

GENERALISIERTE FALLSTUDIE EINER RAHMENBRÜCKE

Das Projekt "SAFEBRIDGE" hat das Ziel, ein fortgeschrittenes Verfahren zur numerischen Bewertung von Brücken auf der Grundlage der Zuverlässigkeitstheorie (auf Basis von EN 1990 und der österreichischen Norm ÖN B4008-2) zu entwerfen und dieses für mehr Ingenieurbüros und Straßen- und Eisenbahninfrastrukturbetreiber in Wien, Niederösterreich und Mähren verfügbar zu machen. Eine der ausgewählten Brücken (5 in Österreich und 5 in der Tschechischen Republik) wird vorgestellt, einschließlich Bauwerksdetails, FE-Modell, Lastmodellen und ausgewählten Ergebnissen.

Bauwerksdetails

Die wichtigsten geometrischen Parameter dieses Brückentyps, die in dieser Fallstudie als Variablen betrachtet werden, sind:

- Kreuzungswinkel $75^\circ - 90^\circ$
- Plattenbreite 6,2m – 11,2m
- Stützweiten 12m – 20m
- Stiellänge 2m – 8m
- Plattendicke = Stieldicke = 1m

Die Angaben wurden aus der RVS 15.02.31 (Entwurf 16.10.2018) Rahmennormalie [1] entnommen. Bei der Modellbildung und Analyse des linearen FE Modells wurde das Dokument als Referenz verwendet. Als Tragwerksbeton wurde die Klasse C30/37 gewählt und für den Betonstahl die Klasse B550 B gewählt.

Abbildungen 1 und 2 zeigen charakteristische Längs- und Querschnitte. Die Lagerung der Brücke erfolgt mittels Bettungsmoduli, die an den Flächen der Fundamente wirken.

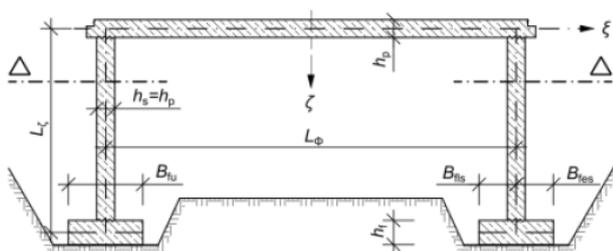


Abbildung 1: Rahmenbrücke – Generalisierte Fallstudie
 Längsschnitt aus [1]

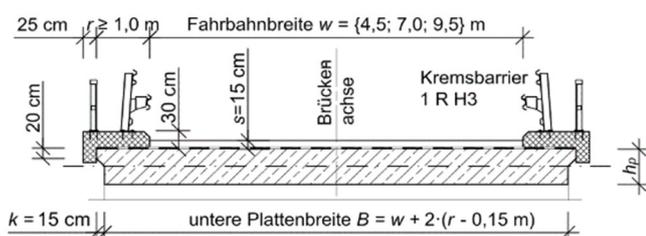


Abbildung 2: Charakteristischer Querschnitt aus [1]

Lastfälle

Die folgenden Lastfälle wurden bei der Modellierung berücksichtigt und orientieren sich ebenfalls an der [1]:

- Eigengewicht (g_1) der Stahlbetonbrückenstruktur
- Lasten aus Fahrbahnaufbau, Randträger, Krembarrier (g_2)
- Erddruck (als Dreieckslast)
- Betonschwinden (als Temperaturlast)
- Setzung (ein Fundament um 15mm)
- Verkehrslast LM1 (nach EN 1991-2)

Modellierungskonzept

Die Modellbildung erfolgte bei der Rahmenbrücke, wie bei den anderen Brücken mit den FE-Programmen SOFiSTiK und ATENA Scientific. Die Modellierung der Brücke in SOFiSTiK diente der Kontrolle der Bewehrungsmengen (Vergleich mit [1]) und Bestimmung der ungünstigsten Laststellung. Da das Programm eine parametrische Eingabe zulässt, konnten sehr schnell verschiedene Varianten durchgerechnet werden (verschiedene Kreuzungswinkel, Plattenbreiten usw.).

Anschließend wurde ein repräsentatives Parameterset ausgewählt und damit die Brücke in ATENA Scientific modelliert. Mit diesem Modell wurde anschließend auch eine probabilistische Analyse durchgeführt, sowie der Einfluss von Korrosion der Bewehrung an signifikanten Stellen, auf die Tragfähigkeit untersucht.

