

La revanche dans les projets de protection contre les crues et de l'analyse de dangers

Recommandations de la Commission pour la protection contre les crues (CIPC)

CIPC

Résumé

La Commission pour la protection contre les crues (CIPC) a élaboré une méthode pour déterminer la revanche nécessaire pour assurer la capacité hydraulique des cours d'eau. La revanche requise est composée de plusieurs revanches partielles. Ces dernières intègrent soit les incertitudes liées au calcul hydraulique, soit des processus hydrauliques tels que la formation des vagues, les remous d'exhaussement causé par des obstacles ou l'espace nécessaires pour assurer le transport de flottants sous les ponts. L'article propose également une méthode pour prendre en considération la revanche lors de l'analyse d'impact dans le cadre de l'évaluation des dangers.

Zusammenfassung

Die Kommission für Hochwasserschutz (KOHS) hat eine Methode erarbeitet, nach welcher das für die Gewährleistung der Abflussskapazität erforderliche Freibord in Fließgewässern bestimmt werden kann. Das erforderliche Freibord setzt sich aus mehreren Teilfreiborden zusammen. Diese berücksichtigen einerseits Unschärfen, die bei der Berechnung einer Wasserspiegellage auftreten, und andererseits hydraulische Prozesse wie die Wellenbildung, den Rückstau an Hindernissen oder den Platz, welcher unter Brücken für das Abführen von Treibgut benötigt wird. Es wird auch eine Methode vorgeschlagen, wie das Freibord bei der Wirkungsanalyse im Rahmen von Gefahrenbeurteilungen berücksichtigt werden kann. Der vorliegende Artikel wurde in der vorangehenden Ausgabe von «Wasser Energie Luft» (WEL 1-2013) in deutscher Sprache veröffentlicht.

1. Pourquoi une recommandation relative à la revanche?

Lors de l'estimation de la capacité d'écoulement d'un cours d'eau et lors du dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues, une revanche est généralement prise en compte. Celle-ci désigne la distance entre le niveau de l'eau et le sommet d'une berge ou le bord inférieur d'un pont. Il existe différentes approches pour la fixation de la revanche nécessaire; par ex. une grandeur fixe (0.5 m, 1.0 m), l'énergie cinétique $v^2/2g$ ou une fraction de celle-ci. Parfois, la revanche nécessaire est aussi fixée par rapport aux objets à protéger, du type d'ouvrages de protection ou en fonction du temps de retour du débit de dimensionnement et reçoit ainsi la fonction d'une grandeur liée à l'objectif de protection. En Suisse, aucune méthode unique ne s'est imposée jusqu'à présent dans la pratique hydraulique. De plus, des approches et des critères différents sont souvent utilisés lors du dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues et lors d'une évaluation des dangers. L'utilisation de critères différents sèment la confusion, provoquent des incertitudes pour les responsables des projets et les autorités compétentes quant au choix «correct» de la

revanche et complique la comparabilité de différents projets de protection contre les crues et d'évaluations des dangers.

L'exemple suivant montre l'importance de la revanche lors de l'évaluation de la capacité d'écoulement du Rhin alpin à Diepoldsau (Figure 1). Le Rhin alpin atteint son niveau de débordement avec un débit de 4500 m³/s (revanche = 0 m). La ligne d'énergie (vitesse moyenne de la surface mouillée totale) atteint la couronne de la digue avec un débit de 3750 m³/s (revanche d'environ 0.5 m) et la capacité d'écoulement s'élève encore à 3200 m³/s avec une revanche de 1 m.

Pour ce débit, une profondeur d'écoulement d'environ 7.5 m est constatée dans le lit mineur du cours d'eau. Selon les calculs, dans le mètre supérieur jusqu'au sommet de la digue, environ 1300 m³/s ou 40% de la capacité d'écoulement avec une revanche de 1 m peuvent être acheminés. Selon le critère utilisé pour la revanche nécessaire, on définit alors la capacité d'écoulement dans cette section du Rhin alpin entre 3200 m³/s (environ HQ_{100}) et 4500 m³/s (environ HQ_{300}).

Avec une recommandation sur le thème de la revanche, la Commission pour la protection contre les crues (CIPC) a

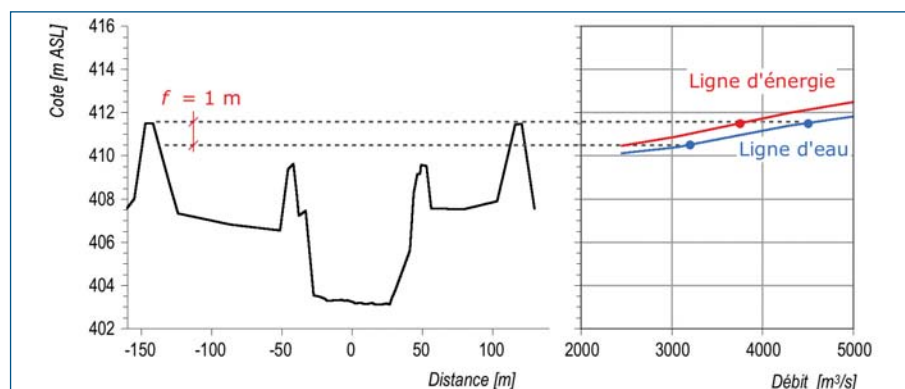


Figure 1. Influence de la revanche sur la capacité d'écoulement (géométrie 1995). Adapté selon [8].

pour objectif de contribuer à une prise en considération harmonisée de la revanche dans la pratique hydraulique en Suisse. La présente recommandation a été adoptée par la CIPC le 17 janvier 2013. Elle décrit les pratiques utilisées jusqu'à présent dans l'application de la revanche en Suisse et dans les pays voisins (chapitre 2), définit les principes pour l'utilisation de la revanche lors des projets de protection et des évaluations de danger (chapitre 3) et propose une méthode de calcul pour la revanche nécessaire (chapitre 4). Enfin, l'application de la revanche lors de l'analyse des effets sera également examinée (chapitre 5).

Il existe peu de normes en Suisse pour le dimensionnement des ouvrages de protection ou pour l'évaluation des dangers naturels. Il faut comprendre la présente méthode pour la détermination de la revanche nécessaire comme recommandation de la Commission pour la protection contre les crues de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux. Elle s'adresse aux ingénieurs hydrauliciens de la pratique et de l'administration. Les approches ont été développées dans le souci d'être les plus transparentes possible, universellement valables, cohérentes en soi et pouvant être appliquées dans la majorité des cas pratiques. Toutefois, il est laissé à l'utilisateur le soin d'adapter et d'améliorer la méthode compte tenu du contexte et des cours d'eau étudiés.

La détermination de la revanche est un élément clé de l'analyse des dangers de crues ou de la conception et le dimensionnement des mesures de protection. D'autres éléments tels que la définition des objectifs de protection, la définition des événements de dimensionnement ou la maîtrise des cas de surcharge doivent être considérés séparément.

2. Pratiques actuelles

2.1 Méthodes d'investigation

Les méthodes appliquées actuellement en Suisse et à l'étranger visant à la détermination de la revanche f_e et son application ont été inventoriées sur la base d'une recherche bibliographique, d'une enquête auprès des services en aménagement hydraulique et des établissements d'enseignement supérieur suisses et étrangers au moyen de questionnaires et d'entretiens avec des spécialistes du domaine [3]. Les pratiques cantonales en matière d'application de la revanche pour les évaluations des dangers ont été rassemblées par l'Office fédéral de l'environnement.

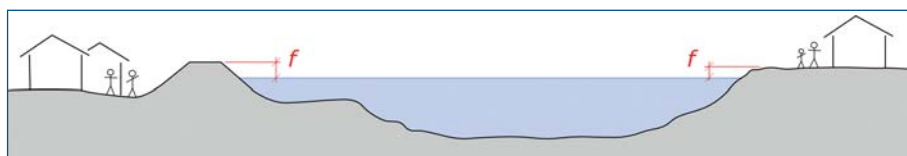


Figure 2. La revanche f désigne la distance verticale entre le niveau de l'eau et le sommet d'une berge.

