

Anhalteweg-Berechnungen für mit K-Bremssohlen gebremste Güterzüge

Anhaltewege der Güterzüge mit Klotzbremsen sind von dem verwendeten Reibmaterial abhängig. Wird dieses von Grauguß durch das Reibmaterial K-Bremssohle substituiert, sind die Anhaltewege mittels Schnellbremsung bei definierten Bremsausgangsgeschwindigkeiten neu zu ermitteln.

Kostengründe sprechen dabei für einen geringen experimentellen Aufwand. Deshalb werden Methoden der mathematischen Statistik genutzt, um aus einem geringen Stichprobenumfang eine allgemeingültige Aussage zum Anhalteweg unter Beachtung der Betriebsparameter zu erhalten. Die mehrfache lineare Regression, die Methode der kleinsten Fehlerquadrate und Eignungstests der Statistik werden dazu angewendet. Das Ergebnis der Untersuchungen ist eine einfache, leicht handbare Gleichung zur Berechnung des Anhalteweges. Sie gilt für den versuchsmäßig abgesteckten Bereich der Betriebsparameter.

1. EINFÜHRUNG

Im Rahmen der Lärmsanierung bei den europäischen Bahnen wird u. a. in der Schweiz ein Großteil der Güterwagen von Grauguss-Bremssohlen (GG) auf Verbundstoff-Bremssohlen (K-Sohlen) umgerüstet.

Der Vergleich der momentanen Reibwertverläufe beider Reibpaarungen zeigt jedoch, dass dieser nicht identisch ist. Der Reibwert-

anstieg der K-Bremssohle ist gegen Ende der Bremsung geringer als der der GG-Sohle. Das führt bei Schnellbremsungen mit Güterzügen aus geringen Bremsausgangsgeschwindigkeiten zu längeren Anhaltewegen. Dieser Tatbestand ist bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit der Bremsen der Güterzüge mit K-Bremssohlen aus niedrigen Bremsausgangsgeschwindigkeiten zu beachten. Die Bremstabellen der Eisenbahnverkehrs-



Dr.-Ing. Dieter Jaenichen
TU Dresden
Institut für Bahnfahrzeuge und
Bahntechnik
dieter.jaenichen@tu-dresden.de



cand.-Ing. Stefan Eske
TU Dresden
Student der Studienrichtung
Kraftfahrzeug- und Schienenfahr-
zeugtechnik
stefan.eske@gmx.de

TABELLE 1: Mengengerüst dynamischer Schnellbremsversuche

Durchzuführende Versuche Schnellbremsungen

Neigung i in [%o]	λ in [%]	Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0				
		40 km/h	60 km/h	75 km/h	100 km/h	120 km/h
-33 bis -27	95	4	4	4	4	-
	80	4	4	4	-	-
	65	4	4	4	-	-
-15 bis -10	95	4	4	-	4	-
	80	4	4	-	4	-
	65	4	4	-	4	-
0	115	4	4	-	4	4
	95	4	4	4	4	4
	80	4	4	-	4	4
	65	4	4	4	4	-
	50	4	4	-	4	-
10 bis 15	95	4	4	-	4	-
	80	4	4	-	4	-
	65	4	4	-	4	-
27 bis 33	95	4	-	4	-	-
	80	4	-	4	-	-
	65	4	4	4	-	-

Unzulässig nach AB-EBV 77 / BT 90, zulässig nach DB Bremstafel 1300 m

Unzulässig nach AB-EBV 77 / BT 90, unzulässig nach DB Bremstafel 1300 m

Grundlage dieses Artikels ist eine mehrjährige wissenschaftliche Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Verkehr in Bern, Abteilung Sicherheit, Sektionschef Fahrzeuge Herrn D. Kiener und seinem Mitarbeiter Herrn H. Schmocker.

unternehmen müssen diesen Tatbestand beachten.

Erforderlich sind damit entsprechende Bremsversuche zur Ermittlung der Anhaltewege mit K-Bremssohlen gebremsten Güterwagen bei Schnellbremsung. In den vergangenen Jahren wurden diese im Auftrage des Bundesamtes für Verkehr (BAV), Abteilung

Sicherheit, Sektion Fahrzeuge und von einer Prüfstelle für Schienenfahrzeuge durchgeführt. Nur das Ausfahren der Anhaltewege gibt eine eindeutige Auskunft zur Leistungsfähigkeit der Bremsen mit K-Bremssohlen in Güterzügen. Es wurde dazu die bei der UIC übliche Methode zur Bewertung der Bremsen durch Verwendung eines Ganzzuges gewählt.

Die Tabelle 1 zeigt das dazu erstellte Versuchsprogramm für einen homogenen Güterwagenzug zur Durchführung von Schnellbremsungen mit den zu variierenden Parametern Bremsausgangsgeschwindigkeit, Streckenneigung und Brems Hundertstel [1]. Insgesamt wurden 55 Stützstellen mit definierten Versuchsparametern für Bremsstellung P ausgewählt. 220 Schnellbremsungen waren damit dafür erforderlich.

Der dazu gebildete Versuchszug bestand aus 26 Rns-Wagen. Die Lok war bei den Versuchen ungebremst. Die geforderten Brems Hundertstel wurden durch Veränderung der Beladung erreicht. Die Versuchsmethodik und die Auswertung erfolgte auf der Grundlage des Merkblattes UIC 544-1 [2].

Das Versuchsprogramm deckt nicht das gesamte Einsatzspektrum der Güterzüge im Fahrbetrieb ab. Es berücksichtigt jedoch weitestgehend das charakteristische betriebliche Einsatzfeld der Güterzüge unter Beachtung der Topografie der Strecken.

Statistische Grundregeln der Versuchsplanung traten bei der Festlegung der Betriebsdaten zunächst in den Hintergrund.

Die Versuchsmatrix ist somit zur Begrenzung des Versuchsumfangs durch folgende Parameterbereiche eingegrenzt.

- Bremsausgangsgeschwindigkeit von 40 bis 120 km/h
- Streckenneigung bis max. $\pm 33\%$
- Brems Hundertstel 50 bis 115%

Die Klassenbreiten zwischen den genannten Parametergrenzen mussten weitestufig festgelegt werden. Jede Parameterstufe sollte mindestens durch jeweils vier Versuchswerte belegt werden, um diese statistisch auswerten zu können. Außer in der Ebene wurden Versuche für zwei Steigungen und zwei Neigungen ausgewählt. Zur Minimierung des Versuchsumfangs konnte nicht jedes Feld der Versuchsmatrix durch jeweils vier Versuche belegt werden. Die Auswahl der Parameter für die Bremsausgangsgeschwindigkeit, der Brems Hundertstel und der Streckenneigung erfolgte aus der Sicht des Bahnbetriebes. Wichtige und häufig auftretende Betriebsparameter sollten als Stützstellen für das Versuchsprogramm dienen. Andererseits waren zusätzlich die ther-

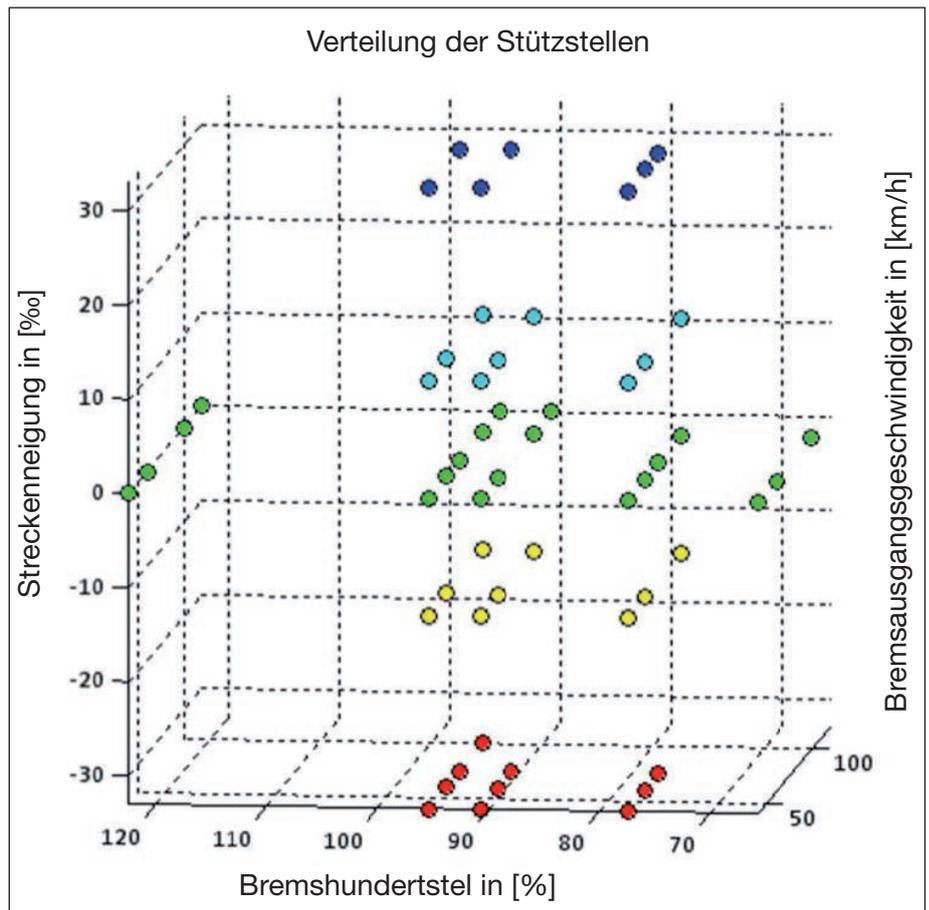


BILD 1: Verteilung der Stützstellen bei Versuchsdurchführung

mischen Leistungsgrenzen der Reibpaarung Bremsklotz/Rad zu beachten um das Fahren in größeren Neigungen den realen Bedingungen anzupassen.

Für eine statistische Bewertung der Versuchsergebnisse ist zu überprüfen, inwieweit die Vorgaben der statistischen Versuchsplanung ausreichend beachtet wurden. Gewisse Grundregeln der mathematischen Statistik sind unbedingt zu beachten. Nur dann kann eine weitere statistische Aufbereitung des Versuchsmaterials erfolgen.

Augenscheinlich ist in der Versuchsmatrix (Tabelle 1) erkennbar, dass die Randklassen nicht voll belegt sind. Einige Randklassen sind aus betrieblicher Sicht nicht erforderlich und deshalb fehlen die entsprechenden Belegungen in der Versuchsmatrix. Andererseits sind mehr Versuche bei niedrigen als bei hohen Geschwindigkeiten vorgesehen, was aber dem Grundgedanken der Versuche Rechnung trägt. Güterzüge des S-Verkehrs sind für Fahrgeschwindigkeiten bis 100 km/h begrenzt. Insbesondere die Stützstellen in den Neigungen bei $i = \pm 33\%$ sind weniger ausgefüllt. Im Gegensatz dazu sollten gerade die Randklassen nach der statistischen Versuchsplanung belegt sein, was aber aus Sicht des Bahnbetriebes nicht notwendig ist. Es standen damit gegensätzliche Argumen-

te bei der Festlegung der Versuchsparameter zur Diskussion.

Hinzu kam, dass bei der Versuchsdurchführung durch die Prüfstelle nicht in jedem Fall die vorgegebenen Brems Hundertstel der Versuchsmatrix realisiert werden konnten. Einige Stützstellen mussten verschoben bzw. nicht beachtet werden. Dadurch wurde der Brems Hundertstelbereich eingeschränkt.

Die Bewertung der Verteilung der ausgewählten Stützstellen wird mittels statistischer Prüfgrößen durchgeführt [3]. Dazu gehört beispielsweise der Abstand der Klassen untereinander, der arithmetische Mittelwert der Klassenwerte über den 55 Stützstellen oder auch die Häufigkeit der Stützstellen innerhalb der Klassen. Infolge dieser Bewertung stellte sich heraus, dass das Versuchsfeld zwar keiner idealen Verteilung entspricht aber praxisrelevant ist.

