

Erschütterungsmessungen bei Gewinnungssprengungen

Dr. Gerhard Reichholf
Coordinator Raw Material Management, Manufacturing Services
Holcim (Schweiz) AG

ABSTRACT:

Das Zementwerk Eclépens der Holcim (Schweiz) AG produziert ca. 650'000 t Zement pro Jahr. In 2005 mussten hierfür im Steinbruch "Mormont" ca. 670'000 t Kalkstein mittels Bohren und Sprengen gewonnen werden. Die für die Klinkerherstellung weiters benötigten 200'000 t Mergelstein wurden im Steinbruch "Marnière" mechanisch mit einem Hydraulikbagger gerissen.

Seit einigen Jahren beschwert sich Eclépens, die einzige an das Zementwerk angrenzende Gemeinde, über zu hohe Sprengerschütterungen. Nach eingehenden Diskussionen hat sich Holcim Eclépens verpflichtet, zukünftig auftretende Sprengerschütterungen auf einen Maximalwert von 3 mm/s zu beschränken; dieser Wert liegt deutlich unter den gesetzlichen vorgeschriebenen Grenzwerten für Sprengerschütterungen.

In 2005 beschloss Holcim Eclépens im Rahmen des Projektes ECCE+ die Jahresproduktion um ca. 30% zu steigern. Da die Gemeinde Eclépens in einer ersten Reaktion reserviert auf das Projekt reagierte, rief Holcim eine Arbeitsgruppe (concept carrière 2005) ins Leben, die sich intensiv mit der Auswirkung der Produktionssteigerung u.a. auf die Bohr- und Sprengarbeit befasste.

Heute, nach mehr als 200 Sprengungen, kann gesagt werden, dass die Produktionssteigerung mit einhergehender Anpassung der Bohr- und Sprengarbeit zu massiven Verbesserungen für die Gemeinde Eclépens führte: nur 3 Sprengungen erreichten den Grenzwert von 3 mm/s und die Mehrheit der Sprengerschütterungen liegt deutlich unter 2 mm/s.

1 EINLEITUNG

Die Holcim (Schweiz) AG ist die Schweizer Tochtergesellschaft des weltweit tätigen Baustoffkonzerns Holcim Ltd. Unser Ursprung ist die Zementherstellung; heute bilden Zement, Kies und Beton die Kernbereiche.

Holcim (Schweiz) AG - Sparte Zementproduktion - besitzt eine Zementfabrik im westlichen Teil der Schweiz. Diese produzierte im Jahre 2005 ca. 650'000 t Zement. Zur Herstellung dieser grossen Zementmenge bedurfte es ca. 670'000 t Kalkstein und ca. 200'000 t Mergelstein, welche direkt im Nahbereich des Zementwerkes gewonnen werden konnten. Der Mergelsteinbruch "Marnière" liegt ca. 2 km südlich des Zementwerkes und das Material wird mit einem Hydraulikbagger mechanisch gewonnen, auf SLKW verladen und ins Zementwerk gebracht. Aufgrund der Gewinnungsform und der Abgeschiedenheit des Steinbruches gibt es keine Probleme mit den nächsten Nachbarn.

Dies ist leider nicht gültig für den im Norden liegenden Kalksteinbruch "Mormont" (Abbildung 1). Der Steinbruch liegt in unmittelbarer Nähe zur Gemeinde Eclépens und das Rohmaterial wird seit Bestehen des Zementwerkes mittels Bohren und Sprengen gewonnen. Seit einigen Jahren beschwerten sich die Einwohner der Gemeinde über zu hohe Sprengerschütterungen. Holcim Eclépens nahm sich der Sorgen der Gemeindeglieder an und versprach zukünftig auftretende Sprengerschütterungen auf einen Maximalwert von 3 mm/s zu beschränken.



