

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Panenka, Andreas

Robustheit nach TbVS: Lohnt sich der Aufwand?

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108384>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Panenka, Andreas (2021): Robustheit nach TbVS: Lohnt sich der Aufwand?. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Angewandte Forschung, von der Forschung in die Praxis. Online-Veranstaltung der Abteilung Bautechnik am 3. November 2021 in Karlsruhe. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 17-23.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Robustheit nach TbVS: Lohnt sich der Aufwand?

Dipl.-Ing. Andreas Panenka (Bundesanstalt für Wasserbau)

1 Motivation

Mit der Robustheitsbewertung stellt das BAWMerkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Verschlüsse im Stahlwasserbau (TbVS) (Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) 2018) ein Verfahren zur Verfügung, das Informationen über die Tragsicherheit und das Tragverhalten von beschädigten Stahlwasserbauten liefert. Kennzahl der Robustheitsbewertung ist die Traglast des beschädigten Tragwerks, deren Berechnung mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Der Beitrag geht der Frage nach, in wie weit sich dieser Aufwand hinsichtlich des Entscheidungsprozess bei der Gewichtung und Reihung von Überwachungs- und Instandhaltungsmaßnahmen lohnt.

Nach den Begriffsdefinitionen in Abschnitt 2 wird der Aufwand bei der Berechnung der Traglast mittels GMNIA in Abschnitt 3 verdeutlicht. Die Beschreibung des Tragverhaltens der unterschiedlichen Tragwerkskomponenten in Abschnitt 4 hilft für das Verständnis der Beispiele in Abschnitt 5, anhand denen die Robustheitsbewertung nach TbVS dargestellt wird. Eine Zusammenfassung in Abschnitt 6 gibt einen Überblick über die wichtigsten Aspekte bei der Anwendung des Verfahrens.

2 Robustheit und Traglast

2.1 Robustheit

Robustheit wird für (massive) Wasserbauwerke in TbW (Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) 2016) definiert als „die Eigenschaft eines Tragwerks, unvorhergesehenen bzw. unberücksichtigten Beanspruchungen oder Ausfällen zielgerecht zu widerstehen.“ Darauf aufbauend definiert TbVS ein Bauteil als ausgefallen, sollte ein normativer Nachweis der Querschnitts- oder Bauteiltragfähigkeit nicht gelingen. Zur Abschätzung der Resttragfähigkeit ist dann eine Robustheitsbewertung anhand der Traglast des durch den Bauteilausfall geschwächten Tragwerks erforderlich. Im Sinne einer außergewöhnlichen Bemessungssituation muss das Tragwerk unter Inkaufnahme plastischer Tragwerksverformungen mindestens das Gebrauchslastniveau aufnehmen können, um weiterhin als tragfähig zu gelten. Mit der Möglichkeit einer Robustheitsbewertung schließt TbVS eine normative Lücke in der für den Stahlwasserbau maßgebenden Norm DIN 19704-1:2014-11, die weder einen Bauteilausfall als außergewöhnliche Bemessungssituation kennt noch die Ausnutzung plastischen Materialverhaltens erlaubt.

2.2 Traglast

Als Traglast wird im Allgemeinen das Lastniveau, das zum Kollaps des Tragwerks führt, verstanden. Der Grenzzustand in dieser Betrachtungsweise ist der Übergang zur kinematischen Kette bzw. das Ausbilden eines Mechanismus, der den Verlust der globalen Steifigkeit zur Folge hat (Thürlimann 1961). Da der tatsächliche Wert der Traglast von einer Vielzahl von Parametern abhängt, die nur unter erheblichem Aufwand in einem Rechenmodell abgebildet werden können, ist die rechnerische Traglast ein operativer Wert, der für Vergleichszwecke verschiedener Bau-

werke oder Tragwerksvarianten herangezogen werden kann. Im Zusammenhang mit der Robustheit ist die Traglast ein Kennwert des Tragsystems: Je stärker die Traglast durch einen Bauteilausfall verringert wird, desto geringer ist die Robustheit des Bauwerks demgegenüber (vgl. Wisniewski et al. 2018).

