

## Mögliche Bremsverzögerungen in Abhängigkeit von der Straßengriffigkeit

FA 2.209

Forschungsstelle: Universität Karlsruhe (TH), Institut für Straßen- und Eisenbahnenwesen (Prof. Dr.-Ing. R. Roos)

Bearbeiter: Zimmermann, M. / von Loeben, W.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: März 2004

### 1. Aufgabenstellung

Die Untersuchungen für die bestehenden Werte der erreichbaren Bremsverzögerung innerhalb des Haltesichtweitenmodells, das in den Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Linienführung (RAS-L 1995) angewandt wird, stammen aus einer Zeit, in der die Fahrzeugbremsen einige große Entwicklungen wie z. B. das Antiblockiersystem (ABS) noch vor sich hatten. Darüber hinaus liegen dem verwendeten Bewertungshintergrund nur Messwerte aus einem Geschwindigkeitsbereich von 40 bis 80 km/h zugrunde, die in höhere Geschwindigkeitsbereiche extrapoliert wurden. Auf Grund der anstehenden Aktualisierung und Ergänzung des Regelwerkes in Bezug auf die Straßengriffigkeit bei Nässe sowie die damit zusammenhängenden Parameter wie Haltesichtweiten und Kuppenhalbmesser wurde es erforderlich, den technischen Stand neu zu dokumentieren.

In dem Forschungsvorhaben "Abnahmewerte für die Griffigkeit von Fahrhahnoberflächen" (FA 4.182/1998) wurden bereits neben Griffigkeitsmessungen auch Vollbremsversuche mit begrenzter Variation der Einflussgrößen wie Bremssystem (mit und ohne ABS), Reifen, Profilhöhe und Wasserfilmdicke durchgeführt. Die hierbei erzielten Ergebnisse waren überraschend: u. a. zeigten sie, dass der Einfluss von Profiltiefe und Wasserfilmdicke geringer war, als bisher angenommen wurde. Vor allem zeigten sie aber, dass die möglichen Bremsverzögerungen mit abnehmender Geschwindigkeit nicht ansteigen, was insbesondere mit der Berechnung der Haltesichtweite in den RAS-L nicht ohne weiteres zu vereinbaren ist. Auch waren die mittleren Bremsverzögerungen deutlich höher, als auf Grund der Fahrhahngriffigkeiten zu erwarten gewesen wäre, und verdeutlichten den Unterschied maximal aktivierbarer Bremsverzögerungen von Fahrzeugen mit bzw. ohne ABS.

Wegen des geringen Datenkollektivs waren jedoch ergänzende Bremsversuche unabdingbar, die im Rahmen des hier vorliegenden Forschungsprojektes durchgeführt wurden. Bei den praktischen Versuchen sollten systematische Variationen der Einflussgrößen vorgenommen sowie zusätzliche (Fahrzeugtyp) hinzugefügt werden. Außerdem sollten die Bremsversuche auf mindestens 10 Strecken mit Griffigkeiten im Bereich des Schwellenwertes durchgeführt werden.

Anhand der praktischen Versuche waren Bremsverzögerungswerte auf dem Stand der Technik zu ermitteln und herauszufinden, ob künftig der Berechnung erforderlicher Haltesichtweiten ein stark vereinfachtes, pragmatisches Modell einer mittleren Bremsverzögerung während der gesamten Bremsung zugrunde gelegt werden kann. Ferner sollte geklärt werden, wie hoch eine solche mittlere Verzögerung für das heutige Fahrzeugkollektiv anzusetzen ist. Im Hinblick auf die künftige Verbreitung in der Fahrzeugflotte sollten darüber hinaus diese Aussagen auch für Fahrzeuge mit ABS gefunden werden.

