

Überlegungen zur Restlebensdauer schweißeiserner Brücken am Beispiel der Basler Wettsteinbrücke

Zusammenfassung

In zunehmendem Maße werden Brücken, die das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen, aus wirtschaftlichen Gründen weiterhin in Betrieb behalten. Um den Unterhalt und die Häufigkeit der Kontrollen solcher Bauwerke vernünftig zu planen, müssen Grundlagen zur Ermittlung ihrer Restlebensdauer zur Verfügung stehen. Die Restlebensdauer einer Brücke ist abhängig von ihrer Konstruktionsart und den auftretenden Beanspruchungen. Ausgehend von wenigen Versuchsergebnissen werden die wichtigsten Einflußgrößen auf das Rißwachstum in schweißeisernen Tragelementen mit Hilfe brüchmechanischer Berechnungsmodelle untersucht und Überlegungen zur Entdeckbarkeit von Rissen angestellt. Außerdem werden die Auswirkungen des Ausfalls einzelner Tragelemente auf das Tragverhalten der Wettsteinbrücke abgeschätzt.

Summary

Assessment of Remaining Fatigue Life of Wrought Iron Bridges. An increasing number of bridges are not replaced at the end of their design lives for reasons of economy. In order to prescribe rational maintenance and inspection strategies for such structures, bases for the evaluation of the remaining fatigue life need to be established. The remaining fatigue life of a bridge depends on its geometry and on service stress ranges. In this paper, the relevant parameters affecting crack growth in wrought iron bridge members are discussed, in relation to test results and possible crack detection, by applying fracture mechanics methods. For an existing bridge, the effect of the failure of individual members on structural safety is estimated.

1 Problemstellung

In der Zeit von 1860 bis etwa 1910 wurden unzählige Brücken aus sogenanntem Schweißeisen, vor allem für den Ausbau des Schienen- aber auch des Straßennetzes, gebaut. Viele dieser Brücken stehen seither unverändert in Betrieb und werden teilweise durch größere Nutzlasten beansprucht als bei ihrer Bemessung vorgesehen war (höhere Achslasten und größeres Verkehrsvolumen). Wenn auch selten, so sind doch Schadensfälle aufgetreten, bei denen durch Ermüdungsrisse geschwächte Tragelemente unter extremen Bedingungen, beispielsweise bei Überlagerung von tiefen Temperaturen und stoßartigen Einwirkungen, zum Bruch kamen [1]. Trotz der größeren Nutzlasten und der damit verbundenen Risiken, und obwohl die ursprünglich vorgesehene Nutzungsdauer in vielen Fällen schon erreicht ist, ist es aus wirtschaftlichen Gründen oft notwendig, solche Brücken noch möglichst lange zu nutzen. Es muß demnach untersucht werden, ob diese Brücken tatsächlich weiterhin in Betrieb bleiben dürfen, oder ob sie verstärkt oder ersetzt werden müssen. Somit ist es nötig, die Restlebensdauer solcher Bauwerke abzuschätzen und Richtlinien für deren Inspektion auszuarbeiten. Dazu ist die Kenntnis des Wachstumsverhaltens von Ermüdungsrissen im Schweißeisen unabdingbar.

Anhand eines konkreten Bauwerks wird in diesem Aufsatz ein mögliches Vorgehen gezeigt, um sinnvolle Aussagen

bezüglich Restlebensdauer und Inspektion einer Brücke zu erhalten: Die Basler Wettsteinbrücke wurde in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts erbaut und 1936 verbreitert. Sie dient dem Straßen- und Straßenbahnverkehr. Infolge des allgemein schlechten Zustandes der Brücke sahen sich die zuständigen Behörden im Jahre 1979 gezwungen, die Verkehrslasten zu beschränken. Gleichzeitig wurde angeordnet, daß die Tragkonstruktion der Brücke einmal pro Jahr einer größeren Inspektion zu unterziehen sei. In der ursprünglichen Schweißeisen-Tragkonstruktion sind bis heute keine Ermüdungsrisse festgestellt worden. Daraus darf aber nicht geschlossen werden, daß keine Risse vorhanden sind. Es ist durchaus denkbar, daß gewisse Tragelemente Risse aufweisen, welche mit den angewandten Prüfmethoden bisher nicht entdeckt werden konnten. Beispielsweise ist es möglich, daß Risse von den Nietlöchern ausgegangen sind, aber noch von den Nietköpfen verdeckt bleiben. Solche Risse könnten infolge der Betriebslasten bis zu einer kritischen Größe anwachsen, das heißt bis zu einer Größe, bei der entweder plastischer Bruch oder Spröbruch des Restquerschnittes des Elementes eintreten könnte [2].

Ein Riß der Länge $2a$ nimmt mit wachsender Anzahl der Spannungswechsel N zu, wie dies schematisch in Bild 1 dargestellt ist. Dies wird als Ermüdung bezeichnet, wobei drei Phasen unterschieden werden können [3]:

- Rißentstehung,
- unterkritisches Rißwachstum,
- überkritisches Rißwachstum, insbesondere beim Erreichen einer kritischen Rißlänge $2a_k$, bei der entweder plastischer Bruch oder Spröbruch des Restquerschnittes eintritt.

Für die vorliegende Untersuchung wurde angenommen, daß bereits Ermüdungsrisse vorhanden seien, daß also die Phase der Rißentstehung abgeschlossen sei. Entsprechend dienten die am Institut für Stahlbau (ICOM) der ETH Lausanne durchgeführten Versuche in erster Linie dazu, die notwendigen Informationen zu sammeln, um die Phase des unterkritischen Rißwachstums rechnerisch erfassen zu können. In Abschnitt 2 des Aufsatzes wird umfassend über Durchführung und Auswertung dieser Versuche berichtet. In Abschnitt 3 werden dann die Versuchsergebnisse verwendet, um einige Betrachtungen zum Rißwachstum in einem Tragelement der Brücke sowie zur Entdeckbarkeit von Rissen anzustellen. Anschließend wird in Abschnitt 4 der Einfluß

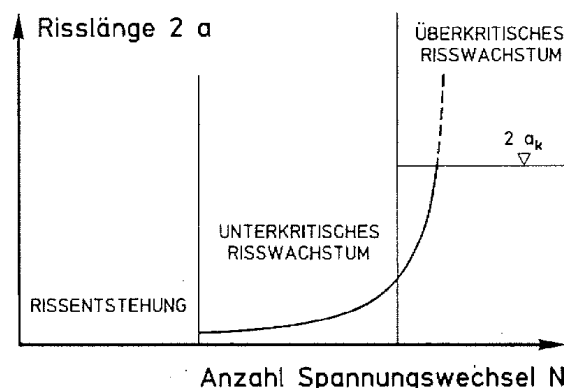


Bild 1. Drei Phasen des Rißwachstums
Fig. 1. Three phases of crack growth

des Versagens verschiedener Bauteile auf die Brücke als Gesamttragwerk beschrieben.

Die Autoren legen Wert darauf festzuhalten, daß der vorliegende Beitrag nicht zum Ziel hat, endgültige Resultate zum Rißwachstum in schweißeisernen Tragelementen zu liefern. Es geht vielmehr darum, Denkanstöße zur Lösung von Problemen im Zusammenhang mit der Nutzung und der Restlebensdauer alter Brücken zu vermitteln.

2 Ermüdungsverhalten von Schweißeisen

2.1 Einleitung

An vier Probekörpern, von denen einer aus Schweißeisen der Wettsteinbrücke, zwei aus Schweißeisen der Berner Kirchenfeldbrücke sowie einer aus Stahl Fe 510 gefertigt worden waren, wurden Rißwachstumsmessungen durchgeführt. Anhand eines Versuches wird ausführlich beschrieben, wie dabei vorgegangen wurde. Anschließend werden die Resultate aller Versuche miteinander verglichen und diskutiert. In diesem Vergleich werden sowohl die an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA-Dübendorf) im Rahmen dieser Studie durchgeführten Rißwachstumsmessungen an zwei genormten Kleinproben aus Schweißeisen der Wettsteinbrücke als auch der Literatur entnommene Versuchsergebnisse einbezogen.

