

# Dynamische Langzeitstabilität des Unterbaus in Verkehrswegen für LKWs

Dipl.-Ing. Hartmut Reichenbach & Dr.-Ing. Thomas Rumpelt  
*Sachverständige für Geotechnik, Smolczyk & Partner GmbH, Stuttgart*

**ZUSAMMENFASSUNG:** In einer Probestrecke mit hohen dynamischen Beanspruchungen, die über die LKW-Belastungen der einschlägigen Regelwerke des Straßenbaus hinausgehen, wurde die dynamische Langzeitstabilität des Unterbaus untersucht. Durch Schwingungsmessungen in der Probestrecke, durch zyklische und dynamische Laborversuche an Bodenproben aus dem Untergrund der Probestrecke und unter Anwendung eines Bemessungsverfahrens aus dem Eisenbahnbau konnte die Langzeitstabilität des Unterbaus beurteilt und daraus Vorgaben für die Ausbildung des Unterbaus bei erhöhten dynamischen Beanspruchungen abgeleitet werden.

## 1. EINLEITUNG

Durch die Erhöhung von Achslasten im LKW-Verkehr oder durch die Verstärkung der dynamischen Wirkung von üblichen Achslasten, z.B. infolge von Straßenschäden, Unebenheiten, planmäßigen Schwellen oder die Erhöhung der Fahrtgeschwindigkeiten, wird auch die dynamische Beanspruchung auf der Unterbau der Verkehrswege verstärkt. Bei Anwendung der einschlägigen Regelwerke des Straßenbaus (RStO, ZTVE etc.), wäre daher eine verkürzte Lebensdauer des Fahrbahnaufbaus zu befürchten.

Die hier dargestellten Untersuchungen hatten zum Ziel, eine hinreichend sichere Grundlage für die Festlegung eines dauerhaft tragfähigen Unterbaus für dynamisch stark beanspruchte Verkehrswege zu liefern. Dies ist von besonderer Bedeutung im Bereich wenig tragfähiger Böden oder bei hohem Grundwasserstand. Dazu wurden an einer etwa 60 m langen Probestrecke die dynamischen Einwirkungen aus LKW-Überfahrten gemessen und im Laborversuchen die dynamische Stabilität verschiedener Boden-Bindemittel-Gemische untersucht.

## 2. AUFBAU DER PROBESTRECKE

Die Fahrbahnoberfläche der Probestrecke wurde als „Waschbrett“-Profil ausgebildet, so dass gegenüber normalen Straßen eine erhöhte dynamische Belastung bei Überfahrten mit LKWs wirkt. Die Fahrbahnplatten wurden als Betonfertigteile hergestellt und in einem Mörtelbett auf einer hydraulisch gebundenen Tragschicht verlegt. Darunter folgt ein Schichtaufbau mit einer ungebundenen Schottertragschicht,

einer Frostschutzschicht aus Kiessand und einer qualifizierten Bodenverbesserung im Untergrund. Dieser besteht aus einem wasserempfindlichen, feinsandigen Schluff mit geringer Tragfähigkeit.

### 3. MESSUNGEN AN DER PROBESTRECKE

In der etwa 60 m langen Probestrecke wurden in zwei Messquerschnitten die dynamischen Beanspruchungen des Unterbaus in verschiedenen Tiefen gemessen. Dafür wurden Beschleunigungsaufnehmer an der Fahrbahnoberfläche sowie in verschiedenen Tiefen unter der Fahrbahn installiert, siehe Abbildung 1. Bei Testfahrten mit zwei LKW-Typen unter Variation der Beladungen und Fahrgeschwindigkeiten wurde die dynamische Beanspruchung des Unterbaus gemessen.

