

# UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRKUNGSWEISE UND BEMESSUNG VON GEOKUNSTSTOFFBEWEHRTEN SCHICHTSYSTEMEN ÜBER WEICHSCHICHTEN BEI EISENBAHNSTRECKEN

Klaus Lieberenz

Hochschule für Technik und Wirtschaft (FH), Dresden

Ulrike Weisemann, Clemens Haase

GEPRO Ingenieurgesellschaft für Geotechnik, Verkehrs- und Tiefbau und Umweltschutz mbH, Dresden

## KURZFASSUNG:

In Schutzschichten kommen zunehmend Geokunststoffe in Form von Geotextilien, Geogittern oder Verbundstoffen als Zusatzelement zum Einsatz, welche zwischen Erdplanum und Schutzschicht und innerhalb der Schutzschicht eingebaut werden. Die zusätzliche Geokunststoffbewehrung führt dabei zu einer Verbesserung des Systemverhaltens im Hinblick auf das Tragverhalten, die Steifigkeit und die Homogenität, wodurch eine günstigere Lastabtragung gewährleistet wird. Aufgrund der sehr komplexen Wirkungsweise der Geokunststoffe ist eine Bemessung der Schutzschicht unter Berücksichtigung der Geokunststoffbewehrung nach wie vor schwierig und es wird auf die auf empirisch ermittelten Werten basierenden Bemessungsverfahren zurückgegriffen.

Bei der messtechnischen Betreuung des Streckenabschnittes km 76,800 bis km 77,500 der auf eine Geschwindigkeit von 230 km/h zu ertüchtigenden Ausbaustrecke Hamburg - Berlin wurden Schwingungs- und Verformungsmessungen durchgeführt. Dabei wurde das Verhalten eines Querschnittes untersucht, bei welchem zuvor ein zweifach mit Geogittern bewehrtes Tragschichtsystem über organogenem Untergrund eingebaut wurden war. Im Ergebnis zeigten sich bei dem untersuchten Querschnitt mit zweifach bewehrten Tragschichtsystems gegenüber dem Referenzquerschnitt ohne Weichschicht geringfügige Reduzierungen der Schwinggeschwindigkeiten und der elastischen Einsenkungen.

Die Ergebnisse der messtechnischen Betreuung der praktischen Anwendung stimmen mit den Aussagen der durchgeführten theoretischen Untersuchungen mit dem FE-Programm PLAXIS tendenziell überein. Bei der analytischen Betrachtung eines geokunststoffbewehrten Schichtsystems mit PLAXIS konnte dabei mit der Annahme einer „zusätzlichen Kohäsion“ zur Berücksichtigung des Einflusses der Geokunststoffe ein Ansatz gefunden werden, welcher es ermöglicht die guten praktischen Erfahrungen mit geokunststoffbewehrten Schichtsystemen auch in der Berechnung nachvollziehen zu können. Die gewonnenen Erkenntnisse stellen einen weiteren Schritt zur Berücksichtigung der Geokunststoffbewehrung von Tragschichtsystemen bei der Bemessung dar.

## 1 PROBLEMSTELLUNG

Das für die Lastabtragung bei Eisenbahnstrecken verantwortliche Gesamtsystem bestehend aus Oberbau, Unterbau sowie Untergrund wird durch Verkehrslasten beansprucht, die sowohl als quasistatische als auch dynamische Lasten in verschiedenen Frequenzbereichen auf das System einwirken.

Die quasistatischen Lasten werden durch die jeweiligen Radsatzlasten der überfahrenden Züge charakterisiert. Die dynamischen Lasten hingegen werden in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und typische Abstände, wie Achsabstände, Drehgestellabstände, Radunrundheiten und Schwellenabstände in unterschiedlichen Frequenzbereichen eingetragen. In der Abbildung 1 sind die maßgebenden Schwinggeschwindigkeiten für die Überfahrt eines Intercity-Zuges in Abhängigkeit von den jeweiligen Frequenzbereichen dargestellt.

Eine Erhöhung der quasistatischen und/oder der dynamischen Lasten führt in der Regel zu Setzungen, welche insbesondere bei Weichschichten im Untergrund verhältnismäßig groß sein und über einen längeren Zeitraum auftreten können.

Mit Erhöhung der Geschwindigkeit und damit der Einwirkungen auf Weichschichten können erhebliche Setzungen eintreten, die unzulässig große Gleislageveränderungen hervorrufen. Als Folge ist mit einem Problem in der Gebrauchstauglichkeit der Strecke zu rechnen, welches in der Regel zu Einschränkungen der Verfügbarkeit der Eisenbahnstrecke führt.

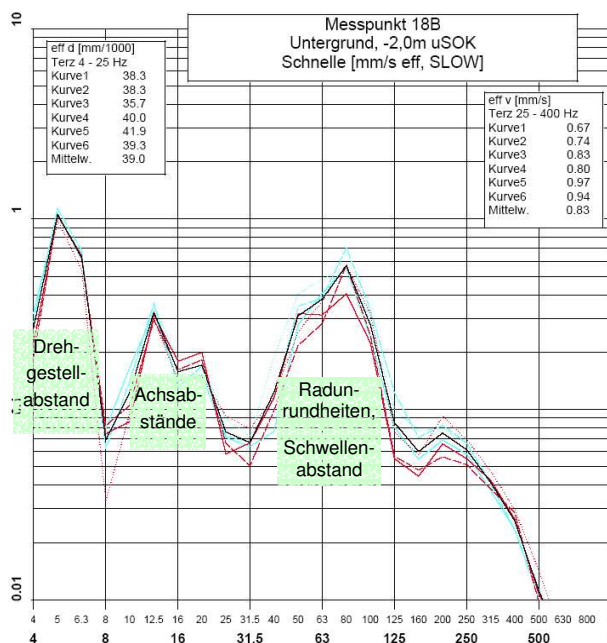


Abbildung 1 Terz-Schnelle-Spektren bei Intercitywagen mit ca. 160 km/h in einer Tiefe von ca. -2,0 m unter SOK im Frequenzbereich 4 - 1.000 Hz

Das Ziel von Ertüchtigungsmaßnahmen ist somit die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit, welche gewährleistet ist,

- wenn die in und an ihm auftretenden Verformungen und Setzungen sowohl bei dem Erdbauwerk als auch bei benachbarten Bauwerken keine Schäden oder Mängel verursachen und
- wenn Verformungen und Setzungen des Erdbauwerkes die Grenzwerte nicht überschreiten.

