

eDev™ II - das Elektronische Zündsystem für Sprengarbeiten im Strecken- und Tunnelvortrieb

Dr. Peter Reinders und Dr. Frank Hammelmann, Orica Germany GmbH

Zusammenfassung

Das elektronische Zündsystem eDev™ II ist Teil der neuesten Generation elektronischer Zündsysteme von Orica und ist speziell für die Anwendung im Tunnelbau entwickelt worden. Der erste Teil des Artikels beschreibt die spezifischen Merkmale des Systems, die Systemkomponenten und die Anwendung im Tunnelbau. Im zweiten Teil werden anhand eines Fallbeispiels die Möglichkeiten zur Kontrolle von Sprengerschütterungen sowie zur Erhöhung der Vortriebsleistung aufgezeigt, die sich aus dem Einsatz von modernen Zünd- und Sprengstoffsystemen im innerstädtischen Sprengvortrieb ergeben.

Abstract

The electronic blasting system eDev™ II is part of Orica's next generation technology and is specifically developed for tunnelling applications. The first part of the paper describes the specific system features, the system components and the general application in tunnelling. The second part of the paper provides a case study, which shows the possibilities to increase advance and to control vibration, which result from the use of modern initiation systems, explosives and loading systems in inner urban tunnelling.

eDev™ Systemüberblick

Das elektronische Zündsystem eDev™ ist das erste und bislang einzige, speziell auf die Anwendung im Tunnelbau zugeschnittene, elektronische Zündsystem. Es wurde im Jahr 2009 in den globalen Markt eingeführt und kam in Deutschland zum ersten Mal bei der Auffahrung des „Neuen Eppsteiner Tunnels“ bei Frankfurt im Jahre 2011 zum Einsatz [1], [2].

Das hier vorgestellte elektronische Zündsystem eDev™ II ist Teil der neuesten Generation elektronischer Zündsysteme von Orica, d.h. es verwendet eine neu entwickelte Mikroprozessor-Technologie für den Zünderchip, der dem heutigen Stand der Technik entspricht. Das eDev™ II System hat im August 2012 die CE Zulassung erhalten.

Das eDev™ II Zündsystem (Bild 1) besteht aus programmierbaren elektronischen eDev™ II Zündern, dem Scanner 120/125, dem Zündkreisprüfgerät „Testbox“ zum Identifizieren und Testen der Zünder und des Zündkreises sowie dem Zündgerät „Blast Box 610“ zum Programmieren und Zünden.

Das System wird durch die Blast Design Software SHOTPlus® Tunnel ergänzt. Neben allgemeiner Planung, Analyse und Dokumentation der Abschlüge unterstützt diese insbesondere bei der Erstellung des Zündzeitplans, der für die Handhabung und Implementierung vor Ort von Bedeutung ist.



eDev™ II Detonator



Scanner 120/125



Testbox



Blastbox 610

Bild 1: Das eDev™ II Zündsystem

Folgende Merkmale zeichnen das eDev™ II Zündsystem aus:

- innovativer Zeitstufen-Programmiermodus
- freie Programmierbarkeit in 1 ms Schritten von 0 – 20.000 ms
- schnelle Programmierungszeiten (etwa 1/3 Sekunde pro Zünder)
- hohe Zündgenauigkeit (+/- 0.01% der Zündzeit)
- einfache, schnelle Verbindung mit der neuen Stegbusleitung und dem neuen Klippverbinder
- 8 stellige Zünder ID aus der die Drahtlänge ablesbar ist
- bis zu 800 Zünder in einem Abschlag
- Barcode scannen zur schnellen Handhabung an der Ortsbrust
- verschlüsselte Kommunikation zur größtmöglichen Sicherheit
- eigensichere Zwei-Wege-Kommunikation zur Funktionsüberprüfung des Zündkreises auf der Sprengstelle
- verfügbare Standard-Drahtlängen: 4, 5, 6, 7 und 8 m
- einfache Lagerhaltung.

Jeder eDev™ II Zünder (Bild 2) hat eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) die während der Fertigung in den Chip programmiert wird. Diese eindeutige ID wird auf einem eindimensionalen Barcode auf der Zünderetikette angegeben, die am Zünderdraht nahe dem Verbinder angebracht ist. Die Zünder-ID ist neben dem eindimensionalen Barcode auch als zweidimensionaler Barcode (Track & Trace) sowie in einer für den Anwender lesbaren Schrift auf dem Etikett angegeben.