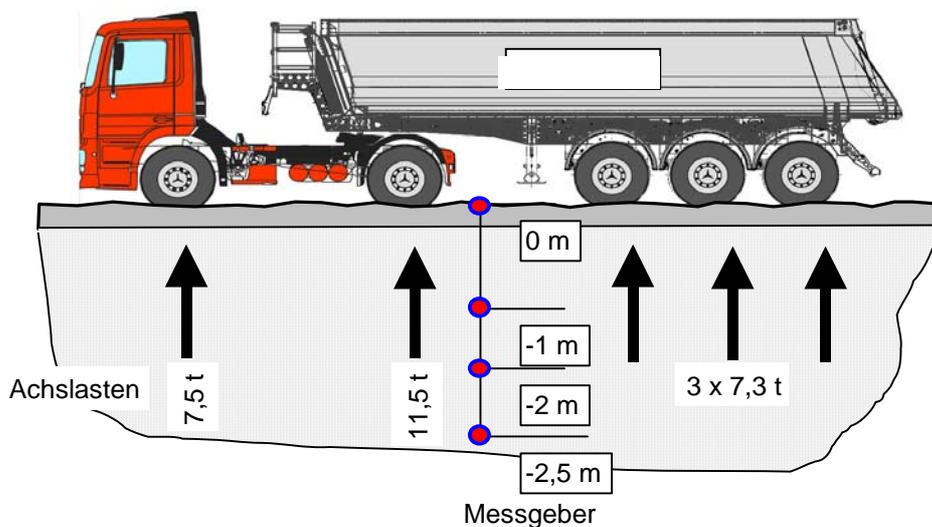


Abbildung 1: Messquerschnitt in der Probestrecke

Bei den Überfahrten mit verschiedenen Testfahrzeugen und Geschwindigkeiten betrug die maximale Schwinggeschwindigkeit bis 3,6 mm/s.

Bei Betrachtung der Daten zeigt sich eine Überlagerung von zwei Verformungskurven: ein einmaliges Durchschwingen des Gesamtsystems unter der Fahrzeuglast überlagert von einer Eigenfrequenzschwingung von etwa 13 Hz, siehe Abbildung 2.

Aus dem Vergleich der Kurven in 1 m Tiefe und 2 m Tiefe ist bereits zu erkennen, dass die Verformungen zur Tiefe hin geringer werden, analog zur Lastausbreitung der Verkehrslast. Aus der Setzungsdifferenz zwischen 1 m und 2 m lässt sich näherungsweise eine Dehnung und über den dynamischen Elastizitätsmodul damit eine Spannung ableiten, die wir als Grundlage für die Wahl der Versuchsparameter der zyklischen Triaxialversuche (siehe unten) herangezogen haben.

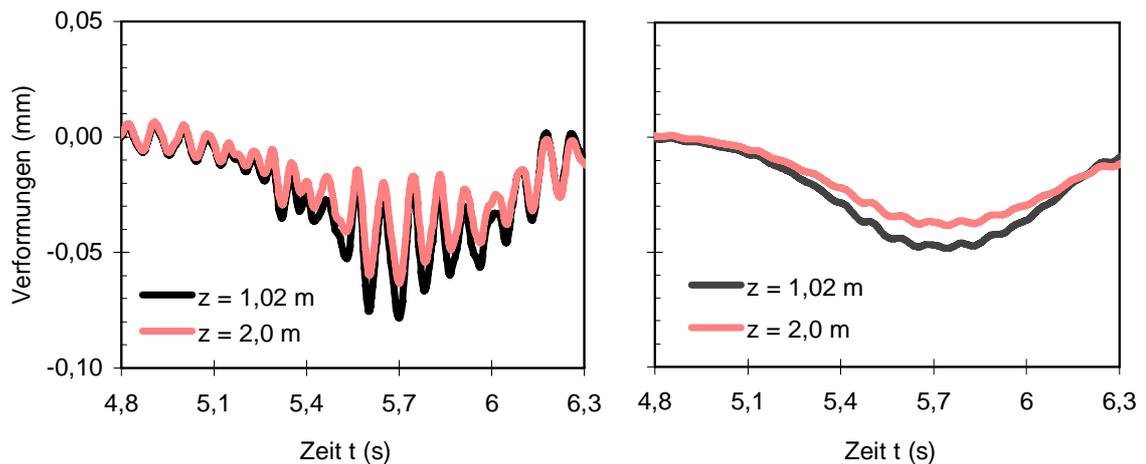


Abbildung 2: Überlagerung der Eigenfrequenz-Schwingungen mit dem Durchschwingen unter der Fahrzeuglast; rechts: geglättete Messwerte, Tiefe 1,02 m und 2,0 m

Die Abnahme der Schwingungsgeschwindigkeiten zur Tiefe kann nach Rump et al (1996) durch folgende Funktion beschrieben werden:

$$v_{\text{res,eff}} = v_{\text{OK}} \cdot e^{(-z/a)} \quad (1)$$

mit  $v_{\text{res,eff}}$ : resultierende effektive Schwingungsgeschwindigkeit in mm/s,

$v_{\text{OK}}$ : Schwingungsgeschwindigkeit an Fahrbahnoberkante, analog  $v_{\text{SU}}$  beim Eisenbahnen

