

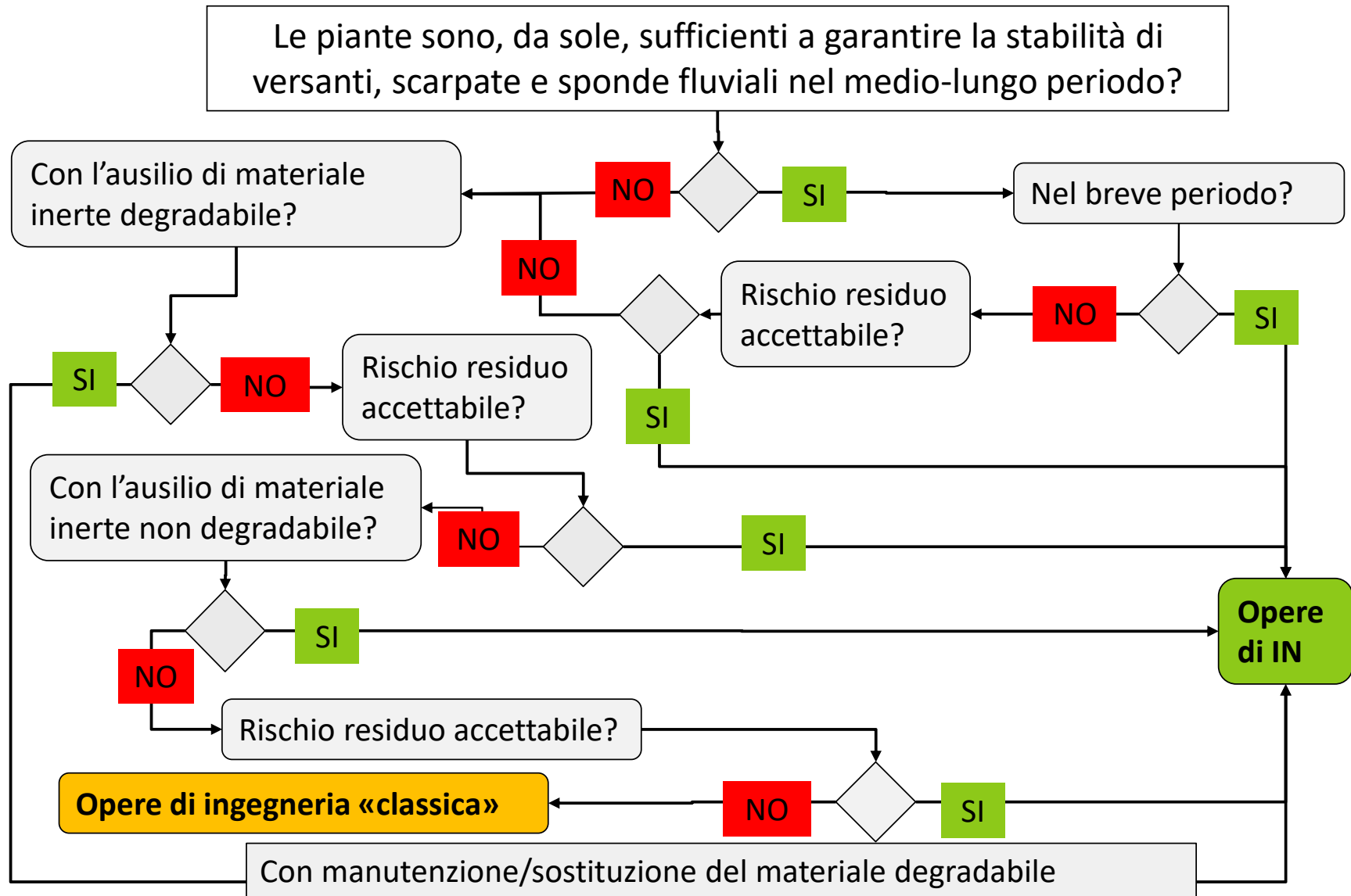
# La vegetazione nella modellazione geotecnica classica

Gian Battista Bischetti

*Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali*

*Università degli Studi di Milano*

bischetti@unimi.it



Come considerare la  
vegetazione nella  
modellistica geotecnica  
«classica»

Per valutare la stabilità di un versante occorre:

- caratterizzare il sito dal punto di vista geologico
- individuare il cinematismo di collasso potenziale o avvenuto
- caratterizzare il materiale dal punto di vista geotecnico
- determinare le pressioni neutre e le loro variazioni nel tempo
- scegliere il modello più adeguato

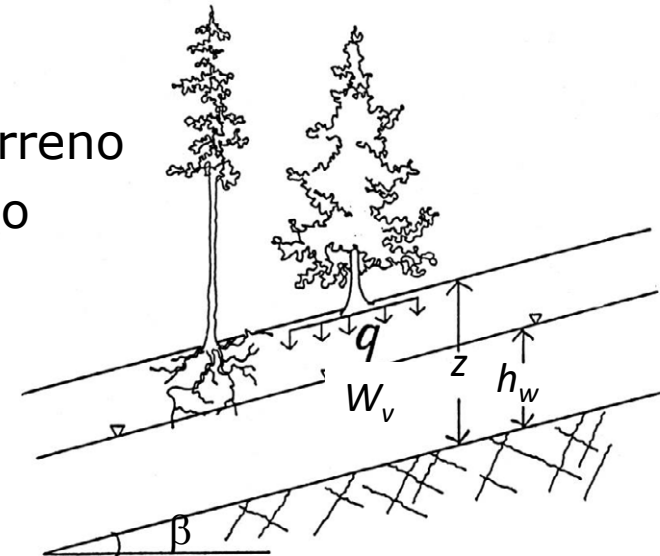
Modelli per la valutazione

- **metodi all'equilibrio limite**
- metodi agli elementi finiti
- metodi alle differenze finite

## FS con vegetazione (pendio indefinito)

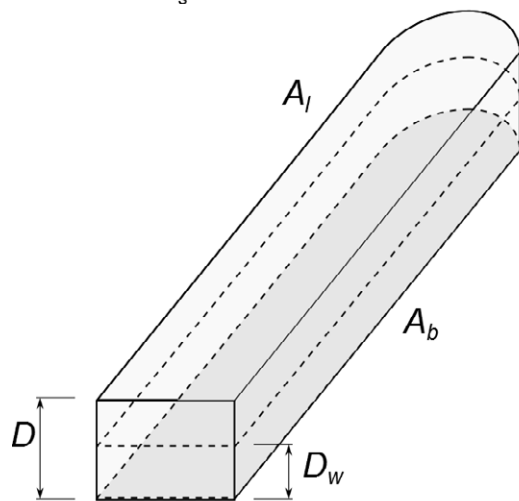
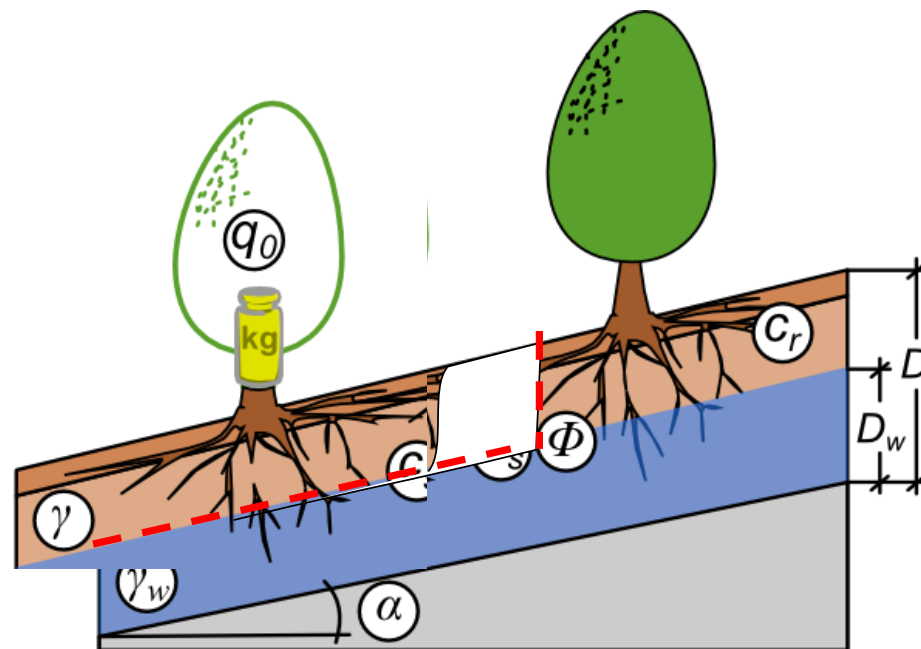
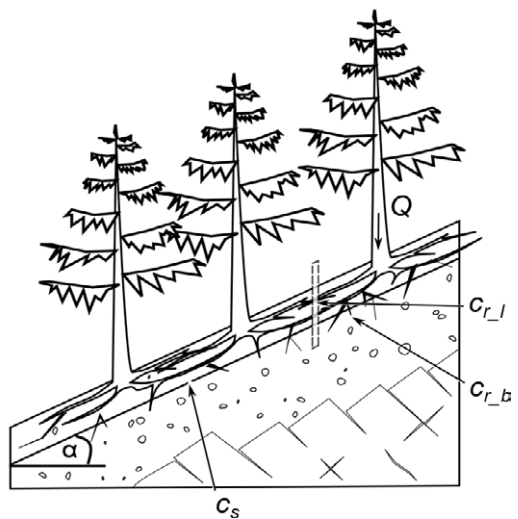
$$FS = \frac{(c' + c'_R) + \{[(\gamma z - \gamma_w h_w) + W_v] \cos^2 \beta + T \sin \theta \cos \beta\} \operatorname{tg} \phi'}{[(\gamma z + W_v) \operatorname{sen} \beta + D - T \cos \theta] \cos \beta}$$

- $c'$  coesione del terreno
- $\gamma$  peso specifico del terreno
- $\gamma_w$  peso specifico dell'acqua
- $\phi$  angolo di resistenza al taglio del terreno
- $z$  profondità del piano di scivolamento
- $h_w$  altezza dello strato saturo
- $\beta$  pendenza
- $c_R$  contributo della vegetazione
- $W_v$  sovraccarico del versante
- $D$  carico del vento
- $T$  ancoraggio con angolo  $\theta$

