



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

Bund, Kantone und Fürstentum Liechtenstein

c/o CEFOR Lyss, Hardernstr. 20
CH-3250 Lyss

Tél.: +41 32 3874960

e-mail raetz@bzwlyss.ch

Eaux superficielles et infrastructures forestières



Support de cours

Nendaz, 9.10.14

Version du 27.10.2014



Contenu

Considérations générales	5
Fonctionnalités d'un aqueduc	5
Effets hydrauliques.....	6
Effet sur l'environnement	6
Bases légales	7
Comparatif de coûts	8
Bases de réalisation	9
Quantités d'eau	9
Généralités	9
Définitions (selon Böll).....	10
Estimation des débits de crue	10
Autres processus – dangers naturels	14
Contraintes de circulation.....	15
Véhicule	15
Choix du type de passage selon Kuonen (1983).....	16
Aptitudes au service des types d'ouvrages.....	17
Capacité hydraulique de l'ouvrage	17
Capacité hydraulique d'un gué / pont.....	18
Charriage et capacité hydraulique des ouvrages.....	20
Comportement en cas de saturation et débordement	20
Type „aqueduc“	21
Simple, peu onéreux mais un système à problèmes.	21
Éléments constructifs des aqueducs	21
Buses.....	21
Dalot (canal en dur avec couvercle).....	24
Gués (préparé par Martin Ammann, Eschenbach).....	27
Introduction	27
Les gués en zone forestière ou agricole	27



Problème à résoudre	28
Valeurs de conception.....	29
Géométrie de la chaussée et arrondi du profil en long.	29
Réalisation à posteriori.....	30
Capacité d'absorption d'un gué.....	32
Détails de réalisation.....	34
Choix des matériaux et réalisation	34
Ponts.....	35
Assainissement de ponts	37
Sources.....	38



Aqueducs, gués ou ponts sont des ouvrages auxquels se trouvent confrontés tout gestionnaire de forêt. Afin de garantir leur fonctionnalité de manière durable, un certain nombre de règles doivent être respectées. Tous les types d'ouvrages ont un même but fonctionnel: assurer le passage des eaux superficielles sans menacer l'existence de l'infrastructure.

Le but de ce document est de fournir des éléments de détail de construction d'ouvrages liés à la gestion des eaux superficielles. Les cours d'eau permanents et intermittents sont traités. Les ouvrages de drainages proprement dit n'en font pas partie.

Considérations générales

Fonctionnalités d'un aqueduc



Illustration 1 A quelles contraintes l'ouvrage doit-il répondre?

Le trafic routier doit mener de A à B et l'eau doit circuler de C à D en tenant compte des conditions suivantes:

- Coûts de construction adéquats.
- L'ouvrage peut absorber les charges de trafic et de transport de bois.
- L'eau et le charriage doivent pouvoir suivre leur cours naturel.
- La durée de vie doit être élevée
- L'entretien doit être facile, minimal et peu coûteux.
- L'ouvrage de doit pas constituer un obstacle à la faune et flore.
- La sécurité et le confort du trafic doit être assuré.



Effets hydrauliques

Les aqueducs entraînent presque toujours une modification de la géométrie du cours d'eau, c'est un canal. En ignorant le charriage et considérant uniquement le débit de l'eau, 3 phases ou transitions ont lieu dans la zone du passage de la route:

En amont : concentration du cours d'eau

Le lit devient plus étroit – la rugosité décroît

- L'eau prend de la vitesse,
- L'énergie cinétique augmente

Passage sous la route

Souvent la pente du lit diminue et la rugosité est moindre

- La vitesse de l'eau s'accélère encore dans le canal (la composante « faible rugosité » domine),
- L'énergie cinétique tend à augmenter encore

Sortie du canal en aval

Le lit s'élargit – la rugosité augmente

- La vitesse de l'eau décroît,
- L'énergie décroît
- L'énergie doit donc être absorbée: risque d'affouillement.

Il s'agit par conséquent de contrecarrer ces changements d'énergie cinétique. En d'autres termes, la **consolidation adéquate du lit du cours d'eau en amont et en aval de l'ouvrage** est nécessaire et si possible la configuration du lit naturel doit être reproduite à l'intérieur du canal lui-même.

L'emploi de béton pour sécuriser le lit du cours d'eau n'est pas toujours nécessaire. On peut renforcer un lit avec des blocs d'un diamètre suffisant (augmenter la rugosité pour freiner l'eau) ou consolider uniquement les berges. Une solution permettant d'assurer **la qualité du lit naturel tout au long de l'ouvrage** doit être recherchée, même si les contraintes du lieu exigent des compromis techniques.

Effet sur l'environnement

Les modifications apportées à la géométrie du cours d'eau, à la qualité du lit et du sous-sol environnant ont toujours des effets adverses sur la faune et la flore, en particulier les petits mammifères, les amphibiens, les reptiles et poissons. C'est principalement leur capacité à remonter le cours d'eau qui est péjorée en raison de la disparition de la végétation qui leur offre couvert et nourriture. Principalement :

- Disparition de biotopes (disruption des échanges entre eaux superficielles et souterrain, interruption du lit et des berges naturelles)
- Le réseau gravitaire est interrompu (la migration est rendue plus difficile, les échanges entre amont et aval sont interrompus),
- L'écoulement de l'eau est perturbé, affouillement, érosion et seuils subséquents constituent autant d'obstacle souvent insurmontable pour la faune et la flore. Ces effets négatifs s'ajoutent aux mesures de construction elles-mêmes,
- Les ruptures de pente naturelles entraînent érosion et dépôts qui gênent la continuité des biotopes.

Pour toutes ces raisons il faut viser (idéaltypiquement constructif):

- **Respect du profil en long naturel,**
- **Conserver la rugosité naturelle du lit**
- **Éviter les seuils**
- **Conserver une berge aussi proche de la nature, même dans le canal.**



Bases légales

Les textes légaux suivant sont à respecter en ce qui concerne les eaux superficielles et les infrastructures de desserte:

Loi/ordonnance	Art.	al.	Theme	Enoncé/Teneur
Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) 814.20 (Etat le 1er janvier 2014)	4	a	Définition	eaux superficielles: les eaux de surface, les lits, les fonds et les berges, de même que la faune et la flore qui y vivent.
	37		Endiguements et corrections de cours d'eau	Principe général de limitation
	37	1,c	Interventions	permettent d'améliorer au sens de la présente loi l'état d'un cours d'eau déjà endigué ou corrigé.
	37	2	Input de la modif. de 2009 « Renaturation » de la LFsur l'aménagement des cours d'eau 721.100	a. ils puissent accueillir une faune et une flore diversifiées; b. les interactions entre eaux superficielles et eaux souterraines soient maintenues autant que possible; c. une végétation adaptée à la station puisse croître sur les rives
	38	1	Interdiction	Couverture ou mise sous terre des cours d'eau
	38	2	Pouvoir discrétionnaire	Seulement avec autorisation de l'autorité pour les exceptions autorisées par la loi ⁽¹⁾ .
	51	2	Compétences cantonale	Service et police à assurer

¹ Exceptions:

- a. les canaux des déversoirs de crues et les canaux d'irrigation;
- b. les passages sous des voies de communication;
- c. les passages sous des chemins agricoles ou forestiers;
- d. les petits fossés de drainage à débit non permanent;
- e. la réfection de tronçons couverts ou mis sous terre, dans la mesure où un écoulement à l'air libre ne peut pas être rétabli ou causerait d'importants préjudices à l'agriculture.

La mise en œuvre est clairement en mains cantonales. Selon l'ampleur du projet, plusieurs services ou département peuvent être consultés pour accorder une autorisation. La définition des eaux superficielles est une définition « à contrario »: sont superficielles toutes les eaux qui ne sont pas souterraines. En cas d'événement pluviométrique exceptionnels la distinction peut n'être plus pertinente. Il apparait que les opinions et interprétations divergent parfois et peuvent présenter des difficultés, même lors de remplacement d'ouvrages existant. Une approche pragmatique est conseillée en gardant à l'esprit les points suivants lors des processus de planification, d'autorisation et de réalisation:

- **Assurer les fonctionnalités (conserver une marge de sécurité)**
- **Solution respectueuse de l'environnement (regarder en amont et en aval)**
- **Solution efficiente en matière de coûts (ne pas oublier l'entretien)**



Comparatif de coûts

Les coûts résultants d'une décision sont toujours intéressants à garder à l'esprit. L'exemple ci-après montre la variation de coûts engendré par le choix d'un type d'ouvrage pour un même cahier des charges d'écoulement.

Hypothèses : longueur de l'ouvrage: 8.5m, Fonds de fouille ~1.8m, pente longitudinale 6%

CAN	libellé	Aqueduc dn600	Buse métal. Profil aplati mm 98 – 120	Dalot
237.	Fouille en pleine masse	Fr. 1'000.-	1'000.-	Fr. 1'000.-
237.	Livraison	Fr. 1'800.-	Fr. 4'150.-	
237.	Pose	Fr. 1'000.-		
237.	Têtes de charge/décharge	Fr. 3'200.-	Fr. 4'000.-	Fr. 4'000.-
221.	grave 0/45, 0/22 mise en œuvre yc. livraison.	Fr. 800.-	Fr. 1'000.-	Fr. 800.-
241.	béton			Fr. 20'000.-
241.	Divers ferrements			Fr. 2'000.-
Total		Fr. 7'800.-	Fr. 10'150.-	Fr. 27'800.-
Ratio		1	~1.5	~3.5

La longévité des ouvrages, les coûts d'entretiens, le risque d'interruption de fonctionnalité, le risque d'une destruction complète et les incidences sur l'aval doivent aussi entrer en ligne de compte. L'analyse en coûts de construction seulement peut amener à une mauvaise décision.

Avant / après: avantages hydrologiques et écologiques



Effets positifs: Le passage pour la faune est facilité, le lit est continu et proche de l'état naturel, la capacité d'écoulement est améliorée, l'écoulement est continu, l'entretien plus facile. Seul bémol : le recouvrement de l'aqueduc est probablement insuffisant.



Bases de réalisation

Quantités d'eau

Généralités

Les chemins forestiers et ruraux traversent généralement des cours d'eaux dont le bassin de réception est petit ($< 10 \text{ km}^2$) ; souvent moins de 1 km^2 .

La détermination des quantités d'eau de crue dans les torrents dotés d'un petit bassin de réception est difficile et grevée d'une grande incertitude.

De manière générale, l'interprétation des résultats de calculs ou de données doit être prudente. En aucun cas il ne faut s'appuyer que sur une seule méthode ou calcul.