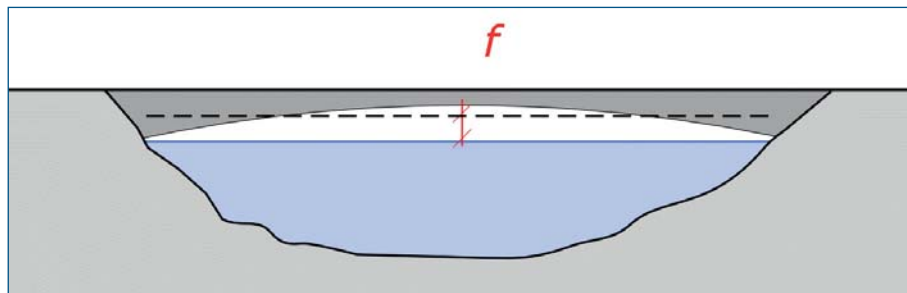


Figure 3. Pour les ponts, la revanche se réfère à la cote moyenne du bord inférieur.

2.2 Méthodes et leur application en Suisse

En Suisse les approches les plus fréquemment utilisées sont:

- f_e = grandeur fixe
- $f_e = v^2/2g$
- f_e = fonction du degré de protection visé et du potentiel de dommages.

Les valeurs suivantes ont été mentionnées pour les grandeurs fixes:

- Sous les ponts $f_e = \min. 1.0 \text{ m}$
- Ruisseaux $f_e = \min. 0.5\text{--}1.0 \text{ m}$
- Fleuves/Rivières $f_e = \min. 0.8\text{--}1.0 \text{ m}$
- Torrents $f_e = \min. 1.5\text{--}2.5 \text{ m}$

Ces valeurs peuvent varier selon les différentes institutions.

Selon les résultats de l'enquête, les processus suivants sont pris en considération:

- Bois flottants
- Variation du niveau du lit du cours d'eau
- Surélévation dans les courbes
- Débits non stationnaires
- Formation de vagues.

Pratiquement toutes les institutions interrogées ont indiqué que la revanche ne doit pas être utilisée pour couvrir les incertitudes liées à l'hydrologique ou à la construction. En règle générale, une revanche est exigée dans les projets. Lors de l'évaluation des dangers, la pratique est très différente: la répartition est relativement homogène entre les cantons qui considèrent une revanche systématiquement, dans certains cas ou jamais. Elle est toutefois assez fréquemment prise en considération lors de l'évaluation de la capacité d'écoulement au passage de ponts.

2.3 Méthodes et leur application à l'étranger

Les institutions interrogées ont chacune

une approche différente par rapport à la détermination de la revanche nécessaire, notamment:

- f_e = une approche probabiliste (Pays-Bas, Haut-Adige, Angleterre)
- f_e = fonction des processus, par un calcul (Autriche, Allemagne)
- $f_e = v^2/2g$ (Autriche, Italie)
- f_e = selon l'objectif de protection visé (Autriche)
- f_e = revanche minimale (Allemagne)
- $f_e = 0.17 \cdot Fr^{1/3} \cdot h_m$, prise en considération d'un développement de vagues générées par le courant avec Fr = le nombre de Froude et h_m = la profondeur d'écoulement moyenne (Allemagne).

Pour la détermination de la revanche, on considère les processus suivants:

- Vent
- Déferlement des vagues
- Embâcle (en raison de bois flottants)
- Obstruction (par arrivée d'une avalanche ou de lave torrentielle)
- Niveau variable du lit du cours d'eau
- Glace
- Courant transversal
- Tolérance d'exécution.

Les incertitudes hydrologiques ne sont pas considérées dans la détermination de la revanche nécessaire.

3. Concept de la revanche: principes

3.1 Définition de la revanche

«La revanche désigne la distance verticale entre le niveau de l'eau et le sommet d'une berge ou d'un ouvrage de construction hydraulique (par ex. barrage, digue), ou le bas d'un pont» ([1], cité dans [3], cf. Figure 2). Pour les ponts avec une bordure inférieure non horizontale (incliné, voûté), la revanche

se réfère à la cote moyenne du bord inférieur (Figure 3).

La revanche nécessaire f_e désigne la revanche devant être respectée afin de garantir une capacité d'écoulement du chenal déterminée par calcul.

3.2 La revanche comme grandeur hydraulique

La revanche nécessaire est considérée comme une grandeur hydraulique. D'une part elle décrit les incertitudes dans le calcul de la ligne d'eau en une section transversale donnée, d'autre part elle prend également en compte des processus tels que la formation de vagues et le remous sur des obstacles, ainsi que le transport de matériaux flottants.

3.3 Charge, sollicitation et capacité

Dans un tronçon de cours d'eau, l'écoulement, l'apport de matériaux charriés, de bois flottants et d'autres matières¹ peuvent être considérés comme des grandeurs de charge. Afin de mesurer l'effet de la charge sur la section transversale, la cote du niveau d'eau – déterminée par la cote du fond (variable) et la profondeur d'écoulement –, la vitesse d'écoulement ainsi qu'une mesure t au-dessus du niveau d'eau seront définies. Cette dernière décrit l'espace sollicité par les débris flottants. La géométrie du chenal, sa pente, sa rugosité ainsi que la revanche déterminent la capacité du chenal d'écouler les grandeurs de charge.

Les grandeurs de charge et de capacité influencent tout deux les niveaux de sollicitation et tout en s'influençant mutuellement (Figure 4). Ainsi par exemple, la cote du niveau d'eau z_w et la vitesse d'écoulement v sont autant une fonction de l'écoulement qu'une fonction de la géométrie et de la rugosité du chenal, ou par ex. la géométrie de la section transversale dépend d'une éventuelle obstruction par des débris flottants. Inversement, la formation de vagues et ainsi la revanche nécessaire sont déterminées par la vitesse d'écoulement v et la profondeur d'écoulement h .

3.4 Incertitudes prises en considération

Lors du calcul du niveau d'eau, la revanche nécessaire couvre les incertitudes générés par celles relatives au pronostic de la cote du fond en période de crue et par celles du calcul hydraulique. Les incertitudes dans le calcul du niveau d'eau peuvent être déterminées d'après les méthodes présentées au

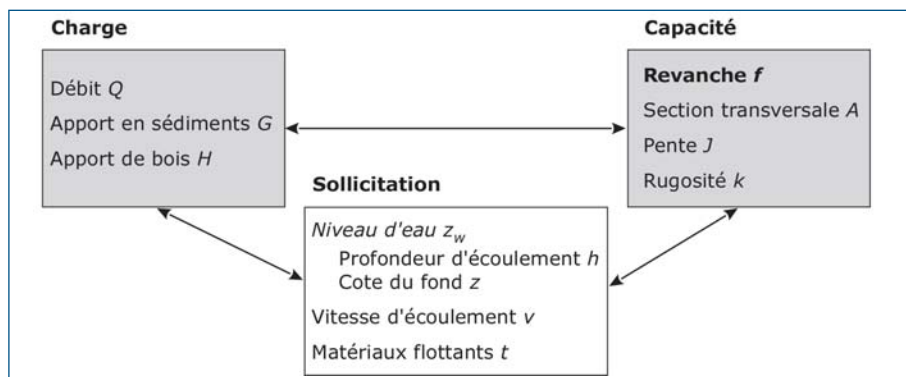


Figure 4. Délimitation de système entre charge, sollicitation et capacité d'un tronçon de cours d'eau. La revanche f est un élément de la capacité.

chapitre 4.2. La revanche ne couvre pas les erreurs consécutives à l'application d'un modèle hydraulique inadapté ou résultant d'une configuration erronée du modèle.

Les incertitudes doivent être identifiées lors du calcul hydraulique. Elles ne doivent pas «être couvertes» par des hypothèses conservatrices en relation au gabarit d'écoulement, la cote du fond ou aux rugosités déterminantes.

3.5 Processus pris en considération

La revanche nécessaire couvre les processus spécifiques ci-dessous. Cela signifie que la revanche garantit la capacité d'écoulement d'un chenal malgré l'apparition de ces processus :

- Vagues formées par l'écoulement,
- Remous d'exhaussement sur des obstacles à l'écoulement locaux (par ex. sur des arbres ou des coins de mur avancés),
- Charriage de bois flottant et de glaces flottantes.

La revanche s'ajoute au niveau d'eau, lequel est calculé en tenant compte des processus suivants :

- Modifications du lit du cours d'eau pendant une crue,
- Modifications du lit du cours d'eau à long terme,
- Surélévation du niveau d'eau sur le côté extérieur des courbes,
- Vitesses d'écoulement différentes dans le lit principal et dans les glaciés dans le cas de sections transversales composées,
- Accumulations de bois et de glaces flottantes sur des piliers ou des culées de ponts.

Dans le cas des laves torrentielles, la revanche s'additionne par analogie à la section d'écoulement transversale exigée par le front de la coulée.

Le concept défini ici ne considère pas les vagues dues au vent (elles sont d'une importance secondaire pour les cours d'eau considérés) et les défaillances géotechniques des digues.

3.6 Domaine d'application

Le présent concept pour la définition de la revanche nécessaire est appliqué lors des projets d'aménagement hydraulique et lors d'évaluations des dangers sur des rivières, ruisseaux et torrents. Le profil d'écoulement peut être simple ou composé. Pour des ponts et des voûtages, une revanche doit en général être respectée. A défaut, la preuve doit être fournie qu'un écoulement en charge est possible. Les critères de la revanche valent alors pour le tronçon amont.

La méthode a été développée afin de traiter la plupart des cas pratiques. Dans les cas particuliers, par ex. dans le cadre de grands projets ou pour des ouvrages spéciaux comme des déversoirs de crues, la présente méthode peut, respectivement doit être complétée ou étendue.

Les exigences en matière de revanche pour les lacs de barrage et les installations de rétention des cours d'eau sont définies dans l'Ordonnance sur la sécurité des ouvrages d'accumulation [7]. Elles ne seront pas traitées ici.

3.7 A quoi la revanche ne doit pas servir

La revanche ne doit pas être utilisée pour couvrir les incertitudes des scénarios hydrologiques (fixation d'un débit ou d'un apport en charriage d'une certaine période de retour) ou des incertitudes dans le dimensionnement géotechnique ou statique des ouvrages de protection. Elle ne doit non plus pas servir à justifier un plus haut niveau de sécurité pour un potentiel de dommages élevé (et donc implicitement une capacité

¹ Par ex. ballots de foin, marchandise encombrante, glaces flottantes, etc.

d'écoulement plus élevée). De tels critères devraient être pris en compte par le choix du scénario de dimensionnement.

4. Calcul de la revanche nécessaire

4.1 Structure

La revanche nécessaire f_e est composée de différentes revanches partielles. Chaque revanche partielle prend en considération une des sollicitations définies au point 3.3:

$$f_{min} \leq f_e = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2} \leq f_{max} \quad (1)$$

avec

f_e = revanche nécessaire

f_{min} = revanche nécessaire minimale

f_{max} = revanche nécessaire maximale

f_w = revanche nécessaire en raison d'incertitudes dans l'estimation de la ligne d'eau

f_v = revanche nécessaire en raison de la formation de vagues et des remous d'exhaussement sur des obstacles

f_t = revanche nécessaire en raison d'une section d'écoulement supplémentaire nécessaire pour le passage de débris flottants sous les ponts

Selon la situation, les différents éléments prennent plus ou moins d'importance. Selon les circonstances, les incertitudes sur le niveau d'eau en raison de l'estimation de la cote du fond (petits cours d'eau sans modifications du chenal), la formation de vague (cours d'eau s'écoulant lentement) ou la section d'écoulement nécessaire supplémentaire (chenal à ciel ouvert) peuvent ne jouer aucun rôle. Dans ces cas, les termes correspondants peuvent être remplacés par zéro.

Pour la définition de la revanche nécessaire, les revanches partielles sont

additionnées géométriquement. De cette façon, on considère que les incertitudes ou les processus ne se manifestent pas toujours de manière cumulée.

4.2 Revanche nécessaire en raison des incertitudes dans l'estimation de la ligne d'eau

4.2.1 Introduction

Chaque calcul de la ligne d'eau comporte des incertitudes. Celles-ci sont liées:

- à l'estimation de la cote de fond déterminante
- au calcul hydraulique en fonction de la cote de fond déterminante (Figure 5).

En raison des incertitudes dans l'estimation de ligne d'eau, la revanche comprend une erreur moyenne σ_w dans le calcul de la ligne d'eau. Celle-ci se compose de l'erreur moyenne provoquée par les incertitudes de l'estimation de la cote de fond déterminante σ_{wz} et de l'erreur moyenne du calcul de l'écoulement σ_{wh} .

$$f_w = \sigma_w = \sqrt{\sigma_{wz}^2 + \sigma_{wh}^2} \quad (2)$$

4.2.2 Erreur dans la ligne d'eau, provoquée par des incertitudes dans l'estimation de la cote de fond déterminante

En principe, des modifications possibles du lit pendant une crue doivent être pronostiquées et prises en considération lors du calcul hydraulique. Ainsi, le paramètre σ_{wz} ne sert pas à considérer d'éventuels atterrissements dans la revanche, mais à couvrir les incertitudes dans le pronostic de la cote de fond. Ces incertitudes doivent être justifiées au cas par cas.

Les incertitudes dans le pronostic de la cote de fond déterminante sont surtout importantes là où, lors d'un événement de

crue, il faut s'attendre à des atterrissements (par ex. sur des tronçons avec rupture de pente ou lors d'un apport latéral de matériaux charriés), ou encore lorsque le risque existe de variations à long terme de la cote de fond. Elles sont d'autant plus grandes que la modification attendue du chenal est élevée.

Jusqu'à présent, il n'existe que peu de valeurs empiriques pour la détermination de σ_{wz} . Des valeurs comprises entre 0.1 m (grand cours d'eau de plaine) et 1.0 m (torrent de montagne) sont plausibles². Si la cote de fond est déterminée par des simulations numériques, la justification peut être donnée par une analyse de sensibilité, par ex. par une variation des grandeurs de grain déterminantes ou par l'application de lois de transport différentes. Si un chenal est qualifié de stable, les incertitudes de la cote de fond peuvent être négligées ($\sigma_{wz} = 0$).

4.2.3 Erreur dans la ligne d'eau, provoquée par des incertitudes dans le calcul de l'écoulement

Les incertitudes dans le calcul hydraulique peuvent être provoquées par des incertitudes dans la géométrie du profil en travers ou par des erreurs dans l'estimation de la rugosité du chenal. Un ordre de grandeur de cette erreur a été déterminé par une analyse de sensibilité pour des calculs d'écoulement de différents cours d'eau en Suisse [3]. Pour ce faire, on a supposé que chaque variable d'entrée pour le calcul d'écoulement comporte une erreur moyenne. L'influence des différentes erreurs sur le résultat du calcul a été déterminée à partir de la formule de l'écoulement de Strickler et en combinant les résultats respectifs à l'aide de la loi de propagation des erreurs selon Gauss.

Le calcul d'erreur a été réalisé pour 18 cours d'eau et un total de 52 débits différents. Les valeurs du Tableau 1 ont été estimées comme erreur sur les variables

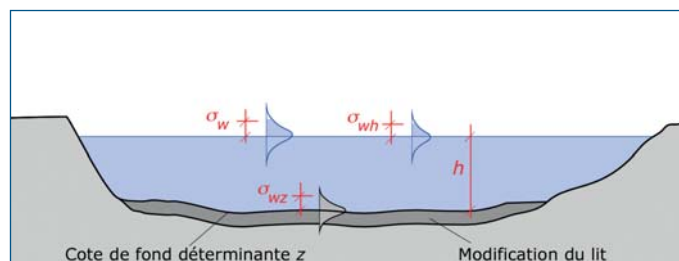


Figure 5. Erreur moyenne σ_w dans l'estimation de la ligne d'eau. La profondeur d'écoulement h est calculée d'après une cote de fond z estimée et déterminante. Les estimations de la cote de fond et de la profondeur d'écoulement comportent des erreurs.

Variables d'entrée	Erreur moyenne
Largeur [m]	10 %, max. 1 m
Cote du fond du lit mesurée [m]	0.1 m
Rugosité moyenne [$m^{1/3}/s$]	10 %
Pente [-]	10 %
Pente du talus [°]	3°

Tableau 1. Erreur moyenne estimée sur les variables d'entrée d'un calcul hydraulique.

² La valeur σ_{wz} décrit l'erreur moyenne dans la ligne d'eau sur la base des incertitudes dans la cote du lit. À fin de simplification, la valeur peut être égale aux incertitudes de la cote du lit, avec $\sigma_{wz} = \sigma_z$.

