

Ausführung des Luftblasenvorhangs beim Niagara Tunnel Project

Univ. Prof. Dr. Peter Steinhauser, Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH

DI Mladen Ristic, ILF Consulting Engineers Austria GmbH

Kurzfassung

Das Niagara Tunnel Facility Project (NTFP) ist eine Erweiterung des im Jahr 1922 gebauten Sir Adam Beck (SAB) Wasserkraftwerkes. Das Wasser des Niagara-Flusses wird oberwasserseitig der Wasserfälle entnommen und durch einen 10,2 km langen Umleitungstunnel zum bestehenden SAB-Kraftwerk geleitet. Am unterwasserseitigen Ende des Tunnels ist ein 380 m langer und bis zu 30 m tiefer Auslaufkanal, welcher im Betrieb die hydraulische Verbindung zum bestehenden Zubringerkanal des SAB-Kraftwerks herstellt. In der Bauphase wurde der Auslaufkanal für baugestaltliche Zwecke des Tunnelvortriebes genutzt und war durch eine 12 m breite und 19 m hohe Felsplombe von dem im Betrieb befindlichen Zubringerkanal getrennt. Nach Fertigstellung des Tunnels und Einbau des beweglichen Tafelschützes für die unterwasserseitige Absperrung wurde der Auslaufkanal geflutet. Zur Verbindung des Auslaufkanals mit dem Zubringerkanal musste die Felsplombe durch eine Unterwassersprengung abgetragen werden, wobei das Tafelschütz in weniger als 350 m Entfernung das kritische Schutzobjekt darstellte.

Infolge des Detonationsdruckes der explodierenden Ladung und des Druckes der entstehenden Gasvolumina breitet sich eine Druckwelle unter extrem günstigen Bedingungen im Wasser aus. Um den Detonationsstoß der Schockfront im Wasser zu reduzieren, wurde ein Luftblasenvorhang zur Dämpfung der Druckwellenausbreitung ausgeführt.

Der gegenständliche Beitrag beschreibt die Planung und Dimensionierung des beim Niagara Tunnel Project ausgeführten Luftblasenvorhangs und präsentiert die während der Sprengung gewonnenen Ergebnisse der Überdruck- und Schwingungsmessungen.

Ausführung des Luftblasenvorhangs beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016

Abstract

The Niagara Tunnel Facility Project (NTFP) is an upgrade of the existing SAB power generating complex, which was taken into operation in 1922. The water of the Niagara River is taken upstream of the waterfalls and conveyed to the existing SAB power generation complex via a 10.15 km long diversion tunnel. Downstream of the tunnel there is an outlet canal of 380 m length and up to 30 m depth, providing a hydraulic connection to the existing feeder canal when in operation. During the construction phase, the outlet canal was used for logistic purposes of the excavation of the tunnel and was separated from the operating feeder canal by a 12 m wide and 19 m high rock plug. After completing the diversion tunnel and installing the outlet gate for the downstream closure of the diversion tunnel, the outlet canal was flooded. In order to connect the outlet canal with the existing feeder canal, the rock plug had to be removed by blasting and subsequent underwater excavation. The outlet gate, which had already been installed at a distance of less than 350 m from the rock plug, was the critical object to be protected during this process.

The detonation pressure of the exploding charge and the pressure of the resulting gas volume result in a hydraulic shock wave, with the water providing extremely favorable conditions for propagation. To reduce the blast impact of the shock front in the water, an air bubble curtain was installed to dampen the pressure wave propagation.

This paper describes the design and dimensioning of the air bubble curtain used in the Niagara Tunnel Project and presents the results of overpressure and vibration measurements obtained during the blasting of the rock plug.

