

Erschütterungsschutz von Hochdruckgasleitungen Sprengtechnischer Abbruch der alten Autobahnbrücke Neckarbrücke der BAB A6 bei Mannheim Seckenheim

Zusammenfassung

Der Abbruch der alten Neckarbrücke der BAB A6 westlich von Mannheim-Seckenheim erfolgte durch Sprengung. Der Rückbau fand so statt, dass die neben der alten Brücke erstellte neue Brücke nicht geschädigt wurde. Vor allem aber konnten die unter der Brücke und parallel zur Fahrbahnachse verlaufenden Hochdruckgasleitungen DN 300 und DN 400 so geschützt werden, dass keine Schäden entstanden.

Im vorliegenden Beitrag werden Prognoseansätze der zu erwartenden Schwinggeschwindigkeiten mit den tatsächlich aufgetretenen Erschütterungen verglichen und Schlussfolgerungen für einen verbesserten Prognoseansatz und eine angepasste Fallbettauslegung getroffen.

1 Einleitung

Der Abbruch der alten Neckarbrücke der BAB A6 westlich von Mannheim-Seckenheim wurde so geplant, daß der Rückbau durch Sprengung erfolgen sollte. Unterhalb der Brücke befinden sich Hochdruckgasleitungen der MVV Energie AG. Während der Abbruchplanung wurde daher verstärkt Augenmerk auf den Schutz der Gasleitungen gelegt. Bei der Festlegung des Schutzzieles gingen sowohl die Anhaltswerte der DIN 4150 Teil 3 als auch die Vorgaben der DIN EN 1594 mit ein. Für den speziellen Fall Neckarbrücke konnten in Zusammenarbeit mit dem TÜV und der MVV Energie AG Grenzwerte für die zulässigen Schwinggeschwindigkeiten festgelegt werden.

2 Zulässige Erschütterungsanhaltswerte für Hochdruckgasleitungen

Vorgaben der DIN 4150 Teil 3 Abs. 5.3; Erschütterungen bei erdverlegten Leitungen

Nach DIN 4150 Teil 3 wird für kurzzeitige Erschütterungen erdverlegter Rohrleitungen als geschweißte Stahleitungen ein Anhaltswert von $v_i = 100$ mm/s in Tabelle 2 angegeben. Die Leitungen müssen nach dem heutigen Stand der Technik hergestellt und verlegt sein. Gegenüber den aus zulässigen Spannungen über einen Krümmungs- oder Dehnungsansatz ermittelten Schwinggeschwindigkeiten besteht mit dem vorgenannten Wert gegebenenfalls eine zweifache

Sicherheit (vgl. DIN EN 1594 Ausgabe September 2000 "Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar").

Vorgaben der DIN EN 1594 F.3.2.; Bodenbewegungen

Die DIN EN 1594 für Hochdruckgasleitungen sieht im Anhang F.3.2 eine Ermittlung der Spannungen und Dehnungen mit entsprechenden Modellen für das Gesamtsystem Leitung/Boden vor. Für die Analyse des Gesamtsystems Leitung/Boden ist ein Modell erforderlich, in dem das nicht-lineare Verhalten des Bodens, große Bodenbewegungen und das unelastische Verhalten der Leitung berücksichtigt werden.

Die zulässige Spannung beträgt:

$$0,72 R_{t,0,5}(\theta) = 0,72 R_{t,0,5}$$

wobei $R_{t,0,5}$ die Dehngrenze bei 0,5% der gesamten Dehnung (spezifizierter Mindestwert) bei Umgebungstemperatur in N/mm² ist.

Vorgaben der TÜVIS – Prüfgrundlagen; Verordnung über Gashochdruckleitungen

Nach §6 der TÜVIS – Prüfgrundlagen darf die Gashochdruckleitung erst in Betrieb genommen werden, wenn ein Sachverständiger auf Grund einer Prüfung hinsichtlich der Dichtheit und Festigkeit und des Vorhandenseins der notwendigen Sicherheitseinrichtungen festgestellt hat, dass gegen die Inbetriebnahme der Gashochdruckleitung keine sicherheitstechnischen Bedenken bestehen.

Für das vorliegende Problem wurden diese Vorgaben spezifiziert und in Zusammenarbeit mit dem TÜV und der MVV Energie AG wurde festgelegt, daß für drucklose Leitungen ein Grenzwert $v = 50$ mm/s (Sicherheitsfaktor 2 im Vergleich zur DIN 4150 Teil 3) einzuhalten ist. Für betriebene Gasleitungen wurde eine Unterscheidung zwischen alten Gasleitungen und neuen Gasleitungen vorgenommen. Der Grenzwert für neue betriebene Gasleitungen betrug 30 mm/s. Für alte Gasleitungen wurde lediglich ein Wert von 20 mm/s zugelassen. Bei Überschreitung dieser Grenzwerte musste eine Überprüfung der aufgetretenen Spannungen erfolgen, die den Nachweis erbrachte, daß die zulässige Spannung eingehalten wurde.

3 Probleme der Erschütterungsprognose

Abbrucharbeiten (z.B. durch Sprengung) erzeugen durch die Aufprallvorgänge kompakter Massen auf den Baugrund Erschütterungen, die sich im Boden ausbreiten.

Die Größe der Aufprallerschütterungen und ihr Frequenzgehalt hängen ab von:

- Fallgewicht G
- Fallhöhe h
- Ausbildung der Aufprallfläche
- Bodenart und -steifigkeit
- Bodenschichtung
- Oberflächenrelief zwischen Aufprall- und Messstelle

Die Größe der Aufprallerschütterungen ist näherungsweise der Quadratwurzel der Fallenergie E proportional:

$$v_{\max} = k \left(\frac{E}{E_0} \right)^{0,5} \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-m}$$

Dabei ist:

v_{\max} der Maximalwert der Schwinggeschwindigkeit im Freifeld, in mm/s;

E die Fallenergie ($E = Gh$), in kJ;

$E_0 = 1$ kJ (Bezugsgröße);

R die Entfernung von der Fallstelle, in m;

$R_0 = 1$ m (Bezugsgröße);

k ein Beiwert, in mm/s, empirisch ermittelt;

m eine Kennzahl, empirisch ermittelt

Dieser Ansatz aus DIN 4150 Teil 1 ist für einen Abstand $R = 0$ nicht sinnvoll und muss daher für das Nahfeld extrapoliert werden.

Die Erschütterung durch die Abbruchsprengung selbst ist gesondert zu untersuchen, sie ist in der Regel jedoch kleiner als die aus den fallenden Massen.

4 Beweissicherndes Messprogramm

Die abzubrechende Brücke bestand aus 2 Richtungsfahrbahnen mit je 6 Feldern mit Dreigelenkbögen. Die Bögen 2 bis 6 wurden durch Sprengung zum Einsturz gebracht. Bogen 1 wurde systematisch rückgebaut. Unter Bogen 4 verlief in ca. 1,50 m Tiefe die Gasleitung mit einem Durchmesser von 400 mm (DN 400). Unter Bogen 6 befand sich ebenfalls in ca. 1,50 m Tiefe die Gasleitung mit dem Durchmesser 300 mm (DN 300).

Bogen 5 wurde auf beiden Seiten gesprengt. Es sollte eine Kippbewegung eingeleitet werden, um ein Aufschlagen der Massen auf der Westseite zu erreichen. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da es für die Sprengung der östlichen Fahrbahn direkt neben der neuen Brücke vorgesehen war.

Die Gasleitung DN400 verlief parallel zur Fahrbahn 40 m östlich und knickte im Bereich des 4. Bogens des Pfeilers 50 nach Westen ab. Sie querte ca. 5 m nördlich des Pfeilers in 1,5 m Tiefe den 4. Bogen. Die Wahl der Messpositionen erfolgte so, daß sowohl die Gasleitungen als auch die neue Brücke bei den Erschütterungsmessungen überwacht werden konnten.

Die Messpunkte 1, 2, 3 und 4 befanden sich direkt auf den Gasleitungen. Hierfür wurden die Sensoren wasserdicht verpackt und im Zuge des Fallbettaufbaues auf den Gasleitungen eingegraben. Die Messpositionen wurden mit einem Abstand von 10 Metern unter den Fahrbahnen platziert. Es war somit möglich sowohl die Erschütterungen der durch das Auftreffen der Massen verursachten Erschütterungen bei den beiden Sprengungen zu messen, als auch bei Überschreitung des vorgesehenen Grenzwertes einen Spannungsnachweis zu führen. Messpunkt 5 wurde zur Überwachung der parallel im Westen verlaufenden Gasleitung im Freifeld über der Leitung installiert. Die Messpunkte 6, 7 und 9 befanden sich jeweils in Feldmitte des Hohlkastenprofils der neuen Brücke. Die dort gemessenen Werte gaben Aufschluß über die Belastung des neuen Bauwerkes infolge der Sprengungen. Messpunkt 8 wurde am südlichen Auflager des Bogens 1 installiert, um die Sicherheit des im Zuge des Rückbaus durch Stahllaschen versteiften Auflagers zu überwachen. In Bild 1 ist die Anordnung der Messpositionen nicht maßstäblich dargestellt.

