Abtragung der Lasten im System Oberbau, Unterbau und Untergrund

Prof. Dr.-Ing. Klaus Lieberenz,
Dipl.-Ing. Dirk Wegener,
beide GEPRO – Ingenieurgesellschaft mbH,
Dresden

1. Problemstellung

Der größte Teil der bestehenden Eisenbahnstrecken in Europa wird auf Erdbauwerken in Damm-, Einschnitts- oder Anschnittslage bzw. in Geländegleiche geführt. Diese wurden überwiegend bereits im 19. Jahrhundert unter vergleichsweise bescheidenen technischen Voraussetzungen errichtet. Der Untergrund wurde weitestgehend ohne Verbesserung überbaut, die Erdbauwerke wurden in ungeregelter Schüttung anfallender Böden und ohne entsprechende Verdichtung hergestellt. Die Belastungen und Geschwindigkeiten des Zugverkehrs waren anfangs noch gering. Auf steigende Belastungen und höhere Anforderungen aufgrund höherer Geschwindigkeiten wurde meist mit Maßnahmen im Oberbau reagiert. Damit sollten auch Verformungen im Unterbau/Untergrund begrenzt werden. Unter der Einwirkung der Eigen- und Verkehrslasten trat bei Erdbauwerken zumeist eine Nachverdichtung im Druckbereich des Gleises bzw. eine Konsolidierung oder Teilkonsolidierung ein, so dass sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Grundlegende Erneuerungen betrafen den Einbau von Planumsschutzschichten zur Begrenzung von Verformungen gleisnah; tiefgründige Ertüchtigungen wurden nur punktuell realisiert.

Der nun begonnene Ausbau der Eisenbahn-Infrastruktur zu einem nachhaltig leistungsfähigen Verkehrsnetz orientiert auf Hochleistungsstrecken mit höheren Geschwindigkeiten bzw. höheren Radsatzlasten. Neubaustrecken können mit ihren Erdbauwerken nach heutigem Standard errichtet werden. Hingegen entsprechen bei Ausbaustre-

Abb. 1: Problemstellung Ausbaustrecken

1

cken Untergrund und Erdbauwerke oftmals in geotechnischer und geometrischer Sicht nicht den heutigen Anforderungen. Eine Erhöhung der Verkehrsbelastung (Geschwindigkeit, Radsatzlast, Streckenbelegung) kann den Gleichgewichtszustand stören und zu Problemen in der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit der Erdbauwerke sowie zu Einschränkungen in der Verfügbarkeit der Strecken führen (Abb. 1). Kritisch sind insbesondere Erdbauwerke mit zu steilen und nicht gesicherten Böschungen sowie mit Problemböden wie verlagerungsempfindliche Sande, feinkörnige Böden ohne ausreichende Scherfestigkeit und mit hoher Verformbarkeit sowie Weichschichten mit organischen Anteilen im Unterbau und Untergrund.

Notwendig wird eine Ertüchtigung des Untergrundes und der Erdbauwerke zur verformungsarmen Aufnahme und Abtragung der Belastungen sowie zur Anpassung an die heutigen Streckenstandards. In der Bauausführung werden zur Ertüchtigung zumeist tiefgründige erdbautechnische Maßnahmen gewählt, die bei Eisenbahnstrecken eine Vielzahl baubetrieblicher, betrieblicher aber auch ökologischer Probleme aufwerfen.

In der Planung sind nach DIN 1054 (2005-01) die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen (Abb. 2). Dabei kommt für Eisenbahnverkehrslasten als zeitabhängige Belastung der Beurteilung der dynamischen Stabilität bei Geschwindigkeiten ≥ 200 km bzw. bei Problemböden eine zunehmende Bedeutung zu.

Nach RIL 836.0401 sind bei einer Erhöhung der Beanspruchung „Untersuchungen über die Veränderung der Beanspruchungen und über ihre Auswirkungen auf das Bauwerk durchzuführen“.

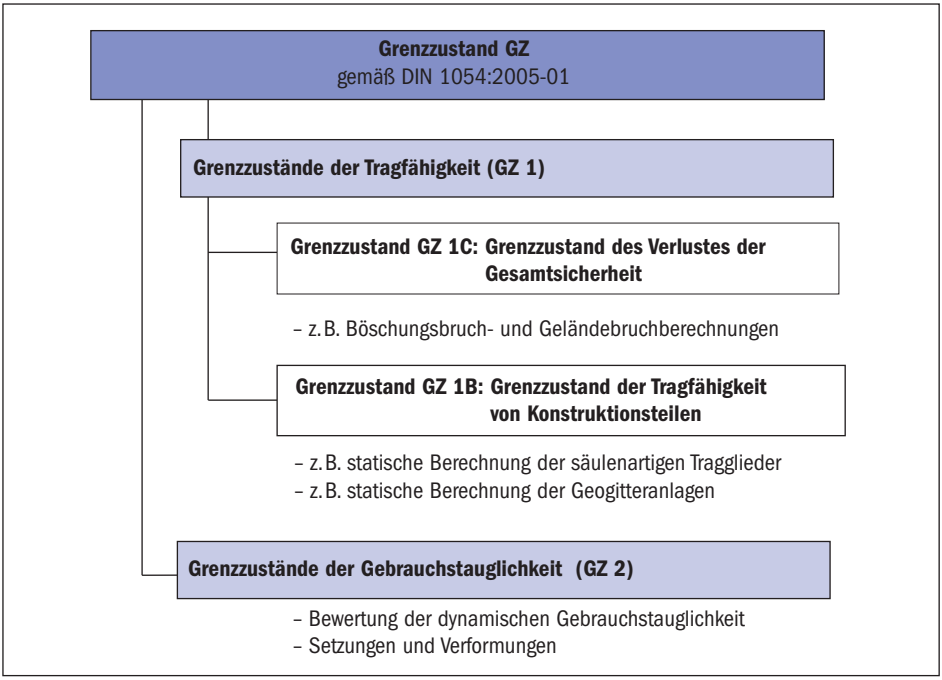


Abb. 2: Standsicherheitsnachweise Unterbau/Untergrund

Zusätzliche dynamische Beanspruchungen führen zu einer Erhöhung von Verformungen und Spannungen, insbesondere aber zu größeren Scherdehnungen infolge der Schwingungsausbreitung in Form von Scher-, Druck- und Oberflächenwellen.
Dies erfordert eine intensive Auseinandersetzung mit den Einwirkungen aus dem Zugverkehr (statische, quasistatische und dynamische Belastungen), den Beanspruchungen in der Fahrbahn mit Oberbau, Unterbau und Untergrund und mit den Widerständen im Bauwerk und Baugrund (Baugrundverhältnisse, baulicher Zustand, Geometrie und Bewuchs).

2 Eintragung und Abtragung der Lasten

2.1 Herangehensweise

Bei der Bemessung der Elemente der Fahrbahn wird in der Ingenieurpraxis nach der Oberbauberechnung vereinfachend von einem unendlich langen, elastisch gebetteten Träger ausgegangen, auf den eine statische Ersatzlast einwirkt. Diese wird zur Berücksichtigung von dynamischen Einflüssen mit Erhöhungsfaktoren für die Radkraftverlagerung im Bogen sowie für den Oberbauzustand und die Fahrgeschwindigkeit beaufschlagt [1]. So können für verschiedene Radsatzlasten incl. Erhöhungsfaktoren für die Dynamik quasistatisch z. B. Schienenspannungen, Schotterpressungen und Spannung im Unterbau/Untergrund ermittelt werden.
Tatsächlich wirkt auf die Fahrbahn mit Oberbau – Unterbau – Untergrund aber eine zeitabhängige Belastung, die aus der Achsfolge der Fahrzeuge (quasistatische Belastung) sowie der Abstände von Unebenheiten des Rades und des Fahrweges (zusätzliche dynamische Belastung) unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit resultiert (Abb. 3). Im Gleis tritt die Superposition beider Beanspruchungen auf.

