

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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 97 (2005)

Heft: 7-8

Artikel: Zur Erdbebensicherheit von Druckleitungen und erdbebenbedingten hydrodynamischen Drücken

Autor: Wieland, Martin

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941758>

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: 23.02.2026

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

Zur Erdbebensicherheit von Druckleitungen und erdbebenbedingten hydrodynamischen Drücken

■ Martin Wieland

Einleitung

Druckleitungen, Schieber und andere Elemente von Druckwassersystemen von Stauanlagen sind bisher kaum gegen Erdbeben-Einwirkungen ausgelegt worden. Obwohl noch kein Fall bekannt ist, wo eine Druckleitung einer Wasserkraftanlage während eines Erdbebens versagt hat, stellt sich generell die Frage der Erdbebengefährdung und Erdbebensicherheit von Druckleitungen. Erdbebenschäden an erdverlegten, vorwiegend kommunalen Wasser- und Gasleitungen sind jedoch von verschiedenen Erdbeben her bekannt. Diese Leitungen sind nicht a priori erdbebensicher. Erdbeben können auf unterschiedliche Art und Weise eine Druckleitung gefährden:

- (I) Hydrodynamische Drücke durch Erdbebenerschütterungen: die Grösse des Druckes hängt vor allem vom Spektrum der Erdbebenanregung sowie der Grundfrequenz des Drucksystems ab.
- (II) Relativverschiebungen entlang einer Bruchfläche oder aktiven Verwerfung.
- (III) Verschiebungen von Fixpunkten infolge Hangrutschungen.
- (IV) Felsstürze auf offenliegende Druckleitung.
- (V) Dynamische Beanspruchung der offenen Leitung infolge Fusspunktanregung an Auflagern und Fixpunkten.
- (VI) Dynamische Bodendrücke auf vergrabene Leitungen; Leitungsverformungen und quasistatische Beanspruchung infolge Bodenverflüssigung; Verformungen infolge Rutschungen usw.

Aus obiger Aufzählung ist ersichtlich, dass die möglichen Erdbeben-Einwirkungen auf Druckleitungen vielfältig sind und dass die Sicherheit von Druckleitungen durch Erdbeben gefährdet werden kann. Eine Vernachlässigung der Erdbeben-Einwirkung ist deshalb problematisch auch wenn in den Alpen starke Erdbeben selten auftreten.

Die Hauptgefährdung während eines Starkbebens resultiert in bergigen Gebieten von Massenbewegungen. Beispielsweise haben sich während dem Chi-Chi-Erdbeben vom 21. September 1999 (Magnitude 7,5) in Taiwan mehr als 10 000 Erdrutsche und Steinschläge ereignet. Auch bei anderen Starkbeben haben sich in den Bergen zahlreiche

Massenbewegungen ereignet. Das heisst, dass auch bei uns mit derartigen Massenbewegungen gerechnet werden muss.

Die Erdbeben-Einwirkung bei Druckleitungen etwa als höhere Gewalt zu klassifizieren entspricht nicht dem Stand der Technik. Bereits vor 30 Jahren wurde die Trans-Alaska-Pipeline auf Erdbeben ausgelegt und spezielle konstruktive Massnahmen wurden vorgesehen, wo die Pipeline bekannte aktive Verwerfungen überquert. Beim Magnitude-7,9-Denali-Erzittern vom 3. November 2002 sind an einer bekannten Verwerfung signifikante Verschiebungen aufgetreten (Bild 1). Aufgrund der frei beweglichen Lagerung der Pipeline konnten diese Verschiebungen fast schadlos aufgenommen werden. An einigen wenigen Auflagern sind jedoch Schäden entstanden (Sorenson und Meyer, 2003; Hall et al. 2003).

Welche Massnahmen können getroffen werden, um die Erdbebensicherheit einer Druckleitung zu verbessern? In erster Linie geht es darum, die Schwachstellen einer bestehenden Druckleitung im Hinblick auf die obenerwähnten Einwirkungen herauszufinden. Diese Vorabklärungen sind nicht sehr aufwendig und es lohnt sich, derartige Überlegungen anzustellen. Um das mögliche Schadensausmass beim Versagen einer Druckleitung zu minimieren, ist das sichere Funktionieren der Schieber während und nach einem Erdbeben erforderlich. Der Erdbebensicherheit dieser Sicherheitsorgane ist deshalb grosse Beachtung zu schenken.