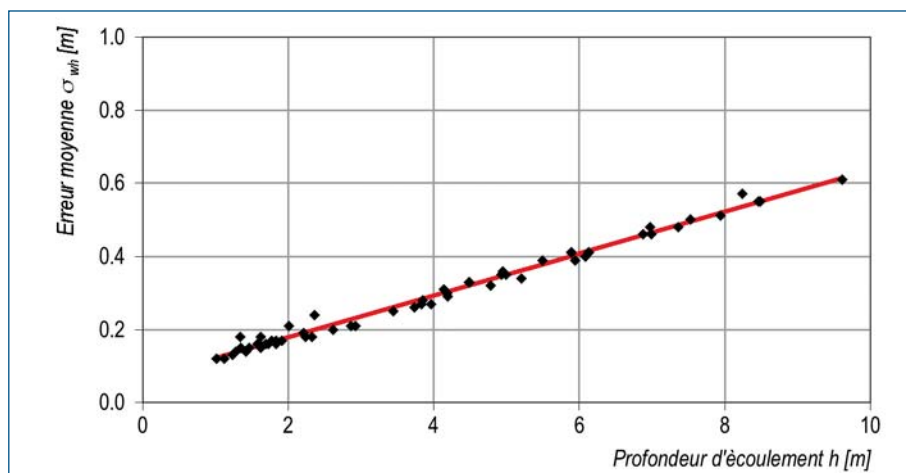


Figure 6. Erreur moyenne σ_{wz} sur la profondeur d'écoulement calculée, en fonction de la profondeur d'écoulement h des cours d'eau tests.

	Ponts avec revêtement inférieur lisse	Ponts avec revêtement inférieur rugueux
Bois flottants de petites dimensions (branches seulement)	0.3 m	0.5 m
Troncs d'arbres charriés individuellement	0.5 m	1.0 m
Souches	1.0 m	1.0 m
Bois flottants charriés en tapis	1.0 m	1.0 m

Tableau 2. Revanche partielle f_t pour bois flottants en relation avec la constitution du pont, le type et la quantité de bois flottants.

d'entrée. Les résultats sont présentés à la Figure 6. On constate que l'erreur moyenne sur la profondeur d'écoulement calculée augmente linéairement avec celle-ci. Les résultats peuvent être approchés avec une équation linéaire:

$$\sigma_{wz} = 0.06 + 0.06 h \quad (3)$$

Plus la profondeur d'écoulement est grande, plus l'erreur dans le calcul hydraulique est également élevée. C'est l'erreur sur la rugosité qui se répercute le plus sur l'erreur sur la profondeur d'écoulement, car selon la loi de l'écoulement de Strickler, le coefficient de rugosité agit linéairement sur le calcul de l'écoulement. Avec des profils en travers composés, une profondeur d'écoulement moyenne pondérée entre les écoulements partiels du chenal principal et du lit majeur doit être utilisée dans l'équation 3.

Dans les situations spécifiques, l'erreur sur le calcul hydraulique doit être déterminée individuellement, par ex. lors d'une géométrie très variable du chenal ou lors de grandes rugosités ou enfin lorsque, pour de grands projets, des calculs hydrauliques complets sont réalisés de toutes façons, permettant de préciser les erreurs dans le calcul hydraulique à l'aide d'une analyse de sensibilité. De même l'observation d'événements de crue antérieurs peut être intégrée dans l'estimation de l'erreur.

4.3 Revanche en raison de la formation de vagues et des remous d'exhaussement sur des obstacles

L'écoulement est par endroit perturbé par des obstacles dans le gabarit d'écoulement (par ex. piliers ou culées de pont, coins de mur avancés). Le niveau d'eau s'élève dans les remous d'exhaussement au maximum jusqu'à la hauteur de la ligne de charge, se trouvant ainsi tout au plus à une hauteur $v^2/2g$ plus élevée que le niveau d'eau moyen dans la section transversale.

Avec des écoulements proches de l'écoulement critique, des vagues apparaissent à la surface de l'eau. Les plus hautes se forment aux emplacements où la vitesse d'écoulement est la plus élevée (au milieu du profil transversal d'une section de cours d'eau rectiligne). Une crête de vague se trouve tout au plus à une hauteur $v^2/2g$ plus élevée que le niveau d'eau moyen dans la section transversale.

C'est pourquoi, la revanche due à la formation des vagues et des remous d'exhaussement sur des obstacles est déterminée par

$$f_v = \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

avec v désignant la vitesse d'écoulement locale. En principe, elle est une fonction

de la profondeur d'écoulement locale, de la déclivité longitudinale et de la rugosité du fond, et peut être dérivée des formules hydrauliques habituelles. Les règles suivantes doivent être appliquées:

- Pour des lits à section simple trapézoïdale ou rectangulaire, on assimile la vitesse d'écoulement locale à la vitesse moyenne.
- Pour un profil composé (profil avec lit majeur, glaciais), la vitesse d'écoulement en fonction de la profondeur d'écoulement moyenne sur le glaciais est déterminante. La largeur du glaciais doit au minimum correspondre à $5 \times$ la profondeur d'écoulement.
- Pour les ponts, on considère la vitesse d'écoulement moyenne des sections transversales partielles respectives (lit mineur ou glaciais) comme vitesse locale.
- Sur le côté extérieur d'une forte courbure, la vitesse locale est jusqu'à environ 30% plus élevée que la vitesse d'écoulement moyenne dans la section transversale.
- Avec une végétation dense à proximité de la rive, la vitesse d'écoulement locale peut être fixée à zéro si les conditions suivantes sont remplies:
 - La bande de végétation est suffisamment large.
 - La bande de végétation est considérée comme non-perméable dans le calcul de l'écoulement.
 - La conservation de la bande de végétation est assurée dans le concept d'entretien.

4.4 Revanche en raison d'une section d'écoulement supplémentaire nécessaire pour le passage sous les ponts

Lors de passage sous les ponts, les débris flottants exigent de l'espace supplémentaire au-dessus du niveau d'eau afin d'être évacués sans encombres. En principe, l'espace nécessaire dépend de la quantité et des dimensions des débris (troncs, souches, blocs de glace, ballots de foin, etc. transportés individuellement ou groupés en tapis), et de la constitution du revêtement inférieur du pont.

Un système de classe est proposé afin de déterminer la revanche partielle f_t pour les bois flottants. f_t est une dimension fixe comprise entre 0.3 m et 1.0 m. La valeur de f_t sera définie en fonction de la constitution du pont et en fonction du type et de la quantité de bois flottants attendus (Tableau 2). On considère un pont avec un revêtement rugueux par ex. un pont avec

Revanche partielle	Critères d'application
f_w	Dans tous les tronçons de cours d'eau.
f_v	Dans le profil transversal des ponts ou en cas de mises sous tuyau. Dans les tronçons avec des digues ou des murs de protection contre les crues non submersibles. Dans les tronçons sur lesquels les remous d'exhaussement sur les obstacles peuvent mener à des sorties d'eau continues. Sur les cônes de déjection. Dans un chenal de torrent pavé.
f_t	Dans le profil transversal des ponts ou en cas de mises sous tuyau où des matières flottantes peuvent jouer un rôle.

Tableau 3. Critères d'application des revanches partielles.

charpente, piliers saillants ou des conduites suspendues.

Dans un cours d'eau avec d'autres types de débris flottants que du bois (balots de foin, glace), f_t doit être déterminée par analogie.

4.5 Choix de la revanche partielle

Avec le choix des revanches partielles f_w , f_v et f_t dans l'équation (1), le calcul de la revanche nécessaire peut être adapté à la situation spécifique d'un tronçon de cours d'eau. Selon la situation, l'une ou l'autre revanche partielle peut être considérée comme nulle. Lors de la détermination de la revanche nécessaire, les critères du *Tableau 3* doivent être appliqués.

4.6 Revanche nécessaire minimale et maximale

La revanche nécessaire déterminée par calcul est arrondie au décimètre et délimitée par des limites inférieures et supérieures.

Avec la limite inférieure $f_{min} = 0.3$ m,

une pondération plus élevée est attribuée à l'erreur moyenne sur la profondeur d'écoulement calculée pour de petits cours d'eau à vitesse d'écoulement modérée. Avec la limite supérieure f_{max} , on évite que la revanche nécessaire pour une vitesse d'écoulement élevée ne soit trop grande. Pour les cours d'eau avec charriage, une limite supérieure $f_{max} = 1.5$ m est proposée. Dans les torrents où un risque de lave torrentielle existe, une revanche maximale plus élevée peut tout à fait être exigée.

La revanche nécessaire est calculée par section transversale et uniformisée par tronçons de cours d'eau.

5. Effet d'un dépassement de la capacité d'écoulement

5.1 Revanche et analyse de points faibles

La revanche est considérée dans l'analyse de points faibles dans le cadre de la planification des mesures de protection contre

les crues ou dans le cadre d'une évaluation des dangers. Dans ces cas, l'analyse de points faibles répond aux questions suivantes:

- Pour un écoulement donné, où est-ce que l'eau peut sortir du chenal?
- Quel est la cause pour laquelle l'eau s'échappe (submersion, rupture de digue, embâcle)?
- Quelle est la quantité d'eau qui s'échappe?

