

# Fahrweggründungen – Nachweise und Untersuchungen zur dynamischen Stabilität

Die vertiefende Betrachtung zu der dynamischen Stabilität des Unterbaus/Untergrunds im Eisenbahnwesen stellt eine relativ neue Entwicklung dar und zeichnet sich durch komplexe Anforderungen bei der rechnerischen Nachweisführung aus. Der Beitrag dient zur Veranschaulichung des derzeitigen Wissens- und Regelungsstandes.



Für die Bewertung von Erdbauwerken unter besonderer Berücksichtigung der zyklisch/dynamischen Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr hat sich in der Vergangenheit der Begriff „dynamische Stabilität“ eingebürgert. Hierunter wird aber auch eine mit der Zeit zunehmende Setzung des Gleises verstanden, die durch das Bodenverhalten bei dynamischer Beanspruchung infolge Eisenbahnverkehr auftrat, obwohl dies nicht mit einem Stabilitätsversagen sondern eher mit einem allmählichen Verlust der Gebrauchstauglichkeit gleichzusetzen ist.

Das „Versagen“ eines Erdbauwerkes unter dynamischen Einwirkungen aus Verkehrslasten infolge mit der Zeit zunehmender, großer Setzungen wird daher als Verlust der „dynamischen Langzeitstabilität“ bzw. der „dynamischen Gebrauchstauglichkeit“ definiert. Dies steht im Gegensatz zu intensiven, kurzzeitigen dynamischen Einwirkungen oder wenn nach wenigen Lastzyklen beträchtliche Scher- und Volumenänderungen verbunden mit einer deutlichen Abminderung der dynamischen Steifigkeit auftreten (beispielsweise auch bei starken Erdbeben oder bei Sprengerschütterungen). Dies wird als Verlust der „dynamischen Kurzzeitstabilität“ bezeichnet.

In der Vergangenheit wurden, weil abgesicherte Berechnungsverfahren zur Bewertung der dynamischen Stabilität fehlten, in der Regel nur allgemeine in der Literatur gegebene Empfehlungen, insbesondere die Information Bautechnik 28a der Deutschen Bundesbahn angewendet. Aufgrund des in etwa den letzten zehn Jahren stattgefundenen Fortschrittes beim Verständnis der Grundlagen und der dynamischen Berechnungsverfahren stellt dies aber nicht mehr den Stand der Technik dar.

## 1. NACHWEISE UND REGELUNGEN NACH RIL 836

Die maßgebenden Regelungen zur Erstellung von Erdbauwerken im Bereich des Eisenbahnwesens in Deutschland finden sich in der Richtlinie 836 „Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke“ der DB AG. Im Rahmen der Herausgabe der neuen Ril 836, Fassung vom 20.12.1999a, mit 1. Aktualisierung, gültig ab 01.10.2008, wurde die bisherige Ril 836 im erheblichen Maße überarbeitet und führte hinsichtlich der Nachweise und Bemessungen zu veränderten Anforderungen.

Die Regelungen für die Führung von Nachweisen und Untersuchungen zu der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von geotechnischen Bauwerken finden sich in Ril 836, Modul 3001 „Nachweise und Bemessung – Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit“. Der Geltungsbereich umfasst die Erstellung, Erneuerung oder wesentliche Änderung. Im Regelwerk wird hierbei zwischen rechnerischen Nachweisen und Untersuchungen unterschieden. Gemäß der Ril 836, Modul 3001, Abschnitt 3, Absatz 2, sind für Strecken mit Fester Fahrbahn sowie für Strecken mit Schotteroberbau, die mit Geschwindigkeiten von mehr als 200 km/h befahren werden sollen, explizite Nachweise für die dynamische Stabilität des Unterbaus erforderlich.

