

# Wellenausbreitung bei Rammarbeiten für die Dreirosenbrücke in Basel

*Peter Billeter*

GRUNER AG, CH-4020 Basel

## *1. Einleitung*

Die Nordtangente der Nationalstrasse N2 in Basel quert den Rhein bei der heute bestehenden Dreirosenbrücke. Dazu wird die Brücke gänzlich neu gebaut. Die Rammarbeiten für die Umspundung zum Bau der neuen Brückenpfeiler geschehen in unmittelbarer Nähe bestehender Bauten (Werkleitungsdüker TBA unterwasserseitig und ARA-Sammelkanal oberwasserseitig der Brücke). Anlässlich von Rammversuchen im März 1998 konnte festgestellt werden, dass die Rammarbeiten primär für den Leitungsdüker ein gewisses Schadensrisiko darstellen können, wenn der Abstand Rammort - Düker weniger als ca. 12 m beträgt. Es wurde deshalb eine Überwachung der rammbedingten Erschütterungen während der Gesamtdauer der Rammarbeiten vorgesehen. Nebst der Messung der Schwinggeschwindigkeiten im TBA-Düker sollten zudem weitere Erschütterungsauswirkungen erfasst oder abgeschätzt werden, damit bei allfälligen Schadensfälle eine Beurteilungsgrundlage zur Klärung von Haftungsfragen vorhanden ist. Folgende Aufgaben waren im Rahmen der Untersuchungen zu bewältigen:

- Messung der dreidimensionalen (triaxialen) Erschütterungsgeschwindigkeiten im TBA-Leitungsdüker auf der Höhe der beiden Brückenpfeiler und Beurteilung der Beanspruchung.
- Alarmierung der Baustelle bei Überschreitung von Richt- bzw. Grenzwerten.
- Extrapolation der aufgetretenen Erschütterungsgeschwindigkeiten im oberwasserseitigen ARA-Düker der Gewässerschutzamts Basel-Stadt anhand der gemessenen und Beurteilung der Beanspruchung.

Die grossräumigen Pfeilerumspundungen (Abb. 1) besteht aus Doppelbohlen des Typs Larssen 25, die bis auf eine Kote von ca. 233 m ü.M. in die Flusssohle gerammt wurden. Die Flusssohle des Rheins ist in diesem Bereich wie folgt aufgebaut (Abb. 2):

- Oberflächennahe: Deck- und Unterschicht aus Lockergestein / Kies.
- Ab 4 - 7 m unter OK Flusssohle: Separienton ("Blauer Letten").

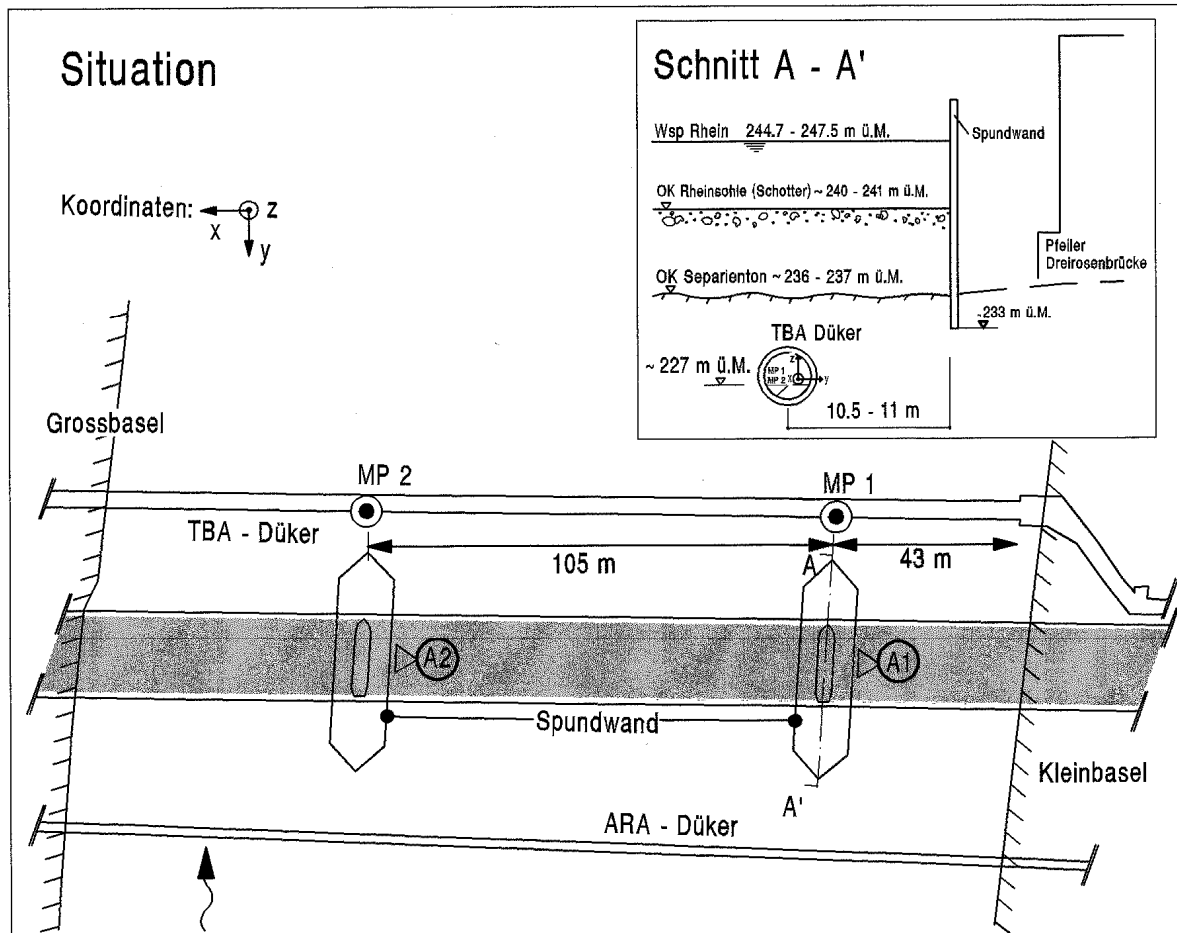
Zum Durchdringen der Deckschicht wurde eine Hochfrequenz-Vibrationsramme ("Vibrieren") verwendet, das Einbinden der Bohlen in den blauen Letten (Einbindtiefe > ca. 3.5 m) geschah mit einem Hydrohammer ("Rammen").