$z$ : Tiefen unter OK Fahrbahn;  $a$ : Absorptionsfaktor

bei Eisenbahnen mit Schotteroberbau ist  $a = 2$

bei Eisenbahnen mit fester Fahrbahn ist  $a = 5$

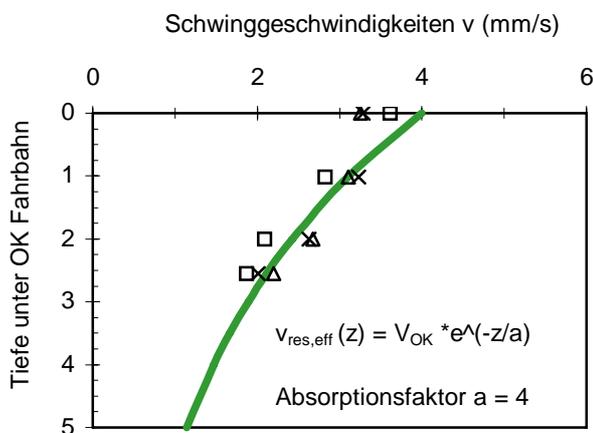


Abbildung 3: Entwicklung der Schwingungsgeschwindigkeit zur Tiefe bei verschiedenen Fahrzeug-Überfahrten

In Abbildung 3 sind die Messwerte der Schwingungsgeschwindigkeiten für unterschiedliche Tiefen aufgetragen, wobei für die Teststrecke ein Absorptionsfaktor von  $a = 4$  als statistisch beste Annäherung ermittelt wurde, also ähnlich dem Faktor bei einer festen Fahrbahn.

## 4. LABORUNTERSUCHUNGEN

Der anstehenden Untergrund, ein feinsandigen Schluff der Bodengruppe ST/TL, sollte durch eine qualifizierte Bodenverbesserung mit Bindemitteln stabilisiert werden. Hierfür wurde das Verhalten verschiedener Boden-Bindemittel-Gemische in Resonant-Column-Tests (RC-Tests) und zyklischen Triaxialversuchen untersucht. Ziel war es, einen Festigkeitsverlust des Unterbaus oder im Grundwasser eine Mögliche Verflüssigung unter der dynamischen Einwirkung zu vermeiden.

### 4.1 ERGEBNISSE DER RC-TESTS

Für den unverfestigten Boden betrug der dynamische Schubmodul bei sehr kleinen Dehnungsamplituden  $G_{\text{dyn},0} = G_{\text{dyn}}(\gamma^{\text{ampl}} < 10^{-6}) = 40,3 \text{ MN/m}^2$ , siehe Abbildung 4. Für den mit 3 % Tragschichtbinder (Doroport TB N, Georoc GmbH Dotternhausen) verfestigten Boden wurde eine 6,8fach größere Steifigkeit ( $G_{\text{dyn},0} = 273,3 \text{ MN/m}^2$ ) gemessen. Für die Probe mit 6 % Doroport wurden nochmals deutlich größere Steifigkeiten gemessen ( $G_{\text{dyn},0} = 409,9 \text{ MN/m}^2$ ), was bezogen auf den Schubmodul des nicht verfestigten Bodens einem Verhältnis von 10,2 entspricht. Mit zunehmendem Bindemittelgehalt steigt demnach erwartungsgemäß der dynamische Schubmodul.

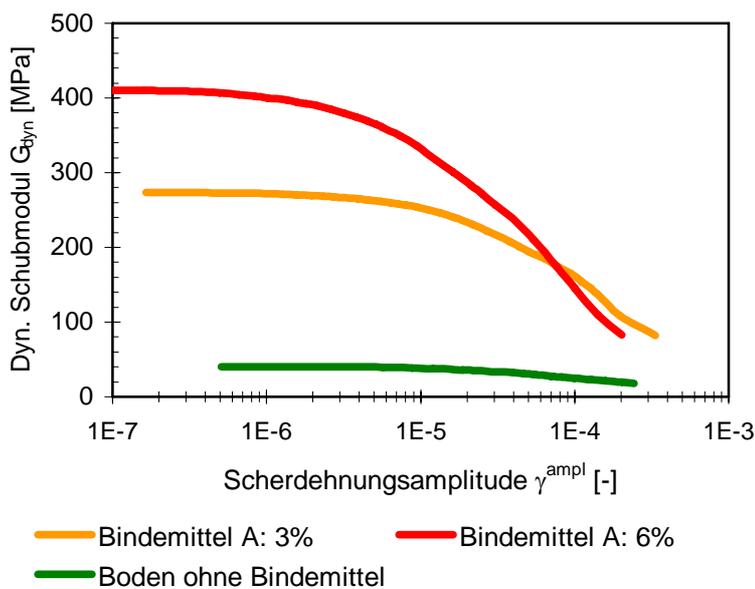


Abbildung 4: Dynamischer Schubmodul als Funktion der Scherdehnungsamplitude

Abbildung 5 enthält die auf den Anfangswert  $G_{\text{dyn},0}$  bezogene Reduzierung des dynamischen Schubmoduls mit zunehmender Scherdehnungsamplitude. Je größer die anfängliche dynamische Steifigkeit ist, desto schneller fällt der Wert der bezogenen Steifigkeit  $G_{\text{dyn}}/G_{\text{dyn},0}$  mit zunehmender Scherdehnungsamplitude  $\gamma^{\text{ampl}}$  ab. So wurde die schnellste verhältnismäßige Abnahme für die mit 6 % Doroport verfestigte Probe und der langsamste Abfall für den unverfestigten Boden gemessen. Die Dehnungsamplitude  $\gamma_{\text{tl}}$ , die die Grenze zwischen linear-elastischem und nichtlinear-elastischem

