

## Eine Vorgehensweise zur Ermittlung von Setzungen der Festen Fahrbahn infolge Eisenbahnverkehr

Dr.-Ing. habil. Y. Hu & Dr.-Ing. A. Hoch  
Institut für Statik der LGA, Nürnberg  
Professor Dr.-Ing. H.-G. Kempfert  
Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel

### 1. EINLEITUNG

Nach dem Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn (AKFF, DB AG) sind Nachweise der dynamischen Stabilität und der langzeitigen Gebrauchstauglichkeit des Bahnkörpers bzw. des Untergrundes erforderlich. Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist die Ermittlung der Setzung infolge Eisenbahnverkehr notwendig.

Für eine wirklichkeitsnahe Prognose der Setzung infolge Eisenbahnverkehr ist das Spannungsverformungs- und Festigkeitsverhalten der Böden unter dieser speziellen Belastungsbedingung erforderlich. Dies kann im Labor, z. B. durch zyklische Dreiaxialversuche, gewonnen werden. Mit den Versuchsergebnissen bzw. den daraus abgeleiteten Stoffparametern für Böden kann die Setzung durch entsprechende Rechenmodelle ermittelt werden. Beispielsweise ist ein quasi-statisches Stoffmodell für Böden unter dieser Belastungsbedingung an der Universität Kassel entwickelt und numerisch verwirklicht worden, jeweils für grobkörnige Böden siehe *Kempfert/Hu (1999 a & b)* sowie für wassergesättigte bindige Böden siehe *Hu (2000)*.

Für praktische Projekte kann so ein verfeinertes Modell jedoch i.d.R. nicht angesetzt werden, da häufig nur die klassischen bodenmechanischen Parameter, wie z. B. statischer Steifemodul  $E_s$  und die Scherparameter  $c'$  und  $\phi'$ , zur Verfügung stehen.

In der Praxis kommt dafür häufig der Ansatz  $s_N = s_1 \cdot [ 1 + c_N \cdot \ln(N) ]$  zur Anwendung (*DS 836, Stand 1997*). Dieser Ansatz stammt aus den im Rahmen der Rad/Schienen-Forschung, überwiegend am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der TU-Karlsruhe durchgeführten

Modellversuche an bahnspezifischen Konstruktionen auf einem Sandhalbraum (siehe z. B. *Rücker & Richter (1991)*).

Hierbei handelt es sich um zwei Parameter, die Setzung (bleibende Verformung) nach der ersten Zugüberfahrt  $s_1$  und den Koeffizient  $c_N$ . Theoretisch sind die beiden Parameter von vielen Faktoren wie Achslasten, Fahrgeschwindigkeit, Aufbau und Geometrie des Bahnkörpers sowie Art und Zustand der Böden im Unterbau/Untergrund abhängig.

Auf der Basis von Modellversuchen ergaben sich für den Koeffizient  $c_N$  folgende Werte:

$c_N = 0,43$	für Schottergleise
$c_N = 0,32$	für Feste Fahrbahnen.

Diese Werte gelten für eine Achslast von 20 Tonnen. Eine Abhängigkeit dieses Koeffizienten von der Achslast wurde aus den Modellversuchen abgeleitet:

$$c_{N, \text{Scho}} = 0,0295 \sqrt{P}$$
$$c_{N, \text{FF}} = 0,0225 \sqrt{P} .$$

Es sei darauf hinzuweisen, dass infolge der beschränkten Randbedingungen der Modellversuche diese empirischen Beziehungen naturgemäß nur bedingt gültig sind.

Bei der Ermittlung der Setzung  $s_1$  nach der 1. Zugüberfahrt sind jedoch unterschiedliche Auffassungen bzw. Vorgehensweisen vorhanden, siehe z. B. *DS 836 (Stand 1997)* und *Rücker & Richter (1991)*. Ein abgesichertes Verfahren liegt bisher nicht vor.

In diesem Beitrag wird aufgrund der Auswertung zweier Setzungsmessungen bzw. bisheriger Erfahrungen eine Vorgehensweise zur Ermittlung der Setzung infolge Eisenbahnverkehr vorgestellt. Dabei wird von einem quasi-statischen Stoff- bzw. Rechenmodell ausgegangen, das aufgrund der zyklischen Dreiaxialversuche in der Literatur formuliert und numerisch mit der Methode der Finite-Elemente realisiert worden ist, siehe *Kempfert/Hu (1999 a & b)*. Für den abgeleiteten analytischen Ansatz wird die Methode zur Ermittlung der Eingangsparameter beschrieben.