## *2. Messkonzept und Alarmierung*

Die gewählten Messorte und die Art der Messung sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die Messpunkte und die Orientierung der Messrichtungen sind zudem in der Situation und im Schnitt in der Abbildungen 1 eingezeichnet.

**Tab. 1:** Messorte und -größen

Name	Ort	Messart
MP1,	Sohle Leitungsdüker TBA, Höhe	Messung triaxialer Erschütterungsgeschwindigkeiten
MP2	Pfeiler Kleinbasel und Grossbasel	(Einzelkomponenten $v_x$ , $v_y$ , $v_z$ und Resultierende $v_R$ ).

**Abb. 1:** Situation und Schnitt A-A', MP1, MP2 = Messpunkte; A1, A2 = Alarmsignale

Zur Messung wurde ein integrierter Motion Recorder Syscom MR2002 eingesetzt (Kombigerät mit Verstärker, Filter, A/D-Wandler und Speichereinheit). Die Samplefrequenz  $f_s$  betrug 400 Hz und die Amplitudenauflösung des 16 Bit Wandlers lag bei einem Full Scale Maximum von 100 mm/s bei ca. 0.002 mm/s. Die Daten konnten über eine RS232 Schnittstelle von den Aufnahmegeräten auf einen Computer überspielt werden. Zur Steuerung der Geräte sowie zur Auswertung der Daten wurden die Software-Pakete des Herstellers verwendet (Syscom-Ziegler: COM2002 und VIEW2002). Die Frequenzanalyse geschah mittels der Fourier-Transformation, wobei zur Verarbeitung der transienten Signale der einzelnen Rammschläge keine Fensterfunktionen verwendet wurden. Weitergehende Auswertungen wurden mit MS EXCEL und selbstentwickelten Datenverarbeitungsprogrammen durchgeführt.

In unmittelbarer Nähe der beiden Brückenpfeiler wurde an der Tragkonstruktion der bestehenden Brücke jeweils ein optischer und ein akustischer Alarmgeber installiert (je ein Blinklicht und eine Sirene, siehe Abb. 1). Die Alarmgeber waren mit den Messgeräten im Leitungsdüker verkabelt und

wurden bei Grenzwertüberschreitungen aktiviert. Die sogenannten Alarmwerte wurden anhand der in Abschnitt 3 ermittelten Grenzwerte festgelegt und konnten direkt an den Messgeräten eingestellt werden.

### ***3. Zulässige Erschütterungen: Richt- und Grenzwerte***

Rammarbeiten erzeugen im Erdreich elastische Wellen von unterschiedlichem Wellentyp (Kompressions-, Scher- und Rayleigh-Wellen). Dominierende Einflussgrösse der Wellenausbreitung ist der Abstand zwischen dem Ort der Wellenerzeugung (Rammort) und dem Ort der Wellenwirkung (z.B. TBA-Düker). Die Wellenausbreitung ist des weiteren eine Funktion des Wellentyps, der Rammenergie und der Rammtiefe (Einbindtiefe). Zudem spielen die Bodeneigenschaften eine wichtige Rolle. Werden die Reaktionen von Bauwerken untersucht, die sich im Boden befinden oder darin fundiert sind, so ist die Wellenwirkung auch von den Eigenschaften der Trennschicht zwischen Boden und Bauwerk sowie vom Resonanzverhalten des Bauwerks abhängig.

Anhand von punktuellen, nicht korrelierten Messungen der Schwinggeschwindigkeiten an beliebigen Orten im Feld von Festkörperwellen lassen sich nur schwerlich näher Aussagen über die Physik der Wellenausbreitung und die Eigenschaften der Ausbreitungsmedien ableiten. Dies war aber auch nicht das Ziel der Untersuchung. Näher untersucht und beurteilt werden einzig die Maxima der durch die Wellenausbreitung verursachten Schwingamplituden bei betroffenen Bauwerken unter Berücksichtigung der dominanten Frequenzbereiche. Hinsichtlich der Beurteilung der Bauwerksbeanspruchung ist dieser Untersuchungsrahmen längst genügend. Er erlaubt teilweise sogar etwas weitergehende Aussagen zur Wellenausbreitung, was in Abschnitt 4 bei der Schilderung der Resultate näher ausgeführt wird.