Lineares FE – Model (SOFiSTiK)

Das lineare FE Modell wurde mittels SOFiSTiK [3] erstellt. Als Elementtyp für alle Bauteile wurden Flächenelemente (QUAD Elemente) verwendet (Abb. 3). Die Eingabe erfolgt in der Programmiersprache CADINP und erlaubt die Parametrisierung der meisten Eingabewerte. Das Modell dient zur Überprüfung der ungünstigsten Laststellung sowie Nachrechnung der Bewehrungsgrade (und Vergleich mit [1]).

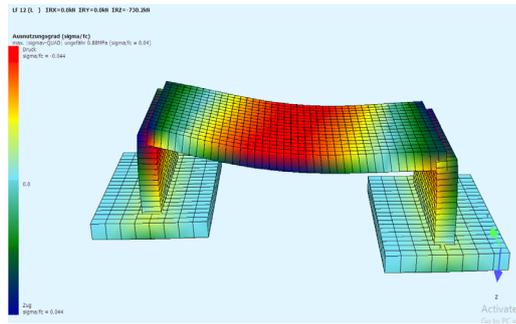


Abbildung 3: FE – lineares Modell

Die Brücke wurde nach dem Lastmodell 1 nach EN 1991-2 berechnet (Abbildung 4). Es wurde auch die Setzung eines Fundamentes um 15mm (Abbildung 5), sowie Betonschwinden in die Lastfallkombinationen aufgenommen.

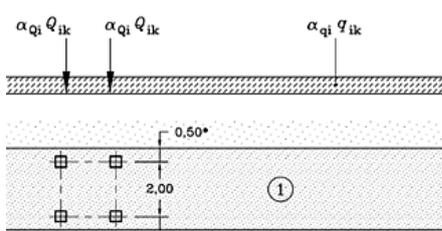


Abbildung 4: Lastmodell 1 nach EN 1991-2 [4]

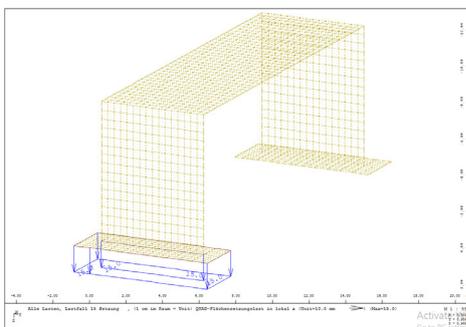


Abbildung 5: Setzung eines Fundamentes

Mit den Lastfallkombinationen laut Norm wurden sehr ähnliche Ergebnisse, wie in [1] errechnet, betreffend Verformungen und Bewehrungsgrade.

Ausgewählte Ergebnisse Lineares FE-Modell

Nachfolgend wird exemplarisch der Bewehrungsgrad für die oberliegende Bewehrung aus den Berechnungen des BEMESS Moduls gezeigt (Abbildung 6). Der größte Bewehrungsgrad ist im Rahmeneck mit 44,9cm²/m lokalisiert. Bei der Berechnung wurden sehr Ähnliche Bewehrungsgrade wie in [1] gefunden. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich von 3cm²/m und sind somit gering.

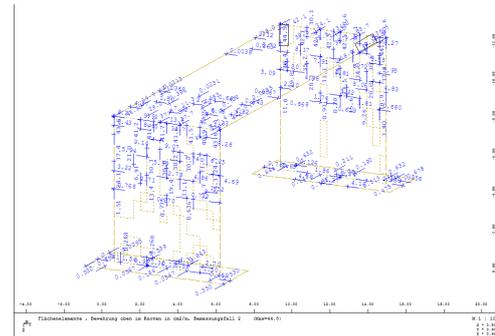


Abbildung 6: Bewehrungsgrade – obere Bewehrungslage

Nichtlineares FE - Modell

Basierend auf den Ergebnissen des SOFiSTiK Modells, sowie der Unterlagen aus [1], wurde eine nicht-lineare FE-Berechnung mit der Software ATENA Scientific vorgenommen. Der Zweck der Analyse war Traglastreserven, Schwachstellen und Rissbilder bzw. Rissentwicklung aufzuzeigen. Das Modell wurde später noch für die probabilistische Analyse und bei der Untersuchung des Tragverhaltens bei Auftreten von Korrosion adaptiert und weiterverwendet. Spezielles Interesse an den Ergebnissen der NLFEM besteht in den Bereichen, die in Abbildung 7 (aus [1]) dargestellt sind. Statt Flächenelementen werden bei der NLFEM Modellierung in ATENA Scientific Volumenelemente (Kontinuums Elemente) für alle Bauteile verwendet. Abbildung 8 zeigt das ATENA Scientific Modell mit Rissweiten bei einer Überlastung von 3 LM1.