Bei Strecken mit Schotteroberbau und Geschwindigkeiten bis 200 km/h sind Untersuchungen zur Schwingungsstabilität des Unterbaus/Untergrundes durchzuführen, wenn von den konstruktiven Festlegungen des Moduls 836.4102 zur Gestaltung des Unterbaus abgewichen werden soll und/oder unterhalb des Unterbaus schwingungsempfindliche Böden verbleiben sollen. Voraussetzung ist hierbei, dass schädliche Schwingungsein-



**Prof. Dr.-Ing.  
Hans-Georg Kempfert**  
Universitätsprofessor an der  
Universität Kassel

geotech@uni-kassel.de



**Dipl.-Ing. (FH) Oliver Krist**  
Technische Aufsicht und Zulassungen  
im Tunnel-, Erd-, Grund- und Felsbau  
der Zentrale des Eisenbahn-Bundes-  
amtes, Ref. 21, Bonn – Büro München

KristO@eba.bund.de



**Dr.-Ing. Marc Raithe**  
Geschäftsführender Gesellschafter  
Kempfert + Partner Geotechnik,  
Würzburg

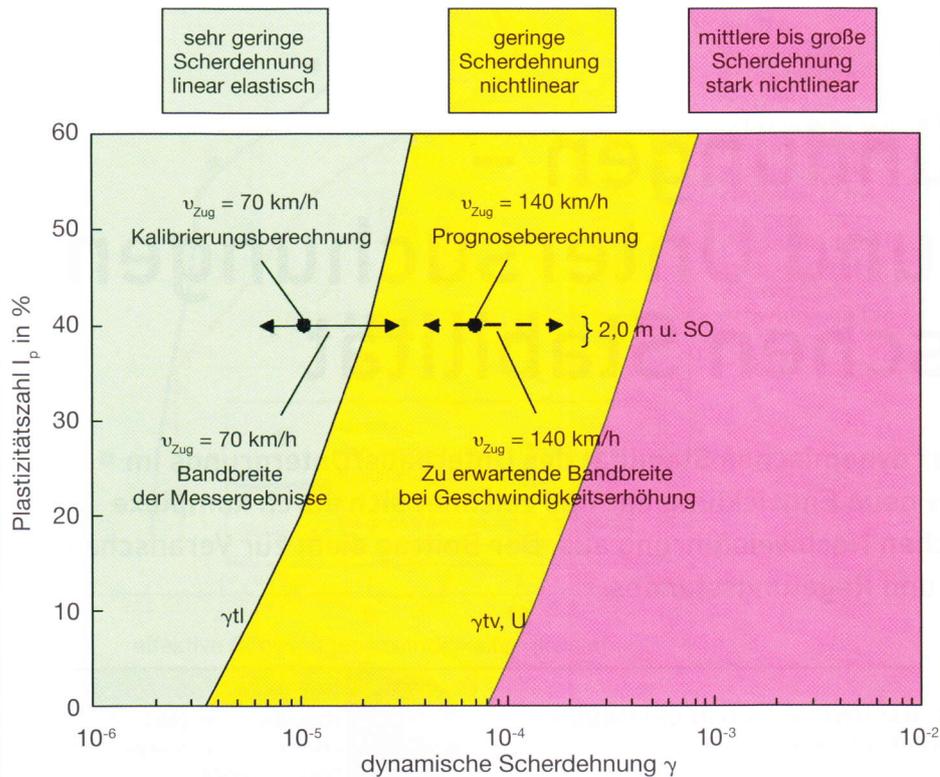
m.raithel@kup-geotechnik.de

flüsse auf die Gebrauchstauglichkeit des Gleises nicht ausgeschlossen werden können (siehe Ril 836, Modul 3001, Abschnitt 5, Absatz 2).

## 2. BAUAUFSICHTLICHE GESICHTS- PUNKTE

### 2.1 BETEILIGUNG DES EISENBAHN- BUNDESAMTES (EBA)

Das EBA ist gemäß der bauaufsichtlichen Regelungen nach der „Verwaltungsvorschrift über die Bauaufsicht im Ingenieurbau, Oberbau und Hochbau“ (VV BAU) an den jeweiligen Baumaßnahmen zu beteiligen. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass Eisenbahninfrastrukturunternehmen für nicht ausreichend geregelte Bereiche den Nachweis der mindestens gleichen Sicherheit führen. Die »



**BILD 1: Beurteilung der dynamischen Stabilität des Untergrunds anhand der dynamischen Scherdehnung** (Quelle aller Bilder: Autoren)

erfolgreiche Nachweisführung bestätigt das EBA verwaltungstechnisch durch eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE). Wie dargelegt, wird in der Ril 836 zwischen rechnerischen Nachweisen und Untersuchungen unterschieden. Die Vorschläge zur Führung von Nachweisen zur dynamischen Schwingungsstabilität des Unterbaus/Untergrundes sind nach Ril 836, Modul 3001, Abschnitt 5, Absatz 1, durch eine ZiE durch das EBA zu bestätigen bzw. zu modifizieren. Untersuchungen nach Ril 836, Abschnitt 5, Absatz 2, bedürfen jedoch keiner ZiE.