Bild 2: eDev™ II Zünder mit Drahtpuppe

Aufgrund von Schutzstrukturen wie Funkenstrecken und Eingangswiderständen weisen die eDev™ II Zünder eine höchstmögliche Sicherheit gegen Streuströme, Überspannungen, statische Elektrizität und elektromagnetische Strahlung auf.

Ein Laserscanner wird benutzt um den Barcode zu erfassen und den einzelnen Zündern Zündzeitstufen bzw. Zündzeiten zuzuweisen (Bild 3).



Bild 3: Einscannen des Barcodes an der Ortsbrust mit dem eDev™ Scanner

Das eDev™ II System verwendet einen innovativen Zeitstufen - Programmiermodus. Dieser bietet folgende Merkmale:

- Verwendung des im Tunnelbau üblichen Zeitstufenkonzepts.
- Frei definierbare, tunnelspezifische Zeitstufenverzögerung über die sog. Zeitstufenliste, die unter Berücksichtigung der geologischen, geometrischen und erschütterungstechnischen Anforderungen des Tunnelprojekts festgelegt wird.
- Zünden von Einzelladungen auch bei Verwendung von gleichen Zeitstufen durch die automatische Vergabe eines Verzögerungszeit-Offsets, d.h. es treten keine Zündzeitüberschneidungen auf. Dazu muss das sogenannte Offset größer als 0 ms sein.
- Zeitgleiche Zündung der Kranzlöcher zur Profilkontrolle auf gleicher Zeitstufe. Dazu muss das Offset gleich 0 ms sein.

Die Zeitstufenliste bestimmt die tatsächlichen Verzögerungszeiten die beim Scannen festgelegt werden.

Eine Zeitstufenliste ist wie folgt aufgebaut (vgl. Bild 4):

Zeitstufe

In der Planung wird wie üblich jedem Bohrloch eine Zeitstufe zugeordnet, ähnlich wie bei der Verwendung pyrotechnischer Zünder.

Inkrement

Das Inkrement legt die Verzögerungszeit (in ms) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitstufen fest.

Offset

Das Offset ist die Verzögerungszeit (in ms), die bei der wiederholten Vergabe einer Zeitstufe jeweils automatisch hinzuaddiert wird. Das Offset bewirkt also, dass alle Zünder – selbst bei Verwendung der gleichen Zeitstufe – mit einem definierten Verzögerungszeit-Offset zünden, so dass es zu keinen unbeabsichtigten Zündzeitüberschneidungen kommt.