## 2. BISHERIGE ERFAHRUNGEN UND AUSWERTUNG

Die Auswertung der gemessenen Setzungen für die Bauart Rheda, Tragrost und Tragplatte in den Versuchsstrecken Dachau-Karlsfeld und Nordring München (*BZA München (1988)*) ergab, dass der Koeffizient  $c_N$  mit den Zugüberfahrten zunimmt. Aus der Rückrechnung wurden folgende Werte in *Rücker & Richter (1991)* angegeben:

bis 160 Tage nach Ausgangsmessung:	$c_N = 0,43$
bis 700 Tage nach Ausgangsmessung:	$c_N = 0,70$ .

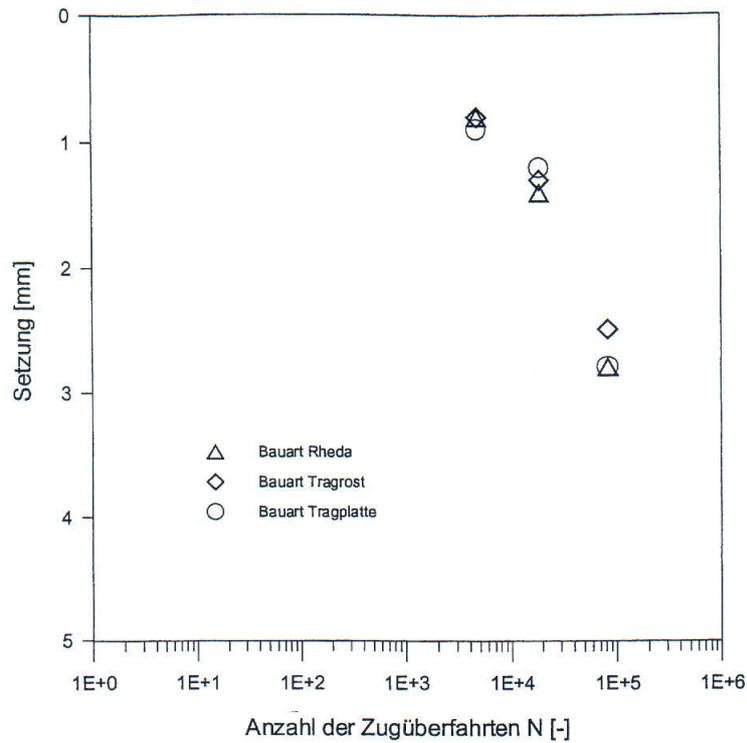
Diese Werte für den Koeffizient  $c_N$  sind höher als 0,32 aus den Modellversuchen für Feste Fahrbahnen.

Ausgehend von einer durchschnittlichen Tageszugeinheiten von 60 sind die Meßergebnisse in einem halblogarithmischen Koordinatensystem  $s_N - \log N$  wiedergegeben, siehe Bild 1 a).

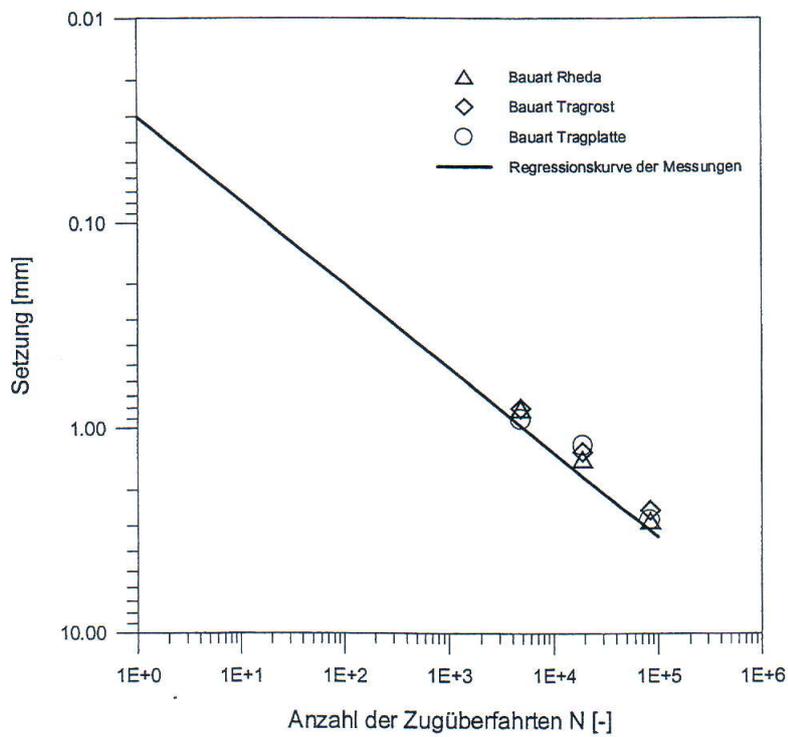
Es ist festzustellen, dass die gemessenen Setzungen nicht über den Ansatz  $s_N = s_1 \cdot [1 + c_N \cdot \ln(N)]$  zutreffend beschrieben werden können, wenn für den ganzen Bereich nur ein einziges Paar der Parameter  $s_1$  und  $c_N$  angesetzt wird. Werden die Meßergebnisse in einem doppellogarithmischen Koordinatensystem  $\log s_N - \log N$  dargestellt (siehe Bild 1 b)), liegen alle Punkte fast auf einer Gerade, wo der Schnittpunkt mit der  $s_N$ -Achse einen positiven Wert aufweist. Diese Regressionslinie kann ausgedrückt werden zu