Materialverhalten markiert, ist zwischen  $\gamma_{t,l} = 2 \cdot 10^{-6}$  (Doroport, 6 %) und  $\gamma_{t,l} = 1 \cdot 10^{-5}$  (unverfestigter Boden) anzusiedeln.

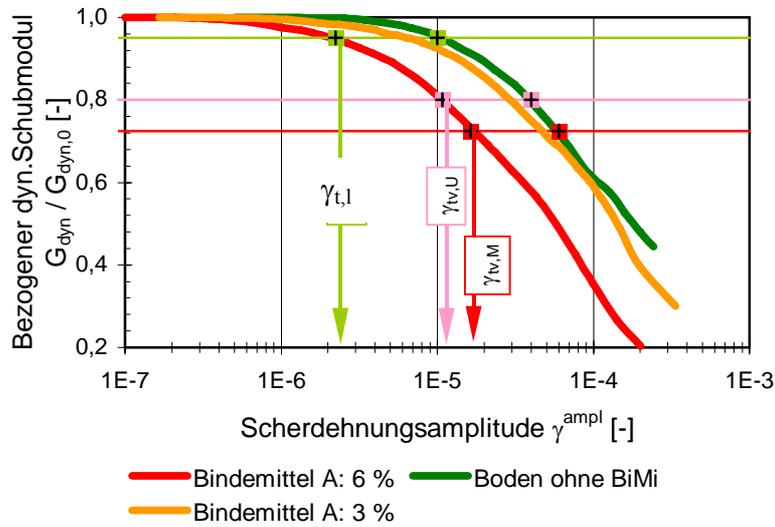


Abbildung 5: Auf den Anfangswert bei sehr kleinen Dehnungsamplituden bezogener dynamischer Schubmodul (RC-Tests)

In Abbildung 6 ist die Stauchung  $\Delta h$  der Probe in der axialen Richtung in Abhängigkeit der Scherdehnungsamplitude  $\gamma^{\text{ampl}}$  dargestellt. Die Akkumulation bleibender Dehnungen setzt zwischen  $\gamma^{\text{ampl}} = 1,5 \cdot 10^{-5}$  (Doroport, 6 %) und  $\gamma^{\text{ampl}} = 3 \cdot 10^{-5}$  (unverfestigter Boden) ein. In diesem Bereich ist die Grenzdehnungsamplitude  $\gamma_{tv}$  anzusiedeln, die das nichtlinear-elastische vom nichtlinear-plastischen Materialverhalten trennt, d.h. den Beginn bleibender Verformungen markiert.

