

Définitions illustrées de quelques notions et concepts géotechniques



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

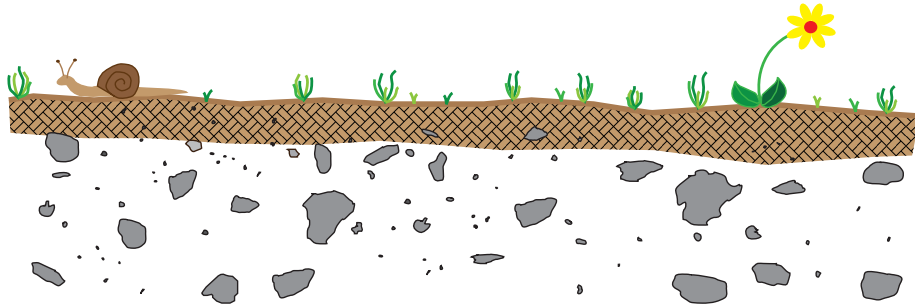
Table des matières

1) Notions essentielles	3
Roches meubles et roche-mère	4 - 5
Nappe phréatique	6
Poids spécifique et densité	7 - 8
Compressibilité	9
Résistance	10
- angle de frottement interne	11
- cohésion	12
Perméabilité	13 - 14
Pénétration du gel / dégâts du gel / permafrost	15
2) Quelques notions „issues de la pratique“	16
Construction en terrain plat	17
- valorisation de matériaux d'excavation	18 - 19
- pente des talus	20
- sites pollués	19
- excavabilité	20
- tassement (aptitude au service)	22
- portance	24
Arasée, talus amont	25
- processus de rupture	26
- stabilisation avec ouvrages de soutènement	27 - 28
- stabilisation avec ouvrages de retenue	29 - 30
Remblais, talus aval	32
- pente du talus	33
- compactage	34
- consolidation	35
- stabilisation	36
3) Références, indications pour approfondir	37 - 39

1) Notions essentielles

Matériaux meubles et roches

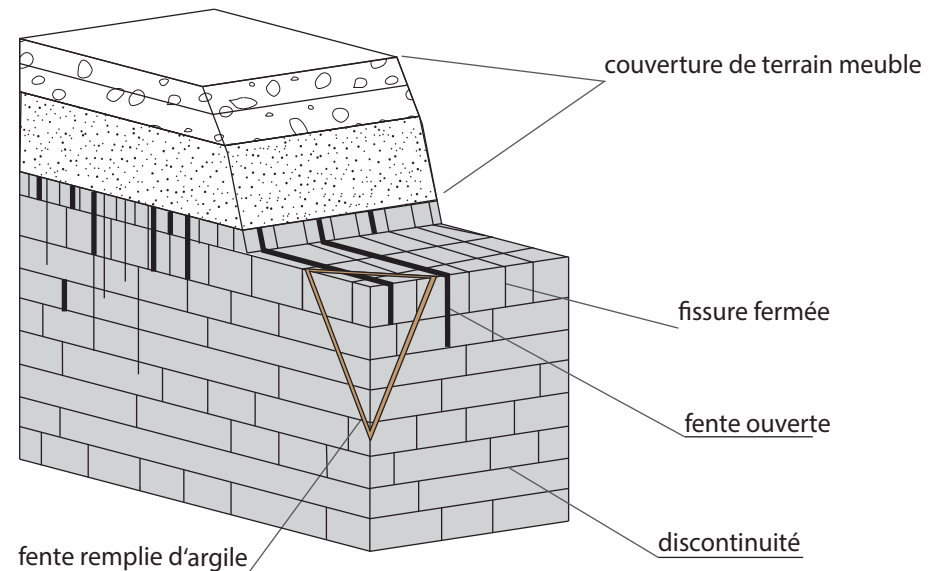
Terrain meuble



Terrains meubles: assemblage de grains de roche dont le lien entre eux peut être plus ou moins lâche. Le terrain meuble se compose de substance solides (minérale ou organique) et de pores remplis d'air, de gaz ou d'eau. Selon leur volume, leur dimension, les grains minéraux peuvent être distingués en blocs (> 200 mm), pierres (63 - 200 mm), gravier (2 - 63 mm), sables (0.063 - 2 mm), limon (0.002 - 0.063 mm) ou argile (< 0.002 mm). Le sol cultivé ou humus représente la couche supérieure (aussi horizon-A) active biologiquement en raison de la présence de matériaux organiques en décomposition.

Les matériaux meubles ont une grande importance économique dans la construction, plus que le rocher. C'est pourquoi les terrains meubles sont décrits plus précisément par la suite.

Roche (roche compacte)



Rocher: ensemble de roches telles qu'elles ont été formées avec les séparations, les discontinuités, fentes et cavités de toutes sortes. La roche présente généralement une meilleure portance et une résistance au cisaillement plus grande que que les terrains meubles.

Matériaux meubles

On distingue les terrains meubles (matériaux) grossiers des terrains meubles fins. Cette distinction est importante car les matériaux fins se différencient des matériaux grossiers par leurs caractéristiques et leur comportement mécanique.

Matériaux grossiers

- gravier, sable (pierres et blocs)
- les composantes n'exercent que peu ou pas de forces entre elles.
- les éléments s'appuient sur les autres par gravité, ils peuvent avoir un comportement fluide
- l'eau s'écoule par gravité de ce type de matériau (non gélif)
- les caractéristiques et les qualités mécaniques de ces matériaux dépendent de:
 - la granulométrie
 - la forme des grains
 - la répartition de la courbe granulométrique:
 - propre = tous les grains de la même taille = mal graduée;
 - mélangé = les grains sont de toutes tailles = bien gradué
 - la densité

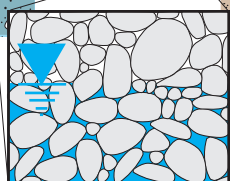
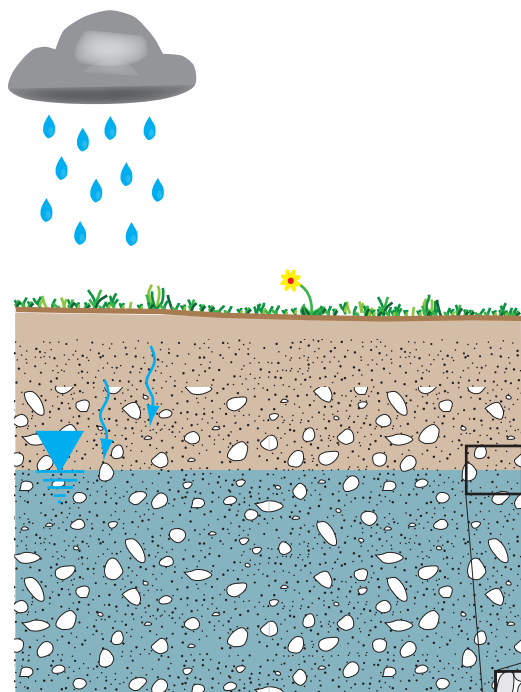
Matériaux fins

- limons, argiles
- forces d'attraction entre les grains (cohésion apparente/cohésion)
- matériau liant, comportement liant, plastique
- l'eau s'aggrège aux grains (gélif)
- les caractéristiques et comportement des matériaux dépendent de:
 - du diamètre des grains (diamètre de la fraction principale)
 - de la plasticité
 - de la teneur en eau (selon la teneur en eau l'état du matériaux peut-être liquide, plastique, tendre ou dur)

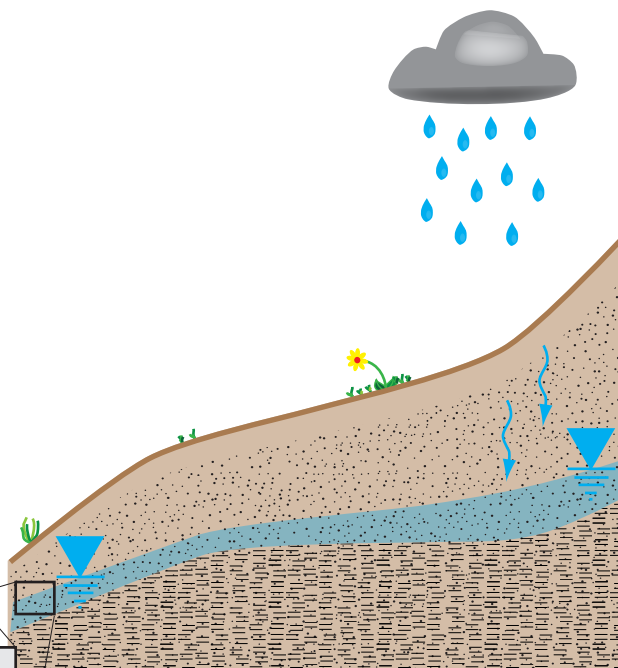
Dans la nature on trouve généralement un mélange de graviers, sables, limon et argile. 5 à 15% déjà de fraction fine confère au matériau une caractéristique légèrement liante. Le sable des bacs pour enfants, par exemple, avec 5 à 7 % de fines (limon) permet de donner des forme au sable s'il n'est pas sec. A partir de 15 - 20% d'argile et limon le sable présente un caractère liant nettement observable [11].

Eau souterraine dans le sol...

...au plat



...dans la pente



L'eau dans la roche



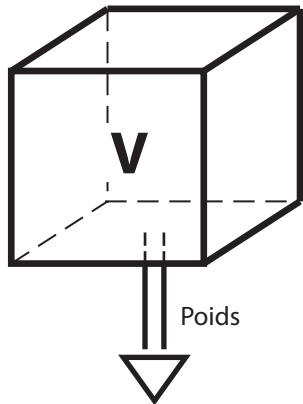
Eau souterraine: il s'agit de l'eau qui remplit les interstices (pores, fissures, conduits karstiques, etc.) du sous-sol de manière complète et continue. On parle aussi d'aquifère lorsqu'une circulation dans une direction est constatée ou une nappe phréatique lorsque l'on se trouve à un endroit éloigné des zones d'alimentation principale. L'eau de percolation pénètre dans le sol et alimente les eaux souterraines. Une nappe perchée est de l'eau souterraine dans les terrains en pente.

Masse volumique apparente et densité en place

Masse volumique apparente = poids par volume

$$\gamma = \frac{P}{V} \equiv \frac{F}{V} \text{ [kN/m}^3\text{]}$$

$$10 \text{ kN} = 1'020 \text{ kg} \approx 1 \text{ to}$$



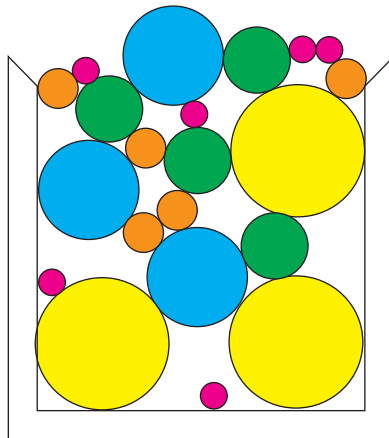
Les roches affichent une masse volumique apparente de $\sim 26 - 27 \text{ kN/m}^3$, rarem. $> 30 \text{ kN/m}^3$. Les matériaux meubles affichent une masse volumique apparente de $\sim 19 - 22 \text{ kN/m}^3$. Elle dépend principalement du volume de pores du matériau.

