

# BEWEHRTE TRAGSCHICHTEN ÜBER WEICHSCHICHTEN – ERSTE ERFAHRUNGEN AUS PRAXISEINSÄTZEN

Klaus Lieberenz, Dirk Wegener  
GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden

Ulrike Weisemann  
Hochschule für Technik und Wirtschaft (FH), Dresden

## KURZFASSUNG:

Eisenbahnstrecken mussten häufig über Moore geführt werden, ohne dass deren Weichschichten beseitigt werden konnten. Um höhere Geschwindigkeiten oder Achslasten realisieren zu können, ist nun im Regelfall eine gleisnahe oder tiefgründige Ertüchtigung des Untergrundes erforderlich. Bei der Ertüchtigung von Eisenbahnstrecken auf Weichschichten konnte mit gleisnahen geokunststoffbewehrten Tragsystemen eine in technischer, baubetrieblicher und ökologischer Hinsicht neue Qualitätsstufe erreicht werden. Bei den Bauvorhaben:

- Ausbaustrecke Hamburg - Berlin, 2. Ausbaustufe (Geschwindigkeitserhöhung von 160 km/h auf 230 km/h),
  - Gleiserneuerung Casekow - Tantow (Streckenausbau für Leitgeschwindigkeit von 160 km/h) und
  - Ausbaustrecke Saarbrücken - Ludwigshafen (POS Nord) (Geschwindigkeitserhöhung von 160 km/h auf 200 km/h)
- erfolgten statt tiefgründigen bautechnischen Maßnahmen jeweils nur gleisnahe Untergrundertüchtigungen mit zweifach geokunststoffbewehrten Tragschichten unter Belassen der organischen bzw. organogenen Schichten im Untergrund. Die Bauvorhaben wurden messtechnisch begleitet. Anhand der Messergebnisse konnte bestätigt werden, dass Geokunststoffe lastverteilend und hinsichtlich des Verformungsverhaltens vergleichmäßigend wirken. Als weiterer Effekt konnte die plattenartige Wirkung dieser Tragschichten messtechnisch nachgewiesen werden.

## 1 PROBLEMSTELLUNG

Der größte Teil der etwa 35.000 km Eisenbahnstrecken in Deutschland wird auf Erdbauwerken in Damm-, Einschnitts- oder Anschnittslage bzw. in Geländegleiche geführt. Dabei wurden die Eisenbahnstrecken auf Grund der Trassenführung häufig über Böden angelegt bzw. die Dämme wurden aus Böden hergestellt, die sich heute als Problemböden darstellen, wie z. B. verlagerungsempfindliche Sande, feinkörnige Böden ohne ausreichende Scherfestigkeit sowie Weichschichten im Untergrund (organische Böden).

Um höhere Geschwindigkeiten oder Achslasten realisieren zu können, ist deshalb im Regelfall eine gleisnahe oder tiefgründige Ertüchtigung des Untergrundes erforderlich. Grundsätzlich sind Unterbau und Erdbauwerke so durchzubilden und instand zu halten:

- dass die Fahrbahn für die vorgesehene Verkehrsbeanspruchung (Entwurfsgeschwindigkeit  $v_e$ , Radsatzlasten, Streckenbelegung) und den geforderten Reisekomfort uneingeschränkt verfügbar ist (Verfügbarkeit),
- dass die Erdbauwerke standsicher sind, also Bruchzustände im Bauwerk und/oder Baugrund ausgeschlossen sind (Nachweis der Tragfähigkeit) und
- dass die vom Erdbauwerk verursachten und die in ihm entstehenden Verformungen unschädlich für den Eisenbahnbetrieb und für Dritte sind (Nachweis der Gebrauchstauglichkeit).

Die Ertüchtigung der Erdbauwerke bestehender, im Regelfall zweigleisiger Eisenbahnstrecken wird dadurch erschwert, dass die Ertüchtigungsmaßnahmen am Baugleis unter ständiger Rücksichtnahme auf den Eisenbahnverkehr im Betriebsgleis durchgeführt werden müssen. Das muss bei der Wahl des Ertüchtigungsverfahrens beachtet

werden und unterstreicht die Notwendigkeit alternativer Ertüchtigungskonzepte.

Aus der in Lieberenz & Vogel (2008) beschriebenen komplexen Betrachtung der Elemente Oberbau, Unterbau und Untergrund im System Fahrzeug / Fahrweg und der damit verbundenen Methodik des Nachweises der dynamischen Stabilität von Eisenbahnstrecken ergibt sich ein erweiterter Ansatz für Maßnahmen der Ertüchtigung (Abbildung 1-1).

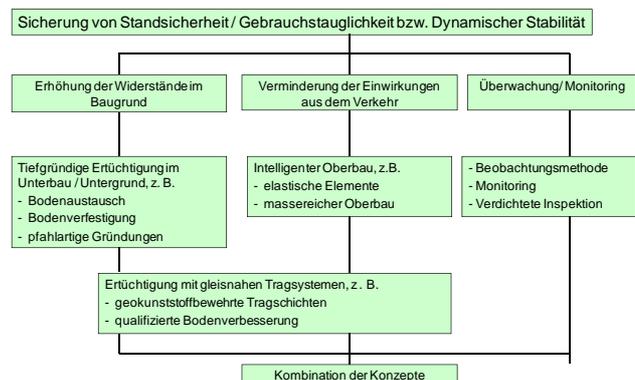


Abbildung 1-1 Mögliche Maßnahmen zur Ertüchtigung von Eisenbahnstrecken

Bei der Ertüchtigung von Eisenbahnstrecken mit Weichschichten kann auch mit gleisnahen geokunststoffbewehrten Tragsystemen eine in technischer, baubetrieblicher und ökologischer Hinsicht neue Qualitätsstufe erreicht werden. Im Folgenden werden Bauvorhaben vorgestellt, bei denen eine Ertüchtigung auf diese Weise erfolgte.

## 2 ERFahrungen aus Praxiseinsätzen

### 2.1 Ausbaustrecke Hamburg – Berlin, 2. Ausbaustufe

Im Rahmen dieses Bauvorhabens wurde die Zuggeschwindigkeit der Eisenbahnstrecke Hamburg - Berlin von 160 km/h auf 230 km/h angehoben. Im betreffenden Abschnitt war ein 4 bis 5 m hoher Damm auf einer ca. 1,2 m dicken organogenen Weichschicht zu ertüchtigen. Auf eine tiefgründige bautechnische Maßnahme wurde verzichtet. Stattdessen wurde ein zweifach geokunststoffbewehrtes Tragschichtsystem mit 60 cm Dicke eingebaut. Zusätzlich wurde die Elastizität des Oberbaus durch die Erhöhung der Schotterdicke auf 35 cm und den Einbau von elastischen Zwischenlagen Zw 700 vergrößert.