De nombreux facteurs peuvent varier et plus le bassin est petit plus les facteurs pèsent sur les résultats. Les grands bassins bénéficient d'effets de moyenne et sont plus suivis par des mesures qui permettent d'affiner les méthodes et prévisions. Très peu de petits bassins sont régulièrement suivis en Suisse et dotés d'une série temporelle de mesures qui permettent de calibrer les méthodes de calcul.

D'autre part le compartimentage des bassins et leur effet de tampon sur les crues agit moins que dans les grands bassins. Les pluies d'orages, assez concentrées géographiquement, peuvent avoir des conséquences très importantes sur les débits de crue. L'appréciation des risques et des processus d'écoulement doit être très soignée.



Illustration 3 Assainissement du pont sur la Sulzelruns (bassin: 1.7 km^2 ; HQ_{max} : env. $24 \text{ m}^3/\text{s}$).



Illustration 4 Remise à neuf de l'aqueduc de la Teufruns sur la Krauchtalstrasse (bassin 0.25 km^2 ; HQ_{max} : env. $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$)



L'estimation des quantités d'eau dépend de celle des facteurs relatifs au bassin de réception qui alimente le cours d'eau à l'endroit d'une intervention. Ces facteurs sont principalement:

- **Les précipitations:** c'est le facteur déterminant pour la formation du débit de crue. Tant la quantité que l'intensité sont importants
- **La végétation:** la couverture végétale et le sol interagissent. La végétation intercepte la pluie. Le type de végétation a une influence ainsi que la composition des types de couverture du bassin.
- **Le sol:** Les caractéristiques telles que la capacité d'infiltration en profondeur, la porosité, l'épaisseur de la couche d'humus et l'état hygrométrique sont déterminantes.
- **Le relief:** la pente, la rugosité, la diversité des stations géomorphologique (cuvettes, parties plates) ont une influence sur la vitesse d'écoulement de l'eau dans le bassin.

Définitions (selon Böll)

Q	:	Le débit Q est le volume d'eau qui passe à un endroit donné, dans un profil donné, pendant un laps de temps. Unité : $m^3 \cdot s^{-1}$ (m^3 par seconde).
HQ _{max}	:	Débit de crue; le débit maximal constaté (aussi HHQ) par une série de mesures.
HQ ₁₀₀	:	Crue centennale
HQ _{det}	:	La crue de dimensionnement est celle qui est choisie pour le dimensionnement d'un aqueduc. Les ouvrages forestiers (gués, ponts et aqueducs) doivent en principe être en mesure d'absorber la crue HQ ₁₀₀ , la crue de période de retour de 100 ans ou le cas échéant HQ _{max} .

Estimation des débits de crue

L'estimation des débits de crue est difficile pour les petits bassins versants et, de plus, très incertaine. La raison est l'absence de station de mesure des débits, les très fortes variations de volumes d'eau et aussi la rareté des événements torrentiels.

Il faut rester prudent lors de l'interprétation des résultats de calculs. Il faut utiliser plusieurs méthodes et se donner la peine de faire quelques recherches dans le passé, chercher les indices de crue et questionner les habitants du lieu.

2 méthodes sont présentées ci-après et un logiciel du FNP.

Formule empirique de Melli – Müller

La méthode repose sur la relation existant entre les débits mesurés (installation d'une station) et la surface du bassin de réception (illustration 5). Il en résulte le débit de crue Q_{max}

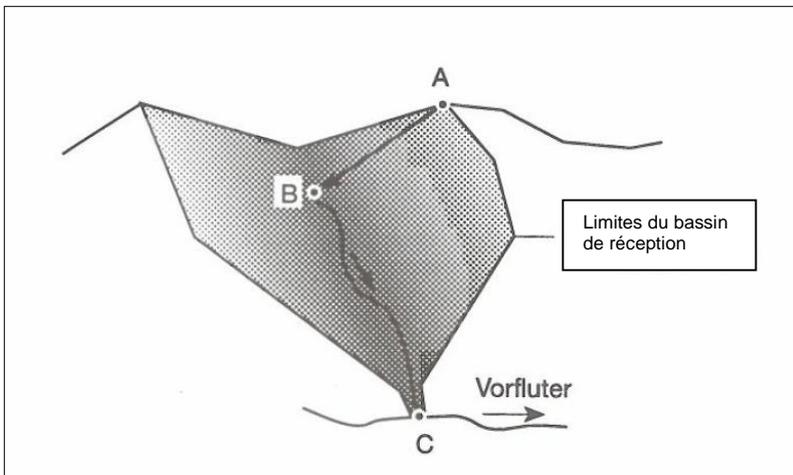


Illustration : bassin de réception
 (schématiquement (tiré de Böll 1997))

$$HQ_{\max} = \alpha \cdot \psi \cdot F^{2/3} \quad (\text{formule de Melli-Müller})$$

- Q_{\max} : Débit de crue maximale [m³/s]
- α : Coefficient de zone et de précipitation [-]
- ψ : Coefficient d'écoulement [-]
- F : Surface du bassin de réception [km²]

Le coefficient d'écoulement ψ donne la part des précipitations qui s'écoule suite aux précipitations. Ce coefficient d'écoulement est central dans la formule. Un bassin de réception avec des stations très diverses doit être divisé et chaque compartiment apprécié pour lui-même.

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

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

Flächencharakter	Abflussbeiwerte ψ
Fels	0,4–0,8
Schutthalden	0,05–0,4
Erosionsflächen	0,3–0,6
Weide	0,2–0,5
Wiese/Acker	0,1–0,5
Wald	0,05–0,4

Illustration: Coefficient d'écoulement selon **BWG** 2003

Illustration: Coefficient d'écoulement selon Böll 1997

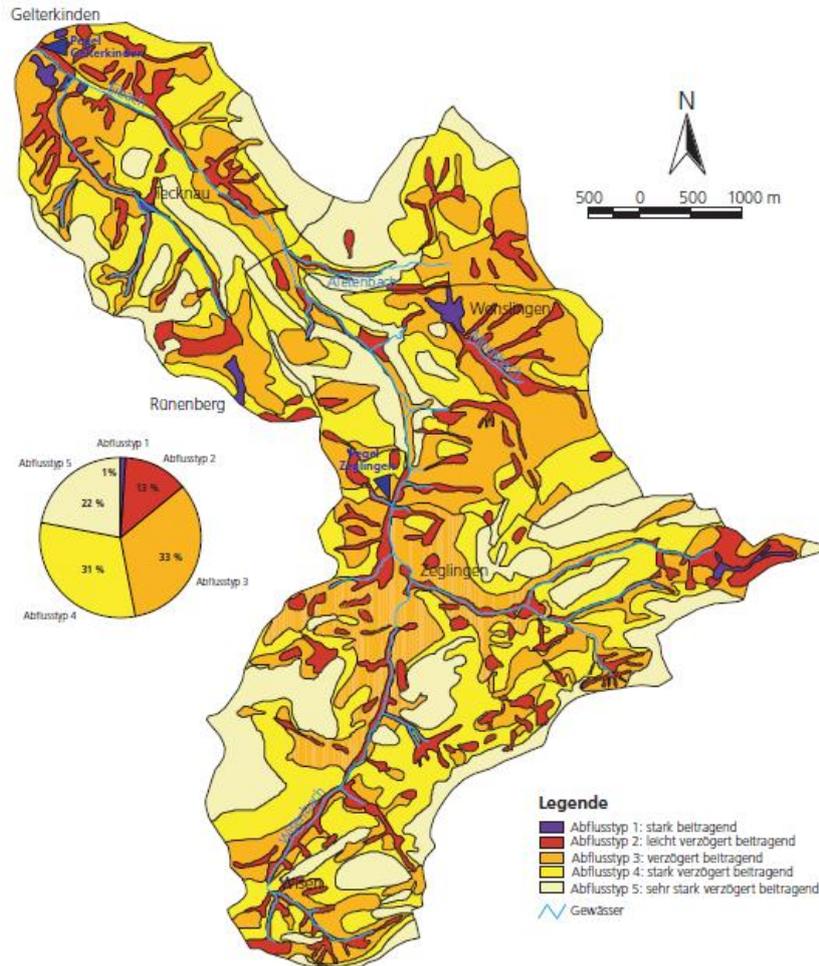
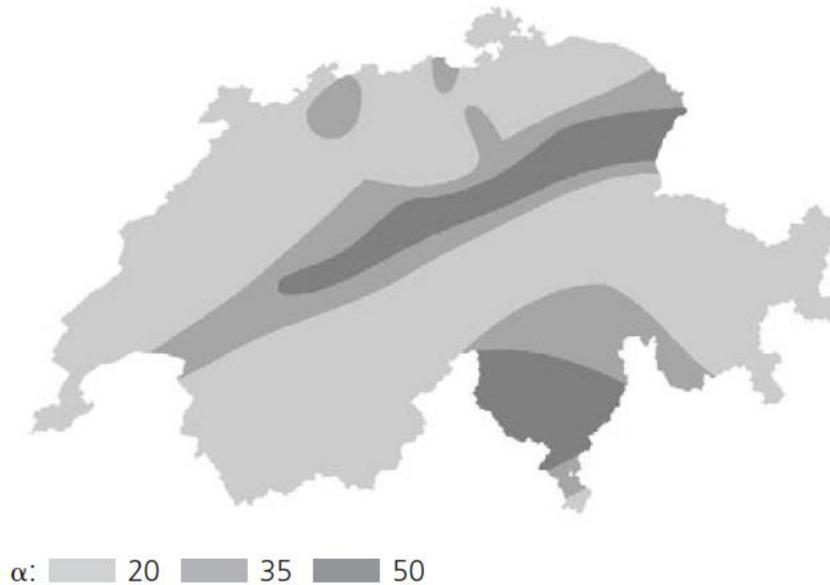


Fig. 4-4: Einzugsgebiet des Eibach (BL):
Die Abflusstypen 1–5 beschreiben die zu erwartende Abflussreaktion der Teilflächen.

Illustration : Bassin stratifié selon les Types d'écoulement (selon BWG 2003)



Illustration Coefficient de zone



L'intensité des précipitations peut être déterminée par une carte à l'échelle nationale qui donne les valeurs pour α .

Fig. 5-5: Zonenkarte für die α -Werte nach Zeller.

La formule empirique Melli-Müller s'applique pour des bassins à partir de 1 km². Pour les bassins entre 0.5 und 1.0 km², la formule produit des résultats plutôt conservateurs. Elle ne devrait pas être utilisée pour des bassins plus petits que <0.5 km².