Zur Beurteilung einer Einschränkung der Betriebssicherheit und/oder der Streckenverfügbarkeit sollen die in Modul 821.2001 festgelegten Prüfgrößen und Beurteilungsmaßstäbe für Einzelfehler der Gleislage mit dem Oberbaumesswagen herangezogen werden. Für die Prüfgrößen Längshöhe der Schienen, gegenseitige Höhenlage und Pfeilhöhe ist bei Überschreitung des Beurteilungsmaßstabes  $S_{R100}$  (Eingriffsschwelle) die Einrichtung einer Langsamfahrstelle und die Planung von Instandsetzungsmaßnahmen notwendig. Für eine Strecke mit einer Ausbaugeschwindigkeit von  $160 < v \leq 230$  km/h beträgt der Grenzwert für die Längshöhe z.B. 9 mm. Entsprechend müssen die Verformungen durch die Ergreifung geeigneter erdbautechnischer Maßnahmen reduziert und vergleichmäßig werden, um die Einhaltung der Grenzwerte gemäß Modul 821.2001 gewährleisten zu können. Generell sind dabei die Gebrauchstauglichkeit, die Standsicherheit sowie die dynamische Stabilität nachzuweisen.

Die geeigneten erdbautechnischen Maßnahmen können im Hinblick auf die grundlegenden Wirkungsweisen in

- Erhöhung der Widerstände im Baugrund und/oder
- Verminderung der Einwirkungen aus dem Verkehr unterschieden werden.

Die Erhöhung der Widerstände im Baugrund umfasst dabei erdbautechnische Maßnahmen wie Bodenaustausch oder Bodenverfestigung.

Eine Verminderung der Einwirkungen aus dem Verkehr hingegen kann durch den Einsatz elastischer Elemente und einen massereichen Oberbau realisiert werden.

Durch den Einbau von Geokunststoffbewehrungen in der Schutzschicht wird eine Kombination aus der Erhöhung der Widerstände im Baugrund und der Verminderung der Einwirkungen auf das Erdplanum aus dem Verkehr realisiert.

## 2 MESSTECHNISCHE BETREUUNG AN DER EISENBAHNSTRECKE HAMBURG - BERLIN

### 2.1 Messprogramm und Messquerschnitte

Im Rahmen der 2. Ausbaustufe der Eisenbahnstrecke Hamburg - Berlin wurde die Reisegeschwindigkeit von 160 km/h auf 230 km/h angehoben.

Bei der Umsetzung dieser Geschwindigkeitsanhebung treten höhere dynamische Beanspruchungen des Oberbaus, Unterbaus und Untergrunds mit höheren Spitzenwerten der Spannungen und höheren Schwingungsgeschwindigkeiten auf dem Niveau des Planums auf. Als Folge ist mit größeren elastischen Einsenkungen im Planum zu rechnen.

Mit dem Messprogramm soll ermittelt werden, wie sich ein höher elastischer Oberbau und eine Geokunststoffbewehrung der Tragschicht auf den Unterbau und Untergrund auswirkt. Nachfolgend sollen nur die Auswirkungen der Geokunststoffbewehrung der Tragschicht betrachtet werden.

Die dabei für dieses Thema relevanten Messquerschnitte 4 und 5 lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Referenzquerschnitt mit elastischem Oberbau (Zw 700) ohne Weichschicht im Untergrund (Messquerschnitt 5) und
- Zweifach bewehrtes Tragschichtsystem mit elastischem Oberbau (Zw 700) über organogenem Untergrund (Messquerschnitt 4).

Beide Querschnitte weisen dabei den gleichen Oberbau mit einem elastischen Element im Oberbau in Form der elastischen Zwischenlage Zw 700 auf. Im Bereich mit organogenen Schichten im Untergrund zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit einschränkende ein zweifach bewehrtes Tragschichtsystem vorgesehen (siehe auch Abbildung 2).

