

DyStaFiT - Großversuch zum Nachweis der dynamischen Stabilität des Eisenbahnunterbaus und Optimierung von Bodenverbesserungsmaßnahmen

Prof. Dr.-Ing. T. Neidhart, OTH Regensburg
Dr.-Ing. D. Wegener, GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden
Dipl.-Ing. B. Kind, DB ProjektBau GmbH, Erfurt
Dipl.-Ing. R. Dürrwang, ARCADIS Deutschland GmbH, Darmstadt

Bei der NBS Ebensfeld - Erfurt wird auf der gesamten Strecke unter der Festen Fahrbahn eine zementstabilisierte Tragschicht aus Boden eingebaut. Für die ungünstigsten Untergrundverhältnisse dieser Strecke wurden zum Nachweis der dynamischen Stabilität und zur Optimierung der Dicke der Tragschicht u. a. dynamische Belastungsversuche zur Simulation des künftigen Zugverkehrs mit dem Großprüfgerät DyStaFiT ausgeführt. Es werden Aufbau, Instrumentierung und Durchführung der Versuche sowie wesentliche Messergebnisse vorgestellt.

Weiterhin werden Nachrechnungen der DyStaFiT-Versuche unter Berücksichtigung der Frequenzen der Belastungen und dem nichtlinearen Verhalten des Bodens und eine Prognose für die dynamische Beanspruchung des Eisenbahnunterbaus unter dem künftigen Zugverkehr bis $v = 300$ km/h geführt.

1. Einleitung

Die Neubaustrecke 8.1 Ebensfeld - Erfurt als Teilabschnitt der VDE 8 Bahnmagistrale Nürnberg - Erfurt - Leipzig/Halle - Berlin wird nahezu vollständig mit Fester Fahrbahn und einer Entwurfsgeschwindigkeit von maximal 300 km/h hergestellt. Entsprechend Ril 836 (DB Netz AG, 2013) ist beim Bau der Festen Fahrbahn bzw. bei Schotteroberbaus mit einer Zuggeschwindigkeit $v > 200$ km/h ein Nachweis der dynamischen Stabilität notwendig.

Der Bau einer bindemittelstabilisierten Tragschicht aus Boden bzw. einer Tragplatte

DyStaFiT - Full-Scale Test to verify the Dynamic Stability of the Railway Substructure and to optimize Cement-Stabilized Base Layers

The complete high-speed-track Ebensfeld – Erfurt continuously bases on a cement-stabilized base layer. Dynamic load tests with the DyStaFiT- full-scale device were performed at the worst soil situation to verify the dynamic stability of the railway substructure and to optimize the cement-stabilized base layer. In this article construction, instrumentation, load tests and significant results will be presented. Further recalculations of the full-scale field tests are conducted by taking into account the frequency dependence of the load and the nonlinear soil behavior. Furthermore, dynamic stress and strains in the substructure due to traffic loading up to a train speed of $v = 300$ km/h will be predicted.

entspricht nicht dem aktuellen Regelwerk der DB. Für diese Bauweise und die Vorschläge zur Nachweisführung der dynamischen Stabilität des Unterbaus der Strecke wurde eine Unternehmensinterne Genehmigung (UIG) bei der DB Netz AG und eine Zustimmung im Einzelfall (ZIE) beim Eisenbahnbundesamt beantragt und erteilt (DB Netz AG (2010), Eisenbahn-Bundesamt (2013).

Die Nachweise mit dem Großprüfgerät DyStaFiT und die begleitenden dynamischen Berechnungen wurden für die ungünstigsten Untergrundverhältnisse auf dem gesamten Streckenabschnitt der NBS Ebensfeld-Erfurt geführt.

2. Durchführung der DyStaFiT-Versuche

Mit dem Erdbau der Strecke wurden 3 Testfelder mit Dicken der bindemittelstabilisierten Tragschicht von 0,60 m, 1,20 m und 1,50 m unter der nicht überhöhten Schiene errichtet. Die Versuchfelder wurden mit Horizontalinklinometern, Schwingungsaufnehmern und Porenwasserdruckgebern ausgerüstet (Bild 1). Auf den Versuchfeldern wurden mit dem Großprüfgerät DyStaFiT über eine Stahlplatte in der Größe eines ICE- Drehgestells über

das Gewicht der Platte, das Gewicht des Rüttlers (MS 24 var) und dem Anpressdruck eines großen Trägergeräts (Bild 2) statische Lasten, wie sie sich unter Oberbau und Achslasten von Zügen einstellen, aufgebracht. Durch den Betrieb des Rüttlers werden den statischen Lasten dynamische Lastanteile überlagert, wie sie in etwa bei der Überfahrt von Zügen entstehen. Die dynamischen Lasten können in verschiedenen Frequenzen und Schwinggeschwindigkeiten in den Untergrund eingeleitet werden.