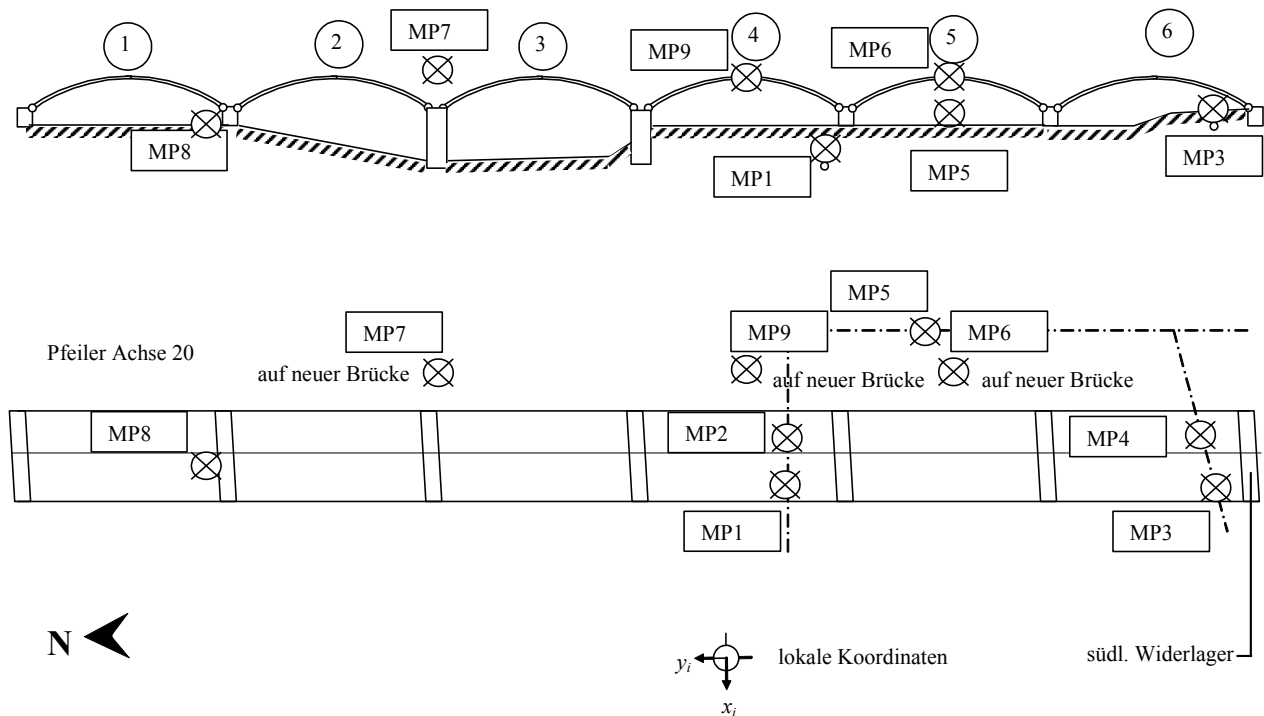


Bild 1. Darstellung der Brücke mit Messpunkten (nicht maßstäblich)

Beim 1. Sprengtermin am 29.02.2004 wurde der westliche Brückenbereich und beim 2. Sprengtermin am 14.03.2004 der östliche Brückenbereich sowie westliche Pfeiler der alten Neckarbrücke gesprengt. Bei der 3. Sprengung am 21.03.2004 wurden die restlichen Pfeiler und Fundamente gesprengt.

Für die Erschütterungsmessungen wurden an MP 1 bis MP 4 Schwingungsmessgeräte ZEB/SM-3C und an MP 8 ein Schwingungsmessgerät ZEB/SM3DO+ der Firma WASAGCHEMIE verwendet. An MP 5 und 6 wurde als Messgerät je ein Schwingungsmesser der Firma Kebe (nach DIN 45669 Klasse 1) vom Typ SMK3 sowie zur Aufzeichnung der Daten ein tragbarer PC der Firma Dolch verwendet, der mit entsprechender Hardware und der Software Meda_AD der Firma Wölfel Messsysteme für die Messwerterfassung ausgestattet ist. An MP 7 wurden mit dem Messcomputer der Firma GSP über das Messprogramm DasyLab die Erschütterungen aufgezeichnet.

Als Sensoren wurden auf das jeweilige Schwingungsmessgerät abgestimmte 3D-Geber (Geophone) für Bewegungen in horizontaler Richtung (x- und y-Richtung) und in vertikaler Richtung (z-Richtung) eingesetzt (Orientierung s. Bild 1). Mit den Sensoren wurden die Schwinggeschwindigkeiten in den drei beschriebenen Richtungen gemessen und bei Überschreitung eines einstellbaren Schwellwertes wurden die Erschütterungen mit den vollständigen Zeitverläufen für die weitergehende Auswertung auf einer Festplatte gespeichert.

Bei dem Messgerät an MP 8 wurde der Zeitverlauf online auf einen Papierstreifen ausgedruckt. Eine elektronische Abspeicherung ist bei diesem Gerät nicht möglich.

Die Sensoren wurden jeweils so aufgestellt, dass die x-Achse in Richtung der Hochdruckgasleitung, in Richtung Westen zeigte.

In Tabelle 1 sind die Messpositionen mit den entsprechenden Messgeräten zusammengestellt.

MP	Beschreibung	Messgerät
1	Gasleitung, Bogen 4, westl.	SM-3C 805
2	Gasleitung, Bogen 4, östl.	SM-3C 822
3	Gasleitung, Bogen 6, westl.	SM-3C 823
4	Gasleitung, Bogen 6, östl.	SM-3C 994
5	Freifeld in Höhe Bogen 5	Kebe 1
6	Hohlkasten in Höhe Bogen 5	Kebe 2
7	Hohlkasten Bogen über Neckar	Messcomputer

8	Pfeiler Achse 20	DO+
9	Hohlkasten in Höhe Bogen 4	Kebe 1

Tabelle 1. Zusammenstellung der Messpositionen

5 Messergebnisse

Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten der Erschütterungsüberwachungen während der 3 Sprengtermine sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

Messposition	1. Sprengung, 29.02.04			2. Sprengung, 14.03.04			3. Sprengung, 21.03.04		
	V _x [mm/s]	V _y [mm/s]	V _z [mm/s]	V _x [mm/s]	V _y [mm/s]	V _z [mm/s]	V _x [mm/s]	V _y [mm/s]	V _z [mm/s]
MP 1	26,34	66,72	83,62	6,77	16,97	10,56	7,63	10,73	13,89
MP 2	16,33	19,22	35,10	6,43	9,80	22,39	6,07	9,25	13,76
MP 3	3,60	19,45	31,68	8,25	9,76	9,11	2,00	7,34	7,09
MP 4	4,80	13,55	14,19	7,42	12,53	9,82	2,06	9,89	7,89
MP 5	19,80	4,70	19,60	16,50	11,70	15,50	-	-	-
MP 6	8,40	7,10	22,90	9,50	6,40	33,40	6,30	6,10	19,30
MP 7	4,35	1,76	11,33	4,35	4,22	13,26	-	-	-
MP 8	17,20	7,70	16,60	18,80	9,10	25,80	-	-	-
MP 9	-	-	-	-	-	-	14,60	5,60	43,60

Tabelle 2. Schwinggeschwindigkeiten an den Sprengterminen

Die Schwinggeschwindigkeiten an den 3 Sprengterminen liegen bis auf einen Wert alle unter dem vereinbarten Anhaltswert von 50 mm/s.

Bei der 1. Sprengung am 29.02.2004 wurde an MP 1, westl. Messpunkt auf der Hochdruckgasleitung unter Bogen 6, mit 83,6 mm/s der Anhaltswert von 50 mm/s überschritten.

Um einen Spannungsnachweis an der Hochdruckgasleitung durchzuführen, wie durch den TÜV gefordert, wurde aus den Geschwindigkeits-Zeitverläufen der Messpositionen 1 und 2 die Verschiebungs-Zeitverläufe über Integration gebildet. In Bild 2 sind die Verschiebungs-Zeitverläufe dargestellt.

Die Verschiebungszeitverläufe für die Messpunkte 1 und 2 zeigen, dass die Abwärtsbewegung am Messpunkt 1 westliche Fahrbahn unter der fallenden Masse der Bewegung des Messpunktes 2 östliche Fahrbahn etwas vorausläuft. Erst nachdem der Stoßvorgang vorbei ist, bei ca. 1,5 sek (1.500 bezogen auf die Abszisse) werden die Bewegungen synchron und die Rohrleitung schwingt aus. Für die Berechnung der Spannung wurde der Spitzenwert der Durchbiegung herangezogen. Da bei dem ca. 8 m entfernten Messpunkt 2 zu dieser Zeit keine Durchbiegung auftrat, wird für eine konservative

Abschätzung die Spannweite eines äquivalenten gleichseitig eingespannten Stabes zu 10 m angenommen (und nicht 2 mal 8 m gleich 16 m).

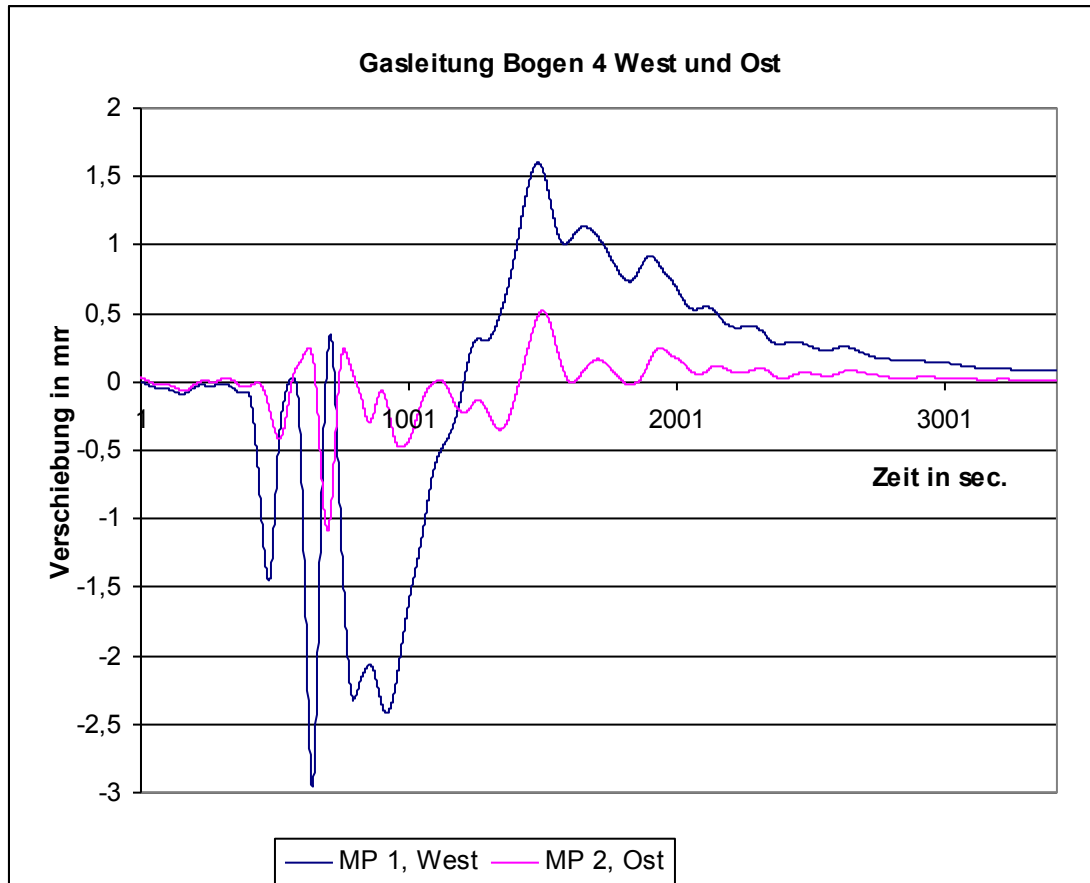
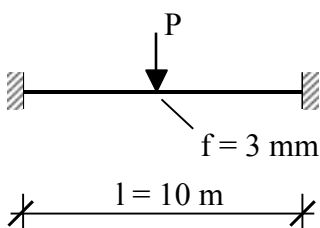


Bild 2. Verschiebungs-Zeitverläufe, MP 1 und MP 2

Spannungsnachweis



$$\sigma = \frac{12 \cdot E \cdot D}{l^2} \cdot f \quad \text{mit } E = 210.000 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma = 30 \text{ N/mm}^2 \quad D = 0,40 \text{ m}$$

Es ergibt sich aus der Stoßbelastung der fallenden Massen eine Spannung von $\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$. Die zulässige Spannung beträgt dagegen 314 N/mm^2 .

Bei den Geschwindigkeitszeitverläufen der 1. Sprengung am 29.02.2004 ist zu erkennen (Bild 3 bis 9), dass die Sprengung selbst zwar zu deutlichen Erschütterungen führt, die etwa eine Sekunde später folgenden Erschütterungen, die durch die auf den Boden (die Fallbette) fallenden Massen entstehen, sind aber sehr viel stärker und für die Bewertung maßgebend.

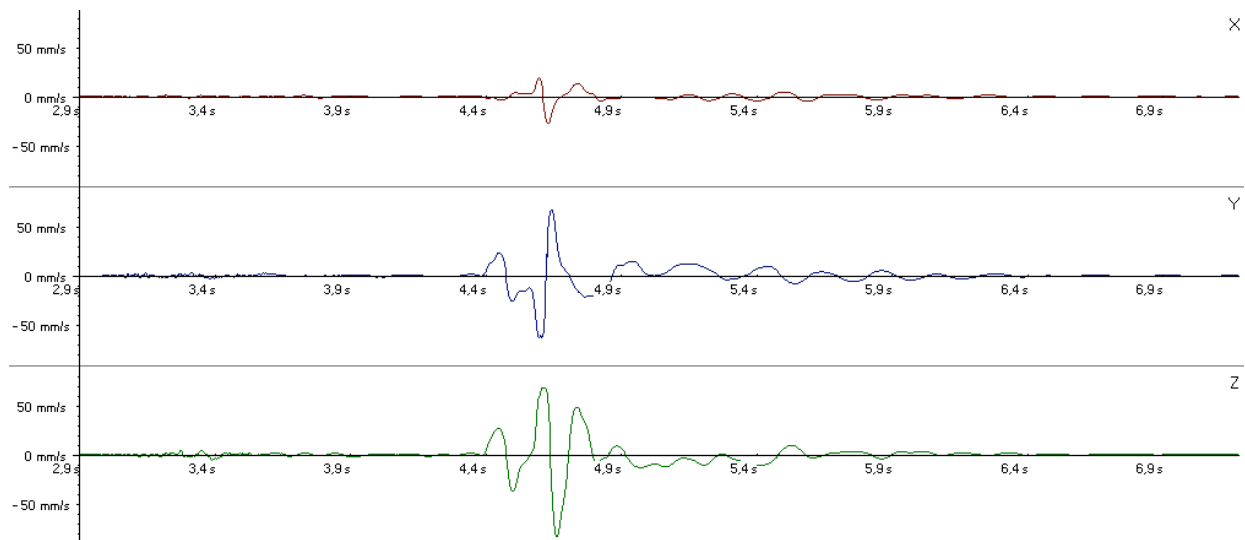


Bild 3. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 1, Gasleitung, Bogen 4, westl., 29.02.2004

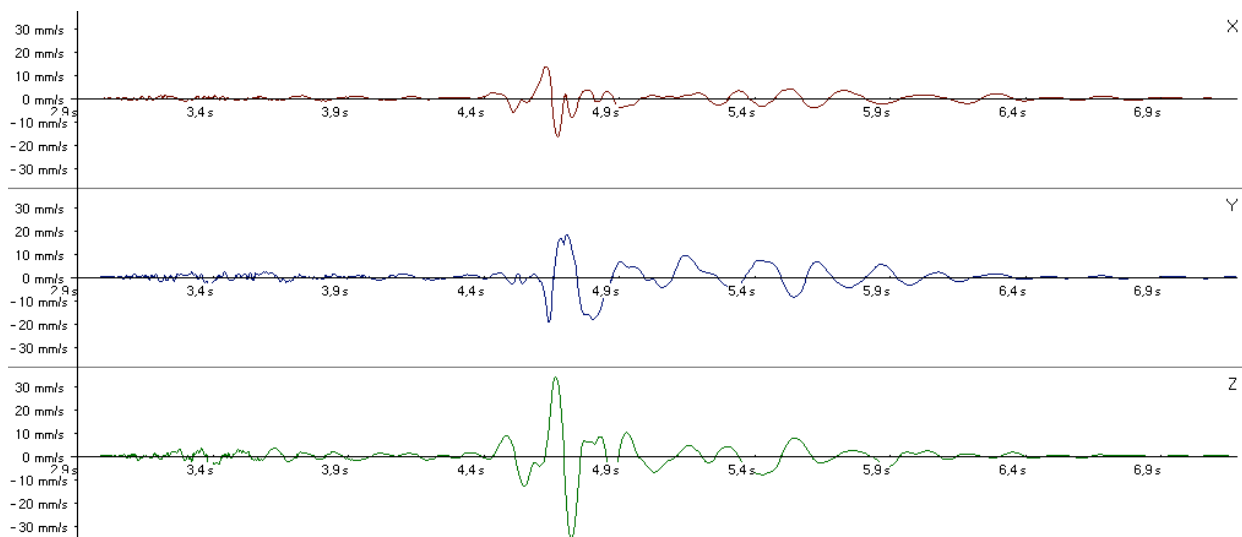


Bild 4. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 2, Gasleitung, Bogen 4, östl., 29.02.2004