3 Aufwand in der Berechnung der Traglast

3.1 Grundlegendes zur numerischen Traglastberechnung

Die numerische Ermittlung der Traglast geschieht nach der Finite-Element-Methode (FEM) mittels einer geometrisch und materiell nichtlinearen sowie unter Berücksichtigung von Imperfektionen durchgeführten Analyse (GMNIA). Geometrische Nichtlinearität entsteht aus großen Verschiebungen und Verzerrungen sowie der daraus resultierenden Lage- und Richtungsänderung der Lastangriffspunkte. Sie ist bei der Analyse von dünnwandigen Stahlwasserbauwerken im Besonderen wichtig, damit die Auswirkungen der Wasserlast korrekt berechnet werden. Materielle Nichtlinearität berücksichtigt im Falle von Stahl das plastische Verformungsvermögen des Werkstoffs. Im Allgemeinen begrenzt TbVS die Auswahl der nach DIN EN 1993-1-5:2017-11 möglichen Werkstoffmodelle auf einen bilineare Spannungs-Dehnungslinie ohne jegliche Widerverfestigung. Zur Erhöhung der numerischen Stabilität der Berechnung ist ggf. das Verwenden einer geringen Widerverfestigung im Bereich von $E_h < E/10.000$ notwendig.

Geometrische und materielle Nichtlinearität sind in den gängigen Softwarepaketen ohne großen Aufwand anwendbar. Der Aufwand für die Berücksichtigung von Imperfektionen hängt dagegen vor allem von der Tragwerkart ab. Während für Stäbe und Platten spezialisierte Softwarelösungen existieren, die die normgerechte Vorverformungen automatisch generieren und die passenden Nachweise führen, ist die Ermittlung der maßgebenden Imperfektion für Schalen aufgrund deren komplexen Beulverhaltens nicht ohne weiteres automatisierbar und erfordert einen deutlich höheren Aufwand (vgl. u.a. Schneider 2004; Schmidt 2012; Rotter 2017; Sadowski et al. 2017).

3.2 Interpretation der Ergebnisse

Die Nichtlinearität des Berechnungsmodell erfordert große Sorgfalt bei der Interpretation der Analyseergebnisse. Einerseits lassen sich die Ergebnisse nicht ohne weiteres durch Handrechnungen plausibilisieren. Andererseits muss sichergestellt werden, dass ein physikalischer Grenzzustand die Traglast bestimmt. Ein physikalischer Grenzzustand gilt als erreicht, wenn sich ein Mechanismus einstellt und das Tragwerk dadurch seine globale Steifigkeit verliert (d.h. die Determinante der Steifigkeitsmatrix K_T des FE-Modells geht gegen 0). Der Verlust der globalen Steifigkeit äußert sich durch einen nahezu horizontalen Verlauf der Last-Verformungskurve. Allerdings können auch numerische Randbedingungen zu einem frühzeitigen Abbruch der Berechnung führen (z. B. stark verzerrte Elemente oder plötzlich ansteigende plastische Verformungen). Bild 1 zeigt die Last-Verformungskurve eines Berechnungsmodells in Abhängigkeit von der Vernetzungsdichte in den maßgebenden Bereichen. Während mit grober Vernetzung die Last-Verformungskurve beim numerisch bedingten Abbruch der Berechnung noch eine deutliche Steigung aufweist (d.h. $K_T \gg 0$), erreicht die Berechnung mit feinerer Vernetzung den nahezu horizontal verlaufenden Bereich (d.h. $K_T \rightarrow 0$) und erfasst somit den physikalischen Grenzzustand.

Die Aussagekraft der Berechnung lässt sich im Allgemeinen durch die Reduktion des Modellumfangs auf die wesentlichen Bauteile, die Qualität der Vernetzung und die Einstellungen des Gleichungslösers beeinflussen. Zur Plausibilisierung der ermittelten Traglast beinhaltet eine GMNIA in der Regel einen iterativen Prozess, aus dem sich das Verständnis über das Tragverhalten des Bauwerks entwickelt. Da die Aussagekraft einer GMNIA auf den maßgebenden Bereich lokal begrenzt ist, sind zur Untersuchung unterschiedlicher Bauwerksbereiche gegebenenfalls mehrere Teilmodelle zu erstellen und zu analysieren.