Abbildung 1: "Mormont" Steinbruch der Holcim Eclérens (links: Gemeinde Eclérens)

Obwohl dieser garantierte Maximalwert deutlich unter dem gesetzlichen Grenzwert liegt, gab es massive Proteste als der Maximalwert nach dieser Selbstbeschränkung einmal erreicht wurde. Als erste Konsequenz wurde in einigen Bereichen des Steinbruches die sich in Verhieb befindliche Etagenhöhen bis auf eine Höhe von 4 m reduziert. Damit war in einem ersten Schritt gewährleistet, dass der garantierte Erschütterungsgrenzwert von 3 mm/s eingehalten werden konnte.

Als in 2005 Holcim Eclérens beschloss im Rahmen des Projektes ECCE+ die Jahresproduktion um ca. 30% zu steigern, befürchteten die Einwohner von Eclérens eine Zunahme der Häufigkeit von Sprengerschütterungen. Holcim Eclérens rief darauf hin eine Arbeitsgruppe (concept carrière 2005) ins Leben, die sich intensiv mit der Auswirkung der Produktionssteigerung auf die Bohr- und Sprengarbeit befasste.

2 BESCHREIBUNG DES PROJEKTES

Das Projekt teilte sich in 3 Bereiche auf:

- Die im Zeitraum von 6 Jahren (2000 and 2005) aufgezeichneten historischen Daten wurden mittels einer dafür programmierten Access Datenbank detailliert analysiert. Die Datenbasis umfasste hierbei Daten bezüglich der Position und Geometrie der Sprenganlage, verwendeter Sprengstoff und Menge, Zündmittel und Mengen, aufgezeichnete Sprengerschütterungen, etc.
- In einem zweiten Schritt wurde die aktuell angewendete Bohr- und Sprengarbeit einer kritischen Analyse unterzogen. Diese Analyse umfasste 9 Produktionssprengungen, welche den "Status Quo" der Bohr- und Sprengarbeit bei Holcim Eclérens definierten.
- In einem dritten Schritt wurde, auf Basis der Erkenntnisse der Schritte 1 und 2, das zukünftige Arbeitsprogramm festgelegt. Um einen möglichst hohen Nutzen aus dem Projekt zu generieren, wurde das Arbeitsprogramm so flexible als möglich gehalten ("learning from mistakes").

3 DATENAUFZEICHNUNG WÄHREND TESTSPRENGUNGEN

Während der 9 Testsprengungen wurde ein umfangreiches Aufzeichnungsprogramm festgelegt. Dies umfasste die Geometrie der Sprenganlage, die Qualität der Bohrarbeit und die Qualität der Ladarbeit (mit Sprengstoff).

3.1 Aufzeichnungen VOR der Sprengung

Die Geometrie der Sprenganlage (Vorgabe, Seitenabstand, Etagenhöhe) wurde mittels einer reflektorlosen Distanzmessung mit einem Theodoliten eingemessen. Die Qualität der Bohrarbeit wurde mit dem Bohrdatenaufzeichnungssystem "Boretrak" aufgezeichnet, welches die Bohrlochneigung und deren Orientierung entlang der Bohrlochachse darstellen kann.

Beide Datensätze, sowohl die Geometrie der Sprenganlage als auch die "Boretrak"- Daten, wurden mit der Bergbauplanungssoftware "Surpac" bearbeitet. "Surpac" lieferte als Ergebnis eine räumliche Darstellung der Bruchwand inklusive der genauen Position des Bohrloches relativ zur Bruchwand. Aus dieser Darstellung konnten nun die genauen Vorgaben und Seitenabstände pro Bohrloch in Realität festgelegt werden (reale Abstände zueinander). Nach dem Abtun der Sprengung wurde die Bruchwand neuerlich Vermessen, um die tatsächlich gelöste Kubatur berechnen zu können.

Zu guter Letzt wurden von der Sprenganlage verschieden Bilder aufgenommen um die Geologie oder andere Charakteristika der Bruchwand beschreiben zu können.

3.2 Aufzeichnungen WÄHREND der Sprengung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Qualität einer Sprengung zu bewerten. Da Holcim Eclépens nicht über eine Installation zur Messung des Zerkleinerungsergebnisses verfügte, konnte keine Aussage über eine mögliche Veränderung der Korngrößenverteilung des Hauwerkes getroffen werden. Dies ist auch gültig für Messung der Detonationsgeschwindigkeit (VoD) als Mass für die Qualität der Sprengstoffumsetzung. Aus Sicherheitsgründen verwendet Holcim Eclépens immer eine detonierende Zündschnur im Bohrloch, welche eine Messung der VoD mittels dem System "DataTrap" verunmöglichte.

