

## **Dynamische Extensometer- und Druckspannungsmessungen an Schienenverkehrswegen**

Dipl.-Ing. A. Gotschol, Dipl.-Ing. T. Stöcker, Univ.- Prof. H.- G. Kempfert  
Fachgebiet Geotechnik, Universität Gh- Kassel

### **1 Einleitung**

Für die Entwicklung, Bemessung und Konstruktion moderner Schienenwege ist unter anderem die Kenntnis der Druckspannungen und Schwingwege bei Zugüberfahrt im Untergrund von Interesse. Anhand solcher Meßergebnisse können analytische und numerische Modelle kalibriert und insgesamt das Untergrundverhalten und deren Beanspruchung überprüft werden.

In den vergangenen Jahren wurden an verschiedenen Neu- und Ausbaustrecken der DB-AG Versuchsstrecken mit Oberbausystemen Fester Fahrbahn verschiedener Hersteller eingerichtet. Das Verhalten des Untergrundes bei Zugüberfahrt über die Feste Fahrbahn wurde dabei meßtechnisch untersucht und mit dem traditionellen Schotteroberbau verglichen. In diesem Zusammenhang wurde das Schwingverhalten und der Spannungsverlauf im Untergrund infolge Zugüberfahrt meßtechnisch erfaßt.

Trotz der zum Teil sehr hohen Ausfallquoten von im Untergrund eingebauter Spannungsgeber liegen insgesamt brauchbare Erkenntnisse vor. Die bestehenden Meßsysteme bzw. Spannungsgeber sind damit auch für dynamische Meßaufgaben einsetzbar, wobei die größte Fehlerquelle in der Regel im unsachgemäßen Einbau vor Ort liegt. Das Messen der Untergrunderschütterungen während einer Zugüberfahrt erfolgt vorwiegend durch Messen der Schwingbeschleunigung bzw. -geschwindigkeit. Durch anschließendes Integrieren wird der Schwingweg berechnet. Bei dieser Signalbehandlung treten jedoch verstärkt Schwierigkeiten, resultierend aus Signalrauschen und Signaldrift auf, wodurch die Signalbearbeitung in der Regel sehr aufwendig oder gar unmöglich wird. Durch nachgeschaltete Filter (z. B. Bandpaßfilterung) gehen oftmals wichtige Signalinhalte verloren.

Aus den in der Vergangenheit aufgetretenen Problemen ergab sich das Ziel ein Meßsystem zur direkten Schwingwegmessung in Form eines dynamischen Extensometers zu entwickeln. Damit ist die direkte Schwingwegmessung ohne weitere Signalbearbeitung

möglich. Ein derartiges dynamisches Extensometer wurde erstmals im Frühjahr 1999 bei einem Feste Fahrbahnssystem auf einer Strecke der DB AG eingesetzt.

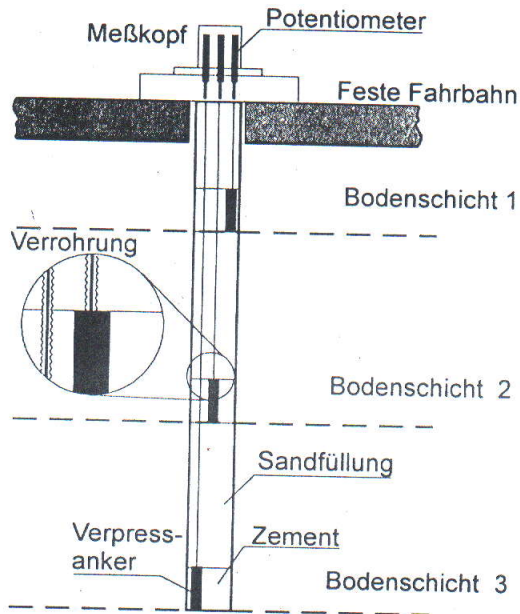
Gleichzeitig wurde die Meßdatenerfassung der Druckspannungs- und Schwingungsmessung neu konzipiert, so daß selbst bei sehr hohen Abtastraten ( $> 10$  kHz) die Registrierung kompletter Zugüberfahrten möglich ist. Die Meßdatenerfassung wurde gleichzeitig in der Art gestaltet, daß Messen, Berechnen und Auswerten in einem Arbeitsgang erfolgt.