**2.2. OBJEKTSPEZIFISCHE BEMESSUNGSVORGABEN**

Die Anforderungen in der Ril 836 hinsichtlich der Art und des Umfangs der Nachweisführung sind derzeit nicht erschöpfend beschrieben. Die notwendigen objektspezifischen Anforderungen variieren im Einzelfall und sind bei der Entwurfsplanung festzulegen. Regelmäßig kann jedoch davon ausgegangen werden, dass mindestens nachfolgende Unterlagen im Rahmen einer ZiE erforderlich sind:

- Begutachtungen im Zuge der Entwurfsplanung durch einen vom EBA anerkannten Gutachter für Geotechnik, Tätigkeitsbereiche Erd- u. Grundbau (EBA-GA);
- Fundierte Bestimmung der bodenmechanischen und bodendynamischen Kennwerte durch Feld- und Laborversuche;

- Festlegungen zu den Grenzwerten der dynamischen Scherdehnungen durch einen EBA-GA;
- Bestimmung der Einwirkungen aus dem Betriebsprogramm der Strecke bzw. durch charakteristische Betriebslasten-züge nach DIN FB 101;
- Festlegung von repräsentativen Querschnitten unter der Annahme von ungünstigsten Randbedingungen (wie z. B. geringe Dammhöhen, große Mächtigkeit schwingungsempfindlicher Böden, hoher Grundwasserstand) und
- Exemplarische, prüffähige Nachweisführung mit dem Vergleich von vorhandenen mit den zulässigen resultierenden Schwinggeschwindigkeiten oder vorhandenen mit zulässigen Scherdehnungen an den repräsentativen Querschnitten.

**3. ANWENDUNG DES NACHWEISVERFAHRENS**

**3.1. ALLGEMEINES**

In der Ril 836 wird darauf verwiesen, dass nach dem derzeitigen Stand der Technik für Nachweise der dynamischen Stabilität Verfahren verwendet werden dürfen, bei denen vorhandene mit zulässigen Schwinggeschwindigkeiten oder vorhandene mit zulässigen Scherdehnungen verglichen werden. Da keine abgesicherten Erkenntnisse und Verfahren hinsichtlich der Festlegung

von zulässigen Schwinggeschwindigkeiten vorliegen, wird zurzeit in der Regel ein Verfahren zum Nachweis der Scherdehnungen in Anlehnung an HU 2003 angewendet, welches nachfolgend erläutert wird.

Als maßgebendes Kriterium wird hierbei die unter einer dynamischen Einwirkung im Boden auftretende Scherdehnung  $\gamma$  nach VUCE-TIC 2004 bewertet. Danach lassen sich für die dynamischen Scherdehnungen die in Bild 1 dargestellten Bereiche angeben. Der grüne Bereich steht für sehr geringe Scherdehnungen, bei denen sich der Boden weitgehend linear elastisch verhält. Wenn die auftretenden Scherdehnungen im roten Bereich liegen, ist mit großen Verformungen schon nach kurzer Zeit bzw. schon bei kurzzeitigen dynamischen Einwirkungen zu rechnen, d. h. die dynamische Kurzzeitstabilität ist gefährdet. Sofern die Scherdehnungen im gelben Bereich liegen, verhält sich der Boden zwar mechanisch nichtlinear, die Verformungen bleiben aber weitgehend im elastischen Bereich. Maßgebend für die Nachweisführung und letztlich die Definition des erforderlichen Sanierungsaufwandes oder Sanierungsgebietes ist somit die Festlegung der einzuhaltenen Scherdehnungsgrenze. Hierbei sind sowohl Sicherheitsfragen als auch Wirtschaftlichkeitsaspekte zu berücksichtigen.