In Bild 1 sind die Stützstellen entsprechend der Versuchsdurchführung räumlich in einem Koordinatensystem über den drei Parametern Neigung, Geschwindigkeit und Brems Hundertstel dargestellt. Bei einer idealen Verteilung würden die Stützstellen einen Würfel aufspannen, hätten innerhalb eines Parameters den gleichen Abstand voneinander und es wären keine Lücken zu sehen. »

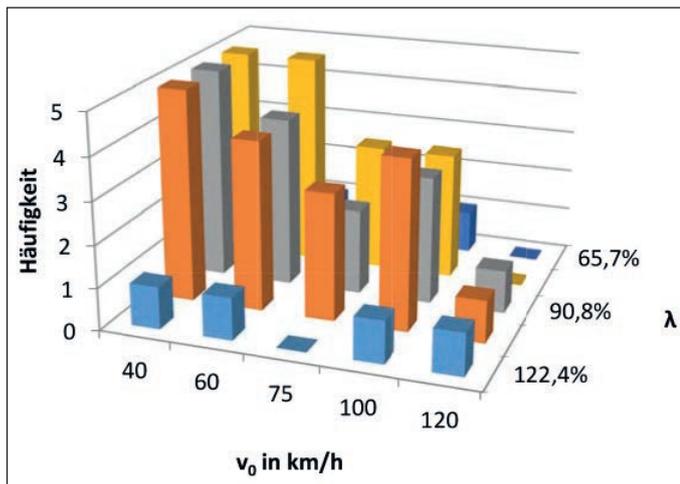


BILD 2: Häufigkeitsverteilung $H = f(v_0, \lambda)$

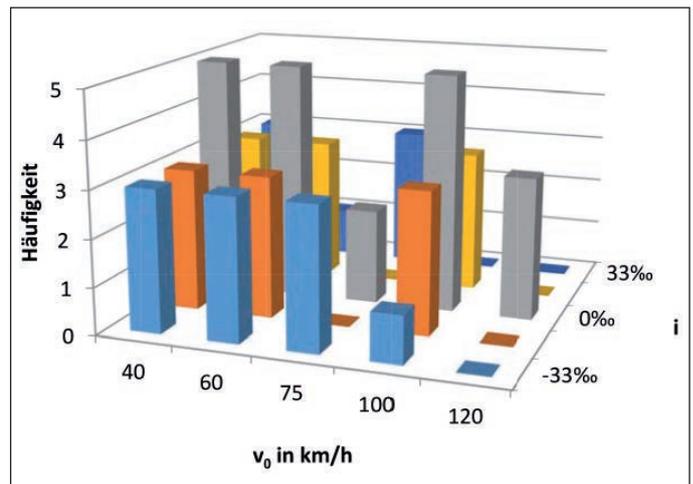


BILD 3: Häufigkeitsverteilung $H = f(v_0, i)$

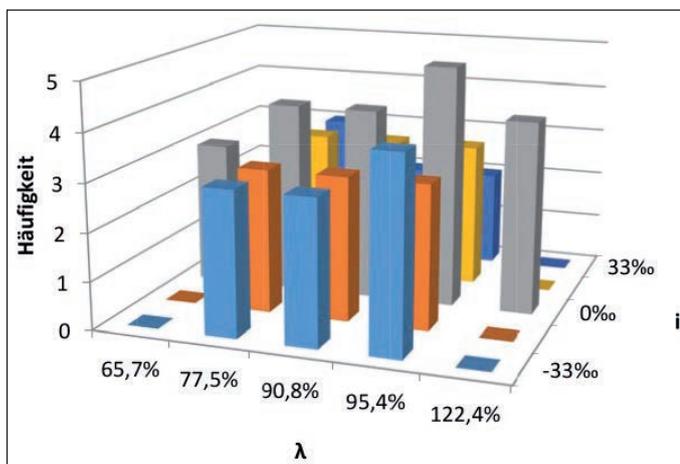


BILD 4: Häufigkeitsverteilung $H = f(\lambda, i)$

Bremshundertstel im Bereich von 90–95 % vor. Die meisten Stützstellen sind in der Ebene $i = 0\text{‰}$ konzentriert. Auch fehlen die im Versuchsprogramm geforderten Stützstellen für 50 Bremshundertstel bei $i = 0\text{‰}$.

Dennoch ist anhand der Bilder 1–4 erkennbar, dass eine gewisse Systematik und Regelmäßigkeit vorliegt. Die ermittelten Prüfgrößen nach der statistischen Versuchsplanung sind nahe genug an den idealen Werten, so dass eine weitere statistische Auswertung der Versuchswerte gerechtfertigt ist.

2. MITTLERE BREMSVERZÖGERUNGEN ALS FUNKTION VON v_0 , λ und i

Damit hätten alle Stützstellen die gleiche Wichtigung. Die Bilder 2–4 zeigen eine weitere Darstellungsart der Verteilung der Stützstellen.

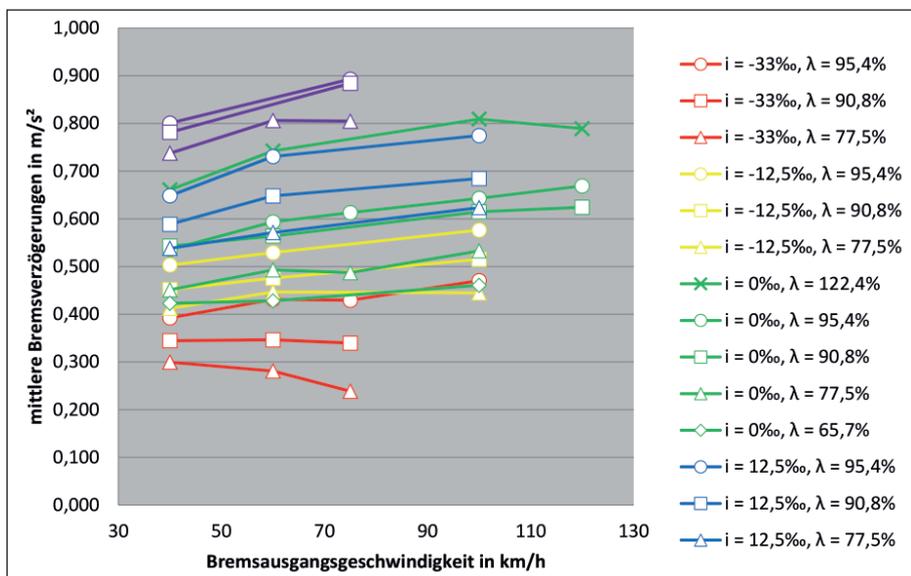
Jede Darstellungsart hat eine andere Verteilung der Stützstellen. Tatsächlich sind die Randklassen weniger belegt und es liegt eine Konzentration der Stützstellen bei

Für die weitere statistische Auswertung ist es zweckmäßig, sich im ersten Schritt einen Überblick über die funktionalen Zusammenhänge des Anhalteweges bzw. der mittleren Bremsverzögerung zu verschaffen.

