



FREIE UNIVERSITÄT BOZEN
LIBERA UNIVERSITÀ DI BOLZANO
FREE UNIVERSITY OF BOZEN · BOLZANO

Fakultät für Naturwissenschaften
und Technik

Facoltà di Scienze
e Tecnologie

Faculty of Science
and Technology



Ripartizione Opere Idrauliche
Provincia Autonoma di Bolzano



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale

Pericolosità idraulica nel territorio montano Italiano ed applicazione della direttiva Europea "alluvioni"

Bolzano, 9-10 Giugno 2011

Il monitoraggio del trasporto solido nei torrenti montani

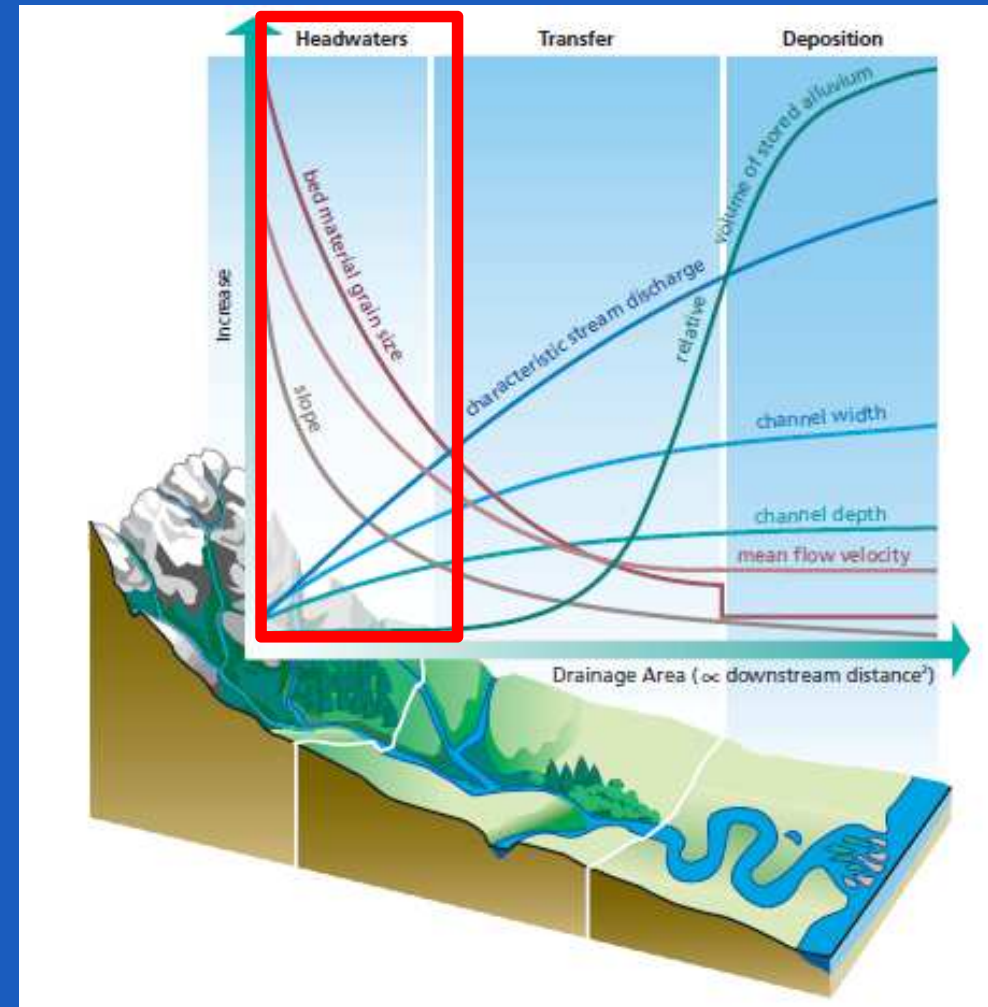
Dr. Luca Mao

Facoltà di Scienze e Tecnologie, Libera Università di Bozen-Bolzano

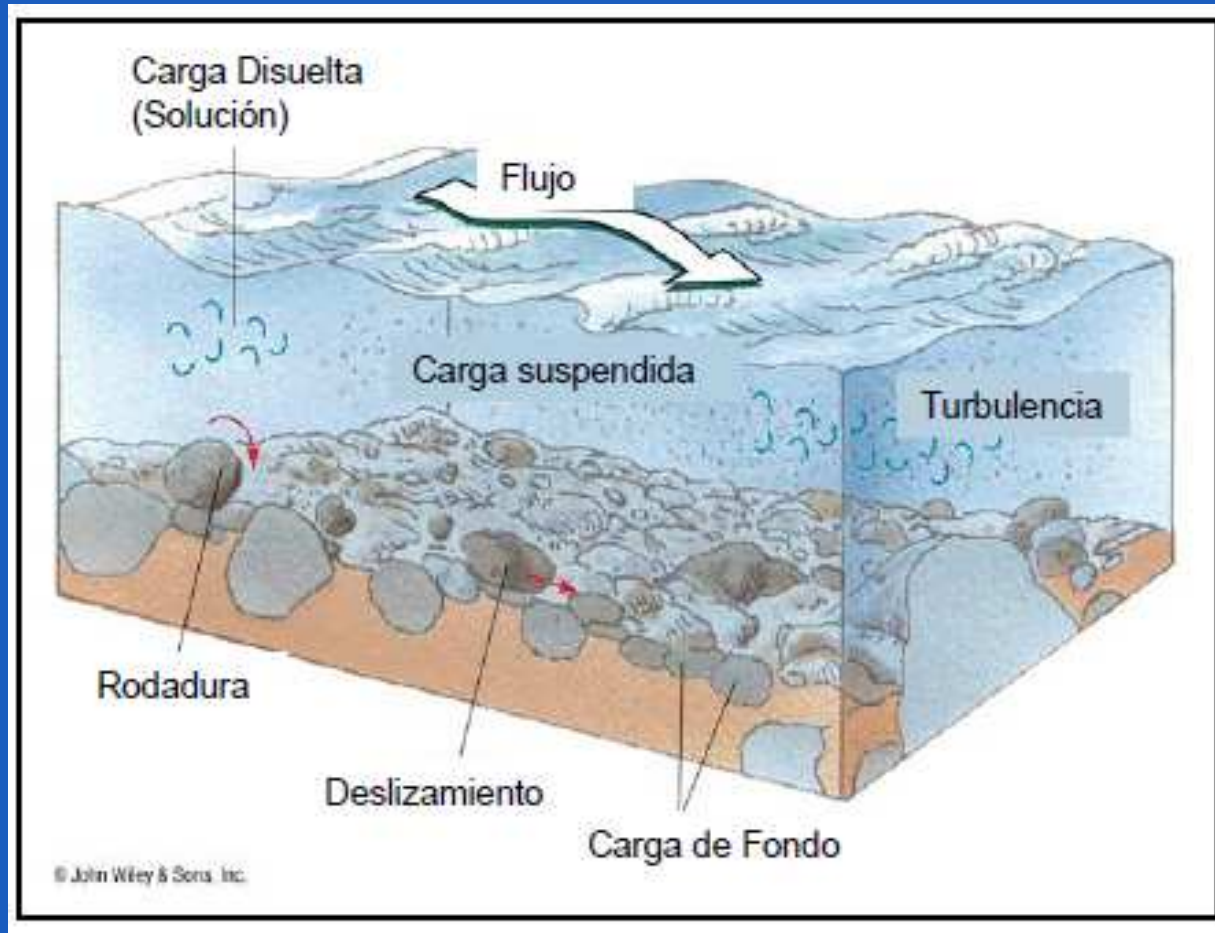
Torrenti montani

Molto diversi dai corsi d'acqua vallivi per:

- **Pendenza** elevata
- **Granulometria** grossolana
- **Larghezza** contenuta
- **Portate** basse
- Variazioni repentine di portata
- **Velocità** alte
- **Disponibilità di sedimenti** spesso limitata
- **Trasporto solido** più grossolano e occasionale

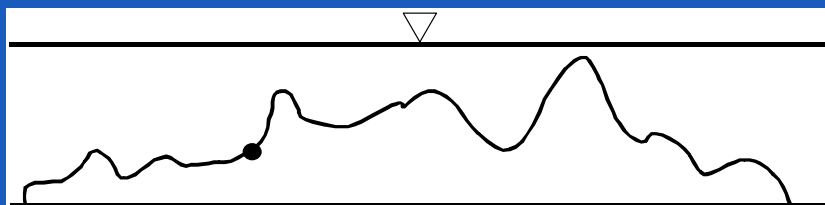


Il trasporto solido



Rotolamento
Scivolamento
Saltellamento

Trasporto in sospensione



Trasporto di fondo



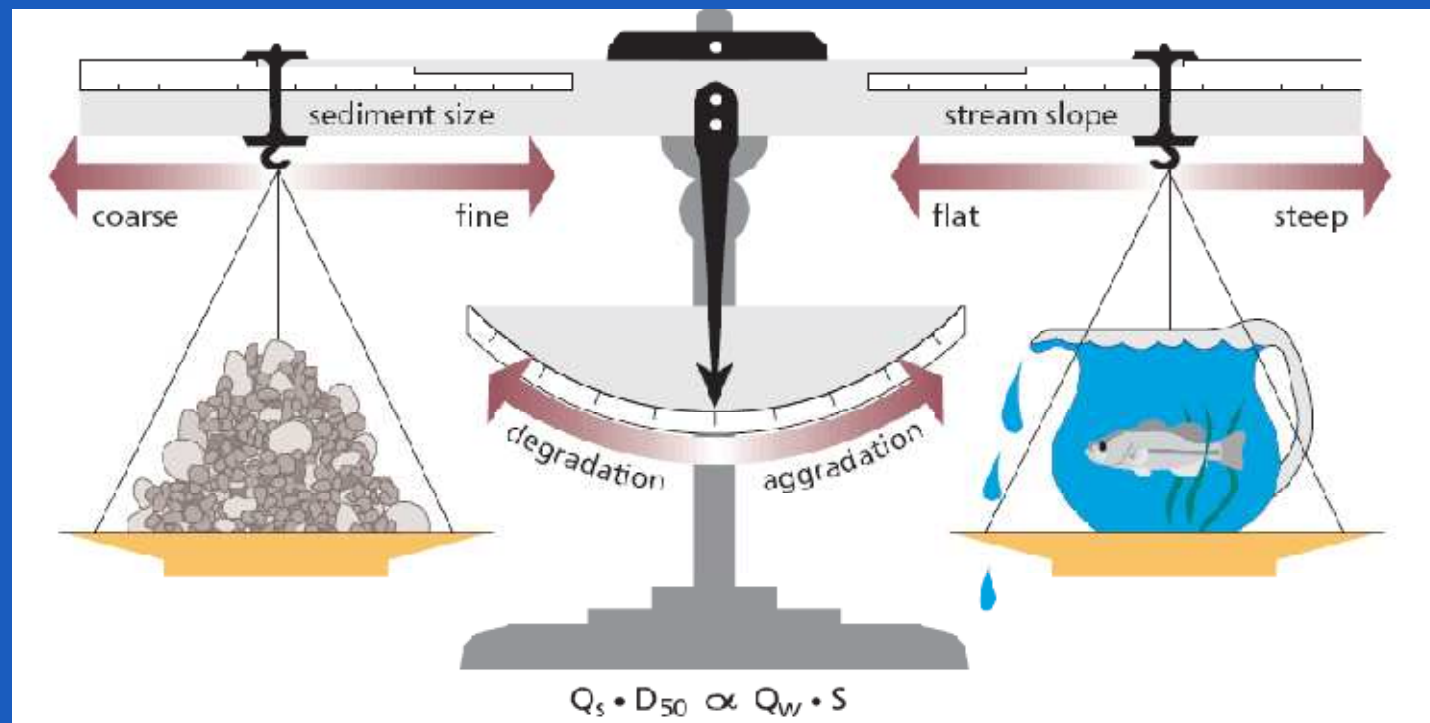
Importanza di quantificare il trasporto solido di fondo

- Il trasporto di fondo determina le **variazioni morfologiche** d'alveo;



Importanza di quantificare il trasporto solido di fondo

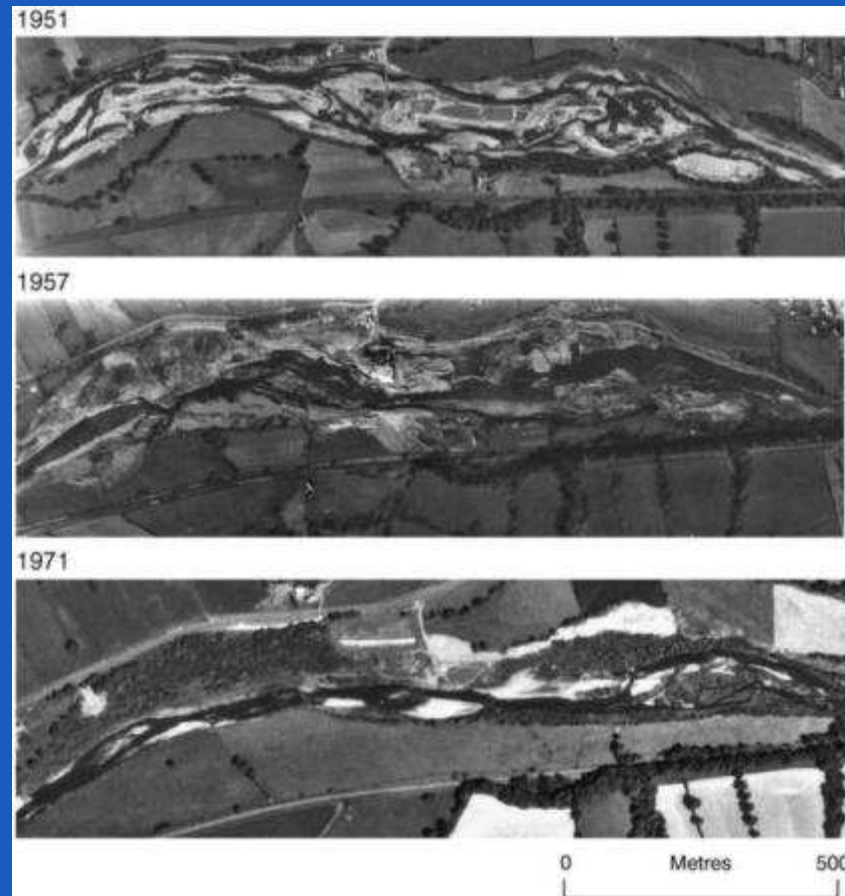
- Il trasporto di fondo determina le **variazioni morfologiche** d'alveo;
- Necessità di relazionare variazioni di apporti solidi o liquidi con **variazioni morfologiche**;



La bilancia di Lane (1950)

Importanza di quantificare il trasporto solido di fondo

- Il trasporto di fondo determina le **variazioni morfologiche** d'alveo;
- Necessità di relazionare variazioni di apporti solidi o liquidi con **variazioni morfologiche**;
- Necessità di quantificare variazioni morfologiche dovute ad **impatti antropici**;



Wishart *et al.* (2008)