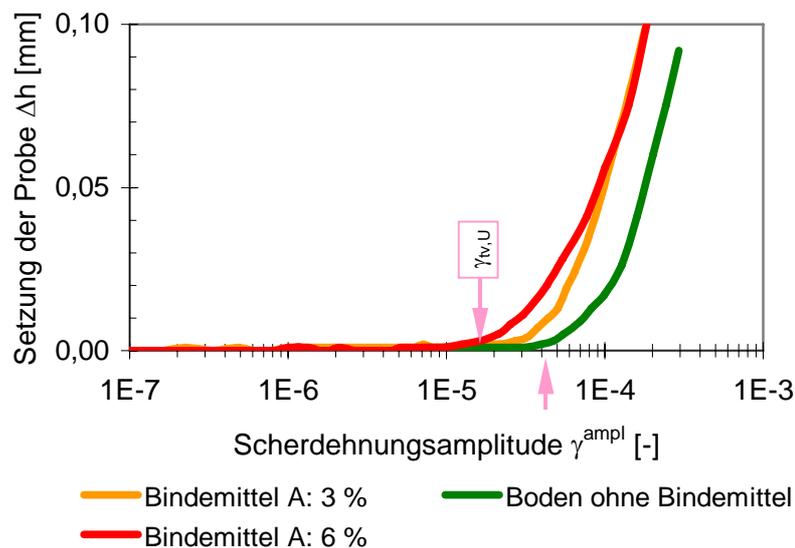
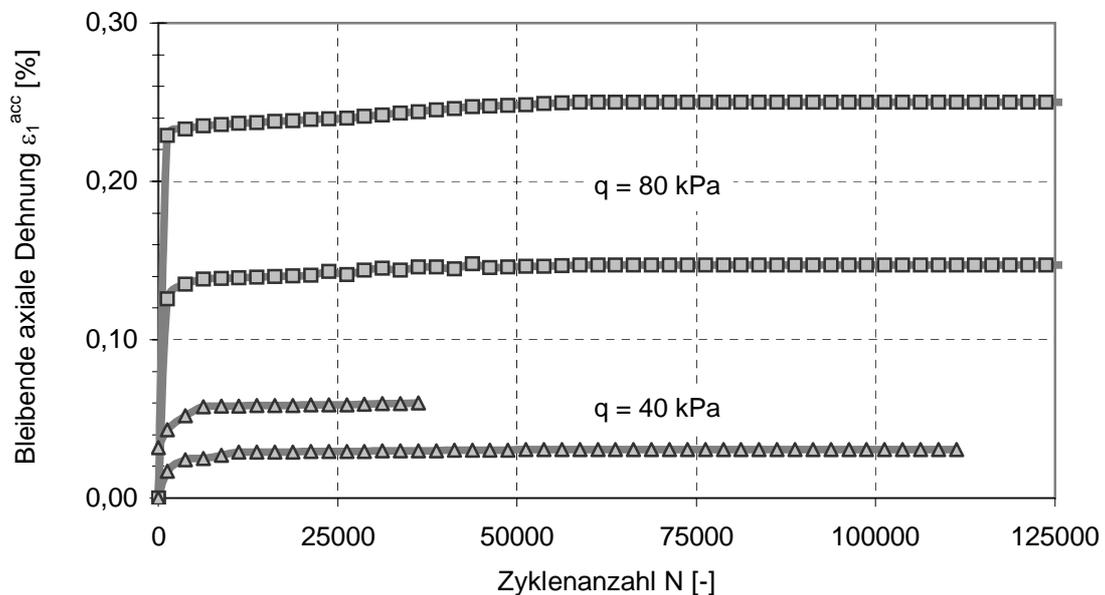
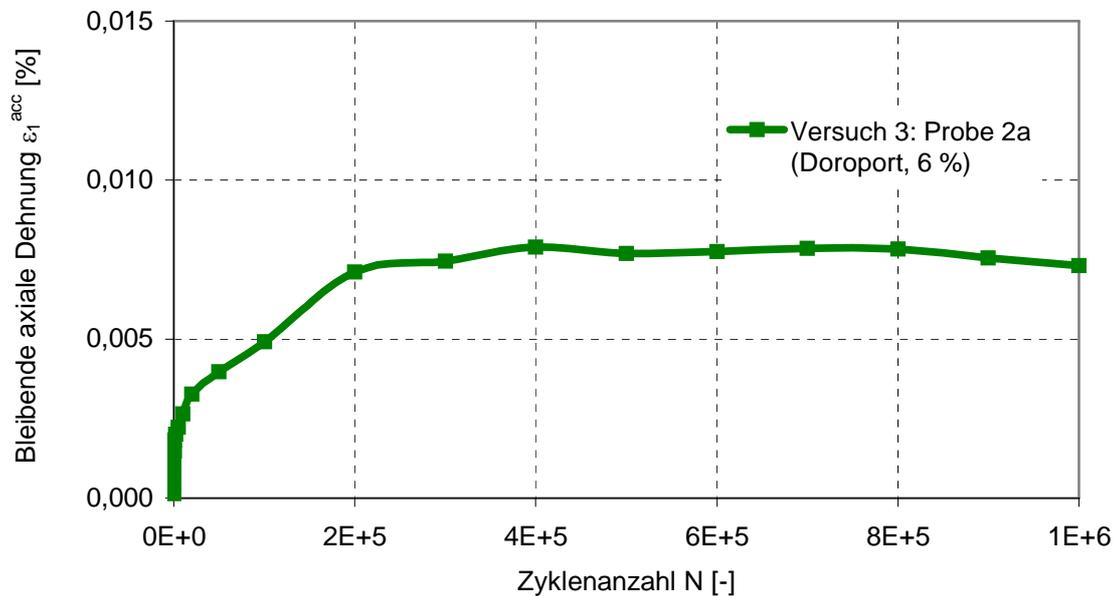


Abbildung 6: Axiale Zusammendrückung der Probe als Funktion der Scherdehnungsamplitude (RC-Tests)

## 4.2 ZYKLISCHE TRIAXIALVERSUCHE

Die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse des zyklischen Triaxialversuchs an einer Probe mit 6 % Doroport zeigen eine Stabilisierung der Setzungen nach etwa 200.000 Lastzyklen bei sehr geringen Dehnungen von 0,01 %. Dies entspricht bei einer Schichtdicke von 1 m Langzeitsetzungen von  $s_N \approx 0,1$  mm.