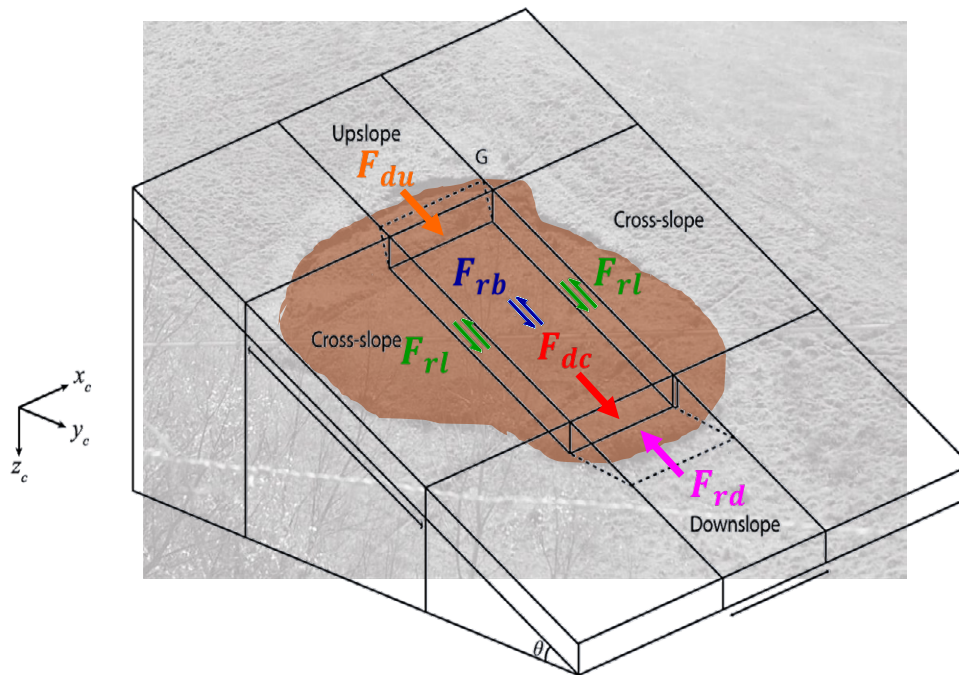


Modificato da Hammond, 1992

# Superiamo il pendio indefinito



# Modelli tridimensionali



$$FS = \frac{F_{rb} + 2 F_{rl} + F_{rd} - F_{du}}{F_{dc}}$$

## PARAMETRI:

- dimensione del blocco: larghezza ( $w$ ) and lunghezza ( $l$ );
- pendenza del blocco ( $\theta$ );
- parametri geotecnici: peso per unità di suolo ( $\gamma_s$ ); angolo di attrito interno ( $\phi'$ ); coesione efficace ( $c'$ );
- profondità ( $z$ );
- rinforzo radicale ( $C'_r$ );
- altezza della falda ( $m$ ).

$$F_{rb} = (C'_{rb} + (\gamma_s - \gamma_w m)z \cos^2 \theta \tan \phi') wl$$

$$F_{rl} = 0.5 K_0 (\gamma_s - \gamma_w m^2) lz^2 \cos \theta \tan \phi' + C'_{rl} lz \cos \theta$$

$$F_{rd} = 0.5 K_p z^2 (\gamma_s - \gamma_w m^2) w$$

$$F_{du} = 0.5 K_a z^2 (\gamma_s - \gamma_w m^2) w$$


$$F_{dc} = \gamma_s z w l \sin \theta \cos \theta$$

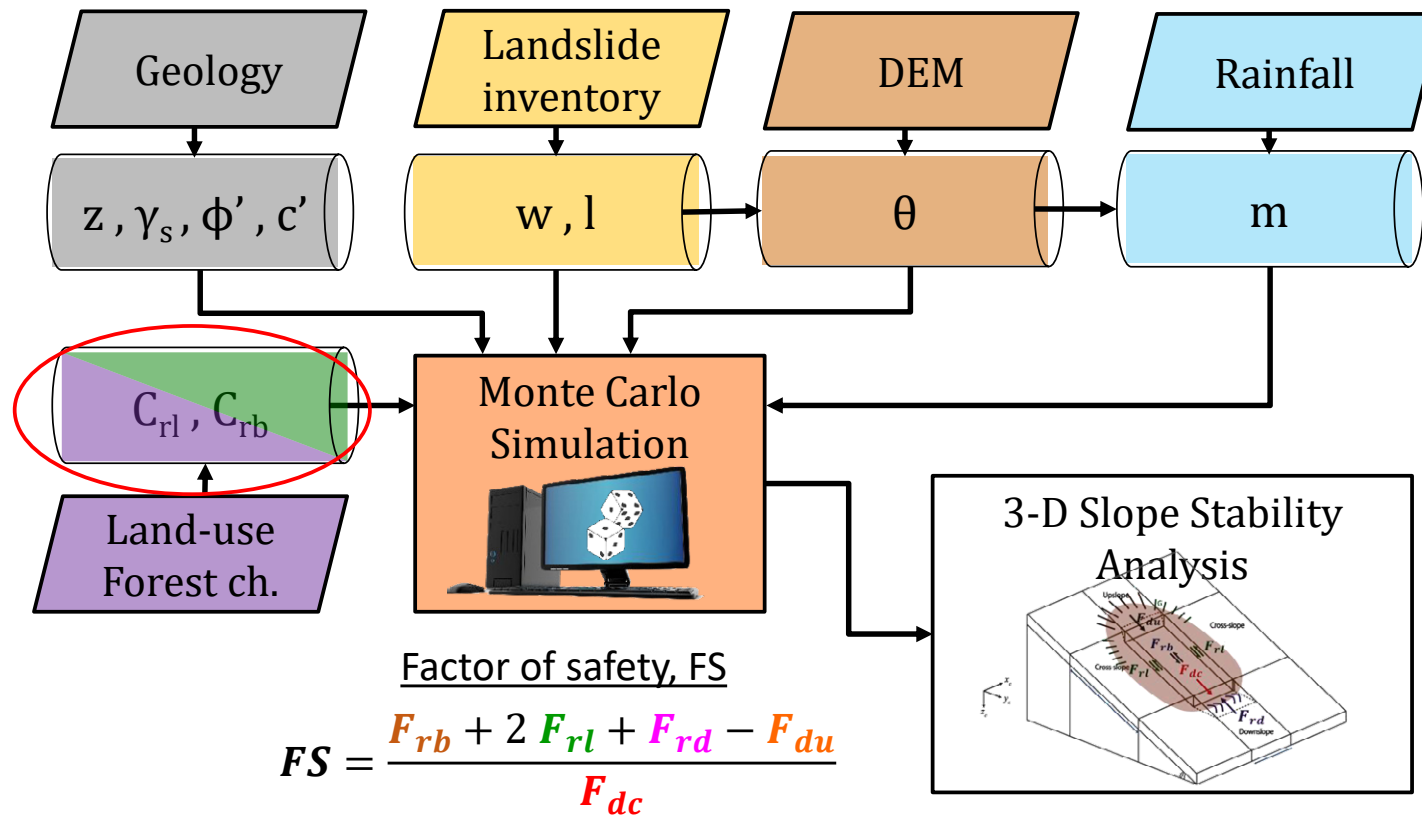
Cislaghi et al. 2017. Including root reinforcement variability in a probabilistic 3D stability model. Earth Surface Processes and Landforms 42, 1789–1806. <https://doi.org/10.1002/esp.4127>

# PRIMULA - PProbabilistic MULTidimensional shallow Landslide Analysis

EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS  
*Earth Surf. Process. Landforms* (2017)  
 Copyright © 2017 John Wiley & Sons, Ltd.  
 Published online in Wiley Online Library  
 (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/esp.4127

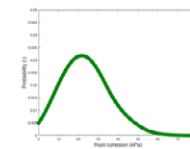
## Including root reinforcement variability in a probabilistic 3D stability model

Alessio Cislighi,<sup>1\*</sup>  Enrico Antonio Chiaradia<sup>1</sup> and Gian Battista Bischetti<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup> Department of Agricultural and Environmental Sciences (DiSAA), University of Milan, Milan, Italy  
<sup>2</sup> Centre of Applied Studies for the Sustainable Management and Protection of Mountain Areas (Ge.S.Di.Mont), University of Milan, EdololItaly

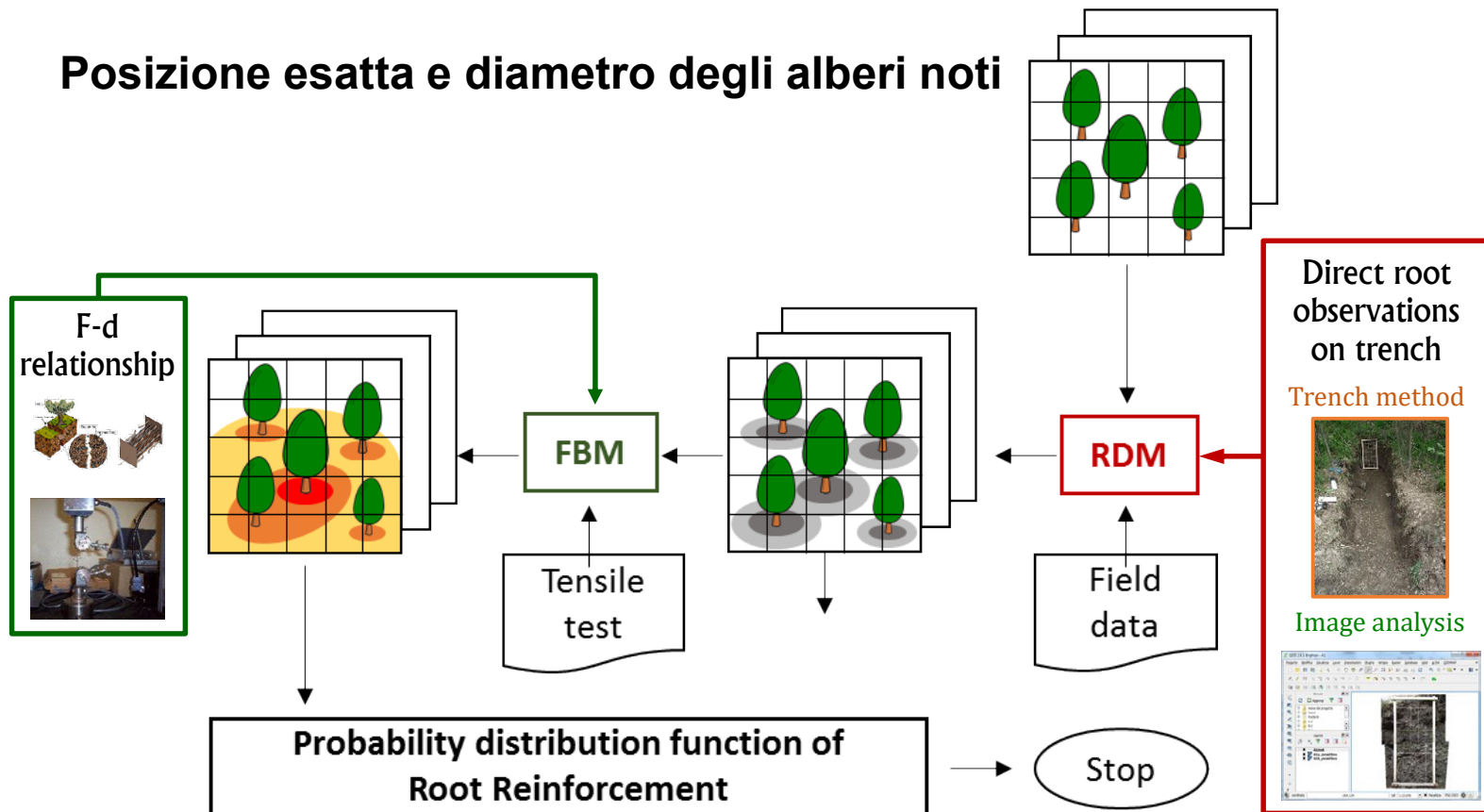




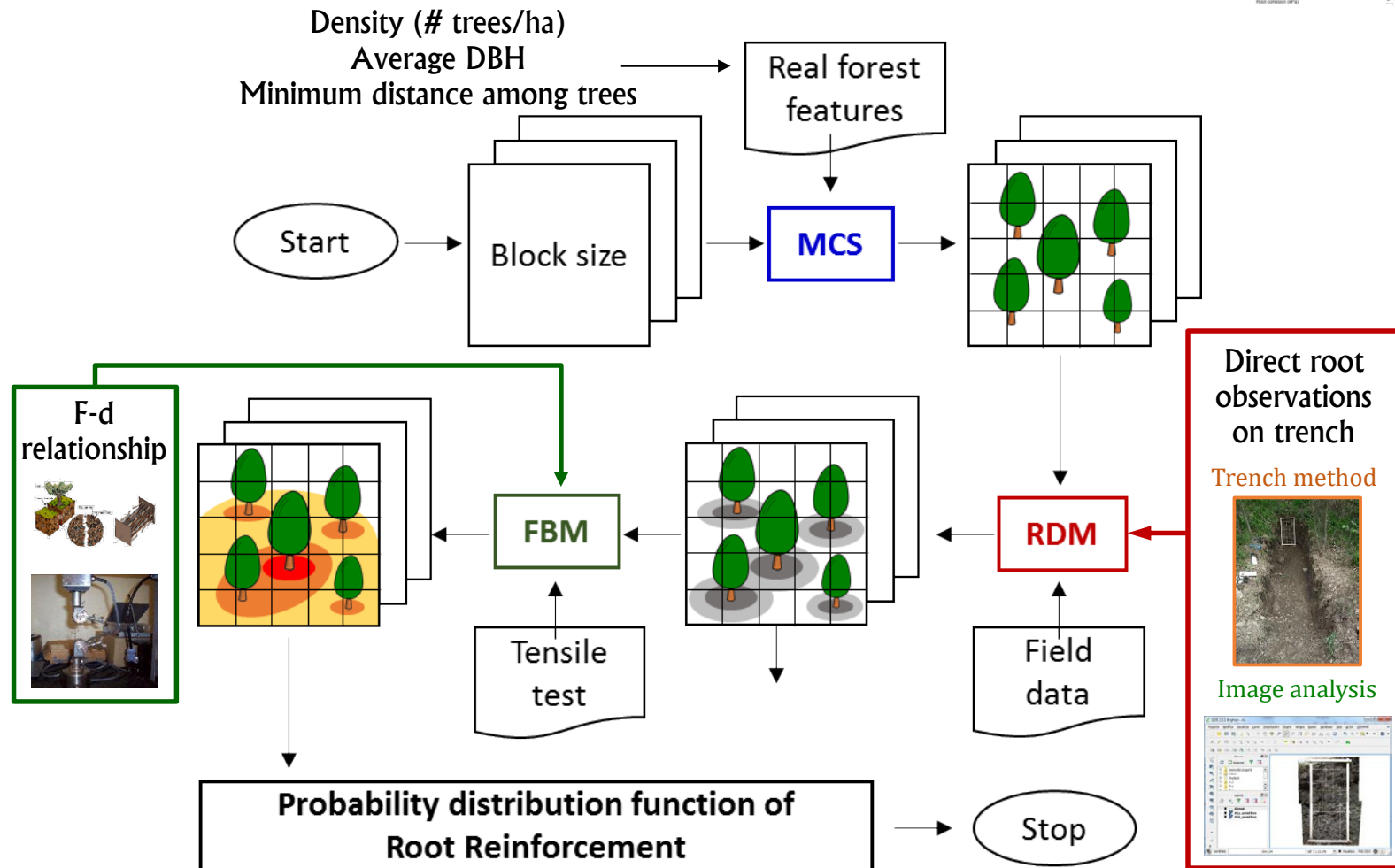
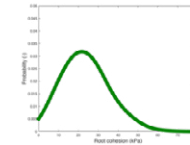
# How to evaluate the PDF of $C_r$ ? Prob-RR



Posizione esatta e diametro degli alberi noti



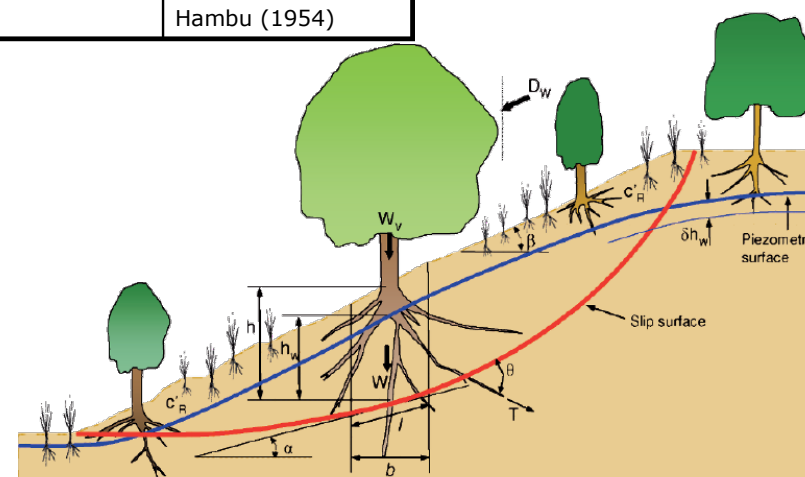
# How to evaluate the PDF of $C_r$ ? Prob-RR



valutazioni di  $C_r$

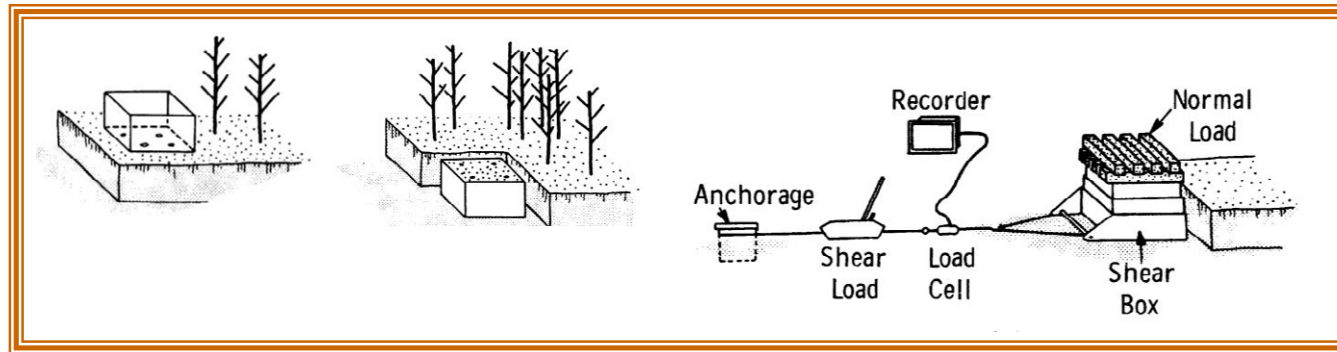
## $C_r$ da Back analysis su eventi avvenuti

Sup. rottura	metodo	Ipotesi	Riferimento
Planare	Pendio indefinito	Pendio uniforme illimitatamente lungo	Taylor (1948)
	Culmann	Superficie di rottura piana che si interseca con la base del pendio	Culmann (1966)
Piani che si intersecano	cuneo	Blocco singolo o blocchi scivolanti	Hoek-Bray (1981) NAVFAC (1982)
Circolare	Conci	Forze laterali sui duellati del concio uguali	Fellenius (1936)
	Cerchio di attrito	Risultante forze agenti su arco di rottura tangenti a un cerchio concentrico con $R \sin \phi$	Taylor (1948)
	Bishop	Sistema di forze interconco	Bishop (1955)
	Bishop mod.	Sistema semplificato di forze interconco	Bishop (1955)
	Spencer	Forze interconco parallele	Spencer (1967, 1981)
Irregolare	Morgsten-Price	Equazioni generali dell'equilibrio	Morgstein-Price (1965)
	Janbu	Considera le forze interconco	Hambu (1954)

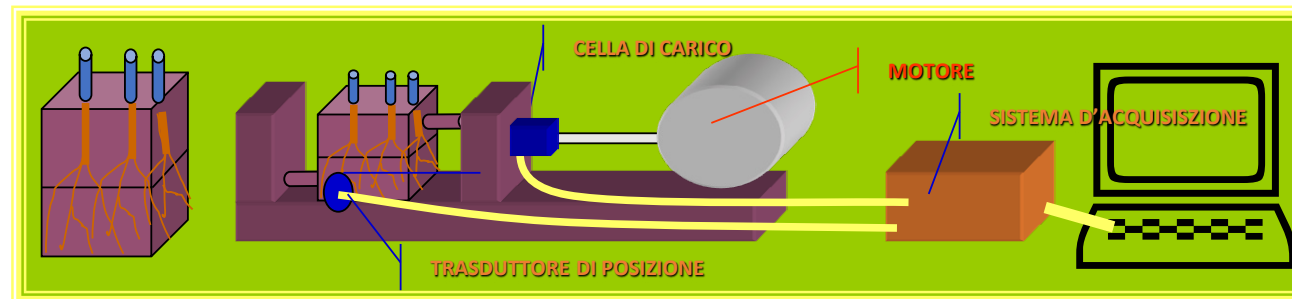


<b>Autore</b>	<b><math>C_r</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>ambito</b>
Swanston (1970)	3.4÷4.4	abete canadese e abete in Alaska (USA)
O'Loughlin (1974)	1.0÷3.0	conifere in British Columbia (Canada)
Buchanan e Savigny (1990)	1.6÷2.1	Prato, carici, arbusti e felci (USA)
	2.6÷3.0	ontano rosso, abete canadese, douglasia e cedro nello Stato di Washington (USA)
Sidle e Swanston (1982)	2.02	mirtillo in Alaska (USA)
O'Loughlin e Ziemer (1982)	3.3	foresta mista sempreverde in Nuova Zelanda
Gray e Meghan (1981)	10.3	conifere in Idaho (USA)
	2.8÷6.2	pino giallo, douglasia, abete Engelmann
Bischetti et al (2002b)	4.5÷6.5	latifoglie miste (nocciolo, faggio) in Valcuvia (Italia)

**IN SITO**



**IN LABORATORIO**





<b>Autore</b>	<b><math>C_r</math> [kN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>ambito</b>
<i>Prove di taglio in situ</i>		
Endo e Tsuruta (1969)	2.0÷12.0	vivaio di ontano (Giappone)
Abe e Iawamoto (1986)	1.0÷5.0	cedro giapponese (Giappone)
Ziemer (1981a)	3.0÷21.0	pino contorto in California (USA)
O'Loughlin e Ziemer (1982)	6.6	faggio in Nuova Zelanda
<i>Prove di taglio in laboratorio</i>		
Waldron (1977)	1÷2.5	orzo
	5÷10	erba medica
	1÷1.7	pino giallo
Waldron e Dakessian (1981)	5.0	pino giallo di 52 mesi
	1.0	orzo
Waldron et al. (1983)	3.7÷6.4	pino giallo 54 mesi



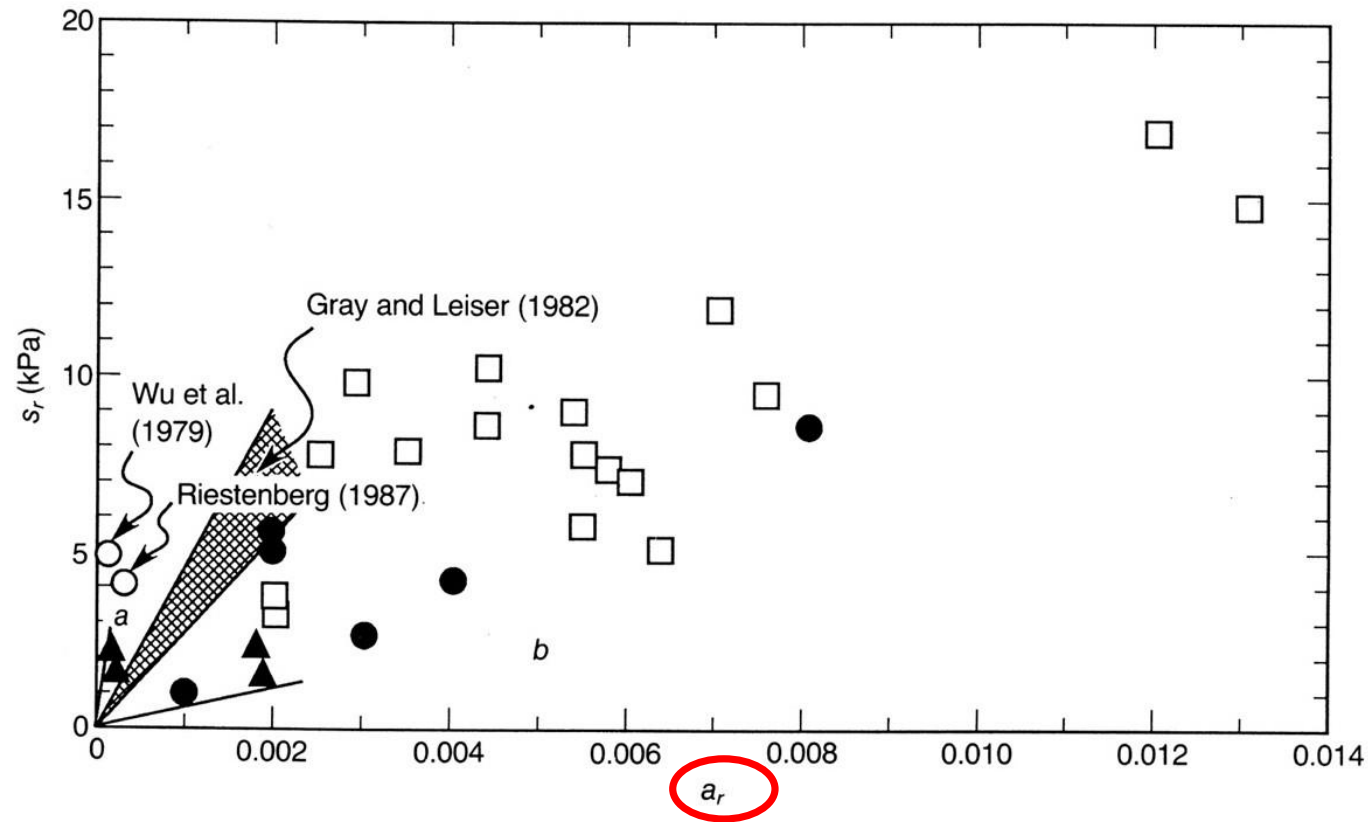
# Valori sperimentali di coesione radicale

Reference	$C_r$ [kPa]	Species and landscape
<i>Shear tests in situ</i>		
Endo & Tsuruta (1969)	2.0÷12.0	Alder in nursery (Japan)
Ziemer (1981)	3.0÷21.0	<i>Pinus contorta</i> California (USA)
O'Loughlin & Ziemer (1982)	6.6	beech in New Zealand
<i>Shear tests in laboratory</i>		
Waldron (1977)	1÷1.7	Yellow pine
Waldron et al. (1983)	3.7÷6.4	Yellow pine (54 months)
<i>Back analysis</i>		
Swanston (1970)	3.4÷4.4	spruce in Alaska (USA)
O'Loughlin (1974)	1.0÷3.0	coniferous in British Columbia (Canada)
Buchanan & Savigny (1990)	2.6÷3.0	Red alder, spruce, douglas fir and cedar Washington (USA)
O'Loughlin & Ziemer (1982)	3.3	Mixed forest in New Zealand
Gray & Meghan (1981)	10.3	coniferous in Idaho (USA)
Bischetti et al (2002)	4.5÷6.5	Mixed ash and hazel trees in Valcuvia (Italy)

$$C_R = 1 \div 21 \text{ kPa}$$

**Valid for tested species, sites, soil depth and root density**

# Valori sperimentali di coesione radicale

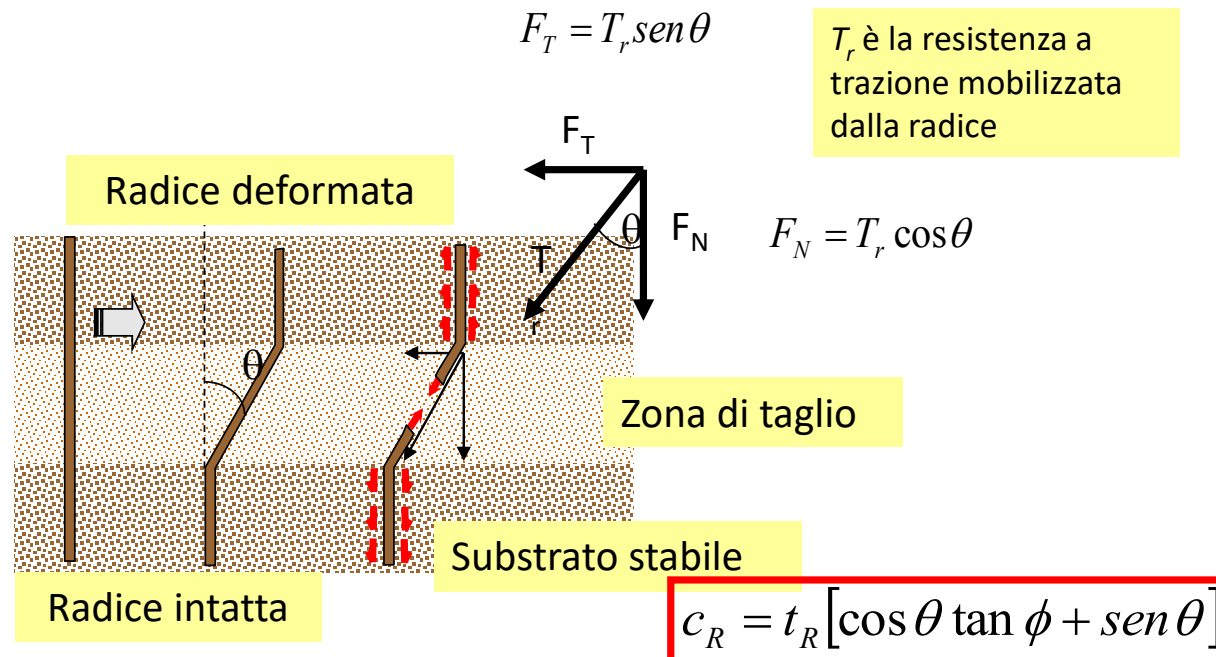


# modellizzazione di $C_r$

# Da cosa dipende l'azione meccanica delle radici?

- Quanto resistono le singole radici
  - Specie
  - Diametro
- Quante radici ci sono nel terreno

# Modello di Wu (1976) e di Waldron (1977) –W&W



# Incremento di resistenza al taglio con radici W&W

resistenza alla trazione media mobilizzata per unità di area del terreno

$$t_R = T_R (A_R / A)$$

$$c_R = t_R [\cos \theta \tan \phi + \sin \theta]$$

Per  $25^\circ < \phi < 40^\circ$  e  
 $40^\circ < \theta < 70^\circ$

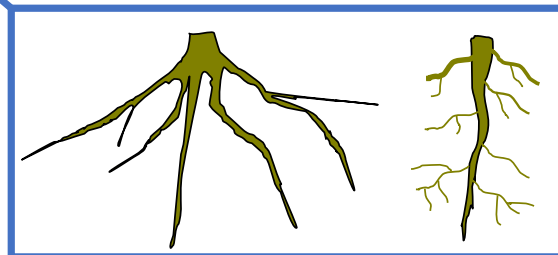
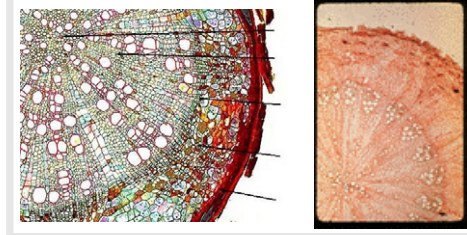
$$[\cos \theta \tan \phi + \sin \theta] = 1 \div 1.3$$

$$c_R \approx k t_R$$

# Incremento di resistenza al taglio con radici -W&W

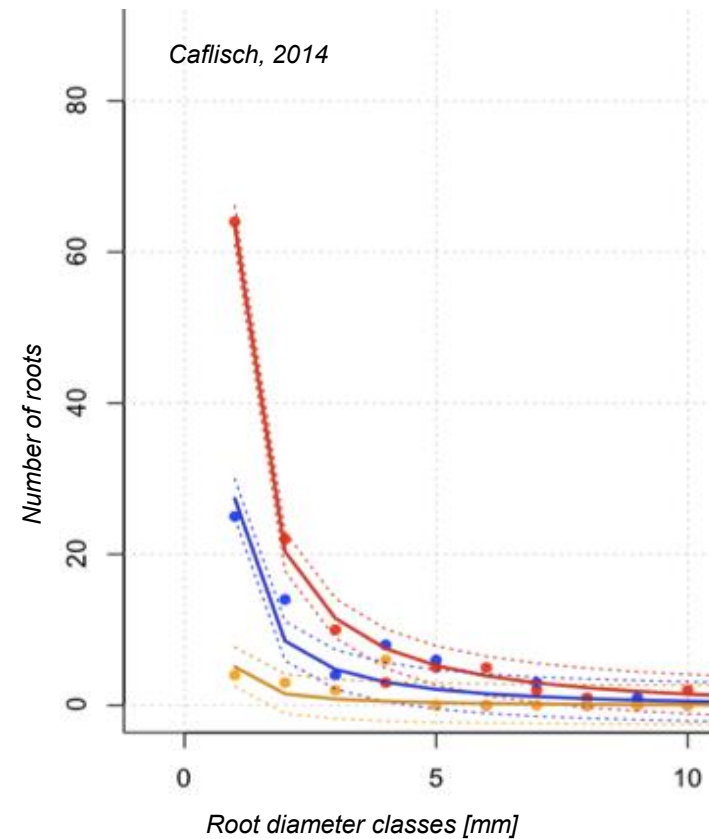
$$t_R = T_R \left( \frac{A_R}{A} \right)$$

$T_R$  resistenza media alla trazione mobilizzata per unità di area effettivamente occupata dalle radici  
 $A_R$  area effettivamente occupata dalle radici  
 $A$  sezione trasversale di terreno considerata



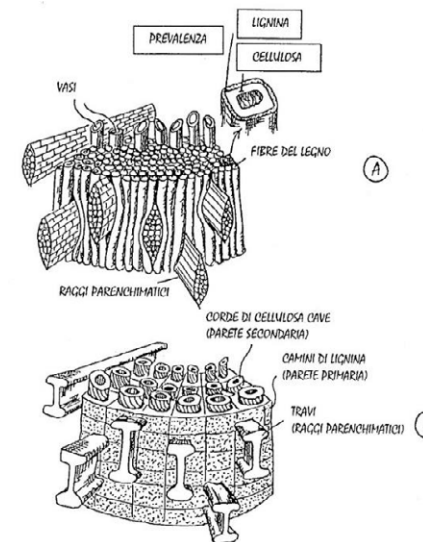
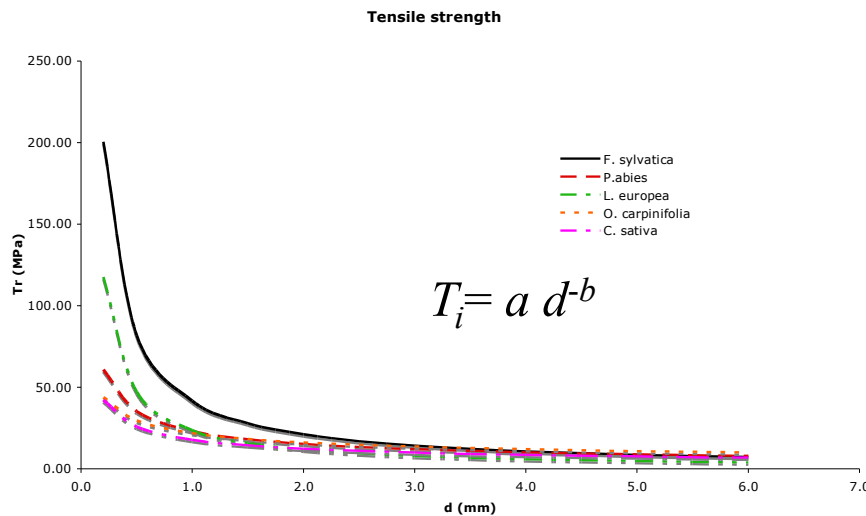
rapporto di area radicata, cioè la frazione di sezione trasversale di suolo ( $A$ ) effettivamente occupata dalle radici ( $A_R$ )

# Eterogeneità della dimensione delle radici nel suolo





# Resistenza delle radici di diverso diametro



$$T_R = \frac{\sum T_i n_i a_i}{\sum n_i a_i}$$

$T_i$  è la resistenza alla trazione per unità di area mobilizzata da radici con diametro  $d_i$   
 $a_i$  è la sezione media delle radici di classe  $i$   
 $n_i$  è il numero di radici di classe  $i$  che si trovano nella sezione di suolo  $A$

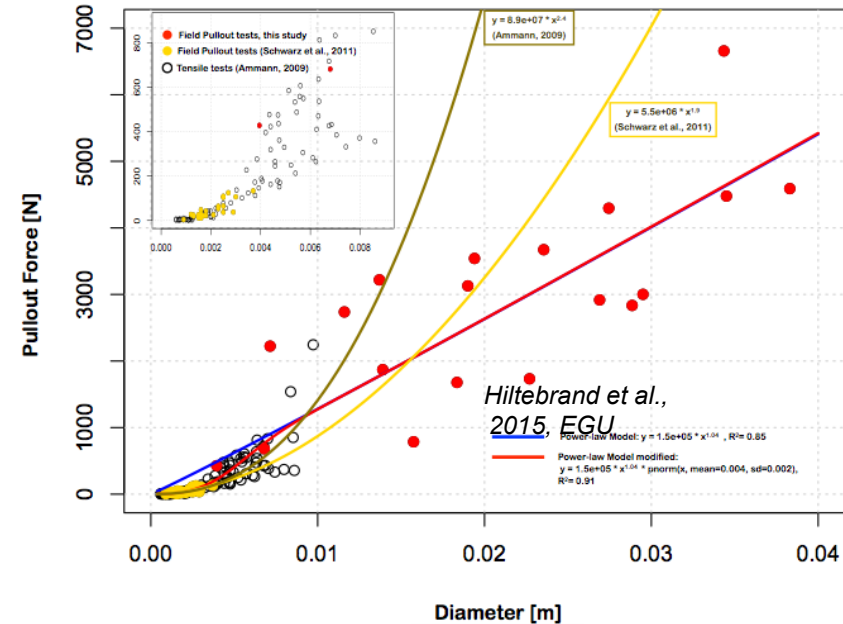
# Misura della resistenza delle radici



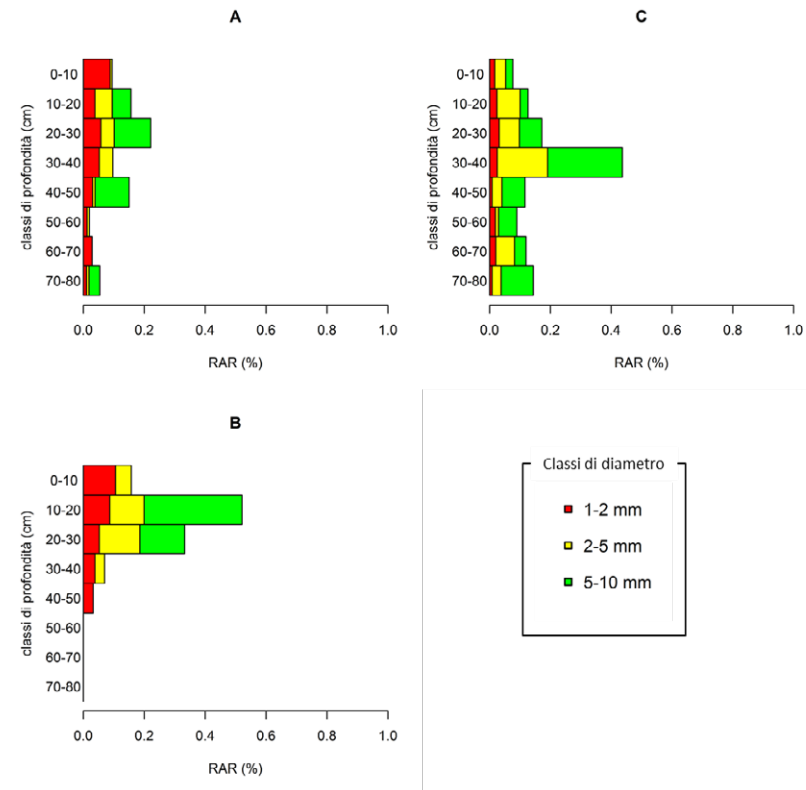
Table 4-3. Root strengths of shrub and tree species. Most tensile testing was carried out on roots with diameters ranging from 0.5 – 15 mm. Key:  $\sigma_T$  – mean tensile strength (MPa);  $\sigma_C$  – mean compression strength (MPa);  $\sigma_B$  – mean bending strength (MPa); a.s.l. – above sea level.

Author	Species	Common Name	$\sigma_T$	$\sigma_C$	$\sigma_B$
<b>SHRUB SPECIES</b>					
Mattia et al. (2005)	<i>Atriplex halimus</i>	Mediterranean saltbush	57		
Schiechl (1980)	<i>Castanopsis chrysophylla</i>	Golden chinkapin	18		
Schiechl (1980)	<i>Ceanothus velutinus</i>	Ceanothus	21		
Norris (2005a)	<i>Crataegus monogyna</i>	Hawthorn	8		
Schiechl (1980)	<i>Cytisus scoparius</i>	Scotch broom	32		
Mattia et al. (2005)	<i>Pistacia lentiscus</i>	Gum mastic	55		
Norris and Greenwood (2003)	<i>Spartium junceum</i>	Spanish broom	17		
Schiechl (1980)	<i>Lespedeza bicolor</i>	Scrub lespedeza	71		
Norris and Greenwood (2003)	<i>Phillyrea latifolia</i>	Privet	11		
Schiechl (1980)	<i>Vaccinium</i> spp.	Huckleberry	16		

Norris et al. (2008) Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions, Springer

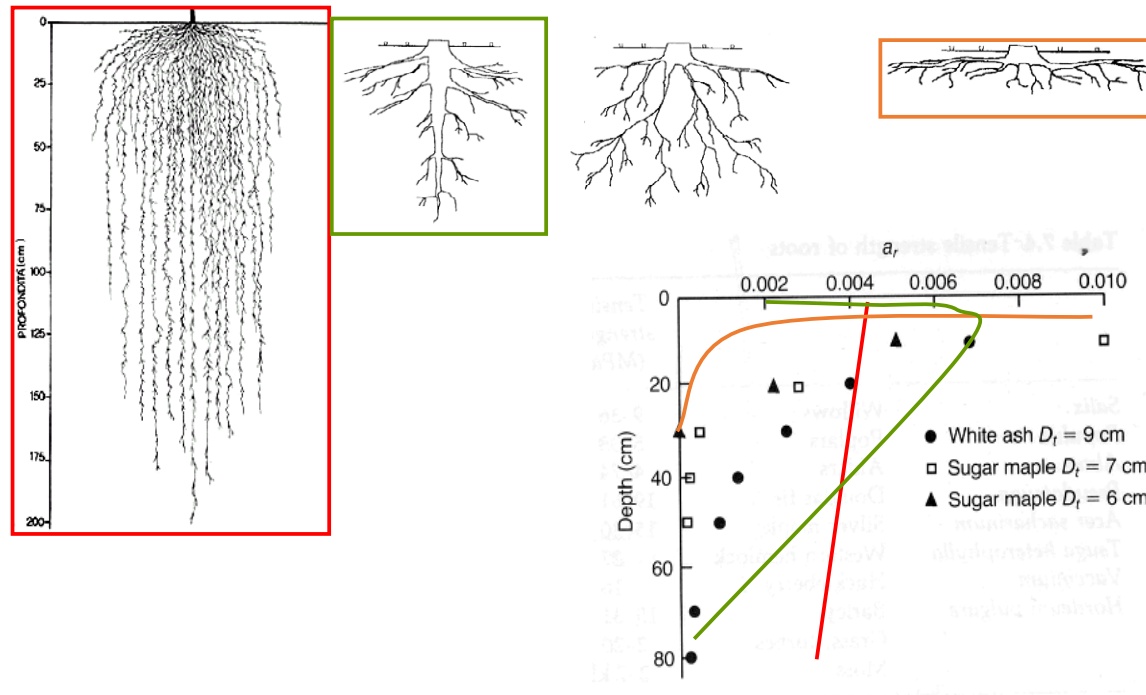


# Misura della densità di radici

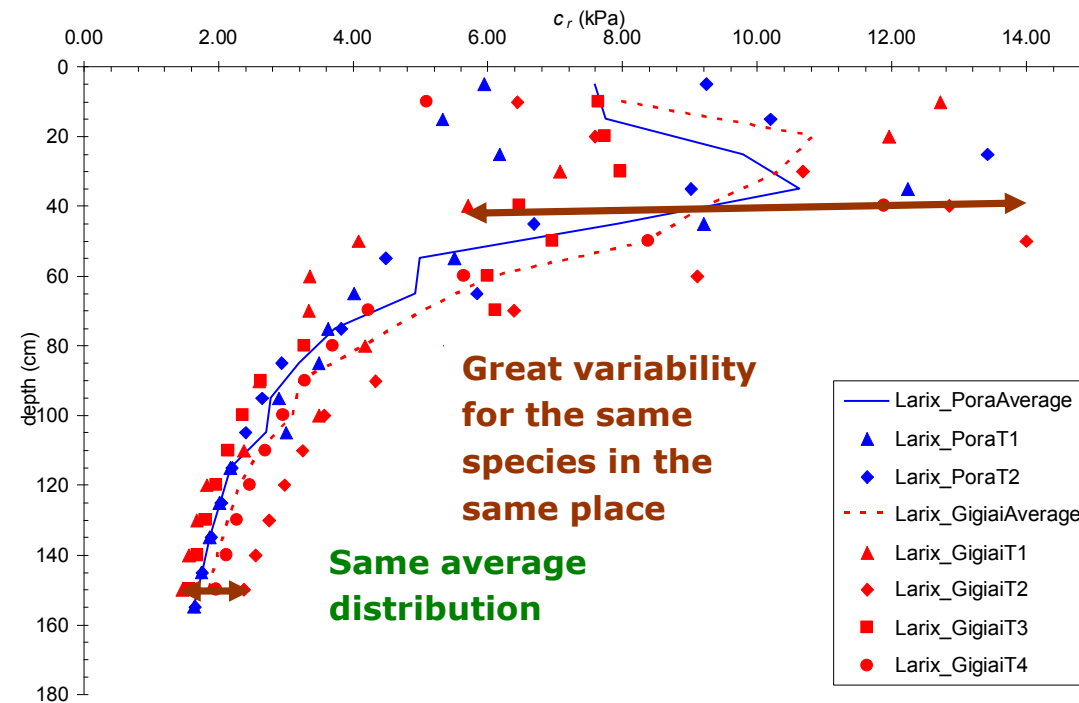


Metodo della trincea (Burke e Raynal, 1994; Schmid e Kazda, 2001 e 2002) combinato con l'analisi d'immagine (Vogt e Persson, 1991)

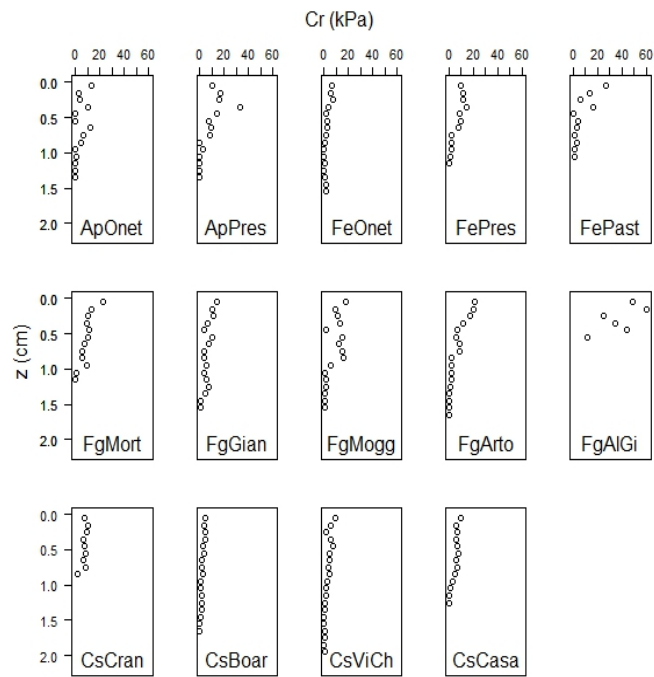
# Distribuzione delle radici nel suolo



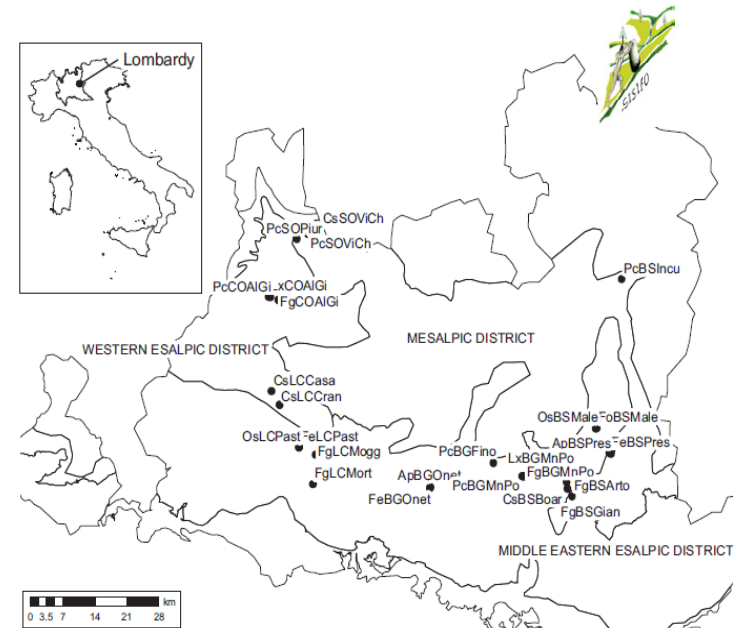
# root cohesion - e.g. *Larix decidua*



# Profili di coesione addizionale

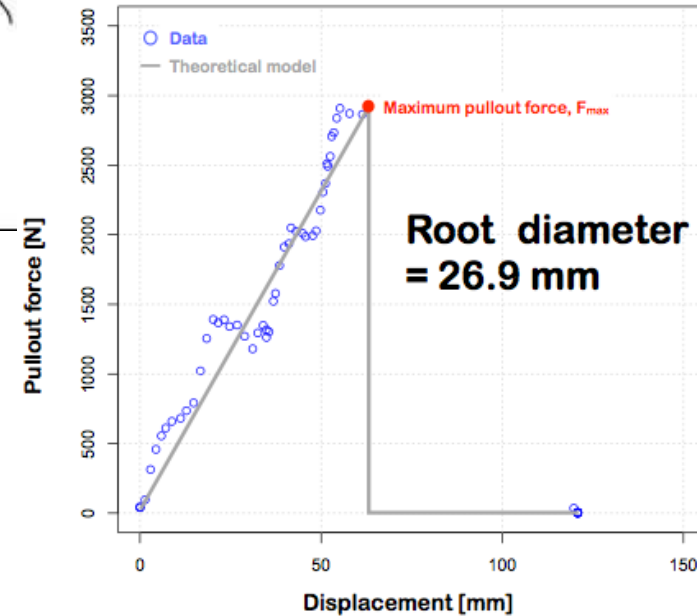
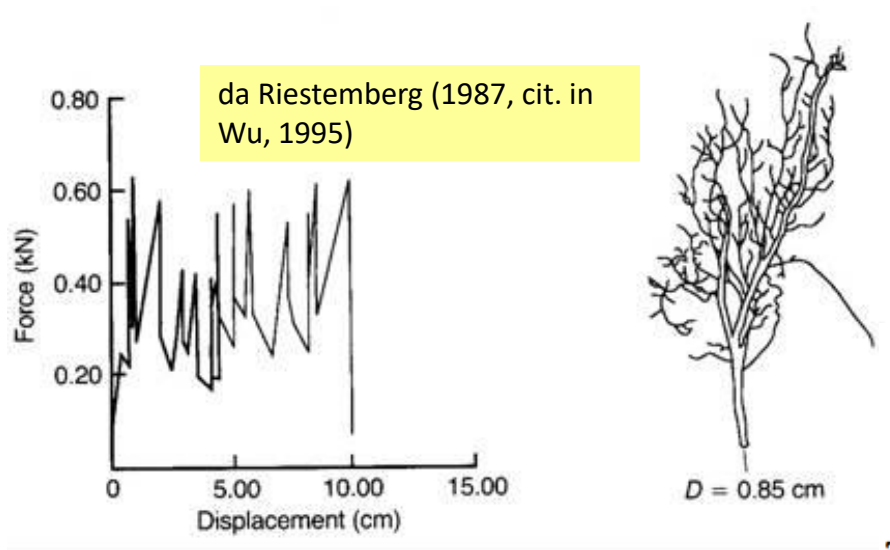


*SIS*temazione Idrraulico FOrestale dei bacini montani  
 Regione Lombardia - DG Agricoltura  
 Piano per la ricerca e lo sviluppo 2007  
 (d.g.r. n. 5214 del 02/08/2007),



**Grande variabilità non ancora completamente  
 spiegata in termini di fattori**

# Le radici non sono fibre singole



# Valutazione di $C_r$ con il modello Wu&Waldron

considera l'orientamento delle radici e della rottura non simultanea

$$c_R = (k' \cdot k'') T_R (A_R / A)$$



# Reinforcement models

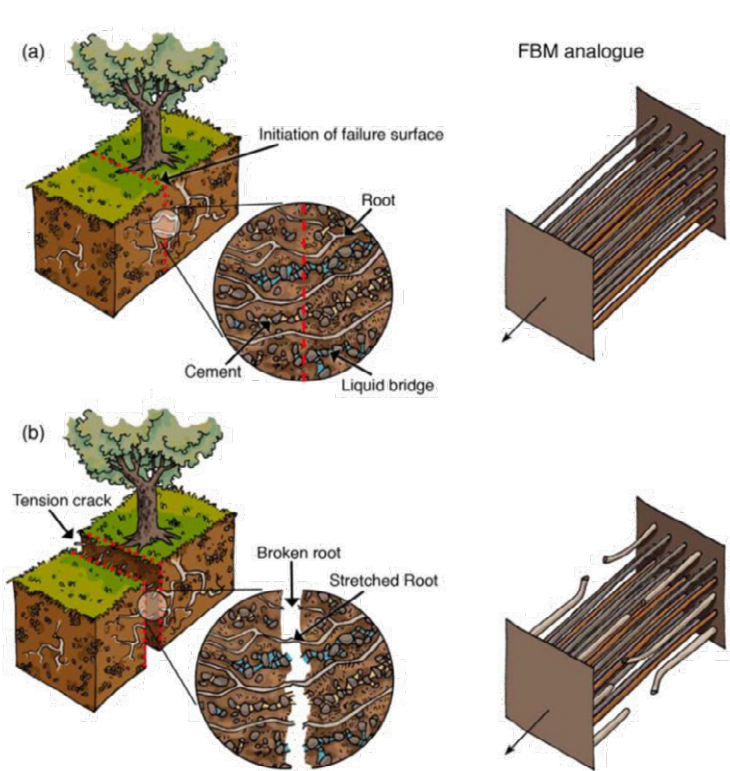
Wu (1976) and Waldron (1977), the first, developed a simplified model for soil additional resistance due to roots presence. This model involves many unrealistic assumptions, but give a simple method to estimate root reinforcement in terms of additional cohesion.

To relax some of the unrealistic hypothesis of the Wu and Waldron model, some “new” models have been proposed in more recent years:

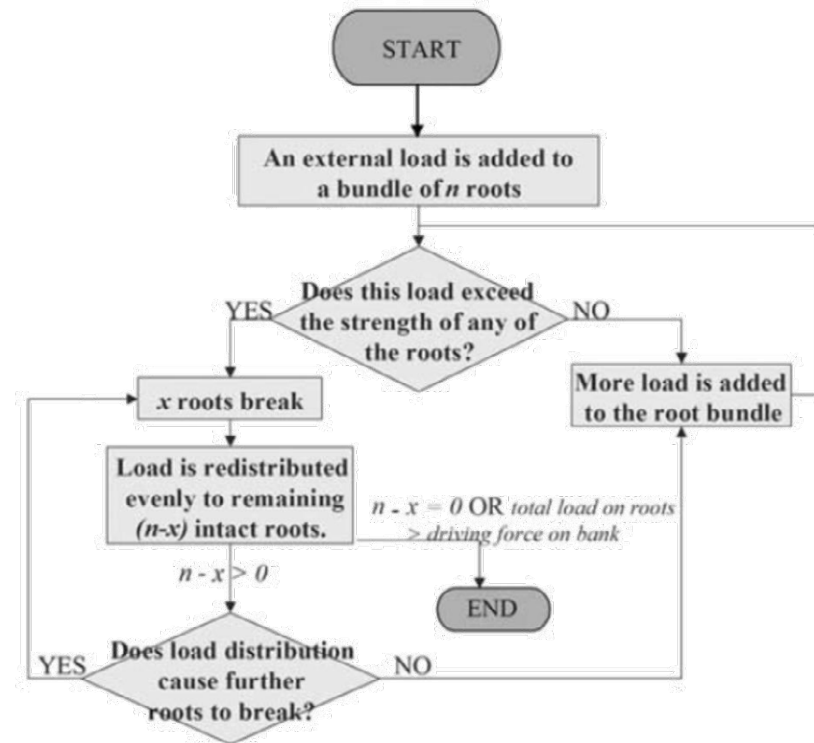
- Modified versions of Wu and Waldron model (e.g. Bischetti et al., 2009)
- Fibre Bundle Model (e.g. Pollen and Simon, 2005)
- Root Bundle Model (Schwarz et al., 2010)

Whatever the model, however, **root resistance** and **root density** are the key factors in accounting for root presence in hillslope stability models.

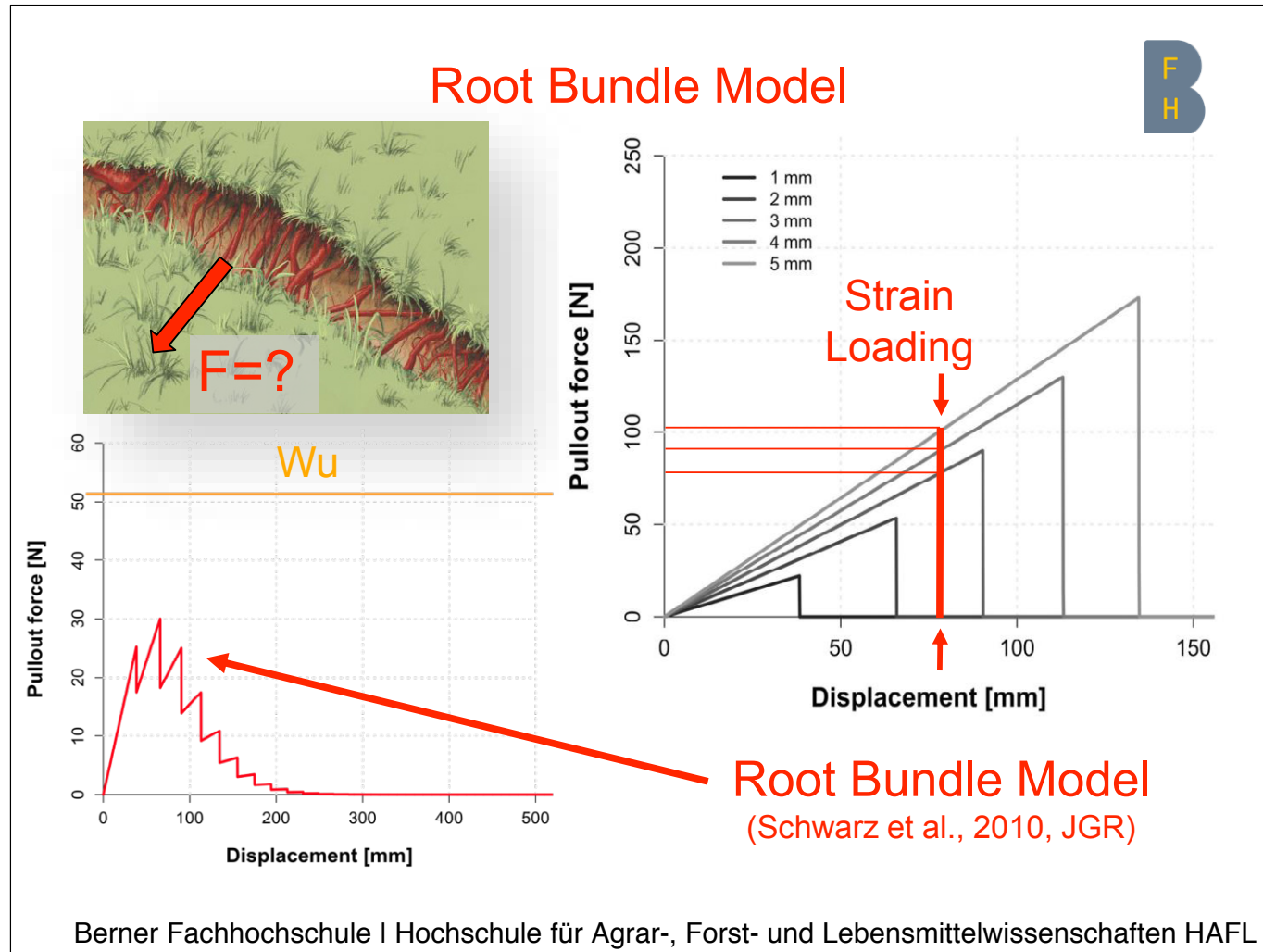
# Fiber Bundle Model (FBM)



Cohen et al. (2009) WRR



Pollen and Simon (2005) WRR

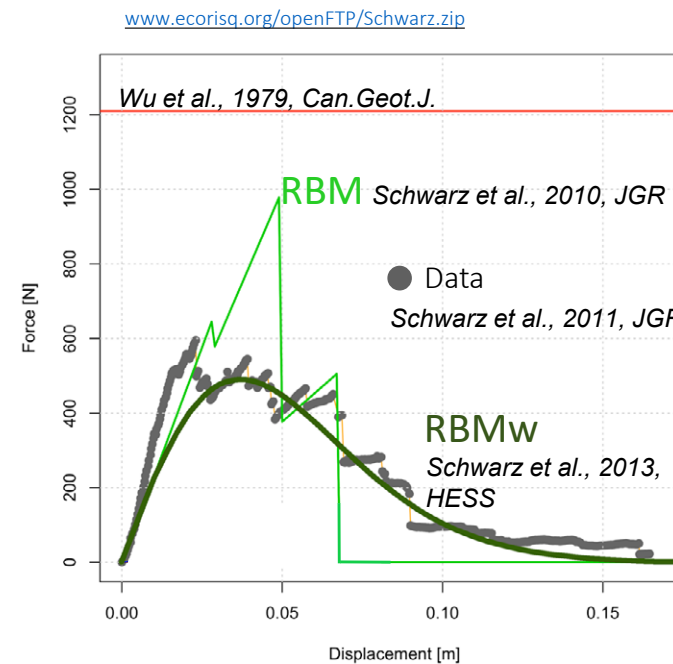


# Il modello RBM

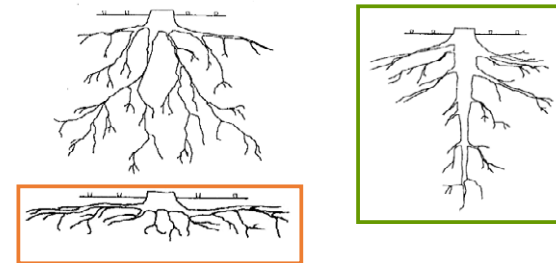
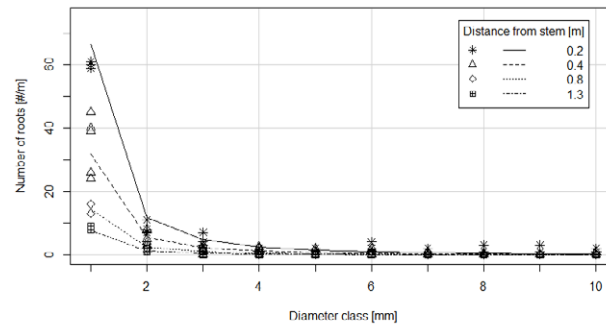
$$F_{tot}(\Delta x) = \sum_{i=1}^N F(\phi_i, \Delta x) S(\Delta x^*) \quad S(\Delta x^*) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta x^*}{\lambda}\right)^\omega\right]$$

$$F(\phi_i, \Delta x) = \frac{\pi E_0}{4 L_0} \phi_i^{2+\beta-\alpha}$$

$E_0$  Young's modulus of elasticity  
 $L_0$  root length  
 $\phi_i$  diameter  $i$

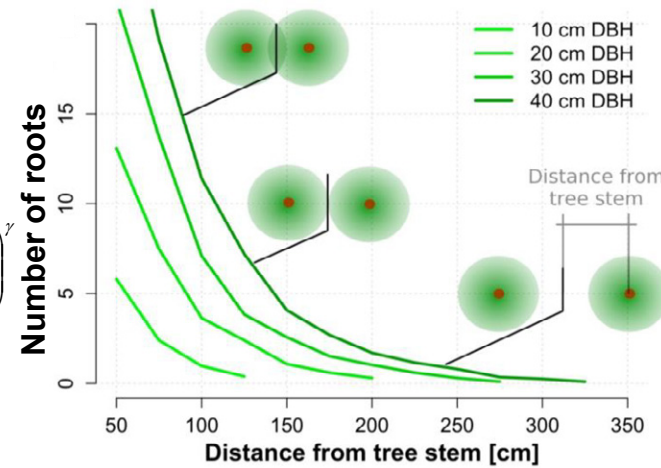


# Densità delle radici rispetto al tronco

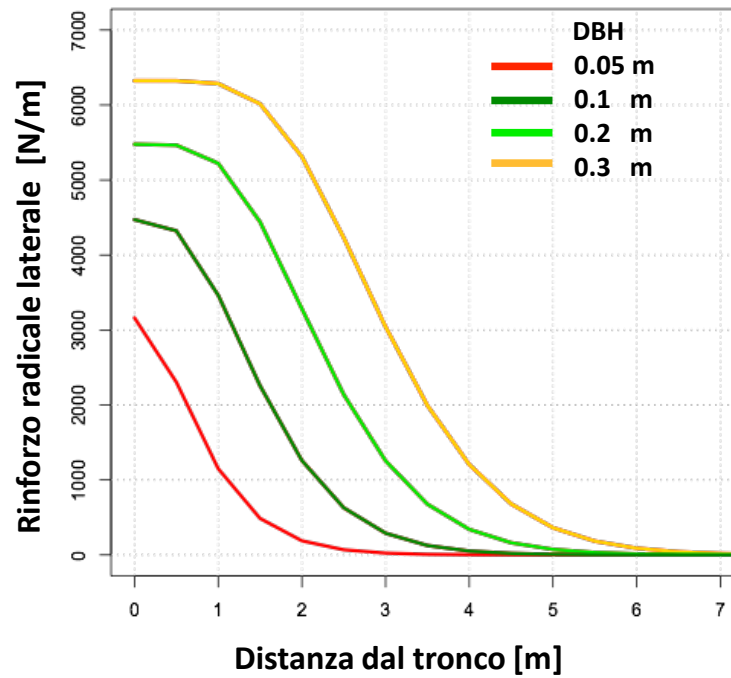


$\rho_{CR}(\phi_i, \Theta, d)$  as function of the considered root size ( $\phi_i$ ), the size of trees ( $\Theta$ ), and distance ( $d$ ):

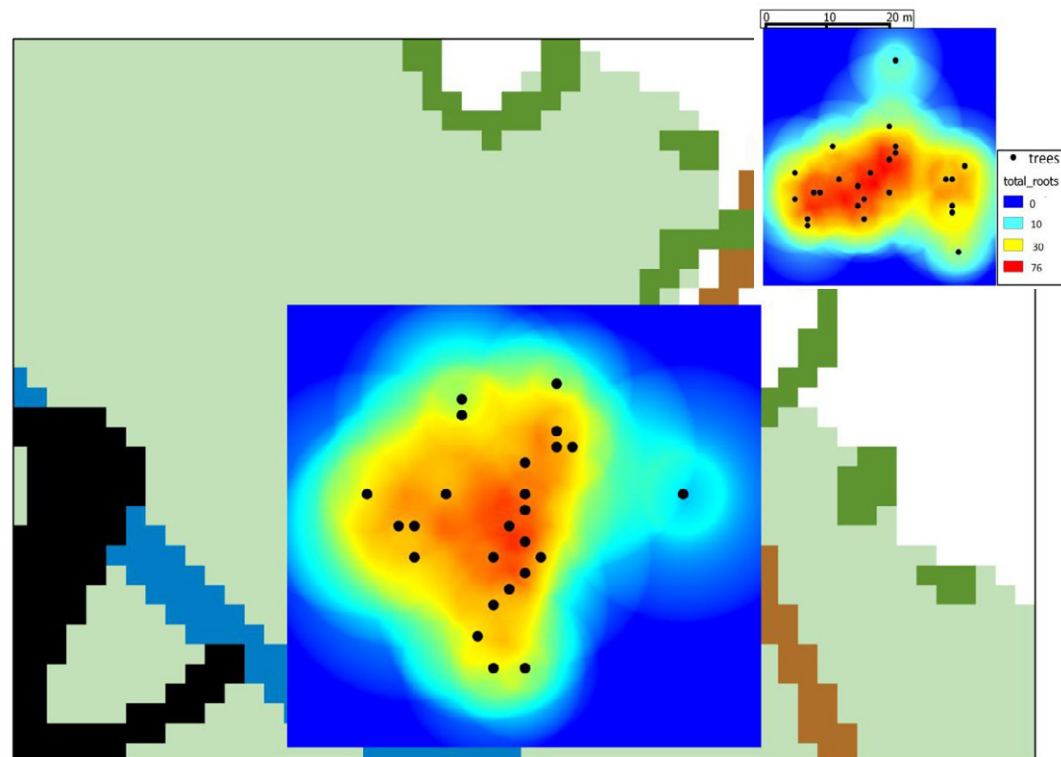
$$\rho_{CR}(\phi_i, \Theta, d) = \rho_{FR} \left( \frac{\ln(1 + \phi_{\max}) - \ln(1 + \phi_i)}{\ln(1 + \phi_{\max})} \right) \left( \frac{\phi_i}{\phi_0} \right)^\gamma$$