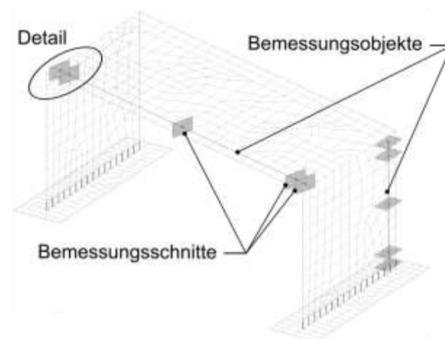


Abbildung 7: Bemessungsschnitte, Details – Rahmenbrücke aus [1]

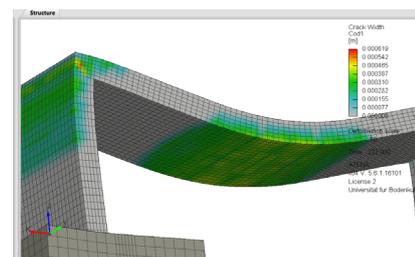


Abbildung 8: Darstellung Rahmenbrücke in ATENA Scientific

In Abbildung 9 sind die Bewehrungspositionen (ein Viertel der Struktur, wegen Symmetriebedingungen) dargestellt. Die Stäbe wurden als einzelne Linien modelliert. Die diskrete Eingabe der einzelnen Stäbe ist vorteilhaft, da im Postprocessing die Spannungen in den einzelnen Stäben ein gutes Verständnis der Schwachstellen und Tragreserven aufzeigt. Da die Lastabtragung nur über eine Achse erfolgt, wurde die Längsbewehrung und Schubbewehrung bzw. Torsionsbewehrung am Rand mittels Linien modelliert. Um Rechenzeit zu sparen wurde die Querbewehrung als verschmierte Bewehrung modelliert. Beim ATENA Modell ist ein Bodenkörper je Fundament, ebenfalls mit Volumenelementen, mit Drucker-Prager Materialeigenschaften erstellt worden. Die Drucker-Prager Parameter α und k wurden mittels der in [1] angegebenen Bodenkennwerte berechnet. Abbildung 10 zeigt das Fundamentbetonkörper und das Bodenmaterial für ein Fundament. Das Lastmodell LM1 ist bei der Modellierung des ATENA Modells in der Brückenmitte aufgestellt.

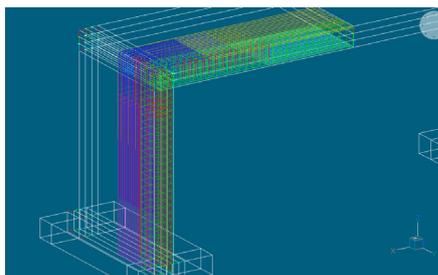


Abbildung 9: Darstellung Bewehrungspositionen

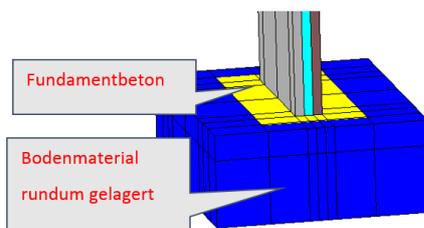


Abbildung 10: Detail Lagerung (ATENA)

Ergebnisse des NL-FEM Modells

Um die verschiedenen Gennzustände zu untersuchen und den Verlauf der Spannungen und Rissweiten bei immer größer werdender Last zu bestimmen, wurde die Brücke zuerst mit den ständigen Lasten und dem LM1 als Verkehrslast beaufschlagt. Danach wurde das LM1 mittels Faktoren erhöht. Daraus ergab sich für die Auswertung ein Lastniveau-Verlauf wie folgt:

- Lastschritt 15 – g_1
- Lastschritt 45 – g_1+g_2
- Lastschritt 95 – g_1+g_2+LM1
- Lastschritt 145 – $g_1+g_2+LM1(x_2)$

- Lastschritt 195 – $g_1+g_2+LM1(x_3)$
- Lastschritt 245 – $g_1+g_2+LM1(x_4)$

Die in Abbildung 11 markierten Zonen wurden grafisch im Postprocessing ausgewertet und es wurden auch Monitore in den Zonen erstellt, um diskrete Ergebniswerte zu erhalten. Die untersuchten Eigenschaften in den Zonen sind: Rissweite im Beton, Spannungen im Bewehrungsstahl sowie Druckspannung im Beton. Die Ergebnisse sind pro Lastniveau in Abbildungen 11 bis 13 dargestellt.

