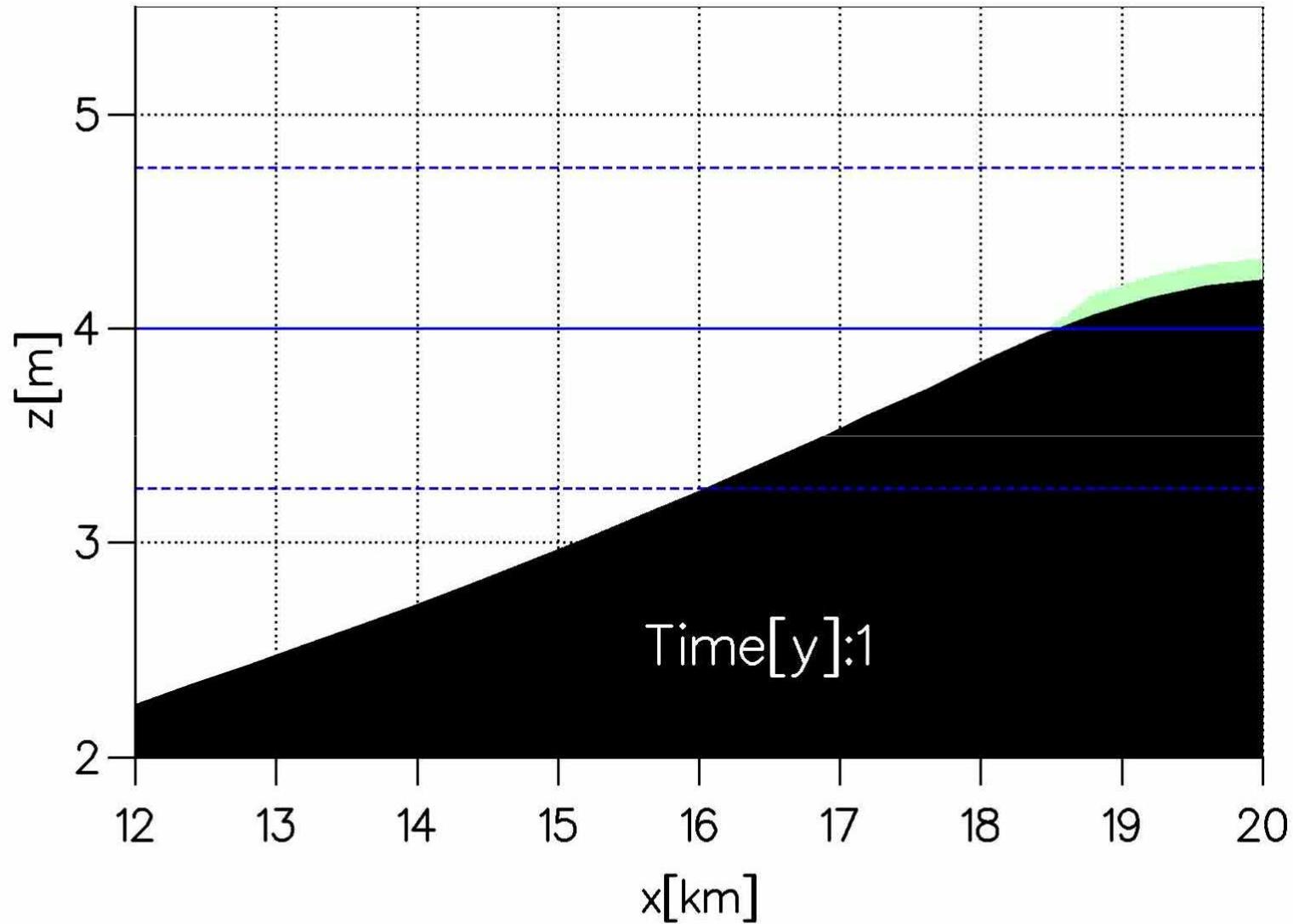
**il destino delle barene dominate
dall'azione della marea**