Der Bremsvorgang bei Schnellbremsung ist aus Sicht der Kinematik eine ungleichmäßig verzögerte Bewegung des Zuges. Betrachtet man diesen über der Zeit, dann setzt sich dieser aus drei Phasen zusammen. Nach der ungebremsten Phase 1 schließt sich der Bremskraftaufbau (Phase 2) an, die dann bei der Phase 3 mit der voll entwickelten Bremskraft weiter bis zum Stillstand des Zuges besteht.

Der Anhalteweg ist das Endergebnis aus diesem genannten Bewegungsverlauf. Ohne nähere Informationen zu den einzelnen Phasen ist es nicht möglich, die Zusammensetzung des Anhalteweges nach diesen zu bewerten. Daher wird hier die ungleichmäßig verzögerte Bewegung als gleichmäßig verzögerte Bewegung mit einer mittleren Bremsverzögerung angenommen. Der Anhalteweg ermittelt sich dann nach Gleichung (1).

BILD 5: Mittlere Verzögerungen in Abhängigkeit von der Bremsausgangsgeschwindigkeit, Parameter Neigung und Bremshundertstel



$$s = \left(\frac{v_0^2}{2 \cdot a_m} \right) \quad (1)$$

Es zeigte sich bei den Untersuchungen, dass funktionale Zusammenhänge mit der mittleren Bremsverzögerung a_m einfacher als mit dem Anhalteweg hergestellt werden können.

Die mittlere Verzögerung a_m ist dabei eine Funktion der definierten Betriebsparameter

$$a_m = f(v_0, \lambda, i) \quad (2)$$

Die Bilder 5–7 zeigen die Abhängigkeit der mittleren Bremsverzögerung von den drei Parametern. In erster Näherung wird auf der Grundlage der grafischen Darstellungen von einer linearen Abhängigkeit ausgegangen. Die Abweichungen der Versuchswerte von den Geraden resultieren vermutlich aus der Versuchsdurchführung.

Es werden nun folgende lineare Abhängigkeiten für die drei Betriebsparameter angenommen:

→ Verlauf über der Bremsausgangsgeschwindigkeit
 $a_m = K_2 \cdot v_0 + K_1 \quad (3)$

→ Verlauf über den Bremsdruck
 $a_m = K_4 \cdot \lambda + K_3 \quad (4)$

→ Verlauf über der Streckenneigung
 $a_m = K_6 \cdot i + K_5 \quad (5)$

3. MULTIPLE LINEARE REGRESSION

Regressionsmodelle sind durch eine Zielvariable y_i und durch eine oder mehrere Kovariablen x_i sowie dem so genannten Störglied gekennzeichnet. Im Falle der multiplen linearen Regression besteht zwischen diesen ein linearer Zusammenhang [3]:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \quad (6)$$

Die Kovariablen sind dabei die Bremsausgangsgeschwindigkeit, Streckenneigung und Bremsdruck. Die mittlere Bremsverzögerung ist die Zielvariable.

Die β -Werte sind Regressionskoeffizienten, die zu den jeweiligen x_i -Werten gehören.

Eine exakte Bestimmung der Regressionskoeffizienten β ist nicht möglich, da die Grundgesamtheit nicht erfasst wurde bzw. werden konnte. Um dieses Problem zu lösen, wird stattdessen mit den Erwartungswerten der stochastischen Größen der genannten Betriebsparameter gearbeitet. Das sind Schätzwerte der „wahren“ Größen.

Für die Verwendung der multiplen linearen Regression müssen wichtige Grundforderungen eingehalten werden. Das sind [3]:

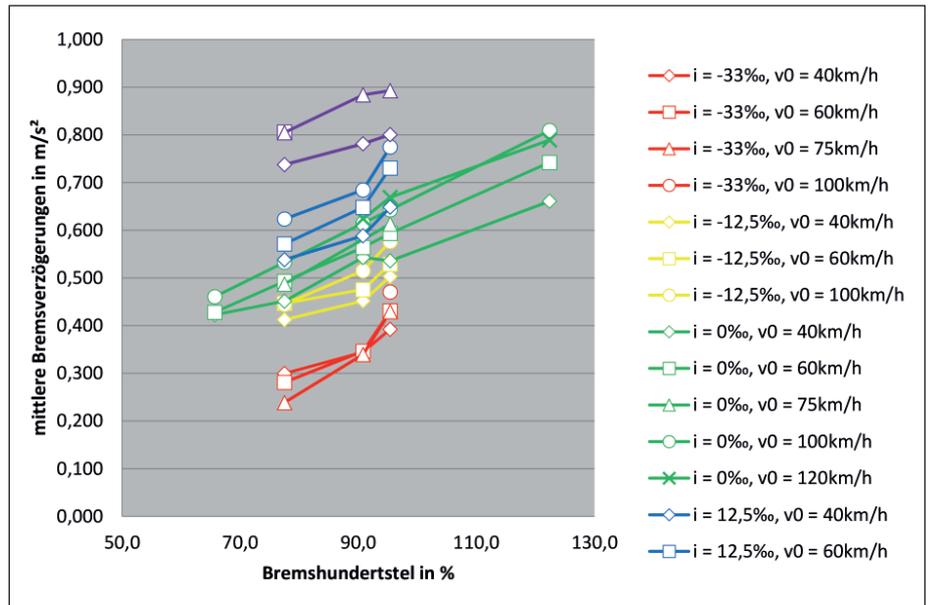


BILD 6: Mittlere Verzögerungen in Abhängigkeit von den Bremsdruckstufen, Parameter Neigung und Bremsausgangsgeschwindigkeit