Die Abklärung der Gefährdung der Leitung durch Massenbewegungen ist am besten zusammen mit einem mit der Gegend vertrauten Geologen durchzuführen.



Bild 1. Gleitverschiebungen der Trans-Alaska-Pipeline im Bereich der Denali-Verwerfung (2002 Denali-Erdbeben) (links) und Auflagerschäden der Pipeline infolge Bodenbewegungen.

Der beste Schutz vor Steinschlägen ist das Zudecken bzw. Eingraben einer Druckleitung.

Fixpunkte und Rohrauflager in potenziell instabilen Hängen benötigen spezielle konstruktive Massnahmen. Es ist möglich, auf derartige kostspielige Massnahmen zu verzichten, wenn durch andere Massnahmen sichergestellt werden kann, dass das austretende Wasser weder Mensch noch Umwelt gefährdet. Das kann beispielsweise durch ein Erdbebenalarmsystem und einer Schnellabschaltung der Leitung (SCRAM) erreicht werden. Bei längeren Leitungen wären auch zusätzliche Schieber vorzusehen, die automatisch bedient werden können.

Im Folgenden werden die erdbebenbedingten hydrodynamischen Drücke in Druckleitungen analysiert und diskutiert, die insbesondere bei Anlagen mit geringer Fallhöhe die hydrostatischen Drücke weit übersteigen können und deshalb eine Gefährdung für eine Druckleitung und die Regulier- und Abschlussorgane darstellen können.

Erdbebenbedingte hydrodynamische Drücke in Druckleitungen

Die Druckstöße in Druckleitungen werden am einfachsten durch die eindimensionale Wellengleichung beschrieben, d.h.

$$u_{tt} = c^2 u_{xx} \quad (1)$$

wobei c die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit des Druckstosses in einem mit Wasser gefüllten elastischen Rohr ist (diese liegt zwischen ca. 1100 bis 1300 m/s), Subskript « t » und « x » bedeuten zeitliche und örtliche Ableitung, x ist die Koordinate entlang der Rohrachse und $u(x,t)$ ist die Verschiebung des



elastischen Flüssigkeitskörpers in Richtung Rohrachse.

Bei Erdbebenanregung (Bodenbeschleunigung entlang Leitung $\ddot{u}_g(t)$) lautet die Wellengleichung wie folgt:

$$u_{tt} - c^2 u_{xx} = \ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

Der hydrodynamische Druck, $p(x,t)$, kann aus folgender Beziehung ermittelt werden:

$$p(x,t) = E u_x(x,t) \quad (3)$$

wobei $E = \rho c^2$ den Elastizitätsmodul des Wassers in der elastischen Druckleitung darstellt und ρ die spezifische Dichte von Wasser (1000 kg/m^3).

In einer an einem Ende geschlossenen Druckleitung der Länge L (inkl. Distanz bis zur Stauseeoberfläche), die in einen offenen Stausee führt, und durch eine Bodenbeschleunigung angeregt wird, kann der Zeitverlauf des Druckes durch die modale Superpositions methode bestimmt werden (vgl. hierzu Clough und Penzien, 1974). Dabei können die Eigenschwingungsformen $X_n(x)$ wie folgt dargestellt werden (Koordinatenursprung an freier Oberfläche, $x = 0$):

$$X_n(x) = \cos[(2n-1) \pi x/(2L)], n = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Dabei gilt die Orthogonalität der Eigenschwingungsformen

$$\int_0^L X_n(x) X_m(x) dx = 0 \text{ für } m \neq n$$

und für $m = n$ ergibt sich $L/2$

Aus der Beziehung

$$u(x,t) = \sum X_n(x) u_n(t)$$

erhalten wir aus Gleichung 4

$$u(x,t) = \sum u_n(t) \cos[(2n-1) \pi x/(2L)] \quad (5)$$

wobei $u_n(t)$ die n -te modale Koordinate (Verschiebung der Flüssigkeit in der Druckleitung beim Stausee, $x = 0$) aus folgender einfacher Bewegungsgleichung bestimmt werden kann (Einsetzen obiger Beziehung in die Wellengleichung (1), Multiplikation mit $X_n(x)$, Einführung eines viskosen Dämpfungsterms und Integration über die gesamte Leitungslänge):

