

6 Simulazione del deposito di sedimenti fini nelle zone golenali

I corsi d'acqua si estendono ben oltre i canali che tipicamente ne definiscono il percorso. Di particolare interesse sono le zone golenali, dove si verificano importanti processi idrodinamici e morfodinamici causati da piene ricorrenti, che favoriscono anche l'insediamento di molte specie di rilevanza ecologica. Il presente capitolo descrive i principali processi di deposito dei sedimenti fini e gli strumenti numerici utilizzati per prevedere le risposte del sistema fluviale, un aspetto particolarmente importante per i progetti di rivitalizzazione dei corsi d'acqua.

Daniel Conde, Carmelo Juez, Davide Vanzo, Christoph Scheidegger, Giovanni De Cesare e David Vetsch

6.1 Introduzione

Quando i fiumi e i torrenti scorrono lungo le valli, assieme all'acqua trasportano considerevoli quantità di sedimenti inorganici e di materia organica. I grani più grossolani, come i ciottoli e la ghiaia, sono trasportati come materiale solido di fondo lungo l'alveo e a stretto contatto con esso (Van Rijn 2005). I grani più fini, tipicamente quelli che non superano i 2 millimetri di diametro, sono principalmente tenuti in sospensione dalla corrente e compongono il materiale in sospensione (Van Rijn 1984). Questi grani fini sono spesso una combinazione di limo, argilla e sabbia fine e la loro concentrazione varia a seconda della profondità: è elevata vicino al fondo dell'alveo fluviale e diminuisce verso la superficie dell'acqua. L'obiettivo principale del presente capitolo è identificare e modellizzare i processi che influenzano il materiale in sospensione, nonché quantificare il loro impatto sull'idrodinamica e la morfodinamica fluviali, concentrandosi in particolare sulle zone golenali (fig. 33), per il loro duplice ruolo di protezione contro le piene e di funzione ecologica (Baptista *et al.* 2018).

Per quanto riguarda la protezione contro le piene, le zone golenali forniscono spazio supplementare per le maggiori quantità di materiale trasportato dal fiume, preservando in modo sicuro le attività e gli insediamenti umani. Costituiscono inoltre un bacino di ritenzione e consentono la regolazione del deflusso, il contenimento del legname alla deriva e il deposito di sedimenti. In termini di funzioni ecologiche, le zone golenali svolgono un ruolo importante come connettori tra gli ecosistemi fluviali e gli ecosistemi terrestri adiacenti. Una varietà di specie riparie si stabilisce in queste regioni ed è sensibile al delicato equilibrio tra la ritenzione

di nuovi sedimenti e l'estrazione di materiale depositato in precedenza. La conservazione di questi corridoi ripari è cruciale per la continuità ecologica.

L'evoluzione geomorfologica del corridoio fluviale è strettamente legata al valore aggiunto delle zone golenali. Il fatto che il processo dominante sia l'erosione o il deposito dipende principalmente dallo scambio di acqua e sedimenti

Figura 33

Esempi del fiume Thur: tratto con canale composto artificiale (a) e tratto con allargamento dopo la rivitalizzazione (b).



Foto: (a) Biblioteca del ETH Zurich, archivio fotografico / fotografo: R. Huber. (b) VAW, ETH Zurich

fini tra il canale principale e la zona golenale. La presenza di vegetazione nella zona golenale ha un impatto significativo su questi scambi idrodinamici, in quanto impone una riduzione della velocità del deflusso rispetto al canale principale. Questo modello di deflusso, che si sviluppa con tutti i tipi di vegetazione, crea forti forze tangenziali tra il deflusso nell'alveo e quello nella zona golenale, formando uno sforzo tangenziale interno (fig. 34). Questo strato presenta tipicamente molteplici moti vorticosi che inducono scambi laterali e miscelazione. La quantificazione di questi deflussi laterali è fondamentale per valutare correttamente l'effettiva capacità di deflusso del corso d'acqua, soprattutto in condizioni di piena, e i conseguenti cambiamenti ecologici e morfologici.

La legge federale (LPac, 1991) e l'ordinanza sulla protezione delle acque (OPac, 1998) prevedono la rivitalizzazione (fig. 33)

