



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Abteilungen Infrastruktur und Sicherheit

Datum: 1. Januar 2021
Version: 1.3

Aktenzeichen: / BAV-511.5-00027/00004/00003/00004

Richtlinie

Nachweis sicheres Fahrverhalten Meterspur-, Spezialspur- und Zahnradbahnen

(RL FV-MSZ)

Impressum

Herausgeber:	Bundesamt für Verkehr, 3003 Bern
Autor:	Thomas Schlusemann
Verteiler:	Veröffentlichung auf der BAV-Internetseite
Sprachfassungen:	Deutsch (Original)

BAV-interne Dokumentenlenkung

Q-Plan Stufe:	RL, öffentlich
QM-SI-Anbindung:	BAV-Ril_FV-MSZ_Nachweis-sicheres-Fahrverhalten_Meter-spur+Spezialspur+Zahnradbahnen_V1.3_2020-08
Anwendungsgebiet BAV-Prozesse:	BAV Prozess 42

Diese Richtlinie tritt am 1. Januar 2021 in Kraft; sie ersetzt die gleichnamige Richtlinie, Version 1.2, vom 3. April 2018.

Bundesamt für Verkehr
Abteilung Infrastruktur

Abteilung Sicherheit

Anna Barbara Remund, Vizedirektorin

Dr. Rudolf Sperlich, Vizedirektor

Ausgaben / Änderungsgeschichte

Version	Datum	Ersteller	Änderungshinweise	Status ^x
1.1	21.02.2018	Th. Schlusemann	generelle Überarbeitung,	in Review
1.2	03.04.2018	Th. Schlusemann	Vereinfachungen	in Kraft
1.3	01.01.2021	Th. Schlusemann	Überarbeitung Kapitel 3.2 ‚Sicherheit gegen Entgleisen – Zahnradbahnen‘, Integration Nachweis durch numerische Simulation	in Kraft

^x folgende Status sind vorgesehen: in Arbeit; in Review; in Kraft/mit Visum; abgelöst

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck der Richtlinie	3
2	Fahrstabilität	4
2.1	Durchführung	4
2.2	Nachweispflicht	4
2.2.1	Nachweismethoden	4
2.3	Wankverhalten	5
3	Sicherheit gegen Entgleisen	5
3.1	Adhäsionsbahnen (SgE-A)	5
3.1.1	Methode 1 (direktes Verfahren)	6
3.1.2	Methode 2 (indirektes Verfahren)	6
3.1.3	Methode 3 (indirektes, vereinfachtes Verfahren)	6
3.1.4	Methode B (direktes, simulatorisches Verfahren)	7
3.2	Zahnradbahnen (SgE-Z)	7
3.2.1	Methode nach Borgeaud (quasistatisches, zustandsstarres Berechnungsprogramm)	7
3.2.2	Methode 2 (quasistatisches, simulatorisches Verfahren)	8
3.2.3	Anerkennung einer Berechnungsmethode	9
4	Standsicherheit bei Seitenwind	11
5	Literatur	11
6	Anhang	12
6.1	Abkürzungen und Symbole	12
6.2	Benchmark-Modell und 4 Modellfälle (Szenarien)	15
6.2.1	Parameter-Sets	15
6.2.2	Referenz-Ergebnisse	21

1 Zweck der Richtlinie

Zweck dieser Richtlinie ist es, Grundlagen zur Führung des Sicherheitsnachweises zum Fahrverhalten von Meter- und Spezialspurfahrzeugen sowie Zahnradbahnen festzulegen.

Die Richtlinie dient der Konkretisierung der anzuwendenden Gesetze, Verordnungen, Ausführungsbestimmungen und Normen in Bezug auf den Nachweis der Fahrsicherheit.

Rechtliche Grundlagen dieser Richtlinie sind die Vorgaben des Eisenbahngesetzes (EBG), Stand 1. Juli 2020, die Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (EBV), Stand 12. Juni 2020, die Ausführungsbestimmungen zur EBV (AB-EBV), Stand 1. November 2020, sowie die Richtlinie Zulassung Eisenbahnfahrzeuge in ihrer Fassung vom 1. Dezember 2019.

Der Richtlinie kommt nicht der Rang von Gesetz oder Verordnung zu, sie ist aber verbindlicher als eine bloße Empfehlung. Abweichungen sind zulässig, sofern das von Gesetz, Verordnung und Richtlinie verfolgte Ziel auf andere Weise erreicht wird.

Befolgt die Gesuchstellerin die Richtlinie, besteht für sie Gewissheit, dass die Behörde die erarbeiteten Grundlagen in methodischer Hinsicht akzeptiert. Andernfalls trägt die Gesuchstellerin das Risiko, dass die Behörde dies nicht tut.

2 Fahrstabilität

Für Adhäsionsbahnen und für kombinierte Adhäsions-/Zahnradbahnen ist der Nachweis der Fahrstabilität abgestimmt mit dem BAV in Anlehnung an SN EN 14363:2016 zu erbringen.

Liegt die zulässige Fahrzeughöchstgeschwindigkeit unter 100 km/h, so sind in der Regel hinsichtlich der Fahrstabilität keine Nachweise vorzulegen.

Falls Systeme eingebaut sind, deren Ausfall oder Fehlfunktion die Fahrsicherheit oder die Profolfreiheit negativ beeinflussen können, so sind diese Systemzustände im Fahrversuch umfassend zu prüfen.

2.1 Durchführung

Die Fahrversuche werden im Tarazustand bei trockener Schiene und abgeschalteter Spurkranzschmierung durchgeführt; sie erfolgen bei bis zu 110% der zulässigen Fahrzeughöchstgeschwindigkeit.

Die Messung erfolgt in Anlehnung an das vereinfachte Verfahren der SN EN 14363:2016:

- Die Messung der Querschleunigungen ypp^+ am Fahrwerkrahmen über den Radsätzen ist erforderlich,
- die Messung der Beschleunigungen ypp^* und zpp^* im Wagenkasten über den Fahrwerken wird für die Betrachtung des Wankverhaltens empfohlen.

Die Auswertung und die Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte für $ypp^+_{rms,lim}$ erfolgen gemäss SN EN 14363:2016.

2.2 Nachweispflicht

Gestützt auf die Ergebnisse bisheriger Prüfungen wird die Nachweispflicht wie folgt festgelegt:

- Für Triebdrehgestelle (potentielle Hohlaufbildung durch Traktion) und unkonventionelle Fahrwerke (Spurwechsel- oder Jakobs-Drehgestelle) für eine zulässige Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von $v_{zul} \geq 100$ km/h ist die Fahrstabilität nachzuweisen.
- Für Laufdrehgestelle (geringes Massenträgheitsmoment) für eine zulässige Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von $v_{zul} \geq 120$ km/h ist die Fahrstabilität nachzuweisen.

2.2.1 Nachweismethoden

In Abstimmung mit dem BAV kann eine der folgenden Methoden angewendet werden:

Methode 1: Prüfung der Fahrstabilität mit Fahrversuchen

- Messfahrten auf Referenzstrecke mit neuen Radprofilen (falls kein Verschleissprofil bekannt) (Radprofilmessung + Konizitätsauswertung)
- Messfahrten auf Referenzstrecke mit verschlissenen Radprofilen (nach dem ersten Betriebsjahr bzw. vor der ersten Regel-Reprofilierung) oder bekanntem Verschleissprofil (z.B.: RhB W03) (Radprofilmessung + Konizitätsauswertung)

Methode 2: Permanente Überwachung der Fahrstabilität

- tägliche Protokollierung der maximalen Querbeschleunigungen ypp^+_{rms} sowie der aktuellen Laufleistung eines Referenzfahrzeuges im Regelbetrieb
- monatliches Monitoring bis zur ersten Regel-Reprofilierung (ca. 80 bis 120 tkm)
- Warngrenze mit um 20% reduzierten Grenzwerten $ypp^+_{rms,lim,red}$

2.3 Wankverhalten

Der Grenzwert für den Wankkoeffizienten ist durch AB-EBV AB 18.2 / 47.2 vorgegeben. Wird er überschritten, so ist die Einschränkungsrechnung zu überprüfen.

Der Wankkoeffizient ist gemäss SN EN 14363:2016 zu ermitteln aus:

- Messung oder Simulation eines statischen Standversuchs (Wanken nach bogeninnen) oder
- Messung oder Simulation einer quasistatischen Bogenfahrt (Wanken nach bogenäusseren)

3 Sicherheit gegen Entgleisen

3.1 Adhäsionsbahnen (SgE-A)

Unabhängig von der vorgesehenen Fahrgeschwindigkeit ist der rechnerische Nachweis (Simulation) der Sicherheit gegen Entgleisen in Gleisverwindungen zu erbringen. Er ist in Anlehnung an SN EN 14363:2016 durch Bestimmung des Grenzwertes Y/Q bzw. des Radaufkletterns Δz_R und Vergleich mit den zulässigen (gegenüber der Norm angepassten) Grenzwerten zu führen.

Bei Adhäsionsbahnen wird als ungünstigster Zustand eine **Ausfahrt aus einem überhöhten Bogen** (Gleisverwindung) betrachtet; dies entspricht einer **Entlastung des führenden bogenäusseren Rades** (je Fahrwerk).

Von den vier beschriebenen Methoden sind für Schmalspurbahnen nur die beiden direkten Methoden 1 und B¹ anzuwenden.

Die Prüfverfahren wurden an die typischen netzspezifischen Verhältnisse bei Schmalspurbahnen (Meterspur M / Spezia Spur S) angepasst.

Die Untersuchungen sind mit repräsentativen Radprofilen und netzspezifischen Schienenprofilen sowie mit den nominalen Einbauständen (Spurweite, Schieneneinbauneigung) durchzuführen.

Als zusätzliche Sicherheitsreserve sind darüber hinaus Berechnungen mit **um 10 % erhöhten Prüfverwindungen** durchzuführen. In diesem Fall muss der komplette Prüfabschnitt ohne tatsächliche Entgleisung (Aufklettern über Spurkranzhöhe) durchfahren werden – die Grenzwerte können dabei überschritten werden.

¹ kurz für „Methode nach SN EN 14363:2016, Anhang B“

3.1.1 Methode 1 (direktes Verfahren)

Nachweis unmittelbar aus den Gleiskräften (Y , Q) im Verwindegleisbogen (VGB).

3.1.1.1 Angepasste Prüfbedingungen und Grenzwerte zu Methode 1

Parameter		Definition	Übliche Werte (M+S)	Werte für Normalspur (N)	Bedingung	Bemerkung
Prüfbedingungen VGB	Prüfgleisradius	$R = 100 \text{ m}$ $R = R_{min}$		150 m		
	Überhöhung	$u = \pm 45 \text{ mm}$				geringer Wankeinfluss
	Prüfverwindung primär	g^+ : netzspezifisch	6.0 ‰	7.0 ‰	RhB 20879D	
	Prüfverwindung sekundär	g^+ : netzspezifisch	3.0 ‰	3.0 ‰ .. (4.0 ‰)	R RTE 22546	
	Radlastdifferenz	$\Delta q_0 = 5 \text{ ‰}$			AB-EBV AB 47.1	maximal zulässiger Wert
	Fahrgeschwindigkeit	$v = 1 \text{ m/s}$				Schrittgeschwindigkeit
	Reibwert Spurkranzflanke	$\mu_F = 0.40$				
	Reibwert Lauffläche	$\tau_{max} = \mu_T(\bar{Q}_0, \alpha)$ $\tau = \frac{Y}{Q_i} - \gamma_t$	0.42 .. 0.52		$2\bar{Q}_0 = 20 \text{ t} \dots 5 \text{ t}$, SN EN 14363:2016	α Anlaufwinkel γ_t Kontaktwinkel
lim	Direkter Grenzwert 1	$\frac{Y}{Q} < \frac{Y}{Q}_{lim} = \frac{\tan \beta_F - \mu_F}{1 + \mu_F \cdot \tan \beta_F}$	0.85 .. <u>1.44</u>	1.2 ($\beta_F = 70^\circ$)	$\mu_F = 0.36$ $\beta_F = 60^\circ \dots 70^\circ \dots 75^\circ$	Entgleisungs-Koeffizient ²
	Indirekter Grenzwert 2	$\Delta z_R < \Delta z_{R,lim} = 5 \text{ mm}$			bei Überschreitung von Grenzwert 1	Radaufklettern ³
	Weiterer Grenzwert 3	$\Delta Q / \bar{Q}_0$		-	nur Beobachtung	Relative Radentlastung ⁴

Die beiden Bedingungen Wankeinfluss und Reibwert sind blau markiert, da diese sich von Methode B grundsätzlich unterscheidet.

3.1.2 Methode 2 (indirektes Verfahren)

Ableitung aus dem Bogenlauf (Y) und aus der Radentlastung (Q).

Methode 2 ist zur Gewinnung belastbarer Aussagen nur mit unverhältnismässigen Prüf- und Beurteilungsaufwand anzuwenden und wird daher **ausgeschlossen**.

3.1.3 Methode 3 (indirektes, vereinfachtes Verfahren)

Ableitung aus der gemessenen Ausdrehsteifigkeit des Fahrwerks und aus der gemessenen Radentlastung des Fahrzeugs.

Da die meisten Schmalspurfahrzeuge mit Drehkranz-Fahrwerken ausgestattet sind, ist dieses Verfahren **nicht sinnvoll**.

Methode 3 ist zur Gewinnung belastbarer Aussagen nur mit unverhältnismässigen Prüf- und Beurteilungsaufwand anzuwenden und wird daher **ausgeschlossen**.

² Formel nach NADAL, mit Spurkranz-Flankenwinkel β_F und Spurkranz-Reibwert μ_F

³ Bei ungünstigem Zusammentreffen von Spurkranzhöhe, grossen Spurkranzkuppen- und Schienenkopfabrundungs-Radius ist der Grenzwert $\Delta z_{R,lim}$ gegebenenfalls zu reduzieren, so dass der effektive Spurkranz-Berührungspunkt nicht im Spurkranzkuppen-Radius liegt.

⁴ \bar{Q}_0 : mittlere Radaufstandskraft eines Radsatzes auf horizontalen Gleis (in SN EN 14363:2016, Anhang V: Q_{F0})

3.1.4 Methode B (direktes, simulatorisches Verfahren)

Nachweis unmittelbar aus den Gleiskräften (Y, Q) in einer betriebsnah trassierten Bogenausfahrt mit zusätzlicher lokaler Senke (BAS).

3.1.4.1 Angepasste Prüfbedingungen und Grenzwerte zu Methode B

Parameter	Definition	Übliche Werte (M+S)	Werte für Normalspur (N)	Bedingung	Bemerkung	
Prüfbedingungen BAS	Prüfgleisradius	$R = 100 \text{ m}$ $R = R_{min}$		200 m .. 100 m		
	Überhöhung	$u = 105 \text{ mm}$ $u = u_{max}(R_{min})$		150 mm .. 50 mm	R RTE 22546	voller Wankeinfluss
	Senke	$l_{Senke} = 2a^+$		6 m		Senke als Dreieck mit halber Stützweite l_{Senke}
	Prüfverwindung primär	g^+ : netzspezifisch	6.0 ‰	6.7 ‰	RhB 20879D	
	Prüfverwindung sekundär	g^+ : netzspezifisch	3.0 ‰	3.3 ‰	R RTE 22546	
	Radlastdifferenz	$\Delta q_0 = 5 \%$			AB-EBV AB 47.1	maximal zulässiger Wert
	Fahrgeschwindigkeit	$v = 1 \text{ m/s}$				Schrittgeschwindigkeit
	Reibwert Spurkranzflanke	$\mu_F = 0.32$		0.32	SN EN 14363:2016	reduzierter Wert nach Norm
	Reibwert Lauffläche	$\mu_T = 0.32$		0.32	SN EN 14363:2016	reduzierter Wert nach Norm
lim	Direkter Grenzwert 1	$\frac{Y}{Q} < \frac{Y}{Q}_{lim} = \frac{\tan \beta_F - \mu_F}{1 + \mu_F \cdot \tan \beta_F}$	0.91 .. 1.55	1.2 ($\beta_F > 68^\circ$)	$\mu_F = 0.32$ $\beta_F = 60^\circ \dots 70^\circ \dots 75^\circ$	Entgleisungs-Koeffizient ²
	Indirekter Grenzwert 2	$\Delta z_R < \Delta z_{R,lim} = 5 \text{ mm}$		-	bei Überschreitung von Grenzwert 1	Radaufklettern ³
	Weiterer Grenzwert 3	$\Delta Q / \bar{Q}_0$		-	nur Beobachtung	Relative Radentlastung

Im Gegensatz zu Methode 1 werden hier der volle Wankeinfluss und ein reduzierter Reibwert spezifiziert.

3.2 Zahnradbahnen (SgE-Z)

Der rechnerische Nachweis (Simulation) der Sicherheit gegen Entgleisen (bisher „Längsstabilität“ und „Entgleisungssicherheit“) ist in Anlehnung an die Vorgaben in den AB-EBV AB 54.1 zu führen.

Bei Zahnradbahnen wird als ungünstigster Zustand eine **Doppelbremsung** im **Bogen** bei **Talfahrt** und **Seitenwind** betrachtet; dies entspricht einer **Entlastung des bergseitigen bogenäusseren Rades** (je Fahrwerk) durch Brems-, Trägheits-, Kupplungs-, Seitenwind- und Zahnauftriebskräfte sowie der Gleisverwindung (Überhöhungsänderung + Helix ⁵).

Der Nachweis ist nach der Methode 2 (siehe 3.2.2) zu erbringen. Diese Methode basiert auf der quasi-statischen Methode nach Borgeaud, ist aber dem aktuellen Stand der Technik angepasst.

Ist eine Spurkranzschmierung wirksam, darf mit definiert günstigen Reibverhältnissen gemäss AB-EBV AB 54.1 Ziffer 3.4 gerechnet werden.

3.2.1 Methode nach Borgeaud (quasistatisches, zustandsstarrs ⁶ Berechnungsprogramm)

Das bisherige Verfahren nach Borgeaud ist nicht mehr Stand der Technik.

Die auf dieses Verfahren zugeschnitten Grenzwerte S_Q (Sicherheitsfaktor der Längsstabilität) und S_R (Sicherheitsfaktor der Entgleisungssicherheit) werden durch heute übliche Grenzkriterien ersetzt. Entsprechend wird der Kommentar 8 zu den AB-EBV nicht mehr benötigt.

Bei Änderungen an historischen Fahrzeugen, die sich im Betrieb unauffällig hinsichtlich Stand- und Entgleisungssicherheit gezeigt haben, wird die Methode nach Borgeaud weiterhin als Ausnahme zugelassen, da sich so vergleichen lässt, wie sich die Änderungen im Einsatz oder an Komponenten auf die Stand- und Entgleisungssicherheit auswirken.

Dabei ist zu fordern, dass die Sicherheitswerte nicht schlechter werden, als in der Ursprungsversion des Fahrzeugs, da die Wirkung der Helixverwindung nicht beachtet wurde.

⁵ Helixverwindung: Verwindung aus Gleisneigung N , Bogenradius R und Stützweite s_w

⁶ Zustandsbetrachtung ohne Verrückungen und Verformungen

3.2.2 Methode 2 (quasistatisches, simulatorisches Verfahren)

Der Nachweis erfolgt unmittelbar aus den Gleiskräften (Y, Q) in einer betriebsnah trassierten Bogenfahrt.

Der Bremsvorgang wird als quasistatisch betrachtet. Nicht-quasistatische Effekte bei der Fahrt durch den verwundenen Übergangsbogen sollen aber beobachtet und bewertet werden.

Die Untersuchungen sind mit serienmässigen Radprofilen und den netzspezifischen Schienenprofilen (jeweils Nominalzustand) sowie mit den nominalen Einbauszuständen (Spurweite, Schieneneinbauneigung) durchzuführen.

Weitere Bau- und Fertigungstoleranzen, Verschleiss und Witterung werden nicht berücksichtigt.

Das Fahrzeug gilt dabei als sicher, wenn der direkte Grenzwert für die relative Radentlastung $\Delta Q/\bar{Q}_0$ eingehalten wird.

Wird dieser überschritten, so sind alle indirekten Grenzwerte (relative Radentlastung $\Delta Q/\bar{Q}_0|_{red}$, Entgleisungs-Koeffizienten Y/Q und Radaufklettern Δz_R) zwingend einzuhalten.

3.2.2.1 Angepasste Prüfbedingungen und Grenzwerte

Parameter	Definition	Übliche Werte	Bedingung	Bemerkung	
Prüfbedingungen SgE-Z	Bogenradius	R : streckenspezifisch	≥ 60 m	AB-EBV AB 17, 5.2 R RTE 22546, 7.2	ungünstigste Situation der Betriebsstrecke (Kombination $R u N$)
	Überhöhung	u : streckenspezifisch	≤ 35 mm (M) ≤ 50 mm (N)	AB-EBV AB 17, 3.4 R RTE 22546, 5.5	
	Gleisneigung	N : streckenspezifisch	≤ 250 ‰	AB-EBV AB 17, 7.2 R RTE 22546, 9.2	
	Überhöhungsverwindung	g_U : streckenspezifisch	≤ 2.5 (3.0) ‰	AB-EBV AB 17, 4.2 R RTE 22546, 6.2	
	Gleislagefehler	$\Delta g^+ = 0$ ‰			keine Doppelfehler: Gleislage + Doppelbremsung
	Radlastdifferenz	$\Delta q_0 \approx 0$ ‰	≤ 5 ‰	AB-EBV AB 47.1, 2.2	maximal zulässiger Wert ⁷
	Fahrgeschwindigkeit	$v = 1$ m/s $v = v_{max} + 10$ ‰			Schrittgeschwindigkeit
			≤ 40 km/h	AB-EBV AB 76.1.a, 9f	gemäss Geschwindigkeitsreihe
	Windgeschwindigkeit	$v_w = 50$ km/h oder streckenspezifisch		AB-EBV AB 54.1, 5.3 DB Ril 807.0439	nach örtlicher Bedingung Seitenwind 90°
	Reibwert Spurkranzflanke	$\mu_F = 0.15$ (ungeschmiert: 0.30)		AB-EBV AB 54.1, 3.4	Dokumentation Spurkranzschmierung
	Reibwert Lauffläche	$\mu_T = 0.30$		AB-EBV AB 54.1, 3.4	
	Reibwert Zahnstange	$\mu_Z = 0.15$		AB-EBV AB 54.1, 3.4	(Aufteilung nach Borgeaud)
	Bremskraft	aus Bremsrechnung		AB-EBV AB 54.2, 2.2	Zuschlag 15% (Streuung)
Fahrzeug-Zustand	Tara (evtl. Brutto) Nom. Feder Luftfeder		gemäss Betrieb	keine Doppelfehler: Notfeder + Doppelbremsung	
lim	Sicherheitsfaktor der Längsstabilität	S_Q	(1.3 .. 1.4)		entfällt gemäss 3.2.1
	Sicherheitsfaktor der Entgleisungssicherheit	S_R	(1.2 .. 1.25)		entfällt gemäss 3.2.1
	Direkter Grenzwert 1	$\left \frac{\Delta Q}{Q_0} \right < \left \frac{\Delta Q}{Q_0} \right _{lim} = 80$ ‰			Relative Radentlastung (Standssicherheit)
	Indirekter Grenzwert 1	$\left \frac{\Delta Q}{Q_0} \right < \left \frac{\Delta Q}{Q_0} \right _{lim,red} = 95$ ‰ ⁷		bei Überschreitung von dir. Grenzwert 1 $\mu_F = 0.15$ $\beta_F = 60^\circ \dots 70^\circ \dots 75^\circ$	
	Indirekter Grenzwert 2	$\frac{Y}{Q} < \frac{Y}{Q}_{lim} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\tan \beta_F - \mu_F}{1 + \mu_F \tan \beta_F}$	0.84 .. 1.53		Entgleisungs-Koeffizient ⁸ (Sicherheit gegen Entgleisen)
Indirekter Grenzwert 3	$\Delta z_R < \Delta z_{R,lim} = 5$ mm		Radaufklettern ³ (Sicherheit gegen Entgleisen)		

⁷ Symmetrisch modellierte Fahrzeuge mit realen Radlast-Differenzen $\Delta q_0 \leq 5$ ‰

⁸ Formel nach NADAL, im Vollbogen 1/3 reduziert gegenüber Übergangsbogen, analog SN EN 14363

Als zusätzliche Sicherheitsreserve⁹ sind Berechnungen mit **20 .. 25 % erhöhten Zahnstangen-Reibwerten** durchzuführen. In diesem Fall muss der um eine Bogeneinfahrt erweiterte Prüfabschnitt ohne tatsächliche Entgleisung (Aufklettern über Spurrkranzhöhe) durchfahren werden – die Grenzwerte können dabei überschritten werden.

- $\mu_z = 0.15 \cdot 120 \% = 0.18$ Geschwindigkeitsreihe 2¹⁰ (~ Loks, lokbespannte Züge)
- $\mu_z = 0.15 \cdot 125 \% = 0.1875$ Geschwindigkeitsreihe 3¹⁰ (~ Triebzüge, -wagen)

3.2.2.2 Simulations-Prozess

Das Szenario beginnt im

- statischen Grundzustand ($R = u = N = v = a = v_w = F_{T|B} = 0$).

Es werden sukzessive folgende Zustandsänderungen überlagert:

- Einstellung des quasistatischen Bremszustands (a aus $m_{trans|rot}$, w , $F_{T|B}$ und N)
- Talfahrt mit der Gleisneigung N
- Bogeneinfahrt mit der Überhöhungsverwindung g_U
- Vollbogen mit dem Radius R (Helixverwindung $g_H \approx \frac{-N}{1+N^2} \frac{s_w}{R}$) und der Überhöhung u
- Aufbringen des Seitenwindes mit der Geschwindigkeit v_w

3.2.3 Anerkennung einer Berechnungsmethode

Um eine Berechnungsmethode beim BAV anerkennen zu lassen, ist ein Benchmark-Modell zu erstellen. Es ist zu zeigen, dass mit vorgegebenen Parametern die Referenz-Ergebnisse erzielt werden.

3.2.3.1 Abzubildende Topologie und Effekte

Simulations-Modell und Fahrsimulation müssen folgende Topologie und Effekte abbilden:

- Steifigkeiten und Elastizitäten von Fahrwerk und Wagenkasten
- Spurführung (Rad-Schiene-Kontakt gemäss Stand der Technik)
- Zahneingriff (Zahnrad-Zahnstange-Kontakt)
- Aufteilung Zahnreibwerte quer / vertikal (quasistatisch nach Borgeaud)
- Antriebsreaktionen (Aufhängungsgeometrie, rotierende Massen, quasistatischer Bremszustand)
- Kupplungskräfte im Zugverband
- Seitenwindkräfte (Standicherheit)
- Helixverwindung

⁹ Analog zum bisherigen Sicherheitszuschlag von 5 bis 25 % (AB-EBV AB 54.1)

¹⁰ Definition gemäss AB-EBV AB 76.1.a Ziffern 9f

3.2.3.2 Benchmark-Modell und 4 Modellfälle (Szenarien)

Als Benchmark-Modell ist eine 4-achsige Zahnrad-Lok He 4/4 zu betrachten. Sie weist folgende Eigenschaften auf: unterschiedliche Wagenkasten-Überhänge, asymmetrische Drehgestellen (Radstand, Masse, Primärfeder-Steifigkeit), Losräder, reine Zahnrad-Tatzlager-Antriebe und asymmetrischer Bremsverteilung.

Es sollen 4 Modellfälle (Szenarien) berechnet werden:

- Solo nur Lok, kein Seitenwind
- Solo (+Wind) zusätzlich Seitenwind
- Komposition (+TB ungebremst) Lok + Vorstell-Lok bergseitig
- Komposition (+TB gebremst, +Wind) zusätzlich Vorstell-Lok gebremst und Seitenwind

Die entsprechenden Parameter-Sets sind in Anhang 6.2.1 aufgeführt:

- Basis-Modell Hauptgeometrie, Primär- und Sekundärstufe, Masse sowie Rad-Schiene-Kontakt
- Getriebe Getriebedaten und Zahnrad-Zahnstange-Kontakt
- Szenarien Zug-Geometrie, -Masse, Traktion/Bremse, Fahrt + Strecke sowie Seitenwind

Ferner sind in Anhang 6.2.2 die Referenz-Ergebnisse dargestellt:

- stat. Radaufstandskraft Q_0
- quasistat. Zahn-Querreibkoeffizient $\bar{\mu}_{z,y,qst}$
- quasistat. Zahn-Vertikalreibkoeffizient $\bar{\mu}_{z,z,qst}$
- quasistat. Zahn-Längskraft $Z_{x,qst}$
- quasistat. Zahn-Querkraft $Z_{y,qst}$
- quasistat. Zahn-Vertikalkraft $Z_{z,qst}$
- quasistat. Rad-Längskraft $T_{x,qst}$
- quasistat. Radführungskraft Y_{qst}
- quasistat. Radaufstandskraft Q_{qst}
- quasistat. Entgleisungsquotient $Y/Q|_{qst}$
- quasistat. relative Radentlastung $\Delta Q/\bar{Q}_0|_{qst}$
- quasistat. Radaufklettern $\Delta z_{R,qst}$

Die Referenz-Ergebnisse sind mit einer Toleranz von $\pm 2\%$ für die Grössen Q_0 , $\bar{\mu}_{z,y,qst}$ und $\bar{\mu}_{z,z,qst}$ sowie von $\pm 5\%$ für alle weiteren quasistatischen Grössen (Endzustand des Szenarios) zu erreichen.

4 Standsicherheit bei Seitenwind

Müssen bei Adhäsionsbahnen im Betrieb sicherheitsrelevante Seitenwindverhältnisse erwartet werden, so ist für das zuzulassende Fahrzeug ein rechnerischer Nachweis (Simulation) der Standsicherheit bei Seitenwind erforderlich (z.B. in Anlehnung an DB Ril 807.04).

Hieraus ist für den Bahnbetreiber eine Grenzwindgeschwindigkeit abzuleiten, bis zu der ein sicherer Bahnbetrieb gewährleistet ist.

Für Zahnradbahnen ist die Untersuchung des Seitenwind-Einflusses ein wesentlicher Anteil des Nachweises der Sicherheit gegen Entgleisen (SgE-Z) gemäss Kapitel 3.2.

5 Literatur

Begriff	Erläuterung
Borgeaud, Dr. Gaston (SLM Winterthur)	„Stand- und Entgleisungssicherheit bei Bergbahnen“ Schweizer Bauzeitung Jg. 96, Hefte 27/28, 30/31, 32, 35 und 37, 1978
	Ergänzungen und Korrekturen dazu Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 29, 1980
Pribnow, Hans-Hermann (Schindler Waggon Schlieren)	„Zur Entgleisungssicherheit von Zahnradbahn-Fahrzeugen“ Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 1/2, 1983
Tillmetz, Karl (Stadler Bussnang), Braess, Patrick (Braess Consult)	„Die Helixverwindung – ein kritischer Einflussfaktor bei der Trassierung und Auslegung von Bergbahnen“ Schweizer Eisenbahn-Revue, 12/2020
D RTE 29700	„Systemtechnik Zahnradbahnen“ Verband öffentlicher Verkehr (VöV), 31.03.2010
R RTE 22546	„Geometrische Gestaltung der Fahrbahn, Meterspur“ Verband öffentlicher Verkehr (VöV), 15.01.2012
SN EN 14363:2016	„Bahnanwendungen – Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Prüfung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche“ Europäisches Komitee für Normung (CEN), 10.2016
DB Ril 807.04, Module 0439 bzw. 0433	„Richtlinie Aerodynamik / Seitenwind“ Deutsche Bahn AG, 04.2006