Aufgrund der speziellen Situation mit der Gemeinde Eclépens wurde der Fokus nur auf die Messung von Sprengerschütterungen gelegt. Um das umfangreiche Messprogramm umsetzen zu können, wurden hierfür bis zu 9 Dreiaxial - Geophone vom Typ Bartec ME 2002 eingesetzt. Daneben wurde jede Sprengung gefilmt, um sowohl die Bewegung der Bruchwand / des Hauwerkes während der Sprengung, als auch die Lage des Hauwerkes und der auftretenden Rückrisse nach der Sprengung bewerten zu können.

4 ERGEBNIS DER ANALYSE DER HISTORISCHEN DATEN

Obwohl Holcim Eclépens in den letzten Jahren eine grosse Menge an Daten gesammelt hatte, zeigte die Datenanalyse, dass die Daten wenig Substanz besaßen. Die Gründe hierfür waren:

- Es wurden falsche oder unvollständige Daten in Datenblätter eingegeben.
- Geophonbezeichnungen und deren Position wurden von verschiedenen Personen vertauscht.
- Die Geometrie von hunderten von Sprengungen war immer identisch und daher nur geschätzt.

Darüber hinaus zeigte die Analyse, dass die aufgezeichneten Sprengerschütterungen nicht in Verbindung mit Sprengstoffmengen, Sprengstoffarten, Zündstufen, etc. gebracht werden konnten. Klare Korrelationen wurden nur zwischen logischen Verbindungen gefunden, wie z.B. zwischen der Bohrlochlänge und der Länge der detonierenden Zündschnur. Weiters konnte gefolgert werden, dass

- die geringe Datendichte und deren mässige Qualität keine seriöse Aussage über die frühere Bohr- und Sprengarbeit zulies. Dies ist speziell gültig für den Zeitraum bis Sommer 2004. Mit der Pensionierung des alten Steinbruchmeisters und der Einstellung eines neuen Steinbruchmeisters wurde die Datenqualität merklich besser.
- Sprengerschütterungen unabhängig von der Lademenge pro Zündzeitstufe waren.
- Sprengungen die auf den oberen Etagen (Etage 5 und Etage 5+) abgetan werden, produzierten mit einer medianen Sprengstoffmenge von 25 kg pro Zündzeitstufe Vibrationen von bis zu 1.90 m/s (Medianwert). Im Gegensatz dazu produzierten Sprengungen auf der Etage 2 (25 m Höhe) mit ei-

ner medianen Sprengstoffmenge von 40 kg pro Zündzeitstufe die geringsten Vibrationen (bis 1.29 mm/s als Medianwert).

- Sprengerschütterungsprobleme starteten im Jahre 2002; zu diesem Zeitpunkt verlagerte Holcim Eclépens seine Gewinnungsaktivitäten auf die oberen Etagen des Steinbruches.

5 ERGEBNIS BEZÜGLICH DER AKTUELLEN BOHR- & SPRENGARBEIT

Die Analyse der Daten zeigte deutlich, dass Holcim Eclépens sowohl die geplanten Vorgaben als auch die geplanten Seitenabstände sehr gut unter Kontrolle hat. Einzig die Bestimmung der Etagenhöhe verursachte Probleme, was zu Problemen bei der angewendeten Bohrarbeit führte; ungenaues Unterbohren. Zur Behebung dieses Problems wurde ein handlicher Laserdistometer angeschafft, der es dem Steinbruchpersonal erlaubt zukünftig einfacher die reale Etagenhöhe bestimmen zu können. Zu guter Letzt wurde darauf hingewiesen, dass Holcim Eclépens bei der Ausrichtung des Bohrgerätes die vorhandene Strategie überdenken muss.

