

# **Ermittlung und Bewertung dynamischer Beanspruchungen an historischen Brückenbauwerken**

Dr.-Ing. Uwe Ernst, Dr.-Ing. Bernd Plassmann  
LGA Bayern, Nürnberg

Dipl.-Ing. Fabian Kirsch  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig

## **Zusammenfassung**

Am Beispiel der Steinernen Brücke in Regensburg wird gezeigt, wie ein Konzept und seine Umsetzung zur Sicherung mittelalterlicher Bausubstanz eingesetzt werden kann, die durch die sehr großen Nutzungszeiträume Schaden genommen hat. Das Zusammenspiel von Schadensanalyse, Langzeitbeobachtung der Verformungen und Monitoring der aktuellen statischen und dynamischen Belastungen wird projektbezogen vorgestellt. Die Ergebnisse von detaillierten Schwingungsuntersuchungen zeigen, dass die Grenzwerte nach DIN 4150 für die Bewertung der dynamischen Beanspruchungen von Bauwerken mit derart langen Nutzungszeiträumen als nicht ausreichend eingestuft werden können. Weiterhin wird der Einsatz dynamischer Messmethoden zur zerstörungsfreien Prüfung der Materialqualität vorgestellt.

## **1 Einleitung**

Infolge zunehmenden Verkehrsaufkommens sowohl im Hinblick auf seine Dichte als auch auf die Geschwindigkeit werden historische Brücken weit über die zum Zeitpunkt ihrer Planung angenommenen Belastungen hinaus beansprucht. Nicht selten ist es der Fall, dass solche Bauwerke, ursprünglich für die Befahrung mit Pferdefuhrwerken ausgelegt, infolge von Individual- und öffentlichem Verkehr einem Vielfachen der seinerzeit bekannten dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Diese Tatsache kann insbesondere im Verbund mit dem gerade bei Mauerwerksbrücken einsetzenden Alterungsvorgängen der natürlichen Baustoffe zu erheblichen Schädigungen führen, die in ihrer Folge die Gebrauchstauglichkeit und die Standsicherheit der Brücken gefährden.

In den letzten Jahren werden von der LGA verstärkt Untersuchungen an Natursteinbrücken zur Planung und Ausführung von Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Schwerpunkte bei den Untersuchungen sind hierbei die Schadenskartierung mit anschließender

Schadensanalyse, die Bestimmung historischer Bauverfahren sowie die Prüfung der verwendeten Baumaterialien.

Beispielhaft wird an der Steinernen Brücke Regensburg gezeigt, wie zusätzlich zu den oben erwähnten Untersuchungen die Ergebnisse aus dynamischen Messungen für ein Sanierungskonzept für historische Brückenbauwerke herangezogen werden können.

## 2 Schadensanalyse historischer Natursteinbrücken

### 2.1 Steinernen Brücke Regensburg

Die Steinernen Brücke in Regensburg wurde in den Jahren 1135 – 1146 erbaut und gilt als eines der bedeutendsten Bauwerke des Mittelalters. Über den historischen Bauablauf ist wenig bekannt. Die Brücke bot dem Handelsverkehr für lange Zeit die einzige feste und ganzjährig befahrbare Passage über die Donau zwischen Ulm und Wien. Die intensive Nutzung für den Transport ist historisch belegt. Noch bis ins Jahr 1936, also fast acht Jahrhunderte lang, bildete die steinerne Brücke für die Stadt die einzige feste Passage über beide Donauarme.

Die historische Steinernen Brücke war ursprünglich knapp 336 m lang und bestand aus 16 Sandsteinbögen mit Tonnengewölben, die auf 15 Pfeilern ruhten. Infolge früherer Umgestaltungen sind derzeit die beiden Auffahrampen der Widerlager, ein Teil des ersten und letzten Jochs sowie dessen Pfeiler verbaut bzw. überschüttet. Die neuzeitliche Fahrbahn der Brücke ist mit grauschwarzen Granitpflastersteinen befestigt.



Bild 1: Blick auf die heutige Brücke gegen Süden

Die Brücke überstand den nun über 850 Jahre dauernden Betrieb in einem erstaunlich guten Zustand. Dennoch treten insbesondere in den Gewölbebögen zunehmend Schäden auf, die auf die Befahrung mit modernen Verkehrsmitteln zurückgeführt werden.

Neben Schadenskartierungen, Untersuchungen der historischen Baumaterialien und Baugrunderkundungen wurden dynamische Untersuchungen durchgeführt, die in Kapitel 4 näher beschrieben werden.

## 2.2 Fleischbrücke Nürnberg

Die Fleischbrücke, die ihren Namen von den westlich unterhalb der Brücke angrenzenden sogenannten "Fleischbänken" – einem städtischen Schlachthaus – erhielt, ist ein zweites Beispiel für die Untersuchungen an historischen Brückenbauwerken. Gegenüber der Südostecke des Nürnberger Hauptmarktes nimmt die Breite der Pegnitz auf etwa 28 m ab. Im Jahr 1596 wurde an dieser Stelle nach einem sehr detailliert Plan mit der Herstellung einer aufwendigen Holzpfahlgründung begonnen. Mit der gewählten Geometrie eines flachen Kreissegmentes für den Bogen und der großen Spannweite von gut 27 m war die Fleischbrücke für die damalige Zeit einmalig. Sie wurde 1598 nach nur zweijähriger Bauzeit fertiggestellt.

Die Brücke überstand den zweiten Weltkrieg in ihrer Struktur trotz enormer Zerstörung in der Umgebung weitgehend unbeschadet. Neuzeitliche Eingriffe am Standort und im Umfeld der Fleischbrücke, wie z.B. die gesteigerten Verkehrsbelastungen, haben jedoch schädliche Auswirkungen auf das historische Bauwerk mit sich gebracht und führten zu Nutzungseinschränkungen.