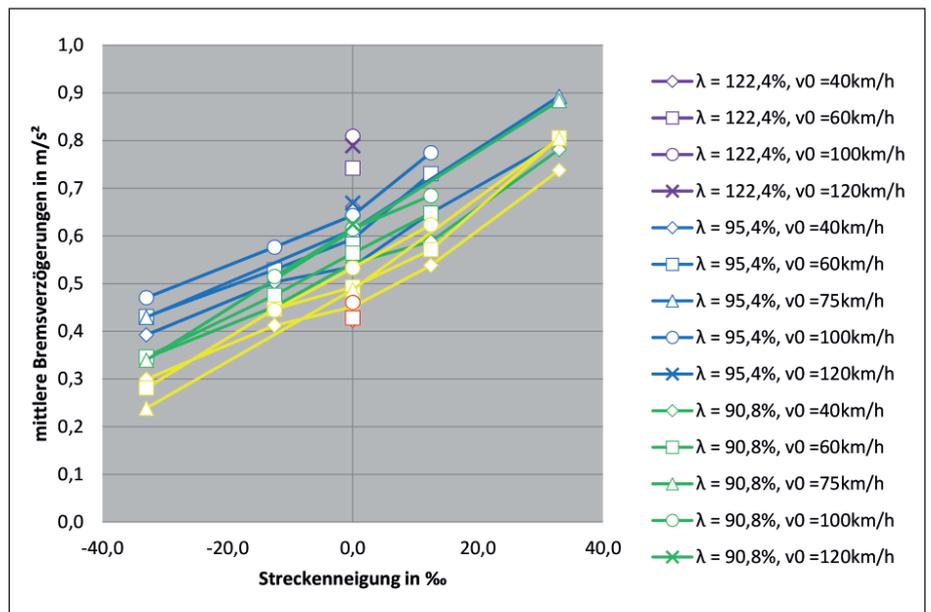


BILD 7: Mittlere Verzögerungen in Abhängigkeit von der Neigung, Parameter Bremsdruckstufen und Bremsausgangsgeschwindigkeit

- Die Kovariablen müssen unabhängig voneinander sein.
- Keine Kovariable darf eine Linearkombination einer anderen sein.
- Die Anzahl der Stützstellen n muss größer als die Anzahl der Kovariablen p sein ($n \geq p + 1$). Mit $p = 8$ ist die Stützstellenanzahl $n = 55$. Damit ist die Bedingung erfüllt.

$$a_m = (K_2 \cdot v_0 + K_1) \cdot (K_4 \cdot \lambda + K_3) \cdot (K_6 \cdot i + K_5) \quad (7)$$

Nach dem Ausmultiplizieren und der Neu Nummerierung der Koeffizienten ergeben sich 8 neue Koeffizienten K_{1-8} .

$$a_m = K_8 \cdot v_0 \cdot \lambda \cdot i + K_7 \cdot v_0 \cdot \lambda + K_6 \cdot v_0 \cdot i + K_5 \cdot v_0 \cdot i + K_4 \cdot \lambda \cdot i + K_3 \cdot \lambda + K_2 \cdot \lambda + K_1 \quad (8)$$

Die a_m -Funktion wird nun in die Gleichung (1) für die Berechnung des Anhalteweges

$$s = \frac{v_0^2}{2 \cdot a_m(v_0, \lambda, i)} \quad (9)$$

eingesetzt. Damit ergibt sich: »

$$s = \frac{v_0^2}{2 * (K_8 * v_0 * \lambda * i + K_7 * v_0 * \lambda + K_6 * v_0 + K_5 * v_0 * i + K_4 * \lambda * i + K_3 * i + K_2 * \lambda + K_1)} \quad (10)$$

Mit 8 Koeffizienten für die mittlere Bremsverzögerung in Gleichung (10) ist die Anzahl der Koeffizienten erheblich geringer, als wenn man die direkte Methode zur Berechnung des Anhalteweges wählt. Bei dem hier nicht weiter dargestellten Berechnungsweg zeigte sich, dass in diesem Falle die Anzahl der Koeffizienten 26 beträgt. Die weitere statistische Verarbeitung wäre dafür erheblich umfangreicher.

4. REGRESSIONSRECHNUNG MITTELS RGP-FUNKTION

Die genannten 8 Koeffizienten der Gleichung (8) für die Berechnung des Anhalteweges sind nun zu ermitteln bzw. es ist zu entscheiden, ob tatsächlich alle 8 Koeffizienten für die Berechnung des Anhalteweges benötigt werden. Denn die Zielstellung für die Praxis ist eine Berechnungsgleichung mit möglichst einfachen Aufbau mit wenig Koeffizienten.

Die Berechnung des Schätzwertes Anhalteweg *s* auf statistischem Wege führt über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Es handelt sich also um ein Optimierungsproblem bei dem die Schätzwerte der Regressionskoeffizienten für den Fall ermittelt werden, dass die Fehlerquadratsumme minimal wird. Dazu können die verschiedensten Rechenprogramme verwendet werden, z.B. MatLab.

Microsoft Excel stellt die RGP-Funktion zur Verfügung, mit der nicht nur Schätzwerte,

sondern auch weitere statistische Größen berechnet werden können. Die RGP-Funktion von Microsoft Excel wird wegen ihrer einfachen Verfügbarkeit für die Berechnungen verwendet.

Mit den RGP-Funktionen werden die Schätzwerte der unbekanntenen Koeffizienten mittels der Methode der kleinsten Quadrate berechnet.

Weiter können mittels der RGP-Funktion zusätzlich statistische Kennwerte bzw. Prüfgrößen berechnet werden.

Das sind u.a. der Hypothesentest und die F-Statistik mit den entsprechenden Prüfgrößen bei Vorgaben eines Quantils bzw. von T-Werten.

Im Ergebnis dieser durchgeführten Tests kristallisieren sich die Koeffizienten *K*₂, *K*₃ und *K*₆ als entscheidende Koeffizienten heraus [4].

Damit besteht nur noch eine lineare Verkettung der drei Betriebsparameter mit den Regressionskoeffizienten. Multiplikativ sind die drei Parameter nicht verknüpft.

Die Gleichung (11) beinhaltet die Verkettung der drei Variablen *λ*, *i* und *v*₀.

$$a_m = K_6 * v_0 + K_3 * i + K_2 * \lambda \quad (11)$$

Zur besseren Übersichtlichkeit der Gleichung wird der Koeffizient *K*₆ mit einem neuen Index versehen (*K*₁).

$$a_m = K_1 * v_0 + K_2 * \lambda + K_3 * i \quad (12)$$

Die Zahlenwerte der Koeffizienten sind:

<i>K</i> ₁	<i>K</i> ₂	<i>K</i> ₃
0,00116800	0,00558355	6,98445079

Die gewählte Anzahl der Kommastellen der Koeffizienten muss bei den Berechnungen unbedingt beachtet werden.

