Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 109 (2017)

Heft: 2

Artikel: Contraintes aux soudures longitudinales des blindages sous l'effet de l'anisotropie du rocher et des imperfections géométriques

Autor: Pachoud, Alexandre / Manso, Pedro / Schleiss, Anton

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941613

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Contraintes aux soudures longitudinales des blindages sous l'effet de l'anisotropie du rocher et des imperfections géométriques

Alexandre Pachoud, Pedro Manso, Anton Schleiss

Résumé

L'utilisation des aciers à haute-résistance permet de concevoir des blindages plus fins pour les puits et galeries blindés en charge des aménagements hydroélectriques. Cependant, ces aciers, bien que présentant une meilleure résistance élastique sous tension, ne sont en général pas plus résistants à la fatigue que les nuances d'acier plus basses lorsqu'ils sont soudés. Dans le contexte changeant du marché électrique européen, les conditions opératoires deviennent de plus en plus extrêmes pour les aménagements hydroélectriques, et plus particulièrement pour les aménagements de pompage-turbinage, qui opèrent pour balancer le réseau. Pour l'estimation de la durée de vie à la fatigue des blindages, les contraintes structurelles et locales aux soudures doivent être connues. En vue de cette analyse, cet article présente une méthode de calcul efficace de ces contraintes aux soudures longitudinales des viroles en acier, notamment en tenant compte des imperfections géométriques et de l'interaction avec une roche anisotrope.

Zusammenfassung

Spannungen in Längsschweissnähten von Stahlpanzerungen unter Einfluss der Anisotropie und geometrischen Imperfektionen

Die Verwendung von hochfestem Stahl erlaubt die Bemessung von dünneren Panzerungen in Druckstollen und Druckschächten. Obwohl diese Stähle eine höhere Zugfestigkeit haben als die üblichen Stähle, sind deren Schweissnähte gegenüber Ermüdung nicht widerstandsfähiger. Im Zuge der Veränderungen des Strommarktes in Europa sind die Wasserkraftanlagen zur Netzregulierung vermehrt einem rauen Wechselbetrieb unterworfen, was insbesondere die Pumpspeicherwerke betrifft. Zur Abschätzung der Lebensdauer von Stahlpanzerungen unter Ermüdung müssen die lokalen Stahlspannungen in den kritischen Längsschweissnähten der Panzerung bekannt sein. Im Hinblick auf die Ermüdungsbemessung wird eine effiziente Berechnungsmethode vorgestellt, welche es erlaubt, diese Spannungen in den Längsschweissnähten unter Berücksichtigung der Gebirgsanisotropie und der geometrischen Imperfektionen zu bestimmen.

1. Introduction

Les puits et galeries sous haute pression avec blindage connectent les réservoirs de barrages aux centrales hydroélectriques (*Schleiss*, 2012), parfois sur l'ensemble du linéaire des voies d'eau. La section transversale de ces structures se composent généralement d'un blindage en acier, du béton de remplissage, du champ proche du rocher (en général fissuré par déformations plastiques, dues à l'excavation), et d'un champ éloigné du rocher, considéré comme non-perturbé *(figure 1)*. Le montage d'un tronçon de virole dans un projet hydroélectrique en Suisse est montré à la *figure 2*. Les viroles sont fabriquées à partir de tôles d'acier, roulées et soudées longitudinalement en atelier. Ces soudures longitudinales, soumises perpendiculairement aux contraintes principales dans les blindages, sont ainsi des parties critiques des puits et galeries blindés en charge.

Le développement des aciers à haute-résistance ainsi que des turbines Pelton à haute-chute ont permis le dimensionnement de puits et galeries blindés sous haute pression. La conjonction de la libéralisation du marché européen de l'énergie et de l'augmentation de la contribution des énergies renouvelables volatiles dans le réseau électrique soumet les aménagements hydroélectriques, particulièrement de pompage-turbinage, à des événements transitoires de plus en plus sévères (coups de bélier). L'utilisation des