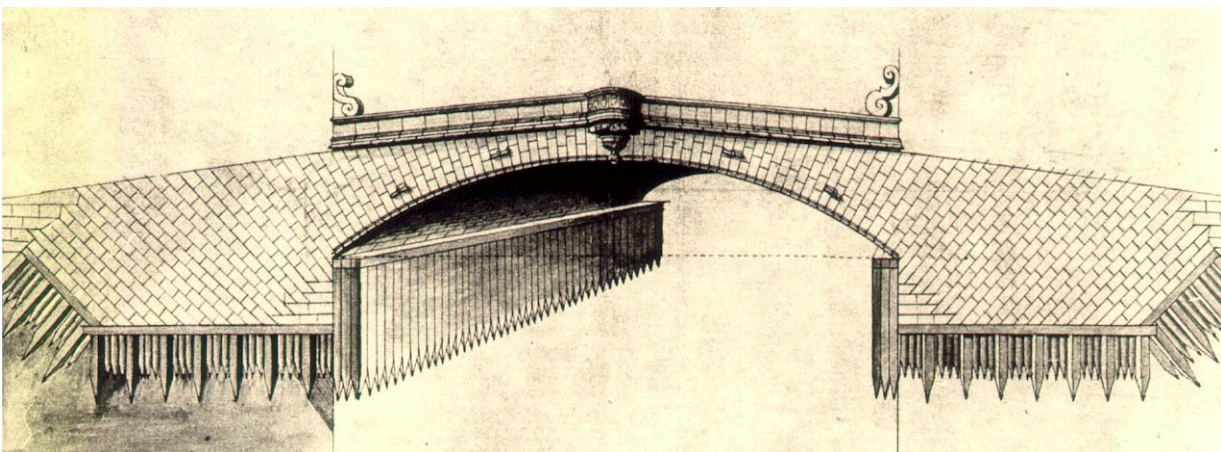


Bild 2: Planung der Fleischbrücke

Neben Schadenskartierungen lag der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen bei der Bewertung der historischen und bereits bei früheren Sanierungen eingesetzten neuzeitlichen Baumaterialien.

### 3 Schadensbewertung historischen Natursteinbrücken

Die prinzipielle Vorgehensweise der LGA zur Untersuchung von Natursteinbrücken wird vereinfacht mit dem in Bild 3 dargestellten Ablauf verdeutlicht.

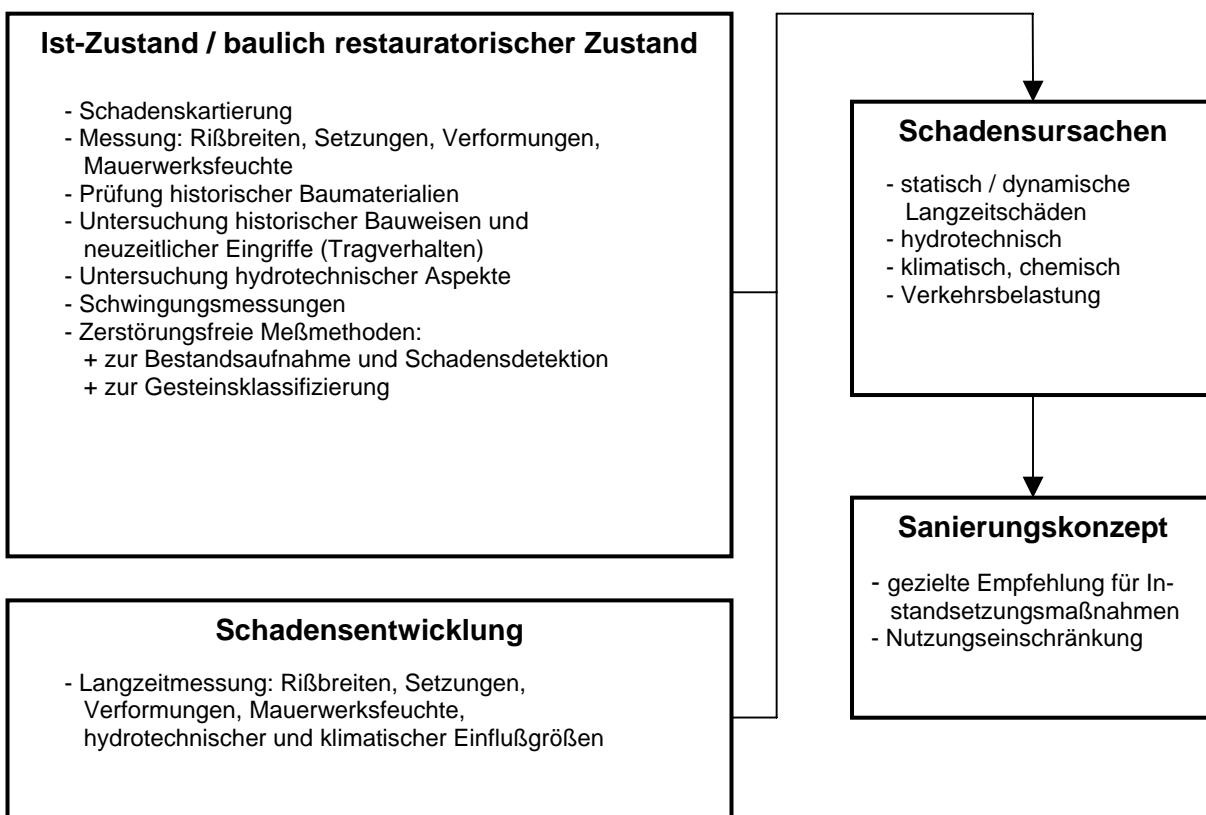


Bild 3: Vorgehensweise zur Untersuchung von Natursteinbrücken

Der Untersuchungsablauf gliedert sich in die Bestandsaufnahme und die langfristige Bauwerksüberwachung mittels Meßtechnik.

Bei der Bestandsaufnahme erfolgt eine Vielzahl von Untersuchungen deren Informationen in die Schadensanalyse und Ursachenbewertung einfließen. Anhand von Langzeitüberwachungen können Aussagen über Stagnation, Geschwindigkeit oder eventuelle Beschleunigung der Schadensgrößen getroffen werden. Auf Grundlage dieser Aussagen kann der Zeitpunkt notwendiger Sanierungsmaßnahmen effektiv geplant werden.

Alle Informationen fließen in die gezielte Ausarbeitung und Empfehlung von Instandsetzungsmaßnahmen ein. Als Sofortmaßnahme werden oft Nutzungsbeschränkungen notwendig.

## **4 Fallbeispiel: Steinerne Brücke Regensburg**

### **4.1 Schadensbild**

Die Ergebnisse der Brückenhauptprüfung (1992) nach DIN 1070 waren Anlass für ein Konzept zur allgemeinen Instandsetzung der Natursteinbrücke in Regensburg.

