Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Abteilung Sicherheit
Sektion Fahrzeuge

AB-EBV Revisionsrunde 2020

Teilprojekt Bremse Meterspur

Aufarbeitung Grundlagen Bremse

Anhalteweg, Bremsbewertung, Bremstabellen

Dokumentbezeichnung:	Referenz-ID:	Erstellt:	Dokument-Status:	Version:
AB-EBV Revisonsbericht Bremse	AF7A8270-2AB5-4337-8666-51098BCE7439	12.09.2017/sca	freigegeben	3.00
Datei und Ablageort: 2020 AB-EBV Grundlagen Bremse Meterspur V3.00 GEVER (BAV-511.3-10/3/2/8/2/13/2)		Geändert: 25.11.2020/sca Freigabe: 01.12.2020/kid	Klassifizierung: öffentlich Veröffentlichung: 01.12.2020	Seiten: 64 Anlagen: 32

Änderungsverzeichnis

Index	Änderung	Autor	Datum
0.1	Erstausgabe	sca	12.09.2017
0.2	Projektversion, mit Ergänzung Anlage 16	sca	13.09.2017
1.0	Projektversion, ergänzt für externe Unterstützung	kid	18.04.2018
1.1	Korrekturen und Ergänzung, fertig stellen verschiedener Kapitel	sca	24.07.2018
1.2	Ergänzungen in Kapitel 5.5.4 und Anlage A7	sca	27.07.2018
1.21	Anhänge in separate Dokumente überführt	sca	28.08.2018
1.22	Ergänzungen in Kapitel *4.3.3* zur Migrationsvariante II Ergänzungen in Kapitel *5.5.1* zur Festlegung der Effektivverzögerung Ergänzungen in Kapitel *5.5.4* zur thermischen Beanspruchung Ergänzungen in Kapitel *4.3.5* zu den Migrationsmassnahmen	sca sca sca sca	31.08.2018 03.09.2018 10.10.2018 11.10.2018
1.23	Erweiterung mit alternativen Anhaltewegberechnung-Modellen Präzisierungen und allgemeine Überarbeitung	sca	29.03.2019
1.24	Aktuelle Arbeitsversion Anlagenverzeichnis ergänzt Quellenverzeichnis eingeführt Abkürzungsverzeichnis eingeführt Zeichenerklärung eingeführt	sca	05.04.2019
2.00	Alternatives Anhalteweg-Berechnungsmodell, «BAV_OrigV2» mit v-Schritt Verfahren entfernt. Anhaltewegberechnung neu nach dem genaueren Referenzmodell.	sca	16.07.2019
2.01	Überarbeitung Kapitel 3.4: Betrachtungen zum Näherungsverfahren	sca	19.08.2019
2.02	Kapitel 6 und Kapitel 3.2 überarbeitet. Ergänzung mit Anhang A20 Rechnungsgang «AB-EBV 2020»	sca	30.08.2019
2.03	Rückmeldung der DB-Systemtechnik vom 27.09.2019 zur Version «20190820_AB-EBV Grundlagen Bremse Meterspur V2.01_RK» eingearbeitet.	sca	03.10.2019
2.03	Überarbeitung von Kapitel 6.3	sca	15.04.2020
2.04	Überarbeitung verschiedener Kapitel	sca	24.04.2020
2.05	Neuverfassung der Kapitel 6.3. und 6.4	sca	07.05.2020
2.06	Entfernung Kapitel 7 (Projektblatt)	sca	12.05.2020
2.07	Kapitel 6.3.5 eingefügt und ergänzt mit den Anlagen A18.2 bis 18.5	sca	05.06.2020
2.08	Komplettüberarbeitung von Kapitel 6.3, Überarbeitung der Anlage 18.1 und Rückmeldungen DB-Systemtechnik eingebunden	sca	05.08.2020
3.00	Formatierung der finalen Version für die Veröffentlichung	sca	25.11.2020

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 8
1.1 Ausgangslage 8
1.1.1 Massgebende Regelwerke 8
1.1.2 Bremstabellen der AB-EBV 8
1.2 Überarbeitungsbedarf Ausführungsbestimmungen zur EBV (AB-EBV) 9
1.2.1 Übersicht und Ausblick 9
1.2.2 Anhaltewegberechnung 9
1.2.3 Bremsbewertung 9
1.2.4 Bremstabellen 9
1.3 Ziele 10

2 Anhaltewegberechnung nach AB-EBV Stand 2016 10
2.1 Aktuell gültiges Berechnungsmodell «BAV_Orig» 10
2.1.1 Analyse zum Modellansatz 10
2.1.2 Bremsentwicklungszeit 11
2.1.3 Neigungswiderstand 11
2.1.4 Berechnungsgleichung 12
2.2 Berechnungs-Parameter 13
2.2.1 Vorgaben gemäss Kommentar Nr. 7 zur AB-EBV 13
2.2.2 Bremskurven BAV/zf/Mn 1983 13
2.2.3 Bremswegkurven BAV/zf/Mn 1985 14
2.3 Rechnungsgang 15
2.3.1 Geschwindigkeits-Schrittweite 15
2.4 Sicherheitsreserven 16

3 Referenzmodell Anhaltewegberechnung 16
3.1 Allgemein 16
3.2 Nummerische Integration, Verfahren nach Runge-Kutta 4. Ordnung (RK_4) 16
3.3 Anhaltewege Referenzmodell versus Modell «BAV_Orig» 17
3.3.1 Ansatz für den Vergleich 17
3.3.2 Anhaltewege Referenzmodell, für GG in der Ebene 17
3.3.3 Absolutdifferenzen BAV_Orig zu Referenzmodell, für GG in der Ebene 18
3.3.4 Relativdifferenzen Modell BAV_Orig zu Referenzmodell, für GG in der Ebene 18
3.3.5 Absolutdifferenzen BAV_Orig zu Referenzmodell, für GG und 40 ‰ Gefälle 19
3.3.6 Bewertung Anhaltewegberechnungsmodell «BAV_Orig» 21
3.4 Betrachtung des Näherungsverfahrens im Referenzmodell 21
3.4.1 Runge-Kutta Verfahren 2. Ordnung (RK_2) nach der Methode von Heun 21
3.4.2 Anhaltewegvergleich bei verschiedenen Näherungsverfahren 21
3.4.3 Anhaltewegvergleich bei Variation der Schrittweite Δt 22

4 Bremsbewertung 24
4.1 Bremsbewertung Stand AB-EBV 2016 24
4.2 Geschwindigkeitserweiterung Bremsbewertung 25
4.3 Folgen einer Reibwertanpassung auf die Bremsbewertung 25
4.3.1 Grundsätzliches 25
4.3.2 Sicherheitsaspekte und Kalibrierung 26
4.3.3 Konflikt Bestandesfahrzeuge und geänderte Bremsbewertung 26
4.3.4 Bremsbewertung & Anhaltweg bei verschiedenen Reibwertcharakteristiken 29
4.3.5 Bremsbewertungskennlinen mit kombinierter Reibwertcharakteristik 31
4.4 Bewertung der Sicherheitsbremse 32

5 Bremstabellen 33
5.1 Ausgangslage, Handlungsbedarf und Ziele 33
5.2 Zweck und Nutzen von Bremstabellen 33
5.3 Untersuchung & Rekonstruktion Bremstabellen Stand AB-EBV 2016 34
5.3.1 Allgemeines 34
5.3.2 Ziel und Ansatz der Untersuchungen 34
5.3.3 Kriterium Bremsweg 34
5.3.4 Kriterium Effektivverzögerung 34
5.3.5 Kriterium Bremswegsensitivität 35
5.3.6 Vergleich der minimalen Effektivverzögerungen 36
5.3.7 Vergleich der maximale Bremswegsensitivitäten 37
5.4 Abhängigkeit zwischen Effektivverzögerung & Bremswegsensitivität 39
5.4.1 Bremswegsensitivität, Abhängigkeit von Effektivverzögerung für GG-Bremssohlen 39
5.4.2 Bremswegsensitivität, Abhängigkeit von Effektivverzögerung für K-Bremssohlen 40
5.4.3 Herleitung der Ergebnisse betreffend die Betrachtung der Bremswegsensitivität 41
5.4.4 Fazit zum Zusammenhang von Effektivverzögerung und Bremswegsensitivität 42
5.5 Schutzkriterien 42
5.5.1 Minimale erforderliche Effektivverzögerung 42
5.5.2 Maximale zulässige Bremswegsensitivität 43
5.5.3 Bremsverhältnisse für die Erfüllung der kinematischen Schutzkriterien 43
5.5.4 Thermische Beanspruchung 45
5.6 Abgrenzung der Gültigkeit von Bremstabellen 47
5.6.1 Massgebende Neigung 47
5.6.2 Inhomogen verteile Bremskräfte 48
5.6.3 Übertragbarkeit der Methodik auf Normalspurbahnen 48

6 Anhaltewegberechnung, Bremsbewertung und Bremstabelle S2020 48
6.1 Anhalteweg K-Sohle & Scheibenbremse in der Ebene und in der Neigung 48
6.2 Anhaltewegberechnungsmodell mit kombinierter Reibwertcharakteristik 50
6.3 Bremsbewertung und Anhaltewege mit kombinierter Reibwertcharakteristik 51
6.3.1 Bremsbewertung 51
6.3.2 Analyse betreffend die Bestimmung «sicherer Anhaltewege» 53
6.3.3 Methode für die optimierte Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» 56
6.3.4 Vergleich «sichere Anhaltewege» mit und ohne Optimierung für GG-Bremssohlen 58
6.3.5 Überarbeitung von «Ergänzung a» zum Kommentar Nr. 4 zur EBV 59
6.3.6 Vergleich zu den Bremskurven gemäss Kommentar Nr. 4 zur EBV Ergänzung a 60
6.4 Neue Bremstabelle S2020 61
6.4.1 Limitierung durch die kinematischen Anforderungen 61
6.4.2 Thermische Belastung der Bremse 63
6.4.3 AB-EBV Bremstabelle S2020 64

Verzeichnis der Anlagen

A1 Kommentar Nr. 7 zur EBV
A2 Ergänzung a zu Kommentar Nr. 4 zur EBV
A3 BAV zf-Weisung 10.85
A4 Bremskurven BAV 26.01.1983
A5 Bremskurven BAV 23.02.1983
A6 Rechnungsgang Anhaltewegberechnung «BAV_Orig»
A6.1 Anhaltewege GG mit Referenzmodell RK_4
A6.2 Vergleich Anhaltewege GG zwischen BAV_Orig und Referenzmodell RK4
A6.3 Einfluss des Näherungsverfahrens auf die Genauigkeit des Anhalteweges
A7 Bewertungskennlinien mit GG und K, kalibriert bei λ=100 bei 50 km/h
A8 Bewertungskennlinien mit GG und K, kalibriert bei für λ=120 bei 120 km/h
A9 Bewertungskennlinien mit GG und K, kalibriert bei für λ=100 bei 80 km/h
A9.1 Bewertungskennlinien mit GG, K und Scheibenbremse, kalibriert bei für λ=100 bei 80 km/h
A10 Effektivverzögerungen Bremstabellen IIA, III und IV
A11 Bremswegsensitivität Bremstabellen IIA, III und IV
A12 Annahmen zu den Reibwertcharakteristiken
A12.1 Umschaltung der Charakteristik bei der Anhaltewegberechnung in der Neigung
A13 Vergleich Effektivverzögerung - Bremswegsensitivität bei GG und K-Charakteristik
A14 Anhaltewege Bremstabellen IIA, III und IV
A15 Teilbremsverhältnis, Auszug aus FDV R 300.5
A16 Simulation Wärmeeintrag mit K-Bremssohle
A17 Bremsbewertungskennlinien 2020
A18 Bremskurven 2020
A18.1 Szenarien zur optimierten Bestimmung «sicherer Anhaltewege»
A18.2 Vergleich Bremskurven mit v_{max} & v_{min} = 80 km/h für GG, gegenüber Kommentar Nr. 4a zur EBV
A18.3 Vergleich Bremskurven mit v_{max} & v_{min} = 100 km/h für GG, gegenüber Kommentar Nr. 4a zur EBV
A18.4 Vergleich Bremskurven K-Sohle gegenüber Kommentar Nr. 4a zur EBV
A18.5 Vergleich Bremskurven Scheibenbremse gegenüber Kommentar Nr. 4a zur EBV
A19 Referenzwerte zu den Bremsbewertungskennlinien 2020
A20 Rechnungsgang Anhaltewegberechnung «AB-EBV 2020»
A30 Teilbericht 1 DB-Systemtechnik, Diskussion Neuberechnung Bremstabellen für Meterspurbahnen
A40 Teilbericht 2 DB-Systemtechnik, Diskussion Neuberechnung Bremstabellen für Meterspurbahnen

Quellenverzeichnis

[1] Bundesamt für Verkehr BAV, «Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen EBV, SR 742.141.1,» 1. Juli 2016.

[2] Bundesamt für Verkehr BAV, «Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung AB-EBV, SR 742.141.11,» 1. Juli 2016.

[3] Bundesamt für Verkehr BAV, «Schweizerische Fahrdienstvorschriften FDV, SR 742.173.001,» Stand 1. Juli 2016.

[4] Knorr-Bremse AG, München, «Handbuch, Bremstechnische Begriffe und Werte,» Knorr-Bremse AG, ©1976, ©1990.

[5] Bundesamt für Verkehr BAV, «Kommentar Nr. 7 zur Eisenbahnverordnung, Bremsen der Adhäsionsbahnen,» 1984.

[6] Bundesamt für Verkehr BAV, «Zf-Weisung 10.85,» Oktober 1985.

[7] Bundesamt für Verkehr BAV, «Bremskurven 0 ‰ bis – 70 ‰,» 26. Januar 1983.

[8] Bundesamt für Verkehr BAV, «Bremskurven 0 ‰ bis – 70 ‰ mit tv = 1.0 s,» 23. Februar 1983.

[9] Bundesamt für Verkehr BAV, «Kommentar Nr. 4a zur Eisenbahnverordnung, Festlegung der Distanz zwischen Vor- und Hauptsignal sowie zwischen Kontrolllicht und Bahnübergang,» Februar 1986.

[10] DB-Systemtechnik, «Diskussion Neuberechnung Bremstabellen für die Meterspurbahnen in der Schweiz,» Teilbericht 2: 18-54707-TT.TVE31-BAV-Bremstabellen vom 04.11.2020.

[11] P. D.-I. h. D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Springer, 1983.

[12] DB-Systemtechnik GmbH, Dr. Peter Spiess, «Rechenmodell zur Abschätzung von Bremsscheiben- und Radtemperaturen,» 2016.

[13] DB-Systemtechnik, «Diskussion Neuberechnung Bremstabellen für die Meterspurbahnen in der Schweiz,» Teilbericht 1: 18-54707-TT.TVE31-BAV-Bremstabellen vom 04.11.2020.

[14] Runge Carl, deutscher Mathematiker (1856-1927).

[15] Kutta Wilhelm, deutscher Mathematiker (1867-1944).

[16] Karl Heun, deutscher Mathematiker (1859-1929).

Begriffe und Abkürzungen

AB	Ausführungsbestimmungen
AB 52.2	AB-EBV: Bremssysteme, Bremskraft
AB 77.2	AB-EBV: Bremsordnung Bremstabellen
AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung
Anhalteweg	Zurückgelegter Weg ab Einleitung der Schnellbremsung bis zum Stillstand
BAV	Bundesamt für Verkehr
Bremsausgangsgeschwindigkeit	Fahrgeschwindigkeit bei Einleitung der Schnellbremsung
Bremsbewertungskennlinien	Bewertungsgrundlage für die Ermittlung des Bremsverhältnisses anhand des Anhaltweges bei Schnellbremsung
Bremsgewicht	Begriff zur Beschreibung der Bremskraft eines Fahrzeuges
Bremsverhältnis	Verhältnis von Bremsgewicht zu Fahrzeuggewicht für Schmalspurfahrzeuge
Bremszylinderfüllzeit	Zeit bis zum Erreichen von 95 % des Enddruckes
DBS	DB-Systemtechnik GmbH, Minden
EBV	Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen
EVU	Eisenbahn Verkehrsunternehmen
FDV	Fahrdienstvorschriften
GG-Sohlen	Bremssohlen aus Grauguss
K-Sohlen	Bremssohlen mit K-Reibwertcharakteristik
Massgebende Neigung	Neigung der Verbindungslinie der um einen bestimmten Abstand voneinander entfernten Punkte der Strecke mit dem grössten Höhenunterschied nach AB-EBV AB77.2 Ziffer 8
Münchner-Formel	Gleichung für die Bremswegberechnung
SB	Scheibenbremse
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
TrainDy	UIC Software zur Berechnung der Längsdruckkräfte in Zügen
UIC	Union internationale des chemins de fer

Zeichenerklärung

Wichtiger Hinweis

Information

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

1.1.1 Massgebende Regelwerke

Die Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen EBV [1] legt im Artikel 52 und Artikel 77 zu den Bremsen der Eisenbahnfahrzeuge folgende Schutzziele fest:

- Die Bremsen der Fahrzeuge müssen das sichere Fahren mit der zulässigen Geschwindigkeit erlauben und jederzeit das sichere Anhalten der Fahrzeuge gewährleisten.
- Die Wirkung der Bremsen eines Zuges muss den betrieblichen Erfordernissen entsprechen.

Die Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung AB-EBV [2] halten in den AB-EBV zu Art. 77, AB 77.2 Ziffer 4 fest:

- Die Wirkung der Bremsen kann als genügend angenommen werden, wenn die Bremsverhältnisse der Züge, die in den Bremstabellen der Ziffern 2.1 bis 2.6 verlangten Werte erreichen.

Die jeweils massgebende Bremstabelle ist nach den zur Verfügung stehenden Bremswegen (Vorsignalentfernung, Steuer- und Kontrolleinrichtung automatischer Anlagen zur Sicherung von Bahnübergängen) und nach der massgebenden Neigung zu bestimmen.
Die EBV [1] hält zudem unter Kapitel 4 «Bahnbetrieb» im 2. Abschnitt «Bilden der Züge» in Artikel 76 fest, nach welchen Gesichtspunkten die Fahrgeschwindigkeit festzulegen ist. In Abhängigkeit von Streckenneigung und Fahrgeschwindigkeit sind in den Bremstabellen dazu die minimal erforderlichen Bremsverhältnisse angegeben.

Alle Verweise in diesem Dokument auf die Ausführungsbestimmungen zur EBV (AB-EBV) [2] beziehungsweise auf die Fahrdienstvorschriften (FDV) [3], beziehen sich auf die Ausgabe mit Stand vom 1. Juli 2016.

1.1.2 Bremstabellen der AB-EBV

Die aktuell gültigen Ausführungsbestimmungen zur EBV [2] regeln die Bremsordnung nach den folgenden Bremstabellen:

Tabelle	*Neigung*[1]	*Geschwindigkeiten*	*Vorsignaldistanz*	*Bremsbewertung*	*Inkraftsetzung*
I	0 – 30 ‰	25 – 125 km/h	350 – 870 m	UIC 544-1	01.01.1984
II	0 – 50 ‰	10 – 80 km/h	240 – 590 m	UIC 544-1	01.01.1984
IIA	**0 – 50 ‰**	**10 – 90 km/h**	**bis 325 m**	**BAV / AB-EBV**	**01.01.1984**
III	**0 – 70 ‰**	**10 – 75 km/h**	**bis 225 m**	**BAV / AB-EBV**	**01.01.1984**
IV	**0 – 70 ‰**	**10 – 90 km/h**	**bis 535 m**	**BAV / AB-EBV**	**01.01.1994**
90	0 – 50 ‰	10 – 160 km/h	bis 1800 m	UIC 544-1	01.01.1994
G2016	0 – 40 ‰	20 – 120 km/h	bis 1800 m	UIC 544-1	01.07.2016

Tabelle 1.1-1: *Übersicht Bremstabellen AB-EBV*

Die Fett dargestellten Bremstabellen gelten hierbei für die Meterspur. Die Eisenbahnunternehmen haben gemäss EBV [1] Art. 12 die für den Betrieb und Instandhaltung notwendigen Betriebsvorschriften zu erlassen. Ein Teil davon sind Streckentabellen, welche die Angaben zu den höchstzulässigen Fahrgeschwindigkeiten enthalten. Die Bremstabellen bilden einen Teil der Grundlagen für die Erstellung solcher Streckentabellen.
Die in den Bremstabellen aufgeführten Mindestwerte für das Bremsverhältnis sind für die jeweils massgebende Neigung und Fahrgeschwindigkeit in jedem Fall einzuhalten. Dies gilt für sämtliche Fahrten auf allen Strecken, unabhängig vom Signalsystem.

[1] gemäss AB-EBV AB77.2 Ziffer 9

1.2 Überarbeitungsbedarf Ausführungsbestimmungen zur EBV (AB-EBV)

1.2.1 Übersicht und Ausblick

Für nicht interoperable Adhäsionsbahnen regeln die AB-EBV [2] in AB-EBV zu Art. 52, AB 52.2, Ziff. 4 die Bremswegberechnung, beziehungsweise in AB-EBV zu Art. 55, AB 52.2, Ziff. 5 die Bremsbewertung. Zudem sind in der Bremsordnung unter AB-EBV zu Art. 77, AB 77.2 die Bremstabellen IIA, III und IV aufgeführt, welche die höchstzulässigen Fahrgeschwindigkeiten festlegen in Abhängigkeit der massgebenden Streckenneigung und des Bremsverhältnisses. Diese Bremstabellen gelten ausschliesslich für Fahrzeuge der Schmalspurbahnen, deren Bremsverhältnis mit der Bremsbewertung gemäss AB-EBV zu Art. 52, AB 52.2, Ziff. 5 anhand von Bremsversuchen bestimmt wurde.

Die Bremstabellen I, II, 90 und G2016 gelten für interoperable Fahrzeuge der Normalspurbahnen, deren Bremshundertstel gemäss UIC-Merkblatt 544-1 ermittelt wurden.
Die nachfolgenden Untersuchungen und Ausarbeitungen wurden im Zusammenhang mit der AB-EBV [2] Revisionsrunde 2020 für das Teilprojekt Bremsen Meterspur initialisiert, weshalb sich diese ausschliesslich auf die Brems-Grundlagen für Schmalspurbahnen beschränken.

1.2.2 Anhaltewegberechnung

Das Berechnungsmodell gemäss AB-EBV [2] in AB-EBV zu Art. 52, AB 52.2, Ziff. 4 basiert auf der sogenannten «Münchner-Formel». Die Bremswege werden im Geschwindigkeitsschrittverfahren mit den Momentanwerten der Rad- Klotz Reibung und des Fahrwiderstandes berechnet. In der Praxis hat sich dieses Berechnungsmodell bewährt, so dass bislang kein Bedarf bestand für einen Wechsel des Berechnungsmodells.

Die aktuell verwendeten Momentanreibwerte für die Bremswegberechnung basieren auf den Reibwerteigenschaften von Bremssohlen aus Grauguss (GG). Im Zusammenhang mit der Senkung der Lärmbelastung durch Abrollgeräusche hat die Verwendung von GG-Sohlen in den letzten Jahren bereits stark abgenommen beziehungsweise nimmt weiter ab. Im Güterverkehr werden GG-Bremssohlen zunehmend durch lärmarme Verbundstoff-Bremssohlen ersetzt und im Reisezugverkehr hat die Scheibenbremse (SB) die Klotzbremse bereits weitgehend verdrängt. Die Reibwertcharakteristika von Bremsbelägen für Scheibenbremsen und von Verbundstoff-Bremssohlen sind ähnlich gegenüber den GG-Bremssohlen. Im unteren Geschwindigkeitsbereich jedoch unterscheiden sich erstere aber durch deutlich tiefere Reibwerte. Dies hat letztlich auch einen grossen Einfluss auf die Feststellbremse und somit auf die Fahrzeugsicherung.

1.2.3 Bremsbewertung

Die Bremsbewertung für Einzelfahrzeuge oder für Zugeinheiten mit betrieblich unveränderbarer Länge erfolgt anhand der Bremsbewertungskennlinien gemäss AB-EBV zu Art. 52, AB 52.2 Blatt 9. Die Grundlagen für die Bremsbewertung und die Anhaltewegberechnung sind identisch, unterschiedlich ist lediglich die Art der Darstellung.
Mit der Zunahme des Verkehrsaufkommens während der letzten Jahre wurde die Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnik wie auch der Ausbau der Bahninfrastruktur vorangetrieben. Bei den Eisenbahnunternehmen entstand damit auch der Bedarf nach einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeiten. Das BAV hat deshalb im Jahr 2003 den Geschwindigkeitsbereich der Bremsbewertungskennlinien von 90 km/h auf 100 km/h erweitert. Eine entsprechende Erweiterung in den Bremstabellen IIA, III und IV, als logische Folge der erweiterten Bremsbewertung, wurden jedoch nicht vorgenommen.
Aufgrund der Weiterentwicklungen bei den Schmalspurbahnen ist es nun sinnvoll, den Geschwindigkeitsbereich bis 120 km/h zu erweitern. Dies entspricht auch einzelnen Branchenrückmeldungen.
Im Zusammenhang mit der Überarbeitung der Anhaltewegberechnung beziehungsweise der Bremsbewertungskennlinien muss allerdings untersucht werden, ob dies Konsequenzen für bestehende Fahrzeuge nach sich zieht, die gemäss bisheriger Bremsbewertung (mit Stand vor der AB-EBV Revision 2020) bewertet sind und welche Massnahmen gegebenenfalls zu ergreifen sind.

1.2.4 Bremstabellen

Die AB-EBV zu Art. 77, AB 77.2 enthalten die Bremstabellen IIA, III und IV für die Schmalspurbahnen. Diese legen für die höchstzulässigen Fahrgeschwindigkeiten, in Abhängigkeit der massgebenden Streckenneigung, die Mindestbremsverhältnisse fest. Die aktuell gültigen Bremstabellen entsprechen immer noch der

Erstausgabe von 1984, obwohl die Bremsausgangsgeschwindigkeit der Bremsbewertungskennlinien im Jahr 2003 von 90 auf 100 km/h erhöht wurde.

Im Rahmen der anstehenden AB-EBV Revision 2020 entstand der Bedarf, diese Bremstabellen zu aktualisieren. Die Grundlagen, welche bei deren Erstellung in den 80er Jahren verwendet wurden, sind nicht mehr lückenlos verfügbar. Für die Überarbeitung der Bremstabellen ist deshalb eine Untersuchung erforderlich, was die Bremstabellen im aktuellen Umfeld der Regelwerke genau zu leisten haben.
Wie bereits in den Kapiteln *1.2.2* und *1.2.3* dargelegt drängt es sich auf, die Regelungen für die Fahrgeschwindigkeiten im Gefälle bis auf eine höchstzulässige Geschwindigkeit von 120 km/h zu erweitern.

1.3 Ziele

Im Rahmen der Arbeiten ergeben sich folgende Ziele:

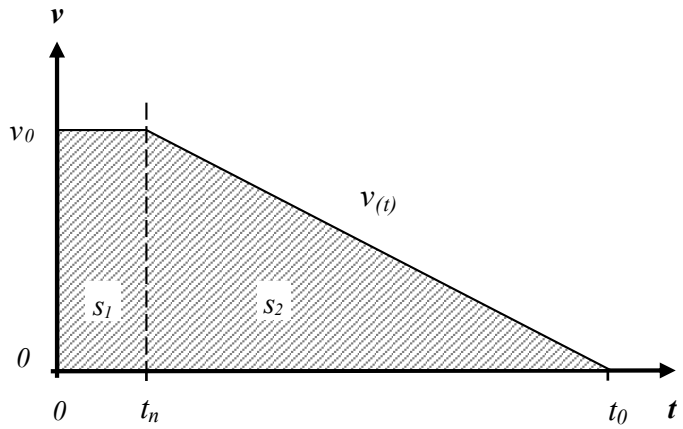
1) Die Regelwerkgrundlagen für die Bremswegberechnung, die Bremsbewertung und die Bremsordnung der Schmalspurbahnen entsprechen dem aktuellen Stand der Technik.
2) Die Ergebnisse der Untersuchungen und Ausarbeitungen sind von einer unabhängigen Stelle erfolgreich validiert und konsolidiert.
3) Zwingend zu ergreifende Massnahmen für Fahrzeuge, welche gemäss den «Regelungen vor der Revision 2020» in Betrieb genommen wurden, sind eruiert.
4) Es besteht Klarheit darüber, ob die für Schmalspurbahnen angewandten Methoden auf die Erarbeitung von Bremsgrundlagen für die Fahrzeuge von Normalspurbahnen übertragbar sind.
5) Die Nachvollziehbarkeit der Dokumentation zu den Untersuchungen und Ausarbeitungen, betreffend die Regelwerkgrundlagen, ist sichergestellt.

2 Anhaltewegberechnung nach AB-EBV Stand 2016

2.1 Aktuell gültiges Berechnungsmodell «BAV_Orig»

2.1.1 Analyse zum Modellansatz

Nachfolgende Grafik zeigt den idealisierten Verlauf der Geschwindigkeit über der Zeit, für ein mit konstanter Verzögerung abgebremstes Fahrzeug in der Ebene:



v_0	Geschwindigkeit bei Einleitung der Schnellbremsung
t_0	Zeit, seit Bremsbefehl bis Stillstand
t_n	Zeit, ab welcher die volle Bremskraft wirkt
$s_1 + s_2$	Zurückgelegte Strecke bis zum Stillstand
$v_{(t)}$	Geschwindigkeitsverlauf während des Bremsvorgangs

***Abbildung** 2.1.1-1: Idealisierter Bremsvorgang*

Der Bremsbefehl erfolgt bei $t = 0$. Das Fahrzeug rollt danach mit der Geschwindigkeit v_0 ungebremst weiter und wird anschliessend ab dem Zeitpunkt t_n mit der konstanten Verzögerung a bis zu Stillstand bei $t = t_0$ abgebremst. Dabei kann die Zeit während der ungebremsten Weiterfahrt vorerst als äquivalente Bremsentwicklungszeit verstanden werden. Die Betrachtung des idealisierten Bremsvorgangs soll dabei der Entwicklung eines möglichst einfachen und verständlichen Berechnungsmodells für die Berechnung der Anhaltewege von Einzelfahrzeugen dienen.
Für die idealisierte Betrachtung in der Ebene, von der Einleitung der Bremsung bei $t=0$ bis zum Stillstand im Zeitpunkt $\boldsymbol{t=t_0}$, ergibt sich die zurückgelegte Gesamtstrecke aus der Summe der Teilstrecken s_1 und s_2.

$$s = s_1 + s_2 \quad \text{für} \quad s_1 = v_0 \cdot t_n \quad \text{und} \quad s_2 = \int_{t_n}^{t_0} v_{(t)} \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot v_0 \cdot (t_0 - t_n) \qquad \textit{Formel 2.1.1-1}$$

Mit der Verzögerung $a = \frac{v_0}{(t_0 - t_n)} \rightarrow (t_0 - t_n) = \frac{v_0}{a}$ ergibt sich für den Anhalteweg:

$$s = v_0 \cdot t_n + \frac{v_0^2}{2 \cdot a} \qquad \textit{Formel 2.1.1-2}$$

In der Formel 2.1.1-2 entspricht der zweite Term mit der von der Zeit unabhängigen Verzögerung a, dem zurückgelegten Fahrweg bei voll entwickelter Bremskraft. Der Einfluss der Bremsentwicklungszeit auf den gesamten Anhalteweg ist im ersten Term der Berechnungsgleichung mit $v_0 \cdot t_n$ berücksichtigt.

2.1.2 Bremsentwicklungszeit

Die Bremskraftentwicklung ist bei der pneumatischen Bremse vom zeitlichen Verlauf des Bremszylinderdruckes abhängig. Mit der Einleitung des Schnell-Bremsvorgangs strömt solange Druckluft in den Bremszylinder, bis der Druckausgleich mit der speisenden Quelle hergestellt ist. Die Dauer dieses Ausgleichvorgangs ist hauptsächlich von der Geometrie der Füllleitung, dem Bremszylindervolumen sowie von dem Fülldruck (Maximal-Druck) abhängig und lässt sich wie folgt darstellen:

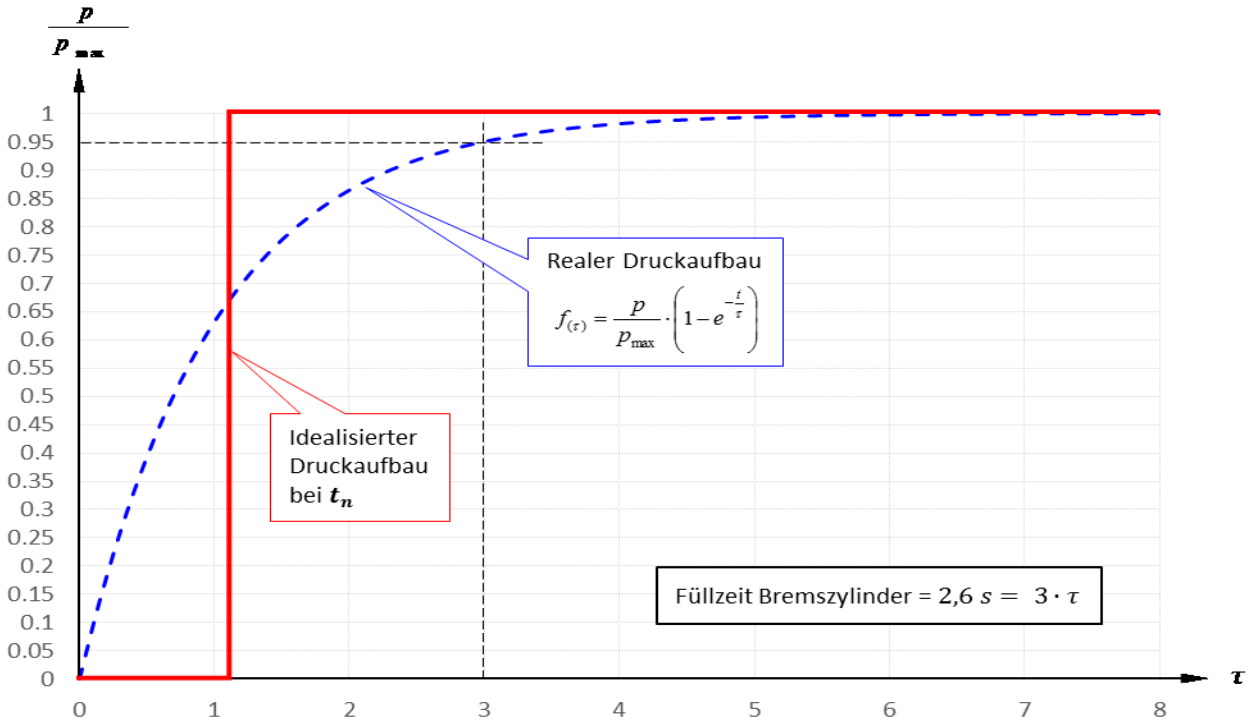


Abbildung 2.1.2-1: *Druckaufbau Bremszylinder*

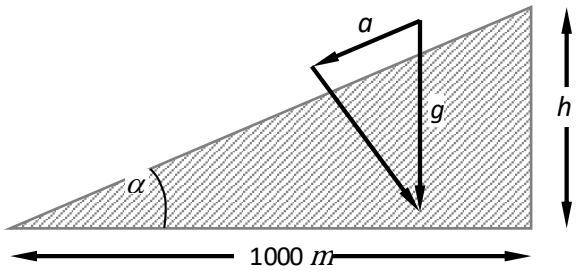
Gemäss AB-EBV [2] zu Art.52, AB 52.2 Ziff. 4 beträgt die äquivalente Bremsentwicklungszeit t_n 39 % der Bremszylinderfüllzeit t_1 von 2,6 Sekunden. Die Bremszylinderfüllzeit ist dabei definiert als die dreifache Zeitkonstante τ, nach welcher rund 95 % des Bremszylinderenddrucks erreicht ist. Nach der obigen Darstellung ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$t_n = 0{,}39 \cdot 3 \cdot \tau = 1{,}17 \cdot \tau = 2{,}6\,s \cdot 0{,}39 \cong 1\,s$$

Mit t_n als äquivalente Ersatzgrösse, soll diese den Einfluss der realen Bremskraftentwicklung auf den Anhalteweg modellieren beziehungsweise berücksichtigen.

2.1.3 Neigungswiderstand

Um den Anhalteweg in der Neigung zu berechnen, ist zusätzlich der Einfluss des Neigungswiderstands zu berücksichtigen, welcher als parallel zur schiefen Ebene wirkender Anteil der Erdbeschleunigung g auf das Fahrzeug zu verstehen ist. In den weiteren Abhandlungen wird der Neigungswiderstand für Gefällestrecken mit negativem Vorzeichen notiert, entsprechend für Steigungen mit positivem Vorzeichen.



Für sehr kleine Neigungswinkel α kann anstatt $\sin[\arctan(h/1000)]$ mit genügender Genauigkeit auch mit $h/1000$ gerechnet werden. Bis zu einer Neigung von 50 ‰ beträgt der maximale Fehler 0,125 %.

$$a_w = g \cdot \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{h}{1000}\right)\right] \text{ in } \frac{[N]}{[kg]}$$

Formel 2.1.3-1: *Streckenwiderstand*

2.1.4 Berechnungsgleichung

Das in den AB-EBV enthaltene Bremsweg-Modell zur Berechnung der Anhaltewege von Einzelfahrzeugen wurde offensichtlich in Anlehnung an die Münchner-Formel [4] erstellt. Die beiden Modelle unterscheiden sich allerdings darin, dass sich das AB-EBV Modell auf Einzelfahrzeuge bezieht. Hierbei gelangen bei der Berechnung Momentanwerte im Geschwindigkeitsschrittverfahren zur Anwendung, anstelle der Mittelwerte für Reibung und Fahrwiderstand.,
Die Dokumentation betreffend die Herleitung der Berechnungsgleichung nach AB-EBV [2] zu Art. 52, AB 52.2 Ziff. 4 aus dem Jahr 1984 ist nur lückenhaft verfügbar. Aus diesem Grund sollen die Berechnungsgrundlagen nachfolgend als Basis für die unmittelbar anstehenden und für die künftigen Anpassungen im Regelwerk rekonstruiert werden.

Die Berechnung des Anhalteweges soll nun gemäss des Modells nach Formel 2.1.1-2 erfolgen.
Mit $\xi = \frac{m_R}{m_T}$ und $m = m_T + m_R \rightarrow m = m_T \cdot (1+\xi)$ lässt sich schreiben:

$$s = v_0 \cdot t_n + \frac{v_0^2}{2 \cdot a} = v_0 \cdot t_n + \frac{\frac{1}{2} v_0^2}{\frac{F}{m_T \cdot (1+\xi)}} = v_0 \cdot t_n + \frac{\frac{1}{2} v_0^2 \cdot (1+\xi)}{\frac{F_b}{m_T} + \frac{F_w}{m_T} + \frac{F_i}{m_T}} = v_0 \cdot t_n + \frac{\frac{1}{2} v_0^2 \cdot (1+\xi)}{(a_b + a_w + a_i)}$$

Formel 2.1.4-1

F	Effektiv verzögernde Kraft	[N]	s	Anhalteweg	[m]
F_b	Bremskraft der Reibbremse	[N]	v_0	Bremsausgangsgeschwindigkeit	[ms^{-1}]
F_w	Fahrwiderstandskraft	[N]	t_n	Bremsentwicklungszeit	[s]
F_i	Neigungswiderstandskraft	[N]	a	Mittlere Verzögerung	[ms^{-2}]
a_b	mittlere Verzögerung Reibbremse	[ms^{-2}]	m_T	Fahrzeugmasse translatorisch	[kg]
a_w	mittlere Verzögerung Fahrwiderstand	[ms^{-2}]	m_R	Fahrzeugmasse rotatorisch	[kg]
a_i	mittlere Verzögerung Neigungswiderstand	[ms^{-2}]	ξ	Massenfaktor	[1]

Nach den Schweizer Fahrdienstvorschriften (FDV) [3] R 300.5 Ziff. 3.2 ist die Bestimmung der Bremsreihe per Definition nach folgender Berechnungsgleichung vorzunehmen:

$$\lambda = \frac{B}{G} \cdot 100\%$$

Formel 2.1.4-2: *Bremsverhältnis*

G	Fahrzeugmasse	[kg]
B	Bremsgewicht	[kg]
λ	Bremsverhältnis	[%]

Demnach gibt λ den gebremsten Anteil der Fahrzeugmasse G an. Bei konstanter Fahrzeugmasse und zunehmendem Bremsgewicht B steigt das Bremsverhältnis λ und damit die Bremswirkung proportional an. Für das Bremswegmodell bedeutet dies, dass die mittlere Verzögerung der Reibbremse a_b gemäss Formel 2.1.4-1 in direkter Abhängigkeit zum Bremsverhältnis λ stehen muss:

$$s = v_0 \cdot t_n + \frac{\frac{1}{2} \cdot v_0^2 \cdot (1+\xi)}{\left(\frac{\lambda}{100} \cdot \frac{P}{G} \cdot \mu_{k(v)} \cdot + a_{w(v)} + a_i\right)}$$

Formel 2.1.4-3: *Anhalteweg «BAV_Orig»*

P	Summe Klotzkräfte	[N]
G	Fahrzeugmasse	[kg]
$\mu_{k(v)}$	Reibwert Klotz-Rad (v-abhängig)	[1]
$a_{w(v)}$	Fahrwiderstand (v-abhängig)	[N/kg]
a_i	Neigungswiderstand	[N/kg]

Das schrittweise entwickelte Bremswegberechnungsmodell stimmt mit der in den AB-EBV zu Art. 52, AB 52.2 Ziff. 4 angegebenen Beziehung für die Bremswegberechnung von Fahrzeugen mit einstufiger Bremse überein. Es ist zu beachten, dass die Formel 2.1.4-3 **nur für konstante Verzögerungen gültig** ist. Da jedoch der Reibwert μ_k wie auch der Fahrwiderstand a_w von der Geschwindigkeit abhängig sind, ist der Anhalteweg im Geschwindigkeitsschritt-Verfahren zu berechnen, so dass die Verzögerung innerhalb des Geschwindigkeitsschritts als annähernd konstant angenommen werden darf.

2.2 Berechnungs-Parameter

Die Festlegung für die Bremsbewertung findet sich in den AB-EBV [2] zu Art. 52, AB 52.2 unter Ziff. 6.1.1 sowie im Kommentar Nr. 7 [5] zur AB-EBV in der Anlage A1. Demnach muss sich bei der Schnellbremsung eines Einzelfahrzeugs in der Ebene, aus einer Bremsausgangsgeschwindigkeit von v_0 = 50 km/h bei einem Bremsverhältnis von λ = 100 %, eine mittlere Verzögerung von 1 m/s einstellen sowie ein Anhalteweg von rund 96 Meter ergeben. Dieser Definition liegen die in Kommentar Nr. 7 aufgeführten Reibwerte und Fahrwiderstände sowie die in den Bremskurvenblättern in den Anlagen A3, A4 und A5 aufgeführten Grundlagen und Berechnungsparameter zugrunde.

2.2.1 Vorgaben gemäss Kommentar Nr. 7 zur AB-EBV

Wie bereits im Kapitel 1.2.2 Anhaltewegberechnung kurz erwähnt, basiert die Berechnung des Anhalteweges auf den Reibwerteigenschaften von GG-Bremssohlen. Der Kommentar Nr. 7 zur EBV [1] enthält dazu, für den spezifischen Klotzdruck von 40 – 60 N/cm², die entsprechenden Reibungskoeffizienten sowie Angaben zu dem Fahrwiderstand. Die nachfolgenden Tabellenwerte sind den Bremsbewertungskennlinien in den AB-EBV [2] zu Art. 52, AB 52.2 unter Ziff. 6.1.3 auf Blatt 9 zugrunde gelegt:

v [km/h]	$\mu_{GG(v)}$ [1]	$w_{(v)}$ [N/t]	
0	0,330	20,0	⇦ μ_{GG} extrapoliert anlässlich der AB-EBV Revision 2010
10	0,251	20,6	
20	0,209	22,7	
30	0,188	26,0	
40	0,174	31,0	
50	0,164	36,7	
60	0,156	44,1	
70	0,150	52,8	
80	0,145	62,8	
90	0,141	74,2	
100	0,139	87,0	⇦ μ_{GG} ergänzt am 07.11.2003 durch BAV/rm/huw

Tabelle 2.2-1: *Reibwerte und Fahrwiderstand zu «BAV_Orig»*

Als Polynomfunktion dargestellt: $\mu_{GG(v)} = a_6 \cdot v^6 + a_5 \cdot v^5 + a_4 \cdot v^4 + a_3 \cdot v^3 + a_2 \cdot v^2 + a_1 \cdot v + a_0$

a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
7.44678879E-13	-3.43319368E-10	6.39304179E-08	-6.17688783E-06	3.35304299E-04	-1.07167751E-02	3.29998393E-01

Aus den vorhandenen Arbeitspapieren zu den Bremsbewertungskennlinien ist folgende Berechnungsgleichung für den Fahrwiderstand zu entnehmen:

$$w_{(v)} = 20\left[\frac{N}{t}\right] + \frac{2}{300}\left[\frac{N \cdot h^2}{t \cdot km^2}\right] \cdot v^2 \qquad \textbf{\textit{Formel 2.2.1-1}}$$

mit **w** Fahrwiderstand [N/t]
v Geschwindigkeit [km/h]

Aus den in den Kapiteln 1.2.2 und 1.2.3 dargelegten Gründen sollen die Reibwerte so angepasst werden, dass diese stärker dem aktuellen, realen Bremsbetrieb entsprechen. Die Auswirkungen der Anpassungen auf den Bremsbetrieb sind zu untersuchen und entsprechende Massnahmen zu definieren.

2.2.2 Bremskurven BAV/zf/Mn 1983

Auf Basis des Bremswegberechnungsmodells nach Formel 2.1.4-3 hatte das BAV im Jahr 1983 verschiedene Bremskurven erstellt. Diese wurden als zf-Weisung 10.85 [6] gemäss Anlage A3 eigens für den BAV/zf internen Gebrauch erarbeitet, insbesondere für die technische und betriebliche Aufsicht durch das BAV.

Bremskurven BAV/zf/Mn vom 26. Januar 1983 [7]

Die Bremskurven BAV 26.01.1983 gemäss Anlage A4 zeigen für verschiedene Neigungen und Geschwindigkeiten den Zusammenhang zwischen Bremsverhältnis und Anhalteweg. In den grafischen Darstellungen ist allerdings keine Streuung der Bremskraft berücksichtigt. Zusätzlich wurden die Bremskurven mit den Effektivverzögerungen $p_e = 0{,}25\,\text{ms}^{-2}$ und $0{,}3\,\text{ms}^{-2}$ graduiert. Hierbei wurde für p_e eine Bremskraftstreuung von - 16,58 % berücksichtigt.

Diese Bremskurven sind identisch mit den doppelt logarithmisch dargestellten Bremsbewertungskennlinien nach AB-EBV [2] zu Art. 52, AB 52.2 Ziff. 6.1.3 Blatt 9.

Berechnungsgrundlagen:

$t_1 = 2{,}6\ s$	Bremszylinderfüllzeit
$t_n \cong 1{,}0\ s$	$t_n = 0{,}39 \cdot t_1$ (Bremsentwicklungszeit)
$\xi = 5{,}5\ \%$	Massenfaktor
μ_k	Reibwerte nach Tabelle 2.2-1
w	Fahrwiderstand nach Tabelle 2.2-1
$P/G = 72{,}45\%$	Theoretische Abbremsung
$\eta = 92\ \%$	Gestängewirkungsgrad
$P/G \cdot \eta = 66{,}66\%$	Wirksame theoretische Abbremsung für das Modell nach Formel 2.1.4-3

Bremskurven BAV/zf/Mn vom 23. Februar 1983 [8]

Die Bremskurven BAV 23.02.1983 nach Anlage A5 unterscheiden sich gegenüber den oben aufgeführten Bremskurven vom 26. Januar 1983 nur darin, dass bei der Bremswegberechnung zusätzlich eine Verlustzeit t_v (Reaktions- und Ansprechzeit der Bremse) eingeführt wurde. Diese Verlustzeit berücksichtigt beispielsweise die Bremswegverlängerung einer talwärts fahrenden, alleine mit der Antriebsbremse in Beharrung gehaltenen Zugkomposition, bei Ausfall der Beharrungsbremse.

Diese Bremskurven finden allerdings bei der Festlegung von Vorsignaldistanzen und den Abständen zwischen Kontrolllicht und Bahnübergang keine Anwendung, da diese keine fahrzeugabhängigen Unsicherheiten mittels Sicherheitsmargen abdecken.

Berechnungsgrundlagen:

$t_1 = 2{,}6\ s$	*Bremszylinderfüllzeit*
$t_v = 1{,}0\ s$	Verlustzeit (Reaktions- und Bremsansprechzeit)
$t_n \cong 2{,}0\ s$	$t_n = 0{,}39 \cdot t_1 + t_v$ (äquivalente Bremsentwicklungszeit)
$\xi = 5{,}5\ \%$	Massenfaktor
μ_k	Reibwerte nach Tabelle 2.2-1
w	Fahrwiderstand nach Tabelle 2.2-1
$P/G = 72{,}45\%$	Theoretische Abbremsung
$\eta = 92\ \%$	Gestängewirkungsgrad
$P/G \cdot \eta = 66{,}66\%$	Wirksame theoretische Abbremsung für das Modell nach Formel 2.1.4-3

Auf den Kurvenblättern ist für P/G ein Prozentwert angegeben, was physikalisch nicht korrekt ist. Die Einheitenkontrolle in [5] liefert für den Quotienten P/G die Einheit [N/kg] und damit eine Beschleunigung. Gemäss Kommentar Nr. 7 zur EBV [1] in Anlage A1 ist P/G jedoch mit 6666 [N/t] angegeben. Es ist deshalb davon auszugehen, dass der angegebene Prozentwert für die theoretische Abbremsung P/G eigentlich für die Beziehung $P/G/g \cdot \eta$ stehen muss, was von den Einheiten her korrekt ist und im Folgenden «physikalische Abbremsung» genannt wird.

Eine theoretische Abbremsung von 72,45 % entspricht demnach, mit einer vereinfachend eingesetzten Erdbeschleunigung g = 10 ms^{-2}, einer physikalischen Abbremsung von knapp 6666 N/t.

2.2.3 Bremswegkurven BAV/zf/Mn 1985

Das BAV hat auf der Grundlage des Bremswegmodells gemäss Formel 2.1.4-3, für verschiedene Geschwindigkeiten und Neigungen, Anhaltewege unter Berücksichtigung einer Bremskraftstreuung berechnet. Diese Bremswegkurven wurden am 21. April 1986 als Ergänzung a zum Kommentar Nr. 4 zur EBV [1] an die Schmalspurbahnen versandt, wobei die Bremskraftstreuung s_f wie folgt festgelegt worden ist:

Komponente	*Streuung*	*Gesamtstreuung s_f*	
Reibwert Bremsklotz – Rad μ_k	- 15 %	$s_f = \sqrt{15^2 + 5^2 + 5^2} = 16{,}58\ \%$	***Formel 2.2.3-1***
Anpresskraft Reibpaarung P	- 5 %		
Wirkungsgrad Bremsgestänge η	- 5 %		

Die Streuung s_f ist nach [6] in die Anhaltewegberechnung nach Formel 2.1.4-3 implementiert worden:

$$s = v_0 \cdot t_n + \frac{\frac{1}{2} \cdot v_0^2 \cdot (1 + \xi)}{\frac{\lambda}{100} \cdot \frac{P}{G} \cdot \left(1 - \frac{s_f}{100}\right) \cdot \eta \cdot \mu_k \cdot + a_w + a_i} \qquad \text{mit P/G in [N/kg]} \qquad \textbf{Formel 2.2.3-2}$$

Bremswegkurven BAV/zf/Mn vom Februar 1985 [9]
Die Bremswegkurven gemäss Ergänzung a zum Kommentar Nr. 4 zur EBV [1] (Anlage A2) wurden für die Festlegung der Distanz zwischen Vor- und Hauptsignal sowie zwischen Kontrolllicht und Bahnübergang unter Berücksichtigung einer Bremskraftstreuung s_f = -16,58 % berechnet. Die Berücksichtigung dieser fahrzeugabhängigen Streuung wurde damals im Sinne der Bremswegsicherheit eingeführt, damit beispielsweise Chargenstreuungen, welchen Bremsklötze unterworfen sein können, oder Wirkungsgradverluste die während eines Wartungsintervalls bei der Kraftübertragung in der Bremsanlage auftreten können, nicht zu einer unzulässigen Verlängerung des Anhalteweges führen.

Berechnungsgrundlagen:

$t_1 = 2{,}6\ s$	Bremszylinderfüllzeit
$t_v = 1{,}0\ s$	Verlustzeit (Reaktions- und Bremsansprechzeit)
$t_n \cong 2{,}0\ s$	$t_n = 0{,}39 \cdot t_1 + t_v$ (Bremsentwicklungszeit)
$\xi = 5{,}5\ \%$	Massenfaktor
μ_k	Reibwerte nach Formel 2.2.1-1
w	Fahrwiderstand nach Formel 2.2.1-1
$P/G = 72{,}45\%$	Theoretische Abbremsung
$\eta = 92\ \%$	Gestängewirkungsgrad
$P/G \cdot \eta = 66{,}66\%$	Wirksame theoretische Abbremsung für das Modell nach Formel 2.1.4-3
$s_f = 16{,}58\ \%$	Gesamtstreuung Bremskraft

In den Jahren 2003 und 2004 wurden die Bremswegkurven wie folgt erweitert:

Neigung [‰]	Geschwindigkeit [km/h]	Anpassung vom
+ 20	90, 95, 100	10.02.2004
+ 15	95, 100	10.02.2004
+ 10	95, 100	07.11.2003
0	95, 100	07.11.2003
- 15	90, 95, 100	11.02.2004

Neigung [‰]	Geschwindigkeit [km/h]	Anpassung vom
- 20	90, 95, 100	11.02.2004
- 25	85, 90, 95	30.08.2004
- 30	80, 85, 90	30.08.2004
- 35	75, 80, 85	30.08.2004
- 40	65	07.11.2003

***Tabelle 2.2-2**: Erweiterung der Bremskurven*

Weitere dokumentarisch festgehaltene Einzelheiten zu den Hintergründen und den Ergänzungen betreffend diese Erweiterungen, liegen allerdings nicht vor. Insbesondere fehlen diesbezügliche Angaben zum Rechnungsgang.

2.3 Rechnungsgang

Wie im Kapitel 2.1.4 Berechnungsgleichung schon aufgegriffen, basiert das Bremswegberechnungsmodell gemäss Formel 2.1.4-3 betreffend Klotz-Rad Reibwert μ_k und Fahrwiderstand a_w auf Momentanwerten, welche von der Geschwindigkeit abhängig sind. Für die Berechnung des Anhalteweges bedeutet dies, dass die Bremsausgangsgeschwindigkeit in so viele Geschwindigkeitsschritte Δv zu unterteilen ist, dass innerhalb jedes Geschwindigkeitsschritts der Momentanwert des oberen Geschwindigkeitsgrenzwertes - mit hinreichender Genauigkeit - als konstant angenommen werden darf.

2.3.1 Geschwindigkeits-Schrittweite

Der zugrundeliegende Geschwindigkeitsschritt Δv wird mittels Bremswegberechnung in Anlage A6 anhand des Erfüllungsgrades der Bremswegbedingung und der Einhaltung der Vorgaben in [5] gemäss A1 nach Kapitel 2.2 ermittelt:

$s \cong 96\ m$ $a_i = 0\ m/s^2$ $v_0 = 50\ km/h$ $\lambda = 100\ \%$ $P/G \cdot \eta = 6{,}666\ N/kg$ $\overline{a} = 1\ m/s^2$
$s_f = 0$ $\eta = 0{,}92$ $\xi = 0{,}055$ $t_n \cong 1{,}0\ s$

sowie mit μ_k und a_w nach Tabelle 2.2-1 entsprechend dem Berechnungsmodell nach Formel 2.1.4-3.

Schrittweite Δv	Bremsweg s
1 km/h	94,73 m
2 km/h	95,06 m
3 km/h	95,37 m

Schrittweite Δv	Bremsweg s
4 km/h	95,68 m
5 km/h	**95,98 m**
6 km/h	96,27 m

***Tabelle 2.3-1:** v-Schrittweite*

Aufgrund der Ergebnisse in Tabelle 2.3-1 zu den Anhaltewegberechnungen mittels des Geschwindigkeitsschrittverfahrens nach Kapitel 2.3, basieren die Bremskurven auf einer Schrittweite Δv von 5 km/h. Mit der Schrittweite Δv sind nun alle erforderlichen Berechnungsparameter bekannt, welche die Analyse der bestehenden Bremstabellen IIA, III und IV ermöglichen. Der Rechnungsgang für den Anhalteweg findet sich in Form eines Flussdiagramms im Anlage A6.

2.4 Sicherheitsreserven

Gemäss Ergänzung a zu Kommentar Nr. 4 zur EBV [1] unter Punkt 1, erster Abschnitt, wie auch aus der zf-Weisung 10.85 im Anlage A3 unter Punkt 3 geht hervor, dass in den Bremswegkurven, welche der Festlegung der Distanz zwischen Vor- und Hauptsignal sowie dem Abstand zwischen Kontrolllicht und Bahnübergang dienen, eine fahrzeugabhängige Streuung von 16,58 % berücksichtigt ist. Weitere von der Bremsausrüstung der Fahrzeuge abhängige Sicherheitsreserven als die Vorgaben gemäss Kapitel 2.2.3 (Bremswegkurven BAV/zf/Mn 1985 für die Berechnung der Anhaltewege) sind nicht vorgesehen. In der Ergänzung a zum Kommentar Nr. 4 (Anlage A2) zum Teil Sicherungsanlagen wird für die Bestimmung der Distanz zwischen Vorsignal- und Hauptsignal sowie dem Abstand zwischen Kontrolllicht und Bahnübergang auf zusätzlich vorzusehende, jedoch vom Fahrzeug unabhängige Sicherheitsmargen eingegangen.

3 Referenzmodell Anhaltewegberechnung

3.1 Allgemein

Um die Güte des aktuell gültigen Berechnungsmodells «BAV_Orig» nach Kapitel 2.1 bzw. Formel 2.1.4-3 bewerten zu können, soll als Vergleich ein alternatives Modell mit möglichst hoher Genauigkeit aufgestellt werden. Das Ziel ist es, den Bremsvorgang mit den vorliegenden Eingangsgrössen physikalisch möglichst genau abzubilden. Dies gilt insbesondere für den Teilbremsweg während der Bremskraftentwicklungsphase.
Wie in Kapitel 2.1.2 dokumentiert, berücksichtigt das aktuell gültige Berechnungsmodell für die Modellierung des Bremskraftaufbaus eine Schrittfunktion, aus der die äquivalente Bremsentwicklungszeit t_n abgeleitet wird. Diese Methodik hat den Vorteil einer einfachen Berechnung bei geringem Rechenaufwand, allerdings auf Kosten der Modellgüte und damit zu Ungunsten der Genauigkeit.

3.2 Nummerische Integration, Verfahren nach Runge-Kutta 4. Ordnung (RK$_4$)

Um den Anhalteweg aus der geschwindigkeits- und zeitabhängigen Verzögerung $a = f_{(v,t)}$ möglich präzise berechnen zu können, muss diese zweimal über der Zeit integriert werden. Der Verlauf des Bremskraftaufbaus lässt sich mit der in Abbildung 2.1.2-1 dargestellten Funktion
$F_{Brems\ (t)} = F_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$, als Nachbildung des realen Druckaufbaus im Bremszylinder, hinreichend genau abbilden. Mit der Reibkraft $F_{Reib} = P{\cdot}\mu_{(v)}$ als Ansatz lässt sich für die ungleichförmige Bewegung folgende Differentialgleichung aufstellen:

$$\mathrm{F_{Reib}} \rightarrow \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{G}} \cdot \mu_{(\mathrm{v})} \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{3 \cdot \mathrm{t}}{\tau}}\right) \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot + \mathrm{a_{w_{(v)}}} + \mathrm{g} \cdot \sin\left[\tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{i}}{1000}\right)\right] = -\frac{\mathrm{dv}}{\mathrm{dt}} \cdot \mathrm{m} \cdot (1 + \xi) \qquad \textit{Formel 2.3.1-1}$$

Für diese Differentialgleichung lässt sich keine symbolische Lösung finden, mit welcher der Anhalteweg exakt berechnet werden könnte. Mittels dem klassischen Näherungsverfahren nach Runge-Kutta lässt sich das Problem jedoch lösen durch nummerische Integration.

Mit der Geschwindigkeit $v = \int a \cdot dt$ folgt für den Weg $s = \int v \cdot dt$ beziehungsweise für den Anhalteweg:

$$s = \int \frac{1}{(1+\xi)} \cdot \left[\int \left(1 - e^{-\frac{3 \cdot t}{\tau}}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \mu_{(v_{(t)})} \cdot \frac{\lambda}{100} + w_{(v_{(t)})} + g \cdot \sin\left[\tan^{-1}\left(\tfrac{i}{1000}\right)\right] \cdot dt\right] \cdot dt \qquad \textit{Formel 2.3.1-2}$$

Aus dem Reibwertgleichung $\mu_{k(v)} = a_6 v^6 + a_5 v^5 + a_4 v^4 + a_3 v^3 + a_2 v^2 + a_1 v + a_0$ *Formel 2.3.1-3*
(Koeffizienten zu Reibwertcharakteristik siehe Kapitel 4.3.5 sowie in Anlage A12)

sowie mit dem Fahrwiderstand $a_{w(v)} = (b_2 \cdot v^2 + b_0)/1000$ [ms^{-2}] *Formel 2.3.1-4*

mit $b_2 = 20$ und $b_0 = {}^2/_{300}$, wobei die Geschwindigkeit v in [km/h] einzusetzen ist, ergibt sich für

$$a_{br_{(v,t)}} = \frac{1}{(1+\xi)} \cdot \left[\left(1 - e^{-\frac{3 \cdot t}{\tau}}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{(v)} + a_{w_{(v)}} + g \cdot sin\left[tan^{-1}\left(\tfrac{i}{1000}\right)\right]\right]. \qquad \textit{Formel 2.3.1-5}$$

Dabei ist die Momentanverzögerung $a_{br(t,v)}$ mittels dem vierstufigen Näherungsverfahren nach Runge-Kutta zu berechnen mit $y' = f_{(x_n;y_n)} = a_{(t_n;v_n)}$ und einer Schrittweite $\Delta t = 0{,}01$ s.

Berechnung der angenäherten mittlere Verzögerung $\bar{a}_n$ während dem Zeitintervall Δt:

$$k_1 = -\left(1 - e^{-\left(\frac{3t_n}{\tau}\right)}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{(v)} - a_{w(v)} - a_{s(i)} \qquad \text{mit} \quad v = v_n$$

$$k_2 = -\left(1 - e^{-\left(\frac{3(t_n+\Delta t/2)}{\tau}\right)}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{(v)} - a_{w(v)} - a_{s(i)} \qquad \text{mit} \quad v = v_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot k_1$$

$$k_3 = -\left(1 - e^{-\left(\frac{3(t_n+\Delta t/2)}{\tau}\right)}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{(v)} - a_{w(v)} - a_{s(i)} \qquad \text{mit} \quad v = v_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot k_2$$

$$k_4 = -\left(1 - e^{-\left(\frac{3(t_n+\Delta t)}{\tau}\right)}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{(v)} - a_{w(v)} - a_{s(i)} \qquad \text{mit} \quad v = v_n + \Delta t \cdot k_3$$

$$\bar{a}_n = \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \cdot \frac{1}{(1+\xi)}$$

Der Anhalteweg gemäss Formel 2.3.1-2 lässt sich nun mittels nummerischer Integration berechnen:

$$s = \sum_{n=0}^{v_n=0} v_n \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \bar{a}_n \cdot \Delta t^2$$

Formel 2.3.1-6: *Anhaltewegberechnung Referenzmodell*

3.3 Anhaltewege Referenzmodell versus Modell «BAV_Orig»

3.3.1 Ansatz für den Vergleich

Um die Genauigkeit der Rechenmethoden, welche den verschiedenen Modellen zugrunde gelegt sind beurteilen zu können, sollen die Berechnungsergebnisse der beiden Modelle miteinander verglichen werden. Die Berechnungsgleichung nach Formel 2.3.1-6, welche den Bremsentwicklungsvorgang ohne Vereinfachungen beschreibt, dient dabei als Referenzmodell. Aufgrund der Vergleichsergebnisse im DB-Teilbericht_2 [10] Kapitel 3.2.2, in dem die Berechnungsergebnisse dieses Referenzmodells mit den Ergebnissen des wesentlich komplexeren und genaueren UIC-Simulationsprogramms TrainDy verglichen wurden, darf das vorliegende Referenzmodell für Bremsausgangsgeschwindigkeiten bis zu 120 km/h als genügend genau angenommen werden.

3.3.2 Anhaltewege Referenzmodell, für GG in der Ebene

Die nachfolgende Tabelle zeigt die mit dem Referenzmodell berechneten Anhaltwege für Grauguss-bremssohlen mit den im Tabellenkopf angegebenen Werten.

i	P/G	t_1	ξ	s_f
0 ‰	6,666 N/kg	2,6 s	0,055	0 %

s [m]	λ														
v_0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	22.3	12.8	9.3	7.5	6.4	5.7	5.1	4.7	4.3	4.0	3.8	3.6	3.4	3.3	3.1
20	95.3	52.9	37.5	29.5	24.6	21.3	18.9	17.1	15.6	14.5	13.5	12.7	12.0	11.4	10.8
30	228.1	126.1	88.5	68.9	56.9	48.7	42.9	38.4	34.9	32.1	29.8	27.8	26.2	24.8	23.5
40	421.9	234.2	164.0	127.1	104.5	89.1	78.0	69.6	63.0	57.7	53.3	49.6	46.5	43.8	41.5
50	673.9	377.7	264.7	205.0	168.1	143.0	124.8	111.1	100.3	91.6	84.4	78.4	73.3	69.0	65.1
60	979.7	555.9	390.8	302.8	248.2	210.9	183.9	163.4	147.3	134.3	123.6	114.6	107.0	100.5	94.8
70		767.3	542.0	420.8	345.1	293.2	255.5	226.8	204.3	186.1	171.1	158.5	147.8	138.6	130.6
80			717.1	558.2	458.3	389.6	339.5	301.3	271.3	247.0	226.9	210.1	195.8	183.5	172.8
90			913.7	713.7	587.0	499.5	435.4	386.5	347.9	316.7	290.9	269.3	250.8	234.9	221.1
100				885.4	729.8	621.8	542.5	481.8	433.8	394.9	362.7	335.6	312.6	292.7	275.4
110					885.6	755.8	660.1	586.6	528.3	481.1	441.9	409.0	380.9	356.6	335.4
120						900.5	787.4	700.3	631.1	574.9	528.2	488.9	455.3	426.3	401.0

Tabelle 3.3-1: *Anhaltewege Referenzmodell mit Grauguss Bremssohlen in [m]*

In Anlage A6.1 finden sich die Anhaltewege für die Neigungen -40 ‰ und -80 ‰ sowie die Darstellung des Bremsvorgangs über der Zeit.

3.3.3 Absolutdifferenzen BAV_Orig zu Referenzmodell, für GG in der Ebene

Untenstehende Tabelle zeigt die Differenzen $\Delta s = s_{BAV_Orig} - s_{Referenzmod.}$, welche sich aus der Anhaltwegberechnung mit dem Berechnungsmodell BAV_Orig bzw. mit dem Referenzmodell ergeben.

i	P/G	t_1	ξ	s_f
0 ‰	6,666 N/kg	2,6 s	0,055	0 %

Δs [m]	λ														
v_0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	1.6	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3
20	4.7	3.2	2.6	2.3	2.1	2.0	1.9	1.8	1.9	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0
30	7.9	4.9	4.2	3.6	3.2	3.1	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.6
40	10.1	7.8	6.0	4.9	4.5	4.1	3.9	3.7	3.5	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.2
50	12.1	9.3	7.3	7.0	5.9	5.0	5.2	4.9	4.7	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	4.0
60	12.3	11.1	9.2	8.2	7.8	7.1	6.1	5.6	5.7	5.7	5.4	5.4	5.0	4.5	4.8
70		11.7	11.0	9.2	8.9	7.8	7.5	7.2	6.7	5.9	5.9	5.5	6.2	5.4	5.4
80			11.9	10.8	9.7	9.4	8.5	7.7	7.7	7.0	7.1	6.9	6.2	6.5	6.2
90			12.3	11.3	11.0	10.5	9.6	9.5	9.1	8.3	8.1	7.7	7.2	7.1	6.9
100				12.6	12.2	11.2	10.5	10.2	9.2	9.1	9.3	8.4	8.4	8.3	7.6
110					12.4	12.2	11.9	11.4	10.7	9.9	10.1	10.0	9.1	9.4	8.6
120						12.5	11.6	11.7	10.9	11.1	10.8	10.1	9.7	9.7	10.0

Tabelle 3.3-2: *Anhalteweg Absolutdifferenzen BAV_Orig zu Referenzmodell für GG-Bremssohlen in 0 ‰*

Die Tabelle zeigt die Anhaltewegdifferenz in [m] zwischen dem BAV-Modell und dem Referenzmodell. Die absolute Maximalabweichung beträgt 12,6 m und tritt erwartungsgemäss bei den längsten Anhaltewegen auf, konkret bei $v_0 = 100\ km/h$ und $\lambda = 40\ \%$ auf. Grundsätzlich wächst die Anhaltewegdifferenz mit zunehmender Geschwindigkeit, beziehungsweise mit abnehmendem Bremsverhältnis λ bei hoher Bremsausgangsgeschwindigkeit. Im tiefen Geschwindigkeitsbereich verringert sich die Anhaltewegdifferenz mit abnehmendem Bremsverhältnis vorerst, bevor diese dann bei weiter abnehmendem Bremsverhältnis wieder etwas zunimmt. In der Ebene weisen die Anhaltewegdifferenzen durchwegs positive Zahlenwerte auf, was als «versteckte Sicherheit» bezeichnet werden kann. Mit dem genauer modellierten Referenzmodell kann diese «versteckte Sicherheit» entfallen.

3.3.4 Relativdifferenzen Modell BAV_Orig zu Referenzmodell, für GG in der Ebene

Die nächste Übersicht zeigt mit $\Delta s = 100\% \cdot \left(s_{BAV_Orig} - s_{Referenzmod.}\right) / s_{Referenzmod.}$, gegenüber Tabelle *3.3-2*, die Relativdifferenzen aus der Anhaltwegberechnung mit den beiden erwähnten Modellen.

i	P/G	t_1	ξ	s_f
0 ‰	6,666 N/kg	2,6 s	0,055	0 %

Δ [%]	λ														
v_0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	7.2	9.4	11.8	14.7	15.6	17.5	19.6	21.3	25.6	30.0	28.9	33.3	35.3	36.4	41.9
20	4.9	6.0	6.9	7.8	8.5	9.4	10.1	10.5	12.2	12.4	14.1	15.0	15.8	16.7	18.5
30	3.5	3.9	4.7	5.2	5.6	6.4	6.5	7.3	7.7	8.1	8.7	9.4	9.9	10.1	11.1
40	2.4	3.3	3.7	3.9	4.3	4.6	5.0	5.3	5.6	5.9	6.4	6.9	7.1	7.5	7.7
50	1.8	2.5	2.8	3.4	3.5	3.5	4.2	4.4	4.7	4.8	5.1	5.4	5.6	5.8	6.1
60	1.3	2.0	2.4	2.7	3.1	3.4	3.3	3.4	3.9	4.2	4.4	4.7	4.7	4.5	5.1
70		1.5	2.0	2.2	2.6	2.7	2.9	3.2	3.3	3.2	3.4	3.5	4.2	3.9	4.1
80			1.7	1.9	2.1	2.4	2.5	2.6	2.8	2.8	3.1	3.3	3.2	3.5	3.6
90			1.3	1.6	1.9	2.1	2.2	2.5	2.6	2.6	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1
100				1.4	1.7	1.8	1.9	2.1	2.1	2.3	2.6	2.5	2.7	2.8	2.8
110					1.4	1.6	1.8	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.4	2.6	2.6
120						1.4	1.5	1.7	1.7	1.9	2.0	2.1	2.1	2.3	2.5

Tabelle 3.3-3: *Anhalteweg Relativdifferenzen BAV_Orig zu Referenzmodell für GG-Bremssohlen in 0 ‰*

Die Tabelle zeigt die Anhaltewegdifferenzen als Relativbetrachtung in [%], welche sich aus den Berechnungen mit den genannten Modellen ergeben. Der Tabelle *3.3-3* ist zu entnehmen, dass die grösste Relativabweichung bei maximalem Bremsverhältnis und minimaler Bremsausgangsgeschwindigkeit auftritt, also bei $v_0 = 10\ km/h$ und $\lambda = 150\ \%$. Im Extremfall ist es möglich, dass ein Fahrzeug/Zug mit hohem

Bremsverhältnis aus tiefer Bremsausgangsgeschwindigkeit zum Stillsand kommt bevor sich die Bremskraft voll entwickelt hat. Das BAV_Orig Anhalteweg-Berechnungsmodell liefert in diesem Fall eher zu lange Anhaltewege.

3.3.5 Absolutdifferenzen BAV_Orig zu Referenzmodell, für GG und 40 ‰ Gefälle

Nachstehende Zusammenstellung zeigt die Absolutdifferenzen $\Delta s = s_{BAV_Orig} - s_{Referenzmod.}$, die sich für 40 ‰ Gefälle ergeben aus der Anhaltwegberechnung mit dem BAV_Orig bzw. dem Referenzmodell.

i	P/G	t_1	ξ	s_f
- 40 ‰	6,666 N/kg	2,6 s	0,055	0 %

Δs [m]	λ														
v_0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10			-2.5	-1.4	-0.7	-0.4	-0.1	0.1	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8
20				-1.7	-1.3	-0.8	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9
30				-0.8	-1.5	-1.3	-0.8	-0.5	-0.2	0.0	0.3	0.4	0.6	0.8	0.8
40					-2.6	-1.7	-1.8	-0.9	-0.4	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.7	0.8
50					-2.1	-1.7	-1.4	-1.1	-0.3	0.2	-0.3	0.7	0.6	0.7	0.9
60					-1.5	-1.7	-1.1	-1.0	-0.2	-0.3	0.4	0.9	0.6	0.6	0.6
70						-3.1	-2.7	-2.0	-0.7	-0.7	-0.4	0.1	0.1	0.3	0.6
80						-5.3	-3.0	-1.9	-1.1	-0.9	0.0	0.1	0.9	0.3	0.7
90							-3.6	-2.5	-1.2	-1.3	0.2	0.5	0.2	0.7	1.1
100								-2.4	-1.7	-0.7	0.1	-0.1	0.5	1.2	1.2
110									-2.3	-1.3	-0.7	-0.1	0.4	0.9	1.4
120										-1.7	-1.1	0.2	0.4	0.6	1.0

Tabelle 3.3-4: *Anhalteweg Absolutdifferenzen BAV_Orig zu Referenzmodell in -40 ‰ für GG-Bremssohlen*

Obige Tabelle zeigt für ein Gefälle von 40 ‰ die Anhaltewegdifferenzen in [m], welche sich aus den Berechnungen mit dem BAV-Modell beziehungsweise mit dem Referenzmodell ergeben. Gegenüber den entsprechenden Differenzen in der Ebene nach Tabelle 3.3-2, treten im Gefälle mit abnehmendem Bremsverhältnis zusätzlich negative Differenzwerte auf. Dies bedeutet, dass das «BAV_Orig» Modell gegenüber dem Referenzmodell zu kurze Anhaltewege berechnet.

Relativdifferenzen: $\Delta s = 100\% \cdot \left(s_{BAV_Orig} - s_{Referenzmodell}\right) / s_{Referenzmodell}$ [%]

i	P/G	t_1	ξ	s_f
- 40 ‰	6,666 N/kg	2,6 s	0,055	0 %

Δ [%]	λ														
v_0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10			-7.4	-8.2	-5.9	-4.3	-1.3	1.5	5.0	5.5	10.0	10.6	13.6	17.1	20.5
20				-2.1	-2.6	-2.1	-1.3	-0.8	0.5	1.5	2.2	3.0	3.9	4.9	6.7
30				-0.4	-1.2	-1.4	-1.1	-0.8	-0.4	0.0	0.7	1.1	1.8	2.5	2.7
40					-1.0	-1.0	-1.3	-0.8	-0.4	-0.2	0.1	0.6	0.8	1.2	1.5
50					-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.2	0.1	-0.3	0.7	0.6	0.8	1.1
60					-0.2	-0.4	-0.3	-0.4	-0.1	-0.1	0.2	0.6	0.4	0.5	0.5
70						-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	0.0	0.2	0.4
80						-0.6	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2	0.0	0.0	0.3	0.1	0.3
90							-0.4	-0.4	-0.2	-0.3	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4
100								-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3
110									-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3
120										-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.1	0.2

Tabelle 3.3-5: *Anhalteweg Relativdifferenzen BAV_Orig* zu Referenzmodell *in -40 ‰ für* GG-*Bremssohlen*

Als Ergänzung zu den Absolutdifferenzen, zeigt die obige Tabelle die relativen Differenzen in [%]. Die Abweichungen in Tabelle 3.3-5 zeigen, dass die grössten Anhaltewegdifferenzen bei tiefen Bremsausgangsgeschwindigkeiten auftreten. Dies lässt sich, wie schon anhand der Tabelle 3.3-3 festgestellt wurde, mit der unterschiedlichen Modellierung der Bremsentwicklungsphase im «BAV_Orig» Modell begründen. Im Unterschied zu der Bremsung in der Ebene, treten jedoch im Gefälle sowohl positive wie auch negative

Anhaltewegdifferenzen auf. Bei Betrachtung der Abweichungen für die Bremsausgangsgeschwindigkeit von 10 km/h lässt sich feststellen, dass die minimale Anhaltewegdifferenz bei einem Bremsverhältnis von 70 % < λ < 80 % liegt. Diese Minimalabweichung verschiebt sich bei einem bestimmten Gefälle und zunehmender Geschwindigkeit hin zu einem grösseren Bremsverhältnis.

Absolutdifferenzen: $\Delta s = s_{BAV_Orig} - s_{Referenzmodell}$ [m]

i	P/G	t_1	ξ	s_f
- 80 ‰	6,666 N/kg	2,6 s	0,055	0 %

Δs [m]	λ														
v_0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10					-21.4	-6.0	-3.5	-2.3	-1.6	-1.1	-0.8	-0.6	-0.3	-0.1	0.0
20						-19.8	-9.2	-6.0	-4.3	-3.3	-2.5	-1.9	-1.5	-1.2	-0.9
30							-18.3	-10.8	-7.9	-6.0	-4.6	-3.7	-3.0	-2.5	-2.0
40							-29.4	-18.1	-12.2	-9.4	-7.1	-5.8	-4.8	-3.9	-3.3
50								-21.7	-15.9	-12.4	-9.4	-7.3	-6.5	-4.9	-4.4
60									-19.2	-14.8	-11.5	-10.2	-7.6	-6.5	-6.0
70									-24.9	-19.3	-15.4	-12.6	-10.2	-9.1	-7.3
80										-24.0	-18.4	-15.4	-12.8	-10.2	-8.6
90											-19.7	-16.4	-13.7	-11.3	-10.3
100												-18.2	-15.2	-13.0	-10.7
110													-17.1	-14.6	-11.9
120														-15.1	-13.6

Tabelle 3.3-6: *Anhalteweg Absolutdifferenzen BAV_Orig* zu Referenzmodell *in -80 ‰ für GG-Bremssohlen*

Relativdifferenzen: $\Delta s = 100\% \cdot \left(s_{BAV_Orig} - s_{Referenzmodell}\right) / s_{Referenzmodell}$ [%]

i	P/G	t_1	ξ	s_f
- 80 ‰	6,666 N/kg	2,6 s	0,055	0 %

Δ [%]	λ														
v_0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10					-29.6	-24.7	-22.4	-19.5	-16.7	-13.4	-11.1	-9.2	-5.1	-1.9	0.0
20						-11.6	-12.3	-12.0	-11.3	-10.6	-9.4	-8.2	-7.2	-6.3	-5.1
30							-7.6	-8.0	-8.2	-7.9	-7.3	-6.8	-6.3	-5.8	-5.1
40							-4.4	-6.1	-6.2	-6.3	-5.9	-5.7	-5.4	-4.9	-4.6
50								-3.8	-4.5	-4.8	-4.6	-4.3	-4.4	-3.8	-3.8
60									-3.3	-3.6	-3.6	-3.9	-3.4	-3.3	-3.5
70									-2.8	-3.2	-3.3	-3.3	-3.2	-3.3	-3.0
80										-2.8	-2.8	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6
90											-2.3	-2.4	-2.4	-2.3	-2.4
100												-2.1	-2.1	-2.1	-1.9
110													-1.9	-1.9	-1.8
120														-1.6	-1.7

Tabelle 3.3-7: *Anhalteweg Relativdifferenzen BAV_Orig* zu Referenzmodell *in -80 ‰ für* GG-*Bremssohlen*

Die beiden Tabellen oben zeigen nun die entsprechenden Differenzen für ein Streckengefälle von 80 ‰. In starken Gefällen verhalten sich die Anhaltewegdifferenzen gemäss Tabelle *3.3-6* und Tabelle *3.3-7* erwartungsgemäss umgekehrt als in der Ebene nach Tabelle *3.3-2* und Tabelle *3.3-3*. Dies bedeutet, dass die mit dem «BAV_Orig-Modell» für das starke Gefälle berechneten Anhaltewege im Gegensatz zu denen in der Ebene, durchwegs länger als jene des Referenzmodells sind. Der Grund dafür ist die Modellierung des Bremskraftaufbaus im «BAV_Orig-Modell», welche die Gefälle-Abhängigkeit des zurückgelegten Bremsweges während des Bremskraftaufbaus nicht berücksichtigt.
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Anhaltewegberechnung gemäss «BAV_Orig- Modell» in der Ebene und kleinen Gefällen gegenüber dem Referenzmodell «versteckte» Sicherheitsreserven beinhaltet. Für grosse Gefälle liefert die Anhaltewegberechnung nach dem «BAV_Orig- Modell» allerdings durchwegs zu kurz Anhaltewege, was als Sicherheitsrisiko einzustufen ist.

3.3.6 Bewertung Anhaltewegberechnungsmodell «BAV_Orig»

Mit dem im Kapitel 3 dokumentierten Referenzmodell lassen sich die Anhaltewege methodisch merklich exakter berechnen als mit dem bisherigen «BAV_Orig»-Berechnungsmodellmodell. Letzteres wurde im Jahr 1984 mit der Erstausgabe der AB-EBV eingeführt. Dieses Modell ist relativ einfach zu handhaben und physikalisch gut nachvollziehbar, dies jedoch auf Kosten der Genauigkeit. Möglicherweise stand bei der Einführung des «BAV_Orig-Modells», in Anbetracht der damaligen rechentechnischen Möglichkeiten, die Einfachheit der Handhabung in Konkurrenz zu einer höheren Modellgüte. Mit den heutigen allgemein zur Verfügung stehenden Rechenmöglichkeiten ist eine problemlose Handhabung des Referenzmodells gegeben.

Mit dem Referenzmodell wird die physikalische Nachvollziehbarkeit der Anhaltewegberechnung verbessert, unter Beibehaltung des Bezugs zu den betrieblichen Kenngrössen.

Im Vergleich zu dem aktuell gültigen Anhaltewegberechnungsmodell «BAV_Orig» weist das Referenzmodell die höhere Modell-Güte auf. Das verfeinerte Integrationsverfahren bewirkt eine weitere Verbesserung der Genauigkeit bei der Anhaltewegberechnung.

Die DBS unterstützt in ihrem 2. Teilbericht [10] unter Kapitel 3.1.3, die Einführung einer exponentiell ansteigenden Bremskraft im Referenzmodell für die Anhaltewegberechnung. Damit wird eine deutlich verbesserte Modellierung der Bremskraftentwicklung erreicht.

3.4 Betrachtung des Näherungsverfahrens im Referenzmodell

In Kapitel 3.2 wurde die Herleitung des Referenzmodells zur Berechnung des Anhalteweges sowie der Ansatz für die nummerische Lösung des Differentialgleichungssystems nach dem klassischen Runge-Kutta Verfahren 4. Ordnung behandelt. Dieses Näherungsverfahren ist nicht sehr anschaulich, relativ rechenintensiv und fehleranfällig in der Implementierung, sofern keine entsprechenden mathematischen Tool-Bibliotheken zur Verfügung stehen. Es soll im Folgenden deshalb geklärt werden, ob sich bei ähnlicher Genauigkeit ein vereinfachtes Näherungsverfahren heranziehen lässt und wie weit die mit $\Delta t = 0.01\ s$ gewählte Schrittweite zu Gunsten eines geringeren Rechenaufwandes ausgedehnt werden könnte.

3.4.1 Runge-Kutta Verfahren 2. Ordnung (RK_2) nach der Methode von Heun

Die Differentialgleichung nach Formel 2.3.1-5 lässt sich auch darstellen als $y' = f_{(x_n\,;\,y_n)}$. In dem zweistufigen Verfahren nach der Methode von Heun wird der Funktionsmittelwert angenähert für das Koordinatenpaar $f(x_n;y_n)$ und $f(x_n + h; y_{n+1})$ mit der Schrittweite h. Approximiert wird y_{n+1} nach dem expliziten Euler-Verfahren 1. Ordnung mit $y_{n+1} = y_n + h \cdot f(x_n;y_n)$.

Daraus ergibt sich nach diesem Verfahren für den Zeitschritt $h = \Delta t$ mit

$$k_1 = -\left(1 - e^{-\left(\frac{3t_n}{\tau}\right)}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{k(v)} - a_{w(v)} - a_{s(i)} \qquad \text{wobei} \quad v = v_n \text{ und mit}$$

$$k_2 = -\left(1 - e^{-\left(\frac{3(t_n+\Delta t)}{\tau}\right)}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{k(v)} - a_{w(v)} - a_{s(i)} \qquad \text{wobei} \quad v = v_n + \Delta t \cdot k_1$$

eine mittlere Verzögerung von $\bar{a}_n = \frac{(k_1+k_2)}{2(1+\xi)}$ ***Formel 3.4.1-1:*** *Mittlere Verzögerung RK_2*

Der Anhalteweg berechnet sich sodann nach Formel 2.3.1-6 mit: $s = \sum_{n=0}^{v_n=0} v_n \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \bar{a}_n \cdot \Delta t^2$

3.4.2 Anhaltewegvergleich bei verschiedenen Näherungsverfahren

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Relativdifferenzen $\Delta s = (RK_2 - RK_4)/RK_4 \cdot 1000‰$, welche sich aus der Berechnung der Anhaltewege nach dem 4-stufigen Verfahren (RK_4) gemäss Abschnitt 3.2, beziehungsweise nach dem 2-stufigen Verfahren (RK_2) gemäss Abschnitt 3.4.1 ergeben. Die folgenden Tabellen geben eine Überblich zu den Relativdifferenzen für die Ebene und für die Gefälle 40 und 80 ‰.

0 ‰	λ [%]														
v [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0129	0.0000	0.0158	0.0000	0.0185	0.0000	0.0000	0.0220	0.0000	0.0000
20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	0.0036	0.0041	0.0000	0.0000	0.0055	0.0059	0.0000	0.0000	0.0070	0.0000
30	0.0000	0.0006	0.0009	0.0012	0.0014	0.0000	0.0019	0.0000	0.0024	0.0026	0.0028	0.0000	0.0032	0.0034	0.0000
40	0.0002	0.0004	0.0010	0.0007	0.0008	0.0010	0.0022	0.0012	0.0014	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0000
50	0.0003	0.0002	0.0007	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0020	0.0011	0.0023	0.0025	0.0013	0.0014
60		0.0000	0.0002	0.0009	0.0004	0.0009	0.0005	0.0006	0.0013	0.0007	0.0007	0.0008	0.0017	0.0009	0.0010
70		0.0001	0.0000	0.0004	0.0005	0.0003	0.0004	0.0004	0.0009	0.0015	0.0011	0.0006	0.0013	0.0014	0.0015
80			0.0004	0.0002	0.0002	0.0002	0.0006	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0009	0.0010	0.0011	0.0011
90			0.0002	0.0001	0.0005	0.0004	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0012	0.0008	0.0013
100				0.0004	0.0007	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0010	0.0005	0.0009	0.0010	0.0010	0.0007
110					0.0001	0.0004	0.0005	0.0002	0.0004	0.0008	0.0005	0.0010	0.0005	0.0006	0.0006
120						0.0001	0.0005	0.0004	0.0006	0.0005	0.0006	0.0006	0.0007	0.0012	0.0005

Tabelle 3.4-1: *Relative Anhaltewegdifferenzen in ‰ bei Δt=0,01s* *Neigung = **0 ‰***

- 40 ‰	λ [%]														
v [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10				0.0017	0.0038	0.0056	0.0000	0.0000	0.0000	0.0118	0.0131	0.0000	0.0155	0.0000	0.0178
20				0.0018	0.0010	0.0016	0.0021	0.0026	0.0031	0.0000	0.0040	0.0044	0.0048	0.0052	0.0056
30				0.0010	0.0009	0.0007	0.0010	0.0025	0.0029	0.0017	0.0019	0.0021	0.0000	0.0025	0.0027
40				0.0005	0.0013	0.0017	0.0011	0.0014	0.0017	0.0020	0.0011	0.0025	0.0014	0.0015	0.0032
50					0.0010	0.0011	0.0007	0.0014	0.0011	0.0013	0.0014	0.0016	0.0027	0.0019	0.0021
60					0.0005	0.0004	0.0008	0.0006	0.0008	0.0009	0.0005	0.0011	0.0013	0.0007	0.0007
70						0.0004	0.0007	0.0005	0.0008	0.0010	0.0007	0.0013	0.0014	0.0015	0.0017
80						0.0005	0.0004	0.0009	0.0007	0.0008	0.0012	0.0010	0.0011	0.0016	0.0013
90							0.0006	0.0003	0.0005	0.0006	0.0009	0.0013	0.0011	0.0012	0.0007
100								0.0005	0.0004	0.0005	0.0013	0.0008	0.0009	0.0008	0.0011
110									0.0003	0.0003	0.0008	0.0010	0.0006	0.0006	0.0009
120										0.0007	0.0009	0.0013	0.0011	0.0009	0.0008

Tabelle 3.4-2: *Relative Anhaltewegdifferenzen in ‰ bei Δt=0,01s* *Neigung = **-40 ‰***

- 80 ‰	λ [%]														
v [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10							0.0052	0.0050	0.0041	0.0056	0.0070	0.0084	0.0096	0.0000	0.0000
20							0.0037	0.0021	0.0024	0.0034	0.0022	0.0026	0.0061	0.0035	0.0077
30								0.0016	0.0011	0.0016	0.0021	0.0025	0.0029	0.0034	0.0019
40								0.0012	0.0016	0.0018	0.0024	0.0022	0.0026	0.0020	0.0022
50								0.0009	0.0014	0.0015	0.0008	0.0014	0.0017	0.0013	0.0022
60									0.0010	0.0014	0.0011	0.0013	0.0016	0.0014	0.0015
70										0.0007	0.0012	0.0012	0.0014	0.0017	0.0019
80										0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0008	0.0015
90											0.0010	0.0006	0.0009	0.0010	0.0009
100												0.0008	0.0011	0.0013	0.0011
110													0.0008	0.0004	0.0011
120														0.0006	0.0005

Tabelle 3.4-3: *Relative Anhaltewegdifferenzen in ‰ bei Δt=0,01s* *Neigung = **-80 ‰***

Die relativen Anhaltewegdifferenzen in [‰], welche sich aus der Berechnung mit unterschiedlichen Näherungsverfahren ergeben, sind über den gesamten Gefällebereich bei einem Zeitschritt von $\Delta t = 0.01\,s$ sehr gering. Bezogen auf das 4-stufige Näherungsverfahren (RK_4), liefert das zweistufige Verfahren (RK_2) nach der Methode von Heun um maximal 0,022 ‰ zu lange und damit um geringfügig sicherere Anhaltewege.

3.4.3 Anhaltewegvergleich bei Variation der Schrittweite Δt

Der Rechenaufwand für die Ermittlung der Anhaltewege ist stark abhängig von der im Näherungsverfahren angewandten Schrittweite Δt. Das Näherungsverfahren liefert umso genauere Werte, je kürzer der Zeitschritt gewählt wird. Allerdings steigt mit zunehmender Genauigkeit auch der Rechenaufwand entsprechend an. Nachfolgend geht es darum die optimale Schrittweite Δt festzulegen für eine genügend genaue Anhaltewegberechnung bei minimiertem Rechenaufwand.

Relative Anhaltwegdifferenzen in Abhängigkeit der Streckenneigung

0 ‰	λ [%]														
v [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	0.066	0.121	0.159	0.199	0.225	0.257	0.274	0.285	0.292	0.314	0.315	0.313	0.308	0.301	0.290
20	0.034	0.063	0.089	0.112	0.138	0.160	0.173	0.193	0.201	0.218	0.229	0.238	0.246	0.260	0.266
30	0.023	0.043	0.062	0.079	0.097	0.110	0.125	0.138	0.152	0.163	0.173	0.183	0.195	0.203	0.207
40	0.018	0.033	0.046	0.057	0.072	0.084	0.095	0.107	0.118	0.126	0.137	0.147	0.154	0.163	0.168
50	0.015	0.026	0.038	0.047	0.059	0.069	0.079	0.089	0.096	0.105	0.114	0.120	0.128	0.135	0.141
60		0.023	0.032	0.041	0.048	0.059	0.065	0.073	0.082	0.088	0.094	0.103	0.110	0.115	0.121
70		0.020	0.027	0.036	0.043	0.050	0.057	0.065	0.072	0.078	0.083	0.090	0.096	0.101	0.106
80			0.025	0.031	0.039	0.046	0.051	0.057	0.063	0.070	0.075	0.079	0.085	0.092	0.096
90			0.019	0.026	0.031	0.033	0.038	0.042	0.048	0.051	0.054	0.060	0.062	0.066	0.071
100				0.025	0.030	0.031	0.036	0.038	0.044	0.047	0.051	0.053	0.059	0.061	0.064
110					0.027	0.030	0.034	0.036	0.039	0.042	0.045	0.049	0.052	0.055	0.060
120						0.027	0.030	0.034	0.037	0.040	0.043	0.045	0.049	0.051	0.053

Tabelle 3.4-4: *Relative Anhaltewegdifferenzen in ‰ bei RK_4_Δt=0,01s und RK_2_Δt=0,1s* ***Neigung = 0 ‰***

- 40 ‰	λ [%]														
v [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10				0.259	0.290	0.326	0.344	0.365	0.384	0.400	0.405	0.401	0.419	0.417	0.427
20				0.138	0.160	0.180	0.199	0.220	0.235	0.249	0.263	0.278	0.289	0.297	0.307
30				0.092	0.108	0.123	0.139	0.152	0.166	0.179	0.191	0.201	0.212	0.222	0.231
40				0.070	0.080	0.096	0.104	0.115	0.127	0.139	0.148	0.157	0.166	0.174	0.184
50					0.063	0.072	0.084	0.093	0.102	0.114	0.120	0.130	0.136	0.144	0.153
60					0.053	0.063	0.070	0.079	0.087	0.094	0.101	0.107	0.115	0.122	0.129
70						0.052	0.060	0.067	0.073	0.082	0.088	0.095	0.100	0.107	0.112
80						0.047	0.052	0.060	0.066	0.072	0.080	0.083	0.090	0.096	0.099
90							0.040	0.045	0.052	0.054	0.059	0.063	0.069	0.070	0.075
100								0.041	0.044	0.050	0.053	0.056	0.062	0.065	0.070
110									0.042	0.045	0.049	0.052	0.054	0.060	0.061
120										0.042	0.045	0.048	0.051	0.053	0.058

Tabelle 3.4-5: *Relative Anhaltewegdifferenzen in ‰ bei RK_4_Δt=0,01s und RK_2_Δt=0,1s* ***Neigung = -40 ‰***

- 80 ‰	λ [%]														
v [km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10							0.490	0.463	0.474	0.489	0.500	0.510	0.520	0.520	0.527
20							0.324	0.265	0.274	0.288	0.303	0.313	0.327	0.337	0.349
30								0.183	0.191	0.200	0.213	0.222	0.234	0.246	0.255
40								0.140	0.145	0.153	0.161	0.173	0.182	0.190	0.197
50								0.111	0.116	0.122	0.131	0.140	0.146	0.153	0.161
60									0.095	0.100	0.110	0.115	0.121	0.129	0.136
70										0.087	0.093	0.098	0.106	0.111	0.120
80										0.075	0.081	0.086	0.091	0.099	0.104
90											0.065	0.067	0.072	0.077	0.081
100												0.062	0.068	0.069	0.071
110													0.058	0.061	0.064
120														0.057	0.061

Tabelle 3.4-6: *Relative Anhaltewegdifferenzen in ‰ bei RK_4_Δt=0,01s und RK_2_Δt=0,1s* ***Neigung = -80 ‰***

Die maximalen relativen Anhaltewegdifferenzen, welche sich bei einer 10-fachen Ausweitung des Zeitschritts von $\Delta t = 0.01\,s \rightarrow 0{,}1\,s$ über den gesamten Neigungsbereich ergeben, sind gering. Bezogen auf das 4-stufige Näherungsverfahren (RK_4) mit $\Delta t = 0.01\,s$, liefert das zweistufige Verfahren (RK_2) mit $\Delta t = 0.1\,s$ für den Gefällebereich bis – 80 ‰ maximal 0,527 ‰ zu lange Anhaltewege, beziehungsweise maximal 0,231 ‰ zu lange Anhaltewege und für den Steigungsbereich bis + 80 ‰.

In der Grafik auf der nachfolgenden Seite ist die Entwicklung der relativen Abweichungen dargestellt, für die Berechnungsverfahren nach 2. beziehungsweise 4. Ordnung in Abhängigkeit der Schrittweite Δt.

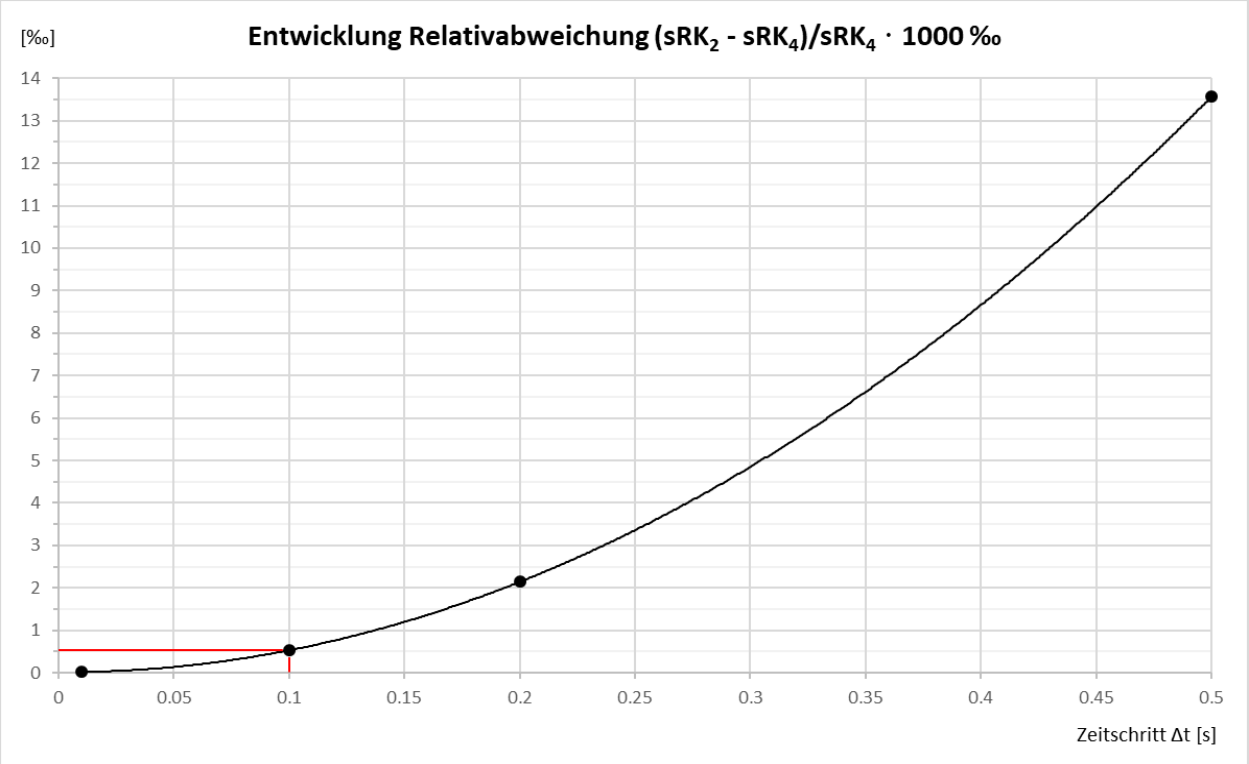


Abbildung 3.4.3-1: *Maximale Relativabweichung für 0 bis 80 ‰ Gefälle in Abhängigkeit des Zeitzschritts Δt*

Die grafische Darstellung oben zeigt die Betrachtung für weitere Zeitschritte Δt. Im Verhältnis zu der fahrzeugbedingten Anhalteweg-Streuung aufgrund der zu berücksichtigenden Bremskraftstreuung von 16,58 %, sind die mit einer Zeitschrittausweitung auf $\Delta t = 0.1\ s$ einhergehenden Anhaltewegdifferenzen sehr gering und damit vernachlässigbar. Handelsübliche Bürorechner erbringen problemlos die erforderliche Rechenleistung, um Anhaltewege aus Bremsausgangsgeschwindigkeiten von 120 km/h bei einer minimalen Effektivverzögerung von 0,13 ms^{-2} effizient berechnen zu können.

Für die Anhaltewegberechnung nach Formel 2.3.1-6 wird als numerische Lösung das 2-stufige Näherungsverfahren nach der Methode von Heun gemäss Formel 3.4.1-1 mit der Schrittweite $\Delta t = 0.1\ s$ festgelegt.

Festlegung 3.4.3-1

Weitere Ergebnisse zu den Anhaltewegdifferenzen mit den Zeitschritten $\Delta t = 0.1, 0.2$ und 0.5 s, beziehungsweise für positive Neigungswerte, finden sich in der Anlage A6.3.

4 Bremsbewertung

4.1 Bremsbewertung Stand AB-EBV 2016

An der Methodik der aktuell gültigen Bremsbewertung für Einzelfahrzeuge soll grundsätzlich festgehalten werden. Jedoch besteht seitens der EVU der Bedarf, die Bremsbewertung dem Stand der Technik und den betrieblichen Bedürfnissen besser anzupassen. Faktisch bedeutet dies, dass die Bremsbewertungskennlinien nicht mehr alleine auf den Reibwerteigenschaften der Grauguss Klotzbremse, sondern auch auf jenen der Verbundstoff-Bremssohle und der Scheibenbremse basieren müssen.
Aufgrund der permanenten technischen Weiterentwicklung im Fahrzeugbereich und der durchgeführten Um- und Ausbauten der Eisenbahninfrastruktur, könne auf gewissen Streckenabschnitten auch mit höheren Geschwindigkeiten gefahren werden, als das aktuelle Regelwerk dies derzeit zulasse, argumentieren die Vertreter der EVU und begründen damit ihren Bedarf nach aktualisierten Regelungen.

Die in diesem Kapitel durchgeführten Analysen und angestellten Vergleiche, welche die **bestehenden Vorschriften** betreffen, basieren auf dem aktuell gültigen Anhalteweg-Berechnungsmodell «BAV-Orig» nach Formel 2.1.4-3.

4.2 Geschwindigkeitserweiterung Bremsbewertung

Voraussetzung für die Erweiterung des Geschwindigkeitsbereichs zur Bewertung der Fahrzeugbremse ist das Vorhandensein eines adäquaten Anhaltewegberechnungsmodells. Ein entsprechendes Berechnungsmodell wurde in Kapitel 3 hergeleitet, dokumentiert und gemäss Kapitel 3.2 im Bericht [10] der DB-Systemtechnik konsolidiert.

Die Bedarfserhebung, welche in Workshops mit Vertretern der Bahnen und des VöV durchgeführt wurde, hat ergeben, dass eine Erweiterung des Geschwindigkeitsbereichs um 20% beziehungsweise eine Anhebung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 120 km/h sinnvoll ist. Die Geschwindigkeitserweiterung zieht selbstverständlich auch eine Validierung des Gültigkeitsbereichs des Anhaltewegberechnungsmodells nach sich. Die DB-Systemtechnik hat diese Validierung vorgenommen gemäss den Ergebnissen in Kapitel 3.2 des 2. Teilberichts [10].

4.3 Folgen einer Reibwertanpassung auf die Bremsbewertung

4.3.1 Grundsätzliches

Die momentane Bremskraft der Reibbremse wird bestimmt von der Anpresskraft zwischen den Reibpartnern sowie dem entsprechenden Momentanreibwert. Dabei gelangen unterschiedliche Bremsbauarten und Reibwertcharakteristiken zum Einsatz. Es sind dies die

- Klotzbremse mit Grauguss Bremssohle,
- Klotzbremse mit Verbundstoff Bremssohle und die
- Scheibenbremse mit Verbundstoffbelag.

Die Anlage A12 enthält weitere Angaben zu den Reibwerten in nachfolgender Abbildung 4.3.1-1:

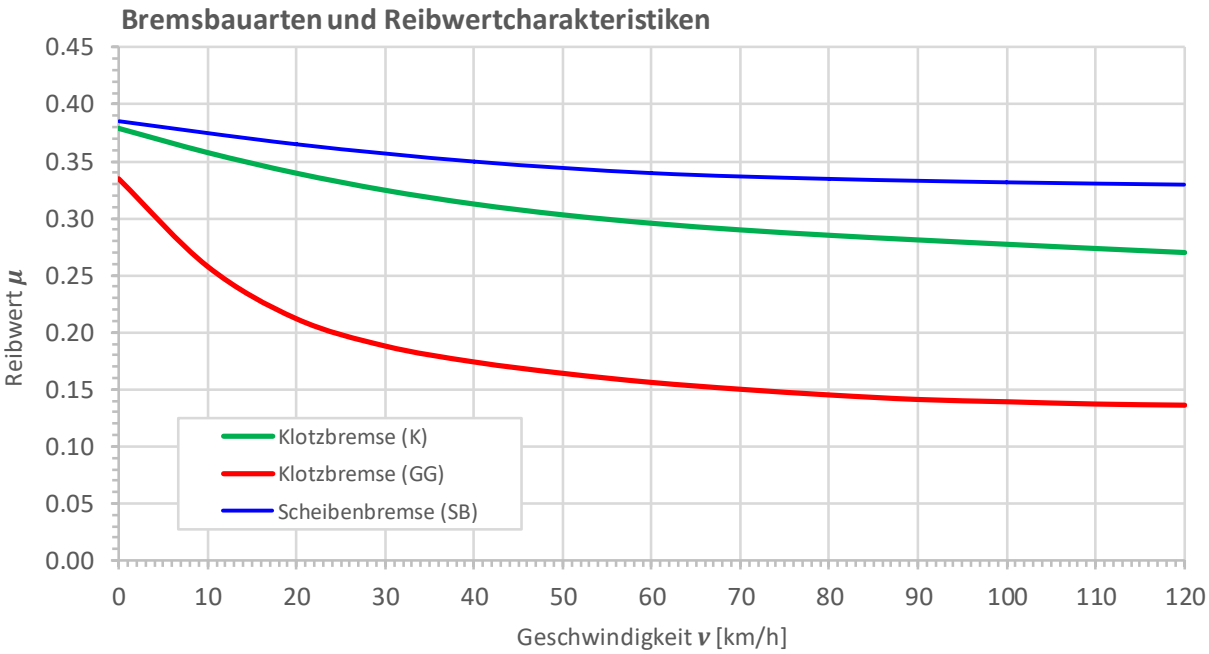


Abbildung 4.3.1-1: *Reibwertcharakteristiken* *Quelle: Fahrdynamik des Schienenverkehrs* [11]

In Bezug auf die Bestandesfahrzeuge wäre es wünschenswert, die Festlegungen für die Bremsbewertung gemäss Kapitel 2.2 auch mit veränderter Reibwertcharakteristik beizubehalten. Mit entsprechender Anpassung der physikalischen Abbremsung in Formel 2.1.4-3 liesse sich dies, zumindest für die aktuell gültige Kalibrierungs-Bremsausgangsgeschwindigkeit $v_0 = 50$ km/h, erfüllen.

Für alle anderen Bremsausgangsgeschwindigkeiten als 50 km/h entstehen bei einer Reibwertanpassung jedoch Abweichungen, deren Auswirkungen zu untersuchen sind. Es ist zu klären, ob allenfalls für Bestandesfahrzeuge, deren Bremsen auf der Basis der GG-Bremssohlen bewertet wurden, gewisse Einschränkungen erforderlich werden. Die Reibwertcharakteristik für die Anhaltewegberechnung ist so festzulegen, dass sich beim freizügigen Einsatz von unterschiedlichen Bremsbauarten und Reibwertcharakteristiken keine sicherheitstechnische Lücke ergibt.

4.3.2 Sicherheitsaspekte und Kalibrierung

Das Ergebnis einer ersten Gegenüberstellung der Bremsbewertungskennlinien, welche mit den Reibwerten gemäss A12 für Grauguss- beziehungsweise für Verbundstoffbremssohlen mit dem Anhaltewegberechnungsmodell «BAV_Orig» berechnet wurden, findet sich in der Anlage A7. Die physikalische Abbremsung $P/G/g \cdot \eta$ von 6666 [N/t] für Graugussbremssohlen wurde für die Verbundstoffsohle auf 3800 [N/t] reduziert, sodass bei einer Bremsausgangsgeschwindigkeit von v_0 = 50 km/h und einem Bremsverhältnis von λ=100 % ein Anhalteweg von rund 96 Meter resultiert, entsprechend der Definition nach AB-EBV [2] zu Art. 52, AB 52.2 Ziff. 6.1.1. Der Darstellung in Anlage A7 ist weiter zu entnehmen, dass die K-Bremsbewertungskennlinien für höhere Bremsausgangsgeschwindigkeiten als 50 km/h immer tiefere und für kleinere Geschwindigkeiten als 50 km/h durchwegs höhere Bremsverhältnisse liefern, als die aktuell gültigen GG-Bremsbewertungskennlinien. Auf die Anhaltewegberechnung bezogen heisst dies, dass die angepasste K-Bremsbewertung bei Bremsausgangsgeschwindigkeiten grösser 50 km/h kürzere und für solche kleiner 50 km/h längere Anhaltewege liefert gegenüber den tatsächlichen Anhaltewegen von GG-Bestandesfahrzeugen.

Für Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen, deren Bremsen nach den Original GG-Bremsbewertungskennlinien bewertet sind, hat eine Reibwertanpassung auf K-Charakteristik für Geschwindigkeiten oberhalb der Kalibrierungsgeschwindigkeit sicherheitsrelevante Folgen. Die Anhaltewegberechnung mit geänderten Reibwerten liefert für Bremsausgangsgeschwindigkeiten grösser 50 km/h zu kurze Bremswege gegenüber dem tatsächlichen Anhalteweg. Für Bremsausgangsgeschwindigkeiten unterhalb 50 km/h werden hingegen längere als die tatsächlichen Bremswege berechnet. Dies ist sicherheitstechnisch unproblematisch, schafft jedoch «versteckte» Sicherheitsreserven.

4.3.3 Konflikt Bestandesfahrzeuge und geänderte Bremsbewertung

Wie aus Kapitel 4.3.2 hervor geht ist es zwingend erforderlich, dass die Bremsbewertung und die Anhaltewegberechnung auf ein und derselben Reibwertcharakteristik basieren. Für Bestandesfahrzeuge mit GG-Bremssohlen, deren Bremse an entsprechenden Bremsbewertungskennlinien bewertet wurden, ist dies bei einem Wechsel der Reibwertcharakteristik, von dem sowohl die Bremsbewertung als auch die Anhaltewegberechnung betroffen sind, nicht mehr gegeben.

Migration Variante I Kalibrierung mit geänderter Bremsbewertung auf Basis der K-Charakteristik, gemäss den Vorgaben nach AB-EBV [2] zu Art. 52, AB 52.2 Ziff. 6.1.1:

Kapitel 4.3.2 und Anlage A7 zeigen die Auswirkungen dieser Migrationsvariante. Die Bremsanschriften der Bestandesfahrzeuge mit GG-Bremssohlen, welche künftig mit Fahrgeschwindigkeiten von mehr als 50 km/h verkehren, müssten angepasst werden. Alternativ wäre auch die Einführung weiterer Restriktionen denkbar.
Die nachfolgende Abbildung 4.3.3-1 zeigt den kritischen Bereich, welcher eine solche Umbeschriftung der Bestandesfahrzeuge mit GG-Bremssohlen erforderlich machen würde:

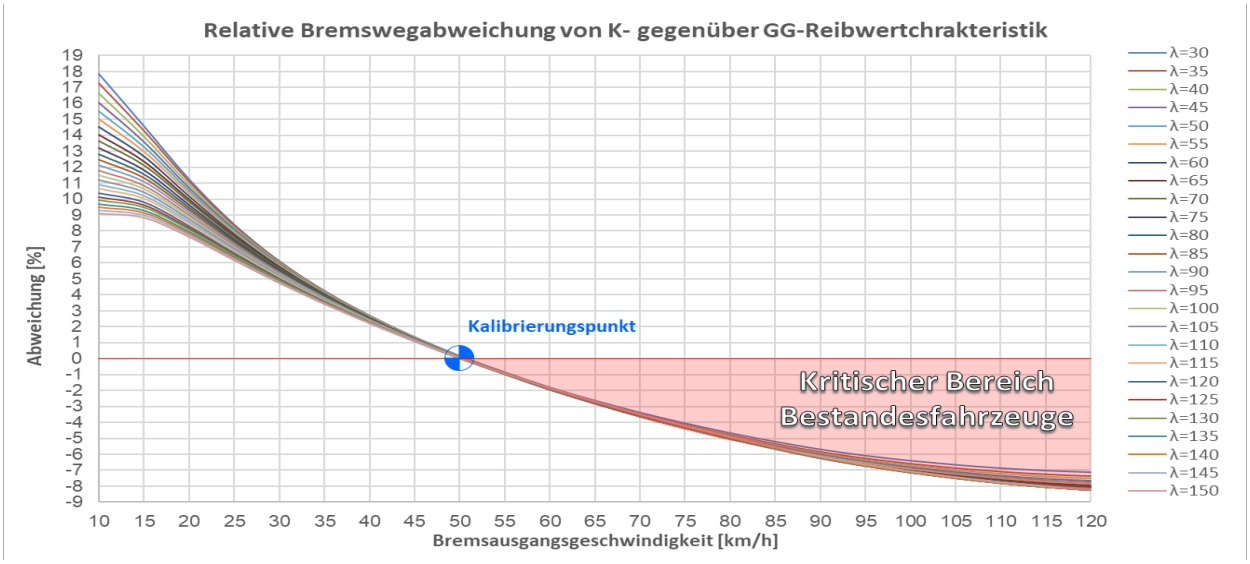


***Abbildung 4.3.3-1**: Anhaltewegabweichungen in der Ebene für GG ⇔ K mit $v_{\lambda_{Kal.\ 100\%}}$=50 km/h*

Migration Variante II Ein anderer Ansatz könnte auch sein, die aktuell gültige Kalibrierungsvorgabe für die Bremsbewertung nach AB-EBV [2] gemäss AB-EBV zu Art. 52, AB 52.2 Ziff. 6.1.1 durch eine neue Definition so zu ersetzen. So könnten bremstechnische Sicherheitslücken vermieden werden.

Die Bremsbewertung könnte beispielsweise so kalibriert werden, dass nach einer Schnellbremsung in der Ebene aus der Bremsausgangsgeschwindigkeit von 120 km/h bei einem Bremsverhältnis von 120 % das Fahrzeug nach rund 500 Meter zum Stillstand kommt. Im Vergleich zu der ursprünglichen AB-EBV Definition ergäbe sich für dies Kalibrierung eine mittlere Verzögerung vom rund 1,11 ms^{-2} statt 1,0 ms^{-2}. Eine Darstellung von entsprechenden Bremsbewertungskennlinien findet sich im Anlage *A8*. Diese Variante hätte den Vorteil, dass sämtliche sich ergebende Abweichungen gemäss nachstehender Abbildung *4.3.3-2* sicherheitstechnisch unkritisch wären, da die Anhaltewegberechnung auf Basis der K-Charakteristik, gegenüber dem tatsächlichen Anhalteweg von Fahrzeugen mit GG-Bremssohlen, durchwegs längere Anhaltewege liefert. Somit könnten die Bremsanschriften der Bestandesfahrzeugen mit GG-Bremssohlen belassen werde. Der Nachteil dieser Variante wäre aber, dass Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen und «bisheriger» Bremsbewertung einen etwas grösseren Performance-Verlust hätten gegenüber der Migrationsvariante I.

Die Diskussion dieser Variante mit den EVU hat ergeben, dass Bestandesfahrzeuge mit GG-Bremssohlen kaum mit Geschwindigkeiten über 80 km/h verkehren können, so dass deren Anhalteweg mit vorhandenen Vorsignalabständen kompatibel sei.

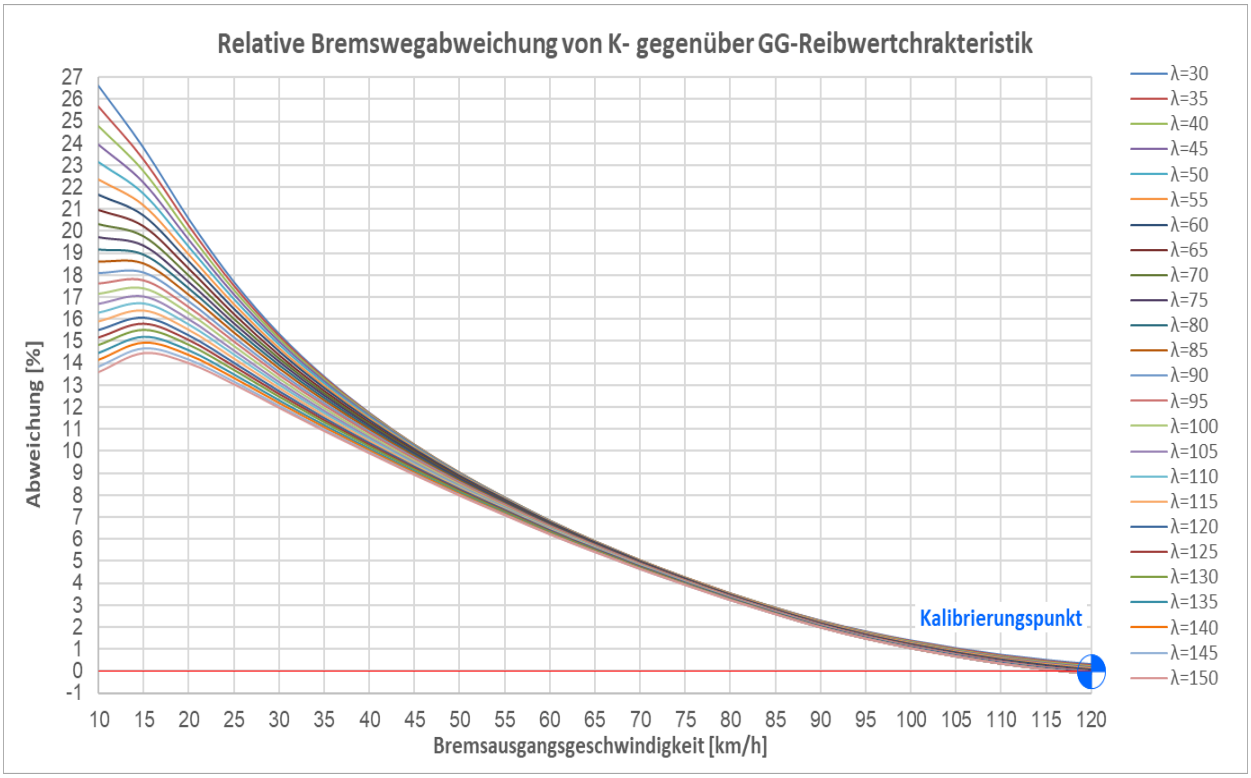


Abbildung 4.3.3-2: *Anhaltewegabweichungen in der Ebene für GG ⇔ K mit* $v_{\lambda_{Kal.}\,120\%} = 120\ km/h$

Migration Variante III Bezogen auf die Migrationsvarianten I und II stellt diese Variante einen Kompromiss dar, welcher seitens Bahnunternehmen vorgeschlagen wurde. Die Kalibrierungsvorgaben sollen in den AB-EBV möglichst so festgelegt werden, dass die Umstellung der Reibwertcharakteristik im Bewertungssystem möglichst wenig «versteckte Reserven» schafft, jedoch weiterhin einen möglichst effizienten Betrieb von bestehenden Fahrzeugen mit GG-Bremssohlen gewährleistet.

Die Migrationsvarianten I und II wurden den Vertretern der Bahnunternehmen in einem Workshop vorgestellt und anschliessend in gemeinsamer Diskussion die Vor- und Nachteile der Varianten erörtert. Aufgrund des aktuellen Betriebs der Bestandesfahrzeuge mit GG- Bremssohlen sowie deren Anteil am gesamten Fahrzeugpark wurde sodann gemeinsam festgestellt, dass:

- die Fahrzeuge mit Grauguss Bremssohlen einen kleinen Anteil am Gesamtfahrzeugpark ausmachen und sich dieser Anteil künftig weiter verkleinern wird,
- aufgrund der bestehenden Vorsignaldistanzen und Bremsleistungen es mit GG- Bremssohlen ausgerüsteten Fahrzeugen kaum möglich sei mit Geschwindigkeiten über 80 km/h zu verkehren,
- für Fahrzeuge mit Graugussbremssohlen, die mit höheren Geschwindigkeiten als 80 km/h betrieben werden sollen, deren Bremse neu zu bewerten und die Bremsanschrift entsprechend anzupassen ist,
- die heutigen maximalen Vorsignaldistanzen nicht mehr als 1000 m betragen.

Das nachfolgende Diagramm zeigt nun für die Migrationsvariante III die Relativabweichungen zwischen den mit dem Modell BAV_Orig gemäss Formel *2.1.4-3* berechneten Anhaltwegen für die GG- beziehungsweise K-Reiberwertcharakteristik. Für die Berechnung der Anhaltewege mit K-Charakteristik wurde die physikalische Abbremsung P/G so bemessen, dass der Anhaltweg bei $v_0 = 80$ km/h und $\lambda = 100\ \%$ dem Anhalteweg von $\cong 254\ m$ mit GG-Charakteristik entspricht.

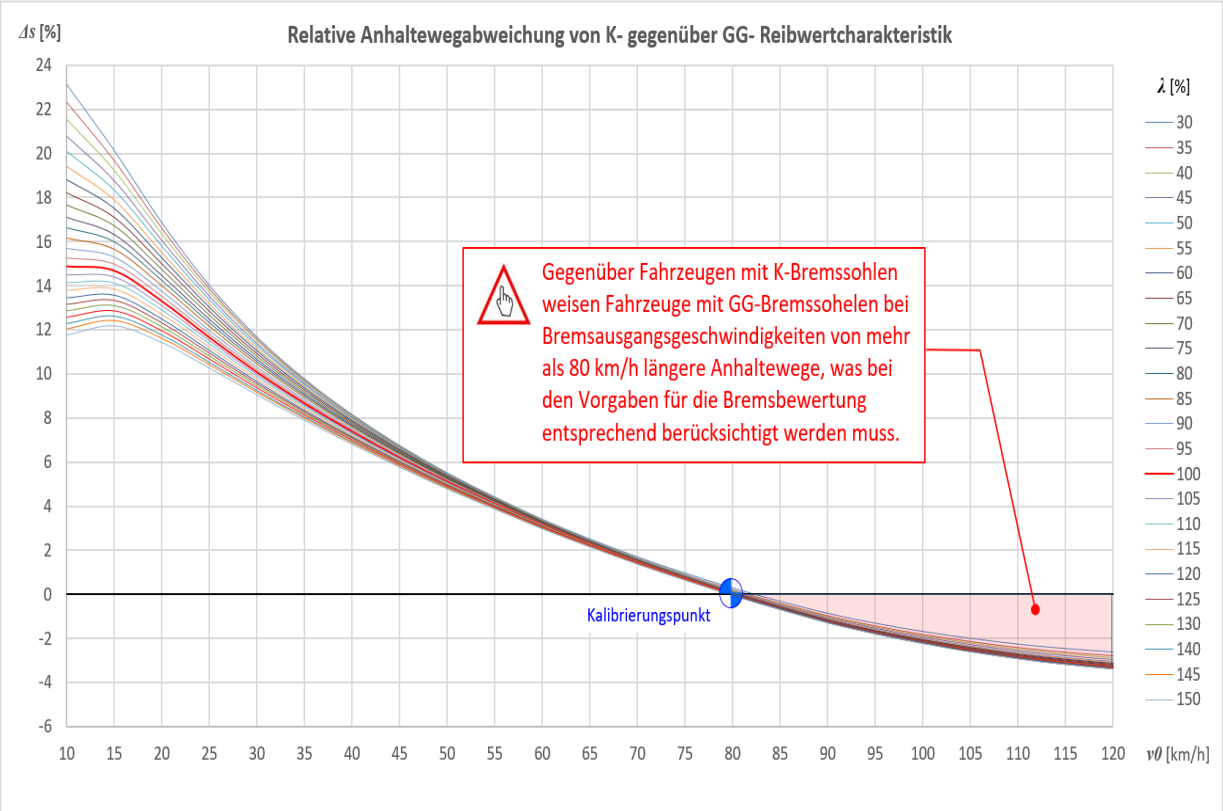


Abbildung 4.3.3-3: *Anhaltewegabweichungen in der Ebene für GG ⇔ K mit* $v_{\lambda_{Kal.}\,100\%} = 80\ km/h$

Aus der Abbildung *4.3.3-3* geht hervor, dass mit dem gewählten Kalibrierungspunkt $v_{\lambda_{Kal.}=100\%} = 80\ km/h$ die maximale «versteckte Bremswegreserve» für Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen, im Vergleich zu Abbildung *4.3.3-2*, rund 4 % tiefer ausfällt.

Kalibrierung der physikalischen Abbremsungen für das Referenzmodell

Für das Referenzmodell nach Formel *2.3.1-6* sind nun die Abbremsungen P/G je Reibwertcharakteristik so zu kalibrieren, dass die Anhaltewege in der Ebene bei $v_{\lambda=100\%} = 80\ km/h$ identisch sind mit dem entsprechenden Anhalteweg von $\cong 253\ m$ für Grauguss-Bremssohlen, berechnet mit einer Schrittweite Δv = 1 km/h nach dem Modell «BAV_Orig» gemäss Formel *2.1.4-3*.

Für das Referenzmodell ergeben sich damit die folgenden physikalischen Abbremsungen:

K-Bremssohle	⇨	3513 N/t	
Scheibenbremse	⇨	3092 N/t	
GG-Bremssohle	⇨	6494 N/t	***Festlegung 4.3.3-1***

4.3.4 Bremsbewertung & Anhaltweg bei verschiedenen Reibwertcharakteristiken

Wie in Kapitel *4.1* erwähnt, soll die Bremsbewertung neu die Reibwertcharakteristiken der K-Bremssohle und jene der Scheibenbremse berücksichtigen. Alle bisherigen in Kapitel *4.3* dokumentierten Untersuchungen beziehen sich beispielhaft auf die Auswirkungen eines Wechsels von der Grauguss auf die K-Bremssohle gemäss Anlage *A9*. Für die Festlegung der Bremsbewertungskennlinien und der davon abhängigen Anhaltewegberechnung müssen zusätzlich auch die Anhaltewege mit den Reibwertcharakteristiken der Scheibenbremse und der GG-Bremssohle mit in die Betrachtungen einbezogen werden.

Nachfolgende Abbildung (s.a. Anlage *9.1*) zeigt die nach Migrationsvariante III in Abschnitt *4.3.3* und Festlegung *4.3.3-1* kalibrierten Bremsbewertungskennlinien, welche sich für die der Scheibenbremse sowie für die K- beziehungsweise für die GG- Reibwertcharakteristik ergeben.

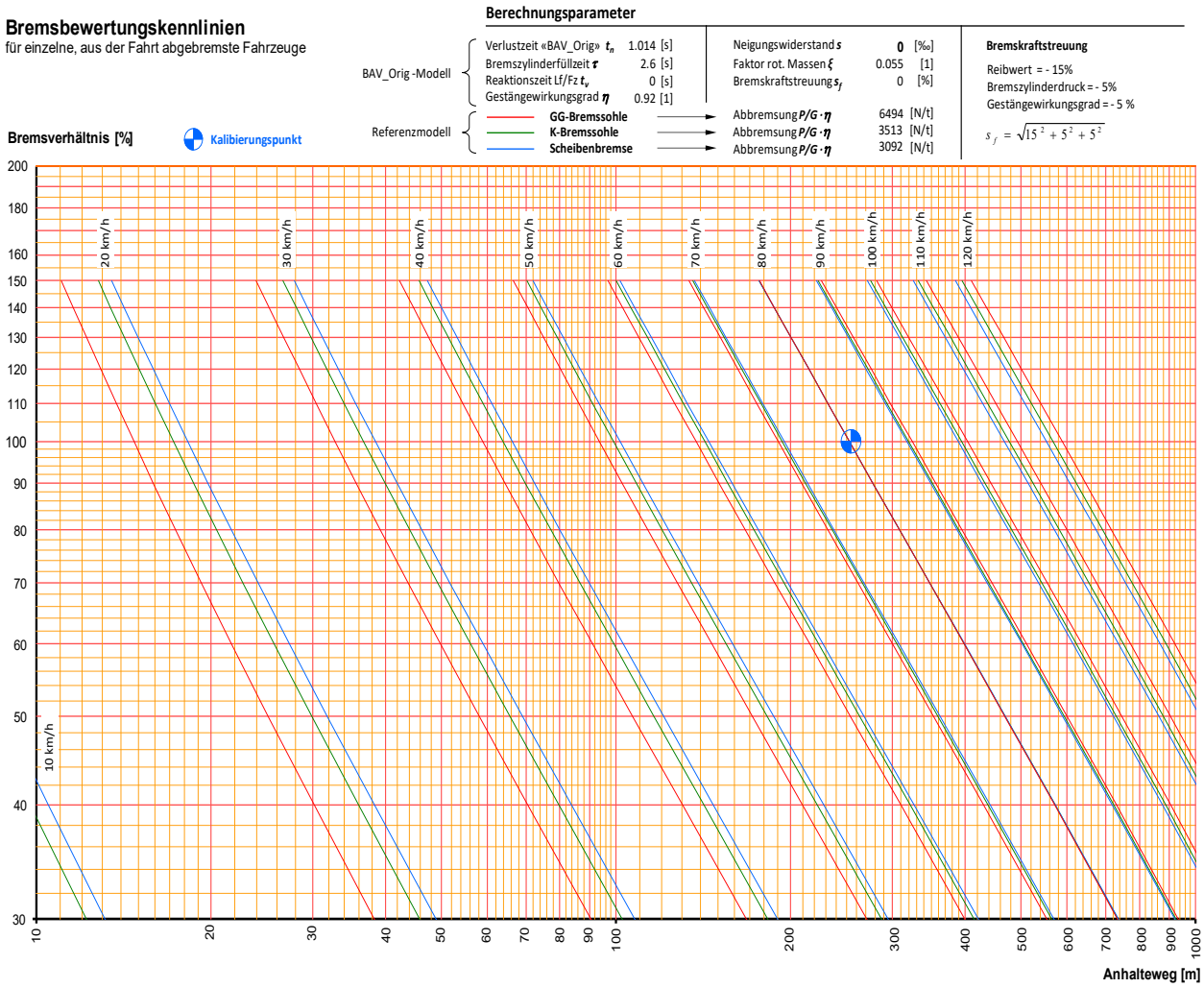


Abbildung 4.3.4-1: *Bremsbewertung bei Reibwertcharakteristiken Klotzbremse GG, K und Scheibenbremse*

Der Abbildung *4.3.4-1* ist zu entnehmen, dass bei Bremsausgangsgeschwindigkeiten unterhalb der Kalibrierungsgeschwindigkeit von 80 km/h die Fahrzeuge mit Scheibenbremse die längsten Anhaltewege aufweisen, während es oberhalb der Kalibrierungsgeschwindigkeit die Anhaltewege der mit K-Sohlen gebremsten Fahrzeuge sind. Dies gilt aber nur mit der Bedingung, dass Fahrzeuge mit GG- Bremssohlen höchstens mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h verkehren.

Damit die Berechnung nach Referenzmodell, für den freizügigen Einsatz von Fahrzeugen mit Bremsen unterschiedlicher Reibwertcharakteristik, genügend lange Anhaltewege liefert, sind demnach für Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 \leq 80$ km/h die Reibwerte für die Scheibenbremse, beziehungsweise für $v_0 > 80$ km/h jene für K-Bremssohlen anzuwenden. Ob dieser Ansatz auch für geneigte Strecken gültig ist, muss zusätzlich anhand weiterer aussagekräftiger Beispielszenarien überprüft und konsolidiert werden. Auch ist der Ausnahmefall zu klären, falls GG gebremste Fahrzeuge mit mehr als 80 km/h verkehren sollen.

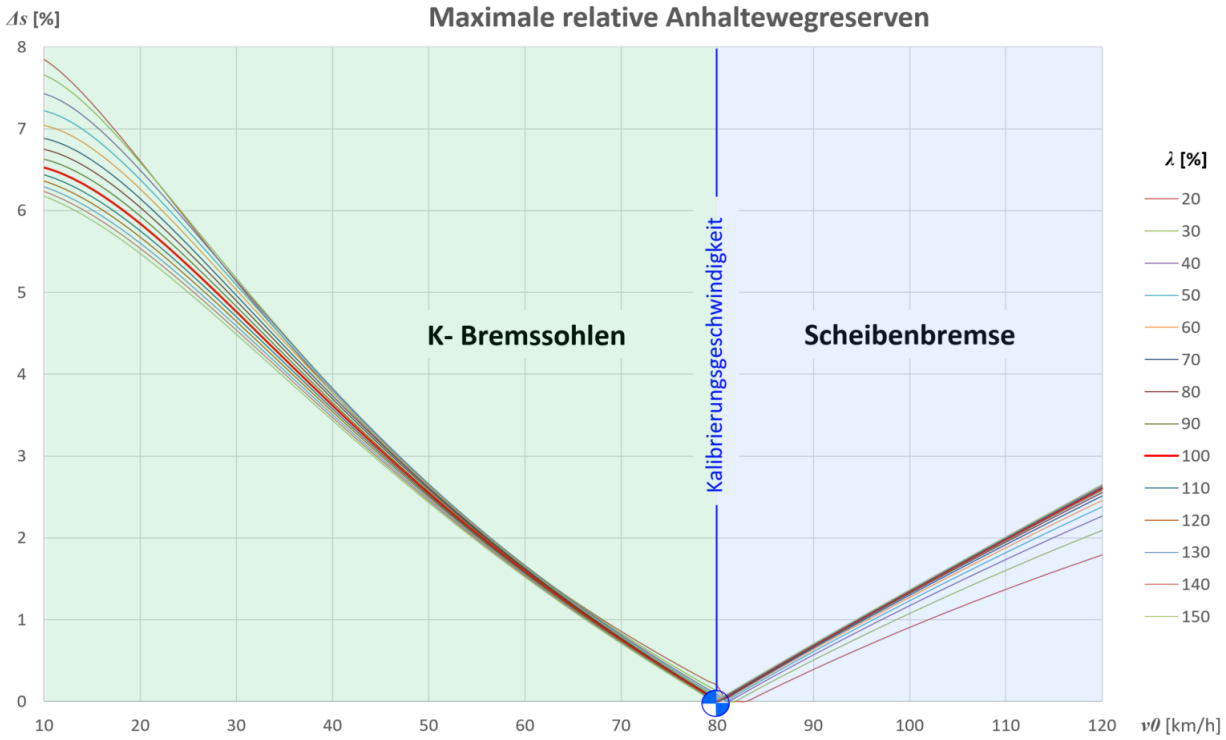


Abbildung 4.3.4-2: *Relative Anhaltewegreserven mit v_{max} = 80 km/h für GG-Bremssohlen*

Abbildung 4.3.4-2 zeigt für $v_0 \leq 80$ km/h die relativen Anhaltewegreserven für K-Bremssohlen bezogen auf den längsten Anhaltewege der Scheibenbremse. Für Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 > 80$ km/h sind die Anhaltewegreserven der Scheibenbremse dargestellt, welche sich auf die längeren Anhaltewege der K-Bremssohlen beziehen. Der Performanceverlust für die K-Bremssohlen beträgt dabei maximal 7,8 % beziehungsweise 2,7 % für Scheibenbremsen.

Nach gleicher Betrachtungsweise zeigt die nachfolgende Darstellung für $v_0 \leq 80$ km/h die Anhaltewegreserven für GG- Bremssohlen in Bezug auf die Scheibenbremse. Infolge des starken Reibwertanstiegs von GG- Bremssohlen kann deren maximaler Performanceverlust bei niedrigen Bremsausgangsgeschwindigkeiten v_0 bis knapp 40 % betragen.

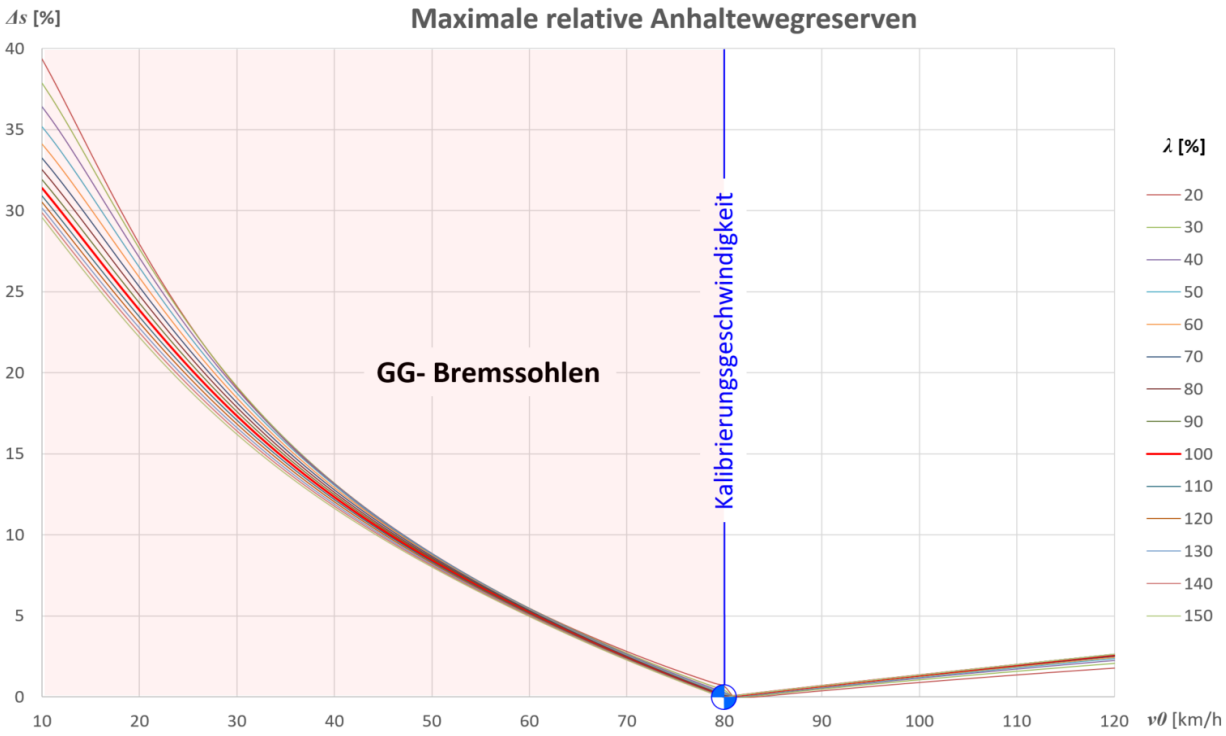


Abbildung 4.3.4-3: *Absolute Anhaltewegreserven mit v_{max} = 80 km/h für GG-Bremssohlen*

Vergleich zu den nach dem BAV_Orig Modell berechneten Anhaltewegen

Nun interessiert der Vergleich zu den nach dem BAV_Orig Modell auf Basis der GG- Reibwertcharakteristik berechneten Anhaltewegen. Nachfolgende Abbildung zeigt dazu die Anhaltwegreserven für die GG-Bremssohlen davon ausgehend, dass Fahrzeuge mit GG-Bremsohlen nur bis 80 km/h verkehren gemäss Abschnitt 4.3.3 Migrationsvariante III.

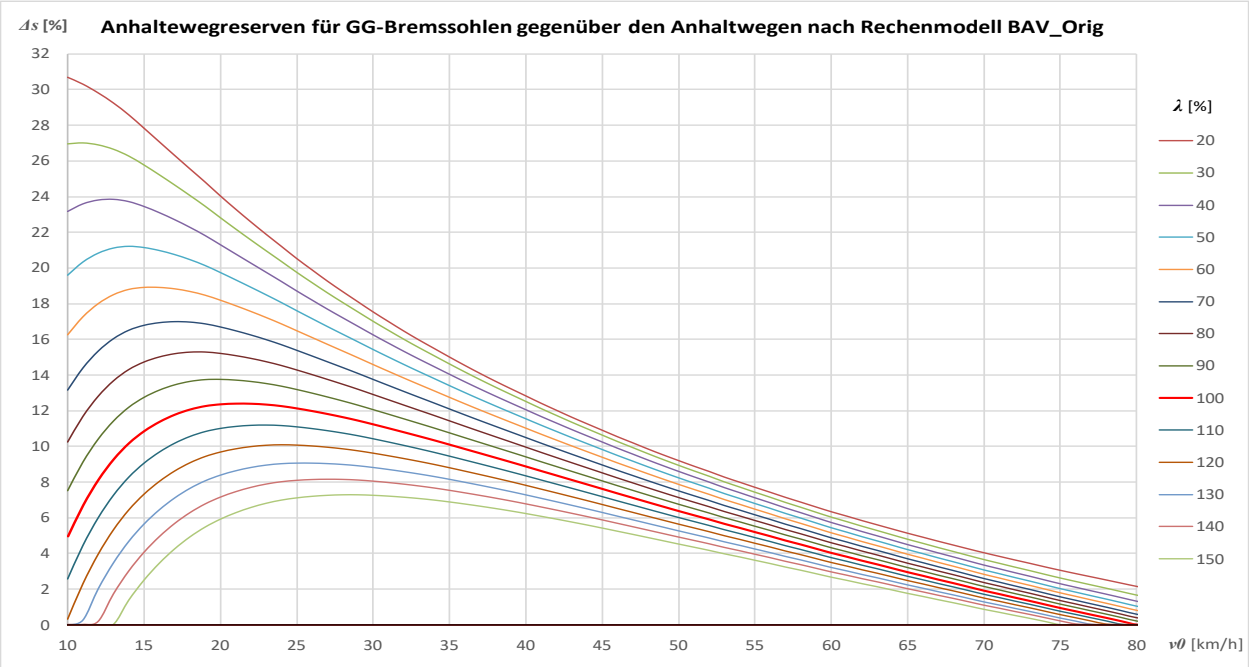


Abbildung 4.3.4-4: *Anhaltwegereserven GG- Bremssohlen: Referenzmodell vs. Modell BAV_Orig*

Abbildung 4.3.4-4 zeigt für Geschwindigkeiten bis 80 km/h die Anhaltwegreserven für GG- Bremssohlen gegenüber der Scheibenbremse, ausgehend von den mit den Vertretern der Bahnunternehmen abgestimmten Kalibrierung der neuen Bremsbewertungskennlinien nach Migrationsvariante III Abschnitt 4.3.3. Wie aus Abbildung 4.3.4-4 ersichtlich ist, beträgt mit der Anhaltwegberechnung nach dem Referenzmodell die maximale Anhaltwegreserve für GG- Bremssohlen für sehr tiefe Bremsausgangsgeschwindigkeiten rund 30 % gegenüber der Scheibenbremse. Bekannterweise ist dies im niedrigen Geschwindigkeitsbereich auf den starken Reibwertanstieg von GG- Bremssohlen gegenüber der Scheibenbremse zurückzuführen. Weiter geht aus der Abbildung 4.3.4-4 hervor, dass die Anhaltwegreserven für hohe Bremsverhältnisse für $v_0 < 30$ km/h wieder abnehmen, trotz stetigem Reibwertanstieg der GG-Bremssohlen bei abnehmender Bremsausgangsgeschwindigkeit. Die ist auf die unterschiedliche Modellierung der Bremskraftentwicklung im Referenzmodell beziehungsweise im Modell BAV_Orig zurückzuführen. Im Referenzmodell wird dieser Bremskraftaufbau realitätsnah anhand einer Eponentialfunktion nachgebildet, während im BAV_Orig Modell dafür eine Schrittfunktion mit Totzeit von zirka 1 Sekunde verwendet wird. Deshalb werden mit dem Referenzmodell bei tiefen Bremsausgangsgeschwindigkeiten kürzere Anhaltewege berechnet im Vergleich zum BAV_Orig Modell.

4.3.5 Bremsbewertungskennlinen mit kombinierter Reibwertcharakteristik

Bei freizügigem Einsatz von Fahrzeugen mit Bremsen unterschiedlicher Reibwertcharakteristik ist, wie das Abbildung 4.3.4-1 für die Bremsungen in Ebene illustriert, immer der Anhaltewege mit der jeweiligen Reibwertcharakteristik zu berechnen, der zum längsten Anhalteweg führt.

Anhaltewege für die Bremsbewertung in der Ebene

Für die im Anhaltewegberechnungsmodell nach Formel 2.3.1-6 anzuwendende Reibwertcharakteristik und Abbremsung heisst das, dass in der Ebene für Bremsausgangsgeschwindigkeiten bis 80 km/h die Reibwertcharakteristik der Scheibenbremse und oberhalb 80 km/h jene der K-Bremssohlen zu verwenden ist. Die entsprechenden massgebenden Reibwert-Charakteristiken finden sich in der Anlage A12 (siehe dazu auch Tabelle 6.2-1).

Festlegung 4.3.5-1

Wie bereits in Abschnitt 4.3.4 festgehalten wurde, muss die Eignung der Anhaltewegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik unbedingt für geneigte Strecken konsolidiert werden. Entsprechenden Untersuchungen dazu werden in vorliegendem Bericht im Zusammenhang mit der Thematik Anhaltewege in der Ebene und in der Neigung in Abschnitt 6.1 angegangen.

Bremsbewertungskennlinien mit kombinierter Reibwertcharakteristik

Abbildung 4.3.5-1 auf der nächsten Seite zeigt die Bremsbewertungskennlinien, welche sich mit der oben beschriebenen Kombination der beiden Reibwertcharakteristiken gemäss Festlegung 4.3.5-1 ergeben. Die Bewertungskennlinien die auf der Reibwertcharakteristik der K-Bremssohle basieren sind im Diagramm grün dargestellt und die Kennlinien denen die Reibwertcharakteristik der Scheibenbremse zugrunde liegt in blauer Farbe.
Diese Kennlinien sind in qualitativ besserer Darstellung, zusammen mit den entsprechenden tabellarisch aufgeführten Zahlenwerten, in Anlage A17 zu finden.

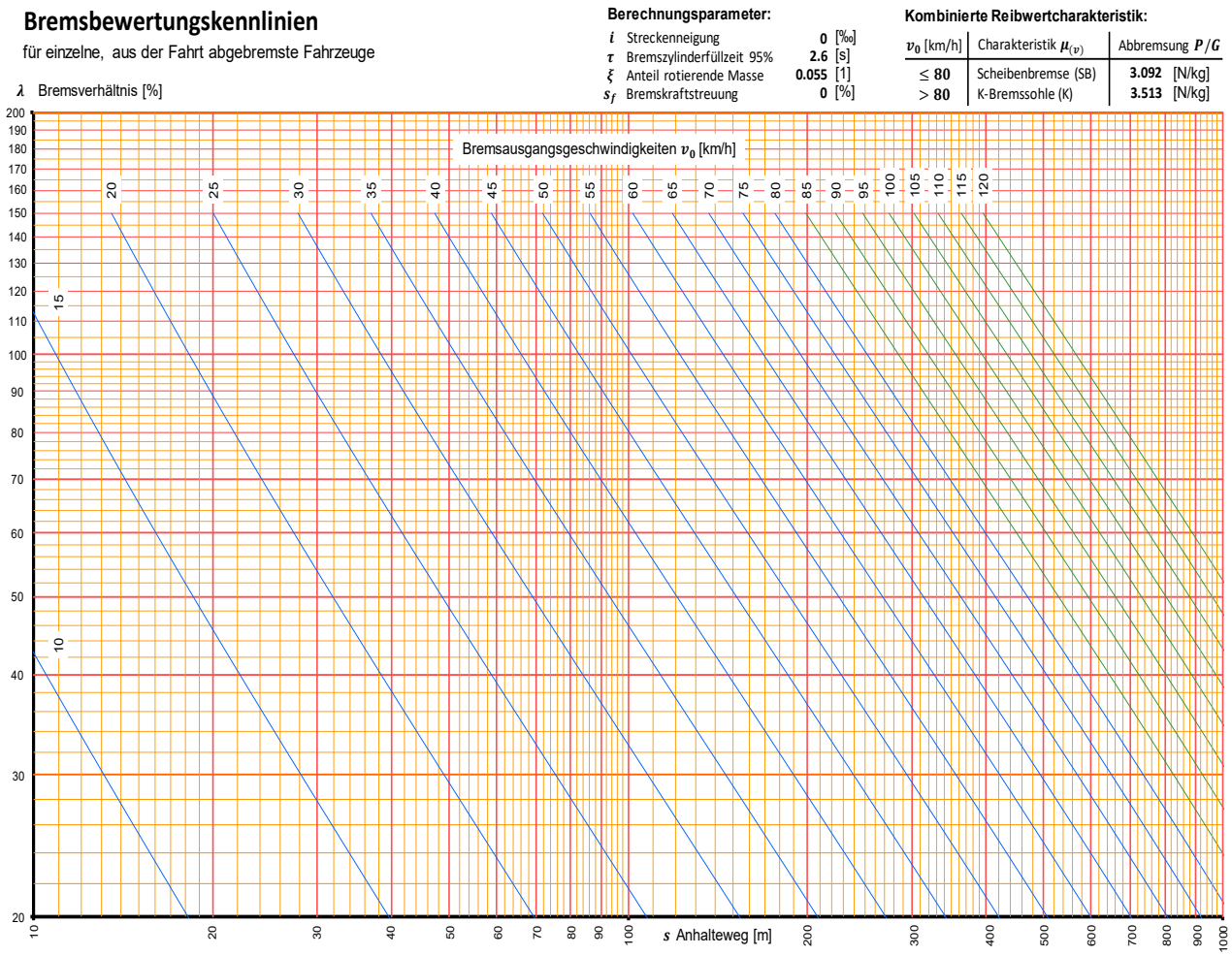


Abbildung 4.3.5-1: *Bremsbewertungskennlinien mit kombinierter Reibwertcharakteristik*

In die AB-EBV aufzunehmende Bedingung betreffend die Bremsbewertung

Die Bremse **aller Fahrzeuge**, welche mit Geschwindigkeiten von mehr 80 km/h verkehren, muss zwingend nach den in Abbildung 4.3.5-1 dargestellten Kennlinien bei der zulässigen Fahrzeug-höchstgeschwindigkeit bewertet werden.

4.4 Bewertung der Sicherheitsbremse

Gemäss den AB-EBV zu Art. 52, AB 52.1, Ziffer 9.3.2 gilt:

«Das Bremsgewicht der Sicherheitsbremse ist gemäss AB-EBV zu AB 52.2 durch Versuche zu bestimmen, wobei die Ausgangsgeschwindigkeit der Fahrgeschwindigkeit auf den Streckenabschnitten, für welche die Sicherheitsbremse vorgeschrieben ist, entsprechen muss.»

Als Sicherheitsbremse eingesetzte Magnetschienenbremsen dürfen, im Rahmen der diesbezüglichen Vorgaben in den AB-EBV, auch weiterhin anhand der Bremsbewertungskennlinien bewertet werden. Anlässlich der AB-EBV Revisionsrunde 2020 wird das Anhaltewegberechnungsmodell unter dem Aspekt «Anrechenbarkeit von Magnetschienenbremsen» nicht weiter untersucht. Aufgrund des zu erwartende Aufwandes muss die Thematik separat behandelt werden.

5 Bremstabellen

5.1 Ausgangslage, Handlungsbedarf und Ziele

In den AB-EBV sind zu den Bremstabellen IIA, III und IV maximale Vorsignaldistanzen zwischen 325 und 535 Meter angegeben. Die Bremstabellen decken einen Bremsausgangsgeschwindigkeitsbereich zwischen 10 und 90 km/h ab für massgebende Neigungen von 0 bis -70 ‰. Die EVU der Schmalspurbahnen weisen zunehmend auf die einschränkende Wirkung der Bremstabellen hin, da aus fahrzeugtechnischer Sicht auf den Gefällestrecken auch mit höheren Geschwindigkeiten gefahren werden könne, als dies die aktuell gültigen AB-EBV erlauben. Oftmals liegen die gewünschten Fahrgeschwindigkeiten sogar ausserhalb des Geschwindigkeitsbereichs der Bremstabellen. Das BAV anerkennt diesen Bedarf und treibt deshalb die Untersuchungen, welche für die Überarbeitung und Erweiterung des Anwendungsbereichs der Bremstabellen erforderlich sind, entsprechend voran. Mit der Erarbeitung von Schutzzielen und Vorgaben für die Erstellung von Bremstabellen soll eine allgemein gültige und nachvollziehbare Basis geschaffen werden, welche künftig eine verlässliche und konsolidierte Beurteilung individueller Spezialfälle ermöglicht sowie die Pflege und Erweiterbarkeit von Bremstabellen sicherstellt.
Nach Möglichkeit soll die Anzahl aktuell gültigen Bremstabellen bei deren Überarbeitung minimiert werden, soweit der gesamte Fahrzeugpark und der Bremsbetrieb bei den einzelnen Adhäsions-Schmalspurbahnen dies zulässt.

5.2 Zweck und Nutzen von Bremstabellen

Die Nachweisführung für einen technisch-betrieblich sicheren Bremsbetrieb ist sowohl komplex als auch aufwändig und erfordert viel fachspezifisches Wissen. Deshalb scheint es sinnvoll zu sein, in den AB-EBV mittels Bremstabellen Vorgaben festzulegen, welche den sicheren Betrieb für einen möglichst breiten Bereich an Fahrzeugeigenschaften und Betriebsfällen abdecken. Die in den Bremstabellen festgelegten Mindestbremsverhältnisse sollen den Fahrbetrieb von Einzelfahrzeugen und Zugkompositionen mit Reibbremse so limitieren, dass die fahrzeugtechnischen Voraussetzungen gegeben sind für einen bremstechnisch korrekten und sicheren Fahrbetrieb.

Bremstabellen stellen für die Bahnbetreiber damit ein Hilfsmittel dar beim Erlass bahnbetrieblicher Vorgaben, welche zur Erfüllung der an den Bremsbetrieb gestellten Anforderungen notwendig sind:

I. Sicheres Anhalten

Für Einzelfahrzeuge sowie Zugkompositionen muss auf allen zu befahrenden Gefällestrecken sichergestellt sein, dass diese mit dem verfügbaren Bremsvermögen aus der Bremsausgangsgeschwindigkeit bei sauberen und trockenen Schienen mittels Schnellbremsung bis zum Stillstand abgebremst werden können.

II. Bremswegstabilität

Auf allen zu befahrenden Gefällestrecken muss das verfügbare Bremsvermögen so bemessen sein, dass kleine Abweichungen zwischen effektivem und nominellem Bremsvermögen, verursacht etwa durch systemimmanente Ungenauigkeiten, im Schnellbremsfall zu keiner unzulässig grossen Verlängerung der Nominalanhaltewege führen.

III. Belastbarkeit der Bremse

Die Bremsausgangsgeschwindigkeit für Einzelfahrzeuge und Zugkompositionen ist so zu begrenzen, dass diese in der Lage sind, auf allen zu befahrende Gefällestrecken mindestens zweimal aufeinanderfolgend mittels Schnellbremsung anzuhalten, ohne dass durch thermische Überbeanspruchung der Bremsausrüstung eine relevante Verlängerung des Anhalteweges gegenüber der ersten Schnellbremsung entsteht. Dabei darf es zu keiner Schädigung oder Vorschädigung von Komponenten der Bremsausrüstung kommen.

5.3 Untersuchung & Rekonstruktion Bremstabellen Stand AB-EBV 2016

5.3.1 Allgemeines

Das Kapitel *3* des vorliegenden Berichts enthält Untersuchungen zu einem Referenzmodel für die Anhaltewegberechnung. Diese Ausarbeitungen erfolgten im Zusammenhang mit der Einschätzung zur Genauigkeit des aktuell gültigen Berechnungsmodells «BAV_Orig», welches auch die Grundlage für die bestehenden Bremstabellen bildet.

Sämtliche nachfolgenden Untersuchungen, Vergleiche und Analysen zu den bestehenden Bremstabelle basieren deshalb mit entsprechender Parametrierung auf dem bisherigen Berechnungsmodell «BAV_Orig» nach Formel *2.1.4-3*.

5.3.2 Ziel und Ansatz der Untersuchungen

Aus den noch verfügbaren Regelwerkgrundlagen geht der Sinn und Nutzen sowie der exakte Schutzzielumfang von Bremstabellen nicht mit ausreichender Tiefe und Klarheit hervor. Es fehlen Angaben zu den Erstellungskriterien und den Grenzwerten, welche den Bremstabellen zugrunde liegen. Deshalb muss untersucht werden, anhand welcher Schutzziele und mit welchen Kriterien und Grundsätzen die aktuell gültigen Bremstabellen konstruiert worden sind. Das Ziel der nachfolgenden Untersuchung muss deshalb sein, die Konstruktionsmethodik der bestehenden Bremstabellen zu verstehen. Die erlaubt dann die limitierenden Parameter daraus zu extrahieren. Erst auf dieser Grundlage kann die Ausweitung bestehender Bremstabellen überhaupt angegangen werden. Zudem besteht der Anspruch, die Konstruktion von Bremstabellen sauber und nachvollziehbar zu dokumentieren.

5.3.3 Kriterium Bremsweg

Zu jeder in den AB-EBV enthaltenen Bremstabelle ist die maximale Vorsignalentfernung angegeben. Weiterführende Hintergründe dazu gehen weder aus Angaben zu den Tabellen selbst, noch aus den verfügbaren Bremsgrundlagen hervor. Um die bestehenden Bremstabellen überhaupt miteinander vergleichen zu können, wurden die in den Bremstabellen IIA, III und IV vorgeschriebenen Mindestbremsverhältnisse in die grafische Darstellung der Anhaltewegberechnung (entsprechend den Bremskurven BAV 26.01.1983) übertragen. Die entsprechenden Darstellungen dazu finden sich in Anlage *A14* zu diesem Bericht.

Aus der Darstellung in Anlage *A14* ergeben sich folgende Feststellungen und Erkenntnisse:

1) Die maximal auftretenden Bremswege sind bei den Bremstabellen IIA, III und IV unterschiedlich. Aufgrund der unterschiedlichen massgebenden Neigungen zwischen 300 bis 500 m stellt sich die Frage, ob dies im Zusammenhang mit unterschiedlichen Zuglängen stehen könnte.
2) Bremstabelle IIA: Der Maximalbremsweg von 325 m wird nur in der Ebene bei v=90 km/h erreicht.
3) Bremstabelle III: Der Maximalbremsweg von 225 m wird für ein bestimmtes Gefälle bei mehreren Geschwindigkeiten erreicht. Dies bedeutet, dass diese Bremstabelle in den Teilbereichen i = 0 – 25 ‰ beziehungsweise v = 60 – 75 km/h einen Bremsweg begrenzenden Effekt hat. In der Ebene und bei kleinen Gefällen lässt die Bremstabelle III wesentlich grössere Bremswege zu als die Bremstabelle IIA, was sich unabhängig von der Neigung ab einer Geschwindigkeit über 45 km/h umkehrt.
4) Gegenüber den Bremstabellen IIA und III, ist Bremstabelle IV mit einer fahrzeugtechnisch bedingten Streuung der Bremskraft von 16,58 % berechnet worden, was Anhaltewege bis 535 m zur Folge hat.
5) Aufgrund der Bremswege, welche sich anhand der Mindestbremsverhältnisse aus den Bremstabellen IIA, III und IV ergeben, lassen sich die Schutzmechanismen, nach denen diese Bremstabellen konstruiert wurden, nicht eindeutig nachvollziehen. Es ist davon auszugehen, dass die verschiedenen Bremstabellen eine Auswahl bereitstellen. Diese erlaubt es den Eisenbahnunternehmen, auf ihre Infrastruktur und den Betrieb abgestimmt, eine möglichst optimale Bremstabelle anzuwenden.

5.3.4 Kriterium Effektivverzögerung

In die Blätter mit den Bremskurven BAV 26.01.1983 im der Anlage *A4* wurde die Effektivverzögerung, welche proportional ist zu $s_f \cdot \frac{P}{G} \cdot \mu_{k(v)} \cdot \lambda + a_{w(v)} - a_i$, für unterschiedliche Werte von p_e aufgetragen. Gemäss Punkt 1 der in der Anlage *A3* enthaltenen BAV zf-Weisung 10.85 wurde dabei für p_e eine Bremskraftstreuung von 16,58 % berücksichtigt.

Effektivverzögerung

Aus Formel 2.1.1-2 und Formel 2.2.3-2 ergibt sich für $p_{e(v)}$:

$$v_0 \cdot t_n + \frac{v_0^2}{2 \cdot a} \quad \longrightarrow \quad v_0 \cdot t_n + \frac{v_0^2}{2 \cdot p_{e(v)}} = v_0 \cdot t_n + \frac{v_0^2 \cdot (1+\xi)}{2 \cdot \left[\left(1-\frac{s_f}{100}\right)\frac{P}{G} \cdot \eta \cdot \mu_{k(v)} \cdot \frac{\lambda}{100} + a_{w(v)} - a_i\right]}$$

$$\longrightarrow \quad p_{e(v)} = \frac{\left(1-\frac{s_f}{100}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \eta \cdot \mu_{k(v)} \cdot \frac{\lambda}{100} + a_{w(v)} - a_i}{(1+\xi)}$$

Formel 5.3.4-1: *Effektivverzögerung p_e*

Die Effektivverzögerung p_e nach Formel 5.3.4-1 entspricht im Anhaltewegberechnungsmodell derjenigen Momentanverzögerung, welche sich bezogen auf die Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 bei voll entwickeltem Anpressdruck der Reibpartner einstellen würde. Diese Momentanverzögerung stellt zwar einen fiktiven Wert dar, schafft dafür aber eine direkte Relation zum Hangabtrieb, welche eine belastbare Bewertung der Sicherheit im Bremsbetrieb ermöglicht.
Um einen Erstvergleich der Bremstabellen auf grafischer Ebene anzustellen zu können, wurden die Blätter mit den Bremskurven gemäss Anlage A14, gegenüber den Bremskurven BAV 26.01.1983 in Anlage A4, mit zusätzlichen Wertekurven für die Effektivverzögerung p_e ergänzt.
Bei der direkten Gegenüberstellung der Bremstabellen ist zu beachten, dass die Bremstabelle IV unter Berücksichtigung einer Bremskraftstreuung von 16,58 % erstellt wurde. Dies bedeutet, dass die in den Kurvenblättern ablesbaren Bremswege, welche sich aus dem jeweiligen Schnittpunkt der Mindestbremsverhältnisse-Kurve und der Geschwindigkeitskurve ergeben, bereits bei einem um 16,58 % tieferen Bremsverhältnis erreicht werden als in der Darstellung auf der y-Achse abgelesen wird. Zu der Bremstabelle IV ist angegeben, dass diese für Vorsignalentfernungen bis zu 535 Meter gültig ist. Dieser Bremsweg wird beispielsweise auf dem Kurvenblatt für 0 ‰ Neigung bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h und einem Bremsverhältnis von λ=70% erreicht. Aufgrund der berücksichtigten Bremskraftstreuung entspricht dies einer Verminderung des Bremsverhältnisses um 16,58 %, also rund 58 %. Der Schnittpunkt dieses Bremsverhältnisses mit der Bremswegkurve bei 90 km/h ergibt dann eben den Anhalteweg von rund 535 m gemäss Bremstabelle IV.

Zusammenfassend ergeben sich aus der Analyse der bestehenden Bremstabellen folgen Erkenntnisse:

1) Für tiefe bis mittlere Geschwindigkeiten unterscheiden sich die Mindestwerte für die Effektivverzögerung zwischen der Bremstabelle IV und den Bremstabellen IIA und II deutlich.

2) Die Mindestbremsverhältnisse nach Bremstabelle IV gewährleisten für alle Geschwindigkeiten und Neigungen eine minimale Effektivverzögerung > 0,1 ms^{-2}.

3) Für tiefe Geschwindigkeiten und kleine Gefälle befinden sich die Mindestbremsverhältnisse nach den Bremstabellen IIA und III b in einem flachen bis sehr flachen Teil der Bremskurve.

4) Um einen übersichtlichen und aussagekräftigen Vergleich zu erhalten, müssen die Effektivverzögerungen aller Bremstabellen für jede Geschwindigkeit und jede Neigung berechnet und grafisch dargestellt werden.

5.3.5 Kriterium Bremswegsensitivität

Bei Betrachtung der Bremskurven BAV 26.01.1983 gemäss Anlage A4 lässt sich feststellen, dass der Quotient $\Delta\lambda/\Delta s$ mit zunehmender Bremsausgangsgeschwindigkeit und abnehmendem Bremsverhältnis kleiner wird. Dieser Zusammenhang ist auch unter Punkt 6 der zf-Weisung 10.85 nach Anlage A3 thematisiert worden. Dazu wurde einzig und alleine festgehalten, dass dieser Quotient $\Delta\lambda/\Delta s$, insbesondere bei der Festlegung der Bremsverhältnisse für Gefällestrecken, nicht zu klein sein darf, damit der Anhalteweg bei geringen Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Bremsverhältnis und dem Nominalbremsverhältnis immer noch stabil bleibt. Für die Konstruktion und Erstellung von Bremstabellen ist in der zf-Weisung 10.85 [6] allerdings kein expliziter Grenzwert für den Quotienten $\Delta\lambda/\Delta s$ angegeben.
Ein direkter Vergleich der Bremstabellen mit den verschiedenen Bremskurven BAV 26.01.1983 [7] ist mit der erforderlichen Genauigkeit nicht durchführbar. Um einen solchen Vergleich anstellen zu können, müssen deshalb zuerst die entsprechenden Bremswegsensitivitäten anhand der in den Bremstabellen angegebenen Mindestbremsverhältnisse eruiert werden.

Definition der Bremswegsensitivität

Der reziproke Wert des Quotienten $\Delta\lambda/\Delta s$ in Relation zum Nominalanhalteweg $s_{(\lambda)}$ wird nun als Bremswegsensitivität β definiert. Er ist ein Mass dafür, wie stark sich eine Bremskraftänderung auf die Änderung des Bremsweges auswirkt. Für dieses Kriterium ist sodann ein Grenzwert festzulegen, welcher Einfluss nimmt bei der Bestimmung der Mindestbremsverhältnisse λ für Bremstabellen.

$$\beta_{(\lambda,s)} = \frac{s_{(\lambda-1)} - s_{(\lambda)}}{s_{(\lambda)}} \cdot 100\%$$

Formel 5.3.5-1: *Relative Bremswegsensitivität*

$\beta_{(\lambda,s)}$ Relative Bremswegsensitivität [%]
$s_{(\lambda)}$ Anhalteweg bei λ [%]
$s_{(\lambda-1)}$ Anhalteweg bei (λ – 1) [%]

5.3.6 Vergleich der minimalen Effektivverzögerungen

Die nachfolgenden Darstellungen zeigen für die aktuell gültigen AB-EBV Bremstabellen IIA, III und IV für Meterspurbahnen, die gemäss der Formel *5.3.4-1* berechneten Effektivverzögerungen. Das Ziel dieser Berechnungen war es, aus diesen Bremstabellen die minimale Effektivverzögerungen zu eruieren.

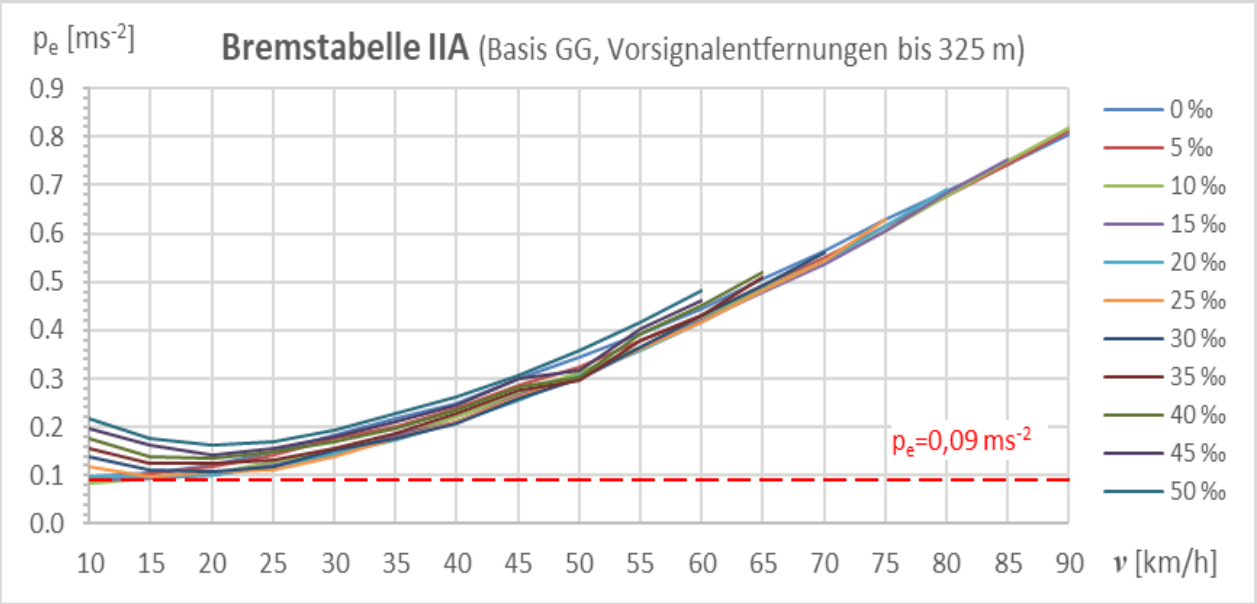


Abbildung 5.3.6-1: *Effektivverzögerungen entsprechend den Mindestbremsverhältnissen in Bremstabelle IIA*

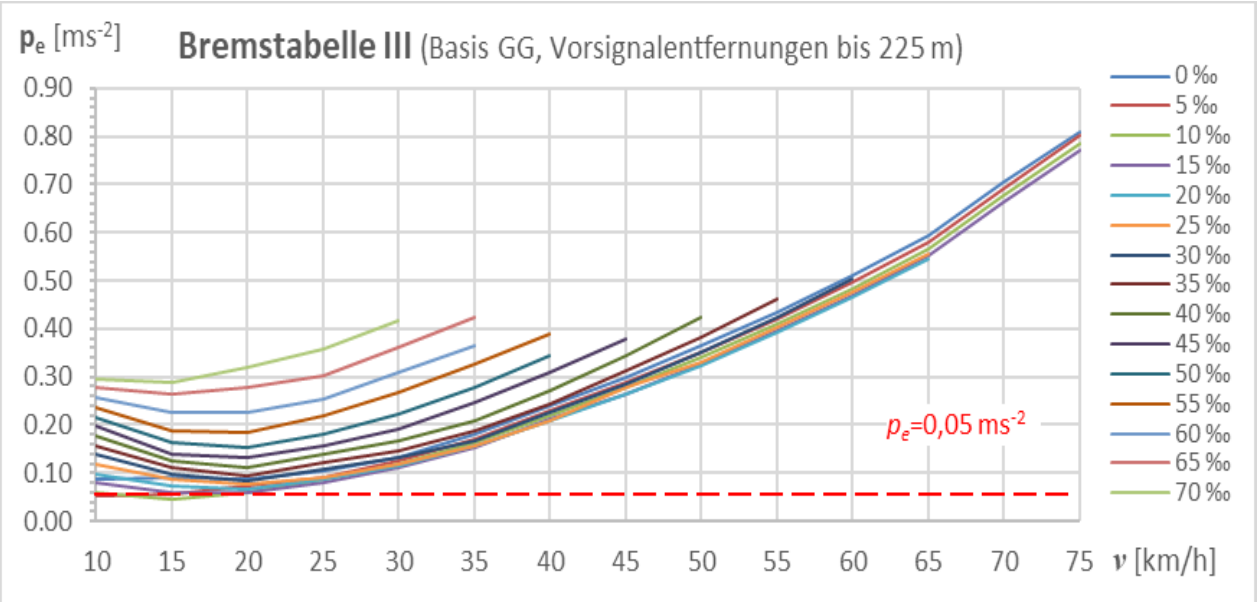


Abbildung 5.3.6-2: *Effektivverzögerungen entsprechend den Mindestbremsverhältnissen in Bremstabelle III*

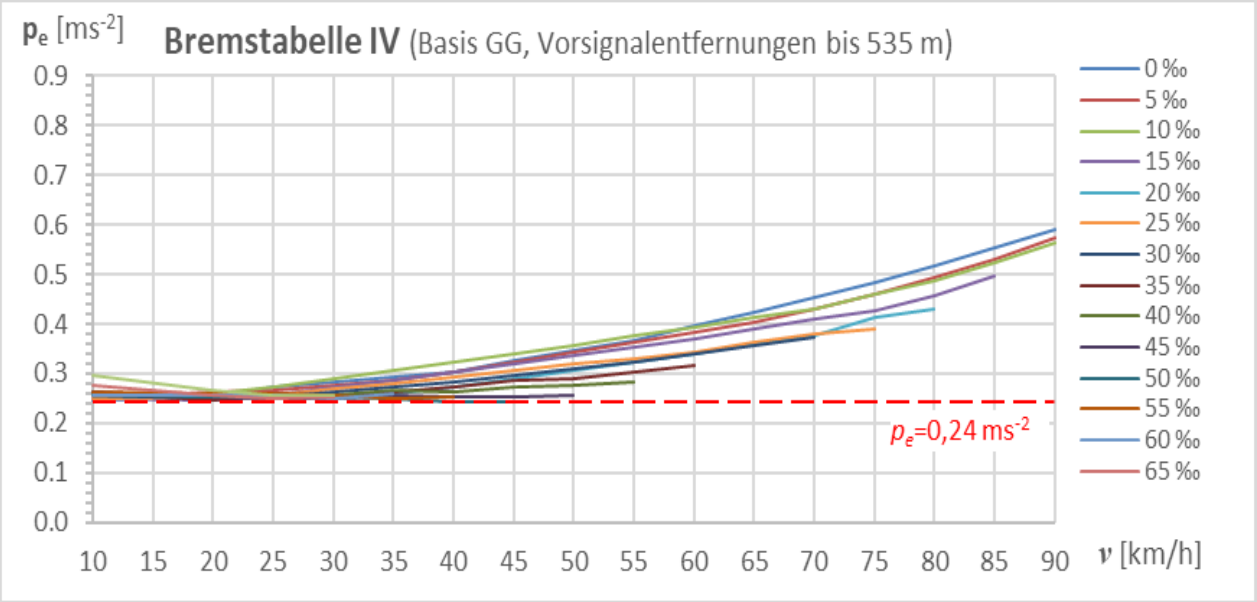


Abbildung 5.3.6-3: *Effektivverzögerungen entsprechend den Mindestbremsverhältnissen in Bremstabelle IV*

Abbildung *5.3.6-1* bis Abbildung *5.3.6-3* ist zu entnehmen, dass den verschiedenen Bremstabellen unterschiedliche Minimalwerte für die Effektivverzögerung p_e zugrunde liegen. Die tiefsten Effektivverzögerungen sind im Neigungsbereich 0 bis 10 ‰ Gefälle auszumachen. Die Maximalverzögerung von rund 0,8 ms^{-2} wird bei der Bremstabelle IIA bei 90 km/h, bei der Bremstabelle III bei 75 km/h erreicht. Bei der Bremstabelle III beträgt die Maximalverzögerung bei 90 km/h hingegen nur bei knapp 0,6 ms^{-2}.
Bei jeder dieser Bremstabellen steht die maximale Effektivverzögerung im direktem Zusammenhang mit der ihr zugeordneten maximalen Vorsignalentfernung. In der Anlage *A10* sind zusätzlich die der Abbildung *5.3.6-1* bis Abbildung *5.3.6-3* zugrunde liegenden Zahlenwerte in tabellarischer Form enthalten.

5.3.7 Vergleich der maximale Bremswegsensitivitäten

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die den Bremstabellen IIA, III und IV gemäss AB 77.2, Ziffern 2.5 bis 2.7 der AB-EBV zugrundeliegenden Bremswegsensitivitäten auf Basis der GG-Reibwertcharakteristik. Die Berechnungen, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt sind, wurden durchgeführt mit dem Ziel, die maximale Bremswegsensitivität aus den bestehenden Bremstabelle zu eruieren.

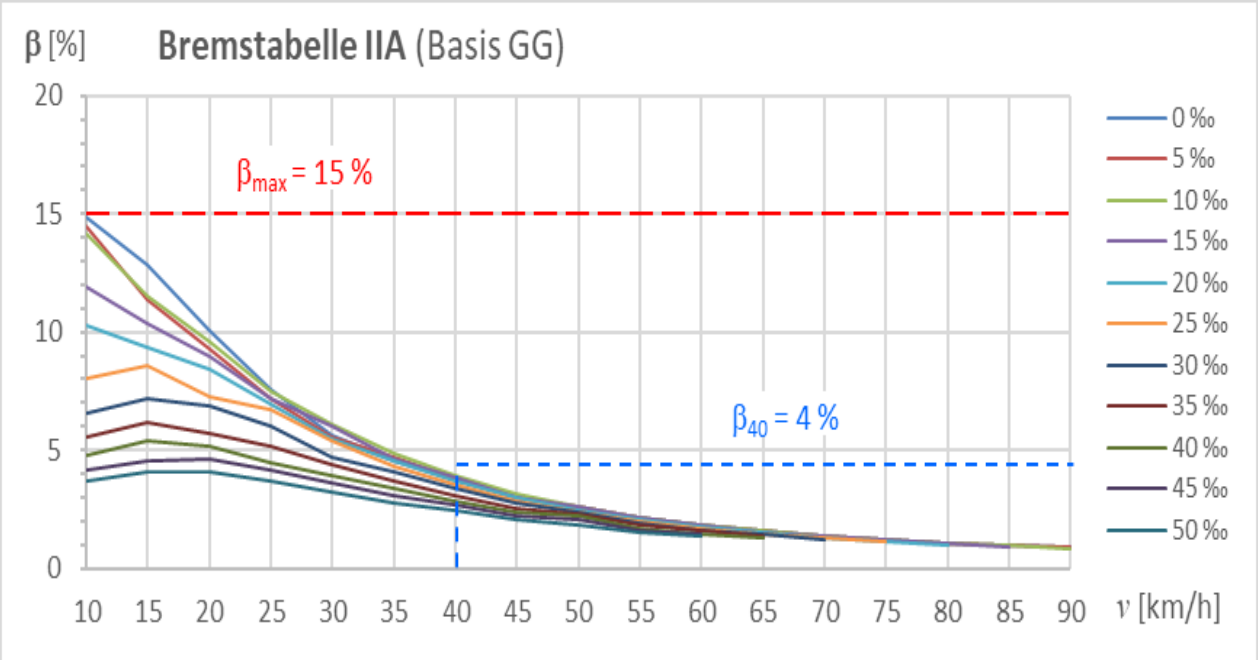


Abbildung 5.3.7-1: *Bremswegsensitivität entsprechend den Mindestbremsverhältnissen in Bremstabelle II*

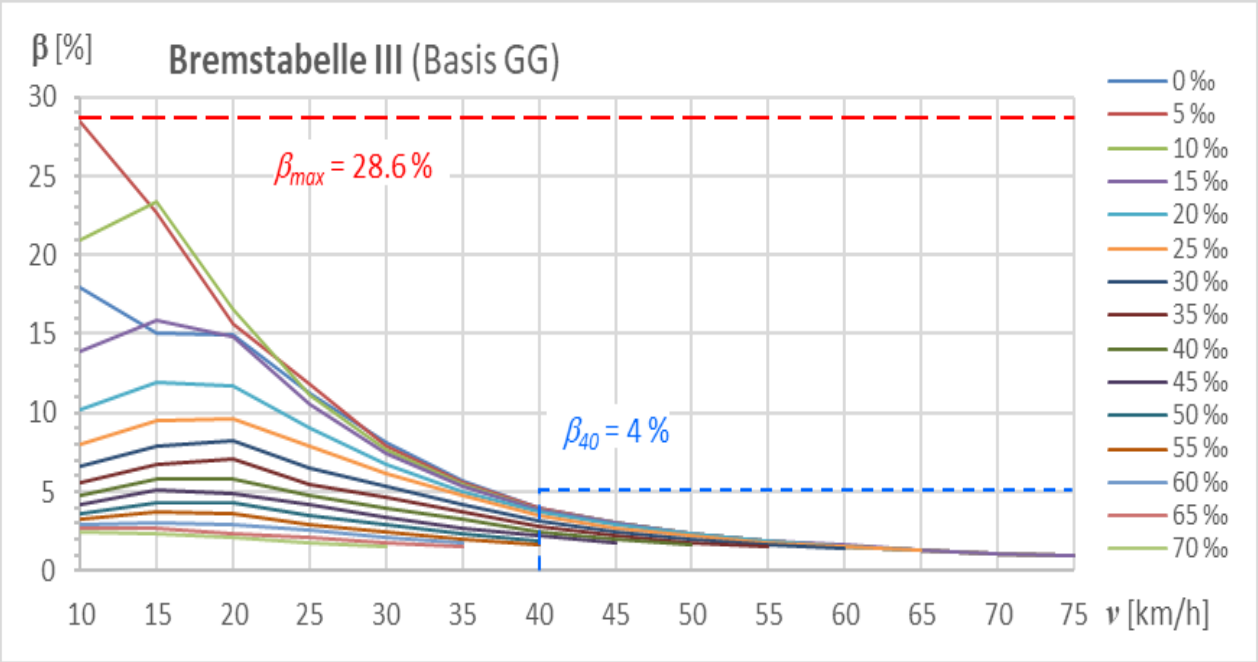


Abbildung 5.3.7-2: *Bremswegsensitivität entsprechend den Mindestbremsverhältnissen in Bremstabelle III*

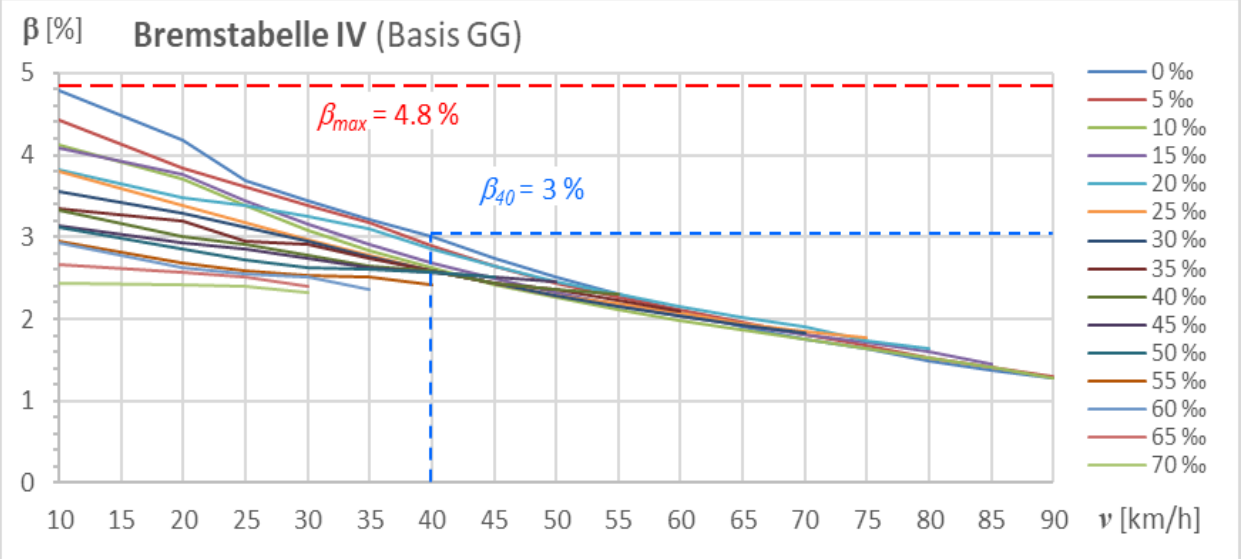


Abbildung 5.3.7-3: *Bremswegsensitivität entsprechend den Mindestbremsverhältnissen in Bremstabelle IV*

Abbildung *5.3.7-1* bis Abbildung *5.3.7-3* zeigen die sich für die Bremstabellen IIA, III und IV ergebenden Bremswegsensitivitäten, welche aufgrund der in den Bremstabellen geforderten Mindestbremsverhältnissen anhand von Formel *5.3.5-1* berechnet wurden.
Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die grössten Bremswegsensitivitäten in den untersuchten Bremstabellen für kleine Gefälle und tiefe Bremsausgangsgeschwindigkeiten auftreten. In diesem Tabellenbereich scheint die Festlegung der Mindestbremsverhältnisse aufgrund einer maximalen Bremswegsensitivität sinnvoll sein. Bemerkenswert ist zudem, dass für Bremsausgangsgeschwindigkeiten von mehr als 40 km/h, also im signaltechnisch relevanten Bereich, bei allen Bremstabellen die Bremswegsensitivität unter einem Wert von 4% bleibt.
Zusätzlich zu den Darstellungen in Abbildung *5.3.7-1* bis Abbildung *5.3.7-3*, finden sich in der Anlage *A11* die Berechnungswerte in tabellarischer Form.
In einem nächsten Schritt soll versucht werden die Abhängigkeiten zwischen Effektivverzögerung und Bremswegsensitivität zu klären mit dem Ziel, die Relevanz von Effektivverzögerung beziehungsweise Bremswegsensitivität als limitierende Kriterien für die Konstruktion von Bremstabellen beurteilen zu können. Im folgenden Abschnitt wird deshalb untersucht, ob es aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen Bremswegsensitivität und Effektivverzögerung im Sinne einer Vereinfachung, alleine die Effektivverzögerung bei der Konstruktion von Bremstabellen als limitierende Leitgrösse heranzuziehen.

5.4 Abhängigkeit zwischen Effektivverzögerung & Bremswegsensitivität

5.4.1 Bremswegsensitivität, Abhängigkeit von Effektivverzögerung für GG-Bremssohlen

Nachfolgende Darstellungen zeigen für bestimmte Effektivverzögerungen die Bremswegsensitivität in Abhängigkeit der Bremsausgangsgeschwindigkeit und der Streckenneigung für die GG-Charakteristik.

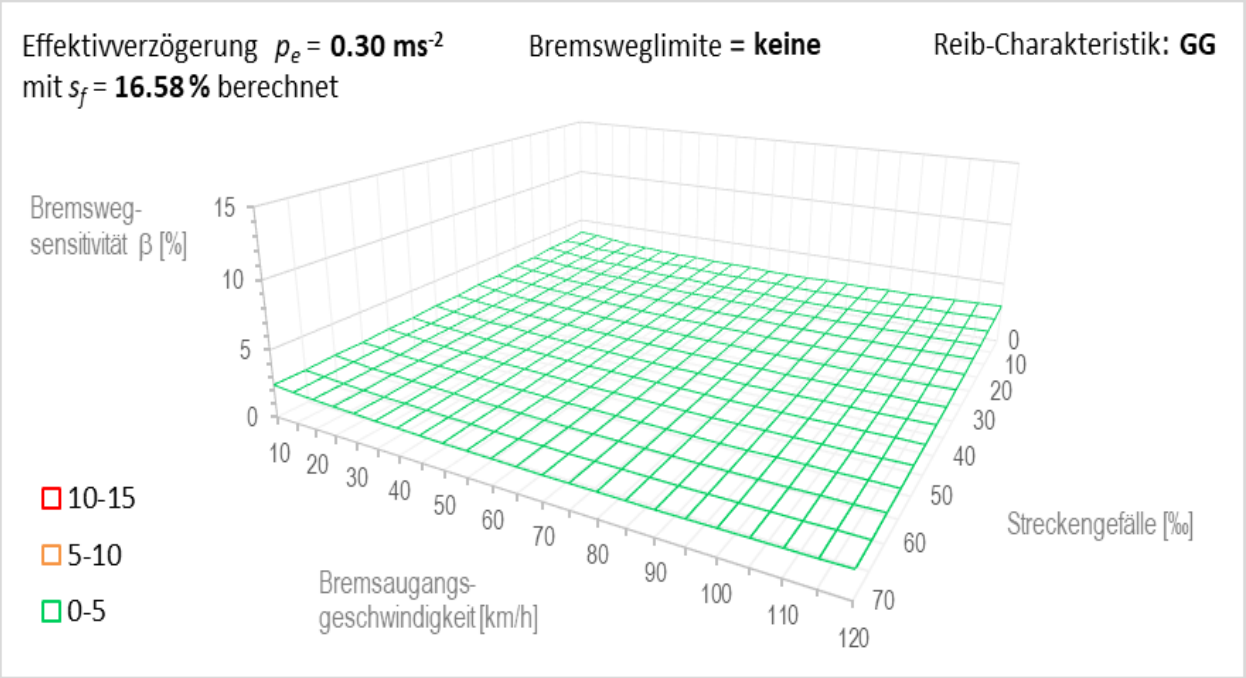


Abbildung 5.4.1-1: *Bremswegsensitivität nach Modell BAV_Orig mit phys.-Abbremsung P/G=6666 N/t*

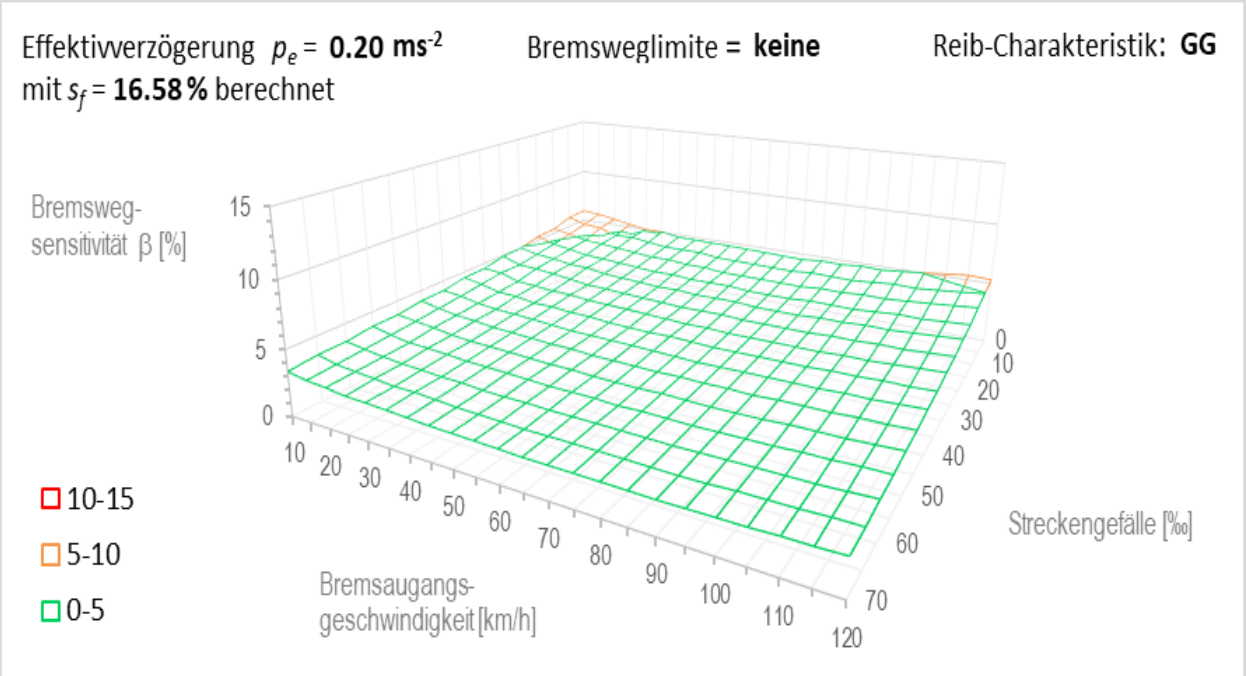


Abbildung 5.4.1-2: *Bremswegsensitivität nach Modell BAV_Orig mit phys.-Abbremsung P/G=6666 N/t*

Der Vergleich von Abbildung 5.4.1-1 und Abbildung 5.4.1-2 zeigt, dass das Niveau der Bremswegsensitivität mit abnehmender Effektivverzögerung leicht zunimmt.
Zudem lässt sich feststellen, dass für die betrachteten Effektivverzögerungen 0,3 ms^{-2} beziehungsweise 0,2 ms^{-2} die Bremsausgangsgeschwindigkeit und die Streckenneigung die Dynamik der Bremswegsensitivität $\Delta\beta = \beta_{p_e=0.3\ (v_0,i)} - \beta_{\ p_e=0.2\ (v_0,i)} \cong konst.$ nicht wesentlich beeinflussen.

Die nachfolgende Grafik zeigt diese Abhängigkeiten und Zusammenhänge für eine noch tiefere Effektivverzögerung von 0.13 ms^{-2}.

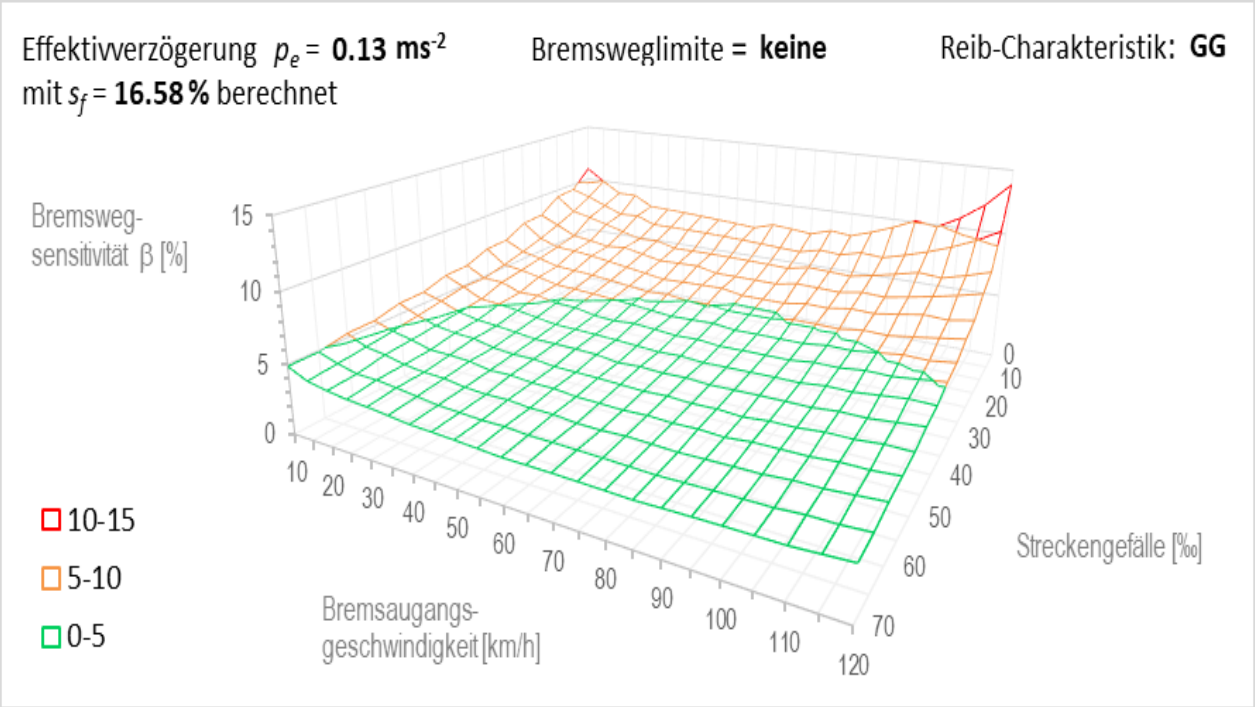


Abbildung 5.4.1-3: *Bremswegsensitivität nach Modell BAV_Orig mit phys.-Abbremsung P/G=6666 N/t*

Die obige Abbildung 5.4.1-3 zeigt, dass das Niveau der Bremswegsensitivität sich etwa proportional zu der weiter abnehmenden Effektivverzögerung entwickelt. Aus dieser Darstellung sticht aber heraus, dass die Bremswegsensitivität sich für schwache Gefälle und konstanter Effektivverzögerung von 0.13 ms^{-2} exponentiell weiterentwickelt.

In der Anlage A13 finden sich die entsprechenden Zahlenwerte in tabellarischer Form zu Abbildung 5.4.1-1 bis Abbildung 5.4.1-3.

5.4.2 Bremswegsensitivität, Abhängigkeit von Effektivverzögerung für K-Bremssohlen

Analog zu den Betrachtungen der Bremswegsensitivität für die GG-Charakteristik in Abschnitt 5.4.1, zeigen die nachfolgenden Darstellungen die entsprechenden Ergebnisse für die K-Reibwertcharakteristik.

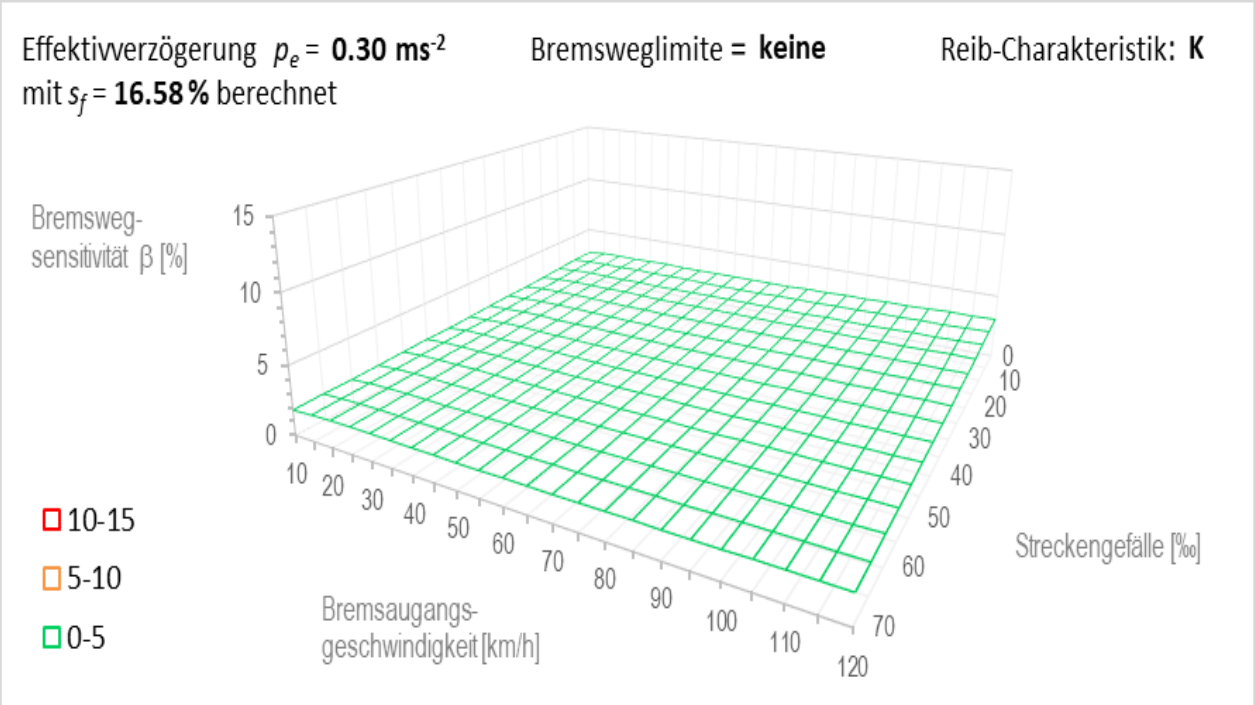


Abbildung 5.4.2-1: *Bremswegsensitivität nach Modell BAV_Orig mit phys.-Abbremsung P/G=3800 N/t*

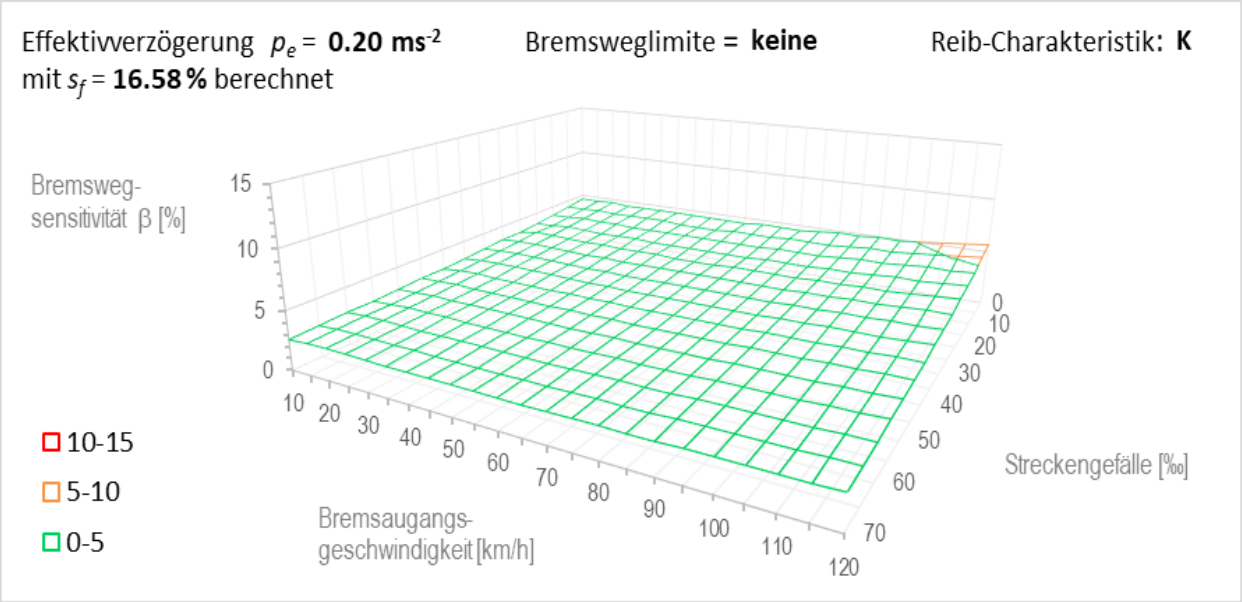


Abbildung 5.4.2-2: *Bremswegsensitivität nach Modell BAV_Orig mit phys.-Abbremsung P/G=3800 N/t*

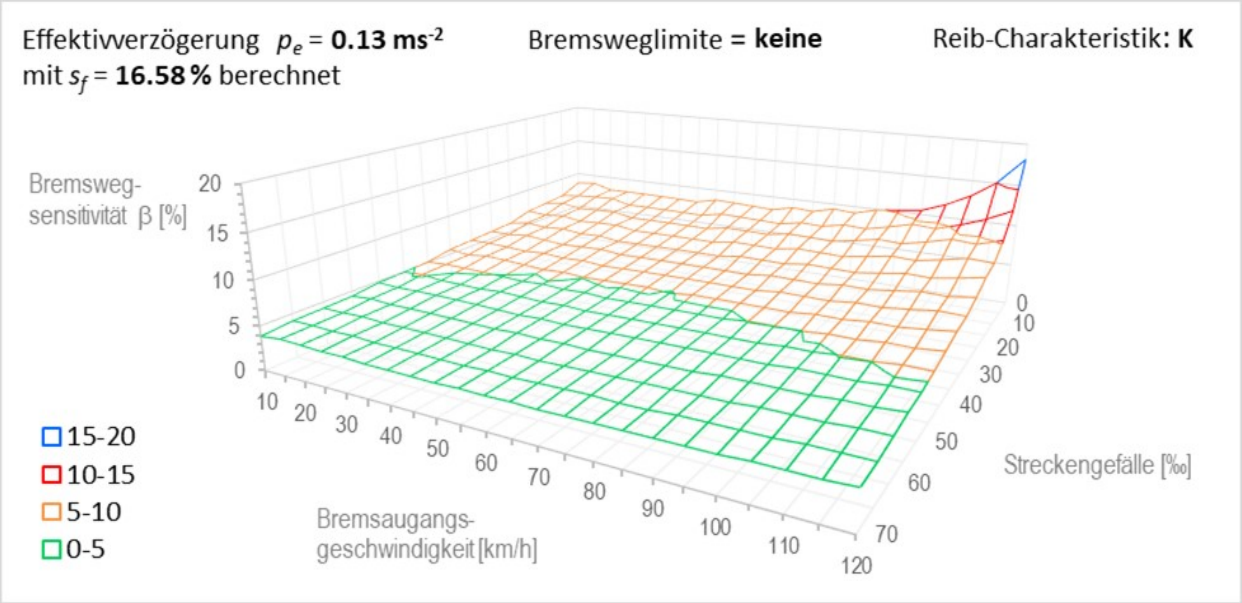


Abbildung 5.4.2-3: *Bremswegsensitivität nach Modell BAV_Orig mit phys.-Abbremsung P/G=3800 N/t*

Die Bremswegsensitivität für die K-Charakteristik zeigt gemäss Abbildung 5.4.2-3 ähnliche Abhängigkeiten wie für die im vorhergehenden Abschnitt betrachteten GG- Bremssohlen. Das Niveau der Bremswegsensitivität liegt bei gleicher konstanter Effektivverzögerung tendenziell etwas tiefer gegenüber der GG-Charakteristik. Die Bremswegsensitivität für hohe Bremsausgangsgeschwindigkeiten und schwache Gefälle liegt bei der K-Charakteristik jedoch etwas höher als bei der GG-Charakteristik. Also gerade umgekehrt gegenüber dem Verhalten bei tiefen Bremsausgangsgeschwindigkeiten und schwachem Gefälle. Dieses Verhalten geht einher mit dem unterschiedlichen Niveau der Momentanreibwerte der beiden Reibwertcharakteristiken. Für schwache Gefälle und tiefe Bremsausgangsgeschwindigkeiten liesse sich daraus ableiten, dass hinsichtlich der unterschiedlichen Reibwertcharakteristiken die Bremswegsensitivität als eigenes Limitierungskriterium für die Konstruktion Bremstabellen durchaus sinnvoll sein könnte.

Die Zahlenwerte zu Abbildung 5.4.2-1 bis Abbildung 5.4.2-3 sind in Anlage A13 zusätzlich in tabellarischer Form enthalten.

5.4.3 Herleitung der Ergebnisse betreffend die Betrachtung der Bremswegsensitivität

Die Abbildung 5.4.1-1 bis Abbildung 5.4.1-3 zeigen für Grauguss- beziehungsweise die Abbildung 5.4.2-1 bis Abbildung 5.4.2-3 für die K- Bremssohlen die entsprechenden Bremswegsensitivitäten nach Formel 5.3.5-1. Für jede Bremsausgangsgeschwindigkeit und jedes Streckengefälle wurde mittels der Formel 5.3.4-1 das

zugehörige Bremsverhältnis berechnet, welches der jeweiligen in der Abbildungen angegebenen Effektivverzögerungen p_e entspricht. Anhand dieser Bremsverhältnisse lassen sich mittels Formel 2.2.3-2 nun die Bremswege und damit die dargestellten Bremswegsensitivitäten berechnen. Die in den Abbildungen festgelegte Effektivverzögerung p_e gilt demnach für jede Bremsausgangsgeschwindigkeit und jedes Streckengefälle. Den Berechnungen liegen die Momentan-Reibwerte für GG-Bremssohlen gemäss der Tabelle 2.2-1, beziehungsweise die angenommene Reibwertcharakteristik für Verbundstoffbremssohlen gemäss der Anlage A12 zugrunde.

5.4.4 Fazit zum Zusammenhang von Effektivverzögerung und Bremswegsensitivität

Bei niedriger konstanter Effektivverzögerung von p_e = 0,13 ms^{-2} wie in Abbildung 5.4.1-3 und Abbildung 5.4.2-3 dargestellt, steigt die Bremswegsensitivität bei der K-Reibwertcharakteristik für kleine Gefälle und Bremsausgangsgeschwindigkeiten grösser 80 km/h etwas stärker an als bei der K-Reibwertcharakteristik. Für schwache Gefälle und niedrige abnehmende Bremsausgangsgeschwindigkeiten zeigt sich allerdings ein entgegengesetztes Verhalten. Hier treten bei der GG-Reibwertcharakteristik bei abnehmender Bremsausgangsgeschwindigkeit höhere Bremswegsensitivitäten auf gegenüber der K-Reibwertcharakteristik. Dies Verhalten geht einher mit dem Niveau der geschwindigkeitsabhängigen Momentanreibwerte der unterschiedlichen Reibwertcharakteristiken von GG- beziehungsweise K-Bremssohlen.
Nach Migrationsvariante III gemäss Abschnitt 4.3.3 wurde ein maximaler Anhaltewege von 1000 Meter festgelegt. Für hohe Bremsausgangsgeschwindigkeitsbereich führt dies dazu, dass die Limitierung zwangsläufig über die höhere Effektivverzögerung erfolgt. Damit ergibt sich für hohe Bremsausgangsgeschwindigkeiten eine hohe Effektivverzögerung, welche erforderlich ist für Einhaltung des maximal zulässigen Anhaltweges, und als Folge dessen eine niedrige unkritische Bremswegsensitivität.
Für tiefe Bremsausgangsgeschwindigkeiten und schwache Gefälle, kommt der Effektivverzögerung nicht die Bedeutung zu wie für starke Gefälle mit grossem Hangabtrieb. Für diese Konstellation wird deshalb die maximale Bremswegsensitivität als Limitierungskriterium für die Konstruktion von Bremstabellen als sinnvoll erachtet. Natürlich liesse sich dies auch mit der Vorgabe eines minimalen operativen Bremsverhältnisses erreichen. Eine solche Vorgabe zur Festlegung von Mindestbremsverhältnissen für die Konstruktion von Bremstabellen wäre zwar pragmatisch, aber schlecht nachvollziehbar.

Für die Konstruktion von Bremstabellen sollen Effektivverzögerung und Bremswegsensitivität je als eigenes Limitierungskriterien zur Anwendung kommen.

Festlegung 5.4.4-1

5.5 Schutzkriterien

5.5.1 Minimale erforderliche Effektivverzögerung

Mit der Festlegung der minimalen Effektivverzögerung p_e wird das für Bremstabellen formulierte Schutzziel *«I. Sicheres Anhalten»* sichergestellt. Die Analyse der bestehenden Bremstabellen wurde durchgeführt auf Basis des Anhaltewegberechnungsmodells «BAV_Orig» mit der Effektivverzögerung, welche gemäss Formel 5.3.4-1 der momentanen Verzögerung bei der Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 und voll entwickelter Bremskraft entspricht. Hieraus folgt, dass die tatsächliche Verzögerung während der Bremskraftentwicklungsphase kleiner ausfällt als der berechnete Wert für die Effektivverzögerung p_e.

Für die Konstruktion neuer Bremstabellen auf Basis des Referenzmodells, wird die momentane Effektivverzögerung p_e festgelegt als die Verzögerung bei

- der Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 und dem Hangabtrieb $a_{s(i)}$,
- der voll entwickelten Anpresskraft $\hat{P}$ nach Formel 2.3.1-1 mit $\left(1 - e^{-\frac{3 \cdot t}{\tau}}\right) = 1$,
- der streuungsbereinigten physikalischen Abbremsung $\hat{P} \cdot \frac{1}{G}(1 - \frac{16{,}58\%}{100})$ nach Formel 2.2.3-1,
- berechnet mit der Anhaltewegberechnung nach dem Referenzmodell mit kombinierter Reibwertcharakteristik

Unter Einhaltung der in der Bremstabelle geforderten Mindestbremsverhältnisse wird die minimale Effektivverzögerung p_e sowohl von der Klotzbremse als auch von der Scheibenbremse mit den Charakteristiken gemäss Abbildung 4.3.1-1 erreicht.

Die Mindest- Bremsverhältnisse in den Bremstabellen sind für alle Gefälle und Bremsausgangsgeschwindigkeiten so festzulegen, dass daraus eine adäquate und vernünftige minimale Effektivverzögerung resultiert. Ebenso stützen sich die Fahrdienstvorschriften (FDV) bei der Festlegung der Teilbremsverhältnisse auf die jeweils angewandte Bremstabelle, um sicherzustellen, dass jeder einzelne Zugteil nach einer Zugtrennung sicher bis zum Stillstand abgebremst wird. In der Anlage A15 ist dazu der entsprechenden Auszug aus den Fahrdienstvorschriften (FDV) enthalten.

Aufgrund der Erkenntnisse zu den bestehenden Bremstabellen gemäss Abschnitt 5.3.6, erfolgt die Festlegung der minimalen Effektivverzögerung mit $p_e \geq 0{,}13\ ms^{-2}$.

Festlegung 5.5.1-1

Im unteren Geschwindigkeitsbereich, welcher in Bezug auf die Effektivverzögerung nicht primär von dem maximalen Anhalteweg abhängig ist, besteht mit der Festlegung 5.5.1-1 im Gefällebereich zwischen 40 und 50 ‰ eine gute Übereinstimmung mit den Werten der bestehenden Bremstabellen IIA, III und VI. Mit zunehmender Bremsausgangsgeschwindigkeit steigt in den bestehenden Bremstabellen IIA und III die Effektivverzögerung progressiv an, was einerseits für die Einhaltung der maximalen Anhaltewege erforderlich ist und andererseits dem zunehmenden Energieeintrag im Gefälle entgegenwirkt und damit zu einer thermischen Robustheit beiträgt. Der Aspekt darf an dieser Stelle vernachlässigt werden, da die thermische Beanspruchung der Reibbremse in Kapitel 5.5.4 separat behandelt wird und damit als Limitierungskriterium Eingang in die Konstruktion von Bremstabellen findet.

5.5.2 Maximale zulässige Bremswegsensitivität

Die Abhängigkeit zwischen Effektivverzögerung p_e und Bremswegsensitivität β wurde für Einzelfahrzeuge über den gesamten Bremsausgangsgeschwindigkeits- und Neigungsbereich in Kapitel 5.4 eingehend behandelt. Die Betrachtungen nach Abbildung 5.4.1-3 und Abbildung 5.4.2-3 basieren auf einer Effektivverzögerung von $p_e = 0{,}13\ ms^{-2}$.

Die Untersuchungen zur Abhängigkeit zwischen der Effektivverzögerung und der Bremswegsensitivität in Kapitel 5.4.4 zeigen, dass es sinnvoll ist, die Bremswegsensitivität bei der Konstruktion von Bremstabellen als eigenständiges Limitierungskriterium zu führen, um Bremstabellen nicht mit sekundären Aspekten, wie beispielsweise mittels betrieblicher Mindest-Bremsverhältnisse, begrenzen zu müssen. Dadurch lässt sich die Bremswegsensitivität völlig losgelöst und damit eigenständig festlegen.
Aus den Darstellungen in Abbildung 5.4.1-3 und Abbildung 5.4.2-1 wie auch aus der Anlage A13 geht hervor, dass bei 70 ‰ Gefälle und einer Effektivverzögerung von $0{,}13\ ms^{-2}$ die Bremswegsensitivität β über den gesamten Geschwindigkeitsbereich für die GG-Reibwertcharakteristik bei rund 5 % und für die K-Reibwertcharakteristik bei etwa 4 % liegt. Ähnliche Werte wurden bei der Untersuchung der den Bremstabellen zugrundeliegenden Bremswegsensitivitäten im Abschnitt 5.3.7 für den Geschwindigkeitsbereich oberhalb 40 km/h festgestellt. Die in Kapitel 5.4.4 dokumentierten Untersuchungen konsolidieren dies und belegen auch, weshalb die Bremswegsensitivität im tiefen Geschwindigkeitsbereich ansteigt. Aufgrund dieser Konstellation sowie in Anbetracht der geringen absoluten Bremswegsensitivität, lassen sich die Bremswegsensitivitäten in diesem Bereich nicht sinnvoll für deren Grenzwertfindung auswerten.

Aus den oben dargelegten Gründen sowie der jahrzehntelangen bewährten Anwendung der Bremstabellen IIA, III und IV, wird der aus den bestehenden Bremstabellen extrahierte Grenzwert für Bremswegsensitivität mit $\beta \leq 4{,}0\ \%$ als adäquat und sicher beurteilt.

Festlegung 5.5.2-1

5.5.3 Bremsverhältnisse für die Erfüllung der kinematischen Schutzkriterien

Die folgenden Darstellungen zeigen die erforderlichen Bremsverhältnisse für die Einhaltung der Grenzwerte Effektivverzögerung $p_e \geq 0{,}13\ ms^{-2}$, Bremswegsensitivität $\beta_{max} \leq 4\ \%$ und Maximalanhalteweg $s_{max} \leq 1'000\ m$, basierend auf der Anhaltewegberechnung mit dem Referenzmodell für die Reibwertcharakteristik K-Bremssohle beziehungsweise jene der Scheibenbremse.

Bremsverhältnisse berechnet auf der Reibwertbasis der K-Bremssohle

Gefälle	Geschwindigkeit v [km/h]																							
i [‰]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	
0	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	25	28	31	35	39	44	48	53	
5	24	25	26	26	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	29	33	36	40	44	49	53	58	
10	28	29	30	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	34	37	41	45	49	53	58	63	
15	32	33	34	34	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	39	42	46	50	54	58	63	68	
20	36	37	38	38	39	39	39	39	40	40	40	40	40	40	40	43	47	51	55	59	63	68	73	
25	40	41	42	42	43	43	44	44	44	44	44	44	44	44	45	48	52	56	60	64	68	73	78	
30	44	45	46	46	47	47	48	48	48	48	49	49	49	49	50	53	57	60	64	69	73	78	83	
35	48	49	50	51	51	52	52	52	53	53	53	53	53	53	54	58	61	65	69	74	78	83	88	
40	52	53	54	55	55	56	56	57	57	57	58	58	58	58	59	62	66	70	74	78	83	88	93	
45	56	57	58	59	59	60	61	61	62	62	62	63	63	63	64	67	71	75	79	83	88	93	98	
50	60	61	62	63	64	65	66	67	67	68	68	68	68	68	68	72	76	80	84	88	93	98	103	
55	64	65	66	68	69	70	71	72	73	73	74	74	74	74	74	77	81	85	89	93	98	103	108	
60	68	70	71	73	74	76	77	78	78	79	79	80	80	80	80	82	85	89	94	98	103	108	113	
65	73	75	76	78	79	81	82	83	84	85	85	86	86	86	86	86	90	94	98	103	108	113	118	
70	77	79	81	83	85	86	87	88	89	90	91	91	92	92	92	92	95	99	103	108	113	118	124	
75	82	84	86	88	90	91	93	94	95	96	96	97	97	98	98	98	100	104	108	113	118	123	129	
80	87	89	91	93	95	97	98	99	100	101	102	103	103	103	104	104	105	109	113	118	123	128	134	

Farblegende: λ_β λ_{pe} λ_s $\lambda_{pe+\beta}$ λ_{pe+s} $\lambda_{\beta+s}$

Tabelle 5.5-1: *Mindestbremsverhältnisse bei K-Charakteristik*

Bremsverhältnisse berechnet auf der Reibwertbasis der Scheibenbremse

Gefälle	Geschwindigkeit v [km/h]																						
i [‰]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
0	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	24	28	31	35	39	43	47	51
5	25	26	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	29	32	36	40	43	48	52	56
10	29	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	34	37	41	44	48	52	57	61
15	33	34	35	35	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	39	42	45	49	53	57	61	66
20	38	38	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	43	47	50	54	58	62	66	71
25	42	43	43	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	45	48	51	55	59	63	67	71	76
30	46	47	48	48	48	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	53	56	60	63	67	72	76	80
35	50	51	52	52	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	54	57	61	64	68	72	76	81	85
40	55	56	56	57	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	59	62	66	69	73	77	81	85	90
45	59	60	61	61	61	62	62	62	62	62	63	63	63	63	64	67	70	74	78	82	86	90	95
50	64	64	65	66	66	67	67	67	67	67	67	67	67	67	68	71	75	79	82	86	91	95	100
55	69	70	70	71	72	72	72	73	73	73	73	73	73	72	73	76	80	83	87	91	95	100	105
60	74	75	76	76	77	77	78	78	78	78	79	78	78	78	78	81	84	88	92	96	100	105	109
65	79	80	81	82	82	83	83	84	84	84	84	84	84	84	83	86	89	93	97	101	105	109	114
70	84	85	86	87	87	88	89	89	89	90	90	90	90	89	89	90	94	98	101	106	110	114	119
75	89	90	91	92	93	93	94	95	95	95	95	95	95	95	95	95	99	102	106	110	115	119	124
80	94	95	96	97	98	99	99	100	100	101	101	101	101	101	100	100	103	107	111	115	119	124	129

Farblegende: λ_β λ_{pe} λ_s $\lambda_{pe+\beta}$ λ_{pe+s} $\lambda_{\beta+s}$

Tabelle 5.5-2: *Mindestbremsverhältnisse bei SB-Charakteristik*

Zusammengeführte Bremsverhältnisse für K-Sohle und Scheibenbremse (Maximalwertbildung)

Gefälle	Geschwindigkeit v [km/h]																						
i [‰]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
0	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	25	28	31	35	39	44	48	53
5	25	26	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	29	33	36	40	44	49	53	58
10	29	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	34	37	41	45	49	53	58	63
15	33	34	35	35	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	39	42	46	50	54	58	63	68
20	38	38	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	43	47	51	55	59	63	68	73
25	42	43	43	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	45	48	52	56	60	64	68	73	78
30	46	47	48	48	48	49	49	49	49	49	49	49	49	49	50	53	57	60	64	69	73	78	83
35	50	51	52	52	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	54	58	61	65	69	74	78	83	88
40	55	56	56	57	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	59	62	66	70	74	78	83	88	93
45	59	60	61	61	61	62	62	62	62	62	63	63	63	63	64	67	71	75	79	83	88	93	98
50	64	64	65	66	66	67	67	67	67	68	68	68	68	68	68	72	76	80	84	88	93	98	103
55	69	70	70	71	72	72	72	73	73	73	74	74	74	74	74	77	81	85	89	93	98	103	108
60	74	75	76	76	77	77	78	78	78	79	79	80	80	80	80	82	85	89	94	98	103	108	113
65	79	80	81	82	82	83	83	84	84	85	85	86	86	86	86	86	90	94	98	103	108	113	118
70	84	85	86	87	87	88	89	89	89	90	91	91	92	92	92	92	95	99	103	108	113	118	124
75	89	90	91	92	93	93	94	95	95	96	96	97	97	98	98	98	100	104	108	113	118	123	129
80	94	95	96	97	98	99	99	100	100	101	102	103	103	103	104	104	105	109	113	118	123	128	134

Farblegende: λ_β λ_{pe} λ_s $\lambda_{pe+\beta}$ λ_{pe+s} $\lambda_{\beta+s}$

Tabelle 5.5-3: *Mindestbremsverhältnisse bei SB-Charakteristik und K-Bremssohle kombiniert*

Interpretation der Tabellen

Die Zahlenwerte in Tabelle 5.5-1 und Tabelle 5.5-2 entsprechen den Mindestbremsverhältnissen die erforderlich sind, um mit der jeweiligen Reibwertcharakteristik die Anforderungen an die Kriterien Effektivverzögerung p_e, Bremswegsensitivität β und Anhalteweg s zu erfüllen. Die Tabelle 5.5-3 enthält die erforderlichen Mindestbremsverhältnisse, mit welchen die Grenzwerte für p_e, β und s eingehalten werden für die kombinierten Reibwertcharakteristiken K-Bremssohle und Scheibenbremse. Die farbliche Kennzeichnung der Tabellenfelder gibt Aufschluss darüber, welches Kriterium dabei das höchste Mindestbremsverhältnis erfordert. Der Vergleich der 10 km/h - Geschwindigkeitsspalte in Tabelle 5.5-1 und Tabelle 5.5-2 verdeutlicht den Einfluss der unterschiedlichen Reibwertcharakteristiken. Um den Grenzwert für die erforderliche Effektivverzögerung von 0,13 ms^{-2} mit der SB-Charakteristik zu erreichen, ist im Vergleich zu K-Charakteristik ein höheres Bremsverhältnis erforderlich, was einhergeht mit dem kleineren Reibwertgradienten der Scheibenbremse im untersten Geschwindigkeitsbereich. Umgekehrt verhält es sich bei höheren Geschwindigkeiten. Dort nimmt das Reibwertniveau der K-Bremssohle gegenüber der Scheibenbremse mit zunehmender Geschwindigkeit schneller ab.

5.5.4 Thermische Beanspruchung

Wie in Kapitel 5.5.1 erwähnt, ist es mit der Definition einer minimal geforderten Effektivverzögerung p_e im Form einer Konstante nicht möglich, über den Gefällebereich energetische und damit thermische Effekte zu begrenzen. Bei einer Bremsung muss die kinetische und potentielle Energie eines Einzelfahrzeuges beziehungsweise jedes Fahrzeuges einer Zugkomposition von der Reibbremse schadlos in Wärmeenergie umgesetzt werden können. Dabei darf die Reibpaarung bei der Energieumwandlung keiner unzulässig hohen thermischen Belastung ausgesetzt werden, welche die Bremswirkung beeinträchtigen oder gar die Bremsausrüstung beschädigen könnte. Je nach Bremsbauart sind unterschiedliche Reibpaarungen anzutreffen. Während es im Güterverkehr vor allem die weit verbreitete Klotzbremse mit Grauguss oder Verbundstoffsohlen ist, so dominiert im Personenverkehr die Scheibenbremse.
Die zeitliche und örtliche Temperaturentwicklung in den Bremskomponenten ist abhängig vom Produkt Geschwindigkeit x Bremskraft, also von der Bremsleistung. Um nun die thermische Beeinflussung des Bremsverhaltens beurteilen zu können, muss der Temperaturverlauf der Reibpaarung bekannt sein. Die Herstellerspezifikationen für Reibbeläge und Bremsklötze enthalten Angaben zu thermischen Belastungen in Bezug auf die Reibwertstabilität. Deshalb muss sichergestellt werden, dass diese Vorgaben im ordentlichen Bremsbetrieb eingehalten werden.

Ansatz für die thermische Limitierung

Alleine mit der Vorgabe von Mindestbremsverhältnissen ist keine Begrenzung der thermischen Belastung möglich. Das zeitliche und örtliche Temperaturverhalten während des Bremsvorgangs hängt massgebend vom Wärmestrom in den Bremskomponenten und der thermischen Leitfähigkeit der dafür verwendeten Materialien ab, und damit von dem Energieeintrag pro Zeiteinheit.
Das für Bremstabellen formulierte Schutzziel *«III. Belastbarkeit der Bremse»* soll gefälleabhängig durch Festlegung einer Grenzgeschwindigkeit bei bestimmter Achslast erreicht werden, für mindestens zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Schnellbremsungen. Dabei darf die thermische Belastung zu keiner relevanten Bremswegverlängerung (Wärmefading) führen, beziehungsweis nicht zu einer Schädigung oder Vorschädigung von Bremskomponenten.

Modell für die Berechnung der Radtemperatur

Im Zusammenhang mit der Einführung von ETCS Level 2 am Gotthard hat die SBB AG Infrastruktur die DB-Systemtechnik beauftragt, die thermische Bremsverträglichkeit hinsichtlich Vorerwärmung der Bremse beim Befahren der Gotthard-Südrampe nachzuweisen. Die entsprechenden Arbeiten wurden von einer Arbeitsgruppe bestehend aus Mitarbeitenden der SBB und des BAV sehr eng begleitet. Das Ziel dabei war eine Methodik zu erarbeiten, welche es erlaubt betrieblichen Grenzen so festzulegen, dass die während der Bremsung in die Bremsausrüstung eingetragene Wärmeenergie zu keiner unzulässigen Veränderung des Bremsverhaltens oder zu einer Schädigung der Bremse führt. In diesem Zusammenhang wurde in vereinfachter Weise das Temperaturverhalten des Radkranzes untersucht, anhand des folgenden Temperaturmodells:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \left[\alpha \cdot \mu_{Reib} \cdot v \cdot F_{B(t)} - (p_0 + p_1 \cdot v) \cdot T\right]$$

Formel 5.5.4-1: *Temperaturmodell zur Grobabschätzung von Bremsscheiben/Radtemperaturen* [12]

In Bezug auf das Bremstabellen-Schutzziel *«III. Belastbarkeit der Bremse»* hat die DBS untersucht, ob es anhand dieses vereinfachten Temperaturberechnungsmodells auch möglich, ist die thermische Bremsverträglichkeit bei Schnellbremsungen zu bewerten.

Gemäss den im DB-Teilbericht 2 [10] dokumentierten Simulationen in Kapitel 4.1.2, eignet sich das Temperaturberechnungsmodell nach Formel 5.3.4-1 nicht für eine qualitativ ausreichende Beurteilung zur thermischen Belastbarkeit der Bremse. Im Weiteren wird deshalb auf weitere Untersuchungen anhand des Temperaturmodells gemäss Formel 5.5.4-1 verzichtet.

Um trotzdem einen ersten Überblick zum thermischen Verhalten der Bremse gewinnen zu können, hat das BAV als Grobabschätzung einige Simulationen zur Verhaltensweise der mittleren Radkranztemperatur bei Verwendung von K-Bremssohlen anhand von Formel 5.5.4-1 durchgeführt. Die Ergebnisse dazu finden sich in Anlage A16.

In Ermangelung der Modell-Koeffizienten p_0 und p_1 in der Formel 5.5.4-1, betreffend die Radkranz-Erwärmung/Abkühlung von Schmalspurfahrzeugen, wurden diese Simulationen mit den Koeffizienten und Modellparametern gemäss Anlage A8 für Räder von Normalspurfahrzeugen durchgeführt.

Überlegungen zu Implementation der thermischen Belastbarkeit in Bremstabellen

Aufgrund der Bremsverhältnisse nach Tabelle 5.5-1 wurden für unterschiedliche Achslasten Abschätzungsberechnungen zur Radkranzerwärmung gemäss den Beispielsimulationen in Anlage A16 durchgeführt. Obschon davon auszugehen ist, dass nicht die mittlere Radkranztemperatur, sondern die Radlaufflächentemperatur für die Beurteilung eines möglichen Wärmefadings massgebend ist, kann doch eine Abschätzungsrechnung einen ersten Anhaltspunkt dazu liefern, mit welcher Methodik die thermische Belastung der Bremse in Bremstabellen adäquat berücksichtigt werden könnte.
Entsprechend den in Tabelle 5.5-1 angegebenen Bremsverhältnissen für die K-Reibwertcharakteristik wurden für unterschiedliche Radsatzlasten die mittleren Radkranztemperaturen nach der Formel 5.5.4-1 berechnet. In nachfolgender Tabelle 5.5-4 sind dazu die Bremsverhältnisse angeben, welche mindestens erforderlich sind, damit nach drei unmittelbar aufeinander folgenden Schnellbremsungen die mittlere Radkranztemperatur nicht über 500 °C ansteigt. Den farblich gekennzeichneten Tabellenfeldern kann entnommen werden, mit welchen Achslasten die einzelnen Temperaturberechnungen durchgeführt wurden.

Da für die Radkranztemperaturberechnungen nur Koeffizienten für die grösseren Normalspurräder verfügbar waren, wurden aus Kompensationsgründen drei Schnellbremszyklen berücksichtigt. Diese Massnahme ist daher vermutlich als eher konservativ einzustufen.

Übersicht zu den kinetischen und thermischen Limitierungszonen der Bremstabelle

① Effektivverzögerung p_e ② Bremswegsensitivität β ③ Anhalteweg s

Radsatzlasten: 12.5 | 16.0 | 18.0 | 20.0 | 22.5 Reibwertcharakteristik **K** Grenztemperatur: **500 °C**

λ [%]	Schnellbremsungen: **3**										**v** [km/h]												
i [‰]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
0	21	22	22	22	23	23	23	23	22	22	22	22	22	22	22	25	28	32	36	40	44	48	53
5	25	26	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	26	26	26	29	33	36	40	44	49	53	58
10	29	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	34	38	41	45	49	54	58	63
15	33	34	34	35	35	35	35	35	36	36	36	36	35	35	36	39	42	46	50	54	59	63	68
20	36	37	38	39	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40	44	47	51	55	59	64	68	73
25	40	41	42	43	43	44	44	44	44	44	45	45	45	45	45	48	52	56	60	64	69	73	78
30	44	45	46	47	47	48	48	49	49	49	49	49	49	49	50	53	57	61	65	69	74	78	83
35	48	49	50	51	52	52	53	53	53	53	54	54	54	54	55	58	62	66	70	74	79	83	88
40	52	53	54	55	56	56	57	57	58	58	58	58	58	58	59	63	67	70	75	79	84	88	93
45	56	57	58	59	60	61	61	62	62	62	63	63	63	63	64	68	71	75	79	84	88	93	98
50	60	61	62	63	64	65	66	67	67	68	68	68	68	68	69	72	76	80	84	89	93	98	103
55	64	65	67	68	69	70	71	72	73	73	74	74	74	74	74	77	81	85	89	94	98	103	108
60	68	70	71	73	74	76	77	78	78	79	79	80	80	80	80	82	86	90	94	99	103	108	114
65	73	75	76	78	79	81	82	83	84	85	85	86	86	86	86	87	91	95	99	104	108	113	119
70	77	79	81	83	85	86	87	88	89	90	91	91	92	92	92	92	96	100	104	109	113	118	124
75	82	84	86	88	90	91	93	94	95	96	96	97	97	98	98	98	100	104	109	113	118	123	129
80	87	89	91	93	95	97	98	99	100	101	102	103	103	103	104	104	105	109	114	118	123	128	134

Tabelle 5.5-4: *Erste Grobabschätzung zur thermischen Belastbarkeit mittels berechneter Radkranztemperaturen*

5.6 Abgrenzung der Gültigkeit von Bremstabellen

Die in den Bremstabellen vorgeschriebenen Mindest-Bremsverhältnisse schränken die Kinematik für den Bremsbetrieb soweit ein, dass sich die mit Reibbremsen ausgerüsteten Fahrzeuge im Schnellbremsfall zuverlässig und sicher bis zum Stillstand abbremsen lassen.

Schnellbremsungen

Die Wirksamkeit der kinematischen Vorgaben für p_e und β in den Bremstabellen beschränkt sich auf die Klotz- und/oder Scheibenbremse von Einzelfahrzeugen und Zugkompositionen. Zur Sicherstellung der thermischen Belastbarkeit der Bremse müssen bei **nicht vorerwärmter** Bremse mindestens zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Bremsungen möglich sein. Bremstabellen sind explizit nicht anwendbar für eine technische Bewertung der Bremse auf langen Gefällestrecken im intermittierenden Bremsbetrieb (Sägezahnmethode) oder im Dauerbremsbetrieb.

Hinsichtlich Begrenzung der thermischen Belastung, decken Bremstabellen ausschliesslich die Bremsbauart Klotzbremse ab. Die Bremstabellen sollen hinsichtlich Begrenzung der kinematischen Kriterien p_e und β auch für Fahrzeuge mit Scheibenbremse angewendet werden. Für scheibengebremste Fahrzeuge ist aber zusätzlich ein spezifischer Nachweis zur thermischen Verträglichkeit der Bremskomponenten erforderlich, damit die Bremstabellen freizügig angewendet werden dürfen.

Homogenität der Bremskraftverteilung

Die Simulationen und Berechnungen der DB-Systemtechnik zur thermischen Belastbarkeit der Bremse basieren auf einer homogenen Bremskraftverteilung im Zugverband. Für den bremstechnischen Betrieb sind die Vorgaben der Fahrdienstvorschriften (FDV) zu beachten und einzuhalten.

Zuglängeneinfluss

Für Zugkompositionen, in welchen die Bremse der einzelnen Fahrzeuge nicht über eine durchgehend pneumatische Hauptleitung gesteuert wird, haben Bremstabellen uneingeschränkte Gültigkeit in Bezug auf die Zuglänge.

Für Züge mit durchgehend pneumatischer Hauptleitung ist der tatsächliche Anhalteweg der Zugkomposition zu vergleichen mit dem berechneten Anhalteweg, welcher sich aus der Bremsrechnung entsprechend der Bewertung seiner Einzelfahrzeuge ergibt. Allfällige Differenzen, die sich aus dem Vergleich ergeben, sind sicherheitstechnisch zu bewerten und wenn erforderlich mit geeigneten Massnahmen zu kompensieren.

5.6.1 Massgebende Neigung

Den bestehenden Bremstabellen IIA, III und IV sind unterschiedliche massgebende Neigungen gemäss AB-EBV [2] zu Art. 77, AB 77.2 Ziffer 8 zugeordnet mit folgenden horizontalen Abständen:

Bremstabelle IIA	⇨	500 m
Bremstabelle III	⇨	300 m
Bremstabelle IV	⇨	500 m

Damit sich die Vorgaben in den Bremstabellen auf kurzen Gefälleabschnitten nicht allzu einschränkend auswirken, wie dies beispielsweise bei Überwerfungen der Fall sein könnte, dürfen die Werte der horizontalen Abstände (siehe oben) nicht zu klein sein. Damit erhalten kurze Teilstücke mit höherer Neigung als die «massgebende Neigung» für lange Züge ihre entsprechende Gewichtung. Andererseits ist natürlich auch das Verhalten sehr kurzer Züge mit zu berücksichtigen, deren Zuglängen deutlich kleiner sind als eben der horizontale Abstand der entsprechenden «massgebenden Neigung».

Der für die bisherigen Bremstabellen IIA und IV geltende horizontale Abstand von 500 Meter scheint für die Zuglängen der Schmalspurbahnen und im Vergleich zu den Bremstabellen für Normalspurbahnen ein sinnvoller Wert zu sein. Für die Erweiterung oder Neuerstellung von Bremstabellen ist die Definition der massgebenden Neigung irrelevant.

5.6.2 Inhomogen verteile Bremskräfte

Betreffend die Anwendung der aktuell gültigen Bremstabellen in den AB-EBV existieren keine Anforderungen an die Verteilung der Bremskräfte im Zug. Allerdings verweisen die Fahrdienstvorschriften (FDV) unter R 300.5 Ziffer 3.5.4 Teilbremsverhältnis auf die Bremstabellen in den AB-EBV. Es soll sichergestellt werden, dass bei einer Zugtrennung die einzelnen Zugteile, durch eine mit der Zugtrennung einhergehenden Schnellbremsung, sicher zum Stillstand kommen. Das kleinste berechnete Teilbremsverhältnis muss dabei mindestens so gross sein wie das Bremsverhältnis nach angewendeter Bremstabelle für die massgebende Neigung und für eine Geschwindigkeit von 25 km/h.

Mit dem Grenzwert für die minimale Effektivverzögerung ist auch das in den Fahrdienstvorschriften (FDV) verfolgte Schutzziel, im Zusammenhang mit den geforderten Teilbremsverhältnissen, welche sich auf die Bremstabellen beziehen, mit abgedeckt.

5.6.3 Übertragbarkeit der Methodik auf Normalspurbahnen

Ob und unter welchen Bedingungen die festgelegten Mechanismen, Methoden und Grenzwerte für die Erstellung von Bremstabellen für Schmalspurbahnen auch für die Erstellung von Bremstabellen für Normalspurbahnen anwendbar sind, kann im Rahmen der Untersuchungen im vorliegenden Grundlagenbericht nicht behandelt werden.
Die dafür erforderlichen Abklärungen, Analysen und Untersuchungen werden als umfangreich eingestuft und müssten deshalb in einem eigens dafür zu definierenden Folgeprojekt angegangen werden. Die vorliegenden Untersuchungen können jedoch ein wichtiger Anhaltspunkt für diese Arbeiten darstellen.

6 Anhaltewegberechnung, Bremsbewertung und Bremstabelle S2020

6.1 Anhalteweg K-Sohle & Scheibenbremse in der Ebene und in der Neigung

In den Abschnitten *4.3.4* und *4.3.5* wurde darauf hingewiesen, dass die Handhabung der Anhaltewegberechnung für beliebige Streckenneigungen und Bremsbauarten, gemäss den Bremsbewertungskennlinien mit kombinierter Reibwertcharakteristik, genauer überprüft werden muss.
Die Kalibrierung der Bremsbewertungskennlinien für die Ebene erfolgte nach Migrationsvariante III gemäss Festlegung *4.3.3-1*. Die physikalische Abbremsung P/G wurde also für die jeweilige Reibwertcharakteristik so gewählt, dass sich im Kalibrierungspunkt (Ebene bei v_0= 80 km/h und λ= 100 %, für die K- und SB-Reibwertcharakteristik) identische Anhaltewege ergeben.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen nun den zeitlichen Verlauf des Bremsvorgangs, mit dem jeweiligen für die Kalibrierung massgebenden P/G für die K- und SB-Reibwertcharakteristik, in der Ebene und für ein Streckengefälle von 80 ‰.

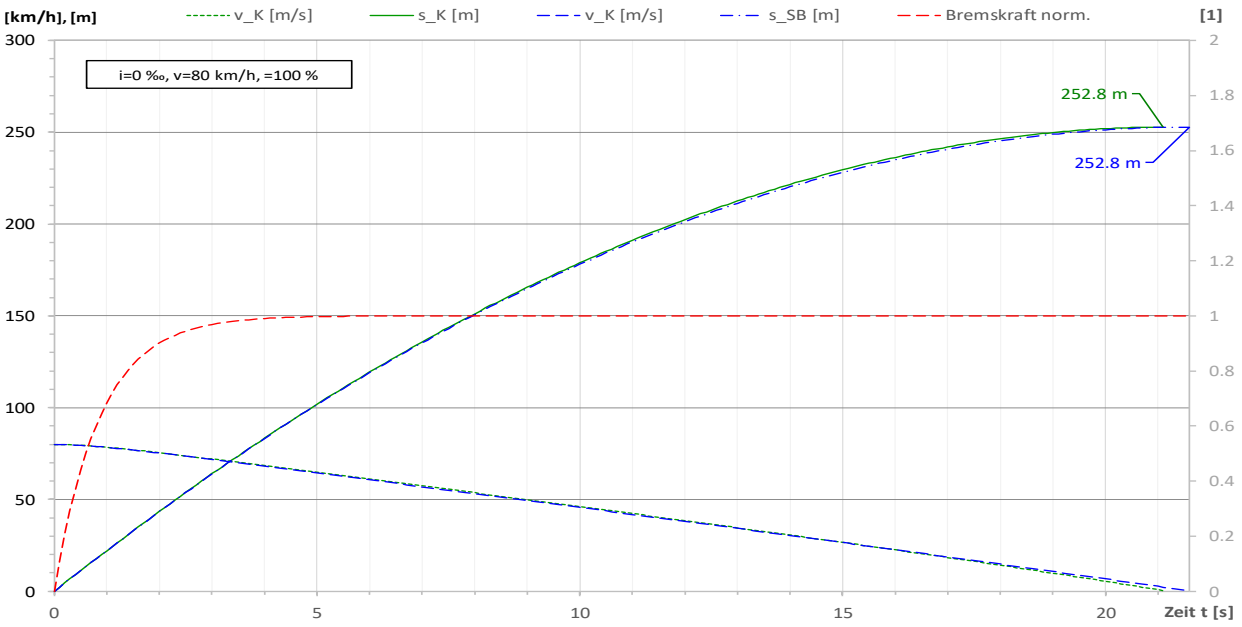


Abbildung 5.6.3-1: *Bremsvorgang für K- und SB-Reibwertcharakteristik in der Ebene*

Abbildung 5.6.3-1 zeigt für den Kalibrierungspunkt (i=0 ‰, v_0=80 km/h, λ=100 %, $s \cong 252\ m$), dass der zeitliche Bremsvorgang für die K-Bremssohle und die Scheibenbremse praktisch identisch ist. Mit der K-Bremssohle wird der Stillstand etwa 0,5 s früher erreicht als bei der Bremsung mit der Scheibenbremse.

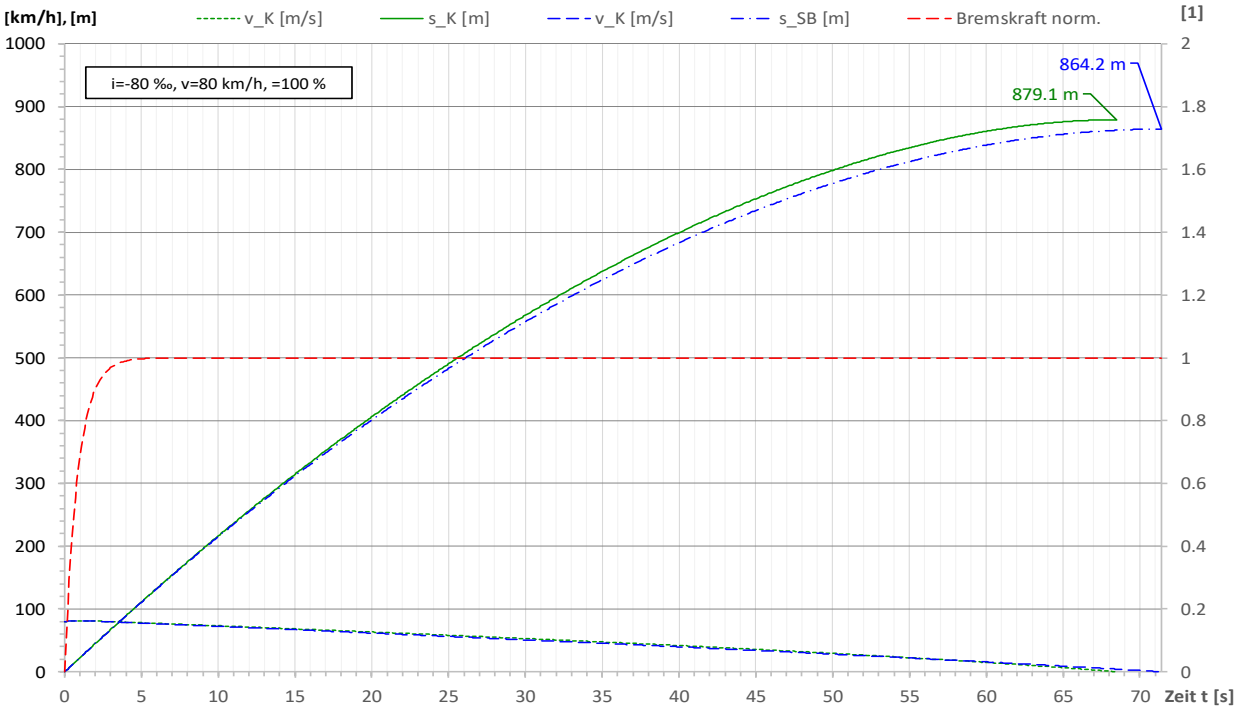


Abbildung 5.6.3-2: *Bremsvorgang für K- und SB-Reibwertcharakteristik in 80 ‰ Gefälle*

Der Abbildung 5.6.3-2 ist für ein Gefälle von 80 ‰ zu entnehmen, dass der Anhalteweg mit K-Bremssohlen im Vergleich zu der Bremsung in der Ebene knapp 15 m kürzer ist als jener der Scheibenbremse. Demnach müsste der Anhalteweg für 80 ‰ Gefälle und ein Bremsverhältnis von 100 % schon bei einer kleineren Geschwindigkeit als der Kalibrierungsgeschwindigkeit mit der Reibwertcharakteristik der K-Bremssohle berechnet werden. Offenbar ist die Bremsausgangsgeschwindigkeit, bei welcher in der Anhaltewegberechnung auf die Reibwertcharakteristik mit dem längeren Anhalteweg umgestellt werden muss, sowohl von der Streckenneigung i wie auch vom Bremsverhältnis λ abhängig. Diese Abhängigkeit wurde für den Neigungsbereich $10\ \% \leq \lambda \leq 150\ \%$ beziehungsweise $-80\ ‰ \leq i \leq 80\ ‰$ untersucht. Die Ergebnisse der Berechnungen finden sich in der Anlage A12.1. Die darin in schwarzer Schrift markierten Tabellenwerte bezeichnen alle Differenzen, bei denen der Anhalteweg der Scheibenbremse länger ist als jener der K-Bremssohle. Die dicke schwarze Linie in der Darstellung symbolisiert die Umschaltgeschwindigkeit für den Wechsel der Reibwertcharakteristik in der Ebene bei 80 km/h.

In der Anlage A12.1 ist aus der Tabelle für 80 ‰ beispielsweise zu entnehmen, dass für ein Fahrzeug mit K-Bremssohlen bei einer festen Umschaltgeschwindigkeit von 80 km/h ein um 16 m zu kurzer Anhalteweg berechnet wird, was einer Relativabweichung von 1,8 % entspricht. Genau dieser Bremsvorgang ist in Abbildung 5.6.3-2 über der Zeitachse dargestellt.

Die blau hinterlegten Zellbereiche in den Tabellen der Anlage A12.1 enthalten die Anhaltewege der Scheibenbremse, welche für alle Bremsverhältnisse länger sind als jene der K-Bremssohlen. Leere Zellen bedeuten, dass der entsprechende Betriebspunkts (v und λ) nach Tabelle 5.5-3 nicht zulässig ist.
Der Geschwindigkeitswert in derjenigen Zeile, welcher identisch ist mit der untersten Zeile im blauen Zellbereich, ergibt zusammen mit dem Neigungswert ein Wertepaar. Diese Wertepaare sind nachfolgend für den gesamten Neigungsbereich tabellarisch zusammengefasst und in Abbildung 5.6.3-3 in Form eines Diagramms dargestellt.

i [‰]	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
v [km/]	73	73	74	74	74	75	75	76	76	77	78	78	78	78	79	79	79	79	79	80	80	80	80	80	81	81	81	81	81	81	81	82	82

Tabelle 6.1-1: *Umstellgeschwindigkeit kombinierte Reibwertcharakteristik*

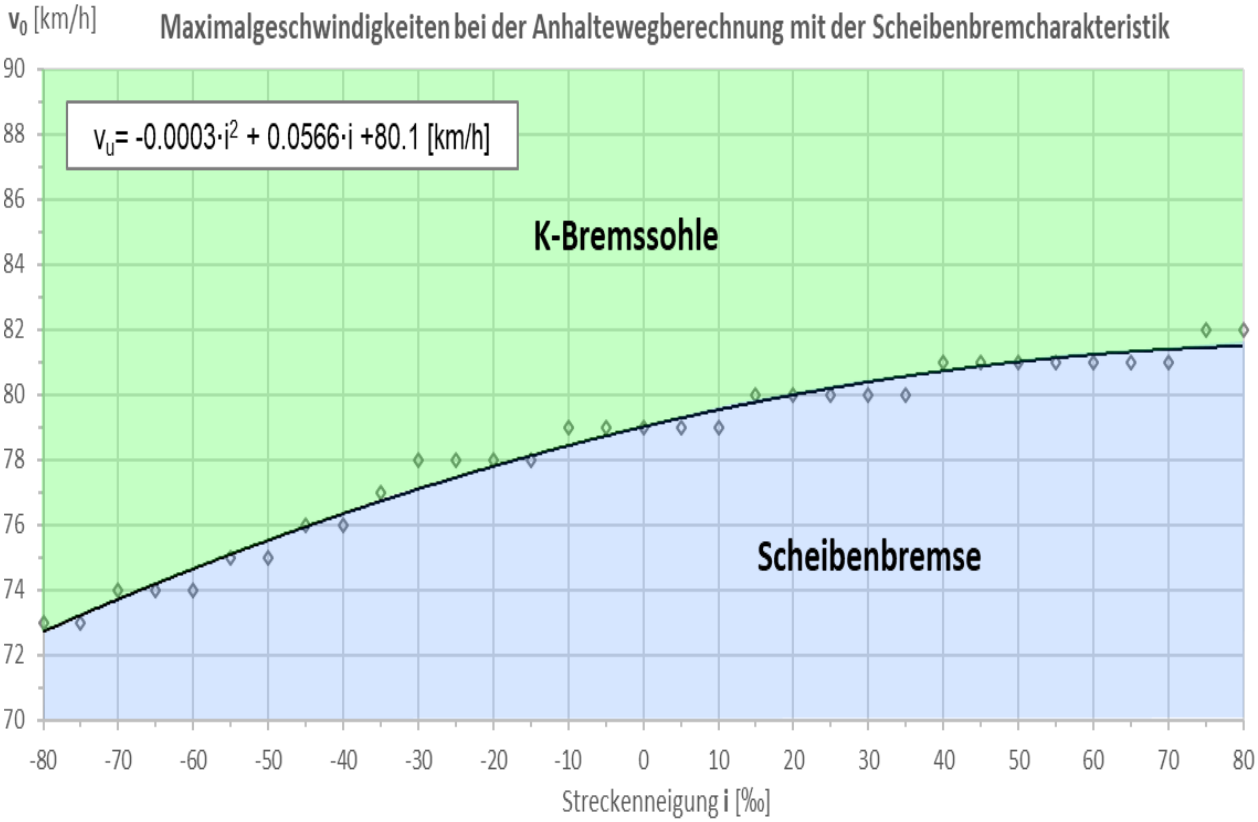


Abbildung 5.6.3-3: *Umschaltgeschwinidigkeiten für die kombinierte Reibwercharakteristik*

Die jeweils massgebende Reibwertcharakteristik muss in der Anhaltewegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik entsprechend Abbildung 5.6.3-3 bedingt berücksichtigt werden. Vereinfacht liesse sich der Geschwindigkeitsschwellwert in [km/h] für die Auswahl der massgebenden Reibwertcharakteristik formulieren mit: $v_{(i)} = -0.0003 \cdot i^2 + 0.0566 \cdot i + 80.1$

6.2 Anhaltewegberechnungsmodell mit kombinierter Reibwertcharakteristik

Die Anhaltewegberechnung ist aufgrund der in den Kapiteln 3.3.5 und 3.3.6 dokumentierten Erkenntnisse künftig nach dem Referenzmodell mittels zweifacher Integration über die Zeit gemäss Formel 2.3.1-6 entsprechend nachfolgender Gleichungen durchzuführen.
Die Herleitung und angestellten Überlegungen zum Anhaltewegberechnungsmodell sind in Kapitel 3.2 ausführlich dokumentiert. Im Abschnitt 3.4 finden sich weitere Untersuchungen und Berechnungen zur Auswahl des Berechnungsmodells. Die Anlage A12 enthält eine Zusammenfassung zu den Reibwertcharakteristiken und im 1. Teilbericht der DB-Systemtechnik [13] unter Kapitel 3.1.1 sind dazu die konsolidierende Betrachtungen dokumentiert.

$$s = \sum_{n=0}^{v_n=0} v_n \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \bar{a}_n \cdot \Delta t^2$$

Formel 5.6.3-1: *Anhaltewegberechnung AB-EBV 2020*

Dabei ist die mittlere Verzögerung $\bar{a}_n$ während Δt entsprechend Kapitel 3.4.1 gemäss dem 2-stufigen Näherungsverfahren nach der Methode von Heun wie folgt zu berechnen:

$$a_n^* = -\left(1 - e^{-\left(\frac{3t_n}{t_1}\right)}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{(v_n)} - a_{w(v_n)} - a_{s(i)}$$

$$a_{n+1}^* = -\left(1 - e^{-\left(\frac{3(t_n+\Delta t)}{t_1}\right)}\right) \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} \cdot \mu_{(v_{n+1}^*)} - a_{w(v_{n+1}^*)} - a_{s(i)} \quad \text{wobei} \quad v_{n+1}^* = v_n + \Delta t \cdot a_n^*$$

$$\bar{a}_n = \frac{1}{2} \cdot (a_n^* + a_{n+1}^*) \cdot \frac{1}{(1+\xi)}$$

$$v_{n+1} = v_n + \bar{a}_n \cdot \Delta t$$

s	Anhalteweg in [m]	k	Index beim Erreichen des Stillstands [1]
n	Schritt-Index nummerische Integration[1]	P	Anpresskraft Reibpaarung [kN]
v_0	Bremsausgangsgeschwindigkeit [ms^{-1}]	G	Fahrzeuggewicht [t]
v_n	Momentangeschwindigkeit bei n [ms^{-1}]	t_1	Bremszylinderfüllzeit 95 % [s]
v_u	Umschaltgeschwindigkeit für $\mu_{(v_u)}$ [ms^{-1}]	$\mu_{(v)}$	Reibwertcharakteristik kombiniert [1]
t_n	Fortlaufende Zeit bei n [s]	$a_{w(v)}$	Fahrwiderstand [ms^{-2}]
Δt	Integrationszeitschritt $= t_{n+1} - t_n$ [ms^{-1}]	$a_{s(i)}$	Streckenwiderstand [ms^{-2}]
$\bar{a}_n$	Mittlere Verzögerung während Δt [ms^{-2}]	m_t	Träge Masse [kg]
a^*	Zwischenwerte Näherungsverfahren [ms^{-2}]	m_r	Rotierende Masse [kg]
i	Streckenneigung [‰] (Gefälle negativ)	ξ	Relation von $m_r/m_t = 0{,}055$ [1]
g	Erdbeschleunigung $= 9{,}81$ [ms^{-2}]		

Mit $a_{s(i)} = g \cdot \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{i}{1000}\right)\right)$ und $a_{w(v)} = \left[20 + \frac{2}{300} \cdot (v \cdot 3{,}6)^2\right] \cdot \frac{1}{1000}$,

der kombinierten Reibwertcharakteristik $\mu_{(v)} = a_6 v^6 + a_5 v^5 + a_4 v^4 + a_3 v^3 + a_2 v^2 + a_1 v + a_0$

für Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 \leq v_u$ nach der Scheibenbrems-Charakteristik und für Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 > v_u$ nach der Reibwertcharakteristik für K-Bremssohlen:

μ	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
SB	5.41795666E-14	-2.03624871E-11	2.73971481E-09	-1.77011369E-07	1.17528580E-05	-1.17900863E-03	3.84878828E-01
K	6.34337368E-18	4.55091734E-12	-1.35099616E-09	7.24688463E-08	1.42684640E-05	-2.27480386E-03	3.79409998E-01

Tabelle 6.2-1: *Polynomkoeffizienten für die Reibwertcharakteristiken SB und K*

Zwecks leichterem Verständnis, ist der Rechengang für die Anhaltewegberechnung nach dem Referenzmodell «AB-EBV 2020», in der Anlage *A20* zusätzlich schematisch darstellt.

6.3 Bremsbewertung und Anhaltewege mit kombinierter Reibwertcharakteristik

Wie die Voruntersuchung in Abschnitt *6.1* gezeigt hat, muss die korrekte Anwendung der Anhaltewegberechnung für Fahrzeuge mit Bremsen unterschiedlicher Reibwertcharakteristik und Bewertung anhand der Kennlinien mit kombinierter Reibwertcharakteristik gemäss Abbildung *4.3.5-1*, für den gesamten Geschwindigkeits- und Neigungsbereich überprüft und konsolidiert werden.
Nachfolgend soll nun nach einer Methodik gesucht werden, mit welcher sich der Anhalteweg für ein Fahrzeug mit einer der Reibwertcharakteristiken gemäss Abbildung *4.3.1-1* berechnen lässt. Dabei muss der für ein Fahrzeug zu berechnende «sichere Anhalteweg» dem längst möglichen Anhalteweg entsprechen, welcher sich bezüglich Reibwertcharakteristik und Bremsbewertung aus der dafür ungünstigsten Konstellation ergibt.

Folgende Punkte bilden die Ausgangslage für die Formulierung einer allgemein gültigen Vorgabe für die rechnerische Bestimmung des sicheren Anhalteweges:

a) Die Reibwertcharakteristik der Fahrzeugbremse ist unbekannt.
b) Der Bremsbewertungsbereich liegt zwischen $v_{Kal.} = 80$ km/h und $v_{maxFz} \leq 120$ km/h (siehe dazu Festlegung *6.3.1-1*).
c) Die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit und somit die Bewertungsgeschwindigkeit ist unbekannt.
d) Das für die Ermittlung des Anhalteweges relevante Bremsverhältnis liegt zwischen 10% und 150 %.
e) Anhaltewege müssen für Neigungen zwischen -80 und 80 ‰ berechnet werden können.

6.3.1 Bremsbewertung

Die folgenden Ausführungen und Darstellungen beschreiben das Vorgehen für die Bewertung der Bremse von Fahrzeugen mit unterschiedlicher Bremsausrüstung und Reibwerteigenschaft.

Entsprechend Festlegung *4.3.5-1* erfolgt die Bremsbewertung an den Kennlinien mit kombinierter Reibwertcharakteristik. Da für die Bremsbewertung der Geschwindigkeitsbereich 80 bis 120 km/h relevant ist, erfolgt die Bewertung faktisch an der Reibwertcharakteristik der K-Bremssohle, welche die GG-Bremssohle bei Meterspurbahnen weitgehend abgelöst hat. Die K-Kennlinien sind in den nachfolgenden Abbildungen in grüner Farbe dargestellt, mit Ausnahme der Kennlinie bei der Kalibrierungsgeschwindigkeit von 80 km/h, bei welcher alle Kennlinien der verschiedenen Reibwertcharakteristiken übereinanderliegen. Die Kennlinie für 80 km/h erscheint in blauer Farbe, da die Kennlinie für die Scheibenbremscharakteristik im Vordergrund angezeigt wird.

In der Ebene durchzuführende Bremsversuche zwecks Bremsbewertung

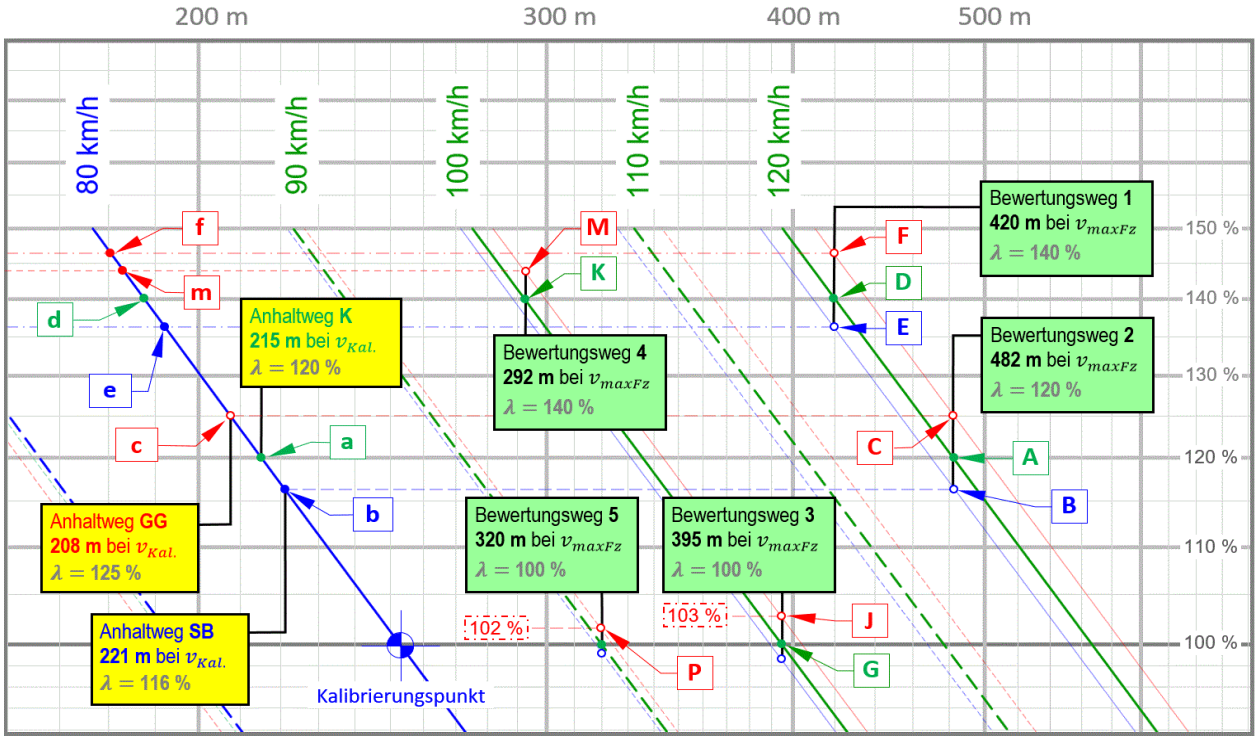


Abbildung 6.3.1-1: *Bremsbewertung in der Ebene, Bremsversuche bei v_0=120, 100, 90 und 80 km/h*

Die Farben der Kennlinien in Abbildung *6.3.1-1* entsprechen folgenden Reibwertcharakteristiken:
Blau: Scheibenbremse (SB), Grün: K-Bremssohle (K) und Rot: Grauguss-Bremssohle (GG).

Aus der Darstellung geht hervor, dass bei Bremsversuchen aus v_0 = 120 km/h mit drei Fahrzeugen mit Bremsen unterschiedlicher Reibwertcharakteristik (**A**, **B**, **C**), alle Fahrzeuge nach einem Anhalteweg von 482 m zum Stillstand kommen. Aus der höchstzulässigen Fahrzeuggeschwindigkeit v_{maxFz} = 120 km/h ergibt sich mit dem «Bewertungsweg 2» und der massgebenden Bewertungskennlinie nach K-Charakteristik entsprechend A für alle Fahrzeuge zunächst ein Bremsverhältnis von 120 %. Bremsversuche mit denselben Fahrzeugen ergeben bei v_0 = 80 km/h = $v_{Kal.}$ jedoch unterschiedliche Anhaltewege und Bewertungsergebnisse. Für die K-Bremssohle beträgt das Bremsverhältnis gemäss a 120 %, also identisch mit dem Bewertungsergebnis bei der höchstzulässigen Fahrzeuggeschwindigkeit von 120 km/h. Für die Scheibenbremse resultiert gemäss b ein Bremsverhältnis von rund 116 %, also ein tieferes Bremsverhältnis als bei der Bewertungsgeschwindigkeit 120 km/h. Die Bewertung des Fahrzeuges mit GG-Bremssohlen schlussendlich liefert gemäss c ein Bremsverhältnis von 125 %, welches damit höher ausfällt als jenes bei der höchstzulässigen Fahrzeuggeschwindigkeit von 120 km/h.
Die Bremsbewertung hat zum Ziel, den Anhalteweg anhand der Fahrzeugbremsanschriften je Fahrzeug und der Anhaltewegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik voraussagen zu können. Es stellt sich somit die Frage, mit welchem Bremsverhältnis nun das einzelne Fahrzeug konkret zu bewerten ist?
Für das Fahrzeug mit K-Sohlencharakteristik besteht Klarheit. Dem Fahrzeug ist gemäss A und a das Bremsverhältnis von 120 % zuzuweisen.
Bei einem scheibengebremsten Fahrzeug ergeben sich jedoch unterschiedliche Bewertungsergebnisse, konkret 120 % mit dem Anhalteweg von 482 m aus 120 km/h gemäss Punkt A, beziehungsweise 116 % mit dem Anhalteweg von 221 m aus 80 km/h nach Punkt b. Würde das Fahrzeug mit 120 % nach Punkt

A bewertet, so lieferte die Anhaltewegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik für die Bremsausgangsgeschwindigkeit von 80 km/h mit 215 m gemäss Punkt a einen etwas zu kurzen Anhalteweg. Umgekehrt liefert die Anhaltewegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik für ein Bremsverhältnis von 116 % gemäss b bei einer Bremsausgangsgeschwindigkeit von 120 km/h einen Anhaltweg von 495 m. Dieser Anhaltweg ist aber rund 13 m länger als der tatsächliche Anhaltweg = Bewertungsweg 2, was aus sicherheitstechnischer Sicht als unkritisch zu bewerten ist.

Ebenfalls ergeben die Bremsversuche mit dem GG-Sohlen-Fahrzeug bei den Bremsausgangsgeschwindigkeiten 120 km/h und 80 km/h unterschiedliche Bewertungsergebnisse, konkret 120 % nach Punkt A und 125 % nach Punkt C. Mit dem Bremsverhältnis von 125 % liefert die Anhaltewegberechnung für eine Bremsausgangsgeschwindigkeit von 120 km/h aber einen um knapp 20 m zu kurzen Anhalteweg. Im Gegensatz dazu ergibt der berechnete Anhalteweg für eine Bremsausgangsgeschwindigkeit von 80 km/h und ein Bremsverhältnis von 120 % gemäss A einen um rund 10 m zu langen Anhalteweg. Dies ist aus sicherheitstechnischer Sicht als günstig zu bewerten.

Die Bremse ist immer mit dem tieferen der beiden Bremsverhältnisse zu bewerten, welches sich ergibt aus den Bremsversuchen in der Ebene mit $v_0 = v_{maxFz}$ bzw. mit $v_0 = v_{Kal.}$. Fahrzeuge mit $v_{maxFz} < v_{Kal.}$ sind nur vereinzelt anzutreffen und als Sonderfall zu betrachten. Sie sind so zu bewerten, dass deren nachweislich sicherer Betrieb gewährleistet ist.

Festlegung 6.3.1-1

Für die Bremsanschrift von Fahrzeugen mit Scheibenbremse oder mit K-Bremssohlen anhand der Bewertungskennlinien mit kombinierter Reibwertcharakteristik gemäss Abschnitt 4.3.5, impliziert die obige Bedingung, dass diese dem tatsächlichen minimalen Bremsverhältnis entspricht und anhand der Punkte b, A und a hervor geht. Eine Bremsanschrift mit tatsächlichem Bremsverhältnis liegt dann vor, wenn das dem Fahrzeug zugeordnete Bremsverhältnis aufgrund der Bewertung an einer Kennlinie ermittelt wurde, welches dieselbe Reibwertcharakteristik zugrunde liegt wie der Reibpaarung des bewerteten Fahrzeuges.

Erfolgt die massgebende Bewertung an der Kennlinie für die Geschwindigkeit $v_0 = v_{Kal.}$, entspricht das Bewertungsergebnis, unabhängig von der Reibwertcharakteristik der Fahrzeugbremse nach Abbildung 4.3.1-1, mit den entsprechenden Anhaltewegen gemäss Abbildung 4.3.4-1, immer dem tatsächlichen Bremsverhältnis.

Die Abbremsung P/G je Reibwertcharakteristik ist so festgelegt worden, dass sich für alle Reibwertcharakteristiken genau bei der Geschwindigkeit $v_0 = v_{Kal.}$ gleich lange Anhaltewege ergeben. Das bedeutet, dass für $v_0 = v_{Kal.}$ die Kennlinien der Reibwertcharakteristik **SB**, **K** und **GG** praktisch deckungsgleich sind. Abbildung 6.3.1-1 zeigt den in Bremsversuchen mit $v_{maxFz} = 120$ km/h ausgefahrenen Anhalteweg von 482 m «Bewertungsweg 2», was gemäss A einem Bremsverhältnis von 120 % entspricht. Damit ein Fahrzeug mit GG-Bremssohlen nach einer Schnellbremsung aus $v_0 = 120$ km/h nach 482 m zu stehen kommt, sind nach Punkt C jedoch 125 % erforderlich. Dies bedeutet aber zugleich, dass der entsprechende Anhalteweg bei der Bremsausgangsgeschwindigkeit $v_0 = v_{Kal.} = 80$ km/h nach Punkt C 208 m beträgt und damit genau dieses Bremsverhältnis von 125 % zugewiesen würde. Da nun aber das Fahrzeug mit dem tieferen der beiden Bremsverhältnisse aus den beiden Bremsversuchen zu bewerten ist, erfolgt die Bewertung mit Punkt A zwangsläufig an der Kennlinie für 120 km/h mit der K-Charakteristik.

Dies bedeutet , dass die Bremsanschriften an Fahrzeugen mit $v_{maxFz} > v_{Kal.}$ und GG-Bremssohlen nicht einer Bewertung nach tatsächlichem Bremsverhältnis entsprechen.

6.3.2 Analyse betreffend die Bestimmung «sicherer Anhaltewege»

Mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 6.3.1 werden nachfolgend weitere Untersuchungen durchgeführt. Es ist das Ziel, eine Methodik zur Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» formulieren zu können, welche für den gesamten zulässigen Geschwindigkeits- und Streckenneigungsbereich Gültigkeit hat.

Das folgende Diagramm zeigt für ein Streckengefälle von 80 ‰ die Anhaltewege wiederum für Bremsen mit der Reibwertcharakteristik **SB**, **K** und **GG**.

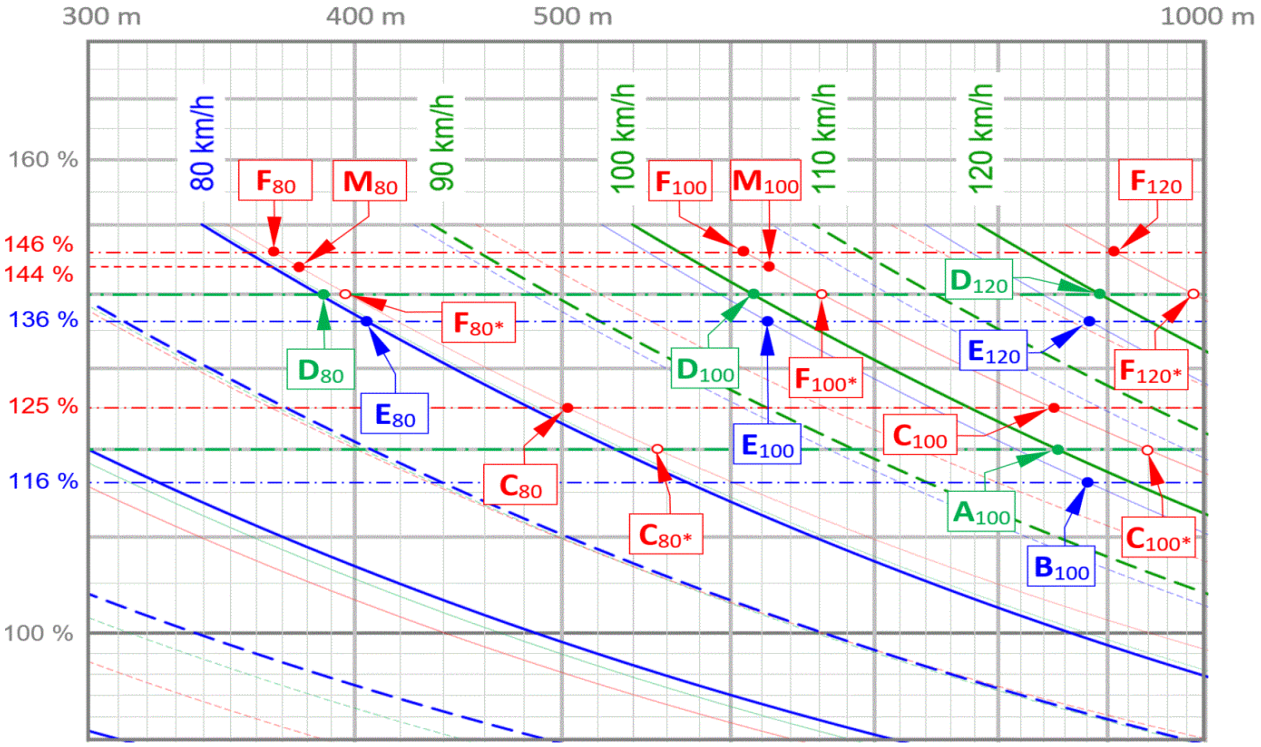


Abbildung 6.3.2-1: *Geschwindigkeitsabhängige Anhaltewege im Maximalgefälle von 80 ‰*

Um die Neigungsabhängigkeit der Anhaltewege von Fahrzeugen mit Bremsen unterschiedlicher Reibwertcharakteristik verstehen zu lernen, sollen das Anhaltwegverhalten in der Ebene gemäss Abbildung *6.3.1-1* mit jenem für eine Streckenneigung von -80 ‰ gemäss Abbildung *6.3.2-1* verglichen werden.
Für Fahrzeuge mit Scheibenbremse oder K-Bremssohlen kann der Anhalteweg direkt aus dem entsprechenden Diagramm abgelesen werden da diese Fahrzeuge, wie in Abschnitt *6.3.1* beschrieben, mit dem tatsächlichen Bremsverhältnis bewertet sind.
Zunächst soll das Anhaltewegverhalten drei verschiedener Fahrzeuge in 80 ‰ Gefälle betrachtet werden, welche nach Abbildung *6.3.1-1* bei der Bremsausgangsgeschwindigkeit $v_0 = v_{maxFz} = 120$ km/h gemäss «Bewertungsweg 2» nach 482 m in der Ebene zu Stillstand kommen. Den Fahrzeugen ist gemäss Festlegung *6.3.1-1* folgendes Bremsverhältnis zuzuordnen: Dem Fahrzeug mit K-Bremssohlen: λ_K=120%, dem Fahrzeug mit der Scheibenbremse: λ_{SB}=116 % und dem Fahrzeug mit den GG-Bremssohlen: λ_{GG}= 120 %.
Bei einer Bremsausgangsgeschwindigkeit von 100 km/h und 80 ‰ Gefälle betragen die tatsächlichen Anhaltewege: 880 m für das scheibengebremste Fahrzeug gemäss B100, 852 m für das K-Sohlen Fahrzeug entsprechend A100 und 849 m für das GG-Sohlen Fahrzeug nach Punkt C100. Die Anhaltewege entsprechend A100 und B100 lassen sich anhand der Fahrzeuganschriften, welche dem tatsächlichem Bremsverhältnis entsprechen, mittels Anhaltewegberechnung und massgebender Reibwertcharakteristik berechnen. Eine Ausnahme bildet das Fahrzeug mit den GG-Bremssohlen, welchem bei der Bremsbewertung das Bremsverhältnis λ_{GG} = 120 % zugeordnet wurde. Die Anhaltewegberechnung mit GG-Charakteristik liefert mit dem Bremsverhältnis gemäss Bremsanschrift für dieses Fahrzeug einen Anhalteweg von 939 m gemäss Punkt C100* statt 849 m nach tatsächlichem Bremsverhältnis entsprechend Punkt C100. Wäre für ein GG-Sohlen Fahrzeug die höchst zulässige Fahrzeuggeschwindigkeit v_{maxFz} bekannt, liesse sich daraus das tatsächliche Bremsverhältnis ermitteln und der korrekte Anhalteweg berechnen.
Weiter soll nun das Anhaltewegverhalten für andere Konstellationen von Bremsbewertungsgeschwindigkeit, Bremsausgangsgeschwindigkeit und Streckenneigung analysiert werden. Dazu ist in Abbildung *6.3.2-1* die mit 146 % bezeichnete Strich-Punkt-Line eingezeichnet. Diese entspricht dem tatsächlichen Bremsverhältnis eines GG-Sohlen Fahrzeuges, wenn dieses in der Ebene mit der Bremsausgangsgeschwindigkeit v_{maxFz} = 120 km/h an einer GG-Bewertungskennlinie bewertet würde.
Gemäss «Bewertungsweg 1» in Abbildung *6.3.1-1* kommen drei Fahrzeuge mit unterschiedlicher Bremscharakteristik bei Bremsversuchen mit Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 = 120 km/h, in der Ebene nach einem Anhaltweg von 420 m zu Stillstand. Als Vergleich dazu sind in Abbildung *6.3.2-1* die Anhaltewege dieser drei Fahrzeuge für ein Streckengefälle von 80 ‰ und v_0 = 120 km/h mit den Punkten D120, E120 und F120 gekennzeichnet. Das Fahrzeug mit den GG-Bremssohlen beansprucht dabei mit 908 m gemäss

F120 den längste Anhalteweg. Auf Gefällestrecken zeigen die drei Fahrzeuge also ein anderes Anhaltewegverhalten als in der Ebene. Der Vergleich der Anhaltewege für 80 ‰ Gefälle und v_0 = 100 km/h, zeigt anhand der Punkte D100 , E100, F100 ebenfalls verschieden lange Anhaltewege mit dem Unterschied, dass der längste Anhalteweg gemäss E100 nun beim scheibengebremsten Fahrzeug auftritt. Dieselbe Verhaltenskonstellation ist auch bei der Bremsausganggeschwindigkeit $v_0 = v_{Kal,} = 80$ km/h gemäss D80 , E80, F80 auszumachen.

Das Anhaltewegverhalten für 80 ‰ Gefälle zeigt im Geschwindigkeitsbereich 70 km/h $> v_0 >$ 80 km/h zudem eine Verwerfung der relativen Anordnung der Reibwertcharakteristiken untereinander.

Im Vergleich zu der Ebene, lassen sich «sichere Anhaltewege» für geneigte Strecken nicht mittels Anhaltewegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik gemäss Abschnitt 6.2 berechnen. Die Anhaltewegberechnung muss mit der für die Bremse des zu betrachtenden Fahrzeuges massgebenden Reibwertcharakteristik erfolgen.

Anhaltewege unter Berücksichtigung des tatsächlichen GG-Bremsverhältnisses

Den Bremsbewertungskennlinien in Abbildung 4.3.5-1 wurde die Anhaltewegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik zugrunde gelegt. Die Überlegungen dazu sind in Abschnitt 4.3.4 erläutert.
Nun ist es aber so, dass sich die Anhaltewegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik nur bedingt für geneigte Strecken eignet.
Dem letzten Absatz von Abschnitt 6.3.1 ist zu entnehmen, dass die Bremsanschrift von Fahrzeugen mit GG-Bremssohlen für $v_{maxFz} > v_{Kal.}$ bei einer Bremsbewertung gemäss Festlegung 6.3.1-1, nicht dem tatsächlichen Bremsverhältnis entspricht. Dies hat partiell die Berechnung von zu langen Anhaltewegen zur Folge. Ob und in welchem Rahmen dies im Zusammenhang mit der Anhaltewegberechnung zu berücksichtigen ist, soll nachfolgend geklärt werden.
Im Fokus stehe vorerst ein Fahrzeug mit $v_{maxFz} = 120$ km/h und GG-Bremssohlen, das in der Ebene bei einer Schnellbremsung aus der Bremsausgangsgeschwindigkeit $v_0 = v_{maxFz}$ nach 420 m zu Stillstand kommt, entsprechend dem «Bewertungsweg 1» in Abbildung 6.3.1-1. Aufgrund der Anhaltwege bei 80 und 120 km/h ist das Fahrzeug entsprechend Festlegung 6.3.1-1 mit dem Bremsverhältnis 140 % zu bewerten. Mit diesem gedeckelten Bremsverhältnis und der Bremsausgangsgeschwindigkeit $v_0 = 120$ km/h ergäbe die Berechnung mit der GG-Reibwertcharakteristik einen Anhalteweg von 435 m. Mit dem tatsächlichen Bremsverhältnis von 146 % entsprechend Punkt f berechnet, resultierte jedoch der korrekte Anhalteweg von 420 m. Der nach angeschriebenem Bremsverhältnis berechnete Anhalteweg ist also 15 m, beziehungsweise + 3,6 %, zu lang. Für $v_0 = 80$ km/h ergibt sich eine Verlängerung von 8 m, was + 4,4 % entspricht.
Im Vergleich dazu liefert die Betrachtung für 80 ‰ Gefälle gemäss Abbildung 6.3.2-1 folgende Ergebnisse:

$v_0 = 120$ km/h Punkte F120 , F120* ⇨ 80 m, bzw. + 8,8 %
$v_0 = 100$ km/h Punkte F100 , F100* ⇨ 53 m, bzw. + 8,7 %
$v_0 = 80$ km/h Punkte F80 , F80* ⇨ 30 m, bzw. + 8,2 %

Als weiteres Beispiel soll ein GG-Bremssohlen Fahrzeug mit 482 m Anhaltweg auf ebener Strecke bei einer Bremsausgangsgeschwindigkeit $v_0 = v_{maxFz} = 120$ km/h gemäss «Bewertungsweg 2» in Abbildung 6.3.1-1 herangezogen werden. Es sollen damit die Auswirkungen bei tieferem Bremsverhältnis analysiert werden. Entsprechend den Anhaltewegen bei $v_0 = 80$ und 120 km/h ist das Fahrzeug mit 120 % nach A zu bewerten.
Die Anhaltewegberechnung unter Anwendung der GG-Reibwertcharakteristik und dem Bremsverhältnis gemäss Bremsanschrift ergibt für die Bremsausgangsgeschwindigkeit $v_0 = 120$ km/h einen Anhalteweg von 500 m. Bei Berechnung mit dem tatsächlichen Bremsverhältnis von 125 % nach c resultiert jedoch ein Anhalteweg von 482 m. Der berechnete Anhalteweg nach Bremsanschrift ist somit für $v_0 = 120$ km/h um 18 m zu lang, oder relativ ausgedrückt um + 3,7 %. Für $v_0 = 80$ km/h sind es 8 m, bzw. + 3,9 %.
Gemäss Abbildung 6.3.2-1 ergeben sich für 80 ‰ Gefälle folgende Differenzen:

$v_0 = 100$ km/h Punkte C100 , C100* ⇨ 53 m, + 8,7 %
$v_0 = 80$ km/h Punkte C80, C80* ⇨ 30 m, + 8,2 %

Abschliessend muss natürlich auch das Verhalten eines Fahrzeuges mit GG-Bremssohlen mit einem Anhaltweg von 292 m in der Ebene, gemäss «Bewertungsweg 4» in Abbildung 6.3.1-1, bei einer Bremsausgangsgeschwindigkeit $v_0 = v_{maxFz} = 100$ km/h, also nicht bei der höchstmöglichen Bewertungsgeschwindigkeit gemäss Abbildung 4.3.5-1, betrachtet werden.

Aufgrund der Anhaltewege bei $v_0 = 80$ km/h und 100 km/h, ist das Fahrzeug gemäss Punkt **K**, wie auch für $v_0 = 120$ km/h gemäss Punkt **D**, mit 140 % zu bewerten. Mit diesem Bremsverhältnis liefert die Anhaltewegberechnung nach GG-Reibwertcharakteristik für $v_0 = 100$ km/h einen Anhalteweg von 300 m. Bei Berechnung mit dem tatsächlichen Bremsverhältnis von 144 % nach **m**, welches sich von dem tatsächlichen Bremsverhältnis für $v_0 = 120$ km/h gemäss Punkt **F** unterscheidet, ergibt sich ein Anhalteweg von 292 m. Der nach Bremsanschrift und GG-Charakteristik berechnete Anhaltweg für $v_0 = 100$ km/h ist somit um 8 m, beziehungsweise + 2,7 % zu lang. Für $v_0 = 80$ km/h sind es 5 m, oder + 2,7 % relativ ausgedrückt.

Für 80 ‰ Gefälle liefert die entsprechende Betrachtung gemäss Abbildung *6.3.2-1* folgende Werte:

$v_0 = 100$ km/h Punkte **M100**, **F100*** ⇨ 32 m, + 5,1 %
$v_0 = 80$ km/h Punkte **M80**, **F80*** ⇨ 22 m, + 5,0 %

Im höheren Geschwindigkeitsbereich zwischen 70 bis 80 km/h wäre, unter Berücksichtigung des tatsächlichen Bremsverhältnisses der Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen, mittels Anhaltewegberechnung mit der für die Fahrzeugbremse massgebenden Reibwertcharakteristik, eine Optimierung der «sicheren Anhaltewege» möglich, gegenüber der Anhaltwegberechnung mit kombinierter Reibwertcharakteristik. Für die Fahrzeugflotte, für deren Fahrzeuge Anhaltewege zu berechnen sind, müsste jedoch die höchstzulässige Fahrgeschwindigkeit v_{maxFz_GG} der Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen bekannt sein. Ebenso wäre denkbar, die Fahrgeschwindigkeit v_{maxFz_GG} abgestuft in der Anhaltewegberechnung zu berücksichtigen.

6.3.3 Methode für die optimierte Bestimmung des «sicheren Anhalteweges»

Gemäss den dokumentierten Erkenntnissen in den Abschnitten *6.3.1* und *6.3.2*, lässt sich der «sichere Anhalteweg» anhand der Anhaltwegberechnung mit den verschiedenen Reibwertcharakteristiken berechnen, aufgrund der Bremsausgangsgeschwindigkeit und der Bremsanschrift am Fahrzeug.
Analog zu der Berechnung der Bewertungskennlinien mit kombinierter Reibwertcharakteristik gemäss Abbildung *4.3.5-1*, erfolgt die Berechnung der «sicheren Anhaltewege» anhand der Maximalwertbildung aus den Berechnungsergebnissen mit den verschiedenen Reibwertcharakteristiken. Für eine ausgewählte Streckenneigung wird der «sichere Anhalteweg» bestimmt anhand des Referenzmodells gemäss Festlegung *3.4.3-1* und zwar mit derjenigen Konstellation aus Bremsausgangsgeschwindigkeit und Reibwertcharakteristik, mit der sich der längste Anhaltweg berechnet.
Zusätzlich, aber nicht zwingend erforderlich, können die Anhaltwege optimiert werden, indem die Anhaltwegberechnung für Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen mit dem tatsächlichen Bremsverhältnis, anstelle des Bremsverhältnisses gemäss Bremsanschrift, durchgeführt wird.

Tatsächliches Bremsverhältnis

Als tatsächliches Bremsverhältnis ist dasjenige Bremsverhältnis zu verstehen, das sich aus der Bewertung an einer Bewertungskennlinie ergibt, welcher dieselbe Reibwertcharakteristik zugrunde liegt wie der Bremse des zu bewertenden Fahrzeuges.
In der nachfolgenden Abbildung *6.3.3-1* sind die Bremsverhältniseinbussen dargestellt für Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen, deren Bremse oberhalb der Kalibrierungsgeschwindigkeit $v_{Kal.}$ bewertet werden soll.

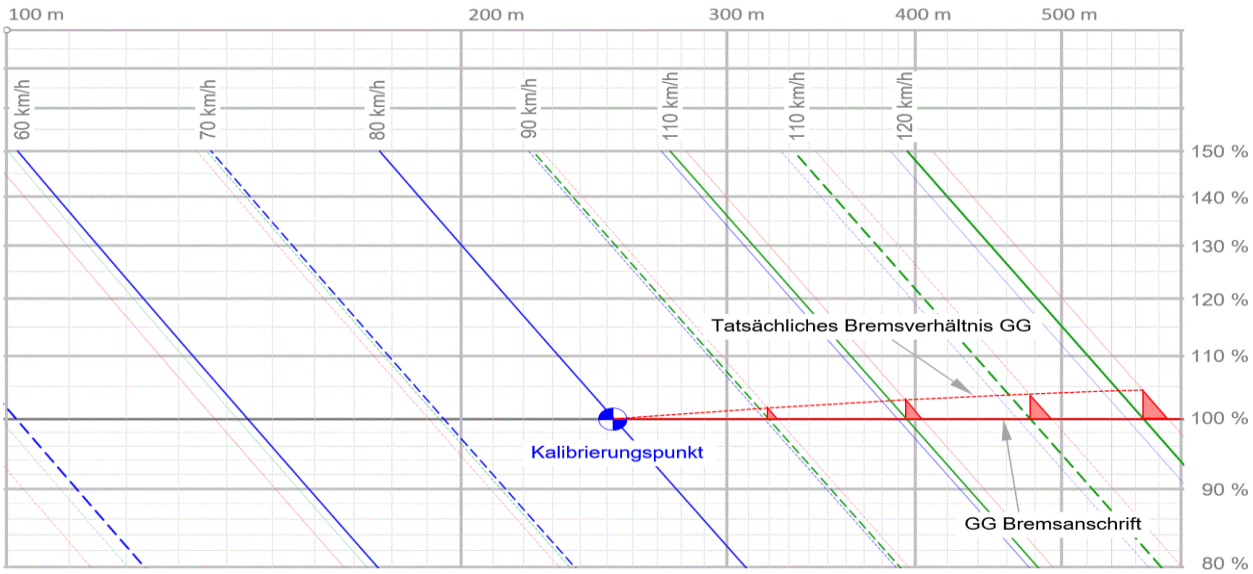


Abbildung 6.3.3-1: *Anhaltwege in der Ebene (fett dargestellte Linien sind Bremsbewertungskennlinien)*

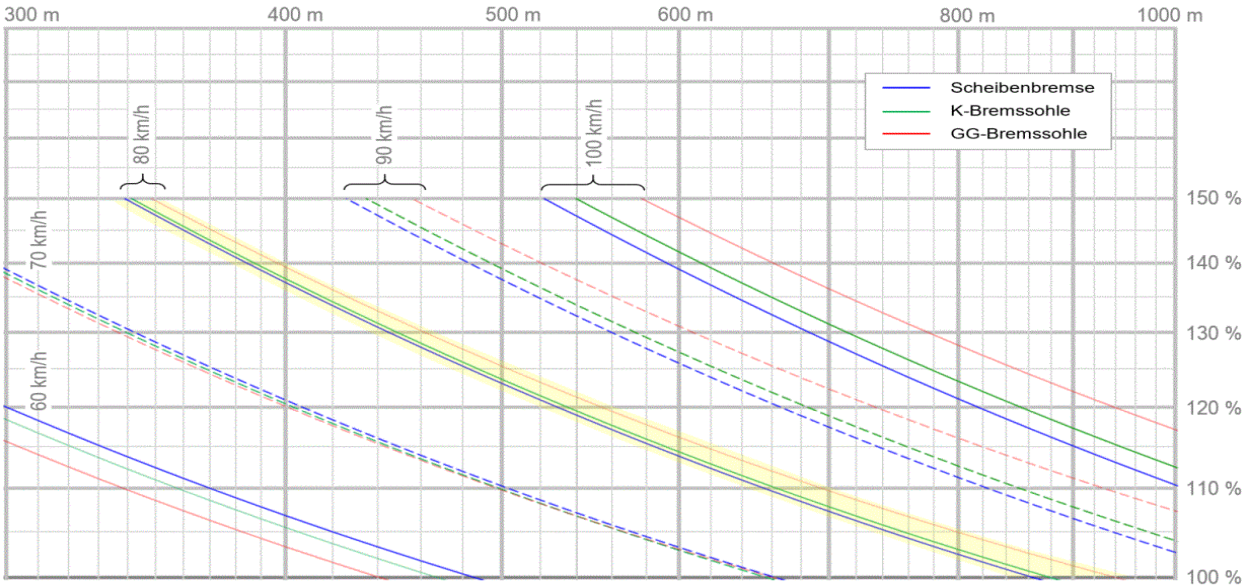


Abbildung 6.3.3-2: *Anhaltewege für 80 ‰ Streckengefälle*

Interpretation der Abbildung 6.3.3-1 und Abbildung 6.3.3-2

Die folgenden Betrachtungen beschränken sich vorerst auf die Anhaltwege von Fahrzeugen mit Scheibenbremse und K-Bremssohle. Wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben wurde, entsprechen die Bremsanschriften an diesen Fahrzeugen dem tatsächlichen Bremsverhältnis.

Die Abbildung 6.3.3-1 zeigt auf, dass sich in der Ebene die längsten Anhaltewege mit scheibengebremsten Fahrzeugen bei Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 \leq v_{Kal.}$ = 80 km/h ergeben, beziehungsweise bei Geschwindigkeiten von $v_0 > v_{Kal.}$ mit K-Sohlen gebremsten Fahrzeugen. Die Abbildung 6.3.3-2 zeigt aber auch, dass die Anhalteweg-Kennlinien für v_0 = 80 km/h von scheibengebremsten Fahrzeugen und jene von Fahrzeugen mit K-Sohlen nicht wie in der Ebene deckungsgleich sind. Dieser Sachverhalt wurde in Abschnitt 6.1 ausführlich behandelt. In Bezug auf die Ermittlung des längsten Anhalteweges bedeutet das, dass diese für die Geschwindigkeiten $v_0 \leq v_{Kal.}$ und $v_0 > v_{Kal.}$ anhand der Reibwertcharakteristiken der Scheibenbremse und der K-Sohle vorzunehmen ist.

Nun ist noch die Frage zu klären, wie die Anhaltwege von Fahrzeugen mit GG-Bremssohlen bei der Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» zu berücksichtigen sind. Die folgenden Betrachtungen beschränken sich darum auf Fahrzeugen mit GG-Bremssohlen.
Gemäss Abschnitt 6.3.1 geht die Bremsanschrift dieser Fahrzeugen nicht einher mit dem tatsächlichen Bremsverhältnis. Für $v_{maxFz} > v_{Kal.}$ = 80 km/h, liefert die Anhaltewegberechnung mit GG-Reibwertcharakteristik und dem angeschriebenen Bremsverhältnis, wie in Abschnitt 6.3.2 beschrieben, für $v_0 > v_{Kal.}$ zu lange Anhaltwege.

Wie der Horizontalabstand zwischen den grünen und roten Anhalteweg-Kennlinien in Abbildung 6.3.3-1 zeigt, besteht für $v_0 = v_{Kal.}$ keine Differenz zwischen den Anhaltewegen von Fahrzeugen mit K-Bremssohlen (grün) und jenen mit GG-Bremssohlen (rot). Es entwickelt sich jedoch eine Anhaltewegdifferenz für Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 > v_{Kal.}$. Proportional dazu verhält sich auch die Differenz zwischen angeschriebenem und tatsächlichem Bremsverhältnis. Das tatsächliche Bremsverhältnis ist also direkt abhängig von der höchstzulässigen Bremsausgangsgeschwindigkeit, da die Bremsbewertung bei $v_{Kal.}$ und v_{maxFz} zu erfolgen hat.

Von einem GG-Bremssohlen Fahrzeug mit der Bremsanschrift 140 % ausgegangen, beträgt das tastsächliche Bremsverhältnis für v_{maxFz} = 120 km/h gemäss Punkt F in Abbildung 6.3.1-1 146 % = λ_{eff120}, für v_{maxFz} = 100 km/h nach Punkt M 144 % = λ_{eff100} und für v_{maxFz} = 80 km/h = $v_{Kal.}$ entsprechend Punkt d 140 % = λ.

Ist beispielsweise anhand der Bewertungswege 1 bis 4 gemäss Abbildung 6.3.1-1 bekannt, dass GG-Fahrzeuge mit v_{maxFz} = 100 km/h, beziehungsweise solche mit v_{maxFz} = 120 km/h verkehren, kann bei Bedarf das tatsächliche Bremsverhältnis bei der Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» wie nachfolgend beschrieben berücksichtigt werden:

$s_{GG\ v_0 \le 80km/h} = f(v_0, \lambda, i);$

$s_{GG\ 80km/h < v_0 \le 100km/h} = f(v_0, \lambda_{eff100}, i)$

$s_{GG\ 100km/h < v_0 \le 120km/h} = f(v_0, \lambda_{eff120}, i)$

Zusammenfassend, unter Einbezug aller Reibwertcharakteristiken, ergibt sich für die Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» folgende Formulierung:

$$
\begin{aligned}
s_{v_0 \le v_{Kal.}} &= max\left(s_{GG}\left(v_0, \lambda_{eff v_{minB_{GG}}}, i\right);\ s_K(v_0, \lambda, i);\ s_{SB}(v_0, \lambda, i)\right) \\
s_{v_{Kal.} < v_0 < v_{minB_GG}} &= max\left(s_{GG}\left(v_0, \lambda_{eff v_{minB_{GG}}}, i\right);\ s_K(v_0, \lambda, i);\ s_{SB}(v_0, \lambda, i)\right) \\
s_{v_{minB_{GG}} < v_0 < v_{maxB_GG}} &= max\left(s_{GG}(v_0, \lambda_{eff v_{maxB_{GG}}}, i);\ s_K(v_0, \lambda, i);\ s_{SB}(v_0, \lambda, i)\right) \\
s_{v_{maxB_GG} < v_0} &= max\left(s_K(v_0, \lambda, i);\ s_{SB}(v_0, \lambda, i)\right)
\end{aligned}
$$

Formel 6.3.3-1

v_0	Bremsausgangsgeschwindigkeit	v_{minB_GG}	Tiefste v_B für GG-Bremssohlen
v_B	Bewertungsgeschwindigkeit	v_{maxB_GG}	Höchste v_B für GG-Bremssohlen
λ	Bremsverhältnis nach Bremsanschrift	$v_{Kal.}$	Kalibrierungsgeschwindigkeit = 80 km/h
i	Streckenneigung	$\lambda_{eff v_{minB_GG}}$	Tatsächliches λ_{GG} bei vB_{min_GG}
s_K	Anhalteweg mit K-Bremssohlen	$\lambda_{eff v_{minB_GG}}$	Tatsächliches λ_{GG} bei vB_{max_GG}
s_{GG}	Anhalteweg mit GG-Bremssohlen	s_{SB}	Anhalteweg mit Scheibenbremse

Als Übersicht und zum besseren Verständnis sind nachfolgend die massgebenden Bremsverhältnisse je Reibwertcharakteristik dargestellt, welche für die Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» in der Anhaltewegberechnung einzusetzen sind:

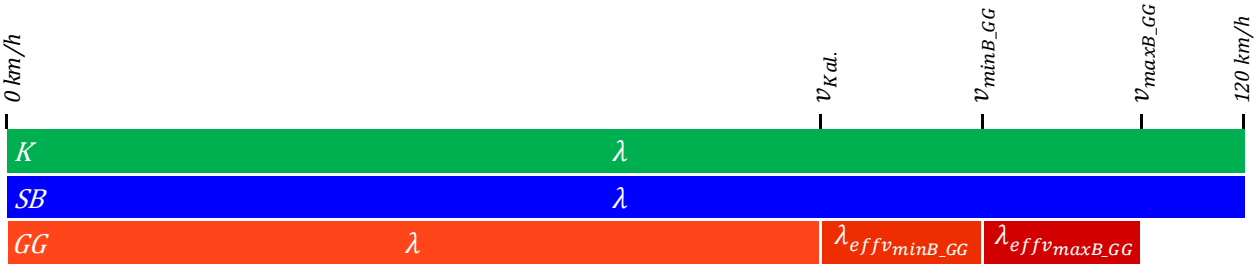


Abbildung 6.3.3-3: *Bremsverhältnisse mit optimierten (GG für $v_0 > v_{Kal.}$) Bestimmung der «sicheren Anhaltewege»*

6.3.4 Vergleich «sichere Anhaltewege» mit und ohne Optimierung für GG-Bremssohlen

Die optimierte Bestimmung der Anhaltewege gemäss Abschnitt 6.3.3 ist relativ aufwändig. Sie berücksichtigt für Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen und Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 > 80$ km/h den bei der Bremsbewertung erfahrenen Abschlag auf das Bremsverhältnis.

Der Nutzen dieser Optimierung ist abhängig von den gegebenen Signalabständen einer bestehenden Bahninfrastruktur, vom Bahnbetrieb (Fahrplan) und vor allem von der bremstechnischen Zusammensetzung der zu betreibenden Fahrzeugflotte. Ist dieser Nutzen als gering oder unbedeutend einzustufen, können die «sicheren Anhaltewege» ohne Optimierung auf einfachere Weise wie folgt bestimmt werden:

$$s_{max} = \max\left(s_{GG}(v_0, \lambda, i);\ s_K(v_0, \lambda, i);\ s_{SB}(v_0, \lambda, i)\right)$$

Formel 6.3.4-1: *«Sicherer» Anhalteweg nicht optimiert*

s_{max}	«Sicherer» Anhalteweg nicht optimiert	$s_{max_{opt}}$	«Sicherer» Anhalteweg optimiert
s_{GG}	Anhalteweg mit GG-Bremssohlen	s_{GG_opt}	Optimierter Anhalteweg mit GG-Bremssohlen
s_K	Anhalteweg mit K-Bremssohlen	s_{SB}	Anhalteweg mit Scheibenbremse
v_0	Bremsausgangsgeschwindigkeit	λ	Bremsverhältnis
i	Streckenneigung		

Die nachfolgende Darstellung veranschaulicht anhand eines Beispiels die Anhaltwege, welche mit und ohne Optimierung für GG-Bremssohlen bestimmt wurden.

Streckenneigung: $i = 0$ ‰
Fahrzeugflotte: Fahrzeuge mit Reibwertcharakteristik K und SB, alle mit $v_{maxFz} = 120$ km/h
Fahrzeuge mit Reibwertcharakteristik GG, alle mit $v_{maxFz} = 100$ km/h

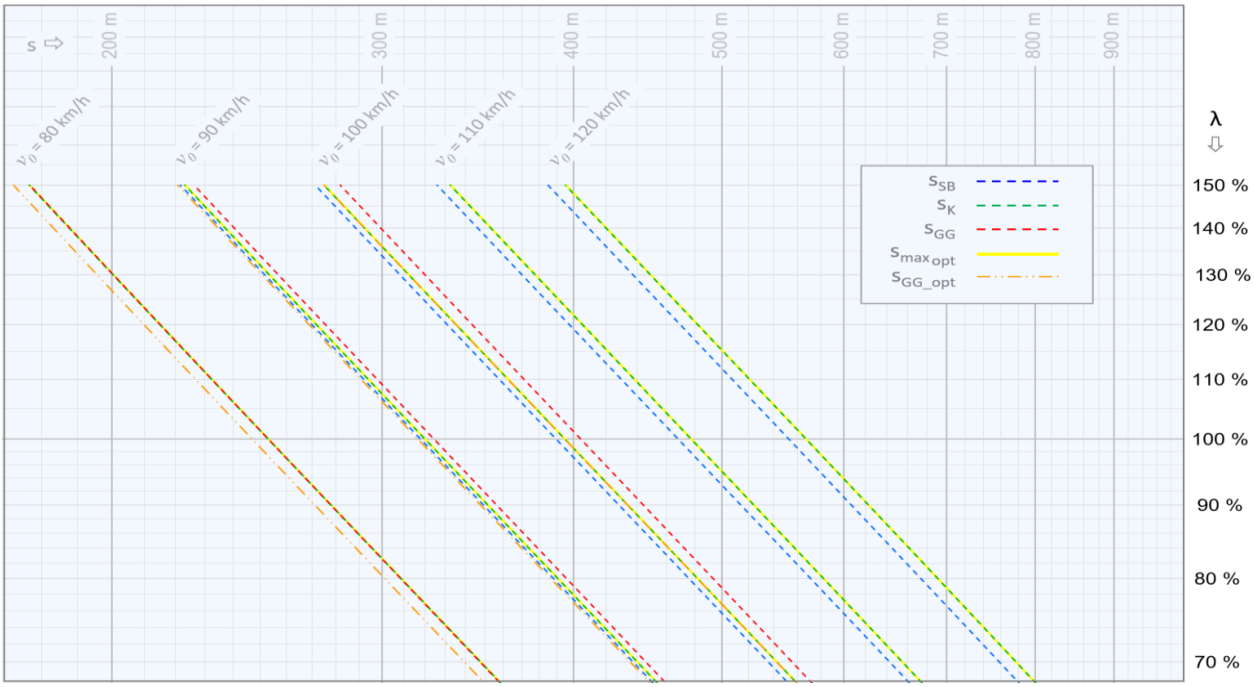


Abbildung 6.3.4-1: *«Sichere Anhaltwege» mit und ohne Optimierung für Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen*

Der erzielte Nutzen durch die optimierte Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» lässt sich für die jeweilige Bremsausgangsgeschwindigkeit direkt in der Abbildung 6.3.4-1 ablesen und entspricht dabei dem horizontalen Abstand zwischen der Kennlinie $s_{max_{opt}}$ und der Kennlinie s_{GG}.
Der «sichere Anhalteweg» ohne Optimierung s_{max} ist in Abbildung 6.3.4-1 nicht gekennzeichnet. s_{max} entspricht je Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 jeweils der Kennlinie mit dem horizontalen Maximalwerten. Für v_0 = 110 und 120 km/h beispielsweise ist s_{max} identisch mit den Kennlinien s_K und $s_{max_{opt}}$.
Als Unterstützung bei der individuellen Klärung des Nutzens einer optimierten Bestimmung der Anhaltwege von Fahrzeugen mit GG-Bremssohlen enthält Anlage A18.1 dazu weitere ausgewählte Szenarien.

6.3.5 Überarbeitung von «Ergänzung a» zum Kommentar Nr. 4 zur EBV

Die überarbeiteten Bremskurven in «Ergänzung a» entsprechen «sicheren Anhaltewegen». Diese wurden mit einer fahrzeugtechnisch bedingten Bremskraftstreuung s_f = -16,58 % berechnet. Innerhalb eines bremstechnischen Fahrzeug-Wartungsintervalls darf davon ausgegangen werden, dass Einzelfahrzeuge bei entsprechenden Adhäsionsbedingungen die «sicheren Anhaltewege» gemäss diesen Bremskurven einhalten.

Ausser der abgebildeten fahrzeugtechnisch bedingten Streuung der Bremskraft, enthalten diese Bremskurven keine Sicherheitsmargen. Sicherheitszuschläge bei der Festlegung von Vorsignaldistanzen oder Abständen zwischen Kontrolllicht und Bahnübergang, sind weiterhin in Kommentar zur EBV Nr. 4 Ergänzung a geregelt, in welchem die Bremskurven gemäss den vorliegenden Grundlagen überarbeitet wurden.

Als Bremskurven, wie im nachfolgenden Diagramm für ein Gefälle von 40 ‰ dargestellt, werden die Kurven-Scharen mit den «sicheren Anhaltewegen» bezeichnet, welche unter Berücksichtigung der fahrzeugbedingten Bremskraftstreuung s_f berechnet wurden gemäss Kapitel 6.3.3.

Die nachstehenden Bremskurven gelten für Fahrzeuge mit Scheibenbremse oder K-Bremssohlen bis zu einer Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von 120 km/h und für Fahrzeuge mit GG-Bremssohlen bis zu einer Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von 80 km/h.

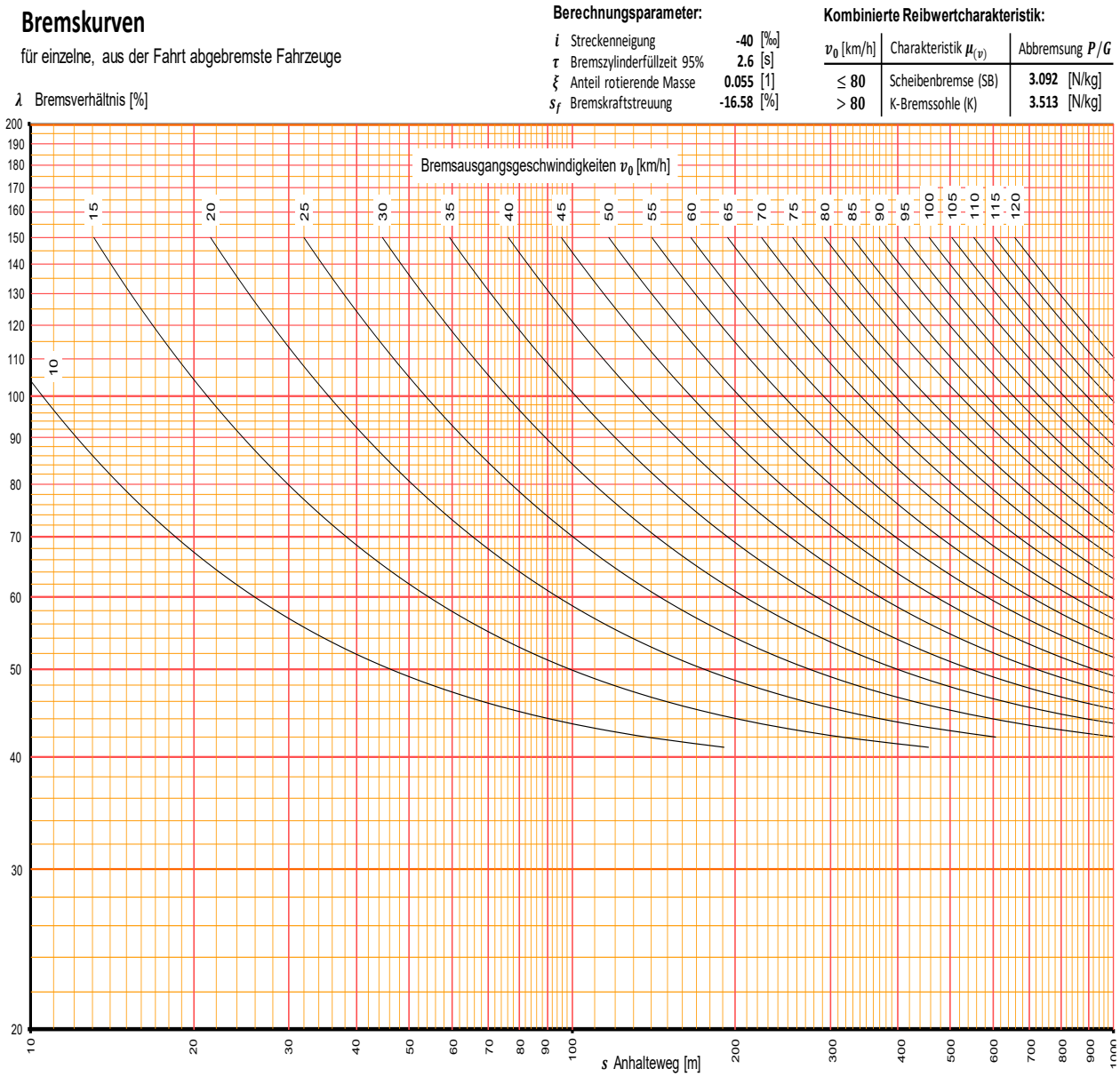


Abbildung 6.3.5-1: *Bremskurven, gültig für GG-Sohlen bis 80 km/h sowie für SB und K-Sohlen bis 120 km/h*

6.3.6 Vergleich zu den Bremskurven gemäss Kommentar Nr. 4 zur EBV Ergänzung a

Um in der Praxis eine Übersicht zu den Auswirkungen der angepassten Bremsbewertung und Anhalteweg-berechnung mittels Referenzmodell mit kombinierter Reibwertcharakteristik, gegenüber der bisherigen Bremsbewertung und Bremskurven gemäss Kommentar Nr. 4 zur EBV Ergänzung a (Anlage *A2*) zu erhalten, wurden als Anlage folgende Vergleichsberechnungen angestellt:

A18.2: Bremskurvenvergleich mit v_{max} & v_{min} = 80 km/h für GG, gegenüber Kommentar Nr. 4a zur EBV

A18.3: Bremskurvenvergleich mit v_{max} & v_{min} = 100 km/h für GG, gegenüber Kommentar Nr. 4a zur EBV

A18.4: Vergleich der Bremskurven mit K-Sohle gegenüber Kommentar Nr. 4a zur EBV

A18.5: Vergleich der Bremskurven mit Scheibenbremse gegenüber Kommentar Nr. 4a zur EBV

6.4 Neue Bremstabelle S2020

6.4.1 Limitierung durch die kinematischen Anforderungen

Wie aus Abschnitt 4.3.4 bekannt, ergeben sich in der Ebene für Bremsausgangsgeschwindigkeiten unterhalb der Kalibrierungsgeschwindigkeit $v_{Kal.}$ die längsten Anhaltewege für scheibengebremste Fahrzeuge und oberhalb $v_{Kal.}$ für die Fahrzeuge mit K-Bremssohlen. Die in Abschnitt 5.5.3 vorgenommene Berechnung der Bremsverhältnisse zur Erfüllung der kinematischen Schutzkriterien von Bremstabellen basieren auf dieser kombinierten Reibwertcharakteristik. Die entsprechenden Berechnungsergebnisse je Reibwertcharakteristik sind für die K-Bremssohle in Tabelle 5.5-1, beziehungsweise in Tabelle 5.5-2 für die Scheibenbremse dokumentiert. Die Kombination dieser Tabellen durch Maximalwertbildung führt zu Tabelle 5.5-3 für die kombinierte Reibwertcharakteristik entsprechend den Bremsbewertungskennlinien nach Abbildung 4.3.4-1.

Wie nun die Untersuchungen zur Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» in Abschnitt 6.3.2 gezeigt haben, lassen sich die «sicheren Anhaltewege» nicht alleine mit der kombinierten Reibwertcharakteristik (K-Bremssohle und Scheibenbremse) berechnen. Zur Bestimmung des «sicheren Anhalteweges» ist für Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 \leq v_{Kal.}$ ebenfalls die Reibwertcharakteristik der GG-Bremssohle mit einzubeziehen gemäss den in den Abschnitten 6.3.3 oder 6.3.4 beschriebenen Methoden. Dies gilt gleichermassen für die Berechnung der limitierenden Grössen p_e, β, s sowie für die für die Konstruktion von Bremstabellen.

Die nachfolgende Tabelle enthält das Ergebnis der durch Maximalwertbildung zusammengeführten Bremstabellen, welche mit den einzelnen Reibwertcharakteristiken (Scheibenbremse, K- und GG-Bremssohle) wie in Abbildung 6.3.3-3 zur Übersicht dargestellt, jedoch ohne die Optimierung für GG-Bremssohlen. Die Berechnungen erfolgten mit den folgenden Werten:

Modellparameter Referenzmodell

Physik. Abbremsung P/G_{SB}	3,092	[ms^{-2}]
Physik. Abbremsung P/G_{K}	3,513	[ms^{-2}]
Physik. Abbremsung P/G_{GG}	6,494	[ms^{-2}]
Bremszylinderfüllzeit t_1	2.6	[s]
Massenfaktor ξ	5.55	[%]
Fahrzeugstreuung s_f für p_e	-16,58	[%]
Fahrzeugstreuung s_f für s	0	[%]
Fahrwiderstand a_w	nach Formel 2.2.1-1	
Reibwert SB für v_0 = 0 .. 120 km/h	nach Tabelle 6.2-1	
Reibwert K für v_0 = 0 .. 120 km/h	nach Tabelle 6.2-1	
Reibwert GG für v_0 = 0 .. 80 km/h	gemäss Anlage A12	

Parameter für Bremstabellenberechnung

Effektivverzögerung p_e	0.13	[ms^{-2}]
Bremswegsensitivität β	4.0	[%]
Anhalteweg s_{max}	1'000	[m]

Farblegende: λ_β λ_{pe} λ_s

Gefälle	Geschwindigkeit v [km/h]																						
i [‰]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
0	21	22	22	22	23	23	23	23	23	22	22	22	22	22	22	25	28	31	35	39	44	48	53
5	25	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	26	26	26	29	33	36	40	44	49	53	58
10	29	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	34	37	41	45	49	53	58	63
15	34	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36	35	36	39	42	46	50	54	58	63	68
20	38	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	44	47	51	55	59	63	68	73
25	42	43	44	44	44	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	48	52	56	60	64	68	73	78
30	47	47	48	48	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	50	53	57	60	64	69	73	78	83
35	51	52	52	53	53	53	54	54	54	54	54	54	54	54	55	58	61	65	69	74	78	83	88
40	55	56	57	57	58	58	58	58	58	58	59	59	60	60	60	62	66	70	74	78	83	88	93
45	59	60	61	62	62	62	63	63	63	63	64	65	66	66	67	67	71	75	79	83	88	93	98
50	64	65	65	66	66	67	67	67	67	69	70	71	72	72	73	72	76	80	84	88	93	98	103
55	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	76	77	78	79	79	77	81	85	89	93	98	103	108
60	74	75	76	76	77	77	78	78	78	80	81	83	84	85	85	82	85	89	94	98	103	108	113
65	79	80	81	81	82	83	83	84	84	86	87	89	90	91	92	86	90	94	98	103	108	113	118
70	84	85	86	87	87	88	89	89	89	91	93	95	96	97	98	92	95	99	103	108	113	118	124
75	89	90	91	92	93	93	94	95	95	97	99	101	102	103	104	98	100	104	108	113	118	123	129
80	94	95	96	97	98	99	99	100	100	103	105	106	108	109	110	104	105	109	113	118	122	128	134

Tabelle 6.4-1: *Zusammenführung der erforderlichen Mindest-Bremsverhältnisse für SB, K- und GG-Bremssohlen*

Die Nachfolgende Abbildung stellt die erforderlichen Mindestbremsverhältnisse gemäss Tabelle 6.4-1 in Abhängigkeit der Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 zur besseren Übersicht in grafischer Form dar.

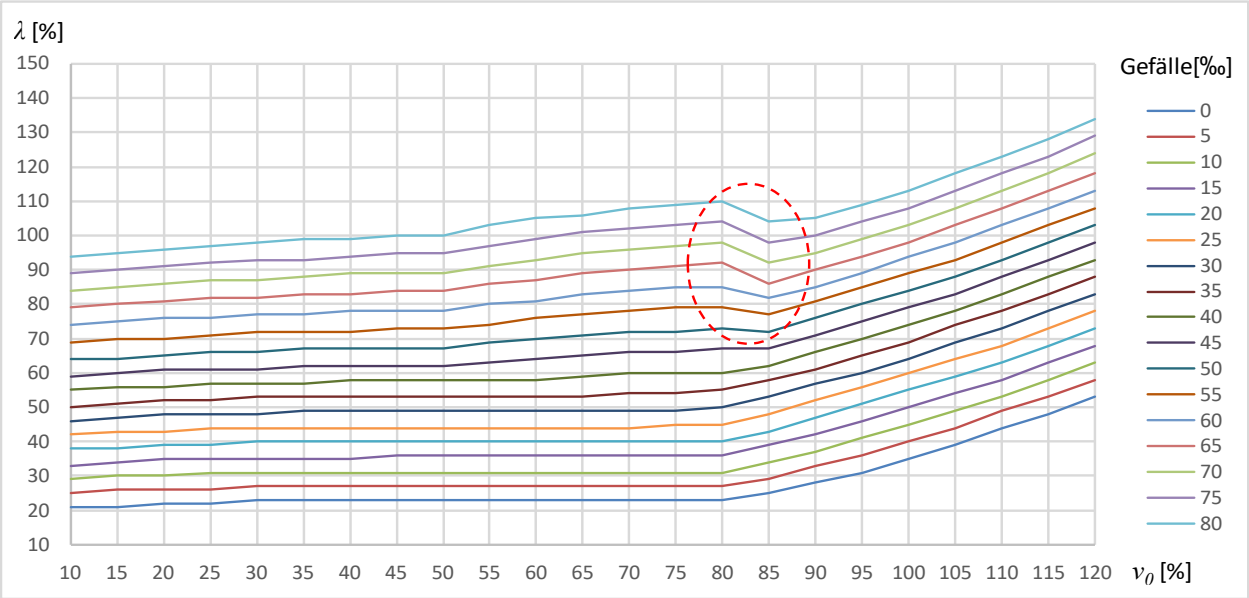


Abbildung 6.4.1-1: *Grafische Darstellung der zusammengeführten erforderlichen Mindest-Bremsverhältnisse*

In Abbildung 6.4.1-1 fällt auf, dass für Gefälle ab 50 ‰ und Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 > v_{Kal.}$ die Mindestbremsverhältnisse nicht durchgehend ansteigen mit zunehmender Bremsausgangsgeschwindigkeit. Dies liegt daran, dass GG-Bremssohlen zwischen 50 und 80 km/h ein relativ tiefes Reibwertniveau aufweisen. Bei diesen Geschwindigkeiten ist deshalb im starken Gefälle, gegenüber der Scheibenbremse oder der K-Bremssohle, ein höheres Bremsverhältnis erforderlich, um den Grenzwert für die Effektivverzögerung einzuhalten. Gemäss Formel 5.3.4-1 wirkt sich der Momentreibwert auf die Effektivverzögerung aus. Wie die Tabelle 6.4-1 zeigt, wechselt zudem im betrachteten Steigungs- und Geschwindigkeitsbereich das Limitierungskriterium von der Effektivverzögerung p_e zum Maximalbremsweg s_{max}. Der Maximalbremsweg ist abhängig von dem Reibwertverlauf.
Gemäss der Festlegung 6.3.1-1 beruht die Bremsbewertung, unabhängig von der Bremscharakteristik des zu bewertenden Fahrzeuges, immer auf der Reibwertcharakteristik der K-Bremssohle. Dies bedeutet, dass bei der Konstruktion von Bremstabellen die einzuhaltenden Grenzwerte für Bremsausgangsgeschwindigkeiten $v_0 > v_{Kal.}$ anhand der Reibwertcharakteristik der K-Sohle zu berechnen sind. Mit der Bremsbewertung wird das tiefere Reibwertniveau der GG-Bremssohle gegenüber der K-Bremssohle kompensiert. Der Grund für den oben erwähnten Einbruch der erforderlichen Mindestbremsverhältnisse ist zwar nicht gerade offensichtlich, aber erklärbar.
Im Sinne eines allgemeinen Verständnisses bei der Anwendung der Bremstabelle ist es sinnvoll, den Einbruch der erforderlichen Mindestbremsverhältnisse zu eliminieren. Ausserdem wirkt sich die Glättung durch die partielle Anhebung der Mindestbremsverhältnisse sicherheitstechnisch positiv aus. Die Zahlenwerte der angepassten Bremsverhältnisse sind Tabelle 6.4-2 in roter Fettschrift gekennzeichnet.

Gefälle	Bremsverhältnisse für SB und K bis 120 km/h sowie GG-Bremssohlen bis 80 km/h																						
i [‰]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
0	21	21	22	22	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	25	28	31	35	39	44	48	53
5	25	26	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	29	33	36	40	44	49	53	58
10	29	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	34	37	41	45	49	53	58	63
15	33	34	35	35	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	39	42	46	50	54	58	63	68
20	38	38	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	44	47	51	55	59	63	68	73
25	42	43	43	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	45	45	48	52	56	60	64	68	73	78
30	46	47	48	48	48	49	49	49	49	49	49	49	49	49	50	53	57	60	64	69	73	78	83
35	50	51	52	52	53	53	53	53	53	53	53	53	54	54	55	58	61	65	69	74	78	83	88
40	55	56	56	57	57	57	58	58	58	58	58	59	60	60	60	62	66	70	74	78	83	88	93
45	59	60	61	61	61	62	62	62	62	63	64	65	66	66	67	67	71	75	79	83	88	93	98
50	64	64	65	66	66	67	67	67	67	69	70	71	72	72	73	**74**	76	80	84	88	93	98	103
55	69	70	70	71	72	72	72	73	73	74	76	77	78	79	79	**80**	81	85	89	93	98	103	108
60	74	75	76	76	77	77	78	78	78	80	81	83	84	85	85	**86**	**87**	89	94	98	103	108	113
65	79	80	81	82	82	83	83	84	84	86	87	89	90	91	92	**92**	**93**	94	98	103	108	113	118
70	84	85	86	87	87	88	89	89	89	91	93	95	96	97	98	**98**	**99**	99	103	108	113	118	124
75	89	90	91	92	93	93	94	95	95	97	99	101	102	103	104	**104**	**105**	**106**	108	113	118	123	129
80	94	95	96	97	98	99	99	100	100	103	105	106	108	109	110	**110**	**111**	**111**	113	118	122	128	134

Tabelle 6.4-2: *Bremstabelle mit* ***partieller Glättung*** *der erforderlichen Mindesbremsverhältnisse*

6.4.2 Thermische Belastung der Bremse

Die folgende Tabelle 6.4-3 enthält die anhand von finiten Volumenelementen berechneten Temperaturen auf der Radlauffläche. Zusammen mit dem Temperaturgrenzwert für die Radlauffläche ergibt sich für die Bremstabelle der thermische Ausschlussbereich gemäss Tabelle 6.4-4.

Temperaturberechnung für die Radlaufflächen

Berechnungsmodell 2-dimensional	Finite Volumenelemente
Lastkollektiv	2 Schnellbremsungen aufeinanderfolgend
Vollrad mit Laufkreisdurchmesser	645 mm
Reibwertcharakteristik	K-Bremssohlen nach Abbildung 4.3.1-1
Bremsverhältnisse	nach Tabelle 6.4-1
Temperaturgrenzwert für die Radlauffläche	500 °C

Temperaturen an der Radlauffläche > 500 °C

T [°C]	v [km/h]																						
i [‰]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
0																							
5																							
10																							
15																							518
20																						513	555
25																					510	550	592
30																				507	546	586	629
35																			506	542	582	623	666
40																		505	541	578	618	659	703
45																	505	539	576	614	654	696	740
50																506	538	573	610	649	690	733	778
55															504	538	571	607	645	685	726	769	815
60															531	570	607	641	680	720	762	806	852
65														512	557	606	640	677	714	756	798	842	889
70														535	586	638	673	711	749	791	834	879	926
75													506	558	611	665	706	745	783	826	869	915	963
80													525	580	635	692	739	779	817	861	905	951	999

Tabelle 6.4-3: *Temperaturen an der Radlauffläche gemäss Bericht [10] DB-Systemtechnik*

Für die Berechnung der Laufflächentemperaturen wurde, im Gegensatz zu den Berechnungen in Kapitel 5.5.4, ein validiertes Finite-Volumenmodell für den Normalspurbereich herangezogen, welches vorab auf die Verwendbarkeit im Meterspurbereich mit deutlich kleineren Rädern überprüft wurde. Die konsolidierten Berechnungsergebnisse sind im 2. Teilbericht der DB-Systemtechnik in Abschnitt «4.1.3 Ergebnisse» dokumentiert. Mit einer maximal zulässigen Radlaufflächentemperatur von 500 °C zur Begrenzung der thermischen Belastung ergibt sich für klotzgebremste Fahrzeuge betrieblich folgender Ausschlussbereich

Ausschlussbereich aufgrund der thermischen Belastbarkeit

λ [%]	v [km/h]																						
i [‰]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
0	21	22	22	22	22	23	23	23	22	22	22	22	22	22	22	25	28	31	35	39	44	48	53
5	25	26	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	26	26	26	29	33	36	40	44	49	53	58
10	29	30	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	34	37	41	45	49	53	58	63
15	34	34	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36	35	36	39	42	46	50	54	58	63	68
20	38	39	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	43	47	51	55	59	63	68	73
25	42	43	44	44	44	44	45	45	45	45	45	45	45	45	45	48	52	56	60	64	68	73	78
30	46	47	48	48	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	50	53	57	60	64	69	73	78	83
35	51	52	52	53	53	53	53	54	54	54	54	54	54	54	55	58	61	65	69	74	78	83	88
40	55	56	56	57	57	58	58	58	58	58	58	59	60	60	62	64	66	70	74	78	83	88	93
45	59	60	61	61	62	62	62	62	63	63	64	65	66	66	67	69	71	75	79	83	88	93	98
50	64	64	65	66	66	67	67	67	67	69	70	71	72	73	73	74	76	80	84	88	93	98	103
55	69	70	70	71	72	72	72	73	73	74	76	77	78	79	79	80	81	85	89	93	98	103	108
60	74	75	76	76	77	77	78	78	78	80	81	83	84	85	85	86	87	89	94	98	103	108	113
65	79	80	81	82	82	83	83	84	84	86	87	89	90	91	92	92	93	94	98	103	108	113	119
70	84	85	86	87	87	88	89	89	89	91	93	95	96	97	98	98	99	99	103	108	113	118	124
75	89	90	91	92	93	93	94	95	95	97	99	101	102	103	104	104	105	106	108	113	118	123	129
80	94	95	96	97	98	99	99	100	100	103	105	106	108	109	110	110	111	111	113	118	123	128	134

Tabelle 6.4-4: *Zone ④, Ausschlussbereich zur Bregrenzung der thermischen Belastung*

6.4.3 AB-EBV Bremstabelle S2020

Gefälle	Geschwindigkeit v [km/h]																						
[%]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
0	**21**	**22**	**22**	**22**	**22**	**23**	**23**	**23**	**22**	**22**	**22**	**22**	**22**	**22**	**22**	**25**	**28**	**31**	**35**	**39**	**44**	**48**	**53**
5	**25**	**26**	**26**	**27**	**27**	**27**	**27**	**27**	**27**	**27**	**27**	**27**	**26**	**26**	**26**	**29**	**33**	**36**	**40**	**44**	**49**	**53**	**58**
10	**29**	**30**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**31**	**34**	**37**	**41**	**45**	**49**	**53**	**58**	**63**
15	**34**	**34**	**35**	**35**	**36**	**36**	**36**	**36**	**36**	**36**	**36**	**36**	**36**	**35**	**36**	**39**	**42**	**46**	**50**	**54**	**58**	**63**	(68)
20	**38**	**39**	**39**	**40**	**40**	**40**	**40**	**40**	**40**	**40**	**40**	**40**	**40**	**40**	**40**	**43**	**47**	**51**	**55**	**59**	**63**	(68)	(73)
25	**42**	**43**	**44**	**44**	**44**	**44**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**45**	**48**	**52**	**56**	**60**	**64**	(68)	(73)	(78)
30	**46**	**47**	**48**	**48**	**49**	**49**	**49**	**49**	**49**	**49**	**49**	**49**	**49**	**49**	**50**	**53**	**57**	**60**	**64**	(69)	(73)	(78)	(83)
35	**51**	**52**	**52**	**53**	**53**	**53**	**53**	**54**	**54**	**54**	**54**	**54**	**54**	**54**	**55**	**58**	**61**	**65**	(69)	(74)	(78)	(83)	(88)
40	**55**	**56**	**56**	**57**	**57**	**58**	**58**	**58**	**58**	**58**	**58**	**59**	**60**	**60**	**62**	**64**	**66**	(70)	(74)	(78)	(83)	(88)	(93)
45	**59**	**60**	**61**	**61**	**62**	**62**	**62**	**62**	**63**	**63**	**64**	**65**	**66**	**66**	**67**	**69**	(71)	(75)	(79)	(83)	(88)	(93)	(98)
50	**64**	**64**	**65**	**66**	**66**	**67**	**67**	**67**	**67**	**69**	**70**	**71**	**72**	**73**	**73**	(74)	(76)	(80)	(84)	(88)	(93)	(98)	(103)
55	**69**	**70**	**70**	**71**	**72**	**72**	**72**	**73**	**73**	**74**	**76**	**77**	**78**	**79**	(79)	(80)	(81)	(85)	(89)	(93)	(98)	(103)	(108)
60	**74**	**75**	**76**	**76**	**77**	**77**	**78**	**78**	**78**	**80**	**81**	**83**	**84**	**85**	(85)	(86)	(87)	(89)	(94)	(98)	(103)	(108)	(113)
65	**79**	**80**	**81**	**82**	**82**	**83**	**83**	**84**	**84**	**86**	**87**	**89**	**90**	(91)	(92)	(92)	(93)	(94)	(98)	(103)	(108)	(113)	(119)
70	**84**	**85**	**86**	**87**	**87**	**88**	**89**	**89**	**89**	**91**	**93**	**95**	**96**	(97)	(98)	(98)	(99)	(99)	(103)	(108)	(113)	(118)	(124)
75	**89**	**90**	**91**	**92**	**93**	**93**	**94**	**95**	**95**	**97**	**99**	**101**	(102)	(103)	(104)	(104)	(105)	(106)	(108)	(113)	(118)	(123)	(129)
80	**94**	**95**	**96**	**97**	**98**	**99**	**99**	**100**	**100**	**103**	**105**	**106**	(108)	(109)	(110)	(110)	(111)	(111)	(113)	(118)	(123)	(128)	(134)

Abbildung 6.4.3-1: *Neue AB-EBV Bremstabelle S2020*

Anwendung und Gültigkeit der Bremstabelle S2020

Bereich mit den Zahlenwerten in Fettschrift:

- ohne Einschränkungen für klotzgebremste Fahrzeuge
- für scheibenbremste Fahrzeuge mit zusätzlichem Nachweis betreffend die thermische Eignung der Bremskomponenten

Bereich mit den eingeklammerten Zahlenwerten:

- diese Mindestbremverhältnisse erfüllen die kinematischen Limitierungskriterien
- dürfen für klotz- und scheibengebremste Fahrzeuge **nur mit zusätzlichem Nachweis** betreffend die thermische Eignung der Bremskomponenten angewendet werden
- dazu sind dem BAV im Anwendungsfall alle dafür erforderlichen Nachweise vorzulegen