### 2. Untersuchungsmethodik

Die erforderlichen Bremsversuche, die später insbesondere auf Straßen mit schlechter Griffigkeit durchgeführt werden sollten, wurden in Ausführung und Variation in einer Vorversuchsphase auf einer für einen längeren Zeitraum zur Verfügung stehenden Neubaustraße (Ortsumgehung Karlsdorf im Zuge der B 35) konzipiert. In dieser Phase wurden Versuche mit Fahrzeugen aus drei Klassen (Mittelklasse, untere Mittelklasse und Kleinwagen mit Reifen verschiedener Hersteller) mit unterschiedlichen Profilhöhen zur Simulation des Abnutzungsgrades, sowie drei unterschiedlichen Wasserfilmdicken (0,3 mm, 0,7 mm, 1 mm) mit drei Geschwindigkeiten (70 km/h, 100 km/h, 130 km/h) systematisch durchgeführt. Um einen Bezug zu den bestehenden Richtlinien herzustellen, konnte am Kleinwagen das Antiblockiersystem deaktiviert werden, um auf diese Weise eine Vergleichsmöglichkeit zu schaffen (Tabelle 1).

**Tab. 1: Fahrzeug-Reifen-Kombinationen für die Hauptversuche**

Fahrzeug	Corsa						Golf		
	ja			nein			ja		
ABS	70	100	130	70	100	130	70	100	130
Reifen und Profilhöhe									
"Guter" Reifen 2 mm	X	X	X	-	-	-	X	X	X
"Guter" Reifen 5 mm	X	X	X	X	X	-	X	X	X
"Mangelhafter" Reifen 2 mm	x/z	x/z	x/z	x	x/z	-	x	x	x/z

Z = Versuch wird außerdem mit einer Zuladung von 200 kg durchgeführt

Während und nach den Vorversuchen wurde die Griffigkeit der Straße mit dem SRMT (Griptester) gemessen, um festzustellen, ob sich diese im Laufe der Versuche deutlich verändert hat, was jedoch nicht der Fall war.

Bei den Verzögerungswerten lagen das Mittelklassefahrzeug und das Fahrzeug der unteren Mittelklasse nahe beieinander, sodass für die weiteren Versuche auf das Mittelklassefahrzeug verzichtet werden konnte.

Weil für die weiteren Versuche öffentliche Bundesstraßen gesperrt werden mussten, wurde das Messprogramm auf Grund der bei den Vorversuchen gesammelten Erfahrungen so komprimiert, dass mit zwei Fahrzeugen nur noch Konfigurationen im Sinne von "Best Case" und "Worst Case" durchzuführen waren und das Messprogramm nicht mehr als einen Tag Vollsperrung der jeweiligen Straße erforderte.

Die Erkenntnis aus den Vorversuchen, dass nur extreme Parameter signifikante Veränderungen der Bremsverzögerungen mit sich bringen, wurde für die Hauptversuche entsprechend genutzt und das Messprogramm mit einer sinnvoll reduzierten Parametervariation zusammengestellt.

Besonders problematisch war das Auffinden von geeigneten Strecken mit möglichst geringen Griffigkeiten, die gleichzeitig Bremsungen aus Geschwindigkeiten bis 130 km/h erlauben sollten. Die Hauptversuche wurden auf eigens hierfür gesperrten Bundesstraßen sowie einer Teststrecke durchgeführt.

Die Griffigkeiten  $\mu_{SCRIM60} / \mu_{SCRIM80}$  dieser Strecken lagen laut ZEB-Datenbank im Bereich des Warnwertes (0,44/0,39) und teilweise im Bereich des Schwellenwertes (0,37/0,32).

Um zusätzlich Verzögerungswerte für eine besonders niedrige Griffigkeit zu erhalten, wurde ein Versuch auf das IVECO-Testfeld bei Ulm gelegt: Hier konnte auf entsprechend glatten Oberflächen von  $\mu_{\text{SCRIM80}} = 0,02$  (Edelstahl) bis 0,24 (Blaubalsalt) gebremst werden. Auf dem Testfeld waren außerdem eine Asphalt- und eine Betonoberfläche vorhanden, die ebenfalls in das Messprogramm einbezogen wurden. Auf diese Weise war es möglich, unter gleichen äußeren Bedingungen auf vier Flächen mit unterschiedlichen Griffigkeiten Bremsversuche durchzuführen.