Zahlreiche offene Fugen in Ringrissen an der Unterseite der Bögen, in Treppenrissen oberhalb der Pfeiler bzw. Radialrissen der Bögenscheitel sowie abplatzende Mörtelversiegelungen der Brückenaußenflächen wurden angetroffen. Weiterhin zeigten sich Horizontalverschiebungen von Steinreihen des Stirnmauerwerks und des Oberbaus sowie Verwitterungen der Steinaußenflächen.

Neuere Setzungsmessungen ergaben für die letzten Jahre ein differenziertes Verformungsbild. Das Brückenbauwerk verformte sich u.a. im Mittelfeldbereich ungleichmäßig um bis zu 5 mm. Die derzeit gemessenen Bauwerksbewegungen sind jedoch grundsätzlich als eine Momentaufnahme in einem andauernden Prozess zu sehen. Weitere Beobachtungen der Bewegungen über einen längeren Zeitraum sind notwendig.

### **4.2 Untersuchungsprogramm**

Von der LGA wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Bewertung des Bauwerks und zur Planung von Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Dieses umfasst neben Bohrungen in den Pfeilern, Landbohrungen zur Baugrunderkundung auch zahlreiche Laboruntersuchungen an den historischen Baustoffen und Forschungen zum Verständnis der historischen Bauweisen. Das Untersuchungsprogramm wurde durch dynamische Messungen ergänzt.

Die Ursachenerkundung hat ergeben, dass sich neben den Wasserströmungskräften und den klimatische Einflüssen die Verkehrsbelastung als wesentlicher Einflußfaktor darstellt. Daher wurden detaillierte Schwingungsmessungen an zwei Brückenbögen ausgeführt.

Zur Klassifizierung des aus den Pfeilern erbohrten Sandsteins wurden die Wellengeschwindigkeiten des Materials mittels der Impact Echo Methode ermittelt und mit einaxialen Druckversuchen in Korrelation gebracht.

Im Folgenden werden diese beiden dynamischen Untersuchungen, die in Zusammenarbeit der LGA mit dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt wurden, beschrieben.

## **4.2 Schwingungsmessungen**

### **4.2.1 Konzept und Ziel der Messungen**

Die erläuterten Schäden haben bei der Steinernen Brücke mittlerweile zu einer Sperrung für den Individualverkehr geführt. Einzig Taxen, Bussen sowie Fußgängern und Radfahrern ist die Überquerung gestattet. Um Aufschluss über die Beanspruchungen des Bauwerkes infolge des öffentlichen Verkehrs zu erhalten, wurde die Messung der dynamischen Beanspruchung an relevanten Punkten der Brücke beschlossen.

Ziel der Schwingungsmessungen ist die dynamische „Beweissicherung“ vor Beginn der Planung von Sanierungsmaßnahmen im Bereich der Brückenfahrbahn und die Abschätzung der dynamischen Beanspruchung des historischen Mauerwerks infolge des Verkehrs. Ferner stellen die Messungen die Grundlage für die umfangreichen Probelastungen der Bögen dar, die in einem weiteren Untersuchungsschritt geplant sind.

### **4.2.2 Messdurchführung**

Die Messungen werden zunächst für die vorrangig zu sanierenden Musterbögen IX und XIV durchgeführt.

Die Schwingungsmessung wird nach DIN 4150, Teil 1 – 3 durchgeführt. Hierbei werden die Schwingereignisse aus dem üblichen Verkehr an ausgewählten Messstellen des Tragwerks erfasst. Es werden sowohl die Intensität als auch die Frequenzen der Schwingungen betrachtet, um Rückschlüsse auf die Verträglichkeit der Belastungen für die Brücke zu gewinnen.

An den zwei Bögen IX und XIV (Mittelbogen und Randbogen) fanden die Messungen mit jeweils sechs bzw. vier Messstellen statt. In den Bildern 4 und 5 sind die Messstellenpositionen skizziert.

Zur Ermittlung der Erregerquelle wurde eine zeitgleich mit dem Messereignis arbeitende Videoüberwachung installiert. Die Datenerfassung erfolgte komplett vor Ort.

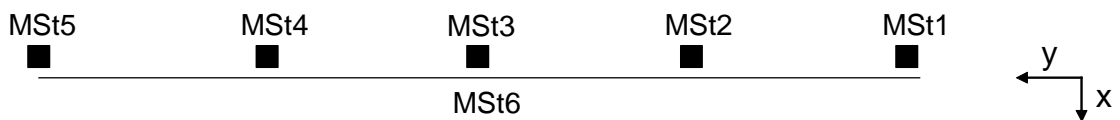
Die dreiaxialen Geophone wurden entlang der Unterstromseite an der Brüstung positioniert. Sie waren direkt auf dem horizontalen Stahlbetonfertigteile der neuzeitlichen Brüstungselemente abgestellt und nach den drei Systemachsen ausgerichtet.

Die als Messstation 6 bei beiden Bögen verwendeten Geophone wurden korrespondierend mit dem Bogenscheitel an einer speziellen Konstruktion aufgehängt. Diese Messgeber registrieren die Schwingungen, welche direkt im Bogenscheitel auftreten. Korrespondierend dazu war die Messstation 3 (Bogen IX) bzw. Messstation 2 (Bogen XIV) auf der Fahrbahn mittig über dem Scheitel positioniert.

Die Messungen am Mittelbogen (IX) bzw. am Randbogen (XIV) an den oben beschriebenen Positionen wurden über den Zeitraum von einem Tag durchgeführt.