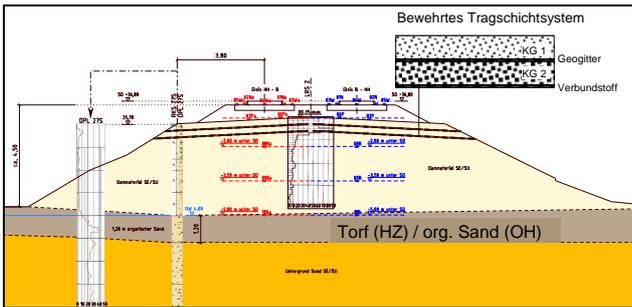


Abbildung 2.1-1 Messquerschnitt mit Torf (HZ) / organischem Sand (OH) im Untergrund und Darstellung des eingebauten Tragschichtsystems

Zur Kontrolle des Ertüchtigungserfolges wurden über 5 Jahre Schwingungs- und Verformungsmessungen durchgeführt. Damit sollte ermittelt werden, wie sich ein geokunststoffbewehrtes Tragschichtsystem in Kombination mit höherer Elastizität auf den Unterbau und Untergrund auswirkt. Abbildung 2.1-2 zeigt exemplarisch die elastischen Einsenkungen bei Überfahrt mit den ICE-T-Triebwagen und einer Geschwindigkeit von 190 km/h sowohl im Referenzquerschnitt mit unauffälligem Untergrund und gleichem Oberbau, aber nur 40 cm Tragschicht mit einer Lage Geogitterbewehrung als auch im Messquerschnitt des zweifach geokunststoffbewehrten Tragschichtsystems.

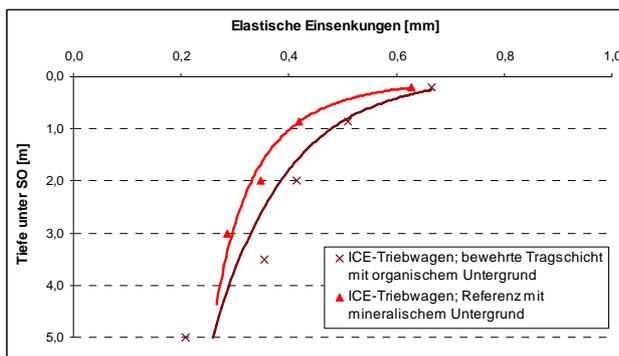


Abbildung 2.1-2 Elastische Einsenkungen infolge ICE-T-Triebwagen mit ca. 190 km/h

Aus Abbildung 2.1-2 ist deutlich zu erkennen, dass sich die im Untergrund vorhandenen, elastisch verformbaren organogenen Sande mit einer Mächtigkeit von etwa 1,2 m auf die elastischen Einsenkungen auswirken, so dass diese verständlicherweise größer als im Referenzmessquerschnitt ausfallen. Das eingebaute zweifach geokunststoffbewehrte Tragschichtsystem und die Überdeckung der organogenen Schicht von knapp 5 m führen jedoch dazu,

dass in Höhe des Oberbaus keine signifikanten Auffälligkeiten im elastischen Verhalten mehr auftreten.

In den Abbildungen 2.1-3 und 2.1-4 sind die maximalen Schwinggeschwindigkeiten dargestellt, die bei der Überfahrt mit den ICE-T-Triebwagen und einer Geschwindigkeit von 190 km/h gemessen wurden.

Der niederfrequente Anteil (Abbildung 2.1-3) bis einschließlich 25 Hz umfasst vorwiegend dynamische Anregungen durch die Radsatzlasten unter Berücksichtigung der zugehörigen Achsfolge (Radsatz-, Drehgestell- und Wagenabstände).

Der Frequenzbereich > 25 Hz umfasst vorwiegend dynamische Anregungen durch fahrweg- und fahrzeugspezifische Besonderheiten, wie z. B. kurzweilige Gleislagefehler, Schienenriffel, Radunrundheiten bzw. Flachstellen.

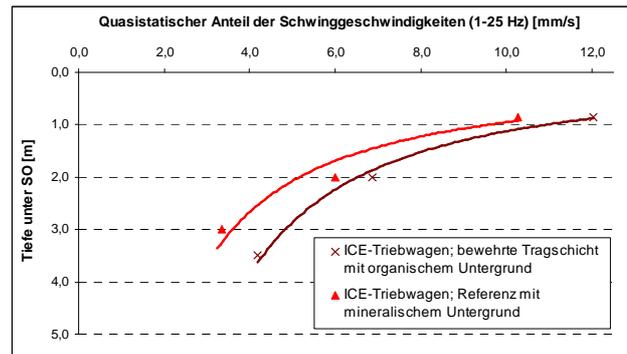


Abbildung 2.1-3 Niederfrequenter Anteil der maximalen Schwinggeschwindigkeiten (0,25 - 25 Hz) infolge ICE-T-Triebwagen mit ca. 190 km/h

Der niederfrequente Anteil der maximalen Schwinggeschwindigkeiten ist im Unterbau bei dem geokunststoffbewehrten Tragschichtsystem mit organogenem Untergrund um ca. 10 - 20 % höher als bei der Referenz. Das ist wegen der vorhandenen Weichschicht und der damit verbundenen höheren Schwingwege auch plausibel. Auf dem Planum sind hingegen aufgrund des lastverteilenden geokunststoffbewehrten Tragschichtsystems die Schwinggeschwindigkeiten ca. gleich groß bzw. nur maximal ca. 10 % größer als bei der Referenz.

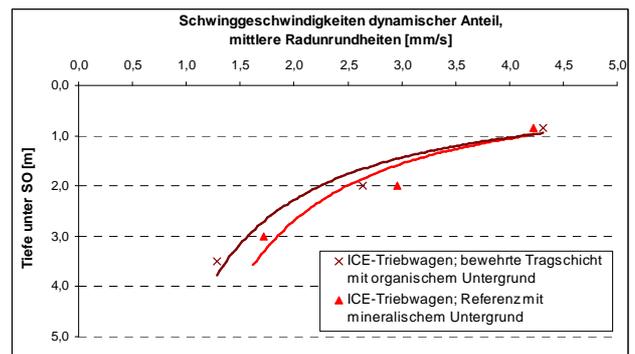


Abbildung 2.1-4 Hochfrequenter Anteil der maximalen Schwinggeschwindigkeiten (25 - 1.000 Hz) infolge ICE-T mit mittleren Radunrundheiten mit ca. 190 km/h

Das geokunststoffbewehrte Tragschichtsystem wirkt sich eindeutig positiv beim Abbau des hochfrequenten Anteils der maximalen Schwinggeschwindigkeiten aus. Hier sind die Schwinggeschwindigkeiten trotz des nachgiebigeren organogenen Untergrundes nicht größer als bei der Referenz bzw. sogar geringer.