2.2 Versuchsdurchführung

Der in Bild 2 dargestellte Probekörper wurde aus einem der Wettsteinbrücke für diese Studie entnommenen Winkel-eisen gefertigt. Der Zugstab weist einen Querschnitt von 70×12 mm auf, und seine Länge beträgt 680 mm. In der Mitte des Zugstabes wurde ein Loch von 16 mm Durchmesser gebohrt und beiderseits eine 1 mm tiefe Kerbe angebracht. Diese wurden zusätzlich mit einer Rasierklinge geschärft mit dem Ziel, die Phase der Rißentstehung zu verkürzen. Um den Riß besser beobachten zu können, wurden die Probenoberflächen im Bereich des Nietloches in Längsrichtung poliert. Im Abstand von 100 mm von der Probenmitte wurde auf beiden Probeoberflächen je ein Dehnmeßstreifen (DMS) aufgeklebt, die dazu dienten, die aufgetragten Spannungen sowie eine mögliche Biegung des nicht vollkommen ebenen Probekörpers, infolge der Einspannung in der Versuchsmaschine, zu bestimmen.

Mittelspannung und Spannungsdifferenz sollten für die Versuchsdurchführung etwa im Bereich der im Tragwerk auftretenden Werte liegen. In den höchstbeanspruchten Tragelementen betragen die Spannungen infolge Eigengewicht und ständiger Lasten der Brücke ungefähr 30 N/mm^2 . Die Spannungsdifferenzen infolge der seit 1979 zugelassenen reduzierten Betriebslasten liegen in denselben Elementen bei 25 N/mm^2 , während sie infolge der Normlasten (SIA 160/1970) ungefähr 40 N/mm^2 betragen würden. Da das unterkritische Rißwachstum und nicht die Rißentstehung betrachtet werden, wurden die Versuchslasten so gewählt, daß sie im Probekörper eine Spannungsdifferenz von 40 N/mm^2 erzeugten. Bei einer Minimalspannung von 10 N/mm^2 ergibt dies ein Verhältnis der Minimallast zur Maximallast von $\kappa = 0,2$.

Der Ermüdungsversuch wurde auf einer servohydraulischen Versuchsmaschine mit einem statischen Leistungsvermögen von $\pm 1000 \text{ kN}$ und einem dynamischen Leistungsvermögen von $\pm 800 \text{ kN}$ mit einer Frequenz von 20 Hz durchgeführt. Da nach 550 000 Spannungswechseln noch keine Risse festzustellen waren, wurden die Lasten um 20 % erhöht, mit dem Zweck, die Rißentstehung zu beschleunigen. Nach weiteren 575 000 Spannungswechseln wurde aus demselben Grund eine neuerliche Erhöhung um 10 % vor-

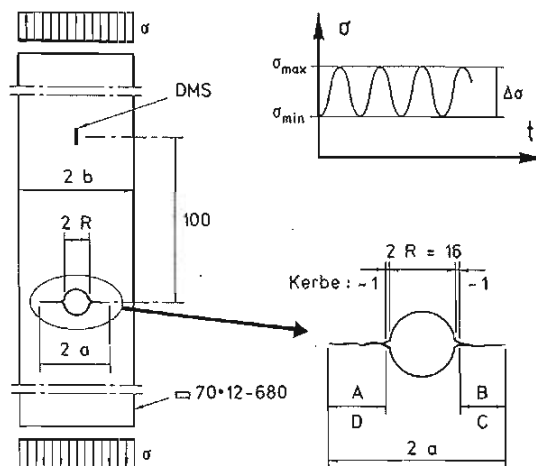


Bild 2. Abmessungen der Probekörper
Fig. 2. Geometry of the test specimens

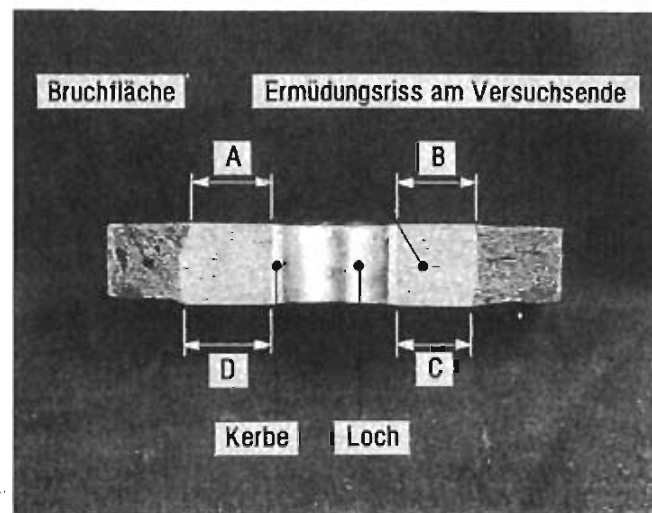


Bild 3. Rißoberfläche eines Probekörpers aus Schweißeisen
Fig. 3. Crack surface from a wrought iron test specimen

genommen, womit die Spannungsdifferenz schließlich 52 N/mm^2 betrug (vgl. 2.3.1). Im übrigen sei darauf hingewiesen, daß laut [4] die Dauerfestigkeit genieteteter Bauteile aus Schweißeisen bei 70 N/mm^2 liegt. Befinden sich alle im Bauteil auftretenden Spannungsdifferenzen unterhalb dieses Wertes, dann sollte theoretisch kein Ermüdungsschaden auftreten.

Das Rißwachstum konnte mit Hilfe zweier, unabhängig von der Versuchsmaschine auf einem Rahmen montierter Meßmikroskope (70fache Vergrößerung) beobachtet werden: Auf den beiden Probeoberflächen wurde beidseitig des Loches, d. h. an insgesamt vier Stellen (A bis D gemäß Bild 2), jeweils die Distanz zwischen der Kerbe- und der Rißspitze gemessen. Die vier Meßstellen sind ebenfalls aus Bild 3 ersichtlich, welches die Rißoberfläche eines Probekörpers am Ende des Versuches zeigt. Die Ablesegenauigkeit mit den verwendeten Instrumenten betrug $0,01 \text{ mm}$. Um die Rißspitze möglichst präzise zu erfassen, wurde während des Messens die Last statisch auf dem Maximalwert belassen.

Für die Rißwachstumsmessungen an den Probekörpern aus Schweißeisen der Berner Kirchenfeldbrücke bzw. aus Stahl Fe 510 (vgl. 2.3.2) wurde zusätzlich zum optischen ein System verwendet, das auf der Variation einer elektrischen Potentialdifferenz basiert. Im Probekörper wird ein elektrisches Feld erzeugt, dessen Linien durch den wachsenden Riß abgelenkt werden. Die so erhaltene Kurve muß mit den

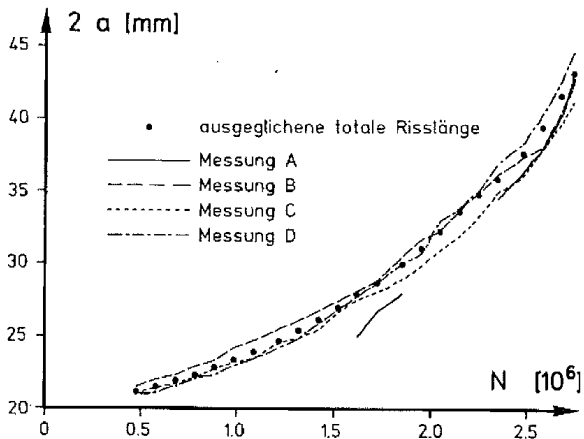


Bild 4. Ausgeglichene totale Rißlänge $2a$ als Funktion der Anzahl der Spannungswechsel N

Fig. 4. Measured and average total crack length, $2a$, versus number of stress cycles, N

optisch gemessenen Werten für die Rißlänge geeicht werden. Nähere Angaben zu diesem Verfahren finden sich in [5]. Diese Methode bietet zwei Vorteile: erstens können sehr kleine Risse entdeckt werden, und zweitens kann das Rißwachstum kontinuierlich und ohne Versuchsunterbruch verfolgt werden, sofern eine geeichte Kurve für die untersuchte Probengeometrie vorhanden ist.

2.3 Resultate

2.3.1 Rißwachstum und Rißfortschrittsrate

Bild 4 zeigt die aus den vier Messungen berechnete, ausgeglichene totale Rißlänge $2a$ als Funktion der Anzahl der Spannungswechsel N . Ebenfalls aufgetragen sind die einzelnen Messungen A bis D. Die Oberflächenbeschaffenheit des Probekörpers verunmöglichte zeitweise, die Rißspitze an der Stelle A zu erfassen. Um die einzelnen Messungen mit der totalen Rißlänge vergleichen zu können, wurden die zwischen Kerb- und Rißspitze gemessenen Werte (Bilder 2 und 3) verdoppelt und zum Lochdurchmesser einschließlich der Kerben hinzugezählt. Die Streuung der Resultate ist gering, beträgt doch die Abweichung von der ausgeglichenen gesamten Rißlänge nirgends mehr als 5 %.