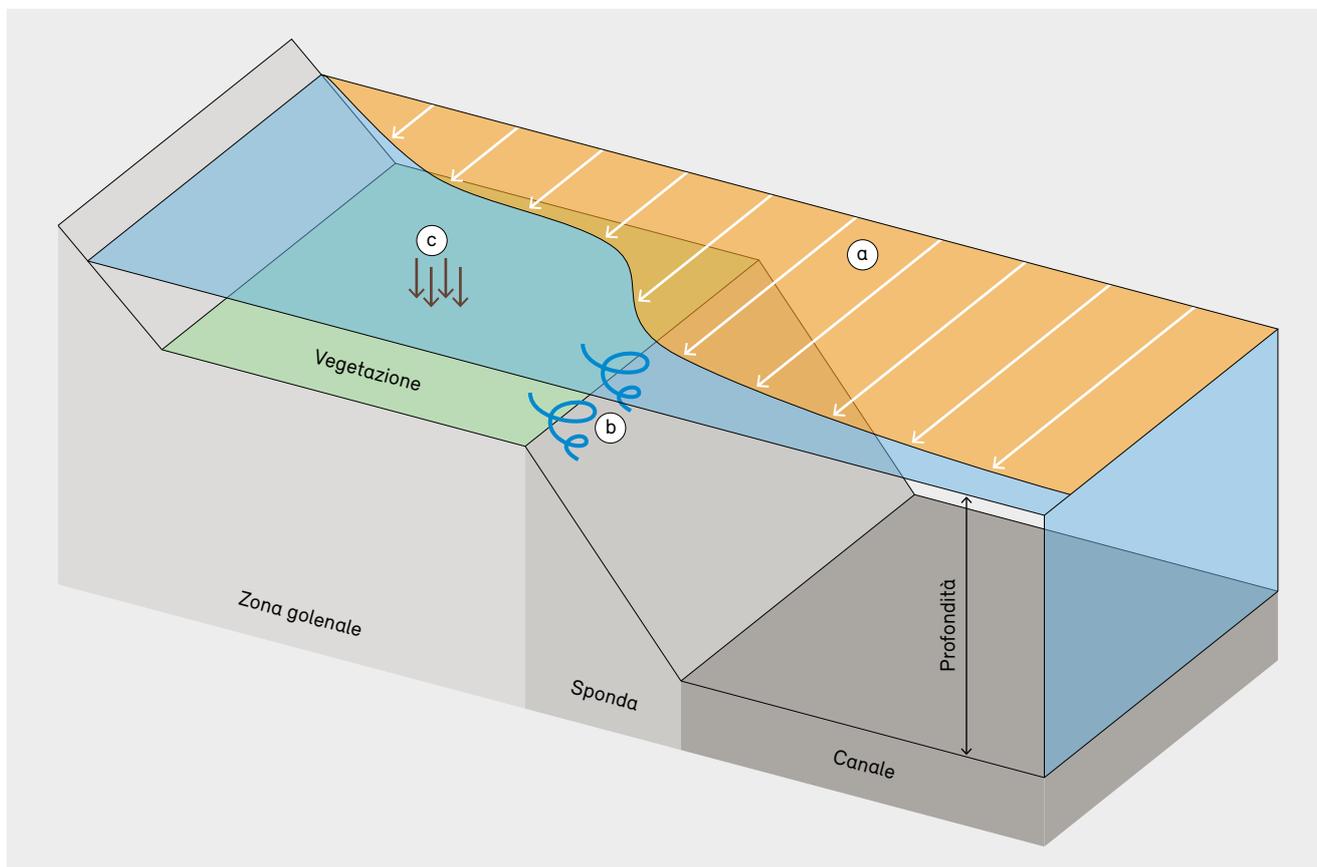
di migliaia di chilometri di corsi d'acqua con un approccio che combina idromorfologia ed ecologia. L'obiettivo politico è ripristinare gli habitat per animali, piante e funghi caratteristici, mantenendo o migliorando la protezione contro le piene e l'equilibrio sedimentario. Di conseguenza, è necessario disporre di modelli efficaci per prevedere accuratamente il comportamento morfodinamico.

6.2 Modellizzazione numerica

Semplificando, i modelli numerici idrodinamici rappresentano virtualmente il flusso d'acqua. Costituiscono un insieme di strumenti di ingegneria idraulica diffusi e riconosciuti, con molteplici applicazioni nella pratica. Il software BASEMENT (Vanzo *et al.* 2021) è un freeware di

Figura 34

Configurazione tipica del deflusso in una zona golenale: distribuzione della velocità (a), vortici orizzontali nello strato di sforzo tangenziale (b) e deposito laterale di sedimenti (c).



modellizzazione numerica sviluppato presso il VAW del PF di Zurigo, applicabile per la simulazione di fiumi, torrenti ed estuari. Inoltre, è possibile simulare processi idrodinamici e morfodinamici, tenendo conto del flusso dell'acqua, delle forze di attrito, della turbolenza e del moto dei sedimenti.

I vortici turbolenti svolgono un ruolo significativo nel determinare le forze resistive totali e la sospensione del materiale trasportato. Per quantificare l'energia cinetica turbolenta del deflusso si utilizzano modelli di conservazione dell'energia. Sono implementati anche altri tipi di metodi di calcolo della turbolenza semplificati. Per quanto riguarda la modellizzazione del materiale in sospensione, è stato sviluppato un modulo di avvezione-diffusione combinato con formule empiriche da letteratura (Van Rijn 1984), dove un maggiore sforzo tangenziale al fondo comporta una maggiore mobilità dei sedimenti.

Le diverse opzioni di BASEMENT possono essere definite in maniera intuitiva dall'utente e permettono una soluzione modellistica efficace per prevedere il comportamento idrodinamico e morfodinamico a molteplici scale di interesse per l'ingegneria fluviale (Vanzo *et al.* 2021). Nel presente capitolo, le capacità di BASEMENT sono testate per modellizzare processi su piccola scala. I modelli sono in seguito completati da osservazioni sperimentali (Juez *et al.* 2019) e proiettati a livello di tratto fluviale attraverso uno studio di caso di un'applicazione ingegneristica.

