

MORFOLOGIA \Rightarrow ECOLOGIA FLUVIALE

C.1 FORMULAZIONE DEL PROBLEMA MORFODINAMICO

1. Introduzione: processi e scale spazio/temporali
2. Formulazione del problema morfodinamico
3. Scale spaziali e Temporali: ipotesi
4. Esempi di evoluzione morfodinamica 1D
5. Classificazione dei corsi d'acqua

C.2 SEZIONE DI EQUILIBRIO DEI FIUMI

1. Introduzione: equilibrio e portata formative
2. Equilibrio della sezione: relazioni empiriche
3. Sezione di equilibrio: formule razionali

C.3 FORME ALTIMETRICHE: BARRE FLUVIALI

1. Barre alternate migranti, fenomenologia
2. Barre alternate migranti, teoria lineare
3. Barre alternate, Teoria non lineare
4. Barre libere: modi superiori
5. Barre libere: alvei in sabbia
6. Barre stazionarie
7. Barre libere; regime idrologico

C.4 FORME PLANIMETRICHE: PROCESSI

1. Moto in curva a raggio costante
2. Convergenze - Divergenze
3. Biforcazioni fluviali

C.5 FORME PLANIMETRICHE; MEANDRI

1. Meandri: fenomenologia
2. Meandri: equilibrio, teoria lineare
3. Meandri: stabilità
4. Meandri: evoluzione
5. Hydraulic geometry of meanders
6. Meandri: coevoluzione curvatura - larghezza
7. Interazioni plano-altimetriche

ECOLOGIA

L. 1 I corsi d'acqua in condizioni naturali - la vita nei sistemi fluviali e l'organizzazione funzionale dei sistemi lotici.

- L'habitat: fattori idro-morfologici

- Fattori idro-climatici

L. 2 La vita nei sistemi fluviali e l'organizzazione funzionale dei sistemi lotici.

- I sistemi lotici: componente biotica

L. 3 La vita nei sistemi fluviali e l'organizzazione funzionale dei sistemi lotici.

- I processi dei sistemi lotici.

L. 4 Processi degli ecosistemi fluviali: connettività

- connettività longitudinale

- connettività laterale

- connettività verticale

L. 5 Processi degli ecosistemi fluviali: connettività temporale

L. 6 Natural sediment and temperature regimes.

L. 7 Alterazione della connettività negli ecosistemi fluviali

~~ECOLOGIA
CAPITOLO 1
1. Formulazione del problema~~

MORFOLOGIA

Forma del fondo

Condizioni al contorno (ambientali)

Regimi portate solido e liquide

Problema:

ipotesi di scale

Reach scale
 $L \sim B$

$T_{SPONDE} \gg T_{FONDO}$
Spicole coesive

VISIONE

ALTIMETRICA



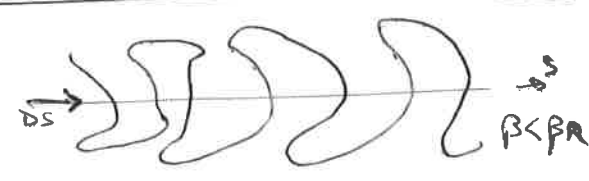
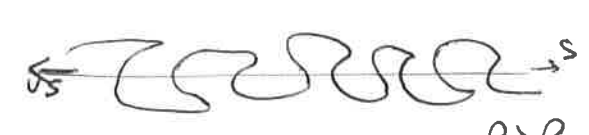
formazione barre
migranti e valli o
stationarie ~~in~~ verso
valle e verso monte

PLANIMETRICA

BIFORCAZIONI
curvature

MEANDRI
super/sub
risamenti.

Problema di stabilita,
equilibrio e sviluppo in
spazio e Tempo
+
interazioni
fenomeni

	BARRE	MEANDRI
EQUAZIONI ADIM. SISTEMA (x,y) BARRE (S,n) MEANDRI	$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{F_0^2} \left[\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right] + \frac{\beta}{c^2} 2U - \eta = 0$ $\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{F_0^2} \left[\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right] + \frac{\beta}{c^2} V = 0$ $\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0$ $(1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + 2f \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{r}{\beta \sqrt{g}} \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = 0$	$\frac{\partial U}{\partial s} + \frac{1}{F_0^2} \left[\frac{\partial \eta}{\partial s} + \frac{\partial \eta}{\partial s} \right] + \frac{\beta}{c^2} (2U - \eta) = A_1 \cos(\lambda_m s)$ $\frac{\partial V}{\partial s} + \frac{1}{F_0^2} \left[\frac{\partial \eta}{\partial n} + \frac{\partial \eta}{\partial n} \right] + \frac{\beta}{c^2} V = A_2 \cos(\lambda_m s)$ $\frac{\partial \eta}{\partial s} + \frac{\partial U}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial n} = 0$ $2f \frac{\partial U}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial n} - \frac{r}{\beta \sqrt{g}} \frac{\partial^2 \eta}{\partial n^2} = A_3 \cos(\lambda_m s)$
SOLUZIONI VARIABILI	$\eta = A \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_m x - \omega t)$ $U = A U_s \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_m x - \omega t)$ $V = A V_s \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_m x - \omega t)$ $V = A V_c \cos\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_m x - \omega t)$	$\eta = \hat{\eta} \cos(\lambda_m s - \delta \eta)$ $U = \hat{U} \cos(\lambda_m s - \delta U)$ $V = \hat{V} \cos(\lambda_m s - \delta V)$ $V = \hat{V} \cos(\lambda_m s - \delta V)$
SOLUZIONI FONDO η	$\eta \propto \exp(\beta t) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_m x - \omega t)$ B. migranti $\eta \propto \exp(\alpha x) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_m x)$ B. stazionarie	$\eta \propto \exp(\beta t) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_m x)$ $\eta \propto \exp(\alpha x) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_m x)$
TRASPORTO SOLIDO LATERALE	$q_{sy} = q_{sx} \left(\frac{V}{ V } - \frac{r}{\sqrt{g}} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)$	$q_{sn} = \frac{\phi(\theta)}{\phi(\theta_0)} \left(\frac{V}{ V } - \frac{r}{\beta} 2f \cos(\lambda_m s) - \frac{r}{\sqrt{g} \beta} \frac{\partial \eta}{\partial n} \right)$
PARAMETRI	$\omega \rightarrow$ frequenza, trasferim. carattere $\Omega \rightarrow$ stabilità $\beta \rightarrow \frac{\beta}{2Y}$ $\alpha \rightarrow$ coeff III grado	$\alpha \rightarrow$ coeff III grado $\sigma = \frac{L_m}{\lambda_m}$ simmetria $C(s) = R_0^{-1} \cos(\lambda_m s)$ $\theta = \frac{\partial C}{\partial s} = -\theta_0 \sin(\lambda_m s)$ β, β_c, β_r
TEORIA LINEARE, NON LINEARE	$\frac{dA}{dt} = \Omega A$ $\frac{dA}{dt} = \Omega A + \alpha A^3$	$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial \theta}{\partial s}$ $\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial s} \int_0^s \frac{\partial \theta}{\partial s} ds = \frac{\partial \theta}{\partial s}$
SEGNALI MONTE O VALLI	stazionarie $\beta < \beta_r$ $\alpha > 0$  $\beta > \beta_r$ $\alpha < 0$ 	 

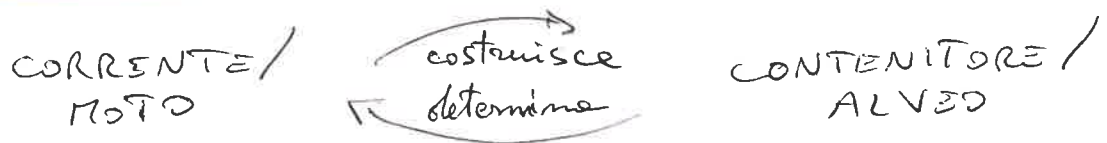
① FORMULAZIONE DEL PROBLEMA MORFODINAMICO

Introduzione: processi e scale spazio/Temporali

L'obiettivo è di trovare la relazione e la definizione della forma dell'alveo, date le variabili di portate e le condizioni al contorno.

VARIABILI	+	COND. CONTORNO	→	FORMA ALVEO
- Q liquido		- pendenza Topografica		- geometria sezione
- Q_s solido		- fondo e sponde		- profilo longitudinale
		- vegetazione riparia		- forma planimet.

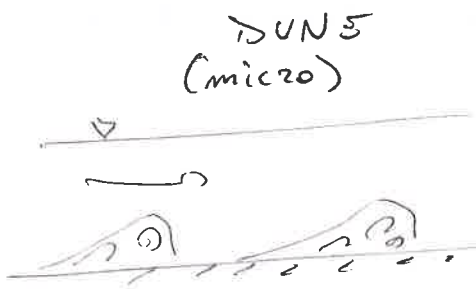
Il processo avviene con la ricerca dell'equilibrio e dell'evoluzione al variare dei parametri, determinando una dinamica fluviale:



La variazione dei parametri del problema è conseguenza degli interventi antropici sull'alveo o sulle portate. Quindi i processi di trasporto solido dipendono dal tipo di fondo e sono divisi in "gravity driven mass flows", a gravità quali frane in rocce o colate, e trasporto idrodinamico, caratteristico del materiale più fine.

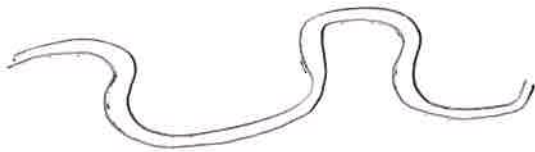
Il trasporto solido implica un processo morfodinamico erosivo, se la capacità di trasporto è superiore alla disponibilità del sedimento, oppure di deposito, se accade l'inverso. Il processo è analizzato in funzione alla scala spazio-temporale.

La forma del corso d'acqua è determinata secondo la configurazione altimetrica:

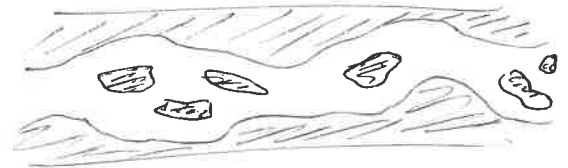


- configurazione planimetrica:

ALVEI MONOCURSALI
(meandering)



ALVEI PLURICURSALI
(braiding)



Lo studio nelle 3 dimensioni permette di capire l'evoluzione di un fiume e l'interferenza con i fenomeni antropici.

La formazione di forme planimetriche segue scale temporali differenti dalle forme altimetriche.

Formazione del problema morfodinamico

In funzione alle scale utilizzate, esistono i due modelli di approccio:

- Reach scale analysis

scala di tratto

$$(L_0, B_0) \gg Y_0$$

$$L_0 \sim B_0$$

bidimensionale - morfologia

- Long term analysis

scala a lungo termine

$$L_0 \gg (B_0, Y_0)$$

$$L_0 \gg B_0$$

unidimensionale - idrodinamica

② Il modello bidimensionale (x, y) è dato dai fenomeni

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho Y} = 0 & U \text{ in } \hat{x} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho Y} = 0 & V \text{ in } \hat{y} \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(U\eta)}{\partial x} + \frac{\partial(V\eta)}{\partial y} = 0 & \text{portate liquide} \\ (1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(C_s \eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 & \text{portate solide (da Exner)} \end{cases}$$

sistema è chiuso con incognite U, V, η, η

L'equazione di Exner definisce le τ del tipo di trasporto solido, ponendo $q_s = f(U, V, \eta, \eta)$ con la capacità di trasporto della teoria di Shields.

Parametro di Shields \Rightarrow capacità di trasporto \Rightarrow portate solide

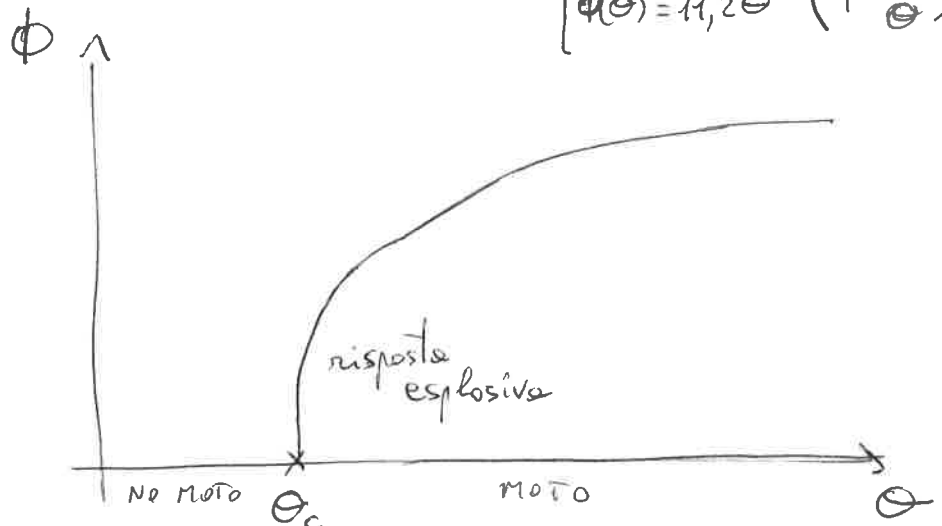
$$\Theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) g D_s} \quad \phi(\Theta) = A \Theta^n \cdot F(\Theta, \Theta_c) \quad |q_s| = \sqrt{\Delta \rho} \Delta_s^3 \phi(\Theta)$$

Il parametro di Shields (Θ) è la definizione matematica per il trasporto idrodinamico ed indicatore di mobilità.

La capacità di trasporto è calcolata con le formule empiriche di Meyer Peter & Müller o Parker.

Relazioni

$$\Theta \begin{cases} \sim C U^2 \\ \sim C \frac{1}{y^{7/3}} \\ \sim C S_0^{7/10} \end{cases}$$



La relazione $\phi \rightarrow \theta$ segue un andamento di potenza
dalla risposta esplosiva (per $\theta \rightarrow \theta_c$) con $\gamma \rightarrow \infty$ e
attenuando la crescita a $\gamma \rightarrow 3/2$ (per $\theta \rightarrow \infty$).

Mayer-Peter & Müller ha $\phi = 8 \theta^{3/2} \left(1 - \frac{\theta_c}{\theta}\right)^{3/2}$ e

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{\phi}{\theta} \left[\frac{3}{2} + \frac{3}{2} \frac{\theta_c}{\theta - \theta_c} \right], \text{ in cui } \gamma = \frac{3}{2} \frac{\theta}{\theta - \theta_c}$$

Le variabili di portata sono calcolate nello stato di riferi-
mento di equilibrio

$$\begin{cases} Q = B_0 k_s S_0^{1/2} Y_0^{5/3} \\ Q_s = B_0 \sqrt{\Delta g D_s^3} \phi(\theta_0) \end{cases}$$

↳ Bisogna trovare lo stato di riferimento, ovvero
la situazione in cui non si ha una modifica
della geometria (B_0), da cui dipendono gli altri
parametri.

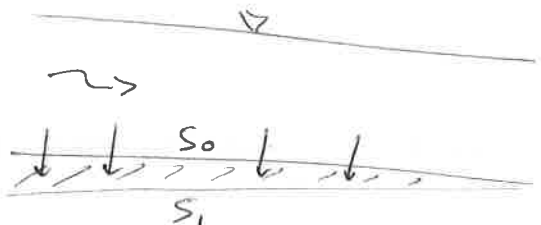
In queste condizioni vale $\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$, quindi una
portata solida costante e $\theta \rightarrow \theta_0$ compatibile con
sedimenti che si distaccano e vengono rimpiazzati.

Quindi si ottiene $\theta_0 = \frac{S_0 Y_0}{\Delta D_s} = \left(\frac{Q}{B_0 k_s} \right)^{3/5} \frac{S_0^{7/10}}{\Delta D_s}$

• Variando Q_s si modifica il fenomeno di trasforma-
zione:

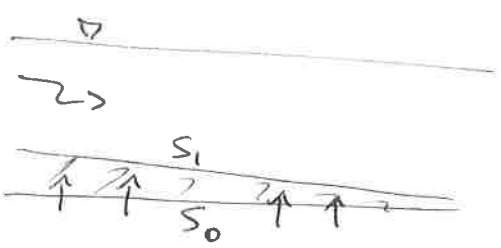
- riducendo $Q_{s1} = Q_s - \Delta Q_s$ si ha $\theta_1 < \theta_0$,
quindi $S_1 < S_0$

3



Abbassare la pendenza porta a EROSIONE del fondo

- aumentando $Q_{S1} = Q_S + \Delta Q_S$ si ha $\theta_1 > \theta_0$, quindi $S_1 > S_0$



Aumentare la pendenza porta a DEPOSITO del fondo

Il parametro che varia più frequentemente è la larghezza B rispetto a B_0 , in cui

$B_1 > B_0$ allargamento \rightarrow riduzione $\theta_1 < \theta_0$ ERODE
 $B_1 < B_0$ restringimento \rightarrow aumento $\theta_1 > \theta_0$ DEPOSITA

La risposta della risposta dipende strettamente dal parametro di Shields, ovvero dall'esponentiale γ .

Gli altri parametri sono in relazione con la larghezza secondo cui

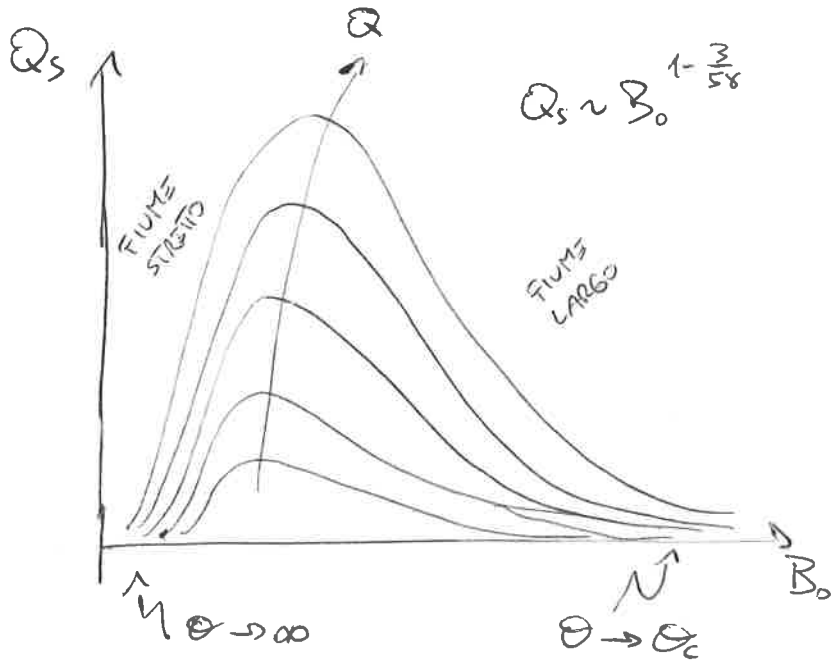
$$\begin{cases} S_0 \sim B_0^{\frac{2}{78}(38-5)} \\ Y_0 \sim B_0^{-\frac{3}{78}(28-1)} \\ Q_{S0} \sim B_0^{1-\frac{3}{78}} \end{cases}$$

Scale spaziali e Temporali: ipotesi

- Alveo largo $\beta = \frac{B_0/2}{Y_0} \gg 1$
- Scale spaziali B_0 in reach scale
- evoluzione fondo lenta $T_{FONDO} \gg T_{MOTO}$
- sponde più coesive del fondo $T_{SPONDE} \gg T_{FONDO}$

Esempi di evoluzione morfodinamica 1D

La ricerca della larghezza di equilibrio "ottimale" per il minimo trasporto solido, avviene fissando la relazione tra Q_s e B_0 al variare della portata liquida Q



fiume stretto
 Q_s aumenta con B_0 ,
 fiume largo
 Q_s diminuisce con B_0

$$\frac{dQ_s}{dB_0} = \sqrt{\Delta \rho D_s^3} \phi \left\{ 1 - \frac{3}{5} \frac{d\phi}{d\theta} \frac{\theta_c}{\phi} \right\}$$

$$= C \left\{ 1 - \frac{3}{5} \chi \right\}$$

dipende dal trasporto χ

Per ridurre i parametri in gioco si sceglie di utilizzare valori adimensionali in relazione alle caratteristiche ambientali:

$R_{cp} \rightarrow D_s$ $d_s \rightarrow \gamma_0$ $\beta \rightarrow B_0$ $\Delta \rightarrow \rho_s$
 $\theta \rightarrow \tau_0$ $Fr = \frac{U}{\sqrt{g \gamma_0}}$

Alcuni di essi vengono tarati con delle correzioni dovute alla granulometria o pendenze localizzate -

la portata solida ha

$$\frac{q_{sy}}{q_{sx}} = \frac{V}{U} - \frac{r}{\sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial n}$$

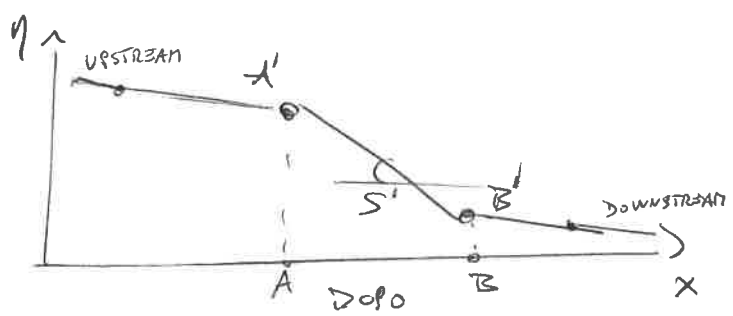
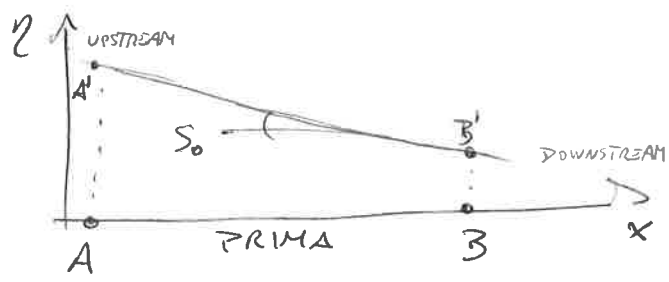
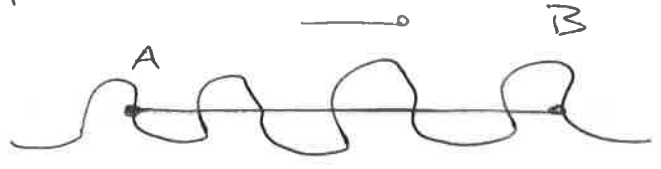
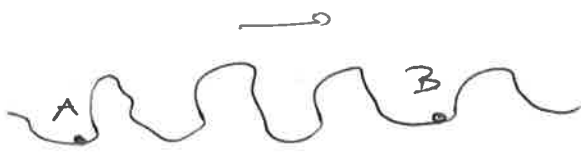
angolo

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{sx} = |q_s| \\ q_{sy} = |q_s| \left(\frac{V}{|V|} - \frac{r}{\sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial n} \right) \end{array} \right.$$

intensità

4)

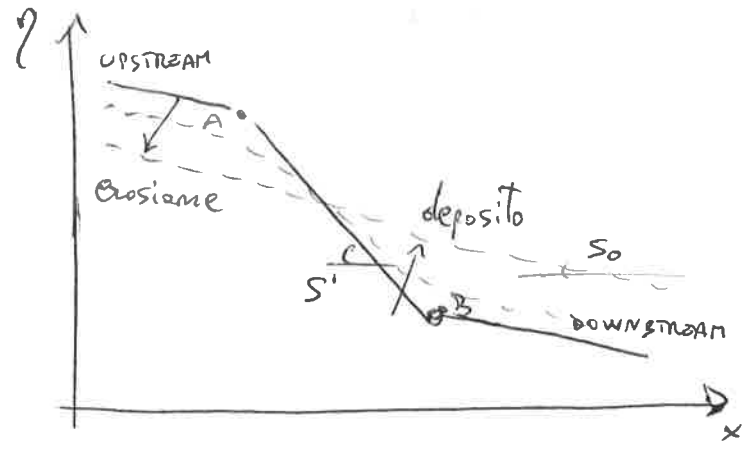
Caso del Kugart River, con un problema monodimensionale



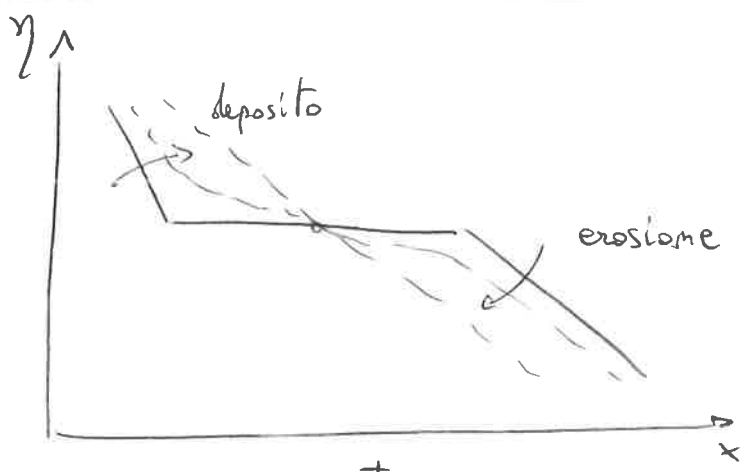
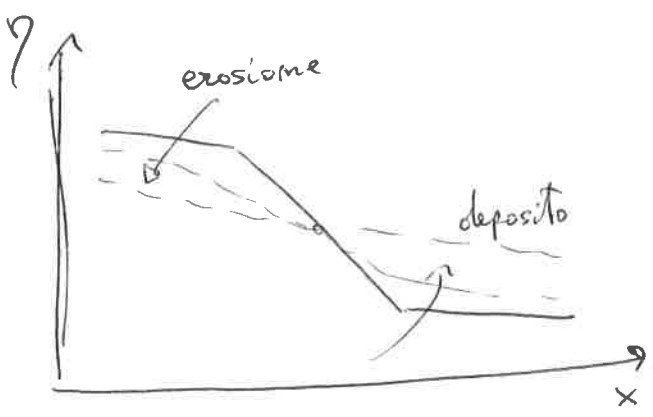
Dopo l'intervento si ha che la differenza di quota tra A e B è la stessa, ma la distanza è minore, quindi aumenta $S' > S_0$.

Il fiume ricerca la pendenza di equilibrio,

quindi tende ad erodere nel punto A (monte) e depositare nel punto B (valle).

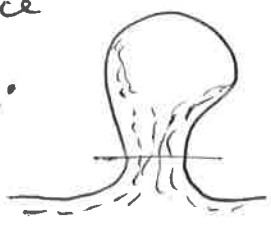


Nei meandri avviene il CUT-OFF e la CRESCITA:



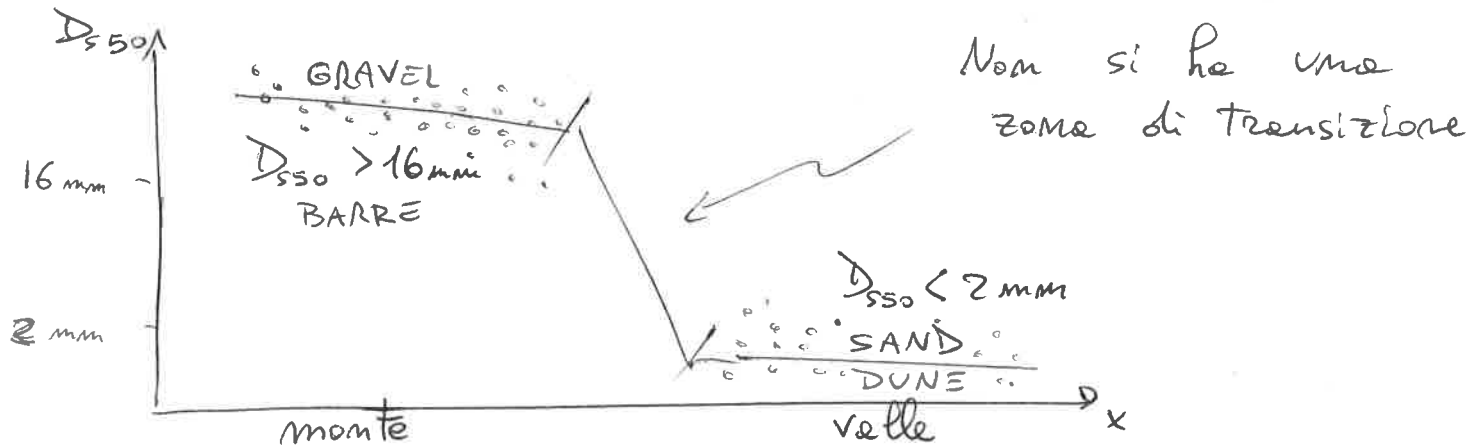
S si riduce

S aumenta



Classificazione dei corsi d'acqua

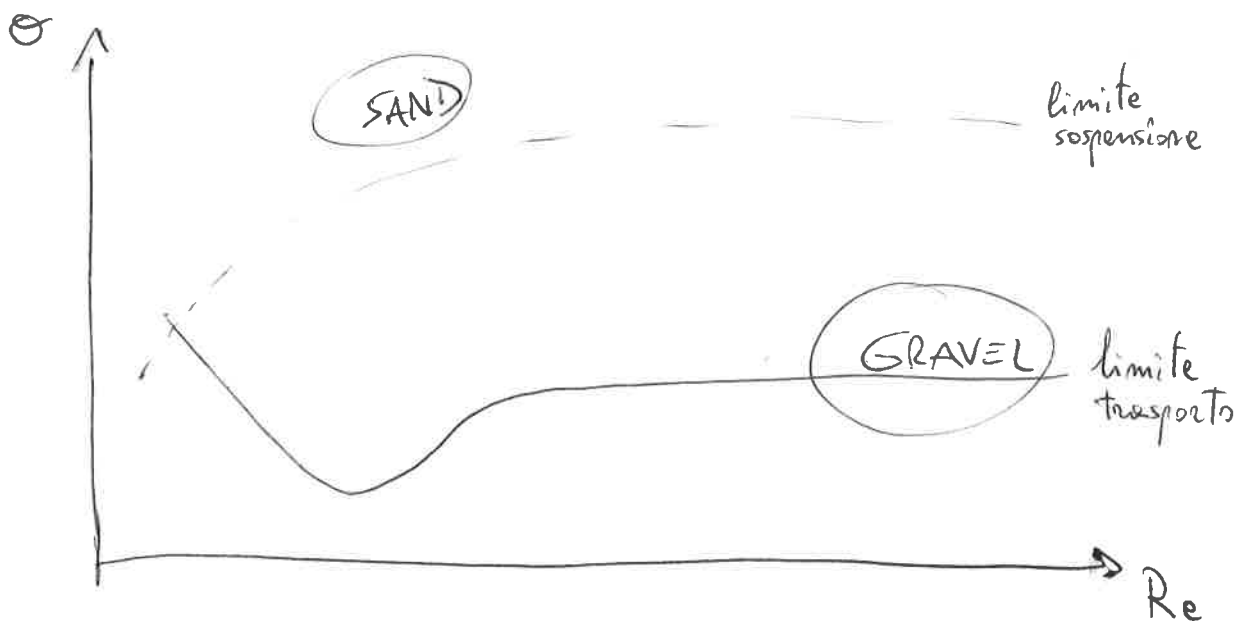
Si differenziano in base alla granulometria del fondo. Se è a grana grossa (GRAVEL) è più eterogeneo con trasporto di fondo e barre; se è a grana fine (SAND) è più uniforme con trasporto in sospensione e dune.



Fenomeno della selezione granulometrica, dovuto alla diversa scala temporale del fondo T_f : per la granulometria grossa si ha T_f maggiore rispetto alla granulometria fine.

Si distinguono le due classi sia per portate bankfull che per larghezza di riferimento.

Determinando il parametro di Shields $\theta = \frac{\tau_{bf} S}{\Delta D_{50}}$



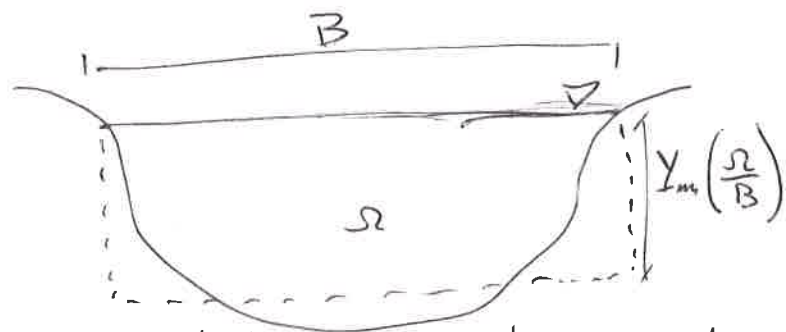
⑤ SEZIONE DI EQUILIBRIO DEI FIUMI

Introduzione: equilibrio e portate formative

Vengono analizzati i fiumi naturali alluvionali, che definiscono la propria geometria nello stato di equilibrio, attraverso azioni di erosione e deposito prodotti dal campo di moto.

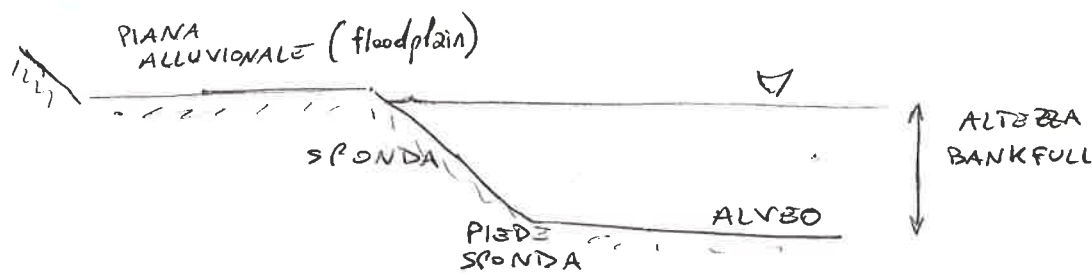
Le principali parti del fiume sono:

- l'ALVEO e il PIEDE DI SPONDA, costituito dal materiale di trasporto idrodinamico che entra nell'equilibrio di Exner;
- la parte medio-alta di SPONDA, materiale più fine trasportato in wash-load;
- la PIANA ALLUVIONALE, stratificazioni successive dovute al wash-load di materiale fine.



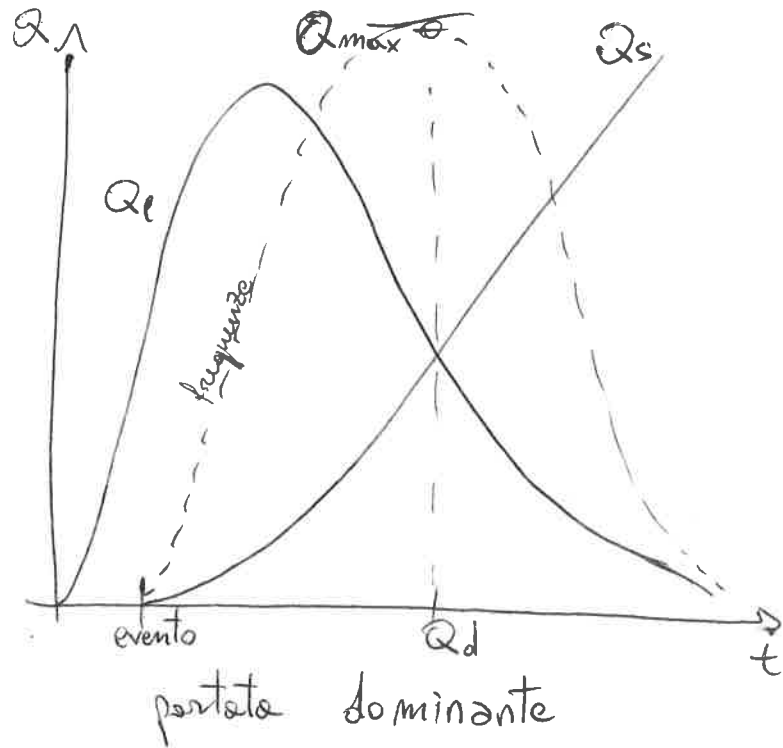
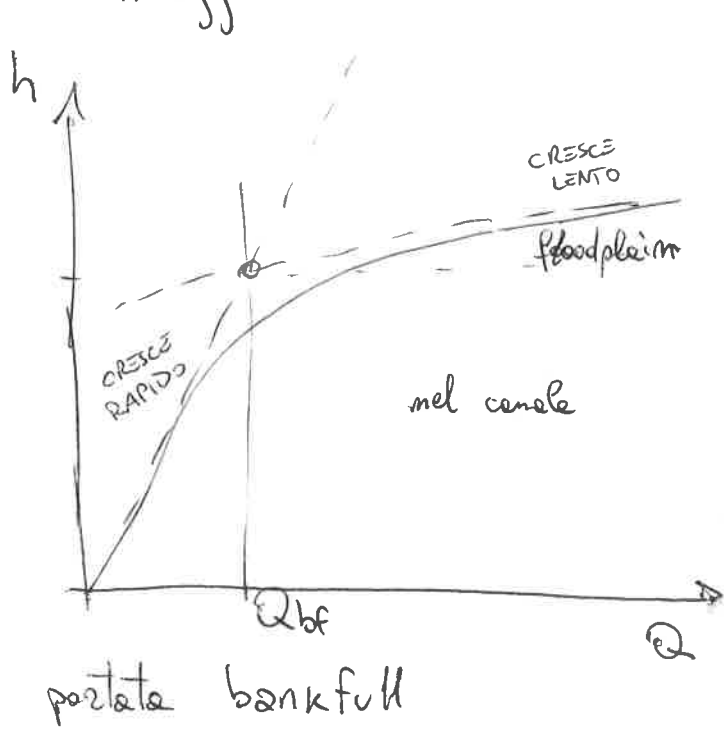
Il problema è volto alla ricerca delle forme della sezione, al verificarsi dell'equilibrio e dei parametri.

Quindi i dati sono: le portate (Q, Q_s), i parametri fisici (ρ, ν, g) e la granulometria (ρ_s, D_s). Vi si trovano la pendenza, la larghezza, la pendenza e la velocità di equilibrio (Y_0, B_0, S_0, U_0).



Per PORTATA FORMATIVA si può intendere:

- Q_{bf} di bankfull, si indica al limite dell'esondazione da sponde naturali;
- $Q(T_r)$ in funzione al tempo di ritorno di 2 anni;
- Q_d dominante, si indica il trasporto solido annuale maggiore.



Nel problema esistono molte variabili non lineari, per cui si utilizza il TEOREMA π per lavorare con le grandezze adimensionali, in funzione a condizioni fissate.

$$\hat{Q} = \frac{Q}{\sqrt{g D_s^5}}$$

$$\hat{Q}_s = \frac{Q_s}{\sqrt{g D_s^5}}$$

$$\hat{P}_s = \frac{P_s}{P}$$

$$\hat{V} = \frac{V}{\sqrt{g D_s^3}}$$

$$R_p = \frac{\sqrt{g D_s^3}}{V}$$

⑥ Equilibrio della sezione: relazioni empiriche

L'approccio empirico è dato tramite alcune relazioni di regime per larghezza, profondità e velocità:

$$B = aQ^{0,5} \quad Y = bQ^{0,4} \quad U = cQ^{0,1}$$

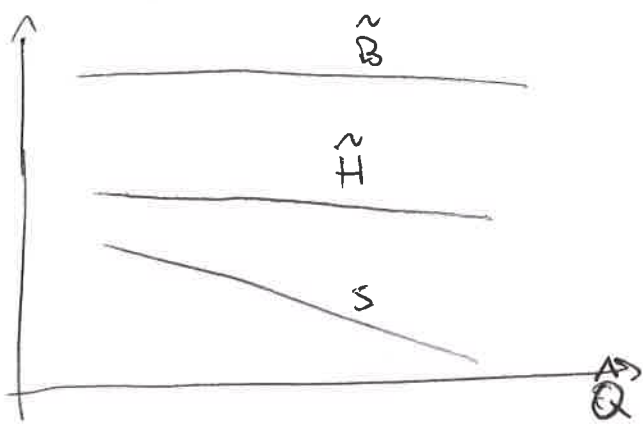
avendo Q come portata media annua e i coefficienti a, b, c caratteristici per ogni fiume.

Dalla scala di deflusso del moto uniforme si ricava anche la pendenza $S \sim Q^{-1/3}$, che diminuisce all'aumentare della portata - (\rightarrow erosione del fondo).

I parametri adimensionali derivanti hanno relazioni:

$$\tilde{H} = \frac{Y_0}{D_s \hat{Q}^{2/5}}$$

$$\tilde{B} = \frac{B_0}{D_s \hat{Q}^{2/5}} = \frac{B_0 \hat{Q}^{1/5}}{Q^{2/5}}$$



Per regressione lineare di misurazioni in campo si ottengono le relazioni:

$$\tilde{B} \sim \hat{Q}^{6,6 \cdot 10^{-2}} \quad \tilde{H} \sim \hat{Q}^{4 \cdot 10^{-5}}$$

$$S \sim \hat{Q}^{-0,344}$$

La pendenza varia più velocemente perché il fondo richiede minor tempo di adattamento, dato $T_{SPONDE} > T_{FONDO}$.

I dati sono per fiumi in ghiaia (secondo Parker) ma validi per tutti i fiumi naturali.

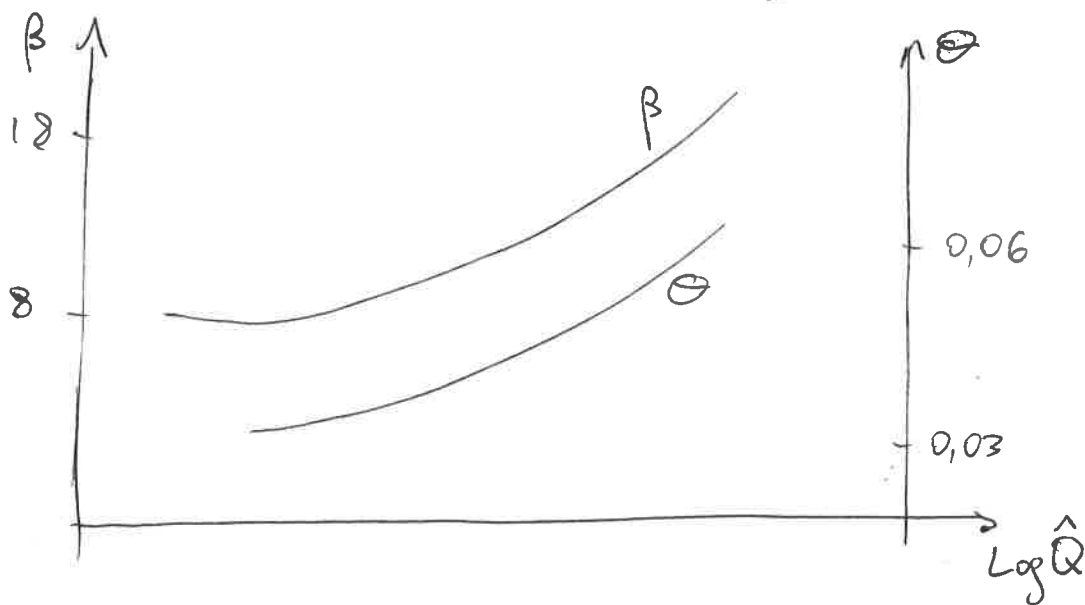
Mentre i parametri \tilde{H} , \tilde{B} sono sempre validi, la pendenza S è influenzata dalle scale temporale e dalle sinuosità planimetrica.

Quindi si propongono altri due parametri adimensionali:

Larghezza $\beta = \frac{B_{bf}}{2 Y_{bf}} \sim Q_{bf}^{0,0661}$

Trasporto $\Theta = \frac{S Y_{bf}}{\Delta D_s} \sim Q_{bf}^{0,06}$

debolmente dipendenti della portata di bankfull



Per trattare i fiumi in sabbia si propongono le relazioni con l'introduzione di R_p (Parker & Wilkerson):

$$\tilde{B} \sim \hat{Q}^{0,27} R_p^{0,5}$$

$$\tilde{H} \sim \hat{Q}^{-0,124} R_p^{-0,31}$$

$$S \sim \hat{Q}^{-0,4} R_p^{-0,2}$$

Avendo il parametro di Shields Θ superiore al limite di trasporto in sospensione, con R_p numero di Reynolds.

⑦ Sezione di equilibrio: formule razionali

Per una precisa determinazione della sezione, quindi del fondo dell'alveo, si segue l'approccio razionale con la distribuzione delle tensioni sul contorno e la condizione di equilibrio limite.

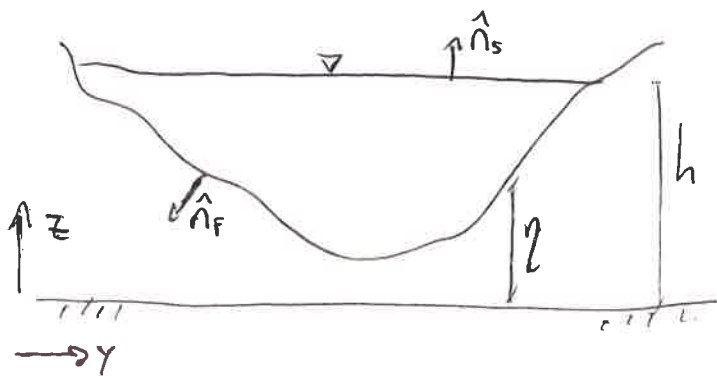
Il metodo di Engelund pone le ipotesi di moto stazionario ed uniforme in acque basse.

La tensione è descritta

$$\frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} + \rho g S = 0$$

definendo la tensione al

$$T_x = \frac{\left(\frac{\partial \eta}{\partial y} T_{xy} - T_{xz} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2}} = -\tau_0$$



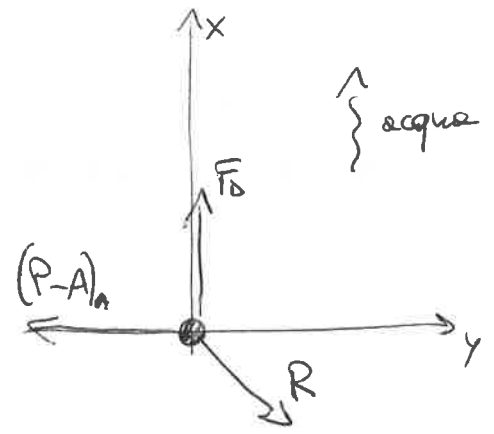
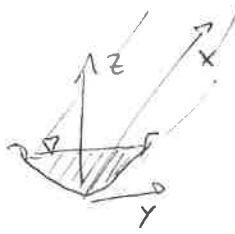
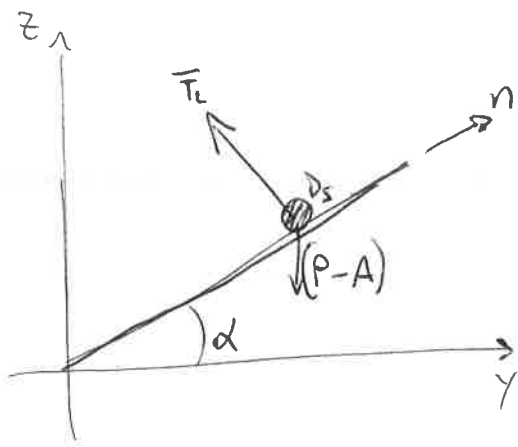
Si ottiene un bilancio di moto (integrato sulle verticali):

$$\rho g S y + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h T_{xy} dz + T_x \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2} = 0 \quad \left[\tau_0 = \frac{\partial \eta}{\partial y} \right]$$

Allora $\tau_0 = \cos \alpha \left[\rho g S y + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h T_{xy} dz \right]$ trasversalmente

Quindi si ha l'aggiunta del bilancio dinamico dato dal peso del volume d'acqua.

