

Maßgebende Einwirkungen auf Bogentragwerke für Brücken aus Quadermauerwerk für beliebige Geometrien infolge Normlasten

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur (FH)

dem Fachbereich Bauingenieurwesen / Architektur
der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)

vorgelegte Diplomarbeit.

Von Thomas Gröschke, geboren am 30.03.1977 in Bad Saarow-Pieskow.

Tag der Einreichung: 06.10.2004

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Bobsin, Dr.-Ing. Purtak

Aufgabenstellung

Maßgebende Einwirkungen auf Bogentragwerke für Brücken aus Quadermauerwerk für beliebige Geometrien infolge Normlasten.

- Lasten, Laststellungen und Lastkombinationen
- Lineare und nichtlineare Berechnungsmodelle, Vergleich
- Beanspruchung des Bogenquerschnittes, Stützlinien
- Eingabemaske erstellen
- Beispielberechnung mit Bemessung nach Traglastkurven

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit widmet sich den für die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken relevanten Einflüssen. Hierzu werden anfangs Themengebiete der Modellgenerierung behandelt, um anschließend mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode ausführliche Parameterstudien unter Normlasten durchführen zu können. Abschließend wird ein Nachweiskonzept für Gewölbebrücken aus quaderförmigem Mauerwerk entwickelt und beispielhaft angewendet.

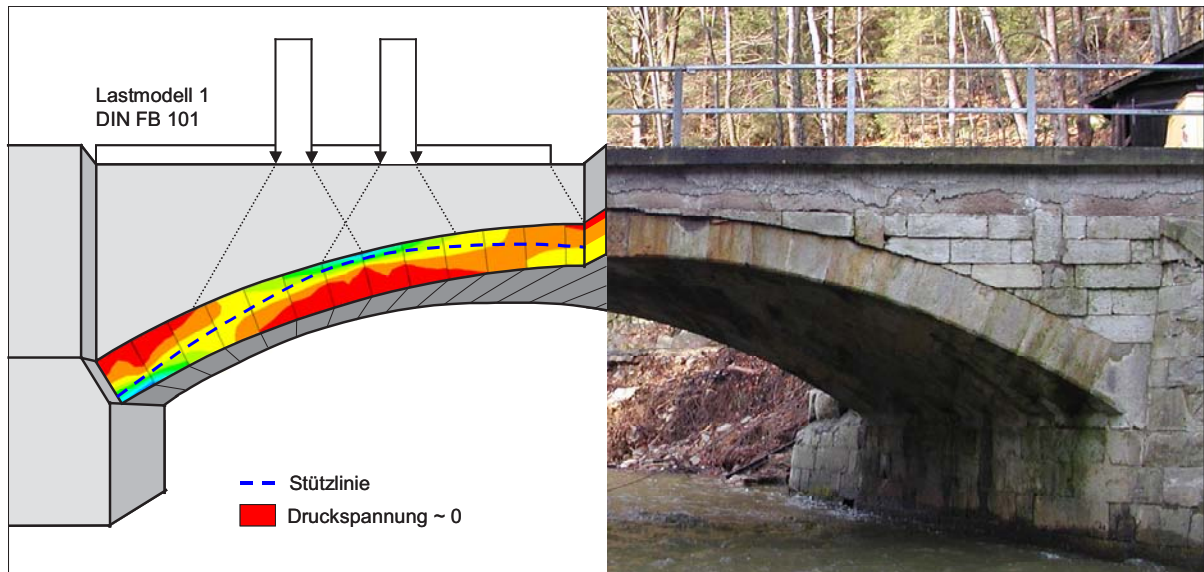


Abb. 1: Müglitzbrücke zwischen Bärenhecke und Glashütte [1]