Zur summarischen Beurteilung der dynamischen Beanspruchung von Bauwerken kann die Norm SN 640 312a "Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke" herangezogen werden. Sie enthält Richtwerte, bei deren Einhaltung in der Regel an Bauwerken keine Schäden auftreten. Als massgebende Grösse zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkung gilt der Maximalwert des Geschwindigkeitsvektors  $v_R$  [mm/s] unter Berücksichtigung der dominanten Schwingfrequenz. Die Richtwerte sind in Abhängigkeit der Häufigkeit der Ereignisse und der Erschütterungsempfindlichkeit der Bauwerke (4 Empfindlichkeitsklassen, 3 Häufigkeitsklassen) angegeben.

Der primär gefährdete Leitungsdüker TBA wie auch der ARA-Düker werden den Empfindlichkeitsklassen 1 (sehr wenig empfindlich) oder 2 (wenig empfindlich) zugeordnet, je nach Festigkeit des anstehenden Untergrunds. Rammarbeiten liegen im allgemeinen in der Häufigkeitsklasse "häufig". Während den Rammversuchen wurde festgestellt, dass die dominante Frequenz der durch Rammschläge bedingten Vibrationen bei ca. 40 Hz liegt, die dominante Frequenz beim Einvibrieren der Bohlen ist identisch mit der Vibrationsfrequenz und beträgt ca. 30 Hz. Damit gelten die Richtwerte des mittleren Frequenzbereichs und die zulässigen Maximalwerte des Geschwindigkeitsvektors liegen bei  $v_R = 16$  bis  $24$  mm/s. Bei vereinzelt Überschreitungen der Richtwerte von bis zu 30 % vergrössert sich die Schadenswahrscheinlichkeit nur geringfügig.

Unabhängig von Normen und Richtlinien kann die zulässige Erschütterungsgeschwindigkeit über die Spannungsänderung infolge der Ausbreitung von elastischen Wellen abgeschätzt werden. Aus der Wellengleichung lässt sich folgender Zusammenhang herleiten:

$$\Delta\sigma = \Delta v_R \cdot c \cdot \rho \quad (1)$$

$\Delta\sigma$  = erschütterungsbedingte Spannungsänderung im Medium (Erdreich),  $\Delta v_R$  = Änderung der Partikelgeschwindigkeit (z.B. Geschwindigkeitsamplitude),  $c$  = Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (je nach Wellenart),  $\rho$  = Dichte des Ausbreitungsmedium. Bei Erschütterungsgeschwindigkeiten (Schwankungen der Partikelgeschwindigkeiten) von 20 mm/s an der Betonoberfläche betragen die Randspannungsschwankungen somit  $\Delta\sigma \approx 0.1$  bis  $0.2 \text{ N/mm}^2$ , je nach dem ob die Partikelbewegung über Scherung oder über Kompression erfolgt. Die Spannungsspitzen liegen damit auch in ungünstigsten Fällen (z.B. Resonanzphänomene im Tunnel) unter der Zug- und der Scherfestigkeit gewöhnlichen Betons.

Die Grenzwerte der zulässigen Erschütterungsgeschwindigkeiten wurden so vorgegeben, dass primär die Anforderungen der Norm SN 640'312a eingehalten sind. Eine beschränkte Anzahl von Grenzwertüberschreitungen wurde jedoch zugelassen. Damit ist die dynamische Beanspruchung des Bauwerks immer noch so gering, dass keine Schäden wahrscheinlich sind. Die Grenzwerte und die entsprechenden Überschreitungshäufigkeiten durften während der Gesamtdauer der Rammarbeiten nicht überschritten werden. Nach einzelnen Überschreitungen der unteren Grenzwerte war die Rammleistung zu reduzieren. Als Anhaltgrößen wurden die an sich massgebende Anzahl Lastwechsel auf eine Netto-Rammdauer bzw. Netto-Vibrationsdauer umgerechnet, während welcher Grenzwertüberschreitung auftreten durften (vgl. Tabelle 2). Die Angaben galten für jeden Pfeiler bzw. jede Pfeilerumspundung einzeln.

**Tab. 2:** Zulässige Grenzwertüberschreitungen.

Grenzwert	Maximal zulässige Lastwechselzahl pro Pfeiler	Zulässige Netto-Rammdauer, Rammfrequenz 1 Hz, 2 Lastwechsel mit Grenzwertüberschreitung pro Rammschlag.	Zulässige Netto Vibrationsdauer, Vibrationsfrequenz 35 Hz
20 mm/s	100'000	ca. 14 h	ca. 1 h
30 mm/s (Rammen), 40 mm/s (Vibriieren)	1'000	ca. 10 Min	ca. 0.5 Min
50 mm/s	0	0	0

Anhand der Grenzwerte in Tabelle 2 wurden die Alarmwerte festgelegt, bei deren Überschreitung die Unternehmung mittels optischen und/oder akustischen Alarmsignalen gewarnt wurde. Die Alarmwerte und die Massnahmen sind in der nachfolgenden Tabelle 3 zusammengestellt.

