

Conception et dimensionnement des enrochements de rivière en montagne

Autor(en): **Schleiss, Anton**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **126 (2000)**

Heft 23

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-81532>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Conception et dimensionnement des enrochements de rivière en montagne

(HYDROLOGIE)

La réalisation d'enrochements le long des rivières de montagne impose la mise en œuvre de blocs relativement volumineux, afin de garantir une sécurité suffisante en cas de crues. Compte tenu du poids important de ces éléments, une pose « bloc par bloc » est nécessaire. La technique de réalisation de ces enrochements ainsi que la morphologie particulière des rivières de montagne conditionnent leurs dimensionnement, conception et intégration dans le paysage.

Les berges des rivières de montagne sont souvent protégées contre l'érosion latérale par des enrochements. Ces cours d'eau se caractérisant par des pentes accentuées et des vitesses d'écoulement élevées, la protection contre l'érosion ne peut être garantie que par des enrochements faisant appel à des blocs d'un poids suffisant, qui peut parfois atteindre plusieurs tonnes. Pour des raisons constructives, les blocs de cette taille ne peuvent pas être mis en place en remblai, si bien qu'une pose bloc par bloc s'impose (fig. 1).



Le revêtement de rive ainsi obtenu présente des joints relativement petits par rapport à ceux d'un enrochement en remblai. Or, malgré cette différence apparente et en raison de la taille des blocs, la rugosité de surface s'avère analogue à celle d'une structure en remblai. Cela dit, le dimensionnement et la conception des enrochements des rivières de montagne posés bloc par bloc n'en présentent pas moins quelques particularités par rapport aux protections en remblai des rivières de plaine, particularités qui sont discutées dans le présent article.

Dimensionnement des enrochements construits par pose individuelle de gros blocs

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement pour les enrochements en remblai faits de blocs relativement petits [6], [8]¹, mais elles ne s'appliquent que sous réserve à des constructions formées de gros blocs dans des rivières de montagne.

Dans le cadre de la réalisation des mesures de protection de la vallée de Reuss, en Suisse centrale, de très bonnes expériences ont été faites avec la méthode de Stevens et al. [9] appliquée à l'analyse de la sécurité des enrochements. Leur résistance théorique a, en particulier, été confirmée par les résultats d'essais sur modèles physiques [7].

Le mode de dimensionnement proposé par Stevens consiste tout d'abord à calculer le coefficient adimensionnel η , égal au rapport des contraintes de cisaillement existante θ et critique θ_{cr} :

$$\eta = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{0,77 \cdot h \cdot J}{(s-1)d_B \cdot \theta_{cr}} \quad (1)$$

avec h : profondeur de l'eau (au-dessus des blocs)

J : pente moyenne du lit

s : $\rho_B/\rho_E = 2,65$

d_B : diamètre moyen du bloc

θ_{cr} : contrainte de cisaillement adimensionnelle critique

Le facteur 0,77 correspond à une contrainte de cisaillement considérée comme plus faible au pied de l'enrochement qu'au milieu de la rivière. Pour des blocs de grande taille, θ_{cr}

¹ Les chiffres entre crochets renvoient aux références données en fin d'article.

Fig. 1: Pose mécanique des blocs d'un enrochement (poids des blocs 4 – 4,5 t)

Fig. 2: Enrochement posé en une seule couche et protection contre l'affouillement au pied

Fig. 3: Ligne ondulée du pied du talus d'un enrochement dans un tronçon rectiligne d'une rivière (pente moyenne du talus 2:3) (Documents A. Schleiss)

peut prendre des valeurs qui dépassent nettement la valeur maximale selon Shields ($\approx 0,05$) [2], [3]. De plus, le lit des rivières de montagne est souvent stabilisé par des blocs résiduels (blocs d'éboulements ou blocs erratiques) qui forment un profil en long en escalier et réduisent ainsi la pente locale déterminante pour le dimensionnement. Cette pente réduite peut être prise en compte, en première approximation, en augmentant la contrainte de cisaillement critique θ_{cr} . L'expérience a montré qu'avec $\theta_{cr} = 0,1$ ces effets peuvent être considérés dans des rivières de montagne à forte pente.