$$s_N = s_1 \cdot N^\xi = 0,03 \cdot N^{0,40} \text{ [mm]}.$$

Ähnliches Verhalten kann ebenfalls bei der Auswertung der Meßergebnisse im Abschnitt Wittenberge-Dergenthin der Ausbaustrecke Berlin-Hamburg beobachtet werden, siehe Bild 2. Hier ist den gemessenen Setzungen das numerische Berechnungsergebnis nach dem Stoffmodell in *Kempfert & Hu (1999a)* gegenübergestellt. Die detaillierten Belastungs- und Randbedingungen sowie Eingangsparameter sind in *Kempfert & Hu (1999b)* zu entnehmen.

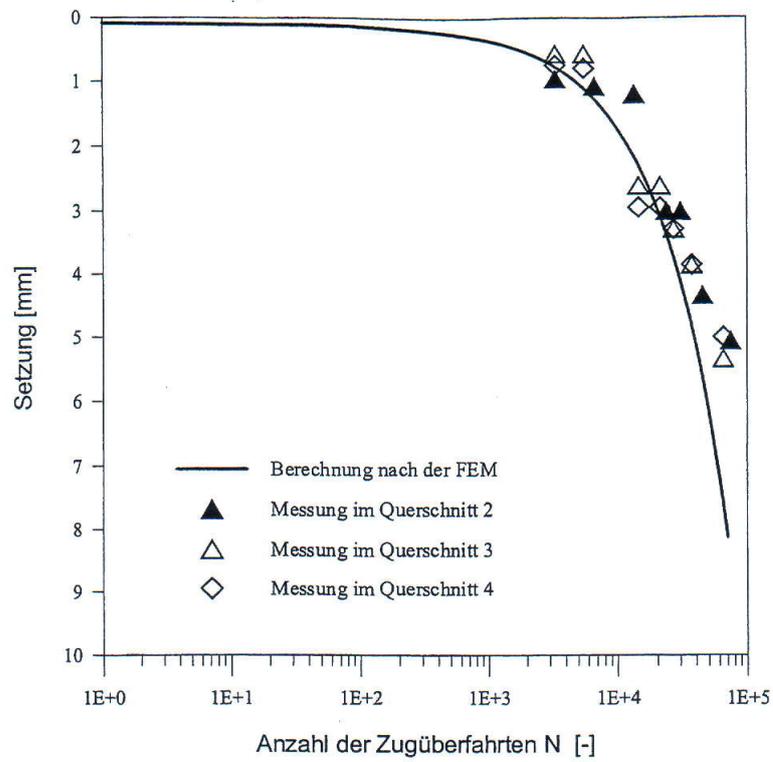


a) halblogarithmisch

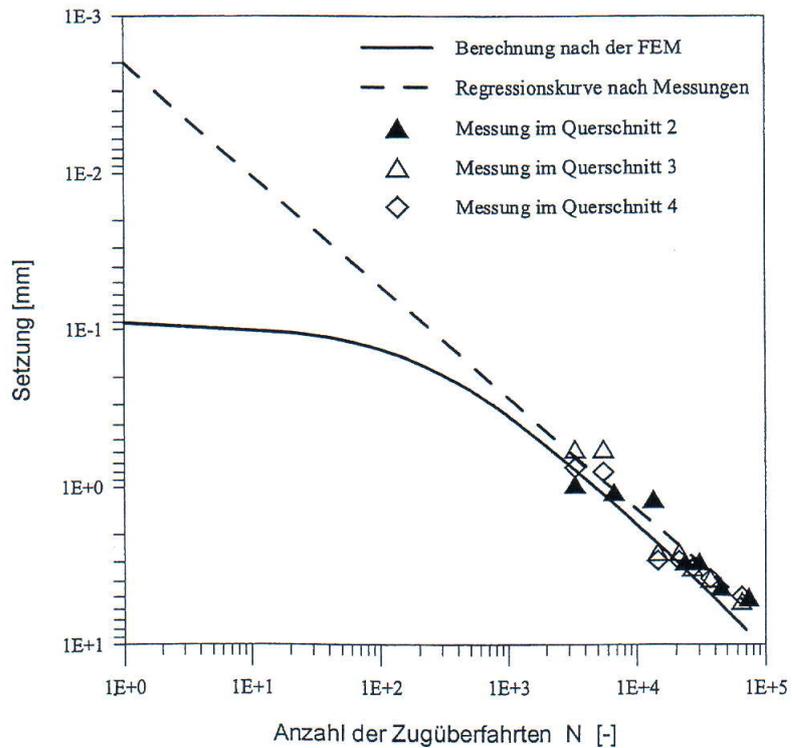


b) doppellogarithmisch

Bild 1: Auswertung der Setzungsmessungen in den Versuchsstrecken Dachau-Karlsfeld und Nordring München, aufgrund von *BZA München (1988)*



a) halblogarithmisch



b) doppellogarithmisch

Bild 2: Auswertung der Setzungsmessungen der Ausbaustrecke Berlin-Hamburg Abschnitt Wittenberg-Dergenthine

Die Regressionskurve ( gestrichelte Linie in Bild 2 b) ) in der doppellogarithmischen Darstellung kann mathematisch ausgedrückt werden mit

$$s_N = s_1 \cdot N^\xi = 0,002 \cdot N^{0,70} \text{ [mm]}.$$

Erfahrungsgemäß ist die Setzung nach der 1. Zugüberfahrt sehr klein (abgeschätzt nach den Messungen: 0,03 mm in den Versuchsstrecken Dachau-Karlsfeld und Nordring München sowie 0,002 mm im Abschnitt Wittenberg-Dergenthine ) und liegt i.d.R. innerhalb der Genauigkeit der heutigen gängigen Meßtechnik. Erst nach einer größeren Zahl von Zugüberfahrten, ab denen die Setzung größer ist als ca. 0,5 mm, ist die Setzung technisch abgesichert zu messen und zur Auswertung zur Verfügung. Der tatsächliche Verlauf in der Anfangsphase ist bisher nicht ausreichend untersucht worden, siehe Bild 1 und 2.

