



Schlussbericht

Der Unfalluntersuchungsstelle Bahnen und Schiffe

Zugentgleisung im Heinrütirank, Widen AG

von Mittwoch, 7. Juli 2004



Telephon

Telefax

E-mail

Adresse

+41 (0)31 323 00 75
+41 (0)79 415 58 41

+41 (0)31 323 00 76

markus.beer@gs-uvek.admin.ch

Schwarztorstr. 59

CH-3003 Bern

Dieser Bericht wurde ausschliesslich zum Zweck der Verhütung von Unfällen beim Betrieb von Eisenbahnen, Seilbahnen und Schiffen erstellt. Die rechtliche Würdigung der Umstände und Ursachen von Unfällen ist nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes gemäss Art. 25 der Verordnung über die Meldung und Untersuchung von Unfällen und schweren Vorfällen beim Betrieb öffentlicher Verkehrsmittel (VUU, SR 742.161).

0. ALLGEMEINES

0.1 Kurzdarstellung

Am Mittwoch, 7. Juli 2004 um ca. 8.40 Uhr entgleiste im Heinrütirank der Regionalzug 523 aus Wohlen mit dem vierten Radsatz. Dabei wurden keine Personen verletzt und es entstand nur geringer Sachschaden.

0.2 Untersuchung

Die Unfalluntersuchungsstelle (UUS) wurde um 9.09 Uhr durch die Meldestelle der REGA über die Entgleisung verständigt. Die Rückfrage bei der BDWM Transport AG ergab, dass der Heinrütirank im Juni 04 einer Totalsanierung unterzogen wurde. Die Ursache der Entgleisung sollte daher genau abgeklärt werden. Der Unfalluntersuchungsleiter Markus Beer rückte unverzüglich zur Unfallstelle aus. Zur Klärung der Entgleisungsursache wurden am 13. Juli 2004, mit einem Experten von SBB-Infrastruktur-Anlagemanagement-Engineering Bahnsystem-Laufwerk Schiene (SBB-I-AM-EB-LS) vor Ort die Gleisanlagen und das betroffene Fahrzeug analysiert.

1. FESTGESTELLTE TATSACHEN

1.1 Vorgeschichte

- Genehmigte Planvorlage BDWM vom 20. November 2003, ergänzt 19. Dezember 2003 durch das Bundesamt für Verkehr (BAV).
- Als Grundlage diente das Reglement R 30.1 RhB vom Januar 1996 „Handbuch für den Bau und die Instandhaltung der Fahrbahn“ mit Richtlinien für den Unter- und Oberbau.
- Die VöV-Richtlinien vom 30.04.1999 „Richtlinien für die Standardisierung der Abmessungen von meterspurigen Radsätzen und Weichen“, waren bei der BDWM Transport AG nicht bekannt.
- Der Heinrütirank mit einem Kurvenradius von 30 m und einer Längsneigung von 54 ‰ wurde vom 18. -21. Juni 2004 einer Totalsanierung unterzogen.

Vor dem Umbau

- Schienenprofil Typ VST 36 auf Stahlschwellen
- Durchgehend verschweisst
- Überhöhung 0-28 mm

Zugskomposition

An der Zugskomposition waren keine technischen Mängel vorhanden. Alle Bremsen und die Sicherheitseinrichtungen waren eingeschaltet und funktionierten einwandfrei.

1.2 Nach dem Umbau

- Schienenprofil Typ SBB I auf Holzschwellen
- Als Versuch ist oberhalb der Kurve eine Dilatationsvorrichtung eingebaut
- Einschotterung bis zum Schienenkopf
- Überhöhung 29-38 mm
- Spurweiten von 1000-1005 mm

1.3 Fahrverlauf

Um 08.33 Uhr fuhr der Ausbildungs-Lokführer mit dem fahrplanmässigen Regionalzug 523, Wohlen-Dietikon in Bremgarten in Richtung Dietikon ab. Nach seinen Aussagen verlief die Fahrt bis Heinrütli normal. Nach der Haltestelle beschleunigte er den Zug auf 22 km/h. Zu Beginn des Vollbogens entgleiste aus zuerst unerklärlichen Gründen der vierte Radsatz nach bogeninnen.

1.4 Sofortmassnahme

Als Sofortmassnahme wurde eine Geschwindigkeitsreduktion auf max. 10 km/h angeordnet.

1.5 Personenschäden

Keine

1.6 Sachschäden am Rollmaterial und an der Infrastruktur

Es entstand nur geringer Sachschaden.

1.7 Sachschäden Dritter

Keine

1.8 Beteiligte Personen

Je ein Mitarbeiter der folgenden Firmen:

- BDWM Transport AG
- Ingenieurbüro Gleisbau (Projektierung)
- Walo Bertschinger AG (Bauführung)

1.9 Schienenfahrzeuge

Eigentümerin: BDWM Transport AG
Zürcherstrasse 10
CH-5620 Bremgarten AG



Zugdaten: Be 4/8 24
V max: 80 km/h
Länge: 37 m
Achsen: 8 A
Gewicht: Tara 55 t / Brutto 73 t
Bremsgewicht: 73 t
BG Feststellbremse: 25 t

1.10 Wetter, Lichtverhältnisse

Trocken, Tag

1.11 Sicherungsanlagen

Die Ausweichstelle Heinrütli ist mit einem Asega Stellwerk ausgerüstet.

1.12 Funkverkehr

Für das Ereignis nicht relevant.

1.13 Bahnanlagen

Einspurige Strecke mit Kurvenradien von 30m und Neigungen bis 56 %.

1.14 Fahrdaten

Der Be 4/8 24 ist mit der elektronischen Fahrdatenaufzeichnung Teloc 2200 von Sécheron ausgerüstet.

Tabellarische Auswertung

Zeit	Weg	V	a	Signal
07.07.2004				
08:38:32	2729.273438	0.81	0.00F
08:38:32	2729.273438	0.81	0.00F
08:38:34	2729.275879	3.95	0.92F
08:38:35	2729.281250	10.11	0.95F
08:38:38	2729.294922	16.53	0.76F
08:38:56	2729.402588	22.04	0.14	.B...F
08:38:57	2729.408203	22.04	0.14	.B...F
08:38:58	2729.410400	13.81	-0.24	.B...F
08:38:58	2729.411377	7.59	-2.47	.B...F
08:38:59	2729.411377	2.20	-2.30	.B...F
08:38:59	2729.411377	0.00	-1.75	.B...F

Der Heinrütirank ist mit einer Geschwindigkeitstafel von 20 km/h gekennzeichnet.

Die Auswertung zeigt, dass der Ausbildungslokfürer mit 22 km/h gefahren ist. Er hatte unverzüglich nach der Entgleisung die Notbremse, registriertes Signal B, ausgelöst.

1.15 Befunde an den Schienenfahrzeugen

Die Zugkomposition war technisch in einem guten Zustand. Alle Bremsen und die Sicherheitseinrichtungen waren eingeschaltet und funktionierten einwandfrei.

1.16 Medizinische Feststellungen

Beim Ausbildungslokfürer waren keine Hinweise in Bezug auf medizinische Beschwerden vorhanden. Er fühlte sich bei Dienstantritt in guter körperlicher Verfassung.

1.17 Feuer

Es brach kein Feuer aus.

1.18 Besondere Untersuchungen I-AM-EB-LS Entgleisung Zug 523 mit Be 4/8 24

Bezugsdokumente:

Dokument	Inhalt
[1] BD: Unfallmeldeformular.	Unfallmeldeformular an das Bundesamt für Verkehr Sektion Betrieb und Investitionen, 3003 Bern. Datiert vom 13.07.2004
[2] SIG: Technischer Bericht Nr. 18'090, Index b.	Technische Beschreibung des Laufdrehgestells für Niederflur – Pendelzüge der RBS/WSB/BD. Datiert vom 08.12.1992
[3] Bundesamt für Verkehr: Plangenehmigung Totalumbau Heinrütirank.	Plangenehmigung nach vereinfachtem Verfahren. Planvorlage der Bremgarten – Dietikon – Bahn BDWM Transport AG vom 20 November 2003, ergänzt Dezember 2003. Betrifft den Totalumbau Heinrütirank. Datiert vom 06.04.2004.
[4] VöV - Richtlinie	Richtlinien für die Standardisierung der Abmessungen von meterspurigen Radsätzen und Weichen
[5] Rhätische Bahn, R 30.1	Handbuch für den Bau und die Instandhaltung der Fahrbahn mit Richtlinien für den Unterbau und den Oberbau, Januar 1996.
[6] ORE B 55	Sicherheit gegen Entgleisen in Gleisverwindungen Utrecht, April 1983

Verwendete Abkürzungen und Symbole:

<u>Symbole</u> <u>[Einheit</u> <u>en]</u>	<u>Definition</u>
a [m]	Achsstand
M [-]	Reibungsmittelpunkt
μ [-]	Gleitreibungsziffer
P_i [kN]	Richtkräfte
p [m]	Richtarme
Ψ [mrad]	Ausdrehwinkel des Radsatzes gegenüber

	dem Fahrwerk um die Hochachse
q_{ij} [m]	Gleitarme
q_r [mm]	Form der Spurkranzflanke
Q [kN]	Radaufstandskraft
R [m]	Bogenhalbmesser
Δr [mm]	Rollradiendifferenz
S_d [mm]	Spurkranzdicke
S_h [mm]	Spurkranzhöhe
T_{xij} [kN]	Kraftschluss-Längsschleppkräfte
Summe Y_i [kN]	Summe der Führungskräfte
V [km/h]	Fahrgeschwindigkeit
$y+\dots$ [mm] in Fig. 19	Die Zahl hinter dem Pluszeichen ist das Spurspiel

Anlagenverzeichnis:

Anlage Nr.	Figur Nr.	Bezeichnung
1	1	Entgleisung des vierten Radsatzes von Fahrzeug Be 4/8
2	2	Grobabmessungen des entgleisten Fahrzeugs Be 4/8
	3	Prinzipdarstellung Laufdrehgestell Be 4/8
3	4	Übersichtsplan Heinrütirank
	5	Trassierung Heinrütirank
	6	Spurweiten und Überhöhungen im Heinrütirank
	7	Trassierungsdaten und fahrdynamische Zielgrößen im Heinrütirank
	8	Unausgeglichene Querschleunigung auf Gleisebene in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit im Heinrütirank
	9	Spurweiten und Überhöhungen in der Belvedere Kurve
	10	Trassierungsdaten und fahrdynamische Zielgrößen in der Belvedere Kurve
	11	Unausgeglichene Querschleunigung auf Gleisebene in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit in der Belvedere Kurve
4	12	Zweiachsiges Drehgestell in Spiessgangstellung

4	13	Einfluss Zugkraft auf die Richtkräfte
	14	Schienenflankenschmierung in den engen Bögen
	15	Starke Schmierung an bogenäusserer und zugleich bogeninnerer Schienenflanke deutet auf Spiessgangstellung der Fahrwerke hin
	16	Nachweis der Spiessgangstellung im Heinrütirank
	17	Versuchstechnischer Nachweis auf dem Netz der Rhätischen Bahn, dass am nachlaufenden Radsatz nach bogeninnen gerichtete Richtkräfte auftreten
	18	Zweiachsiges Drehgestell in Freilaufstellung
	19	Stellungsbilder als Hilfsmittel zur Ermittlung der maximal möglichen Anlaufwinkel in Abhängigkeit des Spurspiels (Bogenhalbmesser 30 m, Achsstand im Drehgestell 1.8 m)
	20	Veränderung des Anlaufwinkels in Abhängigkeit des Spiels bei Spiessgang (Achsstand Drehgestell 1.8 m)
5	21	Diskontinuität an der bogeninneren Schiene an der Stelle, wo das Rad aufgestiegen ist
	22	Diskontinuität an der bogeninneren Schiene an der Stelle, wo das Rad aufgestiegen ist
	23	Unstetigkeit an der bogeninneren Schiene (Ort des Aufsteigens des Rades)
	24	Unstetigkeit an der bogeninneren Schiene (Ort des Aufsteigens des Rades)
	25	Diskontinuität an der bogeninneren Schiene an der Stelle, wo das Rad aufgestiegen ist
6	26	Querabmessungen von Radsätzen und Weichen für BD-Bahn gemäss VöV-Richtlinie
	27	Erfüllung der kinematischen Abrollbedingungen im Bogen
	28	Steuermechanismen durch Kraftschlusskräfte in Bögen
	29	Berührungsgeometrie Rad/Schiene Radprofil RhB W98 / Radprofil RhB W03
	30	Radprofil RhB W98, Querverschiebung gegenüber dem Gleis
	31	Radprofil RhB W03, Querverschiebung gegenüber dem Gleis
	32	Vergleich der RhB Profile W98 und W03

1. **Ausgangslage**

Die Ausgangslage ist unter den Punkten 0.1, 0.2, 1.1, 1.2 und 1.3 beschrieben.

2. **Hergang der Entgleisung im Heinrütirank**

Die Entgleisung der zweiteiligen Zugseinheit erfolgte zu Beginn des Vollbogens im Heinrütirank bei der Bergfahrt. Aufgrund der grossen Steigung von 50 ‰ und des Bogenwiderstandes üben die angetriebenen Radsätze in diesem Streckenabschnitt Zugkraft aus. Dieser Sachverhalt ist im Zusammenhang mit den Kraftschluss-Schlupfkraften von Bedeutung, handelt es sich doch beim entgleisten Radsatz um eine Laufachse.

Das bogeninnere Rad beim vierten Radsatz des Zuges ist aufgrund der beobachteten Entgleisungsspuren auf den Schienenkopf gesprungen und später vollständig nach bogeninnen entgleist. Die Stelle, ab welcher Spuren des Spurkranzes auf dem Schienenkopf festgestellt wurden, ist durch die Oberbaufachleute der BD speziell gekennzeichnet worden.

Spurführungstechnische Entgleisungen nach bogeninnen und insbesondere bei nachlaufenden Radsätzen - ohne äussere Einwirkungen - sind aufgrund des derzeitigen Erfahrungsstandes äusserst selten. Dies dürfte unter anderem damit zusammenhängen, dass auf Strecken mit sehr engen Bögen wie in Anschlussgleisen bei den Vollbahnen bzw. bei den Strassenbahnen bei derartigen Trassierungsverhältnissen Leitvorrichtungen zur Anwendung gelangen (Leitschienen, Rillenschienen, usw.).

3. **Beschreibung des Fahrzeugs**

In Figur 2 der Anlage 2 ist das Typenbild des Fahrzeugs mit den wichtigsten Längsabmessungen dargestellt. Die beiden Triebdrehgestelle mit einem Achsstand von 2 m sind jeweils unter den Führerständen eingebaut. Die Laufdrehgestelle mit einem Achsstand von 1.8 m sind jeweils an der Kuppelseite der beiden Hälften der Zugseinheit eingebaut. Aus lauffechnischer Sicht unterscheiden sich die Trieb- und Laufdrehgestelle, mit Ausnahme des Achsstandes, nicht voneinander. Die beiden Fahrzeughälften sind mit einer Kuppelstange miteinander verbunden. Eine genaue Beschreibung der Kuppelrichtung liegt nicht vor. Obschon derartige Kuppelrichtungen Querkräfte auf die Fahrwerke ausüben können, stehen diese aufgrund der langjährigen Betriebserfahrung nur sekundär in einem Zusammenhang mit der aufgetretenen Entgleisung.

In Figur 3 der Anlage 2 ist die Prinzipskizze des Laufdrehgestells dargestellt. Die Beschreibung des Drehgestells erfolgt an dieser Stelle ausschliesslich mit Hinblick auf ein besseres Verständnis der Entgleisungsursache. Für eine detaillierte Fahrwerksbeschreibung sei auf den technischen Bericht der Herstellerfirma verwiesen [2].

Der Fahrzeugkasten stützt sich über einen Kugeldrehkranz auf die Federtraverse ab. Diese Art der Abstützung bewirkt, dass die Ausdrehbewegung zwischen Wagenkasten und Fahrwerk bei kleinstem Ausdrehmoment erfolgt. Die Federtraverse stützt sich über zwei nicht kommunizierenden jedoch mittels Druckdifferenzventil miteinander verbundenen Luftfedern auf den verwindungssteifen Drehgestellrahmen ab. Die Beschränkung der Wankbewegung erfolgt mittels Wankstützen. Die Längsmittnahme zwischen Fahrzeugkasten bzw. Federtraverse und Drehgestellrahmen erfolgt mit seitlich angeordneten Lenkern. Die Querabfederung sekundär wird durch die Luft- bzw. Gummischichtfeder und durch die progressive Querfederung wahrgenommen. Die

Einhaltung der Fahrzeugumgrenzung wird neben der Querfederung durch die bogenabhängigen Anschläge wahrgenommen. Die Anbindung der Radsätze in der horizontalen Ebene erfolgt mittels Lenkerarmen, in denen die Quer- bzw. Längssteifigkeiten durch die entsprechenden Charakteristiken der Achslenkerlager gegeben sind. Vertikal stützt sich der Drehgestellrahmen durch Flexicoilfedern auf den Radsätzen ab.

Insgesamt ergeben sich aus dem Konstruktionsprinzip des Fahrwerks mit seinen Anbindungen am Wagenkasten sowie aufgrund der augenscheinlichen Begutachtung des entgleisten Fahrwerks keine Hinweise für das Auftreten von Entgleisungen im fraglichen Trassierungsbereich.

Die Nachvermessung der Radsätze mit ihren gummigefederten Rädern ergab

- Rückenabstände von 944 mm,
- Spurkranzdicken von rund 23 mm (siehe Figur 3 der Anlage 2).

Aufgrund dieser Messgrössen ergibt sich ein Spurmass von 990 mm. Diese am Fahrzeug festgestellten Abmessungen entsprechen nicht den von den Fachleuten der BD zur Verfügung gestellten Zeichnungen:

- Wynental- und Suhrentalbahn, Aarau; Zeichnung Nr. R6-164. Für dieses Radprofil spricht die Spurkranzhöhe von 25 mm, jedoch nicht die Dicke von 23 mm (siehe Figur 3). Der Rückenabstand müsste gemäss dieser Zeichnung 948 mm betragen, gegenüber den gemessenen 944 mm.
- Bremgarten-Dietikon-Bahn; Zeichnung Nr. BD 97-12-01. Gegen dieses Radprofil spricht die Spurkranzhöhe von 22 mm.

Insgesamt sind bei den Radprofilen einige Ungereimtheiten aufgetreten, die bereinigt werden sollten. Insbesondere scheint nicht klar, ob die Spurkranzflankenwinkel des entgleisten Fahrzeugs 70° oder 75° betragen. Der grössere Spurkranzflankenwinkel führt zu einem grösseren ertragbaren Entgleisungskoeffizienten, was im Zusammenhang mit der aufgetretenen Entgleisung von Bedeutung jedoch nicht entscheidend ist.

4. Beschreibung des Fahrwegs

4.1 Bogen im Heinrütirank

Die Figur 4 und die Figur 5 der Anlage 3 zeigt den Lageplan mit den geometrischen Trassierungsmerkmalen des Heinrütiranks nach dessen Totalumbau. Die Kurve befindet sich unterhalb einer ca. 300 m langen Gefällestrecke, wo gemäss [3] von der Bahnverwaltung vermutet wird, dass infolge sukzessiver Längswanderung der Schienen zusätzliche Längskräfte in den Bogen einwirken. Mit dem Totalumbau des Bogens wurde diesem Sachverhalt durch eine spezielle Gleis- und Oberbaukonstruktion sowie durch Einsatz einer speziellen Dilatationseinrichtung Rechnung getragen.

Aus den Gesichtspunkten des Zusammenwirkens Fahrzeug/Fahrweg ergeben sich für die Einfahrt in den Bogen bei der Bergfahrt zwei besondere Feststellungen:

- a) Fehlender Übergangsbogen bei der Einfahrt in einen überhöhten Vollbogen. Zur Vermeidung einer unzulässigen Fahrzeugverwindung wurde die Überhöhungsrampe in die Gerade verlegt. Diese Massnahme ist aus den Gesichtspunkten der Verwindungsentgleisung nach dem System ORE B 55 [6] richtig.
- b) Beim angewendeten Überhöhungsfehlbetrag wird diese Massnahme mit einem erhöhten Ruck erkaufte, der sich ungünstig auf den Fahrkomfort auswirken kann. Andererseits kann dieser Ruck eine verstärkte Wankbewegung des Fahrzeugkastens anregen, die zwangsläufig zu einer kurzfristigen Entlastung der bogeninneren Räder führt. Es ist zu

berücksichtigen, dass sich die unausgeglichene Querschleunigung auf Gleisebene ruckartig von -0.3 bis -0.5 m/s^2 auf $+0.7 \text{ m/s}^2$ ändert (siehe auch Figur 7 der Anlage 3).

In Figur 6 in Anlage 3 sind die durch Handvermessung mit dem Messgerät der BD je Schwellenfach erfassten Werte für die Spurweite einerseits und für die Überhöhung andererseits aufgeführt. Aus den Gesichtspunkten des Zusammenwirkens Fahrzeug/Fahrweg ergeben sich für den Bogen zwei besondere Feststellungen:

- a) Die gemessene Überhöhung liegt mit einem Mittelwert von 35 mm leicht unter dem Sollwert der Figur 4 und 20 mm unterhalb des Sollwertes gemäss Figur 5. Viel wichtiger ist jedoch das Ergebnis der kontinuierlichen Überhöhung, sodass grössere Fahrzeugverwindungen ausgeschlossen werden können. Aufgrund des Zustandes des Oberbaus und dessen unter dem Zug beobachteten Einsenkung kann eine Verwindungsentgleisung ausgeschlossen werden.
- b) Die Spurweite entspricht zwar den Bedingungen in [5], zeigt jedoch grössere Schwankungen über die Ausdehnung des Bogens. Im Zusammenhang mit der Entgleisung ist die nahezu sprungartige Verkleinerung der Spurweite am Ort der Einleitung der Entgleisung von Bedeutung.

Die Figur 7 der Anlage 3 zeigt die aus den Messwerten für die Überhöhung bei einer Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h berechnete unausgeglichene Querschleunigung auf Gleisebene. Deutlich ist die Diskontinuität bei der Bogeneinfahrt zu Erkennen. Im Vollbogen werden die Bedingungen gemäss [5] eingehalten ($p = 0.85 \text{ m/s}^2$). Aufgrund Figur 8 der Anlage 3 betrug die unausgeglichene Querschleunigung auf Gleisebene des Unfallfahrzeugs entsprechend der Fahrgeschwindigkeit von 22 km/h in [1] rund 0.9 m/s^2 .

4.2 Bogen im Belvedererank

Zur Klärung der Frage, warum es ausgerechnet unmittelbar nach dem Totalumbau des Heinrütiranks zur Entgleisung gekommen ist, wurden zwei vergleichbare Bögen (Belvedere Rank, Zufiker Rank) mit Bogenhalbmessern von ebenfalls 30 m begutachtet. Nachstehend sind die Ergebnisse für den Belvedere Rank aufgeführt:

- Die Figur 9 der Anlage 3 zeigt die Spurweiten und die Überhöhungen. Vergleichsweise zum Verlegeplan liegen die Überhöhungen weit unterhalb der Sollwerte (Sollwert ca. 30 mm). Die Spurweite liegt vergleichsweise zum Heinrütirank deutlich höher. Allerdings stellen sich auch hier über den Bogen deutliche Sprünge ein.
- Gemäss Figur 10 der Anlage 3 liegt die unausgeglichene Querschleunigung auf Gleisebene bei der zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit deutlich über dem Grenzwert gemäss [5].
- Bei kleinen Geschwindigkeitsfehlern, wie sie beim entgleisten Fahrzeug mit 22 km/h nachgewiesen wurden, erreicht in diesem Bogen die unausgeglichene Querschleunigung auf Gleisebene Werte von 1.2 m/s^2 .

5. Feststellungen aufgrund der Beobachtungen am Fahrweg

Die drei engsten Bögen der BD verfügen über die nachstehenden Gemeinsamkeiten:

- Bogenhalbmesser von 30 m.
- Überhöhungen, welche unter dem Planwert liegen. Die Überhöhungen in den Bögen von Zufiken und Belvedere liegen teilweise bei Null, was Überhöhungsfehlbeträge verursacht, die über dem zulässigen Wert gemäss [6] liegen. Trotzdem sind in diesen Bögen aufgrund von langjährigen Erfahrungen keine Entgleisungen aufgetreten.

- Starke Streuungen der Überhöhungen längs der Bögen ohne dass sich dabei unzulässige Verwindungen einstellen (Vergleich System ORE B 55).
- Starke Streuungen in den Spurweiten, wobei diese im Heinrütirank am engsten sind. Insofern unterscheidet sich dieser Bogen von den beiden anderen Bögen.

Gemäss [3] wurde das Projekt des Totalumbaus des Heinrütiranks in Form eines Versuchs bzw. einer Betriebserprobung mit Auflagen genehmigt. Neu ist die Verwendung von Schienen SBB I und die Anwendung des lückenlos verschweissten Gleises. Das lückenlos verschweisste Gleis in derart kleinen Bogenradien wird als derzeit nicht dem Stand der Technik entsprechend eingestuft, was bei dessen Anwendung eine fachgerechte Ausführung sowie entsprechende Überwachung und Instandhaltung erfordert. Mit Hinblick auf die Problematik der Gleisrostverschiebung ist gefordert, dass sich keine lokalen Fehler oder Unregelmässigkeiten im Fahrkantenverlauf einstellen. Starke Veränderungen der Spurweite sind als derartige Fehler einzustufen.

6. Aspekte der Spurführungstechnik

Da für die betroffene Fahrzeugbauart keine lauftechnischen Nachweisrechnungen vorliegen und damit ein schneller Zugriff auf rechnerische Ergebnisse nicht möglich ist, wird vorerst der Lauf des Fahrzeugs aus den Gesichtspunkten des Zusammenwirkens Rad/Schiene mit Hinblick auf die Klärung der Entgleisungsursache mittels konventioneller Methoden der Spurführungstechnik betrachtet.

Die Beobachtungen am Fahrweg sowie des Stellungsbilds der Fahrzeuge in den engen Bögen lassen auf Spiessgangstellung der Drehgestelle schliessen. Gemäss Figur 12 der Anlage 4 hat diese Stellung an den nachlaufenden Radsätzen Richtkräfte nach bogeninnen zur Folge. Das Vorhandensein dieses Stellungsbildes in den oben aufgeführten engen Bögen wird durch das Vorhandensein eines starken Schmierfilms an der Fahrkante der bogeninneren Schiene untermauert (Figur 14 und Figur 15 der Anlage 4). Die Figur 16 der Anlage 4 zeigt die Stellung der 4 Räder beim Laufdrehgestell bei stillstehendem Fahrzeug im Heinrütirank. Die Räder 3 links und 4 rechts laufen mit den Spurkränzen an den Fahrkanten der Schienen an, was sich mit den Beobachtungen an den durch diesen Bogen fahrenden Zügen deckt. Das Vorhandensein höherer Kraftschluss-Schlupfkräfte in Verbindung mit aus Unstetigkeiten im Fahrkantenverlauf verursachten dynamischen Zusatzkräften in der Richtung waagrecht/quer bei gleichzeitiger partieller Radentlastung infolge Überhöhungsfehlbetrags sowie des dynamischen Fahrzeugverhaltens erhöht den Entgleisungskoeffizienten an den anlaufenden bogeninneren Rädern. Es muss davon ausgegangen werden, dass die aufgetretene Entgleisung auf diesem Mechanismus beruht. Dass mit enger werdenden Bögen eine zunehmende Tendenz zur Spiessgangstellung mit zunehmenden nach bogeninnen gerichteten Radsatzkräften besteht, zeigen Messergebnisse mit Messradsätzen, welche im Frühjahr 2003 an einem Reisezugwagen auf dem Netz der Rhätischen Bahn aufgenommen worden sind. Aufgrund des Flexicoil-Drehgestells traten bei diesem Fahrzeug die Richtkräfte nach bogeninnen am vorlaufenden Drehgestell auf. Es ist deutlich zu erkennen, dass die dynamischen Führungskräfte nach bogeninnen mit abnehmenden Bogenhalbmessern zunehmen. Dieses Praxisbeispiel in Verbindung mit den Beobachtungen bei der BD zeigen, dass sich die Erfahrungen aus dem normalspurigen Eisenbahnnetz mit den daraus resultierenden Festlegungen des Standes von Wissen und Technik nicht uneingeschränkt auf das Meterspurnetz übertragen lassen. Dies insbesondere dann nicht, wenn sehr enge Bogenhalbmesser zur Anwendung

gelangen. Deshalb wäre es auf Grund der vorstehenden Entgleisung und der daraus gewonnenen Erkenntnisse empfehlenswert, diese Wissenslücke durch Ergänzungen in der VöV Richtlinie [4] zu schliessen.

Mit Recht kann die Frage gestellt werden, warum die Entgleisung gerade beim nachlaufenden und nicht beim vorlaufenden Drehgestell aufgetreten ist. Die Erklärung dafür liefert die Figur 13 der Anlage 4. Durch das Vorhandensein der Traktionskräfte verlagert sich der Reibungsmittelpunkt nach bogenaussen, was die nach bogeninnen resultierenden Richtkräfte beim Triebdrehgestell vergleichsweise zum Laufdrehgestell signifikant verringert. Durch die dadurch resultierende Verkleinerung der Kraftschlusskräfte in der Richtung waagrecht/quer verringert sich der Entgleisungskoeffizient.

Das „Zwängen“ in den engen Bögen kann durch die Einrichtung eines ausreichenden Spurspiels beseitigt bzw. gemindert werden. Beseitigen lassen sich die Summenführungskräfte nach bogeninnen durch Freilaufstellung. Mindern lassen sich diese durch Verlagerung des Reibungsmittelpunkts in Richtung des nachlaufenden Radsatzes. Wie der Figur 18 in Anlage 4 entnommen werden kann, wirken im Freilauf die Summen der Führungskräfte bei beiden Radsätzen nach bogenaussen. Das grössere Spurspiel führt jedoch bei gewissen Fahrwerkskonstruktionen zu einer Vergrösserung des Anlaufwinkels. Die Folge davon ist ein Ansteigen der Richtkraft am vorlaufenden Radsatz verbunden mit einer Vergrösserung des Anlaufwinkels Rad/Schiene beim bogenäusseren Rad desselben. Diese beiden Effekte reduzieren einerseits die Entgleisungssicherheit nach bogenaussen und vergrössern andererseits den Rad/Schienenverschleiss. Grundsätzlich sollte das Spurspiel so gering wie möglich gehalten werden. Es sollte nur so gross gewählt werden, dass

- einerseits eine zwängungsfreie Bogendurchfahrt möglich ist,
- andererseits die Kleinhaltung der Richt- bzw. Führungskräfte, der Anlaufwinkel und damit des Verschleissabtrages an Spurkranzstirnflächen und Schienenfahrkanten gewährleistet ist.

Um Abschätzungen hinsichtlich der finanziellen Auswirkungen derartiger Optimierungen vornehmen zu können, wurde vereinfacht der Zusammenhang zwischen Spurspiel und Verschleiss dargestellt. Figur 19 der Anlage 4 zeigt anhand des Vogelplans die Veränderung des Stellungsbildes beim Drehgestell in Abhängigkeit des Spurspiels. Daraus lassen sich für den Extremfall der Spiessgangstellung die dazugehörigen Anlaufwinkel zeichnerisch ermitteln. Diese sind in Figur 20 der Anlage 4 für die erfassten Spurweiten entsprechend Figur 6 und Figur 9 dargestellt. Wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich der Verschleiss proportional zum Anlaufwinkel verhält, so wächst der Verschleiss bei Anwendung einer Spurerweiterung von 10 mm um rund 20 % an. Wegen der geringen Anzahl von derart engen Bögen auf dem Netz der BD wird sich dies bei den Fahrzeugen nicht signifikant bemerkbar machen. Die Auswirkungen beim Fahrweg können durch systematisches Verfolgen der Zunahme der Spurweite nachgewiesen werden.

7. Besondere Feststellung am Ort der Einleitung der Entgleisung

In Figur 21 in Anlage 5 ist rot umrandet die Stelle am bogeninneren Gleis festgehalten, ab welcher nach der Entgleisung Spuren des Spurkranzes auf dem Schienenkopf festgestellt wurden. Die Vergrösserung in Figur 22 zeigt eine deutliche Diskontinuität des Fahrspiegels, welche gemäss Figur 23 und Figur 24 auf die Schweissung zurückzuführen ist. Diese

Schweisstelle fällt gleichzeitig mit dem Spurweitensprung in Figur 6 der Anlage 3 zusammen.

Das Tragbild auf der Schienenfahrfläche ist vor und nach der Schweisstelle identisch. Diese ist durch die Profile der Räder und die Profilform der Schiene SBB I in Verbindung mit ihrer Einbauneigung von 1:20 gegeben. Durch die Schweissung und insbesondere durch die mechanische Nachbehandlung der Fahrfläche nach dem Schweißen ändert sich das Tragbild über der Schweisstelle schlagartig. Es muss davon ausgegangen werden, dass mit dem Berührflächensprung gleichzeitig eine Kraftschlussbusse in der bogeninneren Rad/Schienenberührung verbunden ist. Die Folge davon ist, dass die Führungskraft verstärkt durch Formschluss am Spurkranz übertragen werden muss. Im Weiteren wurde oben gezeigt, dass die Verkleinerung des Spurspiels eine Erhöhung der nach bogeninnen gerichteten Führungskraft zur Folge hat. Beide Effekte, nämlich die Umverteilung der Berührungspunkte einerseits und die Erhöhung der Führungskraft andererseits treten gleichzeitig und bei der gefahrenen Betriebsgeschwindigkeit schlagartig auf. Die erhöhte Führungskraft in Verbindung mit der durch Überhöhungsfehlbetrag reduzierten Radaufstandskraft bogeninnen erhöht den Entgleisungskoeffizienten. Die Einleitung der Entgleisung lässt sich einzig und allein auf das gleichzeitige Zusammentreffen dieser kumulierten Effekte zurückführen. Aus diesem Sachverhalt ist abzuleiten, dass in Bögen mit sehr engen Bogenhalbmessern bei Anzeichen von ausgeprägtem Spiessgang neben der Gleislage am bogenäusseren Gleisstrang auch diejenige des bogeninneren Gleisstranges von grosser Bedeutung und deshalb zu überwachen ist.

8. Berührung Rad/Schiene

Bei der Berührung Rad/Schiene wird einerseits zwischen geometrischen und andererseits zwischen berührungsgeometrischen Kontaktverhältnissen unterschieden.

Die VöV-Richtlinie [5] enthält die geometrischen Querabmessungen der Weichen und Radsätze sowie die Abmessungen der Spurkränze der Räder. Die Figur 26 der Anlage 6 enthält die entsprechenden Abmessungen für jene Bahnen, welche derzeit die Radsätze vom Typ B und die Weichen vom Typ b verwenden. Die BD gehört gemäss Richtlinie zusammen mit den Bahnen AL, BVB, RBS (G) und WSB der Gruppe 4 an. Diese Bahnen können sich dem Standard der Strassenbahnen anschliessen oder den endgültigen Standard von Fahrzeugen und Weichen dieser Richtlinien unter Beachtung von vier folgerichtigen Umbauschritten erreichen. Für die BD besteht der erste Schritt darin, den Radsatz vom Typ B einzuführen. Aufgrund der Zeichnungen Nr. R6-164 und BD 97-12-01 ist dieser Schritt bei der BD nicht in die Wege geleitet worden. Hinsichtlich der geometrischen Beurteilung der Räder des Unfallfahrzeugs fehlt damit ein aktuelles und widerspruchsfreies Dokument (aktuelle Zeichnung).

Hinsichtlich der Berührungsgeometrie Rad/Schiene sind die Figuren 21 bis 25 interessant, in denen die Fahrflächen der Schienen in den Bögen gut erkennbar sind. Diese zeigen die typischen Merkmale einer ausgeprägten Zweipunktberührung. Solche Kontaktverhältnisse haben einen satten Formschluss zwischen Spurkranzflanke und Schienenfahrkante zur Folge. Derartige Kontaktverhältnisse sind vor allem im Zusammenhang mit singulären Gleislageabweichungen waagrecht/quer (Richtungsfehler) empfindlich. Bevor dieser Sachverhalt weitergehend betrachtet wird, sollen einige Aspekte hinsichtlich des Bogenlaufverhaltens vertieft werden. Die Mechanismen der Kontaktmechanik sind sehr stark durch den vorhandenen Kraftschlussbeiwert und damit vom Reibwert Rad/Schiene beeinflusst. Ein hoher Reibwert Rad/Schiene unterstützt einerseits die Steuerfunktionen der Radsätze, führt aber andererseits auch zu erhöhten Kraftschlusschlupfkraften. Gemäss [1]

herrschte am Tag der Entgleisung trockenes Wetter, sodass von erhöhten Reibwerten Rad/Schiene ausgegangen werden kann.

Die Figur 27 der Anlage 6 zeigt für den Heinrütirank bzw. für Bögen mit Halbmessern von 30 m die einzuhaltenden Bedingungen für die Radialeinstellung der Radsätze oben und für die kinematische Rollbedingung unten. Dank des Kugeldrehkranzes beim Fahrwerk stellt sich dieses ohne nennenswertes Gegenmoment ideal im Bogen ein. Für die Radsätze im Drehgestell müsste deren Fesselung beim Laufdrehgestell einen Drehwinkel um die Radsatzhochachse von 30 mrad bzw. eine Längsauslenkung von 16 mm zulassen. Beim Triebdrehgestell betragen die entsprechenden Werte 33 mrad bzw. 18 mm. Es ist davon auszugehen, dass die Achslenker der Drehgestelle diese grossen Bewegungen nicht zulassen, sodass in diesen Bögen immer mit dem Auftreten von Anlaufwinkeln zu rechnen ist. Dies bedeutet, dass die Radsätze wegen des dadurch bedingten und je nach berührungsgeometrischen Verhältnissen mehr oder weniger ausgeprägten Formschlusses empfindlich auf das Vorhandensein von Richtungsfehlern an den bogenäusseren Schienen reagieren. Zur Erfüllung der kinematischen Rollbedingung ist für die Radsätze mit Raddurchmessern von 720 mm eine Rollradiendifferenz von 6.3 mm erforderlich. Wie weiter unten gezeigt wird, ist diese Bedingung bei der verwendeten Profilpaarung in keiner Weise erfüllbar.

Figur 28 der Anlage 6 zeigt den Zusammenhang zwischen den für die Selbststeuerung der Radsätze notwendigen Kraftschlusschlupfkraften und den dazugehörigen berührungsgeometrischen Funktionen. Daraus ist ersichtlich, dass sich für den Aufbau des Schlupfes der vorlaufende Radsatz oberhalb und der nachlaufende Radsatz unterhalb der kinematischen Rolllinie bewegen müssen. Werden diese Bedingungen nur teilweise erfüllt, so treten in der Folge geringere Steuerungskräfte auf, die sich jedoch in der richtigen Ausdrehrichtung orientieren. Werden diese Bedingungen nicht erfüllt, so entstehen Kraftschlusschlupfkraften mit entgegengesetztem Vorzeichen.

Die Figur 29 der Anlage 6 zeigt links die berührungsgeometrischen Funktionen des Radprofils RhB W98 und rechts diejenigen des Verschleissprofils RhB W03. Das Radprofil der BD ist in berührungsgeometrischer Hinsicht identisch mit dem Radprofil RhB W98 (Konus 1/20 – 1/10, Ausrundungsradius Hohlkehle 13 mm). Werden die berechneten Berührungspunktzuordnungen beim Radprofil W98 unten in Blatt 1 der Figur 29 mit dem Fahrspiegel der realen Schienen (Figur 21 und Figur 22) verglichen, so ist eine gute Übereinstimmung festzustellen. Schon bei einer Rollradiendifferenz von rund 0.5 mm stellt sich Zweipunktberührung ein. Dem Aufbau einer weiteren Rollradiendifferenz stellt sich eine grosse Gravitationssteifigkeit des Profils entgegen, sodass es den bogeninneren Reibkräften verunmöglicht wird, die kinematische Rollradiendifferenz aufzubauen. Die Figur 30 der Anlage 6 zeigt, dass weitere Berührungspunkte erst bei starken Radanhebungen zur Verfügung stehen. Werden diese in Anwesenheit grösserer Führungskräfte angefahren und treten dabei gleichzeitig Richtungsfehler auf, so kann dies die Entgleisung einleiten. Deutlich günstiger verhält sich in dieser Hinsicht das Radprofil RhB W03 (rechts in Figur 29). Wie aufgrund der Berührungspunktverteilungen und anhand der Figur 31 eingesehen werden kann, schmiegt sich dieses Radprofil sanft an die Schienenfahrkante an und müsste sich aus diesem Grunde im Zusammenwirken mit Richtungsfehlern in den Bögen deutlich günstiger verhalten. Rein gefühlsmässig wird dieser Eindruck durch die beiden Darstellungen in der Figur 32 untermauert.

9. Schlussfolgerungen

Am 07. Juli 2004 um 08.40 Uhr entgleiste Zug 523 der Eisenbahnunternehmung BDWM Transport AG auf der Strecke Heinrütli Berikon-Widen. Dabei entgleiste der vierte Radsatz des Triebzuges beim Beginn des Heinrütiranks nach bogeninnen. Aufgrund der Beobachtungen am Fahrweg und des Stellungsbilds der Fahrwerke im Bogen traten aufgrund des Spiessgangs bei den nachlaufenden Radsätzen der Laufdrehgestelle nach bogeninnen gerichtete Führungskräfte auf. Diese Richtkräfte nehmen aufgrund der Spurführungstheorie mit abnehmendem Spurspiel zu. Die Entgleisung trat im Bereich der

engsten Spurweiten auf, sodass das bogeninnere Rad des vierten Radsatzes einen Formschluss mit der Fahrkante bildete. Durch die abrupte Spurverengung in Verbindung mit einer durch Schienenschweissung verursachten Fahrkantendiskontinuität muss in Gegenwart der Radentlastung aus dem Überhöhungsfehlbetrag ein erhöhter Entgleisungskoeffizient vorgelegen haben. In der Folge ist das bogeninnere Rad auf die Schienenfahrfläche geklettert, was anschliessend zur Entgleisung des vierten Radsatzes führte.

10. Empfehlungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Bahnen mit sehr engen Bögen unter gewissen Voraussetzungen Entgleisungen nach bogeninnen auftreten können. Dabei steigt der Entgleisungskoeffizient der infolge Spiessgang an die bogeninnere Fahrkante gedrückten Räder über den zulässigen Wert.

Als Sofortmassnahme nach der Entgleisung war die Geschwindigkeitsreduktion im Heinrütirank auf 10 km/h richtig und sollte bis zur Behebung der Ursachen beibehalten werden. Gemäss Figur 8 der Anlage 3 führt diese Geschwindigkeit zum Ausgleich der Radlasten und zur Minderung der dynamischen Führungskräfte. Dadurch reduziert sich der Entgleisungskoeffizient.

Durch die Erhöhung der Spurweite reduzieren sich die Richtkräfte bei den nachlaufenden Radsätzen, was aufgrund der langjährigen Erfahrungen der BD mit dieser Fahrzeugbauart als betriebssicher eingestuft werden kann. Die kleineren Führungskräfte nach bogeninnen bewirken zudem, dass sich das Fahrzeug unempfindlicher auf Fahrkantenfehler am bogeninneren Gleisstrang verhält.

Es ist zu überlegen, ob das bestehende Radprofil durch ein solches ersetzt werden soll, welches sich günstiger an die Schienenfahrflächen anschmiegt und damit die Kraftübertragung durch vorwiegenden Kraftschluss sicherstellt. Vor Einführung eines solchen Profils ist jedoch nachzuweisen, dass daraus keine Nachteile hinsichtlich der Stabilität bei höheren Fahrgeschwindigkeiten auf geraden Strecken resultieren.

Die VöV Richtlinie [5] sollte aufgrund des Vorfalls bei der BD um die Aspekte der Spurerweiterung bei Bahnen mit sehr engen Bögen erweitert werden.

1.19 Information über Organisation und Verfahren

Beim Zug 523 handelte es sich um einen im offiziellen Fahrplan veröffentlichten Regionalzug Wohlen-Dietikon, mit Abfahrt um 8.20 Uhr in Wohlen.

1.20 Verschiedenes

Die Polizei wurde über das Ereignis nicht verständigt.

2. BEURTEILUNG

- Im Reglement R 30.1 der RhB vom Januar 1996 „Handbuch für den Bau und die Instandhaltung der Fahrbahn“ mit Richtlinien für den Unter- und Oberbau, fehlen die Grundlagen für Gleisbögen mit 30 m Kurvenradien.
- Gruppierung der Bahnen nach den VöV-Richtlinien:

Gruppe	Bahnen	Schritt	Einführen von	
			Radsätzen der Typen	Weichen der Typen
I	AB, BAM, BOB, BVZ, FO, GGB, LSE, MC, MIB RhB, SBB, YstC	1	A + vorhandene	a + vorhandene
II	CEV, CJ, CMN (PSC), GFM, JB, MOB	1	A	
		2		a
III	AOMC, ASD, BLM, CMN (RdB), FART, FLP, FW, LEB, NStCM, OSST, RBS (SE, W,Z)	1		b
		2	A	
		3		a
IV	AL, BD, BVB, RBS (G), WSB	1	B	
		2		b
		3	A	
		4		a

Jeder Schritt muss vollständig abgeschlossen sein, bevor zum nächsten Schritt übergegangen werden kann. Aufgrund der Zeichnung BD 97-12-01 ist dieser Schritt bei der BD nicht eingeführt worden.

- In den VöV-Richtlinien fehlen die Aspekte der Spurerweiterung für sehr enge Gleisbögen.

3 SCHLUSSFOLGERUNGEN

3.1 Ursache

Die Entgleisung trat im Bereich der engsten Spurweiten auf, sodass das bogeninnere Rad des vierten Radsatzes einen Formschluss mit der Fahrkante bildete. Durch die abrupte Spurverengung in Verbindung mit einer durch Schienenschweissung verursachten Fahrkantendiskontinuität muss in Gegenwart der Radentlastung aus dem Überhöhungsfehlbetrag ein erhöhter Entgleisungskoeffizient vorgelegen haben. In der Folge ist das bogeninnere Rad auf die Schienenfahrfläche geklettert, was anschliessend zur Entgleisung des vierten Radsatzes führte.

4. SICHERHEITSEMPFEHLUNGEN

- Die Aufhebung der Geschwindigkeitsreduktion bedingt eine Erhöhung der Spurbreite auf 1005 mm.
- Die Schweissung ist auf ihre Diskontinuität zu überprüfen (Anlage 5)
- Gemäss den VöV-Richtlinien ist der 1. Schritt: „Einführung Radsatz-Typ B“ einzuleiten.
- Die VöV-Richtlinien sind zwingend um die Aspekte der Spurerweiterung bei Bahnen mit sehr engen Gleisbögen zu ergänzen.

5. Anlagen

Anlagen 1-6

Die Untersuchung wurde von der UUS und I-AM-EB-LS durchgeführt.

Bern, 27.08.2004

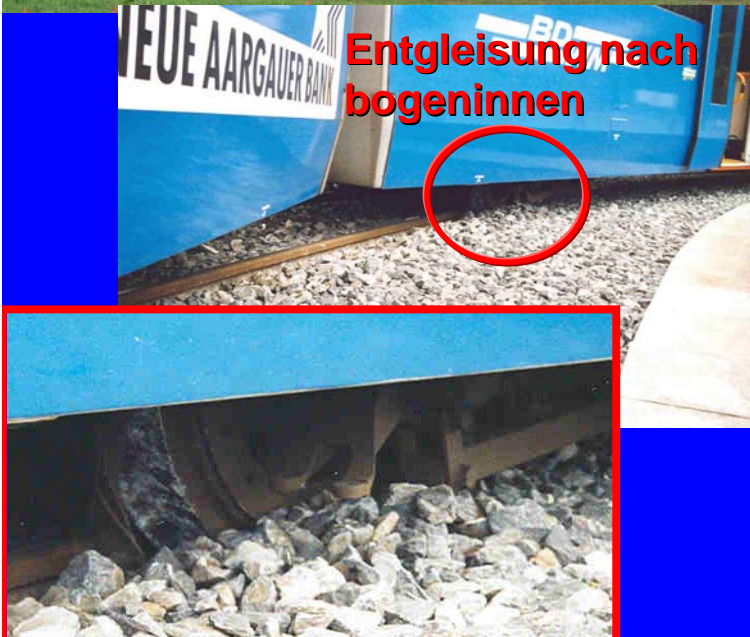
Unfalluntersuchungsstelle
Bahnen und Schiffe

Markus Beer

Anlagen

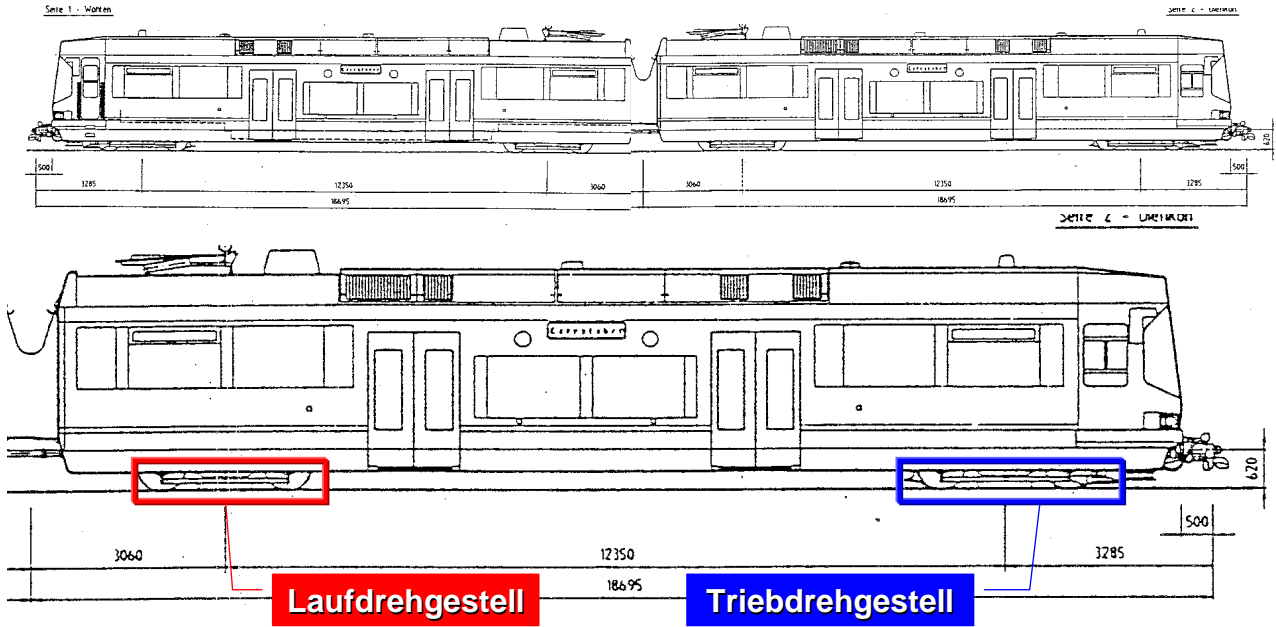
Entgleisung des vierten Radsatzes von Fahrzeug Be 4/8

Anlage 1
Figur 1



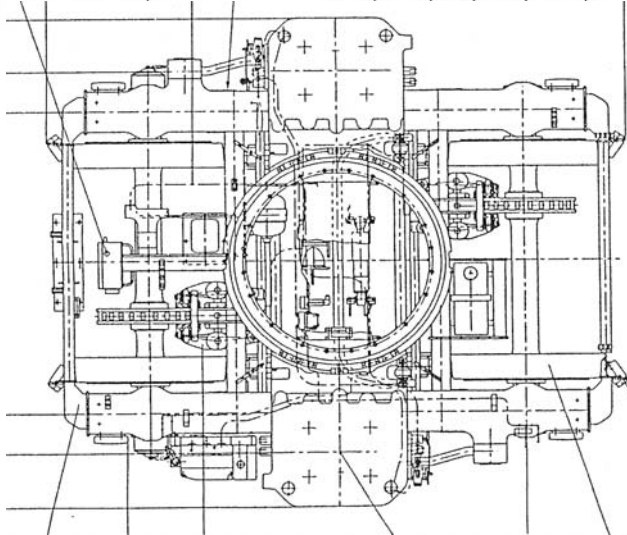
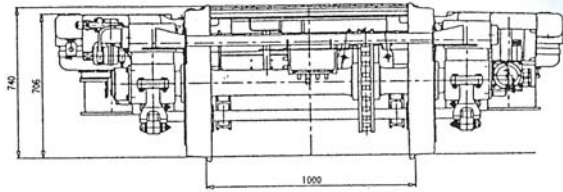
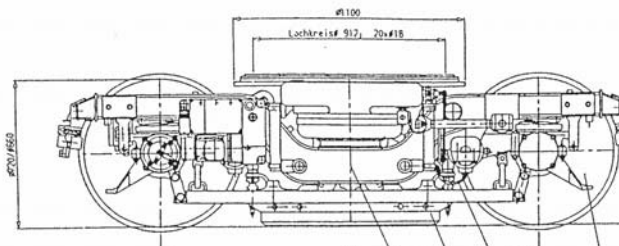
Grobabmessungen des entgleisten Fahrzeugs Be 4/8

Anlage 2
Figur 2

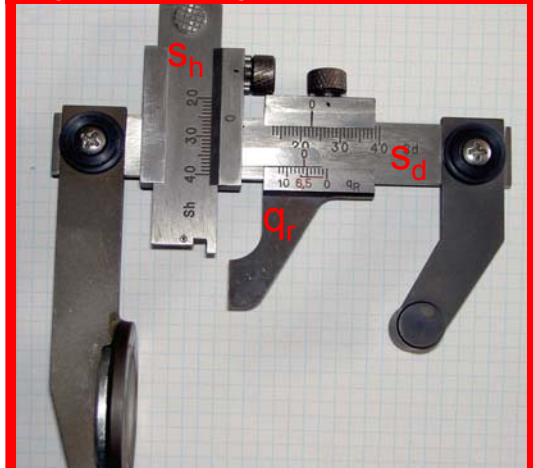


Prinzipdarstellung Laufdrehgestell Be 4/8

Anlage 2
Figur 3

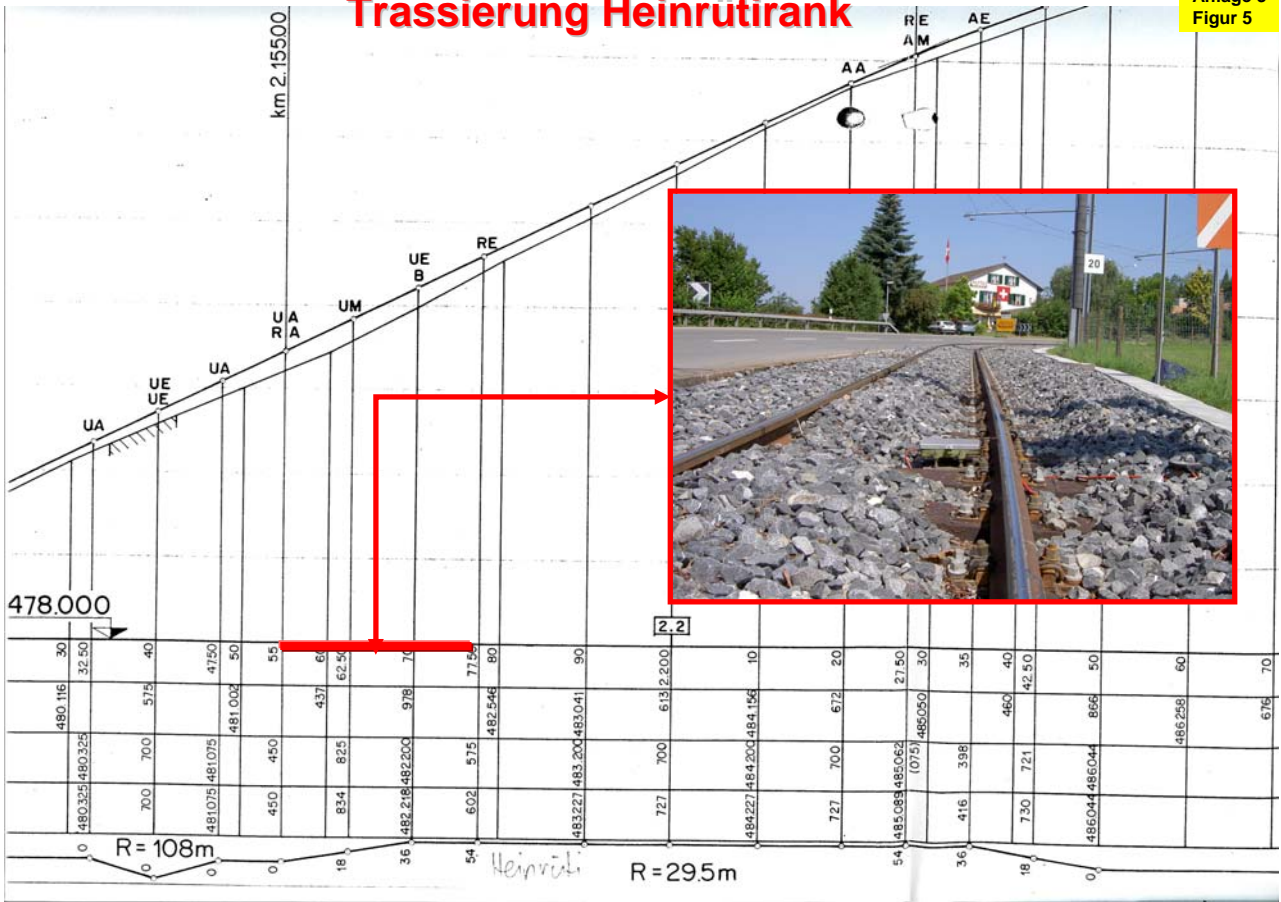


Repräsentatives Beispiel für den Zustand bei den Abmessungen der Spurkränze beim entgleisten Fahrzeug.

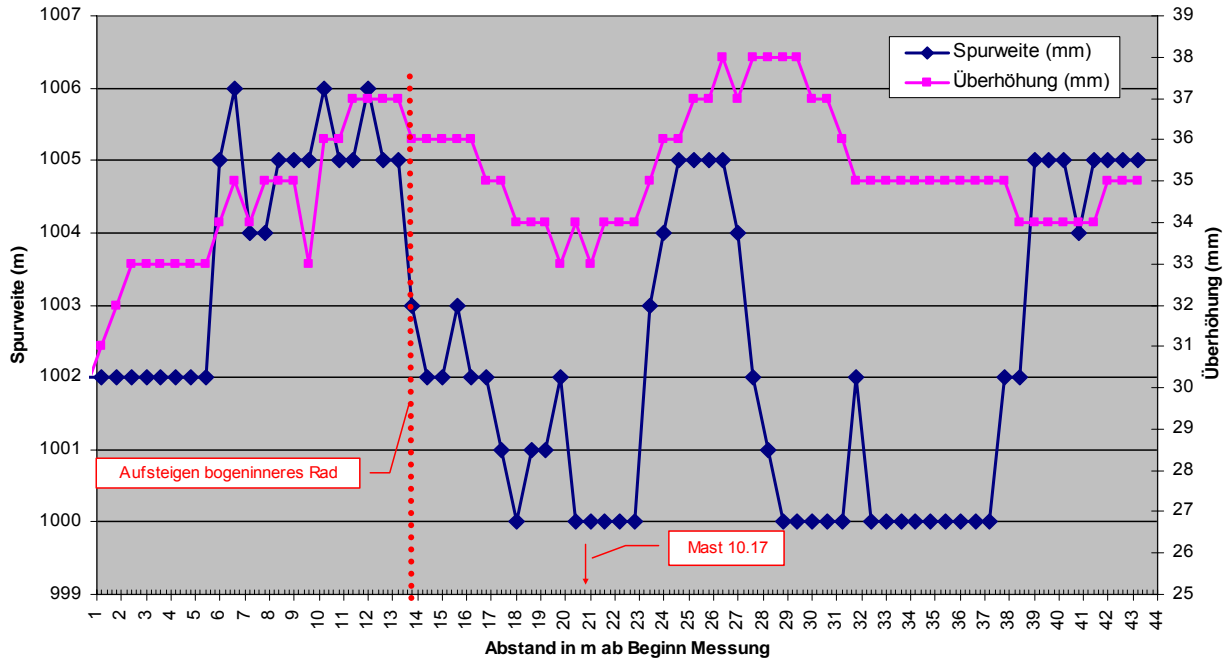


Trassierung Heinrütirank

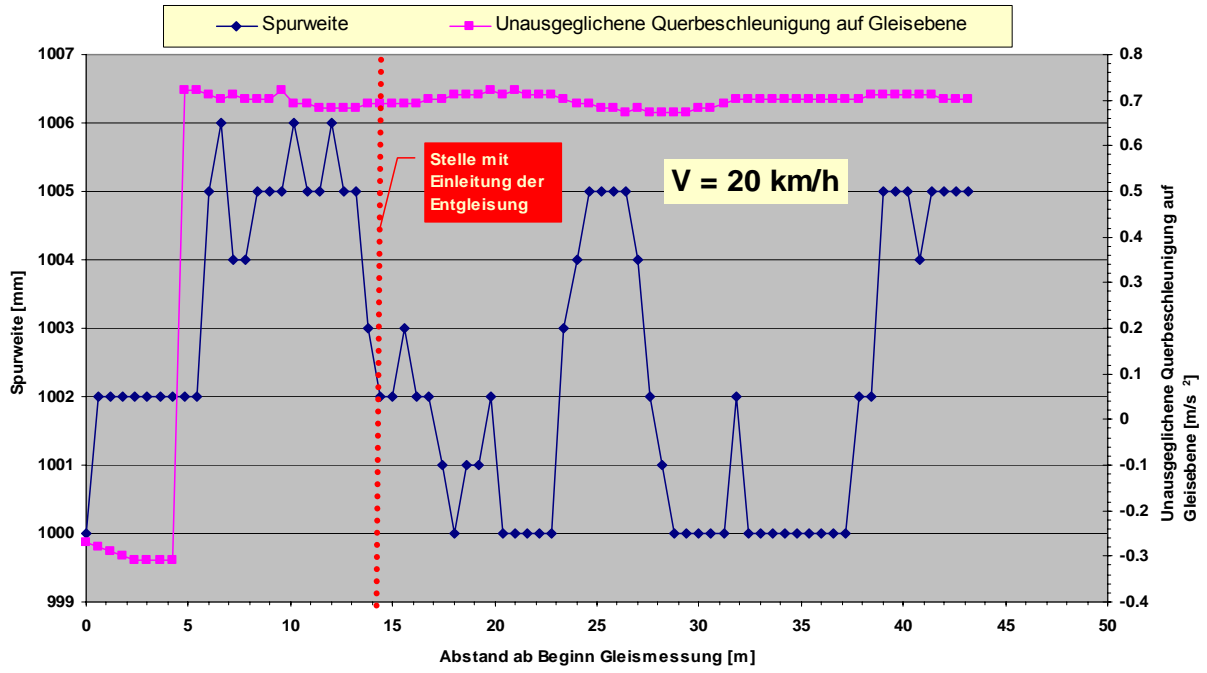
Anlage 3
Figur 5



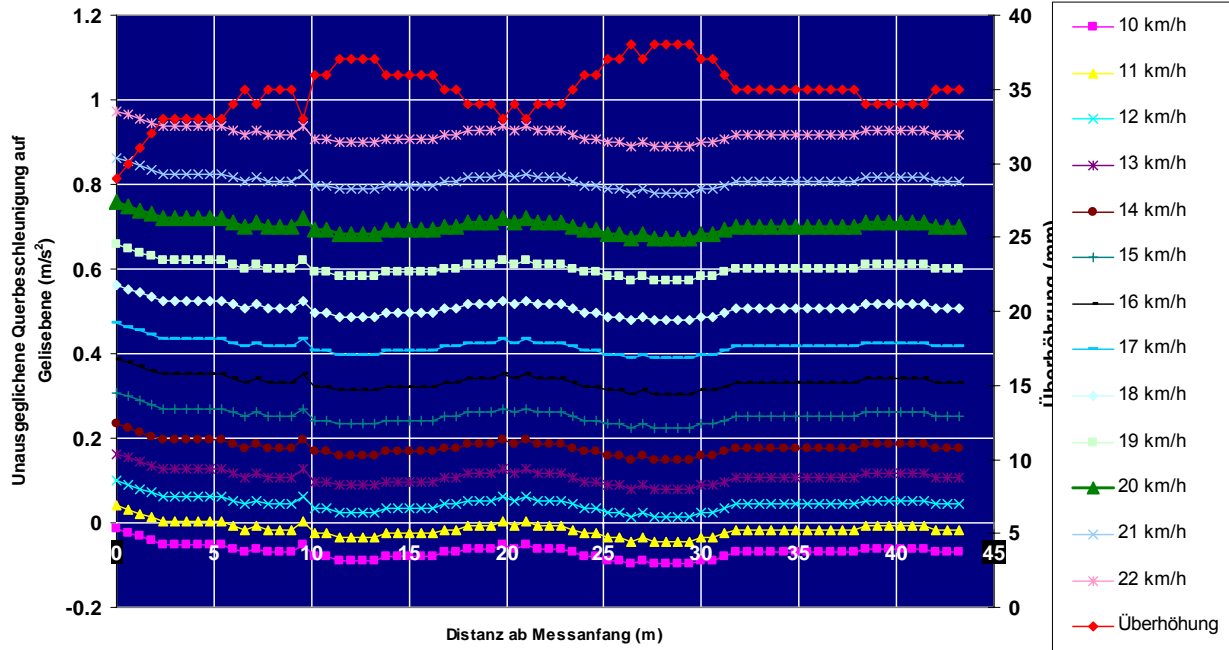
Spurweiten und Überhöhungen im Heinrütirank



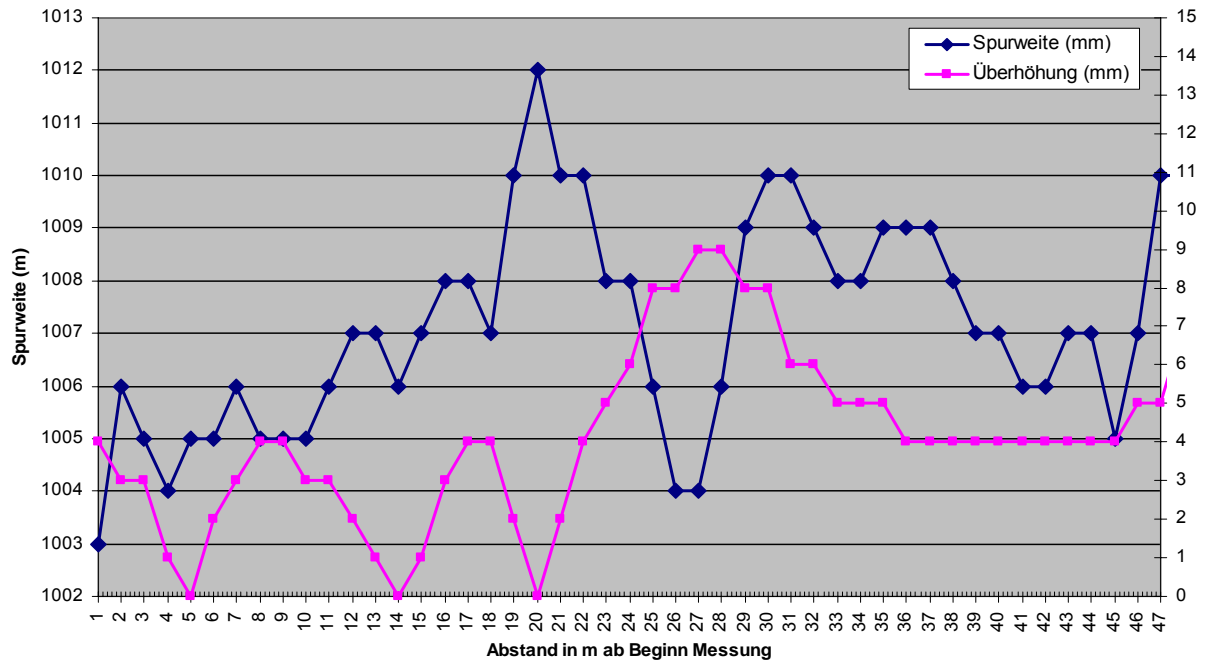
Trassierungsdaten und fahrdynamische Zielgrößen im Heinrütirank



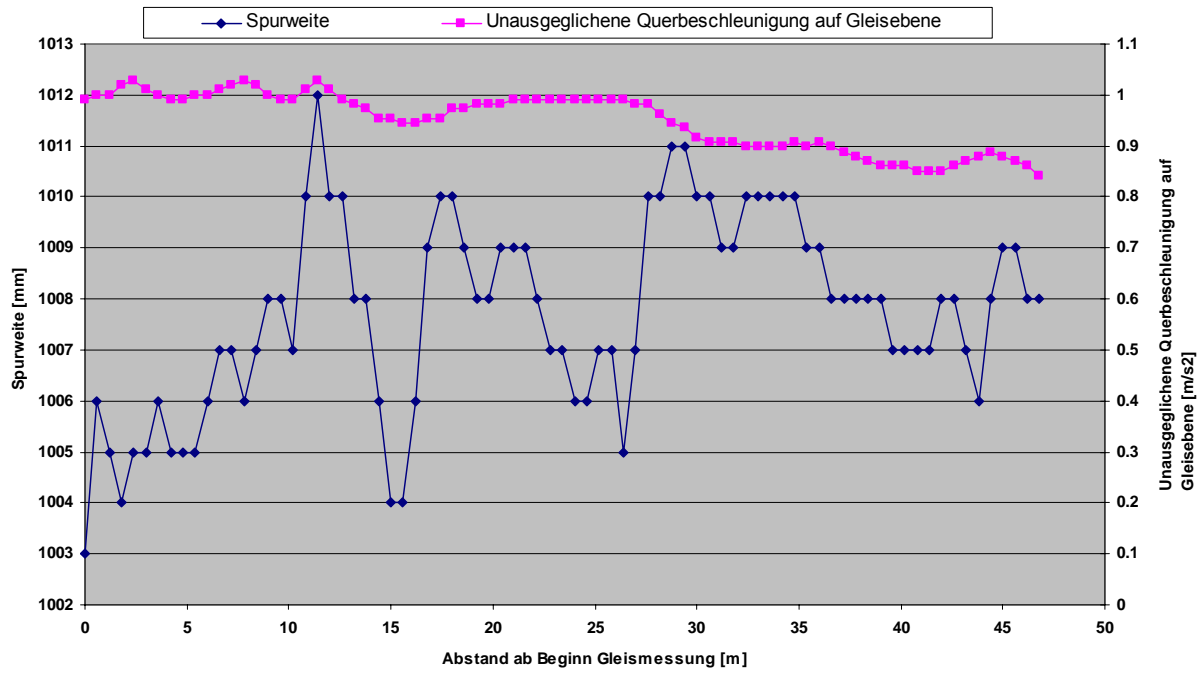
Unausgeglichene Querbewegung auf Gleisebene in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit im Heinrütirank



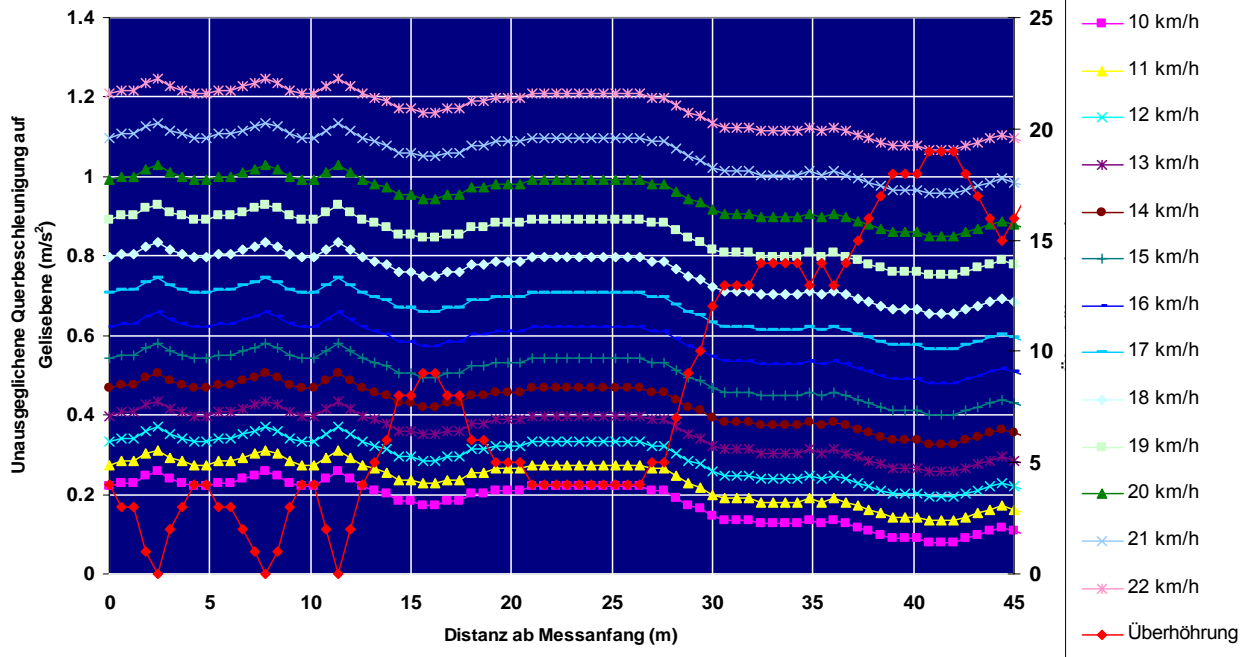
Spurweiten und Überhöhungen in der Belvedere Kurve



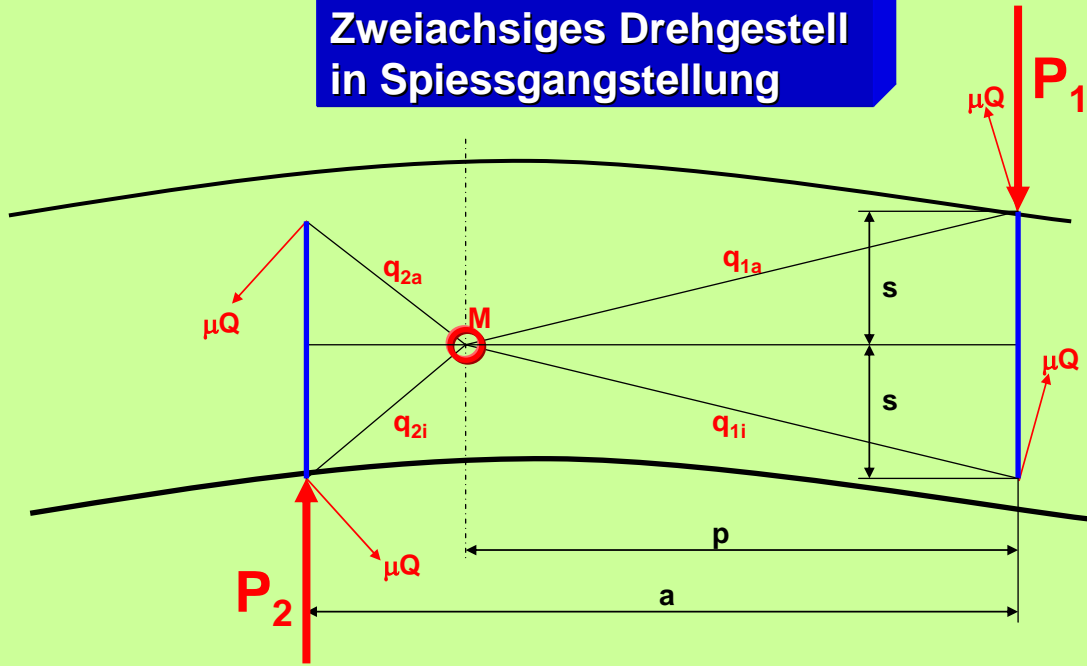
Trassierungsdaten und fahrdynamische Zielgrößen im Belvedere



Unausgeglichene Querbeschleunigung auf Gleisebene in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit im Belvedere Bogen

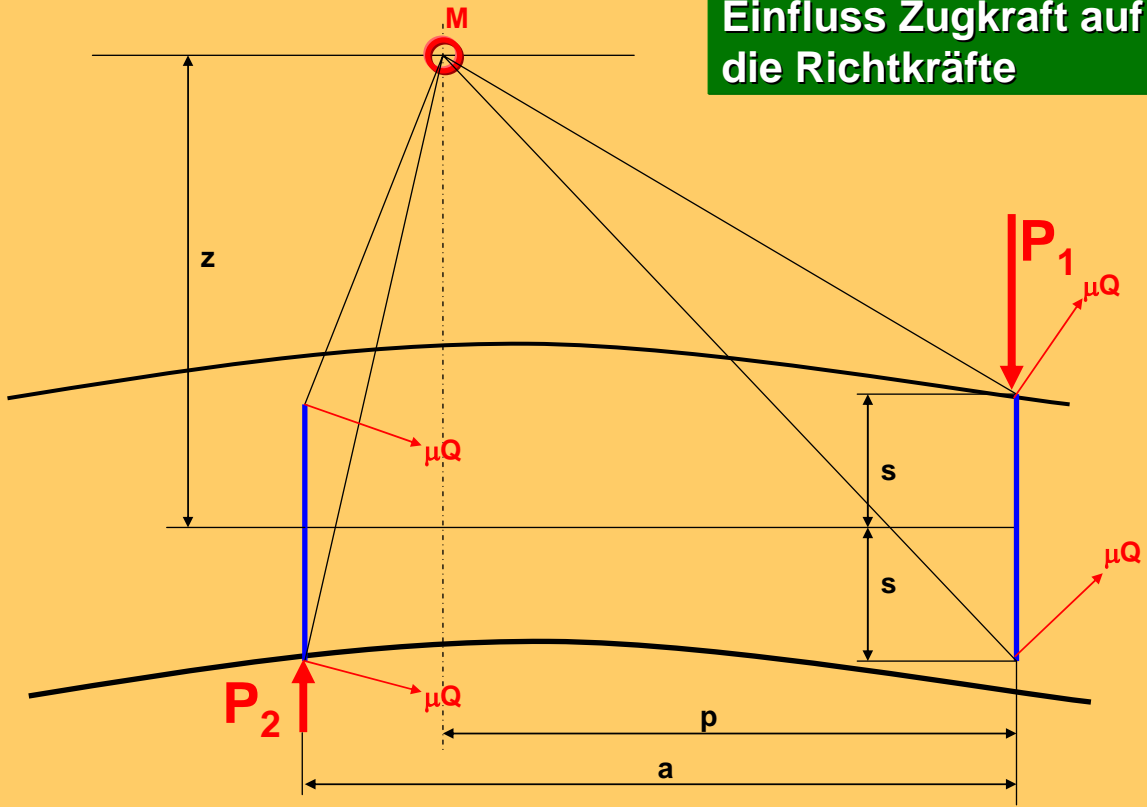


Zweiachsiges Drehgestell in Spiessgangstellung



Ohne Zugkraft

Einfluss Zugkraft auf die Richtkräfte



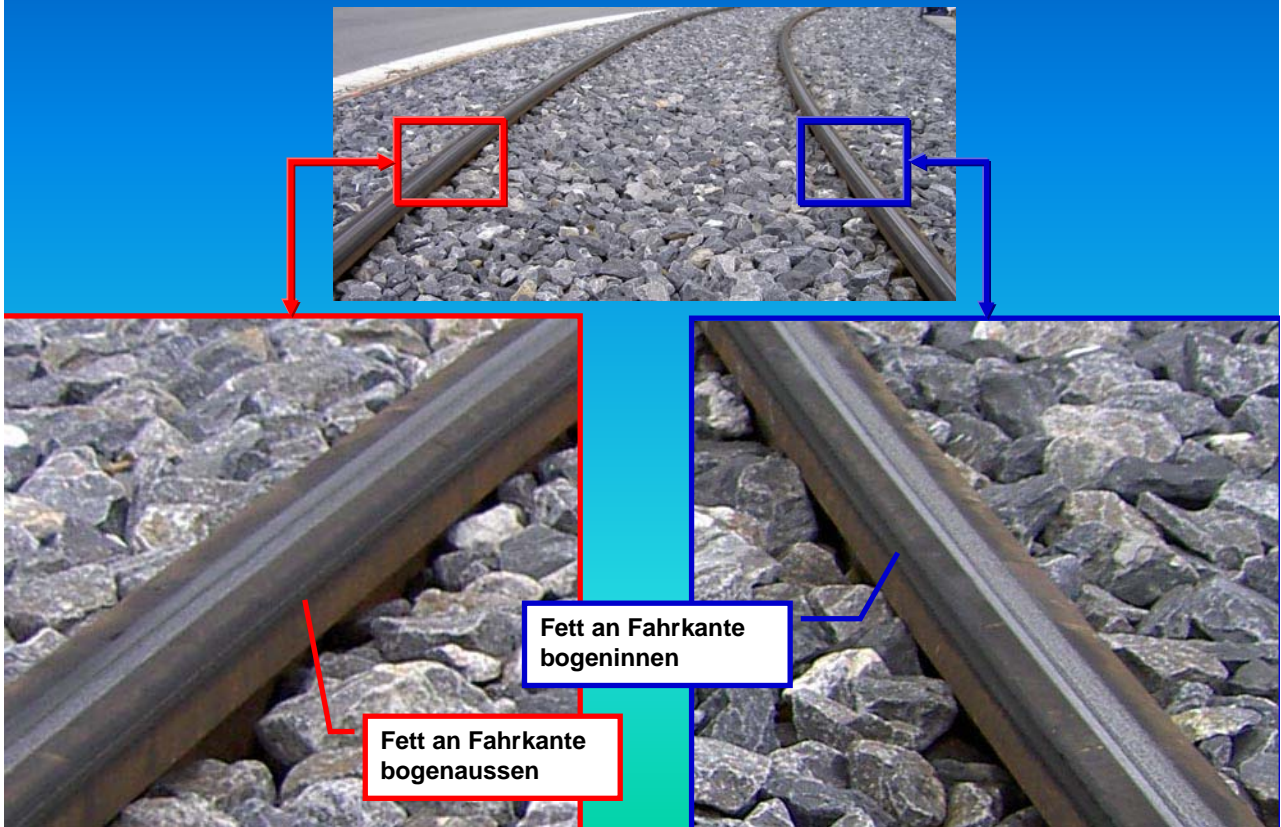
Schienenflankenschmierung in den engen Bögen



**Starker Schmierfilm an den Fahrkanten
bogeninnen und bogenaussen**

Starke Schmierung an bogenäusserer und zugleich bogeninnerer Schienenflanke deutet auf Spiessgangstellung der Fahrwerke hin

Anlage 4
Figur 15



Rad 3 bogenaussen

Rad 3 bogeninnen

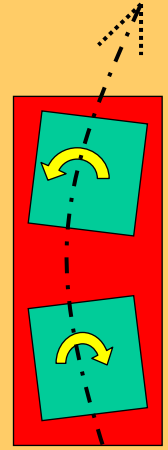
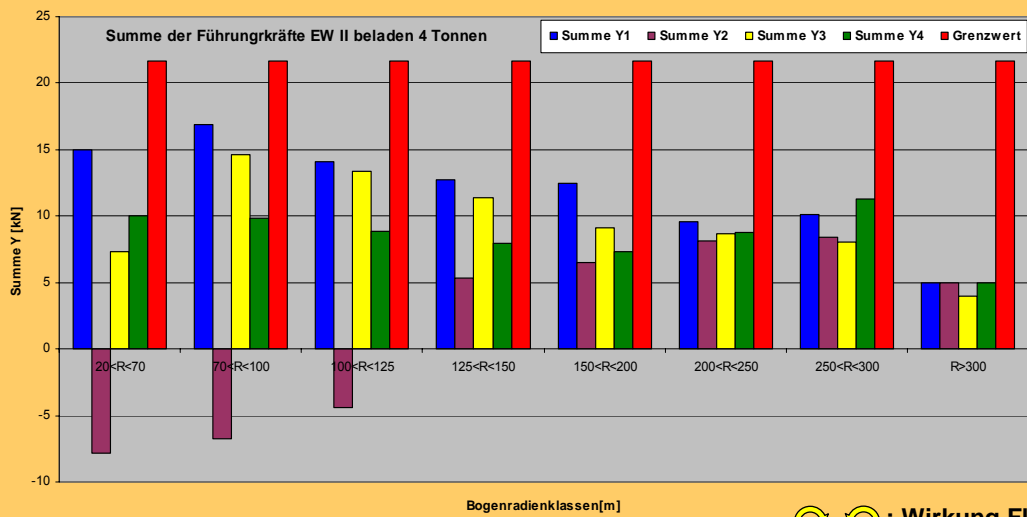
Nachweis der Spiessgangstellung im Heinrütirank

Rad 4 bogenaussen

Rad 4 bogeninnen

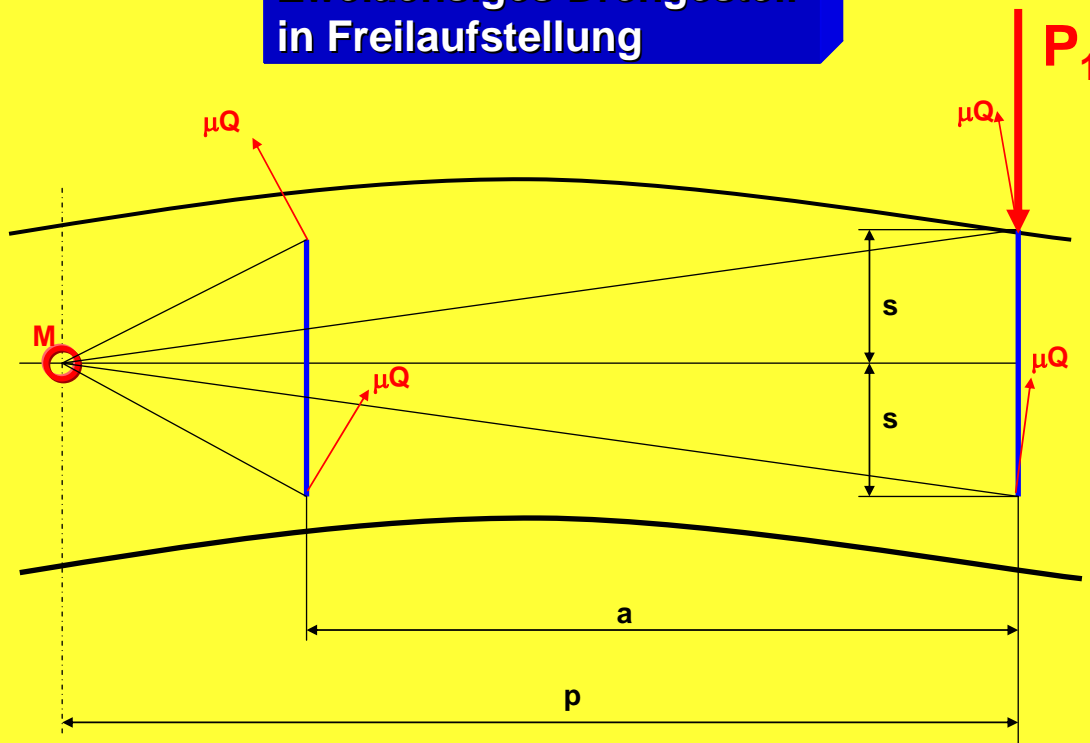
Versuchstechnischer Nachweis auf dem Netz der Rhätischen Bahn, dass am nachlaufenden Radsatz nach bogeninnen gerichtete Richtkräfte auftreten.

Anlage 4
Figur 17



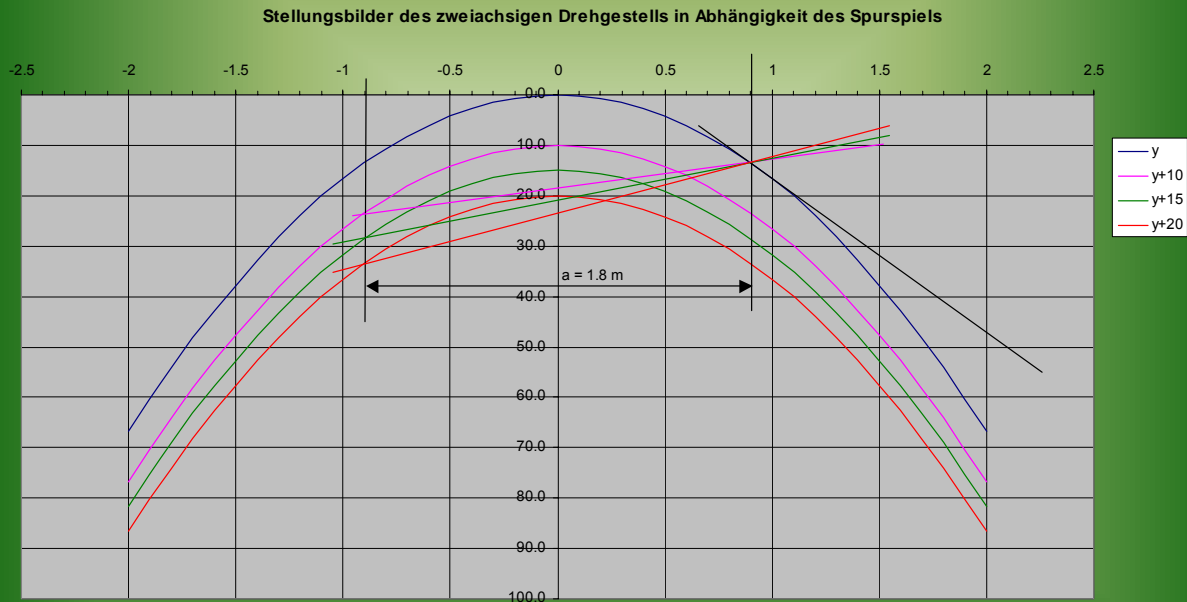
↪ ↪ : Wirkung Flexicoilfederung

Zweiachsiges Drehgestell in Freilaufstellung

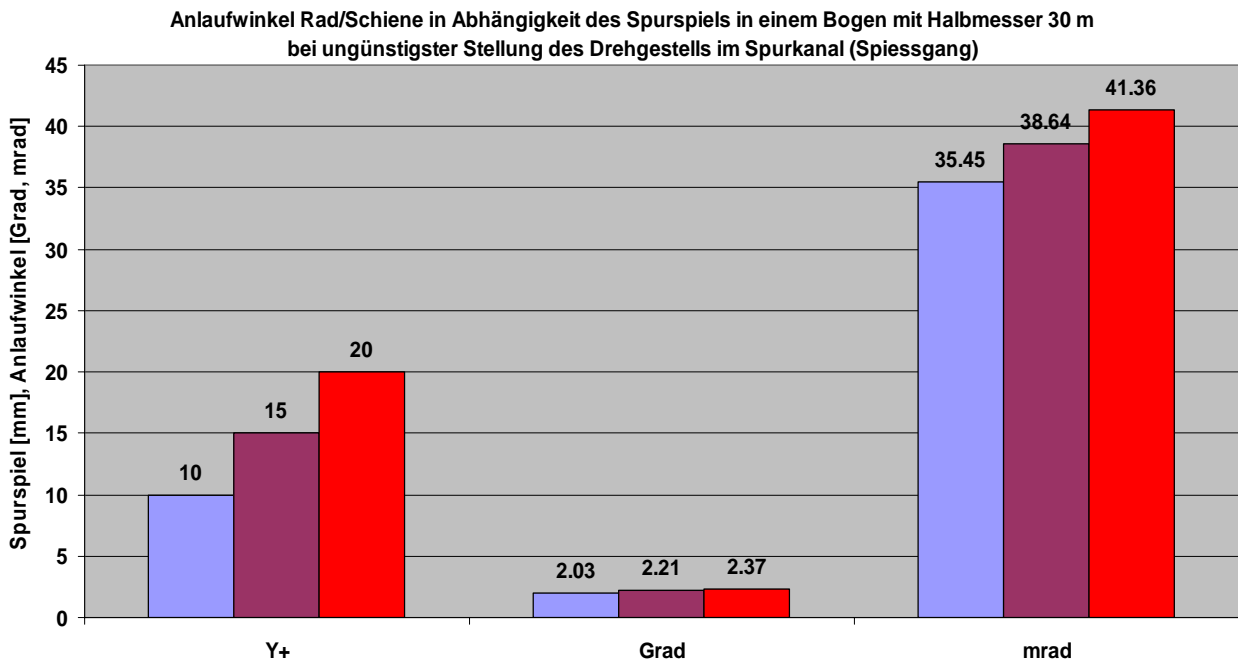


Stellungsbilder als Hilfsmittel zur Ermittlung der maximal möglichen Anlaufwinkel in Abhängigkeit des Spurspiels (Bogenhalbmesser 30 m, Achsstand im DG 1.8 m)

Anlage 4
Figur 19

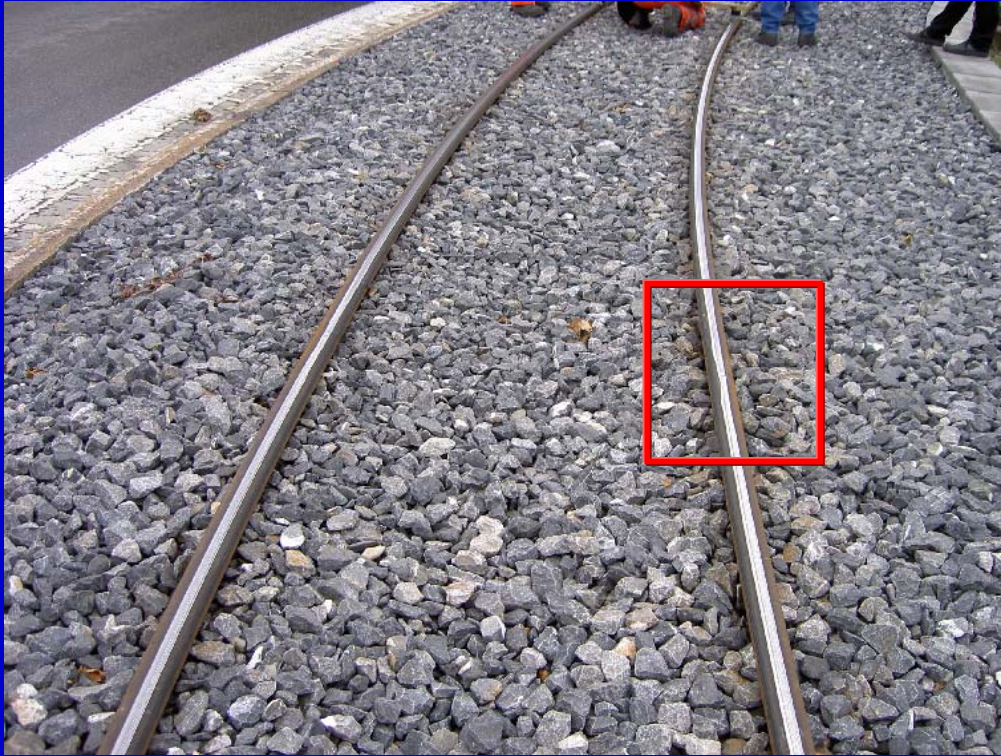


Veränderung des Anlaufwinkels in Abhängigkeit des Spurspiels bei Spiessgang (Achsstand Drehgestell 1.8 m)



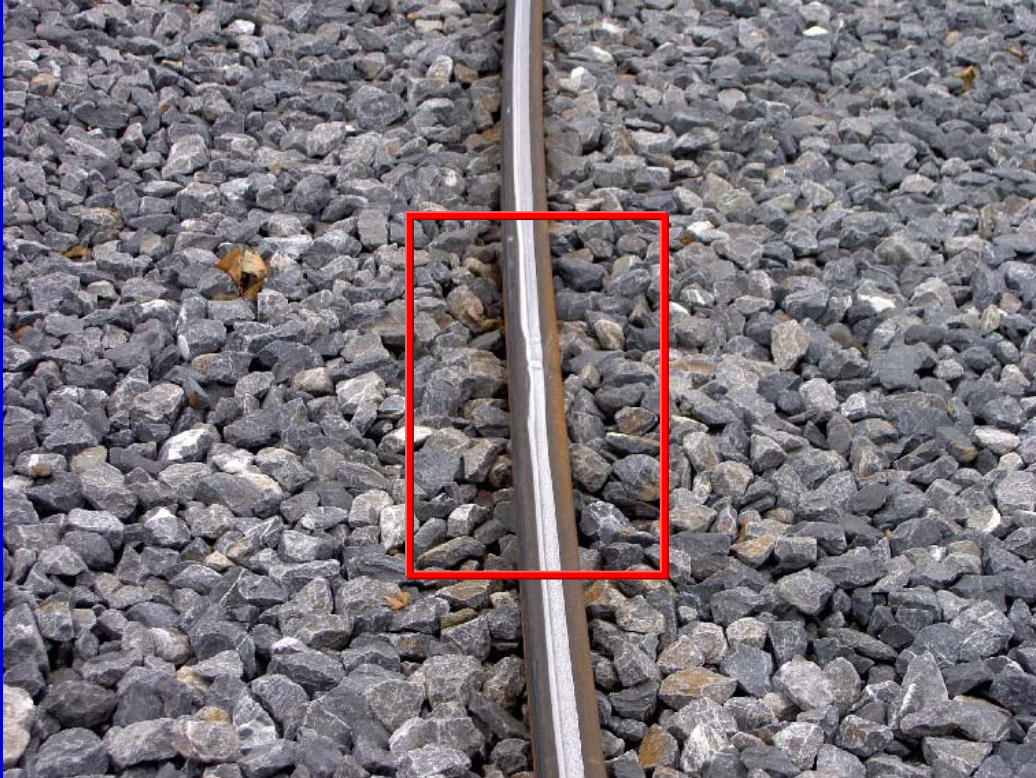
**Diskontinuität an der bogeninneren Schiene an
der Stelle, wo das Rad aufgestiegen ist**

Anlage 5
Figur 21

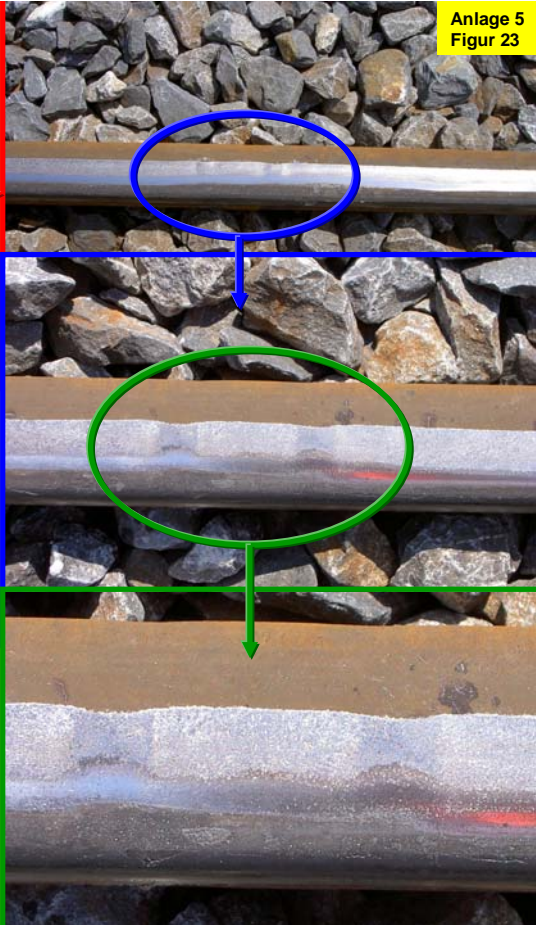


**Diskontinuität an der bogeninneren Schiene an
der Stelle, wo das Rad aufgestiegen ist**

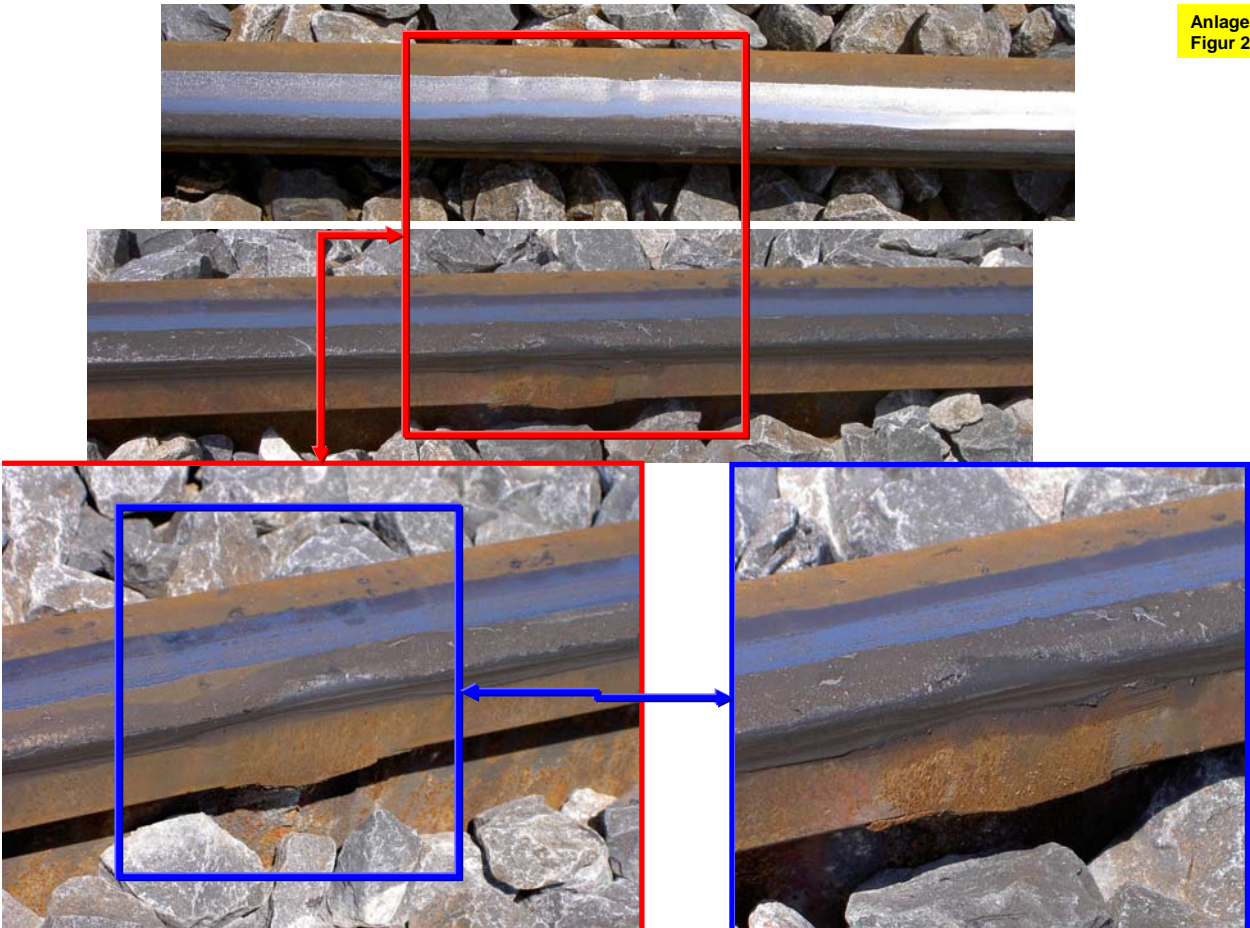
Anlage 5
Figur 22



Unstetigkeit an der bogeninneren Schiene (Ort des Aufsteigens des Rades)



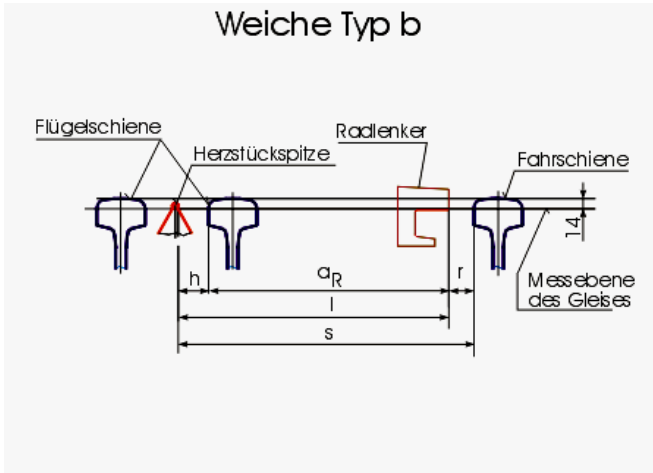
Anlage 5
Figur 23



Diskontinuität an der bogeninneren Schiene an der Stelle, wo das Rad aufgestiegen ist

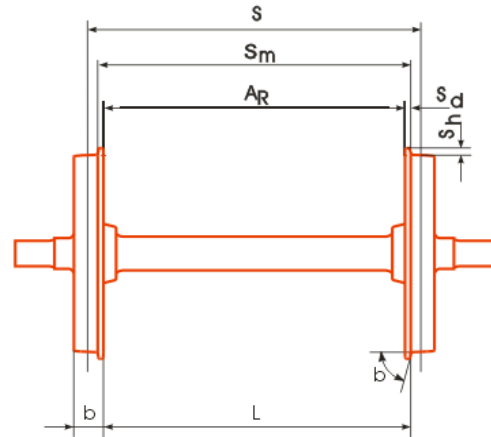


Querabmessungen von Radsätzen und Weichen für BD-Bahn gemäss VöV-Richtlinie



	Mass [mm]	Neuzustand		Im Betrieb	
		Obere Toleranz [mm]	Untere Toleranz [mm]	Obere Toleranz [mm]	Untere Toleranz [mm]
s Spurweite	1003	0	-3	10	-3
a_R Stichweite	(933)				
l Leitweite	971	2	0	4	-2
r Radlenker­rille	32	1	-1	2	-2
h Herzstück­rille	38	1	-1	4	-2

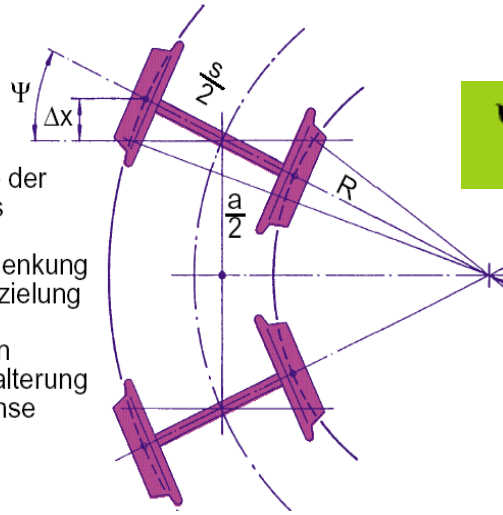
**Radsatz Typ B
Aussenliegende Achslagerung**



	Mass [mm]	Neuzustand unbelastet		Im Betrieb unter Last	
		Obere Toleranz [mm]	Untere Toleranz [mm]	Obere Toleranz [mm]	Untere Toleranz [mm]
S Abstand der Lauf­kreisebenen	1050				
S_m Spurm­mass	990	0		0	-15
A_R Rücken­abstand	945	0	-1	0	-3
L Leit­mass	967.5	0	-1	3	-10
b Rad­breite	120	1	-1	5	-3
α Spur­kranz­flanken­winkel	75°				
S_d Spur­kranz­dicke	22.5	0		0	-7
S_h Spur­kranz­höhe	28			< 38	

Heinrüti Rank

- R = Bogenhalbmesser
- s = Abstand der Laufkreise der Räder eines Radsatzes
- a = Achsabstand
- Δx = Erforderliche Längsauslenkung eines Radsatzes zur Erzielung der Radsatzeinstellung
- Ψ = Ausdrehwinkel zwischen Radsatz und Radsatzhalterung um die Radsatzhochachse



$$\Psi = \arctan \frac{a}{2R}$$

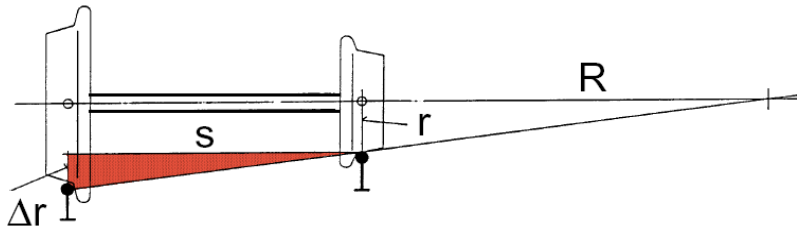
Laufdrehgestell

a = 1.8 m; $\psi = 30 \text{ mrad}$

Triebdrehgestell

a = 2 m; $\psi = 33 \text{ mrad}$

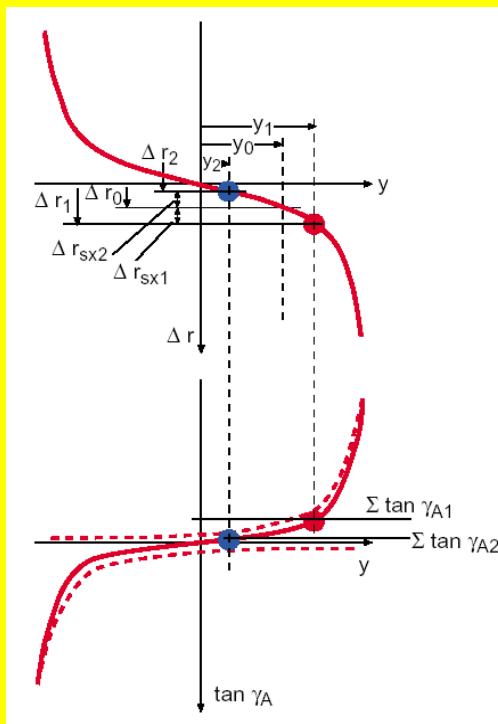
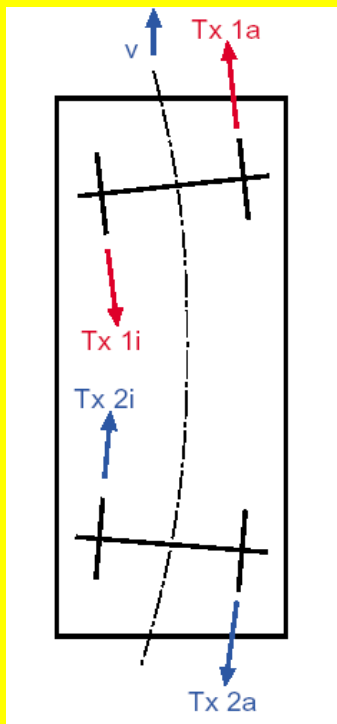
Erfüllung der kinematischen Abrollbedingung im Bogen

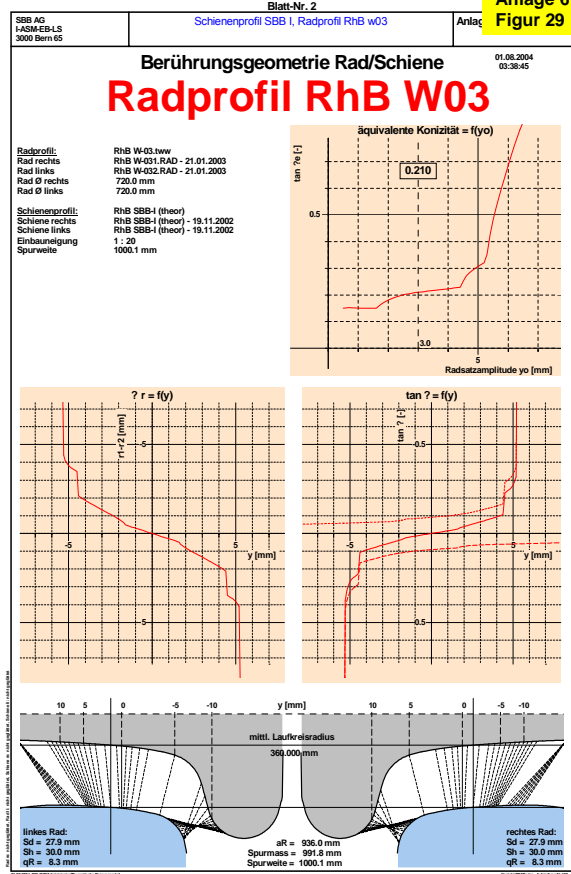
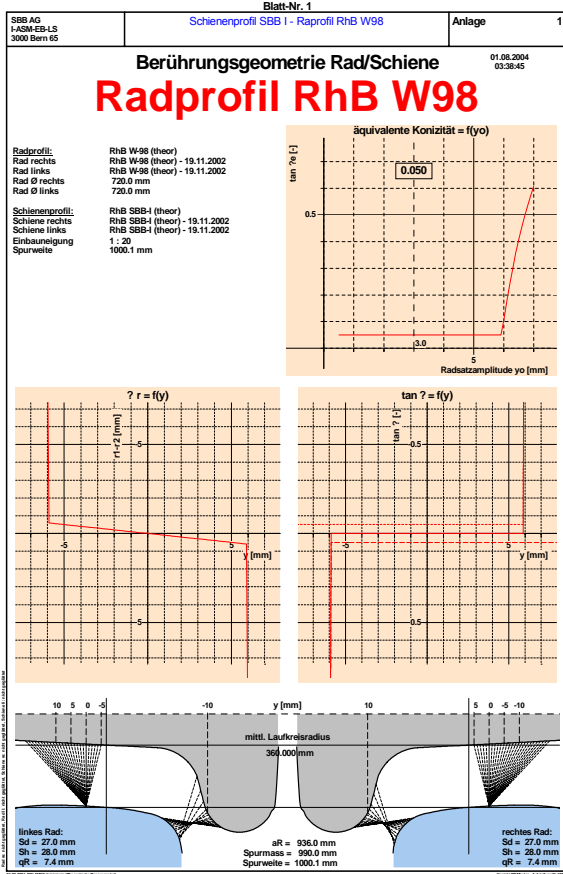


$$\Delta r = \frac{r \cdot s}{R}$$

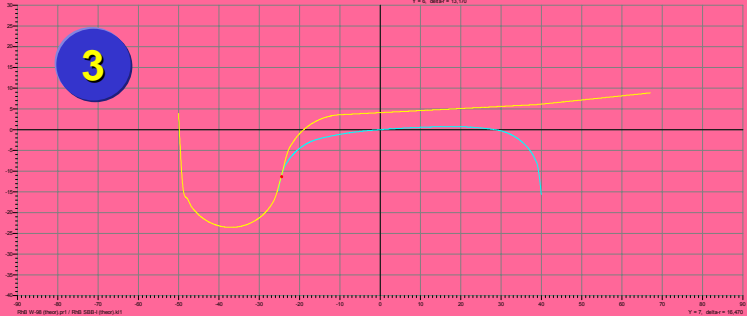
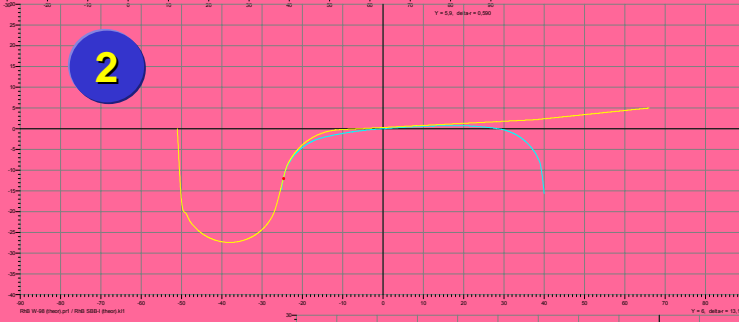
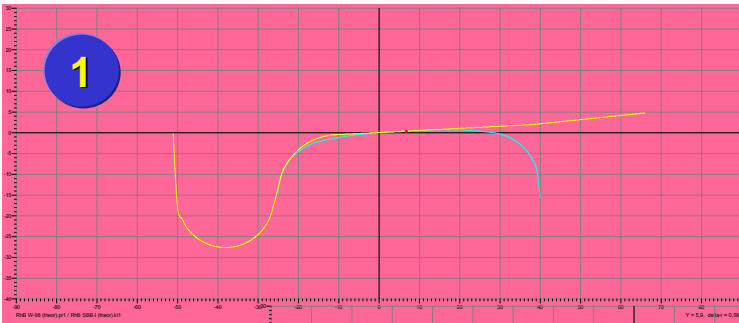
$$\Delta r = 6.3 \text{ mm}$$

Steuermechanismen durch Kraftschlusschlupfkkräfte in Bögen



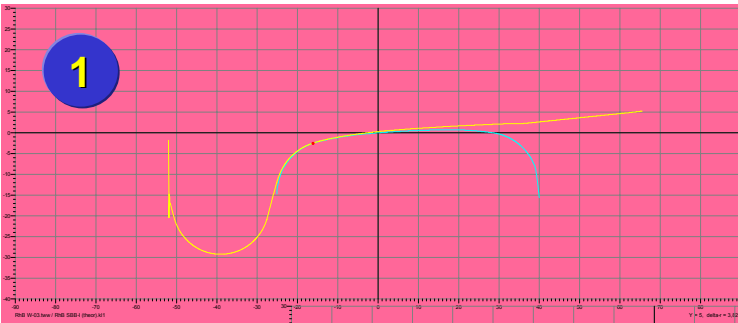


Radprofil RhB W98

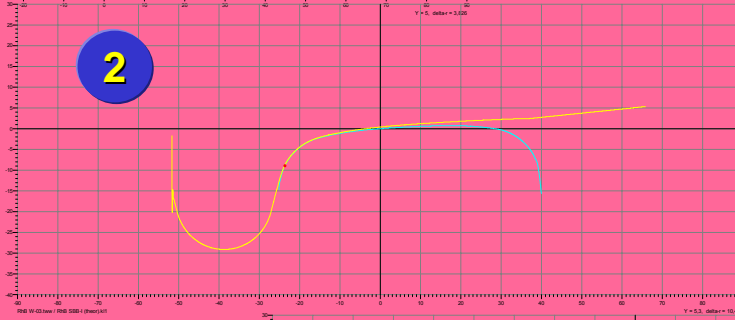


Radprofil RhB W03

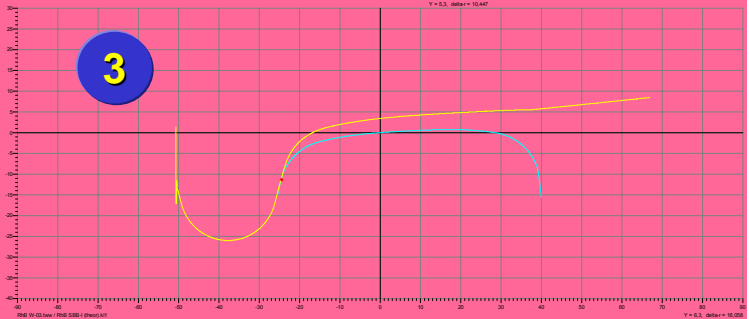
1



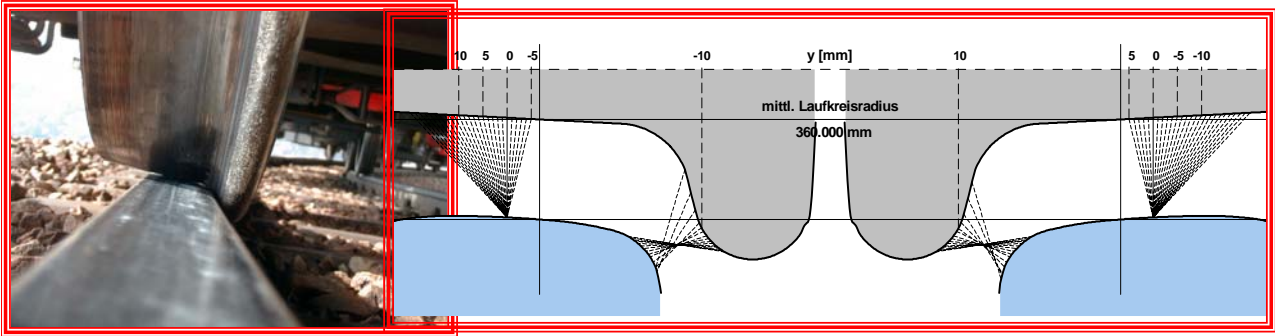
2



3



Radprofil RhB W98



Radprofil RhB W03

