

Erschütterungsschutz bei Unterwassersprengungen am Beispiel des Niagara Tunnels

Univ. Prof. Dr. Peter Steinhauser, Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH
DI Mladen Ristic, ILF Consulting Engineers Austria GmbH

1. Historische 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 m³/s.

Bereits 1758 wurde die Wasserkraft zum Antrieb von Sägemühlen und dann ab 1881 zur Erzeugung von elektrischer Energie genutzt. 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.



Abbildung 1-1: Sir Adam Beck (SAB) Wasserkraftwerk

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 (Abbildung 1-1).

2. Niagara Tunnel Projekt (NTFP)

Da Ontarios Bedarf an Elektrizität kontinuierlich zunimmt, beschloss die Ontario Power Generation Inc. (OPG) den Bau eines zusätzlichen Umleitungstunnels unterhalb der Stadt Niagara Falls mit einer Kapazität von $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

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 (Abbildung 2-1).

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 Schwallschacht 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 zu den SAB Kraftwerken führt.

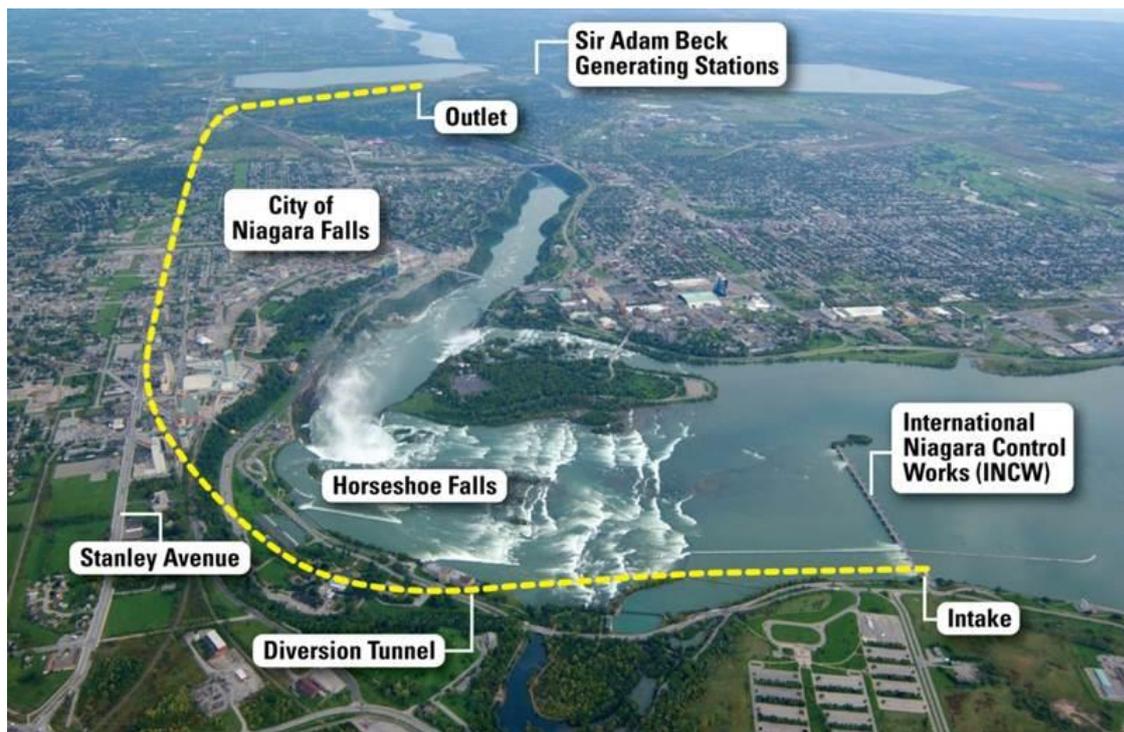


Abbildung 2-1: Projektübersicht

3. Geotechnische Angaben

Der Auslaufkanal liegt in Lockport Dolostone und DeCew Dolostone (Dolomit). Der Dolomit ist sehr hart und dicht. Im Liegenden befindet sich die Rochester Formation, ein mäßig harter und dichter Tonschiefer.