Selon la méthode du chapitre 4, la revanche nécessaire f_e est déterminée pour un débit Q , un apport de matériaux charriés G , de bois H et d'autres matières flottantes. Cela n'importe pas si le débit en question Q est défini comme un débit de dimensionnement Q_{dim} , un débit en cas de surcharge ou comme un débit d'un scénario de crue donné HQ_x ou EHQ .

Si pour un débit Q donné et son niveau d'eau calculé z_w , la revanche f est plus grande que la revanche nécessaire f_e , alors la capacité d'écoulement du tronçon considéré est suffisante pour écouler sans dommages le débit Q . Le tronçon considéré ne présente pas de points faibles quant à sa capacité d'écoulement (*Figure 7*). D'autres mécanismes de défaillance (par ex. embâcle sur des piliers de ponts, érosion latérale, défaillance géotechnique d'un barrage, affouillement, etc.) restent réservés.

Si pour un débit Q donné et son niveau d'eau calculé z_w , la revanche f est plus petite que la revanche nécessaire f_e , alors la capacité d'écoulement du tronçon considéré ne suffit pas pour écouler sans dommages le débit Q . Dans la terminologie de l'évaluation des dangers, le tronçon considéré présente un point faible et un effet peut se produire en-dehors du lit du cours d'eau. Il faut alors examiner si de l'eau peut sortir du chenal.

Jusqu'à présent, cette évaluation n'est pas homogène dans l'estimation des dangers en Suisse. Dans certains cantons, une inondation est identifiée lorsque la revanche nécessaire n'est plus disponible; dans d'autres, lorsque la revanche n'existe plus. Une approche uniforme est proposée aux chapitres suivants.

5.2 Effet pour des lits de cours d'eau avec berge résistante à la submersion

Dans un chenal délimité par le terrain ou par un ouvrage de protection submersible (digue ou murs résistants à la submersion), un scénario de débordement en fonction du niveau d'eau est défini lors du dépassement de la capacité d'écoulement.

Un niveau d'eau z_w' est considéré

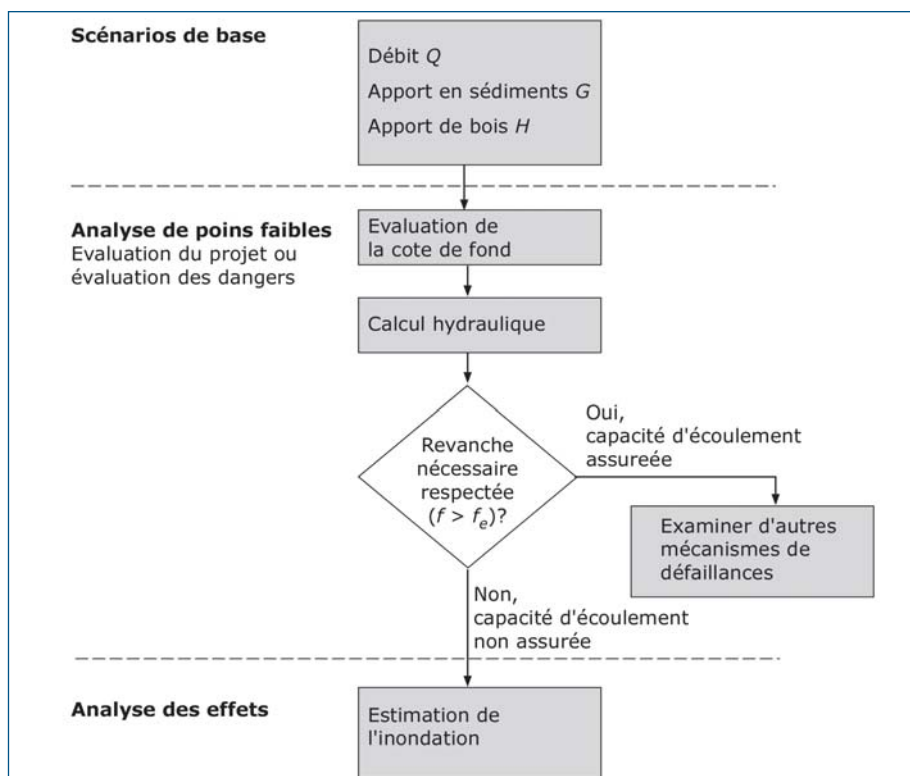


Figure 7. Prise en considération de la revanche lors d'une analyse de points faibles.

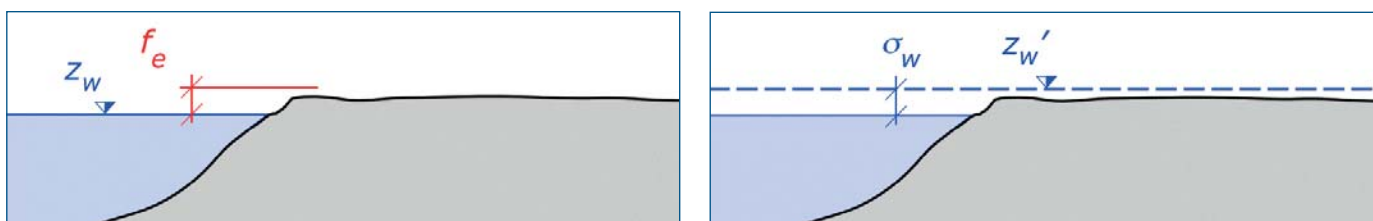


Figure 8. Dépassement de la capacité d'écoulement dans un tronçon avec berge résistante à la submersion et scénario d'inondation avec un niveau d'eau envisageable.

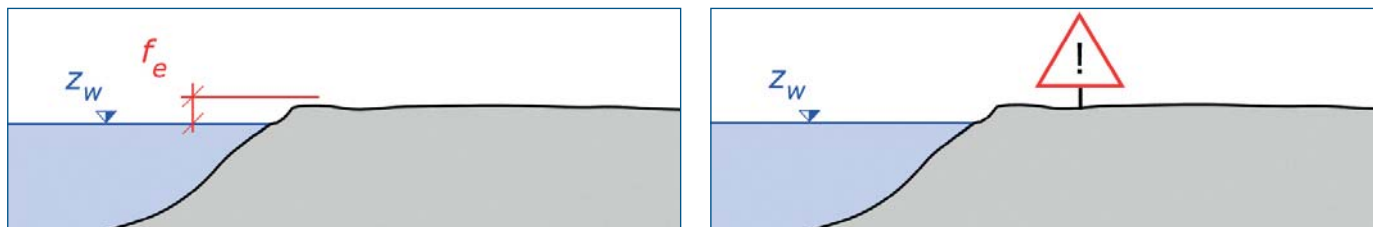


Figure 9. Dépassement de la capacité d'écoulement dans un tronçon avec berge résistante à la submersion sans scénario d'inondation.

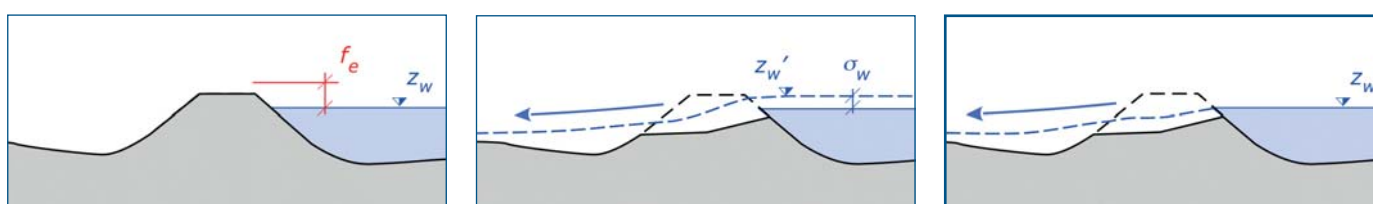


Figure 10. Dépassement de la capacité d'écoulement dans un tronçon avec endiguement ne résistant pas au déversement et scénario d'inondation.

comme niveau d'eau déterminant. Ce niveau d'eau pourrait être atteint compte tenu des incertitudes définies au point 4.2. z_w' est égal à :

$$z_w' = z_w + \sigma_w = z_w + \sqrt{\sigma_{wz}^2 + \sigma_{wh}^2} \quad (5)$$

Dans l'équation, z_w désigne le niveau d'eau qui a été déterminé par un calcul hydraulique et en tenant compte des processus spécifiés au point 3.5. C'est le niveau d'eau le plus probable. z_w' correspond au niveau d'eau plus élevé tenant compte de l'erreur moyenne. Avec cette approche, une surface d'inondation est toujours identifiée lorsque la capacité d'écoulement est considérée comme insuffisante (Figure 8). Ainsi, les mêmes critères sont appliqués lors d'une évaluation des dangers et lors du dimensionnement d'un ouvrage de protection.