## **2 Entwicklung des dynamischen Extensometers**

Für die zuvor genannte Aufgabenstellung wurde am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel ein dynamisches Extensometer entwickelt. Die Grundversion bildet ein handelsübliches Mehrfachextensometer, welches für die spezielle Aufgabenstellung der Schwingwegmessungen im Unterbau und Untergrund von Schienenwegen modifiziert werden mußte. Neben einigen konstruktiven Veränderungen am Extensometer selbst wurde die Meßdatenaufnahme neu konzipiert. Für derartige Anwendungen ist eine Meßdatenaufnahme im kHz Bereich notwendig. Die verwendeten Widerstandswegaufnehmer geben ihre analogen elektrischen Signale an eine PC- Meßkarte, wo sie für die weitere Auswertung digitalisiert werden. Die Meßsignale können im Rechner bereits während der Aufnahme ausgewertet werden, so daß die Ergebnisse der Messungen sofort zur Verfügung stehen. Das notwendige Meßequipment ist vielseitig einsetzbar, Platz sparend und relativ kostengünstig. Neben den Meßsensoren wird ein handelsüblicher PC mit einer Multifunktionskarte und ein Datenpanel benötigt. Für die Aufnahme und Speicherung der Messungen ist eine kommerzielle Meßsoftware wie HP VEE, DasyLab oder  $\mu$ Lab notwendig.

Entsprechend dem Schichtenaufbau des Unterbaues und Untergrundes des Verkehrsweges wurde ein Mehrfachextensometer gewählt. Um die einzelnen sehr kleinen Schwingwege in Untergrundschichten mit dem Extensometer zu registrieren wurde ein spezielles Schutzrohr für das Extensometergestänge verwendet und der Übergang vom Schutzrohr zum Anker beweglich ausgebildet. Somit ist die reibungsfreie Bewegung des Extensometergestänges im Schutzrohr möglich und die Schwingungen des im Untergrund einzementierten Ankers werden weitgehend verlustfrei an die Wegaufnehmer geleitet. Zur sensiblen Erfassung selbst geringer Untergrundschwingungen wurde die Verpreßstrecke der Anker auf ein Minimum reduziert und damit der Einfluß einer zu großen mitschwingenden starren Masse minimiert. Der Bohrdurchmesser wurde aus gleicher Überlegung heraus auf 78

mm begrenzt. Der kraftschlüssige Verbund zwischen dem anstehenden Lockergestein und den Ankerpunkten wurde mit einem quellfähigen und schnellabbindenen Zementmörtel realisiert.



**Bild 1:** Schematische Darstellung des dynamischen Extensometers

Grundsätzlich sollte bei dem hier beschriebenen System eine Tiefenverankerung im nicht mitschwingenden Locker- bzw. Festgesteinshorizont, im allgemeinen ca. 10 m unter SO vorgesehen werden. Dies beinhaltet die Verpressung des untersten Ankers im vorgenannten Horizont, womit gewährleistet wird, daß die am Kopf registrierten Schwingwege (Referenzsignal) in bezug auf diesen untersten Anker den absoluten Verschiebungen des Meßkopfes entsprechen. Wie näher in Abschnitt 5 erläutert, können auf diese Weise die einzelnen relativen Schwingwege der Ankerpunkte ohne weitere Datenaufbereitung vom Referenzsignal subtrahiert werden. Als Ergebnis werden die einzelnen absoluten Schwingwege erhalten.

Grundsätzlich können als Vorteile der direkten Wegmessung mit dem hier vorgestellten dynamischen mehrfach Extensometer gegenüber anderen indirekten (integrativen) Verfahren genannt werden,

- direkte Erfassung der Schwingwege;
- keine nachträgliche Bearbeitung der Signale (Integration) erforderlich, dadurch verminderter Bearbeitungsaufwand;
- durch Installation aller Ankerpunkte eines Mehrfachextensometer in ein und dem selben Bohrloch wird in jeder Tiefenlage das zeitgleiche Erregersignal erfaßt. Eine

räumliche Trennung einzelner Sensoren hätte den Nachteil der zeitlichen Verschiebung der gemessenen Signale (durch Zugüberfahrt) und damit ggf. eine unterschiedliche Registrierung dynamischer Lasteinleitungen in den Verkehrsweg (z.B. durch Flachstellen am Rad, Schienenwelligkeit u. a. Störstellen);

- eine wesentlich problemlosere Differenzierung der Wegsignale in Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen ist ebenfalls möglich.

