

**Giornata di studio**

**Metodi naturali per il controllo dell'erosione e della stabilità dei pendii  
in caso di precipitazioni intense**

**Università degli Studi di Firenze**

**Aula Magna, Piazza San marco 4**

**Lunedì 20 marzo 2017**

**La protezione superficiale dei pendii: prevenzione dalla  
erosione e contributo alla manutenzione**

**Vincenzo PANE**

**Ordinario di Geotecnica - Università degli Studi di Perugia**



# Parole chiave e Riferimenti Normativi

Tema **multidisciplinare**: scienze agrarie, geologia, ingegneria geotecnica, giurisprudenza

Tre **parole chiave**: 1) erosione    2) frane    3) manutenzione

Riferimenti Normativi :

- Normativa Europea : **EN 1997 Eurocodice 7, Geotechnical design**
- **Norme Tecniche per le Costruzioni** (febbraio 2008)
- Legge Quadro 109/94 (**Legge Merloni - ter**) e relativo Regolamento Attuativo (D.P.R. 554/1999)

# Osservazioni preliminari: erosione vs. frane

*Erosione e movimenti di massa dei pendii (frane) sono fenomeni distinti.*

## **Erosione**

progressiva rimozione dalla superficie del suolo di strati di terreno, attraverso il distacco ed il trasporto di **singole particelle**, ad opera di vari agenti fisici (acqua, vento, ghiaccio, neve)

## **Frane**

movimento verso valle di **porzioni di terreno** di varia forma e con diversi cinematismi, ad opera della gravità.

I due fenomeni hanno origine da fattori che in gran parte coincidono, ma sono governati da leggi diverse.

In entrambi i casi, nel nostro clima: **ruolo fondamentale dell'acqua.**

# Ruolo dell'acqua

L'acqua meteorica che perviene al suolo si suddivide in:

- evaporazione
- infiltrazione → frane (+ erosione interna)
- ruscellamento → erosione superficiale di pendii

Il valore di ciascuna frazione varia nel tempo e nello spazio e dipende da **numerosi fattori**:

- intensità e durata della precipitazione
- eventi meteorici precedenti → saturazione del terreno
- temperatura e umidità dell'aria → evaporazione
- permeabilità del terreno → infiltrazione
- pendenza e lunghezza del pendio → energia
- **vegetazione**

# Erosione: ruolo dell'acqua

Nel nostro clima la **pioggia** è il principale agente dell'erosione di un pendio.

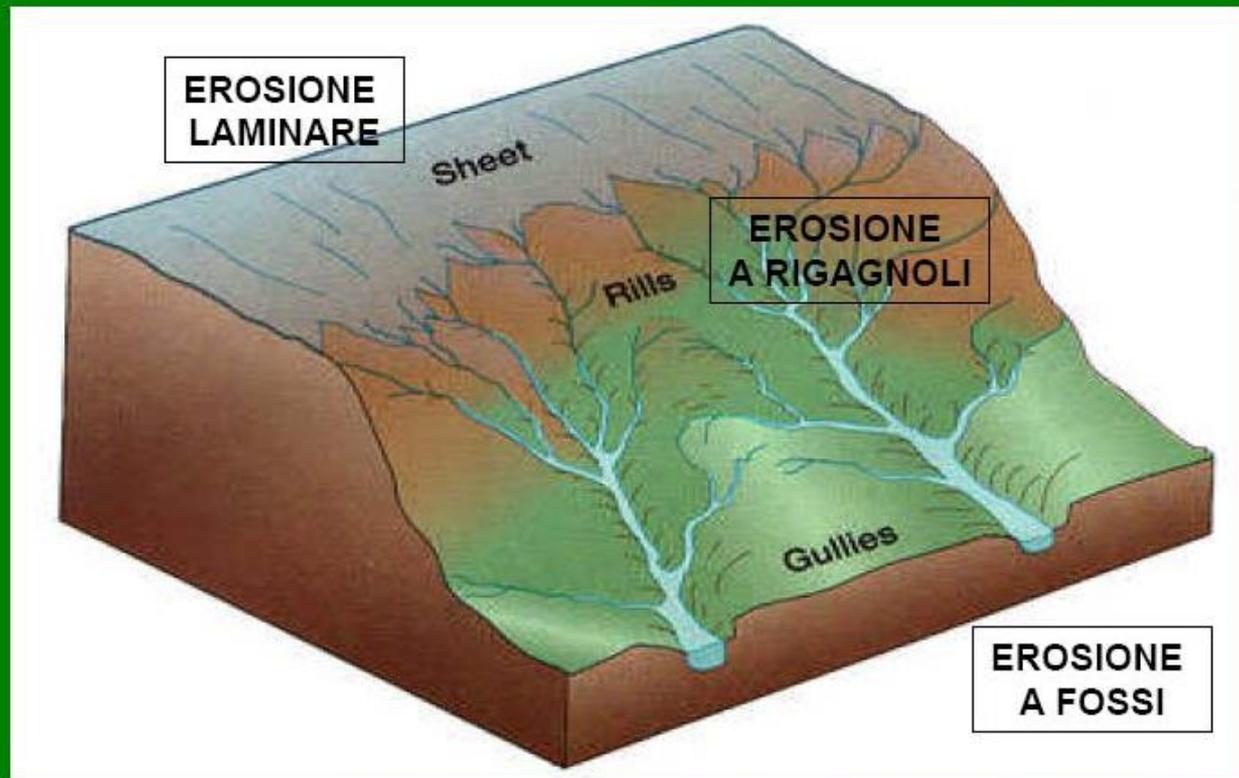
La pioggia erode il terreno con **azioni diverse**:

- energia cinetica delle gocce (*drop erosion*)
- trasporto superficiale di particelle del terreno (*interill erosion*)
- formazione di rivoli (*rill erosion*)
- formazione di solchi e fossi profondi (*gully erosion*)

# Erosione: ruolo dell'acqua

## TIPI DI EROSIONE IDRICA:

Evoluzione su un versante: interrill  $\Rightarrow$  rill  $\Rightarrow$  gully  $\Rightarrow$  channel



tratto da : R. Castaldini, Ordine Ingegneri Verona, 16 luglio 2009

# Erosione: ruolo dell'acqua

L'intensità dell'azione erosiva dipende dai fattori precedenti:

- intensità e durata delle precipitazioni
- lunghezza e inclinazione del pendio
- permeabilità del terreno
- vegetazione presente

ai quali si aggiunge l' **Erodibilità** (intrinseca) del terreno, che dipende da:

granulometria

materia organica

macrostruttura

cementazione

Nella granulometria incidono soprattutto le frazioni di **limo** (0.002 - 0.06 mm) e di **sabbia** (0.06 - 2.0 mm).

# Erosione : stima quantitativa (perdita di suolo)

Vari approcci per la stima quantitativa dell'erosione (perdita di suolo):

- modelli matematici (eq. differenziali moti di filtrazione e trasporto solido)
- modelli fisici in scala ridotta
- modelli empirici (USLE, AGNPS, ... )

**USLE** : Universal Soil Loss Equation (Wishmeier e Smith, 1965; 1978)

Equazione empirica basata su migliaia di dati raccolti dal Servizio Conservazione del Suolo e dal Servizio di Ricerca in Agricoltura degli USA; adottata da United States Department of Agriculture per stima erosione idrica.

**USLE** considera: fattori energetici (clima e topografia)  
fattori resistivi (erodibilità del suolo)  
fattori protettivi

# Erosione : stima quantitativa (perdita di suolo)

USLE :

$$A = R \times K \times LS \times P \times C$$

A= perdita specifica di suolo (t / ha anno)

R= fattore climatico relativo alle precipitazioni (MJ mm/ha h anno)

K= fattore pedologico che esprime erodibilità del suolo (t h/MJ mm)

LS = fattori topografici (lunghezza e pendenza scarpata, energia pendio)

P = fattore relativo all'adozione di tecniche conservative del suolo

C = fattore relativo alla copertura vegetale, funzione del tipo e densità della vegetazione (varia tra 0,003 e 1 !!!)

Possibile agire efficacemente su : L S , ridurre energia scarpate

P, pratiche di controllo e conservazione

C , copertura vegetale

# Erosione: ruolo della vegetazione

In passato, gli effetti della **vegetazione arborea** sono stati più studiati di quelli dell'inerbimento.

Motivi:

- il contenimento dell'erosione prodotto dalle radici delle **erbe comuni** è limitato ad una profondità di **pochi decimetri**.
- questi effetti si perdono per **l'essiccamento estivo** dovuto alla **scarsa profondità** delle radici delle erbe comuni.

Recentemente, le ricerche sulle tecniche di protezione dei pendii mediante l'impianto di una **vegetazione selezionata** hanno prodotto risultati molto positivi.

# Erosione: ruolo della vegetazione

Il ruolo della vegetazione nella mitigazione della erosione è stato a lungo studiato ed è documentato da ricerche sperimentali.

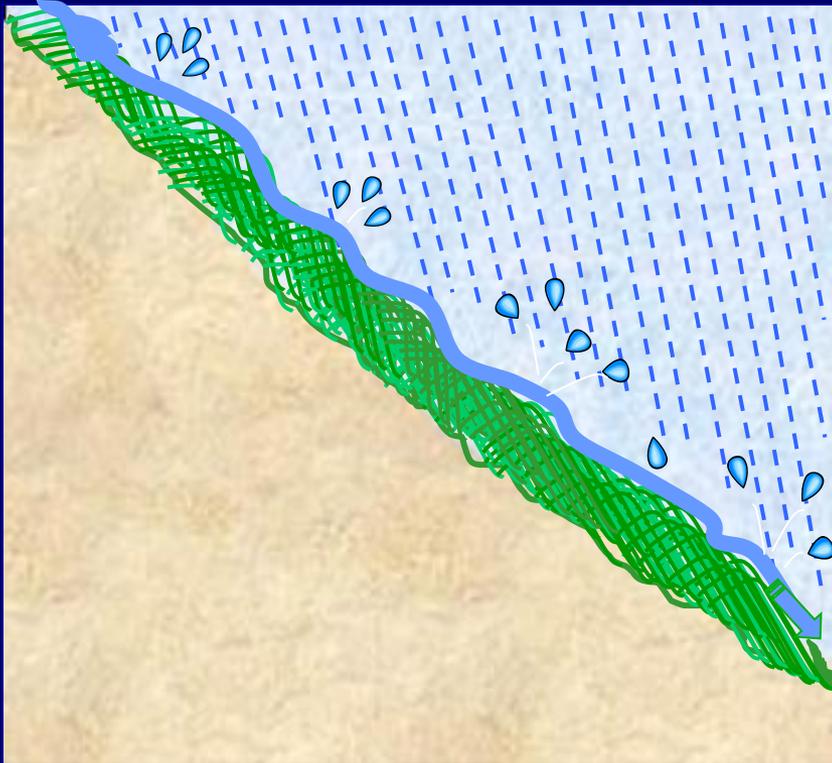
La protezione dall'erosione dipende dal tipo di vegetazione (arborea o erbacea) ma in genere consiste in:

- assorbimento di una parte dell'energia **cinetica** delle gocce
- aumento della perdita per **evaporazione**
- rallentamento del **ruscellamento**
- ritardo nella **saturazione** del terreno
- contenimento, filtro e contrasto del **trascinamento** dei granuli
- limitazione dell'insorgere di **fessure** e crepe
- **rinforzo** del terreno con apparato radicale
- **impermeabilizzazione** della superficie (es: Prati Armati)

# Protezione tramite: impermeabilizzazione e scorrimento superficiale

Precipitazioni intense: l'acqua ruscella al di sopra della vegetazione .....

(courtesy of PRATI ARMATI®)



*Assorbimento di parte dell'energia cinetica dell'acqua battente e ruscellamento al di sopra della coltre vegetale*



*Orvieto (TR) – Versante sigillato dalla coltre vegetale*

# Protezione tramite: impermeabilizzazione e scorrimento superficiale

..... anche quando la vegetazione è disseccata.