Avec cette dernière hypothèse, η devient:

$$\eta = \frac{7,7 \cdot h \cdot J}{(s - 1)d_B} \quad (2)$$

La suite de la démarche, toujours selon [9], consiste à déterminer

$$\xi = \eta \frac{S_m}{\cos \alpha} \quad (3)$$

avec

$$S_m = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (4)$$

où α : talus de la rive protégée ($\tan \alpha = 1:m$)

φ : angle d'équilibre des enrochements, sans écoulement.

La sécurité de l'enrochement s'obtient finalement par:

$$S = \frac{S_m}{2} \left(\sqrt{\xi^2 + 4} - \xi \right) \quad (5)$$

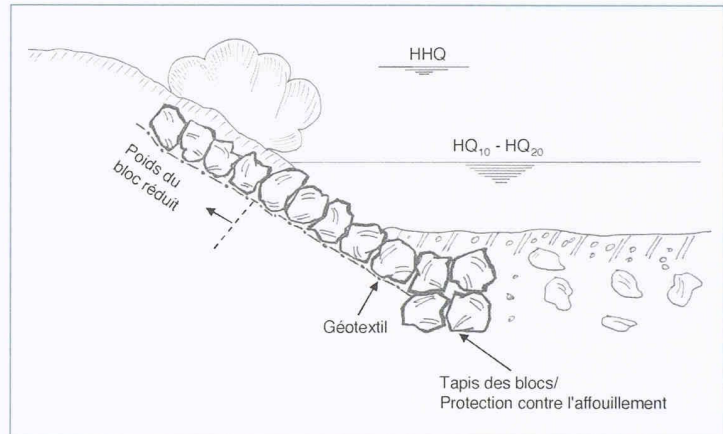
L'angle d'équilibre des gros blocs (> 1 t), sans écoulement, est considérablement plus grand que celui des enrochements en remblai (< 0,5 t). Théoriquement, de gros blocs pourraient être posés presque verticalement; cependant, pour le dimensionnement des blocs de grande taille à angles vifs, des angles φ de 50° (> 1 t) à 60° (> 2 t) sont conseillés.

Selon la période de retour des crues de dimensionnement, les coefficients de sécurité exigés varient de 1,0 (crues rares, extrêmes) à 1,3 (crues fréquentes). Dans la partie supérieure de la rive, la taille des blocs peut être réduite (fig. 2 et 5).

Protection contre l'affouillement

La sécurité à l'affouillement est déterminante pour la résistance globale des enrochements. Elle est d'une part garantie par une profondeur suffisante de la fondation des blocs de pied et de l'autre par des tapis de blocs (fig. 5). Dès que l'affouillement commence, les blocs du tapis glissent immédiatement dans la fosse d'érosion et retardent ainsi le processus.

La profondeur nécessaire de la fondation du pied de l'en-



rochement ou l'épaisseur indispensable du tapis dépendent de la profondeur d'affouillement attendue. Plusieurs théories existent pour son estimation. Par exemple, l'affouillement à l'extérieur des tronçons courbes peut être estimé selon [5], et celui causé par un écoulement en méandres, selon [2] et [10]. L'expérience montre que, pour des tronçons presque rectilignes, la profondeur de fondation nécessaire correspond approximativement à deux fois le diamètre des blocs de pied.

Aspects constructifs

Choix du tracé et pentes des talus

Même dans un tronçon rectiligne, l'enrochement d'un cours d'eau ne devrait pas être aligné géométriquement, mais disposé de manière légèrement ondulée (fig. 3). La ligne du pied de l'enrochement devrait se situer dans une bande comprise entre une à deux fois la hauteur de celui-ci. En même temps, une variation irrégulière des talus entre les parties raides (max. 4:5) et à faible pente (jusqu'à 1:2) est souhaitable. Le choix d'un tracé et de pentes de talus variés présente les avantages suivants:

- l'aspect qu'offre une mesure de protection de rive très géométrique et monotone est évité en faveur d'une rive plus naturelle;

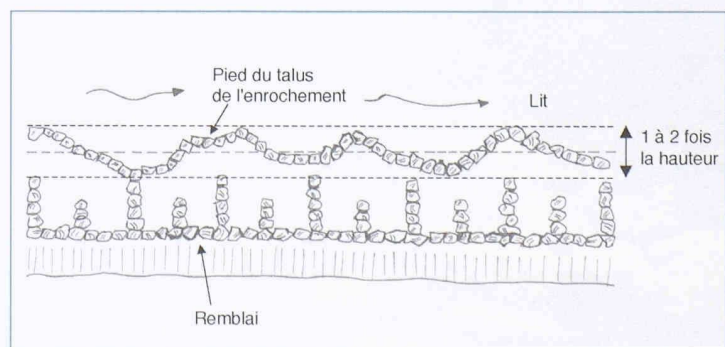


Fig. 4: Rugosité de surface des enrochements selon le mode de disposition

Fig. 5: Enrochement posé en deux couches (pente de talus 4:5 en bas, 2:3 en haut dans la partie à une couche); les blocs du pied sont liés entre eux par des câbles en acier.

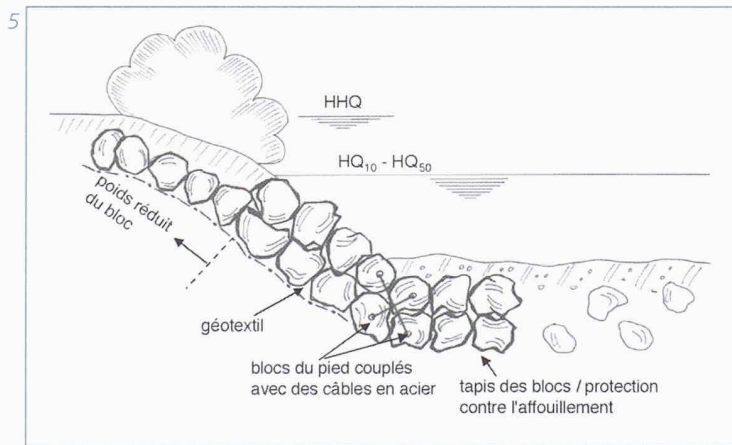
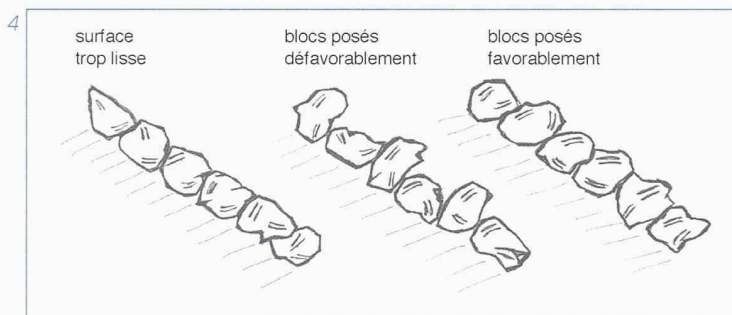
Fig. 6: Enrochement à deux couches en construction (pose sur un géotextile): les blocs de pied sont liés par des anneaux pour faciliter le couplage avec des câbles en acier (poids des blocs: 4,0 – 4,5 t).

Fig. 7: Enrochement partiellement recouvert de terre végétale: photo prise au cours du deuxième été après la fin des travaux (type d'enrochement selon fig. 5).

Fig. 8: Enrochement avec risberme comme chemin de rive; groupe de blocs faisant office de refuge à poissons au pied de l'enrochement

- la rugosité de la rive est augmentée grâce à sa forme variée qui, en même temps, contribue à réduire le danger d'affouillement du pied;
- les anses ainsi créées peuvent servir de refuge aux poissons pendant les crues.

Si les blocs doivent être placés de façon à obtenir une rugosité de surface maximale, il faut toutefois éviter que leur diamètre maximal se trouve perpendiculaire au talus (fig. 4).



Possibilités d'augmentation de la résistance

En raison des contraintes de maniabilité, le poids maximal des blocs extraits de carrières et pouvant être posés dans des cours d'eau est de six à sept tonnes. En présence de fortes pentes (> 4%) et de profondeurs d'eau importantes (> 5 m), les coefficients de sécurité, atteignent difficilement 1,0 selon l'équation (5). Pour garantir une meilleure sécurité, l'enrochement peut être réalisé en deux couches (fig. 5 et 6). Si le gain de sécurité ainsi obtenu est difficile à quantifier, un accroissement de 30 à 50% a néanmoins été observé dans des essais sur modèle physique.

Dans la partie supérieure du talus, où l'eau est moins profonde, un enrochement composé d'une seule couche est suffisant. Cette partie du talus se prête bien au recouvrement par du terrain meuble, sur lequel une végétation adéquate sera ensuite plantée (fig. 5 et 6).

Si, pour des raisons constructives, il est impossible d'atteindre un coefficient de sécurité de 1,0 au pied de l'enrochement, un couplage des blocs au moyen de câbles en acier peut être envisagé (fig. 5 et 6). Il importe toutefois de veiller à ce que cette liaison ne soit pas trop rigide et tendue: il est recommandé de coupler les blocs en groupes de quatre à huit avec des liens fixes aux premier et dernier et une fixation glissante, assurée par des anneaux, entre ceux du milieu (fig. 6). Par exemple, pour des enrochements à deux couches, un guidage du câble en spirale, dans la direction longitudinale entre la couche inférieure et supérieure, s'est avéré être une bonne solution. La couche supérieure doit être posée de manière à ce que les fixations se trouvent orientées vers les joints et que les câbles en acier ne soient pas visibles.

La pose des blocs dans un lit de béton maigre et le remplissage des joints entre eux (également avec du béton) sont en principe déconseillés. Ce genre de mesures de protection empêche non seulement la végétation de se développer, mais des blocs liés par du béton créent un élément en forme de dalle qui, une fois exposé à la pression dynamique de l'eau, peut être facilement emporté par l'écoulement. Un enrochement noyé dans le béton devient rigide et donc plus sensible aux affouillements: dans ce cas, des blocs ne peuvent en effet plus glisser dans la fosse d'érosion et retarder ainsi le processus.

Les points d'un enrochement les plus exposés à l'érosion sont ses extrémités amont et aval. Le plus souvent, la détérioration est tout d'abord observée à l'extrémité amont et se poursuit vers l'aval. Pour lutter contre ce phénomène, un enfouissement suffisamment profond de l'ouvrage dans les rives à ses deux extrémités est indispensable. Il peut être réalisé avec une tranchée remplie de blocs sur toute la hauteur de l'enrochement.

Protection des enrochements contre l'érosion interne et le lavage de la fondation

L'utilisation de gros blocs engendre des joints relativement larges. A travers ces joints, non étanches, les matériaux meubles de la fondation peuvent être exposés à l'érosion, subir des transformations et être emportés par l'écoulement. La stabilité globale de l'enrochement peut alors être mise en danger. Le lavage et l'érosion interne peuvent cependant être évités si l'ouvrage est posé sur une couche filtre: pour des raisons pratiques, des géotextiles sont habituellement employés à cet effet (fig. 6). Une fois l'enrochement couvert par la végétation, les racines assurent également cette fonction de protection contre l'érosion interne.

Aspects écologiques et paysagers

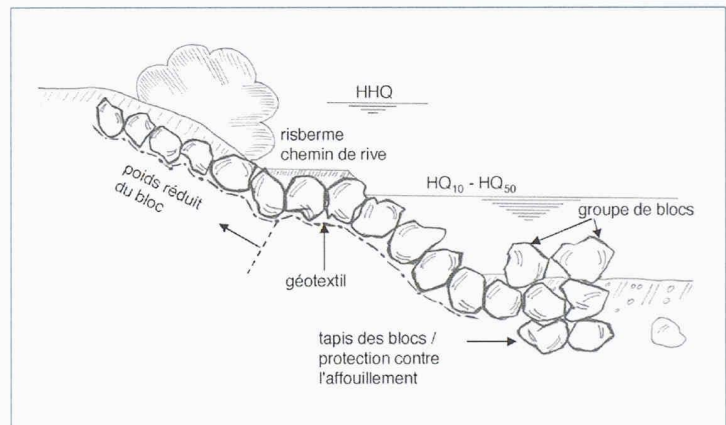
Le choix d'un tracé et de pentes de talus variables représente un premier pas vers une intégration satisfaisante de l'enrochement dans le paysage. La végétation des rives constitue un autre élément important. La croissance de la végétation riveraine peut être favorisée en recouvrant l'enrochement avec du terrain meuble et de la terre végétale jusqu'au niveau d'une crue décennale ou cinquantennale (fig. 3, 5 et 7). Les matériaux d'excavation ou de la terre végétale peuvent servir de remblai. Les premiers favorisent plutôt les plantes typiques des lieux secs, tandis que la végétation grasse se développera sur les matériaux organiques.

L'épaisseur de ce remblai devrait atteindre une fois le diamètre des blocs au minimum. Les joints de l'enrochement situé sous le remblai à réaliser doivent être remplis hydrauliquement, en ajoutant beaucoup d'eau aux matériaux meubles. La réalisation de la couverture des enrochements est facilitée si la pente de cette partie supérieure est faible (fig. 2) et si l'enrochement est réduit à une seule couche (fig. 5).

Les plantations en continu le long des rives et en rangées régulières, par exemple des saules, ne sont pas très naturelles. L'utilisation des plantes locales et la réserve d'espaces libres pour leur prolifération naturelle est beaucoup plus adaptée.

Si les talus des rives sont longs, des risbermes le long du cours d'eau devraient être prévus. Selon leur largeur, ces dernières peuvent se muer en chemins pédestres (1 à 2 m) ou servir de voies d'entretien (env. 3 m) (fig. 8).

Avec des groupes de blocs placés au pied de l'enrochement, des refuges supplémentaires pour les poissons peuvent être créés (fig. 8), qui seront disposés à distance irrégulière le long de la rive, mais pas à l'extérieur d'une courbe. Les plus gros blocs peuvent être sélectionnés pour la réalisation de tels refuges et posés sur le tapis des blocs qui protègent le pied de l'enrochement contre l'affouillement. Pour que ces groupes



de blocs résistent aux crues, ils doivent être, si possible, combinés à des blocs résiduels près des rives. Quant au tracé ondulé également préconisé comme choix constructif, il crée aussi des zones d'eau morte qui servent de refuge aux poissons.

Références

- [1] ISBASH, S.V., «Construction of dams by dumping stones in flowing water», Translated by A. DORJIJKOV, U.S. Army Engineer District, Eastport, ME, 1945
- [2] JÄGGI M., «Alternierende Kiesbänke», Mitteilung Nr. 62 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1983
- [3] JÄGGI M., «Vorlesung Flussbau», ETH Zürich, 1987 und 1999/2000
- [4] JÄGGI M.; BEZZOLA G.R.; KUSTER P., «Hydraulische Modellversuche für das Hochwasserschutzprojekt Gurtellen», *Wasser, Energie, Luft*, Heft 5/6, S. 99-103, 1996
- [5] KIKKAWA H.; IKEDA S.; KITAGAWA A., «Flow and bed topography in curved open channels», *Journal of Hydraulic Division*, ASCE 102, 1976
- [6] MAYNORD S.T.; RUFF J.F.; ABT. S.R., «Riprap design», *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 7, July 1989
- [7] SCHLEISS A.; GMÜR A., «Hochwasserschutzmassnahmen zu Verhinderung von Seitenerosion an der Reuss in Göschenen», Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen, Tagungspublikation, Band 4, S. 234-254, 1996
- [8] SCHLEISS A., «Bemessung und Gestaltung von Blockwürfen an Gebirgsflüssen», Interpraevent, Villach, Tagungspublikation, Band 2, S. 351-360, 2000
- [9] STEVENS M.A.; SIMONS D.B.; LEWIS G.L., «Safety factors for riprap protection», *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 102, No. HY5, 1976
- [10] ZARN B., «Einfluss der Flussbettbreite auf Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität», Mitteilung Nr. 154 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1997