Ist aufgrund der örtlichen Randbedingungen eine Verankerung des Systems im festen bzw. ruhenden Horizont nicht möglich, bietet sich als Ausweg die Aufmessung am Meßkopf mittels Beschleunigungs- bzw. Geschwindigkeitsaufnehmer und anschließender doppelter Integration, allerdings mit den darin enthaltenen Unwägbarkeiten an.

### **3 Meßdatenerfassung**

Die verwendeten Meßelemente sind jeweils handelsübliche Meßsensoren welche elektrische Meßgrößen ausgeben. Die Druckspannungsgeber sind ebenfalls handelsübliche Erddruckmeßdosen mit Halbleiteraufnehmern. Im Extensometerkopf sind 5 lineare Widerstands-Wegaufnehmer integriert, die ebenfalls ein Spannungssignal abgeben. Die Meßsignale beider Sensoren können von der verwendeten PC-Meßkarte aufgenommen und A/D gewandelt werden.

Als Meßkarte wurde eine high speed Multifunktionskarte gewählt und in einen PII Prozessor (360 MHz) integriert. Die Meßkarte besitzt eine Summenabtastrate von 1,25 MHz und ermöglicht das gleichzeitige Messen von 32 (single ended) oder 16 (differential ended) Kanälen. Da alle 10 Meßaufnehmer, 5 Erddruckgeber und 5 Widerstands - Wegaufnehmer gleichzeitig aufgenommen werden sollten, wurde zur Bewältigung der je Messung anfallenden Datenmenge der Arbeitsspeicher auf 256 MB erweitert.

Softwareseitig wurde mit einer graphischen Programmiersprache zur Erstellung meßtechnischer Applikationen gearbeitet. Mit dieser Software wurde für das Meßsystem ein Meßdatenerfassungs- und Auswertprogramm geschrieben. Die Kompatibilität zwischen Meßkarte und Software ist dabei vorauszusetzen. Hierfür werden von den Meßkartenherstellern für die verschiedenen Programmiersprachen Treibermodule angeboten.

Die Abtastrate wurde mit 50 kHz je Sensor eingestellt wobei ein Mittelwertabgleich aus jeweils 5 Meßwerten erfolgt. Die absolute Summenabtastrate beträgt somit 500 kHz. Um selbst lange Zugüberfahrten bei geringeren Zuggeschwindigkeiten vollständig erfassen zu können, wurde die Abtastzeit auf 20 Sekunden festgesetzt. Die in dieser Meßzeit anfal-

lenden Datenmengen werden vom Arbeitsspeicher problemlos bewältigt. Bild 2 zeigt den schematischen Aufbau der verwendeten Meßkette.

