

**Institut für Bauingenieurwesen VI
Lehrstuhl und Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen
Technische Universität München**

**Auswirkungen von Beschleunigungs- und Bremskräften
auf die Längsbewegungen des Gleisrostes**

Dipl.-Ing. Univ. Robert Kupfer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor – Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Busch

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. G. Leykauf
2. o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Kopp
(Universität Innsbruck, Österreich)

Die Dissertation wurde am 20.09.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 10.12.2004 angenommen.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>		<u>Seite</u>
1	Einführung	1
1.1	Eigenschaften des Schotteroberbaus auf Schnellfahrstrecken	1
1.2	Ausländische Untersuchungen zum Verhalten des Schotteroberbaus unter Längskräften aus Schwerlastverkehr	2
1.3	Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2	Auf das Gleis einwirkende Längskräfte	6
2.1	Längskräfte durch Abweichungen von der neutralen Verspanntemperatur	6
2.2	Längskräfte durch Temperaturänderungen des Gleises	7
2.3	Längskräfte durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge	8
2.4	Längskräfte durch den „rolling out“-Effekt	10
3	Abtragung der Längskräfte	12
3.1	Laschenreibungswiderstand der Stoßlaschenverbindung	12
3.2	Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter	13
3.2.1	Einflüsse auf die Größe des Längsverschiebewiderstandes	13
3.2.2	Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes	16
3.2.3	Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes	17
3.2.3.1	Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME	17
3.2.3.2	Beitrag der einzelnen Schwellenflächen zum Quer- bzw. Längsverschiebewiderstand	19
3.2.3.3	Wirkung des Vorkopfschotters und des Schwellenfachschotters bei einer Quer- bzw. Längsverschiebung des Gleises	26
3.2.3.4	Schwellenverdrehung durch die Einsenkung des Gleisrostes unter Verkehrslast	27
3.2.3.5	Schwellenverdrehung bei einer Längsverschiebung des Gleises	28
3.2.3.6	Gegenüberstellung mit verfügbaren Angaben aus der Literatur und vorhandenen Messergebnissen	30
3.3	Durchschubwiderstand der Schiene in der Befestigung	33
3.3.1	Einflüsse auf die Größe des Durchschubwiderstandes	33
3.3.2	Durchschubwiderstand des unbelasteten und des belasteten Gleisrostes	35
3.3.2.1	Versuchsaufbau	36
3.3.2.2	Versuchsdurchführung	37
3.3.2.3	Versuchsauswertung	39
3.3.2.4	Versuchsergebnisse	40

4	Rechenmodell zur Bestimmung der Längsbewegungen des Gleisrostes	44
4.1	Wahl der Eingangsgrößen	45
4.2	Konstanter Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand bezüglich der Verschiebungsgesetze	46
4.2.1	Grundlagen	46
4.2.2	Keine Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes	49
4.2.3	Sprunghafte Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes	50
4.2.4	Lineare Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes	52
4.2.5	Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes	53
4.2.6	Bewertung der Ergebnisse	55
4.3	Linearer Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand bezüglich der Verschiebungsgesetze	55
4.3.1	Grundlagen	55
4.3.2	Keine Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes	61
4.3.3	Sprunghafte Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes	62
4.3.4	Lineare Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes	65
4.3.5	Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes	66
4.3.6	Bewertung der Ergebnisse	67
5	Längsbewegungen des Gleisrostes unter Verkehrslasten	69
5.1	Überprüfung der Rechengrundlagen	70
5.2	20t-Einzelachse	73
5.3	ICE 1	77
5.4	ICE 3	82
5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	87

6	Betriebliche Einflüsse auf die Längsbewegungen des Gleisrostes	89
6.1	Wahl der Eingangsgrößen	89
6.2	Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamische Radlastschwankungen	89
6.3	Gelockerte Schienenbefestigungen	93
6.4	Abweichung der Widerstände von den Mittelwerten	94
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	96
7	Zusammenfassung	98
7.1	Ausgangssituation und Zielsetzung	98
7.2	Entstehung und Abtragung von Längskräften im Gleis	99
7.3	Rechenmodell zur Erfassung der Längsbewegungen des Gleisrostes	101
7.4	Längsbewegungen des Gleisrostes und Folgerungen für die Praxis	102
8	Formelzeichen	105
9	Literaturverzeichnis	108
10	Anlagenverzeichnis	
11	Anlagen	

1 Einführung

Während die Neubaustrecken der Deutschen Bahn AG heute komplett in Fester Fahrbahn ausgeführt werden, so z.B. die Verbindungen Ingolstadt – Nürnberg und Frankfurt – Köln, kam bei den ersten derartigen Projekten noch der klassische Schotteroberbau zum Einsatz. Es handelt sich dabei um die 1990/91 in Betrieb genommenen Verbindungen Hannover – Würzburg und Mannheim – Stuttgart. Um den damaligen Anforderungen an Strecken des Hochgeschwindigkeitsverkehrs zu genügen, wurde mit Ausnahme von Kunstbauwerken ein Aufbau gewählt, der auf dem Unterbau bzw. Untergrund zunächst eine Frostschutzschicht und darüber eine Planumsschutzschicht vorsieht. Die Frostschutzschicht erfüllt zum einen die Funktion einer Tragschicht und beugt zum anderen Frostschäden am Oberbau vor. Die Planumsschutzschicht wiederum dient dem Zweck, Feinbestandteile von dem über ihr angeordneten Schotterbett fernzuhalten sowie in Verbindung mit ihrer geringen Wasserdurchlässigkeit eine schnelle Ableitung des Niederschlagswassers zur Seite zu gewährleisten. Der Gleisrost schließlich besteht i.d.R. aus Schienen UIC 60 und Betonschwellen B 70 W im Abstand von 0,60 m. In Abb. 1.1 ist der beschriebene Aufbau im Querschnitt dargestellt.

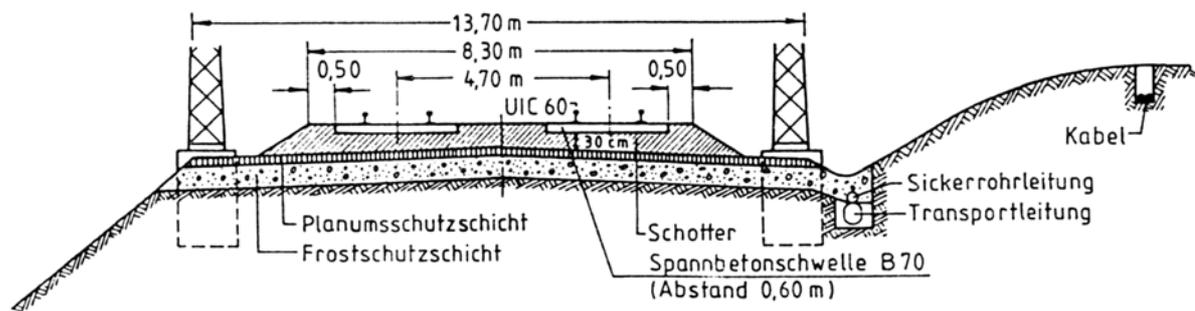


Abb. 1.1: Aufbau der in Schotteroberbau ausgeführten Schnellfahrstrecken (Regelquerschnitt in der Geraden) /1/

1.1 Eigenschaften des Schotteroberbaus auf Schnellfahrstrecken

Zur Vermeidung unzulässig großer Setzungen erfolgte eine hohe Verdichtung der einzelnen Schichten des Oberbaus einschließlich des Schotterbettes, bei dem die Konsolidierung zum Teil mit Hilfe des dynamischen Gleisstabilisators vorweggenommen worden ist. Aufgrund dessen wies der gewählte Aufbau mit Bettungsmoduln von $0,30 \text{ N/mm}^3$ bis $0,40 \text{ N/mm}^3$ eine erheblich geringere Elastizität auf als die Strecken des Bestandsnetzes, deren Bettungsmoduln zwischen $0,10 \text{ N/mm}^3$ und $0,15 \text{ N/mm}^3$ schwanken. Gegenüber den bestehenden Strecken resultierte hieraus eine deutlich schwächere lastverteilende Wirkung der Schiene, wie die unter einer 20t-Achse gemessenen, statischen Einsenkungen von 0,3 mm bis 0,4 mm zeigen, die weit unterhalb der anzustrebenden Werte zwischen 1,2 mm und 1,5 mm liegen. Dies hatte einerseits eine stärkere Beanspruchung des Schotters sowie eine raschere Gleis-

lageverschlechterung zur Folge, was eine Verkürzung der für die Instandhaltungsmaßnahmen vorgesehenen Intervalle notwendig machte und damit die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflusste. Andererseits wirkte sich die große Steifigkeit des Oberbaus nachteilig auf den Fahrkomfort der Züge aus.

Um den genannten Problemen begegnen zu können, war eine Reduzierung des Bettungsmoduls der Schnellfahrstrecken durch eine weichere Auflagerung der Schiene erforderlich /1/, /2/. Hierzu wurden abschnittsweise die konventionellen (harten) Zwischenlagen Zw 687a aus Ethylen-Vinylacetat mit statischen Federziffern von ungefähr 500 kN/mm /3/ gegen elastische Zwischenlagen ausgetauscht. Im Hinblick auf die mit zunehmender Weichheit der Zwischenlagen sich einstellende Spurerweiterung und Kantenpressung der Zwischenlagen sind dem allerdings Grenzen gesetzt. U.a. kamen elastische Zwischenlagen vom Typ Zw 900 zur Anwendung, die statische Federziffern von weniger als 70 kN/mm besitzen. Wegen der größeren Bauteilhöhe der Zwischenlagen Zw 900 von 9 mm im Vergleich zu den Zwischenlagen Zw 687a mit 6 mm mussten auch die Winkelführungsplatten gewechselt werden /4/. Durch den Einbau elastischer Zwischenlagen vom Typ Zw 700 konnte dieser zusätzliche Aufwand entfallen, weil sich deren Bauteilhöhe von 7 mm nur unwesentlich von der der Zwischenlagen Zw 687a unterscheidet /5/. Da sich die Federziffern beider elastischer Zwischenlagen in ähnlicher Größenordnung bewegen, ist trotzdem mit einem positiven Effekt im Hinblick auf den Bettungsmodul des Aufbaus zu rechnen. Es lässt sich allerdings hinzufügen, dass die geforderte Elastizität nur mit einer Schienenbefestigung mit lastverteilernder Grundplatte wie bei der Festen Fahrbahn erreicht werden kann. Demnach konnten die elastischen Zwischenlagen die Nachteile des auf Schnellfahrstrecken angewendeten, sehr steifen Schotteroberbaus zwar abmildern, aber nicht vollständig beseitigen /6/.

1.2 Ausländische Untersuchungen zum Verhalten des Schotteroberbaus unter Längskräften aus Schwerlastverkehr

Auslöser für die Forschungsarbeiten /7/ auf diesem Gebiet waren zunächst unerklärliche Gleislageveränderungen an verschiedenen Strecken, auf denen schwere Güterzüge mit entsprechend leistungsstarken Lokomotiven verkehren. So ließ sich im Laufe der Zeit stellenweise eine dauerhafte Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen in Gleislängsrichtung beobachten. Die Untersuchungen haben einen Zusammenhang mit den in die Schienen eingeleiteten Beschleunigungs- oder Bremskräften der Züge gezeigt, der sich folgendermaßen darstellt: Im unbelasteten Zustand des Gleises ist der Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter erheblich kleiner als der Durchschubwiderstand der Schiene in der Befestigung, weshalb z.B. durch Temperaturänderungen verursachte, ungleichmäßige Längskräfte in den Schienen zu einer Bewegung der Schwellen im Schotter führen können. Wie Abb. 1.2 veranschaulicht, können auf den Gleisrost einwirkende Achslasten die

Größe der Widerstände hingegen soweit beeinflussen, dass bei Beschleunigungs- oder Bremsvorgängen eine Bewegung der Schiene in der Befestigung auftritt (Anlage 1.1). Aus Gründen des Kräftegleichgewichtes muss bei wieder abnehmender Längskraft ebenso die Schienenlängsverschiebung zurückgehen. Parallel dazu verringert sich jedoch auch die vertikale Belastung des Gleises, was eine Änderung des Verhältnisses von Längsverschiebe zu Durchschubwiderstand bewirkt. Hierdurch bedingt kann eine Längsverschiebung der Schiene, die in Form einer Bewegung der Schiene in der Befestigung entsteht, zumindest teilweise durch eine Bewegung der Schwellen im Schotter kompensiert werden. Demzufolge verbleibt eine minimale Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen entgegen der Belastungsrichtung, die bei häufiger Einwirkung von Längskräften gleicher Wirkungsrichtung anwächst.

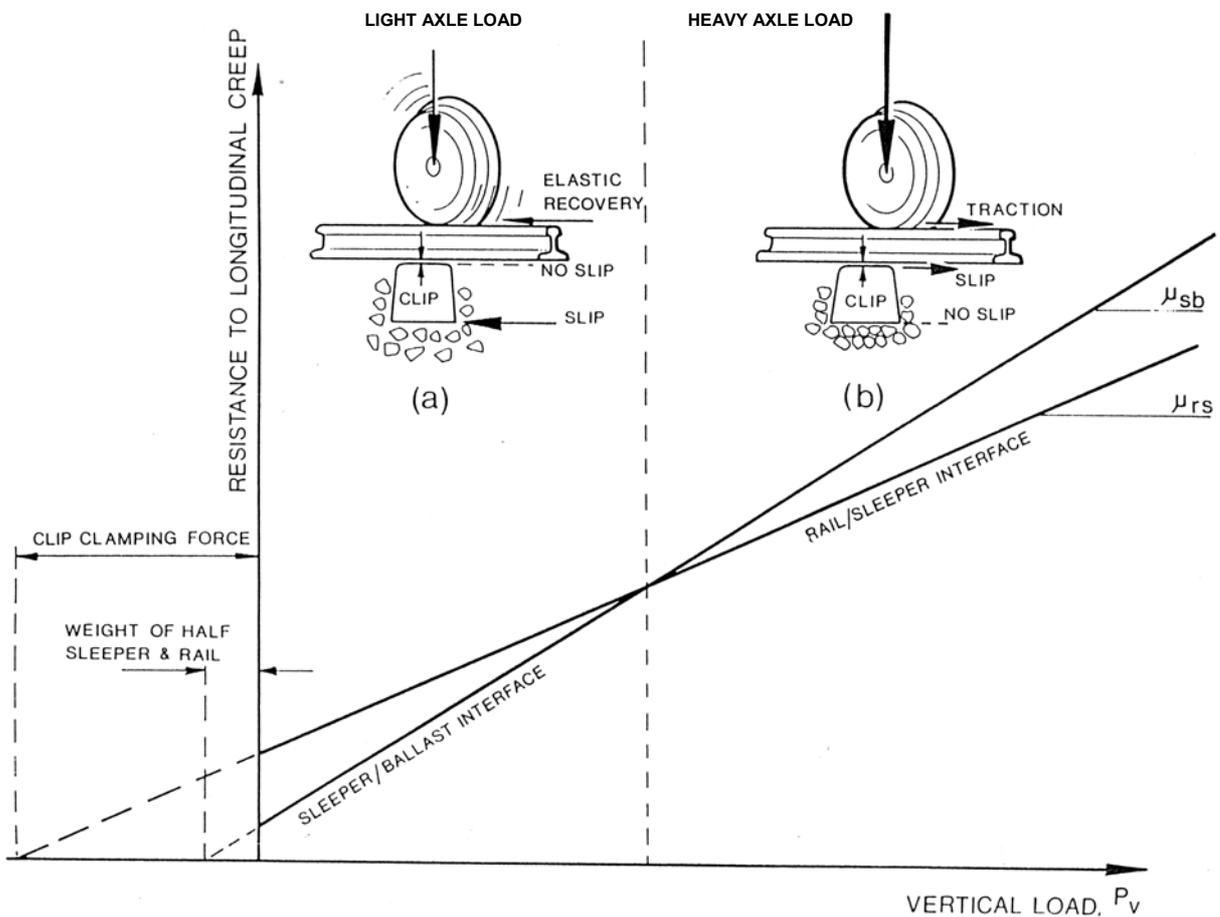


Abb. 1.2: Längsbewegungen des Gleisrostes in Abhängigkeit von der einwirkenden Achslast /7/

Von dem geschilderten Phänomen sind bevorzugt Streckenabschnitte betroffen, die große Längsneigungen aufweisen. Darüber hinaus spielt die Höhe der aufgebrachtten Beschleunigungs- oder Bremskräfte sowie der Achslasten eine Rolle, wobei sich letztere in den Widerständen niederschlägt, die den jeweiligen Bewegungen entgegenstehen (Abb. 1.2). Hinsichtlich der auftretenden Kräfte muss die fortlaufende, technische Weiterentwicklung der Eisen-

bahnfahrzeuge berücksichtigt werden, die eine Steigerung sowohl des Reibungsgewichtes und somit der Achslasten als auch der Beschleunigungs- oder Bremskräfte, z.B. mit Hilfe von Antischlupfregelungen, ermöglicht. Von Seiten des Oberbaus wirken sich zum einen der Instandhaltungszustand des Schotterbettes und zum anderen die Schienenbefestigung auf die Längsverschiebung der Schiene aus. Je stärker der Schotter verdichtet ist und damit der Längsverschiebewiderstand ansteigt, desto eher kommt es zu einer dauerhaften Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen entgegen der Belastungsrichtung. Bezüglich der Schienenbefestigung lässt sich nach /7/ festhalten, dass die Art der zwischen Schiene und Schwelle eingebauten Zwischenlage bei durch Beschleunigungs- oder Bremsvorgänge hervorgerufenen Längskräften eine weitaus größere Bedeutung hat als bei Längskräften infolge von Temperaturänderungen. Hierauf deutet auch das Auftreten von Spannklemmenbrüchen an den in Schotteroberbau ausgeführten Schnellfahrstrecken der Deutschen Bahn AG hin.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In Anbetracht der im Ausland gewonnenen Erkenntnisse zum Verhalten des Schotteroberbaus unter Längskräften aus Schwerlastverkehr soll untersucht werden, welche Konsequenzen sich durch die Auswechslung der Zwischenlagen auf den in Schotteroberbau ausgeführten Schnellfahrstrecken ergeben. Dabei stehen die aus Beschleunigungs- oder Bremskräften der Züge resultierende Schienenlängsverschiebung sowie die Bewegungsanteile im Vordergrund, die den Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstand aktivieren. Ergänzend wird der Frage nachgegangen, ob in Abhängigkeit der Zwischenlagenart eine Zunahme der Beanspruchung einzelner Bauteile der Schienenbefestigung zu erwarten ist. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass die auf den Schnellfahrstrecken mit Schotteroberbau vorhandenen Längsneigungen von bis zu 12,5 ‰ /8/ die im vorigen Abschnitt beschriebenen Vorgänge begünstigen. Hinzu kommt der Mischverkehr /8/ aus Güterzügen mit vergleichsweise hohen Achslasten und Hochgeschwindigkeitszügen, die mit der erwähnten Antischlupfregelung ausgestattet sind. Die von Beginn an gute Verdichtung des Schotters durch den Einsatz des dynamischen Gleisstabilisators darf ebenfalls nicht unberücksichtigt bleiben.

Die Abschnitte 2 und 3 der Arbeit befassen sich mit den unterschiedlichen Ursachen der auf den Gleisrost einwirkenden Längskräfte sowie den an ihrer Abtragung beteiligten Widerständen. In diesem Zusammenhang wird auch die Ermittlung von Werten für den Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstand im unbelasteten sowie belasteten Zustand des Gleises behandelt, um die Eingangsgrößen für die späteren Berechnungen zu erhalten. Im Abschnitt 4 erfolgt die Entwicklung eines Rechenmodells zur Bestimmung der Längsbewegungen des Gleisrostes unter Beachtung des Verschiebeweges einerseits und der Entfernung von der vertikalen Belastung des Gleises andererseits. Abschnitt 5 beinhaltet die Anwendung des

Modells in Verbindung mit einer Variation der Verkehrslast sowie mehrerer Oberbauparameter. Schließlich werden im Abschnitt 6 betriebliche Einflüsse auf die sich als relevant erweisenden Parameter untersucht.

2 Auf das Gleis einwirkende Längskräfte

Die im Gleis auftretenden Längskräfte haben verschiedene Ursachen. Zum einen werden sie durch Abweichungen der tatsächlichen Verschweißtemperatur von der hierbei anzustrebenden Temperatur (neutrale Verspanntemperatur) und durch Temperaturänderungen des Gleises verursacht, zum anderen erzeugen auch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge der Züge Kräfte in Gleislängsrichtung /9/, /10/. Hinzu kommt noch der so genannte „rolling out“-Effekt, der Längsdruckkräfte zur Folge hat und wie eine Verschiebung der neutralen Verspanntemperatur nach unten wirkt /11/.

2.1 Längskräfte durch Abweichungen von der neutralen Verspanntemperatur

Zur Herstellung des heute üblichen lückenlosen Gleises werden bis zu 120 m lange Schienen gewalzt /12/ oder im Werk auf Längen bis zu 180 m mit dem Abbrennstumpfschweißverfahren zusammengesetzt und vor Ort aluminothermisch oder mit einer mobilen Schweißmaschine miteinander verschweißt. Um zu hohe Druckkräfte bei Erwärmung bzw. Zugkräfte bei Abkühlung der Schienen zu vermeiden, muss dies bei einer bestimmten Temperatur, der neutralen Verspanntemperatur geschehen, die bei der Deutschen Bahn AG seit 1997 $23\text{ °C} \pm 3\text{ K}$ beträgt /13/. Zuvor lag der Mittelwert um 3 K niedriger. Bei der Deutschen Reichsbahn in der ehemaligen DDR wurden noch niedrigere, neutrale Verspanntemperaturen gewählt /14/, offensichtlich beeinflusst durch die Gefahr von auftretenden Brüchen im Winter infolge der früher schlechteren Stahlqualität. Schweißarbeiten im lückenlosen Gleis sind grundsätzlich bei Schientemperaturen zwischen 3 °C und 35 °C zulässig /15/, was allerdings zusätzliche Maßnahmen notwendig macht, um den Zustand herzustellen, der bei Vorliegen der neutralen Verspanntemperatur gegeben wäre. So muss bei Temperaturen unterhalb der neutralen Verspanntemperatur eine von der jeweiligen Schientemperatur abhängige Anzahl von Schienenbefestigungen gelöst und die Schienen im Bereich der gelösten Befestigungen erwärmt werden. Bei Temperaturen oberhalb der neutralen Verspanntemperatur hingegen darf man keinen Spannungsausgleich durch Lösen der Schienenbefestigungen durchführen /13/.

Unter Beachtung der vorgeschriebenen Maßnahmen beim Schienenschweißen bleibt der Längskraftverlauf im Gleis in Abhängigkeit von der zugrunde gelegten, neutralen Verspanntemperatur von Schweißarbeiten weitgehend unbeeinflusst. Wird jedoch beispielsweise bei einer Schientemperatur unterhalb der neutralen Verspanntemperatur ohne ausreichendes Erwärmen der Schienen verschweißt, so ist bei Auftreten dieser Temperatur im Bereich der Schweißstelle und der gelösten Schienenbefestigungen die Schiene spannungsfrei, während in größerer Entfernung eine Zugkraft entsprechend der Differenz zwischen aktueller Temperatur und neutraler Verspanntemperatur wirkt. Erreicht die Schientemperatur wieder die

neutrale Verspanntemperatur, baut sich im Bereich der Schweißstelle und der zuvor gelösten Befestigungen eine Druckkraft auf. Auf der restlichen Länge liegt dagegen keine Längskraft vor. Abb. 2.1 stellt den Längskraftverlauf für den eben beschriebenen Fall qualitativ dar.

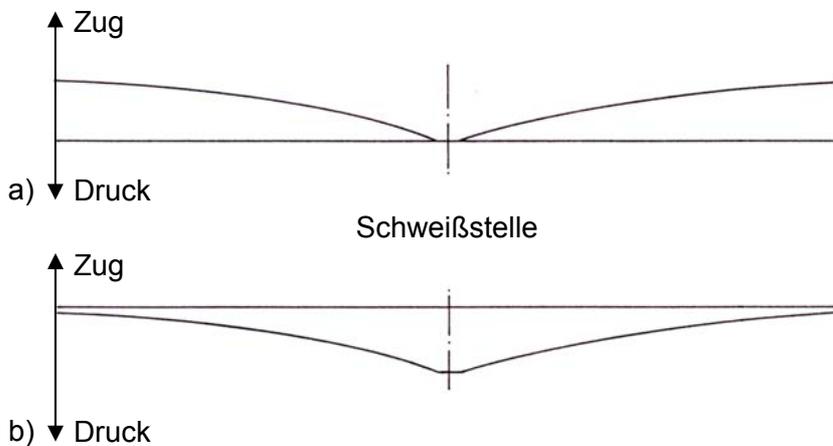


Abb. 2.1: Längskraftverlauf im Gleis /10/

- a) nach dem Verschweißen unterhalb der neutralen Verspanntemperatur ohne ausreichendes Erwärmen der Schienen
- b) nach dem Wiedererreichen der neutralen Verspanntemperatur

2.2 Längskräfte durch Temperaturänderungen des Gleises

Temperaturänderungen des Gleises können sowohl durch klimatische Einflüsse, wie z.B. Sonneneinstrahlung oder Schattenwurf, als auch durch die Lage im Übergang von einem Tunnel auf die freie Strecke hervorgerufen werden. Ein weiterer Faktor, der sich auf die Schientemperatur auswirkt, ist der Einsatz der Wirbelstrombremse bei modernen Zügen /10/, /16/.

Unter der Voraussetzung einer reibungsfreien Lagerung würde sich eine Schiene nach der Gleichung

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \quad (2-1)$$

Δl = Längenänderung [mm]

α = Temperaturdehnzahl von Stahl [1/K]

l = Schienenlänge [mm]

ΔT = Temperaturänderung [K]

ungehindert dehnen. Da dies jedoch weder beim lückenlosen Gleis noch beim Stoßlückengleis gegeben ist, entstehen bei Änderung der Schientemperatur zwangsläufig Spannungen und somit Längskräfte. Deren Größe hängt von der Temperaturdifferenz gegenüber der neutralen Verspanntemperatur ab und berechnet sich für ein lückenloses Gleis zu /9/, /17/

$$\sigma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (2-2)$$

σ = Spannung [N/mm²]

E = Elastizitätsmodul des Schienenstahls [N/mm²]

Unter Zugrundelegung der mittleren, neutralen Verspanntemperatur von 23 °C und den in den Oberbaurichtlinien /18/ der Deutschen Bahn AG angegebenen Höchst- und Niedrigsttemperaturen der Schienen von 65 °C und -25 °C treten somit maximale Druck- bzw. Zugspannungen von 106 N/mm² bzw. 121 N/mm² auf, wobei eine Temperaturdehnzahl von Stahl von $1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/K und ein Elastizitätsmodul des Schienenstahls von 210 000 N/mm² vorausgesetzt wird /9/, /17/. Für das heute auf stark belasteten Strecken zur Anwendung kommende Schienenprofil UIC 60 entsprechen dem maximale Druck- und Zugkräfte von 814 kN und 930 kN. Nach neueren Untersuchungen liegt die maximale Schienentemperatur allerdings ungünstigstenfalls 18 bis 20 K über der maximalen Lufttemperatur. In Deutschland ergibt sich demnach bei einer maximalen Lufttemperatur von 38 °C eine maximale Schienentemperatur von 58 °C /19/.

Gegenüber der freien Strecke können im Bereich von Weichen höhere Längskräfte vorliegen, da Temperaturänderungen sowohl im Stamm- als auch im Zweiggleis Kräfte bewirken, die sich bei der Einleitung in die Weiche überlagern /9/, /20/.

2.3 Längskräfte durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge

Durch die beim Beschleunigen oder Bremsen aktivierte Reibung zwischen Rad und Schiene werden ebenfalls Kräfte in Gleislängsrichtung hervorgerufen. Die Höhe der Längskräfte ist abhängig von der einwirkenden Radlast und vom Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene, welcher von der Geschwindigkeit und vom Zustand der Schienen – nass oder trocken – beeinflusst wird (Abb. 2.2) /1/. Die Gleichung für die von einem Rad durch Beschleunigen oder Bremsen verursachte Kraft in Längsrichtung lautet

$$F_r = \mu \cdot Q \text{ [N]} \quad (2-3)$$

F_r = Reibungskraft [N]

μ = Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene [-]

Q = Radlast

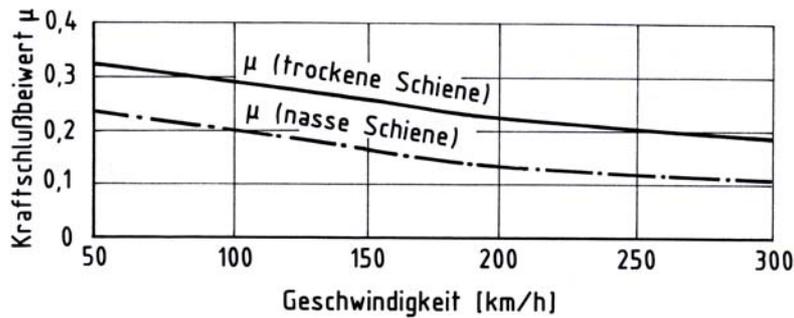


Abb. 2.2: Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene /1/

Bei Beschleunigungsvorgängen leiten nur die angetriebenen Achsen eines Zuges Längskräfte in die Schienen ein. Aufgrund der Tendenz, den Gleisrost entgegen der Fahrtrichtung zu verschieben, entstehen vor der Achse Zugspannungen und im nachfolgenden Bereich Druckspannungen /21/, /22/, wie in Abb. 2.3 qualitativ dargestellt.

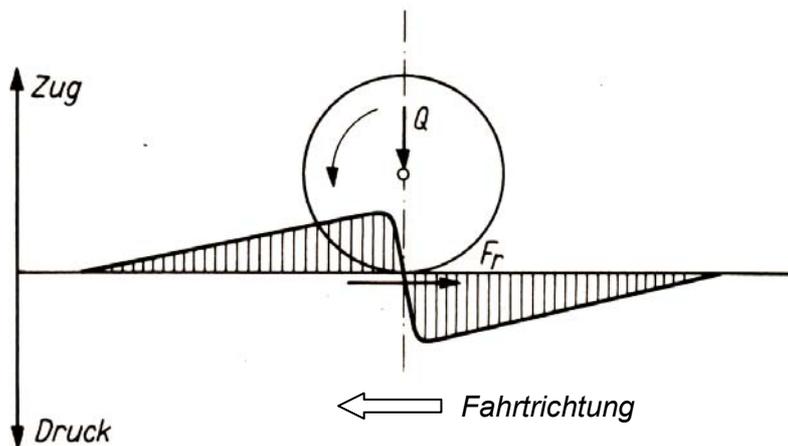


Abb. 2.3: Längsspannungen in der Schiene unter einer angetriebenen Achse /22/

Beim Bremsen hingegen werden von allen Achsen Kräfte auf das Gleis übertragen, so dass sich entlang des gesamten Zuges die Wirkungen benachbarter Achsen überlagern können. Hierdurch wird die Länge, auf der die durch den Bremsvorgang erzeugten Längskräfte wirken, z.T. stark vergrößert. Zudem bewirkt der Einsatz zusätzlicher Bremsrichtungen, wie der Magnetschienen- oder Wirbelstrombremse, unabhängig vom Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene eine weitere Erhöhung der Kräfte in Gleislängsrichtung /10/. Den qualitativen Spannungsverlauf infolge einer gebremsten Achse gibt Abb. 2.4 wieder.

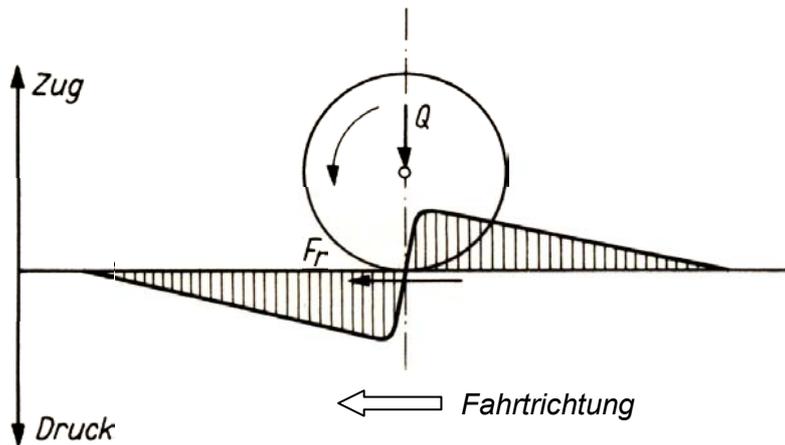


Abb. 2.4: Längsspannungen in der Schiene unter einer gebremsten Achse /22/

2.4 Längskräfte durch den „rolling out“-Effekt

Bei walzernen Schienen liegen aufgrund des Abkühl- und Richtvorgangs im Schienenkopf und in Schienenfußmitte Zugeigenspannungen vor, während am Schienenfußrand und im Steg Druckeigenspannungen auftreten. Durch die Betriebsbelastung werden die Zugeigenspannungen im obersten Bereich des Schienenkopfes in Druckeigenspannungen umgewandelt. Man spricht hierbei vom so genannten „rolling out“-Effekt, dessen Auswirkungen auf den Verlauf der Längseigenspannungen von der Größe der Zugeigenspannungen abhängen, die nach dem Richten im Schienenkopf wirken. Untersuchungen in Großbritannien haben gezeigt, dass der „rolling out“-Effekt bei neuen Schienen innerhalb eines Jahres Spannungsveränderungen hervorruft, die einer Absenkung der neutralen Verspanntemperatur von bis zu 6 K entsprechen, wobei allerdings von einer Abnahme des Effekts in den Folgejahren ausgegangen wird /11/, /23/.

Abb. 2.5 zeigt den Verlauf der Längseigenspannungen in der Schienenachse bei einer walzernen Schiene und bei einer Schiene mit wiederholter Betriebsbelastung.

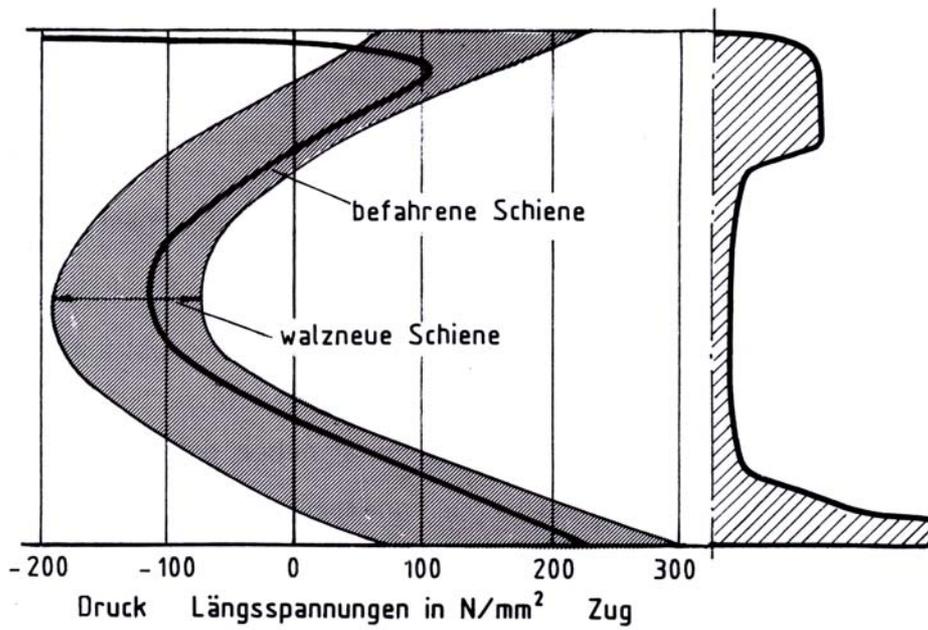


Abb. 2.5: Längseigenspannungen in der Schienenachse bei einer walzneuen Schiene und bei einer Schiene mit wiederholter Betriebsbelastung /23/

3 Abtragung der Längskräfte

Zur Abtragung der auf das Gleis einwirkenden Längskräfte müssen mehrere Widerstände aktiviert werden. Beim lückenlosen Gleis sind dies der Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter und der Durchschubwiderstand der Schiene in der Befestigung. Handelt es sich um ein heute eher selten vorzufindendes Stoßlückengleis, so kommt noch der Laschenreibungswiderstand der Stoßlaschenverbindung hinzu /21/, /24/.

3.1 Laschenreibungswiderstand der Stoßlaschenverbindung

Da beim Eisenbahnoberbau in aller Regel durchgehend geschweißte Schienen zum Einsatz kommen, ist der Laschenreibungswiderstand für die Abtragung von Längskräften im Gleis von untergeordneter Bedeutung und wird nachfolgend nur aus Gründen der Vollständigkeit kurz angesprochen.

Es handelt sich hierbei um den Widerstand, den die Laschenverbindung eines Stoßlückengleises den Längenänderungen der Schienen entgegensetzt. Die Größe des Laschenreibungswiderstandes hängt vom Andrehmoment der Schrauben, von der Abnutzung der Stoßlaschenverbindung und von der Beschaffenheit der Berührflächen zwischen Laschen und Schienen ab. Beim Andrehmoment der Schrauben sind vor allem konstruktive Gesichtspunkte zu beachten. So bewirkt ein zu geringes Andrehmoment bei einer Abkühlung der Schienen, dass sich die Stoßlücke bis zum Anliegen der Laschenbolzen öffnet und somit bei Erreichen der minimalen Temperatur die Laschenbolzen große Scherkräfte aufnehmen müssen, die zum Versagen der genannten Bauteile führen können. Umgekehrt ist ein zu hohes Andrehmoment hinsichtlich der Gleislagestabilität ungünstig, weil sich die Stoßlücke bei einer Erwärmung der Schienen erst nach Aufbau entsprechend hoher Druckkräfte zu schließen beginnt, wodurch die Gefahr einer Gleisverwerfung erhöht wird. Für den zweiten Faktor, die Abnutzung der Laschenverbindung, spielen im Wesentlichen die Witterung und die auftretenden Betriebslasten eine Rolle /21/. Die Beschaffenheit der Berührflächen schließlich und demzufolge der Laschenreibungswiderstand können durch eine Behandlung der Oberflächen beeinflusst werden /22/. Zudem trägt auch die im Laufe der Zeit einsetzende Korrosion der einzelnen Bauteile zur Zunahme des Laschenreibungswiderstandes bei /24/.

Anlage 3.1 zeigt schematisch einen Schienenstoß auf Breitschwellen.

3.2 Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter

Als Längsverschiebewiderstand bezeichnet man den Widerstand, den eine Verschiebung der Schwellen im Schotter in Gleislängsrichtung aktiviert. Im Allgemeinen wird dabei vom unbelasteten Zustand ausgegangen. Wie in Abb. 3.1 zu sehen, wächst der Längsverschiebewiderstand im Bereich geringer Längsverschiebungen zunächst deutlich an, nach Erreichen eines bestimmten Verschiebeweges ist die weitere Zunahme des Widerstandes nur mehr unwesentlich /16/.

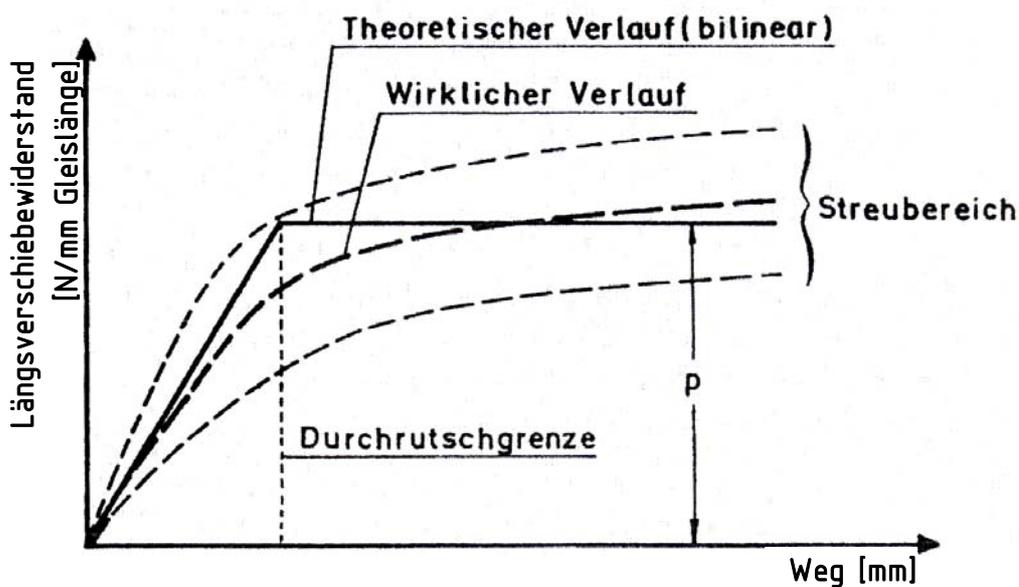


Abb. 3.1: Verlauf des Längsverschiebewiderstandes der Schwellen im Schotter /16/

SEKMEIER /26/ hat bereits in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts durch Versuche ebenfalls festgestellt, dass der Längsverschiebewiderstand ein elastisch-plastisches Verhalten aufweist, wobei sich die Wirkung des Schotters und damit der Widerstand näherungsweise durch Federn und Reibungsdämpfer beschreiben lässt. Deren Einfluss auf den Längsverschiebewiderstand hängt von der aufgetragenen Verschiebung ab. Während im elastischen Bereich des Widerstandes der Anteil der Reibungsdämpfer linear mit der Längsverschiebung ansteigt, geht der Einfluss der Federn immer weiter zurück. Das auf den elastischen Bereich folgende, plastische Verhalten des Längsverschiebewiderstandes wird daher fast ausschließlich durch den Anteil der Reibungsdämpfer bestimmt, deren Wirkung nach wie vor mit der vorhandenen Verschiebung zunimmt.

3.2.1 Einflüsse auf die Größe des Längsverschiebewiderstandes

Der Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter wird von verschiedenen Parametern beeinflusst. Dazu zählen der Schotter, die Schwellen, der vorhandene Instandhaltungs-

zustand bzw. die durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen sowie die Witterungsbedingungen. Zusätzlich wirken sich die Achslast und die Geschwindigkeit der überfahrenden Züge auf den Längsverschiebewiderstand aus. In diesem Zusammenhang ist auch die Häufigkeit der Beanspruchung zu berücksichtigen /26/, /27/, /28/.

- **Einfluss des Schotters:** Empirische Untersuchungen /28/ haben gezeigt, dass sich der Einfluss des Schotters vorwiegend auf dessen Korngröße beschränkt, wobei der Längsverschiebewiderstand mit zunehmender Größe der Schotterkörner anwächst. Die Ursache dafür liegt in der besseren Verzahnung von größeren Schottersteinen untereinander, die somit ein stabileres Korngerüst bilden. Hierfür ist allerdings eine hinreichende Ausdehnung der eingeschotterten Bereiche, z.B. des Schwellenfaches, im Vergleich zur Korngröße des Schotters erforderlich.
- **Einfluss der Schwellen:** Bei den Schwellen spielen vor allem das Material, die Abmessungen, und der Abstand zueinander eine wichtige Rolle. Betonschwellen weisen gegenüber Holzschwellen aufgrund ihres höheren Gewichtes eine größere Reibung zwischen Sohlfläche und Schotter auf, was einen höheren Längsverschiebewiderstand bewirkt. Dieser Vorteil wird jedoch dadurch verringert, dass bei der Verwendung von Holzschwellen im Laufe der Zeit eine „Einarbeitung“ der Schotterkörner in die Kontaktflächen zwischen Schwelle und Schotter eintritt, wodurch sich deren Verzahnung verbessert. Durch den Einsatz von Schwellenbesohlungen mit elastisch-plastischen Materialien kann dies jedoch ebenso bei Betonschwellen erreicht werden /29/, /30/, /31/. Größere Schwellenabmessungen lassen den Längsverschiebewiderstand ansteigen, da hieraus sowohl ein höheres Gewicht als auch größere Kontaktflächen zwischen Schwelle und Schotter folgen. Eine Erhöhung des Schwellenabstandes hingegen reduziert den Längsverschiebewiderstand des Gleises /26/, /28/.
- **Einfluss der Instandhaltung:** Neben dem Schotter selbst hängt der Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter von dessen Instandhaltungszustand bzw. den vorgenommenen Instandhaltungsmaßnahmen ab.

Im Hinblick auf den Instandhaltungszustand bewirkt eine Verschmutzung des Schotterbettes im Laufe der Betriebsdauer eine Reduzierung des Widerstandes, da die zwischen den Schotterkörnern aktivierbare Reibung, besonders bei Nässe, vermindert wird.

Was die Instandhaltungsmaßnahmen betrifft, so hat ein neu verlegter Gleisrost ebenso wie ein frisch gestopftes Gleis einen geringeren Längsverschiebewiderstand als ein Gleisrost, dessen Schotterbett durch eine entsprechend große Anzahl von Zugüberfahrten verdichtet ist /26/, /28/. Dem lässt sich heute allerdings dadurch begegnen, dass die

Verdichtung unter Verkehr durch den Einsatz von dynamischen Gleisstabilisatoren zum Teil bereits vorweggenommen wird. Instandhaltungsmaßnahmen wirken sich außerdem insofern auf den Längsverschiebewiderstand aus, als es z.B. beim Stopfen eines Gleises zu Kantenabplatzungen an den Schotterkörnern kommt, die nach einer Vielzahl von Stopfvorgängen eine Abnahme der Korngröße des Schotters zur Folge haben.

- **Einfluss der Witterung:** Hinsichtlich des Einflusses von Feuchtigkeit auf den Längsverschiebewiderstand zeigt sich, dass Feuchtigkeit zusammen mit einer Verschmutzung des Schotters den Widerstand herabsetzt. Darüber hinaus kann das Schotterbett bei tiefen Temperaturen gefrieren, was wiederum zu einem Anstieg des Widerstandes führt /16/, /24/, /27/, /32/.
- **Einfluss der Belastung:** Der Beitrag der Belastung zur Größe des Längsverschiebewiderstandes gliedert sich in drei Parameter. Dabei handelt es sich um die auf das Gleis einwirkende Achslast, um die Geschwindigkeit der überfahrenden Züge und um die Häufigkeit, mit der die Beanspruchungen aus Verkehr auftreten /26/, /27/, /28/.

Die Achslast betreffend haben Messungen ergeben, dass der Längsverschiebewiderstand bis zur Belastung mit einer 20t-Achse proportional zur aufgebrachten Achslast anwächst, was sich durch die Zunahme der Reibung zwischen Sohlfläche der Schwelle und Schotter mit steigender Auflast erklären lässt /26/, /27/. Für Achslasten über 20 t hinaus sind keine Versuchsergebnisse bekannt. Des Weiteren ist die mit der Belastung verbundene Abhebewelle der Schiene zu beachten, die vor sowie hinter den Achsen eines Zuges auftritt und in deren Bereich sich der Widerstand verringert.

Bei höheren Geschwindigkeiten der Züge müssen zudem dynamische Einflüsse wie beispielsweise Radlastschwankungen berücksichtigt werden, die aus Fehlern in den Laufflächen der Räder, den Fahrflächen der Schienen oder ungleichmäßiger Schwellenauflagerung resultieren. Diese gehen zum einen direkt in die Größe der auf den Oberbau einwirkenden Belastung ein, zum anderen entstehen in Verbindung mit den Radlastschwankungen auch Vertikalschwingungen, die der Biegelinie der Schiene überlagert sind und somit eine Abminderung des Längsverschiebewiderstandes bewirken /17/, /21/, /26/.

Die Häufigkeit der Beanspruchung schließlich beeinflusst die Größe des Längsverschiebewiderstandes einerseits positiv, da mit der Anzahl der Überrollungen die Verdichtung des Schotterbettes verbessert und gegebenenfalls die Konsolidierungsphase nach einer Gleisdurcharbeitung verkürzt wird. Andererseits können größere Längsverschiebungen des Gleisrostes, wenn sie entsprechend oft auftreten, eine Auflockerung des Schotterbettes und damit ein Abfallen des Längsverschiebewiderstandes nach sich ziehen /27/.

Tab. 3.1 gibt abschließend noch einmal einen Überblick über die unterschiedlichen Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen auf den Längsverschiebewiderstand.

Parameter	Einfluss			
	sehr gut	gut	schlecht	sehr schlecht
hohes Gewicht der Schwellen	x			
große Breite der Schwellen (bei Holzschwellen)		x		
große Höhe bzw. Einbindetiefe der Schwellen	x			
große Länge der Schwellen		x		
Profilierung an den Sohlflächen der Schwellen		x		
Erhöhung der Korngröße des Schotters		x		
kleiner Schwellenabstand		x		
Anheben des Gleises				x
Stopfen des Gleises			x	
Verdichten des Schotters	x			
Belastung des Gleises		x		

Tab. 3.1: Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen auf den Längsverschiebewiderstand in Anlehnung an /28/

3.2.2 Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes

Nachfolgend werden Werte für den Längsverschiebewiderstand angegeben, die bei den späteren Berechnungen Verwendung finden. Vorweg ist jedoch zu sagen, dass eine in sich geschlossene Berechnung nicht auf dem in Abb. 3.1 dargestellten wirklichen Verlauf des Längsverschiebewiderstandes basieren kann. Bereits SIEKMEIER hat dies bei seinen Untersuchungen zum Verhalten des Schotterbettes gegenüber Längsverschiebungen des Gleisrostes festgestellt und daher die mechanischen Eigenschaften des Schotters durch Federn und Reibungsdämpfer angenähert /26/. Für einfache Berechnungsverfahren wird i.d.R. ein bilinearer Verlauf des Widerstandes angesetzt, dessen Knickpunkt die so genannte Durchrutschgrenze kennzeichnet (Abb. 3.1) /16/. Eine Annäherung an den wirklichen Verlauf des Längsverschiebewiderstandes hingegen ermöglichen nichtlineare Federmodelle im Rahmen von Finite-Elemente-Berechnungen. Da sich allerdings unter Berücksichtigung der Schwankungen bei den empirisch ermittelten Widerstandswerten auch mit dem bilinearen Verlauf eine ausreichende Genauigkeit erzielen lässt, wird hierauf verzichtet.

Die im Anschluss genannten Werte für das unbelastete Gleis geben den Längsverschiebewiderstand wieder, der bei Erreichen der Durchrutschgrenze vorliegt. Der Begriff des unbe-

lasteten Gleises bezeichnet in diesem Zusammenhang einen Oberbau ohne einwirkende Verkehrslasten. Dieser besteht aus Schienen UIC 60 und Schwellen B 70 W im Abstand von 0,60 m. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass sich die Widerstandswerte definitionsgemäß auf die halbe Schwelle beziehen und in N/mm Gleislänge angegeben werden.

Je nach Instandhaltungszustand des Oberbaus kann der Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter ungefähr zwischen 10 N/mm Gleislänge und 4 N/mm Gleislänge schwanken. Der obere Grenzwert hat Gültigkeit, falls in einem konsolidierten Schotterbett erstmals eine Verschiebung des Gleisrostes auftritt. Durch häufige Längsbewegungen in Kombination mit größeren Verschiebewegen kommt es zu einer Auflockerung des Schotters, wodurch in Einzelfällen ein Absinken des Widerstandes auf bis zu 40 % seines Maximalwertes, also auf etwa 4 N/mm Gleislänge, möglich ist. Im Mittel besitzt der Längsverschiebewiderstand eine Größe von ca. 7 N/mm Gleislänge. Die Durchrutschgrenze des unbelasteten Gleises, bei der die aufgeführten Werte erreicht werden, liegt bei rund 2 mm /16/, /27/. Darüber hinaus haben Versuche an anderen Oberbauformen im Großprüfstand des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München Messwerte in ähnlicher Größenordnung ergeben. So weist ein Gleisrost mit Schienen UIC 60 und Schwellen B 75 W im Abstand von 0,63 m einen Längsverschiebewiderstand von 8 N/mm Gleislänge bezogen auf 2 mm Verschiebung auf /33/.

3.2.3 Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes

Für den Gleisrost unter Verkehrslast liegen wesentlich weniger Ergebnisse über Widerstandswerte vor, was darauf zurückzuführen ist, dass sich diesbezügliche Messungen deutlich schwieriger gestalten. Im Folgenden wird daher versucht, aus dem Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME eine Gleichung herzuleiten, mit der sich der Längsverschiebewiderstand in Abhängigkeit von der einwirkenden Radlast näherungsweise berechnen lässt. Zusätzlich werden die auf diesem Weg ermittelten Werte mit den verfügbaren Angaben aus der Literatur und mit vorhandenen Messergebnissen verglichen.

3.2.3.1 Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME

In den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts hat die staatliche französische Eisenbahngesellschaft SNCF erstmals Versuche mit einem so genannten Entgleisungswagen, wie er in Abb. 3.2 dargestellt ist, durchgeführt. Dabei handelte es sich um einen speziellen Waggon mit drei Achsen im Abstand von ungefähr 4 m und einem Gesamtgewicht von etwa 37 t. Während die beiden äußeren Achsen als Laufachsen dienten, konnten mittels entsprechender Vorrichtungen sowohl die Radlasten der mittig angeordneten Antriebsachse als auch die durch die Achse auf den Gleisrost ausgeübte Horizontalkraft senkrecht zur Gleislängsrich-

tung variiert werden. Damit war es möglich, für verschiedene Radlasten die Querverschiebung des Gleises in Abhängigkeit von der aufgebrachtten Horizontalkraft zu messen, wobei sich ein Einfluss der Nachbarachsen aufgrund des relativ großen Abstandes der Achsen untereinander ausschließen ließ. In den folgenden Jahren haben weitere europäische Eisenbahngesellschaften Versuche mit dem Entgleisungswagen durchgeführt.

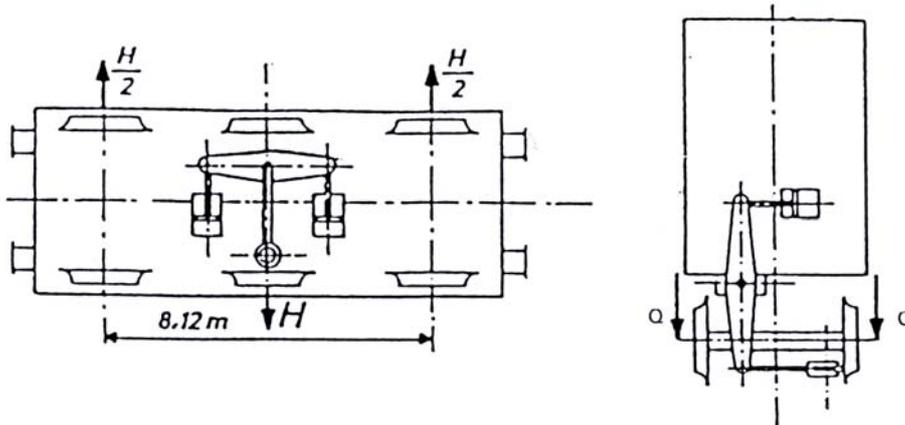


Abb. 3.2: Schematische Darstellung des Entgleisungswagens /34/

Als Zusammenfassung aller Untersuchungsergebnisse hat PRUD'HOMME eine Gleichung aufgestellt, mit der abhängig von der Achs- bzw. Radlast die maximal zulässige Querverschiebekraft eines 2 m langen Gleisabschnittes als Beurteilungsgröße für die Sicherheit gegen Gleisquerverschiebung bestimmt werden kann. Diese lautet

$$\sum Y = k \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 10 \right) \quad (3-1)$$

$\sum Y$ = maximal zulässige Querverschiebekraft [kN]

k = Koeffizient [-]

Q = Radlast

Der Koeffizient k deckt hierbei die Einflüsse ab, die aus der Art und dem Instandhaltungszustand des Oberbaus resultieren. PRUD'HOMME selbst hat den kleinstmöglichen Wert für k mit 0,85 angegeben. Bei der Deutschen Bundesbahn ist in Versuchen eine Bandbreite von 0,95 bis 1,43 ermittelt worden. Die Deutsche Bahn AG verwendet bei einem Oberbau mit Betonschwellen einen Wert für k von 1,00 /8/, /28/, /34/.

Die aus dem Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME ermittelte maximal zulässige Querverschiebekraft lässt sich in den Querverschiebewiderstand des Gleises umrechnen. Hierbei handelt es sich um den Widerstand, der einer Verschiebung des Gleisrostes im Schotter senkrecht zur Gleislängsrichtung entgegenwirkt. Da die bereits erwähnten Untersuchungen verschiedener europäischer Eisenbahngesellschaften /28/ gezeigt haben,

dass die für den Querverschiebewiderstand des Gleises gewonnenen Ergebnisse in weiten Bereichen auf den Längsverschiebewiderstand übertragen werden können, wird aus dem Kriterium der Gleisquerverschiebung eine Formel zur radlastabhängigen Berechnung des Längsverschiebewiderstandes abgeleitet. Dazu sind folgende Annahmen zu treffen:

- Der Querverschiebewiderstand des Gleises lässt sich mittels Division durch die Anzahl der Schwellen des betrachteten Gleisrostes in den Querverschiebewiderstand einer einzelnen Schwelle umrechnen, also den Widerstand, den die Verschiebung einer Schwelle im Schotter senkrecht zur Gleislängsrichtung aktiviert. Hierbei wird die Rahmensteifigkeit des Gleises vernachlässigt, die aus der Verbindung der einzelnen Schwellen durch die Schienen und Schienenbefestigungen zu einem Gleisrost resultiert.
- Die sich aus dem Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME ergebende maximal zulässige Querverschiebekraft ist identisch mit der vom Oberbau aufnehmbaren Kraft. Folglich entspricht der zur maximal zulässigen Querverschiebekraft gehörige Querverschiebewiderstand des Gleises dem tatsächlich im Gleis vorhandenen Widerstand, so dass der enthaltene Sicherheitsbeiwert unberücksichtigt bleibt.
- Das Kriterium der Gleisquerverschiebung gilt für sämtliche Radlasten, also auch für den unbelasteten Zustand des Gleisrostes mit $Q = 0$ kN.

Die Vorgehensweise zur Herleitung der Gleichung gliedert sich in fünf Schritte:

- Gewichtung des Beitrags der einzelnen Schwellenflächen zum Quer- bzw. Längsverschiebewiderstand
- Vergleich der Wirkung des Vorkopfschotters und des Schwellenfachschotters bei einer Quer- bzw. Längsverschiebung des Gleises
- Berücksichtigung der Schwellenverdrehung durch die Einsenkung des Gleisrostes unter Verkehrslast
- Berücksichtigung der Schwellenverdrehung bei einer Längsverschiebung des Gleises
- Überprüfung der Annahmen durch Gegenüberstellung mit verfügbaren Angaben aus der Literatur und vorhandenen Messergebnissen

3.2.3.2 Beitrag der einzelnen Schwellenflächen zum Quer- bzw. Längsverschiebewiderstand

Das Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München hat in einem Betriebsgleis mit Betonschwellen B 70 W Versuche mit dem Ziel durchgeführt, die einzelnen Anteile des Querverschiebewiderstandes zu bestimmen. Hierzu wurden an einzelnen Schwellen die Schienenbefestigungen entfernt und die Schwellen anschließend senkrecht zur Gleislängsrichtung bei gleichzeitiger Messung der dafür erforderlichen Kraft ver-

schoben. Um den Gesamtwiderstand zu erhalten, geschah dies eingangs ohne vorherige Veränderungen am Schotterbett. Zur Ermittlung des Beitrags der einzelnen Schwellenflächen zum Querverschiebewiderstand wurde in weiteren Versuchen die Vorgehensweise zum einen ohne Schwellenfachschotter, zum anderen ohne Vorkopfschotter und schließlich sowohl ohne Schwellenfach- als auch ohne Vorkopfschotter wiederholt. Die jeweils festgestellten Widerstände lassen eine Rückrechnung auf die Größenordnung der einzelnen Anteile des Querverschiebewiderstandes zu. So ergibt sich, dass der Beitrag des Schwellenfachschotters bzw. der entsprechenden Schwellenkontaktfläche bei rund 42 %, der des Vorkopfschotters bzw. der Schwellenstirnfläche bei ca. 16 % und derjenige aus Sohlreibung bei etwa 42 % des Gesamtwiderstandes liegt. Alle genannten Anteile sind dabei auf eine Schwelle ohne Einwirkung von Verkehrslasten bezogen /35/, /36/. Für die beschriebenen Versuche kann alternativ ebenfalls ein Gleisabschnitt mit mehreren Schwellen herangezogen werden /37/

Unter Voraussetzung der Gültigkeit vereinfacht sich das Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME für das unbelastete Gleis zu

$$\sum Y = k \cdot 10 \quad (3-2)$$

Demnach beträgt die maximal zulässige Querverschiebekraft eines 2 m langen Gleisabschnittes 10 kN ohne Berücksichtigung von Einflüssen aus dem Oberbau, für die wie schon erläutert der Koeffizient k steht. Dieser Wert kann wie folgt auf die Beiträge der einzelnen Schwellenflächen aufgeteilt werden:

$$W = W_{SF} + W_{VK} + W_S = 10 \quad (3-3)$$

W = maximal zulässige Querverschiebekraft ohne Oberbaueinflüsse [kN]

W_{SF} = Anteil des Schwellenfachschotters an der Querverschiebekraft [kN]

$$W_{SF} = 0,42 \cdot W = 4,2 \quad (3-4)$$

W_{VK} = Anteil des Vorkopfschotters an der Querverschiebekraft [kN]

$$W_{VK} = 0,16 \cdot W = 1,6 \quad (3-5)$$

W_S = Anteil der Sohlreibung an der Querverschiebekraft [kN]

$$W_S = 0,42 \cdot W = 4,2 \quad (3-6)$$

Zum Längsverschiebewiderstand tragen ebenso wie zum Querverschiebewiderstand der Schwellenfach- und der Vorkopfschotter sowie die Sohlreibung bei. Bezüglich des letztgenannten Anteils können sich die Widerstände nicht unterscheiden, da hierfür jeweils dieselbe Fläche zur Verfügung steht. Während jedoch beim Querverschiebewiderstand in der dem Schwellenfach zugewandten Schwellenkontaktfläche ebenfalls Reibung auftritt und der Vorkopfschotter direkt eine mögliche Verschiebung des Gleisrostes behindert, ist die Wirkungs-

weise dieser beiden Beiträge im Falle des Längsverschiebewiderstandes genau umgekehrt. Somit sind zunächst deren Anteile am Gesamtwiderstand von 42 % und 16 % zu vertauschen. Darüber hinaus muss man berücksichtigen, dass sich die Größe der Flächen, die beim Längsverschiebewiderstand Seitenreibung aufnehmen bzw. einer Gleisverschiebung entgegenwirken, im Vergleich zum Querverschiebewiderstand deutlich verändert. Aufgrund dessen werden die betreffenden Beiträge zum Widerstand im zweiten Schritt mit einem Faktor belegt, der dem Verhältnis der beteiligten Lasteinleitungsflächen entspricht. In diesem Zusammenhang wird auch untersucht, welchen Einfluss eine Variation des horizontalen Lastausbreitungswinkels im Schotter hat. Demnach ergibt sich die maximal zulässige Längsverschiebekraft, wenn die Einflüsse aus dem Oberbau vorerst unberücksichtigt bleiben, analog Gleichung (3-3) zu

$$P' = P_{SF} + P_{VK} + P_S \quad (3-7)$$

P' = maximal zulässige Längsverschiebekraft ohne Oberbaueinflüsse [kN]

P_{SF} = Anteil des Schwellenfachschootters an der Längsverschiebekraft [kN]

$$P_{SF} = 0,16 \cdot W \cdot \frac{F_{SF}}{F_{VK}} \quad (3-8)$$

F_{SF} = dem Schwellenfach zugewandte Lasteinleitungsfläche [mm²]

F_{VK} = dem Vorkopfschotter zugewandte Lasteinleitungsfläche [mm²]

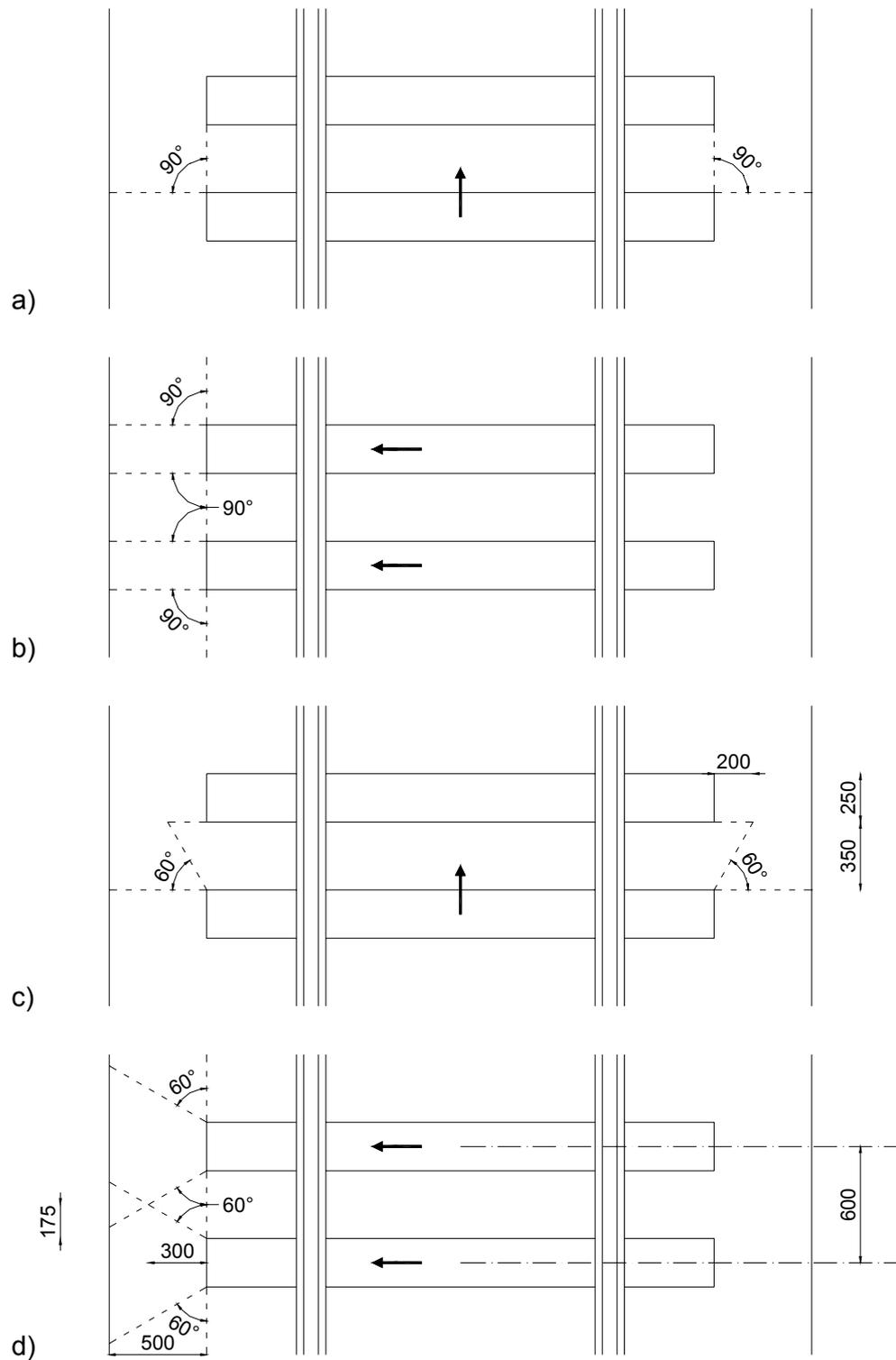
P_{VK} = Anteil des Vorkopfschootters an der Längsverschiebekraft [kN]

$$P_{VK} = 0,42 \cdot W \cdot \frac{F_{VK}}{F_{SF}} \quad (3-9)$$

P_S = Anteil der Sohlreibung an der Längsverschiebekraft [kN]

$$P_S = 0,42 \cdot W = 4,2 \quad (3-10)$$

Um die Anteile des Schwellenfachschootters und des Vorkopfschootters an der Längsverschiebekraft bestimmen zu können, wird die Größe der dem Schwellenfach sowie dem Vorkopfschotter zugewandten Lasteinleitungsflächen benötigt. Während diese für den durch Seitenreibung entstehenden Anteil des Vorkopfschootters direkt aus den zugehörigen Schwellenkontaktflächen resultieren, muss bei dem einer Gleisverschiebung entgegenwirkenden Anteil des Schwellenfachschootters der bereits erwähnte horizontale Lastausbreitungswinkel berücksichtigt werden, der zwei Extremwerte annehmen kann. Einerseits lässt sich durch einen Winkel von 90° jegliche Lastausbreitung im Schotter in horizontaler Richtung ausschließen, andererseits zeigt die Erfahrung, dass die größtmögliche, feststellbare Lastausbreitung in horizontaler Richtung einem Winkel von ungefähr 60° entspricht. Dies bestätigen auch die Messungen zur Ermittlung der einzelnen Anteile des Querverschiebewiderstandes /35/. Hierfür wurde der Vorkopfschotter teils in einem Winkel von 60° und teils in einem Winkel von 0°, also senkrecht zur Schwellenflanke, entfernt. Dabei ergaben sich keine signifikanten Unter-



(alle Abmessungen in [mm])

Abb. 3.3: Lastausbreitung im Schotter in horizontaler Richtung
 a) unter einem Winkel von 90° in Längsrichtung des Gleises
 b) unter einem Winkel von 90° in Querrichtung des Gleises
 c) unter einem Winkel von 60° in Längsrichtung des Gleises
 d) unter einem Winkel von 60° in Querrichtung des Gleises

schiede in den Versuchsergebnissen, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass eine Verringerung des horizontalen Lastausbreitungswinkels unter 60° ohne Auswirkungen bleibt. In Abb. 3.3 ist die Lastausbreitung im Schotter in horizontaler Richtung sowohl unter einem Winkel von 90° als auch unter einem Winkel von 60° für die Längs- und Querrichtung des Gleises dargestellt, wobei auf die eingetragenen Abmessungen im Folgenden noch näher eingegangen wird.

Vor der Ermittlung der einzelnen Anteile an der Längsverschiebekraft muss zunächst die Größe der zugrunde zu legenden Schwellenkontaktflächen festgelegt werden. Dabei ist zum einen zu beachten, dass man nicht bei allen Schwellen eines Gleises von einer exakten Einschotterung bis zu deren Oberkante ausgehen darf. Zum anderen weisen die Schotterkörner der obersten Schicht des Schotterbettes nur eine geringe Verzahnung untereinander auf, wodurch sie kaum Anteil am Gesamtwiderstand haben. Außerdem schreibt die Deutsche Bahn AG vor, auf Strecken, deren zulässige Höchstgeschwindigkeit 140 km/h überschreitet, zur Vermeidung von Schotterwirbel das Schotterbett im Bereich der Schwellenfächer tieferzukehren /18/. Diesen Tatsachen wird dadurch Rechnung getragen, dass die in die Berechnung eingehenden Flächen, wie sie in Abb. 3.4 durch Schraffur hervorgehoben sind, nicht über die gesamte Schwellenhöhe reichen, sondern sich auf eine Höhe von 165 mm bzw. 175 mm beschränken. Des Weiteren bleiben bei beiden Flächen die Abschrägungen an den Schwellenenden unberücksichtigt, da diese aufgrund ihres Winkels zur Längs- bzw. Querrichtung der Schwelle weder zur Seitenreibung noch zum direkten Widerstand gegen eine mögliche Verschiebung des Gleisrostes einen nennenswerten Beitrag liefern.

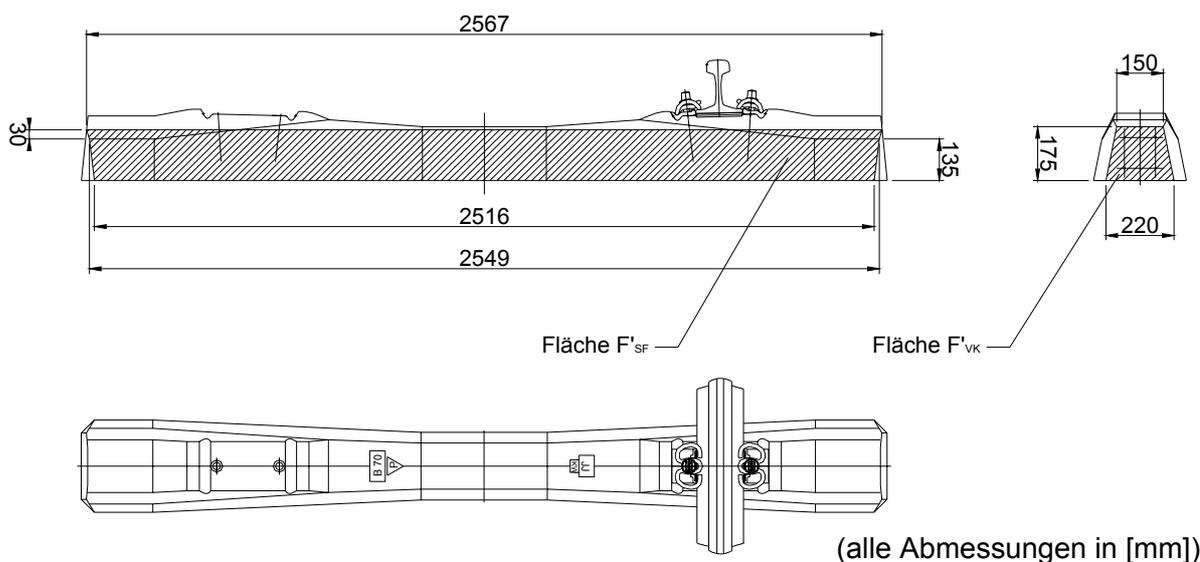


Abb. 3.4: Betonschwelle B 70 W mit Vermaßung der in die Berechnung eingehenden Schwellenkontaktflächen /38/

Die in die Berechnung eingehende Schwellenflanke ergibt sich zu

$$F'_{SF} = \frac{2567 + 2549}{2} \cdot 30 + \frac{2549 + 2516}{2} \cdot 135 = 418\,627,5 \text{ mm}^2 \approx 418\,600 \text{ mm}^2$$

Die Größe der in die Berechnung eingehenden Stirnfläche beträgt

$$F'_{VK} = \frac{150 + 220}{2} \cdot 175 = 32\,375 \text{ mm}^2 \approx 32\,400 \text{ mm}^2$$

Für den Anteil des Vorkopfschotters an der Längsverschiebekraft errechnet sich unter Ansatz einer Schwellenstirnfläche von $32\,400 \text{ mm}^2$ und einer Fläche der Schwellenflanke von $418\,600 \text{ mm}^2$ nach Gleichung (3-9) ein Wert von

$$P_{VK} = 0,42 \cdot W \cdot \frac{F_{VK}}{F_{SF}} = 0,42 \cdot 10 \cdot \frac{32\,400}{418\,600} = 0,3 \text{ kN}$$

Wird beim Anteil des Schwellenfachschootters zunächst ein horizontaler Lastausbreitungswinkel von 90° angenommen, so reduziert sich die dem Schwellenfach zugewandte Lasteinleitungsfläche wiederum auf die Fläche der Schwellenflanke mit $418\,600 \text{ mm}^2$ (Abb. 3.3). Demgegenüber ist für die dem Vorkopfschotter zugewandte Lasteinleitungsfläche zu beachten, dass der ursprüngliche Beitrag der Schwellenstirnfläche zum Querverschiebewiderstand von 16 %, der in Gleichung (3-8) eingeht, auf Basis einer Lastausbreitung in horizontaler Richtung unter etwa 60° ermittelt wurde. Wie aus Abb. 3.3 zu ersehen, überlagern sich in diesem Fall bei einer für Schnellfahrstrecken der Deutschen Bahn AG üblichen Schotterbreite vor Schwellenkopf von 500 mm /39/ bereits die Lasteinleitungsbereiche zweier benachbarter Schwellen. Daher stehen für eine Lastausbreitung in horizontaler Richtung ohne gegenseitige Beeinflussung der Schwellen ca. 175 mm (Abb. 3.3) zur Verfügung, die bei einer Breite des Vorkopfschotters von rund 300 mm erreicht werden und dem halben Abstand zwischen den Schwellenflanken zweier aufeinander folgender Schwellen entsprechen. Dieser beträgt ungefähr 350 mm (Abb. 3.3) und ergibt sich aus der Differenz des ebenfalls auf Schnellfahrstrecken gebräuchlichen Schwellenabstandes von 600 mm /18/ und der mittleren Breite der Betonschwelle B 70 W im Bereich des Schwellenkopfes von ca. 250 mm (Abb. 3.3). Die dem Vorkopfschotter zugewandte Lasteinleitungsfläche stellt somit die Summe der Schwellenstirnfläche mit $32\,400 \text{ mm}^2$ sowie der beiden zusätzlichen, aus der Lastausbreitung in horizontaler Richtung resultierenden Flächen mit einer Breite von rund 175 mm und der Höhe der Schwellenstirnfläche von etwa 175 mm (Abb. 3.4) dar, so dass sich der Anteil des Schwellenfachschootters an der Längsverschiebekraft für den Fall eines horizontalen Lastausbreitungswinkels von 90° laut Gleichung (3-8) zu

$$P_{SF}(90^\circ) = 0,16 \cdot W \cdot \frac{F_{SF}}{F_{VK}} = 0,16 \cdot 10 \cdot \frac{418\,600}{32\,400 + 2 \cdot 175 \cdot 175} = 7,1 \text{ kN}$$

errechnet.

Unter Voraussetzung eines horizontalen Lastausbreitungswinkels von ungefähr 60° ändert sich nun auch die dem Schwellenfachschotter zugewandte Lasteinleitungsfläche. Abb. 3.3 zeigt, dass die Breite des Schwellenfaches von rund 350 mm eine seitliche Lastausbreitung in Gleislängsrichtung von etwa 200 mm ermöglicht, wodurch die Fläche der Schwellenflanke mit 418 600 mm² um zwei Flächen mit entsprechender Breite und der Höhe der Schwellenflanke von ca. 165 mm (Abb. 3.4) ergänzt wird. Die dem Vorkopfschotter zugewandte Lasteinleitungsfläche bleibt im Vergleich zum Anteil des Schwellenfachschotters unter einem horizontalen Lastausbreitungswinkel von 90° unverändert. Demzufolge ergibt sich aus Gleichung (3-8) für eine Lastausbreitung in horizontaler Richtung unter rund 60°

$$P_{SF}(60^\circ) = 0,16 \cdot W \cdot \frac{F_{SF}}{F_{VK}} = 0,16 \cdot 10 \cdot \frac{418\,600 + 2 \cdot 200 \cdot 165}{32\,400 + 2 \cdot 175 \cdot 175} = 8,3 \text{ kN}$$

Dass der Anteil des Schwellenfachschotters an der Längsverschiebekraft hierbei höher ausfällt als bei einem horizontalen Lastausbreitungswinkel von 90° , lässt sich durch die größere Fläche erklären, auf die die in den Schotter eingeleitete Last einwirkt.

Nachdem nun sämtliche Anteile, die zur Längsverschiebekraft beitragen, bekannt sind, kann deren maximal zulässiger Wert ohne Oberbaueinflüsse bestimmt werden. Je nach angenommener Lastausbreitung in horizontaler Richtung berechnet sich dieser entsprechend Gleichung (3-7) zu

$$P'(90^\circ) = P_{SF}(90^\circ) + P_{VK} + P_S = 7,1 + 0,3 + 4,2 = 11,6 \text{ kN}$$

bzw.

$$P'(60^\circ) = P_{SF}(60^\circ) + P_{VK} + P_S = 8,3 + 0,3 + 4,2 = 12,8 \text{ kN}$$

Da sich sowohl der Quer- als auch der Längsverschiebewiderstand aus Sohl- und Seitenreibung sowie einem Anteil zusammensetzen, der über den Vorkopf- bzw. Schwellenfachschotter einer möglichen Gleisverschiebung entgegenwirkt, dürften die Einflüsse aus Art und Instandhaltungszustand des Oberbaus auf beide Widerstände ähnlich sein, was diesbezügliche Untersuchungen /28/ bestätigen. Aufgrund dessen wird hierfür im Falle der maximal zulässigen Längsverschiebekraft ebenfalls der Koeffizient k in Ansatz gebracht, der die bereits genannten Werte annehmen kann.

Schließlich ist noch die Wirkung einer eventuell vorhandenen Radlast auf die maximal zulässige Längsverschiebekraft zu berücksichtigen, die sich beim Quer- und ebenso beim Längsverschiebewiderstand durch eine entsprechende Erhöhung der Sohlreibung bemerkbar macht. Somit besteht auch in diesem Punkt eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Widerständen, weswegen der Einfluss einer Radlast beim Längsverschiebewiderstand in derselben Form angesetzt wird wie beim Querverschiebewiderstand.

Demzufolge lautet die vollständige Gleichung zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft eines 2 m langen Gleisabschnittes analog zum Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME

$$\sum P(\beta) = k \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + P'(\beta) \right) \quad (3-11)$$

$\sum P$ = maximal zulässige Längsverschiebekraft [kN]

β = horizontaler Lastausbreitungswinkel im Schotter [°]

3.2.3.3 Wirkung des Vorkopfschotters und des Schwellenfachschotters bei einer Quer- bzw. Längsverschiebung des Gleises

Während einer Querverschiebung des Gleisrostes der Vorkopfschotter entgegenwirkt, übernimmt dies bei einer Längsverschiebung des Gleises der Schwellenfachschotter. Daher muss überprüft werden, inwieweit die Breite des Schwellenfaches mit der Schotterbreite vor Schwellenkopf vergleichbar ist.

Für den auf Schnellfahrstrecken üblichen Schwellenabstand von 600 mm ergibt sich eine Breite des Schwellenfaches von ungefähr 350 mm (Abb. 3.3). Die für Schnellfahrstrecken gebräuchliche Schotterbreite vor Schwellenkopf beträgt hingegen 500 mm. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es in diesem Abstand von der Schwellenstirnfläche bereits zu einer Überlagerung der Lasteinleitungsbereiche zweier benachbarter Schwellen kommt. Dieser Effekt tritt ab einer Breite des Vorkopfschotters von ca. 300 mm ein, weshalb das letztgenannte Maß der Breite des Schwellenfaches gegenübergestellt werden muss. Der damit verbleibende Unterschied von etwa 50 mm kann im Hinblick auf die vom Kriterium der Gleisquerverschiebung hergeleitete Gleichung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft unberücksichtigt bleiben, da bei dessen Einbeziehung in die Formel lediglich eine Genauigkeit der theoretischen Berechnung vorgetäuscht würde, die sich angesichts der Schwankungen bei empirisch ermittelten Widerstandswerten nicht mit den praktischen Erfahrungen deckt.

3.2.3.4 Schwellenverdrehung durch die Einsenkung des Gleisrostes unter Verkehrslast

Unter Verkehrslast senkt sich der Gleisrost ein, was, wie in Abb. 3.5 zu sehen, eine Verdrehung der Schwellen im Schotterbett um ihre Längsachse zur Folge hat. Es ist zu klären, ob diese Verdrehung eine Größe erreicht, die die Verzahnung zwischen Schwelle und Schotter in den Kontaktflächen beeinflusst.

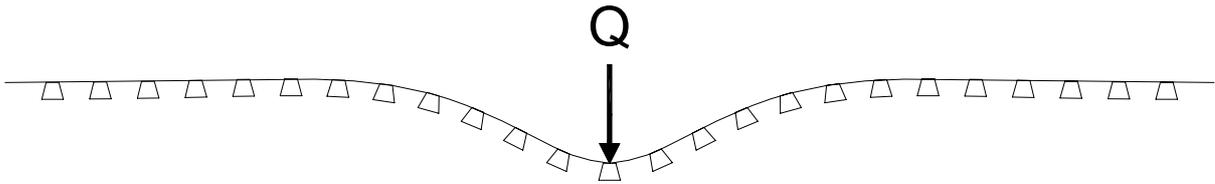


Abb. 3.5: Einsenkung des Gleisrostes unter Verkehrslast

Durch die zwischen Schiene und Schwelle eingebaute Zwischenlage kann sich die Schwelle wiederum gegenüber der Schiene verdrehen, so dass bei einer Einsenkung des Gleisrostes die Verdrehung der Schwelle geringer ausfällt als diejenige der Schiene im Bereich des betrachteten Stützpunktes. Dies wird auf der sicheren Seite liegend jedoch vernachlässigt und stattdessen direkt die Verdrehung der Schiene betrachtet.

Deren Maximalwert stellt sich bei einer Einsenkung des Gleises unter Verkehrslast am ersten Wendepunkt der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN im Abstand $\frac{\pi}{4} \cdot L$ von der größten Einsenkung ein. Die Größe der Verdrehung erhält man demnach durch Berechnung des Wertes der ersten Ableitung der Biegelinienfunktion an dieser Stelle. Hierzu werden folgende Gleichungen benötigt /17/, /40/:

$$y = \frac{Q \text{ [N]}}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} \cdot \eta \quad (3-12)$$

y = Einsenkung der Schiene [mm]

b = Breite des gedachten Längsträgers [mm]

$$b = \frac{F}{2 \cdot a} \quad (3-13)$$

F = wirksame Schwellenauflagerfläche [mm²]

a = Stützpunktstandort [mm]

C = Bettungsmodul [N/mm³]

L = elastische Länge der Schiene [mm]

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}} \quad (3-14)$$

E = Elastizitätsmodul der Schiene [N/mm²]

I = Trägheitsmoment der Schiene [mm⁴]

η = Einflusszahl zur Berücksichtigung der Nachbarachsen [-]

$$\eta = \frac{\sin \xi + \cos \xi}{e^{\xi}} \quad (3-15)$$

$$\xi = \frac{x}{L} \quad (3-16)$$

x = Abstand der Nachbarachsen von der Bezugsachse [mm]

Die erste Ableitung der Biegelinienfunktion ergibt sich somit zu

$$y' = -\frac{Q \text{ [N]}}{b \cdot C \cdot L^2} \cdot \frac{\sin \frac{x}{L}}{e^{\frac{x}{L}}} \quad (3-17)$$

Stellvertretend wird die Verdrehung der Schiene für nachstehende Eingangsgrößen /17/, /41/, /42/ bestimmt:

- Radlast: $Q = 100\,000 \text{ N}$
- Schwelle B 70 W: $F = 570\,000 \text{ mm}^2$
 $a = 600 \text{ mm}$
- Bettungsmodul: $C = 0,02 \text{ N/mm}^3$ (sehr schlechter Untergrund)
- Schiene UIC 60: $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
 $I = 30\,550\,000 \text{ mm}^4$

Der so ermittelte Wert der ersten Ableitung der Biegelinienfunktion im Abstand $\frac{\pi}{4} \cdot L$ von der größten Einsenkung entspricht dem Tangens der zugehörigen Schienenverdrehung, die sich folglich auf 0,12° beläuft. Eine Verdrehung dieser Größenordnung wird sich kaum auf die Verzahnung zwischen Schwelle und Schotter auswirken, zumal dieser Wert nur für den eher seltenen Fall eines sehr schlechten Untergrundes auftritt. Bei höheren Bettungsmoduln reduziert sich die Verdrehung aufgrund der steiferen Auflagerung deutlich.

3.2.3.5 Schwellenverdrehung bei einer Längsverschiebung des Gleises

Ein weiterer Unterschied zwischen einer Quer- und einer Längsverschiebung des Gleisrostes besteht darin, dass sich die Schwellen bei einer Längsverschiebung minimal verdrehen (Abb. 3.6), was bei einer Querverschiebung ausgeschlossen werden kann. Auch hier stellt sich die

Frage, inwieweit dieser Vorgang die Verzahnung zwischen Schwelle und Schotter in den Kontaktflächen verändert.

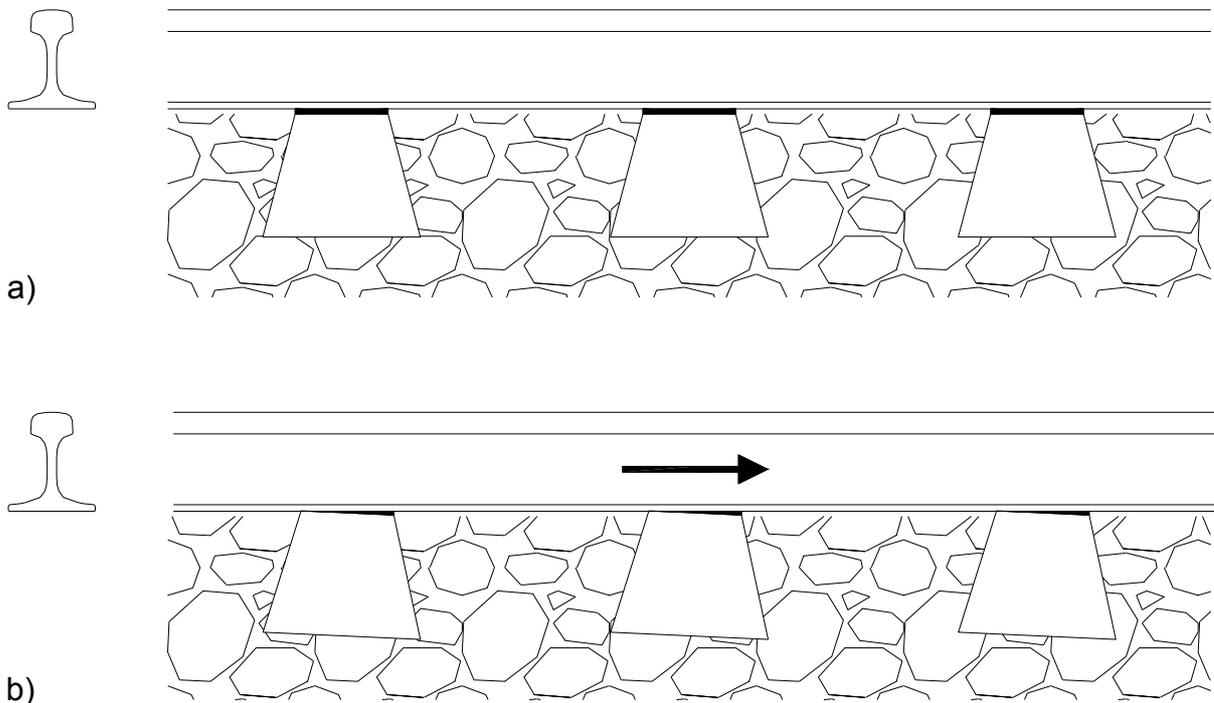


Abb. 3.6: Schwellenverdrehung
 a) Ausgangslage der Schwellen ohne einwirkende Längsverschiebung
 b) gekippte Lage der Schwellen bei einwirkender Längsverschiebung

Die Erfahrung zeigt, dass sich die Schwellen bei einer Längsverschiebung des Gleises um die in Verschiebungsrichtung vorne liegende, untere Schwellenkante verdrehen. Für kleine Winkel lässt sich der Tangens der auftretenden Schwellenverdrehung mit Hilfe einer rein geometrischen Betrachtung als Verhältnis der aufgebrachten Längsverschiebung zur Schwellenhöhe im Stützpunktbereich ausdrücken. Eine Schwelle B 70 W mit einer Höhe von rund 214 mm im Stützpunktbereich würde demzufolge bei einer angenommenen Längsverschiebung von 1 mm eine Verdrehung durch die Kippbewegung um maximal $0,27^\circ$ erfahren. Hierbei bleibt jedoch unberücksichtigt, dass der durchgehende Schienenstrang nicht die Möglichkeit hat, sich an den einzelnen Stützpunkten zusammen mit den Schwellen zu verdrehen, weshalb es zu einer Verformung der zwischen Schiene und Schwelle eingebauten Zwischenlage kommt. Da diese aufgrund der jeweiligen Materialeigenschaften begrenzt ist und die später zu betrachtenden Beschleunigungs- und Bremsvorgänge von Zügen kleinere Längsverschiebungen verursachen als der dem Beispiel zugrunde gelegte Wert von 1 mm, kann von einer geringeren tatsächlichen Verdrehung der Schwellen ausgegangen werden, die die Verzahnung zwischen Schwelle und Schotter nicht beeinflusst. Die Schwellenverdrehung wird daher bei der weiteren Untersuchung vernachlässigt.

3.2.3.6 Gegenüberstellung mit verfügbaren Angaben aus der Literatur und vorhandenen Messergebnissen

Die Herleitung der Gleichung (3-11), die der Berechnung des Längsverschiebewiderstandes in Abhängigkeit von der einwirkenden Radlast dienen soll, beruht auf drei bereits in Abschnitt 3.2.3.1 aufgeführten Annahmen:

- Der Querverschiebewiderstand des Gleises lässt sich mittels Division durch die Anzahl der Schwellen des betrachteten Gleisrostes in den Querverschiebewiderstand einer einzelnen Schwelle umrechnen, also den Widerstand, den die Verschiebung einer Schwelle im Schotter senkrecht zur Gleislängsrichtung aktiviert. Hierbei wird die Rahmensteifigkeit des Gleises vernachlässigt, die aus der Verbindung der einzelnen Schwellen durch die Schienen und Schienenbefestigungen zu einem Gleisrost resultiert.
- Die sich aus dem Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME ergebende maximal zulässige Querverschiebekraft ist identisch mit der vom Oberbau aufnehmbaren Kraft. Folglich entspricht der zur maximal zulässigen Querverschiebekraft gehörige Querverschiebewiderstand des Gleises dem tatsächlich im Gleis vorhandenen Widerstand, so dass der enthaltene Sicherheitsbeiwert unberücksichtigt bleibt.
- Das Kriterium der Gleisquerverschiebung gilt für sämtliche Radlasten, also auch für den unbelasteten Zustand des Gleisrostes mit $Q = 0$ kN.

Diese Annahmen werden im Folgenden durch eine Gegenüberstellung der Gleichung mit Angaben aus der Literatur und vorhandenen Messergebnissen überprüft. So haben in /27/ erwähnte Versuche an einem Gleis mit Schienen UIC 60 und Betonschwellen B 70 W im Abstand von 0,60 m ergeben, dass der Längsverschiebewiderstand linear mit der einwirkenden Radlast ansteigt. Diese Feststellung gilt bis zu einer Radlast von 10 t, bei der der Widerstand ungefähr den dreifachen Wert des unbelasteten Gleisrostes, also etwa 20 N/mm Gleislänge, erreichen kann. Die Durchrutschgrenze von 2 mm ist hingegen unabhängig von der auftretenden Radlast.

Darüber hinaus hat das Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München in einem Großprüfstand Versuche zur Bestimmung des Längsverschiebewiderstandes an einem Gleis mit Schienen UIC 60 und Betonschwellen B 75 im Abstand von 0,63 m durchgeführt. Dabei handelt es sich zwar nicht exakt um den Oberbau, für den die Gleichung zur Berechnung des Längsverschiebewiderstandes abgeleitet worden ist, dennoch erscheint ein Vergleich mit den Messergebnissen sinnvoll, nachdem sich die Werte für den Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes bei beiden Oberbauformen in der gleichen Größenordnung bewegen (Abschnitt 3.2.2). Im Rahmen der Versuche wurde ein aus zehn Schwellen bestehender Gleisabschnitt mit Unterschottermatte in Gleislängs-

richtung verschoben, während man neben anderen Werten die hierfür notwendige Kraft aufzeichnete. Außerdem fand eine Variation verschiedener Randbedingungen statt, so dass u.a. auch Messergebnisse mit simulierten Achslasten von 100 kN und 200 kN vorliegen. Der zugehörige Widerstand lässt sich unter Berücksichtigung der Schwellenanzahl und des Schwellenabstandes aus der Längsverschiebung des Gleisrostes und der aufgebrauchten Kraft ermitteln /43/. Die Unterschottermatte kann hierbei unberücksichtigt bleiben, da deren Schrägstellung unter Einwirkung der Längskraft gegenüber dem Verschiebeweg des Gleisrostes gering ausfällt und sich in Anbetracht der Schwankungen empirisch ermittelter Werte des Längsverschiebewiderstandes kaum auf das Ergebnis auswirkt.

Abb. 3.7 stellt einen graphischen Vergleich der errechneten Längsverschiebewiderstände mit den verfügbaren Angaben aus der Literatur und den vorhandenen Messergebnissen dar. Sie basiert auf den in Tab. 3.2 zusammengefassten Werten, wobei sich die berechneten Widerstände aus der mit Hilfe der Gleichung (3-11) bestimmten maximal zulässigen Längsverschiebekraft eines 2 m langen Gleisabschnittes zu

$$p = \frac{\sum P(\beta) \cdot 1000}{2000 \cdot 2} \quad (3-18)$$

p = Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter [N/mm Gleislänge],
bezogen auf die halbe Schwelle

ergeben. Hierbei erfolgt zum einen eine Umrechnung der Längsverschiebekraft auf 1 mm Gleislänge, zum anderen wird der Längsverschiebewiderstand gemäß Definition auf die halbe Schwelle bezogen. Die Vorgehensweise bei der Berechnung der Widerstandswerte kann Anlage 3.2 entnommen werden.

Radlast [kN]	Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]			
	Gleichung (3-11) ($k = 1,00; \beta = 90^\circ$)	Gleichung (3-11) ($k = 1,00; \beta = 60^\circ$)	Angaben aus der Literatur /16/, /27/	Messergebnisse
0	2,9	3,2	7,0	8,0
50	11,2	11,5		12,5
100	19,6	19,9	20,0	16,4

Tab. 3.2: Längsverschiebewiderstand in Abhängigkeit von der einwirkenden Radlast

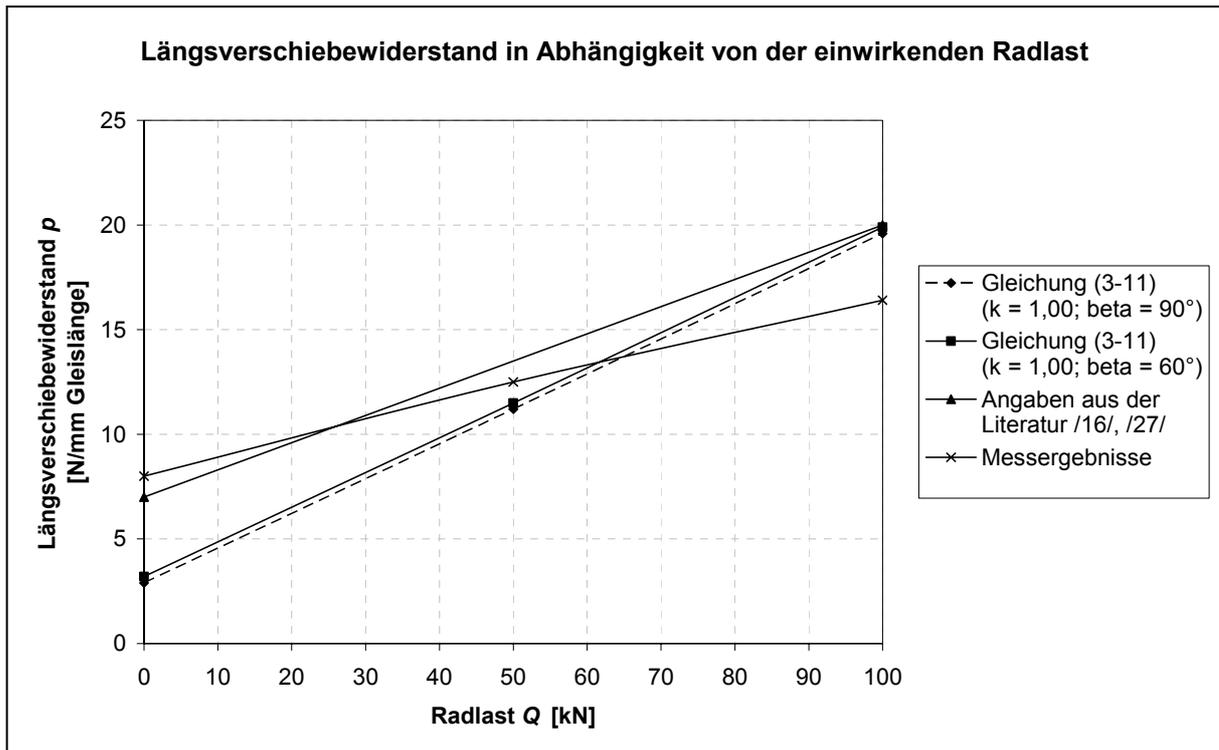


Abb. 3.7: Graphischer Vergleich der aus Gleichung (3-11) errechneten Längsverschiebewiderstände mit den verfügbaren Angaben aus der Literatur und den vorhandenen Messergebnissen

Im Bereich kleiner Radlasten zeigt sich eine deutliche Abweichung der mit der Gleichung berechneten Längsverschiebewiderstände von den Messergebnissen und den Literaturangaben. Demnach lässt sich die Gültigkeit des Kriteriums der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME und somit auch der Gleichung zur Berechnung des Längsverschiebewiderstandes in Abhängigkeit von der einwirkenden Radlast für den unbelasteten Zustand des Gleisrostes nicht nachweisen. Da jedoch über den Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes ausreichende Erkenntnisse zur Verfügung stehen (Abschnitt 3.2.2), kann hierfür auf eine Anwendung der Gleichung verzichtet werden. Für Radlasten ab ungefähr 65 kN hingegen liegen die mit Hilfe der Gleichung (3-11) theoretisch ermittelten Widerstandswerte zwischen den Messergebnissen und den Literaturangaben, die sich ebenfalls auf Versuche beziehen. Die Annahme, dass die maximal zulässige Quer- bzw. Längsverschiebekraft der vom Oberbau aufnehmbaren Kraft entspricht, und folglich der Einsatz der hergeleiteten Formel im genannten Belastungsbereich ist aufgrund dieser Tatsache durchaus gerechtfertigt. Angesichts der guten Übereinstimmung der berechneten Längsverschiebewiderstände mit den Messergebnissen und Literaturangaben für Radlasten über 65 kN hat auch die Vernachlässigung der Rahmensteifigkeit des Gleisrostes keine Auswirkung auf die Anwendbarkeit der aus dem Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME abgeleiteten Gleichung im eingegrenzten Belastungsbereich.

3.3 Durchschubwiderstand der Schiene in der Befestigung

Beim Durchschubwiderstand handelt es sich um den Widerstand, den die Schienenbefestigung einer Verschiebung der Schiene gegenüber der Schwelle in Gleislängsrichtung entgegensetzt. Sein Verlauf entspricht, wie in Abb. 3.8 beispielhaft zu sehen, qualitativ dem des Längsverschiebewiderstandes.

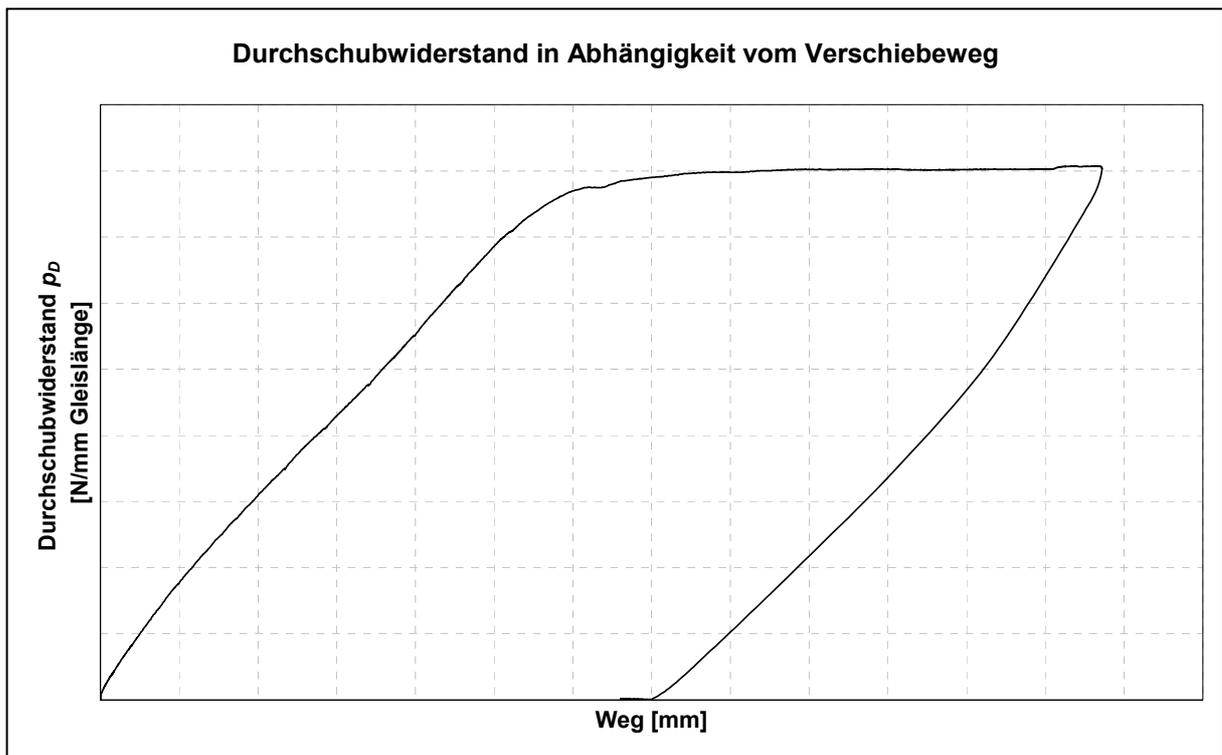


Abb. 3.8: Verlauf des Durchschubwiderstandes der Schiene in der Befestigung

3.3.1 Einflüsse auf die Größe des Durchschubwiderstandes

Die Größe des Durchschubwiderstandes hängt im Wesentlichen von der Art der Schienenbefestigung und der zwischen Schiene und Schwelle eingebauten Zwischenlage ab. Weitere Parameter sind die Reibung zwischen den einzelnen Bauteilen der Befestigung sowie die Anpresskraft, die die Schienenbefestigung auf den Schienenfuß ausübt. Schließlich spielen ebenso wie beim Längsverschiebewiderstand die Achslast und die Geschwindigkeit der überfahrenden Züge eine Rolle /10/, /22/, /24/, /44/.

- **Einfluss der Schienenbefestigungsart:** Im Wesentlichen lassen sich heute zwei Arten von Schienenbefestigungen im Netz der Deutschen Bahn AG unterscheiden, der K-Oberbau, der bei Holz- und Stahlschwellen zum Einsatz kommt, sowie der W-Oberbau, der bei Betonschwellen Anwendung findet /44/.

Beim K-Oberbau wird zur Spurhaltung auf die Schwellen eine Rippenplatte montiert. In diese legt man eine Zwischenlage ein, auf der wiederum der Schienenfuß aufliegt. Die Befestigung der Schiene selbst geschieht durch Klemmplatten und Federringe, die mittels Hakenschrauben und Schraubenmuttern gehalten werden. Seit ca. 15 Jahren ist allerdings die Verwendung des KS-Oberbaus üblich, bei dem anstatt Klemmplatten und Federringen Spannklemmen zum Einsatz kommen. Diese ermöglichen einen größeren Federweg und damit eine höhere Elastizität der Schienenbefestigung /17/, /44/.

Der W-Oberbau besitzt zur Spurhaltung beidseits des Schienenfußes angeordnete Winkelführungsplatten, mit denen die Seitenkräfte direkt in die Betonschultern eingeleitet werden, ohne die Schwellenschrauben auf Biegung zu beanspruchen. Zwischen der so hinsichtlich der Spur fixierten Schiene und der Schwelle wird ebenfalls eine Zwischenlage eingebaut. Die Befestigung der Schiene erfolgt durch Spannklemmen und Schwellenschrauben /44/.

Die genannten Befestigungssysteme, die in Anlage 3.3 dargestellt sind, weisen unterschiedliche Durchschubwiderstände auf, wobei auch berücksichtigt werden muss, dass es von den einzelnen Bauteilen zudem verschiedene Modifizierungen gibt.

- **Einfluss der Zwischenlagenart:** Die Zwischenlage als ein Bauteil der Schienenbefestigung hat einen erheblichen Einfluss auf die Größe des Durchschubwiderstandes. Beim heutigen Schotteroberbau werden vorwiegend entweder harte Kunststoffzwischenlagen oder elastische Zwischenlagen verwendet, die gegenüber den früher gebräuchlichen Pappelholzzwischenlagen gezielt zu einem möglichst hohen Durchschubwiderstand beitragen. Dies ist letztlich auch eine Konsequenz aus der Weiterentwicklung des Oberbaus vom Stoßlückengleis hin zu den durchgehend geschweißten Schienen. Je nach den Materialeigenschaften der eingebauten Zwischenlage variiert der Durchschubwiderstand /24/. Auf die Größenordnung wird in Abschnitt 3.3.2 näher eingegangen.
- **Einfluss der Reibung:** Die Reibung zwischen Schiene und Zwischenlage sowie zwischen Zwischenlage und Rippenplatte bzw. Schwelle hängt zum einen von der Beschaffenheit der beteiligten Kontaktflächen, zum anderen von der Art der Zwischenlage ab /24/.

So ist die Reibung an der Schienenfußunterseite sowie an der Oberseite der ebenso aus Stahl gefertigten Rippenplatte umso höher, je mehr die Oberflächen korrodiert sind. Zusätzlich kann sich eine Verschmutzung der Bauteile während der Montage oder im Betriebsgleis auf die Größe der Reibung auswirken.

- **Einfluss der Anpresskraft der Schienenbefestigung:** Im Hinblick auf die bereits erwähnten Befestigungssysteme ist die Anpresskraft, die die Befestigung auf den Schienenfuß ausübt, weitgehend unabhängig von der Art der Schienenbefestigung. Sie resultiert aus dem Drehmoment der Schraubenmutter bzw. Schwellenschrauben, das i.d.R. ungefähr 200 Nm /46/ beträgt. Mit zunehmender Betriebsdauer kann die Anpresskraft der Schienenbefestigung durch den Verschleiß einzelner Bauteile nachlassen /22/, /24/.
- **Einfluss der Belastung:** Hierbei muss wie beim Längsverschiebewiderstand nach der Achslast einerseits und der Geschwindigkeit der überfahrenden Züge andererseits unterschieden werden.

Aus der Achslast ergeben sich über die Einsenkung des Gleisrostes Stützpunktkräfte, die in den betroffenen Stützpunkten eine Einfederung der Zwischenlage bewirken, wodurch der Durchschubwiderstand zunimmt.

Höhere Geschwindigkeiten der Züge haben in Verbindung mit Fehlern in den Laufflächen der Räder, den Fahrflächen der Schienen oder ungleichmäßiger Schwellenauflagerung dynamische Einflüsse zur Folge, deren Auswirkungen mit denen beim Längsverschiebewiderstand vergleichbar sind. Durch Radlastschwankungen ändert sich unmittelbar die auf den Oberbau einwirkende Belastung, mit den Radlastschwankungen verbundene Vertikalschwingungen führen außerdem zu einer Reduzierung des Durchschubwiderstandes um bis zu 15 % /10/.

3.3.2 Durchschubwiderstand des unbelasteten und des belasteten Gleisrostes

Während beim unbelasteten Gleis in ausreichender Anzahl Werte für den Durchschubwiderstand vorliegen, finden sich wie schon beim Längsverschiebewiderstand für den Gleisrost unter Verkehrslast kaum Widerstandsangaben. In diesem Fall sind entsprechende Messungen allerdings wesentlich einfacher zu verwirklichen, so dass am Prüfamort für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München Versuche durchführbar waren, um die notwendigen Werte für den Durchschubwiderstand zu erhalten. Hierbei wurden auch Messungen für das unbelastete Gleis vorgenommen, was den Vorteil hat, dass sich die Durchschubwiderstände sämtlicher Belastungsstufen des Gleisrostes aus Ergebnissen einer Versuchsreihe gewinnen lassen. Nachfolgend werden der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung sowie die Versuchsauswertung näher beschrieben und die Versuchsergebnisse zusammengefasst.

3.3.2.1 Versuchsaufbau

Für die Durchschubversuche wurde ein kompletter Stützpunkt, bestehend aus einer Betonschwelle B 70 W, einem rund 30 cm langen Schienenstück UIC 60, Spannklemmen Skl 14, Schwellenschrauben Ss 25 und unterschiedlichen Zwischenlagen sowie Winkelführungsplatten montiert. Um die Durchschubwiderstände verschiedener Arten von Zwischenlagen ermitteln zu können, kamen bei den Messungen harte Kunststoffzwischenlagen Zw 687a und elastische Zwischenlagen Zw 700a, beide in Verbindung mit Winkelführungsplatten Wfp 14 K, sowie elastische Zwischenlagen Zw 900 mit den zugehörigen Winkelführungsplatten Wfp 14 K 900 zum Einsatz.

Aufgrund der Vorgabe, auch den Einfluss von Vertikalkräften berücksichtigen zu können, ergab sich eine Versuchsanordnung, die das Aufbringen einer bei Durchschubversuchen eigentlich üblichen Zugkraft /47/, /48/ nicht zuließ. Deshalb wurde die erforderliche Kraft in Schienenlängsrichtung mit Hilfe eines Hydraulikzylinders als Druckkraft an einem der beiden Schienenenden eingeleitet. Die Erfassung der sich einstellenden Verschiebung der Schiene gegenüber der Schwelle geschah mittels eines am zweiten Schienenende angebrachten Induktivwegaufnehmers. Um eine Verfälschung der Versuchsergebnisse auszuschließen, musste die Schwelle gegen Verschieben und Verdrehen infolge der Längskrafteinwirkung gesichert werden, wobei eine Messuhr an der Schwelle zur zusätzlichen Kontrolle diesbezüglicher Bewegungen diente. Die Belastung mit einer Vertikalkraft schließlich erfolgte über einen weiteren, mittig über dem Stützpunkt angeordneten Hydraulikzylinder, der die Kraft über zwei Stahlplatten und ein zwischengeschaltetes Rollenlager an die Schiene weitergab. Damit war gewährleistet, dass sich der Zylinder während des Verschiebens der Schiene nicht verkantet und demzufolge die wirkende Vertikalkraft konstant bleibt. Den erläuterten Versuchsaufbau zeigt Abb. 3.9.

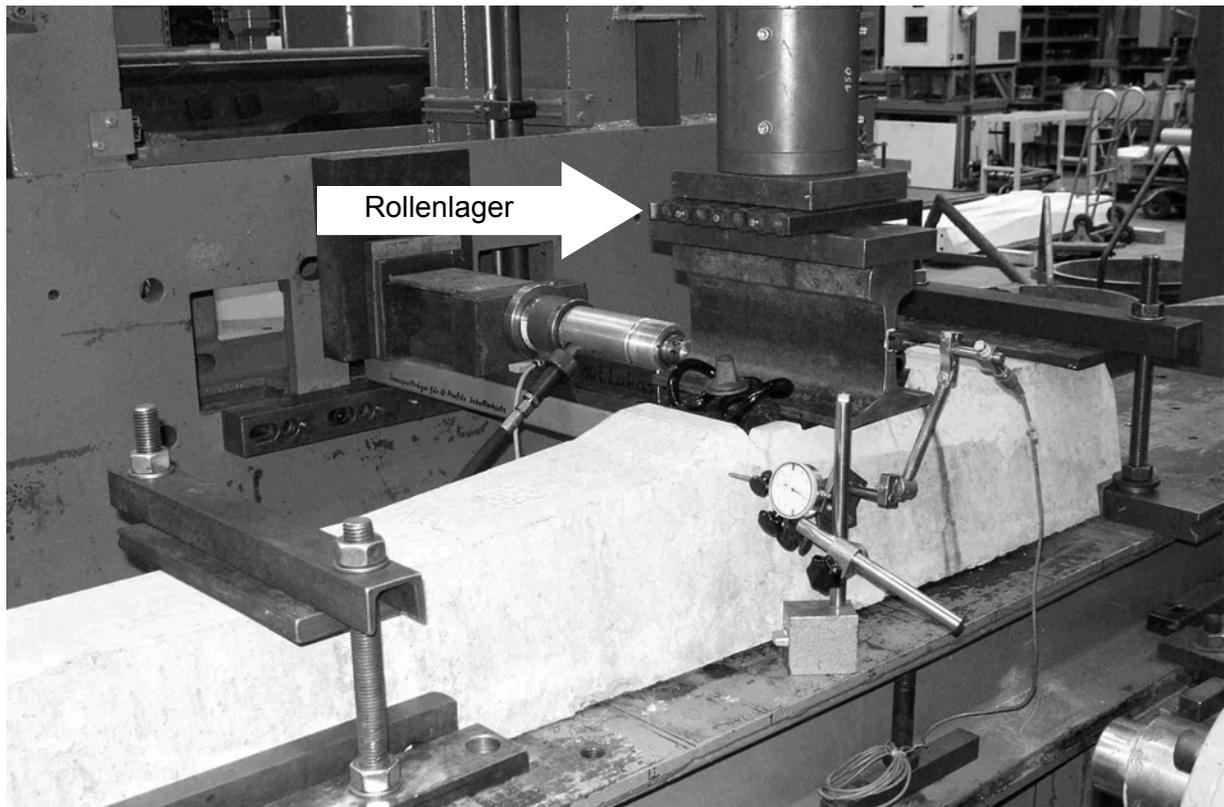


Abb. 3.9: Versuchsaufbau für die Durchschubversuche

3.3.2.2 Versuchsdurchführung

Die auf das Schienenstück aufgebrachte Längskraft wurde kontinuierlich solange gesteigert, bis ein Durchrutschen der Schiene in der Befestigung einsetzte. Sobald dies der Fall war, wurde die Kräfteinleitung gestoppt. Während des gesamten Verschiebevorgangs wurde sowohl die ausgeübte Längskraft als auch die hierdurch verursachte Verschiebung der Schiene gegenüber der Schwelle aufgezeichnet. Für einen vollständigen Durchschubversuch musste die beschriebene Vorgehensweise in Anlehnung an die EN 13146-1 /47/ bzw. die prEN 13146-1 /48/ dreimal wiederholt werden, ohne zwischenzeitlich die Schienenbefestigung zu lösen.

Vor Beginn der Messungen war jedoch noch zu klären, wie groß die Vertikalkräfte zur Simulation von Verkehrslasten sein sollten. Dabei muss beachtet werden, dass sich eine auf das Gleis einwirkende Achslast durch die Einsenkung des Gleisrostes auf mehrere Stützpunkte verteilt, weshalb die daraus resultierenden Stützpunktkräfte für die Belastung des Stützpunktes maßgebend sind. Um deren Größenordnung abschätzen zu können, wurde unter Annahme einer 20t-Achse aus der maximalen Einsenkung des Gleises nach Gleichung (3-12) die Stützpunktkraft

$$S = b \cdot a \cdot C \cdot y \quad (3-19)$$

S = Stützpunktkraft [N]

ermittelt /17/. Für einen Gleisrost mit Schienen UIC 60 sowie Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm und Bettungsmoduln zwischen $0,02 \text{ N/mm}^3$ und $0,30 \text{ N/mm}^3$ errechnen sich Extremwerte von ca. 23 kN und etwa 45 kN. Eine weitere Belastungsstufe mit 75 kN ergab sich durch die Überlegung, in die späteren Berechnungen möglicherweise dynamische Einflüsse einzubeziehen, die zu einer entsprechenden Erhöhung der Stützpunktkraft führen. Diese Kraft stellte sich für die elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 im Versuch aber als zu hoch heraus, was sich dadurch zeigte, dass zum einen die ermittelten Durchschubkräfte unterhalb der Werte bei 45 kN Vertikalkraft lagen. Zum anderen wiesen die Zwischenlagen, wie in den Anlagen 3.4 und 3.5 zu sehen, deutliche Verformungen auf, die ebenfalls auf eine Überbeanspruchung schließen lassen. Infolge dessen wurde für die elastischen Zwischenlagen die höchste Belastungsstufe auf 60 kN herabgesetzt. Wie bereits erwähnt, fanden darüber hinaus Messungen am unbelasteten Stützpunkt statt, die im nachfolgenden Text allerdings nicht mehr getrennt von den anderen Lastfällen angesprochen werden.

Bei den elastischen Zwischenlagen stellten sich deutlich größere Schubverformungen, bedingt durch die Verschiebung der Schiene gegenüber der Schwelle, als bei der harten Kunststoffzwischenlage ein. Daher erschien es sinnvoll, für jede aufgebrachte Vertikalkraft eine eigene Zwischenlage zu verwenden, um einerseits Auswirkungen von Verformungen aus der vorhergehenden Stützpunktbelastung auf die Messungen zu vermeiden und andererseits den Zwischenlagen die Möglichkeit zu geben, sich in einer längeren Beanspruchungspause vollständig rückzuformen, so dass sie für weitere Versuche herangezogen werden konnten. Damit sich bei der Versuchsauswertung etwaige Schwankungen in den Materialeigenschaften der einzelnen Zwischenlagen berücksichtigen lassen, wurden deren Federziffern ermittelt, wobei bei der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a der Maximalwert lediglich um 6 % über der geringsten Federziffer von 505 kN/mm lag. Für die elastische Zwischenlage Zw 700a ergab sich eine ebenfalls vernachlässigbare Abweichung des Größtwertes von 13 % gegenüber dem Minimalwert mit 58 kN/mm , während die Zwischenlage Zw 900 einen Unterschied von 73 % zwischen größter und kleinster (38 kN/mm) Federziffer aufwies. Durchschubversuche mit den beiden Zwischenlagen, die die Extremwerte lieferten, zeigten unter sämtlichen Vertikalkräften jedoch keinen nennenswerten Einfluss der Federziffer auf die festgestellten Durchschubkräfte, so dass die Messungen mit den verfügbaren Zwischenlagen durchgeführt wurden.

Bei den Versuchen erfolgte nicht nur eine Variation der Belastung des Stützpunktes sowie der Zwischenlagen, sondern es wurden alle Messungen mit dem korrekten Drehmoment

der Schwellenschrauben von 200 Nm als auch mit einem reduzierten Drehmoment von 150 Nm zur Simulation einer gelockerten Schienenbefestigung vorgenommen.

3.3.2.3 Versuchsauswertung

Da zum Zeitpunkt der Messungen keine endgültige normative Regelung vorlag, wurden die Versuche entsprechend den Vorgaben des Entwurfs prEN 13146-1 /48/ der europäischen Norm EN 13146-1 /47/ ausgewertet. Demnach muss für jede auf das Schienenstück ausgeübte Längskraft die größte während der Kraffteinwirkung erreichte Verschiebung (D_1) sowie die bleibende Verschiebung nach Wegnahme der Längskraft (D_2) ermittelt werden. Für die sich aus der Differenz dieser Werte ergebende elastische Verschiebung der Schiene (D_3) ist die zugehörige Kraft (F_1) zu bestimmen, wodurch man bei jedem Durchschubversuch insgesamt vier Kraftgrößen erhält. Im Gegensatz zur EN 13146-1 schreibt die prEN 13146-1 hierbei zusätzlich vor, dass bei einer elastischen Verschiebung von weniger als 0,5 mm die Längskraft anzusetzen ist, die eine Verschiebung von 0,5 mm hervorruft. Von den vier Kraftgrößen jedes Durchschubversuches bleibt die erste unberücksichtigt, während aus den restlichen drei Kräften der Mittelwert gebildet wird, welcher der Durchschubkraft der Schienenbefestigung in kN entspricht.

Die den Durchschubkräften zugeordneten Durchrutschgrenzen lassen sich analog als Mittelung der elastischen Verschiebungen der jeweiligen Durchschubversuche errechnen, wobei auch hier die erste Verschiebungsgröße nicht in die Berechnung eingeht. Falls die Ablesung der Kraft bei einer Verschiebung von 0,5 mm stattfindet, werden unabhängig vom aufgezeichneten Wert 0,5 mm für die elastische Verschiebung zugrunde gelegt.

Abb. 3.10 stellt das Kraft-Weg-Diagramm für eine Be- und Entlastung des Schienenstücks dar, in das die bei der Versuchsauswertung wesentlichen Größen eingetragen sind.

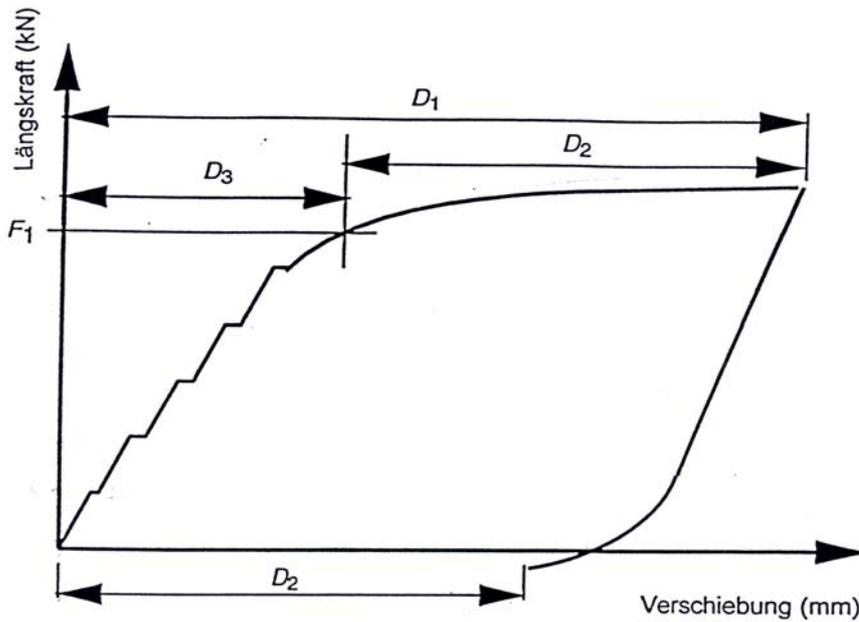


Abb. 3.10: Kraft-Weg-Diagramm für eine Be- und Entlastung des Schienenstücks /48/

3.3.2.4 Versuchsergebnisse

Der wirkliche Verlauf des Durchschubwiderstandes (Abb. 3.8) lässt sich ebenso wenig für einfache Berechnungsverfahren heranziehen wie der des Längsverschiebewiderstandes, so dass wiederum in guter Näherung auf einen bilinearen Verlauf analog Abb. 3.1 zurückgegriffen wird. Der Übergang vom linear ansteigenden Bereich in den konstanten Abschnitt ist ebenfalls über die Durchrutschgrenze und die zugehörige Durchrutschkraft vorgegeben. Die entsprechenden Versuchsergebnisse für ein Andrehmoment der Schwellenschrauben von 200 Nm fasst Tab. 3.3 zusammen, die Werte bei einem Andrehmoment von 150 Nm können Tab. 3.4 entnommen werden.

Stützpunkt- kraft [kN]	Zw 687a		Zw 700a		Zw 900	
	Durchschub- kraft [kN]	Durchrutsch- grenze [mm]	Durchschub- kraft [kN]	Durchrutsch- grenze [mm]	Durchschub- kraft [kN]	Durchrutsch- grenze [mm]
0	11,3	0,5	10,7	1,7	13,9	2,9
23	20,5	0,5	14,4	1,8	20,6	3,1
45	27,4	0,5	15,4	1,6	24,0	3,1
60			17,0	1,6	25,6	3,0
75	36,3	0,5				

Tab. 3.3: Versuchsergebnisse für ein Andrehmoment der Schwellenschrauben von 200 Nm

Stützpunkt- kraft [kN]	Zw 687a		Zw 700a		Zw 900	
	Durchschub- kraft [kN]	Durchrutsch- grenze [mm]	Durchschub- kraft [kN]	Durchrutsch- grenze [mm]	Durchschub- kraft [kN]	Durchrutsch- grenze [mm]
0	6,5	0,5	9,8	1,8	12,7	2,6
23	11,1	0,5	14,5	1,9	16,2	2,9
45	15,8	0,5	16,8	1,8	19,4	2,6
60			18,5	1,8	21,9	2,9
75	22,8	0,5				

Tab. 3.4: Versuchsergebnisse für ein Andrehmoment der Schwellenschrauben von 150 Nm

Es zeigt sich, dass bei allen Zwischenlagen sowie beiden Andrehmomenten der Schwellenschrauben die Durchschubkraft mit steigender Stützpunktkraft zunimmt. Bei der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a lagen die elastischen Verformungen fast ausschließlich unter 0,5 mm, weshalb als Durchrutschgrenze durchwegs ein Wert von 0,5 mm Verwendung findet und die für diese Verschiebung erforderliche Kraft entsprechend prEN 13146-1 als Durchschubkraft angesetzt wird. Hierbei ist hinzuzufügen, dass kaum ein Unterschied zur Durchschubkraft bei der aufgezeichneten elastischen Verschiebung besteht.

Bei den im nächsten Abschnitt folgenden Betrachtungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Stützpunktkräfte, die aus den in die Berechnungen einfließenden Verkehrslasten resultieren, exakt den für die Versuche festgelegten Vertikalkräften entsprechen. Daher wird eine Gleichung benötigt, mit der sich für jede Zwischenlage die Durchschubkraft in Abhängigkeit von der einwirkenden Stützpunktkraft bestimmen lässt. Hierfür empfiehlt sich die Funktion einer auf den jeweiligen Versuchsergebnissen basierenden Regressionskurve. Bei der Auswahl des Typs der Funktion ist zum einen zu beachten, dass diese die zugrunde liegenden Werte umso genauer wiedergibt, je näher ihr Bestimmtheitsmaß an eins herankommt /49/. Zum anderen sollte bei allen drei Zwischenlagen der gleiche Funktionstyp angewendet werden, um die Vergleichbarkeit der Regressionskurven und somit der Durchschubkräfte der einzelnen Zwischenlagen zu gewährleisten. Die genannten Kriterien erfüllt am besten ein Polynom zweiten Grades.

Die Abb. 3.11 bis 3.13 zeigen für die harte Kunststoffzwischenlage Zw 687a und die elastischen Zwischenlagen Zw 700a sowie Zw 900 sowohl die aus den Messungen gewonnenen und in Tab. 3.3 aufgelisteten Ergebnisse als auch die zugehörigen Regressionskurven einschließlich deren Gleichung und Bestimmtheitsmaß.

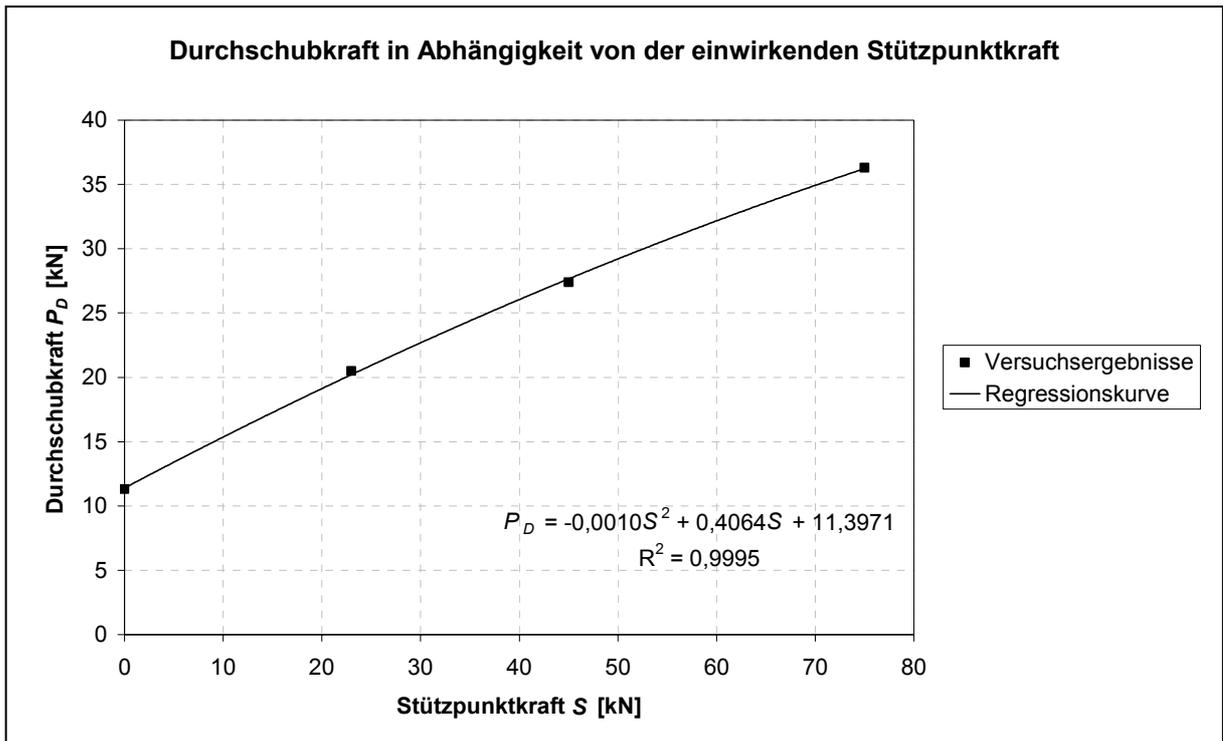


Abb. 3.11: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 687a bei einem Andrehmoment der Schwellenschrauben von 200 Nm

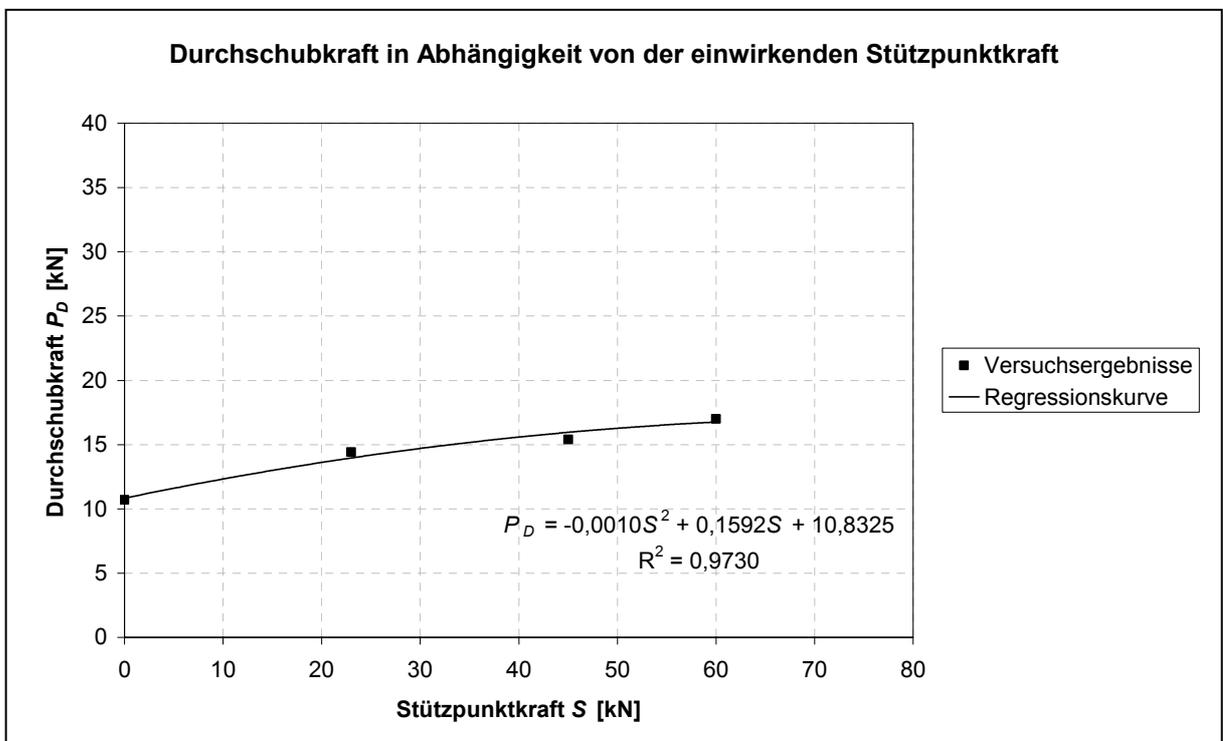


Abb. 3.12: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 700a bei einem Andrehmoment der Schwellenschrauben von 200 Nm

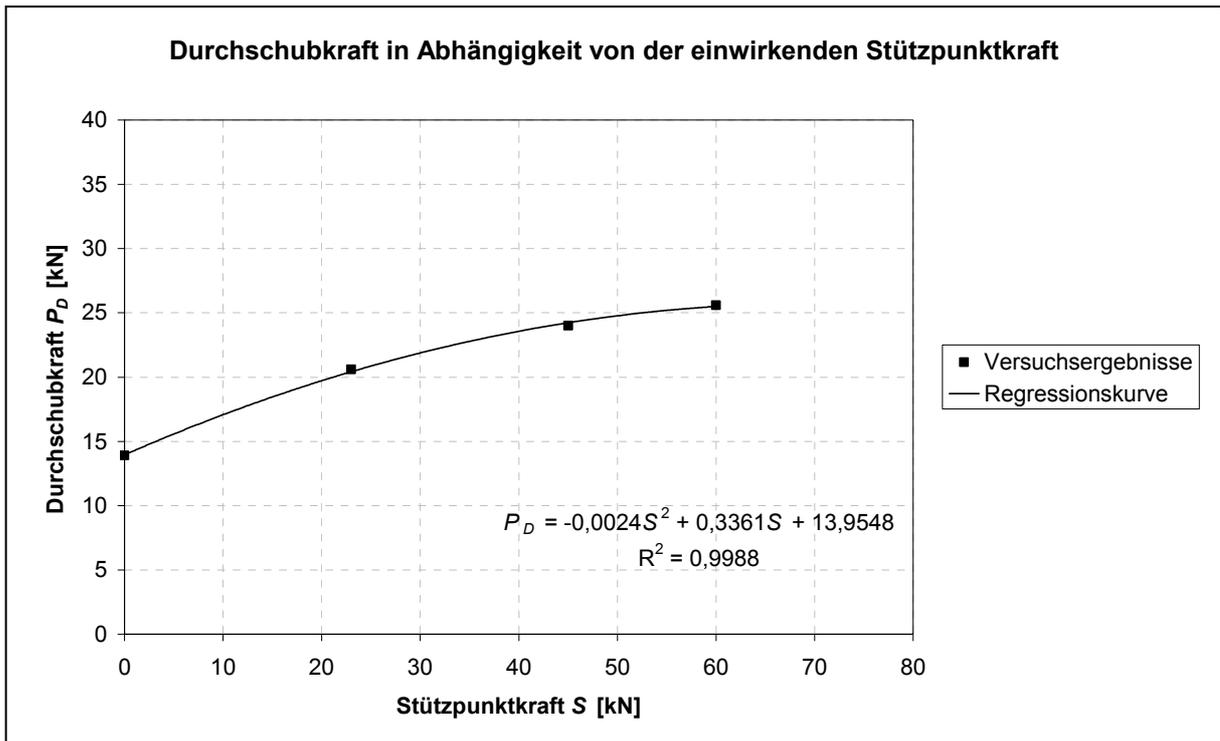


Abb. 3.13: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 900 bei einem Drehmoment der Schwellenschrauben von 200 Nm

Für die weiteren Ausführungen müssen die aus den Regressionskurven bzw. Funktionen ermittelten Durchschubkräfte noch in Widerstände, bezogen auf die Gleislänge, umgerechnet werden, wofür jedoch nur die Division durch den Schwellenabstand erforderlich ist:

$$p_D = \frac{P_D \cdot 1000}{a} \quad (3-20)$$

p_D = Durchschubwiderstand der Schiene in der Befestigung [N/mm Gleislänge]

P_D = Durchschubkraft [kN]

4 Rechenmodell zur Bestimmung der Längsbewegungen des Gleisrostes

Nachfolgend wird ein Modell entwickelt, mit dem sich die unter Verkehrslasten auftretenden Längsbewegungen des Gleises berechnen lassen. Dabei spielen einerseits die Verschiebungsgesetze eine Rolle und andererseits die Frage, wie sich Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand mit zunehmender Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung bis hin zum unbelasteten Bereich des Gleisrostes verhalten /10/, /50/.

Was die **Verschiebungsgesetze** betrifft, so sind drei Ansätze zu untersuchen /10/:

- **Konstanter Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand:** Die aus den Verkehrslasten resultierenden Bewegungen liegen deutlich über den Durchrutschgrenzen beider Widerstände, so dass der lineare Anstieg des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes bis zum Erreichen der Durchrutschgrenze für das Rechenmodell vernachlässigbar ist.
- **Linearer Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand:** Dieser Ansatz trifft zu, falls die Längsbewegungen des Gleises Werte unterhalb der Durchrutschgrenzen beider Widerstände annehmen. Dann lassen sich sämtliche Überlegungen auf den linearen Bereich des Verlaufs von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beschränken.
- **Bilinearer Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand:** Sind die durch überfahrende Züge verursachten Bewegungen nur geringfügig höher als die Durchrutschgrenzen beider Widerstände, so muss dem Modell der vollständige, bilineare Verlauf des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes zugrunde gelegt werden.

Hinsichtlich des Verhaltens von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand in Abhängigkeit von der **Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung** kann man zudem vier Möglichkeiten in Erwägung ziehen /50/:

- **Keine Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes:** Beide Widerstände behalten ungeachtet der Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung den Wert bei, den sie unmittelbar unter der aufgebrachten Verkehrslast haben. Dieser Fall ist zwar äußerst unwahrscheinlich, dennoch eignet er sich aufgrund seiner Einfachheit als Einstieg in die Entwicklung des Rechenmodells.
- **Sprunghafte Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes:** Hierbei wird bis zu einem bestimmten Abstand vom Lasteinleitungspunkt angenommen, dass die Widerstände des belasteten Gleisrostes wirken. In weiterer Entfernung von der be-

trachteten Verkehrslast kommen hingegen die Werte des unbelasteten Gleises zur Anwendung.

- **Lineare Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes:** Vom Ort der Lasteinwirkung aus nehmen beide Widerstände, ausgehend von der Größe direkt unter der Verkehrslast, linear bis auf den Wert des unbelasteten Gleisrostes ab, den sie in festgelegtem Abstand vom Lasteinleitungspunkt erreichen.
- **Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes:** Zwischen der Stelle, an der sich die Verkehrslast befindet und demzufolge die Widerstände des belasteten Gleises anzusetzen sind, sowie dem Bereich des Gleisrostes, der als unbelastet angesehen werden darf, folgt der Verlauf des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN. Diese Annahme dürfte die tatsächlichen Verhältnisse im Gleis im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Varianten am besten wiedergeben, da die vertikale Belastung des Gleisrostes die Größe beider Widerstände maßgeblich beeinflusst.

4.1 Wahl der Eingangsgrößen

Für die Entwicklung des letztlich zutreffenden Rechenmodells wird ein Gleis mit Schienen UIC 60 und Betonschwellen B 70 W im Abstand von 0,60 m zugrunde gelegt. Die darauf ausgeübte Verkehrslast soll aus einer 20t-Einzelachse bestehen, die aufgrund eines Beschleunigungsvorgangs nahe der Schlupfgrenze Längskräfte in die Schienen einleitet. Als Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes findet der Mittelwert der Widerstände Verwendung, die sich unter den beiden horizontalen Lastausbreitungswinkeln von 90° und 60° ergeben. Für das unbelastete Gleis werden 7 N/mm Gleislänge angesetzt. Die Durchschubwiderstände sowohl des belasteten als auch des unbelasteten Gleisrostes nach Erreichen der Durchrutschgrenze basieren auf den in den Abb. 3.11 bis 3.13 angegebenen Funktionen der Regressionskurven, wobei sich Anlage 4.1 entnehmen lässt, wie die einzelnen Widerstandswerte im Detail zustande kommen. Insgesamt erhält man daher folgende Eingangsgrößen, die für alle weiteren Überlegungen des Abschnittes 4 Gültigkeit haben /1/, /17/, /41/, /42/:

- Radlast:	Q	= 100 000 N
	μ	= 0,3 (Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene)
- Schiene UIC 60:	F_Q	= 7690 mm ²
	E	= 210 000 N/mm ²
	I	= 30 550 000 mm ⁴

- Bettungsmodul:	C	= 0,1 N/mm ³
- Schwelle B 70 W:	F	= 570 000 mm ²
	a	= 600 mm
- Längsverschiebewiderstand:	ρ_{bel}	= 19,7 N/mm Gleislänge
	ρ_{unbel}	= 7 N/mm Gleislänge
- Durchschubwiderstand:	$\rho_{D,bel}$ (Zw 687a)	= 40,7 N/mm Gleislänge
	$\rho_{D,unbel}$ (Zw 687a)	= 19,0 N/mm Gleislänge
	$\rho_{D,bel}$ (Zw 700a)	= 25,3 N/mm Gleislänge
	$\rho_{D,unbel}$ (Zw 700a)	= 18,1 N/mm Gleislänge
	$\rho_{D,bel}$ (Zw 900)	= 38,0 N/mm Gleislänge
	$\rho_{D,unbel}$ (Zw 900)	= 23,3 N/mm Gleislänge

Da die Entwicklung des Modells anhand der Belastung des Gleises durch eine Einzelachse erfolgt, ist bei einer späteren Ausweitung auf mehrere Achslasten die Richtigkeit des gewählten Ansatzes nochmals zu überprüfen.

4.2 Konstanter Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand

4.2.1 Grundlagen

Solange man davon ausgeht, dass Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand konstant, also von der Größe des Verschiebeweges unabhängig sind, muss nur der Einfluss der Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung auf beide Widerstände berücksichtigt werden. Für diesen Fall existiert eine in sich geschlossene Lösung, so dass sich die auftretenden Längsbewegungen auf einfachem Wege berechnen lassen.

Dabei wird die Schiene als unendlich langer, elastischer Stab betrachtet, der eine durchlaufende Bettung in Längsrichtung besitzt /10/. Da die Bettung sowohl den Längsverschiebe- als auch den Durchschubwiderstand repräsentiert, ist eine Zusammenfassung beider Widerstände zu einem einzigen Widerstand, im Weiteren als resultierender Widerstand bezeichnet, erforderlich. Auf einen Stützpunkt bezogen handelt es sich bei Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand rein physikalisch um in Serie geschaltete Federn, weshalb für den resultierenden Widerstand

$$\rho_{res} = \frac{\rho \cdot \rho_D}{\rho + \rho_D} \quad (4-1)$$

ρ_{res} = resultierender Widerstand [N/mm Gleislänge]

ρ = Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]

ρ_D = Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]

gilt /1/, /51/. Durch die Beschränkung der Verkehrslast auf eine Einzelachse erweist sich das vorliegende statische System als symmetrisch, was eine Ermittlung der Bewegungen des Gleisrostes am halben System mit freiem Schienenende in der Symmetrieachse ermöglicht. Die dort angreifende vertikale Belastung muss dennoch in der vollen Höhe angesetzt werden, um ihren Einfluss auf die Größe der wirkenden Widerstände nicht zu verfälschen, während sich die zu berücksichtigende Längskraft aus Gründen der Symmetrie halbiert. Darüber hinaus sind die weiteren in der Symmetrieachse sich ergebenden Randbedingungen zu beachten /10/. Abb. 4.1 veranschaulicht die eben beschriebenen Schritte zur Vereinfachung des statischen Systems.

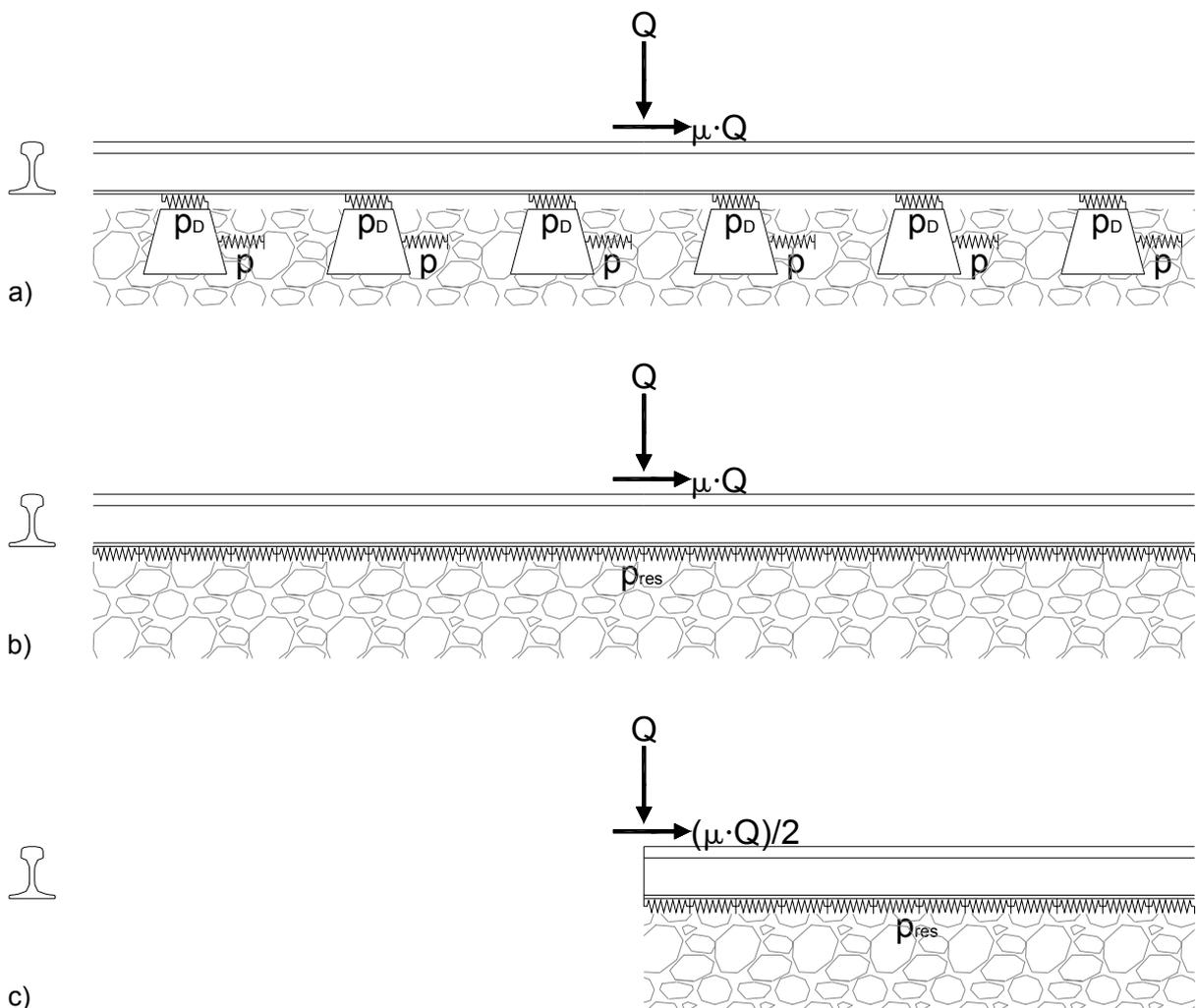


Abb. 4.1: Schritte zur Vereinfachung des statischen Systems

- Gleisrost mit Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand
- Schiene mit resultierendem Widerstand als durchlaufende Bettung in Längsrichtung
- halbes System mit freiem Schienenende

An diesem System lassen sich die Längsbewegungen der Schiene unter Verkehrslast wie folgt ermitteln /10/, /16/:

$$\Delta l_{res}(x_{\Delta l}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_{res,mittel}(x_{\Delta l})}{E \cdot F_Q} \cdot x_{\Delta l}^2 \quad (4-2)$$

Δl_{res} = aus Verkehrslast resultierende Längsverschiebung der Schiene [mm]

$p_{res,mittel}$ = mittlerer, resultierender Widerstand [N/mm Gleislänge]

$x_{\Delta l}$ = Koordinate in Schienenlängsrichtung von außen [mm]

E = Elastizitätsmodul der Schiene [N/mm²]

F_Q = Schienenquerschnittsfläche [mm²]

Die Koordinate $x_{\Delta l}$ läuft hierbei von außen auf das freie Schienenende zu und erreicht dort ihren Maximalwert, der als Atmungslänge des Gleisrostes bezeichnet wird (Abb. 4.2). Die Gleichung für deren Berechnung lautet:

$$l_A = \frac{\mu \cdot Q [N]}{2 \cdot p_{res,mittel}(l_A)} \quad (4-3)$$

l_A = Atmungslänge des Gleisrostes [mm]

μ = Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene [-]

Q = Radlast

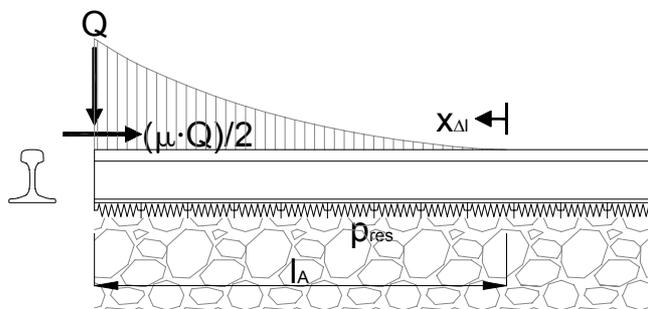


Abb. 4.2: Qualitativer Verlauf der Längsverschiebung über die Atmungslänge /16/

Um das Verhalten der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a sowie der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 unter Einwirkung einer Längskraft vergleichen zu können, muss die Verschiebung der Schiene nach Gleichung (4-2) in eine Bewegung der Schiene in der Befestigung und eine Bewegung der Schwellen im Schotter aufgeteilt werden, wobei die einzelnen Anteile aus dem jeweiligen Verhältnis von Längsverschiebe- zu Durchschubwiderstand folgen und sich zu

$$\Delta l_L(x_{\Delta l}) = \frac{\Delta l_{res}(x_{\Delta l})}{\rho_{D,mittel}(x_{\Delta l}) + \rho_{mittel}(x_{\Delta l})} \cdot \rho_{D,mittel}(x_{\Delta l}) \quad (4-4)$$

Δl_L = Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]

$\rho_{D,mittel}$ = mittlerer Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]

ρ_{mittel} = mittlerer Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]

und

$$\Delta l_D(x_{\Delta l}) = \frac{\Delta l_{res}(x_{\Delta l})}{\rho_{D,mittel}(x_{\Delta l}) + \rho_{mittel}(x_{\Delta l})} \cdot \rho_{mittel}(x_{\Delta l}) \quad (4-5)$$

Δl_D = Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]

errechnen.

Die Verwendung mittlerer Widerstände in den Gleichungen (4-2) bis (4-5) ist bedingt durch die Veränderlichkeit des Längsverschiebe- sowie Durchschubwiderstandes und damit ebenfalls des resultierenden Widerstandes in Schienenlängsrichtung.

4.2.2 Keine Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Aufgrund der Tatsache, dass beide Widerstände die Werte des belasteten Gleises unabhängig von der Entfernung vom Ort der Lasteinleitung beibehalten, bleibt auch der resultierende Widerstand konstant, wie in Abb. 4.3 am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900 dargestellt. Demzufolge kann mit Hilfe der Gleichung (4-3) die Atmungslänge des Gleises bestimmt werden, die man zur Ermittlung der maximalen Längsverschiebung der Schiene nach Gleichung (4-2) benötigt. Unter Verwendung der Gleichungen (4-4) und (4-5) ergeben sich schließlich die Bewegungsanteile, die den Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstand aktivieren. Tab. 4.1 fasst die Ergebnisse zusammen, deren Berechnung im Detail sowie die einzelnen Verschiebungsverläufe über die Atmungslänge enthält die Anlage 4.2.

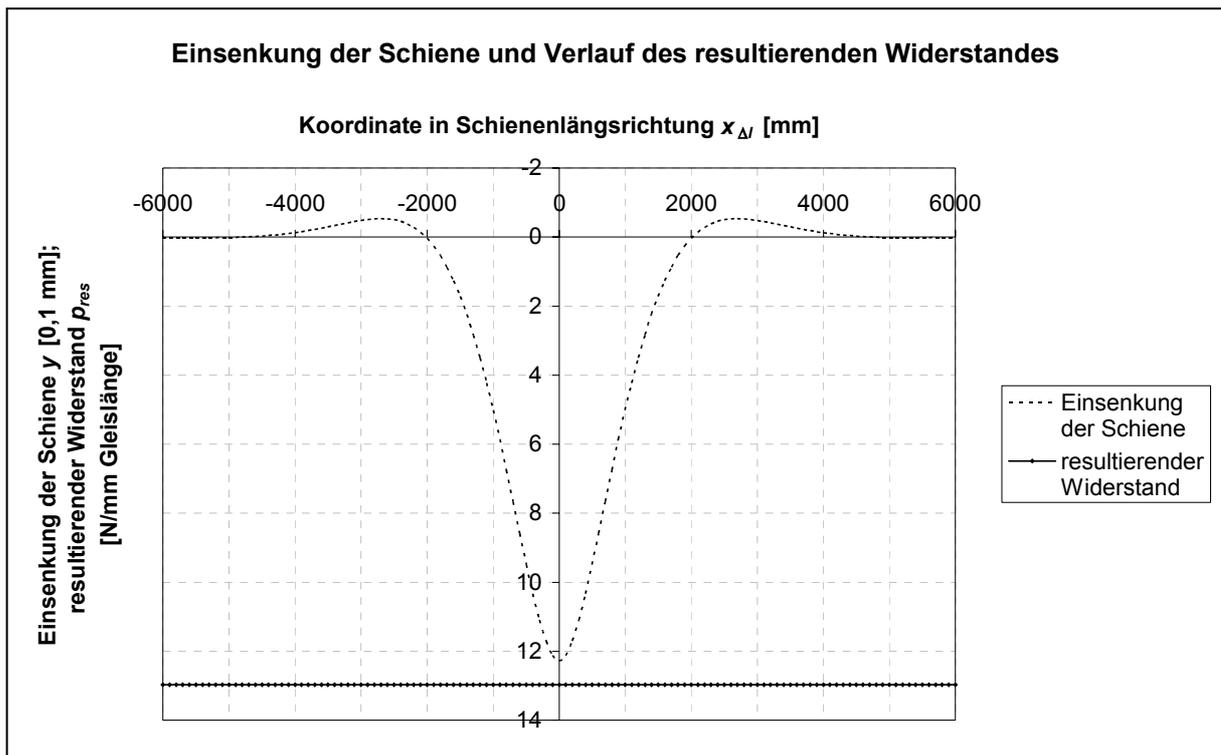


Abb. 4.3: Keine Änderung des resultierenden Widerstandes beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
Atmungslänge des Gleisrostes [mm]	1130	1354	1156
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm]	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
maximale Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
maximale Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$

Tab. 4.1: Längsverschiebungen ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

4.2.3 Sprunghafte Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Bei diesem Ansatz wechseln beide Widerstände und damit ebenso der resultierende Widerstand (Abb. 4.4) sprunghaft vom Wert des belasteten Gleises auf den des unbelasteten Gleisrostes. Als Stelle für den Sprung wird die Mitte zwischen dem Maximum und dem ersten Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN gewählt. Da der resultierende Widerstand nun nicht mehr konstant ist, lässt sich die Atmungslänge nicht direkt aus Gleichung (4.1) bestimmen.

chung (4-3) errechnen, sondern ergibt sich durch Integration des resultierenden Widerstandes über die Schienenlänge bis zum Erreichen der aufgebrachtten Längskraft. Außerdem benötigt man für die Bestimmung der Schienenlängsverschiebung den Mittelwert des resultierenden Widerstandes über die Strecke vom Beginn der Atmungslänge bis zum jeweils betrachteten Punkt /50/. Die einzelnen Bewegungsanteile liefern wiederum die Gleichungen (4-4) und (4-5). Die Ergebnisse sind in Tab. 4.2 aufgelistet, wie die Werte zustande kommen, kann Anlage 4.3 entnommen werden.

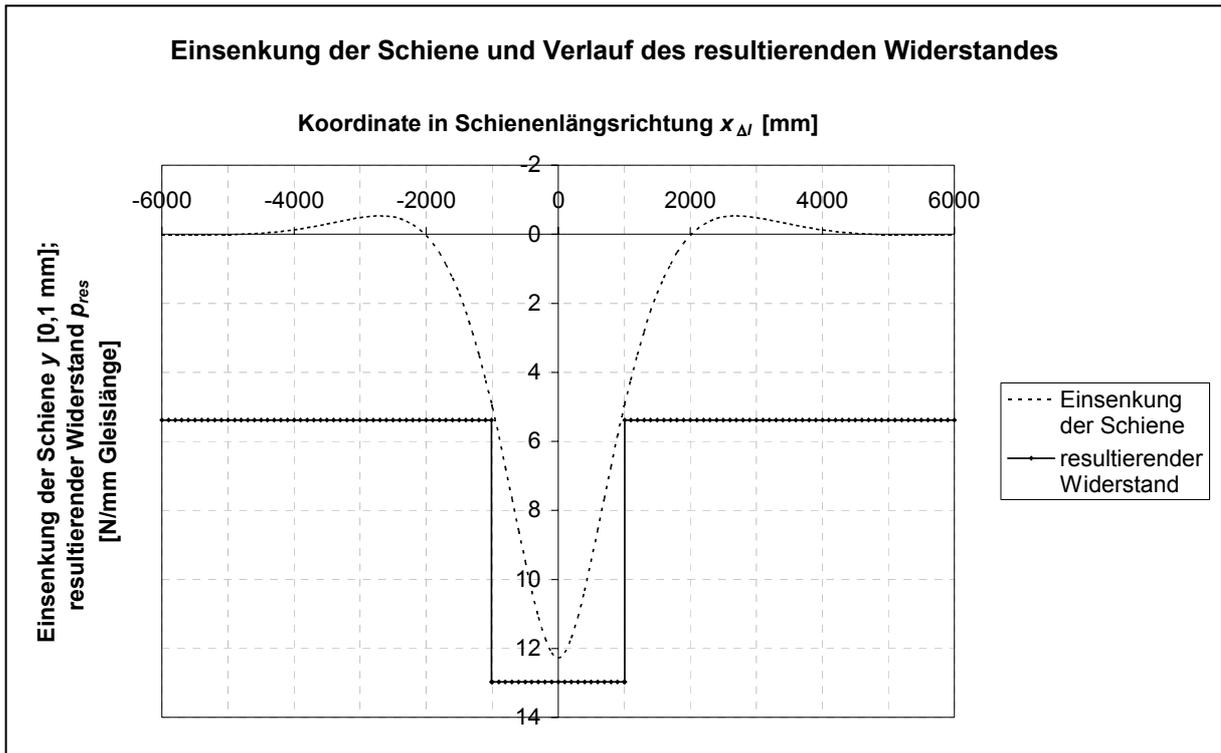


Abb. 4.4: Sprunghafte Änderung des resultierenden Widerstandes beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
Atmungslänge des Gleisrostes [mm]	1321	1765	1362
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm]	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$
maximale Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
maximale Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$

Tab. 4.2: Längsverschiebungen mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

4.2.4 Lineare Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

In diesem Fall sinken Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand linear von ihrer Größe unter der auf das Gleis einwirkenden Einzelachse auf den Wert des unbelasteten Gleisrostes ab, den sie am ersten Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN annehmen. Das gleiche Verhalten, das Abb. 4.5 verdeutlicht, zeigt demnach auch der resultierende Widerstand, wobei folgende Beziehung zugrunde liegt /50/:

$$x_{\Delta l} < l_A - l_{\Delta l} : \quad p_{res}(x_{\Delta l}) = p_{res,unbel} \quad (4-6)$$

$$x_{\Delta l} \geq l_A - l_{\Delta l} : \quad p_{res}(x_{\Delta l}) = p_{res,bel} + \frac{p_{res,unbel} - p_{res,bel}}{l_{\Delta l}} \cdot (l_A - x_{\Delta l}) \quad (4-7)$$

$p_{res,unbel}$ = resultierender Widerstand des unbelasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]

$p_{res,bel}$ = resultierender Widerstand des belasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]

$l_{\Delta l}$ = Länge der linearen Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes [mm]

l_A = Atmungslänge des Gleisrostes [mm]

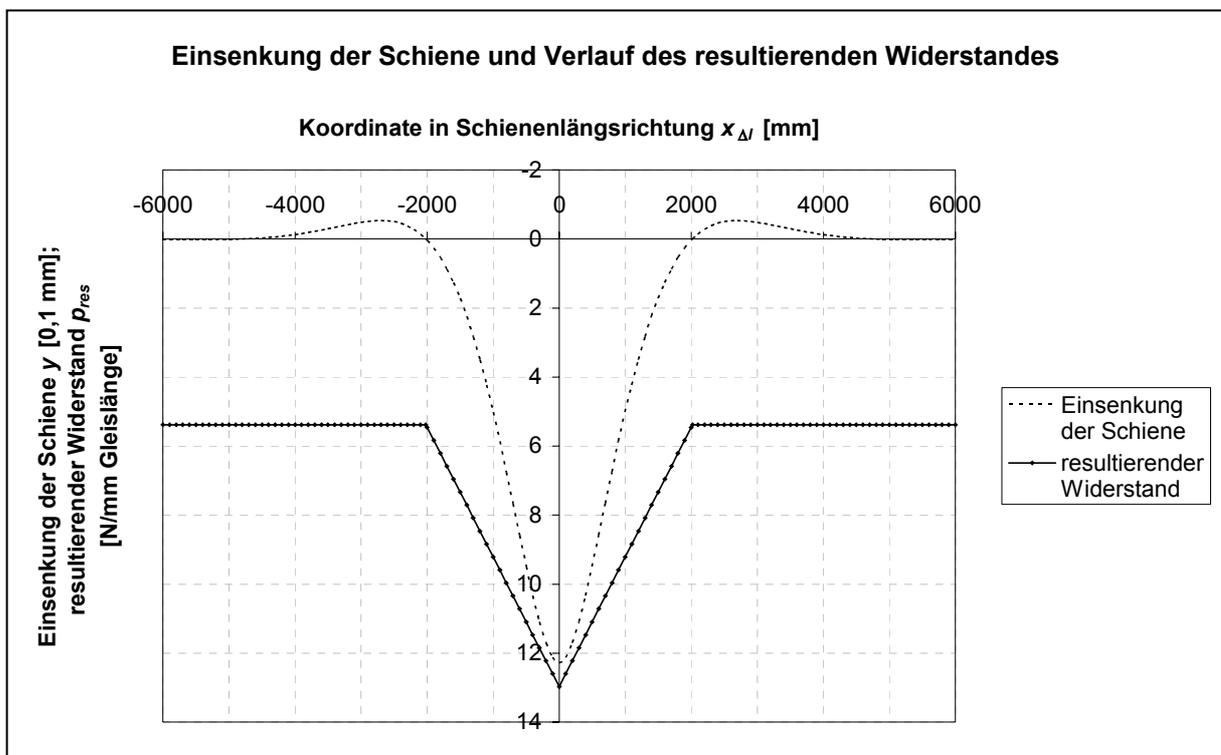


Abb. 4.5: Lineare Änderung des resultierenden Widerstandes beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900

Die Berechnung der Atmungslänge des Gleises, der Verschiebung der Schiene sowie der Bewegung der Schiene in der Befestigung und der Schwellen im Schotter erfolgt analog der Vorgehensweise bei der sprunghaften Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes /50/. Einen Überblick über die Ergebnisse gibt Tab. 4.3, die detaillierte Ermittlung findet sich in Anlage 4.4.

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
Atmungslänge des Gleisrostes [mm]	1450	1782	1468
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm]	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$
maximale Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
maximale Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$

Tab. 4.3: Längsverschiebungen mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

4.2.5 Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Hierbei entspricht der Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand in Schienenlängsrichtung dem der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN. Am Ort der maximalen Einsenkung besitzen beide Widerstände den Wert des belasteten Gleisrostes, in dem Bereich des Gleises, auf den die Verkehrslast keinen Einfluss mehr hat, liegen dagegen die Werte des unbelasteten Gleisrostes vor. Analog verhält sich der resultierende Widerstand (Abb. 4.6), für den daher

$$p_{res}(x_{\Delta l}) = p_{res,unbel} + (p_{res,bel} - p_{res,unbel}) \cdot \frac{\sin \frac{l_A - x_{\Delta l}}{L} + \cos \frac{l_A - x_{\Delta l}}{L}}{e^{\frac{l_A - x_{\Delta l}}{L}}} \quad (4-8)$$

l_A = Atmungslänge des Gleisrostes [mm]

L = elastische Länge der Schiene [mm]

gilt.

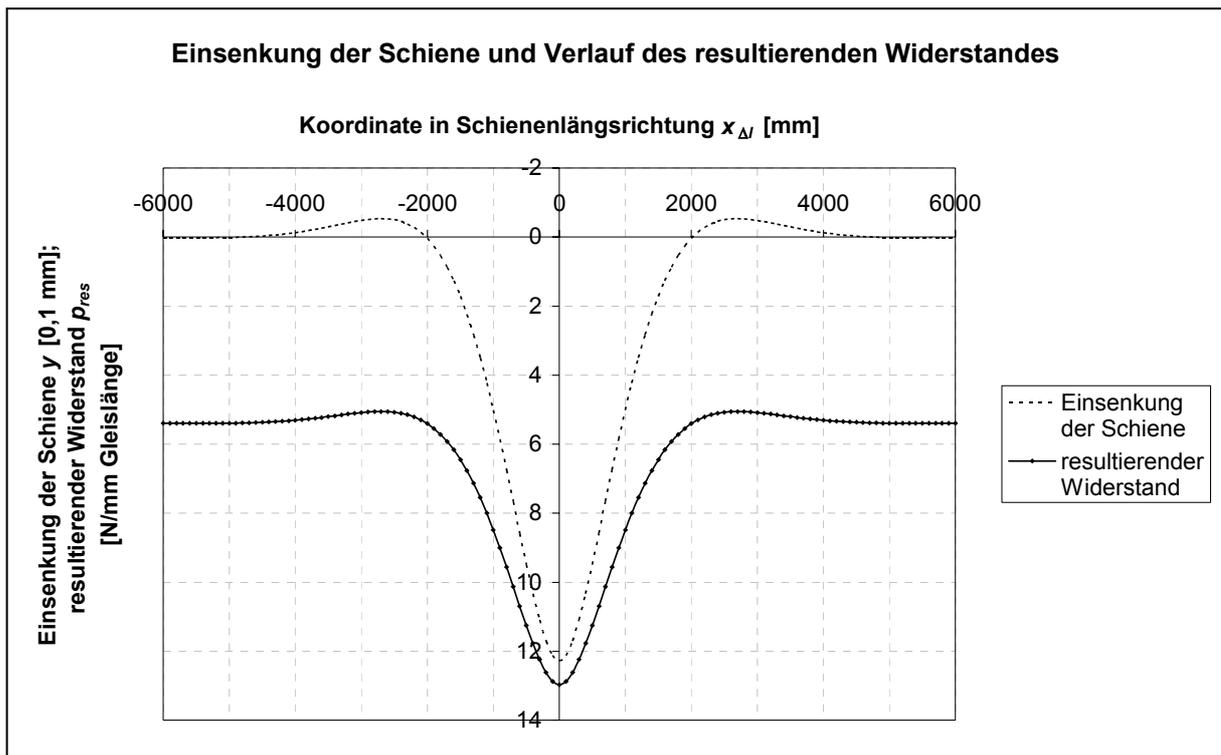


Abb. 4.6: Änderung des resultierenden Widerstandes entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900

Die Atmungslänge, die Längsverschiebung der Schiene sowie die Bewegungsanteile, die eine Aktivierung des Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstandes bewirken, errechnen sich wie in den Abschnitten 4.2.3 und 4.2.4 mit Hilfe mittlerer Widerstände /50/. Die Ergebnisse enthält Tab. 4.4, deren Bestimmung im Einzelnen lässt sich Anlage 4.5 entnehmen.

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
Atmungslänge des Gleisrostes [mm]	1519	1881	1534
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm]	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$
maximale Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$
maximale Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$

Tab. 4.4: Längsverschiebungen mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

4.2.6 Bewertung der Ergebnisse

Bei der Gegenüberstellung des Verhaltens der verschiedenen Zwischenlagen fällt unabhängig vom angenommenen Verlauf des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes in Schienenlängsrichtung auf, dass der Oberbau mit der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a nahezu die gleichen Schienenlängsverschiebungen sowie Bewegungen der Schiene in der Befestigung und der Schwellen im Schotter liefert wie der Oberbau mit der elastischen Zwischenlage Zw 900. Die Verwendung der elastischen Zwischenlage Zw 700a hat hingegen eine Zunahme der Verschiebungen zur Folge, die überwiegend aus größeren Bewegungen der Schiene in der Befestigung resultieren.

Ein Vergleich der vier untersuchten Ansätze zeigt einen Anstieg der ermittelten Längsverschiebungen der Schiene von der einfachsten Überlegung ohne Änderung der Widerstände hin zum Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes. Die Verschiebungszuwächse zwischen den einzelnen Rechenmodellen nehmen dabei stetig ab.

Ungeachtet des zugrunde liegenden Verhaltens der Widerstände in Abhängigkeit von der Entfernung von der aufgebrachten Belastung bewegen sich die Längsverschiebungen jedoch im Bereich weniger tausendstel Millimeter. Somit liegen sie deutlich unter der Durchrutschgrenze des Längsverschiebewiderstandes von 2 mm und den in Tab. 3.3 aufgeführten Durchrutschgrenzen der verschiedenen Zwischenlagen, so dass die Voraussetzungen für die Anwendung konstanter Verläufe der Widerstände bezüglich der Verschiebungsgesetze nicht gegeben sind. Deshalb wird nachfolgend eine lineare Zunahme des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes mit dem Verschiebeweg betrachtet.

4.3 Linearer Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand

4.3.1 Grundlagen

Da Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand nun sowohl von der Größe des Verschiebeweges als auch von der Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung abhängen, gibt es keine in sich geschlossene Lösung mehr, weshalb sich die Längsbewegungen des Gleises nicht auf einfachem Wege berechnen lassen /50/. Stattdessen kommt hierfür das Statikprogramm IQ 100 des Instituts für Baustatik der Technischen Universität Wien zur Berechnung ebener Stabwerke zum Einsatz.

Die Schiene wird dabei als elastischer Durchlaufträger wiedergegeben, der in Längsrichtung im Gegensatz zu den Überlegungen mit konstanten Verläufen der Widerstände bezüglich der

Verschiebungsgesetze keine durchlaufende Bettung, sondern einzelne, im Stützpunktabstand angeordnete Federn erhält. Deren Steifigkeit, analog zum Abschnitt 4.2 resultierende Federsteifigkeit genannt, muss wiederum den Längsverschiebewiderstand einerseits sowie den Durchschubwiderstand andererseits berücksichtigen und errechnet sich in mehreren Schritten.

Um die lineare Abhängigkeit der Widerstände von der Größe des Verschiebeweges zu erfassen, sind zunächst die in N/mm Gleislänge angegebenen Längsverschiebe- und Durchschubwiderstände durch die zugehörigen Durchrutschgrenzen zu dividieren, woraus sich die den jeweiligen Widerständen zugeordneten Elastizitätsbeiwerte ergeben /10/, /50/. Die Durchrutschgrenze beträgt für den Längsverschiebewiderstand, unabhängig von der aufgebrachten Radlast, 2 mm. Für den Durchschubwiderstand der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a liegen die Durchrutschgrenzen aufgrund der Versuchsauswertung nach den Vorgaben der prEN 13146-1 durchwegs bei 0,5 mm, wie die Tab. 3.3 und 3.4 zeigen. Den Tabellen ist ebenfalls zu entnehmen, dass zwischen den einzelnen Durchrutschgrenzen der elastischen Zwischenlage Zw 700a wie auch der elastischen Zwischenlage Zw 900 nur geringfügige Unterschiede auftreten, was jeweils die Anwendung eines von der einwirkenden Stützpunktkraft unabhängigen Mittelwertes ermöglicht.

Im zweiten Schritt ist aus den Einzelwiderständen der resultierende Widerstand in Anlehnung an Gleichung (4-1) zu bestimmen. Die resultierende Federsteifigkeit in N/mm Verschiebeweg schließlich ergibt sich durch Integration des resultierenden Widerstandes über die Gleislänge, auf die sich die Wirkung der betrachteten Feder erstreckt /10/. Dabei handelt es sich um einen Bereich mit einer dem Stützpunktabstand entsprechenden Länge, der zur Hälfte vor und zur Hälfte nach dem betrachteten Stützpunkt liegt (Abb. 4.7). Somit berechnet sich die resultierende Steifigkeit einer Feder zu

$$c_{res}(x_c) = \int_{x_c - \frac{a}{2}}^{x_c + \frac{a}{2}} c_{res,\Delta}(x'_{\Delta}) d(x'_{\Delta}) \quad (4-9)$$

c_{res} = resultierende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]

x_c = Koordinate der betrachteten Feder in Schienenlängsrichtung [mm]

a = Stützpunktabstand [mm]

$c_{res,\Delta}$ = dem resultierenden Widerstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm²]

$$c_{res,\Delta}(x'_{\Delta}) = \frac{c_{\Delta}(x'_{\Delta}) \cdot c_{D,\Delta}(x'_{\Delta})}{c_{\Delta}(x'_{\Delta}) + c_{D,\Delta}(x'_{\Delta})} \quad (4-10)$$

x'_{Δ} = Koordinate in Schienenlängsrichtung [mm]

$c_{\Delta l}$ = dem Längsverschiebewiderstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert
[N/mm²]

$$c_{\Delta l}(x'_{\Delta l}) = \frac{\rho(x'_{\Delta l})}{\Delta l'_L} \quad (4-11)$$

$\Delta l'_L$ = dem Längsverschiebewiderstand zugeordnete Durchrutschgrenze [mm]

$c_{D,\Delta l}$ = dem Durchschubwiderstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert
[N/mm²]

$$c_{D,\Delta l}(x'_{\Delta l}) = \frac{\rho_D(x'_{\Delta l})}{\Delta l'_D} \quad (4-12)$$

$\Delta l'_D$ = dem Durchschubwiderstand zugeordnete Durchrutschgrenze
[mm]

Für die Ermittlung der resultierenden Federsteifigkeiten des unbelasteten bzw. des belasteten Gleisrostes vereinfachen sich die Gleichungen (4-9) bis (4-12) auf

$$c_{res,unbel} = \frac{\frac{\rho_{unbel}}{\Delta l'_L} \cdot \frac{\rho_{D,unbel}}{\Delta l'_D}}{\frac{\rho_{unbel}}{\Delta l'_L} + \frac{\rho_{D,unbel}}{\Delta l'_D}} \cdot a \quad (4-13)$$

$c_{res,unbel}$ = resultierende Federsteifigkeit des unbelasteten Gleisrostes
[N/mm Verschiebeweg]

ρ_{unbel} = Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes
[N/mm Gleislänge]

$\rho_{D,unbel}$ = Durchschubwiderstand des unbelasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]

bzw.

$$c_{res,bel} = \frac{\frac{\rho_{bel}}{\Delta l'_L} \cdot \frac{\rho_{D,bel}}{\Delta l'_D}}{\frac{\rho_{bel}}{\Delta l'_L} + \frac{\rho_{D,bel}}{\Delta l'_D}} \cdot a \quad (4-14)$$

$c_{res,bel}$ = resultierende Federsteifigkeit des belasteten Gleisrostes
[N/mm Verschiebeweg]

ρ_{bel} = Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]

$\rho_{D,bel}$ = Durchschubwiderstand des belasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]

Bezüglich der Symmetrieeigenschaften des statischen Systems ergeben sich gegenüber den Betrachtungen mit konstantem Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand keine Änderungen. Deshalb erfolgt die Bestimmung der Längsverschiebungen weiterhin am halben System mit freiem Schienenende in der Symmetrieachse, auf das die vertikale Belastung in ihrer vollen Höhe, die Längskraft jedoch nur zur Hälfte einwirkt /10/. Die Symmetrieachse des Systems wird hierbei in die Mitte zwischen zwei Stützpunkten gelegt, von wo aus auch die Koordinate x'_Δ läuft.

Die Berechnung der Längsbewegungen des Gleises mit Hilfe eines Statikprogramms setzt das Vorliegen eines kinematisch unverschieblichen Systems voraus, was auf einen Durchlaufträger mit Federn in Längsrichtung nicht zutrifft. Da der durch das Programm generierte Durchlaufträger allerdings im Vergleich zu den Rechengrundlagen mit konstanten Verläufen der Widerstände bezüglich der Verschiebungsgesetze eine endliche Länge und damit ein zweites Ende besitzt, wird an diesem ein festes Auflager angeordnet. Um eine Beeinflussung der auftretenden Längsverschiebungen hierdurch auszuschließen, muss die Länge des Durchlaufträgers so groß gewählt werden, dass die beiden Enden, also der Ort der Lasteinleitung und das feste Auflager, ausreichend weit voneinander entfernt sind /10/. Maßgebendes Kriterium hierfür ist die Verschiebung der Schiene an der letzten Feder vor dem festen Auflager, die nur noch eine rein rechnerische Größe und keinen Wert von praktischer Bedeutung mehr erreichen darf. Außerdem benötigt man an den einzelnen Stützpunkten zusätzlich zu den Federn in Längsrichtung horizontal verschiebliche Auflager, ohne die die Ermittlung der Längsbewegungen des Gleisrostes fehlschlägt. Diese haben jedoch keine Auswirkungen auf die errechneten Längsverschiebungen, weil sie lediglich Bewegungen in vertikaler, nicht aber in horizontaler Richtung unterbinden.

Die zur Herleitung des statischen Systems notwendigen Schritte sind in Abb. 4.7 zusammenfassend dargestellt.

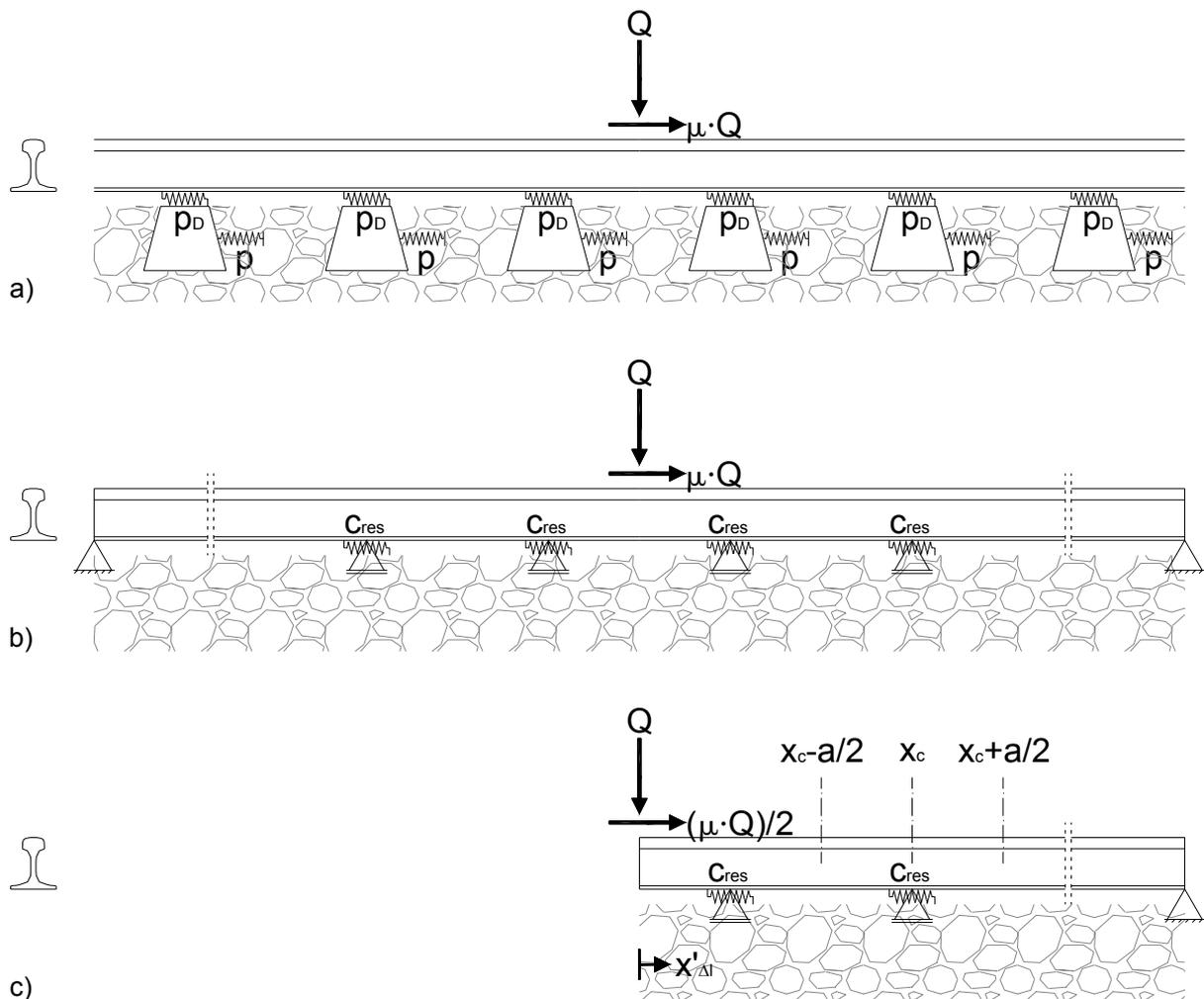


Abb. 4.7: Schritte zur Herleitung des statischen Systems

- a) Gleisrost mit Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand
- b) Schiene mit festen Auflagern an den Enden und horizontal verschieblichen Auflagern sowie Federn in Längsrichtung mit resultierender Steifigkeit an den Stützpunkten
- c) halbes System mit freiem Schienenende

Ein Vergleich der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a mit den elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 hinsichtlich ihres Verhaltens unter Längskrafteinwirkung erfordert eine Aufspaltung der vom Programm IQ 100 ausgegebenen Längsverschiebung der Schiene in eine Bewegung der Schiene in der Befestigung und eine Bewegung der Schwellen im Schotter. Diese basiert wie schon bei den Überlegungen mit konstantem Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand auf dem jeweiligen Verhältnis der Widerstände. Analog zu den Gleichungen (4-4) und (4-5) gelten hierfür folgende Beziehungen:

$$\Delta l_L(x_c) = \frac{\Delta l_{res}(x_c)}{c_D(x_c) + c(x_c)} \cdot c_D(x_c) \quad (4-15)$$

c_D = dem Durchschubwiderstand entsprechende Federsteifigkeit
[N/mm Verschiebeweg]

$$c_D(x_c) = \int_{x_c - \frac{a}{2}}^{x_c + \frac{a}{2}} c_{D,\Delta l}(x'_{\Delta l}) dx'_{\Delta l} \quad (4-16)$$

c = dem Längsverschiebewiderstand entsprechende Federsteifigkeit
[N/mm Verschiebeweg]

$$c(x_c) = \int_{x_c - \frac{a}{2}}^{x_c + \frac{a}{2}} c_{\Delta l}(x'_{\Delta l}) dx'_{\Delta l} \quad (4-17)$$

$$\Delta l_D(x_c) = \frac{\Delta l_{res}(x_c)}{c_D(x_c) + c(x_c)} \cdot c(x_c) \quad (4-18)$$

Die Gleichungen (4-16) und (4-17) lauten für den Fall des unbelasteten bzw. des belasteten Gleises

$$c_{D,unbel} = \frac{p_{D,unbel}}{\Delta l_{D'}} \cdot a \quad (4-19)$$

$c_{D,unbel}$ = dem Durchschubwiderstand des unbelasteten Gleisrostes entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]

bzw.

$$c_{D,bel} = \frac{p_{D,bel}}{\Delta l_{D'}} \cdot a \quad (4-20)$$

$c_{D,bel}$ = dem Durchschubwiderstand des belasteten Gleisrostes entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]

und

$$c_{unbel} = \frac{p_{unbel}}{\Delta l_{L'}} \cdot a \quad (4-21)$$

c_{unbel} = dem Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]

bzw.

$$c_{bel} = \frac{p_{bel}}{\Delta l_L'} \cdot a \quad (4-22)$$

c_{bel} = dem Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]

4.3.2 Keine Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Dabei nehmen wie im Abschnitt 4.2.2 sowohl Längsverschiebe- als auch Durchschubwiderstand unabhängig davon, wie groß die Entfernung von der aufgebrachten Radlast ist, die Werte des belasteten Gleises an. Dies gilt in der Folge ebenso für die resultierende Steifigkeit der einzelnen Federn, die sich aufgrund dessen direkt aus Gleichung (4-14) ergibt. Die vom Statikprogramm IQ 100 errechnete Schienenlängsverschiebung kann unter Verwendung der Gleichungen (4-15) und (4-18) in die Bewegung der Schiene in der Befestigung und die Bewegung der Schwellen im Schotter aufgeteilt werden. In Tab. 4.5 sind die entsprechenden Ergebnisse zusammengestellt, die resultierenden Federsteifigkeiten, die Ermittlung der beiden Bewegungsanteile sowie die verschiedenen Verschiebungsverläufe finden sich, getrennt nach Zwischenlagen, in Anlage 4.6.

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm]	0,12	0,15	0,16
zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]	0,11	0,09	0,09
zugehörige Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]	0,01	0,06	0,07

Tab. 4.5: Längsverschiebungen ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Da sich die Widerstände gemäß der getroffenen Annahme nicht mit der Entfernung vom Ort der Lasteinleitung ändern, besteht faktisch nur eine Abhängigkeit von der Größe des Verschiebeweges. Deshalb lässt sich in diesem speziellen Fall die Verschiebung der Schiene, entgegen der Aussage zu Beginn des Abschnittes 4.3, ebenfalls auf einfachem Wege bestimmen, was nachfolgend für eine Plausibilitätskontrolle der durch das Programm IQ 100 berechneten Werte genutzt werden soll. Die hierfür benötigten Zusammenhänge lauten /10/

$$\Delta l_{res}(x'_{\Delta}) = \frac{\mu \cdot Q}{2 \cdot E \cdot F_Q \cdot k_{\Delta}} \cdot e^{-k_{\Delta} \cdot x'_{\Delta}} \quad (4-23)$$

k_{Δ} = Konstante [1/mm]

$$k_{\Delta} = \sqrt{\frac{c_{res,\Delta}}{E \cdot F_Q}} \quad (4-24)$$

Die vom Statikprogramm IQ 100 ausgegebenen, maximalen Längsverschiebungen sind den mit Hilfe der Gleichungen (4-23) und (4-24) errechneten Werten in Tab. 4.6 gegenübergestellt, Anlage 4.7 enthält deren Ermittlung im Detail. Im Hinblick auf die gute Übereinstimmung der Verschiebungswerte kommt bei den weiteren Betrachtungen sowohl das gewählte Programm als auch das bereits beschriebene statische System zum Einsatz.

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm], vom Statikprogramm IQ 100 ausgegeben	0,12	0,15	0,16
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm], mit Hilfe der Gleichungen (4-23) und (4-24) errechnet	0,13	0,15	0,16

Tab. 4.6: Gegenüberstellung der vom Statikprogramm IQ 100 ausgegebenen, maximalen Längsverschiebungen und der mit Hilfe der Gleichungen (4-23) und (4-24) errechneten Werte

4.3.3 Sprunghafte Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Analog zum Abschnitt 4.2.3 ändern Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand sprunghaft ihren Wert von dem des belasteten Gleisrostes auf den des unbelasteten Gleises. Der Sprung erfolgt wiederum in der Mitte zwischen dem Maximum und dem ersten Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN. Genauso verhalten sich die resultierenden Federsteifigkeiten in Schienenlängsrichtung, auf deren Basis das Programm IQ 100 die Längsverschiebung der Schiene berechnet. Hieraus ergeben sich die Bewegungsanteile, die die beiden Widerstände aktivieren. Die Ergebnisse lassen sich Tab. 4.7 entnehmen, Details beinhaltet Anlage 4.8.

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm]	0,19	0,22	0,23
zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]	0,17	0,13	0,13
zugehörige Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]	0,02	0,09	0,10

Tab. 4.7: Längsverschiebungen mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Wie Abb. 4.8 deutlich erkennen lässt, steigt bei Verwendung der elastischen Zwischenlage Zw 900 die Bewegung der Schwellen im Schotter mit zunehmender Entfernung von der vertikalen Belastung zunächst an, während die Bewegung der Schiene in der Befestigung im gleichen Bereich überproportional abnimmt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass beim unbelasteten Gleisrost die dem Durchschubwiderstand entsprechende Federsteifigkeit mit 4660 N/mm Verschiebeweg etwa 2,2-mal so hoch ist wie die dem Längsverschiebewiderstand entsprechende Federsteifigkeit mit 2100 N/mm Verschiebeweg. Beim belasteten Gleis hingegen beträgt der Unterschied zwischen den Federsteifigkeiten lediglich das rund 1,3-fache, gemäß einer dem Durchschubwiderstand entsprechenden Federsteifigkeit von 7560 N/mm Verschiebeweg und einer dem Längsverschiebewiderstand entsprechenden Federsteifigkeit von 5910 N/mm Verschiebeweg (Abb. 4.9). Somit fällt der Anteil an der Schienenlängsverschiebung nach Gleichung (4-15), der den Längsverschiebewiderstand aktiviert, für einen unbelasteten Gleisrost größer aus als für ein belastetes Gleis. Der von der Schienenbefestigung aufzunehmende Bewegungsanteil nach Gleichung (4-18) verhält sich demzufolge umgekehrt. Aus diesem Grund kommt es beim Übergang vom belasteten Gleisrost auf das unbelastete Gleis zu dem erläuterten Phänomen, wobei die Bewegung der Schwellen im Schotter an der Stelle ihr Maximum erreicht, an der die Federsteifigkeiten gerade wieder die Werte des unbelasteten Gleisrostes annehmen.

Die in den Anlagen enthaltenen Verschiebungsverläufe belegen, dass ein Oberbau mit elastischer Zwischenlage Zw 700a oder harter Kunststoffzwischenlage Zw 687a prinzipiell das gleiche Verhalten zeigt, allerdings ist dieses im Falle der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a wesentlich weniger stark ausgeprägt. Deshalb nimmt der Bewegungsanteil, der eine Aktivierung des Längsverschiebewiderstandes bewirkt, beim Wechsel vom belasteten auf den unbelasteten Zustand des Gleises auch nur relativ zur Gesamtverschiebung und nicht absolut zu.

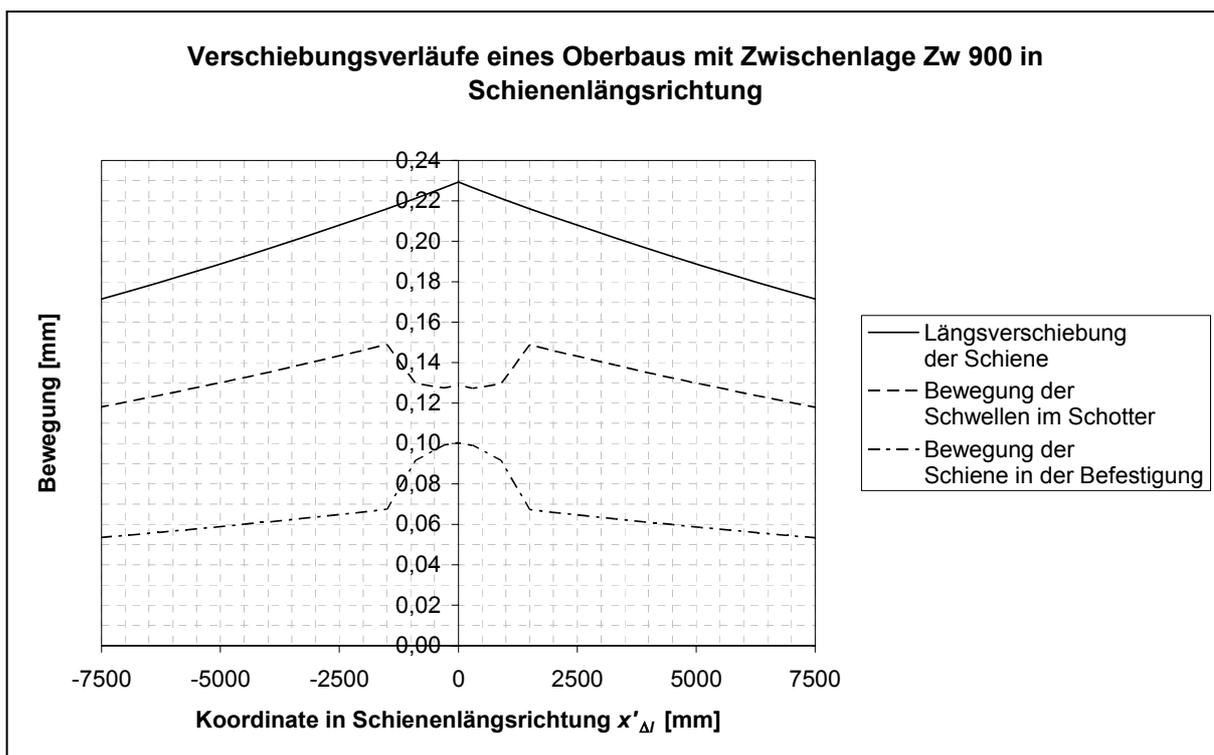


Abb. 4.8: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

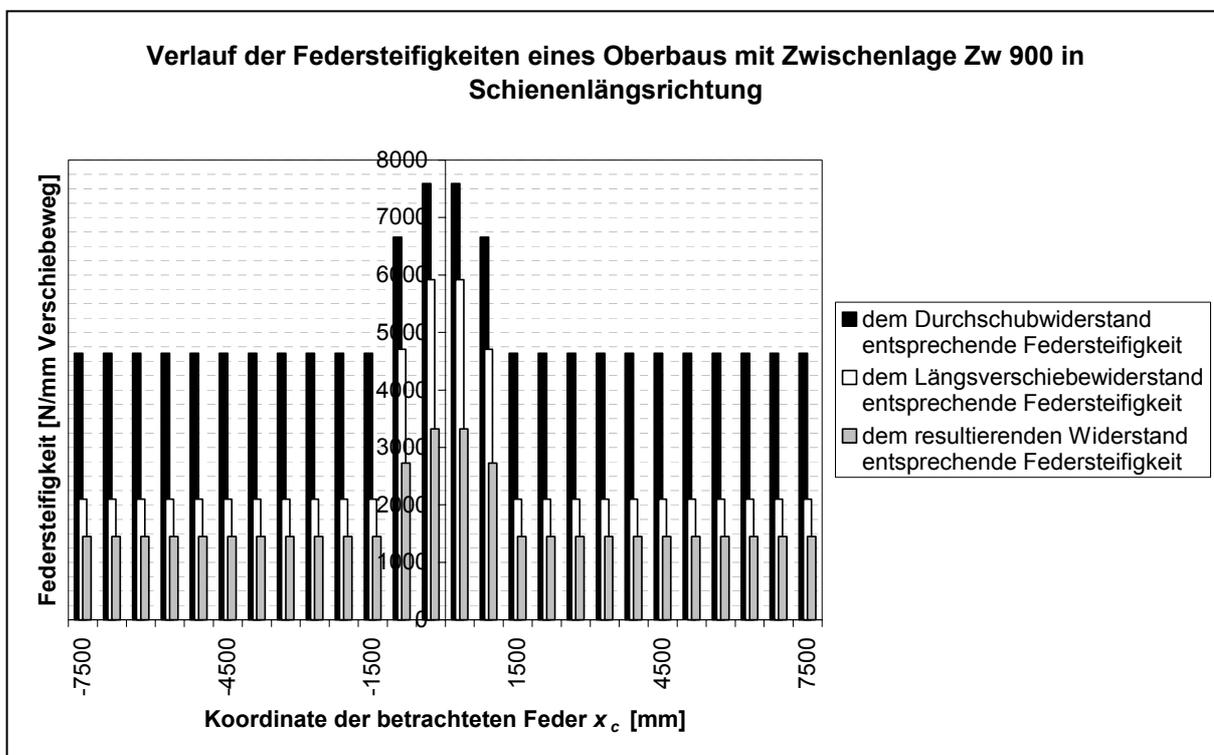


Abb. 4.9: Federsteifigkeiten mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

4.3.4 Lineare Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Bei diesem Ansatz gehen beide Widerstände von ihrer Größe unmittelbar am Ort der Lasteinwirkung linear auf den Wert des unbelasteten Gleises zurück, den sie ab dem ersten Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN aufweisen. Gleiches gilt für die resultierenden Federsteifigkeiten, deren Berechnung anhand Gleichung (4-9) nachstehende Beziehungen zugrunde zu legen sind:

$$x'_{\Delta} \leq l_{\Delta} : \quad c_{res,\Delta}(x'_{\Delta}) = c_{res,\Delta,bel} + \frac{c_{res,\Delta,unbel} - c_{res,\Delta,bel}}{l_{\Delta}} \cdot x'_{\Delta} \quad (4-25)$$

$$x'_{\Delta} > l_{\Delta} : \quad c_{res,\Delta}(x'_{\Delta}) = c_{res,\Delta,unbel} \quad (4-26)$$

$c_{res,\Delta,bel}$ = dem resultierenden Widerstand des belasteten Gleisrostes zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm²]

$c_{res,\Delta,unbel}$ = dem resultierenden Widerstand des unbelasteten Gleisrostes zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm²]

Ebenfalls unter Beachtung der Gleichungen (4-25) und (4-26) kann aus der vom Statikprogramm IQ 100 errechneten Verschiebung der Schiene die Bewegung der Schiene in der Befestigung und der Schwellen im Schotter ermittelt werden. Die entsprechenden Ergebnisse listet Tab. 4.8 auf, genauere Angaben hierzu stellt Anlage 4.9 bereit. Hinsichtlich der Unstetigkeiten in den Verschiebungsverläufen wird auf die Ausführungen im vorigen Abschnitt verwiesen.

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm]	0,19	0,22	0,23
zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]	0,17	0,13	0,13
zugehörige Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]	0,02	0,09	0,10

Tab. 4.8: Längsverschiebungen mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

4.3.5 Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Im letzten zu untersuchenden Fall folgen Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand in Schienenlängsrichtung dem Verlauf der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN. Dabei liegen am Ort der maximalen Einsenkung die Werte des belasteten Gleisrostes vor, während sich die Widerstände mit zunehmender Entfernung von der einwirkenden Radlast ihrer Größe im unbelasteten Gleis annähern. Da sich der Bereich, in dem eine Längsverschiebung der Schiene auftritt, unter Voraussetzung eines linearen Verlaufs von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes im Gegensatz zu den Betrachtungen mit konstanten Verläufen der Widerstände bezüglich der Verschiebungsgesetze nicht auf eine bestimmte Länge, die Atmungslänge, beschränkt, sondern streng genommen bis ins Unendliche reicht, werden die resultierenden Steifigkeiten aller Federn des statischen Systems benötigt. Diese nehmen jedoch wie auch Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand aufgrund der Eigenschaften der Biegelinienfunktion erst im Unendlichen tatsächlich den Wert des unbelasteten Gleisrostes an. Um den Aufwand bei der Berechnung der resultierenden Federsteifigkeiten dennoch zu begrenzen, wird unter Beibehaltung einer ausreichenden Genauigkeit ab dem zweiten Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN für beide Widerstände die Größe im unbelasteten Gleis angesetzt. Infolge dessen lauten die Zusammenhänge, auf denen die resultierenden Federsteifigkeiten basieren

$$x'_{\Delta} \leq x_2 : c_{res,\Delta}(x'_{\Delta}) = c_{res,\Delta,unbel} + (c_{res,\Delta,bel} - c_{res,\Delta,unbel}) \cdot \frac{\sin \frac{x'_{\Delta}}{L} + \cos \frac{x'_{\Delta}}{L}}{e^{\frac{x'_{\Delta}}{L}}} \quad (4-27)$$

$$x'_{\Delta} > x_2 : c_{res,\Delta}(x'_{\Delta}) = c_{res,\Delta,unbel} \quad (4-28)$$

x_2 = Koordinate des zweiten Nulldurchgangs der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN [mm]

Die vom Programm IQ 100 ermittelte Schienenlängsverschiebung lässt sich wiederum unter Verwendung der Gleichungen (4-15) und (4-18) in die Anteile zerlegen, die den Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstand aktivieren. Tab. 4.9 gibt einen Überblick über die Ergebnisse, Details dazu enthält Anlage 4.10. Was die Besonderheiten in den Verschiebungsverläufen anbelangt, so haben die diesbezüglichen Erläuterungen im Abschnitt 4.3.3 weiterhin Gültigkeit.

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
maximale Längsverschiebung der Schiene [mm]	0,19	0,22	0,23
zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]	0,17	0,13	0,13
zugehörige Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]	0,02	0,09	0,10

Tab. 4.9: Längsverschiebungen mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

4.3.6 Bewertung der Ergebnisse

Unter Annahme linearer Verläufe der Widerstände bezüglich der Verschiebungsgesetze ergibt sich bei jedem gewählten Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand in Schienenlängsrichtung in etwa die gleiche maximale Verschiebung der Schiene für die unterschiedlichen Zwischenlagen. Der Unterschied zwischen den einzelnen Zwischenlagen besteht darin, dass ein Oberbau mit harter Kunststoffzwischenlage Zw 687a deutlich geringere Bewegungen der Schiene in der Befestigung aufweist als ein Oberbau mit elastischen Zwischenlagen Zw 700a oder Zw 900, wohingegen die Bewegungen der Schwellen im Schotter größer sind.

Beim Vergleich der verschiedenen Widerstandsverläufe in Schienenlängsrichtung zeigt sich eine Zunahme der Längsverschiebung der Schiene vom Modell ohne Änderung zum Modell mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes. Eine weitere Verfeinerung bewirkt hingegen keine Veränderung der maximalen Schienenlängsverschiebung sowie der zugehörigen Bewegungsanteile mehr.

Die errechneten Bewegungen der Schiene in der Befestigung und der Schwellen im Schotter liegen allesamt unter den jeweils maßgebenden Durchrutschgrenzen von 2 mm beim Längsverschiebewiderstand sowie von 0,5 mm, 1,7 mm bzw. 3,0 mm bei den unterschiedlichen Durchschubwiderständen. Demnach erweist sich der Ansatz eines linearen Anstiegs der Widerstände mit dem Verschiebeweg als richtig, weshalb eine Untersuchung des bilinearen Verlaufs von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entfallen kann.

Gemäß den obigen Ausführungen genügt vom Standpunkt der Genauigkeit her darüber hinaus ein Rechenmodell mit sprunghafter Änderung der Widerstände in Schienenlängsrichtung. Dessen ungeachtet wird die Überlegung einer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes weiter verfolgt. Obwohl es

sich hierbei prinzipiell um die aufwendigste Näherungsmöglichkeit handelt, lässt sich damit die vorgesehene Erweiterung auf mehrere Achslasten am einfachsten verwirklichen, da die Berücksichtigung von Nachbarachsen mit der Biegelinienfunktion bereits möglich ist.

5 Längsbewegungen des Gleisrostes unter Verkehrslasten

Nachdem nun ein geeignetes Modell zur Bestimmung der Längsbewegungen des Gleisrostes vorliegt, wird im Folgenden der Einfluss verschiedener Parameter auf die Größe der Längsverschiebungen untersucht. Im Vordergrund steht hierbei die Verkehrslast, zusätzlich findet jedoch ebenfalls eine Betrachtung mehrerer Oberbauparameter statt. Dazu zählen der Schwellentyp, der Stützpunktabstand, die Zwischenlage und der Bettungsmodul.

- **Verkehrslast:** Neben der im Abschnitt 4 zugrunde gelegten 20t-Einzelachse werden die Achslasten der auf den Schnellfahrstrecken der Deutschen Bahn AG verkehrenden Hochgeschwindigkeitszüge ICE 1 und ICE 3 als Verkehrslasten angesetzt. Deren wesentlicher Unterschied im Hinblick auf in die Schiene eingeleitete Längskräfte besteht darin, dass beim ICE 3 die Hälfte aller Achsen angetrieben ist, während beim ICE 1, wie auch beim ICE 2, lediglich die Triebköpfe über angetriebene Achsen verfügen /52/.
- **Schwellentyp:** Die Berechnungen erstrecken sich auf die Betonschwellen B 70 W und B 75 W. Bei der Schwelle B 70 W handelt es sich um die Betonschwelle, die i.d.R. auf Schnellfahrstrecken der Deutschen Bahn AG mit Schotteroberbau zum Einsatz kommt. Gegenüber dieser besitzt die Schwelle B 75 W eine vergrößerte, wirksame Schwellenauflagerfläche, die zu einer geringeren Schotterbeanspruchung führt /41/.
- **Stützpunktabstand:** Da der auf Schnellfahrstrecken gebräuchliche Schwellenabstand von 600 mm je nach Untergrund-, Strecken- und Beanspruchungsverhältnissen des Gleises auf 630 mm erhöht werden darf /18/, gehen diese beiden Werte in die weiteren Überlegungen ein.
- **Zwischenlage:** Wie schon im Abschnitt 4 wird das Verhalten der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a sowie der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 unter Längskrafteinwirkung gegenübergestellt.
- **Bettungsmodul:** Um den Einfluss des Untergrundes auf die Längsbewegungen des Gleises berücksichtigen zu können, fließen in die nachfolgenden Betrachtungen Bettungsmoduln von $0,02 \text{ N/mm}^3$, $0,05 \text{ N/mm}^3$, $0,1 \text{ N/mm}^3$ und $0,3 \text{ N/mm}^3$ ein, die die Bandbreite von der Tragfähigkeit eines sehr schlechten bis zu der eines steifen Untergrundes beschreiben /17/.

Tab. 5.1 fasst die genannten Parameter mit den jeweils gewählten Varianten nochmals zusammen.

Parameter	Varianten
Verkehrslast	20t-Einzelachse / ICE 1 / ICE 3
Schwellentyp	B 70 W / B 75 W
Stützpunktstand [mm]	600 / 630
Zwischenlage	Zw 687a / Zw 700a / Zw 900
Bettungsmodul [N/mm ³]	0,02 / 0,05 / 0,1 / 0,3

Tab. 5.1: Parameter mit den jeweils gewählten Varianten

5.1 Überprüfung der Rechengrundlagen

Bevor mit der Ermittlung der Schienenlängsverschiebungen begonnen werden kann, ist zu überprüfen, inwieweit sich die Variation der einzelnen Parameter auf die Rechengrundlagen auswirkt.

- **Verkehrslast:** Eine Änderung der Verkehrslasten schlägt sich im Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand des belasteten Gleisrostes sowie im statischen System und den zu berücksichtigenden Lastfällen nieder.

Den Einfluss auf den Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleises beschreibt die im Abschnitt 3.2.3.2 hergeleitete Gleichung zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft, welche als Grundlage für die entsprechenden Widerstandswerte dient und linear von der auf den Gleisrost aufgebrauchten Radlast abhängt.

Der Durchschubwiderstand des belasteten Gleises ist von einer Modifikation der Lastkonfiguration betroffen, da ihm die auf den jeweiligen Stützpunkt einwirkende Stützpunktkraft zugrunde liegt. Diese beinhaltet unter anderem die Radlast, wobei zwischen den beiden Größen ebenfalls ein linearer Zusammenhang besteht.

Hinsichtlich des statischen Systems muss beachtet werden, dass sich eine messbare Längsverschiebung der Schiene bei mehreren Achslasten im Falle des ICE 1 und ICE 3 über einen größeren Bereich erstreckt als bei der 20t-Einzelachse. Dementsprechend wird ein längerer, die Schiene wiedergebender Durchlaufträger benötigt, um, wie im Abschnitt 4.3.1 gefordert, eine Beeinträchtigung der Resultate durch das feste Auflager am Ende des Trägers auszuschließen.

Bei den Lastfällen lassen sich das schon aus dem Abschnitt 4 bekannte Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze mit einem Kraftschlussbeiwert von ungefähr 0,3 und das Bremsen der Achsen unterscheiden. Unter Annahme einer Schnellbremsung stellt sich hierfür aus Gründen des Komforts und der Sicherheit für stehende Fahrgäste ein Kraftschluss-

beiwert von etwa 0,1 ein /8/. Für die 20t-Einzelachse beschränken sich die Betrachtungen weiterhin auf den Beschleunigungsvorgang nahe der Schlupfgrenze, weil der dabei zwischen Rad und Schiene aktivierte Kraftschlussbeiwert deutlich über demjenigen beim Bremsen liegt. Folglich fallen auch die in die Schienen eingeleiteten Längskräfte sowie die hierdurch verursachten Verschiebungen größer aus. Im Falle der Achslasten des ICE 1 ist nicht nur der Beschleunigungs-, sondern ebenso der Bremsvorgang zu untersuchen. Beim Beschleunigen wird zwar ein höherer Kraftschlussbeiwert aktiviert, jedoch übertragen dabei lediglich die Achsen der beiden Triebköpfe Längskräfte auf die Schienen. Demgegenüber sind am Bremsvorgang sämtliche Achsen beteiligt. Die gleichen Verhältnisse ergeben sich für die Achslasten des ICE 3, obwohl bei diesem die Hälfte aller Achsen angetrieben wird. Unabhängig vom zugrunde gelegten Lastfall sind prinzipiell alle Achslasten der jeweiligen Lastkonfiguration als vertikale Belastung anzusetzen, um einen korrekten Verlauf der Widerstände in Schienenlängsrichtung zu gewährleisten.

Auf die für die einzelnen Verkehrslasten spezifischen Konsequenzen im Hinblick auf die Rechengrundlagen wird in den Abschnitten näher eingegangen, die die entsprechenden Lastkonfigurationen behandeln.

- **Schwellentyp:** Ein Wechsel von der Betonschwelle B 70 W zur Betonschwelle B 75 W spielt für die Größe des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes eine Rolle.

Beim Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes macht sich der Wechsel insofern bemerkbar, als dass die Größe der einzelnen Schwellenflächen in die Gleichung zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft einfließt. Hierbei können die prozentualen Anteile der verschiedenen Schwellenflächen am Querverschiebewiderstand, auf deren Basis sich die jeweiligen Beiträge zum Längsverschiebewiderstand ergeben, für die Schwelle B 75 W beibehalten werden /35/, /36/, da ihre Flächen nahezu das gleiche Größenverhältnis aufweisen wie die der Schwelle B 70 W. Streng genommen müsste der Schwellentyp ebenso beim Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes Berücksichtigung finden. Diesbezüglich zeigen Vergleichsrechnungen allerdings, dass die Auswirkungen vernachlässigbar sind, was sich unter anderem durch das Auftreten der größten Verschiebungen der Schiene am Ort der Lasteinleitung und somit im Bereich des belasteten Gleisrostes erklären lässt.

Der Durchschubwiderstand unter Verkehrslast wird ebenfalls vom Wechsel des Schwellentyps tangiert, weil die für den Widerstand maßgebende Stützpunktkraft von mehreren Parametern, darunter der wirksamen Schwellenaullagerfläche, abhängt. Im unbelasteten Zustand des Gleises ändert sich der Widerstand hingegen nicht.

- **Stützpunktstand:** Dessen Vergrößerung von 600 mm auf 630 mm geht wie bereits die Verkehrslast und der Schwellentyp sowohl in den Längsverschiebe- als auch in den Durchschubwiderstand ein. Zudem erfordert auch die Modifikation des Stützpunktstandes eine Anpassung des statischen Systems.

Die Beeinflussung des Längsverschiebewiderstandes im belasteten Zustand des Gleisrostes resultiert aus der Tatsache, dass die Gleichung zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft auf einem bestimmten Stützpunktstand beruht. Den Widerstand des unbelasteten Gleises betreffend kann auf die Ausführungen in Zusammenhang mit der Variation des Schwellentyps verwiesen werden. Für die unterschiedlichen Kombinationen der Parameter Schwellentyp und Stützpunktstand erhält man demnach folgende Gleichungen zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft, deren Zusammensetzung im Detail sich Abschnitt 3.2.3.2 bzw. Anlage 5.1 entnehmen lässt:

$$\text{- Schwelle B 70 W, } a = 600 \text{ mm: } \sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 11,6 \right) \quad (5-1)$$

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 12,8 \right) \quad (5-2)$$

$$\text{- Schwelle B 70 W, } a = 630 \text{ mm: } \sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 11,3 \right) \quad (5-3)$$

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 12,4 \right) \quad (5-4)$$

$$\text{- Schwelle B 75 W, } a = 600 \text{ mm: } \sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 12,3 \right) \quad (5-5)$$

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 13,4 \right) \quad (5-6)$$

$$\text{- Schwelle B 75 W, } a = 630 \text{ mm: } \sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 11,9 \right) \quad (5-7)$$

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q \text{ [kN]}}{3} + 13,1 \right) \quad (5-8)$$

Für die Parameterstudien des Abschnittes 5 wird als Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes der Mittelwert der Widerstände unter den beiden horizontalen Lastausbreitungswinkeln von 90° und 60° angesetzt.

Die Änderung des Durchschubwiderstandes mit dem Stützpunktstand hat zwei Ursachen. Zum einen liegt sie direkt in der Umrechnung der in Versuchen ermittelten Durchschubkräfte in die zugehörigen Widerstände mit Hilfe der Gleichung (3-20) begründet, zum anderen wirkt sich die Variation des Stützpunktstandes auf die für den Durchschubwiderstand des belasteten Gleises relevante Stützpunktkraft aus.

Für das statische System schließlich ist der Stützpunktabstand deshalb von Bedeutung, weil diesem der Abstand der Federn entspricht, die die beiden Widerstände repräsentieren.

- **Zwischenlage:** Bei der Betrachtung der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a sowie der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 muss wie schon im Abschnitt 4 darauf geachtet werden, dass den einzelnen Rechengängen die Versuchsergebnisse der entsprechenden Zwischenlage zugrunde liegen.
- **Bettungsmodul:** Der Einfluss des Bettungsmoduls beschränkt sich auf den Durchschubwiderstand des belasteten Gleises, da er wie der Schwellentyp und der Stützpunktabstand zu den Parametern gehört, die die Größe der Stützpunktkraft bestimmen.

5.2 20t-Einzelachse

Hierbei handelt es sich um die Verkehrslast, auf der die Entwicklung des Rechenmodells in Abschnitt 4 basiert. Demzufolge ergeben sich daraus keine Änderungen bezüglich des statischen Systems und der Eingangsgrößen, deren Werte, insbesondere die Längsverschiebe- und Durchschubwiderstände in Abhängigkeit von den gewählten Oberbauparametern, in Anlage 5.2 zusammengestellt sind. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Längsverschiebung der Schiene sowie der Bewegung der Schiene in der Befestigung und der Schwellen im Schotter ist identisch mit dem in Abschnitt 4.3.5 beschriebenen Verfahren.

Die Ergebnisse für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm** listet Tab. 5.2 auf. Darin, sowie in den weiteren Tabellen, entspricht Δl_{res} der maximalen Längsverschiebung der Schiene und Δl_L bzw. Δl_D der zugehörigen Bewegung der Schwellen im Schotter bzw. der Schiene in der Befestigung. Auf eine Darstellung der einzelnen Verschiebungsverläufe wird für den Fall der 20t-Einzelachse verzichtet, weil diese qualitativ mit den in Anlage 4.10 enthaltenen Diagrammen übereinstimmen.

	Oberbau mit Zwischenlage											
	Zw 687a				Zw 700a				Zw 900			
	und Bettungsmodul [N/mm^3]											
	0,02	0,05	0,1	0,3	0,02	0,05	0,1	0,3	0,02	0,05	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,19			0,20	0,22			0,23	0,23			
Δl_L [mm]	0,17			0,18	0,13			0,14	0,12	0,13		
Δl_D [mm]	0,02				0,09				0,11	0,10		

Tab. 5.2: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einer beschleunigenden 20t-Einzelachse für einen Gleisrost mit **Beton-schwellen B 70 W im Abstand von 600 mm**

Für alle Zwischenlagen stellt sich zwar in etwa die gleiche maximale Verschiebung der Schiene ein, bei den Bewegungsanteilen, die die einzelnen Widerstände aktivieren, fallen jedoch deutliche Unterschiede auf. Während die Schienenlängsverschiebung unter Verwendung der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a größtenteils aus einer Bewegung der Schwellen im Schotter resultiert, bedingt der Einbau elastischer Zwischenlagen Zw 700a oder Zw 900 eine annähernd gleichmäßige Aufteilung auf die beiden Bewegungsanteile. Weiterhin zeigt sich, dass eine Variation des Bettungsmoduls ohne nennenswerte Auswirkungen bleibt, was sich mit zwei gegenläufigen Effekten erklären lässt. Einerseits nimmt die für den Durchschubwiderstand des belasteten Gleises maßgebende Stützpunktkraft mit steigendem Bettungsmodul zu, andererseits verkürzt sich gleichzeitig die elastische Länge der Schiene. Da der Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand in Schienenlängsrichtung an die Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN gekoppelt ist, bedeutet das wiederum ein Erreichen der Werte des unbelasteten Gleisrostes in geringerer Entfernung vom Ort der Lasteinleitung. Hierdurch wird der Einfluss des mit der Stützpunktkraft anwachsenden Durchschubwiderstandes auf die Längsbewegungen des Gleises weitgehend kompensiert, zumal der Anstieg des Widerstandes nicht proportional zur Stützpunktkraft erfolgt, wie die Abb. 3.11 bis 3.13 verdeutlichen. In Anlage 5.3 finden sich ergänzend zu den Ausführungen bezüglich des Bettungsmoduls die zugrunde liegenden mathematischen Zusammenhänge. Darüber hinaus sind für Bettungsmoduln von $0,02 \text{ N/mm}^3$ und $0,3 \text{ N/mm}^3$ die Verläufe des dem resultierenden Widerstand zugeordneten Elastizitätsbeiwertes am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900 dargestellt. Dabei handelt es sich um die Größe, die sämtliche Auswirkungen der Modifikation eines Parameters beinhaltet, weil sich aus ihr nach Gleichung (4-9) durch Integration die resultierenden Steifigkeiten der einzelnen Federn des statischen Systems ergeben. Die nachfolgenden Berechnungen beschränken sich auf Bettungsmoduln von $0,1 \text{ N/mm}^3$ und $0,3 \text{ N/mm}^3$. Dies ermöglicht nach wie vor die Erfassung von Wechselwirkungen mit anderen Parametern, vor allem der Verkehrslast, und trägt außerdem

der Tatsache Rechnung, dass Untergrundverhältnisse entsprechend Bettungsmoduln von $0,02 \text{ N/mm}^3$ und $0,05 \text{ N/mm}^3$ bei Schnellfahrstrecken nicht vorkommen dürften.

Tab. 5.3 lassen sich nun die maximale Längsverschiebung der Schiene und die zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter sowie der Schiene in der Befestigung für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 70 W im Abstand von 630 mm** entnehmen.

	Oberbau mit Zwischenlage					
	Zw 687a		Zw 700a		Zw 900	
	und Bettungsmodul [N/mm^3]					
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,19	0,20	0,22	0,23	0,23	
Δl_L [mm]	0,17	0,18	0,13	0,14	0,13	
Δl_D [mm]	0,02		0,09		0,10	

Tab. 5.3: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einer beschleunigenden 20t-Einzelachse für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 70 W im Abstand von 630 mm**

Unter Berücksichtigung der gewählten Genauigkeit unterscheiden sich die Werte nicht von denen eines Gleises mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm, obgleich eine Erhöhung des Stützpunktabstandes prinzipiell sowohl eine Zunahme der Stützpunktkraft als auch der elastischen Länge der Schiene nach sich zieht. Eine Gegenüberstellung der Gleichungen (5-1) und (5-2) mit den Gleichungen (5-3) und (5-4) sowie die Gleichung (3-20) belegen allerdings, dass mit einer Vergrößerung des Stützpunktabstandes ebenso eine Reduzierung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft sowie des Durchschubwiderstandes verbunden ist, was den erstgenannten Einflüssen entgegenwirkt. Hinzu kommt, dass man eine alleinige Änderung des Stützpunktabstandes um 5 % in ihren Folgen ohnehin vernachlässigen kann, wie aus den Anlagen 5.2 – Seite 1 und 5.4 hervorgeht. Dennoch werden die Werte von 600 mm und 630 mm für die sich anschließenden Betrachtungen beibehalten, um eventuelle Auswirkungen in Kombination mit anderen Lastkonfigurationen untersuchen zu können.

Zunächst sind aber in Tab. 5.4 die Bewegungen eines Gleisrostes mit **Betonschwellen B 75 W im Abstand von 600 mm** unter einer nahe der Schlupfgrenze beschleunigenden 20t-Einzelachse zusammengestellt.

	Oberbau mit Zwischenlage					
	Zw 687a		Zw 700a		Zw 900	
	und Bettungsmodul [N/mm ³]					
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,20		0,22	0,23	0,23	0,24
Δl_L [mm]	0,18		0,13	0,14	0,13	0,14
Δl_D [mm]	0,02		0,09		0,10	

Tab. 5.4: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einer beschleunigenden 20t-Einzelachse für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 75 W im Abstand von 600 mm**

Die Ergebnisse weichen ebenfalls nur unwesentlich von den vorangegangenen Resultaten für ein Gleis mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm ab. Zurückzuführen ist dies darauf, dass ein Austausch der Schwelle B 70 W gegen die Schwelle B 75 W über die hiermit einhergehende Zunahme der wirksamen Schwellenauflagerfläche die gleichen Konsequenzen mit sich bringt wie eine Erhöhung des Bettungsmoduls. Darüber hinaus wächst zwar die für den Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleises ausschlaggebende, maximal zulässige Längsverschiebekraft an, jedoch in vergleichsweise unbedeutendem Maße, wie die Gleichungen (5-5) und (5-6) gegenüber den Gleichungen (5-1) und (5-2) zeigen. Die Größe der einzelnen Einflüsse lässt sich den Anlagen 5.2 und 5.5 entnehmen. Trotz der geringen Auswirkungen eines anderen Schwellentyps unter einer 20t-Einzelachse soll im Folgenden überprüft werden, ob dies ebenso unter den Achslasten des ICE 1 sowie ICE 3 zutrifft.

Abschließend enthält Tab. 5.5 der Vollständigkeit halber die maximale Verschiebung der Schiene mit den zugehörigen Bewegungsanteilen für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 75 W im Abstand von 630 mm**.

	Oberbau mit Zwischenlage					
	Zw 687a		Zw 700a		Zw 900	
	und Bettungsmodul [N/mm ³]					
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,20		0,22	0,23	0,23	
Δl_L [mm]	0,18		0,13	0,14	0,13	
Δl_D [mm]	0,02		0,09		0,10	

Tab. 5.5: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einer beschleunigenden 20t-Einzelachse für einen Gleisrost mit **Beton-schwellen B 75 W im Abstand von 630 mm**

Mit Blick auf die obigen Erläuterungen zum Stützpunktastand stimmen die Werte erwartungsgemäß weitgehend mit denen der Tab. 5.2 bis 5.4 überein.

Zusammenfassend lässt sich für den Fall der 20t-Einzelachse festhalten, dass sich allein die Wahl der Zwischenlage in den Ergebnissen niederschlägt, während der Einfluss der Parameter Schwellentyp, Stützpunktastand und Bettungsmodul vernachlässigbar ist. Es treten durchwegs maximale Schienenlängsverschiebungen von rund 0,2 mm auf, die bei einem Oberbau mit harter Kunststoffzwischenlage Zw 687a zu ca. 90 % in eine Bewegung der Schwellen im Schotter umgesetzt werden. Bei Einsatz der elastischen Zwischenlagen sinkt dieser Anteil auf rund 60 % für die Zwischenlage Zw 700a bzw. auf 50 % bis 60 % für die Zwischenlage Zw 900, wohingegen die Bewegung der Schiene in der Befestigung entsprechend ansteigt.

5.3 ICE 1

Unter Beachtung der Gleichung (2-3) für die Reibungskraft sind die größten Längsbewegungen des Gleises im Bereich der Triebköpfe des ICE 1 mit einer Radlast von 98 000 N zu erwarten. Demgegenüber beträgt die Radlast der Mittelwagen lediglich 70 000 N /8/. Um weiterhin das halbe System mit freiem Schienenende anwenden zu können, müssten für einen ICE 1 mit zwei Triebköpfen und zwölf Mittelwagen insgesamt 28 Achsen bei der Ermittlung der Längsverschiebungen angesetzt werden, was mit einem entsprechend hohen Aufwand verbunden wäre. Zudem belegen Vergleichsrechnungen, dass bereits mit acht Achsen eine ausreichende Genauigkeit der maximalen Verschiebung beim Beschleunigen und Bremsen erzielt wird, wobei die genannte Anzahl sowohl für die Längskräfte als auch die vertikale Belastung gilt. Daher kommt anstatt des halben Systems mit freiem Schienenende das ganze System in Anlehnung an Abb. 4.7b zum Einsatz. Die benötigten Eingangsgrößen finden sich

in Anlage 5.6. Die Berechnungen selbst basieren auf dem Rechenmodell des Abschnittes 4.3.5, erweitert um die Berücksichtigung der Nachbarachsen.

Die Tab. 5.6 bis 5.9 enthalten die maximale Schienenlängsverschiebung sowie die Bewegungsanteile, die den Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstand aktivieren, **unter einem beschleunigenden oder bremsenden ICE 1** für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 70 W oder B 75 W**.

	Oberbau mit Stützpunktstand [mm],											
	600						630					
	Zwischenlage											
	Zw 687a		Zw 700a		Zw 900		Zw 687a		Zw 700a		Zw 900	
und Bettungsmodul [N/mm ³]												
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,53	0,55	0,63	0,65	0,66	0,68	0,53	0,54	0,64	0,66	0,67	0,69
Δl_L [mm]	0,47	0,50	0,39	0,41	0,38	0,40	0,47	0,49	0,39	0,41	0,38	0,40
Δl_D [mm]	0,06	0,05	0,24		0,28		0,06	0,05	0,25		0,29	

Tab. 5.6: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) **unter einem beschleunigenden ICE 1** für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 70 W**

	Oberbau mit Stützpunktstand [mm],											
	600						630					
	Zwischenlage											
	Zw 687a		Zw 700a		Zw 900		Zw 687a		Zw 700a		Zw 900	
und Bettungsmodul [N/mm ³]												
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,25		0,31	0,32	0,32	0,33	0,25	0,26	0,31	0,32	0,32	0,33
Δl_L [mm]	0,22	0,23	0,19	0,20	0,18	0,20	0,22	0,23	0,19	0,20	0,18	0,19
Δl_D [mm]	0,03	0,02	0,12		0,14	0,13	0,03		0,12		0,14	

Tab. 5.7: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) **unter einem bremsenden ICE 1** für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 70 W**

	Oberbau mit Stützpunktstand [mm],											
	600						630					
	Zwischenlage											
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
und Bettungsmodul [N/mm ³]												
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,53	0,55	0,63	0,65	0,67	0,69	0,53	0,55	0,65	0,67	0,68	0,70
Δl_L [mm]	0,48	0,50	0,39	0,41	0,39	0,41	0,47	0,50	0,40	0,42	0,39	0,41
Δl_D [mm]	0,05		0,24		0,28		0,06	0,05	0,25		0,29	

Tab. 5.8: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) **unter einem beschleunigenden ICE 1** für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 75 W**

	Oberbau mit Stützpunktstand [mm],											
	600						630					
	Zwischenlage											
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
und Bettungsmodul [N/mm ³]												
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,25	0,26	0,31	0,32	0,33		0,25	0,26	0,31	0,32	0,32	0,34
Δl_L [mm]	0,22	0,24	0,19	0,20	0,19	0,20	0,22	0,24	0,19	0,20	0,18	0,20
Δl_D [mm]	0,03	0,02	0,12		0,14	0,13	0,03	0,02	0,12		0,14	

Tab. 5.9: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) **unter einem bremsenden ICE 1** für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 75 W**

In den Abb. 5.2 bis 5.4 sind, getrennt nach Zwischenlagen, die Verschiebungsverläufe beim Beschleunigen eines ICE 1 nahe der Schlupfgrenze für einen Oberbau mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm und einem Bettungsmodul von 0,1 N/mm³ aufgetragen. Abb. 5.1 verdeutlicht vorab anhand eines Ausschnittes aus einem der Verschiebungsverläufe die zugehörige Position des Zuges. Der in die Bestimmung der Längsbewegungen eingehende Triebkopf bzw. Mittelwagen ist hierbei dunkelgrau dargestellt, die hellgrau abgebildeten Wagen dienen indessen nur zur Veranschaulichung der Zugkonfiguration. Zusätzlich beinhalten die Abb. 5.2 bis 5.4 die Position des Zuges stark verkleinert oberhalb der Verschiebungsverläufe.

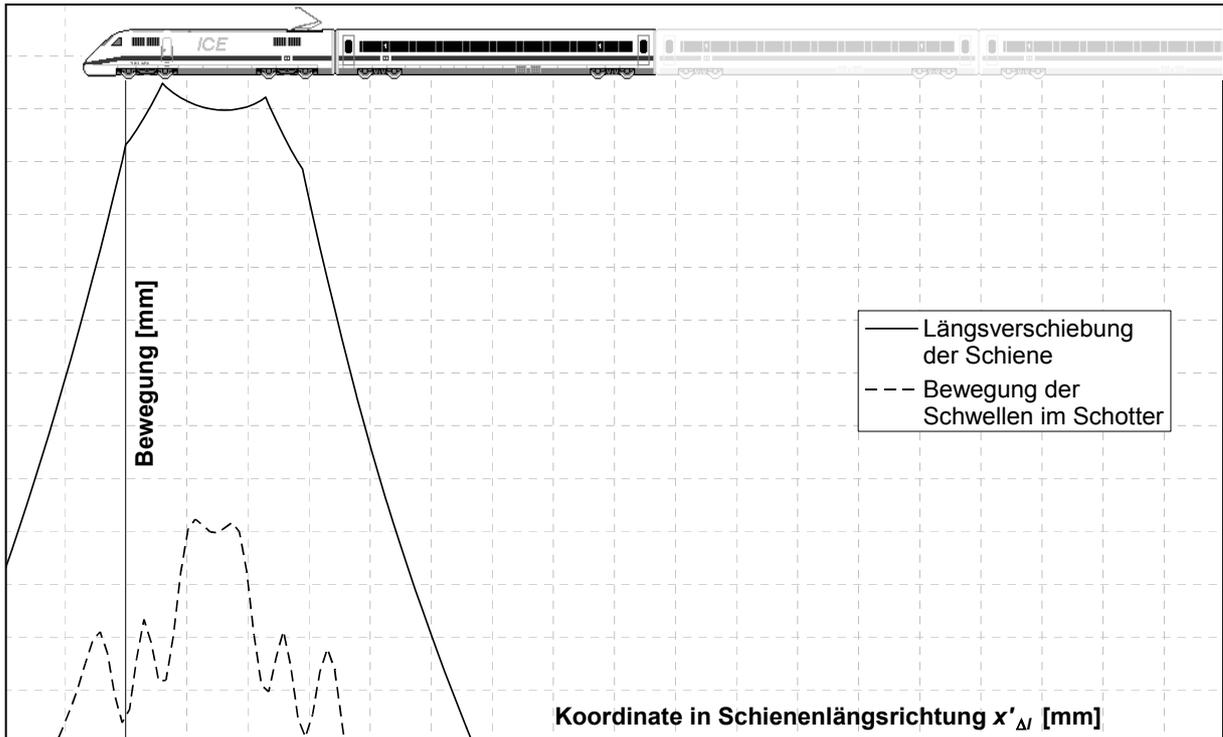


Abb. 5.1: Zu den Verschiebungsverläufen gehörige Position des ICE 1 (in die Bestimmung der Längsbewegungen eingehender Triebkopf bzw. Mittelwagen dunkelgrau dargestellt)

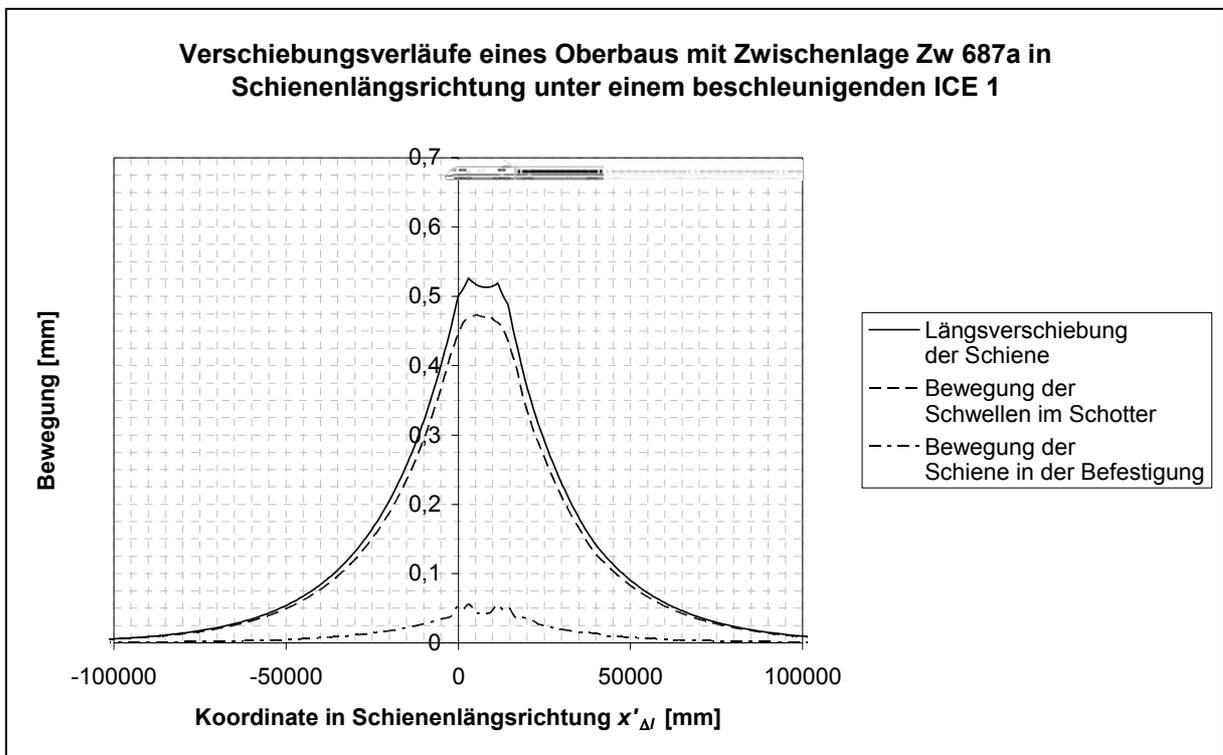


Abb. 5.2: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung für einen Oberbau mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm und einem Bettungsmodul von $0,1 \text{ N/mm}^3$

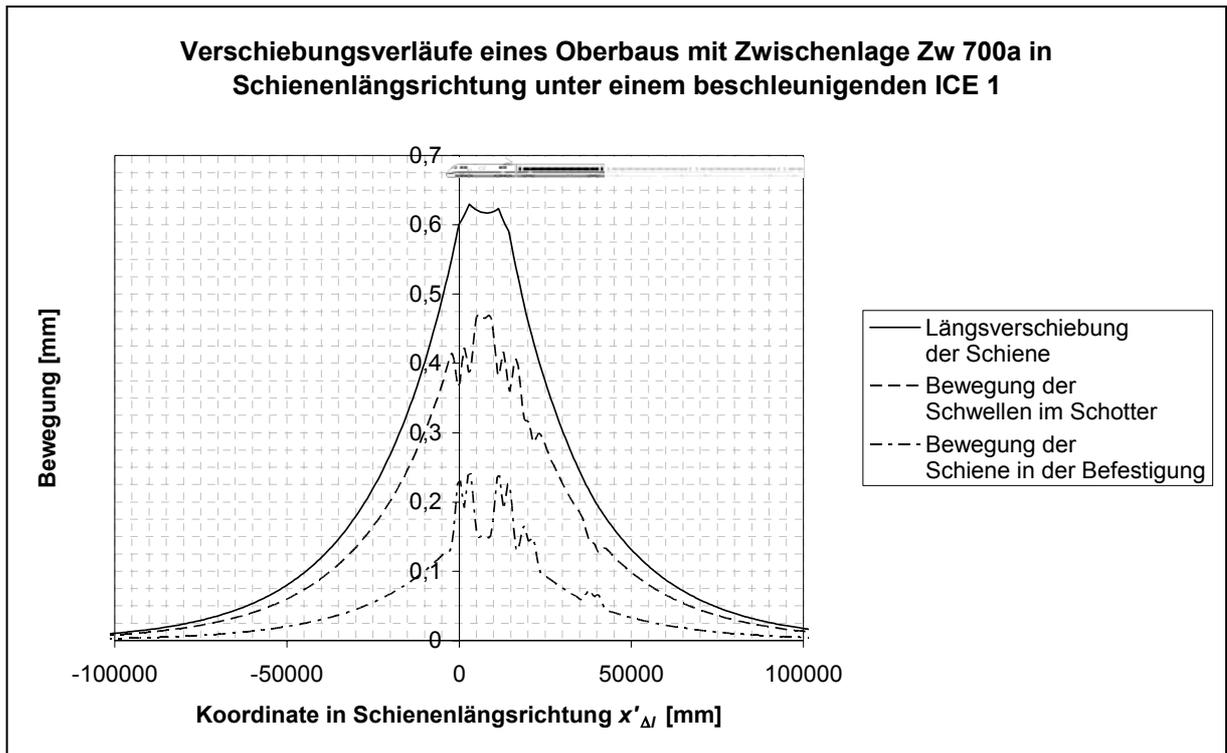


Abb. 5.3: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung für einen Oberbau mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm und einem Bettungsmodul von $0,1 \text{ N/mm}^3$

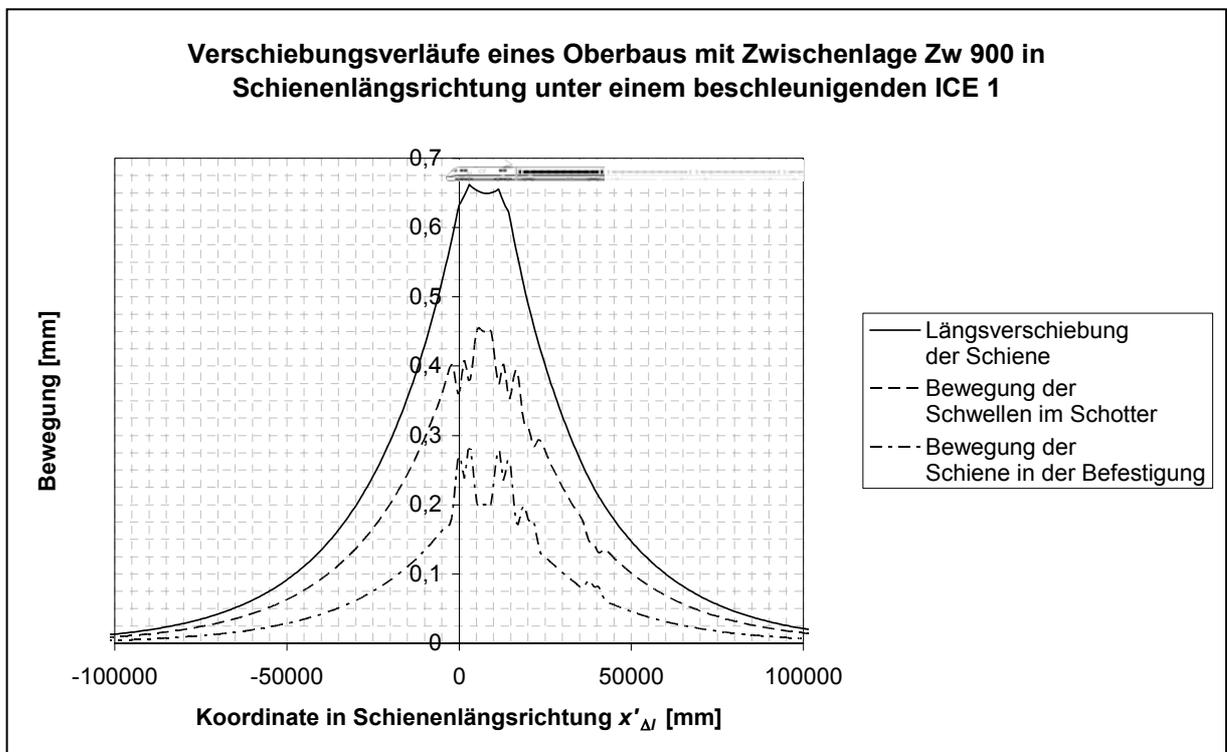


Abb. 5.4: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung für einen Oberbau mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm und einem Bettungsmodul von $0,1 \text{ N/mm}^3$

Die errechneten Längsverschiebungen schwanken zwischen 0,53 mm und 0,70 mm beim Beschleunigungsvorgang sowie zwischen 0,25 mm und 0,34 mm beim Bremsvorgang. Dies zeigt eindeutig, dass für die Achslasten des ICE 1 der Lastfall Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze maßgebend ist, bei dem sich die maximale Verschiebung der Schiene, von der Spitze des Zuges aus betrachtet, unter der zweiten Achse des Triebkopfes einstellt. Beim Bremsen dagegen werden aufgrund der größeren Anzahl in die Schienen eingeleiteter Längskräfte die höchsten Längsbewegungen des Gleises erst unter der vierten und somit letzten Achse des Triebkopfes erreicht.

Hinsichtlich der Relevanz der variierten Parameter und der Größenordnung der einzelnen Bewegungsanteile zeichnet sich ein ähnliches Bild ab wie bei der 20t-Einzelachse. So hat ausschließlich die Zwischenlage nennenswerten Einfluss auf die Schienenlängsverschiebung. Darüber hinaus liegt die Bewegung der Schwellen im Schotter unter Verwendung der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a wiederum bei ungefähr 90 % der Gesamtverschiebung. Bei einem Oberbau mit elastischen Zwischenlagen Zw 700a oder Zw 900 reduziert sich dieser Anteil zugunsten der Bewegung der Schiene in der Befestigung auf etwa 60 %.

Die wiedergegebenen Verschiebungsverläufe weisen die gleichen Besonderheiten bei den die jeweiligen Widerstände aktivierenden Bewegungsanteilen auf wie die entsprechenden Abbildungen für die 20t-Einzelachse. Ursache hierfür ist auch im Falle der Achslasten des ICE 1 das im Abschnitt 4.3.3 beschriebene Phänomen. Dieses bewirkt, dass die Bewegung der Schwellen im Schotter mit sich vergrößerndem Abstand vom jeweiligen Lastangriffspunkt zunächst anwächst, während die Bewegung der Schiene in der Befestigung über die gleiche Länge stark abfällt. Auf eine Darstellung der weiteren Verschiebungen wird verzichtet, da deren Verläufe unter Annahme eines beschleunigenden ICE 1 für die verbleibenden Parameterkombinationen qualitativ mit denen der Abb. 5.2 bis 5.4 vergleichbar sind und die Ergebnisse unter einem bremsenden ICE 1 lediglich nachgeordnete Bedeutung haben.

5.4 ICE 3

Beim ICE 3 gestaltet sich die Bestimmung des Bereiches, in dem die höchste Längsverschiebung der Schiene auftritt, deutlich schwieriger, was mit der Vielzahl unterschiedlicher Radlasten zusammenhängt, die von 58 750 N bis 77 500 N reichen. Entscheidend für deren Größe ist zum einen, ob es sich um die Ein- oder Mehrstromsystemvariante des ICE 3 handelt und zum anderen die Art des betrachteten Wagens, wobei zwischen End-, Trafo-, Stromrichter- und Mittelwagen unterschieden wird. Die individuelle Ausstattung schließlich geht ebenfalls in das Gewicht der einzelnen Wagen ein. Dennoch ermöglichen vorab durchgeführte Vergleichsrechnungen sowohl eine Einschränkung der nachfolgenden Überlegungen auf den Lastfall Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze als auch eine Abgrenzung des im

Hinblick auf die Verschiebungen zu untersuchenden Bereiches. Dabei muss beachtet werden, dass ein Vollzug aus zwei Triebzuginheiten i.d.R. gleicher Baureihe besteht, weshalb die Längsbewegungen des Gleisrostes unter den dann gekuppelten Endwagen den größten Wert annehmen. Unter Voraussetzung eines bezüglich der Kupplungsstelle symmetrisch konfigurierten Vollzuges hat diese Tatsache den positiven Nebeneffekt, dass sich die Berechnungen im Gegensatz zum ICE 1 wieder am halben System mit freiem Schienenende (Abb. 4.7) ausführen lassen. Um die maximal erreichbare Schienenlängsverschiebung mit ausreichender Genauigkeit zu erhalten, sind die ersten zwölf Achsen der Mehrstromsystemvariante des ICE 3 mit Achslasten von 65 000 N für den Endwagen (Wagen 406.0), 71 250 N für den Trafowagen (Wagen 406.1) und 67 500 N für den Stromrichterwagen (Wagen 406.2) anzusetzen /8/, /53/. Eine Zusammenstellung der zugehörigen Eingangsgrößen enthält Anlage 5.7. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Längsverschiebungen entspricht der schon beim ICE 1 und der 20t-Einzelachse zum Einsatz gekommenen Methode.

In den Tab. 5.10 und 5.11 sind die maximale Verschiebung der Schiene sowie die anteilige Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung unter einem beschleunigenden ICE 3 für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 70 W oder B 75 W** zusammengefasst.

	Oberbau mit Stützpunktstand [mm],											
	600						630					
	Zwischenlage											
	Zw 687a		Zw 700a		Zw 900		Zw 687a		Zw 700a		Zw 900	
Δl_{res} [mm]	und Bettungsmodul [N/mm ³]											
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
	Δl_L [mm]	0,60	0,62	0,73	0,77	0,78	0,81	0,60	0,62	0,75	0,77	0,79
Δl_D [mm]	0,06	0,05	0,24		0,29		0,06	0,05	0,25		0,30	

Tab. 5.10: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einem beschleunigenden ICE 3 für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 70 W**

	Oberbau mit Stützpunktabstand [mm],											
	600						630					
	Zwischenlage											
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	und Bettungsmodul [N/mm ³]					
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3
Δl_{res} [mm]	0,60	0,62	0,74	0,77	0,79	0,82	0,61	0,62	0,75	0,78	0,80	0,83
Δl_L [mm]	0,55	0,57	0,50	0,53	0,50	0,53	0,55	0,57	0,50	0,53	0,50	0,53
Δl_D [mm]	0,05		0,24		0,29		0,06	0,05	0,25		0,30	

Tab. 5.11: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einem beschleunigenden ICE 3 für einen Gleisrost mit **Betonschwellen B 75 W**

Die Abb. 5.6 bis 5.8 zeigen die Verschiebungsverläufe beim Beschleunigen eines ICE 3 nahe der Schlupfgrenze für die gleichen Parameter wie im Falle des ICE 1. Abb. 5.5 verdeutlicht wiederum die zugehörige Position des Zuges.

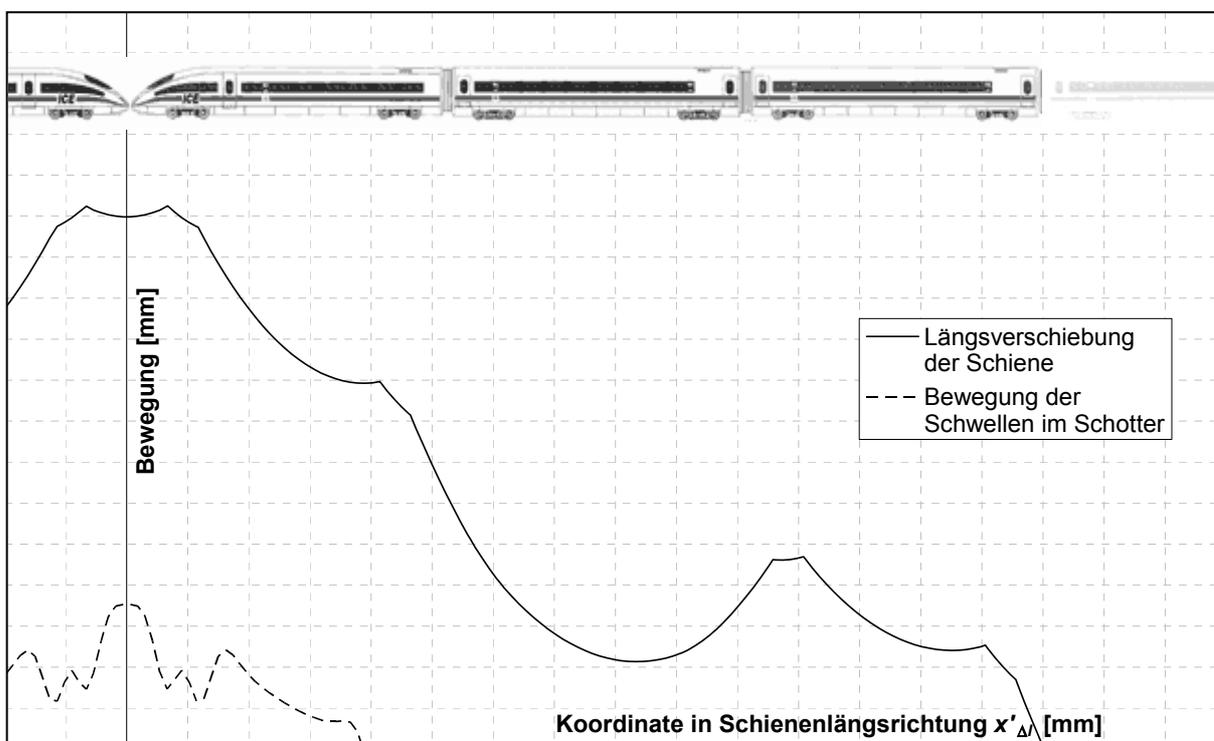


Abb. 5.5: Zu den Verschiebungsverläufen gehörige Position des ICE 3 (in die Bestimmung der Längsbewegungen eingehende Wagen dunkelgrau dargestellt)

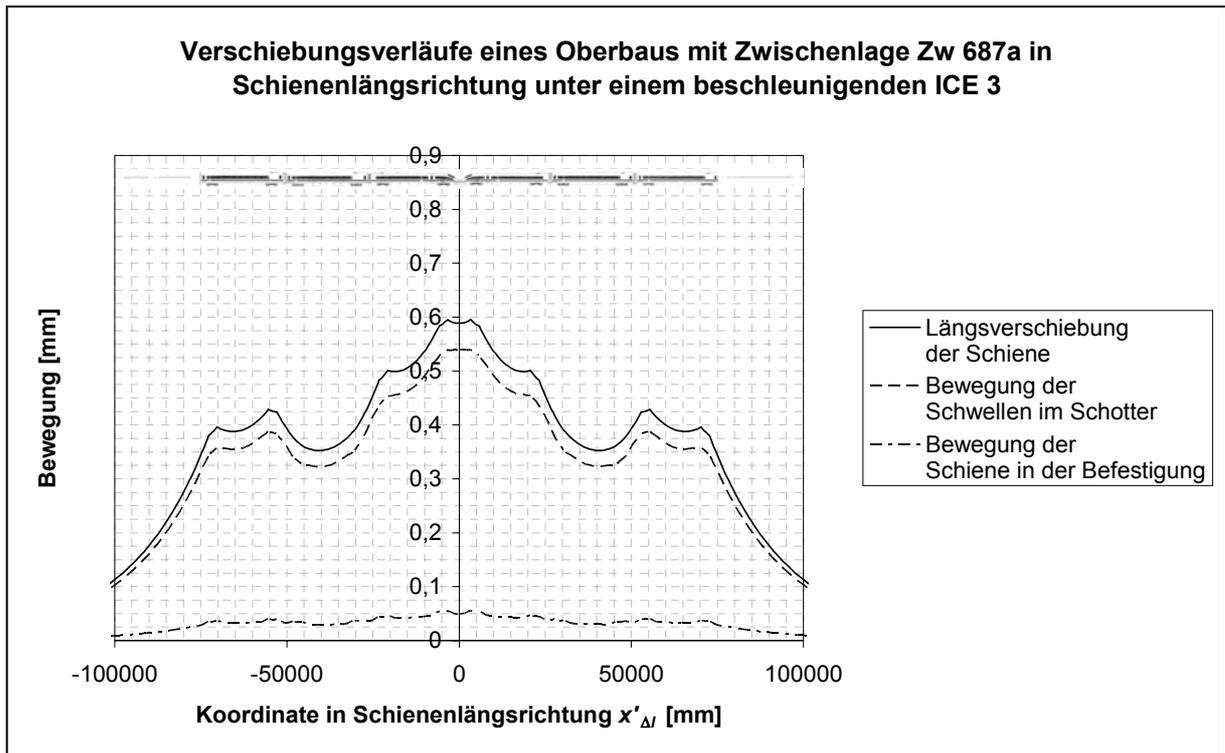


Abb. 5.6: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung für einen Oberbau mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm und einem Bettungsmodul von $0,1 \text{ N/mm}^3$

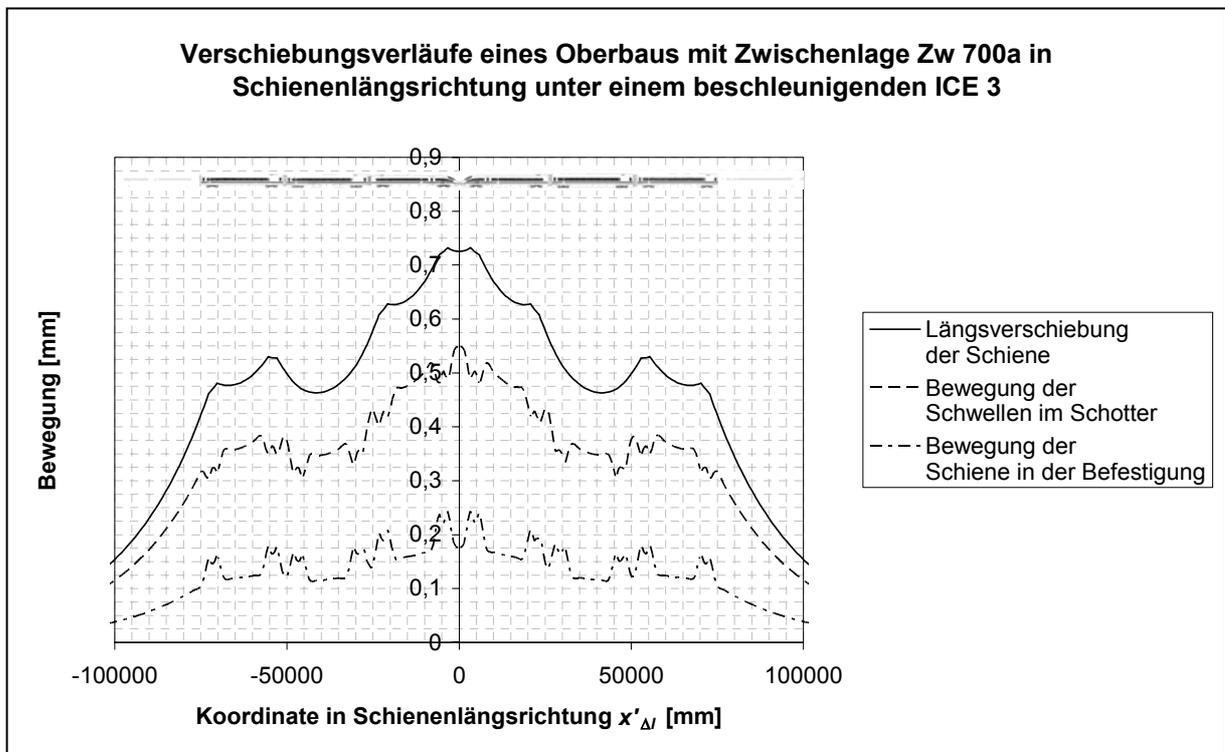


Abb. 5.7: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung für einen Oberbau mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm und einem Bettungsmodul von $0,1 \text{ N/mm}^3$

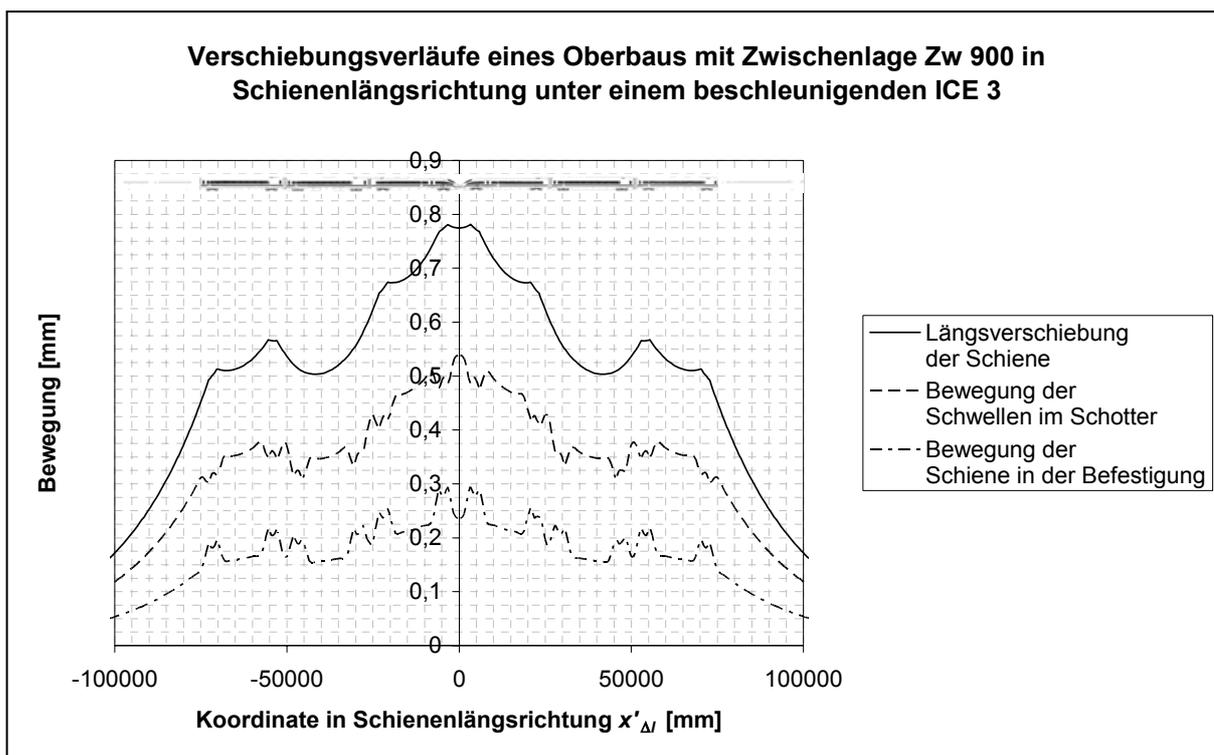


Abb. 5.8: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung für einen Oberbau mit Betonschwellen B 70 W im Abstand von 600 mm und einem Bettungsmodul von $0,1 \text{ N/mm}^3$

Beim ICE 3 bewegen sich die maximalen Schienenlängsverschiebungen zwischen 0,60 mm und 0,83 mm, wobei diese Werte unter der jeweils ersten Achse der beiden gekuppelten Endwagen vorliegen. Die Bedeutung der Parameter und die Bewegungsanteile betreffend zeigen sich nur geringe Unterschiede gegenüber den Ergebnissen der Abschnitte 5.2 und 5.3. Abermals dominiert die Wahl der Zwischenlage die Auswirkungen auf die Längsbewegungen des Gleises. Zudem erreicht die Bewegung der Schwellen im Schotter bei Einbau der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a ebenfalls rund 90 % der gesamten Verschiebung. Bei einem Oberbau mit elastischen Zwischenlagen verringert sich der Bewegungsanteil, der den Längsverschiebewiderstand aktiviert, dagegen auf ca. 70 % für die Zwischenlage Zw 700a bzw. auf 60 % bis 65 % für die Zwischenlage Zw 900. Infolge dessen muss die Bewegung der Schiene in der Befestigung zunehmen. Was die abgebildeten Verschiebungsverläufe anbelangt, so kann auf die Ausführungen zu den Abb. 5.2 bis 5.4 verwiesen werden, weil diese ebenso für die Achslasten des ICE 3 gelten.

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Resultate des Abschnittes 5 gestatten zwei grundlegende Feststellungen, die im Folgenden näher erläutert werden:

- Maßgebenden Einfluss auf die Längsverschiebung der Schiene üben allein die Verkehrslast sowie die Zwischenlage aus, während die Parameter Schwellentyp, Stützpunktstand und Bettungsmodul keiner Berücksichtigung bedürfen
- Bei Einsatz der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 hat die Bewegung der Schiene in der Befestigung einen deutlich höheren Anteil an der Gesamtverschiebung als bei einem Oberbau mit harter Kunststoffzwischenlage Zw 687a

Die errechneten Schienenlängsverschiebungen schwanken zwischen 0,2 mm unter der 20t-Einzelachse und 0,8 mm unter den Achsen eines ICE 3 bei Verwendung der elastischen Zwischenlage Zw 900. Zu den Unterschieden in den Verschiebungswerten tragen der Schwellentyp, der Stützpunktstand und der Bettungsmodul insgesamt maximal vier hundertstel Millimeter bei. Ausschlaggebend für die Höhe der einzelnen Längsbewegungen sind in erster Linie die Art der Verkehrslast sowie die Wahl der Zwischenlage. Letztere wirkt sich außerdem auf die Bewegungsanteile aus, die den Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstand aktivieren. So liegt bei Einbau der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a die Bewegung der Schwellen im Schotter durchwegs bei etwa 90 % der gesamten Verschiebung. Bei einem Oberbau mit elastischer Zwischenlage Zw 700a hingegen sinkt dieser Anteil auf 60 % bis 70 %, bei Einsatz der elastischen Zwischenlage Zw 900 schließlich muss mit einer Abnahme auf 50 % bis 65 % gerechnet werden. Die gleichzeitig ansteigende Bewegung der Schiene in der Befestigung kann daher bis zu 0,3 mm betragen. Trotzdem liegen sämtliche für die beiden Bewegungsanteile ermittelten Werte unterhalb der jeweils zu beachtenden Durchrutschgrenzen der entsprechenden Widerstände. Somit bestätigt sich die Gültigkeit des angewendeten Rechenmodells, das eine lineare Abhängigkeit des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes vom Verschiebeweg voraussetzt. Darüber hinaus ist hinzuzufügen, dass sich für alle Parameterkombinationen das Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze als relevant erweist. Die Ergebnisse im Falle eines bremsenden Zuges sind von untergeordneter Bedeutung.

Die Verschiebungsverläufe aller drei Verkehrslasten zeigen bei der Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung das aus dem Abschnitt 4.3.3 bekannte Phänomen. Aufgrund dessen ist es unter Beachtung der im Abschnitt 1.2 zusammengefassten Erfahrungen aus dem Ausland möglich, dass es ebenso auf den bei dieser Untersuchung im Mittelpunkt stehenden Schnellfahrstrecken mit Schotteroberbau zu einer dauerhaften Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen entgegen der Belastungsrichtung kom-

men kann. Auch deren Aufsummierung im Laufe der Zeit kann in Anbetracht der wiederholten Lasteinwirkung nicht ausgeschlossen werden. Die Tendenz zu dem angesprochenen Verhalten stellt sich bevorzugt bei Einbau der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 ein.

Was die Beanspruchung einzelner Bauteile der Schienenbefestigung anbelangt, so lässt sich auf die bei den Durchschubversuchen gewonnenen Erkenntnisse zurückgreifen. Hierbei folgten die Arme der Spannklemmen über mehrere Millimeter der auf die Schiene aufgetragenen Längsverschiebung, bevor sie sich plötzlich vom Schienenfuß lösten und wieder ihre Ausgangsposition einnahmen. Demzufolge wird bei einer Schienenlängsverschiebung der in Verschiebungsrichtung vorne liegende Spannklemmenarm leicht auf-, der hinten liegende Arm hingegen geringfügig zusammengebogen. Bei der Größenordnung der ermittelten Bewegungen der Schiene in der Befestigung ist zu erwarten, dass dies ebenfalls im Betriebsgleis geschieht. Folglich ergibt sich, vor allem bei einem Oberbau mit elastischen Zwischenlagen Zw 700a oder Zw 900, eine entsprechende Belastung der Spannklemmen, die durch eine eventuell dauerhafte Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen entgegen der Belastungsrichtung weiter zunimmt. Dabei muss auch die Häufigkeit der Beanspruchung berücksichtigt werden, die aus der dichten Zugfolge auf den Hochgeschwindigkeitsstrecken der Deutschen Bahn AG resultiert.

6 Betriebliche Einflüsse auf die Längsbewegungen des Gleisrostes

Da die Ergebnisse des Abschnittes 5 zeigen, dass für die Längsbewegungen des Gleisrostes lediglich die Verkehrslast und die Zwischenlage von Bedeutung sind, werden nachfolgend im Betriebsgleis entstehende Einflüsse auf diese Parameter genauer betrachtet. Bezüglich der Verkehrslast zählen hierzu die Radlastverlagerung im Gleisbogen sowie dynamische Radlastschwankungen. In Zusammenhang mit der Zwischenlage kommen das Auftreten gelockter Schienenbefestigungen und eine Abweichung der Durchschubwiderstände von den bislang zugrunde gelegten Mittelwerten in Frage. Daneben besteht ebenso die Möglichkeit von Schwankungen des Längsverschiebewiderstandes.

6.1 Wahl der Eingangsgrößen

Die zugehörigen Berechnungen basieren weitgehend auf den Eingangsgrößen des Abschnittes 4. Ausgenommen hiervon sind allein die Widerstände, weil diese unmittelbar den betrieblichen Einflüssen unterliegen. Demgegenüber erfolgt die Einbeziehung der Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamischer Radlastschwankungen über einen Faktor, mit dem die Radlast multipliziert wird /17/. Somit werden nachstehende Größen bei der Bestimmung der Längsverschiebungen angesetzt:

- Radlast:	Q	= 100 000 N (20t-Einzelachse)
	μ	= 0,3 (Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene)
- Schiene UIC 60:	F_Q	= 7690 mm ²
	E	= 210 000 N/mm ²
	I	= 30 550 000 mm ⁴
- Bettungsmodul:	C	= 0,1 N/mm ³
- Schwelle B 70 W:	F	= 570 000 mm ²
	a	= 600 mm

6.2 Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamische Radlastschwankungen

Eine Radlastverlagerung im Gleisbogen tritt auf, wenn die im Bogen eingebaute Überhöhung nicht der ausgleichenden Überhöhung entspricht und deshalb eine freie Seitenbeschleunigung auf das Fahrzeug wirkt. Ist dies der Fall, so wird bei Vorliegen eines Überhöhungsfehlers die vertikale Belastung durch das bogenäußere bzw. –innere Rad i.d.R. mit einem pauschalen Zu- bzw. Abschlag von 20 % versehen, dem streng genommen eine freie Seitenbeschleunigung von 0,85 m/s² und eine Schwerpunktshöhe des Fahrzeugs von 1,80 m zugrunde liegt.

Ursache für dynamische Radlastschwankungen können insbesondere Fehler in den Laufflächen der Räder sowie in den Fahrflächen der Schienen oder eine ungleichmäßige Schwellenauflagerung sein. Der Einfluss auf die Radlast hängt von der Art des betrachteten Zuges (Reise- oder Güterzug), der gefahrenen Geschwindigkeit, der vorhandenen Gleislage und der angestrebten statistischen Sicherheit ab. In Anlehnung an die Verkehrslasten des Abschnittes 5 beziehen sich die weiteren Überlegungen auf Reisezüge, für die Geschwindigkeiten von 200 km/h, 250 km/h bzw. 300 km/h angenommen werden. Zudem wird eine auf Schnellfahrstrecken übliche, sehr gute Gleislage unterstellt. Für die im Rahmen der Rechnungen maßgebenden Größen schließlich beträgt die geforderte, statistische Sicherheit 99,7 %.

In Anbetracht der festgelegten Randbedingungen leiten sich für die Radlastverlagerung im Gleisbogen sowie dynamische Radlastschwankungen je nach Geschwindigkeit folgende Faktoren ab, mit denen die vertikale Belastung durch das Rad zu multiplizieren ist /17/:

- $V = 200 \text{ km/h}$: $Q_{max} = 1,69 \cdot Q$

- $V = 250 \text{ km/h}$: $Q_{max} = 1,74 \cdot Q$

- $V = 300 \text{ km/h}$: $Q_{max} = 1,79 \cdot Q$

Wie die Faktoren zustande kommen, lässt sich Anlage 6.1 entnehmen.

Bei den Durchschubversuchen wurden die Stufen für die Vertikalkräfte von vornherein so gewählt, dass eine Ausdehnung der Untersuchungen auf dynamische Einflüsse möglich ist (Abschnitt 3.3.2.2). Daher können die angegebenen Faktoren ohne Einschränkung für die Ermittlung der Durchschubkräfte anhand der Abb. 3.11 bis 3.13 sowie der entsprechenden Widerstände nach Gleichung (3-20) herangezogen werden.

Die Anwendbarkeit der Gleichung (3-11) zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft als Grundlage für den zugehörigen Widerstand bestätigt sich jedoch nur für Radlasten zwischen 65 000 N und 100 000 N. Darüber hinaus liegen weder Angaben aus der Literatur noch Messergebnisse vor (Abschnitt 3.2.3.6). Um diese Tatsache zu berücksichtigen, werden im Hinblick auf den Längsverschiebewiderstand zwei Grenzfälle gegenübergestellt. Einerseits soll die lineare Zunahme der maximal zulässigen Längsverschiebekraft für Radlasten über 100 000 N unverändert Gültigkeit haben. Andererseits wird dies ausgeschlossen, so dass die maximal zulässige Längsverschiebekraft ab einer Radlast von 100 000 N konstant bleibt.

Die gemäß den dargelegten Voraussetzungen für die Verschiebungen maßgebenden Widerstandswerte sind in Tab. 6.1 zusammengefasst.

Widerstand [N/mm Gleislänge]	Radlast [N]				
	0	100 000	169 000	174 000	179 000
p	7	19,7	31,2	32,1	32,9
p_D (Zw 687a)	19,0		53,2	54,1	54,9
p_D (Zw 700a)	18,1		27,9	28,0	28,1
p_D (Zw 900)	23,3		42,4	42,5	42,7

Tab. 6.1: Für die Verschiebungen maßgebende Widerstandswerte

Tab. 6.2 enthält die maximale Schienenlängsverschiebung sowie die Bewegungsanteile, die den Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstand aktivieren, bei **linearem Anstieg der maximal zulässigen Längsverschiebekraft** für Radlasten über 100 000 N. In Tab. 6.3 sind die Ergebnisse **ohne weiteren Anstieg der maximal zulässigen Längsverschiebekraft** aufgelistet. Da sich die einzelnen Verschiebungsverläufe qualitativ nicht von denen in Anlage 4.10 unterscheiden, erübrigt sich deren Darstellung.

	Oberbau mit Zwischenlage								
	Zw 687a			Zw 700a			Zw 900		
	gefährdete Geschwindigkeit [km/h]								
	200	250	300	200	250	300	200	250	300
Δl_{res} [mm]	0,31	0,32	0,33	0,37		0,38	0,38	0,39	0,41
Δl_L [mm]	0,27	0,28	0,29	0,19			0,18		0,19
Δl_D [mm]	0,04			0,18		0,19	0,20	0,21	0,22

Tab. 6.2: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einer beschleunigenden 20t-Einzelachse bei Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamischen Radlastschwankungen sowie **linearem Anstieg der maximal zulässigen Längsverschiebekraft** für Radlasten über 100 000 N

	Oberbau mit Zwischenlage								
	Zw 687a			Zw 700a			Zw 900		
	gefährte Geschwindigkeit [km/h]								
	200	250	300	200	250	300	200	250	300
Δl_{res} [mm]	0,33	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40	0,39	0,40	0,41
Δl_L [mm]	0,30	0,31	0,32	0,23	0,24	0,25	0,23	0,24	
Δl_D [mm]	0,03			0,14		0,15	0,16		0,17

Tab. 6.3: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einer beschleunigenden 20t-Einzelachse bei Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamischen Radlastschwankungen sowie **ohne weiteren Anstieg der maximal zulässigen Längsverschiebekraft** für Radlasten über 100 000 N

Unabhängig von der eingebauten Zwischenlage zeigen die ermittelten Werte, dass die Auswirkungen der verschiedenen angenommenen Geschwindigkeiten auf die Längsverschiebungen unberücksichtigt bleiben können. Die Unterscheidung der beiden Grenzfälle hinsichtlich der maximal zulässigen Längsverschiebekraft macht sich nur anhand der Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung bei Einsatz der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 bemerkbar.

Bei Verwendung der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a beträgt der Bewegungsanteil, der eine Aktivierung des Längsverschiebewiderstandes bewirkt, weiterhin ungefähr 90 % der Gesamtverschiebung. Im Vergleich zu den unter statischer Verkehrsbelastung errechneten Längsbewegungen (Tab. 4.9) wächst die Verschiebung zwischen 63 % (linearer Anstieg der maximal zulässigen Längsverschiebekraft) und 84 % (ohne weiteren Anstieg) auf maximal 0,35 mm an. Falls der Einbau einer elastischen Zwischenlage Zw 700a erfolgt, so hat die Bewegung der Schwellen im Schotter, je nach angenommenem Verhalten der maximal zulässigen Längsverschiebekraft für Radlasten über 100 000 N, einen Anteil von etwa 50 % (linearer Anstieg) bis 60 % (ohne weiteren Anstieg) an der Schienenlängsverschiebung. Diese nimmt gegenüber den statischen Werten um 68 % bis 82 % zu. Ein Oberbau mit elastischer Zwischenlage Zw 900 letztlich trägt die aufgebrachte Längsverschiebung der Schiene zu ca. 45 % (linearer Anstieg) bis 60 % (ohne weiteren Anstieg) dadurch ab, dass sich die Schwellen im Schotter verschieben. Unter Berücksichtigung der Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamischer Radlastschwankungen liegen die Längsbewegungen dabei zwischen 65 % und 78 % über den statischen Gesamtverschiebungen. Insgesamt erreicht die Schienenlängsverschiebung im Falle der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 eine Größe von rund 0,4 mm.

6.3 Gelockerte Schienenbefestigungen

Das Auftreten gelockerter Schienenbefestigungen kann die Ursache in einem von vornherein zu geringen Andrehmoment der Schwellenschrauben oder im Verschleiß einzelner Bauteile der Befestigung mit zunehmender Betriebsdauer haben. Zur Abschätzung der möglichen Verschiebungen werden im Folgenden für sämtliche Schienenbefestigungen die Durchschubkräfte bzw. –widerstände in Ansatz gebracht, die sich bei den Durchschubversuchen mit einem Andrehmoment der Schwellenschrauben von 150 Nm anstatt dem korrekten Andrehmoment von 200 Nm ergaben (Tab. 3.4). Die Längsverschiebewiderstände hingegen lassen sich unverändert vom Abschnitt 4 übernehmen. Somit kommen nachstehende Widerstandswerte zustande, deren Herleitung Anlage 6.2 enthält:

- Längsverschiebewiderstand: $\rho_{bel} = 19,7$ N/mm Gleislänge
 $\rho_{unbel} = 7$ N/mm Gleislänge
- Durchschubwiderstand: $\rho_{D,bel}$ (Zw 687a) = 22,6 N/mm Gleislänge
 $\rho_{D,unbel}$ (Zw 687a) = 10,8 N/mm Gleislänge
 $\rho_{D,bel}$ (Zw 700a) = 26,6 N/mm Gleislänge
 $\rho_{D,unbel}$ (Zw 700a) = 16,5 N/mm Gleislänge
 $\rho_{D,bel}$ (Zw 900) = 29,9 N/mm Gleislänge
 $\rho_{D,unbel}$ (Zw 900) = 21,2 N/mm Gleislänge

Bei der elastischen Zwischenlage Zw 700a ist der Durchschubwiderstand des belasteten Gleisrostes größer als der in Abschnitt 4.1 beim korrekten Andrehmoment der Schwellenschrauben von 200 Nm aufgeführte Widerstand von 25,3 N/mm Gleislänge. Daher wird dieser Wert für die Berechnung angewendet.

Tab 6.4 fasst die Ergebnisse bei Vorliegen gelockerter Schienenbefestigungen zusammen. Die zugehörigen Verschiebungsverläufe betreffend wird auf die Ausführungen im vorigen Abschnitt verwiesen.

	Oberbau mit Zwischenlage		
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
Δl_{res} [mm]	0,21	0,22	0,23
Δl_L [mm]	0,17	0,13	0,12
Δl_D [mm]	0,04	0,09	0,11

Tab. 6.4: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einer beschleunigenden 20t-Einzelachse bei gelockerten Schienenbefestigungen

Bei Einsatz der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a sinkt die Bewegung der Schwellen im Schotter auf ungefähr 80 % der gesamten Verschiebung, die mit 0,21 mm um 11 % höher ausfällt als die in Tab 4.9 wiedergegebenen Resultate bei korrektem Drehmoment der Schwellenschrauben. Unter Verwendung der elastischen Zwischenlagen Zw 700a bzw. Zw 900 liegt der Anteil an der Verschiebung der Schiene, der den Längsverschiebewiderstand aktiviert, bei rund 60 % bzw. 50 %. Eine Abweichung der Schienenlängsverschiebung von den in Tab. 4.9 aufgelisteten Längsbewegungen des Gleises ist nicht feststellbar.

6.4 Abweichung der Widerstände von den Mittelwerten

Aufgrund der in den Abschnitten 3.2.1 und 3.3.1 beschriebenen Einflüsse können die an der Abtragung der Längskräfte beteiligten Widerstände von den bislang zugrunde gelegten Mittelwerten abweichen. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, werden nachfolgend wieder zwei Grenzfälle betrachtet. Zum einen basiert die Ermittlung der Längsverschiebungen auf einer Kombination von maximalem Längsverschiebe- und minimalem Durchschubwiderstand. Zum anderen wird das Zusammenwirken von minimalem Längsverschiebe- und maximalem Durchschubwiderstand untersucht. Die benötigten Widerstandsgrößen resultieren für den Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes aus den Gleichungen (5-1) bzw. (5-2) zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft unter einem horizontalen Lastausbreitungswinkel von 90° bzw. ca. 60° . Für den unbelasteten Zustand des Gleises sind die im Abschnitt 3.2.2 erwähnten 4 N/mm Gleislänge bzw. 10 N/mm Gleislänge maßgebend. Im Falle des Durchschubwiderstandes sowohl des belasteten als auch des unbelasteten Gleisrostes lässt sich abermals auf die durchgeführten Versuche zurückgreifen. Hierbei entfällt die im Abschnitt 3.3.2.3 erläuterte Mittelwertbildung zugunsten der beiden Versuche, die die minimalen bzw. maximalen Werte liefern. Ebenso wie bei der Bestimmung der Mittelwerte bleibt der erste der vier Versuche gemäß EN 13146-1 /47/ bzw. prEN 13146-1 /48/ unberücksichtigt.

Die demnach für die Berechnungen relevanten Widerstände beinhaltet Tab. 6.5, Details finden sich in Anlage 6.3.

Widerstand [N/mm Gleislänge]	minimaler		maximaler	
	Widerstand			
	Radlast [N]			
	0	100 000	0	100 000
p	4	19,6	10	19,9
p_D (Zw 687a)	17,9	39,8	20,3	41,0
p_D (Zw 700a)	17,0	24,4	18,9	26,6
p_D (Zw 900)	22,9	36,8	23,6	39,1

Tab. 6.5: Für die Berechnungen relevante Widerstände

Es fällt auf, dass sich der minimale und maximale Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleises erheblich stärker voneinander unterscheiden als die Widerstände im belasteten Zustand des Gleisrostes sowie die Durchschubwiderstände. Dies deckt sich gut mit der Praxis, weil z.B. eine ungleichmäßige Verdichtung des Schotterbettes oder hohlliegende Schwellen in einem Gleis ohne einwirkende Verkehrslasten wesentlich größere Auswirkungen auf den Längsverschiebewiderstand haben als bei einem Gleisrost mit vertikaler Belastung.

Tab. 6.6 gibt die Ergebnisse für die beiden Grenzfälle maximaler Längsverschiebe- und minimaler Durchschubwiderstand sowie minimaler Längsverschiebe- und maximaler Durchschubwiderstand wieder. Auf die Darstellung der Verschiebungsverläufe wird infolge der qualitativen Übereinstimmung mit den entsprechenden Diagrammen in Anlage 4.10 verzichtet.

	Oberbau mit					
	maximalem Längsverschiebe-, minimalem Durchschubwiderstand			minimalem Längsverschiebe-, maximalem Durchschubwiderstand		
	und Zwischenlage					
	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900	Zw 687a	Zw 700a	Zw 900
Δl_{res} [mm]	0,17	0,20	0,21	0,25	0,27	0,28
Δl_L [mm]	0,15	0,12	0,12	0,22	0,17	0,16
Δl_D [mm]	0,02	0,08	0,09	0,03	0,10	0,12

Tab. 6.6: Maximale Längsverschiebung der Schiene (Δl_{res}) sowie zugehörige Bewegung der Schwellen im Schotter (Δl_L) und der Schiene in der Befestigung (Δl_D) unter einer beschleunigenden 20t-Einzelachse bei Abweichung der Widerstände von den Mittelwerten

Bei Einbau der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a werden die Schienenlängsverschiebungen wiederum zu ca. 90 % in eine Bewegung der Schwellen im Schotter umgesetzt. Die Gesamtverschiebung ist im Vergleich zu den Resultaten in Tab. 4.9 mit 0,17 mm bzw. 0,25 mm um 11 % niedriger bzw. 32 % höher. Ein Oberbau mit elastischer Zwischenlage Zw 700a kompensiert die Längsverschiebung der Schiene zu etwa 60 % durch ein Gleiten der Schwellen im Schotter, wobei die gesamte Längsbewegung um 9 % auf 0,20 mm ab- bzw. 23 % auf 0,27 mm zunimmt. Auch unter Verwendung der elastischen Zwischenlage Zw 900 liegt der Anteil, der eine Aktivierung des Längsverschiebewiderstandes hervorruft, bei ungefähr 60 % der gesamten Verschiebung. Diese erfährt gegenüber den Werten auf Basis mittlerer Widerstände einen Rückgang von ebenfalls 9 % auf 0,21 mm bzw. einen Zuwachs von 22 % auf 0,28 mm.

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt ist festzuhalten, dass von den untersuchten, betrieblichen Einflüssen die Radlastverlagerung im Gleisbogen sowie dynamische Radlastschwankungen die deutlichsten Konsequenzen für die Schienenlängsverschiebungen haben. Das Auftreten gelockerter Schienenbefestigungen und eine Abweichung der Widerstände von den Mittelwerten sind dagegen von untergeordneter Bedeutung. Bei der Beurteilung der Längsbewegungen muss zwischen der Größenordnung der einzelnen Anteile einerseits sowie den Absolutbeträgen der Verschiebungen andererseits differenziert werden.

Eine Abweichung des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes von den Mittelwerten macht sich in Bezug auf die Verhältnisse der beiden Bewegungsanteile zueinander kaum bemerkbar. Das Zusammenwirken von maximalem Längsverschiebe- und minimalem Durchschubwiderstand kann darüber hinaus vernachlässigt werden, da es zu einer Abnahme der Längsverschiebung um ca. 10 % führt. Lediglich bei einer Kombination von minimalem Längsverschiebe- und maximalem Durchschubwiderstand ist ein Anstieg der Gesamtverschiebung, je nach eingebauter Zwischenlage, von rund 20 % bis 30 % zu verzeichnen.

Beim Auftreten gelockerter Schienenbefestigungen ergibt sich eine Reduzierung der Bewegung der Schwellen im Schotter von etwa 90 % auf 80 % im Falle der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a und von ungefähr 60 % auf 50 % der gesamten Längsbewegung für die elastische Zwischenlage Zw 900. Die Schienenlängsverschiebung selbst erhöht sich ausschließlich bei Einsatz der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a um 11 %, während ein Oberbau mit elastischen Zwischenlagen Zw 700a oder Zw 900 diesbezüglich keine Änderungen aufweist.

Die Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamische Radlastschwankungen schlagen sich indessen sowohl in den Bewegungsanteilen, die die jeweiligen Widerstände aktivieren,

als auch in der Größe der Längsverschiebung nieder. Unter Verwendung der elastischen Zwischenlagen Zw 700a bzw. Zw 900 sinkt die Bewegung der Schwellen im Schotter auf ca. 50 % bis 60 % bzw. 45 % bis 60 %. Bei Einbau der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a beträgt der entsprechende Anteil weiterhin etwa 90 % der Gesamtverschiebung. Für alle drei Zwischenlagen ist aber eine erhebliche Zunahme der Längsbewegungen des Gleises zwischen 63 % und 84 % in Abhängigkeit vorwiegend von der Zwischenlage, der von den Zügen gefahrenen Geschwindigkeit und dem Verhalten der maximal zulässigen Längsverschiebekraft für Radlasten über 100 000 N festzustellen.

7 Zusammenfassung

7.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Bei den ersten in Schotteroberbau ausgeführten Schnellfahrstrecken in Deutschland wurde zur Vermeidung unzulässig großer Setzungen eine hohe Verdichtung der verschiedenen Schichten des Aufbaus angestrebt. Dies hatte im Vergleich zu den Strecken des Bestandsnetzes eine wesentlich geringere Elastizität des Oberbaus mit Bettungsmoduln von $0,30 \text{ N/mm}^3$ bis $0,40 \text{ N/mm}^3$ zur Folge. Daraus resultierten eine raschere Gleislageverschlechterung in Verbindung mit vermehrtem Instandhaltungsaufwand und negative Auswirkungen auf den Fahrkomfort der Züge. Um den genannten Problemen zu begegnen, kamen abschnittsweise anstatt der ursprünglich verwendeten, harten Kunststoffzwischenlagen Zw 687a elastische Zwischenlagen vom Typ Zw 900 und vom Typ Zw 700 zum Einsatz. Dennoch ließen sich die nachteiligen Eigenschaften des Schotteroberbaus auf Schnellfahrstrecken nicht vollständig beseitigen, da die mit zunehmender Weichheit der Zwischenlagen sich einstellende Spurerweiterung und Kantenpressung der Zwischenlagen deren Elastizität begrenzt.

Ebenso konnten auf Strecken mit Schwerlastverkehr im Ausland Gleislageveränderungen beobachtet werden, die sich im Laufe der Zeit stellenweise in einer dauerhaften Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen äußerten. Forschungsarbeiten haben einen Zusammenhang zu den in die Schienen eingeleiteten Beschleunigungs- oder Bremskräften der Züge aufgezeigt. Dieser entsteht dadurch, dass das Verhältnis von Längsverschiebe- zu Durchschubwiderstand mit der vertikalen Belastung des Gleisrostes variiert. Aufgrund dessen verursacht eine auf das Gleis aufgebrachte Längskraft ohne gleichzeitig einwirkende Achslasten eine Bewegung der Schwellen im Schotter, wohingegen beim belasteten Gleisrost eine Bewegung der Schiene in der Befestigung möglich ist. Zur Wiederherstellung des Kräftegleichgewichtes verringert sich mit wieder abnehmender Längskraft ebenfalls die Längsverschiebung der Schiene. Parallel hierzu nähern sich die Widerstände den Werten im unbelasteten Zustand des Gleises, weil auch die Vertikalbelastung zurückgeht. Daher kann sich eine vorhandene Bewegung der Schiene in der Befestigung zumindest teilweise durch eine Bewegung der Schwellen im Schotter ausgleichen. Somit verbleibt eine minimale Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen entgegen der Belastungsrichtung, die sich bei häufigen Lastwiederholungen gleicher Wirkungsrichtung aufsummiert.

Gemäß den ausländischen Untersuchungen wird das Auftreten des geschilderten Phänomens durch unterschiedliche Randbedingungen begünstigt, die ebenso auf den deutschen Schnellfahrstrecken mit Schotteroberbau vorliegen. Dazu gehören große Längsneigungen, hohe Achslasten der im Mischbetrieb verkehrenden Güterzüge sowie große Beschleuni-

gungs- oder Bremskräfte der mit Antischlupfregelung ausgestatteten Hochgeschwindigkeitszüge. Von Seiten des Oberbaus darf eine hohe Verdichtung des Schotterbettes und die Art der zwischen Schiene und Schwelle eingebauten Zwischenlage nicht außer Acht gelassen werden. Letztere spielt bei auf Beschleunigungs- oder Bremsvorgängen beruhenden Längskräften eine deutlich stärkere Rolle als bei Längskräften aus Temperaturänderungen. In Anbetracht dieses Sachverhaltes ist zu klären, wie sich die Auswechslung der Zwischenlagen auf den erwähnten Schnellfahrstrecken auswirkt. Den Schwerpunkt bilden hierbei die von Beschleunigungs- oder Bremskräften hervorgerufenen Schienenlängsverschiebungen sowie die Bewegungsanteile, die den Längsverschiebe- bzw. Durchschubwiderstand aktivieren. Zusätzlich beschäftigen sich die Überlegungen mit der Frage, inwieweit die verschiedenen Typen von Zwischenlagen die Beanspruchung einzelner Bauteile der Schienenbefestigung beeinflussen.

7.2 Entstehung und Abtragung von Längskräften im Gleis

Grundsätzlich rühren Längskräfte zum einen von Abweichungen der tatsächlichen Verschleißtemperatur von der anzustrebenden Temperatur und von Temperaturänderungen des Gleisrostes her. Zum anderen basieren sie auf Beschleunigungs- und Bremsvorgängen der Züge sowie dem so genannten „rolling out“-Effekt, der in seiner Wirkung einer Absenkung der neutralen Verspanntemperatur entspricht.

An der Abtragung der Kräfte sind der Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter und der Durchschubwiderstand der Schiene in der Befestigung beteiligt. In einem heute eher selten vorzufindenden Stoßlückengleis trägt zudem der Laschenreibungswiderstand der Stoßlaschenverbindung zur Aufnahme der Längskräfte bei.

Die Größe der Widerstände hängt von verschiedenen Parametern ab. Was den Längsverschiebewiderstand anbelangt, so sind die Schwellen sowie der Schotter, der vorhandene Instandhaltungszustand und die Witterungsbedingungen zu beachten. Hinzu kommen im belasteten Zustand die Achslast und die Geschwindigkeit der überfahrenden Züge sowie die Häufigkeit der Beanspruchung. Im Hinblick auf den Durchschubwiderstand müssen die Art der Schienenbefestigung und der zwischen Schiene und Schwelle eingebauten Zwischenlage berücksichtigt werden. Außerdem gehen die Reibung zwischen den einzelnen Bauteilen der Befestigung sowie die auf den Schienenfuß ausgeübte Anpresskraft in die Größe des Widerstandes ein. Eine Verkehrslast schließlich macht sich in der gleichen Art und Weise bemerkbar wie beim Längsverschiebewiderstand.

Für eine in sich geschlossene Berechnung eignet sich weder der wirkliche Verlauf des Längsverschiebe- noch des Durchschubwiderstandes. Einfachen Berechnungsverfahren lässt sich jedoch unter Beibehaltung einer ausreichenden Genauigkeit ein bilinearer Verlauf

der Widerstände zugrunde legen, dessen Übergang vom linear ansteigenden in den konstanten Bereich durch die so genannte Durchrutschgrenze gekennzeichnet ist.

Zur Bestimmung der Längsbewegungen des Gleises unter Verkehrslasten sind für den Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand Werte sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustand des Gleisrostes erforderlich. Beim Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleises kann auf eine ganze Reihe von Literaturangaben und Messergebnissen zurückgegriffen werden. In Bezug auf den entsprechenden Widerstand des belasteten Gleisrostes gestaltet sich die Bereitstellung der Eingangsgrößen erheblich schwieriger. Dies liegt an der geringen Anzahl von Daten aufgrund des großen Aufwandes für derartige Versuche. Daher wird aus dem Kriterium der Gleisquerverschiebung nach PRUD'HOMME eine Gleichung abgeleitet, mit der sich der Längsverschiebewiderstand je nach einwirkender Radlast näherungsweise errechnen lässt. Die Herleitung beruht auf mehreren Annahmen, deren Richtigkeit anhand einer Gegenüberstellung mit vorhandenen Messwerten und Angaben aus der Literatur zu überprüfen ist. Die Gleichung resultiert aus der Gewichtung des Beitrags der einzelnen Schwellenflächen zum Quer- bzw. Längsverschiebewiderstand sowie dem Vergleich der Wirkung des Vorkopfschotters und des Schwellenfachschotters bei einer Quer- bzw. Längsverschiebung des Gleises. Ergänzend erfolgt eine Betrachtung der Schwellenverdrehung durch die Einsenkung des Gleisrostes unter Verkehrslast sowie durch eine Längsverschiebung des Gleises. Letztlich steht eine Gleichung zur Ermittlung des Längsverschiebewiderstandes unter Radlasten von 65 000 N bis 100 000 N zur Verfügung.

Während für den Durchschubwiderstand im unbelasteten Zustand des Gleisrostes ebenfalls genügend Werte vorliegen, mangelt es für das belastete Gleis wie beim Längsverschiebewiderstand an verwertbaren Angaben. Allerdings war in diesem Zusammenhang die Durchführung von Versuchen am Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München möglich. Hierzu wurde der Durchschubversuch nach EN 13146-1 /47/ bzw. prEN 13146-1 /48/ dahingehend modifiziert, dass gleichzeitig eine vertikale Belastung auf den Stützpunkt aufgebracht werden kann. Um alle für die weiteren Überlegungen benötigten Eingangsgrößen zu erhalten, kamen Zwischenlagen vom Typ Zw 687a, Zw 700a und Zw 900 sowie unterschiedliche Vertikalkräfte zur Anwendung. Zusätzlich fand die Aufzeichnung sämtlicher Messergebnisse beim korrekten Drehmoment der Schwellenschrauben von 200 Nm einerseits und einem reduzierten Drehmoment von 150 Nm zur Simulation einer gelockerten Schienenbefestigung andererseits statt.

7.3 Rechenmodell zur Erfassung der Längsbewegungen des Gleisrostes

In die Entwicklung des Rechenmodells müssen die Verschiebungsgesetze sowie das Verhalten der Widerstände in Abhängigkeit von der Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung einfließen. Deshalb sind unterschiedliche Ansätze zu untersuchen.

Bezüglich der **Verschiebungsgesetze** lassen sich drei Fälle unterscheiden:

- **Konstanter Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand:** Die aus den Verkehrslasten resultierenden Bewegungen liegen deutlich über den Durchrutschgrenzen beider Widerstände, so dass der lineare Anstieg des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes bis zum Erreichen der Durchrutschgrenze für das Rechenmodell vernachlässigbar ist.
- **Linearer Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand:** Dieser Ansatz trifft zu, falls die Längsbewegungen des Gleises Werte unterhalb der Durchrutschgrenzen beider Widerstände annehmen. Dann lassen sich sämtliche Überlegungen auf den linearen Bereich des Verlaufs von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beschränken.
- **Bilinearer Verlauf von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand:** Sind die durch überfahrende Züge verursachten Bewegungen nur geringfügig höher als die Durchrutschgrenzen beider Widerstände, so muss dem Modell der vollständige, bilineare Verlauf des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes zugrunde gelegt werden.

Für das Verhalten der Widerstände mit zunehmender **Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung** werden vier Möglichkeiten in Betracht gezogen:

- **Keine Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes:** Beide Widerstände behalten ungeachtet der Entfernung vom Ort der Lasteinwirkung den Wert bei, den sie unmittelbar unter der aufgebrachten Verkehrslast haben. Dieser Fall ist zwar äußerst unwahrscheinlich, dennoch eignet er sich aufgrund seiner Einfachheit als Einstieg in die Entwicklung des Rechenmodells.
- **Sprunghafte Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes:** Hierbei wird bis zu einem bestimmten Abstand vom Lasteinleitungspunkt angenommen, dass die Widerstände des belasteten Gleisrostes wirken. In weiterer Entfernung von der betrachteten Verkehrslast kommen hingegen die Werte des unbelasteten Gleises zur Anwendung.

- **Lineare Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes:** Vom Ort der Lasteinwirkung aus nehmen beide Widerstände, ausgehend von der Größe direkt unter der Verkehrslast, linear bis auf den Wert des unbelasteten Gleisrostes ab, den sie in festgelegtem Abstand vom Lasteinleitungspunkt erreichen.
- **Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes:** Zwischen der Stelle, an der sich die Verkehrslast befindet und demzufolge die Widerstände des belasteten Gleises anzusetzen sind, sowie dem Bereich des Gleisrostes, der als unbelastet angesehen werden darf, folgt der Verlauf des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN. Diese Annahme dürfte die tatsächlichen Verhältnisse im Gleis im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Varianten am besten wiedergeben, da die vertikale Belastung des Gleisrostes die Größe beider Widerstände maßgeblich beeinflusst.

Die Verschiebungsgesetze betreffend stellt sich der Ansatz eines linearen Verlaufs von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand als richtig heraus. Was das Verhalten der Widerstände in Abhängigkeit von der Entfernung vom Ort der Lasteinleitung anbelangt, so sind die sprunghafte Änderung, die lineare Änderung sowie die Änderung entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes im Hinblick auf die Genauigkeit der Resultate gleichwertig. Letztere gestattet aber aufgrund der Eigenschaften der Biegelinienfunktion ohne zusätzlichen Aufwand eine Erweiterung auf mehrere Achslasten und wird daher weiter verfolgt.

7.4 Längsbewegungen des Gleisrostes und Folgerungen für die Praxis

Die Berechnungen umfassen zum einen die Variation der Verkehrslast und verschiedener Oberbauparameter. Hierzu gehören der Schwellentyp, der Stützpunktstand, die Zwischenlage und der Bettungsmodul. Zum anderen werden unterschiedliche, betriebliche Einflüsse untersucht. Konkret handelt es sich um die Radlastverlagerung im Gleisbogen sowie dynamische Radlastschwankungen, das Auftreten gelockerter Schienenbefestigungen und eine Abweichung der Widerstände von den Mittelwerten.

Es zeigt sich, dass von den variierten Parametern nur die Verkehrslast sowie die Zwischenlage für die Längsbewegungen des Gleises von Bedeutung sind. Demgegenüber können die anderen Parameter unberücksichtigt bleiben.

Unter einer nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene beschleunigenden 20t-Einzelachse beträgt die Schienenlängsverschiebung unabhängig von der eingebauten Zwi-

schenlage etwa 0,2 mm. Davon entfallen bei einem Oberbau mit harter Kunststoffzwischenlage Zw 687a 0,02 mm und bei Einsatz der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 rund 0,1 mm auf die Bewegung der Schiene in der Befestigung. Beim Beschleunigungsvorgang eines ICE 1 erreicht die Längsverschiebung zwischen 0,53 mm und 0,55 mm bei der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a sowie zwischen 0,63 mm und 0,70 mm unter Verwendung der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900. Der Bewegungsanteil, der den Durchschubwiderstand aktiviert, liegt bei Einbau der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a bei 0,05 mm bis 0,06 mm und im Falle der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 bei 0,24 mm bis 0,29 mm. Unter einem beschleunigenden ICE 3 stellt sich eine Längsbewegung von 0,60 mm bis 0,62 mm bei Einsatz der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a sowie von 0,73 mm bis 0,83 mm bei einem Oberbau mit elastischen Zwischenlagen Zw 700a oder Zw 900 ein. Die Schiene verschiebt sich in der Befestigung nahezu um das gleiche Maß wie unter den Achslasten des ICE 1. Somit belegen die Ergebnisse, dass die elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 ungeachtet der aufgetragenen Verkehrslast eine wesentlich größere Bewegung der Schiene in der Befestigung zulassen als die harte Kunststoffzwischenlage Zw 687a.

Von den betrieblichen Einflüssen haben lediglich die Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamische Radlastschwankungen weitergehende Konsequenzen für die Längsbewegungen des Gleisrostes. Im Vergleich hierzu bedürfen das Auftreten gelockerter Schienenbefestigungen sowie eine Abweichung der Widerstände von den Mittelwerten keiner Beachtung.

Bei Einbau der harten Kunststoffzwischenlage Zw 687a verharrt der Bewegungsanteil, der eine Aktivierung des Durchschubwiderstandes bewirkt, trotz Radlastverlagerung im Gleisbogen und dynamischer Radlastschwankungen bei ca. 10 % der gesamten Verschiebung. Unter Verwendung der elastischen Zwischenlagen Zw 700a bzw. Zw 900 steigt dieser jedoch auf 40 % bis 50 % bzw. 40 % bis 55 % an. Die Gesamtverschiebung der Schiene erhöht sich darüber hinaus vorwiegend in Abhängigkeit von der Zwischenlage zwischen 63 % und 84 % gegenüber den Schienenlängsverschiebungen bei statischer Belastung durch eine 20t-Einzelachse. Infolge dessen errechnen sich unter einem nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene beschleunigenden ICE 3 bei Einsatz der elastischen Zwischenlage Zw 900 maximale Längsverschiebungen von ungefähr 1,5 mm, verbunden mit einer Bewegung der Schiene in der Befestigung von rund 0,8 mm. Unter einem bremsenden ICE 3 beträgt die maximale Verschiebung der Schiene ca. 0,7 mm, wovon ungefähr 0,4 mm auf die Bewegung in der Schienenbefestigung entfallen. Ein Oberbau mit elastischer Zwischenlage Zw 700a zieht eine Reduzierung der entsprechenden Werte um etwa ein zehntel Millimeter nach sich.

Die Verschiebungsverläufe verdeutlichen, dass auf den in Schotteroberbau ausgeführten Schnellfahrstrecken ebenfalls eine dauerhafte Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen entgegen der Belastungsrichtung möglich ist. Wie auch bei den Strecken mit

Schwerlastverkehr im Ausland lässt sich deren Anwachsen mit zunehmender Anzahl von Längskräften gleicher Wirkungsrichtung nicht ausschließen. Zu dem beschriebenen Verhalten kommt es bevorzugt bei Einbau der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900.

Zudem konnte im Rahmen der Durchschubversuche beobachtet werden, dass die Arme der Spannklemmen einer Längsbewegung der Schiene zunächst über mehrere Millimeter folgen, bevor sie sich plötzlich vom Schienenfuß lösen und in ihre Ausgangsposition zurückkehren. Demnach wird bei einer durch Beschleunigungs- oder Bremskräfte ausgelösten Schienenlängsverschiebung der in Verschiebungsrichtung vorne liegende Spannklemmenarm geringfügig auf-, der hinten liegende Arm dagegen leicht zusammengebogen. Hieraus resultiert, vor allem unter Verwendung der elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900, eine zusätzliche Beanspruchung der Spannklemmen. In diesem Zusammenhang spielt ebenso die Häufigkeit der Beschleunigungs- oder Bremsvorgänge sowie die eventuell dauerhafte Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen entgegen der Belastungsrichtung und deren Aufsummierung im Laufe der Zeit eine große Rolle. Darüber hinaus darf im Hinblick auf die Beanspruchung der Spannklemmen eine mögliche Schlupfwellenbildung oder Verriefelung der Schienen, verbunden mit hochfrequenten Längsbewegungen, nicht außer Acht gelassen werden /54/, /55/.

Insgesamt wirken sich die elastischen Zwischenlagen Zw 700a und Zw 900 auf die Bewegung der Schiene in der Befestigung sowie eine dauerhafte Verschiebung der Schwellen gegenüber den Schienen entgegen der Belastungsrichtung erheblich ungünstiger aus als die harte Kunststoffzwischenlage Zw 687a. Daher muss gewährleistet sein, dass die einzelnen Bauteile der Schienenbefestigung, insbesondere die Spannklemmen, der höheren Belastung standhalten. Diesbezüglich wird die Aufnahme von Dauerschwingversuchen mit einer longitudinalen Schwingwegamplitude von ± 1 mm, wie bereits vom Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen vorgenommen /56/, /57/, in die entsprechenden Technischen Lieferbedingungen /58/ bzw. künftigen Bahn-Normen empfohlen. Alternativ wäre eine Modifikation der elastischen Zwischenlagen zur Verringerung des Bewegungsanteils, der den Durchschubwiderstand aktiviert, in Erwägung zu ziehen. Vorab sollten die durchgeführten Berechnungen durch Messungen im Betriebsgleis ergänzt werden.

8 Formelzeichen

a, a^*	= Stützpunktabstand [mm]
α	= Temperaturdehnzahl von Stahl [1/K]
b	= Breite des gedachten Längsträgers [mm]
β	= horizontaler Lastausbreitungswinkel im Schotter [°]
c	= dem Längsverschiebewiderstand entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]
c_{bel}	= dem Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]
c_{Δ}	= dem Längsverschiebewiderstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
$c_{\Delta, bel}$	= dem Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
$c_{\Delta, unbel}$	= dem Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
c_{res}	= resultierende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]
$c_{res, bel}$	= resultierende Federsteifigkeit des belasteten Gleisrostes [N/mm Verschiebeweg]
$c_{res, \Delta}$	= dem resultierenden Widerstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
$c_{res, \Delta, bel}$	= dem resultierenden Widerstand des belasteten Gleisrostes zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
$c_{res, \Delta, unbel}$	= dem resultierenden Widerstand des unbelasteten Gleisrostes zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
$c_{res, unbel}$	= resultierende Federsteifigkeit des unbelasteten Gleisrostes [N/mm Verschiebeweg]
c_{unbel}	= dem Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]
c_D	= dem Durchschubwiderstand entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]
$c_{D, bel}$	= dem Durchschubwiderstand des belasteten Gleisrostes entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]
$c_{D, \Delta}$	= dem Durchschubwiderstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
$c_{D, \Delta, bel}$	= dem Durchschubwiderstand des belasteten Gleisrostes zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
$c_{D, \Delta, unbel}$	= dem Durchschubwiderstand des unbelasteten Gleisrostes zugeordneter Elastizitätsbeiwert [N/mm ²]
$c_{D, unbel}$	= dem Durchschubwiderstand des unbelasteten Gleisrostes entsprechende Federsteifigkeit [N/mm Verschiebeweg]
C, C^*	= Bettungsmodul [N/mm ³]

E	= Elastizitätsmodul des Schienenstahls [N/mm ²]
η	= Einflusszahl zur Berücksichtigung der Nachbarachsen [-]
F, F^*	= wirksame Schwellenaugerfläche [mm ²]
F_r	= Reibungskraft [N]
F_Q	= Schienenquerschnittsfläche [mm ²]
F_{SF}	= dem Schwellenfach zugewandte Lasteinleitungsfläche [mm ²]
F_{VK}	= dem Vorkopfschotter zugewandte Lasteinleitungsfläche [mm ²]
F'_{SF}	= in die Berechnung eingehende Schwellenflanke [mm ²]
F'_{VK}	= in die Berechnung eingehende Stirnfläche [mm ²]
I	= Trägheitsmoment der Schiene [mm ⁴]
k	= Koeffizient [-]
$k_{\Delta l}$	= Konstante [1/mm]
l	= Schienenlänge [mm]
l_A	= Atmungslänge des Gleisrostes [mm]
$l_{\Delta l}$	= Länge der linearen Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes [mm]
L, L^*_a, L^*_C, L^*_F	= elastische Länge der Schiene [mm]
Δl	= Längenänderung [mm]
Δl_{res}	= aus Verkehrslast resultierende Längsverschiebung der Schiene [mm]
Δl_D	= Bewegung der Schiene in der Befestigung [mm]
$\Delta l'_D$	= dem Durchschubwiderstand zugeordnete Durchrutschgrenze [mm]
Δl_L	= Bewegung der Schwellen im Schotter [mm]
$\Delta l'_L$	= dem Längsverschiebewiderstand zugeordnete Durchrutschgrenze [mm]
μ	= Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene [-]
n	= Faktor zur Berücksichtigung der Gleislage [-]
p	= Längsverschiebewiderstand der Schwellen im Schotter [N/mm Gleislänge]
p_{bel}	= Längsverschiebewiderstand des belasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]
p_{mittel}	= mittlerer Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]
p_{res}	= resultierender Widerstand [N/mm Gleislänge]
$p_{res,bel}$	= resultierender Widerstand des belasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]
$p_{res,mittel}$	= mittlerer, resultierender Widerstand [N/mm Gleislänge]
$p_{res,unbel}$	= resultierender Widerstand des unbelasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]
p_{unbel}	= Längsverschiebewiderstand des unbelasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]
p_D	= Durchschubwiderstand der Schiene in der Befestigung [N/mm Gleislänge]
$p_{D,bel}$	= Durchschubwiderstand des belasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]
$p_{D,mittel}$	= mittlerer Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]
$p_{D,unbel}$	= Durchschubwiderstand des unbelasteten Gleisrostes [N/mm Gleislänge]

P'	= maximal zulässige Längsverschiebekraft ohne Oberbaueinflüsse [kN]
P_D	= Durchschubkraft [kN]
P_S	= Anteil der Sohlreibung an der Längsverschiebekraft [kN]
P_{SF}	= Anteil des Schwellenfachschotters an der Längsverschiebekraft [kN]
P_{VK}	= Anteil des Vorkopfschotters an der Längsverschiebekraft [kN]
ΣP	= maximal zulässige Längsverschiebekraft [kN]
φ	= Geschwindigkeitsbeiwert [-]
Q	= Radlast
Q_{max}	= maximale Radlast einschließlich der Radlastverlagerung im Gleisbogen sowie dynamischer Radlastschwankungen
ΔQ_S	= maximale dynamische Radlastschwankung
ΔQ_V	= Radlastverlagerung im Gleisbogen
S, S^*_a, S^*_c, S^*_f	= Stützpunktkraft [N]
σ	= Spannung [N/mm ²]
t	= Faktor zur Berücksichtigung der statistischen Sicherheit [-]
ΔT	= Temperaturänderung [K]
V	= Geschwindigkeit [km/h]
W	= maximal zulässige Querverschiebekraft ohne Oberbaueinflüsse [kN]
W_S	= Anteil der Sohlreibung an der Querverschiebekraft [kN]
W_{SF}	= Anteil des Schwellenfachschotters an der Querverschiebekraft [kN]
W_{VK}	= Anteil des Vorkopfschotters an der Querverschiebekraft [kN]
x	= Abstand der Nachbarachsen von der Bezugsachse [mm]
x_1	= Koordinate des ersten Nulldurchgangs der Biegelinie nach WINKLER/ ZIMMERMANN [mm]
x_2	= Koordinate des zweiten Nulldurchgangs der Biegelinie nach WINKLER/ ZIMMERMANN [mm]
x_c	= Koordinate der betrachteten Feder in Schienenlängsrichtung [mm]
$x_{\Delta l}$	= Koordinate in Schienenlängsrichtung von außen [mm]
$x'_{\Delta l}$	= Koordinate in Schienenlängsrichtung [mm]
y, y^*_a, y^*_c, y^*_f	= Einsenkung der Schiene [mm]
ΣY	= maximal zulässige Querverschiebekraft [kN]

9 Literaturverzeichnis

- / 1 / Stahl Walter: Anpassung des Schotteroberbaus an die Anforderungen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs durch die Verwendung von hochelastischen Zwischenlagen und einer Schiene mit breiterem Fuß. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 74, 1998
- / 2 / Eisenmann Josef, Leykauf Günther, Mattner Lothar: Vorschläge zur Erhöhung der Oberbauelastizität. In: Eisenbahntechnische Rundschau 43 (1994), S. 491 – 494
- / 3 / Forschungsbericht: Messungen am Schotteroberbau mit elastischeren Zwischenlagen auf der NBS Würzburg-Hannover. Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1222 vom 11. Januar 1988
- / 4 / Forschungsbericht: Einsenkungsmessungen am Oberbau der NBS Würzburg-Hannover – Schotteroberbau mit elastischen Zwischenlagen Zw 900 und FF Bauart Rheda/Sengeberg. Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1581 vom 19. Juli 1995
- / 5 / Deutsche Bahn AG: TL 918 235 – Technische Lieferbedingungen für elastische Zwischenlagen, Ausgabe 02/1994
- / 6 / Eisenmann Josef, Rump Reinhold: Ein Schotteroberbau für hohe Geschwindigkeiten. In: Eisenbahntechnische Rundschau 46 (1997), S. 99 – 108
- / 7 / Pandrol International Limited, Track design for very high traction forces. In: Rail Track, Journal of the Rail Track Association of Australia 1992, S. 24 – 30
- / 8 / Leykauf Günther: Umdrucke zur Grundvorlesung – Teil I – 5. Semester, Ausgabe WS 2002/2003, Lehrstuhl für Bau von Landverkehrswegen, TU München, 2002
- / 9 / Fastenrath Fritz: Die Eisenbahnschiene. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin – München – Düsseldorf, 1977
- / 10 / Bösl Bernhard: Längsbewegungen des Gleisrostes als Folge von Normalkraftstörungen. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 65, 1992
- / 11 / Frederick C. O., Jones E. G.: Miscellaneous Report Mr Met 1 – A Review of Rail Research on British Rail. Railway Technical Centre, Derby, 1980
- / 12 / Produktprospekt der Voest-Alpine Schienen GmbH, Leoben/Donawitz, 1999
- / 13 / Deutsche Bahn AG: Richtlinie 824.5010 – Oberbauarbeiten durchführen – lückenlose Gleise und Weichen herstellen, Ausgabe 08/2002
- / 14 / Edel Karl-Otto: Verspannungs- und neutrale Temperaturen der Schienen lückenloser Gleise. In: Signal und Schiene (1989), S. 88 – 90
- / 15 / Deutsche Bahn AG: DS 820 03 – Richtlinien für Oberbauarbeiten, Bekanntgabe 12
- / 16 / Eisenmann Josef, Leykauf Günther: Auswirkungen einer nicht gleichmäßigen Schienentemperatur auf das Gleis. In: Eisenbahningenieur 40 (1989), S. 109 – 114

- / 17 / Leykauf Günther: Umdrucke zur Grundvorlesung – Teil III – 7. Semester, Ausgabe WS 2001/2002, Lehrstuhl für Bau von Landverkehrswegen, TU München, 2001
- / 18 / Deutsche Bahn AG: DS 820 01 – Oberbaurichtlinien für Regelspurbahnen, Bekanntgabe 17
- / 19 / Bericht Deutsche Bahn AG 511 702/1 vom 10. Mai 1995 Ka Minden
- / 20 / Stieber Jürgen: Experimentelle und theoretische Ermittlung des Längskraft- und Verformungsverlaufes im Weichenbereich. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 32, 1980
- / 21 / Lichtberger Bernhard: Handbuch Gleis – Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2003
- / 22 / Führer Gunther: Oberbauberechnung. Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 108 Berlin, 1978
- / 23 / Jericho Erwin: Schienen mit geringeren Eigenspannungen. In: Eisenbahntechnische Rundschau 46 (1997), S. 663 – 666
- / 24 / Wattmann J.: Längskräfte im Eisenbahngleis. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt, 1957
- / 25 / Deutsche Bundesbahn, Bundesbahn-Sozialamt (Hrsg.): Bauarten des Oberbaues, DB-Fachbuch, Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg – Mainz, 1979, Band 8/12
- / 26 / Siekmeier Ernst Wilhelm: Zur Frage der Einwirkung von Längskräften auf das lückenlose Gleis und die Gleisbettung. In: Glasers Annalen 88 (1964) Nr. 8, S. 278 – 284, Nr. 9, S. 328 – 337, Nr. 10, S. 361 – 368
- / 27 / Gerlich Kurt, Pahnke Ulf: Abtragung der Längskräfte im Eisenbahnbrückenbau. In: Archiv für Eisenbahntechnik 37 (1982), S. 19 – 30
- / 28 / Dogneton P.: Experimentelle Bestimmung des Querverschiebe- und Längswiderstandes von Gleisen im Schotterbett. ORE – Forschungs- und Versuchsamts des Internationalen Eisenbahnverbandes, Utrecht, April 1975
- / 29 / Forschungsbericht: Prüfung einer elastischen Schwellenbesohlung. Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1635 vom 22. Juli 1996
- / 30 / Müller-Boruttau Frank H., Kleinert Ullrich: Betonschwellen mit elastischer Sohle – Erfahrungen und Erkenntnisse mit einem neuen Bauteil. In: Eisenbahntechnische Rundschau 50 (2001), S. 90 – 98
- / 31 / Leykauf Günther, Stahl Walter: Untersuchungen und Erfahrungen mit besohnten Schwellen. In: Eisenbahningenieur 55 (2004), S. 8 – 16
- / 32 / Eisenmann Josef, Leykauf Günther, Mattner Lothar: Elastisches und plastisches Verformungsverhalten von Eisenbahnschotter. In: Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 67, 1993

- / 33 / Forschungsbericht: Über die Ermittlung des Längsverschiebewiderstandes des Gleisrostes. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 805 vom 20. November 1977
- / 34 / Rießberger Klaus: Zur Entgleisungssicherheit der Rollenden Landstraße. In: Glasers Annalen 118 (1994) Nr. 2/3, S. 70 – 82
- / 35 / Forschungsbericht: Differenzierung des Querverschiebewiderstandes von Schwellen nach Sohl-, Flanken- und Vorkopfwiderstand. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1983 vom 30. Januar 2003
- / 36 / Forschungsbericht: Differenzierung des Querverschiebewiderstandes von Schwellen nach Sohl-, Flanken- und Vorkopfwiderstand – Betriebsgleis mit hoher Verkehrsbelastung. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 2069 vom 15. Dezember 2003
- / 37 / Klugar Karl: Einfluß der mechanischen Nachverdichtungsverfahren auf den Querverschiebewiderstand des Gleises. In: Eisenbahntechnische Rundschau 21 (1972), S. 244 – 247
- / 38 / Produktinformation der Pfeleiderer Infrastrukturtechnik GmbH & Co. KG, Neumarkt, 2003
- / 39 / Deutsche Bahn AG: Richtlinie 800.0130 – Netzinfrastuktur Technik entwerfen - Streckenquerschnitte auf Erdkörpern, Ausgabe 02/1997
- / 40 / Eisenmann Josef, Leykauf Günther: Sonderdruck aus Beton-Kalender 2000 – Feste Fahrbahn für Schienenbahnen. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2000
- / 41 / Leykauf Günther, Maleki Nasser: Langzeitverhalten von Spannbetonschwellen. In: Eisenbahningenieur 44 (1993), S. 266 – 276
- / 42 / Leykauf Günther: Umdrucke zur Grundvorlesung – Teil II – 6. Semester, Ausgabe SS 2003, Lehrstuhl für Bau von Landverkehrswegen, TU München, 2003
- / 43 / Forschungsbericht: Versuch zur Ermittlung des Längsverschiebewiderstandes eines schottergelagerten B 75-Gleisrostes auf Brücken mit Unterschottermatten. Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1727 vom 18. November 1998
- / 44 / Matthews Volker: Bahnbau. 4. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart – Leipzig, 1998
- / 45 / Deutsche Bahn AG: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus, DB-Fachbuch, 5. Auflage, Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg – Mainz, 2000
- / 46 / Produktprospekt der Vossloh Rail Systems GmbH, Werdohl, 1999
- / 47 / EN 13146-1: Bahnanwendungen – Oberbau, Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme, Teil 1: Ermittlung des Durchschubwiderstandes in Längsrichtung. Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, Februar 2003

- / 48 / prEN 13146-1: Bahnanwendungen, Oberbau, Prüfverfahren für Befestigungssysteme, Teil 1: Durchschubprüfung. 1. Manuskript Entwurf März 1998
- / 49 / Hartung Joachim: Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 5. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München – Wien, 1986
- / 50 / Kupfer Robert: Untersuchung der während einer Zugüberfahrt im Gleis auftretenden Längsbewegungen. In: Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 77, 2002, S. 37 – 46
- / 51 / Hering Ekbert, Martin Rolf, Stohrer Martin: Physik für Ingenieure. 8. Auflage, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, 2002
- / 52 / Kurz Heinz R.: Die ICE-Familie – Neue Einsatzfelder durch Mehrsystem- und Neige-technik. In: Eisenbahntechnische Rundschau 47 (1998), S. 264 – 274
- / 53 / LOK Report – ICE-Reihungen – Anmerkungen zu den ICE 3 (Baureihen 403 + 406). www.lok-report.de, 2003
- / 54 / Forschungsbericht: Verformungsmessungen an der Schienenbefestigung 1403 D („Alternative“) bei den Kölner Verkehrsbetrieben. Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1534 vom 27. Juni 1994
- / 55 / Forschungsbericht: Erforschung der hochfrequenten Verformungen an der W-Schienenbefestigung mit SkI1 im Bereich von Hochgeschwindigkeitsstrecken der DB AG (Teil: Dynamische Messung). Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1794a vom 04. Februar 2000
- / 56 / Forschungsbericht: Ermittlung der Dauer-Schwingweite für Spannklemmen SkI 20 in vertikaler und horizontaler Richtung. Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 1910 vom 26. Oktober 2001
- / 57 / Forschungsbericht: Prüfung von Vossloh-Spannklemmen SkI 21 für die W-Befestigung. Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Bericht Nr. 2105 vom 19. April 2004
- / 58 / Deutsche Bahn AG: TL 918 127 – Technische Lieferbedingungen Spannklemmen, Spannägeln und Spannbügel, Ausgabe 11/1991

10 Anlagenverzeichnis

Abschnitt 1 Einführung

- Anlage 1.1 Bewegung der bogeninneren Schiene in der Befestigung unter einem 15 000t schweren Güterzug in einer Steigung von 15 ‰ im Radius

Abschnitt 3 Abtragung der Längskräfte

- Anlage 3.1 Schienenstoß auf Breitschwellen (K-Befestigung auf durch Bolzen gekuppelten Holzschwellen)
- Anlage 3.2 Vorgehensweise bei der Berechnung der Werte des Längsverschiebewiderstandes
- Anlage 3.3 K-Oberbau, KS-Oberbau und W-Oberbau
- Anlage 3.4 Unverformte Zwischenlage Zw 700a und verformte Zwischenlage Zw 700a bei gleichzeitiger Einwirkung der Längskraft und einer Vertikalkraft von 75 kN
- Anlage 3.5 Unverformte Zwischenlage Zw 900 und verformte Zwischenlage Zw 900 bei gleichzeitiger Einwirkung der Längskraft und einer Vertikalkraft von 75 kN

Abschnitt 4 Rechenmodell zur Bestimmung der Längsbewegungen des Gleisrostes

- Anlage 4.1 Werte des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes
- Anlage 4.2 Längsbewegungen **ohne Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **ohne Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**
- Anlage 4.3 Längsbewegungen **ohne Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **mit sprunghafter Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**
- Anlage 4.4 Längsbewegungen **ohne Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **mit linearer Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**
- Anlage 4.5 Längsbewegungen **ohne Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **mit Änderung der Widerstände entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**

- Anlage 4.6 Längsbewegungen **mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **ohne Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**
- Anlage 4.7 Plausibilitätskontrolle der Längsbewegungen **mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **ohne Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**
- Anlage 4.8 Längsbewegungen **mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **mit sprunghafter Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**
- Anlage 4.9 Längsbewegungen **mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **mit linearer Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**
- Anlage 4.10 Längsbewegungen **mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg** und **mit Änderung der Widerstände entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes**

Abschnitt 5 Längsbewegungen des Gleisrostes unter Verkehrslasten

- Anlage 5.1 Gleichungen zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft für die unterschiedlichen Kombinationen der Parameter Schwellentyp und Stützpunkt Abstand
- Anlage 5.2 Eingangsgrößen für die Berechnung der Längsbewegungen unter einer 20t-Einzelachse
- Anlage 5.3 Einfluss des Bettungsmoduls auf die elastische Länge der Schiene und die Stützpunktkraft
- Anlage 5.4 Einfluss des Stützpunkt Abstandes auf die elastische Länge der Schiene und die Stützpunktkraft
- Anlage 5.5 Einfluss der wirksamen Schwellenauflagerfläche auf die elastische Länge der Schiene und die Stützpunktkraft
- Anlage 5.6 Eingangsgrößen für die Berechnung der Längsbewegungen unter einem ICE 1
- Anlage 5.7 Eingangsgrößen für die Berechnung der Längsbewegungen unter einem ICE 3

Abschnitt 6 Betriebliche Einflüsse auf die Längsbewegungen des Gleisrostes

- Anlage 6.1 Faktoren zur Berücksichtigung der Radlastverlagerung im Gleisbogen sowie dynamischer Radlastschwankungen
- Anlage 6.2 Werte des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes bei gelockerter Schienenbefestigung
- Anlage 6.3 Minimale und maximale Werte des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes

11 Anlagen

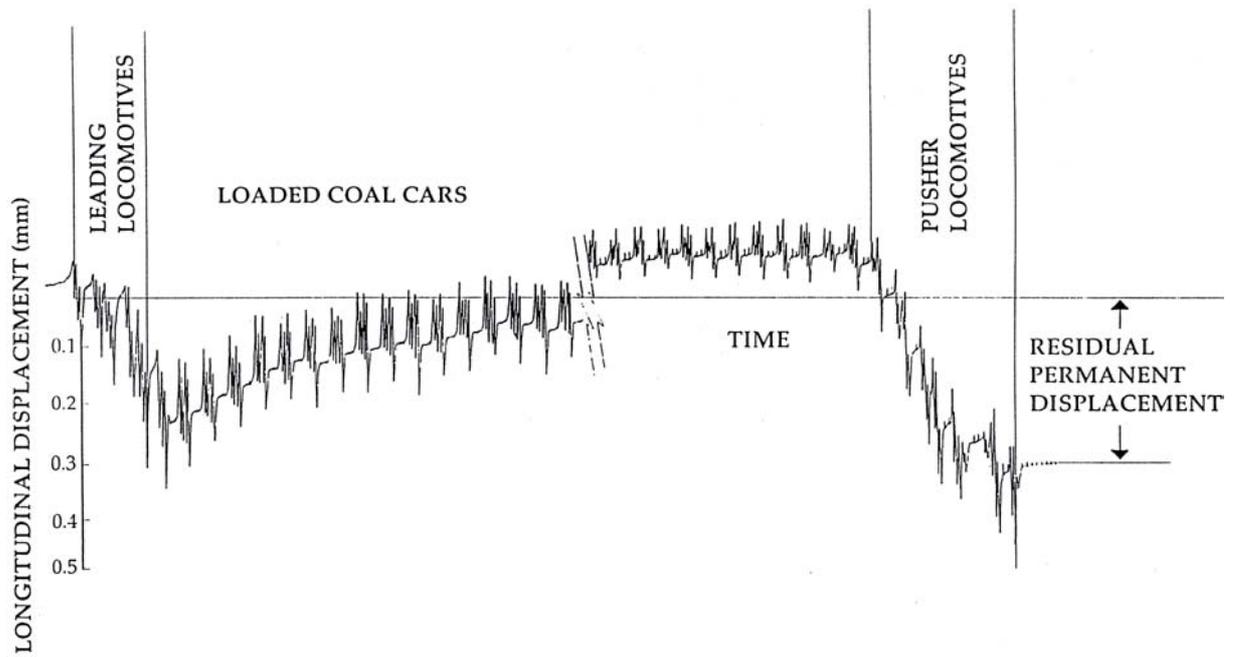


Abb.: Bewegung der bogeninneren Schiene in der Befestigung unter einem 15 000t schweren Güterzug in einer Steigung von 15 ‰ im Radius /7/

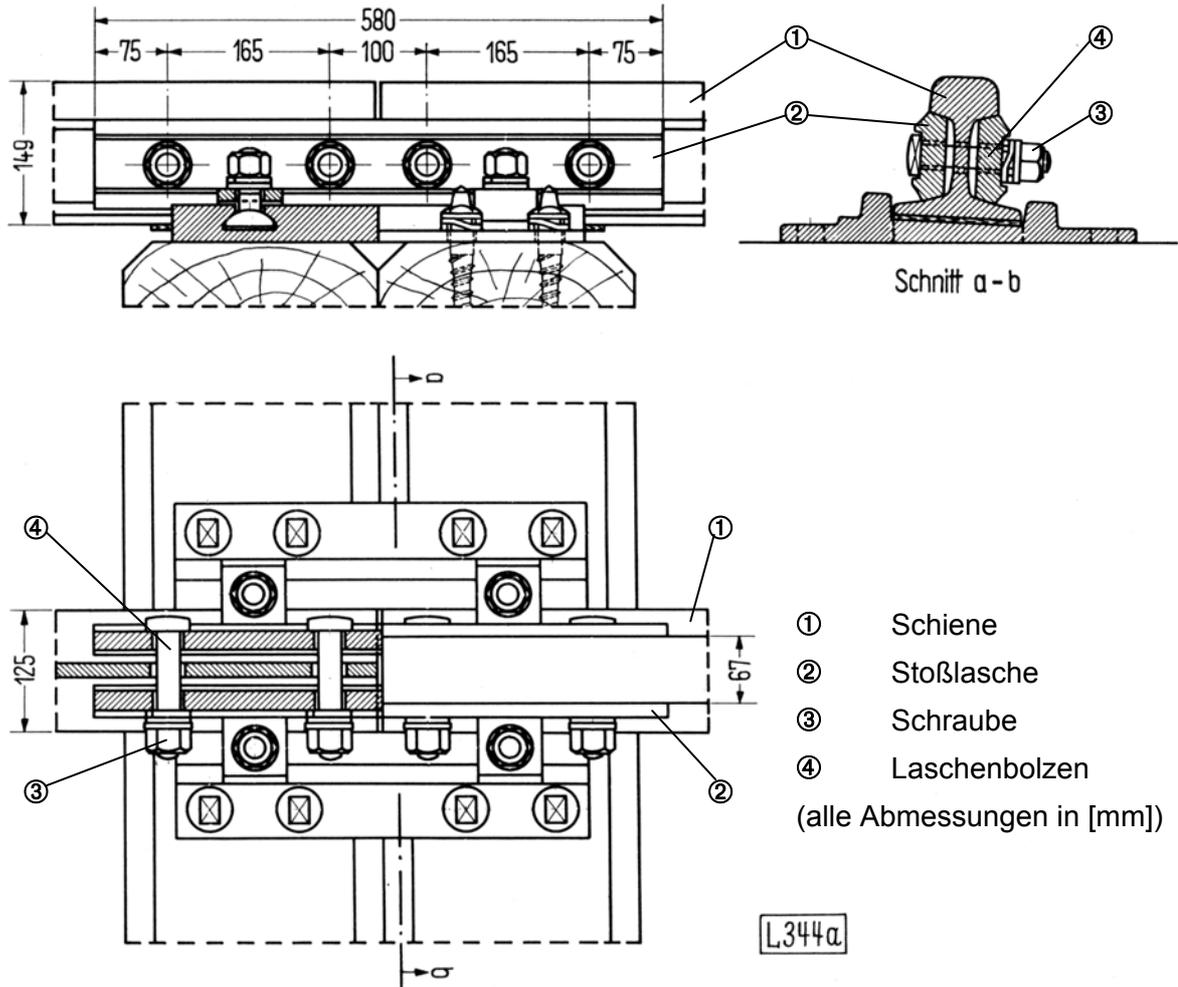


Abb.: Schienenstoß auf Breitschwellen (K-Befestigung auf durch Bolzen gekuppelten Holzschwellen) /25/

$k = 1,00; \beta = 90^\circ$		
$Q = 0 \text{ kN}$	$Q = 50 \text{ kN}$	$Q = 100 \text{ kN}$
maximal zulässige Längsverschiebekraft eines 2 m langen Gleisabschnittes:		
$\sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0}{3} + 11,6\right)$ = 11,60 kN	$\sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 50}{3} + 11,6\right)$ = 44,93 kN	$\sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 100}{3} + 11,6\right)$ = 78,27 kN
Längsverschiebewiderstand (gemäß Definition auf die halbe Schwelle bezogen):		
$\rho = \frac{11,60 \cdot 1000}{2000 \cdot 2}$ = 2,9 N/mm Gleislänge	$\rho = \frac{44,93 \cdot 1000}{2000 \cdot 2}$ = 11,2 N/mm Gleislänge	$\rho = \frac{78,27 \cdot 1000}{2000 \cdot 2}$ = 19,6 N/mm Gleislänge
$k = 1,00; \beta = 60^\circ$		
$Q = 0 \text{ kN}$	$Q = 50 \text{ kN}$	$Q = 100 \text{ kN}$
maximal zulässige Längsverschiebekraft eines 2 m langen Gleisabschnittes:		
$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0}{3} + 12,8\right)$ = 12,80 kN	$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 50}{3} + 12,8\right)$ = 46,13 kN	$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 100}{3} + 12,8\right)$ = 79,47 kN
Längsverschiebewiderstand (gemäß Definition auf die halbe Schwelle bezogen):		
$\rho = \frac{12,80 \cdot 1000}{2000 \cdot 2}$ = 3,2 N/mm Gleislänge	$\rho = \frac{46,13 \cdot 1000}{2000 \cdot 2}$ = 11,5 N/mm Gleislänge	$\rho = \frac{79,47 \cdot 1000}{2000 \cdot 2}$ = 19,9 N/mm Gleislänge

Tab.: Vorgehensweise bei der Berechnung der Werte des Längsverschiebewiderstandes

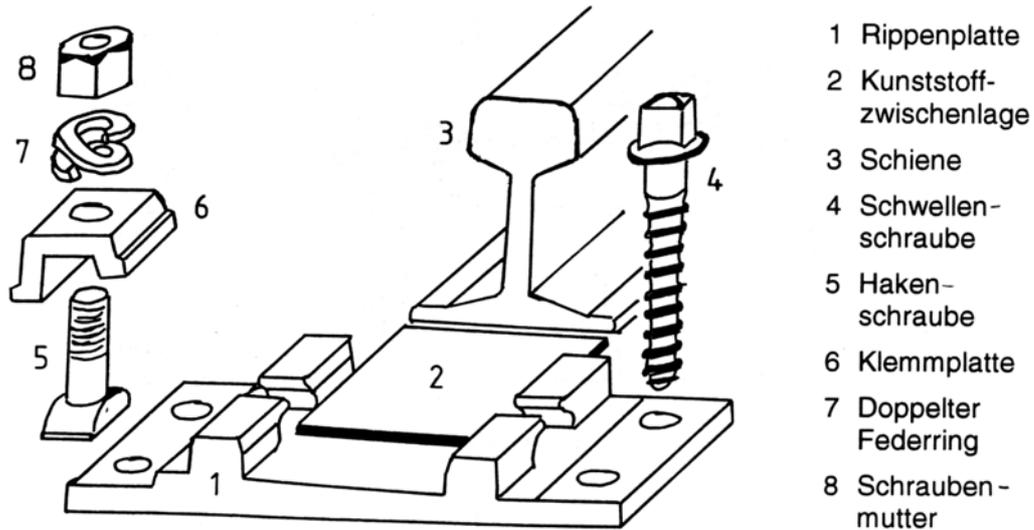


Abb.: K-Oberbau /44/

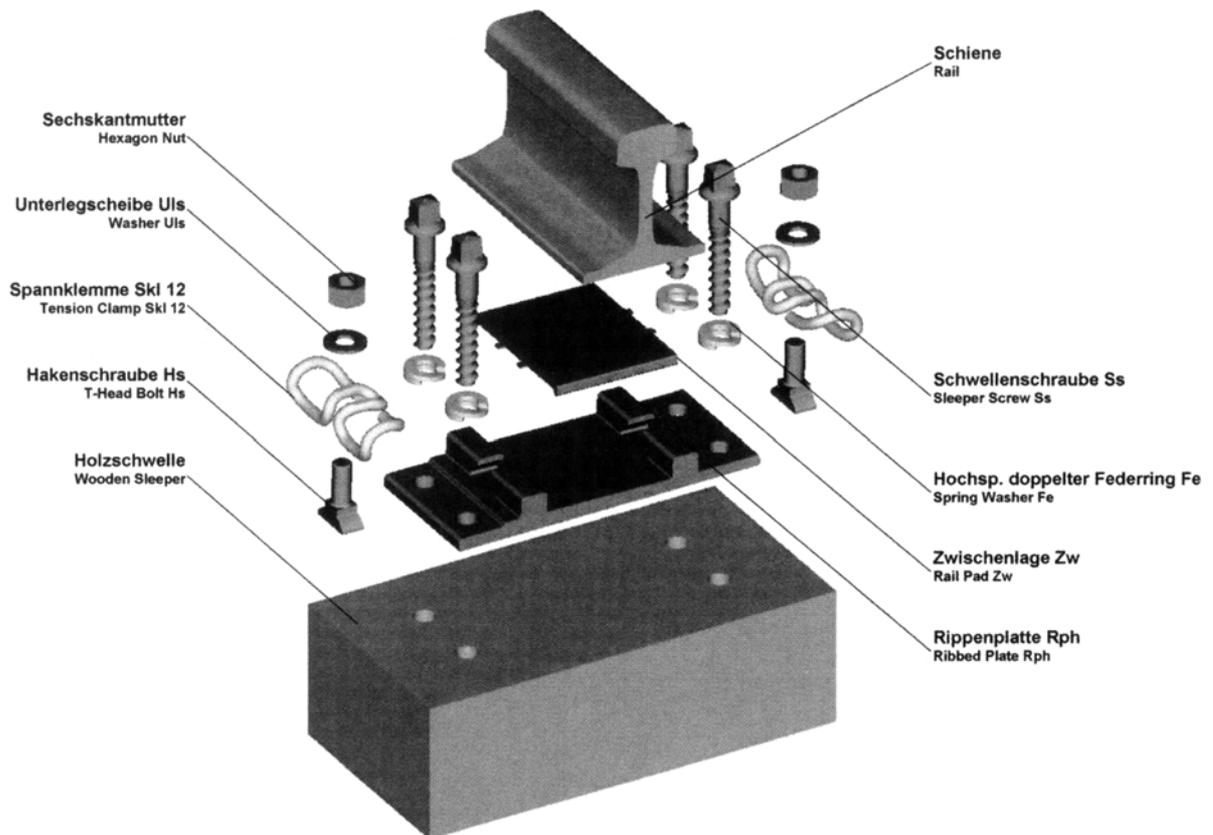


Abb.: KS-Oberbau /45/

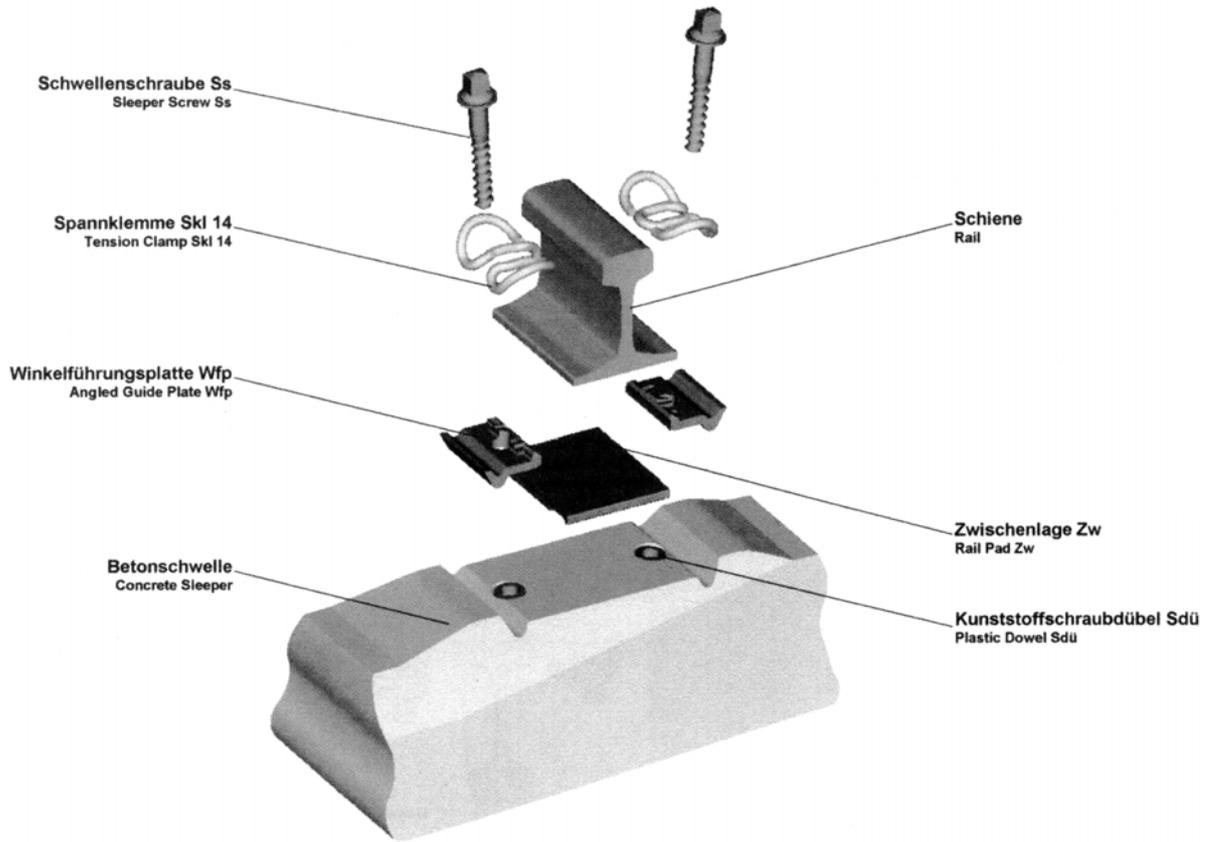


Abb.: W-Oberbau /45/

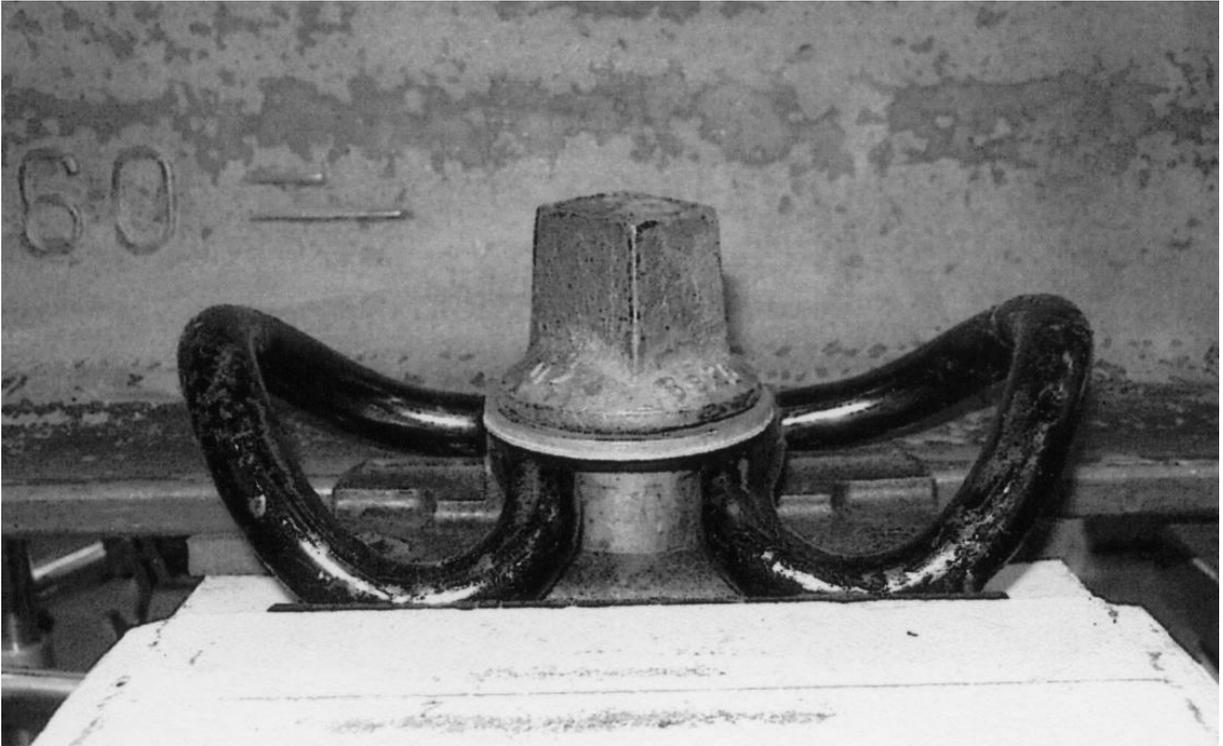


Abb.: Unverformte Zwischenlage Zw 700a



Abb.: Verformte Zwischenlage Zw 700a bei gleichzeitiger Einwirkung der Längskraft und einer Vertikalkraft von 75 kN



Abb.: Unverformte Zwischenlage Zw 900

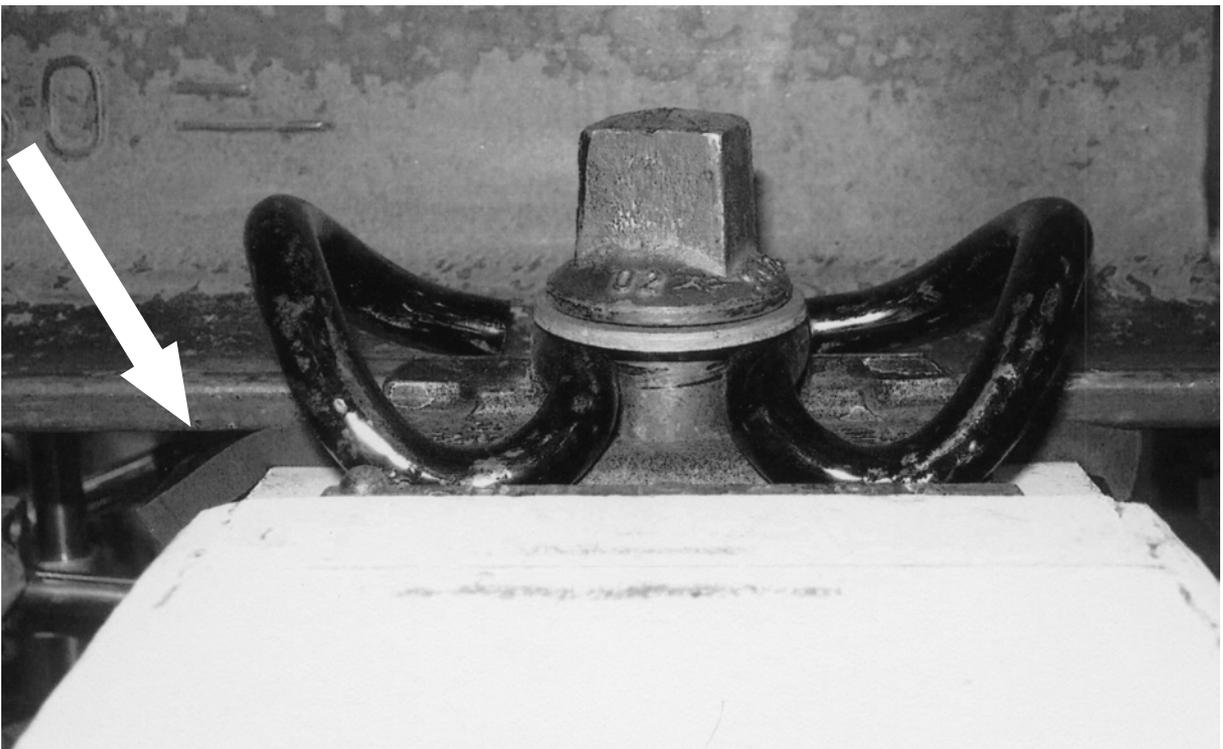


Abb.: Verformte Zwischenlage Zw 900 bei gleichzeitiger Einwirkung der Längskraft und einer Vertikalkraft von 75 kN

Werte des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes

Längsverschiebewiderstand:

$$\sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 100}{3} + 11,6 \right) = 78,27 \text{ kN}$$

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 100}{3} + 12,8 \right) = 79,47 \text{ kN}$$

$$\rho_{bel} = \frac{78,27 + 79,47}{2} \cdot \frac{1000}{2000 \cdot 2} = 19,7 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Stützpunktkraft:

$$y = \frac{100\,000}{2 \cdot 475 \cdot 0,1 \cdot 857} \cdot 1 = 1,2 \text{ mm}$$

$$b = \frac{570\,000}{2 \cdot 600} = 475 \text{ mm}$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 210\,000 \cdot 30\,550\,000}{475 \cdot 0,1}} = 857 \text{ mm}$$

$$S = 475 \cdot 600 \cdot 0,1 \cdot 1,2 = 34,99 \text{ kN}$$

Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 687a:

$$\rho_{D,bel}(\text{Zw 687a}) = \frac{(-0,0010 \cdot 34,99^2 + 0,4064 \cdot 34,99 + 11,3971) \cdot 1000}{600}$$

$$= 40,7 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\rho_{D,unbel}(\text{Zw 687a}) = \frac{11,3971 \cdot 1000}{600} = 19,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 700a:

$$\rho_{D,bel}(\text{Zw 700a}) = \frac{(-0,0010 \cdot 34,99^2 + 0,1592 \cdot 34,99 + 10,8325) \cdot 1000}{600}$$

$$= 25,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\rho_{D,unbel}(\text{Zw 700a}) = \frac{10,8325 \cdot 1000}{600} = 18,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 900:

$$p_{D, bel}(Zw 900) = \frac{(-0,0024 \cdot 34,99^2 + 0,3361 \cdot 34,99 + 13,9548) \cdot 1000}{600}$$

$$= 38,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, unbel}(Zw 900) = \frac{13,9548 \cdot 1000}{600} = 23,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Längsbewegungen ohne Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und ohne Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$p_{res} = \frac{19,7 \cdot 40,7}{19,7 + 40,7} = 13,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$l_A = \frac{0,3 \cdot 100\,000}{2 \cdot 13,3} = 1130 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{res}(1130 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{13,3 \cdot 1130^2}{210\,000 \cdot 7690} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_L(1130 \text{ mm}) = \frac{5,2 \cdot 10^{-3}}{40,7 + 19,7} \cdot 40,7 = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1130 \text{ mm}) = \frac{5,2 \cdot 10^{-3}}{40,7 + 19,7} \cdot 19,7 = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

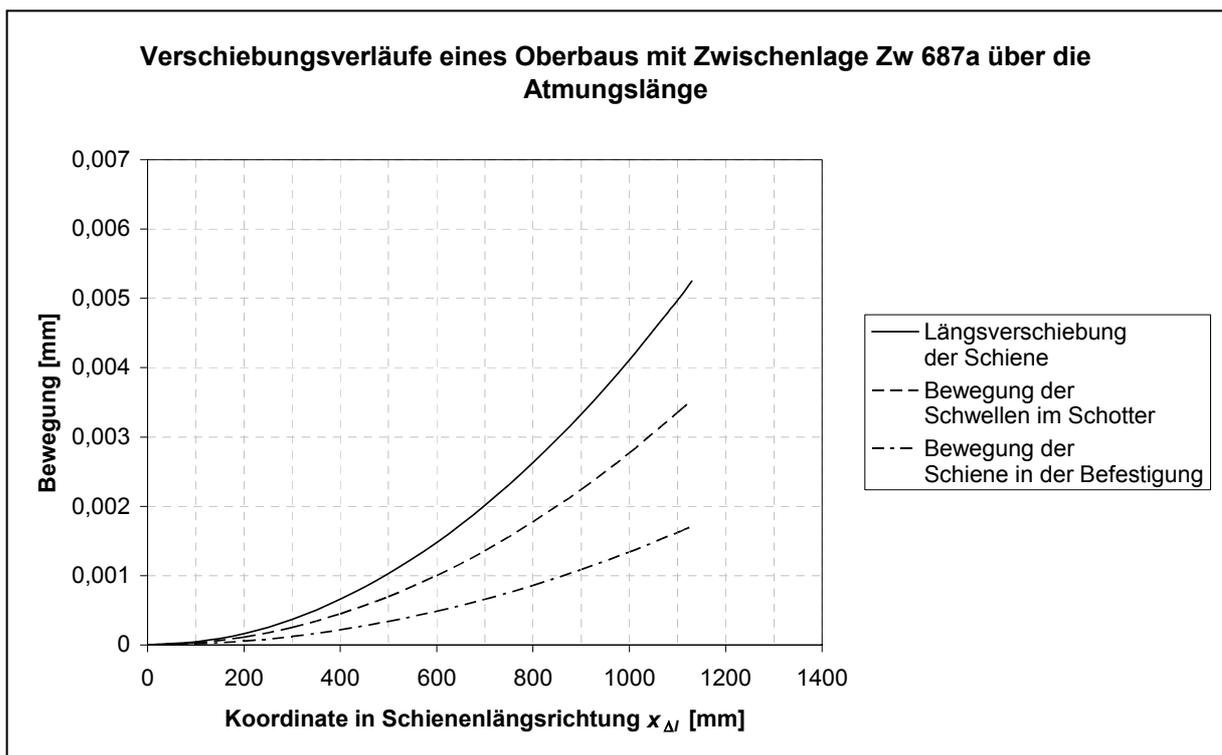


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$p_{res} = \frac{19,7 \cdot 25,3}{19,7 + 25,3} = 11,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$l_A = \frac{0,3 \cdot 100\,000}{2 \cdot 11,1} = 1354 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{res}(1354 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{11,1 \cdot 1354^2}{210\,000 \cdot 7690} = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_L(1354 \text{ mm}) = \frac{6,3 \cdot 10^{-3}}{25,3 + 19,7} \cdot 25,3 = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1354 \text{ mm}) = \frac{6,3 \cdot 10^{-3}}{25,3 + 19,7} \cdot 19,7 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

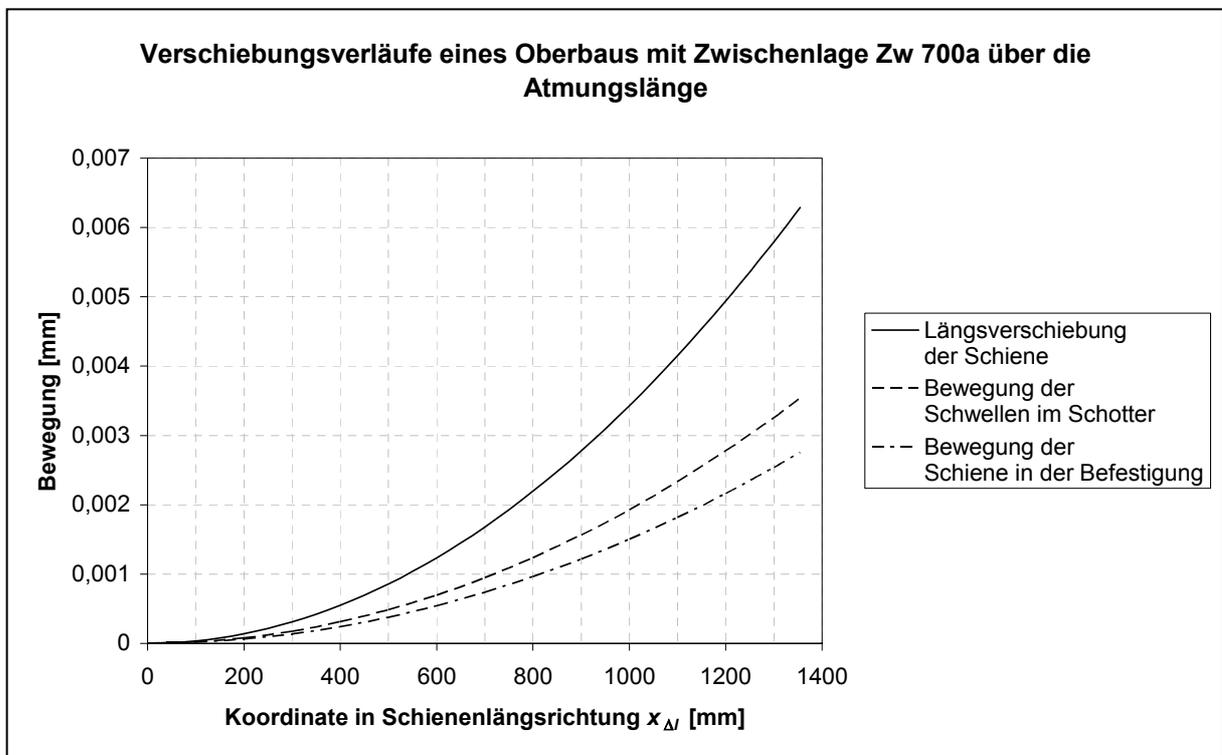


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$p_{res} = \frac{19,7 \cdot 38,0}{19,7 + 38,0} = 13,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$l_A = \frac{0,3 \cdot 100\,000}{2 \cdot 13,0} = 1156 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{res}(1156 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{13,0 \cdot 1156^2}{210\,000 \cdot 7690} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_L(1156 \text{ mm}) = \frac{5,3 \cdot 10^{-3}}{38,0 + 19,7} \cdot 38,0 = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1156 \text{ mm}) = \frac{5,3 \cdot 10^{-3}}{38,0 + 19,7} \cdot 19,7 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

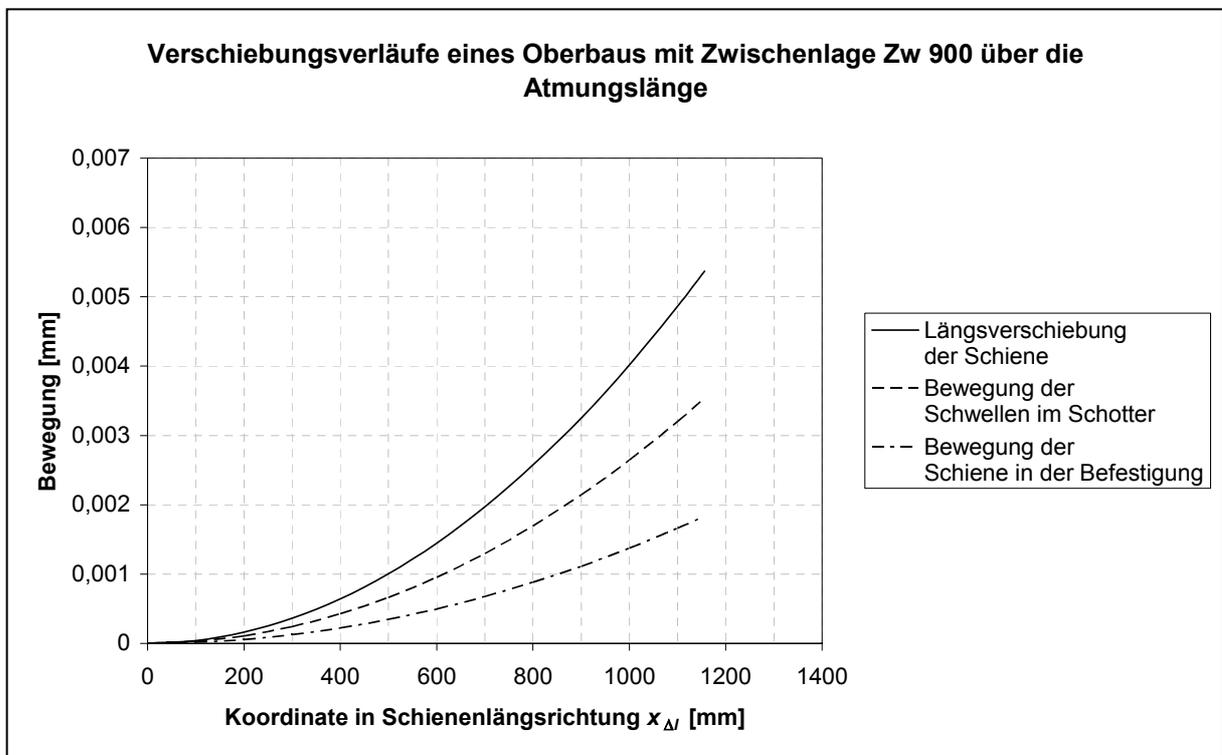


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Längsbewegungen ohne Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und mit sprunghafter Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

erster Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN:

$$x_1 = \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot 857 = 2020 \text{ mm}$$

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$p_{res, bel} = 13,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = \frac{7 \cdot 19,0}{7 + 19,0} = 5,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\frac{0,3 \cdot 100\,000}{2} = 13,3 \cdot \frac{2020}{2} + 5,1 \cdot \left(l_A - \frac{2020}{2} \right)$$

$$l_A = \frac{15\,000 \cdot 8282}{5,1} = 1321 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1321 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1321} = 11,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1321 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{11,4 \cdot 1321^2}{210\,000 \cdot 7690} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1321 \text{ mm}) = \frac{19,7 \cdot \frac{2020}{2} + 7 \cdot \left(1321 - \frac{2020}{2} \right)}{1321} = 16,7 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1321 \text{ mm}) = \frac{40,7 \cdot \frac{2020}{2} + 19,0 \cdot \left(1321 - \frac{2020}{2} \right)}{1321} = 35,6 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1321 \text{ mm}) = \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{35,6 + 16,7} \cdot 35,6 = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1321 \text{ mm}) = \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{35,6 + 16,7} \cdot 16,7 = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

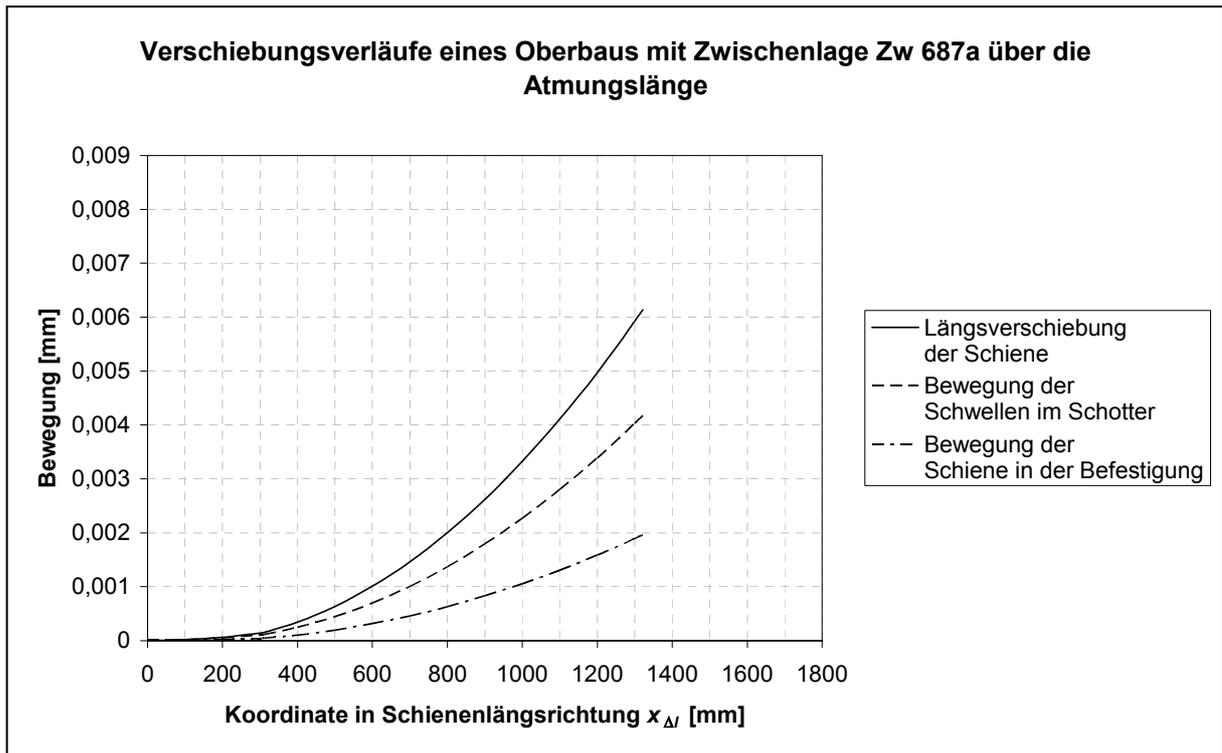


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durch Schubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$p_{res, bel} = 11,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = \frac{7 \cdot 18,1}{7 + 18,1} = 5,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\frac{0,3 \cdot 100\,000}{2} = 11,1 \cdot \frac{2020}{2} + 5,0 \cdot \left(l_A - \frac{2020}{2} \right)$$

$$l_A = \frac{15\,000 \cdot 6161}{5,0} = 1765 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1765 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1765} = 8,5 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1765 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{8,5 \cdot 1765^2}{210\,000 \cdot 7690} = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1765 \text{ mm}) = \frac{19,7 \cdot \frac{2020}{2} + 7 \cdot \left(1765 - \frac{2020}{2} \right)}{1765} = 14,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1765 \text{ mm}) = \frac{25,3 \cdot \frac{2020}{2} + 18,1 \cdot \left(1765 - \frac{2020}{2} \right)}{1765} = 22,2 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1765 \text{ mm}) = \frac{8,2 \cdot 10^{-3}}{22,2 + 14,3} \cdot 22,2 = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1765 \text{ mm}) = \frac{8,2 \cdot 10^{-3}}{22,2 + 14,3} \cdot 14,3 = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

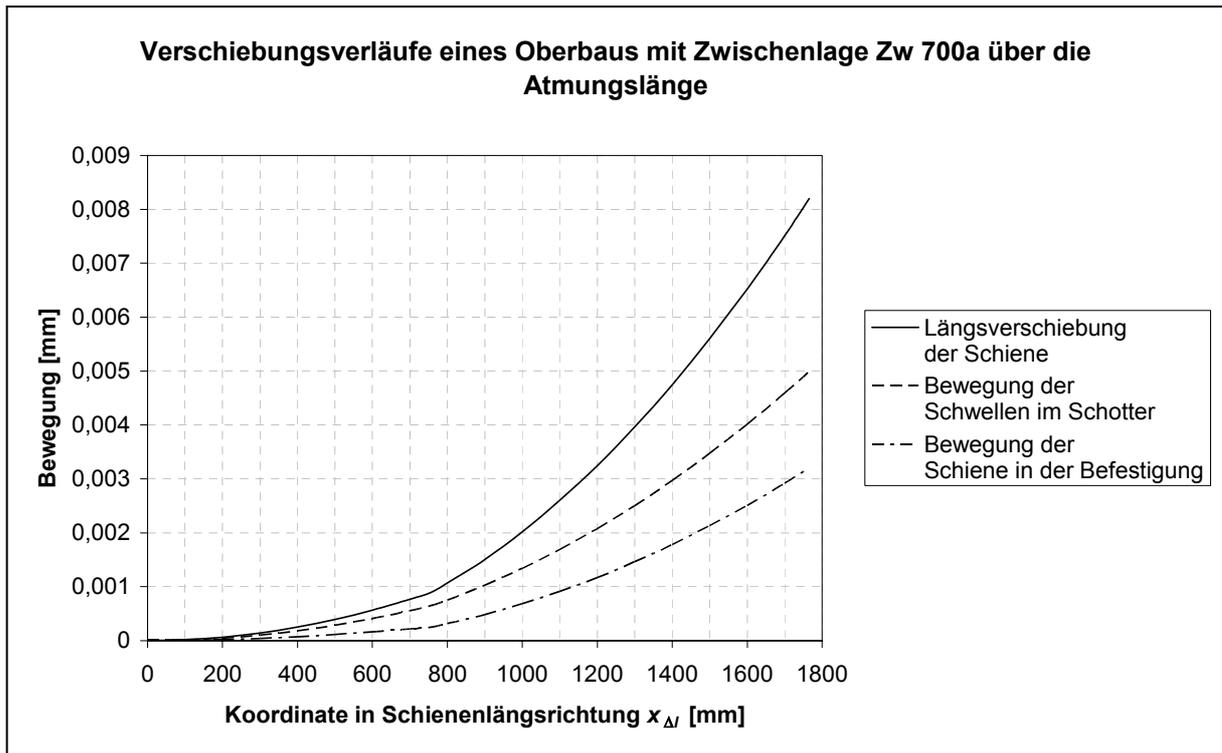


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durch Schubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$p_{res, bel} = 13,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = \frac{7 \cdot 23,3}{7 + 23,3} = 5,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\frac{0,3 \cdot 100\,000}{2} = 13,0 \cdot \frac{2020}{2} + 5,4 \cdot \left(l_A - \frac{2020}{2} \right)$$

$$l_A = \frac{15\,000 \cdot 7676}{5,4} = 1362 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1362 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1362} = 11,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1362 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{11,0 \cdot 1362^2}{210\,000 \cdot 7690} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1362 \text{ mm}) = \frac{19,7 \cdot \frac{2020}{2} + 7 \cdot \left(1362 - \frac{2020}{2} \right)}{1362} = 16,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1362 \text{ mm}) = \frac{38,0 \cdot \frac{2020}{2} + 23,3 \cdot \left(1362 - \frac{2020}{2} \right)}{1362} = 34,2 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1362 \text{ mm}) = \frac{6,4 \cdot 10^{-3}}{34,2 + 16,4} \cdot 34,2 = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1362 \text{ mm}) = \frac{6,4 \cdot 10^{-3}}{34,2 + 16,4} \cdot 16,4 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

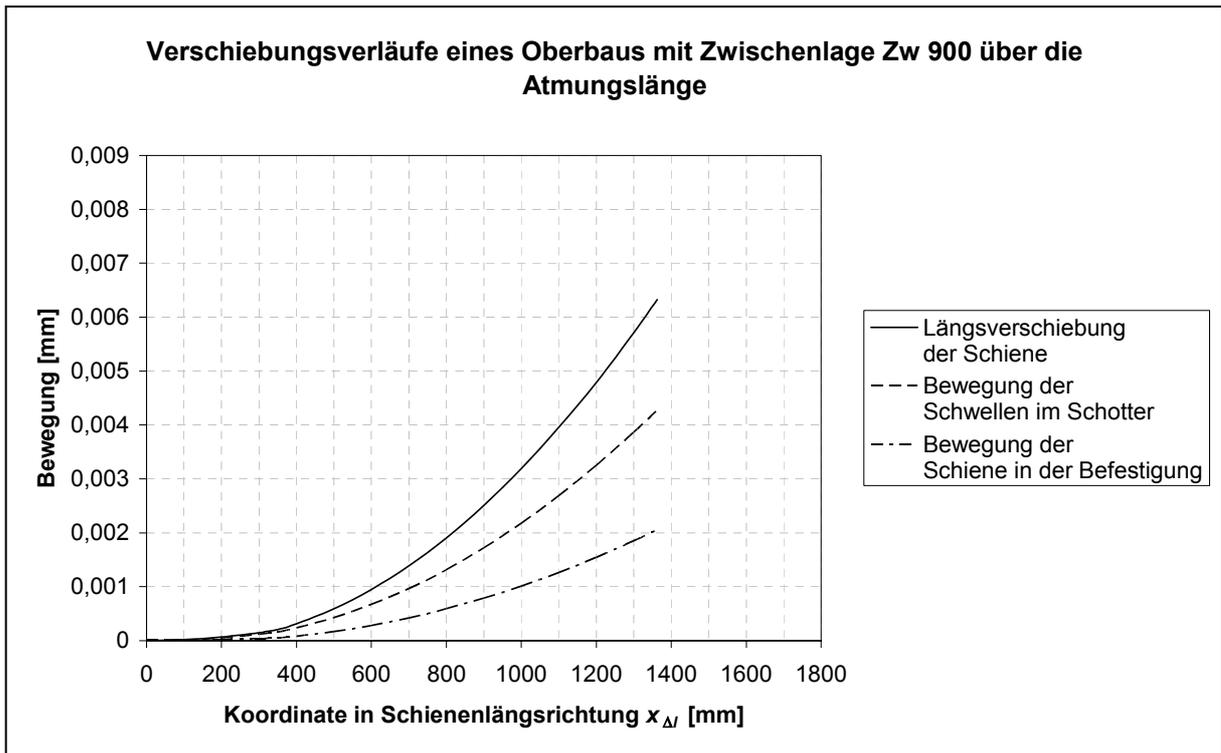


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durch Schubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Längsbewegungen ohne Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und mit linearer Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

erster Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN:

$$x_1 = 2020 \text{ mm} = l_{\Delta}$$

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$p_{res, bel} = 13,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = 5,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\frac{0,3 \cdot 100\,000}{2} = \frac{p_{res}(l_A) + p_{res}(0)}{2} \cdot l_A$$

$$30\,000 = 2 \cdot p_{res, bel} \cdot l_A + \frac{p_{res, unbel} - p_{res, bel}}{l_{\Delta}} \cdot l_A^2$$

$$l_A = \frac{-2 \cdot p_{res, bel} + \sqrt{4 \cdot p_{res, bel}^2 + 4 \cdot \frac{p_{res, unbel} - p_{res, bel}}{l_{\Delta}} \cdot 30\,000}}{2 \cdot \frac{p_{res, unbel} - p_{res, bel}}{l_{\Delta}}}$$

$$l_A = \frac{-2 \cdot 13,3 + \sqrt{4 \cdot 13,3^2 + 4 \cdot \frac{5,1 - 13,3}{2020} \cdot 30\,000}}{2 \cdot \frac{5,1 - 13,3}{2020}} = 1450 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1450 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1450} = 10,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1450 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{10,3 \cdot 1450^2}{210\,000 \cdot 7690} = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1450 \text{ mm}) = 19,7 + \frac{7 - 19,7}{2 \cdot 2020} \cdot 1450 = 15,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1450 \text{ mm}) = 40,7 + \frac{19,0 - 40,7}{2 \cdot 2020} \cdot 1450 = 32,9 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1450 \text{ mm}) = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{32,9 + 15,1} \cdot 32,9 = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1450 \text{ mm}) = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{32,9 + 15,1} \cdot 15,1 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

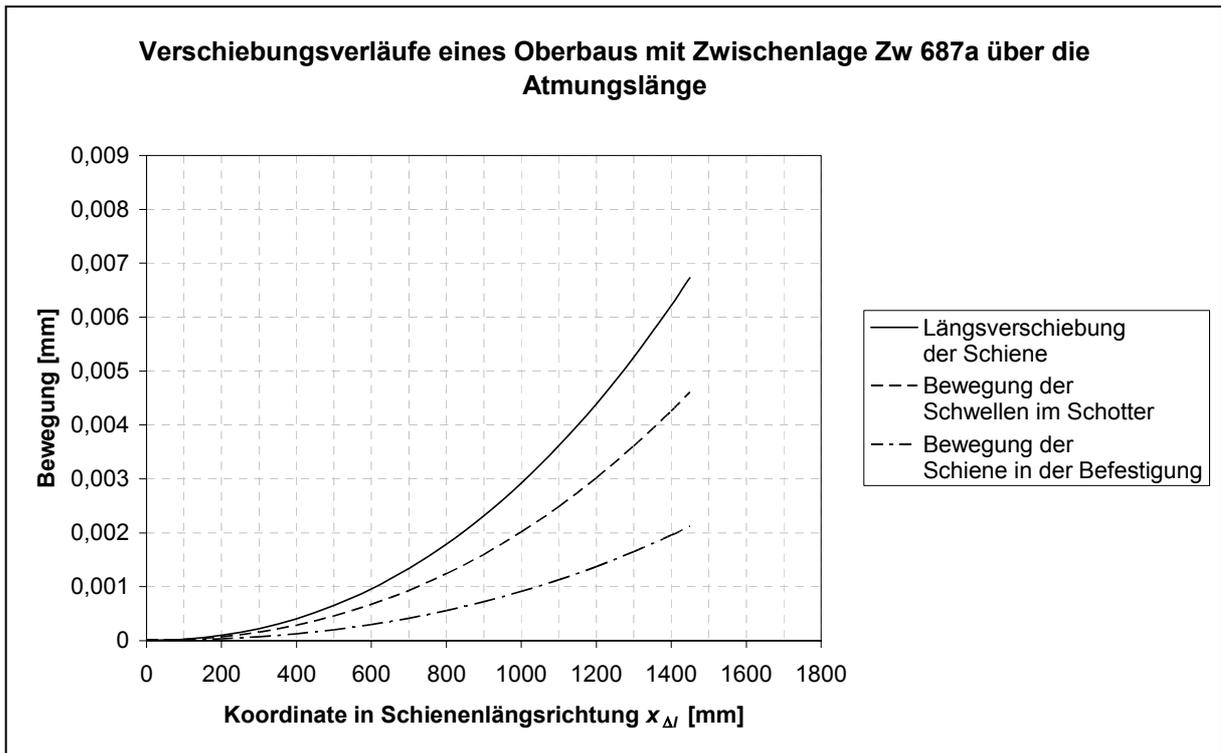


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$p_{res, bel} = 11,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = 5,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$I_A = \frac{-2 \cdot 11,1 + \sqrt{4 \cdot 11,1^2 + 4 \cdot \frac{5,0 - 11,1}{2020} \cdot 30\,000}}{2 \cdot \frac{5,0 - 11,1}{2020}} = 1782 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1782 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1782} = 8,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1782 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{8,4 \cdot 1782^2}{210\,000 \cdot 7690} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1782 \text{ mm}) = 19,7 + \frac{7 - 19,7}{2 \cdot 2020} \cdot 1782 = 14,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1782 \text{ mm}) = 25,3 + \frac{18,1 - 25,3}{2 \cdot 2020} \cdot 1782 = 22,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1782 \text{ mm}) = \frac{8,3 \cdot 10^{-3}}{22,1 + 14,1} \cdot 22,1 = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1782 \text{ mm}) = \frac{8,3 \cdot 10^{-3}}{22,1 + 14,1} \cdot 14,1 = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

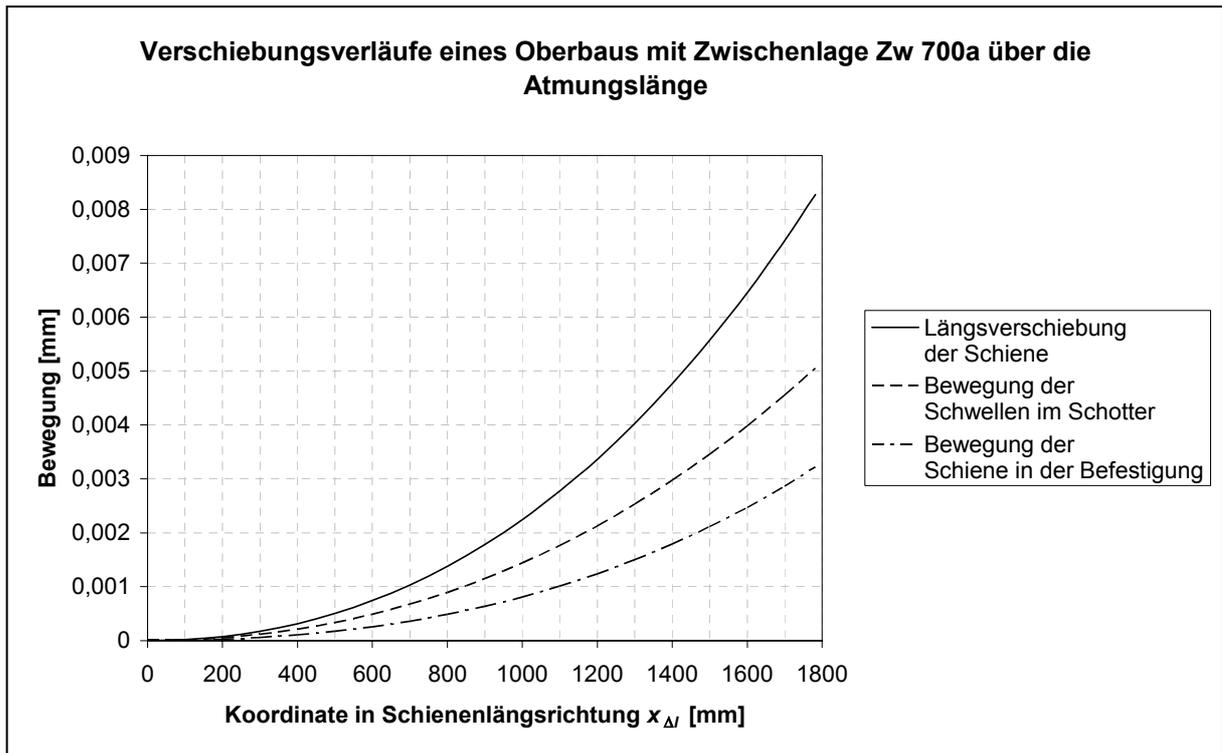


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$p_{res, bel} = 13,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = 5,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$l_A = \frac{-2 \cdot 13,0 + \sqrt{4 \cdot 13,0^2 + 4 \cdot \frac{5,4 - 13,0}{2020} \cdot 30\,000}}{2 \cdot \frac{5,4 - 13,0}{2020}} = 1468 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1468 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1468} = 10,2 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1468 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{10,2 \cdot 1468^2}{210\,000 \cdot 7690} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1468 \text{ mm}) = 19,7 + \frac{7 - 19,7}{2 \cdot 2020} \cdot 1468 = 15,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1468 \text{ mm}) = 38,0 + \frac{23,3 - 38,0}{2 \cdot 2020} \cdot 1468 = 32,7 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1468 \text{ mm}) = \frac{6,9 \cdot 10^{-3}}{32,7 + 15,1} \cdot 32,7 = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1468 \text{ mm}) = \frac{6,9 \cdot 10^{-3}}{32,7 + 15,1} \cdot 15,1 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

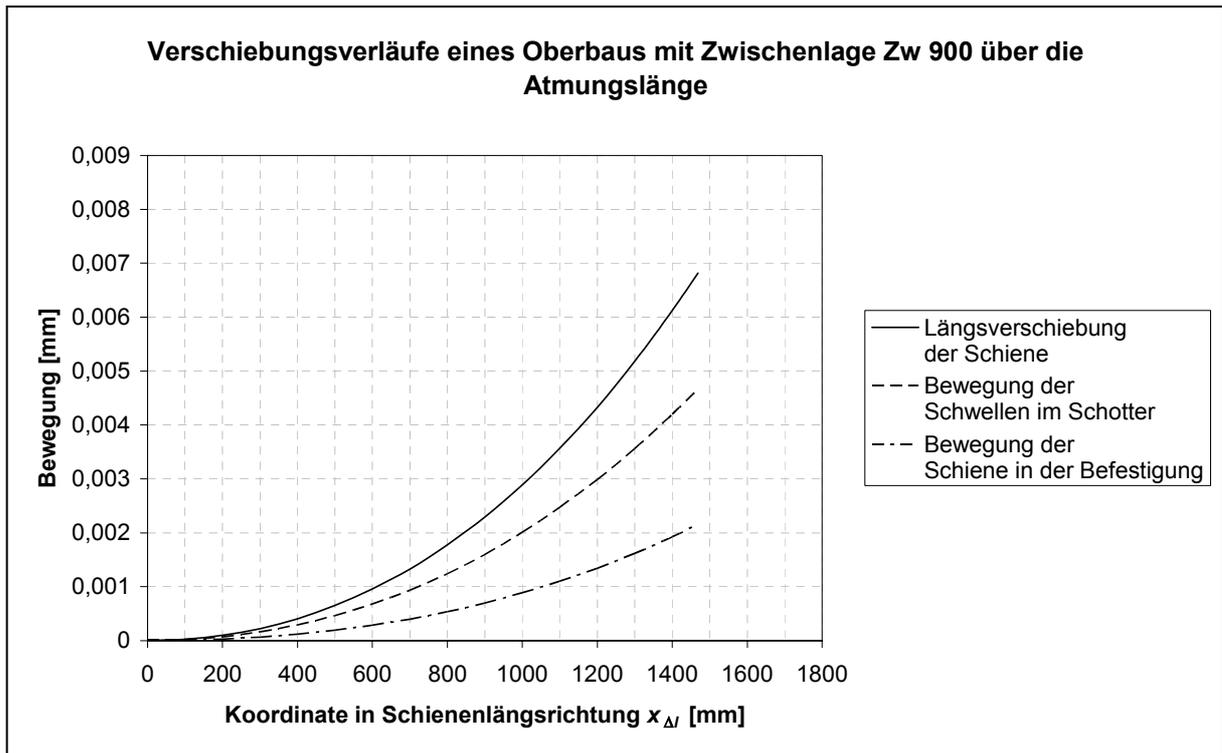


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Längsbewegungen ohne Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und mit Änderung der Widerstände entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$p_{res, bel} = 13,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = 5,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\frac{0,3 \cdot 100\,000}{2} = \int_{I_A}^0 [p_{res, unbel} + (p_{res, bel} - p_{res, unbel}) \cdot \frac{\sin \frac{I_A - x_{\Delta l}}{L} + \cos \frac{I_A - x_{\Delta l}}{L}}{e^{\frac{I_A - x_{\Delta l}}{L}}}] d(I_A - x_{\Delta l})$$

$$15\,000 = [p_{res, unbel} \cdot (I_A - x_{\Delta l}) - (p_{res, bel} - p_{res, unbel}) \cdot L \cdot \frac{\cos \frac{I_A - x_{\Delta l}}{L}}{e^{\frac{I_A - x_{\Delta l}}{L}}}]_{I_A}^0$$

$$15\,000 = p_{res, unbel} \cdot I_A - (p_{res, bel} - p_{res, unbel}) \cdot L \cdot \left(\frac{\cos \frac{I_A}{L}}{e^L} - 1 \right)$$

$$15\,000 = 5,1 \cdot I_A - (13,3 - 5,1) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{I_A}{857}}{e^{857}} - 1 \right)$$

$$I_A = 1519 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1519 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1519} = 9,9 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1519 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{9,9 \cdot 1519^2}{210\,000 \cdot 7690} = 7,0 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1519 \text{ mm}) = 7 - \frac{(19,7 - 7) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1519}{857}}{e^{\frac{1519}{857}}} - 1 \right)}{1519} = 14,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1519 \text{ mm}) = 19,0 - \frac{(40,7 - 19,0) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1519}{857}}{e^{\frac{1519}{857}}} - 1 \right)}{1519} = 31,7 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1519 \text{ mm}) = \frac{7,0 \cdot 10^{-3}}{31,7 + 14,4} \cdot 31,7 = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1519 \text{ mm}) = \frac{7,0 \cdot 10^{-3}}{31,7 + 14,4} \cdot 14,4 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

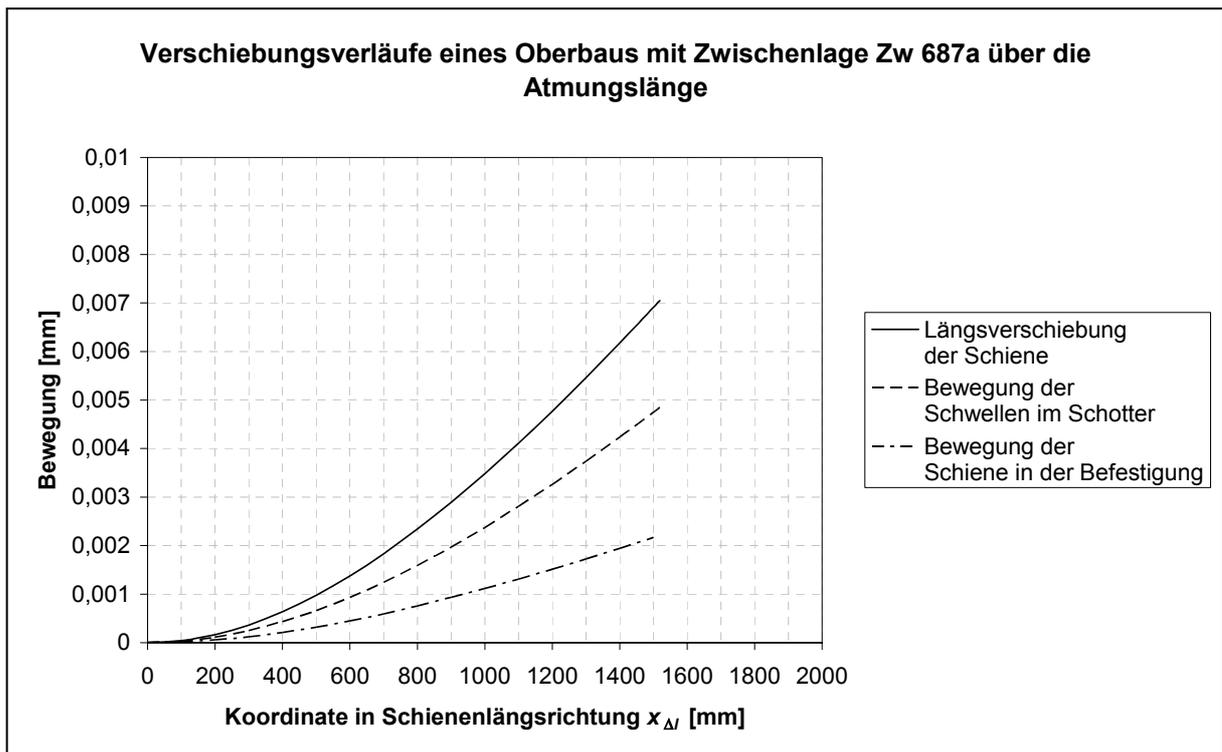


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$p_{res, bel} = 11,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = 5,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$15\,000 = 5,0 \cdot l_A - (11,1 - 5,0) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{l_A}{857}}{e^{\frac{l_A}{857}}} - 1 \right)$$

$$l_A = 1881 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1881 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1881} = 8,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1881 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{8,0 \cdot 1881^2}{210\,000 \cdot 7690} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1881 \text{ mm}) = 7 - \frac{(19,7 - 7) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1881}{857}}{e^{\frac{1881}{857}}} - 1 \right)}{1881} = 13,2 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1881 \text{ mm}) = 18,1 - \frac{(25,3 - 18,1) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1881}{857}}{e^{\frac{1881}{857}}} - 1 \right)}{1881} = 21,6 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1881 \text{ mm}) = \frac{8,7 \cdot 10^{-3}}{21,6 + 13,2} \cdot 21,6 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1881 \text{ mm}) = \frac{8,7 \cdot 10^{-3}}{21,6 + 13,2} \cdot 13,2 = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

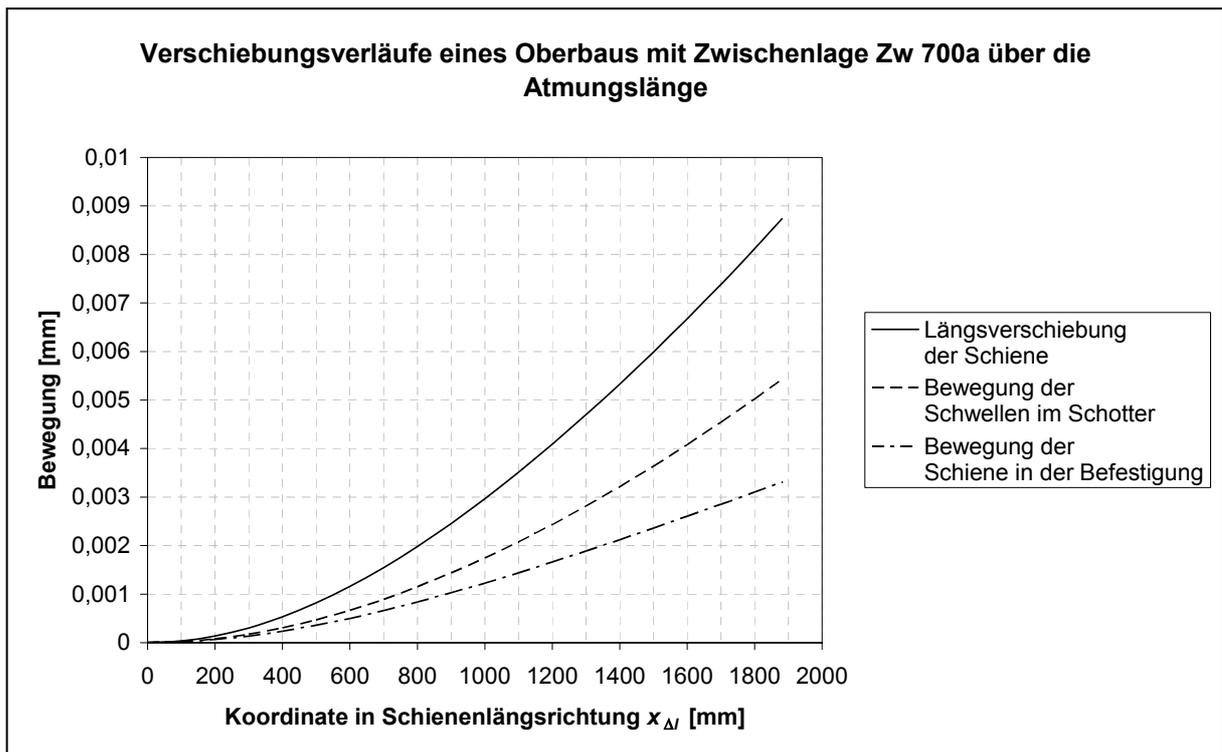


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$p_{res, bel} = 13,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{res, unbel} = 5,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$15\,000 = 5,4 \cdot l_A - (13,0 - 5,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{l_A}{857}}{e^{\frac{l_A}{857}}} - 1 \right)$$

$$l_A = 1534 \text{ mm}$$

$$p_{res, mittel}(1534 \text{ mm}) = \frac{15\,000}{1534} = 9,8 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_{res}(1534 \text{ mm}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{9,8 \cdot 1534^2}{210\,000 \cdot 7690} = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$p_{mittel}(1534 \text{ mm}) = 7 - \frac{(19,7 - 7) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1534}{857}}{e^{\frac{1534}{857}}} - 1 \right)}{1534} = 14,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, mittel}(1534 \text{ mm}) = 23,3 - \frac{(38,0 - 23,3) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1534}{857}}{e^{\frac{1534}{857}}} - 1 \right)}{1534} = 31,8 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\Delta l_L(1534 \text{ mm}) = \frac{7,1 \cdot 10^{-3}}{31,8 + 14,4} \cdot 31,8 = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(1534 \text{ mm}) = \frac{7,1 \cdot 10^{-3}}{31,8 + 14,4} \cdot 14,4 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

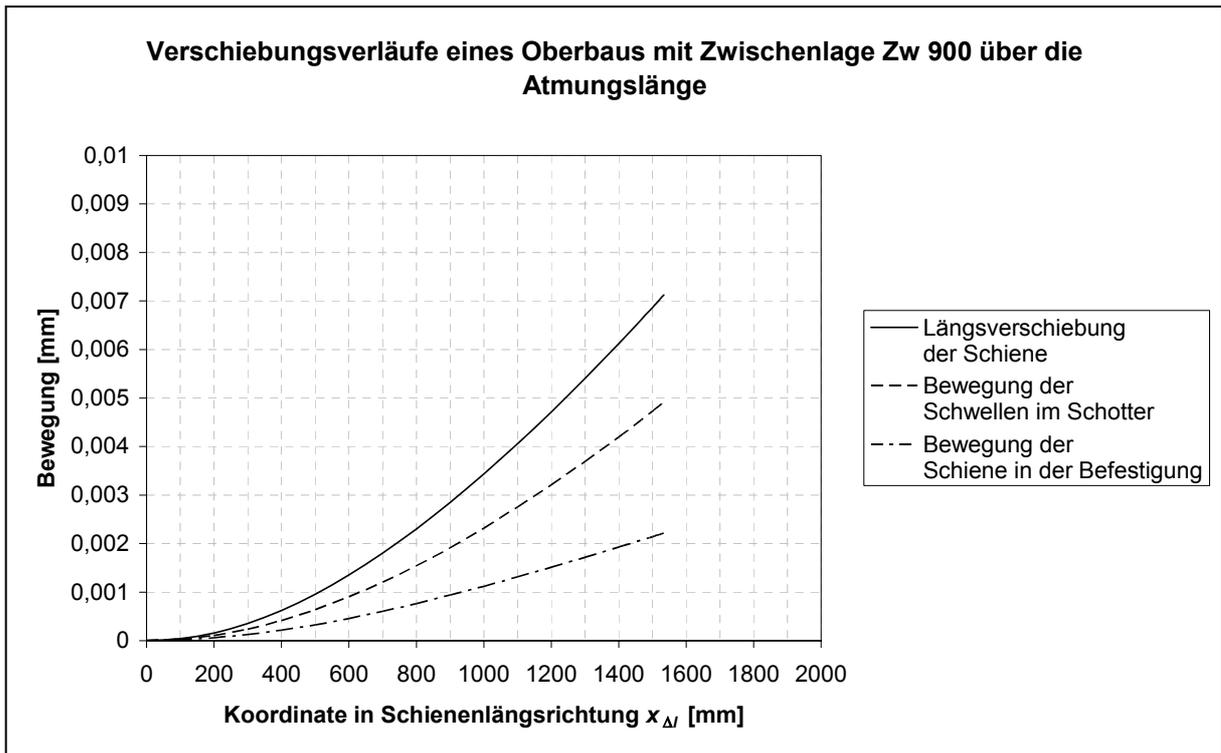


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Längsbewegungen mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und ohne Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$c_{res, bel} = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot \frac{40,7}{0,5}}{\frac{19,7}{2} + \frac{40,7}{0,5}} \cdot 600 = 5272,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

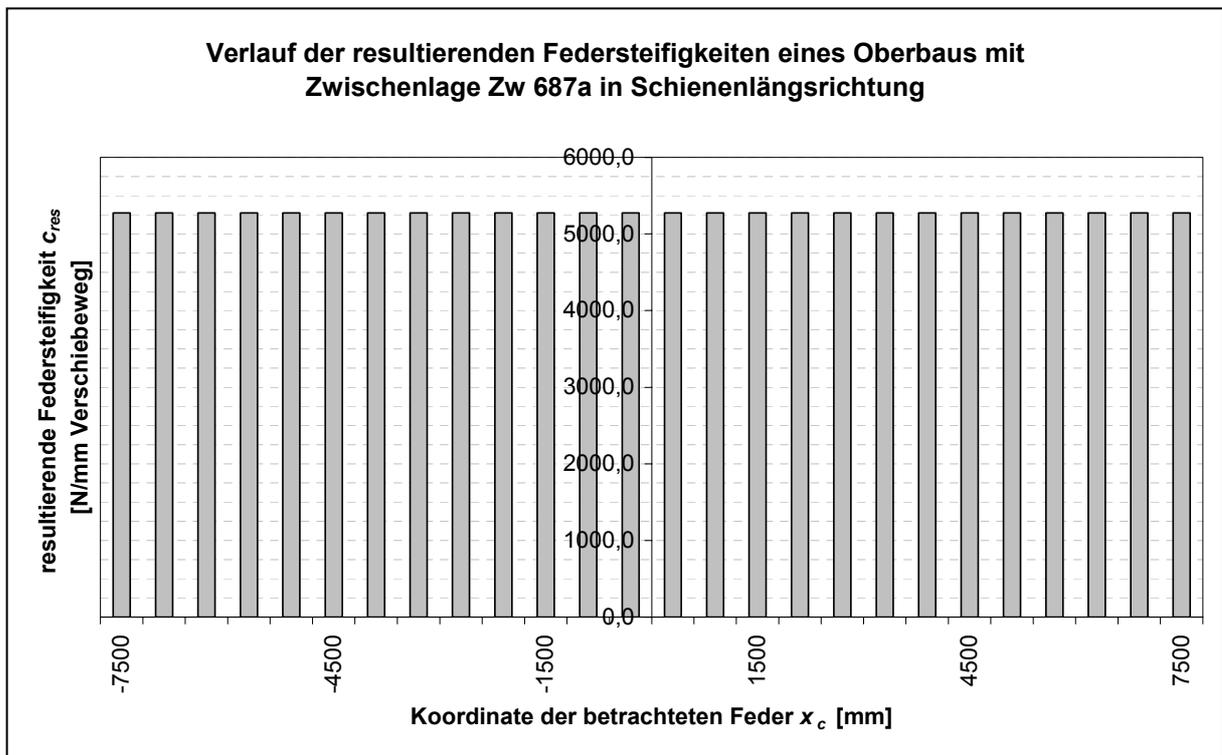


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,12 \text{ mm}$$

$$c_{bel} = \frac{19,7}{2} \cdot 600 = 5910,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{D,bel} = \frac{40,7}{0,5} \cdot 600 = 48\,840,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,12}{48\,840,0 + 5910,0} \cdot 48\,840,0 = 0,11 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,12}{48\,840,0 + 5910,0} \cdot 5910,0 = 0,01 \text{ mm}$$

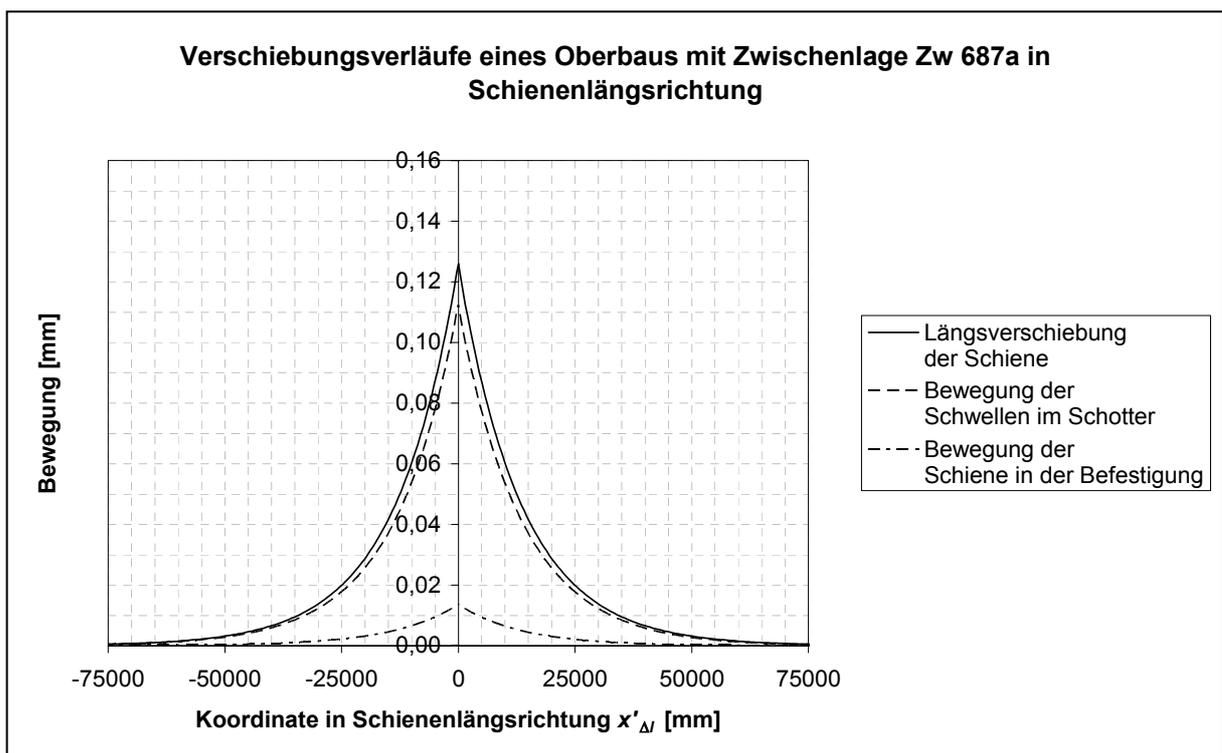


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$\Delta l_D' = \frac{1,7 + 1,8 + 1,6 + 1,6}{4} = 1,7 \text{ mm}$$

$$c_{res, bel} = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot \frac{25,3}{1,7}}{\frac{19,7}{2} + \frac{25,3}{1,7}} \cdot 600 = 3556,3 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

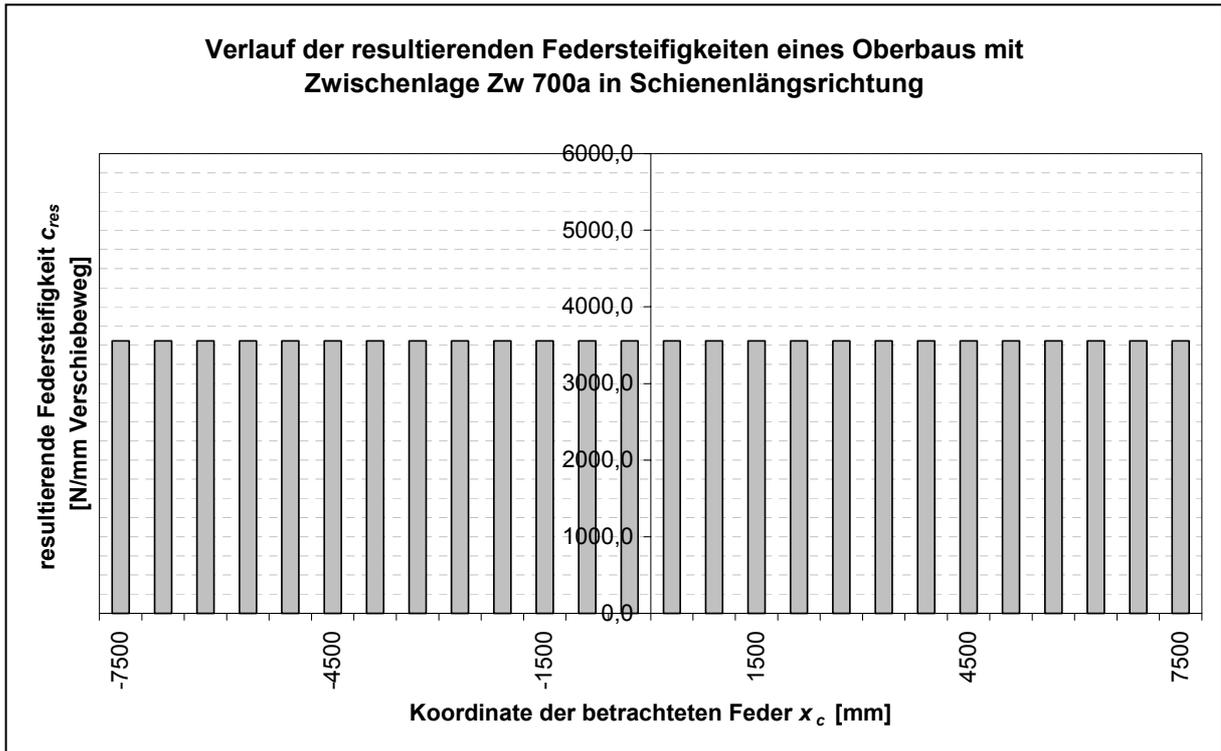


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,15 \text{ mm}$$

$$c_{bel} = 5910,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{D,bel} = \frac{25,3}{1,7} \cdot 600 = 8949,4 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,15}{8949,4 + 5910,0} \cdot 8949,4 = 0,09 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,15}{8949,4 + 5910,0} \cdot 5910,0 = 0,06 \text{ mm}$$

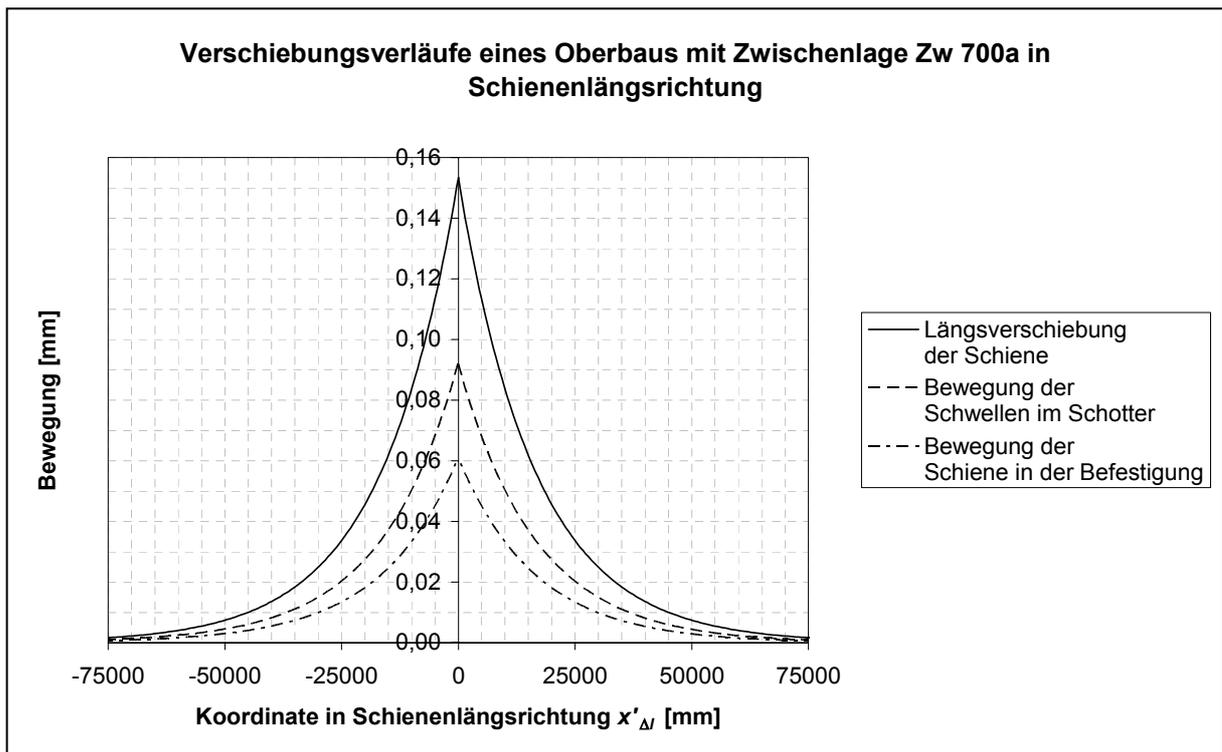


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$\Delta l_D' = \frac{2,9 + 3,1 + 3,1 + 3,0}{4} = 3,0 \text{ mm}$$

$$c_{res, bel} = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot 38,0}{\frac{19,7}{2} + 38,0} \cdot 600 = 3324,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

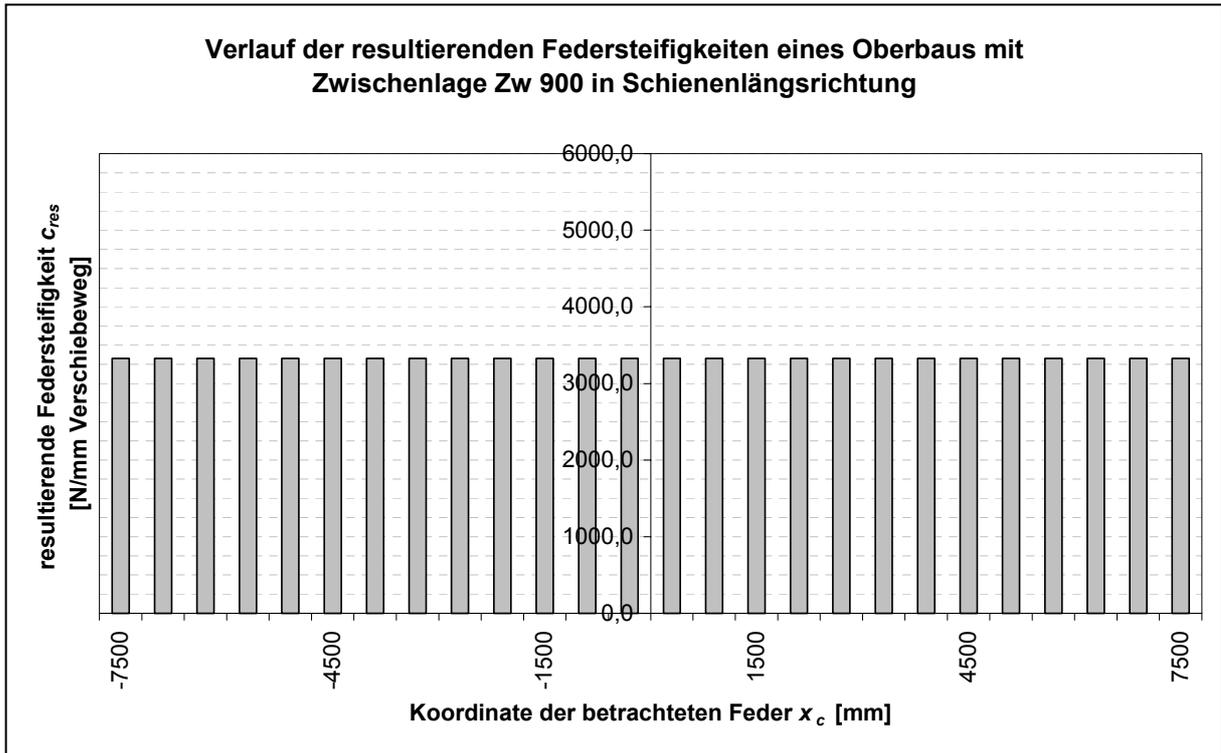


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,16 \text{ mm}$$

$$c_{bel} = 5910,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{D,bel} = \frac{38,0}{3,0} \cdot 600 = 7600,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,16}{7600,0 + 5910,0} \cdot 7600,0 = 0,09 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,16}{7600,0 + 5910,0} \cdot 5910,0 = 0,07 \text{ mm}$$

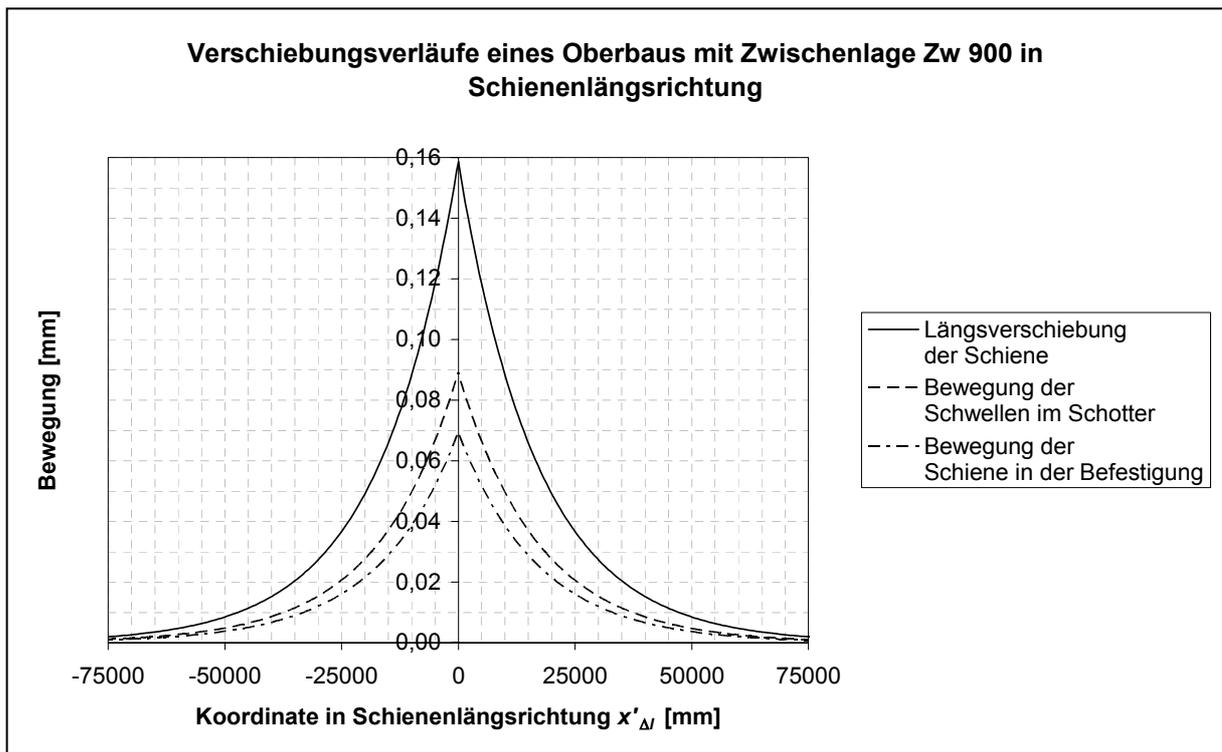


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung ohne Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Plausibilitätskontrolle der Längsbewegungen mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und ohne Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$c_{res,\Delta, bel} = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot \frac{40,7}{0,5}}{\frac{19,7}{2} + \frac{40,7}{0,5}} = 8,8 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{\Delta l} = \sqrt{\frac{8,8}{210\,000 \cdot 7690}} = 7,3763 \cdot 10^{-5} \text{ 1/mm}$$

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = \frac{0,3 \cdot 100\,000}{2 \cdot 210\,000 \cdot 7690 \cdot 7,3763 \cdot 10^{-5}} = 0,13 \text{ mm}$$

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$c_{res,\Delta, bel} = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot \frac{25,3}{1,7}}{\frac{19,7}{2} + \frac{25,3}{1,7}} = 5,9 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{\Delta l} = \sqrt{\frac{5,9}{210\,000 \cdot 7690}} = 6,0583 \cdot 10^{-5} \text{ 1/mm}$$

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = \frac{0,3 \cdot 100\,000}{2 \cdot 210\,000 \cdot 7690 \cdot 6,0583 \cdot 10^{-5}} = 0,15 \text{ mm}$$

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$c_{res,\Delta, bel} = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot \frac{38,0}{3,0}}{\frac{19,7}{2} + \frac{38,0}{3,0}} = 5,5 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{\Delta l} = \sqrt{\frac{5,5}{210\,000 \cdot 7690}} = 5,8577 \cdot 10^{-5} \text{ 1/mm}$$

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = \frac{0,3 \cdot 100\,000}{2 \cdot 210\,000 \cdot 7690 \cdot 5,8577 \cdot 10^{-5}} = 0,16 \text{ mm}$$

Längsbewegungen mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und mit sprunghafter Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

erster Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN:

$$x_1 = 2020 \text{ mm}$$

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = c_{res,bel} = 5272,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot \frac{40,7}{0,5}}{\frac{19,7}{2} + \frac{40,7}{0,5}} \cdot \left(\frac{2020}{2} - 600 \right) + \frac{\frac{7}{2} \cdot \frac{19,0}{0,5}}{\frac{7}{2} + \frac{19,0}{0,5}} \cdot \left(1200 - \frac{2020}{2} \right)$$

$$= 4211,5 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = c_{res,unbel} = \frac{\frac{7}{2} \cdot \frac{19,0}{0,5}}{\frac{7}{2} + \frac{19,0}{0,5}} \cdot 600 = 1922,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

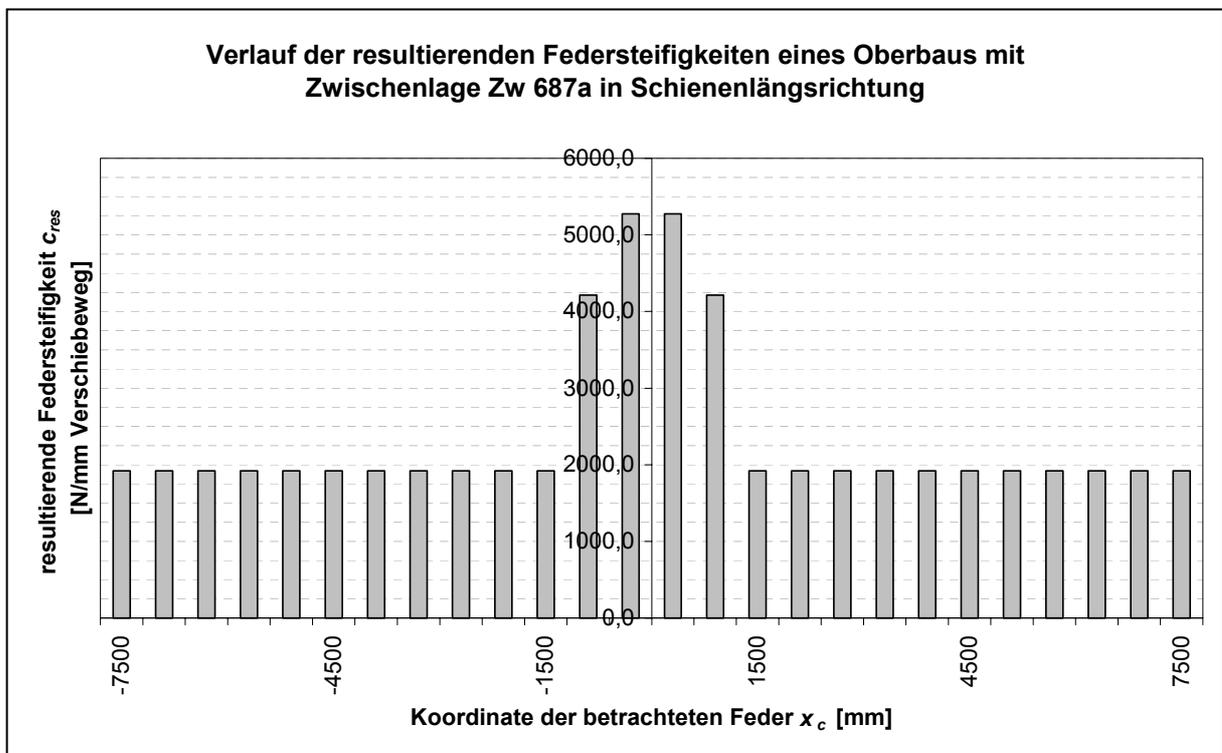


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durch Schubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,19 \text{ mm}$$

$$c_{bel} = 5910,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{D,bel} = 48\,840,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,19}{48\,840,0 + 5910,0} \cdot 48\,840,0 = 0,17 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,19}{48\,840,0 + 5910,0} \cdot 5910,0 = 0,02 \text{ mm}$$

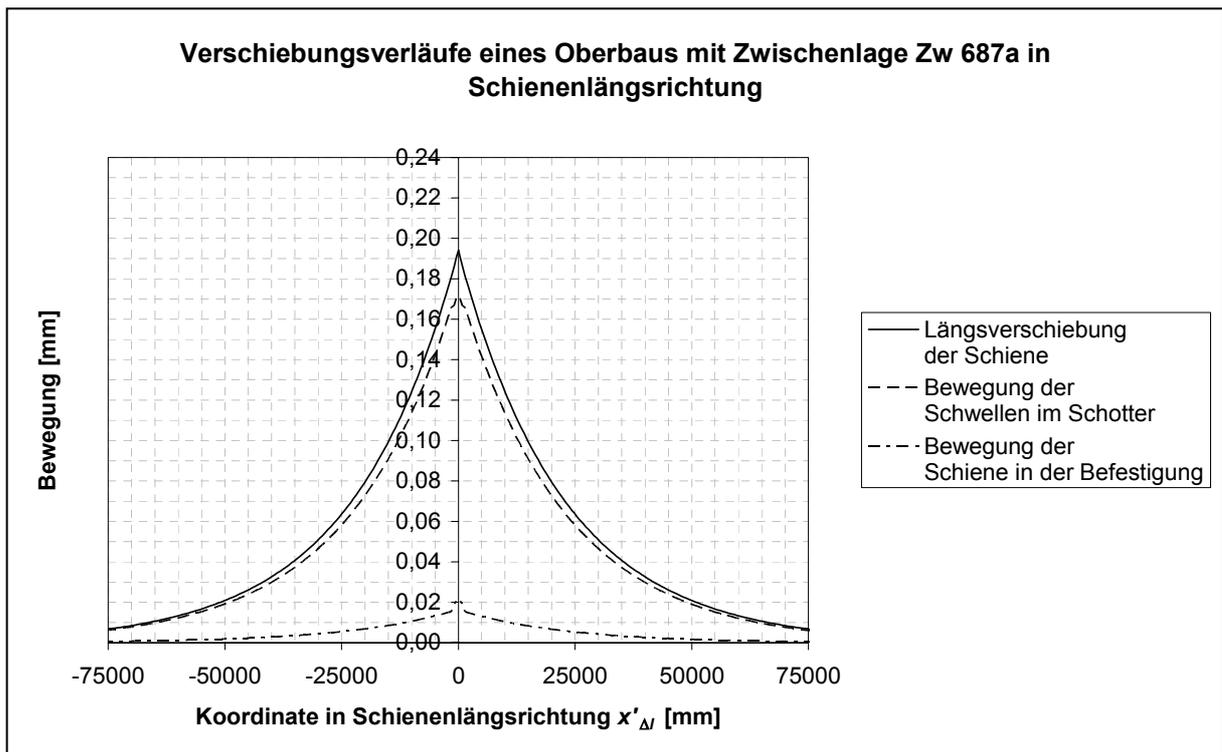


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durch Schubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = c_{res, bel} = 3556,3 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot \frac{25,3}{1,7}}{\frac{19,7}{2} + \frac{25,3}{1,7}} \cdot \left(\frac{2020}{2} - 600 \right) + \frac{\frac{7}{2} \cdot \frac{18,1}{1,7}}{\frac{7}{2} + \frac{18,1}{1,7}} \cdot \left(1200 - \frac{2020}{2} \right)$$

$$= 2930,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = c_{res, unbel} = \frac{\frac{7}{2} \cdot \frac{18,1}{1,7}}{\frac{7}{2} + \frac{18,1}{1,7}} \cdot 600 = 1580,5 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

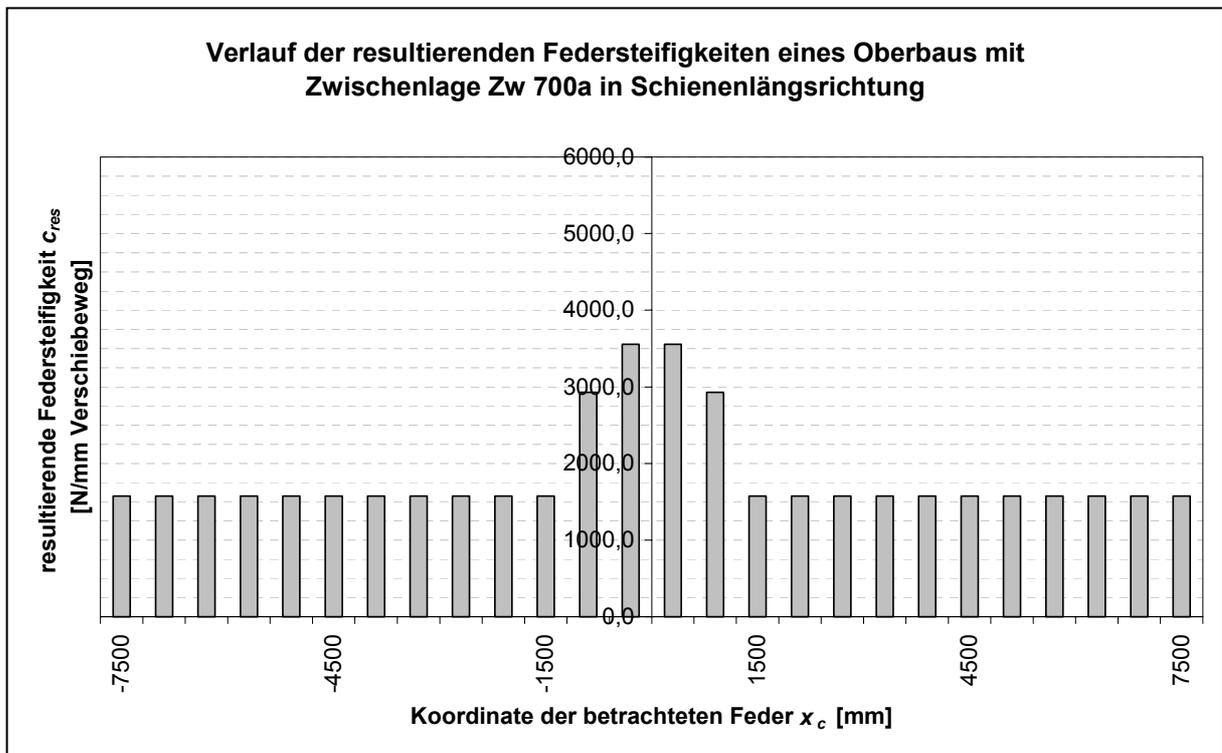


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durch Schubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,22 \text{ mm}$$

$$c_{bel} = 5910,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{D,bel} = 8949,4 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,22}{8949,4 + 5910,0} \cdot 8949,4 = 0,13 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,22}{8949,4 + 5910,0} \cdot 5910,0 = 0,09 \text{ mm}$$

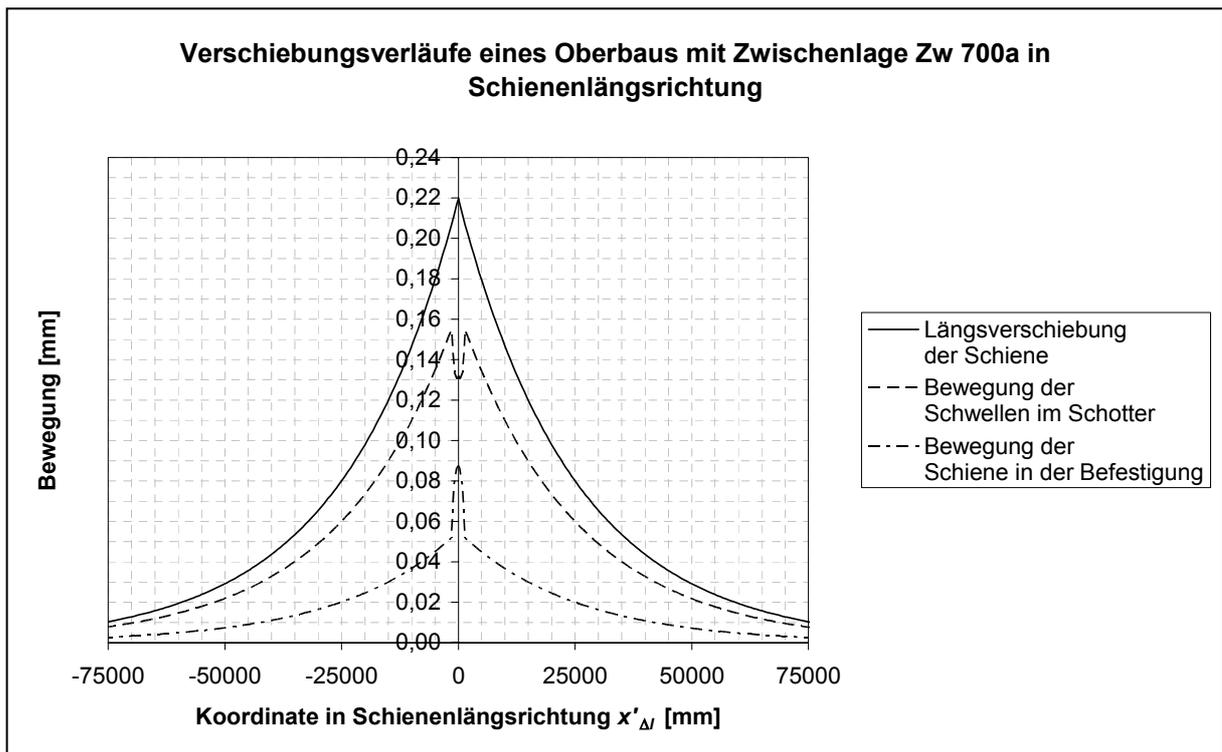


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durch Schubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = c_{res, bel} = 3324,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = \frac{\frac{19,7}{2} \cdot \frac{38,0}{3,0}}{\frac{19,7}{2} + \frac{38,0}{3,0}} \cdot \left(\frac{2020}{2} - 600 \right) + \frac{\frac{7}{2} \cdot \frac{23,3}{3,0}}{\frac{7}{2} + \frac{23,3}{3,0}} \cdot \left(1200 - \frac{2020}{2} \right)$$

$$= 2730,3 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = c_{res, unbel} = \frac{\frac{7}{2} \cdot \frac{23,3}{3,0}}{\frac{7}{2} + \frac{23,3}{3,0}} \cdot 600 = 1447,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

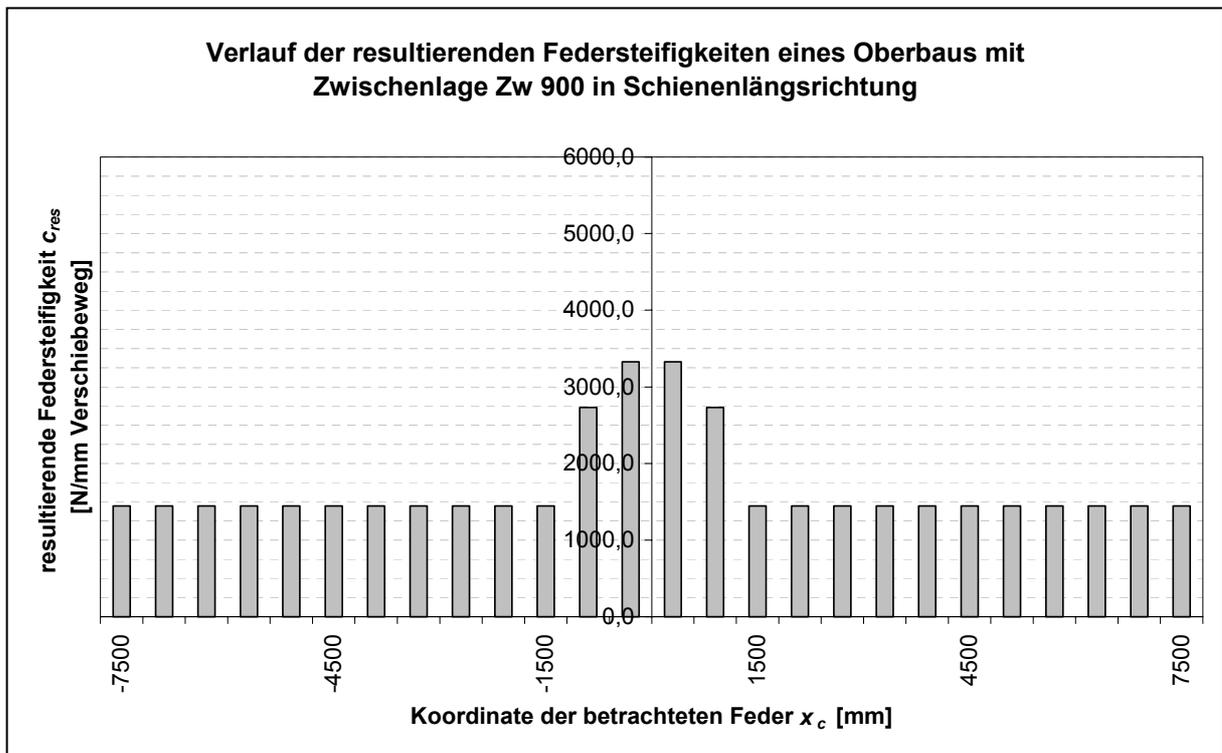


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,23 \text{ mm}$$

$$c_{bel} = 5910,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{D,bel} = 7600,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,23}{7600,0 + 5910,0} \cdot 7600,0 = 0,13 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,23}{7600,0 + 5910,0} \cdot 5910,0 = 0,10 \text{ mm}$$

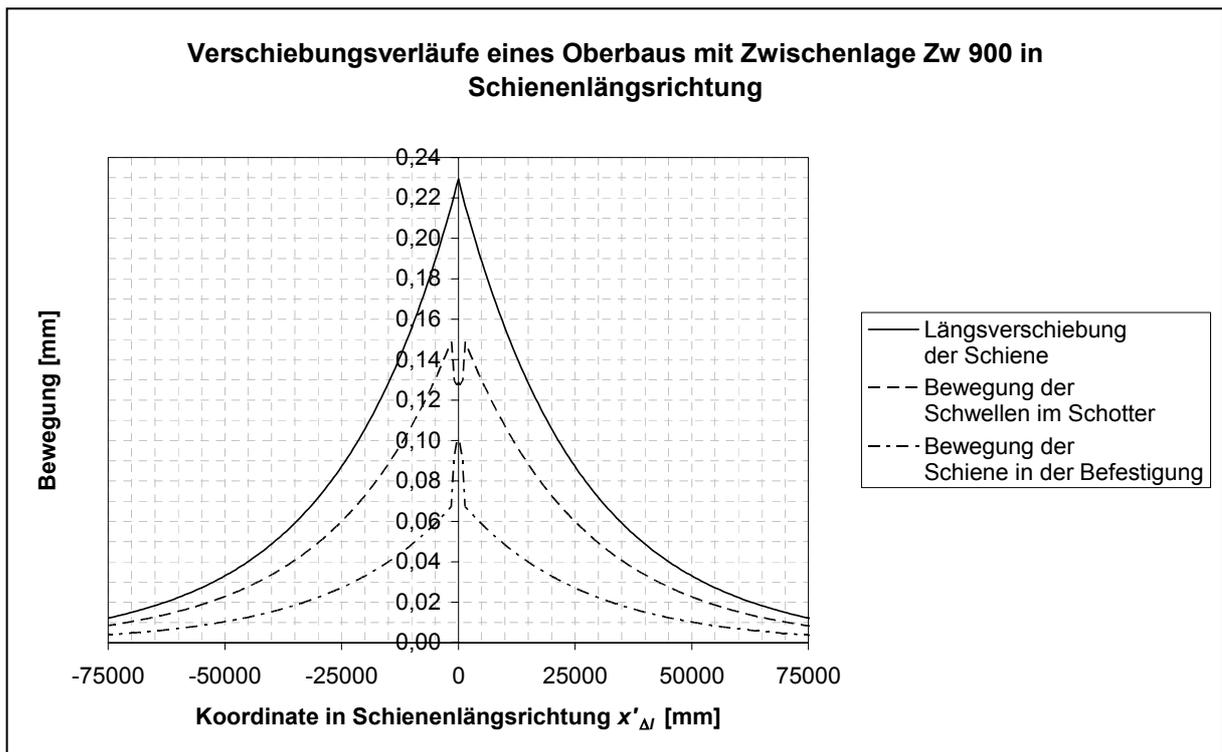


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit sprunghafter Änderung von Längsverschiebe- und Durch Schubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Längsbewegungen mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und mit linearer Änderung der Widerstände beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

erster Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN:

$$x_1 = 2020 \text{ mm} = l_{\Delta}$$

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$x_c + \frac{a}{2} \leq l_{\Delta} : \quad c_{res}(x_c) = \left[c_{res,\Delta, bel} \cdot x'_{\Delta} + \frac{c_{res,\Delta, unbel} - c_{res,\Delta, bel}}{2 \cdot l_{\Delta}} \cdot x'_{\Delta}{}^2 \right]_{x_c - \frac{a}{2}}^{x_c + \frac{a}{2}}$$

$$x_c - \frac{a}{2} \leq l_{\Delta} < x_c + \frac{a}{2} :$$

$$c_{res}(x_c) = c_{res,\Delta, unbel} \cdot a + \frac{c_{res,\Delta, bel} - c_{res,\Delta, unbel}}{2 \cdot l_{\Delta}} \cdot \left[l_{\Delta} - \left(x_c - \frac{a}{2} \right) \right]^2$$

$$x_c - \frac{a}{2} > l_{\Delta} : \quad c_{res}(x_c) = c_{res, unbel}$$

$$c_{res,\Delta, bel} = 8,8 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res,\Delta, unbel} = \frac{\frac{7}{2} \cdot \frac{19,0}{0,5}}{\frac{7}{2} + \frac{19,0}{0,5}} = 3,2 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = 8,8 \cdot 600 + \frac{3,2 - 8,8}{2 \cdot 2020} \cdot 600^2 = 4781,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = 8,8 \cdot (1200 - 600) + \frac{3,2 - 8,8}{2 \cdot 2020} \cdot (1200^2 - 600^2) \\ = 3783,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = 8,8 \cdot (1800 - 1200) + \frac{3,2 - 8,8}{2 \cdot 2020} \cdot (1800^2 - 1200^2) \\ = 2785,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2100 \text{ mm}) = 3,2 \cdot 600 + \frac{8,8 - 3,2}{2 \cdot 2020} \cdot [2020 - (2100 - 300)]^2 \\ = 1987,1 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2700 \text{ mm}) = 1922,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

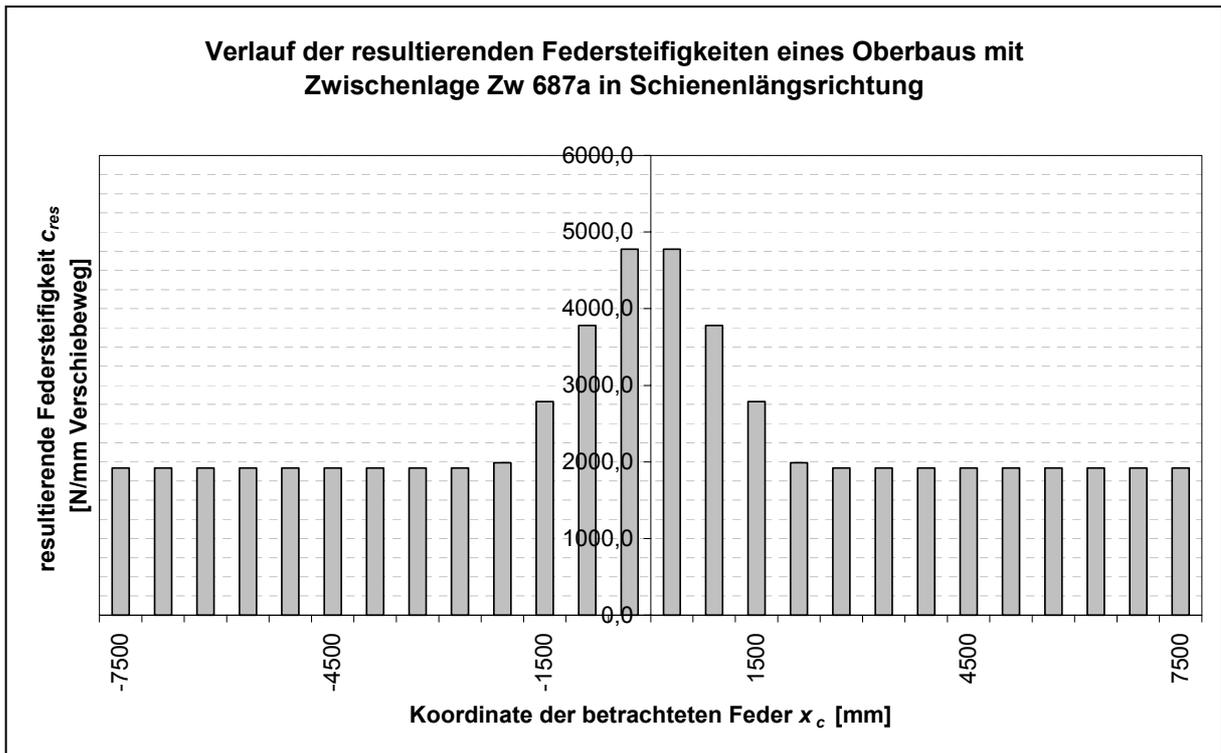


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,19 \text{ mm}$$

$$c_{\Delta l, bel} = \frac{19,7}{2} = 9,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, bel} = \frac{40,7}{0,5} = 81,4 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{\Delta l, unbel} = \frac{7}{2} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, unbel} = \frac{19,0}{0,5} = 38,0 \text{ N/mm}^2$$

$$c(0 \text{ mm}) = 2 \cdot (9,9 \cdot 300 + \frac{3,5 - 9,9}{2 \cdot 2020} \cdot 300^2) = 5654,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_D(0 \text{ mm}) = 2 \cdot (81,4 \cdot 300 + \frac{38,0 - 81,4}{2 \cdot 2020} \cdot 300^2) = 46\,906,3 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,19}{46\,906,3 + 5654,9} \cdot 46\,906,3 = 0,17 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,19}{46\,906,3 + 5654,9} \cdot 5654,9 = 0,02 \text{ mm}$$

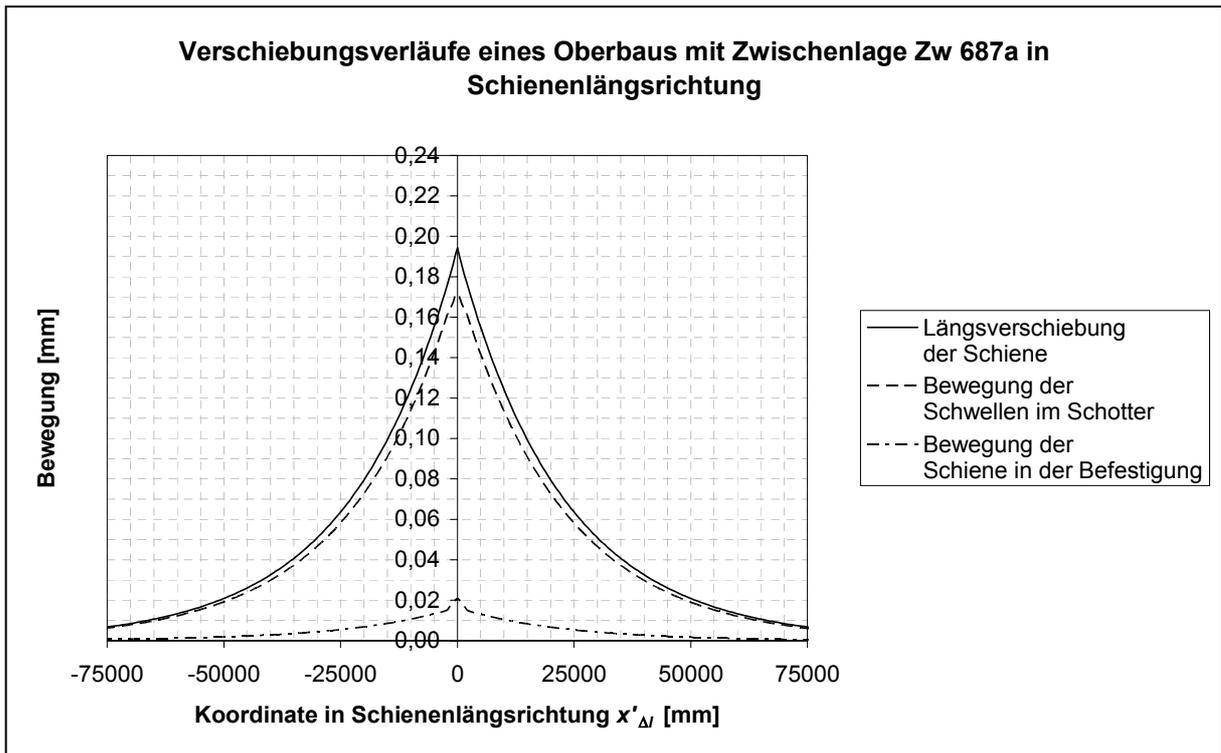


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$c_{res,\Delta, bel} = 5,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res,\Delta, unbel} = \frac{\frac{7}{2} \cdot \frac{18,1}{1,7}}{\frac{7}{2} + \frac{18,1}{1,7}} = 2,6 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = 5,9 \cdot 600 + \frac{2,6 - 5,9}{2 \cdot 2020} \cdot 600^2 = 3245,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = 5,9 \cdot (1200 - 600) + \frac{2,6 - 5,9}{2 \cdot 2020} \cdot (1200^2 - 600^2)$$

$$= 2657,8 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = 5,9 \cdot (1800 - 1200) + \frac{2,6 - 5,9}{2 \cdot 2020} \cdot (1800^2 - 1200^2)$$

$$= 2069,7 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2100 \text{ mm}) = 2,6 \cdot 600 + \frac{5,9 - 2,6}{2 \cdot 2020} \cdot [2020 - (2100 - 300)]^2$$

$$= 1599,5 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2700 \text{ mm}) = 1580,5 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

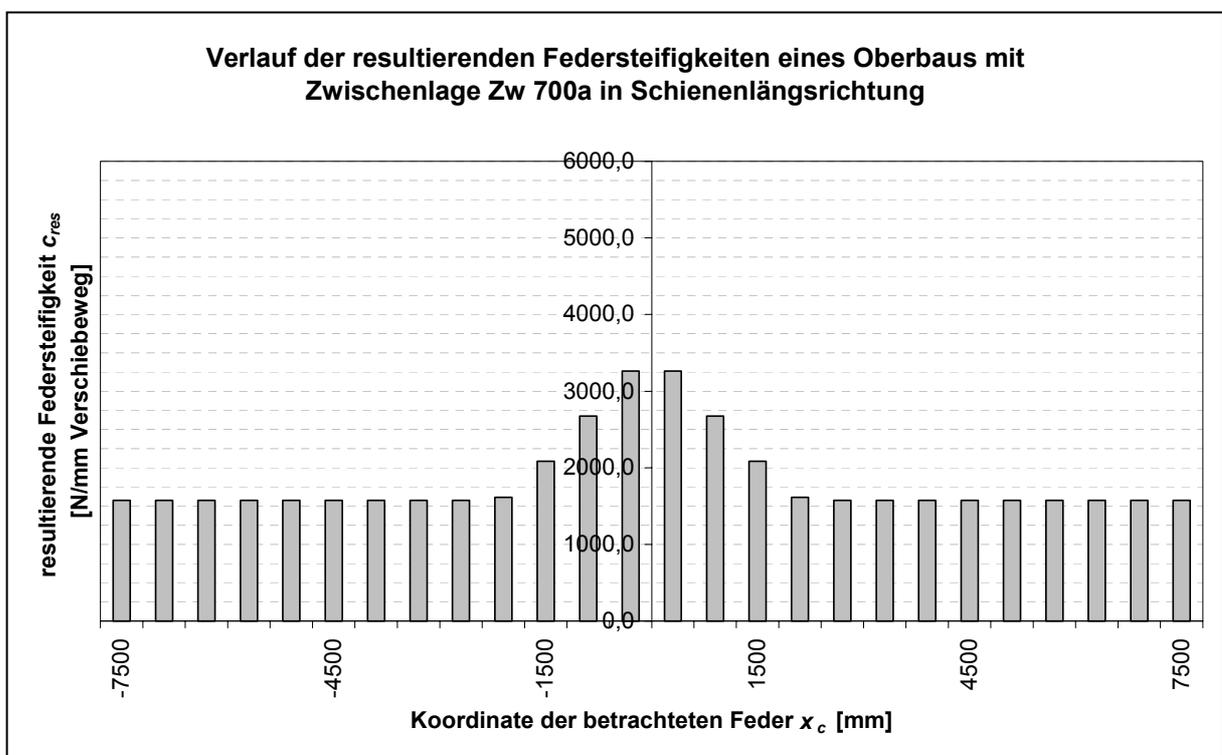


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,22 \text{ mm}$$

$$c_{\Delta l, bel} = 9,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, bel} = \frac{25,3}{1,7} = 14,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{\Delta l, unbel} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, unbel} = \frac{18,1}{1,7} = 10,6 \text{ N/mm}^2$$

$$c(0 \text{ mm}) = 5654,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_D(0 \text{ mm}) = 2 \cdot (14,9 \cdot 300 + \frac{10,6 - 14,9}{2} \cdot 300^2) = 8748,4 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,22}{8748,4 + 5654,9} \cdot 8748,4 = 0,13 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,22}{8748,4 + 5654,9} \cdot 5654,9 = 0,09 \text{ mm}$$

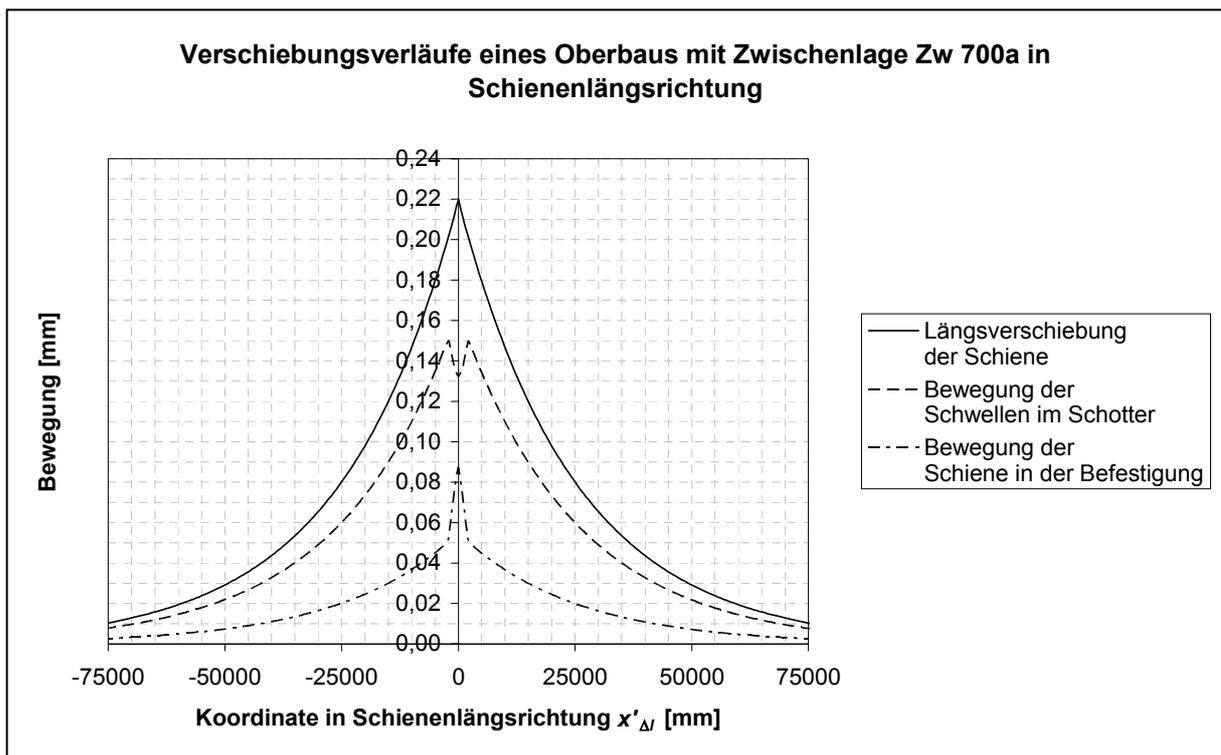


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$c_{res,\Delta, bel} = 5,5 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res,\Delta, unbel} = \frac{\frac{2}{7} \cdot \frac{3,0}{23,3}}{\frac{2}{7} + \frac{3,0}{23,3}} = 2,4 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = 5,5 \cdot 600 + \frac{2,4 - 5,5}{2 \cdot 2020} \cdot 600^2 = 3023,8 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = 5,5 \cdot (1200 - 600) + \frac{2,4 - 5,5}{2 \cdot 2020} \cdot (1200^2 - 600^2)$$

$$= 2471,3 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = 5,5 \cdot (1800 - 1200) + \frac{2,4 - 5,5}{2 \cdot 2020} \cdot (1800^2 - 1200^2)$$

$$= 1918,8 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2100 \text{ mm}) = 2,4 \cdot 600 + \frac{5,5 - 2,4}{2 \cdot 2020} \cdot [2020 - (2100 - 300)]^2$$

$$= 1477,1 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2700 \text{ mm}) = 1447,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

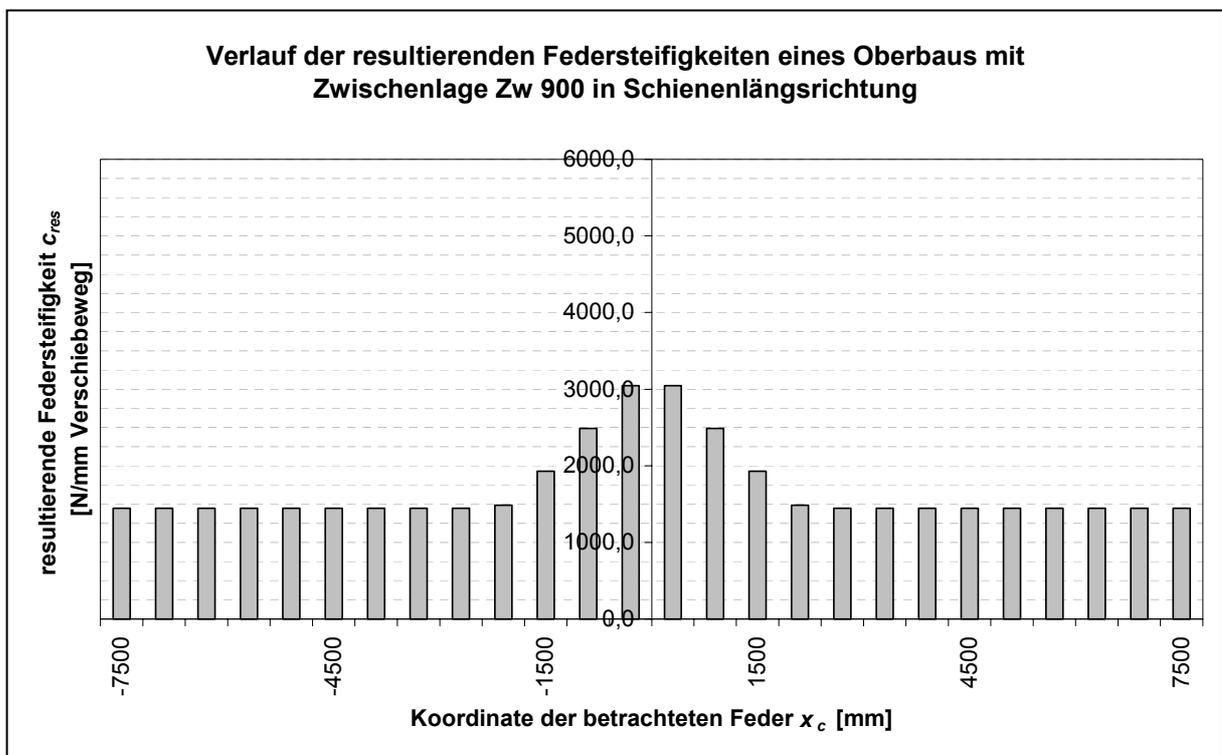


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,23 \text{ mm}$$

$$c_{\Delta l, bel} = 9,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, bel} = \frac{38,0}{3,0} = 12,7 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{\Delta l, unbel} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, unbel} = \frac{23,3}{3,0} = 7,8 \text{ N/mm}^2$$

$$c(0 \text{ mm}) = 5654,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_D(0 \text{ mm}) = 2 \cdot (12,7 \cdot 300 + \frac{7,8 - 12,7}{2} \cdot 300^2) = 7401,7 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,23}{7401,7 + 5654,9} \cdot 7401,7 = 0,13 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,23}{7401,7 + 5654,9} \cdot 5654,9 = 0,10 \text{ mm}$$

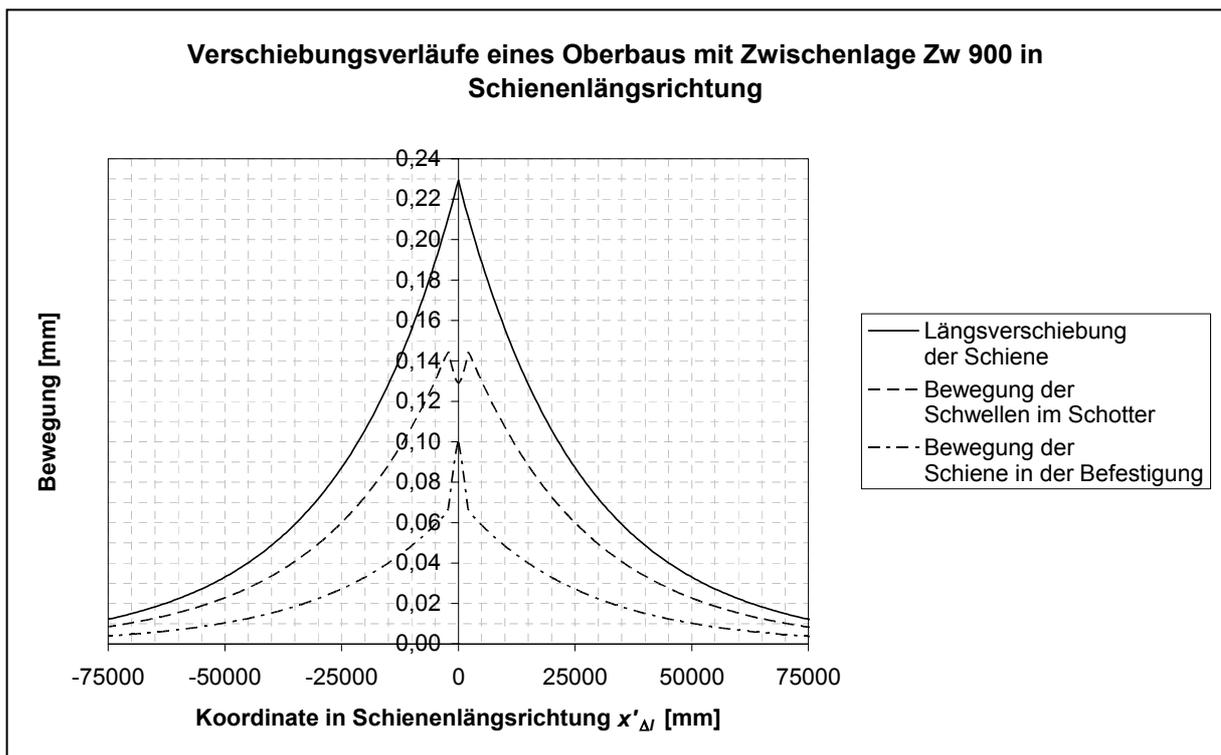


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit linearer Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Längsbewegungen mit linearer Abhängigkeit der Widerstände vom Verschiebeweg und mit Änderung der Widerstände entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

zweiter Nulldurchgang der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN:

$$x_2 = \frac{7}{4} \cdot \pi \cdot 857 = 4713 \text{ mm}$$

Oberbau mit Zwischenlage Zw 687a:

$$x_c + \frac{a}{2} \leq x_2 : c_{res}(x_c) = [c_{res,\Delta,unbel} \cdot x'_{\Delta} - (c_{res,\Delta,bel} - c_{res,\Delta,unbel}) \cdot L \cdot \frac{\cos \frac{x'_{\Delta}}{L}}{e^{\frac{x'_{\Delta}}{L}}}]_{x_c - \frac{a}{2}}^{x_c + \frac{a}{2}}$$

$$x_c - \frac{a}{2} \leq x_2 < x_c + \frac{a}{2} :$$

$$c_{res}(x_c) = c_{res,\Delta,unbel} \cdot a - (c_{res,\Delta,bel} - c_{res,\Delta,unbel}) \cdot L \cdot \left(\frac{\cos \frac{x_2}{L}}{e^{\frac{x_2}{L}}} - \frac{\cos \frac{x_c - \frac{a}{2}}{L}}{e^{\frac{x_c - \frac{a}{2}}{L}}} \right)$$

$$x_c - \frac{a}{2} > x_2 : c_{res}(x_c) = c_{res,unbel}$$

$$c_{res,\Delta,bel} = 8,8 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res,\Delta,unbel} = 3,2 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = 3,2 \cdot 600 - (8,8 - 3,2) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{600}{857}}{e^{\frac{600}{857}}} - 1 \right)$$

$$= 4896,8 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = 3,2 \cdot (1200 - 600) - (8,8 - 3,2) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1200}{857}}{e^{\frac{1200}{857}}} - \frac{\cos \frac{600}{857}}{e^{\frac{600}{857}}} \right)$$

$$= 3541,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = 3,2 \cdot (1800 - 1200) - (8,8 - 3,2) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1800}{857}}{e^{\frac{1800}{857}}} - \frac{\cos \frac{1200}{857}}{e^{\frac{1200}{857}}} \right)$$

$$= 2417,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2100 \text{ mm}) = 3,2 \cdot (2400 - 1800) - (8,8 - 3,2) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{2400}{857}}{e^{\frac{2400}{857}}} - \frac{\cos \frac{1800}{857}}{e^{\frac{1800}{857}}} \right)$$

= 1898,1 N/mm Verschiebeweg

$$c_{res}(2700 \text{ mm}) = 3,2 \cdot (3000 - 2400) - (8,8 - 3,2) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{3000}{857}}{e^{\frac{3000}{857}}} - \frac{\cos \frac{2400}{857}}{e^{\frac{2400}{857}}} \right)$$

= 1780,7 N/mm Verschiebeweg

$$c_{res}(3300 \text{ mm}) = 3,2 \cdot (3600 - 3000) - (8,8 - 3,2) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{3600}{857}}{e^{\frac{3600}{857}}} - \frac{\cos \frac{3000}{857}}{e^{\frac{3000}{857}}} \right)$$

= 1819,6 N/mm Verschiebeweg

$$c_{res}(3900 \text{ mm}) = 3,2 \cdot (4200 - 3600) - (8,8 - 3,2) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{4200}{857}}{e^{\frac{4200}{857}}} - \frac{\cos \frac{3600}{857}}{e^{\frac{3600}{857}}} \right)$$

= 1878,1 N/mm Verschiebeweg

$$c_{res}(4500 \text{ mm}) = 3,2 \cdot 600 - (8,8 - 3,2) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{4713}{857}}{e^{\frac{4713}{857}}} - \frac{\cos \frac{4200}{857}}{e^{\frac{4200}{857}}} \right)$$

= 1912,8 N/mm Verschiebeweg

$$c_{res}(5100 \text{ mm}) = 1922,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

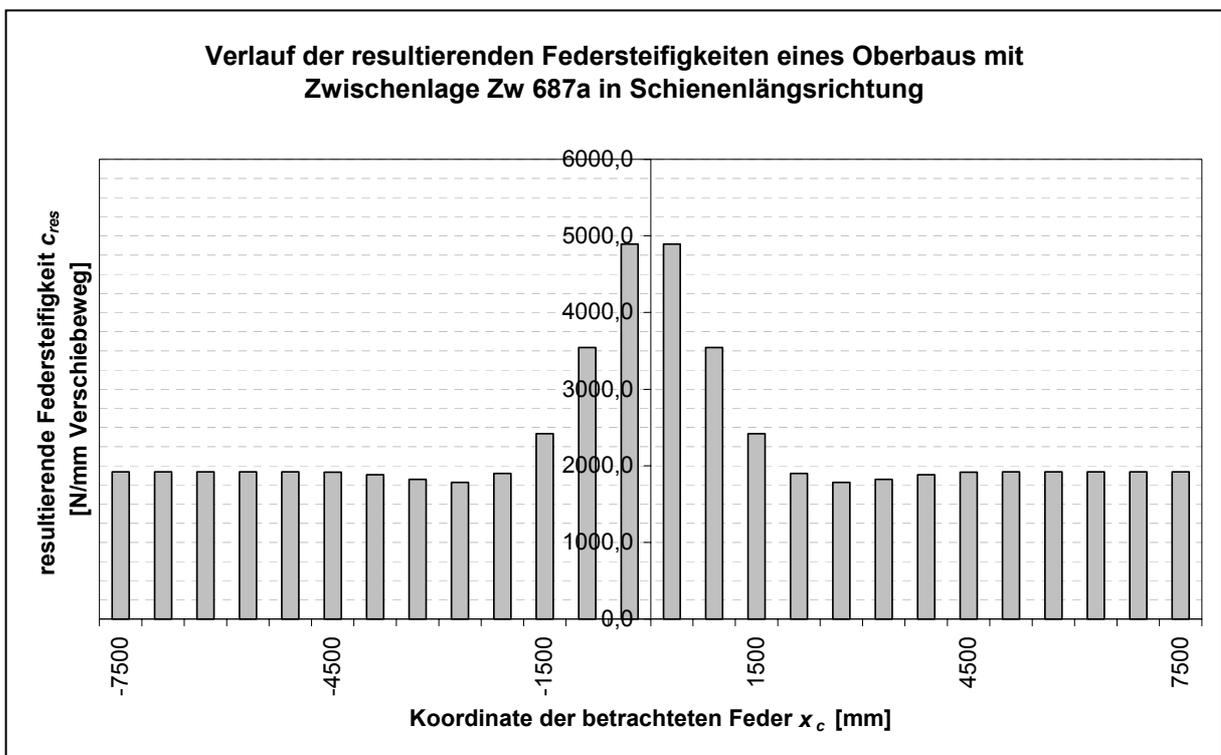


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,19 \text{ mm}$$

$$c_{\Delta l, bel} = 9,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, bel} = 81,4 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{\Delta l, unbel} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, unbel} = 38,0 \text{ N/mm}^2$$

$$c(0 \text{ mm}) = 2 \cdot [3,5 \cdot 300 - (9,9 - 3,5) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{300}{857}}{e^{\frac{300}{857}}} - 1 \right)] = 5628,7 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_D(0 \text{ mm}) = 2 \cdot [38,0 \cdot 300 - (81,4 - 38,0) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{300}{857}}{e^{\frac{300}{857}}} - 1 \right)]$$

$$= 47\,949,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,19}{47\,949,6 + 5628,7} \cdot 47\,949,6 = 0,17 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,19}{47\,949,6 + 5628,7} \cdot 5628,7 = 0,02 \text{ mm}$$

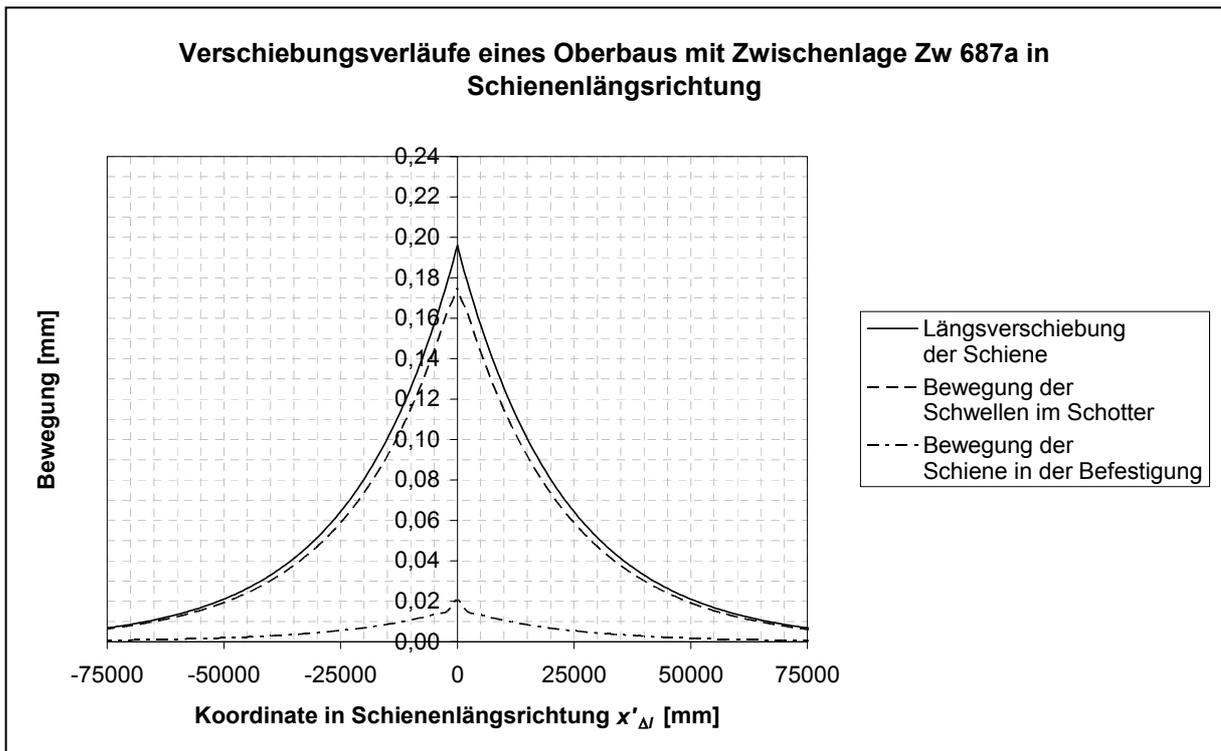


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 700a:

$$c_{res,\Delta l, bel} = 5,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res,\Delta l, unbel} = 2,6 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = 2,6 \cdot 600 - (5,9 - 2,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{600}{857}}{e^{\frac{600}{857}}} - 1 \right)$$

$$= 3314,2 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = 2,6 \cdot (1200 - 600) - (5,9 - 2,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1200}{857}}{e^{\frac{1200}{857}}} - \frac{\cos \frac{600}{857}}{e^{\frac{600}{857}}} \right)$$

$$= 2515,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = 2,6 \cdot (1800 - 1200) - (5,9 - 2,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1800}{857}}{e^{\frac{1800}{857}}} - \frac{\cos \frac{1200}{857}}{e^{\frac{1200}{857}}} \right)$$

$$= 1853,2 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2100 \text{ mm}) = 2,6 \cdot (2400 - 1800) - (5,9 - 2,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{2400}{857}}{e^{\frac{2400}{857}}} - \frac{\cos \frac{1800}{857}}{e^{\frac{1800}{857}}} \right)$$

$$= 1547,1 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2700 \text{ mm}) = 2,6 \cdot (3000 - 2400) - (5,9 - 2,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{3000}{857}}{e^{\frac{3000}{857}}} - \frac{\cos \frac{2400}{857}}{e^{\frac{2400}{857}}} \right)$$

$$= 1477,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(3300 \text{ mm}) = 2,6 \cdot (3600 - 3000) - (5,9 - 2,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{3600}{857}}{e^{\frac{3600}{857}}} - \frac{\cos \frac{3000}{857}}{e^{\frac{3000}{857}}} \right)$$

$$= 1500,8 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(3900 \text{ mm}) = 2,6 \cdot (4200 - 3600) - (5,9 - 2,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{4200}{857}}{e^{\frac{4200}{857}}} - \frac{\cos \frac{3600}{857}}{e^{\frac{3600}{857}}} \right)$$

$$= 1535,3 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(4500 \text{ mm}) = 2,6 \cdot 600 - (5,9 - 2,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{4713}{857}}{e^{\frac{4713}{857}}} - \frac{\cos \frac{4200}{857}}{e^{\frac{4200}{857}}} \right)$$

$$= 1555,8 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(5100 \text{ mm}) = 1580,5 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

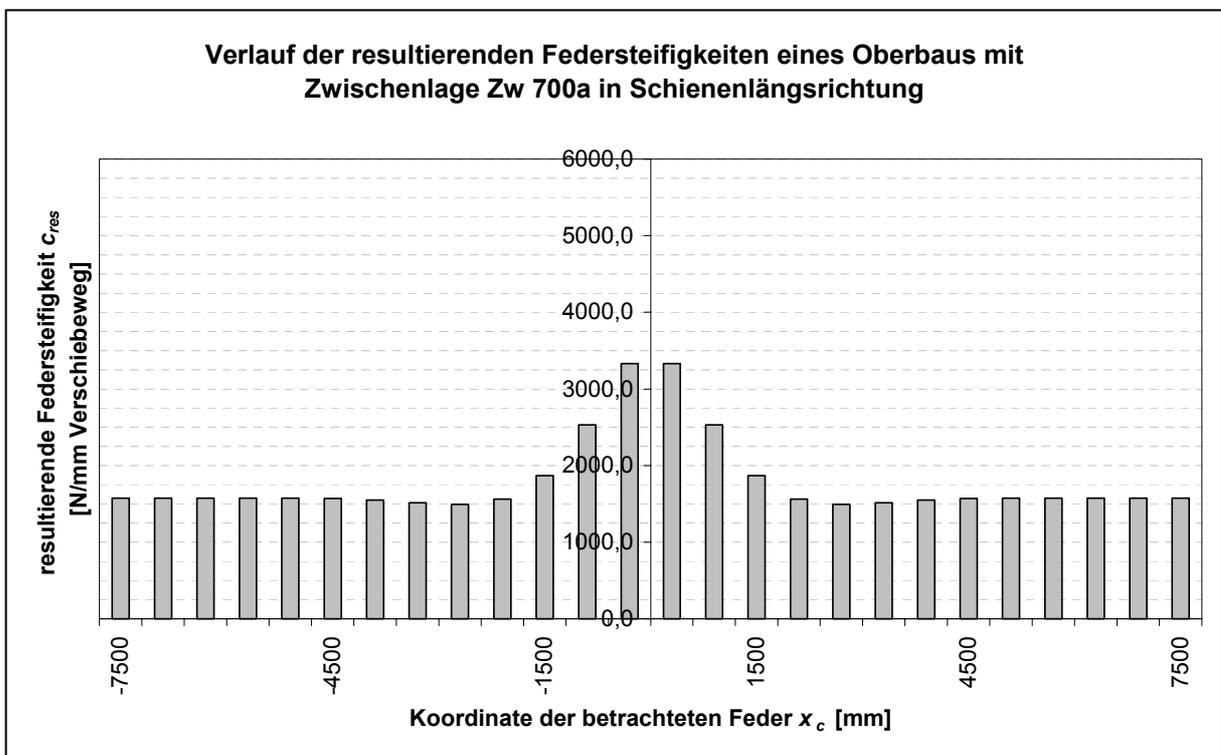


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,22 \text{ mm}$$

$$c_{\Delta l, bel} = 9,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, bel} = 14,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{\Delta l, unbel} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, unbel} = 10,6 \text{ N/mm}^2$$

$$c(0 \text{ mm}) = 5628,7 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_D(0 \text{ mm}) = 2 \cdot [10,6 \cdot 300 - (14,9 - 10,6) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{300}{857}}{e^{\frac{300}{857}}} - 1 \right)]$$

$$= 8851,8 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,22}{8851,8 + 5628,7} \cdot 8851,8 = 0,13 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,22}{8851,8 + 5628,7} \cdot 5628,7 = 0,09 \text{ mm}$$

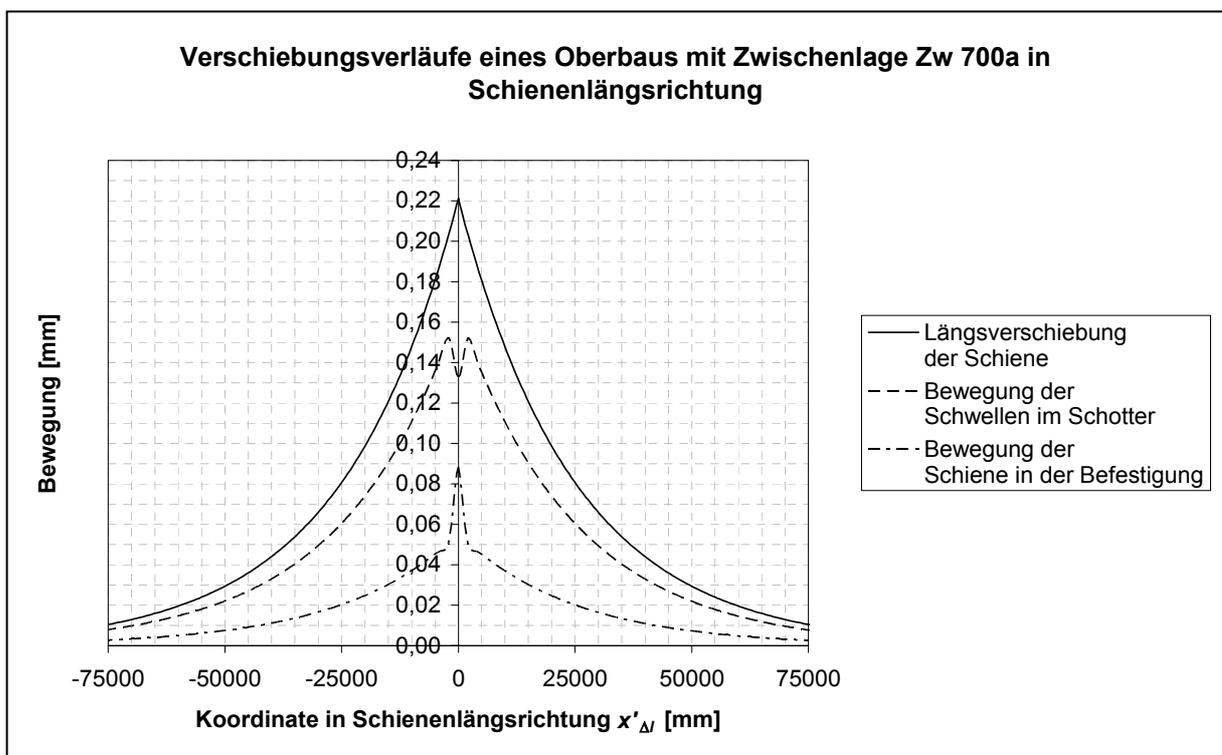


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Oberbau mit Zwischenlage Zw 900:

$$c_{res,\Delta l, bel} = 5,5 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res,\Delta l, unbel} = 2,4 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{res}(300 \text{ mm}) = 2,4 \cdot 600 - (5,5 - 2,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{600}{857}}{e^{\frac{600}{857}}} - 1 \right)$$

$$= 3087,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(900 \text{ mm}) = 2,4 \cdot (1200 - 600) - (5,5 - 2,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1200}{857}}{e^{\frac{1200}{857}}} - \frac{\cos \frac{600}{857}}{e^{\frac{600}{857}}} \right)$$

$$= 2337,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(1500 \text{ mm}) = 2,4 \cdot (1800 - 1200) - (5,5 - 2,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{1800}{857}}{e^{\frac{1800}{857}}} - \frac{\cos \frac{1200}{857}}{e^{\frac{1200}{857}}} \right)$$

$$= 1715,5 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2100 \text{ mm}) = 2,4 \cdot (2400 - 1800) - (5,5 - 2,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{2400}{857}}{e^{\frac{2400}{857}}} - \frac{\cos \frac{1800}{857}}{e^{\frac{1800}{857}}} \right)$$

$$= 1427,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(2700 \text{ mm}) = 2,4 \cdot (3000 - 2400) - (5,5 - 2,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{3000}{857}}{e^{\frac{3000}{857}}} - \frac{\cos \frac{2400}{857}}{e^{\frac{2400}{857}}} \right)$$

$$= 1362,9 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(3300 \text{ mm}) = 2,4 \cdot (3600 - 3000) - (5,5 - 2,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{3600}{857}}{e^{\frac{3600}{857}}} - \frac{\cos \frac{3000}{857}}{e^{\frac{3000}{857}}} \right)$$

$$= 1384,4 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(3900 \text{ mm}) = 2,4 \cdot (4200 - 3600) - (5,5 - 2,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{4200}{857}}{e^{\frac{4200}{857}}} - \frac{\cos \frac{3600}{857}}{e^{\frac{3600}{857}}} \right)$$

$$= 1416,8 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(4500 \text{ mm}) = 2,4 \cdot 600 - (5,5 - 2,4) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{4713}{857}}{e^{\frac{4713}{857}}} - \frac{\cos \frac{4200}{857}}{e^{\frac{4200}{857}}} \right)$$

$$= 1436,0 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$c_{res}(5100 \text{ mm}) = 1447,6 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

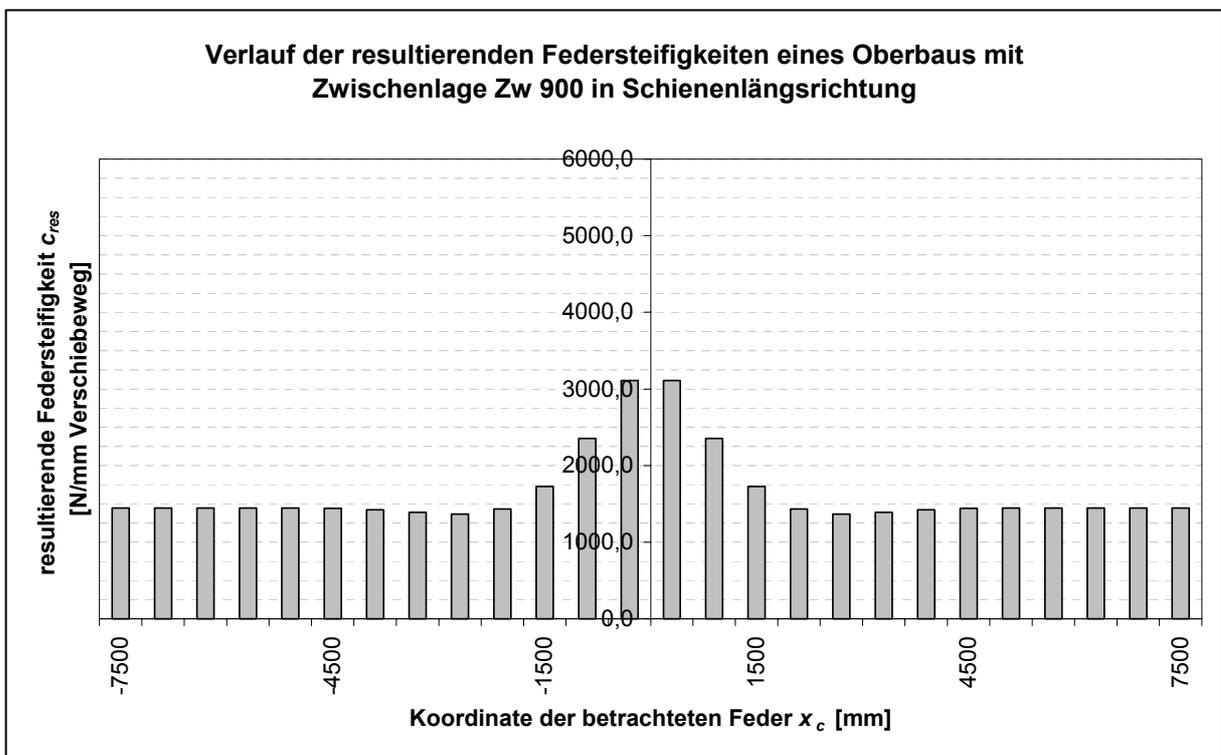


Abb.: Resultierende Federsteifigkeiten mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

$$\Delta l_{res}(0 \text{ mm}) = 0,23 \text{ mm}$$

$$c_{\Delta l, bel} = 9,9 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, bel} = 12,7 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{\Delta l, unbel} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$c_{D, \Delta l, unbel} = 7,8 \text{ N/mm}^2$$

$$c(0 \text{ mm}) = 5628,7 \text{ N/mm Verschiebeweg}$$

$$\begin{aligned} c_D(0 \text{ mm}) &= 2 \cdot [7,8 \cdot 300 - (12,7 - 7,8) \cdot 857 \cdot \left(\frac{\cos \frac{300}{857}}{e^{\frac{300}{857}}} - 1 \right)] \\ &= 7519,5 \text{ N/mm Verschiebeweg} \end{aligned}$$

$$\Delta l_L(0 \text{ mm}) = \frac{0,23}{7519,5 + 5628,7} \cdot 7519,5 = 0,13 \text{ mm}$$

$$\Delta l_D(0 \text{ mm}) = \frac{0,23}{7519,5 + 5628,7} \cdot 5628,7 = 0,10 \text{ mm}$$

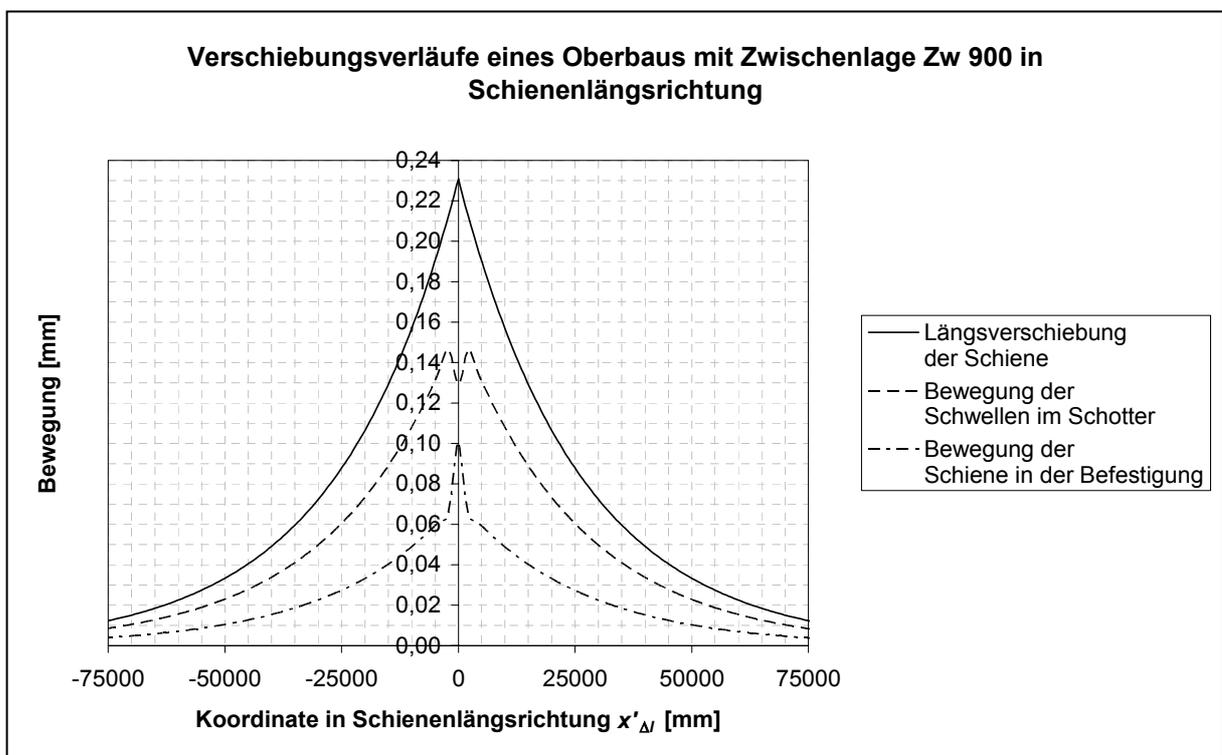


Abb.: Längsverschiebung der Schiene sowie Bewegung der Schwellen im Schotter und der Schiene in der Befestigung mit Änderung von Längsverschiebe- und Durchschubwiderstand entsprechend der Biegelinie nach WINKLER/ZIMMERMANN beim Übergang vom belasteten in den unbelasteten Zustand des Gleisrostes

Gleichungen zur Berechnung der maximal zulässigen Längsverschiebekraft für die unterschiedlichen Kombinationen der Parameter Schwellentyp und Stützpunktstand

Schwelle B 70 W, $a = 630$ mm:

Schwellenstirnfläche:	32 400 mm ² (Abb. 3.4)
Fläche der Schwellenflanke:	418 600 mm ² (Abb. 3.4)
halber Abstand zwischen den Schwellenflanken:	190 mm (Anlage 5.1.2)
Höhe der Schwellenstirnfläche:	175 mm (Abb. 3.4)
seitliche Lastausbreitung in Gleislängsrichtung:	220 mm (Anlage 5.1.2)
Höhe der Schwellenflanke:	165 mm (Abb. 3.4)

$$P_S = 4,2 \text{ kN}$$

$$P_{VK} = 0,42 \cdot 10 \cdot \frac{32\,400}{418\,600} = 0,3 \text{ kN}$$

$$P_{SF}(90^\circ) = 0,16 \cdot 10 \cdot \frac{418\,600}{32\,400 + 2 \cdot 190 \cdot 175} = 6,8 \text{ kN}$$

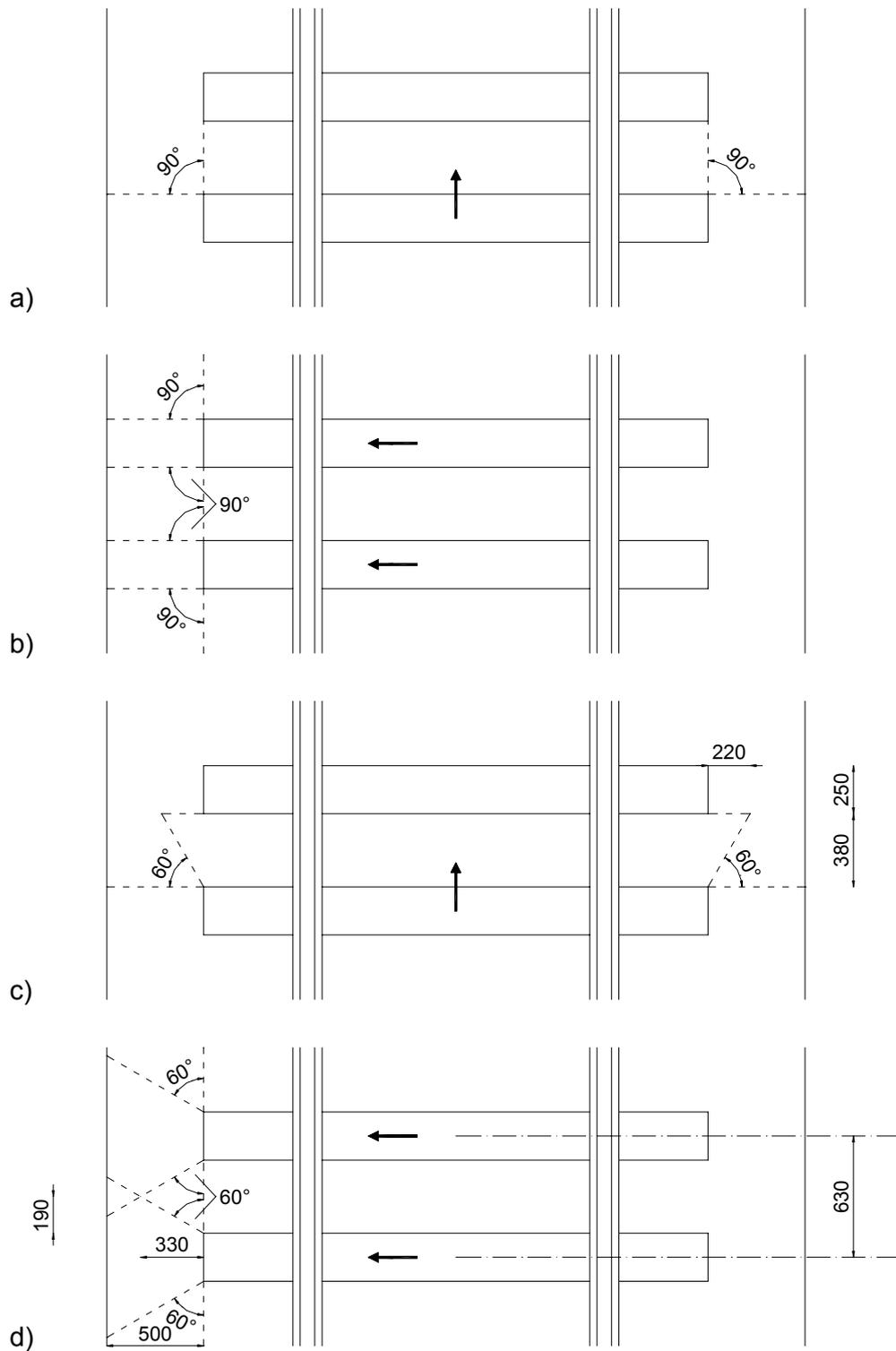
$$P_{SF}(60^\circ) = 0,16 \cdot 10 \cdot \frac{418\,600 + 2 \cdot 220 \cdot 165}{32\,400 + 2 \cdot 190 \cdot 175} = 7,9 \text{ kN}$$

$$P'(90^\circ) = 6,8 + 0,3 + 4,2 = 11,3 \text{ kN}$$

$$P'(60^\circ) = 7,9 + 0,3 + 4,2 = 12,4 \text{ kN}$$

$$\sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q [\text{kN}]}{3} + 11,3 \right)$$

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q [\text{kN}]}{3} + 12,4 \right)$$



(alle Abmessungen in [mm])

Abb.: Lastausbreitung im Schotter in horizontaler Richtung

a) unter einem Winkel von 90° in Längsrichtung des Gleises

b) unter einem Winkel von 90° in Querrichtung des Gleises

c) unter einem Winkel von 60° in Längsrichtung des Gleises

d) unter einem Winkel von 60° in Querrichtung des Gleises

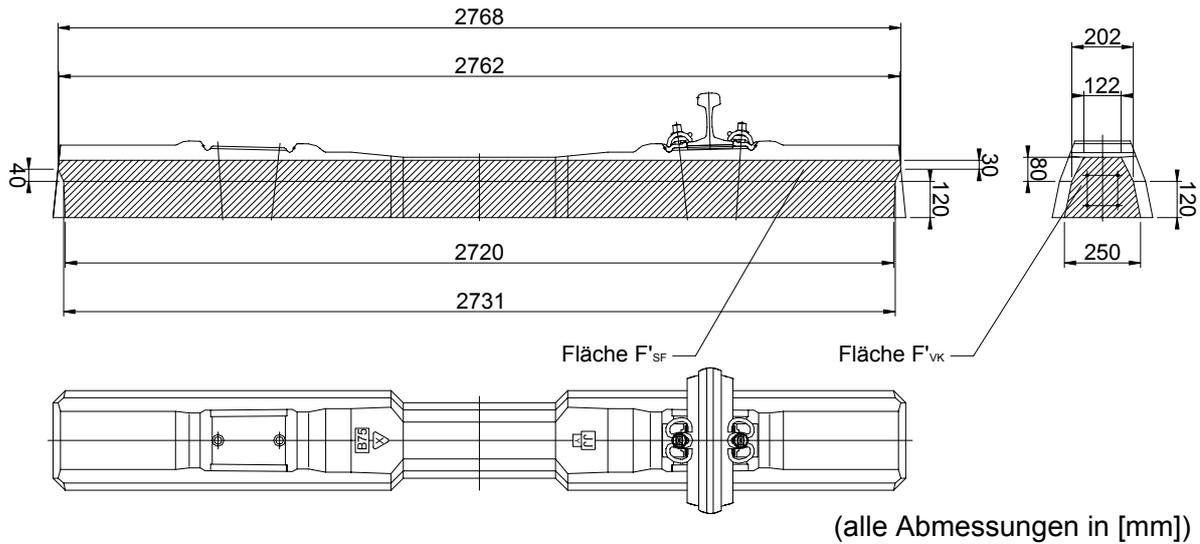


Abb.: Betonschwelle B 75 W mit Vermaßung der in die Berechnung eingehenden Schwellenkontaktflächen /38/

in die Berechnung eingehende Schwellenflanke:

$$F'_{SF} = \frac{2762 + 2768}{2} \cdot 30 + \frac{2768 + 2731}{2} \cdot 40 + \frac{2731 + 2720}{2} \cdot 120 = 519\,990 \text{ mm}^2$$

$$F'_{SF} \approx 520\,000 \text{ mm}^2$$

in die Berechnung eingehende Stirnfläche:

$$F'_{VK} = \frac{122 + 202}{2} \cdot 80 + \frac{202 + 250}{2} \cdot 120 = 40\,080 \text{ mm}^2$$

$$F'_{VK} \approx 40\,100 \text{ mm}^2$$

Schwelle B 75 W, a = 600 mm:

Schwellenstirnfläche:	40 100 mm ² (Anlage 5.1.3)
Fläche der Schwellenflanke:	520 000 mm ² (Anlage 5.1.3)
halber Abstand zwischen den Schwellenflanken:	165 mm (Anlage 5.1.5)
Höhe der Schwellenstirnfläche:	200 mm (Anlage 5.1.3)
seitliche Lastausbreitung in Gleislängsrichtung:	190 mm (Anlage 5.1.5)
Höhe der Schwellenflanke:	190 mm (Anlage 5.1.3)

$$P_S = 4,2 \text{ kN}$$

$$P_{VK} = 0,42 \cdot 10 \cdot \frac{40\,100}{520\,000} = 0,3 \text{ kN}$$

$$P_{SF}(90^\circ) = 0,16 \cdot 10 \cdot \frac{520\,000}{40\,100 + 2 \cdot 165 \cdot 200} = 7,8 \text{ kN}$$

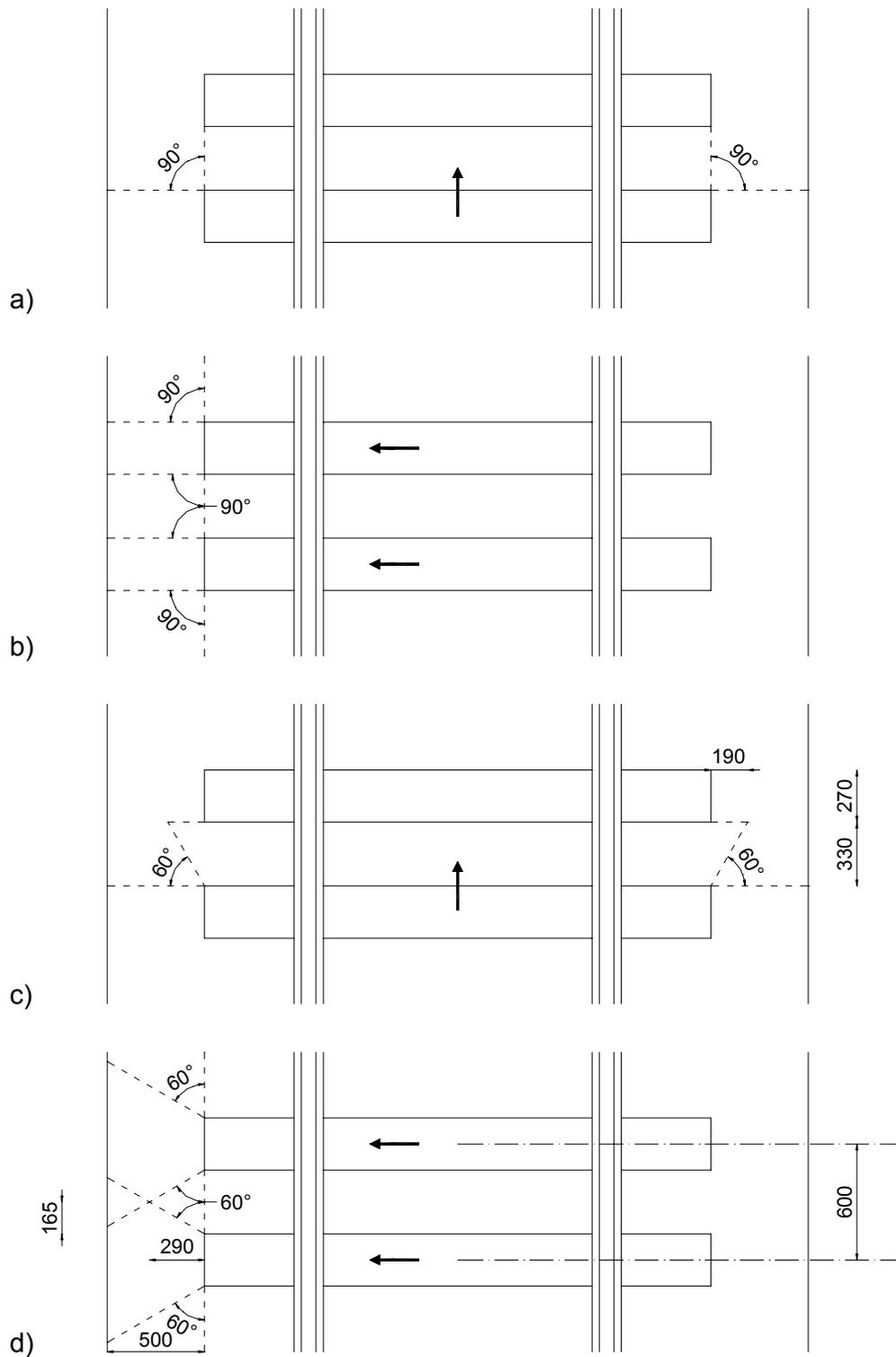
$$P_{SF}(60^\circ) = 0,16 \cdot 10 \cdot \frac{520\,000 + 2 \cdot 190 \cdot 190}{40\,100 + 2 \cdot 165 \cdot 200} = 8,9 \text{ kN}$$

$$P'(90^\circ) = 7,8 + 0,3 + 4,2 = 12,3 \text{ kN}$$

$$P'(60^\circ) = 8,9 + 0,3 + 4,2 = 13,4 \text{ kN}$$

$$\sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q [\text{kN}]}{3} + 12,3 \right)$$

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q [\text{kN}]}{3} + 13,4 \right)$$



(alle Abmessungen in [mm])

Abb.: Lastausbreitung im Schotter in horizontaler Richtung

- a) unter einem Winkel von 90° in Längsrichtung des Gleises
- b) unter einem Winkel von 90° in Querrichtung des Gleises
- c) unter einem Winkel von 60° in Längsrichtung des Gleises
- d) unter einem Winkel von 60° in Querrichtung des Gleises

Schwelle B 75 W, $a = 630$ mm:

Schwellenstirnfläche:	40 100 mm ² (Anlage 5.1.3)
Fläche der Schwellenflanke:	520 000 mm ² (Anlage 5.1.3)
halber Abstand zwischen den Schwellenflanken:	180 mm (Anlage 5.1.7)
Höhe der Schwellenstirnfläche:	200 mm (Anlage 5.1.3)
seitliche Lastausbreitung in Gleislängsrichtung:	210 mm (Anlage 5.1.7)
Höhe der Schwellenflanke:	190 mm (Anlage 5.1.3)

$$P_S = 4,2 \text{ kN}$$

$$P_{VK} = 0,42 \cdot 10 \cdot \frac{40\,100}{520\,000} = 0,3 \text{ kN}$$

$$P_{SF}(90^\circ) = 0,16 \cdot 10 \cdot \frac{520\,000}{40\,100 + 2 \cdot 180 \cdot 200} = 7,4 \text{ kN}$$

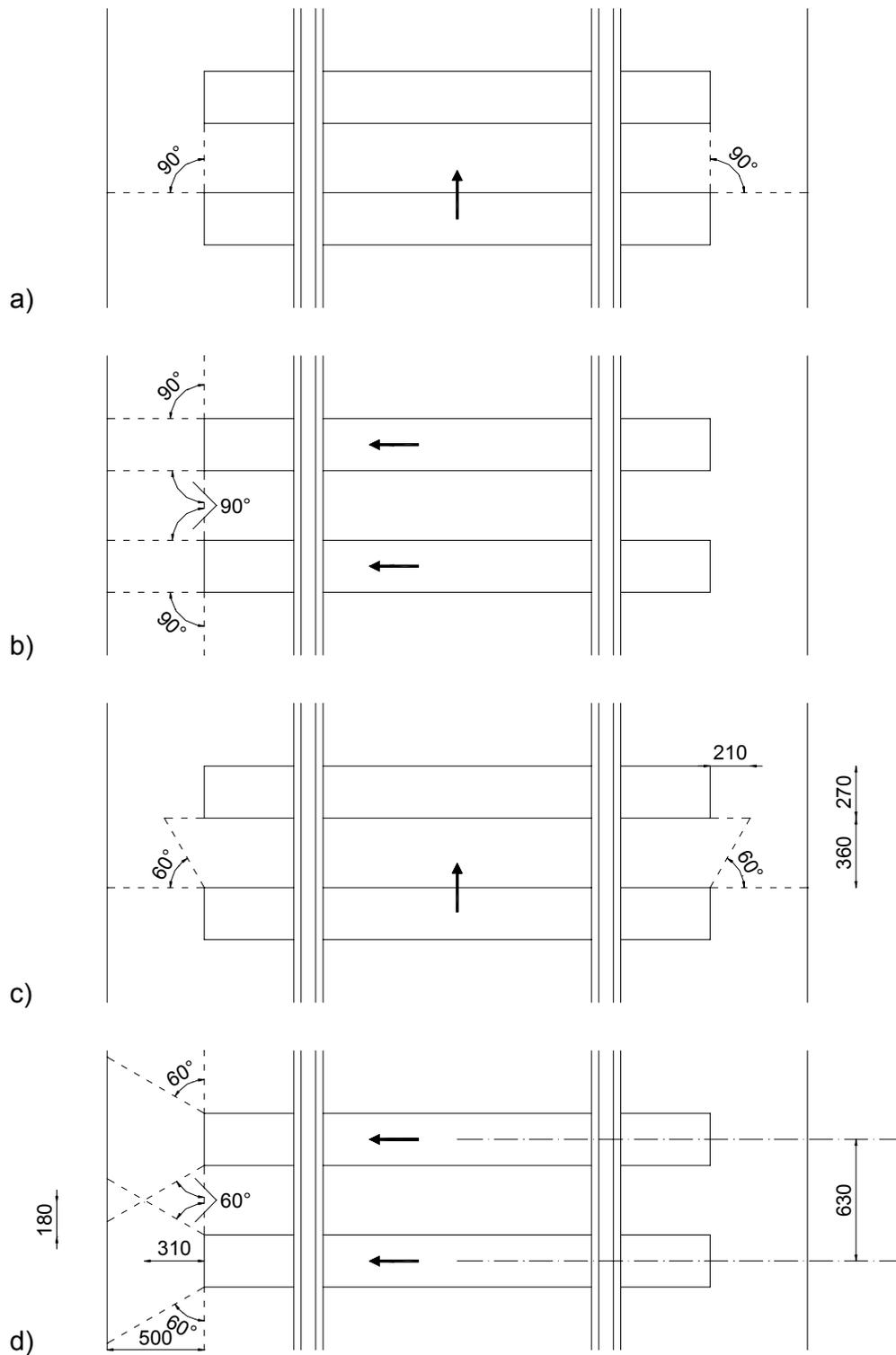
$$P_{SF}(60^\circ) = 0,16 \cdot 10 \cdot \frac{520\,000 + 2 \cdot 210 \cdot 190}{40\,100 + 2 \cdot 180 \cdot 200} = 8,6 \text{ kN}$$

$$P'(90^\circ) = 7,4 + 0,3 + 4,2 = 11,9 \text{ kN}$$

$$P'(60^\circ) = 8,6 + 0,3 + 4,2 = 13,1 \text{ kN}$$

$$\sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q [\text{kN}]}{3} + 11,9 \right)$$

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot Q [\text{kN}]}{3} + 13,1 \right)$$



(alle Abmessungen in [mm])

Abb.: Lastausbreitung im Schotter in horizontaler Richtung

a) unter einem Winkel von 90° in Längsrichtung des Gleises

b) unter einem Winkel von 90° in Querrichtung des Gleises

c) unter einem Winkel von 60° in Längsrichtung des Gleises

d) unter einem Winkel von 60° in Querrichtung des Gleises

Eingangsgrößen für die Berechnung der Längsbewegungen unter einer 20t-Einzelachse

Oberbau mit Betonschwelle B 70 W:

- Radlast: $Q = 100\,000\text{ N}$
 $\mu = 0,3$ (Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene)
- Schiene UIC 60: $F_Q = 7690\text{ mm}^2$
 $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
 $I = 30\,550\,000\text{ mm}^4$
- Bettungsmodul: $C = 0,02 / 0,05 / 0,1 / 0,3\text{ N/mm}^3$
- Schwelle B 70 W: $F = 570\,000\text{ mm}^2$
 $a = 600 / 630\text{ mm}$

- Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]	
		600	630
p_{bel}	100 000	19,7	19,6
p_{unbel}	0	7	

- Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]					
		600		630			
		Bettungsmodul [N/mm ³]					
		0,02	0,05	0,1	0,3	0,1	0,3
$p_{D,bel}$ (Zw 687a)	100 000	33,9	37,5	40,7	46,7	39,4	45,3
$p_{D,unbel}$ (Zw 687a)	0	19,0				18,1	
$p_{D,bel}$ (Zw 700a)	100 000	23,4	24,4	25,3	26,7	24,3	25,6
$p_{D,unbel}$ (Zw 700a)	0	18,1				17,2	
$p_{D,bel}$ (Zw 900)	100 000	34,2	36,3	38,0	40,6	36,5	38,9
$p_{D,unbel}$ (Zw 900)	0	23,3				22,2	

Oberbau mit Betonschwelle B 75 W:

- Radlast: $Q = 100\,000\text{ N}$
 $\mu = 0,3$ (Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene)
- Schiene UIC 60: $F_Q = 7690\text{ mm}^2$
 $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
 $I = 30\,550\,000\text{ mm}^4$
- Bettungsmodul: $C = 0,1 / 0,3\text{ N/mm}^3$
- Schwelle B 75 W: $F = 756\,000\text{ mm}^2 / 41/$
 $a = 600 / 630\text{ mm}$
- Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]	
		600	630
p_{bel}	100 000	19,9	19,8
p_{unbel}	0	7	

- Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]			
		600		630	
		Bettungsmodul [N/mm ³]			
		0,1	0,3	0,1	0,3
$p_{D,bel}$ (Zw 687a)	100 000	42,1	48,4	40,8	47,0
$p_{D,unbel}$ (Zw 687a)	0	19,0		18,1	
$p_{D,bel}$ (Zw 700a)	100 000	25,7	27,1	24,6	26,0
$p_{D,unbel}$ (Zw 700a)	0	18,1		17,2	
$p_{D,bel}$ (Zw 900)	100 000	38,7	41,2	37,2	39,5
$p_{D,unbel}$ (Zw 900)	0	23,3		22,2	

Einfluss des Bettungsmoduls auf die elastische Länge der Schiene und die Stützpunktkraft

elastische Länge der Schiene L und Stützpunktkraft S für einen Bettungsmodul C :

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}}$$

$$S = b \cdot a \cdot C \cdot y$$

elastische Länge der Schiene L_C^* und Stützpunktkraft S_C^* nach einer Änderung des Bettungsmoduls von C in C^* :

$$L_C^* = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C^*}} = \sqrt[4]{\frac{C}{C^*}} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}} = \sqrt[4]{\frac{C}{C^*}} \cdot L$$

$$S_C^* = b \cdot a \cdot C^* \cdot y_C^*$$

$$y_C^* = \sqrt[4]{\left(\frac{C}{C^*}\right)^3} \cdot y \quad /17/$$

$$S_C^* = \sqrt[4]{\frac{C^*}{C}} \cdot b \cdot a \cdot C \cdot y = \sqrt[4]{\frac{C^*}{C}} \cdot S$$

$$C = 0,02 \text{ N/mm}^3$$

$$C^* = 0,3 \text{ N/mm}^3$$

$$L_C^* = \sqrt[4]{\frac{0,02}{0,3}} \cdot L = 0,51 \cdot L$$

$$S_C^* = \sqrt[4]{\frac{0,3}{0,02}} \cdot S = 1,97 \cdot S$$

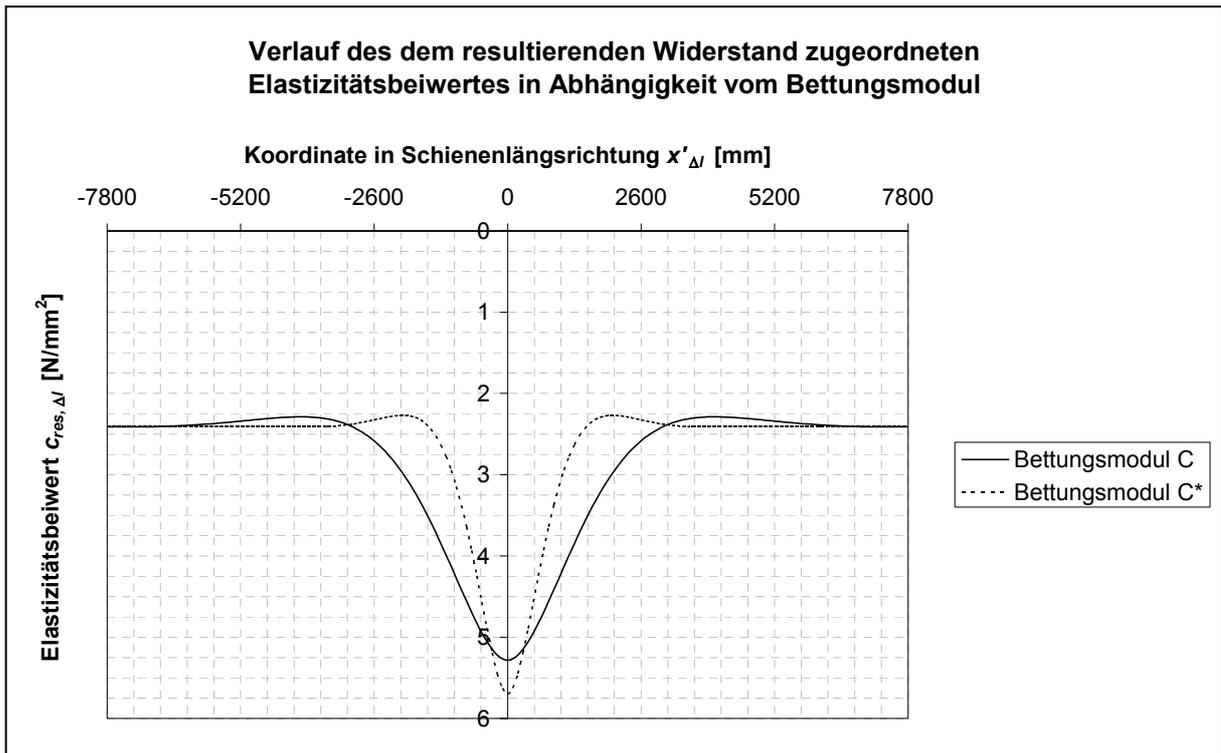


Abb.: Dem resultierenden Widerstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900

Einfluss des Stützpunktabstandes auf die elastische Länge der Schiene und die Stützpunktkraft

elastische Länge der Schiene L und Stützpunktkraft S für einen Stützpunktabstand a :

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}}$$

$$S = b \cdot a \cdot C \cdot y$$

elastische Länge der Schiene L_a^* und Stützpunktkraft S_a^* nach einer Änderung des Stützpunktabstandes von a in a^* :

$$L_a^* = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{\frac{F}{2 \cdot a^*} \cdot C}} = \sqrt[4]{\frac{a^*}{a}} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}} = \sqrt[4]{\frac{a^*}{a}} \cdot L$$

$$S_a^* = \frac{F}{2 \cdot a^*} \cdot a^* \cdot C \cdot y_a^*$$

$$y_a^* = \sqrt[4]{\left(\frac{a^*}{a}\right)^3} \cdot y \quad /17/$$

$$S_a^* = \sqrt[4]{\left(\frac{a^*}{a}\right)^3} \cdot b \cdot a \cdot C \cdot y = \sqrt[4]{\left(\frac{a^*}{a}\right)^3} \cdot S$$

$$a = 600 \text{ mm}$$

$$a^* = 630 \text{ mm}$$

$$L_a^* = \sqrt[4]{\frac{630}{600}} \cdot L = 1,01 \cdot L$$

$$S_a^* = \sqrt[4]{\left(\frac{630}{600}\right)^3} \cdot S = 1,04 \cdot S$$

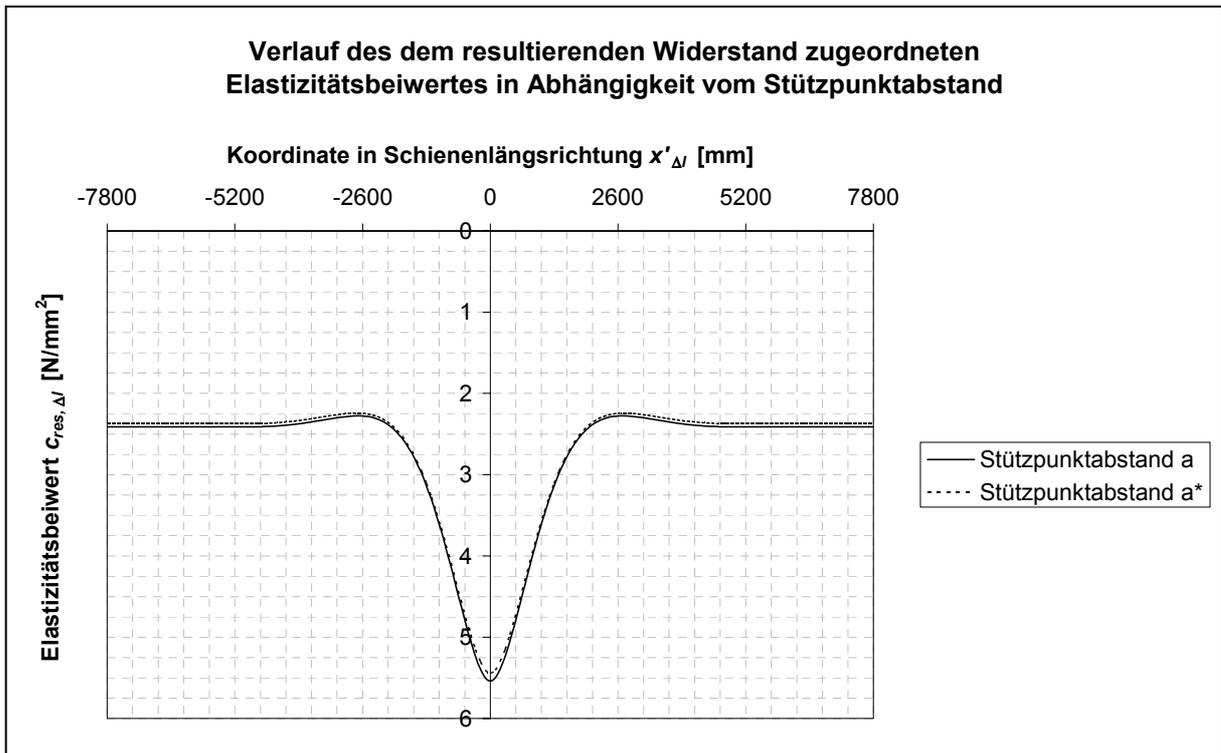


Abb.: Dem resultierenden Widerstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900

Einfluss der wirksamen Schwellenaflagerfläche auf die elastische Länge der Schiene und die Stützpunktkraft

elastische Länge der Schiene L und Stützpunktkraft S für eine wirksame Schwellenaflagerfläche F :

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}}$$

$$S = b \cdot a \cdot C \cdot y$$

elastische Länge der Schiene L_F^* und Stützpunktkraft S_F^* nach einer Änderung der wirksamen Schwellenaflagerfläche von F in F^* :

$$L_F^* = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{\frac{F^*}{2 \cdot a} \cdot C}} = \sqrt[4]{\frac{F}{F^*}} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}} = \sqrt[4]{\frac{F}{F^*}} \cdot L$$

$$S_F^* = \frac{F^*}{2 \cdot a} \cdot a \cdot C \cdot y_F^*$$

$$y_F^* = \sqrt[4]{\left(\frac{F}{F^*}\right)^3} \cdot y \quad |17|$$

$$S_F^* = \sqrt[4]{\frac{F^*}{F}} \cdot b \cdot a \cdot C \cdot y = \sqrt[4]{\frac{F^*}{F}} \cdot S$$

$$F = 570\,000 \text{ mm}^2$$

$$F^* = 756\,000 \text{ mm}^2$$

$$L_F^* = \sqrt[4]{\frac{570\,000}{756\,000}} \cdot L = 0,93 \cdot L$$

$$S_F^* = \sqrt[4]{\frac{756\,000}{570\,000}} \cdot S = 1,07 \cdot S$$

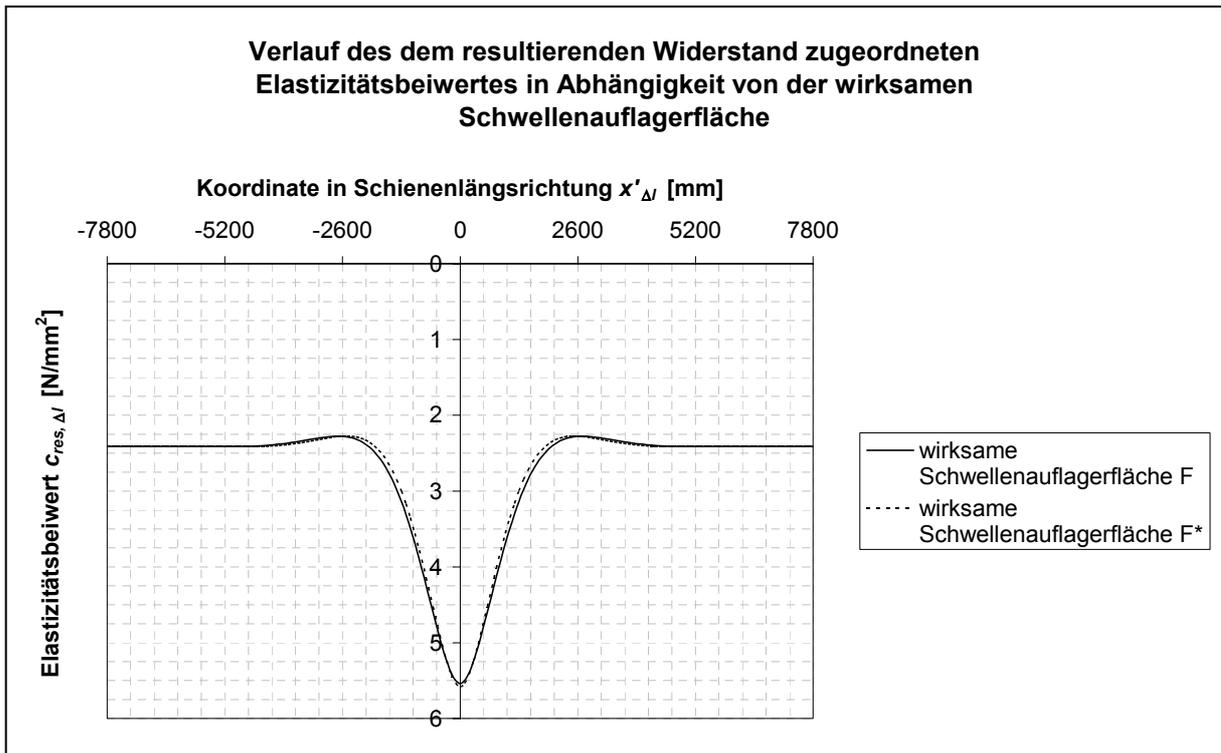


Abb.: Dem resultierenden Widerstand zugeordneter Elastizitätsbeiwert am Beispiel eines Oberbaus mit Zwischenlage Zw 900

Eingangsgrößen für die Berechnung der Längsbewegungen unter einem ICE 1

Oberbau mit Betonschwelle B 70 W:

- Radlast: $Q = 70\,000 / 98\,000$ N
- $\mu = 0,1 / 0,3$ (Bremsen / Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene)
- Schiene UIC 60: $F_Q = 7690$ mm²
- $E = 210\,000$ N/mm²
- $I = 30\,550\,000$ mm⁴
- Bettungsmodul: $C = 0,1 / 0,3$ N/mm³
- Schwelle B 70 W: $F = 570\,000$ mm²
- $a = 600 / 630$ mm

- Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]	
		600	630
p_{bel}	70 000	14,7	14,6
	98 000	19,4	19,3
p_{unbel}	0	7	

- Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]			
		600		630	
		Bettungsmodul [N/mm ³]			
		0,1	0,3	0,1	0,3
$p_{D,bel}$ (Zw 687a)	70 000	34,6	39,1	33,5	37,9
	98 000	40,3	46,2	39,0	44,8
$p_{D,unbel}$ (Zw 687a)	0	19,0		18,1	
$p_{D,bel}$ (Zw 700a)	70 000	23,6	24,9	22,6	23,9
	98 000	25,2	26,6	24,2	25,5
$p_{D,unbel}$ (Zw 700a)	0	18,1		17,2	
$p_{D,bel}$ (Zw 900)	70 000	34,6	37,2	33,2	35,7
	98 000	37,8	40,4	36,3	38,8
$p_{D,unbel}$ (Zw 900)	0	23,3		22,2	

Oberbau mit Betonschwelle B 75 W:

- Radlast: $Q = 70\,000 / 98\,000\text{ N}$
 $\mu = 0,1 / 0,3$ (Bremsen / Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene)
- Schiene UIC 60: $F_Q = 7690\text{ mm}^2$
 $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$
 $I = 30\,550\,000\text{ mm}^4$
- Bettungsmodul: $C = 0,1 / 0,3\text{ N/mm}^3$
- Schwelle B 75 W: $F = 756\,000\text{ mm}^2 / 41/$
 $a = 600 / 630\text{ mm}$

- Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunkt Abstand [mm]	
		600	630
p_{bel}	70 000	14,9	14,8
	98 000	19,5	19,5
p_{unbel}	0	7	

- Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunkt Abstand [mm]			
		600		630	
		Bettungsmodul [N/mm ³]			
		0,1	0,3	0,1	0,3
$p_{D,bel}$ (Zw 687a)	70 000	35,6	40,4	34,5	39,2
	98 000	41,7	47,9	40,4	46,5
$p_{D,unbel}$ (Zw 687a)	0	19,0		18,1	
$p_{D,bel}$ (Zw 700a)	70 000	23,9	25,2	22,9	24,2
	98 000	25,6	27,0	24,5	25,9
$p_{D,unbel}$ (Zw 700a)	0	18,1		17,2	
$p_{D,bel}$ (Zw 900)	70 000	35,2	37,8	33,9	36,4
	98 000	38,5	41,0	37,0	39,3
$p_{D,unbel}$ (Zw 900)	0	23,3		22,2	

Eingangsgrößen für die Berechnung der Längsbewegungen unter einem ICE 3

Oberbau mit Betonschwelle B 70 W:

- Radlast: $Q = 65\ 000 / 67\ 500 / 71\ 250\ \text{N}$
 $\mu = 0,3$ (Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene)
- Schiene UIC 60: $F_Q = 7690\ \text{mm}^2$
 $E = 210\ 000\ \text{N/mm}^2$
 $I = 30\ 550\ 000\ \text{mm}^4$
- Bettungsmodul: $C = 0,1 / 0,3\ \text{N/mm}^3$
- Schwelle B 70 W: $F = 570\ 000\ \text{mm}^2$
 $a = 600 / 630\ \text{mm}$

- Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]	
		600	630
p_{bel}	65 000	13,9	13,8
	67 500	14,3	14,2
	71 250	14,9	14,8
p_{unbel}	0	7	

- Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]			
		600		630	
		Bettungsmodul [N/mm ³]			
		0,1	0,3	0,1	0,3
$p_{D,bel}$ (Zw 687a)	65 000	33,5	37,8	32,4	36,6
	67 500	34,1	38,4	32,9	37,2
	71 250	34,8	39,4	33,7	38,2
$p_{D,unbel}$ (Zw 687a)	0	19,0		18,1	
$p_{D,bel}$ (Zw 700a)	65 000	23,2	24,5	22,3	23,5
	67 500	23,4	24,7	22,4	23,7
	71 250	23,6	25,0	22,7	24,0
$p_{D,unbel}$ (Zw 700a)	0	18,1		17,2	
$p_{D,bel}$ (Zw 900)	65 000	33,9	36,4	32,6	35,0
	67 500	34,3	36,8	32,9	35,4
	71 250	34,7	37,3	33,4	35,9
$p_{D,unbel}$ (Zw 900)	0	23,3		22,2	

Oberbau mit Betonschwelle B 75 W:

- Radlast: $Q = 65\ 000 / 67\ 500 / 71\ 250\ \text{N}$
 $\mu = 0,3$ (Beschleunigen nahe der Schlupfgrenze bei trockener Schiene)
- Schiene UIC 60: $F_Q = 7690\ \text{mm}^2$
 $E = 210\ 000\ \text{N/mm}^2$
 $I = 30\ 550\ 000\ \text{mm}^4$
- Bettungsmodul: $C = 0,1 / 0,3\ \text{N/mm}^3$
- Schwelle B 75 W: $F = 756\ 000\ \text{mm}^2 / 41/$
 $a = 600 / 630\ \text{mm}$
- Längsverschiebewiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]	
		600	630
p_{bel}	65 000	14,0	14,0
	67 500	14,5	14,4
	71 250	15,1	15,0
p_{unbel}	0	7	

- Durchschubwiderstand [N/mm Gleislänge]:

	Radlast [N]	Stützpunktstand [mm]			
		600		630	
		Bettungsmodul [N/mm ³]			
		0,1	0,3	0,1	0,3
$p_{D,bel}$ (Zw 687a)	65 000	34,5	39,0	33,4	37,8
	67 500	35,1	39,7	34,0	38,5
	71 250	35,9	40,8	34,8	39,5
$p_{D,unbel}$ (Zw 687a)	0	19,0		18,1	
$p_{D,bel}$ (Zw 700a)	65 000	23,5	24,9	22,6	23,9
	67 500	23,7	25,1	22,7	24,0
	71 250	24,0	25,3	23,0	24,3
$p_{D,unbel}$ (Zw 700a)	0	18,1		17,2	
$p_{D,bel}$ (Zw 900)	65 000	34,5	37,1	33,2	35,7
	67 500	34,9	37,5	33,5	36,0
	71 250	35,4	38,0	34,0	36,6
$p_{D,unbel}$ (Zw 900)	0	23,3		22,2	

Faktoren zur Berücksichtigung der Radlastverlagerung im Gleisbogen sowie dynamischer Radlastschwankungen

Radlastverlagerung im Gleisbogen /17/:

$$\Delta Q_v = 0,2 \cdot Q$$

maximale dynamische Radlastschwankung /17/:

$$\Delta Q_s = t \cdot n \cdot \varphi$$

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{380}$$

maximale Radlast einschließlich der Radlastverlagerung im Gleisbogen sowie dynamischer Radlastschwankungen /17/:

$$Q_{max} = (Q + \Delta Q_v) \cdot (1 + \Delta Q_s) = 1,2 \cdot \left[1 + t \cdot n \cdot \left(1 + \frac{V - 60}{380} \right) \right] \cdot Q$$

$$t = 3,00 \text{ /17/}$$

$$n = 0,10 \text{ /17/}$$

$$V = 200 \text{ km/h}$$

$$Q_{max} = 1,2 \cdot \left[1 + 3,00 \cdot 0,10 \cdot \left(1 + \frac{200 - 60}{380} \right) \right] \cdot Q = 1,69 \cdot Q$$

$$t = 3,00$$

$$n = 0,10$$

$$V = 250 \text{ km/h}$$

$$Q_{max} = 1,2 \cdot \left[1 + 3,00 \cdot 0,10 \cdot \left(1 + \frac{250 - 60}{380} \right) \right] \cdot Q = 1,74 \cdot Q$$

$$t = 3,00$$

$$n = 0,10$$

$$V = 300 \text{ km/h}$$

$$Q_{max} = 1,2 \cdot \left[1 + 3,00 \cdot 0,10 \cdot \left(1 + \frac{300 - 60}{380} \right) \right] \cdot Q = 1,79 \cdot Q$$

Werte des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes bei gelockerter Schienenbefestigung

Längsverschiebewiderstand:

$$p_{bel} = 19,7 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Stützpunktkraft:

$$S = 34,99 \text{ kN}$$

Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 687a bei gelockerter Schienenbefestigung:

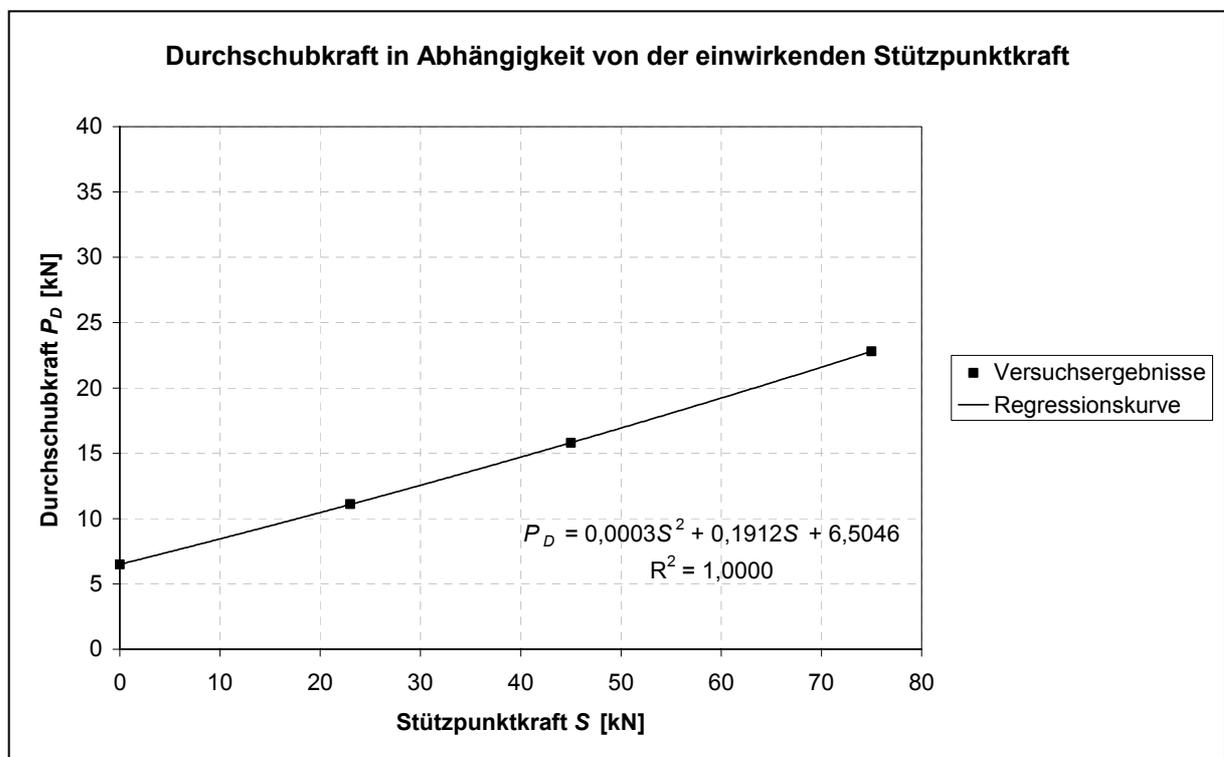


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 687a bei einem Drehmoment der Schwellenschrauben von 150 Nm

$$p_{D,bel}(Zw\ 687a) = \frac{(0,0003 \cdot 34,99^2 + 0,1912 \cdot 34,99 + 6,5046) \cdot 1000}{600}$$

$$= 22,6 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D,unbel}(Zw\ 687a) = \frac{6,5046 \cdot 1000}{600} = 10,8 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Durch Schubwiderstand der Zwischenlage Zw 700a bei gelockerter Schienenbefestigung:

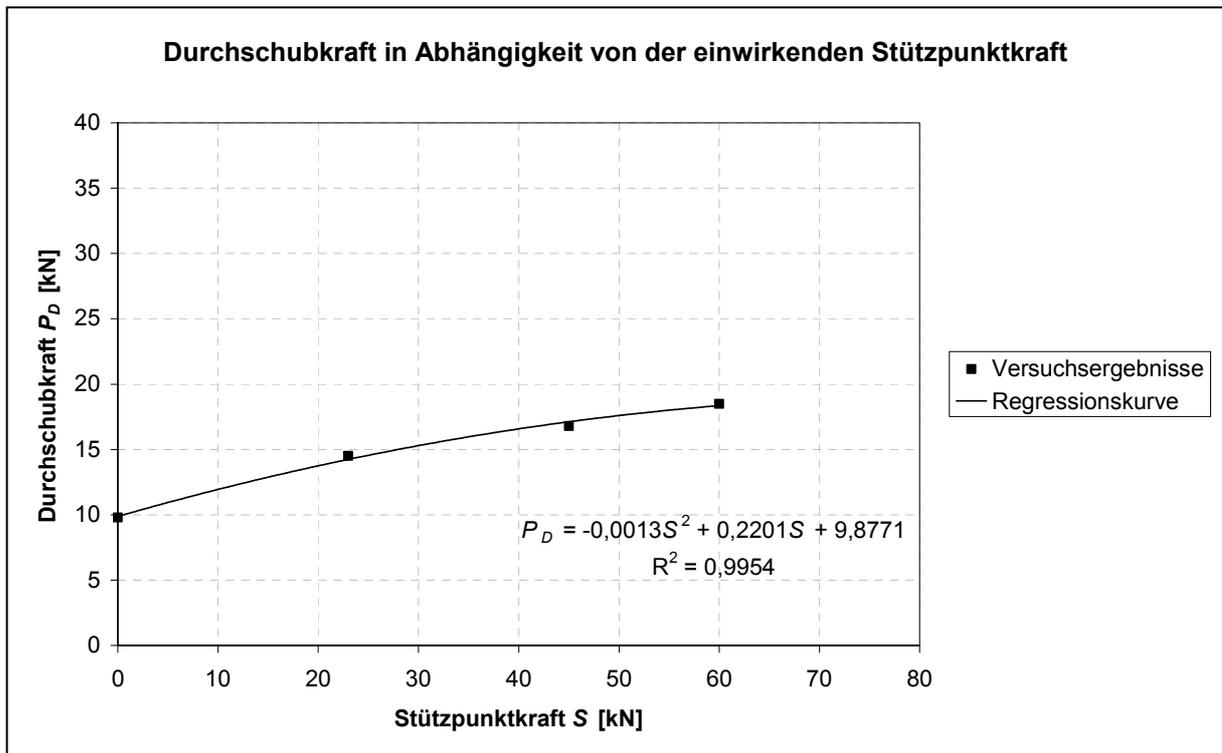


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 700a bei einem Drehmoment der Schwellenschrauben von 150 Nm

$$p_{D, bel}(Zw\ 700a) = \frac{(-0,0013 \cdot 34,99^2 + 0,2201 \cdot 34,99 + 9,8771) \cdot 1000}{600}$$

$$= 26,6\ \text{N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, unbel}(Zw\ 700a) = \frac{9,8771 \cdot 1000}{600} = 16,5\ \text{N/mm Gleislänge}$$

Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 900 bei gelockerter Schienenbefestigung:

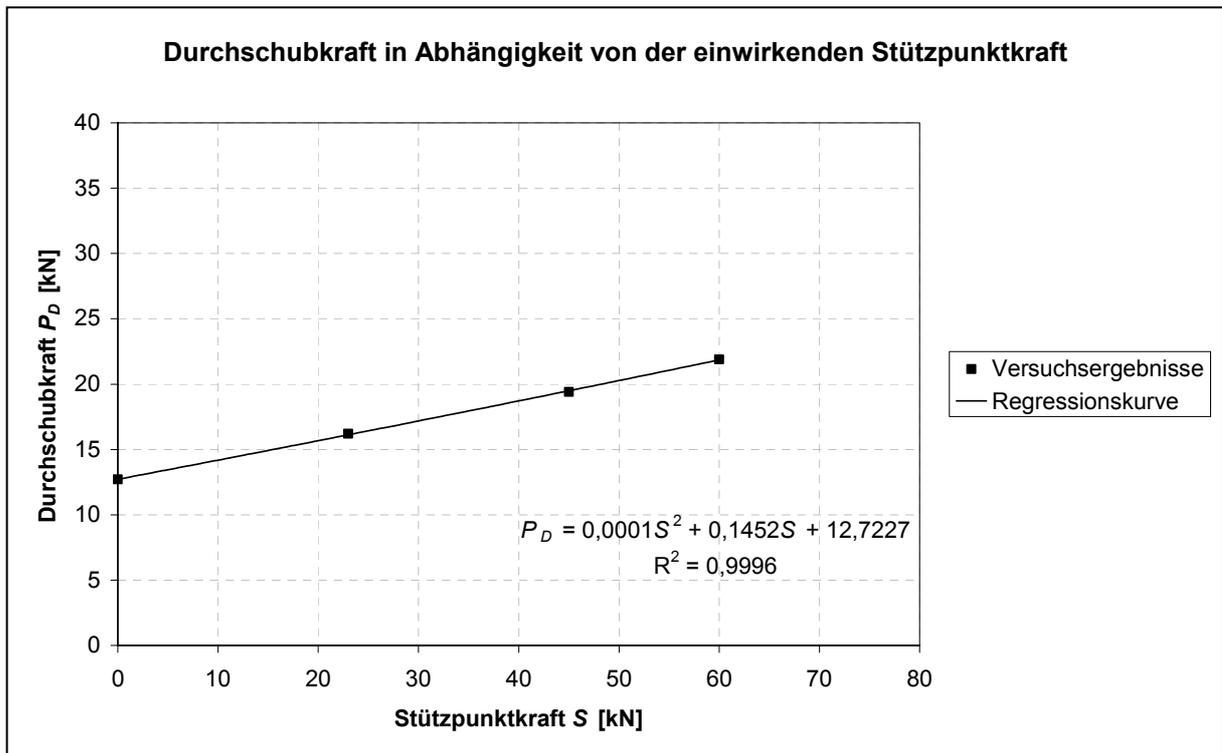


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 900 bei einem Andrehmoment der Schwellenschrauben von 150 Nm

$$p_{D, \text{bel}}(\text{Zw 900}) = \frac{(0,0001 \cdot 34,99^2 + 0,1452 \cdot 34,99 + 12,7227) \cdot 1000}{600}$$

$$= 29,9 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$p_{D, \text{unbel}}(\text{Zw 900}) = \frac{12,7227 \cdot 1000}{600} = 21,2 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Minimale und maximale Werte des Längsverschiebe- und Durchschubwiderstandes

minimaler Längsverschiebewiderstand:

$$\sum P(90^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 100}{3} + 11,6 \right) = 78,27 \text{ kN}$$

$$\rho_{bel} = \frac{78,27 \cdot 1000}{2000 \cdot 2} = 19,6 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Stützpunktkraft:

$$S = 34,99 \text{ kN}$$

minimaler Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 687a:

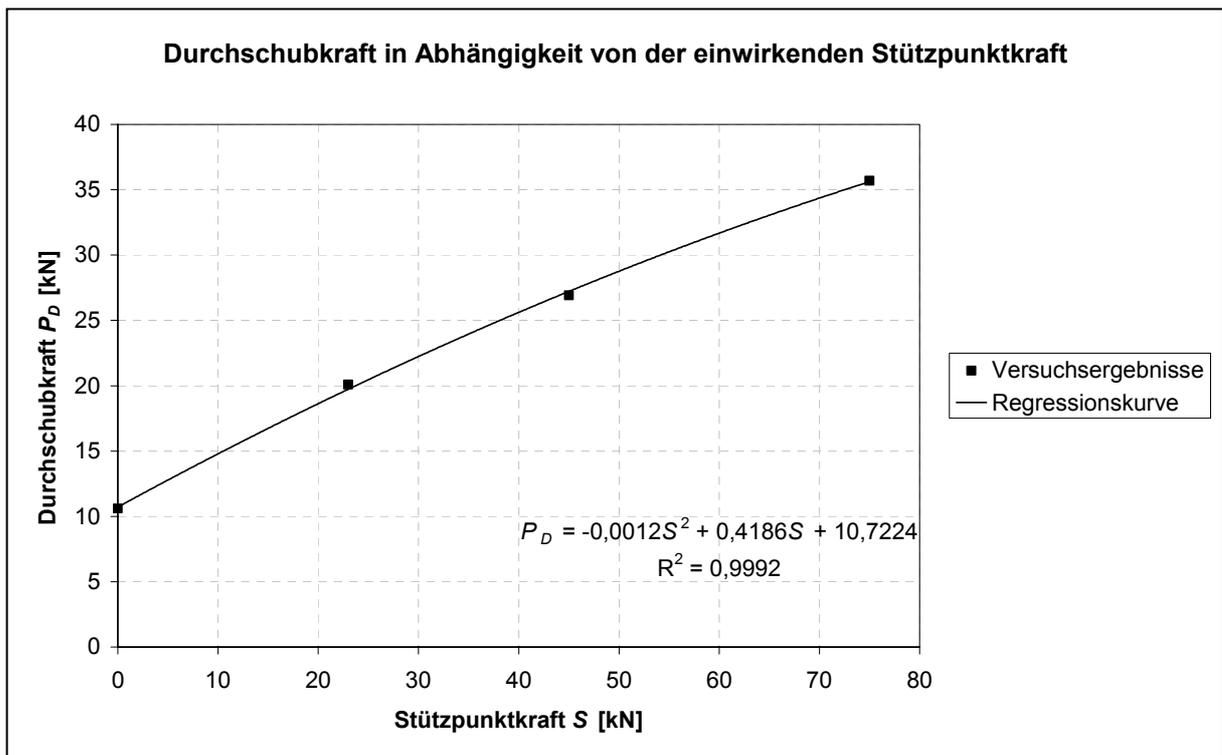


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 687a bei minimaler Durchschubkraft

$$\rho_{D,bel}(\text{Zw 687a}) = \frac{(-0,0012 \cdot 34,99^2 + 0,4186 \cdot 34,99 + 10,7224) \cdot 1000}{600}$$

$$= 39,8 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\rho_{D,unbel}(\text{Zw 687a}) = \frac{10,7224 \cdot 1000}{600} = 17,9 \text{ N/mm Gleislänge}$$

minimaler Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 700a:

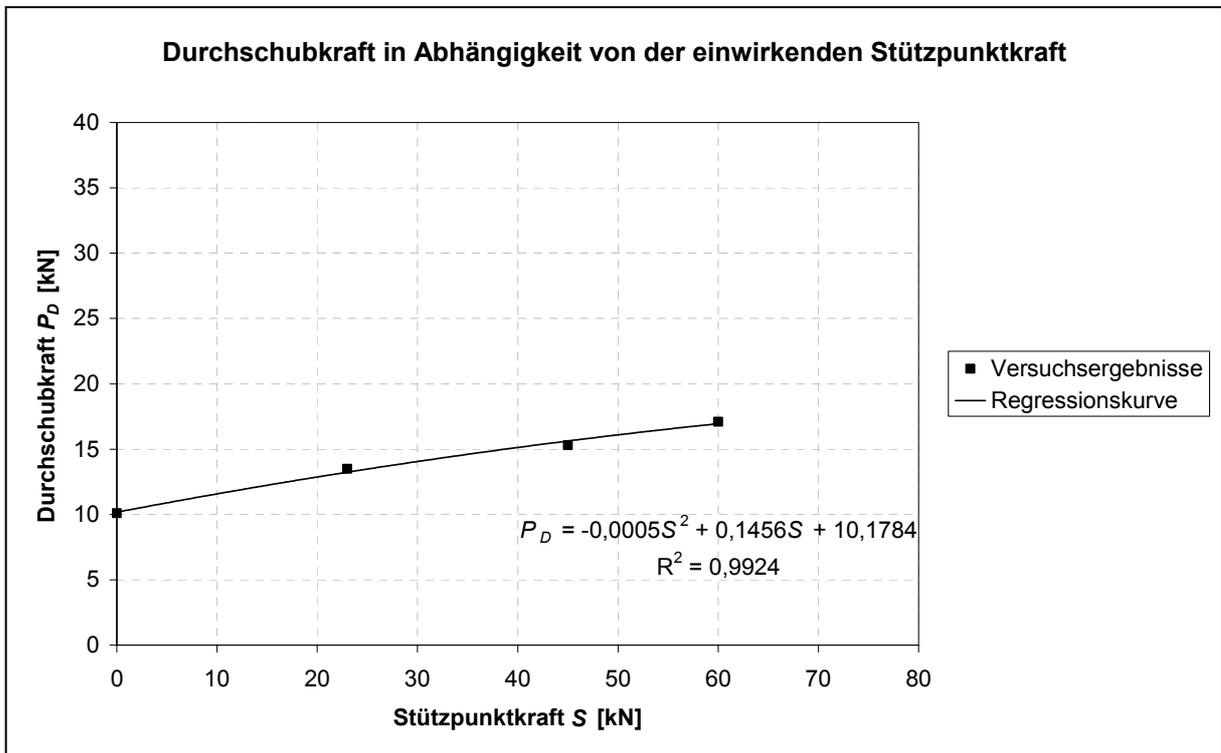


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 700a bei minimaler Durchschubkraft

$$\rho_{D, bel}(Zw 700a) = \frac{(-0,0005 \cdot 34,99^2 + 0,1456 \cdot 34,99 + 10,1784) \cdot 1000}{600}$$

$$= 24,4 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\rho_{D, unbel}(Zw 700a) = \frac{10,1784 \cdot 1000}{600} = 17,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

minimaler Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 900:

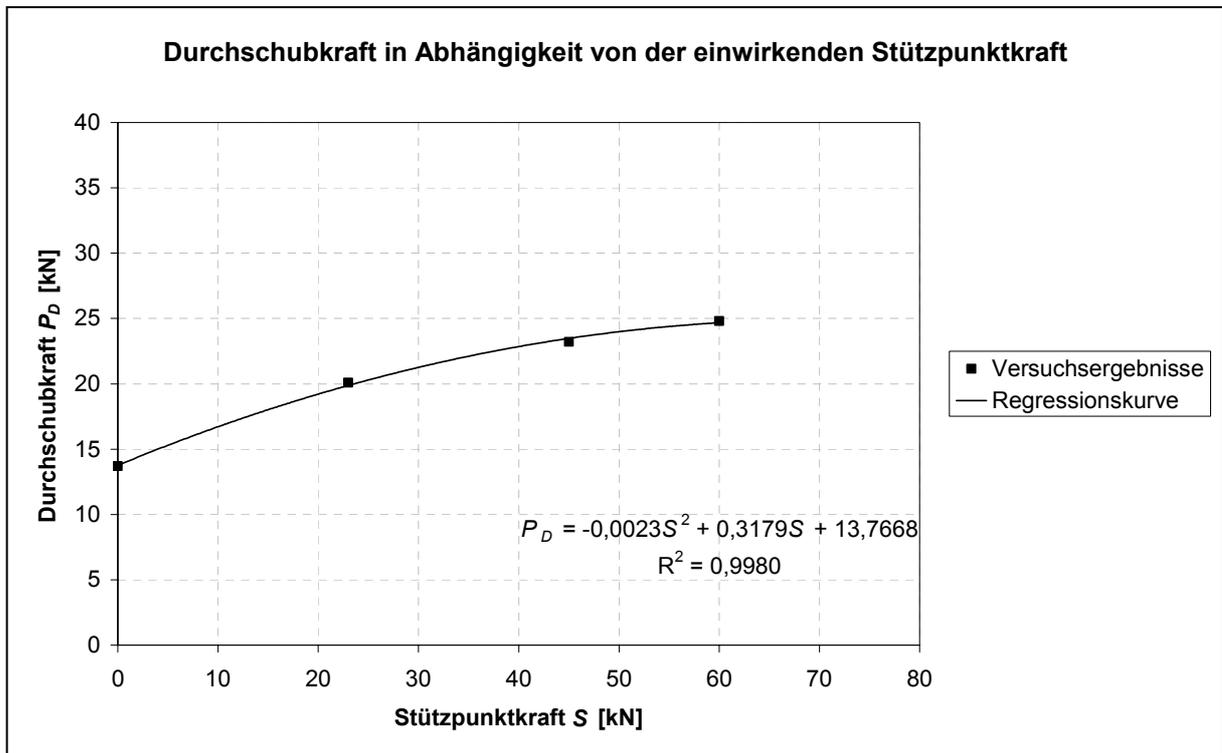


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 900 bei minimaler Durchschubkraft

$$\rho_{D, \text{bel}}(\text{Zw 900}) = \frac{(-0,0023 \cdot 34,99^2 + 0,3179 \cdot 34,99 + 13,7668) \cdot 1000}{600}$$

$$= 36,8 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\rho_{D, \text{unbel}}(\text{Zw 900}) = \frac{13,7668 \cdot 1000}{600} = 22,9 \text{ N/mm Gleislänge}$$

maximaler Längsverschiebewiderstand:

$$\sum P(60^\circ) = 1,00 \cdot \left(\frac{2 \cdot 100}{3} + 12,8 \right) = 79,47 \text{ kN}$$

$$\rho_{bel} = \frac{79,47 \cdot 1000}{2000 \cdot 2} = 19,9 \text{ N/mm Gleislänge}$$

Stützpunktkraft:

$$S = 34,99 \text{ kN}$$

maximaler Durch Schubwiderstand der Zwischenlage Zw 687a:

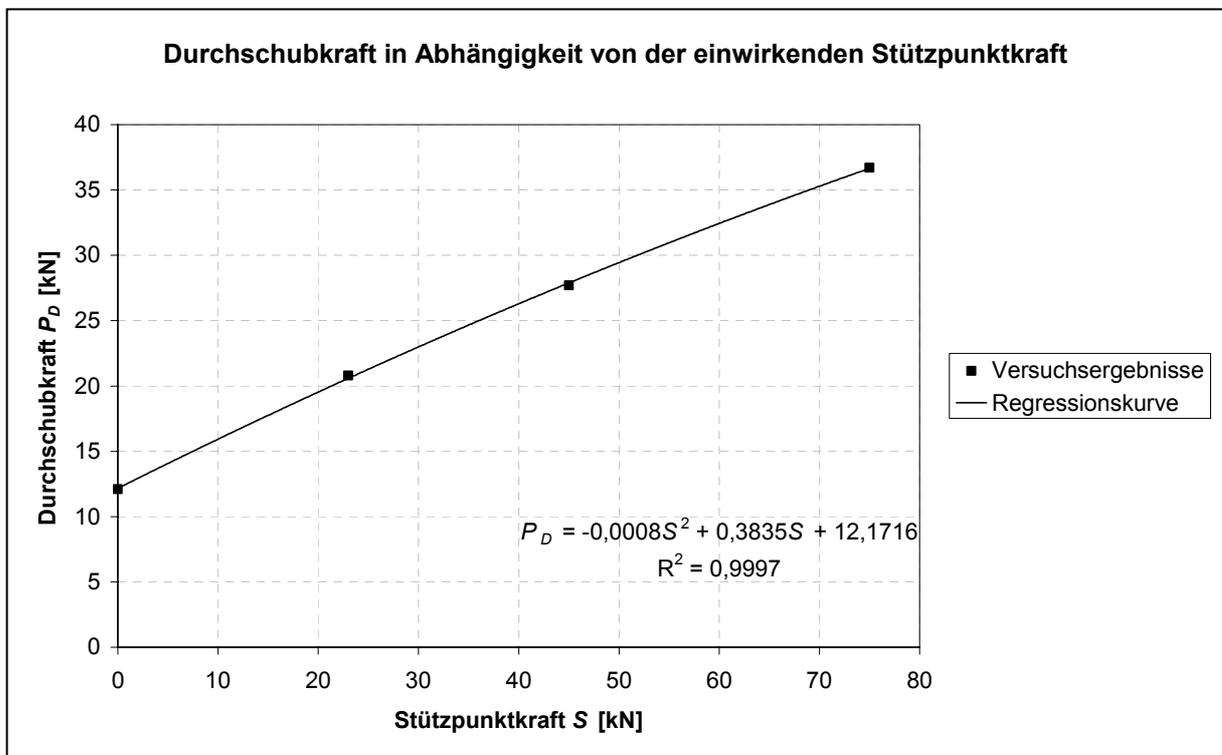


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 687a bei maximaler Durch Schubkraft

$$\rho_{D,bel}(Zw\ 687a) = \frac{(-0,0008 \cdot 34,99^2 + 0,3835 \cdot 34,99 + 12,1716) \cdot 1000}{600}$$

$$= 41,0 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\rho_{D,unbel}(Zw\ 687a) = \frac{12,1716 \cdot 1000}{600} = 20,3 \text{ N/mm Gleislänge}$$

maximaler Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 700a:

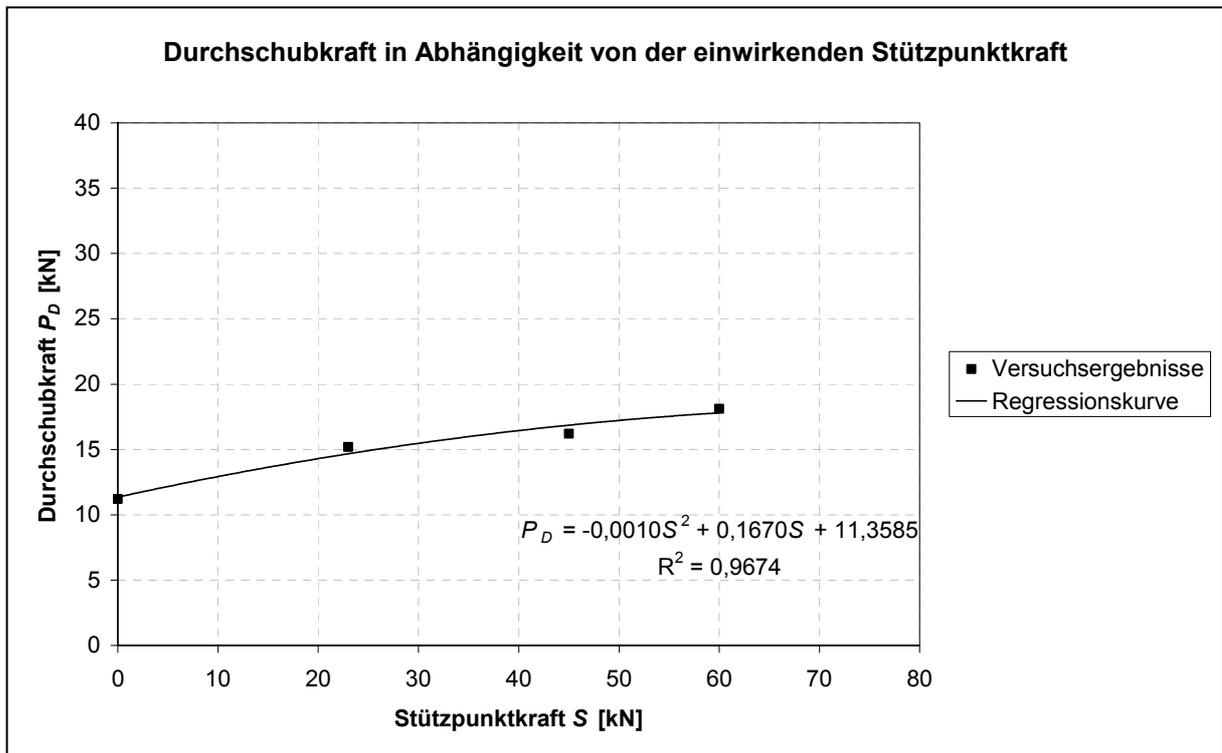


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 700a bei maximaler Durchschubkraft

$$\rho_{D,bei}(Zw\ 700a) = \frac{(-0,0010 \cdot 34,99^2 + 0,1670 \cdot 34,99 + 11,3585) \cdot 1000}{600}$$

$$= 26,6\ \text{N/mm Gleislänge}$$

$$\rho_{D,unbel}(Zw\ 700a) = \frac{11,3585 \cdot 1000}{600} = 18,9\ \text{N/mm Gleislänge}$$

maximaler Durchschubwiderstand der Zwischenlage Zw 900:

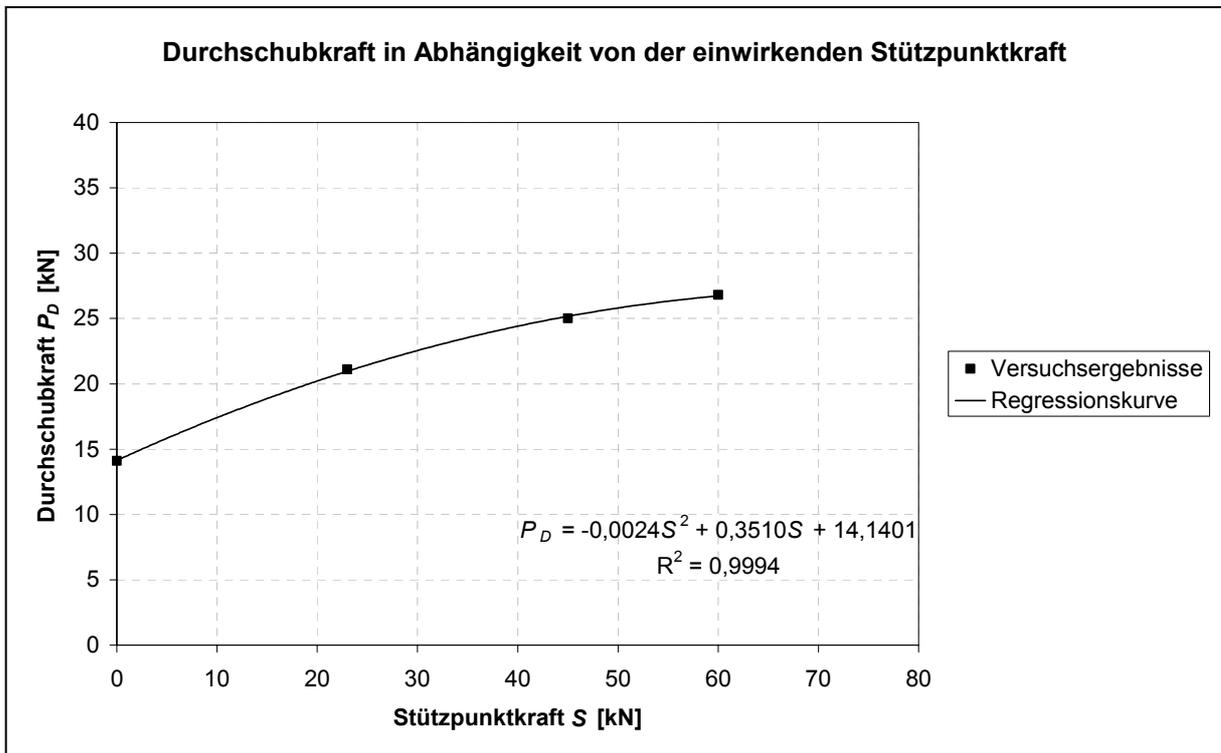


Abb.: Versuchsergebnisse und Regressionskurve mit Gleichung und Bestimmtheitsmaß für die Zwischenlage Zw 900 bei maximaler Durchschubkraft

$$\rho_{D, bel}(Zw\ 900) = \frac{(-0,0024 \cdot 34,99^2 + 0,3510 \cdot 34,99 + 14,1401) \cdot 1000}{600}$$

$$= 39,1 \text{ N/mm Gleislänge}$$

$$\rho_{D, unbel}(Zw\ 900) = \frac{14,1401 \cdot 1000}{600} = 23,6 \text{ N/mm Gleislänge}$$