Aus bauaufsichtlicher Sicht gilt, dass ein Versagen der „dynamischen Kurzzeitstabilität“ und unzulässige Scherdehnungen zwingend zu verhindern sind. Ein Überschreiten des grünen Bereiches kann akzeptiert werden, sofern schädliche Auswirkungen auf die dynamische Gebrauchstauglichkeit rechtzeitig erkannt werden und die Betriebssicherheit sichergestellt ist. Aus wirtschaftlicher Sicht ist zu berücksichtigen, dass gewisse lokale Überschreitungen des grünen Bereiches keineswegs schon zu einem Verlust der Gebrauchstauglichkeit führen. Vielmehr gilt, dass beim Schotteroberbau kleine Scherdehnungen als unproblematisch angesehen werden können, da hieraus resultierende Setzungen durch Stopfvorgänge ausgeglichen werden können. Im Gegensatz dazu kann es bei der Verwendung einer Festen Fahrbahn erforderlich werden, eine geringere einzuhaltenen Scherdehnungsgrenze festzulegen, um die Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten.

**3.2. BERECHNUNGSDURCHFÜHRUNG**

Zur Ermittlung der im Baugrund zu erwartenden Scherdehnungen sind relativ komplexe Berechnungen durchzuführen, die sich grundsätzlich in die nachfolgend dargestellten Schritte gliedern:

- Ermittlung der maßgebenden Lastenzüge,
- Berechnung der sich ergebenden Spannungen in UK Schwelle anhand von gleisdynamischen Berechnungen,

- Dynamische FEM-Berechnung mit einem Einheitsimpuls,
- Faltung des zeitabhängigen Systemverhaltens beim Einheitsimpuls mit den zuvor ermittelten Lastbildern und
- Ermittlung bzw. Ableitung der Scherdehnungen bei Zugüberfahrt in Abhängigkeit der Tiefe.

Bei der Berechnung der Einwirkungen in UK Schwelle kann in der Regel mit ausreichender Genauigkeit die gebräuchliche und anerkannte Oberbauberechnung mit dem Bettungsmodulverfahren nach Zimmermann bzw. das erweiterte Modell von Knothe (KNOTHE 2001) verwendet werden. Bild 2 zeigt eine ausreichende Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit Messwerten.

Zur Ermittlung des typischen Systemverhaltens wird in der Regel zunächst eine dynamische Berechnung unter Ansatz eines sog. Einheitsimpulses durchgeführt. Durch die Kombination bzw. Überlagerung des Systemverhaltens des Untergrundes beim Einheitsimpuls mit den Lastbildern aus der gleisdynamischen Berechnung (Faltung) kann für die verschiedenen Lastenzüge das jeweilige Verhalten des Untergrundes ermittelt werden. Hierbei werden die Eingangssignale (d. h. die äußeren Einflüsse auf das System durch die Lastbilder) mit der Übertragungsfunktion (= Impulsantwort = hier Reaktion des betrachteten Systems auf einen Einheitsimpuls als Signaleingang) gefaltet, um die Antwort eines beliebigen Eingangssignals bzw. auf ein beliebiges Lastbild zu berechnen. Anhand der berechneten Schwinggeschwindigkeiten (bzw. die gemessene effektive Schwinggeschwindigkeit) lässt sich dann die dynamische Scherdehnung nach folgender Beziehung ermitteln:

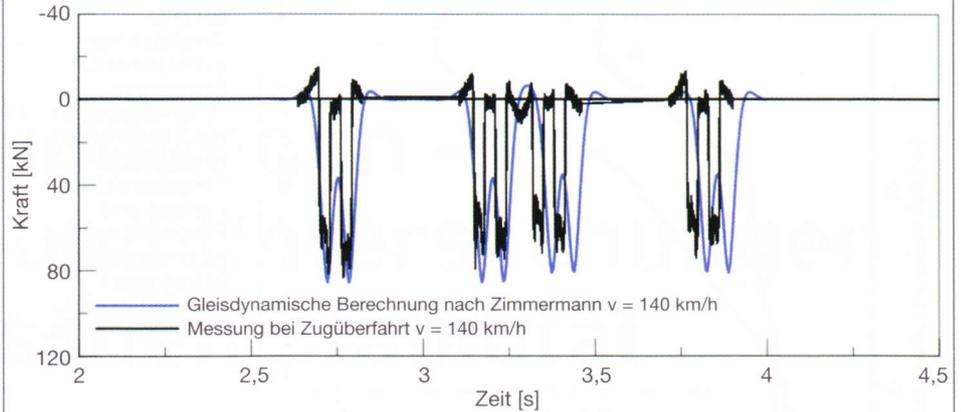
$$\gamma = \frac{v}{c_s}$$

- $\gamma$  dynamische Scherdehnung
- $v$  effektive Schwinggeschwindigkeit
- $c_s$  Scherwellengeschwindigkeit

### 3.3. BAUGRUNDERKUNDUNG UND PARAMETERFESTLEGUNG

Grundlage für die Durchführung der vorstehenden Berechnungen ist eine zielgerichtete Baugrunderkundung und die Festlegung der dynamischen Berechnungsparameter, wie des dynamischen Schubmoduls.

Zur Ermittlung bodendynamischer Kennwerte können geophysikalische bzw. seismische Untersuchungen, z. B. das Verfahren der Refraktions- bzw. Tauchwellentomografie, Downhole-Messungen o. ä. ausgeführt werden. Dabei handelt es sich in der Regel um die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von seismischen Wellen, wobei der Berechnungswert des dynamischen Schubmoduls der Weichschichten bei Ansatz der



**BILD 2:** Ergebnisse von gleisdynamischen Berechnungen im Vergleich mit Messergebnissen

Scherwellengeschwindigkeit  $c_s$  und der Dichte des Bodens  $\rho$  zu  $G_{dyn} = c_s^2 \cdot \rho$  abgeleitet wird.

Bei der Festlegung der zutreffenden Scherwellengeschwindigkeit aus den geophysikalischen Messungen ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese erfahrungsgemäß nicht eindeutig sind und oftmals einen erheblichen Interpretationsspielraum zulassen.

Laborversuche wie zyklische Triaxialversuche und Resonant Column Versuche zeigen zwar in der Regel deutlich verlässlichere Ergebnisse, werden aber durch die Probenahme beeinflusst, sodass infolge von nicht zu vermeidenden Probenstörungen ggf. ein zu geringer Versuchswert bestimmt wird.

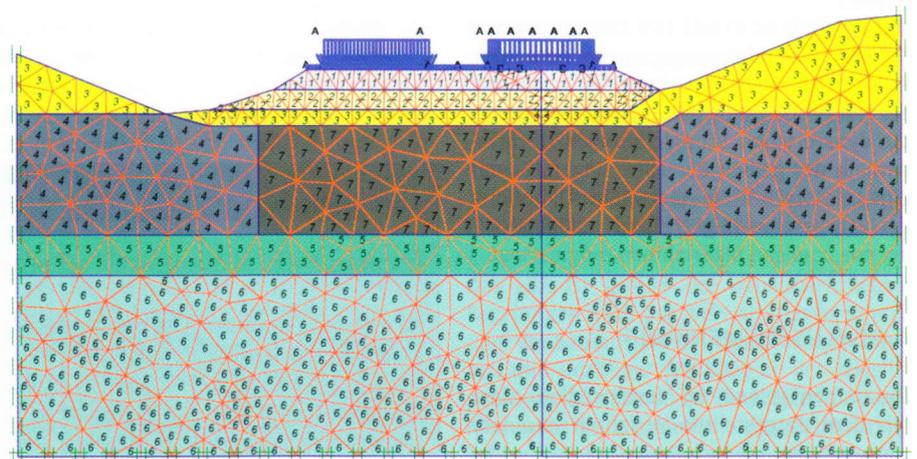
Insofern ergibt sich beim Nachweisverfahren der dynamischen Stabilität das Problem, dass zwar ein sehr komplexes und aufwändiges Berechnungsverfahren mit hoher Berechnungsgenauigkeit angewendet wird, die Bewertungssicherheit aber tatsächlich durch die unvermeidbaren Unsicherheiten bei der Parameterfestlegung stark beeinflusst wird.