Mit Hilfe gleisdynamischen Berechnungen in Kombination mit Berechnungen nach der Finite-Elemente-Methode

(FE-Berechnungen) wurde das dynamische Verhalten mit den ermittelten elastischen Einsenkungen und Schwinggeschwindigkeiten aus den Beschleunigungsmessungen nachgerechnet. Mit solchen Nachrechnungen können Zusammenhänge zwischen den Messergebnissen und Besonderheiten der verschiedenen Messquerschnitte erkannt und darauf aufbauend Prognoseberechnungen für messtechnisch nicht erfasste Konfigurationen von Oberbau, Unterbau und Untergrund oder aber auch Verkehrsbelastungen durchgeführt werden.

Die Abbildungen 2.1-5 und 2.1-6 zeigen die Ergebnisse der Nachrechnungen für den Referenzquerschnitt und für das geokunststoffbewehrte Tragschichtsystem.

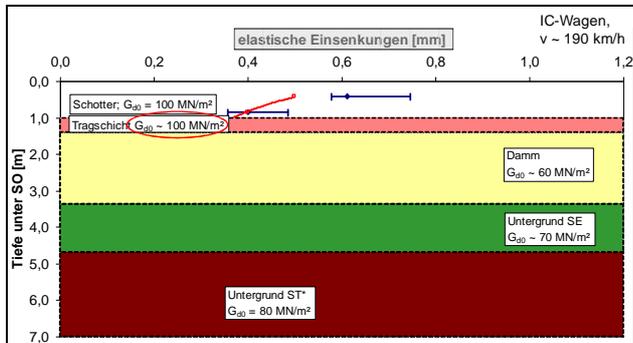


Abbildung 2.1-5 Vergleich der FE-Berechnungsergebnisse mit Messergebnissen für den Referenzquerschnitt

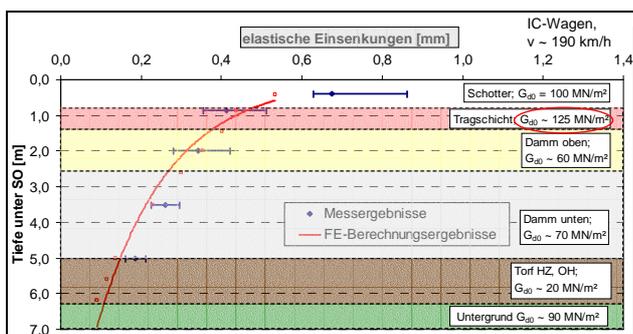


Abbildung 2.1-6 Vergleich der FE-Berechnungsergebnisse mit Messergebnissen für das geokunststoffbewehrte Tragschichtsystem

Bei einer Nachrechnung ist von großer Bedeutung, wie die Bewehrungswirkung der Geokunststoffe plausibel erfasst werden kann. Bereits im Beitrag von Lieberenz et al. (2005) wurden folgende Möglichkeiten diskutiert, eine Geokunststoffbewehrung rechentechnisch zu erfassen:

- über die Dehnsteifigkeit des Geokunststoffes,
- über die Erhöhung des Eigenverformungsmoduls  $E$  der Schutzschicht oder
- über die Erhöhung der Scherfestigkeit einer Reibungsschicht durch Ansatz einer zusätzlichen Kohäsion  $c$ .

Um die spannungsabhängigen dynamischen Schubmodule der einzelnen Bodenschichten bestimmen zu können, mussten die allseitigen effektiven Spannungen  $\sigma'_0$  im Oberbau, im Unterbau und im Untergrund ermittelt werden. Hier wurde in der Nachrechnung der Ansatz einer Kohäsion für die Geogitterbewehrung wieder aufgegriffen (siehe Abbildung 2.1.-7):

- Für die Trag- bzw. Schutzschichten wurde bei der Ermittlung des horizontalen Erddrucks der so genannte Verdichtungserddruck berücksichtigt, da er in dieser oberflächennahen Schicht den Erddruck infolge der recht geringen Auflast aus dem Oberbau teilweise übersteigt.

- Im konkreten Fall kann das eingesetzte Geogitter im Gebrauchszustand (bei ca. 1 % Dehnung) Zugkräfte  $Z = 6 \text{ kN/m}$ , verteilt auf die Tragschichtdicke von 0,60 m, aufnehmen. Dadurch kann ein um  $e_{pch}$  höherer Verdichtungserddruck in der Tragschicht aufgenommen werden.
- Die Horizontalbeanspruchung  $\sigma_h$  hat gemäß Abbildung 2.1-8 die Größe des Verdichtungserddruckes  $e_{pgh}$ , kann zugleich aber den Erdruchdruck  $K_0 \cdot \sigma_h$  nicht unterschreiten.
- Aus diesen Zusammenhängen wurde eine mittlere Horizontalspannung  $\sigma_{hm} = 44,8 \text{ kN/m}^2$  berechnet, die Eingangswert bei der Berechnung der allseitigen effektiven Spannung  $\sigma'_0$  war (im Vergleich dazu unbewehrt:  $\sigma_{hm} = 22,2 \text{ kN/m}^2$ ).
- Somit ergab sich für die geokunststoffbewehrte Tragschicht mit den in der Abbildung 2.1-7 angegebenen Formeln ein vergrößerter Schubmodul  $G_{d0} = 125 \text{ MN/m}^2$ . Im Vergleich dazu besitzt die unbewehrte Tragschicht einen Schubmodul  $G_{d0} = 100 \text{ MN/m}^2$ .

#### Möglichkeiten zur Simulation der Bewehrungswirkung bei dynamischen FE-Berechnungen:

- Berechnung des horizontalen Erddrucks unter Ansatz einer Kohäsion für die Geogitterbewehrung (min: Erdruchdruck, max: Verdichtungserddruck)

$$e_{pch} = k_{pch} \cdot c \quad \text{mit} \quad c = \frac{Z}{d} \rightarrow e_{ph} = e_{pgh} + e_{pch} \rightarrow \text{Erhöhung der Horizontalspannung } \sigma_h$$

Wobei:  $Z$  = Zugkraft des Geogitters bei 1 % Dehnung  
 $d$  = Dicke der geokunststoffbewehrten Tragschicht

- Berechnung der mittleren allseitigen effektiven Spannung  $\sigma'_0$

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma_v + 2 \cdot \sigma_h}{3}$$

- Berechnung des Grundwertes  $G_{d0}$  des dynamischen Schubmoduls

$$G_{d0} = G_{d0,ref} \cdot (\sigma'_0)^{0,5} \quad \text{mit} \quad G_{d0,ref} = 3,23 \cdot \frac{(2,97 - e)^2}{1 + e}$$

→ Ergebnis für geokunststoffbewehrte Tragschicht:  $G_{d0} = 125 \text{ MN/m}^2$   
(Vergleich zur Referenz:  $G_{d0} = 100 \text{ MN/m}^2$ )

Abbildung 2.1-7 Methodik der Berücksichtigung der geokunststoffbewehrten Tragschicht in der FE-Berechnung

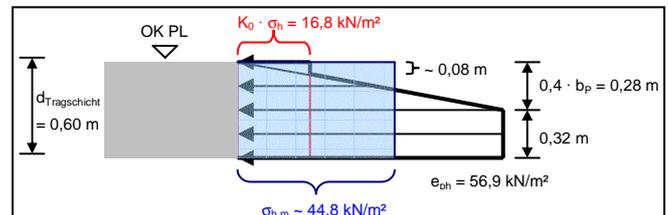


Abbildung 2.1-8 Ermittlung der Horizontalbeanspruchung in der geokunststoffbewehrten Tragschicht

Aus den Abbildungen 2.1-5 und 2.1-6 wird deutlich, dass die Ergebnisse der FE-Berechnungen mit den Ergebnissen der Messungen ab OK Planum und tiefer relativ gut übereinstimmen und hiermit ein plausibler Ansatz für die Erfassung der Bewehrungswirkung der Geokunststoffe verwendet wurde.

