

**Vyšší odborná škola a  
Střední průmyslová škola stavební  
Čs. armády 10, 405 02 Děčín 1**

## **Sborník přednášek**

# **ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTA 2011**



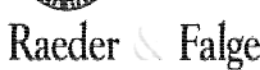
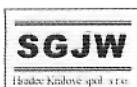
**Děčín 23. - 24. února 2011**



**Plasser & Theurer**



**VHC TRADE**



# ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTA 2011

Sborník přednášek vydáný u příležitosti semináře

**Železniční dopravní cesta 2011**

konaného ve dnech 23. a 24. 2. 2011 v Děčíně

V nákladu 200 výtisků vydala

**Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola stavební, Děčín 1, Čs armády 10,  
příspěvková organizace**

*Neprodejné*

**VOŠ a SPŠ stavební Děčín  
Děčín 2011**

**ISBN 978-80-254-8811-9**

## OBSAH

RNDR.Michal Tesař , Doc. Ing.Ondřej Jiroušek, Ph.D. , Petr Štěpánek , G IMPULS Praha <b>NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ HODNOT ELEKTRICKÉ PERMITIVITY ŠTĚRKOVÉHO LOŽE A MOŽNOSTI VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ PRO SPRÁVU ŽELEZNIČNÍCH TRATÍ</b>	7
Dr.-Ing. Ulf Gerber, Technische Universität Dresden <b>DIE OPTIMIERUNG DER SCHOTTER - UND SCHWELLENINSTANDHALTUNG</b>	17
Ph.D. Mykola Sysyn, Ing. Olga Nabochenko, Dr.-Ing. Ulf Gerber, Prof. Viktor Rybkin, TU Dnjepropetrowsk, TU Dresden <b>DIE INSTANDHALTUNG DER BETTUNG</b>	23
Ing. Martin Tábořský, SŽDC OTH, Praha <b>ŘEŠENÍ „VLNKOVITOSTI“ KOLEJNIC</b>	33
Jaromír Pivoňka, DiS., SŽDC s.o. Praha, OTH, Oddělení železničního svršku <b>PROVOZNÍ OVĚŘOVÁNÍ NOVÝCH SOUČÁSTÍ ŽELEZNIČNÍHO SVRŠKU</b>	37
Ing. Peter Bado, GJW Praha s.r.o. <b>KOLEJOVÝ JEŘÁB GOTTWALD GS 150.14 TR – PRVNÍ ZKUŠENOSTI S NASEZENÍM U SŽDC A ŽSR</b>	43
Ing. Pavel Mathé, SŽDC, s.o., Stavební správa Praha <b>HISTORIE A SOUČASNOST PRAŽSKÉHO ŽELEZNIČNÍHO UZLU</b>	49
Ing. Milan Kössler, ARCADIS Geotechnika, a.s. Praha <b>ŽELEZNIČNÍ TUNELY „NOVÉ SPOJENÍ“ - GEOMONITORING</b>	51
Ing. Michal Gramblička, SUDOP Praha a.s. <b>VÍTKOVSKÉ TUNELY NA NOVÉM SPOJENÍ, PROJEKT A ZKUŠENOSTI Z REALIZACE</b>	61
Ing. Lukáš Bludský, EUROVIA, a.s. Praha <b>NOVÉ SPOJENÍ, SO 860 ESTAKÁDY PŘES MASARYKOVO NÁDRAŽÍ</b>	67
Ing. Zbyněk Mynář, SKANSKA a.s., Praha <b>KONSTRUKCE ŽELEZNIČNÍHO SPODKU NA STAVBĚ NOVÉ SPOJENÍ</b>	75
Ing. Julius Janeba, Skanska, a.s., Praha <b>POKLÁDKA ŽELEZNIČNÍHO SVRŠKU</b>	79
Doc. Ing. Hana Krejčířiková, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra železničních staveb, Praha, CSc., Ing. Josef Koudelka, DT – výhybkárna a strojárna, a.s., Prostějov <b>DILATAČNÍ ZAŘÍZENÍ NA ESTAKÁDÁCH</b>	83
Ing. Radek Bernatík, SŽDC s.o., Praha <b>PŘEDPIS O PEVNÉ JÍZDNÍ DRÁZE</b>	89
Ing. Mojmír Nejezchleb, ŽPSV a.s., Uherský Ostroh <b>KOLEJNICOVÉ PODPORY PRO PEVNOU JÍZDNÍ DRÁHU</b>	97
Ing. M. Hrušíková , doc. Ing. O. Plášek, Ph.D. , prof. Ing. J. Smutný, Ph.D. , Ing. R.Svoboda, Ph.D. , VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb <b>VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍCH ÚSEKŮ S PODPRAŽCOVÝMI PODLOŽKAMI V ČR</b>	101
Ing. Radek Trejtnar, Ing. Vladimír Igielski, Ředitelství SŽDC, s.o., Odbor traťového hospodářství, Praha <b>SŽDC SR103/8(S) KOMENTÁŘ ČSN 73 6360 KONSTRUKČNÍ A GEOMETRICKÉ USPOŘÁDÁNÍ KOLEJE ŽELEZNIČNÍCH DRAH A JEJÍ PROSTOROVÁ POLOHA</b>	113
Ing. Miroslav Hartmann, Pavel Hůja, Viamont DSP, a.s. Ústí nad Labem <b>ZKUŠENOSTI S FRÉZOVÁNÍM KOLEJNIC PROVÁDĚNÝM DVOUCESTNÝM STROJEM LINSINGER SF02W-FS</b>	127

## DIE INSTANDHALTUNG DER BETTUNG

**Ph.D. Mykola Sysyn, Ing. Olga Nabochenko, Dr.-Ing. Ulf Gerber, Prof. Viktor Rybkin**

**TU Dnjepropetrowsk, TU Dresden**

Bei der Auslegung der Gleiskonstruktion oder der Festlegung der Betriebsbelastung wird bei der ukrainischen Eisenbahn die Leistungsfähigkeit der Schotterschicht durch einen Vergleich der berechneten und zulässigen Spannungen im Schotter bestimmt. Die zulässigen Spannungen werden nach der jährlichen Verkehrsbelastung und den Fahrzeugtypen unterschieden und erreichen Werte im Bereich von 0,15 bis 0,5 MPa (LII117) [1]. Derzeit wird jedoch immer offensichtlicher, dass die Übertragung des Kriteriums der zulässigen Spannungen auf den Schotter analog zu den anderen Bestandteilen des Oberbaus zu unakzeptablen Ergebnissen führt. Der Hauptgrund hierfür ist die unscharfe Grenze zwischen einem arbeitsfähigen und nicht arbeitsfähigen Schotterzustand, welcher im Verlaufe der Lebensdauer einer ständigen Veränderung unterzogen ist. Ein weiterer Grund ist die fehlende Berücksichtigung der Instandhaltung auf die Lebensdauer der Schotterschicht. Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer Faktoren, ohne deren Kenntnis die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Schotters schwierig ist.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung besteht in der Optimierung der zulässigen vertikalen Gleislagefehler zur Minimierung der Stopfintervalle und damit der Minimierung der Schotterkosten überhaupt. Dabei wird Anfangsqualität des Fahrweges berücksichtigt. Diese wiederum ist vom Ungleichförmigkeitsgrad des Unterbaus und der Verdichtungsqualität der Bettungsschicht abhängig.

### 1. Gleichmäßige Setzung der Bettungsschicht

Durch die Wechselbelastung der Bettungsschicht entstehen bleibende Setzungen. Das Verhalten des Schotters besteht konventionell aus zwei Phasen: eine erste Phase der Setzungsstabilisierung und eine zweite Phase der gleichmäßigen Setzungen. Dabei wird die Phase der Setzungsstabilisierung mit jeder Erhöhung des Belastungsniveaus erneut reaktiviert. Das Setzungsverhalten wird durch die Summation eines plastischen Anteils  $s_1$  (unabhängig von der Zeit) und eines viskoplastischen Anteils  $s_2$  beschrieben:

$$s = s_1 + s_2, [\text{mm}] \quad (1)$$

Der plastische Teil der Setzung  $s_1$  entsteht plötzlich und hauptsächlich in der Anfangsperiode der Stabilisierung und wird durch folgende Formel beschrieben:

$$s_1 = s_{\text{stab}} + s_{F_{\text{max}}}, [\text{mm}] \quad (2)$$

Die Komponente  $s_{\text{stab}}$  wurde auf der Grundlage von Gleisnivellierungsmessungen nach einer Belastung von 1 Million Lasttonnen bestimmt [2]. Sie beträgt durchschnittlich 22 mm nach einem Stopfen ohne Gleisstabilisierung und 11 mm nach einem Stopfen mit nachfolgender einschichtiger Gleisstabilisierung. Der genaue Wert ist vom anfänglichen Verdichtungsgrad des Schotters mittels dynamischer Gleisstabilisierung abhängig und kann durch die von den Autoren vorgeschlagene Methode bestimmt werden [3]. Die zweite Komponente der plastischen Setzung  $s_{F_{\text{max}}}$  tritt dann auf, wenn die Spannung in der Schotterschicht unter der Schwelle  $\sigma_i$  größer wird als die der bisherigen Belastungsgeschichte  $\text{MAX}(\sigma_i)$ .

In der vorliegenden Untersuchung werden auch Ergebnisse von Laboruntersuchungen einzelner Schwellen im Schotterkasten unter zyklischer Belastung verwendet [4]. Dabei wurde der Schotter maximal verdichtet. Anschließend wurde die Amplitude der zyklischen Belastung schrittweise gesteigert, was erhöhte Anfangssetzungen zur Folge hatte. Die folgende Formel ist eine lineare Näherung, welche die Anfangssetzung (in mm) in Abhängigkeit von der maximale Pressung unter der Schwelle  $\sigma_i$  (in MPa) beschreibt:

$$s_{F\max} = 32,6 \max(\sigma_i) - 3,9, [\text{mm}] \quad (3)$$

Die plastische Komponente der Setzungen  $s_{F\max}$  erreicht ihren Maximalwert nach einer akkumulierten Masse von etwa 1 Million Tonnen. Für Beschreibung dieses Verhaltens wird die Schottersetzung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl  $N$  benützt [5]:

$$s(N) = s_{F\max} \frac{N}{a + bN}, [\text{mm}] \quad (4)$$

hier  $a=1$ ,  $b=10000$  – angepasste Koeffizienten.

Das viskoplastische Verhalten der Setzung  $s_2$  hängt von der Lastwechselanzahl ab. Es gibt eine große Anzahl von einfachen und komplexeren phänomenologischen Formeln zu ihrer Beschreibung, welche unterschiedliche Ergebnisse liefern und schwer miteinander vergleichbar sind [6-8]. Das Ziel dieser Untersuchung ist nicht der absolute Wert der Setzungen sondern die Setzungsdifferenz, daher wird die viskose Setzungsdifferenz vereinfachend linear von der Differenz der Lastwechselanzahl angenommen:

$$\Delta s_2 = b(\sigma_i, U) \Delta N, [\text{mm}] \quad (5)$$

hier  $\Delta N$  – Zunahme von Anzahl der Lastzyklen.

$b(\sigma_i, U_s)$  – Setzungsintensität, abhängig von der Spannung unter den Schwellen  $\sigma_i$  und dem Elastizitätsmodul des Untergrundes  $U_s$ .

Die Setzungsintensität  $b(\sigma_i, U_s)$  wird als das Produkt der entsprechenden Komponenten definiert:  $b(\sigma_i, U_s) = b(\sigma_i) \cdot k_U(U_s)$

Die Spannungsabhängigkeit wird durch eine empirische Formel beschrieben, welche sich aus der Verarbeitung experimentellen Untersuchungen für sauberen Schotter (25-60 mm) ergibt [4]:

$$b(\sigma_i) = 1,981\sigma_i^3 + 0,199\sigma_i^2 + 0,029\sigma_i, [\text{mm}/10000 \text{ Lastwechsel}] \quad (6)$$

Der Abhängigkeit von der Steifigkeit des Untergrundes bzw. der Unterschotterschicht  $k_U(U_s)$  wird durch einen dimensionslosen Koeffizienten ausgedrückt. Gleichung (6) gilt für einen Untergrund mit maximal möglicher Steifigkeit, die Setzungsintensität steigt bei einer geringeren, realen Untergrundsteifigkeit  $U_s$  schnell an. Zur Ableitung dieses Verhaltens werden Ergebnissen aus Untersuchungen [6, 9] benützt. Durch ihre Auswertung kann eine Abhängigkeit zwischen der Setzungsintensität und dem Elastizitätsmodul des Untergrundes hergestellt werden.

Angesichts der Tatsache, dass Formel (6) nur für einen starren Untergrund Gültigkeit besitzt, ergibt sich durch Auswertung der o.g. Untersuchungen die folgende empirische Beziehung:

$$k_U(U_s) = \frac{6000}{14U_s^{1,29} - 26} + 0,74, [ ] \quad (7)$$

Die Setzungsintensität wird noch von einer Reihe anderer Faktoren beeinflusst. Aufgrund des Mangels an geeigneten experimentellen Daten werden diese aber in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt.



## 2. Ungleichmäßige Setzung der Bettungsschicht (Gleislagefehler)

Gleislagefehler treten durch eine ungleichmäßige Setzung der Bettungsschicht auf. Ursache hierfür ist die Wirkung primär verursachender Faktoren (Inhomogenität der mechanischen Eigenschaften des Oberbaus, die Unregelmäßigkeiten seiner Elemente und die damit verbundene dynamisch ungleiche Wirkung) sowie sekundär verursachender Faktoren (Anfangsqualität des Gleises). In dieser Untersuchung werden die wichtigsten Einflussfaktoren hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der Anfangsqualität des Gleises untersucht: die Ungleichförmigkeit der Untergrundsteifigkeit und die Ungleichförmigkeit der Anfangssetzungen des Schotter:

$$\Delta s_{\text{not}} = \Delta s_u + \Delta s_{\text{stab}}.$$

Die anfängliche Ungleichförmigkeit der Untergrundelastizität ( $U_s^{\min}$ ,  $U_s^{\max}$ ) hängt von der Qualität des Planums und seiner Schutzschichten ab. Zahlreiche Untersuchungen [7, 10, 11] zeigen, dass die Ungleichförmigkeit der Untergrundsteifigkeit die Hauptursache für das Auftreten von Gleislagefehlern ist [7, 10, 11]. In der Forschung wurden daraus wahrscheinliche Ober- und Untergrenzen des Elastizitätsmoduls der Unterschienebettung für verschiedene Planumsarten und Planumsschutzschichten abgeleitet [9].

In der vorliegenden Berechnung wird die Anfangsqualität als Ungleichförmigkeit der Untergrundsteifigkeit in Form der Differenz der Schieneneinsenkungen  $\Delta s_U$  unter der statischen Radlast  $P_{cm}$  ausgedrückt:

$$\Delta s_U = \left( \frac{k(U_z^{\min})}{2U_z^{\min}} - \frac{k(U_z^{\max})}{2U_z^{\max}} \right) \cdot P_{cm}, [\text{mm}] \quad (8)$$

Hierbei sind  $U_z^{\min}$  und  $U_z^{\max}$  der maximale bzw. minimale Elastizitätsmodul der Unterschienebettung, der sich in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Schienebefestigungselemente, der Schwellen, der Schotterschicht und dem Ungleichförmigkeitsgrad der Untergrundsteifigkeit  $U_s^{\min}$ ,  $U_s^{\max}$  ergibt.

Die Untersuchungen [7, 12] und andere zeigen eine signifikante Wirkung der dynamischen Gleisstabilisierung auf die ungleichmäßigen Setzungen. In einer experimentellen Untersuchung [2] wurde neben der homogenen Setzung die inhomogene Setzung in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad der Schotterschicht untersucht. Die ungleichmäßige Setzung  $\Delta s_{\text{stab}}$  bei einer einlagigen Stabilisierungstechnologie, wie sie bei den ukrainischen Eisenbahnen eingesetzt wird, beträgt etwa 10-18% der durchschnittlichen Setzungen  $s_{\text{stab}}$  während der Stabilisierungsphase. Zur Erhöhung des Stabilisierungsgrades wird eine zweischichtige Stabilisierungstechnologie benötigt.

Die anfänglichen ungleichmäßigen Setzungen verursachen anfängliche dynamische Gleisbelastungen. Deren Wirkung erhöht wiederum die Spannung in der Schotterschicht, was zu einer Zunahme der Setzungsintensität und damit einer weiteren Fehlerzunahme führt. Somit ergibt sich die Tiefe der Gleislagefehler aus drei Komponenten:

$$\Delta s_{\text{hep}} = \Delta s_N + \Delta s_{\text{stab}} + \Delta s_U, [\text{mm}] \quad (9)$$

In der vorliegenden Untersuchung wird die Wirkung der Gleislagefehler auf die Belastung der ungefederten Massen über die durchschnittliche Fehlerneigung  $i_{\text{hep}}$  berücksichtigt. Die durchschnittliche Fehlerneigung ergibt sich aus der gesamten Differenzsetzung  $\Delta s_{\text{hep}}$  sowie der halben mittleren Wellenlänge des Gleislagefehlers:

$$i_{nep} = \frac{2\Delta s_{nep}}{L_{nep}}, [ ] \quad (10)$$

Untersuchungen [13, 6] haben gezeigt, dass die Länge der vertikalen Gleislagefehler auf die Schottersetzung insbesondere dann einen überragenden Einfluss hat, wenn sie der Länge der elastischen Schienendurchbiegungslinie entspricht. Die Quellen [13, 6] schlagen die Formel (11) zur Ermittlung der dominanten Wellenlänge der Gleisfehler  $L_{nep}$  vor, welche zusätzlich die Eigenschaften der Fahrzeuge berücksichtigt:

$$L_{nep} = 2\pi \sqrt{\frac{q_k V^2}{2U_z} + \sqrt{\left(\frac{q_k V^2}{2U_z}\right)^2 + \frac{EI}{U_z}}}, [m] \quad (11)$$

Hierbei bedeuten:

$q_k$  – ungefederte Gewichtskraft der Fahrzeuge, kN;

$V$  – Betriebsgeschwindigkeit, m/s;

$EI$  – Biegesteifigkeit der Schiene, MPa·m<sup>4</sup>;

$U_z$  – Elastizitätsmodul der Unterschienenbettung, MPa.

In der nachfolgenden Berechnung der durch die ungefederten Massen hervorgerufenen dynamischen Belastung wird in jedem Berechnungsschritt die Fehlerneigung  $i_{nep}$  neu berechnet. Die Wellenlänge  $L_{nep}$  der Gleislagefehler bleibt hingegen über der gesamten Rechnung konstant.

### 3. Rechnerischen Schotterspannung unter den Schwellen

Die faktische Druckspannungen in Schotterschicht zwischen Schotter und Schwellen ist ziemlich unbestimmt. Sie weist entlang der Schwellenfläche erhebliche Unterschiede auf und ist von der Form der Schotterkörner und dem Grad des Schwellenstopfens abhängig. Daher werden Wert die rechnerischen Spannungen der Schwellen auf den Schotter verwendet. Diese Vorgehensweise entspricht auch der Herangehensweise bei der ukrainischen Eisenbahn: "Vorschrift zur Berechnungen der Gleise auf Haltbarkeit und Stabilität" [1].

Die Druckspannungen unter der Schwelle hängen von der Größe der äquivalenten Kraft  $P_{ekv}^{II}$  der Schiene auf die Schwellen ab:

$$\sigma_{\delta} = \frac{P_{ekv}^{II}}{\Omega \cdot \alpha} \cdot 10, [MPa] \quad (12)$$

Hierbei ist  $\Omega \cdot \alpha = \frac{1}{2} \alpha \cdot a \cdot b$  die wirksame Halbschwellenfläche unter Berücksichtigung der Schwellenbiegung.

Die maximale äquivalente Belastung berücksichtigt die kombinierte Wirkung von benachbarten Achsen durch die Formel  $P_{ekv}^{II} = P_{pozp} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i$ .

Für die Berechnung der kombinierten Wirkung der konstanten statischen und variablen dynamischen Kräfte wird folgende Beziehung angenommen:

$$P_{pozp} = \bar{P} + \lambda_{\phi} \cdot S, [kN] \quad (13)$$

Mit:  $\bar{P}$  – durchschnittliche dynamischen Belastung, kN;

$S$  – Standardabweichung der dynamische Belastung;

$\lambda_{\phi} = 2,5$  – Normierungsfaktor für eine Wahrscheinlichkeit von  $F = 0,994$ .

Die durchschnittliche dynamische Belastung ergibt sich nach folgender Formel:

$$\bar{P} = P_{cm} + \bar{P}_p, [\text{kN}] \quad (14)$$

wobei hier  $\bar{P}_p$  für die durchschnittliche Trägheitskraft steht, welche durch die Bewegung der abgefederten Fahrzeugmassen verursacht wird und welche von der Fahrzeugsteifigkeit abhängig ist.

Die Summe der durchschnittlichen Abweichungen der vertikalen dynamischen Radlasten auf die Schiene  $\bar{S}$  wird durch die Überlagerung der Verteilungen ihrer Komponenten ermittelt:

$$\bar{S} = \sqrt{S_p^2 + S_{pu}^2 + 0,05S_{ink}^2 + 0,95S_{önk}^2}, [\text{kN}] \quad (15)$$

Mit:  $S_p$  – Standardabweichung der dynamischen Radlast infolge der vertikalen Schwingung der abgefederten Fahrzeugmasse.

$S_{ink}$  – Standardabweichung der Trägheitsbelastung der nichtabgefederten Massen, welche durch Einzelradfehler hervorgerufen werden.

$S_{önk}$  – Standardabweichung der Trägheitsbelastungen der nichtabgefederte Massen, welche durch periodische Radfehler hervorgerufen werden.