L'equilibrio limite considera l'inclinazione delle sponde, così come studiato da Shields nel moto dei sedimenti.

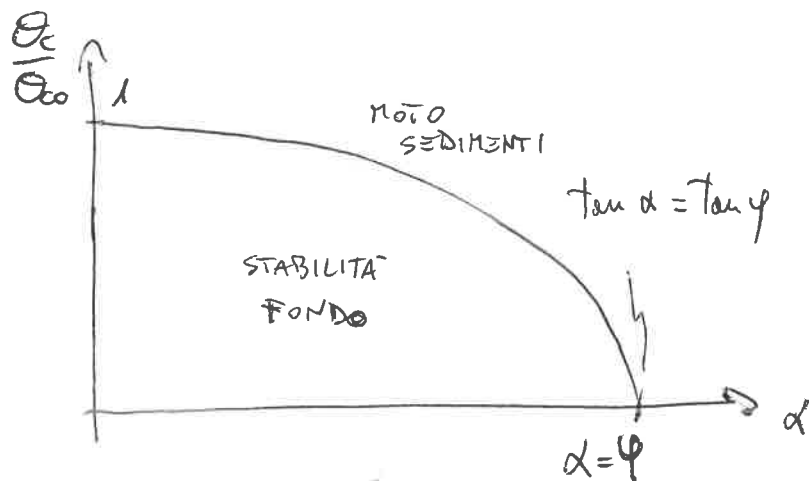


la resistenza è $R = \mu |N| = \tan \varphi |N|$ Coulombiana
 quindi l'equilibrio si ha per R vettoriale risultante

$$\mu \left[G \cos \alpha - \frac{C_0}{C_D} F_D \right] = \left[F_D^2 + G^2 \sin^2 \alpha \right]^{1/2}$$

trovando che il rapporto $\frac{F_D}{G} = \frac{3}{4} C_D A^2 \Theta$, l'equilibrio si
 riscrive con dei parametri definiti sperimentalmente (r e μ)

$$\left(\frac{\Theta_c}{\Theta_{c0}} \right)^2 (1-r) + \left(\frac{\Theta_c}{\Theta_{c0}} \right) 2r \cos \alpha + (1+r) \left[\frac{\sin^2 \alpha}{\mu^2} - \cos^2 \alpha \right] = 0$$



Equazione di II grado

$$\frac{\Theta_c}{\Theta_{c0}} = f(\alpha)$$

massimo in $\alpha = 0$ (fondo)
 $\Theta_c \rightarrow \Theta_{c0}$
 minimo in $\alpha = \varphi$ (sponde)
 instabile

Il modello di Glover & Florey mette in relazione la forma
 e le tensioni sul fondo, dal metodo di Engelund,
 considerando la sezione simmetrica con massima
 profondità Y_0 al centro - $\tau(y)$

8) si assume l'equilibrio per assenza di trasporto solido

$$\frac{\theta_c}{\theta_{c0}} = \frac{\tau_c}{\tau_{c0}} = \frac{y}{y_0} \cos \alpha \quad \text{nell'equazione di II grado}$$

si ottiene un'equazione differenziale ordinaria

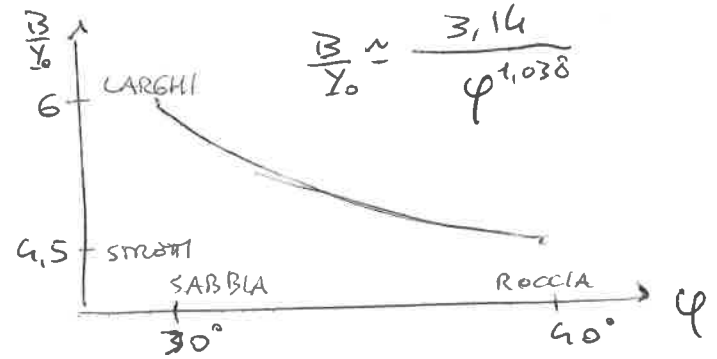
$$\left\{ \frac{dy}{dy} = -\mu \left(1 - \frac{1-r}{1+r} \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 - \frac{2r}{1+r} \left(\frac{y}{y_0} \right) \right)^{1/2} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} y=0 \quad \text{per } y = \frac{B}{2} \quad \text{sponda} \\ \frac{dy}{dy} = 0 \quad \text{per } y = y_0 \quad \text{centro} \end{array} \right\} \text{condizioni di Cauchy}$$

La soluzione analitica viene da $\left\{ \begin{array}{l} y = A_1 \cos(A_2 y) + A_3 \\ r = \cos \left(\mu \sqrt{\frac{1-r}{1+r}} \frac{B}{2 y_0} \right) \end{array} \right.$

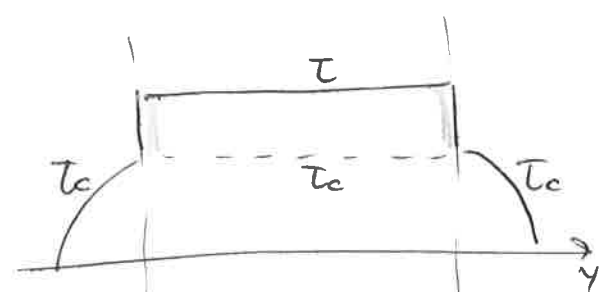
definendo il rapporto tra larghezza e profondità $(2\beta = \frac{B}{y_0})$

$$\frac{B}{y_0} = \frac{2}{\mu} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}} \arccos(r)$$

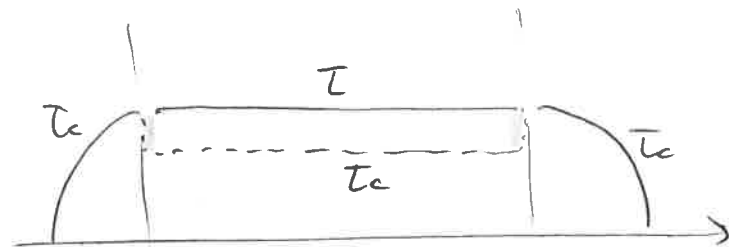


Lo studio si sposta sulla sponda e sul piede per risolvere il paradosso di assenza di trasporto $\tau = \tau_c$.

Hirano ammette due tipi di discontinuità possibili: nelle sponde si ha $\tau = \tau_c$, al fondo $\tau > \tau_c$ con trasporto, al piede discontinuità di $\bar{\tau}$ oppure τ_c .



I discontinuità



II discontinuità

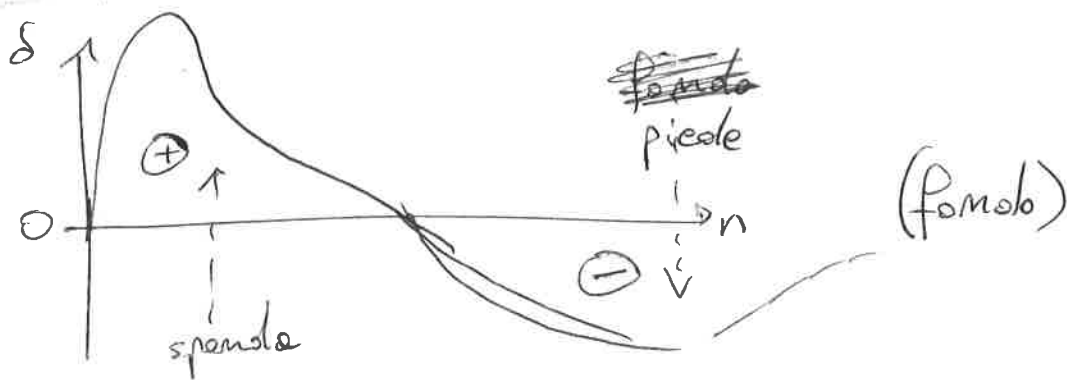
Si preferisce la \mp assunzione di discontinuità coerente con le caratteristiche del fondo. Le tensioni sono

$$\tau = \cos \alpha \left[\rho g S Y S + \frac{\partial}{\partial Y} \int_{\eta}^h T_{xy} dz \right]$$

per cui si corregge la formula con una funzione

$$\tau = \rho g S Y + 2 \rho g S (Y Y_0)^{1/2} \delta(n)$$

la funzione $\delta(n)$ è positiva alla sponda e negativa al piede, soddisfacendo la continuità delle tensioni τ .



Al piede sponda $\tau_{ps} = \rho g S Y_0 (1 - 0,15)$ in cui vale τ_c all'equilibrio. quindi $\theta_{ps} = \frac{\rho g S Y_0 (1 + 2\delta)}{(\rho_s - \rho) g D_s} = \theta_{co}$

mentre $\theta_0 = \frac{\rho g S Y_0}{(\rho_s - \rho) g D_s} = 1,15 \theta_{co}$

→ secondo Parker: i fiumi hanno equilibrio per valori di Shields di poco sopra la critica $Y_0 = A_0 \theta_{co} \Delta D_s \frac{1}{S_0}$

Il problema necessita della determinazione delle formule di regime Q e Q_s .

La portata liquida dipende dal parametro di Chézy (C)

$$\hat{Q} = \frac{Q}{\sqrt{g D_s^3}} = \frac{B_0}{D_s} \left(\frac{Y_0}{D_s} \right)^{3/2} C S_0^{1/2}$$

dal moto uniforme con la scala di deflusso

③ Il parametro di Chézy è $C = 3,71 \left(\frac{Y_0}{D_s} \right)^{0,26}$
 in relazione empirica e dimensionale $C \sim \left(\frac{Y_0}{D_s} \right)^{\alpha}$
 secondo Parker.

Per conoscere le grandezze geometriche si ricorre al sistema

$$\begin{cases} Q = B_0 Y_0 C \sqrt{g S_0 Y} & \text{moto uniforme} \\ Q_s = B_0 \sqrt{g \Delta D_s^3} \phi(\theta_0) & \text{portata solida} \\ \theta_0 = \frac{Y_0 S_0}{\Delta D_s} = A_0 \theta_{c0} & \text{parametro di Shields} \end{cases}$$

Dato che il trasporto solido è imprevedibile e il parametro di Shields varia nella forma del fondo, si sostituiscono le equazioni col nuovo sistema adimensionale:

$$\begin{cases} \hat{Q} \propto \left(\frac{Y_0}{D_s} \right)^{\alpha} \frac{B_0}{D_s} \left(\frac{Y_0}{D_s} \right)^{3/2} S_0^{1/2} & \text{moto uniforme} \\ \frac{Y_0}{D_s} \propto \hat{Q}^{0,4} & \text{da Parker (~~avendo } Y_0 \propto \Delta D_s \text{)}~~ \\ \frac{Y_0}{D_s} \propto A_0 S_0^{-1/2} & \text{equilibrio al piede di sponda} \\ & \text{dato che } Y_0 = A_0 \theta_{c0} \Delta D_s \frac{1}{S_0} \end{cases}$$

Per sostituzione si ottiene la larghezza

$$\frac{B_0}{D_s} \propto \hat{Q}^{-1-0,4\alpha} \left(\hat{Q}^{0,4} \right)^{3/2} \left(A_0 \hat{Q}^{0,4} \right)^{-1/2} \propto A_0^{-1/2} \hat{Q}^{(0,6-0,4\alpha)}$$

quindi la ~~larghezza~~ ^{profondità} $\frac{Y_0}{D_s} \propto \hat{Q}^{0,4}$

e la pendenza $S_0 \propto \hat{Q}^{-1-0,4}$

Tutti i parametri sono in funzione del regime idrologico.
 La portata solida si definisce adimensionale:

$$\hat{Q}_s = \frac{B_0}{D_s} \sqrt{\Delta} \phi(\theta_0) \quad \text{quindi } \hat{Q}_s \propto A_0 \hat{Q}^{(0,6-0,4\alpha)}$$

con $\alpha \approx 0,2$

$$\hat{Q}_s \sim \sqrt{\hat{Q}}$$

Da queste relazioni si descrive il comportamento della geometria dell'alveo alla variazione della portata e delle condizioni al contorno.

Dato che

$$\begin{cases} \frac{B_0}{D_s} = A_B \hat{Q}^{\alpha_B} \\ \frac{V_0}{D_s} = A_V \hat{Q}^{\alpha_V} \\ S_0 = A_S \hat{Q}^{\alpha_S} \end{cases}$$

com A_0 riferito alla coesione dei sedimenti

Vale la relazione $A_Q \sim A_B (A_0 - 1)^{1,5}$ con una risposta morfologica alla variazione del trasporto solido (secondo la LEGGE UNIVERSALE).

La pendenza è il rapporto tra coesione e profondità. $A_S \propto \frac{A_0}{A_V}$

La larghezza è inversa alla coesione e alla profondità. $A_B \propto (A_0^{0,5} A_V^{1+\alpha})^{-1}$

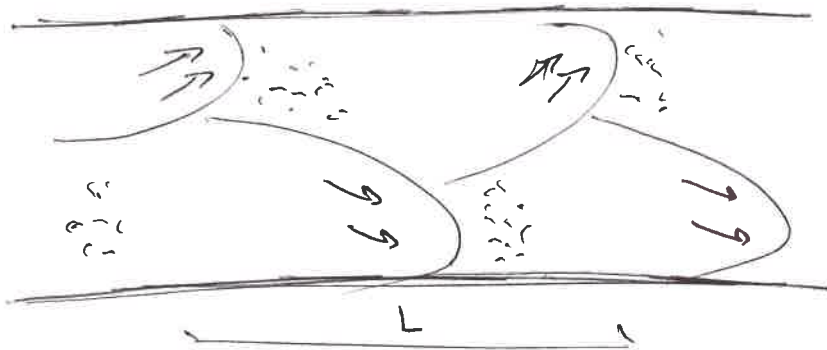
La coesione A_0 varia da 1,15 a 1,6, mentre la pendenza aumenta con la coesione, la larghezza diminuisce.

Un fiume montano ha caratteristiche di alta coesione, essendo in grana grossa, infatti presenta pendenze maggiori e larghezze minori rispetto ad un fiume di pianura.

10) FORME ALTIMETRICHE: BARRE FLUVIALI

Barre alternate migranti, fenomenologia

Le barre alternate sono forme di fondo caratterizzate da una sequenza longitudinale alternate di zone di scavo e di deposito.

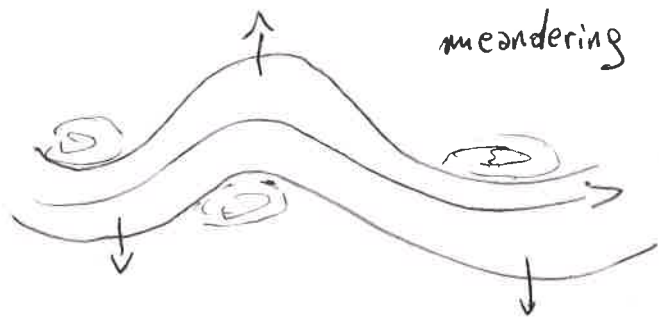


$$L \sim (5-15)B$$

Grande effetto sul campo di moto secondario.

[Reach scale]

Secondo la bar theory, sono cause dell'evoluzione planimetrica dei meandri



Lo studio delle barre ha la finalità di controllare gli effetti topografici, con l'interazione di erosioni localizzate, manufatti e navigazione.

Qualunque intervento che modifica la larghezza del fiume, modifica l'altimetria del fondo.

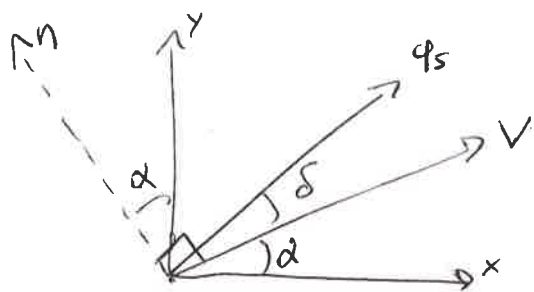
Lo Esistono dubbi sulla validità della bar theory, dato che la scala temporale è molto diversa tra planimetria ed altimetria.

Berre alternate migranti, teoria lineare

la teoria lineare mette a sistema i bilanci di moto con la continuità solida, con le ipotesi di stazionarietà di Exner. ($\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow 0$)

$$\begin{cases} U \frac{\partial v}{\partial x} + V \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho Y} = 0 \\ U \frac{\partial v}{\partial x} + V \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial(UY)}{\partial x} + \frac{\partial(VY)}{\partial y} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

Il trasporto solido ha una forma vettoriale relativa al moto del fluido ma anche alle forme del fondo.



$$|q_s| = \sqrt{\Delta \rho} D_s^3 \phi(\theta)$$

$$\frac{q_{sy}}{q_{sx}} = \tan(\alpha + \delta)$$

per angoli piccoli $\begin{cases} q_{sx} = |q_s| \\ q_{sy} = |q_s| \left(\frac{v}{|v|} - \frac{r}{\sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \end{cases}$

Vengono utilizzate le forme adimensionali, in relazione allo stato di equilibrio U_0, V_0, Y_0, B_0 e tempo di risposte del fondo $T_f = \frac{0,5 B Y_0}{\sqrt{\Delta \rho} D_s^3 \phi(\theta_0)}$ col numero di Froude

$$Fr_0^2 = C^2 \theta_0 \Delta ds$$

Il sistema diventa adimensionale con i coefficienti β, C, Fr_0

$$\begin{cases} U \frac{\partial v}{\partial x} + V \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\beta}{C^2} |v| \frac{v}{Y} = 0 \\ U \frac{\partial v}{\partial x} + V \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\beta}{C^2} |v| \frac{v}{Y} = 0 \\ \frac{\partial(UY)}{\partial x} + \frac{\partial(VY)}{\partial y} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

(11) Le portate solide presentano i termini

$$q_{sv} = \frac{\phi(\theta)}{\phi(\theta_c)} \left(\frac{v}{|v|} - \frac{r}{\beta \sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)$$

quindi maggiore è $\beta = \frac{B}{2Y}$, maggiore è l'effetto gravitazionale sulle particelle.

Anche Froude presenta i parametri β, ds, θ_0 - ~~...~~

È necessario effettuare una LINEARIZZAZIONE per capire la stabilità dello stato di riferimento.

$$\begin{cases} U^* = U_0^* + U_1^*(x^*, y^*, t^*) \\ V^* = V_0^* + V_1^*(x^*, y^*, t^*) \\ Y^* = Y_0^* + Y_1^*(x^*, y^*, t^*) \\ \eta^* = \eta_0^* + \eta_1^*(x^*, y^*, t^*) \end{cases}$$

Imponendo una perturbazione infinitesima sulle grandezze dimensionali

$$(U_1^*, V_1^*, Y_1^*, \eta_1^*) \ll 1$$

Si applica lo sviluppo di Taylor sostituendo i termini nelle relazioni del sistema, con i termini del I ordine:

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right] + \frac{\beta}{G^2} [2U_1 - Y_1] = 0$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial x} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right] + \frac{\beta}{G^2} V_1 = 0$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial x} + \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial Y_1}{\partial y} = 0$$

$$(1-p) \frac{\partial \eta_1}{\partial t} + 2 \underbrace{f(\theta_0)}_{\frac{df}{d\theta}} \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial V_1}{\partial y} - \frac{r}{\beta \sqrt{\theta_0}} \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial y^2} = 0$$

Il sistema è lineare ed omogeneo

$$\text{con } f(\theta_0) = \frac{\theta_0}{\phi(\theta_0)} \left(\frac{d\phi}{d\theta} \right)_{\theta_0} = \frac{3}{2} \frac{\theta_0}{(\theta_0 - \theta_c)}$$

La soluzione è l'evoluzione spaziale del fondo nel tempo:

$$\eta_1 = A(t) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda x - \omega t)$$

Questa soluzione esiste se l'ampiezza aumenta col tempo, altrimenti si ha stabilità del fondo in qualsiasi perturbazione.

I termini dell'onda sono $\left\{ \begin{array}{l} \lambda = \frac{\pi \beta}{\omega} \text{ numero d'onda} \\ \omega = \lambda c \text{ frequenza angolare} \end{array} \right.$

Le soluzioni descrivono il comportamento della variazione con una deviazione di S_u, S_y, S_v

$$\begin{cases} U_1 = A(t) \hat{U}_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos\left[(\lambda x - S_u) - \omega t\right] \\ Y_1 = A(t) \hat{Y}_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos\left[(\lambda x - S_y) - \omega t\right] \\ V_1 = A(t) \hat{V}_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos\left[(\lambda x - S_v) - \omega t\right] \end{cases}$$

Si ottengono 8 equazioni con 8 incognite, con la seconda soluzione $\frac{dA}{dt} = \Omega(\lambda; \beta, \epsilon_0, ds) A$ tramite il coefficiente di amplificazione

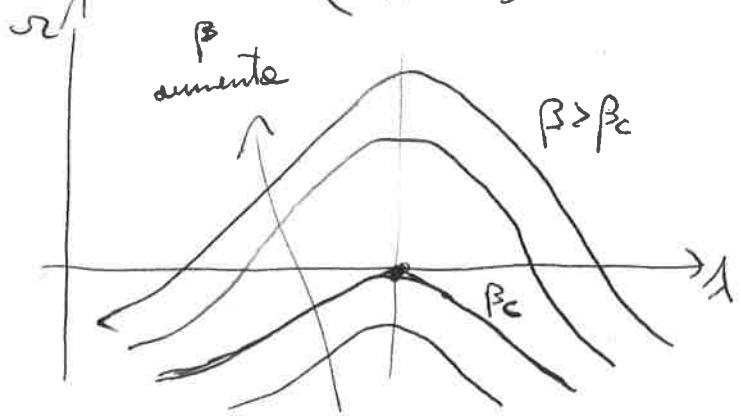
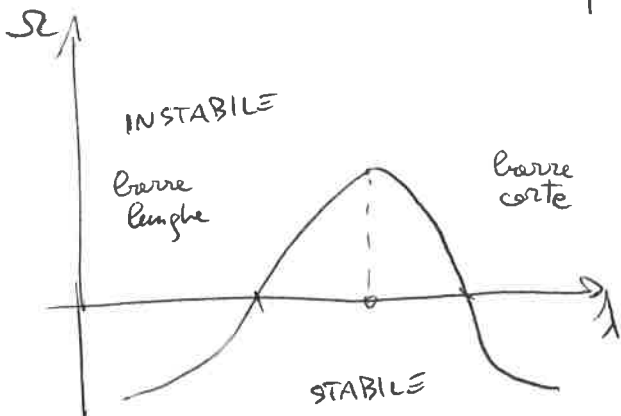
L'equazione di Exner viene descritta dal sistema

$$\begin{cases} (1-p) \frac{dA}{dt} + 2\lambda f A \hat{U}_1 \sin(S_u) - \frac{\pi}{2} A \hat{V}_1 \cos(S_v) + A \frac{2}{\beta \sqrt{\epsilon_0}} \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 = 0 \\ (1-p) \omega A - 2\lambda f A \hat{U}_1 \cos(S_u) - \frac{\pi}{2} A \hat{V}_1 \sin(S_v) = 0 \end{cases}$$

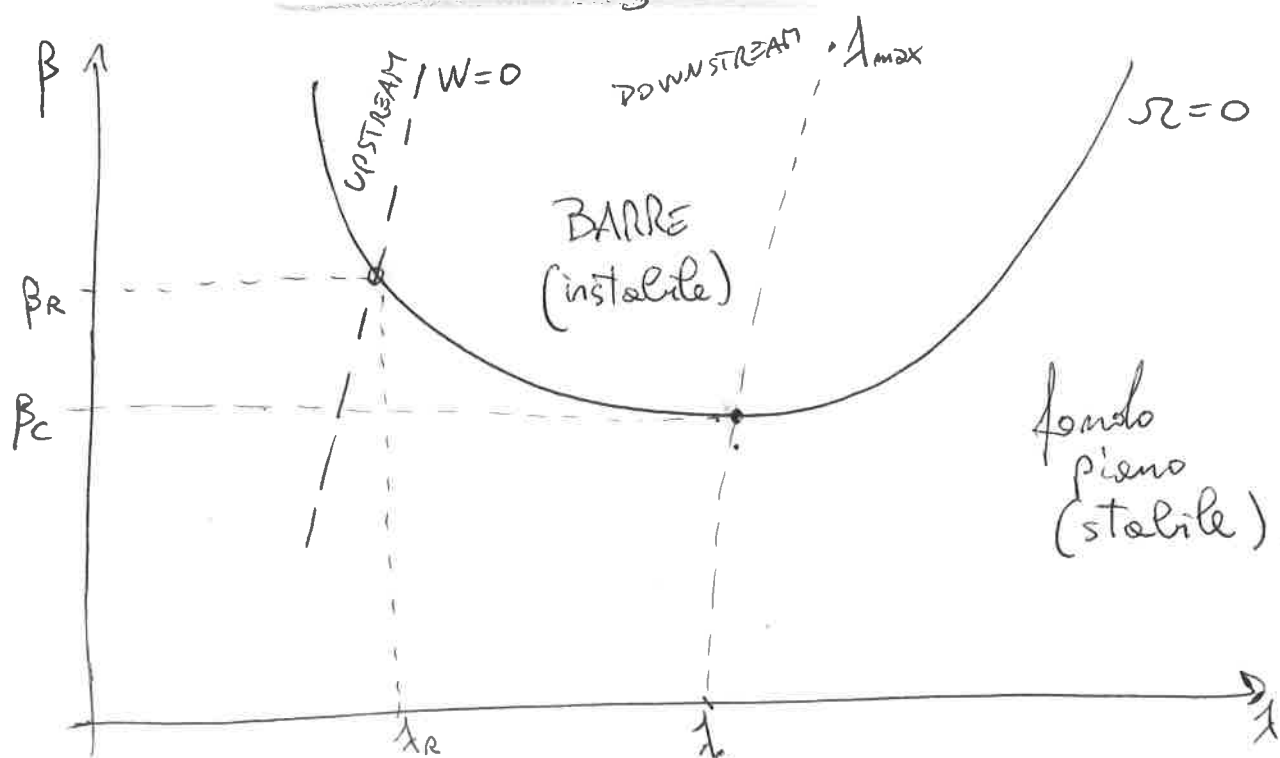
Che può essere sintetizzato nella forma

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = \Omega A \longrightarrow \text{descrive la stabilità} > 0 \text{ instabile} \\ < 0 \text{ stabile} \\ \frac{dA}{dt} = \omega A \longrightarrow \text{descrive la celerità} \end{cases}$$

mentre il termine $-\frac{2}{\beta \sqrt{\epsilon_0}} \left(\frac{\pi}{2}\right)^2$ ha ruolo stabilizzante (effetto gravità)

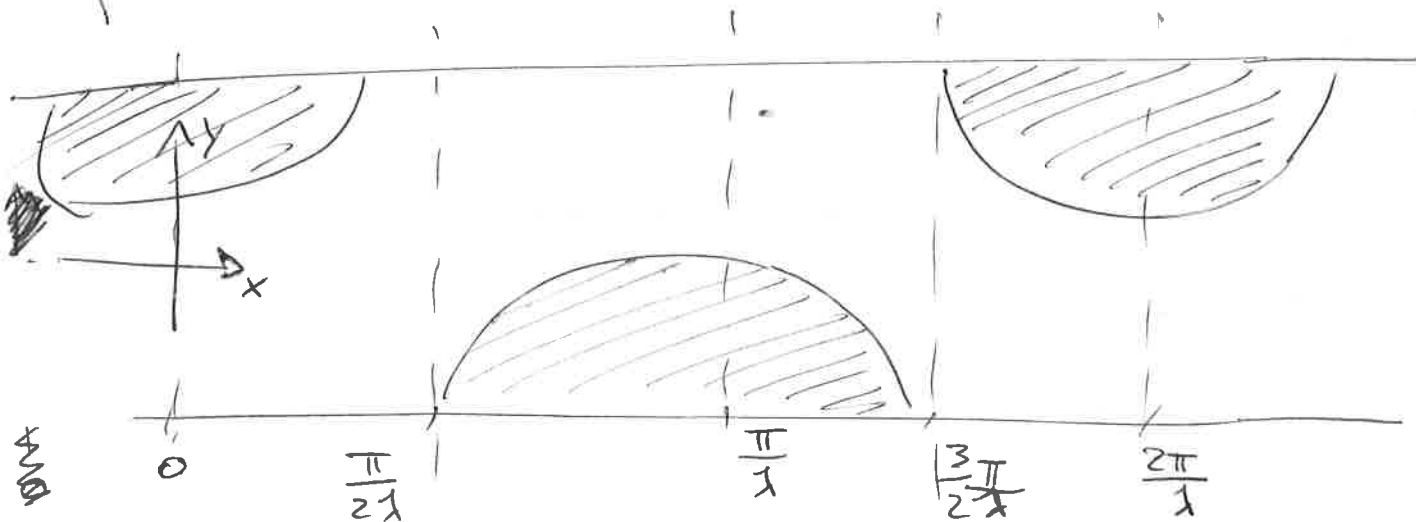


12) la formazione e l'evoluzione delle barre viene descritta nella curva marginale.



Nella coesistenza di $w=0$ e $\Omega=0$ si ha il β risonante (β_R), utile a descrivere il comportamento della barra.

La formazione delle barre vede una situazione artificiale di partenza con barre alternate.



l'equazione di Exner descrive l'equilibrio scavo-deposito

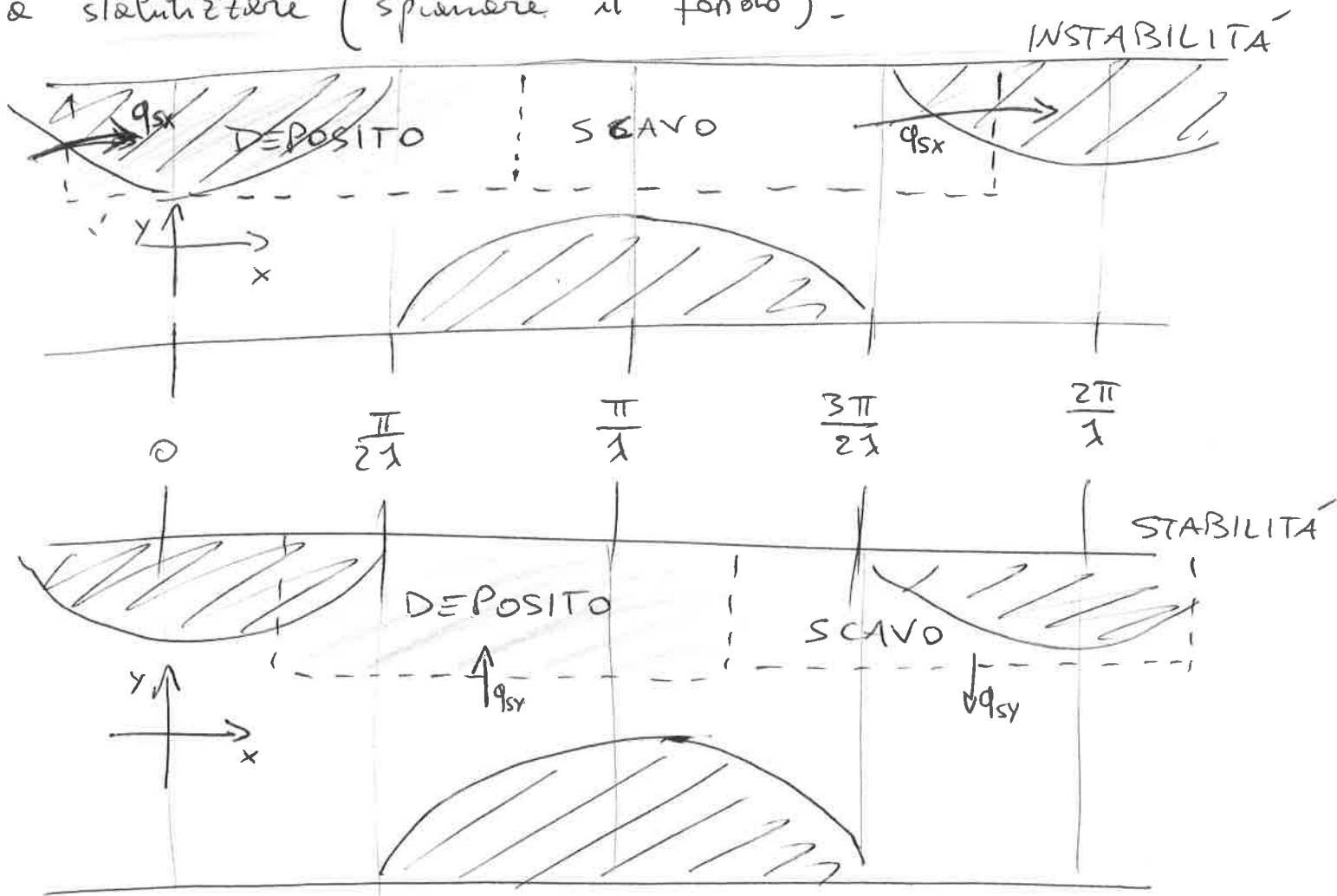
$$(1-P) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0$$

Quindi si hanno i due casi

DEPOSITO $\frac{\partial \eta}{\partial t} > 0 \rightarrow \frac{\partial q_{sx}}{\partial x}, \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} < 0$ *decrece*

EROSIONE $\frac{\partial \eta}{\partial t} < 0 \rightarrow \frac{\partial q_{sx}}{\partial x}, \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} > 0$ *aumenta*

Data la simmetria in \hat{y} e l'antisimmetria in \hat{x} si ha che q_{sx} tende a instabilizzare (formare barre) e q_{sy} a stabilizzare (spianare il fondo).

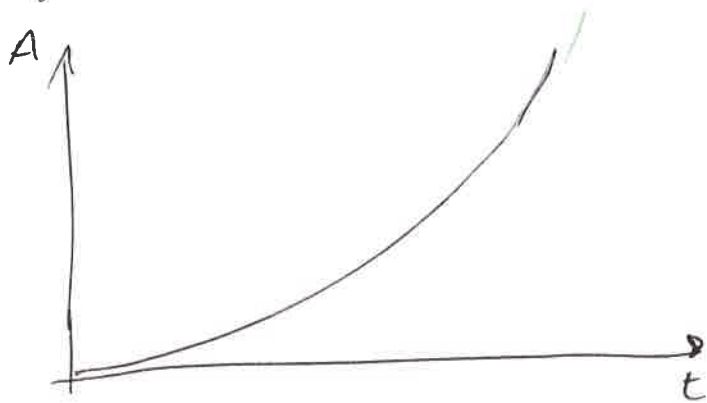


instabilità $\left[\begin{array}{l} \text{deposito sulla ~~barra~~ barra} \\ \text{erosione sul fondo} \end{array} \right. \begin{array}{l} \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} < 0 \\ \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} > 0 \end{array}$

stabilità $\left[\begin{array}{l} \text{deposito sul fondo} \\ \text{erosione sulla barra} \end{array} \right. \begin{array}{l} \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} < 0 \\ \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} > 0 \end{array}$

13) Barre attornate: teorie non lineare

Avendo descritto il parametro A come l'ampiezza di equilibrio $A \sim \exp[\Omega t]$ si ha il grafico nel tempo:

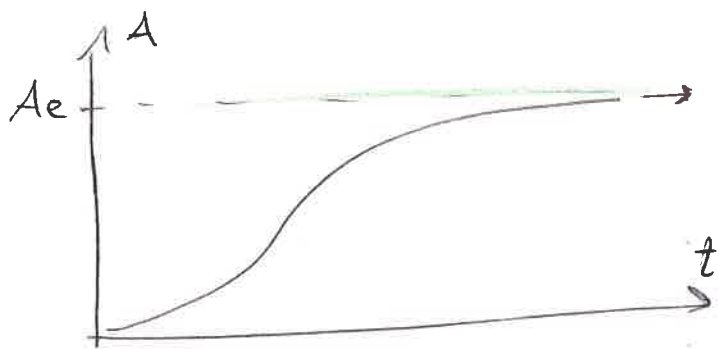


esponenziale che tende a $A \rightarrow \infty$, in cui non descrive l'equilibrio.

La teoria non-lineare volge alla ricerca del caso per cui $t \rightarrow \infty$ secondo metodi analitici

$$\frac{dA}{dt} = (\varepsilon \alpha_0) A + \alpha_1 A^3, \quad \text{con } \alpha = f(\theta_0, \omega_s)$$

$$\varepsilon = \frac{\beta - \beta_c}{\beta_c}$$



si ammette un'ampiezza di equilibrio per tempo infinito $A \rightarrow Ae$

$$\frac{dA}{dt} = 0 = \Omega A + \alpha_1 A^3 \quad \text{quindi } Ae [\Omega + \alpha_1 Ae^2] = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Ae = 0 \quad \text{equilibrio stabile} \\ Ae = \sqrt{-\frac{\Omega}{\alpha_1}} \quad \text{equilibrio instabile} \end{array} \right.$$

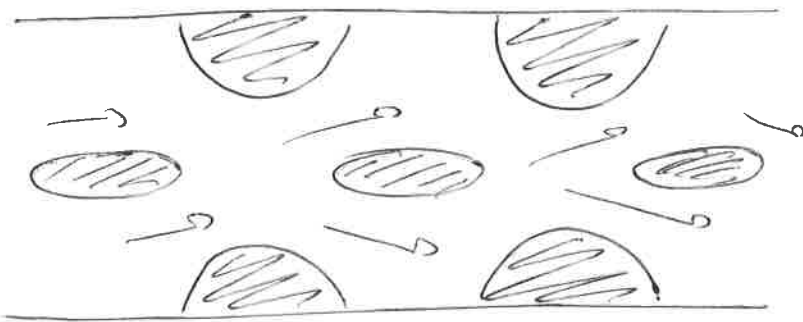
si calcola il massimo dislivello, con la condizione di moto stazionario e parametri ambientali fissati:

$$H_{\text{max}} = \gamma_0 \left[b_1 \sqrt{\frac{\beta - \beta_c}{\beta_c}} + b_2 \frac{\beta_0 - \beta_c}{\beta_c} \right] \approx 3,5 \gamma_0 \quad (b_{1,2} \sim 1_0)$$

$$= \eta_{\text{a}} - \eta_{\text{m}}$$

Barre libere: modi superiori

All'aumentare della lunghezza B , quindi anche del parametro β , si ha la crescita del dislivello rispetto alla massima profondità $\frac{H_{011}}{y_0}$, fino ad una certa valenza. Nel caso in cui $\beta \gg \beta_c$ si ha la formazione di BARRE MULTIPLE con una configurazione replicata in lunghezza.



Anche il campo di moto viene modificato con alternanze di CONVERGENZA e DIVERGENZA.

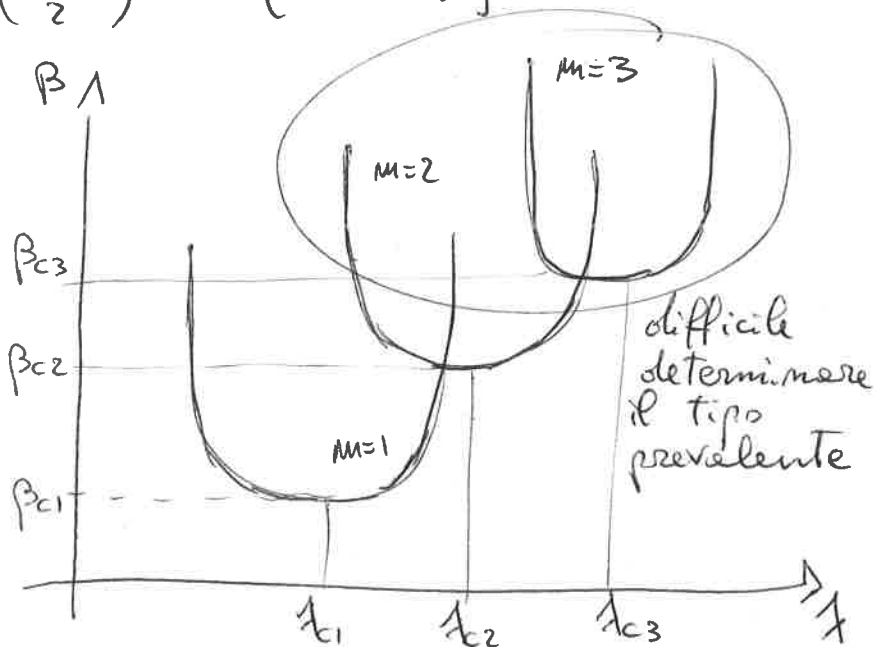
L'equazione del fondo diventa

$$\eta_1 = A(t) \left[\sin\left(\frac{m\pi y}{2}\right) \cos(\lambda x - \omega t) \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m \text{ dispari: } \eta = A(t) \left[\sin\left(\frac{m\pi y}{2}\right) \cos(\lambda x - \omega t) \right] \text{ antisimmetrico} \\ m \text{ pari: } \eta = A(t) \left[\cos\left(\frac{m\pi y}{2}\right) \cos(\lambda x - \omega t) \right] \text{ simmetrico} \end{array} \right.$$

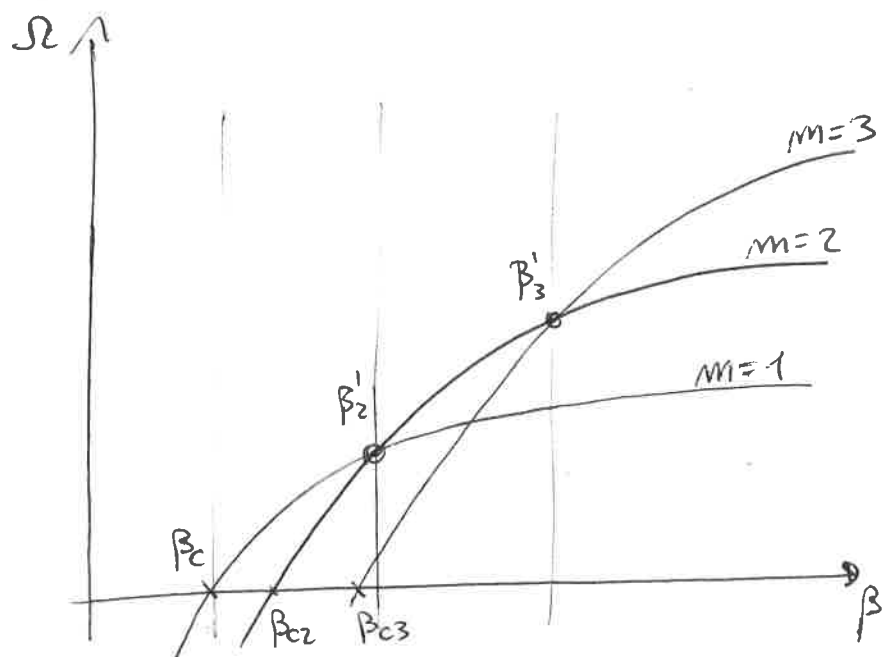
La curva marginale evolve di conseguenza incrementando il β_c per ogni m del doppio valore.

Quindi le barre si accorciano e si appiattiscono.

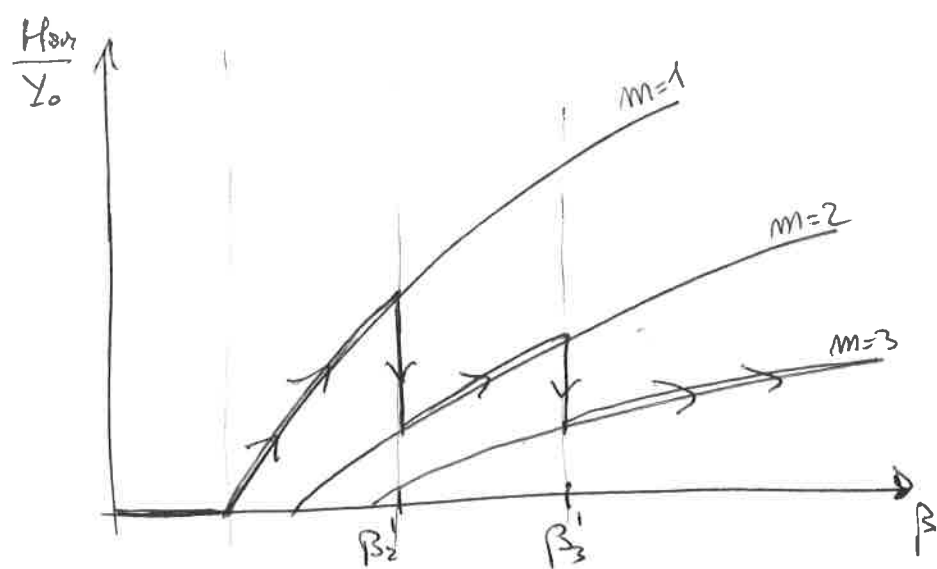


$$\beta_{ci} = i\beta_{c(i-1)}, \quad \lambda_{ci} = i\lambda_{c(i-1)}$$

14) All'aumentare di β e del parametro m , si trovano diverse forme di interazione tra fenomeni, quindi maggior grado di libertà del problema.



i parametri fondamentali li diventano i rispettivi β_i fino a saturazione.



La teoria analitica del massimo dislivello descrive il decadimento all'aumentare di m .
* meglio la rappresentazione dimensionale con β .

La bar theory porta a descrivere la formazione di meandri per canali singoli $m=1$, mentre si avrebbe braiding per canali multipli ($m>1$). Questo criterio si basa sullo studio lineare, inoltre si avrebbe l'attenuazione del fenomeno prima della modifica planimetrica.

Barre libere: alvei in sabbia

La differenziazione granulometrica dell'alveo è stata fatta anche per il tipo di trasporto: domina un trasporto di fondo per ghiaia e ciottoli, mentre si ha trasporto in sospensione per la sabbia. Quindi formazione di dune piuttosto che barre.

Il modello Exner 3D descrive anche la variazione in z

$$(1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \quad \begin{cases} q_{sx} = \int_{\eta}^h q_x dz \\ q_{sy} = \int_{\eta}^h q_y dz \end{cases}$$

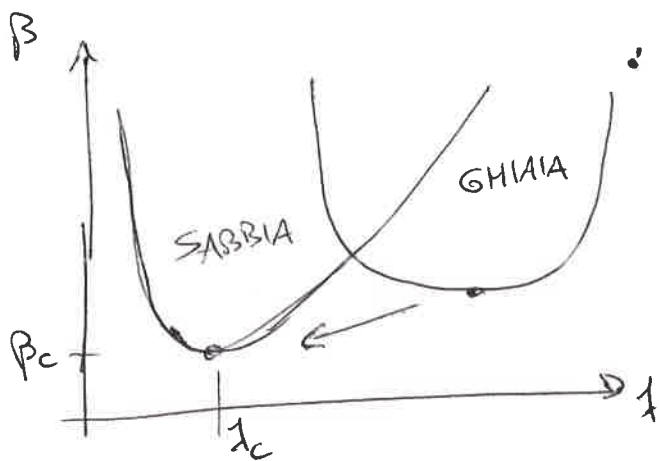
in cui il trasporto è dato per flusso e diffusione, che variano la concentrazione.

$$\vec{q} = \vec{V}_p C - D^T \nabla C$$

Si giunge all'equazione del trasporto convettivo pesante

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\vec{V}_p C) = \nabla(D^T \nabla C) \quad \text{con uno sfasamento}$$

dei punti di massimo (deposito) e minimo (scavo).