## 2.2 Gleiserneuerung Casekow - Tantow

Im Abschnitt Casekow - Tantow der Streckenverbindung Berlin – Stettin wurde eine umfassende Ober- und Unterbauerneuerung der eingleisigen Strecke notwendig, wobei eine Geschwindigkeit von 160 km/h berücksichtigt werden sollte. Die Strecke verläuft in diesem Abschnitt über sechs Moorbereiche, die zur Zeit des Streckenbaus im 19. Jahrhundert belassen und mit Dammkörpern überbaut wurden.

Ausgehend von der umfangreichen Baugrunderkundung mit einer hohen Aufschlussgenauigkeit war es mög-

lich, die Moorbereiche in Teilbereiche mit weitgehend gleichartigen Überdeckungen und Weichschichtmächtigkeiten zu unterteilen (siehe auch Wegener, Weisemann, Neidhart & Neumann (2008)).

Für jeden dieser Teilbereiche wurde das geometrisch ungünstigste Querprofil ausgewiesen und als maßgebendes Querprofil bei den Standsicherheitsberechnungen und den Berechnungen zur dynamischen Stabilität verwendet.

Im Ergebnis entstanden folgende, auf die vorhandenen Baugrundverhältnisse und die künftige Streckenbelastung abgestimmte Ertüchtigungsmaßnahmen:

- 1.270 m tiefgreifende Untergrundertüchtigungen mit Rüttelstopfsäulen, geokunststoffbewehrten Erdkörpern über Fertigmörtelstopfsäulen oder Bodenaustausch,
- 550 m Dammertüchtigung durch Abtrag des oberen Dammbereiches und Neuaufbau als geogitterbewehrte Böschung sowie
- Verbesserung des Unterbaus durch ein zweifach geokunststoffverstärktes Tragschichtsystem mit 50 oder 60 cm Dicke auf 1.525 m Länge, in Kombination mit dem Einbau von elastischen Zwischenlagen Zw 700 und partiell mit Schwellen B 90.

Ursprünglich waren für diese Bereiche generell tiefgründige Ertüchtigungsmaßnahmen vorgesehen. Die optimierten bautechnischen Empfehlungen wurden auf Grundlage von Berechnungen zur Standsicherheit und dynamischen Gebrauchstauglichkeit erarbeitet. Hier konnte auf die gewonnenen Erfahrungen aus dem Bauvorhaben Berlin - Hamburg aufgebaut werden. Außerdem wurden erste praxisrelevante Ergebnisse des durch die DB AG veranlassten Forschungsthemas „Erarbeitung von Kriterien zur Beurteilung der Notwendigkeit von Ertüchtigungen bei Eisenbahnstrecken auf Weichschichten“ umgesetzt.

So wurde z.B. in einem Teilabschnitt des Moorbereiches 1.1 ein zweifach geokunststoffbewehrtes Tragschichtsystem eingebaut. Die Standsicherheit des untersuchten maßgebenden Querschnittes war ausreichend, so dass die organischen Schichten im Untergrund belassen werden konnten (Abbildung 2.2-1).

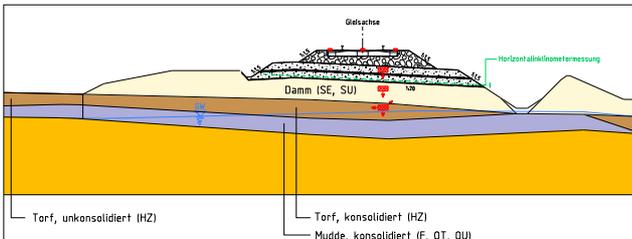


Abbildung 2.2-1 Bauvorhaben Gleiserneuerung Casekow - Tantow, Querschnitt km 100,325, zweifach geokunststoffbewehrte Tragschicht



Abbildung 2.2-2 Bauvorhaben Gleiserneuerung Casekow - Tantow, Einbau der geokunststoffbewehrten Tragschicht im Moorbereich 1.1

Zum Nachweis des Ertüchtigungserfolges wurden Langzeitmessungen durchgeführt. Für das geokunststoff-

bewehrte Tragschichtsystem beinhalteten diese Messungen:

- Schwingungsmessungen sowie
- Horizontalinklinometermessungen.

Die Schwingungsmessungen erfolgten überwiegend mit Geophonen sowie vergleichend mit einem Beschleunigungsaufnehmer und einem direkten Wegaufnehmer.

Die Ergebnisse werden in Abbildung 2.2-3 beispielhaft für den Messquerschnitt km 100,325 gezeigt. Hier sind die Ergebnisse der Schwingungsmessungen im Frequenzbereich auf der Schwelle, im Schotter, im Damm (1,6 m unter SO) sowie in der Weichschicht (2,6 m unter SO) für eine ausgewählte Zugüberfahrt eines Triebwagens der Baureihe 628 mit einer Geschwindigkeit von ca. 100 km/h dargestellt.

Abbildung 2.2-3 zeigt, dass die Schwinggeschwindigkeiten im Damm und in der Weichschicht erwartungsgemäß deutlich geringer als im Schotter und auf der Schwelle sind. Die relativen Peaks liegen jedoch bei allen 4 Kurven bei den gleichen Frequenzen:

- bei 2,5 Hz aufgrund des mittleren Drehgestell- bzw. halben Wagenabstandes von 10,9 m,
- bei 8,0 Hz aufgrund des doppelten Achsabstandes bzw. des halben Drehgestellabstandes zwischen Triebwagen und Steuerwagen von ca. 3,8 m,
- bei 12 Hz aufgrund der 1. Radrundheit bei einem Radumfang von 2,42 m,
- bei 16 Hz aufgrund des Achsabstandes von 1,9 m sowie
- bei 50 - 100 Hz (aufgrund des Schwellenabstandes von 0,60 m und aufgrund der Unebenheiten zwischen Rad und Schiene z. B. Radrundheiten höherer Ordnung).

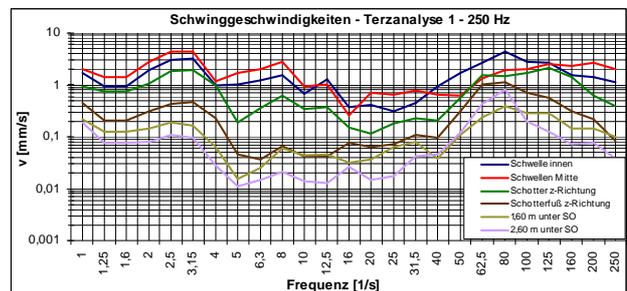


Abbildung 2.2-3 Bauvorhaben Gleiserneuerung Casekow - Tantow, Ergebnisse der Schwingungsmessungen im Frequenzbereich für km 100,325 (Moorbereich 1.1)

In der Planungsphase wurde der zu ertüchtigende Querschnitt in km 100,325 für eine zweidimensionale dynamische FE-Berechnung modelliert. Über das hierbei angewandte Rechenmodell wurde in Lieberenz & Vogel (2008) berichtet. Der rechnerische Nachweis der dynamischen Stabilität erfolgte dabei über den Vergleich zwischen vorhandener und zulässiger Scherdehnung. Neben den Scherdehnungen wurden in der dynamischen FE-Berechnung außerdem effektive Schwinggeschwindigkeiten berechnet. In Abbildung 2.2-4 ist ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen effektiven Schwinggeschwindigkeiten geführt.

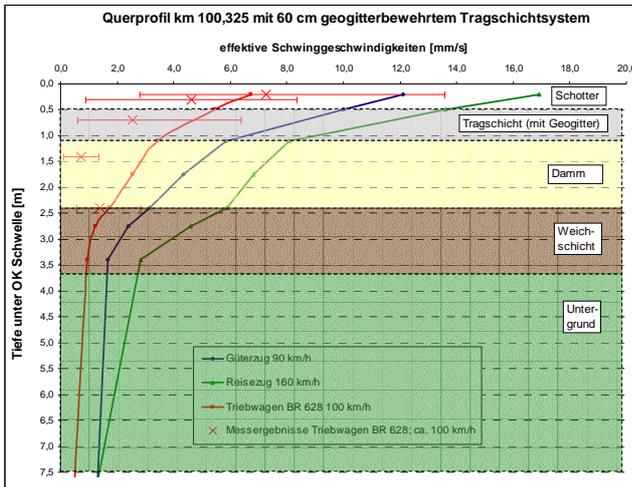


Abbildung 2.2-4 Vergleich der gemessenen mit den berechneten effektiven Schwinggeschwindigkeiten für km 100,325 (Moorbereich 1.1)

Die Messergebnisse der effektiven Schwinggeschwindigkeiten sind für die Aufnehmer auf der Schwellenoberfläche, im Schotter, in der Tragschicht, im Dammkörper und oberhalb der Weichschicht als Mittelwerte (rote Kreuze) dargestellt. Außerdem ist der Schwankungsbereich zwischen 5 % und 95 % Fraktilwert (rote Striche) gekennzeichnet.

In Abbildung 2.2-4 ist zu erkennen, dass auf der Schwellenoberfläche, im Schotter, in der Tragschicht und oberhalb der Weichschicht die berechneten effektiven Schwinggeschwindigkeiten für den Triebwagen der Baureihe 628 (rote Kurve) in etwa so groß wie die Mittelwerte der gemessenen effektiven Schwinggeschwindigkeiten waren. Die wahrscheinlich durch große Radrundheiten verursachten Maximalwerte der gemessenen effektiven Schwinggeschwindigkeiten sind auf der Schwellenoberfläche und im Schotter in etwa so groß wie die berechneten Schwinggeschwindigkeiten für den Güterzug mit 90 km/h (blaue Kurve).

Lediglich für den Dammkörper wurden mit den Messungen deutlich geringere effektive Schwinggeschwindigkeiten ermittelt.

Insgesamt stimmen die in der Planungsphase berechneten Schwinggeschwindigkeiten für den Zielzustand relativ gut mit den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten nach der Ertüchtigung überein. Das hier verwendete Modell zur Berechnung der dynamischen Stabilität kann deshalb als zutreffend bewertet werden.

Mit dem im Tragschichtsystem eingebauten Horizontalinclinometer sollen Verformungen von Unterbau und Untergrund erfasst werden. Insgesamt sind 5 Messkampagnen für die Inclinometermessungen vorgesehen, von denen 4 bereits in den Jahren 2007 und 2008 ausgeführt wurden. Die Abschlussmessung soll im April 2009 durchgeführt werden.

Im Bereich des bewehrten Tragschichtsystems mit im Boden verbliebener Weichschicht nehmen die Verformungen mit der Zeit zu. Pro Messkampagne wurden im Mittel jeweils um ca. 2 mm größere Setzungen gemessen. Jedoch wurde der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Messkampagnen jeweils etwa verdoppelt, so dass ausgesagt werden kann, dass die Differenz der Verformungen unterlinear zunimmt. Deutlich wird das in Abbildung 2.2-5.

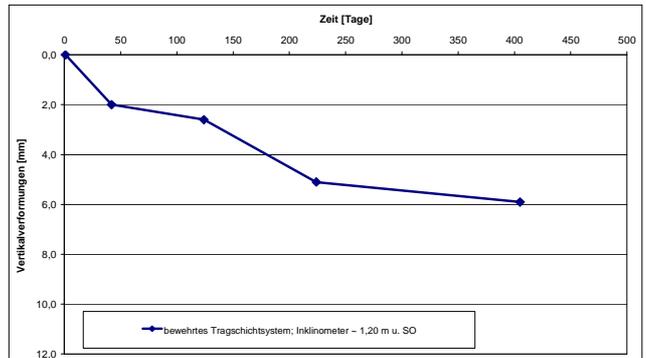


Abbildung 2.2-5 Entwicklung der Vertikalverformungen mit der Zeit für km 100,325 (Moorbereich 1.1)

Mit Setzungsbeträgen von ca. 6 mm ein Jahr nach Inbetriebnahme sind die Verformungen von Unterbau und Untergrund in dem Ertüchtigungsbereich mit zweifach geokunststoffverstärktem Tragschichtsystem hinreichend gering.

Im Moorbereich 1 wurden zur Kontrolle von Fahrwegsetzungen Schienenlängsnivellements durchgeführt. Insgesamt sind 3 Messkampagnen von Schienenlängsnivellements vorgesehen, von denen 2 bereits ausgeführt wurden. Die Abschlussmessung ist für Mai 2009 (ca. 18 Monate nach der Urmessung) geplant. Die Differenzen zwischen Urmessung und 1. Kontrollmessung sind für den Moorbereich 1 in Abbildung 2.2-6 dargestellt.