(courtesy of PRATI ARMATI®)

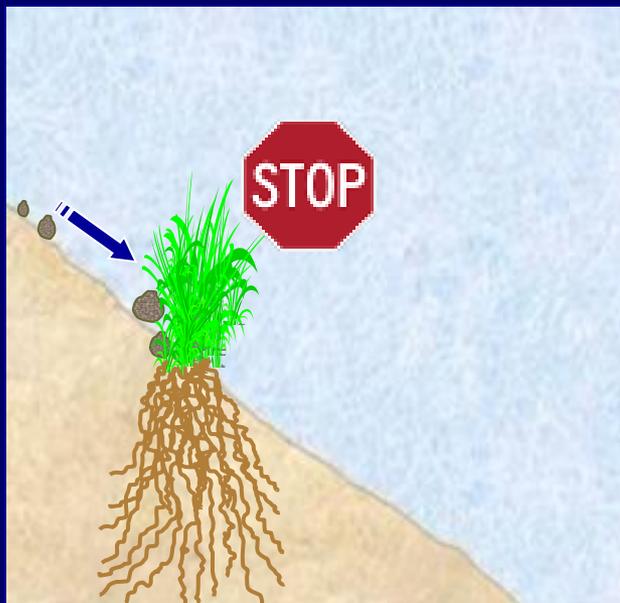


# Protezione tramite: limitazione di fessurazione e crepe



(courtesy of PRATI ARMATI®)

# Protezione tramite :                    altre azioni

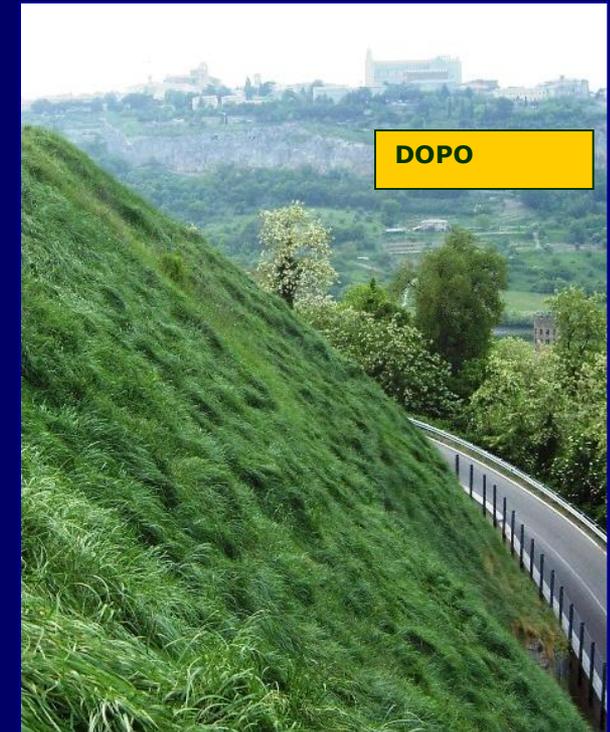


Esempio di :                    contrasto del trascinarsi dei granuli, dissipazione energia acqua, rallentamento ruscellamento, aumento evaporazione.



*Impianto realizzato a Cittadella (PD)*

# Protezione tramite : rinforzo del terreno con apparato radicale



(courtesy of PRATI ARMATI®)

# EUROCODICE 7 : Vegetazione (cap.2: Basi della progettazione)

## VALORI DI PROGETTO DELLE AZIONI (2.4.6.1.(9))

Le seguenti caratteristiche, che possono influenzare le pressioni dell'acqua, devono essere considerate:

- effetto favorevole o sfavorevole del drenaggio ....
- variazioni nelle **pressioni dell'acqua** dovute alla **crescita o alla rimozione di vegetazione**.

## AZIONI E SITUAZIONI DI PROGETTO (11.3.(2)P)

Occorre considerare l'effetto delle seguenti circostanze, ove appropriato :

- variazioni climatiche, incluse variazioni di temperatura .....
- **vegetazione** o la sua rimozione”.

## CONSIDERAZIONI PROGETTUALI E COSTRUTTIVE (11.4)

- L'instabilità può verificarsi su pendii ... la cui inclinazione, che può essere determinata dalla **erosione**, è prossima all'angolo di resistenza a taglio.
- Le superfici di pendii esposte a potenziale **erosione** devono essere **protette**, se necessario, per assicurare che è mantenuto il livello di sicurezza.
- I pendii dovrebbero essere “**sigillati**”, **piantumati** o protetti artificialmente. Per scarpate con berme, deve essere considerato un sistema di drenaggio entro la berma.
- **Pendii potenzialmente instabili possono essere stabilizzati per mezzo di gabbioni, ancoraggi, drenaggi, ....., vegetazione**, o una combinazione di questi.

## Frane: meccanismo

Le frane di detrito (*debris*) e di terra (*soil*) avvengono per scorrimento lungo superfici di varia forma e con cinematismi diversi. La **superficie di scorrimento** può essere curva o approssimativamente piana, vicina al profilo del pendio o molto profonda.

Lo scorrimento avviene se e quando lungo una potenziale superficie di scorrimento lo sforzo necessario a mantenere l'equilibrio della massa sovrastante **raggiunge la resistenza del terreno**.

# Frane: ruolo dell'acqua

La resistenza delle terre dipende solo dalla tensione efficace

tensione totale

$$\sigma = N/A$$

**pressione interstiziale** (acqua)

**u**

tensione efficace

$$\sigma' = \sigma - u$$

resistenza al taglio

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$$

*Fattore di sicurezza*

$$F = \frac{\int \tau_f \, dl}{\int \tau \, dl} = \frac{\int [c' + (\sigma - u) \tan \varphi'] \, dl}{\int \tau \, dl}$$

Questa relazione spiega la **grande influenza della pressione interstiziale** sulla stabilità dei pendii  $\longrightarrow$  **regimentazione acque superficiali, drenaggi** superficiali e profondi

# Frane: ruolo della vegetazione

La vegetazione influenza l'equilibrio di un pendio e la sua suscettibilità al franamento, tramite **effetti "diretti" ed "indiretti"**.

**Effetti diretti** (su frane di **modesta profondità**): **MECCANICI**

- conferimento di resistenza attraverso gli apparati radicali

**Effetti indiretti**: **IDRAULICI**

- aumento dell'evaporazione delle precipitazioni
- diminuzione dell'infiltrazione
- diminuzione del grado di saturazione del terreno
- diminuzione della **pressione "interstiziale"** (dell'acqua)

aumento di  
resistenza  
del terreno

In aggiunta: ausilio a **funzionalità, efficacia, manutenzione, durabilità** degli interventi di drenaggio

Effetti meccanici + idraulici: **ricerca in corso** presso Univ. di Perugia

# EUROCODICE 7 (EC7) : ruolo dell'acqua e manutenzione

da Cap.11 : Stabilità globale

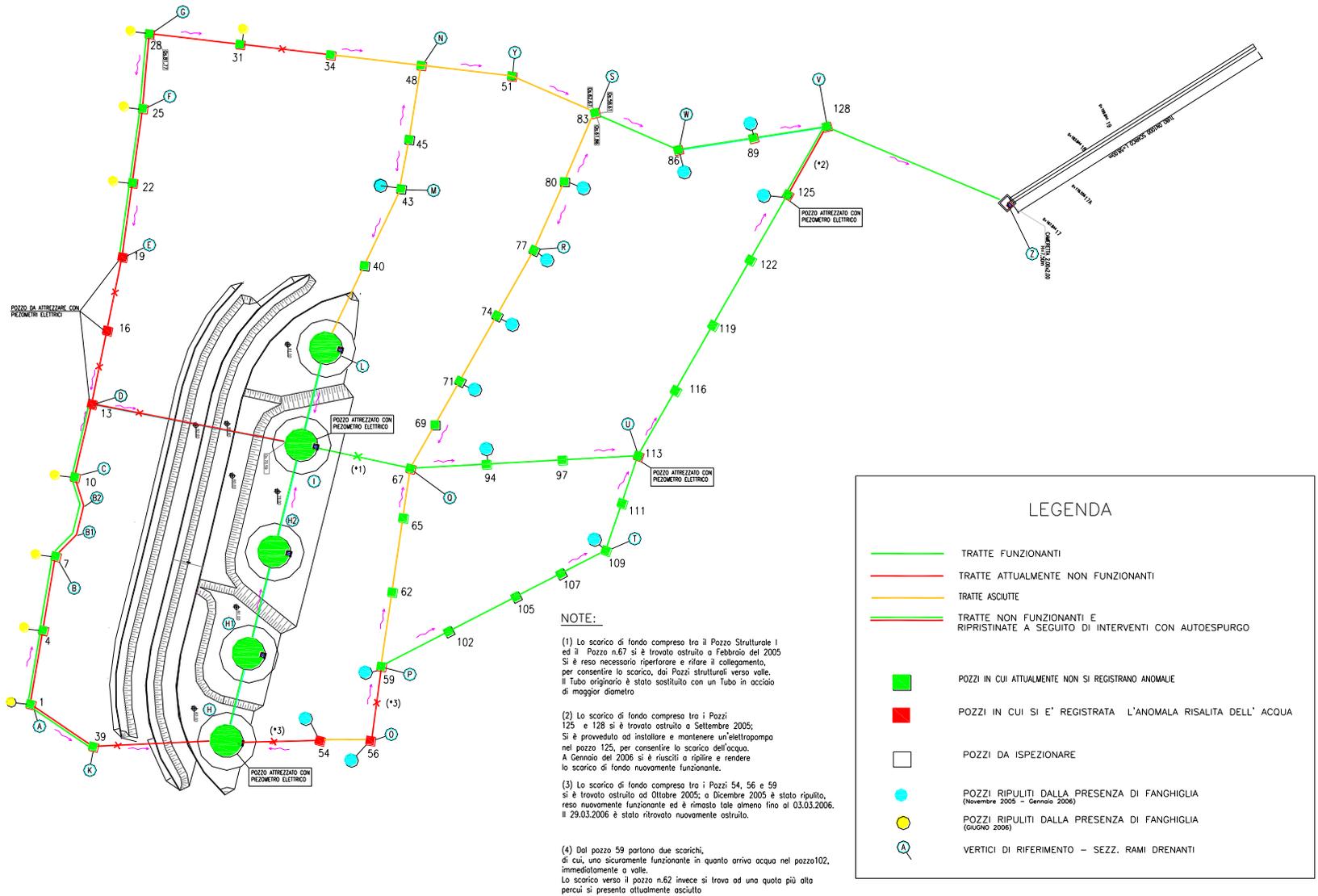
- 11.3.(3)P. .... Deve essere considerata la possibilità della **rottura** di dreni, filtri o giunti di impermeabilizzazione ....

da Cap.2 : Basi della progettazione geotecnica

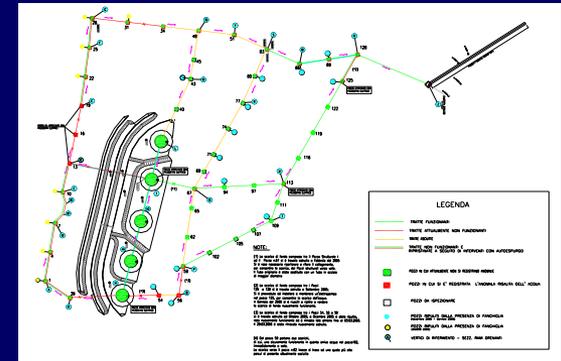
- 2.4.6.1.(6)P. Per stati limiti con conseguenze gravi (SLU), i valori di progetto delle **pressioni dell'acqua** devono rappresentare i **valori più sfavorevoli che potrebbero verificarsi durante la "vita"** della struttura.
- 2.4.6.1.(10). A meno che non si possa dimostrare l'adeguatezza del sistema di **drenaggio** e assicurare la sua **manutenzione**, il valore di progetto del livello dell'acqua deve essere fissato come il **massimo** livello possibile .....



# Esempio di fragilità del sistema drenante: planimetria



# Esempio di fragilità del sistema drenante



## NOTE:

(1) Lo scarico di fondo compreso tra il Pozzo Strutturale I ed il Pozzo n.67 si è trovato ostruito a Febbraio del 2005. Si è reso necessario ripercorere e rifare il collegamento, per consentire lo scarico, dai Pozzi strutturali verso valle. Il Tubo originario è stato sostituito con un Tubo in acciaio di maggior diametro.

(2) Lo scarico di fondo compresa tra i Pozzi 125 e 128 si è trovato ostruito a Settembre 2005; Si è provveduto ad installare e mantenere un'elettropompa nel pozzo 125, per consentire lo scarico dell'acqua. A Gennaio del 2006 si è riusciti a ripulire e rendere lo scarico di fondo nuovamente funzionante.

(3) Lo scarico di fondo compresa tra i Pozzi 54, 56 e 59 si è trovato ostruito ad Ottobre 2005; a Dicembre 2005 è stato ripulito, reso nuovamente funzionante ed è rimasto tale almeno fino al 03.03.2006. Il 29.03.2006 è stato ritrovato nuovamente ostruito.

(4) Dal pozzo 59 partono due scarichi, di cui, uno sicuramente funzionante in quanto arriva acqua nel pozzo102, immediatamente a valle. Lo scarico verso il pozzo n.62 invece si trova ad una quota più alta per cui si presenta attualmente asciutto.