Für die erschütterungstechnische Analyse sind aus den E-Modul Daten der verschiedenen Formationen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der seismischen Druckwellen c_p und

Scherwellen c_s unter der Annahme einer Poisson'schen Zahl $\sigma = 0,25$ gemäß Tabelle 3-1 abgeschätzt werden.

Tabelle 3-1: Abschätzung seismischer Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Formation	E-Modul (GPa)	Druckwellengeschwindigkeit c_p (m/s)	Scherwellengeschwindigkeit c_s (m/s)
Lockport, DeCew	37-69	4100-5400	2400-3100
Rochester	21-40	3100-4200	1800-2500
Irondequoit	44-82	4500-5900	2500-3400
Reynales	32-60	3900-5100	2200-2900

Mit Hilfe dieser Zahlen ergibt eine grobe Abschätzung nach einem Verfahren aus dem Erdbebeningenieurwesen, dass der Untergrund ein Potential für die Übertragung hochfrequenter Erschütterungen besitzt und starke Sprengerschütterungen bewirkt.

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 Felsbarriere vom bestehenden im Betrieb befindlichen Kanalsystem getrennt (Abbildung 3-1).



Abbildung 3-1: Auslaufkanal (vorne) mit Felsbarriere zum PGS Kanal (Mitte) und PGS Pumpspeicherwerk (links)

4. Felsbarriere - Abtragvarianten

Nach der Errichtung des Auslaufbauwerkes und dem Einbau des Auslassschützes (Abbildung 4-1) sollte die hydraulische Verbindung des bis dahin trockenen Auslaufkanals mit dem wasserführenden Kanalsystem hergestellt werden.



Abbildung 4-1: Auslaufbauwerk mit Tafelschütz vor dem Fluten

Der Abtrag der Felsbarriere sollte durch Sprengung erfolgen. Dabei waren insbesondere zwei Objekte zu schützen. Nördlich des Auslaufkanals befindet sich das Pumpspeicherkraftwerk des PGS-Stausees in etwa 280 m Distanz zur Sprengstelle, das durch Abschaltung der Turbinen und Schließen der Sperrwerke einfach gesichert werden konnte. Das in weniger als 350 m Entfernung von der Felsbarriere befindliche Auslaufbauwerk mit seinem mächtigen Tafelschütz stellte aber das kritische Schutzobjekt dar. Für die im Tunnel noch laufenden Injektionsarbeiten bildete der Schacht hinter dem Auslaufschütz den einzigen Zugang. Eine Flutung des Tunnels war daher unbedingt zu vermeiden.

Bei der Sprengung der Felsbarriere wäre bei noch trocken liegendem Auslaufkanal eine Beschädigung des Tafelschützes durch die aus dem 12-16 m tiefen PGS-Zubringerkanal hereinstürzende tsunamiähnliche Schwallwelle möglich gewesen.

Daher wurde nach Einbau und Testen des Auslaufschützes der Auslaufkanal geflutet, um ähnliche hydraulische Bedingungen auf beiden Seiten der Felswand herzustellen. 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 das im bestehenden PGS-Kanal angehoben.

Mit diesem Konzept war es möglich, die Gefährdung des Tafelschützes durch die Schwallwelle zu vermeiden, aber de facto hat die Barrieresprengung dadurch den Charakter einer Unterwassersprengung mit allen ihren Nachteilen bekommen.

