

Paravalanches¹ et barrières à neige²

Stefan Margreth¹
André Burkard²

Résumé. On distingue les mesures de protection à long terme dans les zones de décrochement des avalanches et celles prévues pour les zones d'écoulement et d'arrêt des avalanches. Dans la zone de décrochement on met les **ouvrages de défense permanents**. Ils comprennent les claies à neige et les filets paravalanche. La construction d'ouvrages paravalanches a pour fonction d'empêcher le décrochement d'avalanches ou de réduire les mouvements de la neige à une mesure acceptable. La disposition des ouvrages dans le terrain et le calcul est faite selon les "Directives Suisses pour la construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement". La pression de la neige dépend surtout sur la hauteur de la neige et sur le facteur de glissement. Dans des sols meubles des ancrages (longueur typique de 3 à 6 m), des plaques de base en acier (excavation > 0.5 m) ou des socles de béton armé (dimension minimale 0.5*0.5*0.5 m) sont utilisés comme fondation. Les pentes de 30° à 50° nécessitent généralement la construction d'ouvrages paravalanches. Les ouvrages sont construits en longues rangées horizontales. La hauteur d'ouvrage doit au moins être équivalente à la hauteur de neige extrême avec une période de retour de 100 ans à l'endroit où se trouve l'ouvrage. La protection contre les avalanches en situation de catastrophe et la méthode de dimensionnement des ouvrages doivent remplir cette exigence fondamentale. L'espacement des ouvrages dans la ligne de pente varie typiquement entre 20 et 35 m. Sur une pente avec une inclinaison de 45° 650 m d'ouvrages sont nécessaires pour la protection d'un hectare. Les coûts d'entretien annuels sont à peu près 0.5% des coûts de construction. Finalement le fonctionnement des **barrières à vent**, des vire-vents est expliqué et illustré par des fotos et images.

Mot clés : défense active, défense passive, claie à neige, claie paravalanche, râtelier, filet paravalanche, barrière à neige, ouvrage à vent.

¹ Federal Institute for Snow and Avalanche Research, SLF, Flüelastr.11, CH-7260 Davos Dorf
Tel.+41+81 417 02 54, Fax +41+81 417 01 10, e-mail: margreth@slf.ch

² Cours d'eau/neige/avalanches, Bureau d'ingénieurs A. Burkard, Sebastiansplatz 1, CH-3900 Brigue
Tel.+41+27 924 54 23, Fax +41+27 924 38 94, e-mail: a.burkard@wasserschneelawinen.ch

Avalanche control structures¹ and snow drift fences²

Stefan Margreth¹
André Burkard²

***Abstract:** Two different types of long term avalanche control structures are distinguished: structures in the starting zone, which prevent avalanches from triggering and structures in the track and runout zones which reduce the damaging effect of descending avalanches. In the starting zone **permanent supporting structures** like snow bridges or snow nets are used. They support the snowpack in such a way that the release of avalanches is prevented. The arrangement and design is made according to the "Swiss guidelines on avalanche control structures in the starting zone". Supporting structures are designed for snow pressure forces, which depend mainly on the snow depth and on, snow gliding. In loose ground the foundations consist of drilled anchors (typical length 3-6 m), steel bed plates (excavation >0.5 m) or concrete socles (size>0.5*0.5*0.5 m). Slopes from 30° to 50° are considered to be within the range, which justifies structures. The continuous arrangement of structures is preferred. The structure height is decisive for the avalanche safety in extreme situations. The structure height has to be bigger than the extreme snow depth with a return period of 100 years expected at the structure location. The slope distance between two lines of structures ranges typically between 20 and 35 m. On a 45° slope for the protection of one hectare about 650 m of structures are necessary. The maintenance costs are approximately 0.5% of the initial construction costs.*

*Finally the effect of **snow drift fences** and deflector snow fences are shown and illustrated.*

Keywords: permanent defense structures, active control, passive control, snow barrier, snow bridge, snow rake, snow net, snow drift fence, deflector snow fences.

¹ Federal Institute for Snow and Avalanche Research, SLF, Flüelastr.11, CH-7260 Davos Dorf
Tel.+41+81 417 02 54, Fax +41+81 417 01 10, e-mail: margreth@slf.ch

² Cours d'eau/neige/avalanches, Bureau d'ingénieurs A. Burkard, Sebastiansplatz 1, CH-3900 Brigue
Tel.+41+27 924 54 23, Fax +41+27 924 38 94, e-mail: a.burkard@wasserschneelawinen.ch

1. Introduction

Accidents and damage from interaction of avalanches with human activities and infrastructures can be prevented either by active methods as controlling the avalanches with protection measures or artificial release or by passive methods as regulation of the presence of persons by using hazard maps and avalanche warning. In figure 1 the different methods are given. Active long-term avalanche control structures should be applied where the damaging potential is big and cheaper control methods such as evacuation or explosive control are not easy to apply. These measures are more expensive than short-term or passive measures, but their main advantage is that they are very effective and that a daily hazard evaluation is usually not necessary anymore. Corresponding to their nature and mode of action, different types of structures are distinguished:

In the starting zone, **supporting structures** and **snow drift structures** are built, which prevent the release of avalanches. We distinguish permanent steel supporting structures (service life about 100 years) and temporary supporting structures made out of wood (service life about 30 years).

In the track and runout zone of avalanches **deflecting structures** such as walls, dams or sheds change the direction of the moving avalanche and deflect it from the object to be protected.

In the runout zone **retarding structures** such as catching dams or retarding mounds reduce the avalanche speed and shorten the runout distance.

To find the most effective control measure for a location, cost-benefit analysis should be performed. The outset risk without safety measures, the residual risk and the expected risk reduction are calculated. By comparing the costs and the expected risk reduction, it is possible to compare the different control measures.

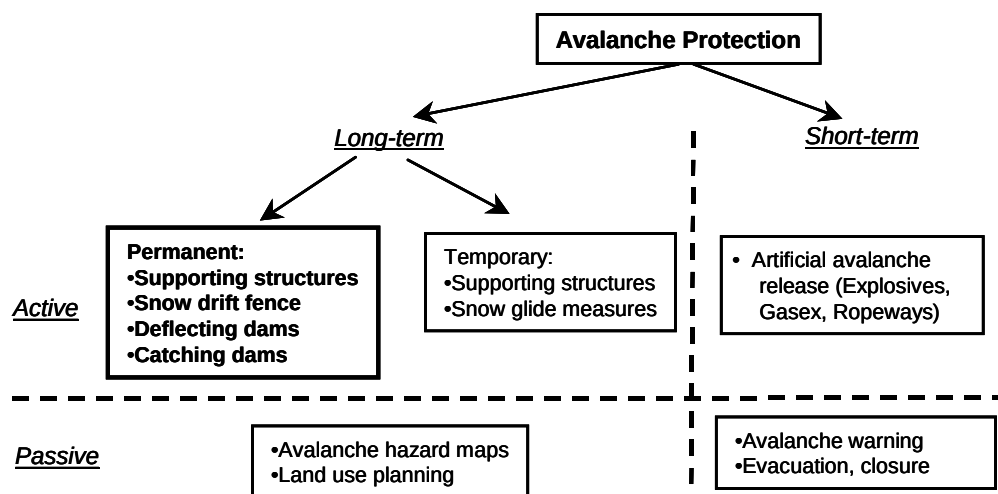


Figure 1 : Overview avalanches protection.
The combination of all the different measures is called integral avalanche protection

2. Supporting structures

The principle, calculation and design of supporting structures (figure 2) in the starting zone are explained in the "Swiss Guidelines for avalanche control structures in the starting zone" (BUWAL/WSL, 2007). There all insights and experiences collected over several decades are summarised.



Figure 2 : Slab avalanche on 24.2.1999 beside supporting structures near Zermatt, Switzerland

2.1. Principles of supporting structures

The task of supporting structures is to prevent large avalanches or at least to limit snow motions (they cannot be completely eliminated) to a harmless magnitude. Supporting structures cannot stop fully developed avalanches; normally the structures will be destroyed. The first problem is to produce an overall increase in the stability of the sloping snowpack by additional compressive stresses and reduced shear stresses in the weak layer due to the supporting plane. The second problem consists in limiting the size of the snow masses which broke loose and in retarding and catching them.

With the installation of supporting structures, conditions in the inclined snow cover are decisively changed. The supporting plane stops the downslope creep and glide movement of the snowpack with the consequence that in the up-slope direction additional compressive stresses produces over a certain "stagnation zone" (figure 3). These compression stresses absorb a part of the dangerous shear stresses in a weak layer and limit the propagation of shear cracks. The desired higher stability is achieved in a decrease of the shear stresses in the weak layer and consequently in an enlargement of the critical size of a so called super weak layer. The smaller the critical size of a super weak layer, the more likely fracture is to start.

If nevertheless, a local fracture takes place, then the lines of structures lying above and below limit the propagation of the shear fracture. The avalanching snow is retarded and stopped by the supporting plane so there is also a limitation of the mass. Avalanches between the structures are mostly released either after very loose or heavy new snowfalls or during springtime situations. Soft and wet slabs seem to be more problematic than hard slabs. If the snow has a very small cohesion, then the retarding capacity of the structures can be very small.

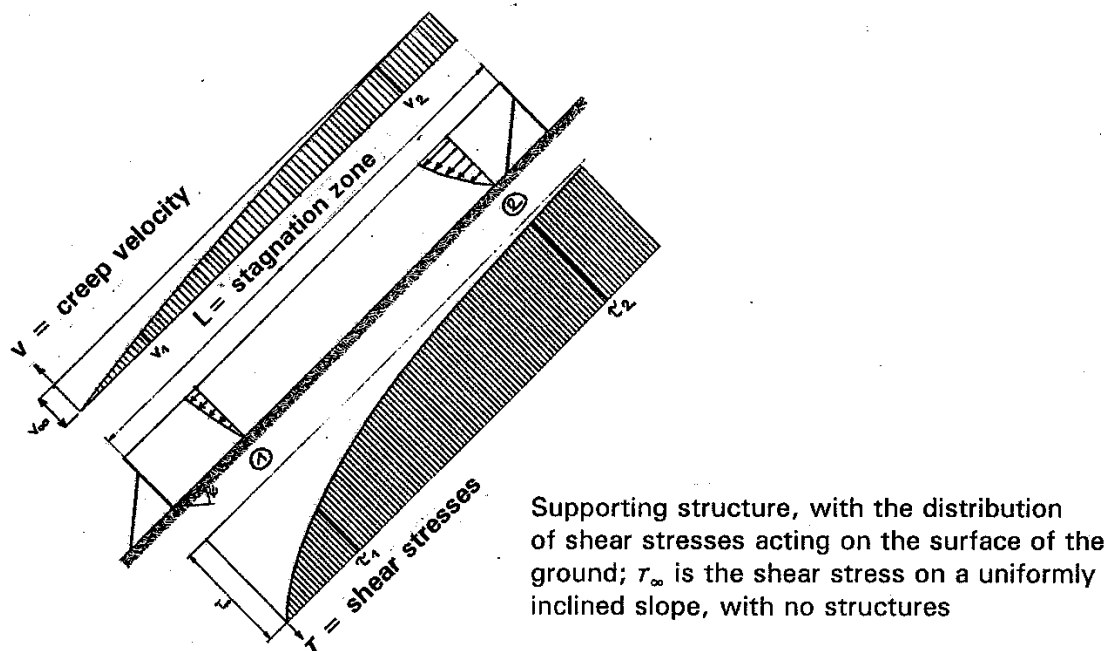


Figure 3 : Supporting structure with distribution of shear stresses, creep velocity and stagnation zone

Supporting structures are built to prevent large avalanches with long return periods and extreme runout distances. If the snow height behind the structures is small (normal winter), the "stagnation zone" is mostly smaller than the distance between the lines of structures. Then the stability-increase, which is produced, covers only a very small space. In such a situation supporting structures can be effective only by limiting the fracture area and by their retarding and catching capability. In this way we can avoid extreme avalanches, but small avalanches cannot be avoided completely. This is a very important point for the determination of the residual risk.

2.2. Snow pressure on supporting structures

The snow pressure on a plane surface perpendicular to the slope is generally composed of (figure 4):

- the pressure that results from a local blocking of the creep movement (creep pressure) and of the glide movement which eventually develops (glide pressure)

- the pressure that results from hindering the settlement of the snowpack that would take place under the influence of the gravity acts perpendicular to the slope (nivostatic pressure).

2.2.1. The component of snow pressure parallel to the slope

The component of the creep and glide pressure parallel to the slope exerts a force on a unit length of an infinitely long supporting plane erected perpendicular to the slope that is equal to :

$$S'_N = H_k^2 \cdot N \cdot f_c \quad [\text{kN/m}] \quad (1)$$

S'_N component of snow pressure parallel to the slope per unit length of the supporting plane. S'_N is assumed to be evenly distributed throughout the entire depth of the snowpack.

H_k snow depth measured vertically [m]

N glide factor (refers to the glide pressure and varies with the roughness of the ground surface and the aspect of the slope).

f_c altitude factor. It considers the general increase of the snow density with altitude (1500m: $f_c = 1.0$, 3000m: $f_c = 1.3$).

ground roughness	aspect of slope	glide factor
big boulders	N	1.2
short grass, bushes < 1.0m	S	2.4
smooth, long bladed grass	S	3.2

Table 1 : Glide factor

2.2.2. The component of snow pressure perpendicular to the slope

A force component perpendicular to the slope develops if a rigid wall, built perpendicular to the slope, hinders the settlement of the snowpack because of the adhesion of the snow to the rough supporting plane. It is expressed as :

$$S'_Q = S'_N \cdot a / (N \cdot \tan \psi) \quad [\text{kN/m}] \quad (2)$$

S'_Q component of snow pressure perpendicular to the slope per unit length of the supporting plane

a a ratio depending on the kind of snow. For the design of the structure: $a = 0.35$ and $a = 0.5$ (the most unfavourable load-case has to be considered).

ψ slope angle [°]

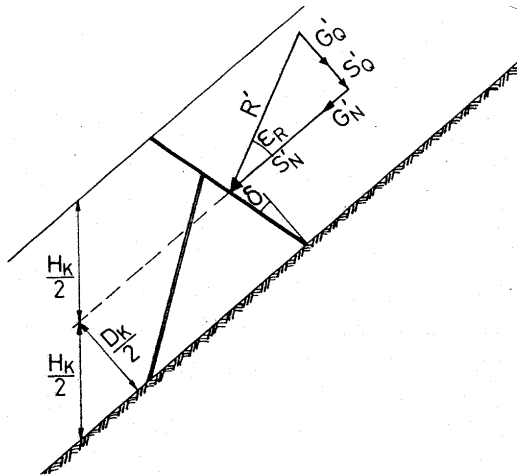


Figure 4 : Snow pressure on supporting structures

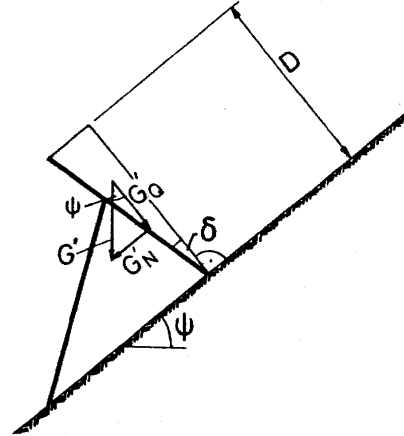


Figure 5 : Weight of snow prism

2.2.3. Additional forces in the case of an inclined supporting plane

If the supporting plane is not perpendicular to the slope, it is necessary to add the weight, G' , to the components S'_N and S'_Q . G' is the weight of the snow prism formed by the supporting plane and its extension to the ground and by a plane perpendicular to the slope at the point, where the extension of the supporting plane intersects the ground (figure 5). G' is:

$$G' = 1.5 \cdot D_k^2 \cdot \tan \delta \quad [\text{kN/m}] \quad (3)$$

G' weight of the snow prism per unit length of structure for a snow density of 300 kg/m^3

D_k thickness of snow cover measured perpendicular to the slope ($D_k = H_k \cdot \cos \psi$) [m]

δ angle between the supporting plane and the normal to the slope (mostly $\delta = 15^\circ$) [$^\circ$].