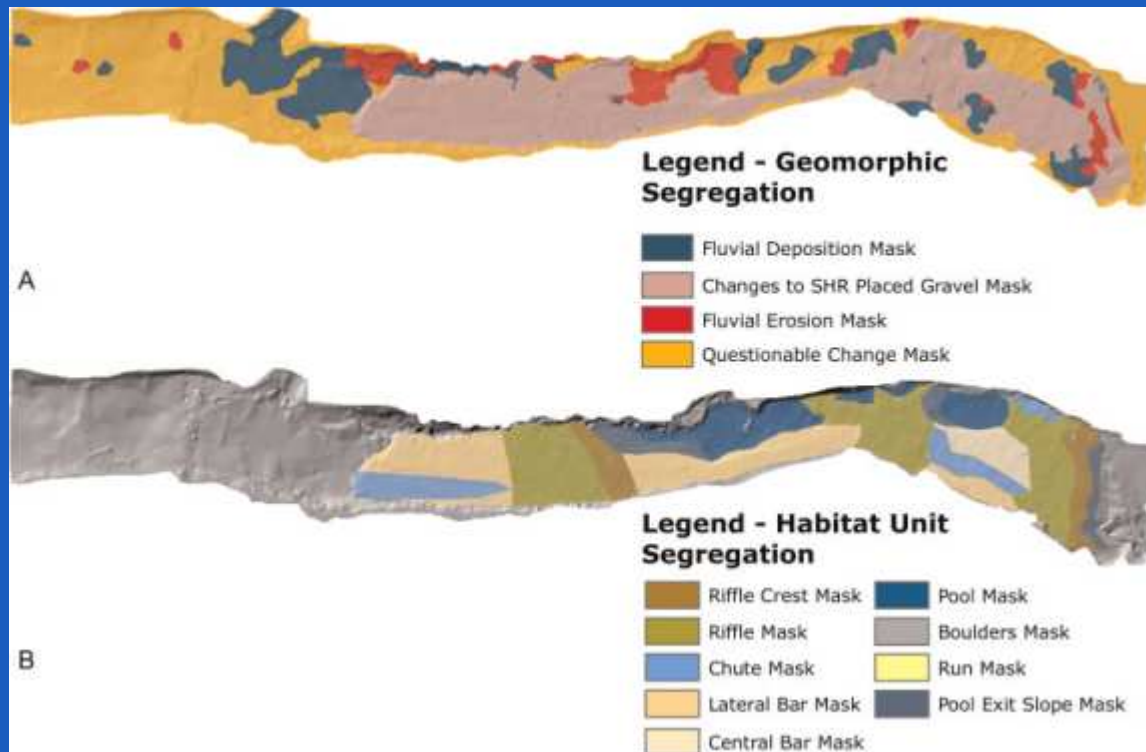
Importanza di quantificare il trasporto solido di fondo

- Il trasporto di fondo determina le **variazioni morfologiche** d'alveo;
- Necessità di relazionare variazioni di apporti solidi o liquidi con **variazioni morfologiche**;
- Necessità di quantificare variazioni morfologiche dovute ad **impatti antropici**;
- Necessità di quantificare la **sedimentazione negli invasi**;



Importanza di quantificare il trasporto solido di fondo

- Il trasporto di fondo determina le **variazioni morfologiche** d'alveo;
- Necessità di relazionare variazioni di apporti solidi o liquidi con **variazioni morfologiche**;
- Necessità di quantificare variazioni morfologiche dovute ad **impatti antropici**;
- Necessità di quantificare la **sedimentazione negli invasi**;
- Il trasporto solido influenza gli **habitat fluviali**;



Weathon *et al.* (2009)

Importanza di quantificare il trasporto solido di fondo

- Il trasporto di fondo determina le **variazioni morfologiche** d'alveo;
- Necessità di relazionare variazioni di apporti solidi o liquidi con **variazioni morfologiche**;
- Necessità di quantificare variazioni morfologiche dovute ad **impatti antropici**;
- Necessità di quantificare la **sedimentazione negli invasi**;
- Il trasporto solido influenza gli **habitat fluviali**;
- Necessità di determinare **aree di rischio** in ambiente montano;



Importanza di quantificare il trasporto solido di fondo

- Il trasporto di fondo determina le **variazioni morfologiche** d'alveo;
- Necessità di relazionare variazioni di apporti solidi o liquidi con **variazioni morfologiche**;
- Necessità di quantificare variazioni morfologiche dovute ad **impatti antropici**;
- Necessità di quantificare la **sedimentazione negli invasi**;
- Il trasporto solido influenza gli **habitat fluviali**;
- Necessità di determinare **aree di rischio** in ambiente montano;
- Necessità di dimensionare correttamente le **opere in alveo**.



Cosa è importante sapere del trasporto di fondo?

- Trasporto solido a scala pluriannuale (uso suolo-produzione sedimenti)
- Produzione **annuale** di sedimenti
- Trasporto solido associato a **singoli eventi di piena**
- Relazione portata liquida – portata solida
- Inizio del movimento dei sedimenti (**moto incipiente**)



Scale spaziali e temporali più ampie

Breve periodo e scala locale

Formule di capacità di trasporto solido

- **Basate sulla portata** (Q , in $m^3 s^{-1}$ o q , in $m^2 s^{-1}$)

$$\Phi \propto a(q - q_c)^b$$

- **Basate su τ** (forza agente sul letto)

$$\tau = \rho g R_h S \quad \tau^* = \tau / ((\rho_s - \rho) g D)$$

$$\Phi \propto a(\tau - \tau_c)^b$$

$$\Phi \propto a(\tau^* - \tau_c^*)^b$$

- **Basate su ω** (energia spesa nel trasporto $\omega = \tau V$, in $W m^{-2}$)

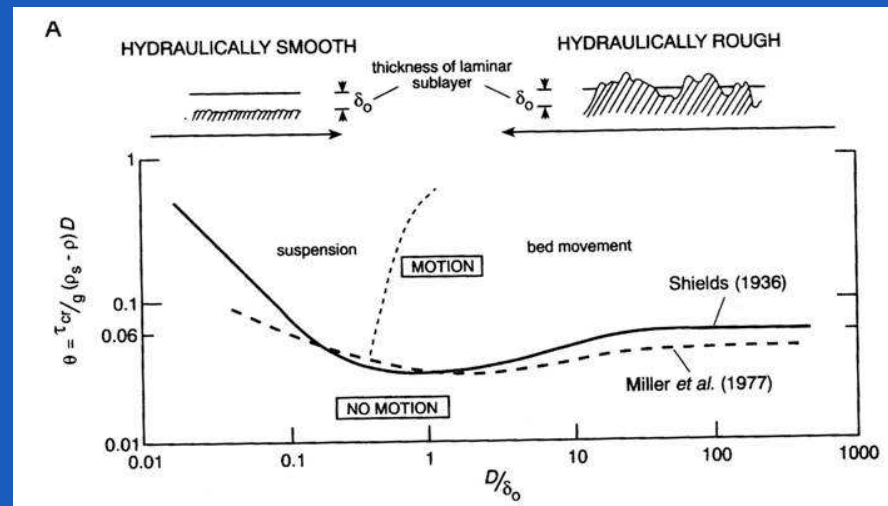
$$\Phi \propto a(\omega - \omega_c)^b$$

$$\Phi = q_s / \sqrt{g \Delta D_i^3}$$

Dipende dalla capacità di trasporto della corrente oltre una certa soglia critica

Shields (1936)
Per regime turbolento

$$\tau_c^* = 0.056$$



Ma le cose si complicano se consideriamo:

- **Sommergenza relativa** (h/D)
- **Pendenza**
(Lamb et al. (2008))
- **Eterogeneità**
granulometrica (effetti di nascondimento/protrusione)
- Dissipazioni energetiche dovute a **forme di fondo** molto spiccate
- Presenza di uno strato **corazzato** (granulom superficiale più grossolana del sottosuperficiale)
- **Ecc...**



Predizione del trasporto di fondo in torrenti montani

Formule di trasporto tendono a **sovrastimare** il trasporto reale di 1-2 ordini di grandezza (Rickenmann, 2001)

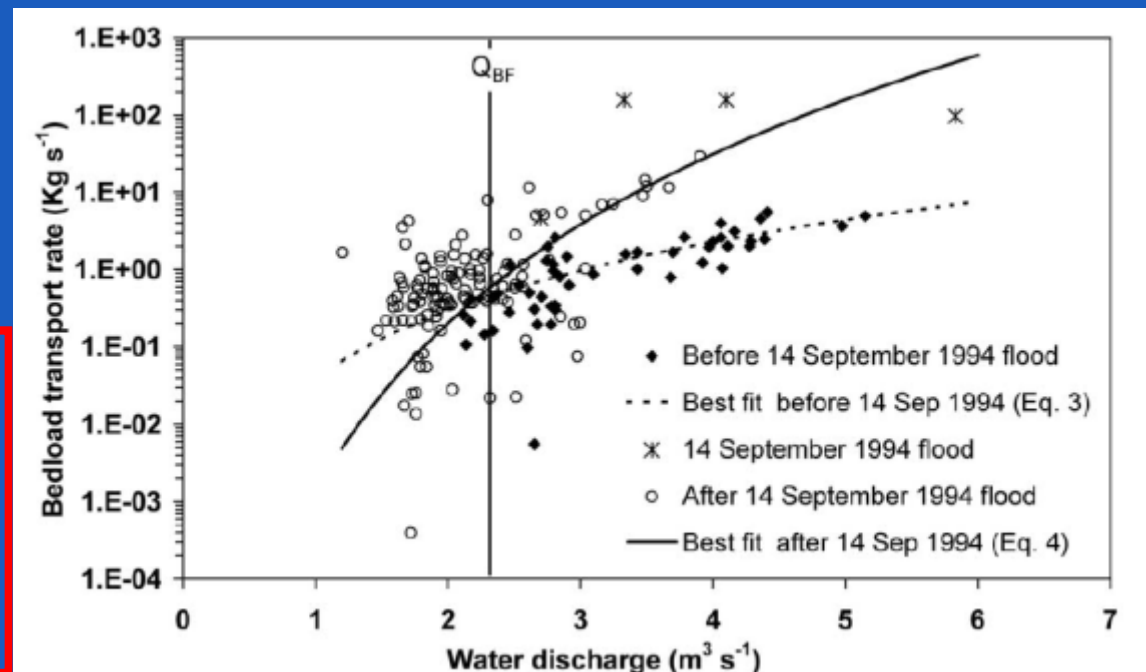
- * Limitata capacità predittiva delle formule;
- * **Limitata disponibilità di sedimenti.**

Predizione migliora per **eventi ad elevata magnitudo**

(Rio Cordon, D'Agostino & Lenzi, 1999)

Disponibilità di sedimenti aumenta dopo eventi ad elevata magnitudo (Rio Cordon, Lenzi et al., 2004)

Necessità di esplorare questi processi con misure di campo LOCALI e possibilmente di LUNGO PERIODO



Monitoraggio del trasporto di fondo in torrenti montani

Metodi DIRETTI (misura di volume o peso di sedimenti trasportati in un certo intervallo temporale)

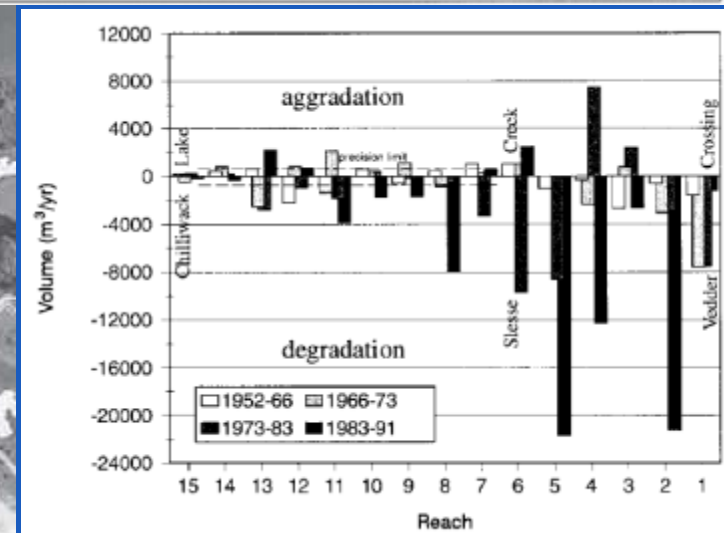
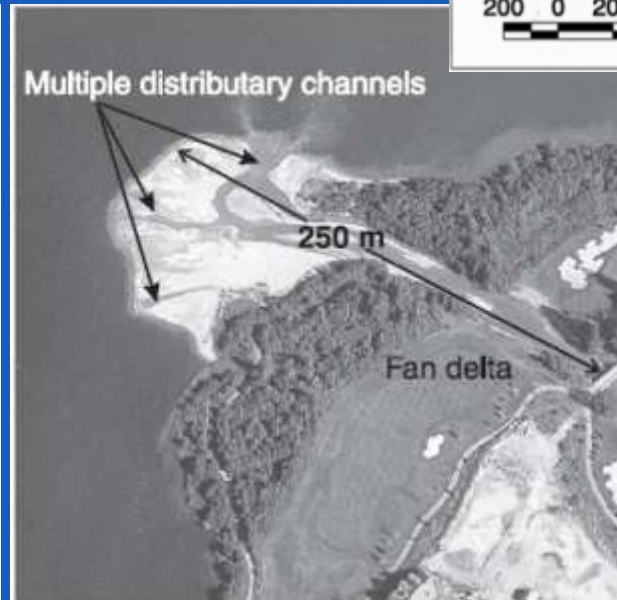
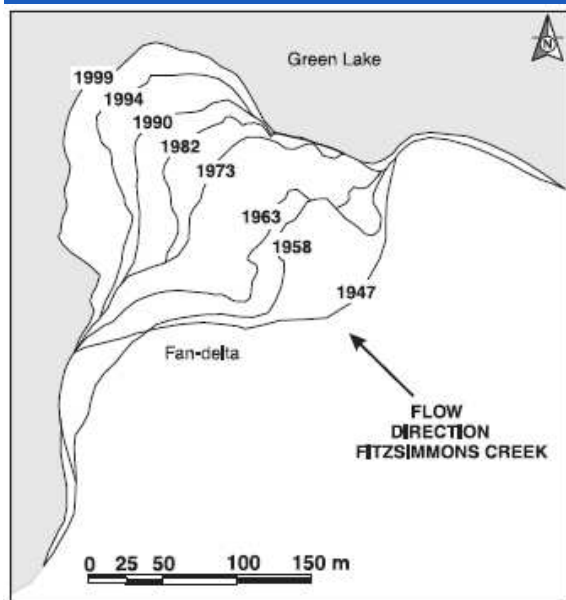
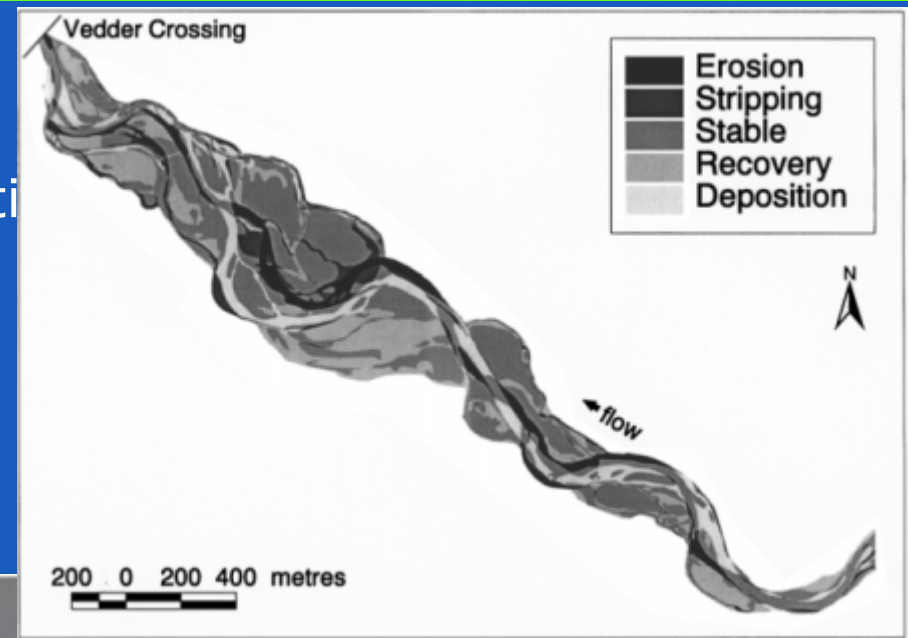
- Metodo morfologico
- Bacini di sedimentazione
- Campionatore vortex
- Trappole a fessura
- Campionatore tipo Helley-Smith
- Campionatore tipo Bunte
- Metodo della velocità virtuale
- Traccianti

Metodi INDIRETTI (misure "surrogate", da calibrare con campionamenti diretti)