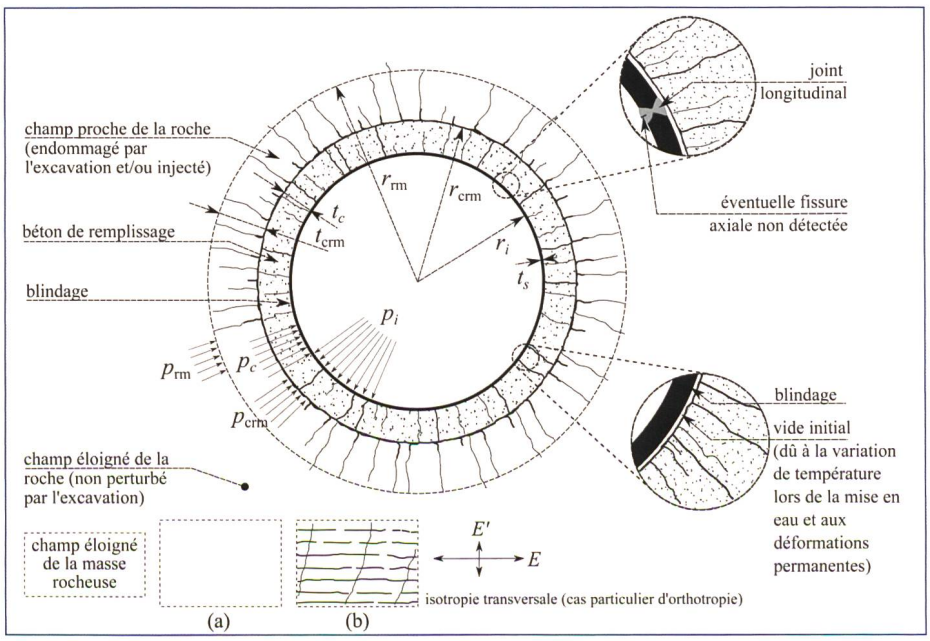


Figure 1. Schéma de la section transversale d'une galerie ou puits blindé dans (a) une roche isotrope, et (b) dans une roche transversalement isotrope avec deux familles de discontinuités.

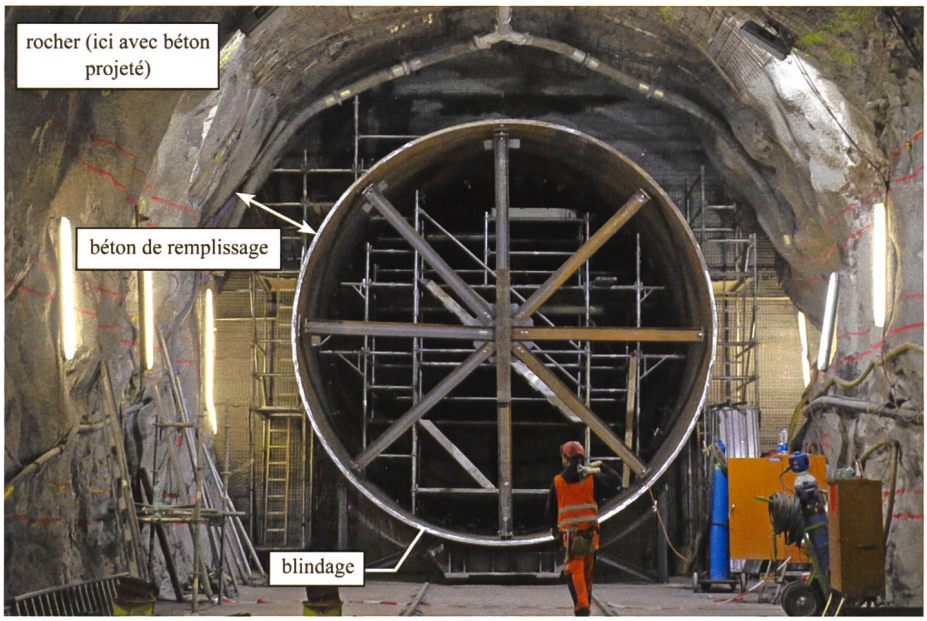


Figure 2. Photo d'une section de blindage lors de la construction d'un projet hydroélectrique en Suisse (© Alexandre J. Pachoud).

aciers haute-résistance permet de dimensionner des blindages plus fins et donc plus économiques. Cependant, les aciers haute-résistance soudés ne présentent pas une meilleure résistance à la fatigue que les nuances plus basses, et sont par ailleurs soumis à un risque plus élevé de fissuration à froid (*Cerjak et al.*, 2013). Cela fut dramatiquement illustré par l'accident de Cleuson-Dixence en 2000. Dans ce contexte, le comportement à la fatigue peut devenir l'état limite ultime prépondérant pour le dimensionnement (*Hachem* & *Schleiss*, 2009).

L'application des méthodes dites locales d'estimation de la durée de vie à la fatigue (voir par exemple *Hobbacher*, 2016) requière la connaissance des contraintes structurelles aux soudures. Cet article présente une méthode pour les ingénieurs permettant de calculer les contraintes aux soudures longitudinales des blindages des puits et galeries en charge. L'influence de l'anisotropie de la roche ainsi que des imperfections géométriques des viroles est considérée.

2. Modèle multicouche typique dans un rocher isotrope

Le modèle standard pour le calcul des contraintes et des déplacements dans les puits et galeries blindés est présenté à la *figure 1*. Dans le cas d'un rocher isotrope, le système est axisymétrique avec 5 zones qui peuvent être distinguées (*Schleiss*, 1988; *ASCE*, 2012; *Pachoud* & *Schleiss*, 2016), comme énuméré ci-après.

1. Le blindage, de module élastique E_s et de coefficient de Poisson ν_s. Il est en contact direct avec l'eau sous pression.
2. Un vide initial Δr_0, qui est un espace annulaire entre le blindage et le béton de remplissage, dû à la contraction thermique de l'acier lors du premier remplissage et aux déformations non-élastiques du béton et du rocher (*Brekke & Ripley*, 1987).
3. Le béton de remplissage, de module élastique E_c et de coefficient de Poisson ν_c. Le béton ayant un comportement fragile et une très faible résistance à la traction, il est considéré comme complètement fissuré radialement, et ainsi ne peut pas transmettre de contraintes tangentielles de traction.
4. Le champ proche du rocher, de module élastique E_{crm} et de coefficient de Poisson ν_{crm}, est la zone du rocher endommagée par l'excavation. Cette couche est également considérée comme radialement fissurée, dû aux déformations plastiques suite à l'excavation. L'étendue t_{crm} de cette zone est un paramètre important à déterminer en pratique, ayant une grande influence sur la déformabilité globale du système.
5. Le champ éloigné du rocher, de module élastique E_{rm} et de coefficient de Poisson ν_{rm}, est la zone du rocher non-perturbée par l'excavation. Elle est considérée comme homogène et élastique. A grande profondeur (grande couverture rocheuse), elle peut être considérée comme infinie.

