

HYDRAULISCHE, ÖKONOMISCHE UND NACHHALTIGE OPTIMIERUNG VON TRIEBWASSERWEGEN FÜR HOCHDRUCK- WASSERKRAFTWERKE

Wolfgang RICHTER¹, Kaspar VEREIDE², Josef SCHNEIDER¹, Gerald ZENZ¹

¹Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Stremayrgasse 10/2, A-8010 Graz, Austria, +43 316 873 8361, hydro@TUGraz.at, www.hydro.tugraz.at/

²Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU, S. P. Andersens veg 5, N-7491 Trondheim, Norway, +47 73594763, kaspar.vereide@ntnu.no www.ntnu.no/ivm

Kurzfassung: Eine nachhaltige Versorgung mit Wasser und Energie ist eine wichtige Grundlage von Prosperität. Die technische Herausforderung der Konstruktion eines Triebwasserweges wird seit mehreren tausend Jahren bewältigt. Der Bau von modernen Hochdruckwasserkraftanlagen erfordert die Bemessung auf sehr große statische und dynamische Kräfte, um eine möglichst lange Lebensdauer zu gewährleisten. Wasserschlässe bieten bei richtiger Auslegung einen sicheren Betrieb der Kraftwerksanlage. Insbesondere wird in diesem Beitrag auf die ökonomischen Optimierungen des Wasserkraftbaus in Norwegen eingegangen und die Eigenschaften von Druckluftwasserschlässern aufgezeigt. Neue Pumpspeicherkraftwerke werden zunehmend für höhere Durchflussmengen bei geringeren und sehr häufigen Schaltfällen dimensioniert. Bei gegebenen Randbedingungen kann durch der Einsatz von Druckluftwasserschlässern einen ökonomischen und nachhaltigen Beitrag zum Ausbau von Energiespeichern in Form von Pumpspeicherkraftwerken leisten.

Keywords: Wasserschloss, Druckluftwasserschloss, Triebwasserweg

1. Einleitung

Seit Jahrtausenden zeichnet sich der Erfolg von Hochkulturen darin aus, sich einerseits vor den Wassergewalten zu schützen und andererseits die lebensnotwendigen Eigenschaften des Wassers sowie die Kraft des Wassers zu nützen. Ingenieurtechnische Wasserbauten stellen somit eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Hochkultur dar. Wasser wird zudem gratis mit Sonnenkraft in höhere Region gehoben und es kann bei seinem Abfluss energetisch genutzt werden. Bei heutigen alpinen Hochdruckanlagen werden Höhenunterschiede von bis zu 1800 m Fallhöhe direkt abgearbeitet. Diese technischen Bauwerke stellen durch den komplexen bautechnischen Aufwand sowie den dabei auftretenden großen Kräfte eine besondere Herausforderung an die Ingenieurskunst dar. Vor 2550 Jahren wurde der 1036 m lange Wasserversorgungstunnel von Samos gebaut. Seine Betriebszeit betrug 1200 Jahre (Garbrecht 1995). Vor 2200 Jahren wurde die Druckrohrleitung von Pergamon errichtet, welche bereits dem heutigen hydraulischen Prinzip alpiner Hochdruckwasserleitungen entspricht. Es wurden eine lange Niederdruckzuleitung (ineinandergesteckte und abgedichtete Tonrohre) errichtet und am Übergang zu Hochdruckbereichen Wasserschlässe angeordnet (Wasserkammern, Absetzbecken). Die Druckrohrleitung von Pergamon hat eine Innendruckbelastung von 175 mWS überwunden (Vermutlich aus Bleirohren gefertigt). Diese Anlage war mindestens 380 Jahre in Betrieb

(Garbrecht 1995). Vitruvius Pollio schreibt im achten Buch seiner zehn Bücher über Architektur bereits im Jahre 22 v.Chr. über die prinzipielle Vorgangsweise beim Bau von Wasserleitungsanlagen. Der Übergang von der Zuleitung zum Versorgungssystem einer Stadt wird über ein zweistufiges Kammersystem bewerkstelligt welches *castellum* bezeichnet wird (Vitruvius 22 v.Chr.).

Wasserkraftanlagen zählen zu den Kraftwerkssystemen mit dem höchsten erzielbaren Erntefaktor bezüglich investierter Energie und erzeugter Energie.

Da die Beschleunigung von Wasser in Rohrleitungen nicht abrupt erfolgen kann, muss ab einer gewissen Leitungslänge ein Wasserschloss angeordnet werden, um eine Wasserkraftanlage überhaupt regulierbar betreiben zu können. Bei Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen wird somit die kinetische Energie des fließenden Wassers vom Einlauf bis zum Wasserschloss in potentielle Energie transformiert. Daraus ergibt sich die grundlegende Auslegung von Wasserschlossern. Der Leitungsbereich vom Wasserschloss zu den hydraulischen Maschinen erfolgt im alpinen Bereich üblicherweise in stahlgepanzerten Rohrleitungen oder Druckschächten. Die Stahlauskleidung ist notwendig, um den statischen und dynamischen Innendruck aufzunehmen. Der dynamische Innendruck ergibt sich aus der Transformation der kinetischen Energie bei Schließ oder Öffnungsvorgängen an den Turbinen. Im Extremfall, bei schnellen Schaltvorgängen wird die gesamte Fließenergie in Druckenergie umgewandelt (Schließ oder Öffnungszeit unter der Reflexionszeit der Schallwelle in der Leitung). Dies wird als Druckstoß bezeichnet. Die Situierung eines Wasserschlosses vermindert beträchtlich die Reflexionszeit und ermöglicht daher eine geringere Belastung des Druckschachtes durch den dynamischen Druck. Panzerungsstrecken bis zum Wasserschloss werden ab wenigen hundert Metern bis etwa zweitausend Metern Länge errichtet. Durch die erforderlichen Stahldicken für Innendruck und die zusätzlich zu dimensionierende Auslegung auf äußerlichen Wasserdruck bei Schachtlösungen werden für den Bau große Mengen an hochqualitativem Stahl benötigt. Der Einsatz dieser Ressource in Kombination mit dem Auffahren des Hohlraums und einer Betonauskleidung erfordert eine hohe finanzielle Investition.

In Norwegen wurde aufgrund geologischer Vorteile bereits 1921 der erste unausgekleidete Druckschacht errichtet (Palmström 1987). Druckhöhen und Schachtlängen werden bis auf über 1000 mWS im 20. Jhdt. gesteigert. Aufgrund schwieriger Zugangsbedingungen für den Schacht- und Wasserschlossbau sowie der ursprünglichen Erfordernis eines sehr langen Wasserschlossschachtes wird 1975 die erste große Wasserkraftanlage mit einem Druckluftwasserschloss ausgestattet (Rathe 1975, Brekke 1972).

Die Situierung eines Druckluftwasserschlosses ermöglicht eine direkte Stollenverbindung von der Kraftkaverne zum Reservoir. Das Wasserschloss muss in ausreichender Überdeckung hinsichtlich der minimalen Gebirgsspannung positioniert werden sowie eine ausreichende Dichtheit aufweisen.

In Norwegen wird bei einigen Anlagen mit Druckwasserschirmen dem Luftverlust entgegen gewirkt (Kjørholt und Broch 1992). Bei der Anordnung eines Druckluftwasserschlosses wird die Rohrleitungslänge zwischen Turbinen und Wasserschloss minimiert und somit ermöglicht das eine sehr geringe erforderliche Länge von Stahlpanzerung. Zusätzlich wird aufgrund der sehr geringen Reflexionszeit der dynamische Druck wesentlich geringer. Durch die tief liegende Anordnung eines Druckluftwasserschlosses können die auftretenden Krafteinwirkungen der Wasserleitungsführung direkt über eine Kraftmitwirkung des Gebirges abgetragen werden.

Besonders bei schnell versperrenden Pumpturbinen kann dadurch die dynamische Belastung der Druckrohrleitung verringert werden. Im Zusammenhang mit einer unausgekleideten Bauweise von Druckstollen konnten somit in Norwegen sehr ökonomische Druckstollen erstellt werden. Aus der ökonomischen Ressourcenminimierung ergibt sich zudem eine wesentliche ökologische Komponente.

Alpin wird derzeit erfolgreich das Unterwasserwasserschloss des Pumpspeicherkraftwerkes Kops 2 als Druckluftwasserschloss betrieben. Die Luftdichtheit wird hierbei durch eine Stahlpanzerung im luftexponierten Teil des Wasserschlosses gewährleistet. Eine ambitionierte Positionierung eines oberwasserseitigen Druckluftwasserschlosses in alpinen Anlagen existiert derzeit nicht, die Entwicklung erfordert zusätzliche Investition in Forschungsleistungen. Auch müssen für die Anforderungen zukünftiger hochflexibler Hochdruckwasserkraftanlagen weitere, bisher auch in Norwegen erst nach und nach adaptierte Herausforderungen gemeistert werden. Diese betreffen die ökonomische Befüll- und Entleerzeiten der Druckluft in den Wasserschlässern oder die Auslegung der Kraftwerke auf ungünstige Mehrfachschaltfälle.

2. Hochdruckwasserkraftanlagen mit Wasserschlässern in Norwegen

Norwegen, mit seiner sehr gut geeigneten Topographie und Hydrologie, ist in der exzellenten Lage etwa 98% seines Strombedarfs aus Wasserkraft zu produzieren. Norwegens pro Kopf Stromverbrauch beträgt mit 24.891 kWh (2010) dreimal so hoch wie dieser in Österreich. Viele norwegische Wasserkraftwerksanlagen werden mittels komplexer Stollen und Rohrleitungssystemen betrieben. Eine erhebliche Anzahl an Beileitungen und Anbindungen an natürliche und künstliche Seen bilden das Leitungssystem. Als Beispiel ist in Abbildung1 die Kraftwerksanlage *Ulla-Førre* dargestellt. Da das gesamte norwegische Elektrizitätsnetz auch durch Wasserkraftanlagen geregelt werden muss, wird den Anforderungen an hydraulische Stabilität der Anlagen besonders Rechnung getragen. Aufgrund der langen und guten Erfahrungen werden die Triebwasserwege in den meisten Fällen bergmännisch aufgefahren. Aufgrund der hohen Felsqualität können vornehmlich unausgekleidete Druckwasserwege gebaut werden. Der erste unausgekleidete Druckschacht mit einer Fallhöhe über 150 m wurde im Kraftwerk *Svelgen* (1921) gebaut. Beim unausgekleideten Schacht im Kraftwerk *Nye Tyin* wird ein maximaler statischer Innendruck von 1054 mWS erreicht (Norwegian Hydropower Tunneling II, 2013). Aus Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen - Hinblick auf die hydraulischen Verluste - ergibt sich üblicherweise die erforderliche Tunnelquerschnittsfläche aus dem angestrebten Verhältnis des Druckverlustes bei Auslegungswassermenge von einem Meter auf 1 km Stollenlänge. Daher werde die Ausbruchsquerschnitte welche eine hohe Felsrauheit aufweisen sehr großzügig gewählt.

Bis in die 1970er Jahre wurden ausschließlich entsprechend der Wasserkraftanlagen in den Alpen, die Hochdruckanlagen in Norwegen mit einem flach geneigtem Druckstollen und einem steilen Druckschacht gebaut. Vor dem Übergang zum Druckschacht oder Druckrohr wurde bei längeren Stollen ein Wasserschloss angeordnet. Vor dieser Entwicklung wurde bereits viel Erfahrung beim Bau von unausgekleideten Druckstollen und -schächten gesammelt. Ziel war stets eine ökonomische Optimierung der Kraftwerkserschließung.

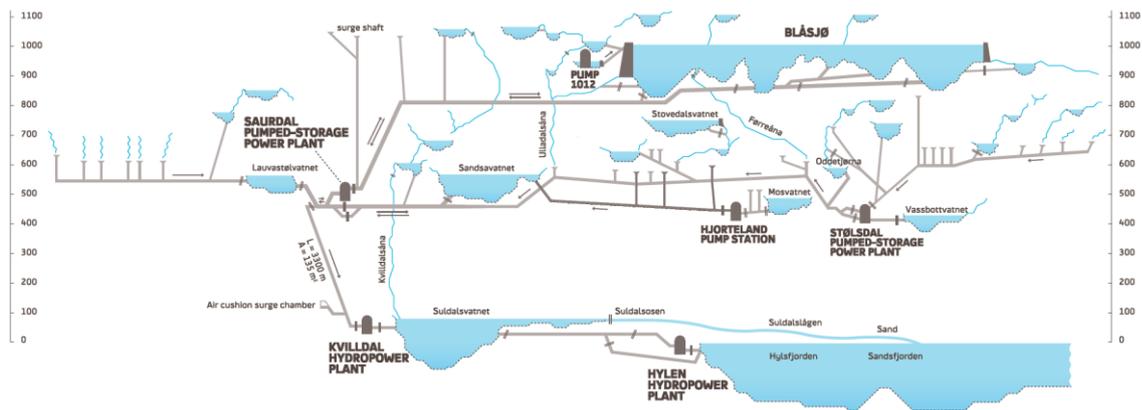


Abbildung 1: Skizze der Wasserkraftanlage von Ulla-Førre (www.statkraft.com)

Aufgrund der Anforderungen an die hydraulische Stabilität an eine Hochdruckwasserkraftanlage (Brekke, 1972) und des schwierigen Zugangs der Baustelle für ein Kammerwasserschloss wurde für das Kraftwerk *Driva* 1973 das erste große Druckluftwasserschloss gebaut (Rathe, 1975). Die Stabilitätsbedingung hinsichtlich der Massenschwingung ist mittels eines erforderlichen Luftvolumens definiert. Die norwegischen Hochdruckwasserkraftsysteme mit Druckluftwasserschlossern (DWS) werden ohne Drosseln konzipiert und gebaut. Darüber hinaus werden für die Bemessung die Randbedingungen der Wasserschlossschwingung unter der Bedingung des Resonanzfalles nicht herangezogen.

Wichtig ist auch zu erwähnen, dass noch während der Bauausführung durch in situ Versuche zur Bestimmung der initialen Gebirgsspannung und -festigkeit (wie z.B.: durch Hydrojacking) Änderungen der Linienführung vorgenommen werden. Dies erfordert eine besonders geeignete und flexible Vertragsgestaltung.

3. Allgemeines zum Druckluftwasserschloss

In Norwegen wurden bisher zehn Druckluftwasserschlösser gebaut. Die Vorteile von Systemen mit Druckluftwasserschlossern sind:

- Möglichkeit der direkten Stollenverbindung zwischen der Kraftkaverne und dem Oberwasserbecken zur Minimierung der Tunnelausbruchsvolumina und Verringerung der Bauzeiten
- Geringere hydraulische Verluste aufgrund der direkten Triebwasser Verbindung
- Eine geringe Länge des gepanzerten Druckschachtes minimiert die nötige Stahlmenge
- Die kurze Distanz zwischen DWS und den Maschinen beschleunigt die Kommunikationszeit der Druckwellen und erhöht somit die Stabilität der Anlage.
- Kein zusätzlicher Zugang für den Ausbruch des Wasserschlosses und zur Belüftung eines freien Wasserspiegels ist notwendig.
- Der tiefliegende Druckstollen hat eine erhöhte Sicherheit bezüglich der Gefahr eines Rohrbruchs und verringert die möglichen Wasseraustrittsmengen (Im Vergleich zu einem oberflächennahen Druckschacht).
- Eine geringe Massenträgheit eines kurzen Verbindungsstollen und der gedrungenen Druckkammer ermöglicht eine schnelle Druckstoßreflektion.

Die wichtigsten Randbedingungen für ein DWS sind:

- Die minimalen Gebirgsspannungen (σ_3) müssen höher sein als der maximale interne Druck im DWS um ein „Fracking“ zu verhindern.
- Das umgebende Gebirge muss eine ausreichende Undurchlässigkeit aufweisen, um Luftverluste zu minimieren.

Zusätzliche Einrichtungen für den Betrieb eines DWS sind:

- Luftversorgungsleitungen
- Kompressoren
- Eventuell Druckwasserversorgung, um einem Wasserschirm zur Abdichtung gegen Luftaustritt zu betreiben

Betriebserfordernisse:

- Sorgfältig Planung der Luftentleerung im Revisionsfall
- Beträchtliche Luftbefüllzeiten der Druckkammer müssen bedacht werden

Tabelle 1 zeigt die neun betriebenen Druckluftwasserschlösser in Norwegen. Das zehnte ausgeführte DWS des Kraftwerks *Tafjord* ist aufgrund einer plötzlichen Überbeanspruchung des Gebirges undicht geworden, nachdem das Stauziel im Oberwasserbecken erhöht wurde.

Tab. 1: Druckluftwasserschlösser in Norwegen (Norwegian Hydropower Tunneling II, 2013)

Projekt	Jahr	Gebirgsart	DWS Volumen m ³	Querschnitt, m ²	Luftdruck MPa	Druckhöhe/Überdeckung*)	Erfahrung
Driva	1973	Banded gneiss	6600	111	4,2	0,5	Kein Luftverlust
Jukla	1974	Granitic gneiss	6200	129	2,4	0,7	Kein Luftverlust
Oksla	1980	Granitic gneiss	18100	235	4,4	1	Luftverlust <5Nm ³ /h
Sima	1980	Granitic gneiss	10500	173	4,8	1,1	Luftverlust <2Nm ³ /h
Osa	1981	Gneissic granite	12000	176	1,9	1,3	Intensive Injektionen
Kvilldal	1981	Migmatitic gneiss	120000	260-370	4,1	0,8	Druckwasser-abdichtung notwendig
Tafjord ^{†)}	1981	Banded gneiss	2000	130	7,8	1,8	Druckwasser-abdichtung notwendig

Brattset	1982	Phyllite	9000	89	2,5	1,6	Luftverlust 11 Nm ³ /h
Ulset	1985	Mica gneiss	4800	92	2,8	1,1	Kein Luftverlust
Torpa	1989	Meta siltstone	14000	95	4,4	2	Druckwasser -abdichtung notwendig
*) Verhältnis von maximalem Druck im DWS zu Gebirgsüberdeckung							
+) Seit einem hydraulischen Frack außer Betrieb							

Bei Anlagen mit höheren Durchlässigkeitseigenschaften des Gebirges konnte durch kombinierte Maßnahmen von Injektionen und Hochdruckwasserverpressung der Luftverlust minimiert werden. In den Anlagen *Torpa* und *Kvilldal* wird dies erfolgreich angewendet. Ein konstanter Druck im Wasserschild von etwa 20 m WS über der statischen Druckhöhe zeigt eine gute Funktionsfähigkeit (Kjørholt H. , 1991). Das DWS *Brattset*, welches in phyllitischem Gestein errichtet wurde, weist eine ausreichend geringe Permeabilität des Gebirges von $16 \cdot 10^{-18}$ [m²] auf, dies entspricht einer hydraulischen Durchlässigkeit von $9,8 \cdot 10^{-9}$ [m/s]. Eine ausreichende Dichtigkeit kann jedenfalls mittels Stahlpanzerung erreicht werden. Dies ist allerdings mit höheren Kosten verbunden.

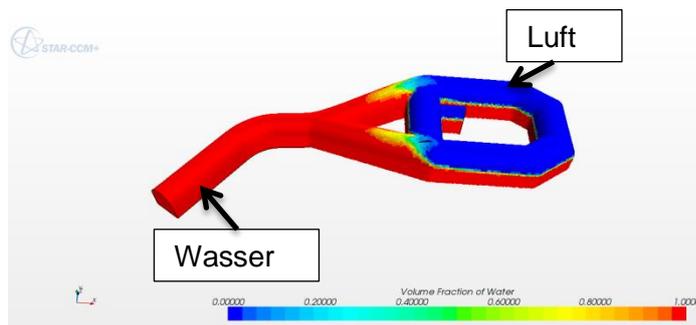


Abb.2 DWS, Torpa, 3D-CFD

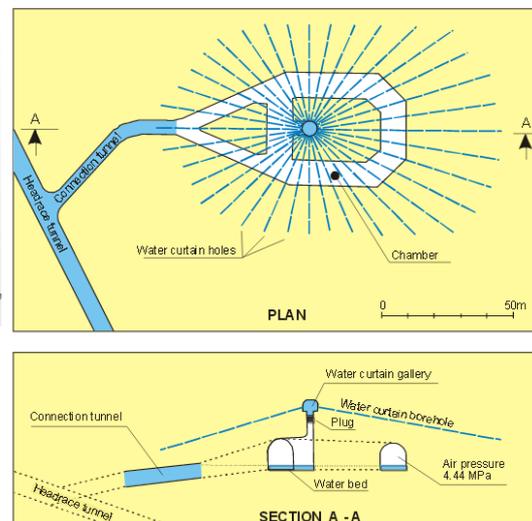


Abb.3 DWS, Torpa, Abdichtungsschirm, (Palmström, 2008)

Abbildung 2 zeigt die Geometrie des Druckluftwasserschlosses *Torpa* in einer zweiphasen Strömungssimulation. Abbildung 3 zeigt den Druckwasser-Abdichtungsschirm im selben DWS. Das Druckwasser in den Bohrlöchern weist einen höheren Druck auf, als die Luft in der Kammer, dadurch wird Wasser in die Kammer gepresst und verhindert somit den Luftaustritt. Mit dieser Technologie werden ebenfalls, erfolgreich, Flüssiggaskavernen abgedichtet (Kjørholt, 1991).

4. Ausblick

Um vom Einsatz von Druckluftwasserschlossern weiter zu profitieren und um die Anlagen zu verbessern, sind weitere Forschungen notwendig. Dazu wird derzeit ein Modellversuch an einem Druckluftwasserschlosssystem mit der Modellierung des gesamten Triebwasserweges im Wasserbaulabor des Institute of Hydraulic and Environmental Engineering der Norwegischen Technischen Universität NTNU in Trondheim bearbeitet. Weitere Beurteilungen der thermodynamischen Prozesse in den Druckluftkammern werden durchgeführt. Um die Luftbefüllzeiten zu verringern oder ein Verschließen des DWS'ses während einer Stolleninspektion zu ermöglichen, sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Aktuelle Injektionstechniken sind für die Felsabdichtung zu evaluieren. Ein zusätzlicher Vorteil des Einsatzes von Druckluftwasserschlossern erscheint in der Möglichkeit einer Verringerung von Maschinenverschlusszeiten.

5. Zusammenfassung

Gerade im Hinblick der stetig steigenden Anforderungen bezüglich eines flexiblen Einsatzes von Wasserkraftanlagen insbesondere Pumpspeicherkraftwerken kann ein Einsatz von Druckluftwasserschlossern sowohl betriebliche als auch ökonomische Vorteile bieten. Wesentlich hierbei ist vor allem eine Minimierung des Stahlverbrauchs gegenüber einem gepanzerten langen Druckschacht. Ziel soll ein möglichst langlebiger Betrieb von Kraftwerksanlagen bei optimierter Nachhaltigkeit in der Betrachtung des Gesamtprojektzeitraums sein. Für eine etwaige Anwendung für alpine PSKW sind zusätzliche Forschungsanstrengungen notwendig. Insbesondere geologische Untersuchungen für Kammerlagen in stabilen und dichten Zonen, bei möglichst großen Überlagerungshöhen, sind notwendig. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Ingenieursdisziplinen ist eine vernetzte interdisziplinäre Forschung und Zusammenarbeit essentiell. Um die Vorteile eines Einsatzes für alpine Regionen zu adaptieren, ist auf den allgemein vorhandenen Vorspannungszustand im Gebirge Bedacht zu nehmen. Ziel einer Anwendung von DWS ist eine Reduktion von Baumaßnahmen und eine Optimierung der hydraulischen Randbedingungen für den Kraftwerksbetrieb.

Danksagung

Die Autoren danken der intensiven Forschungszusammenarbeit mit dem *Institutt for vann- og miljøteknikk* (Norwegische Technische Universität in Trondheim), insbesondere Prof. Leif Lia. Zudem gilt der Dank dem Rektorat der TU Graz und der Europäischen Union für die Förderung eines Forschungsaufenthaltes in Trondheim. Dank gilt Prof. Broch und Dr. Kjørholt für die intensive Diskussion in Norwegen. Freundlicher Dank gilt insbesondere dem Team der Bautechnikabteilung der Vorarlberger Illwerke AG für die Diskussionen und die wertvollen Informationen.

Referenzen

Brekke H. *Stability Problems in High Pressure Tunnel Systems in Norwegian Hydro-Electric Power Plants*, International Conference on Pressure Surges 6th-8th September 1972, University of Kent, Canterbury, England
Garbrecht G. *Meisterwerke antiker Hydrotechnik*, Verlag Teubner Zürich 1995

Kjørholt, H. (1991). *Gas Tightness of Unlined Hard Rock Caverns*. Dissertation NTH Trondheim.

Kjørholt H., Broch E. *The Water Curtain – a Successful Means of Preventing Gas Leakage from High-Pressure, Unlined Rock Caverns*, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 7, No. 2 pp. 127-132, 1992

Norwegian Hydropower Tunneling II. (2013). Norwegian Tunneling Society, Oslo
Palmström A. *Norwegian Design and Construction Experiences of unlined Pressure Shafts and Tunnels*, International Conference on Hydropower, Oslo 1987

Palmström A. *AIR CUSHION SURGE CHAMBER a cost-effective solution in hydropower design*, www.rockmass.net, 2008

Rathe L. *An innovation in surge chamber design*, Water Power & Dam Construction 1975

Vitruvius, M. P. (22 v.Chr.). *De Architectura*, VIII Buch, VI Kapitel

www.statkraft.com. Abgerufen am 07. 01 2014 von http://www.statkraft.com/Images/Ulla-F%C3%B8rre%20folder%20s%20UK_Lowres_tcm9-14180.pdf