**Tab. 3:** Alarmwerte und Massnahmen im Alarmfall.

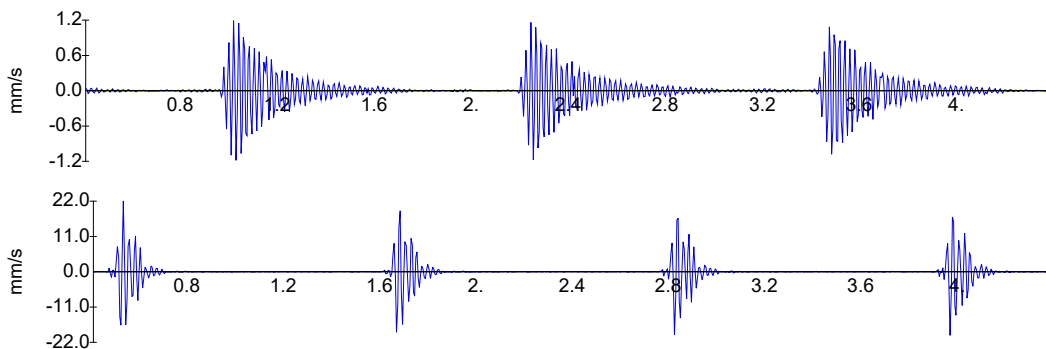
Alarmart	Alarmwert	Massnahme / Verhalten
Blinklicht	16 mm/s	Erhöhte Erschütterungen: Warnung an den Unternehmer, auf akustischen Alarm achten
Sirene	20 mm/s	Starke Erschütterungen: Reduktion der Rammleistung auf 75 %, bzw. wenn notwendig, auf 50 %. Bei vereinzeltm Auftreten des Alarms: Weiterrammen, bei ständigem Alarm: GRUNER AG benachrichtigen

## 5. Resultate

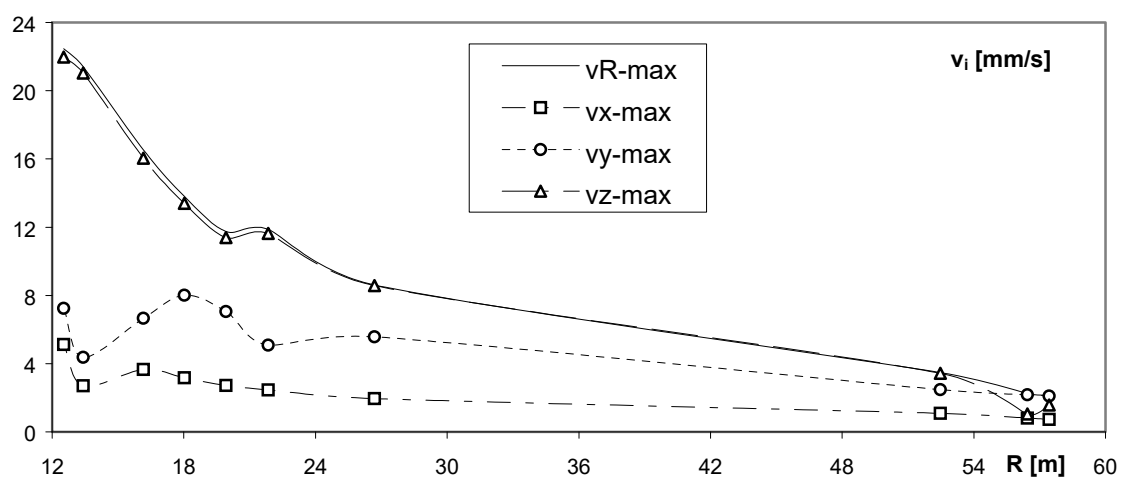
Die gemessenen Maximalwerte der Schwinggeschwindigkeiten beim Rammen der Bohlen lagen je nach Abstand des Rammorts vom Messort im Bereich von 1.0 bis 22.5 mm/s beim Pfeiler Kleinbasel und zwischen 1.0 bis 16.1 mm/s beim Pfeiler Grossbasel. Die Rammfrequenz beim Einbringen der Bohlen mit dem Rammhammer war recht konstant und betrug ca. 0.8 bis 1.2 Hz, d.h. im Mittel ein

Rammschlag pro Sekunde. Die dominanten Frequenzen der durch die einzelnen Rammschläge verursachten Erschütterungen im Düker lag im allgemeinen über 40 Hz. Überschreitungen des unteren Grenzwertes für  $v_R$  von 20 mm/s traten nur beim Kleinbasler Pfeiler auf. Verursacht wurden sie während der Rammung der am weitesten stromabwärts liegenden Bohlen unterwasserseitig der Brücke (Abstand zum Düker kleiner als 14 m). Die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen lag in der Größenordnung von Tausend, was weit unter der zulässigen Anzahl von Grenzwertüberschreitungen ist (zulässige Anzahl: 100'000). Beim Envibrieren der Bohlen wurden Werte bis maximal 7.0 mm/s erfasst, wobei die Schwinggeschwindigkeiten beim Envibrieren der nächstliegenden Pfähle typischerweise bei ca. 4.0 mm/s lagen. Die Arbeitsfrequenz der Vibrationsramme variierte leicht im Bereich zwischen 23 und 35 Hz, was auch dem Frequenzbereich der massgebenden gemessenen Erschütterungen im Düker entsprach. Die Resultate der Messungen während dem Vibrieren werden hier nicht weiter behandelt.