### 3.4. VERIFIZIERUNG VON BERECHNUNGSERGEBNISSEN

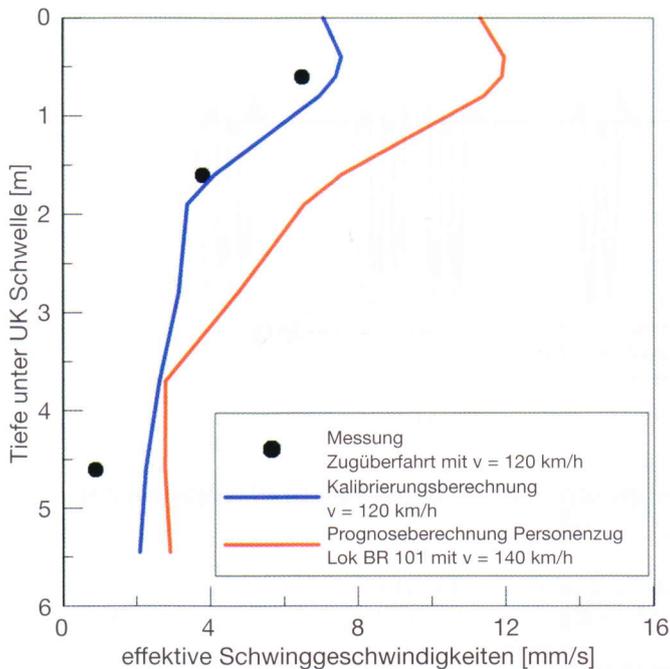
Im vorliegenden Beispiel liegt in einem Streckenbereich mit Fahrgeschwindigkeiten bis 70 km/h unter einer ca. 2 m mächtigen Überdeckung aus Tragschicht und Sanden eine bis zu ca. 8 m mächtige Weichschicht aus Torfen und breiig bis weichen Tonen und Schluffen vor. Für die Weichschichten im FEM-Modell (Bild 3) wurde aus den geophysikalischen Messungen ein dynamischer Schubmodul von  $G_{dyn} = 4 \text{ MN/m}^2$  abgeleitet. Die Berechnungsergebnisse zeigten zunächst eine Überschreitung der Scherdehnungsgrenzen, sodass ein unmittelbarer Sanierungsbedarf gefolgert wurde.

Zur Bestimmung des tatsächlichen dynamischen Baugrundverhaltens bei Zugüberfahrten wurden Schwingungsmessungen entsprechend DIN 45672-1 durchgeführt. Mit Beschleunigungsaufnehmern wurde der zeitliche Verlauf des unbewerteten Signals der Schwingbeschleunigung als Schwingungsgröße während der Messdauer gemessen.

**BILD 3:** FEM-Modell



Böden: 1 = Schotter; 2 = PSS; 3 = Sande; 4 / 7 = Torf (un- bzw. teilkonsolidiert); 5 = Schluff (weich); 6 = tragfähige Sande



**BILD 4:** Vergleich von gemessenen Schwinggeschwindigkeiten mit Ergebnissen von Kalibrierungsberechnungen und Prognose der zu erwartenden Schwinggeschwindigkeiten

Durch einfache Integration der Schwingbeschleunigung über die Zeit wurde die Schwinggeschwindigkeit  $v$  bestimmt.

Im ersten Berechnungsschritt wurde das Berechnungsmodell an die Messergebnisse bei Zugüberfahrten mit verschiedenen Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h kalibriert. In diesen Kalibrierungsberechnungen wurde insbesondere der dynamische Schubmodul ( $G_{dyn}$ ) bzw. die Scherwellengeschwindigkeit ( $v_s$ ) der Torfschicht so variiert, dass die rechnerisch ermittelten Schwinggeschwindigkeiten näherungsweise den aus den Messungen abgeleiteten Werten für die Schwinggeschwindigkeit entsprachen, vgl. Bild 4.

Unter Ansatz des durch o.g. Kalibrierung optimierten Berechnungsmodells wurden in einem zweiten Berechnungsschritt die bei Anhebung der Fahrgeschwindigkeit zu erwartenden dynamischen Schwinggeschwindigkeiten berechnet. Diese Prognoseberechnungen wurden für einen Personenzug mit einem Triebfahrzeug der Baureihe BR 101 ausgeführt.