5. Eigenschaften von Unterwassersprengungen

Sprengungen unter Wasser unterscheiden sich von Sprengungen im Gelände beträchtlich:

- Größere Sprengladungen werden benötigt, da bei der Sprengung der zusätzliche Wasserdruck zu überwinden ist.
- Wasser bildet eine vollflächig, satt anschließende homogene Verdämmung, die die bestmögliche Übertragung des Druckstoßes bewirkt.
- Die Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffs ist wesentlich größer als die Druckwellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wasser. Als Folge davon steilt die Druckfront auf und wird beträchtlich energiereicher, weshalb die Druckwelle unter Wasser den Charakter einer Stoßwelle besitzt. In flachem Wasser folgt sofort eine Reflexion an der Wasseroberfläche, jedoch mit negativem Vorzeichen. Dadurch wird die Druckamplitude nahezu verdoppelt (Abbildung 5-1).
- Die Dämpfung durch Absorption ist im Wasser sehr klein und spielt erst bei sehr hochfrequenten Druckwellen ($f > 100 \text{ kHz}$) eine Rolle, weshalb die Druckwellen im Wasser eine sehr große Reichweite besitzen.

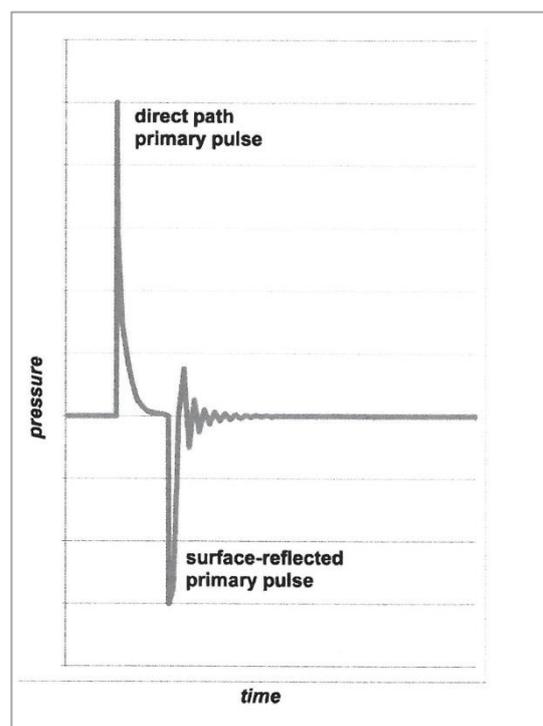


Abbildung 5-1: Druckwellenfront mit Oberflächenreflexion

Während sich in offenem Wasser die Stoßfront radial ausbreitet, mit der Entfernung daher ausdehnt und folglich an Energiedichte verliert, war im vorliegenden Fall der Sprengung in einem Kanal gleichbleibenden Querschnitts diese geometrische Dämpfung des Druckstoßes nicht zu erwarten. Es wird lediglich ein vergleichsweise geringer Verlust durch Brechung in den umgebenden Fels entstehen.

Der Schütz des Auslaufbauwerks bildet somit auch bei der Unterwassersprengung eine zentrale Planungsvorgabe, weshalb ein Luftblasenvorhang eingesetzt werden musste.

6. Dimensionierung des Luftblasenvorhangs

Seit 60 Jahren werden Luftblasenvorhänge zur Dämpfung der Druckwellenausbreitung im Wasser verwendet, allerdings mit wechselndem Erfolg, da sie zunächst nur gefühlsmäßig konfiguriert worden sind.

Die Wirkung ist der einer Nebelwand vergleichbar, bei der die sehr zahlreichen, aber auch sehr kleinen schwebenden Wassertropfchen die Luft für Licht mehr oder weniger undurchdringlich machen. Ähnliche Wirkung erzielen sehr viele Luftblasen im Wasser, die durchlaufende Druckwellen beträchtlich dämpfen können. Hier handelt es sich um den Effekt der Vielfachstreuung an kleinen Gasblasen.

Da Luft im Vergleich zu Wasser eine um vier Größenordnungen höhere Kompressibilität besitzt, verändern Gasblasen die Kompressibilität und die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Luft-Wasser Gemischs. Die Luftblasen befinden sich im Gleichgewicht von Auftriebskraft und Oberflächenspannung und schwingen elastisch. Die Blaseneigenfrequenz f_0 hängt nach Urik (1993) vom Blasendurchmesser a und der Wassertiefe t ab:

$$f_0 = \frac{3260}{a} \sqrt{1 + 0,0981 \cdot t} \text{ Hz; mit } a \text{ in mm, } t \text{ in m} \quad (1)$$

Im Bereich der Eigenfrequenz wird der Wirkungs- oder Rückstreuquerschnitt für Druckwellen sehr groß, u.zw. etwa bis zum Faktor 10^3 des Blasendurchmessers, wodurch die Druckamplituden sehr wirkungsvoll reduziert werden. Dieser große Wirkungsquerschnitt nimmt oberhalb der Resonanzfrequenz langsam, unterhalb davon jedoch exponentiell bis auf den geometrischen Blasenquerschnitt ab.

An der Dämpfung sind weiters adiabatische Absorptionsvorgänge beteiligt, die infolge der Kompression durch den Druckstoß kinetische in thermische Energie umwandeln. Dieser Effekt gewinnt umso mehr an Bedeutung, je niedriger die Frequenzen sind.

Neben der Blasengröße und der sich daraus ergebenden Resonanzfrequenz ist insbesondere der Volumsanteil der Luftblasen für die Wirksamkeit der Dämpfung verantwortlich. Abbildung 6-1 zeigt, wie die Kompressibilität des Wasser-Luft Gemischs je nach Anteil des Luftvolumens im Vergleich zur Kompressibilität des Wassers zunimmt.

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist bewirkt die Anhebung des Luftvolumensanteils von 1‰ auf 1% auch eine Verzehnfachung der Kompressibilität.

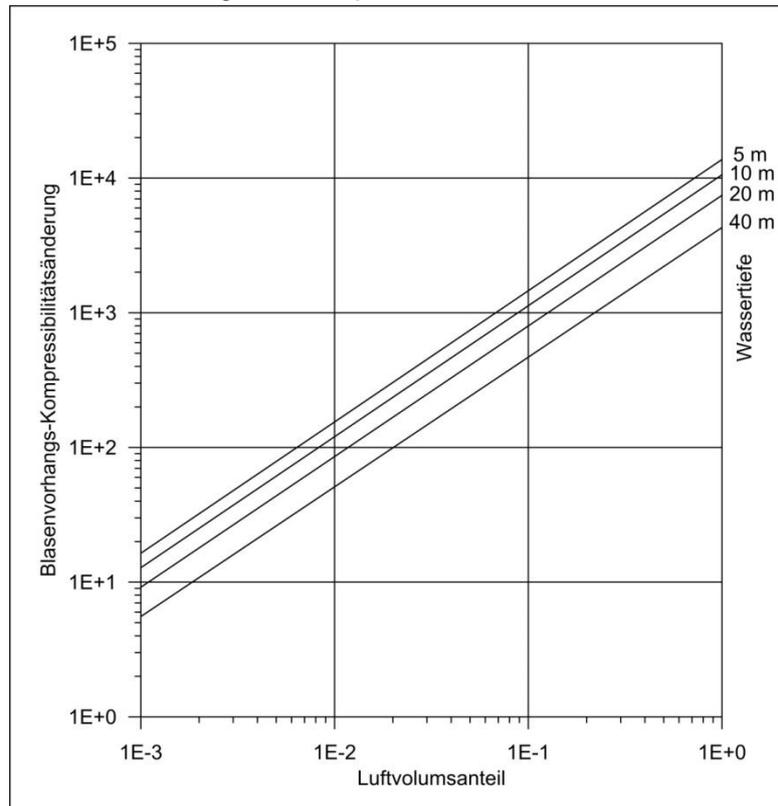


Abbildung 6-1: Zunahme der Kompressibilität des Luftblasenvorhangs bei verschiedenen Wassertiefen in Abhängigkeit vom Luftvolumensanteil im Vergleich zur Kompressibilität des Wassers

Zusammenfassend ergibt sich, dass der Detonationsstoß der Schockfront im Wasser in erster Linie durch einen Luftblasenvorhang mit einem hohen Luftvolumensanteil bekämpft werden kann.

Wie aus Gleichung (1) ersichtlich ist, verschiebt sich der für die Dämmwirkung optimale Eigenfrequenzbereich mit zunehmendem Blasendurchmesser zu immer tieferen Frequenzen wobei das Frequenzband auch immer schmaler wird.

Der Durchmesser einer Luftblase wird vom Bohrungsdurchmesser in der Druckluftleitung bestimmt, wobei die Mindestgröße einer Blase etwa dem Bohrungsdurchmesser entspricht und der maximale etwa 6,5 Mal so groß ist (Lamb, 1932). Dazu kommt, dass die Blasen beim Aufsteigen laufend ihre Form pulsierend ändern, entsprechend dem abnehmenden Wasserdruck größer werden und mit benachbarten Blasen agglomerieren können. In einem Blasenvorhang nimmt dementsprechend der Blasenradius von unten nach oben bei breiter Streuung zu.

Gemäß Abbildung 6-2 verschiebt sich somit das dämmwirksame Frequenzband mit zunehmendem Bohrungsdurchmesser und der daraus folgenden Bandbreite der Blasendurchmesser zu immer tieferen Frequenzen, wobei das gedämmte Frequenzband immer schmaler wird.

Eine Sprengung in harten und dichten Dolomiten kann nach den geotechnischen Angaben kräftige hochfrequente Spektralanteile auslösen, welche im Detonationsstoß bis etwa 5000 Hz reichen können. Für die Bohrungen ist demnach ein Durchmesser von 1 mm zur Dämmung hochfrequenter Spektralanteile (800-5000 Hz) als optimal anzusehen. Um auch den niederfrequenten Anteil der Schockwelle (260-1700 Hz) 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. Diese beiden Frequenzbänder sind in Abbildung 6-2 ebenfalls eingezeichnet.

Um den Detonationsstoß der Schockfront erfolgreich zu bekämpfen, wurde ein Luftblasenanteil in Wasser von 1% angestrebt. Dazu waren je Laufmeter der Druckluftleitung 3 Liter Luft pro Sekunde freizusetzen.

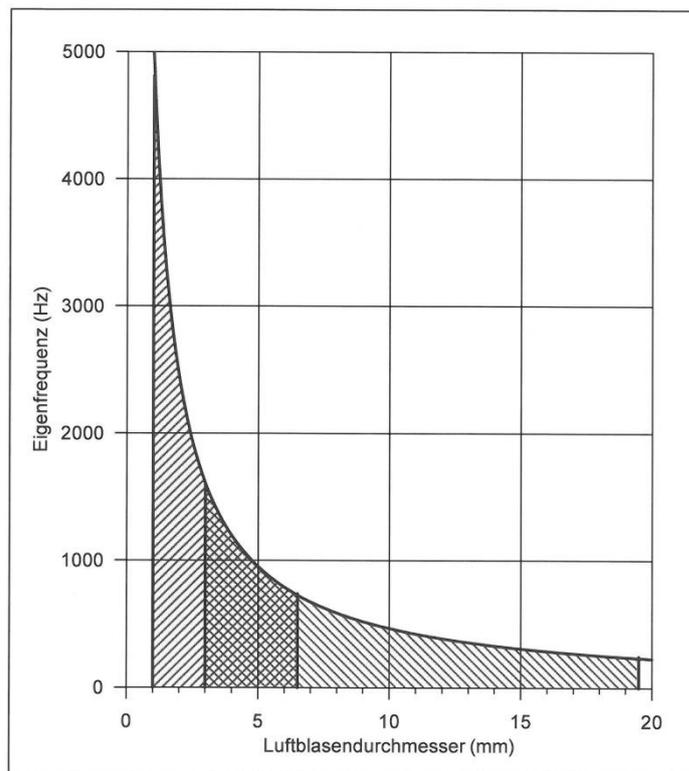


Abbildung 6-2: *Bandbreite der erzeugten Luftblasendurchmesser und Eigenfrequenzbereich für verschiedene Bohrungsdurchmesser bei einer Wassertiefe von 12 m;
Bohrungsdurchmesser: 1 mm: steigend schraffiert
3 mm: fallend schraffiert*

Die nach den Pufferbohrungen das ganze Sprengfeld abdeckenden 3,5"-Sprengbohrungen wurden im Raster 2,1 m x 2,1 m ausgeführt, waren je 17 m tief und wurden bis 1,8 m unterhalb der Oberfläche mit ca. 95 kg brisantem Emulsionssprengstoff geladen. Die oberen 1,8 m der Bohrung wurden mit Kies verdämmt. Die Tiefbohrlöcher wurden im zentralen Bereich als Keil in Richtung des PGS-Zubringerkanals wie ein Einbruch gezündet. Insgesamt wurden knapp 180 Bohrlöcher mit insgesamt rund 17000 kg Sprengstoff geladen und in 8,5 msec-Zeitstufen einzeln gezündet. Die Gesamtzeit der Zündung betrug somit weniger als 2 sec. Die gesprengte Felskubatur betrug 17000 m³.

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, das als Ballast diente, zusammengebaut und in den trockenen Kanal abgesenkt. 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. 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 (Abbildung 7-2).

Der Luftblasenvorhang wurde im Auslaufkanal außerhalb des Wurfbereiches des Haufwerks in einem Abstand zur Felsbarriere von ca. 200 m situiert. Weiters wurde ein Luftblasenvorhang zum Schutz des PGS-Pumpspeicherwerks im bestehenden PGS-Zubringerkanal abgesenkt.



Abbildung 7-2: Montage des Luftblasenvorhanges mit der Felsbarriere im Hintergrund

Die Firma Explotech Engineering Ltd., führte die Messungen der Erschütterungen und des durch die Sprengung verursachten Wasserüberdruckes im Auslauf- und PGS-Kanal durch. Der Wasserüberdruck wurde an drei Stellen im Auslaufkanal, unmittelbar vor und nach dem Luftblasenvorhang und vor dem Auslaufbauwerk, gemessen.

Die Erschütterungen wurden mittels digitalen Dreikomponenten-Seismographen an ausgewählten Objekten im Nahbereich der Sprengung mit einer Abtastrate von 1024 Abtastungen pro Sekunde gemessen. Zur Messung des Wasserüberdruckes wurden digitale Seismographen ausgerüstet mit Hydrophon-Drucksensoren eingesetzt. Diese Geräte können den Wasserdruck bis 329 kPa 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 (Abbildung 7-3). Die gewonnenen Ergebnisse der durchgeführten Druckmessungen sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.



Abbildung 7-3: Sprengung der Felsbarriere am 12-02-2013

Tabelle 7-1: Ergebnisse der Überdruckmessung

Messpunkt	Überdruck (kPa)
Auslaufkanal – vor Blasenvorhang	98.8
Auslaufkanal – nach Blasenvorhang	1.97
Auslaufbauwerk	11.2

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

Der im Auslaufkanal installierte zweiteilige Luftblasenvorhang mit einem ausreichenden Luftvolumenstrom dämmte erfolgreich sowohl hoch- als auch niederfrequente Spektralanteile der sich im Wasser ausbreitenden Schockwelle. Eine Druckreduktion des Wasserüberdrucks im Auslaufkanal um 98 Prozent (!) 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 nennenswerte Leckagen.

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