### Aufsicht

Fahrbahn



### Ansicht

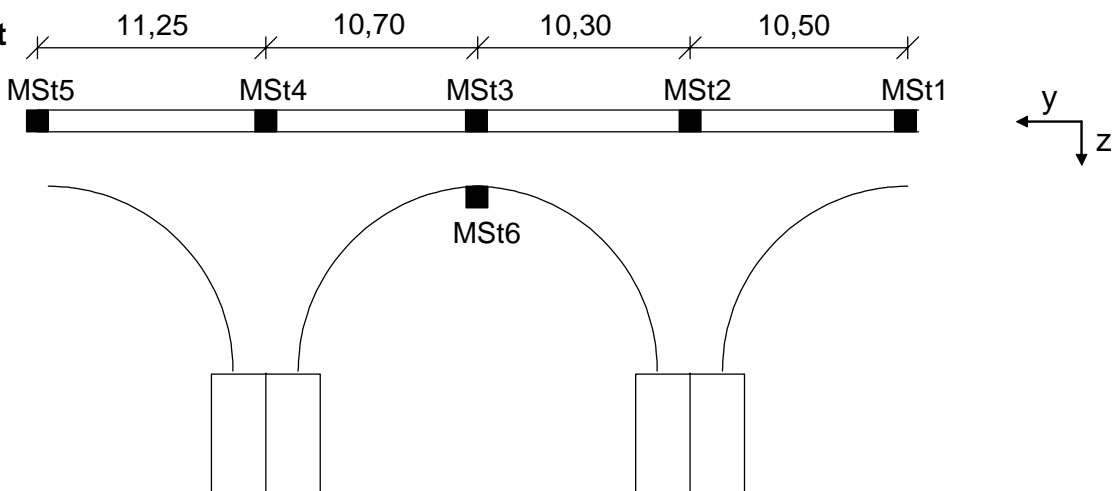
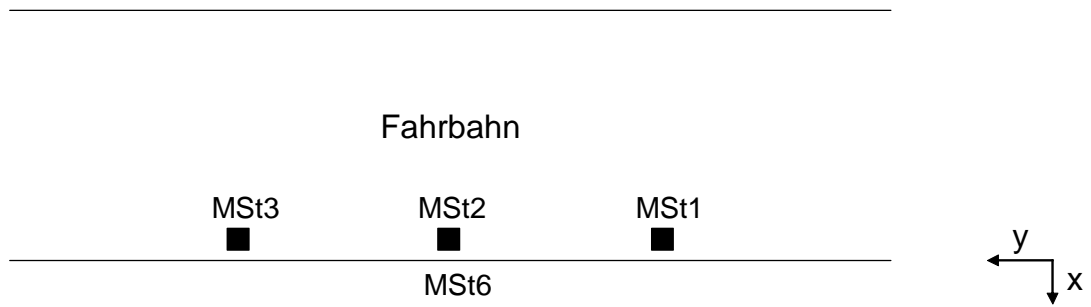


Bild 4: Positionen der Messstellen am Mittelbogen (IX)

## Aufsicht



## Ansicht

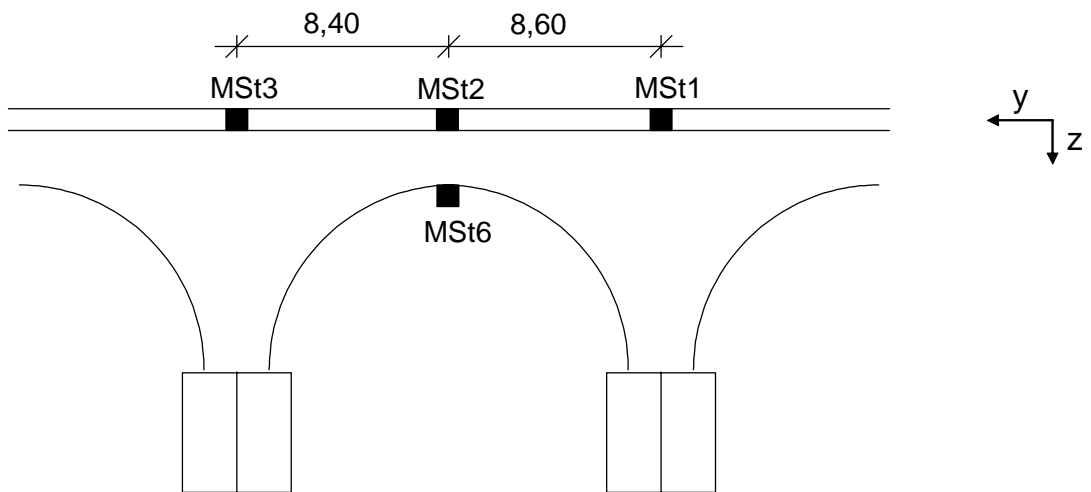


Bild 5: Positionen der Messstellen am Randbogen (XIV)

Die Erschütterungen werden über den gesamten Messzeitraum kontinuierlich erfasst. Bei jeder Überschreitung eines vordefinierten Schwellwertes an einer der Messstellen werden alle sechs bzw. alle vier Messstellen gleichzeitig getriggert und die Messwerte an die Steuereinheit übertragen. Durch dieses Vorgehen wird sichergestellt, dass tatsächlich die größten der aufgetretenen Messwerte zur Auswertung gelangen.

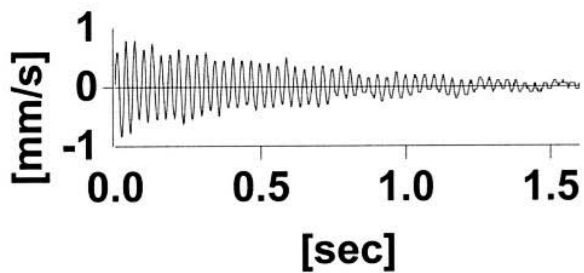
### 4.2.3 Auswertung und Ergebnisse der Messungen

Die Auswertung der Schwingungssignale erfolgt anhand der Schwinggeschwindigkeiten und ihrer Maximalwerte getrennt nach den drei Koordinatenrichtungen. Zusätzlich zu den Schwinggeschwindigkeiten ist die Ermittlung der zugehörigen Frequenzen erforderlich. Dies geschieht im Rahmen der Auswertung durch eine Transformation der Messwerte vom Zeit- in den Frequenzbereich mit dem Algorithmus der Schnellen Fourier-Transformation (FFT).

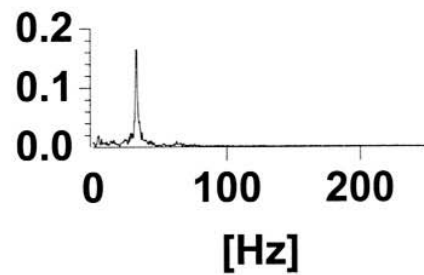
Bild 6 zeigt beispielhaft das Zeitsignal im Scheitelpunkt des Mittelbogens bei der Überfahrt eines Busses sowie die Transformation in den Frequenzbereich.