Ausgehend von der Annahme, dass der tatsächliche Verlauf für den ganzen Bereich mit dem Ansatz  $s_N = s_1 \cdot N^\xi$  zutreffend nachgebildet werden kann, ist aus dem Bild 2 b) festzustellen, dass die theoretischen Ergebnisse nach dem Stoffmodell von *Kempfert & Hu (1999a)* in der Anfangsphase deutlich höher sind als die nach der Messung (in der Größenordnung ca. das 50-fache). Nach ca. 1 bis 2 tausend Zugüberfahrten gehen die beiden wieder zusammen.

Dieses Ergebnis kann vermutlich wie folgt geklärt werden:

Das theoretische Modell baut sich auf den zyklischen Dreiaxialversuchen auf. Bisher können damit die in der Praxis gängigen, tatsächlichen statischen Überschüttung bzw. dynamischen Verdichtungen vor Inbetriebnahme nicht berücksichtigt werden. Es wird hier zunächst die These aufgestellt, dass nach ca. 1 bis 2 tausend Zugüberfahrten die Auswirkung dieser Vorbelastung überwunden ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass für vorgegebene Belastungs- und Randbedingungen die Eingangparameter  $s_1$  und  $\xi$  im Ansatz  $s_N = s_1 \cdot N^\xi$  vermutlich mit den theoretischen Ergebnissen nach den vorstehend genannten Lastzyklen ermittelt werden können.

### 3. STOFFMODELL UND NUMERISCHES VERFAHREN

In Kempfert & Hu (1999a) ist das oben erwähnte quasi-statische Stoffmodell zur Erfassung der Spannungsverformungsbeziehung von trockenen körnigen Böden unter zyklischer Belastungsbedingung formuliert. Im folgenden wird es in kurzer Form wiedergegeben, schematisch dargestellt in Bild 3. Unter eindimensionaler Bedingung wird das Maximum der zyklischen Spannung  $\sigma$  als quasi-statische Belastung auf das System aufgebracht. Das Stoffmodell beinhaltet schematisch vier Elemente: Federelement  $E$ , nichtlineares Viskoselement  $\eta_1$ , lineares Viskoselement  $\eta_2$  und Gleitelement  $\sigma_k$ .