Abbildung 2 zeigt zwei typische Zeitreihen von gemessenen Schwinggeschwindigkeiten, die durch das Einrammen der Bohlen erzeugt wurden. Ausgewählte Verläufe der Schwinggeschwindigkeitskomponenten und der Resultierenden sind in Abbildung 3 in Funktion des Abstands R zwischen Rammort und Messort dargestellt.



**Abb. 2:** Verlauf der rammbedingten Schwinggeschwindigkeiten in Funktion der Zeit [s]. oben:  $v_y(t)$ , Abstand R des Rammorts 51 m; unten:  $v_x(t)$ , Abstand R des Rammorts 12 m.



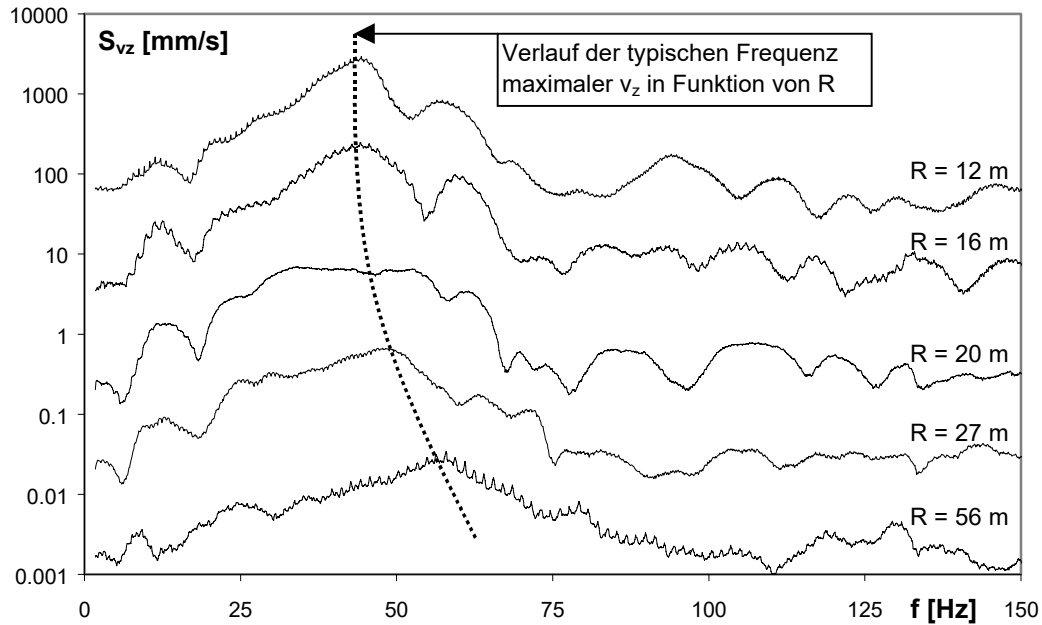
**Abb. 3:** Verlauf typischer rammbedingter Schwinggeschwindigkeiten in Funktion des Abstands R.

Mit abnehmender Distanz wächst die Resultierende der Schwinggeschwindigkeiten überproportional an. Dominant und am stärksten von der Distanz abhängig ist im allgemeinen die vertikale (z-)

Komponente. Entsprechend wird zur Beurteilung der Erschütterungsgefährdung der dominante Frequenzbereich der z-Komponente beigezogen. Nur bei grösseren Abständen der Rammorte und somit geringen Vektorsummen der Schwinggeschwindigkeiten ist die Geschwindigkeitskomponente in horizontaler (y-) Ausbreitungsrichtung dominant, was auf die unterschiedliche Ausbreitung der verschiedenen Wellentypen und auf den Übergang Nahfeld – Fernfeld zurückgeführt werden kann. Der unterschiedliche Verlauf der  $v_z$  und  $v_y$  in Funktion von R bei  $R \approx 20$  m (vgl. Abbildung 3) kann auf einen inhomogenen Aufbau des Untergrundes zurückgeführt werden, wie am Ende des Abschnitts noch weiter ausgeführt wird.