Méthode du temps d'écoulement

Un avantage de cette méthode réside dans la prise en compte explicite des précipitations. Si l'on part en effet de la simple hypothèse que la période de retour d'une précipitation correspond à celle de la crue qui en résulte, il est possible de déterminer la crue de dimensionnement selon une périodicité déterminée. La méthode du temps d'écoulement peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$HQ_x = 0.278 * E * \psi * i(t_{R,x})$$

HQ_x : Crue de la périodicité choisie [m³/s]

F : Surface du bassin de réception [km²]

ψ : Coefficient d'écoulement [-]

$i(t_{R,x})$: Intensité de la précipitation d'une période de x et d'une durée T_R en mm/h

La méthode du temps d'écoulement est adaptée pour les petits bassins (<1 km²).



HAKESCH

Le FNP a développé un logiciel HAKESCH (Hochwasser Abschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz) qui reprend les aspects développés plus haut et permet une estimation des crues efficace et fiable. 5 méthodes sont appliquées, Müller, Taubmann, Kölla, temps d'écoulement modifié et Clark WSL (illustration 10). Les paramètres de terrain peuvent être saisi dans le logiciel. Après l'application des méthodes, le logiciel propose une pondération des résultats respectifs pour l'estimation finale de la crue de dimensionnement.

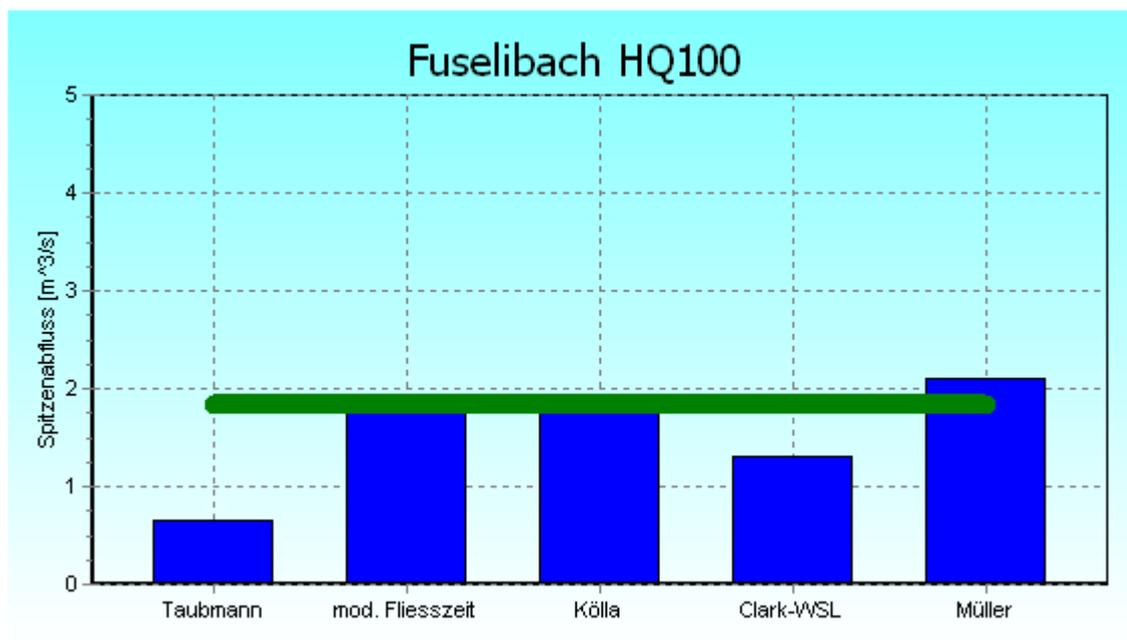


Illustration 10 Résultats HAKESCH sous forme de graphique et proposition d'une crue de dimensionnement (trait vert).

Autres processus – dangers naturels

L'estimation des crues ne tient pas compte du charriage. Seule l'eau est prise en compte. Il faut cependant tenir compte en plus de l'eau de crue du volume du charriage et son effet sur les structures, ainsi que des bois flottés qui peuvent créer des embâcles dans les torrents avec des conséquences désastreuses.

Il s'agit aussi si d'autres processus gravitaires peuvent survenir dans le couloir du cours d'eau, en particulier:

- Avalanches
- Laves torrentielles
- Chutes de pierre

Ainsi si le chemin traverse un couloir d'avalanche, la solution technique du gué d'impose, au détriment d'un pont par exemple.



Contraintes de circulation

Véhicules

- Géométrie des véhicules
- Fréquence des passages

Les passages sur les cours d'eau sont à dimensionner pour les véhicules lourds d'un poids total de 40 to. Les rayons de courbure des courbes du chemin et des arrondis des changements de pente longitudinale sont à dimensionner en conséquence.



Illustration 11 : passage d'un PL avec porte à faux important sur un gué.

Pour un PL à 3-4 essieux (empattement > 5m) ainsi que les remorques à 2 essieux, les valeurs suivantes sont à respecter :

Courbes: rayon minimal à l'axe	10 m
Pente longitudinale maximale	14 %
Largeur de la chaussée sur tronçons rectilignes	3.2 m
Banquette aval	0.5 m
Banquette amont	0.2 m
Dévers (normalement dévers aval)	2 – 4 %

Les sur-mesures dues au rayon de l'arc de cercle sont à ajouter.



Choix du type de passage selon Kuonen (1983)

Ponts:

- Beaucoup d'eau; charriage et flottage; pas d'avalanche
- La stabilité du couloir n'est pas menacée
- Grand confort de circulation
- Possibilité d'entretien hivernal)
- Par sa hauteur et largeur l'ouvrage ne perturbe pas le cours d'eau

Aqueduc:

- Peu d'eau, peu de charriage et de flottage; supporte les avalanches
- Ne pose pas de problème pour la géométrie du chemin

Gué:

- Peu d'eau, beaucoup de charriage et de flottage; avalanches
- Peu de circulation
- Intégration dans l'aménagement du torrent



Aptitudes au service des types d'ouvrages

Capacité hydraulique de l'ouvrage

Grâce aux méthodes hydrologiques on peut calculer les débits des cours d'eau à traverser.

L'aqueduc doit être en mesure de répondre à la crue centennale.

L'estimation de la capacité hydraulique Q d'un aqueduc (eau propre uniquement) se fonde sur la méthode de Strickler. On part de l'hypothèse que le canal n'est rempli que partiellement. La hauteur du tirant d'eau calculé y s'élève à seulement $y \leq 0.5 d$.

Le type d'aqueduc, la pente longitudinale de l'ouvrage joue un rôle important pour la capacité hydraulique. Plus les parois du tuyau, de la buse ou du chenal sont lisses, plus l'ouvrage aura une grande capacité hydraulique.

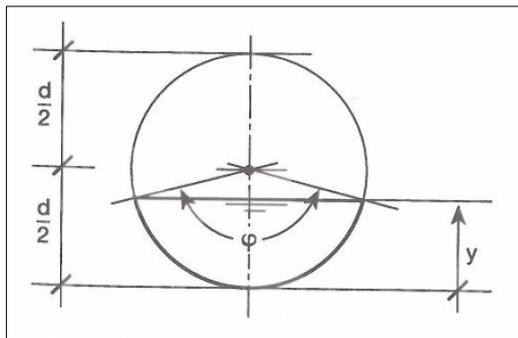


Illustration : Tuyau partiellement rempli avec plan d'eau et tirant d'eau théorique idéal $y \leq 0.4d$. (Böll 1997). On observera ici que l'angle au centre φ est de moins de 180 degrés. Avec un tirant d'eau de $d/2$, l'angle au centre vaut 180° .

L'hydraulique à surface libre est une discipline à part entière de la mécanique des fluides. Elle se distingue par le fait que la pression hydraulique dans le fluide est nulle à son contact avec l'air (miroir du cours d'eau) : la « surpression » observable dans un circuit de distribution d'eau potable par exemple ne se produit pas : le niveau d'eau monte. Sauf si on se trouve en situation de surcharge d'un aqueduc, situation que l'on cherche à éviter bien entendu.

Pour calculer la capacité d'absorption en eau claire d'un aqueduc, d'un canal ou d'un cours d'eau, il faut admettre que **l'écoulement est uniforme** pour établir la relation entre le débit, la vitesse d'écoulement et la section mouillée (ou d'écoulement) suivante :

$$Q = S \cdot V$$

N.B. Il est évident que l'hypothèse de l'écoulement uniforme fonde un modèle assez éloigné de la réalité d'un cours d'eau naturel, il s'en rapproche pourtant s'il s'agit d'un cours d'eau artificiel. L'écoulement uniforme suppose que le fond, le miroir (surface de l'eau à l'air) et la ligne de charge sont parallèles.



$$Q = K * S * R^{2/3} * i^{1/2} \quad (\text{formule de Manning-Strickler adaptée})$$

- V vitesse moyenne
- K coefficient de rugosité du lit (de Strickler)
- S section mouillée
- R rayon hydraulique $R = S/P$
- P périmètre mouillé
- i pente du lit (constant par hypothèse)

N.B. : Attention, le débit obtenu est celui de l'eau claire.

La surmesure pour le charriage dépend de la qualité de celui-ci

Capacité hydraulique d'un gué / pont

La méthode de Strickler peut aussi être utilisée pour calculer la hauteur d'eau dans un cours d'eau, un torrent, au passage d'un gué ou sous un pont. Les paramètres suivants sont nécessaires :

- Pente longitudinale du thalweg (moyenne sur le tronçon considéré)
- Coefficient de rugosité k
- Rayon hydraulique

Tableau 3. Coefficient de rugosité k selon Strickler (Böll 1997) complété

Cours d'eau naturels:	k (m^{1/3}s⁻¹)
Torrent avec des pierres, blocs au repos	25-28
Torrent avec un charriage grossier en mouvement	19-22
Petit torrent, plan d'eau de moins de 8 m de largeur	8 - 15
Canal et conduites:	
Canal avec une surface en béton irrégulière	50
Canal avec des pierres grossières	50
Aqueducs en béton, joints soigneux	85
Buse en tôle ondulée	45 - 50



Illustration : analyse de la capacité hydraulique d'un aqueduc en fonction de la pente et du type de tuyau.