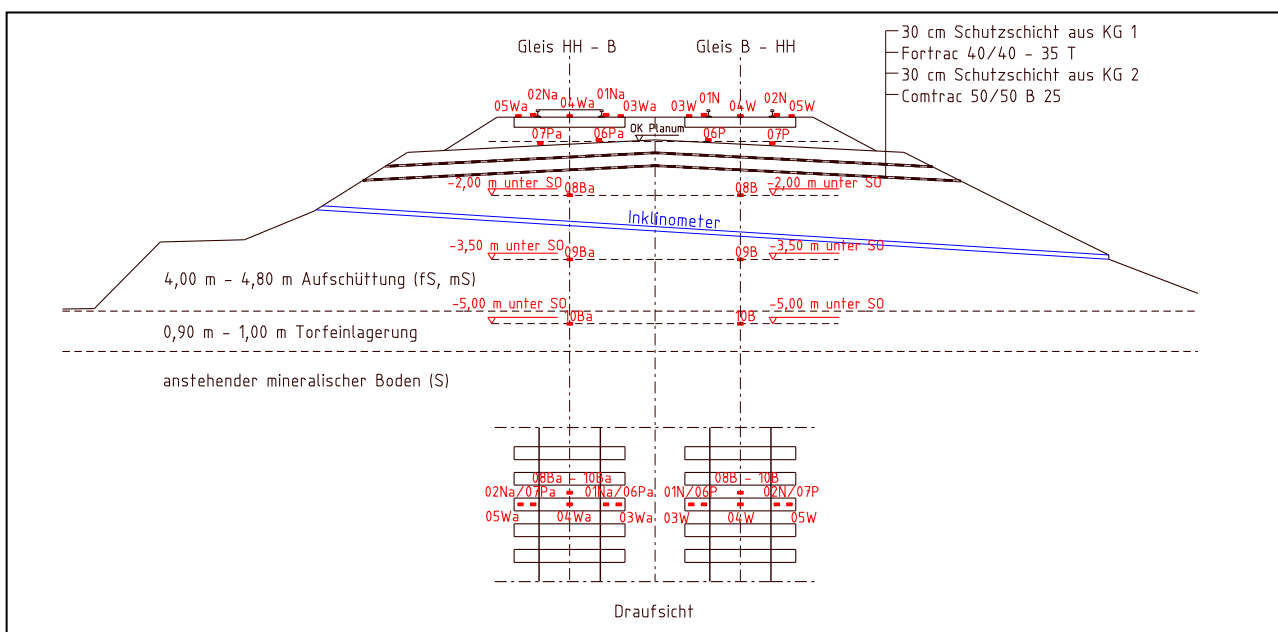


Abbildung 2 Messquerschnitt 4 in km 76,8+96,8 mit Inklinometer und Beschleunigungsaufnehmern

Der Aufbau dieses zweifach bewehrten Tragschichtsystems wurde dabei rein konstruktiv gewählt, eine Bemessung liegt nicht zugrunde.

Dabei ist der folgende Schichtenaufbau des Tragschichtsystems realisiert worden:

- 30 cm Schutzschicht aus KG 1,
- Geogitter „Fortrac 40/40 - 35 T“ auf einem Zwischenplanum innerhalb der Tragschicht,
- 30 cm Schutzschicht aus KG 2,
- Verbundstoff „Comtrac 50/50 B25“ auf dem Erdplanum.

Der Einbau des zweifach bewehrten Tragschichtsystems soll dabei in Kombination mit der elastischen Zwischenlage Zw 700:

- eine Reduzierung der Einwirkungen (Spannungen und Schwinggeschwindigkeiten) und
- eine Verteilung und Vergleichmäßigung möglicher Setzungen auf für die Gleislage und den Fahrkomfort unkritische Längen bewirken.

Die Lage der Messquerschnitte und die dazugehörigen Messstellen mit Angaben zum Umfang und Charakteristik der durchgeführten Messungen ist in der nachfolgenden Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1 Umfang der Messungen und Einteilung der Messstellen

Messquerschnitt	Messstelle	Stationierung	Umfang der Messungen
4	D	km 76,892 br	Schwingbeschleunigung, Rad-Schiene Kraft, Schwellenhohllagen
	I	km 76,893 br	
	4	km 76,896	Verformung des Dammkörpers (geodätisch), Setzung im Untergrund (Inklinometer)
5	E	km 77,950 br	Schwingbeschleunigung, Rad-Schiene Kraft, Schwellenhohllagen
	J	km 77,960 bl	
	5	km 77,954 br	Verformung des Dammkörpers (geodätisch), Setzung im Untergrund (Inklinometer)

Es wurden bisher folgende Messkampagnen im Zeitraum von 2002 bis 2004 durchgeführt:

- Messung der Schwingbeschleunigung:
  - Gleis B-HH: 3 Messkampagnen (im Juli 2002, Februar/März 2003 und Mai 2004)
  - Gleis HH-B: 2 Messkampagnen (im Februar/März 2003 und Mai 2004)
- Messung der Setzungen im Untergrund (Inklinometermessungen):
  - 4 Messkampagnen im Gleis B-HH und Gleis HH-B (Juli 2002, März 2003, August 2003 und Juni 2004)

Für das Jahr 2005 ist eine weitere Messkampagne vorgesehen, um die aus den bisherigen Messkampagnen gewonnenen Erkenntnisse auch bei der mittlerweile erhöhten Geschwindigkeit von 230 km/h zu bestätigen.

## 2.2 Geodätische Messungen und Inklinometermessungen

Bei den geodätischen Messungen wurden die Verformungen des Dammkörpers über den gesamten Zeitraum von Juli 2002 bis Juni 2004 beobachtet. Gleichzeitig wurden mit den Inklinometermessungen die Setzungen des Dam-

mes in einer Tiefenlage von ca. 2,0 m bis 3,5 m unter Schienenoberkante erfasst.

Bei der 1. und 2. Kontrollmessung mit dem Inklinometer wurden im bahnlinken Dammbereich Setzungen und unter dem bahnrechten Gleis Hebungen von 2 bis 3 mm gegenüber der Urmessung festgestellt (siehe Abbildung 3).

Da diese festgestellten Verformungen lediglich in der Größenordnung der Messgenauigkeit liegen, kann davon ausgegangen werden, dass der Damm keine Auffälligkeiten bezüglich der Verformungen aus dem Untergrund aufweist.

Die geometrischen Messungen der Dammgeometrie bestätigen die Ergebnisse der Inklinometermessungen und zeigen keine auffälligen Bewegungen des Dammkörpers.

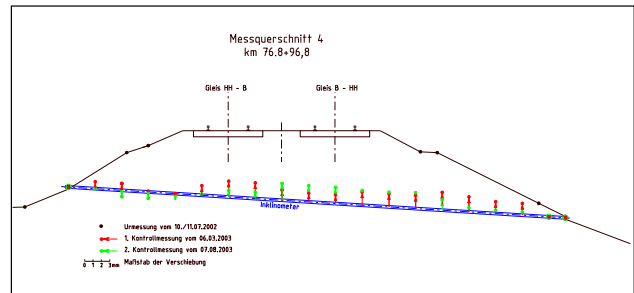


Abbildung 3 Inklinometermessungen am Messquerschnitt 4 in km 76,8+96,8

## 2.3 Schwingungsmessungen

Die Schwingungsmessungen wurden mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern realisiert. Dabei wurden an jeder Messstelle:

- 2 Messpunkte am Schienenfuß,
- 3 Messpunkte an der Schwellenoberkante,
- 2 Messpunkte im oberen Bereich der Schutzschicht und
- je 1 Messpunkt in etwa 2,0 m, 3,5 m und 5,0 m Tiefe angeordnet.

Zusätzlich wurden jeweils 2 Messpunkte an den Nachbarschwellen angebracht.

Eine grafische Darstellung der Lage der Beschleunigungsaufnehmer ist in Abbildung 2 vorhanden.

Die installierten vertikalen Beschleunigungsaufnehmer ermöglichen dabei die Ermittlung folgender Parameter:

- Geschwindigkeit des vorbeifahrenden Zuges,
- vertikale Schwingbeschleunigung,
- vertikale Schwinggeschwindigkeit (aus der einfachen Integration der Schwingbeschleunigungs-Zeitverläufe über der Zeit) und
- vertikaler Schwingweg (aus der zweifachen Integration der Schwingbeschleunigungs-Zeitverläufe über der Zeit).

In der nachfolgenden Abbildung 4 sind die ermittelten Einsenkungen für die Messstelle D mit Torf und der Referenzmessstelle E über der Tiefe aufgetragen. Dabei wird ersichtlich, dass etwa gleich große Setzungen beim zweifach bewehrten Tragschichtsystem mit Torf im Untergrund (Messstelle D) gegenüber der Referenz (Messstelle E) aufgetreten sind.

Ein ähnlicher Zusammenhang zeigt sich auch bei dem Vergleich der maximalen Schwinggeschwindigkeiten, welche für beide Messstellen in der Abbildung 5 über der Tiefe aufgetragen wurden. Dabei ist festzustellen, dass beim zweifach bewehrten Tragschichtsystem mit Torf im Untergrund (Messstelle D) geringfügig geringere Schwingge-

schwindigkeiten gegenüber der Referenz (Messstelle E) festgestellt wurden. Deutlich wird dabei auch, dass die Schwinggeschwindigkeiten in der Tiefenlage zwischen -1,0 m und -2,0 m unter SOK bei der Messstelle D gegenüber der Referenz deutlich abnehmen, was auf eine „Dämpfungswirkung“ des 2-fach bewehrten Tragschichtsystems schließen lässt.

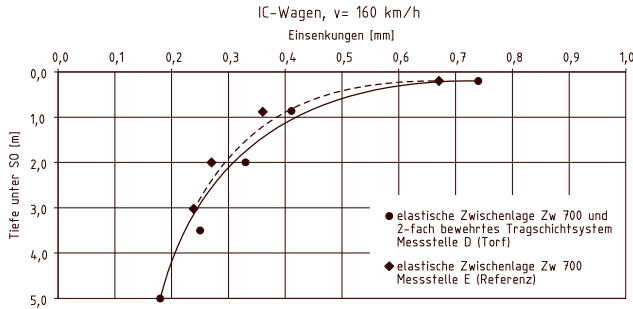


Abbildung 4 Elastische Einsenkungen infolge Überfahrt eines Intercitywagen mit 160 km/h im Gleis Berlin - Hamburg (Mittelwerte aus Erst- und Zweitmessung)

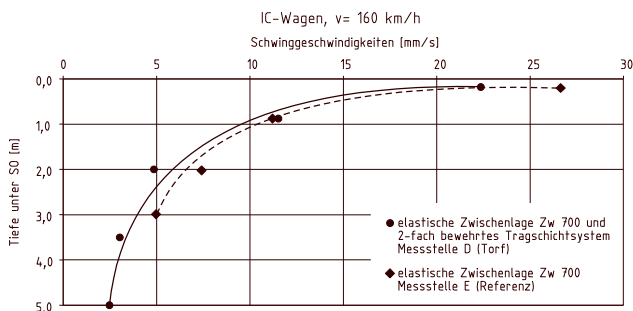


Abbildung 5 Maximale Schwinggeschwindigkeiten infolge der Überfahrt eines Intercitywagen mit 160 km/h im Gleis Berlin - Hamburg (Mittelwerte aus Erst- und Zweitmessung)

#### 2.4 Finite-Elemente-Rückrechnungen

Auf Grundlage der durch die Beschleunigungsaufnehmer ermittelten Vertikalverformungen ist es möglich, für die jeweils zwischen zwei übereinander angeordneten Messpunkten befindlichen Schichten charakteristische Zusammendrückungen zu ermitteln. Dazu wird in 2 Schritten vorgegangen:

1. Unter Abschätzung der maßgebenden Vertikalspannung für die jeweilige Tiefenlage lässt sich überschläglich der dynamische Elastizitätsmodul  $E_{dyn}$  nach dem Hook'schen Gesetz ermitteln:

$$E_{dyn,i} = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} = \frac{\sigma_{m,i}}{s_i / h_i}$$

mit

$s_i$       Einsenkung der jeweiligen Schicht  
 $h_i$       Höhe der jeweiligen Schicht

Unter Annahme einer entsprechenden Querdehnzahl  $\nu$  ergibt sich schließlich nach der Elastizitätstheorie der dynamische Steifemodul zu:

$$E_{s,dyn} = E_{dyn} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1-\nu-2 \cdot \nu^2)}$$

2. Mit Hilfe von 3D-FE-Berechnungen wurden die jeweiligen dynamischen Steifemodule  $E_{s,dyn}$  so gewählt, dass sich nahezu die gemessenen Verformungen ergeben (siehe Abbildung 6). Die jeweiligen Querdehnzahlen  $\nu$  wurden plausibel gewählt.

Im Diagramm der Abbildung 7 sind die tatsächlich gemessenen elastischen Einsenkungen denjenigen mit der 3D-FE-Methode berechneten elastischen Einsenkungen gegenübergestellt.

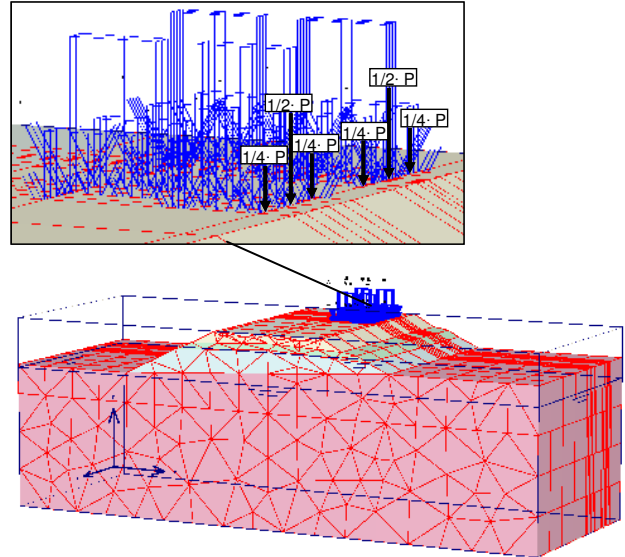


Abbildung 6 Unverformtes FE-Modell mit Darstellung der Belastung mit 2 Achsen mit jeweils 12 t Radsatzlast eines typischen IC-Wagen. Die Achslast wurde auf jeweils 3 Schwellen verteilt (Belastungsschema 25 %, 50 %, 25 %).

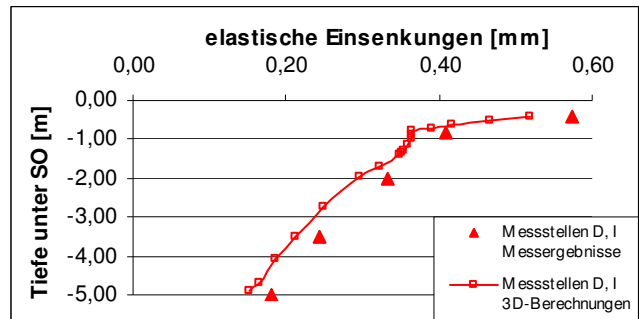


Abbildung 7 Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten elastischen Einsenkungen an der Messstelle D

Die mit der Methode der Finiten Elemente iterativ zurückgerechneten dynamischen E-Module  $E_{dyn}$  und  $E_{s,dyn}$  sind in nachfolgender Tabelle 2 zusammen- und den vom Baugrundgutachter angegebenen statischen Steifemodul  $E_{s,stat}$  gegenübergestellt.

Hervorzuheben ist der deutliche Unterschied zwischen unbewehrter und geokunststoffbewehrter Schutzschicht. Die Geokunststoffbewehrung bewirkt bei den zwei miteinander verglichenen Messquerschnitten eine Verdopplung des dynamischen E-Moduls  $E_{s,dyn}$  gegenüber einer herkömmlichen, unbewehrten Schutzschicht.

Tabelle 2 Zusammenstellung der Ergebnisse der Finiten-Elemente-Rückrechnungen und der vom Baugrundgutachter angegebenen Bodenkennwerte

Beschreibung der Schicht	Ergebnisse der Rückrechnung mit FEM			Baugrundgutachten
	$E_{ref}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\nu$ [ - ]	$E_{s,dyn}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{s,stat}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
Schutzschicht, bewehrt	540	0,20	600	-
Schutzschicht, unbewehrt	270	0,20	300	(200)
Damm	149	0,30	200	(25)
Weichschicht	52	0,30	70	10
Untergrund bis -10,0 m	149	0,30	200	25 - 50

### 2.5 Baupraktische Problemstellung

Bei der im betrachteten Streckenabschnitt durchgeführten Baugrundbegutachtung wurden, wie bereits erwähnt, kritische Baugrundverhältnisse angetroffen und eine umfangreiche konventionelle Ertüchtigung zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit vorgeschlagen. Der Baugrundgutachter formulierte seine Empfehlungen dabei wie folgt:

*„...im Bereich zwischen km 76,800 und 76,900 sind unterhalb des Damms organische Sande im Übergang mit Torf erkundet worden. [...] Bei der Befahrung mit dem Messwagen kristallisieren sich diese Bereiche jedoch als kritisch heraus. Die in diesen Bereichen gemessenen Ausschläge der Längshöhenfehler stellen Grenzwerte dar. Aufgrund der Tatsache, dass die Geschwindigkeit auf 230 km/h erhöht werden soll und die Aufzeichnungen der Gleislage bei 160 km/h erfolgten, empfehlen wir den Austausch des organischen Bodens zumindest im Bereich km 76,800 bis km 76,900.“*

Der von GEPRO vorgeschlagene Lösungsansatz sieht hingegen eine Reduzierung der Einwirkungen unter gleichzeitiger Erhöhung der Widerstände im gleisnahen Bereich vor.

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die vorgeschlagene Herangehensweise und zeigen eine Verbesserung des Tragverhaltens durch den Einsatz eines geokunststoffbewehrten Tragschichtsystems.

Nicht gelöst ist dabei allerdings nach wie vor die Umsetzung der positiven praktischen Erfahrungen in ein entsprechendes anwendbares Bemessungsmodell für geokunststoffbewehrte Schichtsysteme. Diesbezügliche Untersuchungen erfolgten im Rahmen einer Diplomarbeit [3].

## 3 THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN

### 3.1 Gegenwärtige Bemessungstheorien

Derzeit werden für die Bemessung von geokunststoffbewehrten Tragschichten die folgenden Ansätze bzw. Theorien angewandt und können dabei wie folgt kurz charakterisiert werden:

#### - Mehrschichttheorie:

- Modellvorstellungen beruhen ausschließlich auf Gesetzmäßigkeiten der Bodenmechanik
- basiert ausschließlich auf empirisch ermittelten Werten
- Erhöhung des Eigenverformungsmoduls der Tragschicht als Geokunststoffwirkung
- gebräuchlichste Verfahren nach Burmister, Odemark, Iwanow

#### - Theorie der Membrantragwirkung:

- rein theoretische mathematisch-geometrische Modellvorstellungen
- Geokunststoff wirkt als Membran und spannt sich über gering tragfähige Bereiche
- gebräuchlichstes Verfahren von Giroud/Noiray

#### - Theorie der Plattentragwirkung:

- Modellanalogie zum Stahl-Beton-Verbund (Geokunststoff wirkt als Zugband, Boden als Druckzone)
- Nachteil: derzeit ist noch kein anwendbarer Berechnungsalgorithmus vorhanden.

Die Umsetzung der Theorien bzw. Bemessungsansätze weisen dabei wie z.B. die Mehrschichttheorie stark vereinfachte Annahmen auf und basieren lediglich auf empirisch ermittelten Werten. Die Membrantheorie hingegen beschränkt aufgrund der alleinigen Berücksichtigung der Bewehrungswirkung der Geokunststoffe auf Anwendungen mit hohen zu erwartenden und zulässigen Verformungen wie z.B. Baustraßen.

Um allgemeingültige Aussagen über das Bewehrungsverhalten und eine wirklichkeitsnähere Modellbildung und somit Bemessung gewährleisten zu können werden nachfolgend Modellrechnungen nach der Methode der Finiten Elemente durchgeführt.

### 3.2 Lösungsansatz für FE-Betrachtungen

Bei der Simulation von Geokunststoffbewehrungen mit der Methode der Finiten Elemente wird üblicherweise ein geometrisches Element verwendet, welches über alleinig durch die Zuordnung einer Dehnsteifigkeit charakterisiert werden kann.

Bei der Simulation mit einem normalzugfesten Geokunststoffelement, welchem eine Dehnsteifigkeit von 2.250 kN/m zugeordnet wurde, konnten gegenüber dem Grundmodell jedoch keine oder nur marginale Verformungsreduzierungen festgestellt werden.

Ausgehend von dieser Erkenntnis wurde ein hochzugfester Geokunststoff mit entsprechend großer Dehnsteifigkeit (33.300 kN/m) in die Simulationen einbezogen, doch auch dieser Ansatz lieferte nur sehr geringe Verformungsreduzierungen.

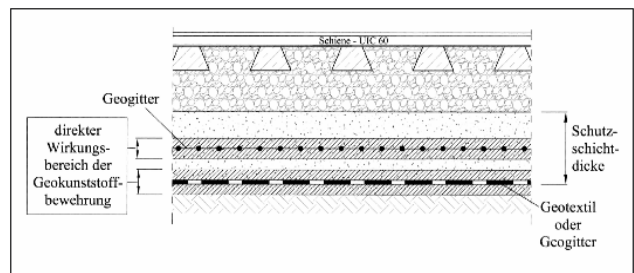


Abbildung 8 Schematische Darstellung des Wirkungsbereiches der Geokunststoffbewehrung in Schichtsystemen unter Eisenbahnfahrwegen

Wie in Kapitel 2.3 bereits dargestellt wurde, konnte mit den praktischen Untersuchungen auf der Strecke Hamburg - Berlin eine Reduzierung der elastischen Einsenkungen durch den Einsatz eines zweifach bewehrten Tragschichtsystems nachgewiesen werden.

Um diese positiven Wirkungen auch in den FE-Simulationen wiedergeben zu können, wurde nach einer weiteren Möglichkeit gesucht, die Bewehrungswirkung der Geokunststoffe zu berücksichtigen. Bei der Betrachtung der bodenmechanischen Grundlagen wurde der Ansatz einer zusätzlichen, durch die Wirkung der Geokunststoffe hervorgerufenen Kohäsion gewählt. Abbildung 8 enthält eine schematische Darstellung des Wirkungsbereiches der Geokunststoffbewehrung, auf welche die angenommene zusätzliche Kohäsion angerechnet wird. Diesen im Weiteren als Reibungsschichten bezeichneten Wirkungsbereichen wird durch den Ansatz der zusätzlichen Kohäsion eine erhöhte Scherfestigkeit zugewiesen.

In den FE-Simulationsmodellen konnte aufgrund programmbedingt vorgegebener Mindestdicken nur eine Reibungsschicht simuliert werden (siehe auch Abbildung 10).

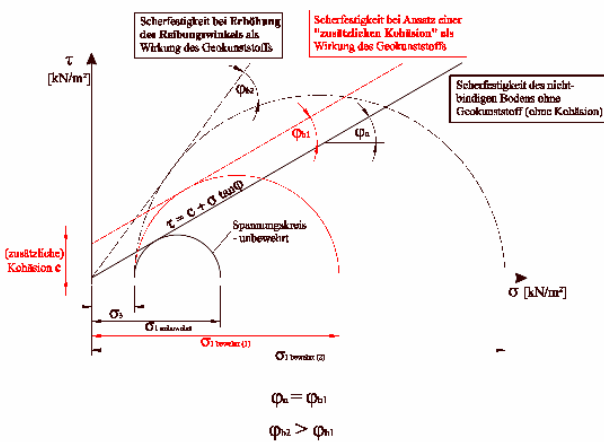


Abbildung 9 Darstellung der unterschiedlichen Möglichkeiten bzw. Ansätze zur Erhöhung der Scherfestigkeit infolge der Wirkung einer Geokunststoffbewehrung

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Möglichkeiten der Simulation mit der FE-Methode zur Berücksichtigung einer Geokunststoffbewehrung in einem Schichtsystem:

- Dehnsteifigkeit des Geokunststoffelements,
- Erhöhung des Eigenverformungsmoduls E der Tragschicht und
- Erhöhung der Scherfestigkeit einer Reibungsschicht durch Ansatz einer zusätzlichen Kohäsion c.

