

TRAGFÄHIGKEITSUNTERSUCHUNGEN VON  
QUADERMAUERWERK ZUR STATISCHEN  
BEURTEILUNG VON BOGENBRÜCKEN

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Diplomingenieur (FH)**

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

vorgelegte Diplomarbeit.

Von Uwe Hirsch

geboren am 04.05.1979

in Zeulenroda

Tag der Einreichung: 06.10.2004

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Bobsin  
Dr. Frank Purtak

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

### Aufgabenblatt für die Diplomarbeit

Name des Diplomanden: Uwe Hirsch

#### Thema

Tragfähigkeitsuntersuchungen von Quadermauerwerk zur statischen Beurteilung von Bogenbrücken

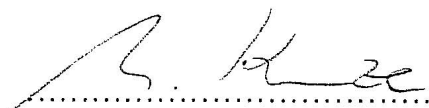
#### Aufgabenstellung (mit Zielsetzung und zu erstellende Unterlagen)

- Bruchmodell Sandstein, Fließmodell Mörtel;
- Versagensarten;
- mehraxialer Spannungszustand;
- Traglastkurven für verschiedene Bogendicken;
- Einfluss der Parameter beispielsweise: Steindruck- und Steinzugfestigkeit, E-modul, Querdehnzahl, Bogendicke.

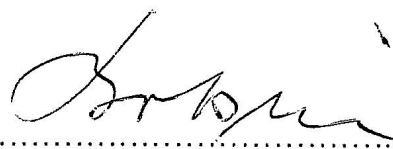
Betreuer: Prof. Dr. Bobsin

Ausgehändigt am: 11.06.2004

Einzureichen bis: 06.09.2004



.....  
Dekan



.....  
verantwortlicher Hochschullehrer

Besondere Hinweise zum Anfertigen der Diplomarbeit sind zu beachten (siehe Homepage des FB)!

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis verwendeter Symbole .....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung und Zielstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Natursteinmauerwerk .....</b>	<b>4</b>
2.1 Natursteine .....	4
2.1.1 Einteilung der Gesteine .....	4
2.1.2 Eigenschaften von Natursteinen.....	6
2.1.3 Der Sandstein .....	6
2.2 Mörtel.....	14
2.2.1 Aufbau historischer Mörtel.....	14
2.2.2 Mechanische Eigenschaften von Mörtel unter einaxialer Belastung.....	15
2.2.3 Mechanische Eigenschaften von Mörtel unter mehraxialer Beanspruchung .....	16
2.3 Mauerwerksverbände .....	19
2.4 Bemessung von Natursteinmauerwerk nach DIN 1053-1 .....	20
<b>3 Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk .....</b>	<b>22</b>
3.1 Tragmechanismus von Mauerwerk unter einaxialer Druckbelastung .....	22
3.2 Versagensarten von Natursteinmauerwerk .....	24
3.2.1 Steinversagen .....	24
3.2.2 Versagen infolge Gelenkbildung.....	28
<b>4 Bruchmodelle .....</b>	<b>29</b>
4.1 Analytische Bruchmodelle und Berechnung.....	29
4.1.1 Bruchmodell von Hilsdorf.....	30
4.1.2 Bruchmodell von Mann .....	31
4.1.3 Bruchmodell von Berndt .....	32
4.1.4 Bruchmodell von Pöschel/Sabha.....	33
4.2 Bruchmodelle für die numerische Berechnung .....	36
4.2.1 Bruchmodell nach Mohr-Coulomb .....	40
4.2.2 Bruchmodell nach Drucker-Prager .....	43

<b>5</b>	<b>Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente.....</b>	<b>47</b>
5.1	Verwendete Software .....	47
5.2	Modell .....	47
5.2.1	Vernetzung .....	47
5.2.2	Inkrementelle Laststeigerung und Gleichgewichtsiteration .....	50
5.2.3	Kontaktfläche Fuge-Stein .....	51
5.2.4	Spannungs-Dehnungs-Beziehung.....	52
5.2.5	Lasteinleitung und Auswertung der Bruchkriterien .....	53
5.2.6	Materialparameter.....	54
5.2.7	Geometrieparameter.....	56
5.3	Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Ausmitte.....	57
5.4	Spannungsverteilung in der Mörtelfuge.....	59
<b>6</b>	<b>Traglasten nach Finite-Elemente-Berechnung .....</b>	<b>60</b>
6.1	Traglast in Abhängigkeit von der Steinhöhe.....	60
6.2	Traglast in Abhängigkeit von der Fugendicke .....	66
6.3	Traglast in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul des Steins .....	68
6.4	Traglast in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul des Mörtels .....	68
6.5	Traglast in Abhängigkeit der Querdehnzahl des Steins .....	69
6.6	Traglast in Abhängigkeit der Querdehnzahl des Mörtels .....	70
6.7	Traglast in Abhängigkeit der einaxialen Mörteldruckfestigkeit .....	73
6.8	Traglast in Abhängigkeit der Steindruck- und Steinzugfestigkeit .....	74
6.9	Traglasten für verschiedene Steindicken und Steinfestigkeiten.....	79
<b>7</b>	<b>Ausblick zur praktischen Anwendung von Traglastkurvenscharen.....</b>	<b>82</b>
<b>8</b>	<b>Praktische Druckversuche an Drei-Stein-Körpern .....</b>	<b>84</b>
8.1	Versuchsprogramm .....	84
8.1.1	Versuchsaufbau.....	84
8.1.2	Belastungsprogramm.....	87
8.1.3	Messprogramm.....	87
8.2	Versuchsergebnisse .....	88
8.2.1	Versuch unter zentrischem Lastangriff.....	88
8.2.2	Versuch mit Lastangriff in $m = 1,0$ .....	90
8.2.3	Versuch mit Lastangriff in $m = 2,0$ .....	91
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>92</b>
<b>10</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>95</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>100</b>

---

# Anhangsverzeichnis

<b>Anhang A: Bruchmodell nach Mohr-Coulomb .....</b>	<b>101</b>
A.1: Herleitung der Materialkennwerte $c$ und $\varphi$ .....	101
A.2: Herleitung der Beziehungen zur Beschreibung des Hexagons.....	103
<b>Anhang B: Bruchmodell nach Drucker-Prager .....</b>	<b>104</b>
B.1: Herleitung der Materialparameter $c$ und $\varphi$ .....	104
<b>Anhang C: Beispiel zur Interpolation in den Traglastkurven .....</b>	<b>107</b>
<b>Anhang D: Formfaktoren nach Schickert und Rustmeier .....</b>	<b>111</b>
<b>Anhang E: Parameterkombinationen zur Erstellung der Traglastkurven .....</b>	<b>112</b>

## Verzeichnis verwendeter Symbole

Formelzeichen	Name
St	Stein
Mö	Mörtel
MG	Mörtelgruppe
N	Normalkraft
F	Kraft
e	Lastausmittigkeit
$m = 6 \cdot e/d$	bezogene Lastausmittigkeit
A	Fläche
$A_{St}$	Steinfläche im Grundriss
$A_{MW}$	Wandfläche im Grundriss
h	Wandhöhe
d	Wanddicke
$\lambda = h/d$	Schlankheit
$h_{St}$	Steinhöhe
$d_{St}$	Steindicke bzw. Bogendicke
t	Dicke der Lagerfuge
$\beta_{D,St}$	Steindruckfestigkeit
$\beta_{Z,St}$	Steinzugfestigkeit
$\beta_{SZ,St}$	Steinspaltzugfestigkeit
$\beta_{BZ,St}$	Steinbiegezugfestigkeit
$\beta_{D,Mö}$	Mörteldruckfestigkeit
$E_{St}$	Stein-E-Modul
$E_{Mö}$	Mörtel-E-Modul
$\varepsilon$	Dehnungen bzw. Stauchungen
$\sigma_0$	Grundwert der zulässigen Spannung nach DIN 1053-1
$\sigma_Z$	Zugspannung
$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$	Hauptspannungen
$\sigma_R$	Radialspannung (Umschnürungsdruck)
$\sigma_v$	Vertikalspannung
$\sigma_{v,u}$	Bruchspannung
$\sigma_{oct}$	Oktaederspannung
$\tau_{oct}$	Oktaederschubspannung
$\theta, \Theta$	Richtungswinkel der deviatorischen Spannung in der Deviatorebene
$\xi$	Länge des Vektors der hydrostatischen Spannung
$\rho$	Länge des Vektors der deviatorischen Spannung

---

$I_1$	erste Invariante des Spannungstensors
$J_2$	zweite Invariante des Spannungsdeviators
$c$	Kohäsion
$\varphi$	Winkel der inneren Reibung
$\psi$	Dilatanzwinkel
$\mu_{ST}$	Stein-Querdehnzahl
$\mu_{Mö}$	Mörtel-Querdehnzahl
$\mu_{Mö,el}$	Mörtelquerdehnzahl für den elastischen Bereich
$\nu$	Reibungsbeiwert

## 1 Einleitung und Zielstellung

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

Aus der Notwendigkeit der Kostensenkung heraus ist man in den letzten Jahren dazu übergegangen, Steinbogenbrücken zu erhalten und gegebenenfalls zu ertüchtigen, statt durch Stahlbetonbauwerke zu ersetzen. Die Bewertung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Steinbogenbrücken wird im Zuge von Neueinstufungen von Verkehrswegen und Ausbauvorhaben auf Basis heute gültiger Lastansätze und Berechnungsvorschriften gefordert. Notwendige Verstärkungen und Ertüchtigungen sind nach Möglichkeit unter weitestgehender Erhaltung des Bestandes durchzuführen, was sowohl Kosten sparen als auch das Erscheinungsbild der Steinbogenbrücken erhalten soll.

Die ältesten bestehenden Gewölbebrücken sind basierend auf Erfahrungswerten der Ausführenden entstanden und stellen damit empirische Bauwerke dar. Später standen zunächst grafische Verfahren für statische Nachweise zur Verfügung, und man entwickelte in der Geschichte der Baustatik Näherungsformeln auf Basis der Bogenstützlinie zum Entwurf wesentlicher Geometrieparameter, wie Stützweite, Stich, Bogendicke und Bogenform. Die verfügbaren Rechenansätze sind heute durchaus nützlich, um eine überschlägliche Abschätzung der Tragfähigkeit einer Steinbogenbrücke anhand ihrer Geometrieparameter vornehmen zu können.

Die aktuell verfügbaren Hilfsmittel der Tragwerksbemessung sind hingegen weitaus vielfältiger. Durch sie ist der Ingenieur in der Lage, sowohl geometrische als auch physikalische Nichtlinearitäten zu berücksichtigen. Wegen der zahlreichen bedeutenden Einflussfaktoren und deren vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten in der Ausführung wird das Tragverhalten von Natursteinmauerwerk derart komplex, dass trotz intensiver Forschungsarbeit bis heute kein konsistentes, alle Effekte ausreichend erfassendes Mauerwerksmodell entwickelt werden konnte. Allerdings wurden gegenüber den Näherungsverfahren große Fortschritte in der Tragfähigkeitsbewertung erzielt.

So ist in der heutigen Zeit der Tragwerksplaner mit modernen Methoden ausgerüstet, um die Tragsicherheit alter Gewölbebrücken zu bewerten. Die verfügbaren Normen zum Nachweis ausreichender Gebrauchs- und Tragfähigkeit erlauben jedoch eine relativ pauschale Bewertung der Widerstandsgrößen. Dem individuellen Bauwerkscharakter einer historischen Natursteinbrücke kann damit allerdings nur begrenzt Rechnung getragen werden. Somit wird ein merkliches Defizit zwischen den Möglichkeiten der mechanischen Modellierung und den verfügbaren Sicherheitsnachweisen erkennbar.



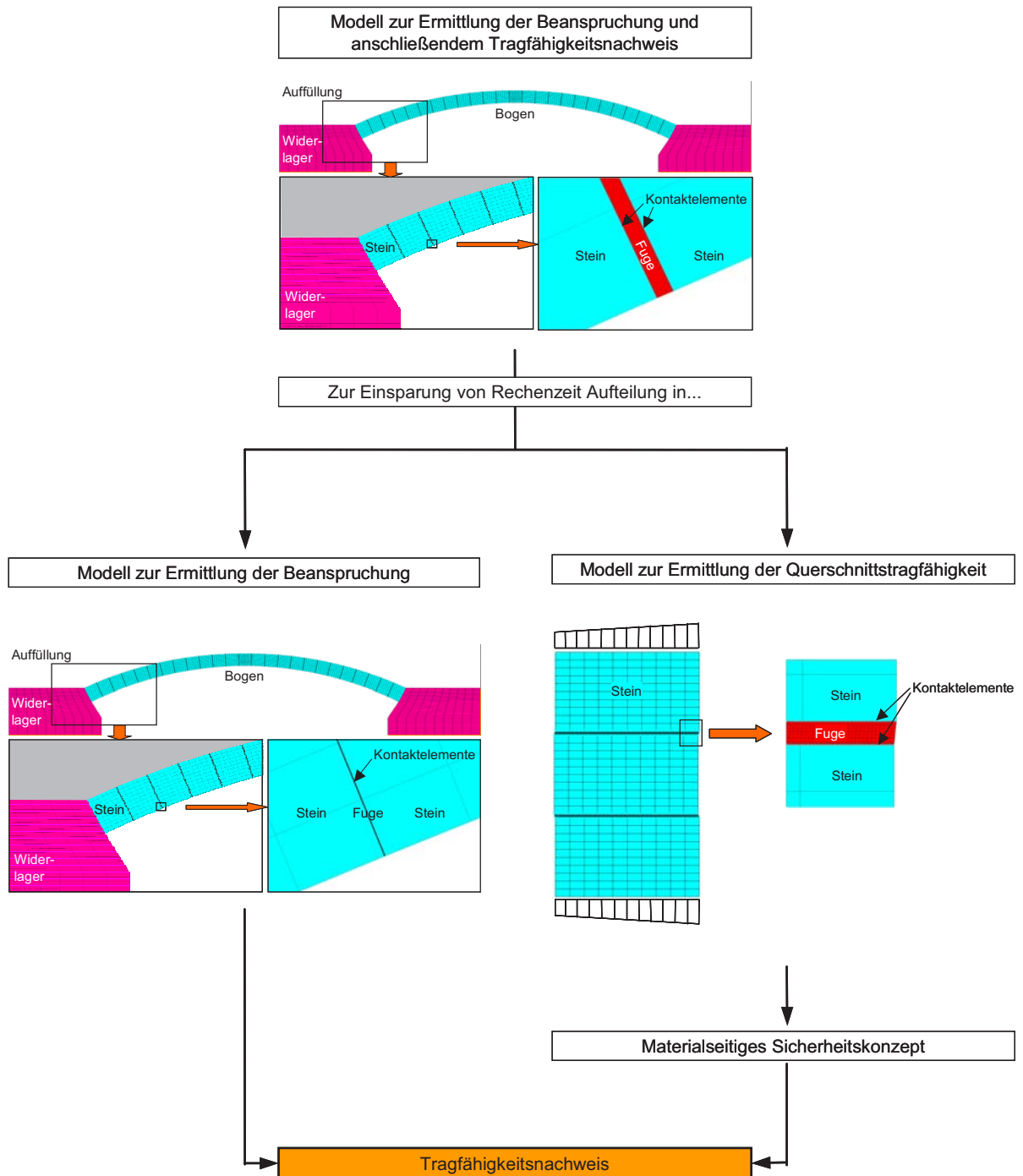
Die Ingenieurbüros G-M-G Partnerschaft und Trag Werk Ingenieure Döking+Purtak Partnerschaft sahen sich deswegen veranlasst, innerhalb des Forschungsvorhabens Nr. KU 0425001KAT2 „Bogenbrücken aus Natursteinmauerwerk“ Vorschläge für eine detaillierte Bewertung und Wichtung wesentlicher Einflussgrößen auf der Einwirkungs- und Bauwerkswiderstandseite zu erarbeiten und den statischen Nachweis auf die neue Normengeneration der semiprobabilistischen Konzepte abzustimmen.

Zur statischen Tragwerksanalyse entwickelte Purta [1] im Programmsystem Ansys ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) zur realitätsnahen Modellierung von Gewölbebrücken, in welchem sowohl die Steine als auch die Mörtelfugen getrennt berücksichtigt sowie das nichtlineare Materialverhalten des Fugenmörtels erfasst werden. Mit Hilfe dieses Modells lassen sich in einem ersten Rechendurchlauf für jede beliebige Lastfallkombination die Beanspruchungen des Bogentragwerkes bestimmen. In einer Nachlaufrechnung wird dann ermittelt, ob der Bogen unter den angesetzten Lasten in irgendeinem Punkt versagt. Dieses Versagen kann durch Steinversagen oder durch die Entstehung einer Gelenkkette- infolge von Gelenkbildungen in den Mörtelfugen - zustande kommen.

Allerdings ist wegen des immensen Rechenaufwandes für das genannte Modell eine Anwendung für den Praktiker angesichts der heute verfügbaren Rechentechnik nahezu ausgeschlossen. Man ging deshalb dazu über, sowohl die Beanspruchung im Bogentragwerk als auch die Tragfähigkeit des Bogenquerschnitts anhand separater Modelle zu bestimmen. Zur Ermittlung der Beanspruchungen im Bogentragwerk wurde in Ansys ein Modell programmiert, welches die plastischen Mörtelfugen unberücksichtigt lässt, dafür jedoch die Fugen mittels Kontaktelementen abbildet [2, 3]. Durch die Kontaktelemente kann den Fugen eine Zugfestigkeit von Null zugewiesen werden, wodurch diese aufklaffen können. Durch die Vernachlässigung der nichtlinearen Materialeigenschaften des Mörtels spart man innerhalb dieses Modells erheblich an Rechenzeit.

Die so ermittelte Beanspruchung im maßgebenden Schnitt kann daraufhin mit der den Materialeigenschaften und Geometrieparametern entsprechenden zulässigen Traglast verglichen werden. Mit der Bestimmung dieser Traglast beschäftigt sich die vorliegende Diplomarbeit. Dazu dient ein zweites Finite-Elemente-Modell. Hierin werden anhand eines Drei-Stein-Körpers Steine und Fugen getrennt modelliert und das nichtlineare Materialverhalten des Mörtels berücksichtigt. Sämtliche Geometrie- und Materialparameter sind dabei beliebig wählbar.

Zusammen mit einer auf der Materialseite befindlichen Sicherheit lässt sich nun anhand der Beanspruchung und der zulässigen Traglast der statische Nachweis führen. Abb. 1-1 veranschaulicht die beschriebene Herangehensweise.



**Abb. 1-1: Nachweiskonzept an entkoppelten Modellen**

## Ziele der Arbeit

Ziele der Arbeit sind die Erstellung von Traglastkurven für zentrisch und exzentrisch druckbeanspruchtes Mauerwerk sowie ein Ausblick auf deren praktische Anwendung. Als Referenzmauerwerk dient in dieser Arbeit dünnfugiges Natursteinquadermauerwerk mit minderfestem Mörtel. Neben Traglastkurvenscharen für verschiedene Bogen- beziehungsweise Steindicken werden auch Traglastkurven zur Untersuchung der Einflüsse verschiedener Material- und Geometrieparameter, wie Fugendicke, Steinhöhe, Steindruck- und -zugfestigkeit und Mörteldruckfestigkeit, auf die Mauerwerkstragfähigkeit erstellt. Einführend erfolgt eine Erläuterung der mechanischen Eigenschaften von Naturstein und Mörtel sowie des mehraxialen Spannungsraumes und der Bruch- beziehungsweise Fließmodelle für Stein und Mörtel. Neben möglichen Versagensarten von Natursteinmauerwerk werden ausgewählte analytische Bruchmodelle aufgezeigt. Zur Verdeutlichung des Tragverhaltens von Mauerwerk unter verschiedenen Ausmitten werden für einen Spezialfall die Spannungsverteilungen der Vertikal-, Horizontal- und Schubspannung nach der Finite Elemente Methode (FEM) dargestellt. Um die Realitätsnähe des verwendeten FE-Modells zu betrachten, werden zu deren Nachrechnung Versuche an Drei-Stein-Körpern vorgenommen.

## 2 Natursteinmauerwerk

Natursteinmauerwerk besteht aus den beiden Komponenten Naturstein und Mörtel, welche im Verband vermauert sind. In diesem Kapitel werden beide Materialien beschrieben und wichtige mechanische Eigenschaften von Steinen und Mörtel erläutert. Neben den Verbandsarten wird die Bemessung nach DIN 1053-1 vorgestellt.

### 2.1 Natursteine

#### 2.1.1 Einteilung der Gesteine [4, 5]

Als Natursteine bezeichnet man die durch geologische Vorgänge gebildeten, natürlich gewachsenen Gesteine. Sie sind ein Gemenge aus Mineralien, deren Zusammenhalt durch direkte Verwachsung oder durch ein Bindemittel gewährleistet wird. Die Eigenschaften und Merkmale der Naturgesteine lassen sich zumeist aus ihrer geologischen Entstehung herleiten. Nach dieser unterteilt man die Gesteine in die drei Hauptgruppen Erstarrungsgesteine, Sedimentgesteine und Umwandlungsgesteine.

## 9 Zusammenfassung

Zur Erhaltung und Ertüchtigung der noch heute im Straßen- und Schienenverkehrsnetz unter Nutzung stehenden, zum Teil mehrere Jahrhunderte alten Natursteinbogenbrücken ist die genaue Kenntnis des Tragverhaltens von grundlegender Bedeutung. Mit modernen Methoden ausgerüstet ist der Ingenieur heute in der Lage, im Rahmen von Neueinstufungen von Verkehrswegen und Ausbauvorhaben auf Basis aktueller Lastansätze und Berechnungsvorschriften die Tragfähigkeit alter Steinbogenbrücken zu bewerten. Jedoch ist mit den verfügbaren Normen zum Nachweis von Gebrauchs- und Tragfähigkeit nur eine relativ pauschale Bewertung der Widerstandsgrößen möglich, wodurch sich eine gewisse Kluft zwischen den Möglichkeiten der mechanischen Modellierung und den bereitgestellten Nachweisverfahren auf tut.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Tragfähigkeit von Quadermauerwerk aus Naturstein und will so einen Beitrag zur detaillierten Bewertung und Wichtung wesentlicher Einflussgrößen auf der Bauwerkswiderstandsseite sowie zur Erarbeitung eines zeitgemäßen Nachweiskonzeptes leisten.

Unter Anwendung des Programmsystems Ansys werden anhand eines Finite-Elemente-Modells Traglastkurvenscharen zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Material- und Geometrieparameter auf die Querschnittstragfähigkeit erstellt. Dies macht es vorab erforderlich, die Materialeigenschaften von Stein und Mörtel unter mehraxialer Beanspruchung zu betrachten, um geeignete Bruch- beziehungsweise Fließkriterien für beide Materialien ableiten zu können.

Zunächst werden die Eigenschaften von Natursteinen, insbesondere die des Sandsteins, beschrieben. Hierbei zeigt sich bei der Darstellung der Bruchhüllenden von Postaer Sandstein mit Mohr'schen Spannungskreisen eine lineare Begrenzung für den Druck-Zug-Zug-Bereich. Dieser ist für das Versagen des Steins im Mauerwerk maßgeblich, weshalb die Wahl eines geeigneten numerischen Bruchmodells auf das nach Mohr-Coulomb fällt. Der Mörtel steht im Mauerwerk in einem Druck-Druck-Druck-Spannungszustand. Unter zunehmendem hydrostatischen Druck weist er einen annähernd linearen Anstieg der Festigkeit gegenüber der hydrostatischen Achse auf. Diese Gegebenheit begründet die Anwendung des Bruch- beziehungsweise Fließkriteriums nach Drucker-Prager für den Mörtel.

Bei dem FE-Modell, welches dem Verfasser seitens des betreuenden Büros zur Verfügung gestellt wurde, handelt es sich um ein 2-D-Modell eines sogenannten Drei-Stein-Körpers, in welchem Steine und Fugen einzeln modelliert und mit vierknotigen Scheibenelementen im ebenen Verzerrungszustand unter unterschiedlicher Netzdichte vernetzt werden. Kontaktelemente verknüpfen die Knoten an den Fugengrenzen zwischen Stein und Mörtel, so dass dort lediglich die Übertragung von Druck- und Reibungskräften erfolgt und sich eine gerissene Zugzone einstellen kann. Aufgrund des ausgeprägten Spröbruchverhaltens des Sandsteins bleibt das Rissverhalten vor dem Bruch unberücksichtigt.

Mit dem im Programmsystem Ansys implementierten iterativen Lösungsverfahren nach Newton-Raphson ist die nichtlineare Berechnung durchführbar. Die Belastung bildet eine Streckenlast dergestalt dass deren Resultierende durch die gewünschte Außermitte verläuft. Erreicht eine Hauptspannungskombination eines Punktes im Stein die Bruchhüllende nach Mohr-Coulomb, ist im rechnerischen Modell für den sprödebrüchigen Sandstein die Bruchlast erreicht. Führt eine steigende Belastung nicht zum Steinversagen und divergiert die Lösung, gilt Versagen infolge Gelenkbildung als gefunden. Ein solches Gelenk bildet sich unter Laststeigerung in der Form aus, dass sich die Lastübertragungsfläche in der Fuge verkleinert und das System mit dem so gebildeten Gelenk kinematisch wird. Im Gegensatz zum elastischen Materialverhalten des Natursteins, wird der Mörtel als elastisch-idealplastisch und damit im Sinne der Plastizitätstheorie als fließfähig angenommen. Erreicht eine Spannungskombination eines Punktes im Mörtel die Fließfläche nach Drucker-Prager, verformt sich dieser plastisch und entzieht sich weiterer Laststeigerung, indem hinzukommende Spannungen auf benachbarte Bereiche umgelagert werden.

Die Spannungsverteilungen von Vertikal-, Horizontal- und Schubspannungen in Stein und Mörtel unter zentrischem und exzentrischem Lastangriff sind für 60 cm dickes Mauerwerk mit 30 cm hohen Steinen und 1,5 cm dicken Fugen angegeben. Das Tragverhalten von Natursteinquadermauerwerk mit mindestem Mörtel ist hieraus ablesbar. Der Lagerfugenmörtel weist ein größeres Querdehnvermögen auf als der Stein, wodurch der Mörtel infolge des Verbundes zwischen beiden Materialien Querdruck und der Stein Querkzug erhält. Hinzu kommen die durch das Plastifizieren beziehungsweise Ausbrechen des Mörtels am Fugenrand und der daraus resultierenden Teilflächenpressung entstehenden Spaltzugspannungen im Stein. Wegen der beschriebenen Abhängigkeit der Festigkeiten körniger Materialien vom herrschenden Spannungszustand liegt die Mauerwerksfestigkeit über der einaxialen Mörteldruckfestigkeit und unter der einaxialen Steindruckfestigkeit.

Versagen tritt bei dünnfugigem, zentrisch belastetem Sandsteinquadermauerwerk in der Regel durch einen Spaltzugbruch im Stein ein. Je nach Stein- und Mörtelfestigkeit kann es vor einem solchen Spaltzugbruch zum Abplatzen des Steinrandes kommen. Bei außermittig belastetem Quadermauerwerk kann ein Versagen auf vielfältige Art und Weise eintreten. So ist neben dem Spaltzugbruch auch ein Biegezugbruch auf der lastabgewandten Seite mit anschließendem schubartigen Bruch auf der lastzugewandten Seite möglich. Je nach Fugendicke sowie Stein- und Mörtelfestigkeit kann es auch zum Versagen durch Gelenkbildung in der Lagerfuge kommen. Mörtelversagen als solches wurde bei dem untersuchten Mauerwerk nicht beobachtet.

Der Einfluss verschiedener Geometrie- und Materialparameter ist in Form von Diagrammen ausgewertet. Auf der Materialseite beeinflussen Steindruck- und -zugfestigkeit die Querschnittstragfähigkeit am stärksten. Steinhöhe und Steindicke sind hingegen die einflussreichsten Geometrieparameter. Bei allen Traglastkurven ist bei einer bezogenen Ausmitte von  $m \geq 1,0$  ein stärkerer Abfall im Verlauf festzustellen. Die Verläufe der Traglastkurven für variierende Fugendicken und Mörteldruckfestigkeiten nähern sich mit diesem Sprung derart an, dass der Einfluss dieser beiden Parameter für größere Ausmitten etwas abnimmt.

---

Selbiges ist bei den Diagrammen zur Untersuchung der Steindruck- und -zugfestigkeit nicht zu verzeichnen. Von vernachlässigbarem Einfluss auf die erreichbare Tragfähigkeit sind die E-Moduli und Querdehnzahlen von Stein und Mörtel. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass ein Variieren der Mörtel-Querdehnzahl nur für den elastischen Bereich gilt. Trifft eine Spannungscombination eines Punktes im Mörtel auf die Fließfläche nach Drucker-Prager und plastifiziert der Mörtel, so strebt die Querdehnzahl gegen den Wert  $\mu = 0,50$ . Hinsichtlich der ermittelten Traglasten ist man damit jedoch auf der sicheren Seite.

Die Ermittlung von Traglasten für Mauerwerk, welches hinsichtlich seiner Material- und Geometrieparameter von dem den erstellten Traglastkurven zugrunde liegenden Mauerwerk verschieden ist, erfolgt anhand eines in der Entwicklung befindlichen Programms. Dabei wird die gesuchte Traglast durch lineare Interpolation zwischen bereits ermittelten Traglastwerten gewonnen. Die entsprechende Vorgehensweise bei der Interpolation ist anhand eines Beispiels exemplarisch dargestellt.

FE-Nachrechnungen von Druckversuchen an Drei-Stein-Körpern im Maßstab 1:1 zeigen für den Fall des zentrischen Lastangriffs eine gegenüber dem Versuch um 27,5 % niedrigere Traglast. Man befindet sich hiermit weit auf der sicheren Seite. Die Versuche unter exzentrischer Belastung bestätigen eine gute Einschätzung der Querschnittstragfähigkeit mit dem verwendeten FE-Modell.