Innalzamento del livello del medio mare 0, 3.5, 20 mm/anno

Si trascura l'azione del vento

$B_{max}=1\text{kg/m}^2$; u sea rise =0 mm/y

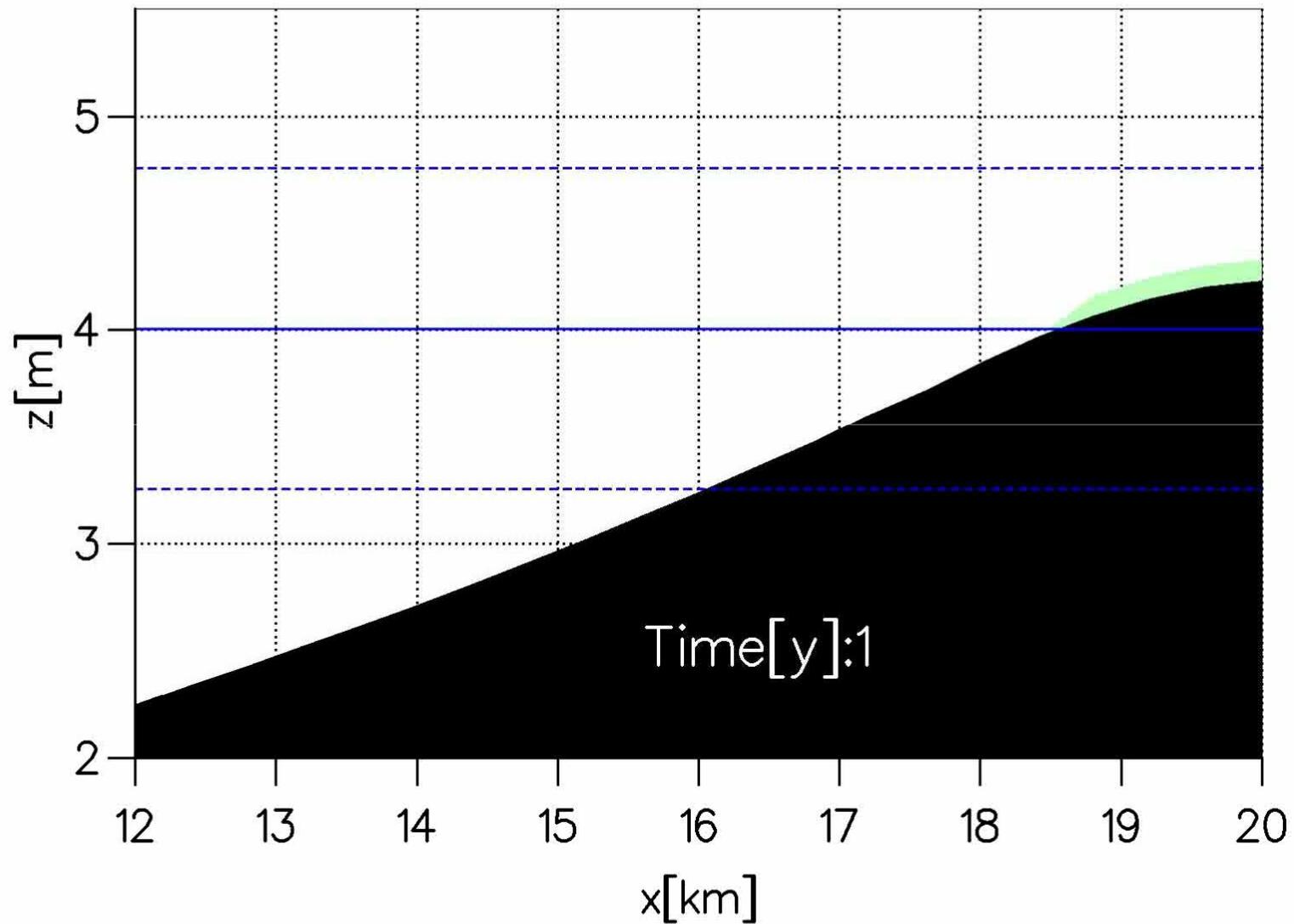
Bed Profile



La barena accresce e lentamente aumenta la sua estensione verso mare