2.2.4. End effects

If the extension of the supporting plane is limited in length, end effect forces will be present (figure 6). These forces are due to the viscous flow of snow masses around the ends of the supporting plane. For the calculation we assume a constant force $S'R$ per running meter applied over the length Δl .

$$S'R = f_R \cdot S'_N \quad [\text{kN/m}] \quad (4)$$

S'_N component of snow pressure parallel to the slope

f_R end-effect factor. In the case of interrupted structures with an interval of 2m $f_R = 2.5$ and $\Delta l = 0.6\text{m}$.

2.2.5. Types of loading

The **first type of loading** is typical for cold winter conditions when snow depths are high but snow density is low. It is based on a maximum snow depth equal to the maximum height of the structure. The resultant force is applied at the midpoint of the structure (figure 7).

The **second type of loading** is typical for spring conditions after settlement has reduced snow depths and increased snow density. This type of loading is based on a snow depth only 77% of the maximum height of the structure. The resultant snow pressure force acts at 0.385 times the maximum height of the structure instead of 0.5. The assumed density is 400 kg/m^3 .

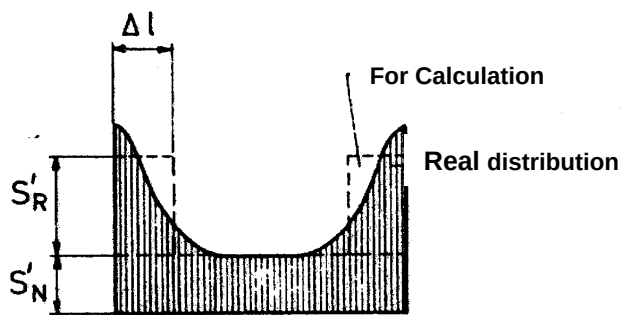


Figure 6 : End effects on snow pressure

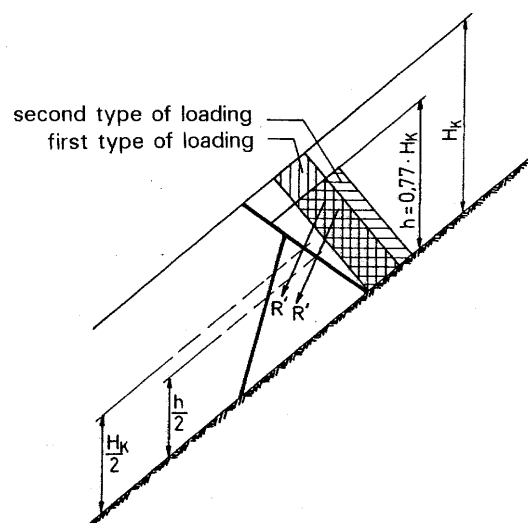


Figure 7 : Types of loading

2.2.6. Example

The components of the snow pressure force are calculated on a supporting structure in a zone without end effects as follows:

Slope inclination	$\psi = 45^\circ$
Extreme vertical snow depth	$H_k = 4.24\text{m}$
Thickness of snow cover	$D_k = 4.24 \cdot \cos 45^\circ = 3\text{m}$
Glide factor	$N = 2.5$
Altitude factor	$f_c = 1.1$

Table2: Input factors for snow pressure calculation.

Snow pressure: $S'_N = H_k^2 \cdot N \cdot f_c = 4.24^2 \cdot 2.5 \cdot 1.1 = 49.5 \text{ kN/m'}$

$S'_Q = S'_N \cdot a / (N \cdot \tan \psi) \rightarrow a = 0.5: S'_Q = 49.5 \cdot 0.50 / (2.5 \cdot \tan 45^\circ) = 9.9 \text{ kN/m'}$

Weight of snow prism: $G' = 1.5 \cdot D_k^2 \cdot \tan 15^\circ = 1.5 \cdot 3^2 \cdot \tan 15^\circ = 3.6 \text{ kN/m'}$

$G'_N = G'_Q = G' \cdot \sin 45^\circ = 2.6 \text{ kN/m'}$

Resultant snow pressure for $a=0.5$:

$$R'_N = S'_N + G'_N = 49.5 + 2.6 = 52.1 \text{ kN/m'}$$

$$R'_Q = S'_Q + G'_Q = 9.9 + 2.6 = 12.5 \text{ kN/m'}$$

$$R' = (R'^2_N + R'^2_Q)^{1/2} = (52.1^2 + 12.5^2)^{1/2} = 53.6 \text{ kN/m'}$$

$$\varepsilon = \text{tg}^{-1}(R'_Q/R'_N) = \text{tg}^{-1}(12.5/52.1) = 13.5^\circ$$

Influence length of structure: $l=3\text{m}$

$$R = R' \cdot l = 53.6 \cdot 3 = \mathbf{160.8 \text{ kN}}$$

With the resultant snow pressure R the forces in the support, the girder and the foundations are calculated.

2.3. Design of the framework

The two loading types are used to calculate the forces in the framework and the reactions in the foundation. The design is made according to the standards for the design of steel structures. For the design calculations of steel structures a safety factor of 1.6 is usual. In Switzerland the following 3 supporting structures are common:

2.3.1. Type A: Snow bridge with one support (figure 8)

This type is very classical and is used since the beginning of avalanche control. The static system is very simple: if snow pressure changes, the direction of the upper foundation force changes and the direction of the force in the support is equal. The upper end of the girder is fixed to the foundation and the support with jointed bolts. This type was used earlier with concrete foundations and now with steel bed plates and anchor foundations. The ideal value for the width of the interspace between the single cross beams is 250m

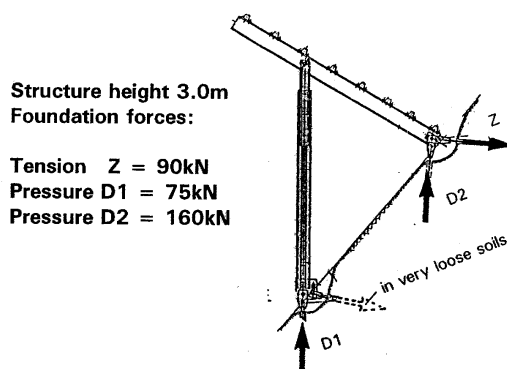


Figure 8 : Snow bridge with one support

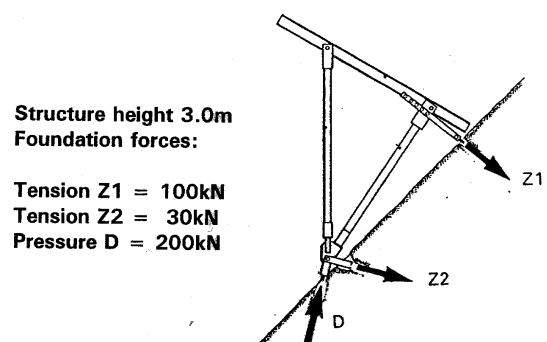


Figure 9 : Snow bridge with two supports

2.3.2. Type B: Snow bridge with two supports (figure 9 and 11)

This type was especially developed for the use of micropile and anchor foundations. The girder and the two supports form a stiff triangular shaped frame which is held at the lower point with a micropile and an anchor and at the upper point with a jointed bar and an anchor. If snow pressure changes, the direction of the lower foundation force changes and the direction of the upper foundation force is constant.

2.3.3. Type C: Snow nets (figure 10 and 12)

Instead of the stiff crossbeams, flexible triangular wire rope nets are used. Swivel posts hold the nets. Because the supporting plane of snow nets is flexible a reduction of the snow pressure of 20% can be assumed. The advantages are the better resistance against rockfall and the invisibility in the landscape. Because of the higher permeability of the supporting plane, their retarding effect and arresting capability can be problematic. The best solution for snow nets to have a sufficient retarding effect is the fitting of small stripes onto the mesh ropes. The posts of snow nets have to be designed also in addition to the axial pressure force to the lateral snow pressure forces. Because of the high upper tension forces snow nets are applied at best in rock.

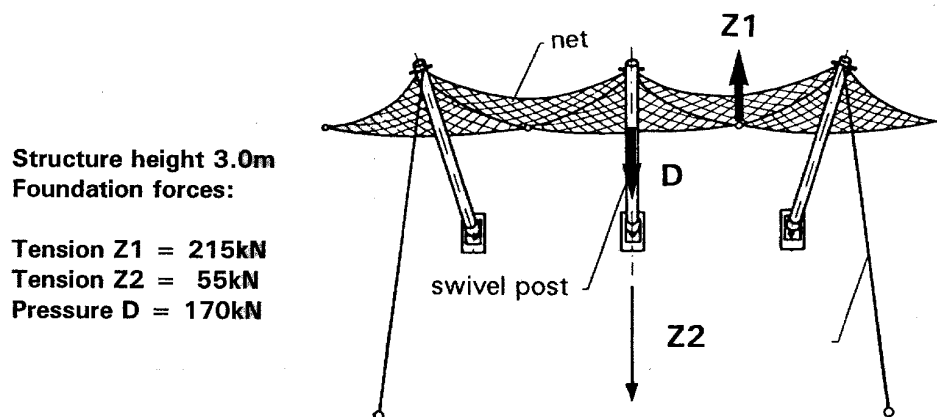


Figure 10 : Snow net



Figure 11 : Snow bridge type Zölling-SA



Figure 12 : Snow net type GEOBRUGG

2.4. Foundations of supporting structures

2.4.1. Loose ground

Because **concrete foundations** are expensive and sometimes difficult to build in very loose soils, **tension and compression anchors** were developed. With small drilling machines boreholes with a minimal diameter of 90mm and a length of 2m to 8m are drilled. After the drilling an a

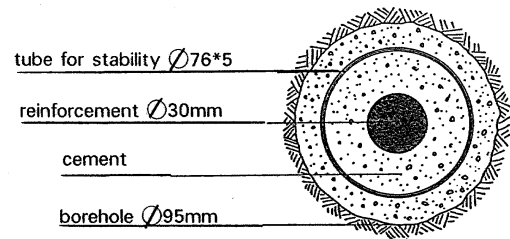


Figure 13 : Cross section micropile

36mm) is installed and the borehole is filled up with special grout (compressive strength $>35\text{N/mm}^2$, high frost resistance) (figure 13). If there is a big loss of grout a stocking net can be used. The upper part of a compression anchor or micropile has to be stabilised with at least a 1.5m long steel tube (for example: ROR 76...89/5...10mm). If the soil is loose or the terrain very steep, the head of the micropile has to be fixed with an additional tension anchor or with a concrete socle. The bearing capacity for 4m long anchors is for tension between 110 and 140kN and for pressure between 160 and 210kN. The permissible load has to be determined with pullout tests. A good injection is very important. Micropiles work only satisfactory if they are loaded axially. Micropiles are not well suited for the foundation of swivel posts of snow nets. The lateral stiffness of the soil is not high enough. In such situations an additional concrete socle or steel bed plates should be built.

Steel-bedplates are often applied for the foundation of the posts of the classical type-A structures. The bedplate has to be in a minimal depth of 0.5m. Bedplate foundations are very simple and cheap, but in very loose soil sometimes problematic because of soil-erosion.

2.4.2. Bedrock

In bedrock steel bars or rope anchors are used. The admissible load for a 1.5m long anchor with a drilled hole of 45mm is about 200kN. The length of the anchor has to be chosen according to the rock quality. Experience shows the minimal length has to be at least 1.5m. If the rock is layered parallel to the slope the bearing capacity can be problematic.

2.5. Planning of supporting structures

2.5.1. Extent of supporting structures

Slopes from 30° to 50° are considered to be in the range, which justifies constructions. In exceptional cases, flatter or steeper parts of a slope may be also controlled (for example flat shoulders above steep slopes). The highest fracture lines that were observed or are expected have to be in the backpressure zone of the uppermost lines of supporting structures. Downhill the area extends until either the slope inclination is definitely less than 30° or it is expected that avalanches breaking off further down will be too small to be dangerous. Laterally the area with supporting structures should extend to natural terrain borders such as crests or terrain ridges. If this is impossible the end of the structures-lines should be arranged by stepping back. The end of the lower lines should be always in the protection of the upper lines. In February 1999 avalanches were released above controlled areas in several locations and in consequence big damages to the structures occurred. To prevent such incidents all the possible starting zones have to be checked and if necessary controlled with structures.

2.5.2. Arrangement of structures

Today the continuous arrangement of structures is preferred (figure 14). The length of the lines should vary between 20 and 50m. The advantage is, that the primary shear crack can hardly propagate up- or downward beyond the structure-lines. As seen in a plan view, the long axis of the structures must be placed as nearly as possible at right angles to the assumed direction of the snow pressure. At the end of a line there are normally stronger structures necessary, for example with double girders and supports. In a narrow gully or very uneven terrain also single structures may be used.

Lines of supporting structures

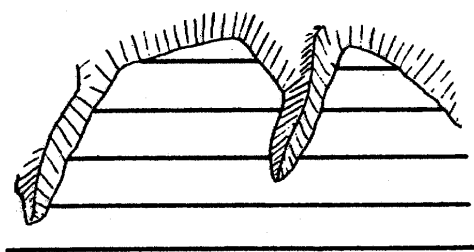


Figure 14 : Continuous arrangement

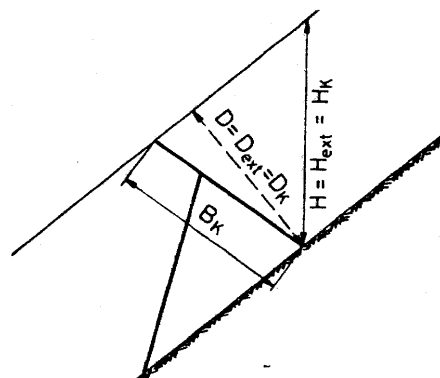


Figure 15 : Snow height and height of the structures

2.5.3. Snow depth and height of structure

The height of the structures is decisive for the degree of avalanche safety in a catastrophic situation and for design of the supporting structures. This requirement is that structure height must correspond at least to the extreme snow depth to be expected at the site where structures are to be built (figure 15). In Switzerland the return period for the extreme snow depth is 100 years. If this requirement is not fulfilled, then supporting structures can only fulfil their task partially or not at all. If structures are overfilled with snow, the retarding and catching capability is completely lost and the risk of damages to the structure is high. During the avalanche cycle of February 1999, in several controlled areas supporting structures were overfilled completely, but fortunately no damaging avalanches occurred. In order to have any chance of fulfilling this requirement, one must have a detailed knowledge of the snow depth distribution in the starting zone. Snow depth measurements with stakes should be carried out during several winters and the results should be compared with long-term snow data taken at nearby observation stations. The snow distribution at the end of a winter gives also often valuable information.