**Erschütterungsmessungen auf der Baustelle Regensburg am 27.11.01**  
**Auswertung der Sensor 6, Triggerzeit: 13:56:55 Uhr, Ereignis: 998**

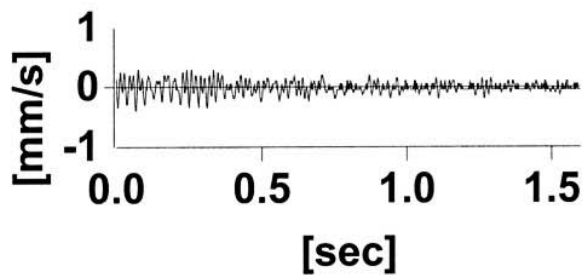
Schwinggeschwindigkeiten in x-Richtung  
Maximaler Betrag: 0.833 [mm/s]



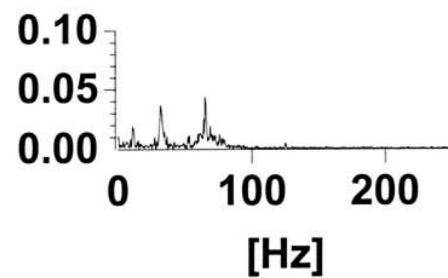
Frequenzanalyse  
Hauptfreq.: 32.2 [Hz]



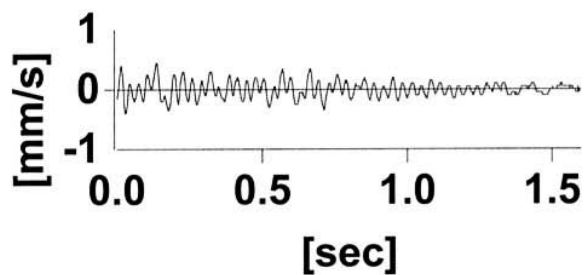
Schwinggeschwindigkeiten in y-Richtung  
Maximaler Betrag: 0.392 [mm/s]



Frequenzanalyse  
Hauptfreq.: 64.9 [Hz]



Schwinggeschwindigkeiten in z-Richtung  
Maximaler Betrag: 0.441 [mm/s]



Frequenzanalyse  
Hauptfreq.: 31.7 [Hz]

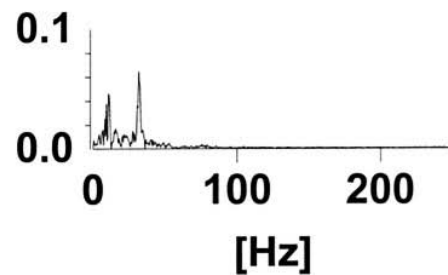


Bild 6: Messsignal an Scheitelpunkt des Mittelbogens

Im Folgenden sind die Ereignisse der einzelnen Messstellen mit den aus der Videoüberwachung ermittelten Erregerquellen dargestellt. Die Erregerquellen werden in PKW, normale Linienbusse (Bus kurz) und Gelenkbusse (Bus lang) unterschieden.

