CM Valle Camonica

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MILANO

Dipartimento di
Ingegneria Agraria

CM Valsassina, Valvarrone,
Val d'Esine e Riviera

www.regione.lombardia.it

Sistemazioni Idraulico Forestali: Indirizzi per gli interventi

Quaderni della Ricerca
n. 116 - giugno 2010

LOMBARDIA. **COSTRUIAMOLA INSIEME.**

RegioneLombardia
Agricoltura

Studio condotto nell'ambito del nell'ambito del Progetto di Ricerca "Sistemazione idraulico forestale dei bacini montani" (acronimo SISIFO) finanziato dalla D.G. Agricoltura nell'ambito del Programma regionale di ricerca in campo agricolo 2007-2009.

A cura di:
Gian Battista Bischetti[1], Vincenzo D'Agostino[2]

Hanno partecipato alle attività sperimentali ed allo studio:
Enrico Antonio Chiaradia, Thomas Epis, Emanuele Morlotti, Eric Spelta, Marta Stropeni, Chiara Vergani[1]
Gian Battista Sangalli[3]
Giacomo Camozzini, Giulio Zanetti[4]
Alessandro Nicoloso[5]

[1]Università degli Studi di Milano – *Dipartimento di Ingegneria Agraria*
Via Celoria, 2 - 20133 Milano
☏ 0250316900 - 🖷0250316911 - 💻 bischetti@unimi.it

[2]Università degli Studi di Padova - *Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Foresatali (TeSAF)*
Viale dell'Università, 16 - 35020 Agripolis- Legnaro (PD)
☏ 0498272682 - 🖷 0498272686 - 💻 vincenzo.dagostino@unipd.it

[3]Comunità Montana Valle Camonica - *Ufficio Bonifica Montana*
Largo Tessara 3 - 25043 Breno (BS)
☏ 0364324029 🖷 036422544 - 💻 gianbattista.sangalli@cmvallecamonica.bs.it

[4]Comunità Montana Valsassina, Valvarrone, Val d'Esine e Riviera - *Ufficio AgroForestale*
via Fornace Merlo 2 - 23816 Barzio, Lecco
☏ 0341910144 🖷 0341910154 - 💻 forestale@valsassina.it

[5]Studio Tecnico Nicoloso
via Cadorna 27 - 20025 Legnano (MI)
☏ 0331455657 🖷 0331457273 - 💻 a.nicoloso@studionicoloso.net

Per informazioni:
Regione Lombardia – Direzione Generale Agricoltura
U.O. Interventi per la competitività e l'innovazione tecnologica delle aziende
Struttura Ricerca e Innovazione Tecnologica
Via Pola, 12/14 – 20124 Milano
Tel. 02/6765.2537 – Fax 02/6765.2757
e-mail: agri_ricerca@regione.lombardia.it
Referente: Marco Castelnuovo - tel. 02/6765 6562
e-mail: marco_castelnuovo@regione.lombardia.it

© Copyright Regione Lombardia

RegioneLombardia
Agricoltura

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MILANO

Dipartimento Ingegneria agraria

C.M. Vasassina, Valvarrone,
Val d'Esine e Riviera

C.M. Valle Camonica

SISIFO

Sistemazioni Idraulico Forestali: indirizzi per gli interventi

Quaderni della ricerca
n. 116 – giugno 2010

Presentazione

La difesa del suolo costituisce un elemento fondamentale per la salvaguardia degli insediamenti umani, per la preservazione del territorio agro-silvo-pastorale e per la conservazione dell'ambiente. Nelle porzioni montane della Lombardia, in particolare, in larga parte considerate a rischio idrogeologico, questa azione di difesa richiede ingenti investimenti per scongiurare fenomeni di dissesto di varia natura.

Le norme forestali della Regione Lombardia, anche al fine di sottolineare ancora una volta l'importanza della gestione delle aree coperte da vegetazione arborea nella più ampia azione di difesa del suolo, introducono i Piani di Indirizzo Forestale con valenza di Piano di Settore nell'ambito delle programmazioni territoriali provinciali. In queste, oltre ai temi più tipicamente selvicolturali, trovano spazio le tematiche del Vincolo idrogeologico e delle Sistemazioni Idraulico Forestali.

Il progetto SISIFO, seguendo un approccio integrale alla gestione del rischio idrogeologico in ambito montano, ha delineato le pratiche selvicolturali e gli interventi di Sistemazione Idraulico Forestale in Lombardia in grado di migliorare l'efficacia dei lavori svolti nell'ambito della stabilità dei versanti.

Questo Quaderno riporta indicazioni utili agli attori del sistema regionale coinvolto, per effettuare interventi coerenti con le più recenti acquisizioni tecnico-scientifiche.

Giulio De Capitani
Assessore all'Agricoltura
Regione Lombardia

INDICE

1 Introduzione 1

2 Il ruolo delle SIF e delle foreste nella difesa dei territori montani 2

2.1 Origine ed evoluzione delle Sistemazioni Idraulico Forestali 2
2.2 Verso un nuovo paradigma di sistemazione montana 5
2.2.1 Corsi d'acqua 6
2.2.2 Versanti 8
2.2.3 L'attualità del messaggio delle SIF 9

3 Gli interventi sul reticolo montano 10

3.1 Produzione trasporto dei sedimenti nel reticolo montano 11
3.1.1 Condizioni di equilibrio e morfologia dei corsi d'acqua: quadro di sintesi 11
3.2 Sistemazione dei tratti in erosione 21
3.2.1 Strategia 21
3.2.2 Criteri progettazione 24
3.2.3 La ricostruzione morfologica 26
3.3 Sistemazione dei tratti di trasporto e deposito 29
3.3.1 Strategia 29
3.3.2 Opere e dispositivi 31
3.4 Manutenzione delle opere 37

4 Le foreste di protezione 39

4.1 Il ruolo delle foreste nella difesa dei territori montani 39
4.2 Pericoli naturali e foreste di protezione 40
4.2.1 Caduta massi 41
4.2.2 Frane superficiali e colate detritiche 44
4.3 Tipologia di funzione protettiva delle foreste 47
4.4 Criteri per l'identificazione delle foreste di protezione diretta 49
4.4.1 Metodi empirici 49
4.4.2 Metodi quantitativi 50

5 Rapporti tra Sistemazioni Idraulico Forestali e Ingegneria Naturalistica 51

5.1 Origine della ingenieurbiologie 52
5.2 Contenuti della Ingenieurbiologie 53
5.3 Definizioni di Ingenieurbiologie nei paesi di lingua non tedesca 54
5.4 I rapporti tra Sistemazioni Idraulico Forestali e Ingegneria Naturalistica 57

6 Conclusioni 57

7 Bibliografia 58

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1: EVOLUZIONE DEGLI INTERVENTI DI SIF (PAT-SSM, 2002 MOD. V. D'AGOSTINO) 6
FIGURA 2: RUOLO DELLE SIF ED I SUOI LEGAMI CON GLI ALTRI AMBITI 9
FIGURA 3: BILANCIA DI LANE 13
FIGURA 4 – ESEMPIO DI TRATTO A RAPIDA (A GRADINI) IN UN TORRENTE MONTANO. 16
FIGURA 5: ESEMPIO DI UNA SEQUENZA DI UNITÀ MORFOLOGICHE A *STEP* E *POOL* 17
FIGURA 6: SCHEMA PLANIMETRICO DI UN TRATTO D'ALVEO CON UNITÀ A *RIFFLE POOL* 19
FIGURA 7: SQUILIBRIO DELLA BILANCIA DI LANE CHE DETERMINA EROSIONE 22
FIGURA 8: PROFILO A GRADINATA OTTENUTO CON BRIGLIE 22
FIGURA 9: RIVESTIMENTO DELLE SPONDE E CORAZZAMENTO DEL FONDO (A SX) E RIVESTIMENTO IN PIETRAME SU FONDO E SPALLE IN CALCESTRUZZO (A DX) 23
FIGURA 10: SITUAZIONE CHE SI PUÒ CREARE CON UNA SISTEMAZIONE ECCESSIVA (VAL ROSSA, SELVA DI PROGNO, VERONA) 23
FIGURA 11: RICOSTRUZIONE MORFOLOGICA DI UN ALVEO MONTANO MEDIANTE *STEP POOL* ARTIFICIALI REALIZZATI IN MASSI POSATI A SECCO: RIO PLIMA (VAL MARTELLO, BOLZANO). 27
FIGURA 12: STRUTTURA IN MASSI CON SCHELETRO IN CALCESTRUZZO DEBOLMENTE ARMATO (LENZI ET AL., 2000) 29
FIGURA 13: SQUILIBRIO DELLA BILANCIA DI LANE CHE DETERMINA DEPOSITO 30
FIGURA 14: STRATEGIA INTEGRATA D'INTERVENTO PER LA MESSA IN SICUREZZA DI TRATTI DI TRASPORTO E DEPOSITO IN FUNZIONE DELLA DENSITÀ DI POPOLAZIONE, CHE COINCIDE CON L'EVOLUZIONE STORICA (RIDISEGNATA DA IRASMOS, 2008) 31
FIGURA 15: "RECINTO DI DEPOSITO STABILITO SOPRA UN CONO"(DA PICCIOLI, 1905 RIPRESA A SUA VOLTA DA DEMONTZEY, 1878) 32
FIGURA 16: MATERIALE FLUITATO TRATTENUTO DA UNA BRIGLIA SELETTIVA 32
FIGURA 17: BRIGLIA A FESSURA (A SX) E A GRIGLIA (A DX) 33
FIGURA 18: BRIGLIA CON STRUTTURA A FILTRO INCLINATO 34
FIGURA 19: ESEMPIO DI BRIGLIA FILTRANTE PER LA LAMINAZIONE DI UN *DEBRIS FLOW* (VAL DEGLI SCHIVI, TRENTO, SERVIZIO BACINI MONTANI): LA PARTE BASSA DEL FILTRO PRESENTA ELEMENTI PIÙ SPAZIATI ED È DIMENSIONATA PER UNA LAMINAZIONE CONTENUTA DI UN '*DEBRIS FLOOD*'. 35
FIGURA 20: SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DI UNA BRIGLIA A FESSURA: DEPOSITO IN CONDIZIONI DI EQUILIBRIO ED OPERA CHE HA TERMINATO LA SUA AZIONE DOSANTE (D'AGOSTINO, 2006). 36
FIGURA 21: BRIGLIA A CORPO PIENO TRASFORMATA IN BRIGLIA SELETTIVA E PIAZZA DI DEPOSITO REALIZZATA A TERGO DELL'OPERA. (T. CISMON, TRENTO) 38
FIGURA 22: RICONVERSIONE DI OPERE DI CONSOLIDAMENTO TRADIZIONALI (TORRENTE CANALI PARCO DI PANEVEGGIO, TRENTO) 39
FIGURA 23: SOSTITUZIONE DI OPERE TRASVERSALI CON RAMPE IN PIETRAME (A SX SCHEMA DA REGIONE LOMBARDIA, 2000; A DX RAMPA SUL T. ACHE, LEUTASCH, TIROLO) 39
FIGURA 24: SCHEMATIZZAZIONE DEL FENOMENO DI CADUTA MASSI (MODIFICATA DA DORREN, 2004) 42
FIGURA 25. PROFILI MEDI DI COESIONE RADICALE NELLE DIVERSE STAZIONI PER LE SPECIE ACERO MONTANO, CASTAGNO, FRASSINO MAGGIORE, FAGGIO. 48

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1: DENSITÀ DEGLI EVENTI DI DISSESTO IDROGEOLOGICO NELLE REGIONI ALPINE ITALIANE (CNR-GNDCI, 2007, PROGETTO AVI, DATI 2005) 2
TABELLA 2: QUADRO TIPOLOGICO DELLE BRIGLIE DI TRATTENUTA (DA PUGLISI, 1996, MODIFICATA). 33
TABELLA 3: VALORI DI COESIONE RADICALE RIPORTATI IN LETTERATURA 46
TABELLA 4: CONOSCENZA SCIENTIFICA DEL RUOLO DELLA FORESTA SUI RISCHI NATURALI (INTEGRATA E MODIFICATA DA BERGER, 1997 CIT. IN BERGER E REY, 2004) 51

1 Introduzione

La difesa del suolo rappresenta un elemento fondamentale in tutti i paesi del mondo per la salvaguardia degli insediamenti umani, per la difesa del territorio agro-silvo-pastorale e per la conservazione dell'ambiente. Essa rappresenta un elemento tanto più cruciale quanto più stretta è la relazione tra i processi di degradazione fisica del suolo e le attività umane, come accade nel caso di una larga parte delle Alpi.

In Lombardia, come del resto avviene in buona parte dell'Italia, ad eccezione di pochi casi localizzati soprattutto nelle regioni nord-orientali, la situazione della difesa dal dissesto idrogeologico nei territori montani sembra, di fatto, tornata ad essere quella di oltre un secolo fa quando un gruppo di ingegneri del Genio Civile (Tornani et al., 1894) scriveva: "*Fin dal tempo antico si sono eseguiti lavori di difesa lungo i torrenti, ma il carattere di essi era quello di pure difese locali nei punti più minacciati senza mai costituire un complesso organico di opere, che risalendo alle radici del canale, ottenesse l'estinzione completa del torrente, cioè quello stato del suo regime, in cui le acque scorrendo tranquille e chiare come in un ruscello, non arrecano più alcun danno alle sponde*".

Le motivazioni di una tale situazione sono ovviamente numerose e di origine non recente. Frequentemente si punta il dito contro la sostanziale mancanza di finanziamenti destinati alla manutenzione ordinaria dei territori e dei corsi d'acqua montani, oppure l'intermittenza nell'erogazione dei fondi, che è perlopiù legata al verificarsi di eventi catastrofici.

Oltre a tali motivazioni, sicuramente veritiere, è però possibile identificare un altro elemento critico costituito da una sostanziale variazione del paradigma di difesa del suolo che si è avuto in Italia, sia a livello centrale, sia a livello periferico.

Come messo in luce da Di Fidio e Bischetti (2007), in tutti i Paesi dell'arco alpino la difesa del suolo in ambito montano si è sempre basata sulla combinazione tra l'approccio ingegneristico-strutturale (con interventi localizzati che fanno riferimento al campo prettamente idraulico o geotecnico) e l'approccio ingegneristico-biologico (con interventi che "*mirano all'estinzione completa del torrente*" che fanno riferimento al campo idraulico-forestale). Tale filosofia si concretizza in una chiara ripartizione delle competenze tra servizi tecnici differenti, ma egualmente finanziati e vitali. L'uno sotto l'influenza culturale dell'ingegneria idraulica ed afferente a ministeri che si occupano di lavori pubblici, l'altro sotto l'influenza culturale del mondo forestale ed afferente a ministeri che si occupano di foreste. Così è stato anche in Italia fino ad alcuni decenni fa con la presenza del Genio Civile, sotto il controllo del Ministero dei Lavori Pubblici, ed il Corpo Forestale dello Stato (CFS) sotto il controllo del Ministero dell'Agricoltura e Foreste. Successivamente, vi è stato il passaggio dell'agricoltura e foreste alle Regioni senza il contemporaneo passaggio del CFS che ha quasi sempre portato ad una perdita netta di competenze ed alla rottura dell'equilibrio realizzato in decenni di attività congiunta. Infine, quando vi è stato il passaggio anche delle competenze in materia di corsi d'acqua non si è quasi mai riusciti a ri-

costituire il sistema, complice un quadro normativo in continua evoluzione e, come ricordato, una modalità di finanziamento che non favorisce la programmazione.
Il risultato è che in buona parte delle regioni italiane si procede privilegiando il finanziamento di poche grandi opere a difesa di singoli interessi, senza una strategia di intervento su larga scala che vada all'origine dei fenomeni.
Sull'efficacia di questo tipo d'approccio è interessante notare che nelle realtà regionali in cui il sistema originario è maggiormente consolidato, la densità di frane e delle piene è sicuramente inferiore (Tabella 1). Chiaramente, occorre considerare che tra le regioni prese in considerazione vi sono differenze sicuramente significative, ma è altrettanto sicuro che vi sono differenze nella modalità di gestire le sistemazioni montane (si veda Di Fidio e Bischetti, 2007).
Se da una parte vi è la necessità di riflettere sull'approccio da adottare alla sistemazione montana e sulle procedure tecnico-amministrative, dall'altra occorre ridefinire un approccio integrale alla gestione del rischio idrogeologico in ambito montano, che metta a disposizione del mondo tecnico le più recenti acquisizioni scientifiche, come sta avvenendo in altre realtà europee (ne sono un esempio il progetto EU IRASMOS -Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements- e SILVAPROTECT-CH in Svizzera).
L'obiettivo di questo documento è proprio quello di proporre una moderna filosofia d'intervento alle sistemazioni montane che, da una parte riprenda i principi e le migliori esperienze del passato e del presente, dall'altro offra un quadro organico e sistematico delle conoscenze scientifiche e delle tecniche oggi a disposizione.

Tabella 1: Densità degli eventi di dissesto idrogeologico nelle regioni alpine italiane (CNR-GNDCI, 2007, progetto AVI, dati 2005)

Regioni	Territorio montano e collinare (km^2)	piene (#/1000 km^2)	frane (#/1000 km^2)
Friuli – V.G.	4860	275	144
Veneto	8022	178	130
Trentino A. A.	13606	45	68
Lombardia	12636	105	243
Piemonte	18685	194	162
Valle d'Aosta	3263	86	77
Italia	231537	95	138

2 Il ruolo delle SIF e delle foreste nella difesa dei territori montani

2.1 Origine ed evoluzione delle Sistemazioni Idraulico Forestali

La necessità d'intervenire sui territori montani per difenderli dai fenomeni di dissesto idrogeologico e per ridurre le sue conseguenze nel territorio di pianura, è molto lontana nel tempo.

Anche se vi sono varie tracce documentali di dispositivi per il contenimento delle erosioni su corsi d'acqua montani (Puglisi, 2003a), la prima definizione di una strategia organica di contrasto ai fenomeni di dissesto sembra essere quella contenuta nel "*Discorso al serenissimo Cosimo III Granduca di Toscana*" di Vincenzo Viviani in cui già verso la fine del '600 s'indicava per risolvere i problemi che affliggevano l'Arno la combinazione di opere biologiche ed ingegneristiche nei bacini di monte: "*Dico esser mio parere che (oltre al rinnovare gli antichi bandi, e ridurre a più esatta osservanza le proibizioni del taglio de' boschi sul'Alpi) [...] si andassero dal piè de' lor fondi su su verso i loro principj, disponendo, e fabbricando, in aggiustate distanze fra loro, più Serre o Chiuse, o Leghe, o Traverse, che dir si vogliano, di buon muro a calcina, traforate da spesse feritoie, su larga pianta stabilmente fondate, e con grandissima scarpa al di fuori, [...] Con tali Serre verrebbe moderata la pendenza di quelle Valli [...] Fabbricate, e rincalzate queste chiuse, si dovrebbe su per esse Valli, in que' luoghi ove già non fossero, far diverse e folte piantate di Boscaglia o da fuoco, o da taglio [...] provvedendo, qui ancora, con pene, alla conservazione perpetua di tali boschi, i quali però debbano sempre restare a domini de' loro veri Padroni.*" (Viviani, 1687, pp.31-32).

Tale impostazione sembra poi perdersi per riapparire due secoli più tardi in Francia, dove si era venuto a formare un discreto corpo di letteratura sull'argomento dei dissesti montani e sui sistemi per porvi rimedio, da cui essa viene rilanciata in tutto l'arco alpino grazie all'opera di Prosper Demontzey (1882).

Nel mondo di lingua tedesca, nel 1880 Arthur von Seckendorff introduce la traduzione della prima edizione[1] del volume di Demontzey, da cui era stato in visita.

In maniera del tutto analoga l'idea originaria di Viviani rientra in Italia con l'opera di Francesco Piccioli (1887) e di Tornani, Sanjust di Teulada, Pasini e D'Urso (1894). Il primo era docente presso il Regio Istituto Forestale di Vallombrosa di "Architettura civile, stradale ed idraulica", e dopo un viaggio fatto in Francia a visitare i lavori di sistemazione idraulico-forestale eseguiti sotto la direzione di Demontzey, scrisse una memoria dal titolo"*Sui rimboschimenti eseguiti in Francia*" (Piccioli, 1887). I secondi, ingegneri del Genio Civile furono gli autori di una memoria dal titolo "*sulla sistemazione dei bacini montani in Svizzera, Austria e Carinzia*" (Tornani et al., 1894) che costituisce il resoconto della loro visita alle eccellenze delle sistemazioni montane europee su incarico del Ministro dei Lavori Pubblici dell'epoca, con lo scopo di acquisire esperienza e riorganizzare il settore in Italia.

Da allora in tutto l'arco alpino vi è stato un succedersi di manuali e pubblicazioni, tutti volti a diffondere la validità dell'impostazione combinata tra opere idrauliche e opere forestali per risolvere definitivamente i problemi di dissesto nei piccoli bacini montani. Esemplari sono, ancora, le parole di Tornani et al. (1894): "*Per ottenere la sistemazione vera e completa di un bacino montano, i lavori di rimboscamento e quelli nell'alveo del torrente de-*

[1] dal titolo *Etude sur les travaux de reboisement et de gazonnement des montagnes* (Paris, Imprimerie nationale, 1878) e destinata ad un pubblico ristretto

vono fondersi completamente, ed aiutarsi a vicenda, anzi gli uni devono essere fatti per gli altri e viceversa."

Questo tipo d'impostazione ha dominato le sistemazioni montane italiane per quasi un secolo e, pur con le dovute evoluzioni e diversificazioni, continua ad essere quella utilizzata nella maggior parte dei paesi dell'arco alpino.

Le evoluzioni maggiori si sono avute grazie ai progressi della tecnica, ed in particolare nella capacità di movimentazione terra, nella disponibilità di calcestruzzo a costi accessibili e nell'introduzione di nuovi materiali, oltre ovviamente ai progressi nella conoscenza dei processi. A questo proposito è interessante l'analisi fatta dal Servizio di Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento (ora Servizio Bacini Montani) che ha identificato i principali cambiamenti avvenuti nell'approccio sistematorio degli ultimi decenni (PAT- SSM, 2002):

- *Programmazione*: si è passati da una pianificazione sommaria, una scarsa presenza di opere ed una valutazione a vista dei rischi, ad una pianificazione omogenea su tutto il territorio, una presenza di opere che richiedono di conoscerne l'ubicazione e lo stato di funzionale ai fini manutentori, all'ausilio di strumenti informatici per la valutazione del rischio;
- *Progettazione*: si è passati da una progettazione per opere tipo, relativamente semplici, da eseguire con materiale reperibile sul posto e con un largo impiego di manodopera, redatti a mano e su singoli stralci, ad una progettazione diversificata in relazione al tipo d'intervento, con molteplici finalità (esecuzione, acquisizione di pareri, acquisizione di risorse), che può utilizzare una notevole varietà di strutture e materiali, attenta agli aspetti ambientali e il più possibile a scala di sottobacino da ottenere per stralci successivi, con un notevole apporto dall'informatizzazione;
- *Esecuzione*: si è passati da una scarsa (o assente) meccanizzazione dei cantieri organizzati in maniera molto semplice con poca attenzione alla sicurezza, con manodopera non specializzata ma a basso costo favorita da specifiche normative per eseguire lavori in amministrazione diretta come ammortizzatore sociale, ad una situazione di notevole meccanizzazione dei cantieri (in particolare il movimento terra e i materiali), che sono complessi dal punto di vista organizzativo, devono essere attenti ai disagi provocati alla popolazione e agli impatti transitori, che impiegano manodopera qualificata e formata con costi elevati, ad una normativa attenta alla sicurezza e che supporta poco i lavori in amministrazione diretta, ma continua a favorire l'impiego nelle vallate come elemento di mantenimento della popolazione in montagna.

In realtà per molte situazioni italiane una tale evoluzione non è avvenuta o è avvenuta parzialmente, anche a causa dell'andamento normativo e di finanziamento che, come già accennato non è sempre stato lineare. Il percorso delineato dalla Provincia Autonoma di Trento (soprattutto quello legato all'organizzazione tecnico-amministrativa), di conseguenza, può in molti casi costituire un esempio cui guardare con interesse da parte di altre amministrazioni, non tanto per ricalcarne pedissequamente lo schema quanto per adattarne i principi generali alla situazione specifica in cui ci si trova ad operare.

Tornando agli aspetti più tecnici, che invece possono essere ritenuti sostanzialmente omogenei sul territorio nazionale ed europeo o che possono essere mutuati senza problemi, l'analisi del Servizio Bacini Montani di Trento evidenzia come un primo salto tecnologico e di conoscenze si sia avuto tra la metà degli anni '60 del secolo scorso con l'inizio della meccanizzazione dei cantieri e la metà degli anni '70 con l'introduzione su larga scala del calcestruzzo armato (Figura 1). Tale evoluzione ha portato ad un aumento degli impatti ambientali degli interventi di sistemazione. A partire dalla metà degli anni '70, invece, il continuo progresso delle tecniche e delle conoscenze hanno intensificato il ricorso alle tecniche di ingegneria naturalistica e all'uso dei massi ed il ricorso alle briglie selettive. Inoltre, le esperienze di ricostruzione morfologica degli alvei, hanno consentito di ridurre l'impatto ambientale degli interventi pur aumentandone l'efficacia.
Mentre il primo salto tecnologico e conoscitivo è stato recepito in maniera omogenea sul territorio nazionale, altrettanto non si può dire per il secondo, con il risultato di assistere molto frequentemente ad interventi di "messa in sicurezza" di carattere strutturale e grande impatto ambientale, spesso a scala locale senza che si riesca ad incidere sull'assetto complessivo del bacino, che sta all'origine del dissesto.
L'esperienza trentina dimostra come l'evoluzione delle sistemazioni montane o, usando un termine ancora più appropriato, delle Sistemazioni Idraulico Forestali (SIF) nella sua forma più compiuta, non si ferma alle tecniche ed ai materiali ma, proprio sfruttando l'impostazione tradizionale di cerniera tra la cultura ingegneristica e quella biologica, si estende verso interventi a basso impatto ambientale, fino a fornire conoscenze e strumenti per interventi che siano anche di vera e propria riqualificazione ambientale. Purtroppo nelle realtà in cui la difesa del suolo si è via via allontanata dalle Sistemazioni Idraulico Forestali, i progressi tecnologici, soprattutto quelli che hanno reso assai meno onerosi i movimenti terra ed il ricorso agli interventi strutturali, hanno indotto ad un ribaltamento di quello che dovrebbe essere (e nelle migliori realtà alpine è ancora) il paradigma di difesa idrogeologica.

2.2 Verso un nuovo paradigma di sistemazione montana

I fenomeni di dissesto idrogeologico in ambito montano non sono certo cambiati negli ultimi decenni, anche se sono cambiate, da una parte le condizioni di esposizione al pericolo a causa dell'estendersi degli interessi antropici verso porzioni del bacino sempre più remote e dall'altra le tecniche, i materiali e le conoscenze.

