

Vorträge

**Bewertung historischer
Tragstrukturen mittels
nichtlinearer Simulationen**

R. Schlegel

Bewertung historischer Tragstrukturen mittels nichtlinearer Simulationen

Dr.-Ing. Roger Schlegel, Dynardo GmbH, Steubenstraße 25, 99423 Weimar

1 Einleitung

Für eine rechnerische Bewertung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit historischer Tragstrukturen ist es erforderlich Spannungs- und Verformungszustände möglichst realitätsnah zu erfassen. Von besonderer Bedeutung hierfür sind neben der Berücksichtigung der maßgeblichen Einwirkungen insbesondere die zutreffende Strukturmodellierung und die Verwendung geeigneter Materialmodelle. Der Beanspruchungszustand historischer Bauwerke wird häufig wesentlich durch Rissbildungen und Lastumlagerungen geprägt. Derartige Effekte können im Berechnungsmodell nur durch die Einbeziehung von Nichtlinearitäten (nichtlineares Materialverhalten, geometrische Nichtlinearität, verformungsabhängige Belastung und Kontaktnichtlinearität) realitätsnah nachvollzogen werden.

Oftmals werden bei historischen Konstruktionen räumliche Tragstrukturen, bestehend aus einzelnen zusammenwirkenden Bauteilen und der Gründung angetroffen. In diesen Fällen kommt der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bauwerksbereichen sowie der Interaktion mit der Gründung eine große Bedeutung zu. In der Regel sind hierfür dreidimensionale Strukturmodelle erforderlich.

Moderne Simulationsverfahren (wie z.B. die Finite-Elemente Methode) sind heute in der Lage die genannten Ansprüche an die Realitätsnähe der Berechnungen zu erfüllen. Sie eröffnen damit neue und umfassendere Möglichkeiten zur Bewertung historischer Tragstrukturen (s. Abb. 1).

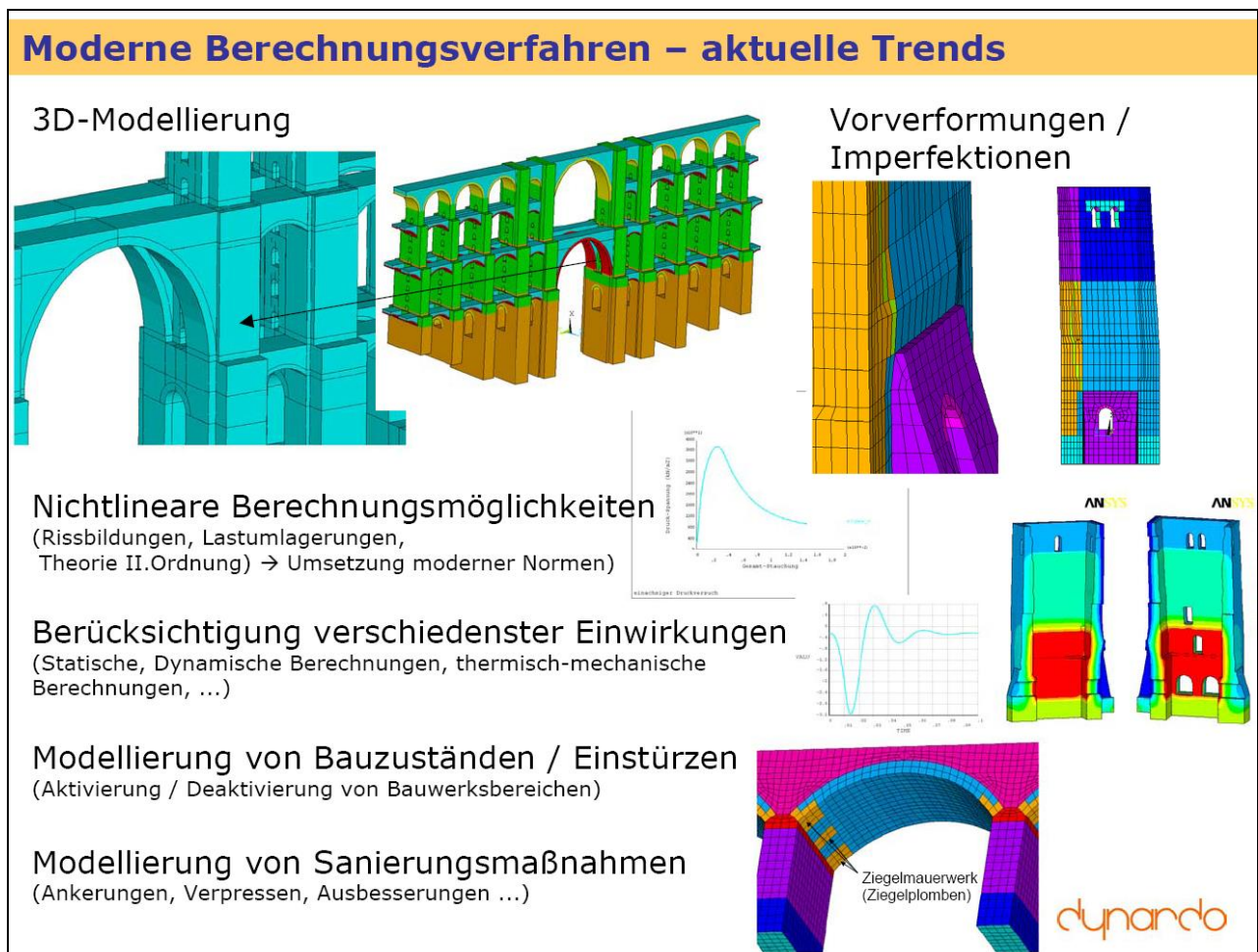


Abb. 1 Übersicht über die Leistungsfähigkeit moderner Simulationsverfahren

Der Aufbau eines zutreffenden Simulationsmodells wird jedoch oft von dem Umstand begleitet, dass die Bereitstellung zuverlässiger Materialdaten (z.B. bei historischem Natursteinmauerwerk) große Schwierigkeiten bereiten kann. Häufig sind einzelne Tragwerksbereiche unzugänglich oder entziehen sich einer sinnvollen Beprobung. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen besteht dann als Grundlage für eine gezielte Beprobung die Möglichkeit, relevante Materialkennwerte und Tragwerksbereiche zu identifizieren. Sensitivitätsanalysen bieten zudem die Gelegenheit bedeutende Einflussfaktoren auf das Tragverhalten der zu untersuchenden Struktur zu lokalisieren und das Problemverständnis zu schärfen. Ebenso können Sensitivitätsanalysen für die Planung und Bewertung von Sanierungsmaßnahmen sinnvoll sein. Der vorliegende Beitrag stellt innovative Softwareentwicklungen und deren den Einsatz zur Simulation historischer Tragstrukturen vor.