Das Ergebnis ist in Bild 1 im Zusammenhang mit den Scherdehnungsgrenzen enthalten. Es ist zu erkennen, dass bei einer Steigerung der Fahrgeschwindigkeit auf bis zu 140 km/h die dynamischen Scherdehnungen noch innerhalb des gelben Bereiches liegen, womit eine messtechnisch überwachte Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit auch ohne tiefreichende bauliche Maßnahmen möglich war.

#### 4. SCHLUSSBEMERKUNG

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit dem dargestellten Verfahren nunmehr auch ein rechnerischer Ansatz auf einer nachvollziehbaren theoretischen Grundlage zum Nachweis der dynamischen Stabilität

zur Verfügung steht. Insofern stellt dies einen deutlichen Fortschritt dar. Es bestehen allerdings auch noch offene Fragen.

So ist die Festlegung der erforderlichen Eingangsparameter mit ausreichender Genauigkeit unter Berücksichtigung der versuchs-technischen und baugrundspezifischen Schwankungsbereiche im Regelfall nur bedingt möglich.

Daher sollte immer eine Kalibrierung des Berechnungsverfahrens an bereits ausgeführten Messungen vorgenommen werden. Hierdurch ist es möglich, eine realistische Prognose der Scherdehnung aufgrund einer Rückrechnung der Baugrundparameter zu erstellen.

Nach den bisherigen Erfahrungen liegen die Scherdehnungsgrenzen nach VUCETIC 2004

im Eisenbahnbau wahrscheinlich auf der sicheren Seite. Ob diese indes tatsächlich angemessen sind, kann abschließend erst durch Langzeiterfahrungen in der Zukunft bewertet werden.

Letztlich bleibt neben der Anwendung des komplexen Berechnungsverfahrens auch die Bewertung der Berechnungsergebnisse durch den mit dem Problem vertrauten Gutachter erforderlich. Das gilt insbesondere, da eine rechnerische Prognose der tatsächlich zu erwartenden Langzeitverformungen unter zyklisch/dynamischen Lasten derzeit nicht möglich ist. Ob der Aufwand angemessen ist und welche der bautechnischen Maßnahmen geeignet sind, kann nicht allein rechnerisch bewertet werden. Vielmehr bedarf es auch einer gutachterlichen Bewertung. ←

#### Literatur

- DB Netz AG: Ril 836 „Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten“, Fassung vom 20.12.1999a mit 1. Aktualisierung, gültig ab 01.10.2008.
- Deutsche Bundesbahn, Bundesbahn – Zentralamt München: Schwingungsverhalten von Bahnkörpern auf organischen Böden (Torf), Information Bautechnik 28a 1991.
- Eisenbahn-Bundesamt: VV BAU „Verwaltungsvorschrift über die Bauaufsicht im Ingenieurbau, Oberbau und Hochbau“, Stand: 19.08.2009, Ausgabe mod. Bauaufsicht Version: 4.5, gültig ab: 01.09.2009.
- Hsu, C. C.; Vucetic, M.: Volumetric Threshold Shear Strain for Cyclic Settlement, in Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 1/2004.
- Knothe, K.: Gleisdynamik. Ernst & Sohn Verlag; Auflage: 1. Aufl. 2001.
- Lieberenz, K; Vogel, W.: Gebrauchstauglichkeit von Eisenbahnstrecken auf weichem Untergrund, in Eisenbahningenieur 10/2008.
- Vucetic, M.: Cyclic threshold shear strain soils, in Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120, 12/1994.
- Yifeng Hu, Erwin Gartung, Helmut Prühs, Bernd Müller: Bewertung der dynamischen Stabilität von Erdbauwerken unter Eisenbahnverkehr, in Geotechnik 1/2003.

## SUMMARY

### Documentation of the dynamic stability of track foundations and research into it

More intensive concern with the dynamic stability of railway substructures and subsoils represents a relatively new development and is characterised by complicated requirements as regards the computerised generation of documentary proof. In this report, the authors set out to give a clear view of the current state of knowledge and regulation. They present a procedure that provides a computerised approach to furnishing evidence of dynamic stability. Calibration of the computation procedure ought always to be performed using measurements obtained beforehand.