Il est également possible d'envisager le niveau d'eau z_w pour l'évaluation de l'inondation. Jusqu'à présent, cette approche a souvent été appliquée pour la cartographie des dangers lorsque les surfaces d'inondation ont été directement

dérivées de simulations hydrauliques à deux dimensions. La probabilité d'inondation est alors certainement plus proche de la probabilité du scénario de base³. La méthode a cependant le désavantage qu'aucune inondation n'est identifiée dans les cas où la revanche existante est insuffisante ($f < f_e$) et que par conséquent la capacité hydraulique est considérée comme non garantie. Le danger d'inondation doit alors être signalé sous une autre forme sur la carte d'inondation, d'intensité ou de danger (Figure 9).

5.3 Effet pour des lits de cours d'eau avec endiguement ne résistant pas à la submersion

Dans le cas où un chenal est délimité par une berge ne résistant pas au déversement (digue ou mur), un scénario de défaillance de la digue ou du mur est défini lors du dépassement de la capacité d'écoulement. Afin de pouvoir déterminer la quantité de sortie d'eau, un niveau d'eau possible z_w' ou le niveau le plus probable z_w peuvent à nouveau être considérés comme déterminants (Figure 10). Il faut néanmoins garder à l'esprit que dans la plupart des cas, d'autres facteurs tels que la grandeur de la

brèche, le moment de rupture de la digue ou le dépôt de matériaux charriés lors du déversement peuvent avoir une plus grande influence que le choix d'un niveau d'eau significatif.

Dans le cadre de l'analyse des effets, la vitesse d'écoulement sera utilisée pour justifier le cas échéant un scénario de rupture de digue, mais pas pour déterminer les quantités d'eau sortantes.

5.4 Effet pour des ponts ou des voûtages

Dans le cas où la capacité hydraulique de la section transversale d'un pont ou d'un voûtage est insuffisante, un scénario d'embâcle sera défini, c'est-à-dire que l'on va définir quelle est la proportion de la surface ΔA diminuant le profil transversal du pont ou du passage (Figure 11). Dans ce cas, les dimensions et la forme du profil transversal, la constitution de la face inférieure et du lit (affouillement possible ou pas) et la quantité de bois charriés jouent un rôle. Pour des profils avec une surface plus petite que 30 m², les propositions suivantes ont été faites dans le cadre des scénarios d'embâcle du projet Protect [6]:

- Diminution de 100% de la section

³ Des déviations sont possibles, si la probabilité du scénario de base se réfère seulement à la pointe de débit et non au volume d'écoulement.

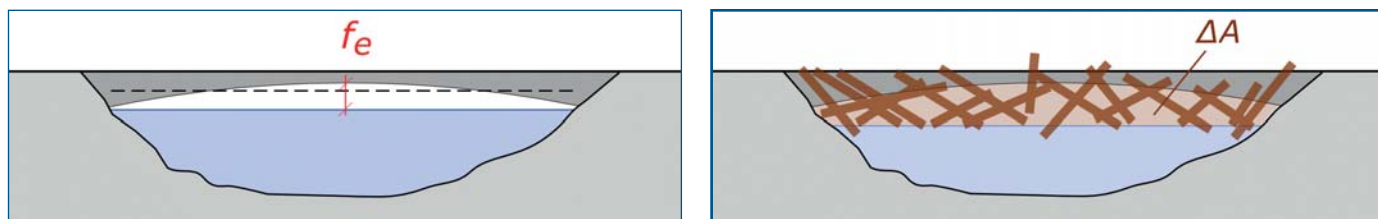


Figure 11. Dépassement de la capacité d'écoulement du profil transversal d'un pont et scénario d'embâcle.

- d'écoulement (embâcle total), lorsque
 - La plus petite dimension de la section est < 1 m ou
 - Le lit du cours d'eau ne peut s'adapter par affouillement ou
 - La quantité de bois flottants est trop élevée.
- Diminution de 50% de la section d'écoulement (embâcle partiel), lorsque
 - La quantité de bois flottants est faible et le lit du cours d'eau peut s'adapter par affouillement.

Dans le cas où le passage d'un pont est forcé par un écoulement en charge, le critère de la revanche ne vaut pas pour la section transversale du pont en soi, mais pour le secteur amont où le remous se crée. Le comportement d'un pont en charge lors de l'arrivée de débris flottants doit faire l'objet d'un examen spécifique.

6. Conclusion

Le présent document contient la description d'une méthode par laquelle la capacité d'écoulement d'un cours d'eau peut être évaluée compte tenu d'une revanche. La revanche nécessaire est interprétée comme une grandeur hydraulique et prend en considération des processus comme la formation des vagues, des remous d'exhaussement suite à des obstacles d'écoulement, le transport de bois flottants, ainsi que les incertitudes dans le calcul du niveau d'eau. D'autres incertitudes telles que celles relatives à la détermination des débits doivent être examinées indépendamment.

Il faut toutefois considérer qu'une section transversale d'un cours d'eau peut aussi présenter un point faible même lorsque la revanche nécessaire est garantie pour un certain débit donné.

La Commission pour la protection contre les crues de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux recommande de déterminer la revanche selon la méthode décrite dans le présent document. Elle recommande d'appliquer la méthode à tous les projets de construction hydrauliques futurs ainsi que lors de l'élaboration de nouvelles cartes de danger ou la révision des cartes existantes.

Sources

- [1] Bezzola G.R., Hegg C. (Hrsg.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.
- [2] Bundesamt für Wasserwirtschaft (1982): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitung.
- [3] KOHS (2012): Literaturrecherche Freibord. HSR Hochschule für Technik Rapperswil – Institut für Bau und Umwelt.
- [4] KOHS Arbeitsgruppe Freibord (2010): Fehlerschätzung am berechneten Wasserspiegel. Internes Arbeitspapier. 24.09.2010, unveröffentlicht.
- [5] Loat R., Meier E. (2003): Wörterbuch Hochwasserschutz. Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Bern: Haupt, 2003.
- [6] Romang H. (Hrsg.) (2008): Wirkung von Schutzmassnahmen. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 289 S.
- [7] Sicherheit der Stauanlagen. Richtlinien des BWG, 2002.
- [8] Zarn B. (2003): Szenarienbildung bei der Erstellung von Überflutungs- und Gefahrenkarten – ein Diskussionsbeitrag. «Wasser Energie Luft», 95. Jahrgang, 5/6.

Symboles

σ_w	[m]	Incrtitudes dans le niveau d'eau calculé
σ_{wh}	[m]	Incrtitudes dans la profondeur d'écoulement calculée
σ_{wz}	[m]	Incrtitudes dans le niveau d'eau calculé en raison des incrtitudes dans l'estimation de la cote de fond
σ_z	[m]	Incrtitudes dans l'estimation de la cote de fond
ΔA	[m ²]	Réduction du profil transversal en raison d'embâcle sur les ponts et passages par des bois flottants
A	[m ²]	Section transversale
EHQ	[m ³ /s]	Crue extrême
f	[m]	Revanche
f_e	[m]	Revanche nécessaire
f_w	[m]	Revanche partielle en raison des incrtitudes dans l'estimation de la ligne d'eau

f_{max}	[m]	Limite supérieure pour la revanche nécessaire
f_{min}	[m]	Limite inférieure pour la revanche nécessaire
f_t	[m]	Revanche partielle en raison d'une section d'écoulement supplémentaire nécessaire pour le passage de débris flottants
f_v	[m]	Revanche partielle en raison de la formation de vague et des remous d'exhaussement sur des obstacles
g	[m/s ²]	Accélération due à la pesanteur
G	[m ³ /évén.]	Apport en charriage
H	[m ³ /évén.]	Apport en bois
h	[m]	Profondeur d'écoulement
HQ_x	[m ³ /s]	Débit de crue avec période de retour x
J	[-]	Pente
k	[m ^{1/3} /s]	Coefficient de rugosité
Q	[m ³ /s]	Débit
v	[m/s]	Vitesse de l'écoulement
z	[m ASL]	Cote du fond
z_w	[m ASL]	Niveau d'eau
z_w'	[m ASL]	Niveau d'eau compte tenu des incrtitudes dans le calcul

Adresse des auteurs

Commission pour la protection contre les crues (CIPC) de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux (ASAE). Membres du groupe de travail: Lukas Hunzinger, Martin Jäggi, Jean-Pierre Jordan, Jürg Speerli, Heinz Weiss, Benno Zarn.