Paramètres d'entrée			Aqueduc			
			A	B	C	D
			tube "Spiwell"		tube béton	
Crue de dimensionnement	Q_{max}	m^3/s	2.50	2.50	2.50	2.50
Pente moyenne du lit en amont	J_c	%				
Pente du tube	J_t	%	10	15	10	15
Angle de pente du tube	γ	°	5.71	8.53	5.71	8.53
Coeff. de rugosité selon Strickler	k	$m^{1/3}/s$	40	40	80	80
Tirant d'eau maximum dans le tube	t	%	50	50	50	50
Angle au centre au tirant max.	φ	°	180.00	180.00	180.00	180.00
Calcul de la capacité eau propre						
Diamètre intérieur du tube	d	m	1.0	1.0	1.0	1.0
Tirant d'eau de crue théorique	y	m	0.5	0.5	0.5	0.5
Section mouillée	S	m^2	0.39	0.39	0.39	0.39
Périmètre mouillé	P	m	1.57	1.57	1.57	1.57
Rayon hydraulique	R	m	0.25	0.25	0.25	0.25
Largeur au miroir	L	m	1.00	1.00	1.00	1.00
Tirant d'eau moyen	\acute{y}	m	0.39	0.39	0.39	0.39
Vitesse d'écoulement théorique	v	m/s	5.02	6.15	10.04	12.30
Hauteur de la ligne de charge	H	m	1.79	2.44	5.66	8.29
Nbre de Froude	Fr		2.56	3.15	5.13	6.30
Pente de la ligne de charge	JE	%	10.00	15.00	10.00	15.00
Capacité	QS	m^3/s	1.97	2.41	3.94	4.83
Réserve de capacité	ΔQ	m^3/s	-0.53	-0.09	1.44	2.33

N. B. On appréciera ici intuitivement l'impact du coefficient de Strickler (rugosité des parois de l'aqueduc) et de la pente sur la vitesse d'écoulement. Le nombre de Froude met en relation l'énergie cinétique de la masse d'eau en mouvement et l'influence de la pesanteur (énergie potentielle). Ce nombre sert à caractériser les écoulements des cours d'eau. Il était à l'origine utilisé pour calculer la performance du design des coques de navire (résistance à l'avancement). Froude était ingénieur naval. Ses travaux sont toujours utiles en dynamique des fluides.



Charriage et capacité hydraulique des ouvrages

L'expérience montre que nombre d'aqueducs existants sont sous-dimensionnés avec pour conséquence qu'ils se bouchent facilement (charriage et flottage) ou qu'ils débordent car leur capacité hydraulique est insuffisante. Le charriage et le flottage nécessitent une sur-mesure (lumière: distance entre le tirant d'eau calculé et la voûte de l'ouvrage). Le charriage est une problématique très importante dans les torrents de montagne : il ne fera pas l'objet d'un développement plus approfondi ici.

Comportement en cas de saturation et débordement

Même si le projet remplit tous les critères de sécurité (sur le papier), si toutes les normes sont remplies, il reste le risque résiduel d'un débordement intempestif. Il s'agit donc de prévoir les effets de l'événement inattendu. Si ceux-ci sont de nature insupportable, il s'agit de repenser le projet, de choisir une autre solution ou d'envisager des mesures complémentaires. Peut-être s'agit-il d'une problématique dangers naturels et non seulement d'un simple passage de cours d'eau.



Type „aqueduc“

Simple, peu onéreux mais un système à problèmes.

Les aqueducs, sous forme de buse ou d'ouvrage maçonné sont relativement simples à réaliser et pas trop onéreux. Les transitions d'énergie hydraulique problématiques sont toutefois plus fréquentes sur ce type d'ouvrage que sur les autres. Entrées et sorties sont les points critiques. Ces dernières doivent être conçues de manière à éviter l'érosion. Ces faiblesses deviennent critiques lorsque l'eau charrie des matériaux.

Les aqueducs se **bouchent** facilement, **nécessitent un entretien sérieux** (on a tendance à les oublier) et les dépôts susceptibles de gêner le passage de l'eau sont souvent invisibles et **difficile à dégager**. De plus ils représentent souvent un **obstacle pour la faune** aquatique.

Pour des raisons de morphologie du terrain, dans la plupart des cas, la route sera construite en remblai. La nature du matériau local de remblai et sa compacité est importante.

Éléments constructifs des aqueducs

Buses

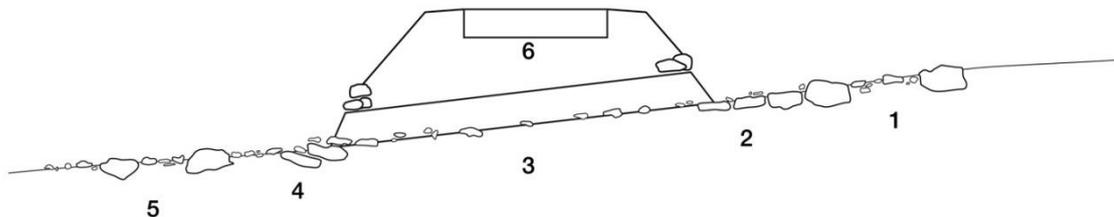


Illustration 2: Profil d'une buse avec lit naturel fin et renforcement artificiel

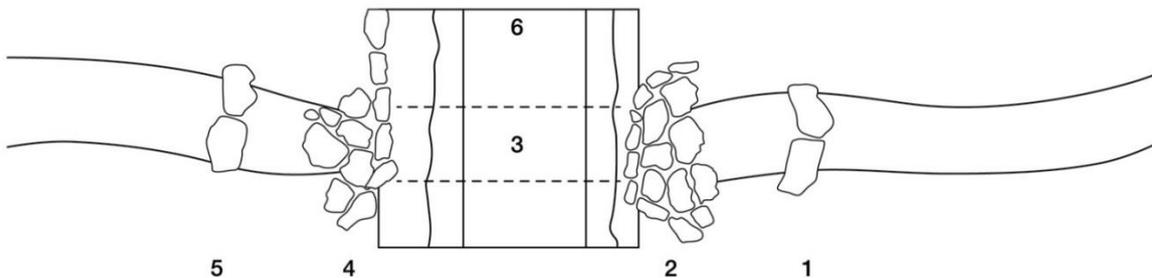


Illustration 3: Situation d'une buse sans représentation du lit naturel

- 1) Renforcement du lit en amont
 - Doit garantir le niveau d'entrée et prévenir l'affouillement des berges.
- 2) Tête de charge, elle doit:
 - Capturer l'eau sans seuil mais le lit doit être structuré (pas de béton lisse),
 - Empêcher l'affouillement et la dérivation intempestive de l'eau et du charriage (stabilisation des berges),
 - Une grille ne peut être incorporée si son nettoyage mécanisé est garanti (accessibilité par une machine et son godet),
 - Un bassin de décantation n'est recommandé que si le cours d'eau est peu pentu et que le nettoyage mécanisé est garanti.
- 3) Passage dans la buse:
 - Le type de buse et son diamètre ne doit pas seulement remplir les contraintes hydrologiques (Débit et nature du charriage) mais aussi les



contraintes environnementale. Un profil aplati est possible même si la statique est un peu plus compliquée.

- Le diamètre minimal pour un entretien facile est de 80 cm (Böll, 1997),
 - Dans la mesure du possible maintenir la pente du cours d'eau,
 - Le lit naturel doit être reconstitué à l'intérieur de la buse, de manière à assurer la continuité du lit naturel,
 - Incorporer si nécessaire des éléments fixes de structure dans la buse,
 - Poser une buse de longueur suffisante,
 - Si la buse nécessite des ancrage pour éviter son déplacement vers l'aval (arrachement), ancrer du côté amont, on évite ainsi les problèmes de tassement en aval.
 - La compaction latérale est la mesure la plus efficace pour assurer la stabilité de la buse,
 - Protéger les extrémités (bucheronnage, entretien, charriage et intempéries),
 - Si la buse n'est pas suffisamment rigide, prévoir un lit de béton maigre
 - La pose se fait d'aval en amont (les manchons vers l'amont),
- 4) Tête de décharge
- Eviter une sortie avec un saut (risque d'affouillement),
 - Si ce n'est pas possible, renforcer le lit et les berges avec des blocs, prévoir un bassin d'affouillement généreux),
 - Protéger la sortie de la buse, biseauter ou protéger constructivement,
 - Assurer l'évacuation des eaux afin d'éviter la saturation du remblai (stabilité du tracé et risque de refoulement dans la buse),
- 5) Renforcement du lit en aval
- Eviter l'érosion et la formation d'un bassin d'affouillement intempestif et régressif qui menacera la stabilité de la route,
- 6) Remblai et superstructure de la route
- Le remblai et la fondation de la route doivent pouvoir reprendre les charges prévues de trafic, prévoir des matériaux susceptible de faire une prise hydraulique ou transmettre les contraintes de part et d'autre de l'ouvrage (conceptuel : pont enterré),
 - Réalisation toujours en fonction du type de buse,
 - Penser à l'évacuation des eaux de la route.

Choix des matériaux

Dans la mise en terre de buses il faut distinguer 2 cas de figure: les tuyaux souples et les tuyaux rigides.

Les tuyaux rigides en béton ou en matériaux similaires peuvent reprendre la plupart des charges statiques. Ils sont toutefois sensibles aux contraintes dynamiques (chocs au transport et à la mise en œuvre mais aussi surcharges ponctuelles et vibrations dues au trafic). Ces inconvénients, surtout leur exposition aux chocs durant leur transport en tête de chantier font qu'ils ne sont plus beaucoup utilisés de nos jours.

Les tuyaux souples en plastique ou en acier ondulé sont plus légers, peuvent se déformer sans perdre tout de suite leur étanchéité. Les contraintes verticales sont déterminantes dans les constructions sous remblais : **une bonne compaction latérale des matériaux de remblai est indispensable** pour que les sections circulaires ne se déforment pas. Plus le matériau est compacté, mieux les forces sont réparties. Une valeur élevée de la rigidité annulaire (valeur SN) indique une résistance élevée à une force. Des tuyaux souples enrobés dans du béton ont un comportement de tuyau rigide.

Tous les matériaux peuvent être mis en soumission par le **Catalogue des articles normalisés (CAN) 272**



Tuyaux en matières plastiques

En génie civil les 3 types de tuyau suivant sont mis en œuvre. Les caractéristiques suivantes sont pertinentes pour l'emploi comme aqueduc:

	Polypropylen (PP)	Polyéthylène (PE oder HDPE)	Polyvinylchlorid (PVC)
Résistance aux UV	non	oui	non
Résistance aux impacts	élevée	élevée	moyenne
Résistance à l'abrasion	élevée	moyenne	Très élevée
Raccordement	emboîtement, <i>bride, raccord à compression</i>	emboîtement, soudure, <i>manchons électrosoudable, bride, raccord à compression</i>	Stecken, Kleben,
Module d'élasticité à long terme	300 – 700 N/mm ²	150 N/mm ² (le plus élevé)	1750 N/mm ²
Manchons longs	oui	oui	non
Prix départ usine pour DN 400 m (dn 400) ab Werk	Fr.94.- SN8	Fr.96.50 SN4	Fr.91.- SN2

Le défaut principal des buses plastique est leur diamètre modeste (800mm pour du SN2 ou 8)

Buses métalliques

Les buses métalliques en tôle ondulée d'acier zingué, avec leur sections circulaires, en arche ou rectangulaire ont des diamètres importants (ils sont aussi utilisés comme tunnels en remblais). **L'importance d'une compaction latérale élevée du matériau de remblai est très élevée.** L'avantage principal des buses métalliques réside dans leurs dimensions, leur légèreté et la possibilité d'améliorer les caractéristiques hydrologiques d'écoulement (imiter le lit naturel) ainsi que la « perméabilité » écologique de l'ouvrage (faune et flore).