## LEGENDA

	TRATTE FUNZIONANTI
	TRATTE ATTUALMENTE NON FUNZIONANTI
	TRATTE ASCIUTTE
	TRATTE NON FUNZIONANTI E RIPRISTINATE A SEGUITO DI INTERVENTI CON AUTOESPURGO
	POZZI IN CUI ATTUALMENTE NON SI REGISTRANO ANOMALIE
	POZZI IN CUI SI E' REGISTRATA L'ANOMALA RISALITA DELL'ACQUA
	POZZI DA ISPEZIONARE
	POZZI RIPULITI DALLA PRESENZA DI FANGHIGLIA (Novembre 2005 - Gennaio 2006)
	POZZI RIPULITI DALLA PRESENZA DI FANGHIGLIA (GIUGNO 2006)
	VERTICI DI RIFERIMENTO - SEZZ. RAMI DRENANTI

# Norme Tecniche per le costruzioni (feb. 08) : Manutenzione

da Cap.6.3 : Stabilità dei pendii naturali

- 6.3.5. Il progetto degli interventi di stabilizzazione deve comprendere la descrizione completa dell'intervento, .. le modalità costruttive ..., il piano di monitoraggio e un **significativo piano di gestione e controllo nel tempo della funzionalità e della efficacia dei provvedimenti adottati.**
- 6.3.6. Il monitoraggio di un pendio o di una frana interessa le diverse fasi che vanno dallo studio al progetto, alla realizzazione e **gestione delle opere di stabilizzazione e al controllo della loro funzionabilità e durabilità.**

# Leggi e regolamenti nazionali : Piano di manutenzione

- Legge Quadro 109/94 (**Legge Merloni-ter**): dispone la redazione, a partire dalle prime fasi progettuali, di **piani operativi per la manutenzione degli interventi**.
- **Regolamento attuativo** della Merloni-ter, D.PR. 554/1999: per i lavori pubblici, impone non solo la predisposizione progettuale ma anche la successiva **attuazione dei piani di monitoraggio e manutenzione**.
- Purtroppo, ad oggi, **l'attuazione dei piani di manutenzione** è spesso incompiuta, e a volte **neppure avviata**.
- **Linee Guida Italia Sicura (2016)** : grande importanza al **monitoraggio, manutenzione, verifica ex-post dell'efficacia degli interventi**
- Necessità di **studi sistematici** sullo stato di attuazione dei **piani di manutenzione** (a livello nazionale e regionale) **→ banca dati** per far emergere problematiche riscontrate nell'attuazione dei piani, soluzioni adottate, risorse e competenze utilizzate.

# Manutenzione : ruolo della vegetazione

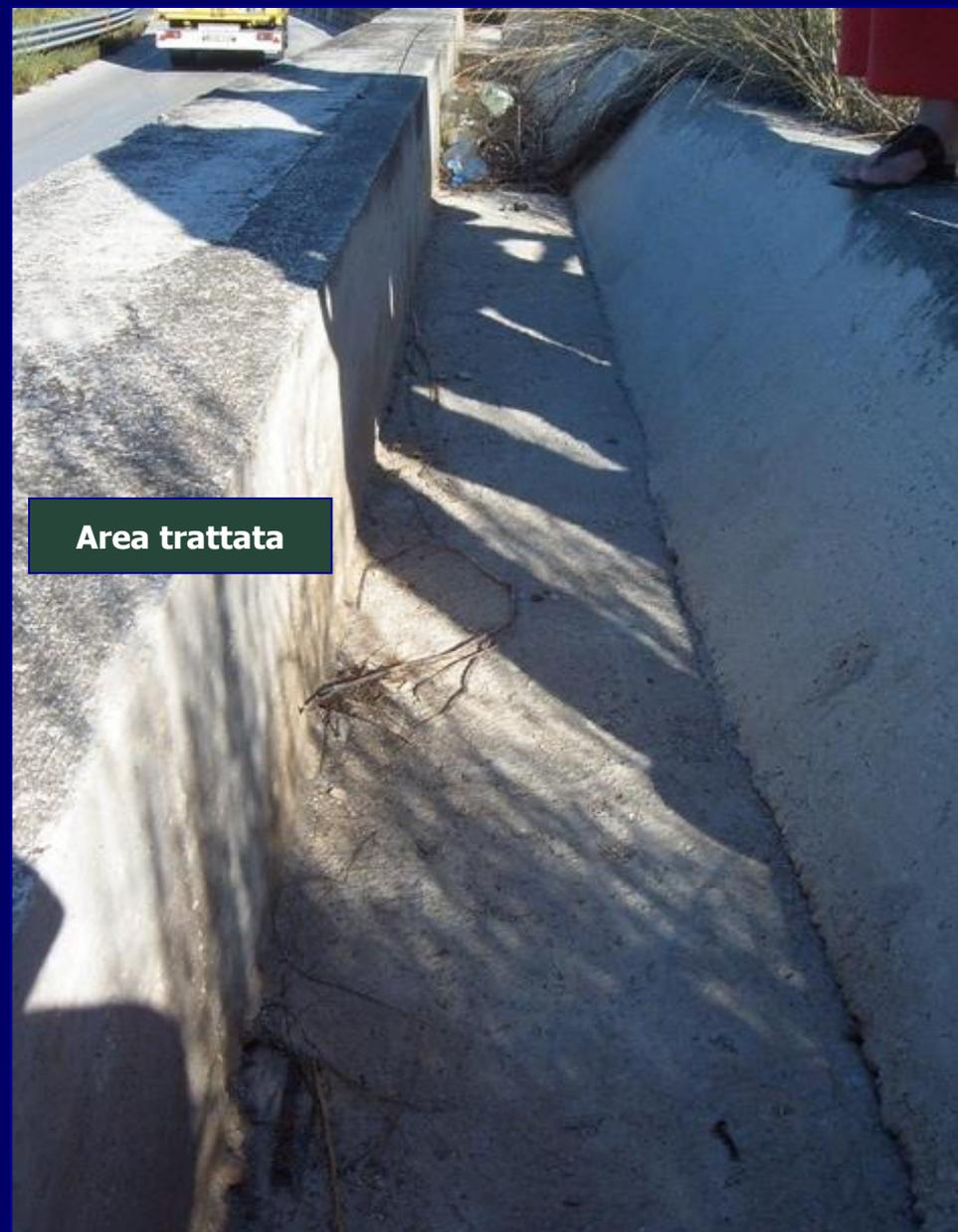


*Florinas (SS) - Drenaggio in sasso, completamente intasato nella zona non protetta*

# Manutenzione : ruolo della vegetazione



*Ancona bypass - Area non trattata*



*Ancona bypass - Area trattata*

# Manutenzione : ruolo della vegetazione



# Manutenzione : ruolo della vegetazione



# Manutenzione : ruolo della vegetazione



**Georeti + sementi tradizionali**



**Georeti + PRATI ARMATI®**



# Diagnosi e Terapia

Karl Terzaghi, 1950 : “ ... se un pendio ha cominciato a muoversi, i mezzi per fermare i movimenti **devono essere adattati ai processi** che hanno iniziato lo scorrimento”



metodo osservazionale

Per fenomeni erosivi, movimenti superficiali, soliflussi : **osservazione e diagnosi** sono relativamente agevoli, e

inerbimento con specie selezionate può essere una valida **“terapia”**

**Giornata di studio**  
**Metodi naturali per il controllo dell'erosione e della stabilità dei pendii**  
**in caso di precipitazioni intense**

**Università degli Studi di Firenze**

**Aula Magna, Piazza San marco 4**

**Lunedì 20 marzo 2017**

**Impianti radicali profondi : effetti meccanici e idraulici**  
**sulla stabilità di versanti e fronti di scavo**

**Vincenzo Pane, Manuela Cecconi**  
**Università degli Studi di Perugia**



## CONTENUTI

1. Tecniche, principali caratteristiche dei sistemi radicali
2. Interazione terreno-radice (meccanica + idraulica)
3. Alcuni esempi di analisi di stabilità per terreno radicato

## PROTEZIONE DEL VERSANTE

Tra le varie tecniche per la riduzione della erosione :  
specie erbacee caratterizzate da radici sottili profonde

In aggiunta :

se le radici hanno una **elevata resistenza a trazione**, questa tecnica può migliorare le condizioni di equilibrio delle porzioni superficiali di versanti e fronti di scavo (rilevati, argini, copertura di discariche, ecc.)

# PROTEZIONE DEL VERSANTE

La tecnica consiste nella idro-semina di piante erbacee perenni :  
semplice, rapida esecuzione, non richiede alcuna manutenzione.

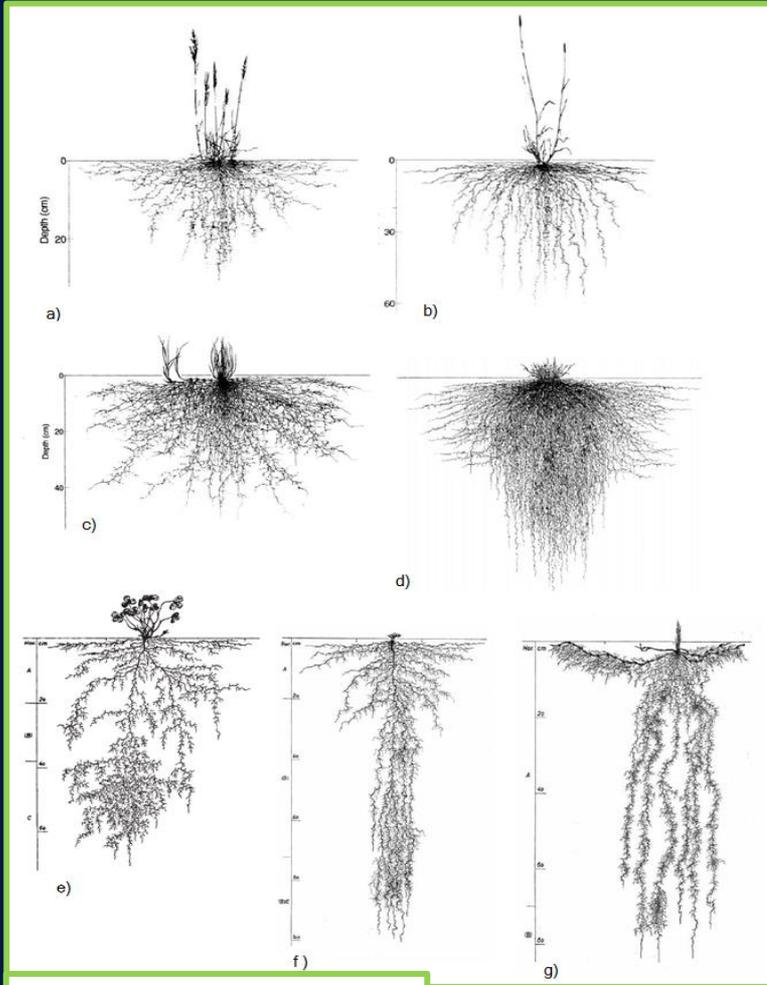
TECHNIQUE



# SISTEMA RADICALE

La complessa geometria del sistema radicale presenta una **grande variabilità**, dipendente da : specie erbacea, proprietà e stratigrafia del terreno, condizioni climatiche e ambientali (Coutts,1983).

ROOT SYSTEM



herbaceous species



# EFFETTI IDRAULICI E MECCANICI DELLE RADICI PROFONDE

## MECCANICO

Rinforzo del terreno fornito dalle radici

## IDRAULICO

Infiltrazione ridotta, diminuzione del contenuto d'acqua del terreno



aumento della suzione



**aumento della resistenza a taglio** (terreno non-saturo)

# EFFETTI IDRAULICI E MECCANICI DELLE RADICI PROFONDE

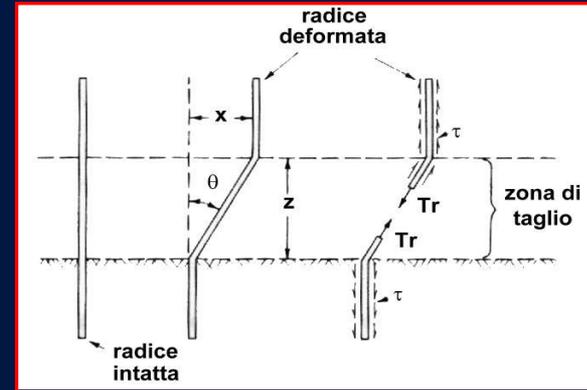
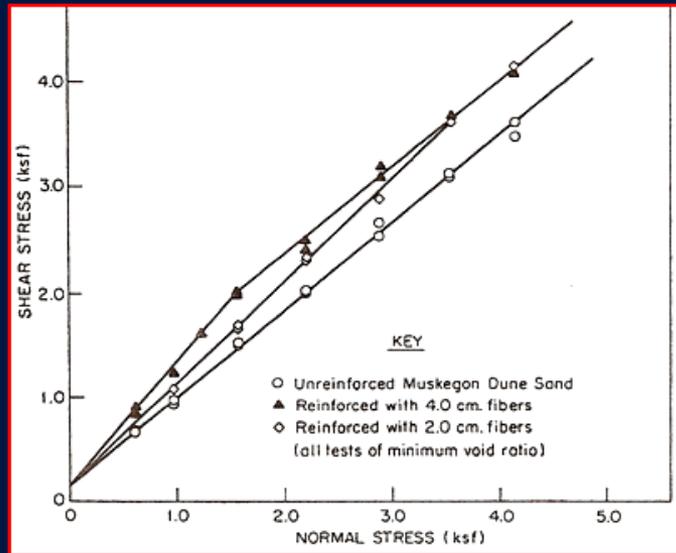
## MECCANICO

Rinforzo del terreno fornito dalle radici

# INTERAZIONE TERRENO/RADICE dal punto di vista meccanico

Il rinforzo meccanico dovuto alle radici è ben noto in letteratura ...