- Geofono "Svizzero"
- Geofono "Giapponese"
- Geofono "Svedese"
- Idrofono

Metodi DIRETTI: Metodo morfologico

- Assunzione che **variazioni morfologiche d'alveo** siano relazionate al trasporto di sedimenti
- Valutazioni fatte su **grandi scale spaziali e lunghe scale temporali**



Es: Ham & Church (2000); Pelpola & Hickin (2003); Martin & Ham (2005)

Metodi DIRETTI: Bacino di sedimentazione

In torrenti montani si può valutare il trasporto solido, **a scala di singolo evento**, dal riempimento di bacini di sedimentazione a monte di briglie



Metodi DIRETTI: Bacino di sedimentazione

Attrezzando adeguatamente i bacini di sedimentazione è possibile anche ottenere informazioni sull'**intensità di trasporto** (kg/h o m³/h)

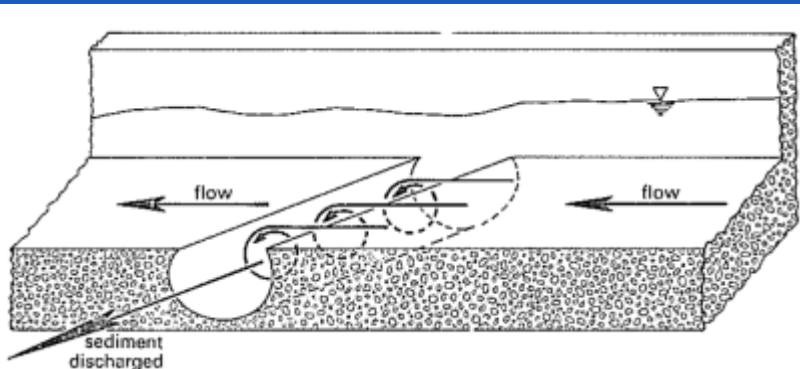
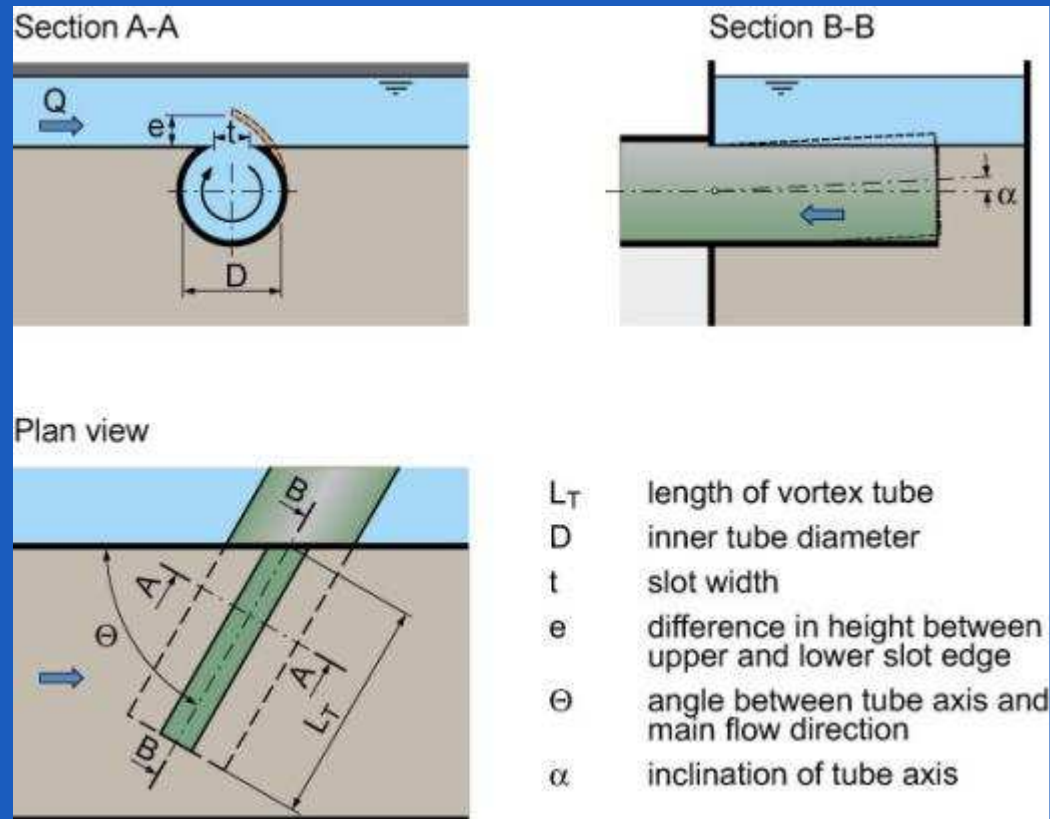
- * Campionatore a **carrello "mobile"** posto a valle della briglia
- * **Sensori di pressione** posti sul fondo del bacino di sedimentazione
- * Griglia separatrice + **sensori ultrasuoni** sopra l'area di deposito



Rio Cordon (Lenzi et al., 2004)

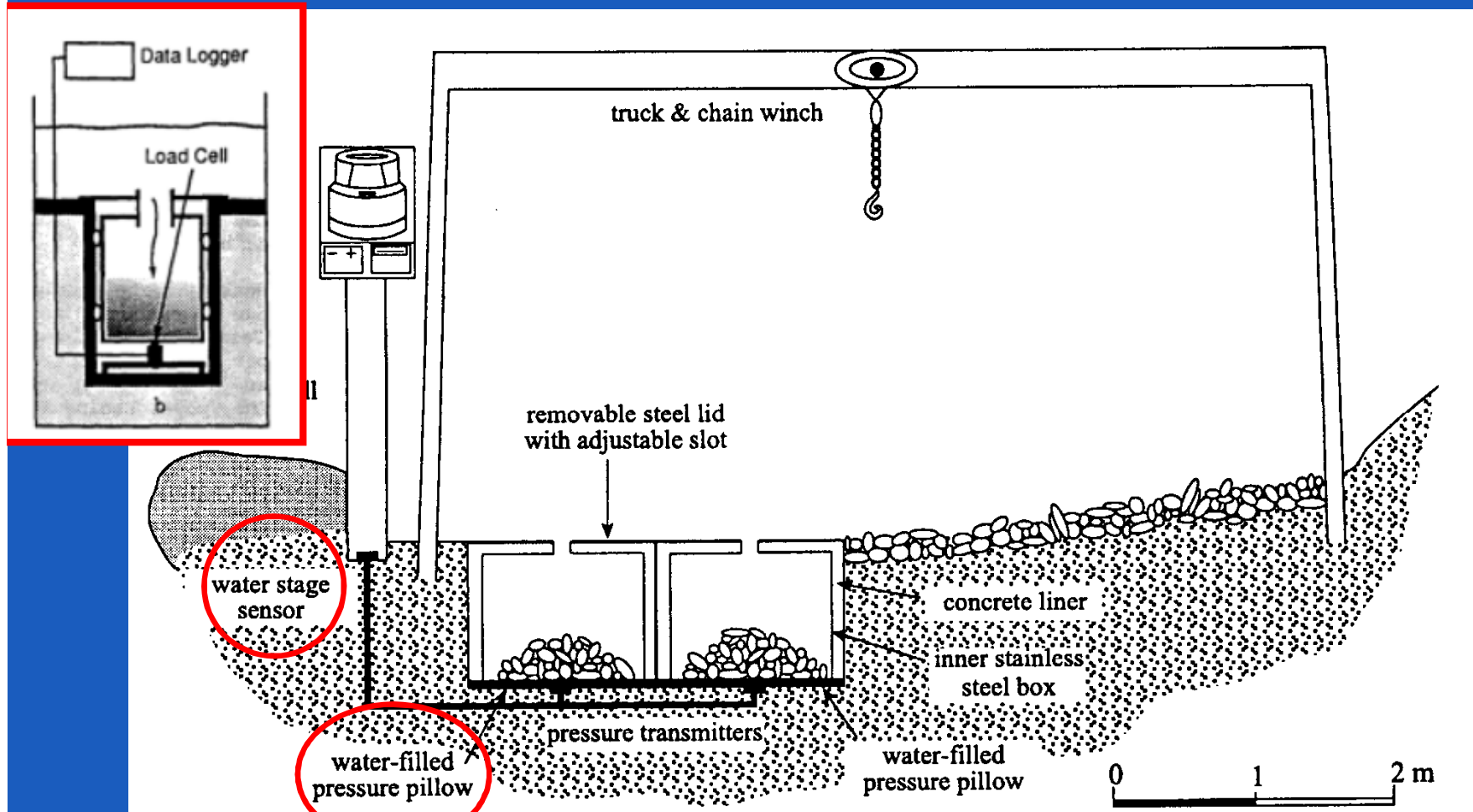
Metodi DIRETTI: Campionatore vortex

- **Fessura** sul fondo di un cunettone o tubo libero che cattura i sedimenti trasportati dalla corrente.
- Misura **in continuo** dell'intensità di trasporto solido
- Più adatto a corsi d'acqua con **granulometria ghiaiosa** (limite è il diametro del tubo)



Torlesse stream, NZ (Hayward & Southerland, 1974)

Metodi DIRETTI: Trappole a fessura (modello Reid)



$$q_{sb} = \frac{\Delta m_s}{B \Delta t} = \frac{c (\Delta p - \Delta p_w)}{B \Delta t}$$

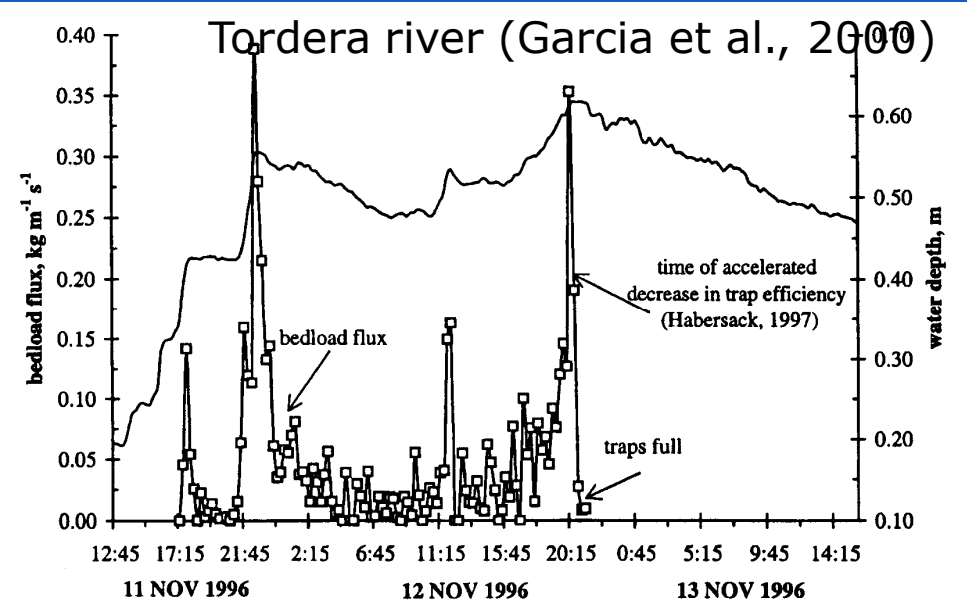
Δp variazione pressione totale
 Δp_w variazione pressione dovuta al livello idrometrico
 B larghezza alveo (m)
 Δt intervallo di registrazione (s)

Metodi DIRETTI: Trappole a fessura (modello Reid)



Nahal Eshtemoa, Israele (Laronne et al., 1992)

- Misura **in continuo** dell'intensità di trasporto solido e delle fluttuazioni a Δt piccoli
- Indicazioni su **inizio e fine** del trasporto (per calcolare τ_c)
- **Raccolta del materiale** trasportato (per calcolare τ_c)



Metodi DIRETTI: Trappole a fessura (modello Reid)



Drau, Austria (Seiz & Habersack, 2010)

Solitamente usati in gravel-bed rivers

Volume a disposizione è limitato (efficienza diminuisce con il riempimento)

Limite granulometrico (dimensione fessura)

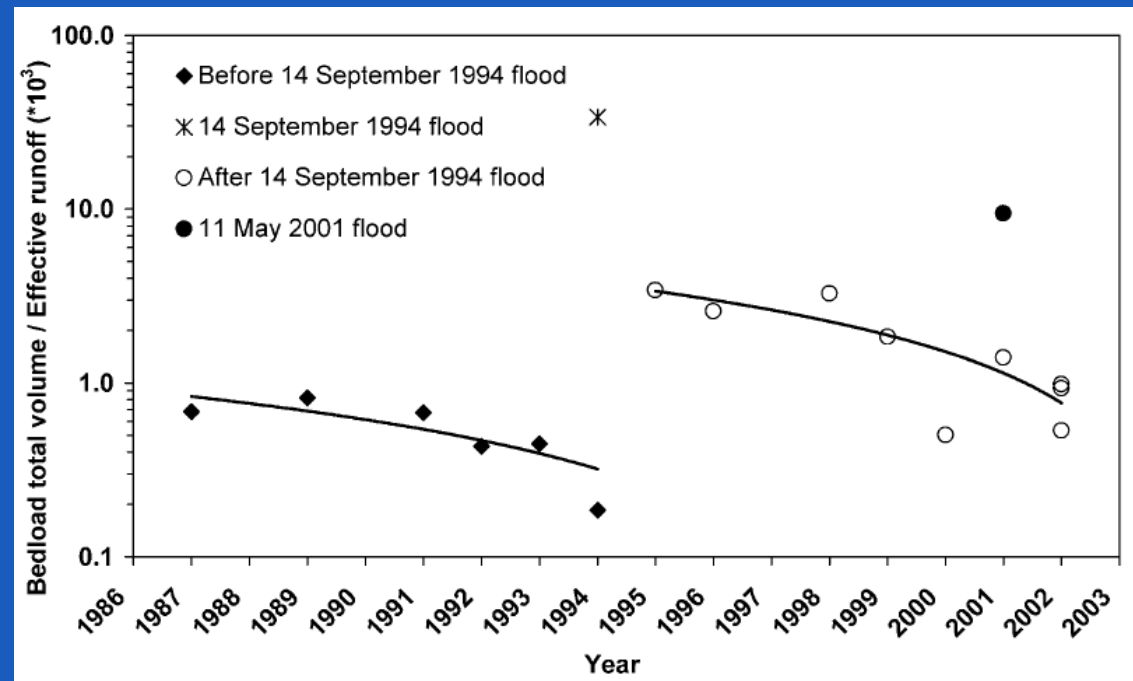


Torrenti giapponesi

Metodi DIRETTI: Bacini e trappole vortex e a fessura

Bacini di sedimentazione, campionatore vortex e trappole a fessura necessitano di **stazioni di monitoraggio fisse (costose)** ma consentono di monitorare **in continuo** il trasporto di fondo, permettendo di quantificare:

- * **Volumi** di sedimento trasportati da singoli eventi
- * **Intensità** di trasporto solido
- * Soglie di **inizio del moto**
- * **Granulometria** del materiale trasportato
- * **Dinamica di lungo periodo** del trasporto solido
- * **Dinamica inter-piène** del trasporto



Lenzi et al. (2004); Bacino di sedimentazione + ultrasuoni

Metodi DIRETTI: Campionatore tipo Helley-Smith

I campionatori Helley-Smith sono utilizzati in una grande varietà di ambienti

- Da ponti



Metodi DIRETTI: Campionatore tipo Helley-Smith

I campionatori Helley-Smith sono utilizzati in una grande varietà di ambienti

- Da barca



- A guado



- Da passerella



Metodi DIRETTI: Campionatore tipo Helley-Smith

In torrenti montani il campionamento con Helley-Smith va preferibilmente condotto da una **passerella**