Für die Schichten des Oberbaus sind ähnliche Versuchsergebnisse in der Literatur zu finden: Nach Gidel et al (2001) liegen die bleibenden axialen Verformungen

verschiedener Kalkstein- und Hartstein-Tragschicht-Materialien unter vergleichbaren Lasteinwirkungen bei  $\varepsilon_1^p$  bei 0,1 % bis 0,5 %, wobei die Stagnation der Verformungen deutlich schneller einsetzt.

## 5. FOLGERUNGEN FÜR DIE DIMENSIONIERUNG DES UNTERBAUS

Die Folgerungen für die Festlegung eines Unterbaus von dynamisch stark beanspruchten Verkehrswegen beruhen auf einem Verfahren zur Bewertung der Langzeitstabilität von Erdbauwerken unter Eisenbahnverkehr, das von Hu et al (2003, 2004) veröffentlicht und aufgrund der Forschungsarbeit von Vucetic (1994) formuliert wurde.

Die unter einer dynamischen Einwirkung im Boden auftretende Scherdehnung  $\gamma$  ist im Hinblick auf die dynamische Stabilität der maßgebende Parameter. Die dynamische Scherdehnung beinhaltet einerseits die dynamische Belastungsgröße, die sich aus der Schwingungsausbreitung im Erdbauwerk ergibt (hier Schwinggeschwindigkeit  $v$ ), andererseits den Einfluss der dynamischen Steifigkeit des Bodens, der über die Scherwellengeschwindigkeit  $c_s$  eingeht:

$$\gamma = v/c_s \quad (2)$$

Die Scherwellengeschwindigkeit  $c_s$  lässt sich wie folgt berechnen:

$$c_s = (G_d/\rho)^{0,5} \quad (3)$$

mit  $G_d$ : dynamischer Schubmodul in  $\text{kN/m}^2$

$\rho$ : Dichte des Bodens in  $\text{t/m}^3$

Vucetic (1994) hat das Verhalten unterschiedlicher Bodenarten unter dynamischer bzw. zyklischer Belastung untersucht. In seiner Arbeit hat er die Ergebnisse von zahlreichen bodendynamischen Laborversuchen aus der Literatur zusammengestellt und systematisch ausgewertet. Diese Auswertung zeigt, dass unter einer dynamischen Einwirkung irreversible Veränderungen in der Struktur bzw. im Korngerüst des Bodens auftreten, sobald die Scherdehnungen eine bestimmte Grenze überschreiten. Diese Grenze wird als volumetrische zyklische Scherdehnungsgrenze  $\gamma_{tv}$  bezeichnet, wobei,  $\gamma_{tv,M}$  den Mittelwert und  $\gamma_{tv,U}$  die untere Grenze der Bandbreite für den betrachteten Boden wiedergeben.

In ordnungsgemäß nach den technischen Vorschriften erstellten Erdbauwerken wird unter dynamischen Einwirkungen aus dem Straßen- oder Eisenbahnverkehr die volumetrische zyklische Scherdehnungsgrenze  $\gamma_{tv}$  für den betrachteten Boden i. d. R. nicht erreicht. Dennoch können Erdbauwerke unter dynamischen Einwirkungen aus Verkehrslasten versagen. Dies kann z. B. geschehen, indem mit der Zeit zunehmende, große Setzungen auftreten, wodurch die Gebrauchstauglichkeit verloren geht. Die Sicherheit gegenüber dieser Art des Versagens wird als Stabilität bei langzeitigen dynamischen Einwirkungen, vereinfacht als dynamische Langzeitstabilität bezeichnet, im Gegensatz zur Standsicherheit gegenüber intensiven, kurzzeitigen dynamischen Einwirkungen - beispielsweise bei starken Erdbeben oder bei Sprengerschütterungen.

Neben den Grenzen für die volumetrische zyklische Scherdehnung  $\gamma_{tv}$  besteht nach Vucetic (1994) eine Grenze der linearen zyklischen Scherdehnung  $\gamma_{tl}$ . Solange die dynamische Scherdehnung  $\gamma$  geringer ist als die lineare zyklische Scherdehnungsgrenze  $\gamma_{tl}$  verhalten sich Böden wie linear elastisches Material.