Dans des roches isotropes, les contraintes et les déplacements peuvent être déterminés de façon analytique en imposant la compatibilité des déplacements à l'interface de chaque couche (voir par exemple *Pachoud* & *Schleiss*, 2016). La première contrainte principale (contrainte tangentielle ou dénommée nominale ici) peut se calculer avec la formule du tube épais:

$$\sigma_{1,\mathrm{iso}} = \sigma_{\mathrm{nom,iso}} = \frac{1}{r_c^2 - r_i^2}\left[r_i^2 p_i - r_c^2 p_c - r_c^2 (p_c - p_i)\right] \tag{1}$$

où la pression reprise par le système béton-roche P_c s'exprime par

$$p_c = \frac{\frac{1+\nu_s}{E_s}\frac{r_c}{r_c^2 - r_i^2}\left[(1-2\nu_s)p_i r_i^2 + p_i r_i^2\right] - \Delta r_0}{\frac{1+\nu_s}{E_s}\frac{r_c}{r_c^2 - r_i^2}\left[(1-2\nu_s)r_c^2 + r_i^2\right] + r_c\frac{1}{E_{\mathrm{eq}}}}. \tag{2}$$

avec:

- $\sigma_{1,\mathrm{iso}} = \sigma_{\mathrm{nom,iso}}$ la contrainte principale dans le blindage d'une galerie dans un rocher isotrope;
- p_c la pression reprise par le système béton-rocher;
- les paramètres géométriques tels que définis à la *figure 1*.

Le module élastique équivalent E_{eq} peut être obtenu par

$$\frac{1}{E_{\mathrm{eq}}} = \frac{1-\nu_c^2}{E_c}\ln\left(\frac{r_{\mathrm{crm}}}{r_c}\right) + \frac{1-\nu_{\mathrm{crm}}^2}{E_{\mathrm{crm}}}\ln\left(\frac{r_{\mathrm{rm}}}{r_{\mathrm{crm}}}\right) + \frac{1+\nu}{E'}. \tag{3}$$

Dans l'équation 3, le module élastique du champ éloigné de la roche isotrope et son coefficient de Poisson sont notés respectivement *E'* et *V* par soucis de consistance avec la suite de cette étude.

3. Influence de l'anisotropie de la roche

L'influence de l'anisotropie de la roche sur les contraintes dans les blindages a été étudiée par *Pachoud* & *Schleiss* (2016) par la méthode des éléments finis. Le cas particulier d'isotropie transversale (orthotropie avec un plan isotrope) a été considéré, par exemple dans le cas de roches avec un plan principal de foliation *(figure 1)*. Les roches présentant une isotropie transversale peuvent être caractérisées par cinq constantes indépendantes, dénotées *E, E', v, v'* et *G'*, avec $G = E/[2+2v]$ dans le plan isotrope (*Amadei et al.*, 1987). Le symbole prime fait référence à la direction perpendiculaire au plan isotrope, à savoir la direction avec le plus petit module élastique (*E'*, voir *figure 1*). Pour des roches transversalement isotropes, *Pachoud* & *Schleiss* (2016) ont montré que la première contrainte principale (équivalente à la

contrainte tangentielle) maximale dans le blindage se trouve à la fibre intérieure de l'acier, dans le plan isotrope. Par ailleurs, ils ont vérifiés que le cas isotrope en considérant le module élastique le plus faible E' conduisait bien à un résultat conservateur en termes de contrainte maximale. Pour déterminer la contrainte maximale dans les blindages dans des roches anisotropes, *Pachoud* & *Schleiss* (2016) ont proposé d'inclure des facteurs de correction dans la solution analytique dans le cas isotrope (équations 1–3, en considérant E'), devant le terme de la participation du champ éloigné du rocher. La première contrainte principale maximale $\sigma_{1,\text{aniso}}$ (aussi appelée contrainte nominale $\sigma_{\text{nom,aniso}}$ ici) s'écrit alors en fonction d'une participation modifiée $p_{c,\text{aniso}}$ du système béton-rocher:

$$\sigma_{1,\text{aniso}} = \sigma_{\text{nom,aniso}} = \frac{1}{r_c^2 - r_i^2}\left[r_i^2 p_i - r_c^2 p_{c,\text{aniso}} - \frac{r_i^2 r_c^2}{r_i^2}(p_{c,\text{aniso}} - p_i)\right] \quad (4)$$