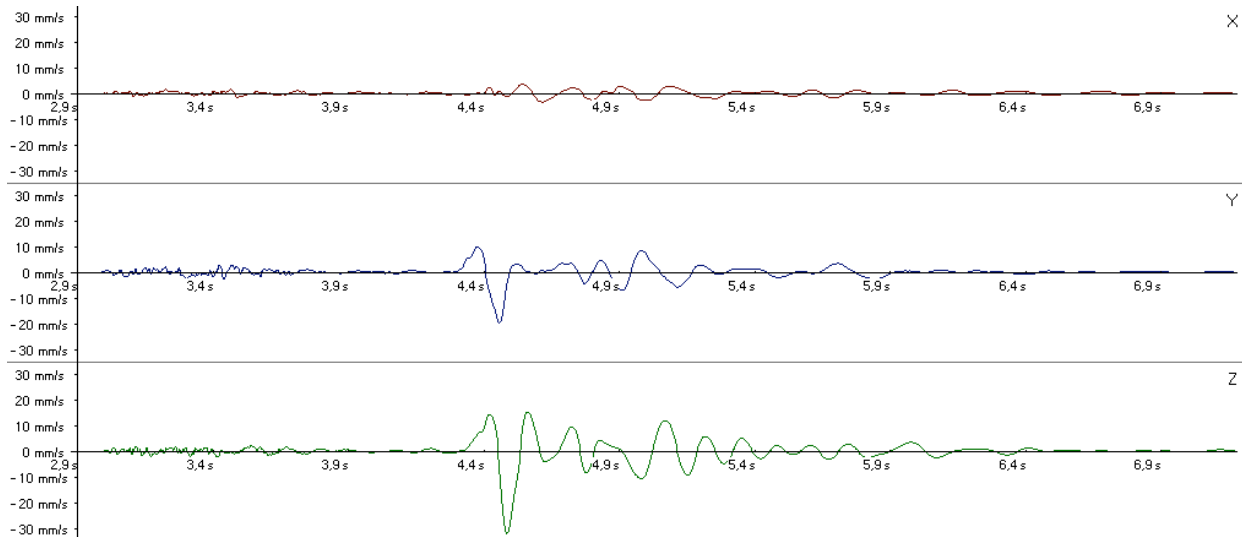


Bild 5. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 3, Gasleitung, Bogen 6, westl., 29.02.2004

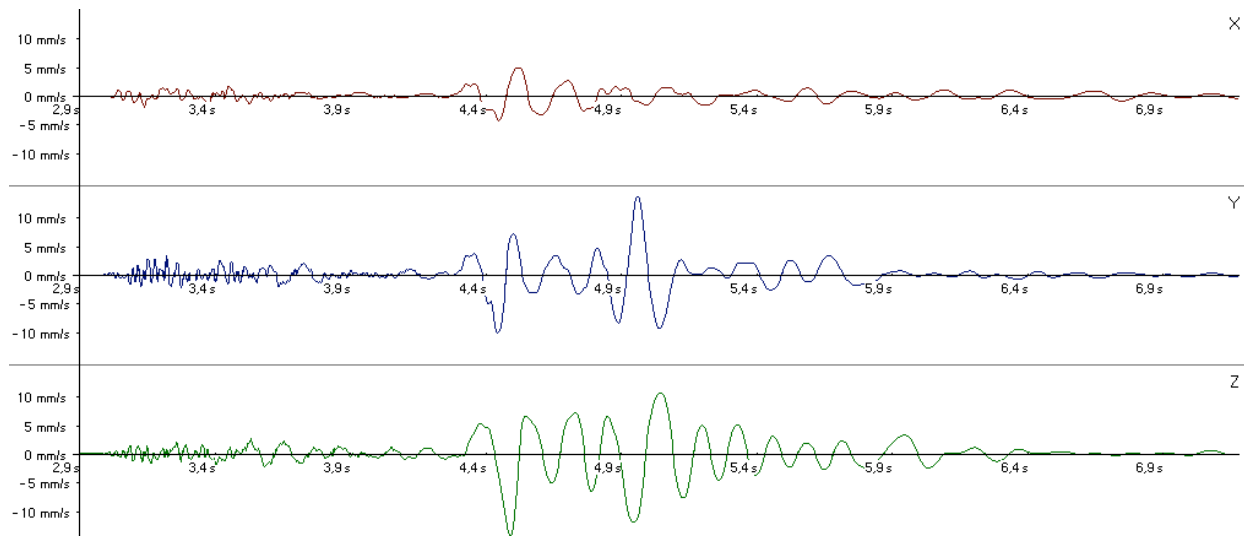


Bild 6. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 4, Gasleitung, Bogen 6, östl., 29.02.2004

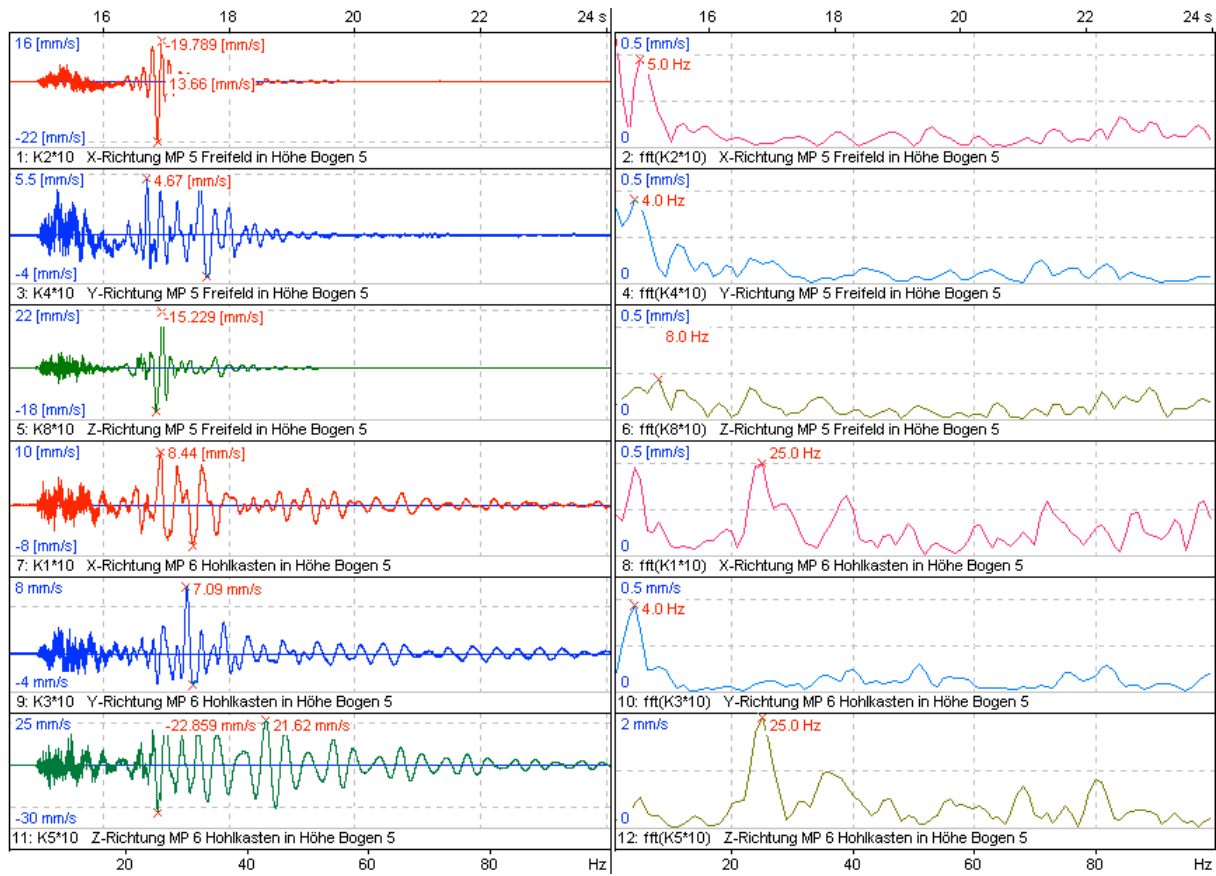


Bild 7. Zeitverlauf und Frequenzanalyse der Schwinggeschwindigkeiten an MP 5 und MP 6, Freifeld und Hohlkasten in Höhe Bogen 5, 29.02.2004

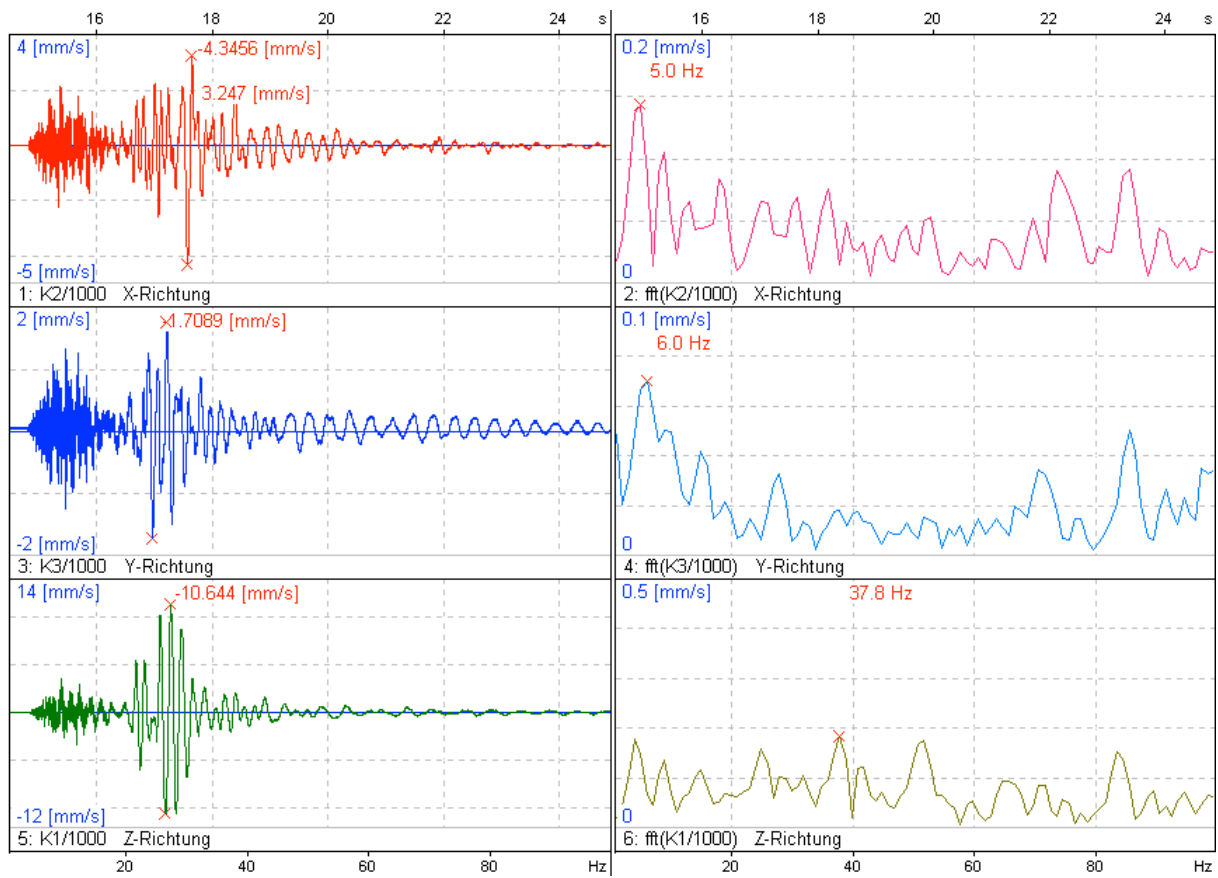


Bild 8: Zeitverlauf und Frequenzanalyse der Schwinggeschwindigkeiten an MP 7, Hohlkasten Bogen über Neckar, 29.02.2004

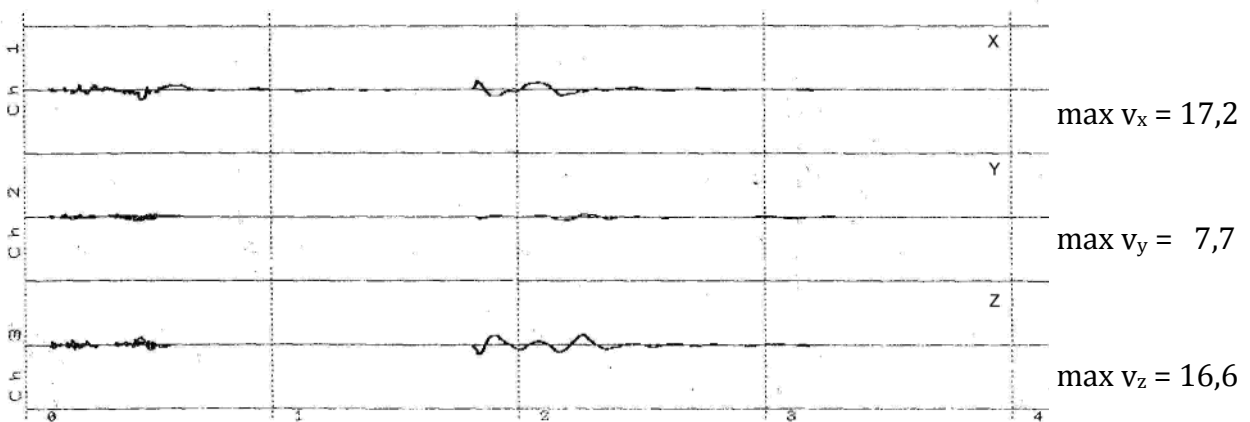


Bild 9. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 8, Pfeiler Achse 20, 29.02.2004

Beim 2. Sprengtermin am 14.03.2004 zeigt sich anhand der Geschwindigkeitszeitverläufe (Bild 10 bis 15), dass die Erschütterungen infolge der Detonation teilweise in gleicher Größenordnung auftreten wie die Erschütterungen infolge der auf den Boden (die Fallbette) fallenden Massen.

Bei der Beurteilung der Messwerte muss die zeitgleiche Sprengung der westlichen Pfeiler berücksichtigt werden.

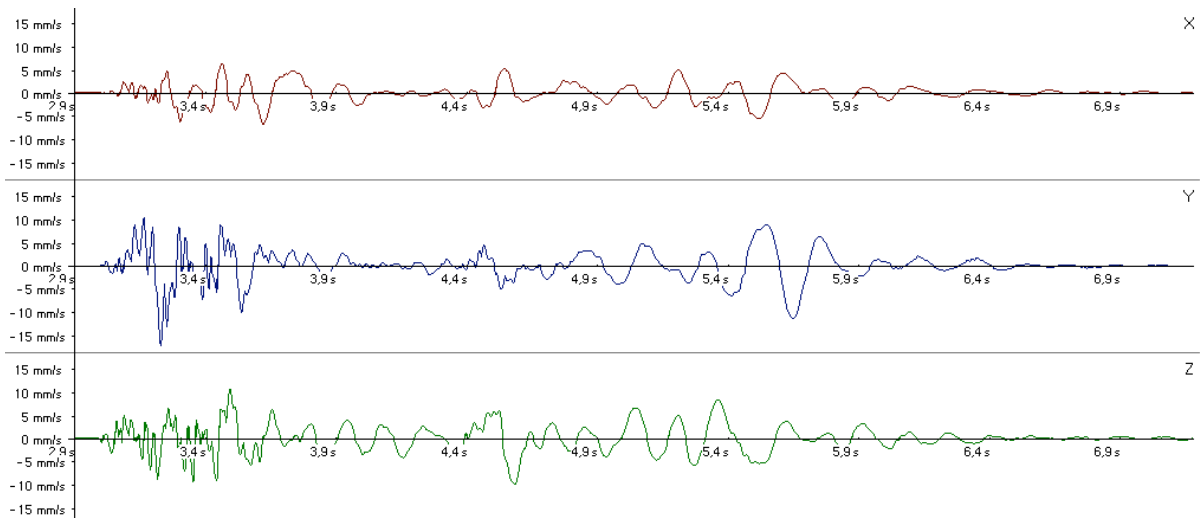


Bild 10. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 1, Gasleitung,
Bogen 4, westl., 14.03.2004

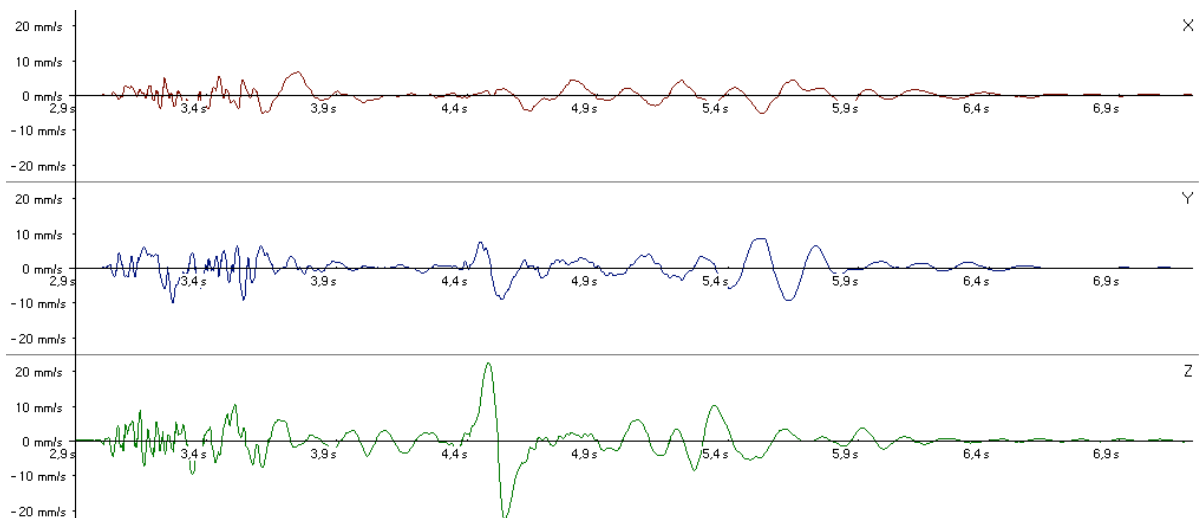


Bild 11. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 2,
Gasleitung, Bogen 4, östl., 14.03.2004

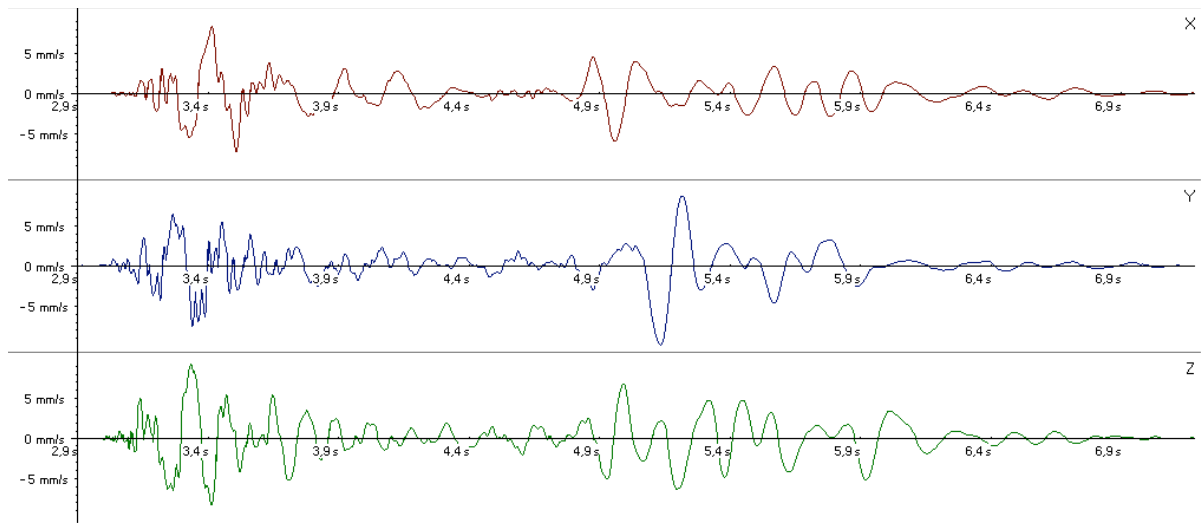


Bild 12. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 3,
Gasleitung, Bogen 6, westl., 14.03.2004

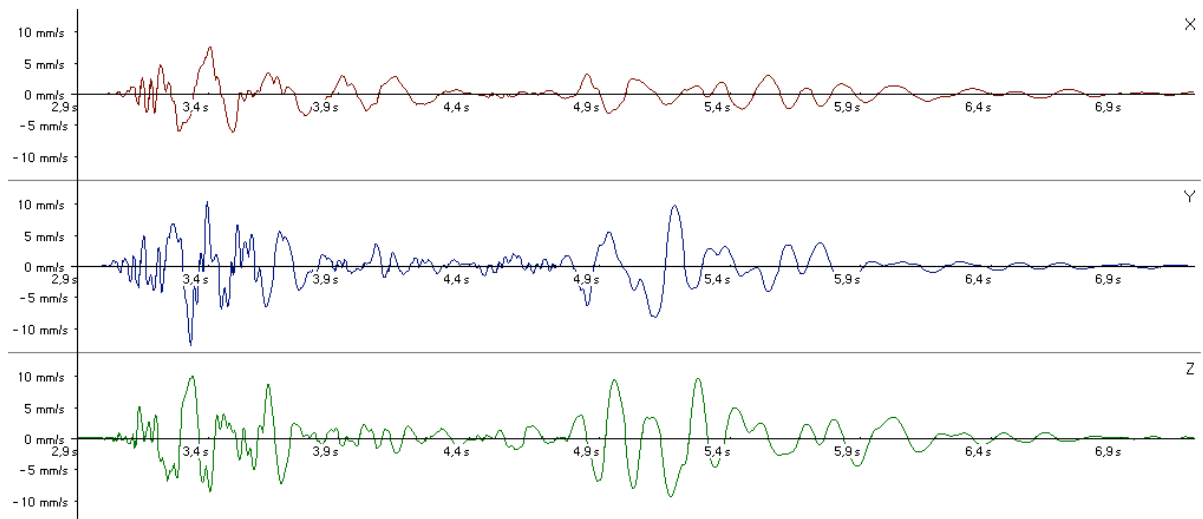


Bild 13. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 4,
Gasleitung, Bogen 6, östl., 14.03.2004

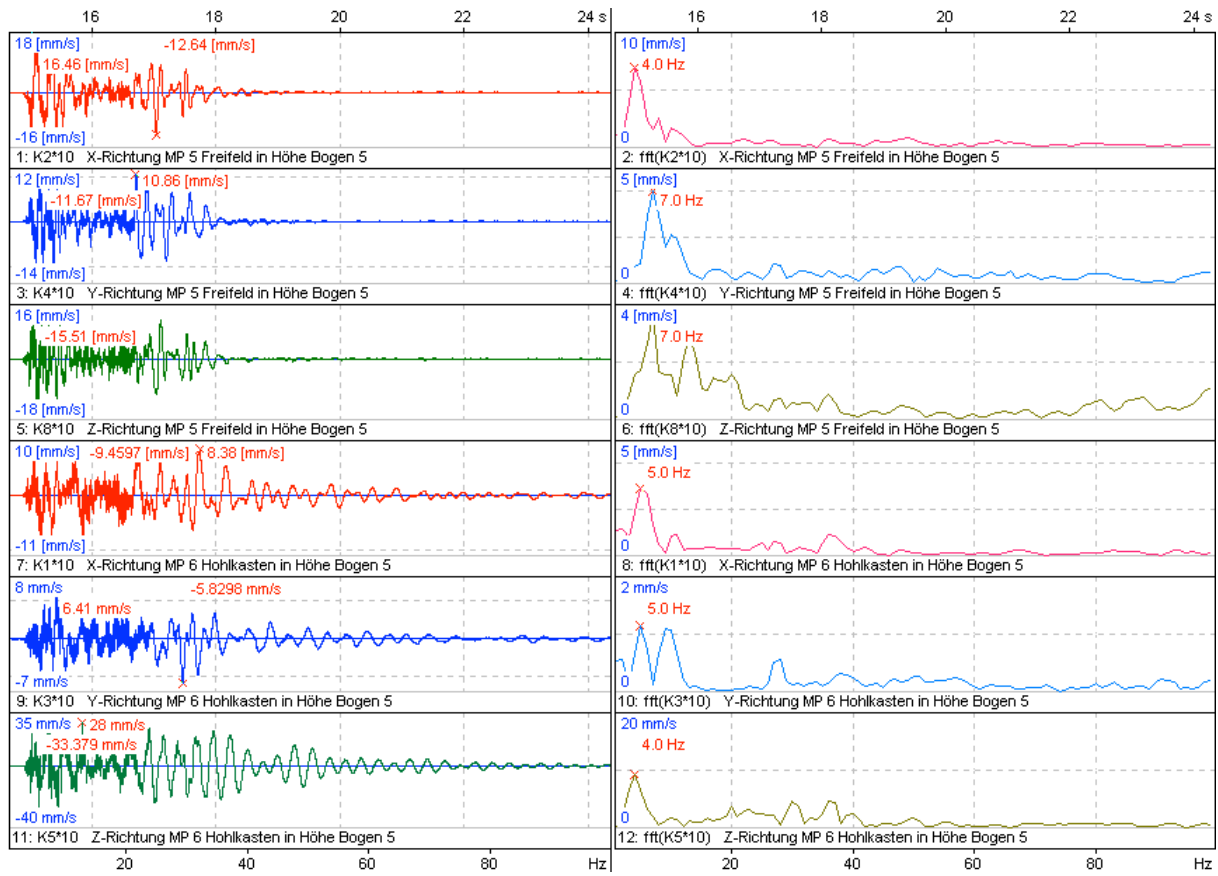


Bild 14. Zeitverlauf und Frequenzanalyse der Schwinggeschwindigkeiten an MP 5 und MP 6, Freifeld und Hohlkasten in Höhe Bogen 5