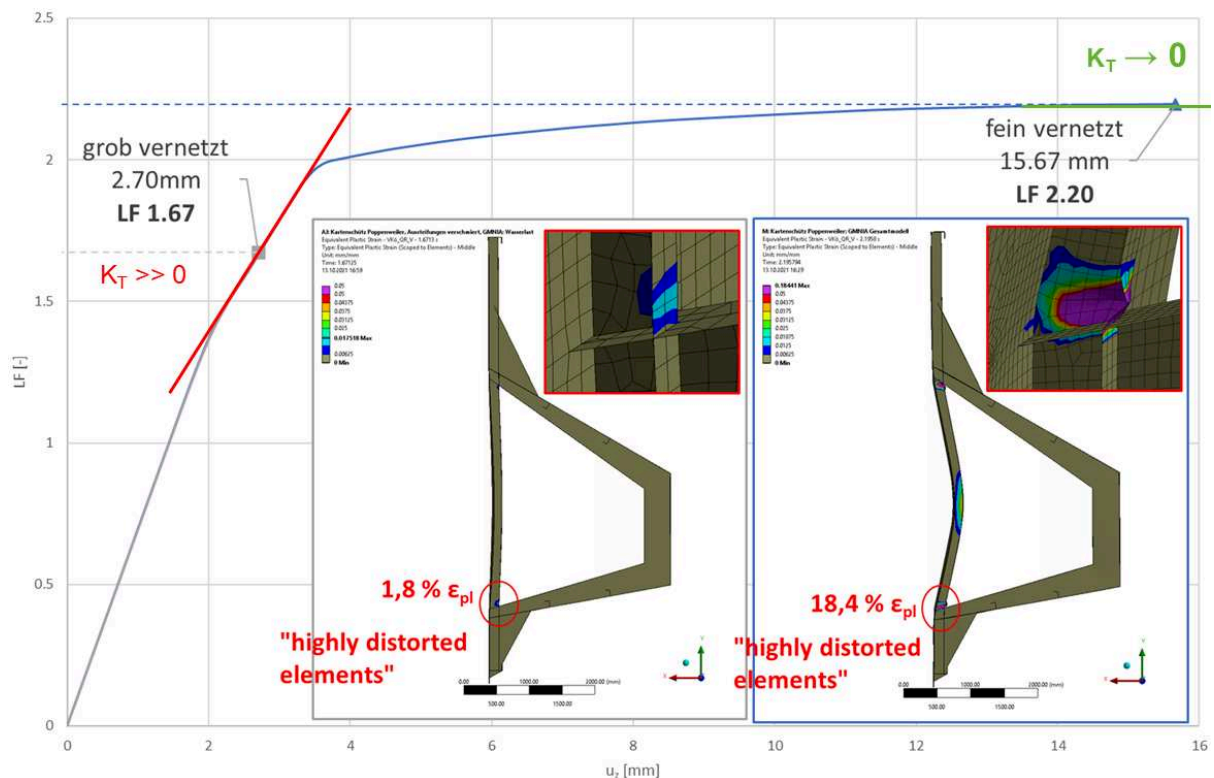


Bild 1: Last-Verformungskurven bei Verletzung eines numerischen Abbruchkriteriums (grau) und beim Erreichen eines physikalischen Grenzzustands des Tragwerks (blau).

4 Tragverhalten von stab-, platten- und schalenbasierten Tragwerken

Das unterschiedliche Tragverhalten von Stäben, Platten und Schalen erfordert eine auf das Bauteil abgestimmte Herangehensweise bei der Robustheitsbewertung. Aufgrund der umfassenden Berechnungsvorschriften in DIN EN 1993-1-1:2010-12 ist eine numerische Berechnung für stab-basierte Tragwerke in der Regel nicht erforderlich. Lediglich für Sonderquerschnitte, die im Stahlwasserbau jedoch häufig vorkommen, sind u. U. detaillierte GMNIA erforderlich. Typische Stabtragwerk im Stahlwasserbau sind die räumlichen Fachwerke von Drei- und Viergurtschützen.

Für plattenartige Querschnitte, wie sie unter anderem in Kastenschützen vorkommen, erlaubt DIN EN 1993-1-5:2017-11 rein numerische Verfahren, in denen sich plattentypischen Besonderheiten realistischer als in den algebraischen Nachweisen abbilden lassen. Dazu gehört u.a. die Berücksichtigung des effektiv wirksamen Querschnitts eines Bauteils, das überkritische Tragverhalten, die Interaktion der Belastungen und den daraus resultierenden Spannungszuständen sowie die Abbildung der realistischen Auflagerbedingungen an den Plattenrändern.

Ähnliches gilt theoretisch für schalenbasierte Tragwerke, beispielsweise von Wehrwalzen oder Fischbauchklappen. DIN EN 1993-1-6:2017-07 beinhaltet neben den algebraischen Nachweisen für die Standardfälle von unversteiften Schalen auch Vorschriften für die numerische Bemessung. Aufgrund des komplexen Beulverhaltens von Schalen läuft die numerische Bemessung in der Praxis jedoch anders als bei Stäben und Platten auf eine umfassende Parameterstudie hinaus, in der die ungünstigste Kombination aus Imperfektionsform, Amplitude und Vorzeichen ermittelt werden muss. Abschließend ist zusätzlich eine Kalibrierung der Ergebnisse anhand bekannter Beulfälle bzw. physikalischer Versuche oder einer allgemein anerkannten Theorie erforderlich. Ist eine Kalibrierung nicht möglich, erlauben die Ergebnisse einer numerischen Analyse von Schalenträgwerken lediglich qualitative Aussagen über das Tragverhalten. Bei Rotter und Schmidt (2013) finden sich darüber hinaus Empfehlung im Umgang mit versteiften Schalen.

5 Beispiele

5.1 Stabbasiertes Tragwerk: Untertor Ladenburg

Als Beispiel für die stabbasierten Tragwerke dient das Tragwerk des alten Untertors in der Hochwasserschutzanlage Ladenburg. Das Viergurtschütz besteht aus zwei Hauptriegeln, die als Fachwerkträger ausgebildet sind und über gelenkig angeschlossene Querrahmen und rückwärtige Verbände miteinander verbunden sind. Gemäß der Voranalyse ist einer der Diagonalstreben im oberen Riegel das maßgebende Bauteil, für das eine GMNIA eine Traglast von $R_d = R_k/\gamma_M = 2580/1,1 \cong 2345$ kN ergibt. Im neuwertigen Soll-Zustand kann die Belastung um einen Lastfaktor von rd. 1,40 gesteigert werden, bevor die Diagonalstrebe und mit ihr das gesamte Tragwerk kollabiert. Unter der Annahme eines Ausfalls des benachbarten Querrahmens sinkt der Lastfaktor auf einen Wert von 1,25. Da der Lastfaktor über dem Gebrauchslastniveau liegt (d.h. $LF_{Ziel} > 1,0$), kann das Tragsystem des Untertors dem Schadensbild eines ausgefallenen Querrahmens gegenüber als robust angesehen werden. Bild 2 zeigt die Knickfigur des maßgebenden Bauteils und den Mechanismus des Gesamttragwerks.

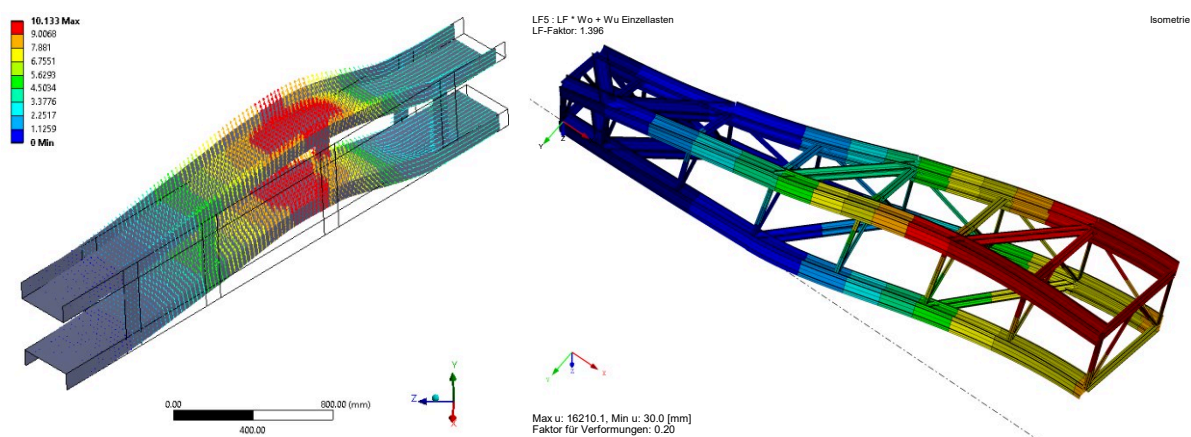


Bild 2: Knickfigur der maßgebenden Diagonalstrebe (links); Mechanismus des Gesamttragwerks beim Erreichen der Traglast (rechts)

5.2 Plattenbasiertes Tragwerk: Kastenschütz ähnlich zu Wehrverschluss Poppenweiler

Das Beispiel eines plattenbasierten Tragwerks beruht auf dem Wehrverschluss Poppenweiler. Das Kastenschütz besteht neben der Stauwand aus einem geschlossenen Torsionskasten, die beide mittels Aussteifungen gegen lokales Versagen verstärkt sind. Ab dem Drittelpunkt der Verschlussbreite ist der Torsionskasten gevoutet ausgeführt. Der Querrahmen am Übergang zum gevouteten Seitenbereich wird aufgrund der Umlenkkkräfte, die dort herrschen, am stärksten belastet. Maßgebendes Bauteil ist gemäß einer algebraischen Voranalyse jedoch der Auflagerbereich. In der ständigen Bemessungssituation beult das Bodenblech aufgrund der Schubbelastung bei einem Lastfaktor von rd. $L_{Fd} = 1,40$. Die GMNIA ergibt einen etwas höheren Lastfaktor von rd. $L_{Fd,soll} = L_{Fk,soll} / (\gamma_F \cdot \gamma_M) = 1,54$. Der Ausfall der Querrahmen im Übergang zum gevouteten Seitenbereich hat weder Einfluss auf den Lastfaktor zum Erreichen der Traglast (d. h. $L_{Fd,ist} = L_{Fk,soll} = 2,29$) noch auf den Ort des Versagens. Das Tragsystem des Kastenschützes ist somit robust gegenüber dem Ausfall der Querrahmen.

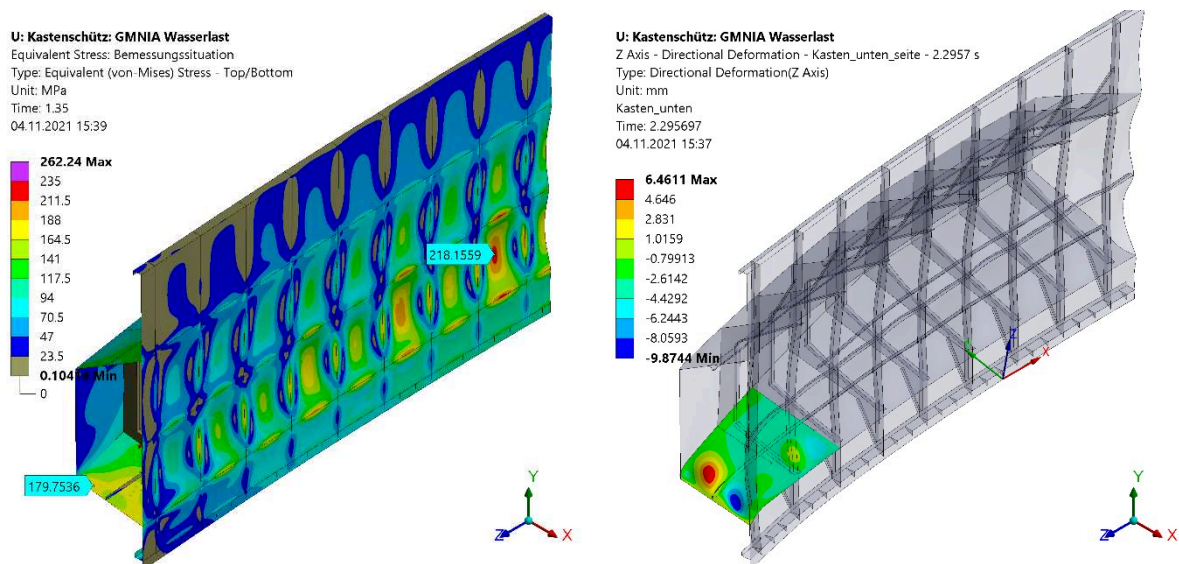


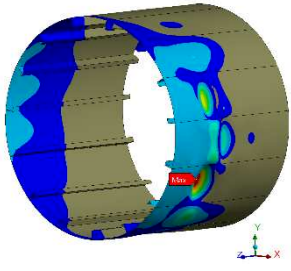
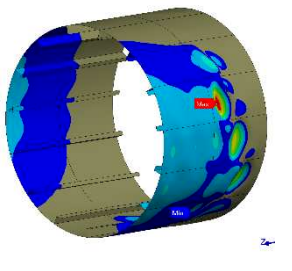
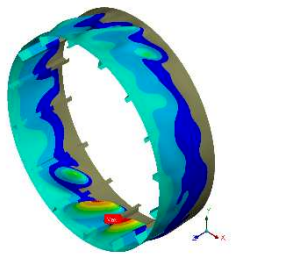
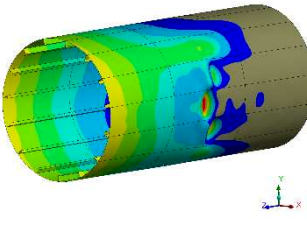
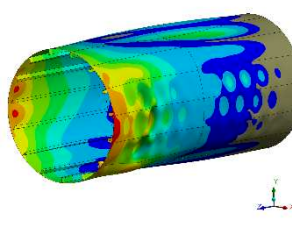
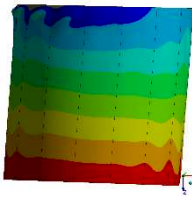
Bild 3: Spannungsverteilung im Kastenschütz in der ständigen Bemessungssituation (links); Mechanismus durch Schub im Auflagerbereich bei $L_{Fk,soll}$ (rechts).

5.3 Schalenbasiertes Tragwerk: Wehrwalze Randersacker

Als Beispiel für ein schalenbasiertes Tragwerke dient die Normalwalze der Wehranlage Randersacker. Tragendes Element der Wehrwalzen ist der zylindrische, mit Längsrippen versteifte Walzenkörper. Gemäß der algebraischen Berechnung nach Rotter und Schmidt (2013) ist der Walzenkörper in Wehrfeldmitte maßgebend. Die Querrahmen sind dagegen, wie bei geschlossenen, zylindrischen Querschnitten generell der Fall, gering belastet. Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der GMNIA zusammen. Im Soll-Zustand erreicht das Teilmodell der Walzenmitte den geringsten Lastfaktor. Andere Bereiche versagen dagegen erst bei teilweise deutlich höheren Lastfaktoren. Auf eine Parameterstudie zur Bestimmung der ungünstigsten Vorverformung wurde an dieser Stelle verzichtet. Zur Simulation des Ausfalls von Querrahmen werden die Bauteillängen der Teilmodelle um den Abstand zu den nächsten Querrahmen vergrößert. Der Lastfaktor in allen Teilmodellen fällt dadurch geringer aus, liegt jedoch noch deutlich über dem nach TbVS für ein Bauwerk

dieses Alters geforderten Wert von $LF_{Ziel} = \gamma_{M,alt} = 1,15$. Maßgebend bleibt auch im beschädigten Zustand das Versagen in Feldmitte. Das Tragsystem der Wehrwalze Randersacker zeigt demnach ein robustes Verhalten gegenüber dem Verlust von Querrahmen.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Ergebnisse aus der GMNIA für die drei Bereiche des Walzenkörpers mit der höchsten Auslastung.

LF	Feldmitte	Wechsel t	Auflager
Belastung	M	M + Q	Q
LF_{Soll}	2,55	2,94	4,08
			
LF_{Ist}	2,33	2,72	3,54
			
LF_{Ziel}	1,15	1,15	1,15
Bewertung:	robust	robust	robust

6 Zusammenfassung

Die Robustheitsbewertung nach TbVS setzt eine intensive Auseinandersetzung mit dem Tragsystem eines Bauwerks voraus. Grundlage ist ein plausibilisiertes Berechnungsmodell, mit dessen Hilfe in einer iterativen GMNIA die Traglast des Tragwerks ermittelt wird. Der Aufwand für die Berechnung und die Qualitätssicherung der Ergebnisse hängt von der Tragwerkart ab. Wie die Beispiele mit den ausfallenden Querrahmen verdeutlichen, liegt der Lohn des Aufwands in einem detaillierten Verständnis über das Tragverhalten und die Mechanismen des Tragsystems. Darauf aufbauend lässt sich die Bedeutung einzelner Bauteile für die Systemtragfähigkeit erkennen. Eine Robustheitsbewertung nach TbVS ist jedoch kein Ersatz für den Tragfähigkeitsnachweis nach Norm, sondern dient der Unterstützung bei der Maßnahmenplanung zur Überwachung und Beseitigung von Bauwerksschäden. Insofern stellt sich die Frage, ob im instandhaltungsintensiven (Stahl-)Wasserbau eine Robustheitsbewertung nicht schon für jeden Neubau sinnvoll wäre, damit die WSV als Anlagenbetreiberin von Beginn an eine solide Grundlage für die Inspektions-, Überwachungs- und Instandhaltungsplanung zur Hand hat.

Der ausführliche Forschungsbericht zum Thema „Systemtragfähigkeit unter Berücksichtigung von Schädigungsgraden“ steht ab Juni 2022 zur Verfügung.

7 Literatur

- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.) (2016): BAWMerkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke. (TbW). Karlsruhe (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).
- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.) (2018): BAWMerkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Verschlüsse im Stahlwasserbau. (TbVS). Karlsruhe (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).
- DIN EN 1993-1-5, 2017-07: Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile.
- DIN EN 1993-1-6, 2017-07: Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen.
- DIN EN 1993-1-1, 2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- DIN 19704-1, 2014-11: Stahlwasserbauten - Teil 1: Berechnungsgrundlagen.
- Rotter, J. Michael (2017): Challenges and their resolution in both philosophy and process to exploit advanced computation in shell structure design. In: W. Pietraszkiewicz und W. Witkowski (Hg.): Shell Structures: Theory and Applications Volume 4: CRC Press, S. 41–50.
- Rotter, J. Michael; Schmidt, Herbert (Hg.) (2013): Buckling of steel shells. European design recommendations. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). 5th Edition. Brussels, Belgium: ECCS - European Convention for Constructional Steelwork (Publication, 125-2).
- Sadowski, Adam J.; Fajuyitan, O. Kunle; Wang, Jie (2017): A computational strategy to establish algebraic parameters for the Reference Resistance Design of metal shell structures. In: Advances in Engineering Software 109, S. 15–30. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.02.012.
- Schmidt, Herbert (2012): Kommentar zu DIN EN 1993-1-6: Festigkeit und Stabilität von Schalen. Stahlbaunormen. In: Ulrike Kuhlmann (Hg.): Stahlbau-Kalender 2012. Eurocode 3 - Grundnorm, Brücken. 14. Jahr. Berlin: Ernst & Sohn (Stahlbau-Kalender), S. 135–204.
- Schneider, Werner (2004): Die "ungünstigste" Imperfektionsform bei stählernen Schalentragwerken - eine Fiktion? In: Bauingenieur 79, S. 436–442.
- Thürlimann, Bruno (1961): Grundsätzliches zu den plastischen Berechnungsverfahren. In: Schweizerische Bauzeitung 79 (48 u. 49), S. 863–880. DOI: 10.5169/seals-65642.
- Wisniewski, Dawid; Casas, Joan R.; Ghosn, Michel (2018): Load Capacity Evaluation of Existing Railway Bridges based on Robustness Quantification. In: Structural Engineering International 16 (2), S. 161–166. DOI: 10.2749/101686606777962440.