6 Anhang

6.1 Abkürzungen und Symbole

Bauteile, Eigennamen

Abkürzung	Beschreibung
AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (BAV)
AL	Achslager
BAV	Bundesamt für Verkehr
DB	Deutsche Bahn AG
EN	Europäische Norm
FW	Fahrwerk
MKS	Mehrkörpersystem
PF	Primärfeder
RS	Radsatz
RTE	Regelwerk Technik Eisenbahn (VöV)
SF	Sekundärfeder
SgE-A	Sicherheit gegen Entgleisen von Adhäsionsbahnen
SgE-Z	Sicherheit gegen Entgleisen von Zahnradbahnen
SLM	Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik, Winterthur
SN	Schweizer Norm
SOK	Schienen-Oberkante
TB	Zugteil, bergseitig
TT	Zugteil, talseitig
VöV	Verband öffentlicher Verkehr
WK	Wagenkasten
ZOK	Zahnstangen-Oberkante

Indizes, Geometrien, Steifigkeiten, Kräfte, Momente, Faktoren und sonstige Größen

Symbol	Einheit	Beschreibung
\ddot{x}_0^0		ungefedert auf Gleisebene
\ddot{x}_0^+		primär gefedert auf Fahrwerkebene
\ddot{x}_0^*		sekundär gefedert auf Wagenkastenebene
\ddot{x}_0		Anfangszustand, in Ruhe
$2a^+$	[m]	Radstand, primär
$2a^*$	[m]	Drehzapfenabstand FW-Gesamtabstand, sekundär/bis Gelenk
$2b^+$	[m]	Feder-Querbasis, primär
$2b^*$	[m]	Feder-Querbasis, sekundär
a	[m/s ²]	Beschleunigung
a_1^+, a_2^+	[m]	Radstand (Asymmetrie), pro RS, primär
a_{K1}, a_{K2}	[m]	Kupplungs-Länge, Gelenk bis Puffer/Kupplung
a_{L1}, a_{L2}	[m]	WK-Lücke (Asymmetrie), Puffer/Wagenübergang vorne hinten
a_q	[m/s ²]	Querbeschleunigung
b_w	[m]	Spurweite
c_t	[Nm/rad]	Torsionssteifigkeit
c_{tS}^+	[Nm/rad]	Torsionssteifigkeit, Fahrwerkrahmen-Struktur, um y
c_{tS}^*	[Nm/rad]	Torsionssteifigkeit, Wagenkasten-Struktur, um x
$c_{x,AL}^+$	[N/m]	Federsteifigkeit, pro AL, primär längs
$c_{x,SF}^*$	[N/m]	Federsteifigkeit, pro FW-Seite, sekundär längs
$c_{y,AL}^+$	[N/m]	Federsteifigkeit, pro AL, primär quer
$c_{y,SF}^*$	[N/m]	Federsteifigkeit, pro FW-Seite, sekundär quer
$c_{z,AL}^+$	[N/m]	Federsteifigkeit, pro AL, primär vertikal

Symbol	Einheit	Beschreibung
$c_{z,SF}^*$	[N/m]	Federsteifigkeit, pro FW-Seite, sekundär vertikal
D_n	[m]	Rad-Durchmesser, nominell
d_n	[m]	(Normal-) Teilkreis-Durchmesser
$d_{f,e}$	[m]	Fusskreis-Durchmesser, effektiv
$d_{k,e}$	[m]	Kopfkreis-Durchmesser, effektiv
$F_{T B}$	[N]	Traktions- Brems-Kraft
g	[-] [%]	Trassierung: Verwindung
g_H	[-] [%]	Helixverwindung
g_U	[-] [%]	Überhöhungsverwindung (aus Überhöhungsänderung)
g^0	[-] [%]	(Gesamte) Gleisverwindung
g^+	[-] [%]	(Prüf-) Verwindung, primär (Drehgestell)
Δg^+	[-] [%]	(Prüf-) Verwindung, primär (Senke)
g^*	[-] [%]	(Prüf-) Verwindung, sekundär (Wagenkasten)
h	[m]	WK-Höhe, von SOK bis Dachscheitel
$h_{f,e}$	[m]	Fusslinien-Höhe über SOK, effektiv
$h_{k,e}$	[m]	Kopflinien-Höhe über SOK, effektiv
h_n	[m]	Teillinien-Höhe über SOK, normal
J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}	[kgm ²]	Massenträgheit um x, y, z
k_{R1}, k_{R2}	[-]	Radsatz-Typ (Asymmetrie), Losräder (0; 1)
l	[m]	WK-Länge, ohne Puffer/Wagenübergänge
l_U	[m]	Trassierung: Länge der Überhöhungsrampe
m	[kg]	Masse
m_1^0, m_2^0	[kg]	Masse, ungefedert (Asymmetrie), pro RS
m^+	[kg]	Gesamt-Masse, primär gefedert, pro FW
m^*	[kg]	Gesamt-Masse, sekundär gefedert, pro FW
m_{rot}	[kg]	Masse, rot. (rotierende Masse, reduziert auf d_n bzw. D_n)
m_{trans}	[kg]	Masse, trans. (translatorische Masse, Gewicht)
N	[-] [%]	Trassierung: Gleisneigung
n_{FW}	[-]	Anzahl Fahrwerke, pro WK
n_L	[-]	Anzahl Zahnstangen-Lamellen
n_{RS}	[-]	Anzahl Radsätze, pro FW
n_Z	[-]	Anzahl Zähne, pro Zahnrad (Zähnezahl)
p	[m]	Zahnteilung
Q	[N]	Radaufstandskraft
Q_0	[N]	statische Radaufstandskraft
\bar{Q}_0	[N]	mittlere statische Radaufstandskraft des Radsatzes
$\Delta Q / \bar{Q}_0$	[-] [%]	Relative Radentlastung
Δq_0	[-] [%]	statische Radlast, relativ (Schieflast)
R	[m]	Trassierung: Bogenradius, auf Grund projiziert
RP	[-]	Schienenprofil
S	[m]	Messkreis-Abstand, Radsatz
S_m	[m]	Spurmass
S_Q	[-]	Sicherheitsfaktor der Längsstabilität
S_R	[-]	Sicherheitsfaktor der Entgleisungssicherheit
s_w	[m]	(Rad-Schiene-) Stützweite
T_x	[N]	Radlängskraft
u	[m]	Trassierung: Überhöhung
\ddot{u}_1, \ddot{u}_2	[m]	Wagen-Überhang, FW-Mitte bis Puffer/Kupplung/Gelenk
v	[m/s] [km/h]	Geschwindigkeit
v_W	[m/s] [km/h]	Windgeschwindigkeit
w	[-] [%]	Fahrwiderstand
WP	[-]	Radprofil
x	[m]	Position in x (längs)
x^+	[m]	Position in x (längs), Primärfeder

Symbol	Einheit	Beschreibung
x^*	[m]	Position in x (längs), Sekundärfeder
y	[m]	Position in y (quer)
y^+	[m]	Position in y (quer), Primärfeder
y^*	[m]	Position in y (quer), Sekundärfeder
Y	[N]	Radführungskraft
Y/Q	[-]	Entgleisungs-Quotient
z	[m]	Position in z (vertikal)
z^+	[m]	Position in z (vertikal), Primärfeder
z^*	[m]	Position in z (vertikal), Sekundärfeder
z_{K1}, z_{K2}	[m]	Kupplungs-Höhe
Δz_R	[m]	Radaufklettern
z_S	[m], [m ü. M.]	Trassierung: Geographische Höhe des Streckenpunktes
Z_x	[N]	Zahn-Längskraft (Antrieb/Bremse)
Z_y	[N]	Zahn-Querkraft (Führung durch Reibung)
Z_z	[N]	Zahn-Vertikalkraft (Auftrieb durch Zahneingriff und Reibung)
α	[rad]	Radanlaufwinkel
α_n	[rad]	Normal-Eingriffswinkel (Zahnflanken-Neigung)
β_F	[rad]	Spurkranzflankenwinkel
μ_F	[-]	Reibwert der Spurkranzflanke
μ_T	[-]	Reibwert der Lauffläche
μ_Z	[-]	Reibwert des Zahnkontaktes
$\bar{\mu}_{Z,y}$	[-]	Zahn-Quer-Reibwert, über eine Zahnteilung p gemittelt (mit Richtungs-Vorzeichen)
$\bar{\mu}_{Z,z}$	[-]	Zahn-Vertikal-Reibwert, über eine Zahnteilung p gemittelt
ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte (aus z_S)

6.2 Benchmark-Modell und 4 Modellfälle (Szenarien)

6.2.1 Parameter-Sets

Basis-Modell



Beschreibung	Bemerkung	Zeichen	Einheit	Tal Berg	
				He 4/4	
				1	
				DG	DG
				2	1

Hauptgeometrie

Raddurchmesser	nom.	D_n	[m]	0.790	0.790
Radstand	pro RS, prim.	a_1^+	[m]	1.120	1.120
		a_2^+	[m]	1.520	1.520
Drehzapfenabstand	sek./bis Gelenk	$2a^*$	[m]	5.430	
Wagenkasten	Länge, ohne Puffer/Wagenübergänge	l	[m]	11.000	
	Lücke, Puffer/Wagenübergang	a_{L1}	[m]	0.765	
		a_{L2}	[m]	0.765	
	Höhe, von SOK bis Dachscheitel	h	[m]	3.450	
Radsatz-Typ	Losräder (0,1)	k_{R1}	[-]	1	1
		k_{R2}	[-]	1	1

Primär

Anzahl Radsätze	pro FW	n_{RS}	[-]	2	2
Feder	Längsposition (ref. RS)	x^+	[m]	0.000	0.000
	Querbasis	$2b^+$	[m]	1.500	1.500
	Höhe	z^+	[m]	0.632	0.632
Federsteifigkeit	pro AL, prim., längs	$c_{x,AL}^+$	[N/mm]	7'000	7'000
	pro AL, prim., quer	$c_{y,AL}^+$	[N/mm]	3'500	3'500
	pro AL, prim., vertikal	$c_{z,AL1}^+$	[N/mm]	1'382	1'382
		$c_{z,AL2}^+$	[N/mm]	1'018	1'018
Fahrwerkrahmen	Torsionssteifigkeit	c_{LS}^+	[N/mm]	2'000	2'000

Sekundär

Anzahl Fahrwerke	pro WK	n_{FW}	[-]	2	
Längsmitnahme	Längsposition, Fahrwerk	$x_{LM,FW}^*$	[m]	-0.400	-0.400
	Längsposition, Wagenkasten	$x_{LM,WK}^*$	[m]	-0.900	-0.900
	Querbasis (Ausdreh-Kinematik)	$2b_{LM}^*$	[m]	0.000	0.000
	Höhe, Fahrwerk	$z_{LM,FW}^*$	[m]	0.305	0.305
	Höhe, Wagenkasten	$z_{LM,WK}^*$	[m]	0.305	0.305
Längsmitnahme-Steifigkeit	pro FW, sek., längs	$c_{x,LM}^*$	[N/mm]	10'000	10'000
Feder	Längsposition	x^*	[m]	0.000	0.000
	Querbasis	$2b^*$	[m]	1.500	1.500
	Höhe	z^*	[m]	0.768	0.768
Federsteifigkeit	pro FW-Seite, sek., längs	$c_{x,SF}^*$	[N/mm]	200	200
	pro FW-Seite, sek., quer	$c_{y,SF}^*$	[N/mm]	400	400
	pro FW-Seite, sek., vertikal	$c_{z,SF}^*$	[N/mm]	4'800	4'800
Wagenkasten	Torsionssteifigkeit	c_{tS}^*	[N/mm]	10'000	

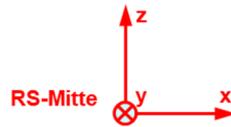
Masse

Masse	FW: ungefedert, pro RS, prim.	$m_{FW,1}^0$	[kg]	2'170	2'170
		$m_{FW,2}^0$	[kg]	2'170	2'170
	FW: primär gefedert pro FW	m_{FW}^+	[kg]	3'141	3'141
	FW: sekundär gefedert pro FW	m_{FW}^+	[kg]	0	0
	WK: sekundär gefedert pro WK	m_{WK}^+	[kg]	17'040	
Schwerpunkt	FW: ungefedert pro FW	$x_{SP,FW}^0$	[m]	-0.200	-0.200
		$y_{SP,FW}^0$	[m]	0.000	0.000
		$z_{SP,FW}^0$	[m]	0.395	0.395
	FW: primär gefedert pro FW	$x_{SP,FW}^+$	[m]	-0.199	-0.199
		$y_{SP,FW}^+$	[m]	0.005	0.005
		$z_{SP,FW}^+$	[m]	0.501	0.501
	FW: sekundär gefedert pro FW	$x_{SP,FW}^+$	[m]	0.000	0.000
		$y_{SP,FW}^+$	[m]	0.000	0.000
		$z_{SP,FW}^+$	[m]	0.711	0.711
	WK: sekundär gefedert pro WK	$x_{SP,WK}^+$	[m]	0.059	
		$y_{SP,WK}^+$	[m]	0.016	
		$z_{SP,WK}^+$	[m]	1.492	

Rad-Schiene-Kontakt

Schiene	Profil	RP	[-]	EN 13674 46E1	
	Einbauneigung	$1: i$	[-]	20	
	Stützweite	s_w	[mm]	1064.0	
	Spurweite	b_w	[mm]	1000.0	
Rad	Profil	WP	[-]	RTE 29500 Typ A h28 e27	
	Messkreis-Abstand	S	[mm]	1050.0	
	Spurmass	S_m	[mm]	990.0	
Reibwert	Lauffläche	μ_T	[-]	0.300	
	Spurkranzflanke	μ_F	[-]	0.150	

Getriebe



Beschreibung	Bemerkung	Zeichen	Einheit	Tal		Berg	
				He 4/4			
				1			
				DG		DG	
				2		1	

Zahnrad-Zahnstange-Kontakt

Zahnstange	Lamellenzahl	n_L	[-]	1			
	Zahnteilung	p	[mm]	100			
	Normal-Eingriffswinkel (Zahnflanken-Neigung)	α_n	[rad]	0.245			
	Teillinien-Höhe über SOK	h_n	[mm]	66.500			
	Kopflinien-Höhe über SOK, effektiv	$h_{k,e}$	[mm]	86.000			
	Fusslinien-Höhe über SOK, effektiv	$h_{f,e}$	[mm]	47.000			
Reibwert	Zahnrad-Zahnstange	μ_Z	[-]	0.150			

Getriebe

G-Gehäuse (Tatzlager)	Drehmomentenstütze	Masse	m	[kg]	961.7	961.7	961.7	961.7
		Koppelpunkt Fahrwerk	x	[mm]	1154	-1154	1154	-1154
			y	[mm]	0	0	0	0
			z	[mm]	273	273	273	273
	Koppelpunkt Getriebe	x	[mm]	1154	-1154	1154	-1154	
		y	[mm]	0	0	0	0	
		z	[mm]	73	73	73	73	
	Motor	Stator	Masse	m	[kg]	386.7	386.7	386.7
Rotor	Masse	m	[kg]	193.3	193.3	193.3	193.3	
	Massenträgheit	J_{yy}	[kgm ²]	1.750	1.750	1.750	1.750	
	Koppelpunkt	x	[mm]	834	-834	834	-834	
		y	[mm]	256	-256	256	-256	
		z	[mm]	0	0	0	0	
Welle 0	Masse	m	[kg]	113.7	113.7	113.7	113.7	
	Massenträgheit	J_{yy}	[kgm ²]	2.502	2.502	2.502	2.502	
Zahnrad 1	Koppelpunkt	x	[mm]	834	-834	834	-834	
		y	[mm]	-303	303	-303	303	
		z	[mm]	0	0	0	0	
	Zähnezahl	n_Z	[-]	21	21	21	21	
Welle 1	Masse	m	[kg]	24.2	24.2	24.2	24.2	
	Massenträgheit	J_{yy}	[kgm ²]	0.163	0.163	0.163	0.163	
Zahnrad 2	Koppelpunkt	x	[mm]	647.277	-647.277	647.277	-647.277	
		y	[mm]	-303	303	-303	303	
		z	[mm]	-21.872	-21.872	-21.872	-21.872	
	Zähnezahl	n_Z	[-]	50	50	50	50	
Welle 2	Masse	m	[kg]	56.7	56.7	56.7	56.7	
	Massenträgheit	J_{yy}	[kgm ²]	0.718	0.718	0.718	0.718	
Zahnrad 4	Koppelpunkt	x	[mm]	317	-317	317	-317	
		y	[mm]	-303	303	-303	303	
		z	[mm]	0	0	0	0	
	Zähnezahl	n_Z	[-]	76	76	76	76	
Zahnrad 7 (Z)	Koppelpunkt	x	[mm]	317	-317	317	-317	
		y	[mm]	-210	210	-210	210	

		z	[mm]	0	0	0	0
	Zähnezahl	n_z	[-]	24	24	24	24
Radsatz (Räder)	Masse	m	[kg]	386.8	386.8	386.8	386.8
	Massenträgheit	J_{yy}	[kgm ²]	35.202	35.202	35.202	35.202
Welle 4 (Z)	Masse	m	[kg]	599.1	599.1	599.1	599.1
	Massenträgheit	J_{yy}	[kgm ²]	11.305	11.305	11.305	11.305
Zahnrad 8	Koppelpunkt	x	[mm]	0	0	0	0
		y	[mm]	-210	210	-210	210
		z	[mm]	0	0	0	0
	Zähnezahl	n_z	[-]	100	100	100	100
Tangentialfederung	Torsionssteifigkeit	c_t	[kNm/rad]	473.7	473.7	473.7	473.7
Zahnradwelle	Masse	m	[kg]	85.8	85.8	85.8	85.8
	Massenträgheit	J_{yy}	[kgm ²]	6.705	6.705	6.705	6.705
Zahnrad	Koppelpunkt	x	[mm]	0	0	0	0
		y	[mm]	0	0	0	0
		z	[mm]	0	0	0	0
	Teilkreis-Durchmesser	d_n	[mm]	636.620	636.620	636.620	636.620
	Kopfkreis-Durchmesser, effektiv	$d_{k,e}$	[mm]	696.823	696.823	696.823	696.823
	Fusskreis-Durchmesser, effektiv	$d_{f,e}$	[mm]	617.612	617.612	617.612	617.612
	Zähnezahl	n_z	[-]	20	20	20	20

Szenarien



Beschreibung	Bemerkung	Zeichen	Einheit	Tal		Berg	
				TT	He 4/4		TB
				2	1		1
				DG	DG		
				2	1		

Szenario 1

				Solo			
Fahrzeug-Geometrie	Drehzapfenabstand DG-Gesamtabstand	$2a^*$	[m]	0.000	5.430		0.000
	Wagen-Überhang	\ddot{u}	[m]	0.000	3.750	3.350	0.000
	Kupplungs-Länge	a_K	[m]	0.000	1.000	1.000	0.000
	Kupplungs-Höhe	z_K	[m]	0.000	0.500	0.500	0.000
Fahrzeug-Masse	Masse, trans.	m_{trans}	[kg]	0.0	32'000.0		0.0
	Masse, rot.	m_{rot}	[kg]	0.0	40'536.1		0.0
Traktion/Bremse	Fahrwiderstand	w	[-]	0.000	0.008		0.000
	Rad-Bremskraft, pro RS WK	F_{BR1}	[N]	0	0	0	0
		F_{BR2}	[N]		0	0	
	Motor-Traktionskraft, pro RS WK	F_{TM1}	[N]	0	0	0	0
		F_{TM2}	[N]		0	0	
	Getriebe-Bremskraft, pro RS WK	F_{BG1}	[N]	0	150'000	75'000	0
F_{BG2}		[N]		150'000	150'000		
Fahrt+Strecke	Bogenradius	R	[m]	-80			
	Überhöhung	u	[mm]	-30			
	Gleisneigung	N	[‰]	230			
	Fahrgeschwindigkeit	v	[km/h]	-3.6			
Seitenwind	Windgeschwindigkeit	v_W	[km/h]	0.0			
	Luftdichte	ρ_L	[kg/m³]	0.000			

Szenario 2

				Solo (+Wind)			
Fahrzeug-Geometrie	Drehzapfenabstand DG-Gesamtabstand	$2a^*$	[m]	0.000	5.430		0.000
	Wagen-Überhang	\ddot{u}	[m]	0.000	3.750	3.350	0.000
	Kupplungs-Länge	a_K	[m]	0.000	1.000	1.000	0.000
	Kupplungs-Höhe	z_K	[m]	0.000	0.500	0.500	0.000
Fahrzeug-Masse	Masse, trans.	m_{trans}	[kg]	0.0	32'000.0		0.0
	Masse, rot.	m_{rot}	[kg]	0.0	40'536.1		0.0
Traktion/Bremse	Fahrwiderstand	w	[-]	0.000	0.008		0.000
	Rad-Bremskraft, pro RS WK	F_{BR1}	[N]	0	0	0	0
		F_{BR2}	[N]		0	0	
	Motor-Traktionskraft, pro RS WK	F_{TM1}	[N]	0	0	0	0
		F_{TM2}	[N]		0	0	
	Getriebe-Bremskraft, pro RS WK	F_{BG1}	[N]	0	150'000	75'000	0
F_{BG2}		[N]		150'000	150'000		
Fahrt+Strecke	Bogenradius	R	[m]	-80			
	Überhöhung	u	[mm]	-30			
	Gleisneigung	N	[‰]	230			
	Fahrgeschwindigkeit	v	[km/h]	-3.6			
Seitenwind	Windgeschwindigkeit	v_W	[km/h]	-50.0			
	Luftdichte	ρ_L	[kg/m³]	1.200			

Beschreibung	Bemerkung	Zeichen	Einheit	Tal		Berg		
				TT	He 4/4		TB	
					2	1		
						DG		DG
				2	1	1		

Szenario 3

Komposition (+TB ungebremst)

Fahrzeug-Geometrie	Drehzapfenabstand DG-Gesamtabstand	$2a^*$	[m]	0.000	5.430		5.430
	Wagen-Überhang	\ddot{u}	[m]	0.000	3.750	3.350	3.750
	Kupplungs-Länge	a_K	[m]	0.000	1.000	1.000	1.000
	Kupplungs-Höhe	z_K	[m]	0.000	0.500	0.500	0.500
Fahrzeug-Masse	Masse, trans.	m_{trans}	[kg]	0.0	32'000.0		32'000.0
	Masse, rot.	m_{rot}	[kg]	0.0	40'536.1		40'536.1
Traktion/Bremse	Fahrwiderstand	w	[-]	0.000	0.008		0.008
	Rad-Bremskraft, pro RS WK	F_{BR1}	[N]	0	0	0	0
		F_{BR2}	[N]	0	0	0	0
	Motor-Traktionskraft, pro RS WK	F_{TM1}	[N]	0	0	0	0
		F_{TM2}	[N]	0	0	0	0
	Getriebe-Bremskraft, pro RS WK	F_{BG1}	[N]	0	150'000	75'000	0
F_{BG2}		[N]	0	150'000	150'000	0	
Fahrt+Strecke	Bogenradius	R	[m]	-80			
	Überhöhung	u	[mm]	-30			
	Gleisneigung	N	[‰]	230			
	Fahrgeschwindigkeit	v	[km/h]	-3.6			
Seitenwind	Windgeschwindigkeit	v_W	[km/h]	0.0			
	Luftdichte	ρ_L	[kg/m³]	0.000			

Szenario 4

Komposition (+TB gebremst, +Wind)

Fahrzeug-Geometrie	Drehzapfenabstand DG-Gesamtabstand	$2a^*$	[m]	0.000	5.430		5.430
	Wagen-Überhang	\ddot{u}	[m]	0.000	3.750	3.350	3.750
	Kupplungs-Länge	a_K	[m]	0.000	1.000	1.000	1.000
	Kupplungs-Höhe	z_K	[m]	0.000	0.500	0.500	0.500
Fahrzeug-Masse	Masse, trans.	m_{trans}	[kg]	0.0	32'000.0		32'000.0
	Masse, rot.	m_{rot}	[kg]	0.0	40'536.1		40'536.1
Traktion/Bremse	Fahrwiderstand	w	[-]	0.000	0.008		0.008
	Rad-Bremskraft, pro RS WK	F_{BR1}	[N]	0	0	0	0
		F_{BR2}	[N]	0	0	0	0
	Motor-Traktionskraft, pro RS WK	F_{TM1}	[N]	0	0	0	200'000
		F_{TM2}	[N]	0	0	0	0
	Getriebe-Bremskraft, pro RS WK	F_{BG1}	[N]	0	150'000	75'000	0
F_{BG2}		[N]	0	150'000	150'000	0	
Fahrt+Strecke	Bogenradius	R	[m]	-80			
	Überhöhung	u	[mm]	-30			
	Gleisneigung	N	[‰]	230			
	Fahrgeschwindigkeit	v	[km/h]	-3.6			
Seitenwind	Windgeschwindigkeit	v_W	[km/h]	-50.0			
	Luftdichte	ρ_L	[kg/m³]	1.200			

6.2.2 Referenz-Ergebnisse



Beschreibung	Zeichen	Einheit	Tal				Berg			
			He 4/4							
			DG 2				DG 1			
			RS 2		RS 1		RS 2		RS 1	
l	r	l	r	l	r	l	r			

Szenario 1

Solo

Grundzustand	Q_0	[kN]	36.609	34.749	42.321	41.452	37.385	35.525	43.374	42.505
	$R = u = N = v = a = v_w = F_{T B} = 0$	Δq_0	[%]	-2.6%		-1.0%		-2.6%		-1.0%
Zahnstangen-Kontakt	$\bar{\mu}_{z,y,qst}$	[-]	-0.050		0.035		-0.050		0.035	
	$\bar{\mu}_{z,z,qst}$	[-]	0.070		0.073		0.076		0.068	
Zahnstangenkraft	$Z_{x,qst}$	[kN]	87.774		87.758		87.771		12.507	
	$Z_{y,qst}$	[kN]	-4.367		3.042		-4.349		0.435	
	$Z_{z,qst}$	[kN]	28.611		28.895		29.128		4.046	
Fahrwegbeanspruchung	$T_{x,qst}$	[kN]	-0.548	-0.152	-0.451	-0.607	-0.585	-0.485	-0.442	-0.685
	Y_{qst}	[kN]	-9.298	17.060	-16.461	9.254	-7.365	6.858	-1.577	1.676
	Q_{qst}	[kN]	26.164	46.919	25.957	26.044	20.763	19.848	44.421	5.170
Sicherheit gegen Entgleisen	$Y/Q _{qst}$	[-]	-0.355	0.364	-0.634	0.355	-0.355	0.346	-0.035	0.324
	$\Delta Q/\bar{Q}_0 _{qst}$	[-]	-0.267	0.315	-0.380	-0.378	-0.430	-0.456	0.034	-0.880
	$\Delta z_{R,qst}$	[mm]	-0.281	0.281	0.318	-0.282	-0.274	0.304	0.294	-0.252

Szenario 2

Solo (+Wind)

Grundzustand	Q_0	[kN]	36.609	34.749	42.321	41.452	37.385	35.525	43.374	42.505
	$R = u = N = v = a = v_w = F_{T B} = 0$	Δq_0	[%]	-2.6%		-1.0%		-2.6%		-1.0%
Zahnstangen-Kontakt	$\bar{\mu}_{z,y,qst}$	[-]	-0.050		0.035		-0.050		0.035	
	$\bar{\mu}_{z,z,qst}$	[-]	0.070		0.073		0.076		0.068	
Zahnstangenkraft	$Z_{x,qst}$	[kN]	87.775		87.759		87.773		12.507	
	$Z_{y,qst}$	[kN]	-4.367		3.042		-4.350		0.435	
	$Z_{z,qst}$	[kN]	28.612		28.895		29.125		4.047	
Fahrwegbeanspruchung	$T_{x,qst}$	[kN]	-0.541	-0.168	-0.438	-0.613	-0.565	-0.509	-0.429	-0.692
	Y_{qst}	[kN]	-9.709	16.462	-17.118	8.694	-8.617	7.173	-2.179	1.047
	Q_{qst}	[kN]	27.313	45.732	27.461	24.480	24.261	16.320	45.949	3.649
Sicherheit gegen Entgleisen	$Y/Q _{qst}$	[-]	-0.355	0.360	-0.623	0.355	-0.355	0.440	-0.047	0.287
	$\Delta Q/\bar{Q}_0 _{qst}$	[-]	-0.234	0.282	-0.344	-0.416	-0.335	-0.552	0.070	-0.915
	$\Delta z_{R,qst}$	[mm]	-0.282	0.282	0.316	-0.280	-0.277	0.308	0.293	-0.249

Beschreibung	Zeichen	Einheit	Tal				Berg			
			He 4/4							
			DG 2				DG 1			
			RS 2		RS 1		RS 2		RS 1	
l	r	l	r	l	r	l	r			

Szenario 3

Komposition (+TB ungebremst)

Grundzustand	Q_0	[kN]	36.609	34.749	42.321	41.452	37.385	35.525	43.374	42.505
	Δq_0	[%]	-2.6%		-1.0%		-2.6%		-1.0%	
Zahnstangen-Kontakt	$\bar{\mu}_{z,y,qst}$	[-]	-0.050		0.035		-0.043		0.043	
	$\bar{\mu}_{z,z,qst}$	[-]	0.071		0.073		0.076		0.070	
Zahnstangenkraft	$Z_{x,qst}$	[kN]	123.701		123.685		123.689		48.489	
	$Z_{y,qst}$	[kN]	-6.153		4.288		-5.278		2.072	
	$Z_{z,qst}$	[kN]	40.378		40.706		41.141		15.770	
Fahrwegbeanspruchung	$T_{x,qst}$	[kN]	-0.148	0.169	-0.077	-0.248	-0.248	-0.035	-0.185	-0.175
	Y_{qst}	[kN]	-9.133	14.652	-17.846	4.968	-4.286	17.311	5.463	9.957
	Q_{qst}	[kN]	25.629	40.282	19.222	13.963	12.055	22.555	22.103	9.330
Sicherheit gegen Entgleisen	$Y/Q _{qst}$	[-]	-0.356	0.364	-0.928	0.356	-0.356	0.767	0.247	1.067
	$\Delta Q/\bar{Q}_0 _{qst}$	[-]	-0.282	0.129	-0.541	-0.667	-0.669	-0.381	-0.485	-0.783
	$\Delta z_{R,qst}$	[mm]	-0.280	0.286	0.326	-0.267	-0.265	0.312	-0.269	0.320

Szenario 4

Komposition (+TB gebremst, +Wind)

Grundzustand	Q_0	[kN]	36.609	34.749	42.321	41.452	37.385	35.525	43.374	42.505
	Δq_0	[%]	-2.6%		-1.0%		-2.6%		-1.0%	
Zahnstangen-Kontakt	$\bar{\mu}_{z,y,qst}$	[-]	-0.050		0.035		-0.050		0.035	
	$\bar{\mu}_{z,z,qst}$	[-]	0.071		0.073		0.076		0.068	
Zahnstangenkraft	$Z_{x,qst}$	[kN]	109.787		109.771		109.784		34.665	
	$Z_{y,qst}$	[kN]	-5.461		3.806		-5.439		1.206	
	$Z_{z,qst}$	[kN]	35.819		36.131		36.437		11.217	
Fahrwegbeanspruchung	$T_{x,qst}$	[kN]	-0.297	0.047	-0.215	-0.388	-0.343	-0.208	-0.288	-0.440
	Y_{qst}	[kN]	-9.365	15.967	-17.225	6.291	-6.962	11.922	4.662	1.214
	Q_{qst}	[kN]	26.301	42.309	22.656	17.700	19.573	17.542	34.827	3.677
Sicherheit gegen Entgleisen	$Y/Q _{qst}$	[-]	-0.356	0.377	-0.760	0.355	-0.356	0.680	0.134	0.330
	$\Delta Q/\bar{Q}_0 _{qst}$	[-]	-0.263	0.186	-0.459	-0.577	-0.463	-0.519	-0.189	-0.914
	$\Delta z_{R,qst}$	[mm]	-0.281	0.284	0.322	-0.272	-0.273	0.310	0.299	-0.248