

Landquart, 07. Juli 2016




## Systemführung ZBMS

# Bestimmung der dynamischen Bremskurven

für Züge von Bahnen welche eine Zugbeeinflussung  
gemäss ZBMS einsetzen

Version  
Inkraftsetzung:  
Dokument-Nummer

Nr. 1.1  
07.07.2016  
21186

<b>Rhätische Bahn</b> erstellt 07.07.2016    Pierre-Yves Kalbfuss P-PE-VZ	geprüft    Martin Kessler P-PE-VZ	freigegeben    Uwe Hartmann Leiter P-PE
--	---	--

**Dokumentinformation**

Version	Datum	Ersteller	Änderungshinweise
1.0	13.05.2016	Pierre-Yves Kalbfuss	Erstausgabe
1.1	07.07.2016	Pierre-Yves Kalbfuss	Ziffer 4.3: Ergänzung der Erläuterungen

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
1.1	Zweck .....	5
1.2	Einsatzbereich .....	6
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>6</b>
2.1	AB-EBV .....	6
2.2	Bestimmung des Bremsverhältnisses eines Fahrzeugs .....	7
2.3	Standard ZBMS .....	8
2.4	Vorsignaldistanz .....	8
<b>3</b>	<b>Ermittlung des Bremsverhaltens .....</b>	<b>9</b>
3.1	Grundsatz .....	9
3.2	Traktionsabschaltung .....	9
3.3	Reaktionszeit .....	9
3.3.1	Durchschlagzeit im Zug .....	10
3.3.2	Aufbauzeit im Einzelfahrzeug .....	10
3.3.3	Teilanrechnung .....	10
3.4	Abbremsung .....	11
3.4.1	Einfluss der Neigung .....	11
3.5	Gesamter Bremsweg .....	12
<b>4</b>	<b>Verzögerung in Abhängigkeit mit der Bremsreihe .....</b>	<b>12</b>
4.1	Grundsatz .....	12
4.2	Methodik .....	13
4.3	Beispiele .....	13
<b>5</b>	<b>Ergebnisse von Bremsversuche .....</b>	<b>16</b>
5.1	Bremsversuche mit Einzelfahrzeugen .....	16
5.2	Bremsversuche mit ganzen Zügen .....	20
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>25</b>



# 1 Einleitung

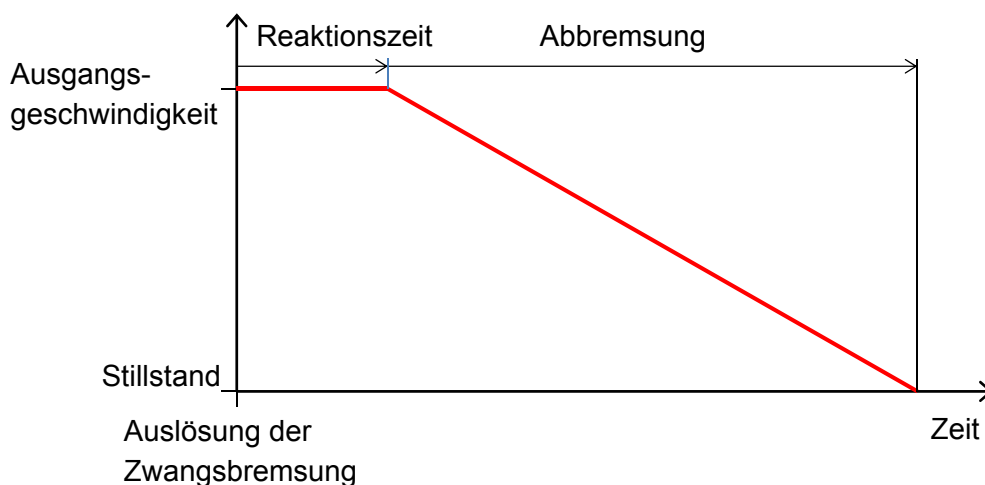
## 1.1 Zweck

Die Bremseigenschaften der Meter- und Spezialspurfahrzeuge werden gemäss AB-EBV, AB 52.2 festgelegt. Diese hoheitlichen Bestimmungen legen die Grundlagen für die Festlegung des Bremsverhältnisses und des Bremsgewichtes eines einzelnen Fahrzeugs.

Ein modernes Zugbeeinflussungssystem legt eine Bremskurve fest, die das Überfahren des projektierten Halteorts ausschliesst. Die dazu nötigen Daten können aber nicht direkt aus der Bremsberechnungsmethode nach AB-EBV Ab 52.2 bestimmt werden. Für die Berechnung der Bremseinsatzkurven moderner Zugbeeinflussungssysteme sowie bei Risikoanalysen wird ein Verfahren angewendet, das die physikalischen Eigenschaften eines Fahrzeugs beziehungsweise eines ganzen Zuges mit dem nach AB-EBV bestimmten Bremsverhältnisses vereinbart.

Das zu verifizierende Berechnungsverfahren ist auf den Grundsatz aufgebaut:

- Nach dem Einleiten der Zwangsbremmung fährt der Zug während der Reaktionszeit mit konstanter Geschwindigkeit
- Anschliessend erfolgt die Abbremsung mit konstanter Verzögerung bis zum Stillstand.



Zweck dieses Dokuments ist, die Anwendbarkeit dieses Verfahrens nachzuweisen. Die Zusammenhänge mit den fahrdienstlich massgebenden Bremsverhältnissen und mit Einflussfaktoren wie der Zuglänge werden aufgezeigt.

Dieses Dokument dient jedoch nicht der Verifizierung eines in einem bestimmten System eingesetzten Algorithmus.

## 1.2 Einsatzbereich

Dieses Dokument ist auf den Adhäsionsstrecken der Meter- und Spezialspurbahnen anwendbar. Die Anhalteweg-Berechnungen gelten im Adhäsionsbereich. Auf Besonderheiten der Zahnradbahnen wird nicht eingegangen.

# 2 Grundlagen

## 2.1 AB-EBV

Die Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV) Ausgabe 01.07.2016 enthalten folgende Artikel und Vorschriften im Zusammenhang mit Bremsen im Allgemeinen und im Speziellen mit Bremsen bei Adhäsionstriebfahrzeugen:

Art.	Kapitel	Abschnitt	Artikel
52	Fahrzeuge	nicht interoperable Fahrzeuge	Bremssysteme
76	Bahnbetrieb	Bilden und Bedienen der Züge	Fahrgeschwindigkeiten
77	Bahnbetrieb	Bilden und Bedienen der Züge	Bremsordnung

In diesen Artikeln werden in einer Vielzahl von einzelnen Abschnitten die Auslegung der Bremsen sowie deren Wirksamkeit behandelt. Es wird grundsätzlich zwischen vier Bremssystemen unterschieden, der indirekt wirkenden automatischen Bremse, der direkt wirkenden Rangierbremse, der Feststellbremse und der Sicherheitsbremse. Zusätzlich ist meistens auch eine elektrische Bremse (Antriebsbremse) vorhanden. Im Zusammenhang mit der Geschwindigkeitsüberwachung durch die Zugbeeinflussung sind dabei nur die automatische Bremse und die als Sicherheitsbremse anrechenbaren übrigen Bremssysteme relevant, wobei nur in bestimmten Fällen die Sicherheitsbremse anteilmässig angerechnet werden darf (AB 77.2, Ziffer 4.2).

Über die nicht oder nur unter gewissen Voraussetzungen anrechenbaren Bremsen wird in diesem Dokument nicht weiter eingegangen. Das zu validierende Bremsberechnungsverfahren ist allein auf der Wirkung der automatischen Bremse abgestützt.

In der AB-EBV (AB 52.2, Ziffer 4) wird der Bremsweg mit einer auf folgendem Grundsatz abgestützten Formel bestimmt:

- Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit während der Bremsaufbauzeit
- Abbremsung bis zum Stillstand

Allerdings gilt diese Formel nur annähernd. Je nach Beschaffenheit der Bremssohlen oder Bremsbelägen verändert sich der Reibungskoeffizient Bremssohle-Rad  $\mu_k$  mit der momentanen Geschwindigkeit. Der Fahrwiderstand steht physikalisch in Abhängigkeit mit dem Quadrat der Geschwindigkeit.

$$X = v_0 \cdot t_n + \frac{\frac{1000}{2} \cdot v_0^2 \cdot (1 + \xi)}{\mu_k \cdot \frac{P}{G} \cdot \frac{\lambda}{100} + w + s}$$

X	Bremsweg ab Einleitung der Zwangsbremmung bis zum Stillstand [m]
$v_0$	Ausgangsgeschwindigkeit [m/s]
$t_n$	Verlustzeit = $0.39 \cdot t_1$ [s]
$t_1$	Füllzeit des Bremszylinders auf 95% des Maximaldrucks [s]
P	Summe der Bremsklotz-Anpresskräfte des Fahrzeugs [N]
G	Fahrzeugmasse inkl. Zuladung [t]
w	Fahrwiderstand (Mittelwert) [N/t]
s	Neigungswiderstand, positiv in Steigung, negativ in Gefälle [N/t]
$\mu_k$	Reibungskoeffizient Bremssohle-Rad (Mittelwert) [-]
$\xi$	Zuschlag für rotierende Massen [-]
$\lambda$	Bremsgewichtshundertstel [-]

Die durchgeführten Bremsversuche haben gezeigt, dass die meisten Fahrzeuge ein Bremsverhalten mit annähernd konstanter Verzögerung aufweisen. Nur im untersten Geschwindigkeitsbereich nimmt die momentane Verzögerung bei gewissen Bauarten von Fahrzeugen auf Grund des zunehmenden Reibungskoeffizienten zwischen Bremssohle und Rad messbar zu. Sie wirkt sich zudem auf die sichere Seite hin aus (Der Bremsweg ist in der Praxis kürzer als bei Annahme einer konstanten Verzögerung über den gesamten Bereich).

Die mittlere Verzögerung eines Fahrzeugs über den gesamten Bremsvorgang nimmt bei sinkender Ausgangs-Geschwindigkeit ab. Dies trifft besonders bei einer längeren Bremszylinder-Füllzeit zu. Diese Feststellung wird nur gemacht, wenn der gesamte Bremsweg von der Einleitung bis zum Stillstand undifferenziert betrachtet wird. Im unteren Geschwindigkeitsbereich hat die Reaktionszeit von der Einleitung der Bremsung bis zum aufgebauten Bremszylinderdruck einen verhältnismässig höheren Einfluss auf den gesamten Bremsweg als im oberen Geschwindigkeitsbereich.

## 2.2 Bestimmung des Bremsverhältnisses eines Fahrzeugs

Die Bestimmung des Bremsverhältnisses eines Fahrzeugs erfolgt nach AB-EBV, AB 52.2. Die Bremsgewichtshundertstel werden in Funktion, des bei Bremsversuchen gemessenen Wegs bestimmt. Sie werden aus der Bremsbewertungskennlinien AB 52.2, Blatt 9 entnommen.

Diese Versuche werden in der Regel mit neuen bzw. mit frisch revidierten Fahrzeugen durchgeführt. Der Zustand der Bremsapparate ist dabei optimal. Im täglichen Betrieb kann der Wirkungsgrad des Bremsgestänges sich verschlechtern. Die unvermeidliche Verschmutzung verursacht zusätzliche Reibungen. Auch mit kompakten Bremssohlen-einheiten ist ein Bremskraftschwund möglich. Hingegen ergeben Versuche mit neuen

Bremssohlen und frisch profilierten Radflächen längere Bremswege als mit eingeschliffenen Bremssohlen.

Direkt ab Bremsbewertungskennlinien entnommene Werte ergeben das effektive Bremsverhältnis im momentanen Zustand des Fahrzeugs. In der EBV ist festgelegt, dass die Bremswirkung über den ganzen Bereich der zulässigen Abnutzung erhalten bleiben muss (EBV, Art. 52.3, Ziffer 1). Abzuleiten ist, dass die Anschriften am Fahrzeug so korrigiert werden müssen, dass das angerechnete Bremsverhältnis im täglichen Betrieb jederzeit erreicht wird. Es liegt in der Verantwortung des Eisenbahnverkehrsunternehmens aufgrund der Einsatzbedingungen und des Unterhaltsstandards einen Korrekturfaktor zu bestimmen. Damit wird die Streuung der Bremswege zwischen Fahrzeugen derselben Serie unter Berücksichtigung des momentanen Unterhaltszustands berücksichtigt.

## **2.3 Standard ZBMS**

Für die korrekte Berechnung der Bremskurven und Bremswege im Fahrzeuggerät müssen die entsprechenden Bremseigenschaften des Fahrzeugs projiziert werden.

Einzig die Bremskurve bei Zwangsbremung ist sicherheitsrelevant und muss den Halt vor dem projizierten Halteort bei Fehlverhalten des Lokführers jedenfalls gewährleisten. Warn- und, wenn projiziert, Betriebsbremskurven dienen der Unterstützung des Lokführers und müssen keine sicherheitsrelevante Ansprüche abdecken.

Aus diesem Grund muss nur das Bremsverhalten bei einer Zwangsbremung validiert werden.

## **2.4 Vorsignaldistanz**

Die Festlegung der Vorsignaldistanzen wird grundsätzlich unter Berücksichtigung einer Vollbremsung ausgelegt, die vom Lokführer auf Höhe des Vorsignals eingeleitet wird. Das Anhalten aller Züge nach einer Zwangsbremung durch die Zugbeeinflussung soll aber auf einem kürzeren Weg erfolgen, weil das System im Hintergrund arbeitet und beim vorschriftenkonformen Verhalten des Lokführers nicht eingreifen soll. Bei zu knapper Vorsignaldistanz wird aber die Bremsenabsatzkurve der Zugbeeinflussung bereits vor dem Vorsignal eine Geschwindigkeitsreduktion erzwingen. Unter Umständen kann diese Problematik nur bei tieferen Bremsverhältnissen auftreten. Eine zu knappe Vorsignaldistanz muss entweder durch Versetzung des Vorsignals oder durch Verminderung der Streckengeschwindigkeit in der Annäherung zum Vorsignal behoben werden.

Die Vorsignaldistanz beeinflusst das Bremsverhalten der Fahrzeuge nicht. Daher braucht sie in diesem Dokument nicht näher betrachtet zu werden.



## 3 Ermittlung des Bremsverhaltens

### 3.1 Grundsatz

Der Bremsvorgang von der Einleitung einer Zwangsbremsung bis zum Stillstand wird in einer Abfolge unterteilt:

- Traktionsabschaltung
- Reaktionszeit
- Abbremsung.

Jeder Vorgang soll getrennt betrachtet werden, weil die Eigenschaften je nach Fahrzeug oder Zuglänge unterschiedlich sein können. Dieser Grundsatz gilt sowohl für einen Einzelfahrzeug wie auch für einen ganzen Zug.

### 3.2 Traktionsabschaltung

Für die Berechnung der Bremskurven wird angenommen, dass das Triebfahrzeug bis zur Traktionsabschaltung maximal beschleunigt. Dies führt dazu, dass die Zwangsbremsung frühzeitig eingeleitet werden muss. Bei einem elektrischen Triebfahrzeug wird die Zugkraft beim Einleiten der Zwangsbremsung z.B. mittels Hauptschalter-Auslösung oder Taktsperrung der Stromrichter unmittelbar unterbrochen. In diesem Fall darf bei der Auslegung der Zugbeeinflussung die Zugkraft-Abbauzeit, also die Zeit bis zum Beginn des Bremskraftaufbaus auf den kleinsten möglichen Wert projiziert werden. Dies gilt für alle projizierten Bremsmodelle.

Bei Fahrzeugen, bei welchen die Traktion nicht unmittelbar unterbrochen werden kann (thermische Fahrzeuge) darf dieser Wert nicht vernachlässigt werden. Der Wert muss in diesem Fall individuell bestimmt werden.

Wenn mehrere einzeln bediente Triebfahrzeuge im Zug verkehren, erfolgt die Traktionsabschaltung nur beim führenden Triebfahrzeug unmittelbar durch die Zugbeeinflussung. Bei den übrigen Triebfahrzeugen erfolgt sie erst, wenn eine Absenkung der Hauptleitung oder ein Anstieg des Bremszylinderdrucks detektiert wird.

Der befahrene Weg während der Traktionsabschaltung wird bei den in diesem Dokument erläuterten Berechnungen nicht berücksichtigt. Er muss fallweise betrachtet werden.

### 3.3 Reaktionszeit

Die Zeitverzögerung beim Einleiten der Bremsung bis zum Erreichen der vollen Bremskraft bildet sich aus der Summe der Aufbauzeit der Bremskraft im Einzelfahrzeug und der Durchschlagzeit bis zum Zugschluss. Während dieser Zeitspanne rechnet das Bremsmodell eine konstante Geschwindigkeit.

Die Bremskraft baut sich mit dem Ansteigen des Bremszylinderdrucks progressiv nach dem Einleiten der Bremsung bis zum vollständigen Füllen des Bremszylinders im letz-

ten Wagen des Zuges. Deshalb bildet die Reaktionszeit die Summe der angerechneten Durchschlag- und Aufbauzeit.

### **3.3.1 Durchschlagzeit im Zug**

Die Durchschlagzeit im Zug ist die Zeit vom Einleiten der Zwangsbremung bis der Hauptleitungsdruck beim letzten Fahrzeug sich so absenkt, dass die Bremsen ansprechen. Das bedeutet eine Absenkung um 0.5 bar gegenüber dem Nenndruck. Bei der Vakuumbremse wird eine Absenkung um 15 cm Hg gegenüber dem Lösedruck berücksichtigt.

Bei Versuchen muss die Hauptleitung mit dem Zwangsbremsventil entleert werden. Die Durchschlagzeit kann gegenüber einer Schnellbremsung massiv länger ausfallen. Dies ist der Fall, wenn der Durchlass des Zwangsbremsventils nicht optimal ist oder, wenn bei älteren Fahrzeugen die Nachspeisung der Hauptleitung nicht unterbrochen wird.

Die Durchschlagzeit kann durch Versuche mit einem Zug der maximalen Länge im Stillstand ermittelt werden.

Die Durchschlagzeit kann mit dem Einsatz von Schnellbrems-Beschleunigungsventilen bzw. bei der Vakuumbremse mittels Schnellbremsventilen minimiert werden.

### **3.3.2 Aufbauzeit im Einzelfahrzeug**

Die Zeit bis der Bremszylinder zu 80 % gefüllt ist, ist repräsentativer als die vollständige Füllzeit des Bremszylinders. Gegen Schluss wird die Lufteinströmung gedrosselt.

Die Aufbauzeit kann durch Versuche im Stillstand mit einem Einzelfahrzeug ermittelt werden.

Bei Versuchen darf die Hauptleitung mit dem geeignetsten Mittel und möglichst rasch entleert werden.

Bei unterschiedlichen Fahrzeuggattungen müssen die Fahrzeuge berücksichtigt werden, welche eine längere Aufbauzeit haben (z.B. Güterwagen).

### **3.3.3 Teilanrechnung**

Da die Bremszylinder progressiv gefüllt werden, kann unter Umständen die Aufbauzeit im Einzelfahrzeug nur teilweise berücksichtigt werden. Eine Verzögerung entsteht bereits, bevor der Bremszylinderdruck den maximalen Wert erreicht hat.

Der Einfluss der Reaktionszeit auf den gesamten Bremsweg ist im unteren Geschwindigkeitsbereich verhältnismässig höher als bei maximaler Geschwindigkeit. Eine Unterschätzung der Reaktionszeit kann dazu führen, dass der Zug bei einer Zwangsbremung ab niedriger Geschwindigkeit einen längeren Bremsweg aufweisen würde als der durch die Zugbeeinflussung errechneten. Der Gefahrenpunkt könnte dadurch überschritten werden. Aus diesem Grund müssen bei Teilanrechnung der Reaktionszeit die berechneten Bremswege durch Zwangsbremsversuche ab tieferen Geschwindigkeiten verifiziert werden.

### 3.4 Abbremsung

Die Berechnung der Bremskurven erfolgt mit der projektierten mittleren Verzögerung  $a$  in  $[m/s^2]$ . Diese mittlere Verzögerung darf nicht mit den Bremsprozenten (Bremsgewichtshundertstel) gleichgesetzt werden, weil im Bremsprozentwert eine Zeit für den Aufbau der Bremswirkung enthalten ist. Nach AB-EBV Artikel 52.2, Ziffer 6.1.1 gilt die Grundlage "100 Bremsgewichtshundertstel entsprechen einer mittleren Verzögerung von  $1 m/s^2$  bei einer Bremsung aus 50 km/h auf horizontaler Strecke, berechnet aus der Ausgangsgeschwindigkeit und dem Bremsweg bis zum Stillstand". Damit wird der gesamte Bremsweg vom Einleiten der Bremsung bis zum Stillstand berücksichtigt. Bei einer Bremszylinderfüllzeit von 2.5 s muss die darauf folgende Verzögerung durchschnittlich  $1.6 m/s^2$  betragen, um den gleichen Bremsweg von 96 m einzuhalten.

Die mittlere Verzögerung wird als konstante Verzögerung bis zum Stillstand angenommen.

Folgende Parameter sind relevant:

$v_0$  = Ausgangsgeschwindigkeit  $[m/s]$

$s_b$  = Bremsweg  $[m]$

$a$  = mittlere Bremsverzögerung  $[m/s^2]$

$st$  = Steigung  $[‰]$  (bei Gefälle ist für den Parameter  $st$  ein negativer Wert einzusetzen)

Es gilt die Formel:

$$a = \frac{v_0^2}{2s_b} + \frac{9.81 \cdot st}{1000}$$

#### 3.4.1 Einfluss der Neigung

Bei der Berücksichtigung der Neigung wird in den Berechnungen eine Vereinfachung angenommen:

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha$$

$\alpha$  = Neigungswinkel gegenüber der Horizontalen  $[^\circ]$

Diese Annahme ermöglicht eine wesentliche Vereinfachung der Berechnungen. Bei den Adhäsionsstrecken in Frage kommenden Neigungen bis 80 ‰ bzw. bis zu einem Neigungswinkel  $\alpha$  von  $4.57^\circ$  führt diese Vereinfachung zu einer Abweichung von 0.3 % der errechneten Werte. Diese Abweichung ist auf allen Adhäsionsstrecken vernachlässigbar.

Mit dieser Vereinfachung wird aus der Erdbeschleunigung und der Tangente des Neigungswinkels eine Verzögerung gerechnet.

$$a_n = \frac{9.81 \cdot st}{1000}$$

$a_n$  = mittlere Bremsverzögerung [ $\text{m/s}^2$ ]

$st$  = Steigung [%] (bei Gefälle ist für den Parameter  $st$  ein negativer Wert einzusetzen)

In diesem Zusammenhang ist auf die Zeichensetzung zu achten. Eine Steigung verursacht eine Abbremsung des Zuges, das heisst eine negative Beschleunigung. Ein Gefälle wird als negative Neigung erfasst. Es verursacht eine Beschleunigung des Zuges, die der Bremsung entgegenwirkt.

Ein Zug, der in der Ebene mit einer mittleren Verzögerung von  $0.8 \text{ m/s}^2$  bremst,

- wird in einer Steigung von 50 ‰ mit ca.  $1.3 \text{ m/s}^2$  verzögert
- wird in einem Gefälle von 50 ‰ mit nur ca.  $0.3 \text{ m/s}^2$  verzögert. Der Bremsweg wird gegenüber der Ebene mehr als verdoppelt.

Der Einfluss einer stärkeren Neigung auf dem Bremsweg ist massiv. Es lässt sich aber auf einfache Weise ermitteln.

### 3.5 Gesamter Bremsweg

Der gesamte Bremsweg bildet sich aus der Summe des Wegs der Reaktionszeit und der Abbremsung:

$$s_b = v_0 \cdot t_v + \frac{v_0^2}{2 \cdot \left(a + \frac{9.81 \cdot st}{1000}\right)}$$

$t_v$  = Bremskraftentwicklungszeit, Summe der Durschlagzeit im Zug und der Aufbauzeit in den Fahrzeugen des Zugverbands [s]

$v_0$  = Ausgangsgeschwindigkeit [m/s]

$s_b$  = Bremsweg [m]

$a$  = mittlere Bremsverzögerung [ $\text{m/s}^2$ ]

$st$  = Steigung [%] (bei Gefälle ist für den Parameter ein negativer Wert einzusetzen).

## 4 Verzögerung in Abhängigkeit mit der Bremsreihe

### 4.1 Grundsatz

Das Bremsverhältnis definiert die Wirksamkeit der automatischen Bremse eines Fahrzeuges oder eines ganzen Zuges. Mit der fahrdienstlichen Bremsrechnung wird für jeden unterschiedlich gebildeten Zug ein Bremsverhältnis errechnet. Eine Bremsreihe wird dem Zug zugeordnet.

Die in den Streckentabellen bekannt gegebene Höchstgeschwindigkeit wird auf Grund der Bremsreihe, der vorhandenen Vorsignalentfernung und der Neigung der Strecke festgelegt.

Die Bremsreihe gilt auch als Ausgangsgrösse, um die Verzögerung eines beliebig zusammengestellten Zugs zu ermitteln.

## 4.2 Methodik

Die Bremswege nach Bremsbewertungskennlinien AB-EBV, AB 52.2 Blatt 9 berücksichtigen den Bremsweg eines einzelnen Fahrzeugs inklusiv Aufbauzeit bei Neigung 0 ‰. Ab diesen Bremsbewertungskennlinien kann für jedes Bremsverhältnis eine äquivalente mittlere Verzögerung zugeordnet werden. Der Bremsweg nach Bremsbewertungskennlinien beinhaltet die Aufbauzeit der Bremskraft im Einzelfahrzeug. Dieser Parameter muss bei der Berechnung der Verzögerung berücksichtigt werden. Die Berechnung ist grundsätzlich ab der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs auf dem Streckennetz vorzunehmen.

$$a = \frac{v_0^2}{2(s - v_0 \times t_0)}$$

$a$  mittlere Verzögerung [m/s<sup>2</sup>]

$v_0$  Ausgangsgeschwindigkeit [m/s]

$t_0$  Aufbauzeit [s]

$s$  Bremsweg [m]

Wenn unterschiedliche Fahrzeuge im Zug eingesetzt werden, wird die Berechnung auf die Bremsreihe bezogen. Die Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  wird mit der Höchstgeschwindigkeit der Bremsreihe auf dem Streckennetz festgelegt. Für die Aufbauzeit  $t_0$  muss der Wert des ganzen Zuges bei der ungünstigsten Zugbildung berücksichtigt werden.

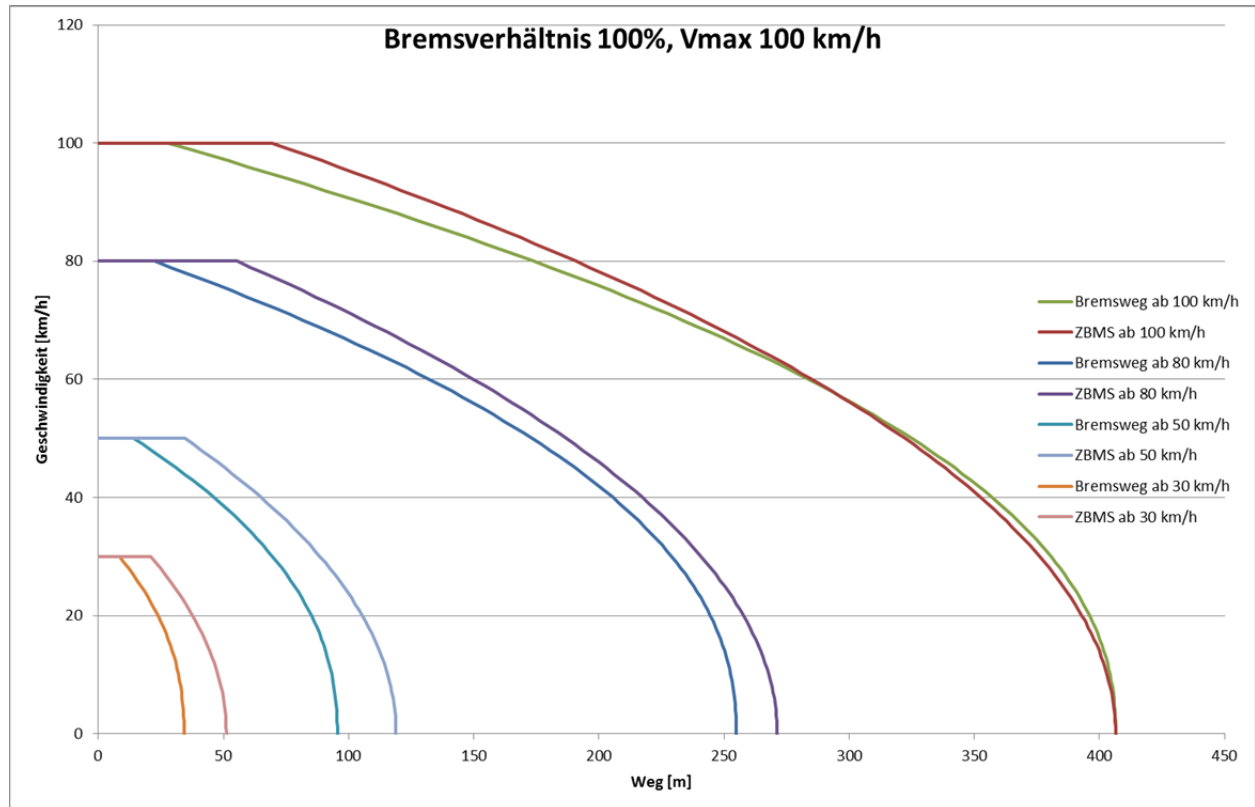
Bei einer Bremsung ab tieferer Geschwindigkeit als die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs oder der Bremsreihe wird mit diesem Verfahren immer einen längeren Bremsweg als der Bremsweg ab gleicher Geschwindigkeit gemäss Bremsbewertungskennlinien berechnet. Demzufolge wird die Zwangsbremse vor einem Gefahrenpunkt immer früher als der minimale Bremsweg gemäss Bremsbewertungskennlinien eingeleitet. Der rechtzeitige Halt vor dem Gefahrenpunkt wird ab jeder Ausgangsgeschwindigkeit gewährleistet.

## 4.3 Beispiele

Der Bremsweg gemäss Bremsbewertungskennlinien und die entsprechende Berechnung durch die Zugbeeinflussung wurden für verschiedene Bremsverhältnisse und Höchstgeschwindigkeiten gezeichnet. Die Reaktionszeit wird einheitlich mit 2.5 s berechnet.

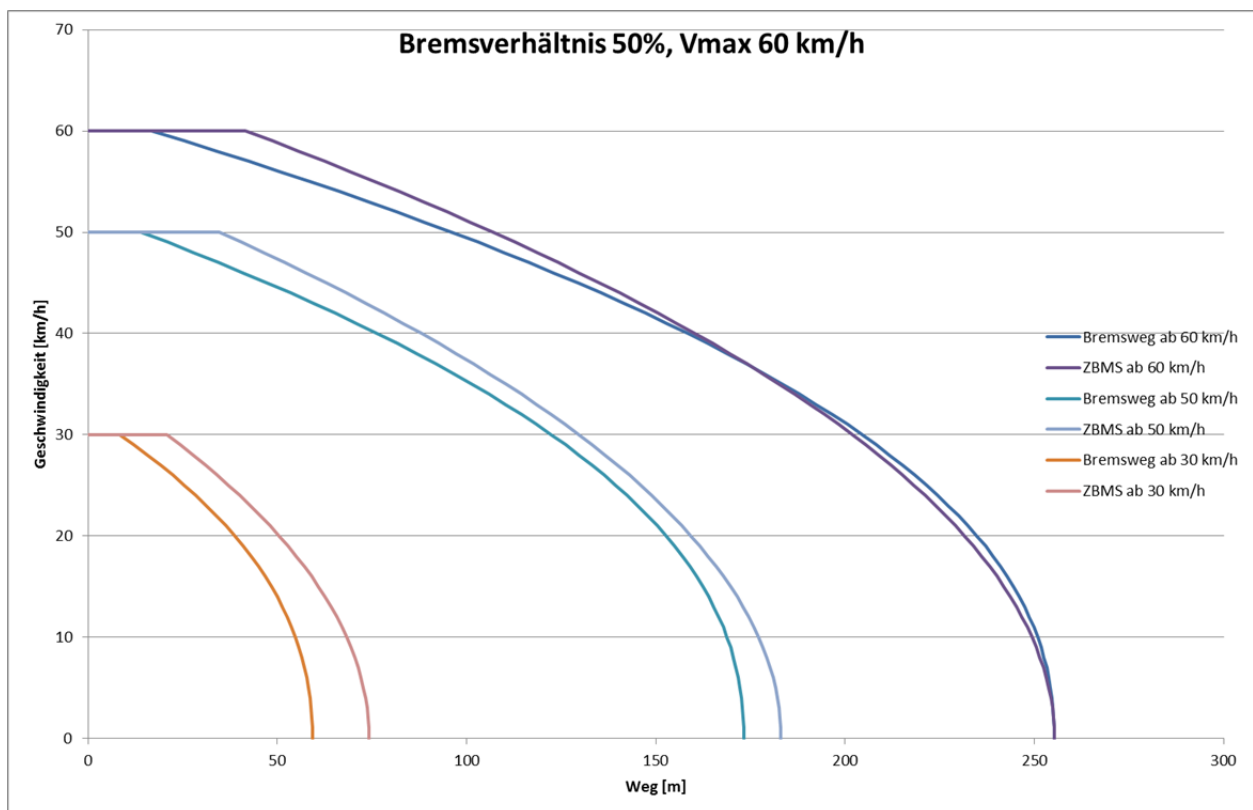
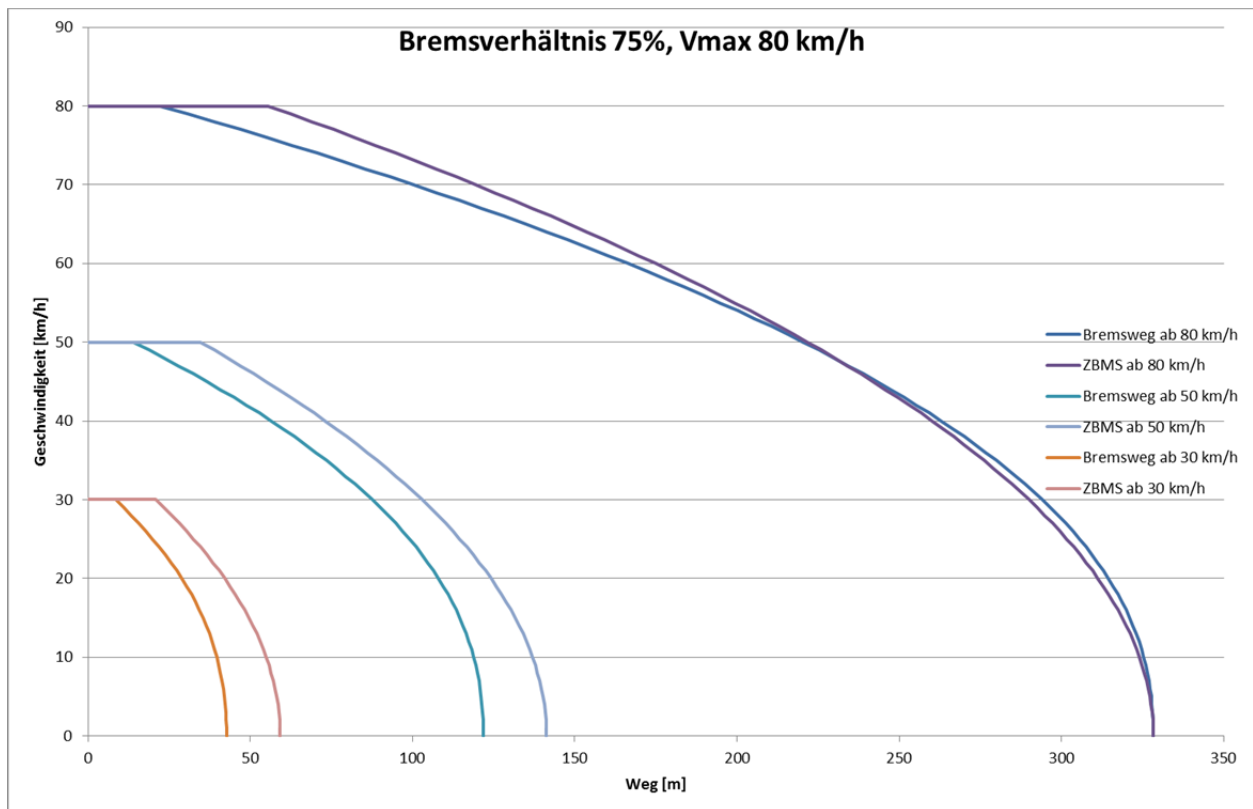
Die Kurven "Bremsweg" zeigen den Bremsweg, der ab der Bremsbewertungskennlinien AB-EBV, AB 52.2 Blatt 9 ermittelt wird.

Die Kurven "ZBMS" zeigen den Bremsweg, der mittels Formel aus Abschnitt 3.5 dieses Dokuments berechnet wird.



Der Bremsweg gemäss Bremsbewertungskennlinien ist aus dem dynamischen Verhalten eines mit Graugusssohlen (GG P10) bestückten Wagens abgeleitet. Wegen des starken Anstiegs des Reibungskoeffizienten von Graugusssohlen gegen den Stillstand verlaufen beide Kurven nicht parallel. Für eine Zielgeschwindigkeit im Bereich 10-50 km/h wird ein leicht kürzerer Weg als gemäss Bremsbewertungskennlinien berechnet. Eine Zwangsbremssung ab Höchstgeschwindigkeit mit Zielgeschwindigkeit 10-50 km/h dürfte zu einer leichten Geschwindigkeitsüberschreitung von bis zu ca. 5 km/h bei der Geschwindigkeitsschwelle führen. Diese Überschreitung muss nicht als gefährdend betrachtet werden und würde nur bei mit Graugusssohlen gebremsten Zügen auftreten.

Die Bremswege gemäss Bremsbewertungskennlinien AB-EBV, AB 52.2 Blatt 9 werden durch die Fahrzeuge eingehalten, weil das Bremsverhältnis eines Fahrzeugs aufgrund dieser Kennlinien bestimmt wird. Diese Bremswege sind immer kürzer als die mittels Formel aus Abschnitt 3.5 dieses Dokuments berechneten Bremswege. Damit ist sichergestellt, dass nach einer Überschreitung der Überwachungskurve, die durch die Zugbeeinflussung eingeleitete Zwangsbremssung den sicheren Halt vor dem projektierten Zielpunkt gewährleistet.



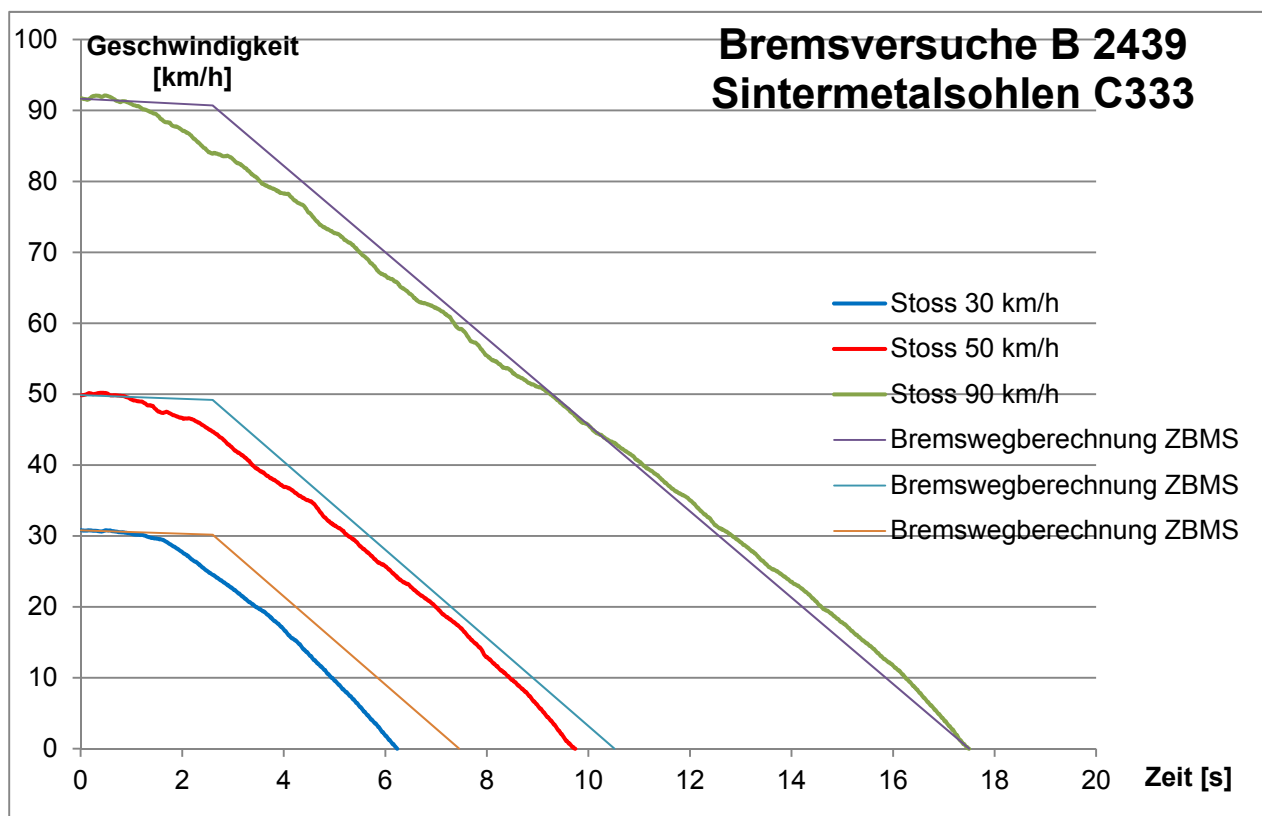
## 5 Ergebnisse von Bremsversuche

### 5.1 Bremsversuche mit Einzelfahrzeugen

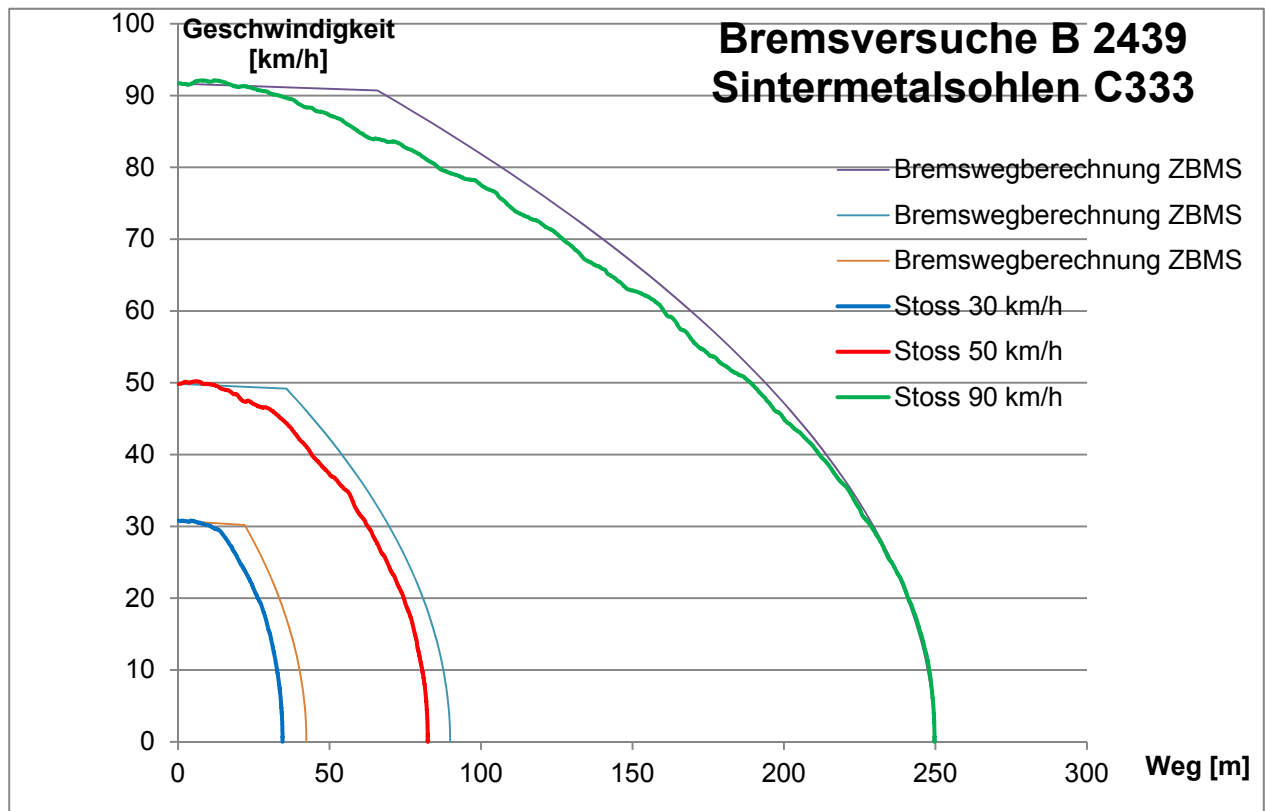
Dargestellt sind die Ergebnisse von Abstossversuchen mit einem Einzelfahrzeug. Es wurden Abstossversuche mit Ausgangsgeschwindigkeit 30, 50 und 90 km/h durchgeführt. Die Diagramme zeigen den Geschwindigkeitsverlauf ab Einleitung der Vollbremsung. Zur Übersicht wird nur eine Bremsung pro Ausgangsgeschwindigkeit dargestellt. Tatsächlich wurden die Versuche je 4 Mal durchgeführt und haben eine optimale Reproduzierbarkeit aufgezeigt. Der Geschwindigkeitsverlauf wurde ab Einleitung der Bremsung mittels Radar gemessen. Die Einleitung der Bremsung erfolgte manuell. Ein Kontakt am Bremsventil löste die Geschwindigkeitsmessung simultan aus. Die Versuche wurden mit Reisezugwagen aus den bestehenden Serien durchgeführt:

- B 2439 (EW II) ausgerüstet mit einer vakuumgesteuerten Druckluftbremse
- D 4209, Gepäckwagen ausgerüstet mit einer reinen Vakuumbremse

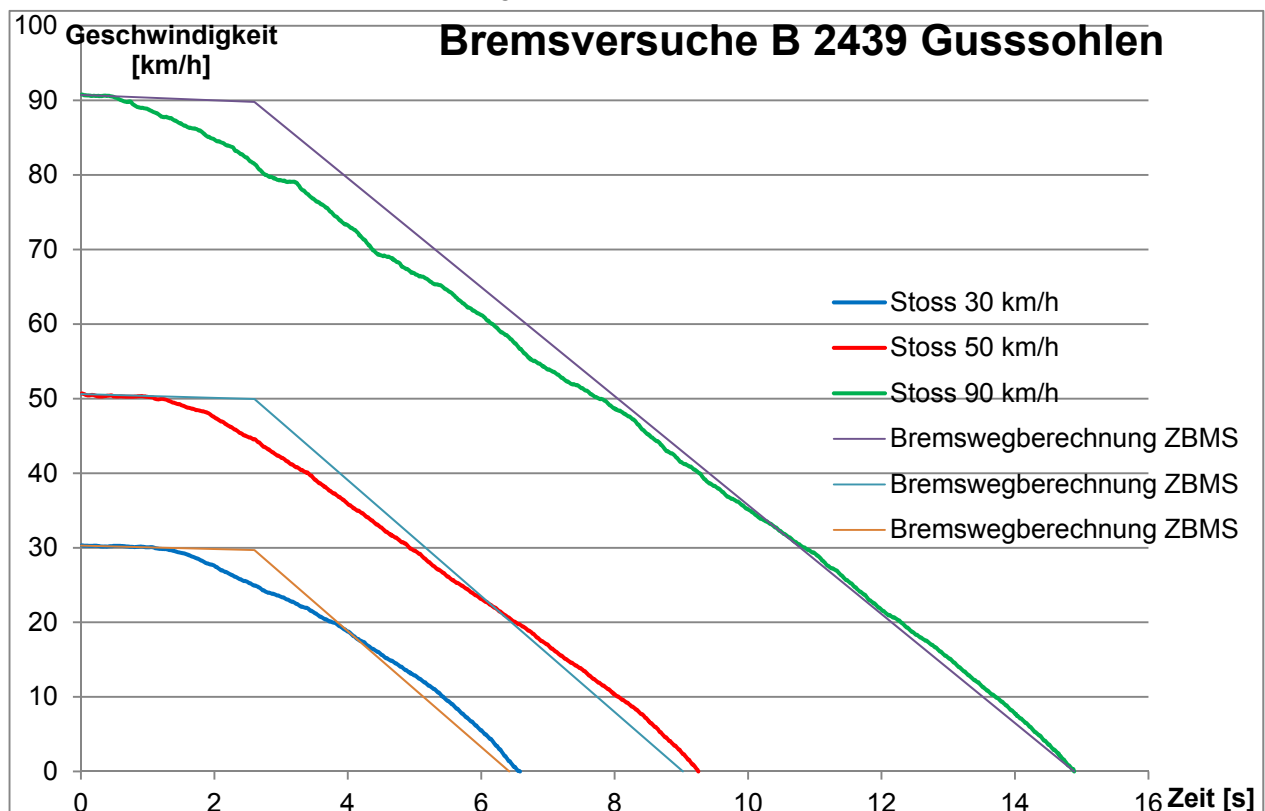
Zusätzlich ist die entsprechend gerechnete Bremskurve eingezeichnet, wie die Zugbeeinflussung sie berechnen würde. Deren Verlauf zeigt zuerst eine leicht abfallende Gerade. Sie entspricht dem Lauf mit gelöster Bremse. Die leichte Verzögerung entspricht dem Roll- und Luftwiderstand sowie der Steigung 5 ‰ am Ort der Versuche. Die Bremszylinder-Füllzeit zu 80% des geprüften Wagens beträgt 2.6 s. Nach Ablauf der Bremszylinder-Füllzeit wird die Bremsung mit konstanter Verzögerung bis zum Stillstand eingezeichnet. Gerechnet wurde aufgrund des Versuchs mit einer Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h und einer Verzögerung von  $1.73 \text{ m/s}^2$ . Dieselben Parameter ergeben für die Versuche ab Ausgangsgeschwindigkeit 30 und 50 km/h einen leicht längeren Bremsweg als die Messung.

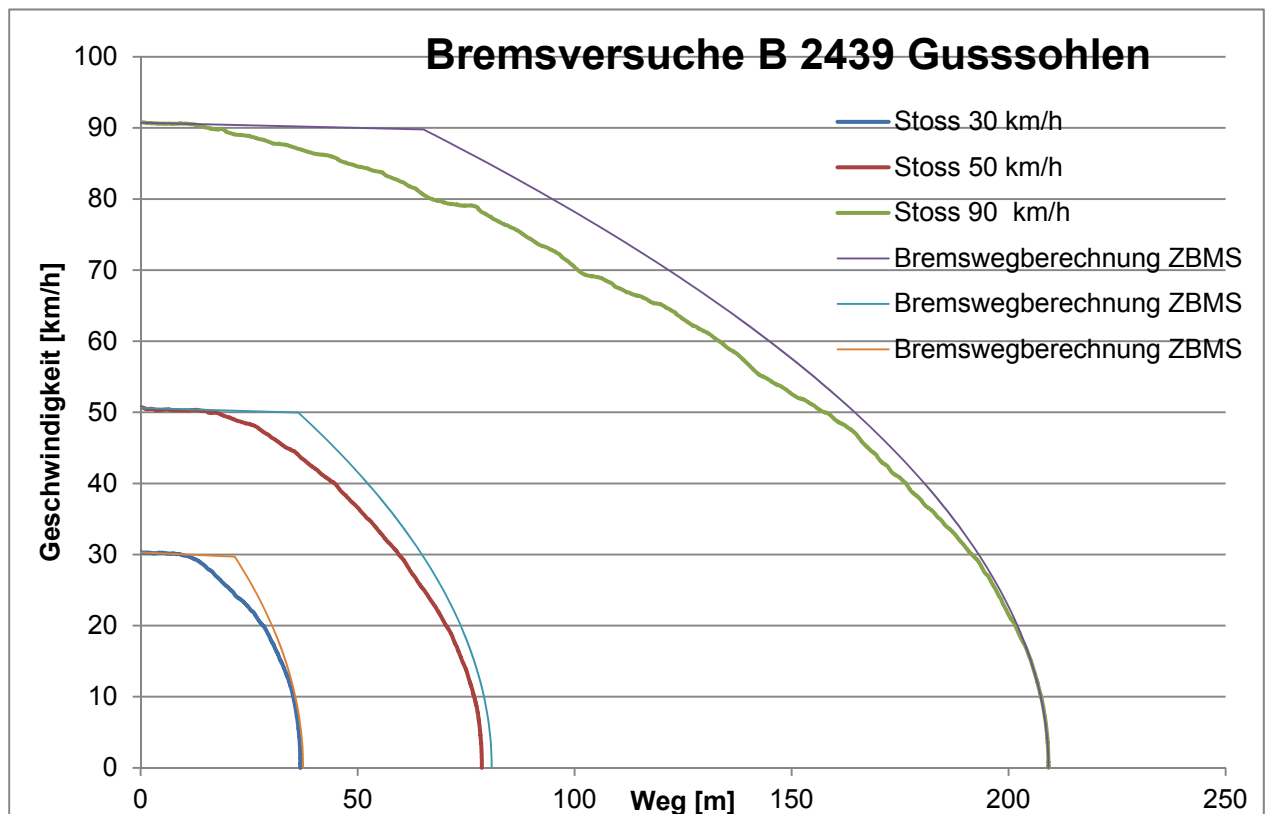




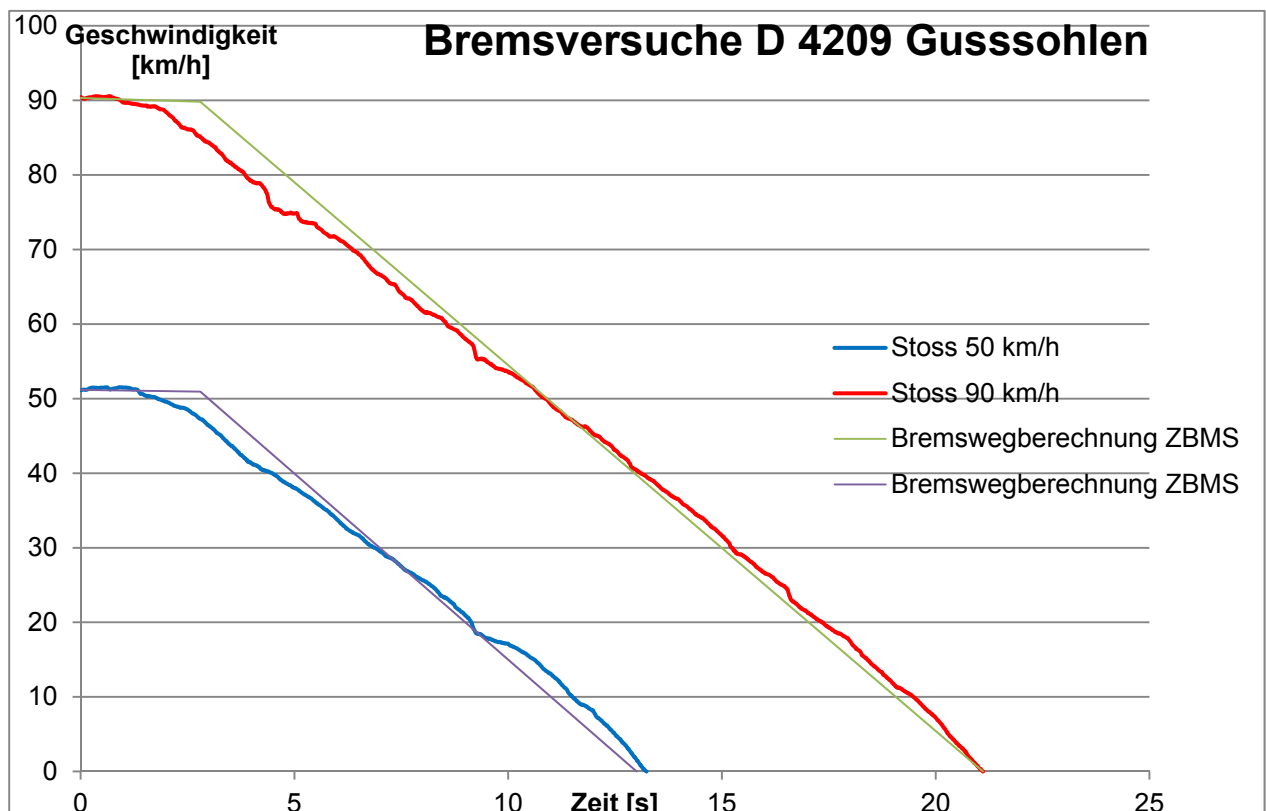


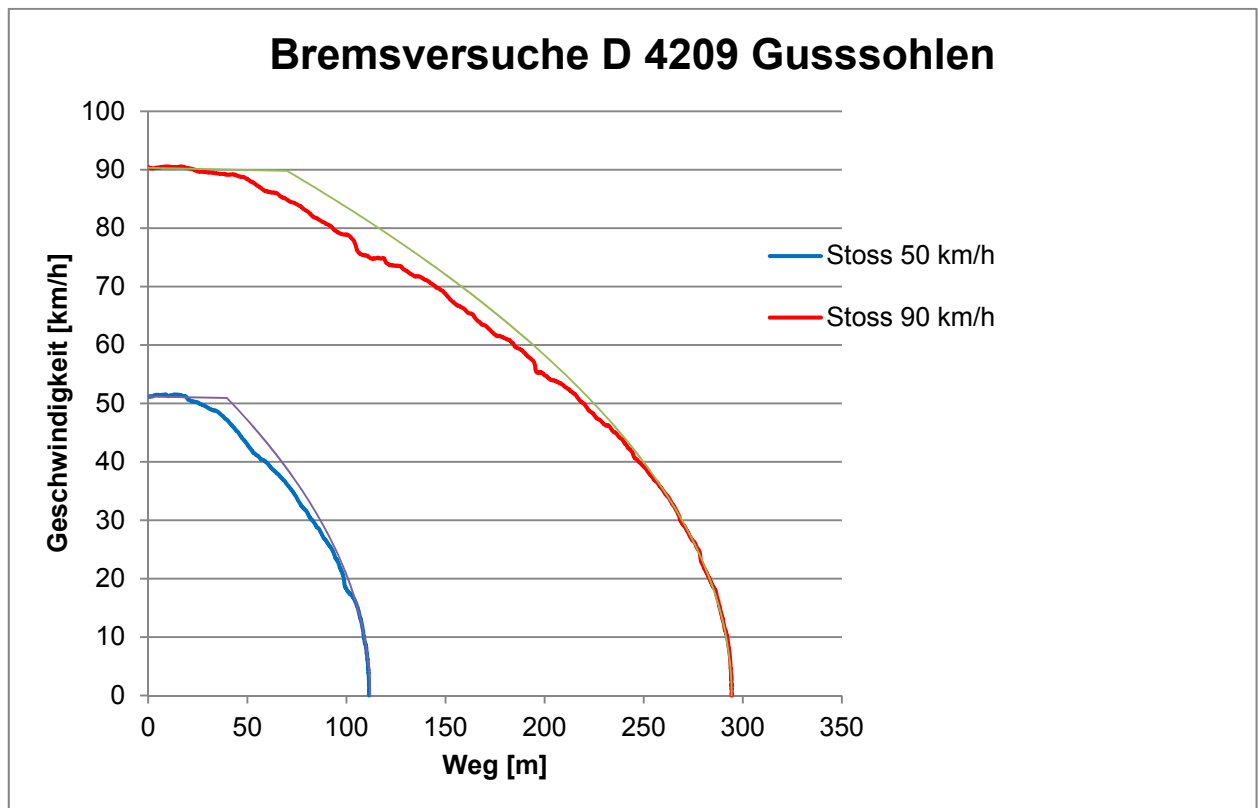
Das gleiche Fahrzeug wurde mit Samson-Gusssohlen (GG P30) bestückt. Die Bremszylinder-Füllzeit zu 80% beträgt 2.6 s. Gerechnet wurde aufgrund des Versuches mit einer Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h und einer Verzögerung von  $1.73 \text{ m/s}^2$ . Mit diesen Parametern ergeben die Versuche ab 30 und 50 km/h sowie die Berechnung beinahe identische Bremswege.





Der mit einer reinen Vakuumbremse und Samson-Gusssohlen (GG P30) ausgerüstete Wagen D 4209 wurde mit einer Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h sowie mit 50 km/h abgestossen. Die errechneten Parameter betragen eine Reaktionszeit von 2.8 s und eine Verzögerung von  $1.39 \text{ m/s}^2$ . Die Versuche wurden in der Ebene durchgeführt.





Diese Versuche widerspiegeln die aufgrund von Berechnungen erstellten Beispiele im Abschnitt 4.2. Abweichungen im Kurvenverlauf sind feststellbar:

- Die ausgeführten Bremsungen ab tieferer Ausgangsgeschwindigkeit ergeben sehr ähnliche Bremswege wie die berechneten Bremskurven.
- Im Kapitel 4.2 ergibt die Anwendung der Bremsbewertungskennlinien AB-EBV, AB 52.2 Blatt 9 bei tieferer Ausgangsgeschwindigkeit kürzere Bremswege als die berechneten Bremskurven.

Diese Abweichung ist begründet, weil die Bremsbewertungskennlinien auf einer sehr kurzen Bremszylinder-Füllzeit bzw. auf einer Teilanrechnung der Bremszylinder-Füllzeit abgestützt sind. In den Bremsbewertungskennlinien gemäss AB-EBV, AB 52.2 Blatt 9 werden unterschiedliche Bremszylinder-Füllzeiten nicht berücksichtigt.

Die Diagramme der gemessenen Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit ab Auslösung der Zwangsbremse zeigen alle während der Abbremsung annähernd eine Gerade. Eine gerade Linie entsteht bei konstanter Verzögerung. Nur am Schluss der Bremsung unter ca. 15 km/h werden die Aufzeichnungen steiler. Erst gegen den Halt erhöht sich die Verzögerung mit dem Reibungskoeffizient des eingesetzten Bremssohlen-Werkstoffes. Die gemessene annähernd konstante Verzögerung und die Berechnungsmethode widerspiegeln sich. Die Anwendbarkeit der Berechnungsmethode wird mit dem ähnlichen Verlauf der gemessenen und der berechneten Grafiken aufgezeigt.

## 5.2 Bremsversuche mit ganzen Zügen

Bremsversuche wurden mit ganzen Zügen unterschiedlicher Länge durchgeführt. Alle Zwangsbremssungen wurden in der Annäherung zum Ausfahrtsignal B12 in Schiers eingeleitet. Die Fahrt in Richtung des *Halt* zeigenden Signals erfolgte mit konstanter Geschwindigkeit und gelöster Luftbremse, bis die Zwangsbremssung durch die Zugbeeinflussung eingeleitet wurde. Der gesamte Abschnitt zwischen Ausfahrtsignal B\*12 und Ausfahrtsignal B12 liegt im Gefälle von 15 ‰ und ist kurvenfrei. Entsprechend wird die Verzögerung des Zuges gegenüber der Ebene vermindert und der Bremsweg verlängert. Es wurden Bremsversuche mit unterschiedlicher Ausgangsgeschwindigkeit durchgeführt. Die Diagramme zeigen den Geschwindigkeitsverlauf ab Einleitung der Zwangsbremssung bis zum Halt. Zur besseren Übersicht wird nur eine Bremsung pro Ausgangsgeschwindigkeit dargestellt. Tatsächlich wurden die Versuche mehrmals wiederholt und haben eine optimale Reproduzierbarkeit aufgezeigt. Der Geschwindigkeitsverlauf wurde mittels Radar gemessen. In der Steuerung des Triebfahrzeugs wurde das Signal zur Zwangsbremssung abgegriffen und als Trigger zur Geschwindigkeitsmessung verwendet.

Der gemessene Geschwindigkeitsverlauf des Zuges sowie der theoretische Geschwindigkeitsverlauf des Bremsmodells werden dargestellt.

Das dem Bremsverhältnis von 100 % entsprechende Bremsmodell wurde für eine maximale Zuglänge von 200 m ausgelegt. Die Parameter sind:

- Reaktionszeit 2.0 s
- Verzögerung während der Abbremsung:  $0.98 \text{ m/s}^2$

Zur Prüfung des Bremsmodells wurde den Versuchszug wie folgt zusammengesetzt:

- Lokomotive Ge 4/4<sup>II</sup>
- Anhängelast 40 Achsen Reisezugwagen / 169 t.
- Zuglänge 185 m
- Bremsverhältnis des Zuges nach Bremsrechnung 100 %

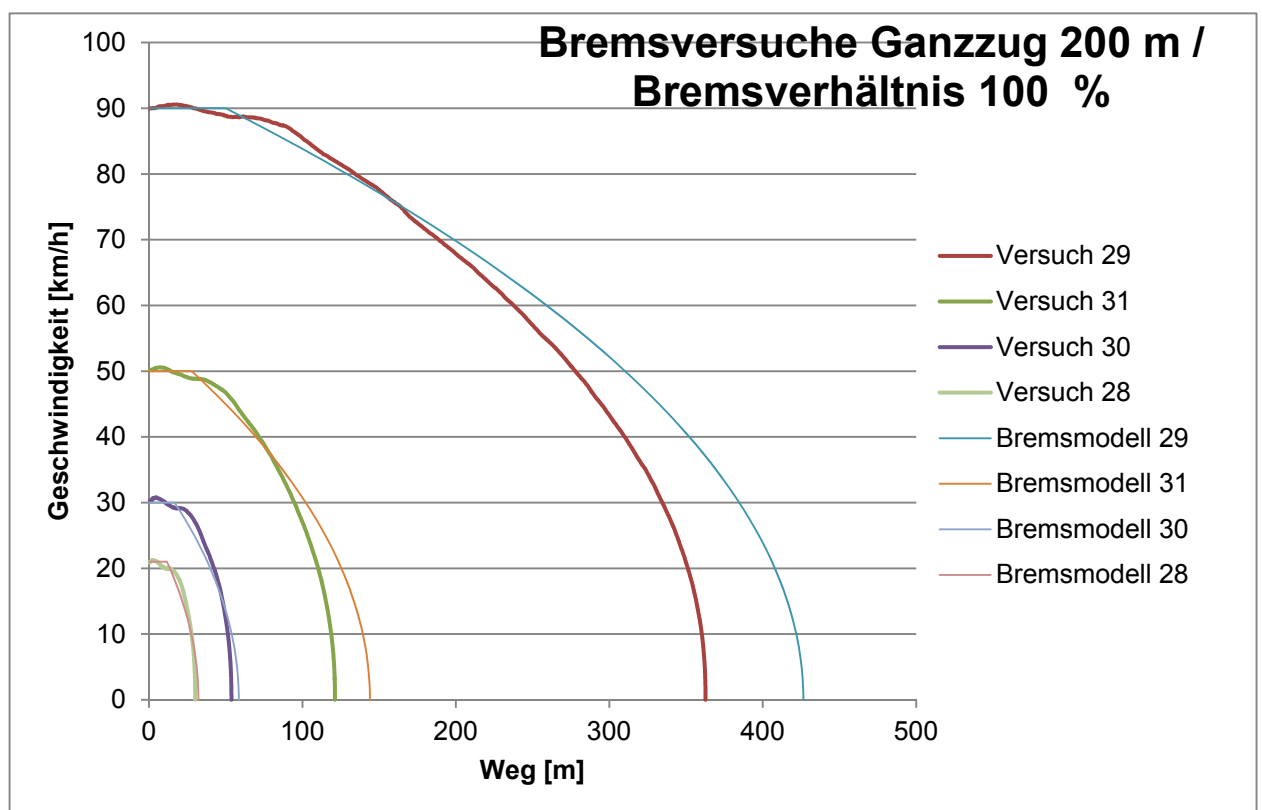
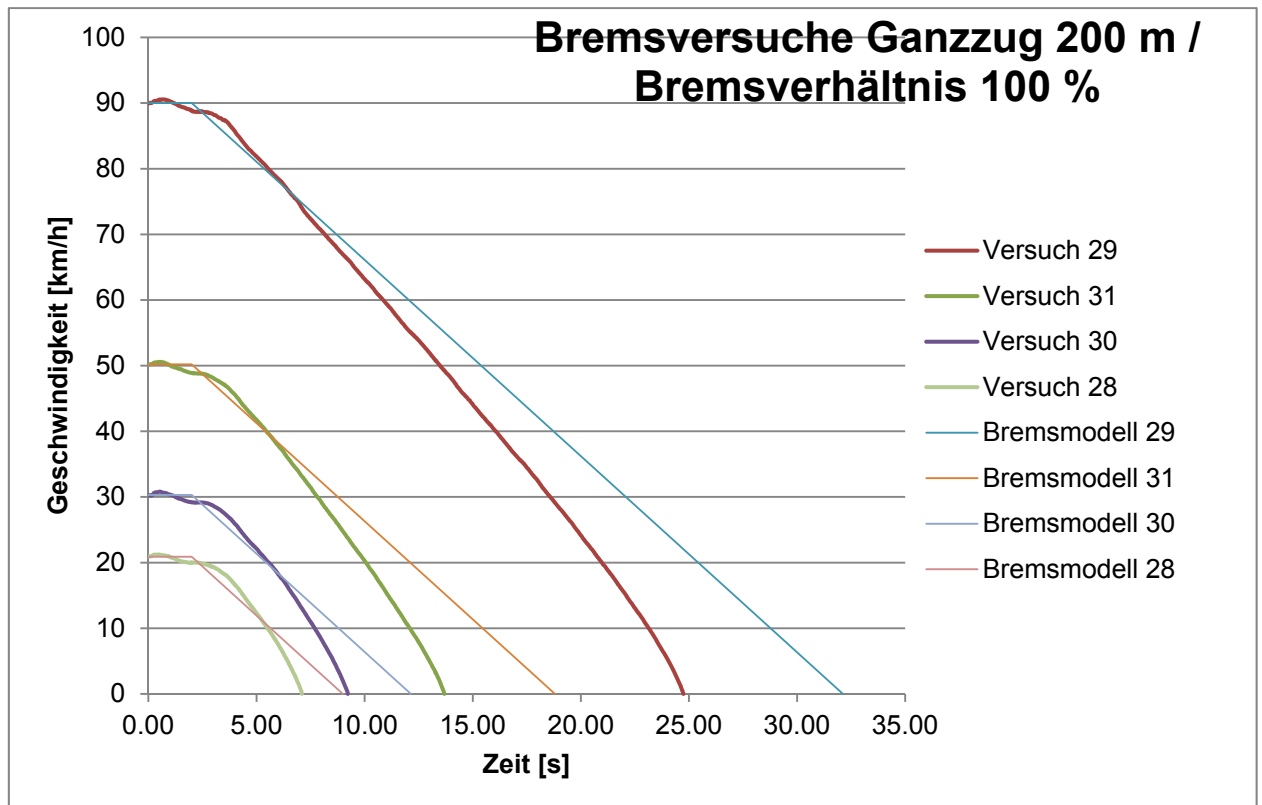
Das dem Bremsverhältnis von 75 % entsprechende Bremsmodell wurde für eine maximale Zuglänge von 350 m ausgelegt. Die Parameter sind:

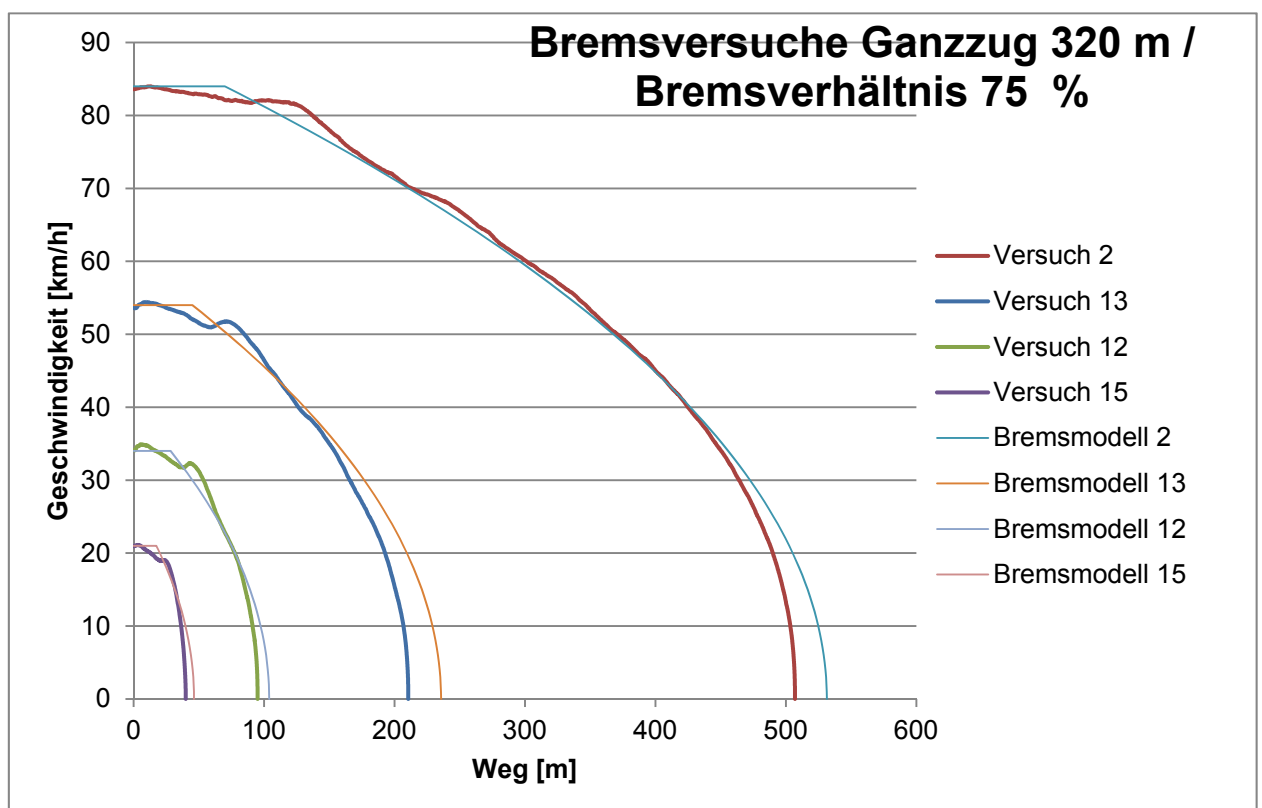
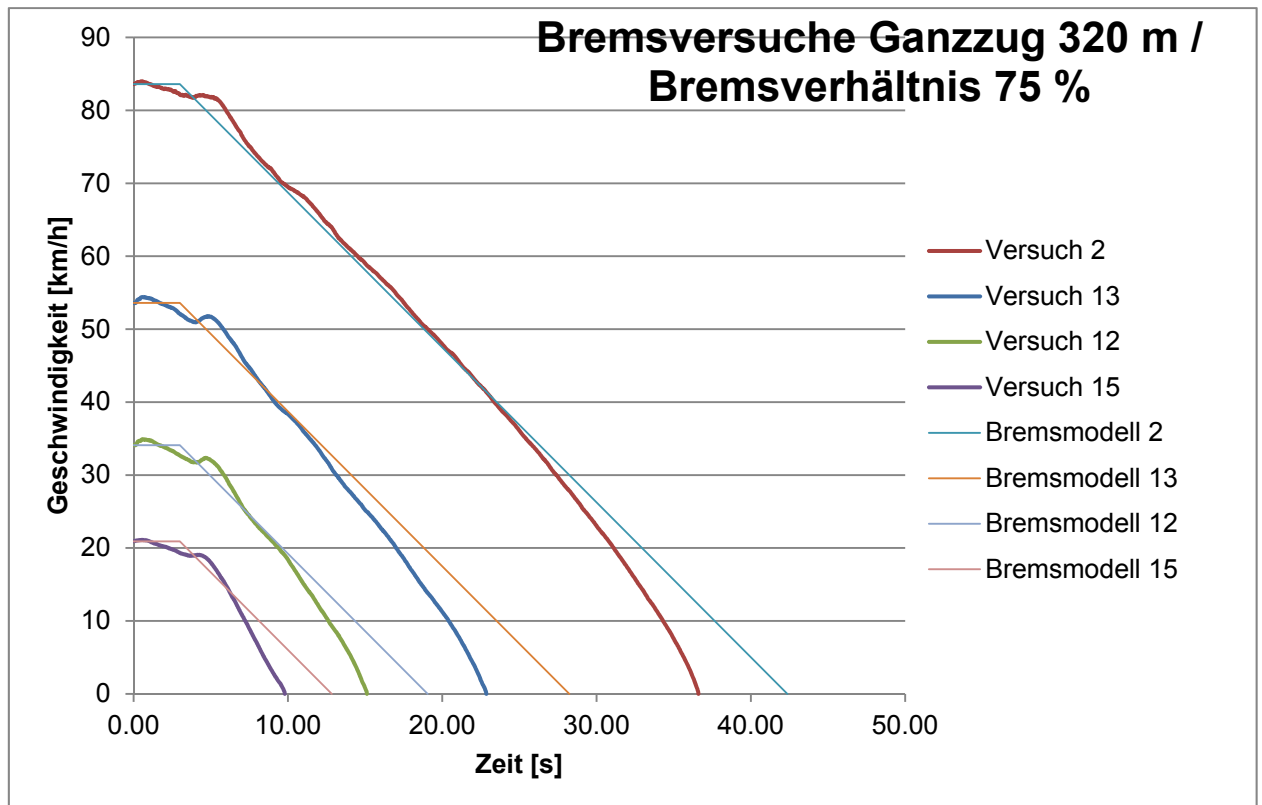
- Reaktionszeit 3.0 s
- Verzögerung während der Abbremsung:  $0.74 \text{ m/s}^2$

Zur Prüfung des Bremsmodells wurde den Versuchszug wie folgt zusammengesetzt:

- Lokomotive Ge 4/4<sup>II</sup>
- Anhängelast 76 Achsen Reisezug- und Güterwagen / 363 t.
- Zuglänge 319 m
- Bremsverhältnis des Zuges nach Bremsrechnung 73 %

Die grafischen Darstellungen zeigen den Verlauf ausgewählter repräsentativen Bremsungen in Abhängigkeit mit der Zeit sowie mit dem Weg ab Einleiten der Zwangsbremssung.





Die Bremskraft wird mit der Füllung der Bremszylinder progressiv aufgebaut. Daher ist der Knick des Geschwindigkeitsverlaufs zwischen Reaktionszeit und vollumfänglicher Bremsung progressiv.

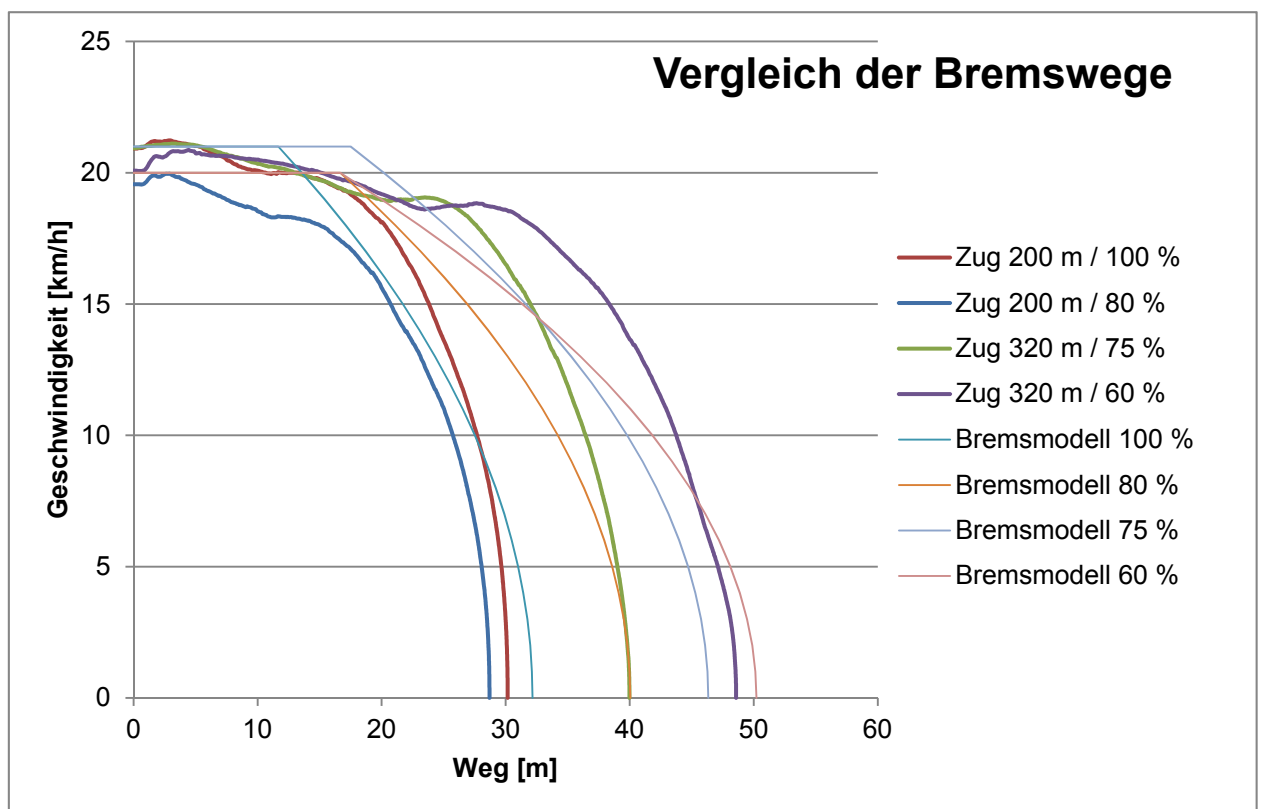
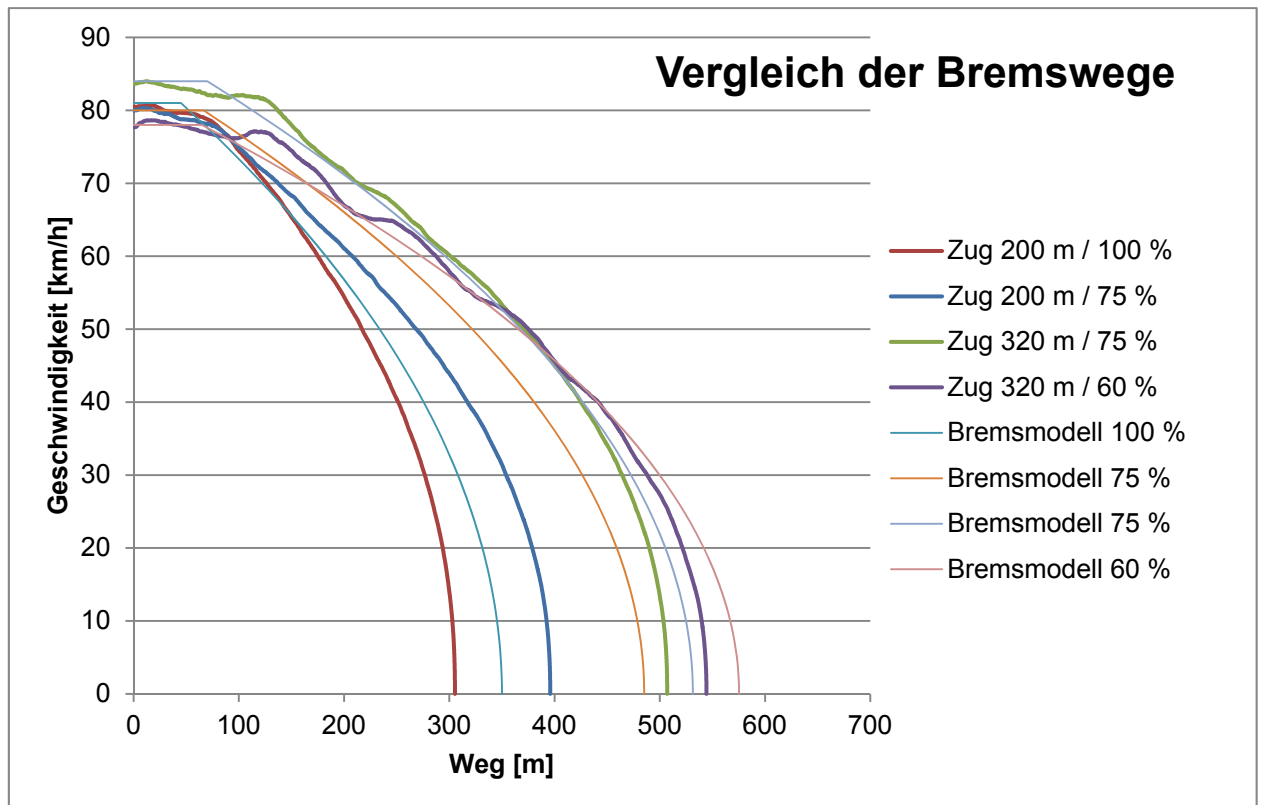
Sichtbar ist auch eine leichte Erhöhung der Geschwindigkeit während der ersten 0.5 Sekunden nach dem Einleiten der Zwangsbremung. Nach max. 1.5 Sekunden entspricht die Geschwindigkeit wieder dem Ausgangswert. In der Zeitspanne zwischen Ausfall der elektrischen Bremse und Aufbau des Bremszylinderdrucks im Triebfahrzeug, beschleunigt der Zug im Gefälle.

Die Reaktionszeit des Bremsmodells wurde gegenüber der effektiven Durchschlagzeit im Zug und Aufbauzeit in den Fahrzeugen minimiert. Bei allen Versuchen ab tieferer Ausgangsgeschwindigkeit (30 km/h und 20 km/h) wurden die Bremswege nach Bremsmodell eingehalten oder leicht unterschritten. Damit wurde nachgewiesen, dass die projektierte Reaktionszeit mit den massgebenden Zugformationen umsetzbar ist.

Der Geschwindigkeitsverlauf beim längeren Zug zeigt 5 Sekunden nach dem Einleiten der Zwangsbremung einen Buckel auf. Dieser Verlauf wurde durch die dynamischen Reaktionen im langen Zug verursacht.

Die Versuche wurden mit vakuumgebremsten Zügen durchgeführt. Bei der Vakuumbremse wird die Durchschlagzeit bis zum Zugschluss bei einer Schnellbremsung auf einem Minimum gehalten, weil sämtliche Fahrzeuge mit Schnellbremsventilen ausgerüstet sind. Hingegen sind die Bremszylinder-Füllzeiten verhältnismässig lang.

In den untenstehenden Grafiken wird der Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit mit dem Weg bei Zwangsbremungen mit unterschiedlichen Zugbildungen abgebildet. Das Bremsverhältnis des Zuges wurde durch gezieltes Ausschalten der Bremse einzelner Fahrzeuge ohne Änderung der Zugzusammensetzung angepasst. Beim Vergleich muss darauf geachtet werden, dass die Ausgangsgeschwindigkeit der einzelnen versuche leicht abweicht.





## 6 Schlussfolgerungen

Die bei Risikoanalysen eingesetzten Berechnungsalgorithmen stützen sich auf folgende Grundsätze:

- Rollen mit konstanter Geschwindigkeit nach Einleiten der Zwangsbremmung während der Bremsaufbauzeit.
- Anschliessend Bremsung mit konstanter Verzögerung bis zum Stillstand.

Die bei Zugbeeinflussungssystemen eingesetzten Berechnungsalgorithmen stützen sich auf dem gleichen Grundsatz. Dabei werden zusätzliche Einflussfaktoren wie zum Beispiel die örtliche Neigung genauer berücksichtigt. Die genaue Verifizierung des Berechnungsverfahrens eines bestimmten Systems sprengt aber den Rahmen dieses Berichts.

Dies stellt eine vereinfachte Berechnungsmethode dar: Beim effektiven Verhalten der Fahrzeuge:

- wird die effektive Bremskraft progressiv mit dem Anstieg des Bremszylinderdruck aufgebaut
- ist die Bremskraft nach dem Aufbau des Bremszylinderdrucks konstant. Die Verzögerung hingegen verändert sich, weil sich der Reibungskoeffizient Bremssohle-Rad bzw. Bremsbelag-Bremsscheibe mit der momentanen Geschwindigkeit ändert
- ist der Verlauf des Reibungskoeffizienten im Zusammenhang mit der momentanen Geschwindigkeit je nach eingesetztem Material unterschiedlich
- bildet eine allfällige verzögerte Traktionsabschaltung bei den in der Schweiz herrschenden Verhältnissen eher die Ausnahme. Daher wird sie nicht berücksichtigt. Sie muss fallweise betrachtet werden.

Diese Berechnungsmethode weicht gegenüber der Bremsbewertungskennlinien der AB-EBV, AB 52.2, Blatt 9, weil:

- Die Bremsbewertungskennlinien auf das Verhalten der nicht mehr sehr verbreiteten Graugussbremssohlen abgestimmt sind
- In den Bremsbewertungskennlinien unterschiedliche Bremszylinderfüllzeiten nicht berücksichtigt werden.

Auch aus diesen Gründen weichen die Bremsbewertungskennlinien der AB-EBV, AB 52.2, Blatt 9 vom tatsächlichen Verhalten der unterschiedlichen Fahrzeugbauarten ab.

Diese Berechnungsmethode ermöglicht sowohl das Verhalten jeder Fahrzeugbauart als auch die Grundlagen der AB-EBV darzustellen. Entscheidend ist eine korrekte Berücksichtigung der fahrzeugspezifischen Parameter, damit sich die Abweichungen aufgrund der Vereinfachung des Modells auf die sichere Seite auswirken.

Die Berechnungsmethode mit dem Grundsatz "Rollen während der Bremskraftaufbauzeit – Abbremsung mit konstanter Verzögerung" ist für Zugbeeinflussungs-Systeme und Risikoanalysen geeignet.