

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Tragverhalten von Ankerschienen unter ermüdungsrelevanten Einwirkungen experimentell zu untersuchen und mittels der erzielten Ergebnisse ein umfassendes Sicherheits- bzw. Bemessungskonzept herzuleiten. Die experimentellen Untersuchungen sind unter Berücksichtigung der Einflüsse auf das Tragverhalten von Lastniveau, Lastrichtung, unterschiedlichen Laststellungen und der Stützwirkung des umgebenden Betons konzipiert und durchgeführt worden. Dabei werden die Einwirkungen in eine zentrische Zuglast N , eine Querlast in Richtung der Schienenlängsachse V_x bzw. quer dazu V_y und eine Schräglast aufgeteilt. Die ausschließlich periodisch wirkende Beanspruchung ist stets im Zugschwellbereich erfolgt. Derzeitige Bemessungsansätze für nicht ruhende Beanspruchungen berücksichtigen lediglich eine zentrische Zugschwellbelastung.

Bei allen Untersuchungen ist ausschließlich Stahlversagen maßgebend gewesen. Als hauptsächliche Versagensursache haben sich Risse im Übergangsbereich des Schienenrückens zum Schienenschenkel und des Schienenschenkels zur Schienenlippe erwiesen. Bei Beanspruchungen quer zur Schienenlängsrichtung haben sich zusätzlich Brüche im Ankerfuß eingestellt. Ein Betonversagen ist in keinem Fall aufgetreten.

Maßgebend für eine Bemessung unter ermüdungsrelevanten Beanspruchungen ist die Höhe der ertragbaren Schwingbreite, die vom Tragsystem dauerhaft aufgenommen werden kann. Diese wird als die Dauerfestigkeit bezeichnet und bei Stahlbauteilen nach etwa $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen erreicht. Die Gültigkeit dieser Dauerfestigkeit ist für Ankerschienen anhand von vorliegenden Versuchsdaten experimentell bestätigt worden. Weitergehende Untersuchungen und Auswertungen sind im Rahmen dieser Arbeit stets auf Grundlage dieses Ergebnisses erfolgt.

Zulässige Schwingbreiten sind im Rahmen der aktuellen Bemessungsvorschrift an nicht einbetonierten Ankerschienen mit symmetrischen und ausreichenden Endüberständen ermittelt worden. Im Falle der untersuchten Ankerschiene betragen die Endüberstände jeweils 50 mm, obwohl nach aktueller Bemessung Einbautzustände mit mindestens 25 mm Endüberstand vorgeschrieben sind. Somit ist eine zentrale Fragestellung in dieser Arbeit, welchen Einfluß der umgebende Beton und die Laststellung auf das Ermüdungstragverhalten von Ankerschienenbefestigungen ausüben.

Bei Versuchen mit einbetonierten Ankerschienen unter zentrischem Zug sind sowohl unter Ausnutzung von Mindestendüberständen, als auch bei günstigeren Lasteinleitungskonfigurationen im Vergleich zum nicht einbetonierten Zustand, stets höhere ertragbare Schwingbreiten erzielt worden. Der umgebende Beton bewirkt eine Stützwirkung, welche zu geringeren Dehnungen an den maßgebenden Versagensstellen führt. Mit Hilfe geeigneter meßtechnischer Methoden zur Erfassung der Spannungen und Dehnungen ist dieser Einfluß erfaßt und in Form eines Faktors quantifiziert worden.

Bei Beanspruchungen in Schienenlängsrichtung haben sich ebenfalls Einflüsse auf das Ermüdungstragverhalten durch den umgebenden Beton gezeigt. Mit Zunahme der

Betonfestigkeit zeigt sich eine Erhöhung der Tragfähigkeit unter Ermüdungsbeanspruchung. Eine meßtechnische Erfassung von Spannungs- bzw. Dehnungszuständen in Bereichen der unmittelbaren Versagensstellen ist nicht vorgenommen worden. Jedoch kann angenommen werden, daß mit steigender Betonfestigkeit die Stützwirkung auf die Ankerschiene zunimmt und somit die Verformungen an den Versagensstellen reduziert werden. Die schadensäquivalenten Spannungen nehmen somit ab.

Belastbare Aussagen zum Einfluß des umgebenden Betons bei Beanspruchungen quer zur Schienenlängsrichtung können aufgrund zu weniger Versuchsergebnisse nicht gemacht werden.

Experimentelle Untersuchungen mit variierenden Endüberständen (Laststellungen) bei zentrischem Zug haben sowohl im einbetonierten, als auch im nicht einbetonierten Fall, Einflüsse auf die Ermüdungstragfähigkeit gezeigt. Anhand von Spannungs- und Dehnungsmessungen in unmittelbarer Nähe der maßgebenden Versagensstellen wird der Versagensmechanismus verdeutlicht. Hier haben sich deutliche Schädigungszunahmen an den Versagensstellen durch instabiles Rißwachstum erst im unmittelbaren bruchnahen Bereich gezeigt. Unter Ausnutzung von Mindestendüberständen werden stets geringfügig kleinere ertragbare Schwingbreiten erreicht als bei günstigeren Lasteinleitungskonfigurationen. Auf der sicheren Seite liegend sind nachfolgende Untersuchungen ausschließlich für Laststellungen unter Ausnutzung von Mindestendüberständen erfolgt.

Wesentlich für eine möglichst allgemein gültige Bemessung ist die Erkenntnis, daß die ertragbare Schwingbreite eine Abhängigkeit vom Lastniveau aufweist. Gemäß dem Ermüdungsfestigkeitsdiagramm nach *Goodman* zeigt sich mit Zunahme der statischen Einwirkung eine Abnahme der ertragbaren Schwingbreite. In der aktuellen Bemessung von Ankerschienen hingegen bleibt dieser Einfluß unberücksichtigt. Die ertragbare Schwingbreite wird hierbei unabhängig vom Lastniveau bis zum Bemessungswert der statischen Tragfähigkeit als konstant angesetzt. Anhand experimenteller Untersuchungen unter zentrischem Zug kann der Einfluß des Lastniveaus verdeutlicht werden. Durch eine Vereinfachung des Ermüdungstragfähigkeitsdiagramms nach *Goodman* wird eine modifizierte Bemessung vorgeschlagen. Dieses vereinfachte Verfahren beruht auf Schwingversuchen auf niedrigen Lastniveaus ($R \approx 0$) und statischen Versuchen zur Tragfähigkeit ($R = 1$). Durch eine lineare Verbindung dieser beiden Punkte wird der Bemessungsbereich bestimmt. Er deckt die derzeitige Bemessung voll ab und erlaubt sogar eine Gesamtbelastung oberhalb der aktuellen statischen zulässigen Last.

Ein weitere Charakteristik der derzeitigen Bemessung liegt darin, daß sie für nicht ruhende Beanspruchungen lediglich den Bereich des reinen zentrischen Zugs abdeckt. Experimentelle Untersuchungen zur Interaktion von kombinierten ruhenden und nicht ruhenden Zug- und Querbeanspruchungen von einbetonierten Ankerschienen zeigen jedoch, daß eine allseitige nicht ruhende Beanspruchung erfolgen kann. Dabei zeigt sich der zentrische Zug stets als kritische Beanspruchungsrichtung. Zur Beschreibung der Abhängigkeit zwischen den jeweiligen Beanspruchungsrichtungen ist ein nichtlinearer Interaktionsansatz nach den Vorgaben der ETAG zugrunde gelegt

worden. Dieser wird in den überwiegenden Bereichen der Befestigungstechnik zur Beschreibung des Tragverhaltens von Kraftgrößen herangezogen. In Abhängigkeit von einem Formfaktor α im Exponenten dieser Exponentialfunktion gelingt es die erzielten Versuchsergebnisse abzubilden. Beträgt der Formfaktor $\alpha = 1$, so entspricht die Form der Interaktion einer Geraden, wo sich hingegen bei $\alpha = 2$ eine Kreisgleichung ergibt. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Formfaktoren für die drei unterschiedlichen Beanspruchungsebenen beschreiben Verläufe zwischen beiden Grenzfällen. Eine Interaktion für vorwiegend nicht ruhende Querbeanspruchungen konnte nicht durch Versuchsergebnisse belegt werden, weshalb auf der sicheren Seite liegend, ein geradliniger Verlauf angenommen wird.

Mit zunehmendem Beanspruchungswinkel zeigen sich deutliche Tragreserven im System, die in der derzeit gültigen Bemessungsrichtlinie nicht angesetzt werden. Bei der Annahme einer kugelförmigen Interaktionsbeziehung, mit dem nach aktueller Bemessungsrichtlinie anzusetzenden zulässigen Last der zentrischen Zugschwellbelastung als Radius, liegen alle Versuchsergebnisse deutlich oberhalb des Kugelvolumens und somit auf der sicheren Seite. Die Versuchsergebnisse zeigen mit zunehmendem Lastniveau eine Vergrößerung des Formfaktors. Lediglich für die $N-V_y$ -Interaktion stellt sich ein konstanter Formfaktor ein. Durch die Annahme einer linearen Funktion zur Beschreibung der Abhängigkeit beider Variablen wird eine einfache Darstellungsweise erzielt.

Die Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen finden Eingang in ein neues, umfassendes Bemessungskonzept, welches auf der Methode der Grenzzustände beruht und im Rahmen dieser Arbeit verwendet worden ist. Im Rahmen dieses Stufe II Verfahrens nach Eurocode 1 wird der Sicherheitsindex β als Maß für die Zuverlässigkeit eines Tragsystems betrachtet. Der Eurocode 1 bietet die Möglichkeit, durch eine auf der sicheren Seite liegende Vereinfachung, die Sicherheitsbetrachtung bei der Herleitung von Bemessungsansätzen auf der Basis von Versuchen durchzuführen. Dabei wird der Wichtungsfaktor α_R , welcher den Einfluß der Verteilungsfunktion der Beanspruchbarkeit beschreibt, mit einem konstanten Wert von 0,8 belegt. Als Verteilungsfunktion, zur Beschreibung der ertragbaren Schwingbreite an der maßgebenden Bemessungsschwingungszahl von $2 \cdot 10^6$ Schwingungen, ist nach Überprüfung der Anpassungsfähigkeit sowohl die Standardnormalverteilung, als auch die logarithmische Normalverteilung zugrunde gelegt worden.

Im ersten Schritt der Sicherheitsbetrachtung werden bisherige Auswerteverfahren nach SVA, EC 3 und ETAG gegenübergestellt. Diese unterscheiden sich in den verwendeten Fraktilwerten und Aussagewahrscheinlichkeiten. Im Streubereich der erzielten Versuchsergebnisse gibt es Überschneidungen zwischen den verschiedenen Auswerteverfahren und es zeigen sich vergleichbare Ergebnisse. Nach dem direkten Verfahren zur Bestimmung des Bemessungswertes im Eurocode 1 können in Abhängigkeit von der Versuchsanzahl und Belastungsrichtung, Teilsicherheitsbeiwerte bestimmt werden. Je nachdem, welcher Verteilungstyp zur Beschreibung der Versuchsergebnisse zugrunde gelegt wird, ergeben sich Unterschiede in den Teilsicherheitsbeiwerten. Ab einer Anzahl von etwa acht Versuchen auf mindestens drei unter-

schiedlichen Lastniveaus zeigen sich Teilsicherheitsbeiwerte unter 1,35. Als maximale errechnete Teilsicherheit für die Ermüdungsfestigkeit ergibt sich dabei, unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung, ein Wert von 1,29. Um in Einklang mit europäischen Regelwerken zu stehen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Teilsicherheitsbeiwert für den Grenzzustand der Ermüdung von 1,35 empfohlen. Der 5%-Fraktilwert der Grundgesamtheit wird in Anlehnung an die europäischen Normung als charakteristischer Wert angesetzt. Die Wahl einer Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % erfolgt in Anlehnung an die Vorgaben der EOTA (ETAG).

Auf der Basis dieser sicherheitstheoretischen Erkenntnisse wird anschließend eine umfassende und variable Bemessung für Ankerschienen unter kombinierten ruhenden und nichtruhenden Zug- Querbeanspruchungen vorgestellt. Dabei werden zunächst die jeweiligen Kraftkomponenten der beliebig einwirkenden Gesamtkraft auf die unterschiedlichen Beanspruchungsebenen projiziert. Zur Gewährleistung der statischen Tragfähigkeit muß im ersten Schritt der Nachweis der ruhenden Belastungen für jede Beanspruchungsebene separat erfolgen. Sind zusätzlich zu den ruhenden Lasten die Kraftkomponenten der nichtruhenden Beanspruchung bekannt, so kann anschließend der Nachweis der Tragfähigkeit für eine kombinierte ruhende und nichtruhende Zug- und Querbeanspruchung erfolgen. Dazu werden zunächst in Abhängigkeit von der einwirkenden Last, die charakteristischen Formfaktoren der jeweiligen Beanspruchungsebenen bestimmt. Mit Hilfe der Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten, den einwirkenden Lasten und den für jede Beanspruchungsebene ermittelten Formfaktoren kann schließlich der Nachweis der Tragfähigkeit im Grenzzustand der Ermüdung erfolgen. Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit bei räumlicher Beanspruchung darf der Betrag der räumlichen Interaktionsgleichung nicht den Grenzwert 1 (Grenzzustand der Ermüdungstragfähigkeit) überschreiten.

Anhand von Beispielen wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bemessungsverfahren vorgestellt. Zunächst erfolgt der Vergleich dieses Verfahrens zur derzeitigen Bemessung von Ankerschienen. Anschließend wird an einem Anwendungsfall der Nachweise der Ermüdungstragfähigkeit demonstriert.

Ausblick

Die vorgestellten experimentellen Untersuchungen für gezahnte Ankerschienen erfassen hauptsächlich den Bereich der nichtruhenden Zugschwellbelastung bei Einzelbefestigung. Dabei sind Einflüsse auf das Ermüdungstragverhalten infolge des umgebenden Betons, der unterschiedlichen Endüberstände, des Lastniveaus und der verschiedenen Belastungsrichtungen untersucht worden. In Hinblick auf weiterführende Arbeiten erscheinen insbesondere die folgenden Punkte als interessant:

- In den überwiegenden Fällen wird bei Ankerschienenbefestigungen eine reine Zugschwellbeanspruchung vorherrschen. Jedoch sollte die Kenntnis des Tragverhaltens unter nichtruhenden Wechselbeanspruchungen in allen Beanspruchungsrichtungen angestrebt werden.

- Eine Interaktion zwischen den Kraftgrößen V_x und V_y in Querrichtung wird auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt. Durch weitere experimentelle Untersuchungen ist diese Beanspruchungsebene zu belegen.
- Das Tragverhalten von Mehrfachbefestigungen unter nichtruhenden Lasten ist bisher nicht untersucht worden. Daher erscheint es sinnvoll, die Trageigenschaften bei paarweiser oder mehrfacher Befestigung zu ermitteln.
- Die Untersuchungen sind an Ankerschienen mit einem angeordneten Ankerbolzen und Laststellungen über dem Ankerbolzen erfolgt. Untersuchungen zum Ermüdungstragverhalten mit variierenden Laststellungen zwischen zwei oder mehreren Ankerbolzen begründen weiteren Forschungsbedarf.
- Die Ermittlung der Trageigenschaften von weiteren unterschiedlichen Profiltypen sollte auf Basis der in dieser Arbeit wiedergegebenen Methodik durchgeführt werden.
- Ankerschienen werden neben der Herstellung aus Normalstahl auch in verschiedenen Edelstahlvarianten für spezielle Anwendungsbereiche im Bauwesen angefertigt. In Bereichen des Brücken- und Straßenbaus sind korrosionsbeständige Stähle unabdingbar. Das Tragverhalten von Ankerschienenbefestigungen aus Edelstahl bedarf weiterer Forschungsarbeiten, weshalb o.g. Untersuchungen hierzu sinnvoll erscheinen.