[e.g.: Wu, 1976; Waldron, 1977; Gray & Leiser, 1989; Gray & Sotir, 1996; Wang & Lee, 1998, Qi & Hu, 2006]

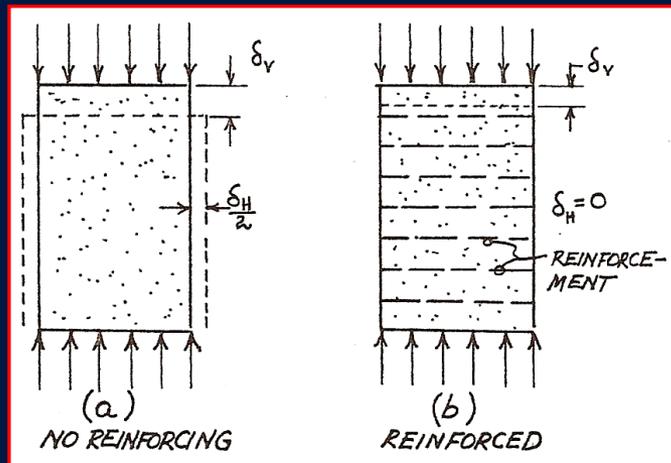


SOIL/ROOT  
MECHANICAL  
INTERACTION

## Risultati sperimentali di prove di taglio diretto

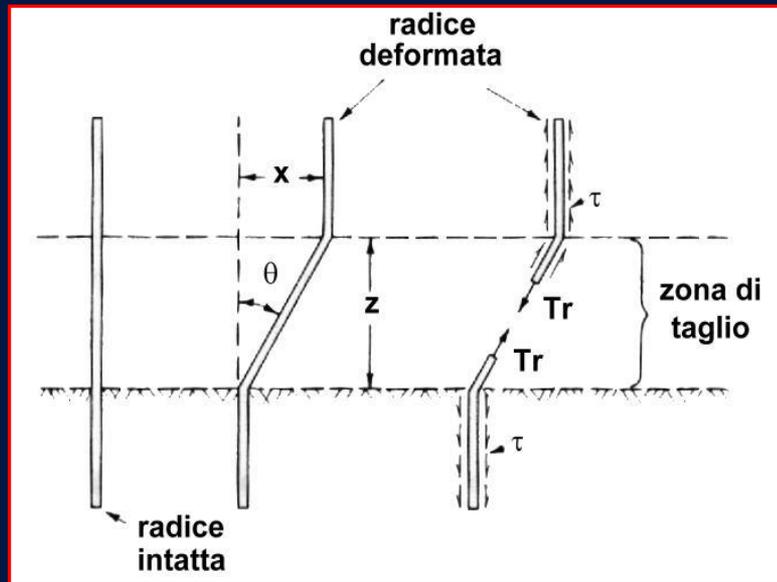
provini di sabbia asciutta costipata coltivati con radici di palma

Gray e Leiser, 1982



*Effetto : limitare la deformazione nella direzione del rinforzo*

# INTERAZIONE TERRENO/RADICE dal punto di vista meccanico



SOIL/ROOT  
MECHANICAL  
INTERACTION

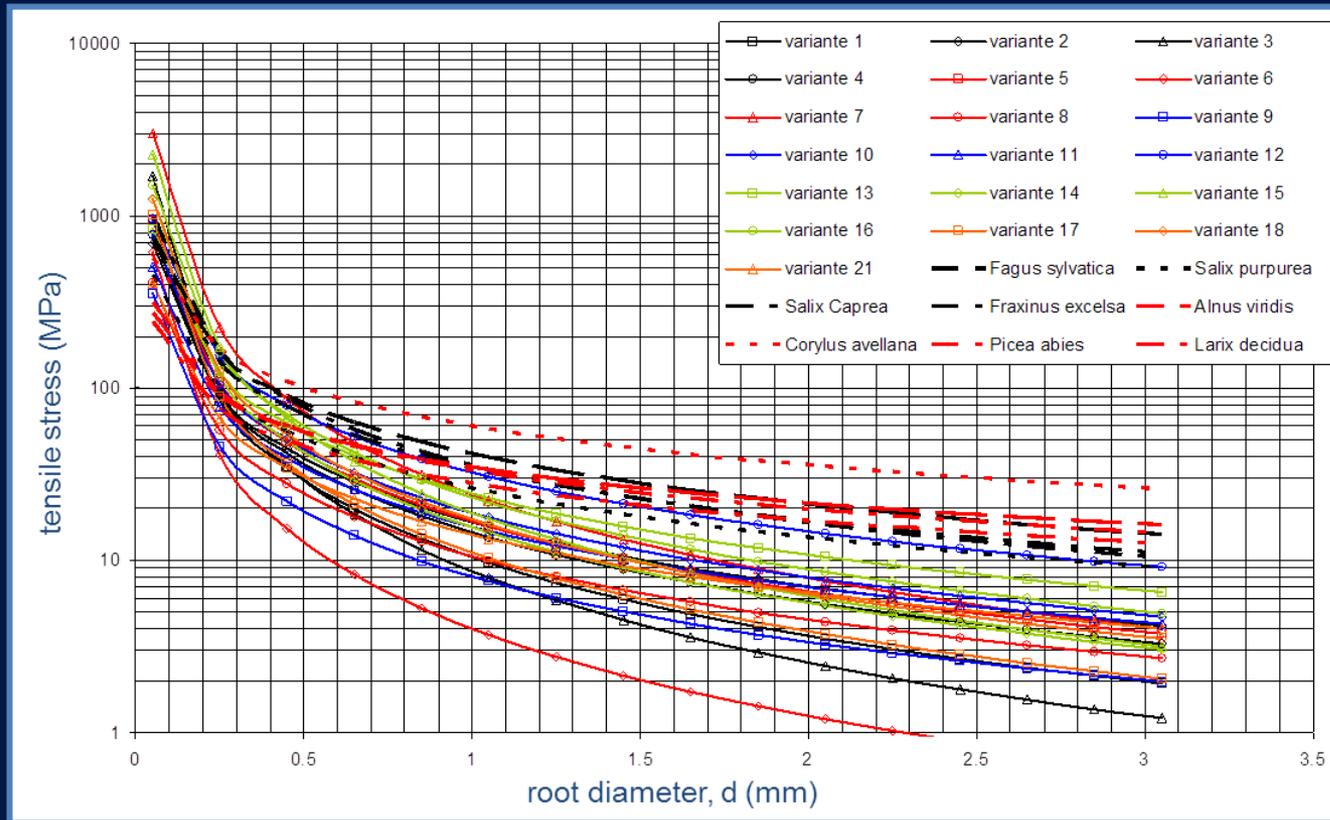
$$\Delta\tau_r(z) = RAR(z) \cdot \sum_{i=1}^n (t_{r,i} \cos \theta_i \cdot \tan \phi + t_{r,i} \sin \theta_i)$$

L' **incremento** di resistenza a taglio offerto dall' impianto radicale,  $\Delta\tau_r$  è funzione di :

- resistenza a trazione della radice ,  $t_r$
- angolo  $\theta$
- rapporto di area radicata :  $RAR = A_r(z)/A_s$
- angolo d'attrito del terreno,  $\phi$

# Resistenza a trazione della radice , $t_r$

$$\Delta\tau_r(z) = RAR(z) \cdot \sum_{i=1}^n (t_{r,i} \cos \theta_i \cdot \tan \phi + t_{r,i} \sin \theta_i)$$



Dati ottenuti da prove a trazione su specie arboree perenni appartenenti alle famiglie botaniche delle *Graminaceae* e *Leguminosae*

$$t_r = f(\text{diametro}) = a \cdot d^{-b} \quad [MPa]$$

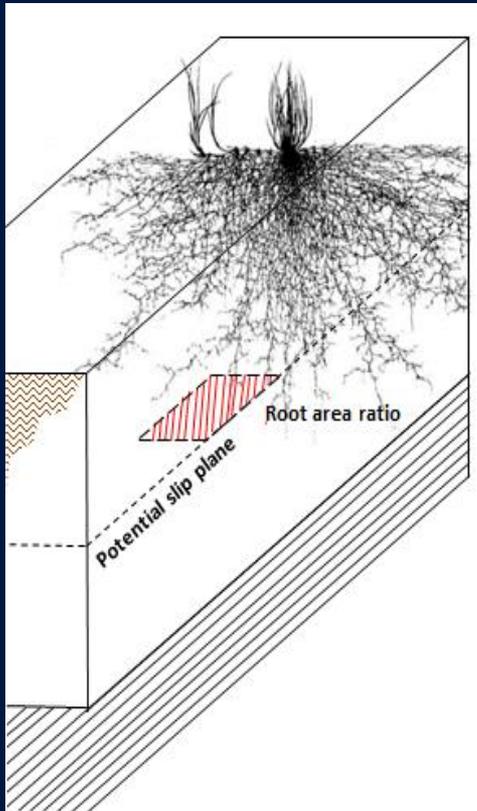
coeff.  $a$ ,  $b$  dipendono dalla specie

# RAPPORTO DI AREA RADICATA : $RAR = A_r(z) / A_s$

$$\Delta\tau_r(z) = RAR(z) \cdot \sum_{i=1}^n (t_{r,i} \cos\theta_i \cdot \tan\phi + t_{r,i} \sin\theta_i)$$

Nonostante la complessità e variabilità del sistema radicale, il profilo **RAR** tipicamente diminuisce con la profondità (z)

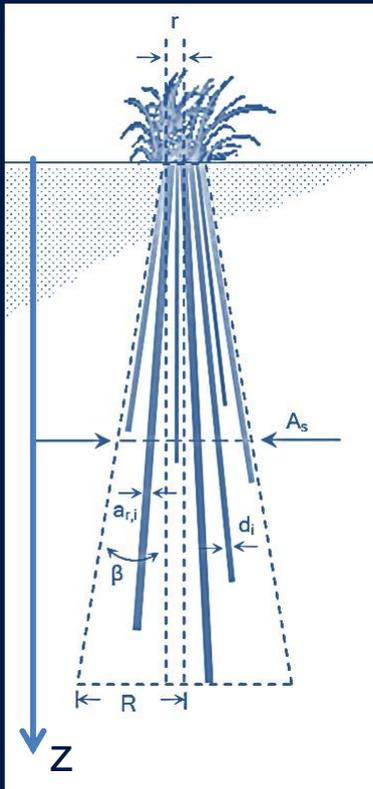
[e.g.: Abe & Ziemer, 1991; Feddes et al., 2001; Osman & Barakbah, 2006; Zuo et al., 2004]



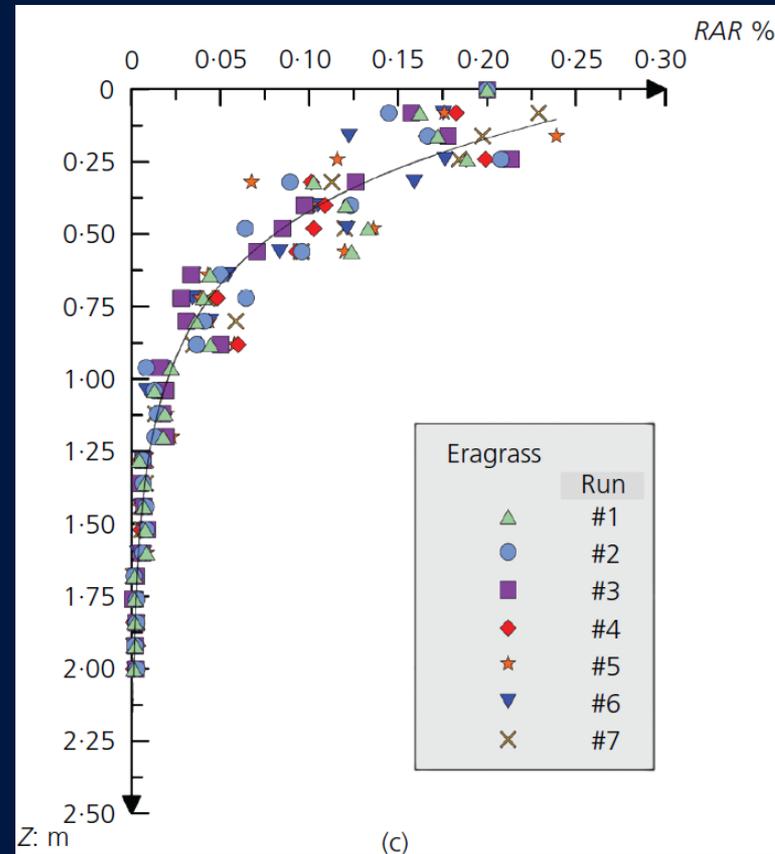
# RAPPORTO AREA RADICATA :

$$RAR = A_r(z) / A_s$$

modello geometrico  
(sistema radicale "fascicolato")



RAR vs. z



$$A_s(z) = \pi \cdot (z \tan \beta + r)^2$$

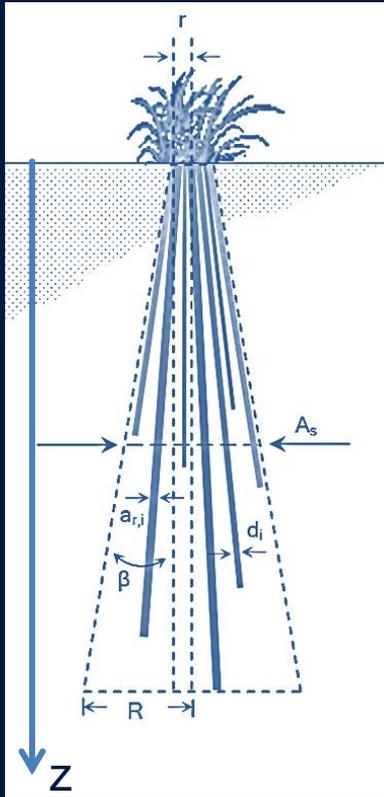
$$A_r(z) = \sum_{i=1}^m n(z, d_i) \cdot a_{r,i}$$

"funzione random" genera il numero di radici  $n(z, d_i)$   
per ogni strato e diametro della radice ( $m$  classi di diametro)  
[ $n$  varia con la profondità (10 – 40)]

SOIL/ROOT  
MECHANICAL  
INTERACTION

# RAPPORTO AREA RADICATA : $RAR = A_r(z)/A_s$

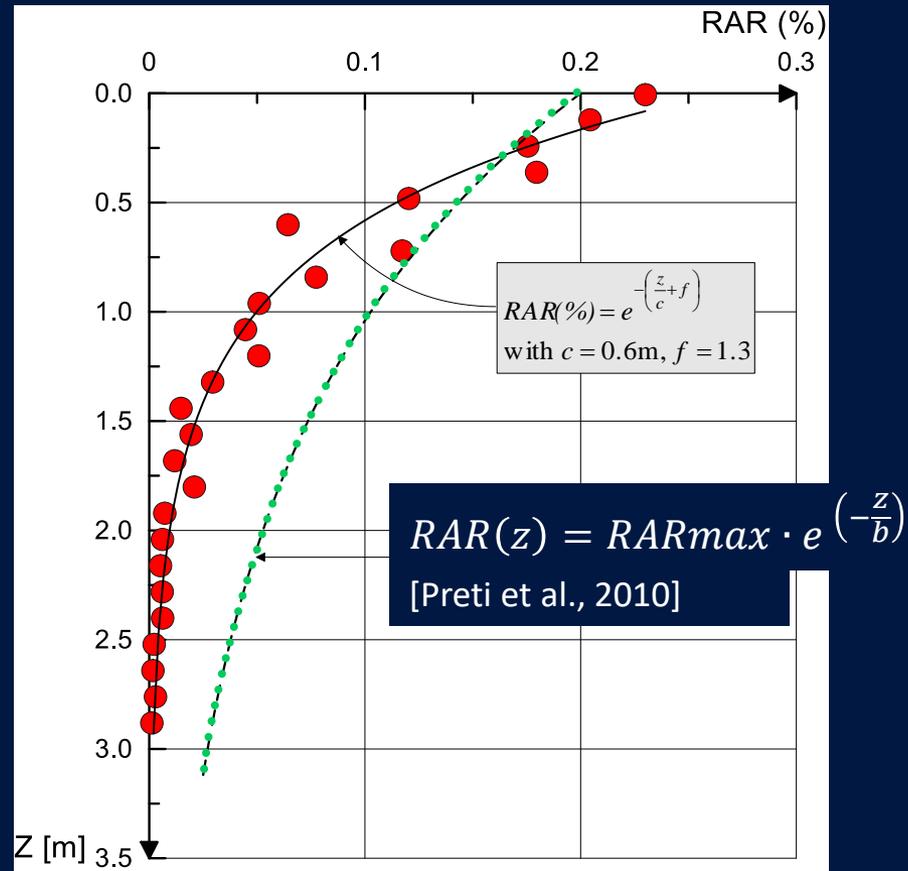
modello geometrico  
(sistema radicale "fascicolato")



$$A_s(z) = \pi \cdot (z \tan \beta + r)^2$$

$$A_r(z) = \sum_{i=1}^m n(z, d_i) \cdot a_{r,i}$$

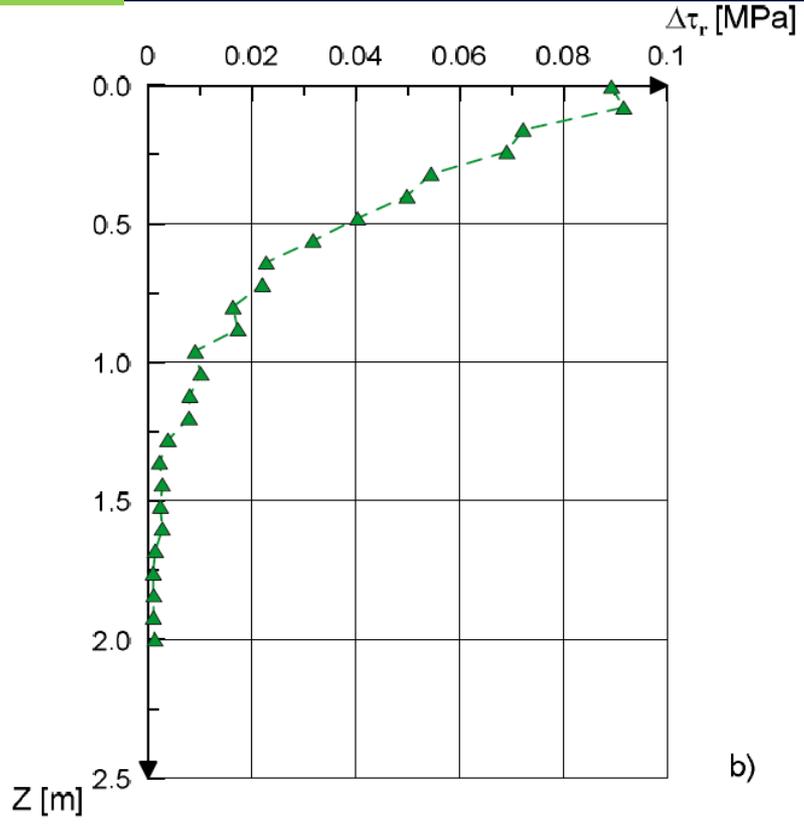
RAR vs. z



# INCREMENTO DELLA RESISTENZA A TAGLIO DEL TERRENO

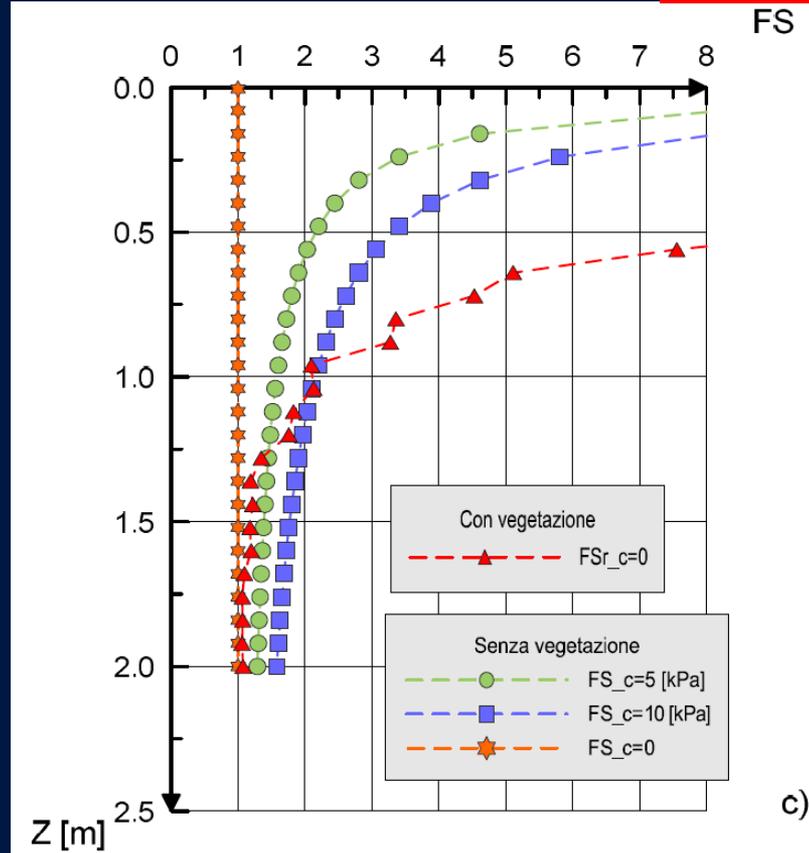
aumento di resistenza vs. z

$\Delta\tau(z)$



Fattore di sicurezza vs. z

$SF(z)$



SOIL/ROOT  
MECHANICAL  
INTERACTION

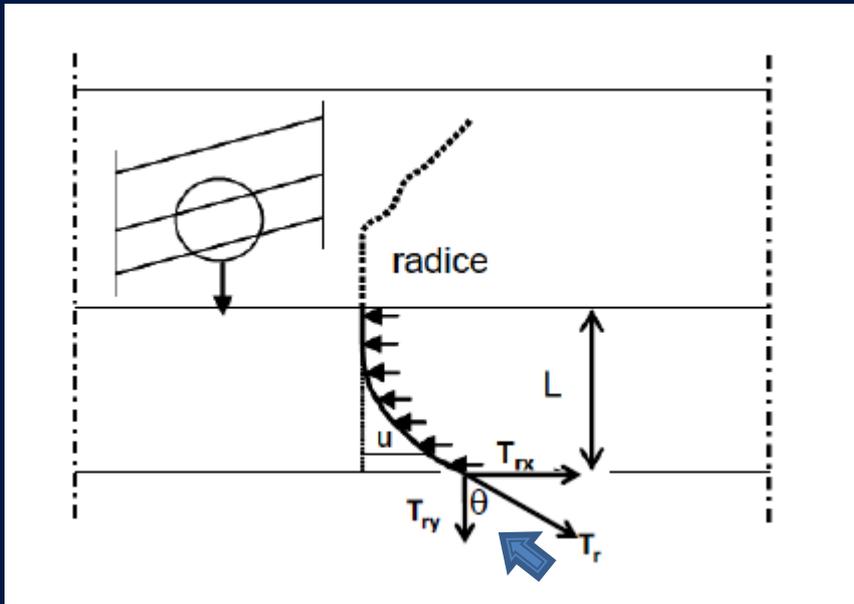
$$\Delta\tau_r(z) = RAR(z) \cdot \sum_{i=1}^n (t_{r,i} \cos \theta_i \cdot \tan \phi + t_{r,i} \sin \theta_i)$$

Metodo : pendio indefinito  
 $\phi = 30^\circ$ ,  $\alpha = 30$

# INTERAZIONE MECCANICA TERRENO/RADICE : approccio alternativo

(Wu, 1988; Belfiore & Urciuoli, 2004; Amato et al, 2006)

Ipotesi: radice: **cavo elastico** di rigidezza flessionale trascurabile  
al contatto radice-terreno si mobilita la resistenza passiva del terreno



Interazione radice/terreno nella zona di taglio  
(da Amato et al.. 2006)

$$E_r I_r \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} - T_{ry} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = R_p d$$

$$T_{rx} = R_p d L \quad T_{ry} = \frac{R_p d L^2}{2u}$$

$E_r I_r$  : rigidezza flessionale apparato radicale

$L$  : lunghezza della radice

$U$  : spostamento direzione  $x$

Resistenza a trazione:

$$T_r / A = t_m \frac{A_r}{A} = E_r \varepsilon_{ar} \cdot \frac{A_r}{A} = E_r \cdot \left( \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} \right) \cdot \frac{A_r}{A}$$

$\varepsilon_{ar}$  : deformazione assiale radice

# INTERAZIONE MECCANICA : CONFRONTO TRA I DUE APPROCCI

Approccio 1 (eq. 5 in figura):

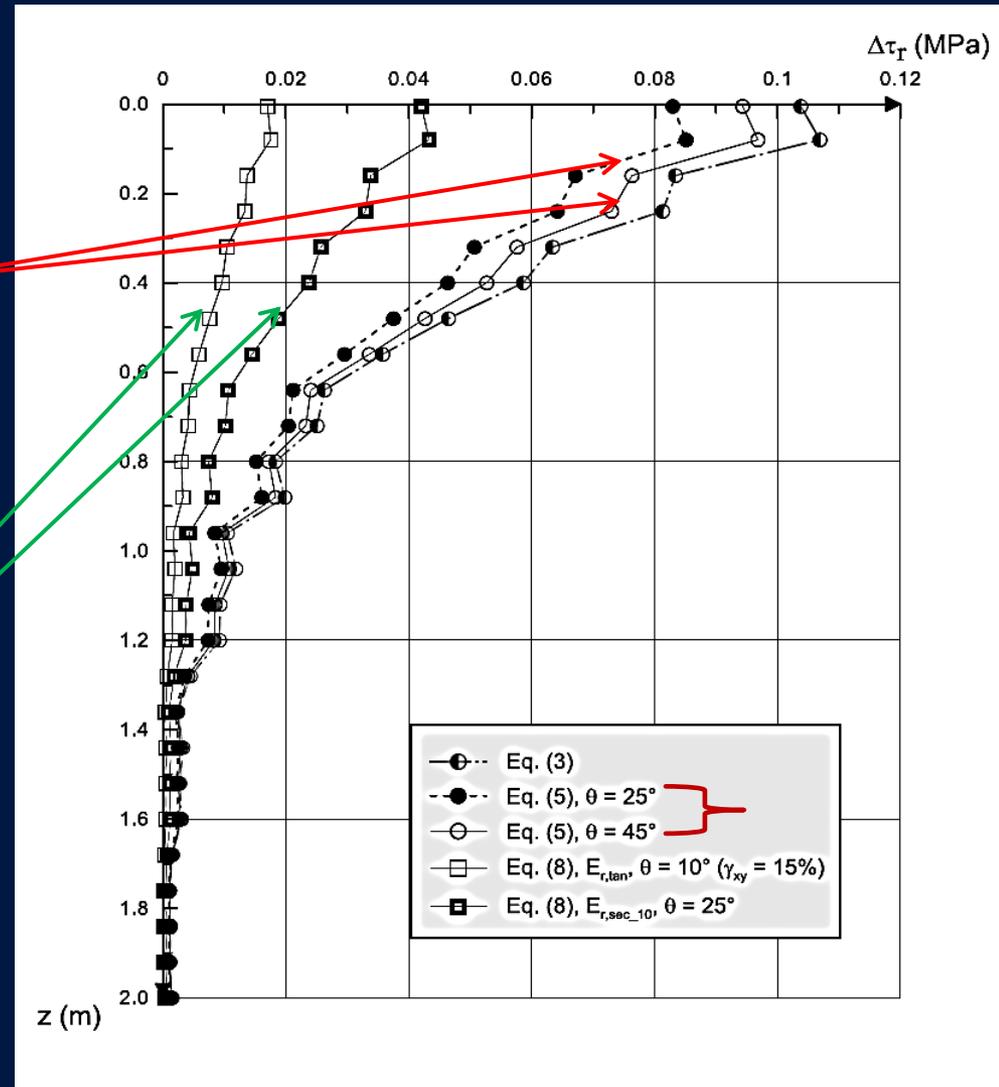
$$\Delta\tau_r(z) = RAR(z) \cdot \sum_{i=1}^n (t_{r,i} \cos \theta_i \cdot \tan \phi + t_{r,i} \sin \theta_i)$$



Approccio 2 (eq. 8 in figura)  
(radice ~ cavo elastico):

$$T_r / A = t_{rm} \frac{A_r}{A} = E_r \varepsilon_{ar} \cdot \frac{A_r}{A} = E_r \cdot \left( \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} \right) \cdot \frac{A_r}{A}$$

Nota: nell'Approccio 1, l'influenza dell'angolo  $\theta$  è lieve



$\Delta\tau_r$  offerto da apparato radicale profondo (*Eragross*).  
Confronto fra diversi approcci di calcolo (angolo di attrito del terreno,  $\phi' = 35^\circ$ ).

# EFFETTI IDRAULICI E MECCANICI DELLE RADICI PROFONDE

## IDRAULICO

Infiltrazione ridotta, diminuzione del contenuto d'acqua del terreno



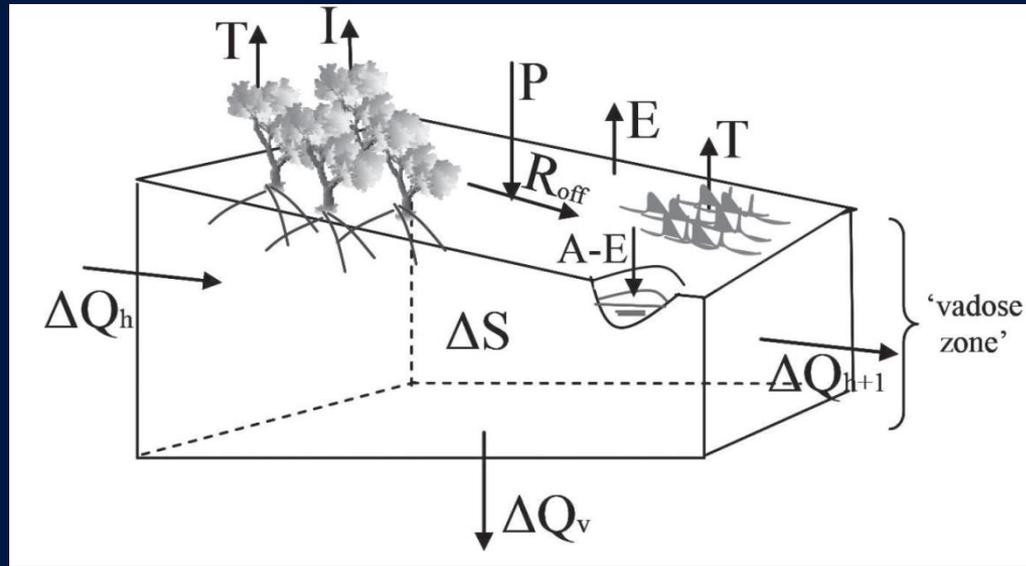
aumento della suzione



**aumento della resistenza a taglio** (terreno non-saturo)

# DESCRIZIONE DEL PROBLEMA

Precipitazione (P)



DESCRIPTION  
OF  
THE PROBLEM

I = intercettata da vegetazione

$R_{off}$  = ruscellamento (runoff)

A-E = accumulata in pozzanghere

ET = evapotraspirazione

$\Delta S$  = variazione in contenuto d'acqua nel terreno

$\Delta Q$  = flusso d'acqua in profondità o verso valle

Bilancio massa acqua nella frangia non satura (in un tempo  $\Delta t$ )

$$P - [I + R_{off} - (A - E)] = ET + \Delta S + \Delta Q$$

[after Blight, 2003]

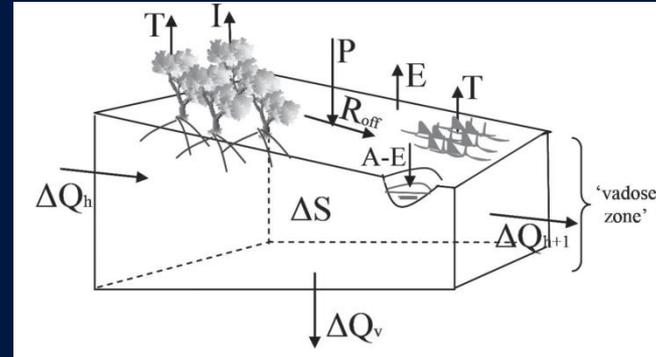
# DESCRIZIONE DEL PROBLEMA

$$P - [I + R_{off} - (A - E)] = ET + \Delta S + \Delta Q$$

Acqua che si infiltra nel terreno

Stimata con :

- eq. empiriche
- modelli fisici
- **modelli teorici** che simulano il processo di infiltrazione nel dominio non-saturo. Eq. differenziale di Richards  $\Longrightarrow$  Finite Element Method
- (es: Seep/W; **Vadose/W**; Plaxis 2-D; Code-Bright; ecc.)



DESCRIPTION  
OF  
THE PROBLEM

# DESCRIZIONE DEL PROBLEMA

$$P - [I + R_{off} - (A - E)] = ET + \Delta S + \Delta Q$$

Evapo-transpirazione dipende da :

- Tipo di vegetazione
- Condizioni atmosferiche
- Caratteristiche del terreno
- Contenuto d'acqua del terreno



OPERAZIONE COMPLESSA

DESCRIPTION  
OF  
THE PROBLEM

Allen et al., 1998

<b>FAO Penmann - Monteith method</b> [ALLEN <i>et al.</i> , 1998] (Actual transpiration, $T$ , and Actual evaporation, $E$ )	<i>Reference Evapotranspiration</i>	$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_{sat} - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (\text{mm/day}) \quad (d)$
	<i>Single Coefficient</i>	$ET_C = k_C \cdot ET_0 \quad (\text{mm/day}) \quad (e)$
	<i>Dual Coefficient</i>	$ET_C = (k_{cb} \cdot k_{st} + k_e) \cdot ET_0 \quad (\text{mm / day})(f) \quad \text{where}$ $k_{st} = 1 \quad D_r < RAW$ $k_{st} = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad RAW < D_r < TAW \quad (f_1)$ $k_e = k_r \cdot (k_{c,max} - k_{cb}) \leq f_{ew} \cdot k_{c,max} \quad (f_2)$ <p>in which</p> $k_r = 1 \quad D_o < REW$ $k_r = \frac{TEW - D_o}{TEW - REW} \quad REW < D_o < TEW \quad (f_3)$

$ET_0$  = reference ET : terreno ricoperto da ipotetica erba standard (h=12cm, surface resistance = 70 s/m, albedo = 0.23)

# ASSORBIMENTO DI ACQUA DELLA RADICE (ROOT WATER UPTAKE)

dal terreno circostante

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) - S(z, t)$$

Eq. di Richards modificata

[e.g. Mathur & Rao, 1999]

PHENOMENA

termine aggiuntivo :  $S(z, t) = C(z, t) \cdot TR$

$S(z, t)$  = *sink term* = contenuto d'acqua assorbito dalle piante, per unità di tempo

[Feddes et al., 1976; Prasad, 1988]

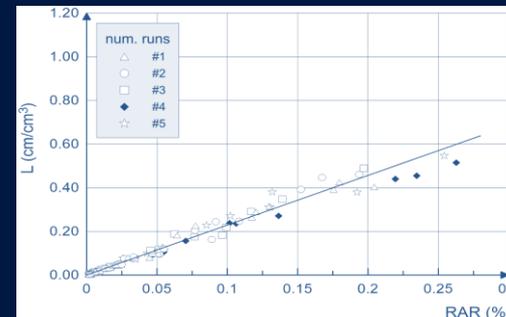
TR: traspirazione giornaliera

C : funzione della permeabilità (K) e della densità di lunghezza radicale

$$C(z, t) = \frac{K(h) \cdot L(z)}{\int_0^{z_{rmax}} K(h) \cdot L(z) dz}, \quad \int_0^{z_{rmax}} C(z, t) dz = 1$$

$$L(z) = \frac{\sum_{i=1}^m n(z, d_i) \cdot h_i}{z_{rmax} \cdot A_{rs}}$$

$L(z)$ : densità di lunghezza radicale



# ANALISI DI STABILITA' per un terreno radicato

## STEP 1 : calcolo del profilo di suzione $s(z)$

Alternativa 1 : calcolo "manuale"

- calcolare la traspirazione giornaliera TR (FAO-P&M method)
- stimare l'assorbimento d'acqua (sink term S)  $\longrightarrow$  profilo del contenuto d'acqua,  $\theta(z)$
- dalla curva di ritenzione idrica del terreno,  $\theta = f(s)$   $\longrightarrow$  **suzione  $s(z)$**

Alternativa 2 : calcolo con codici di calcolo (es: VADOSE/W)  
eq. Richards modificata  $\longrightarrow$  **suzione  $s(z)$**

## STEP 2 :

- calcolare la resistenza dovuta alla **non-saturazione** :  $\tau_{r\_unsat}(z) = f(s(\theta))$
- calcolare incremento  $\Delta\tau_r(z)$  dovuto al **rinforzo** delle radici
- calcolare il Fattore di Sicurezza  $SF_r(z)$

$$SF_r(z) = \frac{\tau_{r\_unsat}(z) + \Delta\tau_r(z)}{\gamma z \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha}$$

(metodo : pendio indefinito)

# Analisi numeriche Vadose/W

(GeoStudio 2007)

Esempio di calcolo:

versante : inclinazione  $\alpha = 30^\circ$   
sabbia fine :  $\phi = 30^\circ$ ,  $c = 0$   
specie erbacea : Eragrass

## Soil – physical properties

Saturated volumetric water content $\theta_s$ (mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> )	0.508	Soil–water retention properties, (van Genuchten, 1980)	$n = 1.39$
Residual volumetric water content $\theta_r$ (mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> )	0.120		$\alpha^{-1} = 12.2 \text{ kPa}$
		Saturated hydraulic conductivity $k_s$ (m/s)	$1.1 \times 10^{-7}$

## Vegetation boundary conditions

Max. root depth $z_{r,\max}$ (m)	2 m	Wilting point (kPa)	1500 kPa
Average root diameter (mm)	0.66 mm	LAI	2.7