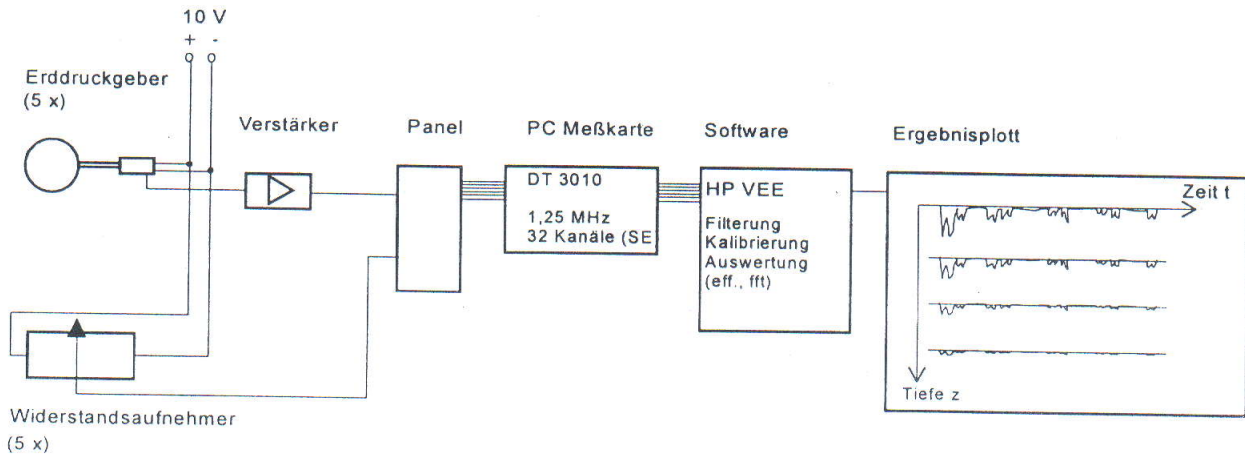


Bild 2: Schematischer Aufbau der Meßkette

#### 4 Einbau der dynamischen Extensometer und der Druckspannungsgeber

Der Einbau der Druckspannungsgeber erfolgte im Rahmen einer Gleissanierung im offenen Schurf. Die Erddruckgeber wurden dabei ausnivelliert in ein dünnes Sandbett aus enggestuftem Sand verlegt und anschließend mit anstehendem Bodenmaterial überschüttet. Bei der weiteren Verfüllung des Schurfes wurde auf eine optimale Verdichtung geachtet. Die Meßkabel wurden zusätzlich in einem Schutzrohr verlegt und in einen betonierten Meßschacht eingebunden.

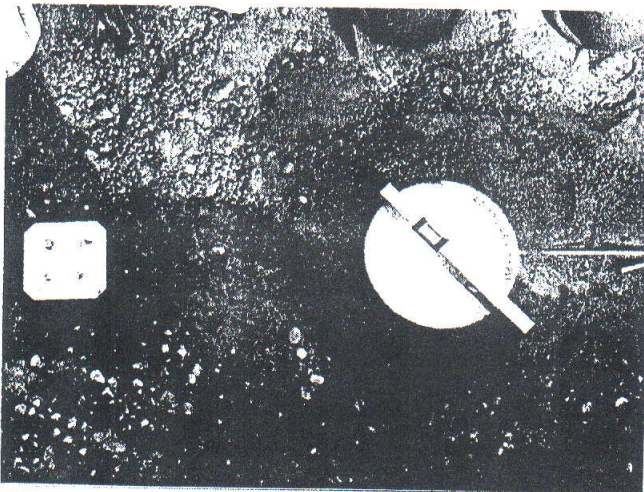
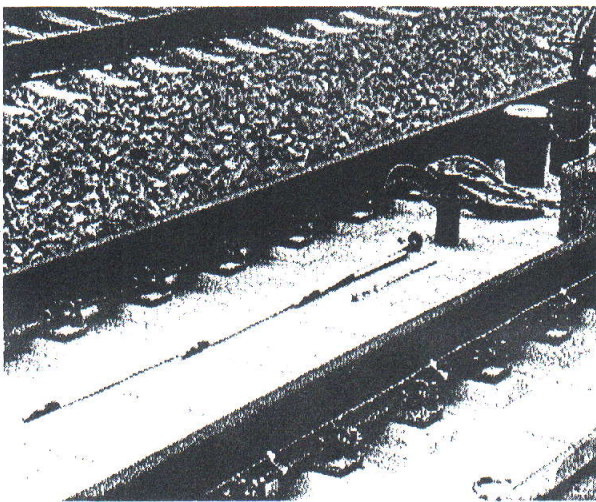


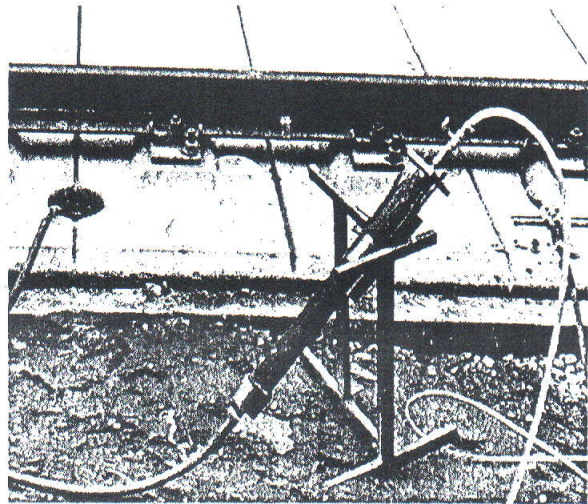
Bild 3: Einbau der Erddruckgeber

Der Einbau des Extensometers erfolgte in einer nachträglich von OK Feste Fahrbahn abgeteufte Bohrung. Dabei wurde das Extensometergestänge vorerst getrennt vom Meß-