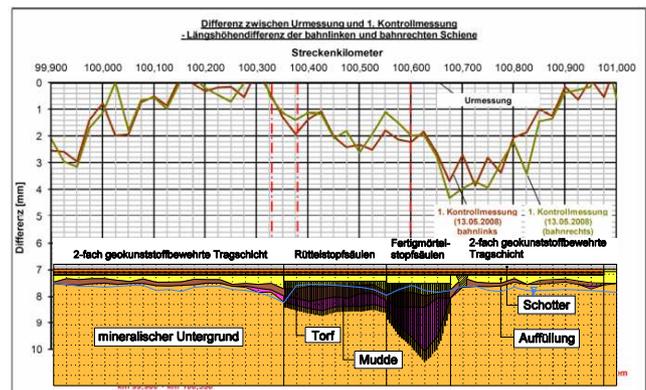


Abbildung 2.2-6 Schienenlängsnivellement km 99,900 - km 101,000 (Moorbereich 1)

Die Schienenlängsnivellements zeigen im Moorbereich 1 Setzungszunahmen während der 6-monatigen Verkehrsbelastung zwischen der Urmessung und der 1. Folgemessung von maximal 4,3 mm (Mittelwert 1,5 mm).

Für die Gebrauchstauglichkeit ist gemäß RIL 821.2001 (DB AG 2007) nicht der absolute Setzungsbetrag, sondern es sind die Setzungsdifferenzen  $\Delta s$  maßgebend, die zum Beispiel mit dem Gleismesstriebzug (GMTZ) ermittelt werden. Diese müssen gemäß RIL 821.2001 bei der derzeitigen Streckengeschwindigkeit von 120 km/h kleiner als 13 mm ( $SR_{100}$ -Wert der Längshöhe) bzw. kleiner als 11 mm ( $SR_{100}$ -Wert der gegenseitigen Höhenlage) sein.

Zur Einschätzung des Sanierungserfolges wurde eine Auswertung der von der DB Netz AG zur Verfügung gestellten Gleismessschriebe von 2005 und 2006 (vor Ertüchtigung) sowie 2007 und 2008 (nach Ertüchtigung) vorgenommen. Die einzelnen Sanierungsabschnitte wurden in 50 m lange Teilbereiche untergliedert, anschließend der jeweils maximale Längs- und Querhöhenfehler in jedem Teilbereich ermittelt und diese hinsichtlich der Überschreitungen der Beurteilungsmaßstäbe bewertet. In Abbildung 2.2-7 ist die Auswertung für die Bereiche mit zweifach

geokunststoffbewehrtem Tragschichtsystem dargestellt, das insgesamt auf einer Länge von 1.525 m eingebaut wurde.

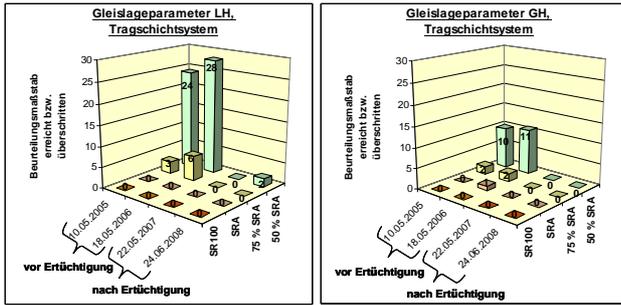


Abbildung 2.2-7 Ergebnisse der gleisgeometrischen Prüfung, Bereiche mit zweifach geokunststoffbewehrtem Tragschichtsystem

Es ist erkennbar, dass eine deutliche Verbesserung der Gleislage mit der Ertüchtigung erreicht wurde. Zwar gab es vor der Ertüchtigung keine Überschreitung des Beurteilungsmaßstabes SR<sub>100</sub> und lediglich eine Überschreitung von SR<sub>A</sub> bei der gegenseitigen Höhenlage, jedoch wurden häufig 50 % von SR<sub>A</sub> sowie wiederholt 75 % von SR<sub>A</sub> überschritten. Außerdem musste vor der Ertüchtigung eine Langsamfahrstelle mit 70 km/h eingerichtet werden. Damit veränderten sich die gültigen SR<sub>100</sub>-Werte. Des Weiteren war der Instandhaltungsaufwand stark erhöht.

Nach der Ertüchtigung gibt es hingegen bis jetzt keine einzige Überschreitung von 75 % des SR<sub>A</sub>-Wertes und nur selten werden 50 % von SR<sub>A</sub> überschritten.

### 2.3 Ausbaustrecke Saarbrücken - Ludwigshafen (POS Nord)

Im Zuge der Schnellbahnverbindung Paris - Ostfrankreich - Südwestdeutschland (POS) wurden innerhalb der ABS 23 Saarbrücken - Ludwigshafen (POS Nord) im Planfeststellungsabschnitt 4.2 Hauptstuhl / Ramstein - Miesenbach Ausbaumaßnahmen durchgeführt. Hier wurde die Streckengeschwindigkeit nach der 2003 abgeschlossenen 1. Ausbaustufe auf 160 km/h erhöht. Nach der 2. Ausbaustufe soll die Betriebsgeschwindigkeit auf 200 km/h angehoben werden, wodurch sich die dynamische Beanspruchung von Oberbau, Unterbau und Untergrund vergrößert.

Für den Streckenbereich km 24,850 - km 25,050 war in einer ersten Bearbeitungsstufe aufgrund von vergleichsweise gleisnah anstehenden Torfschichten sowie einer geringen Lagerungsdichte der in Höhe des Planums anstehenden Böden das Erfordernis tieferreichender Ertüchtigungsmaßnahmen ausgewiesen worden.

Im Ergebnis von zusätzlichen umfangreichen Baugrunduntersuchungen sowie von dynamischen Messungen konnte eine veränderte bautechnische Empfehlung zur Ertüchtigung abgeleitet werden. Es wurde die Herstellung eines geokunststoffverstärkten Tragschichtsystems mit folgenden Anforderungen an den Unterbau und Oberbau vorgeschlagen:

- Verformungsmodul auf dem Erdplanum  $E_{V2} \geq 45$  MN/m<sup>2</sup> bzw.  $E_{Vd} \geq 30$  MN/m<sup>2</sup> gemäß den Instandhaltungskriterien von Modul 836.0501,
- Verformungsmodul auf dem Zwischenplanum und dem Planum  $E_{V2} \geq 80$  MN/m<sup>2</sup> bzw.  $E_{Vd} \geq 40$  MN/m<sup>2</sup> ebenfalls gemäß den Instandhaltungskriterien von Modul 836.0501,
- zweifach geokunststoffbewehrtes Tragschichtsystem mit 60 cm Dicke mit folgendem Aufbau von oben nach unten:
  - 20 cm Schutzschicht aus KG 1 gemäß DBS 918 062,

- Geokunststoff (Geogitter) gemäß Kapitel 4.6 der „Prüfungsbedingungen für Geokunststoffe in Zulassungsverfahren des Eisenbahn-Bundesamtes“ vom 01.02.2007,
- 40 cm Schutzschicht aus KG 2 gemäß DBS 918 062,
- Geokunststoff (Verbundstoff) gemäß Kapitel 4.5 der „Prüfungsbedingungen für Geokunststoffe in Zulassungsverfahren des Eisenbahn-Bundesamtes“ vom 01.02.2007.

Auch hier erfolgte der Einbau von elastischen Zwischenlagen Zw 700 und Schwellen B 90. In Abbildung 2.3-1 ist das Regelquerprofil für den Zielzustand schematisch dargestellt.

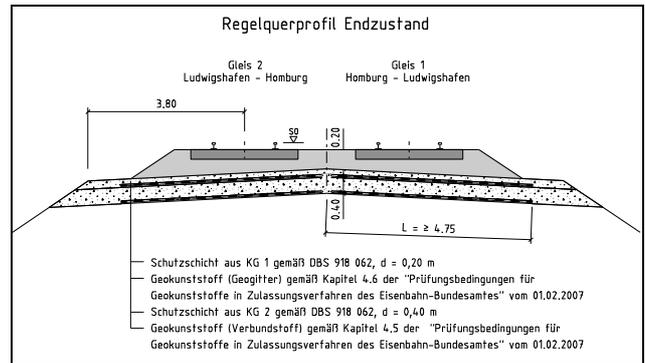


Abbildung 2.3-1 Bauvorhaben POS Nord, Regelquerprofil für den Zielzustand im Bereich km 24,850 - km 25,050

Die Herstellung des geokunststoffbewehrten Tragschichtsystems in Gleis 1 erfolgte am 20./21.01.2008; in Gleis 2 wurden die Umbauarbeiten am 04./05.05.2008 durchgeführt.

Hierbei wurden durch die bauausführende Schwebbau GmbH & Co. KG die Bettung und die vorhandene Schutzschicht mit der Bettungsreinigungsmaschine RM 900 ausgebaut. Der Einbau des geokunststoffverstärkten Tragschichtsystems erfolgte in jeweils 2 Bearbeitungsgängen ebenfalls gleisgebunden mit der Umbaumaschine SVV 100. Die Abbildung 2.3-2 zeigt während der Arbeiten angefertigte Fotoaufnahmen.



Abbildung 2.3-2 Bauvorhaben POS Nord, Einbau der Schutzschicht im Bereich km 24,850 - km 25,050

Der Nachweis des Ertüchtigungserfolges beinhaltete Laufzeitmessungen zur Ermittlung der bodendynamischen Kennwerte der Tragschicht sowie Schwingungsmessungen infolge Zugverkehr nach Inbetriebnahme, um die im Gutachten prognostizierten dynamischen Beanspruchungen (Schwinggeschwindigkeiten und Scherdehnungen) messtechnisch überprüfen zu können.

Es wurden jeweils in den 3 Messquerschnitten km 24,760 (Referenz), km 24,940 und km 24,970 Laufzeitmessungen zur Ermittlung der bodendynamischen Eigenschaften der Tragschicht in 2 Teilmessungen durchgeführt.

Die 1. Teilmessung wurde von der GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH unter Verwendung von tempo-

rär auf der Tragschichtoberkante bzw. auf der Geländeoberfläche angeordneten Geophonen durchgeführt, siehe Bild Abbildung 2.3-3.

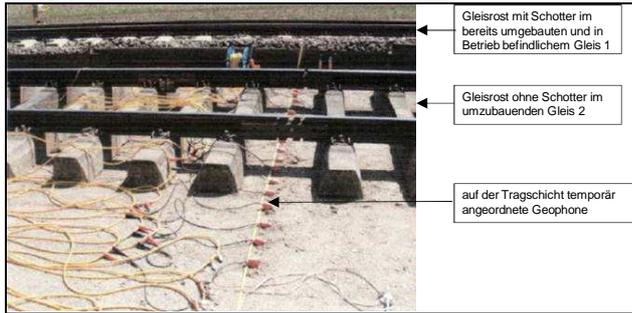


Abbildung 2.3-3 Bauvorhaben POS Nord, Laufzeitmessung auf der Tragschicht 2 Tage nach deren Einbau

Die 2. Teilmessung erfolgte zusammen mit den Schwingungsmessungen ca. 8 Wochen nach Inbetriebnahme, also nach vollständigem Einbau des Oberbaus und nach Eintragung von dynamischer Belastung aus Zugverkehr.

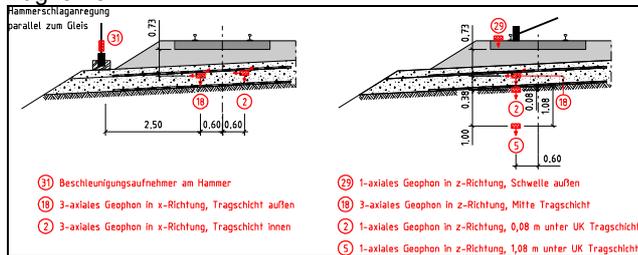


Abbildung 2.3-4 Bauvorhaben POS Nord, Laufzeitmessung auf der Tragschicht ca. 8 Wochen nach Inbetriebnahme

Die Laufzeitmessungen ergaben, dass die Scher- (SH) und Kompressionswellengeschwindigkeiten (P) nach Einbau des kompletten Oberbaus und der bereits eingetragenen dynamischen Belastung aus Zugverkehr um ca. den Faktor 1,7 bis 1,8 höher sind als kurz nach Einbau der Tragschicht. Damit wurde der dynamische Schubmodul  $G_{d0}$  um einen Faktor von 3,0 größer.

Station [km]	1. Teilmessung (Tage nach Tragschichteinbau)			2. Teilmessung (ca. 8 Wochen nach Inbetriebnahme)		
	SH-Wave [m/s]	P-Wave [m/s]	Querdehnzahl zahl v [-]	SH-Wave [m/s]	P-Wave [m/s]	Querdehnzahl zahl v [-]
24,760	162	295	0,28	313	591	0,25
24,940	152	267	0,26	282	470	0,22
24,970	176	288	0,20	303	506	0,21
Mittelwert	163	283	0,25	299	522	0,23

$\rho_{TS} = 2,25 \text{ g/cm}^3$

$G_{d0} \sim 60 - 70 \text{ MN/m}^2$   
 $E_{d0} \sim 150 \text{ MN/m}^2$

$G_{d0} \sim 180 - 200 \text{ MN/m}^2$   
 $E_{d0} \sim 500 \text{ MN/m}^2$

Abbildung 2.3-5 Bauvorhaben POS Nord, Ergebnisse der Laufzeitmessung auf der Tragschicht

Zur Überprüfung der prognostizierten dynamischen Beanspruchungen (Schwinggeschwindigkeiten und Scherdehnungen) wurden nach Inbetriebnahme der Strecke gemeinsam mit der FH Regensburg Schwingungsmessungen in den 3 Messquerschnitten km 24,760 (Referenz), km 24,940 und km 24,970 durchgeführt. Beispielhaft ist in Abbildung 2.3-6 der Messquerschnitt km 24,970 mit den Messaufnehmern dargestellt.

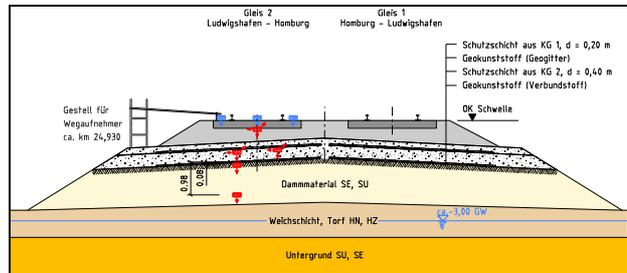


Abbildung 2.3-6 Bauvorhaben POS Nord, Messquerschnitt in km 24,970 mit eingebauter Messtechnik und Baugrundsichtung

Es wurden ICE mit ca. 160 km/h, IC mit ca. 140 km/h, Regionalzüge mit ca. 120 km/h und Güterzüge mit ca. 100 km/h Geschwindigkeit gemessen. Für die statistische Auswertung wurden die Maximalwerte der einzelnen Achsen bzw. Drehgestelle der Zugüberfahrten mit ICE und IC verwendet. Beispielhaft sind in Abbildung 2.3-7 die Schwinggeschwindigkeiten für einen ICE 3 mit ca. 160 km/h im Zeit- und Frequenzbereich für den Messquerschnitt km 24,970 dargestellt.

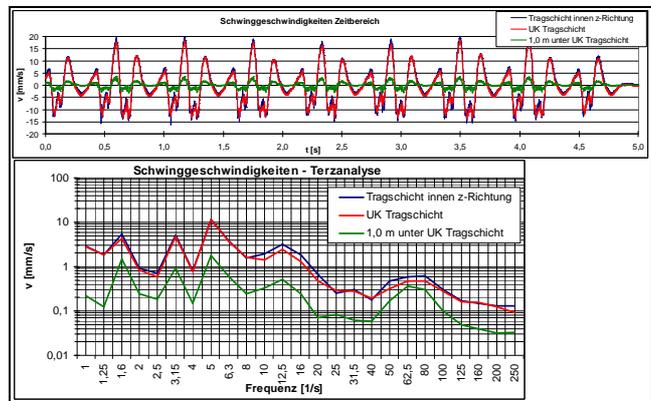


Abbildung 2.3-7 Bauvorhaben POS Nord, Gemessene Schwinggeschwindigkeiten für einen ICE 3 mit ca. 160 km/h im Zeit- und Frequenzbereich im Messquerschnitt km 24,970.

In Abbildung 2.3-7 ist zu sehen, dass die Schwinggeschwindigkeiten sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich an der Unterkante der Tragschicht (rote Linien) in etwa so groß wie in der Mitte der Tragschicht (blaue Linien) sind. Die ca. 1,0 m unterhalb der Tragschicht gemessenen Schwinggeschwindigkeiten (grüne Linien) sind hingegen deutlich niedriger.

Ursache dafür ist die offensichtlich lastverteilend und plattenartig wirkende Tragschicht. Die Tragschicht selbst ist relativ steif, wie durch die direkten Laufzeitmessungen ermittelt werden konnte. Dadurch kommt es innerhalb der Tragschicht zu keiner nennenswerten Reduzierung der Schwinggeschwindigkeit, jedoch zu einer guten lastverteilenden Wirkung. Unterhalb der Tragschicht werden dadurch jedoch die Schwinggeschwindigkeiten relativ gering.

In Abbildung 2.3-8 sind die Ergebnisse der FE-Berechnungen mit den Messergebnissen (blaue Kreuze mit Schwankungsbereich) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass jeweils für den ICE 3 mit ca. 160 km/h im Oberbau und in der Mitte der Tragschicht eine relativ gute Übereinstimmung der Mess- und Rechenergebnisse vorliegt. Die in ca. 1,0 m unterhalb der Tragschicht gemessenen Schwinggeschwindigkeiten sind hingegen deutlich niedriger als die berechneten Schwinggeschwindigkeiten. Die positive lastverteilende Wirkung ist also offensichtlich noch größer als für die Prognoseberechnung angenommen wurde.

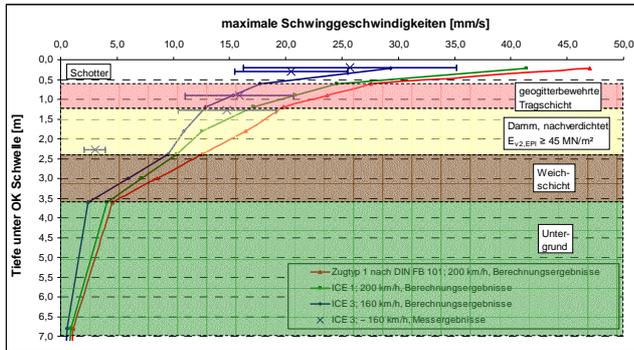


Abbildung 2.3-8 Bauvorhaben POS Nord, Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messergebnissen, ICE 3 mit ~ 160 km/h

### 3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die messtechnisch ermittelten Ergebnisse der drei vorgestellten Bauvorhaben zeigen, dass durch den Einbau gleisnaher geokunststoffbewehrter Tragschichtsysteme die Beanspruchungen von anstehenden Weichschichten reduziert und die Widerstände des Tragsystems erhöht werden. Dabei wurde eine deutliche Reduzierung der Schwinggeschwindigkeiten unterhalb des bewehrten Tragschichtsystems festgestellt.

Die Ergebnisse der Schwingungsmessungen zeigen, dass sich das bewehrte Tragschichtsystem als kompaktes Verbundsystem verhält.

Mit Hilfe von dynamischen FE-Berechnungen wurde die Messergebnisse nachgeprüft. Dabei konnte das Geogitter über den Ansatz einer Kohäsion plausibel berücksichtigt werden.

Aus den Messergebnissen lassen sich wirklichkeitsnahe dynamische Schub- und Elastizitätsmoduln ermitteln. Diese konnten durch dynamische FE-Berechnungen ebenfalls nachvollzogen werden. Somit sind Prognoseberechnungen für andere Zuggattungen und Geschwindigkeiten möglich.

Die vorgestellte Herangehensweise stellt einen Zwischenstand dar, der durch systematische Labor- und Felduntersuchungen weiterentwickelt werden sollte.

### 4 LITERATUR

DB AG (2007): „Ril 821.2001 - Oberbau inspizieren, Prüfung der Gleisgeometrie mit Gleismessfahrzeugen“, DB Netz AG 2007.

DB AG (2008): „Ril 836.0501 - Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, Erdkörper - Grundsätze“, DB Netz AG 2008.

Lieberenz, K., Weisemann, U., Haase, C. (2005): „Untersuchungen zur Wirkungsweise und Bemessung von geokunststoffbewehrten Schichtsystemen über Weichschichten bei Eisenbahnstrecken“, KGEO 2005.

Lieberenz, K., Vogel, W. (2008): „Gebrauchstauglichkeit von Eisenbahnstrecken auf weichem Untergrund“, Eisenbahningenieur (59) 10/2008.

Wegener, D., Weisemann, U., Neidhart, T., Neumann, G.: „Ertüchtigung von Eisenbahnstrecken auf Weichschichten“, Eisenbahningenieur (59) 12/2008.