La participation $p_{c,\text{aniso}}$ du système béton-rocher est obtenue par:

$$p_{c,\text{aniso}} = \frac{\frac{1+\nu_s}{E_s}\frac{r_c}{r_c^2 - r_i^2}\left[(1-2\nu_s)p_i r_i^2 + p_i r_i^2\right] - \Delta r_0}{\frac{1+\nu_s}{E_s}\frac{r_c}{r_c^2 - r_i^2}\left[(1-2\nu_s)r_c^2 + r_i^2\right] + r_c\frac{1}{E_{\text{eq,corr}}}} \quad (5)$$

où le module élastique équivalent corrigé s'exprime ainsi:

$$\frac{1}{E_{\text{eq,corr}}} = \frac{1-\nu_c^2}{E_c}\ln\left(\frac{r_{\text{crm}}}{r_c}\right) + \frac{1-\nu_{\text{crm}}^2}{E_{\text{crm}}}\ln\left(\frac{r_{\text{rm}}}{r_{\text{crm}}}\right) + \left[\left(\frac{E}{E'}\right)^{-0.65}\left(\frac{G}{G'}\right)^{0.50}\left(\frac{1+\nu}{1+\nu'}\right)^{-0.56}\right]\frac{1+\nu}{E'} \quad (6)$$

où trois facteurs de corrections adimensionnels en fonctions des paramètres de la loi constitutive du rocher transversalement isotrope sont inclus. Les exposants ont été optimisés par algorithme génétique sur la base de 2000 cas générés de façon aléatoire, avec 9 paramètres variés uniformément.

Un facteur de correction $K_{\text{rm,aniso}}$ de la contrainte nominale dans le blindage peut ainsi être introduit comme suit:

$$K_{\text{rm,aniso}} = \frac{\sigma_{\text{nom,aniso}}}{\sigma_{\text{nom,iso}}}. \quad (7)$$

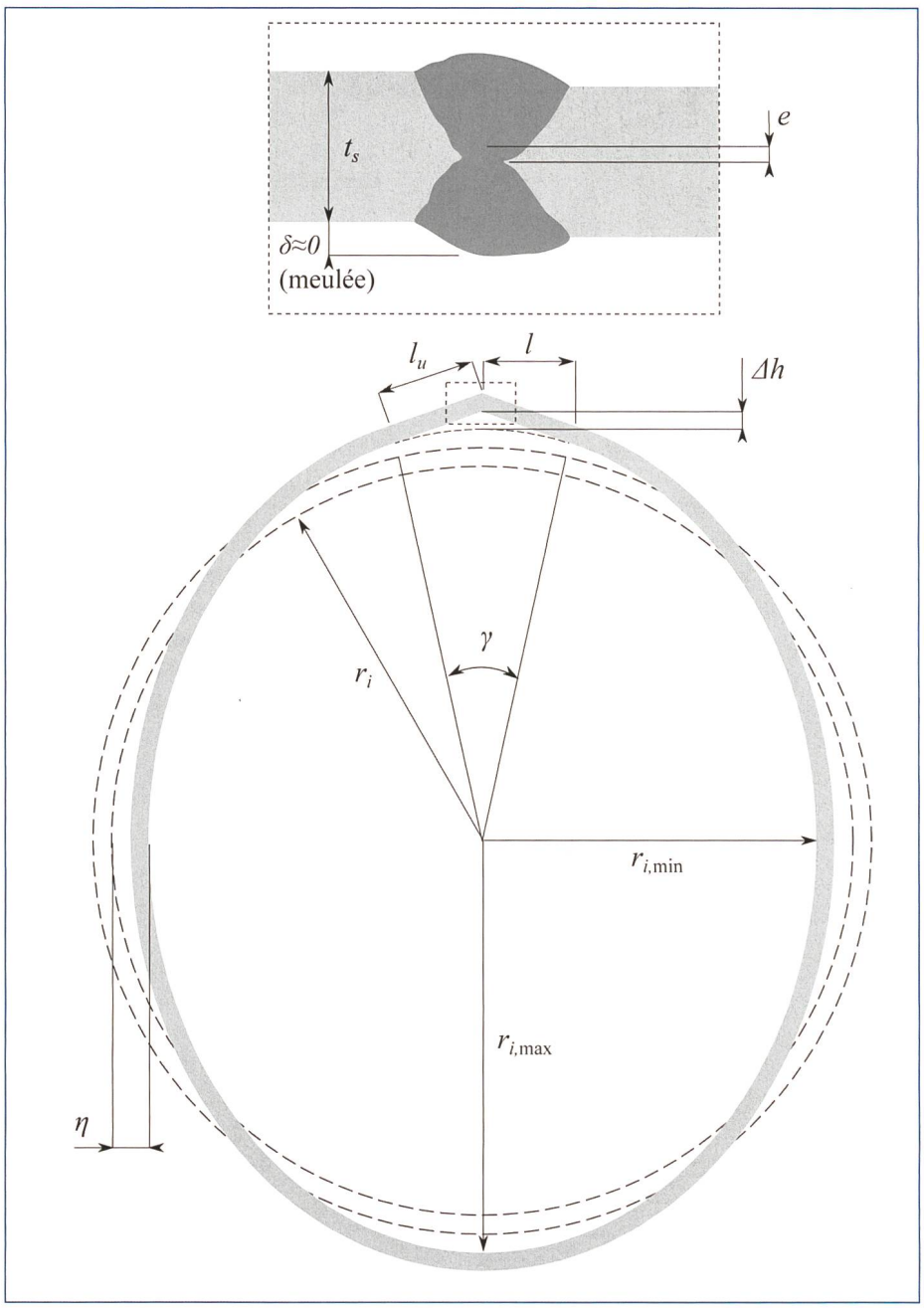


Figure 3. Schéma représentant les imperfections géométriques des viroles de blindage considérées dans cette étude.