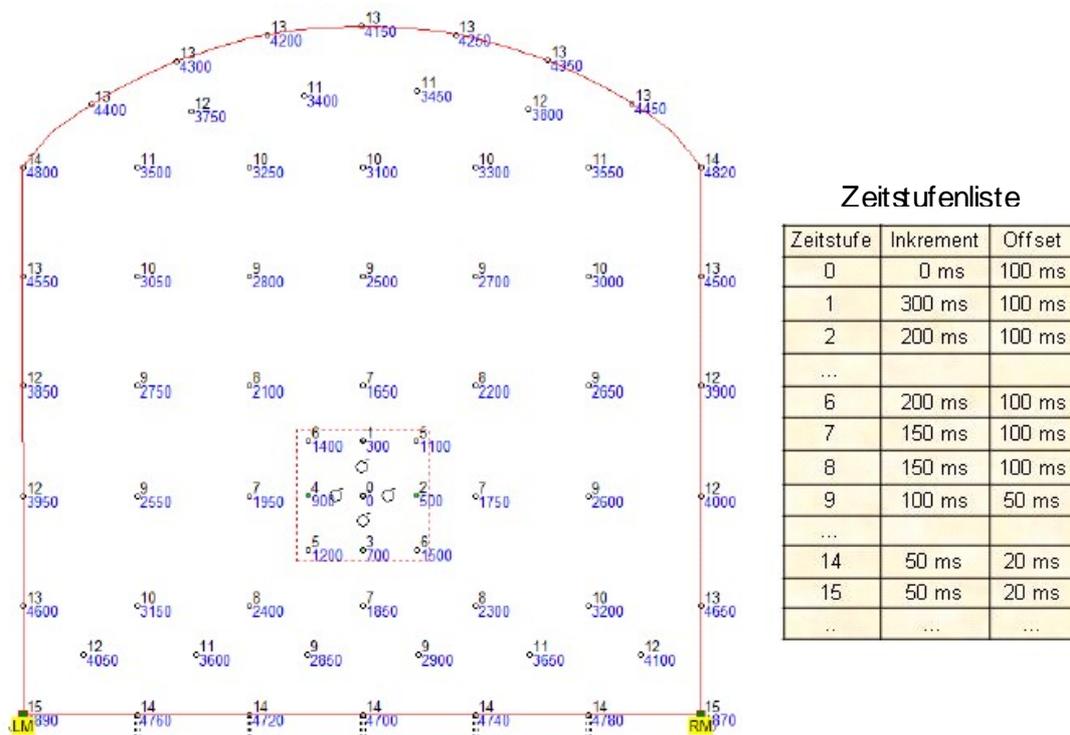


Bild 4: Erstellung des Zündplans und der Zeitstufenliste in SHOTPlus® –T.

Die tatsächliche Verzögerungszeit wird erst nach Übertragung der Scannerdaten auf die Blast Box berechnet und den Zündern entsprechend der ID zugewiesen.

Vor dem Scannen eines Abschlags muss eine Zeitstufenliste auf dem Scanner ausgewählt und aktiviert werden. Auf dem Scanner können verschiedene Zeitstufenlisten abgelegt sein, die verschiedenen tunnelspezifischen Anforderungen gerecht werden.

Das Einscannen der Zünder bzw. die Vergabe der Zündzeiten kann auch unabhängig vom Verbinden der Zünder mit der Busleitung erfolgen. Die Zünder können also entweder vor, beim oder nach dem Laden der Sprengbohrlöcher gescannt werden. Jeder Scanner kann die Daten von bis zu 800 Zündern speichern. Die Zündzeitstufen können in beliebiger Reihenfolge gescannt werden. Das erfolgreiche Einlesen einer Zünder-ID wird auf dem Display mit dem Aufleuchten einer grünen LED bestätigt, zusätzlich wird ein Signalton „Beep“ gegeben.

Um die Arbeitszeit an der Ortsbrust zu minimieren, kann die Sprengmannschaft auch mit zwei oder drei Scannern parallel arbeiten. Die Scanner müssen dann die gleiche Zeitstufenliste verwenden.

Die Liste der Zünder und Zündzeitstufen kann auf dem Scanner kontrolliert und gegebenenfalls bearbeitet werden, da die den Zündern zugewiesene Zündzeit noch nicht einprogrammiert worden ist. Vor der Programmiersequenz müssen die Zünderdaten dann auf das Zündgerät übertragen werden.

Wenn die Sprenganlage geladen ist, müssen alle Zünder über die neuartigen Klippverbinder mit der Duplex-Busleitung verbunden werden. Die Funktion der gesamten Zündanlage aber auch jedes einzelnen Zünder kann jederzeit mit der eigensicheren Testbox (Bild 5) überprüft werden. Je nach Abschlagsgröße bietet es sich an, diese Überprüfung auch sektionsweise durchzuführen.



Bild 5: eDev™ Testbox

Wenn die korrekte Funktion des Zündkreises überprüft ist, sind die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Programmierung der Sprenganlage hergestellt. Vor dem Verbinden des Zündgeräts mit der Zündanlage muss die Sprengstelle und der Sicherheitsbereich geräumt sein. Das Zündgerät, die Blast Box 610, wird in sicherer Entfernung zur Ortsbrust aufgestellt und über eine herkömmliche Zündleitung mit der Sprenganlage verbunden.

Zum Einschalten der Blast Box 610 (Bild 6) muss der Sprengberechtigte zunächst den digitalen Zündschlüssel in das Zündschloss stecken. Die Blast Box durchläuft dann einen Selbsttest und fordert zum Download der Zünderdaten, d.h. der eingescannten IDs und der zugewiesenen Zündzeitstufen auf. Für die Übertragung der Daten vom Scanner auf die Blast Box 610 wird eine Bluetooth Verbindung genutzt. Als Anwenderoberfläche dient ein gut lesbares LCD - Display. Zur Bedienung sind 4 Tasten unterhalb der LCD angeordnet. Nach der erfolgreichen Übertragung der Daten kann die Programmierung der Zünder gestartet werden.



Bild 6: eDev™ Blast Box 610

Dabei wird die Zündspannung angelegt und jeder Zünder über die eindeutige ID mit der zugewiesenen Zündzeitstufe bzw. mit der daraus berechneten Verzögerungszeit programmiert. Sollten Fehler auftreten und einzelne Zünder nicht programmiert werden können, werden dem Anwender entsprechende Fehlermeldungen über das Display angezeigt, so dass dieser stets genauestens über den Zustand der Zündanlage informiert ist. Nach Durchlaufen der Programmiersequenz ist die Zündbereitschaft hergestellt und die Sprengung kann ausgelöst werden. Dazu müssen die beiden Zündtasten gleichzeitig gedrückt werden.

Nach der Sprengung können die Informationen über die Zündanlage (Zünder ID, Verzögerungszeit, Status bei der Programmiersequenz, Zündzeit) über eine serielle Schnittstelle der Blast Box ausgedruckt werden oder alternativ auch auf einen PC hochgeladen werden.

Anwendungsbeispiel im innerstädtischen Tunnelbau

Die Stockholm „Cityline“ ist ein 6 km langer Bahntunnel, der für den öffentlichen Nahverkehr genutzt werden soll. Der Tunneltrasse läuft von Tomtebodavägen im Norden der Innenstadt über zwei weitere Haltestationen zur Stockholmer U-Bahn Station „Süd“. Die Haltestationen Odenplan und Zentral der Cityline liegen direkt unterhalb der gleichnamigen Metrostationen und sind mit Aufzügen an die Metrostationen angeschlossen. Über die Zentralstation ist die Cityline mit allen anderen Linien des Knotenpunkts (Bild 7) Stockholm Zentralstation verbunden. Die geschätzten Baukosten belaufen sich auf 16,8 Mrd SEK (1,85 Mrd EUR). Das Cityline Tunnelprojekt wurde in vier Baulose unterteilt.

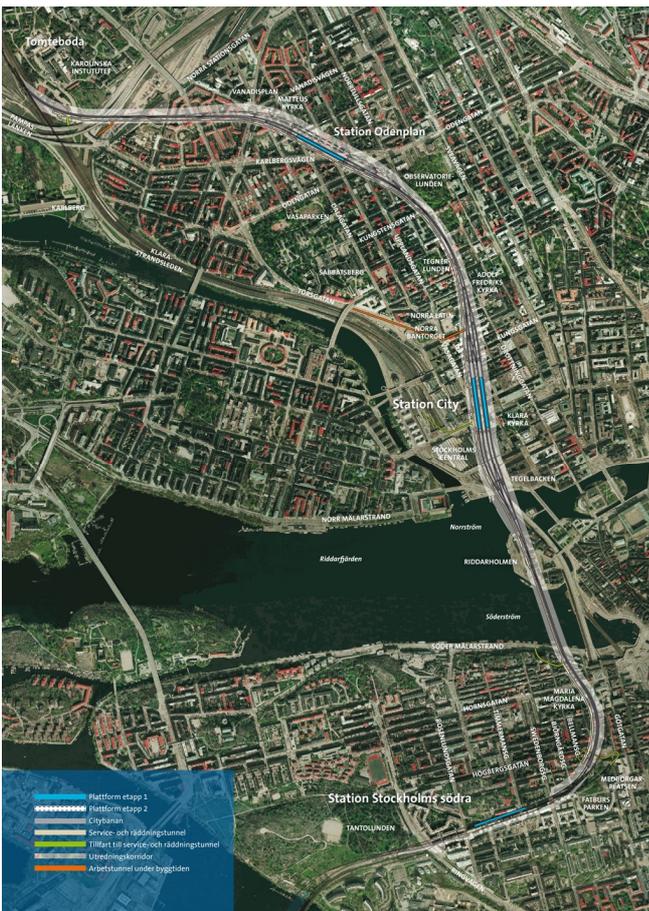


Bild 7: Stockholm Cityline

Orica versorgt drei dieser Baulose mit Zünd- und Sprengstoffsystemen, Untertage - Pumpfahrzeugen und Sprengdienstleistungen. In den besonders erschütterungssensiblen Bereichen der Sprengvortriebe hat das elektronische Zündsystem eDev™ eine verbesserte Kontrolle der Sprengerschütterungen bei gleichzeitig erhöhten Vortriebsleistungen ermöglicht. Während der Gesamtdauer des Projekts werden etwa 150.000 eDev™ bzw. eDev™ II Zünder eingesetzt.

Die nördliche Sektion der Cityline wird von der Firma Bilfinger gebaut. Nitro Consult führt die Beweissicherung und messtechnische Überwachung der Sprengemissionen sowie beratende Tätigkeiten durch (Bild 8). In den Tunnelabschnitten unterhalb der Gustav Vasa Kirche, die in unmittelbarer Nähe der Odenplan U-Bahnstation liegt, bietet Orica Mining Services darüberhinaus Dienstleistungen zur Optimierung des Bohrplans, der Sprengstofflademengen und des Zündplans an. In diesem Bereich der Trasse verläuft der Service- und Fluchttunnel direkt unterhalb der historischen Gustav Vasa Kirche. Der Servicetunnel liegt in einem Abstand von etwa 10 m zur zweigleisigen Haupttröhre.

Die Gustav Vasa Kirche wurde in den Jahren 1901 bis 1906 gebaut. Die Kirche wurde auf Pfählen gegründet von denen aber - soweit bekannt - nur einige in den Felsuntergrund einbinden. Bei der Unterquerung der Kirche beträgt der kürzeste Abstand zum Kirche ungefähr 22 m, davon 16 m im Fels. Die maximal zugelassenen Schwinggeschwindigkeiten am Fundament der Kirche wurden auf 18 mm/s festgelegt, der Alarmwert auf 13 mm/s. Bei Überschreiten des Alarmwerts muss der Sprengplan geprüft und modifiziert werden, um ein Erreichen des maximalen Grenzwerts zu verhindern.



Bild 8: Messtechnische Überwachung im Bereich der Gustav Vasa Kirche: Messpunkte (grün) und Sprengungen (gelb).

Trotz des geringen Abstands zur historischen Kirche wollte sowohl der Bauherr als auch Bilfinger einen möglichst schnellen Vortrieb unter Einhaltung des vorgegebenen Erschütterungsgrenzwerts erreichen. Jede Überschreitung des Grenzwerts würde einen mehrtägigen Baustopp bedeuten, da die Kirche genauestens auf potentielle Schäden untersucht werden müsste.

Für die Ladearbeiten des Emulsionssprengstoffs Civec Control™ wurden zwei Untertage MCUs vom Typ Handi Loader™ eingesetzt, die je nach Sprengplan bis zu fünf verschiedene spezifische Lademengen [kg/m] pro Bohrloch einbringen. Dadurch war es möglich für jeden Abschlag einen spezifischen Sprengplan mit minimierten Lademengen

pro Bohrloch zu entwickeln, der jeweils unter Berücksichtigung der letzten Messwerte und ständig aktualisierten Regressionsanalysen festgelegt wurde.

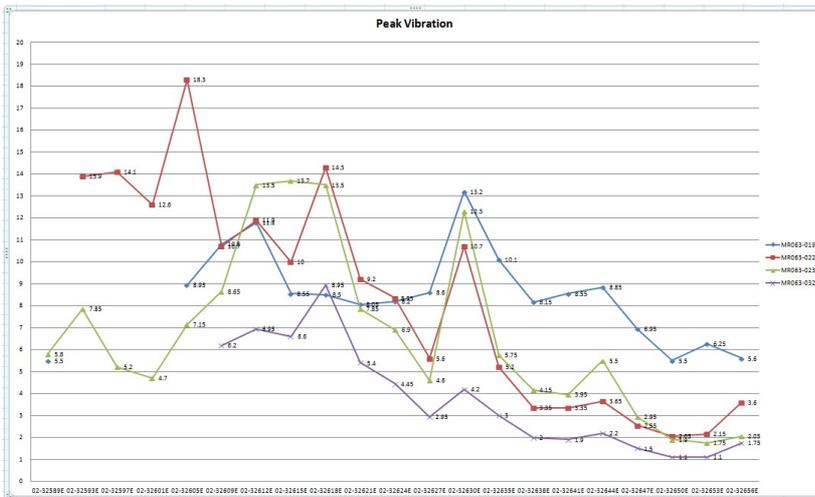


Bild 9: Schwinggeschwindigkeiten für verschiedene Messpunkte der Gustav Vasa Kirche

Die bei der Unterfahrung der Gustav Vasa Kirche aufgezeichneten maximalen, vertikalen Schwinggeschwindigkeiten sind in Bild 9 dargestellt. Bis auf eine Überschreitung des Grenzwerts von 18,3 mm/s bei Annäherung an die Kirche, traten im weiteren Verlauf des Vortriebs keine weiteren Grenzwertüberschreitungen auf. Eine Untersuchung ergab, dass die Überschreitung wahrscheinlich durch zwei verlaufene Bohrlöcher bedingt war, was zum Zünden der doppelten Lademenge führte.

Einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Kontrolle der Sprengerschütterungen leistete der Einsatz des elektronischen Zündsystems eDevTM. Die hohe Zündgenauigkeit führt dazu, dass es bei entsprechender Wahl der Zündzeiten im Nahfeld zu keiner Überlagerung der sprengbedingten Erschütterungen der Einzelladungen kommt. Eine zufällige Verstärkung der Sprengerschütterungen wie sie beim Einsatz von pyrotechnischer, nicht-elektrischer Zündung bedingt durch eine zufällige, zeitgleiche oder zeitnahe Zündung von mehreren Sprengbohrlöchern vorkommt, kann ausgeschlossen werden. Zur Entwicklung des Zündplans wurde die Software SHOTPlus[®]-T eingesetzt. Mit Hilfe der Software wurden die Zeitstufenliste, die Zündzeitstufen und die Scanreihenfolge festgelegt. Insgesamt wurden etwa 8.000 ms für das Heraussprengen der Runde benötigt.

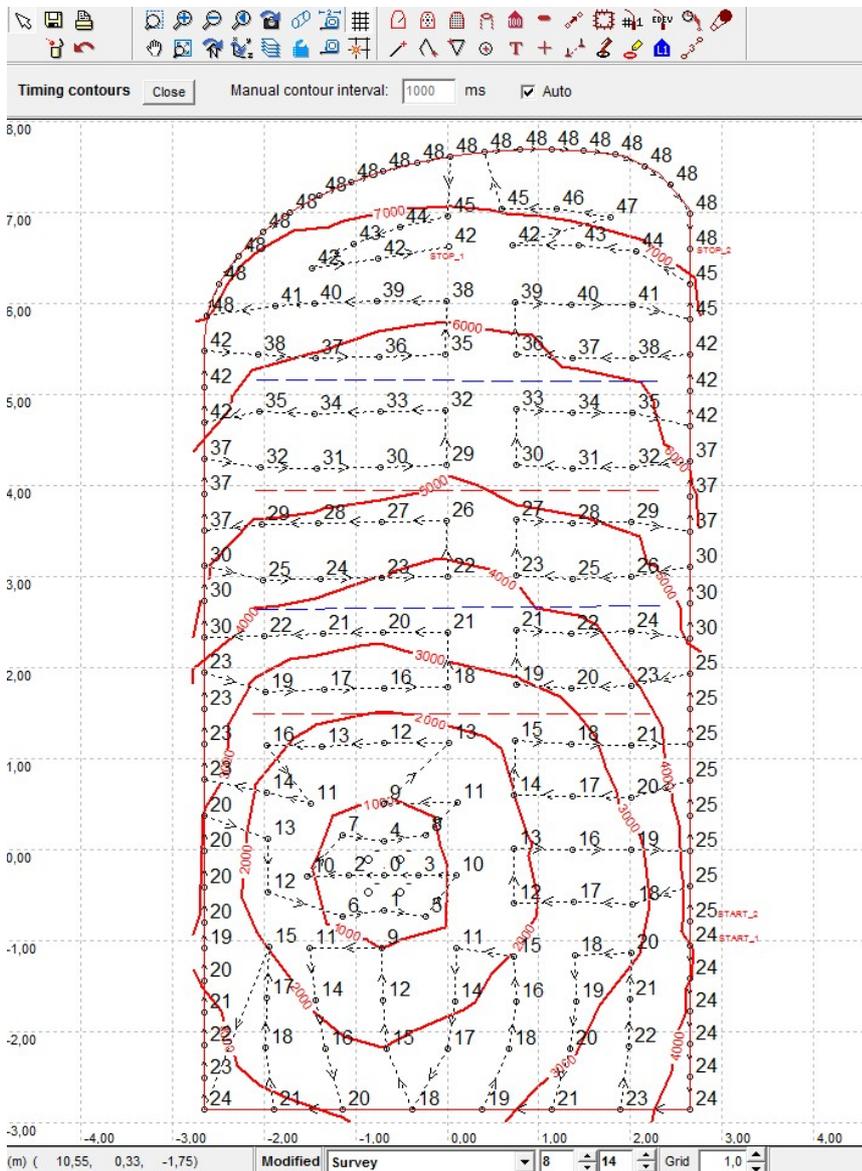


Bild 10: Zündplan, Isozeitlinien und Scanpfad für den Servicetunnel

Der im Zündplan dargestellte Abschlag im Bereich des Service Tunnels hat einen Ausbruchquerschnitt von etwa 55 m^2 ($5,3 \text{ m} \times 10,5 \text{ m}$). Pro Abschlag wurden mit einem Bohrraster von $0,6 \text{ m} \times 0,7 \text{ m}$ zwischen 197 und 217 Sprengbohrlöcher gebohrt. Die spezifische Lademenge betrug etwa $2,5 \text{ kg/m}^3$. Die Bohrlochtliefen betragen im Einbruch $3,3 \text{ m}$ und im Rest des Querschnitts $3,0 \text{ m}$. Alle Sprengbohrlöcher wurden mit einer deutlich reduzierten Lademenge von 450 g/m sowie einer Fußladung von etwa 500 g geladen. Als Schlagladung diente eine kleine EurodynTM Patrone, die mit Sperrfedern im Bohrlochtliefsten gesichert wurde. Die Gesamtlademenge betrug zwischen $1,8 - 2,0 \text{ kg/Bohrloch}$. Für die Berechnung der Lademenge pro Bohrloch wurde das Gewicht der EurodynTM Patrone in das äquivalente Gewicht des verwendeten Emulsionssprengstoffs umgerechnet.

Die Software erlaubt es aufgezeichnete Seismogramme in den Zündplan zu importieren (Bild 11), wodurch eine genaue Auswertung möglich wird. Dadurch lassen sich die aufgezeichneten Schwingungswerte der Einzelladungen jedem einzelnen Sprengbohrloch zuordnen. Durch Auswahl eines Schwingungswerts mit einem Mausklick, wird das korrespondierende Sprengbohrloch im Zündplan hervorgehoben.

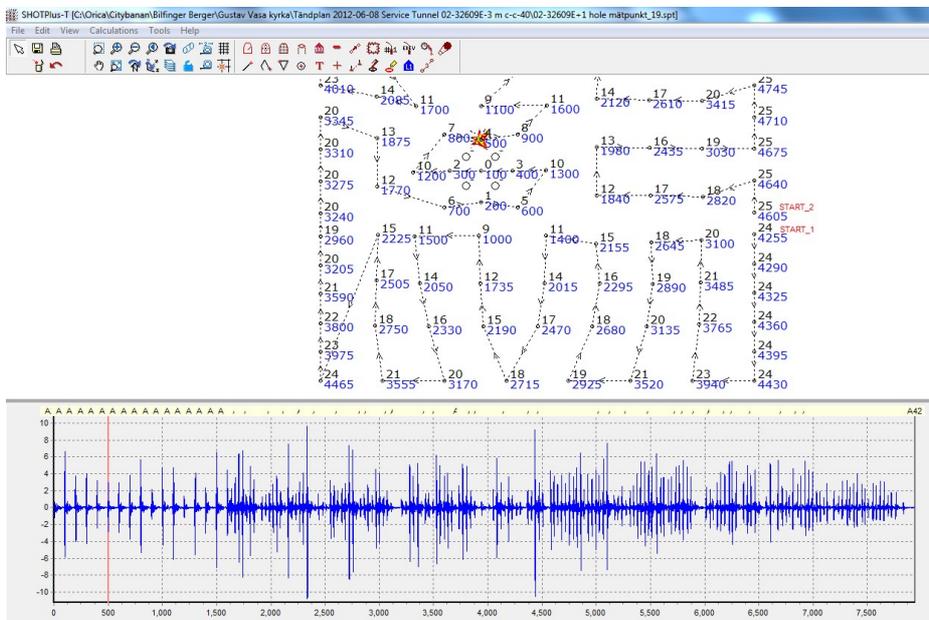


Bild 11: Detail des Zündplans - Auswertung des aufgezeichneten Seismogramms.

Bild 12 stellt ein typisches Seismogramm dar, das bei der Unterfahrung der Kirche mit dem elektronischen eDevTM Zündsystem aufgezeichnet wurde. Auf der Ordinate ist die vertikale Schwinggeschwindigkeit (mm/s) aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit (s). Deutlich erkennbar ist das regelmäßige Auftreten der einzelnen Maxima über die Zeit.

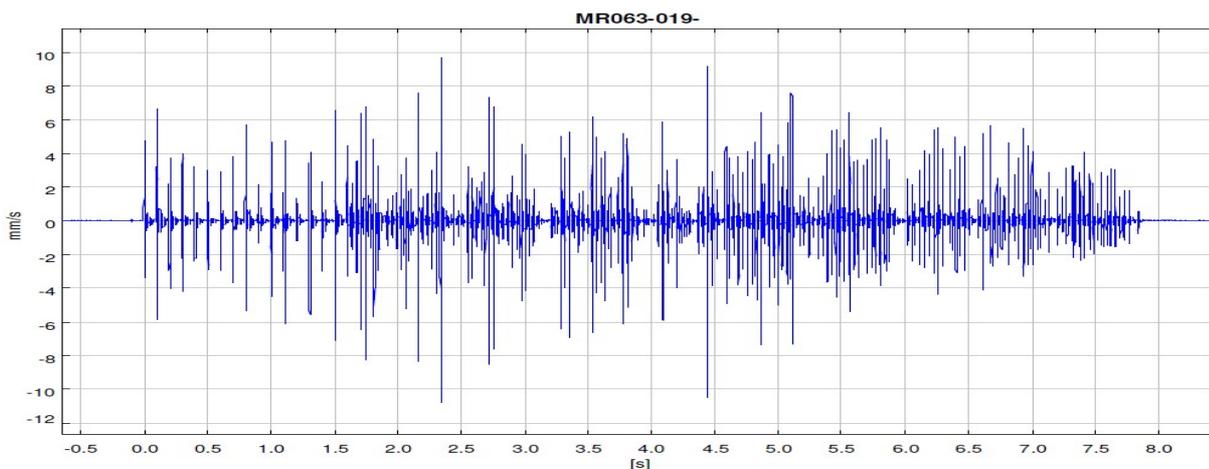


Bild 12: Seismogramm von der Unterfahrung der Gustav Vasa Kirche

Die Unterfahrung der Gustav Vasa Kirche im Sprengvortrieb hat sich trotz zunächst großer Bedenken als sehr erfolgreich herausgestellt. Verschiedene Alternativen wie eine Umlegung der Trasse oder der Einsatz einer Vollschnittmaschine wurden erst sehr spät verworfen, da die Bauausführung bereits zu weit fortgeschritten war. Die ursprüngliche Planung für diesen Bereich des Servicetunnels sah eine Abschlagslänge von 1,0 m vor. Durch die Entwicklung und ständige Überprüfung eines optimierten Sprengplans sowie die Verwendung des elektronischen Zündsystems eDevTM konnten die vorgegebenen Erschütterungsgrenzwerte eingehalten werden und sogar direkt unterhalb der historischen Kirche eine Abschlagslänge von 3,0 m erreicht werden. Die Erwartungen an den Sprengvortrieb wurden sowohl hinsichtlich der Vortriebsgeschwindigkeit als auch hinsichtlich der erzielten Kontrolle der Sprengerschütterungen deutlich übertroffen.

Literatur

- [1] Armbrus H. und Buttgerit Ph.: Der neue Eppstein Tunnel, Sprenginfo, Heft Nr. 3 2012, pp 32-35
- [2] Reinders P., Staskiewicz L. und Hammelmann F.: eDev – das neue elektronische Zündsystem für Sprengarbeiten im Strecken- und Tunnelvortrieb, Sprenginfo, Heft Nr. 2 2011, pp 30-33
- [3] Case study “eDev™ in vibration controlled Tunnelling: City line project, Sweden, Bilfinger Construction Odenplan AB”, Orica Mining Services, 2013