Remerciements

La CIPC remercie l'Office fédérale de l'environnement pour le soutien financière et l'Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft du canton de Zurich pour le soutien logistique pour l'élaboration de la recommandation.

La revanche dans les projets de protection contre les crues et de l'analyse de dangers

Exemples des cas

CIPC

1. Introduction

La méthode pour déterminer la revanche nécessaire présentée dans l'article précédent est appliquée sur trois exemples. Les exemples représentent des cours d'eau de grandeur différente dont la revanche nécessaire est déterminée par des processus distincts.

2. Sagentobelbach, commune de Dübendorf, canton de Zurich

Le Sagentobelbach prend sa source au nord de la colline de Zurich (Zürichberg) sur un terrain raide et boisé. Son bassin-versant mesure 3.2 km². Le ruisseau est pour une part fortement endigué et par endroits principalement stabilisé par des falaises molassiques. A partir du quartier de Stettbach, le cours du ruisseau s'aplatit; le ruisseau est surtout étroit et fortement endigué à l'entrée du village, ce qui périodiquement amène à des embâcles. A la sortie du village, le ruisseau a été dévié et réaménagé sur environ 300 m lors de l'élargissement de la gare de Stettbach.

Le nouveau tronçon a été creusé dans une moraine compacte à granulométrie fine avec des lentilles de gravier et d'éboulis. Sur le tronçon considéré, la pente longitudinale du ruisseau varie entre 1.5% et 2.0%. Le lit pour les eaux moyennes a un diamètre compris entre 0.5 m et 1 m. Le lit majeur se situe entre 50 et 80 cm au-dessus du lit moyen et s'alterne sur les rives gauches et droites. La largeur de la berge supérieure mesure au minimum 15 m. La pente des talus varie entre 1:3 et 1:2. En profil, les berges atteignent bien 4 m de haut. A certains endroits, des petites digues s'élèvent jusqu'à 60 cm au-dessus du terrain. Celles-ci ont une inclinaison de 1:5 du côté terre et sont recouvertes d'herbe, mais ne sont par calcul pas conçues pour être sujettes à la submersion. Dans la partie amont, le ruisseau est traversé par un pont dont la largeur est de 7 m entre les culées et la hauteur de 2 m au-dessus du lit moyen.

Le ruisseau a été dimensionné sur la base d'un calcul hydraulique à une dimension avec courbe de remous (indice de rugosité $k = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$). Le débit de dimensionnement est de 13 m³/s. Il en résulte une profondeur d'eau de 1.1 m et une vitesse d'écoulement de 2.5 m/s. Sur la section considérée, l'apport en matériaux charriés est faible car la plupart des apports en matériaux du bassin-versant restent bloqués à l'entrée du village. De plus, du matériel graveleux (matériaux adjacents et matériaux introduits pour des considérations écologiques) est transporté en cas de crue, si bien que la cote du fond est soumise à des variations en cas de crue. C'est pourquoi, les incertitudes à la cote du fond sont estimées à $\sigma_{wz} = 0.2 \text{ m}$. L'apport en bois est plutôt faible en raison des embâcles dans la partie étroite en amont du village et aussi à cause de la présence d'ouvrages de stabilisation. Les arbres sont charriés de manière isolée.

Les revanches nécessaires résultantes sont présentées dans le Tableau 1.

3. Schächen, commune d'Aldorf, canton d'Uri

La rivière Schächen draine l'ouest du col du Klausen situé dans le Schächental et se jette dans la Reuss à Attinghausen. Le bassin-versant mesure 109 km². Sur les



Figure 1. Le Sagentobelbach sur le tronçon plat (1.5%–2.0%). Photographie prise en novembre 2012 (après la grosse crue du 3 juillet 2012) (Photo: Basler&Hofmann AG).

deux derniers kilomètres de son parcours, la rivière s'écoule sur son cône alluvial. Sur ce tronçon, le ruisseau a été corseté dans un canal rigide après les inondations dévastatrices de 1911 (cf. Figure 2). Sur ce secteur, la pente est de 2.2%, la largeur du lit fait 15 m et les berges ont une inclinaison de 1:1. La rugosité du lit et du mur peut être caractérisée par une valeur k de Strickler de 45 m^{1/3}/s.

Dans la partie supérieure, le canal se trouve dans une tranchée. Le canal

Revanche nécessaire f_e	calculée	arrondie (valeur limite considérée)	Remarque
Écoulement Q [m ³ /s]	13		
Profondeur d'écoul. h [m]	1.1		calcul des courbes de remous
Vitesse d'écoulement v [m/s]	2.5		calcul des courbes de remous
σ_{wz} [m]	0.20		estimé
σ_{wh} [m]	0.13		équation (3)
f_w [m]	0.23		équation (2)
f_v [m]	0.32		équation (4)
f_t [m]	0.50		bois flottant isolé, pont avec revêtement inférieur lisse
f_e coupe [m]	0.23	0.3	selon éq. (1) avec f_w
f_e digue / cône [m]	0.39	0.4	selon éq. (1) avec f_w , f_v
f_e pont [m]	0.64	0.6	selon éq. (1) avec f_w , f_v , f_t

Tableau 1. Revanches nécessaires pour le ruisseau du Sagentobelbach pour un débit de 13 m³/s.

coule ensuite sur le cône alluvial, c'est-à-dire que l'eau sortante ne retourne pas dans le chenal.

Les situations météorologiques de barrages de l'ouest conduisent toujours à des crues importants. Le 1^{er} août 1977 et le 23 août 2005, le Schächen déborda en amont du pont CFF et aussi-juste en

amont de son embouchure, et provoqua de nombreux dégâts. La Reuss ne parvint plus à maîtriser l'accumulation des matériaux charriés, conduisant à un atterrissement du lit à l'embouchure. La combinaison de ces deux événements provoqua un atterrissement régressif dans le canal du Schächen, puis le remplissage

de la section transversale du pont par des matériaux charriés et du bois.

Fondamentalement, on distingue deux cas de dimensionnement différents, à savoir le cas d'un écoulement d'eau claire avec une vitesse élevée sur un lit lisse, ainsi que le cas d'un écoulement sur un atterrissement régressif.

Les revanches nécessaires pour le cas sans dépôt de matériaux charriés dans le canal sont présentées dans le *Tableau 2*. Elles sont déterminées d'après les revanches nécessaires minimales et maximales décrites au chapitre 4.6 de l'article précédent. La distance intérieure sous le pont et la hauteur des berges s'élèvent à 3 m. La somme de la hauteur d'eau avec la revanche vaut 2.8 m. Le dimensionnement serait alors suffisant dans ce cas.

Les revanches nécessaires pour le cas avec dépôt de matériaux charriés dans le canal sont présentées dans le *Tableau 3*. Dans ce cas-là, les berges doivent être d'au moins 4 m (correspondant à la somme des dépôts, de la hauteur d'eau et la revanche nécessaire). Cette condition est respectée par le rehaussement récent des murs de rive.

Sous le pont, un dégagement de 4.16 m devrait être disponible. La hauteur de 4 m prévue initialement lors de la construction des NLFA n'aurait donc pas suffi. Le nouveau pont a été réalisé comme pont en charge avec un carénage de 3 m. Plus tard, le dimensionnement calculé se révéla correct dans les modèles d'essais hydrauliques.

4. Rhin alpin, tronçon du Rhin international

En amont du lac de Constance, le Rhin alpin marque la frontière entre Saint-Gall (CH) et le Vorarlberg (A) et draine un grand bassin versant de 6119 km². Le long de ce tronçon, plusieurs ponts traversent le fleuve. Celui-ci s'écoule entre des hautes digues non-résistant à la submersion en forme de double trapèze. Les glacis sont séparés du lit mineur par des digues submersibles. Le lit mineur a une largeur d'environ 60 m. La distance entre les digues principales est d'environ 255 m. Le Rhin alpin a une pente de 0.11 ‰. L'indice de rugosité du lit est estimé à 37 m^{1/3}/s, celui des berges et du glacis est évalué à 32.5 m^{1/3}/s. Ce tronçon est considéré comme un secteur d'aggradation. Mais, les variations du lit sont faibles durant les crues car les bassins versants des torrents sont éloignés et les matériaux charriés stockés dans le lit en amont. Par contre les apports de bois sont élevés en cas de crue.

Revanche nécessaire f_e	calculée	arrondie (valeur limite considérée)	Remarque
Ecoulement Q [m ³ /s]	120		
Profondeur d'écoul. h [m]	1.3		selon calcul d'écoul. normal
Vitesse d'écoulement v [m/s]	7.1		selon calcul d'écoul. normal
σ_{WZ} [m]	0.00		chenal fixe, pas d'atterrissement
σ_{Wh} [m]	0.14		équation (3)
f_W [m]	0.14		équation (2)
f_V [m]	2.57		équation (4)
f_t [m]	0.50		bois flottant isolé, pont avec sous-face lisse
f_e coupe [m]	0.14	0.3	selon éq. (1) avec f_W
f_e digue / cône [m]	2.57	1.5	selon éq. (1) avec f_W, f_V
f_e pont [m]	2.62	1.5	selon éq. (1) avec f_W, f_V, f_t

Tableau 2. Revanche nécessaire pour le ruisseau de Schächen. Calcul effectué pour un débit de 120 m³/s, avec un écoulement sur un lit lisse, sans atterrissement.

Revanche nécessaire f_e	calculée	arrondie (valeur limite considérée)	Remarque
Ecoulement Q [m ³ /s]	120		
Profondeur d'écoul. h [m]	1.36		selon calcul d'écoul. normal sur une couche de dépôts de 1.5 m, déterminée par simulation numérique
Vitesse d'écoulement v [m/s]	4.56		idem
σ_{WZ} [m]	0.30		la hauteur d'atterrissement calculée par simulation dépend fortement des scénarios choisis
σ_{Wh} [m]	0.14		équation (3)
f_W [m]	0.33		équation (2)
f_V [m]	1.06		équation (4)
f_t [m]	0.50		bois flottant isolé, pont avec sous-face lisse
f_e coupe [m]	0.33	0.3	selon éq. (1) avec f_W
f_e digue / cône [m]	1.11	1.1	selon éq. (1) avec f_W, f_V
f_e pont [m]	1.26	1.3	selon éq. (1) avec f_W, f_V, f_t

Tableau 3. Revanche nécessaire pour le ruisseau de Schächen. Calcul effectué pour un débit de 120 m³/s, avec atterrissement régressif.



Figure 2. Ruisseau de Schächen au niveau de la commune d'Altdorf (Photo: Flussabau AG SAH).



Figure 3. Rhin alpin à Au/Lustenau (la photo ne correspond pas à l'hydraulique d'emplacement) (Photo: Hunziker, Zarn & Partner AG).

Revanche nécessaire f_e	Glacis gauche		Lit mineur		Glacis droite		Remarque
	calculée	arrondie	calculée	arrondie	calculée	Arrondie	
Ecoulement Q [m ³ /s]	715		2080		305		$Q_{total} = 3'100$ m ³ /s
Profondeur d'écoul. h [m]	3.73		7.36		2.92		selon calcul d'écoul. normal, moyenne pondérée 6.10 m
Vit. d'écoulement v [m/s]	2.31		3.67		1.96		selon calcul d'écoul. normal
σ_{wz} [m]	0.05		0.05		0.05		estimé
σ_{wh} [m]	0.43		0.43		0.43		équation (3)
f_w [m]	0.43		0.43		0.43		équation (2)
f_v [m]	0.27		0.69		0.20		équation (4)
f_t [m]	1.00		1.00		1.00		beaucoup de bois flottant, ponts avec revêtement en partie rugueux
f_e coupe [m]	0.43	0.4	0.43	0.4	0.43	0.4	selon équ. (1) avec f_w
f_e digue / cône [m]	0.51	0.5	0.81	0.8	0.47	0.5	selon équ. (1) avec f_w, f_v
f_e pont [m]	1.12	1.1	1.29	1.3	1.11	1.1	selon équ. (1) avec f_w, f_v, f_t

Tableau 4. Revanche nécessaire pour le Rhin alpin avec un débit de 3100 m³/s.

La revanche partielle f_w considérant les incertitudes lors de détermination du niveau d'eau, est calculée sur la totalité de la section transversale. Une erreur dans l'estimation de l'indice de rugosité du lit majeur se répercute sur le niveau d'eau dans le chenal moyen et vice-versa.

Pour un débit de 3100 m³/s (HQ_{100}), environ 2080 m³/s s'écoulent dans le chenal principal (lm) avec une hauteur d'eau moyenne de 7.36 m et une vitesse d'écoulement moyenne de 3.67 m/s. Les valeurs correspondantes pour le glacis gauche (gg) sont de 715 m³/s, 3.73 m et 2.31 m/s; et pour le glacis droite (gd) 305 m³/s, 2.92 m et 1.96 m/s. Les valeurs ont été déterminées en écoulement normal sur un profil transversal idéalisé au kilomètre 79.4. L'erreur induite par le calcul du débit σ_{wh} peut être évaluée en pondérant les débits partiels avec les hauteurs d'eau moyenne. Celle-ci peut être calculée par:

$$h_{moyen} = \frac{h_{gg}Q_{gg} + h_{lm}Q_{lm} + h_{gd}Q_{gd}}{Q_{total}} = \frac{3.73 \cdot 715 + 7.36 \cdot 2080 + 2.92 \cdot 305}{3100} \approx 6.10 \text{ m}$$

Avec l'équation (3), la valeur obtenue pour σ_{wh} est 0.43 m. L'erreur sur le niveau d'eau σ_{wz} liée aux incertitudes de la cote du fond est estimée à 0.05 m. Dans le lit mineur, cette incertitude est due aux dépôts potentiels de matériaux charriés, et dans le lit majeur, elle est due aux dépôts des matières en suspension.

Si les erreurs étaient estimées différemment pour les lits partiels, une moyenne pondérée pourrait être déterminée avec le même procédé que celui utilisé pour le calcul d'erreurs des hauteurs d'eau. En utilisant l'équation (2), on obtient enfin une valeur f_w de 0.43 m aussi bien

pour le lit majeur que pour le canal principal.

En raison des vitesses d'écoulement différentes dans les sections partielles, la formation des vagues et les remous d'exhaussement sur des obstacles diffèrent selon la section considérée. La revanche partielle f_v du lit majeur n'est donc pas équivalente à celle du lit mineur. Avec l'équation (4), on obtient $f_v = 0.69$ m pour le lit mineur, $f_v = 0.27$ m pour le glacis gauche et $f_v = 0.20$ m pour la glacis droite. Comme les bois flottants peuvent être charriés dans toutes les sections transversales partielles, la revanche partielle f_t est fixée partout à 1 m.

La revanche nécessaire est déterminée individuellement pour chaque section transversale partielle. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 4. Pour les berges à hauteur de terrain, une revanche nécessaire f_e de 0.4 m est définie. Celle-ci est une valeur théorique car le Rhin alpin ne s'écoule pas sans digues. Dans cette situation hypothétique, la revanche nécessaire serait identique pour les trois sections transversales partielles, car elle serait uniquement dépendante de l'erreur du niveau d'eau. Le long des digues, la revanche nécessaire est de 0.50 m pour les deux rives du lit majeur. Elle serait de 0.80 m dans le lit mineur si celui-ci était canalisé par des digues. Cette différence est causée par une vitesse d'écoulement plus élevée dans le lit mineur. Au niveau d'un pont, la revanche nécessaire f_e est de 1.10 m pour les deux lits majeurs et de 1.30 m dans le canal principal.

Adresse des Auteurs:

Commission pour la protection contre les crues (CIPC)



Hydraulische Lösungen - alles aus einer Hand

Planen - entwickeln - produzieren

Als innovatives Schweizer Traditionsunternehmen sind wir spezialisiert auf hydraulische Steuerungs- und Antriebstechnik. Ob grosse, komplexe Herausforderungen oder Einzelkomponenten: Jeder Auftrag ist für uns der Wichtigste.

Bei Fragen, Anliegen oder Projekten freut es uns, für Sie da zu sein.

Oelhydraulik Hagenbuch AG, Rischring 1, CH-6030 Ebikon, Tel. +41 (0)41 444 12 00, Fax +41 (0)41 444 12 01

ohe@hagenbuch.ch, www.hagenbuch.ch, www.hydraulikshop.ch

OHE
Oelhydraulik Hagenbuch AG