$$\ddot{u}_n + 2 \xi_n \omega_n \dot{u}_n + \omega_n^2 u_n = -d_n \ddot{u}_g(t), n = 1, 2, \dots \quad (6)$$

wobei

ξ_n : n -te Dämpfungsrate

ω_n : n -te Kreisfrequenz des Drucksystems in rad/s

$$\omega_n^2 = c^2 \int_0^L X_n(x) X_n''(x) dx / \int_0^L X_n^2(x) dx = [(2n-1) \pi^2 / (2L)^2] \quad (7)$$

d_n : n -ter modaler Partizipationsfaktor,

$$d_n = \int_0^L X_n(x) dx / \int_0^L X_n^2(x) dx = 4 / [\pi(2n-1)] \quad (8)$$

$\ddot{u}_g(t)$: Grundbeschleunigung in Richtung Leitungssachse.

Die Eigenfrequenzen des Drucksystems sind wie folgt:

$$f_n = \omega_n / (2\pi) = (2n-1) c / (4L), n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Die Grundfrequenz ($n = 1$) ergibt sich zu $f_1 = c / (4L)$.

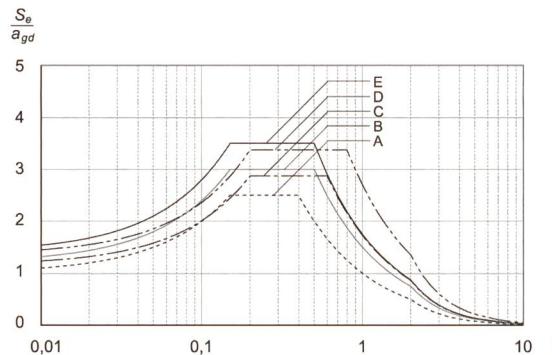


Bild 2. Elastische Beschleunigungsantwortspektren der SIA-Norm 261 (2003) für 5%-Dämpfung für verschiedene Baugrundklassen (A = Fels) und einer Spitzenbodenbeschleunigung von a_{gd} (Wiederkehrperiode: 475 Jahre).

Der Maximalwert von u_n lässt sich direkt aus dem Antwortspektrum der Grundbeschleunigung $S_a(f_n, \xi_n)$ ermitteln, d.h.

$$u_{n,max} = d_n S_a(f_n, \xi_n) / \omega_n^2 \quad (10)$$

Aus Gl. (3) lässt sich auf analoge Weise der hydrodynamische Druck der n -ten Eigenschwingungsform am Leitungsende ($x = L$) ermitteln

$$p_{n,max} = E u_{xn,max} = E [(2n-1) \pi / (2L)] u_{n,max} \quad (11)$$

Einsetzen von Gl. (10) und den Ausdrücken für f_n und d_n in Gl. (11) ergibt folgende Beziehung:

$$p_{n,max} = 8 \rho L S_a(f_n, \xi_n) / [(2n-1)^2 \cdot \pi^2] \quad (12)$$

Der maximale hydrodynamische Druck am geschlossenen Ende der Leitung ergibt sich aus folgender Superposition der modalen Maximaldrücke:

$$p_{tot} = [p_{1,max}^2 + p_{2,max}^2 + \dots + p_{n,max}^2]^{1/2} \quad (13)$$

Bei Berücksichtigung der ersten Eigenschwingung resultiert ein maximaler hydrodynamischer Druck von

$$p_{1,max} = 8 \rho L S_a(f_1, \xi_1) / \pi^2 \quad (14)$$

Im Fall einer Leitung mit inkompressibler Flüssigkeit ergibt sich

$$p_{max} = \rho L a_o \quad (15)$$

wobei a_o der Maximalwert der Grundbeschleunigung $\ddot{u}_g(t)$ ist.