$B_{max}=1\text{kg/m}^2$; u sea rise $=3.5\text{ mm/y}$

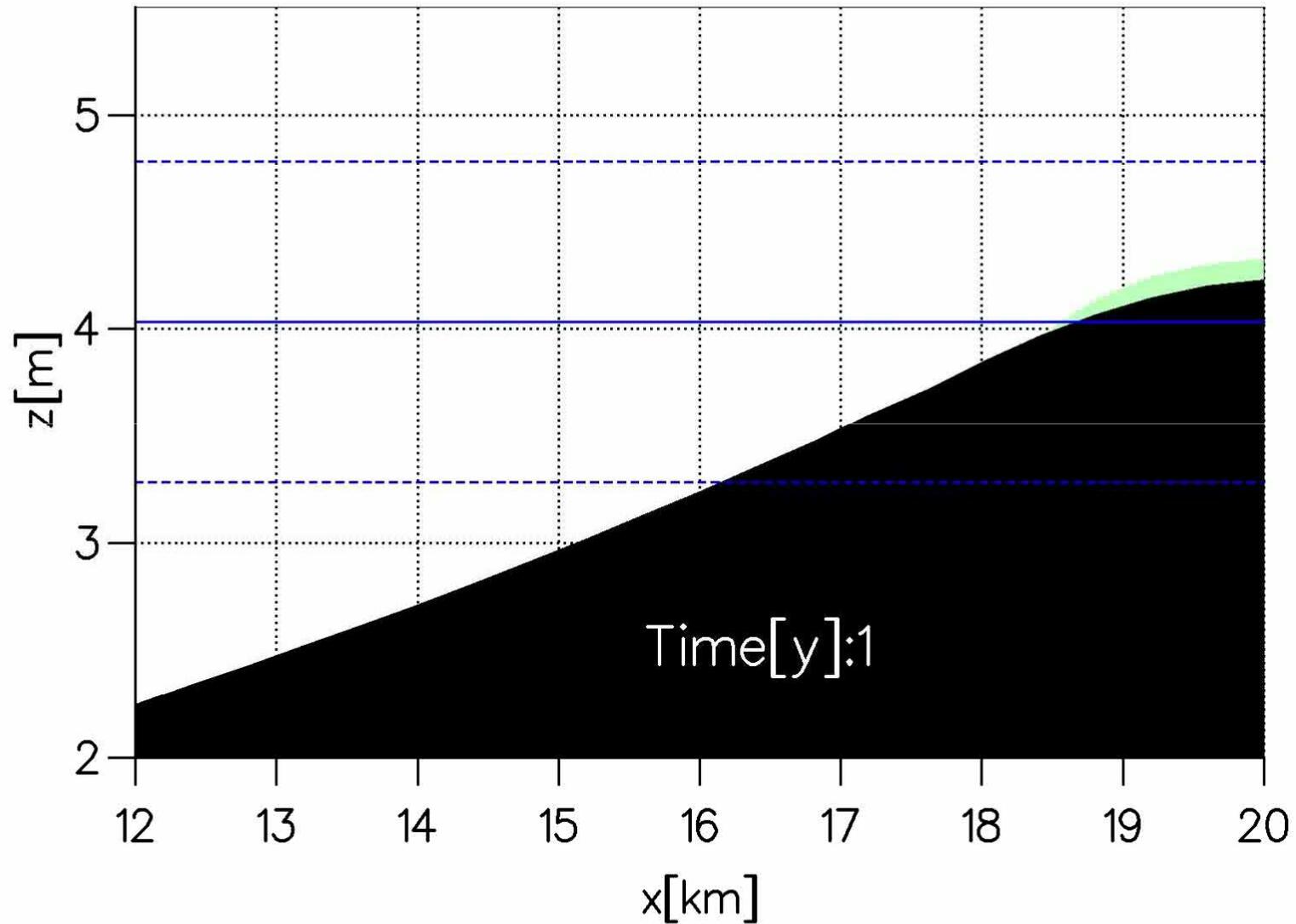
Bed Profile



Barena accresce ma lentamente arretra

$B_{max}=1\text{kg/m}^2$; u sea rise =20 mm/y

Bed Profile



La barena rapidamente scompare

Esiste un equilibrio a lungo termine?