kopf installiert. Der getrennte Einbau war notwendig, um bei dem relativ engen Bohrlochdurchmesser ausreichend Platz zum Verpressen der Anker sicherzustellen. Damit die spätere Montage des Extensometermeßkopfes problemlos erfolgen konnte, wurde für das Gestänge eine Einbaujustiervorrichtung entwickelt. Mit dieser wurde sichergestellt, daß während des Verpreßvorganges der Anker und dem anschließenden Verfüllen der freien Bohrlochstrecke die Gestänge in ihrer exakten Lage verbleiben. Parallel zum Verpressen und Verfüllen wurde die Bohrlochverrohrung gezogen. Anschließend wurde der Meßkopf mit dem Gestänge verschraubt und an die Betonfahrbahnplatte angeflanscht. Zum Schutz vor mechanischer Beschädigung wurde eine zweite Schutzhaube aus Stahl über dem Meßkopf auf der Festen Fahrbahn befestigt. Der Einbau des Extensometers ist in den Bildern 4 und 5 gezeigt.



a)



b)

Bild 4: a) Extensometer vor dem Einbau b) Pneumatische Verpreßvorrichtung

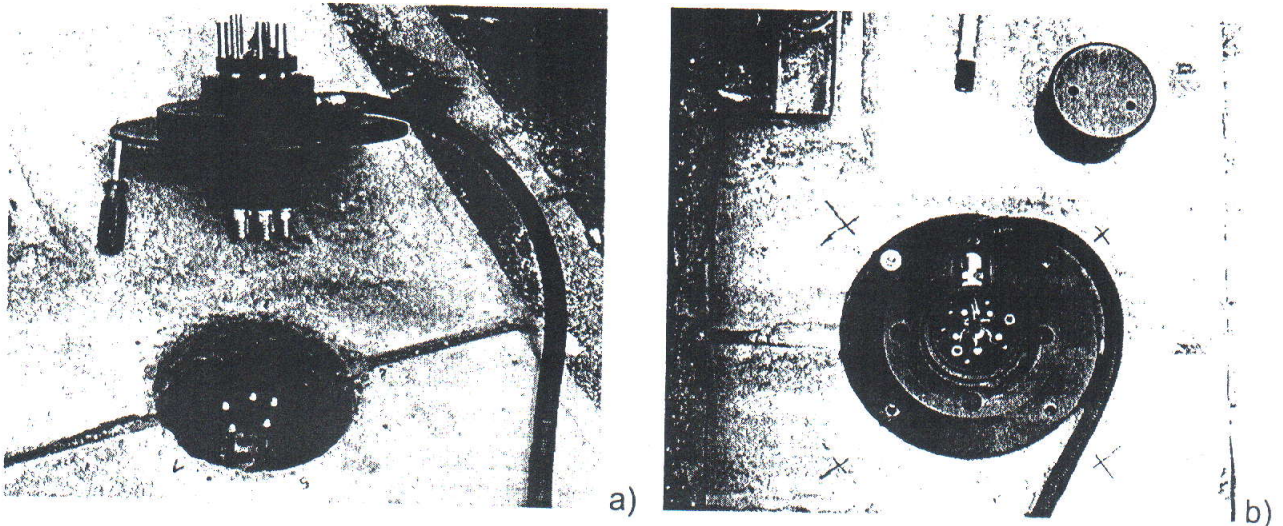
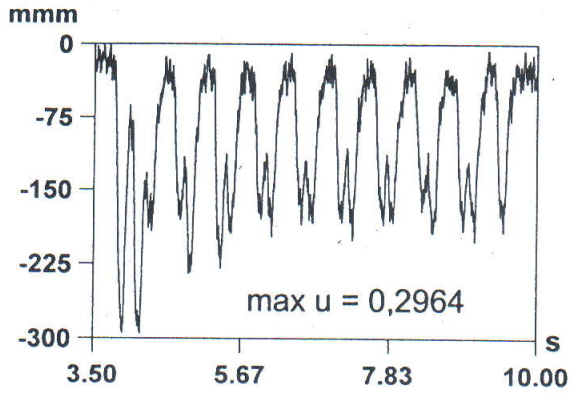