Das Verhältnis zwischen kompressiblem und inkompressiblem hydrodynamischen Druck, K , ergibt sich somit unter Berücksichtigung von $S_a(f_1, \xi_1) = k a_o$ zu

$$K = 8 k / \pi^2 \quad (16)$$

Für die in Bild 2 dargestellten Antwortspektren mit 5% Dämpfung variiert der Maximalwert von k zwischen 2,5 (Baugrundklasse A: Fels) und 3,5 (Baugrundklasse E). Die Dämpfung einer Druckschwingung in einer Druckleitung liegt jedoch unter 5%, somit ist $k > 2,5$ (Fels). Für kleinere Dämpfungs-

raten können die Antwortspektren in dem für Druckleitungen relevanten Frequenzbereich mit dem Faktor $\eta = 1/(0,5 + 10\xi)^{1/2}$ multipliziert werden. Bei einer ungedämpften Schwingung ergibt sich $\eta = 1,41$ und der maximale k -Wert für Fels beträgt in diesem Fall 2, $5 \cdot 1,41 = 3,5$.

Daraus folgt aus Gl. (16) $K = 2,9$, d.h. der Maximaldruck in einer Druckleitung mit kompressibler Flüssigkeit kann denjenigen in einer inkompressiblen Leitung um fast das

Zweifache übersteigen. Bei der Baugrundklasse E gemäß SIA 261 und einer ungedämpften Druckschwingung ergibt sich K zu $8 \times 3,5 \times 1,41 / 3,14^2 = 4,0$ (Maximalwert).

Beispiel 1:

1000 m lange Druckleitung

Unter der Annahme eines Felsstandortes und einer Spitzenbodenbeschleunigung von $0,3 \text{ g}$ ergibt sich in einer $L = 1000 \text{ m}$ langen Druckleitung mit einer Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit von $c = 1100 \text{ m/s}$ (Eigenperiode der Grundschwingung von $4L/c = 3,64 \text{ s}$) gemäß Gl. (14) und dem Antwortspektrum für Fels in Bild 2 (Spektralwert Antwortspektrum: 0,264) für eine ungedämpfte Druckschwingung (Amplifikation des 5%-Referenzspektrums: 1,414) ein maximaler hydrodynamischer Druck der Grundschwingung von $p_{1,max} = 8 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ m} \times 1,414 \times 0,264 \times 3 \text{ m/s}^2 / 3,14^2 = 0,91 \text{ MPa}$ bzw. $9,1 \text{ bar}$

Diese hydrodynamischen Drücke der Grundschwingung sind für eine Druckleitung mit einem grossen Gefälle und grossen statischen Drücken relativ klein. Gefährdet wären vor allem Druckleitungen mit einem geringen hydrostatischen Druck, das sind i.A. Druckleitungen mit einem schwachen Gefälle.

Der hydrodynamische Druck der zweiten Eigenschwingung ($n = 2$) mit einer Periode von $4L/(3c) = 1,212 \text{ s}$ beträgt gemäß Gleichung 12 (Spektralwert Antwortspektrum Bild 2: 0,825):

$$p_{2,max} = 8 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ m} \times 1,414 \times 0,825 \times 3 \text{ m/s}^2 / (9 \times 3,14^2) = 0,32 \text{ MPa}$$

Im weiteren erhalten wir für die dritte Eigenschwingung folgenden Anteil (Periode: 0,727 s, Spektralwert Antwortspektrum: 1,375):

$$p_{3,max} = 8 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ m} \times 1,414 \times 1,375 \times 3 \text{ m/s}^2 / (25 \times 3,14^2) = 0,19 \text{ MPa}$$

Wie aus dieser Zusammenstellung ersichtlich, nehmen die hydrodynamischen Drücke der weiteren Eigenschwingungen ab. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen modalen Drücke gemäß Gl. (13) zu überlagern sind, d.h. der totale hydrodynamische Druck der ersten drei Eigenschwingungen beträgt demzufolge:

$$p_{tot} = (0,91^2 + 0,32^2 + 0,19^2)^{1/2} = 0,98 \text{ MPa}$$

bzw. $9,8 \text{ bar}$

Der Gesamtdruck ist deshalb in diesem Beispiel nur rund 8% grösser als derjenige, der sich aus der ersten Eigenschwingung ergibt. Deshalb ist es normalerweise ausreichend, wenn man sich bei den Druckschwingungen in einfachen Rohrleitungen nur auf den Beitrag der ersten Eigenschwingung beschränkt.