Se $u_{\text{sea rise}} = 0$, il fronte vegetato avanza verso mare!!!

Se $u_{\text{sea rise}} = 3.5 \text{ mm/yr}$, il fronte vegetato arretra!!!

Per valori intermedi di $u_{\text{sea rise}}$ puo' essere raggiunto un equilibrio?

La condizione d'equilibrio morfodinamico sembra essere **instabile** e solo in casi eccezionali raggiunta nella realtà!

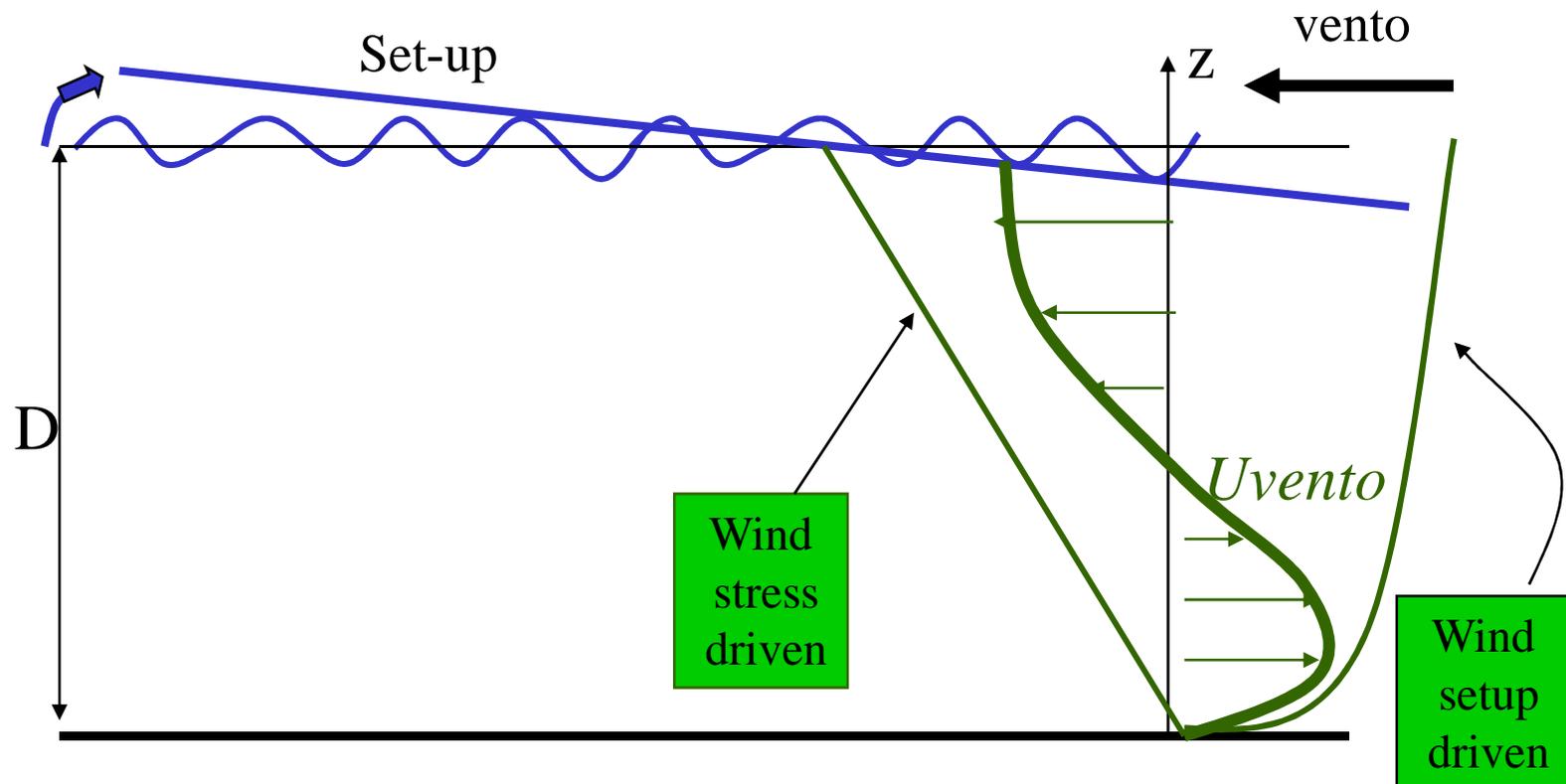
2. Effetto del vento sui bassifondi

Due effetti distinti:

i) **Il primo:** formazione di *onde*, la cui ampiezza dipende fortemente dalla profondità locale e dal *fetch*.

(YOUNG & VERHAGEN, 1996)

ii) **Il secondo:** generazione di correnti indotte dal *setup superficiale* generato dalle tensioni agenti sulla superficie libera



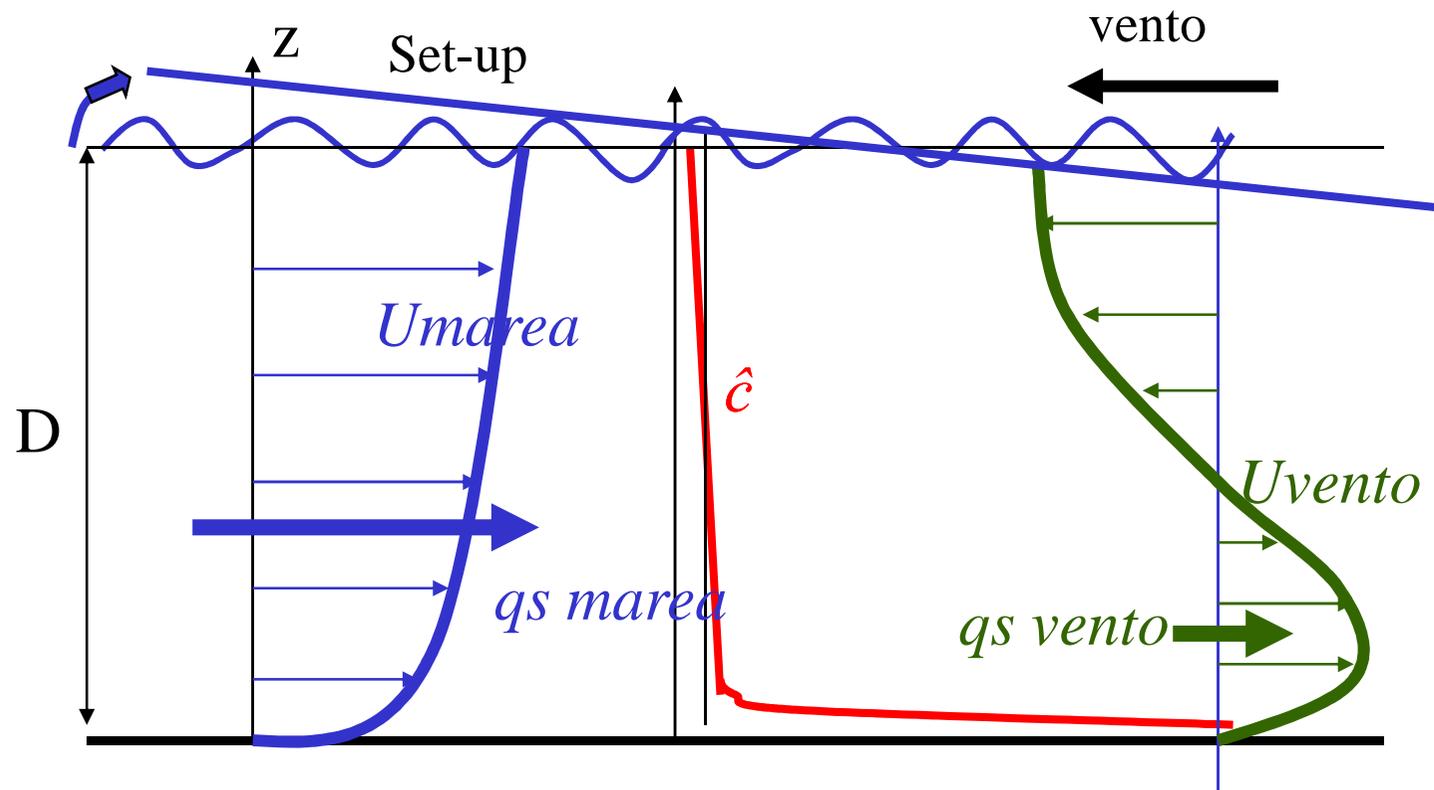
Il flusso di sedimenti

$$q_s = \int_0^D \bar{c} U dz$$

Due distinti contributi:

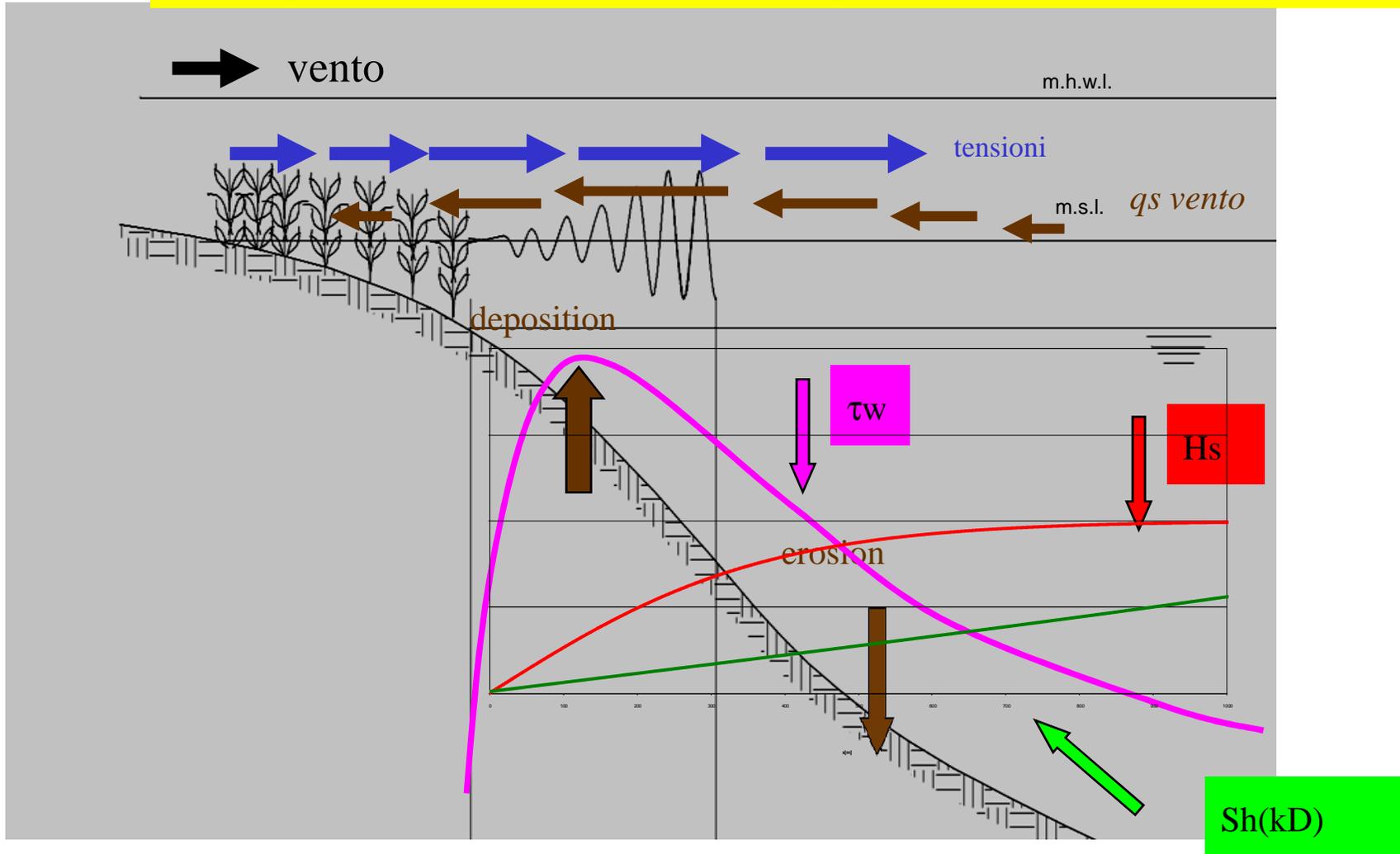
- i) **Il primo:** *avvezione da parte delle correnti mareali*
- ii) **Il secondo:** *avvezione da parte delle correnti indotte dal vento*

Il campo di moto indotto dal setup puo' essere significativo tanto quanto le correnti mareali nella determinazione della direzione e dell'intensità del flusso di sedimenti!



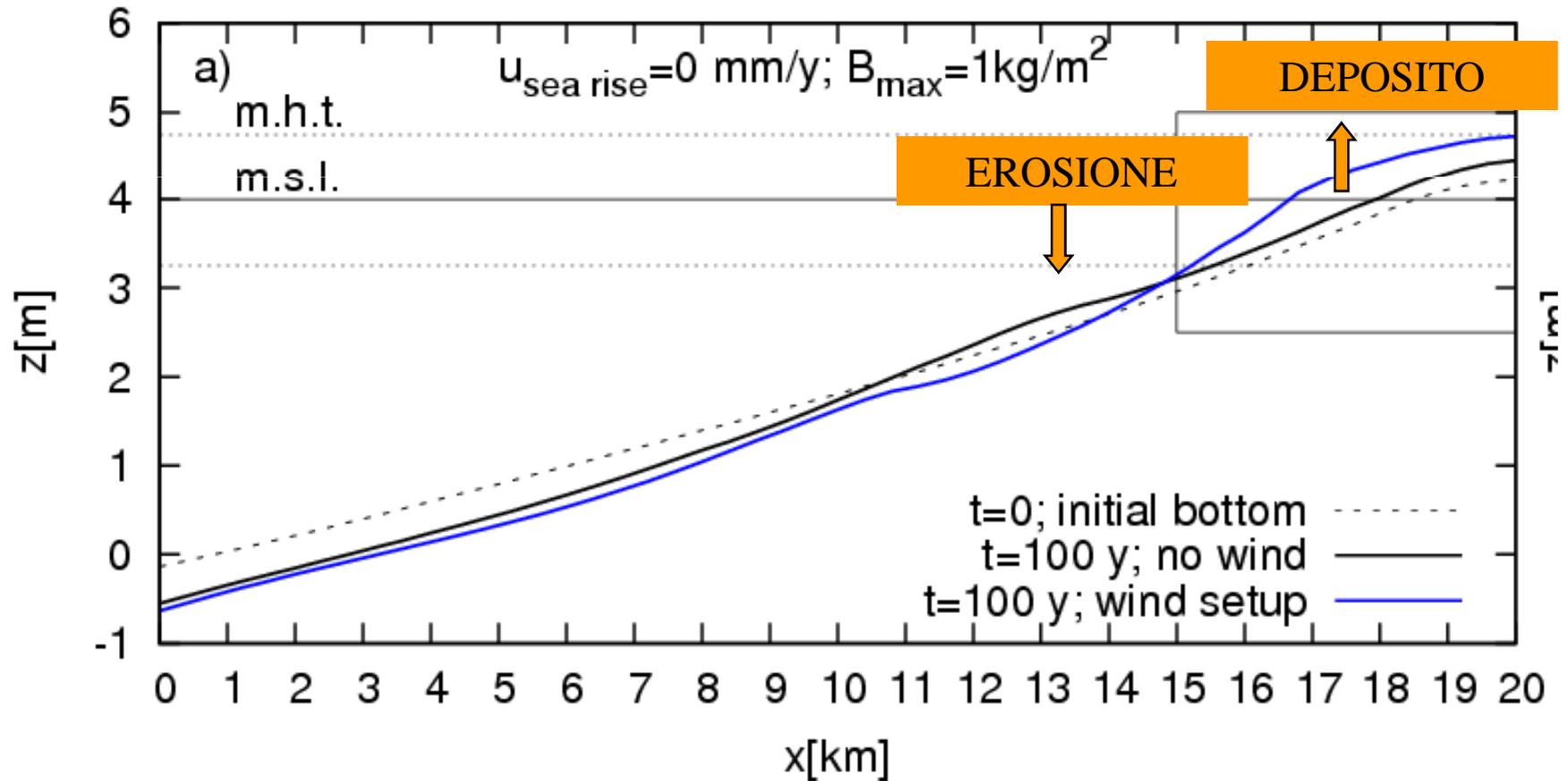
Implicazioni morfologiche sulla risospensione del vento nei bassifondi