6.3 Processi

È stata progettata ed eseguita una serie di esperimenti per valutare l'effetto della geometria del canale e della copertura vegetale della zona golenale sul comportamento idrodinamico e morfodinamico dei flussi nei canali composti (Juez *et al.* 2019). I risultati di questi esperimenti dovrebbero favorire lo sviluppo e l'uso di modelli, ad esempio nella progettazione di futuri interventi fluviali, contribuendo così alla mitigazione dei problemi legati ai sedimenti fini. I flussi nei canali composti sono stati caratterizzati fisicamente attraverso molteplici test su un modello in scala ridotta nella piattaforma PL-LCH dell'EPFL. Gli stessi test sono stati simulati anche nell'ambiente virtuale di BASEMENT per studiare e confermare in modo selettivo i seguenti parametri principali:

- (i) rapporto di profondità: rapporto tra la profondità del deflusso nel canale principale e nella zona golenale;
- (ii) rapporto di velocità: rapporto tra la velocità media del deflusso nel canale principale e nella zona golenale;
- (iii) rapporto di larghezza: rapporto tra la larghezza della zona golenale e quella del canale principale;
- (iv) tipo e scabrezza idraulica della copertura del suolo nella zona golenale.

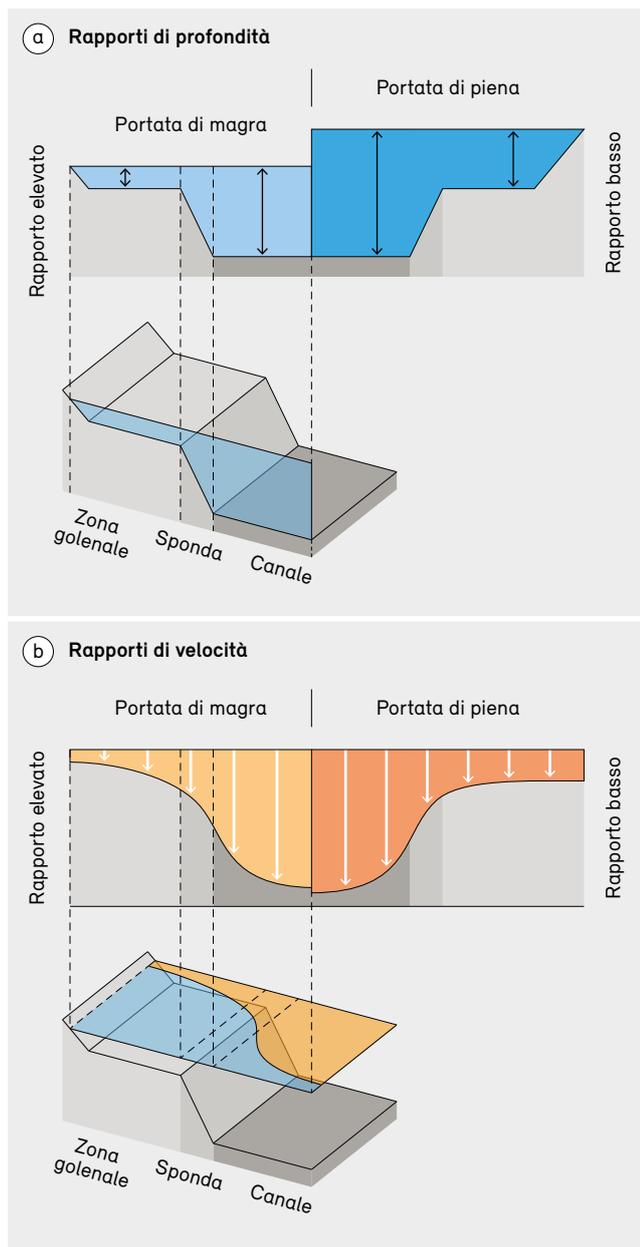
Il modello in scala ridotta e il suo corrispondente virtuale comprendevano un canale rettilineo con una zona golenale regolabile lateralmente, coperture con scabrezza variabile e strumenti per misurare la profondità del deflusso, la velocità superficiale e le concentrazioni di sedimenti sospesi. Per garantire letture consistenti, tutte le misurazioni sono state effettuate in condizioni di deflusso continuo e uniforme, con profondità e velocità locali mantenute costanti nel tempo e nello spazio.

La gamma di esperimenti ha coperto portate in scala realistica, tratte dall'idrologia fluviale nota. I risultati di questi esperimenti indicano che maggiori portate determinano rapporti di profondità e velocità inferiori (fig. 35). Il rapporto di velocità è risultato sensibile anche al rapporto di larghezza, con valori più bassi nei canali più stretti (rapporto di larghezza superiore). Si è osservato che la differenza relativa di velocità tra il canale principale e la zona golenale vegetata (fig. 36a) favorisce la comparsa di vortici orizzontali, che influenzano gli scambi di massa laterali. Canali principali più larghi (rapporto di larghezza inferiore) sono inoltre associati a una maggiore variazione di velocità (indicata dalle frecce nella fig. 36a) e a sforzi tangenziali e vortici più ampi (fig. 36b).