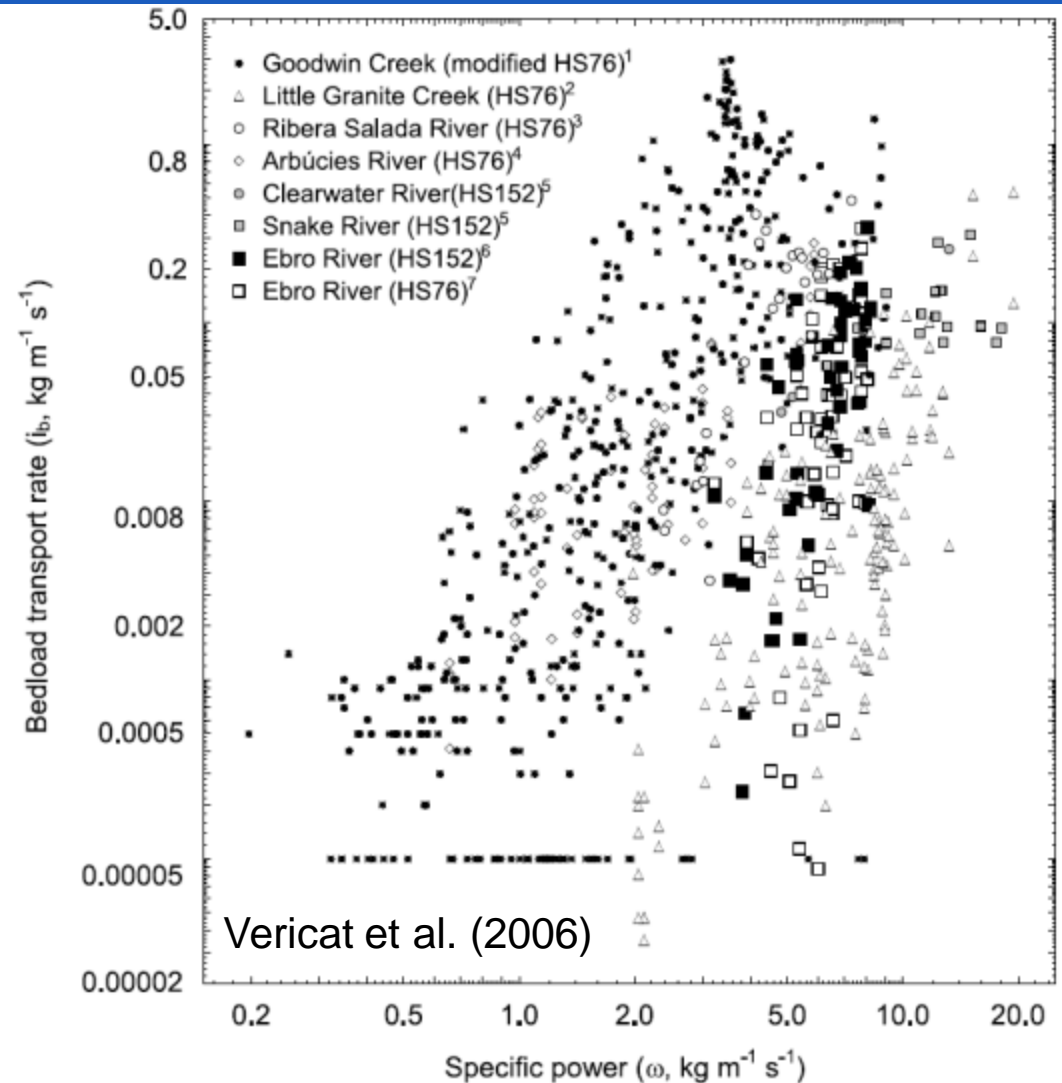
- Consigliabile prendere **campioni in più punti** lungo la sezione trasversale



Metodi DIRETTI: Campionatore tipo Helley-Smith

- Data la forte variabilità temporale del fenomeno è consigliabile **ripetere più volte i campionamenti** in ogni verticale

- Permettono di misurare l'**intensità** di trasporto e la **granulometria** del material trasportato

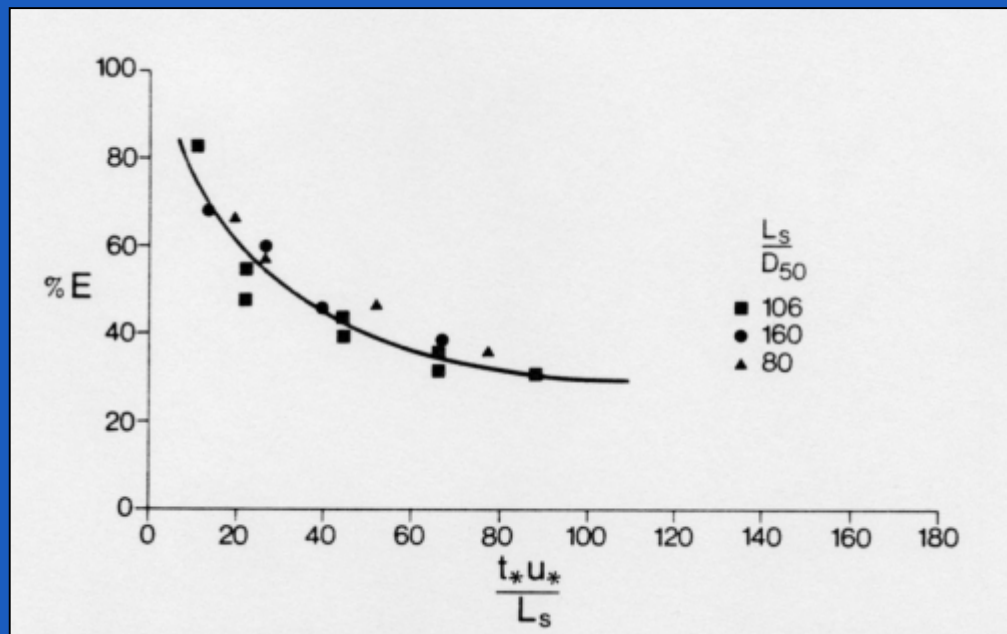


Metodi DIRETTI: Campionatore tipo Helley-Smith

L'efficienza di campionamento diminuisce con il progressivo riempimento del campionatore

L'efficienza di campionamento diminuisce con tempi di campionamento lunghi e campionatori piccoli

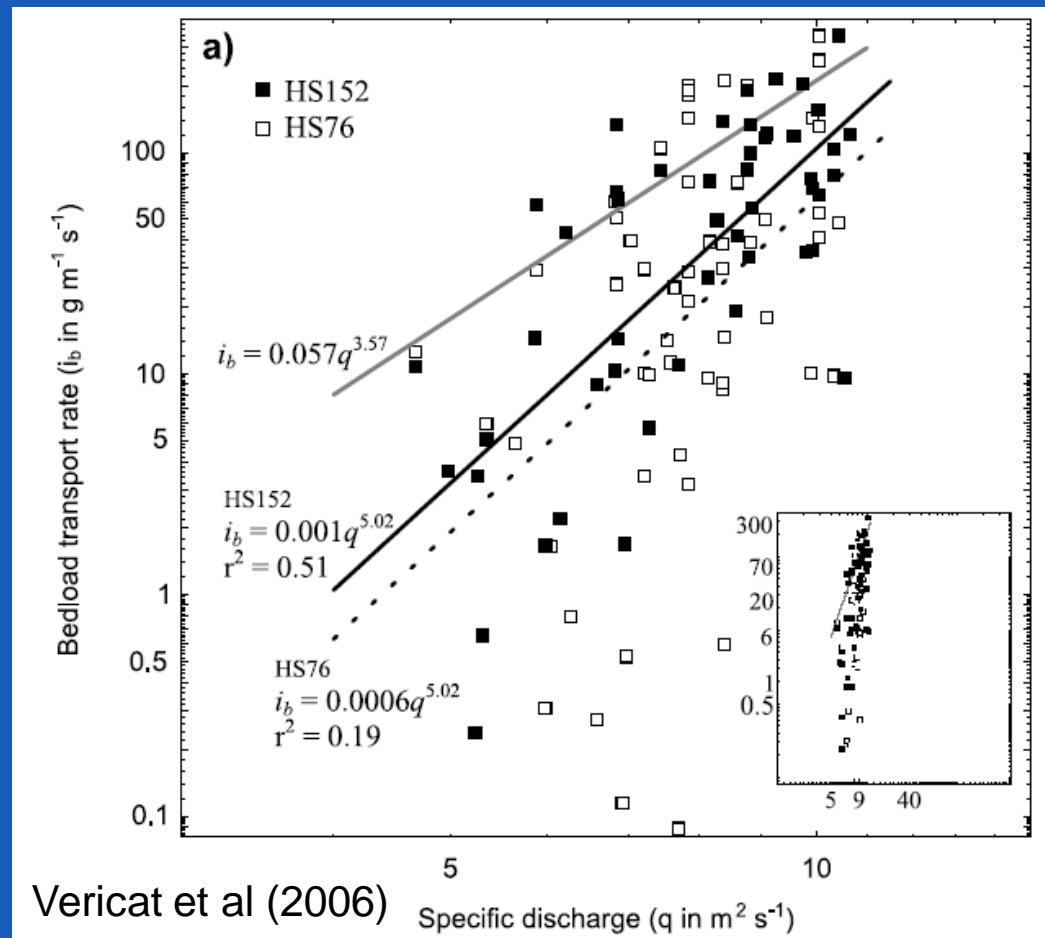
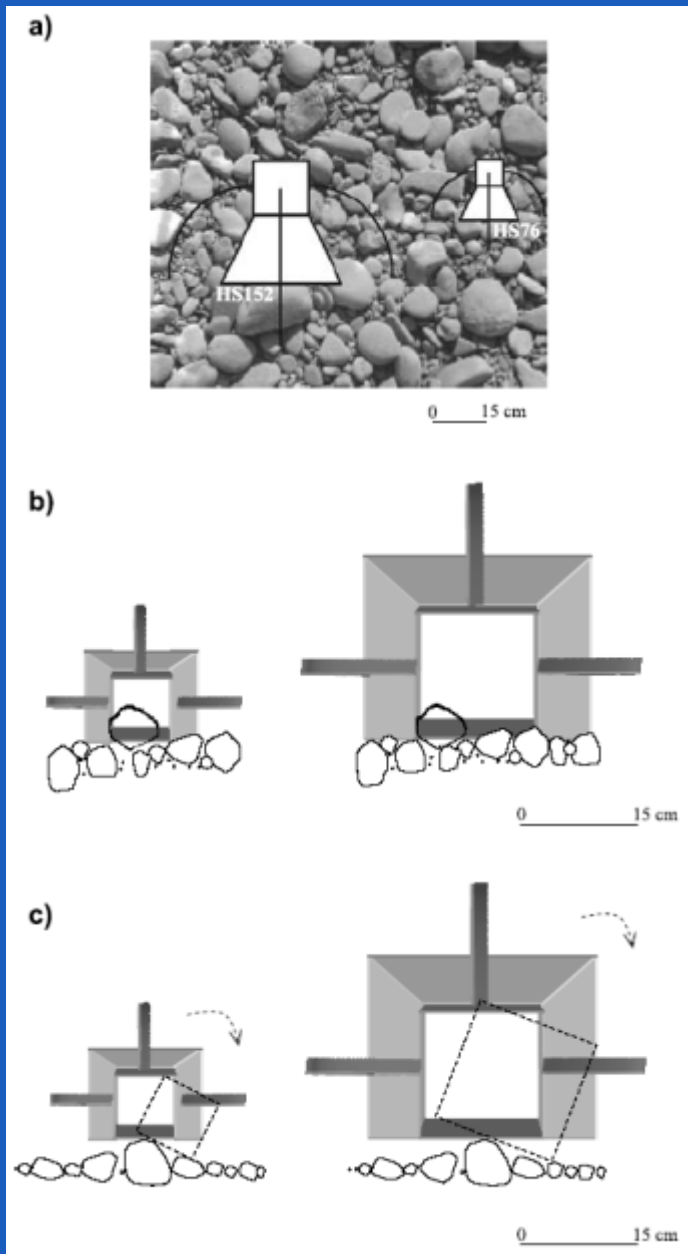
$$E = \frac{\text{Volume}_{\text{raccolto}}}{\text{Volume}_{\text{effettivam}_{\text{trasportato}}}}$$



$$E (\%) = f \left[\frac{L_s}{D_{50}}, \frac{t^* u^*}{L_s} \right]$$

t^* tempo di campionamento
 L_s larghezza del campionatore
 u^* velocità della corrente

Metodi DIRETTI: Campionatore tipo Helley-Smith

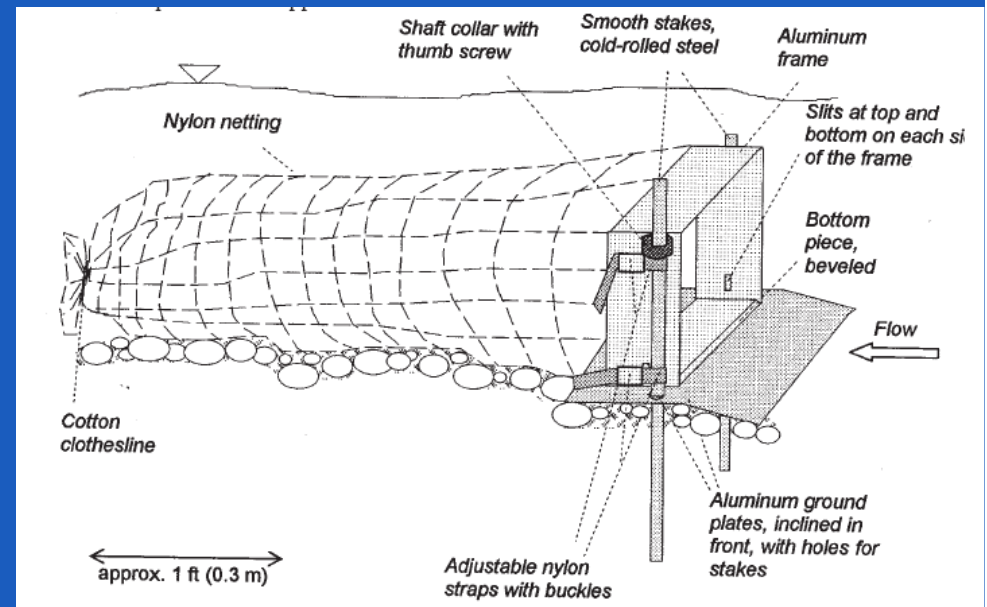


Vericat et al (2006)

La **dimensione del campionatore**, la **granulometria superficiale** e la presenza di ostruzioni influenzano l'efficienza di cattura del campionatore.

Metodi DIRETTI: Campionatore tipo Bunte

- Misura del trasporto a **scala temporale più lunga** (anche evento singolo)
- Non necessita necessariamente della presenza in campo durante l'evento



Metodi DIRETTI: Campionatore tipo Bunte

Utilizzabili anche in torrenti montani (dimensioni maggiori di un H-S)



Bunte & Abt (2005)

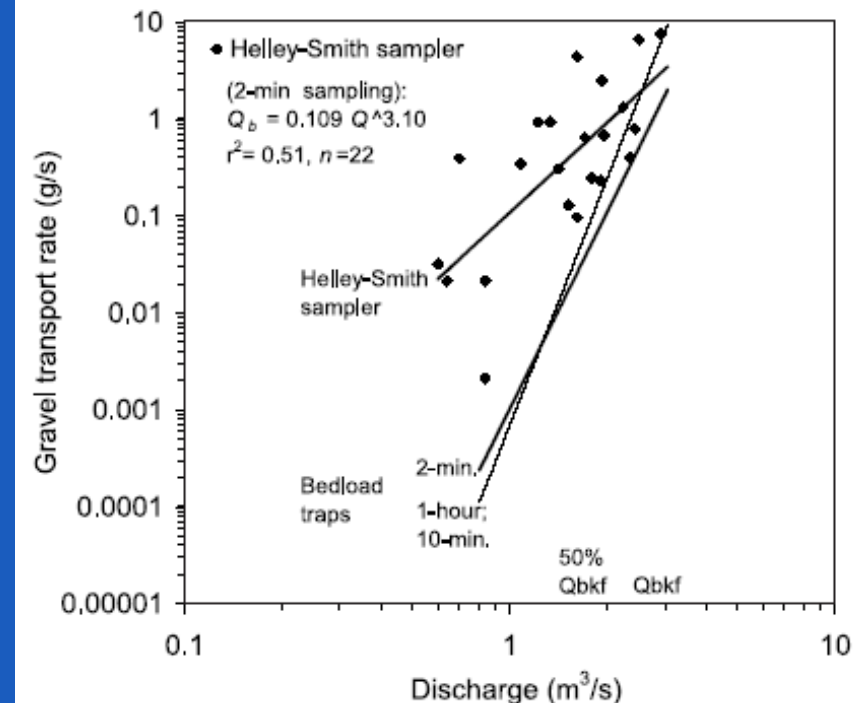
$$Q_b = \frac{m_{s1} * w_1}{w_s * t_{s1}} + \frac{m_{s2} * w_2}{w_s * t_{s2}} + \frac{m_{s3} * w_3}{w_s * t_{s3}}$$

m_{s1} = sedimenti raccolti nel campionatore 1

w_s = larghezza campionatore

w_{s1} = porzione rappresentata dal campionamento

t_{s1} = durata del campionamento

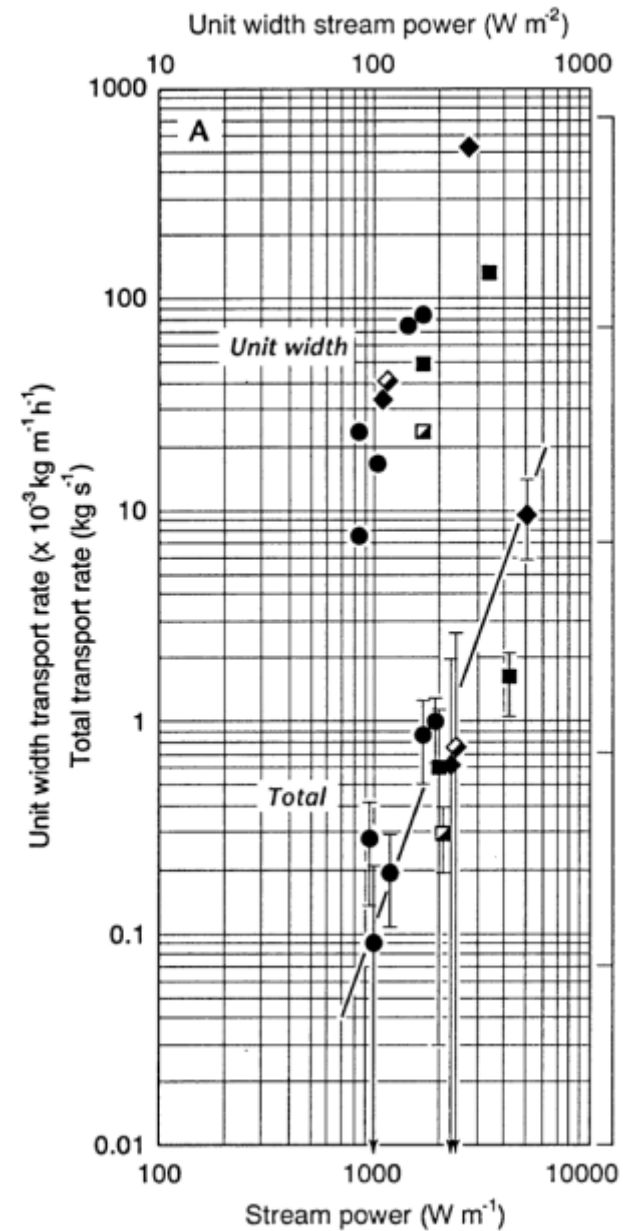
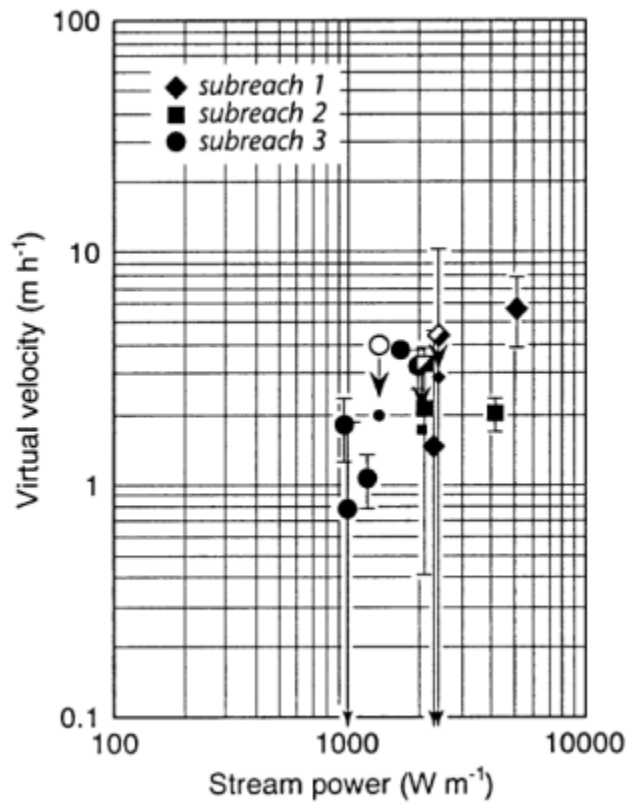


Metodi DIRETTI: Metodo della velocità virtuale

$$G_b = v_b d_s w_s \rho_s$$

G_b intensità di trasporto
 v_b velocità di trasporto
 d_s spessore di sedimento
 w_s larghezza attiva (m)

Haschenburger & Church (1998)



Metodi DIRETTI: Misura del trasporto di singoli clasti

Elementi grossolani numerati singolarmente



Ciottoli colorati

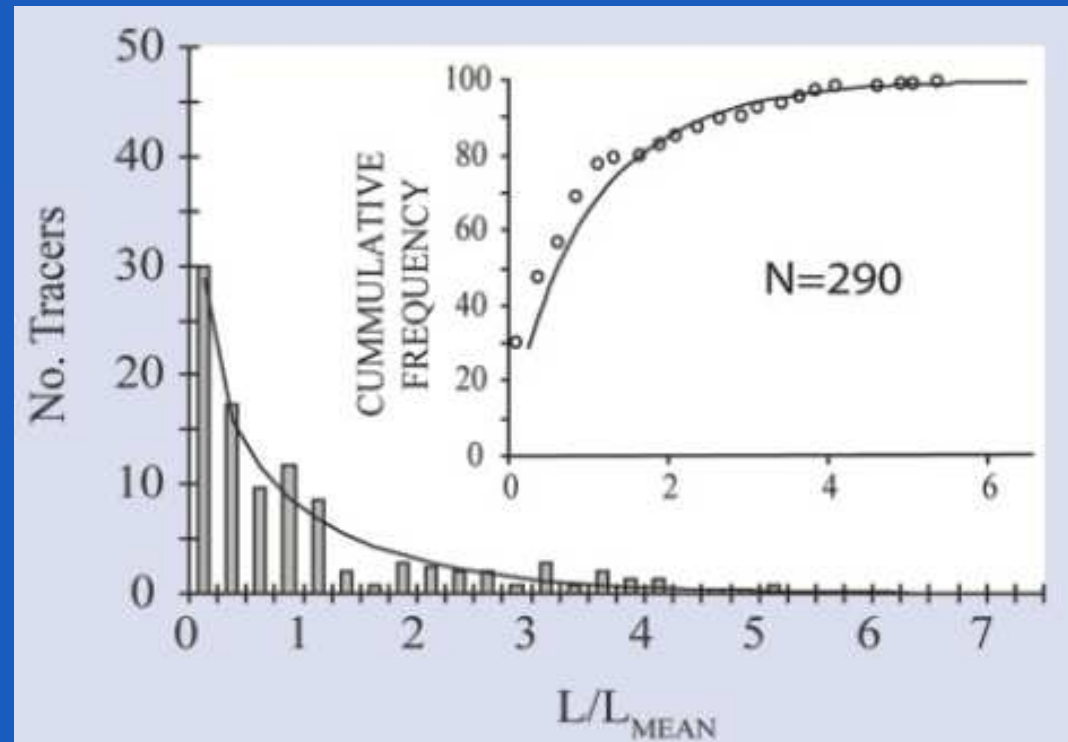
Aree ghiaiose colorate



Metodi DIRETTI: Misura del trasporto di singoli clasti

Tag magnetici inseriti in singoli elementi lapidei, rintracciati poi con un particolare metal detector

Consente la misura del trasporto di singoli clasti, da relazionare al loro diametro



Eaton et al. (2008)

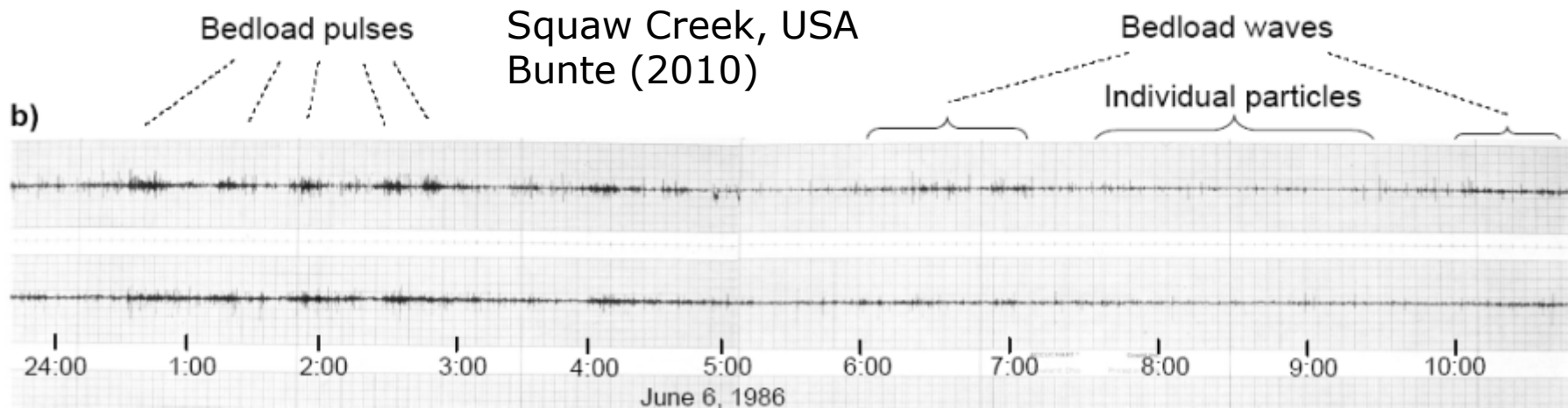
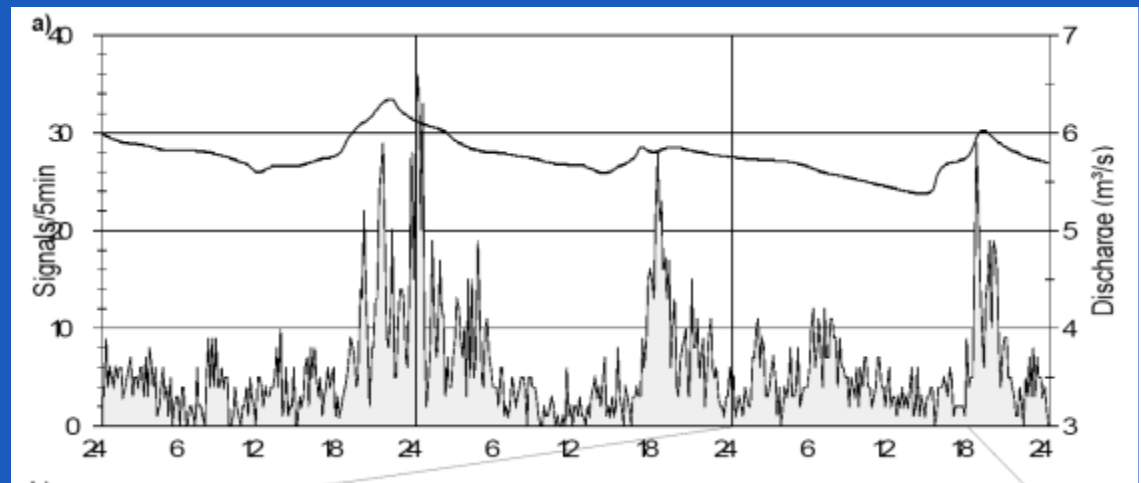
Metodi DIRETTI: Misura del trasporto di singoli clasti

Traccianti magnetici

Misura del passaggio di grani magnetici in prossimità di una antenna fissa. Adatta a bacini con litologia vulcanica (**magnetiti**)

I segnali dipendono fortemente dalla **velocità** di trasporto e non dipendono dal **diametro** dei sedimenti.

Necessità di calibrazione con misure dirette

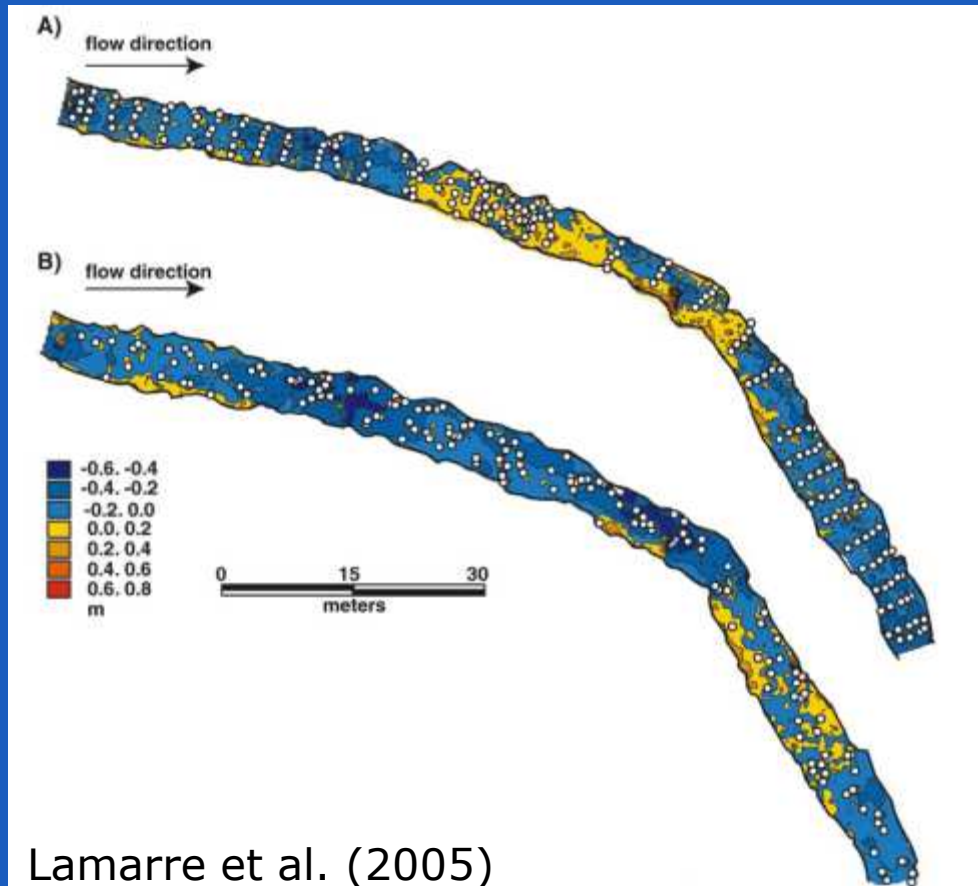


Metodi DIRETTI: Misura del trasporto di singoli clasti

Transponders passivi (PIT) inseriti in singoli clasti

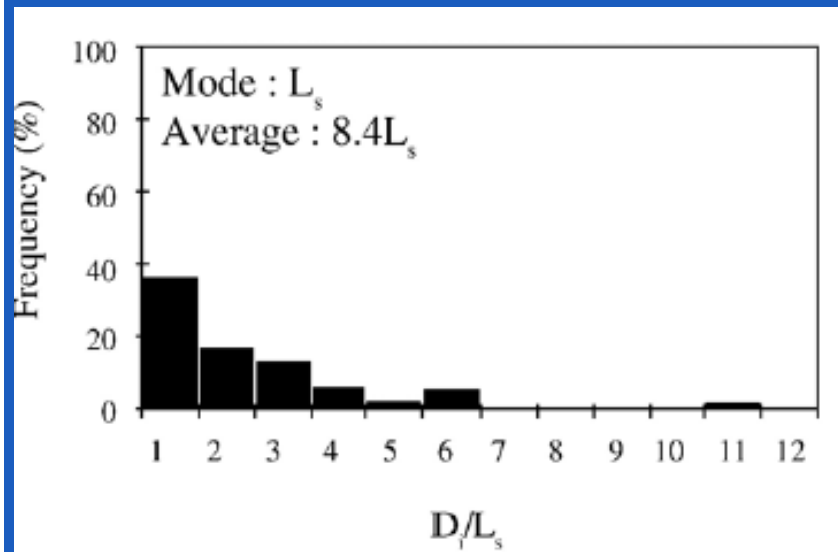
Ad ogni PIT è associato un **codice numerico**, leggibile da una **antenna** dedicata

Già usato con successo in torrenti montani

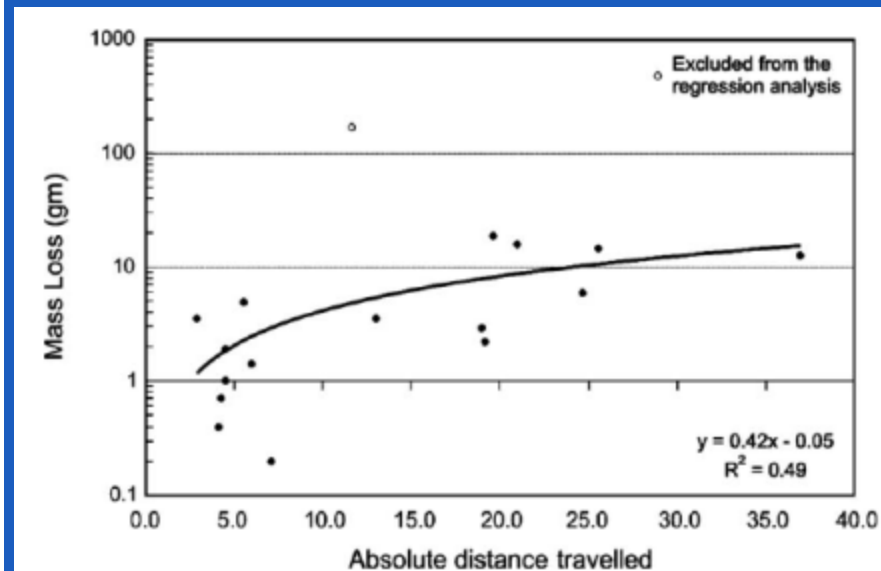


Lamarre et al. (2005)

Metodi DIRETTI: Misura del trasporto di singoli clasti



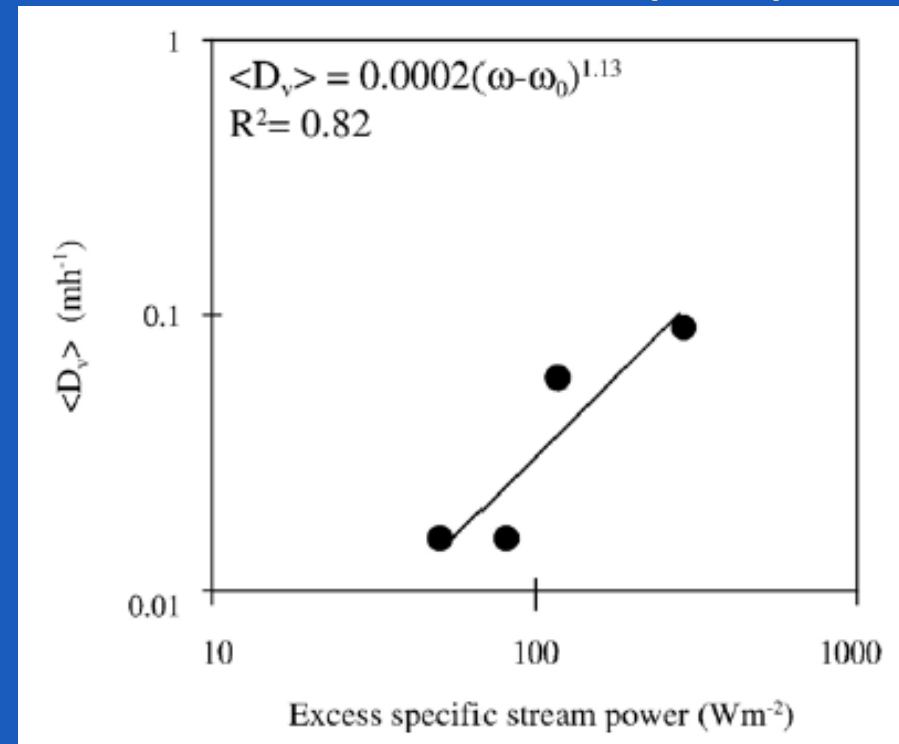
Numero di elementi mobilizzati vs.
Diametro/distanza percorsa



Distanza percorsa vs.
erosione netta

Allan et al. (2006)

Lamarre et al. (2008)



Velocità virtuale vs.
stream power



Metodi DIRETTI: Misura del trasporto di singoli clasti

Sistema di antenne fisse per il monitoraggio del trasporto di singoli clasti (PIT)

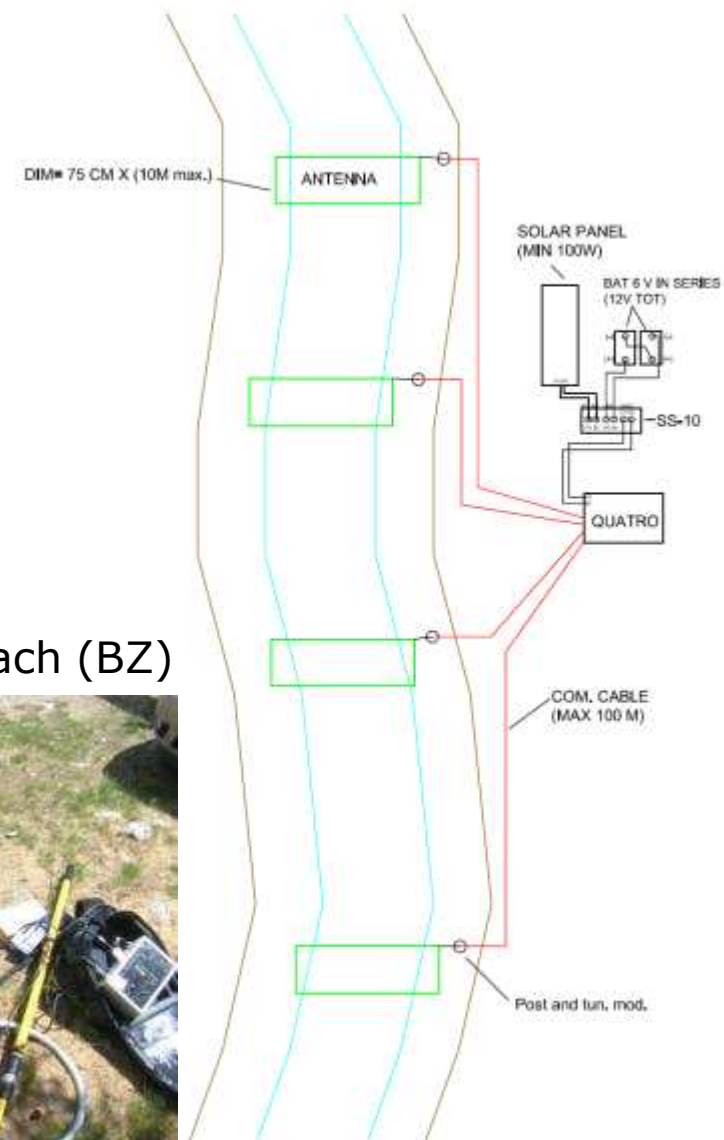
Consente il monitoraggio di:

- Moto incipiente
- Velocità virtuale dei clasti
- Velocità reale dei clasti
- Durata delle soste
- Ricostruzione percorso



Saldurbach (BZ)

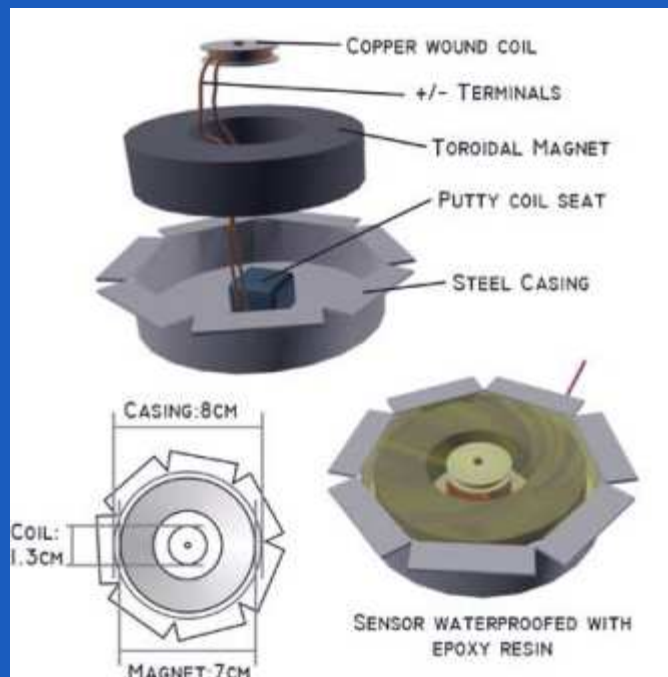
PLAN VIEW (M)



Metodi INDIRETTI

Misurano l'effetto sonoro o di vibrazione o di impatto generato dal trasporto di sedimenti su sensori di vario tipo:

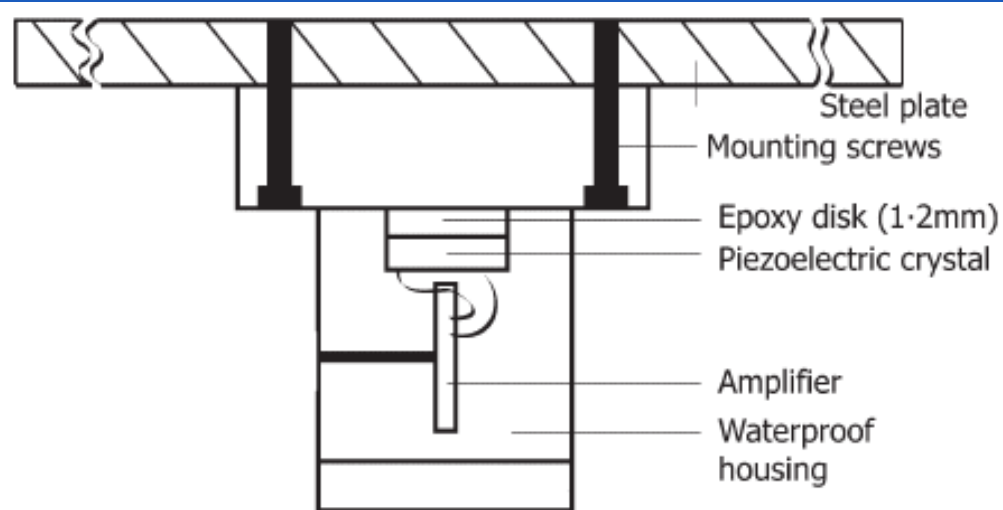
- Sensori ad impatto (geofoni) tubolari
- Sensori ad impatto (geofoni) a placca
- Apparecchi acustici
- Apparecchi magnetici



Metodi INDIRETTI: Geofono "svizzero"

Sensore piezoelettrico che registra il **suono** generato dall'impatto di clasti su una **placca** metallica

- **Non invasivo** (influenza minima sul trasporto e sull'idraulica locali)
- Il suono aumenta con l'**intensità di trasporto**
- La frequenza è inversamente proporzionale al **diametro** dei sedimenti trasportati



Metodi INDIRETTI: Geofono "svizzero"

Torrenti Erlembach (0.7 km²) e Pitzbach (27 km²)

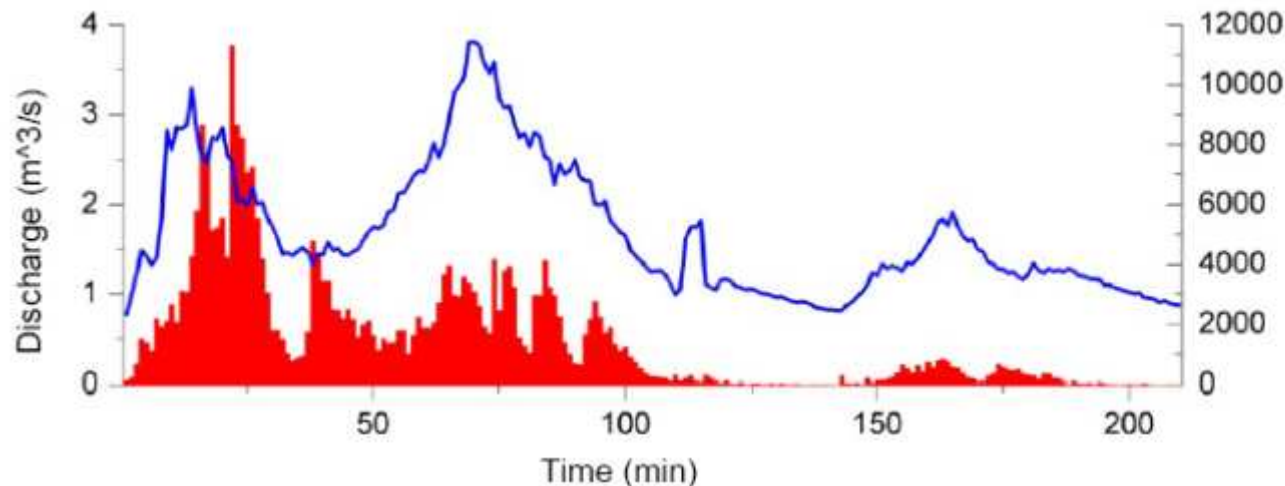
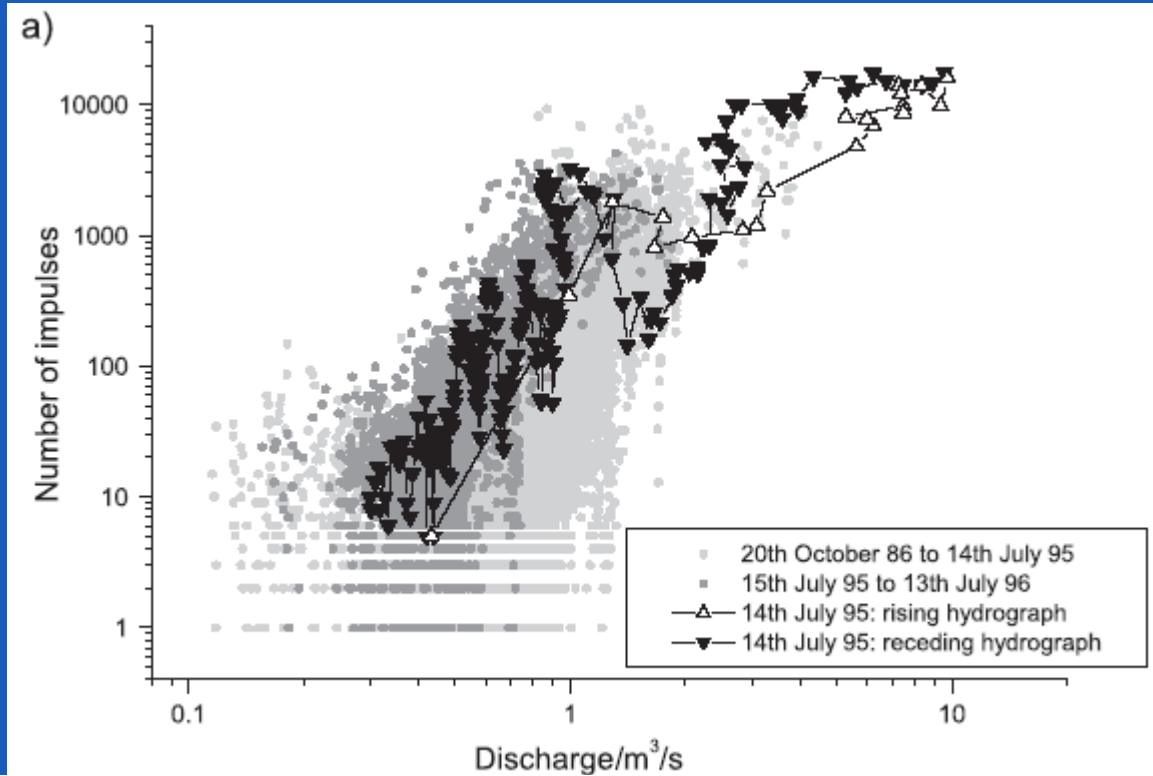
- Bacino di sedimentazione
- Campionatore a canestro
- Geofono