Ausgehend von dieser ausgeglichenen Rißlänge ergibt sich die Rißfortschrittsrate, das heißt die Zunahme der Rißlänge pro Spannungswechsel. Für jeweils sieben aufeinanderfolgende Meßpunkte wird nach der Methode der kleinsten Quadrate eine Kurve dritter Ordnung eingepaßt, deren Steigung im mittleren Punkt die Rißfortschrittsrate an dieser Stelle ergibt [6]. Die so berechnete Rißfortschrittsrate ist in Bild 5 als Funktion der ausgeglichenen Rißlänge aufgezeichnet.

Um das Wachstum von Ermüdungsrissen zu beschreiben, wird üblicherweise die Beziehung von Paris [7] verwendet:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n \quad (1)$$

In dieser Beziehung ist ΔK die Differenz der Spannungsintensität, C und n sind Materialkonstanten. Der allgemeine Ausdruck für die Spannungsintensität K des angerissenen Probekörpers lautet:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot Y \left(\frac{a}{b}, \frac{R}{b} \right) \quad (2)$$

Im Ausdruck für K sind die Spannung σ , die halbe Rißlänge a und mittels eines Rißformfaktors Y die Geometrie des ange-

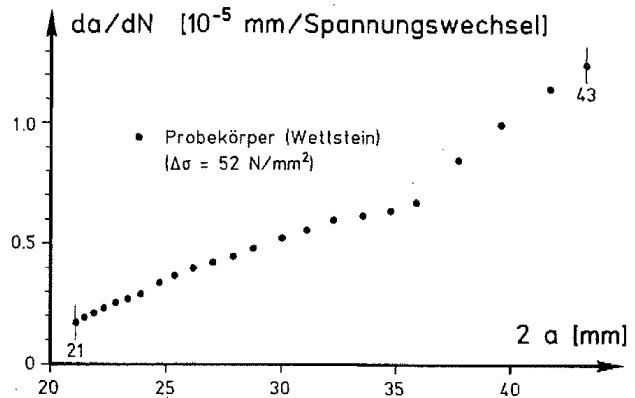


Bild 5. Rißfortschrittsrate da/dN als Funktion der ausgeglichenen totalen Rißlänge $2a$

Fig. 5. Crack growth rate, da/dN , versus average total crack length, $2a$

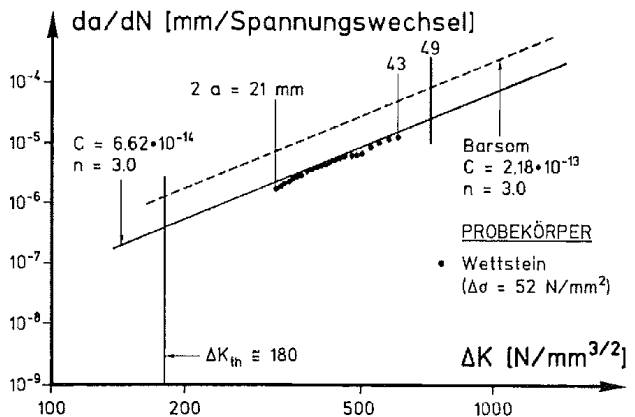


Bild 6. Rißfortschrittsrate da/dN als Funktion der Differenz der Spannungsintensität ΔK für einen Probekörper aus Material der Wettsteinbrücke

Fig. 6. Crack growth rate, da/dN , versus stress intensity factor range, ΔK ; results obtained from Wettstein bridge test-specimen

rissenen Elementes sowie die relative Rißgröße berücksichtigt. Der Rißformfaktor konnte für den vorliegenden Fall gemäß Angaben in [8] durch Interpolation bestimmt werden. Setzt man in Gleichung 2 anstelle der Spannung σ die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ ein, erhält man die Differenz der Spannungsintensität ΔK .

Bild 6 zeigt das Resultat der Auswertung: Die Rißfortschrittsrate da/dN ist als Funktion der Differenz der Spannungsintensität ΔK dargestellt. Begonnen wurde mit der Auswertung für eine totale Rißlänge von 21 mm, was bei einer Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 52 \text{ N/mm}^2$ einen Wert von $321 \text{ N/mm}^{3/2}$ für ΔK ergibt. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem der Riß eine Gesamtlänge von 43 mm erreicht hatte, was einem $\Delta K = 607 \text{ N/mm}^{3/2}$ entspricht. Wäre der Versuch unter unveränderten Bedingungen fortgeführt worden, das heißt mit $\Delta\sigma = 52 \text{ N/mm}^2$ und einer maximalen Spannung von $\sigma_{\text{max}} = 65 \text{ N/mm}^2$, so wäre bei einer Gesamtrißlänge von rund 49 mm der plastische Restbruch eingetreten. Auch diese Grenze ist in Bild 6 eingezeichnet ($\Delta K = 720 \text{ N/mm}^{3/2}$).

Beim Beschreiben des Versuchsablaufes (vgl. 2.2) wurde erwähnt, daß auch nach einer Erhöhung der anfänglich gewählten Spannungsdifferenz um 20 % auf $\Delta\sigma = 48 \text{ N/mm}^2$ noch kein Rißwachstum zu beobachten war. Das heißt, daß unterhalb eines gewissen Wertes für $\Delta\sigma$ die Risse sehr langsam oder gar nicht wachsen. Dieser Wert, eingesetzt in Gleichung 2, entspricht einem Schwellenwert der Differenz der Spannungsintensität, welcher normalerweise mit ΔK_{th}

(threshold) bezeichnet wird. Für die gegebene Probengeometrie mit einem Loch und zwei Kerben gemäß Bild 2, das heißt für eine gesamte „Rißlänge“ von 18 mm und eine Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 48 \text{ N/mm}^2$, kann der Wert ΔK_{th} mit $180 \text{ N/mm}^{3/2}$ geschätzt werden.

Das Rißwachstum kann gemäß Gleichung 1 durch eine Gerade mit den Werten $n = 3,0$ und $C = 6,62 \times 10^{-14}$ angenähert werden. Diese Gerade stellt eine obere Grenze für die Punkte aus der Versuchsauswertung dar. Sie kann zwischen dem Grenzwert für das Rißwachstum ΔK_{th} und demjenigen für den plastischen Restbruch extrapoliert werden. In Wirklichkeit erfolgen die Übergänge von einem Bereich zum andern natürlich nicht derart unvermittelt wie aufgezeichnet, sondern fließend.

2.3.2 Vergleich von Versuchsergebnissen

Die Darstellungsform von Bild 6 bietet den Vorteil, daß sie einen Vergleich mit anderen Versuchsergebnissen erlaubt. Zunächst ist die Beziehung von Barsom für das Rißwachstum in ferritisch-perlitischen Stählen aufgezeichnet ($n = 3,0$, $C = 2,18 \times 10^{-13}$) [9]. Im Vergleich dazu verlief das Rißwachstum im Probekörper aus Schweißseisen der Wettsteinbrücke bedeutend langsamer. Dieses einzelne Versuchsergebnis läßt selbstverständlich noch keine allgemeingültigen Aussagen zum Rißwachstum im Schweißseisen zu.

Probekörper aus Schweißseisen

Im Abschnitt 2.2 wurde bereits kurz darauf hingewiesen, daß am ICOM zwei weitere Versuche zum Rißwachstum im Schweißseisen durchgeführt wurden. Dies, um erste Aussagen zur Streuung der Resultate machen zu können. Dazu wurden Probekörper gleicher Geometrie wie für den vorgängig beschriebenen Versuch (Bild 2) verwendet. Allerdings wurden diese aus Schweißseisen der Berner Kirchenfeldbrücke hergestellt. Die Spannungsdifferenz wurde von Anfang an mit $\Delta\sigma = 52 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Alle anderen Bedingungen für die Versuchsdurchführung blieben unverändert.

Die Resultate der beiden Versuche sind in Bild 7a eingetragen. In beiden aus der Kirchenfeldbrücke stammenden Probekörpern verlief das Rißwachstum schneller als in demjenigen aus der Wettsteinbrücke; die Gerade mit den Werten $n = 3,0$ und $C = 1,40 \times 10^{-13}$ gemäß Gleichung 1 entspricht einer oberen Grenze. Der Vergleich mit der in Bild 6 eingezeichneten Geraden für den Probekörper aus der Wettsteinbrücke zeigt für letzteren eine halb so große Rißfortschrittsrate. Der geringen Anzahl durchgeführter Versuche wegen dürfen diese Resultate keineswegs als definitiv gelten. Sie geben jedoch einen ersten Hinweis auf die Streuung, wie sie für das Rißwachstum im Schweißseisen zu erwarten ist.

Probekörper aus Stahl

Zusätzlich zum Rißwachstum im Schweißseisen wurde am ICOM auch dasjenige im Stahl Fe 510 untersucht. Dazu wurde wiederum ein Probekörper identischer Geometrie (Bild 2) verwendet. Auch dieser Versuch wurde mit einer Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 52 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt.

Aus Bild 7a ist ersichtlich, daß der Riß im Probekörper aus Fe 510 schneller gewachsen ist als in denjenigen aus Schweißseisen. Die Werte liegen innerhalb eines Streubandes für Compact-Tension Proben (CT-Proben [9]) aus Fe 510, das aus [10] entstammt. Sie liegen auch in der Größenordnung der von Barsom bestimmten Geraden für das Rißwachstum in ferritisch-perlitischen Stählen, womit Versuchsdurchführung und -auswertung vernünftig erscheinen. Geht man von der Annahme aus, daß die linearelastische Bruchmechanik auf Schweißseisen anwendbar sei [2], sind

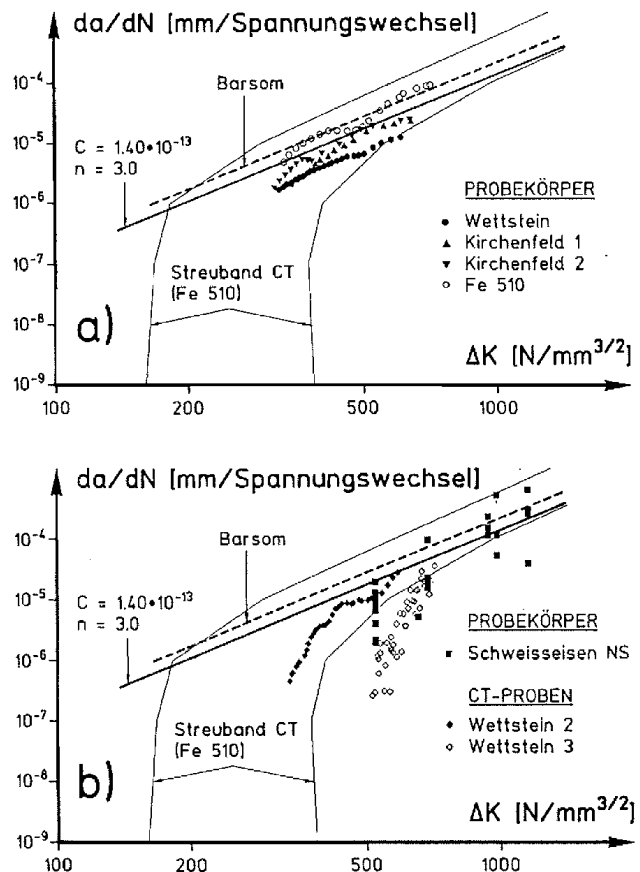


Bild 7. Rißfortschrittsrate da/dN als Funktion der Differenz der Spannungsintensität ΔK :

a) ICOM-Versuche und Streuband von Compact-Tension Proben (CT)
 b) EMPA-Versuche und Versuche der Niederländischen Staatsbahnen (NS)

Fig. 7. Crack growth rate, da/dN , versus stress intensity factor range, ΔK :

a) ICOM test results and scatter band obtained from Compact Tension specimens (CT)
 b) EMPA and Netherlands Railways (NS) test results

somit auch die an diesem Material gefundenen Werte für das Rißwachstum vergleichbar, da Versuchsdurchführung und -auswertung für alle Probekörper gleich waren.

CT-Proben aus Schweißseisen

An der EMPA in Dübendorf wurden an zwei Compact-Tension Proben (CT-Proben) aus Schweißseisen der Wettsteinbrücke Rißwachstumsmessungen durchgeführt. Die verwendeten Proben wiesen die Abmessungen $w = 50 \text{ mm}$ und $v = 6 \text{ mm}$ auf (Definition der Geometrie gemäß [9]). Sie wurden derart gefertigt, daß das Rißwachstum wie bei den vorgängig beschriebenen Versuchen an Probekörpern quer zur Walzrichtung erfolgte.

In Bild 7b sind die Resultate dieser Versuche eingetragen. Sie weichen von den an den Probekörpern aus Schweißseisen ermittelten Werten ab (vor allem diejenigen der CT-Probe „Wettstein 3“), und bleiben mit bedeutend langsamerem Rißwachstum unterhalb der für diese bestimmten oberen Grenze. Möglicherweise sind die Resultate nicht direkt miteinander vergleichbar: an der Rißspitze einer CT-Probe bildete sich nämlich eine größere plastische Zone als in den Probekörpern, da die CT-Proben mit 6 mm einerseits dünner waren (ebener Spannungszustand) und andererseits höhere Nennspannungen aufgebracht wurden. Eine größere plastische Zone führt zu einem verlangsamten Rißwachstum. Um dazu gesicherte Aussagen machen zu können, wären weitere Versuche notwendig.

Lochstäbe aus Schweißeseisen

Die Niederländischen Staatsbahnen (NS) untersuchten das Rißwachstum ebenfalls an Lochstäben aus Schweißeseisen [11]. Im Vergleich zur vorliegenden Arbeit wurden diese Versuche für größere Werte von ΔK durchgeführt. Die Resultate der NS zeigen tendenziell kleinere Rißfortschrittsraten da/dN als diejenigen aus den ICOM-Versuchen (Bild 7b). Für $\Delta K > 900 \text{ N/mm}^{3/2}$ nimmt die Rißfortschrittsrate sehr stark zu. Ein Vergleich mit der in Bild 6 eingetragenen, bei $\Delta K = 720 \text{ N/mm}^{3/2}$ liegenden Grenze für den plastischen Restbruch des ICOM-Probekörpers zeigt, daß für diese Werte möglicherweise schon der Bereich des überkritischen Rißwachstums erreicht wird.

3 Rißwachstum und Rißentdeckung in Brückentragelementen aus Schweißeseisen

3.1 Einleitung

Geht man von der Annahme aus, daß in der ursprünglichen Schweißeseisen-Tragkonstruktion der Wettsteinbrücke unentdeckt gebliebene Ermüdungsrisse vorhanden sind, so interessieren folgende Fragestellungen:

- Wachsen diese Risse unter den heutigen Betriebsbedingungen weiter?
- Wenn ja, besteht die Möglichkeit der Rißentdeckung bevor das angerissene Tragelement ausfällt?

Die in den Versuchen gewonnenen ersten Erkenntnisse über das Wachstumsverhalten von Ermüdungsrissen im Schweißeseisen sollen auf ein Flacheisen mit Abmessungen, die für die Tragkonstruktion der Wettsteinbrücke typisch sind, angewandt werden: Es weise eine Breite von 100 mm und eine Stärke von 12 mm auf. Der Nietlochdurchmesser betrage 16 mm und derjenige des Nietkopfes 24 mm. Die Phase der Rißentstehung sei abgeschlossen: Beiderseits des Nietloches sei ein Riß von 1 mm Länge vorhanden, ausgehend beispielsweise von Kerben, die vom Setzen der Niete herrühren können. Die totale Anfangsrißlänge betrage demnach $2 a_0 = 18 \text{ mm}$. In diesem Abschnitt werden zunächst Überlegungen zum rechnerischen Erfassen des Rißwachstums angestellt und die wichtigsten Einflußgrößen diskutiert. Danach werden Betrachtungen zur Möglichkeit des rechtzeitigen Entdeckens von Ermüdungsrissen – vor dem Ausfall des betroffenen Tragelementes – gemacht.

3.2 Rißwachstum in einem Tragelement

3.2.1 Kritische Rißlänge

Das Versagen des Elementes kann auf zwei Arten erfolgen, entweder durch plastischen Bruch oder durch Sprödbruch des Restquerschnittes. Zunächst wird der Sprödbruch betrachtet. Mit Hilfe der Spannungsintensität K gemäß Gleichung 2 kann der Spannungszustand an der Rißspitze beschrieben werden. Der Riß führt dann zum Sprödbruch, wenn der K -Wert eine kritische Größe K_c erreicht:

$$K = K_c \quad (3)$$

K_c ist abhängig von der Temperatur, der Dicke des betrachteten Elementes sowie von der Belastungsgeschwindigkeit [2]. Ist K_c bekannt, kann die kritische Rißlänge $2 a_k$, bei der Sprödbruch eintritt, aus den Gleichungen 2 und 3 berechnet werden:

$$2 a_k = \frac{2}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma \cdot Y \left(\frac{a}{b}, \frac{R}{b} \right)} \right)^2 \quad (4)$$

Das Problem auf der Beanspruchungsseite liegt nun darin, daß für σ in Gleichung 4 nicht einfach die aufgebrachte Spannung eingesetzt werden kann, sondern daß die möglicherweise vorhandenen Eigenspannungen ebenfalls zu berücksichtigen sind. Diese können durch den Walzvorgang bei der Herstellung des Schweißeseisens, durch Umlagerungen in einem zusammengesetzten, genieteten Querschnitt oder durch die Montage und den Zusammenbau sowie durch Auflagerverschiebungen verursacht werden. Über Eigenspannungen in Nietkonstruktionen ist sehr wenig bekannt, laut [2] dürften sie jedoch bedeutend kleiner sein als in geschweißten Konstruktionen. Die tatsächlich vorhandene Spannung wird somit die Fließgrenze wahrscheinlich nicht erreichen. Für einen Wert von $K_c = 1500 \text{ N/mm}^{3/2}$ (vgl. [2], Bauteilversuche an angerissenen Nietlochstäben) und unter der Annahme einer Spannung, die der halben Fließspannung entspricht, beträgt im betrachteten Beispiel die kritische Rißlänge $2 a_k = 62 \text{ mm}$. Gemäß neuesten EMPA-Untersuchungen an Material der Wettsteinbrücke [12] kann sogar mit bedeutend höheren K_c -Werten gerechnet werden. Somit muß ein Riß eine entsprechend größere Länge aufweisen, bevor Sprödbruch eintritt.

Es stellt sich die Frage, ob das Element durch plastischen Bruch versagt, bevor es zu einem Sprödbruch des Restquerschnittes kommen kann. Für eine Bemessungsspannung von 100 N/mm^2 , was für die Wettsteinbrücke einer oberen Grenze entspricht, tritt ein Bruch durch Plastifizierung bei einer Rißlänge von 54 mm auf, das heißt vor dem Sprödbruch des Restquerschnittes. Trotz der mangelnden Kenntnis der vorhandenen Eigenspannungen kann vermutet werden, daß die Sprödbruchgefahr gering ist.

3.2.2 Einflußgrößen auf das Rißwachstum

Für das betrachtete Tragelement sind nun die anfängliche Rißlänge $2 a_0$ und die kritische Rißlänge $2 a_k$ bekannt. Es interessiert, wie lange es dauert, bis der Riß von $2 a_0$ auf $2 a_k$ anwächst. Die Rißzunahme pro Spannungswechsel da/dN läßt sich mit Hilfe der Bruchmechanik beschreiben (Gleichungen 1 und 2). Die vereinfachte Integration von Gleichung 1 mit $Y = \text{konstant}$ ergibt eine geschlossene Funktion für die Rißlänge $2 a$ in Abhängigkeit von der Anzahl der Spannungswechsel N :

$$2 a(N) = \left[\alpha \cdot C \cdot Y^n \cdot \Delta \sigma^n \cdot \pi^{n/2} \cdot N + (2 a_0)^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad (5)$$

$$\text{mit } \alpha = \left(1 - \frac{n}{2} \right)$$

Diese Funktion ist in den Bildern 8a bis 8c aufgetragen, wobei der Einfluß folgender Parameter dargestellt wird:

- Spannungsdifferenz $\Delta \sigma$,
- Rißformfaktor Y ,
- Rißwachstumskonstante C .

Einfluß der Spannungsdifferenz

Für die Berechnung des Rißwachstums wird die Beziehung von Barsom mit $C = 2,18 \times 10^{-13}$ und $n = 3,0$ gemäß Bild 6 verwendet. Der Wert für den Rißformfaktor wird zu $Y = 1,25$ eingesetzt. Es zeigt sich (Bild 8a), daß das Flacheisen bei einer Spannungsdifferenz von $\Delta \sigma = 30 \text{ N/mm}^2$ mehr als doppelt so viele Spannungswechsel erträgt als bei $\Delta \sigma = 40 \text{ N/mm}^2$, bevor der Riß die kritische Länge von $2 a_k = 54 \text{ mm}$, bei der plastischer Bruch erfolgt (vgl. 3.2.1), erreicht.

Für einen Schwellenwert des Rißwachstums von $\Delta K_{th} = 180 \text{ N/mm}^{3/2}$ (vgl. 2.3.1) tritt bei einer Spannungsdifferenz von $\Delta \sigma = 25 \text{ N/mm}^2$ und einer Anfangsrißlänge von $2 a_0 =$

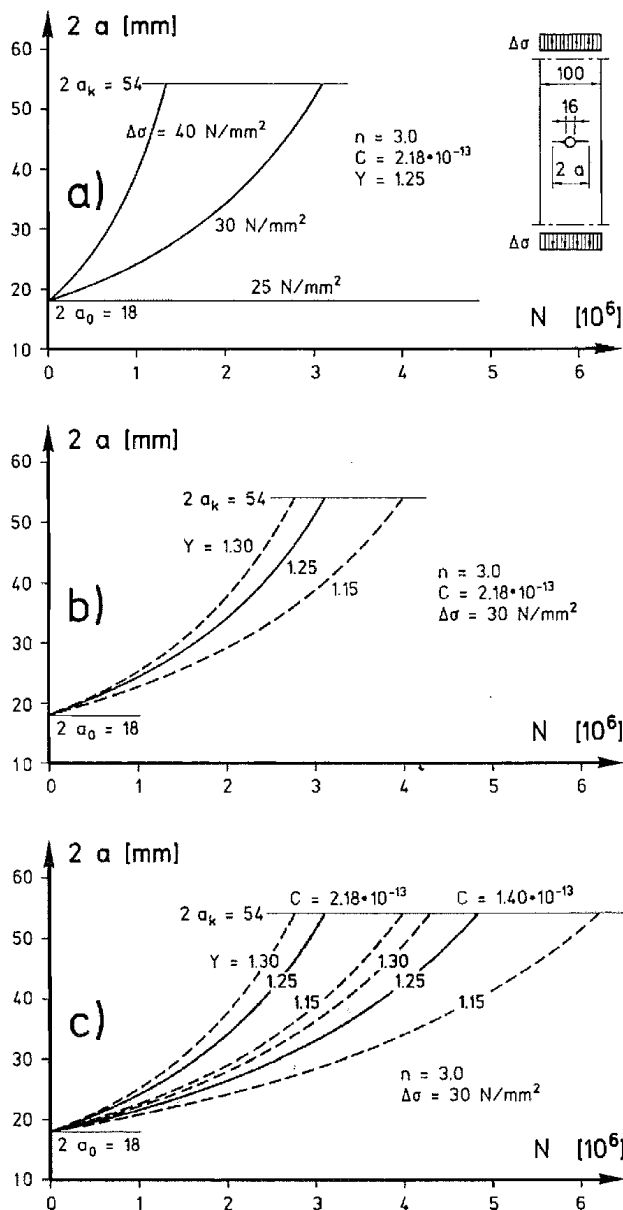


Bild 8. Parameterstudie zum unterkritischen Rißwachstum:

- a) Einfluß der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$
- b) Einfluß des Rißformfaktors Y
- c) Einfluß der Rißwachstumskonstanten C .

Fig. 8. Parametric study of subcritical crack-growth:

- a) effect of stress range, $\Delta\sigma$
- b) effect of crack shape correction factor, Y
- c) effect of material constant, C

18 mm kein Rißwachstum auf. Die anfängliche Rißlänge müßte schon 30 mm betragen, damit der Riß unter diesen Voraussetzungen wachsen würde.

Einfluß des Rißformfaktors

Für die Herleitung der Gleichung 5 wurde angenommen, daß Y konstant sei, während in Wirklichkeit der Rißformfaktor abhängig ist von der Rißlänge. Für eine Rißlänge, die dem Nietkopfdurchmesser entspricht, beträgt im vorliegenden Beispiel $Y = 1,15$. Bis zum Bruch wächst dieser Wert auf $Y = 1,30$ an. Wird das Rißwachstum wiederum nach der Beziehung von Barsom und mit $\Delta\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$ berechnet (Bild 8b), führt dies für $Y = 1,30$ zu einer Überschätzung und für $Y = 1,15$ zu einer Unterschätzung des Wachstums. Für einen „mittleren“ Wert, beispielsweise $Y = 1,25$, wird zwar das Rißwachstum zu Beginn überschätzt, die berechnete

Anzahl der Lastwechsel bis zum Bruch entspricht jedoch einem wahrscheinlichen Wert.

Einfluß der Rißwachstumskonstanten

Die Gerade von Barsom für das Rißwachstum in ferritisch-perlitischen Stählen könnte als obere Grenze für das Rißwachstum in Schweißeisern angenommen werden. In den ICOM-Versuchen an Schweißeisern wurde als obere Grenze eine Gerade mit den Konstanten $C = 1,40 \times 10^{-13}$ und $n = 3,0$ gefunden (Bild 7a).

Die Berechnung des Rißwachstums von der anfänglichen ($2 a_0$) bis zur kritischen Rißlänge ($2 a_k$) wurde für beide Konstanten C am betrachteten Element mit einer Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$ und für drei verschiedene Werte von Y durchgeführt (Bild 8c). Mit der am ICOM gefundenen Rißwachstumskonstanten für das Schweißeisern ergibt sich eine um rund 50 % längere Lebensdauer gegenüber Stahl, wenn Y mit 1,25 eingesetzt wird.

3.3 Rißentdeckung in einem Tragelement

3.3.1 Ausgangslage

Betrachtet wird dasselbe Element, für das im Abschnitt 3.2 das Rißwachstum untersucht wurde. Dabei werden die in 3.2.2 diskutierten Einflußgrößen wie folgt festgelegt: Damit bei einer anfänglichen Rißlänge von $2 a_0 = 18 \text{ mm}$ überhaupt ein Rißwachstum auftritt, wird mit einer Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$ gerechnet. Für den Rißformfaktor wird ein „mittlerer“ Wert von $Y = 1,25$ eingesetzt. Mit Hilfe der Gleichung 5 kann nun das Rißwachstum berechnet werden. Das Resultat dieser Berechnung ist in Bild 9 für verschiedene Werte der Rißwachstumskonstanten C dargestellt: Einerseits für die Konstante nach Barsom ($C = 2,18 \times 10^{-13}$) und andererseits für die Konstante, die der am ICOM als obere Grenze für das Rißwachstum in Schweißeisern gefundenen Geraden entspricht ($C = 1,40 \times 10^{-13}$) sowie für die am Probekörper aus Schweißeisern der Wettsteinbrücke gefundene Konstante ($C = 6,62 \times 10^{-14}$).

3.3.2 Entdeckbare Risse

Mit Hilfe visueller Prüfung kann ein Riß im betrachteten Beispiel frühestens dann entdeckt werden, wenn er gerade unter dem Nietkopf hervorwächst. Unter der Annahme eines gleichmäßigen Rißwachstums beiderseits des Nietloches entspricht seine Länge dann dem Nietkopfdurchmesser $2 a_N = 24 \text{ mm}$. Laborversuche haben zudem gezeigt, daß ein Riß eine Länge von mindestens 5 mm aufweisen muß, damit er visuell mit guter Wahrscheinlichkeit zu entdecken ist. Gleichmäßiges Rißwachstum vorausgesetzt heißt dies im vorliegenden Fall, daß der Riß dann die visuell entdeckbare Länge erreicht hat, wenn er beiderseits um 5 mm über den Nietkopfdurchmesser hinausragt: $2 a_{vis} = 34 \text{ mm}$.

3.3.3 Inspektionsintervalle

Die Schweißeisernkonstruktion der Wettsteinbrücke wird einmal pro Jahr einer größeren Inspektion unterzogen. Dies bedeutet, daß die meistbeanspruchten Tragelemente der Brücke beim gegenwärtigen Verkehrsaufkommen zwischen zwei Inspektionen ungefähr eine Million Spannungswechsel erfahren. Interessant ist nun, die Möglichkeit abzuschätzen, ob ein Riß unter den gegebenen Bedingungen vor dem Versagen des angrenzenden Elementes entdeckt werden kann.

Zunächst wird mit einem Rißwachstum nach Barsom gerechnet (Bild 9a). Es wird angenommen, daß eine Inspektion genau zu dem Zeitpunkt stattfindet, wenn der Riß eine

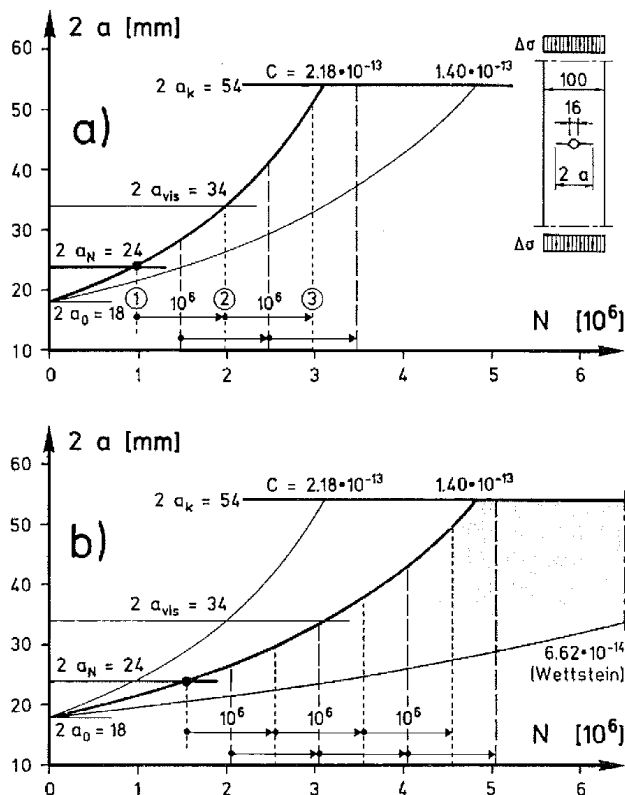


Bild 9. Rißwachstum während der Inspektionsintervalle von einer Million Spannungswechseln, berechnet mit $\Delta\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$, $Y = 1,25$ und der Rißwachstumskonstanten C:

- a) gemäß Barsom
- b) gemäß ICOM-Versuchsergebnissen

Fig. 9. Crack growth during inspection interval of one million stress cycles, calculated for $\Delta\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$, $Y = 1,25$ and the material constant, C:

- a) according to Barsom's test data for ferrite-pearlite steels
- b) according to ICOM test data for wrought iron

Länge erreicht hat, die mit der angewandten Prüfmethode sicher nicht entdeckbar ist (totale Länge gleich Nietkopfdurchmesser $2 a_N = 24 \text{ mm}$). Anlässlich der nachfolgenden Inspektion, das heißt nach rund einer Million Spannungswechseln, weist der Riß eine Länge von rund 34 mm auf, was zufälligerweise der visuell entdeckbaren Rißlänge entspricht. Falls der Riß dabei trotzdem übersehen wird, besteht bei der nächsten Inspektion, wenn er eine Länge von $2 a = 51 \text{ mm}$ erreicht hat, eine weitere Möglichkeit zur Entdeckung vor dem Versagen des Elementes.

Nun ist es aber nicht wahrscheinlich, daß eine Inspektion genau dann stattfindet, wenn die Rißlänge dem Nietkopfdurchmesser entspricht. Das Inspektionsintervall kann beispielsweise um ein halbes Jahr verschoben sein, wie dies in Bild 9a dargestellt ist. In diesem Fall weist der Riß anlässlich der ersten Inspektion, nachdem er unter dem Nietkopf hervorgewachsen ist, eine Länge von rund 28 mm auf. Ein solcher Riß ist mit großer Wahrscheinlichkeit noch zu kurz, als daß er visuell entdeckt werden könnte. Somit wird vor dem Ausfall des Elementes nur eine Inspektion stattfinden, die zur Entdeckung des Risses führen kann.

Die gleichen Überlegungen werden gemacht für ein Rißwachstum, welches gemäß der vorliegenden Arbeit einer oberen Grenze entspricht (in Bild 9b ist das Band eingezeichnet, das sich aus der Streuung der ICOM-Versuchsergebnisse ergibt). Findet eine Inspektion genau dann statt, wenn der Riß eine Länge von $2 a_N = 24 \text{ mm}$ aufweist, dann können gemäß Bild 9b vor dem Versagen des Elementes zwei Inspektionen durchgeführt werden, anlässlich derer eine Entdeckung des Risses möglich sein müßte. Für ein um ein halbes

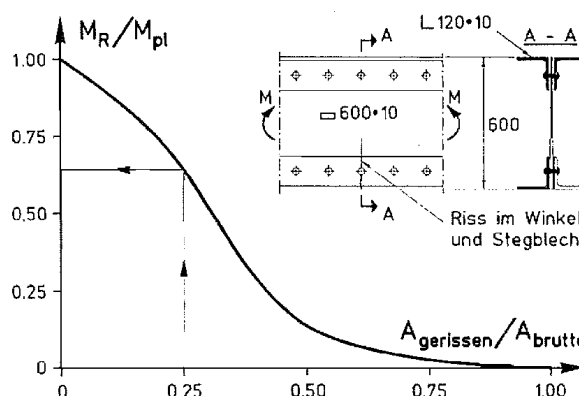


Bild 10. Tragwiderstand eines genieteten Querschnittes als Funktion der gerissenen Querschnittsfläche

Fig. 10. Load capacity of riveted section versus cracked area

Jahr verschobenes Intervall erfolgt eine Inspektion dann, wenn der Riß eine Länge von 33 mm erreicht hat, was praktisch der visuell entdeckbaren Rißlänge entspricht. Vor dem Versagen des Elementes findet dann noch eine Inspektion statt, bei welcher der Riß mit guter Wahrscheinlichkeit entdeckt werden kann.

Die der Berechnung zugrundegelegte Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 30 \text{ N/mm}^2$ tritt infolge der seit dem Jahre 1979 beschränkten Verkehrslasten in der Wettsteinbrücke nicht auf. Eventuell vorhandene Risse werden demzufolge langsamer wachsen als für die vorhergehenden Betrachtungen berechnet wurde. Für die Abschätzung der Anzahl der Spannungswechsel, die ein Tragelement zwischen zwei Inspektionen erfährt, wurde ebenfalls ein konservativer Wert eingesetzt. Somit kann davon ausgegangen werden, daß vor dem Versagen des Elementes mindestens zwei Inspektionen durchgeführt werden können, bei denen ein Riß eine entdeckbare Länge aufweist. Es besteht keine Notwendigkeit, das gewählte Inspektionsintervall anders festzulegen.

4 Tragsicherheit des Gesamttragwerkes

4.1 Tragwiderstand eines Tragelementes

Bild 10 zeigt das Beispiel eines genieteten Tragelementes, bestehend aus einem Flacheisen und vier symmetrisch angeordneten Winkelprofilen. Genietete Tragelemente weisen folgende charakteristische Merkmale auf [2]:

- sie sind aus mehreren Teilen, welche durch Niete miteinander verbunden sind, zusammengesetzt,
- die Flacheisen und Winkelprofile sind dünnwandig ($< 15 \text{ mm}$),
- die konstruktive Ausbildung (z. B. symmetrische Anordnung der einzelnen Bleche und Winkel) erlaubt eine gewisse Kraftumlagerung, wenn ein Winkel oder ein Blech angerissen ist.

Der letzte Punkt soll etwas näher beleuchtet werden. Das in Bild 10 dargestellte Tragelement sei auf Biegung beansprucht. Ausgehend von einem Nietloch eines der beiden auf Zug beanspruchten Winkelprofile wachse ein Riß nach und nach in das Stegblech und in das zweite Winkelprofil des Vullgurtes. Trägt man den durch das plastische Moment des Vollquerschnittes (M_{pl}) dividierten Biegeverstand des reduzierten Querschnittes (M_R) als Funktion der gerissenen Querschnittsfläche auf, ergibt sich die in Bild 10 dargestellte Abhängigkeit. Ist beispielsweise ein Winkelprofil ganz und das Stegblech zu einem Viertel gerissen, beträgt der Biegeverstand des Restquerschnittes noch zwei Drittel des plastischen Momentes des Vollquerschnittes. Der Ausnutzungs-

grad genieteter Tragelemente beträgt nun aber unter den Bemessungslasten normalerweise weniger als 50 % und dementsprechend noch weniger infolge der Betriebslasten. Das Tragelement laut Bild 10 versagt infolge des beschriebenen Risses noch nicht, und es ist kaum anzunehmen, daß ein vollständig durchgerissenes Winkelprofil anlässlich einer Inspektion nicht entdeckt würde.

4.2 Ausfall von Tragelementen

Wird angenommen, daß ein angerissenes Tragelement übersehen wird und es zu seinem Versagen kommt, so muß dies nicht gezwungenermaßen zum plötzlichen Einsturz der Brücke führen. Die Konsequenzen des Versagens eines Tragelementes für die Brücke als Gesamttragwerk sind abhängig von der Bedeutung des ausgefallenen Elementes, das heißt abhängig von der Konstruktionsart der Brücke. Bevor aufwendige Berechnungen durchgeführt werden, können diese Konsequenzen mit Hilfe einfacher Betrachtungen zum Tragverhalten der Brücke abgeschätzt werden.

Das räumliche Tragsystem der Wettsteinbrücke (Bild 11) besteht aus fünf Bogenträgern mit aufgeständerten Fachwerken, die durch Fachwerk-Querträger in Abständen von ungefähr 3,2 m und die aufbetonierte Fahrbahnplatte miteinander verbunden sind. Zwischen den Bogenträgern befinden sich auf den Querträgern aufliegende sekundäre Längsträger, mit denen die Fahrbahnplatte ebenfalls im Verbund wirkt. Nach dem Ausfall eines dieser Elemente können dank ihres gekoppelten Tragverhaltens Kraftumlagerungen, verbunden mit lokalen Verformungen, stattfinden. Für verschiedene Tragelemente der Wettsteinbrücke werden unter den heute gegebenen Bedingungen – Lastbeschränkung, regelmäßige Inspektionen – qualitative Überlegungen zur Möglichkeit ihres Ausfalles und den sich daraus ergebenden Folgen gemacht:

Querträger

Zwischen zwei Inspektionen erfährt ein Querträger ungefähr eine Million Spannungswechsel (vgl. 3.3.3). Es wird als unwahrscheinlich erachtet, daß möglicherweise vorhandene Risse infolge der beschränkten Lasten weiterwachsen und zum Versagen eines Querträgers führen, da die auftretenden Spannungsdifferenzen gering sind ($< 10 \text{ N/mm}^2$). Die Steifigkeit der Bogenträger mit den aufgeständerten Fachwerken ist genügend groß, damit nach dem etwaigen Ausfall eines Fachwerk-Querträgers Kraftumlagerungen auf die benachbarten Querträger erfolgen können. Dazu trägt auch die Verteilwirkung der Fahrbahnplatte und der sekundären Längsträger bei.

Längsträger

Der Ausfall eines Längsträgers würde zu Kraftumlagerungen in der Fahrbahnplatte führen, verbunden mit Verformungen. Diese Verformungen würden den Schaden anzeigen und seine Entdeckung ermöglichen. Sicherheitsmaßnahmen müßten umgehend angeordnet werden. Falls die Kräfte nicht in genügendem Maße umgelagert werden können, beispielsweise unter einer großen Radlast, könnte ein lokaler Einbruch der Platte erfolgen, was jedoch nicht den Einsturz der gesamten Brücke zur Folge hätte.

Bogenträger-Diagonalen

Von den auf Zug beanspruchten Elementen weisen die Bogenträger-Diagonalen die größten Spannungsdifferenzen auf. Infolge der seit 1979 beschränkten Lasten sind diese allerdings relativ klein ($< 25 \text{ N/mm}^2$), womit etwaige Risse kaum weiter anwachsen würden (Bild 8a). Andernfalls sollte

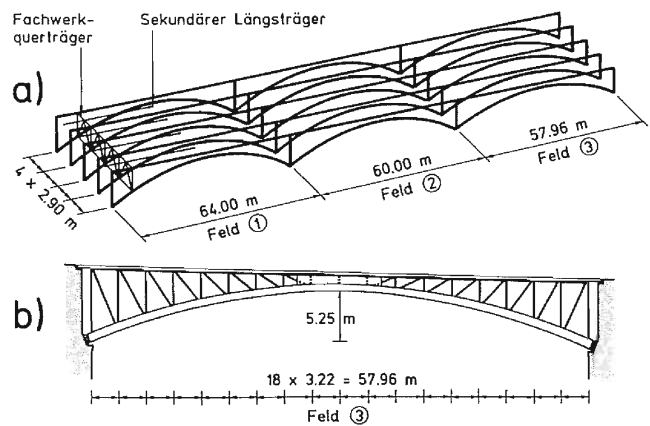


Bild 11. Schema der Schweißeisnerkonstruktion der Wettsteinbrücke
a) räumliches Tragsystem
b) Bogenträger mit aufgeständertem Fachwerk

Fig. 11. Schematic representation of the wrought iron structure of Wettstein bridge:

- a) structural system
- b) trussed arch

die Entdeckung eines Risses möglich sein, bevor die beschädigte Diagonale ganz ausfällt, da diese dank des symmetrischen Querschnittsaufbaus die Diagonalkraft noch aufnehmen kann (vgl. 4.1).

Bogenträger-Pfosten

Die infolge der beschränkten Lasten auftretenden Spannungsdifferenzen sind so klein ($\leq 26 \text{ N/mm}^2$), daß kaum mit Rißwachstum zu rechnen ist, umso weniger, als ein Riß in einem Druckelement nicht mehr zunimmt, wenn er aus der Zone der Zugeigenspannungen herausgewachsen ist. Das Entdecken etwaiger Risse wäre schwierig, da diese in einem Druckelement geschlossen bleiben. Der Ausfall eines Pfostens hätte Kraftumlagerungen auf die Längsträger zur Folge, verbunden mit lokalen Verformungen, vor allem auch der Betonplatte. Diese Verformungen würden auf den Schaden hinweisen und müßten seine Entdeckung möglich machen, bevor es zum Ausfall weiterer Elemente kommt.

Bogen

Der Ausfall eines Bogens würde sich verheerend auswirken. Die Wahrscheinlichkeit, daß es unter den gegebenen Umständen soweit kommt, ist jedoch extrem klein, da infolge der auftretenden Spannungsdifferenzen ($\leq 12 \text{ N/mm}^2$) ein Rißwachstum unwahrscheinlich ist. Vermindert wird dieses Risiko noch dadurch, daß die infolge unsymmetrischer Auflasten in den Bogen auftretenden Biegezugspannungen durch das Eigengewicht der Konstruktion wesentlich überdrückt werden.

5 Folgerungen

An Probekörpern und an genormten Kleinproben wurde das Verhalten von Ermüdungsrissen in Schweißeisner unter untersucht. Mit Hilfe bruchmechanischer Berechnungsmethoden wurde der Einfluß verschiedener Parameter auf das Rißwachstum erfaßt. Zum Rißwachstum unter Betriebsspannungen, zur Entdeckungsmöglichkeit vorhandener Risse und zur Bruchgefahr angerissener Brückentragelemente wurden qualitative Überlegungen gemacht. Aus den Versuchsergebnissen und den vorwiegend im Hinblick auf die Beurteilung der Wettsteinbrücke angestellten Betrachtungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Obwohl aufgrund der wenigen zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse keine abschließende Aussage zum Rißwachstum in Schweißseisen gemacht werden kann, beobachtet man doch folgende Tendenz: Risse wachsen langsamer als in Stahl. Der besondere Aufbau des Schweißseisens scheint sich günstig auf das Rißwachstumsverhalten auszuwirken.
2. Die an genormten Kleinproben (Compact-Tension-Proben) ermittelten Werte des Rißwachstums sind möglicherweise nicht direkt vergleichbar mit den an größeren Probekörpern gemessenen Werten.
3. Die wichtigste Einflußgröße auf das Wachstum von Ermüdungsrissen in Tragelementen ist die Spannungsdifferenz. Die in der Wettsteinbrücke infolge der heute zugelassenen Höchstlasten auftretenden Spannungsdifferenzen sind jedoch so klein, daß ein Rißwachstum eher unwahrscheinlich erscheint.
4. Falls trotzdem in gewissen Tragelementen Risse vorhanden sein sollten, die unter den aktuellen Betriebsbedingungen weiter anwachsen, kann davon ausgegangen werden, daß diese anlässlich einer der regelmäßig durchgeführten Inspektionen entdeckt werden, bevor die betroffenen Elemente ausfallen. Dies auch aus dem Grund, weil der Aufbau genieteter Tragelemente aus verschiedenen Flacheisen und Winkelprofilen sowie der unter Betriebslasten geringe Ausnutzungsgrad dazu führen, daß die Kraftübertragung auch dann noch gewährleistet ist, wenn ein Element schon weit fortgeschrittene Risse aufweist.
5. Der Ausfall eines Tragelementes – am ehesten gefährdet sind die Diagonalen der Bogenträger, da sie die größten Spannungsdifferenzen und die größte Anzahl von Spannungswechseln erfahren – führt zu Kraftumlagerungen in der räumlichen Tragkonstruktion der Brücke, verbunden mit lokalen Verformungen. Dank des geringen Ausnutzungsgrades der einzelnen Tragelemente wäre nicht mit dem progressiven Ausfall weiterer Elemente und somit dem Einsturz der Brücke zu rechnen, bevor der Schaden entdeckt würde.

Abschließend sei noch einmal darauf hingewiesen, daß das Ziel des vorliegenden Beitrages nicht darin besteht, endgültige Resultate zum Rißwachstum in schweißseisenen Trag-

elementen zu liefern. Es geht vielmehr darum, Denkanstöße zur Lösung von Problemen im Zusammenhang mit der Nutzung und der Restlebensdauer alter Brücken zu vermitteln.

Dank

Die Autoren danken dem Tiefbauamt des Kantons Basel-Stadt (Kantonsingenieur A. Müller) für die Ermöglichung und Unterstützung dieser Untersuchungen. Im weiteren wird den Mitarbeitern der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (EMPA) und des Instituts für Stahlbau (ICOM, Leitung: Prof. J.-C. Badoux), die in irgendeiner Form an den Versuchen und an der Vorbereitung dieses Aufsatzes beteiligt waren, für ihre Mithilfe gedankt.

Literatur:

- [1] Fisher, J. W.: Fatigue and fracture in steel bridges – Case studies. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1984.
- [2] Brühwiler, E., Hirt, M. A., Morf, U., und Huwiler, R.: Bewertung der Spontanbruchgefahr angerissener Brückenbauteile aus Schweißseisen. Stahlbau, Berlin, vol. 58, no 1, 1989, S. 9–16.
- [3] Hirt, M. A.: Anwendung der Bruchmechanik für die Ermittlung des Ermüdungsverhaltens geschweißter Konstruktionen. Bauingenieur, Berlin, vol. 57, no 3, 1982, S. 95–101.
- [4] Brühwiler, E., und Hirt, M. A.: Das Ermüdungsverhalten genieteter Brückenbauteile. Stahlbau, Berlin, vol. 56, no 1, 1987, S. 1–8.
- [5] Dubois, V., et Bremen, U.: Détermination de la profondeur de fissures de fatigue à l'aide d'un champ électrique. Lausanne, Ecole polytechnique fédérale, 1988 (Publication ICOM 202).
- [6] Tentative test method for constant-load-amplitude fatigue crack growth rates. (E 647–78T). Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis. ASTM STP 738, 1981, p. 321–339.
- [7] Paris, P. C., and Erdogan, F.: A critical analysis of crack propagation laws. Transactions, ASME, Series D, vol. 85, no 4, 1963, p. 528–534.
- [8] Rooke, D. P., and Cartwright, D. J.: A compendium of stress intensity factors. London, HMSO, 1976.
- [9] Rolfe, S. T., and Barsom, J. M.: Fracture and fatigue control in structures. Applications of Fracture Mechanics. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1977.
- [10] Bremen, U.: Amélioration du comportement à la fatigue d'assemblages soudés: étude et modélisation de l'effet de contraintes résiduelles. Lausanne, Ecole polytechnique fédérale, 1989 (thèse no 787).
- [11] Van Maarschalkerwaart, H. M. C. M.: Fatigue aspects in structural design. Edited by J. Wardenier and J. H. Reusink. Delft University Press, 1989, p. 97–119.
- [12] Schindler, H. J., und Morf, U.: Wettsteinbrücke Basel; Materialtechnische Untersuchungen zum Bruchverhalten. Dübendorf, EMPA-Bericht Nr. 115 709/2, 1990.

Korrosionsschutz

Vorgegebener Norm-Reinheitsgrad Sa 2 1/2 nicht gegeben

Für eine Stahlkonstruktion, die mit einer Grundbeschichtung angeliefert wurde, war eine Strahlentrostung Norm-Reinheitsgrad Sa 2 1/2 nach DIN 55 928 Teil 4 „Zunder, Rost und Beschichtungen sind soweit entfernt, daß Reste auf der Stahloberfläche lediglich als leichte Schattierungen infolge Tönung von Poren sichtbar bleiben.“

vorgegeben.



Bild 1.

Zur Kontrolle, ob der Norm-Reinheitsgrad gegeben ist, wurde an einigen Stellen die Beschichtung mittels Abbeizpaste abgebeizt. Hierbei zeigte sich, daß noch Walzhautreste vorhanden waren, demnach war der vorgegebene Norm-Reinheitsgrad Sa 2 1/2 nicht gegeben, Bild 1.

Die Beschichtung der Konstruktion wurde abgestrahlt, eine neue Beschichtung appliziert.

van Oeteren