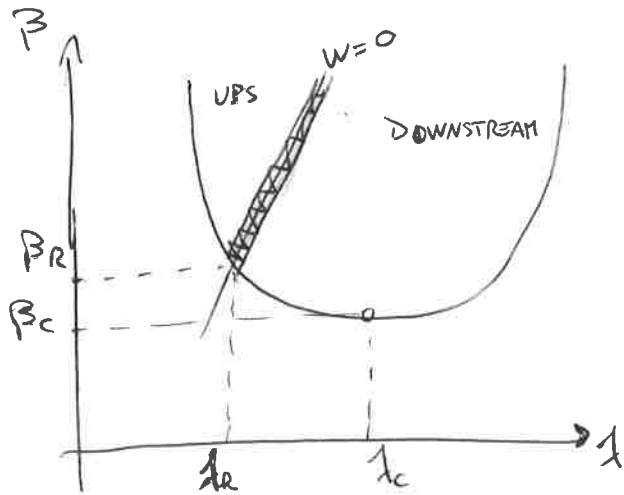
si ha una stabilizzazione del fondo abbassando le barre e riempiendo i buchi.

Le barre sono molto più lunghe $L \sim (15 \div 30) B$.

~~si ha sfasamento della velocità rispetto alla profondità~~
 Si ha sfasamento della portata solida e della tensione al fondo.

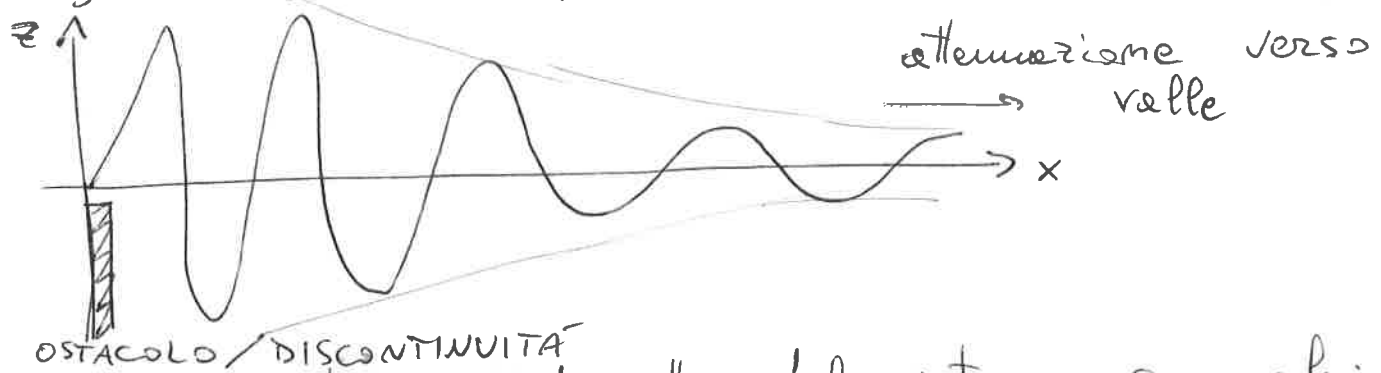
15) Barre stazionarie

Le barre sono dette stazionarie se non evolvono nel tempo, quindi non migrano lungo \hat{x} . Sono generate da un disturbo esterno, come un ostacolo antropico o una curva.



Nella curva marginale si descrive la zona upstream e quella downstream, quindi le barre stazionarie sono presenti per $w=0$, ovvero velocità di propagazione nulla.

Lungo l'asse \hat{x} si presenta un'attenuazione del fenomeno



La stazionarietà è descritta dal sistema generale:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{T_x}{\rho Y} = 0 \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{T_y}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial (uY)}{\partial x} + \frac{\partial (vY)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

annullando i termini dipendenti dal tempo ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$)

La linearizzazione del problema con le piccole perturbazioni
 $(U_1, V_1, \eta_1, \eta_2) = f(x, y)$ Trova la soluzione

$\eta_1 = A(x) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_1 x)$ senza il termine temporale

Le 4 incognite del problema sono descritte con

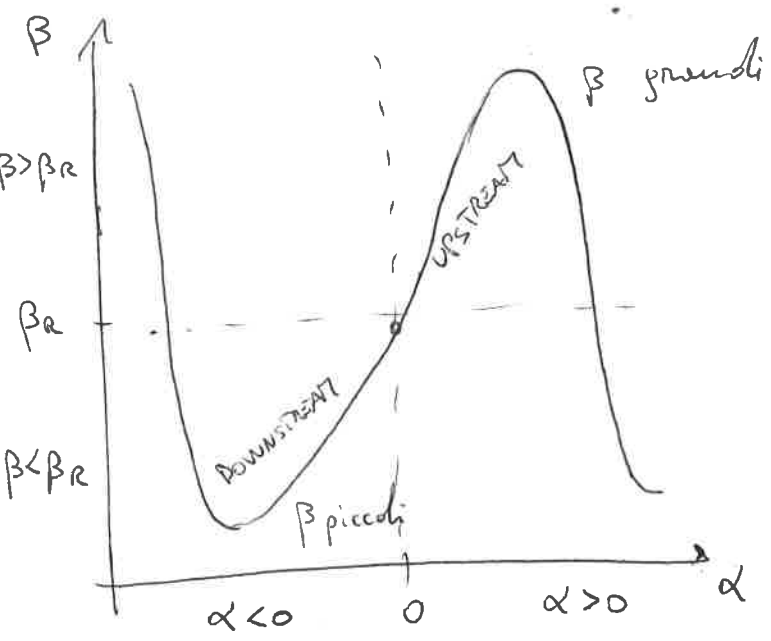
$\eta_1 = C_i \exp(\alpha^i x) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda^i x) \quad i = 1 \dots 4$

$\neq \underbrace{C_1 \exp(\alpha_1 x) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_1 x)}_{\text{scala lunga}} + \underbrace{C_3 \exp(\alpha_3 x) + C_4 \exp(\alpha_4 x)}_{\text{scala corta}}$

Per il lungo termine si ha $\alpha_1 > 0$ in β grandi
 $\alpha_1 < 0$ in β piccoli

mentre β_R vale per $\alpha_1 = 0$

In fatti per $\beta < \beta_R$ si ha disturbo verso valle, per $\beta > \beta_R$ il disturbo è verso monte -



Lo stato di risonanza come $\alpha = 0$, quindi la soluzione è costante nel caso limite

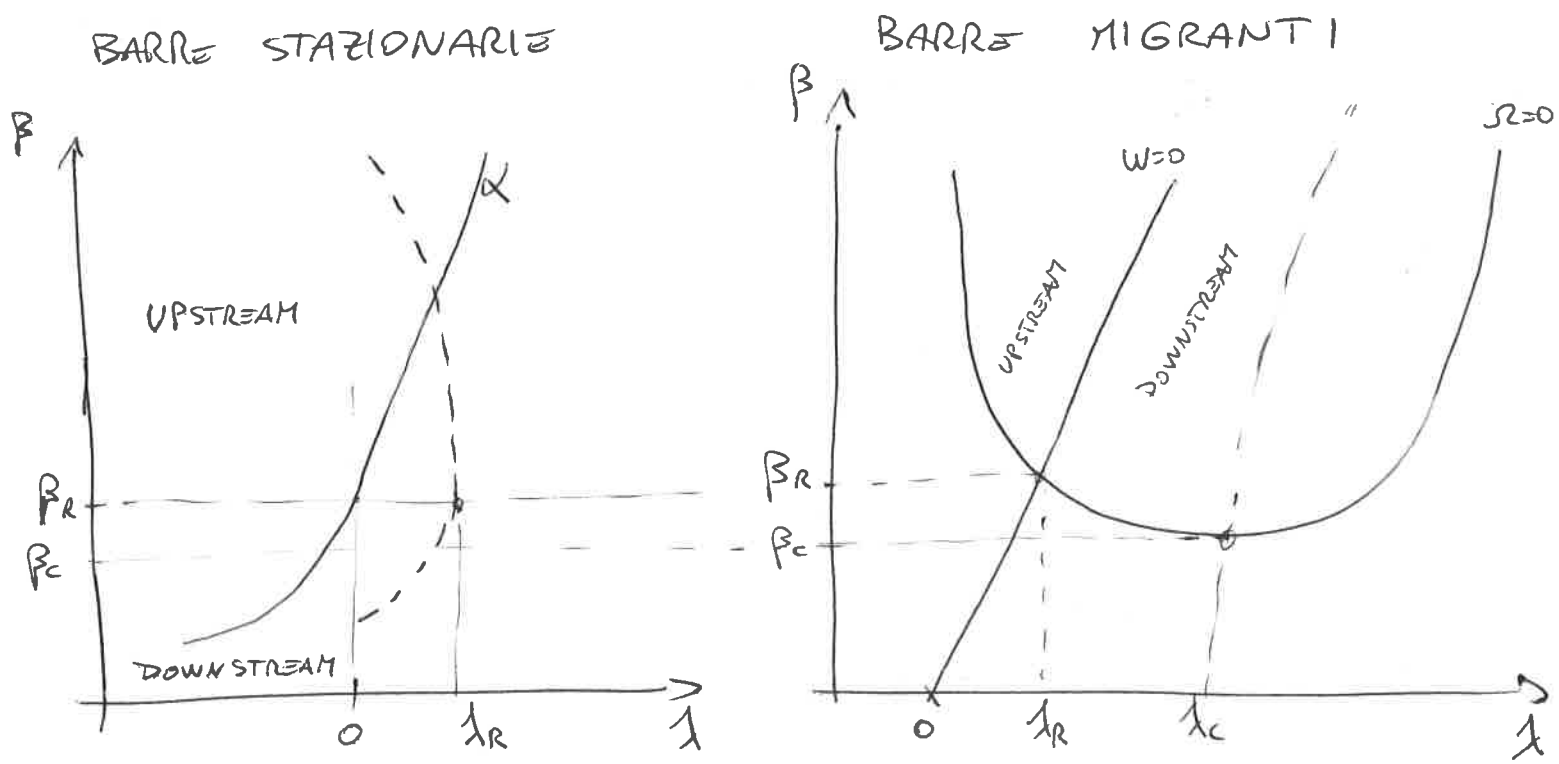
$\eta_1 = C_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_1 x)$

in cui $C_1 =$ disturbo iniziale

La risonanza ha una forte dipendenza da Shields e dal regime di portata -

BASSA	Q	\rightarrow	β_R basso
ALTO	Q	\rightarrow	β_R alto

16) La differenza tra i tipi di barre si vede nel grafico



Quindi le equazioni diventano

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{BS} \sim \exp[\alpha x] \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_{BS} x) \\ \eta_{BM} \sim \exp(\alpha t) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda_{BM} x - \omega t) \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{B. STAZIONARIE} \\ w=0 \\ \text{B. MIGRANTI} \\ w \neq 0 \end{array}$$

esponenziale
trasversale
longitudinale
(x o t)

All' aumentare di β si ha:

- C. stazionarie downstream ($\beta < \beta_C$)
- C. stazionarie downstream e C. migratorie downstream ($\beta_C < \beta < \beta_R$)
- C. stazionarie upstream e C. migratorie downstream e upstream ($\beta > \beta_R$)

Barre libere; regime idrologico

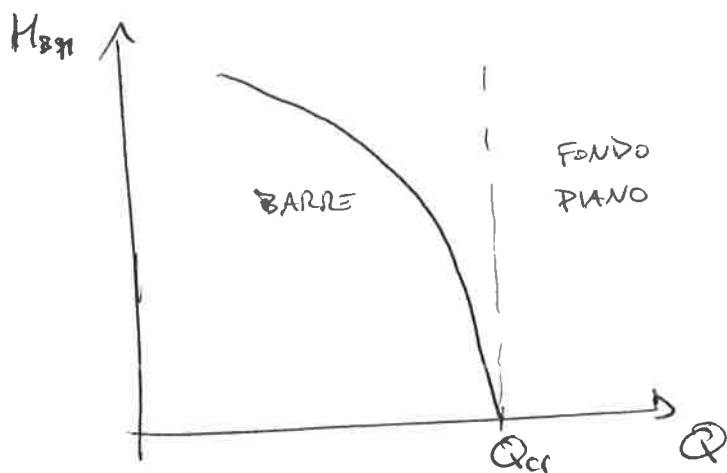
Per i casi più reali bisogna imporre un regime idrologico invece che una portata fissata.

Viene considerata la portata formativa adeguata, ovvero quella dominante con massimo trasporto solido (Q_d) perché più adatta ad alvei naturali.

Partendo dalle 4 ipotesi:

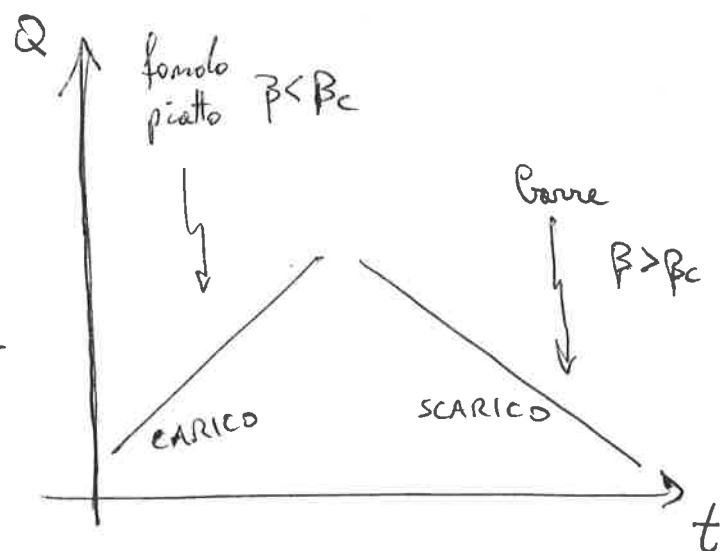
1. al crescere della portata Q aumenta il trasporto solido Q_s ;
2. al crescere della portata Q diminuisce la scala temporale;
3. la risposta è istantanea;
4. l'effetto è irreversibile, se la portata Q si riduce la lunghezza resta invariata.

In piena l'altezza aumenta (Y_0) riducendo $\beta = \frac{B}{2Y_0}$, quindi la formazione di barre è ridotta.



Esiste una portata Q_{cr} per cui si ha il limite di sviluppo delle barre.

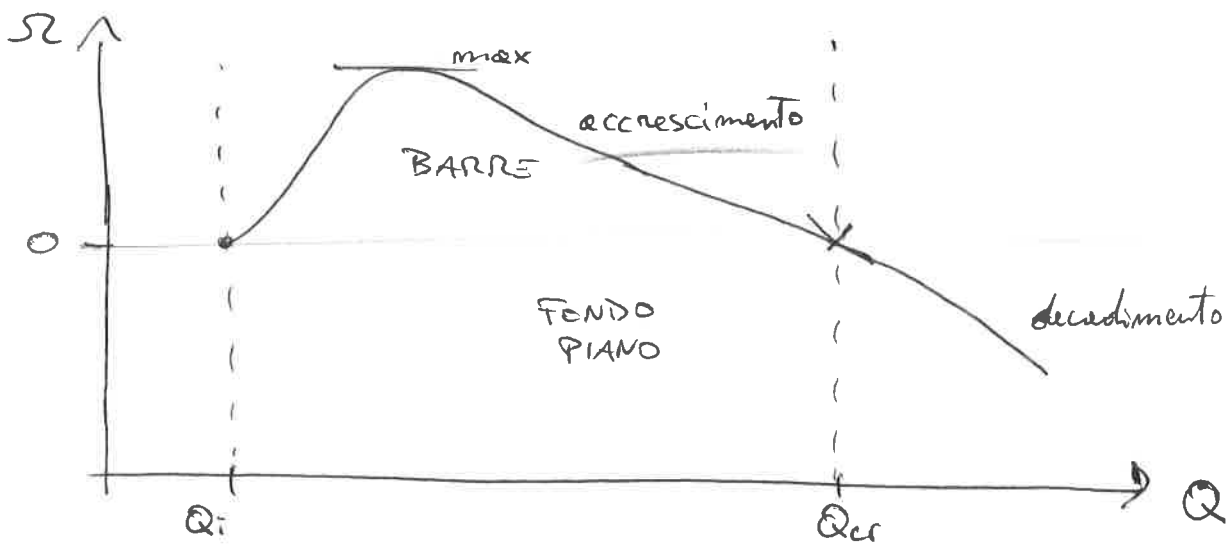
Durante una piena si ha la fase di "carico" in cui si riducono le barre e la fase di "scarico" in cui si formano le barre.



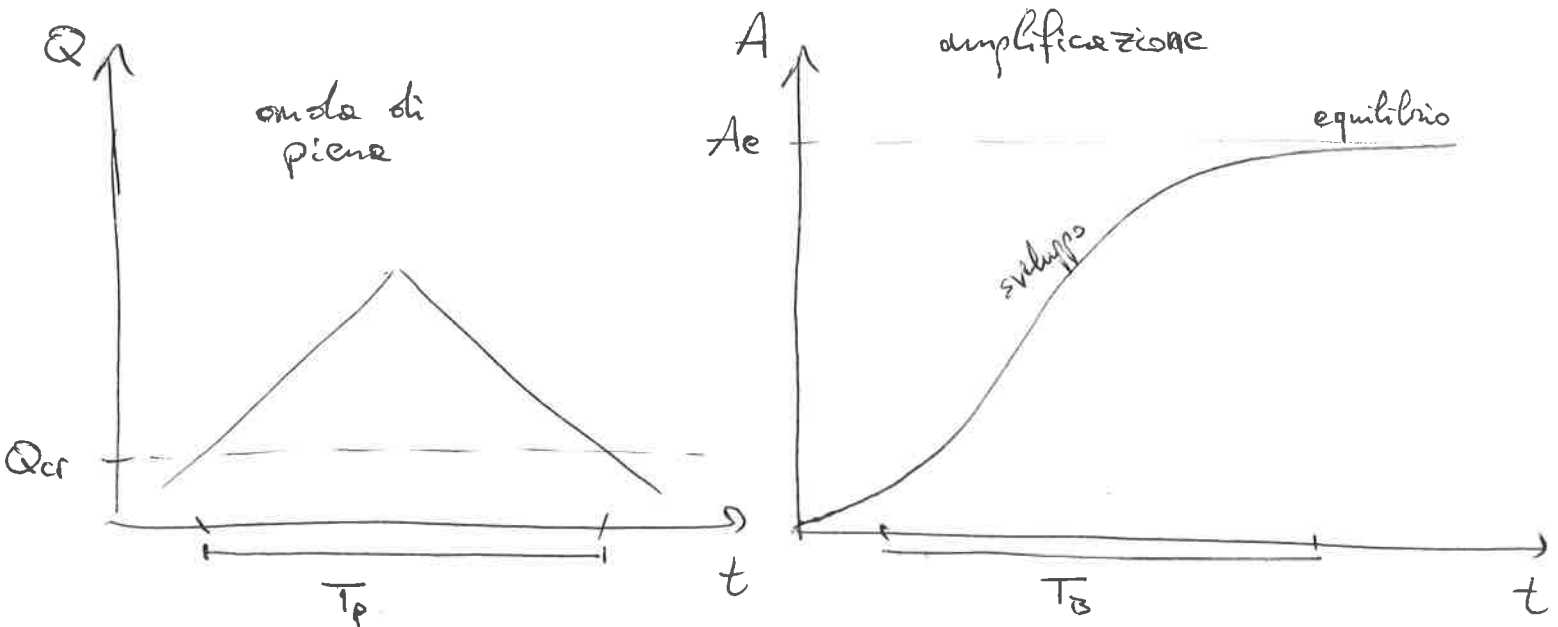
(17) Nella realtà, la risposta non è istantanea (III ipotesi) perché la formazione al fondo richiede tempo, quindi si relaziona col tempo della piena in

$$R_T = \frac{T_p}{T_B} \rightarrow \begin{array}{l} \text{tempo piena} \\ \text{tempo barra} \end{array} \quad \text{con } T_B \sim \frac{1}{\Omega}$$

Quindi la massima amplificazione si ha per un range di portate normali



Quindi il problema deve tener presente di entrambi i tempi di evoluzione; tipicamente $R_T \sim 1$.





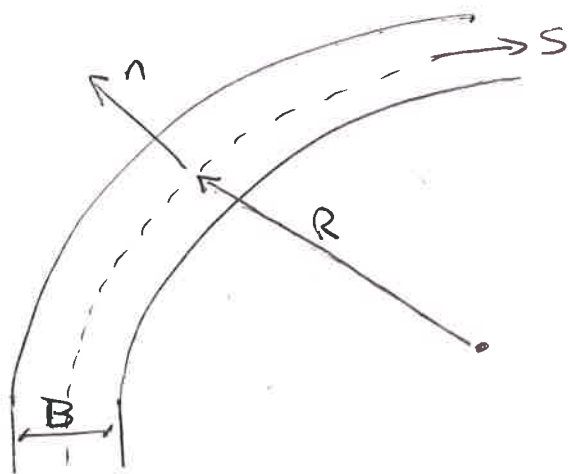
18) FORME PLANIMETRICHE: PROCESSI

Moto in curva a raggio costante

Il problema ha un primo approccio con la teoria di Rozowski,

in cui si ipotizza

- una debole curvatura $\frac{B}{R} \ll 1$
- moto completamente sviluppato $\frac{\partial}{\partial s} = 0$
- alveo largo $\beta \gg 1$
- moto stazionario $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

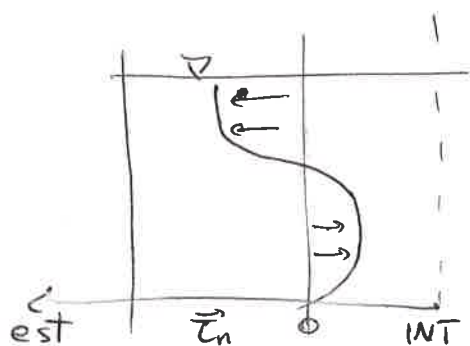


$$\frac{v^2}{R} = \rho g h \frac{\partial \eta}{\partial n} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

In cui l'effetto centrifugo è la differenza tra l'inclinazione superficiale ed il moto secondario (\hat{n}).

L'equilibrio prevede un ~~non~~ moto secondario senza trasporto solido

$$q_{sn} = |q_s| \left(\frac{\bar{\eta}_n}{|\bar{\eta}|} - \frac{r}{\sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial n} \right) = 0$$



La formula di Exner è corretta dalle nuove coordinate (\hat{s}, \hat{n}) del moto in curva. $\left[h_s = \frac{R+n}{R} \right]$

$$(1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial q_{ss}}{\partial s} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial}{\partial n} (q_{sn} h_s) = 0$$

Per le ipotesi $\frac{\partial}{\partial s}, \frac{\partial}{\partial t} = 0$ si ha $\frac{1}{h_s} \frac{\partial}{\partial n} (q_{sn} h_s) = 0$

Quindi significa che lungo la trasversale \hat{n}
 $q_{sn} \frac{R+n}{R} = \text{costante}$; in particolare per sponde a trasporto nullo vale $q_{sn} \frac{R+n}{R} = 0$ ovunque.

Da questa deduzione, si impone che il rapporto

$$\frac{\tau_n}{|\tau|} = \frac{r}{\sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial n} \quad \text{quindi un equilibrio trasversale}$$

$$\left[\tau_n = -\rho v^2 \frac{y}{R} f_1\left(\frac{D_3}{Y}\right) \right]$$

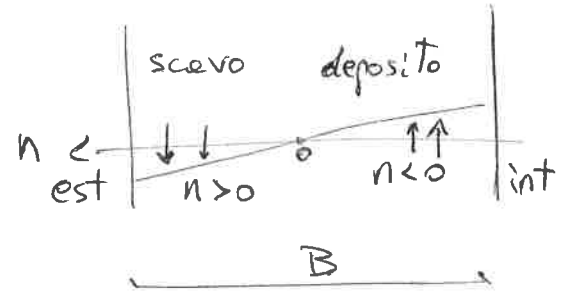
Il profilo del fondo è dato $\frac{\partial \eta}{\partial n} = -\frac{\sqrt{\theta}}{r} \frac{y}{R} \cdot f_1\left(\frac{D_3}{Y}\right)$

in cui si ha un ~~minimo~~ ^{massimo} nella parte interna, con $\theta =$ positivo, ed un ~~massimo~~ ^{minimo} nella parte esterna, con θ negativo.

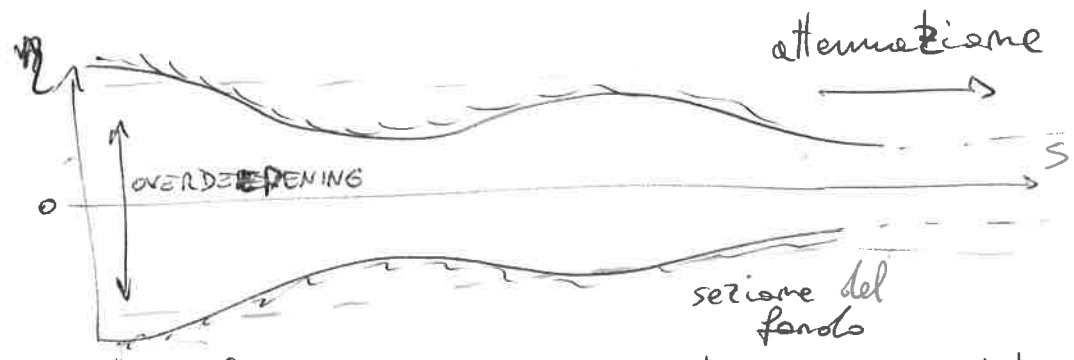
Posto $n=0$ al centro dell'alveo e negativo verso l'interno:

$$\eta = -\frac{\sqrt{\theta}}{r} \frac{y_0}{R} f_1 n$$

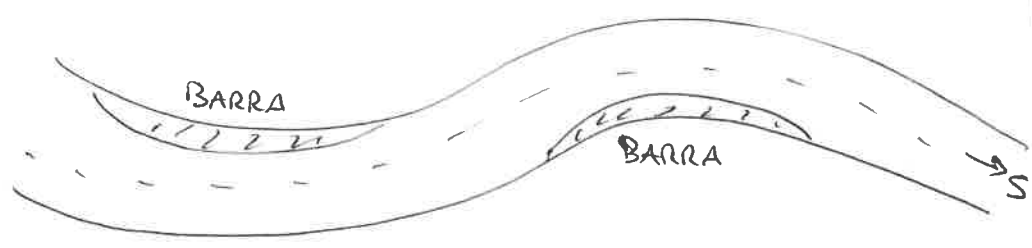
$$\begin{cases} \eta_{max} = +\frac{\sqrt{\theta}}{r} \frac{y_0}{R} f_1 \frac{B}{2} \\ \eta_{min} = -\frac{\sqrt{\theta}}{r} \frac{y_0}{R} f_1 \frac{B}{2} \end{cases}$$



Il fenomeno dell'OVER DEEPENING è dovuto alle discontinuità che una curva porta all'andamento dell'alveo. Quindi è causa di barre stazionarie sul fondo.

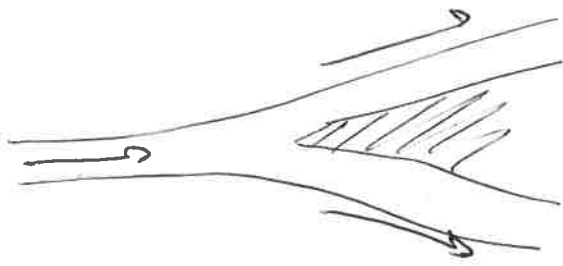


Ma la forzante antisimmetrica è data da $T_{SPONDE} \gg T_{FONDO}$ (ipotesi di partenza)



18) Convergenze - Divergenze

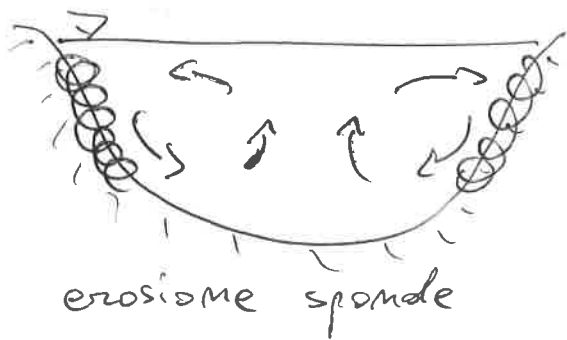
Simmetria della larghezza variabile porta a divergenze o convergenze -



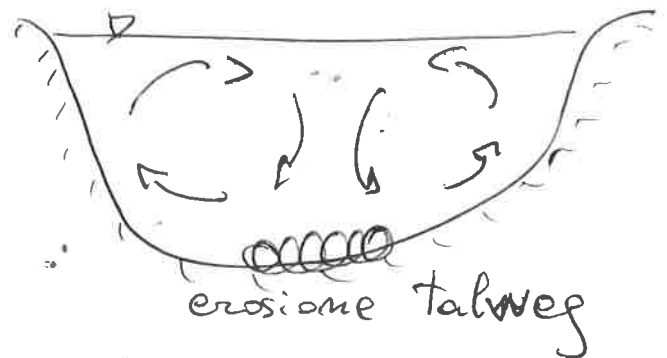
B diminuisce



B aumenta



erosione sponde



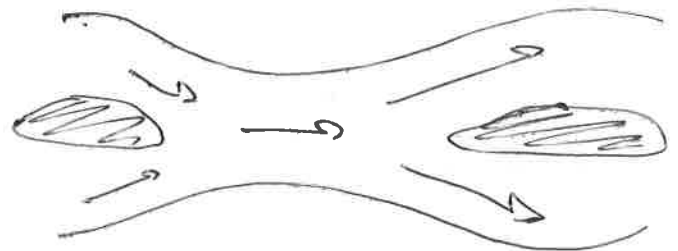
erosione talweg

La forzante simmetrica viene da $T_{SPONDE} \gg T_{FONDO}$, quindi formazione di barre centrali o alternate, rispettivamente al variare della larghezza o della curvatura. Senza la condizione temporale per simmetria si avrebbe crescita dei meandri per erosione delle sponde.



CRESITA
MEANDRI

(variazione curvatura)



FORMAZIONE

BARRE

CENTRALI

(variazione larghezza)

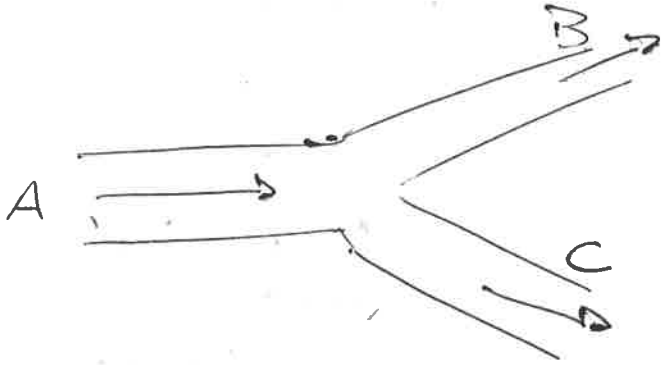
Biforcazioni fluviali

La corrente divergente porta a biforcazioni fluviali in continua evoluzione, essendo un sistema mai stabile.

Questo comporta la ripartizione della portata nei due canali e valle del modo

$$r_q = \frac{Q_B}{Q_C}$$

$$r_q \sim \exp\left[-\frac{t}{T}\right] \text{ (rapido)}$$



in genere r_q non è mai 1, è molto piccolo (o molto grande) per prevalenza di un canale sull'altro.

Lo squilibrio Q_B e Q_C è dovuto alla migrazione di barre dal canale A, sviluppo planimetrico, zigurgito o variazione del regime idrologico.

Senza forzanti, un canale super-risonante ($\beta > \beta_R$) tende a dividersi e sbilanciarsi in uno dei canali.

Le sponde possono essere ~~fisse~~ ~~zone diverse~~

FISSE
MOBILE



È una discontinuità che genera barre stazionarie, che influenzano monte o valle (se $\beta > \beta_R$) o valle (se $\beta < \beta_R$).

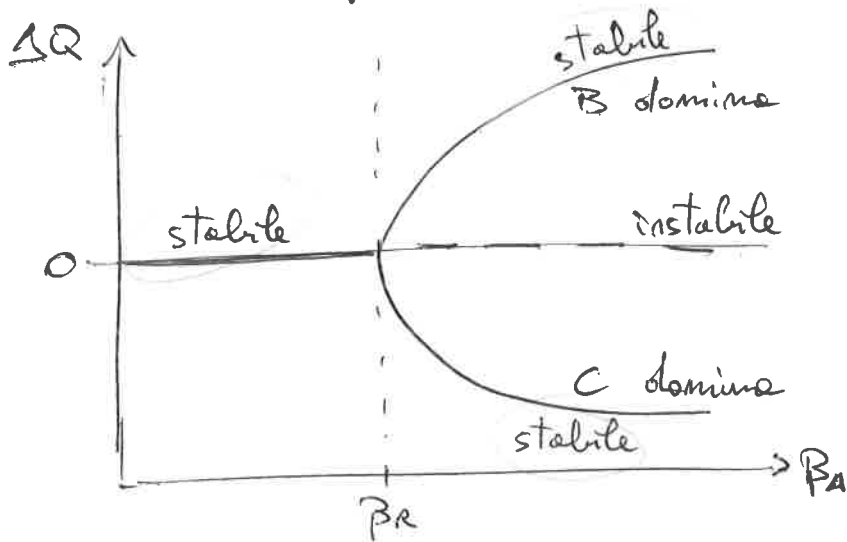
Il bilancio di portata solida ha l'equazione di Exner

$$\begin{cases} (1-p) \frac{\partial Q_b}{\partial t} \alpha B_a B_b + (Q_{sb} - Q_{sbl}) - \alpha B_a q_{sy} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial Q_c}{\partial t} \alpha B_a B_c + (Q_{sc} - Q_{scl}) + \alpha B_a q_{sy} = 0 \end{cases}$$

in cui lo scambio è

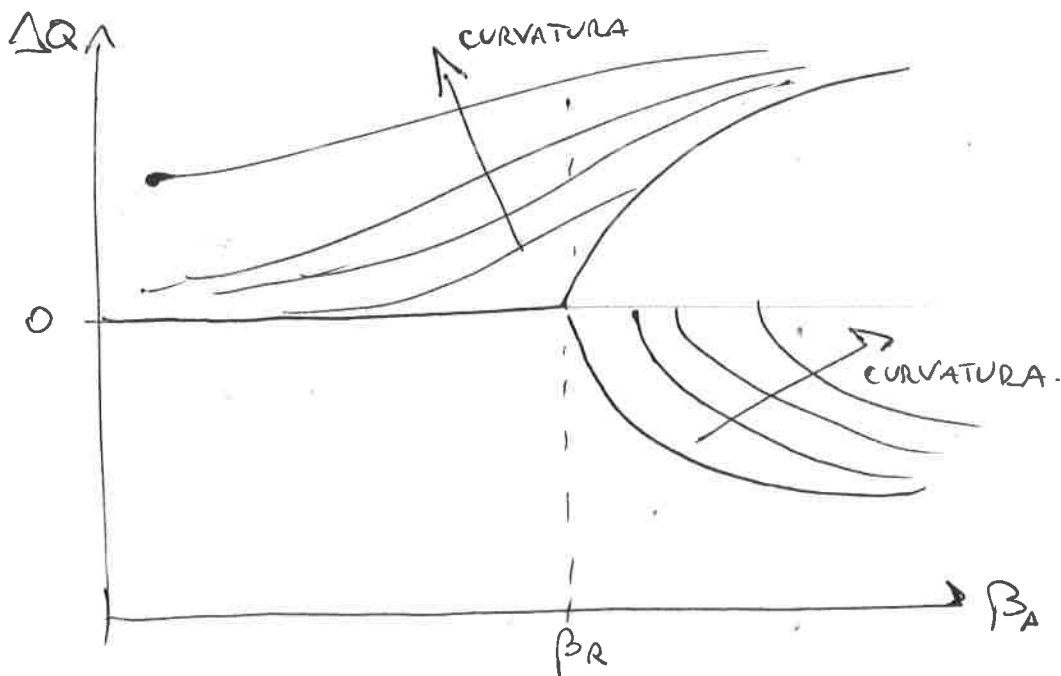
$$q_{sy} = q_{s0} \left(\overbrace{\frac{Q_b - Q_{bl}}{\alpha Q_0}}^{\text{moto trasversale}} - \overbrace{\frac{r}{\sqrt{g}} \frac{Q_b - Q_c}{B_b + B_c}}^{\text{gravità}} \right)$$

Si hanno 3 soluzioni possibili: 2 stabili e una instabile, se $\beta > \beta_R$; altrimenti esiste un'unica soluzione.



Quindi un canale super-risonante tende a rinforzarsi non equilibrato.

Se il canale a monte (A) presenta una curvatura, si ha influenza a valle aumentando il disequilibrio tra i canali B e C.



②1 FORME PLANIMETRICHE: MEANDRI

Meandri: fenomenologia

Il meandro è formato dalla combinazione degli effetti di curvatura, larghezze variabile e curve alternate.

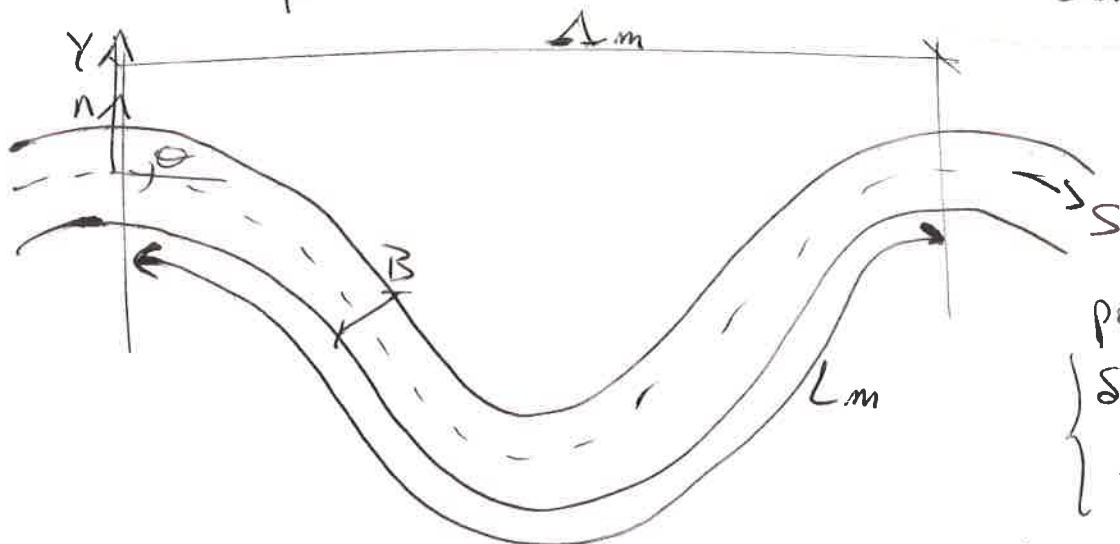
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{curvatura} \quad c(s) = -\frac{\partial \theta}{\partial s} \\ \text{numero d'onda} \quad \lambda_m = \frac{2\pi}{L_m} = \frac{\pi B}{L_m} \end{array} \right.$$

$$c(s) = R_0^{-1} \cos(\lambda_m s)$$

Formule di Kimoshita $c(s) = R_0^{-1} \left[\cos(\lambda_m s) - C_f \cos(3\lambda_m s) - C_s \sin(3\lambda_m s) \right]$
 (analisi planimetrica)

fattening
skewing

Parametro fondamentale: sinuosità $\sigma = \frac{L_m}{\lambda_m}$



parametri

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \frac{B_{\max} - B_0}{2B_0} \\ \nu = \frac{B_0}{4R_0} \end{array} \right.$$

La sinuosità aumenta nel tempo, e alta per meandri più maturi per la crescita di L_m . È bassa per meandri più giovani, $\sigma \rightarrow 1$ per tratto rettilineo.

Quindi la legge della variazione nel tempo è

$$\theta = \pm \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{L_m(t)} s\right) \quad \text{e} \quad c(s) = \frac{1}{R_0} \cos\left(\frac{2\pi}{L_m} s\right)$$

Allora $\frac{1}{R_0} = \frac{2\pi \theta_0}{L_m}$ è la definizione di curvatura

La larghezza è doppia $B(s) = B_0 + (B_{\max} - B_0) \cos(\lambda_m s)$

Meandri: equilibrio, Teoria lineare

Per esprimere il sistema di equazioni di partenza, si impongono le condizioni di geometria fissata e stazionarietà, con l'influenza della curvatura -

$$B = \text{cost} \quad \left(T_{\text{NORO}} \ll T_{\text{FONDO}} \ll T_{\text{SPONDE}} \right) \quad \frac{\partial}{\partial t} = 0$$

Imponendo una correzione per il moto in curva $h_s = \frac{R(s) + n}{R(s)}$ quindi $h_s = 1 + \frac{n}{R_0} \cos(\lambda_m s)$ a raggio variabile.

Il sistema di partenza del problema è:

$$\begin{cases} \frac{1}{h_s} U \frac{\partial U}{\partial s} + V \frac{\partial U}{\partial n} + \frac{1}{h_s} \rho \left(\frac{\partial Y}{\partial s} + \frac{\partial n}{\partial s} \right) + \frac{T_s}{\rho Y} = 0 \\ \frac{1}{h_s} U \frac{\partial V}{\partial s} + V \frac{\partial V}{\partial n} + \rho \left(\frac{\partial Y}{\partial n} + \frac{\partial n}{\partial n} \right) + \frac{T_n}{\rho Y} = 0 \\ \frac{1}{h_s} \frac{\partial(UY)}{\partial s} + \frac{\partial(VYh_s)}{\partial n} \frac{1}{h_s} = 0 \\ \frac{1}{h_s} \frac{\partial \psi_{ss}}{\partial s} + \frac{\partial(\psi_{sn} h_s)}{\partial n} \frac{1}{h_s} = 0 \end{cases}$$

Modello bidimensionale alle coordinate (s, n) con curvatura

Il modello 3D tramite gli sforzi tangenziali descrive il moto secondario, con T_{ns}

$$T = T_{2D} + T_{ns} \hat{n} = \rho \frac{|V|^2}{G^2} \frac{V}{|V|} - |T| \frac{Y}{R(s)} f_1(d_s)$$

$$\text{quindi} \quad \begin{cases} T_s = \rho \frac{|V|^2}{G^2} \frac{U}{|V|} & \text{longitudinale al moto} \\ T_n = \rho \frac{|V|^2}{G^2} \left(\frac{V}{|V|} - \frac{Y}{R_0} f_1 \cos(\lambda_m s) \right) & \text{trasversale al moto} \end{cases}$$

con la portata

solida trasversale

nulle

$$q_{sn} = |q_s| \left(\frac{T_n}{|T|} - \frac{r}{V_0} \frac{\partial n}{\partial n} \right) = 0$$

(22)

Prima della linearizzazione, il problema viene posto in termini adimensionali con G, Fr_0^2, β ; trovando gli stessi termini delle barre con la correzione della curvatura h_s .

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{h_s} U \frac{\partial U}{\partial s} + V \frac{\partial U}{\partial n} + \frac{1}{h_s} \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial s} + \frac{\partial \eta}{\partial s} \right) + \beta \frac{L_s}{Y} &= 0 \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{h_s} U \frac{\partial V}{\partial s} + V \frac{\partial V}{\partial n} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial n} + \frac{\partial \eta}{\partial n} \right) + \beta \frac{L_n}{Y} &= 0 \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(UY)}{\partial s} + \frac{\partial(VY h_s)}{\partial n} &= 0 \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \varphi_{ss}}{\partial s} + \frac{\partial(\varphi_{sn} h_s)}{\partial n} &= 0 \end{aligned} \right.$$

in cui $\bar{\epsilon}$ adimensionale

$$h_s = 1 + n \left(\frac{\beta}{2R_0} \right) \cos(\lambda_m s)$$

$$= 1 + n(2V) \cos(\lambda_m s)$$

Quindi la linearizzazione avviene con le piccole perturbazioni dovute all'effetto di curvatura piccolo $v \ll 1$.

$$U = 1 + v U_1(s, n) \quad V = 0 + v V_1(s, n) \quad Y = 1 + v Y_1(s, n) \quad \eta = \eta_0(s) + v \eta_1(s, n)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y_1}{\partial s} + \frac{\partial \eta_1}{\partial s} \right) + \frac{\beta}{G^2} (2U_1 - Y_1) &= A_1(n) \cos(\lambda_m s) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial V_1}{\partial s} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y_1}{\partial n} + \frac{\partial \eta_1}{\partial n} \right) + \frac{\beta}{G^2} V_1 &= A_2(n) \cos(\lambda_m s) \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial Y_1}{\partial s} + \frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{\partial V_1}{\partial n} &= 0 \end{aligned} \right. \quad (\text{stazionarietà})$$

$$\left\{ \begin{aligned} 2f(\theta_0) \frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{\partial V_1}{\partial n} - \frac{r}{\beta \sqrt{g_0}} \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial n^2} &= A_4(n) \cos(\lambda_m s) \end{aligned} \right.$$

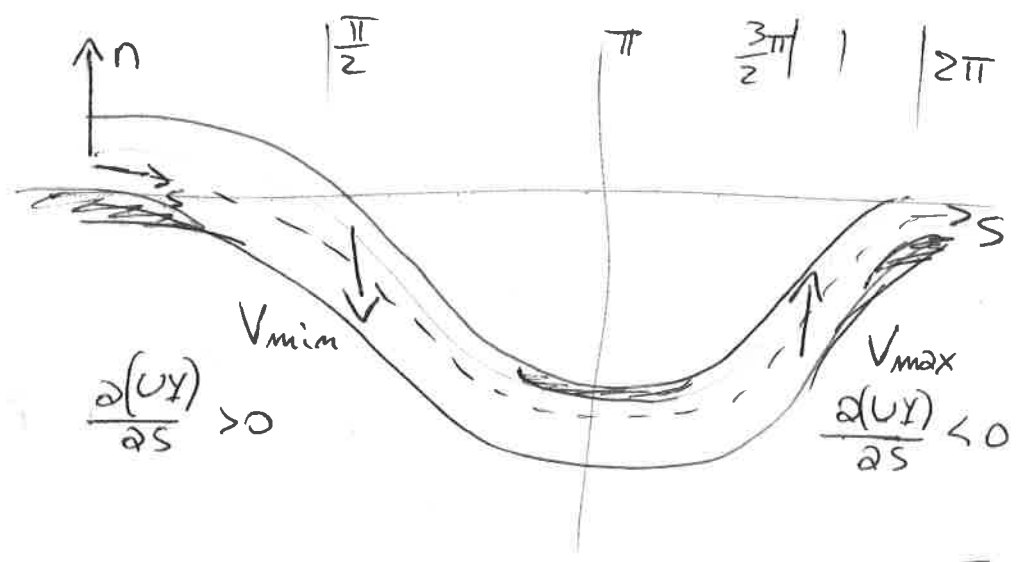
Il modello non omogeneo ammette una soluzione stazionaria in cui $\beta = \beta_R$ e $\lambda = \lambda_R$, detto punto di RISONANZA.