Der Schätzwert des Anhalteweges berechnet sich für das Versuchsfeld nunmehr aus der Berechnungsgleichung für die Bremsverzögerung mit den genannten drei Koeffizienten *K*₁ bis *K*₃

$$s = \frac{\left(\frac{v_0}{3,6}\right)^2}{2(K_3 * \frac{i}{1000} + K_2 * \lambda + K_1 * v_0)} \quad (13)$$

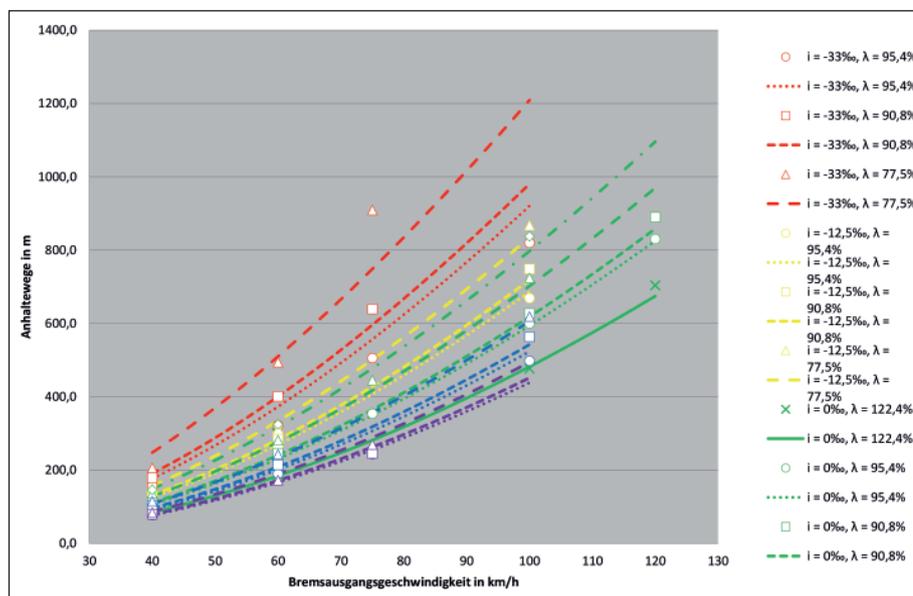
mit *i* = 1[‰], *λ* = 1[%] und *v*₀ = 1[km/h] und *s* in m.

5. INTERPRETATION BERECHNUNGSERGEBNISSE AUF STATISTISCHER GRUNDLAGE

Die berechneten Schätzwerte der Anhaltewege nach Gleichung (13) sind als Kurvenschar im Bild 8 über der Bremsausgangsgeschwindigkeit mit den Parametern Versuchsbremshundertstel und der Streckenneigung dargestellt. Gleichzeitig sind die Versuchsbremswerte für den Vergleich in Bild 8 mit eingezeichnet. Die Abhängigkeiten der Anhaltewege werden für das vorhandene Versuchsfeld betrachtet. Das sind die Bereiche:

$$v_0 \in [40; 120] \frac{\text{km}}{\text{h}}, \quad \lambda \in [65,7; 122,4] \%, \quad i \in [-33; 33] \text{‰}$$

BILD 8: Anhaltewege nach Berechnungsgleichung und Stützstellenwerte aller Neigungen



Der Vergleich der berechneten mit den Versuchswegen zeigt eine gute nicht erwartete Übereinstimmung über dem gesamten Versuchsfeld. Die Versuchswerte weichen in der Regel nur geringfügig von den berechneten Werten ab. Größere Abweichungen zwischen den Werten treten nur bei den Neigungen von -33 ‰ auf.

Beispielhaft werden die Zusammenhänge in den Bildern 9 – 11 für die Neigungen *i* = 0, -12,5 und -33 ‰ noch einmal deutlicher dokumentiert.

Die Koeffizienten sind mittels Regressionsrechnung mit den durchgeführten Testgrößen so geschickt ausgewählt worden, dass für das gesamte Einsatzfeld eine einzige Funktion für die mittlere Verzögerung zur Berechnung der Anhaltewege ausreichend ist. Es wird deutlich sichtbar, dass das Minimum-Verfahren des geringsten quadratischen Abstandes hier brauchbare Ergebnisse liefert.

Die Tabelle 2 zeigt für den Vergleich zur Bewertung der ausgefahrenen mit den berechneten Anhaltewegen die prozentualen Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung. Zur besseren Unterscheidung wurden in dieser Tabelle die negativen Abweichungen mit „grün“ und die positiven Werte mit „rot“ gekennzeichnet. Das mathematische Modell berechnet in den Feldern „rot“ etwas zu kurze Anhaltewege. Das bedeutet, dass die ausgefahrenen Anhaltewege länger sind und damit stehen keine Wegreserven zur Verfügung.

Bei den „roten“ Feldern sind die prozentualen Anhalteweg-Verkürzungen minimal. Die prozentualen Abweichungen zwischen Rechnung und Versuch überschreiten die 10% nur in einem Fall.

Die „grünen“ Felder liegen hauptsächlich in der Neigung von ±33‰. Damit ist sichergestellt, dass bereits hier Reserven für den Anhalteweg vorliegen.

Es dreht sich also in der Neigung ±33‰ die Tendenz um, so dass zu lange Anhaltewege berechnet werden. Teilweise sind größere prozentuale Anhalteweg-Abweichungen vorhanden.

Von Nachteil bei der statistischen Auswertung ist, dass die vorliegenden Versuchswerte für 90,5 und 95,4 Bremsmündertstel sehr nahe beieinanderliegen und Versuchswerte mit geringeren Bremsmündertstel wie in der Tabelle 1 vorgesehen nicht vorhanden sind.

Die prozentuale Abweichung des Weges von -18% ist für λ = 77,5 km/h und v₀ = 75 km/h als Ausreißer zu betrachten. Das dürfte auf die Versuchsdurchführung zurückzuführen sein.

6. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Die mehrfache lineare Regression ist eine zweckmäßige Methode für die Versuchsauswertung von Anhaltewegen. Mit ihr können auf einfache Art und Weise Koeffizienten für eine Berechnungsgleichung bestimmt werden.

Der hier vorgestellte Weg zur Herleitung einer Berechnungsgleichung für den Anhalteweg liefert im Ergebnis eine sehr einfache nutzbare Berechnungsgleichung mit drei Koeffizienten. Die Anzahl der Koeffizienten könnte noch erhöht werden, um den Genauigkeitsgrad der Berechnungsgleichung evtl. noch weiter zu erhöhen. Zu bedenken ist, dass die Versuchswerte doch selbst einer Streuung unterliegen und diese nur eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit darstellen.

Andere gewählte statistische Ansätze als die hier vorgestellte Berechnungsgleichung

Neigung i in [‰]	λ in [%]	Bremsausgangsgeschwindigkeit v ₀ in [km/h]				
		40	60	75	100	120
-33,0	95,4	13%	16%	10%	12%	
	90,8	7%	0%	-7%		
	77,5	20%	3%	-18%		
-12,5	95,4	2%	3%		3%	
	90,8	-3%	-3%		-4%	
	77,5	5%	8%		-4%	
0,0	122,4	-9%	-1%		1%	-4%
	95,4	-8%	-2%	-1%	-1%	-1%
	90,8	-2%	-2%		-1%	-4%
	77,5	-6%	-2%	-6%	-3%	
	65,7	2%	-2%		-5%	
12,5	95,4	-3%	6%		5%	
	90,8	-8%	-2%		-4%	
	77,5	-5%	-3%		-2%	
33,0	95,4	-1%		5%		
	90,8	0%		7%		
	77,5	4%	10%	7%		

TABELLE 2: Prozentuale Abweichung des Anhalteweges zwischen Versuch und Berechnung

sind zwar möglich. Aber wegen größerer Nichtlinearitäten musste dann eine größere Anzahl von Koeffizienten gewählt werden, um zu einem brauchbaren Ergebnis zu kommen.

Obwohl nicht alle Grundregeln der statistischen Versuchsplanung eingehalten wurden, ermöglichten die zusätzlich durchgeführten statistischen Tests eine sinnvolle Auswahl der Koeffizienten zu treffen.

Die vorgestellte Berechnungsgleichung gilt ausschließlich für den Versuchsbereich der drei Versuchsparameter.

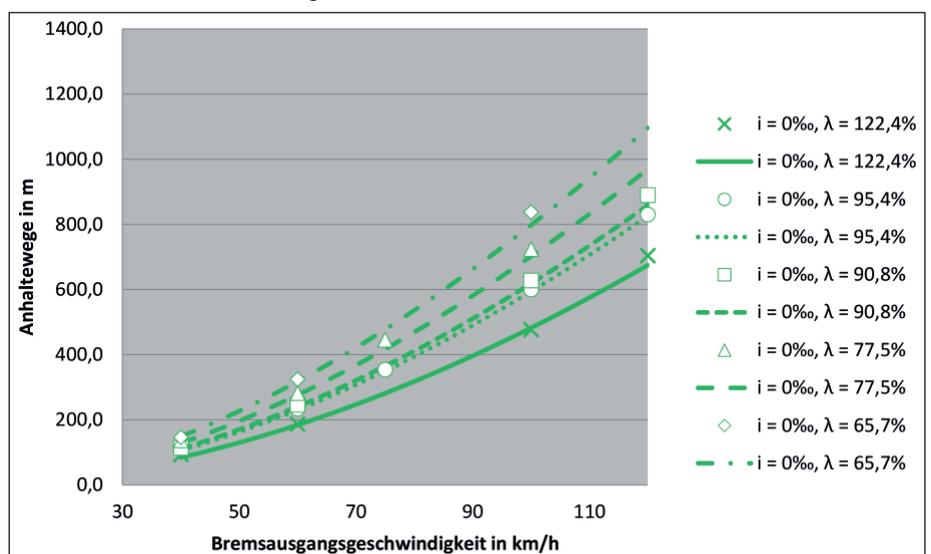
$$v_0 \in [40;120] \frac{\text{km}}{\text{h}}, \quad \lambda \in [65;125]\%, \\ i \in [-33;33]\text{‰}$$

Eine weitere Extrapolation der Parameter für die Bremsmündertstel und die Bremsausgangsgeschwindigkeit mit der Berechnungsgleichung ist zwar mathematisch möglich, aber es fehlt dann der verifizierte Nachweis.

Der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Versuchswerten zeigt an den Randklassen teilweise größere Abweichungen. Die Ursache braucht nicht unbedingt im mathematischen Modell zu liegen, sondern es fehlen ausreichende Versuchswerte. Es liegt damit eine gewisse Unschärfe der Versuchswerte für die statistischen Berechnungen vor.

Die Berechnungsgleichung gilt für klotz- »