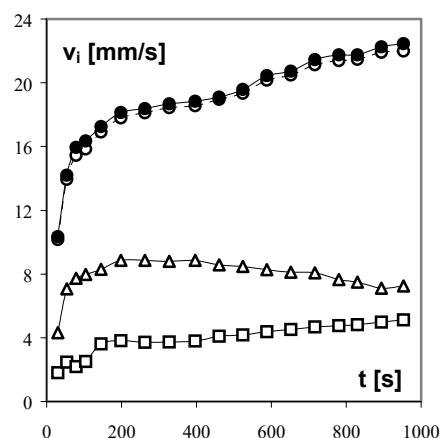
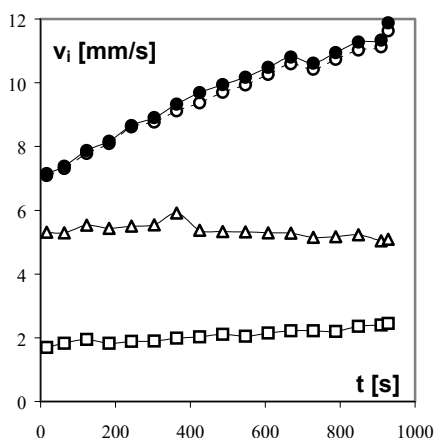
Wie ebenfalls aus Abbildung 2 hervorgeht, vergrössert sich mit zunehmender Distanz Messort – Rammort die Einwirkungsdauer der Vibrationen infolge des einzelnen Rammschlags. Die Form von rammbedingten Wellen, d.h. der Verlauf der Partikelgeschwindigkeit im Zeitraum, gleicht anfänglich einem sogenannten Dirac-Stoss (Puls). Das Spektrum der Partikelgeschwindigkeit ist dann breitbandig mit näherungsweise gleichmässig hohen Leistungen im Bereich von Null bis zu mehreren Hundert Hertz. Die Breite  $f_0$  des Spektrums ist über die Fourier-Transformation mit der Pulsdauer  $T_0$  (Dauer des Rammschlags auf die Bohle) verbunden und liegt in der Grössenordnung von  $1/T_0$ . Bei der radialen Wellenausbreitung bewirkt die Dispersion und die Dämpfung im Umgebungsmedium, dass die Impulswelle einerseits räumlich und zeitlich gestreckt wird und dass andererseits Wellenzüge (d.h. Vibrationen) mit teilweise dominanten Frequenzen entstehen. Die Dispersion, d.h. hauptsächlich die Streckung des Wellenzugs, führt somit auch dazu, dass der dominant ausgeprägte Frequenzbereich von Wellen mit zunehmender Ausbreitungsdistanz abnimmt.

Bei den Messungen im TBA-Düker wurde nun aber genau das Gegenteil festgestellt. In Abbildung 4 sind die Amplitudenspektren der vertikalen Komponenten ausgewählter Schwinggeschwindigkeiten aufgezeichnet, die von Rammarbeiten mit unterschiedlichem Abstand vom Messort erzeugt wurden. Mit abnehmendem Abstand verschiebt sich der Frequenzbereich dominanter Vibrationen, entgegen der oben erwähnten, theoretischen Überlegung, in Richtung tieferer Frequenzen und die Spitzen werden etwas ausgeprägter. Dies deutet darauf hin, dass die Rammenergie bei Rammungen in unmittelbarer Nähe des Dükers typische Eigenmodi des Bauwerks anfacht. Das Beispiel zeigt demnach, dass nicht nur die Wellenausbreitung im als näherungsweise homogen angenommenen Untergrund (d.h. die Anfachung) sondern auch die modalen Eigenschaften des Dükers (d.h. das Resonanzverhalten des Bauwerks) einen Einfluss auf die dynamischen Beanspruchung haben.



**Abb. 4:** Geglättete Amplitudenspektren  $S_{v_z}$  der vertikalen Schwinggeschwindigkeit  $v_z$  die durch Rammen mit abnehmendem Abstand von der Messstelle erzeugt werden. Die Spektren sind der Übersichtlichkeit halber mit einem konstanten Ordinatenversatz von 10 dB übereinander aufgezeichnet.

Die Schwinggeschwindigkeiten der Erschütterungen infolge der Rammarbeiten beim Kleinbasler Pfeiler waren deutlich grösser als die gemessenen Werte während dem Rammen beim Grossbasler Pfeiler. Dies, obwohl die Spundwand auf der Grossbasler Seite den kleineren minimalen Abstand zum Düker hat. Die unterschiedlichen Schwinggeschwindigkeiten deuten auf einen inhomogenen Aufbau des Untergrundes hin (was nicht weiter verwundert). Auch die zeitliche Entwicklung der Schwinggeschwindigkeiten während dem Rammen unterschiedlicher Bohlen bestätigt dies (Abb. 5): Im allgemeinen steigen die maximalen Schwinggeschwindigkeiten mit zunehmender Rammdauer, d.h. zunehmender Einbindtiefe der Bohlen stetig an. Der Verlauf des Anstiegs ist jedoch für jede Bohle unterschiedlich. Wird der zeitliche Verlauf zudem nach den einzelnen Komponenten der Schwinggeschwindigkeiten aufgeschlüsselt, so unterscheiden sich auch die Verläufe der einzelnen Komponenten (im allgemeine wächst  $v_z$  stetig an während  $v_x$  und  $v_y$  näherungsweise konstant bleiben oder gar abnehmen). Die Variation der Schwinggeschwindigkeiten sind eine Folge der in Abschnitt 3 erwähnten Einflüsse auf die Wellenausbreitung. Namentlich ändern sich mit der Einbindtiefe die Bodeneigenschaften am Ort der Wellengense und der Typ der sich dominant ausbreitenden Wellen.