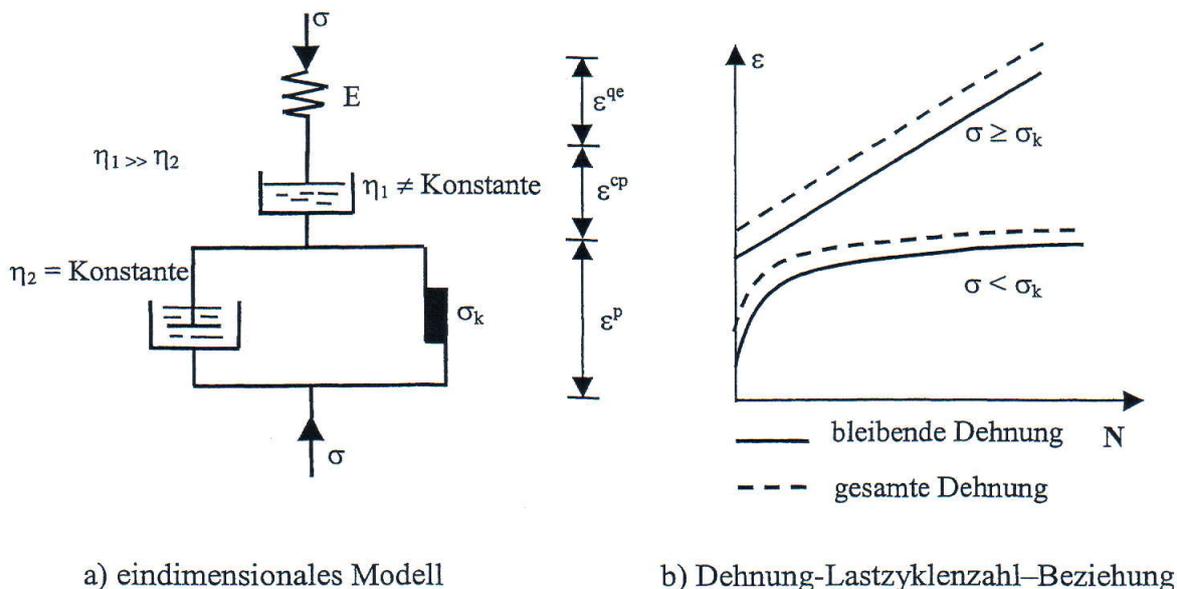


Bild 3: Quasi-statisches Modell zur Erfassung des Spannungsverformungs- und Festigkeitsverhaltens von körnigen Böden unter zyklischer Belastungsbedingung

Die Versuchsergebnisse unter zyklischen dreiaxialen Bedingungen in der Literatur zeigen, dass der reversible bzw. zyklische Anteil der Verformung  $\varepsilon^{qe}$  i.d.R. wesentlich geringer ist als der irreversible bzw. bleibende  $\varepsilon^{cp}$ . Als erste Annäherung kann deshalb der quasi-statische E-Modul als unabhängig von der Lastzyklenzahl  $N$  angesehen werden.

Ist die zyklische Belastung  $\sigma < \sigma_k$ , geht die Bodenprobe nach gewissen Zyklen in einen stabilen Zustand („Shakedown“) über. Zur Beschreibung dieses Verhaltens ist das nichtlineare

Viskoselement  $\eta_1$  eingeführt. Dieses ist wiederum abhängig von der Lastzyklenzahl  $N$ . Diese Beziehungen sind durch zyklische Dreiaxialversuche zu ermitteln.

Beim Fall lineares Versagens ( $\sigma > \sigma_k$ ) ist die klassische viskoplastische Theorie mit  $\eta_1$  einzuschalten. Der Grenzwert  $\sigma_k$  ist über statische Festigkeitsparameter  $\varphi$  und dynamische Abminderungsfaktor  $K$  zu bestimmen.

Diese eindimensionale Modellvorstellung ist unter weiteren Annahmen dreidimensional verallgemeinert worden. Anhand der Methode der Finite-Elemente ist das Stoffmodell numerisch zweidimensional realisiert worden (Programmsystem „GeoCycl“), siehe *Kempfert & Hu (1999a und b)*.

Dieses Modell dient hier als Grundlage für die Formulierung des neuen Ansatzes zur Bestimmung der Setzung infolge Eisenbahnverkehr.

#### 4. NEUER ANSATZ UND ANWENDUNG

Aufgrund der Ausführungen in Abschnitt 2 wird für Feste Fahrbahn der Ansatz zur Berechnung der Setzung infolge Eisenbahnverkehr  $s_N$  wie folgt formuliert:

$$s_N = s_1 \cdot N^\xi,$$

wobei

$s_1$ : Setzung nach der 1. Zugüberfahrt;

$\xi$ : Parameter, in Abhängig von Eisenbahnverkehrslasten, geometrischen Randbedingungen des Bahnkörpers, anstehenden Böden u. s. w.