Metodi INDIRETTI: Geofono "svizzero"

Anche senza calibrazione:

- **Inizio e fine** trasporto
- **Numero impulsi** vs portata liquida
- **Dinamica temporale** dell'intensità di trasporto a scala di evento e a scala medio-lunga

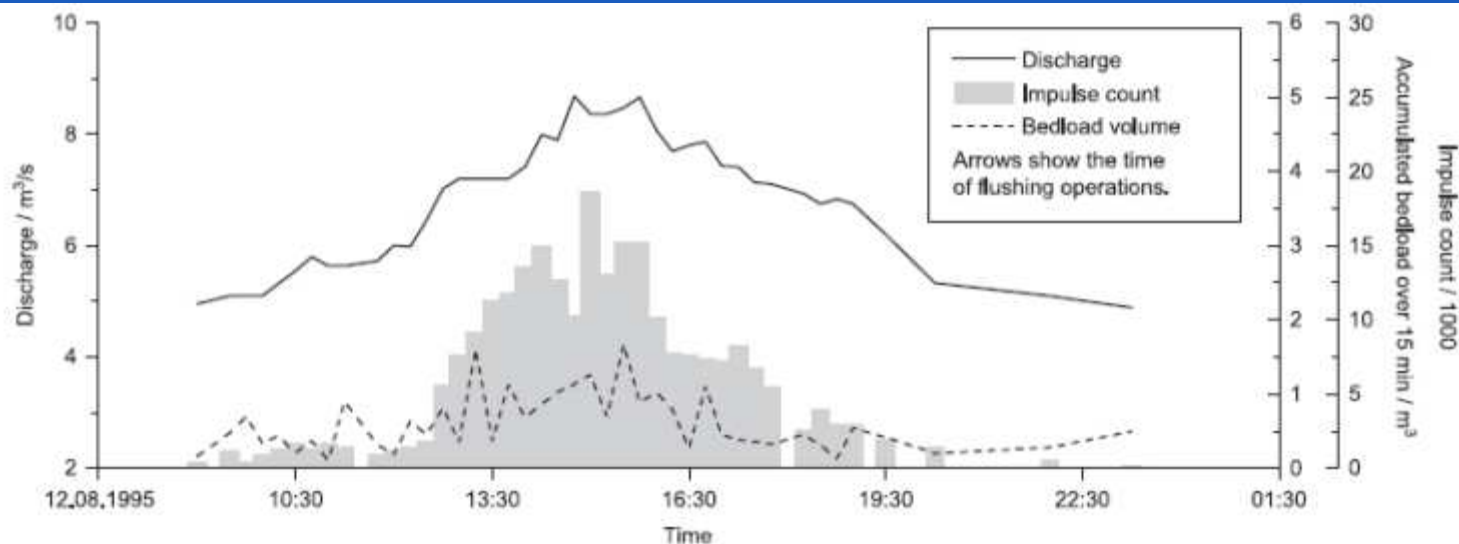
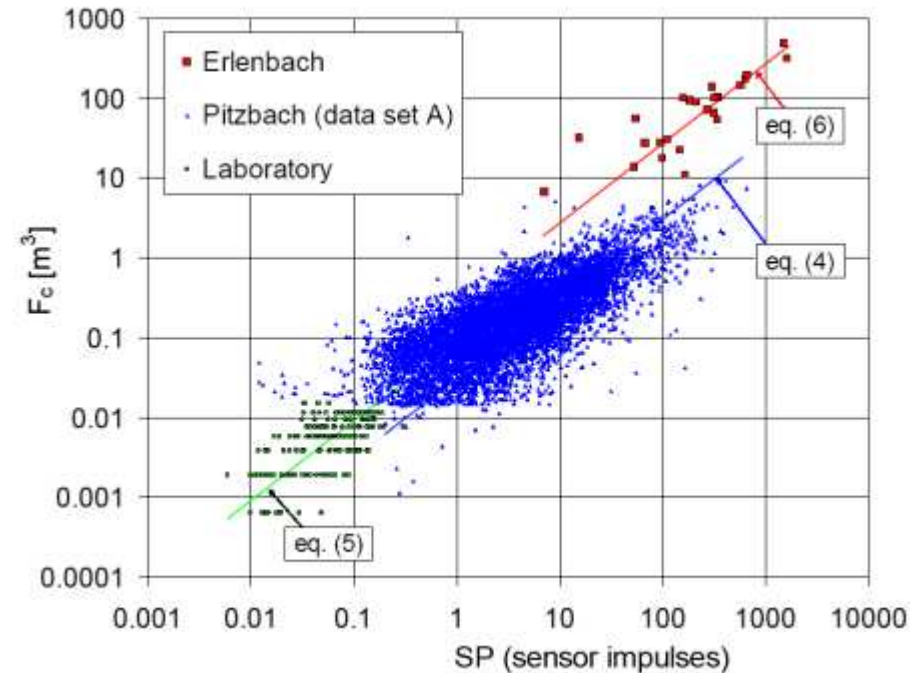


Turowski &
Rickenmann (2011)
Rickenmann &
McArdell (2007)
Hegg & Rickenmann
(1998)

Metodi INDIRETTI: Geofono "svizzero"

Calibrazione: Rimane scatter considerevole (2 o.g.) dovuto a:

- Forma e dimensione dei clasti
- Tipo di trasporto (saltazione vs. rotolamento)
- Fluttuazioni naturali
- Lo scatter si riduce se media fatta a **scala temporale** più lunga



Rickenmann et al. (2010)
Turowski & Rickenmann (2009)
Rickenmann & McArdell (2008)

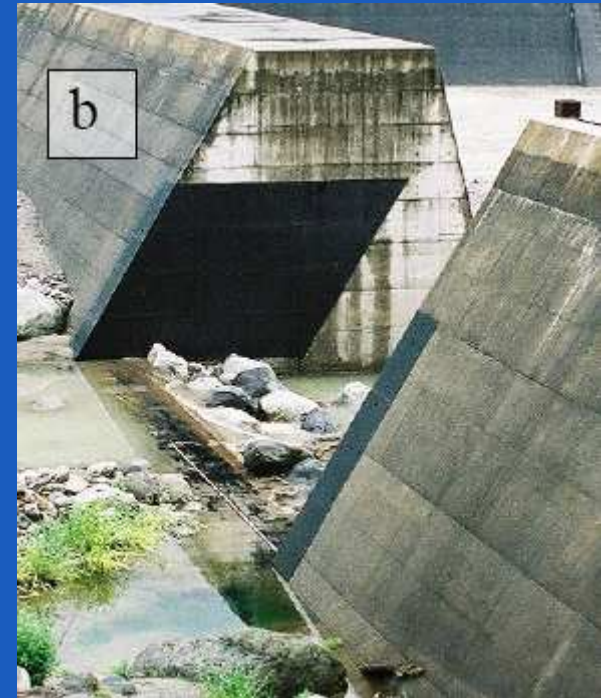
Metodi INDIRETTI: Geofono "giapponese"

Sensore acustico collegato a un tubo metallico vuoto

Registrazione intensità di impatti su più canali (multifrequenza)



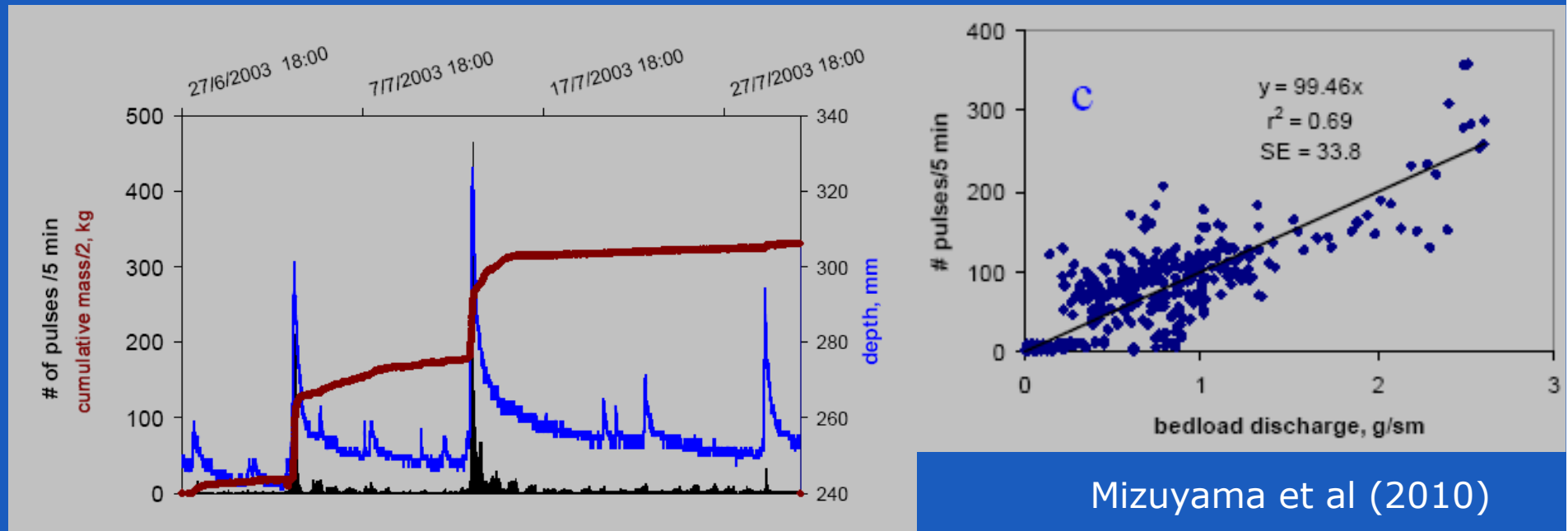
Saldurbach (BZ)



Mizuyama et al (2003; 2010)



Metodi INDIRETTI: Geofono "giapponese"

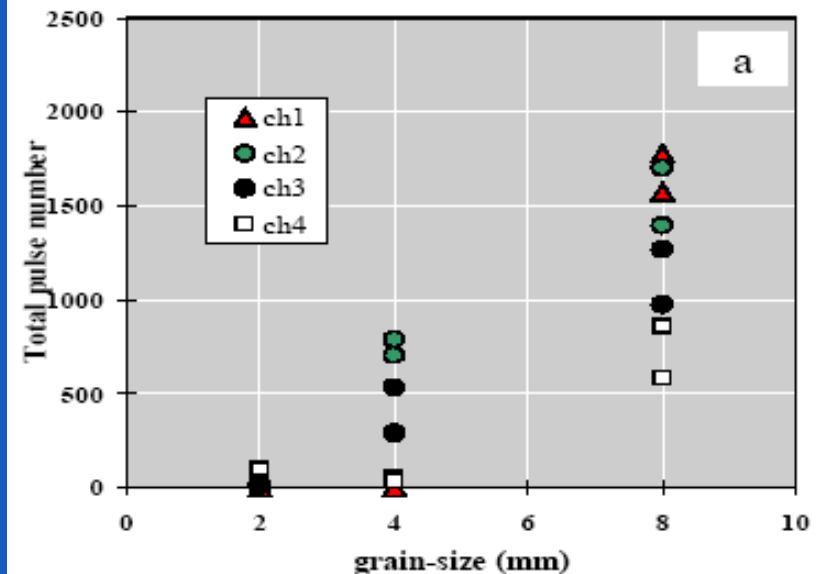


Mizuyama et al (2010)

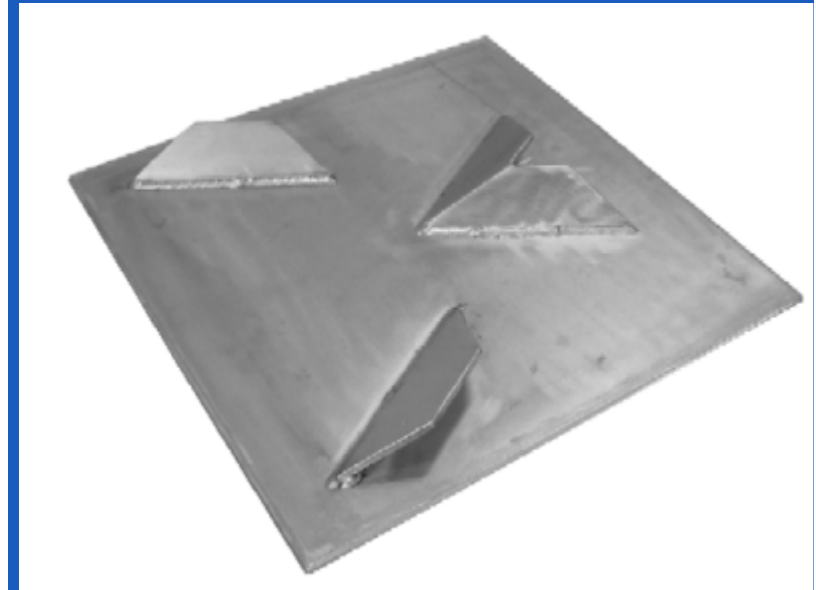
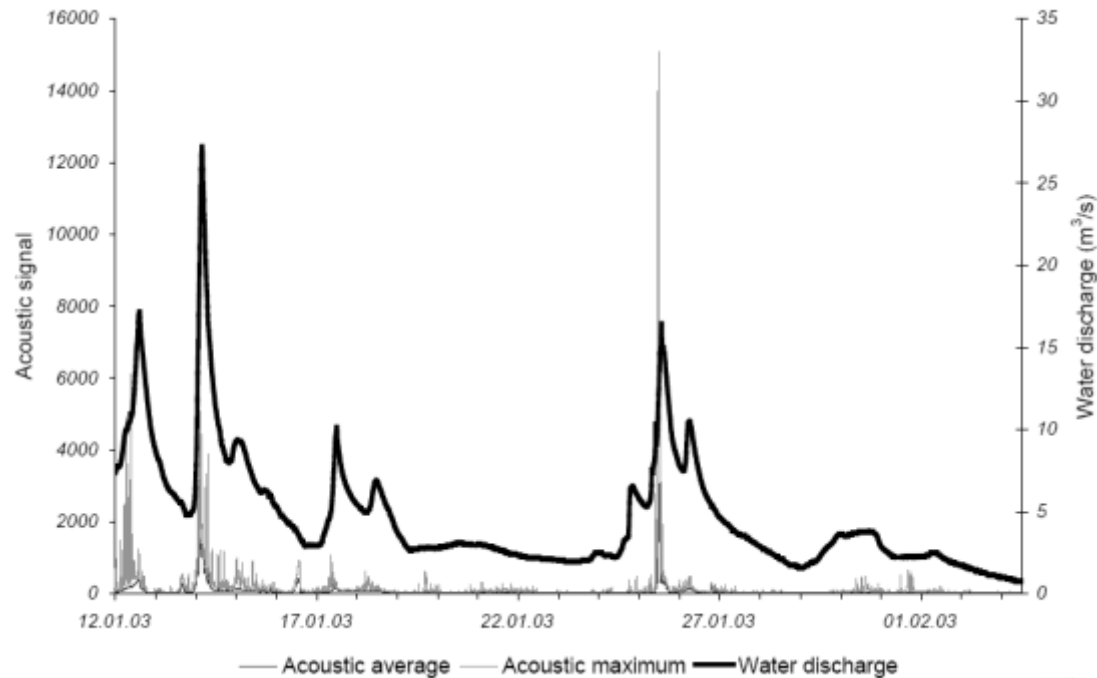
La calibrazione dipende da:

- Sensitività del microfono
- Granulometria dei clasti trasportati

Possibilità di migliorare la calibrazione cambiando l'amplificazione e il filtraggio dei segnali registrati

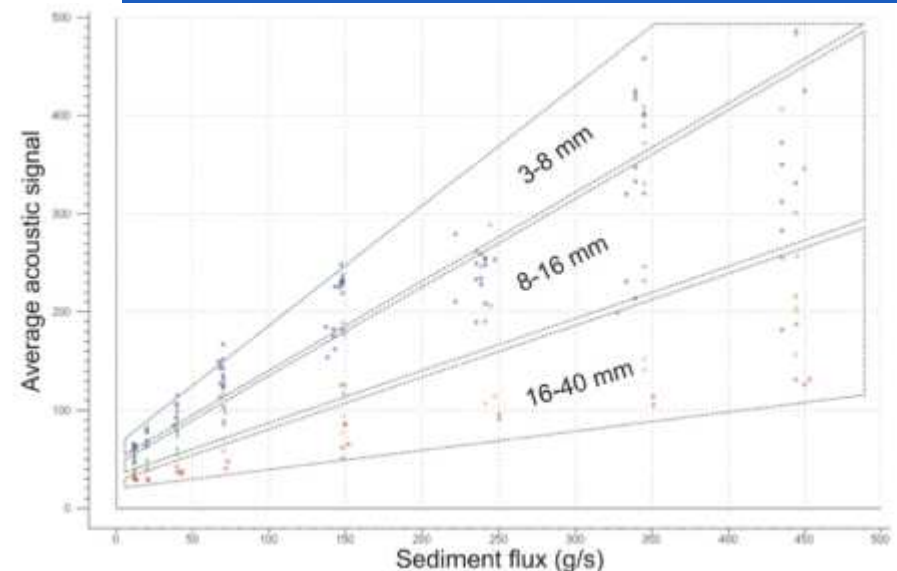


Metodi INDIRETTI: Geofono "svedese"



Moen et al (2010)

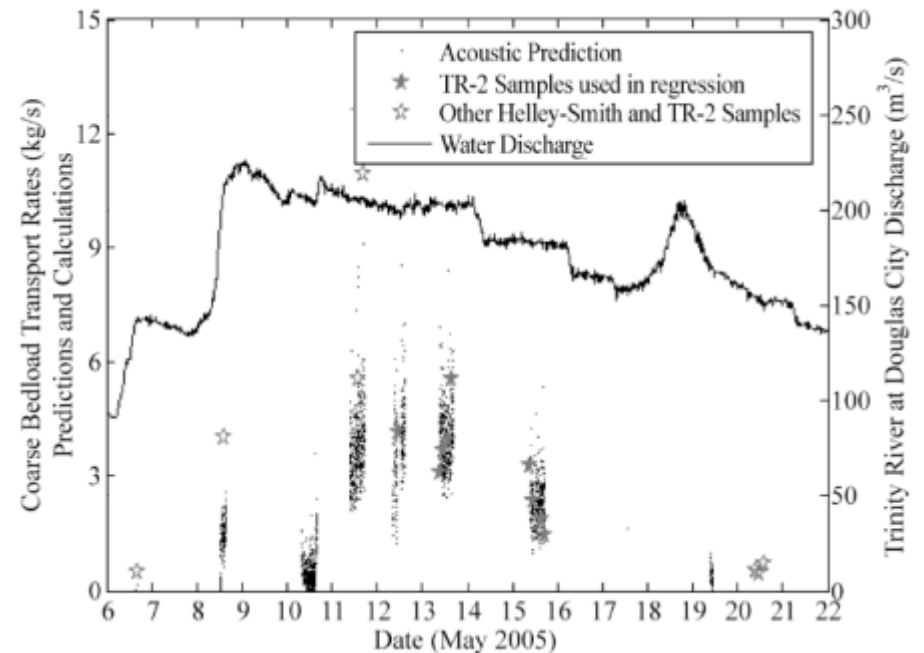
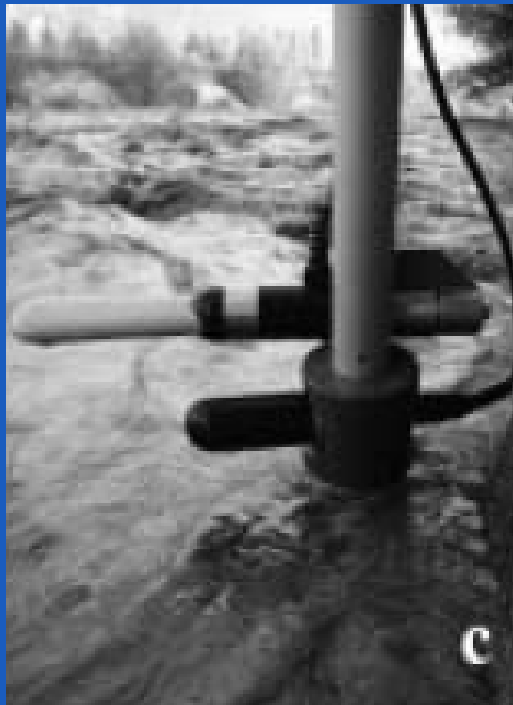
- Microfono **multifrequenza** (0-1000 kHz) montato sotto una placca metallica di 50x50cm
- Calibrati con esperimenti di laboratorio
- **Granulometria** influenza fortemente il segnale



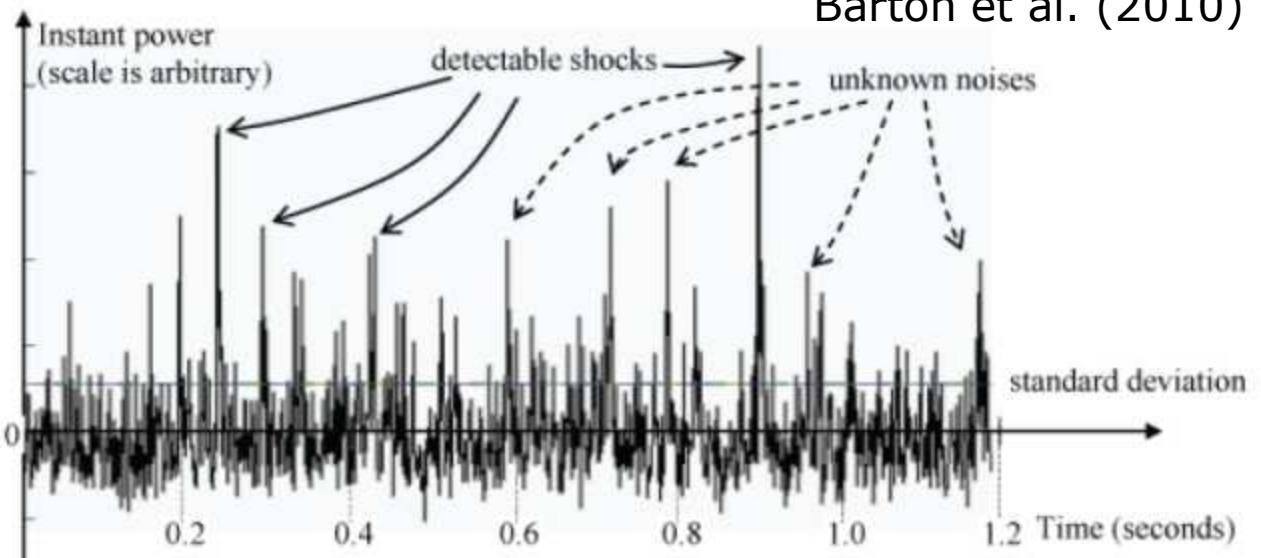
Metodi INDIRETTI: Idrofono

Sensore acustico collegato a un sistema di amplificazione

- Calibrazione molto problematica
- Elevata influenza di "rumori di fondo" generato anche dai deflussi liquidi

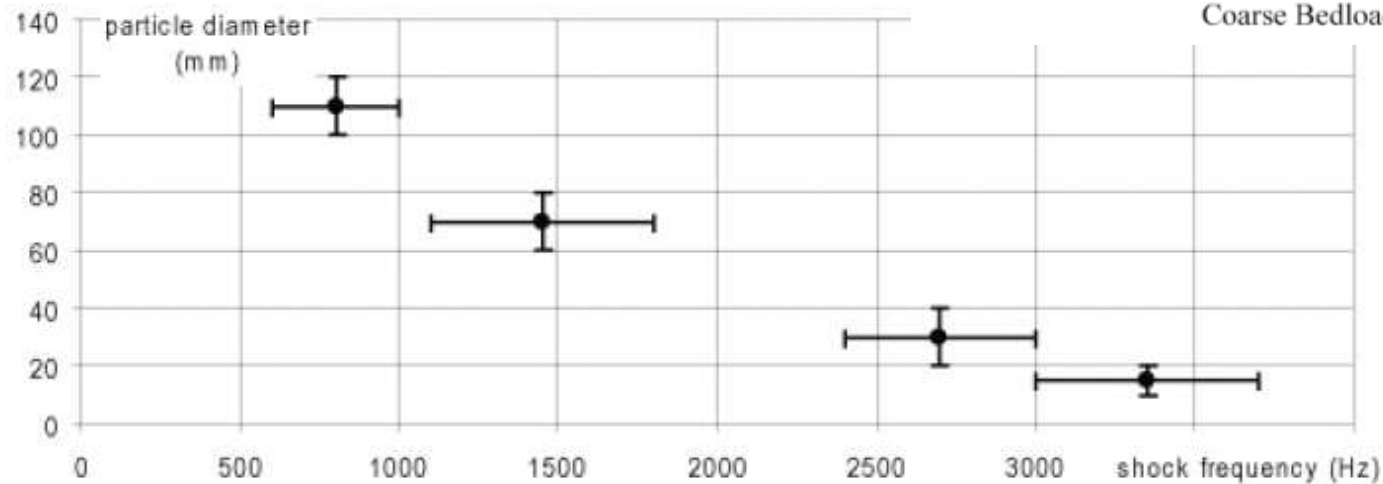
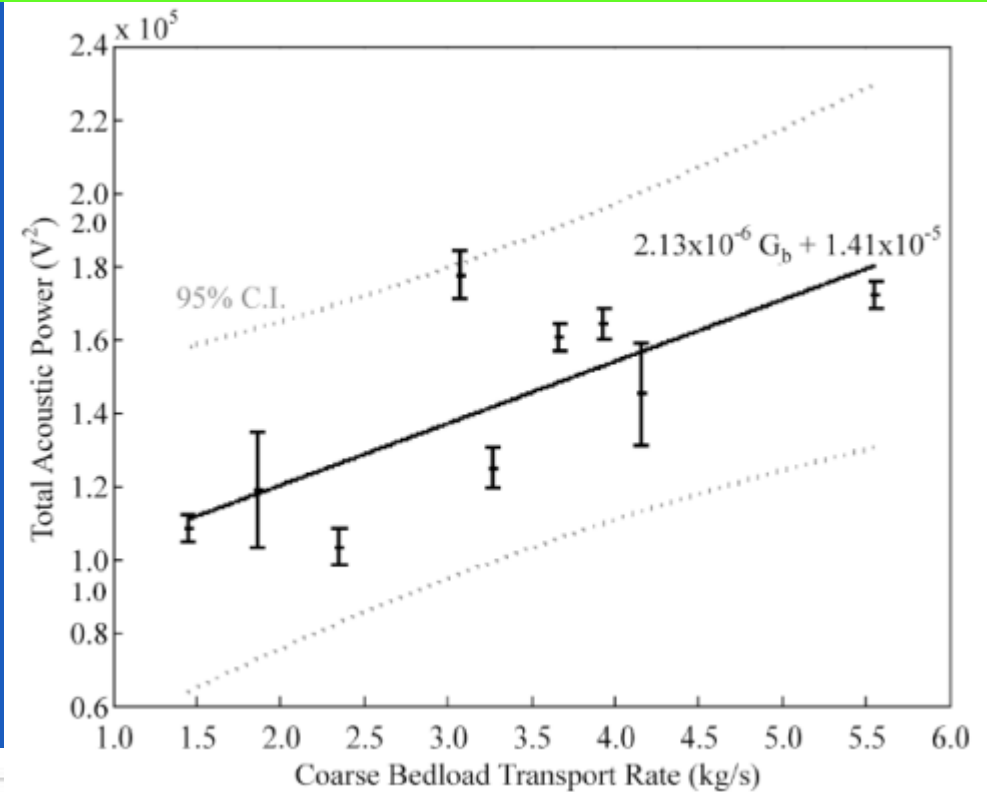


Barton et al. (2010)



Metodi INDIRETTI: Idrofono

L'analisi spettrale della frequenza dei suoni registrati sembra poter aiutare a determinare la granulometria del materiale trasportato



Belleudy et al.
(2010)

Metodi INDIRETTI

VANTAGGI

Robusti; Economici;
Facili da installare su opere esistenti;
Non invasivi; Registrazioni in continuo e a bassi step temporali.

SVANTAGGI

Necessità di stazioni stabili (soglia o briglia);
Limite inferiore di granulometria rilevabile;
Misura incerta del trasporto solido per rotolamento;
Necessita calibrazione locale;
Calibrazione ancora incerta.

Comunque, anche senza calibrazione:

- Inizio e fine del trasporto
- Numero impulsi vs. portata
- Dinamica del trasporto a varie scale temporali

Metodi adatti a torrenti montani

Vantaggi e svantaggi dei diversi metodi

| | Invasività | Flessibilità | Durata campionam | Efficienza | Dati D | Distanza trasporto | Automatiz zazione | Costi |
|--------------------|------------|--------------|------------------|------------|--------|--------------------|-------------------|-------|
| Trappola a fessura | -- | --- | ++ | - | +++ | | +++ | -- |
| Helley-Smith | --- | +++ | --- | -- | +++ | | --- | ++ |
| Bunte | - | ++ | + | ++ | ++ | | - | ++ |
| Traccianti | -- | --- | ++ | +++ | ++ | +++ | ++ | - |
| Geofono | ++ | --- | +++ | | --- | | +++ | -- |

+++ molto positivo

--- molto negativo

Es: Per stazione fissa

Metodi adatti a torrenti montani

Metodi vs. parametri del trasporto da monitorare

| | Intensità trasporto (kg m ⁻¹ s ⁻¹) | Trasporto totale (kg) | Δ spaziale del trasporto | Δ temporale del trasporto | Inizio del moto | Distanza trasporto | Percorso singoli grani | Spessore sedimenti attivi |
|--------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|------------------------|---------------------------|
| Trappola a fessura | *** | ** | - | *** | ** | - | - | - |
| Helley-Smith | *** | ** | *** | ** | * | - | - | - |
| Bunte | * | ** | ** | * | ** | - | - | - |
| Traccianti | * | ** | * | * | ** | *** | *** | *** |
| Geofono | *** | *** | * | *** | *** | - | - | - |

*** Molto adatto

- Non adatto

Considerazioni finali

- **Importante quantificare** in campo il trasporto solido nel lungo periodo per conoscere le **dinamiche** del bacino;
- Le **formule** di trasporto spesso sovrastimano il trasporto reale;
- Campionamenti **manuali** sono difficili, costosi, e potenzialmente pericolosi;
- I metodi **indiretti** sono economici e registrano in continuo;
- I metodi indiretti forniscono interessanti informazioni sulla dinamica del trasporto, ma per una sua quantificazione realistica necessitano di adeguate **calibrazioni**;
- Recente interesse scientifico per i metodi indiretti (**nuovi dispositivi e nuove tecniche di filtraggio** e trattamento dei dati)

Grazie dell'attenzione