Bild 5: a) Extensometer vor der Montage des Meßkopfes b) Angeflanschter Meßkopf

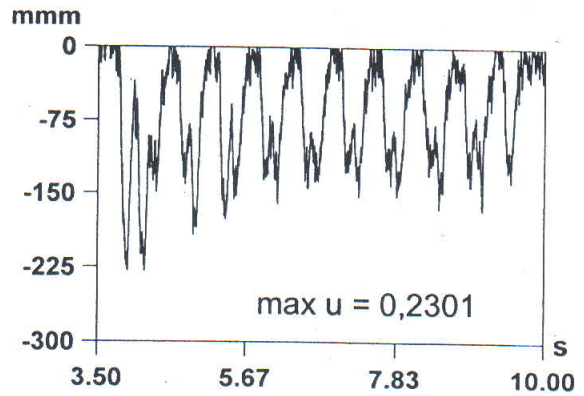
## 5 Ausgewählte Meßergebnisse

Exemplarisch sind in den Bildern 6 und 7 eine IC Überfahrt dargestellt wobei bereits die *absoluten* Schwingwege der einzelnen Tiefen-/Ankerpunkte aufgezeigt sind.

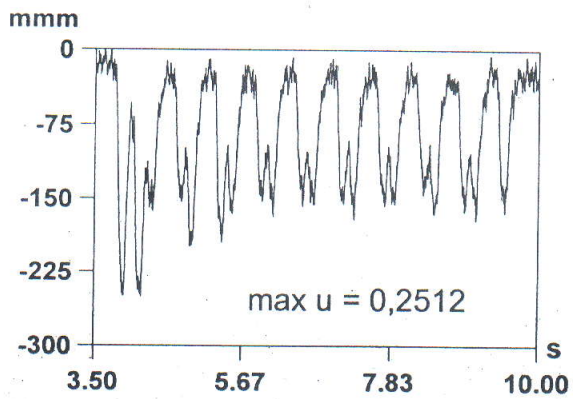
Die absoluten Schwingwege werden aus den relativen Schwingwegen wie folgt ermittelt. Das Referenzsignal bzw. die absolute Extensometerkopf-Schwingung wird durch die in Abschnitt 2 erläuterte Tiefenverankerung gewährleistet. Da sich alle Ankerpunkte des Extensometer im selben Bohrloch befinden, existiert bei zeitgleicher Triggerung eine zeitliche wie örtliche Übereinstimmung aller Meßsignale. Die einzelnen Relativschwingungen der Ankerpunkte können somit ohne jegliche weitere Bearbeitung vom Referenzsignal subtrahiert werden. Als Ergebnis erhält man die einzelnen absoluten Schwingwege.