2 Nichtlineare Materialbeschreibung historischer Baustoffe

Die meisten Materialien im Bauwesen und der Geotechnik weisen ein ausgeprägtes nichtlineares Materialverhalten auf. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass viele Baustoffe (wie z.B. Beton, Fels und Mauerwerk) zwar sehr druckfest sind, jedoch eine relativ geringe Zug- oder Schubfestigkeit besitzen. Deshalb ist es für die Simulation historischer Tragwerke notwendig, Materialmodelle, welche das nichtlineare Spannungs-Verformungsverhalten und die verschiedenen Versagensmechanismen der einzelnen Baustoffe beschreiben können, bereitzustellen. Leistungsfähige, praktisch gut einsetzbare Materialmodelle zeichnen sich dabei durch die Formulierung mit gut bestimmbar bzw. für den Ingenieur gut einschätzbaren Materialparametern aus.

Zur nichtlinearen Simulation von Baustoffen mit Hilfe der Finiten-Elemente Methode haben sich in den vergangenen Jahren vor allem elasto-plastische Materialmodelle sehr gut bewährt. Für die Beschreibung nichtlinearen Materialverhaltens wird dabei der Vektor der Gesamtdehnungen in einen elastischen und einen plastischen (irreversiblen) Anteil zerlegt.

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} \quad (1)$$

Die Grenze zwischen dem elastischen und dem plastischen Bereich wird allgemein durch die Fließbedingung F als Festigkeitsbeschreibung in Abhängigkeit von dem Spannungszustand σ und der Beanspruchungs-Vorgeschichte (als Ver- bzw. Entfestigungsparameter κ) definiert.

$$F = F(\sigma, \kappa) \quad (2)$$

Eine für das Bauwesen besonders geeignete Form der Festigkeitsbeschreibung ist die mehrflächige Fließbedingung. Dabei wird die Fließbedingung (Festigkeit) eines Baustoffs aus mehreren einzelnen Fließkriterien (Festigkeitskriterien) zusammengesetzt. Dadurch ist eine realitätsnahe Einbeziehung verschiedener materialspezifischer Versagens- und Schädigungsmechanismen möglich. Die Kombination dieser relativ einfachen Einzelkriterien ermöglicht die Abbildung der Komplexität des Materialverhaltens des jeweiligen Werkstoffes mit praxisnahen und experimentell gut bestimmbar Materialparametern. Ein weiterer Vorteil mehrflächiger Materialformulierungen liegt darin, einzelne Versagensmechanismen im Berechnungsergebnis gesondert ausweisen zu können. Neben der Visualisierung ist es damit auch möglich, die Ursachen eines Strukturversagens zu identifizieren. Vor allem im Massivbau und in der Geotechnik ist die Verwendung mehrflächiger Materialmodelle z.B. für Beton, Mauerwerk und Fels besonders attraktiv, da diese Materialien in Abhängigkeit des Beanspruchungszustandes verschiedene Versagensarten sowie Schädigungs- und Rissmuster aufweisen [4].

Ein Beispiel für Mauerwerk zeigt Abb. 2. Diese mehrflächige Fließbedingung enthält alle relevanten Versagensmechanismen eines Mauerwerkverbands, wie z.B. Druckversagen der

Mauerwerks (F2), Schubversagen des Mauerwerks infolge Steinversagen (F3), Schubversagen der Lagerfugen (F6), Zugversagen des Mauerwerks parallel zur Lagerfuge infolge Steinversagen (F4, F1) und infolge Fugenversagen (F10), Zugversagen der Lagerfuge (F7) sowie kombiniertes, treppenförmiges Schub- und Zugversagen der Mauerwerksfugen.

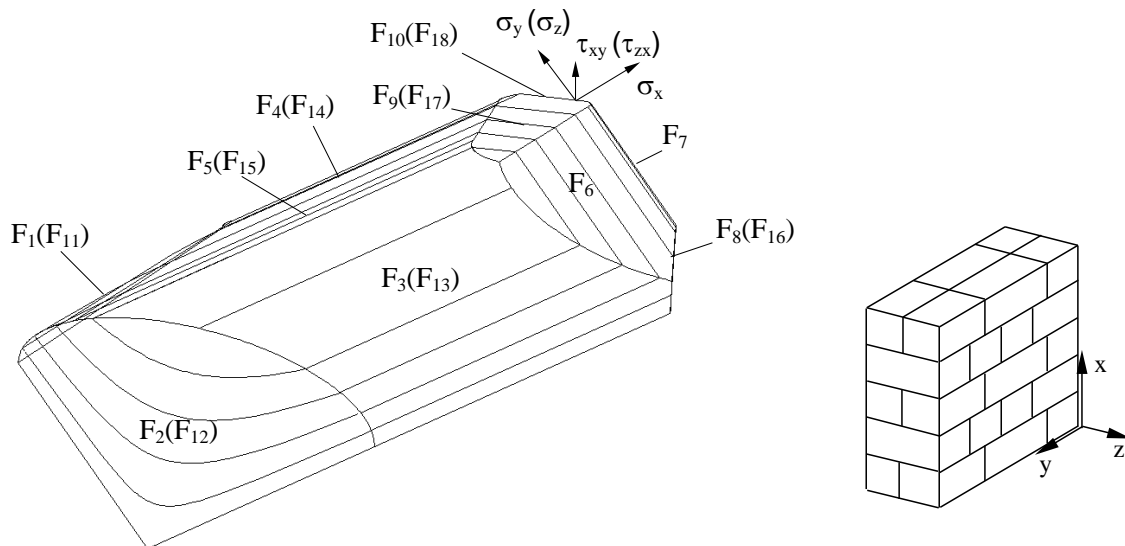


Abb. 2 Mehrflächiges Materialmodell für Mauerwerk [3], [4]

Mit derartigen mehrflächigen Materialmodellen können Phänomene berücksichtigt werden wie

- isotrope / anisotrope Festigkeit
- beanspruchungsabhängiges nichtlineare Spannungs-Dehnungsverhalten / Ver- und Entfestigung, Restfestigkeiten
- Rissbildung / Schädigung
- assoziierte / nicht assoziierte Plastizität, Steuerung des Dilatanzverhaltens
- Temperaturabhängigkeit, Feuchteabhängigkeit

Nachfolgend soll die praktische Anwendung des für Mauerwerk vorgestellten Materialmodells am Beispiel der Untersuchung von Rissursachen am Wasserturm Oldenburg [5] demonstriert werden.