BILD 9: Berechnete Anhaltewege und Stützstellewerte für i= 0 ‰



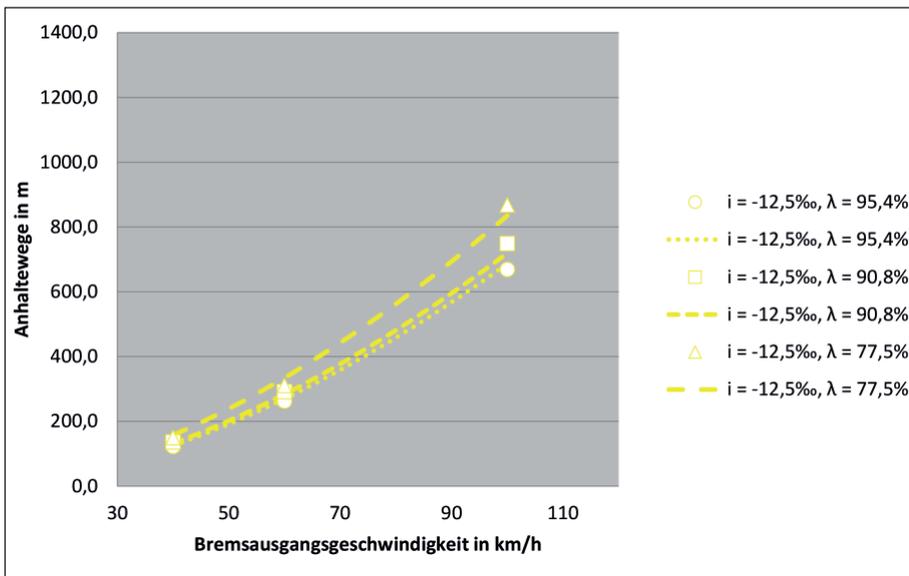


BILD 10: Berechnete Anhaltewege und Stützstellwerte für $i = -12,5\%$

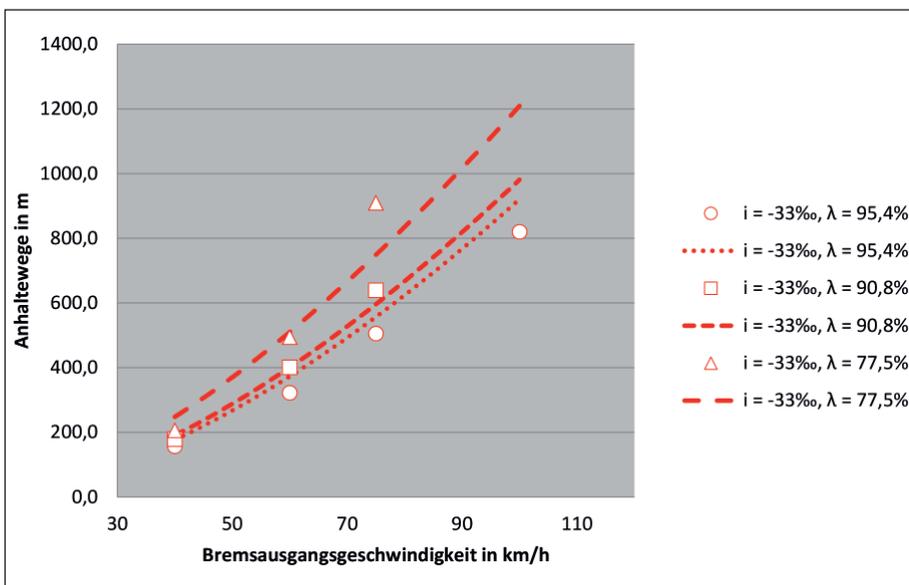


BILD 11: Berechnete Anhaltewege und Stützstellwerte für $i = -33\%$

gebremste Güterwagen- mit K-Bremssohlen ausgerüstet- mit einer Wagenzuglänge von 500 m. Für die Bewertung längerer Güterwagenzüge kann der Zuglängenfaktor bis 700 m nach UIC 544-1 „Bremsleistung“ verwendet werden [2]. Kürzere Güterwagenzüge als 500 m werden nach UIC 544-1 wie ein 500 m Zug bremsleistungsmäßig behandelt.

Aus dieser geschilderten Sachlage ergibt sich die Forderung, weitere Versuche mit Parametern außerhalb und innerhalb des jetzt genutzten Versuchsfeldes durchzuführen, vor allem für den Bremsleistungsbereich kleiner 77,5% in der Neigung.

Dann kann anschließend mit der dargelegten statistischen Methodik die Berechnungsgleichung für einen größeren Parameterbereich weiter abgesichert werden.

Durch die Wahl eines Ganzzuges von ca.

500 m Länge ist abgesichert, dass die Anhaltewege nicht das Ergebnis der Wirkung von wenigen K-Bremssohlen ist, sondern er ist das Ergebnis der Wirkung von 416 Bremssohlen des Wagenzuges. Die Konfidenzintervalle der Erwartungswerte für die Anhaltewege fallen damit gering aus.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse kann auch durch weitere mathematische Ansätze und Berechnungswerkzeuge durchgeführt werden. Statt von einer mittleren Verzögerung zur Berechnung des Anhalteweges auszugehen, kann das mathematische Modell des Bewegungsvorganges physikalisch exakter nachgebildet werden. Das bedeutet, dass dann der Bewegungsvorgang in Teilphasen zerlegt wird und die Bewertung für jeden Teilbereich erfolgen kann. Die auch dort benötigten Korrekturfaktoren

wurden bereits im ersten Ansatz über Newtonsche Interpolationspolynome ermittelt. Die Arbeiten werden in dieser Richtung weitergeführt. Auch könnte dann ein zusätzlicher statistischer Ansatz zur Anwendung kommen. Entsprechende Untersuchungen sind in dieser Richtung für die Zukunft vom BAV vorgesehen.

Mit dem Vorliegen weiterer Berechnungsmethoden für den Anhalteweg auf ausreichender physikalischer Grundlage und deren Verifizierung kann eine Berechnungsmethodik ausgewählt werden, die in das Regelwerk des BAV aufgenommen wird.

Die mit einem Sicherheitszuschlag zu versehenen Anhaltewege werden dann auch für die Bewertung von Vorsignaltabellen verwendet. ◀

Literatur

- [1] Ausschreibung Bremsversuche mit K-Bremssohlen ausgerüsteten Güterwagen und Güterzügen Leistungsschrieb/technisches Lastenheft, Bundesamt für Verkehr, Bern 2011
- [2] UIC-Kodex 544-1 Bremse-Bremsleistung, 6. Ausgabe
- [3] Fahrmeir, L.; Kneib, Th.; Lang, St. : Regression Modelle, Methoden und Anwendungen, Springer Verlag 2007
- [4] Jaenichen, D.; Eske, St.: Anhalteweg-Berechnungen durch Verwendung mehrfacher linearer Regression für mit K-Sohlen gebremsten Güterzüge , TU Dresden, Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik, Professur Technik spurgeführter Fahrzeuge, Nov.2014

► SUMMARY

Computations of stopping distances for freight trains equipped with composite brake blocks

The stopping distances of freight trains equipped with tread brakes depends on what friction material is used. If composite brake blocks are installed to replace grey cast-iron ones, it is necessary to recalculate the stopping distances for emergency braking from defined initial speeds. Cost considerations militate in favour of minimising expenditure on experiments. Instead of these, mathematical statistical methods are used in order to extract a generally valid statement of stopping distances from only a small sample, while still giving adequate consideration to operational parameters. The methods applied are multiple linear regression, least error squares and statistical testing of appropriateness. The output of these investigations is an easy-to-manage equation for calculating stopping distance. It is valid for the range of operational parameters confirmed through tests.