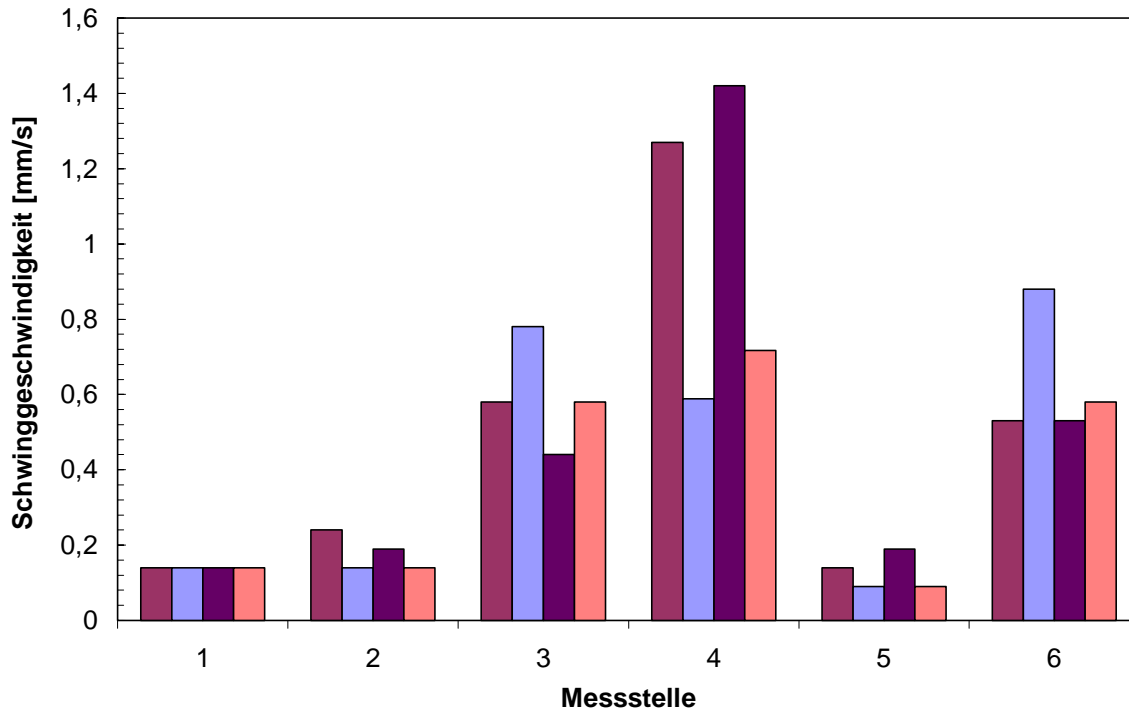


Bild 7: Schwinggeschwindigkeiten bei Überfahrt Bus kurz – Mittelbogen

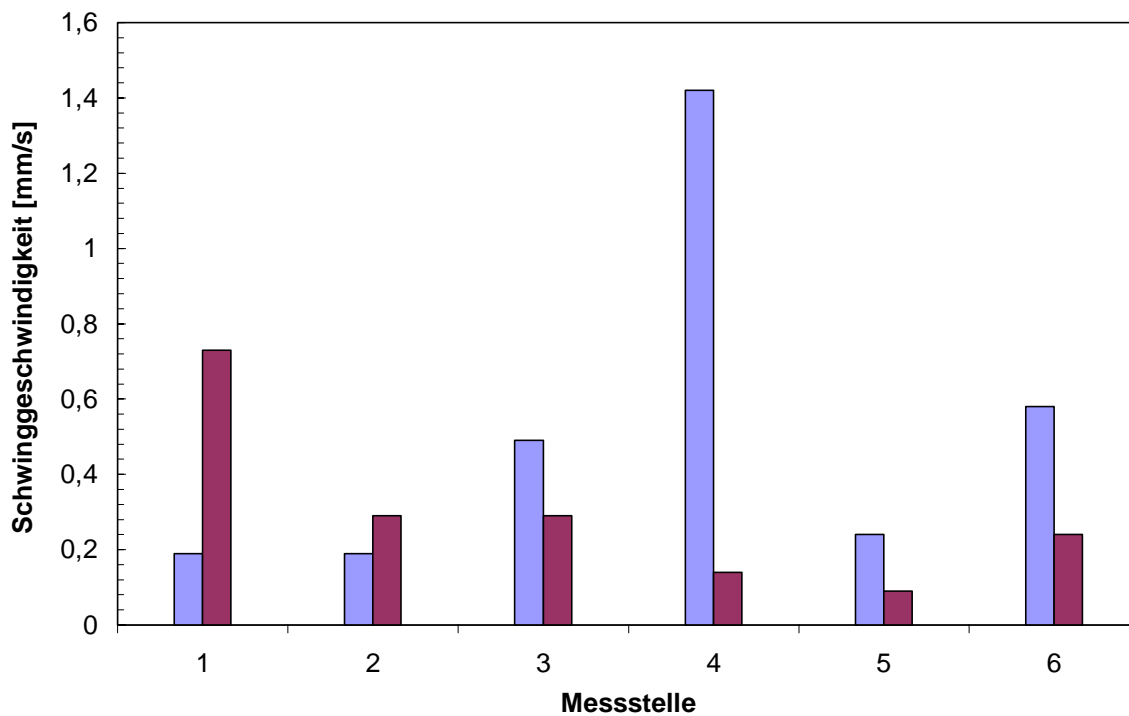


Bild 8: Schwinggeschwindigkeiten bei Überfahrt Bus lang – Mittelbogen

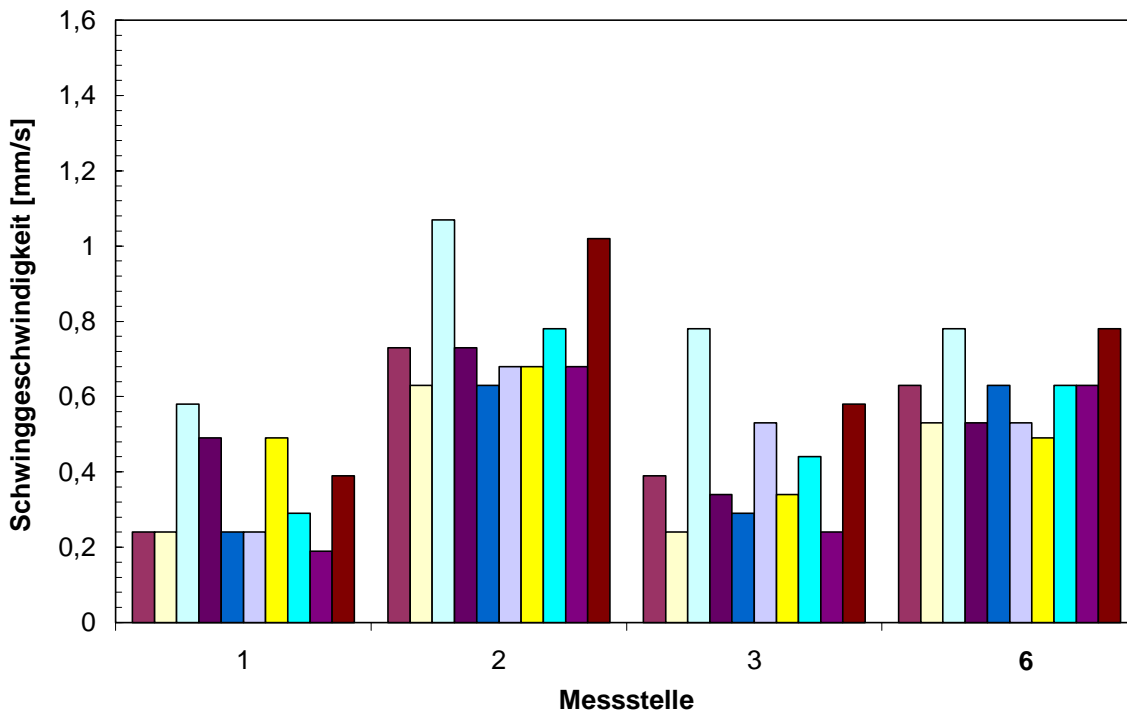


Bild 9: Schwinggeschwindigkeiten bei Überfahrt Bus kurz – Randbogen

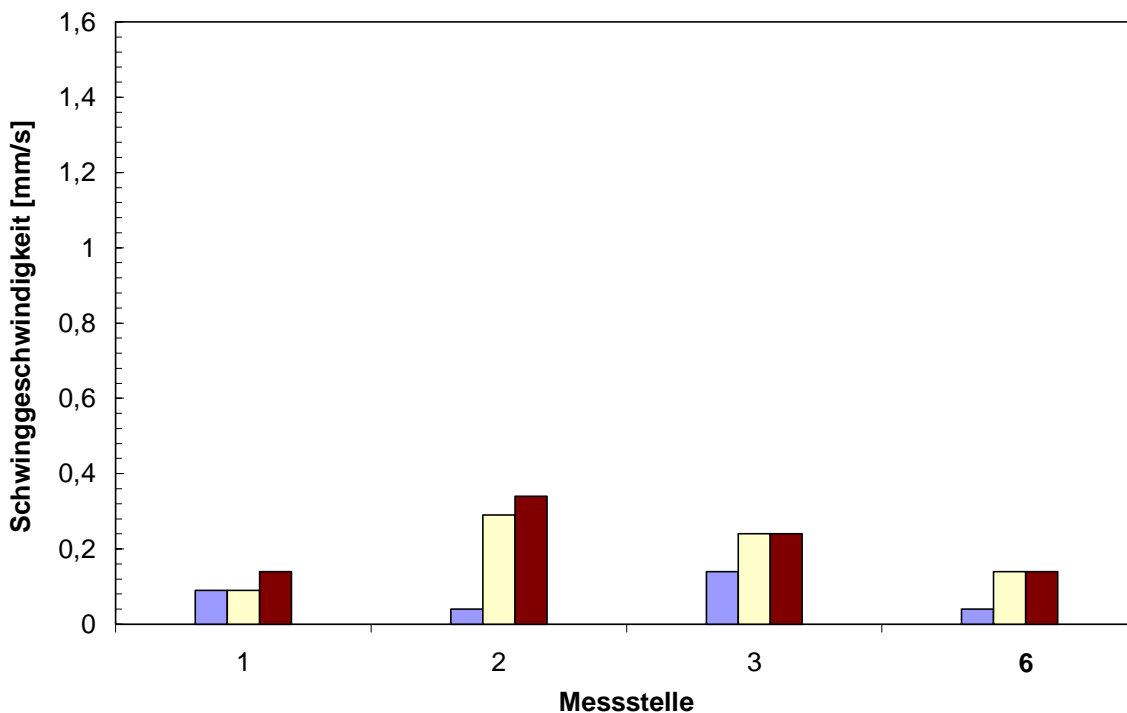


Bild 10: Schwinggeschwindigkeiten bei Überfahrt Taxi – Randbogen

Es wird deutlich, dass die einzelnen Messpositionen unterschiedlichen dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Die Absolutwerte der Schwinggeschwindigkeiten sind mit

maximal ca. 1,5 mm/s als eher gering einzustufen. Der Frequenzgehalt der gemessenen Signale bewegt sich in Abhängigkeit der Erregerquelle und der Messposition dabei hauptsächlich im Bereich zwischen ca. 9 Hz und ca. 45 Hz.

#### **4.2.4 Bewertung der dynamischen Einwirkung auf die Brücke**

In Anlehnung an DIN 4150 wären diese Schwingungen auch für denkmalgeschützte Bauwerke als weitestgehend unschädlich einzustufen. Das Schadensbild und der allgemeine Zustand der Steinernen Brücke lassen die Grenzwerte nach DIN 4150 in diesem Falle jedoch nicht ausreichend erscheinen, so dass auch hier von schadensrelevanten Erschütterungen gesprochen werden muss.

Aus den durchgeführten Messungen und Auswertungen ergeben sich folgende Erkenntnisse für die dynamisch – statische Untersuchung des Bauwerks:

- Die bei der aktuellen Belastung aus dem städtischen Busverkehr registrierten Beanspruchungen liegen an den individuellen Messstellen im Tragwerksystem der betrachteten Bögen IX und XIV in einem Rahmen, der mit maximalen Schwinggeschwindigkeiten unter 1,5 mm/s (resultierende Geschwindigkeit) für Einzelereignisse als dynamisch nicht schädlich zu klassifizieren ist.
- Bei den sichtbaren Schäden, insbesondere unterhalb des Fahrbahnniveaus mit seitlich herausgedrückten Fertigteilen der Brüstung aber auch verschobenen Steinreihen des Mauerwerks ist anzunehmen, dass nicht alleine die Größe der individuellen Ereignisse eine Rolle spielt, sondern auch die Wiederkehr im Zuge des historisch bemerkenswert langen Betriebes von Bedeutung ist. Der heutige Verkehr ist auf die städtischen Busse und Taxis reduziert. Es ist mit Sicherheit anzunehmen, dass in der Vergangenheit stärker ausgeprägte dynamische Beanspruchungen des Bauwerkes stattgefunden haben. Dazu zählen größere Fahrzeuge oder Rammarbeiten bei der Sanierung der Pfeilerinseln. Die dynamischen Ereignisse wurden durch die Einleitung von Bremskräften über und in die Fertigteile quasi-statisch verstärkt (Begegnungsverkehr). Im Zuge der Fahrbahnsanierung und der Abdichtung muss auch der Schutz der oberen Mauerwerksreihen verbessert werden.

- Die Maxima der Beanspruchung wurden auf der sehr steifen Brückenoberfläche, nicht aber am historischen Bogenscheitel festgestellt. Nahezu bei allen Messungen ist keine dämpfende Wirkung des Straßenunterbaus gegenüber der korrespondierenden Messstelle am Bogenscheitel zu verzeichnen. Dies ist u.a. auf die durchgehend hergestellten massiven Betonkörper der Unterschichten (neuer Unterbau nach dem 2. Weltkrieg) zurückzuführen.

#### **4.2.5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse**

Einige Schäden, die an der Steinernen Brücke aufgetreten sind, können mit großer Wahrscheinlichkeit auf dynamische Beanspruchungen aus Verkehrsbelastungen zurückgeführt werden. Zur Erfassung der dynamischen Beanspruchung wurden Schwingungsmessungen durchgeführt. Die bei den Messungen erfassten Schwingungen sind nach einer Bewertung nach den Anhaltswerten der DIN 4150, Teil 3 als gering einzustufen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß für eine Bewertung der auftretenden Schwingungen bei historischen Natursteinbrücken zusätzliche Betrachtungen notwendig sind. Es muß die Belastungsgeschichte einer Brücke und deren Auswirkung auf die Tragfähigkeit bzw. Resttragfähigkeit berücksichtigt werden. In der Historie sind häufig größere Belastungen aufgetreten.

Das Beispiel der Steinernen Brücke in Regensburg zeigt, daß häufig neuzeitliche Sanierungseingriffe negative Auswirkung auf das statische / dynamische Tragverhalten haben. Das historische Tragverhalten wurde bei neuzeitlichen Eingriffen nicht untersucht und berücksichtigt. Bei der Steinernen Brücke ist die historisch gegebene Dämpfung unter dem ursprünglichen Natursteinpflaster der Fahrbahn bei dem momentan vorhandenen Betonaufbau nicht mehr gegeben. Dadurch kommt es zur ungedämpften Einleitung der dynamischen Belastung in das historische Mauerwerk. Dieses führt auch bei vergleichbar geringen Schwinggeschwindigkeiten zu Schädigungen.

#### **4.3 Gesteinsklassifizierung anhand der Impact Echo Methode**

Zur Bewertung der Gesteinsqualität wurden insgesamt elf Kernbohrungen in die noch im historischen Zustand erhaltenen Brückenpfeiler abgeteuft. Jeder der gewonnenen Bohrkerne gibt bis in eine Tiefe von ca. 10 m unterhalb der Fahrbahnoberkante Aufschluss über die

Zusammensetzung des im Mittelalter verwendeten Baumaterials. An 17 Bohrkernstückchen wurden weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der Gesteinsart und der Materialeigenschaften durchgeführt.

Zur Ermittlung der Materialgüte wurden Messungen nach dem Impact Echo Verfahren durchgeführt. Mit Hilfe dieses Verfahrens sind Aussagen über die Unversehrtheit und die Materialeigenschaften von Bauteilen und Proben möglich. Im vorliegenden Falle wurde das impact-echo Verfahren zur Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Dehnwelle in den stabförmigen Probekörpern verwendet. Mit Hilfe von Korrelationen zu Druckfestigkeitsbestimmungen konnte damit die Gesteinsgüte untersucht werden. Bild 11 zeigt schematisch den Versuchsaufbau.

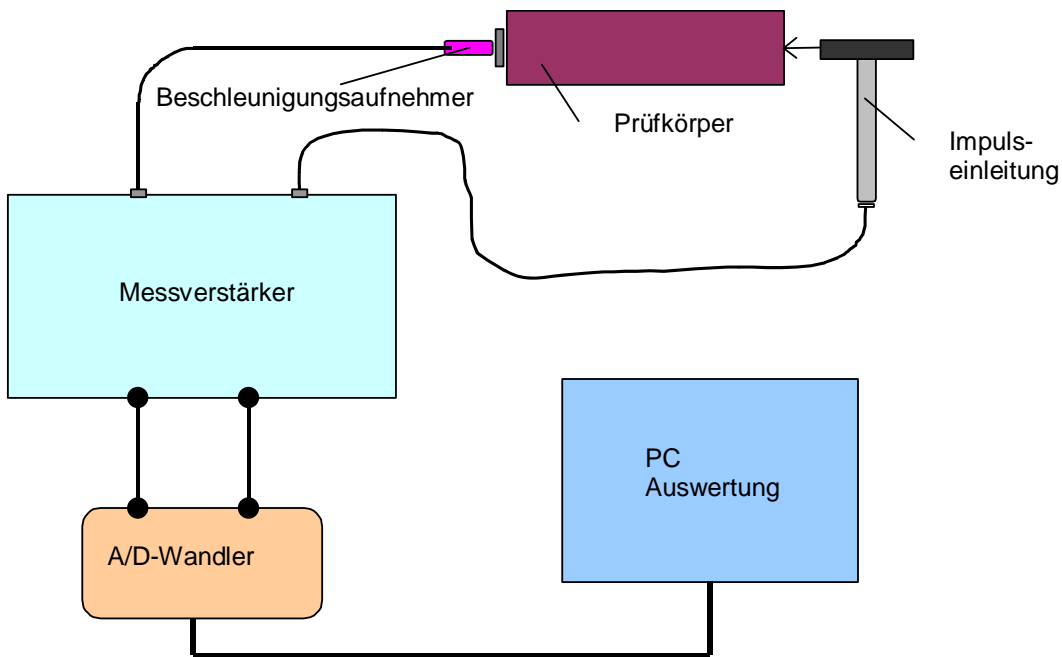


Bild 11: Durchführung der impact-echo Methode an einer Gesteinsprobe

In Bild 12 sind die ermittelten Wellengeschwindigkeiten den einaxialen Druckfestigkeiten gegenübergestellt.

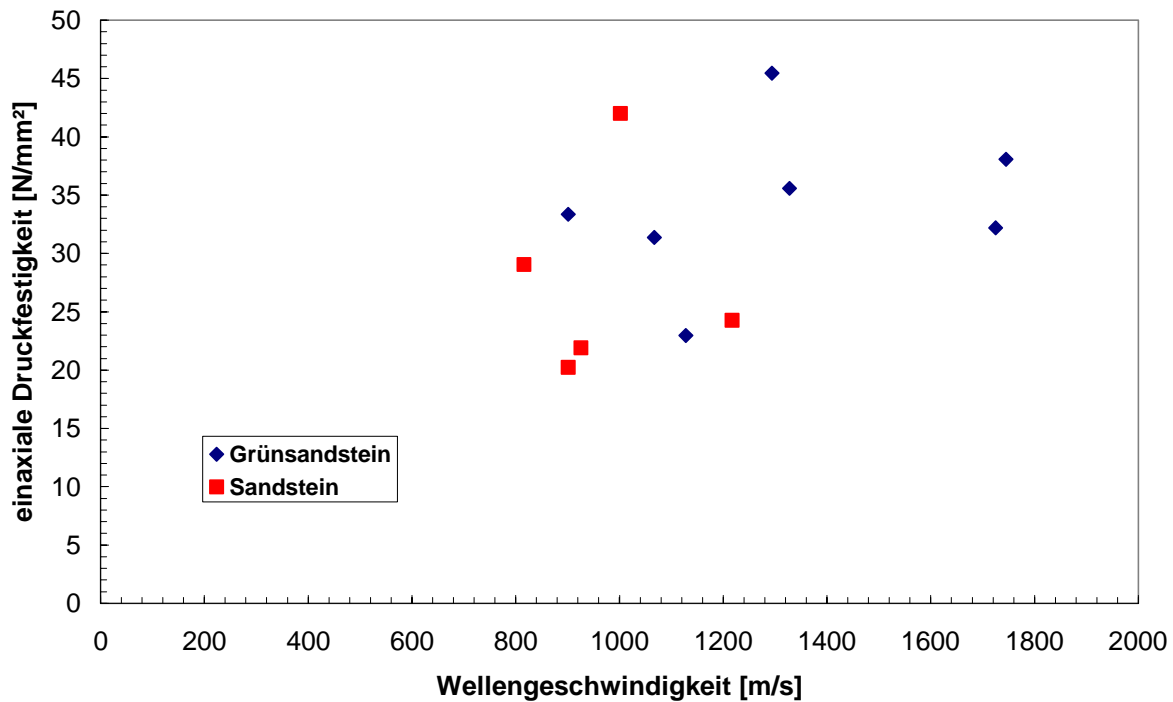


Bild 12: Ergebnisse der impact-echo Messungen

Es zeigt sich, dass die impact-echo Methode in einem gewissen Rahmen Prognosen über die einaxiale Druckfestigkeit von Sandsteinproben liefern kann. Da die Wellengeschwindigkeiten jedoch unter anderem von den Lagerungsbedingungen der Proben, ihren Wassergehalten und nicht zuletzt auch ihren geometrischen Abmessungen abhängen, sollten problembezogene Vergleiche zu einaxialen Druckversuchen erfolgen.

Die Bewertung der Messergebnisse zeigt, dass die ermittelten Werte sowohl der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit als auch der einaxialen Druckfestigkeiten relativ gering sind, das Material also nur noch eine geringe Güte besitzt. Dies erhöht die Notwendigkeit der messtechnischen Überwachung des Brückenbauwerkes zur Sicherstellung seiner Gebrauchstauglichkeit.