## „Upscaling“ del rinforzo radicale



# Distribuzione spaziale del rinforzo radicale



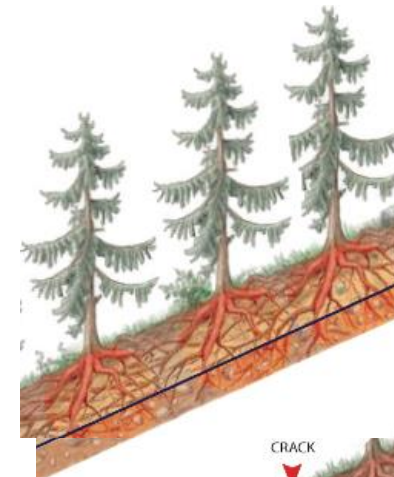
# Rinforzo basale vs laterale



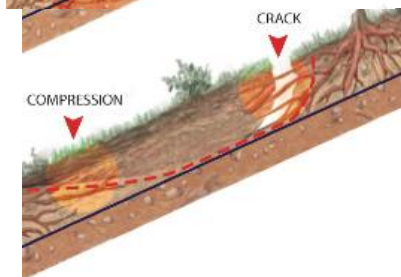


## Frane superficiali: tipi di rinforzo radicale

1. Sulla superficie di scorrimento.  
“Rinforzo basale”. (dal 1977).



2. Rinforzo laterale (dal 2001).



# Rinforzo delle radici

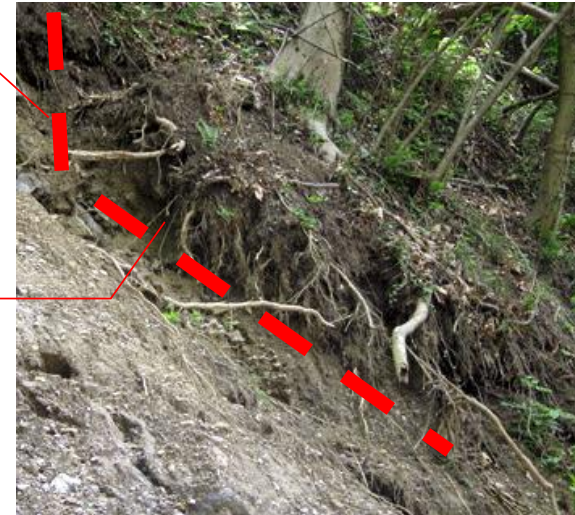
$$c_{r_{lat}}^Z = \frac{[\sum_{z=1}^M \sum_{i=1}^N \alpha d_{i,z}^{-\beta} a_{r_{i,z}}] \cdot \Delta Z}{Z}$$

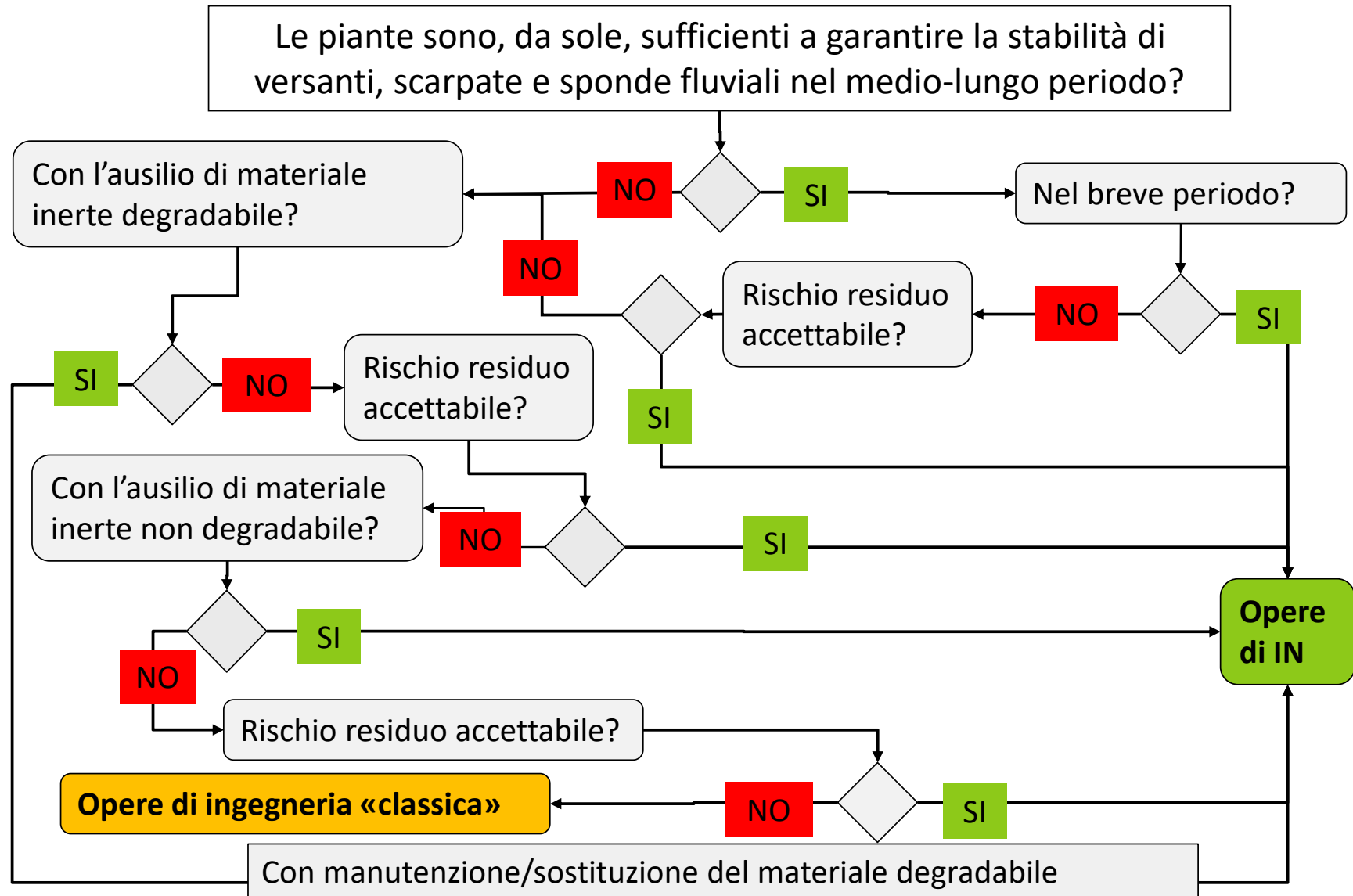
$$c_{r_{base}}^Z = \sum_{i=1}^N \alpha d_{i,Z}^{-b} a_{R_{i,Z}}$$

$$c_r^Z = (K' + K'') (c_{r_{laterale}}^Z + c_{r_{base}}^Z)$$

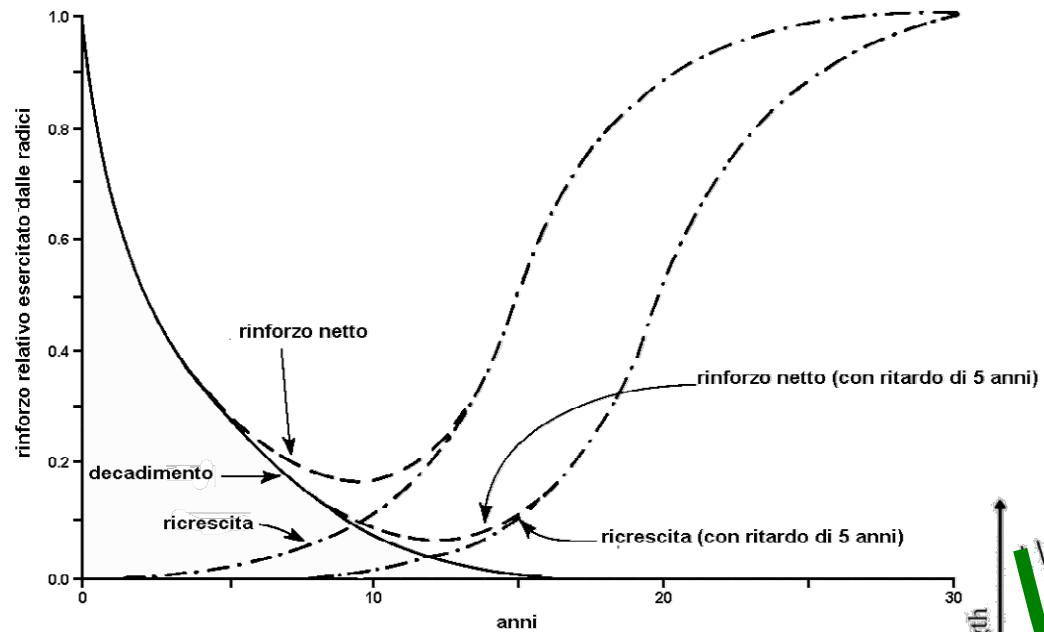
Superficie di distacco laterale

Superficie di distacco basale



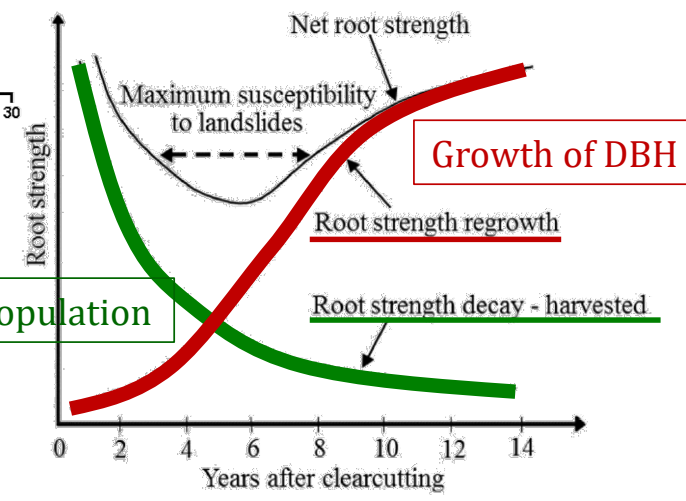


# Effetto della gestione



(da Ziemer, 1981)

Decay of root population



(Sidle and Bogaard, 2016)