1. Geschichtliche Entwicklung des SAB-Wasserkraftwerkes

Der Niagara-Fluss verbindet den Eriesee mit dem Ontariosee und bildet über eine Länge von 56 km die Grenze zwischen der kanadischen Provinz Ontario und dem US-Bundesstaat New York. Der Fluss verliert in seinem Verlauf 99 m Höhe und stürzt über die Niagarafälle mit einer freien Fallhöhe von 52 m in die Tiefe. Der mittlere Wasserdurchfluss beträgt ca. $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Geschichte der wirtschaftlichen Nutzung der Wasserkraft der Fälle geht zurück ins Jahr 1758, als die Wasserkraft zunächst zum Antrieb von Sägemühlen und dann ab 1881 zur Erzeugung von elektrischer Energie genutzt wurde. Das Niagara Tunnel Facility Project (NTFP) ist eine Erweiterung des Wasserkraftwerkes Sir Adam Beck (SAB). Die erste Stufe des Wasserkraftwerkes (SAB 1) wurde im Jahr 1922 in Betrieb genommen. Durch teilweise Umleitung des Flusses wurde das Wasser über einen Kanal zum 8 km unterwasserseitig der Wasserfälle situierten Krafthaus geführt. Um dem steigenden Strombedarf gerecht zu werden, wurde im Jahr 1954 die zweite Stufe (SAB 2) in Betrieb genommen. Die Kapazität wurde, zu den 10 bereits bestehenden, um 16 neue Generatoren erweitert. Für die Versorgung der neuen Generatoren mit Wasser aus dem Fluss wurden zwei 9 km lange Tunnel unterhalb der Stadt Niagara Falls aufgeföhren.



Abbildung 1-1: Sir Adam Beck (SAB) Wasserkraftwerk
Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project
Dynamik Tage Wien 2016

Da Ontarios Bedarf an Elektrizität kontinuierlich zunimmt und durch die bestehende Anlage nur ein Bruchteil der Energie des Niagara Flusses tatsächlich zur Stromgewinnung verwendet wurde, beschloss Ontario Power Generation Inc. (OPG) den Bau eines zusätzlichen Umleitungstunnels unterhalb der Stadt Niagara Falls mit einer Kapazität von $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Durch diesen Druckstollen sollen bei einer geplanten Nutzungsdauer von 90 Jahren 160.000 zusätzliche Haushalte mit Energie versorgt werden.

Die Regierung der Provinz Ontario hat das Projekt im Jahr 2004 genehmigt. Im August 2005 hat OPG den „Design and Build“-Auftrag aufgrund einer von ILF Consulting Engineers / Strabag ausgearbeiteten Alternative an Strabag Canada Inc. vergeben. Dieser Auftrag umfasst den Bau eines 10,2 km langen Umleitungstunnels mit Ein- und Auslaufbauwerk.

Der 150 m lange Einlaufkanal mit dem Einlaufbauwerk wurde in der Nähe des bestehenden Stauwehrs „International Niagara Control Work“ situiert. Der Umleitungstunnel mit einem Innendurchmesser vom 12,8 m verbindet das Ein- und Auslaufbauwerk. Das Auslaufbauwerk beinhaltet den Schwalltschacht und das Auslassschütz. Dem Auslaufbauwerk folgt ein ca. 380 m langer, 23 m breiter und bis zu 30 m tiefer Auslaufkanal, welcher in den bestehenden Zuleitungskanal führt.

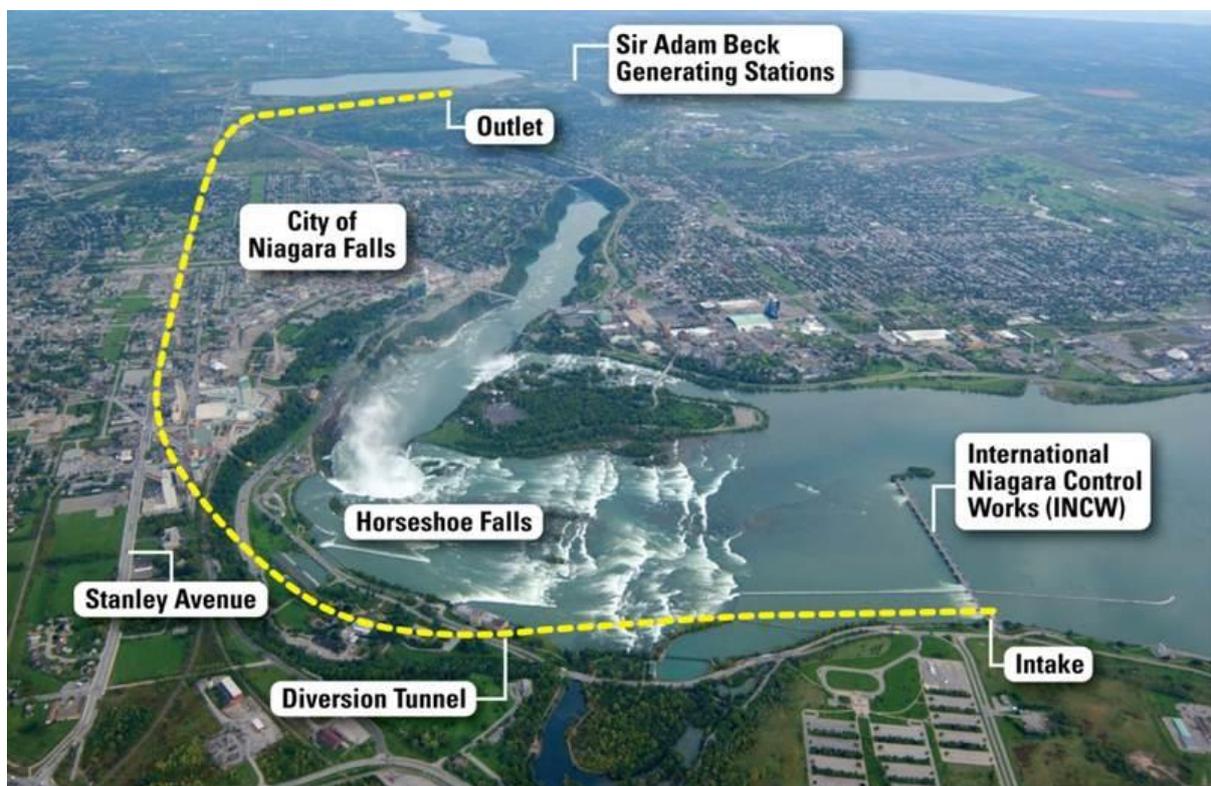


Abbildung 1-2: Projektübersicht

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016

2. Auslaufkanal

Der Gebirgsbau im Projektgebiet ist durch eine 800 bis 900 m starke Lagerungsfolge von Sedimentgesteinen, Dolomiten, dolomitischen Kalksteinen und Tonschiefern geprägt. Der Auslaufkanal wurde in standfesten und dichten Dolomiten der Lockport- und DeCew-Formation ausgebrochen. Aus der Tabelle 2-1 ist ersichtlich, dass der Untergrund ein Potential für die Übertragung hochfrequenter Erschütterungen besitzt.

Tabelle 2-1: Schätzwerte der seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeit

Formation	E-Modul [GPa]	ν [-]	C_P [m/s]	C_S [m/s]
Lockport, DeCew	37-69	0,25	4100-5400	2400-3100

ν - Poissonzahl
 C_P - Bandbreite der Druckwellengeschwindigkeit
 C_S - Bandbreite der Scherwellengeschwindigkeit

Der Kanal diente als Startgrube für die TBM und bildete in der Bauphase die einzige Zufahrt in den Tunnel. In der Bauphase war dieser Auslaufkanal durch eine 12 m breite und 19 m hohe Felsplombe vom bestehenden im Betrieb befindlichen Kanalsystem getrennt. Nach der Errichtung des Auslaufbauwerkes und dem Einbau des Auslassschützes sollte der Tunnel geschlossen und die hydraulische Verbindung des bis dahin trockenen Auslaufkanals mit dem wasserführenden Kanalsystem hergestellt werden.



Abbildung 2-3: Auslaufkanal mit Felsplombe

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Für einen kontrollierten Abtrag der Felsplombe war es notwendig den Auslaufkanal zu fluten. Die Entfernung der bestehenden Felsplombe sollte durch Sprengung und Unterwasserabtrag erfolgen. Um die Bauzeit zu verkürzen, sollte diese Maßnahme parallel zu den Injektionsarbeiten im Tunnel durchgeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt war auch der Einlaufkanal zum Rückbau der Kofferdämme geflutet, so dass der Zugang zum Tunnel nur über das Auslaufbauwerk möglich war.

Nördlich des Auslaufkanals befindet sich die Flügelmauer des PGS-Stausees mit 6 Turbinen in einem Abstand von ca. 280 m zur Felsbarriere. Das in weniger als 350 m Entfernung zur Felsbarriere bereits installierte Tafelschütz stellte aber das kritische Schutzobjekt dar.



Abbildung 2-4: Auslaufbauwerk vor dem Fluten

3. Unterwassersprengung und Sicherheitsvorkehrungen

Zu Beginn der Arbeiten wurde die im Auslaufkanal befindliche Zufahrtsrampe durch Sprengung abgetragen, um die Felsplombe auf eine für Standsicherheit erforderliche Breite von 12 m zu reduzieren.

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016

Nach Einbau und Testen des Auslaufschützes wurde der Auslaufkanal im Jänner 2013 geflutet, um ähnliche hydraulische Bedingungen auf beiden Seiten der Felswand herzustellen. Der Wasserstand im bestehenden PGS-Zubringerkanal variiert zwischen ca. 12,5 m und 16,0 m Wassertiefe. Um eine Welle während des Wandabtrages aus dem bestehenden Wasserkanal in Richtung des Auslaufkanals zu reduzieren, wurde das Wasserniveau im Auslaufkanal um ca. 2,0 m über dem im bestehenden PGS-Kanal gewählt. Um Schaden an den Turbinen der bestehenden PGS-Stützmauer zu vermeiden, wurde die Drehung der Turbinen während der Sprengung gestoppt.

Zur Abgrenzung der Sprengzone vom restlichen Teil des Felsmassives wurden Reihenbohrungen mit 6" Durchmesser in Achsabstand von 11" ausgeführt. Die Tiefe der einzelnen Bohrungen reichte bis zur Kanalsohle. Diese Bohrungen wurden nicht geladen.

Das von den Firmen Castonguay and Explotech entwickelte Sprengkonzept sah 3,5"-Pufferbohrungen im Raster $0,6 \times 1,2$ m im Bereich angrenzend an die Reihenbohrungen vor. Die zwischen den Pufferbohrungen angeordneten 3,5"-Sprengbohrungen wurden im Raster $2,1 \text{ m} \times 2,1 \text{ m}$ ausgeführt und bis 1,8 m unterhalb der Oberfläche mit ca. 95 kg brisantem Sprengstoff geladen. Die oberen 1,8 m der Bohrung wurden mit Kies verschlossen. Um eine erschütterungsarme Lösung zu erreichen, wurde jedes Bohrloch als einzelne Stufe gezündet. Der zentrale Bereich sollte einen Keil in Richtung des PGS-Zubringerkanals lenken und Platz für Nord- und Südbereiche schaffen. Die vorgesehene Gesamtzeit der Zündung betrug weniger als 2 sec.



Abbildung 3-5 Sprengung der Felsbarriere am 12/02/2013

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016

4. Wirkungsweise und Dimensionierung des Luftblasenvorhanges

Bei einer Unterwassersprengung wirken der Detonationsdruck der explodierenden Ladung und der nachfolgende Druck der entstehenden großen Gasvolumina zusammen. Da bei der Sprengung zusätzlicher Wasserdruck zu überwinden ist, sind größere Lademengen erforderlich. Die Ausbreitungsbedingungen für die Druckwellen sind im Wasser besonders günstig. Während die Schockfront in Fels mit wachsender Entfernung rasch abnimmt und an freien Flächen vollständig reflektiert wird, beträgt der Reflexionsverlust zwischen festen Dolomiten und Wasser nur 36 %.

Zur Dämpfung der Druckwellenausbreitung im Wasser haben sich in Vergangenheit Luftblasenvorhänge bewährt. Im Zuge des Baus von SAB 2 musste zur Verbindung der Wasserkanäle die Felsbarriere durch Unterwassersprengung abgetragen und dabei das in der Nähe befindliche Einlaufbauwerk vor der Druckwelle geschützt werden. Canadian Industries Limited, Hersteller von Sprengstoffen, hat die Idee des Luftblasenvorhanges in Modellversuchen getestet. Nachdem im Labour eine Druckreduktion im Verhältnis von 70 zu 1 erreicht wurde, wurde das Konzept in-situ erfolgreich umgesetzt. Dabei wurden folgende zwei Wirkungsmechanismen der Luftblasen im Wasser beobachtet:

- Reflexion der Druckwellenenergie an der Schnittstelle zwischen Luft und Wasser und
- Umwandlung der kinetischen Energie des Druckstoßes bei Kompression der Luftblasen in thermische Energie.

Die Wirksamkeit der Druckreduktion hängt von der Blasengröße und vor allem vom Volumenanteil der Luftblasen ab.

Luft hat im Vergleich zu Wasser eine um vier Größenordnungen höhere Kompressibilität. Dadurch werden die Kompressibilität und die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Luftwassergemisches wesentlich beeinflusst. Die Luftblasen befinden sich im Gleichgewicht von Auftriebskraft und Oberflächenspannung und schwingen elastisch im Wasser. Die Blaseneigenfrequenz „f₀“ hängt dabei vom Blasendurchmesser „a“ und der Wassertiefe „t“ ab:

$$f_0 [Hz] = \frac{3260}{a} \times \sqrt{1 + 0,0981 \times t}$$

, wobei „a“ in mm und „t“ in m eingegeben werden.

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016

Im Bereich der Eigenfrequenz kann der Rückstreuquerschnitt für Druckwellen des 1000-fache des Blasendurchmessers erreichen und dadurch die Druckamplituden wirkungsvoll reduzieren. Dieser Wirkungsquerschnitt nimmt oberhalb der Resonanzfrequenz langsam, unterhalb davon jedoch exponentiell bis auf den Blasenquerschnitt ab.

An der Dämpfung sind weiter adiabatische Absorptionsvorgänge beteiligt, die infolge der Kompression durch den Druckstoß kinetische in thermische Energie umwandeln. Für den Transfer der thermischen Energie ins Wasser sind die Blasen mit kleinerem Durchmesser aufgrund, des größeren Fläche/Volumen-Verhältnisses wirksamer.

Beim Aufsteigen ändern die Blasen ihre Form und werden entsprechend dem abnehmenden Wasserdruck laufend größer. Dabei können sie mit benachbarten Blasen agglomerieren. Der minimale Durchmesser einer Blase entspricht dem Bohrungsdurchmesser in der Druckleitung, wobei der maximale Durchmesser das 6,5-fache des minimalen Durchmessers betragen kann. In einem Blasenvorhang nimmt der Blasenradius dementsprechend von unten nach oben bei breiter Streuung zu.

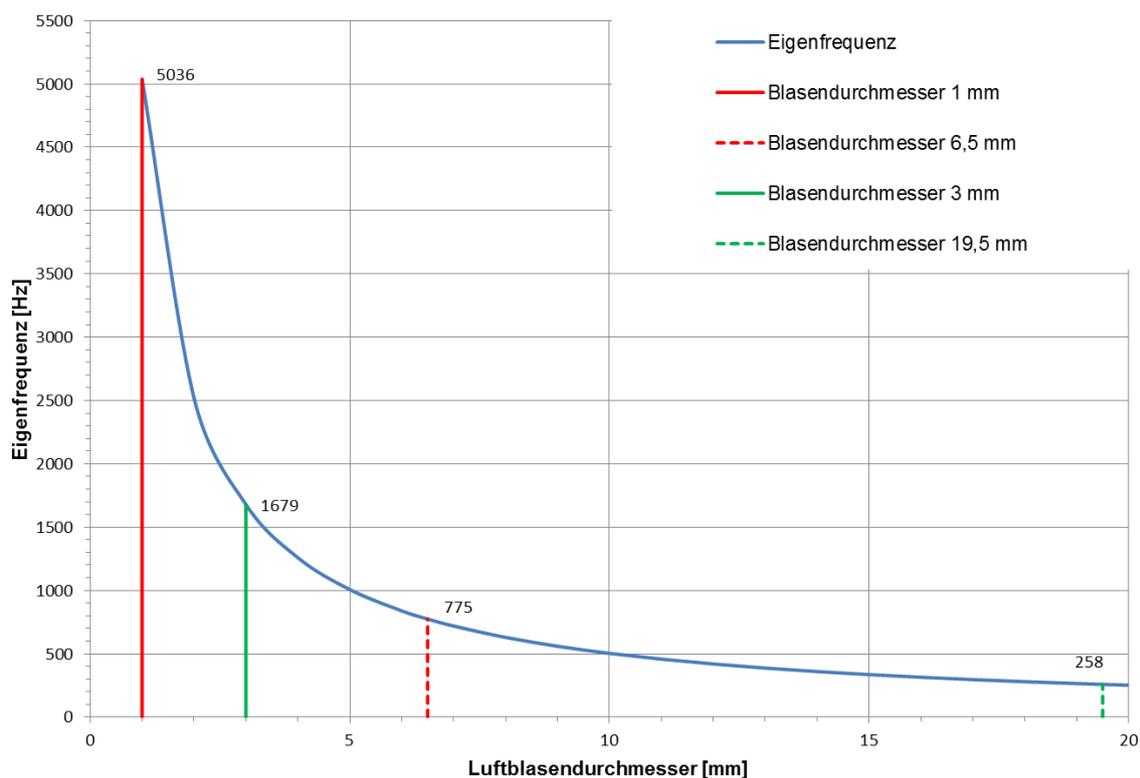


Abbildung 4-6: Eigenfrequenzbereiche für verschieden Luftblasendurchmesser bei einer Wassertiefe von 14 m

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016

Wie in Abbildung 4-5 ersichtlich ist, verschiebt sich der für die Dämmwirkung optimale Eigenfrequenzbereich mit zunehmendem Bohrungsdurchmesser zu immer tieferen Frequenzen, wobei das Frequenzband auch immer schmaler wird.

Eine Sprengung in harten und dichten Dolomiten kann kräftige hochfrequente Spektralanteile auslösen, welche im Detonationsstoß bis etwa 5000 Hz reichen können. Für die Bohrungen ist demnach ein Durchmesser von 1 mm als optimal anzusehen. Um auch den niederfrequenten Anteil der Schockwelle zu dämmen, sind Bohrungen von etwa 3 mm Durchmesser ausreichend. Für eine optimale Dämmung ist daher ein Blasenvorhang erforderlich, der aus zwei unterschiedlich großen Bohrungen gespeist wird.

Um den Detonationsstoß der Schockfront erfolgreich zu bekämpfen, wird ein Luftblasenanteil in Wasser von 1% benötigt. Daher sind je Laufmeter der Druckluftleitung 3 Liter Luft pro Sekunde freizusetzen.

5 Ausgeführte Lösung und Ergebnisse der erschütterungstechnischen Überwachung

Entsprechend den Vorgaben der Planung wurde der Luftblasenvorhang zur besseren Dämmung der hochfrequenten und der niederfrequenten Druckstoßanteile zweiteilig ausgeführt. Zur Dämmung der hohen Frequenzen wurden zwei 6“-Druckluftleitungen in einem Abstand von 50 cm angeordnet, welche mit zwei im Querschnitt einander gegenüberliegenden Bohrungen von 1 mm Durchmesser alle 25 mm versehen wurden. Die Druckluftleitung zur Dämmung der niedrigen Frequenzen wurde als 6“-Leitung im Abstand von 1 m von den Druckluftleitungen für hohe Frequenzen auf der sprengblockabgewandten Seite angeordnet. Die 3 mm-Bohrungen im Abstand von 200 mm wurden auf beiden Seiten der Leitung ausgeführt.

Alle drei 23 m langen Druckluftleitungen samt 1,5“-Luftzufuhrleitungen wurden auf einem Stahlgerüst außerhalb des Kanals zusammengebaut und mit Kran in den trockenen Kanal abgesenkt. Neben der Montagehilfe bot das eingesetzte Stahlgerüst mit seinem Gewicht der ausreichende Ballast zur Sicherung der Lage der Leitungen. Zur besseren Verteilung der Luftblasen wurden die Druckluftleitungen von beiden Seiten mit 11,6 m³/min Luft versorgt. Diese Luftmenge berücksichtigte die über die Leitungswege entstehenden Verluste und den Druckes der Wassersäule im Kanal. Zur Sicherstellung der vorgesehenen Luftversorgung wurde je Zufuhrleitung ein Luftkompressor eingesetzt.

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016

Der Luftblasenvorhang wurde im Auslaufkanal außerhalb des Wurfbereiches des Haufwerks in einem Abstand zur Felsbarriere von ca. 200 m situiert. Die Verlegung des Luftblasenvorhanges zur Schutz der in PGS-Stützmauer befindlichen Turbinen, konnte im bestehenden PGS-Zubringerkanal aufgrund der Nähe des bestehenden Hochspannungsnetzes nur in einem Nahbereich östlich der Felsbarriere ausgeführt werden.



Abbildung 5-7: Montage des Luftblasenvorhanges mit der Felsbarriere im Hintergrund

Der kanadische Spezialist für Sprengung und erschütterungstechnische Überwachung, Firma Explotech Engineering Ltd., wurde mit Messungen der Erschütterungen und des durch Sprengung verursachten Wasserüberdruckes im Auslauf- und PGS-Kanal beauftragt. Die Wasserüberdrücke wurden an drei Stellen im Auslaufkanal, unmittelbar vor und nach dem Luftblasenvorhang und vor dem Auslaufbauwerk, gemessen.

Die Erschütterungen wurden mittels dreidimensionalen digitalen Seismographen an ausgewählten Objekten im Nahbereich der Sprengung gemessen. Die eingesetzten Seismographen besaßen die Fähigkeit die Spitzenwerte der Partikelgeschwindigkeit von bis 254 mm/s im Frequenzbereich von 2-250 Hz kontinuierlich mit einer Abtastrate von 1024 Abtastungen pro Sekunde aufzuzeichnen. Zur Messung des Wasserüberdruckes wurden

digitale Seismographen ausgerüstet mit Hydrophon-Drucksensoren eingesetzt. Diese Geräte sind fähig den Wasserdruck von bis 329 kPa zu messen und wurden auf eine Abtastrate von 13.384 Abtastungen pro Sekunde konfiguriert.

Die Sprengung der Felsbarriere im Auslaufkanal wurde am 12 Februar, 2013 um 14:03 Uhr gezündet. Die gewonnenen Ergebnisse der durchgeführten Hydrophon- und Erschütterungsmessungen sind in den Tabellen 5-1 und 5-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Überdruckmessung gemäß Referenz [2]

Overpressure Readings – Plug Blast		
February 12, 2013 @ 14:03		
Unit#	Location	Overpressure (kPa)
BE 15857	Outlet Canal – East of Bubble Curtain	98.8
BE 15859	Outlet Canal – West of Bubble Curtain	1.97
BE 17270	Outlet Canal – Outlet Structure	11.2

Tabelle 5-3: Messwerte „Peak Particle Velocity“ gemäß Referenz [2]

Vibration Readings – Plug Blast					
February 12, 2013 @ 14:03					
Unit#	Location	App. distance to Plug Blast	Tran PPV [mm/s]	Vert PPV [mm/s]	Long PPV [mm/s]
BE 14190	Outlet Structure	350 m	8.13	2.79	8.39
BE 9330	PGS Wing Wall	280 m	1.02	1.65	1.77
BE 16225	Butterfly Conservatory	600 m	2.16	0.635	1.27

7. Zusammenfassung

Durch sorgfältige Planung und präzise Ausführung konnte beim Niagara Tunnel Project, trotz der ungewöhnlichen Abmessungen des Bauwerkes und des für Übertragung der Erschütterungen und der Druckwellenausbreitung extrem günstigen Verhältnissen, eine erfolgreiche Unterwassersprengung der Felsbarriere durchgeführt werden.

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016

Die gemessenen Erschütterungen blieben bei allen schutzwürdigen Objekten deutlich unter dem vertraglich vereinbarten Sprengerschüttungsgrenzwert von 30 mm/s.

Der im Auslaufkanal installierte zweiteilige Luftblasenvorhang mit einem ausreichenden Luftvolumenstrom dämmte erfolgreich die hoch- als auch niederfrequente Spektralanteile der im Wasser ausgebreiteten Schockwelle. Eine Druckreduktion des Wasserüberdrucks im Auslaufkanal im Verhältnis von 50 zu 1 konnte durch den Einsatz dieses Luftblasenvorhanges erzielt werden. Der gemessene Wasserüberdruck vor dem Auslaufbauwerk ist wahrscheinlich auf eine Verstärkung der Überdruckwelle zufolge der Reflexionen von den Kanalwänden und dem Auslaufbauwerk selbst zurückzuführen.

Das Tafelschütz des Auslaufbauwerks überstand die im geringen Abstand durchgeführte Unterwassersprengung ohne sichtbaren Schaden und nennenswerten Leckagen.

Das Beispiel des NTFP zeigt, dass der Einsatz von Luftblasenvorhängen zur Dämpfung der Druckwellenausbreitung im Wasser wirtschaftlich und sicher angewendet werden kann.

Literaturangaben:

[1] *The Hydro-Electric Power Commission of Ontario, Research Division: The use of air-bubble curtains to reduce hydraulic shock from blasting*

[2] *Explotech Engineering Ltd.: Niagara Tunnel Project, Plug Blast Monitoring Report*

[3] *Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH: Dimensionierung des Luftblasenvorhangs bei der „Rock Plug“ Sprengung zum Niagara-Tunnel*

[4] *ILF Consulting Engineers Austria: Projektbericht R-NAW130-29700-0023 “Outlet Canal – Blast of Rock Plug”*

Autorenkontakt: peter.steinhauser@stce.at

mladen.ristic@ilf.com

Ausführung des Luftblasenvorhanges beim Niagara Tunnel Project

Dynamik Tage Wien 2016