Statique et éléments de mise en œuvre d'un ouvrage composite

Les buses métalliques sont des « ouvrages composites, constitués principalement d'une paroi métallique en tôles ondulées et d'un certain volume de sol qui l'entoure »

« La buse et les remblais techniques sont indissociables sur le plan du fonctionnement mécanique ».

« Les buses métalliques peuvent être considérées comme un coffrage destiné à réorienter les contraintes dans les massifs de sols environnants et non comme un ouvrage possédant une capacité portante intrinsèque » (Club OA, 15 mars 2012 O. FISCHER / CG67)

En principe, la sécurité structurale (portance) et l'adéquation de l'ouvrage doit être faite selon la norme SIA 190. Souvent le fournisseur livre des valeurs caractéristiques et des profils type avec le produit. Néanmoins, les éléments de la norme SIA 261 concernant les sollicitations seraient à prendre en compte:

- Charges des masses de terrain
- Charges de trafic
- Autres charges (constructions)
- Pression hydrostatique
- (poids propre des tuyaux)



Indépendamment du type de buse, les précautions suivantes sont à prendre lors de la pose d'un aqueduc:

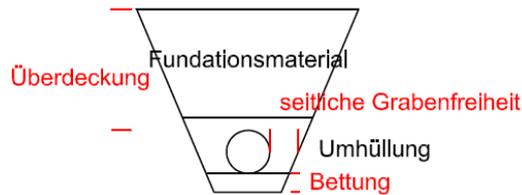


Illustration: Profil normal „pose de tuyau en fouille »

Le recouvrement sous la route doit, selon plusieurs fabricants, être d'au moins 80 cm d'épaisseur. Si ce n'est pas possible de respecter cette épaisseur, il faut répartir les sollicitations par une dalle béton par exemple. Lors d'une pose en fouille, il faut prévoir au **minimum 30 cm** de part et d'autre du tuyau pour assurer un bon enrobage et compactage (largeur de dameuse).

Lit de fond de fouille: au moins 12 cm (buses métall. 40cm) d'épaisseur, matériau granulaire non liant (max. Ø 40mm) ou un béton maigre C 12/15

Enrobage : Matériau granuleux, non liant (max. Ø 40mm) ou béton C 12/15, à mettre en couches de 40 cm max (n'utiliser que des machines de compactage légères à proximité du tuyau).

Recouvrement et fondation de la route: Matériau non gélif, Valeurs de compactage selon VSS SN 640 585 et SN 640 588

Dalot (canal en dur avec couvercle)

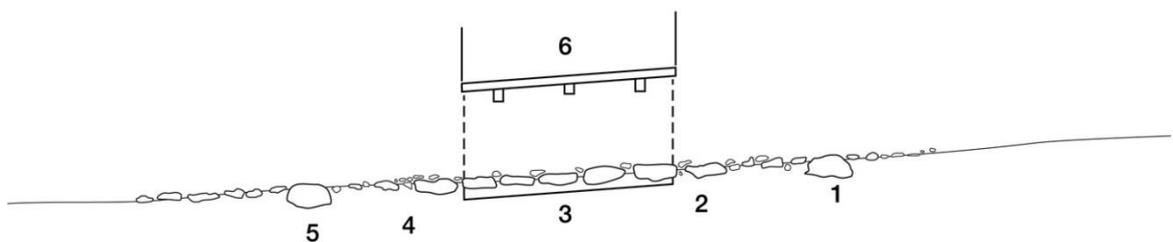


Illustration 4: Profil d'un dalot avec tablier en bois ou métal.

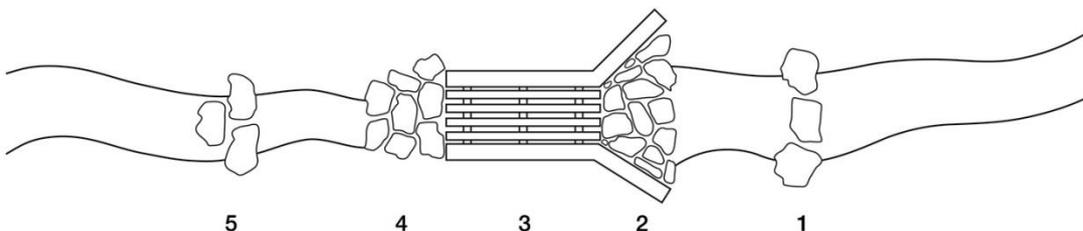


Illustration 5: Situation d'un dalot

- 1) Renforcement du lit du torrent en amont



- Consolidation adéquate du lit et des berges afin de garantir le niveau à la tête de charge.
- 2) Tête de charge
- Pas de seuil, conserver une rugosité, pas de béton lisse,
 - Consolider le remblai du chemin afin d'éviter le contournement par l'eau,
 - Prévoir l'accès d'une machine pour l'entretien (curages).
- 3) Chenal
- Maçonner des blocs pour reconstituer des éléments de structures, s'efforcer de garder la même pente que le lit naturel,
 - faire attention au tassement différentiel (maçonnerie, raccord de route et remblais) tout particulièrement en cas de revêtement routier liant, prévoir une dalle de transition ou des ailes maçonnées si nécessaire,
 - Béton selon SIA 262 non gélif (XF3) ou prévoir du XF4 en cas de service hivernal (salage).
- 4) Tête de décharge
- Éviter un seuil,
 - Consolider le lit pour éviter un bassin d'affouillement. Prévoir des gros blocs pour maintenir une rugosité élevée.
 - Protéger les extrémités de l'aqueduc contre l'affouillement,
 - Evacuer les eaux de surface du chemin afin d'éviter la déstabilisation du remblai (stabilité du chemin).
- 5) Stabiliser le lit du torrent en aval
- En aval, il faut consolider le lit du torrent pour éviter un affouillement régressif et une mise en danger de l'ouvrage et du chemin.
- 6) Chaussée
- faire attention au tassement différentiel (maçonnerie, raccord de route et remblais) tout particulièrement en cas de revêtement routier liant, prévoir une dalle de transition ou des ailes maçonnées si nécessaire,
 - Le couvercle doit pouvoir être enlevé facilement à la grue,
 - Les éléments du couvercle (tablier) doivent être montés transversalement par rapport à la chaussée (sécurité),
 - Aux raccords en ouvrage maçonné et remblai, coffre et revêtement penser aux joints de dilatation (température et hygrométrie),
 - Parapet et garde-corps selon prescription (SN 640568),
 - Solutions pour le bétail (nattes de caoutchouc, etc.),
 - Accorder suffisamment d'attention à l'évacuation des eaux de surface.



Choix des matériaux et utilisation

Les dalots se caractérisent par leur facilité d'entretien. Leur couverture en bois ou métal s'enlève facilement. Ils peuvent gérer un débit important car le remplissage est possible jusqu'à fleur de la chaussée. Ils constituent par contre une discontinuité de la chaussée. Selon le profil d'utilisation le choix des matériaux peut varier selon l'importance du charriage, le type de chaussée ainsi que les caractéristiques du trafic.

	<i>Dalot en bois avec couverture métalliques</i>	<i>Blocs bétonnés avec couverture en bois ou métal</i>	<i>Béton avec couverture en bois ou métal</i>
<i>Utilisation</i>	Petits ruisseaux sans charriage, débits sporadiques, Ouvrages provisoires	Gros ruisseaux ou ruisseaux avec du charriage, Comme aqueduc pour le débit normal, en combinaison avec un passage à gué pour les crues	
<i>Utilisation à éviter</i>	Chaussée en enrobé ou circulation de poids lourds	Dans les situations exigeant un nettoyage régulier	
<i>Couverture</i>	Doit pouvoir être retirée facilement aussi en cas de forte accumulation de charriage (attention au comportement hygrométrique du bois) Une grille perpendiculaire au trafic facilite le passage des véhicules		
<i>Liaison avec la chaussée</i>	Eviter les nids de poule à proximité du bois	Le tassement différentiel entre la chaussée et le dalot doit être repris dans la mesure du possible par une fondation renforcée ou une dalette de transition (dans le cas d'un revêtement bitumineux)	
<i>Lit</i>	pourriture	Le pavage du lit au moyen de blocs cristallins ralentira l'érosion et constitue une bonne solution pour le passage de la petite faune.	



Dalots en béton



La vérification de la résistance de l'ouvrage ainsi que les plans d'exécution nécessite la collaboration d'un ingénieur civil. Une alternative consiste en la reprise d'ouvrages types mis à disposition par les autorités dans certains cantons.

Gués (préparé par Martin Ammann, Eschenbach)

Introduction

Les gués en zone forestière ou agricole

Les chemins forestiers doivent souvent traverser des cours d'eau situés dans un terrain pentu et difficile du point de vue géotechnique. Les aqueducs et ponts présentent le désavantage du risque de se boucher suite à l'accumulation du charriage et de bois flotté. L'eau suit alors le tracé du chemin et peut occasionner au chemin et aux terrains en aval de la sortie d'eau intempestive des dégâts considérables.

Le gué artificiel permet de contourner ce problème d'embâcle dans les lits couverts de manière élégante. Il constitue donc la première variante à étudier lors de la traversée d'un cours d'eau

Définition historique:

- Partie peu profonde d'un ruisseau ou cours d'eau permettant le passage à pied ou à cheval
- Par le passé de tels passages ont vu des centres urbains s'installer et la population se développer.

Sur un gué, la surface de la route se confond avec le lit du ruisseau permanent ou intermittent. L'eau, le charriage et la neige dans un couloir d'avalanche passent ainsi au gré des précipitations sur la route même.



Illustration: gué avec passage permanent de l'eau



Illustration: gué en combinaison avec un aqueduc. Le gué fait office de trop-plein.