2.5.4. Slope distance between lines of structures

In the Swiss Guidelines the distance L between two lines of structures (figure 16) depends on the following criteria: The structures have to withstand the maximum static and dynamic snow pressures. Furthermore they have to reduce – as artificial roughness – velocities of small avalanches. The spacing factor f_L depends on the slope inclination, the friction angle between snow and soil φ , on the gliding factor N and the structure height H_K . For normal conditions the middle curve with $\tan \varphi = 0.55$ is taken. With smooth ground or also in situations with high safety requirements, the lower curve with $\tan \varphi = 0.5$ should be applied. In regions with a lot of precipitation eventually smaller values than $\tan \varphi = 0.5$ should be taken.

Example: slope inclination $\psi = 100\%$ or 45° , $H_K = 4.95\text{m} \rightarrow \tan \varphi = 0.55$
 $\rightarrow$ structure spacing $L = f_L \cdot H_K = 4.45 \cdot 4.95 = \mathbf{22\text{m}}$

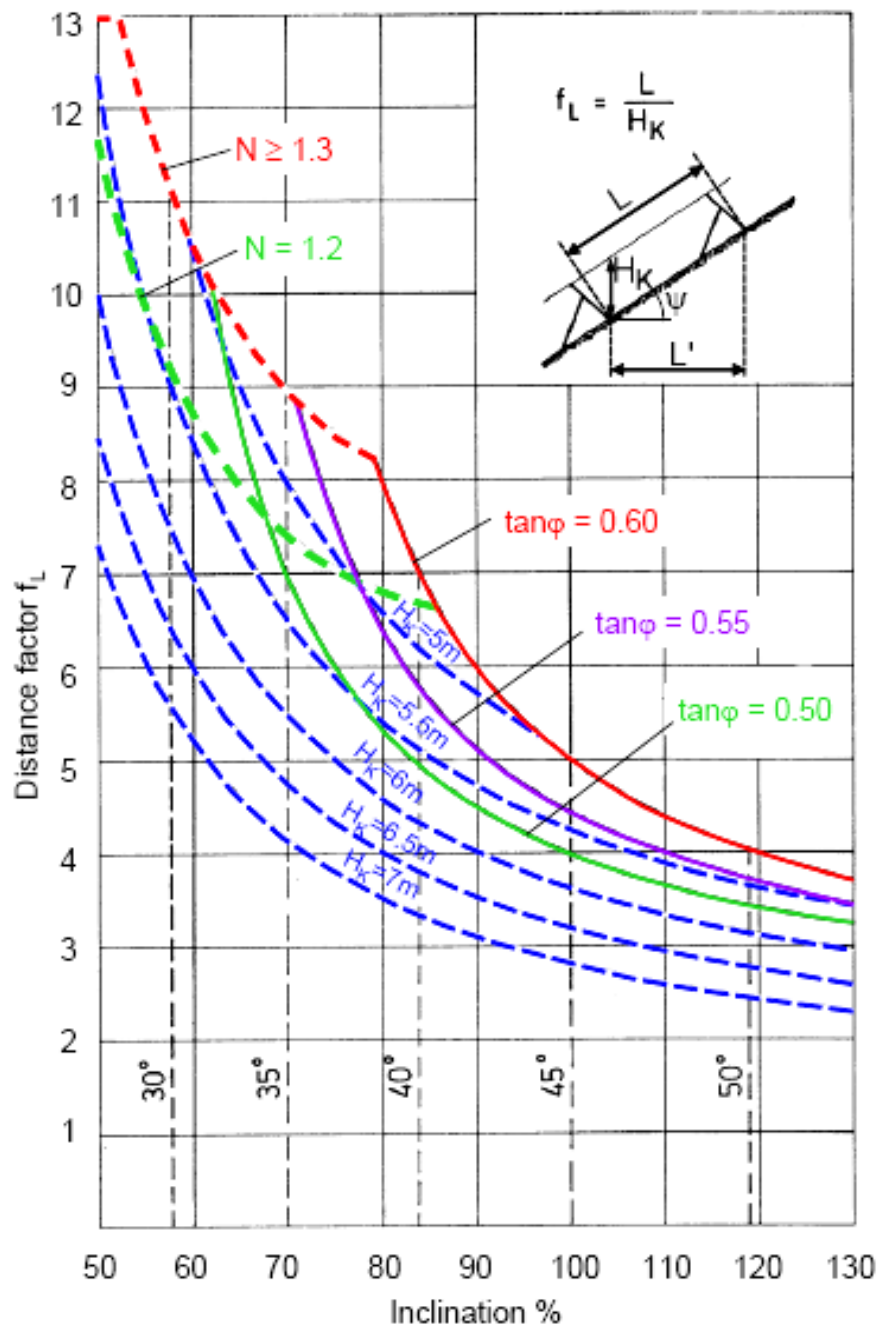


Figure 16 : Slope distance between lines of structures (Swiss guideline)

2.6. Costs of supporting structures

For a rough cost estimate, the number of meters of supporting structures represents the most relevant cost factor. The number of meters can be estimated with help of figure 17 for different slope inclinations and structure heights.

At the present time the cost for completely installed steel snow bridges with a height of 3.5m is 1200 € per meter. One hectare controlled with supporting structures costs roughly 0.6 Million €. The composition of the costs for a structure with drilled anchors is for a typical example:

steel superstructure:	41%
anchor, cement, fuel:	7%
cost for manpower	-foundation: 14%
	-assembling: 8%
drilling and injection machine:	10%
transport of material:	12%
installation, managing of the site, bad weather:	8%

In Switzerland a homologation of permanent supporting structures on the basis of the Swiss Guidelines was established. Only approved and homologated systems are subsidized by the Confederation (BUWAL, 2004).

Running meter per hectare (m)

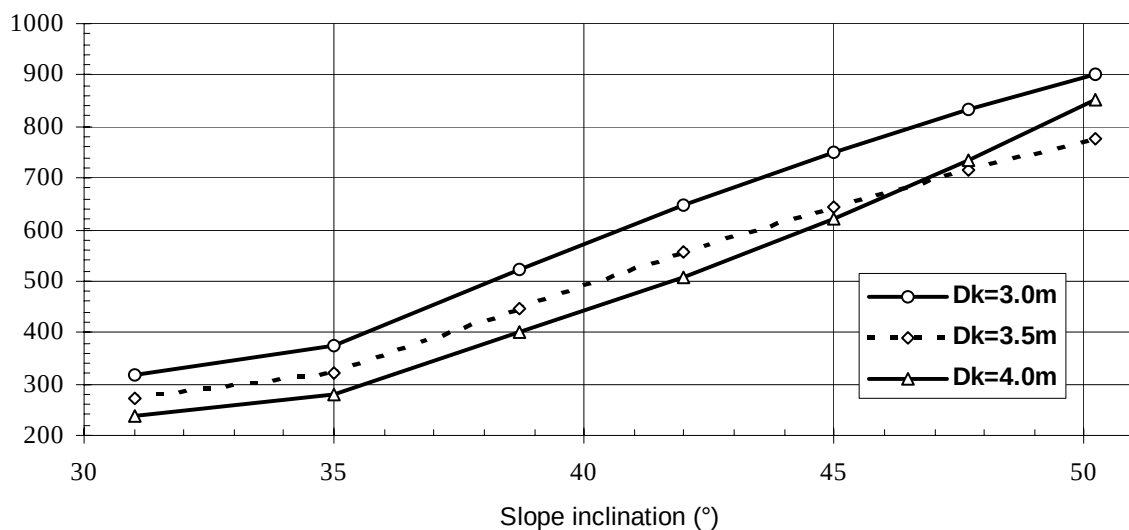


Figure 17 : Necessary meters supporting structures per hectare to the Swiss Guidelines.

2.7. Maintenance

To achieve the expected service life of 100 years the maintenance of supporting structures is very important. All structures should be visually checked every year. Important points are the geometry of the structure, bent or broken elements, erosion around the foundations, rope connections etc. After extreme winters with high snow

gliding or high snow heights the inspection must be made very carefully. For an effective inspection a cadastre should be established where the positions and characteristics of all the structures are marked. The results from the inspections have to be marked in the cadastre. The cost for the maintenance is estimably 0.5% of the initial building cost.

2.8. Residual risk

The residual risk below a starting zone which is controlled by supporting structures consist of avalanches which break loose nevertheless of the structures. To quantify the residual risk the following 3 main cases can be distinguished (figure 18):

- **Case 1: Avalanche release outside of the controlled area.** This situation appears quite often because not always the whole starting zone can be controlled e.g. because of the too big size of the starting zone or too small budget. Due to the controlled area the avalanche volume respectively the width of the starting zone is reduced. Therefore the runout distance is smaller compared to the initial situation.
- **Case 2: Avalanche release inside the controlled area.** An avalanche can break loose also in between the lines of structures. This situation often appears if the snow height is much smaller compared to the structure height. In such a situation the avalanche discharge is compared to the initial situation much reduced because of the breaking and retarding effect of the structures. In avalanche dynamics modelling this fact can be considered either by reducing the fracture depth or by decreasing the friction value ξ .
- **Case 3: Avalanche release over the filled up structures.** This situation appears if the extreme snow height is bigger than the effective structure height. The fracture depth of an avalanche released over the structure depends on the difference of the structures height and the extreme snow height for a certain return period. Often supporting structures are overfilled due to cornices or wind blown snow.

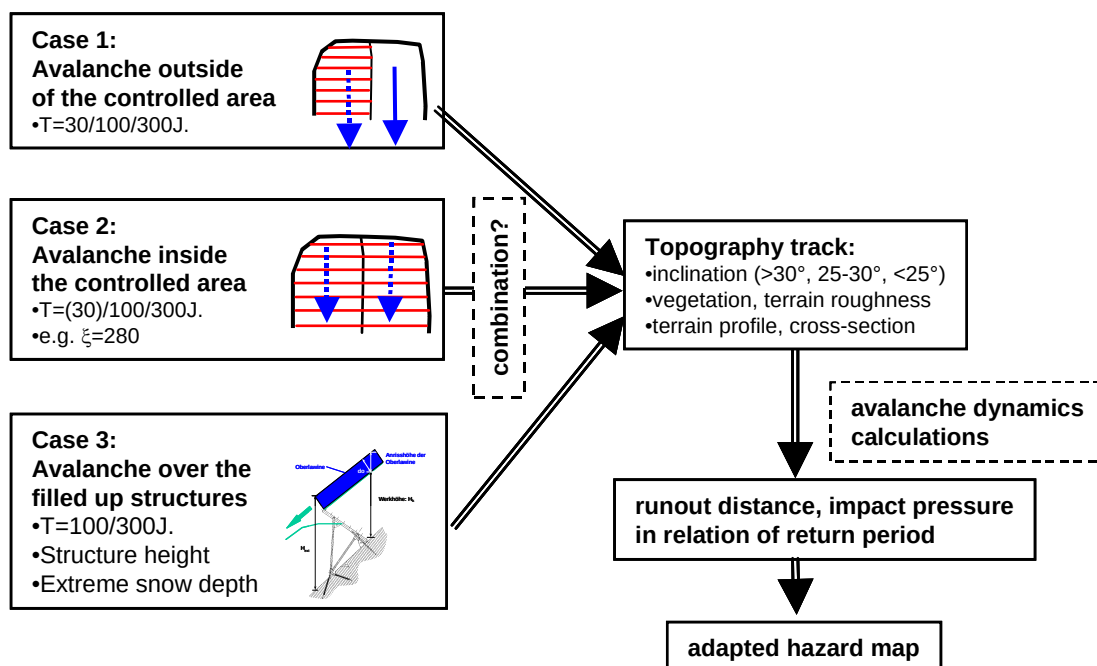


Figure 18 : Determination of the residual risk of supporting structures.

3. Snowdrift fences

Snow drift fences and Kolktafeln close to avalanche starting zones alter the wind flow over ridges and reduce the amount of snow drift into the starting zones (figure 19). Because many avalanches are, amongst other factors, caused by snow drift in starting zones, snow fences can reduce the avalanche frequency and size. The snow fence produces snow deposits with a typical length of 15 – 20 times the fence height H . The minimum setback distance from a starting zone is therefore $15-20H$. This distance is very important, if a snow drift fence is built too close to the starting zone the situation can be worse than before.

Typical fence heights H are between 2 and 5m. The cost of taller fences would be disproportionally high and it would be better to use more rows of snow fences rather than one tall fence. The length of a fence should be more than $20H$. A porosity of 50% is common. The smaller the porosity, the longer the snow deposit. To prevent that the fence fills up with snow and becomes inefficient, a bottom gap of $0.1H$ is important.

Snow fences are inexpensive and can be built quickly. For a fence height of 4m the costs are approximately 350 to 600 € per meter. Wind forces are determining for the design. Crucial is the location of the fence. Observations of the snow distribution and the wind direction over several years are mandatory. Good locations for snow drift fences are relatively rare.

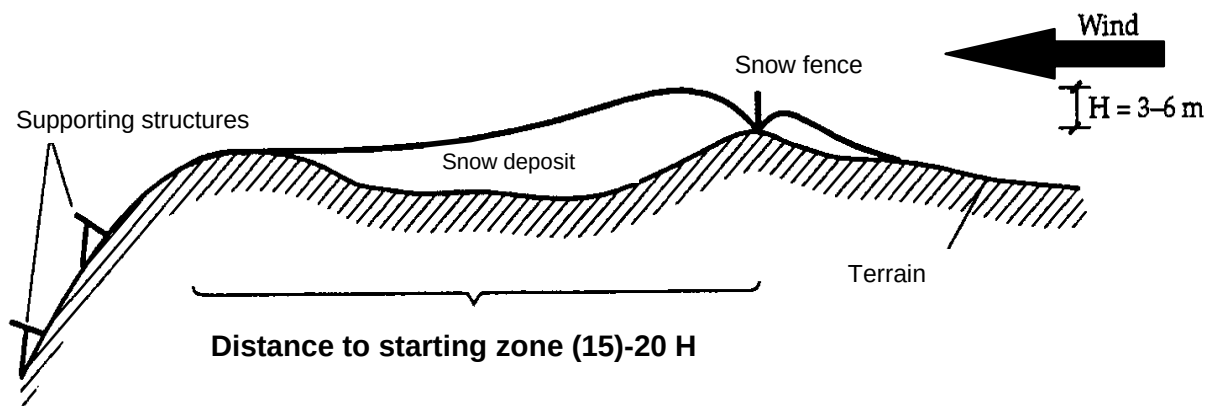


Figure 19 : Snow drift fence, snow deposit on the plane near the support structures. Swiss recommendations

Wind is from the left in the photo of a 12.4-ft-high, 50-percent porous snow fence in a blizzard (figure 20).