Im folgenden wird die Vorgehensweise bei der Ermittlung von  $s_1$  und  $\xi$  nach dem in Abschnitt 3 vorgestellten Rechenmodell am Beispiel der Ausbaustrecke Wittenberge-Dergenthine vorgeführt.

Die ausführliche Beschreibung der Randbedingungen und Parameter für die Dämme im Abschnitt Wittenberge-Dergenthine findet man in *Kempfert & Hu (1999b)*. In Bild 4 ist das Sy-

stem (Damm) mit Belastungen und Parametern wiedergegeben. Die Verkehrslasten werden in Form zweier Linerlasten  $p$  nachgebildet, in denen der dynamische Erhöhungsfaktor 1,3 bereits enthalten ist. Die Achslast  $P$  kann mit

$$P = p \cdot L / (2 \cdot k_d)$$

umgerechnet werden (dynamischer Erhöhungsfaktor  $k_d = 1,3$ ,  $L = 6,4$  m nach UIC 71).

### Materialkennwerte

Betonplatte:

$$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3 \quad E = 30000 \text{ MN/m}^2 \quad \nu = 0,16$$

HGT:

$$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3 \quad E = 5000 \text{ MN/m}^2 \quad \nu = 0,25$$

FSS:

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3 \quad E = 100 \text{ MN/m}^2 \quad \nu = 0,30$$

$$\varphi = 40^\circ$$

Dammschüttung:

$$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3 \quad E = 45 \text{ MN/m}^2 \quad \nu = 0,35$$

$$\varphi = 40^\circ \quad K = 0,8 \quad \alpha = 0,84 \quad \beta = 0,0005$$

$$\chi = 3 \quad \lambda = 0,1$$

Untergrund:

$$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3 \quad E = 45 \text{ MN/m}^2 \quad \nu = 0,35$$