Porosité de quelques matériaux meubles	
Sable, gravier, propre:	25 - 50 %
Sable, gravier, bien gradué:	20 - 40 %
Limon, argile:	20 - 70 %

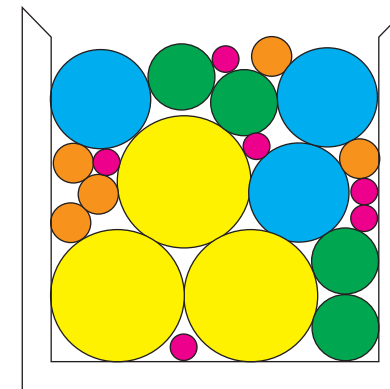
Densité en place

La densité en place se détermine en comparant sa valeur avec celle de la densité maximale (compactée) et celle de la densité minimale (foisonnée, aussi en vrac). La densité la moins élevée (matériau foisonné) est mesurée remplissant prudemment un récipient. La densité la plus élevée (matériau compacté) est atteinte en compactant le matériau par battage, roulage ou vibration.

matériau foisonné



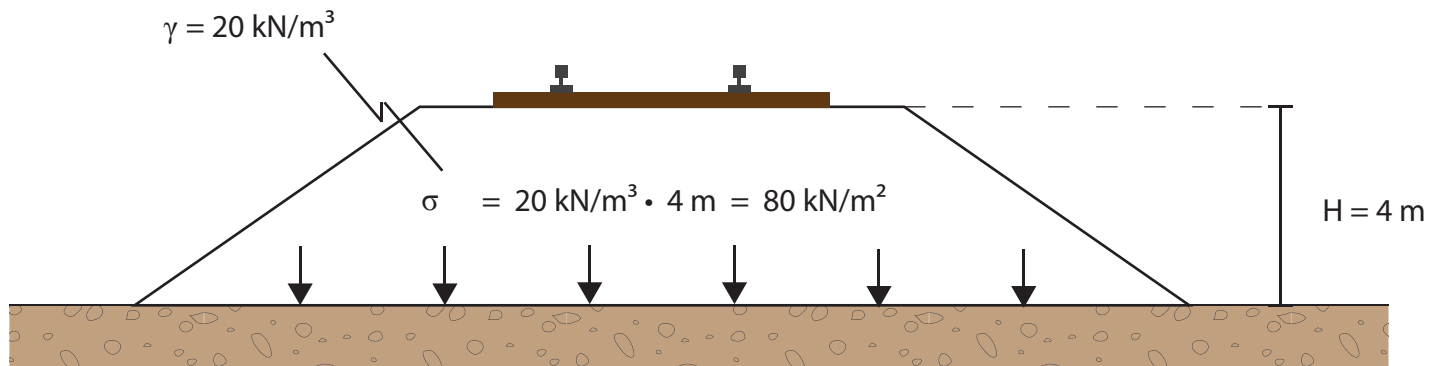
matériau compacté



À propos:

La dimension, respectivement l'unité de la masse volumique apparente (voir p.5), est très pratique pour le dimensionnement en 2D comme par exemple pour les profils types. Selon l'épaisseur de la couche de matériaux de remblai (matériaux meubles) il résulte une contrainte (force) à la base du remblai s'exerçant sur le sol en place. Cette contrainte statique peut ensuite être utilisée pour vérifier l'aptitude du terrain en place à supporter la charge.

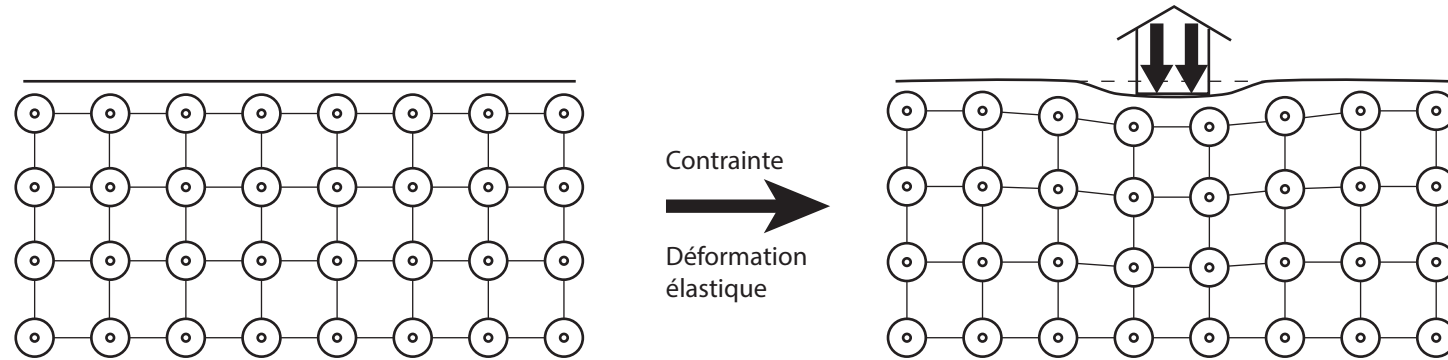
Exemple voie de chemin de fer en remblai.



H = hauteur du remblai
 γ = masse volumique apparente
 σ = contrainte (poids par surface)

Résistance à la compression

Si une roche compacte ou un matériau meuble est soumis à une contrainte, il en résulte généralement une déformation élastique. La contrainte est une force qui s'exerce sur une surface donnée, par exemple le poids d'un bâtiment ou le poids d'un remblai. Une déformation élastique n'engendre pas de cassures. Les grains ne se déplacent pas les uns par rapport aux autres mais ils se rapprochent les uns des autres: le volume de pores diminue.



L'amplitude de la déformation dépend en premier lieu de la résistance à la compression de la roche ou du matériau meuble. La résistance à la compression (compressibilité) d'un matériau meuble fin est sensiblement plus élevée que celle d'un matériau grossier. La roche est peu compressible. Si une contrainte entraîne une déformation dans le sol, on parle alors de tassement.

En Suisse la compressibilité est exprimée par la valeur du ME (module de compressibilité). Ce dernier est exprimé dans la même unité que la contrainte (force par unité de surface). Une couche de 1 m d'épaisseur d'un matériau libre de contrainte avec une valeur de ME de 20'000 kN/m² se tasse de la manière suivante sous une charge de 200 kN/m²:

$$s = \frac{\sigma \cdot z}{ME} = \frac{200 \text{ kN/m}^2 \cdot 1 \text{ m}}{20'000 \text{ kN/m}^2} = 1 \text{ cm}$$

s: tassement
 σ : contrainte appliquée
 z: épaisseur de la couche de matériau
 ME: module de compressibilité

Pour des estimations détaillées de tassement on utilisera des incréments de sols ou de couches choisies, des compressions répétées et on tiendra compte du rabattement de l'eau souterraine. Un tassement particulier est celui de la consolidation (voir page 32).

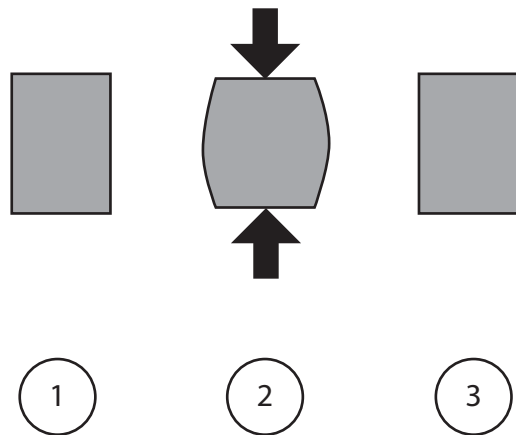
Résistance

Le résistance d'un matériau correspond à la contrainte pour laquelle le matériau se casse (rupture). Si la contrainte est supérieure à la résistance, le matériau est détruit. Les grains se déplacent par rapport aux autres: il s'agit alors d'une déformation plastique. On parle aussi d'une rupture de cisaillement.

Plus la contrainte à exercer pour détruire la structure d'un matériau est élevée, plus grande est sa résistance. Ainsi la roche a une résistance plus élevée que l'argile.

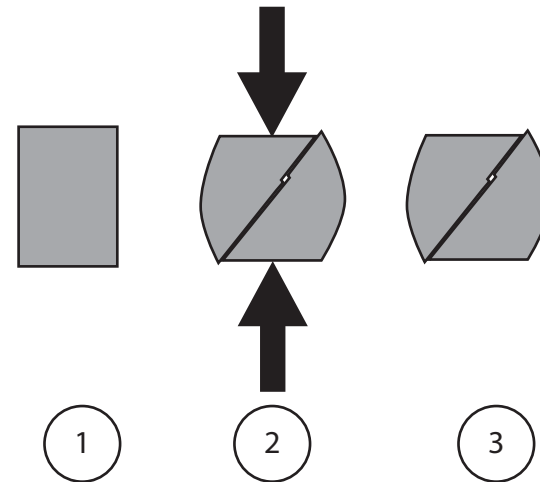
En géotechnique le critère de rupture de Mohr-Coulomb est le plus usité. Les matériaux y sont décrits au travers de l'angle de frottement (page 11) et la cohésion (page 12).

Comportement élastique



- 1: échantillon
- 2: contrainte
- 3: après suppression de la contrainte

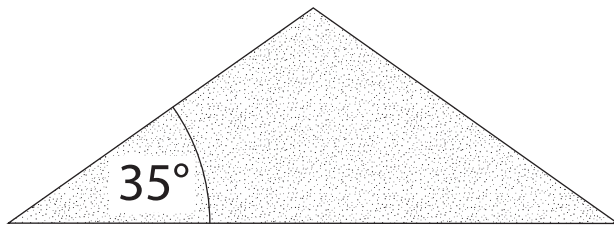
Comportement plastique (rupture de cisaillement)



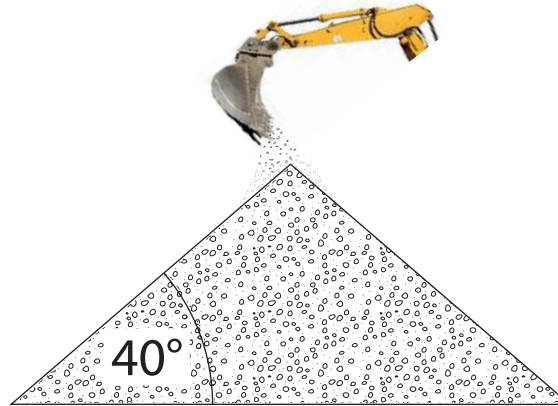
- 1: échantillon
- 2: contrainte
- 3: après suppression de la contrainte

Résistance: angle de frottement φ

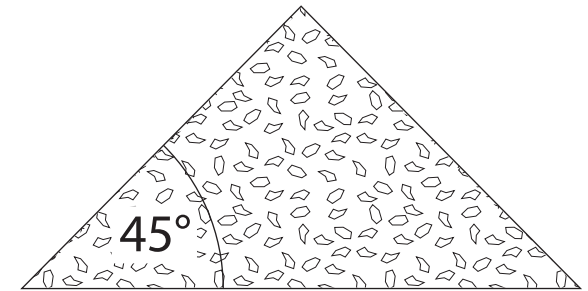
Pour les matériaux tels que le sable ou les gravier, la résistance dépend de l'angle de frottement interne φ . En d'autres termes, l'angle de frottement correspond à la pente naturelle que forme le matériau lorsqu'il est déposé en tas foisonné.



sable



gravier rond



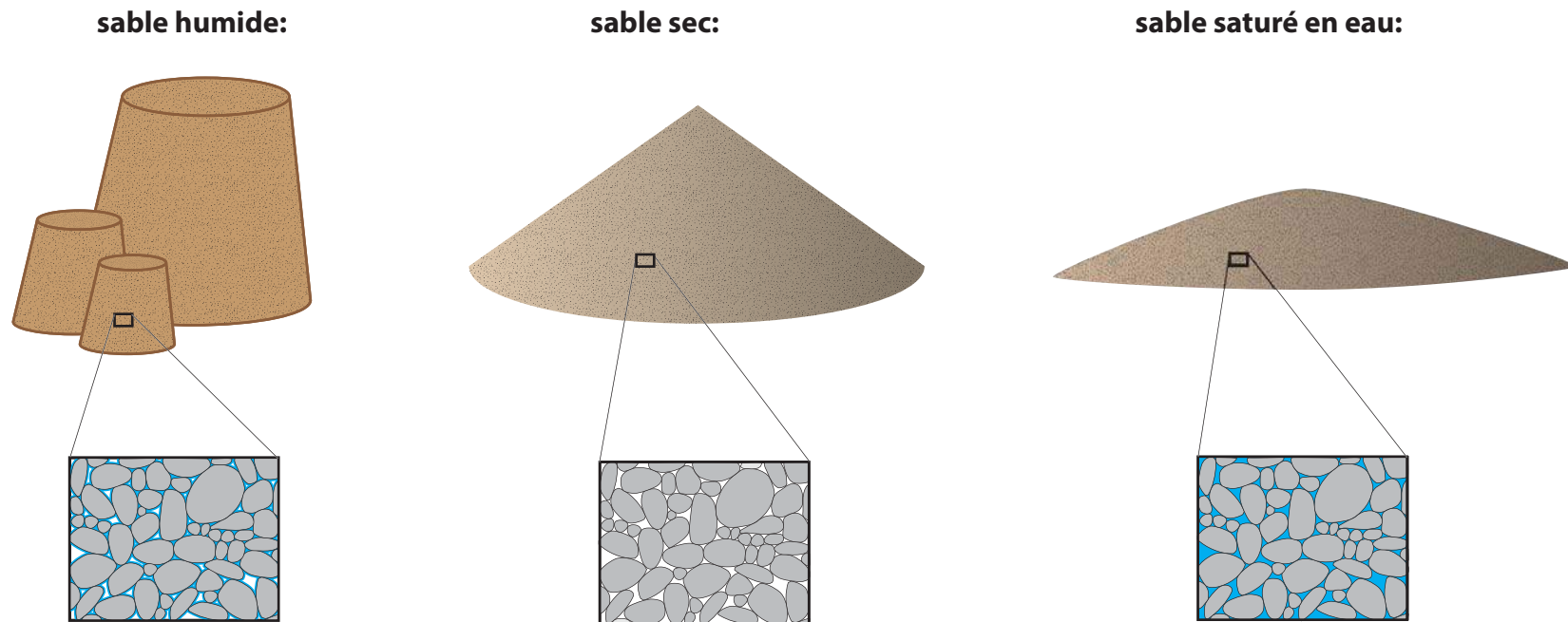
gravier concassé

L'angle de frottement d'un matériau dépend de sa granulométrie, de la forme des grains et de sa masse volumique apparente.