Figure 20 : Snow drift fence, type Wyoming,
Photo: www.wrds.uwyo.edu

The diagram in figure 21 shows the reduction of wind speed downwind (right in the photo) scaled with fence height, H . For example, in the region below the line marked 60, wind speed is reduced by more than 60 percent from what it would be without the fence (Tabler and Jairell 1993).

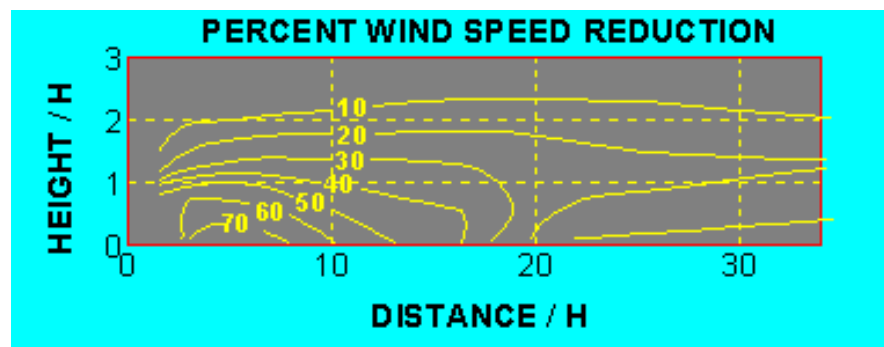


Figure 21 : Influence of the drift fence on wind speed
(Tabler and Jairell, 1993), from www.wrds.uwyo.edu



Figure 22 : Snow drift fence with a bottom gap, Type Wyoming, Photo A. Burkard, 2009

3.1. How Snow Fence Drifts Grow

The way snowdrifts grow changes as drifting snow fill the zone of reduced wind speed around a porous snow fence ([Tabler and Jairell 1993](#)). Deposition begins in the region of greatest wind speed reduction, extending to about $12H$ downwind (H is fence height). As the snowdrift grows in height, a recirculation zone and slip face form on the downwind edge. The plot of drift growth shows this stage for profile measurements 1 through 3. Once the drift attains its maximum height (1 to $1.2H$), the recirculation zone begins to fill (profiles 4 through 6). As the lee drift grows beyond $20H$ downwind from the fence, less and less of each drifting snow is trapped in the drift. With enough blowing snow, the drift finally reaches a shape where it stops growing. This is called the equilibrium drift, the most snow the fence will store. The vertical scale is exaggerated in this plot to show the measurements more clearly (figure 24).

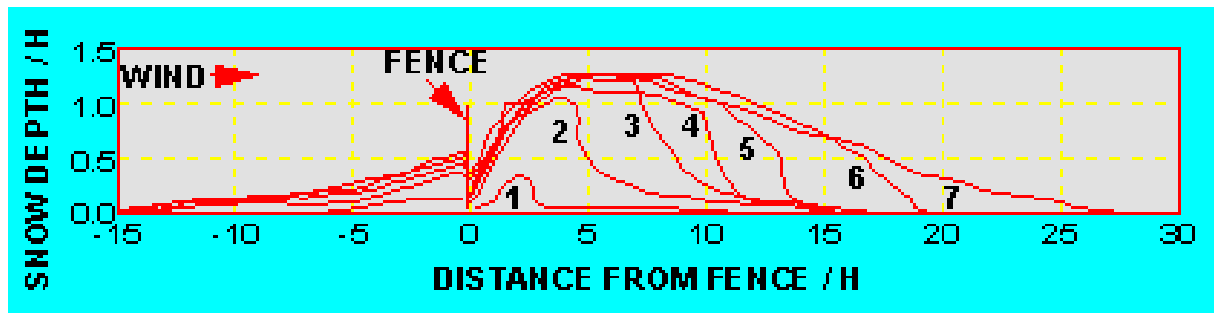


Figure 23 : The growth of snow in function of several snow drift periods
(Tabler and Jairell, 1993) from www.wrds.uwyo.edu/

3.2. Snow Fence Equilibrium Drifts

As blizzards build the downwind and the upwind drifts around a snow fence, a smaller part of each blizzard's drifting snow is trapped (Tabler and Jairell 1993). Finally these drifts reach a distinctive shape, and a size that does not grow. If blizzards pass without losing snow, the drift is at equilibrium with the blizzard winds. Storms may add a little snow, strong winds erode the drift slightly, but over several storm cycles, the drift cross section doesn't change much.

Tabler and Jairell (1993) used this equilibrium snowdrift cross section to compute how much snow transport the snow fence will trap. From the snow fences on I-80, they learned that the size and shape of equilibrium drifts scale with fence height H (Tabler 1980b, 1986). The maximum drift depth develops near $6H$ downwind and is about 1.2 times the fence height. The upwind drift develops slowly, until it extends to $15H$ and reaches maximum depth near $0.5H$ just upwind of the fence. One of the most surprising dimensions was how far the downwind drift extends. If the distance between the fence and road or other object is less than 34 times the fence height, then the equilibrium drift will reach the object. That can make a drift problem worse, instead of eliminating it.

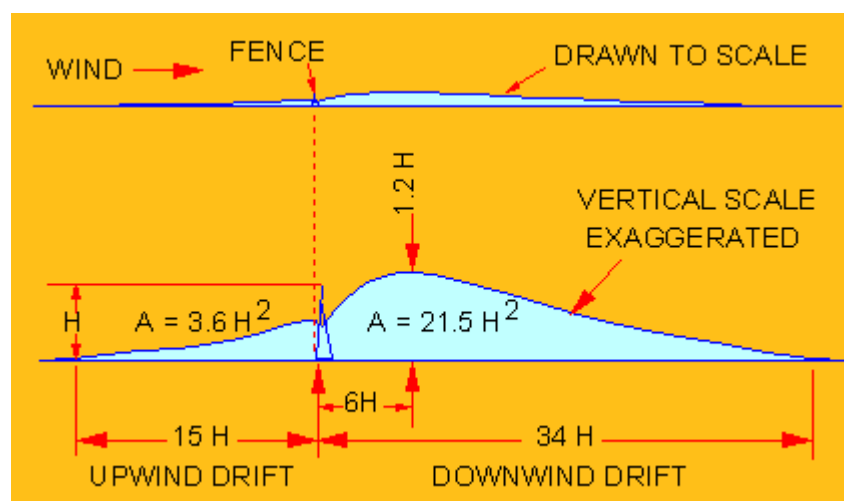


Figure 24 : The growth of snow around snow fence in function of several snow drift periodes
(Tabler, 1986) from www.wrds.uwyo.edu/



Figure 25 : In this photo, the drift downwind of a 12.4-ft Wyoming snow fence is near equilibrium ([Tabler 1986](#)). Wind is from the left, from www.wrds.uwyo.edu/

3.3. Designing rules are summarized in (Vögeli, 1996):

- Fences should not be built directly in the lee side of a natural snow drifting trap.
- Distinct main wind direction.
- The terrain can help to control the wind direction. On a saddle for instance, wind will be channeled in a certain direction.
- Snow fences never reach 100% efficiency.
- High fences are more efficient than low ones.
- With increasing snow deposition, the efficiency decreases.
- A high filling level of the fence results in a high efficiency.
- Maximum deposition capacity will be reached by a porosity of 45% to 66%
- Fences with a horizontal order of bars reach a higher deposition capacity than fences with vertical bars.
- A decreasing windward deposition length will be reached by a steeper rising slope on the lee side.
- A decreasing efficient height of the fence results from an increasingly steeper rising or descending slope on the windward.
- With a perpendicular fence, maximal lee deposition length will occur with a 15° descending slope on the windward side.
- A considerable diminution of the lee side deposition capacity is caused by a rising slope on the lee side.
- A descending slope on the lee side enhances the deposition capacity and deposition length with fences of the type Wyoming up to an inclination of 10°; for each degree 15-20%.
- The effect of partially snow covered fences is reduced to that part of the fence that reaches out of the snow.
- With a decreasing porosity, the distance between fence and point of maximal lee side deposition height increases.
- The length of deposition will become longer with a filling level that decreases from 100% to 27%.
- Narrow bars give a better dissipation of energy than wide ones.

- The jet effect at the bottom gap increases with an increasing filling level.
- The jet effect decreases with an increasing height of the windward deposition.
- A close to the fence and steeply inclined lee side deposition gives a worsen jet effect than a more distant deposition.
- Snow deposits resulting of snowing in still air can cover the bottom gap.
- Snow drifting from the opposite wind direction covers the bottom gap or the whole fence.
- The maximum effect of the fence will only be reached by a fully efficient bottom gap.
- The efficiency increases with an increasing length of the fence.
- In proportion to their length, high fences have a higher capacity than short ones.
- During the state of saturation of up to 12 H, the edge effects on a flat surface are detectable up to the middle of the fence.
- On a flat surface, staggered fences with a filling level of 50% reach their maximal efficiency with a relative displacement of ca. 15H.
- In case of high wind velocity, the lee side deposits are further away from the fence than in case of low wind velocity.
- Locations strongly exposed to wind are more convenient for snow drift fences than low wind locations.
- The shape of deposit out of range of the edge effects is independent of the wind direction, at least up to a deviation of 75° to the perpendicular direction.

Designing rules are also defined in Tabler, R.D: Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design, Final Report, Tabler and Associates Niwot, Colorado, August 2003.

4. Deflector snow fences

Deflectors are used to prevent snow cornices from forming in avalanche starting zones. The most common forms of deflectors are jet roofs and Kolktafeln (turbulence generators).

The jet roof consists of a single, broad, roof-like deflection member that has a horizontal longitudinal axis. The structure is sloped so that the downwind edge is closer to the ground than the upwind edge. By accelerating the airflow and deflecting it downward, this structure promotes turbulent entrainment of the blowing snow particles and causes the snow to be carried farther downwind before it is deposited. These effects can be used to eliminate snow cornices at the tops of cuts or in avalanche starting zones downwind of mountain ridges.



Figure 26 : Jet roof. Photo from www.avalanche-center.org

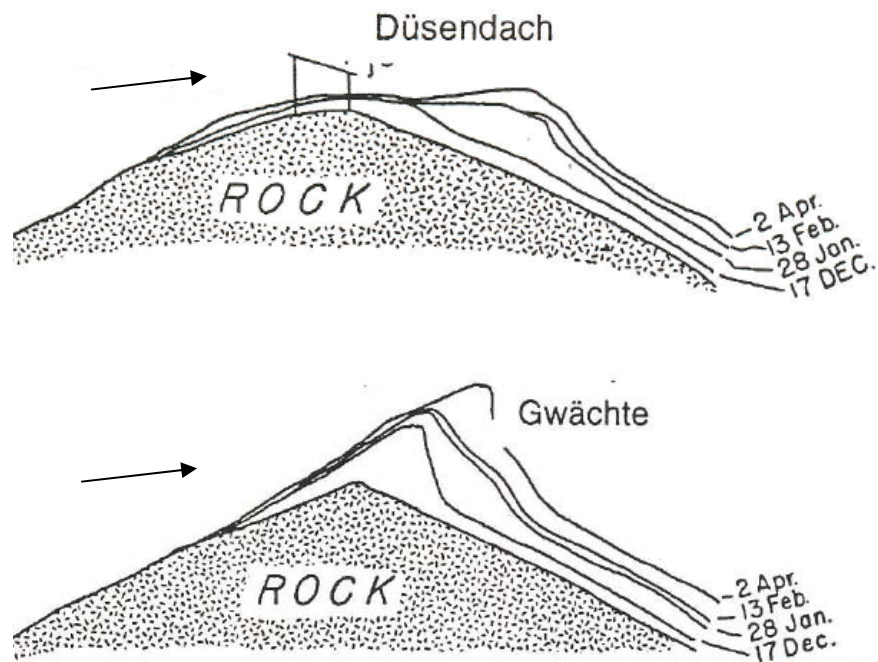


Figure 27 : Influence of a Jet roof compared to a location that is 9 meters away from the jet roof (Bridger Range, Montana, 1966)

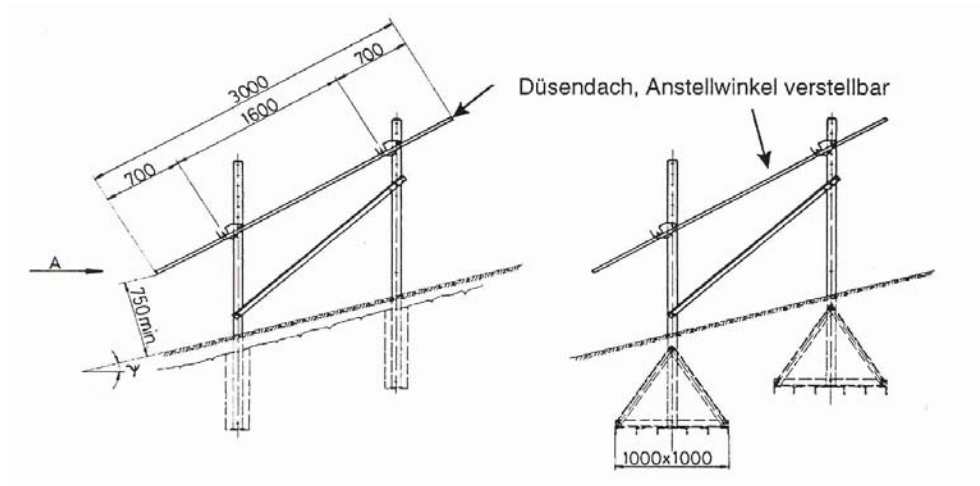


Figure 28 : Type Voest-Alpine Jet roof

The **Kolktafeln** prevent the formation of a continuous snow cover. The deposition of snow can be influenced in a certain zone, such as the probability of avalanches is reduced. However, the influenced zone is limited (few decametres). This type is often seen in Switzerland above supporting structures, to prevent cornices or to reduce an overload of snow in supporting structures.



Figure 29 : Kolktafeln prevent the formation of a continuous snow cover, Dimension of the Kolktafel: height = 4 m, largest width = 4 m. Photo. Gian Cla Feuerstein, AfW Zuoz, Switzerland, 2008



Figure 30 : Kolktafeln, to reduce the formation of cornices above the Berninapass Road in Switzerland.
Photo. Gian Cla Feuerstein, AfW Zuoz, Switzerland, 2008

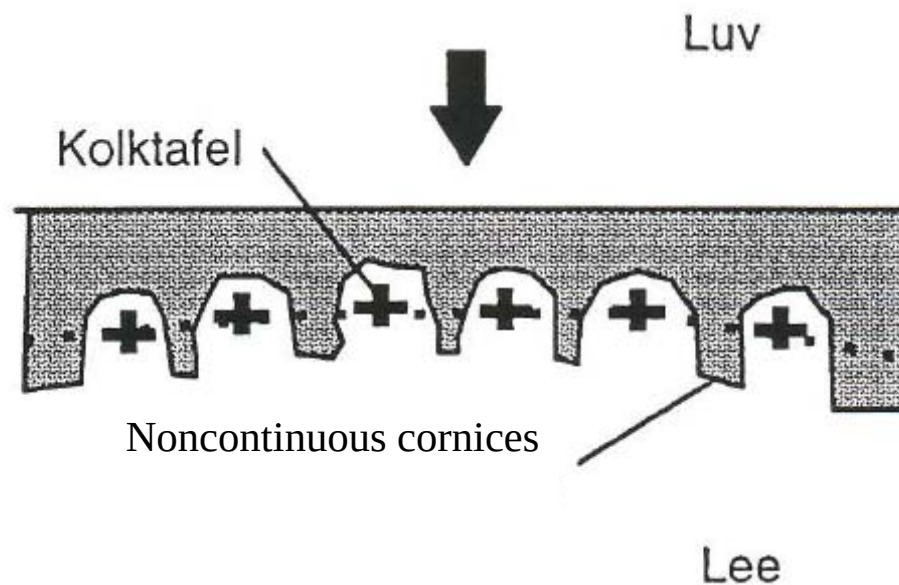


Figure 31 : Kolktafeln prevent the formation of a continuous cornice (Margreth, 1997)

Bibliography

- [1] BUWAL (2004): Typenliste Lawinenverbauungen. Aktuelle Ausgabe vom 15. Januar 2004. Reihe: Vollzug Umwelt, Bestellnummer: VU-7504-D.
- [1] Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Hrsg.) (2000): Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. 588 S.
- [1] HAKONARDOTTIR, K.M ET AL. (2003): A laboratory study of the retarding effect of breaking mounds on snow avalanches. Journal of Glaciology, Vol. 49. 2003, 165.
- [2] LIED, K. (2002): Snow Avalanche Research Programme SIP-6, Rygfonn. Full scale avalanche test site and the effect of the catching dam. NGI-Report No. 581200-35, Oslo, 28.2.2002.
- [3] MCCLUNG, D. AND SCHAEERER, P. (1993): The Avalanche Handbook, The Mountaineers, Washington
- [4] MARGRETH, S., HARVEY, S. AND WILHELM, C. (2000): Effectiveness of long-term avalanche defence measures in Switzerland in Winter 1999 in Switzerland. Proc. Int. Snow Science Workshop ISSW, Big sky, Montana, US, October 1-6, 2000, p.501-508.
- [5] MARGRETH, S. (1996): Experiences on the use and the effectiveness of permanent supporting structures in Switzerland. Proc. Int. Snow Science Workshop ISSW, Banff, Canada, October 6-10, 1996, p.233-238.
- [6] MARGRETH, S (1995): Snow pressure measurements on snow net systems, Proceedings of ANENA Symposium, Chamonix, 1995
- [7] MEARS, A.I. (1992): Snow-Avalanche Hazard Analysis for Land-Use Planning and Engineering, Colorado Geological Survey, Department of Natural Resources, Denver, p. 54
- [8] TABLER, RONALD D. AND ROBERT L. JAIRELL. (1993): Trapping efficiency of snow fences and implications for system design. Transportation Research Record 1387, Snow Removal and Ice Control Technology (Papers presented at a Symposium Sept. 14-18, 1992, Minneapolis, MN). Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, pp. 108-114.
- [9] NORWEGIAN PUBLIC ROADS ADMINISTRATION (1994): Snow Engineering for Roads, Oslo, Handbook Serial No. 174, 102 p.
- [10] SALM, B. (1994): Snow slab release, its mechanism and conclusion for the arrangement of supporting structures, Defence Science Journal, New Dehli, Vol 45, No 2, April 1995, p.125-129
- [11] SALM, B. (1988): Vorlesung über Schnee, Lawinen und Lawinenschutz, Zürich, VAW, 277 p.
- [12] TABLER, R. (1991): Snow Fence Guide, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC 1991.

- [13] U.S.Department of Agriculture Forest Service (1975): Avalanche protection in Switzerland, General Technical Report RM-9, Fort Collins, 168 p.
- [14] VÖGELI, TH. P.(1996): Erkenntnisse aus Freilandmodellversuchen für den Einsatz von Tribschneezäunen im Gebirge. Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- [15] WILHELM, CHR. (1999): Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen. Vorgehen, Beispiele und Grundlagen der Projektevaluation. Vollzug Umwelt, Praxishilfe, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, 1999, 100 S.
- [16] MARGRETH, M. (1997): Schneeverwehungsverbau: Grundregeln für das Erstellen von Verwehungsverbauungen. FAN-Kurs, Verbier.
- [17] TABLER, R.D (2003) : Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design, Final Report, Tabler and Associates Niwot, Colorado.
- [18] Federal Office for the Environment FOEN, WSL Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Bern 2007.

Un résumé des récents développements théoriques et pratiques concernant le dimensionnement des digues paravalanches

Thierry Faug¹

Résumé. La présente note de cours résume les développements théoriques et pratiques récemment réalisés au niveau européen concernant le dimensionnement des ouvrages de protection passive contre les avalanches de neige : les digues d'arrêt, les digues de déviation et les tas freineurs. Après un bref historique du génie paravalanche et une description des principales fonctions des ouvrages de protection passive -déviation, freinage et arrêt- (partie 1), le dimensionnement fonctionnel de ces ouvrages est présenté. Les méthodes traditionnelles de dimensionnement pour calculer la hauteur d'une digue paravalanche sont d'abord rappelées (partie 2). Après quelques mots sur l'avalanche de projet contre laquelle on cherche à se protéger (partie 3), on met l'accent sur les développements théoriques récents qui ont conduit à la formulation de nouveaux critères de dimensionnement pour le calcul de la hauteur des digues de déviation et d'arrêt : ces critères sont basés sur les ressauts granulaires (variation brutale de la hauteur et de la vitesse de l'avalanche) susceptibles de se former en amont de l'obstacle et sont valides pour les avalanches rapides de neige sèche (partie 4). Ensuite, des considérations particulières concernant d'abord les digues de déviation (partie 5) puis les digues d'arrêt (partie 6) sont évoquées. Le cas des avalanches de neige humide est également considéré (partie 7). Les digues d'arrêt sont souvent combinées à la mise en place de tas freineurs ; leurs nouveaux critères de dimensionnement sont présentés (partie 8). Les ouvrages de protection passive sont d'abord dimensionnés pour lutter contre les avalanches de neige dense ; leur effet sur les avalanches en aérosol est aussi traité (partie 9). Enfin, la note de cours se termine sur des éléments concernant le calcul de la force exercée par les avalanches sur les ouvrages de protection (partie 10).

¹ Cemagref, Unité de Recherche ETNA, BP 76, F-38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex
Tel : +33 (0)4 76 76 28 28 ; fax : +33 (0)4 76 51 38 03 ; e-mail : thierry.faug@cemagref.fr

A summary of recent practical and theoretical developments about the design of snow avalanche protection dams

Thierry Faug¹

Abstract. The present textbook summarizes the practical and theoretical developments recently made at the European level about the design of protection structures against snow avalanches: catching dams, deflecting dams and retarding mounds. After a short history of avalanche engineering and a description of the main functions of passive defence structures –deviation, breaking and stopping- (section 1), the functional design of these structures is presented. Firstly, the classical design methods which allow the calculation of the protections dams' height is reminded (section 2). After some words on the project avalanche ones wants to fight against (section 3), the report focuses on the recent theoretical developments leading to the formulation of new design criteria in order to calculate the height of catching and deflecting dams: these criteria are based on the granular jumps (sudden change in avalanche flow and velocity) likely to occur upstream of the obstacle and are valid for rapid avalanches of dry snow (section 4). Then, specific considerations about catching (section 5) and deflecting dams (section 6) are described. The case of dense avalanches of humid snow is also considered (section 7). The catching dams are often combined with the construction of retarding mounds; their new design criteria are presented (section 8). The passive defence structures are first designed to fight against dense snow avalanches; their effect on aerosols is also tackled (section 9). Finally, the textbook ends on some considerations about the calculation of the avalanche force exerted on protection structures (section 10).

¹ Cemagref, Unité de Recherche ETNA, BP 76, F-38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex
Tel : +33 (0)4 76 76 28 28 ; fax : +33 (0)4 76 51 38 03 ; e-mail : thierry.faug@cemagref.fr

1. Introduction

1.1. Une petite histoire du génie paravalanche

Le génie paravalanche peut se définir comme « le corps de connaissances nécessaires à l'étude des avalanches et à la conception des moyens de protection spécifiques » [1]. Contrairement à beaucoup de croyances, le génie paravalanche n'est pas récent puisque dès le XVIII^{ième} siècle, des actions de défense organisée contre les avalanches ont été mises en place en France et en Suisse. Plusieurs étapes ont marqué le développement du génie paravalanche : il y a d'abord eu le savoir empirique des populations montagnardes (Cf. Figure 1), puis les premières recherches menées par les services forestiers à la fin du XIX^{ième} s., suivies des études des géographes au début du XX^{ième} s., les développements des ingénieurs civils au milieu du XX^{ième} s., et enfin l'ère des numériciens qui, par leurs simulations, ont permis de définir plus quantitativement l'avalanche de projet visant à définir la stratégie de protection. Pour en savoir plus sur la petite histoire du génie paravalanche, on pourra consulter l'article de C. Ancey [1].

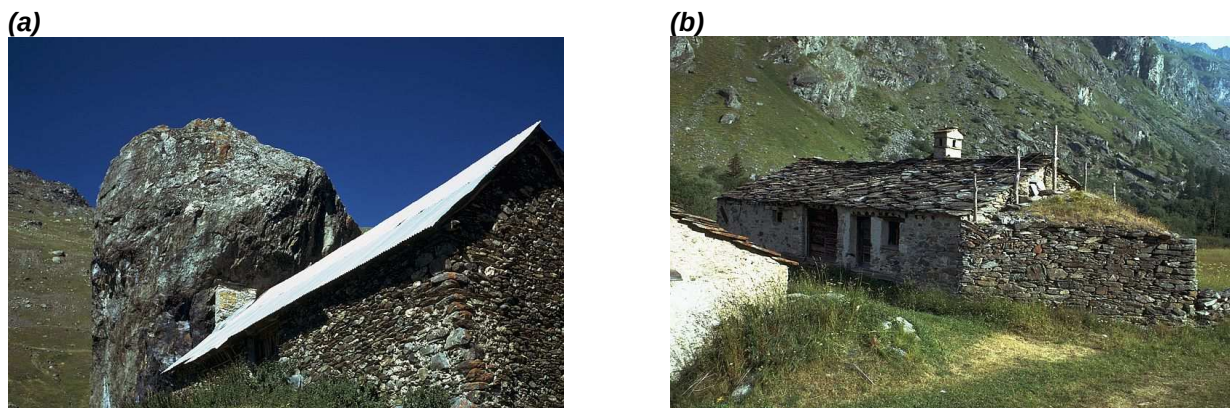


Figure 1: (a) étrave naturelle à Clavans le Haut, Isère et (b) étrave construite à Val d'Isère, Haute-Savoie (photos F. Valla, Cemagref)

La présente note de cours n'est pas exhaustive. Elle résume les méthodes de dimensionnement des principaux ouvrages de protection permanente passive. L'accent est mis ici sur les développements théoriques et pratiques récemment développés au niveau européen pour le dimensionnement des digues paravalanches (déviation et arrêt) ainsi que des tas freineurs.

1.2. Les différents ouvrages de protection permanente passive

La **protection permanente passive**¹ vise à installer des ouvrages fixes et pérennes dans la zone d'arrêt de l'avalanche (ou parfois en zone d'écoulement). On admet le départ de l'avalanche et on vise à lutter contre l'avalanche et à limiter ses effets sur les

¹Cette terminologie est généralement utilisée en France mais des différences existent selon les pays.

enjeux situés en aval. On peut distinguer trois fonctions essentielles des ouvrages de protection permanente passive associées à divers types d'ouvrages [2] [3]:

- **La déviation** de l'écoulement : digue de déviation ou tourne (déviation sur le côté dans une direction), galerie ou tunnel, toit-tremplin (déviation vers le haut), étrave (déviation vers le côté dans deux directions) ;
- **Le freinage** de l'écoulement : tas freineurs et dents freineuses ;
- **L'arrêt** de l'écoulement : digue d'arrêt.

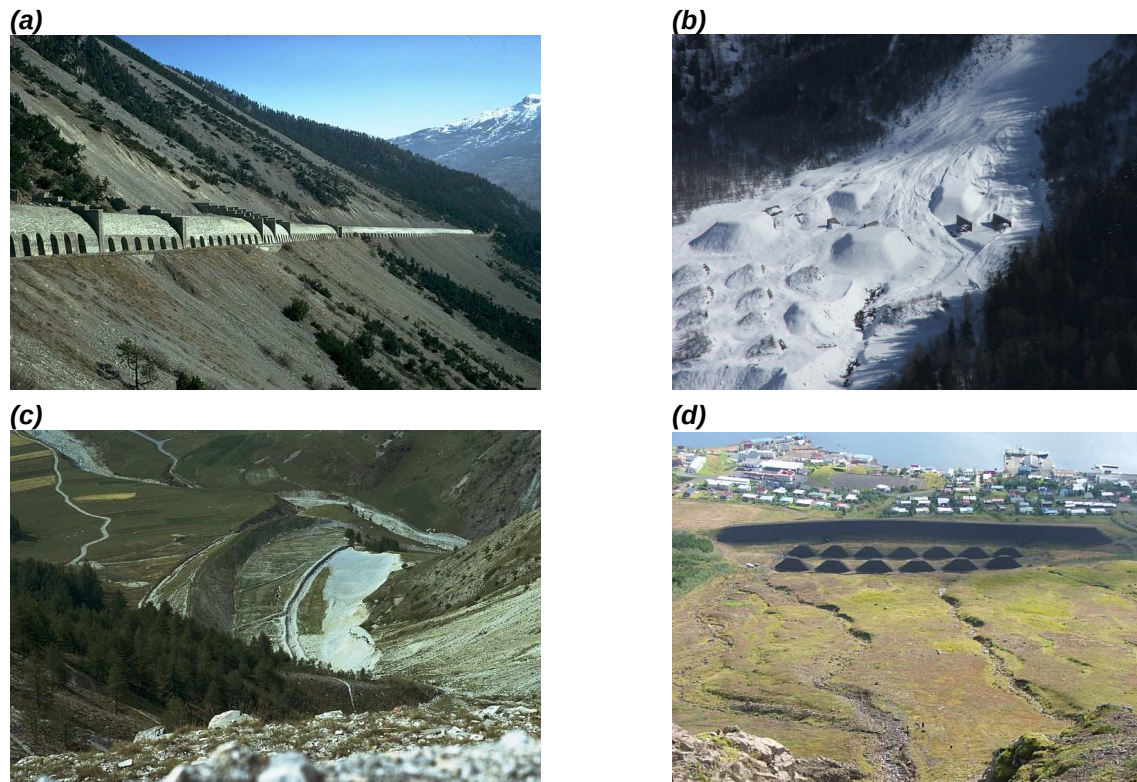


Figure 2: Les principaux types d'ouvrages de protection permanente passive : (a) tunnel paravalanche à Montgenèvre, Italie (photo, F. Valla, Cemagref), (b) tas freineurs à Taconnaz, Haute-Savoie, France (photo T. Faug, Cemagref), (c) tourne à Larche, Alpes-Maritimes, France (photo F. Valla) (d) tas freineurs et digue d'arrêt à Neskaupstadur, Islande (photo T. Faug).

2. Le dimensionnement traditionnel des digues paravalanches

2.1. Introduction

De nombreuses méthodes ont été utilisées pour concevoir des digues paravalanches. Certaines, largement utilisées dans des pays Alpains [4], reposent sur l'idée d'assimiler l'avalanche à un point matériel. D'autres méthodes reposent sur la description de la dynamique du front principal de l'avalanche [5]. Enfin d'autres méthodes s'appuient sur les calculs numériques de la trajectoire d'un point matériel sur la face amont de la digue [6] [7]. Nous rappelons ici les grands principes du dimensionnement des digues paravalanches d'arrêt et de déviation.

2.2. Les digues d'arrêt

La hauteur de la digue H_D est la somme de trois contributions : (i) la hauteur de neige déjà en place², h_s , (ii) la hauteur de l'écoulement incident, h_f , (iii) la hauteur additionnelle requise due à l'énergie cinétique de l'écoulement incident, h_u (Cf. Figure 3.a). On utilise donc la formule suivante : $H_D = h_s + h_f + h_u$. La hauteur h_u est calculée en transformant toute (ou une part de) l'énergie cinétique de l'écoulement incident en hauteur équivalente : $h_u = u^2 / (2g\lambda)$. Dans cette dernière formule, u est la vitesse de l'avalanche à l'emplacement où l'on souhaite implanter la digue. λ est un coefficient empirique qui tient compte (i) de l'énergie dissipée à l'impact avec la digue et (ii) des pertes d'énergie due au frottement de l'avalanche sur la face amont de la digue qu'elle cherche à franchir. Il varie en général de 1 (avalanches extrêmes à grands volumes) à 2, parfois 3 (avalanches de plus faible ampleur). L'efficacité de la digue d'arrêt dépend [2] :

- de la *rectitude du parement amont* : la solution idéale est un parement amont vertical (en dessous de 60°, l'efficacité diminue : Cf. partie 4.7) ;
- de la *pente du terrain amont* qui doit être suffisamment faible, de l'ordre de 10-15° ;
- du *volume de l'avalanche* : il faut vérifier que l'espace disponible à l'amont de la digue est suffisant pour stocker tout le volume (attention au risque d'avalanches multiples sur un même hiver) ; il est généralement calculé en traçant une ligne d'inclinaison de quelques degrés depuis le dessus de la digue : au maximum 5 à 7° pour la neige humide et moins de 5° pour la neige sèche [2] (Cf. partie 6.1).

L'utilisation d'une digue d'arrêt seule est déconseillée. On préconise de combiner la digue d'arrêt avec un dispositif d'ouvrages freineurs et déflecteurs (dents ou tas) situés en amont (Cf. Figure 3) pour (i) réduire l'énergie de l'avalanche (rôle de freinage) et (ii) augmenter la capacité de stockage à l'amont (rôle d'étalement). Le dimensionnement des tas freineurs est décrit dans la partie 8.

2.3. Les digues de déviation

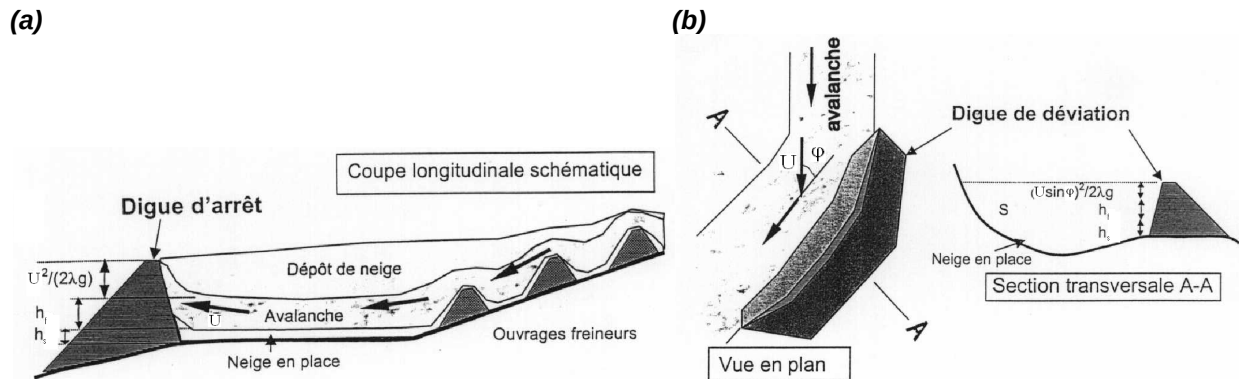
Une formule équivalente à celle utilisée pour la digue d'arrêt est utilisée pour les digues de déviation en remplaçant le terme liée à l'énergie cinétique incidente par $h_u = (u \sin \varphi)^2 / (2g\lambda)$. φ est l'angle de déviation de la digue (Cf. Figure 3.b). Dans ce cas, une valeur de 1 est souvent préconisée³ pour le coefficient λ . L'efficacité de la digue de déviation dépend [2] :

- de l'*angle de déviation* : la déviation doit se faire progressivement, des problèmes de débordement à l'aval pouvant survenir en liaison avec les dépôts de neige en amont de la digue ; on préconise généralement une valeur maximale de 30° ;

²Attention : cette hauteur peut être non négligeable (haute altitude, emplacement fortement soumis à des accumulations de neige dues au transport de neige par le vent, avalanche antérieure à l'avalanche de projet) (Cf. partie 4.9).

³Cela doit être considéré comme une mesure de sécurité liée à l'incertitude (manque de connaissances) concernant l'angle de déviation et aussi pour prendre en compte les forces internes de pression qui tendent à augmenter la hauteur atteinte sur la digue de déviation.

- de la *pente du terrain amont* : en zone peu pentue (typiquement moins de 15°), le risque de remplissage et de réduction de la hauteur effective est plus fort (faible énergie cinétique de l'avalanche) ;
- de la *rectitude du parement amont* : l'efficacité augmente avec la raideur de la face amont (on peut atteindre 45° avec des renforcements internes à la digue, 60° avec des géotextiles et même plus avec un parement en enrochements ou béton armé).



3. Quelques mots sur la dynamique de l'avalanche de projet

3.1. Les différents types d'écoulement

Avant de dimensionner un ouvrage de protection permanente passive, il s'agit de définir l'**avalanche de projet** contre laquelle on veut se protéger. Elle est généralement définie par sa hauteur et sa vitesse. Il existe trois grands types d'avalanches :

- les avalanches **denses** (ou coulantes),
- les avalanches **en aérosol**,
- les avalanches **mixtes** (partie dense surmontée d'un aérosol).

En mettant en place des ouvrages de protection permanente passive on cherche à se protéger contre la partie dense de l'écoulement. Aucun ouvrage n'est capable d'arrêter un aérosol ! Dans ce cas, on devra considérer le risque résiduel lié à l'aérosol (Cf. partie 9) en veillant à ce que le risque en aval ne soit pas aggravé. Lorsque l'on parle d'avalanches denses, on omet de préciser une caractéristique importante de la neige dense en écoulement : sa teneur en eau liquide. Il faut distinguer deux types : (i) les avalanches denses de neige **sèche** et (ii) les avalanches denses de neige **humide**.

3.2. Les différentes phases dans le temps de l'avalanche

L'avalanche est un phénomène transitoire généralement décrit comme la succession de trois phases : (i) le front d'avalanche, (ii) le corps de l'avalanche (maximum en hauteur ou phase quasi-stationnaire en fonction du volume de l'avalanche), et (iii) la queue d'avalanche. Or l'avalanche de projet est souvent définie par sa hauteur maximale et sa vitesse moyenne maximale dans le corps de l'avalanche à une position donnée

(emplacement de l'ouvrage projeté) alors que les grandeurs u et h varient fortement dans le temps. Pour décrire plus quantitativement la dynamique de l'avalanche et son interaction avec l'ouvrage, la simulation numérique et le modèle réduit de laboratoire peuvent s'avérer être des outils complémentaires très efficaces à mettre en œuvre en plus des calculs préconisés dans cette note (Cf. l'exemple de Taconnaz, France [8]).

3.3. Le nombre de Froude

L'avalanche est donc généralement définie par sa vitesse et sa hauteur. Il est judicieux d'introduire ici un nombre dimensionnel important bien connu des hydrauliciens : le nombre de Froude, noté Fr . Le carré du nombre de Froude⁴ est défini comme le rapport entre l'énergie cinétique de l'écoulement (proportionnelle à la vitesse au carré u^2) et son énergie potentielle (proportionnelle à la hauteur de l'écoulement h) : $Fr^2 = u^2/(gh)$. Pour une épaisseur similaire, les avalanches rapides (inversement lentes) de neige sèche (inversement humide) sont caractérisées par un Froude élevé (inversement faible).

3.4. Retour sur les formules classiques de dimensionnement des digues

On peut revenir sur les formules traditionnelles précédemment présentées et les exprimer en valeur de hauteur normalisée. La hauteur de la digue normalisée par la hauteur de l'écoulement incident est ainsi égale à :

$$\frac{H_D}{h_f} = \frac{h_s}{h_f} + 1 + \frac{(Fr \sin \varphi)^2}{\lambda}$$

Pour la digue d'arrêt, on a $\sin \varphi = 1$ ($\varphi = 90^\circ$). Si la hauteur de neige déjà en place est nulle ou négligeable devant la hauteur de l'écoulement incident ($h_s/h_f \ll 1$) alors la formule se réduit à $H_D/h_f = 1 + Fr^2/\lambda$. Cette transformation permet de faire apparaître le nombre de Froude et de comparer ces formules traditionnelles aux développements théoriques récents présentés par la suite.

4. Nouveaux critères de dimensionnement pour les digues

4.1. Introduction

Une amélioration importante des connaissances concernant l'interaction des avalanches de neige avec les digues et d'autres formes d'obstacles a été réalisée durant la décennie 2000-2010 à l'aide d'analyses théoriques combinées à des expériences de laboratoire en modèle réduit avec des granulaires, des simulations numériques et des observations en nature. Cela a conduit à la formulation de nouveaux critères de dimensionnement des digues sur la base des concepts de *débordement supercritique* et de *hauteur d'écoulement à l'aval d'un ressaut*. Ces critères sont

⁴En hydraulique à surface libre, le nombre de Froude est défini comme le rapport entre la vitesse moyenne de l'écoulement, u , et la célérité des ondes de gravité, $(gh)^{1/2}$. Un ressaut hydraulique (discontinuité en hauteur et vitesse) se forme lorsque l'on passe d'une pente forte à une pente faible, ce qui marque le passage d'un écoulement supercritique ($Fr > 1$) à subcritique ($Fr < 1$).

détaillés dans le guide européen paru en 2009 [9]⁵ et la suite de cette note de cours s'appuie en grande partie sur ce guide avec quelques mises à jour. Il faut garder à l'esprit que la connaissance de l'interaction écoulement-obstacle est encore incomplète et que la formulation de ces nouveaux critères reste encore basée sur des considérations subjectives ou partiellement justifiables.

4.2. Les avalanches granulaires de neige !

La neige qui tombe du ciel et forme le manteau neigeux a une structure granulaire (Cf. les différents types de *grains* dans [10]). La neige dense en écoulement est constituée d'*agrégats* [11] [12] et présente des *seuils* d'arrêt et d'écoulement [13] [14]. Les *profils de vitesse* [13] [15] sont typiques des écoulements granulaires cohésifs ou bi-disperses : une couche basale fortement cisailée, constituée de petits grains, est surmontée d'une couche plus faiblement cisailée, constituée d'agrégats [13]. Ces propriétés particulières de la neige justifient, faute de plus de connaissances, l'utilisation de matériaux granulaires en laboratoire pour modéliser les écoulements de neige et pour étudier en particulier l'interaction écoulement-obstacle (Cf. par exemple [16] [17] et les références citées). Les résultats présentés par la suite sont issus de théories validées sur des expériences de laboratoire avec des granulaires et en partie confrontées à des cas d'avalanches de neige réelle (Cf. partie 4.10). L'ensemble des calculs préconisés par la suite sont plus faciles à justifier pour les écoulements rapides de neige sèche (Froude élevé typiquement supérieur à 2-3) où « l'analogie granulaire-neige » est pertinente, que pour les écoulements plus lents de neige humide. Le cas complexe de la neige humide est traité dans cette note de cours (Cf. partie 7).

4.3. Géométrie de la digue et notation

La Figure 4 montre la géométrie complète d'une digue de déviation en tenant compte :

- de la topographie (pente locale ψ),
- de la pente de la face amont de la digue (α),
- de l'angle de déviation de la digue (φ).

En toute rigueur, il faut distinguer la hauteur de digue H_D , correspondant au runup vertical (dont nous avons parlé jusqu'à présent) d'une part, et la hauteur normale au terrain, H , d'autre part. Ces deux hauteurs sont reliées par l'égalité géométrique:

$$H_D = \frac{\cos\psi - \sin\varphi \sin\psi \cot\alpha}{1 - \cos^2\varphi \sin^2\psi} H.$$

Les hauteurs H_D et H sont généralement voisines car les digues sont généralement construites sur des pentes faibles. Sur des pentes plus raides, cette équation doit être prise en compte. Dans toute la suite de la présente note, on raisonnera sur des quantités exprimées dans un système de coordonnées aligné avec le terrain, donc sur

⁵Une version française du guide [9] est disponible (traduction par M. Naaim, T. Faug, F. Naaim-Bouvet).

une hauteur homogène à H . La hauteur de runup de l'avalanche au dessus de la neige déjà en place sera notée h_r . En tenant compte de h_r , on a l'égalité : $H=h_r+h_s$.

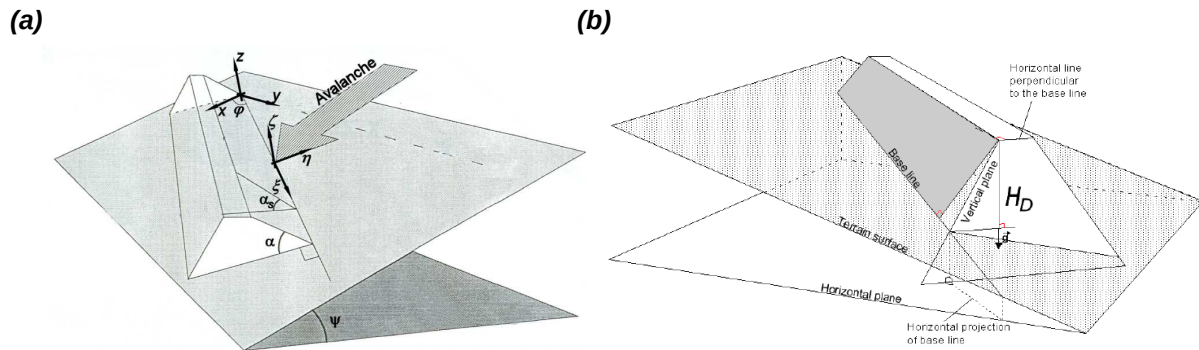


Figure 4: Schéma montrant la géométrie générale de la digue de déviation : (a) notations et (b) définition de la hauteur H_D .

4.4. Dynamique de l'écoulement contre les digues

Les avalanches de neige sèche sont généralement dans un régime supercritique avant d'impacter l'ouvrage, avec un nombre de Froude $Fr > 1^6$.

- Le **premier critère** déterminant pour le dimensionnement de la hauteur de digue est d'éviter la propagation de l'écoulement supercritique en aval de la digue. Si ce débordement supercritique est impossible, la dynamique des fluides prédit la formation d'un ressaut à l'amont de la digue ;
- Le **second critère** de dimensionnement est alors de veiller à ce que la hauteur de digue soit supérieure à la hauteur d'écoulement en aval du ressaut pour éviter le débordement.

La combinaison de ces deux critères constitue la base des recommandations qui sont proposées dans cette note de cours.

4.5. Débordement supercritique

La hauteur de digue doit être supérieure à la hauteur critique, $H_{cr}+h_{cr}$, pour éviter un débordement supercritique à l'aval. En valeur de hauteur de digue normalisée par la hauteur de l'écoulement incident, h_1 , cela revient à la formule suivante⁷ :

$$\frac{H_{cr} + h_{cr}}{h_1} = \frac{1}{k} + \frac{1}{2}(kFr_{\perp})^2 - \frac{1}{2}(kFr_{\perp})^{2/3}.$$

Le nombre de Froude $Fr_{\perp}$ est défini par : $Fr_{\perp} = Fr \sin \varphi = \frac{u_1 \sin \varphi}{\sqrt{gh_1 \cos \psi}}$.

⁶Ce critère pour l'écoulement supercritique s'applique à des contraintes internes décrites par une distribution de pression hydrostatique. D'autres rhéologies peuvent conduire à des critères différents pour séparer le régime supercritique du régime sub-critique.

⁷La formule proposée résulte de la somme de deux grandeurs (choix allant dans le sens de la sécurité) : H_{cr} est la hauteur critique au dessus de laquelle l'écoulement passe d'un régime supercritique à un régime sub-critique (formation d'un ressaut) et h_{cr} est la hauteur de l'écoulement formé au dessus de la hauteur critique H_{cr} .

La Figure 5 peut être utilisée pour calculer $H_{cr}+h_{cr}$ avec les hypothèses suivantes : $k=1$ (perte de quantité de mouvement à l'impact nulle). On donne également les prédictions des formules traditionnelles avec $\lambda=1$ en terrain horizontal ($\psi=0^\circ$) sans tenir compte de la hauteur de neige éventuellement déjà en place.

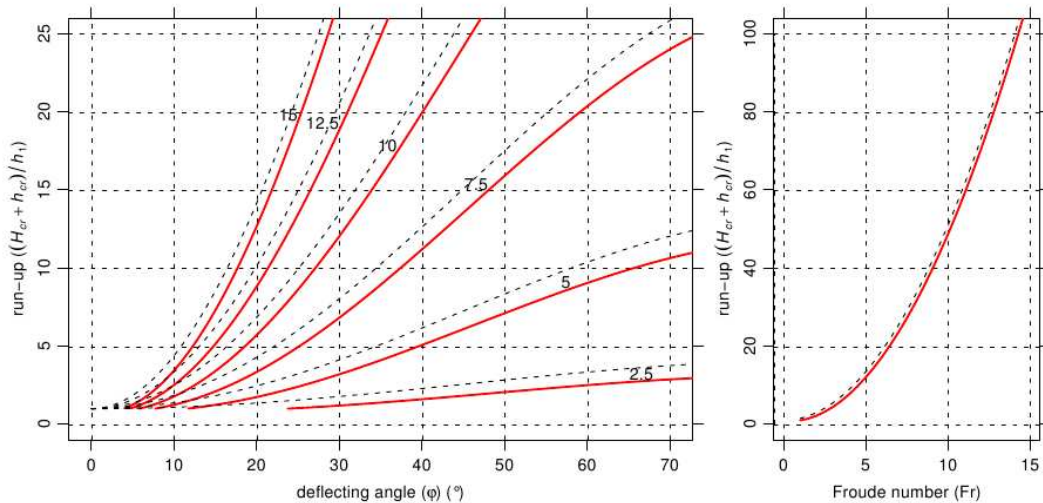


Figure 5: Courbe donnant le runup supercritique, $H_{cr}+h_{cr}$, normalisé par la hauteur de l'écoulement incident, h_1 , en fonction : de l'angle de déviation pour la digue de déviation pour différents nombres de Froude (à gauche) et du nombre de Froude pour la digue d'arrêt (à droite).

4.6. Ressaut amont

Si la digue est suffisamment haute pour empêcher un débordement supercritique :

- Un ressaut normal se propagera en amont d'une digue d'arrêt ;
- Un ressaut oblique semi-stationnaire pourra se former en amont de la digue de déviation.

La formule théorique donnant la hauteur du ressaut est :

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{3} \left(2\sqrt{(6Fr_\perp^2 + 4) \cos \delta} + 1 \right).$$

L'angle δ est une fonction complexe de $Fr_\perp$ que nous ne donnerons pas ici (Cf. [9] pour les détails). C'est la solution exacte pour la digue d'arrêt et une bonne solution approchée pour la digue de déviation. La Figure 6 peut être utilisée pour calculer h_2 .

Pour chaque valeur du nombre de Froude, un ressaut oblique, stationnaire et attaché est dynamiquement possible seulement si l'angle de déviation ne dépasse pas une valeur maximale φ_{max} donnée par la solution approchée [9] :

$$\varphi_{max} = \frac{\pi}{2} - \frac{2^{3/4}}{Fr^{1/2}} - \frac{2^{1/4}}{6Fr^{3/2}} + O\left(\frac{1}{Fr^{5/2}}\right).$$

On préconise que l'angle de déviation soit choisi à une valeur d'au moins 10° à cet angle maximal φ_{max} (Cf. solution graphique dans [9]).

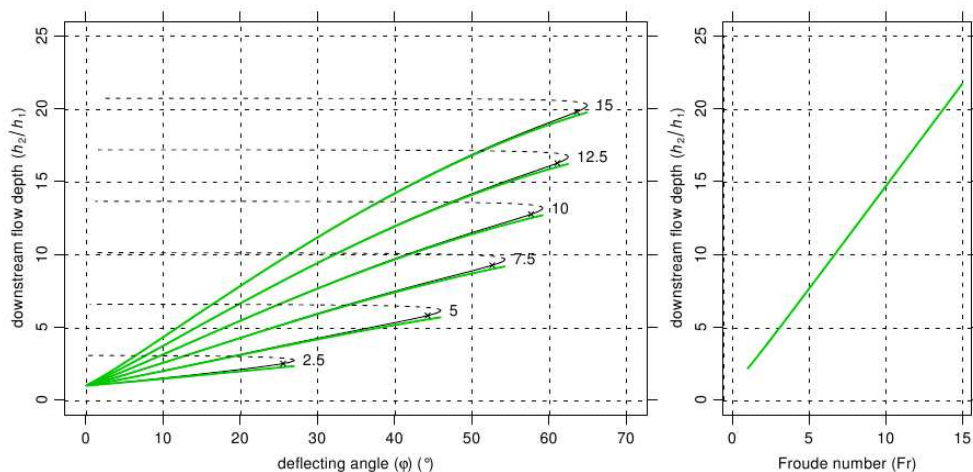


Figure 6: Courbe donnant la hauteur de ressaut normalisée, h_2/h_1 , en fonction : de l'angle de déviation pour la digue de déviation (à gauche) et du nombre de Froude pour la digue d'arrêt (à droite).

4.7. Perte de quantité de mouvement à l'impact

La discussion précédente et les graphes fournis ont été donnés en négligeant la perte de quantité de mouvement (ou d'énergie cinétique) : $k=1$. C'est le scénario le pire allant dans le sens de la sécurité. Les digues à face amont très raide (avec un fruit typiquement supérieur à 60°) sont plus efficaces et produisent des pertes d'énergie à l'impact. Cette discussion rejoint le choix de λ dans le dimensionnement traditionnel des digues. Faute d'un cadre théorique établi, et sur la base d'expériences en modèle réduit avec des granulaires, on préconise des valeurs de k dépendant de α (en degrés) [9] :

- $k=0.75$ pour $\alpha > 60^\circ$
- $k=0.75+0.1 \times (60^\circ - \alpha)/30^\circ$ pour $30^\circ < \alpha < 60^\circ$

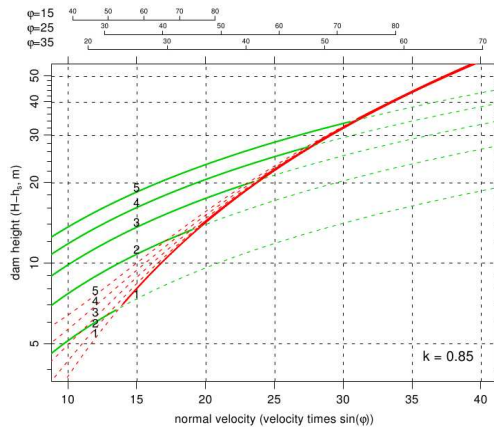
Il n'est pas conseillé de construire une digue avec un fruit inférieur à 30° , c'est pourquoi aucune valeur de k n'est donnée dans ce cas. Ces valeurs de k sont préconisées pour des avalanches de neige sèche. Pour la neige humide, les dissipations d'énergie sont probablement plus faibles (effets de la cohésion) et on préconisera une valeur de k égale à 1 allant dans le sens de la sécurité [9], en particulier en regard de leur comportement parfois très spécifique et surprenant (Cf. partie 7).

4.8. Critères combinés : débordement supercritique et hauteur de ressaut

En combinant les deux critères précédents, on peut dériver la hauteur de digue requise qui correspond au maximum de $H_{cr}+h_{cr}$ (limite de débordement supercritique) et de h_1 (hauteur d'écoulement en aval du ressaut). La Figure 7 donne les résultats graphiques qui peuvent être utilisés comme des abaques : on présente la hauteur requise, $H-h_s$, en fonction de la vitesse normale incidente pour différentes valeurs de hauteur incidente. La valeur dimensionnant la hauteur de digue est en trait épais (l'un ou l'autre des critères étant dimensionnant en fonction de la vitesse normale de l'écoulement incident). Deux cas sont présentés avec $k=0.85$ (digue en matériau lâche, peu raide) et

$k=0.75$ (digue renforcée, raide). Bien que cela doive être étudié au cas par cas, on rappelle ici qu'une valeur de k égale à 1 est plus raisonnable dans le cas d'un scénario « avalanche de neige humide » (Cf. aussi partie 7).

(a)



(b)

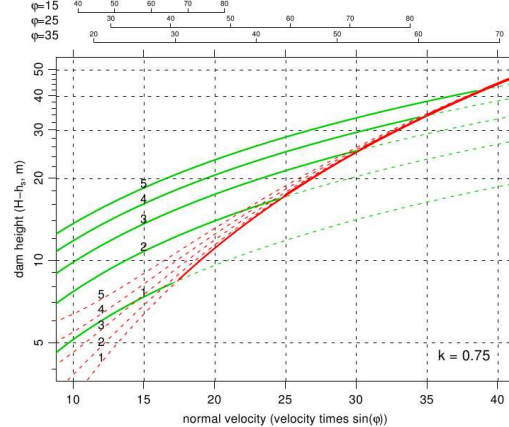


Figure 7: Combinaison des critères de débordement supercritique et de hauteur de ressaut. Hauteur de la digue diminuée de la hauteur de neige en place, $H-h_s$ (en m) en fonction de la vitesse normale, $u_1 \sin \varphi$ (en m/s), pour différentes valeurs de hauteurs, h_1 (en m): (a) $k=0.85$ et (b) $k=0.75$. Les courbes en trait épais donnent la valeur de hauteur de digue à retenir.

La comparaison de ces nouveaux critères à la formule traditionnelle, présentée dans la partie 2, montre que des digues considérablement plus hautes sont requises avec cette nouvelle méthode quand les angles de déviation et les nombres de Froude sont relativement faibles. Par exemple, les digues de déviation avec $\varphi=20^\circ$ et un écoulement à $Fr=5$ sont environ 1/3 plus hautes selon les nouveaux critères comparés à la formule traditionnelle. En valeur absolue de hauteur de digue, la différence entre les nouveaux critères et la formule traditionnelle conduit à une augmentation de runup, h_r , au dessus de la neige déjà en place, de 6-8 m à 9-10 m [9].

4.9. Hauteur de neige déjà en place

Lors du calcul de la hauteur de digue, il ne faut pas oublier de tenir compte de la contribution statique de la neige déjà en place devant la digue avant l'arrivée de l'avalanche. Trois points importants doivent être considérés dans le calcul de h_s [9]:

- on préconise une période de retour pour le calcul de la hauteur du manteau neigeux sur le site généralement égale à 50-100 ans (légèrement inférieure à celle de l'avalanche de projet [9]) ;
- la probabilité de présence du dépôt d'une avalanche antérieure doit être évaluée par une connaissance historique du site ;
- l'effet du transport de neige par le vent peut conduire à des accumulations importantes de neige à l'amont de l'ouvrage.

4.10. Confrontation des critères proposés à des observations en nature

Les résultats issus des calculs sur la base des critères de dimensionnement proposés ont été confrontés à des observations de terrain sur plusieurs sites d'avalanches en Europe (Norvège, Islande et France) : Cf. le détail de ces comparaisons dans [9].

5. Considérations particulières pour les digues de déviation

Plusieurs points importants doivent être considérés plus spécifiquement pour la construction des digues de déviation (Cf. détails dans [9]) :

- L'emplacement et la configuration de la digue : la pente du terrain doit être faible et l'écoulement doit être progressivement dévié ;
- La détermination de l'angle de déviation φ : elle est souvent directe mais en cas de géométrie complexe (inclinaison latérale de la zone d'arrêt par rapport à la direction principale de l'écoulement), une modélisation numérique est vivement conseillée ;
- L'angle maximal de déviation φ_{max} : il est recommandé que l'angle de déviation soit d'au moins 10° plus petit que φ_{max} (calculé en partie 4.6) ;
- La pente du terrain $\psi_\perp$ dans la direction normale à l'axe de la digue : si $\psi_\perp > 5^\circ$, il faut considérer un runup supplémentaire (qui provient de la force de frottement non prise en compte dans le calcul de ressaut oblique) pour les nombres de Froude faibles (Cf. détails dans [9]) ;
- La courbure le long de la digue : si elle est importante, il faut considérer un runup supplémentaire qui provient des forces centrifuges [9] ;
- Le risque d'augmentation de l'extension de l'avalanche (du fait de sa canalisation le long de la digue) dans la direction de l'écoulement dévié doit être considéré après définition de la géométrie de la digue (par modélisation numérique) ;
- Le risque d'étalement latéral de l'avalanche avant que cette dernière n'atteigne le bout de la digue : il a été quantifié pour des écoulements granulaires (l'étalement, si il se produit, augmente quand le Froude diminue) avec une théorie qui prédit un étalement de $11-21^\circ$ pour un Froude dans la gamme 5-10, ce qui est consistant avec une valeur de 20° parfois adoptée en Suisse pour ce type d'étalement (Stephan Margreth, communication personnelle 2006) ; une modélisation numérique est là encore conseillée.

6. Considérations particulières pour les digues d'arrêt.

6.1. Stockage à l'amont de la digue

La digue doit contenir le volume total de l'avalanche. Le volume est calculé sur la base :

- de l'angle de talus moyen de la neige déposée ;
- du facteur de compaction de la neige lorsqu'elle est déposée devant la digue.

Une règle empirique souvent utilisée est de considérer une pente du dépôt variant de quelques degrés: 5 à 7° pour la neige humide et moins de 5° pour la neige sèche (Cf. partie 2.2 [2]), des valeurs de 5 à 10° sont préconisées par ailleurs sans distinguer le

type de neige [3]. Le facteur de compaction est généralement pris égal à 1 mais certains experts préconisent des valeurs de l'ordre de 1.5 parfois [Stefan Margreth, communication personnelle, 2006]. Dans le guide européen [9], on préconise un angle de dépôt dans la gamme 0-10° (nul pour l'avalanche très rapide de neige sèche) et un facteur de compaction égal à 1 dans le sens de la sécurité. Comme déjà mentionné pour le dimensionnement classique, il est important de tenir compte du risque d'avalanches multiples dans le calcul du volume de stockage. Malgré toutes les précautions prises, une digue peut être débordée. C'est le cas quand survient une avalanche d'ampleur supérieure à l'avalanche de projet ! Il faut donc être capable d'évaluer la longueur de débordement potentielle en aval de la digue.

6.2. Investigations sur la longueur de débordement au-delà de la digue

Des lois d'échelle donnant la longueur de débordement en aval d'une digue ont été mises en évidence par des expériences à échelle réduite et par des mesures sur le site expérimental norvégien du Ryggfonn [18]. La forme de ces lois d'échelle est la même : la longueur de débordement normalisée par la hauteur de digue, l_{over}/H_D , est proportionnelle à l'énergie cinétique incidente normalisée, $u^2/(2gH_D)$. De ces lois d'échelle, il est possible de calculer la valeur du coefficient λ utilisé pour le dimensionnement des digues. Le coefficient λ peut être supérieur à 1-3 (valeur préconisée dans la partie 2.2) dans les expériences alors qu'il a tendance à être inférieur à 1-2 dans les observations du Ryggfonn [9] [18]. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour affiner cette loi d'échelle.

6.3. Risque résiduel, zonage en aval des digues d'arrêt

Le risque résiduel lié au débordement peut être évalué à l'aide de la formule classique pour le calcul de la hauteur de la digue d'arrêt [4] [19]⁸ ou par la loi d'échelle présentée dans la partie précédente en gardant à l'esprit qu'elle reste à valider. On préconise que ces calculs doivent être utilisés *pour indiquer la réduction de l'aléa dans des zones de constructions existantes plutôt que pour justifier l'expansion des constructions dans des zones non construites auparavant*⁹.

7. Considérations particulières pour les avalanches de neige humide

Nous avons, à plusieurs reprises, attiré l'attention sur la distinction entre les avalanches de neige sèche d'une part, et humide d'autre part. Si les progrès récents dans la compréhension des écoulements granulaires rapides ont permis de progresser sur les avalanches denses de neige sèche et de proposer des nouveaux critères de

⁸Il est fait l'hypothèse que l'énergie cinétique de l'avalanche qui déborde la digue est réduite par l'énergie potentielle correspondant à la hauteur de digue multipliée par le coefficient λ classiquement utilisé.

⁹Il faut distinguer ici les pays de législations différentes. Par exemple, en France, le zonage reste inchangé à l'aval d'une digue d'arrêt malgré l'implantation de l'ouvrage alors qu'il est parfois modifié en Suisse ou récemment en Islande [9] suite à la construction d'ouvrages.

dimensionnement, l'avalanche de neige humide peut montrer des comportements très spécifiques (qui restent aujourd'hui non, ou partiellement, expliqués) pouvant poser de sérieux problèmes lors que cette dernière interagit avec une digue (Cf. photos dans [9]):

- Dépôts épais de grands volumes conduisant au dépassement de la capacité de stockage ;
- Hauteur de dépôt importante avec phénomène de « pile-up » et débordements latéraux induits ; c'est plus la hauteur du dépôt que la vitesse de l'avalanche qui est dimensionnant dans ce cas ;
- Changement de direction de propagation très aléatoire ; cela peut être très problématique dans le cas d'une digue de déviation ;
- Transport de débris et de rochers pouvant causer une érosion importante des ouvrages (Cf. le problème des impacts de corps solides dans la partie 10).

8. Dimensionnement des tas freineurs

Il est nécessaire de combiner la construction de digues d'arrêt avec des tas freineurs visant à dissiper l'énergie de l'avalanche. Les tas freineurs contribuent à une réduction du terme cinétique h_u (formule classique) et à une augmentation de la capacité de stockage amont. On construit généralement deux rangées de tas freineurs avec un positionnement des tas en quinconce. Des recherches en modèle réduit de laboratoire ont conduit aux recommandations suivantes concernant la géométrie des tas [9] :

- *hauteur des tas* : l'efficacité des tas augmente avec la hauteur des tas jusqu'à un seuil au-delà duquel il n'y a pas de gain significatif ; pour des avalanches rapides de neige sèche on préconise une hauteur de l'ordre du double de la hauteur de l'écoulement incident [9] ;
- *face amont* : comme pour les digues, l'efficacité augmente avec la raideur de la face amont du tas ;
- *rapport d'aspect* : le rapport entre la hauteur des tas et la dimension latérale de l'aire de recouvrement devrait être voisin de 1 ;
- *distance inter-tas et nombre de tas* : à recouvrement égal, plusieurs tas étroits semblent plus efficaces que peu de tas larges.

L'interaction écoulement-tas est complexe (impact initial, déviation, jet, impact avec le sol...) et n'est pas encore comprise [9]. Sur la base d'expériences de laboratoire avec des granulaires et de connaissances à propos des ouvrages dissipateurs en hydraulique, la réduction de vitesse d'une rangée de tas freineurs est estimée à 20%, et la seconde rangée apporte une réduction supplémentaire de 10% [9].

9. L'effet des digues sur les aérosols

On aborde ici la question du risque résiduel lié à l'aérosol qui franchit la digue paravalanche. Sur la base d'expériences en modèle réduit et de simulations numériques, on fait les recommandations suivantes [9]:

- Des hauteurs réalistes de digue (issues des calculs précédents pour la partie dense) n'arrêtent pas ou ne dévient pas complètement un aérosol mais engendrent des réductions de pression significatives à l'aval de l'ouvrage ;
- La réduction de pression dépend de la hauteur de digue relative à celle de l'aérosol, qui doit donc être déterminée à l'emplacement de la digue ;
- Pour une hauteur de digue voisine de 0.3 fois la hauteur de l'aérosol, la réduction de vitesse est estimée à 20% ; à 0.2 fois la hauteur de l'aérosol, la réduction peut être considérée comme nulle ;
- La réduction de pression évoquée dans les trois items précédents doit être appliquée juste au voisinage aval de la digue, typiquement pas au-delà d'une distance égale à 2-3 fois la hauteur de digue ; cela est particulièrement vrai si la pente en aval de la digue continue à être assez forte ;
- Les digues de déviation sont plus efficaces pour dévier l'aérosol si l'angle de déviation est 45-60° plutôt que 30°, ce qui n'est pas compatible avec les principes de dimensionnement des digues pour la partie dense ; la réduction de pression due à une digue de déviation à un angle égal ou inférieur à 30° est donc du même ordre que dans le cas d'une digue d'arrêt.

Des simulations numériques de l'écoulement aérosol sont recommandées pour préciser la réduction de pression en fonction de la distance à l'aval de la digue.

10. La force des avalanches

Le problème de la force exercée par les avalanches sur les ouvrages reste une question de recherche ouverte très active à l'heure actuelle [20] [21] [22] [23] [24]. Nous n'aborderons pas en détail le problème de la force dans cette note de cours principalement dédié à l'efficacité fonctionnelle des ouvrages (forme, dimensions). On pourra consulter le guide européen [9] pour un état des connaissances concernant le calcul de la force dans diverses situations :

- *force sur un mur* (obstacle large) : pic initial de force (onde de pression) et force après pic initial (calcul de ressaut) ;
- *force sur des pylônes et des obstacles étroits* : la force est de la forme $\frac{1}{2} \rho u^2 C_x A$ avec C_x dépendant de la couche d'écoulement considérée (dense, saltation, aérosol) et de la qualité de la neige, humide ou sèche (Cf. tableau 12.1 dans [9]) ; ρ est la masse volumique de la neige et A la surface projetée de l'obstacle normalement à l'écoulement ;
- *impact de corps solides* (pouvant être transportés par l'avalanche) : un calcul basé sur l'équation de hertz décrivant un impact élastique est proposé dans le guide européen [9] ;
- *chargement statique* (reptation, fluage) : un calcul empirique est proposé pour les obstacles étroits (pylônes par exemple) dans le guide européen [9].

Le cas des galeries paravalanches (en particulier la force de frottement exercée) a été investigué récemment [25]. Les nouveaux résultats ont été pris en compte dans la dernière directive suisse concernant l'action des avalanches sur les galeries [26].

Bibliographie

- [1] ANCEY C., (2005), *Une petite histoire du génie paravalanche*, Neige & Avalanche **112** (revue de l'ANENA), 2-5.
- [2] RAPIN F., (1992), *Un résumé des techniques françaises de protection contre les avalanches*, Université Européenne d'Eté sur les risques naturels : neige et avalanches, Chamonix, 14-25 septembre 1992, Cemagref Editions, Antony, 353-362.
- [3] MARGRETH S., (2004), *Avalanche control structures*, Grenoble, course material presented at the Université Européenne d'Eté, session 2004, Courmayeur: « Avalanches: Risque, zonage et protections ».
- [4] SALM B., BURKARD A., GUBLER H. U., (1990), *Berechnung von Fliesslawinen. Eine anleitung für praktiker mit beispielen*. Mitteilung **47**, eidg. institut für schnee und lawinenforschung, davos.
- [5] CHU T., HILL G., MCCLUNG D. M., NGUN R., SHERKAT R. (1995), *Experiments on granular flow to predict avalanche runup*. Canadian Geotechnical Journal **32**, 285-295.
- [6] IRGENS F., HARBITZ C. B., DOMAAS U., OPDHAL R. (1998), *Simulations of dense snow avalanches on deflecting dams*. Journal of Glaciology **26**, 265-271.
- [7] HARBITZ C. B., DOMAAS U., ENGEN A., (2001), *Design of snow avalanche deflecting dams*. Report 5890004, NGI, Oslo, Proceedings of the 9th Interpraevent 2000 Congress, 26th-30th June 2000, Villach, Austria, **1**, 383-396.
- [8] NAAIM M., FAUG T., NAAIM-BOUVET F., ECKERT N., (2010), *Return period calculation and passive structure design at the Taconnaz avalanche path, France*, Annals of Glaciology **51**, 89-97
- [9] *The design of avalanche protection dams. Recent practical and theoretical developments*, (2009), European Commission, contributions by Barbolini M., Domaas U., Faug T., Gauer P., Hákonardóttir K. M., Harbitz C. B., Issler D., Jóhannesson T., Lied K., Naaïm M., Naaïm Bouvet F., Rammer L.
- [10] LACHAPPELLE E.R., (2001), *Field Guide to Snow Crystals*, International Glaciological Society.
- [11] BOUCHET A., NAAIM M., BELLOT H., OUSSET F., (2004), *Experimental study of dense snow avalanches: velocity profiles in quasi-permanent and fully developed flows*, Annals of Glaciology **38**, 30-34.
- [12] BARTELT P. AND MCARDELL B.W., (2009), *Granulometric investigations of snow avalanches*, Journal of Glaciology **55**, 829-833.
- [13] ROGNON P.G., CHEVOIR F., BELLOT H., OUSSET F., NAAIM M., COUSSOT P., (2008), *Rheology of dense snow flows: Inferences from steady state chute-flow experiments*, Journal of Rheology **52**, 729-748.
- [14] SOVILLA B., MCELWAINE J., SCHAEER M., VALLET J., (in press), *Variation of deposition depth with slope angle in snow avalanches: Measurements from Vallée de la Sionne*, Journal of Geophysical Research.
- [15] KERN M. BARTELT P., SOVILLA B., BUSER O., (2009), *Measured shear rates in large dry and wet snow avalanches*, Journal of Glaciology **55**, 327-338.
- [16] HAKONARDOTTIR K.M., (2004), *The interaction between snow avalanches and dams*, PhD thesis, Bristol University.
- [17] FAUG T., (2004), *Simulation sur modèle réduit de l'influence d'un obstacle sur un écoulement à surface libre. Application aux ouvrages de protection contre les avalanches de neige*, PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- [18] FAUG T., GAUER P., LIED K., NAAIM M., (2008), *Overrun length of avalanches overtopping catching dams: Cross-comparison of small-scale laboratory experiments and observations from full-scale avalanches*, Journal of Geophysical Research **113**, F03009.
- [19] BALLIFARD M. A., (2007), *Interaction between snow avalanches and catching dams*, PhD thesis, ETH Zürich.
- [20] GAUER P., LIED K., KRISTENSEN K., (2007), *On avalanche measurements at the Norwegian full-scale test-site Ryggfonn*, Cold Regions Science and Technology **51**, 138-155.
- [21] SOVILLA B., SCHAEER M., KERN M., BARTELT P., (2008), *Impact pressures and flow regimes in dense snow avalanches observed at the Vallée de la Sionne test site*, Journal of Geophysical Research **113**, F011010.
- [22] THIBERT E. AND BAROUDI D., (2008), *Avalanche impact pressure on an instrumented structure*, Cold Regions Science and Technology **54**, 206-215.
- [23] FAUG T., CHANUT B., BEGUIN R., NAAIM M., THIBERT E., BAROUDI D., (2010), *A simple analytical model for pressure on obstacles induced by snow avalanches*, Annals of Glaciology **51**, 1-8
- [24] EGLIT M., KULIBABA V.S., NAAIM M., (2007), *Impact of a snow avalanche against an obstacle, formation of shock waves*, Cold Regions Science and Technology **50**, 86-96.
- [25] PLATZER K., (2006), *Experimental investigation of avalanche forces acting on snow sheds*, PhD thesis, University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna.
- [26] *Actions d'avalanches sur les galeries de protection*, (2007), Confédération Suisse, directive de l'office fédéral des routes (OFROU).