Risultato generale

$$\left\{ \begin{aligned} U_1 &= \hat{U}(n) \cos(\lambda_m s - \varphi_U) \\ Y_1 &= \hat{Y}(n) \cos(\lambda_m s - \varphi_Y) \\ \eta_1 &= \hat{\eta}(n) \cos(\lambda_m s - \varphi_\eta) \\ V_1 &= \hat{V}(n) \cos(\lambda_m s - \varphi_V) \end{aligned} \right. \quad \text{con sfasamenti} \quad \left\{ \begin{aligned} \varphi_U &= 0 \\ \varphi_Y &= 0 \\ \varphi_\eta &= \pi \\ \varphi_V &= \frac{3}{2} \pi \end{aligned} \right.$$

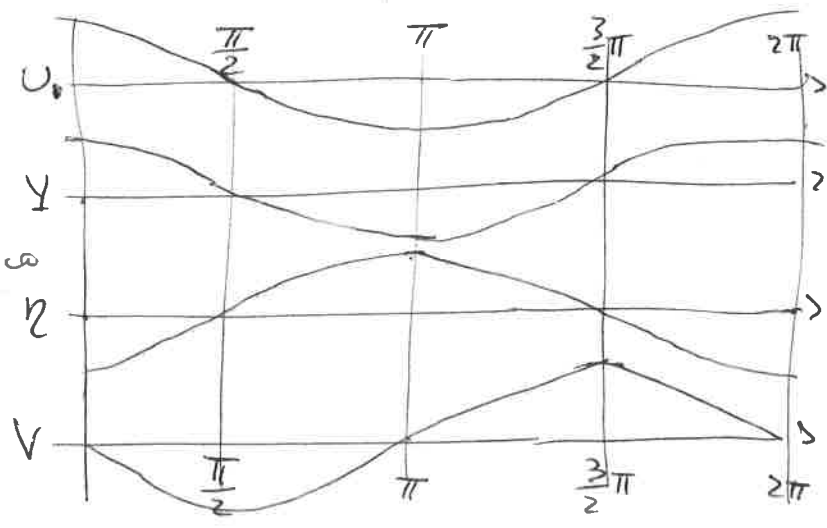
Le soluzioni di Rozowski vengono corrette con scavi e depositi:

$$VY = - \int_{-1}^n \frac{\partial(UY)}{\partial s} dn$$



Analisi dei parametri rispetto allo sfasamento rispetto

- U, Y, η asimmetrici, V simmetrica rispetto alla sezione
- > U, Y, η velutati alla sponda sinistra
- > V velutato della sponda destra



Dall'equazione di Exner, si trova l'equilibrio trasporto trasversale

$$q_{sn} = - \int_{-1}^n \frac{\partial q_{ss}}{\partial s} dn$$

$$q_{sn} = \frac{\phi(\theta)}{\phi(\theta_0)} \left(\frac{V}{|V|} - \frac{V}{\beta} 2Yf_i \cos(\lambda_m s) \right) - \frac{r}{\sqrt{\theta} \beta} \frac{\partial \eta}{\partial n}$$

Componente trasversale circolazione secondaria effetto previte

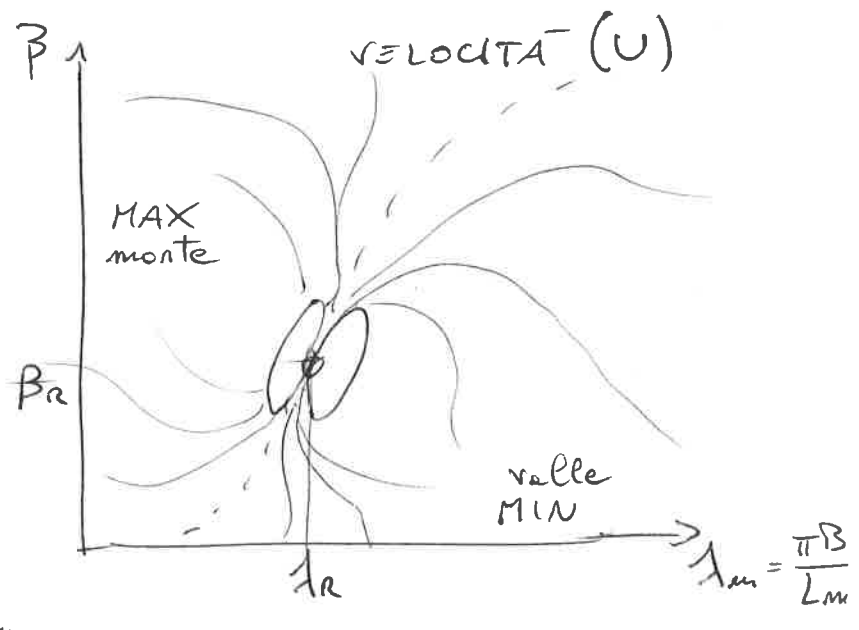
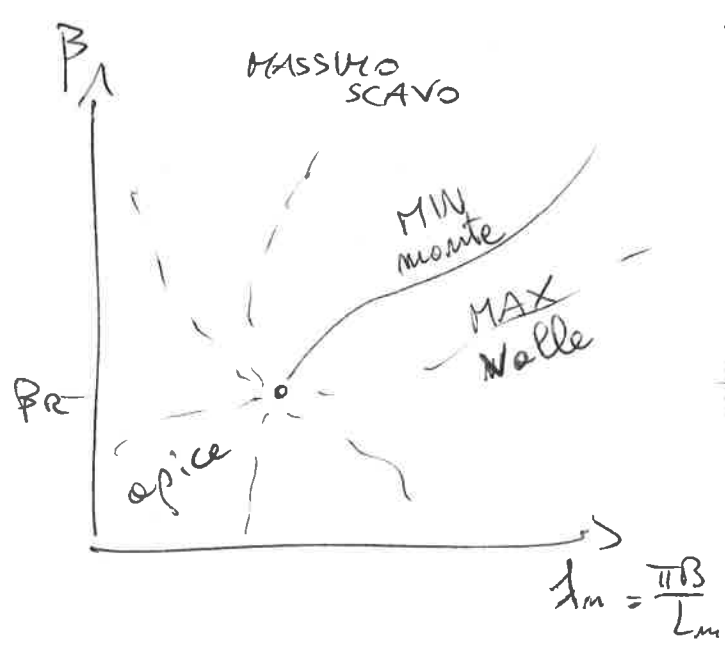
La pendenza del fondo trasversale è

$$\frac{\partial \eta}{\partial n} = \frac{\beta \sqrt{\theta}}{r} \left[V_i - \frac{2f_i}{\beta} \cos(\lambda_m s) + \int_{-1}^n \frac{\partial q_{ss}}{\partial s} dn \right]$$

La variazione della curvatura porta uno sfasamento, quindi un movimento laterale del talweg in alveo.

23

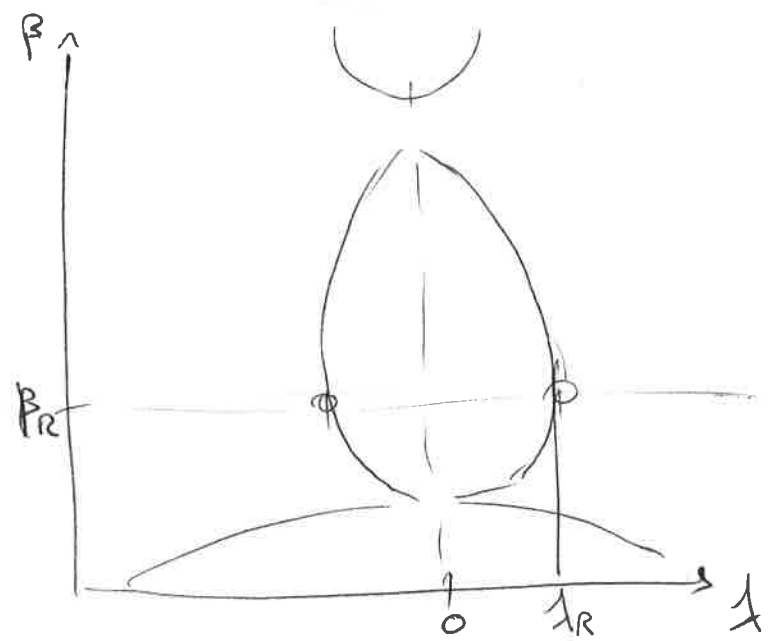
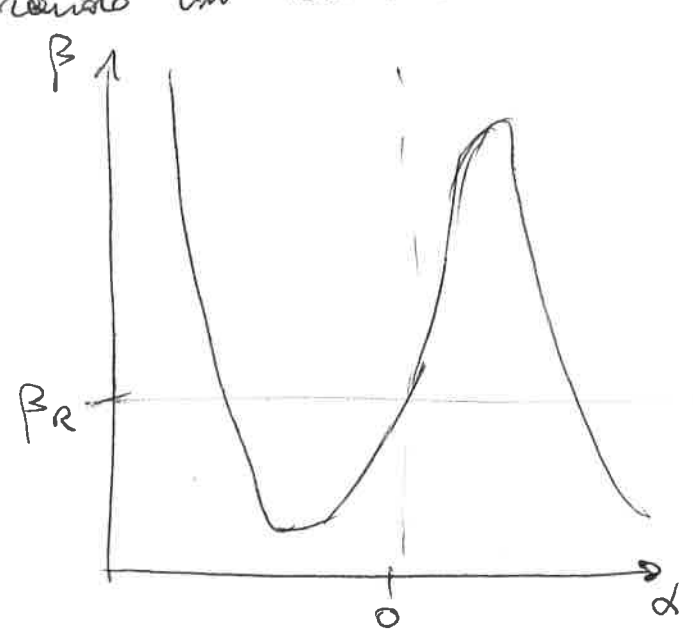
Il DIAGRAMMA di MASSIMO SCAVO trova il punto R di RISONANZA (β_R, λ_R)



Nel punto di RISONANZA la soluzione v e $\pm \infty$ date la piccola perturbazione $v \ll 1$, quindi in contrasto con l'ipotesi iniziale ottenendo $v \rightarrow \infty$.

L'effetto di punti massimi e minimi molto vicini e dovuto all'antisimmetria dei parametri η e v .

Mentre un sistema meccanico a molle e oscillatorio nel tempo, i meandri sono oscillatori nello spazio, considerando un termine di smorzamento.



L'oscillatore può essere rappresentato con un termine ~~libero~~ forzante o senza (libero)

$$\eta_1 = C_1 \exp[\alpha^i x] \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda^i x) - \underbrace{B(\omega_n^2 - \omega_F^2) \cos(\omega_F t) + 2\mu \omega_F \sin(\omega_F t)}_{\text{forzante di smorzamento}}$$

La condizione di risonanza è data

con $\omega_F \rightarrow \omega_n$ e $\mu = 0$ ($\beta \rightarrow \beta_R$ e $\lambda \rightarrow \lambda_R$)

Meandri: stabilità

L'evoluzione dei meandri è vista secondo un'ottica differente di $T_{SPONDALE} \gg T_{FONDO}$ tramite l'erosione selettiva dovuta al disturbo anti-simmetrico.

In base a $\beta_R < \beta$ super-risonanti \rightarrow verso monte
 $\beta_R > \beta$ sub-risonanti \rightarrow verso valle

In base a L_m $\left\{ \begin{array}{l} L_m \text{ grande} \rightarrow \text{amplificazione } (\Delta m \downarrow) \\ L_m \text{ piccolo} \rightarrow \text{rettificazione } (\Delta m \uparrow) \end{array} \right.$

Secondo la "Bend Theory of meanders" valgono le

ipotesi in cui:

- il modello è 2D,
- è lineare per campo di moto e fondo,
- la larghezza è costante ($B = \text{cost}$).

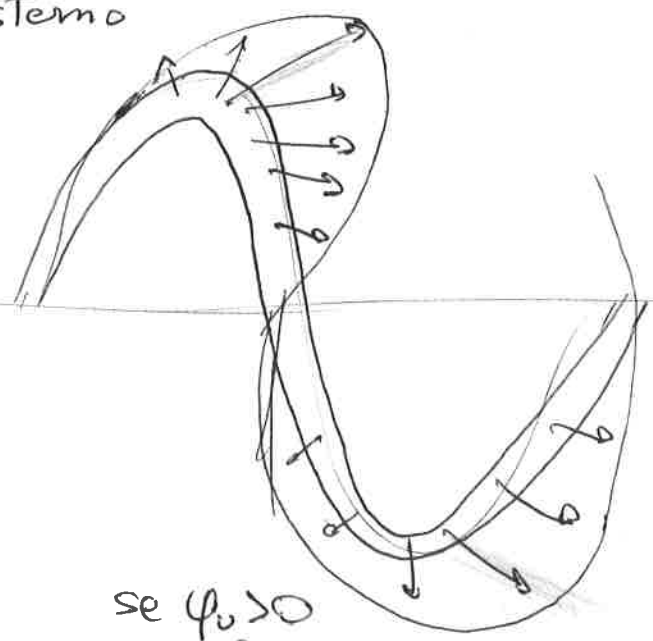
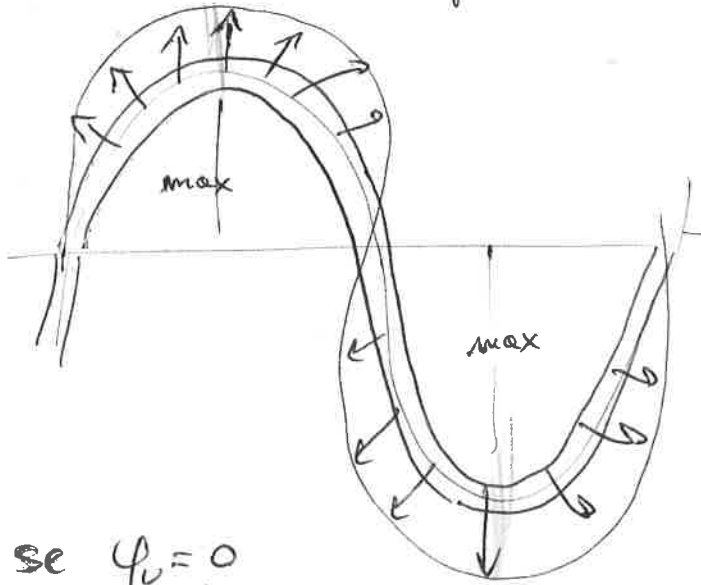
\rightarrow si ha
EROSIONE
SPONDALE

valutando un tasso di spostamento della linea d'asse

$$\left[\frac{\zeta}{s} = E (U_{n+1} - U_{n-1}) \right]$$

26) Il tasso di spostamento dipende da

- E = tasso di erosione
- $U_{n=1}$ = velocità sponda ell'interno
- $U_{n=-1}$ = velocità sponda all'esterno



se $\psi_0 = 0$
con simmetria

se $\psi_0 > 0$
con sfasamento

Per cui il modello disaccoppiato prevede una piccola perturbazione della linea d'asse e del campo di moto.

$$\xi = 2EV \hat{U}_{n=1} \cos(\lambda m s - \psi_0) ; \theta = -\theta_0(t) \sin(\lambda m s - \omega t)$$

amplificazione

migrazione

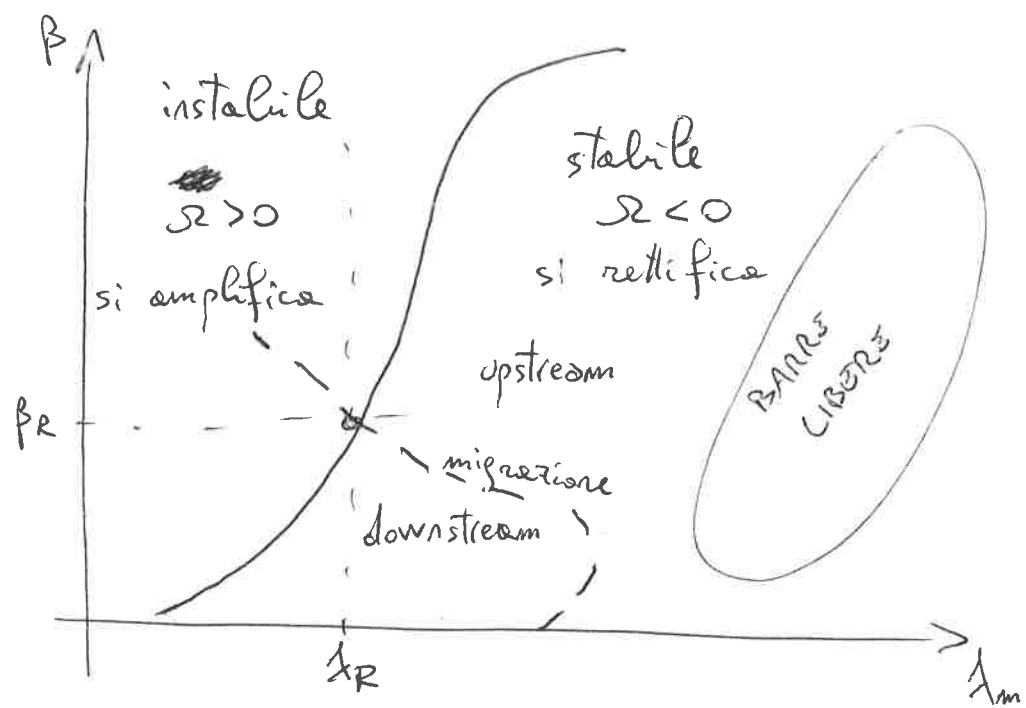
La migrazione è descritta con

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial s}$$

LEGGE DI EROSIONE

CURVA DI STABILITÀ MARGINALE

Le barre libere si formano per λ molto più grandi dei meandri.



Meandri : evoluzione

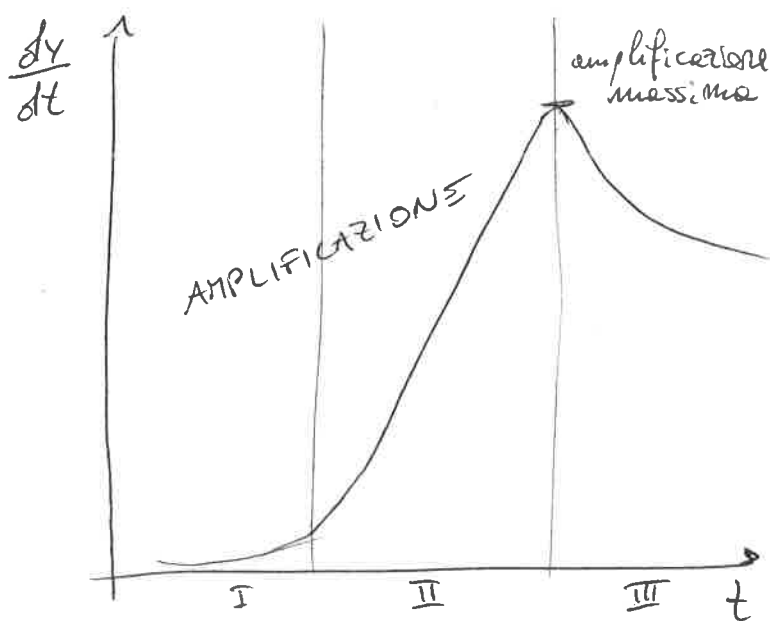
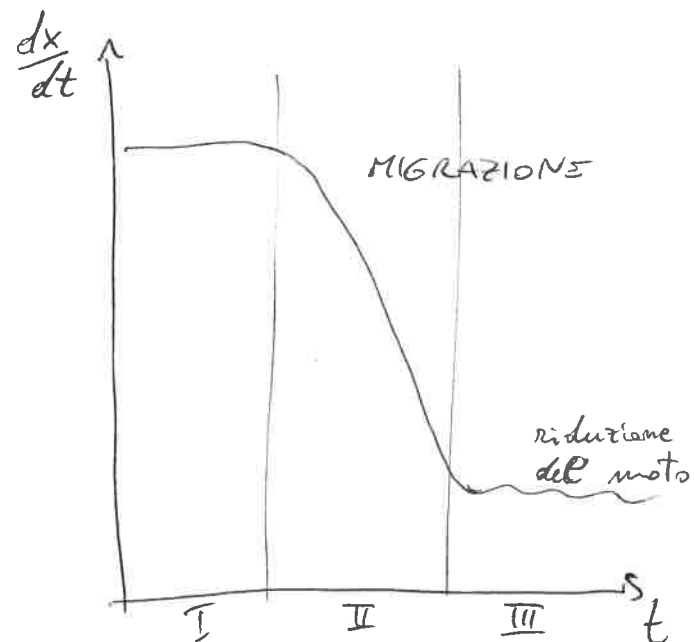
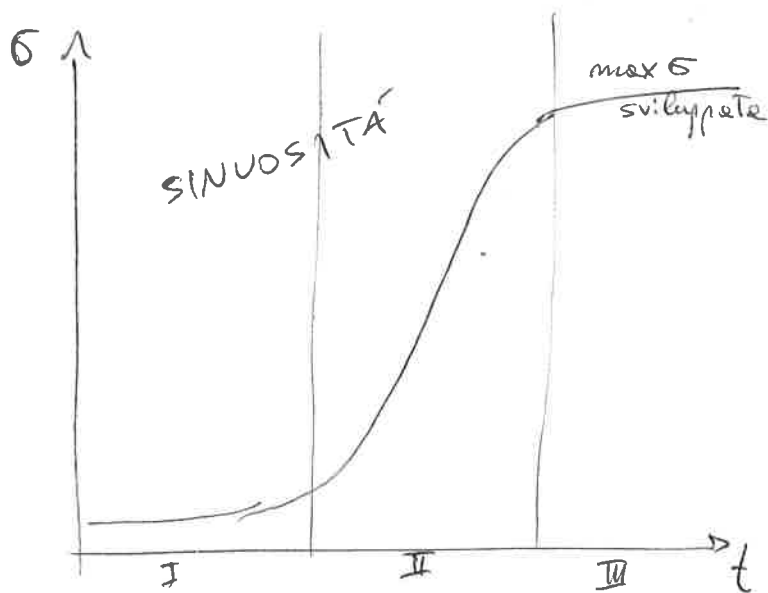
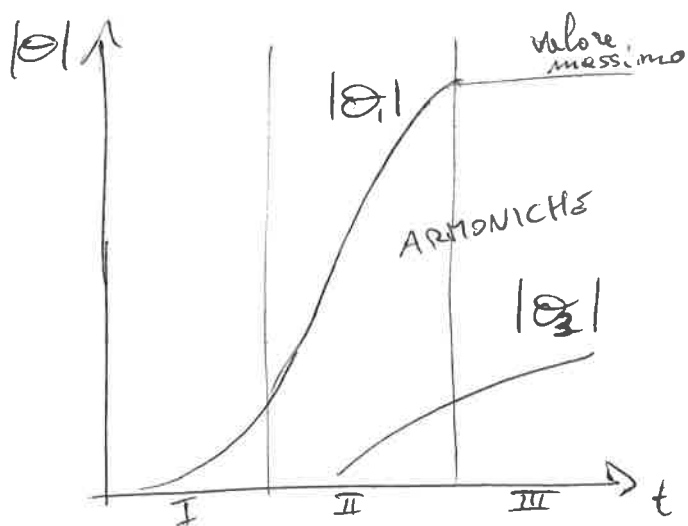
L'evoluzione e la crescita del meandro è descritta

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \underbrace{\frac{\partial \theta}{\partial s} \int_0^s \frac{\partial \theta}{\partial s} ds}_{\text{Termine non lineare}} = \frac{\partial \tau}{\partial s}$$

Termine non lineare

← continuo allungamento del meandro in \hat{s}

Il termine integrale non lineare rappresenta un accumulo, ovvero conserva l'evoluzione del meandro nel tempo e nello spazio come memoria - la conseguenza è che si generano meandri non armonici per tre fasi temporali:

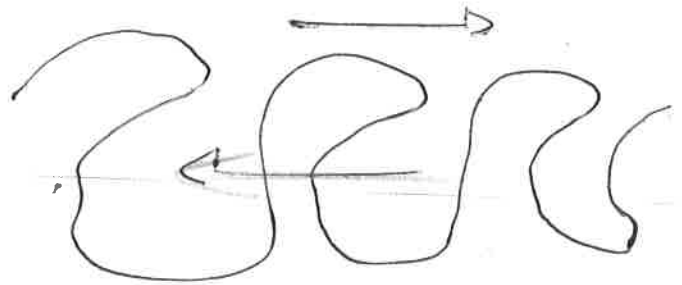
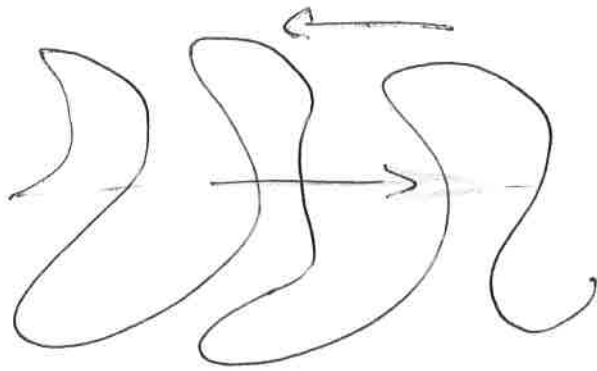


(25)

L'evoluzione è in funzione al meandro stesso; in base a $\beta = \frac{B_0}{2Y_0}$, quindi alla larghezza, ha forme diverse.

$\beta < \beta_R$ SUB-RISONANTI

$\beta > \beta_R$ SUPER-RISONANTI



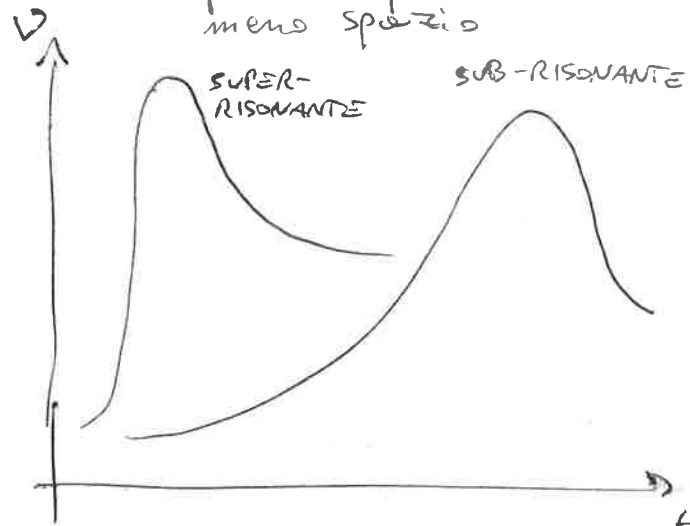
Gescita DOWNSTREAM

più lento
più spazio

I meandri non trovano mai l'equilibrio perché raggiungono prima il cut-off, riedottendosi per una nuova configurazione, in continua evoluzione.

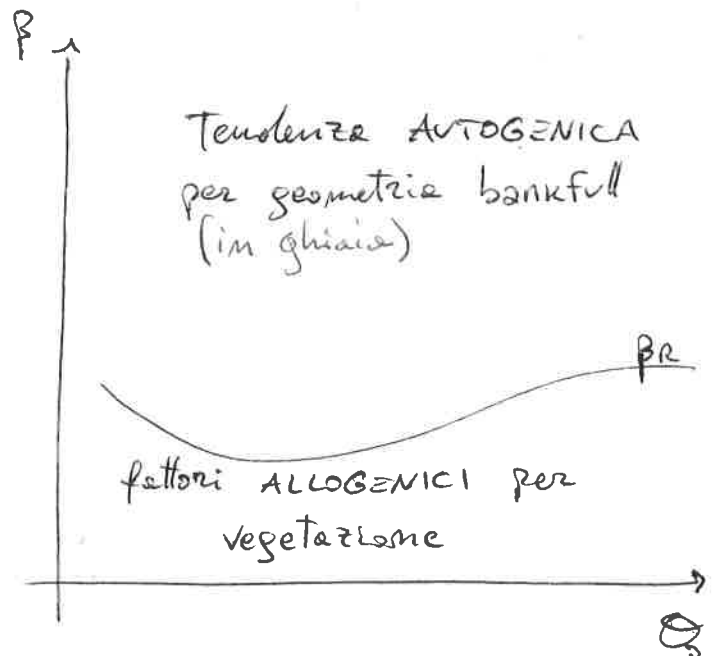
Crescita UPSTREAM

più rapido
meno spazio



Gli alvei in ghiaia hanno un carattere maggiormente super-risonante, con evoluzione upstream.

Gli alvei sub-risonanti sono influenzati maggiormente dalla vegetazione.



Hydraulic geometry of meanders

Nella realtà i parametri di portata sono variabili con il regime idrologico, ed influenzati dalla forma stessa dell'alveo. La modifica del meandro provoca evoluzione del moto, quindi il problema pone un grado di libertà in più.

La sinuosità si evolve nel tempo, crescendo da 1 a 5 e riducendo la pendenza.

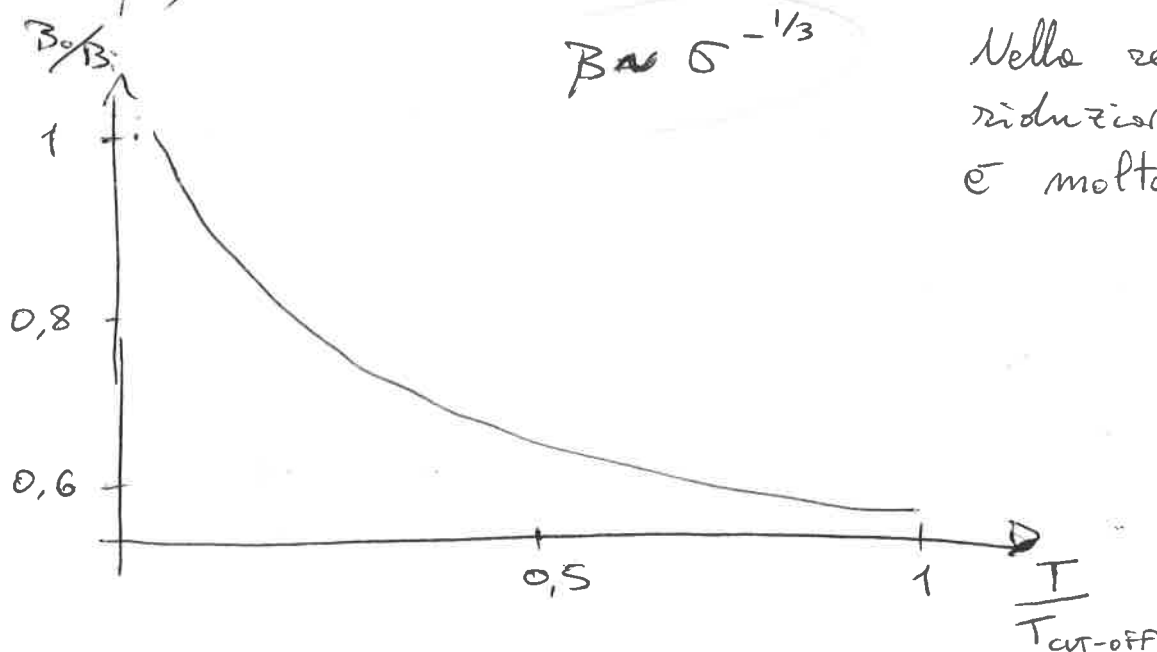
$$\sigma = \frac{L_m}{L_{mi}} = \frac{S_i}{S_0} \quad \text{con modifica del fondo per trasporto solido}$$

S_i è visto come i casi di $\left\{ \begin{array}{l} \text{CUT-OFF} \quad S_i < S_0 \quad \text{erosione} \\ S \text{ si riduce riadattandosi} \\ \text{GROWTH} \quad S_i > S_0 \quad \text{deposito} \\ S \text{ aumenta riadattandosi} \end{array} \right.$

quindi la capacità di trasporto si riduce con l'aumento della sinuosità

$$Q_0 \sim \sigma^{-2/3}$$

Ne consegue un deposito di materiale e riduzione delle sponde, quindi la larghezza diminuisce nel tempo, con la sinuosità crescente.



Nella realtà la riduzione di B è molto piccola!

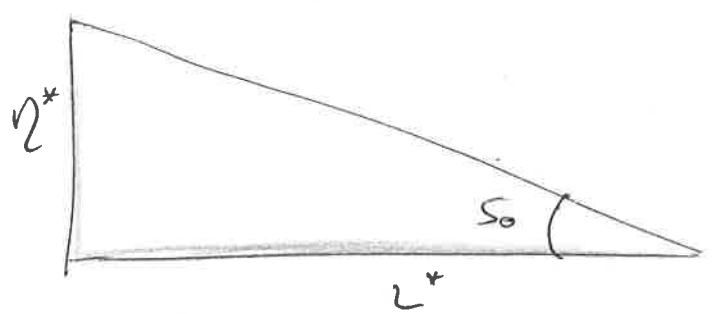
26

PARADOSSO: dove finiscono i sedimenti?

Il fiume tende sempre a recuperare una configurazione di equilibrio, secondo la crescita del meandro ed il successivo cut-off, fungendo da deposito dei sedimenti provenienti da monte.

$$S_0 = \frac{Q^*}{L^*}$$

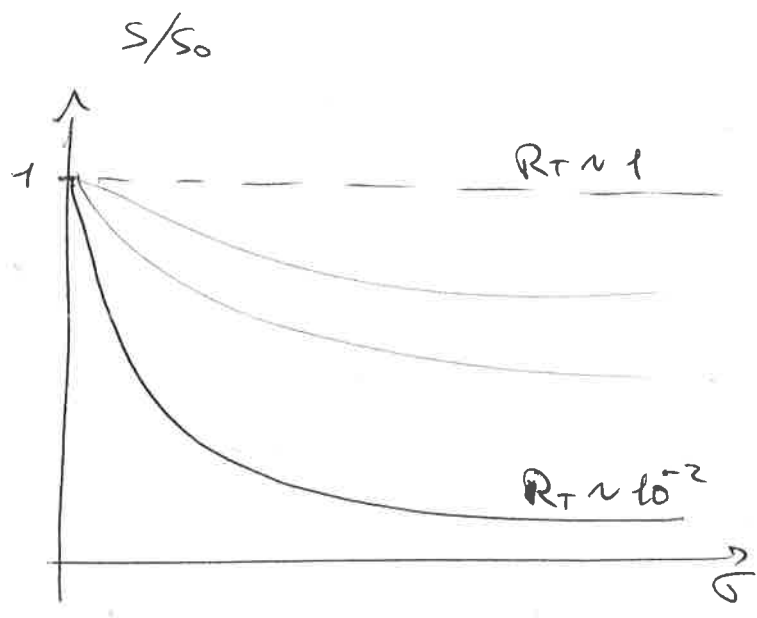
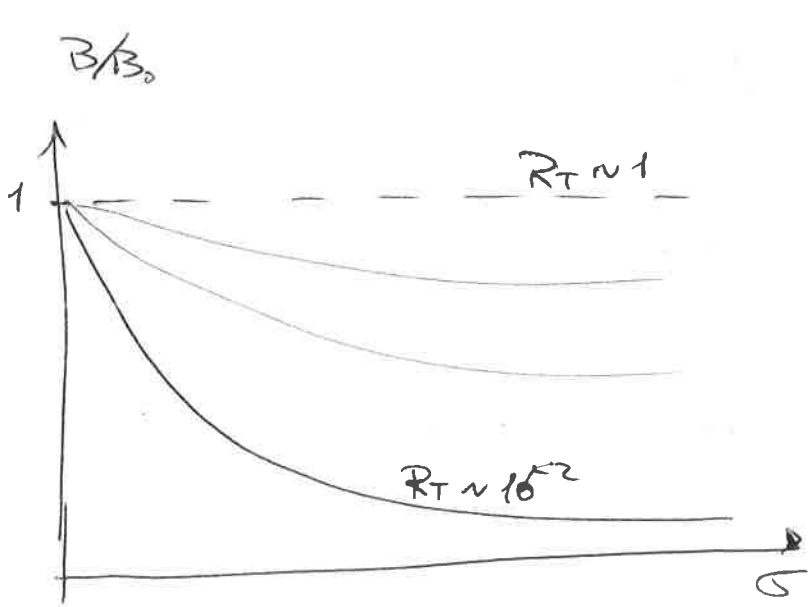
$$\frac{dS_0}{dt} = S_0 \left[\frac{1}{Q^*} \frac{dQ^*}{dt} - \frac{1}{L^*} \frac{dL^*}{dt} \right]$$



L'ipotesi iniziale sul tempo era parametro fondamentale come studio planimetrico.

$T_{SPONDE} \gg T_{FONDO}$, ma il $R_T = \frac{T_{SPONDE}}{T_{FONDO}} \sim 1$ nello studio planimetrico.

L'aumento della sinuosità modifica la larghezza e la pendenza in base alla scala temporale.



Meandri: coevoluzione curvatura - larghezza

Analizzando singolarmente i vari casi di evoluzione si pone:

2. LARGHEZZA VARIABILE

con una piccola perturbazione

$$U = U_0 + \delta U,$$

$$\begin{cases} B(x) = B_0 + (B_{\max} - B_0) \cos(\lambda_b x) \\ \delta = \frac{B_{\max} - B_0}{2 B_0} \end{cases}$$

in cui $U_1 = \hat{U}(y) \cos(\lambda_b x - \varphi_0)$

L'equilibrio si ha per deformazione del fondo

- longitudinale per sezione larga (maggior deposito) o stretta (maggior erosione);
- trasversale per barre centrali.

Alle sponde, si ipotizza una variazione simmetrica con il

tasso di allargamento $\xi = \frac{\partial B}{\partial t} = 2 \xi = 2 \epsilon \delta \hat{U}_y \cos(\lambda_b x - \varphi_0) \pm 2 \epsilon \delta U_1 = 2 \epsilon (U - U_0)$

La stabilità si raggiunge quando il fondo entra in fase con la larghezza -

b. WIDER-AT-BEND (effetto della curvatura)

Indica che l'evoluzione migliore è data dall'instabilità per λ_m più grandi e δ migliori -

c. COEVOLUZIONE

Caso in cui entrambi i precedenti fenomeni influenzano la crescita, per cui:

$$\begin{cases} v = \frac{B_0}{4 R_0}, & c(s) = -\frac{\partial \theta}{\partial s} = 2 v \cos(\lambda_m s) \\ \delta = \frac{B_{\max} - B_0}{2 B_0}, & B(s) = 1 + 2 \delta \cos[2(\lambda_m s - \varphi_B)] \end{cases}$$

27

La risposta è vista

- lineare antisimmetrica (con $o(v)$) e simmetrica (con $o(s)$),
- non lineare antisimmetrica (con $o(vS)$) e simmetrica (con $o(v^2)$).

Il tasso di spostamento della sponda ξ_b è dato dalla definizione dei parametri E di erosione ed A di crescita. Quindi:

$$\begin{cases} \text{se } U_n > 1, & \xi_b = \pm E (U_n - 1) \\ \text{se } U_n < 1, & \xi_b = \pm A (U_n - 1) \end{cases}$$

Lo spostamento dell'asse è dato da $\xi = \frac{1}{2} (E + A) U_n^{2sim}$

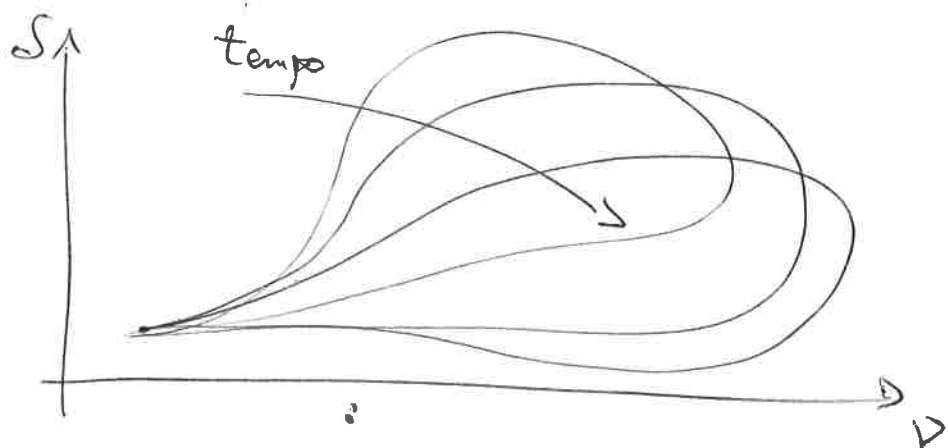
mentre la variazione di lunghezza è data da

$$\begin{cases} \xi = \underbrace{(E - A) U_n^{2sim}}_{\text{ALLOGENICA}} + \underbrace{2EU_n^{sym}}_{\text{AUTOGENICA}} & \text{se } U_n > 1 \\ \xi = \underbrace{(E - A) U_n^{2sim}}_{\text{ALLOGENICA}} + \underbrace{2AU_n^{sym}}_{\text{AUTOGENICA}} & \text{se } U_n < 1 \end{cases}$$

Le variazioni di curvatura sono associate alla lunghezza:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = v\alpha_{10} + v\alpha_{11} \\ \frac{ds}{dt} = s\alpha_{10} + v^2\alpha_{20} + (v\alpha_{10} + v\alpha_{11}) \left(\frac{4}{3\pi} k \right) \end{cases}$$

CICLO DI
ISTERESI



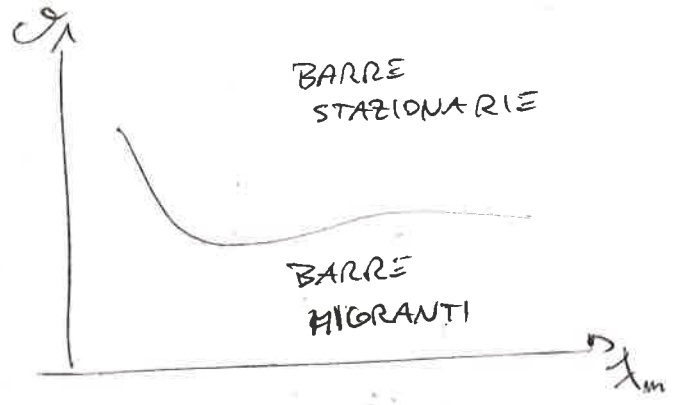
Interazioni plano-altimetriche

L'interazione di più elementi imilisce la formazione di barre fluviali migranti libere.

Questo è dovuto dal fatto che la discontinuità a causa di curvatura (meandri) e variazioni di larghezza favorisce la formazione di barre stazionarie, quali point bars e barre centrali.

In particolare debole variazione di larghezza implica una piccola discontinuità, quindi sono favorite le barre migranti libere; viceversa forti variazioni di larghezza implicano grandi discontinuità, quindi barre stazionarie.

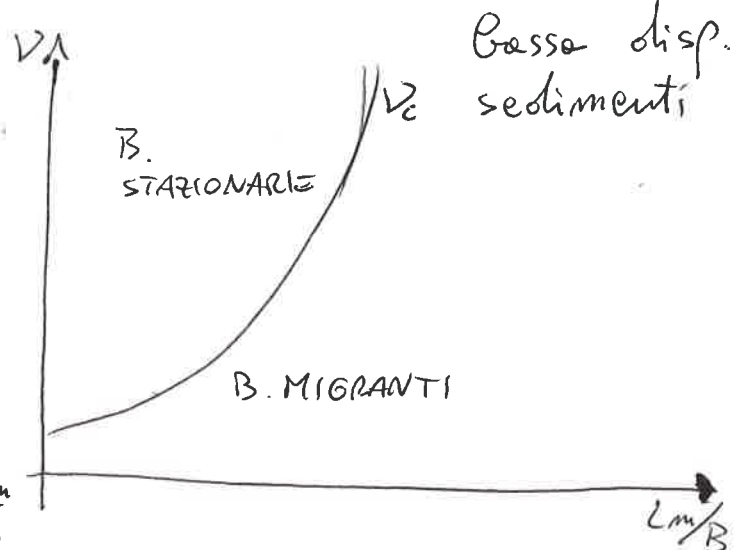
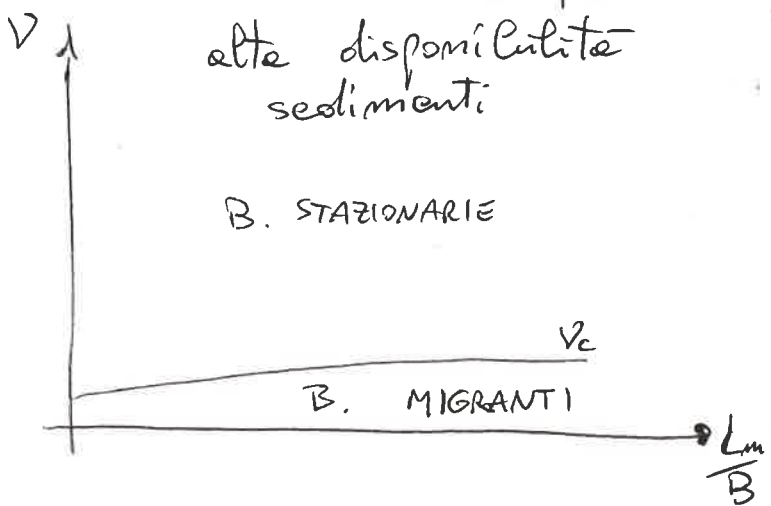
Dato una soglia dell'angolo del meandro, le barre migranti sono presenti in alvei più rettificati.



Quindi i meandri imiliscono le barre migranti.

→ È data una curvatura critica in funzione del trasporto solido, del diametro e della lunghezza del meandro.

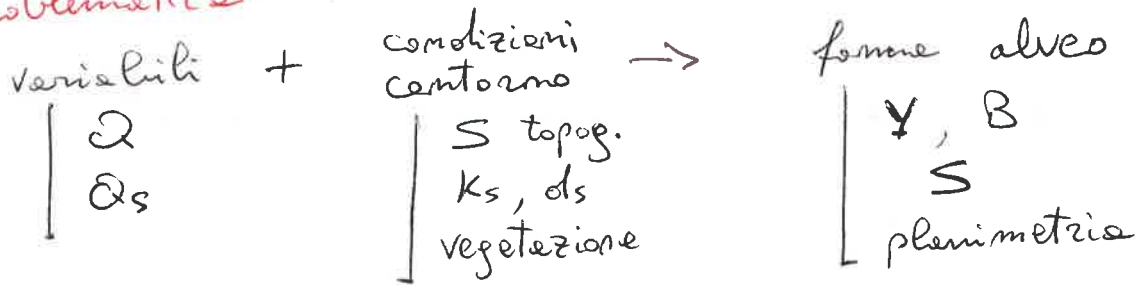
$$V_c = K_c(\theta_0, d_s, \lambda_m) \left(\frac{\beta - \beta_c}{\beta_c} \right)^{1/2}$$



①

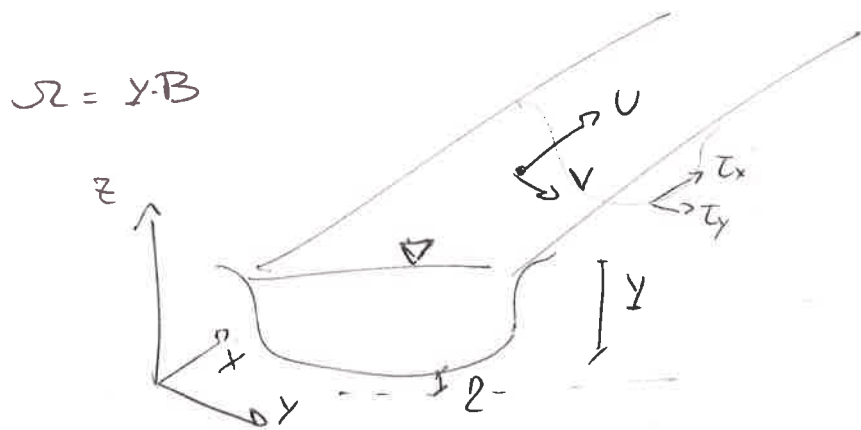
SIMBOLI e RELAZIONI

Problematica



Modello 2D completo (RICH SCALE ANALYSIS)

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (u\eta)}{\partial x} + \frac{\partial (v\eta)}{\partial y} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (c_s \eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$



p = porosità

c_s = concentrazione al fondo

q_{sx}, q_{sy} = trasporto solido sull'unità di larghezza

Portata solida $|q_s| = \sqrt{\Delta g D_s^3} \phi(\theta)$

capacità trasporto $\phi(\theta) = A \theta^n \cdot F(\theta, \theta_c)$ ~~Parker~~ = θ^8

L Parker $\phi = 11,2 \theta^{3/2} \left(1 - \frac{\theta_c}{\theta}\right)^{3/2}$

L M.P.M. $\phi = 8 \theta^{3/2} \left(1 - \frac{\theta_c}{\theta}\right)^{3/2}$

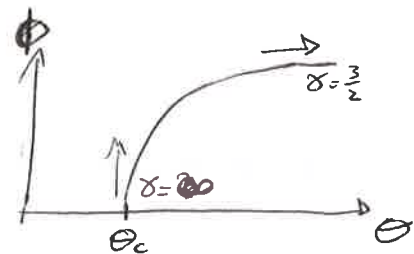
parametro di Shields $\theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) g D_s} = \frac{U_*^2}{\Delta g D_s} = \frac{S Y}{\Delta D_s}$

(con hp di moto uniforme)

$$= \left(\frac{Q}{B \cdot k_s} \right)^{3/5} \cdot \frac{S^{7/10}}{\Delta D_s}$$

Risposta al variare di Shields

con γ esponente di Θ in $\phi = \Theta^\gamma$
 varia da $\frac{3}{2}$ a $+\infty$



$$\begin{cases} S_0 \sim B_0^{\frac{2}{78}} (38-5) \\ Y_0 \sim B_0^{-\frac{3}{78}} (28-1) \\ Q_{s0} \sim B_0^{1-\frac{3}{58}} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{alle variazioni} \\ \text{della larghezza} \\ \text{d'equilibrio} \end{array}$$

Relazioni empiriche

con la portata

$$\left. \begin{array}{l} \text{larghezza} \\ \text{profondità} \\ \text{velocità} \end{array} \right\} \begin{array}{l} B = a Q^{0,5} \\ Y = b Q^{0,4} \\ U = c Q^{0,1} \end{array}$$

parametri
dimensionali

$$\tilde{H} = \frac{Y_0}{\Delta S Q^{2/5}} \sim Q^{4 \cdot 10^{-5}}$$

$$S \sim \hat{Q}^{-0,344}$$

$$\tilde{B} = \frac{B_0}{\Delta S Q^{2/5}} \sim Q^{6,6 \cdot 10^{-2}}$$

parametri
adimensionali

$$\beta = \frac{B}{2Y} \sim Q_{bf}^{0,0661}$$

$$\Theta = \frac{SY}{\Delta S} \sim Q_{bf}^{0,06}$$

} in condizioni
di bankfull
(B_{bf}, Y_{bf})

Formule razionali

Tensione al fondo di Engelund
con l'angolo di attrito

$$\tau_0 = \cos \alpha \left[\rho g S Y + \frac{2}{2Y} \int_0^h T_{xy} dz \right]$$

Relazione tra Shields e l'angolo di sponde α

$$\left(\frac{\Theta}{\Theta_0} \right)^2 (1-r) + \left(\frac{\Theta_c}{\Theta_0} \right)^2 r \cos \alpha + (1+r) \left[\frac{\sin^2 \alpha}{\mu^2} - \cos^2 \alpha \right] = 0$$

$$r = \cos \left(\mu \sqrt{\frac{1-r}{1+r}} \frac{B}{Y_0} \right) \rightarrow 2\beta = \frac{B}{Y_0} = \frac{2}{\mu} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}} \arccos(r)$$

2

Tensione al fondo con
correzioni di Hirano

$$\tau_0 = \rho g S Y + 2\rho g S (Y Y_0)^{1/2} \delta(n)$$

→ piede di sponda $\tau_{ps} = \rho g S Y_0 (1 - 0,15)$

$$\text{con } \theta_0 = 1,15 \theta_{c0}$$

legame geometria - portata liquida

$$Q = k_s B S_0^{1/2} Y^{3/2} \approx \left(\frac{Y_0}{D_s}\right)^2 \left(\frac{B_0}{D_s}\right) \left(\frac{Y_0}{D_s}\right)^{3/2} S_0^{1/2} \text{ moto uniforme}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Y_0}{D_s} \propto \hat{Q}^{0,4} \end{array} \right. \text{ metodo empirico di Parker}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Y_0}{B} \propto A_0 S_0^{-1} \end{array} \right. \text{ equilibrio piede di sponda}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{B_0}{D_s Y_0} = A_B \hat{Q}^{2B} \\ \frac{Y_0}{D_s} = A_Y \hat{Q}^{2Y} \\ S_0 = A_S \hat{Q}^{2S} \end{array} \right. + Q_s = \frac{B_0}{D_s} \sqrt{\Delta} \phi(\theta_0)$$

Modello 2D stazionario per le barre + adimensionale

$$\left\{ \begin{array}{l} U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \left(\frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho Y} = 0 \\ U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \left(\frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial(UY)}{\partial x} + \frac{\partial(VY)}{\partial y} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial \phi_{sy}}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

parametro di
larghezza
 $\beta = \frac{B}{2Y}$

$$\left\{ \begin{array}{l} U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\beta}{C^2} |V| \frac{U}{Y} = 0 \\ U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\beta}{C^2} |V| \frac{V}{Y} = 0 \\ \frac{\partial(UY)}{\partial x} + \frac{\partial(VY)}{\partial y} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial \phi_{sy}}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

Numero di
Froude
 $Fr_0^2 = C^2 \theta_0 \Delta ds$

Modello 2D con perturbazione infinitesime

perturbazioni sulle variabili $\left\{ \begin{array}{l} U^* = U_0^* + U_1^*(x^*, y^*, t^*) \\ V^* = V_0^* + V_1^*(x^*, y^*, t^*) \\ Y^* = Y_0^* + Y_1^*(x^*, y^*, t^*) \\ \eta = \eta_0^* + \eta_1^*(x^*, y^*, t^*) \end{array} \right. \rightarrow \text{linearizzazione del sistema}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right] + \frac{\beta}{G^2} [2U_1 - Y_1] = 0 \\ \frac{\partial V_1}{\partial x} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right] + \frac{\beta}{G^2} V_1 = 0 \\ \frac{\partial Y_1}{\partial x} + \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial Y_1}{\partial y} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial \eta_1}{\partial t} + 2 f(\theta_0) \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial V_1}{\partial y} - \frac{r}{\beta \sqrt{\theta_0}} \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial y^2} = 0 \end{array} \right.$$

funzione

$$f(\theta_0) = \frac{3}{2} \frac{\theta_0}{(\theta_0 - \theta_c)}$$

soluzioni di evoluzione

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_1 = A(t) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda x - \omega t) \\ U_1 = A(t) \hat{U}_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos[(\lambda x - \delta u) - \omega t] \\ V_1 = A(t) \hat{V}_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos[(\lambda x - \delta v) - \omega t] \\ Y_1 = A(t) \hat{Y}_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos[(\lambda x - \delta y) - \omega t] \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{con} \\ A(t) \sim \exp[\Omega t] \\ (\text{tempo}) \end{array}$$

coefficienti descrittivi $\left\{ \begin{array}{l} \Omega = \text{stabilit\`a} \\ \omega = \text{velocit\`a di propagazione} \end{array} \right.$

$\Omega > 0$ si perde
 $\Omega < 0$ No perde
 $\omega > 0$ downstream
 $\omega < 0$ upstream

Massimo scavo

$$H_{\text{scavo}} = Y_0 \left[b_1 \sqrt{\frac{\beta - \beta_1}{\beta_c}} + b_2 \frac{\beta - \beta_1}{\beta_c} \right]$$

③ La soluzione del fondo di barre stazionarie è

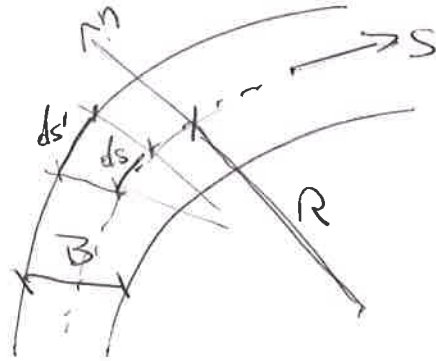
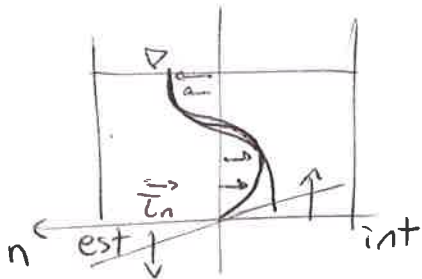
$$\eta_1 = C_1 \exp(\alpha_1 x) \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\alpha_1 x) + C_3 \exp(\alpha_3 x) + C_4 \exp(\alpha_4 x)$$

scale lunga
scale corta

in cui l'ampiezza è $A(x) \sim \exp[\alpha x]$ (spazio)

Teoria di Rozowski moto in curva

$$\frac{v^2}{R} = g \frac{\partial h}{\partial n} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$



correzione curvatura $h_s = \frac{ds'}{ds} = \frac{R+n}{R}$

modello di Exner adattato in curva

$$(1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial q_{ss}}{\partial s} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial}{\partial n} (q_{sn} h_s) = 0$$

soluzione del parametro di fondo

$$\eta(n) = -\frac{\sqrt{\theta}}{r} \frac{y_0}{R} f_1(n), \quad \text{con } n \in \left(-\frac{B}{2}; +\frac{B}{2}\right)$$

Equazioni di bilancio per l'irforcazione

$$\begin{cases} Q_b = Q_{b1} - q_y \alpha B_a \\ Q_c = Q_{c1} + q_y \alpha B_a \end{cases} \quad \text{portata liquida } A \rightarrow B, C$$

$$\begin{cases} (1-p) \frac{\partial Q_b}{\partial t} \alpha B_a B_b + (Q_{sb} - Q_{sb1}) - \alpha B_a q_{sy} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial Q_c}{\partial t} \alpha B_a B_c + (Q_{sc} - Q_{sc1}) + \alpha B_a q_{sy} = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{equazione} \\ \text{di Exner} \end{array}$$

$$q_{sy} = q_{s2} \left(\frac{Q_b - Q_{b1}}{\alpha Q_a} - \frac{r}{\sqrt{\theta}} \frac{z_b - z_c}{B_b + B_c} \right) \quad \text{portata trasversale solida al moto}$$

Parametri meandri

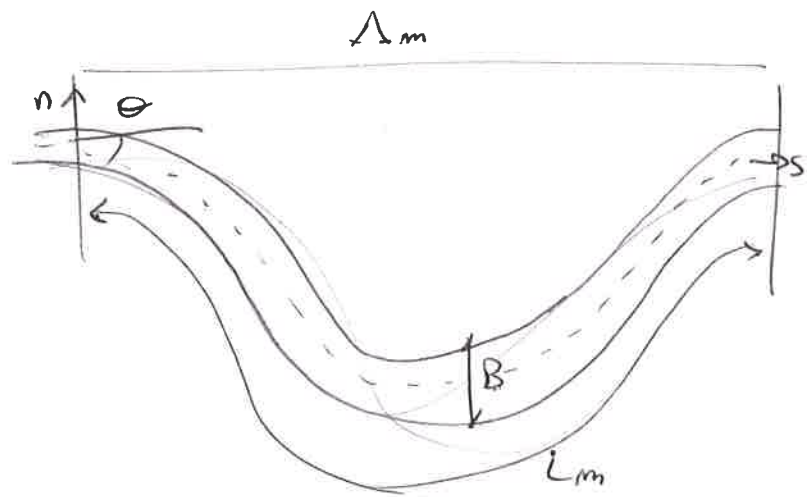
curvatura $c(s) = -\frac{\partial \theta}{\partial s} = R_0^{-1} \cos(\lambda_m s)$

ampiezza angolo $\theta = -\theta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{L_m(t)} s\right)$

numero d'onde $\lambda_m = \frac{\pi B}{L_m}$

sinuosità $\delta = \frac{L_m}{\Delta_m}$

adimensionali $\left\{ \begin{array}{l} \delta = \frac{B_{\max} - B_0}{2B_0} \\ \nu = \frac{B_0}{4R_0} \end{array} \right.$



Formula di Kimoshita

$$c(s) = R_0^{-1} \left[\cos(\lambda_m s) + \underbrace{C_f \cos(3\lambda_m s)}_{\text{fattening}} + \underbrace{C_s \sin(3\lambda_m s)}_{\text{skewing}} \right]$$

Modello 2D coordinate curvilinee (s, n)

$$\begin{cases} \frac{1}{h_s} u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{1}{h_s} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{T_s}{\rho Y} = 0 \\ \frac{1}{h_s} u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + \rho \left(\frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial u}{\partial n} \right) + \frac{T_n}{\rho Y} = 0 \\ \frac{1}{h_s} \frac{\partial (uY)}{\partial s} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial (h_s vY)}{\partial n} = 0 \\ \frac{1}{h_s} \frac{\partial \psi_{ss}}{\partial s} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial (h_s \psi_{sn})}{\partial n} = 0 \end{cases}$$

moto secondario descritto dagli sforzi tangenziali

$$\begin{cases} T_s = \rho \frac{|V|^2}{G^2} \frac{U}{|V|} \\ T_n = \rho \frac{|V|^2}{G^2} \left(\frac{V}{|V|} - \frac{Y}{R_0} f_i \cos(\lambda_m s) \right) \end{cases}$$

④ Modello 2D curvilineo adimensionale + linearizzato

$$\frac{1}{h_s} U \frac{\partial U}{\partial s} + V \frac{\partial U}{\partial n} + \frac{1}{h_s} \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial s} + \frac{\partial \eta}{\partial s} \right) + \beta \frac{\tau_s}{Y} = 0$$

$$\frac{1}{h_s} U \frac{\partial V}{\partial s} + V \frac{\partial V}{\partial n} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial n} + \frac{\partial \eta}{\partial n} \right) + \beta \frac{\tau_n}{Y} = 0$$

$$\frac{\partial(UY)}{\partial s} + \frac{\partial(h_s V Y)}{\partial n} = 0$$

adimensionale

$$h_s = 1 + n(z\gamma) \cos(\lambda_m s)$$

$$\frac{\partial \psi_{sn}}{\partial s} + \frac{\partial(h_s \psi_{sn})}{\partial n} = 0$$

piccola perturbazione sulle variabili

$$U = 1 + v U_1(s, n)$$

$$V = 0 + v V_1(s, n)$$

$$Y = 1 + v Y_1(s, n)$$

$$\eta = \eta_0(s) + v \eta_1(s, n)$$

Modello non omogeneo linearizzato stazionario

$$\frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y_1}{\partial s} + \frac{\partial \eta_1}{\partial s} \right) + \frac{\beta}{G^2} (2U_1 - Y_1) = A_1(n) \cos(\lambda_m s)$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial s} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y_1}{\partial n} + \frac{\partial \eta_1}{\partial n} \right) + \frac{\beta}{G^2} V_1 = A_2(n) \cos(\lambda_m s)$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial s} + \frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{\partial V_1}{\partial n} = 0$$

$$2f(\theta_0) \frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{\partial V_1}{\partial n} - \frac{r}{\sqrt{\theta_0} \beta} \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial n^2} = A_4(n) \cos(\lambda_m s)$$

soluzioni con sfasamenti

$$U_1 = \hat{U}(n) \cdot \cos(\lambda_m s - \varphi_U) \rightarrow U_1 = \hat{U}(n) \cos(\lambda_m s)$$

$$Y_1 = \hat{Y}(n) \cdot \cos(\lambda_m s - \varphi_Y) \rightarrow Y_1 = \hat{Y}(n) \cos(\lambda_m s)$$

$$\eta_1 = \hat{\eta}(n) \cdot \cos(\lambda_m s - \varphi_\eta) \rightarrow \eta_1 = \hat{\eta}(n) \cos(\lambda_m s - \pi)$$

$$V_1 = \hat{V}(n) \cdot \cos(\lambda_m s - \varphi_V) \rightarrow V_1 = \hat{V}(n) \cos(\lambda_m s - \frac{3}{2}\pi)$$

portate di trasporto solida trasversale al moto

$$\psi_{sn} = \frac{\Phi(\theta)}{\Phi(\theta_0)} \left(\frac{v}{|V|} - \frac{v}{\beta} z \gamma f_1 \cos(\lambda_m s) - \frac{r}{\sqrt{\theta} \beta} \frac{\partial \eta}{\partial n} \right)$$

Bend Theory of meanders

tasso di spostamento linea d'asse $\Sigma = E(U_{n+1} - U_{n-1})$
 $\neq 2E \nu \hat{U}_{n+1} (\cos \lambda_m s - \psi_0)$

LEGGE DI
EROSIONE
lineare

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \xi}{\partial s}$$

LEGGE DI
EROSIONE
NON lineare

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial s} \int_0^s \xi \frac{\partial \theta}{\partial s} ds = \frac{\partial \xi}{\partial s}$$

tasso di allargamento $\xi = 2 \Sigma = 2E \nu \hat{U}_n \cos(\lambda_m s - \psi_0)$
 $\neq 2E (U_{n+1} - U_{n-1})$

↳ componente allopatrica + autogenica

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = (E - A) U_n^{asim} + 2E U_n^{sym}, \quad \text{se } U_n > 1 \quad \text{erosione esterno} \\ \xi = (E - A) U_n^{asim} + 2A U_n^{sym}, \quad \text{se } U_n < 1 \quad \text{crescita interno} \end{array} \right.$$

①

DIMOSTRAZIONI

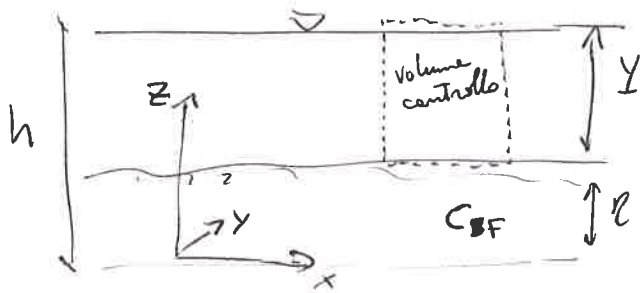
1. Modello bidimensionale, sistema e chiusura (1.2)
2. Lunghezza ottimale per massima portata (1.4)
3. Parametri adimensionali (2.1)
4. Formule dell'alveo con formule razionali (2.3)
5. Formule razionali (2.3)
6. Linearizzazione del sistema (3.2)
7. Soluzione del problema linearizzato (3.2)
8. Moto in curva di Rozovskij (4.1)
9. Problema forzato per piccola perturbazione (5.2)
10. Tasso di spostamento nei meandri (5.6)

Modello bidimensionale, sistema e chiusura (1.2)

Ipotesi iniziali sullo spazio: scala di tratto (e scale)

$$L_0 \sim B_0, \quad (L_0, B_0) \gg \lambda_0 \quad \text{quindi} \quad \frac{\partial}{\partial z} \gg \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$$

Equazioni del modello 2D lungo \hat{x} e lungo \hat{y} , sulla colonna d'acqua -



$$\begin{aligned} \bar{U} &= \frac{1}{Y} \int_{\eta}^h u \, dz \\ \bar{V} &= \frac{1}{Y} \int_{\eta}^h v \, dz \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \bar{U} \\ \bar{V} \end{aligned}} \right\} \begin{array}{l} \text{velocità} \\ \text{longitudinale} \\ \text{e trasversale} \end{array}$$

Systeme composto dalle equazioni di bilancio:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{moto lungo } \hat{x} \\ \text{moto lungo } \hat{y} \\ \text{continuità} \end{array} \right. \quad \text{e da una chiusura per} \\ \text{conservazione del solido}$$

$$\begin{aligned} \text{moto} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho Y} = 0 \end{array} \right. \end{aligned}$$

$$\text{continuità} \rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial (uY)}{\partial x} + \frac{\partial (vY)}{\partial y} = 0$$

Le incognite sono u, v, y, η per 3 equazioni, aggiunta l'equazione di Exner per i sedimenti: bilancio tra la portata solida (erosione) e la concentrazione (deposito).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V c \, dV + \oint_{\partial V} q \cdot \vec{n} \, ds = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot q = 0$$

integrata sulla verticale da η a h , con c_f fissato.

$$\int_{\eta}^h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot q \right) dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\eta}^h c \, dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h q_x \, dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta}^h q_y \, dz - \frac{\partial h}{\partial t} c_h - \frac{\partial h}{\partial x} q_{xh} - \frac{\partial h}{\partial y} q_{yh} + q_{zh} + \frac{\partial \eta}{\partial t} c_{\eta} +$$

$$\textcircled{2} + \frac{\partial \rho}{\partial x} q_{x\eta} + \frac{\partial \rho}{\partial y} q_{y\eta} - \rho_{z\eta} = 0$$

Il flusso sulle superficie ds causa accumulo in dv .

$$\text{Il vettore superficiale } \vec{n} = \frac{(-\frac{\partial h}{\partial x}; -\frac{\partial h}{\partial y}; 1)}{\sqrt{1 + (\frac{\partial h}{\partial x})^2 + (\frac{\partial h}{\partial y})^2}}$$

Le condizioni di controllo superficiali sono:

$$\text{in } h: -q_x \frac{\partial h}{\partial x} - q_y \frac{\partial h}{\partial y} + q_z = C_h \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\text{in } \eta: \rho \cdot \vec{n}_F = \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \vec{n}_{Fz} (C_\eta - C_F)$$

L'equazione di Exner si semplifica in:

$$\int_{\eta}^h \left(\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} \right) dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\eta}^h C dz + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h q_x dz}_{q_{sx}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta}^h q_y dz}_{q_{sy}} + C_F \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

$\frac{d\bar{C}}{dt}$ \uparrow (1-P)

\Rightarrow Forma mediata 2D per la conservazione dei sedimenti

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{C} Y) + (1-P) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0$$

Il sistema completo è:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial y}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial (u y)}{\partial x} + \frac{\partial (v y)}{\partial y} = 0 \\ (1-P) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{C} Y)}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

Lunghezza ottimale per massima portata (1.4)

Ipotezzando una pendenza media S_0 fissa, si fa variare la lunghezza in funzione della portata solida -

Le variabili idrologiche dipendono dal regime nel tempo, quindi la lunghezza viene adattata nell'evoluzione del regime -

Le portate sono valutate
$$\begin{cases} Q_l = B_0 k_s S_0^{1/2} Y_0^{5/3} \\ Q_s = B_0 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}} g D_s^3 \phi(\Theta_0) \end{cases}$$

quindi il parametro di Shields
$$\Theta_0 = \left(\frac{Q}{B_0 k_s} \right)^{3/5} \cdot \frac{S_0^{7/10}}{\Delta D_s}$$

 con $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}$

Il legame del trasporto solido è $\phi \sim \Theta^\gamma$, $\gamma \in \left[\frac{3}{2}; \infty \right]$

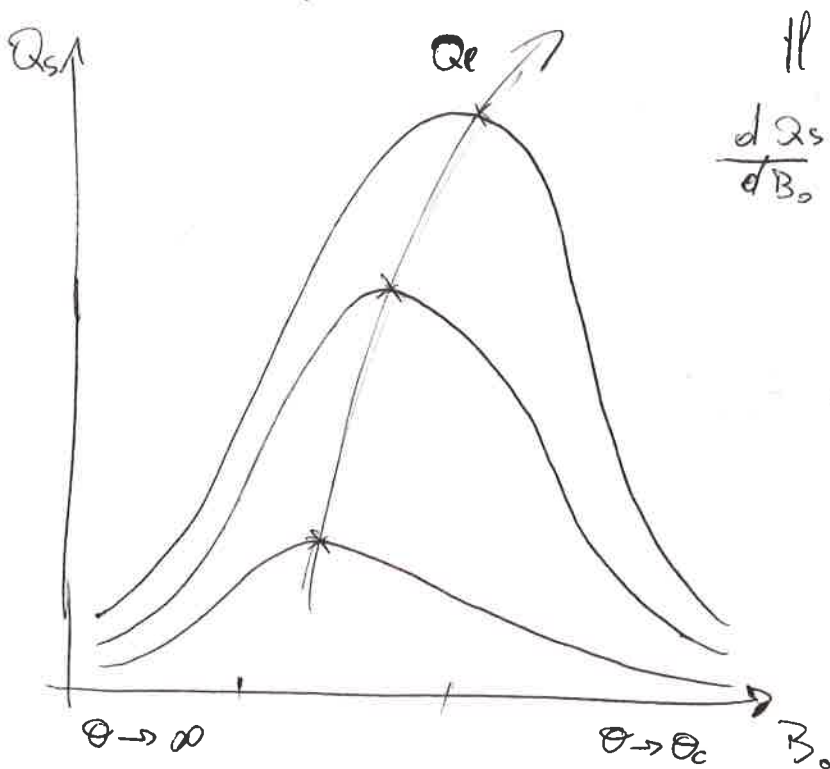
Quindi la relazione con la lunghezza è $\Theta \sim B_0^{-1/8}$, dato che

che
$$\phi(\Theta_0) = \frac{Q_s}{B_0 \sqrt{\Delta g D_s^3}} \sim \Theta^\gamma$$
 con i termini costanti -

Dalla portata liquida si ha $Y_0 \sim B_0^{-3/5}$, mentre nella portata solida vale $Y_0 \sim B_0^{-1/8}$ (con Q ed S_0 costanti).

Quindi la relazione con la portata è

$$Q_{os} \sim B_0 \cdot \left(B_0^{-3/5} \right)^{1/8} \sim B_0^{1 - \frac{3}{5}\gamma}$$
 dipendente dal parametro γ .



Il massimo della curva si ha con

$$\frac{dQ_s}{dB_0} = \sqrt{\Delta g D_s^3} \phi \left\{ 1 - \frac{3}{5} \frac{d\phi}{d\Theta_0} \frac{\Theta_0}{\phi} \right\}$$

↓ cost $\left\{ 1 - \frac{3}{5} \gamma \right\}$

com $\Theta \rightarrow \Theta_c$, $\gamma = \infty$

com $\Theta \rightarrow \infty$, $\gamma = 3/2$

trasporto minimo

com $\gamma = 5/3$ trasporto massimo

③ Parametri adimensionali (2.1)

Dato l'alto numero di variabili fisici nel problema, è necessario adimensionarli col teorema Π .

La larghezza B_0 è una variabile fondamentale dipendente da 7 grandezze:

$B_0 = f(Q, Q_s, D_s, v, \rho, \beta, g)$ oltre alla geologia e alla coesione del suolo e sponde.

TEOREMA Π : data una rappresentazione dimensionale del problema $A_0 = f(A_1, A_2, \dots, A_n)$; il teorema afferma che se identifichiamo 3 grandezze dimensionalmente indipendenti rispetto alla tripla fondamentale (L, M, T) posso passare alla rappresentazione semplificata con $n-3$ parametri - $\Pi_0 = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n)$

Si esprime qualsiasi variabile in funzione delle grandezze fondamentali. La definizione di $\Pi_k = \frac{A_k}{A_1^{a_1} \cdot A_2^{a_2} \cdot A_3^{a_3}}$ non è ambigua.

I parametri ambientali si trasformano come:

$$[D_s] = L M^0 T^0; \quad [g] = L M^0 T^{-2}; \quad [\rho] = L^{-3} M T^0;$$

Per rendere la larghezza B_0 adimensionale, devo dividerla

$$\frac{B}{D_s^{a_1} \rho^{a_2} g^{a_3}} = \frac{[L]}{[L]^{a_1} [L^{-3} M]^{a_2} [L T^{-2}]^{a_3}} = 0 \quad \text{quindi} \quad \begin{cases} a_1 = 1 \\ a_2 = 0 \\ a_3 = 0 \end{cases}$$

si valuta come γ , $\frac{1}{B} = \frac{B}{D_s}$ e $\hat{\gamma} = \frac{\gamma}{D_s}$

Le portate adimensionalizzate sono

$$\frac{Q}{D_s^{a_1} \rho^{a_2} g^{a_3}} = \frac{[L^3 T^{-1} M^0]}{[L]^{a_1} [L^{-3} M]^{a_2} [L T^{-2}]^{a_3}} = 0 \quad \text{quindi} \quad \begin{cases} a_1 = 5/2 \\ a_2 = 0 \\ a_3 = 1/2 \end{cases}$$

Allora $\hat{Q}_s = \frac{Q_s}{\sqrt{g D_s^3}}$ e $\hat{Q}_p = \frac{Q_p}{\sqrt{g D_s^3}}$

I parametri fisici restanti sono $\hat{p}_s = \frac{p_s}{p_0}$ (per p fissato dell'acqua)

la viscosità $\hat{\nu} = \frac{\nu}{\sqrt{g D_s^3}}$ e il numero di Reynolds

$$R_p = \frac{\sqrt{g D_s^3}}{\nu} = \frac{u D_s}{\nu}$$

Alla fine si ottiene $\hat{B} = f(\hat{Q}, \hat{Q}_s, \hat{p}_s, \hat{\nu})$, ma con ipotesi di \hat{p}_s pressoché costante, $\hat{\nu}$ molto piccolo e \hat{Q}_s influente, si riceve $\hat{B} = f(\hat{Q})$.

④ Forma dell'alveo con formule razionali (2.3)

- DISTRIBUZIONE DELLA TENSIONE SUL CONTORNO

Il metodo di Engelund ha ipotesi di moto stazionario e problema quasi uniforme, $\left(\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} = 0 \text{ e } L_0 \gg Y, B_0\right)$

con acqua bassa $u \gg (v, w)$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \langle u'u' \rangle + \frac{\partial}{\partial y} \langle u'v' \rangle + \frac{\partial}{\partial z} \langle u'w' \rangle + \rho \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial y} \langle u'v' \rangle + \frac{\partial}{\partial z} \langle u'w' \rangle + \rho \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial y} \langle u'v' \rangle + \frac{\partial}{\partial z} \langle u'w' \rangle - \rho S = 0$$

in termini tensionali $\frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} + \rho S = 0$, ovvero:

$$\int_{\eta}^h \rho S dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta}^h T_{xy} dz - \frac{\partial h}{\partial y} T_{xy}|_h + \frac{\partial \eta}{\partial y} T_{xy}|_h + T_{xz}|_h - T_{xz}|_{\eta} = 0$$

la tensione al fondo è $T_x = \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} T_{xy} - T_{xz} \right) \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2}}$

Il bilancio di moto si scrive

$$\rho S Y + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta}^h T_{xy} dz + \underbrace{T_x}_{\text{al fondo}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2} = 0$$

definendo l'angolo $\alpha = \arctan \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)$ trasversale, la tensione

$$T_0 = \cos \alpha \left[\rho S Y + \frac{\partial}{\partial y} \int_{\eta}^h T_{xy} dz \right] \text{ definita al fondo}$$

- CONDIZIONE DI EQUILIBRIO LIMITE

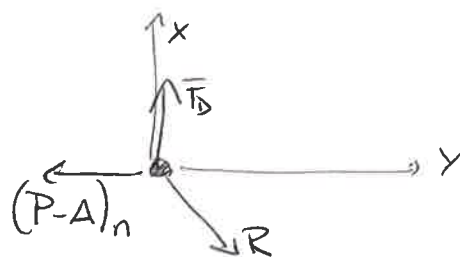
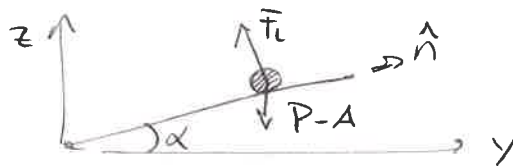
Date le sponde inclinate di α ,
i termini delle forze agenti, sono:

F_n = portanza normale al suolo

$P-A$ = peso con spinta di Archimede

F_D = forza di Darcy sul moto

R = attrito del fondo



La resistenza al moto equivale alle legge di Coulomb

$$|R| = \mu |N| = \tan \varphi |N| \quad \text{secondo l'attrito del terreno } \mu$$

Le altre forze sono definite

$$|P-A| = (p_s - p) g \frac{\pi D_s^3}{6} = G \quad \text{mentre } (P-A)_n = -G \sin \alpha \quad \text{trasversale al moto}$$

$$|F_D| = \frac{1}{2} \rho C_D U_p^2 \frac{\pi D_s^2}{4}$$

$$|F_L| = \frac{1}{2} \rho C_L U_p^2 \frac{\pi D_s^2}{4} = \frac{C_L}{C_D} |F_D|$$

$$|N| = G \cos \alpha - \frac{C_L}{C_D} F_D$$

dato che $|R| = (F_D^2 + G^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$ l'equilibrio si ricava da

$$(F_D^2 + G^2 \sin^2 \alpha)^{1/2} = \tan \varphi (G \cos \alpha - \frac{C_L}{C_D} F_D)$$

$$\left[\text{moto che } \frac{F_D}{G} = \frac{1/2 \rho C_D U_p^2 \frac{\pi D_s^2}{4}}{(p_s - p) g \frac{\pi D_s^3}{6}} = \frac{3}{4} C_D A^2 \frac{\rho U_*^2}{(p_s - p) D_s g} = \frac{3}{4} C_D A^2 \Theta \right]$$

$$\text{l'equilibrio si ha per } \mu \left[\cos \alpha - \frac{C_L}{C_D} \frac{3}{4} C_D A^2 \Theta \right] = \left[\left(\frac{3}{4} C_D A^2 \Theta \right)^2 + \sin^2 \alpha \right]^{1/2}$$

al fondo piatto $\alpha = 0$ si pone $\Theta_c \rightarrow \Theta_{c0}$ dividendo i termini in G

$$\mu \left[1 - \frac{C_L}{C_D} \frac{3}{4} C_D A^2 \Theta_{c0} \right] = \frac{3}{4} C_D A^2 \Theta_{c0}$$

$$\text{per cui } \Theta_{c0} = \frac{\mu}{\frac{3}{4} C_D A^2 \left[1 + \mu \frac{C_L}{C_D} \right]} = \frac{\mu}{\frac{3}{4} C_D A^2 \left[1 + r \right]} \approx 0,04$$

Avendo $\alpha \neq 0$ si pone $\Theta_c / \Theta_{c0} = f(\alpha)$

$$\cos^2 \alpha + \frac{\Theta_c^2}{\Theta_{c0}^2} \left(\frac{r}{1+r} \right)^2 - 2 \frac{r}{1+r} \frac{\Theta_c}{\Theta_{c0}} \cos \alpha = \left(\frac{\Theta_c}{\Theta_{c0}} \right)^2 \frac{1}{(1+r)^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{\mu^2}$$

fino all'equazione di II grado,

nulle per $\alpha = \varphi$

$$\left(\frac{\Theta_c}{\Theta_{c0}} \right)^2 (1-r) + \frac{\Theta_c}{\Theta_{c0}} 2r \cos \alpha + (1+r) \left[\frac{\sin^2 \alpha}{\mu^2} - \cos^2 \alpha \right] = 0$$

con i parametri ambientali μ e $r = \cos \left(\mu \sqrt{\frac{1-r}{1+r}} \frac{3}{2\%} \right) \approx 0,5$

⑤ Le relazioni tendono a cercare la forma trasversale della sezione con la tensione del fondo.

$$\left(\frac{Y}{Y_0}\right)^2 (1-r) \cos^2 \alpha + 2r \frac{Y}{Y_0} \cos^2 \alpha + (1+r) \left[\frac{\sin^2 \alpha}{\mu^2} - \cos^2 \alpha \right] = 0$$

dove Y_0 è la profondità massima nel talweg, allora

$$\tan \alpha = - \frac{dY}{dy} \quad \text{vale} \quad \frac{dY}{dy} = -\mu \left(1 - \frac{1-r}{1+r} \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^2 - \frac{2r}{1+r} \left(\frac{Y}{Y_0}\right) \right)^{1/2}$$

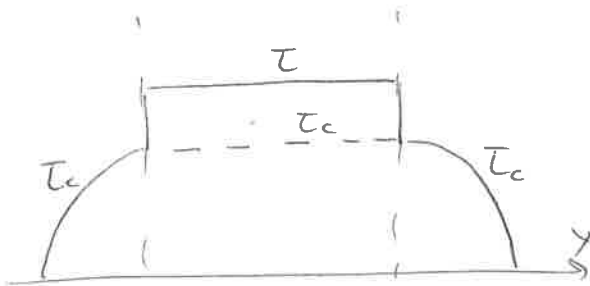
che definisce la forma del fondo con le condizioni:

- $Y=0$ in $y = \frac{B}{2}$ all'estremo della sponda
- $Y=Y_0$ in $y=0$, $\frac{dY}{dy}=0$ al centro dell'alveo

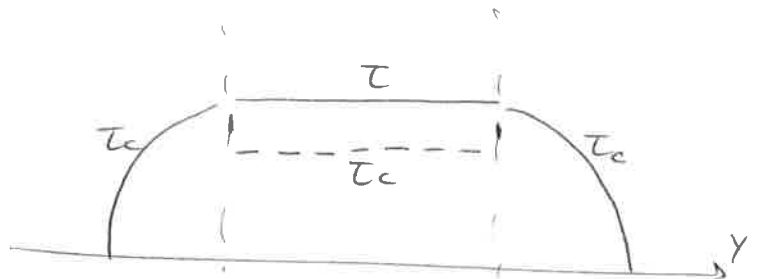
La soluzione analitica è $\frac{Y}{Y_0} = \frac{1}{1-r} \left[\cos\left(\mu \sqrt{\frac{1-r}{1+r}} \frac{Y}{Y_0}\right) - r \right]$

Tra le sponde ed il fondo resta una discontinuità:

I caso



II caso



Alle sponde bisogna avere stabilità $T \rightarrow T_c$ ma al fondo si ha sempre $T > T_c$ per trasporto solido. Quindi c'è una correzione per cui

$$T = \rho g S Y + 2 \rho g S (Y Y_0)^{1/2} \cdot S(n) \quad \text{attraverso una funzione}$$

che lega le tensioni al fondo con quelle delle sponde.

$S(n)$ è positiva alle sponde (più stabile)
 negativa al piede
 nulla al fondo (Engelund)

~~Linearizzazione del sistema (3.2)~~

Formule razionali (2.3)

Bisogna definire le variabili geometriche Y_0, S_0, B_0 delle portate Q e Q_s ; ma è difficile determinare Q_s .

Le formule di regime iniziali sono:

$$\begin{cases} Q = B_0 Y_0 C \sqrt{g S_0 Y_0} & \text{portata liquida} \\ Q_s = B_0 \sqrt{g \Delta D_s^3} \phi(\theta_0) & \text{portata solida} \\ \theta_0 = \frac{Y_0 S_0}{\Delta D_s} = A_0 \theta_{c0} & \text{parametro di Shields} \end{cases}$$

Essendo incognita la portata Q_s , vengono sostituite con formule razionali diverse ed una empirica di Parker.

$$\begin{cases} \hat{Q} \propto \left(\frac{Y_0}{D_s}\right)^{\alpha} \left(\frac{B_0}{D_s}\right) \left(\frac{Y_0}{D_s}\right)^{3/2} S_0^{1/2} & \text{moto uniforme } (\alpha = 0,18 \div 0,26) \\ \frac{Y_0}{D_s} \propto \hat{Q}^{0,4} & \text{empirica di Parker} \\ \frac{Y_0}{D_s} \propto A_0 S_0^{-1} & \text{equilibrio piede sponda} \end{cases}$$

I parametri geometrici adimensionalizzati si ricavano per sostituzione:

$$\begin{cases} \frac{B_0}{D_s} \propto \hat{Q} \left(\frac{Y_0}{D_s}\right)^{-\alpha} \left(\frac{Y_0}{D_s}\right)^{-3/2} S_0^{-1/2} \rightarrow \frac{B_0}{D_s} \propto \hat{Q}^{1-0,4\alpha} \hat{Q}^{1-0,6} \left(\hat{Q}^{0,4}\right)^{-1/2} \\ \frac{B_0}{D_s} \propto \hat{Q}^{(0,6-0,4\alpha)} & \text{larghezza al variare della portata} \\ S_0 \propto \hat{Q}^{0,4} & \text{pendenza al variare della portata} \\ \frac{Y_0}{D_s} \propto \hat{Q}^{0,4} & \text{profondità al variare della portata} \end{cases}$$

Quindi si usano i coefficienti tarati sperimentalmente

$$\frac{B_0}{D_s} = A_B \hat{Q}^{\alpha_B}; \quad S_0 = A_S \hat{Q}^{\alpha_S}; \quad \frac{Y_0}{D_s} = A_Y \hat{Q}^{\alpha_Y};$$

Adesso si possono confrontare i coefficienti per capire come varia la geometria in funzione della portata.

⑥ Date le definizioni di portata solida

$$Q_s = B_0 \sqrt{\Delta g D_s^3} \phi(\theta_0) \quad \text{e} \quad \hat{Q}_s = \frac{Q_s}{\sqrt{g D_s^3}} = \frac{B_0}{D_s} \sqrt{\Delta} \phi(\theta_0)$$

correlando alle formule razionali di regime, si ha

$$\hat{Q}_s = A_2 \hat{Q}^{\alpha} \quad \text{in particolare} \quad \hat{Q}_s \sim \sqrt{\hat{Q}}$$

in cui $A_2 \sim A_B (A_0 - 1)^{1,5}$

in base alla portata solida si ha una risposta geometrica del coefficiente A_2 :

pendenza $A_s \propto \frac{A_0}{A_y}$
 larghezza $A_B \propto (A_0^{0,5} A_y^{1+\alpha})^{-1}$

Grazie a questo metodo, si può ricavare la portata Q_s a posteriori, avendo assunto corrette le formule empiriche verificate nei dati sperimentali di Parker.

$A_0 \rightarrow$ coesione

A_0 aumenta all'aumentare della coesione $1,15 \rightarrow 1,6$

A_s aumenta all'aumentare della coesione

A_B diminuisce all'aumentare della coesione

Linearizzazione del sistema (3.2)

Del sistema di partenza bisogna ~~le~~ adimensionalizzare i termini tramite G, β, Fr_0 .

$$\begin{cases} U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + \beta \left(\frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\tau_x}{\rho Y} = 0 \\ U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + \beta \left(\frac{\partial Y}{\partial Y} + \frac{\partial \eta}{\partial Y} \right) + \frac{\tau_y}{\rho Y} = 0 \\ \frac{\partial(UY)}{\partial x} + \frac{\partial(VY)}{\partial Y} = 0 \\ (1-\rho) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \varphi_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_{sy}}{\partial Y} = 0 \end{cases}$$

Le tensioni sono $\tau_x = \rho \frac{|V|}{C^2} U$ e $\tau_y = \rho \frac{|V|}{C^2} V$ mentre i termini adimensionali valgono $\beta = \frac{B}{2Y_0}$ e $Fr_0^{-2} = \frac{gY_0}{U_0^2}$.

Invece le grandezze si adimensionalizzano

$$(U, V) = \frac{(U^*, V^*)}{U_0} \quad (x, Y) = \frac{(x^*, Y^*)}{0,5B} \quad (Y, \eta) = \frac{(Y^*, \eta^*)}{Y_0}$$

il moto in \hat{x} vale (ugualmente per le altre equazioni):

$$\frac{U_0^2}{0,5B} U^2 \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U_0^2}{0,5B} V^2 \frac{\partial U}{\partial Y} + \beta \frac{Y_0}{0,5B} \left(\frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\rho U_0^2 \tau_x}{\rho Y_0 Y} = 0$$

allora si raccoglie e diventa

$$\begin{cases} U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\beta}{C^2} \frac{|V|U}{Y} = 0 \\ U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial Y} + \frac{\partial \eta}{\partial Y} \right) + \frac{\beta}{C^2} \frac{|V|V}{Y} = 0 \\ \frac{\partial(UY)}{\partial x} + \frac{\partial(VY)}{\partial Y} = 0 \\ (1-\rho) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \varphi_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_{sy}}{\partial Y} = 0 \end{cases}$$

La LINEARIZZAZIONE avviene secondo il metodo di Taylor con piccole perturbazioni.

$$U = 1 + U_1$$

$$V = 0 + V_1$$

$$Y = 1 + Y_1$$

$$\eta = \eta_0 + \eta_1$$

sostituendo al sistema

7) La prima equazione è

$$(1+U_1) \frac{\partial U_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right] + \frac{\beta}{G^2} (1+U_1) \frac{|V|}{Y} = 0$$

$$\bullet |V| = \sqrt{U^2 + V^2} = \sqrt{(1+U_1)^2 + V_1^2} = \sqrt{1 + 2U_1 + U_1^2 + V_1^2}$$

$$\bullet \frac{1}{Y} = \frac{1}{1+Y_1} = \frac{1-Y_1}{(1+Y_1)(1-Y_1)} = 1-Y_1$$

$$\rightarrow \frac{|V|}{Y} = (1+U_1)(1-Y_1)$$

$$\Rightarrow (1+U_1) \frac{\partial U_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial U_1}{\partial y} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right] + \frac{\beta}{G^2} (1+U_1)(1+U_1)(1-Y_1) = 0$$

↳ piccole perturbazioni, ordine 1

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right] + \frac{\beta}{G^2} (2U_1 - Y_1) = 0$$

La seconda equazione è

$$(1+U_1) \frac{\partial V_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial y} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_0}{\partial y} + \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right] + \frac{\beta}{G^2} V_1 (1+U_1)(1-Y_1) = 0$$

$$\rightarrow \frac{\partial V_1}{\partial x} + \frac{1}{F_{r0}^2} \left[\frac{\partial Y_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right] + \frac{\beta}{G^2} V_1 = 0$$

La terza equazione è

$$\frac{\partial(1+Y_1)}{\partial x} + \frac{\partial(1+U_1)}{\partial x} + \frac{\partial(1+Y_1)}{\partial y} + \frac{\partial V_1}{\partial y} = 0$$

$$\rightarrow \frac{\partial Y_1}{\partial x} + \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial V_1}{\partial y} = 0$$

La quarta equazione è Casata sulle portate solide definite:

$$\varphi_{sx} = \frac{\phi(\theta)}{\phi(\theta_0)} \quad e \quad \varphi_{sy} = \varphi_{sx} \left[\frac{V}{|V|} - \frac{2}{\beta \sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right]$$

$$(1-p) \frac{\partial(\eta_0 + \eta_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\phi(\theta)}{\phi(\theta_0)} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\phi(\theta)}{\phi(\theta_0)} \left(\frac{V}{|V|} - \frac{2}{\beta \sqrt{\theta}} \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right] = 0$$

$$\rightarrow (1-p) \frac{\partial \eta_1}{\partial t} + 2 f(\theta_0) \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial V_1}{\partial y} - \frac{2}{\beta \sqrt{\theta_0}} \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial y^2} = 0$$

$$\text{dove } f(\theta_0) = \frac{\theta_0}{\phi(\theta_0)} \left(\frac{d\phi}{d\theta} \right)_{\theta_0} = \frac{3}{2} \frac{\theta_0}{(\theta_0 - \theta_c)}$$

Soluzione del problema linearizzato (3.2)

Dal sistema linearizzato nel I ordine

$$\begin{cases} \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{1}{F_0^2} \left[\frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_1}{\partial x} \right] + \frac{\beta}{G^2} (2U_1 - Y_1) = 0 \\ \frac{\partial V_1}{\partial x} + \frac{1}{F_0^2} \left[\frac{\partial \eta_1}{\partial y} + \frac{\partial \eta_1}{\partial y} \right] + \frac{\beta}{G^2} V_1 = 0 \\ \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial \eta_1}{\partial y} = 0 \\ (1-p) \frac{\partial \eta_1}{\partial t} + 2f(\theta_0) \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial V_1}{\partial y} - \frac{2}{\beta \sqrt{\theta_0}} \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial x^2} = 0 \end{cases}$$

Le variabili U_1, V_1, Y_1 e η_1 sono in funzione dei parametri $x, y, t; \beta, \theta_0, \dots$

La soluzione del problema è la definizione del fondo nello spazio con l'evoluzione nel tempo.

$$\eta_1 = \underbrace{A(t)}_{\substack{\text{ampiezza} \\ \text{in tempo}}} \underbrace{\sin\left(\frac{\pi}{2} y\right)}_{\substack{\text{onda} \\ \text{trasversale}}} \underbrace{\cos(\lambda x - \omega t)}_{\substack{\text{onda} \\ \text{longitudinale}}}$$

Di conseguenza si ottengono le altre variabili

$$\begin{cases} U_1 = A(t) \hat{U}_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos[(\lambda x - \delta_U) - \omega t] & \text{antisimm.} \\ V_1 = A(t) \hat{V}_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos[(\lambda x - \delta_V) - \omega t] & \text{simmm.} \\ Y_1 = A(t) \hat{Y}_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos[(\lambda x - \delta_Y) - \omega t] & \text{antisimm.} \end{cases}$$

ammettendo un relativo sfasamento longitudinale.

Sostituendo le 6 soluzioni nelle IV equazione

(di Exner) si ottiene un'equazione completa:

$$\begin{aligned} (1-p) \left[\frac{dA}{dt} \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda x - \omega t) + \omega A \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \sin(\lambda x - \omega t) \right] - \\ - 2f \lambda A \hat{U}_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \sin(\lambda x - \delta_U - \omega t) - \\ - \frac{\pi}{2} A \hat{V}_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda x - \delta_V - \omega t) + \\ + \frac{2}{\beta \sqrt{\theta_0}} \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 A \sin\left(\frac{\pi}{2} y\right) \cos(\lambda x - \omega t) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \textcircled{8} (1-p) \left[\frac{dA}{dt} \cos(\lambda x - \omega t) + \omega A \sin(\lambda x - \omega t) \right] - \\
 & - 2f \lambda A \hat{U}_i \left[\sin(\lambda x - \omega t) \cos(\delta v) - \cos(\lambda x - \omega t) \sin(\delta v) \right] - \\
 & - \frac{\pi}{2} A \hat{V}_i \left[\cos(\lambda x - \omega t) \cos(\delta v) + \sin(\lambda x - \omega t) \sin(\delta v) \right] + \\
 & + \frac{2}{\beta \sqrt{\epsilon_0}} \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 A \cos(\lambda x - \omega t) = 0
 \end{aligned}$$

Si raccolgono in 2 equazioni i termini trigonometrici

$$\text{a.) } (1-p) \frac{dA}{dt} + 2f \lambda A \hat{U}_i \sin(\delta v) - \frac{\pi}{2} A \hat{V}_i \cos(\delta v) + \frac{2}{\beta \sqrt{\epsilon_0}} \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 A = 0$$

~~(1-p) \frac{dA}{dt} + \omega A~~ in $\cos(\lambda x - \omega t)$ \nearrow in $\sin(\lambda x - \omega t)$

$$\text{b.) } (1-p) \omega A - 2f \lambda A \hat{U}_i \cos(\delta v) - \frac{\pi}{2} A \hat{V}_i \sin(\delta v) = 0$$

L'equazione (a) definisce il coefficiente di amplificazione:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{(1-p)} \underbrace{\left[\frac{\pi}{2} \hat{V}_i \cos(\delta v) - 2f \lambda \hat{U}_i \sin(\delta v) + \frac{2}{\beta \sqrt{\epsilon_0}} \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \right]}_{\omega \text{ stabilità}} A$$

L'equazione (b) definisce il termine di celerità dell'onda:

$$\underbrace{\frac{1}{(1-p)} \left[2f \lambda \hat{U}_i \cos(\delta v) + \frac{\pi}{2} \hat{V}_i \sin(\delta v) \right]}_{\omega \text{ frequenza}} A = \omega$$

Moto in curva di Rozowski (4.1)

Dalle ipotesi di Rozowski si ottiene l'equazione

$$\frac{U^2}{R} = \rho \frac{\partial h}{\partial n} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v^T \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

in cui si bilanciario l'effetto centrifugo, l'indclinazione della superficie libere ed il moto secondario.

L'attore morfodinamico e' la tensione al fondo in \hat{n}

$$\tau_n = - |\underline{\tau}| \frac{y}{R} f_1 \left(\frac{D_s}{y} \right)$$

in cui $|\underline{\tau}| = \rho U_*^2$

quindi $|\underline{\tau}| = \sqrt{\tau_n^2 + \tau_s^2} \approx \tau_s$ perche' $\tau_n \ll \tau_s$.

Il coefficiente metrico della curvatura e' $h_s = \frac{ds'}{ds} = \frac{R+n}{R}$

da inserire nella IV equazione del sistema in

$$(1-p) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial \varphi_{ss}}{\partial s} + \frac{1}{h_s} \frac{\partial (\varphi_{sn} h_s)}{\partial n} \quad \text{coordinate } (s, n)$$

Per ipotesi di uniformita' e stazionarieta', si analizza

$$\frac{1}{h_s} \frac{\partial (\varphi_{sn} h_s)}{\partial n} = 0 \quad \text{quindi} \quad \varphi_{sn} h_s = \varphi_{sn} \frac{R+n}{R} = \text{costante } \hat{n}$$

Per la condizione al contorno in cui $\varphi_{sn} = 0$ ai bordi, si ottiene che $\varphi_{sn} \frac{R+n}{R} = 0$ su tutto il fondo.

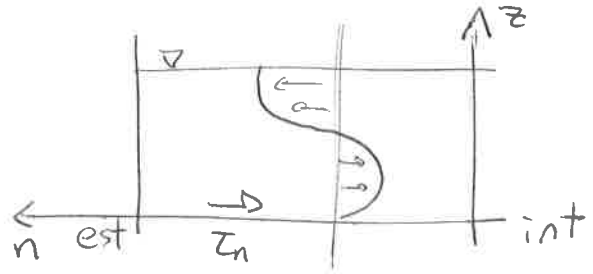
L'evoluzione morfodinamica del fondo e'

$$\frac{\varphi_{sn}}{|\varphi_{sn}|} = \frac{\tau_n}{|\underline{\tau}|} - \frac{\rho}{\sqrt{\theta}} \left(\frac{\partial \eta}{\partial n} = 0 \right) \rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial n} = \frac{|\underline{\tau}|}{\tau_n} \cdot \frac{\sqrt{\theta}}{\rho}$$

quindi, dato $\frac{|\underline{\tau}|}{\tau_n} = - \frac{y}{R} f_1 \left(\frac{D_s}{y} \right)$, si ha la definizione

$$\boxed{\frac{\partial \eta}{\partial n} = - \frac{\sqrt{\theta}}{\rho} \frac{y}{R} f_1 \left(\frac{D_s}{y} \right)}$$

Erode all'esterno della curva, deposita all'interno.



⑧ Problema forzato con piccola perturbazione (5.2)

Per conoscere l'evoluzione morfodinamica del medio, si applica una piccola perturbazione al sistema ordimensionalizzato in coordinate curvilinee.

$$\begin{cases} \frac{1}{h_s} U \frac{\partial U}{\partial s} + V \frac{\partial U}{\partial n} + \frac{1}{h_s} \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial s} + \frac{\partial \eta}{\partial s} \right) + \beta \frac{\tau_s}{Y} = 0 \\ \frac{1}{h_s} U \frac{\partial V}{\partial s} + V \frac{\partial V}{\partial n} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y}{\partial n} + \frac{\partial \eta}{\partial n} \right) + \beta \frac{\tau_n}{Y} = 0 \\ \frac{\partial(UY)}{\partial s} + \frac{\partial(h_s V Y)}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial \psi_{ss}}{\partial s} + \frac{\partial(\psi_{sn} h_s)}{\partial n} = 0 \end{cases}$$

Il parametro di curvatura $\nu = \frac{\beta}{Gr_0}$ si presenta in:

$$h_s = 1 + \nu \left[\frac{\beta}{Gr_0} \right] \cos(\lambda_m s)$$

$$\tau_n = \frac{|V|^2}{G^2} \left[\frac{V}{|V|} - \frac{1}{\beta} \left[\frac{\beta}{Gr_0} \right] Y f_1 \cos(\lambda_m s) \right]$$

Allora le variabili hanno il termine di I ordine $\nu \ll 1$

$$U = 1 + \nu U_1(s, n)$$

$$V = 0 + \nu V_1(s, n)$$

$$Y = 1 + \nu Y_1(s, n)$$

$$\eta = \eta_0 + \nu \eta_1(s, n)$$

si sostituiscono al sistema ottenendo

$$\frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y_1}{\partial s} + \frac{\partial \eta_1}{\partial s} \right) + \frac{\beta}{G^2} (2U_1 - Y_1) = A_1(n) \cos(\lambda_m s)$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial s} + \frac{1}{Fr_0^2} \left(\frac{\partial Y_1}{\partial n} + \frac{\partial \eta_1}{\partial n} \right) + \frac{\beta}{G^2} V_1 = A_2(n) \cos(\lambda_m s)$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial s} + \frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{\partial V_1}{\partial n} = 0$$

$$2f(\theta) \frac{\partial U_1}{\partial s} + \frac{\partial V_1}{\partial n} - \frac{2}{\beta \sqrt{\theta}} \frac{\partial^2 \eta_1}{\partial n^2} = A_4(n) \cos(\lambda_m s)$$

Se si considera la sola parte omogenea, il problema ha l'unica soluzione nel punto di risonanza (β_R, λ_R) ; la perturbazione provoca sfasamento e, quindi, attenuazione.

Le variabili sono definite con lo sfasamento:

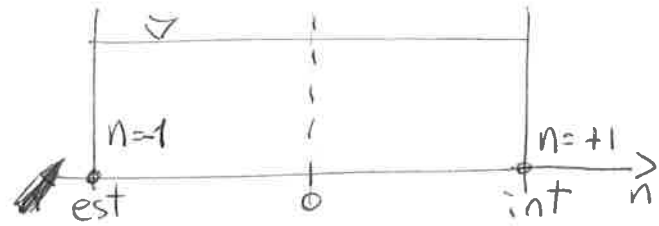
$$\begin{cases} U_i = \hat{U}(n) \cos(\lambda_m s - \varphi_u) & \text{antisimm.} \\ V_i = \hat{V}(n) \cos(\lambda_m s - \varphi_v) & \text{simmm.} \\ Y_i = \hat{Y}(n) \cos(\lambda_m s - \varphi_y) & \text{antisimm.} \\ Z_i = \hat{Z}(n) \cos(\lambda_m s - \varphi_z) & \text{antisimm.} \end{cases}$$

⑩ Tasso di spostamento nei meandri (5.6)

Il tasso di spostamento è definito dalla Bend Theory of river Meanders nel modello 2D come la differenza di velocità longitudinali alle sponde.

$$\xi = E (U_{n=1} - U_{n=-1})$$

per cui la velocità interna è maggiore di quella esterna, e



E rappresenta un tasso di erosione dipendente dal terreno

$$\xi = 2E V \hat{U}_{n=1} \cos(\lambda_m s - \varphi_0)$$

com la perturbazione

Di conseguenza varia l'angolo del meandro nello spazio

$$d\theta = \frac{(\xi_{s+ds} - \xi_s) dt}{ds} \quad \mapsto \quad \boxed{\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\xi}{ds}} \quad \text{legge di erosione}$$

Alla definizione si aggiunge un termine di accumulo, per cui l'evoluzione è

$$\boxed{\frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial \theta}{\partial s} \int_0^s \xi \frac{\partial \theta}{\partial s} ds = \frac{\partial \xi}{\partial s}}$$

Con la variazione di larghezza si ha un suo tasso:

$$\xi = \frac{\partial B}{\partial t} = 2\xi = 2E V \hat{U}_y \cos(\lambda_b x - \varphi_0) = 2E (U - U_0)$$

avendo definito $\Delta = \frac{B_{max} - B_0}{2B_0}$

così come l'erosione E, si pone la crescita A:

$$\left. \begin{array}{l} \text{per } U_n > 1, \\ \text{per } U_n < 1, \end{array} \right\} \begin{array}{l} \xi_b = \pm E (U_n - 1) \\ \xi_b = \pm A (U_n - 1) \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \boxed{\xi = \frac{1}{2} (E + A) U_n^{2sim}}$$

spostamento dell'asse

la variazione di larghezza è

$$\left. \begin{array}{l} \text{per } U_n > 1, \\ \text{per } U_n < 1, \end{array} \right\} \begin{array}{l} \xi = (E - A) U_n^{2sim} + 2E U_n^{sym} \\ \xi = (E - A) U_n^{2sim} + 2A U_n^{sym} \end{array}$$

ECOLOGIA

INTRO

- descrizione fiume e bacino
part: di alveo e zona riparia
- relazione habitat - biodiversità

FATTORI

+ IDROMORFOLOGICI

morfologia alveo, microhabitat
regime fluviale con clima
scale < speciali
temporali
vegetazione riparia

+ IDROCLIMATICI

nutrienti, attività antropiche, Temperatura,
caratteristiche acque
classificazione longitudinale fauna

COMPONENTE BIOTICA

Adattamento < fisico
comportamentale

Specie di flora e fauna in scale

PROCESSI

- Respirazione = Fotosintesi
- sistema aperto → produzione primaria
- tipi di consumatori e predatori
- catene < detrito
pescolo

CONNETTIVITÀ SPAZIALE

+ LONGITUDINALE

lungo il corso
modello spiralling

+ LATERALE

concetto di "pulsazione" di piena
fascia riparia - inondazione
funzioni fascia riparia

+ VERTICALE

zona iporrea
connessione fiume - falda

CONNETTIVITÀ
TEMPORALE

SCALA { breve - regime idrologico
lungo - evoluz. morfodinamica

Attributi ecologici del regime in tempo

4 principi per biodiversità

- eventi estremi
- ciclicità eventi
- piene
- portate alterate

INFLUENZA
ESTERNA

Sedimenti
Temperatura

Influenza sul
ciclo vitale delle
specie

ALTERRAZIONE
CONNETTIVITÀ

longitudinale
~~HYDROPAKING~~

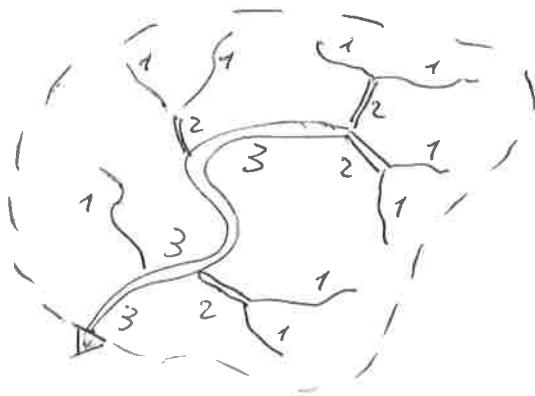
(dighe
serbatoi)

laterale - arginature
verticale - (clogging
corazzamento)

temporale (HYDROPAKING
THERMOPAKING)

① I CORSI D'ACQUA IN CONDIZIONI NATURALI

Si definiscono ASTE FLUVIALI le linee di impluvio in cui confluiscono le acque di precipitazione, convogliando nel mare. Queste costituiscono il reticolo idrografico di un bacino e sono ordinate secondo il numero di Strahler (1852) crescente verso valle.



Il FIUME è inteso come mezzo di trasporto di sedimenti, acque e organismi nel suo complesso, ma diviso in tanti tratti diversi fra loro per condizioni ambientali:
e monte ordini I-II più stretti e maggiore pendenza,
e valle ordini III-V più larghi e minore pendenza.

⇒ A monte prevale erosione di sedimento portato verso valle in cui prevale deposito.

Si definisce ALVEO la porzione di terreno occupata dal corso d'acqua, si modifica nel tempo sulla base di fattori (portata, erosione, deposito, ...). Classifica le piene come megra, morbida, piena, normale, piena eccezionale.

Il CORRIDOIO FLUVIALE è caratterizzato da porzioni di spazio differenti ~~perpendicolarmente~~ perpendicolarmente al corso del fiume:

- al centro c'è il CANALE ATTIVO costituito da uno o più canali, con meandri, laghi residuali, argini naturali, ventagli di esondazione;
- più esternamente c'è la FASCIA GOLENALE (floodplain) che

può essere sommersa dalle piene, quindi caratterizzata da un substrato fine e vegetazione erbustiva;

- successivamente si presenta la PIANA ALLUVIONALE, cioè l'area circostante sommersa dalle piene eccezionali;
- sopraelevati rispetto all'elvelo ci sono i TERRAZZI, scavati nel tempo dalle forze erosive del fiume.



Si definisce BACINO IMBRIFERO l'area di territorio occupata dal corso d'acqua piovano, invitandolo in un preciso reticolo idrografico e raccogliendolo nello stesso fiume principale. Le sue caratteristiche geomorfologiche (litologia, suolo, pendenze) determinano il sistema idrografico influenzando la velocità, la composizione chimica dell'acqua e le sostanze organiche presenti.

Le SOSTANZE ORGANICHE raggruppano le quantità di carbonio, nei detriti vegetali ed animali.

② Le INTERAZIONI BIOTICHE sono governate dai principali fattori chiave per l'ambiente acquatico:

- a. fattori isoclimatici, quali temperatura, CO_2 , pH;
- b. fattori trofici, composti da nutrienti, produttori primari e detriti vegetali;
- c. il complesso dell'habitat, come insieme di aree riparie e vegetazione.

⇒ Queste interazioni sono alla base del legame tra componenti vivente e non vivente, caratterizzando la popolazione di un ecosistema.

L'HABITAT ha fattori fisici, una scala spaziale dovuta alla morfologia fluviale ed una scala temporale dovuta all'idrologia variabile. Quindi è la combinazione di un elemento stabile (il suolo come alveo) ed uno instabile (l'acqua del canale).

Si definisce BIODIVERSITÀ la varietà di organismi viventi, nelle loro diverse forme e nei rispettivi ecosistemi. Comprende l'intera variabilità biologica: di geni, specie, nicchie ecologiche ed ecosistemi. Le risorse energetiche sono considerate la componente determinante della Biodiversità all'interno di una singola specie.

La Biodiversità è favorita con l'eterogeneità, la variabilità e la connettività.

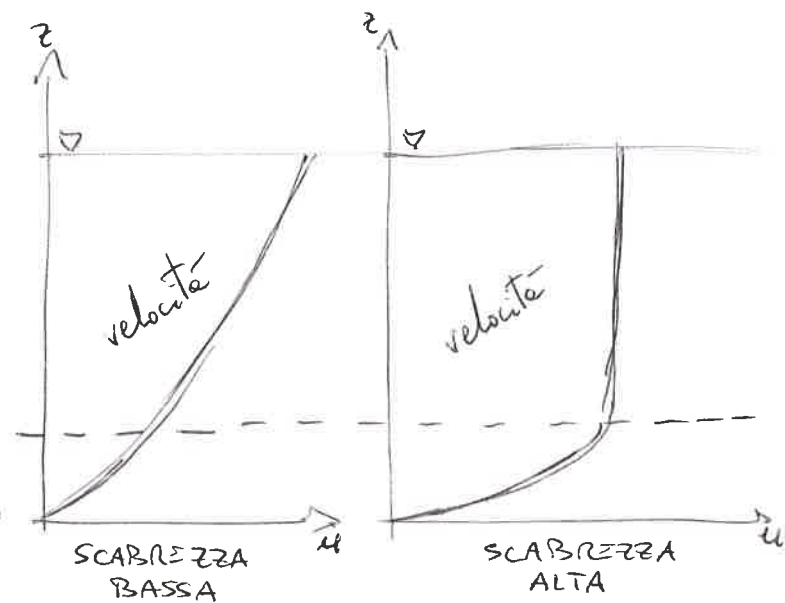
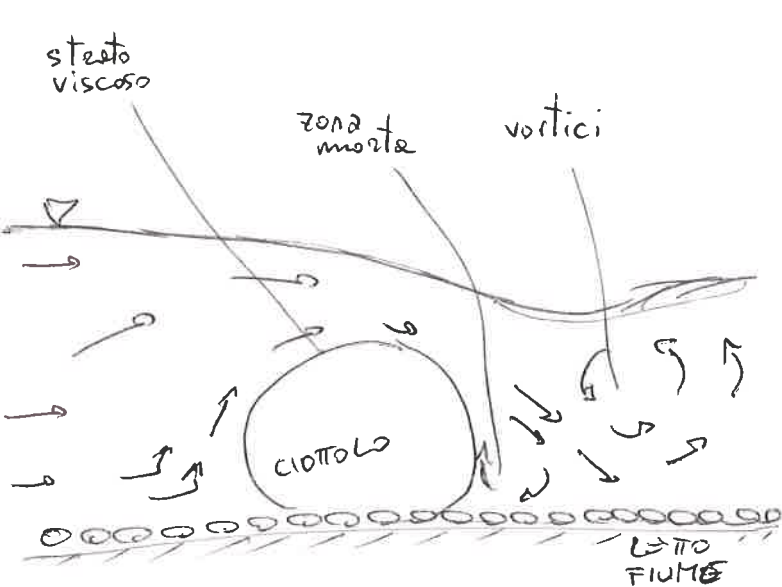
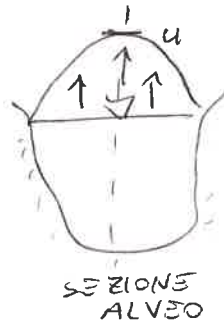
Halutet: fattori idromorfologici

Il fiume è inteso come ECOSISTEMA, ovvero il sistema che comprende tutti gli organismi esistenti in una determinata area e ambiente in cui vivono.

La MORFOLOGIA è il risultato dell'interazione tra le particelle liquide e solide con le condizioni al contorno di topografia, tipo di sedimenti e vegetazione.

Queste condizioni variano nello spazio per adattamento del substrato fluviale, dovuto alle diverse granulometrie e al continuo fenomeno di erosione e deposito.

Le VELOCITÀ variano specialmente anche nelle più basse scale, dovuta alle scabrezze dell'alveo.

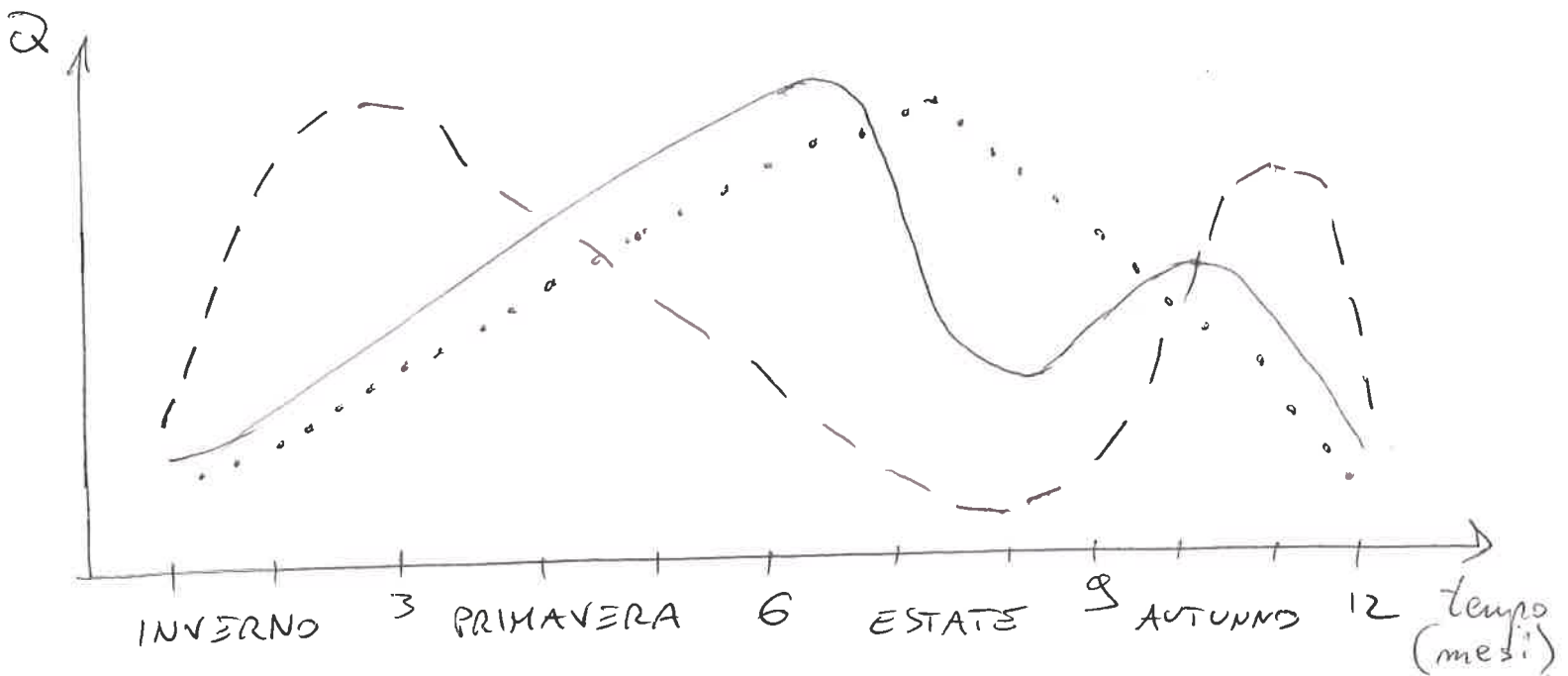


Nelle scale più piccole, si creano micro halutet diversi; per variazione di velocità, creando un'elevata diversità biologica e migliorando la "qualità" del fiume.

③ Il regime fluviale

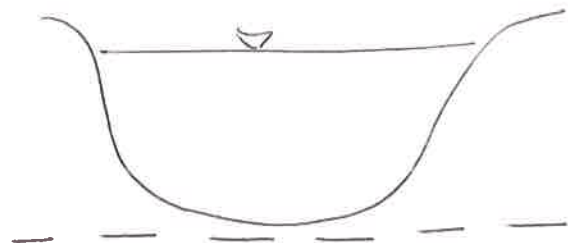
Il regime fluviale determina la variazione temporale di un ecosistema, in particolare durante l'anno per le diverse stagioni, in base alle località.

REGIMI: pluviale, pluvionivale, nivoglaciale

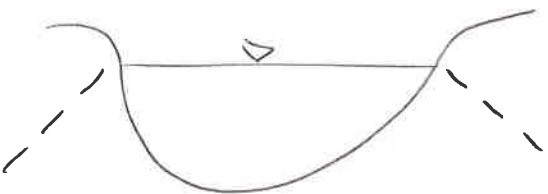


Alcuni fiumi sono in relazione alle ACQUE SOTTERRANEE (falde) che scambiano acqua con l'ambiente lotico grazie alle zone iporreiche.

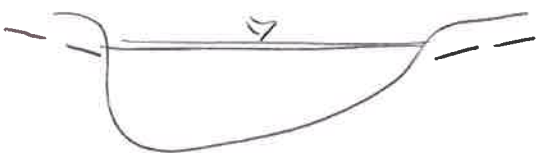
FIUME EFFIMERO, in climi aridi, con acque solo dopo forti precipitazioni.



FIUME INTERMITTENTE, scompare nella stagione più secca per abbassamento della falda.



FIUME PERENNE, sempre fornito d'acqua per buona connessione con la falda.



L'ecosistema globale viene analizzato ~~studato~~ tramite diverse scale spaziali e temporali.

RETICOLO IDROGRAFICO	CORSO D'ACQUA	TRATTO FLUVIALE	STABILE BUCHE e RASCHI	MICRO HABITAT
10^3 m	10^2 m	10 m	1 m	10^{-1} m
10^6 anni	10^4 anni	10^2 anni	1 anno	10^1 anni

L'ETEROGENEITÀ dei tratti permette una buona diversificazione delle specie, per svolgere tutte le attività degli stadi vitali. Una buona eterogeneità del substrato permette un'elevata eterogeneità della biosfera, quindi maggior numero di organismi viventi.

La connettività ~~su~~ diverse scale di questi elementi favorisce i cicli vitali delle specie. I pesci hanno funzioni ~~quotidiane~~ QUOTIDIANE (alimentazione e riposo) a piccole scale locali, funzioni CRITICHE (rifugio e riproduzione) a grande scala.

La copertura vegetale influisce gli habitat su varie scale, regola le piene riducendo i picchi e le magre, migliorano la qualità dell'acqua.

L'interazione con la vegetazione garantisce una buona connettività laterale con la floodplain, favorendo lo scambio di organismi e, quindi, l'eterogeneità.

④ I fattori idroclimatici

La QUALITÀ DELL'ACQUA SUPERFICIALE è in funzione del carico naturale ed antropico. Il primo è dovuto dalla chimica dell'acqua meteorica e dalle caratteristiche ecologiche del bacino; il secondo racchiude le attività dell'uomo vicino il reticolo idrografico.

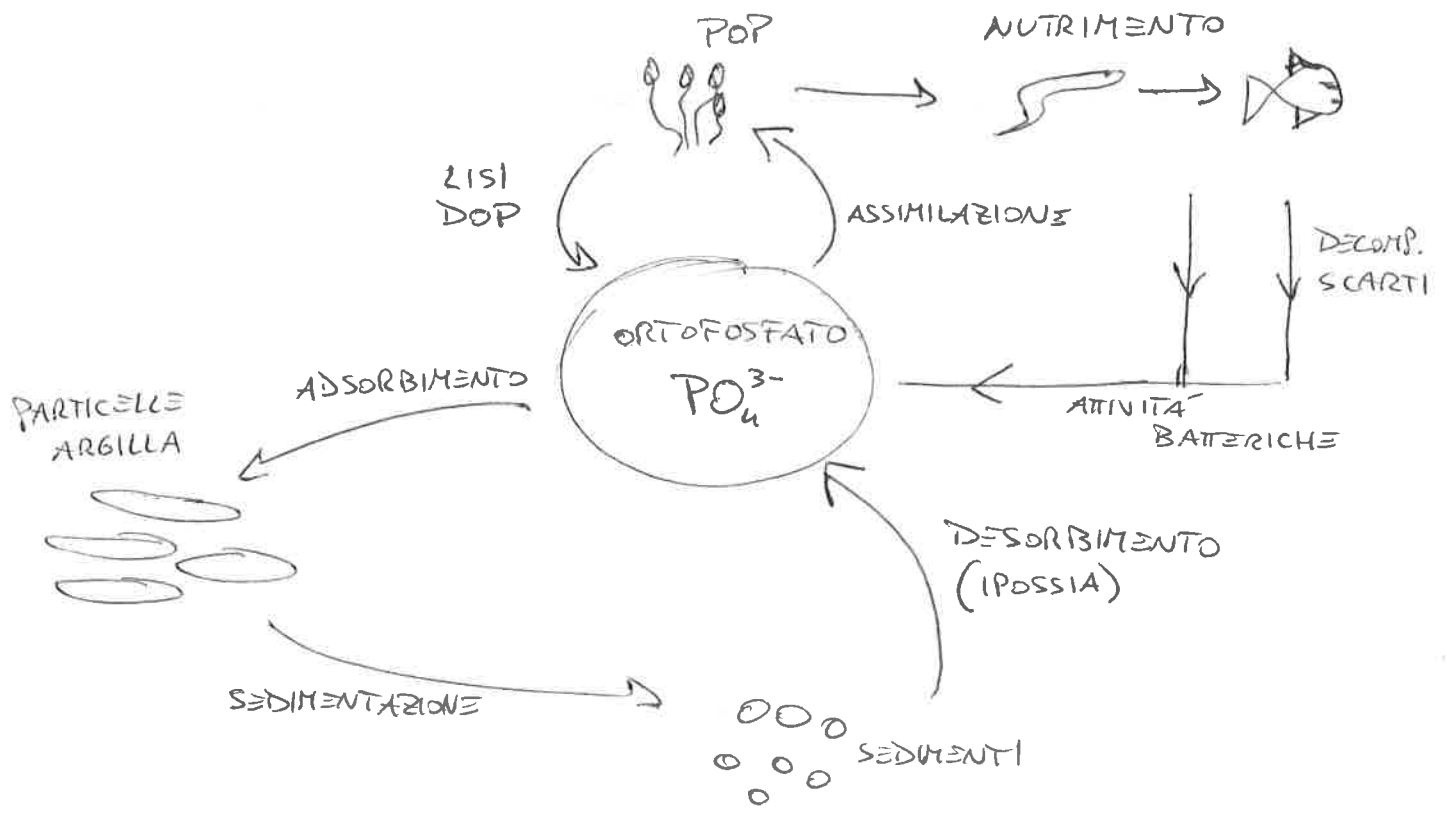
le caratteristiche biocchimiche dell'acqua vengono risentite a valle per effetto del trasporto fluviale, determinando gli elementi ecosistemici: ioni, nutrienti (azoto, fosforo e potassio), elementi gassosi, materiale organico ed inorganico.

Gli elementi sono valutati attraverso misure parametriche puntuali, come la concentrazione ionica [mg/L], ~~la~~ la conduttività elettrica [$\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$], il pH, la durezza [$^\circ\text{F}$], la presenza di solidi sospesi [mg/L] e i nutrienti (P, N).

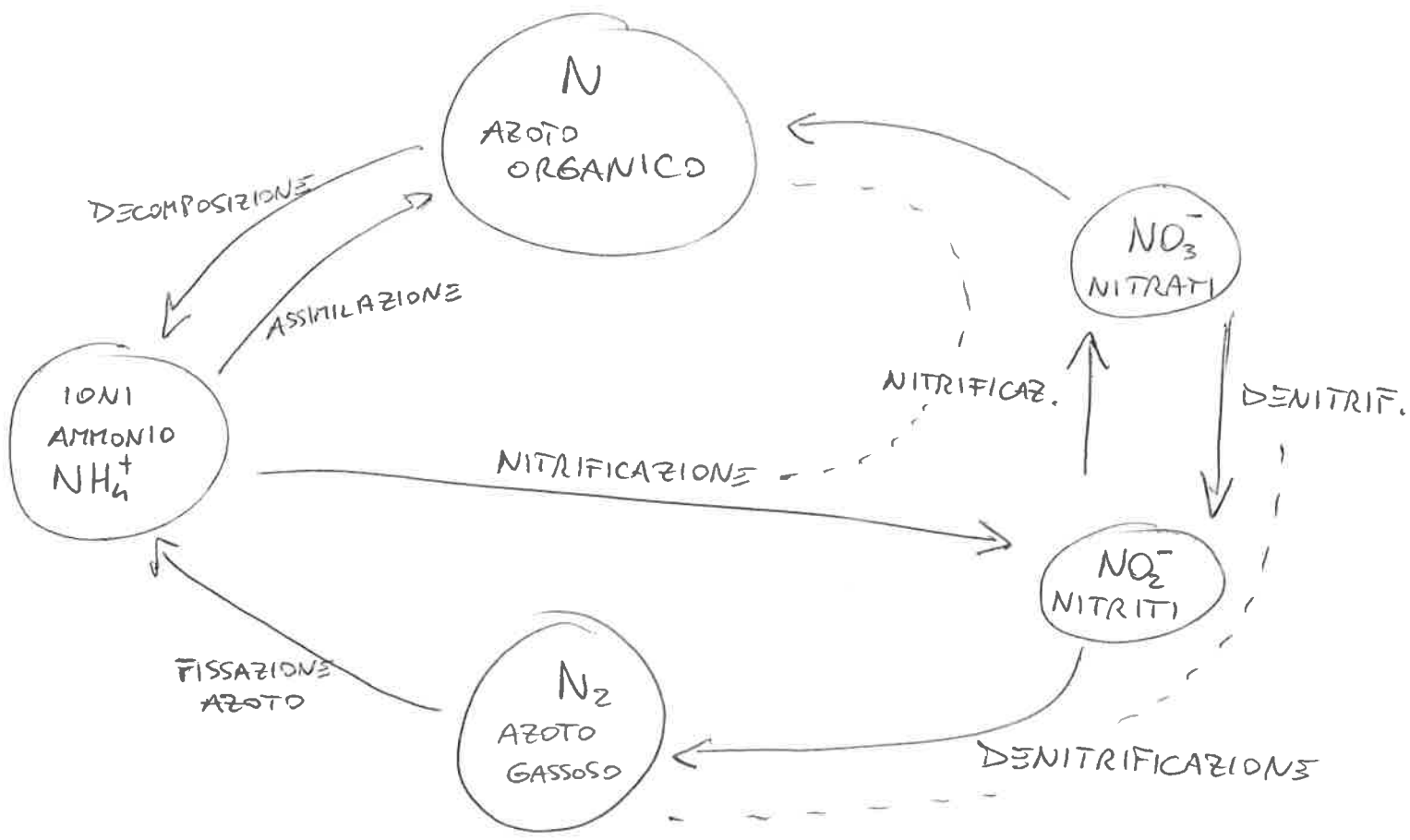
I NUTRIENTI sono alla base della formazione di proteine nella fauna. Uno scompenso o uno squilibrio provoca gravi ripercussioni ~~nel~~ nel complesso sistema:

- Eutrofizzazione, ovvero abbondanza di nutrienti, determinando degrado ambientali per maggiore attività batterica;
- Lisotrofizzazione, ovvero scarsità di nutrienti, provocando aridità nell'ambiente e sfavorendo la connettività tra diversi sistemi.

• CICLO DEL FOSFORO P



• CICLO DELL'AZOTO N

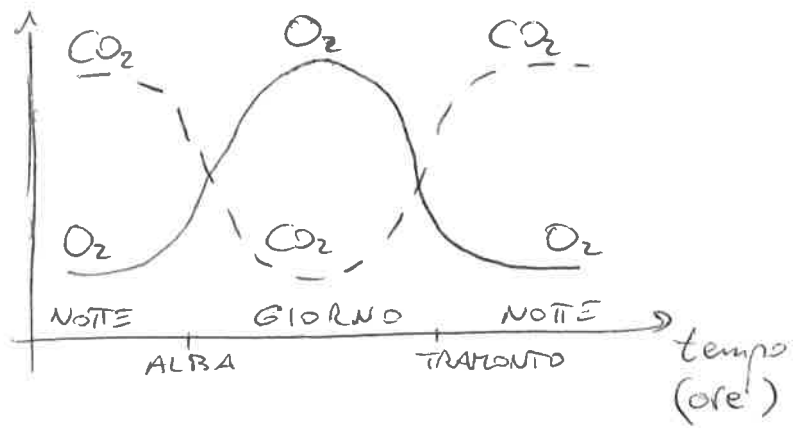


5

Tra gli elementi gassosi rientra anche l'ossigeno, presente in acque correnti grazie alla diffusione dell'atmosfera.

Il parametro fondamentale è la saturazione, raggiunta quando l'acqua presenta una quantità di ossigeno pari alla solubilità, per determinata temperatura.

Infatti la TEMPERATURA regola il livello di solubilità, abbassandolo se essa si riduce. Anche fattori come velocità e turbolenza, fotosintesi e respirazione influenzano e variano la composizione di ossigeno in base ai cicli vitali e alle attività.



Durante il giorno la composizione gassosa varia: nelle ore di luce è favorita la fotosintesi ($O_2 > CO_2$), la notte è favorita la respirazione ($CO_2 > O_2$).

La temperatura ha effetti

- DIRETTI, interagendo sui cicli vitali degli organismi pecilotermi, non in grado di regolare la temperatura corporea,

- INDIRETTI, interagendo sul sistema con una variazione delle caratteristiche ambientali, come la viscosità al fondo e l'interazione con la velocità dell'acqua.

Il fiume assume configurazioni differenti man mano che si va da monte (sorgente) a valle (foce), quindi si ha una CLASSIFICAZIONE LONGITUDINALE, all'aumentare della temperatura:

- monte (sorgente)

SALMONIDI

TROTA

epithron
metathron

- zone pedemontane

CIPRINIDI A
DEPOSIZIONE
LITOFILA

TEMOLO

ipithron

- pianura (meandri)

CIPRINIDI A
DEPOSIZIONE
FITOFILA

BARBO

epipotamon

- valle (foce)

MUGILIDI

ABRAMIDE

metapotamon
ipopotamon

⑥ LA VITA NEI SISTEMI FLUVIALI E ORGANIZZAZIONE FUNZIONALE DEI SISTEMI LOTICI

Di un ecosistema, la COMPONENTE BIOTICA è la parte rappresentata dagli organismi animali e vegetali divisi in 3 categorie: produttori primari, consumatori e decompositori.

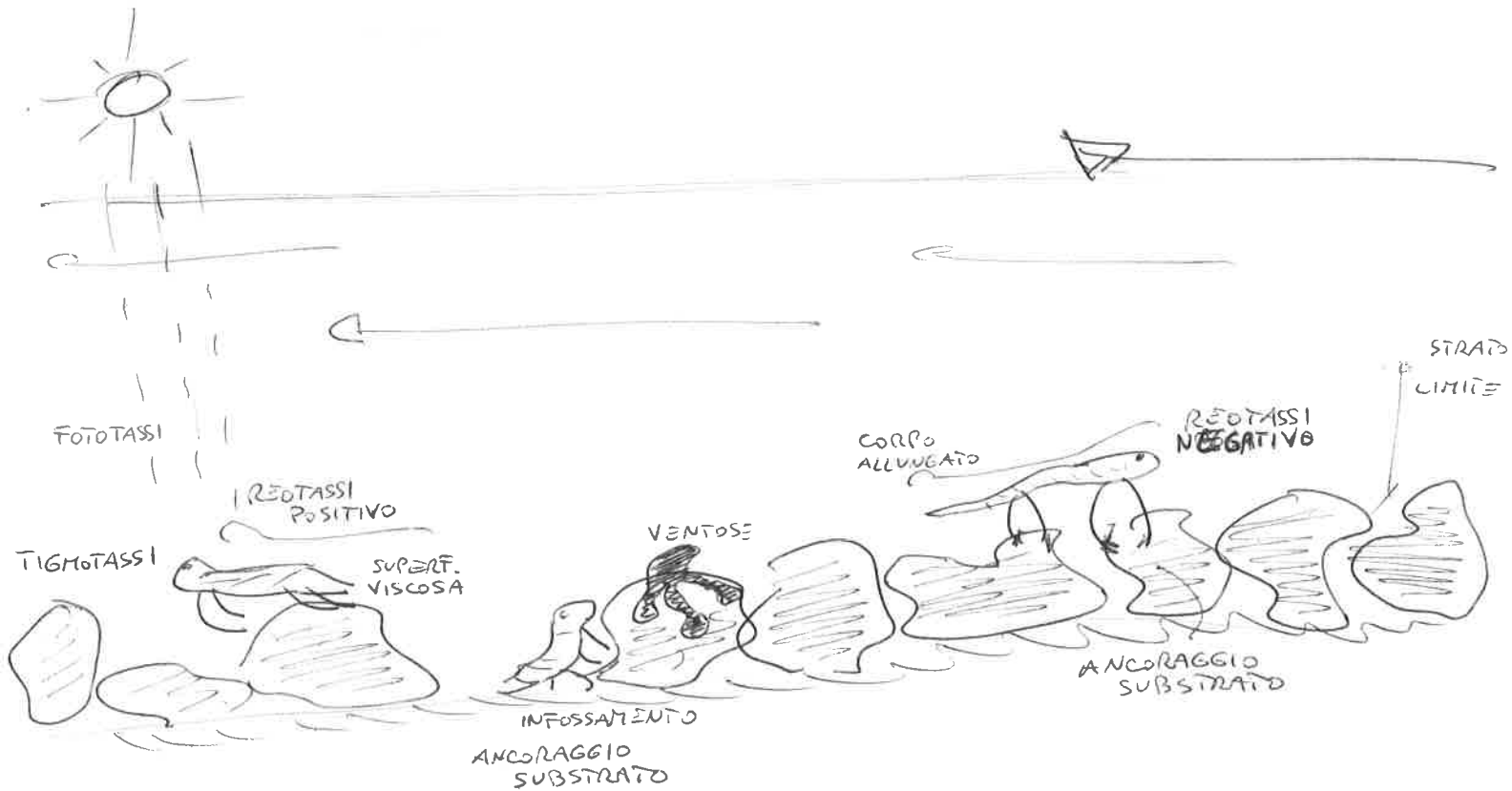
A causa della corrente dell'acqua, questa si adatta incrementando la biodiversità - la corrente stessa modifica i sistemi fluviali diversificando gli habitat -

L'interazione tra habitat e biodiversità è alla base del funzionamento e degli equilibri per un ecosistema -

Esistono tecniche di ADATTAMENTO del biotopo alle forze della corrente acquatica:

- ancoraggio al substrato, tramite "rizoidi" diffusi in alghe e funghi e altre tallofite;
- colonizzazione nello strato limite, essendo per definizione di maggior scabrezza e velocità più basse;
- dentelli o ventose, organi capaci di aderire al substrato;
- superfici inferiori viscosi, riducendo l'attrito e la scabrezza del fluido;
- forme del corpo, modificate per favorire la fluidodinamica;
- reotassi, la capacità di un organismo di muoversi in risposta alla corrente, positive (pro-corrente) o negative (contro corrente);
- tigmotassi, cambiamento della direzione di movimento determinato da uno stimolo meccanico tattile;
- fototassi, meccanismo per cui un organismo è in grado di reagire ad uno ~~stimolo~~ stimolo luminoso, modificando la propria posizione;

- infossamento, l'organismo trova riparo in una fosse del substrato.



La componente biotica dell'ecosistema viene divisa in classi in base alla funzione e al ruolo che assumono.

1. Componente planctonica, composta dal Plancton che può essere zooplancton (rotiferi, protozoi e crostacei) o fitoplancton (diatomee e alghe verdi) - Questi si lasciano trasportare dalle correnti e sono alla base della catena alimentare.
2. Necton, complesso degli animali capaci di muoversi attivamente in acqua, come cefalopodi, pesci migratori, animali pelagici (stenocalimi e stenotermiti) che si alimentano di plancton.
3. Benthos, parte della meiofauna che sono commessi al substrato. È composta da zoobenthos (macroinvertebrati) e da fitobenthos.

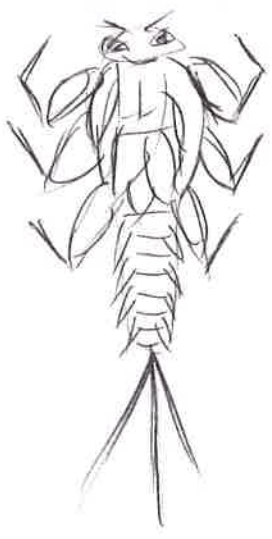
- ④
4. Batteri, compongono la microfiora, quindi costituiscono il biofilm sulle rocce e radici. Si trovano in sospensione, negli interstizi e sulle superficie del substrato.
 5. Protozoi, organismi eucarioti unicellulari o coloniali.
 6. Funghi, unicellulari, come ifomiceti che decompongono la materia organica per rottura delle cellule.
 7. Alghe, sono i principali produttori primari; costituite da crisofite, euglenofite, clorofite, rodofite, diatomee. Si classificano in fitoplancton se in acqua, periphyton se nel substrato.
 8. Licheni, composti dalla simbiosi di un fungo ed un cianobatterio (eterotrofo ed autotrofo). Sono caratterizzati da un tello e vengono classificati basandosi sulla tassonomia della specie fungina.
 9. Briofite, note come muschio, formano un ottimo microhabitat per riparo e nutrimento. Il loro habitat ideale è caratterizzato da acque fredde con elevate CO_2 ed ombra, substrato grossolano, tipici ambienti di basso ordine fluviale.
 10. Macrofite acquatiche, componente vegetale grossolana, che cresce sul fondo, e spesso emersa. Costituite da fanerogame, pteridofite, briofite ed alghe. Diffuse nella parte intermedia dei fiumi per l'elenco di velocità/ombreggiatura e monte e profondità/torbidità a valle.
 11. Vegetazione riparia, più grossolana sulle sponde, con il ruolo di connessione laterale con le floodplain.

L'insieme della FAUNA FLUVIALE è composto da:

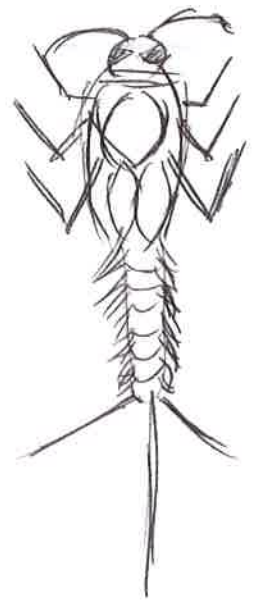
1. Meiofauna, con dimensioni comprese tra 63 e 100 μm e molto eterogenei. Vivono in interstizi del substrato, e nelle zone iporreica.
2. Macrofauna, invertebrati di dimensioni fino a 500 μm come insetti e larve. Sono detti anche macroinvertebrati, e classificati in varie specie. Compongono la principale fauna ittica.
3. Insetti acquatici, comprendono ~~se~~ numerose classi e possono vivere sia fuori che dentro l'acqua. Di questa fanno parte i plecoteri, gli efemeroteri, i tricoteri, i coleteri, gli odonati, i ditteri, i ciclostomi.
4. Pesci, cartilaginei (condritti) oppure ~~ost~~ ossei (osteti), a loro volta suddivisi in sottoclassi ed ordini.
5. Amfibi e rettili, diffusi in ambienti umidi e nelle aree riparie dei boschi.
6. Uccelli, tipicamente quelli con un ciclo vitale adattato all'ecosistema fluviale per riparo e nutrimento.
7. Mammiferi, con funzione di adattamento tra l'ambiente ripario e il corso del fiume.

8) Tabelle Componente biotica con adattamento (fauna)

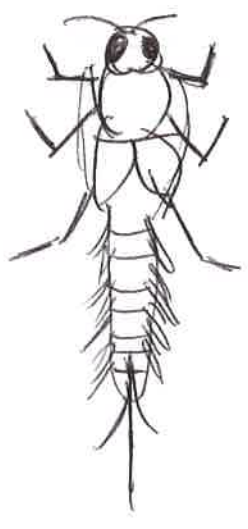
NINFE
PIATTE



NINFE
STRISCIANTI



NINFE
NUOTATRICI

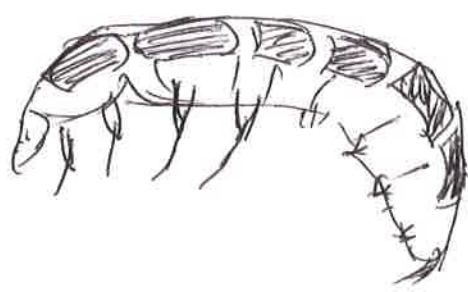
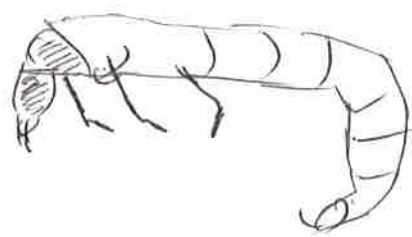
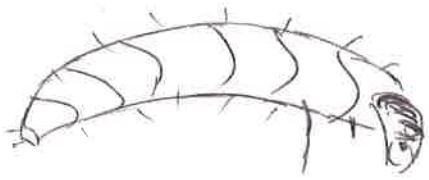


NINFE
SCAVATRICI



TRICOTTERI

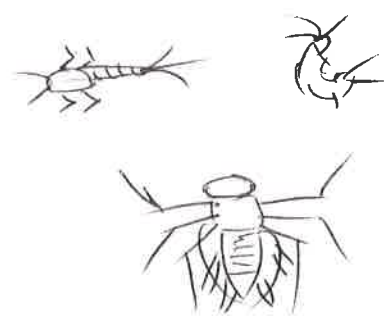
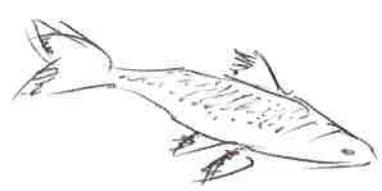
Unghie, Pigopodi, Mammelloni, Reti, Zavorre



ZOPLANCTON

NECTON

BENTHOS



PLECOTTERI



due unghie Tarsali
No branchie addome
due cerci

figli: NINFE

EFEMEROTTERI

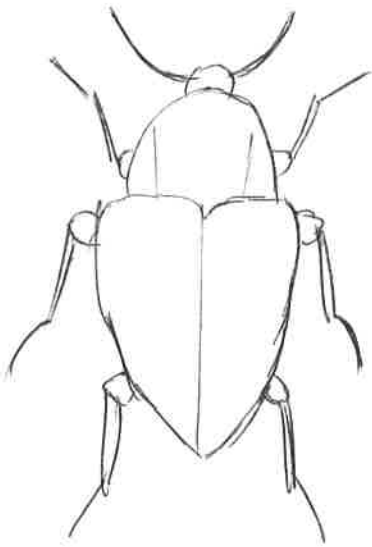


un' unghia
tarsale
51 branchie
addome

figli: LARVE

tre cerci

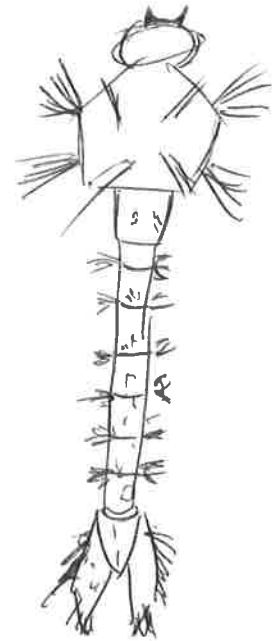
COLEOTTERI



ODONATI



DITTERI



CICLOSTOMI



9) I PROCESSI DEI SISTEMI LOTICI

Lo scambio energetico avviene tramite la RESPIRAZIONE per gli animali e la FOTOSINTESI per i vegetali.

- Respirazione, grazie al glucosio produce energia rilasciando anidride carbonica



- Fotosintesi, grazie all'anidride carbonica produce energia rilasciando ossigeno



Il glucosio ($C_6H_{12}O_6$) per la respirazione è prodotto per via autotrofica, dalla fotosintesi dei vegetali, oppure dall'alimentazione per via eterotrofica. L'energia prodotta nella respirazione permette il movimento, le sintesi, la crescita e la riproduzione di ogni specie.

Il fattore fondamentale per la fotosintesi è la luce solare, che permette la formazione di glucosio.

In un ecosistema, le tre classi principali sono:

- i produttori, che sintetizzano sostanze organiche o inorganiche, autotrofi;
- i consumatori, che si nutrono di sostanze organiche, eterotrofi;
- i decompositori, che degradano le molecole organiche, eterotrofi.

Nei sistemi fluviali, i produttori sono rappresentati dalle macrofite, che si sviluppano solo nella parte centrale del torrente o corso d'acqua. Più a monte si ha un'eccessiva velocità dell'acqua e più a valle si ha profondità e torbidità.

Mentre i consumatori primari sono insetti e lumache, i secondari sono i pesci.

Quindi i fiumi sono strutturati sulla CATENA di DETRITO, cioè dei detriti vegetali portati dalla corrente e dagli eventi meteorici.

Gli ambienti lotici sono fortemente influenzati dal flusso di materia ed energia che arriva dal tratto di monte e dal bacino drenato, costituendo un tipico sistema ecologico aperto.

In base alla dimensione, le sostanze organiche sono classificate

- materiale organico autoctono
- Coarse Particulate Organic Matter (CPOM) $> 1 \text{ mm}$
- Fine Particulate Organic Matter (FPOM) $0,45 \mu\text{m} \div 1 \text{ mm}$
- Dissolved Organic Matter (DOM) $< 0,45 \mu\text{m}$

In particolare, il materiale prodotto (DOM) autoctono alimenta la CATENA del PASCOLO, mentre il materiale ~~alloctono~~ trasportato alloctono (FPOM) alimenta la CATENA del DETRITO.

Durante l'anno si hanno cicli diversi di materiale per la stagionalità della vegetazione.

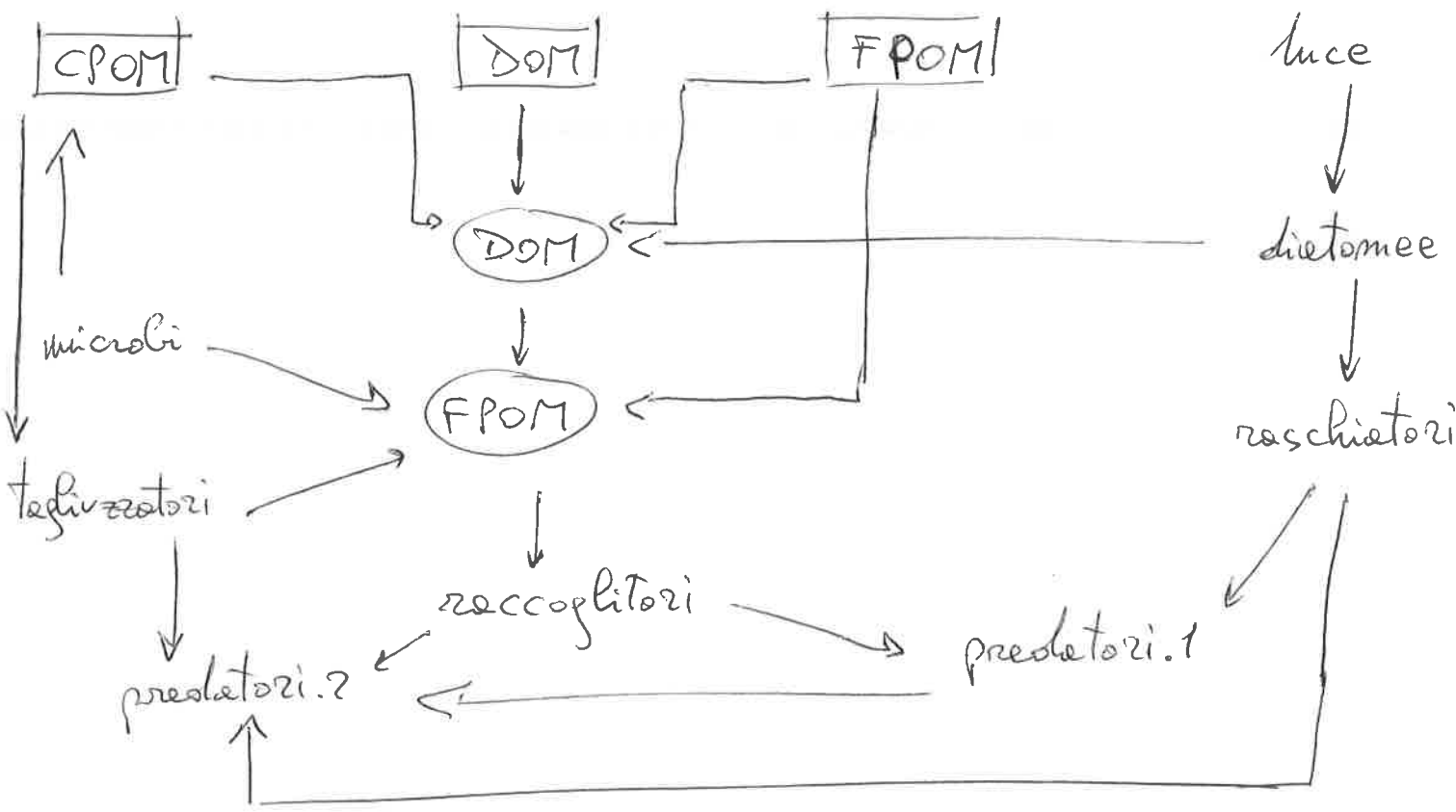
(10)

Le specie animali vengono raggruppate in base alle loro funzioni nell'ecosistema, attraverso una classificazione trofica-funzionale, o anche Functional Feeding Groups (FFG):

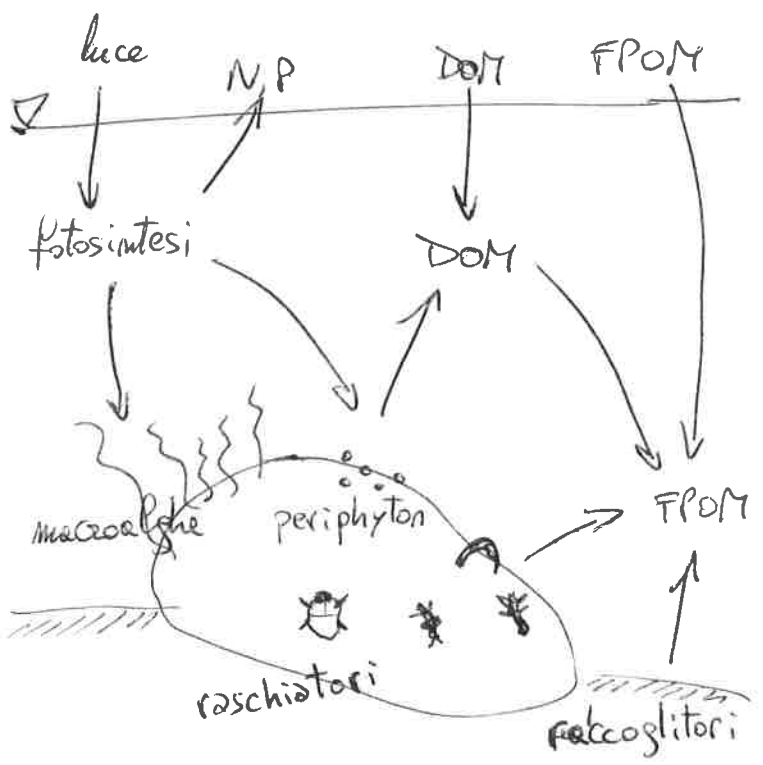
- <u>Tagliareccatori</u> shredders	detrivori erbivori	FPOM/CPOM
- <u>Reschiatori</u> scrapers	erbivori detrivori	DOM
- <u>Raccoglitori</u> collectors	detrivori	FPOM
- <u>Filtratori</u> filterers	detrivori	
- <u>Predatori</u> predators	canivori	

Nella catena del pascolo il perfiton viene utilizzato come alimen-
to del macrobenthos reschiatore, può essere fonte di ~~nutri-~~
~~zione~~ sostanza disciolta in aggiunta alla materia organica
all'interno del sistema.

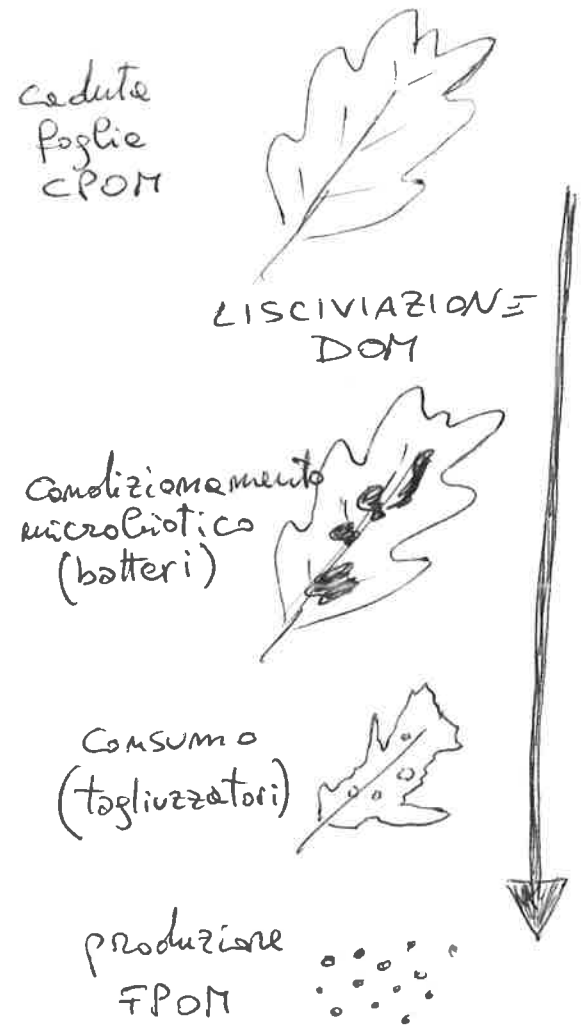
La catena del detrito segue la decomposizione dei vegetali
attraverso le fasi di caduta, lisciviazione da funghi e
batteri, il condizionamento microbico per gli inverte-
brati trituratori ed il consumo da animali.



CATENA DEL PASCOLO



CATENA DEL DETRITO



11) LA CONNETTIVITÀ SPAZIALE

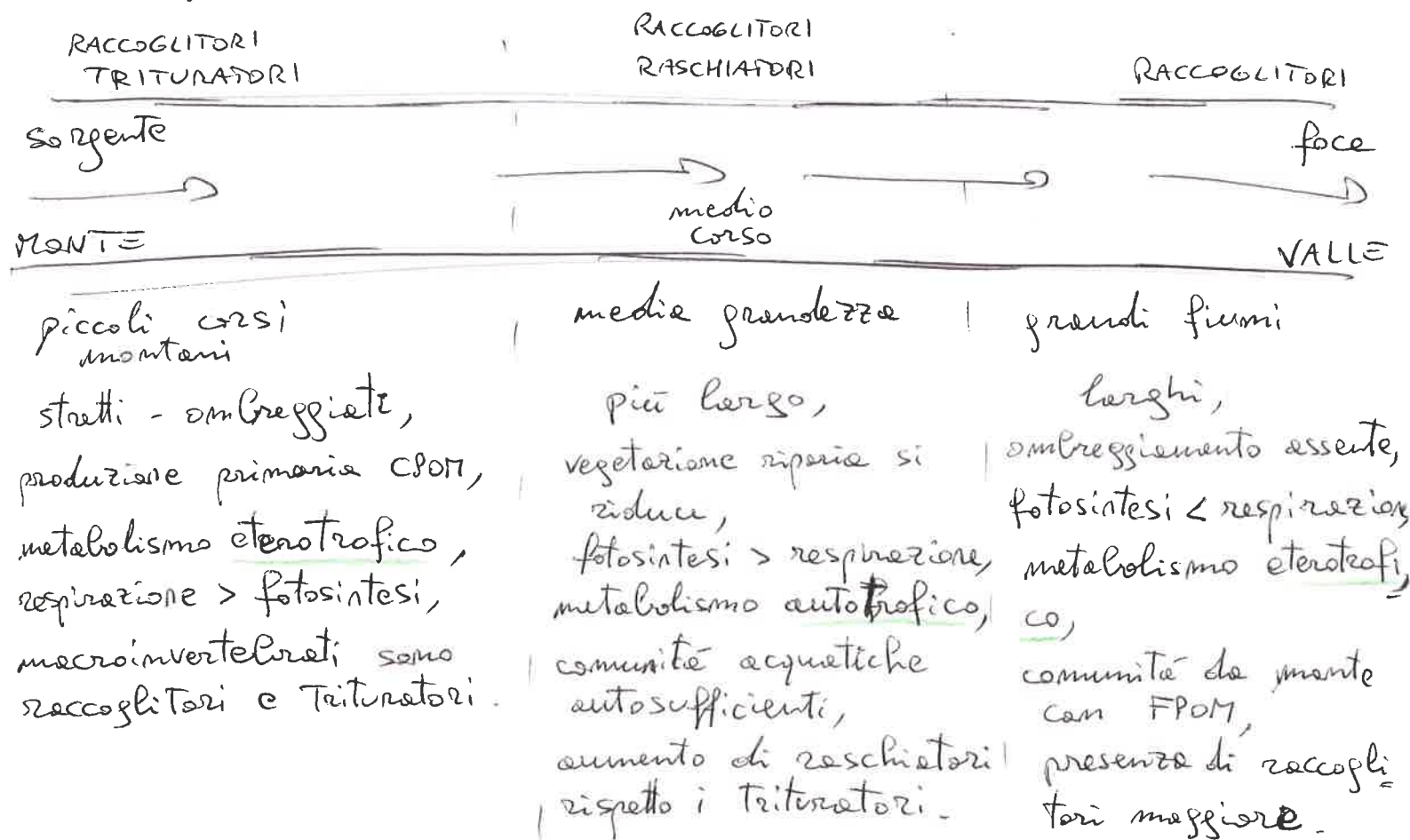
I processi energetici aperti sono in relazione con gli altri tratti fluviali e con le aree circostanti. Si ha una connettività complessiva in quattro dimensioni:

- longitudinale, lungo il corso d'acqua,
- laterale, con le floodplain, ~~le~~
- verticale, con le falde sotterranee,
- Temporale, su scale a breve o lungo termine.

In ogni caso, una buona connettività favorisce lo scambio energetico e di materia, migliorando la biodiversità. I processi biologici, morfologici e chimici saranno in ~~essenti~~ assenza di ostacoli.

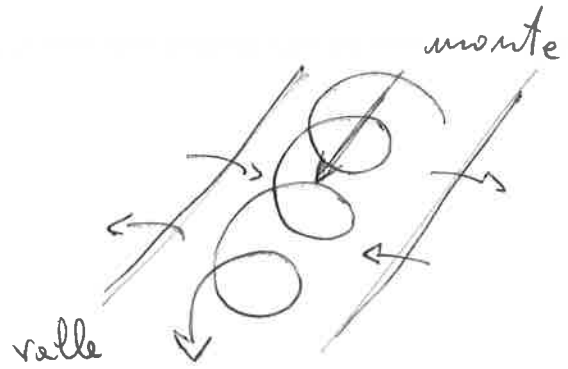
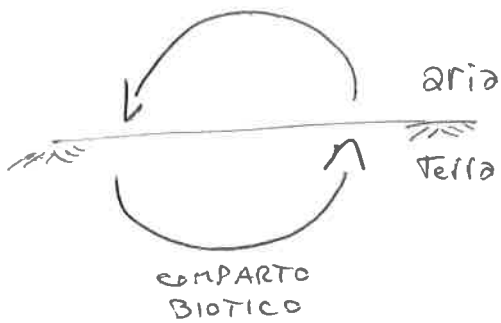
Connettività longitudinale - River Continuum Concept

Per il principio di continuità, quello che accade a monte influenza il metabolismo e valle.

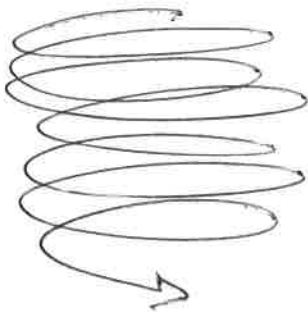


Fenomeno di SPIRALLING: concetto di trasporto accoppiato di materia ed energia nei sistemi fluviali.

CAMPARTO
ABIOTICO



Secondo il modello, la spirale descrive il percorso di un atomo di materia che viaggia da monte verso valle, scambiando con i sistemi circostanti. Più sono la densità e la grandezza delle spire, maggiore è la biodiversità e l'eterogeneità del corso d'acqua. Queste interferenze dipendono dall'entità del trasporto: la velocità della corrente, l'efficienza dei dispositivi di ritenzione, favorendo l'assunzione dei nutrienti.



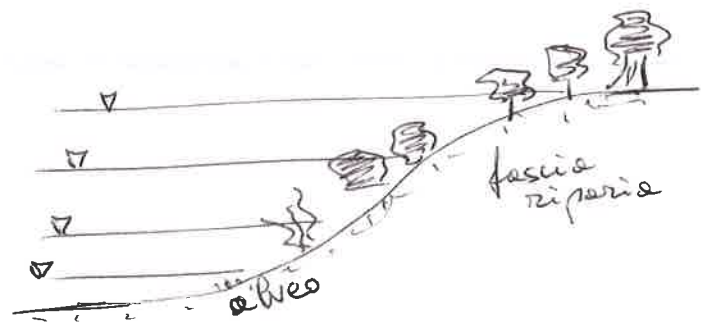
sistema ricco,
con ritenzione e
biodiversità



sistema povero,
veloce ed omogeneo.

12) Connettività laterale - Flood Pulse Concept

La connettività laterale è analizzata col modello delle pulsazioni di piena, collegando l'alveo alla floodplain.



La vegetazione riparia ha una forte dipendenza con l'entità e la ripetitività delle piene, quindi c'è una relazione anche con il fattore temporale.

La connessione può essere PERMANENTE, con il collegamento diretto delle aree più vicine, oppure EPISODICA, in caso di piene temporanee.

Quindi si definisce un ECOTONO RIPARIO la zona di transizione tra ecosistemi acquatici (alveo) e terrestri (piene). Rappresenta tutta la fascia laterale al fiume con grande eterogeneità ed un carattere di resilienza alle inondazioni.

Una caratteristica fondamentale è la successione di microhabitat trasversali, differente per l'entità della piena che inonda la floodplain.

Le funzioni principali della fascia riparia sono:

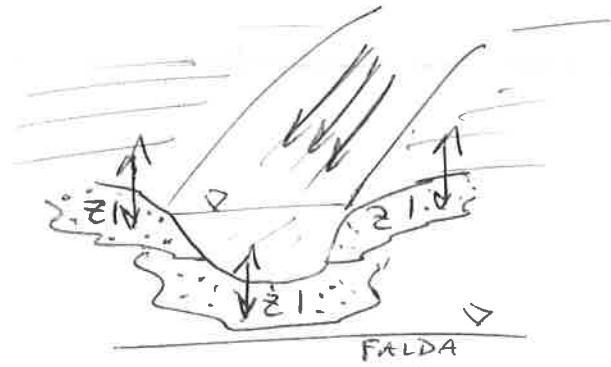
- controllo del funzionamento trofico
 - ↳ produzione primaria
 - ↳ rapporto fotosintesi / respirazione
 - ↳ regolazione struttura comunità acquatiche
- fascia tempore / protezione
 - ↳ filtro per sedimentazione o infiltrazione, favorito dalle piante che acquisiscono i nutrienti

- protezione da piene
 - ↳ inondazioni pilotate in aree sicure
 - ↳ fasce "frangi-piène"
- habitat per fauna selvatica
 - ↳ rotte migratorie
 - ↳ corridoi ecologici
- Biodiversità vegetale, grazie ~~alla~~ all'ecotono ripario
- regolazione temperatura
 - ↳ cicli vitali
 - ↳ qualità cibo
 - ↳ ossigeno
- consolidamento e stabilizzazione sponde
 - ↳ coesione suolo, con le radici
 - ↳ riduzione velocità aumentando la scabrezza
- funzione presagistica

Il processo di DENITRIFICAZIONE è anaerobico e velocissimo, oltre che irreversibile per l'azoto liberato in aria. È utile all'assorbimento di elementi chimici nocivi delle floodplain grazie alla vegetazione riparia ~~ed all'esso~~ e al terreno poroso. Evita l'immissione di tossicità e sovraccarico di azoto e ~~potassio~~ ^{fosforo} nei cicli vitali dell'alveo in caso di ritiro della piena. Quindi si riduce il fenomeno di eutrofizzazione.

13) Connettività verticale

La connettività verticale è data dall'efficienza della zona iporreica, ovvero la zona di sedimenti saturi d'acqua con mescolamento di nuove acque del fiume e della falda.



Lungo il corso d'acqua si definisce il CORRIDOIO IPORREICO, capace di scambiare col sottosuolo e la falda sotterranea - il trasporto avviene grazie allo scambio alternato con upwelling, acqua entra nella zona iporreica, ed il downwelling, acqua esce dalla zona iporreica -

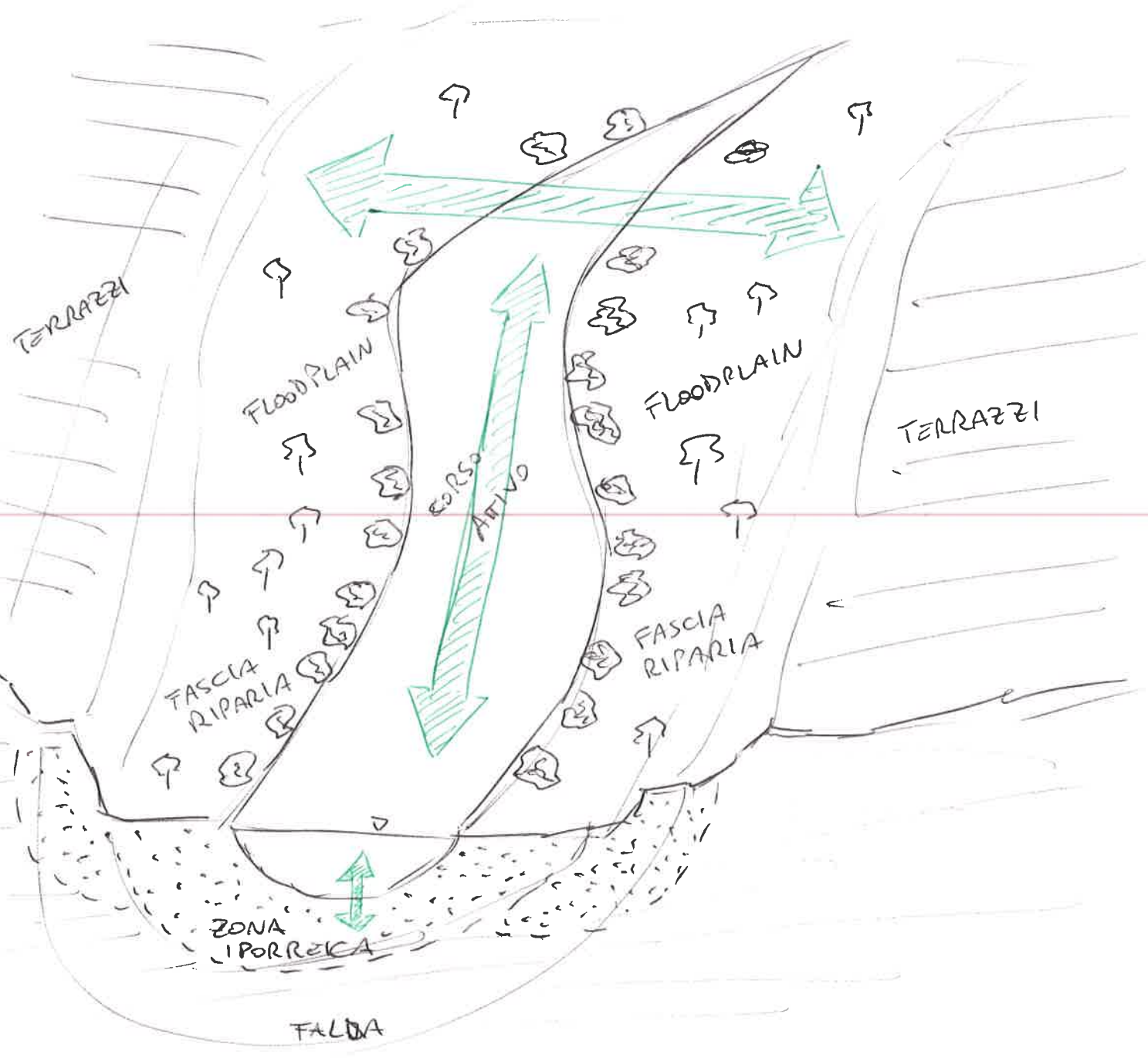
La fauna presente si nutre di DOM e non necessita di luce, essendo in profondità; utilizza la zona iporreica anche per riparo da alluvioni o seche, per la cova di uova e larve e per la migrazione al variare delle stagioni e condizioni ambientali.

La zona iporreica viene classificata in scale spaziali differenti

BACINO	—	ritenzione idrica
TRATTO	—	nutrienti e gas
SEDIMENTO	—	processi chimici

Le FUNZIONI ECOLOGICHE sono in generale di cuscinetto per la connessione tra ambiente acquatico e vegetativo ripario, quindi favorire l'ecotono e la biodiversità, l'autodepurazione delle sostanze, rifugio della fauna, la trasformazione dei nutrienti e la produttività primaria.

L'approccio pluridimensionale da regime della vulnerabilità dell'intero ecosistema all'interposizione di barriere che ne interrompano la continuità in ciascuna delle direzioni spaziali.



14) LA CONNETTIVITA' TEMPORALE

La quarta dimensione di connettività è rappresentata dal tempo, ovvero la ciclicità delle funzioni vitali rispetto alle stagionalità, quindi alla variazione di portata più o meno regolare.

L'analisi condotta è sulle due scale

- lungo termine → evoluzione morfodinamica
- breve termine → regime idrologico

Il regime idrologico è la chiave degli attributi ecologici che determinano l'integrità del sistema.

Ampiezza,
Stagionalità,
Frequenza,
Durata,
Tasso di cambiamento

→ Si descrive il NATURAL FLOW REGIME, ovvero il regime idrologico senza interventi antropici.

Risulta fondamentale avere una buona variazione del livello di portata per garantire più sistemi ecologici.

A portate elevate (piena) si ha maggiore produttività, mentre a portate basse (magra) si hanno nuove specie vegetali riparie.
L'alternanza degli eventi determinano la composizione fitocenose.

Si seguono quattro principi di crescita della biodiversità:

I PRINCIPIO: la presenza di eventi estremi; questi determinano la forma dell'alveo, attraverso il disturbo locale favoriscono la complessità dell'habitat.

II PRINCIPIO: andamento temporale degli eventi; la ciclicità e la stagionalità delle piene regolarizzano i cicli vitali delle forme.

III PRINCIPIO: le piene; favoriscono la connessione spaziale, quindi lo scambio con le zone riparie, arricchendo l'habitat.

IV PRINCIPIO: portate alterate; a causa dell'intervento antropico vengono compromesse le ~~cicliche~~ ciclicità del regime naturale, modificando l'ecosistema e favorendo le specie aliene invasive.

Integrità ecologica data dalla qualità delle acque, le fonti trofiche, l'habitat fisico e le interazioni biotiche.

* La STAGIONALITÀ indica la predicibilità degli eventi:

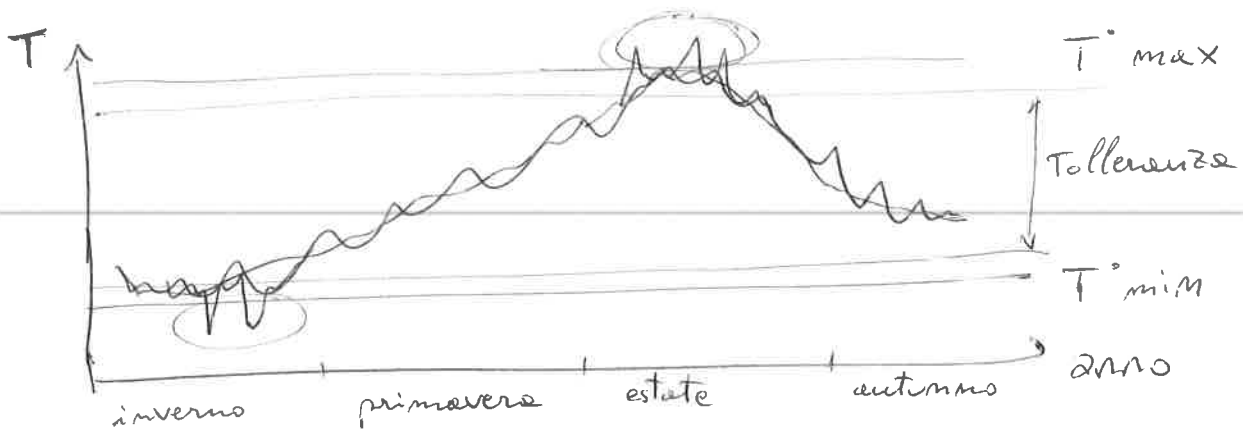
- fornisce indicazioni ambientali per le fasi dei cicli vitali;
- garantisce l'accesso stagionale alle zone umide riparie;
- fenologie delle piante sincronizzate con i regimi naturali;
- influenza della produttività delle foreste riparie.

* Il TASSO DI CAMBIAMENTO delle condizioni di portata può influenzare la persistenza e la convivenza delle specie.

15) NATURAL SEDIMENT AND TEMPERATURE REGIMES

Così come il regime di portata, anche la temperatura deve rispettare una sua naturale ciclicità. Questo è detto NATURAL TEMPERATURE REGIME ed ha un forte impatto sulla biodiversità.

La temperatura dell'acqua regola la quantità di ossigeno, allora influenza il metabolismo ed il ciclo vitale della fauna, specialmente pesci ed invertebrati ectotermi. L'oscillazione naturale durante l'anno prevede il raggiungimento di massimi e minimi di temperatura, anche valori fuori dalle medie stagionali per poco tempo.



Ad influenzare la biodiversità c'è anche la CONNECTIVITÀ dei SEDIMENTI nella loro transizione da monte a valle. Questi sono dovuti al fenomeno di continuo deposito ed erosione, quindi relativo alla morfologia fluviale. Bisogna notare che è solo qualitativamente prevedibile e non corrisponde alla portata liquida istantanea. I sedimenti hanno un forte impatto sull'habitat dell'alveo, modificandone la struttura. Perciò è utile uno studio su varie scale spaziali.

La CONNETTIVITÀ DEI SEDIMENTI descrive sia il movimento che lo stoccaggio di sedimento nei corsi d'acqua e lungo le reti fluviali. Segmenti fluviali altamente connessi minimizzano lo stoccaggio dei sedimenti, mentre caratteristiche quali valli ampie, con basso gradiente, possono creare disconnessione dei sedimenti lungo una rete fluviale tramite lo stoccaggio di sedimento.

①6 ALTERAZIONE DELLA CONNETTIVITÀ NEGLI ECOSISTEMI FLUVIALI

Si è visto come sia importante garantire una certa continuità e connessione con le aree circostanti e con il regime naturale; l'intervento dell'uomo sui fiumi sfavorisce questo equilibrio, alterando la biodiversità e i cicli vitali delle specie autoctone.

L'interruzione della connettività longitudinale è data spesso dalla costruzione di digue e serbatoi, perché bloccano la migrazione e i regimi di portata, favoriscono la dispersione delle comunità e l'incremento di malattie.



I maggiori impatti a valle sono:

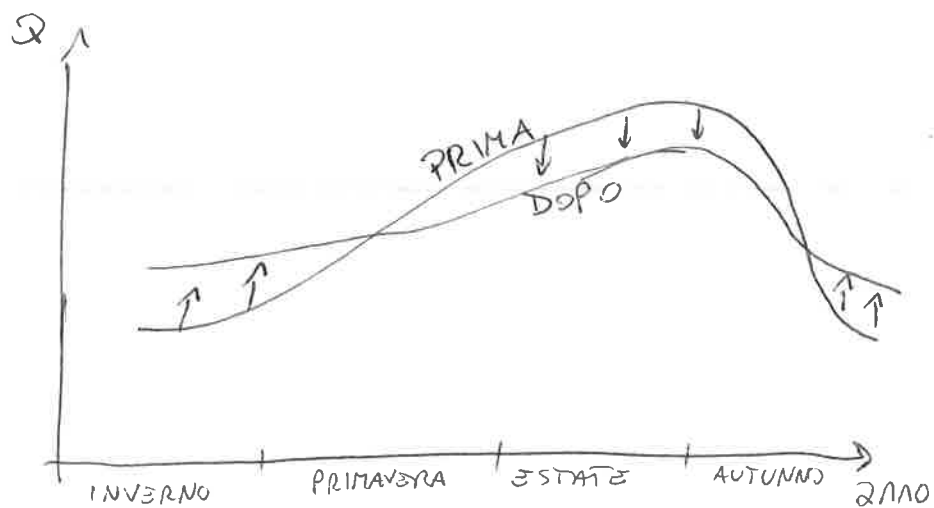
- riduzione di biodiversità
- abbassamento qualità dell'acqua
- abbassamento produzione primaria
- riduzione di fauna

Associate alle dighe ed ai serbatoi, anche le OPERE IDROELETTRICHE sono cause di forte interferenza con l'ambiente naturale.

Allo stesso modo sono sbarramenti per la fauna e la continuità longitudinale, modificando i livelli idrici, gli habitat, il corso a valle, e le condizioni di sedimentazione e temperatura.

In più bisogna tener presente del continuo CAMBIAMENTO CLIMATICO, che varia il regime idrologico tramite il riscaldamento della temperatura e lo scioglimento dei ghiacci, oltre all'incremento di eventi estremi che sfavoriscono gli equilibri degli habitat.

Le attività antropiche hanno anche effetti indiretti sulle portate. Nello storage di acque delle centrali idroelettriche si seguono 3 fasi:



- PRELIEVO, blocca la continuità e varia il regime di portata;
- STOCCAGGIO, effetti sul deflusso minimo vitale;
- RILASCIO, hydropeaking a valle.

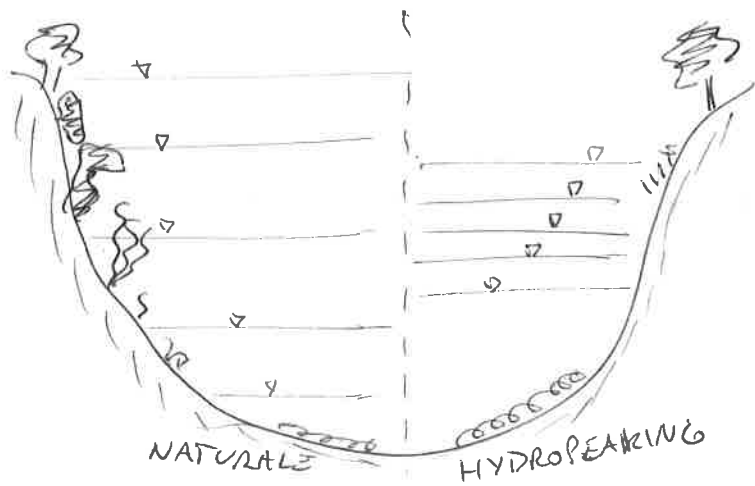
Il DEFUSSO MINIMO VITALE (DMV) è la portata minima in rilascio dalla diga, regolato in funzione del luogo e della stagionalità. Il rilascio discontinuo di acque a valle provoca l'effetto di HYDROPEAKING, cioè picchi di flusso imprevisti che impattano fortemente sull'ecosistema.

L'effetto sulle faune è il catastrophic drift verso valle. Associato a questo, il fenomeno di THERMOPEAKING è simile, abbassando la temperatura dell'acqua in estate, ~~ed~~ alzandola in inverno. Provoce il behavioral drift attivo sulle faune che migra.

Le piccole centrali idroelettriche hanno lo stesso impatto di quelle più grandi, alcune sono con o senza deviazione e con o senza storage.

Gli interventi di mitigazione sono specifici per l'hydropeaking con la gestione del corso di valle oppure la modifica del pattern del rilascio.

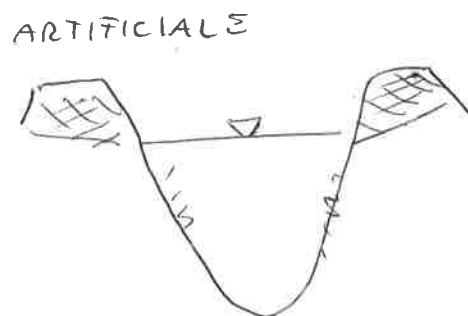
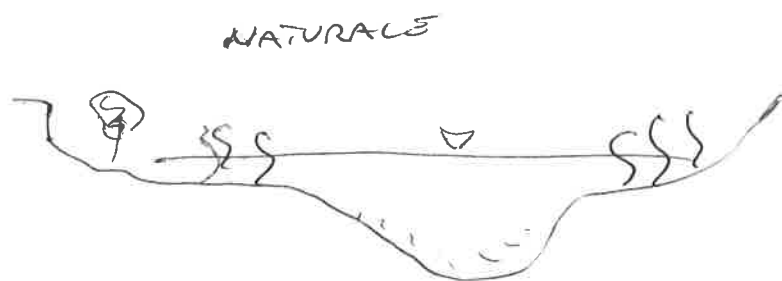
17
 L'hydropacking è anche
 causa di selettività nell'alveo.
 Riduce la variabilità del
 livello superficiale, abbassan-
 do il grado di biodiversità.



Conseguenze più gravi sulle microscale sono: la variazio-
ne della geometria d'alveo, la temperatura, la
conducibilità, il materiale sospeso, la saturatione dei
gas, ~~la~~ la trasmissione del suono, lo stress superficiale.

Gli interventi di mitigazione del thermopeaking riguardano
 il prelievo a livello variabile dal serbatoio a monte e
 l'inserimento di bacini di laminazione.

L'interruzione della connettività laterale è causata
 dagli interventi strutturali di arginatura. Questi bloccano
 le periodiche inondazioni della floodplain, utili allo scambio
 di materia ed energia per la flora e la fauna.

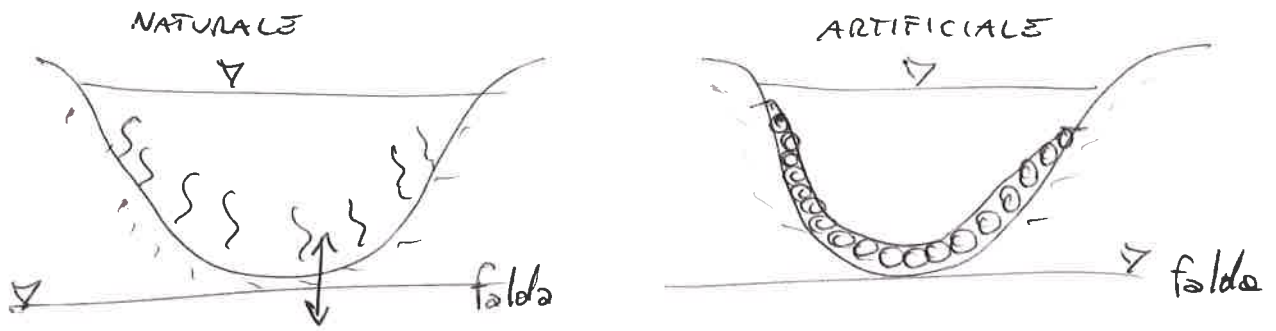


L'effetto più grande deriva dalla riduzione di biodiver-
sità, causata dall'omogeneizzazione dei tratti.

La RIVALUTAZIONE FLUVIALE tende a rimaturizzare
 il fiume, togliendo, ove possibile, le opere di interruzio-
ne longitudinale e trasversale, lasciando che l'acqua

recuperi l'originale area morfologica.

L'interruzione della connettività verticale è dovuta ai fenomeni di CLOGGING e CORAZZAMENTO in alveo.



La riduzione di trasporto solido impatta sugli equilibri dei minerali e la parte organica. Inoltre, isola l'alveo con acque fluviale dalle zone iporreice sottostante, quindi blocca lo scambio con la falda.

FREQUENCY AND
TIMING OF ARTIFICIAL
FLOW FLUCTUATIONS

INTENSITY OF
RESULTING WATER
LEVEL CHANGES

VULNERABILITY
OF ORGANISM

GENERAL
HABITAT
AVAILABILITY

MITIGATION
MEASURES

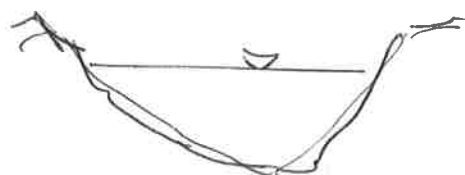
① FLUVIAL GEOMORPHOLOGY

I corsi d'acqua vengono classificati per la loro funzione di trasporto d'acqua e sedimenti; possono essere alluvionali se l'alveo viene formato dal corso d'acqua, oppure non alluvionali se la forma è imposta esternamente variando il regime idrologico da quello naturale.

ALLUVIONALE



NON ALLUVIONALE

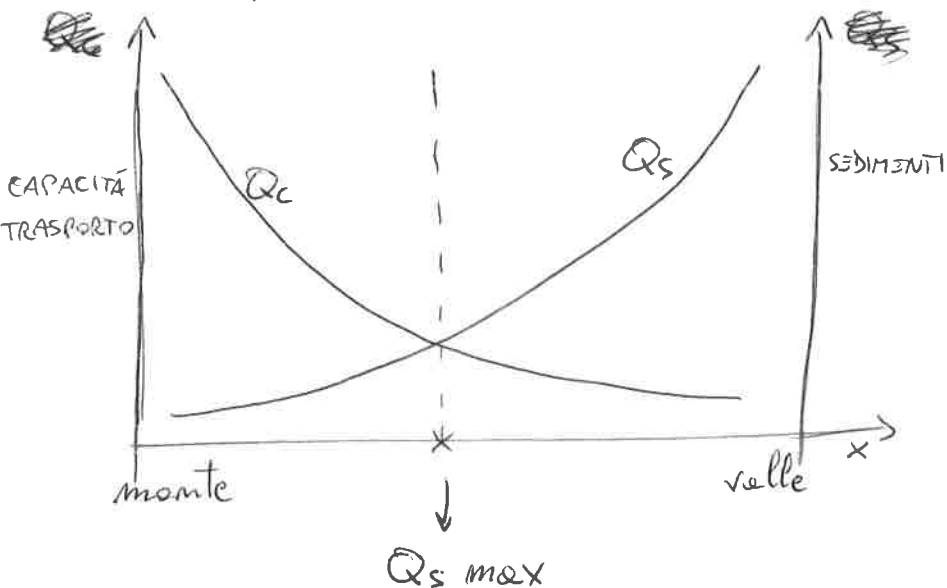


L'ente ISPRA (Istituto ~~per~~ ~~la~~ Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) ha emanato due manuali:

+ IDRAIM, sistema di valutazione idromorfologica, Analisi e Monitoraggio dei corsi d'acqua (2016).

I fiumi alluvionali sono definiti dalla morfologia attraverso le variazioni di controllo. I fiumi montani sono caratterizzati dalla forte pendenza e dalla grana grossolana.

Di questi si definisce il fondo e la vegetazione che lo compone.

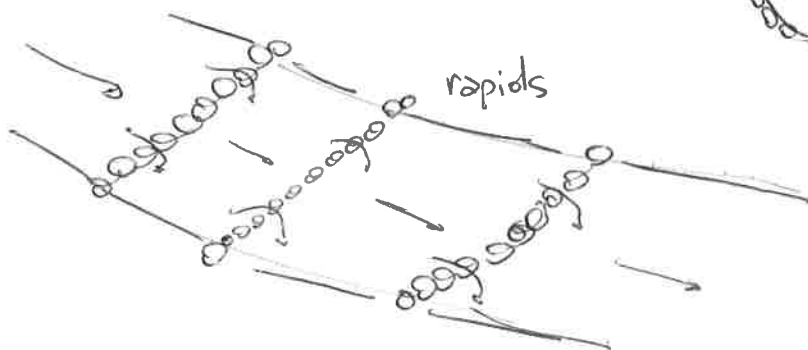
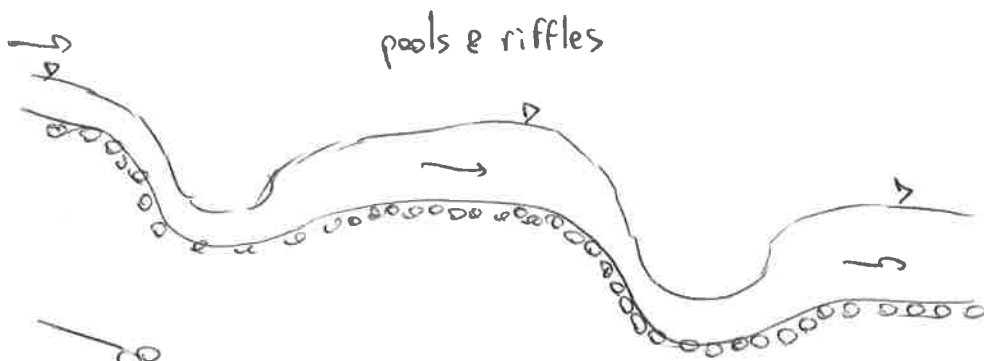
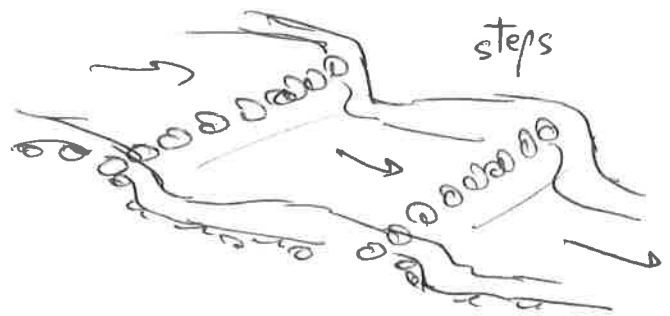
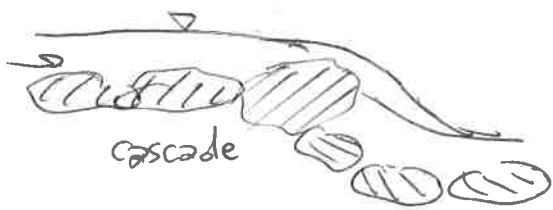


al monte si ha una bassa quantità di sedimenti, e valle è bassa la capacità di trasporto. Nel mezzo si verifica il massimo trasporto di materiale.

+ SUM (Sistemi di rilevamento e classificazione delle Unità Morfologiche) dei corsi d'acqua (2016).

Si descrivono le forme di fondo relative alle condizioni ambientali e alle capacità di trasporto solido.

1. CASCADE, massi e ciottoli grossi, trasporto solo in caso di grandi piene, flusso molto turbolento.
2. STEP, alta pendenza per fiumi alluvionali o in roccia, salti con massi eterogenei, portata maggiore della bankfull.
3. RIFFLE, sedimenti uniformi in ghiaia, portata poco profonda e veloce.
4. POOL, depressioni topografiche alternate alle riffles.
5. RAPID, grandi massi e ciottoli, organizzate in linee perpendicolari al corso.



② La FLOODPLAIN è la piana alluvionale laterale al fiume, si inonda con portate superiori alle bankfull e garantisce la continuità ecologica laterale. È caratterizzata da materiali fini e da vegetazione riparia.

Il TERRAZZO è l'area precedente la floodplain, formato dall'incisione dell'alveo centrale e si inonda con portate molto superiori.

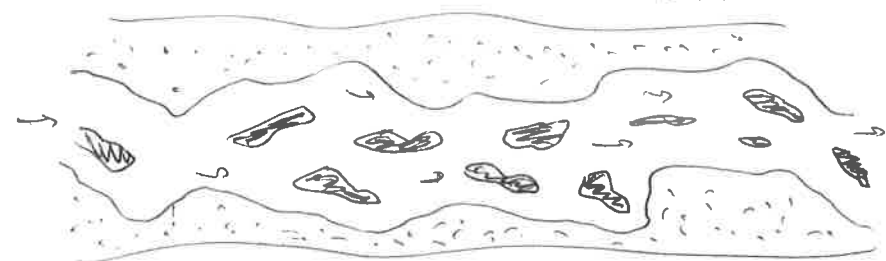
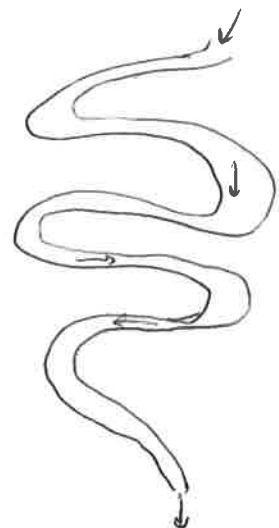


Corsi d'acqua non confinati a valle

Per i fiumi alluvionali di valle si ha una planimetria variabile dovuta ai processi morfologici. La larghezza tipica dipende dall'idrologia liquida Q , mentre la forma del fondo dipende dall'idrologia solida Q_s .

Possiamo essere:

- canale singolo → MEANDERING
- canale multiplo
 - BRAIDING
 - WANDERING
 - ANASTOMOSED

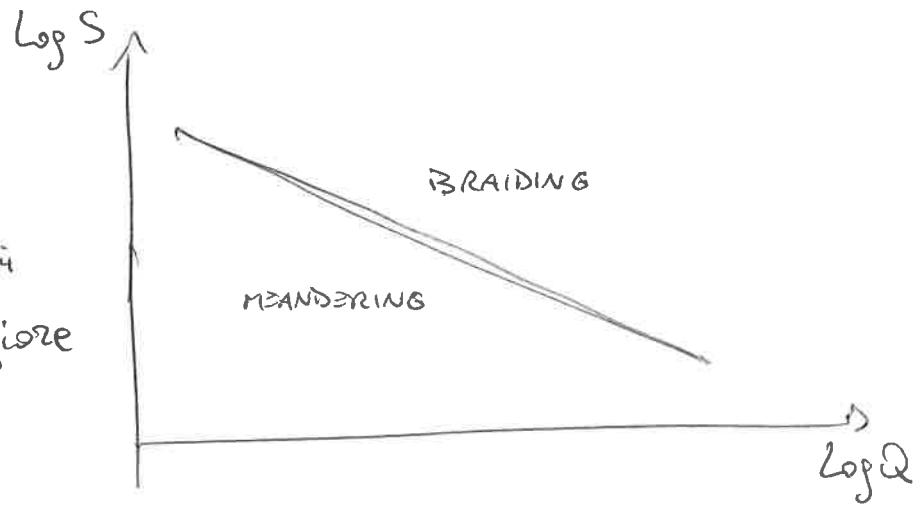


Il channel pattern è studiato da

- Leopold & Wolman sperimentalmente della relazione tra le pendenze e la portata liquida, senza considerare la variabilità dei sedimenti.

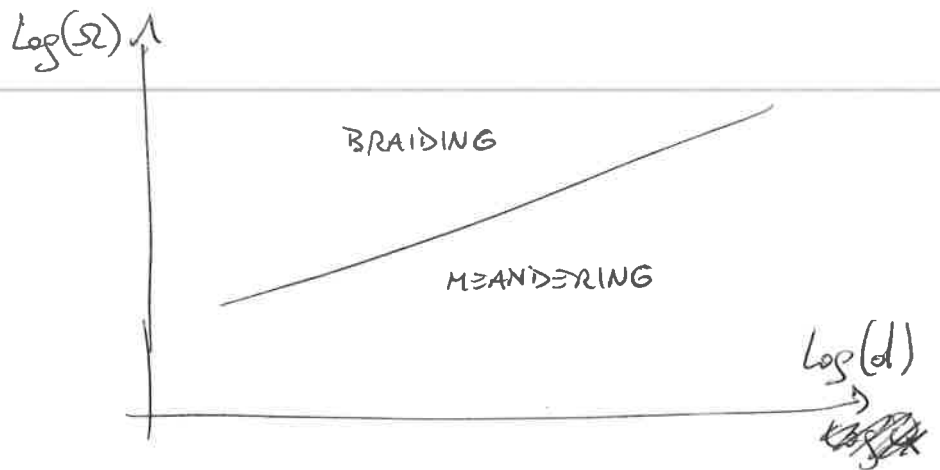
$$S = 0,0125 Q^{-0,44}$$

A parità di portata i fiumi multi-canali hanno maggiore pendenza.



- Van der Berg ponendo il parametro STREAM POWER definito come una potenza $\Omega = \gamma Q S$

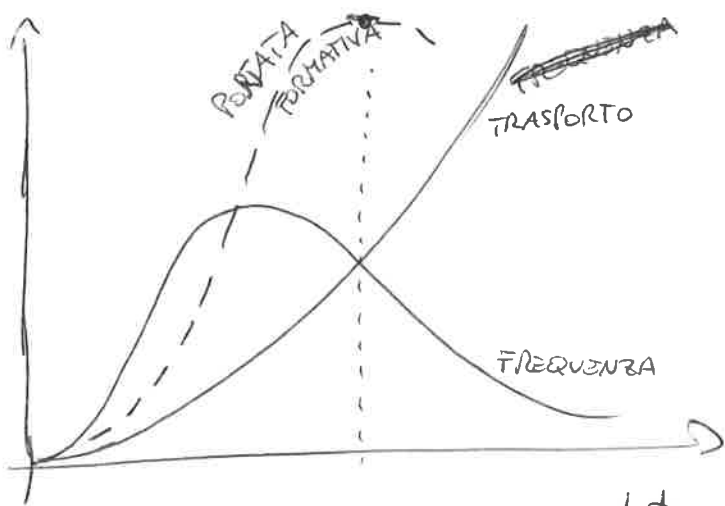
Lo stream power cresce linearmente con il diametro dei sedimenti, favorendo i fiumi multi-canali.



- I parametri da valutare per la descrizione del pattern sono:
- il rapporto larghezza e profondità ($\frac{B}{Y} > 50$ per multi-canale),
 - definire i rapporti adimensionali con la pendenza,
 - porre il problema 2D a 3 parametri,
 - instabilità dei fiumi multi-canale,
 - analizzare la vegetazione che interferisce con la portata.

③ La dinamicità dei corsi d'acqua e l'instabilità dei fiumi bedloading, portano a valutare le piene in funzione dei processi di interazione tra il campo di moto e i sedimenti oppure la vegetazione.

La PORTATA FORMATIVA è il prodotto tra la capacità di trasporto e la frequenza di evento.



La portata formative è responsabile della formazione della geometria della sezione trasversale, con basso tempo di ritorno e relativamente elevata.

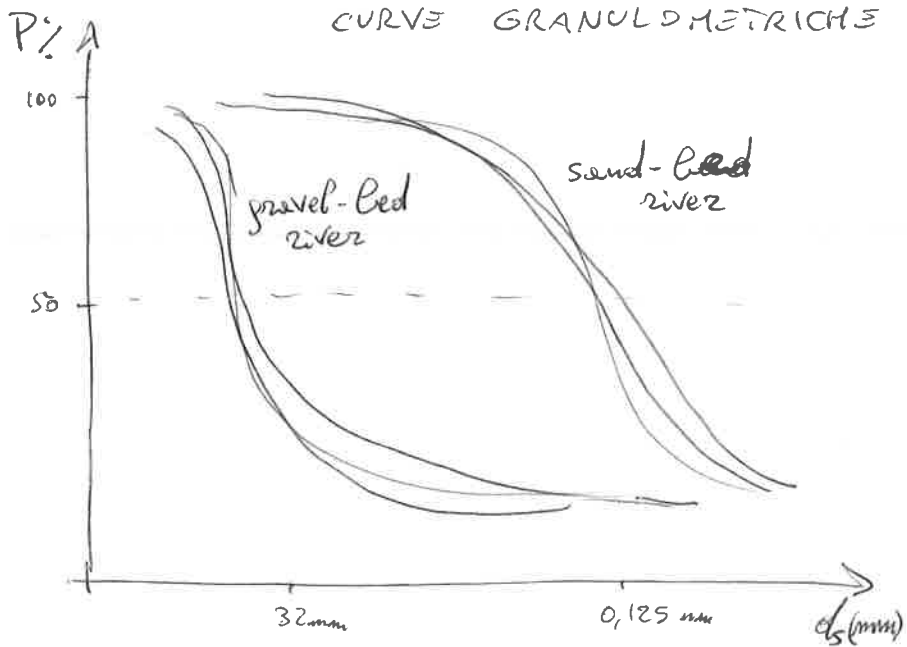
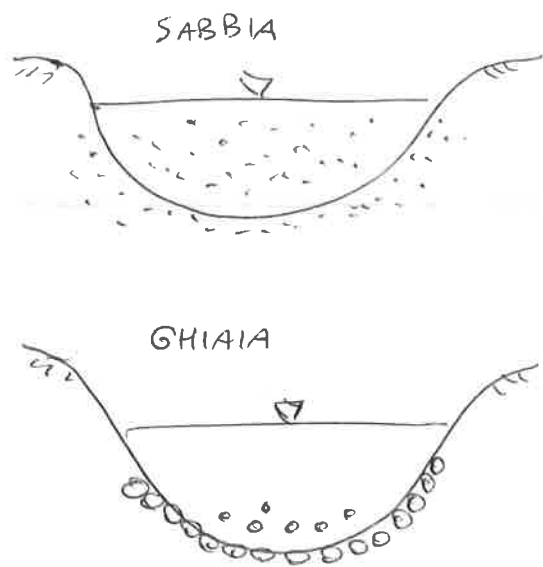
Negli alvei naturali, la portata di bankfull corrisponde con quella formative al tempo di ritorno di 2 anni, ma negli alvei antropizzati le portate non corrispondono dato che gli argini ~~sono~~ non dipendono dal fiume (non-alluvionali).

Fenomeni sedimentologici

Uno dei caratteri principali per descrivere un fiume è la geomorfologia del fondale che determina la scabrezza e il trasporto solido.

Nei fondali in SABBIA (ds piccolo) si ha sempre trasporto in sospensione per tutta la sezione bagnata.

Nei fondali in GHIAIA (ds grande) si ha trasporto di fondo per ~~piene~~ eventi di piena, che interessano solo la parte inferiore della sezione.



Nelle curve granulometriche si distinguono bene i due casi, a causa della SELEZIONE GRANULOMETRICA e per ABRASIONE.

Analizzando i fenomeni sedimentologici per gli alvei in ghiaia si hanno:

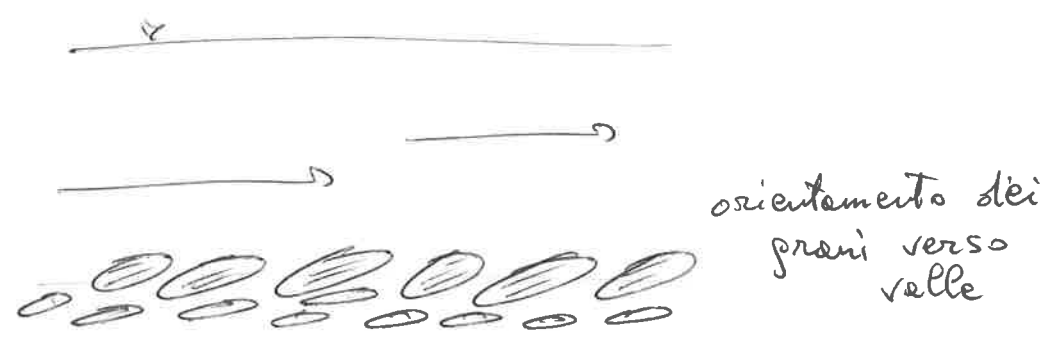
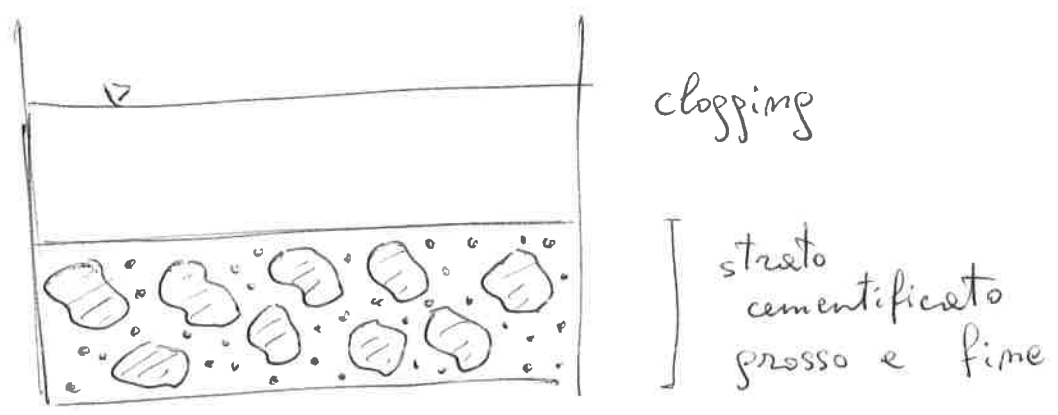
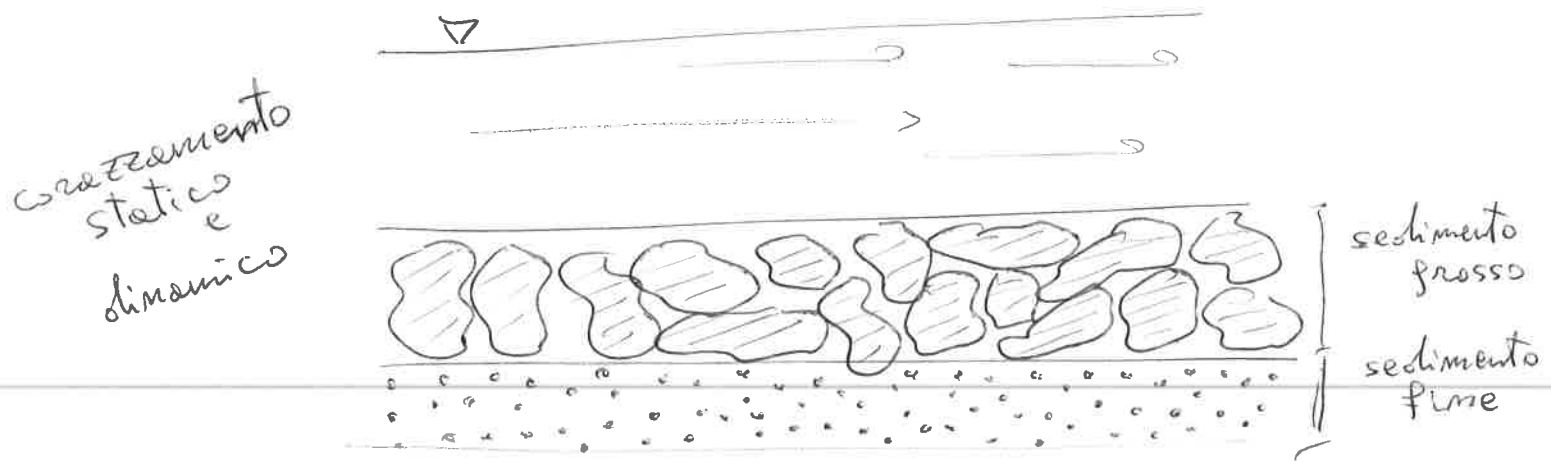
1. SORTING, la distribuzione spaziale granulometrica non è uniforme e le variazioni sono improvvise. Questo è dovuto dal corazzamento dinamico durante le piene, in cui la parte più grossolana tende a restare sopra lo strato fine.
2. BED ARMOURING, in eventi di piena non troppo intensi viene trasportato solo materiale fine, quindi resta il grossolano in superficie. Questo è detto corazzamento statico e pone il rapporto di corazzamento confrontando il diametro medio dello strato superficiale con quello inferiore. Nei regimi aridi è pari a 1, nei fiumi umidi e nivali può arrivare a 5.
$$R_c = \frac{d_s(\text{grosso})}{d_s(\text{fine})}$$

④

3. CLOGGING, deposizione di sedimento fine nella matrice di ghiaia. Provoca cementazione del fondo.

4. IMBRICATION, orientamento delle particelle di grani verso la corrente - Questo permette di individuare fenomeni passati localizzati.

Le dinamiche sedimentologiche interferiscono sempre con l'habitat; la fauna ittica si adatta al fondo e, talvolta, può modificarlo.



⑤ RIVER RESTORATION

Gli interventi antropici modificano la morfologia e l'ecologia portando conseguenze economiche ed impatti all'ecosistema: si ha instabilità morfologica, limitati ulteriori interventi di protezione, riduzione della biodiversità.

La River Restoration è l'insieme di due tipi di approccio al fiume:

- RINATURALIZZAZIONE, riportando ~~il~~ l'alveo allo stato quasi-naturale tramite interventi di protezione;
- RIQUALIFICAZIONE, focalizzandosi sull'ambiente biotico ed abiotico con lo scopo di rinnovare la biodiversità.

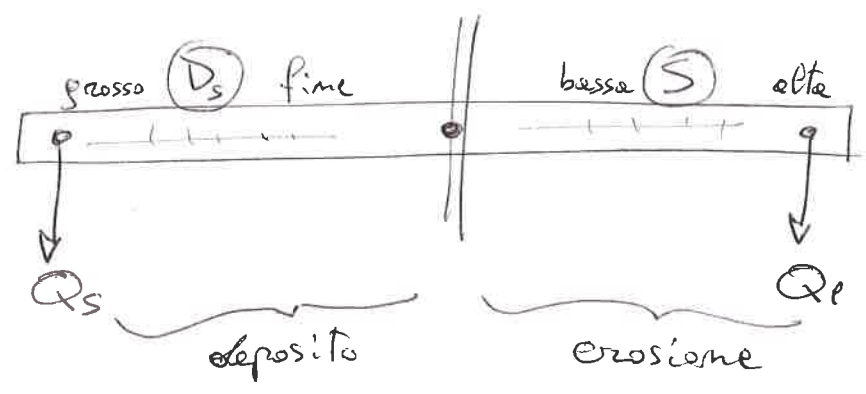
L'approccio di tipo gerarchico è process based, cioè fondato sui processi dinamici invece che lo stato fisso di un corso d'acqua. Questo significa che bisogna capire come risponde il fiume alle variazioni nel tempo tramite la visione di scale spaziali diverse, da quella microscopica degli habitat ai tratti planimetrici fino ai grandi corredi ecologici. Gli obiettivi da raggiungere sono dati dalla società che vive il fiume.

Il controllo delle variabili dei regimi di portata è necessario per avere una risposta dell'ecosistema. Questo si adatte a cicli di magra e di piena basando i processi evolutivi sulla biodiversità venutasi a creare.

Lane (1855) struttura la configurazione come un equilibrio tra portate solide e liquide dovuto rispettivamente ai sedimenti ed alla pendenza. La dominanza dell'uno sull'altro determina fenomeni di erosione o deposito.

BILANCIA
DI LANE

$$Q_s \cdot D_s = Q_l \cdot S$$

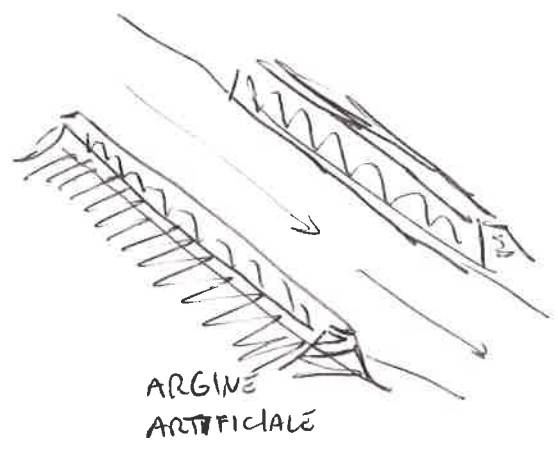


L'evoluzione dell'assetto del fondo tende a rendere fiumi multi-canali in monocursali, al crescere dell'incisione e del restringimento laterale.

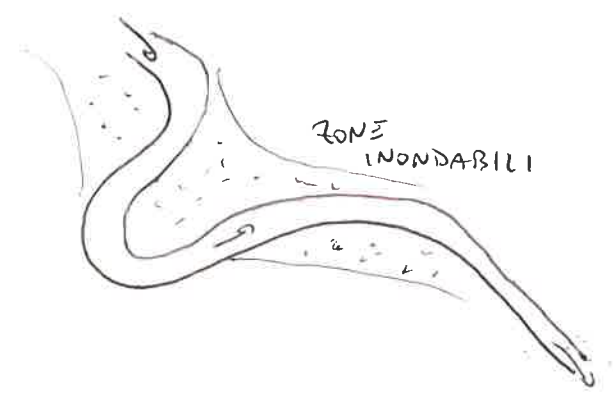
Nuove direttive europee floods directive

Il nuovo approccio introdotto nella gestione delle alluvioni aggiornò il precedente basato sulla costruzione di grandi opere, con un nuovo obiettivo volto a ridere spazio al corso per incrementare la capacità di laminazione. La valutazione è necessariamente a scala di bacino, perché insufficiente a scala locale di tratto.

PRIMA



DOPO



⑥ La restituzione di spazio al fiume implica scontri sociali con la popolazione che occupa il territorio circostante.
→ Un passo fondamentale è quello della COMUNICAZIONE del rischio tramite esperti.

La GESTIONE del rischio comprende fasi di

- prevenzione, pianificando l'urbano con obiettivo di ridurre la vulnerabilità;
- protezione, tramite opere idrauliche di difesa;
- preparazione, con la giusta informazione alle cittadinienze;
- responsabile emergenza, per la gestione dei piani in fase di emergenza;
- recupero e mitigazione, resilienza per il ritorno alle condizioni normali.

L'integrazione della direttiva nel 2013 si basa sulla preliminare valutazione dei rischi e la creazione di mappe, successivamente si passa al management plan in fase di crisi.

⑦ VALUTAZIONE STATO IDRO-MORFOLOGICO

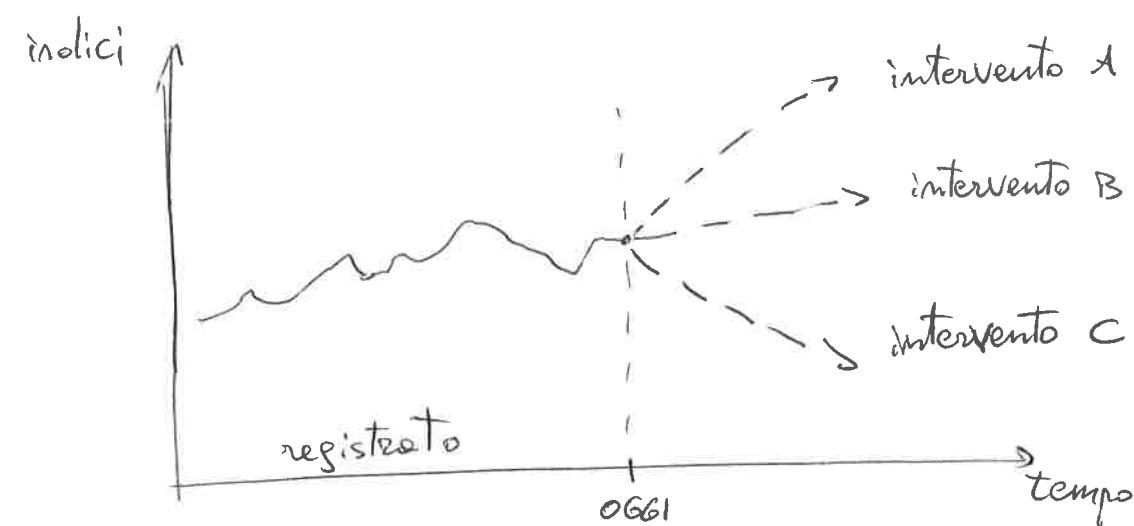
Ogni fiume viene valutato per tratti omogenei in base al suo stato idro-morfologico. L'obiettivo è classificare con 5 classi detti Indici di Funzionalità Fluviale (IFF) secondo la direttiva "4 acque" (D.L. 152/2006).

La valutazione è pressoché chimica e ecologia e individua le pressioni antropiche sulla salute del fiume.

Nel 2008 ISPRA pone l'aggiornamento degli indici basati sui processi fluviali seguendo una serie di step:

- valutazione a scale di bacino
- componente temporale
- dinamica morfologica
- gestione corretta dei corsi d'acqua
- presso agenzie pubbliche
- confronto GIS con rilievi in sito

Quindi si confrontano i risultati parametrici nel tempo decidendo come intervenire e se è necessario.



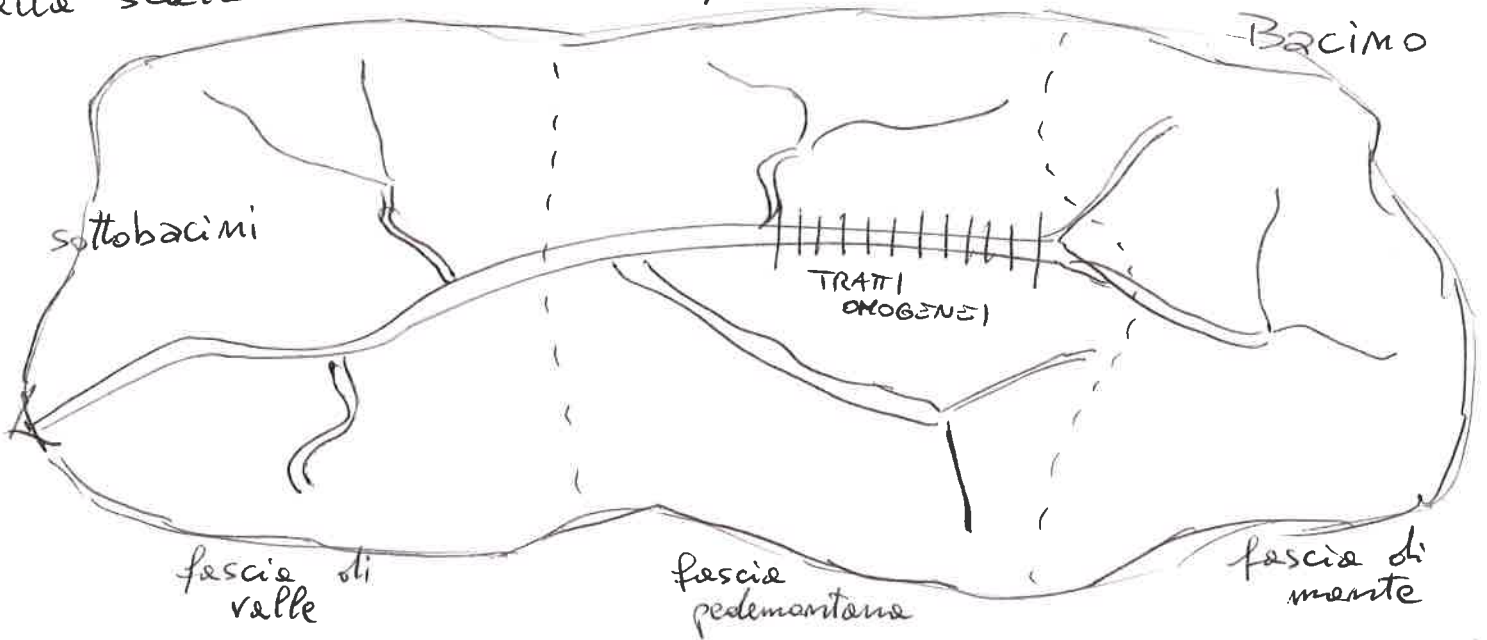
L'indice di qualità morfologica

L'Indice di Qualità Morfologica (IQM) fa riferimento allo stato di equilibrio, grazie ad un questionario con punteggi - Le domande sono relative a:

- funzionalità dei processi geomorfologici
- artificialità
- variazioni significative

Il procedimento segue 3 fasi: la suddivisione in tratti omogenei, la valutazione dello stato attuale e il successivo monitoraggio.

In base al fiume e alla regione, si dividono i tratti della scala di bacino e quella locale.



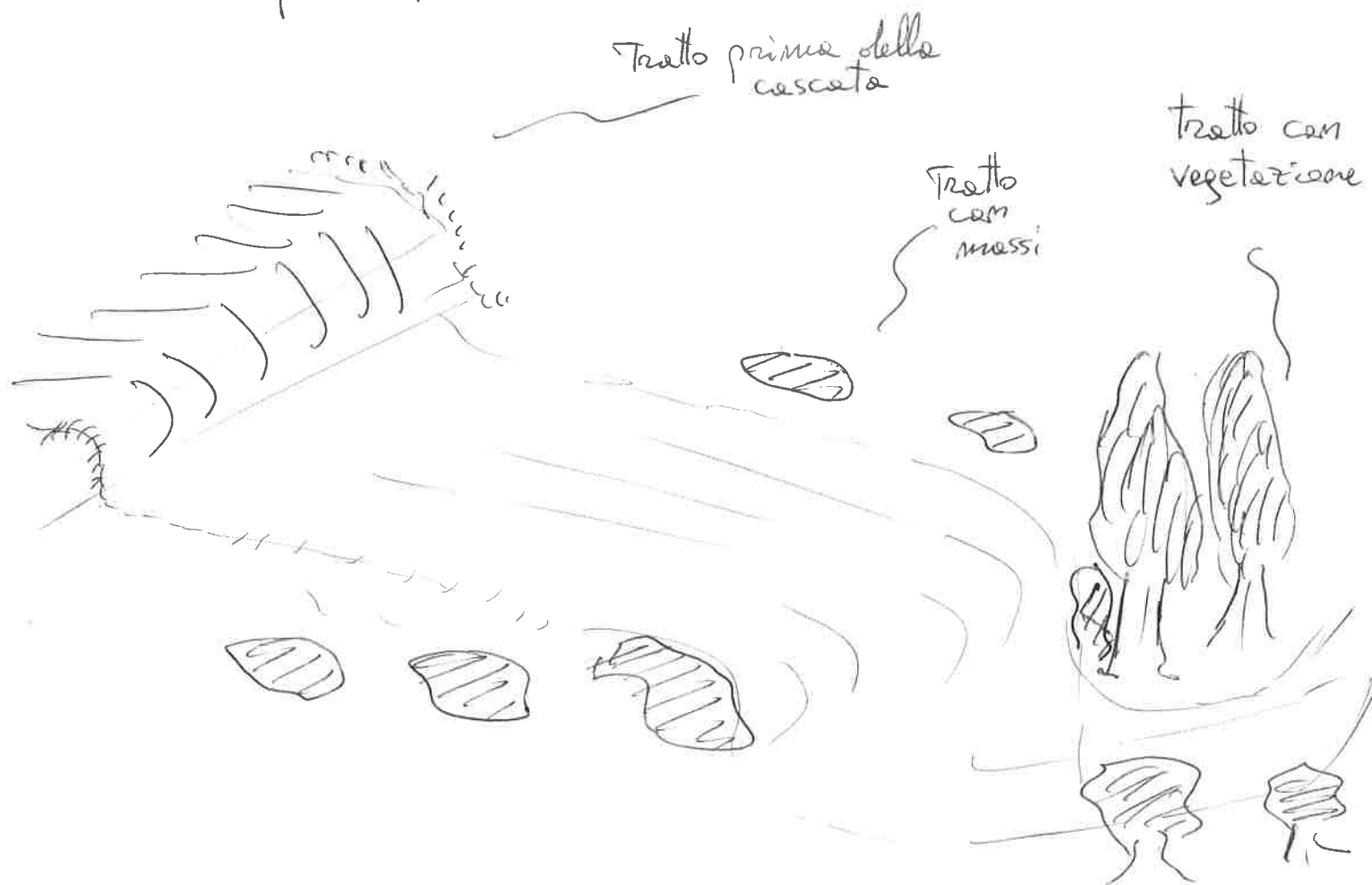
Uno dei parametri più importanti è il GRADO di CONFINAMENTO, che determina l'interazione tra il corso d'acqua ed il versante in maniera longitudinale

$$I_c = \frac{L_p}{L_a} \left[\frac{\text{larghezza piana / solena}}{\text{larghezza alveo}} \right]$$

⑧ I parametri per la definizione della morfologia sono:
l'Indice della Sinuosità per i meandri, l'Indice di Intrecciamento per i canali e l'Indice di Amastomizzazione per le barre.

I parametri per la definizione del fondo determinano le unità di fondo come le gradinate, il letto pieno, le ripples and pools e le dune, in base alle pendenze e alla geometria.

Le domande sono specifiche dopo aver identificato i vari tratti e distinte le caratteristiche morfologiche. Le risposte sono genericamente $3/4$ con un valore ~~med~~ IQM da mediare per tipologia.

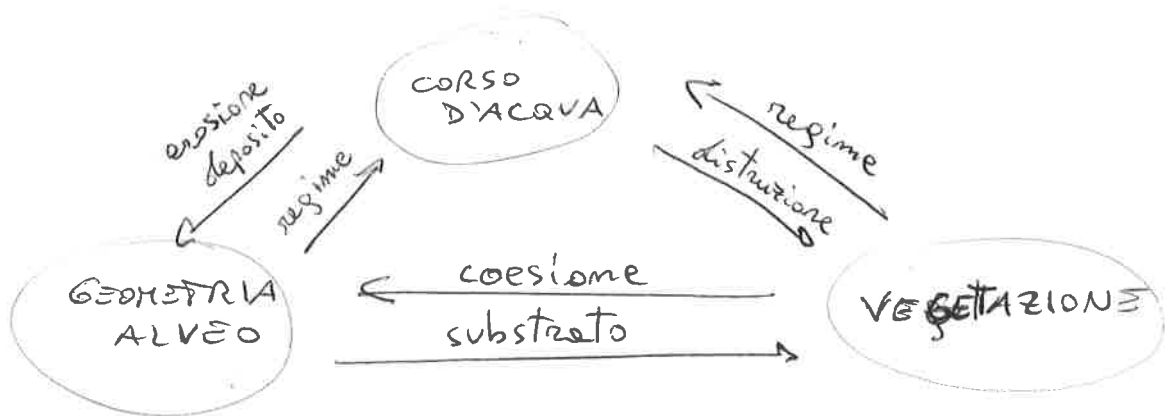


La valutazione morfologica avviene con

- l'Indice di Dinamica Morfologica (IDM)
- la Classificazione Dinamica dell'Evento, dovuta ad un evento di piena con $T_r \geq 100$ anni, valuta la velocità di modifica ed il trasporto solido (CDE)
- le Fasce di Dinamica Morfologica, mappate con GIS in tempi di ritorno diversi in funzione delle opere artificiali presenti (FDM) -

⑧ VEGETATION AND HYDRO-GEOMORPHOLOGY

La Dinamica Fluviale è data dalle interazioni di vegetazione, geometria d'alveo e corso d'acqua.



La fase di REGENERATION è data da entrambe le componenti biotiche ed abiotiche.

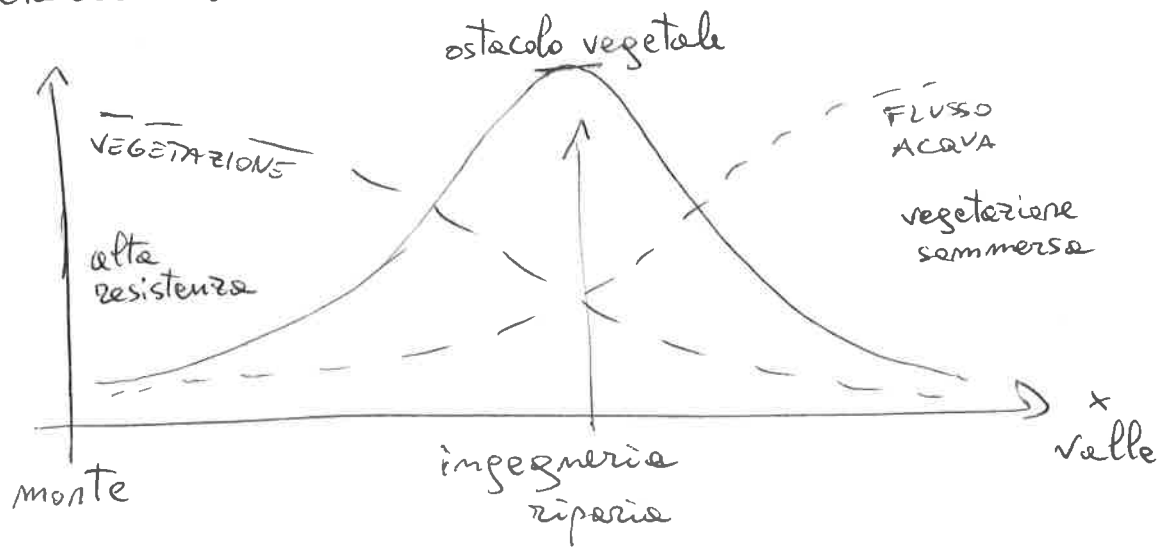
Bisogna considerare la vegetazione perché determina la scabrezza, la coesione, individua ostacoli e può trattenere il materiale sospeso. Quindi gioca un ruolo fondamentale per il trasporto solido e l'intensità delle piene.

Inoltre, una buona copertura vegetale garantisce la competitività laterale, indice di crescita della ~~diversità~~ biodiversità.

Un ecosistema completo ha variabili idrologiche e dinamiche di sedimenti ~~ben~~ specifico per le zone diversificate da monte e valle, secondo la "Intermediate disturbance hypothesis".

Il disturbo idrologico determina lo spazio disponibile, ovvero la configurazione dell'alveo, sede degli habitat e interazione tra specie alloctone con specie autoctone.

La vegetazione ha un ruolo attivo sui meccanismi biotici, quali la dispersione, strategie di riproduzione e la crescita, e sui meccanismi abiotici, come resistenza al flusso, erodibilità sedimenti e influenza sulla portata. L'INGEGNERIA RIPARIA è rimarcata nei tratti centrali dei fiumi perché si ha il bilancio del flusso d'acqua e della vegetazione.



Le variazioni degli effetti della vegetazione sono relativi al livello di interazione col fiume, per questo si classificano le zone presenti o meno, in base al confinamento laterale.

- zona 1 - alveo perennemente inondato
- zona 2 - dominato dal corso, con erosione e deposito
- zona 3 - dominato dal corso, con sedimenti fini
- zona 4 - dominato dalle inondazioni
- zona 5 - dominato dalle ~~zone~~ alluvioni, con misture solide

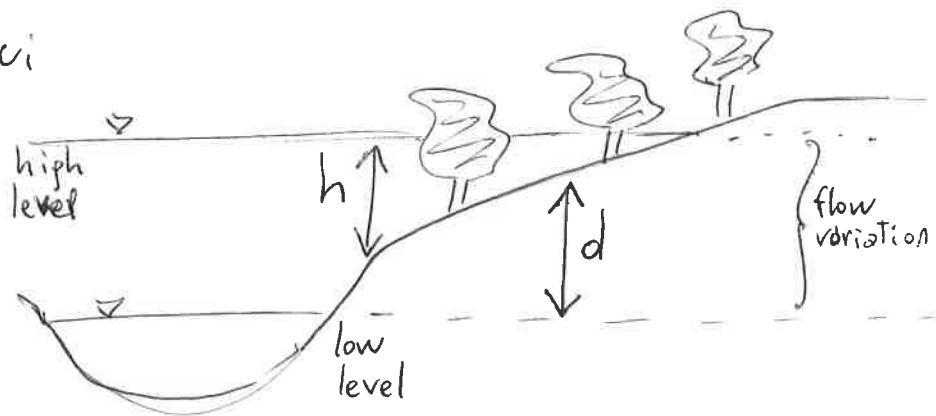
⑩ La VEGETATION RECRUITMENT (disponibilità) dipende della stagionalità durante l'anno ed è governata dal livello dell'acqua.

Quindi la VEGETATION REPRODUCTION (crescita) si basa sulle piante già esistenti più favorite per l'evoluzione. Questo porta alla crescita continua di zone verdi in alveo, con l'accumulo localizzato di sedimenti. Una discontinuità che accelera la formazione di barre stazionarie al fondo. Da questi punti si concentrano i micro-habitat con sviluppo di biodiversità (de flora e fauna).

Modellazione della vegetazione

La modellazione dei fenomeni della vegetazione ~~sono~~ è molto complicata perché ci sono numerosi parametri in gioco. I due processi principali da confrontare sono la CRESCITA della vegetazione, in funzione alla disponibilità di acqua e ~~la~~ la sua EROSIONE, a cause dello sforzo al fondo della corrente.

Il modello può basarsi sui due parametri nella serie



h = disponibilità acqua
 d = sponda erodibile

Quindi la vegetazione è valutata come

$$\begin{cases} v = \exp(-\beta_1 d) & \text{prevale la crescita} \\ \cancel{v = \exp(-\beta_1 d)} \\ v = 1 - \exp(-\beta_2 d) & \text{prevale l'erosione} \end{cases}$$

I parametri β_1 e β_2 dipendono dai molteplici tipi di vegetazione possibile, per questo il modello ha una validità relativa.