4. Influence des imperfections géométriques

Les imperfections géométriques, inhérentes au processus de fabrication des viroles et du soudage, peuvent induire des contraintes de flexion. Trois imperfections géométriques sont considérées ici, c'est-à-dire l'ovalité η, le désalignement e (ou excentricité), et l'effet de toit Δh *(figure 3)*. Ce dernier est dû à une certaine longueur de la tôle d'acier qui ne peut être courbée lors du processus de roulement des viroles, ou à une déformation forcée pour permettre la soudure longitudinale. Dans les recommandations du Comité Européen de la Chaudronnerie et de la Tôlerie (*C.E.C.T.*, 1980), des tolérances sont données pour chaque type d'imperfections. En revanche, aucune méthode n'est proposée afin d'en calculer l'influence en termes de contraintes à la soudure.

Des formules permettant de calculer les concentrations de contrainte dues à des imperfections géométriques peuvent être trouvées dans la littérature, notamment dans des standards ou recommandations telles que celles de l'International Institute of Welding (*IIW*, *Hobbacher*, 2016). Le facteur de concentration $K_{m,\eta}$ de contraintes dû à l'ovalité d'un cylindre peut être calculé par

$$K_{m,\eta} = 1 + \frac{1.5(d_{\max} - d_{\min})\cos(2\Phi)}{t_s\left[1 + \frac{0.5 p_i (1-\nu_s^2)}{E_s}\left(\frac{d_{\text{mean}}}{t_s}\right)^3\right]} \quad (8)$$

où, $d_{\max}$, $d_{\min}$ et d_{mean} sont respectivement les diamètres maximum, minimum et moy-

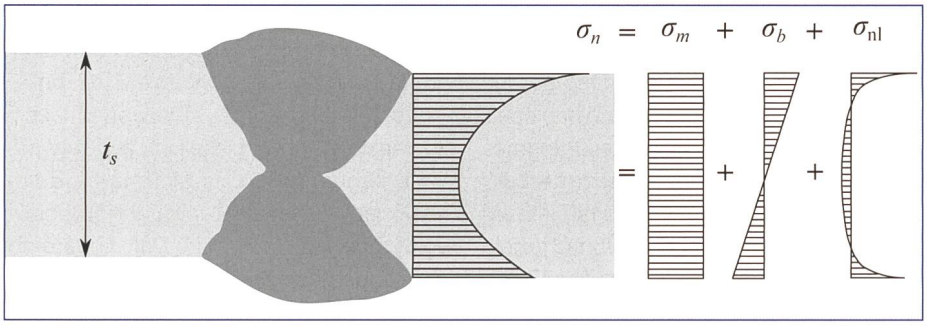


Figure 4. Schéma explicatif de la décomposition des contraintes au droit d'une soudure.

ens de la virole d'épaisseur t_s et Φ la localisation angulaire autour de la virole par rapport au rayon le plus large, où la contrainte est alors maximale (par exemple Φ=0). Pour l'effet de toit, le facteur de contrainte associé $K_{m,p}$ peut être calculé avec

$$K_{m,p} = 1 + \frac{3\Delta h}{t_s(1-\nu_s^2)} \cdot \frac{\tanh(\phi/2)}{\phi/2} \tag{9}$$

où

$$\phi = \frac{2l}{t_s}\sqrt{\frac{3(1-\nu_s^2)\sigma_m}{E_s}} \tag{10}$$

avec σ_m la partie membranaire du profile de contrainte *(figure 4)*, équivalent à la contrainte nominale ici. La déviation Δh par rapport à la forme cylindrique peut être estimée ainsi (*Böck* & *Zeman*, 1994)

$$\Delta h = r_i\left[1/\cos(\gamma/2) - 1\right] \tag{11}$$

où $\gamma \approx 2l_u$ est l'angle du désalignement angulaire, et la longueur du bord droit l_u peut être reliée à l'épaisseur par un facteur adimensionnel Ψ_u:

$$l_u = \psi_u t_s \ . \tag{12}$$

Finalement, le facteur de concentration de contrainte $K_{m,e}$ peut être calculé par la formule suivante:

$$K_{m,e} = 1 + \frac{3e}{t_s(1-\nu_s^2)} \tag{13}$$

avec *e* le désalignement.

Ces formules, largement reprises dans la littérature, sont applicables pour des plaques ou cylindres soudés à l'air libre. En revanche, dans le cas des puits blindés elles ne tiennent pas compte de l'interaction du blindage avec le système béton-rocher. Par ailleurs, l'interaction entre les imperfections elles-mêmes n'est pas décrite. La somme de leur contribution est en général considérée comme une approche conservative.

5. Calcul des contraintes structurelles en considérant toutes les influences

La décomposition du profile de contrainte au droit d'une soudure est présentée à la *figure 4*. La contrainte structurelle σ_s peut alors se définir comme la somme des composantes membranaire σ_m et de flexion σ_b du profil

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b \ . \tag{14}$$

La partie non-linéaire σ_{nl} du profil (voir *figure 4*) est due à l'effet d'entaille au pied du cordon de soudure, créant un gradient de contrainte. La détermination de cette concentration de contrainte n'est pas traitée ici, mais devrait être considérée dans le cas d'études de fissures émanant du pied de la soudure, par exemple (*Pachoud et al.*, 2017a).

Pour un calcul plus raffiné des concentrations de contraintes structurelles aux soudures longitudinales des blindages des puits et galeries en charge, *Pachoud* (2017) a étudié l'effet du confinement sur l'influence des trois types d'imperfections précédemment décrits, par la méthode des éléments finis et la technologie du contact, implémenté à l'interface acier-béton. Dans une étude paramétrique de chaque imperfection prise séparément, *Pachoud* (2017) a principalement montré que le confinement atténue complètement l'influence de l'ovalité. En revanche, le désalignement linéaire n'est pratiquement pas influencé par l'effet de confinement par rapport au cas de la conduite à l'air libre, et l'effet de toit n'est que légèrement atténué.

Dans le but de calculer les contraintes structurelles aux soudures longitudinales en tenant compte de l'interaction avec un rocher anisotrope, *Pachoud* (2017) a proposé une modification des formules précédemment présentées (*Hobbacher*, 2016). En introduisant un facteur de concentration de contrainte K^*_m tenant compte de l'interaction avec le système béton-rocher, la contrainte structurelle σ_s peut alors s'écrire en fonction de la contrainte nominale dans le blindage:

$$\sigma_s = K^*_m \sigma_{\text{nom,aniso}} \tag{15}$$

avec

$$\sigma_{\text{nom,aniso}} = \sigma_{\text{nom,iso}} K_{\text{rm,aniso}} \ . \tag{16}$$

Le facteur de concentration de contrainte K^*_m s'écrit alors comme la somme des influences du désalignement linéaire et de l'effet de toit (l'effet de l'ovalité est omis):

$$K^*_m = \left[1 + (K^*_{m,e} - 1) + (K^*_{m,p} - 1)\right] \tag{17}$$

avec $K^*_{m,e}$ modifié d'un coefficient égal à 0.87:

$$K^*_{m,e} = 1 + \frac{3 \cdot 0.87 \cdot e}{t_s(1-\nu_s^2)} \ ; \tag{18}$$

et $K^*_{m,p}$ d'un facteur 1.05:

$$K^*_{m,p} = 1 + \frac{3 \cdot 1.05 \cdot \Delta h}{t_s(1-\nu_s^2)} \cdot \frac{\tanh(\phi/2)}{\phi/2} \ . \tag{19}$$

Ces facteurs de corrections ont été optimisés par algorithme génétique, sur la base de 170 simulations, à travers lesquelles 15 paramètres (y compris l'ovalité) ont été variés arbitrairement de façon à couvrir une large étendue de cas possibles.

6. Conclusions

Dans un contexte énergétique imposant des conditions d'exploitation de plus en plus rudes aux aménagements hydroélectriques et particulièrement de pompage-turbinage, la fréquence des coups de bélier augmente ainsi dans les puits et galeries blindés dans ces aménagements. Avec l'utilisation des aciers haute-résistance pour diminuer l'épaisseur des blindages et optimiser ces structures hydrauliques, le critère de dimensionnement à la fatigue peut devenir prépondérant, notamment avec le risque de la fissuration à froid dans le cordon de soudure.

Afin d'évaluer le comportement à la fatigue des blindages avec l'approche de la mécanique de la rupture, les contraintes structurelles à la soudure doivent être connues afin de calculer les facteurs de concentration de contrainte. L'influence de l'anisotropie du rocher sur la contrainte nominale dans le blindage peut être déterminée en incluant des facteurs de correction dans la solution isotrope en considé-

rant le module élastique du rocher le plus faible mesuré in situ. L'introduction d'un moment de flexion au droit de la soudure dû aux imperfections géométriques peut être évaluée en utilisant les corrections proposées dans les formules de concentrations de contrainte bien connues dans la littérature. Cette méthodologie fournit des outils spécifiques aux puits et galeries blindés pour l'ingénieur, lui permettant d'évaluer les contraintes structurelles aux soudures longitudinales des viroles d'une manière efficace en vue d'une analyse à la fatigue. Un exemple pratique de l'analyse à la fatigue d'un blindage en utilisant les contraintes aux soudures longitudinales est présenté dans *Pachoud et al.* (2017b) pour le cas de fissures non détectées.

Remerciements

Cette étude fait partie de HydroNet 2: Modern methodologies for design, manufacturing and operation of hydropower plants, un projet de recherche fondé par le Swiss Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH). Des contributions additionnelles ont été obtenues du Comité suisse des barrages (CSB) et du Centre Suisse pour la Recherche en Energie – Pôle d'Approvisionnement en Electricité (SCCER-SoE).

Bibliographie

Amadei, B., Savage, W.Z. & *Swolfs, H.S.*, «Gravitational stresses in anisotropic rock masses», International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 24, No. 1; 1987, pp. 5–14

ASCE, «Steel Penstocks», Vol. 79 of Manuals and Reports on Engineering Practice, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia; 2012.

Brekke, T.L. & *Ripley, B.D.*, «Design guidelines for pressure tunnels and shafts», Tech. Rep., University of California at Berkeley, Department of Civil Engineering, Berkeley, California 94707, EPRI AP-5273, Project 1745-17; 1987.

Böck, N. & *Zeman, J.L.*, «On bending stresses at longitudinal weld joints of cylindrical shells due to peaking», International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 60, No. 1; 1994, pp. 103–106.

Comité Européen de la Chaudronnerie et de la Tôlerie (CECT), Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded construction for hydroelectric installations. European Committee for Boilermaking and Kindred Steel Structures; 1980.

Cerjak, H., Enzinger, N. & *Pudar, M.*, «Development, experience and qualification of steel grades for hydropower conduits», Steel Construction, Vol. 6, No. 4; 2013, pp. 265–270.

Hachem, F.E. & *Schleiss, A.J.*, «The design of steel-lined pressure tunnels and shafts», International Journal on Hydropower and Dams, Vol. 16, No. 3; 2009, pp. 142–151.

Hobbacher, A.F., Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW Collection, Springer International Publishing; 2016.

Pachoud, A.J. & *Schleiss, A.J.*, «Stresses and displacements in steel-lined pressure tunnels and shafts in anisotropic rock under quasi-static internal water pressure», Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 49, No. 4; 2016, 1263–1287.

Pachoud, A.J., Influence of geometrical imperfections and flaws at welds of steel liners on fatigue behavior of pressure tunnels and shafts in anisotropic rock, Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland; 2017, and Volume 69 of Communication of Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), EPFL, Ed. A. J. Schleiss, 2017, DOI: 10.5075/epfl-lchcomm-69.

Pachoud, A.J., Manso, P.A. & *Schleiss, A.J.*, «New parametric equations to estimate notch stress concentration factors at butt welded joints modeling the weld profile with splines», Engineering Failure Analysis, Vol. 72, No. February, 2017a, pp. 11–24.

Pachoud, A.J., Manso, P.A. & *Schleiss, A.J.*, «New methodology for safety assessment of steel-lined pressure shafts using high-strength steel», International Journal of Hydropower & Dams, in print; 2017b.

Schleiss, A.J., «Design criteria applied for the lower pressure tunnel of the North Fork Stanislaus River hydroelectric project in California», Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 21, No. 3; 1988, pp. 161–181.

Schleiss, A.J., «Triebwassersysteme bei Wasserkraftanlagen – Herausforderungen und Tendenzen für die Linienführung und Auskleidung»/«Waterway systems for hydropower plants – Challenges and tendencies for alignment and lining», in: Swiss Tunnel Congress. Luzern, Switzerland; 2012 , pp. 204–221.

Adresses des auteurs

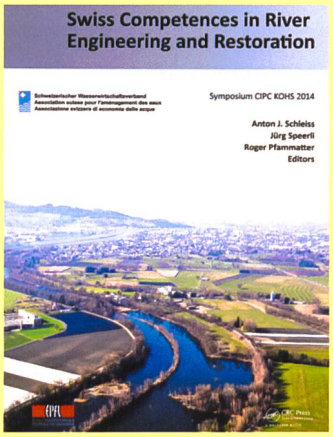
Alexandre Pachoud, STUCKY SA (a GRUNER company), Suisse, précédemment au Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), apachoud@stucky.ch

Pedro Manso, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), pedro.manso@epfl.ch

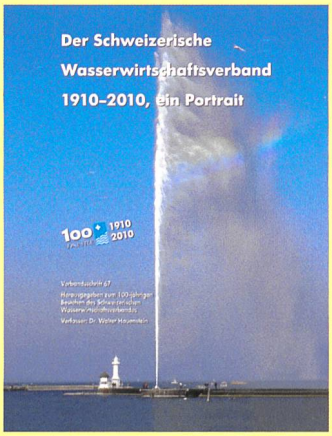
Anton Schleiss, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), anton.schleiss@epfl.ch

Bestellen Sie unsere Verbandsschriften direkt unter: www.swv.ch

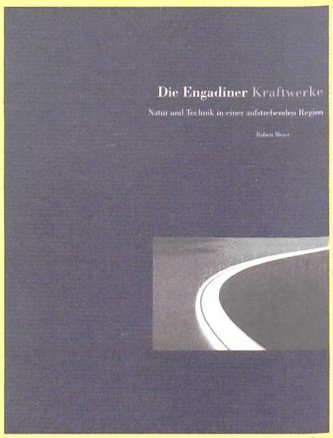
VS: Nr. 69, *Der Verband Aare-Rheinwerke 1915 bis 2015 – Rückblick auf ein Jahrhundert Wasserwirtschaft,* von Hans Bodenmann und Roger Pfammatter, ISBN 978-3-033-05079-2, CHF 25.–.



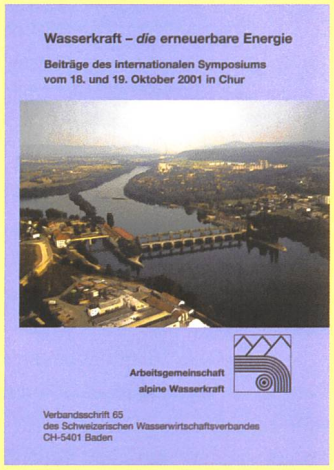
VS: Nr. 68, *Symposium CIPC KOHS 2014,* Anton Schleiss, Jürg Speerli, Roger Pfammatter (Eds.), 2014, 214 Seiten, Format A4, ISBN 978-1-138-02676-6, CHF 50.–.



VS: Nr. 67, *Der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband 1910– 2010, ein Portrait,* von Walter Hauenstein, 2010, 156 S. Format 17 × 24 mm, ISBN 978-3 85545-155-5, CHF 40.–.

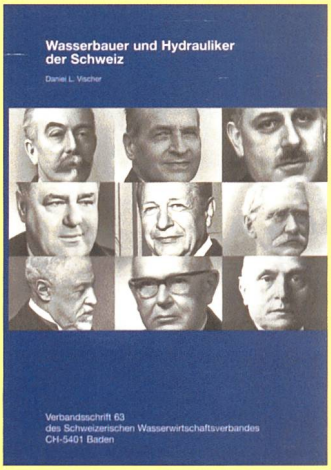


VS: Nr. 66, *Die Engadiner Kraftwerke – Natur und Technik in einer aufstrebenden Region,* von Robert Meier, 2003, 207 S., Format 28.5 × 20.5 cm, ISBN 3-85545-129-X, CHF 60.–.

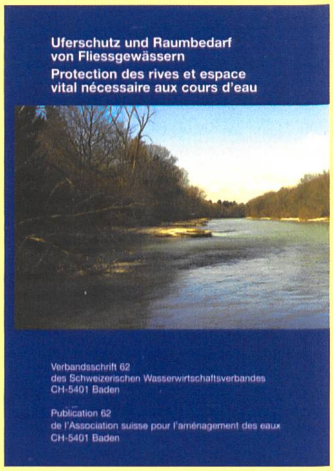


VS: Nr. 65, *Wasserkraft – die erneuerbare Energie,* Beiträge des internationalen Symposiums vom 18./19. Okt. 2001 in Chur, CHF 30.–.

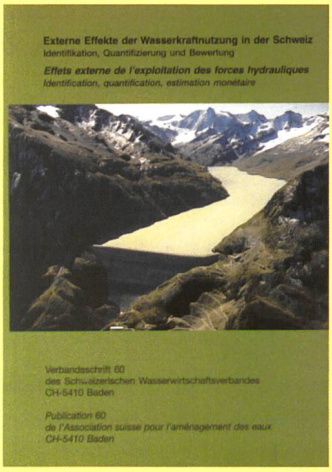
VS: Nr. 64, *Ökologische (Teil A) und technisch/ökonomische Qualitäten der Wasserkraft,* ecoconcept, Zürich und Schnyder Ingenieure AG, Ottenbach, CHF 40.–.



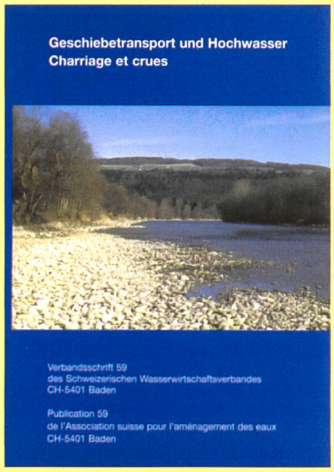
VS: Nr. 63, *Wasserbauer und Hydrauliker der Schweiz,* Kurzbiografien ausgewählter Persönlichkeiten, 2001, von Daniel L. Vischer, CHF 50.–.



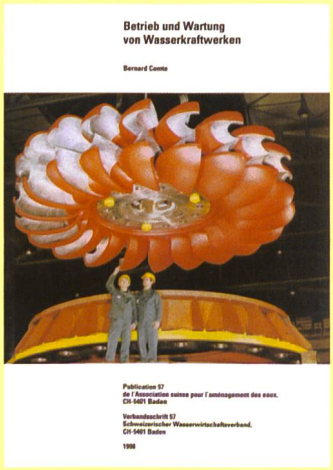
VS: Nr. 62, *Uferschutz und Raumbedarf von Fliessgewässern/Protection des rives et espace vital nécessaire aux cours d'eau,* 2001, Vorträge in Biel, CHF 40.–.



VS: Nr. 60, *Externe Effekte der Wasserkraftnutzung/Effets externe de l'exploitation des forces hydrauliques,* 1999, CHF 50.–.



VS: Nr. 59, *Geschiebetransport und Hochwasser/Charriage et crues,* Vorträge in Biel, 1998, CHF 50.–.



VS: Nr. 57, *Betrieb und Wartung von Wasserkraftwerken,* 1998, Bernard Comte, CHF 120.–.

VS: Nr. 54, *Directives pour l'exploitation et la maintenance des groupes hydroélectriques,* 1995, Bernard Comte, CHF 98.–.