Die Darstellung der COULOMBSchen Bruchgeraden in Abbildung 9 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

### 3.3 Analytische Untersuchungen mit FE-Rechnungen

Für die Simulation in PLAXIS wurde dabei ein 2D-Modell gewählt, welches eine Eisenbahnstrecke über einer Weichschicht im Längsschnitt darstellt, um somit die als Rechteck vereinfachte Geometrie der Weichschicht bei gleich bleibendem Ober- und Unterbau verändern zu können (siehe Abbildung 10).

Folgende Parameter wurden hierbei als Variablen definiert, um durch Simulationen mit jeweils mindestens 3 unterschiedlichen Wertepaaren als Ergebnis eine tendenzielle Abhängigkeit der gewählten Einflussfaktoren ableiten zu können.

Folgende Parameter wurden dabei verändert:

- Weichschicht:
  - Mächtigkeit,
  - Länge und
  - Spezifischer Eigenverformungsmodul.
- Parameter bezüglich der Tragschicht:
  - Dicke der Tragschicht,
  - Anzahl der Geokunststofflagen,
  - Dehnsteifigkeit des Geokunststoffes bzw.
  - Höhe der (äquivalenten) zusätzlichen Kohäsion und
  - Dicke der angenommenen kohäsiven Reibungsschicht.

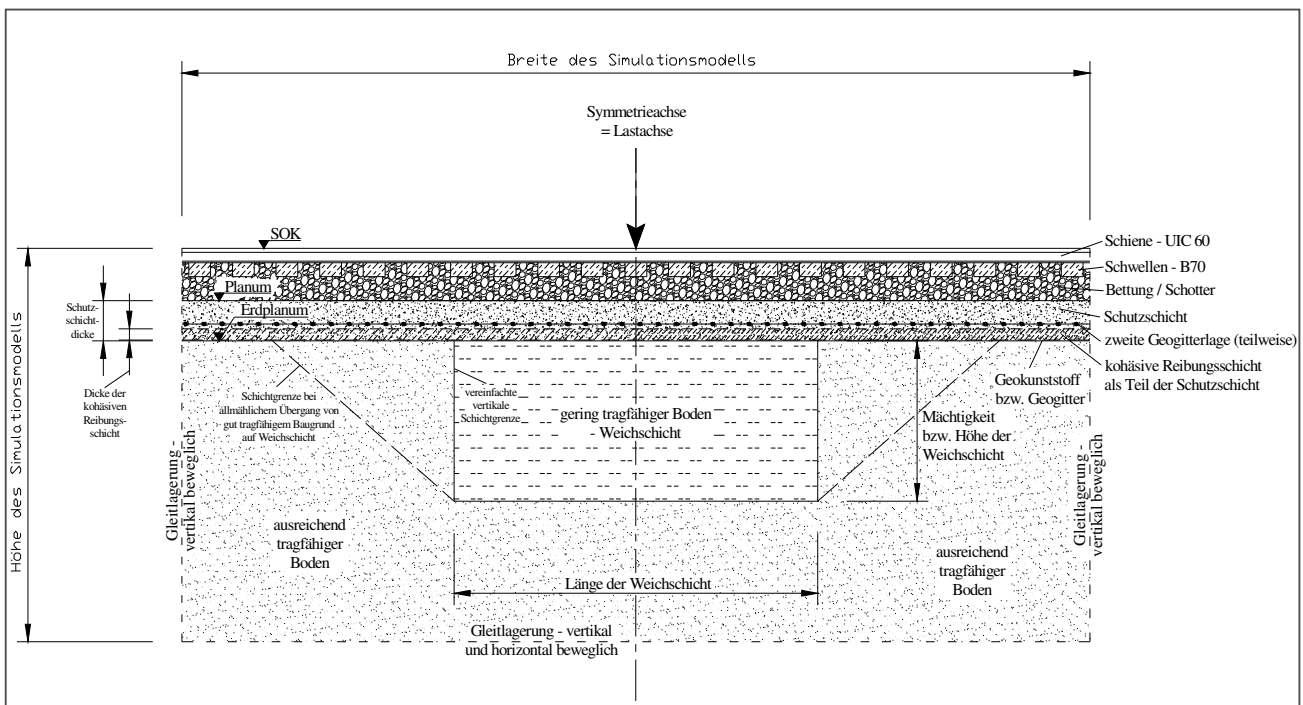


Abbildung 10 Darstellung des Simulationsmodells als Längsschnitt in Gleisachse

Für die Simulation der Geokunststoffbewehrung als „zusätzliche Kohäsion“ wurde angenommen, dass der Geokunststoff seine Zugfestigkeit über Reibung und Verzahnung in den umliegenden Boden einträgt. Der Tragschicht wurde entsprechend eine durch die Bewehrungswirkung hervorgerufene „künstliche Kohäsion“ zugeordnet. Dabei wurde die Zugfestigkeit des Geokunststoffes auf die gesamte Schutzschichtdicke ( $h_{PSS} = 0,5 \text{ m}$ ) bzw. auf einen als Reibungsschicht bezeichneten Teilbereich der Schutzschicht „umgerechnet“.

Die Belastung erfolgte in der Symmetrieachse des Simulationsmodells und damit mittig der Weichschicht mittels einer quasistatischen Last von  $P = 96 \text{ kN}$ .

Als Ergebnis wurden die elastischen und plastischen Verformungen auf:

- der Schienenoberkante (SOK) und
- dem Erdplanum (EPL)

ermittelt.

Insgesamt wurden dabei 120 Einzelsimulationen mit jeweils 3 verschiedenen Werten der jeweils oben aufgeführten veränderlichen Größen durchgeführt

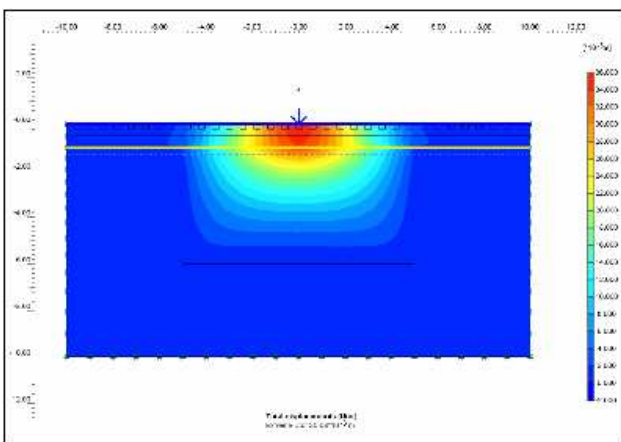


Abbildung 11 Gesamtverformungen des Simulationsmodells der FE-Simulation

In der nachfolgenden Abbildung 12 sind die verschiedenen berechneten Verformungswerte in Abhängigkeit von der Dehnsteifigkeit des Geogitters und der Art der Modellierung aufgetragen. Der konstruktive Aufbau der Eisenbahnstrecke, die Geometrie der Weichschicht (Länge = 10 m, Höhe = 5 m) sowie der Verformungsmodul der Weichschicht ( $E_{ref} = 5 \text{ MN/m}^2$ ) sind bei den hierbei betrachteten Einzelsimulationen konstant.

Bei der Betrachtung der Abbildung 12 wird ersichtlich, dass bei der Simulation des Geokunststoffes mit dem alleinigen Ansatz seiner Dehnsteifigkeit im Vergleich mit dem Referenzmodell ohne Geokunststoffbewehrung marginale Verformungsreduzierungen erzielt werden können. Auch durch den Ansatz einer sehr hohen Dehnsteifigkeit bleiben deutliche Verformungsreduzierungen aus. Mit dem Ansatz der zusätzlichen Kohäsion einer Reibungsschicht hingegen können in der FE-Simulation deutliche Verformungsreduzierungen dargestellt werden, welche tendenziell den auf der Strecke Hamburg - Berlin messtechnisch ermittelten Untersuchungsergebnissen entsprechen.

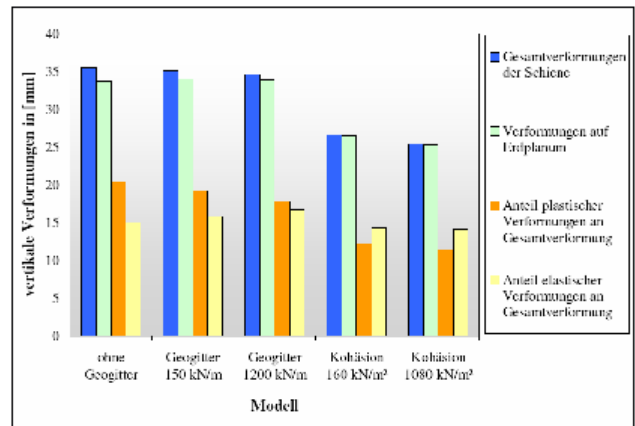


Abbildung 12 Abhängigkeiten der elastischen und plastischen Verformungen auf dem Niveau der Schienenoberkante und des Planums von der Art der Modellierung des Geokunststoffes

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

1. Die messtechnisch ermittelten Ergebnisse zeigen, dass durch den Einbau bewehrter Tragschichtsysteme die Beanspruchungen auf anstehende Weichschichten reduziert und die Widerstände des gleisnahen Tragsystems erhöht werden können.
2. Aus den Messergebnissen lassen sich wirklichkeitsnähere dynamische Elastizitätsmoduln ermitteln, mit denen Prognoseberechnungen für andere Zuggattungen und Geschwindigkeiten möglich sind.
3. Sowohl der Ansatz der Erhöhung des Eigenverformungsmoduls als auch der Ansatz einer äquivalenten zusätzlichen Kohäsion ist geeignet die Geokunststoffwirkung zu simulieren, es zeigen sich deutliche Verformungsreduzierungen.
4. Der Einsatz von hochzugfesten Geogitters bringt in den Simulationsberechnungen gegenüber einem normalzugfesten Geogitter nur geringe Reduzierungen der Verformungen.
5. Die günstigen Wirkungen bewehrter Tragschichtsysteme können durch weitere Maßnahmen, wie die Verringerung der Einwirkungen durch Einsatz elastischer Elemente ergänzt werden.
6. Die Untersuchungen stellen einen derzeitigen Zwischenstand dar, der durch Messungen bei der Betriebsgeschwindigkeit von 230 km/h und durch weitere theoretische Untersuchungen bestätigt werden muss.

#### 5 LITERATUR

- [1] „Reduzierung der Einwirkungen auf Erdbauwerke durch den Einsatz von hochelastischen Elementen im Oberbau, Zwischenbericht; VDE 2, ABS Hamburg - Berlin, 2. Ausbaustufe, Erprobungsabschnitt km 76,300 - km 76,800, Betriebsprüfung von E14-Stützpunkten und besohnten Schwellen, GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, 30.07.2004.
- [2] „Geotechnischer Bericht; Nacherkundung; ABS Hamburg-Berlin, 2. Ausbaustufe, Los 1, km 14,680 - km 79,254, Teilobjekt Bf Neustadt/Dosse, km 76,600 - km 79,254“, ARGE Baugrund, 26.06.2001.
- [3] Haase, C.: „Untersuchungen zur Wirkungsweise und Bemessung von geokunststoffbewehrten Schichtsystemen in Verkehrswegen“, Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), 19.03.2004.