2.2 Ermittlung der Beanspruchung aus quasistatischen Einwirkungen

Die Flächenpressung $p_{(x)}$ in Höhe der Schwellenunterkante wird mit Hilfe des Langträgerverfahrens nach Zimmermann auf Grundlage des Bettungsmodulverfahrens nach Winkler ermittelt. Dabei werden die Radsatzlasten als Wanderlasten betrachtet, die an einer Stelle x die Flächenpressung/Spannung $p_{(x)}$ hervorrufen:

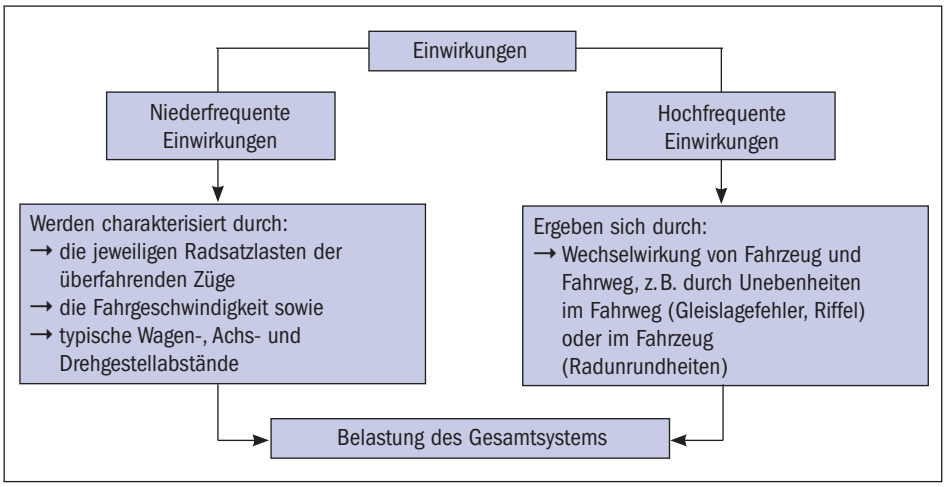


Abb. 3: Dynamische Einwirkungen

1

$$p_{(x)} = \frac{Q}{2 \cdot b_L \cdot L} \cdot e^{-\frac{x}{L}} \cdot \left(\cos\frac{x}{L} + \sin\frac{x}{L}\right)$$

mit: Q = Radlast,
x = horizontaler Abstand des betrachteten Punktes von der Radlast Q,
L = elastische Länge; wobei

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{k \cdot b_L}}$$

mit: $E \cdot I$ = Biegesteifigkeit,
k = Bettungsmodul,
b_L = Verteilungsbreite (Breite des Längsträgers)

Die Festlegung der Größe des Bettungsmoduls erfolgt dabei iterativ unter Ermittlung der Einsenkungen der Schwelle und der Schiene im Ergebnis der späteren dynamischen FE-Berechnungen, mit denen die Wellenausbreitung in den einzelnen Schichten erfasst wird.

Zur Berücksichtigung von Resonanzeffekten mit höheren elastischen Verformungen bei hohen Zuggeschwindigkeiten und weichen verformbaren Böden im Untergrund sollte das mechanische Modell des dynamisch belasteten Fahrweges nach [2] verwendet werden.

Aus den maximalen Spannungen an der Stelle x werden, jeweils über eine Verteilungslänge L in Bahnlängsrichtung verteilt, die mittleren Spannungen in der Ebene der Schwellenunterkante ermittelt. Aus diesen werden dann über einen Lastausbreitungswinkel im Schotter und Boden die Spannungen in tieferen Ebenen errechnet.

Die auf diese Weise berechneten mittleren Spannungen in unterschiedlichen Ebenen des Oberbaus, Unterbaus und Untergrundes sind beispielhaft für den Lasttyp 1 nach DIN FB 101 (Reisezug mit 6-achsiger Lok) bei einer Geschwindigkeit von

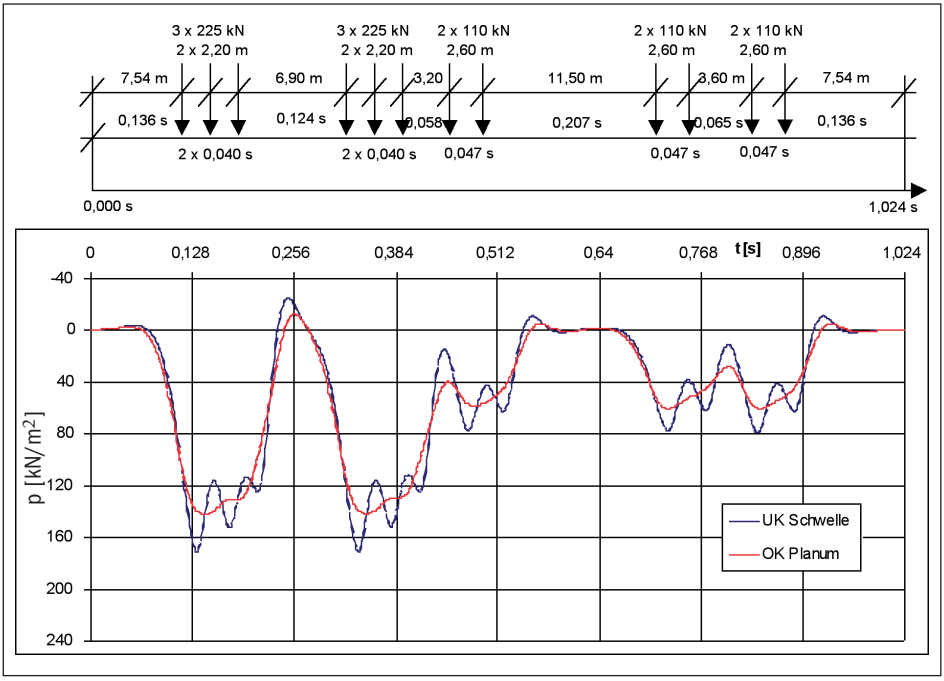


Abb. 4: Spannungs-Zeit-Verlauf quasistatisch

200 km/h und einen Bettungsmodul von ca. 100.000 kN/m³ in Abb. 4 dargestellt. In dem Spannungs-Zeit-Verlauf zeichnen sich bei der Flächenpressung in Schwellenunterkante deutlich die Spannungsspitzen unter den Rädern von Lok und Wagen ab, wobei die Radsatzlast von 225 kN der Lok maßgebend ist. Im Planum sind bei diesem Bettungsmodul die Spannungen im Drehgestell schon vergleichmäßigt.

2.3 Ermittlung der Beanspruchung aus zusätzlichen dynamischen Einwirkungen

Neben der quasistatischen Anregung treten auch zusätzliche dynamische Anregungen auf, die durch die Wechselwirkungen von Fahrzeug und Fahrweg verursacht werden (Abb. 3). Ihre zeit- und frequenzabhängigen Beanspruchungen nehmen mit der Fahrgeschwindigkeit zu und müssen speziell berücksichtigt werden.

Zur Erfassung dieser zusätzlichen dynamischen Anregungen wird eine im Rahmen des Projektes EUROBALT 2 erstellte Rundlaufabzeichnung eines speziell präparierten stark unrunden ICE-Rades als maßgebendes unrundes Rad verwendet [3]. Weil dieses Rad hauptsächlich Unrundheiten niederer Ordnung aufwies, wurde die Unrundheit dieses Rades rechnerisch noch durch eine starke Unrundheit 6. Ordnung ergänzt. Damit werden die dynamischen Anregungen durch den Schwellenabstand von 0,60 m, der etwa 1/6 des Radumfanges entspricht, erfasst.

Um mit diesem maßgebenden unrunden Rad auch die Unebenheiten im Fahrweg hinreichend zu berücksichtigen, werden die maßgebenden Radunrundheiten

- für die normalerweise vergleichsweise gut runden Räder der Lokomotiven und HGV-Züge in einfacher Größe und
- für die vergleichsweise weniger gepflegten Räder der Wagen der Personen- und Güterzüge in doppelter Größe angesetzt.

In Abb. 5 ist die Ortskurve für die Profilstörung Δz (s, t) eines derartig gebildeten typischen unrunden Rades dargestellt.

Die eingetragenen Radkraftschwankungen ΔQ können mit Hilfe eines einfachen Fre-

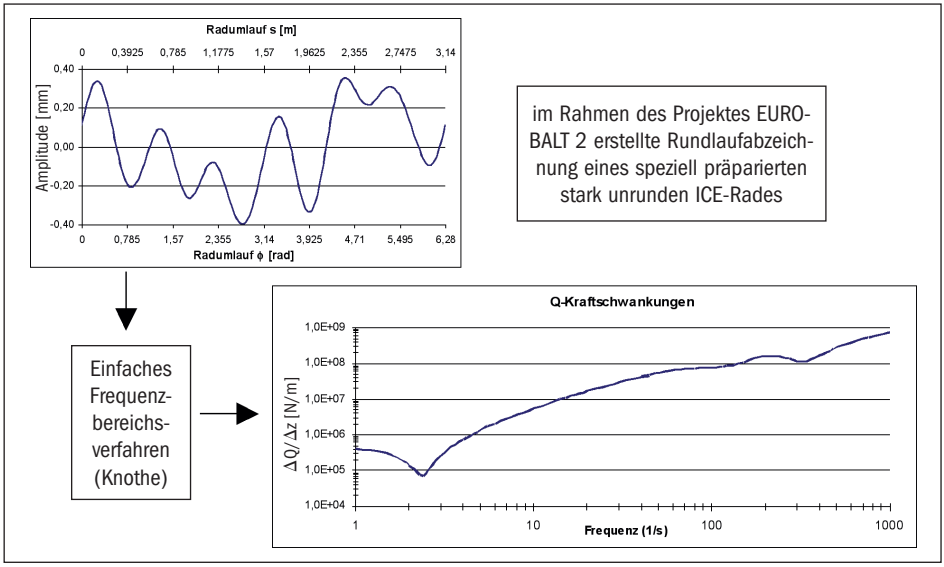


Abb. 5: Erfassung der dynamischen Anregung

1

quenzbereichsverfahrens gemäß [4] ermittelt werden.
Auf Grundlage
- der Steifigkeiten und Dämpfungen der Schienen, der Zwischenlagen, der Schwellen und dem Schotter, aus denen man die komplexe Gleisrezeptanz H_r (iΩ) erhält,
- der Fahrzeugkennwerte, aus denen man die komplexe Radsatzrezeptanz H_w (iΩ) erhält, sowie
- der Hertz'schen Kontaktsteifigkeit zwischen Rad und Schiene k_h

wird der Quotient aus Radkraftschwankungen ΔQ und der Profilstörung Δz nach folgender Formel ermittelt:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta z} = \frac{1}{H_r(i\Omega) + H_w(i\Omega) + \frac{1}{k_h}}$$

Da der Quotient ΔQ / Δz stark frequenzabhängig ist, ergibt sich ein Verlauf nach Abb. 5.
Durch Multiplikation der Profilstörung Δz (s, t) mit dem Quotienten der Radkraftschwankungen und der Profilstörung ΔQ/Δz können dann die zeit- und ortsabhängigen Radkraftschwankungen ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Lastverteilung in Bahnlängsrichtung können analog auch die Schotterkraftschwankungen S bzw. die Schwankungen der Spannungen im Unterbau und Untergrund ermittelt werden.
In Abb. 6 sind die zeit- und ortsabhängigen dynamischen Zusatzspannungen in der Ebene der Schwellenunterkante und auf dem Planum für den Lasttyp 1 (Reisezug mit 6-achsiger Lok) mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h dargestellt. Es zeichnen sich die Spannungsspitzen unter den Rädern von Lok und Wagen ab. Im Planum sind die Spannungen bereits etwas abgebaut.

2.4 Gesamtbeanspruchung

Die Gesamtbeanspruchung ergibt sich aus der Summe der quasistatischen und der zusätzlichen dynamischen Beanspruchung.
In Abb. 7 sind die Vertikalspannungs-Zeit-Verläufe infolge Gesamtbeanspruchung durch den Lasttyp 1 (Reisezug mit 6-achsiger Lok) mit 200 km/h dargestellt. Die Superposition der Spannungen aus quasistatischer (Abb. 4) und zusätzlicher dynamischer (Abb. 6) Beanspruchung zeigt deutlich höhere Spannungsspitzen unter den Rädern, die auch im Planum noch wirken. Die Lok bleibt mit ihrer Radsatzkraft maßgebend.
Zur Ermittlung der tatsächlichen Gesamtbeanspruchung für einen Lasttyp oder einen

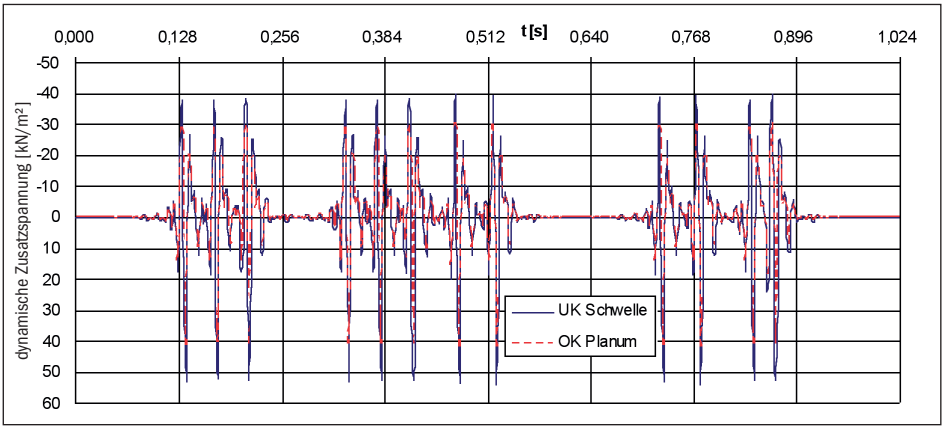


Abb. 6: Spannungs-Zeit-Verlauf dynamisch

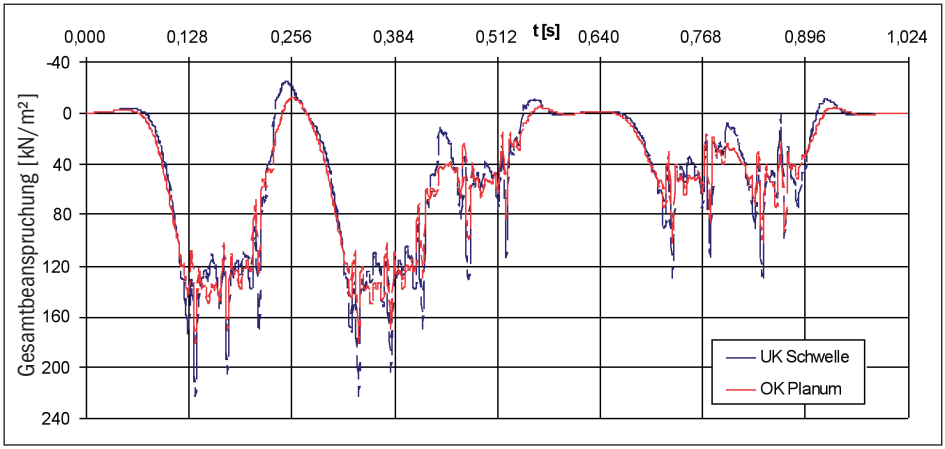


Abb. 7: Spannungs-Zeit-Verlauf gesamt

Betriebslastenzug sind detaillierte Berechnungen in Abhängigkeit von

- den Massen, Federn und Dämpfern des Wagens, Drehgestells und Radsatzes,
- der tatsächlichen Größe der Radunrundheit,
- der Zuggeschwindigkeit,
- der Oberbauelemente, insbesondere vorhandene elastische Elemente und Zwischenlagen sowie
- der Steifigkeit des Unterbaus und Untergrundes.

notwendig.

Die Darstellung der Gesamtbeanspruchung im Frequenzbereich zeigt Abb. 8. Die Messergebnisse zur Schwingungsgeschwindigkeit bilden die quasistatische Beanspruchung durch Achs- und Drehgestellabstände im Bereich bis ca. 20 Hz und die zusätzliche dynamische Beanspruchung im Bereich von ca. 40 bis 125 Hz ab.

2.5 Bodendynamische Berechnungen

Mit dem Modell des dynamisch belasteten Fahrweges und dem Frequenzbereichsverfahren können die quasistatischen und zusätzlichen dynamischen Beanspruchungen im gleisnahen Bereich ermittelt werden. Die zeitabhängige Belastung führt im Unterbau und Untergrund zu einer Ausbreitung von Schwingungen in Form von Scher-, Druck- und Oberflächenwellen und zu Beanspruchungen, die mit diesen Verfahren nicht erfasst werden können.

Ziel ist es jedoch, das dynamische Verhalten des gesamten Oberbaus, Unterbaus und Untergrundes zu untersuchen, um einerseits Prognoseberechnungen über die Auswirkung von Belastungserhöhungen durchführen zu können und andererseits die Wirkungsweise zusätzlich elastischer Elemente nachweisen zu können.

Mit dem FE-Programm „PLAXIS“, das speziell für Aufgabenstellung in der Boden- und Felsmechanik entwickelt wurde, besteht die Möglichkeit, dynamische Berechnungen an einem ebenen oder axialsymmetrischen Modell durchzuführen, d. h. die Einwirkung zeitabhängiger Belastungen zu simulieren. Als Eingabewerte für die Belastung im Finite Elemente Programm „PLAXIS“ dienten die Spannungs-Zeitverläufe in der Ebene Schwellenunterkante aus den gleisdynamischen Berechnungen. Der Bettungsmodul, der für die gleisdynamischen Berechnungen erforderlich ist, wurde bereits iterativ aus den Ergebnissen der FE-Berechnungen ermittelt.