Die beiden Scherdehnungsgrenzen  $\gamma_{tl}$  und  $\gamma_{tv}$ , die über die RC-Tests bestimmt werden können, ermöglichen eine Einstufung der unter dynamischen Einwirkungen

auftretenden Bodenreaktionen. Wenn die Scherdehnungen unterhalb der linearen zyklischen Scherdehnungsgrenze  $\gamma_{tl}$  im „grünen Bereich“ liegen, treten nur elastische Verformungen auf. Liegen die Scherdehnungen zwischen der linearen  $\gamma_{tl}$  und der volumetrischen zyklischen Scherdehnungsgrenze  $\gamma_{tv}$ , so ist mit bleibenden Verformungen zu rechnen, die mit der Anzahl der Lastzyklen zunehmen und um so größer werden, je mehr sich die Scherdehnungen der volumetrischen zyklischen Scherdehnungsgrenze nähern. Wenn die auftretenden Scherdehnungen oberhalb der volumetrischen zyklischen Scherdehnungsgrenze liegen, ist mit einem Versagen des Erdbauwerks bereits bei kurzzeitigen dynamischen Einwirkungen zu rechnen.

In Tabelle 1 sind die Nachweiskriterien der dynamischen Stabilität für Erdbauwerke zusammengefasst.

Dynamische Scherdehnung $\gamma$	$\gamma \leq \gamma_{tl}$	$\gamma_{tl} < \gamma < \gamma_{tv,U}$	$\gamma_{tv,U} \leq \gamma$
Bodenverhalten	Linear elastisch	geringe Scherdehnung nichtlinear	große Scherdehnung stark nichtlinear
Stabilität unter kurzzeitigen dyn. Einwirkungen	Erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt
Stabilität unter langzeitigen dyn. Einwirkungen	Erfüllt	erfüllt, wenn $S_N < S_{V,zul}$	nicht erfüllt
Langzeitsetzung $S_N$ infolge dyn. Verkehr	Nachweis nicht erforderlich	Nachweis erforderlich	Versagen

Tabelle 1: Nachweiskriterium der dynamischen Stabilität

Für die Bewertung der dynamischen Langzeitstabilität und für die Dimensionierung des Unterbaus von dynamisch stark beanspruchten Fahrbahnen wurden nun für die einzelnen Schichten des Unterbaus die dynamischen Scherdehnungen aus der Einwirkungen des Verkehrs

$$\gamma = v_{res,eff}/c_s \quad (4)$$

mit  $v_{res,eff}$ : resultierende effektive Schwinggeschwindigkeit in mm/s

$c_s$ : Scherwellengeschwindigkeit in mm/s

den aus den beschriebenen Untersuchungen abgeleiteten Grenzen der volumetrischen zyklischen Scherdehnung  $\gamma_{tl}$  und  $\gamma_{tv}$  gegenübergestellt.

In Abbildung 9 ist die maßgebliche Scherdehnung für eine angenommene dynamisch wirksame Achslast von 27 t dargestellt. Es zeigt sich, dass für die Belastung durch die 27 t Achse die zu erwartenden Scherdehnungen erst in sehr großer Tiefe in den linearen Bereich kommen. Ein Schichtaufbau entsprechend den einschlägigen Richtlinien, wie in Abbildung 9 beispielhaft dargestellt, konnte auf dem Untergrund der Probestrecke aus feinsandigem Schluff, daher nicht als dynamisch stabil bewertet werden. In Anlehnung an die Richtlinien für Erdbauwerke im Eisenbahnbau müsste für dynamische Einwirkungen dieser Größenordnung daher empfohlen, den Unterbau bis 2,3 m unter Fahrbahnoberkante zu stabilisieren.

Hierzu ist nach den Ergebnissen der Laborversuche z. B. eine qualifizierte Bodenverbesserung des Untergrundes mit Tragschichtbinder Doroport TB N geeignet, oder eine Verstärkung der ungebundenen Tragschichten.