Beispiel 2:

130 m langer Druckstollen

Unter der Annahme eines Felsstandortes und einer Spitzbodenbeschleunigung von 0,3 g ergibt sich in einem $L = 130$ m langen Druckstollen mit einer Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit von $c = 1300$ m/s (Eigenperiode der Grundschiung von $4L/c = 0,4$ s) gemäss Gl. (14) und dem Antwortspektrum für Fels in Bild 2 (Spektralwert Antwortspektrum: 2,5) für eine Druckschwingung mit 5% Dämpfung ein maximaler hydrodynamischer Druck der Grundschiung von

$$p_{\max} = 8 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 130 \text{ m} \times 2,5 \times 3 \text{ m/s}^2 / 3,14^2 = 0,79 \text{ MPa bzw. } 7,9 \text{ bar}$$

Für Leitungen mit einer geringen Fallhöhe und relativ kleinen hydrostatischen Drücken sind auch das noch beträchtliche Drücke. Die Beiträge der höheren Eigenschwingungen sind hier geringer als im Beispiel 1, da die Spektralwerte für die höheren Eigenschwingungen nicht mehr zunehmen (der Maximalwert ist bereits bei der Grundschiung erreicht), währenddem im Beispiel 1 die Spektralwerte der 2. und 3. Eigenschwingung immer noch zugenommen haben und den Plateauwert von 2,5 für den Felsstandort noch nicht erreicht haben.

In einer inkompressiblen Leitung hängt der Maximaldruck nur von der Leitungslänge und dem Spitzwert der Bodenbeschleunigung ab. Der dynamische Maximaldruck ergibt sich dann im Beispiel 1 zu $1000 \text{ kg/m}^3 \times 1000 \text{ m} \times 3 \text{ m/s}^2 = 3 \text{ MPa}$ (30 bar) und für Beispiel 2 zu $1000 \text{ kg/m}^3 \times 130 \text{ m} \times 3 \text{ m/s}^2 = 0,39 \text{ MPa}$ (3,9 bar).

Es ist speziell darauf hinzuweisen, dass das Gefälle der Leitung keinen Einfluss auf die Grösse des erdbebenbedingten hydrodynamischen Druckes hat.

Im weiteren ist festzuhalten, dass bei einer Druckschwingung keine negativen Drücke auftreten können. Grosse Negativdrücke, die unter den Dampfdruck fallen, können sich nicht einstellen und eine zusätzliche Dämpfung der Druckschwingung ist durch die daraus entstehenden nichtlinearen Prozesse zu erwarten.

Aufgrund obiger Diskussion, die auf der Analyse des dominanten Beitrags der Grundschiung auf die gesamten hydrodynamischen Drücke basiert, lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Die hydrodynamischen Drücke in relativ kurzen Leitungen und Stollen können relativ hohe Werte annehmen, da hier bei einem Erdbeben «Resonanzeffekte» auftreten können, d.h. die Eigenfrequenzen des Drucksystems liegen im Bereich der dominanten Frequenzen der Erdbebenanregung. Die Annahme einer inkompressiblen Flüssigkeit in der Druckleitung führt zu einer Unterschätzung der hydrodynamischen Drücke.
2. Bei Druckleitungen mit einer Länge von mehreren hundert Metern liegen die Eigenfrequenzen des Drucksystems weit unter den dominanten Erdbebenfrequenzen. Die hydrodynamischen Drücke in einer kompressiblen Flüssigkeit liegen hier beträchtlich unter denjenigen in einer Druckleitung mit inkompressibler Flüssigkeit.
3. Die Beiträge der höheren Eigenschwingungen des Druckwassersystems sind relativ gering.
4. Die hydrodynamischen Drücke hängen stark von der Wahl des zu verwendenden Antwortspektrums ab. Bei langen Druckleitungen mit langen Eigenschwingungsperioden ist der Spektralbereich massgebend, der normalerweise für Bauwerke nicht von Bedeutung ist. Die entsprechenden Normspektren sind deshalb kritisch zu betrachten.

Auslegung von Druckleitungen für hydrodynamische Drücke

Bei der Auslegung und Sicherheitsüberprüfung von Druckleitungen sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Das Auslegungserdbeben ereignet sich sehr selten, z.B. im Durchschnitt einmal in 475 Jahren, wenn die in der Norm SIA 261 angegebenen Bemessungswerte der Bodenbeschleunigung der verschiedenen Erdbebenzonen in der Schweiz verwendet werden.
- Der hydrodynamische Druck wirkt relativ kurzfristig (bei einer Eigenfrequenz von ca. 0.2 Hz ist die Dauer des Maximaldruckes einer sinusförmigen Schwingung weniger als ca. 2 Sekunden pro Schwingung).
- Da es sich um seltene Ereignisse handelt dürfen Mittelwerte der Materialfestigkeiten verwendet werden und es sind keine zusätzlichen Sicherheitsfaktoren in Rechnung zu stellen (Lastfaktor 1.0; Widerstandsfaktor 1.0).
- Lokale Plastifizierung von Stahlteilen ist in eng begrenztem Umfang zulässig solang die Abschlussorgane sicher bedient werden können, das gilt speziell für Bauteile mit hoher Biegebeanspruchung, wo eine lokale Plastifizierung zu vernachlässigbaren Zu-

satzdeformationen führt und somit die Gebrauchstauglichkeit nicht beeinträchtigt.

Mit diesen Annahmen kann eine Leitung, die für einen statischen Sicherheitsfaktor von 1,8 ausgelegt worden ist, auch relativ grosse zusätzliche hydrodynamische Drücke aufnehmen. In jedem Fall ist jedoch ein entsprechender Nachweis zu erbringen.

Schlussfolgerungen

Druckleitungen und andere Elemente des Druckwassersystems von Wasserkraftanlagen sind bisher kaum gegen Erdbebeneinwirkungen ausgelegt worden.

Erdbeben können in Drucksystemen beträchtliche hydrodynamische Drücke verursachen. Je nach Untergrundverhältnissen und Länge der Leitung sind bei einer maximalen Bodenbeschleunigung von 0,3 g dynamische Maximaldrücke von rund 1 MPa zu erwarten. Diese sind eher bei Leitungen mit einem relativ geringen statischen Innendruck ein Problem als bei Druckleitungen in steilen Gebieten mit grosser Druckhöhe.

Hohe Drücke sind auch in relativ kurzen Einläufen zu erwarten, die sich in der Sperre befinden, wo durch die Schwingung der Sperre auf dem Niveau des Einlaufs erhöhte Beschleunigungen auftreten können.

Die Hauptgefährdung von oberirdisch verlegten Druckleitungen kommt jedoch von potenziellen Hangrutschungen und Steinschlägen. In steilen Hängen ist während einem Starkbeben mit einer grossen Anzahl von Steinschlägen zu rechnen. Erdbeben in Iran und Taiwan haben gezeigt, dass während einem Starkbeben tausende von Steinschlägen zu erwarten sind.

Referenzen

- Clough R. W., Penzien J. (1975): Dynamics of structures, McGraw-Hill, Inc., USA
 Hall W. J. et al. (2003): Performance of the Trans-Alaska Pipeline in the November 3, 2002 Denali Fault Earthquake, Proc. Sixth U.S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering; Long Beach, CA, August 2003
 SIA 261 (2003): Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
 Sorenson S. P., Meyer K. J. (2003): Effect of the Denali Fault Rupture on the Trans-Alaska Pipeline, Proc. Sixth U.S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Long Beach, CA, August 2003

Anschrift des Verfassers

Dr. Martin Wieland, Electrowatt-Ekono AG (Jaakko Pöyry Group), Hardturmstrasse 161, CH-8037 Zürich, Schweiz; E-mail: martin.wieland@ewe.ch