Gli esperimenti hanno dimostrato che la presenza di vegetazione nelle zone golenali impone forze di attrito ancora più forti, contribuendo a un maggiore rapporto di velocità. Nello sforzo tangenziale è stato osservato un effetto secondario: una riduzione della sua larghezza determina un leggero aumento dell'intensità massima delle sollecitazioni nei canali più stretti e densamente vegetati. Per quanto riguarda il deposito di sedimenti sospesi, gli esperimenti hanno indicato che anche la portata e i corrispondenti rapporti di profondità (fig. 35) hanno un effetto significativo: a portate più basse (deflussi poco profondi con un rapporto di profondità più elevato), nelle zone golenali vegetate si

Figura 35

Effetto di portate di magra (a sinistra) e di piena (a destra) sui rapporti di profondità (a) e sui rapporti di velocità (b).



Fonte: VAW, ETH Zurich

è osservato che la sedimentazione nel canale principale è influenzata principalmente dal rapporto di larghezza, con geometrie più strette che concentrano più sedimenti nel canale (fig. 36c). Per i deflussi più profondi (rapporto di profondità inferiore) e portate più elevate, i sedimenti si propagano ulteriormente nella zona golenale e si depositano

prevalentemente lì (fig. 36d), mentre non si verifica quasi nessuna sedimentazione all'interno del canale principale. In presenza di una zona golenale spoglia, è stata osservata una maggiore diffusione laterale dei sedimenti, soprattutto nei canali più stretti (rapporto di larghezza elevato).

Gli esperimenti hanno infine dimostrato che il deflusso laterale di acqua e sedimenti sospesi è influenzato principalmente dai rapporti di profondità e larghezza e in minor misura dalla scabrezza della zona golenale. Un canale principale più stretto presenta un maggiore trascinarsi laterale, il che può essere attribuito alla dinamica turbolenta nello sforzo tangenziale e comporta una maggiore dispersione dei sedimenti lungo la zona golenale, soprattutto per i deflussi più profondi. Il principale fattore d'influenza del comportamento idrodinamico e morfodinamico di un canale composto con una zona golenale vegetata è risultato essere il rapporto di velocità, mentre il fattore più marginale è la presenza di vegetazione arborea ad alto fusto. Questo vale soprattutto per i canali composti con una geometria semplice, come quello in scala ridotta utilizzato negli esperimenti. Per geometrie più complesse, il comportamento deve essere studiato separatamente, numericamente o sperimentalmente.

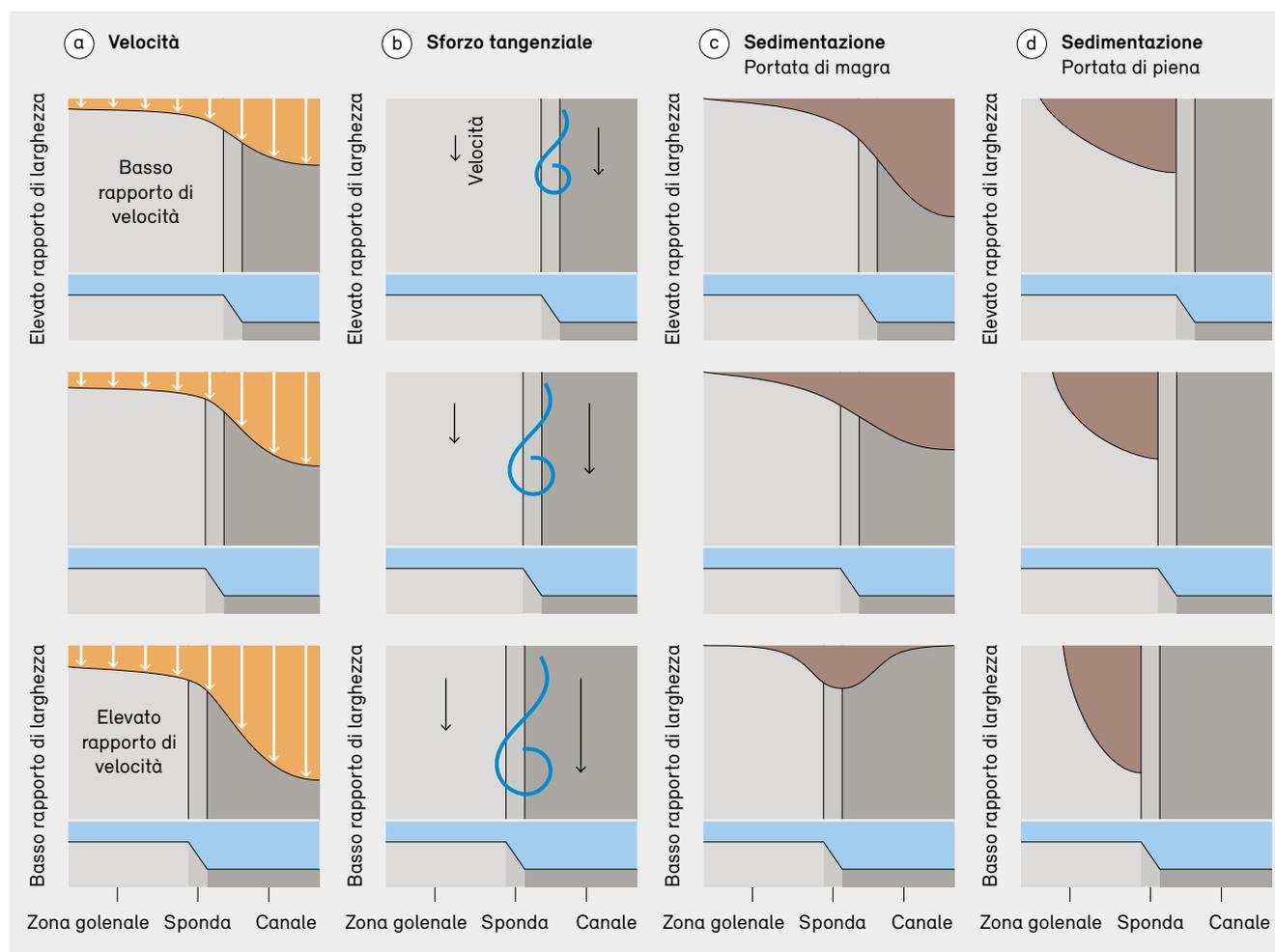
6.4 Aspetti ecologici

In ecologia, le zone golenali rappresentano ecosistemi ripari generati da regimi di disturbo quali piene, trasporto di sedimenti e fluttuazione delle acque sotterranee. Le diverse granulometrie dei sedimenti svolgono un ruolo importante nel formare diversi habitat, soprattutto perché la capacità di immagazzinare acqua nel letto fluviale aumenta con il diminuire della granulometria dei sedimenti. Le zone con elevate proporzioni di sedimenti fini fungono da letti di germinazione fondamentali per piante, briofite e licheni e determinano la successione della vegetazione ripariale. Le forti dipendenze tra la morfologia del canale, gli elementi strutturali (come i banchi di ghiaia), i detriti legnosi e i massi formano un ambiente vario e collegato lateralmente, che facilita lo sviluppo di ecosistemi diversificati e resilienti.

Dato lo spazio limitato a disposizione, la rivitalizzazione delle zone golenali si concentra su ecosistemi altamente dinamici, tra cui i banchi (barre) di ghiaia e le prime fasi di

Figura 36

Vari effetti (vista dall'alto) di un canale più stretto (elevato rapporto di larghezza) o più largo (basso rapporto di larghezza): distribuzioni della velocità (a), sforzo tangenziale (b) e distribuzione della sedimentazione in condizioni di portata di magra (c) o di portata di piena (d).



Fonte: VAW, ETH Zurich

successione dei boschi golenali (*Salicion elaeagni*, *Alnion incanae*). I boschi golenali nelle fasi di successione tardive, compresi gli stagni e le aree aperte fortemente disseccate (*Psoretea decipientis*, comunità colorate sulla superficie del suolo) con disturbi poco frequenti dovuti alle piene, sono attualmente habitat sottorappresentati nelle zone golenali rivitalizzate. Le frequenti nebbie e l'elevata umidità dell'aria in questi ambienti altrimenti secchi favoriscono la presenza di comunità con specie come l'enigmatico lichene stellato *Buellia asterella*, che colonizza spesso sabbie compatte raramente inondate. Questa specie è ora estinta in Svizzera e minacciata a livello mondiale.

Secondo i risultati degli esperimenti di cui sopra, la presenza di alberi più alti non influenza molto l'idrodinamica o la morfodinamica. L'effetto degli arbusti non è stato testato in laboratorio, anche se la loro presenza potrebbe aumentare gli effetti della vegetazione erbacea e forse portare a un maggiore deposito. La disponibilità di elementi strutturali di grandi dimensioni è importante anche per creare un'elevata diversità e favorire una biodiversità caratteristica delle zone golenali. I detriti legnosi grossolani svolgono un ruolo importante in prossimità dei corsi d'acqua con bracci secondari (*anabanch*), dove possono essere realizzati anche alcuni siti inondate di rado. La creazione di banchi di ghiaia e la collocazione di massi

a livelli raramente inondati possono aumentare in modo sostanziale la diversità degli habitat nelle zone golenali rivitalizzate.

6.5 Caso di studio

Un tratto del Reno alpino vicino a Widnau (CH) e Höchst (A) (fig. 37) è stato utilizzato come studio di caso per simulare la morfodinamica dei sedimenti fini nelle zone golenali. La sorgente del Reno alpino si trova nel Cantone dei Grigioni, nelle Alpi svizzere, e in seguito il Reno scorre lungo il confine con il Liechtenstein e l'Austria verso il lago di Costanza. La protezione di questa regione contro le piene è essenziale, viste le aree densamente popolate e le importanti attività economiche lungo il Reno alpino: il potenziale di danni materiali derivanti da eventi di piena importanti è stimato a oltre 10 miliardi di franchi. I progetti in corso hanno l'obiettivo di aumentare la capacità di convogliamento delle piene del Reno alpino attraverso la rivitalizzazione del fiume mediante l'allargamento del canale.

Figura 37

Tratto considerato nel caso di studio: Reno alpino a Widnau in condizioni di portata di magra (a) e di portata di piena (b) (vista in direzione della corrente).



Fonte: IRR

Un esempio di applicazione di BASEMENT come strumento di supporto alla progettazione, è presentato di seguito. L'area di studio si estende dal chilometro 80,1 al chilometro 82,6 del Reno alpino (fig. 37), dove gli insediamenti urbani si estendono fino al bordo degli argini esterni di protezione contro le piene. Il modello include la maggior parte dei moduli disponibili in BASEMENT, segnatamente l'idrodinamica (con la modellizzazione dell'attrito e della turbolenza) e la morfodinamica (con la modellizzazione sia del materiale solido di fondo che del materiale in sospensione).

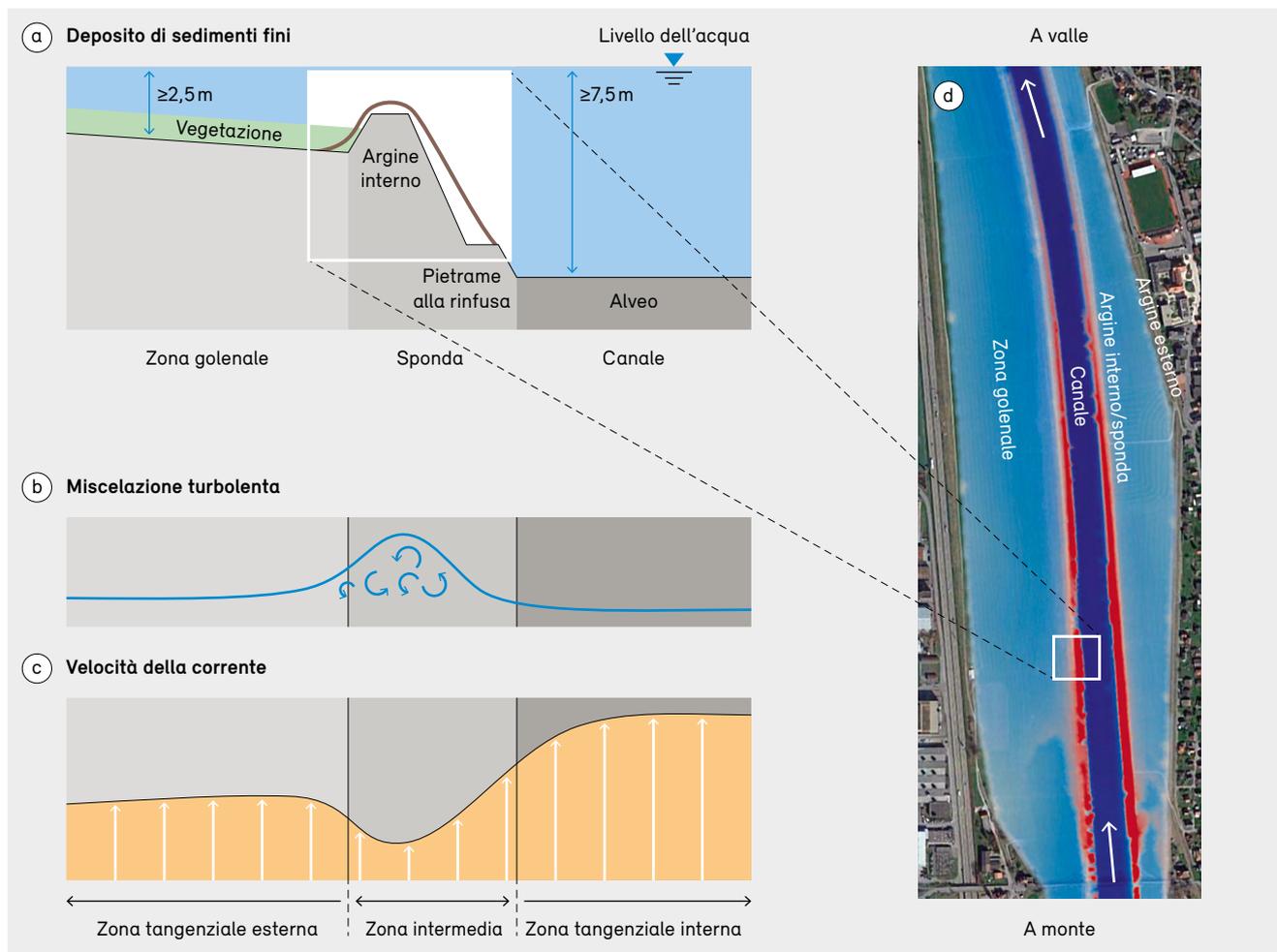
L'attrito è modellizzato con la formula GMS (Gauckler-Manning-Strickler), in cui lo sforzo tangenziale tra l'alveo e il deflusso è ricavato da un coefficiente empirico che dipende dalla scabrezza del materiale dell'alveo e dalla sinuosità della superficie. Il coefficiente considera anche la presenza di vegetazione e la sua resistenza idrodinamica, indipendentemente dal tipo di vegetazione. La turbolenza generata dagli sforzi tangenziali, tra il canale principale e la zona golenale, e nell'alveo è considerata in termini di resistenza al deflusso e di dispersione dei sedimenti con un modello standard « $k-\epsilon$ ». Per quanto riguarda la dinamica dei sedimenti, lo scambio verticale tra alveo e deflusso è modellizzato secondo le formule proposte da Meyer-Peter-Müller per il materiale solido di fondo e da Van Rijn per il materiale in sospensione (Vetsch *et al.* 2021). Esempi di file di configurazione per questi tipi di applicazioni sono disponibili sul sito web di BASEMENT (www.basement.ethz.ch).

L'area studiata è descritta nella figura 38c. Nel modello sono definite due condizioni limite, una a monte e una a valle, che impongono entrambe condizioni di flusso uniforme: tutte le forze che agiscono sul flusso sono bilanciate e quest'ultimo non accelera né decelera. I coefficienti di attrito di Manning sono stati calibrati con i dati idrometrici osservati nelle stazioni idrologiche. I valori ottenuti sono compatibili con quelli consolidati per le zone golenali erbose (è stato dimostrato che la vegetazione più alta, come gli alberi, ha un impatto minore e i cespugli non sono stati presi in considerazione), per i canali fluviali con fondo in ghiaia e per gli argini protettivi in pietra.

Come negli esperimenti di laboratorio, l'influenza dei processi di turbolenza è evidente, con due distinte zone tangenziali che si sviluppano su ciascun lato degli argini interni (fig. 38b), mostrando una transizione progressiva della

Figura 38

Schema dei risultati per la situazione attuale nel Reno alpino a $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$: (a) vista in sezione del sedimento depositato (linea marrone), (b) miscelazione turbolenta, (c) distribuzione della velocità e (d) vista dall'alto del tratto studiato con i depositi di sedimento in rosso.



Fonte: VAW, ETH Zurich / fotografia aerea @swisstopo

velocità tra le aree a bassa e ad alta scabrezza idraulica. Senza un'attenta parametrizzazione di questo processo, gli sforzi tangenziali non vengono considerati e la distribuzione delle velocità in sezione trasversale potrebbe non essere fisicamente corretta. Gli schemi di deposito dei sedimenti simulati tendono a manifestarsi lungo la sponda del canale degli argini interni (fig. 38a), con un'ulteriore sedimentazione nelle zone golenali in caso di esondazione a portate più elevate ($> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), anche se in quantità minore. Sebbene la geometria di questo sistema non sia paragonabile a quella utilizzata negli esperimenti di laboratorio, lo stesso comportamento è stato osservato durante le recenti piene del 2005 e del 2009. Questo schema è realistico anche in

termini di schemi di velocità, poiché le aree a bassa velocità determinano tassi di deposito più elevati (fig. 38a, b). Sono stati considerati due scenari di deflusso (1000 e $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), corrispondenti rispettivamente alle condizioni di deflusso nel canale principale e nel canale composto. La concentrazione media annuale di sedimenti sospesi nel Reno alpino è applicata alle condizioni limite a monte.

La quantità di sedimenti depositati aumenta con l'aumentare della portata: la disponibilità di sedimenti è quindi un fattore critico e la probabilità che piene successive dilavino i depositi precedenti nella zona golenale è ridotta. Il risultato probabile è un processo di deposito continuo nelle zone golenali accanto

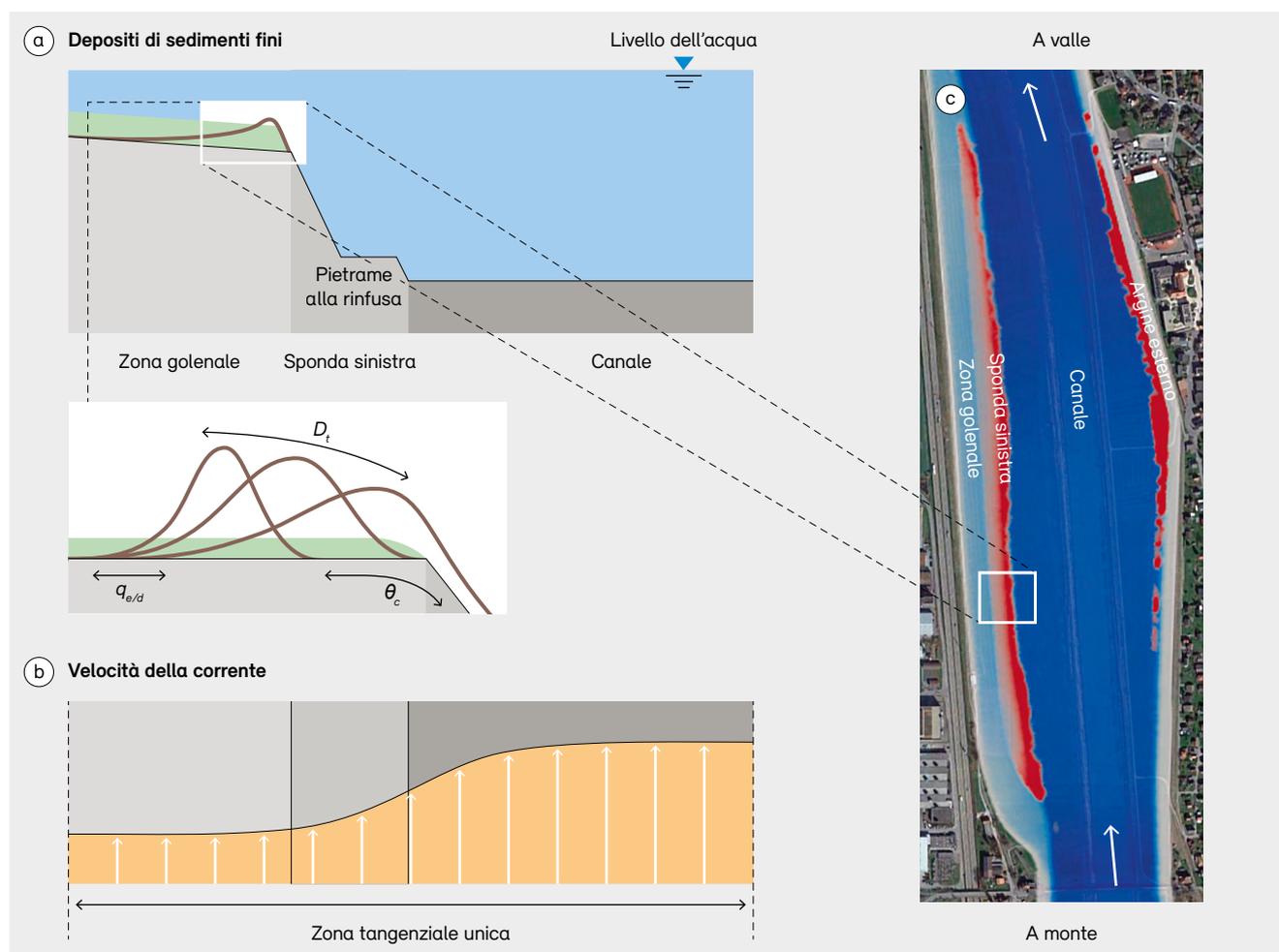
agli argini, quando sono inondate con portate $> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, nonché sulle sponde, anche con portate $< 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ciò comporta una riduzione del trasporto di materiale nel canale. Per gli scenari di riferimento, il deposito totale copre dallo 0,8 all'1,6 per cento (volume depositato da 8000 a 16 000 m^3) dell'area di deflusso utilizzabile nella zona golenale, dopo eventi di piena di breve durata (48 h).

Questa applicazione mostra come BASEMENT possa essere utilizzato per valutare le esigenze attuali e future di manutenzione delle condizioni della zona golenale. Una configurazione semplice, come quella qui descritta,

è applicabile anche alla pianificazione di futuri progetti fluviali (fig. 39c). A titolo di esempio, prendiamo una configurazione rivitalizzata dello stesso tratto, mantenendo i modelli e le ipotesi della prima applicazione. Tale configurazione è caratterizzata da un ampio allargamento del canale principale, con soppressione totale della zona golenale destra e accorciamento di circa la metà di quella sinistra. Ad alte portate ($2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), i risultati mostrano un singolo strato di sforzo tangenziale (fig. 39b) e un accumulo predominante di sedimenti fini sulla zona golenale sinistra (fig. 39a, c), pari allo 0,4–0,9 per cento dell'area di deflusso utilizzabile ($2000\text{--}4500 \text{ m}^3$), a seconda della

Figura 39

Schema dei risultati per la configurazione del progetto di rivitalizzazione a $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$: (a) vista in sezione del sedimento depositato (linea marrone) e influenza dei parametri di modello, (b) distribuzione della velocità e (c) vista dall'alto del tratto studiato con i depositi di sedimento in rosso. I parametri visualizzati sono: diffusione turbolenta (D_t), sforzo tangenziale critico (θ_c) e tasso di scambio verticale ($q_{e/d}$).



configurazione del modulo di morfodinamica dei sedimenti fini. Per portate inferiori ($< 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), il deposito avviene principalmente sulle sponde e nel canale principale.

I parametri principali (fig. 39a) in questo esempio sono la diffusione turbolenta (D_t), lo sforzo tangenziale critico (θ_c) e il tasso di scambio verticale ($q_{e/d}$). La diffusione turbolenta è il principale indicatore dello scambio di massa tra il canale

principale e la zona golenale, che favorisce il trascinarsi laterale dei sedimenti e la loro dispersione nella zona golenale. Lo sforzo tangenziale critico determina l'inizio della mobilità dei sedimenti, trasferendo il deposito dei sedimenti dal canale principale verso le aree laterali. I restanti parametri determinano i tassi di erosione e deposito e quindi influenzano il modo in cui, nella zona golenale, il flusso s'impoverisce di sedimenti in sospensione.

Riquadro 9: Nella pratica – rimozione dei sedimenti fini dalle zone golenali

Daniel Dietsche e Mathias Speckle, Regolazione internazionale del Reno (IRR)

Il tratto del Reno alpino descritto in questo capitolo è di competenza della Regolazione internazionale del Reno (IRR), che ha mostrato come la rimozione rapida dei sedimenti dopo le piene, cioè l'estrazione e il riporto nel canale principale, si sia dimostrata altamente efficace. I rami e le radici sono trasportati nell'estuario e utilizzati per il riassetto ecologico del paesaggio. I sedimenti depositati possono anche essere rimossi in un secondo momento, ma

sono necessarie una sorveglianza regolare e l'elaborazione di previsioni per garantire il mantenimento della capacità di deflusso prevista. È stato osservato che la presenza di vegetazione determina un maggior deposito di sedimenti, anche con livelli dell'acqua bassi. Questo esempio pratico evidenzia la necessità di strumenti accurati per prevedere la quantità di sedimenti depositati e testare potenziali soluzioni per il loro smaltimento. Sia per le amministrazioni pubbliche sia per gli studi d'ingegneria privati, i progressi delle nuove capacità numeriche di BASEMENT favoriranno un'evoluzione sicura ed ecologicamente consapevole dei corsi d'acqua svizzeri.