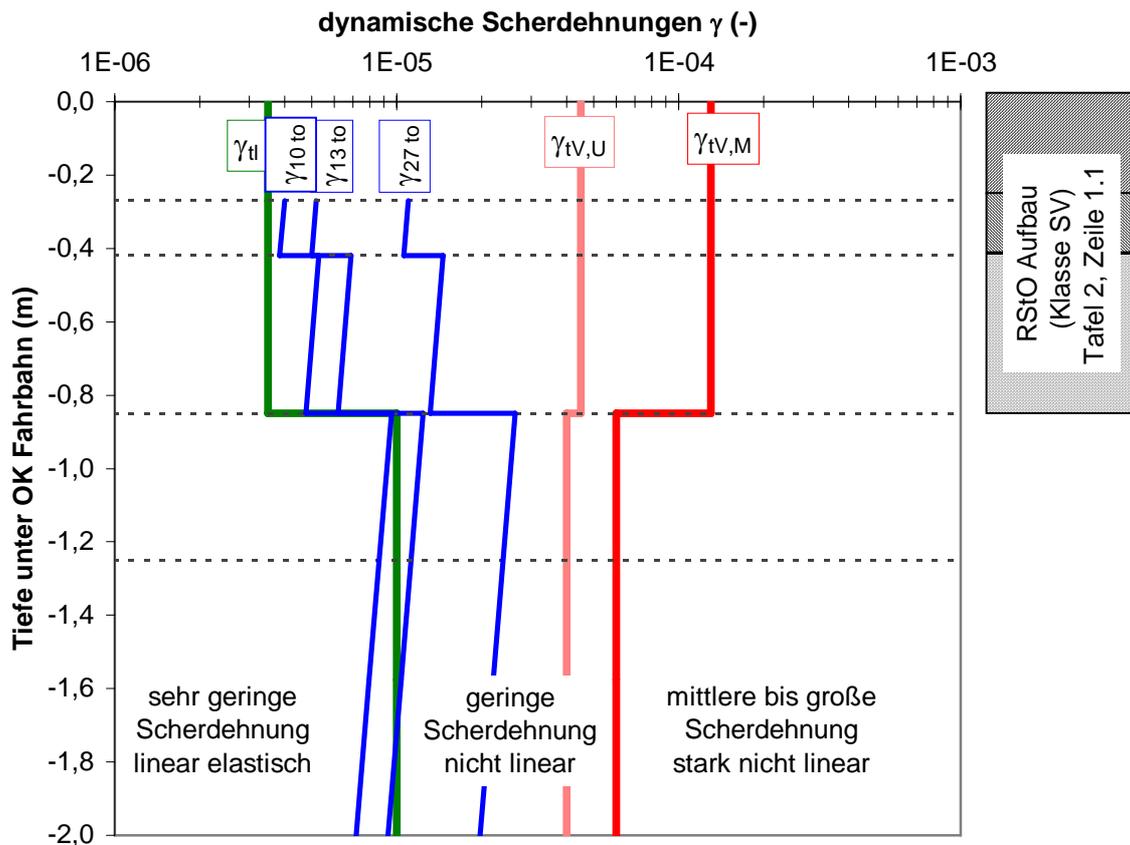


Abbildung 9: Ermittlung der dynamischen Langzeitstabilität, Nebenstrecken und Fahrbahnen.

Für Verkehrswege mit geringeren dynamischen Einwirkungen wurden die Standard-Dicken des Tragschichtaufbaus nach RStO mit dem hier beschriebenen Verfahren ebenfalls überprüft. Dabei konnten mit dem Nachweis der dynamischen Langzeitstabilität die Standarddicken für einen RStO-Aufbau mit rund 80 cm Dicke für die äquivalente 10-t-Achslast ohne dynamischen Erhöhungsfaktor bestätigt werden, wie die Darstellung in Abbildung 9 zeigt.

Straßenschäden, unplanmäßige Unebenheiten oder höhere Fahrgeschwindigkeiten, können jedoch zu einer dynamischen Erhöhung der Achslasten führen, wodurch die dynamischen Scherdehnungen im Untergrund sehr schnell auch in größeren Tiefen eine kritische Größe erreichen und im Standard-Oberbau zu unverträglichen Verformungen führen können.

## 5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das verwendete Bemessungsverfahren einerseits die Standard-Oberbaudicken der RStO bestätigt, andererseits die Erhöhung von Achslasten bzw. deren dynamischer Wirkung (z. B. durch Straßenschäden, Schwellen oder höhere Fahrgeschwindigkeiten) einen starken Einfluss auf die langfristige Stabilität des Unterbaus haben können.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Gidel, G., Hornych, P., Chauvin, J.-J., Breyse, D., Denis, A.: Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargement répétés; Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées -233- Juillet-Août 2001, Réf. 4359, S. 5-21
- Hu, Y., Gartung, E., Prühs, H., Müllner, B.: Bewertung der dynamischen Langzeitstabilität von Erdbauwerken unter Eisenbahnverkehr. Geotechnik 26 (2003) Nr.1
- Hu, Y., Haupt, W., Müllner, B.: ResCol-Versuche zur Prüfung der dynamischen Langzeitstabilität von TM/TA-Böden unter Eisenbahnverkehr. Bautechnik 81 (2004) Heft 4
- Rump, R.; Ehling, B.; Rehfeld, E. (1996): Wirkung von Verkehrserschütterungen auf Erdbauwerke und ungebundene Tragschichten im Oberbau. In: ETR 45, Nr. 7/8.
- Vucetic, M.: Cyclic threshold shear strain soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120 (1994), 12