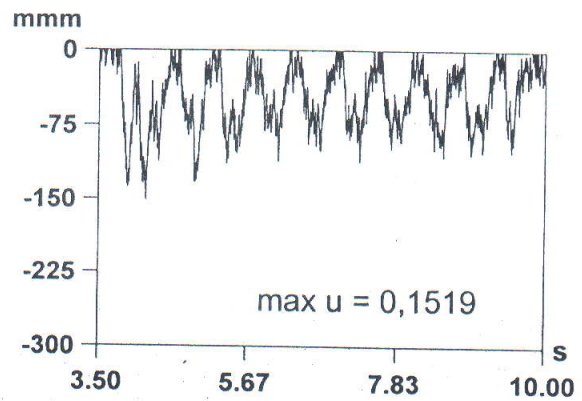
Schwingweg an OK Feste Fahrbahn



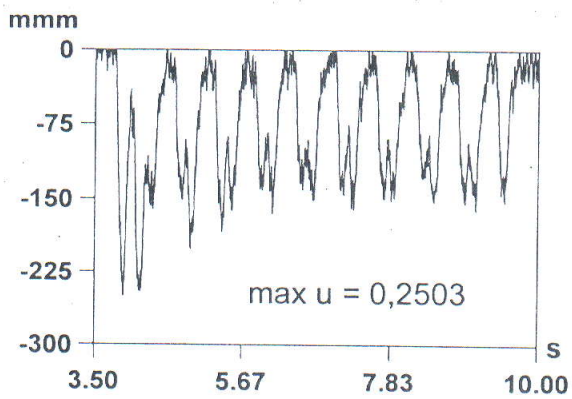
Schwingweg in 1,5 m unter SO



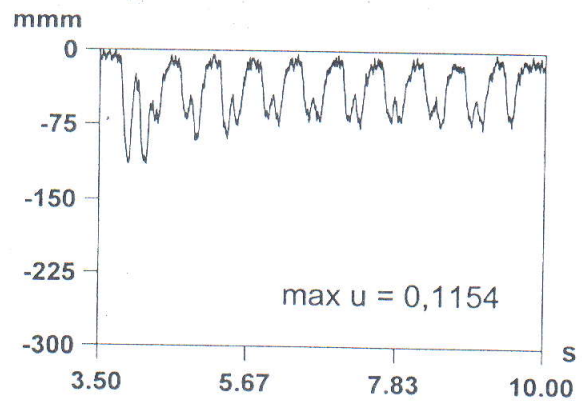
Schwingweg in 0,8 m unter SO



Schwingweg in 2,0 m unter SO



Schwingweg in 1,2m unter SO



Schwingweg in 2,5 m unter SO

Bild 6: Schwingwege der Extensometerpunkte in verschiedenen Tiefen unter der Feste Fahrbahn



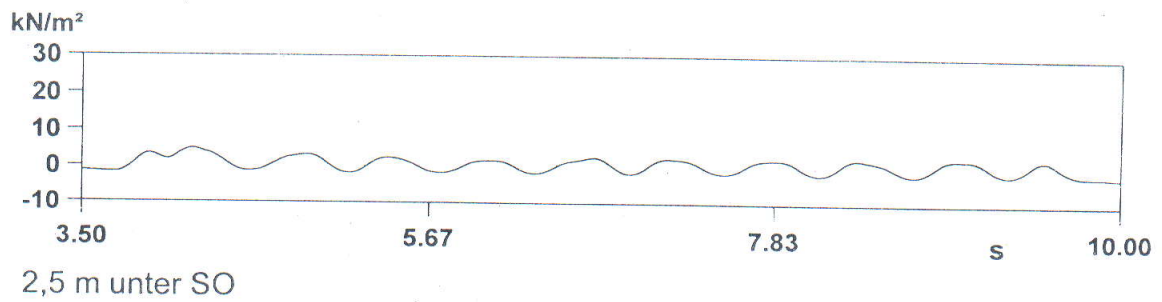
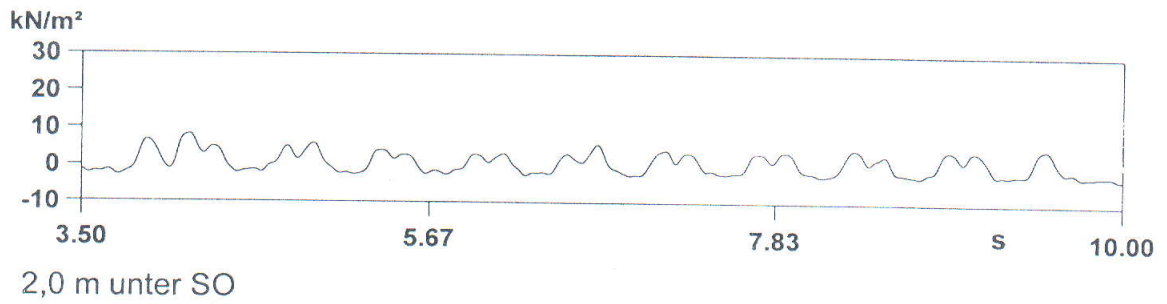
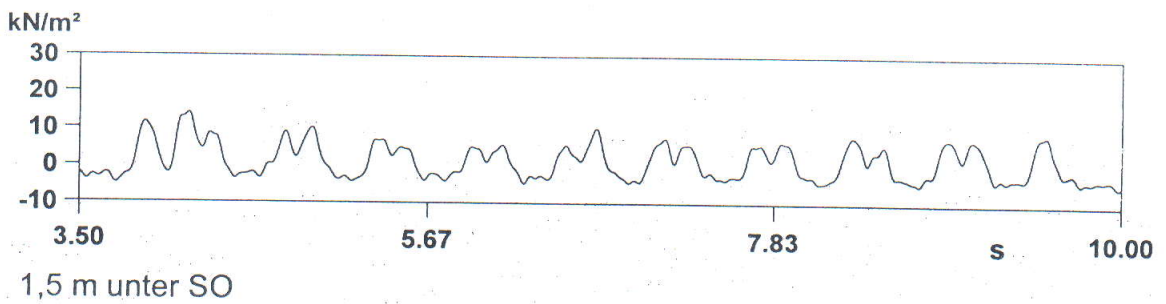
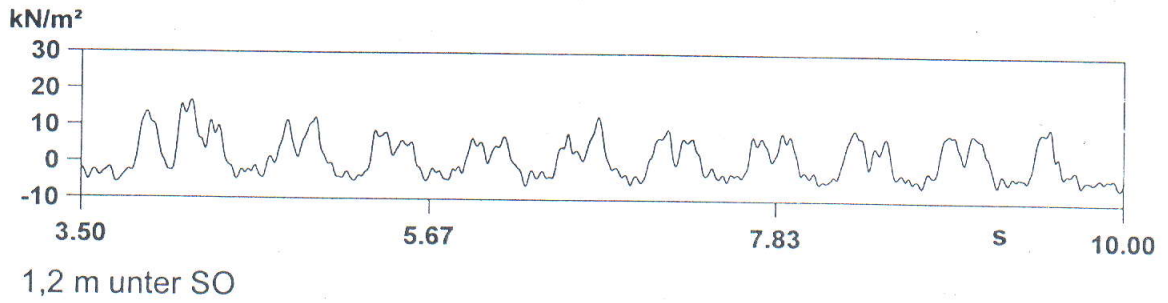
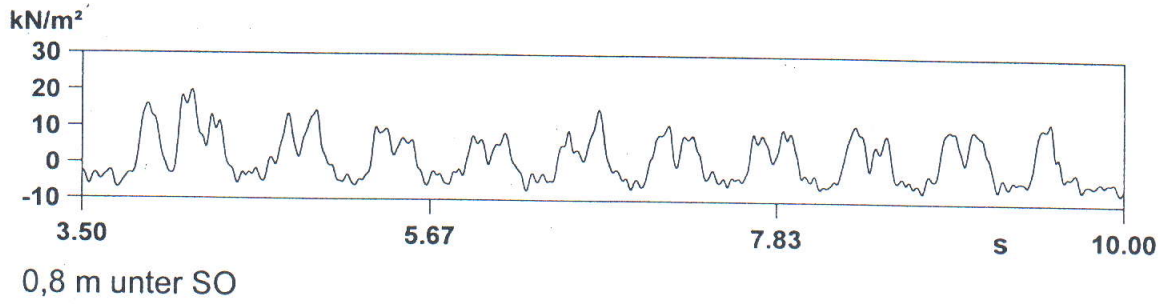