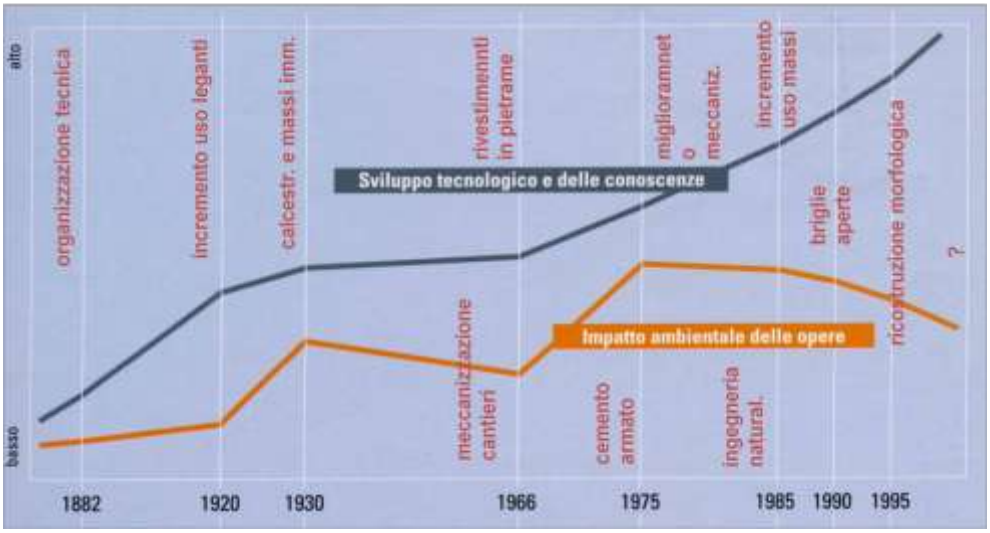

Figura 1: evoluzione degli interventi di SIF (PAT-SSM**, 2002 mod. V. D'Agostino)**

Proprio la combinazione tra innovazioni tecniche, dei materiali e scientifiche, permette oggi di rivisitare ed applicare quei principi e quelle intuizioni che stanno all'origine delle Sistemazioni Idraulico Forestali e che hanno contribuito, ove applicati, a garantire la sicurezza delle zone montane (o almeno ad attenuare i danni dovuti ai pericoli naturali).
Utilizzando una vecchia metafora si tratta di "*Ammazzare la fiera nella tana e prima che ne esca, anziché attenderla in aperta campagna e tanto meno in casa propria*" (Valente, 1905; in Puglisi 2007).
Come verrà meglio illustrato nei paragrafi seguenti, lo stato delle conoscenze in merito ai processi idraulici e geomorfologici dei corsi d'acqua montani ed agli effetti della vegetazione sul deflusso e sulla stabilità di versanti e scarpate, porta a definire i seguenti indirizzi generali di sistemazione.

2.2.1 Corsi d'acqua

Nell'ambito della sistemazione dei corsi d'acqua, si deve constatare che la domanda di sicurezza idraulica trova sempre più spesso risposta ad una scala locale. L'approccio più comunemente seguito consiste in misure che hanno l'obiettivo di aumentare la capacità di deflusso negli alvei e di ridurre le aree inondate, talvolta anche in tratti ove ciò potrebbe essere compatibile con il loro utilizzo. Tale impostazione spesso riduce i tempi di corrivazione e peggiora le condizioni di deflusso a valle, incrementando le portate di piena e talvolta anche i volumi complessivi, con il risultato di generare situazioni di pericolo ove prima non esistevano o di rendere inefficaci le misure precedentemente attuate. La situazione attuale è tale che la rete idrografica si trova spesso in condizioni limite ed ogni intervento che miri ad aumentarne la capacità di deflusso localmente rischia di pregiudicare la sicurezza dei tratti di valle. A ciò concorre anche la normativa che spesso impone di dimensionare gli interventi con tempi di ritorno molto lunghi anche quando i processi e le conseguenze consentirebbero di accettare esondazioni con una frequenza maggiore. Ad esempio, la Regione Lombardia indica un tempo di ritorno di 100 anni "per gli studi finalizzati a valutare la compatibilità idraulica delle previsioni degli strumenti urbanistici e terri-

toriali o più in generale delle proposte di uso del suolo, ricadenti in aree che risultino soggette a possibile esondazione".
In genere, inoltre, l'attenzione è focalizzata prevalentemente sulla sicurezza idraulica ed eventualmente sui fenomeni di trasporto di massa (colate detritiche o debris flow). Quasi mai la progettazione degli interventi sui corsi d'acqua prende in considerazione l'equilibrio geomorfologico ed i meccanismi di alimentazione solida nei diversi tratti.
A livello normativo viene indicato di utilizzare ovunque sia compatibile le tecniche di ingegneria naturalistica, che tuttavia assumono più una funzione di mitigazione degli impatti anziché costituire un approccio differente agli interventi di sistemazione.
Un moderno approccio alla sistemazione dei corsi d'acqua montani, supportato dalle più recenti conoscenze scientifiche, invece, si basa sui seguenti punti:

- Studiare l'assetto morfologico del collettore prima di ogni intervento e analizzare la dinamica del trasporto dei sedimenti a scala di bacino;
- Cercare di far convivere sicurezza idraulica, gestione della vegetazione, gestione dei sedimenti, spazio riservato al corso d'acqua - fascia di mobilità funzionale. Tale indirizzo si può ottenere:
  - Preservando i processi idraulici e sedimentologici dove sono già equilibrati;
  - Ripristinando gradualmente l'equilibrio geomorfologico ove questo non esista;
  - Cercando di indurre regimi di portate il più possibile naturali;
  - Salvaguardando e, ove possibile, ampliando le aree naturali di esondazione;
  - Ripristinando la geometria naturale dell'alveo (almeno quello della portata formativa);
  - Favorendo il ripristino della vegetazione riparia;
- Limitare la realizzazione di opere strutturali:
  - Favorendo la messa in sicurezza dalle piene attraverso la laminazione naturale delle stesse;
  - riducendo le interferenze antropiche con la dinamica evolutiva degli alvei e dei sistemi fluviali.

A questa filosofia d'intervento si accompagna il convincimento che non sia né necessario né opportuno ricercare una "sistemazione definitiva" del torrente, (obiettivo comunque utopico e che non è assicurato neppure dall'impiego di manufatti e materiali considerati resistenti alle sollecitazioni esterne e di maggiore durata nel tempo come quelli in calcestruzzo), ma che sia, invece, più utile tendere ad una *rinaturalizzazione* del corso d'acqua. Questo approccio si concretizza in un insieme di azioni e tecniche finalizzate a stabilire per il corso d'acqua, e per il territorio ad esso connesso (sistema fluviale), la condizione di massima naturalità possibile, cioè quella in grado di espletare le sue caratteristiche funzioni ecosistemiche (fisico-chimiche, biologiche, geomorfologiche) garantendo, nel contempo, anche il raggiungimento degli obiettivi socio-economici. Il ritorno ad una condizione preesistente l'intervento antropico (che è l'obbiettivo della rinaturalizzazione in senso stretto), infatti, potrebbe essere inattuabile in relazione sia ai vincoli antropici esistenti (infrastrutture, edifici, etc.), sia alla possibilità di mantenere nel tempo l'habitat fluviale restaurato. In questo caso il processo di rinaturalizzazione finisce con l'avere come obiettivo la possibili-

tà di creare nuovi habitat, anche mai esistiti nel corso d'acqua in esame, ma capaci di esercitare una funzione sia ecologica sia di fruizione ambientale.

2.2.2 Versanti

Per quanto riguarda i dissesti di versante, occorre riconoscere che negli ultimi decenni l'attenzione si è quasi esclusivamente rivolta alla messa in sicurezza di quei dissesti che insistono direttamente su strutture e infrastrutture, spesso attraverso misure di tipo strutturale puntuali che non vanno ad incidere sulle cause che stanno all'origine dei fenomeni.
Anche in questo caso l'utilizzo delle tecniche di ingegneria naturalistica è fortemente incentivato come elemento di riduzione degli impatti. Molto spesso, tuttavia, queste tecniche vengono applicate in maniera acritica e senza una visione di medio e lungo periodo sull'evoluzione della componente vegetazionale, che è quella che nello spirito dell'ingegneria naturalistica dovrebbe garantirla stabilità nel lungo periodo. Sebbene sia da più parti riconosciuta in termini di principio, inoltre, la funzione protettiva dei boschi viene di fatto trascurata quasi completamente. A riprova di ciò l'istituto del vincolo idrogeologico, istituito dal RD 3267/1923 e tuttora vigente in tutta la legislazione regionale, viene quasi sempre considerato un mero adempimento burocratico.
Fermo restando l'importanza di tutte le opere ingegneristiche per la sicurezza degli insediamenti umani e delle infrastrutture, la foresta montana mantiene inalterato il suo potenziale protettivo e può tornare ad essere un importante elemento nella strategia di difesa idrogeologica, anche in relazione ai minori costi degli interventi selvicolturali rispetto agli interventi prettamente strutturali. Il numero ed i costi degli interventi strutturali di difesa attiva e passiva necessari a mettere in sicurezza il territorio montano, infatti, ne mettono in discussione la sostenibilità economica, anche in ragione delle elevate spese che sono richieste per la loro manutenzione. Al contrario, le misure di protezione che utilizzano la vegetazione, oltre ad aumentare la loro efficacia con il tempo sono maggiormente efficienti dal punto di vista dei costi (Kienholz e Mani, 1994; Motta e Haudemand, 2000; Berger et al., 2002; Dorren et al., 2004a; Perret et al., 2004; Brauner et al., 2005).
In un tale contesto, molti Paesi dell'arco alpino hanno ripreso a valorizzare il carattere protettivo dei boschi montani, comprendendoli a pieno titolo nella loro strategia di difesa del suolo. In Austria e Svizzera, ad esempio, si stima che vengano spesi ogni anno circa 50 milioni di Euro per mantenere e migliorare le funzioni protettive dei boschi (CIPRA, 2006 cit. in Brauner et al., 2005).
Una moderna visione degli interventi di versante deve quindi valorizzare il ruolo protettivo dei boschi, passando da un approccio qualitativo che oggi può difficilmente essere accettato, ad uno di tipo quantitativo. Non si tratta tanto di riaffermare che la vegetazione esercita un ruolo positivo e preventivo nei confronti del dissesto idrogeologico, quanto di quantificare tale effetto nelle diverse situazioni.
Per quanto riguarda l'ingegneria naturalistica, invece, occorre sviluppare schemi di calcolo che consentano di affrontare la progettazione di queste tipologie di opere al pari di quelle in materiale inerte ed affrontare gli aspetti legati alla dinamica della vegetazione nel tempo.

Figura 2: ruolo delle SIF ed i suoi legami con gli altri ambiti

2.2.3 L'attualità del messaggio delle SIF

L'impostazione tradizionale delle Sistemazioni Idraulico Forestalli rimane assolutamente adeguata a fornire i principi generali d'intervento, che devono essere applicati integrando le più moderne conoscenze sui processi con le innovazioni dei materiali e delle tecniche.

I principi generali che le SIF ci lasciano in eredità possono essere riassunti in: *integralità*, *gradualità* e *continuità* degli interventi.

INTEGRALITÀ DEGLI INTERVENTI

I processi che stanno alla base dei fenomeni di dissesto idrogeologico in ambito montano sono prevalentemente di tipo diffuso:

- L'aumento della portata negli alvei è legato ai processi idrologici che si verificano sui versanti ed a quelli idraulici nei rami della rete idrografica minore;
- L'erosione e/o il deposito che possono verificarsi negli alvei è legato alla portata liquida e solida che vi perviene dai versanti e dalla rete di monte;
- La quantità di materiale solido che perviene agli alvei è particolarmente legata ai fenomeni destabilizzazione superficiale, spesso di modesta rilevanza in termini di singoli volumi ma largamente presenti sui versanti, ed all'erosione nei tratti minori della rete.

In tale ottica gli interventi di sistemazione (compresa l'azione amministrativa) non deve essere concentrata a livello locale sul singolo dissesto ma deve considerare l'intero bacino idrografico come unità base di riferimento per l'analisi dei fenomeni e delle condizioni in atto.

L'integralità dell'approccio sistematorio nei bacini montani non riguarda solo l'aspetto territoriale, ma anche quello della tipologia degli interventi. In particolare occorre combinare misure di tipo tecnico, silvicolturale, d'ingegneria naturalistica e di tipo amministrativo/non strutturale, con l'obiettivo di ottimizzare il rapporto costi-benefici (Holub, 2008).

GRADUALITÀ DEGLI INTERVENTI
Le varie categorie di opere (forestali, idraulico-forestale, idrauliche) devono essere realizzate per gradi, al fine di osservare e valutare gli effetti conseguiti e quindi orientare al meglio gli interventi successivi, e proseguite fino al completamento della sistemazione.
Tale principio è spesso ostacolato dall'impossibilità di una programmazione pluriennale dei finanziamenti, che sono invece spesso legati alle emergenze.
CONTINUITÀ DEGLI INTERVENTI
Tutte le opere devono mantenere la loro funzionalità e quindi essere adeguatamente controllate e riparate in modo che in nessun momento vengano meno alla loro funzione.
Occorre quindi promuovere la manutenzione dei versanti e del territorio montano, con particolare riferimento alla forestazione ed alla regimazione della rete idrografica minore, per la difesa dai fenomeni di erosione e di frana.

3 Gli interventi sul reticolo montano

Il reticolo idrografico montano presenta una serie di caratteristiche peculiari che richiedono un approccio sistematorio differente rispetto ai tratti di valle.
In esso vi è una stretta connessione tra le dinamiche di produzione di sedimento, sui versanti e nei tratti di monte della rete stessa, e tra versanti e reticolo.
Proprio questa connessione richiede, ancora più che nei tratti di valle, un approccio integrato agli interventi di sistemazione, nel senso illustrato nel precedente paragrafo.
Ai fini della sistemazione è indispensabile andare a distinguere il reticolo montano da quello di pianura e di fondovalle in quanto, sul primo dovrà prevalere un approccio idraulico-forestale, mentre sul secondo un approccio tipicamente idraulico. Nel primo caso, infatti, si ha a che fare con una dinamica torrentizia e le condizioni di pericolosità sono legate principalmente al trasporto solido di fondo ed al trasporto di massa, a loro volta alimentati da fenomeni di dissesto gravitativo dei versanti dove la vegetazione ricopre un ruolo di consolidamento chiave. Nel secondo caso, invece, le connessioni tra versante e alveo sono meno strette.
Il fatto che il reticolo montano ed i relativi versanti siano intrinsecamente legati e mutuamente influenzati comporta che l'approccio sistematorio debba essere strettamente integrato. Pur prevedendo interventi localizzati, quindi, questi si devono necessariamente inserire in una logica complessiva di sottobacino e si deve prevedere la combinazione tra interventi strutturali e non strutturali, in cui la componente biologica (in particolare quella forestale) gioca un ruolo fondamentale. Questa distinzione, come accenanto, era assolutamente chiara in Italia fino agli anni '70-'80 del secolo scorso quando il Corpo Forestale dello Stato interveniva sul bacino e sulla rete sopra una certa altitudine, mentre al di sotto interveniva il Genio Civile, solitamente sulla sola rete idrografica.
La distinzione tra le due tipologie di reticolo non è affatto semplice ed ha impegnato gli studiosi fin dall'origine delle Sistemazioni Idraulico Forestali, senza però che nel concreto si sia andati oltre una delle prime definizioni di torrente presente nella letteratura tecnica: "*Un corso d'acqua i cui alzamenti di pelo sono subitanei e violenti, le pendenze conside-*

revoli ed irregolari e che spesso innalza alcune parti del suo letto col deposito delle materie trasportate , ciò che fa divagare le acque al momento delle piene" (Gras, 1857).
Sicuramente, come già accennato, uno dei fenomeni chiave in tali corsi d'acqua è la produzione e il trasporto al fondo di sedimenti. I meccanismi che stanno alla base di tale processo sono oggi molto più chiari rispetto al passato ed è possibile applicare i principi delle sistemazioni in maniera moderna ed innovativa.

3.1 Produzione trasporto dei sedimenti nel reticolo montano

3.1.1 Condizioni di equilibrio e morfologia dei corsi d'acqua: quadro di sintesi

L'osservazione di campo della morfologia delle forme fluviali é il principale strumento per interpretare la dinamica di un corso d'acqua, per valutare il suo grado di stabilità e per prevedere quale potrà essere la sua risposta ad un evento di piena di una certa eccezionalità.
L'estesa produzione scientifica sulla morfologia dei corsi d'acqua testimonia l'articolata complessità delle forme fluviali che si osservano in natura e sottolinea la difficoltà di riassumere, mediante un'unica classificazione, la varietà delle configurazioni che i corsi d'acqua presentano.
La classificazione proposta da Rosgen (1994) perviene all'identificazione dei differenti tipi morfologici, incrociando la natura del materiale dominante che costituisce il fondo (roccia, massi, ciottoli, ghiaia, sabbia, limo/argilla) con quattro parametri di natura esclusivamente geometrica: sinuosità, rapporto tra larghezza dell'alveo a piene rive e corrispondente profondità della corrente, pendenza del pelo libero, rapporto di confinamento della sezione (larghezza di piene rive/larghezza della piana alluvionale). Il limite della classificazione di Rosgen è rappresentato dal fatto che non esplicita il nesso tra la codifica delle diverse forme fluviali ed i processi che determinano i differenti assetti morfologici. Nel condurre un'analisi morfologica, la prima distinzione che può operarsi è quella fra un corso d'acqua che scorre in roccia ed uno di tipo alluvionale. Il primo, fatte salve le eccezioni che mettono in gioco substrati rocciosi piuttosto erodibili o discontinuità tettoniche, presenta dei processi di adattamento e modellamento della sua sezione e del profilo di fondo molto dilatati nel tempo e comunque spazialmente contenuti. Il secondo scorre sui sedimenti (le alluvioni) da esso stesso trasportate e può modificare la sua forma anche repentinamente a causa dei fenomeni di trasporto, erosione o deposito dei sedimenti. Nella tipologia alluvionale la dinamica d'alveo comprende anche la possibilità, assai frequente, che, ad una evoluzione morfologica anche molto rapida, si affianchino processi di modellamento più lenti. questi sono indotti da un disequilibrio fra i parametri che favoriscono l'erosione, come la portata liquida Q e la pendenza longitudinale del fondo S, e le variabili che a questa si oppongono (favorendo la deposizione dei sedimenti), quali la portata solida Q_s e le dimensioni granulometriche (D) dei sedimenti superficiali e sottosuperficiali che compongono il letto.
Un principio che regola indistintamente la dinamica di un fiume, a prescindere dalla morfologia che esso assume, è quello espresso da Lane (1955). L'Autore afferma che un fiume tende sempre a conservare o a ripristinare una situazione di equilibrio in modo che le variazioni di Q_s e di D siano controbilanciate da Q e da S. Si può scrivere questa relazione di proporzionalità in forma dimensionalmente omogenea:

$$Q\,S \cong Q_s\,D_{50} \qquad (1)$$

ove:

- Q è la portata liquida formativa per il canale (m^3/s);
- S è la pendenza longitudinale del fondo del canale (m/m);
- Q_s è il carico di materiale solido o portata solida per larghezza unitaria di canale (m^2/s); questa variabile esprime l'alimentazione solida da monte, piuttosto che la capacità di trasporto che il corso d'acqua è in grado di sviluppare localmente;
- D_{50} è la dimensione rappresentativa del materiale d'alveo (m); il pedice indica che, sottoponendo un campione dei sedimenti ad una vagliatura, il D_{50} è la dimensione della maglia del setaccio che lascia passare il 50% (in peso o in numero) del campione.

L'eq. (1) è anche nota come bilancia di Lane (Figura 3), poiché il prevalere di uno dei due prodotti che vi compaiono determina lo spostamento momentaneo del corso d'acqua verso un stato di deposizione (prevalenza del fattore $Q_s\,D_{50}$) o di erosione (prevalenza del fattore $Q\,S$). Così, ad esempio, si ipotizzi che, preesistendo una condizione di equilibrio, si realizzi una traversa fluviale per la produzione di energia idroelettrica. La conseguenza dell'intervento, non intervenendo variazioni nel regime idrologico del bacino idrografico sotteso (quindi di Q), sarà una brusca riduzione dell'alimentazione solida (Q_s) che transita a valle. L'ago della bilancia di Lane si sposterà decisamente nella direzione dell'erosione, fino a che il fiume, vedendo progressivamente abbassato il suo profilo, le sponde incise e l'alveo allargato, avrà ritrovato una nuova e più ridotta pendenza energetica (S).

Il prodotto che compare al primo membro dell'eq. (1) esprime anche il lavoro compiuto dalla corrente in virtù della forza di gravità. Se si indica con γ (N/m^3) il peso specifico dell'acqua, si può introdurre la variabile:

$$\Omega = \gamma\,Q\,S \qquad (2)$$

che rappresenta il tasso di perdita di energia potenziale per unità di lunghezza del canale. Ω è espressa in W/m ed è denominata "stream power".

La stream power può essere rapportata alla larghezza (B) del canale, divenendo così una *stream power* unitaria ($\omega = \Omega / B$; W/m^2).

Indicando con τ (N/m^2) lo sforzo tangenziale medio che agisce lungo il contorno bagnato della sezione e con V (m/s) la velocità media della corrente, sussiste anche l'identità:

$$\omega = \frac{\Omega}{B} = \tau\,V \qquad (3)$$

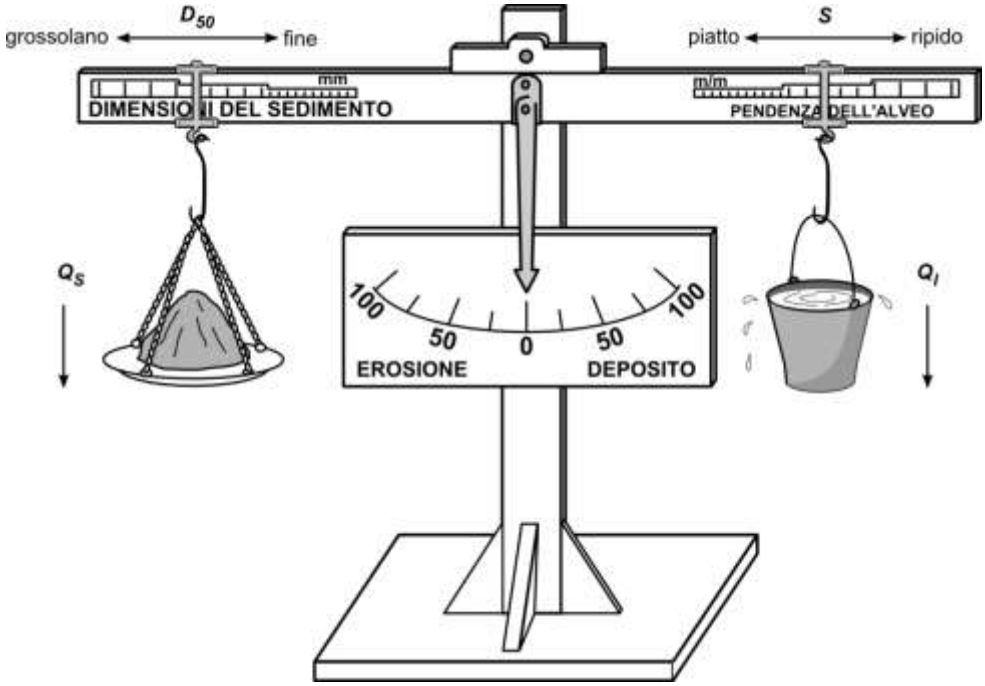

Figura 3: Bilancia di Lane

In ogni corso d'acqua, in definitiva, il tasso di lavoro svolto dalla corrente per unità di larghezza del canale è espresso dal prodotto dello sforzo tangenziale medio per la velocità media del flusso. Yang e Song (1979) e Chang (1980) hanno dimostrato che un corso d'acqua, passando attraverso la ricerca di uno stato di equilibrio dinamico, sceglie il suo andamento plano-altimetrico e la forma della sua sezione tendendo a minimizzare Ω o, identicamente, a sviluppare il suo moto con il minimo tasso di dissipazione energetica.
La *stream power* è una variabile molto rilevante per valutare la mobilità di un alveo, poiché esistono dei valori abbastanza ben definiti in corrispondenza ai quali essa è in grado di determinare l'inizio del moto dei sedimenti e l'avvio del trasporto solido di fondo (Williams, 1983). Anche le classificazioni delle varie morfologie sono, in ultima analisi, una risposta alla ricerca dell'equilibrio espresso dalla bilancia di Lane, soprattutto se si tiene conto del fatto che una limitazione all'azione modellante della corrente (espressa da Q_s e D_{50}) include anche le dissipazioni energetiche S_S e S_F (espresse in termini di cadenti energetiche, m/m), indotte rispettivamente dalle irregolarità planimetriche ed altimetriche del corso d'acqua. Se si tiene conto dell'eq. (2), si potrebbe quindi proporre una relazione ancor più generale di quella di Lane (1955), esprimendo l'eq. (1) nella forma (D'Agostino, 2003):

$$\Omega / \gamma \cong \alpha \, Q_s \, \phi D_{50} \, S_S \, S_F \qquad (4)$$

dove α è una costante di proporzionalità, S_S rappresenta la dissipazione energetica di tipo continuo causata dalla sinuosità del corso d'acqua. S_F esprime invece tutte quelle dissipazioni energetiche che non possono essere espresse solo in funzione del D_{50} e che sono im-

putabili all'andamento altimetrico del profilo (con le sue irregolarità) e alla forma della sezione.
S_F è legato sia ai corpi sedimentari vegetati e non (barre longitudinali e mediane) che si osservano negli alvei naturali, sia alle forme di organizzazione dell'alveo (bruschi salti e rapide) che inducono una successione di dissipazioni energetiche di tipo localizzato.
Considerando le tipologie morfologiche che hanno implicazioni dirette sugli interventi di Sistemazione Idraulico Forestale si illustrano di seguito gli assetti morfologici caratteristici di alvei montani e pedemontani.
Il reticolo idrografico di molti bacini alpini può essere scomposto in due distinte tipologie di canale: incisioni colluviali e tratti alluvionali. Il reticolo alluvionale sottintende tutti i tratti di quei collettori il cui letto è costituito dai sedimenti che il flusso idrico è in grado di trasportare e selezionare. A differenza di un canale in roccia, un tratto alluvionale è soggetto ad un'evoluzione della sua geometria abbastanza dinamica nel tempo, potendo dare luogo, sia spazialmente che temporalmente, all'alternarsi di fenomeni di erosione e di deposizione. Come reticolo colluviale viene intesa la porzione del reticolo idrografico che si sviluppa nella parte superiore del bacino idrografico, caratterizzata da incisioni più o meno evidenti del substrato, causate prevalentemente dalla concentrazione del deflusso idrico superficiale. I solchi colluviali d'incisione possono essere considerati come piccoli corsi d'acqua di testata che possiedono una debole capacità di trasporto (Montgomery e Buffington, 1997). La limitata profondità di incisione e il carattere effimero dei deflussi nella rete colluviale sembrano non garantire la mobilizzazione di gran parte del sedimento che può essere immesso nel canale (Dietrich e Dunne, 1978). Il deflusso intermittente può rimuovere parte di tale materiale, ma non è tale da determinare processi di selezione e trasporto assimilabili a quelli che avvengono nella rete idrografica principale (Montgomery e Buffington, 1997; D'Agostino e Vianello, 2005).
Nei tratti colluviali di bacini montani a forte pendenza sono anche possibili trasporti di sedimento in forma massiva (colate detritiche o fangose), legati talora al processo di formazione e rimaneggiamento periodico del canale stesso e determinati da una molteplicità di fattori, quali apporto di materiale da canali in roccia superiori, franamenti superficiali di versante, rilasci impulsivi di sedimenti accumulatisi nel tempo nel reticolo per l'azione di intrappolamento indotta dalla vegetazione in alveo o dai detriti legnosi.
Il reticolo colluviale assume importanza, poiché costituisce la componente elementare del reticolo idrografico. Le tipologie colluviali possono essere considerate gli elementi iniziali della rete idrografica e rappresentano la forma di transizione da impluvio non inciso a rete idrografica (Montgomery e Dietrich, 1989).
Nell'ambiente alpino lo sviluppo di tale tipologia morfologica è favorito dalla litologia dei suoli. I canali colluviali si generano nei terreni morbidi e propensi all'azione di modellamento da parte del deflusso superficiale. Trattasi di substrati di origine sedimentaria a prevalenza limoso-argillosa e i cui suoli sono assai plastici.
I bacini idrografici alpini non presentano sempre lo sviluppo di una rete effimera colluviale, che può essere sostituita da canali detritici di testata che s'innestano direttamente sul reticolo alluvionale.

A valle del reticolo colluviale, i corsi d'acqua montani sono generalmente a debole tortuosità e vengono per questo identificati come canali rettilinei. L'aggettivo "rettilineo" non è da interpretarsi in modo troppo rigido, poiché tutti corsi d'acqua posseggono, in misura più o meno marcata, una certa tortuosità. In natura si osservano, infatti, assai raramente, tratti che si mantengono rettilinei per una lunghezza superiore a 20-25 volte la loro larghezza (D'Agostino, 2003).

I canali rettilinei si trovano prevalentemente nei settori montani e pedemontani dei bacini idrografici e sono caratterizzati da pendenze abbastanza elevate e da una granulometria dei sedimenti grossolana ed eterogenea. Il campo di pendenze tipico si colloca generalmente sopra a 1-2%, anche se non mancano esempi di canali rettilinei su pendenze anche più ridotte. Altre caratteristiche che possono presentare sono: l'assenza di pianure alluvionali estese, affioramenti rocciosi lungo le sponde e nel letto, presenza poco sviluppata di corpi sedimentari centrali, sezioni di forma abbastanza confinata e con profilo del fondo piuttosto incassato nella valle. La forma di trasporto solido che si considera caratterizzante é il moto dei sedimenti in prossimità del fondo (trasporto di fondo o trasporto per 'scorrimento del letto'). Esso può essere affiancato da fenomeni di moto dei sedimenti in forma ancora più massiva, quali le correnti iperconcentrate e le colate detritiche (*debris flow*). Le colate si verificano in quei corsi d'acqua a forte torrenzialità, che presentano pendenze medie superiori al 20% e che sottendono bacini dell'estensione generalmente inferiore ai 10 km^2 e, assai raramente, superiore ai 25-30 km^2 (D'Agostino, 1996).

I corsi d'acqua rettilinei sono contraddistinti da un livello energetico piuttosto elevato. La *stream power* unitaria si mantiene sempre sopra 300 W/m^2 e, più spesso, 1000 W/m^2 (Nanson e Croke, 1992). Nella ricerca di un equilibrio questa energia viene controbilanciata dalle granulometrie elevate dei sedimenti (fattore D_{50}, eq. 4) e dall'organizzazione in unità morfologiche altamente dissipative (fattore S_F, eq.4) rappresentate dalle rapide e dagli *step pool*. Lo sviluppo di queste unità viene bruscamente interrotto, o quantomeno alterato, nel caso che da monte si renda improvvisamente disponibile una portata solida (Q_s) in eccesso, liberata, ad esempio, da una grossa frana connessa con l'alveo.

I tratti a rapida e a *step pool* si sviluppano preferenzialmente su pendenze superiori al 3-4%. Le prime unità si presentano come degli scivoli ove si concentrano (anche per alcune decine di metri) i sedimenti più grossolani (Figura 4). Questi vanno come a "tappezzare" l'unità a rapida, conferendole una buona stabilità. Le rapide si accompagnano ad una forte scabrezza dell'alveo che, per la distribuzione casuale dei massi più grossi, dà luogo ad una dissipazione energetica di tipo quasi continuo (D'Agostino et al., 2000). Talora, all'interno di un tratto a rapida, alcuni degli elementi più grossolani risultano parzialmente allineati in senso trasversale; si formano così delle successioni di gradini che non occupano l'intera larghezza del canale e la cui interdistanza risulta irregolare.

Gli *step pool* si sviluppano con un profilo longitudinale a gradinata che si traduce, dal punto di vista idraulico, in una successione di salti (*step*) e di pozze (*pool*). Figura 5

Figura 4 – Esempio di tratto a rapida (a gradini) in un torrente montano.

Le perdite energetiche avvengono, lungo il thalweg, ad impulsi e sono localizzate nelle *pool*. Gli *step* sono costituiti dall'allineamento trasversale di una o due file dei sedimenti più grossolani che compongono l'alveo. Dentro le *pool* erosive si concentrano superficialmente i sedimenti più fini; i sedimenti crescono poi progressivamente di dimensioni procedendo verso lo *step* di valle. Se un tratto a *step pool* non ha subito particolari processi di sovralluvionamento, il profilo schematizzato di una *pool*, dal piede di uno *step* alla testa dello *step* successivo, risulta in contropendenza. Grazie alla presenza dei continui salti idraulici, queste strutture, specie in condizioni di magra, sono fortemente dissipative, mentre le perdite energetiche si attenuano quando gli *step*, annegati da valle, vengono quasi sommersi dall'altezza del flusso.

Gli *step pool* si organizzano generalmente in sequenze di almeno 2 o 3 unità in successione con un'interdistanza (o lunghezza d'onda) abbastanza regolare fra *step* e *step* (o fra *pool* e *pool*). Una recente indagine (D'Agostino e Vianello, 2004) condotta alla testata del rio Cordevole ha messo in evidenza che la larghezza a piene rive delle sequenze a *step pool* e delle rapide tende a crescere quasi linearmente con l'area drenata, ma che il tasso di crescita della larghezza delle unità a *step pool* è inferiore di circa un 30% rispetto a quello delle rapide. Questo risultato può essere attribuito alla circostanza che i tratti a *step pool* prediligono, per la loro formazione, le sezioni più confinate, e al fatto che le rapide, assicurando un corazzamento quasi continuo del fondo, incoraggiano una maggiore erosione laterale delle sponde.

L'altezza complessiva H (Figura 5) degli *step* ricade solitamente all'interno del campo di valori (D'Agostino e Lenzi, 1998):

$$H = (1 \div 4)\, D_{90} \tag{6}$$

e, mediamente, il rapporto H/D_{90} si aggira intorno a 2-2.5 (D_{90} è il diametro per il quale il 90% del materiale campionato in alveo è più fine).

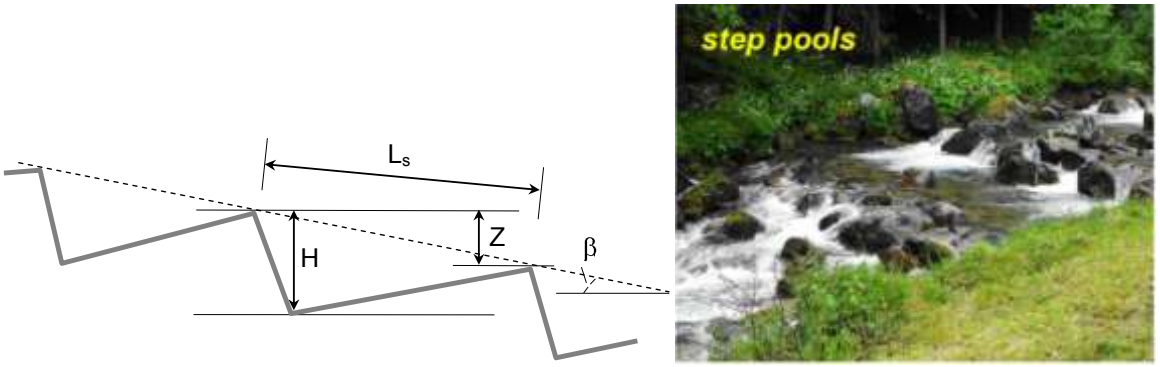

Figura 5: Esempio di una sequenza di unità morfologiche a *step* e *pool*

Uno degli elementi più caratteristici degli *step pool* è la lunghezza d'onda degli *step* (L_s, Figura 5), che esprime anche l'interdistanza fra sezioni del canale aventi velocità medie della corrente simili. Da un'analisi condotta in campo da D'Agostino e Lenzi (1998) su alcuni tratti di cinque diversi torrenti a *step* e *pool* (49 sequenze per complessive 253 unità) è emersa la relazione:

$$L_s = (0.5 \div 1.6)\, B \tag{7}$$

essendo B la larghezza a piene rive degli *step*, con un valore medio del rapporto L_s/B pari ad 1.
Negli *step pool* il campo di moto è dominato dai ripetuti salti idraulici, cosicché, specie in condizione di piena, si sviluppano a valle degli *step* dei vortici di copertura (totalmente o parzialmente annegati) che dipendono dalla profondità del flusso e dall'altezza dello *step*. Secondo questa ipotesi il fattore di scala più determinante per L_s potrebbe essere l'altezza degli *step* (H) od il dislivello (Z) fra *step* e *step* (Figura 5).
La dimensione Z risulta, in genere, sempre inferiore ad H, determinando, come si è detto, una contropendenza del fondo per il tratto d'alveo compreso fra il punto di massima erosione entro la *pool* e lo *step* a valle. Negli *step* naturali risulta mediamente:

$$Z = k\, H \tag{8}$$

con la costante k che è in genere prossima a 0.7 (Abrahams et al.,1995). Una recente indagine di Vianello et al. (2005), condotta analizzando un ampio set di dati di campo molto eterogenei dal punto di vista geografico, ha evidenziato come, se si escludono i quartili estremi della distribuzione di Z/H, il valore di k rimanga sempre compreso tra 0.6 e 0.8 e tenda, mediamente, a 0.676. Un valore del coefficiente k pari a 2/3 corrisponde anche mediamente, secondo le sperimentazioni di laboratorio condotte da Abrahams et al. (1995), all'assetto morfologico che determina, a parità di Q ed L_s, la minima velocità media del flusso all'interno della sequenza (la velocità media di queste sperimentazioni è il risultato del tempo di trasferimento medio della massa liquida lungo la successione di *step* e *pool*).

Secondo questa teoria gli *step pool* sembrerebbero tendere ad una configurazione tale da massimizzare la resistenza al moto.
Vianello et al. (2005) hanno anche sottolineato come le relazioni descrittive della morfologia degli *step pool* rimangano sostanzialmente invarianti nei vari ambienti geo-climatici. Gli Autori hanno anche desunto una relazione sperimentale che dimostra come pendenza del torrente S ($S = \tan\beta$; Figura 5), larghezza B e dislivello Z tra cresta e cresta degli *step* concorrano tutte a determinarne la lunghezza d'onda caratteristica. La relazione ottenuta è la seguente:

$$L_s = 1.22\, Z^{0.69}\, B^{0.31}\, S^{-0.57} \tag{9}$$

Essa può essere di notevole utilità pratica nella progettazione degli interventi di consolidamento degli alvei con tecniche di ricostruzione morfologica.
Un'altra successione tipica dei corsi d'acqua rettilinei e, in particolare, degli alvei con fondo in sabbia e/o ghiaia, è quella dei *riffle pool*. Più rara è invece la loro presenza in corsi d'acqua dominati dalla presenza di massi (Leopold et. al., 1964). Queste unità si osservano più frequentemente nei settori pedemontani dei bacini idrografici in un campo di pendenze del fondo compreso tra 0.5% e 3%. I *riffle*, analogamente alle rapide, sono dei tratti dove il canale aumenta la sua pendenza e dove sono presenti le granulometrie più grossolane. Il tratto a *riffle* si localizza quasi in corrispondenza all'inizio di una barra laterale, segue quindi una lunga *pool*, che ha il suo punto di massimo sviluppo trasversale al termine e poco a valle della barra (Figura 6). Il successivo *riffle* è indotto dalla presenza di una barra laterale localizzata sulla sponda opposta rispetto alla precedente.
La genesi dei *riffle pool* sembra da attribuire al fatto che, pur essendo il canale rettilineo, l'andamento sinusoidale del filone principale della corrente induce la formazione di corpi sedimentari alternati, ai quali si accompagnano, specie in condizioni di magra e di morbida, fenomeni accelerativi (nel *riffle*) e decelerativi (nel *pool*) del flusso.
L'osservazione delle interdistanze fra *riffle* successivi (lunghezza d'onda L_r, Figura 6) ha evidenziato che la larghezza del canale (B) in condizioni di piene rive (*bankfull*) sembra essere il parametro morfologico che più influenza L_r. I *riffle*, nei corsi d'acqua rettilinei, presentano mediamente una lunghezza d'onda compresa nel campo:

$$L_r = (5 \div 7)\, B \tag{10}$$

con un valor medio del rapporto L_r/B molto prossimo a 6 (Keller e Melhorn, 1978).
Yalin (1992) giustifica l'eq. (10) osservando che la struttura macroturbolenta della corrente induce la formazione di vortici orizzontali aventi dimensioni proporzionali alla larghezza stessa del canale e localizzati ad una distanza teorica pari a circa $2\pi\, B \cong 6.3\, B$. La stessa distanza fra i vortici è poi anche quella che determina la deformazione dell'alveo in *riffle* e *pool*, come conseguenza delle ritmiche fluttuazioni del campo di moto.

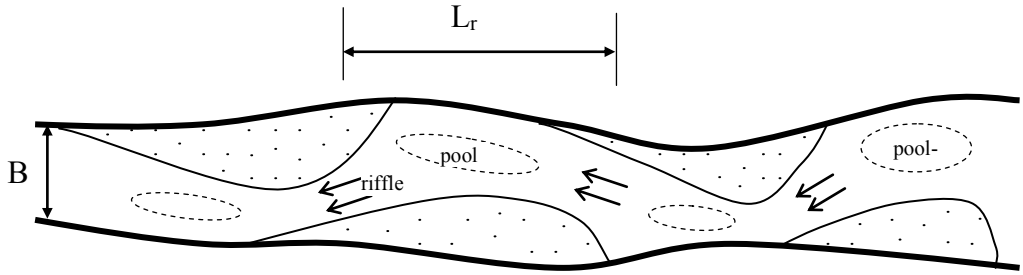

Figura 6: **Schema planimetrico di un tratto d'alveo con unità a** *riffle pool*

Si ricorda che l'alternanza di *riffle* e *pool* si manifesta, con modalità leggermente differenti, anche nei tratti vallivi dei fiumi ad andamento meandriforme. Tuttavia in questi casi l'alternanza di fenomeni accelerativi e decelerativi è maggiormente legata al continuo sbandamento delle linee di corrente lungo il meandro, piuttosto che ad un forte condizionamento dei corpi sedimentari.

Montgomery e Buffington (1997) hanno proposto la definizione di unità morfologica a letto piano per i tratti dove il profilo di fondo ha un andamento regolare e con pendenza costante, la sezione conserva una certa prismaticità e l'alveo è caratterizzato da granulometrie più uniformi rispetto ai tratti limitrofi e dalla quasi totale assenza di massi. I tratti a letto piano riflettono una condizione di sostanziale equilibrio fra *stream power* ed alimentazione solida e presentano una certa similitudine con i *riffle*, dai quali si differenziano per la mancanza di barre longitudinali lungo le sponde. Nei corsi d'acqua montani queste unità sono in genere di breve lunghezza e si localizzano dove il profilo presenta, rispetto ai tratti a monte ed a valle, una diminuzione di pendenza. I tratti a letto piano costituiscono spesso l'allungamento e la prosecuzione di pool e fungono da collegamento fra morfologie a forte corazzamento (rapide e *step*).

Su pendenze del fondo più contenute rispetto ai canali rettilinei (approssimativamente in un campo compreso tra 0.01% e 2÷3 %) si può osservare la tipologia fluviale a rami intrecciati (detta anche *braided*), caratterizzata da un fitto intreccio o reticolo di canali di dimensioni simili, separati da barre longitudinali mediane (isole) a forma di losanghe. Le barre possono essere di due tipi (Billi, 1994): quelle che vengono sommerse da una portata di piena annuale e sono prive di vegetazione; quelle di maggiore elevazione, caratterizzate da sedimento più fine, con vegetazione erbacea ed arbustiva e con un certo grado di evoluzione del suolo.

Il fattore di controllo più caratteristico dei canali di tipo *braided* è il rapporto fra larghezza e profondità che, quando supera il valore di 50, favorisce fortemente lo sviluppo dell'andamento ramificato dell'alveo. Le condizioni di formazione di un tratto *braided* sono essenzialmente da ricercarsi nell'abbondanza di alimentazione solida da monte, nella possibilità di un facile aggiustamento della larghezza (sponde erodibili anche per valori contenuti di Q) e in un regime altamente variabile delle portate liquide che favorisce una trasporto solido di fondo irregolare. In generale questi tratti di corsi d'acqua esprimono l'incapacità a fare defluire mediante un unico canale tutta la portata solida (Q_s) che essi ricevono da monte, dando luogo a processi deposizionali (Leopold et al., 1964). La deposizione di sedimenti al centro dell'alveo finisce per indurre erosioni laterali e l'allargamento

complessivo del canale. L'assetto ramificato riflette anche la risposta del canale alla ricerca di una configurazione più efficiente per lo smaltimento della portata solida. Canali relativamente stretti e con una profondità del flusso contenuta sono in grado, a parità di *stream power* unitaria, di massimizzare la capacità di smaltimento della portata solida unitaria. Questa osservazione è ancora più intuitiva se si considera che la comparsa delle barre centrali ha l'effetto di ridurre la larghezza effettiva di deflusso, aumentando la velocità media della corrente.
Nei settori più vallivi dei bacini idrografici, quando alla diminuzione della pendenza si accompagnano un aumento della portata liquida, una marcata riduzione della granulometria dei sedimenti ed un incremento del trasporto solido in sospensione, i tratti a rami intrecciati tendono a scomparire per lasciare spazio alla morfologia meandriforme.
Leopold e Wolman (1957) hanno determinato analiticamente la seguente condizione di esistenza dei tratti a canali intrecciati:

$$S > 0.012\, Q_{bk}^{0.44} \tag{11}$$

dove S (m/m) è la pendenza del canale e Q_{bk} (m^3/s) è la portata a piene rive; Q_{bk} può essere identificata, in mancanza di misurazioni dirette, come la portata contrassegnata da un tempo di ritorno compreso tra 1 e 2 anni (Leopold, 1994).
Il mancato soddisfacimento della relazione (11) implica, invece, la probabile formazione di canali di tipo rettilineo o meandriforme.
I corsi d'acqua di tipo *braided* che si sviluppano su un substrato sabbioso hanno mediamente, a parità di Q_{bk}, pendenze più contenute rispetto ai *braided* ghiaiosi. Molto significativa in tal senso è l'estesa analisi condotta da Van den Berg (1995) che mette in gioco, nel valutare le condizioni di soglia per lo sviluppo del *braiding*, anche il D_{50} del materiale d'alveo. Si rientra, secondo lo studio di Van den Berg, nel campo dei canali intrecciati, quando la *stream power* unitaria soddisfa la relazione:

$$\omega > 900\, D_{50}^{0.42} \tag{12}$$

con D_{50} (espresso in m) compreso tra 0.0001 m e 0.1 m.
L'eq. (12), se applicata alle sabbie (D_{50}=0.001 m) e ai ciottoli (D_{50}=0.1 m), dà luogo rispettivamente a valori di ω di 49 W/m^2 e di 340 W/m^2, risultato che é praticamente coincidente con l'intervallo di 50-300 W/m^2 già proposto da Nanson e Croke (1992) per le piane alluvionali interessate dallo sviluppo di canali intrecciati.
Anche nei fiumi *braided* si osserva la presenza di tratti a *riffle pool*; questi, però, rispetto a quelli dei canali rettilinei, risultano più distanziati ed irregolari e presentano una dinamica vivace ed un assetto un po' più precario a causa delle continue migrazioni delle barre verso valle e degli spostamenti dei relativi canali.

Pur nell'ottica di considerare il corso d'acqua nella sua integralità dei processi, a livello tecnico-operativo è ancora utile fare riferimento alla classificazione consolidata di De Horatiis (1930) che considerava *di scavo* quei tratti in cui la corrente possiede energia sufficiente sia a trasportare il materiale che arriva in alveo, sia ad eroderne il fondo e le sponde, *di trasporto* quei tratti in cui la quantità di materiale che arriva in alveo supera la capacità di trasporto della corrente per cui non si ha erosione al fondo ma semplice trasporto di materiale prodotto altrove o il suo deposito con conseguente rischio di sovralluvionamento e parzializzazione della sezione utile per il deflusso. Le unità morfologiche richiamate sopra (rapide, *step pool*, *riffle pool*, letto piano), quando sono presenti in un certo tratto di torrente, ne riflettono un sostanziale stato di equilibrio dinamico. Quando invece sono assenti possono riflettere un disequilibrio che può tradursi, nelle situazioni estreme, in forre torrentizie molte incise e dissestate (tratti in forte scavo), oppure in tratti iper-congestionati dai sedimenti dove sono assai probabili fenomeni di divagazione del canale e di avulsione in conoide (tratti in forte deposito).
Nei paragrafi successivi si tracceranno le moderne strategie d'intervento e le opere più innovative per fronteggiare questi disequilibri e le relative situazioni di pericolosità territoriale che a questi possono seguire.

3.2 Sistemazione dei tratti in erosione

3.2.1 Strategia

La strategia da adottare per riequilibrare i tratti in erosione ci viene suggerita dall'analisi della bilancia di Lane (Figura 7). La tendenza all'approfondimento del letto può essere legata ad un eccesso di pendenza e/o portata liquida (energia della corrente, sforzi tangenziali al fondo) oppure ad una carenza di alimentazione solida da monte e/o ad una riduzione/asportazione della dimensione granulometrica dei sedimenti che protegge l'alveo.
L'incremento di portata liquida è abbastanza raro ed è solitamente determinato dalla confluenza con importanti tributari. È invece più frequente una carenza di alimentazione solida che viene bruscamente interrotta dalla realizzazione di opere di trattenuta non filtranti, come avveniva nel passato, o più raramente dalla realizzazione di serbatoi d'accumulo o di traverse. Solitamente è opportuno intervenire sulla pendenza del corso d'acqua attraverso la realizzazione di un profilo a gradinata ottenuto con l'ausilio di briglie e di soglie (Figura 8), oppure rendendo il fondo più corazzato e le sponde meno erodibili.
Quest'ultima soluzione, in genere riservata agli attraversamenti di centri abitati o infrastrutture per ragioni di costo, se portata all'estremo può arrivare a rendere il contorno del tutto inerodibile realizzando delle canalizzazioni rigide (muri di sponda, fondo rivestito) a volte troppo impattanti dal punto di vista fluviomorfologico, ecologico e paesaggistico (Figura 9).

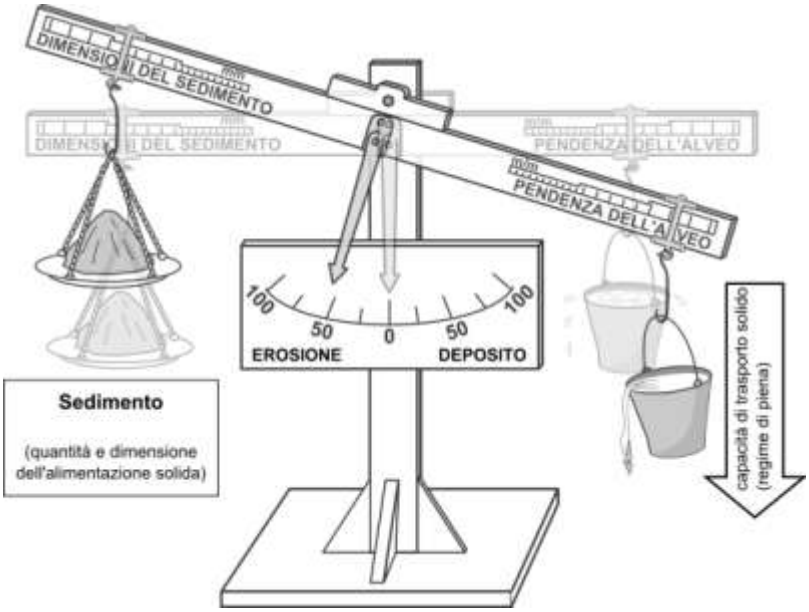

Figura 7: squilibrio della bilancia di Lane che determina erosione

Figura 8: profilo a gradinata ottenuto con briglie

Figura 9: rivestimento delle sponde e corazzamento del fondo (a sx) e rivestimento in pietrame su fondo e spalle in calcestruzzo (a dx)

Occorre sottolineare che anche una sistemazione mediante briglie a gradinata, che sia stata progettata con una pendenza di correzione troppo contenuta, riduce eccessivamente l'alimentazione solida a valle e non garantisce sicurezza. Infatti, nel lungo periodo, la sistemazione può determinare accumuli eccessivi di sedimento che sovra-alluvionano le opere stesse e che potrebbero essere rilasciati impulsivamente in occasione delle piene (Figura 10).

Figura 10: situazione che si può creare con una sistemazione eccessiva (Val Rossa, Selva di Progno, Verona)

La progettazione di opere trasversali in sequenza (*briglie*, *soglie*, *step pool* artificiali) e, con essa, la stima della pendenza di correzione meritano, in definitiva, la massima attenzione. Ciò sia per le conseguenze che tale stima ha localmente, sia per quelle che essa può avere a valle in aree ancora più densamente abitate.

La pendenza di correzione deve essere il giusto compromesso fra l'esigenza di contenere le alluvioni solide a valle nel breve-medio periodo e l'opportunità di garantire un'apprezzabile dinamicità dell'alveo nel medio-lungo periodo.

3.2.2 Criteri progettazione

Come si è sopra evidenziato, la stima della pendenza di correzione di un torrente è un problema centrale nell'ambito della progettazione di un intervento di stabilizzazione del letto e delle sponde. Tuttavia, a dispetto della sua importanza e delle ricadute che la sua scelta comporta sulla dimensione complessiva degli interventi di sistemazione idraulica, non è ancora del tutto consolidato, soprattutto in ambito montano, un approccio metodologico che coniughi le basi deterministiche e concettuali con le scelte progettuali che, di fatto, vengono adottate in sede esecutiva (D'Agostino e Cerato, 2004).

La corretta previsione della pendenza di correzione, detta anche "ottimisticamente" di equilibrio, dovrebbe essere tale da non sovradimensionare l'intervento di consolidamento e, dall'altra parte, da non rendere necessaria l'apertura di un nuovo cantiere, qualora, dopo una prima sistemazione, si manifestino ancora fenomeni erosivi fra briglie.

I metodi per la stima della pendenza di correzione (i_c) si possono suddividere in tre grandi gruppi: vi sono i metodi che muovono da un approccio deterministico, quelli a base sostanzialmente empirica e quelli, infine, che propongono un approccio di tipo comparativo.

APPROCCIO DETERMINISTICO

L'approcci deterministico mira a conseguire le condizioni di stabilità o, quantomeno di incipiente movimento, per i sedimenti che compongono il letto. Questi metodi, pur fondandosi sullo stesso principio, si differenziano anche fortemente fra loro, in quanto divergono sia per la scelta del frattile (d_{xx}; diametro di riferimento) della curva granulometrica per il quale si impone la stabilità, sia per la frequenza probabile della portata di piena per la quale si vuole che tale diametro di riferimento risulti stabile. Nelle Alpi Italiane e nell'Appennino Centrale si fa frequentemente riferimento ai diametri più grossolani (d_{84}, d_{90}) e ad una portata di piena con tempo di ritorno di 10-20 anni (Benini, 2000). Per le fiumare Calabre e per i torrenti della Sicilia le relazioni di stima di i_c considerano spesso i diametri mediani o quelli più grossolani e focalizzano l'attenzione su di una portata di riferimento con tempo di ritorno di 2 anni, quindi prossima alla portata di modellamento (o di piene rive) del corso d'acqua (Ferro, 2006). Le relazioni di tipo deterministico hanno inoltre registrato, in questi ultimi anni, degli ulteriori affinamenti, che tengono conto dell'effetto stabilizzante indotto dalla presenza in superficie di sedimenti più grossolani e di un complessivo fenomeno di pavimentazione del letto (Ferro et al., 1996).

APPROCCIO EMPIRICO

I metodi di tipo empirico per la stima di i_c sono basati sulla prevalente interpretazione di osservazioni di campo e si riconducono essenzialmente a quelle ricerche basate sulla teoria del regime dei corsi d'acqua oppure alla osservazione di tratti sistemati da tempo che hanno assunto, verosimilmente, una pendenza di equilibrio (Valentini, 1912; Calamini et al., 1978; Della Lucia et al.,1980). Il limite di queste relazioni è da attribuirsi alla cautela che è necessaria nell'estenderle al di fuori dal contesto geografico di origine.

APPROCCIO COMPARATIVO

L'approccio di tipo comparativo per la stima di i_c consiste essenzialmente nell'individuare nel corso d'acqua nel quale si interviene dei tratti d'alveo che si possano considerare come un modello di riferimento di un assetto stabile del profilo. Una volta individuate queste situazioni, la pendenza i_c per il tratto in progetto è desunta da esse, tenendo conto della diversa entità dei deflussi rispetto al modello di riferimento. Nel noto criterio del confronto di Thiery (1914) entrano in gioco, ad esempio, oltre alla pendenza originaria del tratto di riferimento, anche i rapporti fra le portate liquide e larghezze delle due situazioni a confronto.

In una recente indagine è stato proposto di calcolare la pendenza di correzione partendo dalla relazione di moto incipiente relativo al d_{90} dei sedimenti superficiali (D'Agostino, 2003; D'Agostino e Cerato, 2004). I due Autori hanno rielaborato il criterio di moto incipiente di Shields accoppiato all'equazione di moto turbolento rettilineo uniforme, in modo che le condizioni di equilibrio risultino immediatamente espresse in funzione della nuova pendenza di correzione e non siano necessari calcoli iterativi (si veda a questo proposito Benini, 2000). La relazione di D'Agostino e Cerato, che fa riferimento ad una sezione del torrente di forma pseudo-rettangolare di larghezza B, è la seguente:

$$i_c = \left(\frac{\tau_c^* \, d_{90} \, K_s^{3/5} \, B^{3/5}}{Q^{3/5}} \right)^{10/7} \qquad (13)$$

ove i_c è adimensionale (m/m) , d_{90} e B sono espresse in metri. Inoltre:

- τ_c^* è sforzo tangenziale adimensionale di Shields;
- K_s è il coefficiente di scabrezza del fondo secondo Strickler ($m^{1/3}/s$);
- Q è la portata liquida (m^3/s) per la quale si impone il limite di inizio del movimento del d_{90}.

Tenendo conto che le taglie granulometriche in gioco sono le più grossolane, si può assumere un valore abbastanza cautelativo di $\tau_c^* = 0.06$ e un valore di K_s da stimare mediante la relazione proposta da Bray (1979):

$$K_s = \frac{20.1}{d_{90}^{1/6}} \qquad (14)$$

L'eq. (14) non tiene conto della maggiore resistenza al moto che si genera quando il flusso è in condizioni di bassa sommergenza relativa (rapporto tra profondità della corrente e diametro del sedimento) e si entra in un regime di macroscabrezza. In queste condizioni un minore valore di K_s porterebbe, quindi, secondo l'eq. (14), a valori più ridotti di i_c.

D'Agostino e Cerato (2004), sulla base di alcune verifiche condotte su interventi di consolidamento pregressi, consigliano di adattare l'equazione deterministica (14) alle condizioni specifiche di alimentazione solida che caratterizzano il torrente ove si attua l'intervento. Tale adattamento può essere condotto mediante una scelta oculata della portata Q da inserire nell'equazione (14).

In questa scelta possono essere coinvolti:

- la forma di trasporto solido dominante (trasporto di fondo, correnti iperconcentrate colate detritiche);
- il 'comparto' di bacino idrografico nel quale si opera (testata, tratto intermedio del canale principale della valle, tratto terminale/conoide)
- gli effetti di medio-lungo periodo sui tratti fluviali a valle della sistemazione.

Seguendo questa linea sistematoria, la portata di piena al colmo Q da adottare nell'eq. (14) potrà essere contrassegnata:

- da tempi di ritorno più elevati (> 30-50 anni) per un tratto intermedio di canale che drena un bacino di ampia superficie (>30 km^2) in cui domina il trasporto solido di fondo (specie per concentrazioni volumetriche di sedimento inferiori al 5%);
- da tempi di ritorno di media entità (20-30 anni) quando l'effetto consolidante vuole accompagnarsi all'opportunità di lasciare passare a valle un importante quantitativo di materiale in occasione delle piene estreme e/o quando le aree sorgenti di sedimento a monte garantiscono comunque un approvvigionamento di sedimenti cospicuo al tratto da sistemare;
- da tempi di ritorno modesti (5-10 anni) quando si sta intervenendo o in un tratto d'alveo dove la forme di trasporto prevalenti sono le colate detritiche e le correnti iperconcentrate (*debris flood*) e queste si vogliono lasciare defluire senza indurne rallentamenti e deposizioni, oppure in zona di conoide soggette solo occasionalmente ad erosione, o ancora in alvei molto larghi (ghiaie e sabbie dominanti) dove divagazione del flusso, avulsione, aggiramento delle opere trasversali diverrebbero molto più probabili se si riducesse eccessivamente la pendenza del fondo.

3.2.3 La ricostruzione morfologica

Tra gli interventi di correzione della pendenza più innovativi vi sono quelli che s'inseriscono nel filone della ricostruzione morfologica. Questi hanno la caratteristica di aspirare ad unire gli obiettivi di sicurezza del corso d'acqua e del territorio circostante con quelli di naturalità, tentando di riprodurre i caratteri morfologici che il sistema torrente spontaneamente creerebbe. Come si è già visto, infatti, vi sono alcune configurazioni che i corsi d'acqua tendono a raggiungere naturalmente e che manifestano una buona stabilità.
Un intervento di ricostruzione morfologica di un corso d'acqua può definirsi come l'insieme degli interventi di sistemazione idraulica, che, utilizzando in prevalenza materiali costruttivi che sono propri della dinamica naturale dell'alveo (sedimenti, legname, vegetazione), tende a ripristinare la tipologia morfologica che ad esso compete in ragione dei parametri che regolano le sue condizioni dinamiche di equilibrio (eq. 4).
La ricostruzione morfologica, finalizzata al recupero e al ripristino morfologico di un corso d'acqua alterato dall'attività antropica o, in particolare, da fenomeni di dissesto, deve essere sostenuta da una profonda conoscenza della morfologia d'alveo e della sua dinamica evolutiva. La dinamica varia in funzione di molteplici fattori quali clima, geologia, topografia, morfometria, vegetazione, regimi di portata solida e liquida. A tale proposito ci si può appoggiare ai diversi criteri di classificazione dei sistemi fluviali, che devono poter prece-

dere gli interventi di ricostruzione previsti, al fine di assecondare le caratteristiche di naturalità del corso d'acqua.

In tutti gli interventi di ricostruzione morfologica si può riconoscere, quale denominatore comune, la necessità di ripristinare lungo il corso d'acqua la condizione di naturale e ritmica variazione della velocità media e della profondità della corrente. Questa variazione si traduce in un susseguirsi di stati accelerativi e decelerativi del flusso che si accompagnano alle *lunghezze d'onda caratteristiche* delle varie tipologie morfologiche. La progettazione degli interventi - *step* e *riffle* artificiali e rampe in massi - si basa, perciò, sulla similitudine strutturale e funzionale tra le opere da realizzare e le morfologie naturali. Lo studio delle morfologie a *step pool* (profilo, interdistanze, altezze dei gradini) e a rapida è risultato pertanto il punto di partenza (D'Agostino e Lenzi, 1997; Lenzi et al., 2000, Vianello et al., 2005) per la realizzazione di opere di consolidamento in massi. Allo stesso modo le relazioni 'morfologiche' riportate in precedenza - da eq. (5) a eq. (9) - essendo state desunte da situazioni di equilibrio rilevate in campo, costituiscono alcuni modelli esemplificativi per avviare la ricostruzione morfologica.

Le conoscenze ottenute in merito alle condizioni di formazione delle unità morfologiche torrentizie hanno permesso l'attuazione dei criteri di ricostruzione morfologica in molti corsi d'acqua della provincie di Trento e di Bolzano. Oltre alle realizzazioni ex-novo, in alcuni torrenti diverse briglie di consolidamento tradizionali sono state parzialmente sostituite con opere in trasversali massi (*step* artificiali). In Figura 11 si riporta un esempio di ricostruzione morfologica molto estesa (2 km) che è stata realizzata sul Rio Plima in Val Martello (Bolzano). Questo intervento, eseguito interamente utilizzando massi posati a secco, rappresenta un valido esempio di consolidamento dell'alveo nel quale la ricostruzione morfologica del letto è stata accompagnata da tecniche di ingegneria naturalistica per la stabilizzazione delle sponde (copertura diffusa con astoni di salice).

Figura 11: Ricostruzione morfologica di un alveo montano mediante *step pool* artificiali realizzati in massi posati a secco: Rio Plima (Val Martello, Bolzano).

La progettazione e realizzazione di opere di sistemazione basate su metodi di ricostruzione morfologica dovrebbero essere pensate ed attuate in modo tale da armonizzare la necessità di protezione dell'uomo (riduzione del rischio) con il bisogno di salvaguardia dell'ambiente nel quale si va ad intervenire. Tali interventi, soprattutto nella fase che precede la progettazione vera e propria, devono seguire i seguenti criteri volti alla comprensione del corso d'acqua oggetto d'intervento:

- *identificazione delle cause di instabilità del corso d'acqua*: studio delle condizioni complessive del corso d'acqua e del bacino idrografico; analisi delle modificazioni e trasformazioni naturali ed antropiche succedutesi nel tempo (Lenzi et al., 2000);
- *valutazione delle potenzialità e delle caratteristiche morfologiche del corso d'acqua*: classificazione del sistema fluviale; individuazione di dettaglio dei tratti caratteristici (dimensioni dell'alveo, larghezza di piene rive, profondità, confinamento); determinazione dei principali parametri morfologici (sinuosità, intrecciamento, raggio di curvatura); analisi delle sezioni trasversali e dell'andamento delle pendenze del fondo lungo il reticolo idrografico, individuazione delle tipologie morfologiche dominanti;
- *analisi delle tendenze evolutive e studio della dinamica fluviale*: i torrenti montani sono particolarmente soggetti a repentine alterazioni della loro morfologia durante il passaggio di piene eccezionali, cui si accompagna una destabilizzazione del letto con conseguente trasporto di sedimento verso valle ed instabilità delle sponde e dei versanti. E' importante saper cogliere quelle situazioni dove le variazioni attese sono così spinte da non giustificare l'intervento di ricostruzione morfologica, poiché esso avrebbe irrimediabilmente una durata troppo breve. Vi sono inoltre quelle situazioni di regimazione spinta che hanno già prodotto forti alterazioni. Se da una parte è possibile affermare che le sistemazioni realizzate negli anni '60 e '70 sono state efficaci contro i dissesti causati dalle alluvioni, altrettanto non si può dire in relazione all'aspetto ambientale e paesaggistico. In queste situazioni, già molto condizionate dalla presenza di un intervento strutturalmente invasivo, il costo di una ricostruzione morfologica integrale potrebbe essere poco sostenibile.

È bene specificare che la ricostruzione morfologica 'non strutturale' con massi a secco non può essere applicata ovunque. Quando deve essere garantito un elevato livello di sicurezza a centri abitati ed infrastrutture sarà necessario ricorrere all'uso dei massi legati ad una retrostante struttura in calcestruzzo debolmente armato (Lenzi et al., 2000; Figura 12). Molti interventi combinano opere di ricostruzione morfologica con opere di regimazione classiche. In altre situazioni, come si è già detto, lo stato di fatto del corso d'acqua può risultare così distante dal modello fluviomorfologico ideale da rendere quasi impraticabile, o quanto meno assai dispendioso, un intervento di ricostruzione morfologica.

Nella parte alta dei bacini, ove il reticolo idrografico non è ancora così intensamente sistemato come nei tratti vallivi, la metodologia fluviomorfologica è più facilmente percorribile, soprattutto in quelle situazioni di elevato pregio dal punto di vista naturalistico e nelle quali l'intervento strutturale tradizionale apparirebbe come un elemento estraneo al paesaggio. Vi è anche da ricordare che, in generale, i torrenti montani non sono così intensamente sistemati come i corsi d'acqua di pianura, cosicché l'intervento di ricostruzione

morfologica, giovandosi della buona disponibilità del materiale costruttivo, può essere conseguito anche con un vantaggio economico rispetto ad una sistemazione idraulica tradizionale in calcestruzzo.

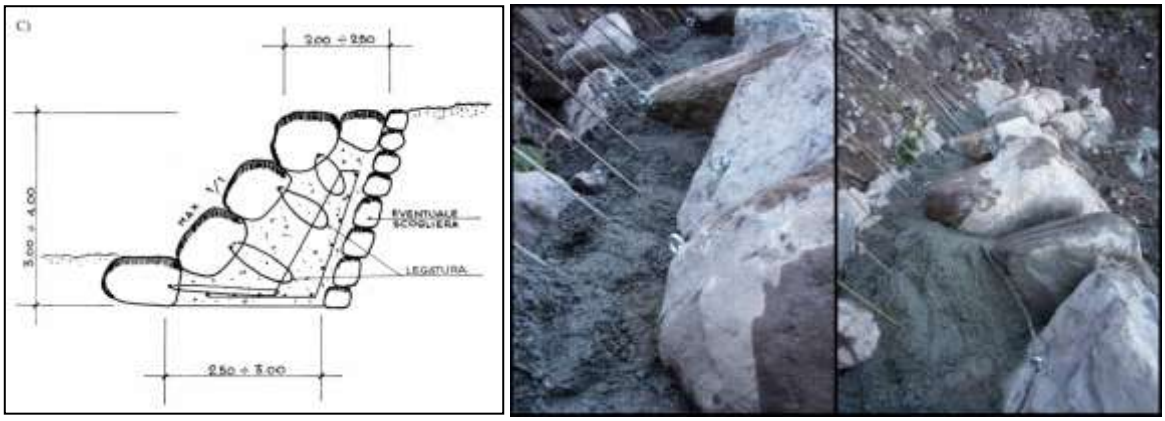

Figura 12: struttura in massi con scheletro in calcestruzzo debolmente armato (Lenzi et al., 2000)

Operando invece su situazioni vallive fortemente irrigidite, l'intervento morfologico, pur essendo realizzabile, può rendere necessarie tutta una serie di azioni non sempre agevoli, quali la riacquisizione dell'area di pertinenza fluviale, l'esproprio di terreni, la demolizione o riconversione di opere già esistenti e, infine, la ridefinizione del tracciato plano-altimetrico del canale. Nonostante queste difficoltà, sono già numerose nel mondo le esperienze relative sia ad interventi di rimeandrizzazione dell'alveo, sia alla ricreazione di corpi sedimentari e di sequenze a *riffle* e *pool* (Brookes, 1996; Haltiner et. al., 1996; Nielsen, 1996).

3.3 Sistemazione dei tratti di trasporto e deposito

3.3.1 Strategia

Anche per i tratti di trasporto è la bilancia di Lane a suggerire la strategia da adottare per il loro riequilibrio (Figura 13). Tale situazione è legata ad un eccesso di alimentazione solida (più raramente ad un brusco aumento della granulometria) o ad una carenza di capacità di trasporto della corrente. Tipica in questo senso è la situazione del tratto d'alveo in apice al conoide al quale, da una parte compete in ingresso una portata solida proveniente dal tratto di torrente più a monte che è caratterizzato da una maggiore pendenza energetica, dall'altra vi è una capacità di trasporto locale che invece è relativa alla pendenza del conoide più contenuta. I conoidi montani sono quindi intrinsecamente dei tratti di trasporto ed il pericolo di sovralluvionamento solido cui essi sono soggetti, è direttamente proporzionale al cambio di pendenza del fondo (monte-valle apice) e al tasso di rifornimento solido che è determinato dalle aree sorgenti del bacino che alimentano il canale principale.
Altri tratti di trasporto si possono inoltre venire a creare a monte del conoide:

- a seguito di grossi dissesti e di frane superficiali in corrispondenza dei versanti prospicienti il canale principale;

- in concomitanza di forti allargamenti trasversali della sezione di deflusso, spesso favoriti da condizionamenti geologici e/o tettonici (ad esempio l'affioramento di una soglia morfologica rocciosa che favorisce la formazione di valli sospese a debole pendenza).

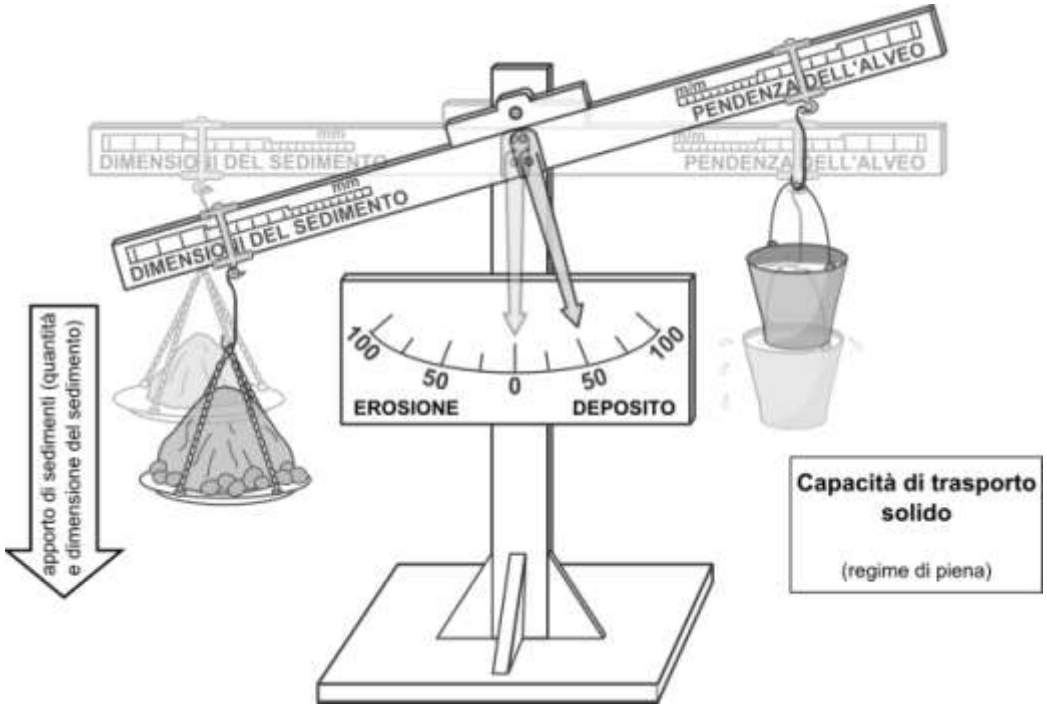

Figura 13: squilibrio della bilancia di Lane che determina deposito

Gli interventi di sistemazione sono spesso indirizzati a ridurre la quantità di materiale solido che perviene alla parte terminale del bacino, specie se questa parte è abitata oppure è interessata da attività antropiche. Si agisce, innanzitutto, in modo attivo sulle fonti stesse di produzione del sedimento (sistemazione dei versanti e dei tratti di rete in erosione), secondariamente si mira a trattenere il materiale solido e quello fluitato nei tratti a monte o nelle zone prossime all'apice delle conoidi attive.
Nei tratti molto urbanizzati che lasciano poco spazio al canale, dopo che si è cercato di ridurre l'apporto solido da monte, si può ancora intervenire incrementando la capacità di trasporto della corrente con opere di canalizzazione. Esse si prefiggono di migliorare la capacità di smaltimento del trasporto solido residuo massimizzando le tensioni tangenziali lungo il contorno.
Più che mai per questo tipo di problemi occorre agire in maniera integrale sia dal punto di vista delle tecniche che dal punto di vista spaziale con interventi su tutto il bacino e la rete idrografica. In questo caso l'attuazione di azioni di riforestazione dei versanti, mirando ad estinguere parte delle aree sorgenti, contribuisce insieme agli interventi di consolidamento in alveo (par. 3.2) a limitare i principali pericoli dei tratti di trasporto: congestionamento/parzializzazione delle sezioni di deflusso, alluvionamento con materiale solido delle correnti solido-liquide non contenute dal torrente (IRASMOS, 2008; Figura 14).

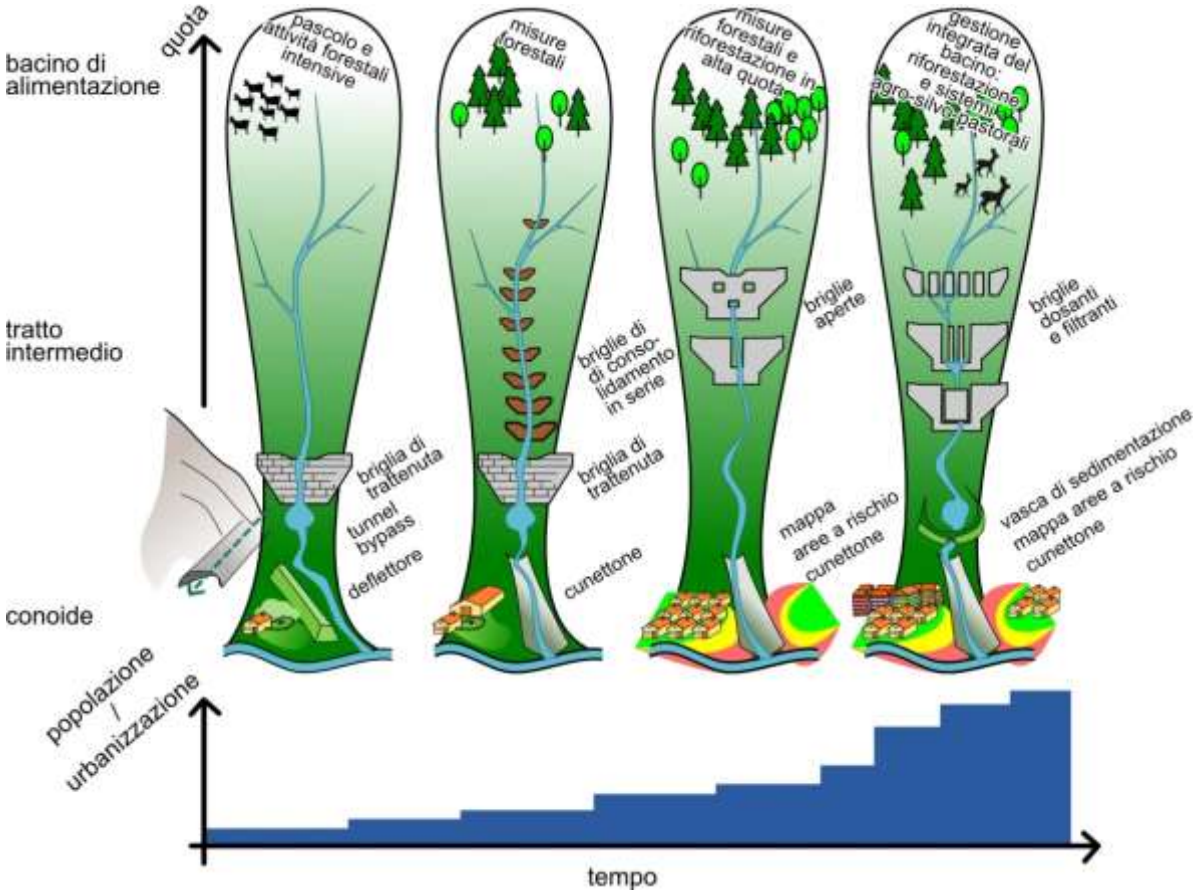

Figura 14: **strategia integrata d'intervento per la messa in sicurezza di tratti di trasporto e deposito** in **funzione della densità di popolazione, che coincide con l'evoluzione storica** (ridisegnata da IRASMOS, 2008)

3.3.2 Opere e dispositivi

Bacini o piazze di deposito chiusi da briglie di trattenuta (Benini, 2000) hanno rappresentato, fino a circa il 1960, la soluzione sistematoria classica per la gestione dei tratti di torrente di trasporto (Figura 15). Si sono poi sempre più affermate le briglie di tipo filtrante o aperto (Cerato, 1995), opere di trattenuta in grado di esercitare un controllo selettivo sul trasporto solido e sul materiale fluitato in concomitanza degli eventi di piena più gravosi (Figura 16).

Il valore aggiunto di queste briglie va ricercato in una gestione più dinamica del bacino di invaso e dei sedimenti:

- le opere possono essere più agevolmente svuotate dopo un evento di piena, recuperando a pieno la loro funzionalità per l'evento successivo;
- il filtro, se ben progettato, limita l'intercettazione dei sedimenti a quelli più grossolani trasportati dagli eventi di piena più severi; in questo modo vengono favoriti ad un tempo sia il controllo delle componente indesiderata del trasporto (che ostruisce le sezioni), sia l'alimentazione 'ordinaria' dei tratti d'alveo più a valle, che diversamente potrebbero manifestare erosione.

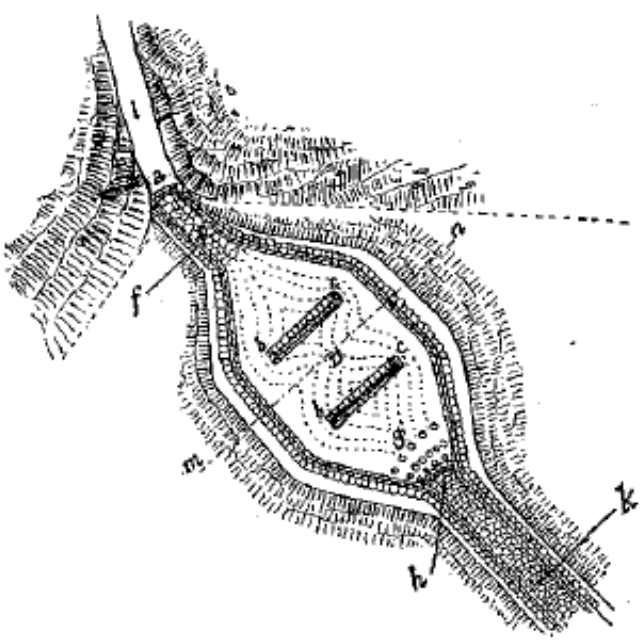

Figura 15: **"recinto di deposito stabilito sopra un cono"(da Piccioli, 1905** ripresa a sua volta da Demontzey, 1878)

Figura 16: materiale fluitato trattenuto da una briglia selettiva

Un esaustivo quadro tipologico delle opere di trattenuta è riportato in Tabella 2, suddiviso per tipologie e con l'indicazione del materiale costruttivo utilizzabile (Puglisi, 1996).
Il dispositivo canonico per la trattenuta dei sedimenti è costituito dal sistema integrato bacino di deposito-briglia di trattenuta, che si localizza, eccetto casi particolari, a monte della zona per la quale si teme il sovralluvionamento del canale e la sua avulsione.

Tabella 2: Quadro tipologico delle briglie di trattenuta (da Puglisi, 1996, modificata).

Funzione dell'opera	Tipo di briglia	Materiale utilizzato
Trattenuta permanente (a capacità limitata)	Chiusa tradizionale	Calcestruzzo – Cemento armato – Elementi prefabbricati (lapidei, metallici o in materiali plastici) – Fondazioni su pali o micropali – Gabbioni – Legname – Legname zavorrato con pietrame – Muratura di pietrame (a secco o con malta cementizia) – Combinazione di materiali diversi – Scogliere – Terra (materiali sciolti).
Trattenuta temporanea (a svuotamento)	Aperta a fessura (a prevalente dissipazione "idraulica" di energia)	Calcestruzzo – Cemento armato – Fondazioni su pali o micropali – Combinazioni di materiali diversi
	Aperta a pettine (a debole trattenuta meccanica)	Calcestruzzo + Acciaio e materiali metallici – Fondazioni su pali o micropali
	Aperta a griglia (a prevalente trattenuta meccanica)	Calcestruzzo + Acciaio e materiali metallici – Fondazioni su pali o micropali – Combinazione di materiali diversi – Solo acciaio (Giappone)
	Ritardante (laminazione delle piene)	Calcestruzzo – Cemento armato – Fondazioni su pali o micropali – Muratura di pietrame (a secco o con malta cementizia)

Alle briglie di trattenuta aperte si è soliti associare una funzione di controllo selettivo dei flussi acqua-sedimento che si esplica secondo le tre principali azioni (D'Agostino, 2001 e 2006):

- prevalente azione meccanica di un filtro separatore (effetto setaccio);
- meccanismo idraulico di sedimentazione dovuto al rigurgito della corrente indotto dalla presenza del restringimento (filtro);
- meccanismo collisionale tra le particelle; i materiali solidi, convergendo verso le aperture del filtro, urtano reciprocamente e subiscono un processo di rallentamento che induce una parziale o totale deposizione dei sedimenti.

I risultati delle indagini condotte sul comportamento di campo di queste opere hanno evidenziato che i tre meccanismi non sono facilmente separabili, ma che esistono piuttosto tipologie di filtri, come quelli a fessura verticale semplice o multipla, che fanno prevalere il meccanismo puramente idraulico, mentre altri, caratterizzati da strutture graticciate con luci rettangolari, che fanno prevalere il funzionamento meccanico e collisionale (Figura 17).

Figura 17: briglia a fessura (a sx) e a griglia (a dx)

Il primo aspetto progettuale da valutare è la forma di trasporto che ci si prefigge di controllare.
Se si pensa di contenere il volume potenziale di una colata detritica, le strutture di tipo graticciato, magari con filtro inclinato ed irrigidito da contrafforti (Figura 18), sono tra le più funzionali. Il classico concetto di azione selettiva o di trattenuta parziale deve essere riconsiderato, poiché il sistema briglia-bacino, per essere efficiente e mettere in sicurezza il territorio, dovrebbe poter contenere volumi solidi comparabili al volume potenziale atteso (non inferiori al 35-40% del volume di progetto). In diverse ricerche (Ikeya, 1989; D'Agostino et al., 2004) si è dimostrato che le aperture del graticcio riescono ad operare una trattenuta quasi totale del debris flow se risultano comprese entro una valore pari ad 1.5-2 volte la dimensione dei clasti più grossolani (novanticinquesimo percentile d_{95}) costituenti la colata. In questo caso il filtro è utile, più che per operare una laminazione della colata, per migliorarne le condizioni di arresto. Il fronte che impatta su di una parete che riesce a drenare l'acqua contenuta nella colata ha maggiori probabilità di essere fermato; il filtro, inoltre, induce la formazione di un profilo superiore del deposito su angoli più elevati rispetto all'orizzontale, incrementando la capacità di invaso del bacino stesso.

Figura 18: briglia con struttura a filtro inclinato

Negli ultimi anni si vanno intensificando esperienze progettuali per il controllo delle colate detritiche che ricorrono a briglie e/o a cunei frangicolata piuttosto voluminosi. Tali strutture sono impiegate per ridurre il livello energetico dei *debris flow* che transitano nella parte terminale del conoide e, se sono veramente utili a garantire l'incolumità delle persone, giustificano anche la messa in secondo piano del loro impatto sul paesaggio. Questa soluzione è particolarmente indicata quando si ravvisano velocità del fronte elevate (>1.5 m/s) e si teme che, per la fuoriuscita del flusso dal canale, l'onda detritica impatti con edifici ed infrastrutture, causando danni ingenti. All'entità dell'impatto dinamico concorrono i massi di più grosse dimensioni che compongono il fronte ed è proprio al controllo e alla trattenuta di questi massi che vengono spesso finalizzati i dispositivi frangicolata. Le opere possono

essere posizionate all'apice del conoide o in un tratto di canale poco a monte e precedono, solitamente, il successivo bacino di deposito.
I dispositivi frangicolata sono progettati o come briglie con il filtro costituito da robusti contrafforti in cemento armato o come una serie di cunei isolati interagenti tra loro che, oltre ad abbattere il carico energetico del flusso, favoriscono il successivo deposito dei sedimenti. In questo modo si può anche mirare a conseguire una più uniforme distribuzione dei detriti entro l'area di deposito, permettendo di utilizzare al meglio il volume di invaso disponibile, specie se l'area di deposito ha un ridotto sviluppo longitudinale (D'Agostino, 2006b). In alcuni casi la funzione frangicolata viene perseguita congiuntamente all'azione di trattenuta, portando alla realizzazione di briglie posizionate alla chiusura del bacino di deposito e dotate di filtri che assolvono ad una duplice funzione.
Se la forma di trasporto è una corrente iperconcentrata (qui nell'accezione di flusso di detrito '*debris flood*'), si può ricorrere a dispositivi filtranti simili a quelli che si utilizzano per le colate. Dal punto di vista volumetrico i '*debris flood*' sono molto temibili, poiché costituiscono quelle alluvioni solide che combinano concentrazioni non molto inferiori a quelle di una colata, con durate dell'evento idrologico più prolungate. E' pertanto opportuno ricercare un'azione di filtraggio più blanda rispetto a quella delle opere per il controllo dei *debris flow*, portando l'ampiezza delle luce minima del filtro a valori pari fino a 3-4 volte le dimensioni dei clasti più grossolani (D'Agostino, 2006a). In questo modo si cercherà di ottenere la trasformazione di un flusso iperconcentrato in un trasporto solido di fondo e a prolungare nel tempo la capacità di assolvere questa funzione (Figura 19).

Figura 19: Esempio di briglia filtrante per la laminazione di un *debris flow* (Val degli Schivi, Trento, Servizio Bacini Montani): la parte bassa del filtro presenta elementi più spaziati ed è dimensionata per **una laminazione contenuta di un '*debris flood*'**.

Quando si opera il controllo del trasporto solido di fondo si ricerca la laminazione del picco di portata solida, mirando a 'dosare' il sedimentogramma associato all'idrogramma di progetto. La briglia a fessura (Figura 17, foto a sx) è univocamente riconosciuta come la tipologia di opera più adatta a questo compito. La larghezza (B) della fessura si dimensiona in modo da rendere necessario un vistoso recupero energetico da parte della corrente di monte, controllando cinematicamente le dimensioni dei sedimenti che possono essere trattenute dall'opera (D'Agostino et al., 2004). Pochi progettisti si soffermano su di una possi-

bile limitata efficacia temporale di questa dispositivo di trattenuta, poiché i sedimenti iniziano a depositarsi in corrispondenza del risalto idraulico (o comunque all'inizio del profilo di moto ritardato) e la barra di deposito cresce progressivamente in estensione fino ad arrivare a ridosso della fessura (Figura 20; D'Agostino, 2006a). In questa condizione si è raggiunto il massimo volume invasabile (V_i), che dipende principalmente da due parametri: l'altezza di valle del deposito ΔZ_3 e la pendenza di equilibrio (i_c) dello stesso deposito; il calcolo di V_i può effettuarsi, con qualche approssimazione, con la formula:

$$V_i = \frac{\Delta Z_3^2}{2\,(i_0 - i_c)} B_a \qquad (15)$$

avendo indicato con B_a la larghezza media del tratto d'alveo a monte della briglia e con i_0 la pendenza del fondo prima della formazione del deposito. Se si trascura la perdita energetica che avviene nell'attraversamento della fessura, l'equazione di bilancio energetico, verificata anche sperimentalmente da Benedetti (1997), risulta:

$$H_3 + \Delta Z_3 = z + H_c \qquad (16)$$

ove H_3 e H_c sono le energie specifiche della corrente rispetto al fondo nelle due sezioni (3, c) e z è la distanza fra il fondo e la base della fessura (Figura 20). L'equazione (16) può essere agevolmente risolta rispetto a ΔZ_3 completando i dati necessari alla progettazione.

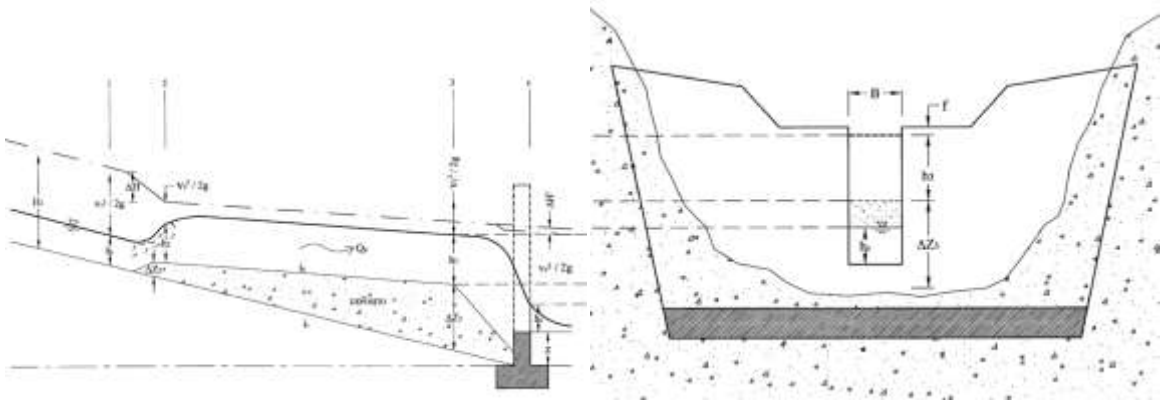

Figura 20: Schema di funzionamento di una briglia a fessura: deposito in condizioni di equilibrio ed **opera che ha terminato la sua azione dosante (D'Agostino, 2006).**

Il comportamento idraulico di tali opere è stato diffusamente indagato in laboratorio, tuttavia l'applicazione in sede progettuale delle conoscenze acquisite nella modellazione fisica e numerica delle briglie filtranti soffre di alcune limitazioni ed incertezze. Pur in assenza di conoscenze teorico-modellistiche completamente esaustive, le opere aperte sono state realizzate diffusamente in tutto l'arco alpino, per cui la loro presenza costituisce un occasione per approfondire le modalità effettive del loro comportamento in relazione agli eventi di piena. Una ricerca in tal senso è stata condotta da D'Agostino et al. (2004) che hanno analizzato il comportamento di 20 opere in concomitanza di 28 eventi di piena ed hanno dedotto che si può contare mediamente su di una capacità di autosvuotamento intorno al 20% e quasi mai superiore al 50%.

Parallelamente alle linee progettuali appena richiamate, vi sono anche alcuni aspetti peculiari legati alla realizzazione delle briglie aperte. Essi sono di seguito sinteticamente richiamati:

- Poiché lo svaso dell'opera dopo una piena appare irrinunciabile, è opportuno valutarne attentamente i relativi costi gestionali. In alcuni torrenti la qualità del materiale invasato è tale da consentirne un impiego ottimale nel confezionamento del calcestruzzo. In questo caso lo svaso dell'opera può essere realizzato dall'ente gestore non solo senza alcun costo, ma addirittura conseguendo un utile come contropartita del prelievo del materiale stesso (Servizio Bacini Montani, Provincia di Trento, com. pers.). Quando il materiale invasato è fangoso la gestione può essere anche molto onerosa, specie se le modalità di accesso al bacino di deposito non sono agevoli.
- A fronte della realizzazione di un sistema di trattenuta in conoide, una parte di risorse devono essere destinate a condividere con la popolazione residente le finalità dell'opera ed anche le sue debolezze. Prima della costruzione della struttura si deve rendere noto come il bisogno di una maggiore sicurezza vada a compensare i disturbi temporanei legati alla costruzione e quelli permanenti sul paesaggio e sulla morfologia del corso d'acqua. Nella stessa fase di presentazione dell'intervento devono essere anche precisati i rischi residui attesi, affinché alla messa in opera della difesa non si associ univocamente l'aspettativa di una protezione totale a prescindere dall'entità dell'evento che potrà verificarsi.
- L'immediata mitigazione del pericolo che segue alla costruzione di un sistema di trattenuta, induce spesso i tecnici delle autorità competenti a ricercare sempre più frequentemente questo tipo di soluzione. L'ubicazione dell'intervento nella parte bassa del bacino rende, infatti, economico l'allestimento del cantiere, offrendo anche un allungamento del periodo dell'anno nel quale l'intervento risulta cantierabile. E' importante non eccedere con questo approccio sistematorio, demandando solo ad esso le aspettative di protezione. Bisogna invece continuare ad affiancarlo alla sistemazione idraulico-forestale dei versanti in dissesto e del reticolo idrografico anche più periferico.

3.4 Manutenzione delle opere

Come per qualsiasi opera dell'uomo, anche quelle di sistemazione idraulico forestale hanno la necessità di essere soggette ad una manutenzione periodica. Il passare del tempo ed un ambiente particolarmente difficile, come quello dei versanti e dei corsi d'acqua montani, infatti, tende a deteriorare le opere ed a ridurne la funzionalità fino ad annullarla completamente. Anche le opere che impiegano la vegetazione, come le opere di sistemazione più tradizionali e quelle che fanno riferimento all'ingegneria naturalistica, che in linea di principio dovrebbero aumentare il loro effetto nel tempo, richiedono spesso interventi di manutenzione, specialmente nei primi anni o in occasione di stagioni particolarmente critiche. Ogni operazione di manutenzione, sia di tipo ordinario sia straordinario, richiede innanzitutto la conoscenza e l'ubicazione delle opere e la data della loro realizzazione (o di ultima manutenzione). Si tratta quindi di realizzare e di mantenere aggiornato un catasto delle opere via via realizzate e su cui si è fatta manutenzione. Tale operazione assai sem-

plice in linea di principio, nella maggior parte delle realtà italiane trova invece una serie di ostacoli dovuti a:

- L'onerosità dei rilevamenti in campo delle opere, spesso realizzate molto tempo addietro (una grande quantità di opere è stata realizzata tra le due guerre mondiali) e/o in siti poco accessibili una volta dismessa la viabilità di cantiere;
- La necessità di prevedere risorse finanziarie per questa specifica attività sottraendole, di fatto, ai già esigui finanziamenti destinati agli interventi;
- La difficoltà che vi era prima della diffusione dei Sistemi Informativi Geografici, nel gestire e tenere aggiornate le informazioni;
- La molteplicità dei soggetti che finanziano e realizzano le opere, spesso senza alcuna struttura di coordinamento;

L'attività di manutenzione non può comunque non prendere le mosse da un'attività di monitoraggio che consenta di valutare il mantenimento nel tempo delle caratteristiche funzionali delle opere, secondo quanto previsto in sede di progetto.

Oltre ad un'attività di monitoraggio programmata, occorre anche prevedere, almeno per le opere principali, un'attività di monitoraggio straordinario qualora si verifichino eventi eccezionali, potenzialmente in grado di comprometterne la funzionalità.

Nel caso specifico delle opere di trattenuta realizzate secondo la vecchia modalità a parete non filtrante è opportuno valutare la possibilità di una loro trasformazione in opere aperte. Distruggendo la parte centrale delle briglie di trattenuta è, infatti, possibile realizzare le aperture necessarie a creare un filtro. La grande capacità di movimentazione dei materiali accumulatisi a tergo dell'opera che è oggi disponibile, inoltre, permette di gestire al meglio il bacino di accumulo del materiale (Figura 21). Affinché questo tipo di riconversione sia possibile occorre che le condizioni strutturali delle opere forniscano adeguate garanzie di tenuta ed è quindi generalmente limitata al caso delle opere in calcestruzzo armato (per le quali risulta anche più semplice operare il taglio della porzione centrale senza pregiudicare la stabilità dell'intera opera). Per le briglie di consolidamento tradizionali è possibile considerare una seconda operazione di manutenzione straordinaria di un certo interesse. Si tratta di effettuare una demolizione parziale o totale delle opere preesistenti, che vengono sostituite da opere in massi che simulano le strutture a *step pool* (Figura 22) o da rampe in pietrame (Figura 23).

Figura 21: briglia a corpo pieno trasformata in briglia selettiva e piazza di deposito realizzata a tergo **dell'opera.** (t. Cismon, Trento)

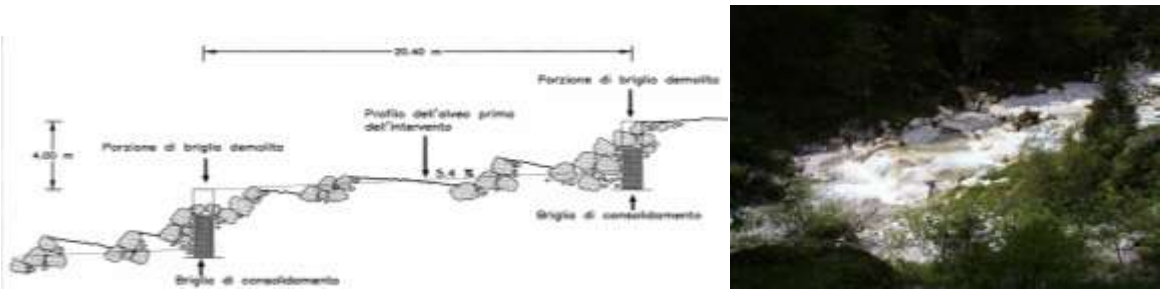

Figura 22: riconversione di opere di consolidamento tradizionali (Torrente Canali Parco di Paneveggio, Trento)

Figura 23: sostituzione di opere trasversali con rampe in pietrame (a sx schema da Regione Lombardia, 2000; a dx rampa sul t. Ache, Leutasch, Tirolo)

4 Le foreste di protezione

4.1 Il ruolo delle foreste nella difesa dei territori montani

Gli ecosistemi forestali possono esercitare un ruolo fondamentale nel prevenire e mitigare i pericoli naturali (Cotler et al., 2006; Cammeraat et al., 2005; Bischetti et al., 2005; Shiang et al., 2001), e quindi nella salvaguardia degli insediamenti umani, nella difesa del territorio agro-silvo-pastorale e più in generale nella conservazione dell'ambiente. In ambito alpino ciò trova la sua concretezza nei cosiddetti boschi di protezione, che possono avere un effetto di tipo indiretto o diretto (Motta e Haudemand, 2000) nei confronti di diversi pericoli naturali legati ai fenomeni di carattere idrogeologico. Nel primo caso, il bosco esercita una difesa generalizzata per l'effetto che le piante hanno sui processi idrologici, sulle caratteristiche meccaniche del terreno, sull'arresto delle valanghe, ecc. Nel secondo caso, invece, il bosco esercita il suo effetto per prevenire e arrestare o mitigare specifici pericoli naturali (frane, valanghe, cadute massi, ecc.), che insistono su specifici interessi umani (insediamenti civili e produttivi, vie di comunicazione, infrastrutture turistiche, ecc.).

Il ruolo protettivo della vegetazione è noto da secoli nella cultura alpina, e nel passato è stato ampiamente sfruttato, congiuntamente agli interventi strutturali, come uno dei pilastri della lotta contro il dissesto idrogeologico. La consapevolezza di questo ruolo, tuttavia, è andata affievolendosi come conseguenza di alcuni fattori. Innanzitutto, lo spopolamento

delle montagne ha determinato una perdita d'interesse, sia da parte dei cittadini che delle istituzioni, per le problematiche legate alla realtà montana e in particolare al bosco. In secondo luogo, il progresso tecnologico ha messo a disposizione una serie di mezzi e di tecniche facilmente utilizzabili anche in un ambiente tradizionalmente difficile come quello montano e, forse soprattutto, schemi di calcolo che supportano la progettazione d'interventi realizzati con materiale inerte ma non con materiale vegetale vivente.
Da alcuni anni, però, il quadro sembra essere mutato e si assiste ad una rivalutazione della funzione protettiva del bosco. In primo luogo, i fenomeni di dissesto idrogeologico non sembrano ridursi e le loro conseguenze sono sempre più consistenti, anche a causa dell'estensione delle attività antropiche in zone sensibili. Secondariamente, vi è una sempre maggiore sensibilità ambientale che vede con preoccupazione le grandi opere strutturali necessarie alla difesa idrogeologica. Infine, ma non ultimo, le restrizioni dei bilanci pubblici, che caratterizzano l'attuale fase economica, rendono impossibile far fronte al fabbisogno di opere che in Italia è stimato in circa 44 miliardi di euro (Luciani, 2008).
Nei Paesi in cui vi è maggiore sensibilità verso tutti questi temi si è andata sviluppando una concezione di gestione integrale dei fattori di rischio idrogeologico, nella quale i boschi di protezione assumono un'importanza crescente. In tali contesti, segnatamente Svizzera e Austria, la tendenza è quella di intervenire coordinando gli interventi di tipo più ingegneristico-strutturale con le misure di protezione che utilizzano la vegetazione, spesso meno impattanti ed economicamente meno onerose (Kienholz e Mani, 1994; Motta e Haudemand, 2000; Berger et al., 2002; Dorren et al., 2004a; Perret et al., 2004; Brauner et al., 2005). In sostanza si assiste ad una "riscoperta" delle Sistemazioni Idraulico Forestali e in molti Paesi dell'arco alpino si è ripreso a valorizzare il carattere protettivo dei boschi montani, comprendendoli a pieno titolo nella strategia di difesa del suolo. In Austria e Svizzera, ad esempio, si stima che vengano spesi ogni anno circa 50 milioni di Euro per mantenere e migliorare le funzioni protettive dei boschi (CIPRA, 2006 cit. in Brauner et al., 2005).
In una moderna ottica di utilizzo dei boschi per prevenire e mitigare i pericoli naturali è però cruciale poterne quantificare gli effetti. Non è infatti più sufficiente affermare che il bosco esercita una favorevole azione di riduzione del rischio idrogeologico, ma occorre essere in grado di quantificarla e di verificare se essa è sufficiente a mettere in sicurezza l'area e i beni a rischio, al pari degli altri interventi a carattere srtrutturale.

4.2 Pericoli naturali e foreste di protezione

Un pericolo naturale è un processo, potenziale o in evoluzione, che può produrre effetti negativi per l'uomo o per l'ambiente (AA.VV., 2006). In ambito montano i principali pericoli naturali verso i quali il bosco può esercitare un'azione di protezione prevenendo il loro verificarsi o mitigandone gli effetti sono la caduta di massi, le frane superficiali, le colate detritiche e le valanghe (AA.VV., 2006; Sakals et al, 2006); secondo alcuni autori, inoltre, i boschi possono avere azione diretta anche nei confronti delle piene (Frehner et al., 2005).
L'azione protettiva di un bosco può dipendere anche dalla sua localizzazione: una protezione attiva da parte della vegetazione nei confronti di valanghe, piene o erosioni, ad esempio, è possibile nella zona d'innesco del fenomeno, mentre nella zona di transizione e

d'arresto è possibile anche una difesa passiva per l'erosione (Rey, 2003) e la caduta massi (Berger e Renaud, 1994), mentre non è possibile nel caso di valanghe (Berger e Chauvin, 1996) e di frane.
Di seguito si sintetizzano gli effetti delle foreste nei confronti della caduta massi e dei franamenti superficiali.

4.2.1 Caduta massi

Uno dei maggiori pericoli rispetto ai quali il bosco può esercitare un ruolo significativo è la caduta di massi. Si tratta di un fenomeno in cui blocchi rocciosi di diversa dimensione si distaccano e cadono liberamente da pareti rocciose. Quando il fenomeno coinvolge una massa complessiva che supera un determinato volume si parla di *rock avalanches*. La differenza tra i due fenomeni non è meramente terminologica, ma implica una diversa dinamica ed una diversa interazione con il bosco.
In genere sono più frequenti le cadute di massi isolati, che sotto l'azione della forza di gravità, possono scivolare, rotolare o rimbalzare in funzione della pendenza, della forma dei massi, della morfologia del versante, ecc. (Berger, 2004). Nella sua corsa verso basso, il masso può perdere energia cinetica urtando gli alberi, i tronchi a terra, le ceppaie, le rocce e ovviamente, se presenti, anche le opere di protezione.
Il fenomeno può essere distinto in tre differenti fasi, distacco, caduta e arresto, cui corrispondono tre diverse zone (Figura 24) e nelle quali la vegetazione agisce in maniera significativamente differente:

- *Zona di distacco*, è la zona in cui i massi si distaccano dalla parete ed iniziano a muoversi verso valle. La valutazione del volume e delle dimensioni del materiale distaccato è oggetto di una serie di studi e di modelli matematici (Rouiller et al. 1998; Pierson et al., 1990; Bieniawski, 1979; Romana, 1988; Selby, 1993) cui si rimanda per approfondimenti. In generale, il volume e le dimensioni del materiale è legato alla densità e profondità delle fessurazioni, anche se le dimensioni del materiale che raggiunge la zona d'arresto e deposito sono solitamente inferiori rispetto a quelle effettivamente distaccate a causa della frammentazione indotta dagli impatti nella zona di transito. Tale considerazione deve essere tenuta in conto nella valutazione della capacità di resistenza agli impatti da parte della vegetazione; alcuni autori per tener conto del fenomeno introducono un indice di frantumazione (Pettifer e Fookes, 1994);
- *Zona di transito*, in cui i massi si muovono verso valle per salti successivi e rotolamento impattando il terreno e gli ostacoli che incontrano sul loro percorso. Il meccanismo di movimento dei massi, caduta libera, rimbalzo, rotolamento, è essenzialmente legato alla pendenza media del versante (in genere tra 70° e 90°, tra 70° e 45° e tra 45° e 30°, rispettivamente). Mentre nel primo caso è piuttosto semplice modellizzare il comportamento e le caratteristiche energetiche dei massi, negli altri due (e per l'arresto) è decisamente più complicato. In generale la dinamica è legata, oltre alla pendenza, alla dimensione dei massi ed alle caratteristiche della superficie di rimbalzo/rotolamento (essenzialmente morfologia, depressioni, e presenza di ostacoli quali grandi massi, tronchi e ceppaie; Gsteiger, 1989);

- *Zona d'arresto*, in cui i massi si arrestano a causa della perdita di energia che non è più sufficiente a mantenerli in movimento, determinandone il deposito; in genere non è un fenomeno graduale ma improvviso, legato sia alle caratteristiche dei massi che a quelle della superficie d'arresto. A causa del differente livello energetico delle diverse dimensioni dei massi, il deposito del materiale caduto avviene selettivamente da monte verso valle partendo dalle granulometrie più fini verso quelle maggiori.

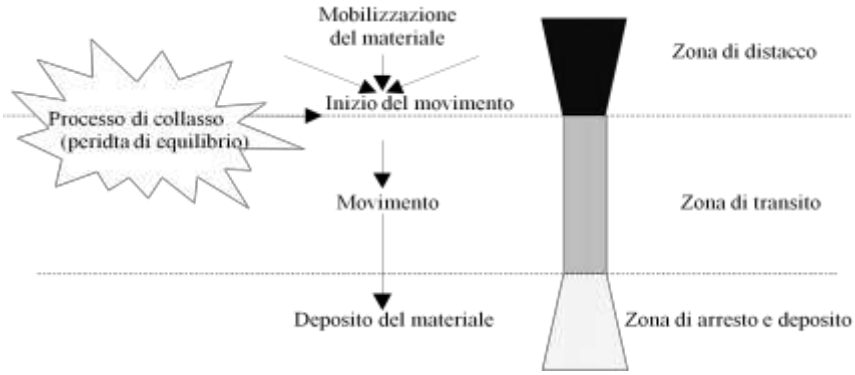

Figura 24: schematizzazione del fenomeno di caduta massi (modificata da Dorren, 2004)

La dinamica della caduta massi è stata investigata da numerosi autori ed ha portato a sviluppare modelli che ne descrivono i principali parametri. In questa sede non si ritiene opportuno entrare nel dettaglio dei diversi modelli proposti, per i quali si rimanda alla letteratura; una buona sintesi è riportata in Berger (2004) cui si rimanda per approfondimenti.
Gli studi sulla capacità delle piante di interferire con il fenomeno sono, invece, piuttosto limitati (Jahn, 1988; Zinggeler et al., 1991; Doche, 1997; Hétu e Gray, 2000; Berger, 2004; Berger et al., 2005), ma hanno permesso di avere indicazioni molto utili sugli effetti che il bosco può avere sull'arresto dei massi da un punto di vista quantitativo.
Pur con i limiti tipici nella generalizzazione dei risultati che si ottengono in contesti sperimentali di pieno campo, le sperimentazioni di campo effettuate generando cadute di massi (Jahn, 1988; Doche, 1997; Berger et al., 2005) è stato dimostrato come l'effetto del bosco sia significativo: la quantità di massi che raggiungono la zona in cui si avrebbe arresto senza la sua presenza viene ridotta del 60-70% dalla presenza del bosco, la velocità e l'altezza dei rimbalzi dei massi (due elementi importanti nel determinare la distanza d'arresto) viene ridotta, rispettivamente, del 25% e del 30% circa.
I risultati ottenuti dalle sperimentazioni hanno anche permesso di sviluppare modelli di caduta massi in grado di tenere conto della presenza di alberi (Dorren et al., 2004; Le Hir et al., 2004).
Oltre ai modelli che permettono di simulare ciò la dinamica della caduta massi a scala di versante, sono stati proposti modelli tridimensionali a scala regionale che fanno riferimento all'approccio spazialmente distribuito, e che prevedono l'integrazione con i Sistemi Informativi Geografici. Questi modelli identificano le zone di sorgente nella regione d'interesse, ipotizzano il percorso effettuato dai massi e calcolano la lunghezza d'arresto (Hegg e Kienholz, 1995; Meißl; 1998). Dorren e Seijmonsbergen (2003) utilizzando un approccio

simile, riescono a tenere conto esplicitamente della presenza di alberi sul versante, arrivando a calcolare la possibilità che un masso colpisca un albero in funzione della struttura del bosco.
In generale, indipendentemente dalla modellistica, gli studi effettuati hanno permesso di chiarire come la presenza di vegetazione forestale interferisca in maniera differente con il processo della caduta massi nelle tre diverse zone e come non sempre l'azione esercitata sia positiva.
Nella zona di distacco la maggior parte degli effetti sono negativi. Le radici, da una parte s'inseriscono nelle fessure della roccia esercitando una pressione che favorisce il distacco dei massi, dall'altra la fitta maglia radicale e la presenza di ceppaie, alberi in piedi, tronchi a terra possono trattenerli ma tale azione rischia di essere temporanea; la presenza del sistema radicale, infine, tende ad accelerare i processi di degradazione chimica.
L'azione del bosco e la sua capacità di trattenere o mettere in movimento i massi dipende, oltre che dalla natura geologica e dalla topografia del luogo, anche dalla composizione specifica e dall'altezza del popolamento forestale.
Le indicazioni di gestione in questa zona sono generalmente di eliminare le piante, soprattutto se si tratta di individui di grandi dimensioni e con radici di diametro elevato in grado di penetrare nelle fessure della roccia.
Nella zona di transito e nella **zona d'arresto e deposito** il bosco è in grado di esercitare un ruolo essenzialmente positivo, la cui importanza può variare in relazione al numero, al diametro e alla stabilità delle piante, nonché alle dimensioni delle aperture presenti. Le piante, infatti, rappresentano ostacoli in grado di dissipare una parte dell'energia cinetica dei massi, fino ad arrestarne la caduta e/o modificarne la traiettoria. L'efficacia di queste azioni dipende dalle dimensioni dei massi, dalle dimensioni degli alberi e dallo spazio tra un albero e l'altro. Linee guida recentemente sviluppate indicano, che i boschi per essere efficaci sulla caduta di massi con diametro dell'ordine di 1 m devono avere una densità di almeno 200 alberi per ettaro con un diametro (DBH) maggiore di 36 cm (Thornan e Schwitter, 2004 cit. Dorren et al., 2005; Freher et al., 2005) ed avere una distanza minima nella direzione di caduta inferiore a 20 m. Per quanto riguarda il legame tra dimensione del masso e diametro dell'albero in grado di fermarlo, Schwitter (1998 cit Dorren et al., 2005) indica un rapporto 3:1. Le indicazioni che emergono dalle linee guida sopra citate, sono sostanzialmente confermata dalle sperimentazioni condotte in campo (Dorren et al, 2005). In particolare, da tali sperimentazioni emerge chiaramente come più che la capacità di un singolo albero di arrestare la caduta di un masso, sia importante il numero di impatti che il popolamento può determinare; si è per esempio dimostrato che anche alberi di modeste dimensioni (DBH pari a 10 cm) possono arrestare massi di grandi dimensioni (1,5 m^3), se questo ha prima perso energia per l'impatto con altri alberi posti a monte.
Per aumentare la capacità di smorzamento dell'energia dei massi, si usa anche lasciare sul versante alcuni tronchi tagliati e posti diagonalmente rispetto alla direzione di caduta dei massi. Ciò permette di indirizzare i massi verso vie preferenziali (ad esempio verso zone a minor possibilità d'impatto con obiettivi sensibili o dove vi è una morfologia favorevole

all'arresto); esperienze condotte in Austria hanno mostrato che tronchi di abete rosso con diametro maggiore di 50 cm sono risultati efficienti per 10 anni (Dorren et al, 2004a).

4.2.2 Frane superficiali e colate detritiche

In ambito forestale, com'è noto, i versanti sono caratterizzati da un'elevata permeabilità del suolo e tendono ad infiltrare gran parte della precipitazione. In situazioni d'elevata pendenza si genera così deflusso sub-superficiale verso la base del versante e nelle zone di concavità, che risultano così più facilmente saturate e suscettibili al franamento.
L'elevato contenuto idrico del suolo che caratterizza l'innesco di questo tipo di fenomeni e la loro vicinanza con gli impluvi, inoltre, ne determina spesso l'evoluzione in colata.
La funzione protettiva del bosco nei confronti di questi fenomeni si esercita attraverso una serie d'effetti sui processi idrologici e sulle caratteristiche meccaniche del terreno. Dal punto di vista meccanico gli apparati radicali esercitano un'importante azione di rinforzo dei versanti, che determina un aumento delle forze di resistenza al taglio (Bischetti et al., 2009). Dal punto di vista idrologico si ha, da una parte l'aumento del contenuto idrico del suolo per la maggior quota di precipitazione infiltrata nel suolo, mentre dall'altra si ha una sua riduzione dovuta all'effetto di suzione delle radici legato all'evapotraspirazione. La maggiore capacità d'infiltrazione, comunque, riduce l'entità del deflusso superficiale da cui dipende l'erosione del suolo e, di conseguenza, la quantità di materiale granulare che si accumula negli impluvi. Il movimento sub-superficiale dell'acqua, infine, aumenta i tempi di corrivazione verso gli impluvi e quindi riduce la probabilità che in essi si presentino le condizioni per l'innesco dei fenomeni di colata.
L'azione di protezione del bosco nei confronti di franamento e colate è quindi essenzialmente legata alla presenza dell'apparato radicale, la cui densità rappresenta un fattore essenziale. Densità che raggiunge i valori massimi in boschi molto densi, pluristratificati su piccole superfici (massima colonizzazione del suolo da parte delle radici sia in senso verticale che orizzontale) e con distribuzione degli alberi omogenea (assenza di aperture). Al contrario, lo sradicamento degli alberi o il loro scarso vigore, tipici di foreste non in equilibrio, determinano uno scarso rinforzo meccanico e l'infiltrazione dell'acqua negli strati profondi attraverso vie preferenziali, con la conseguente predisposizione agli scivolamenti.
L'azione di prevenzione nei confronti delle frane superficiali e delle colate esercitata dalle foreste è anche legata alla loro estensione, sia a scala di versante cha a scala di bacino idrografico.
Per la protezione da fenomeni di colata o di trasporto iperconcentrato, un ruolo cruciale è anche esercitato dai boschi localizzati in prossimità delle ripe, che sono in grado d'influenzare direttamente sia il regime idraulico che l'alimentazione solida dei torrenti.

L'azione di protezione del bosco nei confronti dei franamenti è, come detto, essenzialmente legata alla presenza dell'apparato radicale. La sua quantificazione è però un aspetto che comporta notevoli difficoltà. In genere gli effetti sul contenuto di umidità del suolo, pur potendo determinare aumenti di coesione apparente molto elevati, vengono trascurati a causa dell'aleatorietà di tale effetto, che spesso viene a mancare proprio in occasione degli

eventi che determinano il collasso del versante (Coppin e Richards, 1990). Limitandosi quindi agli aspetti meccanici, l'azione delle radici può essere distinta in due grandi categorie. La prima è quella dovuta alle radici piccole e flessibili che tendono a seguire la deformazione del terreno sottoposto alle forze di taglio e che mettono in gioco la loro resistenza a trazione; la seconda è quella delle radici di grandi dimensioni, meno flessibili, che intersecano la superficie di scivolamento e che agiscono da tiranti singoli senza mobilizzare la loro resistenza a trazione, che supera quella d'attrito radice-terreno.
Entrambe queste azioni possono essere valutate attraverso modelli relativamente semplici (si veda ad esempio Coppin e Richards, 1990), ma al momento solamente il primo effetto viene preso in considerazione a causa della carenza nei parametri in gioco. In particolare, l'azione delle radici più sottili che permeano il terreno (che sono anche le più numerose) può essere espressa in termini di coesione aggiuntiva, ed in questo modo essere inclusa nei modelli comunemente disponibili per la valutazione della stabilità dei versanti (Schmidt et al. 2001; Roering et al. 2003; Sidle e Ochiai 2006).
I valori di coesione radicale possono essere determinati con *prove di taglio diretto* in campo oppure in laboratorio; i risultati ottenuti mostrano valori che variano tra pochi kPa e alcune decine di kPa. La variabilità dei risultati deve essere valutata alla luce del piano cui si riferiscono le prove effettuate (basale o laterale), del valore della densità di radicazione corrispondente e dei diametri considerati nelle diverse sperimentazioni.
Per la stima della coesione radicale può essere utilizzata anche la metodologia della "*back analysis*", che determina il valore della coesione con un'analisi a ritroso di frane avvenute in contesti forestali. L'utilizzo di questa tecnica conduce a valori di coesione inferiori a quelli determinabili con le prove di taglio.
Un ultimo metodo per valutare la coesione radicale, infine, consiste nell'applicazione dei *modelli di rinforzo*, che permettono di utilizzare un approccio di carattere generale che meglio si presta anche all'interpretazione della variabilità spaziale della coesione.
In Tabella 3 sono riportati alcuni valori della coesione radicale derivanti dai diversi metodi ripresi dalla letteratura. Come si è detto, le diverse metodologie influenzano i risultati delle ricerche poiché, implicitamente, si considerano profondità differenti. I valori ottenuti con la *back analysis* si riferiscono a profondità dell'ordine del metro, mentre le prove di taglio interessano solo qualche decina di centimetri (dove l'area radicata è effettivamente maggiore), e sono pertanto sistematicamente minori di quelli ottenuti con le prove di taglio. Oltre a ciò, con la *back analysis*, di fatto, vengono analizzate le sezioni dove il rinforzo si è dimostrato essere minore rispetto alle aree circostanti.
Un altro elemento critico è il diametro e la densità delle radici considerate, che influenza notevolmente la resistenza in termini unitari. Waldron (1977), ad esempio, ha condotto le misure su radici molto sottili (d<1mm) con un'elevata densità di radici mentre altri autori (Wu et al., 1979, ad esempio) hanno lavorato su specie forestali in campo, con diametri e densità molto diversi.
Diversamente dalle prove di taglio e dall'analisi a ritroso, i modelli di rinforzo rappresentano uno strumento adeguato a descrivere la variabilità spaziale della coesione aggiuntiva dovuta alla presenza delle radici nel terreno. Essi, inoltre, permettono di valutare il rinforzo

in funzione della profondità del piano di taglio. Diversi autori (Schmidt et al., 2001; Bischetti et al. 2002) mettono però in luce la tendenza generalizzata dei modelli a sovrastimare i valori di coesione radicale a causa dell'ipotesi di considerare la rottura contemporanea di tutte le radici presenti sulla superficie di taglio; recenti proposte, hanno tuttavia introdotto modalità più realistiche del processo di rottura (Pollen e Simon, 2005; Bischetti et al., 2009).

Tabella 3: Valori di coesione radicale riportati in letteratura

Autore	C_r (kN/m^2)	Ambito
Prove di taglio in situ		
Endo e Tsurata (1969)	2,0÷12,0[b]	vivaio di ontano (Giappone)
Abe e Iawamoto (1986)	1,0÷5,0[b]	cedro giapponese (Giappone)
Ziemer (1981)	3,0÷21,0[b]	pino contorto in California (USA)
O'Loughlin e Ziemer (1982)	6,6[b]	faggio in Nuova Zelanda
Prove di taglio in laboratorio		
Waldron (1977)	1,0÷2,5[b] 5,0÷10,0[b] 1,0÷1,7[b]	orzo erba medica pino giallo
Waldron e Dakessian (1981)	5,0 [b] 1,0 [b]	pino giallo di 52 mesi orzo
Waldron et al. (1983)	3,7÷6,4[b]	Pino giallo 54 mesi
Back analysis di franamenti		
Swanston (1970)	3,4÷4,4[b]	Abete canadese e abete in Alaska (USA)
O'Loughlin (1974)	1,0÷3,0	Conifere in British Columbia (Canada)
Buchanan e Savigny (1990)	1,6÷2,1[b] 2,6÷3,0[b]	Prato, carici, arbusti e felci (USA) ontano rosso, abete canadese, douglasia e cedro nello Stato di Washington (USA)
Sidle e Swanston (1982)	2,02 [b]	mirtillo in Alaska (USA)
O'Loughlin e Ziemer (1982)	3,3	foresta mista sempreverde in Nuova Zelanda
Gray e Meghan (1981)	10,3 2,8÷6,2[b]	conifere in Idaho (USA) pino giallo, douglasia, abete Engelmann
Bischetti et al (2002b)	4,5÷6,52[l]	latifoglie miste (nocciolo, faggio) in Valcuvia (Italia).
Modelli di rinforzo		
Wu et al. (1979)	5,9[l]	conifere in Alaska (USA)
Wu (1984a)	3,5÷7[l]	muschi in Alaska (USA)
Wu (1984b)	5,6÷12,6[l]	Abete canadese, abete di sitka, cedro giallo in Alaska (USA)
Riestemberg e Savonick Dunford (1983)	5,7 [b] 6,2÷7,0[l]	bosco a prevalenza di acero americano in Ohio (USA)
Burroghs e Thomas (1977)	7,5÷17,5[l]	Douglasia in Oregon (USA)
Bischetti et al. (2002a)	10÷35[l]	faggio (prealpi, Italia)
Schmidt et al. (2001)	6,8÷23,2 25,6÷93,4 <10 kPa	Boschi industriali a latifoglie (43-123 anni) foreste naturali (>200 anni) boschi da taglio raso (<11 anni (Oregon USA))
b= basale l= laterale		

I valori riportati in letteratura consentono di avere un campo di valori entro cui ci si attende varino i valori di coesione radicale per le diverse specie, ma spesso non tengono conto dell'effettiva densità delle radici alle diverse profondità e nei diversi contesti. Inoltre, i dati

disponibili si riferiscono quasi sempre a specie esotiche e contesti differenti da quello d'interesse.
Negli ultimi anni sono state condotte diverse ricerche per colmare questa lacuna in ambito europeo ed alpino in particolare (si veda Bischetti et al., 2009) e la DG Agricoltura della Regione Lombardia ha finanziato un progetto per la caratterizzazione delle principali categorie forestali presenti sul territorio lombardo in tale senso (il progetto SISIFO nell'ambito del quale è stato sviluppato anche il presente documento).
Le categorie considerate, sulla base della loro diffusione in aree interessate da fenomeni di dissesto sono: Aceri-frassineti, Orno-ostrieti, Castagneti, Faggete, Peccete, Robinieti, Lariceti e Alneti di ontano bianco. Per tali categorie sono stati effettuati rilievi di campo in diverse località della Valsassina e della Valle Camonica (e di qualche altra località della Lombardia), corredate da analisi di laboratorio. Attraverso l'applicazione di un modello di rinforzo che utilizza le informazioni relative a resistenza a trazione delle radici e di densità radicale alle diverse profondità, sono stati valutati i valori di coesione radicale alle diverse profondità per ciascuna delle 19 stazioni considerate, per un totale di 113 profili.
In Figura 25 sono riportati a titolo d'esempio gli andamenti rispetto alla profondità dei valori di coesione radicale stimata per acero montano, castagno, frassino maggiore e faggio.
Come si può notare i valori ottenuti sono di alcuni kPa anche a profondità superiori al metro, valori di un certo interesse ai fini della stabilità dei versanti rispetto ai fenomeni di scivolamento superficiale. Per una trattazione esaustiva di rinvia al rapporto finale del progetto SISIFO(Bischetti et al., 2010).

4.3 Tipologia di funzione protettiva delle foreste

In linea di principio tutti i boschi, ed in particolare quelli montani, svolgono un'azione protettiva nei confronti dei rischi naturali; l'importanza che l'uomo attribuisce a questa funzione, tuttavia, varia in relazione a due fattori: la tipologia di popolamento ed alla loro localizzazione rispetto agli interessi antropici.
Qualsiasi bosco svolge, innanzitutto, un'azione generale di regimazione delle acque meteoriche e di difesa dal dissesto, sulla cui base è possibile attribuire un primo livello di protezione di carattere generico. Tale livello di protezione conferisce al bosco una *funzione di protezione indiretta* (AA.VV., 2006).
Un secondo livello di protezione è legato all'azione che il bosco svolge nei confronti di specifici beni ed interessi, rispetto a pericoli naturali ben definiti (valanghe, caduta massi, scivolamenti superficiali e colate detritiche). In questi casi il bosco assume *funzione di protezione diretta* e deve avere determinati requisiti, legati alle proprie caratteristiche intrinseche ed alla sua localizzazione, che devono essere presenti contemporaneamente (Schönenberger, 1998 e 2000; Brang, 2001):

- l'esistenza di un pericolo naturale;
- la presenza di un popolamento forestale in grado di impedire il verificarsi del pericolo naturale o di mitigarne gli effetti;
- la presenza d'interessi antropici (insediamenti, attività economiche e vie di comunicazione).

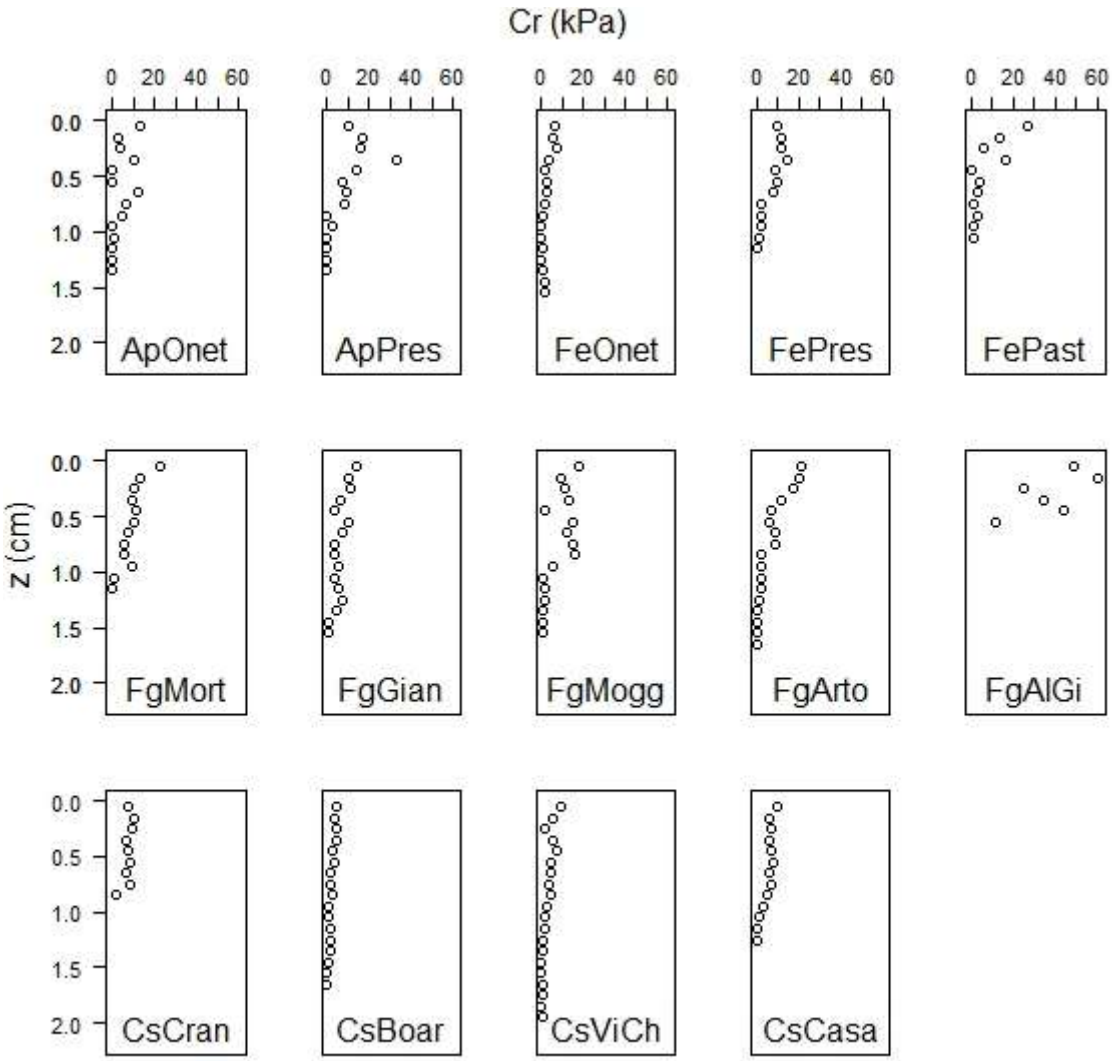

Figura 25. Profili medi di coesione radicale nelle diverse stazioni per le specie acero montano, castagno, frassino maggiore, faggio.

Questo tipo di boschi, definiti anche *Foreste di Protezione Diretta* (FPD), secondo Langenegger (1979) possono essere suddivise in tre principali categorie in relazione dell'oggetto della protezione:

- *protezione diretta di importanza fondamentale* quando è a protezione di insediamenti permanenti, vie di comunicazione che collegano insediamenti permanenti, aree industriali, stazioni turistiche estive ed invernali e comprensori sciistic);
- *protezione diretta d'importanza media* quando è a protezione di abitazioni stagionali, vie di comunicazione che legano abitazioni permanenti ad abitazioni stagionali, zone agricole, tralicci per il trasporto dell'energia elettrica;
- *protezione diretta di importanza secondaria* quando è a protezione di pascoli, aree prossime ad insediamenti permanenti o stagionali poco frequentati.

La protezione diretta può essere svolta efficacemente solo da popolamenti forestali aventi determinate caratteristiche (composizione, densità, struttura, tessitura), in relazione ai pericoli naturali presenti. È stato messo in luce che tali caratteristiche variano in relazione allo stadio evolutivo ed alle pratiche di gestione (Dotta e Motta, 2000; Motta e Haudemand, 2000; Dorren et al., 2004a).

4.4 Criteri per l'identificazione delle foreste di protezione diretta

L'attribuzione della funzione di protezione diretta ad un bosco è il risultato di un processo piuttosto complesso e che attualmente non può ancora basarsi completamente su conoscenze scientifiche consolidate. Per la maggior parte dei casi, infatti, rimangono ancora significative lacune nella conoscenza del ruolo delle piante nei processi che governano il verificarsi dei pericoli naturali in esame.

4.4.1 Metodi empirici

In genere, i metodi empirici sono piuttosto semplici e consistono nell'identificare e qualificare i rischi naturali sotto forma di mappe tematiche e nel localizzare e qualificare le aree boscate che possono esercitare una qualche azione di mitigazione nei confronti dei rischi identificati. Successivamente vengono identificate ed analizzate le relazioni tra rischio e presenza del bosco, in genere attraverso la sovrapposizione di differenti tematismi territoriali e mediante un'opportuna assegnazione di fattori di ponderazione (Berger e Rey, 2004; Lingua et al., 2003; Motta et al., 2003; Meloni et al., 2005; Di Fidio, 2007).
Austria (Plonner e Sonser, 2000), Svizzera (Medico, 2000) e Francia (Berger et al., 2000; Berger e Rey, 2004) hanno sviluppato metodologie simili per la zonazione delle foreste di protezione nei confronti dei rischi naturali, il cui scopo principale è quello di identificare e mappare le aree forestali con una funzione protettiva (Berger e Rey, 2004).
Per l'Italia l'unica procedura reperita in letteratura è quella sviluppata dalla Regione Valle d'Aosta (Lingua et al., 2003). Recentemente il tema è stato affrontato anche dalla Regione Lombardia nell'ambito dei criteri di redazione dei Piani d'Indirizzo Forestale previsti dalla l.r. 27/2004 (ora sostituita dalla l.r. 31/2008, "Testo unico delle leggi regionali in materia di agricoltura, foreste, pesca e sviluppo rurale"), i quali in attesa della definizione di più precise metodologie basate su modelli di stabilità, indicano di classificare come boschi di protezione ai fini del dissesto idrogeologico, le superfici: soggette al regime di vincolo ex art 17 RD 3267/1923, incluse nelle fasce PAI o fasce di ridelimitazione del PAI, inserite in classe di fattibilità geologica e quelle incluse nelle fasce di rispetto e di attenzione del reticolo idrico principale e minore. (Regione Lombardia, 2008[2])
L'approccio di tipo empirico è in grado di identificare i boschi che esercitano un'azione di protezione diretta in maniera più o meno articoalta, ma non di quantificare il reale grado di protezione e quindi la possibilità da parte del bosco di ridurre il rischio considerato in maniera adeguata a quanto richiesto dagli interessi da difendere.

[2] Regione Lombardia (2008) Criteri e procedure per la redazione e l'approvazione dei piani di indirizzo forestale (PIF), Allegato alla deliberazione di Giunta regionale n° 7728 del 24 luglio 2008

Per fare ciò occorre utilizzare modelli di simulazione dei fenomeni fisici che tengano conto della presenza del bosco. Come illustrato nei paragrafi precedenti, la ricerca scientifica ha iniziato a dare risposte per quanto riguarda la caduta massi ed i franamenti superficiali, oltre al fatto che la modellistica idrologica a parametri spazialmente distribuisce fornisce gli strumenti per affrontare tale tema anche per quanto riguarda le piene.

4.4.2 Metodi quantitativi

Come accennato, al momento le conoscenze scientifiche sono ancora parziali e comunque insufficienti per l'elaborazione di metodi in grado di quantificare nel suo complesso l'effetto delle piante nei confronti dei diversi pericoli naturali, che siano anche applicabili a livello operativo. In Tabella 4 è riassunto il livello delle conoscenze scientifiche inerenti il ruolo del bosco rispetto alla funzione protettiva dei rispetto ai diversi pericoli naturali e le principali linee di ricerca da sviluppare.

Tra i rischi naturali per i quali i risultati della ricerca scientifica sono sufficientemente maturi da essere in grado di fornire una qualche risposta in merito alla quantificazione dell'effetto della presenza di vegetazione sono la caduta massi (Gsteiger, 1989; Dorren, 2002; Vospernik, 2002; Dorren et al., 2004b; 2005; Brauner et al., 2005; Dorren et al., 2005) ed i franamenti superficiali, limitatamente all'azione di rinforzo (Bischetti, 2003; Sidle e Ochiai, 2006; Schmidt et al., 2001; Roering et al., 2003; Norris, 2005; Tosi, 2007; Normaniza et al., 2008; Sun et al., 2008; Bischetti et al., 2009).

Sugli altri rischi le conoscenze sono ancora limitate o contraddittorie.

Per quanto riguarda la capacità protettiva nei confronti della caduta massi, le più recenti ricerche si basano su esperimenti, di campo e modellistici, nel corso dei quali si misurano (o simulano) il numero e le caratteristiche dei massi che riescono ad attraversare porzioni di bosco con determinate caratteristiche forestali (Doche, 1997; Jahn, 1998; Dorren et al., 2005; Stokes et al., 2005). Sulla base dei risultati ottenuti è possibile trarre indicazioni sulle specie maggiormente adeguate e sulla distanza e diametro minimi affinché il bosco sia efficace; è inoltre possibile inferire sul grado di efficacia del bosco con diverse caratteristiche nella protezione dalla caduta di massi di determinate dimensioni.

Per quanto riguarda le frane superficiali, l'azione di rinforzo della vegetazione è attualmente considerata, come detto, solo in termini di coesione aggiuntiva da inserire nei modelli di stabilità. In particolare, sono oggi disponibili modelli, che utilizzando l'integrazione con i GIS, in grado di accoppiare modelli idrologici semplificati basati sulle caratteristiche topografiche delle aree considerate e modelli di stabilità dei versanti basati sul pendio indefinito (ad esempio Dietrich et al., 1993; Montgomery e Dietrich, 1994; Wu 1995; Pack et al., 1998; Dietrich e Montgomery, 1998; Borga et al., 2002; van Beek 2002; Simoni et al., 2008). Qualora si disponga di valori di coesione radicale per la tipologia vegetazionale e la profondità considerate, di conseguenza, attraverso l'impiego di questi modelli è possibile quantificare il Fattore di Sicurezza del versante e quindi la sua capacità di assicurarne la stabilità o meno.

Tabella 4: conoscenza scientifica del ruolo della foresta sui rischi naturali (integrata e modificata da Berger, 1997 cit. in Berger e Rey, 2004)

Rischio naturale	localizzazione	Conoscenze scientifiche	bosco considerato nei modelli	linee di ricerca da sviluppare
Piene	Formazione	medie	poco	Quantificazione dell'effetto sul ciclo idrologico e soglia di efficacia
	Propagazione	crescenti	poco	Quantificazione delle resistenze idrauliche in alveo Effetto dei depositi di legname in alveo
Frane superficiali	Zona d'innesco	crescenti	poco	Quantificazione dei diversi effetti meccanici e idrologici
	Zona di transito e arresto	scarse	no	
Colate	Zona d'innesco	scarse	poco	Quantificazione dell'innesco di frane superficiali
	Zona di transito e arresto	scarse	no	Ruolo della vegetazione come effetto di rallentamento
Caduta massi	Zona d'innesco	medie	no	Ruolo delle radici
	Zona di transito e arresto	scarse	poco	Energia di rottura da parte dei singoli alberi e del bosco nel suo complesso
Valanghe	Zona d'innesco	medie	poco	Ruolo sulla copertura nivale
	Zona di transito e arresto	scarse	no	

5 Rapporti tra Sistemazioni Idraulico Forestali e Ingegneria Naturalistica

Le tecniche di ingegneria naturalistica rappresentano una modalità d'intervento indicata sempre più spesso per gli interventi di difesa idrogeologica. Molte delle tecniche classificate come tecniche di ingegneria naturalistica sono in realtà le classiche tecniche delle Sistemazioni Idraulico Forestali, che vengono troppo spesso riproposte in maniera acritica come mera riproduzione del passato, senza tenere conto dei progressi che vi sono stati nelle conoscenze sui processi e spesso introducendo elementi di confusione. Molti esempi di tale situazione si possono trovare nella copiosa manualistica prodotta dai diversi enti sull'argomento dell'ingegneria naturalistica.

Nell'ambito di una moderna ridefinizione del ruolo delle Sistemazioni Idraulico Forestali nella difesa del territorio, di conseguenza, è necessario portare alcuni chiarimenti, primo fra tutti l'origine dell'ingegneria naturalistica ed i suoi rapporti con la disciplina da cui deriva. L'impiego della vegetazione nelle opere per la sistemazione del territorio ed in particolare di quello montano, infatti, è stato lungamente guidato dalla necessità pratica di utilizzare materiale economico e disponibile sul posto, piuttosto che per motivazioni di carat-

tere ambientale. È quindi da ritenersi assolutamente scorretto, da una parte attribuire la definizione di ingegneria naturalistica a tutte le opere costruite utilizzando vegetazione e materiale naturale secondo lo spirito "autarchico" che che ha dato origine alle SIF [3], e dall'altra considerare opere di ingegneria naturalistica quelle che, pur avendo una finalità "naturalistica" non usano la vegetazione con finalità di stabilizzazione.

5.1 Origine della ingenieurbiologie

Ciò che ha dato origine alla "*ingenieurbiologie*" (termine che viene tradotto nelle diverse lingue in modo diverso e talvolta ampliandone il significato, come si vedrà in seguito) è qualcosa di diverso dal semplice impiego della vegetazione come materiale da costruzione.
Sicuramente, come accennato, non può essere fatta risalire al primitivo impiego di legname o piante per realizzare recinzioni o semplici manufatti come talvolta viene riportato (Cornelini, 2006). Ad una prima analisi essa potrebbe essere ricondotta agli anni '50 del secolo scorso quando alcune delle tecniche SIF tradizionali vengono maggiormente valorizzate (von Kraudener, 1951; Hassenteufel, 1954, Seifert, 1965, Prückner, 1965; Schiecthl, 1973) e von Kraudener (1951) intitola il suo volume proprio "*Ingenieurbiologie*".
In realtà la sua origine è assai più articolata. Essa nasce nel mondo di lingua tedesca dall'innesto del bagaglio tecnico sviluppato nella difesa del territorio (ed in particolare nelle sistemazioni montane) su un substrato culturale molto particolare. Le tecniche e le conoscenze sviluppate nelle sistemazioni montane, verso la fine dell'800, infatti, hanno trovato un terreno reso fertile da quei movimenti sociali e culturali che, sempre nello stesso periodo, manifestavano le prime preoccupazioni per la difesa dell'ambiente naturale dai danni provocati da uno sviluppo urbano e industriale disordinato (Di Fidio, 2008).
Nel pensiero tecnico – scientifico tedesco, la *Ingenieurbiologie* costituisce un settore comune tra la costruzione del paesaggio e le Sistemazioni Idraulico Forestali, la cui concezione generale associa metodi costruttivi con materiali vivi o misti e metodi costruttivi con materiali morti.
In sostanza, l'utilizzo di tecniche che, mediante l'impiego di vegetazione, sono in grado di svolgere contemporaneamente azioni di tipo statico ed estetico-paesaggistico[4], accomuna, nel mondo di lingua tedesca, i paesaggisti e i sistematori. Sono però quest'ultimi, costretti dalla severità dei processi con cui si confrontano, a sviluppare un maggiore bagaglio tecnico che viene messo a disposizione dei primi, soprattutto intorno agli anni '30 del secolo scorso quando i metodi di costruzione con materiali vivi sono applicati alle scarpate delle prime autostrade tedesche.

---

[3] il vigente D.M. 20 agosto 1912, "Approvazione delle norme per la preparazione dei progetti di lavori di sistemazione idraulico-forestale nei bacini montani", all'art.12 dispone che in tali lavori fossero <<*da impiegare i materiali rustici del sito, pietre, legnami, chiedendo alla forza di vegetazione i materiali viventi per il consolidamento dei terreni, ricorrendo anche a opere miste di legname e sasso*>>.

[4] Va precisato che *l'accezione "paesaggio"* nel mondo germanico ha un significato non perfettamente coincidente con quello del paesaggio italiano, poiché esprime anche una forte valenza naturalistica (ecosistema paesistico), mentre nel paesaggio italiano prevalgono la valenza estetica (quadro paesistico) e quella storico - culturale (palinsesto).

Il termine *Ingenieurbiologie* (ingegneria naturalistica) è invece coniato solo più tardi da von Kruedener, il quale negli anni precedenti il secondo conflitto mondiale dirige in Germania uno specifico istituto di ricerca.
Nel mondo di lingua tedesca i contenuti ed i metodi della *Ingenieurbiologie* conoscono una crescente affermazione in una molteplicità d'applicazioni, sia in ambienti naturali sia artificiali, già prima della 2° guerra mondiale e riprendono vigore dopo la ricostruzione postbellica. In particolare, la loro diffusione prevale nel settore della costruzione del paesaggio che può efficacemente utilizzare le sole costruzioni vive, mentre le sistemazioni montane non possono fare a meno anche delle opere in materiale inerte, le sole in grado di soddisfare determinati requisiti meccanici.
In definitiva le tecniche della *Ingenieurbiologie* vengono dapprima sviluppate nell'ambito forestale per la difesa da fenomeni di dissesto idrogeologico e poi, a partire dagli anni '30 e soprattutto dagli anni '50 del secolo scorso, vengono maggiormente valorizzate nell'ambito della costruzione del paesaggio e delle sistemazioni montane a basso impatto ambientale.

5.2 Contenuti della Ingenieurbiologie

La particolare situazione culturale che ha generato la *Ingenieurbiologie* nell'Europa centrale, è stata ed è invece assente negli altri Paesi, nei quali essa si è successivamente estesa. Ciò rende particolarmente delicata l'operazione di diffusione di queste tecniche, e si corre il rischio di snaturarne i principi e l'articolazione originaria. In pratica, essa può considerarsi una sorta di snodo e di raccordo tra le sistemazioni montane ed idrauliche e la costruzione del paesaggio (inteso anche in senso naturalistico), dei quali costituisce una parte più o meno rilevante.
Mentre nella costruzione del paesaggio si privilegia l'uso delle sole piante (in lingua tedesca viene usato il termine *Lebendbau*), nella *Ingenieurbiologie* si tende a sottolineare il suo scopo stabilizzante, sia per le sponde dei corsi d'acqua sia per i versanti e le scarpate. Basti ricordare la definizione che *Schiechtl e Stern* (1992 e 1994) ne danno, attribuendola a von Kruedener: L'ingegneria naturalistica "*è una tecnica costruttiva ingegneristica, che si avvale di conoscenze biologiche nell'eseguire costruzioni in terra e idrauliche e nel consolidare versanti e sponde instabili. Per questo scopo è tipico l'impiego di piante e di parti di piante, messe a dimora in modo tale, da raggiungere, nel corso del loro sviluppo, sia da sole, come materiale da costruzione vivo, sia in unione con materiale da costruzione inerte, un consolidamento duraturo delle opere. L'ingegneria naturalistica non si deve intendere come sostituzione, ma come necessaria e razionale integrazione delle modalità costruttive meramente tecniche.*".
Definizione che si ritrova, molto simile all'originale, anche nel sito internet della *Gesellschaft für Ingenieurbiologie* (l'associazione per l'ingegneria naturalistica): "*Nei Paesi di lingua tedesca, per "Ingenieurbiologie" s'intende una tecnica costruttiva ingegneristica ad indirizzo biologico, che si serve di conoscenze biologiche ed ecologiche per consolidare e proteggere dall'erosione versanti, scarpate, sponde, golene, argini e discariche. Sua caratteristica è l'impiego di piante e parti di piante come materiali viventi, in modo tale che,*

nel corso del loro sviluppo, assieme al suolo e alle rocce, forniscono il contributo essenziale per un consolidamento duraturo. Nella fase iniziale è spesso necessaria l'associazione con materiali costruttivi inerti".
La fondamentale distinzione tra *Ingenieurbiologie* e *Lebendbau*, sebbene le tecniche utilizzate possano anche essere comuni, dovrebbe, quindi, essere mantenuta nell'estendere i contenuti della *Ingenieurbiologie* agli altri Paesi.

5.3 Definizioni di Ingenieurbiologie nei paesi di lingua non tedesca

La definizione attribuita a von Kruedener dovrebbe essere, ovviamente, ritenuta quella originale ed autentica, cui tutte le traduzioni, e soprattutto le applicazioni, dovrebbero attenersi. Ciò è reso ancora più importante da quanto illustrato in merito all'origine ed ai contenuti della *Ingenieurbiologie*.
Nella maggior parte dei casi, così è stato, anche se qualche eccezione si è riscontrata, soprattutto in Italia, dove si è cercato di attribuire al termine in oggetto anche i contenuti legati più propriamente alle componenti paesaggistica e naturalistica, che però, come si è visto, nella cultura tedesca vengono riferiti alla costruzione con materiali vivi (la *Lebendbau*). Tale distinzione viene conservata nella maggioranza delle traduzioni, che verranno brevemente illustrate.
PAESI ANGLOFONI
A livello internazionale, ove è consuetudine utilizzare la lingua inglese, il termine *Ingenieurbiologie* è comunemente tradotto con *Soil bioengineering*.
Tra le diverse definizioni reperibili in letteratura, tutte pongono l'accento sull'azione stabilizzante della vegetazione, e quella che ci sembra maggiormente fedele all'originale è data da Lewis et al. (2001): "*Soil bioengineering è l'utilizzo di materiale proveniente da piante, vivo o morto, per mitigare problemi ambientali, quali frane superficiali rapide e versanti e sponde fluviali in erosione*". Negli interventi di *bioengineering* le piante sono un'importante componente strutturale.
PAESI FRANCOFONI
Nei Paesi francofoni, il primo ad introdurre i concetti della *Ingenieurbiologie* è stato lo svizzero Bernard Lachat, il quale in ambito fluviale utilizza il termine *génie biologique*: "*abbiamo proposto il termine Génie biologique, in parallelo al genio rurale, al genio civile o ancora al genio forestale, per descrivere nella sua globalità la scienza che, in biologia applicata, utilizza la materia vivente per costruire, restringendone il dominio alle 'tecniche vegetali della protezione e stabilizzazione', poiché si tratta di proteggere il suolo*." (Lachat, 1988). In Francia, tuttavia, con *génie biologique* s'intende un campo ben più ampio, che va dall'utilizzo sostenibile del territorio, alla filiera agro-alimentare, alle biotecnologie. I concetti della *Ingenieurbiologie* vengono meglio rappresentati dal termine *génie végétal*, cui lo stesso Lachat (1996) si adegua: "*génie végétal è definito come l'utilizzo di piante o parti di piante per risolvere i problemi ingegneristici nel dominio della protezione contro l'erosione, della stabilizzazione e della rigenerazione dei suoli. La considerazione degli aspetti e delle funzioni biologiche costituisce un principio irrinunciabile*".

Nel Québec, *le Bureau de normalisation du Québec* (BNQ), nel 2001 ha coniato la seguente definizione di *génie végétal* (Office québécois de la langue français, 2001): "*Insieme di tecniche che coniugano i principi dell'ecologia e dell'ingegneria per concepire e realizzare delle opere che utilizzano i vegetali come materiale di base e che mirano, tra l'altro, alla stabilizzazione delle scarpate, degli argini e delle sponde, alla depurazione delle acque ed al controllo dell'erosione*".

IL CASO ITALIANO

Il caso italiano è quello che, unico, sembra creare qualche fraintendimento in quanto, come si è detto, vi sono definizioni che cercano di attribuire alla *Ingenieurbiologie* anche contenuti che vanno oltre la stabilizzazione, e che sono legati più propriamente alle componenti paesaggistica e naturalistica. In Italia le tecniche di *Ingenieurbiologie* sono originariamente definite di *Bioingegneria Forestale* (tale è il titolo della traduzione del volume di Schiechtl su iniziativa del Servizio foreste della Regione Veneto e in tale modo vengono citate dalla L 102/1990 "Valtellina") ed i primi lavori che ne trattavano era sicuramente afferenti all'ambito delle Sistemazioni Idraulico-Forestali (Dragogna, 1968; 1970).

Dopo questi primi approcci, tuttavia, il mondo sistematorio italiano non è forse riuscito a dare il giusto peso ad un movimento di pensiero che si stava delineando all'estero e soprattutto nei paesi di lingua tedesca e che andava a valorizzare il ruolo della vegetazione nelle opere di sistemazione. Il vuoto creatosi è stato colmato da alcuni uffici delle amministrazioni forestali e dal mondo professionale, trai più vicini al mondo di lingua tedesca ed afferenti per lo più all'ambito del ripristino ambientale. È proprio in tale ambito che le tecniche di Ingegneria Naturalistica hanno iniziato a diffondersi; nella L102/1990 ad esempio "*gli interventi di sistemazione idrogeologica nelle aree a maggiore rilevanza ambientale ..., si attuano preferibilmente con l'impiego delle tecniche di bioingegneria con particolare riferimento alla sistemazione dei corsi d'acqua*".

Lo spostamento verso questo tipo di applicazioni ha anche portato all'abbandono della dizione di bioingegneria forestale ed all'adozione del termine *Ingegneria Naturalistica*, dall'originario nome tedesco *Ingenieurbiologie*; tale variazione è avvenuta nel 1990 nell'ambito del Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana Naturalisti tenutosi a Torino (AIN, 1990).

Un esempio della confusione che regna nella situazione italiana è rappresentato dal DPR 25.01.2000 n. 13, Allegato A, il quale riporta la seguente definizione dell'Ingegneria Naturalistica: "*riguarda la costruzione, la manutenzione o la ristrutturazione di opere o lavori puntuali, e di opere o di lavori diffusi, necessari alla difesa del territorio ed al ripristino della compatibilità fra 'sviluppo sostenibile' ed ecosistema, comprese tutte le opere ed i lavori necessari per attività botaniche e zoologiche. Comprende in via esemplificativa i processi di recupero naturalistico, botanico, faunistico, la conservazione ed il recupero del suolo utilizzato per cave e torbiere e dei bacini idrografici, l'eliminazione del dissesto idrogeologico per mezzo di piantumazione, le opere necessarie per la stabilità dei pendii, la riforestazione, i lavori di sistemazione agraria e le opere per la rivegetazione di scarpate stradali, ferroviarie, cave e discariche.*"

Tale definizione risulta, oltre che generica, assai confusa, in quanto associa costruzione e manutenzione, lavori puntuali e diffusi, difesa del territorio e attività prettamente naturalistiche. In un tale marasma può starci tutto ed il suo esatto contrario e, soprattutto, è difficile identificare le conoscenze che devono stare alla base dei diversi interventi. Non è, infatti, ragionevole comprendere nella medesima categoria, interventi di "recupero naturalistico, botanico, faunistico", per la "rivegetazione di scarpate" e per "l'eliminazione del dissesto idrogeologico", che sottendono processi e problematiche completamente differenti.
In assenza di un comune retroterra culturale in materia di natura e paesaggio il medesimo termine "ingegneria naturalistica" è stato (ed è) utilizzato da parte dei tecnici di diversa estrazione, sottintendendo contenuti molto differenti e che hanno in comune solamente l'utilizzo della vegetazione.
In sostanza, in Italia si perde quell'articolazione che nel mondo di lingua tedesca si riflette nella pluralità di termini che sottendono l'uso di vegetazione per finalità costruttive (*Lebendbau*, *Landschafsbau*, *Grünverbau*, *naturnahe Verbauung*, *Begrünung*, ecc.) e si amplia il contenuto dell'Ingegneria Naturalistica fino a comprendere ciò che è già parte d'altre discipline consolidate. Ad esempio le "tecniche di rinaturazione finalizzate alla realizzazione d'ambienti idonei a specie o comunità vegetali e/o animali" o la "ricostruzione o innesco d'ecosistemi paranaturali" sono argomenti propri dell'ecologia applicata.
Sulla base di tali considerazioni, riteniamo quindi che si debba riportare la definizione dell'ingegneria naturalistica alla sua accezione originaria, presente nella traduzione dei volumi di Schiechtl (Schiechtl e Stern, 1992 e 1994) a cura di L. Dibona: "*L'Ingegneria naturalistica è una tecnica costruttiva ingegneristica, che si avvale di conoscenze biologiche nell'eseguire costruzioni in terra e idrauliche e nel consolidare versanti e sponde instabili. Per questo scopo, è tipico l'impiego di piante e di parti di piante, messe a dimora in modo tale, da raggiungere nel corso del loro sviluppo, sia da sole, come materiale da costruzione vivo, sia in unione con materiale da costruzione inerte, un consolidamento duraturo delle opere*". Tale definizione è supportata da Florin Florineth, considerato diretto erede dello stesso Schiechtl, il quale afferma: *"Il termine Ingenieurbiologie, tradotto in lingua italiana come "ingegneria naturalistica", è stato usato per la prima volta da Arthur Freiherr von Kruedener nel 1951. Fino ad allora si usavano i termini tedeschi Lebendverbau o Grünverbau, che significano "opere di consolidamento con materiale vivo o verde". Questa definizione è valida ancora oggi, anche se si tende ad estenderne il significato. Il verde pensile, la cosiddetta architettura inerbita (con piante rampicanti), la progettazione, l'organizzazione e la gestione del verde urbano, dei campi sportivi o di fasce verdi lungo la strada, la potatura di alberi e arbusti nei centri abitati sono materie che presso le università austriache, tedesche e svizzere fanno parte di quelle discipline che utilizzano in modo "tecnico" la vegetazione, concetto che in tedesco si esprime nella parola Vegetationstechnik. L'Università Bodenkultur di Vienna ha istituito nel 1994 la prima cattedra d'Ingegneria naturalistica e costruzione del paesaggio, che comprende come terza disciplina la sopracitata Vegetationstecknich. Personalmente considero l'ingegneria naturalistica una disciplina che si deve occupare solo di opere di consolidamento di corsi d'acqua, versanti, fossati e zone di frana o erosive, attraverso l'impiego di materiale vivo o in com-*

binazione con materiale morto, come legname, pietrame, geotessile o strutture metalliche." (Florineth, 2005 p. 8).
In effetti, presso l'istituto che lo stesso Florineth dirige da oltre dieci anni (*Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau* – Istituto per l'Ingegneria naturalistica e la Costruzione del paesaggio), l'insegnamento e la ricerca sono focalizzati in tre settori: Ingegneria naturalistica (*Ingenieurbiologie*), Tecnica vegetazionale (*Vegetationstechnik*) e Costruzione del paesaggio (*Landschaftsbau*).

5.4 I rapporti tra Sistemazioni Idraulico Forestali e Ingegneria Naturalistica

L'obiettivo primario delle Sistemazioni Idraulico Forestali è quello di garantire la stabilità dei versanti e dei corsi d'acqua montani e possono essere definite come una "*disciplina concernente le opere, le regole per costruirle ed il modo di impiegarle per eliminare le cause o contrastare gli effetti dei fenomeni alluvionali, dei processi erosivi e franosi, delle colate detritiche e fangose, e delle cadute di valanghe che avvengono nei bacini torrentizi*" Puglisi (2003a). Il percorso che questa disciplina ha fatto in oltre un secolo di vita e legato al progresso tecnico-scientifico illustrato nel paragrafo 2.1, le ha portate oggi a poter dare una risposta combinata sia alla tradizionale esigenza di sicurezza, sia alla più recente esigenza di tutela ambientale. In tale percorso rientra appieno l'Ingegneria Naturalistica nella sua accezione originaria, di utilizzo della vegetazione con finalità di stabilizzazione, come del resto risulta chiaramente da quanto scritto in precedenza circa l'origine della *Ingenieurbiologie.*
È quindi fondamentale riconoscere che, così come in passato le tecniche che utilizzavano la vegetazione non rappresentavano da sole le SIF come disciplina, oggi l'Ingegneria naturalistica non esaurisce e non può sostituire le SIF, come invece sembra essere avvenuto in una parte della manualistica professionale e nella mente di molti tecnici.
È tuttavia vero che è altrettanto scorretto affermare che l'Ingegneria Naturalistica è solo una porzione delle Sistemazioni Idraulico Forestali, ma occorre riconoscere che queste tecniche possono essere efficacemente utilizzate anche in altre discipline, con finalità paesaggistiche, naturalistiche e di mitigazione degli impatti ambientali.
L'elemento cruciale per una corretta e moderna applicazione di queste tecniche risiede da un parte nel mantenere ben chiara la finalità dell'intervento (*Lebendbau* = costruzioni vive */Ingenieurbiologie* = costruzioni vive per stabilizzare), dall'altra occorre sviluppare schemi di calcolo a supporto della progettazione. In entrambi i casi le Sistemazioni Idraulico Forestali hanno dimostrato di essere in grado di fornire un contributo determinante.

6 Conclusioni

Si può innanzitutto affermare che i principi che stanno alla base delle Sistemazioni Idraulico Forestali sono ancora attuali e che, alla luce delle più recenti acquisizioni tecnico-scientifiche, queste devono dare un contributo fondamentale alla messa in sicurezza del territorio montano.

In particolare, le conoscenze relative alla fluviomorfologia dei corsi d'acqua montani forniscono una serie di strumenti che consentono di affrontare in modo innovativo la necessità di contemperare le esigenze di sicurezza idraulica con quelle di tutela e salvaguardia dell'ambiente. La ricostruzione morfologica degli alvei montani rappresenta l'esemplificazione più concreta e compiuta di tale capacità.
In secondo luogo, la medesima esigenza di combinare sicurezza e qualità ambientale, può essere ottenuta tornando a considerare i boschi quali strumenti indispensabili per garantire l'assetto idrogeologico dei territori montani. Rispetto al passato siamo oggi in grado di quantificarne l'efficacia, seppure ancora in maniera parziale e con tutti i limiti dati dalla grande variabilità presente in natura. La minor onerosità del mantenimento e del potenziamento della funzione protettiva dei boschi rispetto ai soli interventi strutturali, inoltre, è ormai dimostrata in diversi paesi dell'arco alpino. Tornare a considerare il bosco e gli interventi più prettamente ingegneristici con pari dignità nel raggiungimento degli obiettivi messa in di sicurezza del territorio montano equivale a rivalutare l'essenza stessa delle Sistemazioni Idraulico Forestali che su tale binomio si sono appunto fondate.
Infine, l'utilizzo delle tecniche di ingegneria naturalistica in maniera rigorosa dal punto di vista metodologico e progettuale anziché in maniera palliativa per ingentilire gli interventi, costituisce delle Sistemazioni Idraulico Forestali.

7 Bibliografia

AA.VV. (2006) Selvicoltura nelle foreste di protezione - Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e Valle d'Aosta, Regione Piemonte, Compagnia delle foreste, Arezzo.

Abrahams A. D., Li G., Atkinson J. F. (1995) Step-pool streams: Adjustment to maximum flow resistance, Water Resources Research, vol. 31, 2593-2602.

A.I.N. (1990) Dibattito: <<bioingegneria>> una definizione controversa, Acer, 6, 4.

van Beek, H. (2002) Assessment of the influence of changes in land use and climate on landslide activity in a Mediterranean environment, PhD thesis, Utrecht University, http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2003-0205-095231/inhoud.htm.

Benedetti, G. (1997) Analisi teorica e sperimentale del funzionamento delle briglie aperte, Dendronatura, 2(18), 53-65.

Benini, G. (2000) Sistemazioni idraulico-forestali, Utet, Torino.

Berger, F. (2004) Forest interrelation efficiency of the protective function of mountain forest against rockfalls – Final Report, http://rockfor.grenoble.cemagref.fr/.

Berger, F., Renaud, J. P. (1994) Stabilité et fonction de protection des forêts de montagne dans les Alpes du nord. L'exemple de la forêt domaniale de Rioupéroux (Isère), Revue Forestière Française, 56, 359–374.

Berger, F., Chauvin, C. (1996) Cartographie des fonctions de protection de la forêt de montagne: appréciation des potentialités d'avalanches sous couvert forestier, Revue de Géographie de Lyon, 71, 137–145.

Berger, F., Rey, F. (2004) Mountain Protection Forests against Natural Hazards and Risks: New French Developments by Integrating Forests in Risk Zoning, Natural Hazards, 33, 395–404.

Berger, F., Liévois, J., Weinmeister, H.W. (2000) La gestion du milieu naturel dans une optique de lutte contre les risques naturels, In: Proc. Conference IDNDR 'la prévention des catastrophes naturelles, gestion des territoires et développement durable', Paris, France, 177–183.

Berger, F., Quetel, C., Dorren, L.K.A. (2002) Forest: a natural protection mean against rockfalls, but with which efficiency?, International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim, Conference Proceedings, vol. 2, Matsumoto, Japan, pp. 815– 826.

Bieniawski, Z.T. (1979) Rock mechanics design in mining and tunneling, A.A. Balkema, Rotterdam, Olanda, 272 pp.

Billi, P. (1994) Morfologia dei corsi d'acqua, Verde Ambiente, 5, pp. 61-70.

Bischetti, G.B. (2003) Il ruolo della vegetazione nella stabilità dei versanti, Quaderni della scuola d'ingegneria naturalistica, Consorzio Parco Monte Barro. Lecco

Bischetti, G.B., Speziali, B., Zocco,A (2002) Effetto di un bosco di faggio sulla stabilità dei versanti, Convegno Nazionale La Difesa della Montagna, 11-12 dicembre 2002.

Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali B., Vitali B., Vullo P., Zocco A. (2005) Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy), Plant and Soil, 278, pp. 11-22.

Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Epis, T., Morlotti, E. (2009) Root Cohesion of forest species in the Italian Alps, Plant and Soil. DOI 10.1007/s11104-009-9941-0.

Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Epis, T., Morlotti, E., Spelta E., Vergani C. (2010) Progetto SISIFO – Rapporto Finale, Dipartimento di Ingegneria Agraria dell'Università degli Studi di Milano, giugno 2010.

Borga, M., Dalla Fontana, G., Cazorzi, F. (2002) Analysis of topographic and climatic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index, J. Hydrol., 2002, 268(1–4), 56–71.

Brang, P. (2001) Resistance and elasticity: promising concepts for the management of protection forests in the European Alps, Forest Ecology and Management, 145, 107–117.

Brauner, M., Weinmeister, W., Agner, P., Vospernikb, S., Hoeslea, B. (2005) Forest management decision support for evaluating forest protection effects against rockfall, Forest Ecology and Management, 207, 75–85.

Brookes, A. (1996) River restoration experience in northern Europe", Perspective on river channel restoration", in A. Brookes e D. Shields jr (a cura di), River channel restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects, Wiley, Chichester, England, pp. 233-267.

Bray, D. G. (1979) Estimating average velocity in gravel bed rivers", *Journal of Hydraulisc Division*, ASCE, 105(HY9), 1103-1122.

Calamini G., Falciai M., Silvani G. (1978) Ricerca sul pendio di stabilimento di alcuni torrenti della Val di Sieve e dell'Alto Arno, *L'Italia Forestale e Montana*, 33(6), 257-267.

Cammeraat, E., van Beek, R., Kooijman, A. (2005) Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain, Plant and Soil 278,135-147.

Cerato, M. (1995) Sulla progettazione e il funzionamento delle briglie filtranti: alcune esperienze in provincia di Trento, L'Italia Forestale e Montana, 2, 147-169.

Chang, H.H. (1980) Geometry of gravel streams, Journal of the Hydraulic Division American Society of Civil Engineers, 106, HY9, 1443-1456.

Coppin, N.J., Richards, I.G. (1990) Use of Vegetation in Civil Engineering, Butterworths: London.

Cornelini, P. (2006) Le origini storiche, in: Regione Lazio, Manuale di Ingegneria Naturalistica – sistemazione dei versanti, cap. 7.

Cotler, H., Ortega-Larrocea, M.P. (2006) Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico, Catena 65, 107-117.

CNR-GNDCI (2007) Progetto AVI Censimento delle aree italiane storicamente vulnerate da calamità geologiche ed idrauliche, http://avi.gndci.cnr.it/.

D'Agostino, V. (1996) La rinaturalizzazione dei torrenti montani . Quaderni del Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università di Padova, 33, 7 pp.

D'Agostino, V. (2001) Elementi per la progettazione delle briglie aperte, Atti del Corso: "Rischi torrentizi", Università Europea d'Estate sui Rischi naturali, Serre Chevalier – Hautes Alpes, modulo 4.

D'Agostino, V. (2003) Dinamica dei corsi d'acqua ed interventi di ricostruzione morfologica". In Bischetti G., D'Agostino V., Baldo G., Goltara A., Boz B., Quaderni - Corsi d'acqua e aree di sponda: per un progetto di valorizzazione - Tecniche di intervento sui corsi d'acqua e sulle aree spondali, a cura di Lelio Pagani. Bergamo: Bergamo - University Press - Edizioni Sestante, 21-34 (ISBN: 88-87445-43-5).

D'Agostino, V., Lenzi, M.A. (1998) La massimizzazione della resistenza al flusso nei torrenti con morfologia a step pool. Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, vol I, 281 – 293.

D'Agostino, V. (2006a) Le opere di idraulica torrentizia per il controllo dei sedimenti. Quaderni di Idronomia Montana, 26, Le sistemazioni idraulico-forestali per la difesa del territorio (Nuova Bios), 231-250.

D'Agostino, V. (2006b) Principi di dimensionamento delle opere di protezione dai debris flow". In "F.R.A.N.E. Foreste: Recupero Ambientale Naturalistico ed Ecologico – Linee Guida per la mitigazione del rischio idrogeologico", Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia – Servizio territorio montano e manutenzioni, cap.24, 301-314.

D'Agostino, V., Cerat,o M. (2004) Una revisione critica del concetto di pendenza di correzione, 10° Congresso Interpraevent, 24-27 Maggio 2004, Riva del Garda, vol. 1, III/69-III/80 (ISBN/ISSN: 3-90 11 64-06-05).

D'Agostino, V., Vianello ,A. (2004) Analisi di campo sulla larghezza a piene rive in un torrente delle Dolomiti, Rivista di Ingegneria Agraria, vol. 4, pp. 53.

D'Agostino, V., Vianello, A. (2005) Identificazione morfodinamica del reticolo idrografico: integrazione fra rilievi di campo e tecniche GIS, Quaderni di Idronomia Montana, 24, Recenti acquisizioni nel settore delle Sistemazioni Idraulico-Forestali, 271-290, Bios, Cosenza (ISBN 88-7740-387-X).

D'Agostino, V., Sonda, D., Lenzi, M.A. (2000) La strutturazione fluvio-morfologica dei corsi d'acqua montani, Quaderni di Idronomia Montana, 19, Bios, Cosenza, 87-102.

D'Agostino, V., Dalla Fontana, G., Ferro,V., Milano, V., Pagliara, S. (2004) Briglie aperte". In: "Opere di sistemazione idraulico-forestale a basso impatto ambientale, Cap.5, McGraw-Hill, Milano, 283-384.

Demontzey, P. (1882) Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes, Paris, J. Rothschild, Editeur, 1882, Deuxième édition, revue et augmentée Rothschild, Parigi, 528 pp.

De Horatiis M. (1930), Istituzioni di Idronomia Montana, Tip. Mari Ricci, Firenze

Della Lucia, D., Fattorelli, S., Nardin, D., Provasi, C., Tomasetti, R. (1980) Ricerca sulla determinazione della pendenza di compensazione nei torrenti del trentino, Provincia Autonoma di Trento, Azienda Speciale di Sistemazione Montana.

Di Fidio, M., Bischetti, G.B. (2007) Le sistemazioni idraulico-forestali nell'arco alpino: aspetti tecnico - normativi, Quaderni di Idronomia montana, 27, 323-338.

Di Fidio, M. (2007). I boschi protettivi in Austria – Relazione introduttiva. Università degli studi di Milano – Istituto d'Idraulica agraria. Milano.

Di Fidio, M. (2008) Considerazioni sullo sviluppo storico dell'ingegneria naturalistica in Germania e Austria, Istituto di Idraulica Agraria - Università degli Studi di Milano.

Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R., McKean, J. (1993) Analysis of erosion thresholds, channel networks and landscape morphology using a digital terrain model, J. Geol., 1993, 101, 161–180.

Dietrich, W.E., Montgomery, D.R. (1998) SHALSTAB: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential, http: //socrates.berkeley.edu/geomorph/shalstab.

Dietrich, W. E., Dunne, T. (1978) Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain, Z. Geomorphology, 29, 191 – 206.

Doche, O. (1997) Etude expérimentale de chutes de blocs en forêt. Cemagref/Institut des Sciences et Techniques de Grenoble (ISTG), Cemagref doc. 97/0898, 130 pp.

Dorren, L.K.A. and Seijmonsbergen, A.C. (2003) Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. Geomorphology, 56(1-2): 49-64.

Dorren, L.K.A, Berger, F., Imeson, A.C, Maier, B., Rey, F. (2004a) Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps, Forest Ecology and Management, 195, 165–176

Dorren, L.K.A., Maier, B., Putters, U.S., Seijmonsbergen, A.C., (2004b) Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. Geomorphology, 57(3-4), 151-167.

Dorren, L.K.A., Berger, F., le Hir, C., Mermin, E., Tardif, P. (2005) Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests, Forest Ecology and Management, 215, 183–195.

Dotta, A., Motta, R. (2000) Boschi di coniferi montani – indirizzi selvicolturali. Assessorato Economia Montana e Foreste. Regione Piemonte, Blu Edizioni, Paveragno-Cuneo.

Dragogna, G. (1968) Il contributo dell'ingegneria biologica alla difesa del suolo, Quaderni della Mendola, 2, 82-88.

Dragogna, G. (1970) Ingegneria biologica applicata: i risultati di nuovi metodi di consolidamento del terreno, Il Frantoio, 42-60

Duan, J., Grant, G.E. (2000) Shallow landslide delineation for steep forest watersheds based on topographic attributes and probability analysis, In: Wilson JP, Gallant JC (Eds.), Terrain Analysis: Principles and Applications, 2000, Wiley & Sons, New York, 311-329.

Ferro, V. (2006). La sistemazione dei bacini idrografici – seconda edizione, Ed. McGraw-Hill, Milano, 848 pp.

Ferro V., Giordano G., Iovino M. (1996) Approfondimenti teorici e verifiche sperimentali del criterio del moto incipiente per la valutazione della pendenza di sistemazione dell'alveo, Scritti dedicati a Giovanni Tournon, Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, 143-156.

Florineth, F. (2005) Un'antica moderna disciplina, in: Album di ingegneria naturalistica, il Verde Editoriale, Milano, 2005, 8-9.

Frehner, M., Wasser, B., Schwitter R. (2005). Continuità nel bosco di protezione e controllo dell'efficacia. Istruzioni per le cure nei boschi con funzione protettiva. Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio (UFAFP), CH-3003 Berna, 564 pp.

Gras, S. (1857) Etudes sur le torrents des Alpes,

Gsteiger, P. (1989) Steinschlag Wald Relief Empirische Grundlagen zur Steinschlagmodellierung. Diploma Thesis Geography, Department of Geography, Università di Berna.

Haltiner, J.P., Kondolf, G.M., P. B. (1996) Restoration approach in California, in A. Brookes e D. Shields jr (a cura di), River channel restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects, Wiley, Chichester, England, 291-329.

Hassenteufel, W. (1954) Die bedeutung der pflanzensoziologie für die wildbach und lawinenverbaung festchirft aichinger, I Bd., Sonderdruck der "Angerwandten Pflanzensoziologie".

Hegg, C., Kienholz, H., (1995) Determining paths of gravity-driven slope processes - The 'Vector Tree Model'. In, Carrara, A. and Guzetti, F., editors, Geographic Information Systems in assessing natural hazards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 79-92.

Hétu, B., Gray, J.T. (2000) Effects of environmental change on scree slope development throughout the postglacial period in the Chic-Choc Mountains in the northern Gaspé Peninsula, Québec. Geomorphology, 32(3), 335-355.

Holub, M. (2008) Counter measures against extremely rapid mass movements, IRASMOS Symposium 2008, 15-16 may 2008, Davos, Switzerland.

IRASMOS (2008) Deliverable D2.1 Countermeasures State of the art and description.

Ikeya, H. (1989) Debris flow and its countermeasures in Japan. Bull. of the International Association of Engineering Geology, 40, 15-33.

Jahn, J. (1988) Deforestation and Rockfall. International Symposion Interpraevent 1988 – Graz, Tagungspuplikation, Band 1, S 185-198, Villach

Keller, E.A., Melhorn,W.N. (1978) Rhythmic spacing and origin of pools and riffles, Bulletin of the Geological Society of America, 89, 723-730.

Kienholz, H., Mani, P. (1994) Assessment of geomorphic hazards and priorities for forest management on the Rigi north face, Switzerland. Mountain Research and Development 14(4), 321-328.

von Kraudener, A. (1951) "Ingenieurbiologie", Verlag, München.

Lachat, B. (1988) Les vetaux dans la construction et la protection des sols, Journée d'étude de l'OCF "Les aménagements extérieurs', 14 juin 1988 – EPFL.

Lachat, B. (1996) De l'âge de la pierre à l'âge du vert, 24e Journées de l'hydraulique, congrés de la sociéteé hydrotechnique de France, Paris, 18-20 septembre 1996.

Lane, E.W. (1955) The importance of fluvial morphology in hydraulic engineeering, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 81, pp. 1-17.

Langenegger, H. (1979) Eine Checkliste für Wald-stabilität im Gebirgswald, in *Schweiz. Z. Forstwes*, n.130, 640-46.

Le Hir, C., Berger, F., Dorren, L.K.A., Quétel, C., (2004) Forest: a natural means of protection against rockfall, but how to reach sustainable mitigation? Advantages and limitations of combining rockfall models taking the forest into account. International Congress Interpraevent Trento 2004.

Lenzi, M. A., D'Agostino, V., Sonda, D. (2000) Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti. Criteri metodologici ed esecutivi, Ed. Bios. Cosenza, 209 pp.

Leopold, L.B. (1994) A View of the River, Harvard University Press, Cambridge, England.

Leopold, L.B., Wolman, M.G. (1957) River channels patterns – braided, meandering and straight, United States Geological Survey Professional Paper, 282 B, 39-85.

Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P. (1964) Fluvial processes in Geomorphology, W.H. Freeman & Company, San Francisco, USA. (ristampato da Dover Pubblication Inc., New York, 1995).

Lewis, L., Salisbury, S.L., Hagen, S. (2001) Soil bioengineering for upland slope stabilization, Research Report, Research Project WA-RD 491.1, 2001.

Lingua, E., Collatin, A., Haudemand, J.C. (2003) Individuazione ed analisi delle foreste di protezione diretta (FPD) nel comune di Cogne (Valle d'Aosta). Atti della 7a Conferenza Nazionale ASITA: "L'informazione territoriale e la dimensione tempo". Verona, 1325-1330.

Luciani, M. (2008) Le iniziative della direzione generale per la difesa del suolo nel settore dell'Ingegneria naturalistica, Quaderni di Idronomia montana, 28/3

Medico, J. (2000) Canton du valais: méthode de classification des forêt. In: Proc. Conference IDNDR 'la prévention des catastrophes naturelles, gestion des territoires et développement durable', Paris, France, 195–197.

Meißl, G. (1998) Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispeile zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Beierischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geografischen Studien 28, Ph.D. Thesis, Universität Innsbruck, Innsbruck.

Meloni, F., Lingua, E., Motta, R. (2005) Utilizzo di strumenti GIS per l'individuazione automatica delle foreste di protezione diretta in Valle d'Aosta. Atti della 9a Conferenza Nazionale ASITA. Catania, 15-18 Novembre,1499-1504.

Montgomery, D.R., Dietrich, W.E. (1994) A physically based model for the topographic control on the shallow landsliding, Water Resources Research, 30, 1153–1171.

Montgomery, D. R., Dietrich, W. E. (1989) Source areas, drainage density, and channel initiation, Water Resources Research, 25(8), 1907 – 1918.

Montgomery, D. R., Buffington, J. M. (1997) Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of American Bulletin, 109(5) 596 - 611.

Motta, R., Haudemand, J.C. (2000) Protective forests and silvicultural stability. An example of planning in the Aosta valley, Mountain Res. Dev., 20, 74–81.

Motta, R., Actis, F., Collatin, A., Dovigo, L., Haudemand, J.C., Lingua, E. (2003) Selvicoltura e foreste di protezione diretta nel comune di Cogne (Valle d'Aosta), Sherwood, 94, 1-7.

Nanson, G.C., Croke, J.C. (1992) A genetic classificastion of floodplains, Geomorphology, 4, 459-486.

Nielsen, M.B. (1996) Lowland stream restoration in Denmark, in A. Brookes e D. Shields jr (a cura di), River channel restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects, Wiley, Chichester, England, 269-289.

Normaniza, O.H., Faisal, A., Barakbah, S.S. (2008) Engineering properties of Leucaena leucocephala for prevention of slope failure, Ecological engineering, 32, 215–221.

Norris, J. (2005) Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England, Plant and Soil, 278, 43–53.

Office québécois de la langue français (2001) Le grand dictionnaire terminologique, Montreal, Canada, 2001.

Pack, R.T., Tarboton, D. G., Godwin, C.N.(1998) The SINMAP Approach to terrain Stability Mapping, 8th Congress of the international association of engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada, 21-25 September 1998.

PAT Servizio Bacini Montani (2002) La difesa del territorio montano fra tradizione e innovazione. 1° Bilancio Sociale di un anno di lavoro, Trento, 2002.

Perret, S., Dolf, F., Kienholz, H. (2004) Rockfalls into forests: analysis and simulation of rockfall trajectories—considerations with respect to mountainous forests in Switzerland. Landslides, 1(2), 123–130

Pettifer, G.S., Fookes, P.G. (1994) Excavatibility of Rock: The Graphical Method. Quarterly Journal of Engineering Geology, 27, 145-164.

Piccioli, F. (1887) Sui rimboschimenti eseguiti in Francia: Rappporto, 1887, Barbèra, Firenze, 137 pp.

Plonner, A., Sonser, T. (2000) Natural hazard zoning as an important basement of the evaluation of forest protection function in Austria, In: Proc. Conference IDNDR 'la prévention des catastrophes naturelles, gestion des territoires et développement durable', Paris, France, 417–421.

Pollen, N., Simon, A. (2005) Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on streambank stability using a fiber bundle model, Water Resources Research, 41 W07025 doi:10.1029/2004WR003801.

Prückner, R. (1965) Die technik der lebendverbaung, Österr. Agreverlag, Vienna.

Puglisi, S. (1996) Modelli sistematori per la correzione dei torrenti collinari. Atti del Corso "Sviluppo e Gestione dei Bacini Idrografici", S. Fattorelli, F. Fideli e D. Nardin (eds.), Cuadernos IILA, Serie Cooperacion, 6, 49-59.

Puglisi, S. (2003a) Attualità delle sistemazioni idraulico-forestali in un mondo che cambia, Annali della Accademia Italiana di Scienze Forestali, Vol. LI.

Puglisi, S. (2003b) Profilo delle sistemazioni idraulico-forestali, in Bilancio Sociale 2003, PAT Servizio Sistemazione Montana.

Puglisi, S. (2006) Le sistemazioni idraulico-forestali: dalla correzione dei torrenti alla ricostruzione morfologica degli alvei, Quaderni di Idronomia Montana, 2006, 25, 21-62.

Roering, J.J., Schmidt, K.M., Stock, J.D. et al. (2003), Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range, Can Geotech J 40:237-253.

Rosgen, D. L. (1994) A Classification of Natural Rivers, Catena, 22, 169-199.

Rouiller, J.D., Jaboyedoff, M., Marro, C., Philippossian, F., Mamin, M.(1998) Pentes instables dans le Pennique valaisan, Matterock: une m´ethodologie d'auscultation des falaises et ded´etection des ´eboulements majeurs potentiels. Rapport final PNR31, VDF, Zurich, 239, 1998.

Sakals, M.E., Innes, J.L.,Wilford, D.J., Sidle, R.C., Grant, G.E. (2006) The role of forests in reducing hydrogeomorphic hazards, For. Snow Landsc. Res. 80, 1: 11–22

Schiechtl, H.M. (1973) Sicherungsarbeitem Landschaftsbau, Verlag G.W., Callwei, Monaco, Germania.

Schiechtl, H.M., Stern, R., (1992) Manuale delle opere in terra, (Naturnaher Erdbau mit ingenieurbiologischen Bauweisen, Osterreichischer Agrarverlag, Wien), a cura di Lorenzo Dibona, Tipografia Castaldi, Feltre.

Schiechtl, H.M., Stern, R., (1994) Ingegneria naturalistica - manuale delle costruzioni idrauliche (Handbuch fur naturnahen Wasserbau, Osterreichischer Agrarverlag, Wien), a cura di Lorenzo Dibona, ed. Arca Trento.

Schmidt. K.M., Roering, J.J., Stock, J.D. et al. (2001) The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range, Can Geotech J., 38, 995-1024.

Schönenberger, W. (1998) Adapted Silvicolture in Mountain Forests in Switzerland, in IUFRO Inter-Divisional Seoul Conference, Seul 1998, 142-147.

Schönenberger, W. (2000) Silvicultural problems in subalpine forests in the Alps. In: Price M.F., Butt N., (Eds.), Forest in sustainable Mountain development: a state of knowledge report for 2000. CABI, Wallinford, 197-203.

von Seckendorff, A. (1880) Studien über die Arbeiten der Wiederbewaldung und Berasung der Gebirge, von Oberforstmeister P. Demontzey, 1880

Seifert, A. (1965) Naturferner und wasserbau, Montana Verlag, Zurigo, Svizzera.

Selby, M. J. (1993) Hillslope materials and processes, second edition, Oxford University Press, Oxford, 451, 1993.

Sidle, R.C., Ochiai, H. (2006) Landslides, Processes, Prediction, and Land Use Water Resources Monograph 18, AGU, Washington D.C., USA.

Simoni S., Zanotti F., Bertoldi G., Rigon R. (2008) Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS. Hydrol. Proc., 2008, 22(4), 532–545.

Stokes, A., Salin, F., Kokutse, A.D., Berthier, S., Jeannin, H., Mochan, S., Dorren, L.K.A., Kokutse, N., Ghani, M.A., Fourcaud, T., (2005). Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps, Plant Soil, 278, 107-117.

Sun, H.L., Li, S.H., Xiong, W.L. et al. (2008) Influence of slope on root system anchorage of Pinus yunnanensis, Ecological engineering 32, 60–67.

Thiery, E. (1914) Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement, Béranger, Paris.

Tornani, I., Sanjust di Teulada, E., Pasini, P., D'Urso, F. (1895) Sulla correzione dei torrenti nella Svizzera, nella Francia e nella Carinzia, Biblioteca di idronomia, ristampa anastatica ed. Nuova BIOS, Cosenza, 2007.

Tosi, M. (2007) Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy), Geomorphology 87, 268 – 283.

Valentini, C. (1912) Sistemazione dei torrenti e dei bacini montani, Hoepli, Milano.

Van den Berg J.H. (1995) Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers, Geomorphology, 12, 259-279.

Vianello, A., Bischetti, G.B., D'agostino, V. (2005) Sull'invarianza delle morfologie a step pool", Quaderni di Idronomia Montana, 25, Riqualificazione ambientale dei corsi d'acqua, 175-189, Bios, Cosenza.

Viviani, V., Discorso al serenissimo Cosimo III Granduca di Toscana intorno al difendersi da' riempimenti e dalle corrosioni dei fiumi, Firenze, 1687, Italia.

Vospernik, S., (2002) Predicting forest growth against rockfall. Final report, Institute of Forest Growth and Yield, University of Agricultural Sciences, Vienna.

Waldron, L.J. (1977) The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil, Doil Science Society of America Journal, 41, 843-849.

Williams, G.P. (1983) Paleohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environment, Geografiska Annaler, 65A, 227-244.

Wu, T.H. (1995) Slope stabilization, in: Morgan, R.P.C. Rickson,R.J. (1995) Slope stabilization and erosion control, E&FN Spon, Londra, UK,221-264.

Wu, T.H. McKinnel, W.P., Swanston, D.N. (1979) Strength of tree roots and landslides on prince of Wales Island, Alaska, Canadian Geotechnical Journal, 16, 19-33.

Yalin, M.S. (1992) River mechanics, Pergamon, Oxford, England.

Yang, C.T., Song, C.S.S. (1979) Theory of minimum rate of energy dissipation, Journal of the Hydraulic Division American Society of Civil Engineers, 105, HY7, pp. 769-784.

Zinggeler, A., Krummenacher, B., Kienholz, H. (1991) Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern. Berichte und Forschungen 3: Geographisches Institut der Universität Freiburg, 61-70.

RegioneLombardia

Agricoltura