**Abb. 5:** Verlauf der Schwinggeschwindigkeiten in Funktion der Rammdauer, d.h. der Einbindtiefe der Bohlen. links: Abstand  $R = 22$  m. rechts: Abstand  $R = 12$  m. (●) Maxima der Vektorsumme  $v_R$ , (○)  $v_z$ -Komponente, (Δ)  $v_y$ -Komponente, (□)  $v_x$ -Komponente.

### 5. Extrapolation der Erschütterungen im ARA-Düker

Zur Extrapolation der während den Rammarbeiten beim ARA-Düker aufgetretenen Erschütterungsgeschwindigkeiten wird eine ortsspezifisches exponentielles Ausbreitungsgesetz der folgenden Form verwendet:

$$v_R = C \cdot R^n \quad \text{bzw.} \quad \frac{v_R}{v_{R0}} = \left( \frac{R_0}{R} \right)^n \quad (2)$$

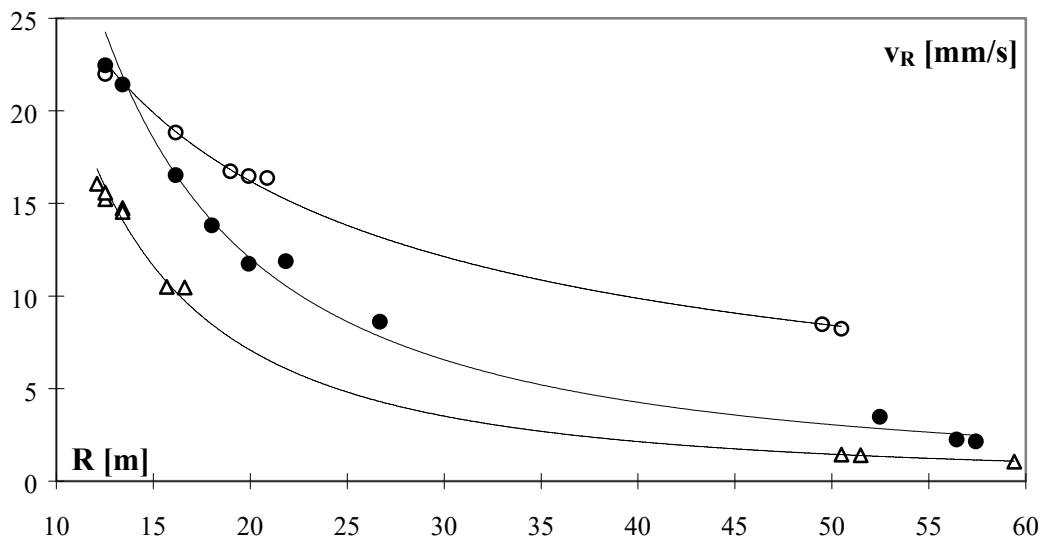
Darin ist  $v_R$  = Schwinggeschwindigkeit,  $v_{R0}$  = Referenzgrösse der Schwinggeschwindigkeit im Abstand  $R_0$ ,  $R$  = Abstand Emissions- zu Immissionsort,  $R_0$  = Referenzabstand,  $n$  = Exponent der Wellenausbreitung. Anhand theoretischer Ableitungen lässt sich zeigen, dass der Exponent  $n$  je nach Wellentyp und Bodeneigenschaften im Bereich  $-2.5 < n < -0.5$  liegen muss. Physikalische Effekte der Wellenausbreitung, wie die Dämpfung, die Reflexion und Absorption sowie die Dispersion der Wellenzüge, werden nicht näher analysiert und fliessen summarisch in die interpolierten Parameter ein. Hierbei sei angefügt, dass die Messungen im TBA-Düker teilweise noch im Nahfeld der Wellenausbreitung liegen. In diesem Bereich ist die Wellenausbreitung nicht immer linear-elastisch, was einen gewissen Einfluss auf die Ausbreitungsfunktion haben kann. Auch diese Effekte werden unter den oben genannten Parametern subsumiert. Ebenfalls erwähnt sei auch, dass die Regressionsanalyse mit dem Maximalwert des Geschwindigkeitsvektors  $v_R$  durchgeführt wurde, um eine Funktion für die Maximalbeanspruchung abzuleiten. Physikalisch sinnvoller wäre an sich eine Regression mit der Varianz der Schwinggeschwindigkeit  $\text{var}[v(t)]$  und der Einwirkungsdauer  $T$  der schwingungsverursachenden Wellenzüge, da sich die Gesamtenergie pro Flächeneinheit der durch einen Rammschlag erzeugten Partikelbewegungen an einem beliebigen Ort  $X$  wie folgt schreibt (vgl. Gl. 1):

$$e(x) = \int_T \sigma \, ds = \int_T (\sigma \cdot v) \, dt = \rho \cdot c \cdot \int_T v^2 \, dt = \rho \cdot c \cdot T \cdot \text{var}[v(t)]$$

Die obigen Funktionen (2) wurden nun mit einer Regression nach dem Least-Square Verfahren an die gemessenen Vektorsummen der Schwinggeschwindigkeiten angepasst und daraus die beiden relevanten Parameter  $n$  und  $C$  bestimmt. Beim Kleinbasler Pfeiler mussten für die Spundwände links und rechts des Pfeiler unterschiedliche Funktionen abgeleitet werden. Entweder ändern in diesem Bereich die Bodeneigenschaften bzw. der sich dominant ausbreitende Wellentyp oder aber das Pfeilerfundament beeinflusst die Wellenausbreitung.