Abkürzungsverzeichnis

F	Kraft
N	Normalkraft
N_{Bruch}	Normalkraft im Bruchzustand
N_{vorh}	rechnerisch vorhandene Normalkraft
Q	Querkraft
M	Moment
e	Exzentrizität von N bezüglich der Querschnittsmitte
m	bezogene Ausmitte von N; $m = 6 \cdot e/d$
u	Verschiebung
L	Spannweite des Bogens
F	Stichhöhe des Bogens
R	Krümmungsradius
d	Bogen- bzw. Gewölbedicke
d_S	Dicke am Scheitel
d_K	Dicke am Kämpfer
d_o	oberer Grenzwert der Mindestdicke
d_u	unterer Grenzwert der Mindestdicke
h_A	Höhe der Auffüllung über Bogenscheitel
h_{FB}	Höhe des Fahrbahnaufbaus
h_{St}	Steinhöhe
b_{St}	Steinbreite
t	Fugendicke
H	Horizontalschub am Kämpfer
φ_K	Anstiegswinkel des Bogens am Kämpfer
E_{St}	Elastizitätsmodul für Stein
$E_{\text{Mö}}$	Elastizitätsmodul für Mörtel
E_{MW}	äquivalenter Elastizitätsmodul für Mauerwerk
E_0	Elastizitätsmodul Ausgangszustand
E_S	Steifeziffer des Baugrundes
G_{MW}	äquivalenter Schubmodul für Mauerwerk
$\beta_{D,\text{St}}$	Steindruckfestigkeit
$\beta_{D,\text{St},5\%}$	5%-Fraktilwert von $\beta_{D,\text{St}}$
$\beta_{Z,\text{St}}$	Steinzugfestigkeit
$\beta_{Z,\text{St},5\%}$	5%-Fraktilwert von $\beta_{Z,\text{St}}$
$\beta_{\text{SZ},\text{St}}$	Spaltzugfestigkeit des Steins
$\beta_{D,\text{Mö}}$	Mörteldruckfestigkeit

β_{RHS}	Haftscherfestigkeit
τ	Schubspannung
σ	Spannung
ε	Dehnung
$\mu_{\text{Mö}}$	Querdehnzahl für Mörtel
μ_{St}	Querdehnzahl für Stein
γ_{A}	Wichte der Auffüllung
φ_{A}	Lastverteilungswinkel der Auffüllung
γ_{St}	Wichte des Steins
LM 1	Lastmodell 1 nach DIN FB 101
x_{DA}	Abstand von Brückenanfang bis Vorderkante Doppelachse des LM 1
x_{FL}	Abstand von Brückenanfang bis Vorderkante Flächenlast des LM 1
α_{Qi}	Abminderungsfaktor
Q_{max}	Traglast der Brücke
T_0	Aufstelltemperatur
T_{min}	tiefste Außenlufttemperatur
T_{max}	höchste Außenlufttemperatur
$T_{\text{e,min}}$	minimale Bauteiltemperatur
$T_{\text{e,max}}$	maximale Bauteiltemperatur
$\Delta T_{\text{N,neg}}$	Abkühlung des konstanten Temperaturanteils im Bauteil
$\Delta T_{\text{N,max}}$	Erwärmung des konstanten Temperaturanteils im Bauteil
α_t	linearer Temperaturexpansionskoeffizient
E_d	Bemessungswert der Beanspruchung
R_d	Bemessungswert des Traglastwiderstandes
C_d	Gebrauchstauglichkeitskriterium
$\beta_{\text{D,St,d}}$	Bemessungswert der Steindruckfestigkeit
$\beta_{\text{Z,St,d}}$	Bemessungswert der Steinzugfestigkeit
σ	Standardabweichung
α	Ausnutzungsgrad
α_{Q}	Querkraftausnutzung
FEM	Finite-Elemente-Methode
K	Systemsteifigkeit

Die Bedeutung weiterer Abkürzungen ergibt sich aus dem Kontext.

Inhaltsverzeichnis:

Aufgabenstellung	II
Kurzfassung	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Ziele und Lösungsansatz	4
3 Diskussion der Begriffe Bogen und Gewölbe	6
4 Aufbau von Gewölbebrücken	8
4.1 Fahrbahn	8
4.2 Auffüllung	9
4.3 Aufmauerung	10
4.4 Gewölbe	10
4.5 Pfeiler und Widerlager	11
5 Ausgewählte Verfahren der Gewölbeberechnung	12
5.1 Kantungstheorie	13
5.2 Stützlinientheorie	16
5.2.1 Hängemodelle	18
5.2.2 Seilpolygonverfahren	21
6 Einwirkungen	22
6.1 Lastmodell 1	22
6.2 Temperatur	24
7 Modellierungstechniken	27
7.1 Iterative Modellanpassung	27
7.2 Diskontinuumsmodelle	29
7.3 Elastisch-plastische „Smeared Chrack“ Modelle	30
7.4 Vergleich statischer Modelle für Gewölbebrücken	32

8	Modellgenerierung	34
8.1	ANSYS®	35
8.2	NEWTON-RAPHSON-Verfahren	35
8.3	Brückenbogen	37
8.4	Stützzlinie	38
8.5	Auffüllung	39
8.5.1	Stabwerksmodell	39
8.5.2	Scheibenmodell	41
8.5.3	Programmtechnisch umgesetzte Methode	44
8.6	Widerlager	45
8.7	Reihenfolge der Lastgenerierung	46
8.8	Generierung der Wanderlasten	46
8.9	Vorbereitung einer Eingabemaske	47
9	Parameterstudien	48
9.1	Vorbemerkungen	48
9.1.1	Statistische Erhebung	49
9.1.2	Standardbrücke	51
9.1.3	Versagensarten und Bruchkurven	53
9.2	Modelleinstellung	57
9.2.1	Netzfeinheit	57
9.2.2	Substeps	59
9.2.3	Schrittweite des Lastenzuges	60
9.3	Elastizitätsmodul	62
9.4	Auffüllung	63
9.4.1	Lastverteilungswinkel der Auffüllung	63
9.4.2	Höhe der Auffüllung	65
9.4.3	Wichte der Auffüllung	66
9.5	Spannweite	66
9.6	Bogendicke	67
9.7	Konische Bögen	70

9.8	Stichhöhenverhältnis F/L	72
9.8.1	Eigenlastzustand	73
9.8.2	Eigenlast und symmetrische Belastung unter Gleichlast	74
9.8.3	Eigenlast und Überfahrt des Lastmodells 1	75
9.8.4	Querkraftbeanspruchung aus Eigenlast und Überfahrt des Lastmodells 1.....	78
9.9	Auflagerverschiebungen	80
9.10	Temperatur	85
10	Nachweise.....	87
10.1	Vorschlag für ein Nachweiskonzept	88
10.2	Nachweis der Standardbrücke	90
10.2.1	Anwendung des entwickelten Nachweiskonzeptes.....	90
10.3	Vergleichsrechnungen	95
10.3.1	DIN 1053 (11/96).....	95
10.3.2	Seilpolygonverfahren.....	96
10.3.3	Diskontinuumsmodell ohne Mörtelfuge	97
10.3.4	Diskontinuumsmodell mit Mörtelfuge	98
11	Zusammenfassung und offene Probleme	101
12	Quellenverzeichnis	104
13	Eidesstattliche Erklärung	109
14	Anhang	110

1 Einleitung

Der Gewölbebau ist eines der ältesten Verfahren Räume zu überspannen und Geländeeinschnitte oder Flüsse zu überqueren. Heute sind allorts noch viele Gewölbebrücken vorhanden. In Sachsen entstanden die ersten Natursteinbrücken um die Mitte des 13. Jahrhunderts. Besonders zur Blütezeit des Silberbergbaus im 16. Jahrhundert baute man im Freiburger Raum massive Brücken aus unregelmäßigen Gneis-Hausteinen, die nicht selten auch heute noch ihre zugeordnete Aufgabe erfüllen. Hierzu gehört beispielsweise die um 1570 errichtete Altväternbrücke in Halsbrücke die eine einspurige Straßenüberführung über die Freiburger Mulde gewährleistet (Abb. 2 a).



Abb. 2: a) Altväternbrücke in Halsbrücke [45], b) Göltzschtalbrücke bei Mylau [ebenda.]

Nach einem zwischenzeitlichen Stillstand im Brückenbau, welcher durch den Dreißigjährigen Krieg (1618-1648) eintrat, konnte sich der Brückenbau unter dem sächsischen Kurfürsten Friedrich August I. (August der Starke, 1694-1733) stetig entwickeln. In dieser Zeit entstand beispielsweise die durch das Jahrhunderthochwasser im Jahr 2002 zerstörte Pöppelmannbrücke über die Mulde in Grimma, deren Wiederaufbau gegenwärtig diskutiert wird. Die wohl bedeutendsten sächsischen Gewölbebrücken wurden jedoch im 19. und am Anfang des 20. Jahrhunderts mit dem Ausbau der Verkehrsnetze errichtet. In dieser Zeit kamen die seit dem 17. Jahrhundert in stetiger Entwicklung befindlichen statischen Berechnungsverfahren erstmals ausführlich zur Anwendung.

Die größte Ziegelbrücke der Welt entstand mit der Göltzschtalbrücke im Zuge der Eisenbahnverbindung Leipzig - Nürnberg zwischen 1846 und 1851 bei Mylau im Vogtland [Abb. 2 b]. Die 574 m lange und bis zu 78 m hohe Brücke besteht aus 26 Millionen Ziegelsteinen und wird auch heute noch befahren. Zum Zeitpunkt ihrer Fertigstellung war sie zugleich die weltweit höchste Brücke der damals noch jungen Eisenbahngeschichte.

Neben den Schienennetz erforderte das anwachsende Straßennetz ab Mitte des 19. Jahrhunderts zunehmend größere Brückenbauwerke. Ein Beispiel hierfür ist die von 1875 bis 1877 entstandene Albertbrücke in Dresden [Abb. 3 a]. Sie überquert als letzte gemauerte Steinbogenbrücke die Elbe.

Einen weiteren Höhepunkt des Gewölbebaus in Sachsen markiert die Syratalbrücke (Friedensbrücke) in Plauen (Sachsen), die auch heute noch als die weitspannendste Steinbrücke Europas gilt [Abb. 3 b]. Sie wurde von 1903 bis 1905 im Zuge der jetzigen Friedensstraße errichtet. Die lichte Weite der korbformig gewölbten Hauptöffnung beträgt 90 m.



Abb. 3: a) Albertbrücke in Dresden [45], b) Syratalbrücke in Plauen [45]

Ebenfalls im Vogtland befindet sich die 635 m lange und max. 60 m hohe Elstertalbrücke Pirk, mit welcher der Bau bedeutender Gewölbebrücken in Sachsen seinen Abschluss fand. Sie besteht aus zwölf aneinandergereihten halbkreisförmigen Granitgewölben. Infolge der Kriegsanstrengungen stellte man die Bauarbeiten 1940 im unvollendeten Zustand ein [Abb. 4 a]. Erst im zweiten Bauabschnitt von 1991 bis 1993 erfolgte die Fertigstellung im Zuge des Ausbaus der Bundesautobahn A 72, die sechsspurig über das Weisse-Elster-Tal geführt werden soll [Abb. 4 b]. Hierzu sind zwei jeweils einseitig auskragende Hohlkastenquerschnitte aus Spannbeton zum Einsatz gekommen, welche jeweils über den Pfeilern punktförmig gelagert sind. Auch wenn dadurch die Gewölbe nicht ihre ursprünglich zuge dachte Tragfunktion besitzen, so gilt die Elstertalbrücke Pirk als größte europäische Quadersteingewölbebrücke.



Abb. 4: Elstertalbrücke Pirk a) nach 1940 [45], b) nach 1993 [ebenda.]

Allein in Sachsen erfolgten in den letzten Wochen des Zweiten Weltkrieges mehr als 600 gezielte Brückensprengungen. Hiervon waren viele Gewölbebrücken betroffen. Im Zusammenhang mit der Wiederherstellung kam es letztmalig zur umfangreichen Anwendung von tragendem Mauerwerk im Brückenbau.

Leider wurden in den neuen ostdeutschen Bundesländern im Zeitraum zwischen 1990 und 1995 im Zuge von Streckenausbauvorhaben eine ganze Reihe alter Gewölbebrücken durch Stahlbetonkonstruktionen ersetzt. Im Gegensatz hierzu entstanden besonders in China zwischen 1960 bis 1990 zahlreiche imposante Gewölbebrücken. Als größte Gewölbebrücke der Welt gilt derzeit die 1990 fertiggestellte Wuchaohe Brücke mit einer lichten Spannweite von 120 m und einer Gesamtlänge von 241 m.

Neben den hier vorgestellten Beispielen existieren gegenwärtig in Deutschland mehrere tausend Gewölbebrücken mittlerer und kleiner Dimensionen. Aus Gründen der Denkmalpflege und der Kosteneffizienz ist man zunehmend motiviert, Natursteinbrücken zu erhalten und gegebenenfalls zu ertüchtigen. Für die Neueinstufung von Verkehrswegen und Ausbauvorhaben ist es nötig, Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit am Bestand unter den heute gültigen Lastansätzen zu führen.

Die heute gültige DIN 1053-1 [10] ist in erster Linie für Neubauten ausgelegt. Die im Abschnitt 12 dieser DIN getroffenen Festlegungen für Natursteinmauerwerk sind sehr pauschal. Sie eignen sich deshalb nur bedingt zur genauen Einschätzung tatsächlich vorhandene Tragfähigkeitsreserven an bestehenden Gewölbebrücken. Diese Materialfestigkeitsnorm beruht auf dem Bruchmodell von MANN [2].

Aktuelle Hilfsmittel auf dem Gebiet der Rechentechnik ermöglichen die Berücksichtigung sowohl geometrischer als auch physikalisch nichtlinearer Tragwerkseigenschaften. Trotzdem liegt für das sehr komplexe Tragverhalten von Natursteinmauerwerk bisher kein konsistentes, alle Effekte ausreichend erfassendes Materialmodell vor. Für die Modellierung der Gewölbebrücke ist es mit den heutigen Möglichkeiten der Finite-Elemente-Methode (FEM) zudem nicht mehr zwingend notwendig, ein vereinfachtes Tragmodell für Mauerwerk anzuwenden.

Vor diesem Hintergrund hat das Dresdner Planungsbüro TRAG WERK INGENIEURE in Zusammenarbeit mit der ebenfalls in Dresden ansässigen G-M-G INGENIEURPARTNERSCHAFT das Forschungsvorhaben „Bogenbrücken aus Natursteinmauerwerk“ [41] beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie bewilligt bekommen. Im Vordergrund steht das Ziel, Vorschläge für eine detaillierte Bewertung und Wichtung wesentlicher Einflussgrößen auf der Einwirkungs- und Bauwerkswiderstandsseite zu erarbeiten und ein speziell für Gewölbebrücken geeignetes Nachweisverfahren anzubieten. Hierzu ist die Entwicklung realitätsnaher Berechnungsmodelle nötig.

2 Ziele und Lösungsansatz

Als Mitarbeiter im Forschungsvorhaben „Bogenbrücken aus Natursteinmauerwerk“ [41] möchte der Autor mit der vorliegenden Arbeit einen Beitrag zur Entwicklung eines realitätsnahen Berechnungsmodells für den statischen Nachweis von Gewölbebrücken leisten. Hauptgegenstand der Untersuchungen sind Straßenbrücken.

Hauptsächlich sollen folgende Sachverhalte verfolgt werden:

- Weiterentwicklung eines ANSYS® - Berechnungsmodells [30] auf Grundlage des vom Büro TRAGWERK INGENIEURE [41] übergebenen Programmcodes. Hierbei steht vor allem die Programmierung der Verkehrslastgenerierung im Vordergrund.
- Vorbereitung einer Eingabemaske für die Modellparameter
- Studien zur Klärung der einzelnen Parametereinflüsse auf die Traglast von Gewölbebrücken
- Entwicklung und beispielhafte Anwendung eines Nachweiskonzeptes

Der Lösungsansatz für die Ermittlung der Tragfähigkeit durch realitätsnahe Simulation von Gewölbebrücken ist in Abb. 5 dargestellt. Bogenmodelle aus finiten Scheibenelementen mit den in Abschnitt 7.2 beschriebenen Kontaktbedingungen sind bei der Berücksichtigung von nichtlinearen Materialeigenschaften des Fugenmörtels noch sehr rechenzeitaufwendig.

Somit ist es notwendig, das Thema der Beanspruchbarkeit des Mauerwerks in einem gesonderten Modell zu betrachten. Die hierzu notwendige wissenschaftliche Abhandlung wird parallel zu dieser Arbeit von HIRSCH [31] durchgeführt. Darin werden Traglastkurven für die wesentlichen Geometrie- und Materialparameter ermittelt. Das dazu verwendete Finite-Elemente-Modell besteht aus drei quaderförmigen Steinen, wobei der Mörtel in den Lagerfugen berücksichtigt ist.

Das Themengebiet der Beanspruchung vertritt der Autor. Die Schnittgrößen werden hierfür im Bogen-tragwerk aus Quadermauerwerk ermittelt, wobei die rechenaufwendige Modellierung des Fugenmörtels entfällt.

Somit werden die beiden Themen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Gewölbebrücken in zwei getrennten FE-Modellen betrachtet. Die Schnittgrößen, welche aus der ungünstigsten Stellung von Normlasten an einem Brückenbogen ohne modelliertem Mörtel resultieren, sind im Rahmen des in Abschnitt 10.1 vorgestellten Tragfähigkeitsnachweises mit einer Bemessungstraglastkurve zu vergleichen. Hierdurch soll die gegenwärtige Lücke zwischen den Möglichkeiten der mechanischen Mauerwerksmodellierung und den verfügbaren Sicherheitsnachweisen geschlossen werden.

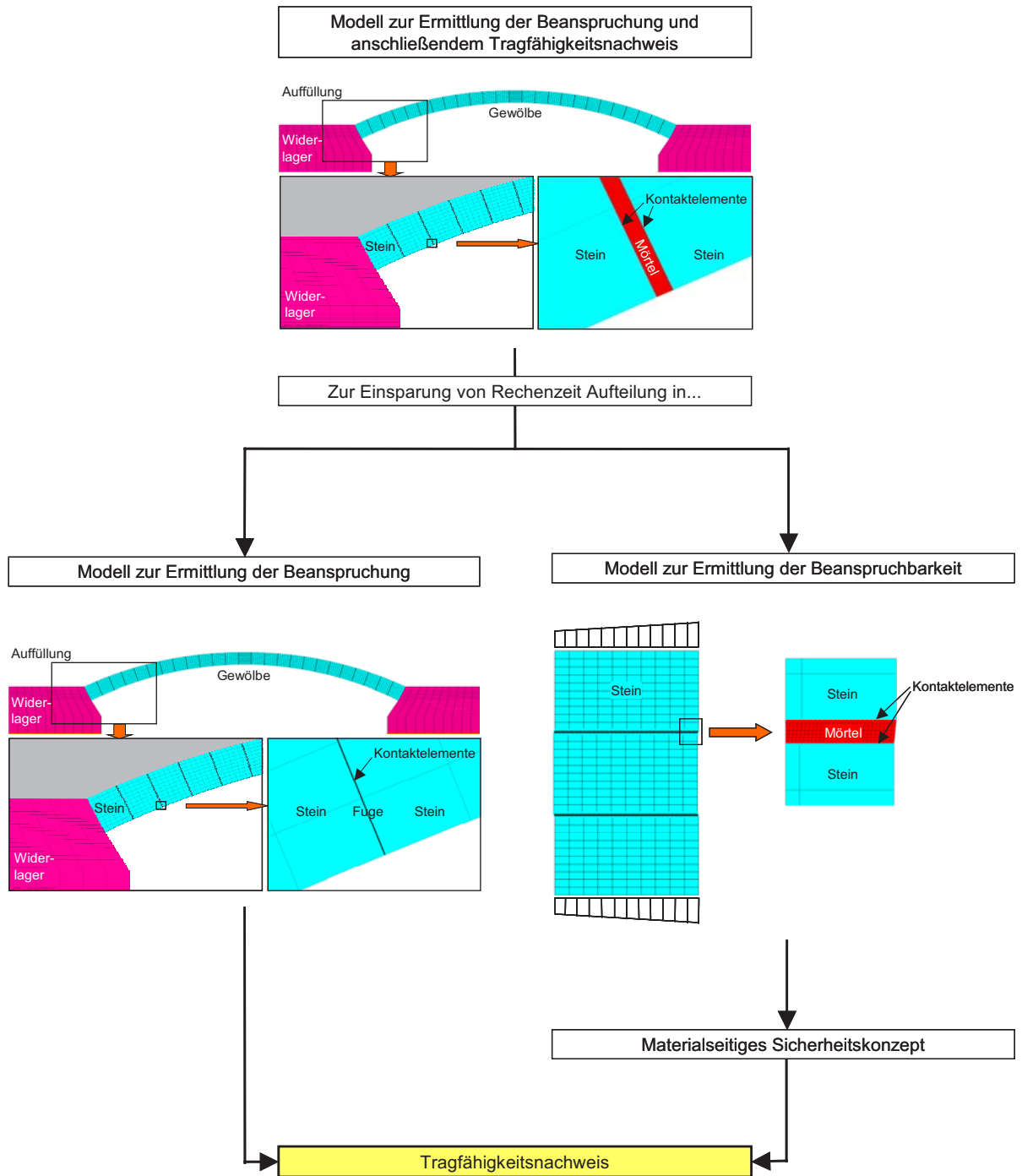


Abb. 5: Konzeptioneller Lösungsansatz durch entkoppelte Modelle

11 Zusammenfassung und offene Probleme

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit ist ein Beitrag zur Erhaltung von historisch bedeutsamen Gewölbebrücken. Hierzu steht nach Abschluss dieser Diplomarbeit ein weiterentwickeltes Rechenmodell auf Grundlage der Programmiersprache APDL [30] zur Verfügung, welches den Grundstein für eine marktfähige Software bilden kann. Nach umfangreichen Parameterstudien wird ein Nachweis-konzept formuliert und angewendet, welches auf die speziellen Eigenarten von Gewölbebrücken zugeschnitten ist.

Nach einem Einblick in das Tragverhalten von Gewölbekonstruktionen, insbesondere zur Entwicklung der Kantungs- und der Stützlinientheorie, werden verschiedene Modellierungsvarianten für Gewölbe vorgestellt und diskutiert. Für die Brückenmodellierung steht ein ebenes Berechnungsmodell aus dem Büro TRAGWERK INGENIEURE [41] auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode zu Verfügung, welches das Tragverhalten von Brückenbögen aus Mauerwerk realitätsnah erfasst. Durch die Verwendung von Kontaktelementen wird das Klaffen der Mauerwerksfugen unter exzentrisch im Querschnitt angreifender Normalkraft ermöglicht, ohne dass für die Modellgenerierung die Implementierung einer Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge notwendig ist. Den Schwerpunkt der für die Diplomarbeit notwendigen Weiterentwicklung des Programmiercodes bildet die Verkehrslastgenerierung, wobei die Lastverteilung in der Auffüllung unter Anwendung eines Kugelmodells geschieht. Für die in der Praxis häufig auftretenden Probleme bei der Auffüllungsgenerierung mittels finiten Scheiben- oder Volumenelementen steht nach Abschluss dieser Arbeit ein Lösungsvorschlag bereit.

Anschließend umfangreich durchgeführte Parameterstudien dienen zur Klärung der Einflüsse von maßgebenden Normlasten auf die Tragfähigkeit von Brückenbögen aus Quadermauerwerk. Die Grundlage hierfür bildet eine Standardbrücke, die das Ergebnis einer statistischen Erfassung ist. Als Normlast werden das Lastmodell 1 und die Temperaturbeanspruchung aus dem DIN Fachbericht 101 gewählt. Anhand der Standardbrücke ist die Variation von Geometrieparametern möglich. Zusätzlich sind Auflagerverschiebungen Gegenstand der Betrachtungen.

Nach Kenntnis wesentlicher Zusammenhänge und Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken ist es möglich, ein spezielles Nachweis-konzept für Brückenbögen aus quaderförmigen Natursteinmauerwerk zu entwickeln und beispielhaft anzuwenden. Der Nachweis stützt sich auf Bemessungstraglastkurven, welche aus den abgeminderten 5%-Fraktilwerten für die Steindruck- und Steinzugfestigkeit durch Interpolation gewonnen werden. Die Beanspruchung erfolgt auf charakteristischem Lastniveau. Die Vorteilhaftigkeit des entwickelten Verfahrens zeigt sich bei hochbeanspruchten Brückenbögen aus Mauerwerk in den durchgeführten Vergleichsrechnungen. Darin ist der Nachweis einer Gewölbebrücke unter dem heutigen Lastniveau möglich, deren Tragfähigkeit nach der aktuellen DIN 1053 nicht gewährleistet ist.

Raum für zukünftige Forschungstätigkeiten verbleibt im Zusammenhang mit dem Querkrafteinfluss auf die Tragfähigkeit von Brückenbögen aus Mauerwerk. Einen Ansatz hierfür bietet der in dieser Arbeit vorgestellte, sehr rechenaufwendige Modellbogen mit Kontaktelementen in konkret ausgeformten Mörtelfugen, in dessen Traglast das Querkraftproblem bereits automatisch Berücksichtigung findet. Leider ermöglicht der derzeitige Stand der Rechentechnik noch keine brauchbare Anwendung von Kontaktproblemen in räumlichen Modellen.

Im einzelnen sind folgende Ergebnisse zu nennen:

- Am vorteilhaftesten ist die Modellbildung des Brückenbogens aus Mauerwerk als Diskontinuum mit Kontaktelementen.
- Die Abbildung der Auffüllung durch Scheiben- oder Volumenelemente ist problematisch. Vorteilhafter ist die Generierung der Lasten als mathematische Funktionen direkt auf den Brückenbogen, wobei Einzellasten, in Anlehnung an das geotechnische Kugelmodell, als Gauß-Normalverteilungen aufgeprägt werden.
- Der Elastizitätsmodul des Sandsteins besitzt in dessen üblichem Streubereich weder einen wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Mauerwerks noch auf die Tragfähigkeit oder die Schnittgrößen des Brückenbogens.
- An den maßgebenden Schnitten ist die Empfindlichkeit der Zustandsgrößen auf abweichende Laststellungen am größten. Für Lastüberfahrten ist es deshalb von Vorteil, möglichst geringe Schrittweiten anzustreben.
- Ein steiler Lastverteilungswinkel der Auffüllung reduziert die Tragsicherheit von Gewölbebrücken maßgeblich.
- Symmetrische Lastanteile vergrößern die Vorspannung am Querschnitt und somit die Tragheit der Stützlinie bezüglich ihrer Exzentrizität im Querschnitt. Deshalb haben diese bei asymmetrisch belasteten Brückenbögen stabilisierende Wirkung.
- Große Höhen und Wichten der Auffüllung erhöhen den Vorspanngrad und wirken sich auf die Stützlinienlage und Tragfähigkeit günstig aus.
- Schon leicht konische Bogengeometrien bringen wesentliche Tragfähigkeitsvorteile.
- Unter symmetrischen Lastzuständen existieren, in Abhängigkeit von deren Belastungsfunktion, optimale Bogengeometrien für die Stützlinienlage.

-
- Für die Tragfähigkeit überschütteter Bogenkonstruktionen aus Mauerwerk ist festzustellen, dass sich eine steile Geometrie bei asymmetrischen Lasten ungünstig auswirkt.
 - Die Querkraftausnutzung des Querschnitts reagiert sehr träge auf die Änderung des Stichhöhenverhältnisses.
 - Für die Bestimmung der Querkraftausnutzung im Querschnitt ist mit guter Näherung davon auszugehen, dass derjenige Schnitt bemessungsrelevant ist, an dem die größte Querkraft festgestellt wird.
 - Bei Querkraftnachweisen (Plattenschub) an Gewölbebrücke ist der Einfluss der Haftscherfestigkeit vernachlässigbar.
 - Schon kleinste Relativverschiebungen zwischen den Widerlagern reduzieren die Tragfähigkeit des Brückenbogens erheblich. Für den Sonderfall eines symmetrischen Lastzustandes sind Lokalisationen der Verdrehungen bei sehr großen Auflagerverschiebungen zu beobachten.
 - Der maßgebende Temperaturlastfall wird bei Abkühlung erreicht. Infolge zunehmender Ausmitte der Druckresultierenden im Querschnitt nimmt die Tragfähigkeit des Brückenbogens deutlich ab.
 - Für ungeschädigte Gewölbebrücken üblicher Geometrien aus Sandsteinmauerwerk ist in Stabilitätsversagen kein vorrangiges Nachweiskriterium. Nur bei sehr großen Auflagerverschiebungen kann ein Durchschlagen des Modellbogens infolge einer sich bildenden Gelenkkette für asymmetrische Stellungen des Lastmodells 1 [DIN FB 101] festgestellt werden.
 - Die Steindruck- sowie die Steinzugfestigkeit sind die einflussreichsten Materialkennwerte und die Steinbreite sowie die Steinhöhe die einflussreichsten Geometrieparameter auf die Bruchlast von Mauerwerk [31].
 - Der Einsatz von Lastfaktoren für die Erhöhung der Beanspruchungen zum Zwecke der Sicherheit ist bei Gewölbebrücken generell negativ zu beurteilen.
 - Es wird ein Tragfähigkeitsnachweis mit charakteristischem Lastniveau vorgeschlagen, welcher auf der Absicherung der 5%-Fraktile von Steindruck- und Steinzugfestigkeit beruht.