$$\varphi = 40^\circ$$

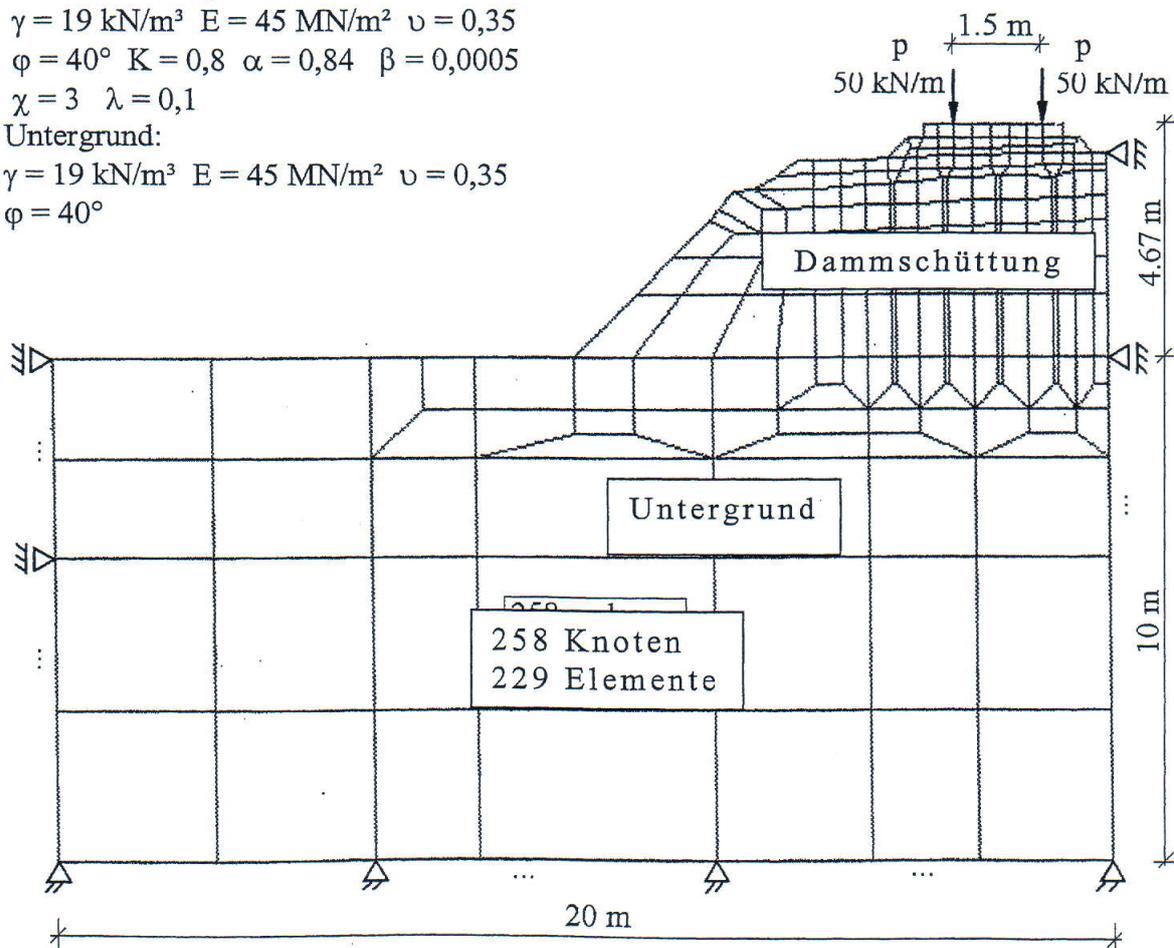


Bild 4: Berechnungsausschnitt, FE-Netz, Belastungen und Parameter, Abschnitt Damm Wittenberge-Dergenthine

Eine Parameterstudie mit vier Belastungsgrößen  $p$  wurde durchgeführt. Für jede Belastung wurde eine Auswertung  $s_N$  als eine Funktion von  $N$  für einen kennzeichnenden Punkt an der Betonplatte im doppellogarithmischen Diagramm vorgenommen. Anhand der Berechnungsergebnisse nach eintausend Lastzyklen wurde jeweils eine Geradlinie bestimmt. Daraus ergaben sich die zwei Parameter  $s_1$  und  $\xi$  für jeweilige Verkehrslast  $p$  bzw. Achslast  $P$ . In Tabelle 1 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 1: Parameter  $s_1$  und  $\xi$  aus der numerischen Berechnungen

Linienlast $p$ [kN/m]	Achslast $P$ [Tonnen]	$s_1$ [mm]	$\xi$ [-]
50	12,3	0,002	0,70
65	16	0,0036	0,75
81	20	0,0059	0,77
97,5	24	0,008	0,78

In Bild 5 sind die Abhängigkeiten der Parameter  $s_1$  und  $\xi$  von der Achslast  $P$  für diesen Abschnitt wiedergegeben.

Als Beispiel wird der Fall mit einer Achslast von  $P = 12,3$  Tonnen ausgewählt:

$$s_1 = 0,002 \text{ mm,}$$

$$\xi = 0,70.$$

Mit dem Ansatz  $s_N = s_1 \cdot N^\xi$  kann die Setzung bei verschiedenen Zeitpunkten ermittelt werden:

$$s_N = 0,002 \text{ mm}$$

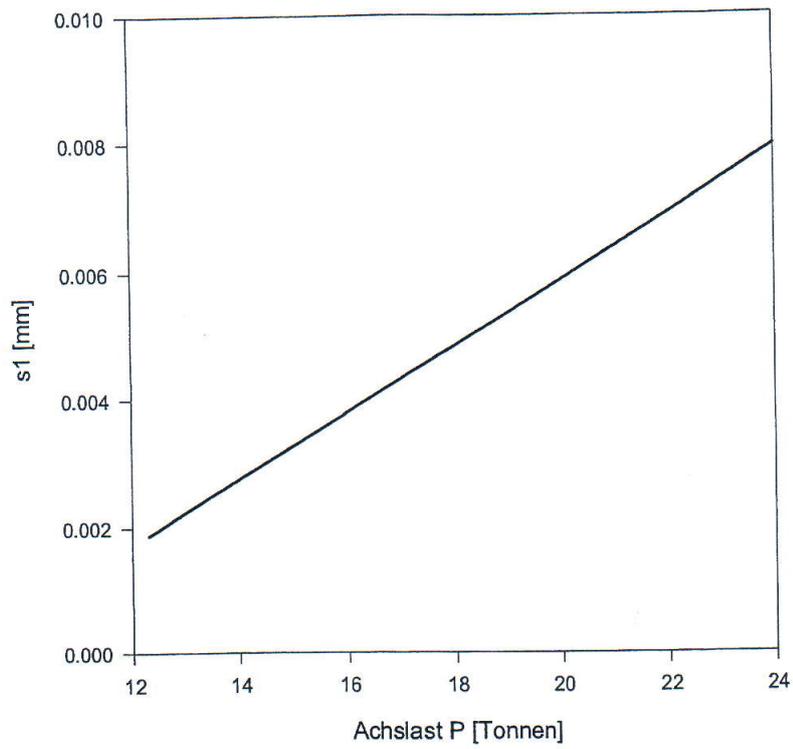
$$N = 1$$

$$s_N = 4,42 \text{ mm}$$

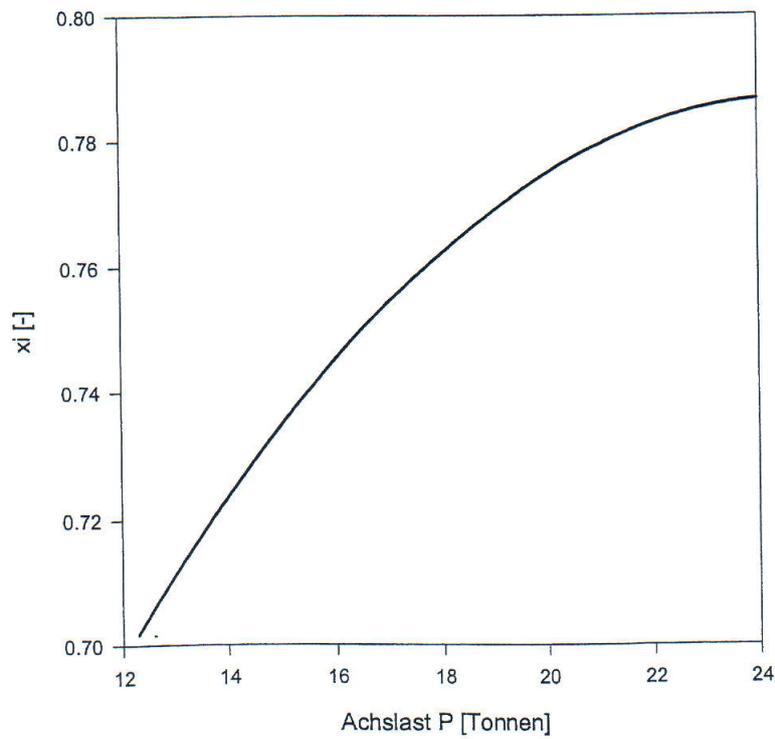
$$N = 60.000 \text{ (ca. 2,5 Jahre)}$$

$$s_N = 24,69 \text{ mm}$$

$$N = 700.000 \text{ (ca. 30 Jahre).}$$



a) Parameter  $s_1$



b) Parameter  $\xi$

Bild 5: Parameter  $s_1$  und  $\xi$  in Abhängigkeit der Achslast P (FEM), Abschnitt Damm Wittenberge-Dergenthine

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wird auf der Basis der bisherigen praktischen Erfahrungen und der theoretischen Ergebnisse nach der Methode der Finite-Elemente ein neuer Ansatz zur Bestimmung der Setzung infolge Eisenbahnverkehr vorgestellt. Im Gegensatz zu dem bisherigen Ansatz, der aus den Modellversuchen formuliert worden ist, zeigt sich beim neuen Ansatz eine gute quantitative Übereinstimmung mit den bisherigen Setzungsmessungen. Des weiteren scheinen die Eingangsparameter des neuen Ansatzes im Laufe der Bahnbetriebszeit unveränderlich und somit für den ganzen Betrachtungszeitraum allgemein gültig zu sein. Eine weitere Prüfung der Anwendbarkeit des neuen Ansatzes ist für die Praxis von Bedeutung.

## 6. LITERATUR

*BZA München (1988):* EA Projekt 565/85 Feste Fahrbahn/Erdbau, Gesamtbericht, Band 1, Textteil.

*DS 836 (Stand 1997):* Vorschrift für Erdbauwerke, Deutsche Bahn AG.

*Hu, Y. (2000):* Zum Verformungsverhalten von wassergesättigten bindigen Böden unter zyklischer Belastung. Schriftenreihe Geotechnik Universität Gh Kassel, Heft 8.

*Kempfert, H.-G., Hu, Y. (1999a):* Prediction on the long-term behavior of subsoils under high-speed railways. Proceedings of the XIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, Niederlande, Vol. 3, A.A. Balkema.

*Kempfert, H.-G., Hu, Y. (1999b):* Numerical Modeling of the Deformation in Railway Foundation - A Case Study. Proceedings of the International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG VII, Graz, Austria.

*Rücker, W., Richter T. (1991):* Endbericht zum Vorhaben "Weiterentwicklung von schotterlosen Fahrbahnen auf Erd- und Kunstbauwerken, Teilprojekt Erdbau", AP4: Dynamische Einwirkungen. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin.