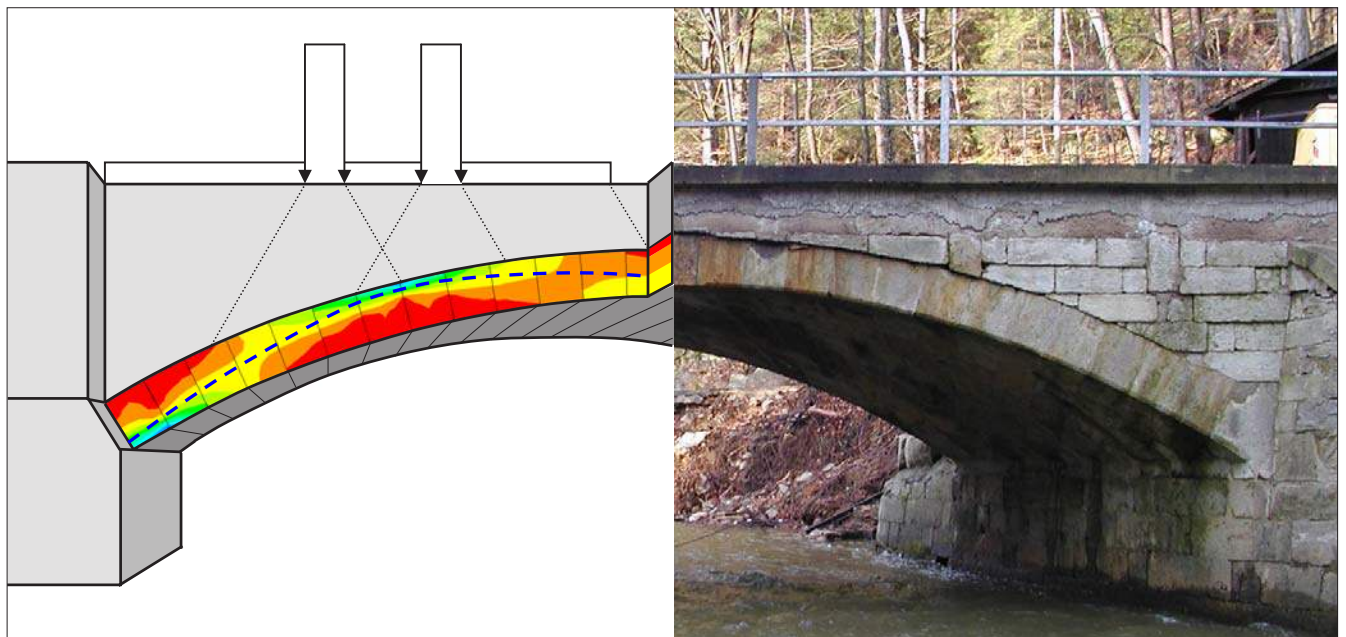


Bogenbrücken aus Natursteinmauerwerk

Entwicklung eines realitätsnahen Berechnungsmodells für den
statischen Nachweis von Bogenbrücken aus Natursteinmauerwerk

Forschungsvorhaben Nr. KU 0425001KAT2 Schlussbericht 03/2006

Auftraggeber
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
„Otto von Guericke“ e.V.
Geschäftsstelle Berlin
Tschaikowskistraße 49
13156 Berlin



Trag Werk Ingenieure
Döking+Purtak Partnerschaft
Goetheallee 23
01309 Dresden
Tel.: 0351/ 43308-50
Fax: 0351/ 43308-55

Dresden, März 2006
Dr.-Ing. Frank Purtak

GMG Ingenieurpartnerschaft
Prof. Graße – Dr. Geißler
George-Bähr-Straße 10
01069 Dresden
Tel.: 0351/ 87657- 0
Fax: 0351/ 87657- 28

Dresden, März 2006
Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Inhalt

1.	Einleitung und Zielstellung	5
2.	Bestehende Vorschriften	7
3.	Aufbau von Bogenbrücken	9
3.1.	Bogenkonstruktion	9
3.2.	Fahrbahn	9
3.3.	Auffüllung	10
3.4.	Aufmauerung	11
3.5.	Widerlager und Pfeiler	11
4.	Einwirkungen auf die Tragkonstruktion	13
4.1.	Eigengewicht des Natursteinbogens	13
4.2.	Eigenlast der Auffüllung	13
4.3.	Eigengewicht der Fahrbahnkonstruktion	15
4.4.	Straßenverkehrslasten	16
4.5.	Eisenbahnverkehrslasten	21
4.6.	Temperaturbeanspruchung	28
4.7.	Windbeanspruchung	31
5.	Bauwerkserkundungen und Festlegung einer Standardbrücke	32
5.1.	Bestandsaufnahme zu Natursteinbogenbrücken	32
5.2.	Bewertung materialtechnischer Untersuchungen	38
5.3.	Festlegung des Standardbrückenbogens	42
6.	Vorhandene Berechnungsmodelle	44
6.1.	Ebene Berechnungsmodelle	44
6.2.	Räumliche Berechnungsmodelle	57
7.	Entwicklung neuer Diskontinuumsmodelle	59
7.1.	Allgemeines Diskontinuumsmodell	59
7.2.	Entkoppeltes Diskontinuumsmodell	59
7.3.	Modellierung der Auffüllung	61
7.4.	Widerlager	66
7.5.	Modellierung der Wanderlasten	67
8.	Traglastermittlung von Mauerwerksquerschnitten	70
8.1.	Berechnung mit finiter Elemente Methode	70
8.2.	Druckversuche an Drei-Stein-Körpern im Maßstab 1:1	80
9.	Untersuchungen an der Standardbrücke	89
9.1.	Einfluss der Spannweite	89
9.2.	Einfluss der Bogendicke	89
9.3.	Elastizitätsmodul des Bogens	93
9.4.	Einfluss des Stichhöhenverhältnisses F/L	94
9.5.	Eigenlastzustand	94
9.6.	Einfluss der Auffüllung	98
9.7.	Einfluss von Auflagerverschiebungen	99
9.8.	Einfluss der Temperatur	104
10.	Versuche am Brückenbogen	106
10.1.	Versuche im Maßstab 1:1	106
10.2.	Ergänzende Bauwerksmessungen an bestehenden Steinbogenbrücken	112
11.	Sicherheitskonzept – Herleitung für Belastung durch Straßenverkehr	117
11.1.	Gültigkeitsgrenzen der Beispielberechnung	117
11.2.	Auswahl und Beschreibung der Basisvariablen	118
11.3.	Bezug zu den Versuchsergebnissen – Testrechnungen	119
11.4.	Bestimmung der numerischen Stützstellen am Standardbogen	120
11.5.	Approximationsfunktion an die diskreten Stützstellen	122

11.6.	Zuverlässigkeitsanalyse	122
11.7.	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	132
12.	Vergleichsberechnungen an der Standardbrücke	133
12.1.	Materialkennwerte	133
12.2.	Berechnung nach DIN 1053 (11/96)	134
12.3.	Seilpolygonverfahren	135
12.4.	Entkoppeltes Diskontinuumsmodell	136
12.5.	Allgemeines Diskontinuumsmodell	140
13.	Empfehlungen für die Nachweisführung	143
13.1.	Statische Modelle	143
13.2.	Nachweiskonzept, Schwerpunkt Naturstein-Quadermauerwerk	143
13.3.	Empfohlene Zahlenwerte für Sicherheitsfaktoren	146
13.4.	Bewertungsstrategie zur gezielten Begutachtung der vorhandenen Bausubstanz	147
14.	Zusammenfassung	151
15.	Literatur	153
16.	Anlage 1: Statistische Erfassung von Bogenbrücken	161
17.	Anlage 2: Seilpolygonmethode	165
18.	Anlage 3: Bruchhypothesen von Natursteinmauerwerk	169
18.1.	Festigkeitsparameter von Naturstein und Mörtel	169
18.2.	Bruchhypothesen	172
19.	Anlage 4: Berechnung des Spannungszustands einer zweiseitig ausmittig belasteten Rechteckscheibe nach der Elastizitätstheorie	191
19.1.	Grundsätzliches	191
19.2.	Symmetrischer Lastfall	193
19.3.	Antimetrischer Lastfall	199
19.4.	Formelzusammenstellung	208
19.5.	Berücksichtigung Teillast mit Randabständen	212
20.	Anlage 5: Querschnittstragfähigkeit nach Finiter-Elemente-Berechnung	215
20.1.	Traglast in Abhängigkeit von der Steinhöhe	216
20.2.	Traglast in Abhängigkeit von der Fugendicke	221
20.3.	Traglast in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul des Steins	222
20.4.	Traglast in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul des Mörtels	222
20.5.	Traglast in Abhängigkeit der Querdehnzahl des Steins	223
20.6.	Traglast in Abhängigkeit der Querdehnzahl des Mörtels	224
20.7.	Traglast in Abhängigkeit der einaxialen Mörteldruckfestigkeit	227
20.8.	Traglast in Abhängigkeit der Steindruck- und Steinzugfestigkeit	228
20.9.	Traglasten für verschiedene Steindicken und Steinfestigkeiten	232
21.	Anlage 6: Möglichkeiten zur probabilistischen Berechnung	237
21.1.	Grenzzustand der Tragfähigkeit	237
21.2.	Grenzzustand der Nutzungsfähigkeit	238
21.3.	Lösungsverfahren nach Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung	238
22.	Anlage 7: Berechnungsoptionen für Finite-Elemente-Berechnungen	252
22.1.	Newton-Raphson-Verfahren	252
22.2.	Netzfeinheit	254
22.3.	Substeps	255
23.	Anlage 8: Versagenslasten der Standardbrücke	257
23.1.	Lastmodell 1	257
23.2.	Lastmodell 71	261

1. Einleitung und Zielstellung

Bogenbrücken aus Natursteinmauerwerk zählen zu den ältesten noch in voller Funktion befindlichen Tragwerken innerhalb von Straßen- und Schienenwegen. Mit einem Bauwerksalter von weit über 100 Jahren stellen diese in großer Anzahl von mehreren Tausend Bauwerken eine historisch sehr wertvolle Bausubstanz dar.

Leider sind im Zeitraum zwischen 1990 und 1995 im Zuge von Streckenausbauvorhaben eine ganze Reihe alter Steinbogenbrücken durch Stahlbetonkonstruktionen ersetzt worden. In den letzten Jahren ist man jedoch durch die Notwendigkeit einer Kostensenkung zunehmend motiviert, Natursteinbogenbrücken zu erhalten und gegebenenfalls zu ertüchtigen.

Im Zuge der Neueinstufung von Verkehrswegen und Ausbauvorhaben werden Bewertungen hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit am Bestand auf der Basis heute gültiger Lastansätze und Berechnungsvorschriften gefordert. Notwendige Verstärkungen oder Ertüchtigungen sind nach Möglichkeit unter weitestgehender Erhaltung des Bestandes durchzuführen, was sowohl Kosten sparen als auch das äußere Erscheinungsbild der Steinbogenbrücken erhalten soll.

Die ältesten bestehenden Bogenbrücken sind Konstruktionen basierend auf Erfahrungswerten der Ausführenden, später standen grafische Verfahren für statische Nachweise zur Verfügung und man entwickelte Näherungsformeln auf Basis der Bogenstützlinie zum Entwurf wesentlicher Geometrieparameter, wie Stützweite, Bogenstich, Bogenform, Bogendicke an Scheitel und Kämpfer. Stellvertretend seien an dieser Stelle die Formelsätze von TOLKMITT, MELAN, MÖRSCH und MÜLLER-BRESLAU genannt. Umfangreiche Zusammenstellungen hierzu findet man bei BUSCH [20]. Solche rechnerischen Überschlüsse können auch heute durchaus nützlich sein, um eine grobe Abschätzung der Tragfähigkeit einer alten Bogenbrücke anhand ihrer Geometrieparameter zu geben.

Die aktuellen Hilfsmittel der Tragwerksbemessung sind hingegen weitaus vielfältiger und können sowohl geometrisch als auch physikalisch nichtlineare Bauwerkseigenschaften berücksichtigen. Allerdings ist das Tragverhalten von Natursteinmauerwerk aufgrund der zahlreichen bedeutenden Einflussfaktoren und der Vielgestaltigkeit in der Ausführung derart komplex, dass trotz intensiver Forschungstätigkeit bis heute kein konsistentes, alle Effekte ausreichend erfassendes Mauerwerksmodell entwickelt werden konnte. Im Vergleich zu den Näherungsverfahren sind jedoch wesentliche Fortschritte in der wirklichkeitsnahen Tragfähigkeitsbewertung erzielt worden.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich ein gewisses Spannungsfeld für den Tragwerksplaner, der mit modernen deterministischen Methoden ausgerüstet, die Tragsicherheit einer alten Bogenbrücke zu bewerten hat. Die verfügbaren Normen zum Nachweis ausreichender Gebrauchs- und Tragfähigkeitseigenschaften gestatten eine relativ pauschale Bewertung der Widerstandsgrößen, die dem individuellen Bauwerkscharakter einer historischen Natursteinbogenbrücken nur begrenzt Rechnung tragen kann. Insofern besteht ein merkliches Defizit zwischen den Möglichkeiten der mechanischen Modellierung und den verfügbaren Sicherheitsnachweisen.

Im Vordergrund dieses Forschungsvorhabens steht das Ziel, Vorschläge für eine detaillierte Bewertung und Wichtung wesentlicher Einflussgrößen auf der Einwirkungs- und Bauwerks-widerstandsseite zu erarbeiten und den statischen Nachweis möglichst auf die neue Normengeneration der semiprobabilistischen Konzepte abzustimmen. Zur Untersetzung der theoretischen Arbeitsergebnisse soll eine experimentelle Bestätigung an Mauerwerksmodellen im Maßstab 1:1 erfolgen.

Die Praxis zeigt, dass Steinbögen – eine gute handwerkliche Ausführung und einen entsprechenden Bauwerkszustand vorausgesetzt – über beachtliche Tragreserven verfügen und in vielen Fällen den heutigen Sicherheitsansprüchen genügen. Nimmt man als einen Sicherheitsindikator das vorhandene Bauwerksalter, dann zeigen bestehende Steinbogenbrücken die Zweckmäßigkeit und Robustheit bogenförmiger Tragwerksgeometrien. Allerdings – und das ist ein wesentlicher Gesichtspunkt – erfordern Bogen eine den Eigenheiten des statischen Systems entsprechende möglichst flächige Lasteintragung.

Ein zuverlässigkeitstheoretisch untersetztes Bemessungskonzept kann den Rahmen für die statische Berechnung bestehender Steinbogenbrücken schaffen. Es setzt jedoch eine genaue Kenntnis der wesentlichen Bauwerkparameter (Geometrie, Festigkeitskennwerte, erd-statische Kennwerte etc.) und eine Analyse des Tragwerkszustandes voraus. Der Tragwerksplaner ist deshalb geradezu verpflichtet, weitere Fachspezialisten (Materialgutachter, Vermesser, Bodengutachter) hinzuzuziehen. Ihm obliegt es, die erforderlichen Voruntersuchungen gezielt mit vertretbarem Kostenaufwand zu koordinieren.

Da die Autoren auf dem Gebiet der Nachrechnung und Ertüchtigung bestehender Brückentragwerke zahlreiche Erfahrungen sammeln konnten, werden in einem Teilabschnitt dieses Forschungsvorhabens Grundsätze für die Formulierung einer Aufgabenstellung und Mindestanforderungen an entsprechende Spezialgutachten zusammengestellt. Damit sollen dem planenden Ingenieur auch einige Hinweise zur Interpretation von Untersuchungsergebnissen zur Verfügung gestellt werden.