



FACHSTELLE FÜR FORSTLICHE BAUTECHNIK  
CENTRE POUR LE GÉNIE FORESTIER  
CENTRO PER IL GENIO FORESTALE  
POST SPEZIALISÀ PER TECNICA DA CONSTRUCCIUN FORESTALA

---

Bund, Kantone und Fürstentum Liechtenstein

Bovel  
CH-7304 Maienfeld  
Telefon +41 81 403 33 62  
e-mail walter.kraettli@ibw.ch  
www.fobatec.ch

# Stabilisation de glissements

Support de cours

Plaffeien, 11.06.15

## Impressum

Editeur:

Fachstelle für forstliche Bautechnik  
Bovel  
CH-7304 Maienfeld  
Telefon +41 81 403 33 62  
e-mail walter.kraettli@ibw.ch  
www.fobatec.ch



FACHSTELLE FÜR FORSTLICHE BAUTECHNIK  
CENTRE POUR LE GÉNIE FORESTIER  
CENTRO PER IL GENIO FORESTALE  
POST SPEZIALISÀ PER TECNICA DA CONSTRUCCIUN FORESTALA

---

Bund, Kantone und Fürstentum Liechtenstein

Auteurs:

Walter Krättli, Fachstelle forstliche Bautechnik (fobatec), ibW Maienfeld  
Massimiliano Schwarz, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen  
Traduction : Philippe Raetz, Centre pour le génie forestier Cefor Lyss

2015



Introduction.....	3
Notions de bases et conséquences pour la planification de mesures de stabilisation de nature technique et écologique (M. Schwarz) ....	6
Bases de calcul.....	6
Paramètres géotechniques .....	10
Facteurs d'instabilité .....	12
Analyse de sensibilité de la méthode du „remblai infini“.....	15
Glissements – évaluer la situation correctement – agir en conséquence (W. Krättli).....	18
Intervention immédiate, oui ou non ?.....	18
A faire à moyen et long terme.....	18
Exécution des mesures.....	21
Mesures techniques possibles (W. Krättli) .....	22
Captation et dérivation des eaux de surface et des eaux souterraines.....	22
Aplanir.....	30
Soutènement .....	32
Retenir .....	34
Protection de la surface.....	36
Limites .....	37
Mesures de génie biologique (M. Schwarz) .....	38
Effets de la végétation .....	38
Développement temporel de l'effet d'armature des racines et sa signification dans les mesures biologiques.....	40
Sources.....	50
Annexes .....	52
Storme analyse de l'événement.....	52
Exemple Econome .....	56

## Introduction

La société organise, modèle et exploite son environnement. Dans ses activités, elle est continuellement contrariée par les processus naturels de formation du paysage. Les glissements et les instabilités de pente sont des processus inéluctables. Dès lors, leur stabilisation revêt un caractère hautement temporaire. Il s'agit plutôt d'une adaptation, d'un compromis entre une nouvelle donne et des exigences humaines qui doivent s'y adapter.

Les glissements et les instabilités sont définis comme suit dans les recommandations de la Confédération: „Mouvements de parties de pente rocheuse ou de masses de terrain meubles vers le bas le long d'un horizon de glissement (de cisaillement) ». (lateltin et al. 1997)

Phénomènes complexes, les glissements peuvent se définir et être comparés entre eux selon différents point de vue :

- Classification selon la **vitesse** de déplacement et le **type** de déplacement

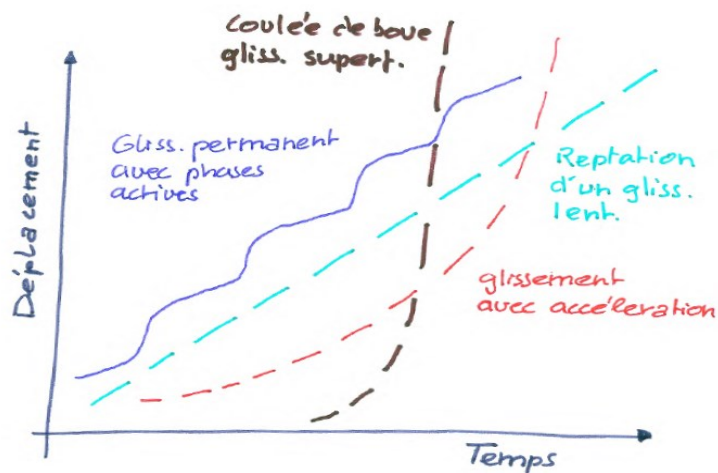


Illustration 1 Types de glissement selon la vitesse de déplacement, principalement les glissements permanents, les glissements spontanés et les coulées de boue (Schwarz 2015 mod. selon Parriaux).

- Classification selon l'**activité** seulement

Repose sur la constatation de la vitesse de glissement ( $v$ ) sur une longue période de temps (généralement en cm par an):

$v \leq 2\text{cm} / \text{an}$	substable	très lent
$v \leq \text{dm} / \text{an}$	peu actif	lent
$v > 0.1\text{m} / \text{an}$	actif	lent avec phases d'accélération

- Classification selon la profondeur (de l'horizon de glissement)

Superficiel	0 à 2m
Moyen	2 à 10m
Profond	> 10m



– Classification selon le mécanisme de formation

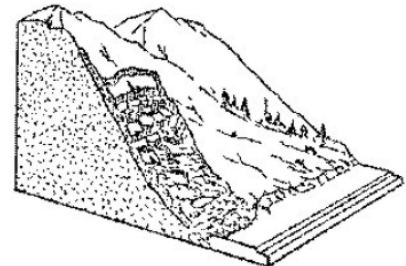
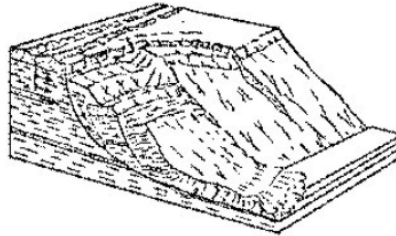
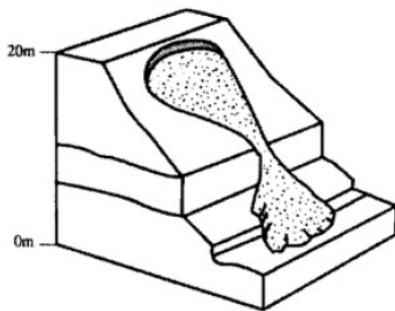


Illustration 2: coulée de boue de (Krummenacher B., Tobler D, 2009)

Glissement de rotation

Glissement

de

translation

Lors d'un glissement de **translation** (illustration 2), des paquets de couches ou des couches entières glissent sur une zone faible existante (discontinuité, schistes, fissure ou cassure). La zone faible est souvent imperméable, saturée en eau lors de précipitations et favorise ainsi le glissement. Les surfaces de glissement peuvent être importantes (de quelques m<sup>2</sup> ou km<sup>2</sup>). Elles sont fréquentes dans les flyschs, les schistes marno-calcaire et les schistes métamorphisés (PLANAT 2015).

Les glissements **de rotation** sont caractérisés par un horizon de glissement en arc de cercle et une pente très forte au niveau de la niche d'arrachement (illustration 2). Le volume des glissements de rotation sont généralement assez faibles. Les matériaux restent plus ou moins intacts dans leur mouvement. L'horizon de glissement se forme dans les matériaux meubles homogènes argileux ou limoneux. On observe souvent des fissures au sommet du glissement. Au bas du glissement il se forme des bourrelets qui, s'ils sont sursaturés d'eau, peuvent se transformer en coulées de boue (dans les matériaux argileux limoneux et sablonneux fins) (PLANAT 2015).

Une **coulée de boue** se forme dans les pentes raides et résulte d'un effondrement rapide de matériaux meubles (généralement un mélange de pierres, de bois, de matériaux et de végétation) et de beaucoup d'eau, raison de la rapidité du phénomène. Souvent les coulées de boue résultent d'un glissement superficiel sans qu'il soit possible d'identifier clairement un horizon de glissement. Elles sont fréquentes dans les matériaux plutôt imperméables (moraines argileuses, suspensions limoneuses). Le volume des coulées de boue n'est pas très important généralement en raison du caractère superficiel du phénomène. (PLANAT 2015).

– Classification simplifiée afin d'estimation du danger

**Les glissements permanents** (processus permanent) se déplacent régulièrement vers le bas sur une longue période. Le mouvement suit un horizon de glissement existant plus ou moins bien formé ou se déplace le long de zones de failles marquées (Bolliger et. al. 2004).

**Les glissements spontanés** : ce sont des masses de matériaux meubles qui se mettent en mouvement assez rapidement sous l'effet d'une perte de la résistance au cisaillement. L'horizon de cassure fait alors office d'horizon de glissement. Le terme de „glissement secondaire» ne recouvre que partiellement la notion de glissement spontané : il sous-entend que le glissement fait partie d'une zone de glissement préexistant. Lors d'un glissement spontané il y a toujours formation d'un nouvel horizon de glissement, ce qui n'est pas le cas d'un glissement permanent. (Bolliger et. al. 2004).

**Coulées de boue** : Mélanges de matériaux meubles (seules les parties supérieures du sol ainsi que la végétation) et d'eau qui s'écoule très rapidement. (Bolliger et. al. 2004).

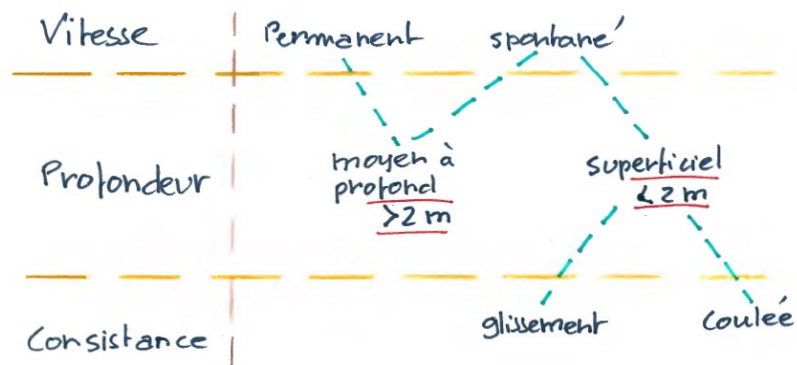


Illustration 3 Synthèse des 3 critères principaux de différenciation des glissements (Schwarz M.)

La compréhension des facteurs menant à un glissement constitue une difficulté majeure : certains facteurs sont difficiles à reconnaître et peuvent se modifier avec le temps. Plus les facteurs visibles sont identifiés et ceux qui sont dissimulés plausiblement estimés, plus les mesures de stabilisation auront une chance de réussite. Au-delà de la répétition des règles de bases qui mènent à une stabilisation couronnée de succès, les pages qui suivent visent à donner des aides à la documentation d'un glissement, des canevas conceptionnels avec des exemples et en particulier les effets stabilisants de la végétation et leurs limites. Les éléments apportés dans ce support de cours concernent les glissements spontanés, les coulées de boue et les petits glissements permanents. Les techniques forestières usuelles ne permettent de maîtriser les glissements permanents profonds que de manière marginale.



# Notions de bases et conséquences pour la planification de mesures de stabilisation de nature technique et écologique (M. Schwarz)

## Bases de calcul

De nombreuses méthodes pour l'estimation de la stabilité quantitative d'une pente ont été développées. Toutes ces méthodes se distinguent par des hypothèses simplificatrices rendant, autant que faire se peut, la complexité de la nature sur de nombreux plans (structure géologiques, processus hydrogéologiques, caractéristiques hydrogéologiques, etc.). Pour l'estimation de la stabilité d'une pente il s'agit de procéder à deux étapes importantes : la construction d'un modèle de sol et le choix d'une méthode de calcul.

La construction d'un modèle de sol est capitale pour l'estimation de la stabilité. Le modèle devrait être aussi précis que possible. A cet effet, on peut se baser sur les cartes géologiques, la carte des sols et les cartes géomorphologiques. Idéalement, les informations peuvent être tirées de projets de la même région (expertises de carrières, de travaux de fouille et de sondages pour la géothermie). Ces informations peuvent en principe être obtenues auprès des autorités cantonales. Les cas délicats nécessitent l'obtention d'informations spécifiques au lieu étudié (tranchées, sondages, investigations sismologiques). Ces dernières mesures sont coûteuses et sont souvent laissées de côté. Leur emploi doit faire l'objet d'une pesée des intérêts soigneuse.

En deuxième lieu, il faut choisir une méthode de calcul adaptée : aussi simple que possible et aussi complexe que nécessaire. Il s'agit de déterminer quels paramètres d'équilibre sont pertinents (forces, moments ou énergie), quelle géométrie (discrète, à deux ou trois dimensions, surface de rupture ou zone de rupture) est adéquate et quelles sont les caractéristiques plausibles des matériaux (hétérogénéités spatiales ou temporelles).

Dans la pratique forestière deux méthodes se sont établies : la méthode du « remblai infini » et celle des lamelles. Dans les deux approches, le comportement du terrain est simulé par des blocs rigides. Le comportement mécanique de ces blocs lors d'un glissement est calculé au moyen de la mécanique des corps solides : entrent alors en jeu les contraintes de poussée et de résistance, les forces statiques ou les moments dynamiques.

La méthode du remblai infini est le modèle le plus simple et considère l'équilibre des forces de poussée ou de butoir pour atteindre l'équilibre. On parle de remblai infini parce que cette méthode ignore les forces latérales et se base sur l'hypothèse d'une surface de glissement linéaire infinie.

La méthode des lamelles (ou méthode selon Fellenius, 1927) a été principalement utilisée en géotechnique à partir des années 60 et déclinées en plusieurs variantes. Cette méthode repose sur un profil en 2 dimensions sectionné verticalement en lamelles discrètes (ou slides). On parle de méthode discrète car chacune des slides est considérée comme un point avec une masse). Chacune des lamelles est considérée comme un corps rigide. La stabilité de la pente résulte de l'équilibre de l'ensemble des lamelles selon les forces auxquelles elles sont soumises (hypothèse de Jambu) ou des moments (hypothèse de Bishop) ou des deux (hypothèse de Spencer et Morgenstern). Ces méthodes permettent de tenir compte des conditions marginales irrégulières, telles une surface de glissement irrégulière ou en arc de cercle. Certaines variantes se différencient par la manière de calculer les tensions verticales et horizontales entre chacune des slides (voir Duncan et al. pour plus de détails)

Ces méthodes sont à la base des logiciels actuels qui permettent de simuler les mesures prises pour assainir un glissement (par exemple « Larix » de Cubus ou « SLIDE » de Rocsciences).

Dans les normes SIA sont introduits des coefficients afin de tenir compte de l'incertitude des forces de poussée et de butoir (coefficients de sécurité partielle). A ce propos il faut remarquer que, selon les hypothèses de calcul, le résultat peut déjà tenir compte d'un coefficient de sécurité implicite qui résulte des hypothèses admises (par exemple, lors d'un calcul en 2 dimensions, les conditions marginales dues aux effets latéraux ignorés résultent en un facteur de sécurité plus élevé). Cette remarque est tout particulièrement valable pour les petits glissements superficiels.

L'exemple de la méthode du remblai infini qui suit montre comment les forces (poussée et butoir) sont calculées et quels paramètres sont nécessaires. L'exemple montre aussi les concepts de base du calcul de stabilité valables pour la méthode des lamelles. Dans toutes les méthodes la stabilité calculée est exprimées par le « facteur de sécurité » (SF) qui résulte du quotient entre les forces stabilisantes (R) et déstabilisantes (E).

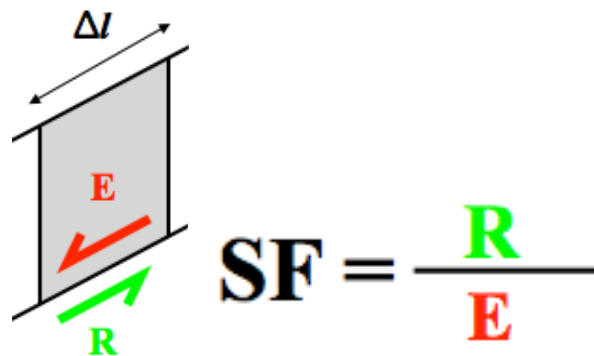


Illustration 4 Représentation des forces stabilisatrices (R), butoir, et déstabilisatrice (E), poussée qui s'exercent au niveau de la surface de glissement d'un glissement. Le facteur de sécurité (SF) est défini comme le quotient entre R et E.

En résumé, les étapes pour le calcul sont les suivantes :

Définir les dimensions du glissement et volumes en état insaturé ou saturé (d'eau). Ici on admet que le glissement représentatif a une largeur constante de 1 mètre (réduction de 3D à 2D) → calcul du poids → calcul de la poussée et de la contrainte (E) → calcul de la force normale et de la tension perpendiculaire à la surface de glissement → calcul de la force de butée (R) au moyen de l'équation de Mohr-Coulomb → calcul du facteur de sécurité SF.

La profondeur du sol,  $z$ , est mesurée verticalement, parallèlement à l'accélération terrestre. Afin de calculer le volume du glissement, l'épaisseur de glissement,  $h$ , perpendiculaire à la surface de glissement il faut passer par l'équation suivante :

$$h = z \cos(\alpha) \text{ [m]}$$

où  $\alpha$  représente la pente du glissement. On admet que la surface du terrain (OKT) est parallèle à la surface de glissement (voir illustration 5).

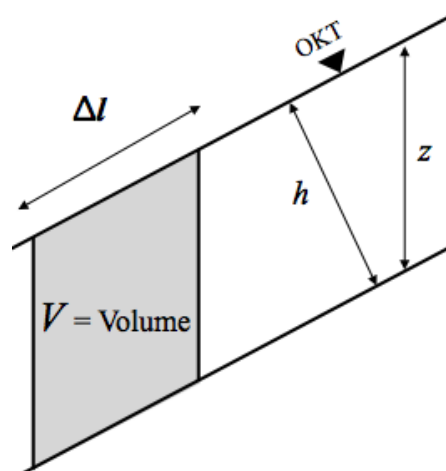


Illustration 5 Définition du volume 2D du sol ( $v$ ) et épaisseur du sol ( $z$ ) pour la représentation d'un glissement selon la méthode du remblai infini.

Le volume du glissement,  $v$ , peut être calculé selon l'équation suivante :

$$V = h \Delta l \text{ (Breite) [m}^3\text{]}$$

Où  $\Delta l$  représente la longueur du glissement. La largeur (Breite) est constante = 1 m.

Le poids,  $W$ , résulte du produit de la masse du glissement,  $M$ , multiplié par l'accélération terrestre  $g$  ( $9.81 \text{ [m s}^{-2}\text{]}$ ). La masse du glissement est obtenue en multipliant le volume  $V$  par la densité des matériaux  $\rho$ . Ici il faut distinguer entre densité apparente  $\rho$  (en l'état non saturé) de la densité saturée  $\rho_{sat}$  (tous les pores du matériau sont remplis d'eau) et la densité de l'eau  $\rho_w$  (environ  $1 \text{ [t m}^{-3}\text{]}$ ). Les valeurs plausibles pour la densité apparente d'un horizon B (horizon minéral dégradé) se situent entre  $1.4$  et  $1.6 \text{ [t m}^{-3}\text{]}$ .

Du poids,  $W$ , on calcule les 2 composantes vectorielles, l'une parallèle et l'autre normale à la pente. L'illustration 6 montre les composantes vectorielles du poids ( $E$  et  $N$ ).

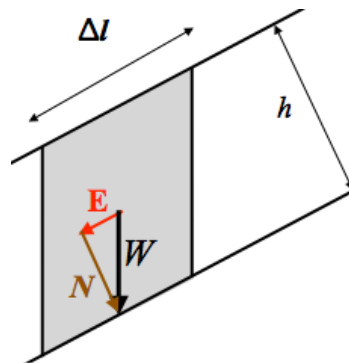


Illustration 6 Décomposition du poids du glissement en ses composantes vectorielles  $N$  (normale, perpendiculaire à la pente) et  $E$  parallèle à la pente.

La composante parallèle représente la force déstabilisatrice ou poussée  $E$ .

$$\mathbf{E} = W \sin(\alpha)$$

Où

$$[\text{N}] = [\text{kg m s}^{-2}] = \text{Newton, unité pour les forces}$$

$$[\text{Pa}] = [\text{N m}^{-2}] = \text{Pascal, unité pour les tensions}$$

La composante perpendiculaire ( $N$ ) du poids s'appelle la force „normale“ et contribue à la stabilité de la pente.

$$N = \text{Force normale} = W \cos(\alpha)$$

La force de cisaillement (une conséquence de la composante normale du poids des matériaux) le long d'une surface de glissement agit comme une force retenue ( $R$ ), un butoir, et est directement proportionnelle à la force normale (illustration 7).



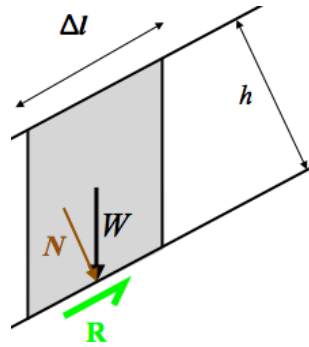


Illustration 2 Représentation de la force de réaction (R) calculée en fonction de la force normale (N).

La force de cisaillement est calculée par la tension de cisaillement,  $\tau$ , multipliée par la surface A. La tension de cisaillement est obtenue par l'équation de „Mohr-Coulomb“ :

$$\tau_t = c' + (\sigma - u) \tan \Phi' = c' + \sigma' \tan \Phi'$$

Où  $c'$  représente la cohésion effective du sol,  $\Phi'$  est l'angle de frottement effectif des matériaux,  $\sigma$  est la force normale,  $\sigma'$  la force normale effective et  $u$  est la pression de l'eau interstitielle. La pression interstitielle est isotrope (s'exerce dans toutes les directions) et linéairement proportionnelle à la profondeur du sol saturé ( $z_2$ )

$$u = z_2 \rho_w g \text{ [Pa]}$$

Où  $\rho_w$  représente la densité de l'eau et  $g$  l'accélération terrestre.

Si seule une partie du sol est saturée (voir illustration 8), la contrainte normale ( $\sigma$ ) et la force déstabilisante (E) peuvent être calculées au moyen de la formule suivante :

$$\sigma = (\rho z_1 + \rho_{\text{sat}} z_2) \cos^2(\alpha) g \text{ [Pa]}$$

$$E = (\rho z_1 + \rho_{\text{sat}} z_2) \cos(\alpha) (\Delta l \text{ Breite}) g \sin(\alpha) \text{ [N]}$$

Breite= largeur

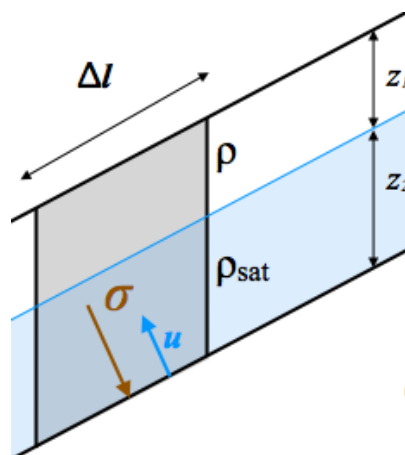


Illustration 3 Représentation de la pression interstitielle ( $u$ ), une force antagoniste à la contrainte normale ( $\sigma$ ).

L'exemple suivant montre le calcul numérique du facteur de sécurité d'une petite expérience réelle sur une surface inclinée :

Masse = 545 [g]

Poids = 5,35 [N]

Surface = 0.022575 [m<sup>2</sup>]

Pente = 30°

Cohésion = 0 [Pa]

Angle de frottement <- 30°

$E <- \text{Poids} * \sin(\text{alpha\_rad})$

$E = 2.675 \text{ [N]}$

$\sigma <- \text{poids} * \cos(\text{alpha\_rad}) / \text{surface}$

$\sigma = 205.2375 \text{ [Pa]}$

$\tau <- \text{Cohésion} + (\sigma * \tan(\text{angle de frottement}))$

$R <- \tau * \text{surface}$

$R = 2.675 \text{ [N]}$

**SF <- R/E SF=1**

## Paramètres géotechniques

Ce chapitre aborde de manière plus approfondie les paramètres géotechniques et les discute.

Afin de déterminer la résistance au cisaillement d'un sol, il faut connaître deux paramètres géotechniques : l'angle de frottement interne et la cohésion.

L'angle de cisaillement effectif ( $\Phi'$ ) ou angle de frottement interne est l'angle (de talus) que forme un corps ou matériau sous contrainte sans céder ou glisser.

Pour un matériau sans cohésion (tel du sable sec) cet angle se visualise par l'angle que forme un tas artificiel ou la pente naturelle d'un pierrier (illustration 9). Cet angle, toujours sans cohésion, dépend de la forme et du volume des grains et de la densité en place du matériau. Plus gros sont les grains et plus la densité en place est élevée plus l'angle de frottement sera élevé. Plus la granulométrie est bien répartie, plus la densité en place est élevée car les grains les plus petits remplissent les espaces entre les plus gros. C'est ainsi qu'une granulométrie bien répartie présente un angle de frottement plus élevé qu'un matériau présentant une granulométrie avec une dimension prédominante. (Lang et al. 2003). On peut ainsi attendre qu'un sol sablonneux bien réparti présentera un angle de frottement d'environ 40° alors que celui d'un sol principalement argileux sera bas (environ 22°).



Illustration 9 Visualisation de l'angle de frottement d'un tas de matériaux sans cohésion (à gauche) et comme pente d'un pierrier (à droite).

La cohésion représente en géotechnique les force entre les grains dans les sols liants (on parle aussi parfois d'adhérence). La cohésion ne déploie ses effets que dans les matériaux très fins.

Une partie de la cohésion est variable et se nomme la cohésion apparente. La cohésion est influencée par de nombreux facteurs comme la composition chimiques des argiles dans le sol, la composition chimique de l'eau, les produits de l'activité biologique dans le sol (exsudats des racines, des champignons ou des bactéries), les racines, les radicelles, le mycélium des champignons, etc. (voir illustration 10). Tous ces facteurs sont eux-mêmes influencé par la teneur en eau du sol. En plus, en conditions insaturées la capillarité joue encore un rôle, une force engendrée par les ponts d'eau entre les grains individuels. Selon la texture des sols ou matériaux (c'est-à-dire la répartition de la courbe granulométrique), l'influence de la capillarité peut être très diverse.

L'illustration 11 montre de manière schématique comment la cohésion apparente peu changer selon le type de sol et la teneur en eau. L'exemple le plus souvent cité est celui du château de sable : il est impossible d'utiliser du sable sec pour construire un château. Il faut mouiller le sable pour augmenter la cohésion partielle ; en augmentant la teneur en eau jusqu'à saturation, les forces capillaires disparaissent et le château s'écroule.

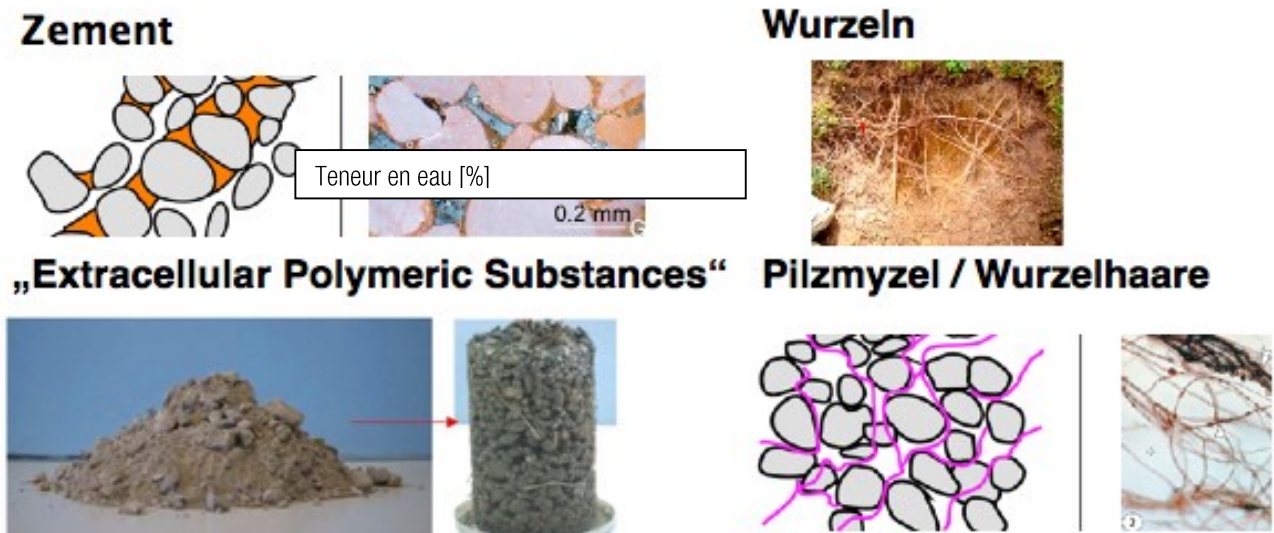


Illustration 10 Représentation de quelques éléments de cohésion dans le sol : ciment, racines, exsudats, mycélium et radicelles

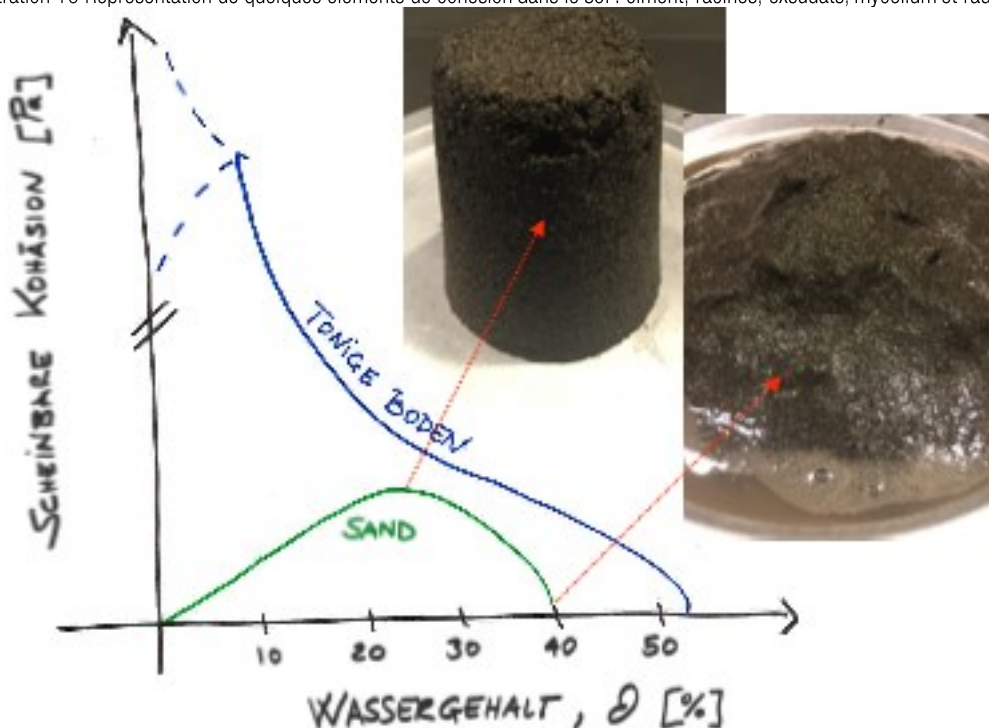


Illustration 11 : Représentation graphique de la relation entre teneur en eau et cohésion apparente pour les matériaux argileux (Ton) et sableux (Sand). L'effet des forces de capillarité dans un sol sablonneux est illustré. Modifié, selon Lu et al. (2010).

La détermination ou l'estimation des paramètres géotechniques est difficile. Les propriétés mécaniques des sols dépendent de paramètres tels la densité en place et la teneur en eau si bien qu'il est difficile dans les essais sur le terrain et en laboratoire de reproduire les conditions représentatives de l'état « en place » naturel.

Plusieurs méthodes ont été développées afin de faire une estimation aussi précise que possible des propriétés géotechniques. L'investissement en temps et en moyens financiers peut varier considérablement. Le choix d'une méthode ou l'autre doit être en adéquation avec l'utilité et l'ampleur du projet. On distingue 4 groupes de méthodes :

- Méthode de terrain : Cette méthode teste qualitativement et classe le sol selon sa plasticité. La classification permet de déduire les valeurs des paramètres géotechniques selon des tables.
- Analyse granulométrique : Cette analyse permet une classification précise du matériau meuble (grains jusqu'à 60 mm). Des tables permettent d'associer la granulométrie aux paramètres géotechniques. Les normes VSS donnent également une estimation de l'écart-type, permettant ainsi d'apprécier la variabilité des valeurs estimées. Il faut environ une semaine pour obtenir les résultats d'un laboratoire et il faut compter 800.- par échantillon de sol.
- Essais de cisaillement (terrain ou laboratoire): cette méthode permet de mesurer directement la résistance au cisaillement dans différents états du sol. Les échantillons sont placés dans une boîte à cisaillement d'une surface connue et soumis à une force. L'échantillon est soumis à 3 contraintes verticales différentes (il faut faire 3 essais). La détermination du paramètre de cisaillement au moyen de cette méthode coûte environ 2500.- (pour 3 essais).
- Essais triaxiaux : Ces essais très complets permettent la paramétrisation de nombreux facteurs environnementaux ainsi que la mesure de la tension, le fluage et la perméabilité des matériaux. Les tests effectués tiennent compte des états fondamentaux des matériaux : drainés ou non-drainés, consolidés ou non consolidés. La détermination des paramètres de cisaillement par cette méthode coûte environ 5000.- (pour 3 essais).

## Facteurs d'instabilité

Les facteurs de stabilité, respectivement d'instabilité, d'une pente peuvent se décliner en trois types de facteurs qui se distinguent par leur temporalité. Les facteurs de la disposition de base (DB) à très long terme ne sont pratiquement pas influençables. Les facteurs pouvant varier à moyen et court terme forment la disposition variable (DV) et enfin les facteurs déclenchant (FD) qui, eux, peuvent varier à très court terme. Les frontières ne sont pas toujours très nettes. Un glissement résulte lorsque la somme des facteurs de la disposition de base, des facteurs variables et déclenchants dépasse la contrainte admissible maximale du sol.

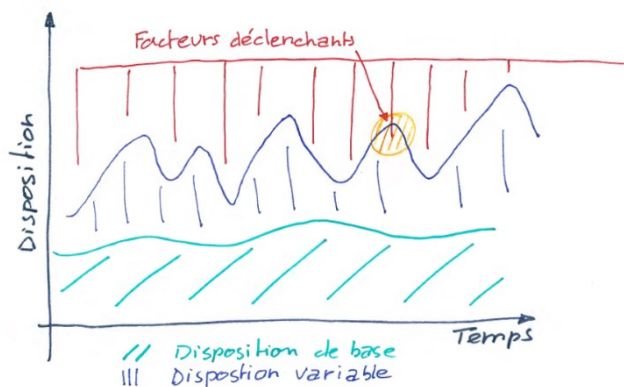


Illustration 4 Représentation de la résistance à une charge d'un sol par la disposition de base (DB), la disposition variable (DV) et facteurs déclenchants (FD) (selon Schwarz M.).

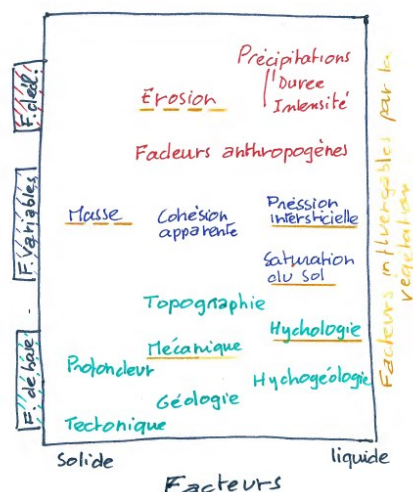


Illustration 5 Représentation des facteurs d'instabilité selon leur variabilité temporelle, des matériaux solides et de l'eau ainsi que l'influence de la végétation (selon Schwarz M.).

**Disposition de base (DB):** Géologie (couches, minéraux, mouvements tectoniques, hydrogéologie...), sols (profondeur, propriétés mécaniques, propriété hydrologiques), pente, topographie, climat.

**Disposition variable (DV):** végétation, géométrie du terrain, masse, saturation du sol, etc.

**Facteurs déclenchant (FD):** eau (différentes causalités: poids, perte de capillarité, source, écoulement, drainage des terrains), séismes, activités humaines (conduites, routes, usage du sol, ...)

Suite à l'analyse des nombreux glissements de 2005, Gruner et Wyss (2009) ont proposé quelques facteurs de nature hydrogéologique, de mécanique des sols et des roches qui ont contribué fréquemment au dépassement de la capacité de résistance des pentes étudiées (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Ils ont souligné qu'il ne fallait pas se limiter à une analyse de l'événement en soi mais aussi procéder à l'analyse des causes.

Tableau 1 Quelques facteurs notables de nature hydrogéologiques et de la mécanique des sols et des roches selon Gruner et Wyss (2009) ainsi que leurs caractères associés.

#### Facteurs hydrogéologiques

- Résurgences d'eau de la roche-mère (DB (DV))
- Infiltration d'eau en provenance des matériaux meubles avoisinants (eaux superficielles) (DV)
- Infiltration d'eau en provenance de la surface (eaux superficielles) (DB (DV))
- Infiltration d'eau anthropogène (FD)
- Infiltration d'eau en provenance d'ouvrages de drainage existants (FD)

#### Facteurs mécaniques

- Nature et position de la surface de glissement (DV)
- Pente / Pente de la zone de décrochement (DV (DB))
- Accélération / réactivation de glissements précédents (DB (DV))
- Erosion du pied de la pente (FD)

### L'eau, un facteur déclenchant

L'eau est souvent responsable des glissements observés. On distingue principalement 3 mécanismes d'action de l'eau qui peut mener à la déstabilisation d'une pente :

1. Augmentation du poids propre du sol
2. Diminution de la cohésion apparente
3. Augmentation de la pression interstitielle dans les pores du sol

L'illustration 14 montre de manière conceptuelle la relation entre le début d'une précipitation et l'évolution du poids propre du sol (gauche), de la cohésion apparente (milieu) et la pression interstitielle (droite) à la profondeur d'un horizon de glissement potentiel. Au début de la précipitation l'eau s'infiltrate et occupe tout d'abord les mésopores (pour les micropores de la fraction argileuse il faut des heures, voire des jours). Avec une teneur en eau augmentant, le poids propre du sol devient plus important jusqu'à saturation de tous les pores. Avec la teneur en eau augmentant, la cohésion apparente diminue avec la saturation jusqu'à une faible valeur résiduelle (qui correspond environ à la capacité au sol). L'eau peut s'accumuler au-dessus du futur horizon de glissement et provoquer une surpression interstitielle (plus la pluie est intensive et ou longue, plus la pression interstitielle s'élève).

Les pentes peuvent être déstabilisées par une érosion à leur pied (érosion des berges de cours d'eau), ce qui provoque un déséquilibre des masses.

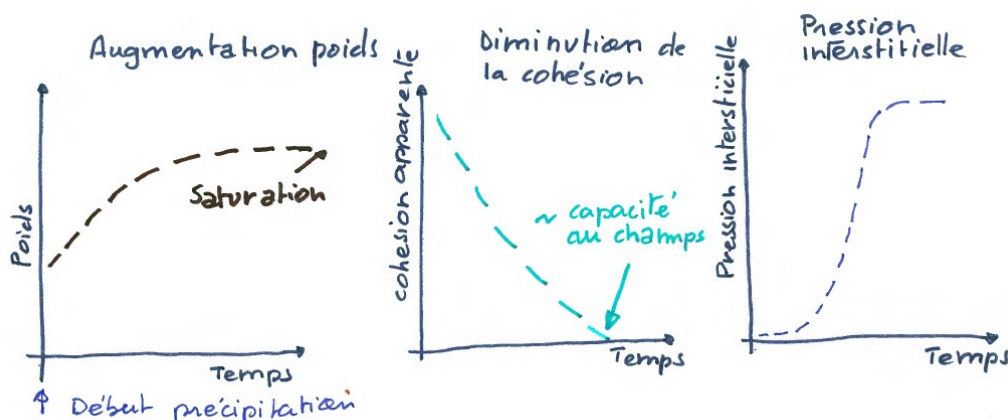


Illustration 6 Représentation conceptuelle de la relation entre le début d'une précipitation et augmentation du poids des terrains (gauche), de la cohésion apparente (milieu) et de la pression interstitielle à la profondeur de l'horizon de glissement.



La répartition spatiale et temporelle de l'eau dans le sol est influencée par de nombreux processus. Entrent en jeu des facteurs naturels ou anthropogènes (cellules orageuses, rupture de conduite, concentration d'eau venant de l'évacuation des eaux de chemins forestiers, etc.). Dans la plupart des cas, un glissement est déclenché par une élévation ponctuelle de l'eau dans les pores. En gros, deux processus conduisent à cette situation dans une pente :

1. Circulation concentrée d'eau au-dessus d'une couche imperméable (horizon ou roche-mère).
2. Résurgence d'eau de source intermittente, exfiltrée par des roches perméables (typique dans le flysch, la moraine de fond, les schistes et la molasse).

## Analyse de sensibilité de la méthode du „remblai infini“

Les graphiques qui suivent représentent l'analyse de sensibilité de la méthode par la modification des paramètres d'entrée. Le glissement de Rüdliggen (Schwarz et al., 2012a), très bien documenté, a fourni les caractéristiques suivantes :

Pente =  $38^\circ$

Profondeur du glissement = 1.1 m

Angle de cisaillement =  $31^\circ$

Cohésion effective = 3.78 kPa

Densité du sol =  $1.63 \text{ t m}^{-3}$

Largeur du glissement = 7.5 m

Longueur du glissement = 17 m

La géométrie du glissement est modélisée au moyen d'une ellipse.

Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent que la cohésion et la pression interstitielle ont la plus grande influence sur la stabilité (Illustration 15). A une modification de la cohésion peut aussi être associée une perte de capillarité en raison d'une augmentation de la teneur en eau du sol. La pente a aussi une grande influence sur la stabilité (illustration 16), ce paramètre pouvant être déterminé précisément. La densité du sol a une influence modeste sur la stabilité, ce résultat tend à montrer que l'augmentation du poids propre du sol en raison de l'augmentation de la teneur en eau et /ou la végétation qu'il supporte n'a qu'une petite influence sur la stabilité de la pente (illustration 16). De petites variations de l'angle de frottement interne ont une petite influence sur la stabilité (illustration 17). C'est-à-dire qu'une estimation de cette valeur dans un intervalle de  $\pm 3^\circ$  est suffisant pour un calcul de la stabilité de la pente. La profondeur n'est pas en relation linéaire avec la stabilité et la sensibilité globale du résultat décroît avec une profondeur croissante (illustration 17).

Les résultats de l'analyse de sensibilité peuvent varier selon les valeurs des paramètres du calcul. Il est néanmoins possible d'affirmer que **la cohésion effective du sol et la pression interstitielle sont les paramètres décisifs pour le calcul de la stabilité.**

Cependant il ne faut pas oublier que le déclenchement de glissement résulte de la combinaison de plusieurs facteurs.

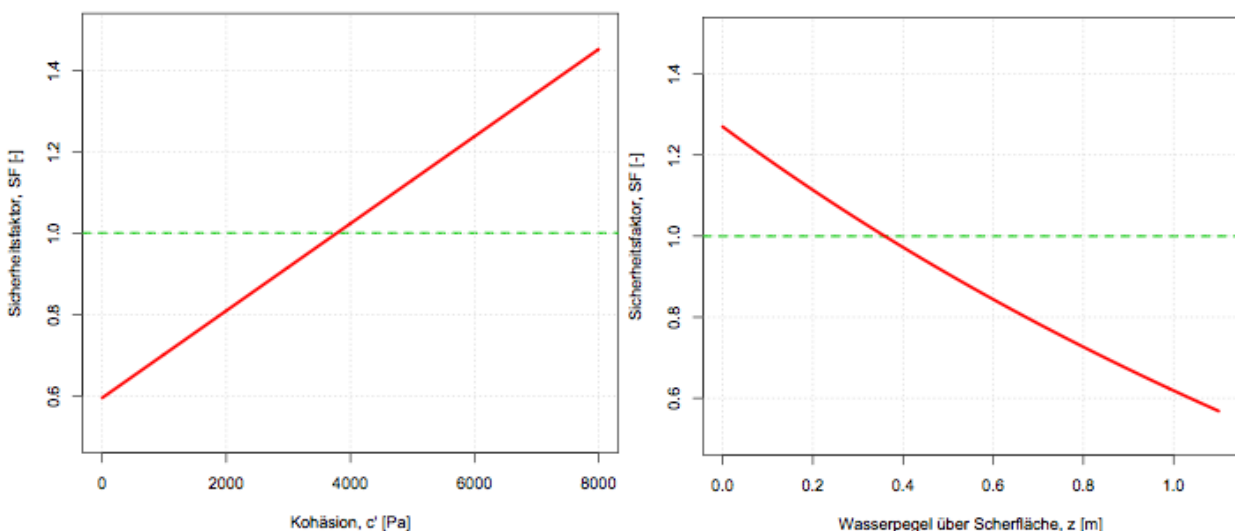


Illustration 7 Facteur de sécurité en fonction de la cohésion (gauche) et du niveau d'eau au-dessus de l'horizon de glissement (droite)

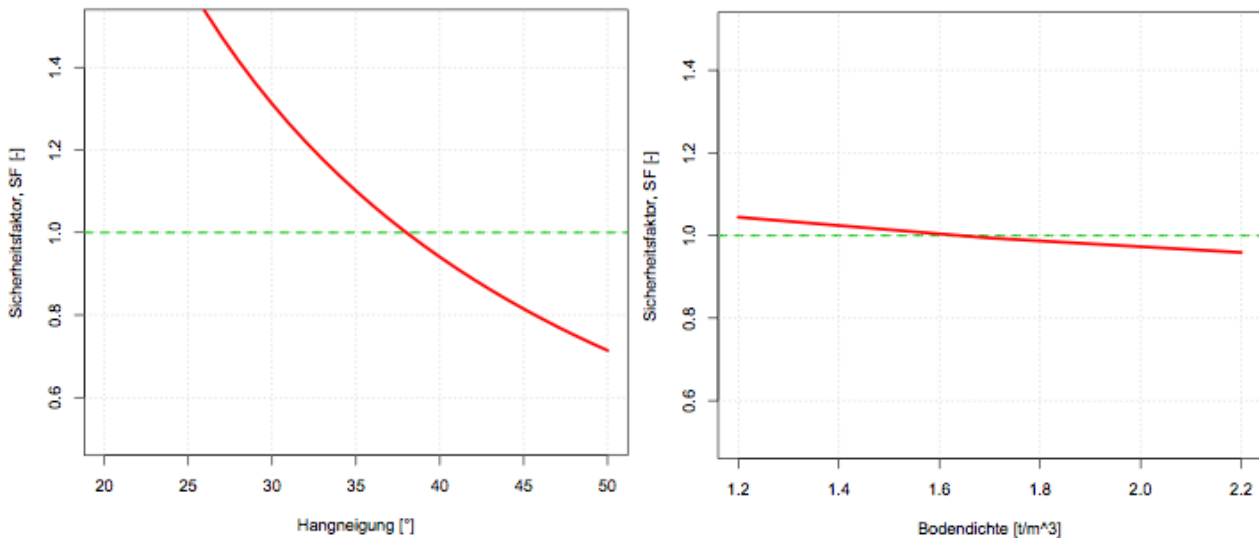


Illustration 8 Facteur de sécurité en fonction de la pente (gauche) et de la densité du sol (droite).

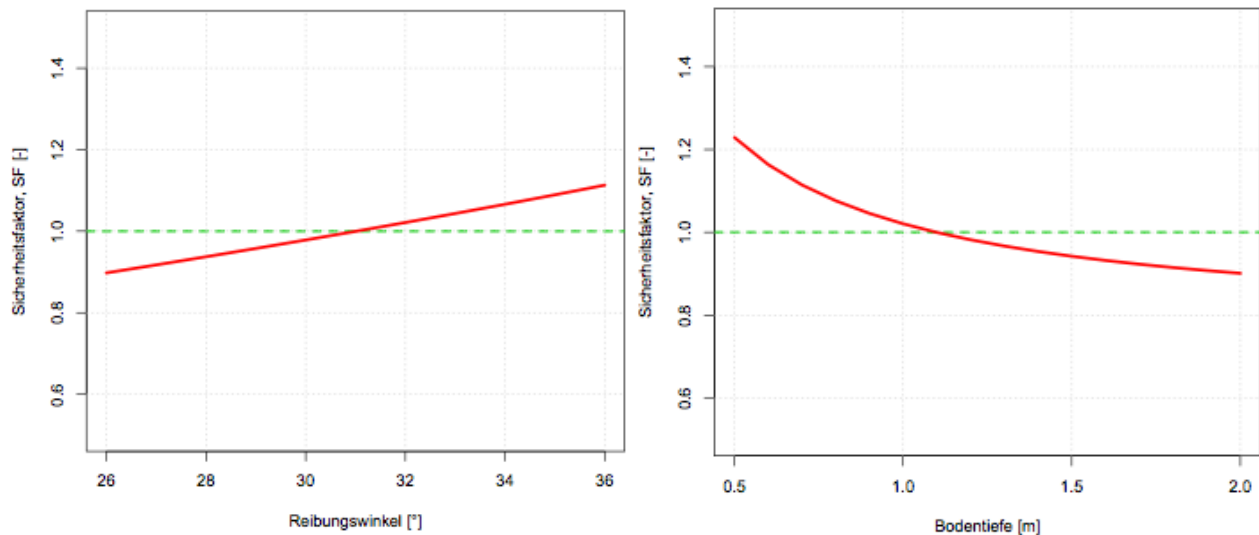


Illustration 9 Facteur de sécurité en fonction de l'angle de frottement interne (gauche) et de la profondeur du sol (droite).

Les modèles sont des instruments utiles afin de quantifier une situation et de rendre les mesures prises cohérentes et transparentes. Les résultats des modèles doivent cependant toujours être discutés en fonction des hypothèses retenues. Par exemple le modèle „remblais infini“ a l'avantage d'être simple et de donner une première indication sur les facteurs d'instabilité dominants susceptibles de jouer un rôle. Il ne faut cependant pas oublier que ce modèle est très réducteur : il ne tient pas compte des interactions latérales, le sol se comporterait alors comme un bloc solide où tous les paramètres sont constants dans l'ensemble du volume (pression interstitielle, effet d'armature des racines et les paramètres mécaniques).

Pour les glissements superficiels tout particulièrement, le modèle ne tient pas compte des „effets de bord“ latéraux et de l'hétérogénéité spatiale des facteurs. Il peut ainsi mener à des gros écarts dans le calcul du facteur de sécurité. Des observations sur le terrain (Illustration 10) et des recherches (Schwarz et al., 2012b) ont démontré que le corps du glissement ne se comporte pas comme un bloc mais que les forces de tension et de pression déploient leurs effets de manière différente lors du mouvement du terrain. Les hypothèses du modèle ont des effets négatifs (corps rigide) ou positifs (effets de bord). Les effets positifs et négatifs ne se compensent pas toujours.





D'autres méthodes ont été développées afin de surmonter ces défauts et produire des résultats plus proches de la réalité. Les méthodes reposant sur les éléments finis ou discrets sont utilisés par la recherche ou pour les projets d'envergure. L'investissement temps considérable et la difficulté d'estimer les paramètres limitent l'emploi des méthodes reposant sur les éléments finis dans la pratique.



Illustration 10 Glissement superficiel avec zone de traction et zone de compression.

## Glissements – évaluer la situation correctement – agir en conséquence (W. Krättli)

### Intervention immédiate, oui ou non ?

- **Identifier le danger immédiat :**
  - Délimitation du corps du glissement (en tenant compte des environs et la totalité du processus !)
  - Agir sur les facteurs variables et déclenchant : dériver l'eau superficielle, recouvrir la zone d'alimentation, éviter la surcharge et décharger les accumulations.
- **Identifier le danger potentiel immédiat et protéger :**
  - Barrer/évacuer,
  - Protection des objets menacés,
  - Débarrasser,
  - Sécurité du personnel
- **Évaluer l'impact du glissement** sur l'environnement : inventorier tous les enjeux (risques pour l'infrastructure forestier et agricole, pour l'environnement naturel, les opportunités écologiques, les dégâts consécutifs, les suites à long terme).

### A faire à moyen et long terme

Se posent les questions suivantes : stratification du sol, zone de décrochement, zone de transit, zone de dépôt, horizon de glissement, chemin de l'eau (hydrologie et hydrogéologie), l'événement dans la région, évaluation de l'efficacité d'une mesure (voir mesures techniques et biologiques) ainsi que d'autres questions.

Afin de concevoir un assainissement de glissement il est nécessaire d'analyser les causes le plus complètement possible. Etant donné que les paramètres d'un glissement et l'enchaînement des causes ne sont pas toujours visibles, c'est une tâche difficile. Le résultat des investigations et la modélisation de l'événement laissent planer des doutes. Chaque glissement est un cas spécial en soi. La compréhension des traces visibles et cachées (témoins muets) sont une aide à la représentation aussi réaliste que possible de l'événement.

### Modélisation de l'événement

- Documentation Storme (Voir exemple en annexe)
- Relevés de terrain (situation, profil, observations depuis l'autre versant, mesures GPS, Laser scanning)
- Caractéristiques géotechniques (type de sol, stratification, processus, couleurs, végétation, érosion)
- Régime hydrique (valeurs des précipitations, résurgences d'eau, aquifères, ruisseaux, contrôle des installations de drainage existantes)
- Éventuellement expertise géologique et investigations détaillées (sondages, forages, mesures à l'inclinomètre, géodésie, tranchées, investigations hydrogéologiques (essais de marquage, pompage et modèles numériques)
- Prise en compte des incidents similaires dans la région.

Résultat : Protocoles et esquisses du glissement et indices significatifs.  
Situation  
Profils (description de la surface et hypothèse sur le sol (modèle de sol)  
Réflexion sur les facteurs déclenchants et sur la disposition variable.

La représentation par un modèle permet d'estimer l'ampleur des processus à l'œuvre. Il est ainsi possible d'identifier les objets menacés. L'information collectée doit servir à formuler les étapes suivantes. Il s'agit de déterminer tout d'abords, indépendamment de l'ampleur du glissement, quelles mesures sont adéquates. Les mesures techniques et biologiques sont présentées dans le chapitre suivant. Elles sont souvent mises en œuvre de manière conjointe. La question de savoir si l'on faut prévoir des mesures d'assainissement supplémentaires après un glissement doit être examinée sous deux aspects :

- Les conditions naturelles et les usages des infrastructures sont-elles améliorées de manière significative (effets d'un projet d'assainissement)?
- Quels sont les gains d'utilité visés par rapport aux coûts engendrés par les mesures (économisme du projet) ?

Afin de tester l'efficacité et l'efficience des mesures, il faut recourir à l'analyse de variantes. Selon l'ampleur des travaux il existe différentes méthodes pour structurer l'analyse de variantes :

## Définition et examen d'une mesure par l'étude de variantes

Après avoir construit un modèle plausible du processus de glissement il est possible de définir des mesures adéquates (ou une combinaison de mesures) :

Quelles méthodes (techniques et biologiques) sont-elles envisageables ? Quelles mesures accompagnatrices ? Quels sont les coûts de construction et les coûts d'entretien (coûts du cycle de vie)? Des mesures peuvent-elles être éliminées d'emblée ?

Selon l'ampleur du glissement (principalement le potentiel de dégâts, les coûts, les coûts résultant de la restriction d'usage mais aussi la complexité du cas) plusieurs méthodes de comparaison des mesures sont proposées :

### 1. Très petites instabilités, exposition au danger faible, typiquement des talus instables ou des glissements dans les pâturages

De par les risques faibles, la question d'une remise en état ou d'un assainissement dépend principalement de la restriction à l'usage que le glissement représente. Si l'intervention est jugée sensée et financièrement supportable, le recours à des mesures pragmatiques et simples avec les ressources locales sont indiquées.

### 2. Evaluation quantitative et qualitative (étude des coûts et des avantages) des mesures d'une importance moyenne.

Les cantons proposent parfois des instruments permettant de comparer des variantes. Dans les documents d'avant-projet ou de projet, la comparaison de variantes techniques y est imposée.

Si un modèle de comparaison n'est pas proposé, il peut être nécessaire de recourir à des analyse couts-avantages, ou des analyses qualitatives accompagnées par un calcul des investissements. Il s'agit alors de définir soi-même des critères pertinents liés à l'objet et procéder à leur pondération. Les tableaux 2 et 3 montrent comment différentes mesures peuvent être comparées de manière relativement simple.

Tableau 1 Comparaison succincte

Systèmes de soutènement	chantier	Entretien	Stabilité de fondation	Environnement	coûts	durée de vie	Entretien annuel	Coûts par an <sup>1</sup>
<b>Mur de blocs (250 t)</b>	Dim. des blocs limitée Transports intermédiaires	léger	moyenne	Trsp. impact matériau - - - - - - +	45'450 Fr.	40	500 Fr.	1640 Fr.
<b>Paroi berlinoise (95 m<sup>2</sup>)</b>	Peu problématique	léger	Haute	Trsp. impact matériau +++ +++ --	76'000 Fr.	50	500 Fr.	2020 Fr.
<b>caisson (210 m<sup>3</sup>)</b>	Beaucoup de transports et de fouilles	léger	moyenne	Trsp. impact matériau - - - +++	105'000 Fr.	30	500 Fr.	4000 Fr.
<b>Palissade en acier (55 m)</b>	Par tranches, organisation rel. complexe	Assez élevé.	moyenne	Trsp. impact matériau + - +	63'600 Fr.	30	1300 Fr.	3420 Fr.

<sup>1</sup> Sans intérêts



Tableau 2 Résumé des avantages et désavantage des méthodes du tableau 2

Systèmes	Avantages	Désavantages
Murs de blocs	Bon marché	Grosse intervention (machines et poids), besoin en place, prix peu prévisible
Paroi berlinoise	Peu de transports, peu de fouilles, fondation sûre et bonne durée de vie	Acier s'intègre peu au paysage naturel
Caisson	Matériaux sur place et absorbe les petits déplacements et tassements	Gros volume de fouille, durée de vie courte si l'ouvrage ne peut pas être entièrement enterré.
Palissade en acier	Les matériaux sont facilement disponibles, peu de fondations	Transports importants, entretien rel. Élevé, coûts peu prévisibles



### 3. Analyse de l'économicité et de l'efficacité des mesures (diminution du risque) des glissements de grande envergure.

A partir d'un volume financier déterminé par les cantons, il existe un instrument en ligne „EconoMe“ visant à une analyse de l'économicité et l'efficacité basée sur l'évaluation des risques. Il y a dans chaque canton un chargé de projet qui gère les diverses analyse et l'accès au logiciel. L'analyse suit les pas suivants :

- Description du système
- Evaluation des dangers et définition de scénarios
- Dégâts potentiels dans le périmètre
- Analyse des conséquences (prise en compte des objets menacés)
- Risque individuel
- Définition de(s) mesure(s)
- Analyse des conséquences (après mesures)
- Risque individuel (après mesures)
- Compilation des coûts et risques
- Fin du projet

### Exécution des mesures

Après une décision de principe positive, il s'agit d'élaborer la planification de détail et la réalisation des mesures suivies d'un **plan d'exécution** pour les mesures d'entretien qui vont suivre. Les responsabilités concernant l'entretien et les tournus font partie intégrantes de la planification de détail.



## Mesures techniques possibles (W. Krättli)

Les solutions visant à stabiliser une pente instable peuvent être considérées selon la manière dont elles agissent. Selon Lateltin et. al. (1997) ont peut distinguer les actions suivantes :

### Drainer

- Abaisser le niveau de la nappe par des fossés ou des drainages
- Capter les arrivées d'eau du sous-sol (résurgences) et les évacuer de manière sécurisé jusqu'au réseau hydrologique
- Capter et dériver les eaux de surface qui alimentent la masse en mouvement

### Aplanir

- Rééquilibrer les terrains en délestant les masses qui « poussent » et/ou en remblayant devant les masses en mouvement.

### Soutenir

- Augmenter la résistance au cisaillement au niveau de l'horizon de glissement par clouage
- Construire des ouvrages de soutènement (caissons, murs poids)

### Retenir

- Ancrages ou pieux

### Amélioration de la qualité des sols

- Stabilisation (chaux et/ou ciment) et injections

### Protéger la surface

- Méthodes de génie biologique

Toutes ces actions (à l'exception des ancrages et des pieux) peuvent être réalisées avec des moyens modestes pour les petits glissements. Des travaux de plus grande envergure sont toutefois nécessaires pour maîtriser des glissements plus importants. Les solutions présentées plus loin correspondent aux moyens auxquels il est fait recours en forêt.

## Captation et dérivation des eaux de surface et des eaux souterraines

La résolution à long terme des problèmes causés par les arrivées d'eau sont indispensables à toute entreprise de stabilisation de pente instable. En effet l'eau est presque toujours le facteur déclenchant un glissement. L'abaissement de la teneur en eau des sols a pour effet :

- Augmentation de la cohésion apparente (augmentation des forces de capillarité)
- Diminution de la pression interstitielle (diminution du poids de la masse en mouvement)
- Amélioration de la capacité d'absorption de l'eau et de la résistance au gel

Ces effets des mesures sont au cœur d'une stabilisation. Cependant tous les sols n'ont pas le même potentiel de réagir à une mesure de drainage. La perméabilité peut être très variable. La densité, la granulométrie et la saturation du sol en place est décisive. De plus, la structure en couches successives d'un sol entraîne parfois une discontinuité nette de la perméabilité du sol. Cette discontinuité est très souvent à l'origine de la formation d'un horizon de glissement. Les zones exposées aux glissements sont souvent peu perméables. C'est pourquoi la technique d'assainissement forestière passe par la captation des sources d'eau effectivement observées et la captation systématique de l'eau qui circule en surface. Il s'agit d'éviter l'infiltration des masses en mouvement par l'eau souterraine et de surface. Les masses en mouvement devraient être isolées autant que faire se peut des sources, des ruisseaux, de l'eau de la fonte des neiges et de la pluie. C'est à ce prix qu'il est possible d'améliorer les caractéristiques du sol (Böll 1997).

Après la dérivation des eaux visibles, le drainage fait partie intégrante de la planification d'un assainissement durable.

Selon la situation diverses solutions techniques de drainage sont à disposition.

- En surface, de simples fossés **ouverts**, des fossés étanchéifiés (maximum 34% de pente), des cunettes ou des tuyaux sont possibles. Il s'agit de collecter et évacuer l'eau de surface.
- Les tranchées drainantes **enterrées**, fascines et résineux entiers enterrés permettent de capter l'eau souterraine, etc.



Les systèmes ouverts sont facilement contrôlables et permettent de capter la pluie et l'eau de fonte des neiges qui forment l'essentiel des quantités d'eau formant le débit de dimensionnement à évacuer (Zeller J., Trümpler J., 1984). En plus ils sont indépendants du gel (Patt H, Gonsowski P. 2010).

**A propos du dimensionnement des systèmes de drainage:**

Zeller et Trümpler (1984) ainsi que Böll (1997) utilisent de manière prudente la formule du temps d'écoulement pour les petits bassins. La détermination du débit de crue pour les petits bassins est entachée d'une grosse incertitude. Il est nécessaire de recourir à plusieurs méthodes de calcul et se renseigner sur les événements historiques (chroniques, cadastre, enquête auprès des riverains (Ammann M., 2014)). Les systèmes de drainage doivent être dimensionnés pour un événement d'une période de retour de 30 ans (HQ<sub>30</sub>).

Origine de l'eau : eau souterraine, de nappe, de fonte et de pluie (seule la forte pluie est déterminante (Zeller J., Trümpler J., 1984)).

Dimensionnement selon la méthode du temps d'écoulement  $HQ_{30} = 0.278 \times E \times \psi \times i(t_{R,30})$

- Où :
- HQ<sub>x</sub> : Débit de la périodicité X [m<sup>3</sup>/s]
  - E : Surface du bassin [km<sup>2</sup>]
  - ψ : Coefficient d'écoulement [-]
  - i(t<sub>R,30</sub>) : Intensité de la pluie de périodicité 30 ans et de durée T<sub>R</sub> [mm/h]

i(t<sub>R,x</sub>) peut se trouver (par exemple) dans l'atlas hydrologique suisse

Höhenlage	Charakter	ψ flach bis steil	
oberhalb Waldgrenze	undurchlässige Weide-	0,4	bis 0,8
	böden, Fels Schutthalden (Zeller)	0,05	bis 0,4
Waldgrenzgebiet	Alpweiden mit Sträuchern, einzelne Bäume	0,3	bis 0,7
	lichter Wald ohne Schluss	0,2	bis 0,6
tiefere Lagen	junger Wald, Wies- und Ackerland	0,1	bis 0,5
	vernässte Gebiete, Sumpf (Zeller)	0,3	bis 0,6

Tab. 5-2: Abflusskoeffizient ψ nach Müller resp. Zeller.

Illustration 19 coefficient d'écoulement tiré de Spreafico et al. 2003

La dérivation des eaux récoltées ne doit pas provoquer des instabilités dans d'autres compartiments du paysage (en aval surtout). Pour des raisons de sécurité, il est parfois nécessaire de transporter l'eau sur de longues distances (tuyau enterré ou fossé ouvert) pour la mener dans un cours d'eau.



Illustration 11 Résurgences d'eau captées sur le glissement Untere Schafera, Plaffeien, après les premières mesures (image WALDA FR)

### *Fossés de drainage*

Creuser dans un terrain a pour but de recueillir l'eau d'écoulement de surface et, si les caractéristiques du sol le permettent, de drainer l'eau des terrains avoisinants (Illustration 12). La stagnation et l'infiltration d'eau peut ainsi être contrecarrée. Le contrôle de l'efficacité des fossés ouverts peut être contrôlé de visu en tout temps. Il faut veiller à ne pas donner une pente trop importante aux flancs du fossé. Zeller et Trümpler ont élaboré un nomogramme qui donne des indications selon les caractéristiques du sol. D'expérience, il apparaît qu'une pente de plus de 40° (84%) ne devrait pas être dépassée.

La qualité du lit du fossé est à adapter à la pente longitudinale (max. 34% (Böll, 1997)) pour parer à l'érosion. Dans les parties très raides, il faut renforcer le lit (seuils) ou travailler avec des cunettes préfabriquées dont il existe de nombreuses variantes. L'entretien est indispensable, d'autant plus que le tracé est pentu. A défaut de quoi, des dégâts importants peuvent se produire lors de crues (dimensionnement). Zeller und Trümpler (1984) décrivent en détail les techniques dans le classeur „Rutschungsentwässerungen“ qui est consultable sur le réseau ([WWW.fobatec.ch](http://WWW.fobatec.ch)).



Illustration 12 rassembler et évacuer les eaux superficielles et l'eau du sol dans un fossé ouvert.





Illustration 13 Fossé en V



Illustration 14 Cunettes en béton polymère (bap Ing.).



Illustration 15 cunettes rectangulaires 40/25 en bois ronds selon Zeller/Trümpler 1984 (Lieberherr M.)



Illustration 16 fossé avec cunette en V 20/4 selon Zeller/Trümpler 1984 (Lieberherr M.)

## Drainage

Les drainages sont des systèmes de collecte et d'évacuation des eaux de surface et souterraines placés sous la surface du sol. En mettant en place des matériaux plus perméables que les sols avoisinants, les eaux du sol et les eaux superficielles sont collectées et évacuées (voir illustration 26). Les chemises et tranchées drainantes, les fascines et arbres entiers, et les ancrages drainants sont les techniques utilisées fréquemment en foresterie. La profondeur drainée est relativement modeste et l'effet drainant limité dans les sols peu perméables (Böll, 1997). Afin de fonctionner toute l'année, l'évacuation des eaux (tuyau) doit être mise en place hors gel. Les forages drainants, les galeries de drainage du génie civil sont des systèmes qui ne sont en principes pas utilisés en forêt. Ces techniques sont mises en œuvre lors de glissements profonds (par ex. Glissement de la Frasse VD).

Le bon fonctionnement des drainages ne sont contrôlable que par le débit d'eau. Des regards sont à aménager pour le contrôle. L'eau de drainage emporte avec elle des particules qui se déposent et finissent par colmater les matériaux poreux mis en place. Afin de protéger le gravier on peut utiliser des géotextiles pour séparer les types de matériaux mais avec le temps ces géotextiles se bouchent également. De nombreuses polémiques existent quant à l'effet des géotextiles. On s'en référera aux expériences locales sans pour autant renoncer à l'innovation. L'eau des drainages ne doit pas être introduite dans les réseaux d'évacuation des eaux.

Les tuyaux des drainages sont sensibles aux mouvements du sol et ne sont pas conseillés à l'emploi dans une zone de glissement proprement dite. Si leur emploi est nécessaire, il faut recourir aux tuyaux PE avec des raccords thermo soudés.

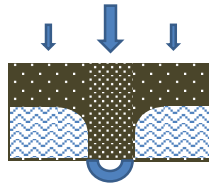


Illustration 17 Effet de drainage par la mise en place de matériaux plus perméables.

Les indications concernant le dimensionnement des capacités de débit des tuyaux en matière synthétique se trouvent dans les fiches techniques des constructeurs ou dans les instructions de pose de l'association faitière de la branche (VKR) qui se basent sur les normes SN 640 355. En principe il s'agit d'une application de la formule de Strickler pour un tuyau partiellement rempli.

Indications :	pente minimale du drainage	0.5%
	Pente minimale du tuyau de transport	1%
	Diamètre minimal	150mm (di)
	Profondeur minimale	hors gel (au-dessus du tuyau)



Illustration 18 Fossé drainant avec géotextile (filtrer/drainier) du côté de l'amont et géotextile étanche du côté de la route (Bentonit) am Grund et regard de contrôle (AWN GR).



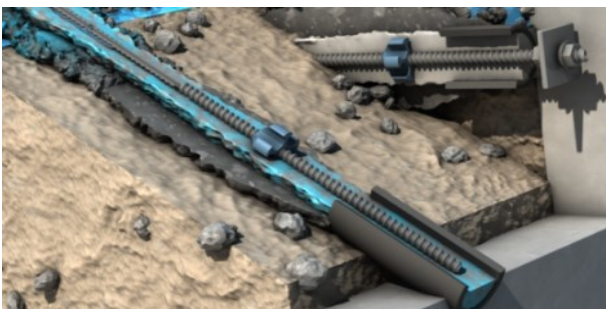
Illustration 19 Drainage classique en PP S, dn 160, avec gravier 32/50, sans géotextile. Avec dérivation de rinçage en aval. Avant la construction de la tête de charge de l'aqueduc (AWN SZ).



Illustration 29 Tuyau PE avec manchon de thermosoudage (bap Ing.).



Illustration 30 mise en place de résineux complet qui ménagent un chemin pour l'eau tout en maintenant les terres alentour. (fobatec).



Sol aggloméré  
 Filtre  
 Mortier filtrant  
 Tirant d'acier

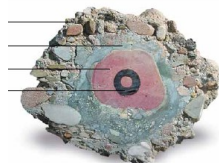


Illustration 20 Ankrage drainant: le mortier drainant est très perméable ( $k=10^{-4}$  ~ sable fin) et permet de réduire la pression interstitielle (Sytec).



Illustration 21 Fascines avant la remise en place du sol (Caprez Ing.).

## Etanchéification

Les tronçons étanches d'une dérivation des eaux sont importants afin d'éviter l'infiltration d'eau dans des terrains sensibles. L'argile est un élément intéressant qui remplit alors la fonction d'étanchéifier la surface du fossé. L'argile peut être directement employé pour réaliser des bourrelets forçant l'eau dans les tuyaux ou en combinaison avec des nattes enduite de bentonite (la bentonite est un argile sous forme de poudre à sec qui peut être incorporé directement ou en nattes) qui permettent de réaliser des étanchéifications de surface et construire ainsi des fossés étanches. Ces nattes sont en mesure de reboucher de petits trous par transfert de particules d'argile. Elles sont utilisées dans la construction de plans d'eau artificiels..

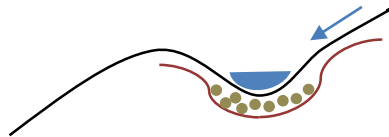


Illustration 33 Fossé ouvert étanchéifié avec une natte de bentonite et renforcé par un plattelage en bois.



Illustration 22 fossé étanchéifié avec une natte de bentonite pour une dérivation contrôlée des eaux (bap Ing.)

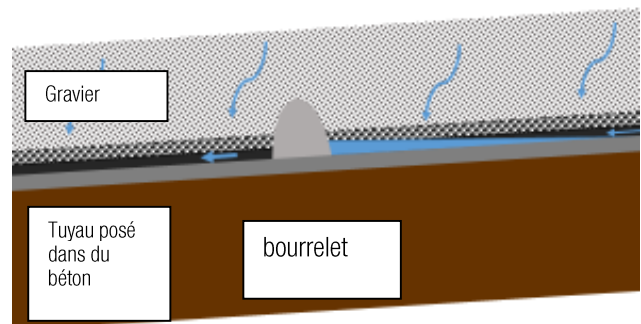


Illustration 23 Schéma d'un bourrelet d'argile forçant l'eau dans le tuyau

## Regards et dépotoirs

Tous les systèmes de drainage et d'évacuation des eaux donnent lieu à un transport de particules fines. Selon la qualité de l'eau il y a aussi précipitation de calcaire et formation de tufs. Les racines des végétaux et des arbres cherchent de l'eau et croissent à l'intérieur des systèmes. Ces phénomènes bouchent les tuyaux avec le temps. C'est pourquoi les contrôles réguliers sont une nécessité et les entretiens doivent être prévus. Dérivations de rinçage regards de contrôles et bassins de décantation sont des éléments à planifier dès le début (Illustration 24).

Les dérivations de rinçage sont à signaler et à protéger de manière adéquate pour faciliter les entretiens. Les placer dans un petit regard est une possibilité.



Les regards de contrôle peuvent aussi être utilisés comme dépotoirs s'ils sont construits de manière adéquate. Ils doivent être accessibles et mesurer au moins 60 cm de diamètre jusqu'à 1,3 m de profondeur. Plus large si plus profond (SN 640 355 préconise au moins 70cm) s'ils doivent être vidés. Des dépotoirs en béton sur mesure réalisés sur place sont plus performants. L'introduction d'eau de surface dans un regard peut se faire moyennant la construction d'un bassin de décantation étanche juste avant le regard.

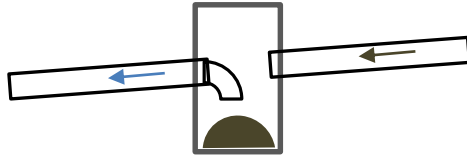


Illustration 24 Pour le contrôle des installations de drainage, des regards et des dépotoirs doivent être planifiés..



Illustration 25 Pour le contrôle et la vidange, un regard doit avoir un diamètre de 600 mm au moins. A partir de 1,3 m de profondeur il faut prévoir un diamètre supérieur. (AWN GR).

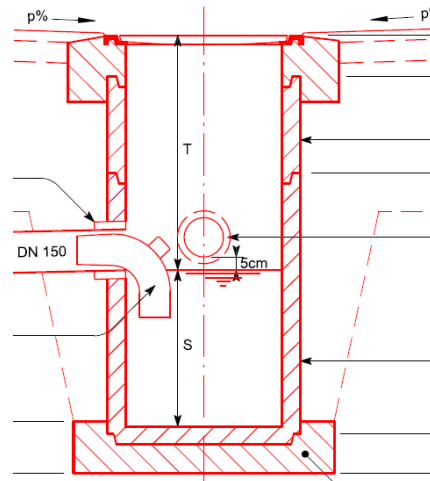


Illustration 26 Coupe d'un dépotoir. L'arrivée d'eau est au moins 5 cm plus haute que la sortie. La sortie est équipée d'un coude plongeur. (TBA ZH).



Illustration 27 Lors de l'envoi d'eau de surface dans un tuyau, un petit dépotoir d'entretien facile est à aménager (bap Ing.)



Illustration 40 Dérivation de rinçage correctement obturée et protégée (AWN GR).

## Aplanir

La granulométrie et la stratification des sols sont en grande partie déterminantes pour la résistance des sols au cisaillement. La résistance au cisaillement dans une zone de cassure est le paramètre par excellence pour établir et vérifier la stabilité des terrains. A l'endroit de la rupture s'ajoute la poussée qui résulte du poids de la masse au-dessus de la rupture ou/ une charge supplémentaire d'un véhicule ou bâtiment. Dans le cas d'un glissement, les masses en mouvement poussent vers le bas. Une saturation des masses de sol en eau et/ou la présence d'un horizon où l'eau circule contribue à la perte de stabilité. Si la pente se réduit, toutes choses égales par ailleurs, la poussée se réduit et le risque de glissement diminue (Illustration 41).

Il est possible d'aplanir en évacuant les matériaux de la zone de décrochement (délester) ou en remblayant au pied du glissement. Le remblai doit être mis en place en assurant une bonne cohésion avec le sol en place en façonnant des redans et en compactant les matériaux de remblai en compactant par couches de 40 cm environ. La largeur des redans doit pouvoir permettre le passage de l'engin de compactage.

Il existe des logiciels qui, pour une forme de terrain donnée, peuvent donner des indications sur la stabilité, la configuration possible d'un glissement et la zone faible d'un talus (illustration 41) Il faut cependant avoir une idée de la stratification du terrain et de ses propriétés, chose peu aisée comme mentionné plus haut.

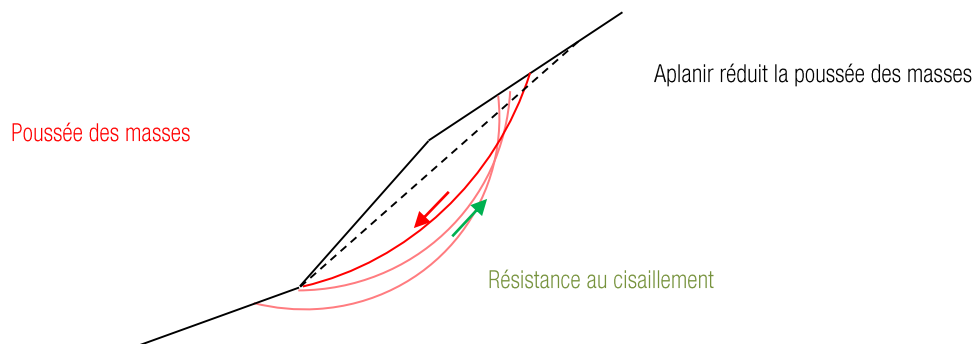
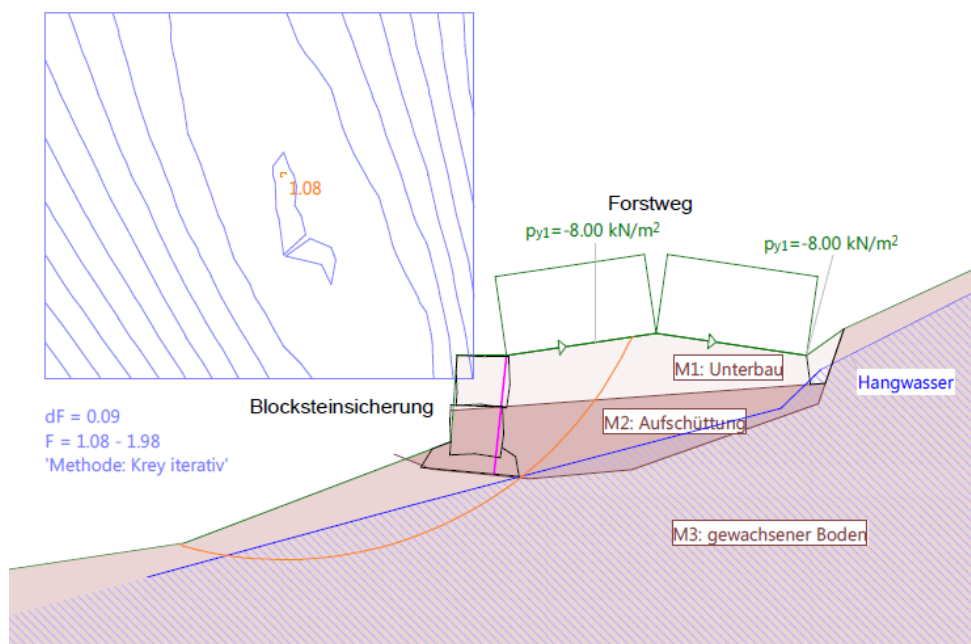


Illustration 41 Schéma des forces de poussée et de résistance.

Plus le terrain est plat, plus la surface de rupture potentielle est plate. Les masses génèrent moins de tension, „poussent“ moins, et la stabilité du terrain augmente.





Modèle de sol (couche M1 : infrastructure, M2 : sol en place, M3 : remblai)

**Bodenschichteigenschaften**

Id	Beschreibung	$\phi_k$ [°]	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]
M1	Unterbau	34.00	20.00	2.00
M3	gewachsener Boden	28.50	19.50	2.00
M2	Aufschüttung	32.00	20.00	2.00

**Numerische Resultate aller Ewk für Definition mit Zentren und Zwangslinie**

**Gleitkreise mit den kleinsten Sicherheiten**

GWS	Ewk Nr	Kreis Nr.	x [m]	y [m]	R [m]	Anker	F <sub>vorth</sub> [-]	L <sub>erf</sub> [m]	L <sub>min</sub> [m]	Bemerkung siehe Fussnoten
G1	1	166	2.15	4.86	3.85		1.08			
		136	2.15	4.45	3.54		1.08			
		109	2.62	4.05	2.92		1.08			
		106	2.15	4.05	3.25		1.09			

GWS : G1 = IGZ Tragsicherheit Typ 3  
 F<sub>vorth</sub> : vorhandene Sicherheit, erforderliche Sicherheit F<sub>erf</sub> = 1.00  
 L<sub>erf</sub> : berechnete, erforderliche freie Ankerlänge im Bereich L<sub>min</sub> - L<sub>max</sub>  
 L<sub>min</sub> : eingegebene, minimale freie Ankerlänge

Illustration 42 Exemple de calcul de stabilité à l'aide d'un logiciel (Cubus, Larix 5.0)

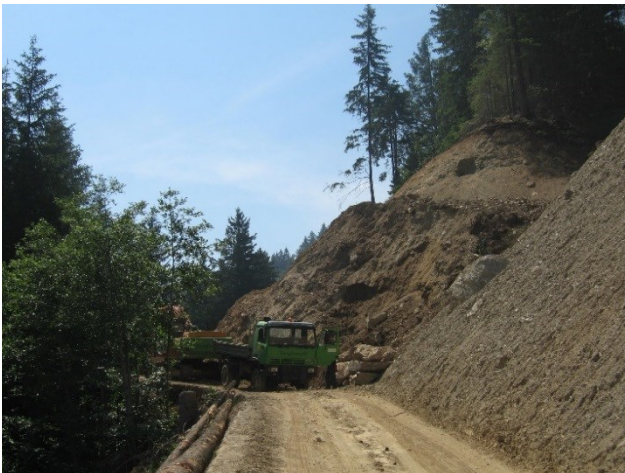


Illustration 43 Le talus amont est rendu instable en raison de l'élargissement amont du chemin. Des matériaux sont évacués sur toute la hauteur du talus (AWN GR).



Illustration 44 Grâce à l'évacuation des matériaux, le talus s'est aplani et sa stabilité améliorée. Sans évacuation, le mur de soutènement devrait être bien plus haut. (AWN GR).

## Soutènement

Les ouvrages de soutènement, en raison de leur poids, s'opposent à la poussée des masses. D'une part il y a des ouvrages poids qui retiennent les masses par leur poids propre (Illustration 46). Par exemple les remblais, les murs poids, gabions, armatures en bois, parois clouées et caissons. Ces 3 derniers systèmes sont des constructions mixtes qui allient le poids des terrains avec l'effet de maintien de l'armature ou des clous. Une autre approche consiste à utiliser la poussée des terrains et dévier cette force par une console (illustration 45, mur en L). La poussée reprise par la console horizontale compense la poussée oblique des terres par l'angle du pied. Cette solution nécessite un béton très armé.

Dans tous les cas, quel que soit la hauteur de l'ouvrage, un ouvrage de soutènement nécessite une bonne fondation car cette dernière est très sollicitée.

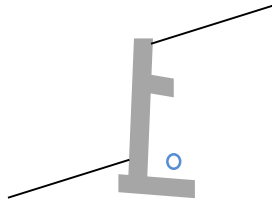


Illustration 28 Mur en L avec double console et drainage.

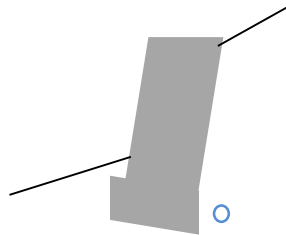
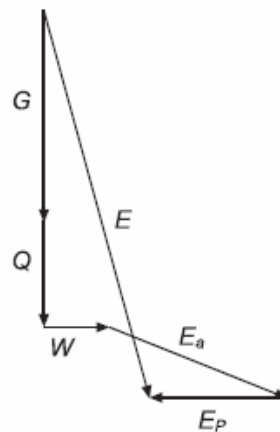
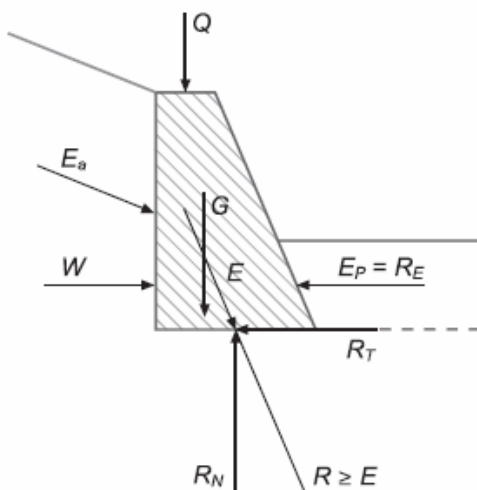


Illustration 46 Mur-poids avec drainage

Les ouvrages de soutènement permettent de réduire la pente des terrains au-dessus de l'ouvrage. Il en résulte une stabilisation de la surface. Il est indispensable par contre de prévoir un drainage ou une construction ouverte (gabion) afin d'éviter une augmentation de la pression hydrostatique à l'arrière de l'ouvrage.

### Dimensionnement des ouvrages de soutènement

Selon les normes il faut vérifier l'ouvrage pour 3 scénariis : glissement, basculement et rupture (SIA 267, 267/1, SN 640 383a). **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** montre les forces agissantes ou actions (G poids, Q contrainte, W pression hydrostatique,  $E_a$  poussée active,  $E_p$  poussée passive), la résultante ou effet (E) et la résistance (R).



Der Widerstand R wird in Berücksichtigung der Auswirkung E berechnet

Einwirkungen	G, Q, W, $E_a$ , $E_p$
Auswirkung	E
Widerstände	R bzw. $R_N$ , $R_T$

Illustration 47 actions, effets et résistances sur les ouvrages de soutènement (SIA 267)

Indications pratiques :

Incliner la semelle de fondation contre la pente





Conserver le fruit sur toutes les couches de l'ouvrage  
Profondeur de fondation  $\approx 0.35$  à  $0.4$  fois la hauteur de l'ouvrage (approximation pour des sols liants)  
Fruit au moins 5:1, (Plus bas pour les caissons !)  
Profondeur de la fondation min. 0.8m (gel)  
Drainage par chemise ou tuyau.



Illustration 48 pour les murs en blocs choisir et ajuster les formes aux autres. Mortier à partir de 3 m de hauteur est recommandé (AWN GR).



Illustration 29 recouvrir les caissons et suivre le fruit naturel du terrain assure la longévité de l'ouvrage. Le caisson peut absorber certains mouvements de terrain.



Illustration 50 La terre armée est un concept qui utilise le poids des terres pour les retenir. (nacken-steisslingen.de)

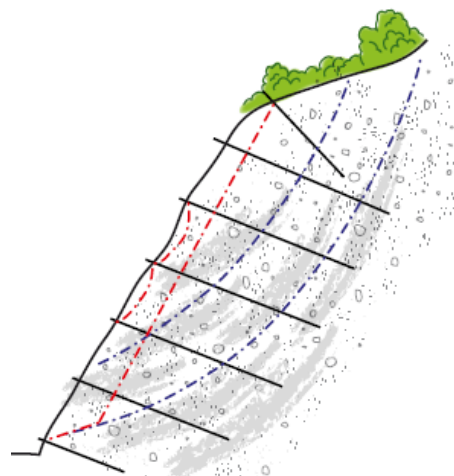


Illustration 51 Une paroi clouée constitue avec les matériaux en place un bloc dont la résistance au cisaillement est plus importante. La face peut être bétonnée (gunitage) ou pourvue d'un treillis résistant. (Geobrugg).



## Retenir

Les ouvrages de retenue ne produisent pas d'effet de butoir (par leur poids propre) sur les masses susceptibles de se mettre en mouvement mais transmettent la poussée au travers d'éléments portants légers ancrés par des tirants dans les couches de sols profonds et stables (illustrations 52 et 53). L'horizon de glissement se trouve ainsi **au-dessus** des éléments d'ancrages des tirants. Ancrages-pieux, ancrages à câble (« Duckbill » par exemple) et ancrages homme-mort sont des dispositifs courants en génie forestier. La poussée du front de la masse en glissement est reprise par des longrines, des parois en bois, des étrépillons ou des palplanches. Les éléments de ce type de construction sont sensiblement plus légers que ceux des ouvrages de soutènement. Il faut néanmoins prendre aussi les mesures adéquates de drainage pour éviter la pression hydrostatique derrière l'ouvrage. Une construction perméable de la face de l'ouvrage permet, selon la nature des sols, de renoncer à la pose de drainage.

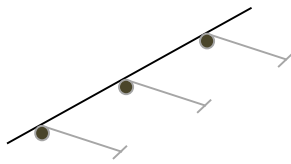


Illustration 30 Longrines ancrées, ancrage « queue de canard »

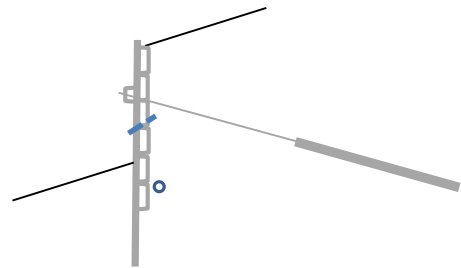


Illustration 31 Paroi berlinoise ancrée, face perméable et/ou drainage

### Dimensionnement d'ouvrages de retenue (ancrage passif)

#### Modèle structurel

L'ouvrage consiste en une face légère (éléments de béton, pieux et étrépillons, palplanches et longrines, etc.) retenue par des ancrages passifs. Les ancrages passifs nécessitent un léger déplacement de l'ouvrage pour se mettre en tension et reprendre la force de poussée contrairement aux ancrages précontraints du génie civil. Les ancrages précontraints sont nécessaires dans les ouvrages qui ne tolèrent pas de déplacement significatifs ; leur mise en œuvre est beaucoup plus complexe.

Le déplacement des ouvrages ancrés passivement doit toutefois être raisonnable.

Action : poussée active des masses et pression hydrostatique

Effet : tension sur la tête d'ancrage transmise par les éléments de la face de l'ouvrage

Action : tension reprise par la force de frottement du tirant

Dimensionnement des clous :

- Preuve de la sécurité structurelle interne : la valeur caractéristique de la traction à la limite élastique du tirant acier de l'ancrage.
- Preuve de la sécurité structurelle externe : la valeur caractéristique de la résistance d'un ancrage résulte de la valeur la plus faible de trois essais d'arrachement par type de sous-sol.
- Aptitude au service : en général inutile pour des ouvrages forestiers si la résistance est suffisante.

Protection contre la corrosion :

Les clous peuvent être mis en œuvre temporairement pour 5 ans et plus (de manière permanente). La protection contre la corrosion doit satisfaire la norme SIA 267. La classe d'ouvrage (selon SIA 261) et la durée de vie de l'ouvrage dictent les mesures à prendre.

En pratique, les règles suivantes sont applicables :

- Au minimum 3 essais d'arrachement par type de sous-sol pour déterminer la valeur de la sécurité structurelle externe, de la longueur du tirant et du choix de la méthode de forage ou d'injection. Bien entendu, les ancrages d'essais doivent être ancrés au-delà de l'horizon de glissement. La valeur déterminée par les essais représente la valeur de résistance caractéristique du terrain.



- Le niveau de protection contre la corrosion doit se conformer à la classe d'ouvrage (pour les applications forestières on se contente de la classe de protection 1 (recouvrement du tirant par 20 mm de mortier))
- Détermination de la qualité d'exécution au moyen d'épreuve de traction sur 5% des ancrages (au minimum 3) pour chaque type de sous-sol. La valeur de la traction testée est celle qui résulte des ancrages d'essai.



Illustration 32 Armature superficielle au moyen de longrines ancrées (AWN GR).



Illustration 33 forçage de l'ancrage au compresseur et mise sous tension jusqu'à la prise de l'ancrage (AWN GR).



Illustration 34 Mise en place de rails CFF et ancrages spiraux pour une palissade (Ribbert AG).



Illustration 35 Palissade terminée (Ribbert AG)



## Protection de la surface

Si la pente d'un talus n'atteint pas sa valeur critique et si les conditions climatiques sont acceptables, la colonisation des sols bruts par la végétation herbacée et ligneuse est rapide. Si ces conditions ne sont pas réunies, des mesures accompagnatrices sont nécessaires. Réduire la pente est souvent très utile mais pas toujours possible.

Piquetages, armatures en bois, empierrements, tressages sont autant de méthodes qui permettent d'atteindre un effet d'armature de la couche superficielle (illustrations 58 et 59). Les forces peuvent ainsi être réparties latéralement et verticalement. On peut ainsi obtenir des pentes légèrement plus élevées.

La protection contre les impacts des gouttes de pluie peut être obtenue avec des méthodes de protection de la surface. Faciliter la germination, l'installation de la végétation, éviter le lessivage et les micro glissements en surface, tels sont les effets recherchés. Le choix des espèces composant l'ensemencement et la période de semences est important : il dépend de la station. Parfois, la pose d'un géotextile peut poser problème car il absorbe l'énergie solaire et un microclimat trop chaud qui empêche la germination peut se développer au-dessus et dans le géotextile. Ce phénomène s'observe dans les pentes limites ensoleillées, riches en squelette où le géotextile est légèrement recouvert de sol végétal : la chaleur qui s'y développe sèche les graines à tel point que la germination est rendue impossible. Le génie biologique se penche sur ces questions de stabilisation superficielle.

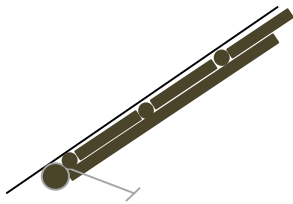


Illustration 36 Armature de sol en bois, recouvert, avec longrines ancrées

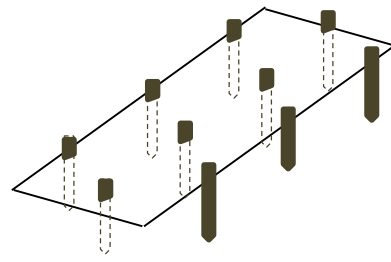


Illustration 37 Pentés avec piquets en quinconce.



Illustration 38 empierrement d'un talus de route. Les blocs sont posés en contact entre eux. (AWN GR)



Illustration 39 talus protégé par une natte en coco et ensemencé. (LAWA LU).



Abbildung 40 Armature de sol en bois posé sur un mur (AWN GR).



Illustration 41 L'armature de sol en bois terminée et complètement recouverte (allonge la durée de vie de l'ouvrage) (AWN GR).



Illustration 42 Réseau d'ancrage (clous) et treillis métallique avant l'ensemencement (fobatec).

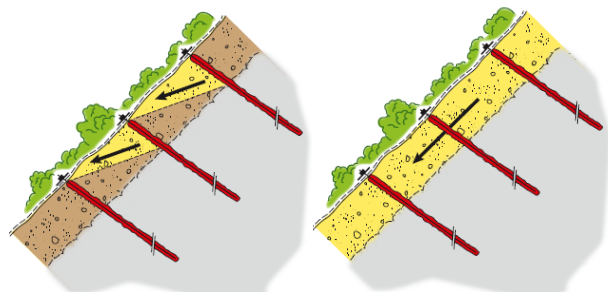


Illustration 43 Effet superficiel des clous et treillis : Les tassements et glissements superficiels ainsi que les glissements peu profonds peuvent être stabilisés.

En jouant avec les dimensions des plaques de tête on peut appliquer une certaine précontrainte sur le treillis et l'espacement entre les clous peut être augmenté. (Geobrugg). On peut ainsi atteindre globalement une meilleure résistance au cisaillement. L'ensemencement est indispensable pour éviter le lessivage de la surface par le ruissellement.

## Limites

Les possibilités techniques sans considérations de coût sont très étendues. Parmi les solutions les plus coûteuses mises en œuvre pour maîtriser un glissement, les galeries de délestage, les pieux drainants, les forages et pompages en profondeur représentent les moyens engagés pour stabiliser un glissement profond.

Il s'agit de mettre en place un système de drainage fondé sur des études hydrogéologiques et géologiques détaillées. Le glissement de la Frasse sur la route du col des Mosses dans le canton de Vaud en est un exemple. Il est aussi possible d'améliorer les caractéristiques des sols en leur injectant des liants comme le calcaire ou le ciment. Il est également possible de procéder à des mouvements de terrain très importants. Ces solutions dépassent le cadre du génie forestier. Lorsque le potentiel de dégâts est très important, il convient de faire appel à des géologues, géotechniciens et ingénieurs civils pour élaborer les mesures adéquates, en raison de questions de responsabilité des travaux surtout.



## Mesures de génie biologique (M. Schwarz)

### Effets de la végétation

Les mesures d'ingénierie biologiques ont une longue tradition dans les applications de corrections de cours d'eau et la stabilisation de pentes. Dans les années 60, ces méthodes ont connu un regain d'intérêt dans la pratique et l'enseignement au travers de publications qui ont repris les fondements de la discipline de manière qualitative (Schiechtl par ex.). A partir des années 70/80 les premières tentatives de modèles quantitatifs ont été proposées afin de calculer et discuter l'effet des mesures. L'effet stabilisateur de la végétation, une qualité centrale du génie biologique, reste toutefois très difficile à quantifier. Ceci est dû à la complexité et l'hétérogénéité des phénomènes qui interviennent dans les processus (mécaniques, chimiques, hydrologiques, etc.). Souvent les mesures de génie biologique sont accompagnées d'ouvrages techniques temporaires (caissons, armatures de sols, etc.), afin de faciliter la reprise de la végétation. De nombreuses publications traitent des différents types de mesures biologiques (Sotir et Gray, 1996 ; Florineth, 2004; Pauli et al. 2005; Zeh et al. 2010). Dans ce chapitre, il s'agit d'ordonner et mieux quantifier les effets de la végétation dans quel processus et avec quel horizon temporel.

En premier lieu il s'agit de déterminer dans quel contexte il est fait appel au génie biologique : la stabilisation de berges ou celle de pentes instables.

C'est tout particulièrement la stabilisation des pentes instables qui fait l'objet de ce script. Dans ce domaine, c'est la nature du processus qui permet de cerner l'effet recherché de la couverture végétale. En cas d'érosion superficielle, la cohésion des agrégats du sol en surface est intéressante. Le système racinaire profond de la végétation permet de renforcer le sol en cas de glissement superficiel. A l'échelle d'un bassin versant, l'interception régularise les apports d'eau dans le sol et l'évapotranspiration contribue à diminuer la quantité d'eau présente dans le sol : l'effet est ressenti sur les glissements de profondeur moyenne à élevée. Pour chaque processus l'effet recherché de la végétation est différent (Illustration 66).

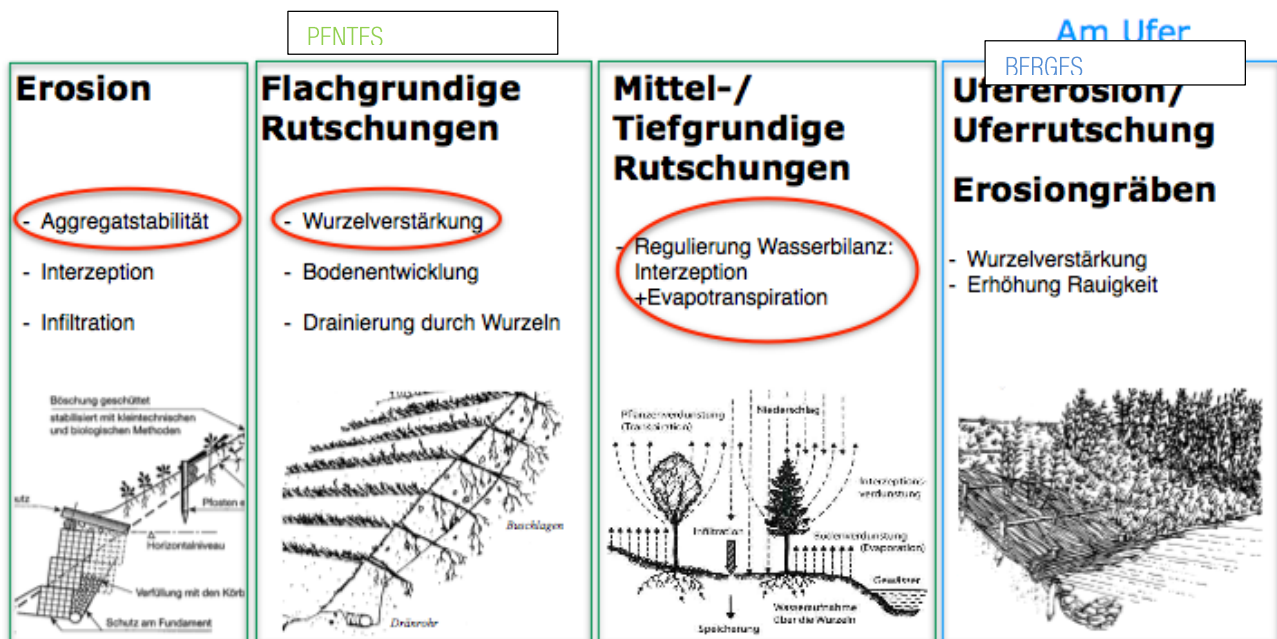


Illustration 44 Représentation schématisques des effets de la végétation dans la stabilisation de pente selon les processus.

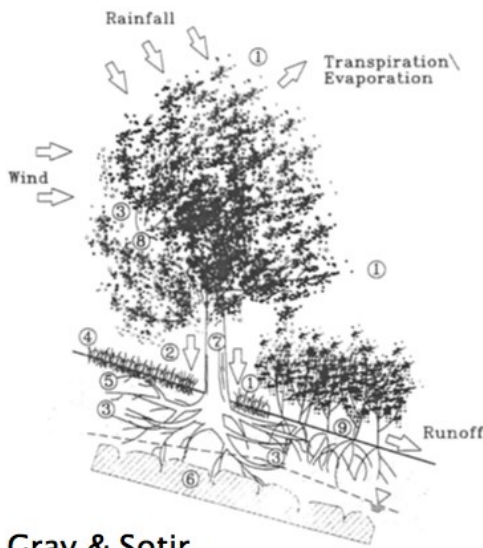
Les effets de la végétation sur la stabilité sont directes (interception ou armature du sol par les racines) ou indirectes (régulation de l'activité biologique du sol et pilotage du développement du sol). On peut aussi distinguer les effets mécaniques des effets hydrologiques ou chimiques. Afin de donner un ordre de grandeur de la signification de ces effets, des données quantitatives tirées de la littérature sont brièvement analysées et discutées pour un événement centenaire (précipitations d'environ 80mm/h ou 180 mm/24 h).

- **Interception** : 0 bis 5 mm (max 20 mm) par événement. La strate végétale agit comme un tampon et retarde l'arrivée de l'eau au sol. L'eau de pluie interceptée peut ruisseler le long du tronc et provoquer une saturation locale (typique pour le hêtre) mais on peut considérer ce phénomène très local comme insignifiant pour la stabilité de la pente en général.
- **Infiltration** : Les horizons colonisés par les systèmes racinaires sont plus perméables que ceux sans racines. L'infiltration est aussi facilitée par la stabilité des agrégats et la structure du sol qui résulte de l'activité biologique.



- **Evapotranspiration (ET):** A court terme elle n'a que peu d'influence (0-2 mm/heure), par contre à long terme elle influence de manière significative les processus hydrologiques des bassins versants, la teneur en eau et l'écoulement pendant les précipitations. L'évapotranspiration des forêts est plus importante que celle des prairies et pâturages et représente jusqu'à 50 % des précipitations annuelles. Cet effet peut aussi être important pour les glissements de profondeur moyenne à élevée (Sidle et Ochai, 2008). Cet effet est spatialement hétérogène et dépend de la répartition des racines.
- **Capacité de rétention d'eau du sol :** selon les types de sol jusqu'à 70-80 mm dans les horizons A et B. L'augmentation de poids local due à la saturation en eau n'a que peu d'influence négative sur la stabilité générale des pentes (voir l'analyse de sensibilité plus bas); par contre, l'augmentation du ruissellement en surface en raison de la saturation des sols a une importance pour la stabilité des pentes à l'échelle du bassin versant.
- **Vitesse de ruissellement :** les racines, la fanne et la végétation herbacée augmentent la rugosité des surfaces et favorisent l'infiltration.
- **Effet d'armature par les racines :** représente entre 0 et 20 kPa. Agit selon 3 mécanismes principaux : renforcement basal, latéral et rigidification du sol. L'effet de renforcement basal des racines se fait sentir jusqu'à 1,5 -2 m. Cela dépend de l'essence ligneuse, de l'âge du peuplement et de la station (voir plus bas).
- **Cohésion apparente :** L'évapotranspiration favorise la cohésion apparente en diminuant la quantité d'eau dans le sol. Plusieurs études ont montré que cet effet disparaît rapidement lors de précipitations modestes. Cet effet n'est pas significatif pour la stabilité des pentes.
- **Poids des arbres :** Cet effet peut être positif ou négatif selon la pente et les caractéristiques du sol. Cependant cet effet est faible en raison des forces relativement peu importantes qui résultent de la masse des arbres par rapport à celles qui résultent du poids du sol. Par exemple, les forces exercées par un vieux peuplement (5 to/m<sup>2</sup>) dans une pente de 30° représentent environ 400 N/m<sup>2</sup> alors qu'un sol de 1 m de profondeur génère 8000 N/m<sup>2</sup>.
- **Vent et neige :** Les forces entraînées par le vent et la neige sont transmises dans le sol par l'assiette racinaire et reprises par le sol sur quelques mètres. Ces contraintes sont très locales, dans l'assiette, 1 à 2 m de rayon et sont asymétriques : traction au vent et compression sous le vent. Ces forces sont principalement transmises dans le sol par les grosses racines primaires structurantes. Le système des racines secondaires et radicelles contribue plutôt à la stabilité du sol et colonise une surface du sol nettement plus étendue.
- **Stabilité des agrégats :** la végétation influence l'activité biologique du sol qui détermine des processus chimiques et mécaniques importants. Le résultat de cette activité correspond à la structure du sol, partant la stabilité des agrégats qui la composent. La stabilité des agrégats est influencée directement par les exsudats (processus chimiques) relâchés par les champignons, les bactéries et les racines. L'activité mécanique des vers de terre permet de mélanger le sol (bioturbation), en particulier la répartition verticale des argiles. Une stabilité élevée des agrégats améliore la résistance à l'érosion et au cisaillement. La stabilité des agrégats décroît fortement avec la profondeur. Cet effet de la végétation est significatif pour la réduction de l'érosion en surface de fortes pentes. Voir l'illustration 68, qui montre la progression de la stabilité des agrégats en fonction du développement de la végétation.
- **Composition chimique de l'eau dans le sol :** La végétation influence les propriétés chimiques de l'eau dans le sol (pH, concentration en ions et argiles). Ces dernières ont une influence à long terme sur les processus de formation du sol (altération, érosion). Les processus de formation du sol déterminent fortement les caractéristiques hydrologiques et mécaniques des horizons et ainsi la sensibilité des pentes au glissement. Ces effets à long terme sont très difficiles à quantifier.

Bien que ces effets soient difficilement quantifiables selon les contextes, il est possible d'évaluer des ordres de grandeur quantitatifs qui permettent de comparer ces effets à ceux des ouvrages techniques.



#### Hydrologique

- Interception
- Infiltration (rugosité surface, macropores)
- Capacité de rétention
- Vitesse d'écoulement

#### Mécanique

- Armature racinaire (basale et latérale)
- Cohésion apparente (ET)
- Poids des arbres (+/-)
- Vent, neige
- Stabilité des agrégats

#### Chimique

- Composition de l'eau (pH, ions, argiles)

### Gray & Sotir.

Illustration 45 Liste des effets possibles de la végétation sur la stabilité des pentes (modifié, selon Gray et Sotir (1995)).

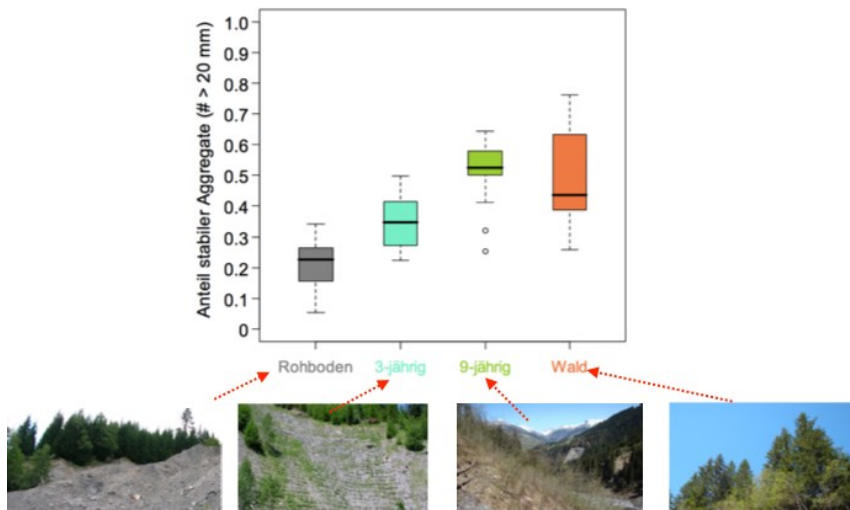


Illustration 46 Stabilité des agrégats : résultats d'une série chronologique d'observations selon le développement de la végétation après des mesures de génie biologique (part des agrégats stables) à Arieschbach (GR). Modifié, selon Schwarz et al. (2006).

## Développement temporel de l'effet d'armature des racines et sa signification dans les mesures biologiques.

Le rôle de l'effet d'armature des racines est discuté dans cette section. Pour les processus de glissement de moins de 2 m de profondeur et d'un petit volume (500 à 1000m<sup>3</sup>) il est possible d'affirmer que l'effet d'armature est important. C'est pourquoi les mesures de génie biologiques peuvent être efficaces pour les petits glissements et constituer une solution avantageuse financièrement par rapport à une mesure technique.



L'effet d'armature se manifeste principalement selon trois mécanismes : Ancrage de la couche en glissement à la couche stable au-dessous (augmentation de la résistance au cisaillement).

1. Amélioration de la rigidité de la couche par la colonisation de la couche et l'interpénétration des systèmes racinaires des plantes.
2. Ancrage latérale de la couche instable aux environs plus stables.

Ces mécanismes sont décrits dans leur ordre d'efficacité dans l'illustration 69 et l'illustration 70 présente ces 3 mécanismes-types de l'effet d'armature du sol par les racines.

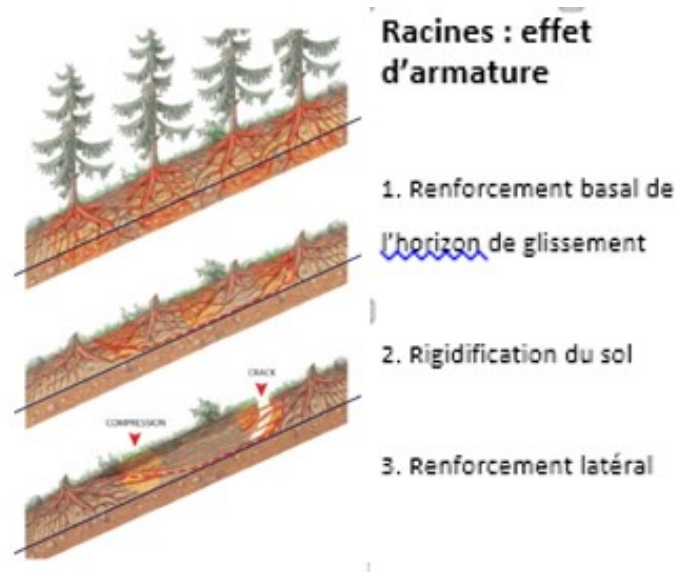


Illustration 47 Représentation des trois mécanismes d'armature stabilisatrices des systèmes racinaires. Modifié selon Giadrossich et al. (2014).



Illustration 48 Situations montrant les différents mécanismes: renforcement basal (à gauche), rigidité de la couche supérieure tel une armature technique de sol au milieu, renforcement latéral à droite.

Lors de la planification de mesures de génie biologique, il faut tenir compte du fait que les végétaux ne déploient pas leurs effets immédiatement. Il faut le du temps aux systèmes racinaires pour coloniser le sol. La dimension des plantes (p. ex. le DHP) ne se corrèle pas toujours avec l'âge ; il est toutefois possible de calculer le développement temporel au moyen de la formule  $BHD = a * \text{âge}^b$  où a et b représentent des coefficients empiriques qui varient selon l'essence et la station.

Des études ont quantifié le renforcement du sol par les racines et établi une relation entre le DHP et l'éloignement du tronc (Mattli, 2014; Vergani et al., 2014; Schwarz et al., 2012b). L'illustration 71 montre les résultats pour un hêtre dans les Préalpes bernoises. Les données sont traitées par une fonction spéciale (gamma) dont les paramètres sont dépendants du DHP. Avec cette formule, il est possible de calculer la répartition latérale de l'effet de renforcement induit par les racines.

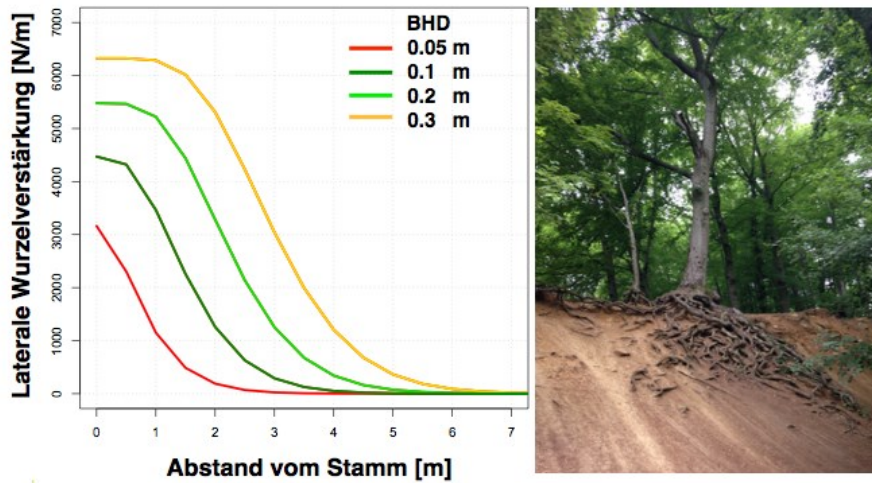


Illustration 49 Renforcement racinaire en N/m selon le DHP (BHD) et la distance au tronc (Stamm). La photo montre la répartition du système racinaire exposé d'un hêtre (fagus sylvatica).

L'effet de renforcement des racines sur un horizon de glissement potentiel (renforcement basal, mécanisme 1 de l'illustration 69) dépend de la répartition verticale des racines. La répartition dépend de l'essence et de la station. Glenz (2005) a rassemblé les données de la littérature et ordonné les profondeurs d'enracinement selon les essences et les facteurs stationnels. L'illustration 72 donne les profondeurs maximales de développement des systèmes racinaires selon les 3 types d'enracinement RT (traçant, pivotant et en cœur) qui caractérisent les essences (N. B. : certaines essences changent d'architecture racinaire avec le développement, par exemple l'épicéa qui débute avec un modèle pivotant mais termine son évolution avec un modèle traçant suite au dépérissement du pivot). Le tableau 4 liste les essences selon le modèle architectural racinaire. Cette information est importante pour estimer le pouvoir d'armature à une profondeur donnée selon le stade de développement du peuplement. Cette estimation permet de dire si le renforcement basal attendu sera significatif pour la stabilisation d'un glissement.

Dans le cas de l'existence probable d'un renforcement basal, il est utile d'en estimer l'intensité. Le renforcement du sol par les racines ne diminue pas linéairement avec la profondeur. L'illustration 72 montre la répartition typique de l'effet de renforcement du sol en fonction de la profondeur „normalisée“ (= profondeur du sol/profondeur maximale de l'enracinement), où la valeur de la profondeur du sol „normalisée“ correspond à une profondeur variant selon le modèle d'enracinement.

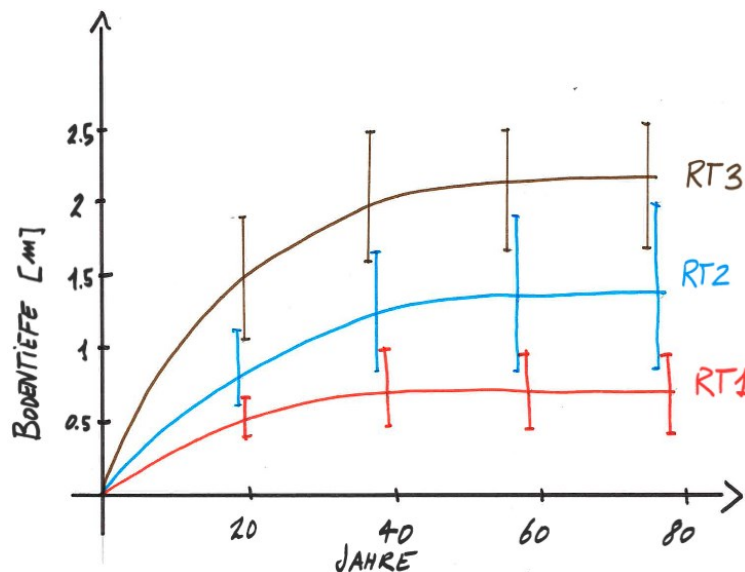


Illustration 50 Profondeur de sol colonisée par les racines en fonction de l'âge du peuplement (an/jahre), selon le modèle d'enracinement (RT). Modifié selon Glenz (2005).

Tabelle 3 Liste des essences selon le modèle d'enracinement (RT1, RT2 et RT3).

RT 1		RT 2		RT 3	
<i>Alnus viridis</i>	Grün-Erle	<i>Acer campestre</i>	Feldahorn	<i>Pinus silvestris</i>	Waldkiefer
<i>Cornus sanguinea</i>	Roter Hartriegel	<i>Aesculus hipp.</i>	Gewöhnliche Rosskastanie	<i>Quercus petraea</i>	Traubeneiche
<i>Frangula alnus</i>	Faulbaum	<i>Betula pendula</i>	Hänge-Birke	<i>Quercus pubescens</i>	Flaumeiche
<i>Ilex Aquifolium</i>	Europäische Stechpalme	<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	<i>Quercus robur</i>	Stieleiche
<i>Ligustrum vulgare</i>	Gewöhnlicher Liguster	<i>Prunus spinosa</i>	Schlehdorn	<i>Robinia pseudo.</i>	Gewöhnliche Robinie
<i>Ionicera xylosteum</i>	Rote Heckenkirsche	<i>Prunus domestica</i>	Pflaume	<i>Salix alba</i>	Silber-Weide
<i>Prunus avium</i>	Vogel-Kirsche	<i>Prunus padus</i>	Gewöhnliche Traubenkirsche	<i>Salix appendiculata</i>	Grossblättrige Weide
<i>Rhamnus cathartica</i>	Purgier-Kreuzdorn	<i>Prunus mahaleb</i>	Steinweichsel	<i>Salix caprea</i>	Sal-Weide
<i>Viburnum opulus</i>	Gewöhnlicher Schneeball	<i>Sorbus aucuparia</i>	Vogelbeere	<i>Salix cinerea</i>	Ash-Weide
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder	<i>Ulmus glabra</i>	Bergulme	<i>Salix daphnoides</i>	Reif-Weide
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte	<i>Abies alba</i>	Weiss-Tanne	<i>Salix elaeagnos</i>	Lavendel-Weide
		<i>Tilia platyphyllos</i>	Sommerlinde	<i>Salix fragilis</i>	Bruch-Weide
		<i>Viburnum lantana</i>	Wolliger Schneeball	<i>Salix m. nigricans</i>	Schwarz-Weide
		<i>Cornus mas</i>	Kornelkirsche	<i>Salix pentandra</i>	Lorbeer-Weide
		<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	<i>Salix purpurea</i>	Purpur-Weide
		<i>Populus tremula</i>	Espe	<i>Salix triandra</i>	Mandel-Weide
		<i>Alnus incana</i>	Grau-Erle	<i>Salix viminalis</i>	Korb-Weide
		<i>Acer platanoides</i>	Spitzahorn	<i>Acer pseudopl.</i>	Berg-Ahorn
		<i>Amelanchier ovalis</i>	Gewöhnliche Felsenbirne	<i>Alnus glutinosa</i>	Schwarz-Erle
		<i>Berberis vulgaris</i>	Gewöhnliche Berberitze	<i>Ulmus minor</i>	Feldulme
		<i>Castanea sativa</i>	Edelkastanie	<i>Larix decidua</i>	Europäische Lärche
		<i>Corylus avellana</i>	Gemeine Hasel	<i>Populus nigra</i>	Schwarz-Pappel
		<i>Crataegus laevigata</i>	Zweigrieffeliger Weissdorn	<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche
		<i>Crat. monogyna</i>	Eingrieffeliger Weissdorn		
		<i>Hipp. Rhamnoides</i>	Sanddorn		
		<i>Juglans regia</i>	Walnuss Baum		
		<i>Juniperus com.</i>	Gemeiner Wacholder		
		<i>Sorbus aria</i>	Mehlbeere		
		<i>Taxus baccata</i>	Eibe		
		<i>Tilia cordata</i>	Winterlinde		
		<i>Malus sylvestris</i>	Wildapfel		
		<i>Betula pubescens</i>	Moor-Birke		
		<i>Populus alba</i>	Silber-Pappel		

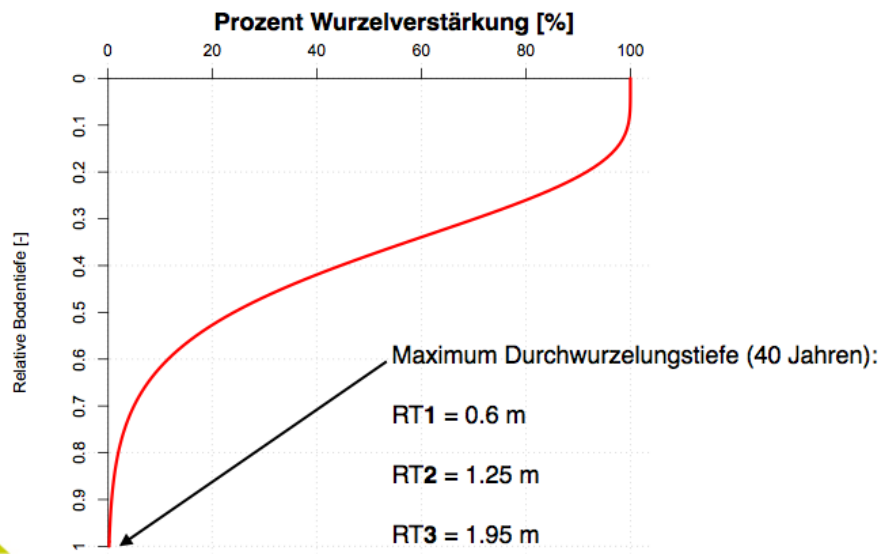


Illustration 51 Diminution de l'effet de renforcement en % selon la profondeur du sol. Modifié selon Vergani et al. (2014). La valeur absolue en mètre de la profondeur varie selon le modèle d'enracinement à 40ans d'âge (RT1=0.6 m, RT2= 1.25, RT3=1.95); données tirées de Glenn (2005).

Il a été démontré que la contribution au renforcement racinaire de 2 systèmes racinaires qui colonisent le même espace peut être additionnée (Giadrossich et al. 2013). Ce fait permet d'estimer l'effet de renforcement latéral au niveau d'un peuplement en admettant que l'effet de renforcement du sol minimal est celui calculé au point d'intersection des couronnes de deux arbres voisin (la moitié de l'espacement moyen des arbres d'un peuplement).

Exemple d'espacement moyen : 100 arbres par ha correspond à une surface moyenne de 100 m<sup>2</sup> par arbres, ce qui donne un espacement moyen de 11 m selon la formule :  $\text{esp. moy.} = 2 * \sqrt{100/3} = 14$

Cette hypothèse permet d'estimer de manière reproductible le renforcement latéral et basal sur la base de la dimension des plantes. L'illustration 74 montre un exemple de calcul de l'effet de renforcement latéral d'une mesure de génie biologique dans une pente réalisée par plantation à des écarts différents (2x2 m, 3x3 m, 5x5 m).

Cet exemple montre clairement que l'effet de renforcement ne se déploie vraiment qu'après 30 à 40ans et que la densité du peuplement influence considérablement l'effet de renforcement. A partir d'un certain stade il faut prévoir des mesures d'entretien qui permettent d'influencer la grosseur des tiges au détriment de la densité et atteindre un certain équilibre comme le prévoient les recommandations des directives Nais pour la forêt protectrice (durabilité dans la forêt protectrice). La mise en œuvre de ces directives sur les pentes traitées par les méthodes du génie biologique se justifient pleinement (Ammann, 2004).

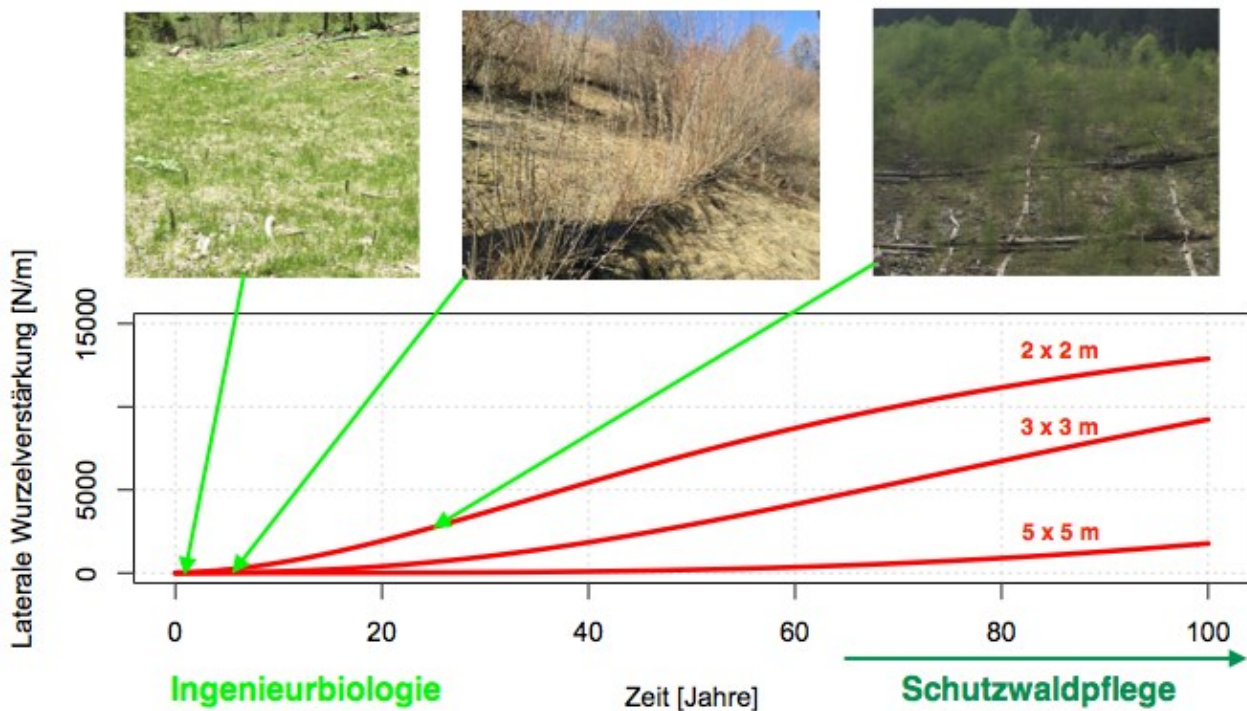


Illustration 52 Déploiement de l'effet de renforcement latéral en fonction de l'âge des végétaux et la distance de plantation initiale des plantes/boutures. Ne sont pas prise en compte l'effet des éclaircies éventuellement nécessaires.

Le manque d'effet mécanique de renforcement des plantes pendant les premières années, voire décennies doit souvent être compensé par des mesures techniques tel l'armature de sol ou le caisson. La durée de vie de ce type d'ouvrages en bois est très variable et dépend de nombreux facteurs. Böll et al. (1999) ont discuté des facteurs de longévité et déterminé que la durée de vie dépend des conditions hydriques de la station (station anaérobie ou à régime hydrique alterné). C'est principalement la composition de la microfaune saprophyte et l'essence qui sont déterminantes pour la longévité des ouvrages. Si la durée de vie des ouvrages en bois est très variable selon la station, une approximation basée sur un scénario pessimiste permet de tabler sur une durée de vie de 20 à 40 ans. Sous des conditions anaérobies une durée de vie des structures en bois pouvant atteindre 100 ans est documentée. L'illustration 75 montre l'aptitude au service de seuils dans un torrent en fonction de l'âge. Ces données donnent une bonne idée de l'évolution de l'aptitude au service des constructions en bois. Cette évolution peut être estimée à l'aide d'une fonction de survie (exemple de fonction de survie chez Schwarz et al. 2013). La fonction de soutènement d'une armature de sol en bois peut être quantifiée au travers de la résistance maximale des longrines du maillage (élément horizontal). Déterminantes sont les caractéristiques mécaniques du bois, les dimensions des longrines et la longueur du maillage. L'illustration 76 montre l'interaction et la succession des effets du renforcement par les structures en bois et par les racines.

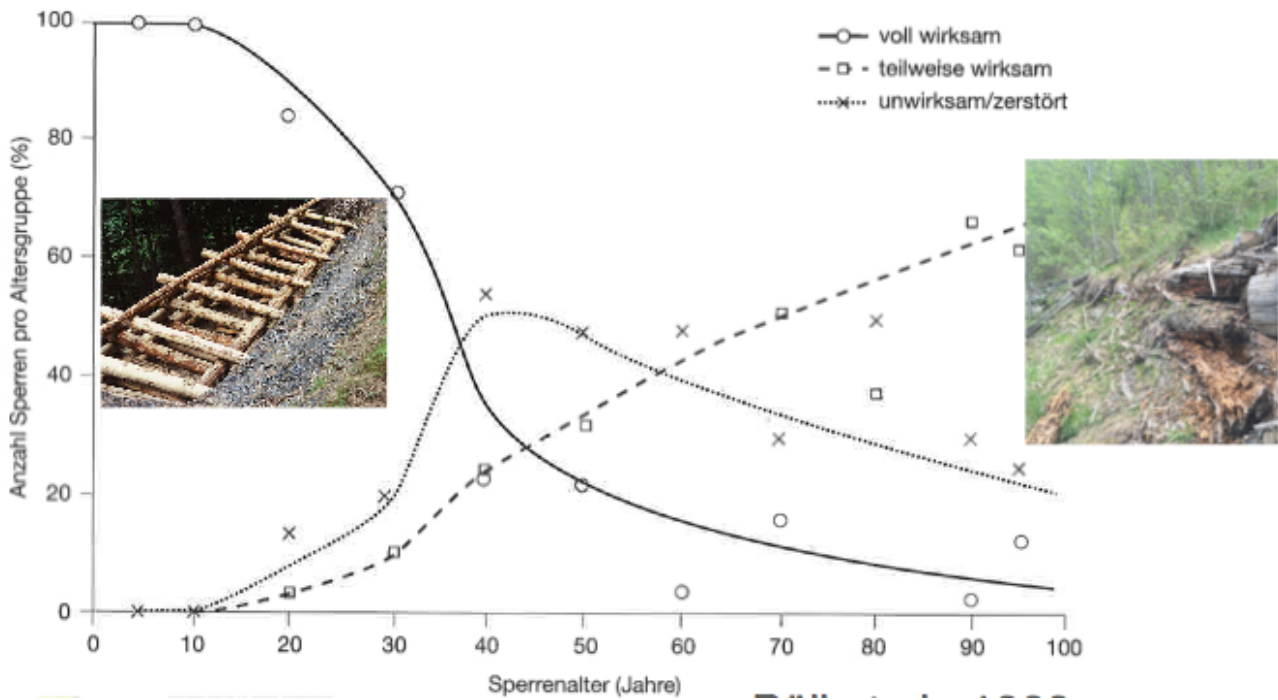


Illustration 53 Aptitude au service par seuil en fonction de l'âge. Modifié selon Böll et al. (1999).

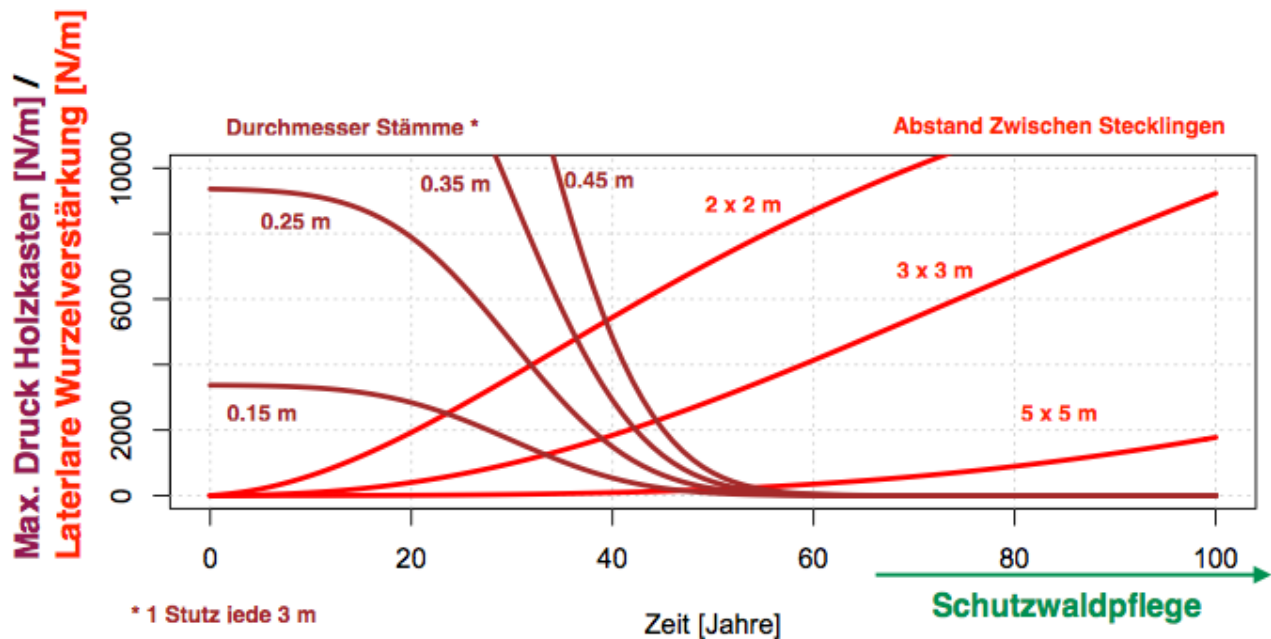


Illustration 54 représentation combinée des effets mécaniques des ouvrages en bois (armature en bois) et renforcement racinaire latéral par la végétation au cours du temps en N/m. Pour des longrines d'épaisseur différentes (0.15 m à 0.45 m) avec un tirant tous les 3 m et des densités de plantations de 2x2, 3x3 et 5x5 mètres.

L'illustration 76 montre la reprise de l'effet de renforcement par les racines des plantes suite à la dégradation parfois rapide des ouvrages techniques en bois. Selon le diamètre des bois employés et de la densité de plantation, l'effet de renforcement peut connaître une baisse avant que la végétation ne déploie ses effets complètement. Ces deux facteurs ayant une influence sur les coûts initiaux il s'agit de trouver la solution optimale qui s'oriente sur les risques encourus en cas de défaillance de l'ouvrage. Quelle que soit la solution choisie, le suivi de la végétation est indispensable car c'est la qualité du peuplement final qui assurera la longévité en fin de compte. Cette qualité est obtenue en appliquant les recommandations pour les soins aux forêts protectrices. L'illustration 77 montre un exemple de peuplement qui s'installe environ 35 ans après des mesures de génie biologique. Le peuplement a été éclairci afin de régler le mélange et améliorer la structure.



Illustration 55 Exemple d'une pente traitée par génie biologique après 35 ans (Patenjarüfe, Arieschbach, 2015). On distingue très bien la dégradation des ouvrages en bois à gauche et le développement d'une jeune forêt à droite.

La directive „Gestion durable des forêts de protection (projet NaiS)“ (NaiS, Frehner et al., 2005) est une base importante pour la prise en compte des aspects sylvicoles lors de la planification de mesures de soins dans la forêt protectrice. Des études récentes, complémentaires au projet NaiS, donnent des approches quantitatives pour estimer l'effet des soins à la forêt en relation avec les processus de glissements. L'outil SlideforNET (<http://www.ecorisq.org/slidefor-net-en>) calcule le renforcement racinaire latéral et basal sur la base de caractéristiques du peuplement comme le mélange des essences, le DHP moyen et le nombre de tiges à l'hectare. L'estimation de la valeur de renforcement racinaire est introduite dans les calculs de stabilité de pentes pour des glissements superficiels. L'effet protecteur de la forêt est ainsi calculé en donnant une estimation de la probabilité que l'effet de renforcement racinaire réduise le nombre de glissements superficiels de toutes tailles. Les illustrations 78 et 79 donnent un exemple d'application d'un cas dans le canton de Berne dans lequel l'effet de protection de la forêt selon différents profils de peuplement est comparé.

Les valeurs estimées de l'effet de renforcement des racines dans les calculs de stabilité des pentes sont dérivées de glissements superficiels potentiels. Ainsi la fonction de protection de la forêt est quantifiée selon la probabilité que le renforcement racinaire réduise la fréquence de glissements de dimensions différentes. Les illustrations 78 et 79 montrent l'application de l'outil « SlideforNET » à un cas dans le canton de Berne dans lequel la fonction de protection de différents profils de forêt garantissant un renforcement racinaire minimal est comparée : le « statut quo », le « profil optimal » selon NaiS et le « minimum d'arbres par ha ». Ce dernier scénario représente l'effet d'une intervention sylvicole qui serait encore compatible avec la stabilité (minimale) de la pente. Selon la situation, l'outil indique les limites de l'effet de renforcement pour la protection contre les glissements superficiels. Pour plus de détail voir Schwarz et al. (2014a)



# SlideForNet

## Slope characteristics

Mean gradient of the slope

Estimated depth of the slide plane

Friction angle of the soil

Soil cohesion

Safety Factor (SF)

25 °  
 2 m  
 28 °  
 0.5 kPa  
 1 -

## Forest characteristics

Mean stand density

Mean diameter at breast height (DBH)

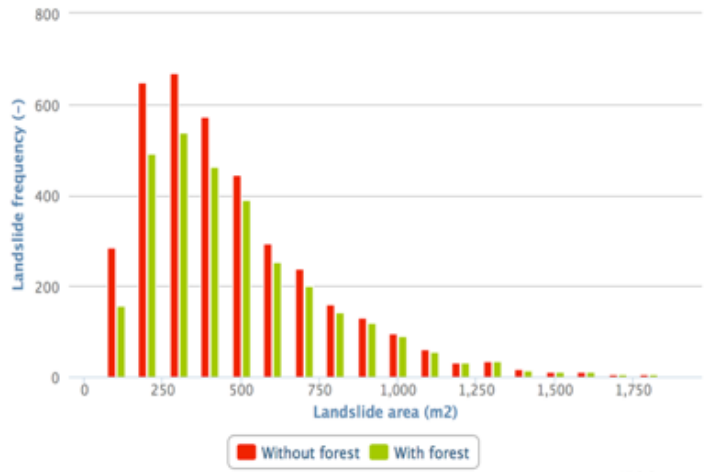
Occurrence of dominant tree species:

- Norway spruce (*Picea abies*)
- Silver fir (*Abies alba*)
- European beech (*Fagus sylvatica*)
- Other broadleaved species
- Other coniferous species

350 ha<sup>-1</sup>  
 39 cm  
 80 %  
 20 %  
 0 %  
 0 %  
 0 %

1. Current degree of protection: 5 - 25 %

Frequency-magnitude distribution of shallow landslides



Data used for the calculation:

- Safety Factor (SF) of slopes at the point of failure (critical) = 1
- Lateral reinforcement by tree roots = 5 kPa
- Weight of the forest vegetation = 0.04 t m<sup>-2</sup> (on average #2 cm of soil)

Illustration 56 Interface de l'application „SlideForNet“ (EcorisQ, 2013) avec la liste de paramètres d'entrée (gauche) et restitution des résultats (droite).

# SlideForNet

## “Honegg” bei Schangnau

Gründigkeit: **1.5 m**

Hangneigung: **25°**

Boden: Toniger Sand mit viel Feinanteil (  $\phi=25$   $c=0.5$  )

Waldgesellschaft:

18, Waldschwingel-Tannen-Buchenwald

“ist Zustand”: **Bu 0%, Ta 30%, Fi 70%;**

Mininal Profil (NaiS):

**Bu 30-80%,**

**Ta 20-60%,**

**Fi 0-30%;**

Optimal Profil (NaiS):

**Bu 40-60%,**

**Ta 30-50%,**

**Fi 0-20%;**

Anzahl Stämme:

**350/ha;**

Mittlerer BHD:

**38.91 cm;**





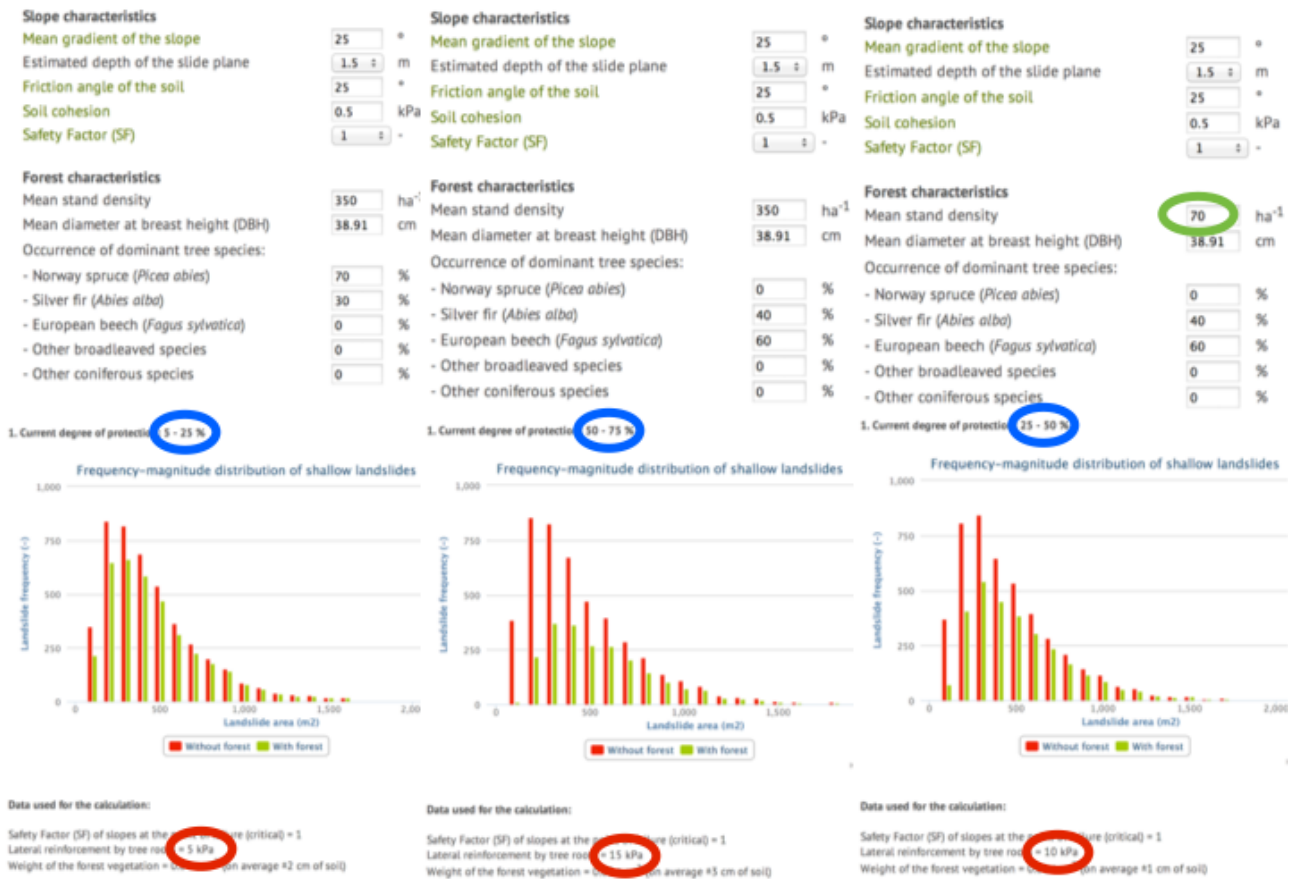


Illustration 57 Exemple de l'application de « SlideForNet » tiré d'une étude de cas dans le canton de Berne. für eine Fallstudie in Kt. Bern. Les résultats de 3 scénarii sont représentés („statut quo“, „profil minimal“ et „profil optimal“ selon NaïS).



## Sources

- AGN, 2004: Gefahreinstufung Rutschungen. Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN. Arbeitsbericht zu Handen des BWG. Bern (download [www.sfig-gsgj.ch](http://www.sfig-gsgj.ch)).
- Ammann M., 2014. Grundlageninformationen zur Realisierung von Querungsbauwerken, in Tagungsdokumentation ‚Waldstrassen und Gerinnequerungen‘. fobatec, Maienfeld, 2014.
- Ammann, P.L., 2004. Untersuchung der natürlichen Entwicklungsdynamik in Jungwaldbestände biologische Rationalisierung der Waldbaulichen Produktion bei Fichte, Esche, berghohen und Buche. Dissertation ETH, E-collection: eth-27834-02.
- Böll A., 1997. Wildbach- und Hangverbau. Bericht Eidgenössische Forschungsanstalt Wald Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 123S.
- Böll A., Gerber W., Graf F. und Rickli C., 1999. Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Rensenverbau. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft, 60S.
- Bolliger D., Keusen H.R., Rovina H., Wildberger A., Wyss R., 2004. Gefahreinstufung Rutschungen i.w.S. - Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren (Entwurf), Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern und Zollikofen, 44S.
- Florineth F., 2004. Pflanzen statt Beton: Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Patzer Verlag, 272S.
- Frehner M., Wasser B., Schwitter R., 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald: Wegleitung für Pflegemassnahmen in Walder mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Bern, 564S.
- Giadrossich F., Schwarz M., Cohen D., Preti F. und Or D., 2013. Mechanical interactions between neighbouring roots during pullout tests, Plant and Soil, DOI 10.1007/s11104-012-1475-1.
- Giadrossich F., Schwarz M., Pirastru M. und Niedda M., 2014. Stabilization's mechanisms of hill-slopes due to root reinforcement. Quaderni di idronomia montana 31, 353-362.
- Glenz C., 2005. Process-based, spatially-explicit modelling of riparian forest dynamics in Central Europe: tool for decision-making in river restoration. Dissertation EPFL, doi:10.5075/epfl-thesis-3223.
- Gray D. und Sotir, R, 1996. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization, John Wiley and Sons, NY, 369S.
- Gruner U., Wyss R., 2009. Anleitung zur Analyse von Rutschungen. In Swiss Bulletin für angewandte Geologie Vol 14/1\_2. 2009. Bern, 4S.
- Lang H-J., Huder J., Ammann P., Puzrin A.M., 2010. Bodenmechanik und Grundbau, Springer, Heidelberg, 336S.
- Lateltin O., Tripet J.-P. und Bollinger D., 1997. Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, EDMZ Bern, 42S.
- Lu N., Godt J.-W. und Wu D., 2010. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. Water Resources Research, VOL. 46, W05515, doi:10.1029/2009WR008646.
- Krummenacher B., Tobler D., 2009. Teil B. Anwendung des Risikokonzpts: Spontane Rutschung / Hangmuren, PLANAT und BAFU, Bern, 32S.
- Mattli J., 2014. Quantifizierung der Wurzelverstärkung im Schutzwald. Bachelor Thesis HAFL-BFH, 79S.
- Parriaux, A., Bonnard C. und Tacher L., 2010. Glissements de terrain: hydrogéologie et techniques d'assainissement par drainage. Guide pratique. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1023: 128S.
- Patt H., Gonsowski P., 2010. Wasserbau. Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen, Springer, Heidelberg, 410S.
- PLANAT 2015: Erdrutsch, <http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/erdrutsch/> (Stand 28.5.15)
- Rüegger R., 2014. Entwurf und Konstruktion in der Geotechnik, Vorlesungsteil Verankerungen, ETH-Skript, St. Gallen, 178S.
- Sauli G., Cornelini P. und Preti F., 2005. Manuale d'ingegneria naturalistica. Regione Lazio, Roma, 192S.



Schwarz M., Cohen D. und Or D., 2012a. Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: theory and case study, *Geomorphology*, 171: 190-200.

Schwarz M., Thormann J.-J., Zürcher K. und Feller K., 2012b. Quantifying root reinforcement in protection forests: implications for slope stability and forest management. 12th Congress Interpraevent-Grenoble, France. 791-802.

Schwarz M., Giadrossich F. und Cohen D., 2013. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4367-4377, doi:10.5194/hess-17-4367-2013.

Schwarz M., Dorren L. und Thormann J.-J., 2014a. SLIDEFORNET: a web tool for assessing the effect of root reinforcement on shallow landslides. Code: F04. International Conference Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards, 18-19 November 2014 I Padua, Italy.

Schwarz M., Mattli J., Dorren L., Hunziker G., Loup B., Hagen K., Mazzorana B., Rickli C., Bebi P., Wohlweind S., Huwiler A. und Vacchiano G., 2014b. „Best Practice“ Methoden zur Gefahrenbeurteilung für flachgründige Rutschungen - Ein alpiner Vergleich. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz, Villach*, 78(174) : 223-231.

Sidle R. und Okay H., 2008. *Landslides - Processes, Prediction, and Land Use*. AGU Water Resources Monograph 18, 312S.

Spreafico M, Weingartner R, Barben M, Ryser A, 2003. Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, *Praxishilfe, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern*, 119S.

Vergani C., Schwarz M., Cohen D., Thormann J.-J. und Bischetti G.B., 2014. Effects of root tensile force and diameter distribution variability on root reinforcement in the Swiss and Italian Alps. *Canadian Journal of Forest Research*. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0095.

Zeh H., 2010. Ingenieurbio-logische Bauweisen im naturnahen Wasserbau. *Praxishilfe. Umwelt-Wissen Nr. 1004*. Bundesamt für Umwelt, Bern. 59 S.

Zeller J., Trümpler J., 1984. *Rutschungsentwässerungen*, EAFV Birmensdorf, Teufen AR, 276S.

#### **Normes / Standards :**

Normes SIA :

261 Structures portantes

267 Géotechnique

267/1 Géotechnique – compléments

Normes SN (VSS):

640 355 Drainage, Projets

640 383a Ouvrages de soutènement, conception, planification et réalisation

#### **Catalogue des articles normalisés (CAN):**

164 Ancrages et parois clouées

211 Fouilles

237 Canalisations et Drainages

#### **Informations des fabricants:**

Jansen AG, *Technisches Handbuch Entwässerungssysteme*

Geobru gg, *Tecco System3 und Spider*

Cubus, 2005. *Larix-5*, [http://www.cubus-software.com/Guests/Produkte/Larix/d\\_main.html](http://www.cubus-software.com/Guests/Produkte/Larix/d_main.html) (Stand 28.5.15)

Verband Kunststoffrohre und Rohrleitungsteile VKR, 2015. *Richtlinie drucklos betriebene Rohrleitungen 03*





**Dommmages** (suite)

**Note (description du dommage):**

- (1) Travaux d'évacuation et leur coût, volume des matériaux déplacés
- (2) Montant du dommage subdivisé en privé / public
- (3) Voies de déviation
- (4) Autre
- (5) Avertissement publié
- (6) Mesures d'urgence ordonnées

**Aménagement du territoire**

Conflit avec les zones d'affectation et de dangers valides?

Zones concernées? (zone à bâtir, camping, site d'extraction, zone de danger, etc.): \_\_\_\_\_

**Ouvrages de protection**

Présent dans la zone d'arrachement / de détachem.?

N° du cadastre des ouvrages de prot.: \_\_\_\_\_

Présent dans la zone de transit?

N° du cadastre des ouvrages de prot.: \_\_\_\_\_

Présent dans la zone de dépôt?

N° du cadastre des ouvrages de prot.: \_\_\_\_\_

**Note (description de l'efficacité des mesures de protection):**

- (1) Genre / type d'ouvrage de protection
- (2) Etat des ouvrages de protection, évaluation de leur efficacité
- (3) Dangers résiduels / nouveaux dangers
- (4) Coût des réparations / des ouvrages complémentaires
- (5) Autre

**Documentation**

Nom, adresse service de documentation / désignation, numéro de l'étude, photos, etc.

Note, étude, expertise, calculs \_\_\_\_\_

Jounaux, bibliographie, sources historiques \_\_\_\_\_

Documentation photographique \_\_\_\_\_

Orthophotos, vues aériennes \_\_\_\_\_

Vidéo, film \_\_\_\_\_

Données météorologiques \_\_\_\_\_

**Relevé cartographique**

Le site du phénomène a-t-il été cartographié?

**Méthode**

**Zone d'arrachement / de détachement:**

**Zone de dépôt:**

sur place

sur place

Vues aériennes, photos

Vues aériennes, photos

Observ. à distance ( de la pente opposée)

Observ. à distance (de la pente opposée)

Relevés rétrospectifs / autres relevés

Relevés rétrospectifs / autres relevés

StorMe 2.0

Numéro interne: \_\_\_\_\_

Numéro du cadastre des événements: \_\_\_\_\_



**Dangers naturels  
Cadastre des événements**

**Glissement**

Feuille 3/4

Cases (Code-MAXO): M = valeur mesurée, constatation A = supposition, estimation X = pas claire, doit encore être relevé O = ne peut être déterminé

**Type de phénomène**

Glissement  Coulée  Affaissement et effondrement

**Autres phénomènes (d'importance secondaire):**

Inondation  Lave torrentielle (dans le lit)  Erosion (rives, talus de berge)  Autre (Description dans la note)  
 Débordement avec dépôts  Glissement  Chute de pierres ou éboulement

**Causes météorologiques**

**Orage**

Durée [h]  
  Hauteur des précipitations [mm]

**Pluie persistente**

Durée [h]  
  Hauteur des précipitations [mm]

Fonte de la neige  Ne peut être déterminé

**Déclenchement**

Déclenchement:

Naturel  Artificiel (du à l'activité humaine)  
 Erosion du lit  Autre (Description dans la note)

**Zone de rupture / de détachement**

Profondeur de la surface de rupture:   [m] Degré d'affaissement:   [m] Masse glissée:   Roche  
Masse affaissée:   Matériau meuble  
Largeur de la surface de rupture:   [m] Surface de rupture:   [m<sup>2</sup>] Surface de glissement:   Sur la roche  
  Dans les matériaux meubles

**Zone de transit / de dépôt**

Epaisseur du matériel déposé:   [m] Profondeur de la surf. de glissement:   0 – 2 m (superficiel)  
Volume du matériel déplacé:   [m<sup>3</sup>]  2 – 10 m (moyennem. profond)  
 > 10 m (profond)  
Passage d'un glissement à une coulée (ravin)?   
Dépôt dans le lit?   Vitesse:   actif (> 10 cm/a)  
 lent (2 – 10 cm/a)  
Dans l'affirmative, obstruction dans le lit?   substabilisé, très lent (< 2 cm/a)

**Note (Description de l'événement):**

- (1) Venues d'eau, dynamique générale
- (2) En cas de cause artificielle: description détaillée du processus déclencheur
- (3) Conditions hydrologiques dans le bassin versant
- (4) Situation préalable (humide, moyen, sec, gel)
- (5) Données météorologiques complémentaires) limite du 0°C, précipitations, fonte de la neige)
- (6) Comparaison avec des événements antérieurs, évaluation des conséquences du dommage
- (7) Autre

StorMe 2.0

Numéro interne:

Numéro du cadastre des événements:



**Dangers naturels**  
**Cadastre des événements**

***Relevé cartographique***

**Feuille 4/4**

**Événement:** Commune: ..... Processus principale: ..... **Digitalisation effectuée?**

**Relevé cart.:** Echelle 1 : ..... Date: .. Nom, adresse, tél.: .....

**StorMe 2.0**

Numéro interne:

Numéro du cadastre des événements:



## Exemple Econome



### Valais - EconoMe Projekt 23-61-3076 Résumé

04.08.15, 08:08:07

#### Glissement Les Afforêts

Durée:	20.01.2015 -
Entreprise:	
Commune:	
Secteur:	Les Afforêts

#### Personnes concernées

##### - Administrator Kanton

Etat du Valais/DTEE/Service des forêts et du paysage/Section dangers naturels

Téléphone

@admin.vs.ch

##### Projektleiter

XXX SA

Téléphone

Contact au canton Valais:

Contact à la commune:

#### Avancement du projet

20.01.15, 14:48	Créer le projet
20.01.15, 14:48	Le chef de projet a été informé
09.08.15, 15:08	Définition du système
22.06.15, 14:38	Analyse de danger
22.06.15, 14:36	Définition des objets dans le périmètre
22.06.15, 14:43	Analyse des conséquences
14.07.15, 08:53	Risque individuel
04.08.15, 08:05	Définir la mesure
14.07.15, 08:43	Analyse des conséquences une fois la mesure prise
14.07.15, 08:44	Risque individuel une fois la mesure prise
14.07.15, 08:44	Efficacité des coûts

#### Processus dangereux

##### Eboulement -

##### Scénario libre, 10 ans

Fichier <http://www.econome.admin.ch>

Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit 0.8

##### Scénario 30, 30 ans

Fichier <http://www.econome.admin.ch/doc/VS/23-61-3076>

Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit 0.8

##### Scénario 100, 100 ans

Fichier <http://www.econome.admin.ch/doc/VS/23-61-3076/>

Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit 0.7





## Définition des mesures

### Drainage et déchargement du glissement

3 drainages, un rabaissement du talus du glissement à 2:3 et une petite digue en amont de la RC vont être réalisés (cf. rapport technique)

Coûts d'investissement	1 157 330 CHF
Frais annuels d'entretien	5 786 CHF/a
Frais annuels d'exploitation	1 000 CHF/a
Durée de vie	100 ans
Frais annuels	29 933 CHF/a

## Aperçu des résultats

### Vue d'ensemble du potentiel de dommage

Potentiel de dommage: nombre de personnes	0.35
Potentiel de dommage: personnes (monétarisées)	1 760 000 CHF
Potentiel de dommage: biens matériels	246 000 CHF
Potentiel de dommage: total	2 006 000 CHF

### Eboulement -

Risque avant mesures	107 990 CHF/a
Risque avant mesures (Calcul avec valeurs de base)	107 990 CHF/a
Une fois la mesure prise Drainage et déchargement du glissement	0 CHF/a
Une fois la mesure prise Drainage et déchargement du glissement (Calcul avec valeurs de base)	0 CHF/a

### Diminution du risque (utilité) CHF/an

Drainage et déchargement du glissement	107 990 CHF/a
Drainage et déchargement du glissement (Calcul avec valeurs de base)	107 990 CHF/a

### Coûts de la mesure CHF/an

Drainage et déchargement du glissement	29 933 CHF/a
--	--------------

### Répartition selon les bénéficiaires

#### Sans attribution d'un bénéficiaire

Drainage et déchargement du glissement	29 933 CHF/a (100,0%)
--	-----------------------

### Rapport utilité/coûts

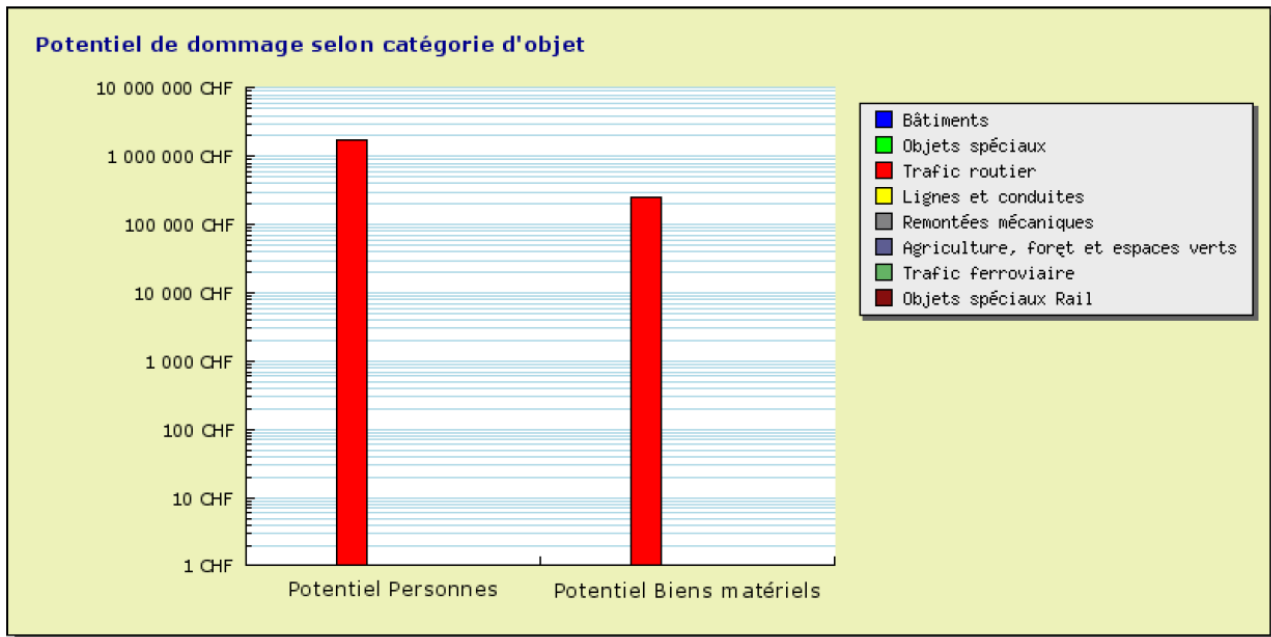
Drainage et déchargement du glissement	3,8
Drainage et déchargement du glissement (Calcul avec valeurs de base)	3,8

### Risque individuel (nombre d'objets touchés)

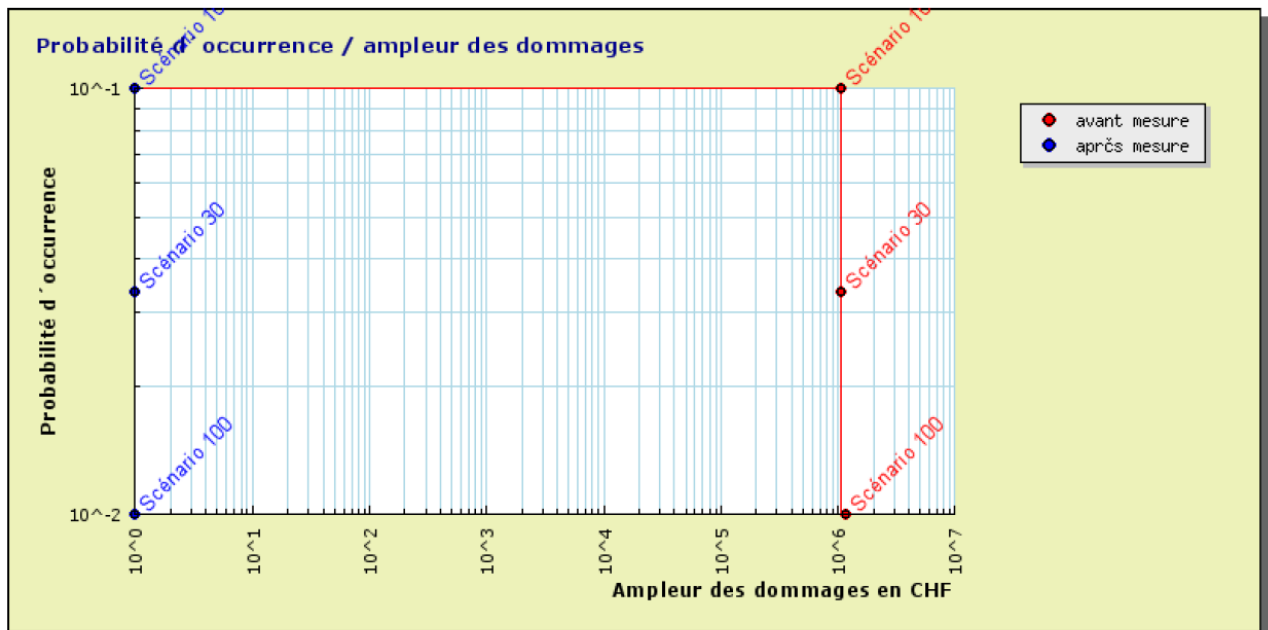
Avant la prise de la mesure	1	0	0
Une fois la mesure prise Drainage et déchargement du glissement	0	0	0



Potentiel de dommage selon catégorie d'objet

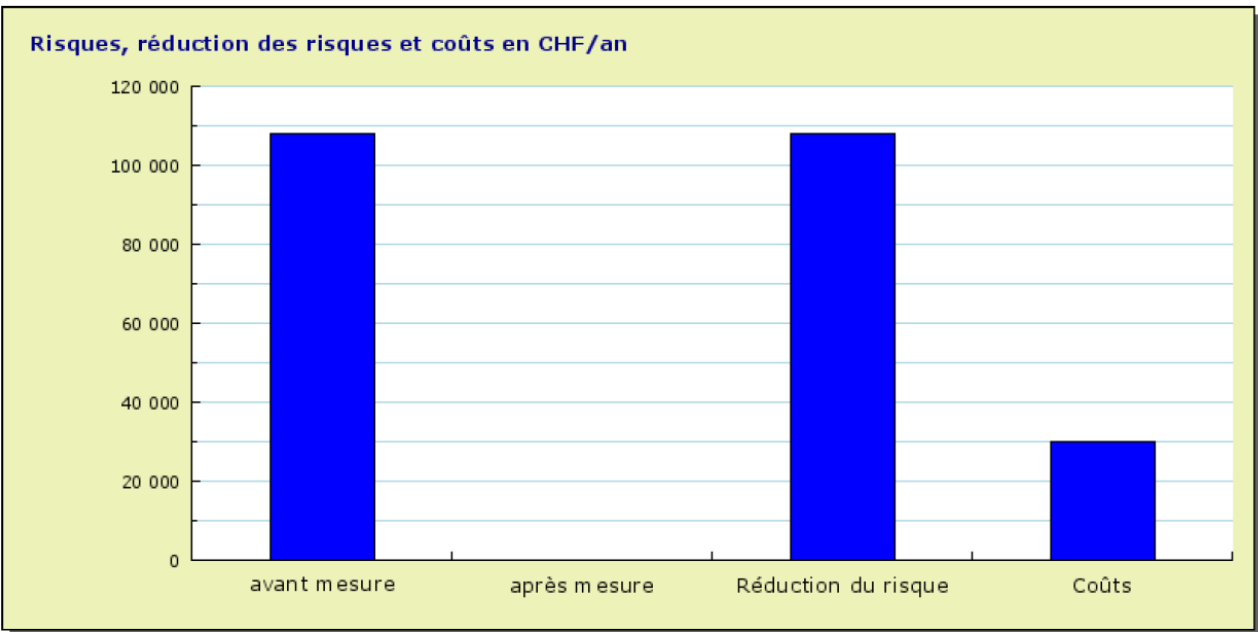


Eboulement, -, Drainage et déchargement du glissement - Probabilité d'occurrence / ampleur des dommages





Eboulement, -, Drainage et déchargement du glissement - Risques, réduction des risques et coûts en CHF/an



Eboulement, -, Drainage et déchargement du glissement - Ampleur des dommages selon le scénario