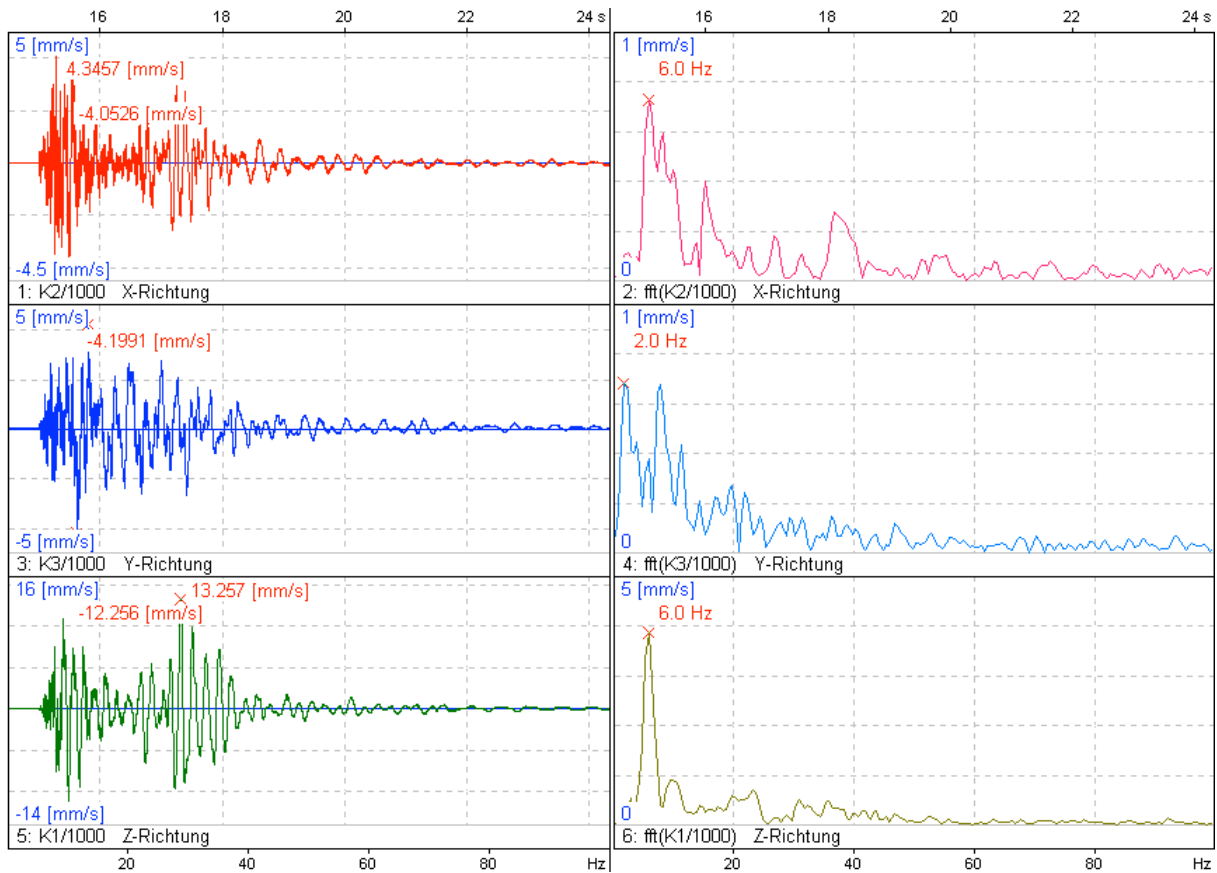


Bild 15: Zeitverlauf und Frequenzanalyse der Schwinggeschwindigkeiten an MP 7, Hohlkasten Bogen über Neckar, 14.03.2004

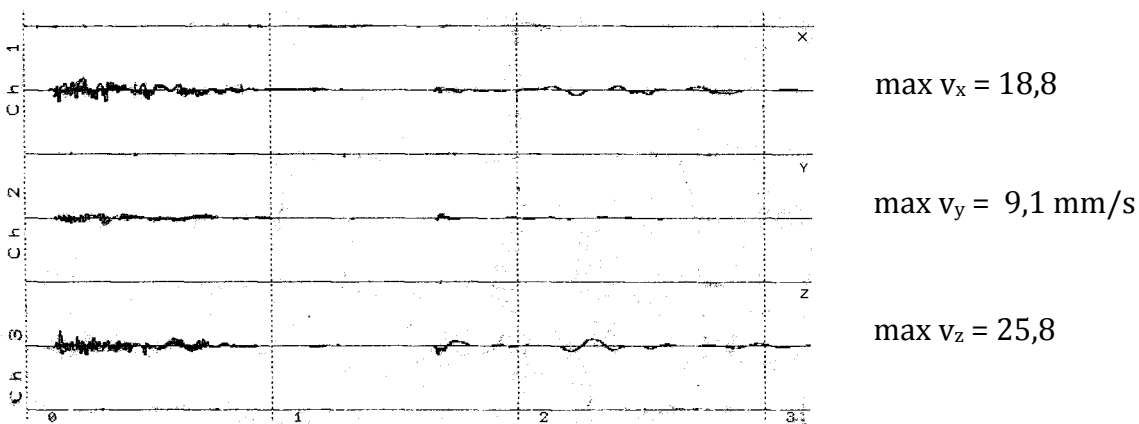


Bild 16. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 8, Pfeiler Achse 20, 14.03.2004

Sprengtechnischer Abbruch
Alte Neckarbrücke der BAB A6 bei Mannheim-Seckenheim

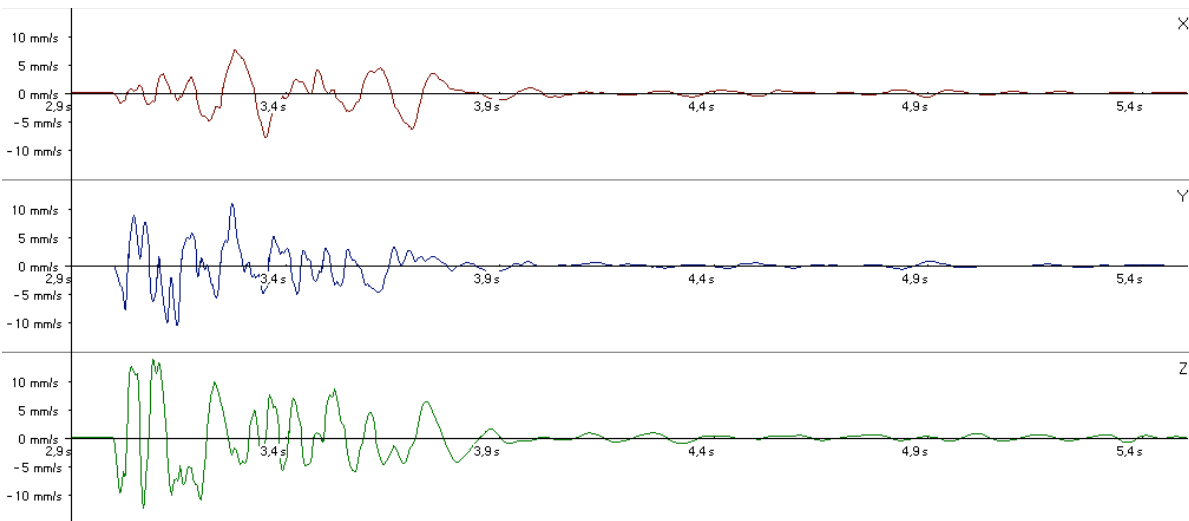


Bild 17. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 1,
Gasleitung, Bogen 4, westl., 21.03.2004

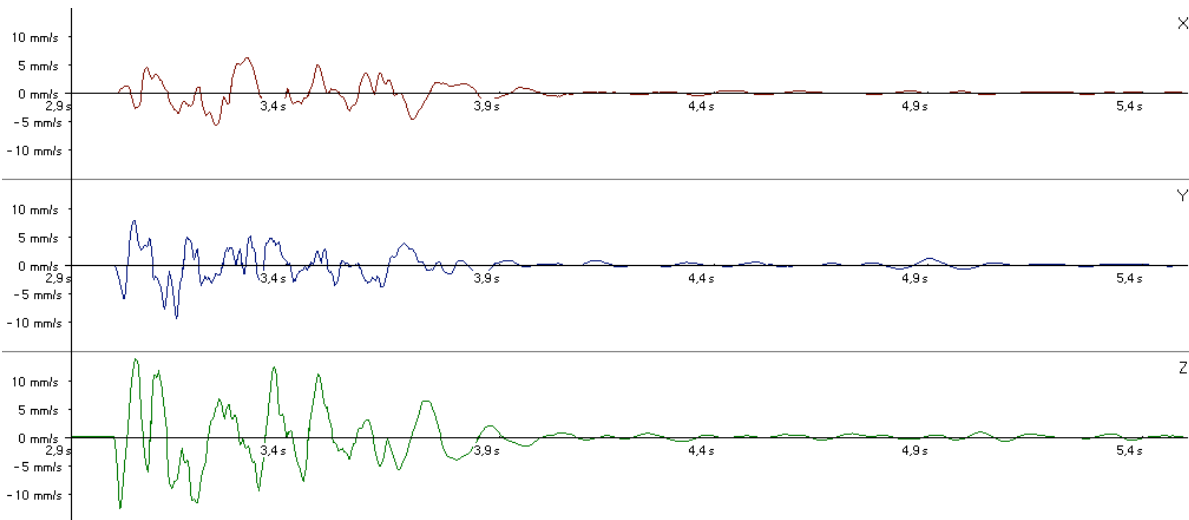


Bild 18: Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 2,
Gasleitung, Bogen 4, östl., 21.03.2004

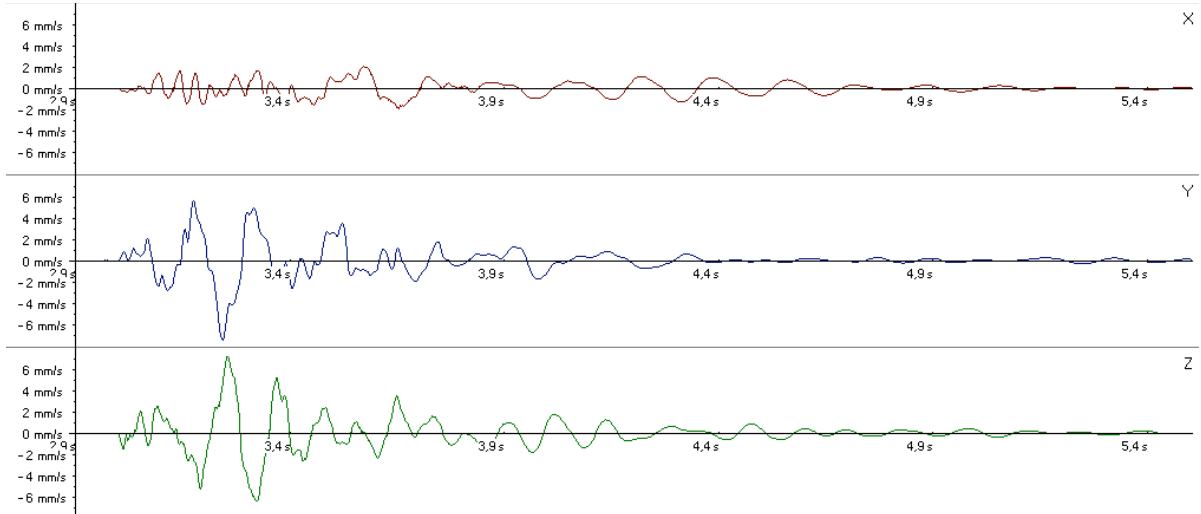


Bild 19. Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 3,
Gasleitung, Bogen 6, westl., 21.03.2004

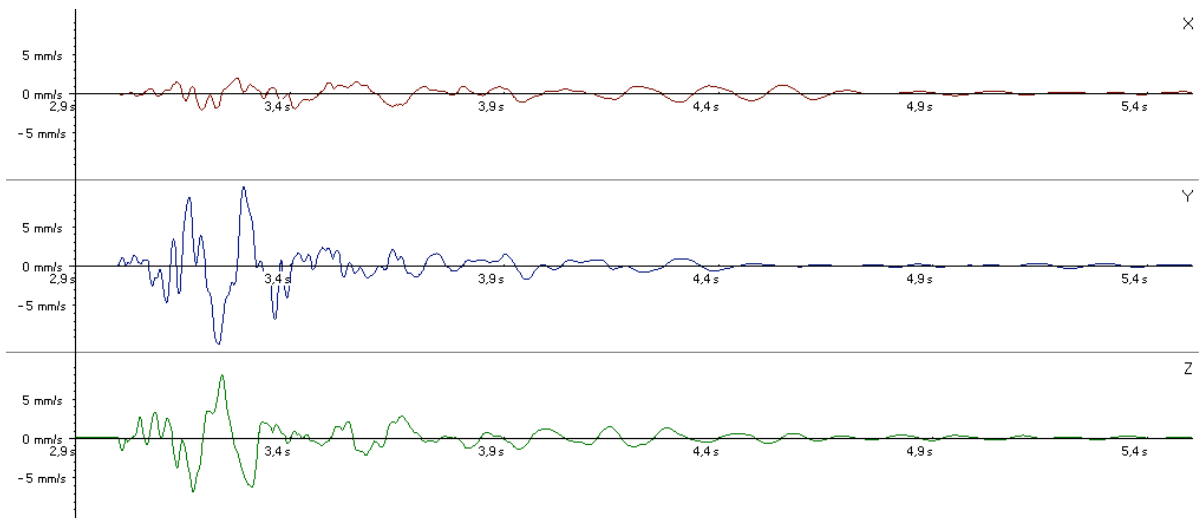


Bild 20: Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeiten an MP 4,
Gasleitung, Bogen 6, östl., 21.03.2004

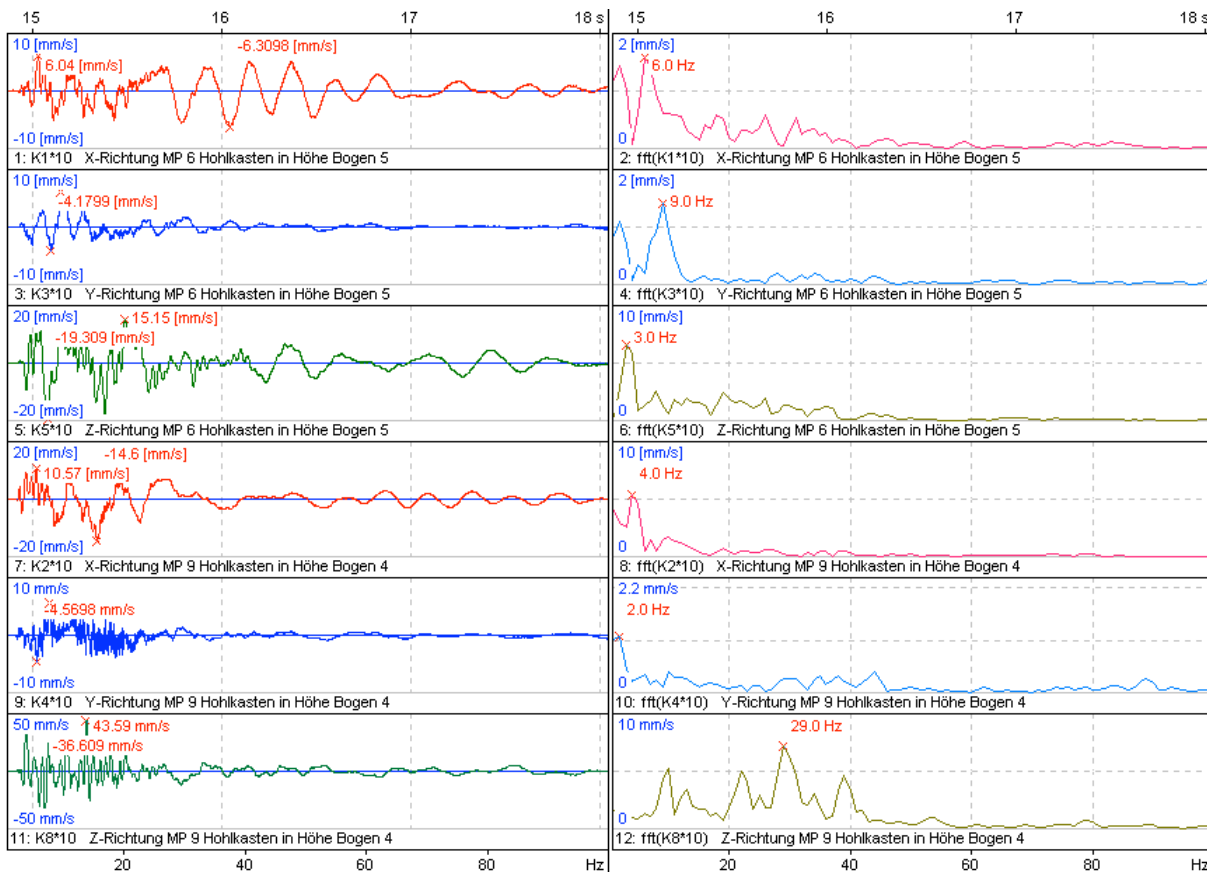


Bild 21: Zeitverlauf und Frequenzanalyse der Schwinggeschwindigkeiten an MP 6 und MP 9, Hohlkasten in Höhe Bogen 5 und Bogen 4, 21.03.2004

Bei den Pfeiler- und Fundamentsprengungen, 3. Sprengtermin am 21.03.2004, zeichnen sich in den Geschwindigkeitszeitverläufen (Bild 16 bis 21) die Erschütterungen infolge der Detonation der Sprengung noch deutlicher ab.