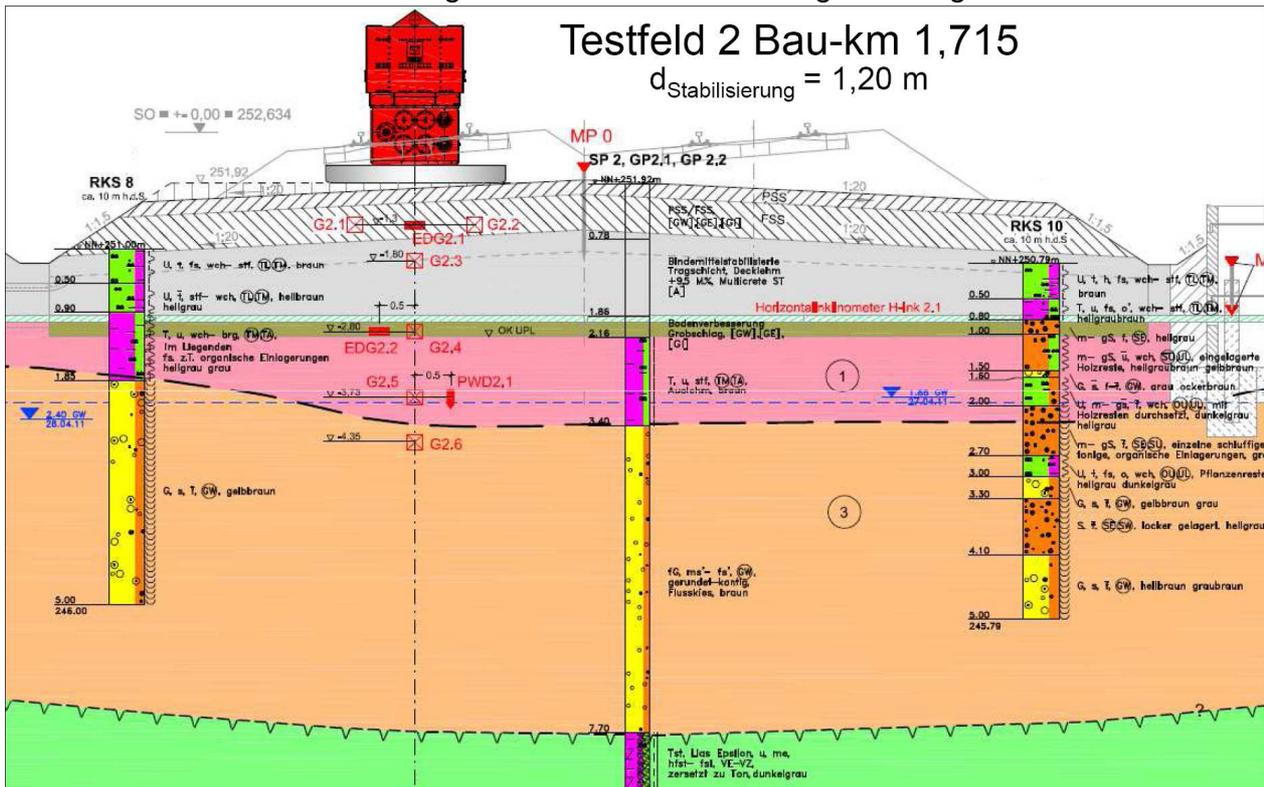


Bild 1 Versuchsfeld 2 mit Baugrundsichtung, Messaufnehmern und DyStaFiT-Gerät.



Bild 2 Links - DyStaFiT-Gerät auf den Versuchsfeldern. Rechts – Detail Platte mit Rüttler.

Im Sommer 2011 erfolgten Großversuche mit dem dynamischen Prüfgerät DyStaFiT in 3 messtechnisch ausgerüsteten Versuchsfeldern zur Simulation von Zugüberfahrten bei unterschiedlichen Frequenzen und Schwinggeschwindigkeiten (Neidhart, 2012). Exemplarisch ist in Bild 1 das 2. Versuchsfeld mit einer Dicke von 1,20 m der bindemittelstabilisierten Tragschicht unter der nicht überhöhten Schiene dargestellt.

Insgesamt wurden 6 Versuchsphasen mit insgesamt über 500.000 Lastwechseln pro Versuchsfeld wie folgt durchgeführt:

Phase I: Statischer Großplattenversuch mit $p = 31, 57, 82, 31, 57, 82, 31 \text{ kN/m}^2$,

Phase II: Frequenzabhängige Schwingungsausbreitung mit jeweils 5.000 - 10.000 Zyklen und $f = 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36$ und 39 Hz mit konstanter Schwinggeschwindigkeit von $v_{\max} = 11 \text{ mm/s}$ bzw. $v_{\text{eff}} = 7 \text{ mm/s}$ in der Frostschutzschicht (FSS),

Phase III: Simulation der Festen Fahrbahn mit jeweils 250.000 Zyklen und $f = 30 \text{ Hz}$ mit konstanter Schwinggeschwindigkeit von $v_{\text{eff}} = 12 \text{ mm/s}$ in der FSS,

Phase IV: Simulation des Schotteroberbaus mit jeweils 250.000 Zyklen und $f = 27,5 \text{ Hz}$ mit konstanter Schwinggeschwindigkeit von $v_{\text{eff}} = 24 \text{ mm/s}$ in der FSS,

Phase V: Simulation des Schotteroberbaus mit jeweils 100.000 Zyklen und $f = 15 \text{ Hz}$ mit konstanter Schwinggeschwindigkeit von $v_{\text{eff}} = 24 \text{ mm/s}$ in der FSS und

Phase VI: Simulation des Schotteroberbaus (Grenzbelastung) mit jeweils 100.000 Zyklen und $f = 27,5 \text{ Hz}$ mit konstanter Schwinggeschwindigkeit von $v_{\text{eff}} = 36 \text{ mm/s}$ in der FSS.

Die Festlegung der Anregungsfrequenz in den Versuchsphasen III - VI erfolgte aufgrund der Zuggeschwindigkeit und des Achsabstandes der fahrenden Züge. Dabei entspricht die Versuchsphase III mit $f = 30 \text{ Hz}$ einem ICE mit 300 km/h und einem Achsabstand von $a = 2,50 - 3,00 \text{ m}$, die Versuchsphase IV und VI mit $f = 27,5 \text{ Hz}$ einem ICE mit 280 km/h und ebenfalls $a = 2,50 - 3,00 \text{ m}$ und die Versuchsphase V mit $f = 15 \text{ Hz}$ einem Güterzug mit 140 km/h und $a = 2,50 \text{ m}$ oder mit 100 km/h und $a = 1,80 \text{ m}$.

Die dynamische Beanspruchung der einzelnen Versuchsphasen wurde systematisch mit jeder Versuchsphase gesteigert. In Bild 3 ist zu sehen, dass es unterhalb der Bindemittelstabilisierung in allen Versuchsphasen zu keiner nennenswerten Akkumulation von bleibenden Verformungen kommt.

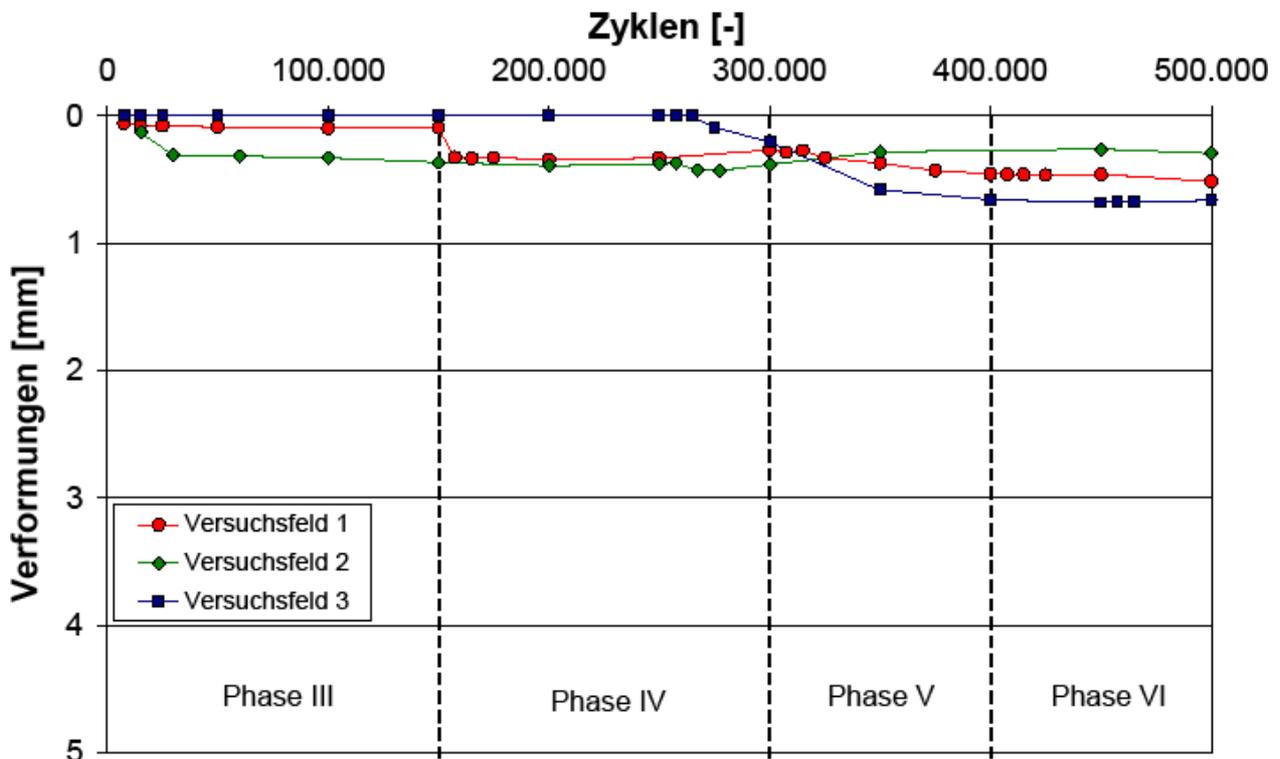


Bild 3 Verformungen über die Zyklenzahl unterhalb der Bindemittel - stabilisierten Tragschicht.

Zusätzlich wurden in den Belastungspausen die Setzungen der DyStaFiT-Platte mit einem elektronischen Nivelliergerät mit erfasst. Lediglich in der Ausgleichsschicht aus Sand, die auf der Frostschuttschicht zu Gewährleistung eines vollflächigen Kontakts der DyStaFiT-Platte aufgebracht wurde, kam es in der Versuchsphase III zu einer geringen Zunahme von bleibenden Verformungen bis zu ca. 5 mm nach 250.000 Lastwechseln, wobei die Verformungsraten mit zunehmender Zyklenzahl abnehmen.

Gleiches gilt für die Versuchsphasen IV und V, auch hier kommt es zu einer Abnahme der Verformungsraten mit zunehmender Zyklenzahl, die gesamten bleibenden Verformungen bis einschließlich Versuchsphase V betragen ca. 10 mm.

Erst beim Aufbringen der Grenzbelastung in der Versuchsphase VI, die deutlich höher als die charakteristische Belastung infolge des künftigen Zugverkehrs ist, kam es in der Ausgleichsschicht zu einer deutlichen Zunahme der bleibenden Verformungen.

3. Nachrechnung der DyStaFiT-Versuche

3.1 Numerische Modellierung

Die Nachrechnung der DyStaFiT-Versuche erfolgt mit dem FE-Programm PLAXIS 2D, Version 2012 mittels axial-symmetrischer Modellierung im Rahmen der Nachweisführung der dynamischen Stabilität (GEPRO, 2013). Die FE-Modelle einschließlich Lasteintragung, Baugrundsichtung und FE-Ränder sind in Bild 4 exemplarisch für das Versuchsfeld 2 dargestellt. Um Reflektionen an den FE-Rändern zu vermeiden, wurden absorbierende Ränder auf der Unterseite und der rechten Seite des FE-Modells verwendet und das FE-Netz mit einer Breite von 25 m entsprechend groß gewählt. Der einzelne Zeitschritt wurde mit $\Delta t = 0,002$ s so klein gewählt, dass auch bei der größten Anregungsfrequenz von $f = 39$ Hz die Wellenausbreitung numerisch ausreichend genau erfasst werden kann. Entsprechend der Empfehlung aus (Neidhart, 1994) darf der Zeitschritt Δt höchstens $1 / (10 \cdot f)$ bis $1 / (5 \cdot f)$ betragen.

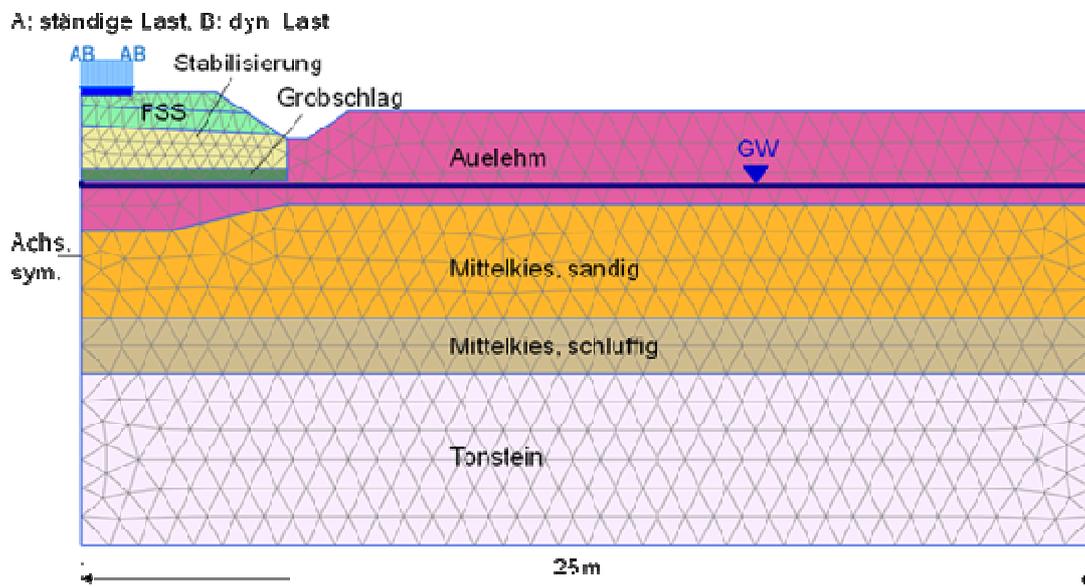


Bild 4 FE-Modell des Versuchsfelds 2.

3.2 Bodendynamische Kennwerte

Die für die FE-Berechnungen notwendigen bodendynamischen Kennwerte wurden auf Basis folgender durchgeführter Labor- und Feldversuche bestimmt:

- Refraktionstomografische Messungen vor Herstellung der bindemittelstabilisierten Tragschicht (GGL GmbH 2011),
- Crosshole Messungen nach Herstellung der bindemittelstabilisierten Tragschicht (Fugro Consult 2011) und

- Resonant-Column-Versuche an der bindemittelstabilisierten Tragschicht und am Auelehm (KIT 2012).

Die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten bodendynamischen Kennwerte (Dichte ρ , Scher- und Kompressionswellengeschwindigkeiten c_s und c_p , Querdehnzahl ν und Grundwert des Schubmoduls G_0) sind in *Tabelle 1* zusammengestellt.

Tabelle 1 Bodendynamische Kennwerte für die einzelnen Bodenschichten.

Bodenschicht	ρ [g/cm ³]	c_s [m/s]	c_p [m/s]	ν [-]	G_0 [MN/m ²]
Schotter	1,80	230	430	0,30	95
Tragschicht	2,20	280	520	0,30	173
Bindemittelstabil.	1,90	700	1210	0,25	930
Grob-schlag	1,80	290	500	0,25	150
Auelehm	1,90	180	440	0,40	62
Kies, sandig	2,00	260	860	0,45	135
Kies, schluffig	2,00	350	1600	0,475	245
Tonstein	2,13	540	2000	0,46	620

3.3 Berechnungsergebnisse und Vergleich mit den Messergebnissen

Auf Grundlage der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten und Schwingwege können unter Verwendung der bodendynamischen Kennwerte nach Abschnitt 3.2 die bodendynamischen Berechnungen mit dem in Bild 3 dargestellten FE-Modell durchgeführt werden. Die dynamische Lastamplitude auf der DyStaFiT-Platte, die aus den Messergebnissen nur mit größerem Aufwand ermittelt werden kann, lässt sich somit versuchstechnisch rückrechnen.

Zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit von 9 - 39 Hz in der Versuchsphase II wurde eine resultierende effektive Schwinggeschwindigkeit $v_{res,eff} \approx 7$ mm/s in Mitte der FSS angestrebt, die jedoch über die Steuerung der Unwucht des DyStaFiT-Gerätes nicht exakt einstellbar ist. Die Nachrechnung der DyStaFiT-Versuche erfolgte unter Berücksichtigung der tatsächlich gemessenen Werte.

Exemplarisch ist in Bild 5 ein Vergleich der Mess- und Berechnungsergebnisse für das Versuchsfeld 2 in der Versuchsphase II mit einer Anregungsfrequenz von 9 Hz dargestellt.

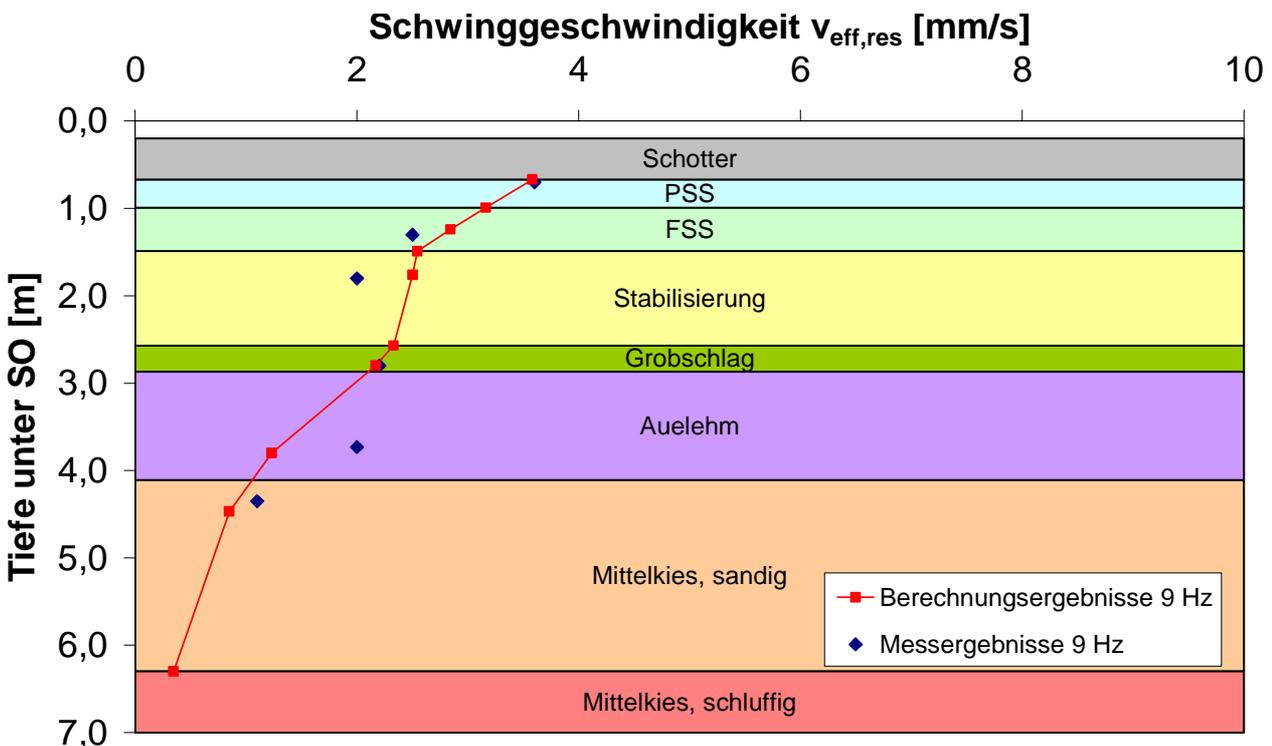


Bild 5 Mess- und Berechnungsergebnisse für das Versuchsfeld 2 in der Versuchsphase II.

Im Ergebnis der Rückrechnungen der DyStaFiT-Versuche zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Spannungsamplitude vom Versuchsfeld und von der Frequenz.

Zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der erzeugten Schwinggeschwindigkeiten wurden bodendynamische Berechnungen mit einer dynamischen Lastamplitude von jeweils 10 kN/m² auf der DyStaFiT-Platte unter Variation der Anregungsfrequenz geführt.

Exemplarisch sind in 6 die Ergebnisse für

das Versuchsfeld 2 zusammengestellt. Dabei wurden die Ergebnisse zwischen einer statischen Anregung von 0 Hz (mit 0 mm/s) und 9 Hz linear interpoliert.

Aufgrund der Schichteigenschaften (Dicken und Steifigkeiten) resultiert bei ca. 18 Hz eine Überhöhung. Eine eindeutige Schichtresonanz besteht nicht, da es sich um mehrere Schichten mit unterschiedlicher Wellengeschwindigkeit und die darunter liegende Schicht nicht unendlich steif ist.

frequenzabh. eff. Schwinggeschw. Phase II, $\Delta\sigma = 10$ kPa

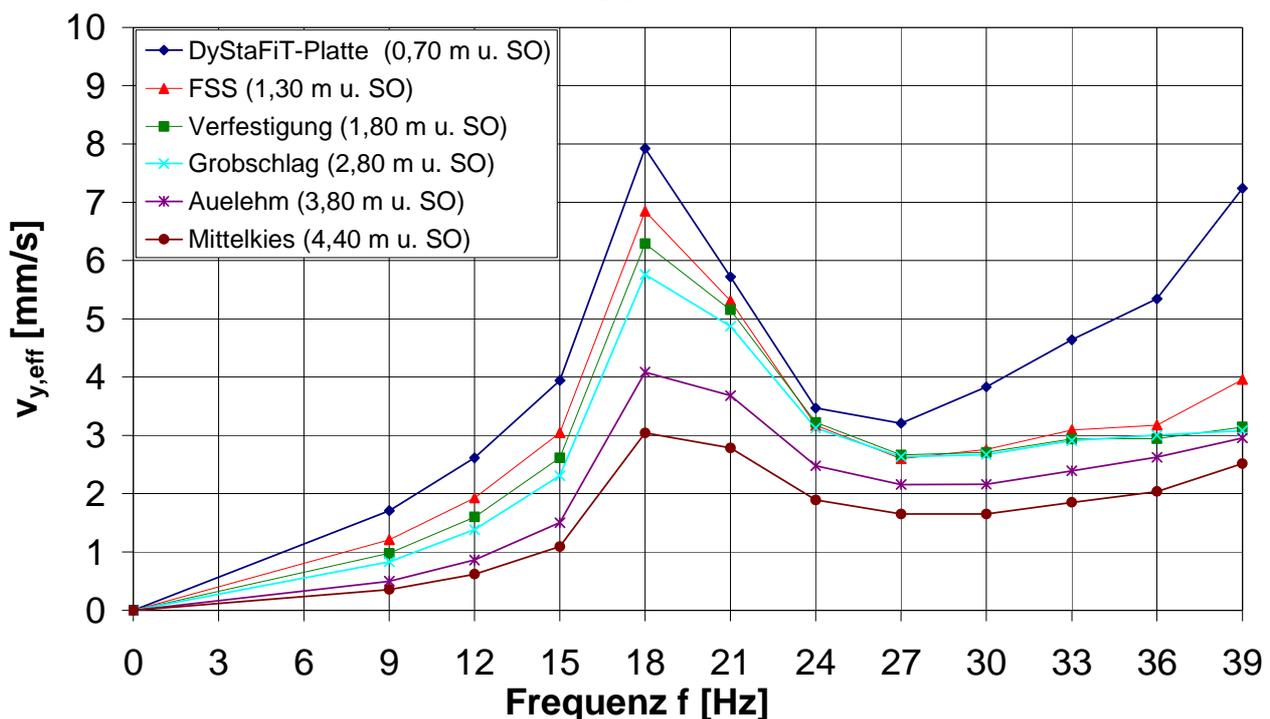


Bild 6 Berechnungsergebnisse exemplarisch für das Versuchsfeld 2 für eine dynamische Lastamplitude von $\Delta\sigma = 10$ kN/m² in Abhängigkeit von der Frequenz.

Die Überhöhung bei 18 Hz resultiert vermutlich aus den gesamten Bodenschichten mit einer Mächtigkeit von ca. 6,0 m unterhalb der Bindemittelstabilisierung bis zur Oberkante des deutlich steiferen Tonsteins. Die Anregungsfrequenz, bei der es zu einer Überhöhung der Schwinggeschwindigkeiten kommt, beträgt entsprechend (Neidhart, 1994) $f_E = c_p / (4 \cdot H) = 18$ Hz mit $c_p = 440$ m/s.

Bis zur Überhöhung bei 18 Hz zeigt sich eine lineare bzw. teilweise überlineare Zunahme der effektiven Schwinggeschwindigkeit mit der Anregungsfrequenz.

Die numerischen Berechnungen in den Versuchsphasen III bis V bestätigten das nichtlineare Bodenverhalten der Aus-

gleichsschicht auf der FSS und das annähernd linear elastische Verhalten in den darunter befindlichen Bodenschichten. In der FSS nahm einerseits die Steifigkeit bzw. der Schubmodul $G(\gamma)$ mit zunehmender Scherdehnung ab.

Andererseits konnte nachgewiesen werden, dass es infolge der eingetragenen Lastzyklen zur Simulation des Zugverkehrs bei Fester Fahrbahn bis 280 km/h und bei Schotteroberbau bis 250 km/h zu keiner nennenswerten Akkumulation bleibender Verformungen entsprechend Bild 3 kam.

Da die Anregung bei den Zugüberfahrten jedoch bei verschiedenen Anregungsfrequenzen erfolgt und sich die Gesamtbeanspruchung aus der Summe der Anregung

gen bei den verschiedenen Anregungsfrequenzen zusammensetzt, ist eine direkte Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse mit dem DyStaFiT-Gerät, bei der nur eine sinusförmige Anregung in einer Frequenz erfolgt, nicht möglich.

4. Prognoseberechnungen für den späteren Zugverkehr

Auf Basis der durchgeführten DyStaFiT-Versuche und der numerischen Modellierung und Nachrechnung nach Abschnitt 3 wurden Prognoseberechnungen für den künftigen Zugverkehr für Feste Fahrbahn bis 300 km/h und Schotteroberbau bis 280 km/h geführt.

Im Bereich der Versuchsfelder wird Schotteroberbau hergestellt und die maximale Zuggeschwindigkeit beträgt $v = 250$ km/h. Um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auch für andere Streckenbereiche mit günstigeren bodendynamischen Eigenschaften, aber höherer Zuggeschwindigkeit zu gewährleisten, wurden folgende Oberbauvarianten und Lastenzüge nach DIN EN 1991-2 (2010) modelliert und berechnet:

- Feste Fahrbahn und Hochgeschwindigkeitszug Typ 4 mit $v = 300$ km/h,

- Feste Fahrbahn mit Lokgezogenen Güterzug Typ 7 mit $v = 160$ km/h,
- Schotteroberbau und Hochgeschwindigkeitszug Typ 4 mit $v = 280$ km/h und
- Schotteroberbau mit Lokgezogenen Güterzug Typ 7 mit $v = 160$ km/h.

Diese Lastenzüge haben sich auch auf der NBS Erfurt-Halle-Leipzig als wesentliche maßgebende Lastenzüge erwiesen (Lieberenz et. al., 2013).

Der rechnerische Nachweis der dynamischen Stabilität erfolgte analog dem rechnerischen Untersuchungs- und Nachweisverfahren zur Beurteilung der dynamischen Stabilität (DB Netz AG, 2013) durch Vergleich der einwirkenden Scherdehnungen γ mit der Scherdehnungsgrenze γ_{tv} . Bei Überschreitung dieser Grenze tritt unter undrainierten Bedingungen ein deutlicher Anstieg des Porenwasserdruckes und unter drainierten Bedingungen eine messbare Akkumulation von bleibenden Verformungen ein, siehe auch (Wegener, 2013).

Die berechneten Scherdehnungsamplituden γ wurden u. a. näherungsweise aus dem Quotienten von effektiver Schwinggeschwindigkeit zur Scherwellengeschwindigkeit c_s nach DIN 45672-1 (2009-12) ermittelt.

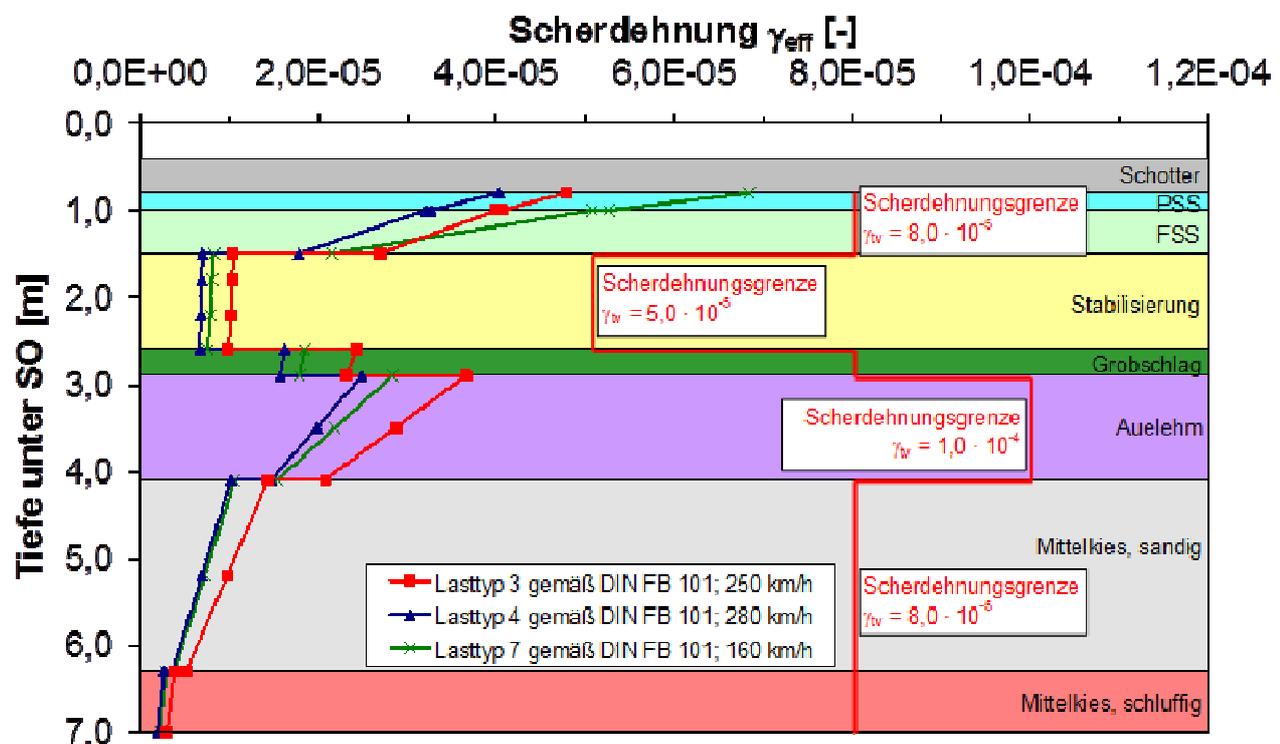


Bild 7 Vergleich berechnete Scherdehnungen γ_{eff} mit Scherdehnungsgrenzen γ_{tv} .

Die in Bild 7 dargestellten Scherdehnungsgrenzen γ_{tv} wurden für die bindemittelstabilisierte Tragschicht und den Auelehm in Resonant-Column-Versuchen ermittelt und für die anderen Bodenschichten aufgrund von Erfahrungswerten aus der Literatur (Hsu & Vucetic, 2004) mit $\gamma_{tv} = 8 \cdot 10^{-5}$ für grobkörnige Böden ohne Plastizität plausibel gewählt.

Bei der Nachweisführung konnte gezeigt werden, dass für alle Bodenschichten die einwirkenden Scherdehnungen γ kleiner als die Scherdehnungsgrenzen γ_{tv} sind und damit der Nachweis der dynamischen Stabilität erbracht ist (Bild 7).

5. Zusammenfassung

Für den Nachweis der dynamischen Stabilität für die Neubaustrecke (NBS) 8.1 Ebensfeld-Erfurt erfolgten dynamische Belastungsversuche mit dem Großprüfgerät DyStaFiT für drei Versuchsfelder mit bindemittelstabilisierten Tragschichten von 0,60 m, 1,20 m und 1,50 m Dicke. Die Testfelder befinden sich im nahezu geländegleichen Bereich in der Mainau mit den innerhalb der NBS 8.1 ungünstigsten bodendynamischen Eigenschaften der oberflächennah anstehenden Schichten.

Das Versuchsprogramm wurde dabei so ausgelegt, dass von der Größe der Belastungsfläche und der eingetragenen Schwinggeschwindigkeit sowohl Schotteroberbau mit einer Zuggeschwindigkeit von 250 km/h als auch Feste Fahrbahn mit einer Zuggeschwindigkeit von 300 km/h simuliert wurde.

Mit der numerischen Modellierung mittels bodendynamischer FE-Berechnung unter Verwendung der in Labor- und Feldversuchen ermittelten bodendynamischen Kennwerte konnten die DyStaFiT-Versuche nachgerechnet und das Berechnungsmodell verifiziert werden.

Auf Basis der Mess- und Berechnungsergebnisse für die DyStaFiT-Versuche und der numerischen Modellierung wurden Prognoseberechnungen für den künftigen Zugverkehr für Schotteroberbau mit $v = 250$ km/h und Feste Fahrbahn mit $v = 300$ km/h geführt. Mit diesen Berechnungen wurde der Nachweis der dynamischen Stabilität exemplarisch für das maßgebende

Querprofil auf der NBS 8.1 mit einer 1,20 m dicken bindemittelstabilisierten Tragschicht erbracht. Die Ergebnisse sind auch für andere Streckenabschnitte mit ähnlichen oder günstigeren bodendynamischen Eigenschaften für Schotteroberbau bis 280 km/h und Feste Fahrbahn bis 300 km/h mit vergleichbaren Oberbaueigenschaften übertragbar.

6. Literatur

ARCADIS Deutschland GmbH: DyStaFiT-Testfelder Bau-km 1,6+60 - 2,045, Baugrunderkundung DyStaFiT-Versuche, VDE 8.1 NBS Ebensfeld - Erfurt, BA Staffelstein (Abschnitt 1), 28.03.2013, unveröffentlicht.

DB Netz AG: Planungshilfe Rechnerisches Verfahren zur Bewertung der dynamischen Stabilität des Eisenbahnfahrweges bei Zugüberfahrt, Stand 01.08.2013.

DB Netz AG: Ril 836; Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke; planen, bauen und instand halten; 2. Aktualisierung, gültig ab 01.02.2013.

DB Netz AG, Vorstandsressort Technik; Unternehmensinterne Genehmigung (UiG), VDE 8.1 NBS Ebensfeld-Erfurt, BA 3110 Staffelstein, Nachweis der dynamischen Stabilität des Unterbaus der Strecke, 28.07.2010, unveröffentlicht.

Eisenbahn-Bundesamt; Zustimmung im Einzelfall (ZiE) zum Nachweis der dynamischen Stabilität des Unterbaus der Strecke mit dem dynamischen Prüfgerät DyStaFiT einschließlich Geotechnischer Bericht von Kempfert + Partner Geotechnik GmbH vom 14.11.2013, 20.11.2013, unveröffentlicht.

DIN-EN 1991-2; Eurocode 1; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2 Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2010.

DIN 45672-1 (2009-12): Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen - Messverfahren; Deutsches Institut für Normung.

Fugro Consult GmbH: Dokumentation Ergebnisse Seismische Cross-Hole-Tests, NBS Ebensfeld - Erfurt, BA 3110 Staffel-

stein, VP TU Eiberge, Januar 2011, unveröffentlicht.

Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH: Refraktionstomografische Messungen zur Bestimmung der Scher- und Kompressionswellengeschwindigkeiten, VDE 8.1 NBS Ebersfeld - Erfurt, BA 3110, VP TU Eiberge, 24.03.2011, unveröffentlicht.

GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH: Nachweisführung der dynamischen Stabilität, 10.07.2013, unveröffentlicht.

Hsu, C. C. & Vucetic: Volumetric threshold shear strain for cyclic settlement, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, pp. 58-70, No.1/2004.

Karlsruhe Institute of Technology (KIT): RC-Versuche an bindemittelstabilisierten Probekörpern und an Auelehm-Proben, VDE 8.1 Ebersfeld - Erfurt, VP TU Eiberge, Versuchsfelder DyStaFiT, 30.07.2012 bzw. 12.09.2012, unveröffentlicht.

Lieberenz, K. & Vehlow, A. & Vogt, L. & Wegener, D.: Zum Nachweis der dynamischen Stabilität bei NBS mit Fester Fahrbahn am Bsp. der VDE 8.2, Eisenbahntechnische Rundschau, ETR 12/2013, S. 32 - 39.

Neidhart, T.: Dokumentation und Auswertung der dynamischen Versuche mit DyStaFiT, VDE 8.1 Ebersfeld - Erfurt, VP TU Eiberge, Versuchsfelder DyStaFiT, 08.06.2012, unveröffentlicht.

Neidhart, T.: Lösung dreidimensionaler linearer Probleme der Bodendynamik mit der Randelementmethode, , Dissertation Veröffentlichungen des Instituts für Boden- und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 131 (1994).

PLAXIS 2D 2012: Reference Manual, Herausgeber Brinkgreve, R.B.J. & Engin, E. & Swolfs, W. M., Plaxis bv. The Netherlands, 2012. www.plaxis.nl.

Wegener, D.: Ermittlung bleibender Bodenverformungen infolge dynamischer Belastung, Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der TU Dresden, Heft 17, 2013.