Résistance: cohésion (c)

On parle de cohésion lorsque l'on considère les forces qui lient les grains entre eux. Ces forces agissent comme une colle élastique. Ces forces sont actives dans les matériaux fins au travers des forces qui lient les argiles entre eux. Dans la roche les forces qui lient les grains minéraux entre eux sont très fortes. La cohésion est plus élevée dans la roche que dans les argiles.

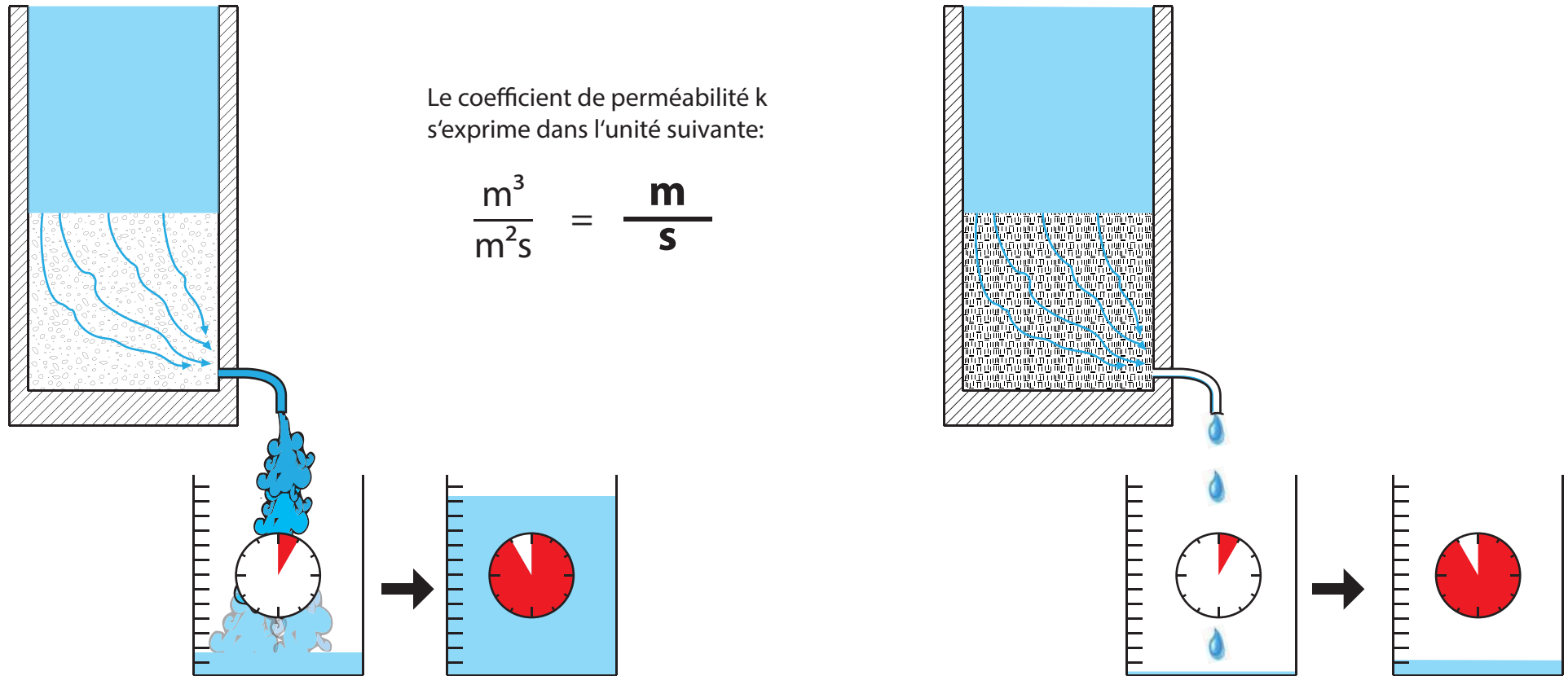
Une forme particulière de la cohésion est la cohésion apparente. Ce n'est pas une caractéristique du matériau lui-même mais la cohésion dépend de l'état du matériau, en particulier sa teneur en eau. C'est pourquoi la cohésion apparente ne peut pas être prise en compte dans les calculs géotechniques usuels. Par exemple, le sable est pourvu d'une cohésion dite apparente car elle dépend du contenu en eau du matériau. La force de capillarité dans les vides entre les grains agit sur les grains tant qu'il reste aussi de l'air entre ces mêmes grains. C'est pourquoi il est possible de faire des châteaux de sable avec du sable humide. Sitôt que le sable est saturé en eau il devient presque liquide. S'il est sec, sa résistance se réduit au frottement des grains entre eux. Sec ou saturé le sable perd sa cohésion apparente.



Perméabilité

Dans la roche, la perméabilité dépend de fissures et de conduits karstiques. Combien, où et quand coule l'eau dans la roche est difficile à prévoir.

Dans les matériaux meubles la perméabilité dépend de la proportion de pores (porosité) et de la continuité de ces mêmes pores. Dans les matériaux meubles on fait, par souci de simplification, l'hypothèse d'une circulation homogène de l'eau. La perméabilité k exprime le volume en $[m^3]$ qui coule par unité de temps $[s]$ au travers d'une section $[m^2]$ du sous-sol.



Si une grande quantité d'eau coule au travers d'un matériau pendant une période donnée, ce matériau est qualifié de très perméable. Au contraire si, pendant la même période, seule une petite quantité d'eau circule, le matériau est qualifié de peu perméable.

Perméabilité

Les valeurs de perméabilité k caractéristiques vont de 1×10^{-2} m/s (graviers perméables) à env. 1×10^{-8} m/s (argiles peu perméables).

Valeurs de k

gravier propre	10^{-1} à 10^{-3} m/s	très perméable
sable propre	10^{-3} à 10^{-5} m/s	perméable
limon	10^{-5} à 10^{-8} m/s	peu perméable
argile	10^{-8} à 10^{-10} m/s	très peu perméable

Nota Bene: De visu, la perméabilité d'un sol est très difficile à estimer. En effet des facteurs tels que le colmatage ou une densité élevée peuvent influencer grandement la perméabilité. Si des valeurs fiables de perméabilité sont nécessaires, il faut recourir à des méthodes reconnues comme le test de percolation.

Pénétration du gel / dégâts dus au gel / permafrost

La profondeur de pénétration du gel décrit la profondeur maximale jusqu'à laquelle l'isotherme de 0° C pénètre à partir de la surface. La profondeur de pénétration du gel dépend des conditions climatiques locales. La profondeur de pénétration du gel s'estime selon la règle simplifiée suivante:

$$\text{Profondeur de pénétration du gel [m]} = \text{Altitude [m au dessus de niveau de la mer]} / 1000$$

La profondeur du gel peut se calculer plus exactement par l'indice de gel de l'air FI et l'ensoleillement [14].

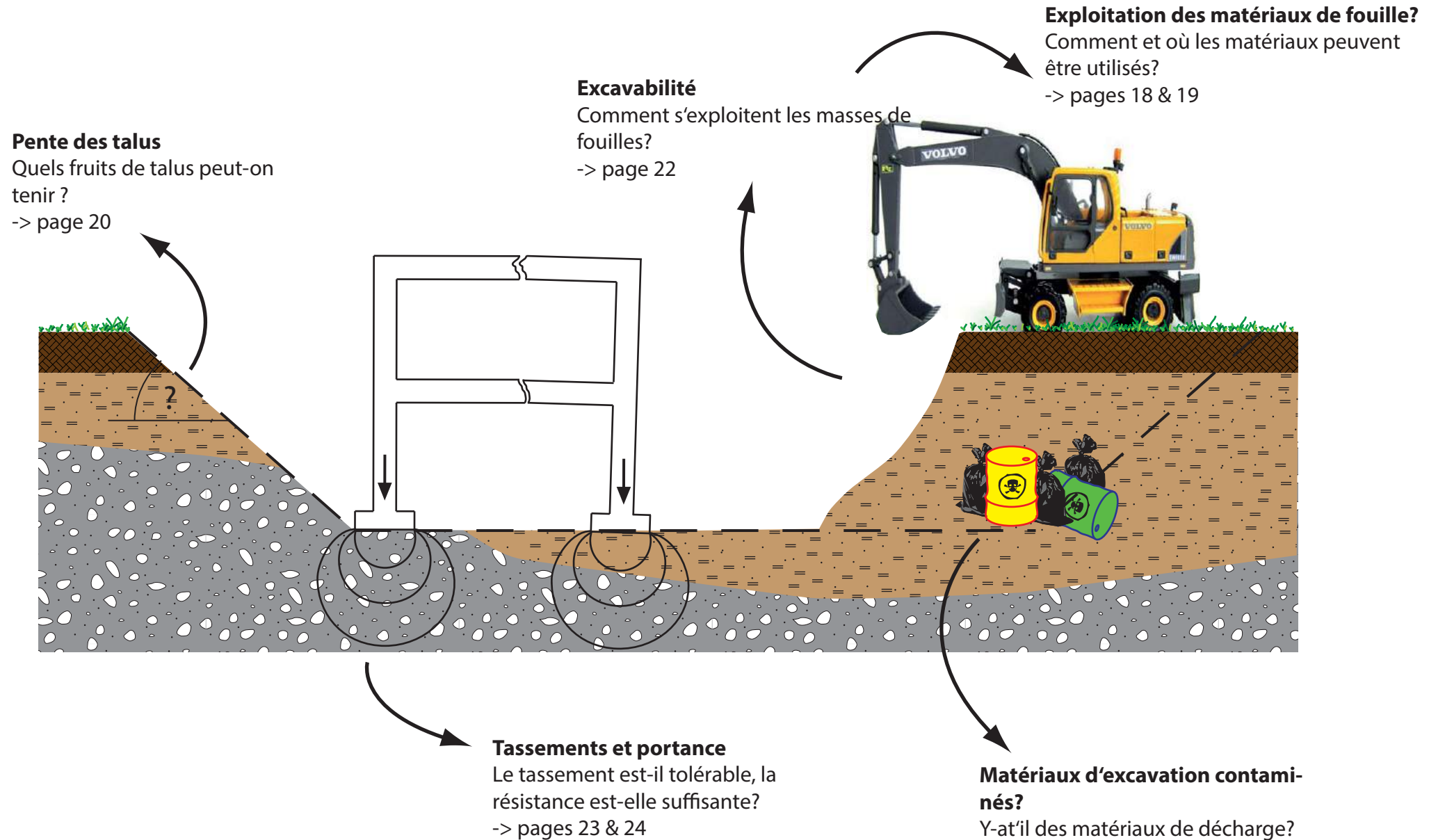
Si l'eau interstitielle (des pores) du sol gèle, il se forme des lentilles de gel. L'expansion de la glace provoque un gonflement du sol. Afin d'éviter ce phénomène il faut fonder la route ou la semelle de fondation à une profondeur dépassant celle de la pénétration du gel avec un matériau non-gélif. De manière générale, les matériaux meubles grossiers perméables peuvent être considérés comme non gélifs. Les matériaux fins et peu perméables avec de l'eau interstitielle sont gélifs et peu aptes comme fondations. Les gonflements ne sont pas les seuls dégâts observés: pendant la période de dégel la superstructure enregistre une perte de résistance significative. Une contrainte comme le passage d'un véhicule suffit alors à provoquer des dégâts structurels à la route.

Par permafrost sont désignés les sols et roches dont la température est inférieure à 0° C durant toute l'année. Le permafrost se situe sous une couche de sols qui se dégèle pendant la belle saison. Cette couche peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur. Ainsi le permafrost n'est pas observable directement à la surface. La localisation du permafrost et ses caractéristiques dépendent principalement du climat, de la topographie et des caractéristiques du sol. En Suisse, le permafrost est très fréquent au-dessus de la limite des forêts. A l'aide des cartes du potentiel de permafrost, il est possible de déterminer les régions pour lesquelles le sol est gelé de manière permanente [15].

2) Quelques notions illustrées „par la pratique“

Construction en terrain plat

Idéalement les questions concernant les travaux de fouille surgissent lors de la planification des travaux, au plus tard lors du début des travaux.



Construction en terrain plat: utilisation de matériaux de fouille

Les matériaux excavés devraient toujours être utilisés. Les matériaux grossiers peuvent être employés comme fondation de chemin ou en remblai. Les meilleurs matériaux peuvent servir comme granulats (ou aggrégats: sable,gravier) pour le béton ou les revêtements bitumineux. Les matériaux fins peuvent être mis en remblai si celui-ci n'est pas sollicité par le poids propre trop important (hauteur de remblai: attention aux surcharges). Souvent ils doivent être transportés en décharge inerte. Afin de déterminer l'aptitude des matériaux excavés, il faut d'abords connaître les caractéristiques des matériaux adéquats au chantier de destination.

Pour les matériaux de remblai (digues), par exemple, un angle de frottement $\varphi \geq 34^\circ$ [19] est exigé par l'administration cantonale des Grisons . Une valeur de $\varphi(0)$ drainé peut se déterminer à l'aide d'une courbe granulométrique (répartition des fractions du sol, voir page suivante). A cet effet, il faut procéder à des analyses de tamisage sec et humide. Afin d'atteindre les qualités de matériau souhaité sur le lieu de destination, il faut satisfaire au critère de portance, par ex. $ME1 \geq 30 \text{ MN/m}^2$ (30 tonnes au m², voir page 32). Le contrôle de cette valeur ME s'effectue sur place au moyen de l'essai par plaque propres.

Les exigences pour des matériaux de fondation routière (graves 0/45, „fondation“) sont encore plus élevées. Outre les exigences granulométriques, les granulats doivent être conformes à des exigences relevant de leur forme et leur résistance à l'écrasement.

Les granulats à béton ou asphaltes doivent satisfaire à d'autres exigences pétrographiques (teneur maximale en soufre et chlore, minéraux oxydés et silicates feuilletés).



Essai ME à la plaque, le PL est utilisé comme contre-poids

Construction en terrain plat: utilisation des matériaux de fouille

Korngrößenverteilung (Summationskurve)

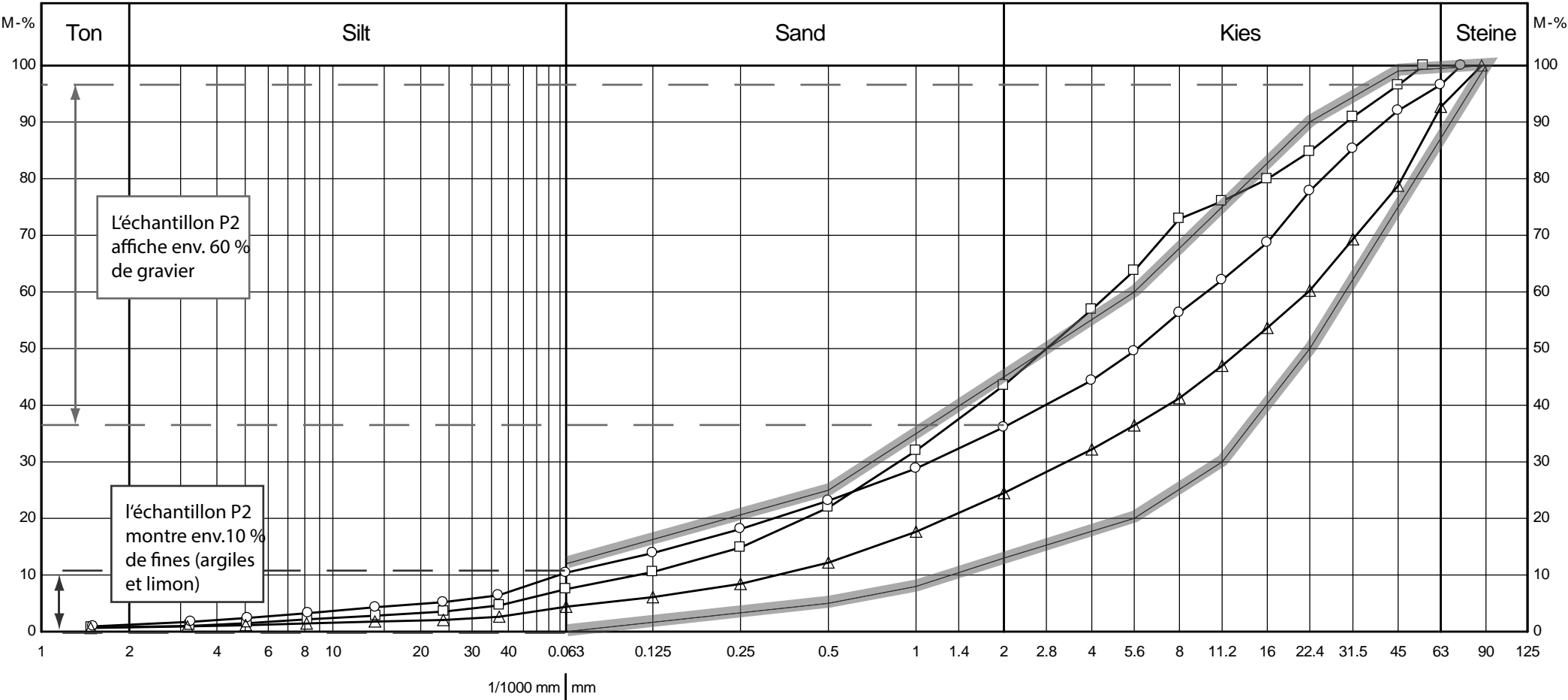
Labor Nr. Muster
 Fundations-/
 Baugrundproben

Proben P1 - P3

P1 □ 24.06.2014 P513: Foundation S1 0.025
 P2 ○ 24.06.2014 P514: Foundation S1 km 0.025
 P3 △ 24.06.2014 P515: Untergrund S1 km 0.025

— Sieblinienbereich
 UG 0/45
 SN 670 119-NA Allgemein

Pour une grave 0/45
 la courbe doit de trouver
 dans ce domaine



Construction en terrain plat: pente des talus

La stabilité et la sécurité des talus dans les sols meubles dépendent principalement de l'angle de frottement et de la cohésion, dans une moindre mesure de la masse volumique. Dans la roche, la résistance, l'orientation du clivage (schistes) et le pendage sont importants.

La pente des talus doit s'adapter à la stabilité du sol en place. Jusqu'à 4 m de hauteur, la pente des talus, sans surcharge, dans des sols normalement humides peuvent être tenus visuellement et jusqu'à une pente de 3:1 (71.6°). Dans des conditions plus difficiles, la stabilité doit être testée [29].

Lorsque les conditions de sécurité du talus dans un sol naturel ne peuvent pas être atteintes, des ouvrages de soutènement sont nécessaires (voir pages 27 - 31).



Rupture de talus amont (2014)



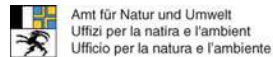
Rupture de talus dans une fouille importante (2010)

Construction en terrain plat: matériaux d'excavation pollués

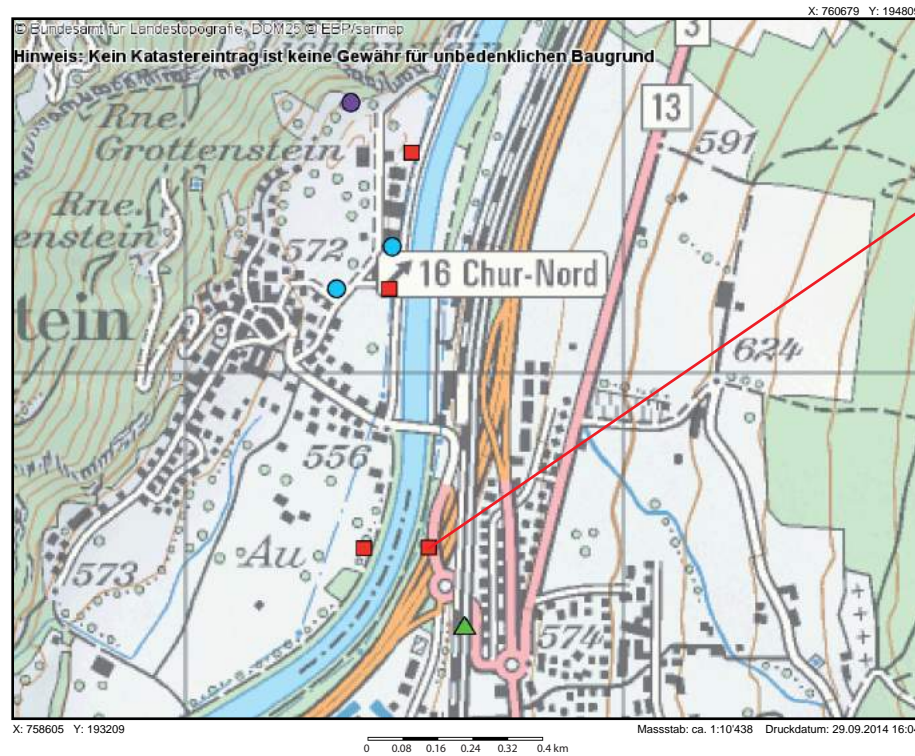
Lorsqu'on soupçonne des matériaux contaminés dans un projet prévoyant des mouvements de terres, il faut agir très tôt dans la planification et identifier la nature de ces contaminations.

Sans être complet, le cadastre des décharges ou sites pollués peut donner une première indication. Ce cadastre est tenu par les autorités cantonales, maintenu à jour et généralement publié sur internet (voir un exemple plus bas). Concernant la procédure et les possibilités d'assainissement des sites, il faut s'en référer aux ordonnances en la matière (souvent „sites pollués“). L'article 3 de l'Ordonnance sur l'assainissement des sites pollués (Osites, 814.680) stipule que les sites pollués ne peuvent être bâtis que si:

- s'ils ne nécessitent pas d'assainissement et si le projet ne nécessite pas d'assainissement, ou
- si le projet n'entrave pas de manière considérable l'assainissement ultérieur des sites ou si ces derniers (...) sont assainis en même temps.



Kataster belasteter Standorte (KbS) Graubünden



Information complémentaire sur le site

Objekt Nummer	3901-20
x-Koordinate	759557
y-Koordinate	193600
Parzellennummer	815
Bezeichnung	Ehemalige Kehrrechtdeponie Nr. 2
Adresse	Bettlerchuchi
Ort	Chur
Gemeinde	Chur
Standorttyp	Abfallablagerung
Branche	Abfallablagerung, Deponie
Betrieb von	1953
Betrieb bis	1958
Katasterstatus	Katastereintrag
Bearbeitungsstufe	keine Standortuntersuchung
Vorgehen	nicht definiert
Deponieinhalt	Hausmüll
Deponievolumen	50000
Deponieablagerung von	1953
Deponieablagerung bis	1958

- Sites pollués
- Décharges
- Localisation des décharges
- Sites industriels
- Sites industriels
- Stands de tir
- Stands de tir
- Sites d'accidents
- ▲ Sites d'accidents

Informations de base
 Carte nationale 25000
 Carte nationale 25'000

Hinsichtlich der inhaltlichen Richtigkeit, Genauigkeit, Aktualität und Vollständigkeit der veröffentlichten Informationen kann keine Gewährleistung übernommen werden.

Construction en terrain plat: excavations, fouilles

Dans la norme sur les travaux d'excavation [31] les travaux de fouille sont classés en 5 groupes.

Excavabilité	Terrain, exemple	Machine nécessaire
sols peu portants sols à excavabilité normale	tourbe, argiles saturés graviers, sables	pelle rétro équipée de chenille marais ou caillebotis pelle rétro normale
sols à excavabilité difficile	moraine de fond avec de gros blocs	pelle rétro lourde avec griffe
roche exploitable à la haveuse roche à miner	roche dégradée ou très fissurée roche dure peu fissurée	pelle rétro lourde avec brise-roche ou griffe minage(éventuellement haveuse)



Pelle rétro avec brise-roche
(Source: www.eberhard.ch)



Pelle retro avec griffe
(Source: www.spessartit.de)



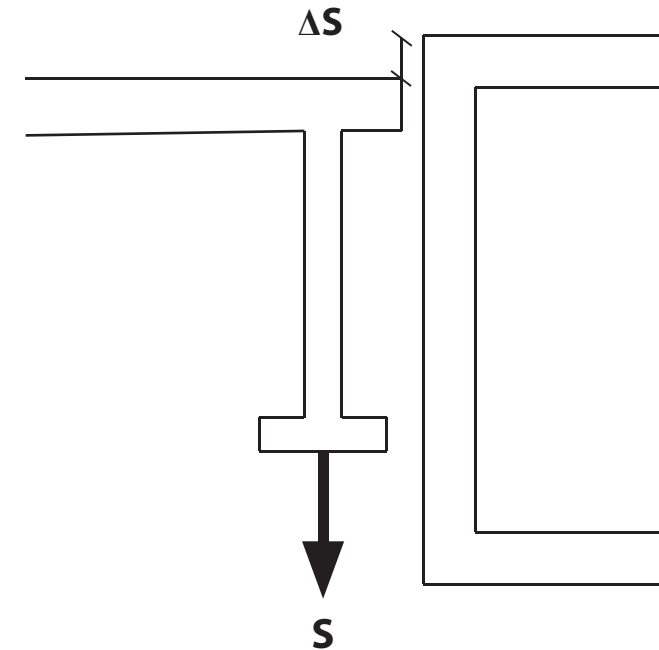
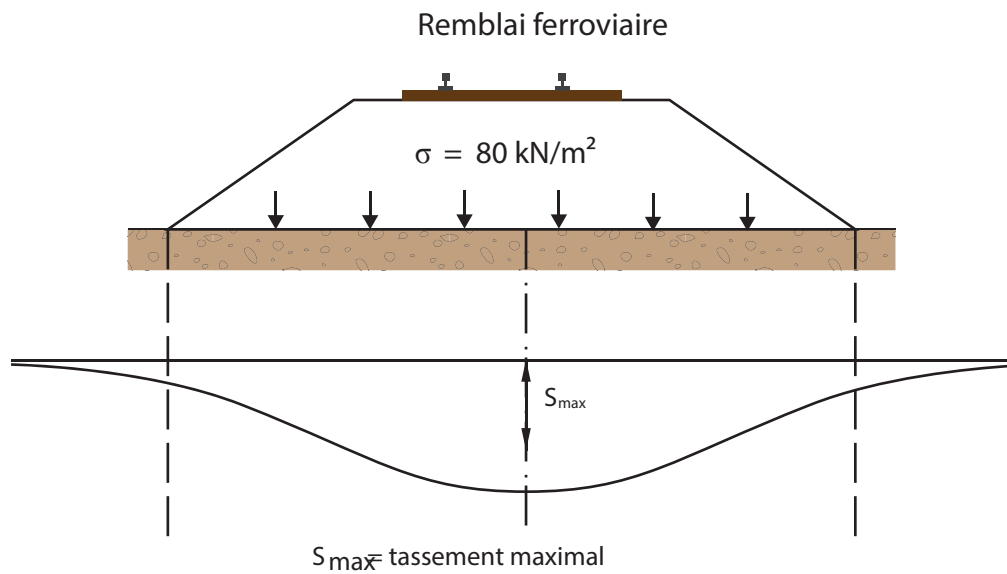
haveuse sur pelle rétro
(source: www.tecnoart.ch)

Construction en terrain plat: tassements (aptitude au service)

En ce qui concerne la surcharge applicable aux sols il faut distinguer deux aspects fondamentalement différents: la résistance ou portance et le tassement (aptitude au service).

Le tassement peut mener à la limitation de l'aptitude au service de l'ouvrage. Le tassement différentiel entre deux parties contigües d'un ouvrage s'accompagne typiquement de différences de niveau intolérables, de basculements ou de fentes.

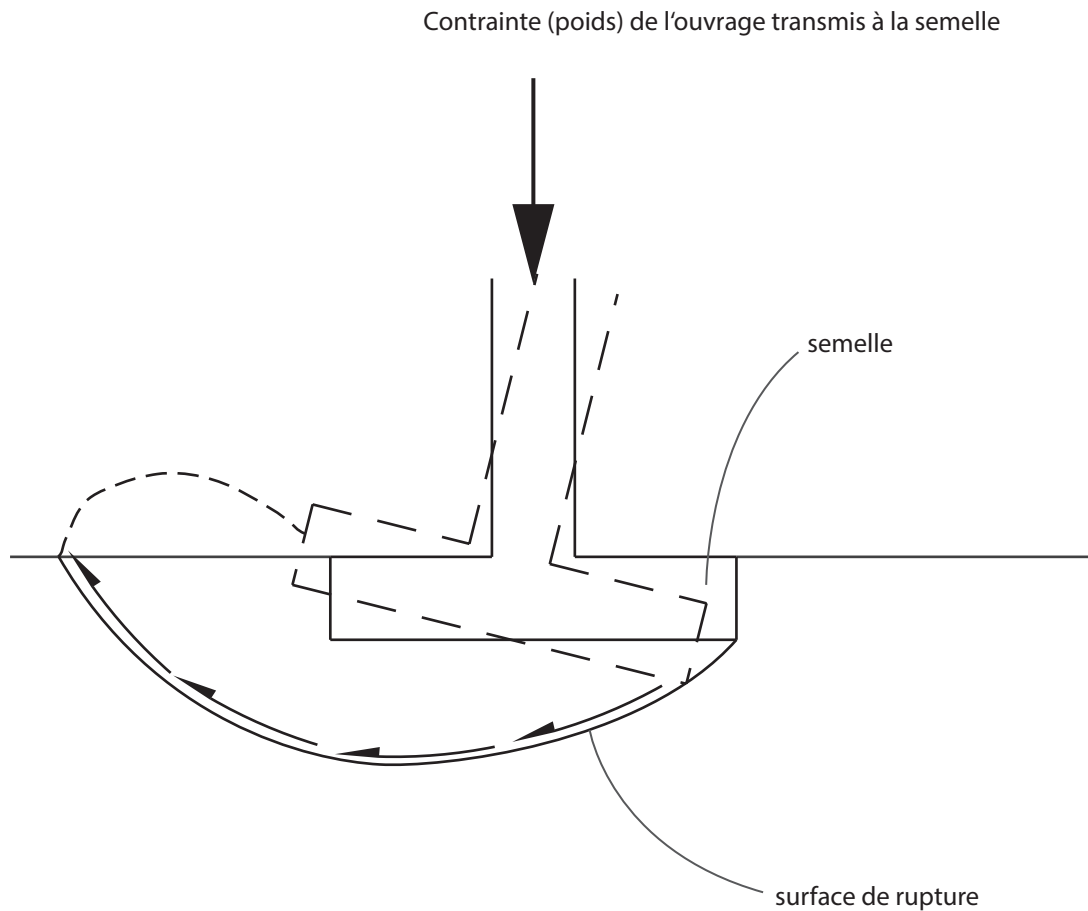
Il faut relever que le tassement en dessous d'un ouvrage ou d'une fondation prend la forme d'une cuvette qui s'étend au-delà de l'emprise de l'ouvrage: les bâtiments aux alentours peuvent ainsi être endommagés.



Le tassement ou tassement différentiel tolérable entre deux parties d'ouvrage non solidaires doit être déterminé à chaque cas.

Construction en terrain plat: portance

La portance est la résistance à la rupture statique. tandis que le tassement limite l'aptitude au service des bâtiments, une insuffisance de portance du sol peut mener à la destruction d'un bâtiment. Le calcul de l'aptitude du sol à supporter la charge doit être fait.



Une semelle comme exemple:

Si la contrainte engendrée par l'ouvrage dépasse la résistance du sol, une rupture a lieu. Dans le sol, sous la semelle, se forme une surface de rupture. La résistance ou portance du sol est dépassée.

Les facteurs qui déterminent une rupture sont naturellement la charge (poids de l'ouvrage), la géométrie de la semelle, l'angle de frottement, la cohésion et la masse volumique des matériaux qui composent le sol.

Talus amonts

Lors de travaux dans une pente, il faut généralement couper dans la pente, par exemple lors d'une excavation pour un sous-sol ou la construction d'une route dans un versant. En raison de la suppression du pied de la pente, il disparaît une force, une retenue qui „soutenait“ la pente en amont. La stabilité de la pente est ainsi amoindrie. Si la résistance du sol naturel ne peut plus être garantie, il faut alors recourir à des mesures de soutien (voir page 26).

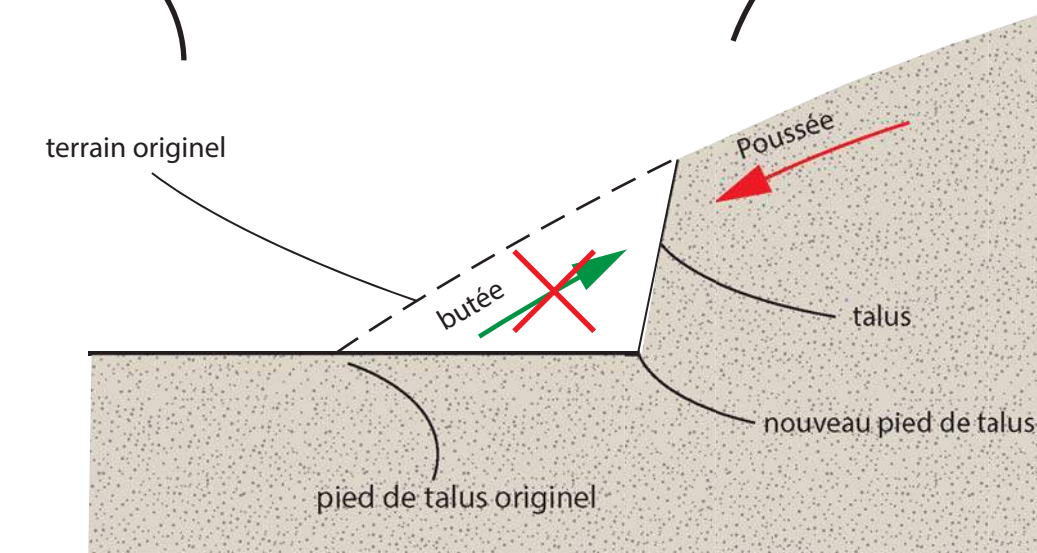
Mécanismes de rupture

Que faire si le talus cède?

-> page 26

Stabilisation de pente avec un ouvrage de soutènement.

Quelles sont les possibilités de stabiliser un talus? -> pages 27 & 29



Stabilisation avec un ouvrage de retenue-

Quelles sont les mesures d'assainissement ?

-> pages 29 - 31

Talus et pentes : processus de rupture

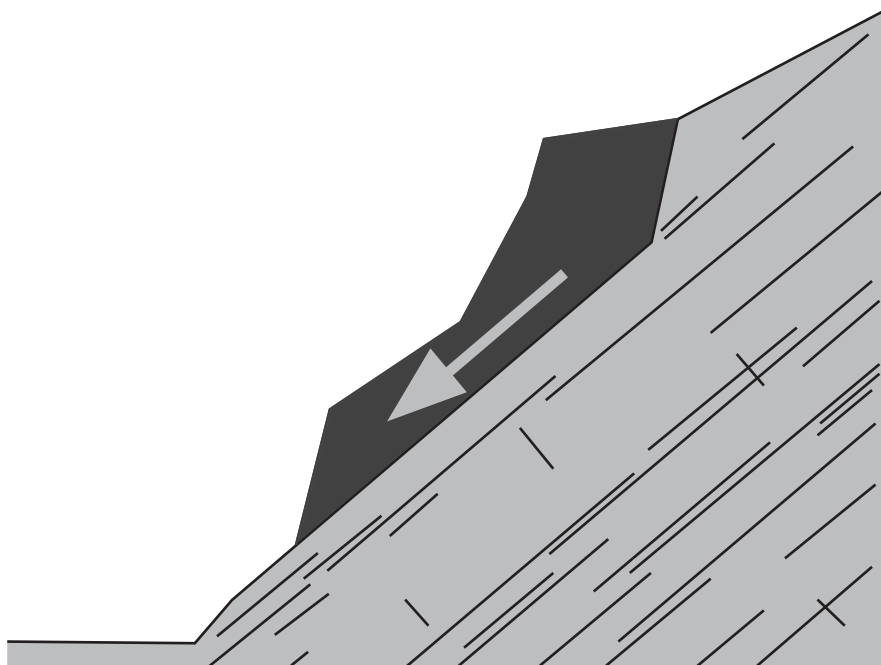
S'il n'y a plus de force de résistance, il n'y a plus de réserve de stabilité, l'état du talus est critique. Les forces de retenues et les forces de contrainte sont en équilibre. Si la contrainte augmente encore, une rupture de cisaillement a lieu dans le sol (voir aussi page 10).

La manière dont se déroule la rupture donne des indications sur la nature de la rupture. Lorsque des mesures d'assainissement sont prévues, il faut connaître les mécanismes qui ont conduit à la rupture. C'est l'information indispensable pour mener un assainissement durable.

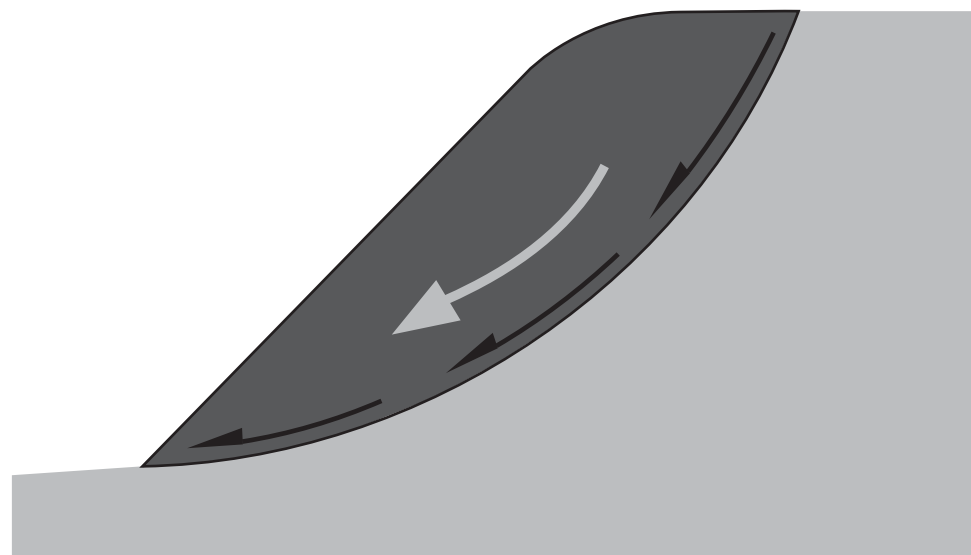
Dans la roche, la rupture a lieu le long des surfaces de discontinuités ou de fracturation. La surface de glissement est alors plane. On parle alors d'un glissement translationnel (figure de gauche). Si la rupture est favorisée par la présence d'eau, il s'agit d'en tenir compte.

Dans les matériaux meubles, les glissements rotatifs sont typiques (figure de droite). La surface de rupture est en arc de cercle. La rupture peut aussi suivre les couches de matériaux fins ou saturés en eau. Au pied du talus, la résultante des forces d'un glissement rotatif est plus ou moins horizontale.

Glissement de translation (surface de rupture plane)



Glissement rotationnel (surface en arc de cercle)



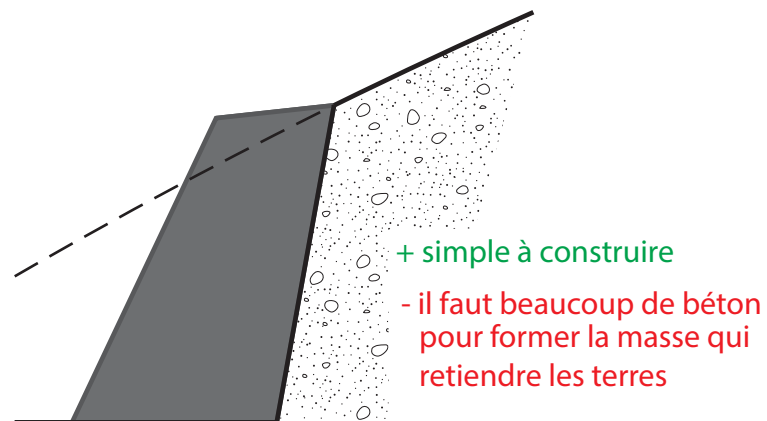
Talus: assainissement avec un ouvrage de retenue

Réduit à des termes de mécanique simples, l'assainissement d'un talus revient à contrer la contrainte de rupture (poussée) par une force de sens inverse (butée). Trois effets de rupture doivent être contrés et dimensionnés dans un ouvrage de retenue: le glissement horizontal, le basculement et la rupture statique (portance). Les valeurs caractéristiques des sols sont pris en compte lors du dimensionnement de l'ouvrage pour les 3 contraintes citées (voir les exemples bâtiment et route).

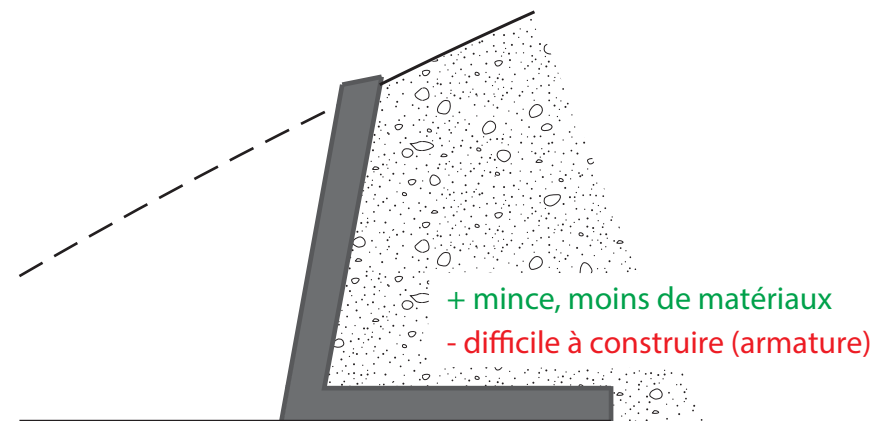
Il ne faut jamais oublier la circulation de l'eau. La saturation en eau des matériaux derrière l'ouvrage peut augmenter les contraintes de telle manière que les valeurs de dimensionnement soient dépassées: il faut impérativement drainer ou ménager des perforations dans l'ouvrage (barbacanes).

Il faut distinguer les ouvrages permanents des ouvrages temporaires. Les assainissements définitifs sont assurés typiquement par les murs de retenue ou butée : on distingue les murs poids des murs en équerre:

Le mur poids utilise sa masse pour retenir.



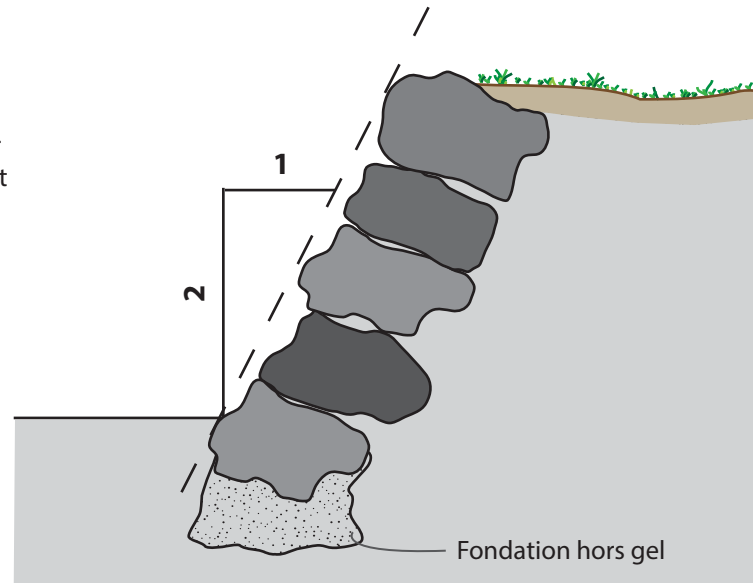
Le mur en équerre transmet et redirige les forces



Talus: assainissement au moyen d'ouvrages de soutènement

Les ouvrages de retenue ne sont pas toujours la meilleure solution pour sécuriser un talus. Les murs en blocs de pierre, qui appartiennent aux murs poids, permettent de mieux s'adapter aux déformations ultérieures du terrain que les ouvrages rigides en béton. Les murs de blocs sont utilisés dans les pentes en mouvement. Le fruit de ces ouvrages est plus incliné que celui des murs en béton (p. ex. 5:1 ou 3:1 voire 2:1).

Un fruit de 2 : 1 signifie qu'à la hauteur de 2 m, la couronne est décalée de 1 m par rapport au pied de l'ouvrage.



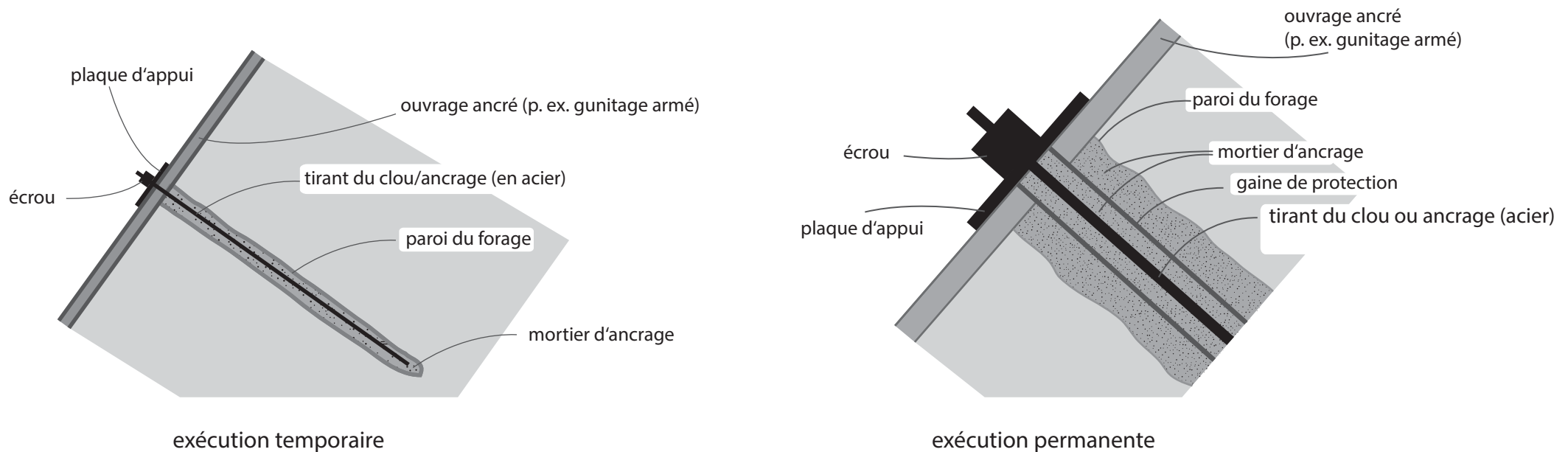
D'autres exemples d'ouvrage de soutènement :

- armature de sol (TerraMur, Textomur, etc.)
- caissons en bois
- gabions
-

Talus: assainissement au moyen d'ouvrages de retenue

Un ouvrage de retenue permet de contrer la poussée du terrain au moyen d'ancrages. Un type d'ouvrage très répandu est la paroi clouée avec gunitage de la surface, les parois berlinoises ou le treillis métallique ancré. Pour les consolidations temporaires de talus en génie civil il est souvent fait appel au clouage et gunitage de la surface du talus.

Principe de la paroi clouée et gunitée:



Si l'ouvrage est destiné à durer, il faut assurer la protection contre la corrosion des parties métalliques [36]. Selon les sollicitations prévisibles, il s'agit de définir l'épaisseur du manteau de mortier du clou et pour les classes de résistance supérieures il faut envelopper le clou dans un manchon en matière synthétique. Pour les cas extrêmes, le tirant de l'ancrage doit remplir des conditions spécifiques. Parfois le tirant de l'ancrage doit être bétonné.

Talus: assainissement avec des ouvrages de retenue

Les ancrages sont soumis aux contrôles selon la norme SIA 267.

Avant les travaux d'ancrage des essais de résistance à la traction doivent être conduits. Les essais permettent de déterminer les valeurs de dimensionnement et tout particulièrement les résistances du sol atteignables. Les ancrages d'essais sont des ancrages normaux avec une longueur d'ancrage libre. Le nombre d'ancrages d'essai pour un ouvrage à ancrer dépend de l'importance de l'ouvrage, du risque encouru lors de la rupture des ancrages et des caractéristiques du sol. Par compartiments du sol aux caractéristiques similaires au moins 3 essais sont nécessaires. La manière de procéder à ces essais est fixée par la norme 267/1.

Pendant les travaux d'ancrage des épreuves de mise en tension doivent être conduites. Elles servent à garantir la solidarité de l'ancrage avec le sol. Elle servent aussi à garantir la bienfaisance des ouvrages. 5% des ancrages mais au minimum 3 épreuves de mise en tension doivent être faites par compartiment de sol aux mêmes caractéristiques géotechniques. Il est aussi possible de déterminer quel ancrage doit être testé après les travaux. La norme SIA 267/1 décrit en détail les procédures d'épreuve.

La conformité des mortiers d'ancrage doit aussi être contrôlée. La qualité des mortiers et la manière de les contrôler est également fixée dans la norme SIA 267/1,

Les ouvrages ancrés sont normalement inspectés pendant toute leur durée de service, particulièrement la mesure et le suivi de leur déformation.

En ce qui concerne les ancrages des ouvrages paravalanche dans la zone de décrochement, les directives de l'institut fédéral SLF font foi.



essai d'ancrage
(source: www.fp-ankerpruefungen.ch)

Talus: assainissement avec des ouvrages de retenue

La technique d'ancrage distingue les ancrages forés et tubés des ancrages auto forants.

Ancrages auto forants

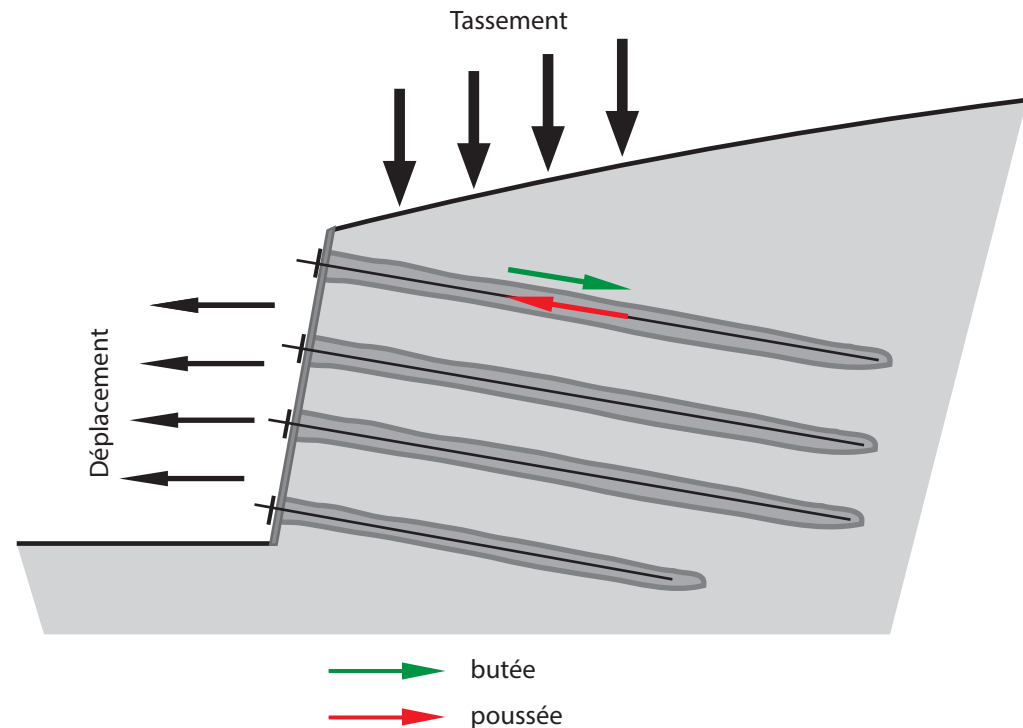
Les ancrages autoforants sont munis d'un trépan qui reste en place et le foret sert de tirant et de canal d'injection. Le mortier est injecté dans le sol à mesure de l'avancement du forage. Les ancrages de ce type sont mis en oeuvre rapidement, offrent généralement une bonne solidarité du tirant avec le sol. Les défauts principaux résident dans leur faible capacité à traverser des blocs plus durs, ils sont déviés, et il est impossible de contrôler la qualité du corps d'ancrage.

Ancrages forés et tubés

Dans ce procédé, le tirant est introduit dans un trou foré et chemisé au préalable. Le chemisage est ensuite retiré avant l'injection du mortier. L'utilisation d'un manchon souple permet d'éviter les fuites de mortier dans les sols très poreux et perméables voire dans les fentes du sol aquifères. On évite ainsi les risques de contamination de la nappe phréatique par du mortier.

Les ancrages passifs n'appliquent pas de précontrainte sur l'ouvrage ancré. Jusqu'à ce que l'ancrage se mette à agir (tension), un certain mouvement des masses retenues doit se produire. Des déformations de quelques pour mille des dimensions des terrains retenus est normal. A partir d'une certaine hauteur statique les déformations deviennent trop importantes et la solidarité du sol et des corps d'ancrage ne peut plus être garantie. Le système d'ancrage non précontraint ne peut plus être recommandé.

S'il s'agit d'infrastructures sensibles et exposées, l'ancrage précontraint s'impose. Les ouvrages devraient être appareillés pour le suivi des déformations.



Remblais

Afin d'aplanir les irrégularités du terrain , par ex. lors de la construction d'une route ou d'une voie de chemin de fer , il est souvent nécessaire de construire en remblai. Toutes les activités en relation avec des mouvements de matériaux meubles sont des terrassements. Il faut veiller à deux points importants dans les terrassement: la stabilité des talus et les tassement des remblais fraîchement mis en place ainsi que des sous-sols surchargés. Afin d'éviter les tassements ultérieurs, les matériaux mis en remblai doivent être compactés.

Consolidation

Que se passe-t'il lors du compactage d'un remblai en matériaux fins?
-> page 35

Angles des talus de remblai

Quelle est la pente maximale des talus de remblais?
-> page 33



Compactage

WComment peut-on éviter le tassement des remblais de matériaux grossiers?
-> page 34

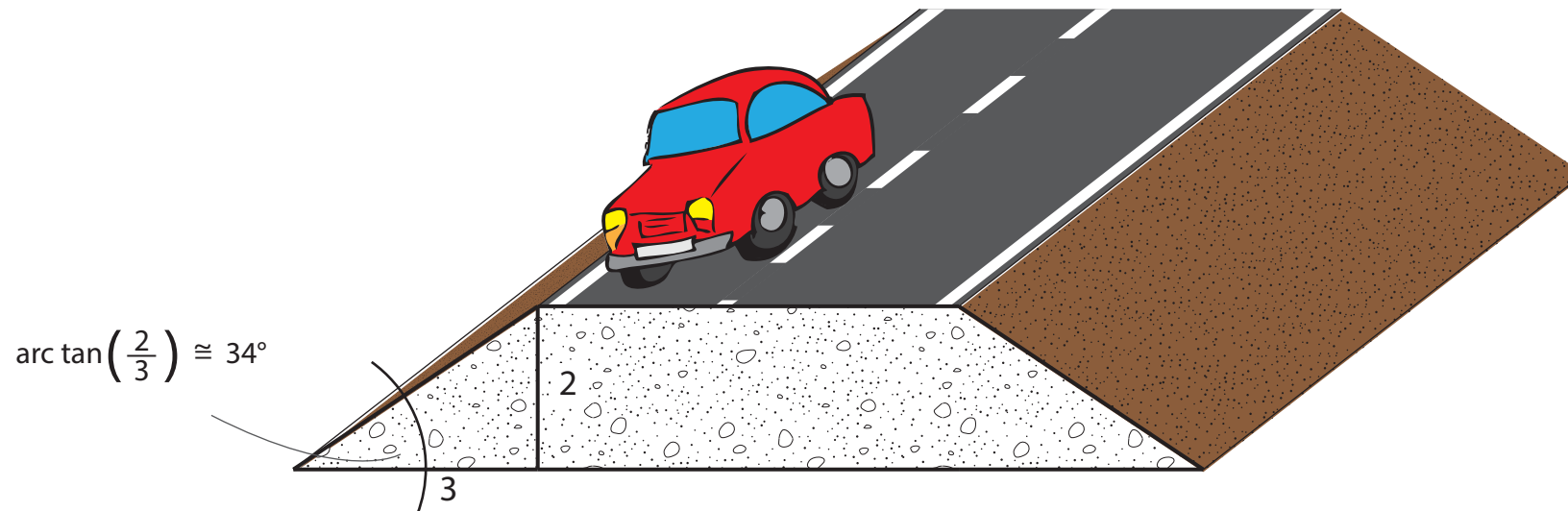
Stabilisation

Comment empêcher le tassement des remblais de matériaux fins?
-> page 36

Remblais: la pente des talus

Souvent la pente des talus des remblais (constructions ferroviaires et routières) affichent une pente de 2:3. Pourquoi précisément 2:3?

L'angle de frottement interne des matériaux meubles grossiers au moins moyennement compactés s'élève à $\geq 34^\circ$. L'angle de frottement des matériaux fins est sensiblement plus faible. Un talus avec une pente de 2:3 correspond à un angle de talus de plus ou moins 34° . D'un matériau meuble d'un angle de frottement interne de $\geq 34^\circ$ il est possible de construire des remblais avec des talus de 2:3. Même sans tenir compte d'une éventuelle cohésion ces talus sont justes stables de manière permanente. Si l'angle de frottement d'un matériau est $< 34^\circ$ il faut alors taluter plus plat ou prévoir une stabilisation du talus.



Remblais: compaction

Si le matériau mis en remblai (foisonné, densité faible) n'a pas été suffisamment compacté (forte densité), des tassements peuvent se produire dans le remblai (voir pages 5 et 7): ces tassements peuvent provoquer des dégâts aux ouvrages, par exemple à la route posée sur le remblai.

Lors de travaux de compactage il faut observer les règles suivantes:

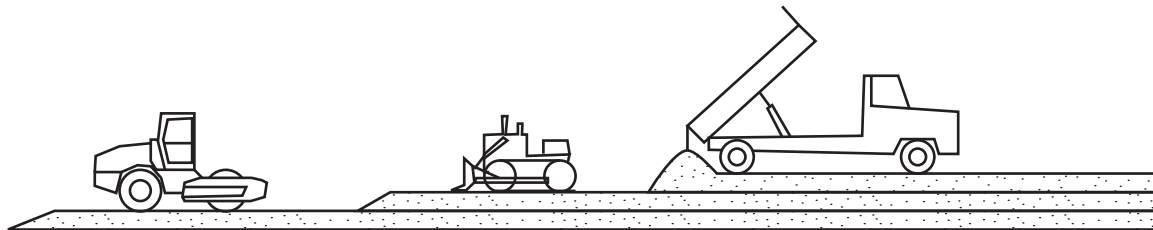
Le matériau à compacter doit être mis en place et compacté par couches successives de 40 cm d'épaisseur au maximum. L'épaisseur des couches ne doit pas être de moins du double des granulats les plus gros du matériau de remblayage. Il faut tenir compte de la profondeur d'action des machines (dameuse, rouleau, rouleau vibrant). Plus la sollicitation prévisible du futur remblai est élevée, plus il faut remblayer en couches minces.

En règle générale, la teneur en eau du matériau doit être proche de l'optimum (ni trop humide, ni trop sec comme pour le sable). Pour des petites quantités, la teneur en eau optimale du matériau peut être estimée selon sa composition et ses caractéristiques. Sinon, il est toujours possible de procéder à un essai de Proctor.

Pendant la mise en place des matériaux il faut veiller à maintenir un dévers pour permettre aux eaux de surface de s'évacuer.

Si une valeur de compaction doit être atteinte, par exemple $ME1 \geq 30 \text{ MN/m}^2$, il faut effectuer des essais de plaque sur le chantier (voir aussi page 18).

La machine adéquate pour le compactage dépend de la composition et des caractéristiques du matériau. Pour une vision d'ensemble des équipements de compactage adéquats et des passages nécessaires voir la norme spécialisée [21]. Pour les engins agissant par pression (les rouleaux lisses, à grille, hérissés et à pneus) l'effet résulte principalement de la charge statique de l'engin. Pour les engins pétrissants l'effet est accentué parce que la charge est répartie irrégulièrement. Les dames à explosion ou les grues dameuses compactent par chocs de basse fréquence. Les plaques, dames et rouleaux vibrants à haute fréquence mettent le sol en vibrations et le compactent. Les engins vibrants ne sont pas adaptés pour compacter les matériaux fins (les vibrations augmentent la pression interstitielle mais pas de manière continue pour que l'eau s'évacue).

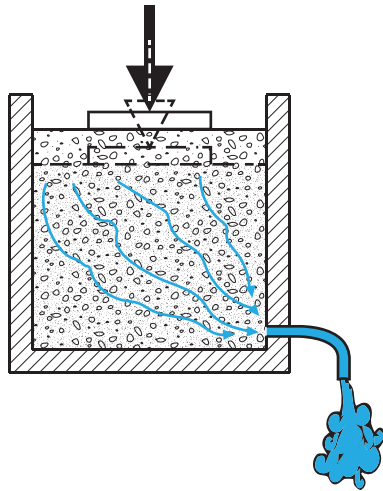


Remblais: consolidation (des matériaux fins)

La compaction des matériaux fins (liants) est tout particulièrement problématique

Les matériaux liants sont des matériaux dont le comportement est déterminé par une fraction fine élevée. Quel est l'origine de la caractéristique „liante“?

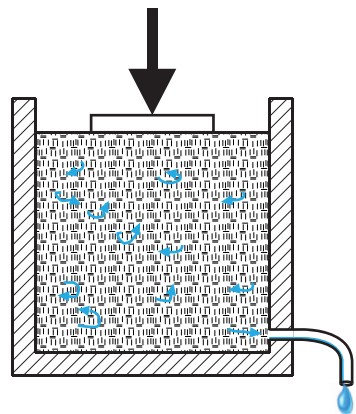
„Liant“ fait référence à la capacité du matériau de lier, d'adsorber, l'eau. Tandis que les matériaux propres, poreux et perméables, comme les graviers sablonneux, se drainent rapidement, l'eau est retenue dans les matériaux fins.



Compactage de remblai en matériaux grossiers

- Angle de frottement interne élevé
- bonne perméabilité
- à l'application d'une charge (rouleau):
- l'eau s'échappe du matériau
- le volume de pores diminue, le matériau se densifie
- sans surcharge sensible, une compaction ou un tassement ultérieur n'est pas prévisible à moyen ou long terme
- un matériaux bien gradué se compacte plus fortement qu'un matériau mal gradué: les granulats les plus petits remplissent les espaces entre les gros

—> on parle alors d'un matériau bien compactable



Compactage de remblai en matériaux fins

- matériau liant
- peu perméable,
- au passage du rouleau ou du camion, le matériau „matelasse“
- l'eau ne s'évacue pas ou très lentement du matériau. Pour que l'eau s'évacue, il faut patienter des mois voire des années
- les pores sont remplis d'eau. Le volume de pores ne diminue presque pas puisque l'eau ne peut pas s'en échapper: le matériau ne se compacte pas.
- aussi longtemps que l'eau sort du matériau, il faut compter avec des tassements. Ce tassement par évacuation de l'eau interstitielle se nomme la **consolidation**.
- afin d'éviter ce phénomène il est possible de prendre des mesures (voir page suivante).

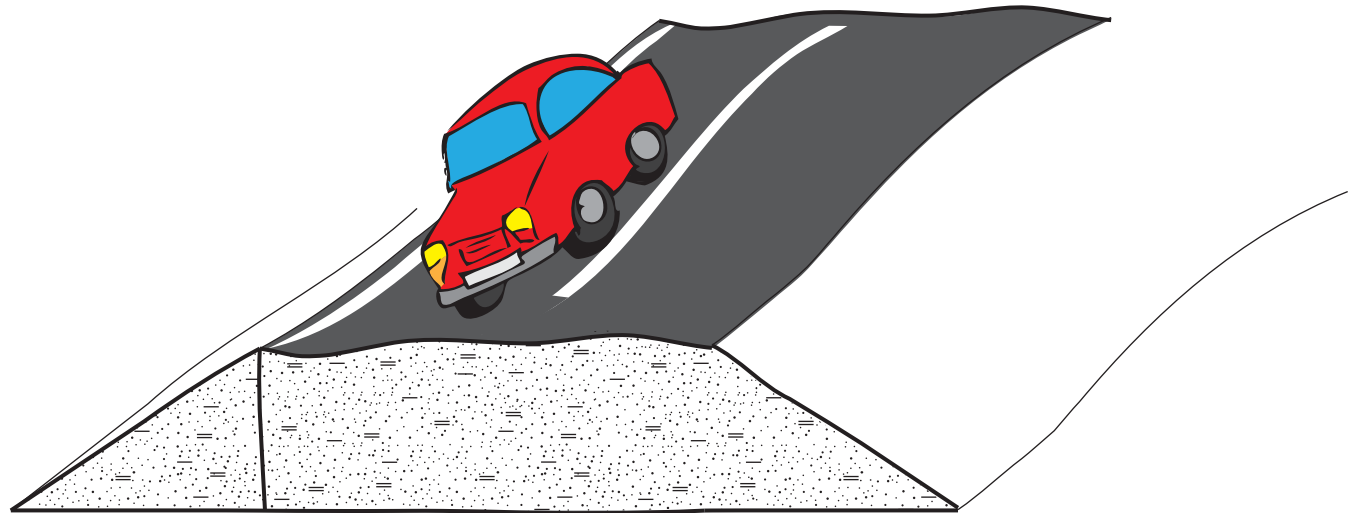
—> on parle alors d'un matériau peu compactable

Remblais: stabilisation

Si le planning le permet, on peut consolider un sol fin en le soumettant à la surcharge d'un remblai provisoire. Cela peut prendre beaucoup de temps.

Une possibilité d'atténuer l'effet de l'eau dans un sol fin consiste à le stabiliser en y incorporant du ciment ou de la chaux avec une épandeuse et un malaxeur. Le ciment ou la chaux incorporent l'eau dans leur structure cristalline (prise hydraulique): le matériau sèche et peut alors se compacter plus facilement. En plus il devient moins sensible au gel ou à l'effet de l'eau.

La question du dosage surgit tôt ou tard à chaque chantier de stabilisation. Les dosages varient de quelques dizaines de kg à quelques centaines de kg par mètres cubes de matériau. Le profil de charge du remblai est le facteur déterminant. Le dosage pour obtenir une valeur de ME ou une portance déterminée doit faire l'objet d'essai préalables.



Dégâts consécutifs à un compactage insuffisant.

3) Sources et références

Sources, pour aller plus loin

- 1 SN 670009a, Terminologie géologique des terrains meubles
- 2 SN 670008, Classification des terrains meubles
- 3 SN 670004-2b-NA, Dénomination, description et classification des sols - Partie 2: Principes pour une classification
- 4 EN ISO 14688-1, Dénomination, description et classification des sols
- 5 EN ISO 14689-1, Dénomination, description et classification des roches
- 6 SIA 199, Etude du massif encaissant pour les travaux souterrains
- 7 FSKB Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie, ABC für Erdarbeiten
- 8 U. Smoltczyk, Grundbautaschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen
- 9 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines
- 10 H.-J. Lang, J. Huder, P. Amann, A. M. Puzrin, Bodenmechanik und Grundbau
- 11 ETH Zürich, Grundlagen der Ingenieurgeologie, WS 02/03, Löw S.
- 12 SN 670010b, Bodenkennziffern
- 13 Press/Siever, Allgemeine Geologie
- 14 SN 670140b, Gel
- 15 Bundesamt für Umwelt BAFU, Permafrost, Eigenschaften und vorkommen (www.bafu.admin.ch)
- 16 Bundesamt für Umwelt BAFU, Hinweiskarte zur potenziellen Permafrostverbreitung in der Schweiz (www.bafu.admin.ch)
- 17 WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (www.slf.ch)
- 18 SN 670115 Granulats minéraux
- 19 Tiefbauamt Graubünden, Besondere Bestimmungen Teil 2, Vorschriften für die Ausführung von Erdarbeiten
- 20 SN 670317b, Essai de plaque EV und ME
- 21 SN 640588a, Compactage à l'aide d'engins de chantier
- 22 SN 670119-NA, Graves non traitées, spécifications
- 23 SN 670902-1, Détermination de la granulométrie de granulats, méthodes de tamisage
- 24 SN 670903-2, Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation
- 25 SN 670902-3, Détermination de la forme des granulats - coefficient d'aplatissement

Referenzen, weiterführende Literatur

- 26 SN 670816, Agrégats minéraux, sédimentométrie par la méthode de l'aréomètre
- 27 Ordonnance sur la sécurité et la protection de la santé des travailleurs dans les travaux de construction
Ordonnance sur les travaux de construction, (OTConst)
- 28 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Abfall und Altlasten, Richtlinie für die Verwertung, Behandlung und Ablagerung von Aushub-, Abraum- und Ausbruchmaterial (Aushubrichtlinie)
- 29 Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD)
- 30 Ordonnance sur l'assainissement des sites pollués (Osites)
- 31 SN 640575, Travaux de terrassement, classes d'exploitation et recommandations
- 32 H. Prinz, R. Strauss, Abriss der Ingenieurgeologie
- 33 Tiefbauamt Graubünden: Projektierungsgrundlagen Kunstbauten: Stützmauern
- 34 SN 505266/2 Maçonnerie en pierres naturelles
- 35 Rudolf Rügger, dipl. Bauing. ETH/SIA: Baugrundverbesserung durch den Einsatz konstruktiver Elemente - Nägel, Dübel und Mikropfähle (2005)
- 36 SIA 261, Actions sur les structures porteuses
- 37 SIA 267, Geotechnique
- 38 SIA 267/1, Geotechnique, spécifications complémentaires
- 39 SN 640576, Remblais et déblais
- 40 SN 670330-2a, Compactage Proctor
- 41 SN 640501, Sols stabilisés à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place
- 43 Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF / Bundesamt für Umwelt BAFU, Lawinenverbau im Anbruchgebiet
- 44 SIA 262, Construction en béton
- 45 SIA 262/1 Construction en béton, spécifications complémentaires