Bild 7: Druckspannungen in verschiedenen Tiefen, IC Überfahrt mit  $v = 160 \text{ km/h}$

## 6 Zusammenfassung

Aus Bild 6 sind die sauberen Meßsignale der Schwingwege bei diesem Verfahren hervorzuheben, die nach unserer Kenntnis bei vergleichbaren Messungen mit konventionellen Systemen nur selten erreicht werden. Ähnliches gilt für die Druckspannungsmessungen im Untergrund, siehe Bild 7.

Messungen im Untergrund von Schienenwegen sind insbesondere für die technische Weiterentwicklung und Optimierung von Hochgeschwindigkeitsstrecken von großer Bedeutung. Die Messungen sind aber andererseits auch mit erheblichen Kosten verbunden. Insofern muß die Forderung nach verbesserten Verfahren erhoben werden, um insgesamt eine abgesicherte Ergebnisinterpretation vornehmen zu können. Dazu sind mit den vorgestellten Verfahren erste Schritte vorgenommen worden.

### Autorenanschrift:

Dipl.-Ing. A. Gotschol, Dipl.-Ing. T. Stöcker, Univ.- Prof. H.- G. Kempfert

Universität Gh- Kassel

Fachgebiet Geotechnik

Mönchebergstraße 7

34125 Kassel

Mitteilung des Instituts  
für Grundbau und Bodenmechanik  
Technische Universität Braunschweig

Heft Nr. 62



IGB·TUBS

## Messen in der Geotechnik 2000

Fachseminar: 24./25. Februar 2000

Zusammengestellt von:

Dr. J. Gattermann  
B. Plaßmann

Braunschweig 2000

---

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz