

Bernhard Lichtberger

Schottergleisverhalten und Einflussparameter – der Versuch eines Überblicks

Teil 1: Die Suche nach der optimalen Schottergleiskonstruktion

1 Die Gleisqualität

Damit der Zustand einer Gleiskonstruktion objektiv beurteilbar ist, sollte er durch signifikante meßbare Größen beschreibbar sein. Als besonders geeignet zur Beschreibung der Gleisqualität hat sich der mittlere Längshöhenfehler über eine bestimmte Streckenlänge erwiesen.

Andere übliche Gleisgüteziffern stellen sich aus gewichteten Fehlern der Längshöhe, der Richtung, der Überhöhung und anderen geometrischen Kenngrößen zusammen.

Neben dieser Art der Gleisqualitätsdefinition werden auch noch die folgenden Methoden angewandt [1]:

- CEN – Qualitätsstufen: die Größtwerte der Meßgrößen werden geprüft und mittels Häufigkeitsverteilungen von Grenzwertüberschreitungen Klassen zugeordnet,
- Gleis-Analyseverfahren wie das der DBAG [2, 3, 4]: die Standardabweichungen der Gleislageparameter werden gewichtet und zu einem Qualitätsindex summiert,
- Beschreibung durch Fahrzeugreaktionen [5, 6, 7, 8, 9, 10]: Beurteilungsgrößen sind dabei Beschleunigungen und Beschleunigungsdifferenzen.

Dr. Bernhard Lichtberger, Forschungs- & Versuchsabteilung, Fa. Franz Plasser, Linz

1.1 Ansätze zur Beschreibung der Gleisqualität

1.1.1 Exponentielle Darstellung [11, 12, 13]

Mit dem Ansatz, daß die Verschlechterungsrate proportional zur Qualität ist:

$$dQ = c * Q * dM$$

ergibt sich als Lösung dieser einfachen Differentialgleichung

$$Q = Q_0 * e^{cM} .$$

Q	...	Gleisqualität
Q ₀	...	Anfangs- oder Ausgangsqualität
c	...	Verfallskonstante
M	...	Betriebslast

Die Gültigkeit dieser Beziehung läßt sich vor allem für Gleise mit sehr schlechtem Erhaltungszustand, die am Ende Ihrer Lebensdauer angekommen sind, vermuten.

Die Gleichung besagt nämlich, daß sich der Gleiszustand umso rascher verschlechtert je schlechter der Gleiszustand ist (die e-Funktion ist ihrer Ableitung proportional).

1.1.2 Lineare Darstellung [14], [15]

Dieser Ansatz geht davon aus, daß sich die Gleisqualität linear mit der Betriebslast verschlechtert. Dieses Verhalten wird durch ORE-Untersuchungen [14] beschrieben.

$$dQ = c * dM$$

$$Q = Q_0 + c * M$$

c	...	Verschlechterungsrate (Steigung des Gleisqualitätsverfalls)
---	-----	---

Die Verschlechterung des Gleises geht proportional mit der Radlast. Radsätze mit Höchstlast (dynamisch und statisch) sind bestimmend [16].

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, daß die Setzung (damit auch die Standardabweichung und der Gleisfehler) vor allem von den höchsten Achslasten abhängt.

1.1.3 Halblogarithmische Darstellung [17]

$$Q = Q_0 + c \cdot \log M/M_0$$

M_0 ... $2 \cdot 10^6$ Mio. Lasttonnen

Die Standardabweichung der Gleisfehler und die Standardabweichung der Einsenkungen verhalten sich ähnlich. Die Gleisfehler betragen 30–60% der Standardabweichung der Einsenkung.

1.2 Eigenschaften der Gleisqualität

1.2.1 Schematischer Verlauf der Gleisqualität

Bild 1 zeigt den schematischen Verlauf der Gleisqualität.

Nach Erreichen der Eingriffsschwelle (gewünschter Fahrkomfort) wird das Gleis gestopft und die Standardabweichung der Gleisfehler sinkt. An diese Verbesserung schließt sich eine Periode des schnellen exponentiellen Anwachsens des Gleisfehlers an – diese Phase ist durch das Abbrechen der Kornspitzen [18] und das Umlagern der Körner in eine dichtere Lage gekennzeichnet. Diese Periode ist nach etwa 0.5–1 MGT abgeschlossen. Anschließend nimmt der Fehler linear zu [14].

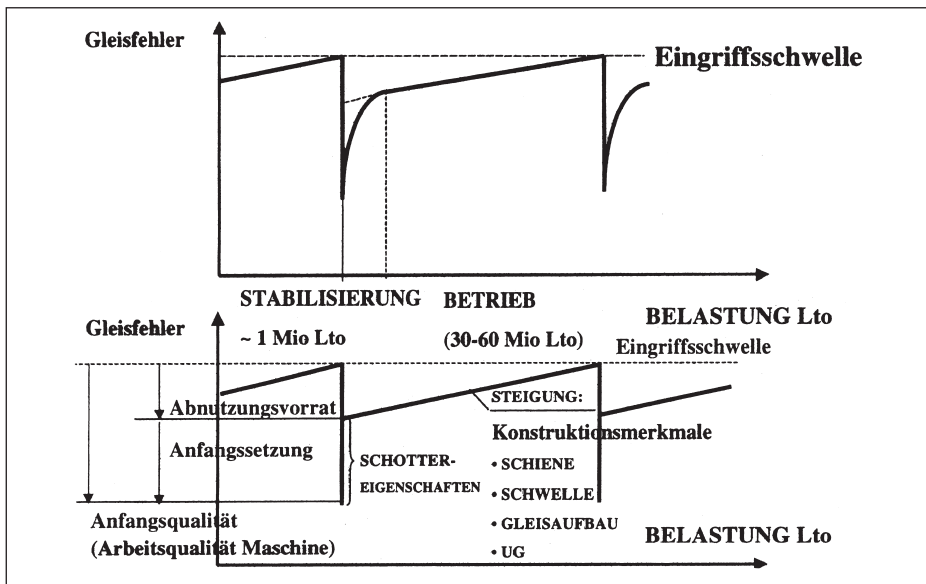


Bild 1: Schema des Gleisqualitätsverlaufes

Wichtige Parameter:

– **Anfangsqualität**

Je höher die Anfangsqualität ist, um so größer ist der Abnutzungsvorrat, umso länger dauert es, bis die Eingriffsschwelle wieder erreicht wird. Eine hohe Anfangsqualität wird bei gegebener Gleiskonstruktion durch [17]

- optimale Arbeitstechnologie und Arbeitsmethoden,
 - hochwertige Gleisbaumaschinen und
 - hochwertige Gleisbaumaterialien
- erreicht.

– **Anfangssetzung**

Unter der Anfangssetzung wird die schnelle Einbuße der Gleisqualität innerhalb der ersten MGT Betriebsbelastung verstanden.

Diese schnelle Anfangsverschlechterung läßt sich durch gezielte kontrollierte Setzung mittels des dynamischen Gleisstabilisators reduzieren. Mit dem Gewinn an Abnutzungsvorrat sinkt der Instandhaltungsaufwand.

– **Verschlechterungsrate**

Die Verschlechterungsrate der Gleisqualität entspricht der Steigung der Kurve. Je flacher die Steigung verläuft, umso größer sind die Instandhaltungsintervalle und umso geringer ist der Instandhaltungsaufwand.

Die Qualität des Gleises während seiner gesamten Lebensdauer [14] hängt direkt vom Anfangsniveau nach der Gleisverlegung ab.

Die Verschlechterungsrate ist durch die folgenden Parameter beeinflussbar [14]:

- ein größeres Trägheitsmoment der Schiene verlangsamt den Verfall,
- ein Verkleinern des Schwellenabstandes wirkt sich günstig aus,
- enge Kurvenradien wirken nachteilig,
- homogen verdichteter Untergrund und Schotterschicht sind ein wichtiger Faktor für die Dauerhaftigkeit der Gleislage,
- die Schwankung der vertikalen Elastizität zeigt negative Auswirkungen und,
- das Spektrum der ins Gleis eingebrachten Kräfte ist insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten ein entscheidender Faktor. Es kann als sicher angenommen werden, daß dynamische Kräfte, insbesondere die auftretenden maximalen dynamischen Kräfte, eine überproportionale Schädigung des Gleises mit sich bringen [19].

Pita [18] postuliert das Vorhandensein einer optimalen vertikalen Steifigkeit. Seine Versuchsergebnisse zeigen Steifigkeitsschwankungen unter der Schwelle, sowohl in Quer- richtung als auch in vertikaler Richtung. Mit Hilfe eines FEM-Modells der Schotterbettung, wobei eine zufallsbedingte Streuung des Elastizitätsmoduls gemäß statistischen experimentiellen Daten angenommen wurde, erklärt er aus diesen Steifigkeitsschwankungen die stark unterschiedlichen Setzungsverläufe mancher Streckenabschnitte.

Lokale Steifigkeitsschwankungen sind auch nach anderen Arbeiten Ausgangspunkte für ungleichmäßige Schottersetzungen. Die Gleissteifigkeit selbst ändert sich kaum während der Betriebsbelastung. Die große Bandbreite der Schottersetzungen und die Schwellenhohllagen werden auf

- die zufällige Anordnung der Schotterkörner und
- die Streuungen in der Anfangsverdichtung zurückgeführt.

Die Winkeligkeit des Schotters ist von großer Bedeutung für die Setzungen. Eine Verunreinigung des Schotters führt zu einer Verstopfung der Hohlräume in den unteren Schichten, die Verdichtung des Schotters wird dadurch erhöht – die Elastizität gemindert, die Schotterpressung steigt an – es kommt zu einer beschleunigten Schotterzerstörung und damit auch zu einem Ansteigen der Verschlechterungsrate. Der Wasserablauf wird durch die Verunreinigung behindert – es drohen in der Folge Frostschäden.

Sato [20] zeigte, daß die Häufigkeitsverteilung der Verschlechterungsraten einer Strecke einer Exponentialverteilung unterliegt.

Als maßgebender Faktor für die Entwicklung von Gleislagefehlern wird häufig die Höhe der Schotterpressung unter dem fahrenden Rad angesehen. Dabei wird unter Ansatz der 2. oder 4. Potenzregel ein mathematischer Zusammenhang zwischen der Schotterpressung und der Häufigkeit von Gleisdurcharbeitungen formuliert [21]. Die Schotterpressung wird nach der Methode von Zimmermann berechnet [22]. Nach einer neueren Arbeit [19] wird der Einfluß der Schotterpressung auf die Gleislagequalität überschätzt. Das vermehrte Auftreten von Gleislagefehlern an diskreten Störstellen deutet vielmehr darauf hin, daß den dynamischen Erscheinungen im Zusammenwirken von Rad und Schiene, insbesondere auf Schnellfahrstrecken, eine sehr große Bedeutung zukommt.

Eine Untersuchung an der TU Graz zeigte eine erstaunlich geringe Anzahl von Schotterberührungspunkten der Schwellenunterseite mit dem Schotterbett. Dabei ergeben sich bei Holzschwellen Kontaktflächen im Bereich zwischen 4–10%, bei Spannbetonschwellen zwischen 1–9%. Erstaunlich niedrige Kontaktflächen bekommt man mit 0.5–3% bei Gleisneulagen [23]. Durch Stopfen und durch Stabilisieren mit dem Dynamischen Gleisstabilisator erhält man eine Erhöhung der Kontaktflächen um etwa 40%. Zur Erhöhung der Kontaktflächen und damit der Verbesserung des Lastübertragungsverhaltens wird neben der Anwendung des Stabilisators, eine Optimierung der Schotterkorn-Zusammensetzung (Beimischung von 15% Oberbauschotter der Körnung 2), Optimierung der Schotterform, sowie die Besohlung der Schwellenunterseite empfohlen. Je höher die Anzahl der Kontaktflächen ist, umso besser ist das Lastübertragungsverhalten und umso geringer wird die rasche Anfangsver schlechterung unter den ersten Zugbelastungen nach einer Durcharbeitung sein.

Das verbesserte Lastübertragungsverhalten führt auch zu einer geringeren Verschlechterungsrate der Gleisqualität.

1.2.2 Messungen des Verlaufs der Gleisqualität

Bild 2 zeigt den Verlauf der Gleisqualität einer TGV-Strecke. Trotz gleicher Gleiskonstruktion, gleichem Baujahr und derselben Verkehrsbelastung streuen die Verschlechterungsraten auch benachbarter Abschnitte sehr stark, wobei die Verschlechterungsraten zwischen 0.6mm/100MGT und 2.4mm/100MGT liegen. Eine Ursache wird in Inhomogenitäten der Schotterbettung und vertikalen Elastizitätsschwankungen gesehen. Eine Problematik der Regressionsanalyse in diesem Zusammenhang ist die große Streuung der Meßergebnisse. Die Korrelationen verstecken sich zum Teil in der Streubreite (Bild 3 [24]).

Die Verschlechterungsraten einzelner Abschnitte derselben Strecke streuen zwar sehr stark – sie bleiben aber für den einzelnen Abschnitt charakteristisch und ändern sich kaum.

1.2.3 Verbesserung durch Stopfen

Bild 4 [24] zeigt die Verbesserungen in der Standardabweichung der Gleisfehler durch die Stopfung.

Stopfen wirkt vergleichmäßiger und bringt ein Gleis auf die günstigste mögliche Verschlechterungsrate [14].

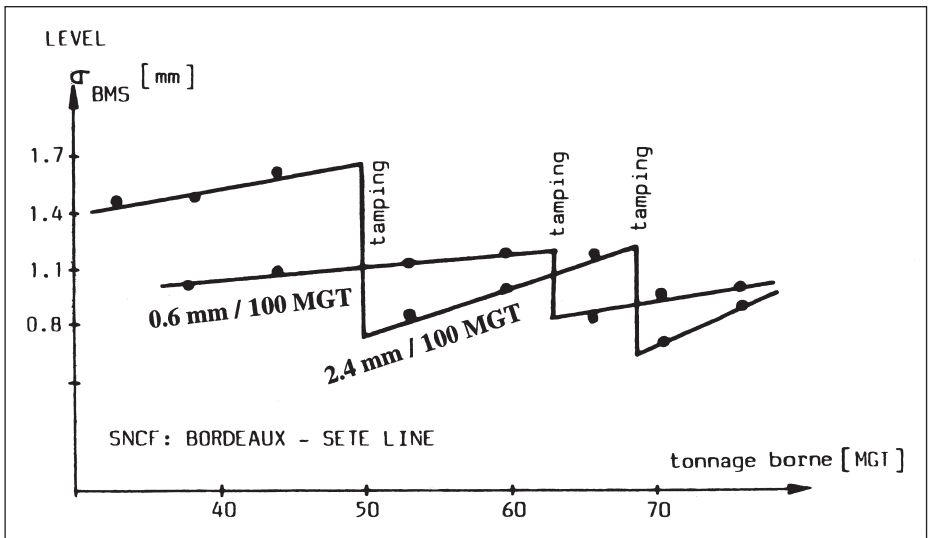


Bild 2: Streuung der Gleisqualität zwischen zwei benachbarten Gleisabschnitten auf der Strecke Bordeaux – Sete [24]

Aus dem Bild kann man auch ableiten, daß die mögliche relative Verbesserung durch die Stopfmaschine mit zunehmender Fehlergröße sinkt.

2 Die Suche nach der optimalen Gleiskonstruktion

Die optimale Gleiskonstruktion ist die, die über die gesamte Lebensdauer gesehen am wirtschaftlichsten ist. Dazu ist die für die gewünschte Betriebsbelastung, die Achslast, die Streckengeschwindigkeit etc. am besten geeignete Konstruktion zu suchen.

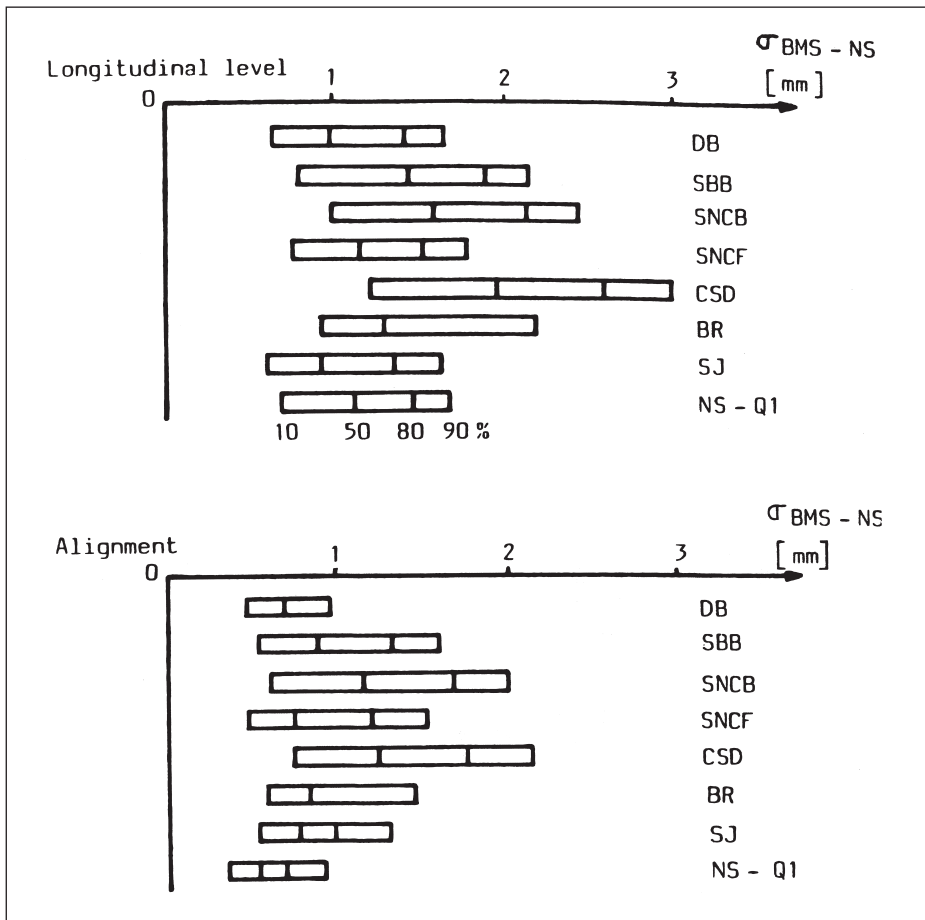


Bild 3: Verteilung der Standardabweichungen der Längshöhe und der Richtung gemessen auf Gleisen verschiedener europäischer Bahnen [24]

Damit man die für bestimmte Anforderungen optimale Gleiskonstruktion wählen kann ist der grundsätzliche Zusammenhang zu klären, wie sich die Betriebsart (die Achslasten, die Zugfrequenzen, die dynamischen Lasten, die Fahrgeschwindigkeit etc.) auf die Gleisqualität und damit vor allem auf die Verschlechterungsrate auswirken.

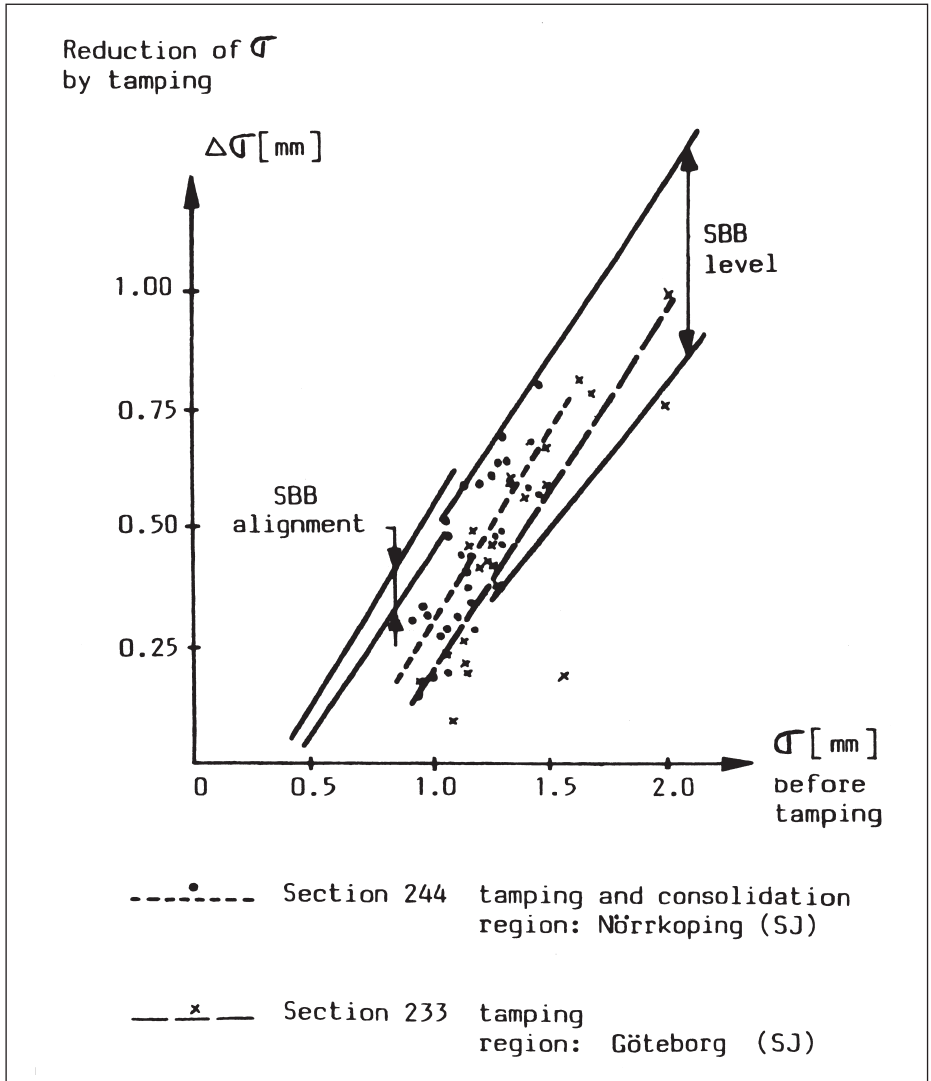


Bild 4: Verbesserung der Längshöhe (SBB und SJ) und der Richtung (SBB) durch das Stopfen [24]

2.1 Das Modell von JR Central [20, 25]

Sato postuliert ein Konvergenzverhalten der Gleisqualität. Das heißt, man kann Gleisqualitäts Grenzen vorgeben, die durch entsprechende Instandhaltungszyklen eingehalten werden können. Mit diesem Ansatz kann ein Zusammenhang zwischen Verschlechterungsrate, gewünschten Gleisqualitäts Grenzen und der notwendigen Anzahl der Stopfzyklen hergestellt werden (Bild 5).

Die Gerade A stellt die Linie dar, bei der die Instandhaltungsmaschine den Gleisfehler nicht verbessern würde. Die Kurve C steht für die Verbesserung des Fehlers durch die Instandhaltungsmaschine. Die Kurve B liegt parallel zu C. Die Kurve steht, nimmt man eine lineare Verschlechterung unter Verkehrslast an, für ein bestimmtes Instandhaltungsintervall. Wegen der Parallelität der Kurve B zu C und der konstanten Verschlechterungsrate dauert es immer gleich lange, bis sich der Gleisfehler vom Punkt auf der Kurve C bis zu dem Punkt auf der Kurve B verschlechtert hat.

Der Schnittpunkt X steht für die obere Gleisqualitäts Grenze, die man für die Strecke als gewünscht garantieren will. Der Punkt legt neben der Eingriffsschwelle auch die notwendige Anzahl der Stopfungen/Jahr fest.

2.1.1 Erklärung der Konvergenz des angestrebten Qualitätsniveaus

Man beginnt den Gleisfehler mit dem Anfangsniveau X_A auf das Niveau X_C zu verbessern. Anschließend verschlechtert sich das Gleis so lange unter der Verkehrslast, bis das Fehlerniveau X_B erreicht ist. Eine Stopfung, die bei der Eingriffsschwelle X_B erfolgt,

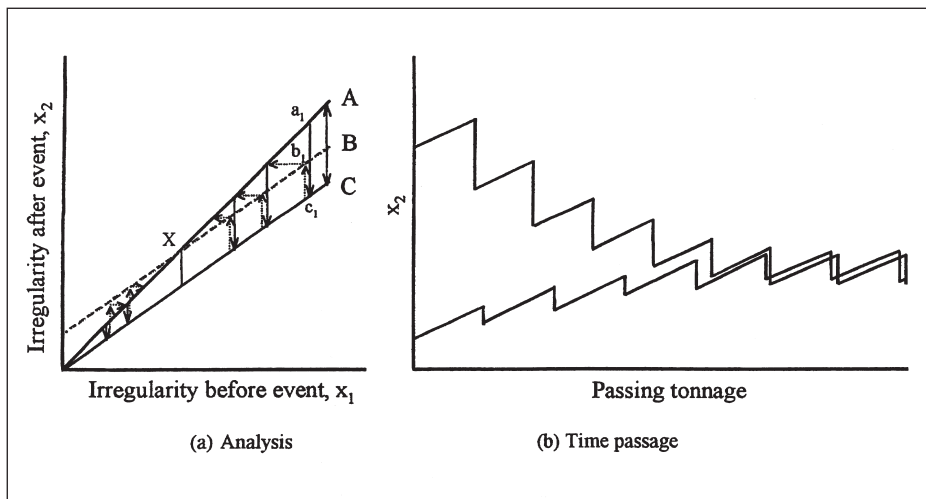


Bild 5: Konvergenz der Gleisqualität abhängig von der Verbesserungsrate durch Stopfmaschinen, der Instandhaltungshäufigkeit und der gewünschten Gleisqualität [25]

erreicht ein höheres Anfangsniveau als die vorausgehende Stopfung. Dies wird wiederholt, bis die Verbesserungsrate bei X konvergieren.

Es ergibt sich:

$$X = \frac{D}{W} \cdot \frac{1}{1 - K}$$

D	...	Verschlechterungsrate [mm/Jahr]
W	...	Anzahl der Stopfeingriffe [1/Jahr]
K	...	Verbesserungsrate der Instandhaltungsmaschine

Gibt man die gewünschte Gleisqualität X vor, setzt D ein (aus überwachten Gleis-meßwagenmessungen oder von einem theoretischen Modell her bekannt) und verwendet K als empirisch ermittelten Parameter der Arbeitsgüte von Instandhaltungsmaschinen, dann kann die Anzahl der notwendigen Instandhaltungseingriffe W errechnet werden.

2.1.2 Modell für die Verschlechterungsrate

Für die Verschlechterungsrate D wurde folgender Ansatz gewählt:

$$D = L \cdot M \cdot N$$

L	...	Einfluß der Achslast, der Geschwindigkeit und der Wagenparameter
M	...	Gleiskonstruktionsfaktor, maximale Pressung Schotter unter Schwelle, maximale Schotterbeschleunigung, Stoßkoeffizient
N	...	Zustandsfaktor Ungleichförmigkeitszahl, Schiene, Schwelle, Verschmutzung Schotter, Untergrund

Für die ersten zwei Faktoren werden Modellformeln angegeben.

Damit kann prinzipiell für eine geplante Oberbaustruktur und die vorgesehenen Betriebsparameter die Verschlechterungsrate vorhergesagt und mit Hilfe des gewünschten Gleisqualitätsbereiches die Anzahl der notwendigen Stopfungen berechnet werden.

2.2 Das Modell der Delft Universität [26]

Bei diesem Modell wird der Gleisaufbau durch die Abmessungen der Komponenten und deren mechanischen, statischen und dynamischen Eigenschaften, wie Steifigkeit und Dämpfung, beschrieben. Das Verhalten des Gleises wird durch ein Finite-Element-Modell beschrieben. Optimale Gleisparameter können durch numerische Methoden ermittelt werden. Als Optimierungsbedingungen können z.B. die minimale Abnutzung von Rädern und Schienen und der abgestrahlte Lärm vorgegeben werden. Um die optimalen Gleisparameter zu finden, werden die Komponentendimensionen bzw. deren mechanische Eigenschaften variiert und ihre Auswirkungen auf die zu optimierenden Parameter untersucht.

2.3 Dynamische Fahrbahnmodelle [27]

Dynamische Fahrbahnmodelle unterscheiden zwischen niederfrequenten quasistatischen Anregungen durch Achslasten ($<40\text{Hz}$), mittelfrequenten Anregungen durch Radunrundheiten ($40\text{--}400\text{ Hz}$) und hochfrequenten durch Riffel und andere Schienenoberflächenfehler ($>400\text{Hz}$). Durch umfangreiche Variantenanalysen können die Auswirkungen von unabgefederten Radsatzmassen, Zwischenlagen unterschiedlicher Steifigkeiten, Schwellen verschiedener Bauart, Schotter- und Planumseigenschaften auf das Schottergleis untersucht werden.

Diese Untersuchungen führen zu folgenden Ergebnissen:

- weichere Zwischenlagen, sowie eine Besohlung von Schwellen wirken sich günstig auf die Haltbarkeit des Schotterbettes aus,
- verringerte unabgefederte Radsatzmassen sind vorteilhaft, ebenso wie
- schwerere Schwellen mit vergrößerter Fläche und
- eine angemessene Steifigkeit des Planums.

Vor allem der Hochgeschwindigkeitsverkehr verlangt eine dynamische Betrachtungsweise des Gleisverhaltens. Rehfeld [28] postuliert in der Schwinggeschwindigkeit eine wichtige Größe für kritische dynamische Zustände im Schotterbett.

Vorausgesetzt man könnte zu einer Klassifizierung der Oberbaukonstruktionen finden und mit entsprechender Parametrisierung der Instandhaltungskosten diese abhängig von der Klassifizierung der Oberbaukonstruktionen angeben, dann ließen sich die folgenden fundamentalen Aussagen machen:

- Zu einer gegebenen Gleiskonstruktion mit gegebenen Betriebsparametern ließe sich überprüfen, ob das gesamte System im Bereich eines Kostenoptimums arbeitet oder nicht – dies ließe Schlüsse zu, ob die Strecke überlastet ist oder noch freie Kapazitäten hätte – oder ob mehr oder weniger Instandhaltung betrieben werden muß,
- für eine neu zu bauende Strecke ließe sich für die gewünschten Betriebsparameter die hinsichtlich der Gesamtkosten optimale Oberbaukonstruktion bestimmen,
- die Auswirkung einer Änderung der Instandhaltungstechnologie oder Strategie auf die Gesamtkosten und die Verschiebung der Lage des Optimums zur Ausführung der Gleiskonstruktion ließe sich studieren.

Ein hervorragendes österreichisches Kostenmodell für verschiedene Instandhaltungstechnologien und Strategien existiert bereits [29]. Im Gegensatz zur rein statischen Berechnung der Gesamtkosten bei LCC-Modellen wird bei diesem Modell eine dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung angewandt. Dabei werden die Kosten und Preise als über die Lebensdauer des Gleises veränderlich angenommen.

Im Modell werden verschiedene Normkilometer (welche für das Streckennetz typisch sind) definiert. Es müssen alle Kosten, wie die Lohnkosten, Materialkosten und Maschinenkosten eingegeben werden. Diese werden mit frei wählbaren Wachstumsraten ergänzt.

3 Bedeutung der Herstellung der Gleise mit höchster Anfangsqualität

Bild 6 zeigt beispielhaft die Höhenlage eines Planums, welches in Längsrichtung mit einer Reinigungsmaschine geschnitten wurde. Offenbar wurde keine besondere Sorgfalt im Hinblick auf die Ebenheit des Längsschnittes gelegt. Wie negativ sich diese mangelnde Sorgfalt im Hinblick auf die Anfangsqualität ausgewirkt hat, zeigt die gemessene Längshöhe an der Schienenoberkante. Die ins Planum geschnittenen langwelligen Fehler sind deutlich an der Schienenoberkante festzustellen. Die Erfahrung zeigt, daß das Gleis mit einem **Geurtsfehler** behaftet ist, der zumindest bis zur nächsten Reinigung oder Umbau des Gleises vorhanden ist. Ergänzend sei noch angemerkt, daß es heute mit Hilfe von Lasern und anderen hochgenauen Meßsystem auf Reinigungsmaschinen möglich ist, ein sehr präzises Planum zu schneiden und so für eine möglichst hohe Anfangsqualität zu sorgen. In der ORE-Untersuchung D161 [14] wird daher der Schluß gezogen:

„Die Qualität eines Gleises während seiner gesamten Lebensdauer scheint also direkt vom Anfangsniveau nach der Gleisverlegung und der ersten Zeit danach abzuhängen.“

Die Forderung nach bestmöglicher Verbesserung oder Schaffung der wirtschaftlich sinnvollen besten inherenten Gleisqualität betrifft nicht nur die Gleisgeometrie, sondern auch

- die Festigkeit der Schwellenaufleger und ihre Gleichmäßigkeit,
- den Schichtenaufbau des Planums und des Schotterbettes, sowie die optimale Abstufung der Tragfähigkeiten und Elastizitäten,

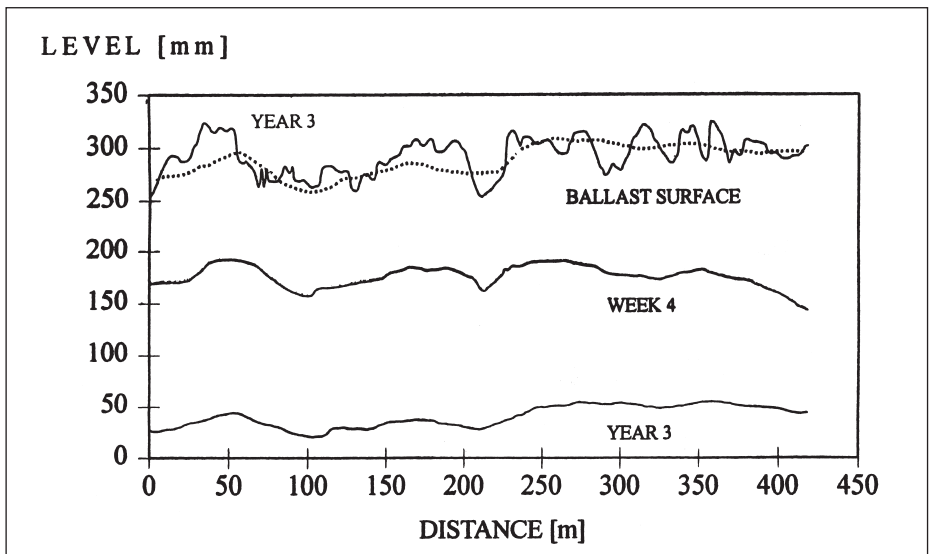


Bild 6: Einfluß des Verlaufes des Längsschnittes des Planums auf die Gleisgeometrie [16]

- die ausreichende Dicke der Schotterbettstärke,
- den „gesunden“ Schotter: Reinheit, Abriebfestigkeit, Korngröße, Korngrößenverteilung, Kornform etc.,
- Eigenschaften des Untergrundes, Tragfähigkeit, Drainage, Frostunempfindlichkeit, vertikale Elastizität etc.,
- beste Arbeitstechnologien wie asynchrone Stopfung, lagenweise Verdichtung und Stabilisierung, langwellige Fehlererfassung und -behebung, moderne Steuerungsgeräte wie Laser, Leitcomputer etc.,
- Schwellenfachverfüllung usw..

Ein Strategiewechsel in der Instandhaltung auf einer bestehenden Strecke bietet sich wegen der zu geringen Nutzungsdauer bei Altgleisen vor allem im Zuge einer Neulage oder Umbaus an.

Das beste Gleis ist das wirtschaftlichste – wenn die höhere Ausgangsqualität durch entsprechende Instandhaltung in eine Verlängerung der Nutzungsdauer umgesetzt wird [30].

Schrifttum

- [1] Zacher, Manfred: Unrunde Räder und Oberbausteifigkeit; ETR 45 (1996), H.10 – Oktober, S605ff
- [2] Esveld, Coenraad: Modern Railway Track, MRT Productions, Duisburg, Deutschland, 1989
- [3] Franz, Johannes; Ebering, Rolf: Gleislagebewertung mit Hilfe der Mikrorechen-technik auf dem Oberbaumeßwagen der Deutschen Reichsbahn, Signal und Schiene 4/89, S122ff
- [4] Krettek, Otmar; Adamek, Walter: Zur Frage der Minimierung der Instandhaltungskosten von Schotteroberbaugleisen; ZEV + DET Glas. Ann. 122 (1998) Nr. 5 Mai, S181ff
- [5] Fendrich, Lothar: Gleisdiagnose bei der Deutschen Bundesbahn – Verfahren zur Qualitätskontrolle und zur Bestimmung von Instandhaltungsmaßnahmen; Schienen der Welt, Juni/Juli 1991, S22ff
- [6] Hehenberger, Walter: Gleislagebeurteilung mit der Oberbaumeßwageneinheit der Deutschen Bundesbahn, ETR 39 (1990), Hr. 4 – April, S213ff
- [7] Hehenberger, Walter: Gleisdiagnose für den Hochgeschwindigkeitsverkehr; ETR 41 (1992), H.6 – Juni, S399ff
- [8] Esveld, Conraad: Grundsätze der Überwachung und Bewertung des Gleiszustandes; Schienen der Welt, Januar 1992, S10ff
- [9] Esveld, Conraad: Track Geometry and Vehicle Reactions; Rail Engineering International Edition 1989 Number 4, p13
- [10] Esveld, C.: Fahrzeugreaktionsanalyse (VRA); Schienen der Welt, Juni 1989, S9ff
- [11] Riessberger, Klaus: Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit – oder – wie gut muß ein Gleis sein?; ÖVG Spezial, Bd 41, September 1997, Graz, S64ff

- [12] Vaszary, Paul: Gedanken zu einer natürlichen Theorie für die Beurteilung des Gleiszustandes; Eisenbahntechnik 2/81, S13ff
- [13] Riessberger, Klaus; Wenty, Rainer: Track Quality – Key to Load Bearing Capacity and Efficient Maintenance
- [14] ORE Frage D161: Dynamische Erscheinungen der Wechselwirkung Fahrzeug/Gleis aus der Sicht der Gleisunterhaltung, Bericht Nr. 1, Utrecht, April 1987
- [15] Lichtberger, Bernhard: Die Gleisqualität: Die Grundlage für effizienten Eisenbahnbetrieb; Eisenbahningenieurkalender 1994, VDEI, Tetzlaff Verlag GmbH Hamburg
- [16] Selig, Ernest T.; Waters, John M.: Track Geotechnology and Substructure Management; Thomas Telford Services Ltd, 1994
- [17] ORE Frage D117: Optimale Anpassung des klassischen Oberbaus an den künftigen Verkehr, Bericht Nr. 7, Utrecht, Oktober 1975
- [18] Leykauf, Günther; Mattner, Lothar: Elastisches Verformungsverhalten des Eisenbahnoberbaus; Eisenbahningenieur 41 (1990) 3, S111ff
- [19] Sewcyk, Bernd: Einfluß der Radsatzlast auf die Gleislageveränderung von Eisenbahnfahrwegen; Eisenbahningenieur (49) 10/98, S116 ff
- [20] Sato, Yoshihiko: Optimum Track Structure Considering Track Deterioration in Ballasted Track; Sixth International Heavy Haul Railway Conference, Conference Papers, 6-10 April 1997, Cape Town, South Africa, p576
- [21] Henn, W.: Auswirkung von Oberbauform und Betriebsbelastung auf die Veränderung der Gleishöhenlage; Archiv für Eisenbahntechnik, 33. Jg. (1978), S51-64
- [22] Zimmermann, H.: Berechnung des Eisenbahnoberbaues, Verlag W.Ernst und Sohn, Berlin 1941
- [23] Jani, Johann: Experimentielle Ermittlung der Kraftübertragungsflächen zwischen Beton-/ Holzschwellen und Oberbauschotter, Diplomarbeit am Institut für Eisenbahnwesen der Technischen Universität Graz, Mai 1993
- [24] Esveld, C; Jourdain; Kaess, G.; Shenton, M.J.: Historic data on track geometry in relation to maintenance; Rail Engineering International Edition, Number 2, 1988, p16
- [25] Sato, Yoshihiko; Convergence Theory Including Spot Tamping; Proceedings of Conference on Railway Engineering, 7-9 September 1998, Capricorn International Resort, Queensland, Australia
- [26] Markine, V.L.; de Man, A.P.; Esveld, C.: A Procedure for Design and Optimization of a Railway Track Structure
- [27] Müller-Boruttau, Frank H.; Ebersbach, Dietrich; Breitsamter, Norbert: Dynamische Fahrbahnmodelle für HGV-Strecken und Folgerungen für Komponenten; ETR 47 (1998), H.11, S696ff
- [28] Rump, Reinhold; Ehling, BÉla; Rehfeld, Erich: Wirkungen von Verkehrserschütterungen auf Erdbauwerke und ungebundene Tragschichten im Oberbau, ETR 45(1996) – Juli/August, S485ff
- [29] Veit, Peter: Entwicklung von Oberbaustrategien; Auftragsarbeit der ÖBB; Geschäftsbereich Fahrweg; Graz, Oktober 1998
- [30] Veit, Peter: Rechenmodell zur wirtschaftlichen Bewertung von Gleisbautechnologie; ÖVG-Spezial, Bd41, September 1997, Graz, S101ff
- [31] Ionescu, Daniela; Indraratna, Buddhima; Christie, Hugh David: Deformation of Railway Ballast Under Dynamic Loads; Proceedings of Conference on Railway Engineering, 7-9 September 1998, Capricorn International Resort, Queensland, Australia