Bezüglich des Bohrlochfüllungsgrades musste angemerkt werden, dass der gerechnete und gemessene Wert mit ca. 30 - 40 % sehr gering war. Holcim Eclépens muss zukünftig sowohl das Sprengraster als auch den Bohrlochfüllungsgrad anheben. Anderenfalls würde sich die Frage stellen, wieso Eclépens Bohrlöcher bohrt und diese mit 70 - 60% Bohrmehl wieder verfüllt.

6 BEWERTUNG DER VIBRATIONEN

Erschütterungen, welche durch Sprengungen hervorgerufen werden, bewegen sich als seismische Wellen durch das Gebirge. Dabei nimmt die Energie der seismischen Welle mit zunehmender Entfernung zum Bohrloch ab. Da sich in der Natur (Realität) das zu sprengende Gebirge aus verschiedenen Gesteinen, Klüften, Kavernen, etc. zusammensetzt, kann die Ausbreitung der Welle im Gebirge als nicht-triviales Ereignis angesehen werden. Der Autor versucht aber dem Leser anhand der Wellenausbreitung im homogenen Material den Mechanismus zu erläutern.

In einem homogenen und elastischen Medium verringert sich aufgrund von Absorption die Amplitude der sich ausbreitenden Welle. Dieses Dämpfungsverhalten ist ein Charakteristikum des Wellentyps und kann wie folgt beschrieben werden (Jimeno 1995):

- die Amplitude einer Oberflächenwelle verringert sich um den Faktor $1/(\text{Entfernung})^{1/2}$
- die Amplitude einer Körperwelle wird mit dem Faktor $1/\text{Entfernung}$ gedämpft

Da die ausbreitende Welle einen Einfluss auf das Verhalten des Untergrundes in einiger Entfernung zum Sprengung hat, ist es von grosser Bedeutung den sich ausbreitenden Wellentyp zu kennen. Der Autor empfiehlt hierzu die Erstellung der charakteristischen Gebirgskennlinie als Hilfsmittel zur Beschreibung des Gebirgsverhaltens bei Sprengarbeiten.

6.1 Ergebnisse

Die Analyse der historischen Daten (Sommer 2004 - Frühling 2005) zeigte, dass die höchsten Sprengerschütterungen auf den obersten Etagen der Steinbruches erzielt wurden (und umgekehrt). Um diese Schlussfolgerung beweisen zu können, wurden zwei Geophonlinien zwischen dem Steinbruch und der Gemeinde Eclépens installiert. Nach Installation der beiden Geophonlinien wurden 33 Sprengungen abgetan und das Gebirgsverhalten zwischen dem "Mormont" und der Gemeinde Eclépens aufgezeichnet.

Die permanent installierten Geophone G1 und G2 waren die Startpunkte der beiden Geophonlinien (Abbildung 2). Jede Geophonlinie bestand aus 4 weiteren Geophonen. Diese wurden in einer Linie im Wald ausgelegt, fest mit den Untergrund / Felsen verbunden und mittels eines GPS eingemessen.

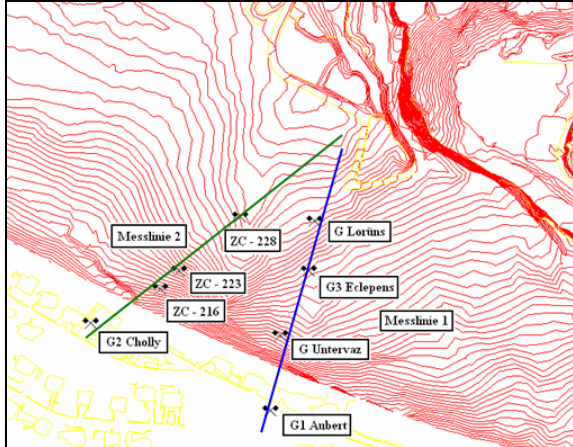


Abbildung 2: Geophonlinie 1(blau) und 2 (grün)

Abbildung 3 veranschaulicht die charakteristischen Gebirgskennlinie des Steinbruches "Mormont". Diese Kennlinie setzt die aufgezeichneten Sprengerschütterungen in Bezug zur Lademenge pro Zündzeitstufe und zur Distanz zwischen dem Ort der Sprengung und des Geophons.

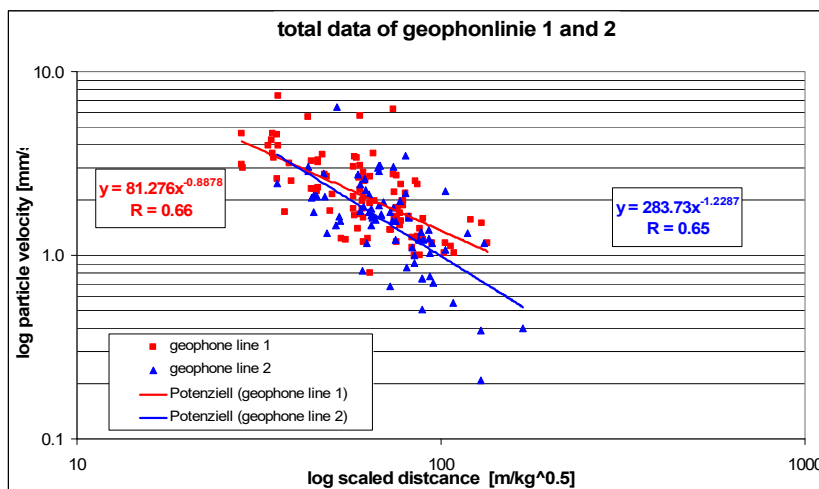


Abbildung 3: Sprengerschütterungen vs. Geophonlinie 1 & 2

Die Darstellung zeigt, dass Sprengungen welche mit der Geophonlinie 1 aufgezeichnet wurden, tendenziell höher zu sein scheinen als solche welche mit der zweiten Geophonlinie aufgezeichnet wurden. Der Korrelationskoeffizient der beiden Geophonlinien ist zwar mit 0.66 (Linie 1) and 0.65 (Linie 2) nahezu ident, aber der Exponent der Trendlinie unterscheidet sich doch recht deutlich (0.89 vs. 1.23).

Um das Wellenausbreitungsverhalten des Gebirges besser verstehen zu können, wurde nachfolgend eine Analyse bezüglich der Etagen als Referenz zur Position im Steinbruch durchgeführt.

In Abbildung 4 ist das Ergebnis der Analyse dargestellt. Es zeigt sich dabei deutlich, dass im Steinbruch "Mormont" auf den oberen Etagen zwei Wellenausbreitungsfamilien anzutreffen sind. Das Wellenausbreitungsverhalten der ersten Familie ("Familie 1") ist rot für Etage 4 beschrieben. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0.71, der Exponent der Trendlinie ist -0.96 und der Multiplikator der Gleichungsfunktion ist 109.

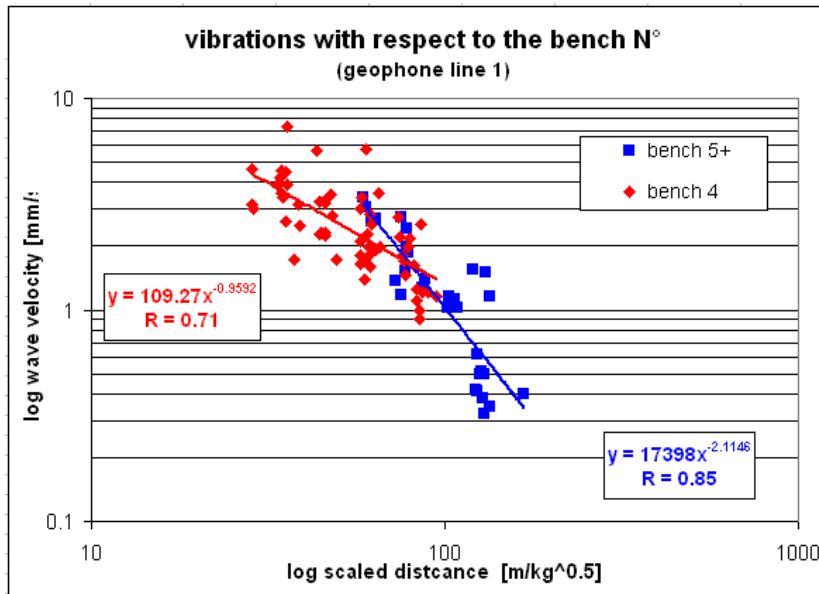


Abbildung 4: Sprengerschütterungen vs. Etagenbezeichnung (Geophonlinie 1)

Das Wellenausbreitungsverhalten der zweiten Familie ("Familie 2") ist in Abbildung 4 blau für die Etage 5+ dargestellt. Der Korrelationskoeffizient ist mit 0.85 ähnlich hoch, aber der Exponent der Trendlinie ist mit -2.12 deutlich höher und der Multiplikator der Gleichungsfunktion ist um den Faktor 160 höher (109 zu 17'398).

Aufgrund dieser Analyse wird deutlich, dass Holcim Eclépens im Steinbruch "Mormont" zwei verschiedene Wellenausbreitungsphänomene antrifft. Sprengungen, welche auf der obersten Etage (5+) abgetan werden, können durch einen hohen Trendlinienexponenten charakterisiert werden. Das Gebirge dämpft zwar die generierten Sprengerschütterungen gut, aber der "Multiplikator" ist mit 17'398 zu hoch, als das die Wellen noch ordentlich gedämpft werden könnten. Das Gegenteil ist gültig für Etage 4. Das Gebirge dämpft die erzeugten Wellen schlechter. Damit können Erschütterungswellen schon mit einem geringen "Multiplikator" problematisch sein.

7 SCHLUSSFOLGERUNG UND EMPFEHLUNG

Das von Holcim Eclépens initiierte Arbeitsprogramm "Concept carrière 2005" war wichtig um die Problematik der Sprengerschütterungen im Steinbruch "Mormont" besser verstehen zu können. Aus der Datenanalyse kann geschlossen werden, dass

- Holcim Eclépens vor allem unter dem vorhandenen Gebirge zu leiden hat.
- ein geringer Einfluss der Qualität der angewendeten Bohr- und Sprengarbeit, der Grösse der Sprengung, etc. zugeschrieben werden kann.

Die folgenden Empfehlungen sollten durch Holcim Eclépens umgesetzt werden:

- alle Sprengungen müssen Vermessen werden
- eine Umstellung auf vertikale Bohrlöcher sorgt für höhere Bohrqualität (Bohrlochlänge, Orientierung)
- Reduktion der Unterbohrung auf 0 - 0.8 m (mehr ist nicht nötig)
- Reduktion der Etagenhöhe aller Etagen auf 12 - 13 m (bringt zusätzlich positiven Einfluss auf die Qualitätssteuerung)
- Verringerung der Sprengungen pro Jahr durch Einsatz eines neuen Zündsystems (elektrische Zünder vs. nichtelektrische Zünder)
- Vergrößerung des Sprengrasters auf den unteren Etagen (keine Erschütterungen zu befürchten)
- bei hohen Etagen mit geteilter Ladesäule sprengen (bis zu 4 Zünder pro Bohrloch)
- Verwendung von Splitt (8-15 mm) anstatt Bohrmehl zum Verdämmen der Ladesäule

Heute, nach mehr als 200 Sprengungen, kann gesagt werden, dass die Produktionssteigerung mit einhergehender Anpassung der Bohr- und Sprengarbeit zu massiven Verbesserungen für die Gemeinde Eclépens führte: nur 3 Sprengungen erreichten den Grenzwert von 3 mm/s und die Mehrheit der Sprengerschüttungen liegt deutlich unter 2 mm/s.

8 LITERATUR

Jimeno, Carlos et. al. 1995 Drilling and blasting of rocks, A.A. Balkema Publisher, ISBN 905410199 7

Moser, P. & Reichholf G. 2006 Experience with the change from cartridge to bulk site sensitized emulsion products, *Fragblast 8, Santiago de Chile 2006*

Schachinger, T. 2005. Analysis of the drill and blast work in the Eclépens quarry of Holcim (Switzerland) with respect to blast vibrations, *Diploma thesis, Montanuniversity of Leoben 2005*