### 3. Untersuchungsergebnisse

Ein Bearbeitungspunkt war es, einen funktionellen Zusammenhang der Bremsverzögerung mit der Griffigkeit zu ermitteln. Dazu wurde zum einen mittels Regressionsrechnung eine Funktion gesucht, die diesen Zusammenhang darstellt. Als gute nicht-lineare Regression hat sich für die Mittlere Vollverzögerung (Mean fully developed deceleration) die Wurzelfunktion

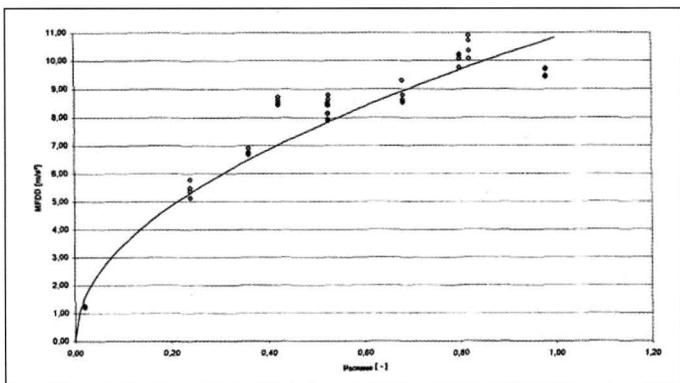
$$\text{MFDD} = c(Fz) \cdot \sqrt{\mu_{\text{SCRIM80}}}$$

herausgestellt, wobei der Parameter  $c(Fz)$  von Fahrzeug, Reifen und Ausgangsgeschwindigkeit abhängig ist. Bei linearen Funktionen besteht das Problem, dass die Funktion nicht durch den Ursprung verläuft und deshalb für eine theoretische Griffigkeit von Null nicht den korrekten Wert liefert. Insbesondere die Messung auf einer nassen Edelstahlplatte, die zwar keinen originären Straßenbelag darstellt, dafür aber eine Griffigkeit nahe bei Null besitzt, konnte einen fehlenden Messbereich füllen. Damit kann über die Wurzelfunktion eine Abhängigkeit der Bremsverzögerungen von der Griffigkeit über den Bereich von 0 bis 1 beschrieben werden.

Die Funktion

$$\text{MFDD} = c \cdot \sqrt{\mu_{\text{SCRIM}}} + a \cdot V + b \cdot p + d$$

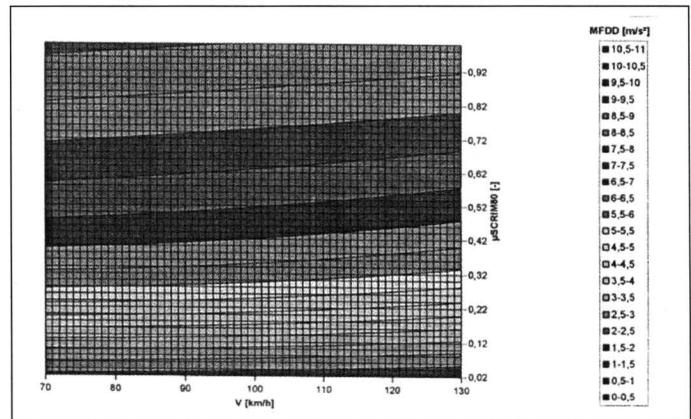
mit den zusätzlichen Parametern  $a$ ,  $b$  für die Eingangsgrößen Ausgangsgeschwindigkeit  $v$  [km/h] und Profilhöhe  $p$  [mm] ergibt Funktionen  $\text{MFDD} = f(\mu_{\text{SCRIM}}, V, p)$  für die beiden eingesetzten Versuchsfahrzeuge (Bild 1). An den Parametern lassen sich die Einflüsse der Eingangsgrößen ablesen. Die Vorzeichen zeigen den vorwiegend negativen Einfluss der Ausgangsgeschwindigkeit und die positive Wirkung der Reifenprofilhöhe.



**Bild 1: Mittlere Vollverzögerung in Abhängigkeit der Griffigkeit (Golf, Reifen Pirelli P6000, 5 mm Profilhöhe,  $V_0 = 100$  km/h,  $c(Fz) = 10,8$ ,  $R^2 = 0,88$ )**

Eine weitere Möglichkeit, einen Zusammenhang zwischen der Griffigkeit und der Bremsverzögerung zu ermitteln, erfolgte mit Hilfe eines Simulationsprogramms für künstliche neuronale Netzwerke. Damit konnte ein Feed-Forward Netzwerk erzeugt werden, das auf die Eingabe von Fahrzeugparametern wie

Fahrzeugtyp, Reifenprofilhöhe, Ausgangsgeschwindigkeit sowie der Wasserfilmdicke und der Straßengriffigkeit die mittlere Vollverzögerung ausgibt (Bild 2).



**Bild 2: Bremsverzögerung in Abhängigkeit von Ausgangsgeschwindigkeit und  $\mu_{\text{SCRIM80}}$  für Opel Corsa mit 2 mm Profilhöhe und 1 mm Wasserfilm, mit ABS**

### 4. Folgerungen

Auf Grundlage einer Literaturstudie wurde ein Vorschlag für eine modifizierte Haltesichtweite und damit verbundene Kuppenmindesthalbmesser erarbeitet (Tabelle 2, folgende Seite).

Zur Berücksichtigung des aktuellen Fahrzeugbestandes sowie der serienmäßigen Ausstattung von Neuwagen mit Antiblockiersystemen wird ein zweiteiliges Modell vorgeschlagen, eines für kurz- bis mittelfristig umsetzbare Ausbaumaßnahmen und ein weiteres für langfristig umzusetzende Neubaumaßnahmen. Obwohl im Gegensatz zu Bremsvorgängen mit ABS Bremsvorgänge ohne ABS geschwindigkeitsabhängig sind, wird unter dem Aspekt einer einheitlichen Berechnung der Haltesichtweite auch für die kurz- bis mittelfristigen Maßnahmen eine konstante Verzögerung vorgeschlagen. Auf Basis der ermittelten Verzögerungswerte wird für kurzfristig umsetzbare Ausbaumaßnahmen eine konstante Verzögerung von  $3,7 \text{ m/s}^2$  und für langfristig umzusetzende Neubaumaßnahmen eine konstante Verzögerung von  $4,3 \text{ m/s}^2$  vorgeschlagen, die dem zu diesem Zeitpunkt zu erwartenden verschwindend geringen Anteil von Fahrzeugen ohne ABS Rechnung trägt. Auf Grund der Einführungszeiträume von neuen Richtlinien und der dazukommenden Planungs-, Genehmigungs- und Bauphasen ist davon auszugehen, dass zum Zeitpunkt der ersten nach neuen Richtlinien fertiggestellten Straße nur sehr vereinzelt Fahrzeuge ohne ABS zu erwarten sind, die jedenfalls nicht mehr als richtlinienrelevant angesehen werden können.

Vor dem Hintergrund, dass zum einen die ABS-Verbreitung deutlich zunimmt und dass die gewählten Umstände den "Worst Case" darstellen, ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Haltesichtweiten und Kuppenmindesthalbmesser für 0 % Längsneigung. Darin enthalten sind verschiedene Modelle für die Reaktionszeit und die Zielpunkthöhe.

Der Literatur wurde die Erkenntnis entnommen, dass die benötigte Reaktionszeit mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Wenn in die neuen Richtlinien ein zusätzlicher Nachweis einer noch zu definierenden Orientierungssichtweite aufgenommen wird, dann ist der dargestellten geschwindigkeitsabhängigen Reaktionszeit der Vorzug gegenüber der konstanten Reaktionszeit von 2 s zu geben.

Tab. 2: Haltesichtweiten und Kuppenmindesthalbmesser nach ISE 2003

$V_{85}$ [km/h]	Bem.	70		100				130			
berechnet nach		ISE $h_{z,alt}$ $t_R = \text{const} = f(V)$	ISE $h_{z,neu}$ $t_R = \text{const} = f(V)$	ISE $h_{z,alt}$ $t_R = \text{const}$	ISE $h_{z,alt}$ $t_R = f(V)**$	ISE $h_{z,neu}$ $t_R = \text{const}$	ISE $h_{z,neu}$ $t_R = f(V)$	ISE $h_{z,alt}$ $t_R = \text{const} = f(V)$	ISE $h_{z,alt}$ $t_R = f(V)$	ISE $h_{z,neu}$ $t_R = \text{const} = f(V)$	ISE $h_{z,neu}$ $t_R = f(V)$
$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	ohne ABS, $f(V)^*$	4,3	4,3	3,7	3,7	3,7	3,7	3,2	3,2	3,2	3,2
	ohne ABS, const	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7				
	mit ABS, const	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
$h_A$ [m]		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$h_z$ [m]		0,05	1,00	0,35	0,35	1,00	1,00	0,45	0,45	1,00	1,00
$t_R$ [s]		2	2	2	1	2	1	2	1	2	1
$S_h$ [m] für $s = 0\%$	ohne ABS, $f(V)$	83	83	159	131	159	131	277	241	277	241
	ohne ABS, const	90	90	160	132	160	132				
	mit ABS, const	83	83	145	117	145	117	224	188	224	188
min $H_k$ [m]	ohne ABS, $f(V)$	2.301	861	4.978	3.388	3.152	2.146	13.719	10.372	9.575	7.239
	ohne ABS, const	2.704	1.012	5.042	3.442	3.193	2.180				
	mit ABS, const	2.292	2.292	4.166	2.725	2.638	1.726	8.975	6.313	6.264	4.406

\*  $f(V) = -0,0183 \cdot V + 5,5667$  geschw.abh. Verzögerung

\*\*  $t_R = f(V)$  geschw.abh. Reaktionszeit

Eine Umsetzung der aktuellen Verzögerungswerte und der geschwindigkeitsabhängigen Reaktionszeiten in Kombination mit dem Vorschlag des BMVBW zur Einführung einer konstanten Hindernishöhe von 1,0 m in den neuen Richtlinien ist im Hinblick auf die gravierenden Änderungen der mindestens erforderlichen Kuppenhalbmesser nicht zu vertreten. Neben der zu erwartenden Abnahme der Verkehrssicherheit auf Grund mangelnder Vorausorientierung würde eine derartige Verminderung zudem zu einem deutlichen Bruch in den Ausbaustandards von Straßen führen, die nach unterschiedlichen Richtlinienjahrgängen geplant wurden.

Unstrittig ist, dass die Bereitstellung der Haltesichtweite auch in Zukunft die zu jedem Zeitpunkt der Befahrung einer Straße zu

gewährleistende Mindestanforderung im Straßenentwurf bleiben wird.

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei Unterschreitung der erforderlichen Haltesichtweite bauliche Verbesserungen zur Gewährleistung der erforderlichen Haltesichtweite bzw. Geschwindigkeitsbeschränkungen – und damit eine Verringerung der erforderlichen Haltesichtweite – erforderlich wird.

Gemäß dem heutigen Kenntnisstand ist jedoch auch davon auszugehen, dass nicht in jedem Fall das Vorliegen der erforderlichen Haltesichtweite für die Gewährleistung einer sicheren Befahrung einer Straße ausreicht. □