2.1 Beispiel Untersuchung der Rissursachen am Wasserturm Oldenburg

Der denkmalgeschützte Wasserturm der Stadt Oldenburg (gebaut 1896) wies im Turmschaft Rissbildungen und Durchfeuchtungen (s. Abb. 3) auf. Mit Hilfe numerischer Simulationen sollten die Ursachen der Rissbildungen geklärt werden. Den rechnerischen Analysen gingen eine umfangreiche Schadensaufnahme, Materialbeprobungen und Untersuchungen zur Feuchteverteilung im Bauwerk voraus [2]. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse konnten die Materialkennwerte und die hygri-sche Dehnungen des Mauerwerks bestimmt werden. Die Simulationen wurden als gekoppelte thermisch-mechanische Berechnungen mit dem FEM-Programmsystem ANSYS® und der darin implementierten Materialbibliothek multiPlas [4] durchgeführt. Der Wasserturm wurde als räumliches FE-Modell mit 1,7 Mio Freiheitsgraden diskretisiert. Dies entspricht einer heute gut beherrschbaren, praxistauglichen Modellgröße. Zur Erfassung möglichst realistischer Temperatureinwirkungen wurden mit instationären Temperaturfeldberechnungen des Jahresgangs dreidimensionale Temperaturverteilungen im Bauwerk ermittelt und als Temperaturzustand in die mechanische Berechnung eingelesen. Die Feuchtebeanspruchung (hygri-sche Dehnung) des Turmschaftmauerwerks wurde vereinfacht mit Hilfe einer Temperaturanalogie berücksichtigt. Dabei wurde die in der Schadensaufnahme [2] am Bauwerk ermittelte Feuchteverteilung auf das FE-Netz übertragen.

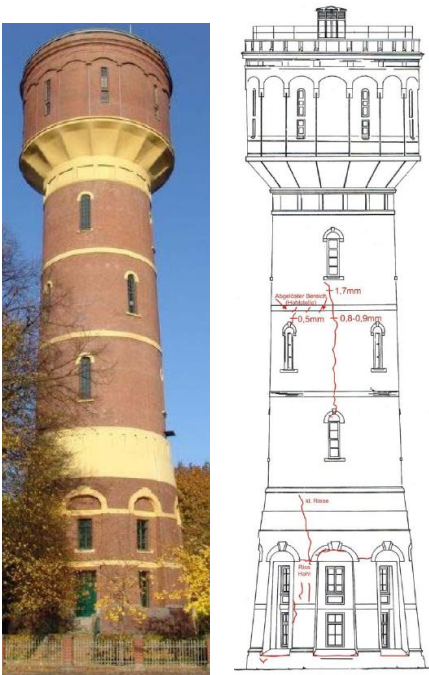


Abb. 3 Wasserturm Oldenburg; links: Foto, rechts: Risskartierung [2]

Zur Identifikation der Rissursachen wurden nichtlineare Lastgeschichteberechnungen unter Berücksichtigung des Eigengewichts (Lastschritt 1), der Wasserlast (Lastschritt 2), des Temperaturjahresgangs (Lastschritte 3 bis 14) und der Feuchteverteilung (Lastschritt 15) durchgeführt. Die in Abb. 4 dargestellten plastischen Dehnungen im Turmfußbereich infolge Eigengewicht und Wasserlast zeigen deutlich die aus der Gewölbewirkung zwischen den Fenstern herrührenden Lastumlagerungen an. Diese führen zu ersten Gefügebrauchungen und Mikrorissbildungen in diesem Bereich.

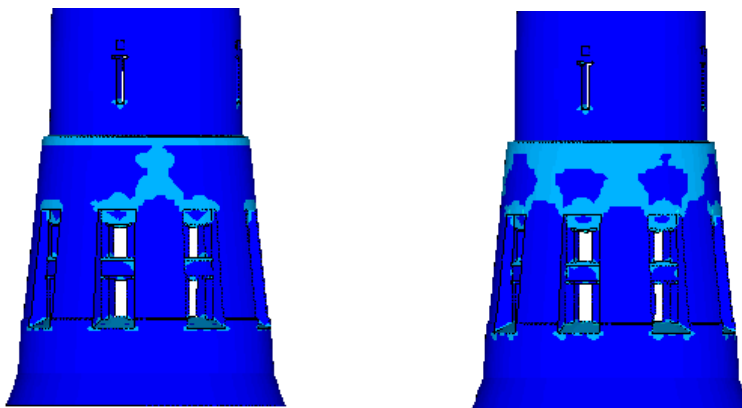


Abb. 4 Plastische Vergleichsdehnungen im Turmfußbereich; links: Lastschritt 1 Eigengewicht, rechts: Lastschritt 2 Eigengewicht und Wasserlast

Die insgesamt nach Lastschritt 15 berechneten plastischen Dehnungen sind in Abb. 5 dargestellt. Es konnten sowohl im Turmfußbereich als auch im Turmschaft Rissbildungen durch plastische Dehnungen nachvollzogen werden. In Abb. 6 sind die zeitlichen Verläufe der plastischen Dehnungen für ausgewählte Punkte im Turmfuß und Turmschaft angezeigt. Im Ergebnis der Berechnungen wird deutlich, dass die Risse im Turmfußbereich durch erste Lastumlagerungen des Vertikallastabtrags (Eigengewicht, Wasserlast) initiiert und durch den Temperaturjahresgang in den Sommermonaten (März bis Juli) weiter ausgeprägt werden. Die Feuchteeinwirkung am Turmfuß haben den größten Einfluß auf die Rissbildungen in diesem Bereich (Abb. 6 links) und

führen zu deutlichen Rissvergrößerungen. Wie aus Abb. 6 rechts deutlich wird, sind die Rissbildungen im Turmschaft auf die Temperatureinwirkungen im Sommer zurückzuführen.

```
NODAL SOLUTION
STEP=15
SUB =12
TIME=15
EPPLEQV (AVG)
DMX =.00866
SMX =.004948
```

ANSYS

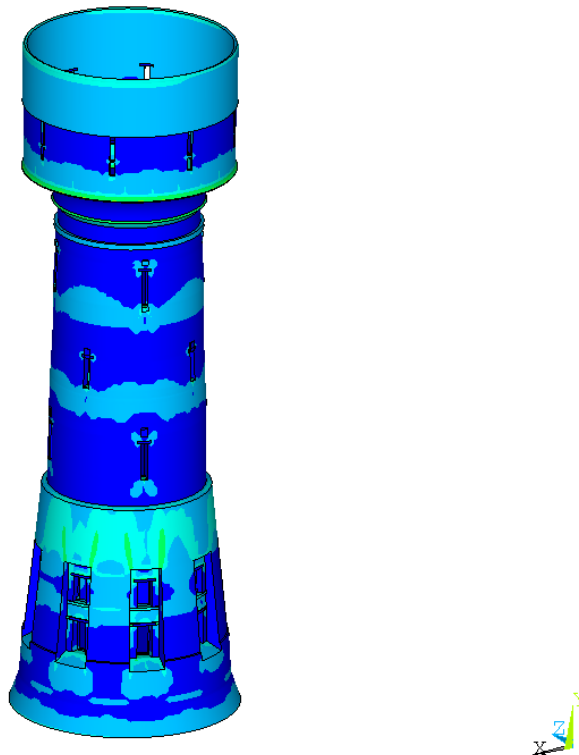


Abb. 5 Plastische Vergleichsdehnungen

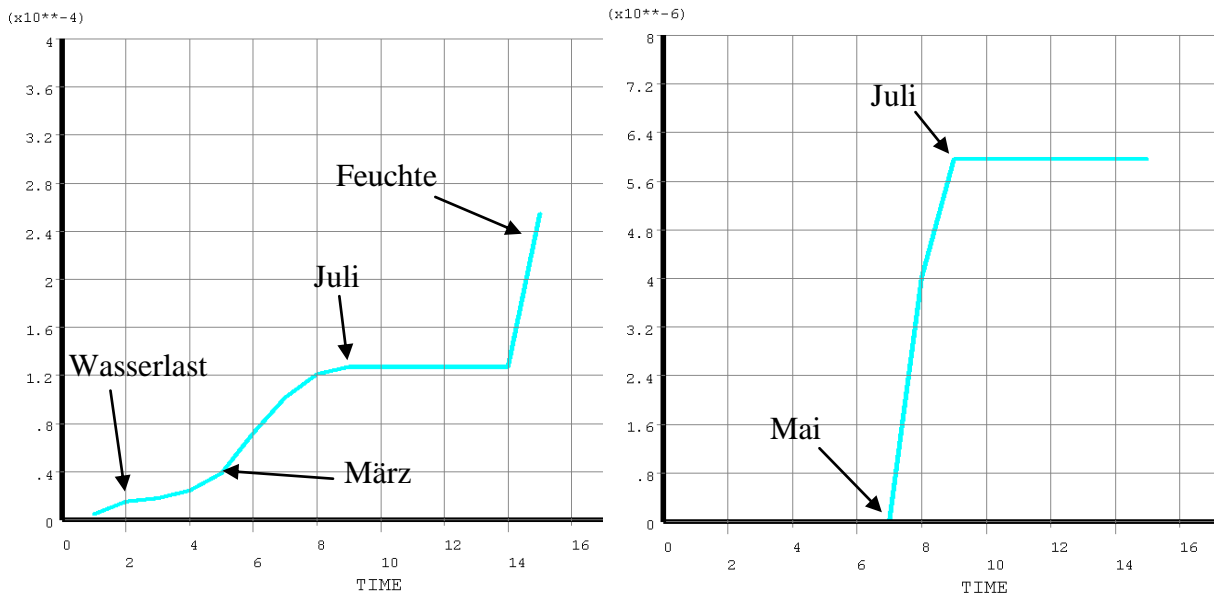


Abb. 6 Zeitliche Entwicklung der plastischen Vergleichsdehnungen; links: Turmfuß, rechts: Turmschaft

Mit Hilfe der numerischen Simulationen wurde es möglich, die grundlegenden Rissursachen im Mauerwerk als eine wesentliche Grundlage für weitere Planung von Sanierungsmaßnahmen zu identifizieren. Außerdem konnten die Spannungen, Verformungen und Auslastungsgrade des Mauerwerks ermittelt und somit auch Aussagen zur aktuellen Sandsicherheit des Wasserturms gemacht werden.

3 Berücksichtigung von Streuungen und Sensitivitäten der Modellparameter

Häufig wird es für die Beurteilung der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit historischer Mauerwerkstrukturen notwendig, Materialbeprobungen vorzunehmen und im Prüflabor die erforderlichen Materialkennwerte als Grundlage der Nachweisführung zu bestimmen. Für die Materialprüfung stellen sich dabei grundsätzliche Fragen nach den Orten der Beprobung am Bauwerk sowie nach den Materialkennwerten die für die Nachweisführung entscheidend sind und daher einer möglichst guten experimentellen Absicherung bedürfen. Die Lokalisierung relevanter Bereiche und die Identifikation der wichtigen Parameter können mit optiSlang [1] durch Sensitivitätsanalysen bestimmt werden. Das Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es, die Sensitivität der Systemantworten auf die Variation von Modellparametern zu untersuchen. Die statistische Bewertung der Sensitivität erfolgt durch die Auswertung der Korrelationsmatrizen, der Korrelationskoeffizienten, der Bestimmtheitsmaße der Modellparameter zu den Antwortgrößen sowie durch Anthillplots und die Verteilung der Antwortgrößen (s. Abb. 7). Für eine aussagekräftige statistische Auswertung ist es notwendig, den gesamten Designraum, definiert z.B. durch Ober- und Untergrenzen aller Parameter, möglichst gleichmäßig zu belegen. In optiSlang [1] stehen hierfür sehr leistungsfähige Samplingverfahren zur Verfügung. Unter Verwendung geeigneter Samplingverfahren steigt die Anzahl der notwendigen Durchrechnungen zur Identifikation maßgebender Eingangsvariablen nur sehr moderat an und es können große Designräume untersucht werden (z.B. 100 Eingangsparameter).

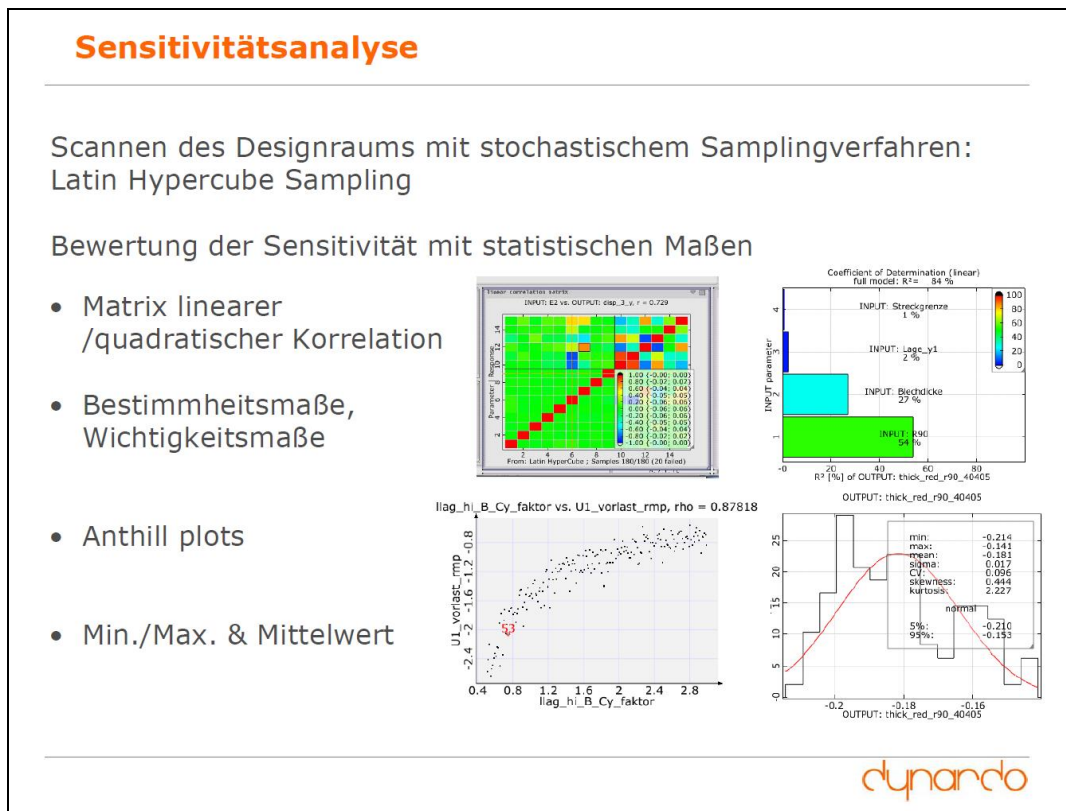
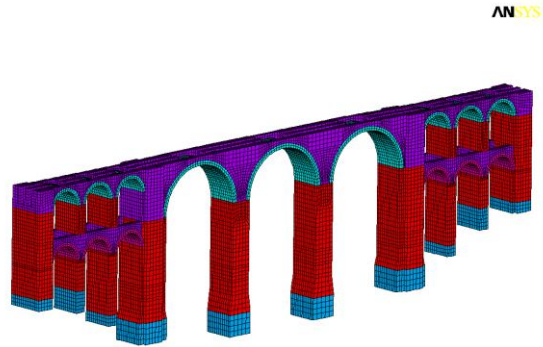


Abb. 7 Übersicht Sensitivitätsanalyse in optiSLang [1]

3.1 Sensitivitätsanalyse zur Bewertung einer historischen Eisenbahnbrücke

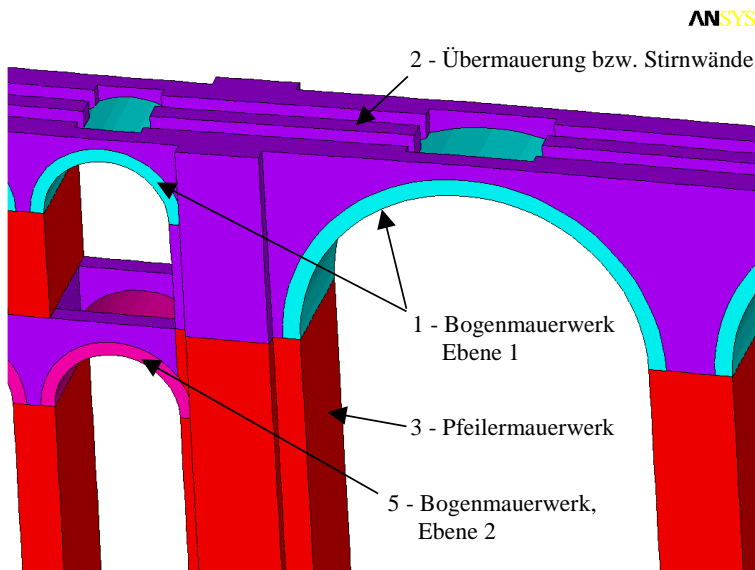
Das betrachtete Eisenbahnviadukt ist in Abb. 8 dargestellt. Das für die Berechnungen verwendete räumliche Finite-Elemente-Modell kann ebenfalls Abb. 8 entnommen werden. Die Länge des Berechnungsausschnitts beträgt 103,62 m, die Höhe ca. 30 m.



ANSYS

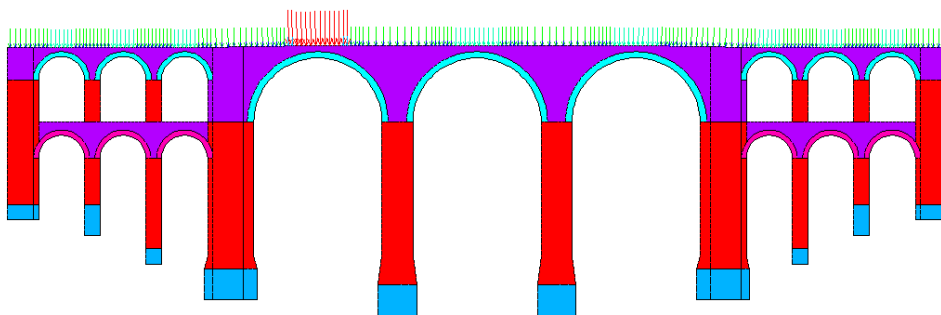
Abb. 8 Untersuchtes Eisenbahnviadukt; links: Foto; rechts: 3D-Finite-Elemente-Modell

Es soll die Tragfähigkeit des Tragwerks im Istzustand ermittelt werden und die Gebrauchstauglichkeit der Mauerwerkbögen für die heutigen Verkehrslasten überprüft werden. Die Berechnungen wurden mit dem in Kap. 2 vorgestellten Materialmodell für Mauerwerk durchgeführt. Abb. 9 zeigt den Aufbau und die einzelnen Materialbereiche des Tragsystems des Viadukts. In Abb. 10 ist die für die Bogenbelastung ungünstigste Verkehrslaststellung dargestellt.



ANSYS

Abb. 9 Materialbereiche



ANSYS

Abb. 10 Maßgebende Verkehrslaststellung des UIC 71

Die Sensitivitätsstudien werden sowohl im Gebrauchslastzustand als auch für die Ermittlung der Versagenslast durchgeführt. Dabei wird der Gebrauchslastzustand durch nichtlineare Lastgeschichteberechnungen mit den drei Lastschritten

- 1: Eigenlasten
- 2: Temperaturbeanspruchung im Winter (Abkühlung -15 K)
- 3: Verkehrslast gem. Abb. 10

berechnet. Zur Ermittlung der Versagenslast wird im Anschluss daran die Verkehrslast bis zum Versagen des Brückenbauwerks gesteigert.

Die Sensitivitätsanalysen wurden für die 21 wichtigsten streuenden, unabhängigen Materialkennwerten der einzelnen Materialbereiche vgl. Abb. 9 durchgeführt. Dies sind die E-Moduli des Bogenmauerwerks e_{y_1} , e_{y_5} , der Stirnwände e_{x_2} und der Pfeiler e_{x_3} , die Mauerwerksdruckfestigkeiten $f_{m_x_1}$, $f_{m_x_2}$, die Zugfestigkeiten $f_{t_x_1}$, $f_{t_x_2}$, $f_{t_x_5}$, die Schubfestigkeitskennwerte Reibungswinkel ϕ und Haftscherfestigkeit c , die Fugenabstände der Lagerfugen a_{l_1} , a_{l_2} , a_{l_5} und der Stoßfugen a_{s_y1} , a_{s_y2} , a_{s_y5} sowie die Dichten der einzelnen Materialbereiche ρ_{h_1} , ρ_{h_2} , ρ_{h_3} , ρ_{h_5} .

Das Ziel der Sensitivitätsstudien ist es, die Sensitivität von streuenden Inputparametern (in dem Falle von streuenden Materialparametern) auf die Streuungen von Systemantworten (hier nachweisrelevante Ergebnisgrößen wie Spannungen, Verformungen, Traglast) zu untersuchen.

3.1.1 Untersuchungen unter Gebrauchslastniveau

Für den Nachweis im Gebrauchslastzustand sind vor allem Spannungen und Verformungen interessant. Als Antwortgrößen der Sensitivitätsanalyse werden daher die Bogenspannungen und Vertikalverformungen des Bogenmauerwerks, die Horizontaldruckspannungen des Stirnwandmauerwerks sowie als ein Maß für evtl. Schädigungen bzw. Rissbildungen die plastischen Dehnungen im Bogenmauerwerk gewählt. Die qualitative Verteilung der Vertikalverformungen sind in Abb. 11 und der Bogen- sowie Horizontalspannungen in Abb. 12 dargestellt. Derartige Plots geben bereits Auskunft über für die Materialbeprobung relevanten Bereiche höherer Auslastung.

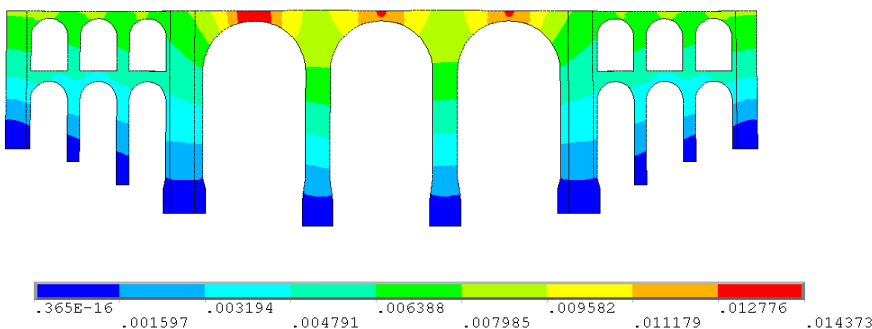


Abb. 11 Vertikalverformungen (m) unter Gebrauchslastniveau

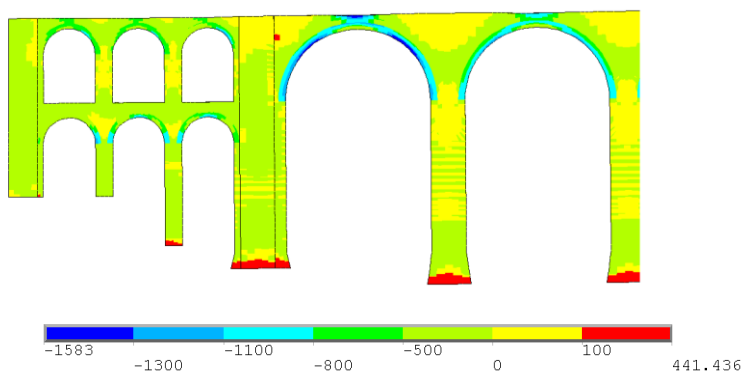


Abb. 12 Bogen- und Horizontalspannungen (kN/m²) unter Gebrauchslastniveau

Die lineare Korrelationsmatrix ist in Abb. 13 abgebildet. Sie ist eine symmetrische Matrix, welche die linearen Korrelationskoeffizienten enthält. Aus ihr können an der Größe der Korrelationskoeffizienten die relevanten Materialparameter mit relevantem Einfluss auf die Antwortgrößen abgelesen werden. In Abb. 14-links sind die Korrelationskoeffizienten der Materialparameter für die vertikale Relativverschiebung des Bogenmauerwerks angegeben. Den größten Einfluss auf die vertikale Durchbiegung hat erwartungsgemäß der E-Modul des Bogenmauerwerks ey_1 . Der lineare Korrelationskoeffizient r beträgt 0,73 und das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 54\%$. Das heißt, dass ca. 54 % der Veränderung der Durchbiegung des Bogens durch die Streuung von ey_1 erklärbar sind. Weitere Materialparameter mit relevanter Korrelation sind ex_2 ($R^2 = 10\%$) und ϕ ($R^2 = 8\%$). In Abb. 14-rechts sind die Korrelationskoeffizienten der Materialparameter für die maximale Bogendruckspannung angegeben. Auch hier sind die drei wichtigsten Materialparameter ex_2 ($R^2 = 49\%$), ey_1 ($R^2 = 38\%$) und ϕ (R^2 ca. 8 %). Damit sind die E-Moduli des Bogenmauerwerks und der Stirnwände sowie der Reibbeiwert die entscheidenden Materialparameter für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit.

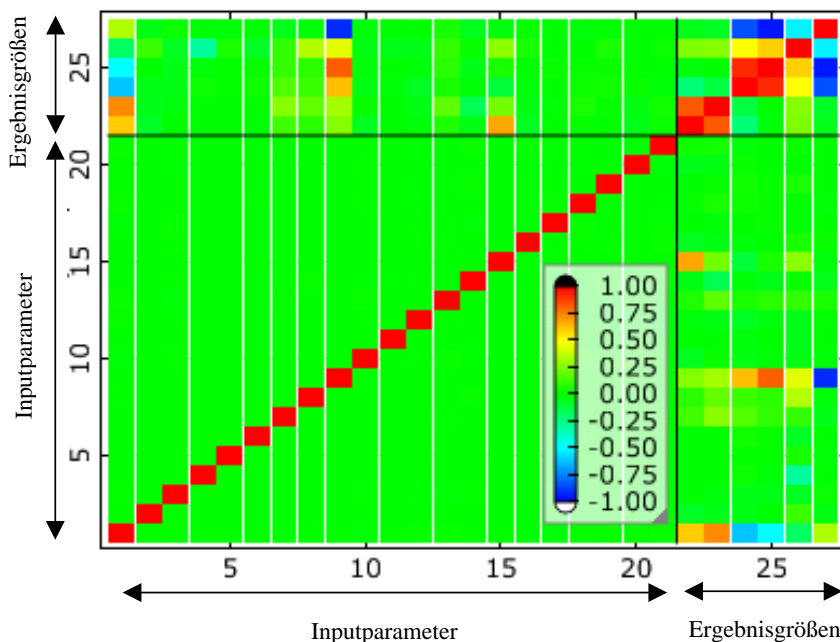


Abb. 13 Lineare Korrelationsmatrix, Gebrauchslastniveau

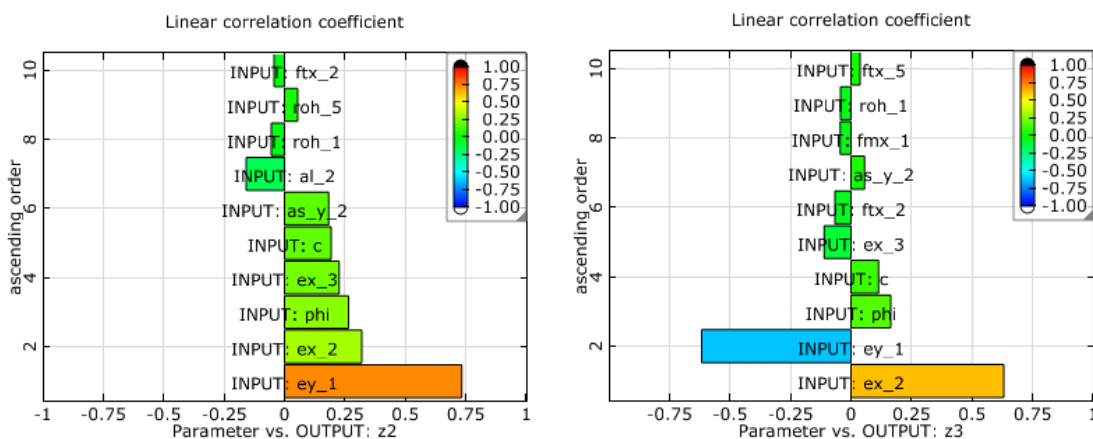


Abb. 14 Lineare Korrelationskoeffizienten der Inputparameter, Gebrauchslastniveau
 links: z2 - vertikale Relativverschiebung des Bogens,
 rechts: z3 - maximale Bogendruckspannung

3.1.2 Untersuchung der Sensitivität der Versagenslast gegenüber streuenden Inputgrößen

Die ermittelten Versagensmechanismen beim Erreichen der Traglast sind in Abb. 15 dargestellt. Daraus wird deutlich, dass das Versagen des Tragwerks durch ein seitliches Ausweichen des Bogenauflagers über dem Pfeiler, durch ein Versagen der Stirnwände und durch ein Versagen des Bogenmauerwerks beschrieben wird.

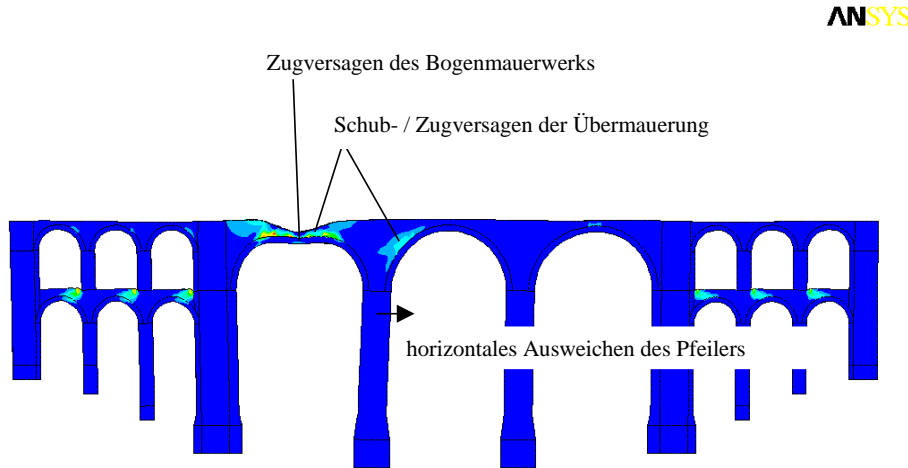


Abb. 15 Plastische Dehnungen und Versagensmechanismen im Versagenzustand

Bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse zeigte sich, dass mit den linearen Korrelationskoeffizienten lediglich 74 % der gesamten Streuung der Versagenslast erklärbar sind, so dass in diesem Falle die quadratischen Korrelationskoeffizienten (Abb. 16) herangezogen werden müssen. Es ist erkennbar, dass das Versagen stark durch ex_3 (E-Modul des Pfeilermauerwerks $R^2 = 23\%$) und damit durch das horizontale Verschieben des Pfeilerkopfs beeinflusst wird. Weitere relevante Materialparameter für die Versagenslast der Gewölbebögen sind der E-Modul ey_1 ($R^2 = 16\%$) und die Druckfestigkeit fmx_1 ($R^2 = 14\%$) des Bogenmauerwerks sowie ftx_2 und phi.

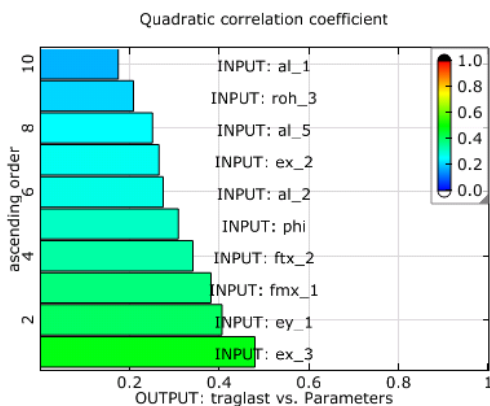


Abb. 16 Quadratische Korrelationskoeffizienten der wichtigsten Inputparameter

4 Der Abgleich von Messung und Simulation zur Modellkalibrierung als Optimierungsaufgabe

Durch die Kopplung moderner Optimierungsalgorithmen mit leistungsfähigen numerischen FEM-Berechnungsprogrammen mit realitätsnahen Materialmodellen wird es möglich, unsichere oder unbekannte System- und Materialparameter zu identifizieren. Zugleich sollen durch den Abgleich mit Messergebnissen Berechnungsmodelle validiert und deren Prognosegüte überprüft werden.

Bei der Bewertung historischer Tragstrukturen ist zu beachten, dass die Materialqualität stark streuen kann. Einzelne Materialbeprobungen können dabei nur lokale Aussagen liefern. Für die Ermittlung des globalen Systemverhaltens werden oft weitere Messungen (z.B. Eigenfrequenzen, Eigenformen, Dämpfungsverhalten) erforderlich. Mit Hilfe moderner Optimierungsalgorithmen können mit optiSlang [1] aus den Messergebnissen wesentliche globale System- und Materialparameter identifiziert werden. Der Abgleich zwischen Messung und Nachrechnung gehört zu den klassischen Aufgabenstellungen einer Modellvalidierung. Ist die Differenz zwischen Messung und Nachrechnung zu groß, kann daraus eine Optimierungsaufgabenstellung der Minimierung der Differenzen formuliert werden. Optimierungsaufgabenstellungen des Abgleichs zwischen Messung und Nachrechnung werden häufig als Identifikationsproblem (z.B. Parameter-, Systemidentifikation) oder inverses Problem bezeichnet. In der Vergangenheit wurde diese Aufgabenstellung i.d.R. durch iterative Anpassung einzelner Kennwerte bearbeitet. Mit der Verfügbarkeit der Optimierungsplattform optiSlang kann der iterative händische Abgleich automatisiert werden und es können komplexere Aufgabenstellungen bearbeitet werden. Zur allgemeinen Parameteroptimierung können in optiSlang Gradientenverfahren, stochastische Suchstrategien oder Response Surface Approximationen eingesetzt werden [1]. Damit wird es möglich Parameter- und Systemidentifikationen an großen komplexen Tragstrukturen in überschaubaren und praxistauglichen Rechenzeiten durchzuführen. Der klassische Ablauf der Lösung einer derartigen Optimierungsaufgabe ist in Abb. 17 dargestellt.

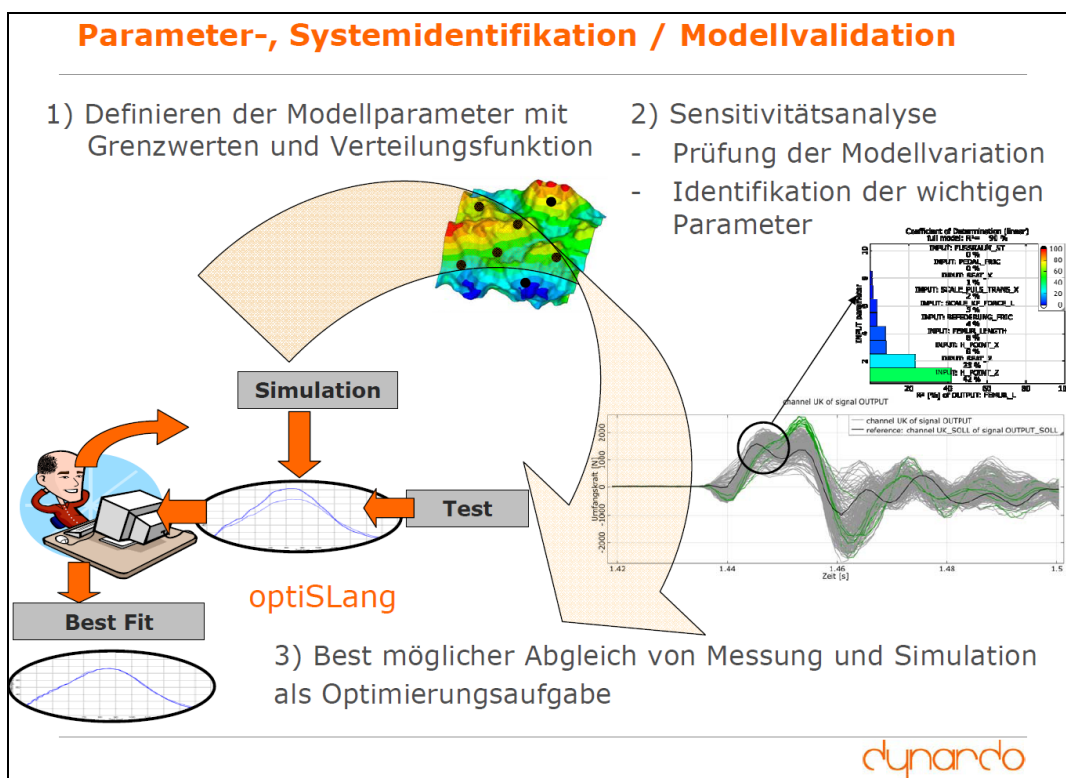


Abb. 17 Übersicht Abgleich von Messung und Simulation in optiSlang

4.1 Parameteridentifikation an einer historischen Eisenbahnbrücke

Basierend auf den Ergebnissen der Sensitivitätsstudien in Kap. 3.1 können die wesentlichen Materialkennwerte experimentell genauer bestimmt werden. Im Falle der relativ unregelmäßig gemauerten Stirnwände ist z.B. die Bestimmung des E-Moduls oder eines Reibbeiwerts der Mauerwerksfugen experimentell am bestehenden Bauwerk nicht möglich. In derartigen Fällen können Materialparameter indirekt durch eine Parameteridentifikation bestimmt werden. Das Ziel einer Parameteridentifikation ist der Abgleich der berechneten Ergebnisse des numerischen Simulationsmodells mit den durch Messungen am Bauwerk ermittelten Werten. Dieser Abgleich

der berechneten Ergebnisse und gemessenen Werte stellt eine Optimierungsaufgabe dar, bei der die Zielfunktion die Minimierung der Differenz zwischen Berechnung und Messung zum Gegenstand hat.

Im vorliegenden Fall bieten sich hierfür die Messungen der Vertikalverschiebungen der Bögen unter Verkehrslast an. Für eine Verkehrslast von 60 t in mittlerer Stellung auf dem Bogen 1 beträgt die (gemessene) maximale Vertikalverschiebung des Bogens 2,5 mm. Die Parameteridentifikation des E-Moduls und des Reibbeiwerts der Übermauerung wurde mit evolutionären Optimierungsalgorithmen durchgeführt. In Abb. 18 links ist der Verlauf der Optimierung dargestellt. Wie in Abb. 18 rechts gezeigt, wurde die beste Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung (best design) für den Reibbeiwert $\phi = 38^\circ$ und den E-Modul $= 1,844 \text{ E}+06 \text{ kN/m}^2 = 1844 \text{ N/mm}^2$ gefunden.

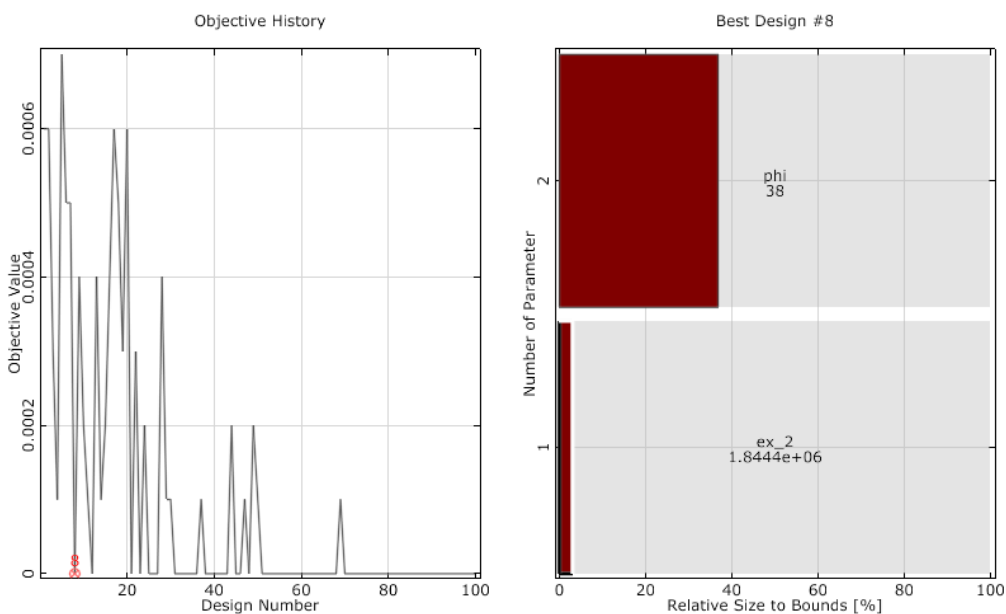


Abb. 18 links: Verlauf des Optimierers, rechts: best design

5 Referenzen

- [1] Dynardo - optiSLang the optimizing Structural Language for Sensitivity Analysis, Multidisciplinary Optimization, Robustness Evaluation and Reliability Analysis, Version 2.1 Users Manual 2006
- [2] Grotlüschen, K.: Wasserturm Oldenburg, Tragverhalten unter Feuchte- und Temperatureinfluss. Diplomarbeit, FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven (2007)
- [3] Schlegel, R.: Numerische Berechnung von Mauerwerkstrukturen in homogenen und diskreten Modellierungsstrategien. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Universitätsverlag (2004) ISBN 3-86068-243-1
- [4] Schlegel, R.: ANSYS/multiPlas – General-Multisurface-Plasticity, Version 5, Users Manual 2008, Internet: www.dynardo.de
- [5] Schlegel, R.: Möglichkeiten der numerischen Simulation von Mauerwerk heute anhand praktischer Beispiele. In: Mauerwerk-Kalender (2009) S. 791-820, ISBN 978-3-433-02908-4