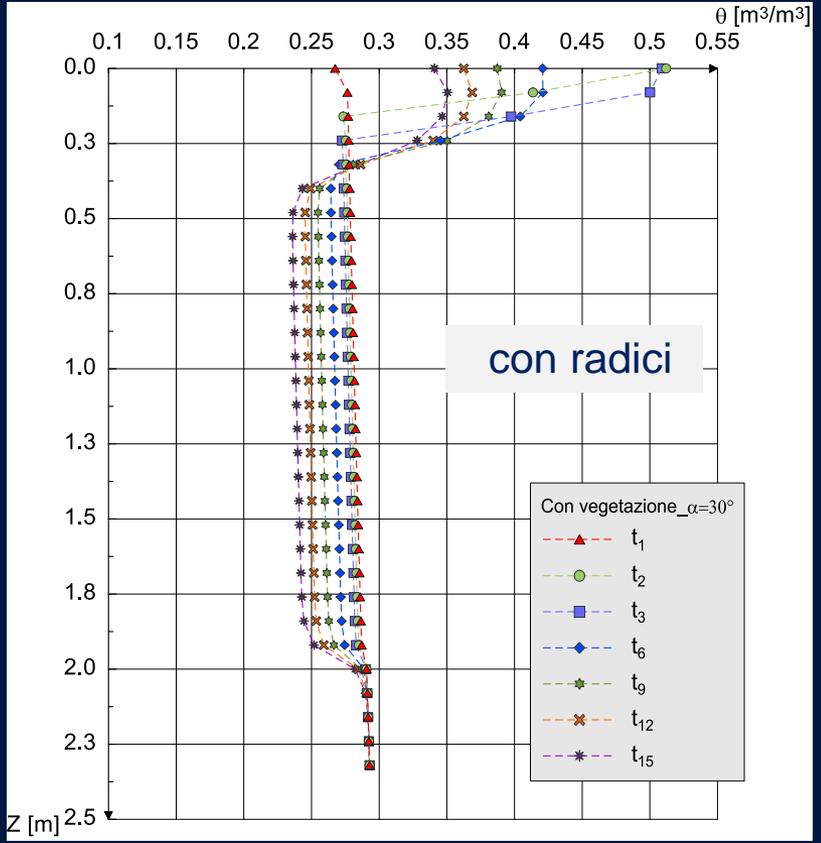
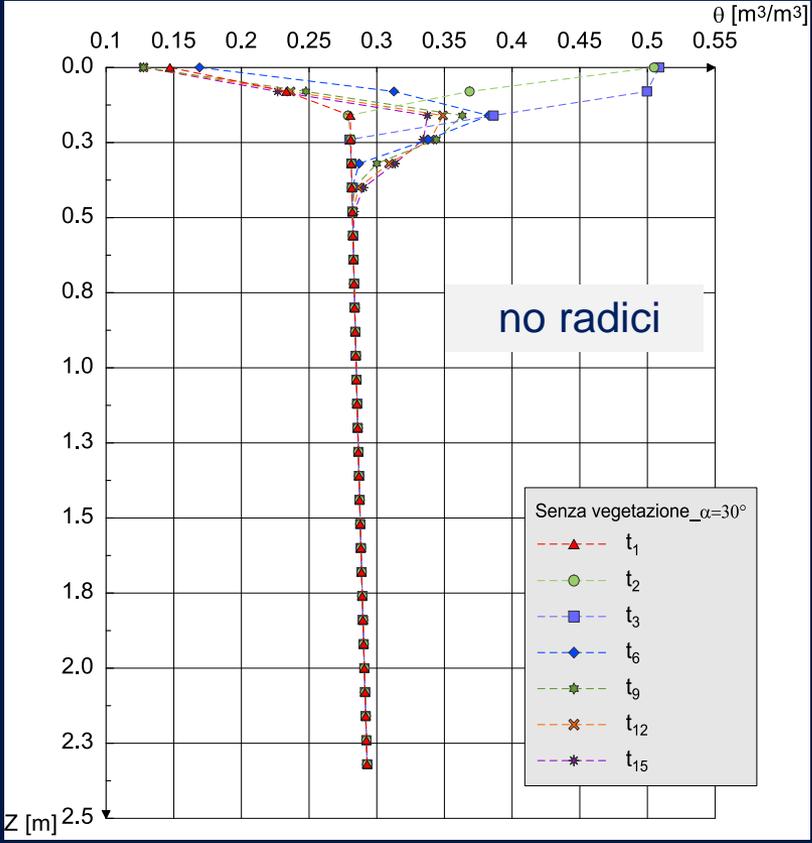
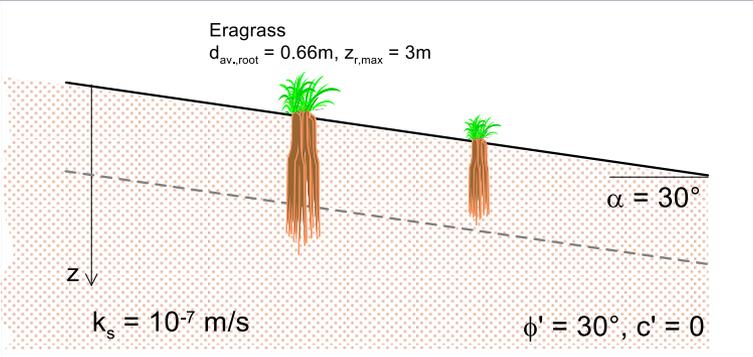
## Climate boundary conditions

$T_{\max}$ (°C)	26°C	Wind speed (m/s)	3.6
$T_{\min}$ (°C)	18°C		

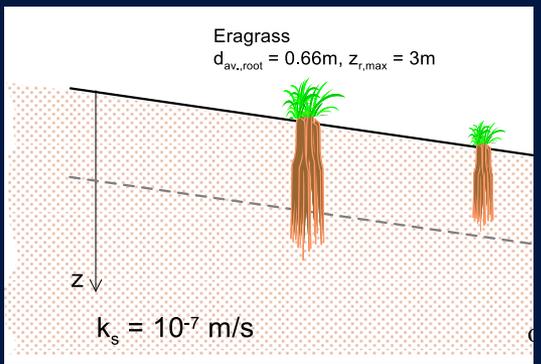
Table 1. Hydrological soil properties, climate and vegetation boundary conditions

Evento di pioggia : giorno 1, 40 mm  
giorno 2, 80 mm

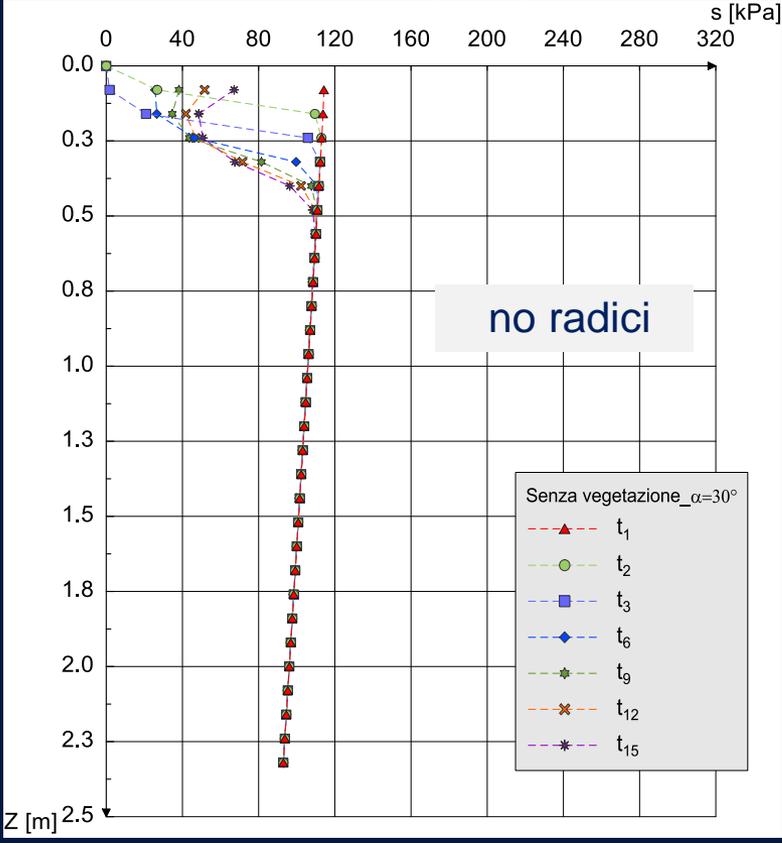
# ESEMPIO 1 : falda assente



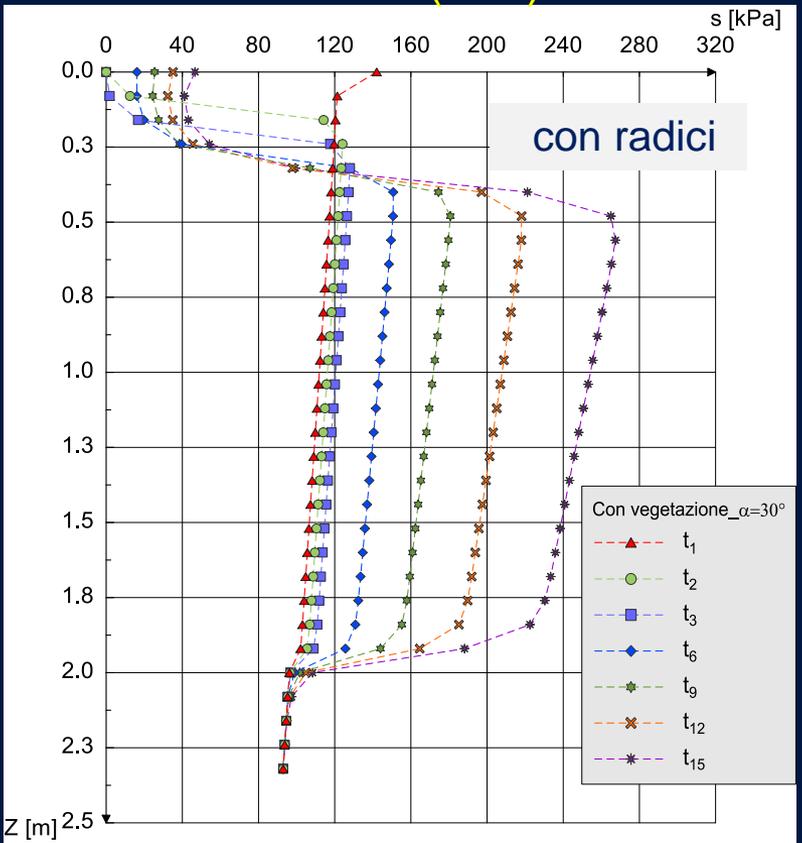
# ESEMPIO 1 : falda assente



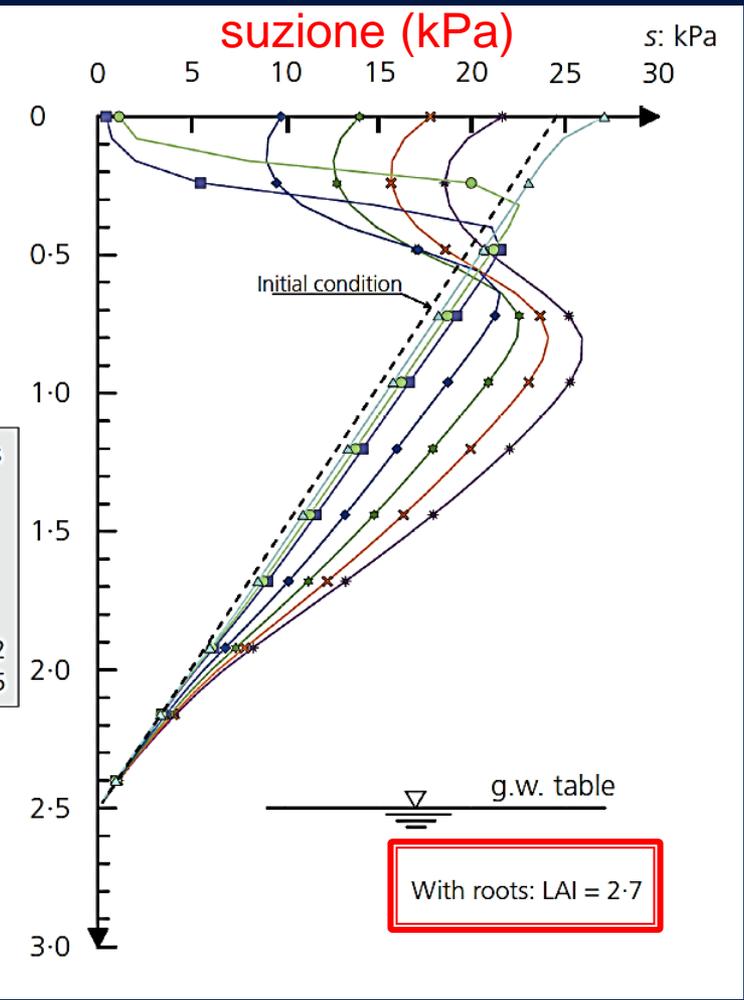
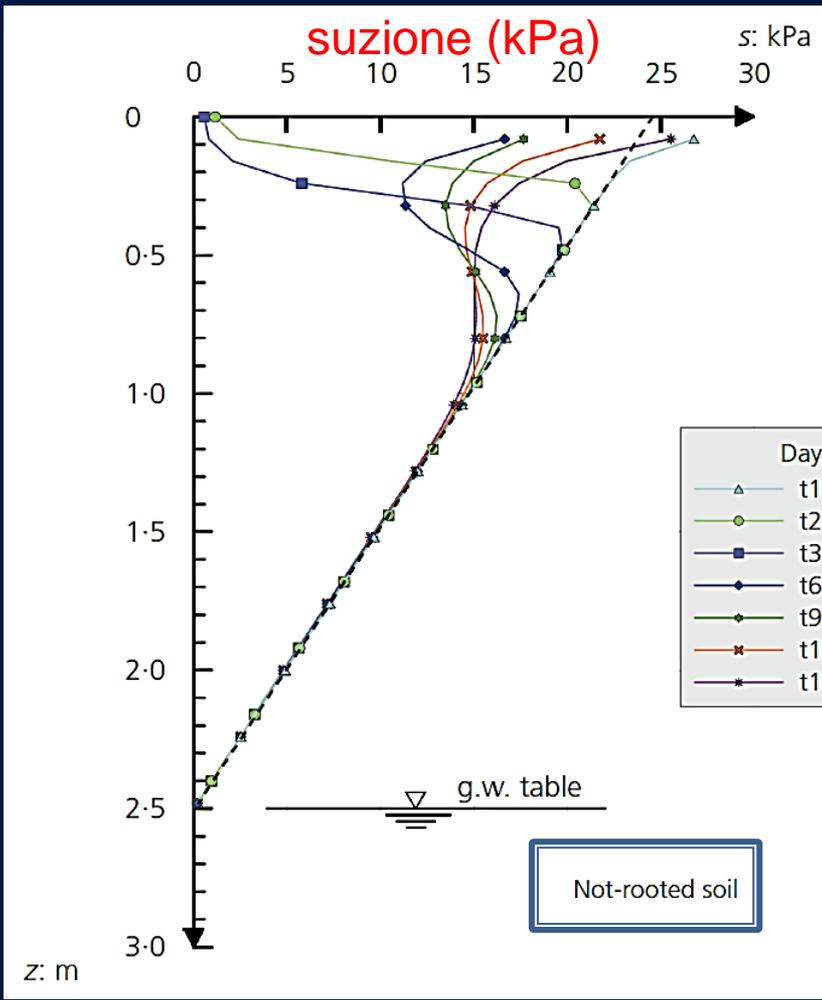
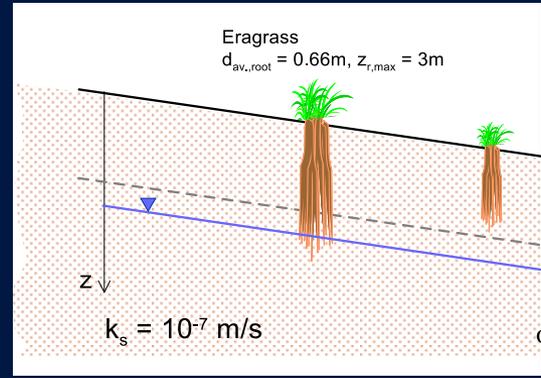
suzione (kPa)



suzione (kPa)



# ESEMPIO 2 : falda a -2.5 m



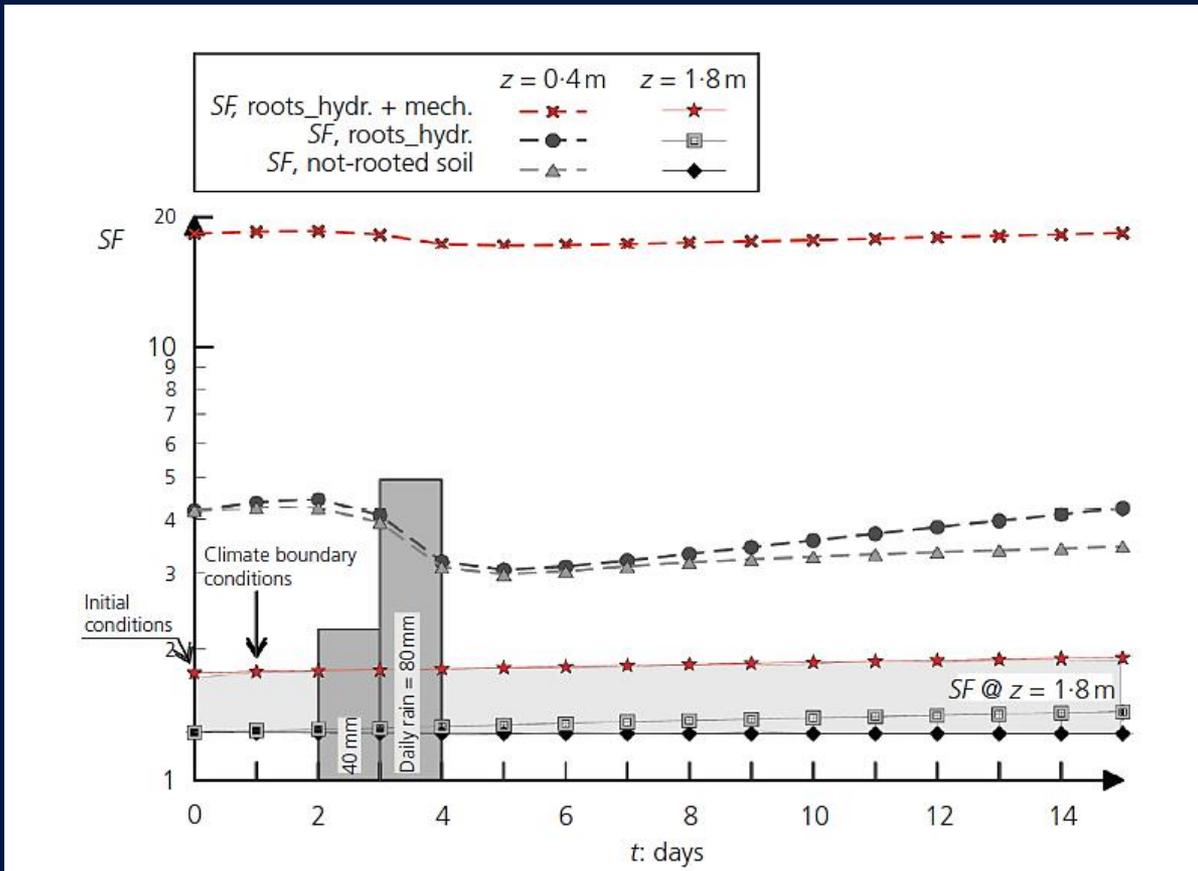
# ESEMPIO 2 : falda a -2.5 m

$$SF_r(z) = \frac{\tau_{r\_unsat}(z) + \Delta\tau_r(z)}{\gamma z \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha}$$

usando Vanapalli et al. (1996) per  $\tau_{r\_unsat}(z)$  :

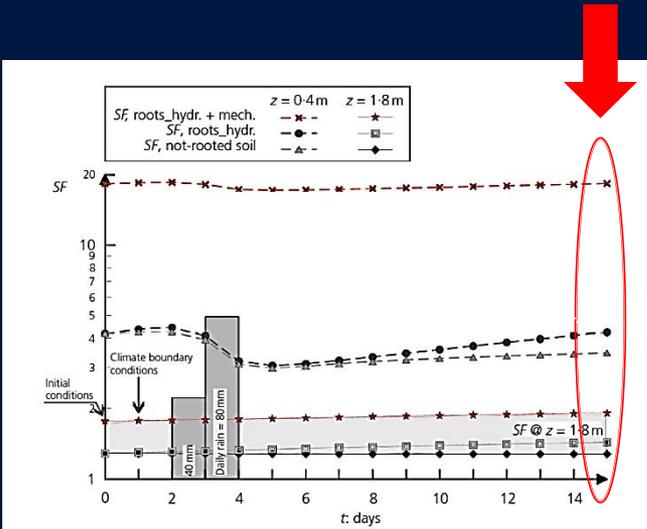
$$SF(z) = \left(1 + \frac{S_r(z)s(z)}{\gamma z \cos^2\alpha}\right) \frac{\tan\phi'}{\tan\alpha} + \frac{c' + \Delta\tau_r(z)}{\gamma z \cos\alpha \sin\alpha}$$

## coefficiente di sicurezza vs. tempo

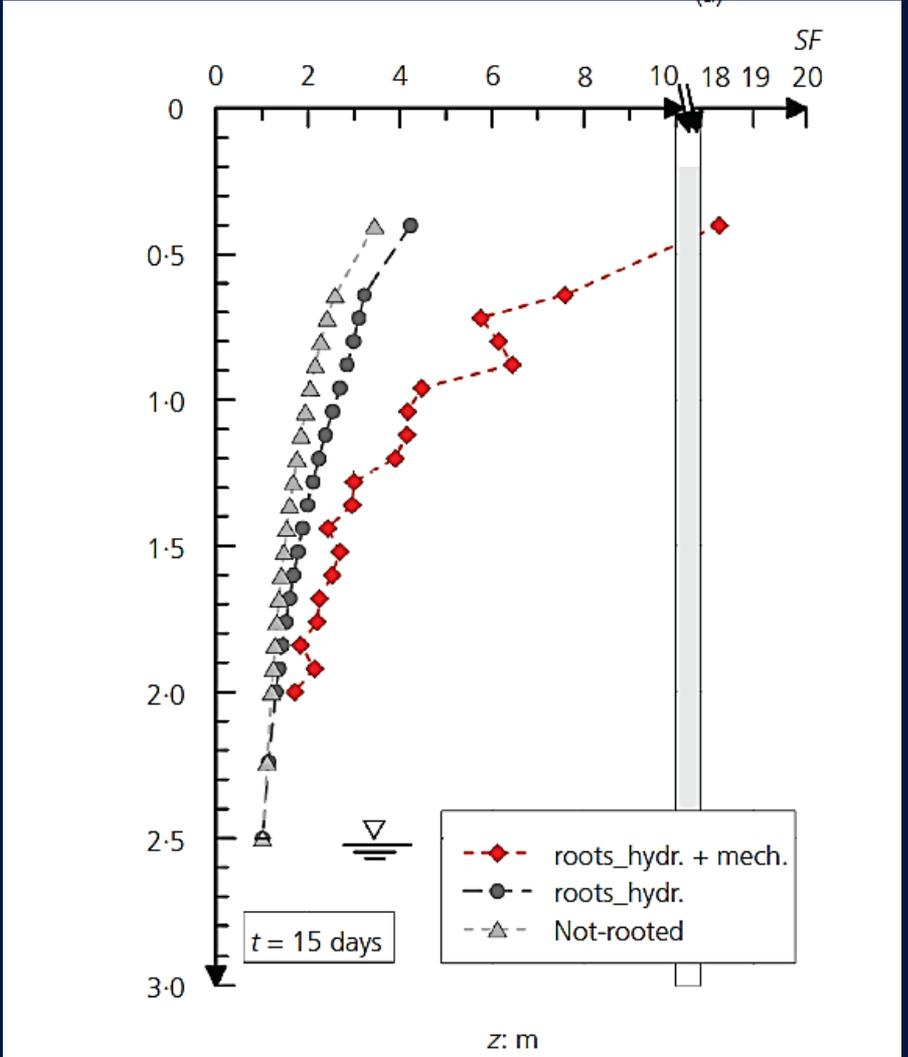


# ESEMPIO 2 : falda a -2.5 m

@tempo t = 15 giorni



SF vs. profondità, z



# Riferimenti bibliografici

- Allen R, Pereira LS, Raes D and Smith M (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, p. 326.
- Amato M., Belfiore G., Mazzoleni S., Urciuoli G. (2006). *Analisi del contributo meccanico della vegetazione alla resistenza delle coltri di terreno superficiale*. Questioni di Ingegneria Geotecnica, Vol. I, 89- 104, Hevelius Edizioni.
- Blight GE (2003) The vadose zone soil-water balance and transpiration rates of vegetation. *Géotechnique* 53(1): 55–64.
- Bonfanti F and Bischetti GB (2009) Resistenza a trazione delle radici e modello di interazione terreno-radici. In Rapporto Interno (in Italian). Istituto di Idraulica Agraria, Università degli Studi di Milano, Milan, Italy.
- Cecconi M., Pane V., Napoli P., Zarotti C., 2013. Mechanical and hydraulic effects of deep roots planting on slope stability. TC 215 CPEG 2013 Symposium, Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, Torino, Italy , July 2013, p. 533-540.
- Cecconi M., Napoli P., Pane V. (2015). “Effects of soil vegetation on shallow slope instability”. *Environmental Geotechnics*, vol. 2, issue EG3, p. 130–136.
- Cecconi M., Mannocchi F., Napoli P., Pane V., Todisco F., Urciuoli G., Vecchietti A . (2014). “Interventi di protezione dei versanti per il controllo dei fenomeni erosivi e la stabilizzazione superficiale”, Associazione Geotecnica Italiana, XXV Convegno Nazionale di Geotecnica, Baveno 4-6 giugno 2014, ISBN9788897517030, Edizioni AGI, Roma, p. 441- 448.
- Feddes RA, Kowalik P, Malinka KK and Zaradny H (1976) Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *Journal of Hydrology* 31: 13–26.
- Gray D.H., Leiser A.T., 1989. Biotechnical slope protection and erosion control. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida.
- Preti F., Dania A., Laio F., 2010. *Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes*. *Ecological Engineering*, 36, 305–316.
- Selim HM and Iskandar IK (1978) Nitrogen behavior in land treatment of wastewater: a simplified model. State of Knowledge in Land Treatment of Wastewater. Cold Regions Research and Engineering Lab, Hanover, NH, pp. 171–179.
- Vanapalli SK, Fredlund DG, Pufahl DE and Clifton AW (1996) Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal* 33: 379–392.
- Wu, T.H., 2013. *Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design*. *Can. Geotech. J.*, 50, 259–274.