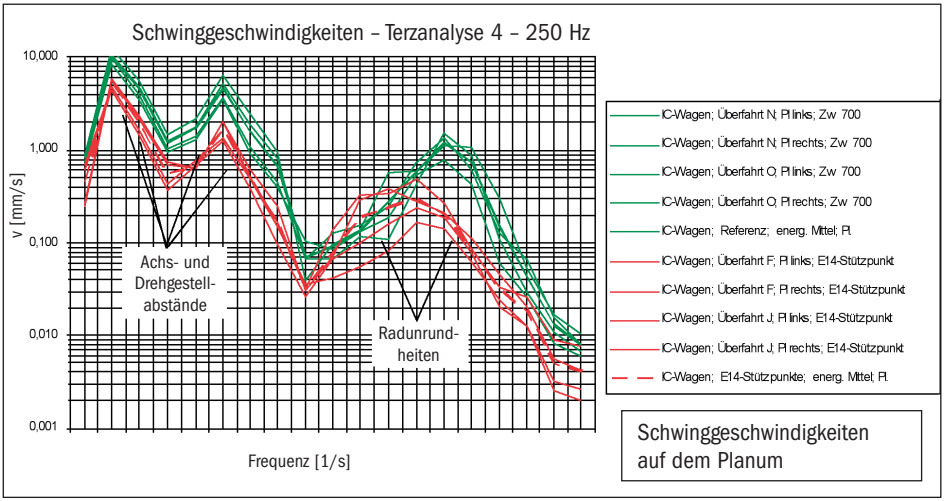


Abb. 8: Gesamtbeanspruchung im Frequenzbereich

Mittels FE-Berechnungen soll das dynamische Verhalten des Oberbaus, Unterbaus und Untergrundes und die Ausbreitung der Spannungen und Schwingungen in den Unterbau und Untergrund wirklichkeitsnah erfasst werden.

Für die Beurteilung des dynamischen Verhaltens unter Verkehrsbelastung sind zusätzlich Angaben über die Geometrie des Oberbaus, der Schutzschicht, des Dammes und der Schichtgrenzen im Untergrund sowie die bodenmechanischen und bodendynamischen Eigenschaften der einzelnen Schichten notwendig. Die für die Widerstände im Boden maßgebenden Bodenkennwerte sind in Abb. 9 zusammengestellt.

Unter Kenntnis der Bodenart, der Dichte, der Porenzahl sowie der mittleren Spannung können die bodendynamischen Kennwerte nach den „Empfehlungen des AK Baugrunddynamik“ [5] für mineralische Böden abgeleitet werden. Bei organischen Böden im

Widerstände im Böden

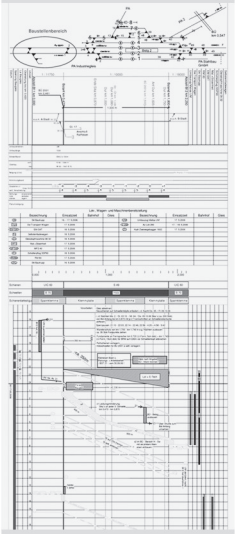
→ Baugrunderkundung und Laborversuche und ggf. dynamische Messungen zur Ermittlung der Bodenarten und der charakteristischen Bodenkennwerte:

- Konsistenz und Plastizität,
- Dichte, Trockenrohdichte,
- Wassergehalt,
- Glühverlust,
- Reibungswinkel, Kohäsion.
- Scherwellengeschwindigkeit,
- Kompressionswellengeschwindigkeit,
- Querdehnzahl,
- Dynamischer Schubmodul,
- Dämpfung.

Zusätzlich sind zu berücksichtigen:

→ der Zustand der Strecke,
→ ggf. vorhandene Nutzungseinschränkungen und
→ Anzeichen von Gebrauchstauglichkeits- und Standsicherheitsproblemen.

Abb. 9: Widerstände im Boden



Sperrpausenoptimierung im Gleisbau

Bauablaufplanung Betriebsablaufplanung

SOG unterstützt Sie bei der

- Erstellung von Rahmenbauablaufplänen
- Grobplanung für Machbarkeitsstudien
- Ermittlung des Sperrpausenbedarfs
- Detaillierten Bauablaufplanung
- Ermittlung der Baukosten
- Planung optimaler Nutzung vorgegebener Sperrpausen
- Planung von Maschinen-, Wagen- und Personaleinsätzen
- Ad-hoc-Planung auf der Baustelle
- Baustellendokumentation
- Erstellung von Soll-Ist-Vergleichen
- Baustellenabrechnung
- Begründung von Nachtragsforderungen

http://www.ivembh.de/sog

Digitale Weichenskizze

Die Bestellgrundlage für Weichen nach DB RIL 823.0700

http://www.ivembh.de/dws

IVE mbH

Ingenieurgesellschaft für Verkehrs- und Eisenbahnwesen mbH

Tel.: (05 11) 98 42 28 - 10
Fax: (05 11) 98 42 28 - 29
E-Mail: info@ivembh.de
Internet: www.ivembh.de

- Fahrwegtechnologie
- Systemforschung
- Softwareentwicklung
- Personen- und Güterverkehr
- Betriebswissenschaft
- Risikoanalyse/Gutachten

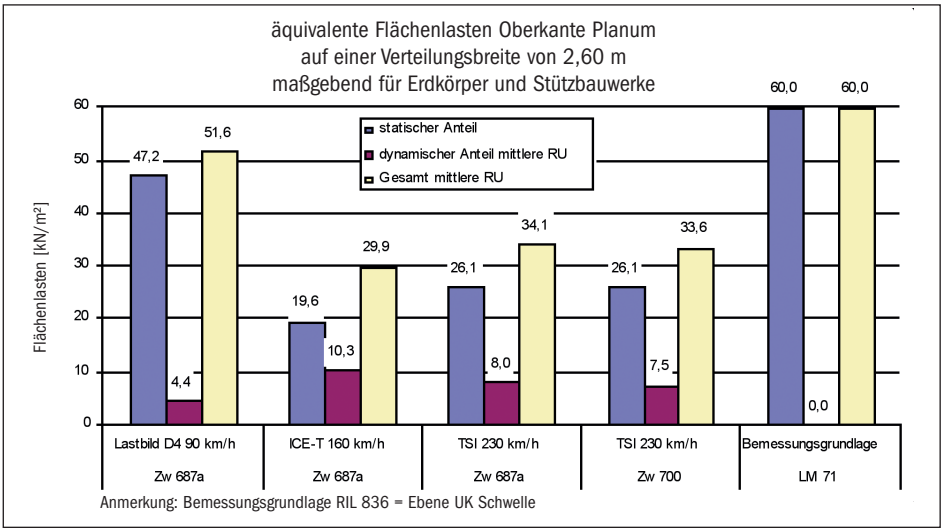


Abb. 10: Mittlere Spannungen auf dem Planum

Untergrund sind spezielle geophysikalische Messungen am Bahnkörper erforderlich.
Im Ergebnis der dynamischen FE-Berechnung erhält man Beanspruchungen als Einsenkungs-Zeitverläufe bzw. Schwinggeschwindigkeits-Zeitverläufe. Daraus können dann für Nachweise Spannungen und Scherdehnungen ermittelt werden.
Die Abb. 10 und 11 zeigen Spannungen und Schwinggeschwindigkeiten für unterschied-

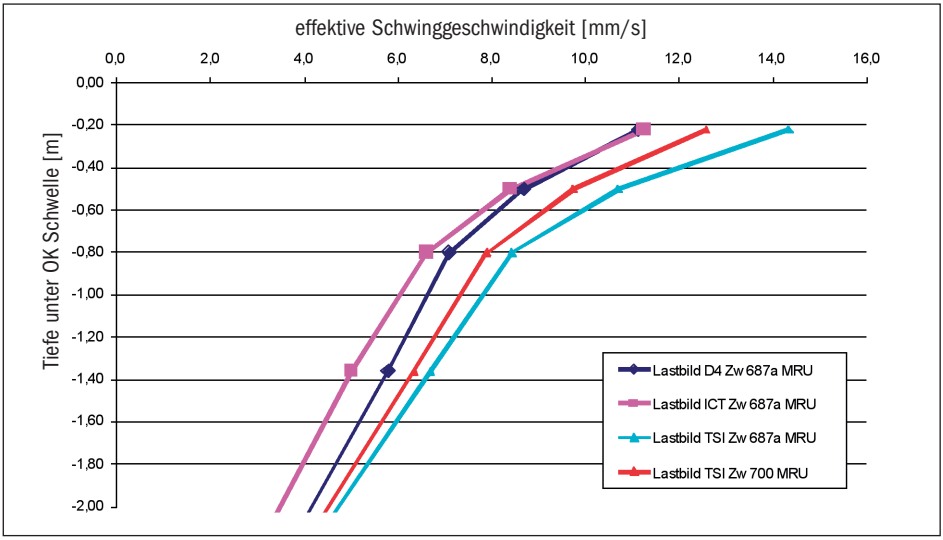


Abb. 11: Schwinggeschwindigkeiten im Oberbau/Unterbau

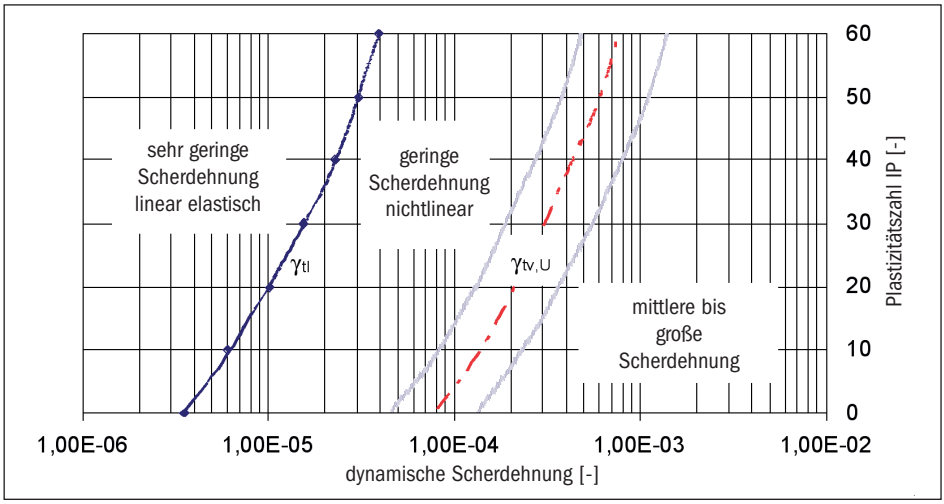


Abb. 12: Scherdehnungsgrenzen nach Hsu & Vucetic [6]

liche idealisierte und tatsächliche Lastbilder und für Zwischenlagen unterschiedlicher Elastizität. Deutlich ist die Zunahme der zusätzlichen dynamischen Belastungen bei höherer Geschwindigkeit und die Reduktionsmöglichkeit durch elastische Zwischenlagen sowohl bei den Spannungen als auch bei den Schwinggeschwindigkeiten. Damit wird noch deutlich, dass das Modell aus gleisdynamischer und bodendynamischer Berechnung geeignet ist, die Wirkung zusätzlicher elastischer Elemente im Oberbau auf die Beanspruchung im Oberbau, Unterbau und Untergrund abzubilden.

2.6 Nachweise der Grenzzustände

Für die Erdbauwerke und den Untergrund sind im Vergleich der Einwirkungen und Widerstände die Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen (Abb. 2).

Die Nachweise für die Gesamtstandsicherheit, die Tragfähigkeit von Konstruktionsteilen sowie der Setzungen erfolgen nach den bekannten Verfahren.

Der Nachweis der dynamischen Gebrauchstauglichkeit kann in Weiterführung der Berechnungen nach Abschnitt 2.5 über die Scherdehnungen γ geführt werden, die sich überschläglich zu

$$\gamma \approx v_{eff} / c_s \; [-]$$

mit: v_{eff} – effektive Schwinggeschwindigkeit und

c_s – Scherwellengeschwindigkeit

ergeben.

Die Scherdehnungsgrenzen nach Abb. 12 stehen für Bereiche mit linear elastischem, nicht linearem und stark nicht linearem Verhalten des Bodens. Die Scherdehnungen sind ein Grad für die dynamische Beanspruchung von Böden. Für Ausbaustrecken mit Schotteroberbau können geringe Scherdehnungen akzeptiert werden; ggf. sind zusätzlich die Langzeitsetzungen und ihre Verträglichkeit bezüglich der Gleislage nachzuweisen. Für Strecken mit Fester Fahrbahn gelten höhere Anforderungen nach [7].

Im Ergebnis der Nachweise sind bautechnische Maßnahmen zur Anpassung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Erdbauwerke bestehender Eisenbahnstrecken an die geplante höhere Streckenbelastung bzw. Streckenkategorie abzuleiten.

1

3 Ertüchtigung von Unterbau und Untergrund

3.1 Ertüchtigungskonzepte

Die Ertüchtigung wird definiert als Durchführung von bautechnischen Maßnahmen zur Anpassung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Erdbauwerke bestehender Eisenbahnstrecken an eine geplante höhere Streckenbelastung bzw. Streckenkategorie oder zur Aufhebung von Nutzungseinschränkungen (z. B. Langsamfahrstellen).

Dies geschieht bisher nahezu ausschließlich durch die Erhöhung der Widerstände mit erdbautechnischen Maßnahmen. Die Gleichgewichtsbetrachtung beim Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit (Bemessungswerte der Einwirkungen ≤ Bemessungswerte der Widerstände) kann aber auch durch die Verminderung der Einwirkungen gelöst werden. Gerade beim Nachweis der dynamischen Gebrauchstauglichkeit ist eine intensive Auseinandersetzung mit der dynamischen Lastein- und Abtragung notwendig. Auf diesem Weg können bereits im Oberbau Einwirkungen reduziert werden, bevor sie den Unterbau/Untergrund beanspruchen. Aus der komplexen Betrachtung der Elemente Oberbau, Unterbau und Untergrund im System Fahrzeug/Fahrweg ergibt sich somit ein erweiterter Ansatz für Maßnahmen der Ertüchtigung nach Abb. 13.

Grundsätzlich sind drei Maßnahmekategorien (auch in Kombination) möglich:

- **Erdbautechnische Maßnahmen** zur Erhöhung der Widerstände im Bauwerk und Baugrund. Diese klassischen auf geotechnische Wirkungen beruhenden Maßnahmen können tiefgründig oder gleisnah genutzt werden.
- **Oberbautechnische Maßnahmen** zur Verminderung der Einwirkungen durch einen elastischeren und ggf. massereicheren bzw. verstärkten Oberbau. Diese Dämp-

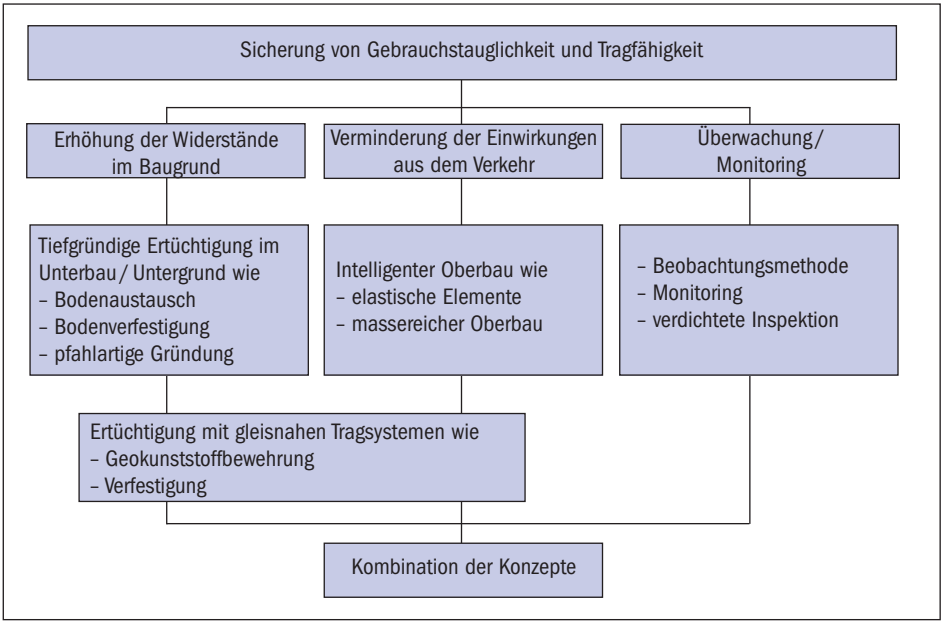


Abb. 13: Maßnahmen der Ertüchtigung

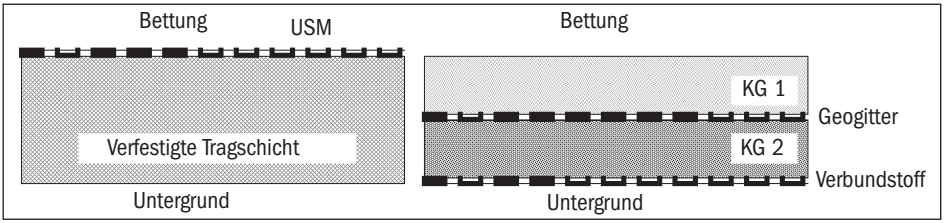


Abb. 14: Gleisnahe bewehrte oder verfestigte Tragsysteme

fungswirkung wird durch gleisnahe Tragsysteme verstärkt.

- **Messtechnische Maßnahmen** zur ergänzenden Überwachung bei geotechnisch schwierigen Bauwerken und neuen Bauverfahren sowie verdichtete Inspektionen mit Vorhaltung entsprechender Instandhaltungsmaßnahmen.

Die bisher überwiegend angewandten tiefgründigen erdbautechnischen Maßnahmen im Unterbau und Untergrund sollen zukünftig noch konsequenter mit Maßnahmen im Gleis bzw. in Gleisnähe und durch messtechnische Maßnahmen ergänzt und dadurch optimiert werden. Gleisnahe bewehrte oder verfestigte Tragsysteme (Abb. 14) verteilen und vergleichmäßigen mögliche Setzungen auf für die Gleislage und den Fahrkomfort größere Längen und reduzieren damit die dynamischen Beanspruchungen unterhalb dieser Tragsysteme.

Elastische Elemente im Oberbau reduzieren als Feder- und Dämpfungselemente die quasistatischen und insbesondere dynamischen Einwirkungen.

Gutachterliche Studien und Zuarbeiten
Beurteilung der Standsicherheit und der dynamischen Stabilität im Verkehrswegebau
FE-Modellierung, Verformungs-, Konsolidierungs- und Setzungsberechnung
Baugrundbegutachtung und Gründungsberatung
Objekt- und Tragwerksplanung
Verkehrs- und Tiefbau
Spezialtiefbau, Untergrundertüchtigung im Verkehrswegebau
Stützbauwerke, Bauweisen mit Geokunststoffen
Baubetreuung
Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen, messtechnische Überwachung
Abfallrechtliche Betreuung
Bauüberwachung
GEPRO
Ingenieurgesellschaft für Geotechnik Verkehrs- und Tiefbau und Umweltschutz mbH
Caspar-David-Friedrich-Straße 8
01219 Dresden
Tel. 0351 / 877 75 - 0
Fax 0351 / 877 75 - 55
Internet: www.gepro-dresden.de e-mail: x@gepro-dresden.de

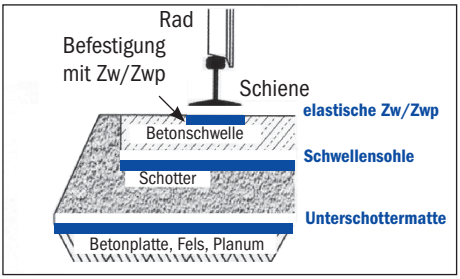


Abb. 15: Positionen elastischer Elemente im Oberbau

Messtechnische Maßnahmen bieten nicht nur eine zusätzliche Absicherung gegen unzulässige Verformungen und Versagenszustände, sondern ermöglichen über Modellkalibrierung auch eine Rückrechnung realistischer, verbesserter Bodenkennwerte aus den Messwerten. Mit diesen können im Anschluss die notwendigen Nachweise realitätsnäher geführt werden. Die Dauerüberwachung über bestimmte Zeiträume ermöglicht eine deutlich höhere Absicherung der Messwerte und der daraus abgeleiteten Bodenkennwerte und damit genauere Kenntnisse zum Gesamtverhalten Fahrzeug – Gleis – Oberbau – Unterbau – Untergrund. Dies ist bei Erdbauwerken mit Boden als Baugrund und zugleich Baustoff besonders wichtig, da sowohl die Widerstände im Boden als auch die Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr zeitlich zum Teil stark veränderliche Größen darstellen.

3.2 Oberbautechnische Maßnahmen zur Verminderung der Einwirkungen

Mit oberbautechnischen Maßnahmen können die Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr nahe der Lasteintragung Rad/Schiene vermindert werden. Dazu muss die tatsächliche dynamische Lastein- und Abtragung im System Fahrzeug/Fahrweg betrachtet werden. In Abb. 8 ist die quasistatische Beanspruchung durch die Achs- und Drehgestellabstände im Bereich bis ca. 20 Hz und die zusätzliche dynamische Beanspruchung von ca. 40 bis 125 Hz dargestellt. Die zeit- und frequenzabhängigen Beanspruchungen nehmen mit der Fahrgeschwindigkeit zu und

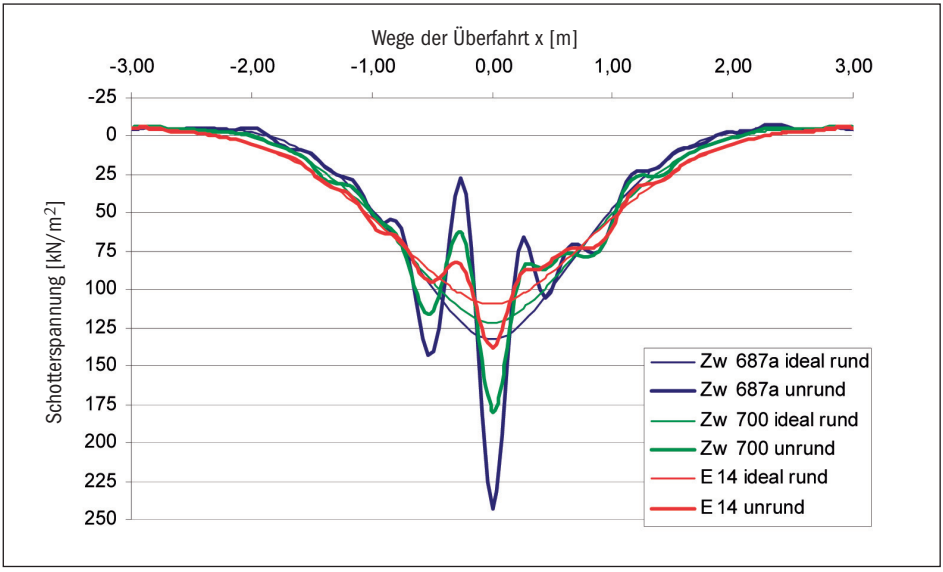


Abb. 16: Schotterspannung bei unterschiedlicher Elastizität

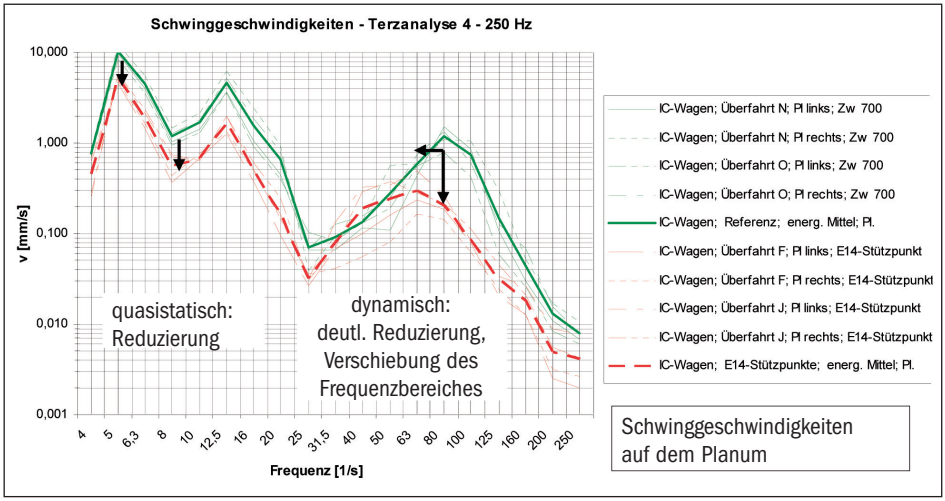


Abb. 17: Wirkung elastischer Elemente im Frequenzbereich

wirken auf den Oberbau, Unterbau und Untergrund.

Mit der Anordnung zusätzlicher elastischer Elemente im Oberbau kann diese dynamische Beanspruchung reduziert werden. Dabei können zur Reduzierung der Einwirkungen die elastischen Elemente in unterschiedlichen Positionen unter der Schiene (als Zwischenlage), unter der Schwelle (als Schwellensohle) oder unter der Bettung (als Unterschottermatte) angeordnet werden (Abb. 15).

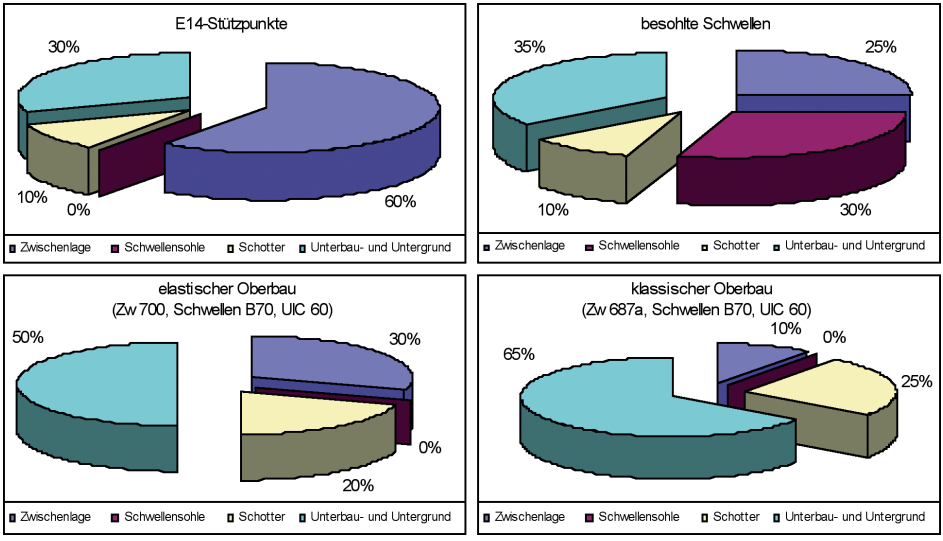


Abb. 18: Verteilung der Elastizität

1

Bei quasistatischer Beanspruchung senkt sich die Schiene infolge der Elastizität von Bettung und Untergrund ein, wodurch Verformungen und Spannungen beeinflusst werden. Ein höherelastisches Element vermindert die Gleissteifigkeit.
Eine geringere Gleissteifigkeit bewirkt unter quasistatischer Beanspruchung
- eine höhere Einsenkung der Schiene,
- eine höhere Schienenfußspannung,
- eine höhere Schwinggeschwindigkeit der Schiene, aber
- eine geringere Stützpunktkraft und Schotterspannung und damit
- geringere Verformungen und Spannungen im Unterbau und Untergrund.

Die zusätzlichen dynamischen Beanspruchungen führen in bestimmten Frequenzbereichen zu zusätzlichen Beanspruchungen in Form von Verformungen, Spannungen und Schwinggeschwindigkeiten.
Ein höherelastisches Element bewirkt unter zusätzlicher dynamischer Beanspruchung als Federelement
- eine höhere Einsenkung der Schiene,
- eine flachere Biegelinie der Schiene und
- eine geringere Stützpunktkraft und Schotterspannung

sowie als Dämpfungselement
- eine Verminderung der Schwingungsanregung (Schwinggeschwindigkeit) und
- eine Dämpfung insbesondere im mittleren und hohen Frequenzbereich.

Elastische Elemente bewirken eine deutliche Reduzierung der Schotterspannungen und in der Folge damit der Verformungen und Spannungen im Unterbau und Untergrund. Auch die effektive Schwinggeschwindigkeit wird durch die elastischen und hochelastischen Elemente deutlich und gleisnah reduziert, so dass Unterbau und Untergrund entlastet werden.
Abb. 16, 17, 18 und 19 zeigen ausgewählte Berechnungs- und Messergebnisse [8] zu den angesprochenen Wirkungen.
In Abb. 16 sind im Zeitbereich die Schotterspannungen bei der Überfahrt eines Rades für einen Oberbau mit harter, elastischer und hochelastischer Zwischenlage angegeben. Für ideal runde Räder (quasistatische Beanspruchung) kommt es mit zunehmender Elastizität zu einer Reduzierung. Bei dy-

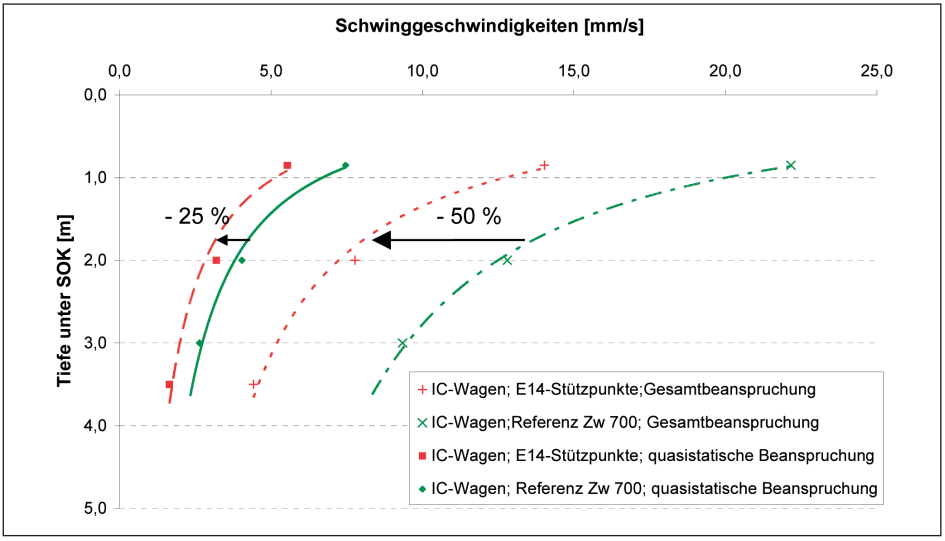


Abb. 19: Reduktion der Schwinggeschwindigkeit

Schwihag

SCHWIHAG AG

IHR BERATER, PROBLEMLÖSER UND LIEFERANT FÜR GLEIS- UND WEICHENTECHNIK.

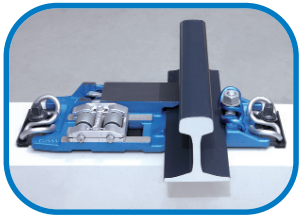
INNOVATIVE GLEIS- UND WEICHENTECHNIK

SCHWIHAG, Ihr Partner in Gleis und Weiche, entwickelt, produziert und vertreibt seit 1971 Schlüsselkomponenten für den Oberbau.

Neben den klassischen Produkten für die Zungenvorrichtung in der Weiche wie IBAV-Gleitstuhlplatten und IBAV-Rollenplatten mit SCHWIHAG-Spannbügeln SSb2 bietet SCHWIHAG jetzt auch einen neuen Klinkenverschluss (SKV) in Verbindung mit der SCHWIHAG-Verschlussschwelle an.

Das Produktprogramm der Gleistechnik umfasst Schienenbefestigungssysteme für Schotteroberbau und Feste Fahrbahn, schraublose Radlenker-/Leitschienenbefestigungen und Kabelschachtschwellen.

Die SCHWIHAG AG wurde 2008 von der Deutschen Bahn AG in der Kategorie Komponenten mit dem Lieferantenprädikat **„DB-Lieferant des Jahres“** für innovative Schienenbefestigungssysteme und Weichenkomponenten ausgezeichnet.



Schwihag AG
Gleis- und Weichentechnik

Lebernstrasse 3, CH-8274 Tägerwilen
Telefon ++41(0)71 666 88 00 Telefax ++41(0)71 666 88 01
info@schwihag.com www.schwihag.com

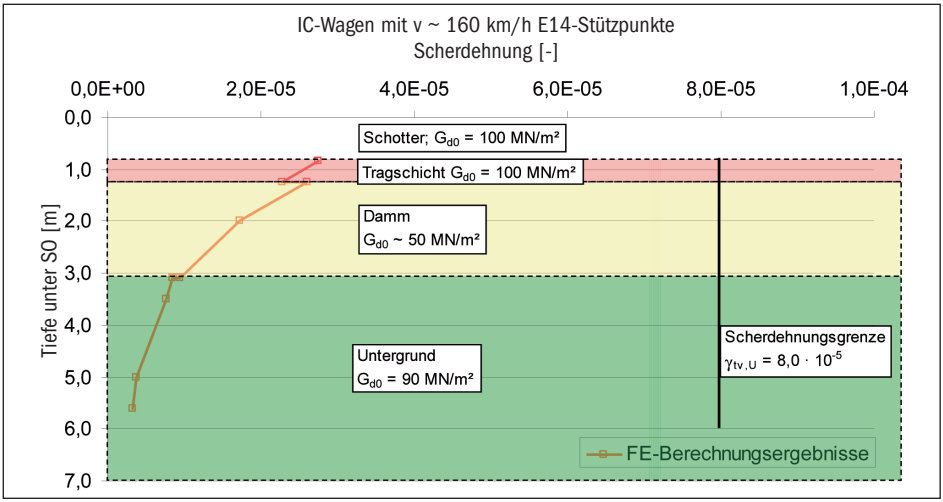


Abb. 20: Nachweis der Scherdehnungen am Beispiel E14-Stützpunkt

namischer Beanspruchung durch unrunde Räder ist die Reduzierung deutlich größer.

In Abb. 17 sind im Frequenzbereich die Schwinggeschwindigkeiten aus Messungen für elastische und hochelastische Zwischenlagen angegeben. Der hochelastische E14-Stützpunkt bewirkt im quasistatischen Bereich eine Reduzierung und im dynamischen Bereich eine deutliche Reduzierung und eine Verschiebung des Frequenzbereiches.

Abb. 18 zeigt die Verteilung der Elastizität aus Messungen für elastischen und hochelastischen Oberbau. Bei der elastischen Zwi-

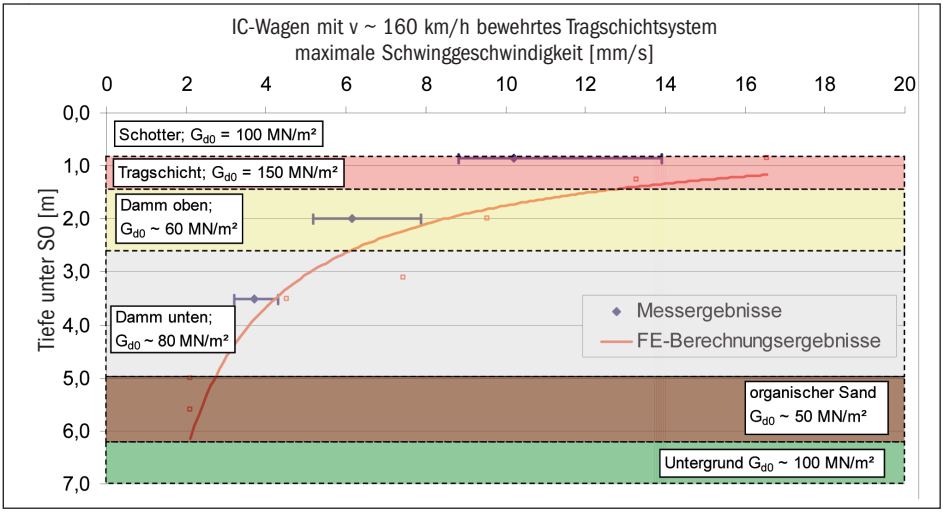


Abb. 21: Vergleich FE-Berechnung – Messung am Beispiel bewehrtes Tragschichtsystem

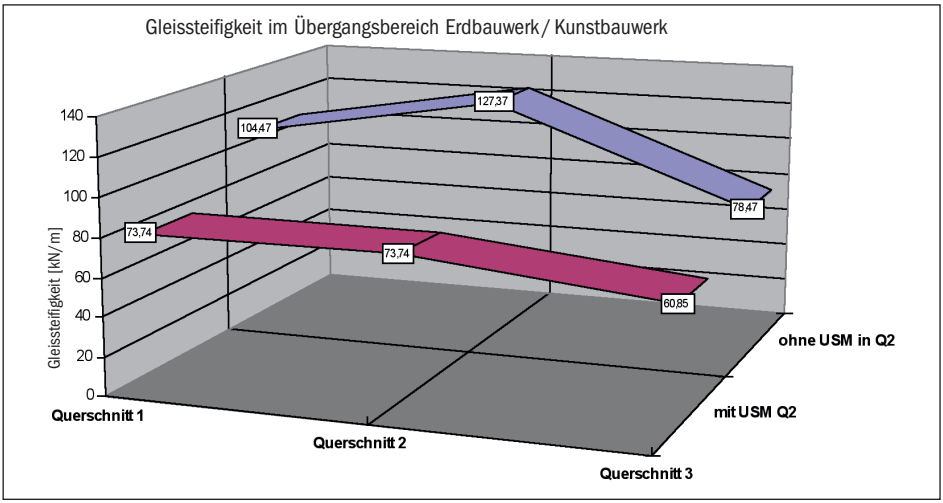


Abb. 22: Gleissteifigkeit im Übergangsbereich

schenlage Zw 700 leistet die Zwischenlage 30 %, der Schotter 20 % und der Unterbau/Untergrund 50 % der Elastizität. Mit dem Einbau zusätzlicher Elastizität durch den E14-Stützpunkt bzw. die Schwellensohle werden Schotter (nur noch 10 %) und Unterbau/Untergrund (nur noch 30 % bzw. 35 %) deutlich entlastet. Bei der harten Zwischenlage Zw 687 wird nach Berechnungen Schotter und Unterbau/Untergrund mit 90 % deutlich höher belastet.

Die in Abb. 19 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass die Schwinggeschwindigkeiten auch mit der Tiefe deutlich abnehmen und der E14-Stützpunkt zu einer Reduzierung von 25 % in der quasistatischen Beanspruchung und um 50 % in der Gesamtbeanspruchung führt.

4 Ergebnisse der Betriebserprobung

Auf der ABS Hamburg – Berlin wurde die Geschwindigkeit der Fernzüge von 160 km/h auf 230 km/h angehoben und dazu standardmäßig Schienen UIC 60 sowie Schwellen B 70 mit Zwischenlagen Zw 700 auf 35 cm dicken Schotterbett eingebaut. Mit dieser höheren Elastizität soll generell ein Teil der Zusatzbelastung aus der höheren Fahrgeschwindigkeit kompensiert werden.

Bei Problemstellen im Unterbau/Untergrund wurden nach den Grundsätzen der Abschnitte 2 und 3 die Ertüchtigungsmaßnahmen geplant und realisiert [9]. Die Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit wurde mit einer Kombination aus elastischen Elementen im Oberbau (Reduzierung der Einwirkungen), aus gleisnahen verstärkten Tragsystemen (Erhöhung der Widerstände) und Messprogrammen [Beobachtungsmethode nach DIN 1054 (2005-01)] abgesichert. Die Messprogramme umfassten Schwingungsmessungen, Inklinometermessungen und geodätische Messungen.

In einem Streckenabschnitt mit gleichförmigen, verlagerungsempfindlichen Sanden im Dammkörper wurde der hochelastische Stützpunkt E 14 bzw. eine besohlte Schwelle B 90 mit Zwischenlage Zw 700 eingebaut, um gezielt die Einwirkungen zu reduzieren und den Unterbau zu entlasten. Die Abb. 17 bis 19 zeigen anhand der Messergebnisse die Wirkung eindrücklich auf. Der Unterbau wird so entlastet, dass keine kri-

tischen Scherdehnungen und Spannungen im Dammkörper auftreten (Abb. 20).
In einem Streckenabschnitt mit einem ca. 4 m hohen Damm auf einer ca. 1,2 m dicken organogenen Weichschicht wurde eine 60 cm dicke zweifach geokunststoffbewehrte Tragschicht und die Zw 700 im Oberbau eingebaut [10]. Die Messungen belegen deutlich die Verminderung der Einwirkungen durch diese Maßnahmen. Abb. 21 zeigt für die Schwinggeschwindigkeiten die Prognoseberechnungen und die bisherigen Messergebnisse. Die Messergebnisse zeigen sogar eine höhere Wirkung auf, so dass das Berechnungsmodell anhand dieser Ergebnisse verifiziert werden kann.
Die geodätischen und die Gleislagemessungen belegen auch, dass Setzungen im Untergrund/Unterbau tatsächlich eingetreten sind. Diese konnten aber durch das zweifach bewehrte Tragsystem so längs verteilt werden, dass sie unkritisch für die Gleislage blieben.
In Übergangsbereichen zu Brücken wurden verfestigte Tragschichten mit Unterschottermatte unter der Bettung eingebaut [11]. Abb. 22 zeigt die damit erzielte Vergleichmäßigung der Gleissteifigkeit im Übergangsbereich. Dadurch werden die dynamischen Zusatzlasten so begrenzt, dass Verformungen im Erdkörper unkritisch für die Gleislage bleiben.

Ausblick

Eine wesentlich differenzierte und tiefgehendere Betrachtung der Einwirkungen aus dem Verkehr und der Widerstände im Bauwerk und Baugrund führt zu problemorientierten Lösungsvorschlägen der Ertüchtigung unter Einbeziehung von Maßnahmen im Oberbau.
Das Ziel dieses erweiterten Ansatzes für Ertüchtigungen beim Ausbau von Eisenbahnstrecken ist eine deutlich höhere Absicherung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit bei gleichzeitig wesentlich zielsicherem Einsatz der Mittel für Instandhaltung und Ausbau von Strecken und damit ein kostenoptimiertes Bauen und Instandhalten.
Bei konsequenter Verfolgung des vorgestellten Konzepts mit den kombinierten gleisdynamischen und bodendynamischen FE-Berechnungen kann der Nachweis der dynamischen Gebrauchstauglichkeit bei Eisenbahnstrecken mit hohen Geschwindigkeiten und/oder kritischen Baugrundverhältnissen geführt werden.
Die umfangreichen Messungen an Betriebsstrecken ermöglichen eine Kalibrierung des Berechnungsmodells bzw. eine Ableitung zuverlässiger Bodenkennwerte. So werden realistische Prognoseberechnungen und Nachweise für andere Zuggattungen und Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen möglich.

Literatur

[1] Göbel, C.; Lieberenz, K.: „Handbuch Erdbauwerke der Bahnen“, Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG, 2004.
[2] Fryba, L.: “Vibrations of Solids and Structures under Moving Loads”, 3. Auflage, Telford Verlag London, 1999.
[3] Breitsamter, N.: Model Wheel Unevennesses Calculations”, Aktennotiz N 11223 AC, imb-dynamik, 1998.
[4] Knothe,K.: „Gleisdynamik“, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2001
„Empfehlungen des Arbeitskreises Baugrunddynamik“, DGGT, Berlin 2002.
[5] Hsu, Ch-Ch.; Vucetic, M. „Volumetric threshold shear strain for cyclic settlement“,
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, pp. 58-70, No.1/2004.
[6] Hu, Y.; Gartung, E.; Prühs, H.; Müllner, B.: „Sicherung von Erdbauwerken“, Eisenbahningenieur (54) 10/2003.
[7] „Reduzierung der Einwirkungen auf Erdbauwerke durch den Einsatz von hochelastischen Elementen im Oberbau; Vorab- Abschlussbericht“, GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, 2007.
[8] Lieberenz, K.; Wegener D.; Müller-Boruttau, F. H.: „Dynamische Stabilität der Fahrbahn“, Edition ETR, ABS Hamburg – Berlin, Eurailpress 2005.
[9] Weisemann, U.: „Bewehrte Tragschichten über Weichschichten“, Vorträge-Bautex Chemnitz, 2008.
[10] Kipper, R., Lieberenz, K., Schweister, J.: Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit von Eisenbahnstrecken, Vorträge – 6. Tiefbautagung des VDEI, Dresden, 2007.
[11] Lieberenz, K.; Wegener D.; „Zur Abtragung der Lasten im System Oberbau-Unterbau-Untergrund“, ÖVG-Tagung Fahrweg, Salzburg 2007.