Les avantages du gué:

- adapté au charriage et avalanches
- facile d'entretien

Les désavantages:

- la circulation est moins facile
- le profil en long du ruisseau est modifié brutalement (rupture de pente), de l'énergie est absorbée, le chemin doit donc être sérieusement consolidé, le lit en aval aussi et il peut être nécessaire d'évacuer les dépôts après de fortes précipitation.
- en montagne, un gué peut rallonger considérablement la longueur du chemin.

Problème à résoudre

Si un ruisseau charrie, la traversée de la route constitue un seuil (rupture de pente) et un dépôt se constitue. L'eau contourne ce dépôt latéralement et déborde de la cuvette et suit le chemin, occasionnant les dégâts (érosion, glissement, etc.) que l'on cherche précisément à éviter. Une déviation du thalweg des eaux de crue constitue le risque majeur.

Une réponse à ce problème réside dans la conduite **du profil en long du chemin (voir illustration 25)**. Il s'agit d'incorporer au profil en long une **contre-pente** suffisamment généreuse pour garantir le renvoi des eaux de crue dans le thalweg en aval du chemin. Dans un couloir étroit, il peut être judicieux de prévoir **la contre-pente** depuis l'épaulement. Ceci tout particulièrement en cas d'exposition aux avalanches ou aux laves torrentielles : d'épaulement à épaulement tout point du chemin renvoie l'eau dans son thalweg original. Sur le chemin, plus on s'éloigne du thalweg, plus le risque d'érosion due au charriage diminue, celui-ci s'étant déposé à partir du thalweg.

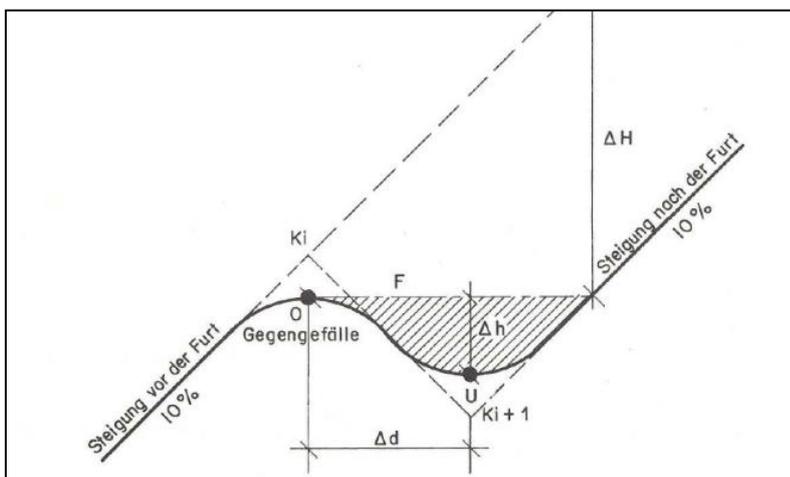


Illustration: Profil en long d'un chemin dans une zone de gué (Kuonen 1983). La perte d'altitude effective ΔH dépend de la longueur de la contre-pente Δd et de la décote Δh au thalweg (gué)



En régions montagneuses, les chemins sont souvent construits avec une pente longitudinale élevée pour gagner de l'altitude. La contre pente génère une perte d'altitude dont il s'agit de tenir compte **dès la planification**, après, quand les machines de terrassement sont sur le chantier, c'est trop tard !

Le défi lors de la planification réside dans la recherche d'une solution qui tienne compte à la fois du profil du cours d'eau et son thalweg à traverser, des caractéristiques du débit maximal (qualité du charriage), et des impératifs de planification de la desserte. Sans oublier l'appréciation globale de l'évolution des risques naturels et financiers.

La combinaison d'un gué et d'un dalot ou aqueduc flanqué d'un dépotoir constitue parfois la solution technique pour réduire tout à la fois la perte d'altitude et les risques de débordements mais au détriment des risques financiers.

Pour un gué sans dalot ou aqueduc, le débit normal maximal est limité en raison de la sécurité du trafic.

Valeurs de conception

Géométrie de la chaussée et arrondi du profil en long.

Les véhicules forestiers de débardage, de façonnage et de transport n'ont, en règle générale, pas de problèmes à passer un gué : ils sont conçus pour le terrain naturel.

La situation pour les véhicules de transports « civils » est toute autre : **leur garde au sol est souvent insuffisante pour passer une cuvette marquée**, tout particulièrement pour les véhicules équipés d'une grue à l'arrière.

Selon le droit européen sur les poids lourds il existe plusieurs catégories, dont une catégorie « tout-terrain » N₃G caractérisée par sa garde au sol élevée. Les camions de transport de bois utilisés en forêt ne correspondent pas toujours à cette norme, si bien qu'il faut dimensionner la cuvette d'un gué selon les

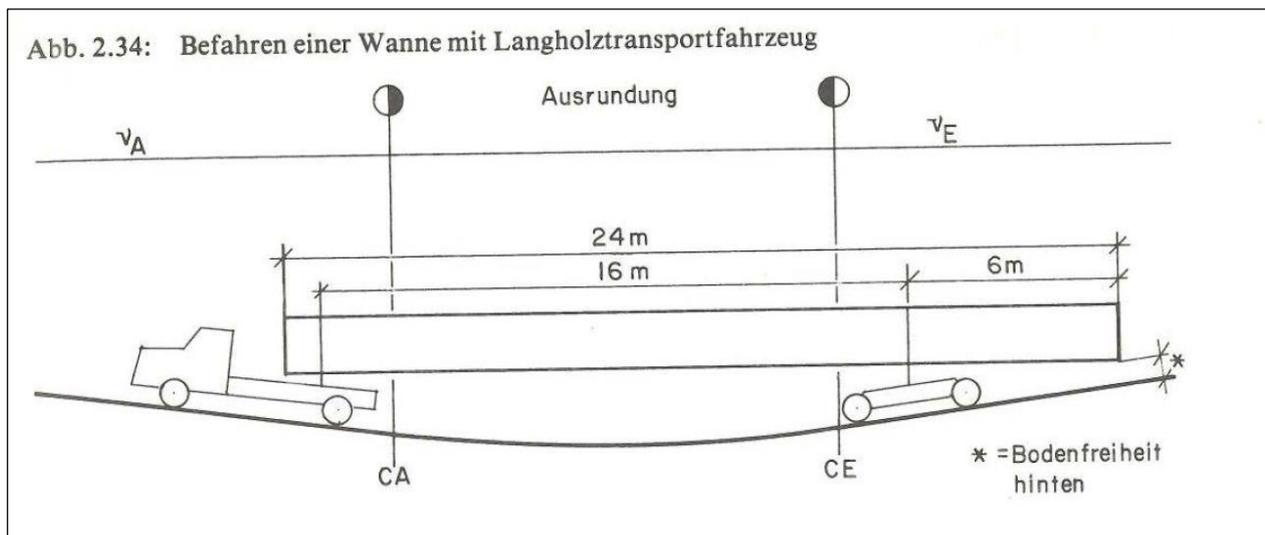


Illustration 6 : passage d'une cuvette par un transport de longs bois (Kuonen 1983)



camions « normaux ». Selon les fabricants, l'enveloppe des véhicules peut varier relativement fortement. Les modèles les moins tolérants sont les 3 essieux pour les billons en raison de la grue généralement placée à l'arrière. Les deux essieux et les remorques à essieux tandem n'ont généralement pas de problèmes. Les semi-remorques pour le transport de bois long, les plateformes 4 essieux (déchiqueteuse) et les véhicules personnels de même.

Pour un passage à vitesse réduite (moins de 10 km/h) les rayons de courbure minimaux suivants sont recommandés :

Rayon de courbure min. du profil en long de la cuvette pour un 3 essieux à billons (26 to):

36 m (correspond environ à 0.72 m/%)

Rayon de courbure min. du profil en long de la cuvette pour un 2 essieux à billons (18 to):

33 m (correspond environ à 0.66 m/%)

Si l'on tient compte d'une vitesse supérieure (Kuonen 1983):

Tab. 2.33: Minimale Ausrundungslängen

Verkehrsgeschwindigkeit V (km/h)	15	20	30	40	60
Σ Anhaltstrecken s_{\min} (m)	20.0	27.9	48.2	74.4	144.5
Ausrundungslänge ℓ_o (m/%)	0.5*	1.0*	2.9	6.9	26.1
Krümmung δ (‰/m)	2.0*	1.0*	0.34	0.14	0.04

* Diese Werte sind nur ausnahmsweise zulässig (z.B. in Furten)

Illustration 7 longueurs d'arrondi selon Kuonen 1983

Des rayons de courbure < 1.0 ‰/m sont à utiliser. Des rayons de courbure plus élevés ne sont à utiliser qu'exceptionnellement (illustration 12, Kuonen)

Si le rayon de courbure dépasse la valeur de 1.0 ‰/m, la charge peut s'appuyer sur le sol dans le cas d'un transport de bois longs ou les étais hydrauliques des camions grue peuvent entrer en contact avec le sol.

Réalisation à postériori

Les passages de cours d'eau par un aqueduc sujets à dégâts répétés peuvent être améliorés par l'aménagement d'un gué. Les conditions de pente longitudinale du chemin étant données et certains points fixes venant compliquer le problème (conduites, pattes d'oies), il n'est recommandé d'appliquer cette technique que si la pente est faible ou nulle. Rattraper une contre pente sur un chemin à 10% génère un profil en long très défavorable à la sécurité du trafic (pente, visibilité).



A nouveau, la nature du charriage est importante. La construction d'une grille et/ou d'un dépotoir en tête de charge de l'aqueduc peut s'avérer judicieux. La solution du pont est éventuellement à examiner mais elle entraîne un rehaussement de la section d'écoulement et est onéreuse.

La construction d'un gué sur un chemin existant doit faire l'objet d'une analyse approfondie. Les logiciels peuvent être utiles.

Abb. 1.34: Höhenverlust in Furten
(Neigung der Nulllinie vor und nach der Furt 10%)

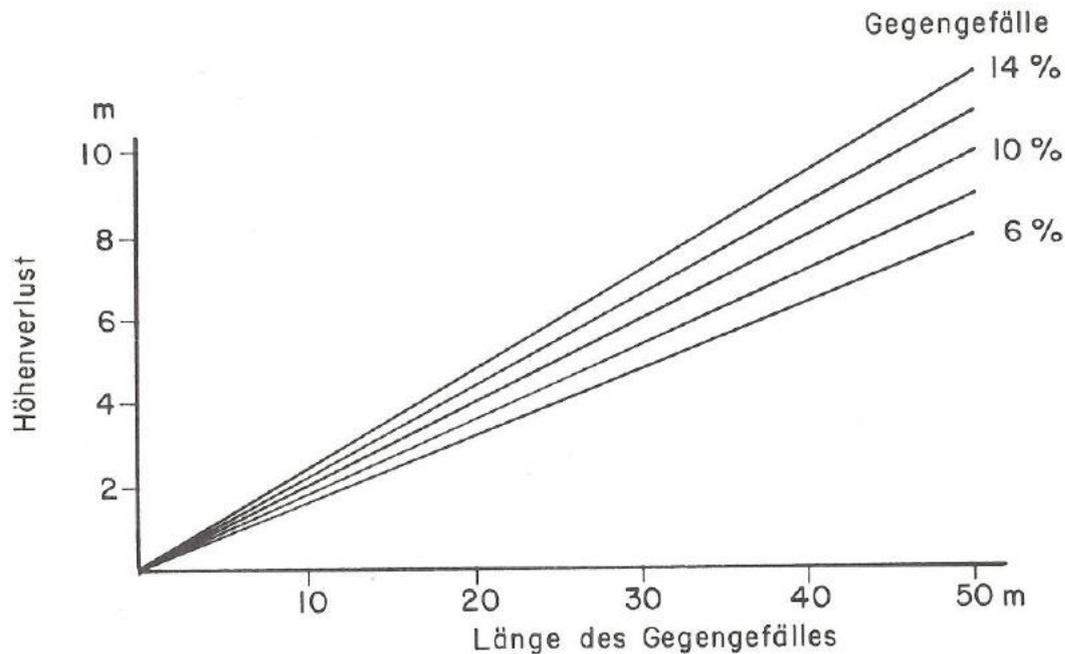


Illustration 28: perte d'altitude occasionnée par la construction d'un gué en fonction de la longueur de la contre-pente et de la pente du chemin (Kuonen 1983)

Différents logiciels peuvent être utiles à la planification et la production de plans d'exécution (Roadeng, CAO, Excel). Les informations suivantes sont toutefois indispensables :

- Profil en long du chemin existant,
- Points fixes des raccordements, embranchements et thalweg du cours d'eau,
- Section d'écoulement de dimensionnement du cours d'eau
- Caractéristiques du trafic et véhicules

La prise de profils en travers supplémentaires du chemin et de photographies permettra d'analyser le déplacement de l'axe du chemin. Plus la pente originale du chemin est élevée, plus ces informations sont indispensables. Un grand degré de précision est nécessaire afin d'éviter les surprises désagréable lors des travaux. Un MNT peut être utile.

Les logiciels fournissent des informations utiles pour les déplacements de masse (déblais/remblais) même si cet aspect n'est pas primordial. **Par contre les déplacements d'axe du chemin existant en situation sont essentiels.** Il s'agit de trouver un compromis viable entre les processus d'écoulement dans le thalweg et ceux de la circulation de véhicules.



Ce type de projet ne tolère pas l'a peu près. Le soutien d'une personne expérimentée maîtrisant les techniques d'arpentage, de planification et la conduite de chantier est indispensable

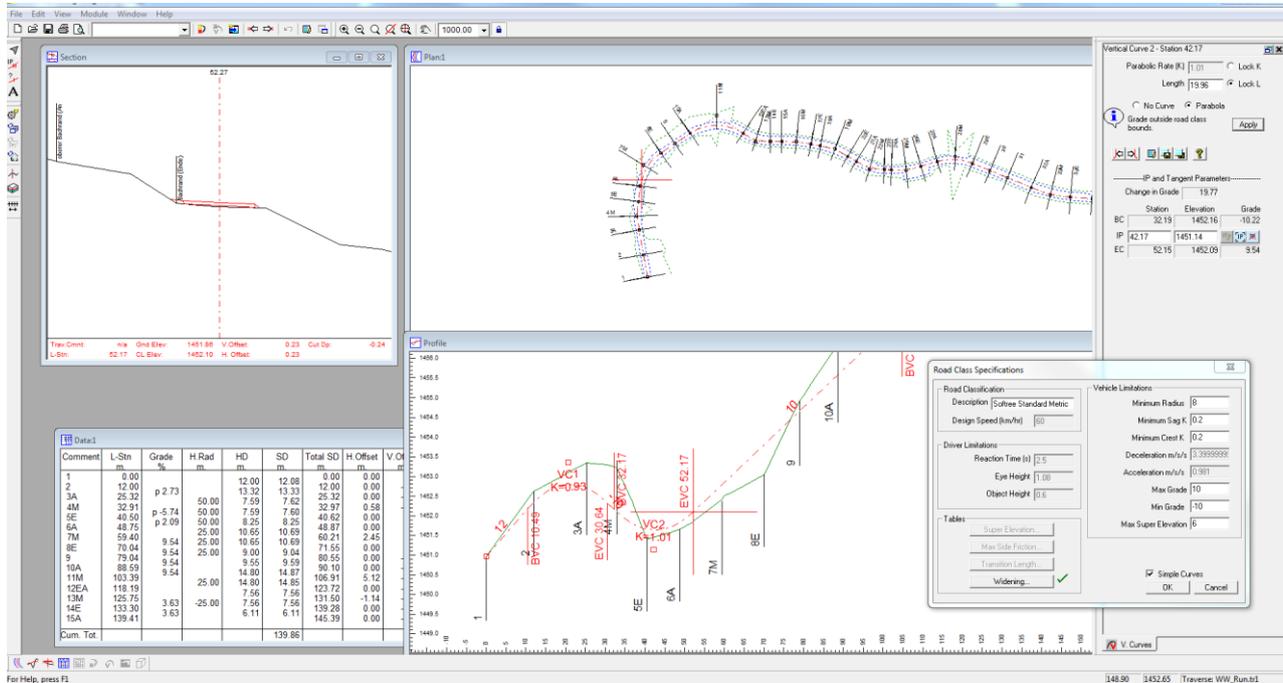


Illustration 29 : Screenshot d'un logiciel (Roadeng Softree) avec Profil en travers, situation table de valeurs et profil en long d'un tronçon de chemin avec un gué.

Capacité d'absorption d'un gué

Le nouveau profil du gué doit pouvoir absorber la crue de pointe (en cas d'aqueduc bouché) et être en mesure d'évacuer les eaux sans qu'elles ne débordent et empruntent le chemin. Dans un premier temps il faut déterminer la vitesse de l'eau en amont du gué (V_a) au moyen de la formule de Strickler. Cette vitesse calculée est celle avec laquelle l'eau entre sur le gué. Dans un deuxième temps il faut calculer la vitesse minimale (V_{min}) nécessaire avec laquelle l'eau doit parcourir le gué pour être en mesure d'absorber la quantité d'eau du ruisseau en crue.

Il faut également calculer la hauteur d'eau maximale (tirant d'eau) dans le gué, une dimension qui doit être augmenté de 20% pour parer aux vagues et au débordement. Finalement au moyen du périmètre mouillé calculé, il est possible de calculer la vitesse minimale de l'eau dans le gué à même d'absorber le débit de crue.

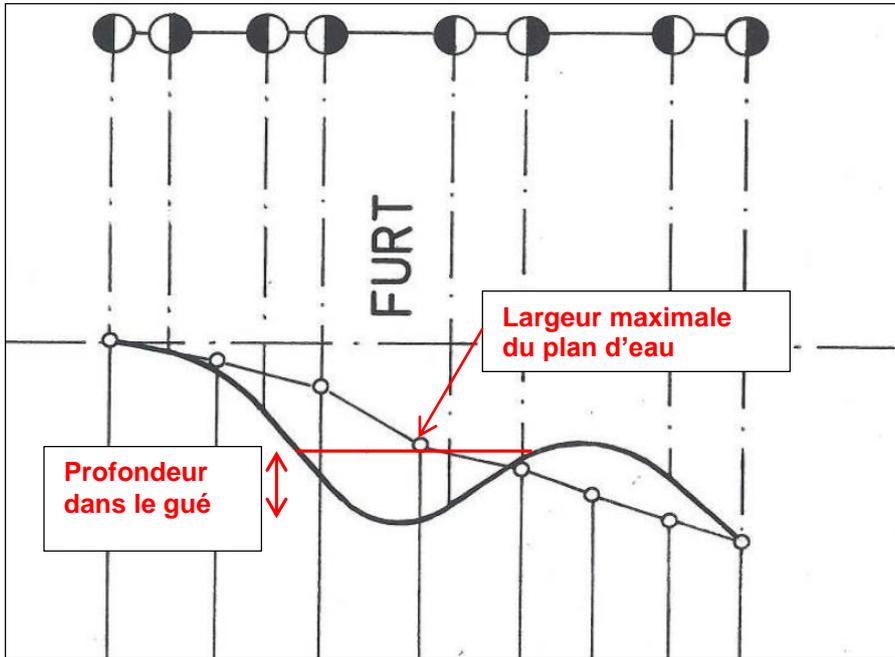


Illustration 8 Profil en long du gué du Wellchessibach

Si la valeur V_{min} calculée est plus petite que la valeur V_a alors le gué est capable d'absorber le débit de crue.

L'exemple présenté à l'illustration 30 et le tableau 6, présente une solution qui satisfait aux exigences. Dans ce cas, la vitesse de l'eau avant le gué ($V_a = 1.62$ m/s) est plus grande que la vitesse minimale de l'eau dans le gué ($V_{min}=1.08$ m/s).

Tableau 1 Valeurs caractéristiques Wellchessibach

Höhenunterschied im Gegengefälle	Δh	[m]	0.9
Maximale Breite des Wasserspiegels in der Furt	l	[m]	31.0
Wassergeschwindigkeit vor der Furt	V_{vor}	[m/s]	1.62
Minimal notwendige Wassergeschwindigkeit auf der Furt	V_{min}	[m/s]	1.08
Schluckvermögen			ausreichend



Détails de réalisation

La réalisation de gué peut prendre différentes formes et solutions techniques, celle-ci doivent être adaptées au caractéristiques du torrent.

Choix des matériaux et réalisation

Les changements d'énergie sont particulièrement difficile à maîtriser sur les gués, ceci en raison de sa réalisation en travers d'une route dont le devers est limité et qui forme le lit artificiel du torrent. Les zones du torrent en aval et en amont doivent impérativement être consolidés et sécurisés. En montagne un bassin d'amortissement est pratiquement indispensable pour éviter l'affouillement. Il n'est pas possible d'augmenter le dévers aval du chemin au-delà de 7% pour la sécurité du trafic, alors qu'il serait nécessaire de respecter la pente du torrent pour éviter les changements d'énergie de l'eau et du charriage. Le renforcement de la cunette est indispensable, la résistance à l'abrasion est importante. Un pavage avec des pierres de qualité (si possible pas de schistes) enrobé dans un béton renforcé en fibres et de classe XF3 ou XF4. La structure du sol en résultat est favorable à la faune. Sous le pavage la pose d'un treillis-natte de renforcement est recommandée. Les nattes bi axiales B335.xx avec des tiges de 8mm et un poids de 5.3 kg par m2 font l'affaire. Ne pas oublier les joints de dilatation tous les 5 à 7 m. Si des changements de pente du lit du torrent élevés doivent être maîtrisés, l'implantation de profilés métalliques ou de rails dans du béton, en amont surtout, pour retenir les plus gros blocs constitue une solution intéressante et peu onéreuse selon la qualité du terrain. A nouveau, ne pas oublier l'entretien après une crue.

Par intempéries et grosses quantités d'eau, le chemin peut devenir impraticable. La pose de grille, de rails en amont peut retarder le phénomène. Des aménagements pour le passage des piétons n'est pas recommandable pour des raisons de sécurité et de responsabilité civile causale du propriétaire de l'ouvrage. Les torrents en crue sont dangereux !

Les travaux commencent par un piquetage précis et la sécurisation aux alentours de points de référence. Il faut également prévoir le détournement provisoire du torrent (éviter la période des orages). Les travaux doivent se dérouler d'aval en amont. Si la stabilité des matériaux en place est suffisante, le gué peut être mis en place sur le nouveau terrassement. Le rayon de courbure vertical doit être vérifié constamment voir des essais de circulation effectués. La pose correcte du pavage peut nécessiter de vibrer le béton d'enrobage.

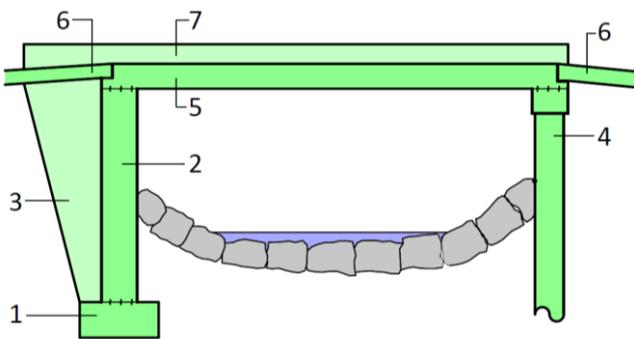
Une solution pragmatique sur un gué devenu impraticable à la circulation est de le remplir avec des matériaux adéquats pendant le transport de bois.



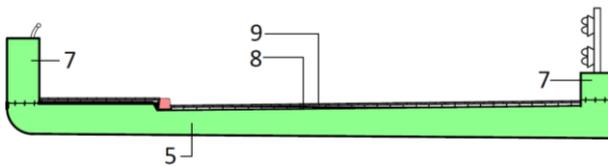
Ponts

Eléments constitutifs d'un pont

profil en long



coupe transversale

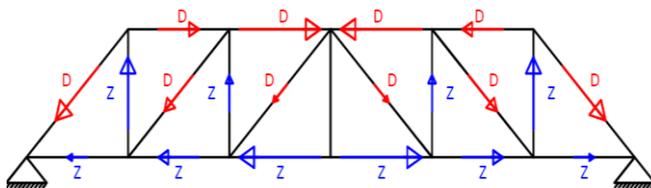


- 1 Fondation (radier)
Stabilisation du lit et des berges,
résistance au gel,
portance du sol,
béton de fondation
- 2 Culée ou piédroit
Poussée du terrain
Affouillement,
type de béton (pas de salage)
- 3 Mur d'aile
affouillement
protection du talus et du tracé
- 4 Pieux
Alternative dans les terrains de faible
portance
- 5 Tablier
Dilatation – joint de dilatation,
Dimensionnement selon le type de charge
- 6 dalle de transition
Absorbe les mouvements dus au
tassement différentiel et l'effet du gel
- 7 parapet
Sécurité de la circulation
Barrière selon VSS 640568
- 8 lé d'étanchéité
Protection contre les effets de l'eau,
- 9 Revêtement
Dilatation et étanchéité

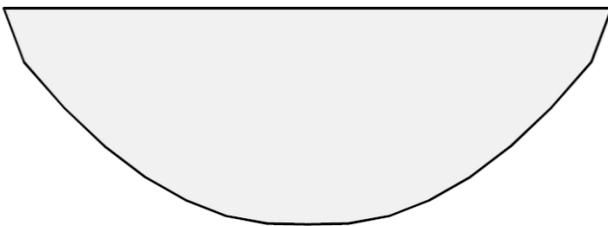


Statique

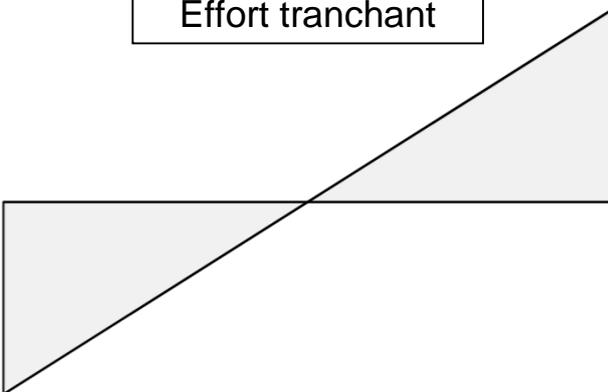
Modèle du treillis



Moment de flexion



Effort tranchant



Les ponts sont sollicités par le moment fléchissant et par les forces transversales (compression-traction).

Le modèle de treillis réduit toutes les forces en forces normales (traction ou compression):

Dans chaque élément n'agissent que des forces de traction (en bleu) ou de compression en rouge. Les éléments du tablier sont sollicités en traction, l'effort principal étant repris par l'élément central. Les haubans sont sollicités en traction, les éléments au centre de la portée étant les plus sollicités. Les éléments de liaison sont sollicités alternativement en compression ou traction, les éléments proches des culées devant supporter les efforts les plus élevés. Le système est ainsi en équilibre.

Le même phénomène se retrouve concernant les sollicitations externes (charge statique ou véhicule par exemple). Les forces de compression et de traction de la ceinture multiplié par la hauteur statique donnent le moment de flexion, alors que les forces s'exerçant sur les tirants donnent l'effort tranchant..

Si une dalle en béton ne ressemble pas à un treillis, les mêmes forces agissent à l'intérieur du béton. Pour le dimensionnement d'une dalle ou une poutre en béton le modèle du treillis est utilisé. Selon leur caractéristiques propres, le matériau béton reprend les forces de compression et l'acier du ferrailage les forces de traction.





Assainissement de ponts

Diagnostic / Causes des dégâts / symptômes

Die beiliegende Hauptinspektion des Durchlasses Schnetzerenbach zeigt exemplarisch die hauptsächlichen Ursachen von Schäden an Betonbrücken:

Jointes d'étanchéité défectueuses: Jusqu'à la fin des années 70, les ponts étaient construits sans joints d'étanchéité.

Béton gélif: Les ouvrages exposés au gel nécessitent impérativement un béton non gélif. Ce type de béton est poreux si bien que l'eau contenue dans la matière peut augmenter de volume sans faire sauter le béton.

Sels: Sans effet sur le béton lui-même, le sel pénètre dans la matière et attaque l'armature métallique. En rouillant, l'acier gonfle et fait sauter le recouvrement. L'épaisseur de recouvrement de béton au-dessus (en-dessous) des fers a été augmentée depuis les années 70.

Carbonatation: Le béton frais est basique (pH 12-13) et l'armature n'est pas sujette à la corrosion. Les pores du béton absorbent du CO₂ de l'air. Ainsi se forme du carbonate de calcium avec les éléments du béton à partir de la surface. La résistance à la compression du béton est ainsi améliorée. L'inconvénient de ce processus de carbonatation est une baisse du pH sensible (<10) et la ferraille se met à rouiller avec ses conséquences néfastes.

Armature sous-dimensionnée: Le béton est une matière « fêlée ». Les fentes sont présentes dans tous les ouvrages en béton.

On distingue les fentes de retrait, les fentes de contraintes tranchantes, les fentes de flexion et les fentes de compression.

Les fentes de retrait et celles de contrainte tranchante n'ont en règle générale pas d'impact sur la résistance structurelle. Les fentes de flexion et de compression par contre sont des indicateurs d'une faiblesse structurelle. Toutes les fentes si elles évoluent en s'élargissant indiquent clairement un problème.

Prévention des dégâts

- Étanchéfier la surface supérieure du béton, éviter la stagnation d'eau par des renvois, pentes et aération
- Type de béton adapté, aciers adéquats, essences adaptées.
Béton: classes XF3 ou XF4 (ouverture en hiver avec salage),
Acier: B500B
bois: mélèze, douglas, chêne, (châtaignier)
- Béton: prévoir des joints de dilatation, suffisamment de recouvrement sur le ferrailage.
- Le bon matériau au bon endroit.



Sources

M. Spreafico, R. Weingartner, M. Barben, A. Ryser. Evaluation des crues dans les bassins versants de Suisse. Guide pratique. Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapports dell'UFAG, Serie Acque No 4 – Berne 2003 (PDF sur Internet)

Böll A., 1997. Wildbach- und Hangverbau. Bericht Eidgenössische Forschungsanstalt Wald Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 123S.

Dietz P., Knigge W., Löffler H., 1984. Walderschliessung. Ein Lehrbuch für Studium und Praxis unter besonderer Berücksichtigung des Waldwegebaus (Reprint 2011), Kessel, Remagen – Oberwinter, 426S.

Künnecke et. al., 2003. Erdverlegte, drucklos betriebene Rohrleitungen aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC-U) – Leitfaden und Verlegerichtlinie, Verband Kunststoff-Rohre und –Rohrleitungsteile (VKR), Aarau, 96S.

Kuonen V. et al., 1983. Wald und Güterstrassenbau. Planung-Projektierung-Bau, Eigenverlag, Pfaffhausen, 743S.

Vischer D., Huber A., 2010. Wasserbau. Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen, Springer, Heidelberg, 410S.

Rickli, C.; Forster, F., 1997: Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweiz. Z. Forstwes. 148, 5: 367-385.

Diagnostic, aménagement et gestion des rivières (2^e Éd.) : Hydraulique et morphologie fluviales appliquées, DEGOUTTE, Gérard, 2012, 542 p.

Données techniques de constructeurs:

Jansen AG (Hrsg.), 08/2012. Technisches Handbuch Entwässerung. Drucklose Rohre für die Kanalisation und Liegenschaftsentwässerung, Oberriet

Sytec Bausysteme AG (Hrsg), 2014. Sytec Geoproducts, Produkthandbuch, Niederwangen