Ein graphische Darstellung der Abhängigkeit der Schwinggeschwindigkeitsvektoren vom Abstand ist in der untenstehenden Abbildung 6 zu finden. Die Werte der Parameter  $n$  und  $C$  sowie der Regressionskoeffizienten sind in der nachfolgenden Tabelle 4 zusammengestellt. Wie sich zeigt, liegt die Grösse des Parameters  $n$  innerhalb der theoretisch möglichen Grenzen und ist damit physikalisch sinnvoll.





**Abb. 6:** Schwinggeschwindigkeit  $v_R$  in Funktion des Abstands  $R$ , Messdaten und Regressionen, (○) Kleinbasel, rechts; (●) Kleinbasel links; (△) Grossbasel.

**Tab. 4:** Koeffizienten aus der Regressionsanalyse für spezifische Ausbreitungsgesetze

Ort	Exponent $n$	Konstante $C$	Regressionskoeffizient $R^2$
Pfeiler Kleinbasel, links / flusseitig	-1.50	1070	0.985
Pfeiler Kleinbasel, rechts / uferseitig	-0.71	138	0.997
Pfeiler Grossbasel	-1.70	1250	0.999

Die grossen Regressionskoeffizienten ( $R^2$  nahe bei 1) deuten auf zuverlässige und vertrauenswürdige Regressionsfunktionen hin. Anhand dieser Funktionen kann nun der Bereich der maximalen, während den Rammarbeiten aufgetretenen Erschütterungsgeschwindigkeiten  $v_{R,ARA,max}$  beim ARA-Düker bestimmt werden. Bei einem minimalen Abstand "Düker – Fuss der Spundwand" von  $R = 14.6$  m beim Grossbasler Pfeiler und von  $R = 16.4$  beim Kleinbasler Pfeiler ergeben sich folgende Schwinggeschwindigkeiten:

- Pfeiler Kleinbasel:  $v_{R,ARA,max} = 16 - 19$  mm/s
- Pfeiler Grossbasel:  $v_{R,ARA,max} = 13$  mm/s

Diese Werte sind kleiner als die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten beim TBA-Düker. Die Konstruktion und Festigkeit des ARA-Dükers und des TBA-Dükers sind vergleichbar. Die Gefahr von stehenden elastischen Wellen im teilweise mit Wasser gefüllten ARA-Düker kann vernachlässigt werden, da das Wasser eine freie Oberfläche hat (Druckluftdüker). Es gelten damit für den ARA-Düker die gleichen Richt- und Grenzwerte wie für den TBA-Düker (vgl. Abschnitt 3). Und diese Werte werden von den oben berechneten Schwinggeschwindigkeiten nicht überschritten

## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Resultate der Erschütterungsuntersuchungen während den Rammarbeiten bei den Pfeilern für den Neubau der Dreirosenbrücke in Basel können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die begleitenden Messungen während der gesamten Rammdauer erlaubten eine wirkungsvolle Überwachung der rammbedingten Erschütterungen bei den nächstliegenden Bauwerken.
2. Die Alarmierung, die eine mögliche Gefährdung des TBA-Dükers signalisieren sollte, wurde bei den vereinzelt Grenzwertüberschreitungen ausgelöst. Die Alarmsignale wurden durch die Unternehmung umgehend wahrgenommen, und es wurden die geforderten Massnahmen getroffen.
3. Die gemessenen Maximalwerte der Schwinggeschwindigkeiten im TBA-Düker lagen innerhalb des Bereichs zulässiger Werte der Schwinggeschwindigkeit und deren Auftretenshäufigkeit. Eine Beschädigung des Dükers infolge der Rammarbeiten ist höchst unwahrscheinlich und konnte nach Abschluss der Arbeiten auch nicht festgestellt werden.
4. Die gemessenen Daten erlaubten die Ableitung eines spezifischen empirischen Ausbreitungsgesetzes für die maximalen Schwinggeschwindigkeiten rammbedingter Festkörperwellen in Funktion der Distanz Rammort – Einwirkungsort der Wellen. Anhand dieser Funktion konnten die während den Rammarbeiten beim ARA-Düker mit grosser Wahrscheinlichkeit aufgetretenen Schwinggeschwindigkeiten extrapoliert werden. Die resultierenden Geschwindigkeiten lagen deutlich unterhalb der Grenzwerte für den TBA-Düker und damit unterhalb der zulässigen Werte gemäss der Norm SN 640'312a.
5. Die Signalanalysen der Schwinggeschwindigkeiten in Frequenzraum zeigten einmal mehr deutlich, dass Bauwerksschwingungen, die durch die Einwirkung elastischer Wellen aus dem Erdreich erzeugt werden, von den Eigenschaften sowohl der Wellenausbreitung als auch des Bauwerks beeinflusst sind.