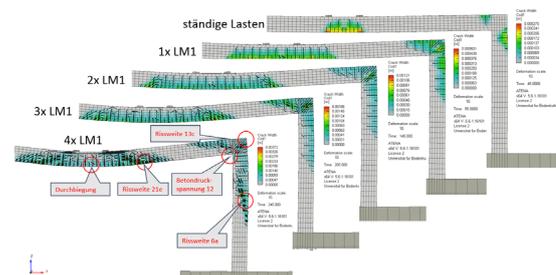


Abbildung 11: Verlauf der Rissbildung

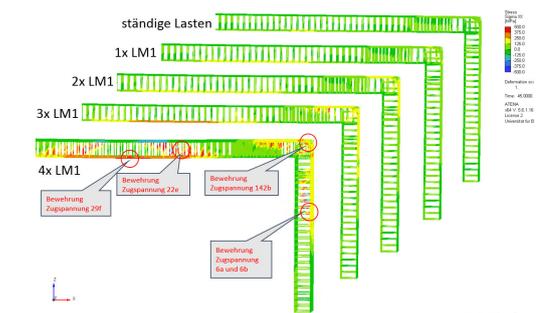


Abbildung 12: Verlauf der Spannungen der Bewehrung

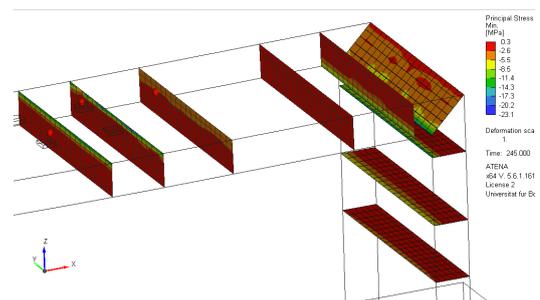


Abbildung 13: Betondruckspannungen im letzten Lastschritt

Die Ergebnisse des NL-FEM Modells zeigen, dass bei einem Lastniveau von ständigen Lasten + 4x LM1, das ULS fast erreicht ist. Die größten Rissweiten sind im Bereich von 3mm und ein großer Teil der Bewehrung verformt sich bereits plastisch. Die roten Kreise in den Abbildungen 11 und 12 zeigen die Stellen, der für die probabilistische Analyse verwendeten Monitoring Punkte. Bis zu einem Lastniveau $g_1+2xLM1$ sind die größten Risse, Biegerisse. Danach beginnt ein Schubversagen einzutreten.

Probabilistische Analyse

Für die probabilistische bzw. stochastische Berechnung wurden die Mittelwerte der Beton- und Bewehrungsstahlparameter auf Grundlage der in normativ angegebenden Dokumenten ([5], [6]) Werte und Formeln abgeleitet. Die dazugehörigen Verteilungsdichte-funktionen sind ebenso nach [2] und [6] gewählt. Abbildung 14 zeigt Ergebnisse für die Durchbiegung einen gleichmäßigen Verlauf, der erst beim letzten Lastniveau (4xLM1) breiter wird und den baldigen Stabilitätsverlust der Struktur ankündigt.

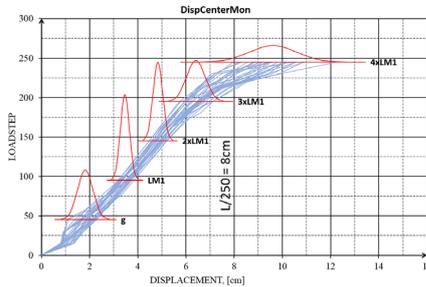


Abbildung 14: Ergebnisse der 30 Proben - Durchbiegung

Die Ergebnisse der Rissweiten zeigen für die Monitore auf dem Steg und auf der Platte sehr unterschiedliche Resultate zwischen den Proben. Dies könnte mit Auftreten des Dekompressionspunktes und plötzlichem „aufplatzen“ der Struktur zusammenhängen. Das Limit für die Rissweite (für Dauerhaftigkeit nach EC2) wird wie folgt erreicht: (a) Steg: zwischen 2xLM1 und 3xLM1 (oberer 5% Fraktilwert); (b) Platte: zwischen 1xLM1 und 3xLM1 (oberer 5% Fraktilwert); (c) Rahmenecke: etwa bei 4x LM1. In Abbildung 15 wird sichtbar, dass auch die Zugspannungen in der Bewehrung einer großen Schwankungsbreite unterliegen können.

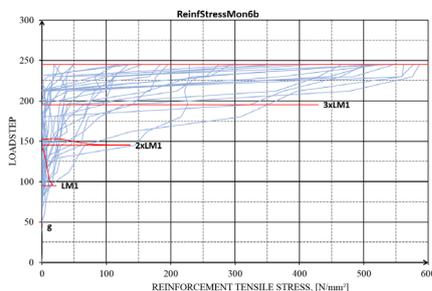


Abbildung 15: Ergebnisse der 30 Proben – Ausgewählter Monitor für Bewehrungszugspannungen

Im nächsten Schritt wird die Berechnung der Sicherheitsniveaus mit den Ergebnissen durchgeführt. Die Ergebnisse der Rissweiten werden genauer geprüft, da sich für die Struktur bei Varianten verschiedenen Überdeckungsmaßen, ein signifikanter unterschied der Rissweiten ergeben hat.

Degradation

Ausgehend von den Berechnungen der NFLEM Analyse wurde zur Untersuchung des Einflusses der Degradation des Bewehrungsstahls in der Zugzone in Feldmitte die Querschnittsflächen der hier befindlichen Bewehrungspositionen herabgesetzt. Durchbiegung in Feldmitte bei schrittweiser Reduktion um 40% und 60% ist in Abbildung 16 dargestellt. Während bei dem Modell ohne Verlust an Querschnittsfläche das SLS (Gebrauchstauglichkeit) von L/250 bei einem Lastniveau von $g + 4xLM1$ fast erreicht wird, ist es bei 40% Verlust schon bei etwas unter $g+3xLM1$ erreicht und bei 60% Verlust schon bei $g+\sim 2.3xLM1$. Es findet eine Lastumlagerung hin zum Randträger, der stärker bewehrt ist statt. Es muss angemerkt werden, dass es sich hierbei nicht um probabilistische Ergebnisse handelt, sondern das Modell mit Mittelwerten. In Abbildung 17 ist die Entwicklung der Rissbreiten bei Reduktion der Bewehrung abgebildet.

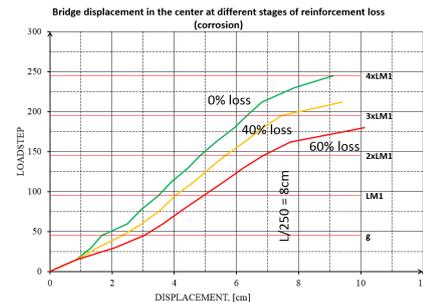


Abbildung 16: Durchbiegung in Brückenmitte bei verschiedenen Querschnittsverlust Niveaus

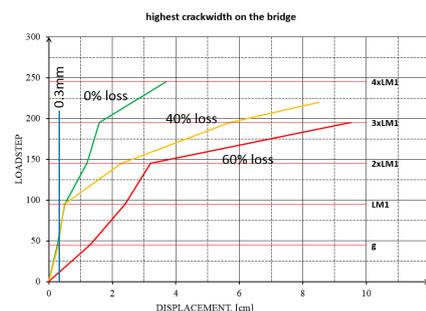


Abbildung 17: Entwicklung der Rissbreite bei Reduktion der Bewehrung in der Zugzone der Platte

Quellen

- [1] Rahmennormale RVS 15.02.31 (Entwurf 16.10.2018), Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, 2018
- [2] Correlation among selected fracture-mechanical parameters of concrete obtained from experiments and inverse analyses, Zimmermann et al. 2016
- [3] SOFISTIK AG, SOFISTIK 2019
- [4] ÖNORM EN 1991-2, 2004
- [5] EN 1992: Eurocode 2, 2004.
- [6] JCSS, Joint Committee on Structural Safety: Probabilistic Model Code. Zürich, 2001.