Cosa possiamo dedurre da semplici considerazioni fisiche?

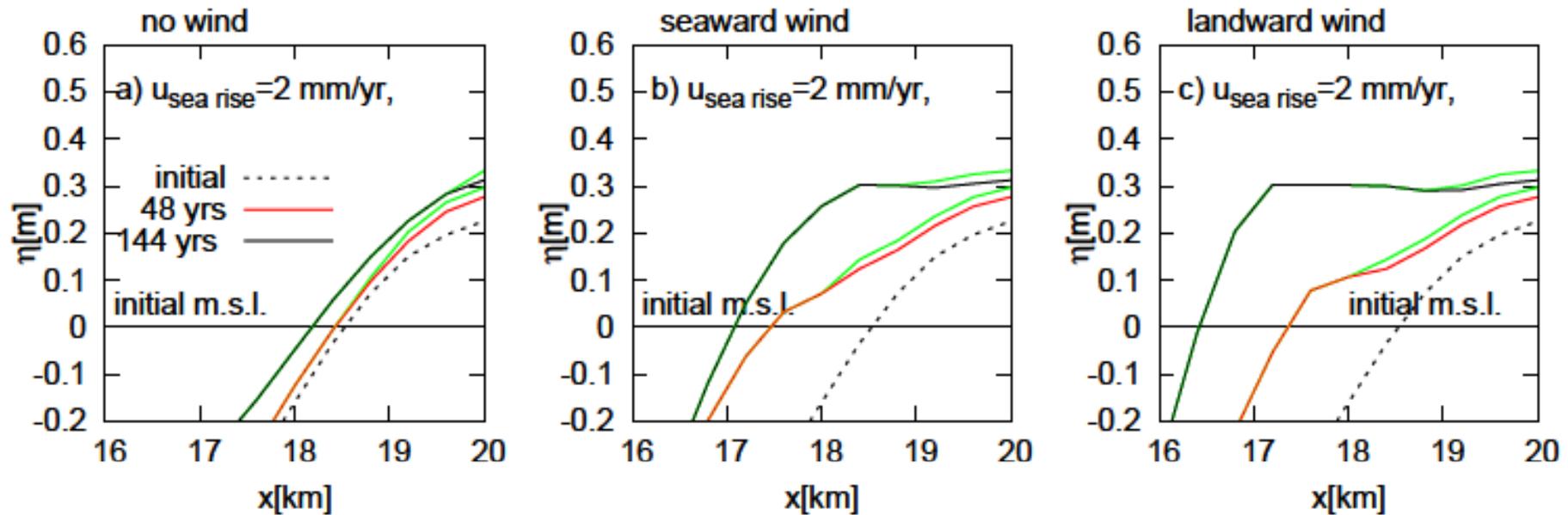


$$\tau_w = 0.5 f_w \rho_w (\pi H_s)^2 / (T Sh(kD))^2$$

Profili del fondo dopo 100 anni :
no innalzamento del livello medio
-vegetazione con $B_{max} = 1 \text{ Kg/m}^2$



Cosa accade a lungo termine?



La risospensione del vento nei bassifondi non è in grado a contrastare l'effetto dell'innalzamento del livello medio del mare!

La scala temporale del processo evolutivo è dell'ordine di secoli, pertanto in assenza di forti effetti antropici o climatici, le variazioni possono essere così piccole da essere difficilmente percepite

La condizione d'equilibrio morfodinamico è **instabile** e solo in casi eccezionali raggiunta nella realtà!