$S_{pu}$  – Standardabweichung der dynamischen Radlasten auf die Schienen, welche beim Überfahren eines Gleislagefehlers infolge der Trägheitsbelastung der ungefederten Massen entsteht; sie wird durch folgende Formel bestimmt

$$S_{pu} = \frac{\alpha_0 i_{nep} V \pi^2}{\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{U_z q_k}{k}}, [\text{kN}] \quad (16)$$

Mit:  $i_{nep}$  – durchschnittlichen Neigung des Gleislagefehlers;

$k$  – Koeffizient, anhängig von der Steifigkeit der Unterschienenbettung und der Schiene entsprechend folgender Formel:

$$k = \sqrt[3]{\frac{U_z}{4EI}}, [\text{m}^{-1}] \quad (17)$$

#### 4. Einfluss der Gleisinstandhaltung

Beim Gleisstopfen wird der geometrische Gleiszustand verbessert, ohne jedoch den ursprünglichen Zustand wieder herstellen zu können. Außerdem nimmt Intensität Schottersetzung nach dem Stopfen infolge der Zerkleinerung der Schotterkörner sowie Veränderung ihre Form zu. Also können zu viele Stopfgänge eine wesentliche Verschlechterung des Schotters verursachen.

Der durch das Stopfen erzielbare Verbesserungsgrad hängt vom geometrischen Zustand des Gleises vor dem Stopfen ab. Zur Berücksichtigung des Verbesserungsgrades durch das Stopfen werden die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen verwendet [10-11, 14-15, 7]. Dabei wird berücksichtigt, dass ein Stopfen die Anfangsqualität des Gleises nicht wieder herstellen kann (wegen der Ungleichförmigkeit der Untergrundsteifigkeit  $\Delta s_{uj}$  und der ungleichmäßigen Setzung nach der einlagigen Stabilisierung  $\Delta s_{stab}$ ). Die durch das Stopfen mögliche Verbesserung wird durch die folgende Formel dargestellt:

$$\Delta s_{mög} = k_{mög} \cdot \Delta s - k_{mög} \cdot (\Delta s_{uj} + \Delta s_{stab}), [\text{mm}] \quad (18)$$

Mit:  $k_{mög}$  – linearer Verbesserungskoeffizient, etwa 0,5 - 0,8 (nach [10-11]).

Die Erhöhung der Setzungsintensität nach dem Stopfen hängt von der Schädigung der Schotterkörner durch die Stopfpickel ab. Diese Schädigung ist hauptsächlich von der



Bruchfestigkeit der Schottersteine abhängig, welche sich stark für verschiedene Arten von Schottermaterial unterscheidet [7]. Daher werden in der Forschung verschiedene Werte der der Intensitätszunahme angegeben. Einige Quellen [10, 14] zeigen eine Erhöhung der Intensität der Schottersetzung infolge Stopfen um 70-90%, andere Quellen gehen von einer Intensitätssteigerung um 20% bis 50% aus. Die ukrainische Eisenbahn verwendet überwiegend Schotterstein aus Granit mit einer hohen Bruchfestigkeit. Deshalb wird in der vorliegenden Berechnung von einer Intensitätszunahme der Schottersetzung von 20% je Stopfgang ausgegangen.

## 5. Ausgangsdaten zur Berechnung

Zur Vereinfachung der Berechnung werden die Lokomotiven nicht berücksichtigt. Es wird nur zwischen Personenwagen auf Drehgestellen vom Typ KB3-ЦННН mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h und beladenen, 4-achsigen Güterwagen auf Drehgestellen vom Typ ЦННН-X3-0 mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h unterschieden.

Die statische Radlast der Personenwagen ist 71,25 kN, die der Güterwagen ist 116,2 kN; die ungefederten Massen betragen 710 kg bzw. 995 kg. Die Fahrzeugsteifigkeit ergibt sich aus der statischen Einsenkung der Wagenfedern von 155,0 mm für die Personenwagen bzw. von 48 mm für die Güterwagen [1].

Bei der Berechnung wird die Standardkonstruktion des Oberbaus der ukrainischen Eisenbahnen angenommen, nämlich: lückenloses Gleis mit Schienen vom Typ R65, Betonschwellen mit einer Anzahl von 1840 Stück/km (0,54 m Schwellenabstand), Schienenbefestigung vom Typ KB. Der Elastizitätsmodul des Untergrundes verändert sich in den Grenzen von  $U_{s\min} = 140 \text{ MPa}$  und  $U_{s\max} = 196 \text{ MPa}$ . Daraus ergeben sich der maximale und minimale Elastizitätsmodul der Unterschienebettung von  $U_{z\min} = 59,4 \text{ MPa}$  sowie  $U_{z\max} = 67,7 \text{ MPa}$ .

Die nach Formel (11) berechnete Wellenlänge der maßgeblichen Gleislagefehler beträgt 4,22 m für Personenwagen mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h und 3,82 m für Güterwagen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h.

## 6. Analyse der Berechnungsergebnisse

Ein Stopfen wird erforderlich, wenn die Setzung die zulässige Tiefe des Gleislagefehlers erreicht hat. Die zulässige Tiefe des Gleislagefehlers wird durch die sog. Abweichungsstufe beschrieben, wobei bei der ukrainischen Eisenbahn 5 Abweichungsstufen (I - V) existieren.

Die Berechnungsergebnisse in Abb. 1 (Abweichungsstufe III) zeigen, dass sich die Gleislagefehler unter dem Einfluss der Güterwagen wesentlich schneller entwickeln als unter dem Einfluss der Personenwagen: Das erste Stopfen ist im Falle der Güterwagen bereits nach 3,76 Millionen Achsen (87 Mt) nötig, im Falle der Personenwagen erst nach 7,16 Millionen Achsen (102 Mt).

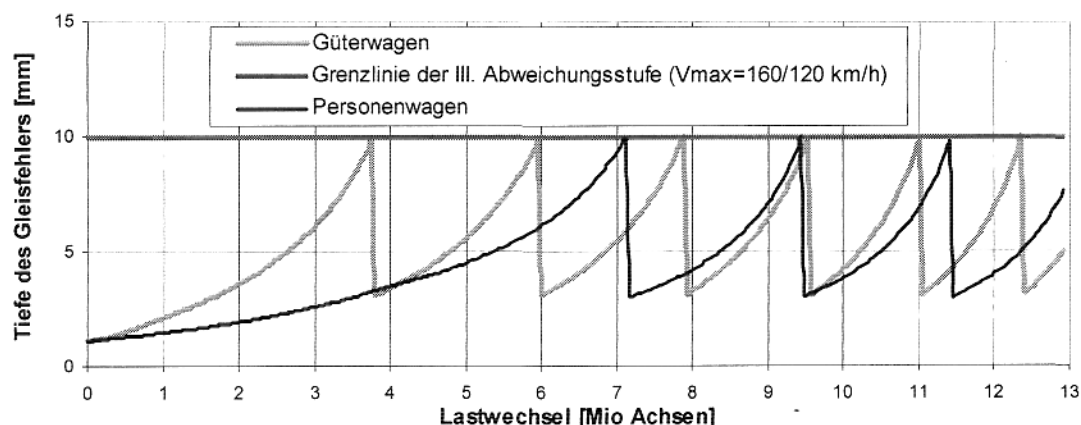


Abbildung 1 Fehlerwachstum der Personen- und Güterwagen in Abhängigkeit von der akkumulierten Achsanzahl (für III. Abweichungsstufe)

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die Entwicklung der Gleislagefehler für 3 verschiedene zulässige Gleislagefehler (Abweichungsstufe II, III, IV) in Abhängigkeit von der akkumulierten Belastung, getrennt nach Personen- und Güterwagen.

Der grundlegende Zusammenhang wird anhand von Abbildung 3 erläutert. Im Neuzustand ist die Anfangsqualität einheitlich, demzufolge wird das erste Stopfintervall umso größer sein, desto größer der zulässige Gleislagefehler ist (Abweichungsstufe IV: 90 Mt, Abweichungsstufe V: 110 Mt). Die Stopftechnologie ist aber nur in der Lage, einen vom maximalen Gleislagefehler abhängigen Anfangsfehler herzustellen. Im vorliegenden Falle beträgt der Anfangsfehler 25% des zulässigen Fehlers, d.h. bei einem zulässigen Gleislagefehler von 12,5 mm (Abweichungsstufe IV) beträgt der Anfangsfehler 3,1 mm, bei einem zulässigen Gleislagefehler von 22,5 mm (Abweichungsstufe V) beträgt der Anfangsfehler 5,6 mm. Der Gleislagefehler erzeugt aber eine dynamische Zusatzbeanspruchung des Schotters, welche ihrerseits die Setzungsintensität des Schotters vergrößert. Dieser rückgekoppelte Prozess hat eine progressive Entwicklung der Setzung zur Folge. Damit ist die Setzungsintensität im Falle der Abweichungsstufe V bereits unmittelbar nach dem Stopfen größer als bei der Abweichungsstufe IV. Im Ergebnis verringert sich die Länge des Stopfintervalls bei der Abweichungsstufe V schneller als bei der Abweichungsstufe IV. Entsprechend Abbildung 3 liefert eine Anhebung des maximalen Gleislagefehlers von 12,5 mm (Abweichungsstufe V) auf 22,5 mm (Abweichungsstufe IV) bereits beim 3. Stopfgang keinen Vorteil mehr. Ab dem 4. Stopfgang liegt der Vorteil auf der Seite der Abweichungsstufe IV. Aus dieser Betrachtung folgt, dass durch eine Optimierung des zulässigen Gleislagefehlers das mittlere Stopfintervall bzw. die daraus folgende Lebensdauer des Schotters (als Summe der Stopfintervalle) maximiert werden kann.

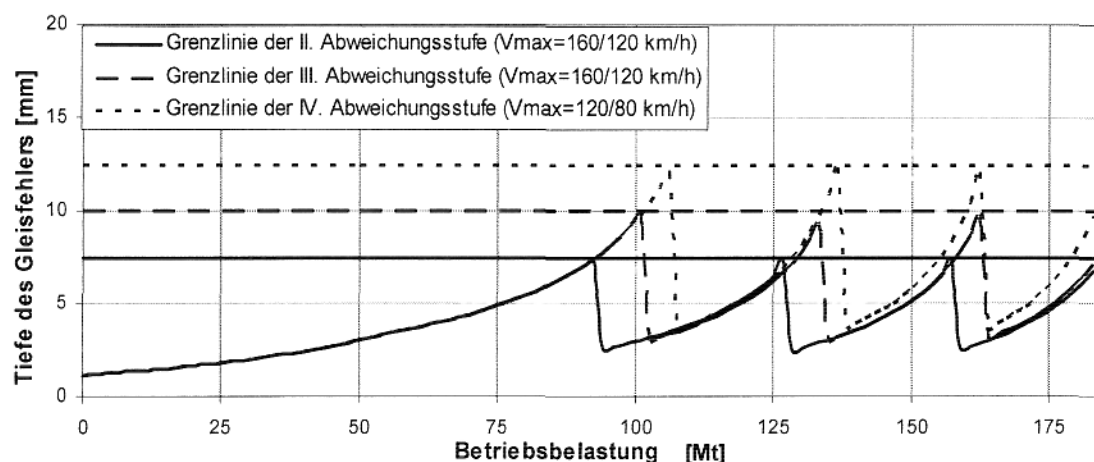


Abbildung 2 Fehlerentwicklung bei verschiedenen Werten des zulässigen Gleislagefehlers für die III. Abweichungsstufe

### Personenwagen

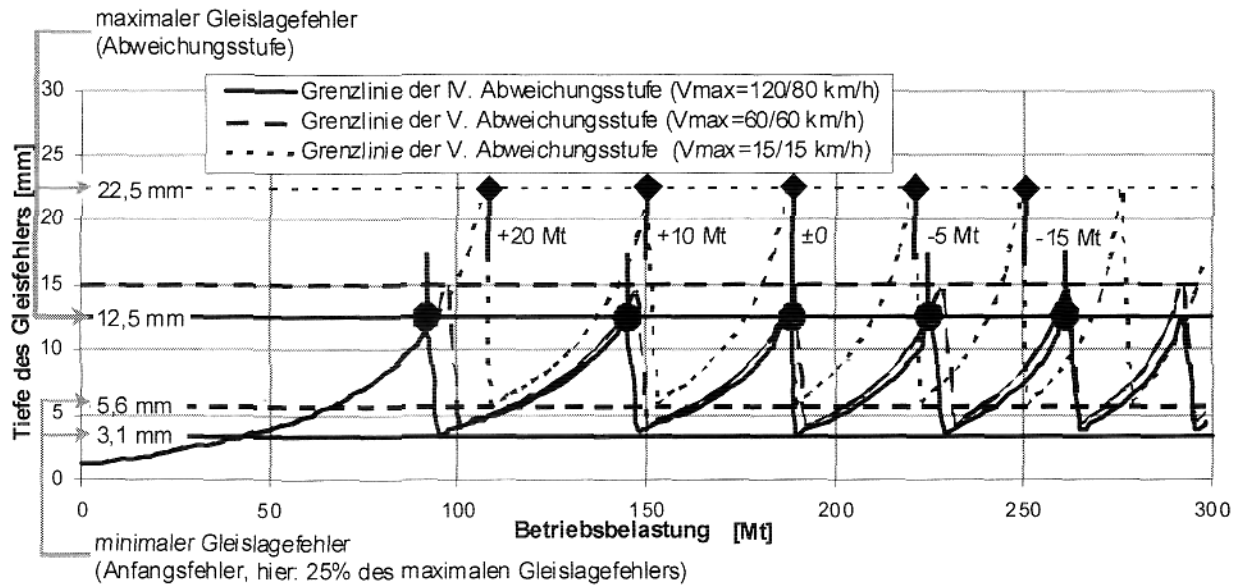


Abbildung 3 Fehlerentwicklung bei verschiedene Werten des zulässigen Gleislagefehlers für Güterwagen

Bei der Suche nach dem optimalen zulässigen Gleislagefehler wird davon ausgegangen, dass der Schotter eine Lebensdauer von 6 Stopfzyklen aufweist (5 mal Stopfen bis zum Schotterwechsel; dieser Lebenszyklus ist in Abbildung 3 angegeben). Das mittlere Stopfintervall ergibt sich nun aus dem Mittelwert der Stopfintervalle:

$$\Delta B_m = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^6 \Delta B_i \quad (19)$$

Für die folgenden Betrachtungen wird eine Kennzahl KZ eingeführt, welche angibt, wie viele mittlere Stopfintervalle zur Erzielung einer akkumulierten Verkehrsmasse von 100 Mt erforderlich sind:

$$KZ = \frac{100 \text{ Mt}}{\Delta B_m} \quad (20)$$

Aus Gleichung 20 wird deutlich, dass der optimale zulässige Gleislagefehler dann erreicht ist, wenn die Kennzahl KZ ihr Minimum erreicht. Die Berechnung der Kennzahl KZ in Abhängigkeit von verschiedenen zulässigen Gleislagefehlern, getrennt nach Personen- und Güterwagen, ist in Abbildung 4 dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass der optimale zulässige Gleislagefehler für Personenwagen 10 mm beträgt (Abweichungsstufe III), für Güterwagen 12,5 – 15 mm (Abweichungsstufe IV oder V).

Die Kennzahl KZ ist in erster Näherung proportional zu den Schotterkosten (für Erneuerung und Instandhaltung). Im Bereich der möglichen Abweichungsstufen der ukrainischen Eisenbahn variiert die Kennzahl KZ bei Personenwagen um 35% (2,0 – 2,7), bei Güterwagen um 53% (2,05 – 3,15). Dies bedeutet ein vergleichsweise großes Einsparungspotential.

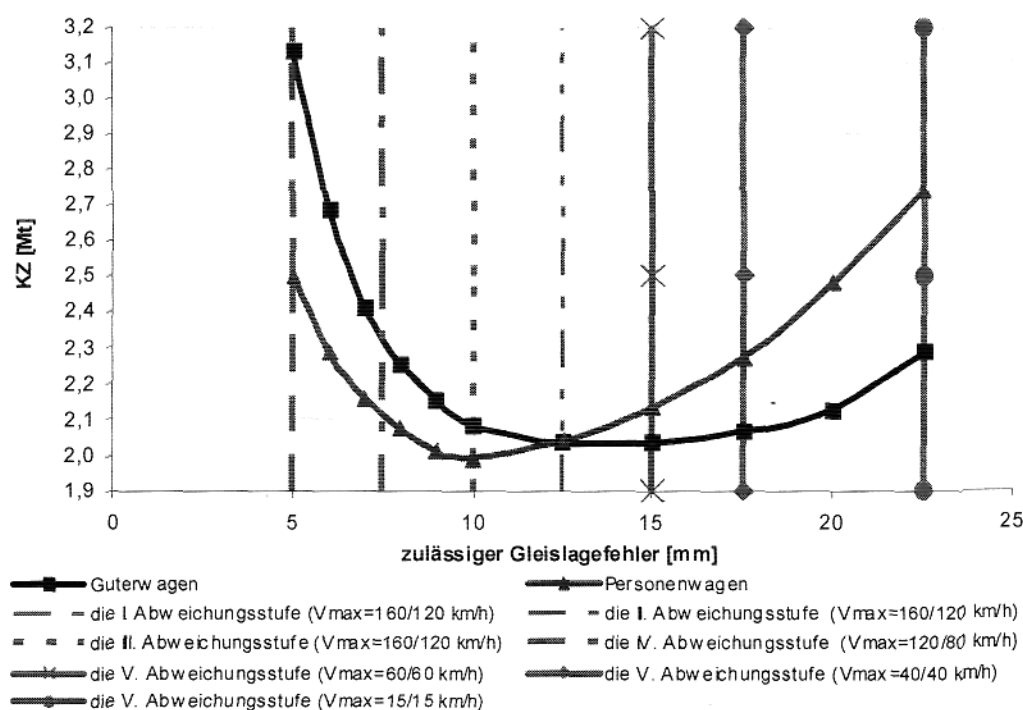


Abbildung 4 Kennzahl KZ in Abhängigkeit vom zulässigen Gleislagefehler, getrennt nach Personen- und Güterwagen

## 7. Fazit

Die Festlegung des zulässigen Gleislagefehlers im Normbereich der ukrainischen Eisenbahn (5 – 22,5 mm) beeinflusst die Schotterkosten zu 30 - 50%. Diese Abhängigkeit hat 2 grundlegende Ursachen:

- Die durch die Stopftechnologie hervorgerufene Kopplung zwischen dem maximalen Gleislagefehler und dem durch das Stopfen erreichbaren minimalen Gleislagefehler.
- Die Kopplung der durch die Gleislagefehler erzeugten dynamischen Kräfte mit der Setzungsintensität des Schotters.

Aus den vorliegenden Berechnungen kann der Schluss gezogen werden, dass auf Strecken mit dominierendem Personenverkehr und einer maximalen Geschwindigkeit von 160 km/h der optimale zulässige Gleislagefehler 10 mm beträgt (Abweichungsstufe III). Für dominierenden Güterverkehr mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h beträgt der optimale zulässige Gleislagefehler 15 mm (Abweichungsstufe IV oder V).

## Literatur

1 Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. — Київ: Транспорт України, 2006. — 168 с.

2 Звіт НДР: "Проведення досліджень та розробка рекомендацій по визначенню ефективності використання динамічних стабілізаторів різних конструкцій при виконанні модернізації колії на довгостроково закритих перегонах" (№ держреєстрації 0107U005237), 2007. — 103 с.

3 Рыбкин, В. Определение степени уплотнения балластного слоя путем динамического и кинематического анализа проходящей в нем акустической волны / В. Рыбкин, У. Гербер, О. Набоченко, М. Сысин // Sborník přednášek. Železniční Dopravní Cesta. VOŠ a SPŠ stavební. Děčín, 17.-18. února 2010. — S. 123-130.

4 М. Ф. Вериге, А. Х. Ветченко, О. П. Ершкова, С. Н. Попов, Б. Д. Хейстер  
Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути // Труды ВНИИЖТ,  
вып. 97. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – 411 с.

5 Лысюк В.С., Сазонов В.Н., Башкатова Л.В. Прочный и надежный  
железнодорожный путь. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. — 589 с.

6 Kira Holtzendorff. Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der  
Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen. Dissertation. Technische Universität Berlin. –  
Berlin, 2003 D 83. – 130 s.

7 Lichtberger B. Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit.  
— Hamburg: Tetzlaff Verlag, 2003. — 318 s.

8 Ulf Gerber, Wolfgang Fengler. Setzungsverhalten des Schotter. Eisenbahntechnische  
Rundschau, 2010. – №4. – S. 170-175.

9 Бондаренко І.О. Підвищення якості оцінки працездатності залізничної колії за  
рахунок удосконалення розрахункових характеристик підрейкової основи. – Дисертація.  
ДНУЗТ, Дніпропетровськ, 2006. – 248 с.

10 Peter Veit. Qualitat im Gleis – Luxus oder Notwendigkeit? Eisenbahningenieur, 2006.  
– №12 (57). – S. 32-37.

11 Jochen Holzfeind, Robert Hummitzsch. Qualitätsverhalten von Gleisen -  
Zusammenhänge zwischen Parameterkennwerten und Verschlechterungsverhalten. ZEVrail,  
2009. – №6-7 (133). – S. 240-250.

12 Esveld C. Modern railway track, Second edition, MRT-Production, 2001. – 653 p.

13 System Dynamics and Long-Term Behavior of Railway Vehicles, Track and Subgrade  
(Lecture Notes in Applied Mechanics; vol. 6)/ K. Popp, W. Schiehlen. — Berlin Heidelberg:  
Springer-Verlag, 2003. — 488 p.

14 Jochen Holzfeind, Robert Hummitzsch. Zur Prognostizierbarkeit des  
Qualitätsverhaltens von Gleisen. Eisenbahningenieur, 2010. – №8. – S. 32-40.

15 Ferenc Horvat, Ferenc Kiss. Streckenbewirtschaftung in Relation von  
Gleislagequalität zu Traktionsenergieverbrauch. Eisenbahntechnische Rundschau, 2006. – №11.  
– S. 798-805.