

Einfluß der Beanspruchungs- geschwindigkeit auf das mechanische Verhalten von unlegiertem Baustahl – Teil 2

3 Mathematisch-rechnerische Beschreibung des Materialverhaltens

3.1 Bisheriger Kenntnisstand

Sogenannte Werkstoffgesetze sind mathematische Modelle, die das Materialverhalten in einem vorgegebenen Anwendungsbereich beschreiben sollen. Dieser zeichnet sich im Bauwesen gewöhnlich dadurch aus, daß die Beanspruchung des Materials im Bereich der Raumtemperatur und – durch Beschränkung auf höchstens moderate Beanspruchungsgeschwindigkeiten – näherungsweise isotherm verläuft. Weiterhin kann zunächst davon ausgegangen werden, daß das Material bei makroskopischer Betrachtung homogen und während der gesamten Beanspruchung nicht durch Riß oder Bruch geschädigt ist. Die Beanspruchungen sind dabei so gering, daß alle Größen auf die Referenzkonfiguration bezogen werden dürfen (infinitesimale Theorie). Der Verzerrungszustand eines betrachteten materiellen Punkts X kann dann über den linearisierten Greenschen Verzerrungstensor aus den Verschiebungsgradienten bezüglich der Referenzkonfiguration bestimmt werden. Der Spannungszustand kann durch den Cauchyschen Spannungstensor beschrieben werden, der ebenfalls auf einen materiellen Punkt X in der Referenzkonfiguration bezogen ist.

Die zuvor getroffenen Annahmen erlauben allgemein folgende additive Dekomposition der Dehnungen:

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{\epsilon}}^{\text{el}} + \underline{\underline{\epsilon}}^{\text{in}} \quad (1)$$

mit

$\underline{\underline{\epsilon}}$ Tensor der Gesamtdehnung

$\underline{\underline{\epsilon}}^{\text{el}}$ Tensor des elastischen Dehnungsanteils

$\underline{\underline{\epsilon}}^{\text{in}}$ Tensor des inelastischen Dehnungsanteils

Für die überwiegende Mehrzahl der in den bauspezifischen Finite-Element-Programmen verwendeten Werkstoffgesetze für Baustahl liegt hingegen folgende Vereinfachung von Gl. (1) der Modellformulierung zugrunde:

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{\epsilon}}^{\text{el}} + \underline{\underline{\epsilon}}^{\text{pl}} \quad (2)$$

mit

$\underline{\underline{\epsilon}}^{\text{pl}}$ Tensor des (spontan)plastischen Dehnungsanteils

Es handelt sich dann um Modelle im Rahmen der klassischen Plastizitätstheorie. Hierbei wird – wie einleitend erwähnt – eine Zeit- oder Geschwindigkeitsabhängigkeit einerseits zugunsten der einfacheren Modellformulierung, andererseits aufgrund der nicht gesehenen Notwendigkeit

einer Berücksichtigung von Geschwindigkeitseinflüssen vernachlässigt.

Zeit- oder geschwindigkeitsabhängig, beispielsweise auf der Basis von Gl. (1) formulierte Modelle, deren Ursprünge überwiegend in der Beschreibung des viskoplastischen Materialverhaltens hochlegierter Stähle im Hochtemperaturbereich liegen, finden im Bauwesen nur selten Anwendung.

Neben den zuvor diskutierten Gründen sind weiterhin Probleme bei der Bestimmung der erforderlichen Modellparameter für den baupraktisch relevanten Beanspruchungsbereich die Ursache. Zudem kann auch mit diesen „aufwendigeren“ Modellen das komplexe Materialverhalten der unlegierten Baustähle vielfach nur in Teilaspekten beschrieben werden, wobei der gesamte mögliche Beanspruchungsbereich i. d. R. auch nicht mit einem einzigen Modellparametersatz hinreichend abgedeckt werden kann.

3.2 Entwicklung einer weitergehenden Beschreibungsmöglichkeit

Im vorigen Abschnitt wurde erläutert, daß im Bauwesen hauptsächlich linearelastisch-plastische Modelle auf Basis der klassischen, also geschwindigkeits- bzw. zeitunabhängigen Plastizitätstheorie Anwendung finden. Bekannt ist u. a. das im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 319 „Stoffgesetze für das inelastische Verhalten metallischer Werkstoffe – Entwicklung und technische Anwendung“ maßgeblich von Scheibe [4] und Reininghaus [5] entwickelte sog. Zweiflächenmodell. Dieses basiert auf den von Dafalias/Popov [16] mitgeteilten Grundlagen und ist in der Lage, das charakteristische Materialverhalten unlegierter Baustähle auch bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich in wesentlichen Zügen zu beschreiben.

Das Zweiflächenmodell nach Scheibe/Reininghaus beschreibt auf der Basis von Gl. (2) das Materialverhalten im Kern mittels zweier ineinander verschachtelter Flächen im mehrachsigen Spannungsraum, die auf der bekannten Fließbedingung nach v. Mises [1] basieren. Die innere Fläche (Loading-Surface) repräsentiert die aktuelle Größe des elastischen Bereichs, welcher sich – wie bereits in Abschn. 2 berichtet – beanspruchungsabhängig stark verkleinert. Die umgebende Bounding-Surface stellt eine Begrenzung für die im aktuellen Materialzustand maximal erreichbaren Spannungen dar. Beide Flächen, deren tensorielle Formulierungen in den Gln. (3) und (4) angegeben sind, können sich bei Dafalias/Popov bei Veränderung des inelastischen Verzerrungszustands in ihrer Größe und Lage verändern. Beim Modell nach Scheibe/Reininghaus sind sowohl bei der Loading- als auch bei der Bounding-Surface jeweils isotrope Größenveränderungen vorge-

sehen, in ihrer Lage ändert sich nur die Loading-Surface (sog. kinematische Verfestigung).

Über den Abstand zwischen Loading- und Bounding-Surface bestimmt sich zu jedem Zeitpunkt, genauer für jedes Beanspruchungsinkrement der sog. inelastische Tangentenmodul, also die Materialsteifigkeit im inelastischen Bereich.

Loading-Surface F

$$F = \frac{1}{2} (\underline{\sigma}^D - \underline{\alpha}^D) \cdot (\underline{\sigma}^D - \underline{\alpha}^D) - \frac{1}{3} k^2 = 0 \quad (3)$$

Bounding-Surface \hat{F}

$$\hat{F} = \frac{1}{2} (\underline{\sigma}^D - \hat{\underline{\alpha}}^D) \cdot (\underline{\sigma}^D - \hat{\underline{\alpha}}^D) - \frac{1}{3} \hat{k}^2 = 0 \quad (4)$$

mit

- $\underline{\sigma}^D$ deviatorischer Tensor der Gesamtspannungen
- $\underline{\alpha}^D$ deviatorischer Tensor der Mittelspannungen der Loading-Surface
- $\hat{\underline{\alpha}}^D$ deviatorischer Tensor der Mittelspannungen der Bounding-Surface
- k isotrope Größe der Loading-Surface (Radius)
- \hat{k} isotrope Größe der Bounding-Surface (Radius)

In Bild 19 ist die Arbeitsweise des Modells am Beispiel des zweidimensionalen deviatorischen Hauptspannungsraumes schematisch dargestellt. Die innere Fläche F (Loading-Surface) bewegt sich innerhalb der umgebenden Bounding-Surface zugleich unter Berücksichtigung der Stabilitätskriterien der klassischen Plastizitätstheorie und unter der Bedingung, daß eine gegenseitige Durchdringung der Fließflächen nicht möglich ist.

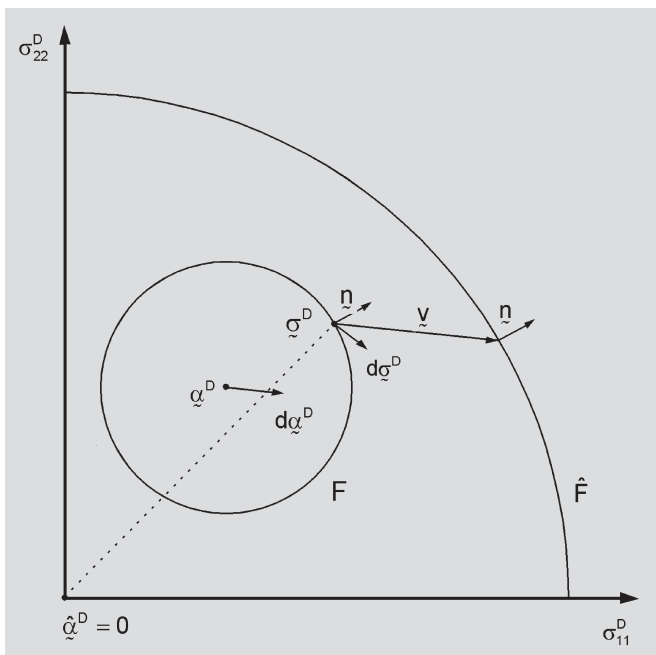


Bild 19. Schematische Arbeitsweise des Modells nach Scheibe/Reininghaus

840 Fig. 19. Basics of Scheibe/Reininghaus constitutive model

Die komplexe Materialerinnerung an verschiedene Beanspruchungszustände wird mittels dreier Gedächtnisflächen im Dehnungsraum simuliert [4]. Damit ist es im Gegensatz zum Originalmodell beispielsweise möglich, ein ausgeprägtes Fließplateau zu beschreiben. Des weiteren besteht die Möglichkeit einer Unterscheidung von einmaligen und wiederholten Beanspruchungen sowie zwischen proportionalen und nichtproportionalen Beanspruchungen.

Das Werkstoffmodell nach Scheibe/Reininghaus wurde später von Böttcher [15] für die Beschreibung geschwindigkeitsabhängigen und im Sinne von Ludwik (s. Abschn. 2.4) somit zeitabhängigen Materialverhaltens erweitert. Der Erweiterung zugrunde liegt die durch experimentelle Untersuchungen (s. Abschn. 2) gestützte Annahme, daß auch bei einem sich insgesamt geschwindigkeitsabhängig darstellenden mechanischen Verhalten ein der Beanspruchungsgeschwindigkeit von Null zuzuordnender, im Gleichgewicht stehender Materialzustand existiert. Relaxation und Kriechen sind dann Ausdruck des Unterschieds zwischen dem aktuellen Beanspruchungszustand und dem zugehörigen Gleichgewichtszustand.

Die grundlegende Idee der von Böttcher [15] vorgeschlagenen, geschwindigkeitssensitiven Modellerweiterung liegt in der gleichzeitigen Beeinflussung der (isotropen) Größen des elastischen Bereichs (Loading-Surface) und der Spannungsbegrenzung (Bounding-Surface) durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit. Dazu wird für alle relevanten Größen zunächst ein der Beanspruchungsgeschwindigkeit von Null zugeordneter Wert des Gleichgewichtszustands vorgegeben. In Abhängigkeit der für das aktuelle Verzerrungsinkrement vorliegenden Geschwindigkeit wird diesem sog. Grundwert jeweils ein Additivum hinzugefügt, ohne daß direkt – außer im Falle einer durch andauernde Beanspruchungsgeschwindigkeit von Null gekennzeichneten Relaxationsphase – eine vorangegangene Beanspruchungsgeschwindigkeit berücksichtigt wird. Es kann daher auf Basis der Modellgrößen des bereits ausiterierten Beanspruchungszustands stets explizit zwischen der Loading- bzw. Bounding-Surface des Gleichgewichtszustands und der vom Additivum bestimmten Loading- bzw. Bounding-Surface eines nicht im Gleichgewicht stehenden Zustands unterschieden werden. Mit der hierbei zugrunde liegenden Formulierung ist zudem optional die Beschreibung einer oberen Streckgrenze bei Erstbeanspruchung bis in den inelastischen Bereich möglich.

Die sprunghafte Größenveränderung von Loading- und Bounding-Surface für den Fall einer Vergrößerung der Beanspruchungsgeschwindigkeit im aktuellen Verzerrungsinkrement ist in Bild 20 dargestellt. Das Bild gibt in ausgezogenen Linien die geschwindigkeitsbedingt neue Startkonfiguration für die „Abarbeitung“ des aktuellen Verzerrungsinkrements selbst an. In der neuen Konfiguration wird dann das aktuelle Verzerrungsinkrement analog zu Bild 19 im Modell berücksichtigt.

Die vorstehend beschriebene Modellerweiterung kann wegen des ganzheitlichen Ansatzes für die inelastischen Dehnungen als „unified“ gemäß Gl. (1) eingestuft werden. Der Unterschied zu den vielfach zitierten, hierzu ebenfalls zählenden sog. Überspannungsmodellen besteht darin, daß nicht die Größe der als Überspannung bezeichneten Differenz zwischen einem Gleichgewichtszustand und einem

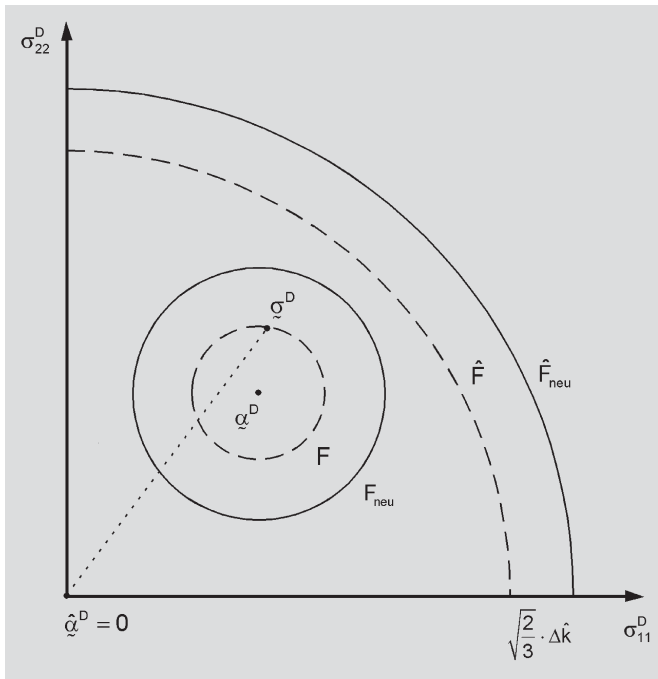


Bild 20. Schema der zusätzlichen Funktionalität des Modells nach Böttcher [15]

Fig. 20. Additional functionality of Böttcher's constitutive model [15]

Ungleichgewichtszustand die bestimmende Modellgröße darstellt. Vielmehr bleibt die für das Zweiflächenmodell charakteristische Betonung des inelastischen Tangentensmoduls erhalten, da dieser lediglich durch die geschwindigkeitsabhängige Veränderung der Größen von Loading- und Bounding-Surface beeinflusst wird. Spannungen außerhalb der Loading-Surface sind wie beim Originalmodell nicht erlaubt. Somit tritt auch das für Überspannungsmodelle typische Problem im Grenzübergang zu einer unendlich niedrigen Beanspruchungsgeschwindigkeit nicht auf, da auch für diesen Fall mit den der Geschwindigkeit Null zugeordneten Modellgrößen weiterhin die bekannte Funktionalität des Werkstoffmodells nach Scheibe/Reininghaus vorliegt.

3.3 Berechnungsbeispiele

Das im Abschn. 3.2 vorgestellte Werkstoffmodell wurde via Fortran77-Schnittstelle exemplarisch in das Finite-Elemente-Programmsystem ANSYS® [6] implementiert. Damit wurden Vergleichsrechnungen einiger der bereits im Abschnitt 2 vorgestellten experimentellen Untersuchungen durchgeführt.

Es sei explizit erwähnt, daß alle Berechnungen für eine Materialcharge mit lediglich einem Parametersatz durchgeführt wurden, wobei dieser vorab anhand der statistischen Mittelwerte der kennzeichnenden Größen festgelegt wurde. Die verwendeten Parameter können der Arbeit von Böttcher [15] entnommen werden. Die optionale Beschreibung einer oberen Streckgrenze ist hier aktiviert.

In Bild 21 sind zunächst die analogen Berechnungen der in Abschn. 2.3.1.1 vorgestellten Zugversuche mit experimentell konstanten Dehngeschwindigkeiten dargestellt. Durch Vergleich läßt sich eine gute Übereinstimmung erkennen, die sich zum einen in geschwindigkeitsbedingt unterschiedlichen Spannungswerten von oberer Streck-

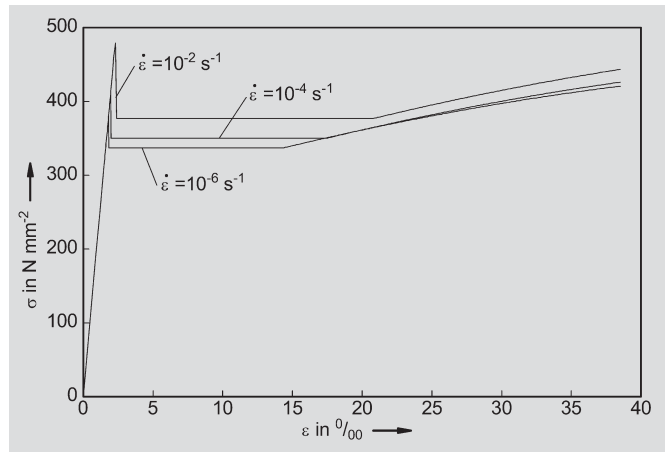


Bild 21. Berechnung von monotonen Zugversuchen mit konstanter Geschwindigkeit

Fig. 21. Calculation of monotone tensile tests with constant strain-rate

grenze und Fließplateau und zum anderen in der Länge des initialen Fließplateaus widerspiegelt.

Die gleichen Zusammenhänge werden auch bei monotonen Zugversuchen mit multiplen Relaxationsphasen von je 1800 s Dauer deutlich. Dies zeigt Bild 22 mit Nachrechnungen der im Abschn. 2.3.1.3 vorgestellten Experimente. Vom Modell wird auch die unterschiedliche Rela-

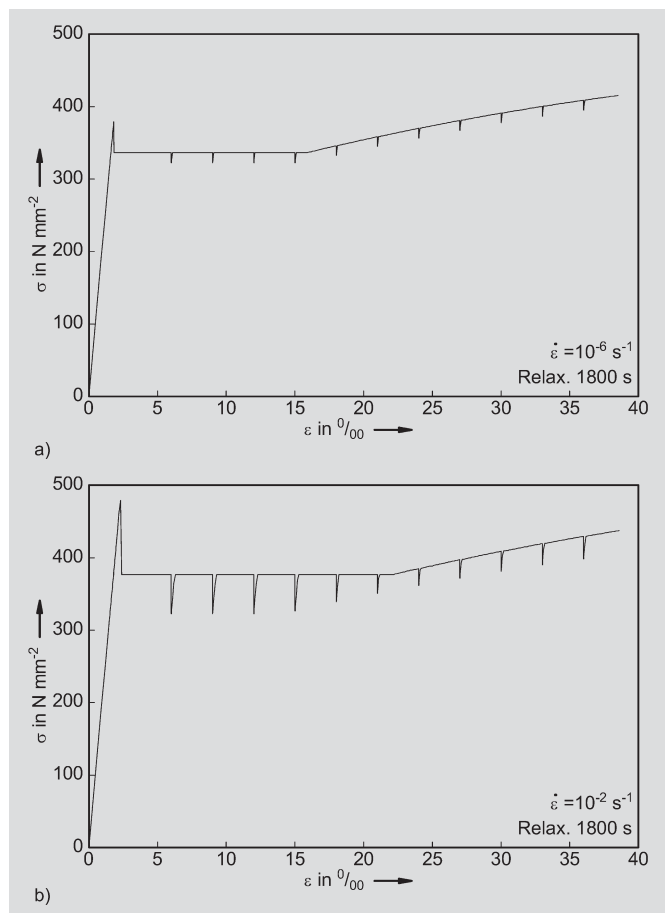


Bild 22. Berechnung von Zugversuchen mit multiplen Relaxationsphasen ausgehend von a) niedriger Grundgeschwindigkeit, b) hoher Grundgeschwindigkeit

Fig. 22. Calculation of tensile tests with multiple relaxation periods starting from a) low base-rate, b) high base-rate

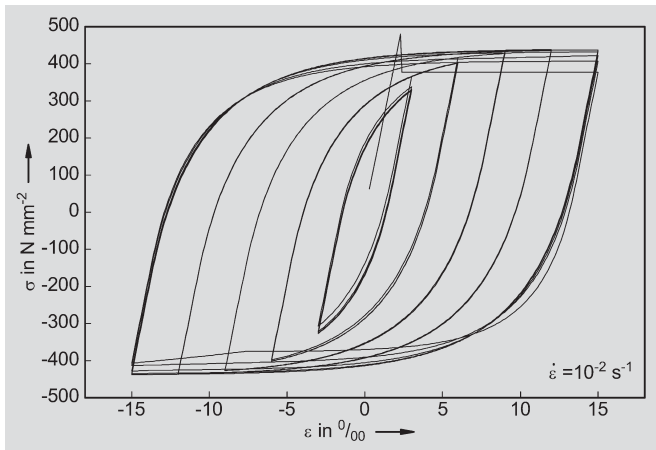


Bild 23. Berechnung eines Mehrstufenversuchs mit absteigender Amplitudenfolge bei hoher Geschwindigkeit

Fig. 23. Calculation of multiple step test with descending amplitudes and high strain-rate

xationsneigung im Bereich des initialen Fließplateaus und des Verfestigungsbereichs richtig wiedergegeben.

Ein großer Vorteil der hier erläuterten Modellformulierung liegt darin, daß die Stärken des Modells nach *Scheibe/Reininghaus* hinsichtlich der Beschreibung des Materialverhaltens bei wiederholter Beanspruchung mit konstanter Geschwindigkeit erhalten bleiben. In Abhängigkeit der aufgetragenen Beanspruchungsintensität, hier der Dehnungsamplitude, wird u. a. zyklische Ver- und Entfestigung beschrieben. Dies wird in Bild 23 am Beispiel eines Mehrstufenversuchs mit absteigender Amplitudenfolge bei hoher Geschwindigkeit deutlich. Die Übereinstimmung von Experiment und Berechnung kann für den gesamten Beanspruchungsbereich als gut angesehen werden.

Ein diesbezüglich vergleichbares Ergebnis erhält man für den als Beispiel eines typischen Nahbebens verwendeten Schrieb des Erdbebens von Kobe (Bild 24). Hier treten im Verlauf des 48 s andauernden Bebens besonders hohe und stark unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten auf. Zu Beginn ist der Beanspruchungsverlauf geradezu explosionsartig. Entsprechend groß sind die gemessenen und vom Werkstoffmodell beschriebenen Spannungen. Im weiteren Verlauf sind die Geschwindigkeitsunterschiede nicht mehr so groß. Von der Beanspruchungsintensität

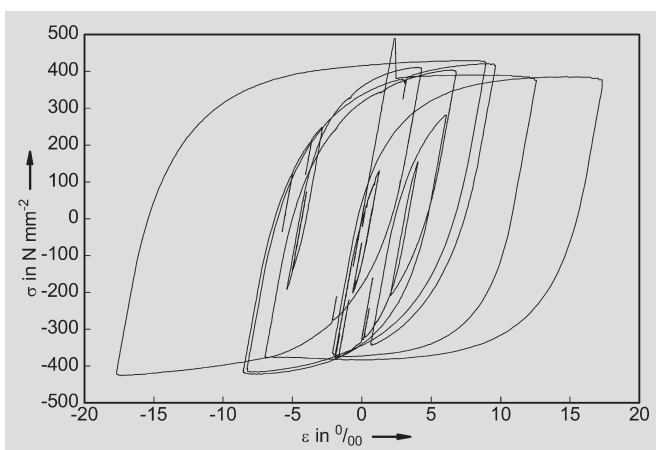


Bild 24. Berechnete Hysteresen für den Erdbebenschrieb Kobe

842 Fig. 24. Calculated hysteresis from Kobe earthquake record

her liegt hier eine fast zyklische Beanspruchung vor. Aufgrund des großen Beschreibungsumfanges des Basismodells nach *Scheibe/Reininghaus* zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung von Experiment und Berechnung.

Auf weitere Nachrechnungen ausgewählter Experimente, beispielsweise auch von Experimenten mit multiplen Wechslen zwischen Geschwindigkeiten größer Null, soll hier aus Übersichtsgründen nicht eingegangen werden. Es sei an dieser Stelle auf die Arbeit von *Böttcher* [15] verwiesen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das mechanische Verhalten unlegierter Baustähle wird im Bereich der Raumtemperatur signifikant von der Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst. Wie experimentelle Untersuchungen einachsiger Zug/Druck-Beanspruchungen an verschiedenen Chargen zeigen, gilt dies unabhängig von einer möglichen Vorbeanspruchung des Materials und unabhängig von der Art der Beanspruchung (weg-, dehnungs- oder spannungsgeregelt). Die Einflüsse aus der Beanspruchungsgeschwindigkeit sind dabei größer als Einflüsse aus der statistischen Streuung der Materialeigenschaften.

Es kann in Übereinstimmung mit dem bisherigen Kenntnisstand allgemein festgestellt werden, daß das Material im inelastischen Bereich mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit steifer reagiert. Dies bedeutet, daß im Falle einer verformungsgesteuerten Beanspruchung der Widerstand gegen die Deformation mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit anwächst, während bei kraftgesteuerter Beanspruchung die aus einer bestimmten Belastung resultierende Deformation mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit abnimmt.

Die jeweils abhängige Beanspruchungsgröße (Spannung bei verformungsgesteuerter Beanspruchung bzw. Verformung bei kraftgesteuerter Beanspruchung) ist nur dann zeitlich invariant, wenn die Beanspruchung mit äußerst niedriger Geschwindigkeit aufgebracht wird. Es ist nachvollziehbar, daß dem Material nur in diesem Fall genügend Zeit für eine Reaktion auf die Beanspruchung gelassen wird. Mit hinreichender Genauigkeit liegt daher die bereits von *Ludwik* [8] vorgeschlagene Definition eines Gleichgewichtszustands für den Fall einer Beanspruchung mit unendlich niedriger Geschwindigkeit nahe. Somit treten zeitabhängige Kriech- und Relaxationsphänomene bei Raumtemperatur und näherungsweise metallurgischer Konstanz lediglich in Folge einer von Null verschiedenen Beanspruchungsgeschwindigkeit auf.

Wie die eingangs angeführten Schadensfälle belegen, sollte bei der Auslegung erdbebenbeanspruchter Stahlkonstruktionen neben den bereits bekannten Einflüssen aus der wiederholten Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich [4], [5] die Geschwindigkeitssensitivität des Materialverhaltens nicht vernachlässigt werden [15]. Hier ist das Hauptaugenmerk auf mögliche geschwindigkeitsbedingte Überfestigkeiten des Materials zu richten. Die Problematik von Überfestigkeiten ist bereits von der Anwendung des sog. Traglastverfahrens (Verfahren Plastisch-Plastisch gemäß DIN 18800 [17]) bekannt. Die insbesondere für diesen Kontext in DIN 18800 T1, El. 759 angegebene 30%ige Erhöhung der Bemessungswerte der Festigkeiten

im Falle einer ungünstigen Wirkung kann im baupraktisch relevanten Geschwindigkeitsbereich (vgl. Abschn. 1) auch zur Abdeckung von festigkeitserhöhenden Geschwindigkeitseinflüssen herangezogen werden.

Anders verhält es sich bei der gewöhnlichen Bemessung zur Absicherung hinreichender Tragsicherheit. Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse kann in Anlehnung an Scheer et al. [18], [19] empfohlen werden, sich dort an den zu sehr niedrigen Beanspruchungsgeschwindigkeiten gehörenden Festigkeitskennwerten zu orientieren.

Die in den derzeitigen Stahlbaunormen [17] übliche Charakterisierung der Fließgrenze mittels der oberen Streckgrenze R_{eH} erscheint angesichts der vorgestellten Untersuchungsergebnisse insofern diskussionsbedürftig, als daß zumindest bei normalgeglühtem Material im gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich ein deutlicher Spannungsunterschied zwischen oberer Streckgrenze und der mittleren Spannung des Fließplateaus besteht, wobei sich dieser Spannungsunterschied mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit vergrößert. Zugleich kann dabei die mittlere Spannung des Fließplateaus bei niedrigen Geschwindigkeiten deutlich unter den in den Vorschriften angegebenen charakteristischen Werten der Fließgrenzen liegen. Ein Bezug auf die obere Streckgrenze erscheint aber auch insofern nicht unproblematisch, als daß bei diesem Kennwert bekanntlich eine größere statistische Streuung und zusätzlich eine deutlich größere Geschwindigkeitssensitivität vorliegt als beispielsweise bei der mittleren Spannung des Fließplateaus. Aus vorstehend genannten Gründen schlagen die Verfasser in Anlehnung an Scheer et al. [19] die Verwendung eines jenseits der oberen Streckgrenze bestimmten Festigkeitskennwerts vor. Dies kann beispielsweise die für das geforderte Sicherheitsniveau bei hinreichend niedriger Beanspruchungsgeschwindigkeit bestimmte 0,2-%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ oder die statische Streckgrenze R_{eS} [10], [19] sein.

Bei experimentellen Traglastuntersuchungen von Bauteilen sollte der beim Standard-Zugversuch [7] angegebene Geschwindigkeitsbereich nicht nach oben verlassen werden. Zusätzlich wird empfohlen, wie in [18] durch mehr-

fach eingefügte Haltephasen der Beanspruchung den vorhandenen Geschwindigkeitseinfluß transparent zu machen. In die Dokumentation gehört eine genaue Angabe der tatsächlichen Einwirkungs- bzw. Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Die bislang übliche Geschwindigkeitsangabe „im quasistatischen Bereich“ ist unpräzise und nicht immer hinreichend.

Mit dem vorgestellten Materialmodell [15] bestehen hinreichende Möglichkeiten, das Materialverhalten unlegierter Baustähle bei baupraktisch relevanten Beanspruchungen einschließlich der Geschwindigkeitssensitivität des mechanischen Verhaltens abzubilden. Das Materialmodell kann über entsprechende Schnittstellen in ein beliebiges Standard-FE-Programm implementiert werden und steht somit für die Anwendung zur Verfügung.

Für die nahe Zukunft bietet sich auf der Materialseite eine Erweiterung des Kenntnisstands zum Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die zunehmend verwendeten thermomechanisch gewalzten Stähle an. Diese könnten wie die in Japan neuerdings verwendeten LYP-Stähle mit extrem niedriger Fließgrenze gegenüber der untersuchten Stahlsorte S 355 J2 G3 (N) eine höhere Geschwindigkeitssensitivität aufweisen.

Weiterhin sollte der Einfluß der Geschwindigkeitssensitivität des Materialverhaltens auf das Tragverhalten von Bauteilen weiterverfolgt werden, beispielsweise auf die Traglast von mittelschlanken und gedrungenen Stützen [18]. Hierauf kann ggf. in einem späteren Aufsatz noch genauer eingegangen werden.

Abschließend sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft noch einmal für die finanzielle Förderung herzlich gedankt.

Literatur s. Teil 1, Stahlbau 72 (2003), H. 11, S. 778–787.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Christian Böttcher, Ingenieurbüro Dr. Binnewies GmbH, Alsterterrasse 10a, 20354 Hamburg, Dr.-Ing. Matthias Reininghaus, akademischer Oberrat, Prof. Dr.-Ing. Udo Peil, Universitätsprofessor am Institut für Stahlbau der TU Braunschweig, Beethovenstraße 51, 38106 Braunschweig