

Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen; Berechnung der Wasserfilmdicke

FA 5.126

Forschungsstelle: Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. W. Ressel)

Bearbeiter: Herrmann, S.

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

Abschluss: August 2006

1 Aufgabenstellung

Der Aquaplaning-Effekt wurde erstmals in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts beim Starten und Landen von Flugzeugen bei Regen von der NASA beobachtet und dokumentiert. Dabei handelte es sich im Wesentlichen um zwei Faktoren: 1. schnell fahrende Fahrzeuge (Flugzeuge) und 2. große, zusammenhängend befestigte Flächen. Physikalisch betrachtet, bedeutet dies a) sehr wenig Zeit, um das Wasser zwischen Reifen und Fahrbahn zu verdrängen, und b) lange Wege des abfließenden Niederschlagswassers.

Zu einer Gefahr für die Sicherheit des Kraftfahrzeugverkehrs entwickelte sich der Aquaplaningeffekt auf breiten Fahrbahnen, d. h. auf drei- oder mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen von Autobahnen. Vor allem Verwindungsbereiche verlängern die Fließwege des Oberflächenwassers durch die gekrümmte Form der Fahrbahn derart, dass die Wasserfilmdicken bei Regenereignissen über das kritische Maß hinausreichen können.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Literaturrecherche

In einer Literaturstudie wurden bisherige Veröffentlichungen ausgewertet, um alle funktionalen Zusammenhänge des Aquaplaningprozesses darzustellen. Im Einzelnen wurde recherchiert: Abflusscharakteristik auf berechneten und nicht-berechneten Fahrbahnoberflächen, Einfluss der Wasserfilmdicke auf die Aufschwimmgeschwindigkeit von Fahrzeugreifen, Ansätze zur Modellierung von oberflächlichem Dünnschichtabfluss, straßenplanerische und -bautechnische Möglichkeiten zur Verminderung des Aquaplaningeffekts, Untersuchung von Unfällen auf Autobahnen zur Lokalisation von Unfallhäufungsstellen.

2.2 Modellierungskonzept

Als Modellierungsbasis wurde ein diskretisiertes Topographiemodell (Gitterraster) entwickelt, mit dem Straßenoberflächen aus Trassierungsparametern oder geodätisch erfassten Oberflächen, beispielsweise irreguläre Oberflächen mit Spurrinnen im Querschnitt, generiert werden können. Als mathematisches Verfahren dient ein Finite-Volumen-Ansatz, bei dem jede Gitterzelle als Volumenelement mit seiner Massen- und Impulsbilanz betrachtet wird. Bei dem gewählten Konzept werden für einzelne, fiktive Wasserelemente exemplarische Abflusswege (Falllinien) generiert. Entlang jeder dieser Falllinien wird der Wasserabfluss berechnet. Eine gegenseitige Beeinflussung benachbarter Falllinien wird ausgeschlossen, da sich Falllinien nicht kreuzen können. Damit ist eine eindimensionale Berechnung der Fließvorgänge möglich.

Die zweite Dimension wird berücksichtigt, indem fiktive Fließquerschnittsbreiten zwischen den Falllinien im Sinne eines Fließgerinnes eingeführt werden. Seine Breite richtet sich nach

dem Abstand der benachbarten Falllinien und ist damit variabel. Ein Auseinanderdriften von Falllinien bewirkt eine Vergrößerung der Fließquerschnittsbreite (und umgekehrt). Die Gitterzellen zwischen den Falllinien werden über einen Interpolationsalgorithmus gefüllt, der die bereits vorhandenen Zellwerte in einem Umkreis als Stützstellen verwendet und die leeren Zellen abstandsgewichtet füllt.

2.3 Validierung durch Fließversuche

2.3.1 Laborversuche

Nach Auswertung der Literatur im Hinblick auf Abflussversuche wurde ein labormäßiger Versuchsaufbau gewählt. Dafür wurde ein Teststand konstruiert, der mit einer Berechnungs- und Zufusseinrichtung sowie mit einem Ultraschall-Messsystem ausgestattet ist. Entgegen vieler bisheriger Abflussversuche, bei denen Modelloberflächen (z. B. Glatte) im Einsatz waren, wurden reale Mischgute verwendet und in den Prüfstand eingebaut. Getestet wurden zwei Zementbetone mit verschiedener Textur (Besenstrich, Kunstrasen) und drei Asphalte (SMA 0/8, SMA 0/11, GA 0/8 mit Splittabstreuerung). Beim Einbau konnte sichergestellt werden, dass die Oberflächen planeben sind. Von Vorteil ist eine weitestgehende Eindimensionalität, die durch Tracerversuche bestätigt werden konnte.

Falllinien können Längen von weit über 100 m in Verwindungsbereichen auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen erreichen. Um die Position des Testfelds innerhalb einer Falllinie unter Laborbedingungen zu simulieren, wurde die Zuflussmenge am oberen Rand entsprechend dosiert. Somit konnte über mehrere Versuchsläufe eine komplette Falllinie partiell nachgebildet werden. Die Messung erfolgte als Punktmessung mittels Ultraschall-Sensor mit einer Höhengenaugigkeit von 1 µm. Es wurden die Wasserhöhen an sechs Querschnitten des 1,00 m breiten und 2,50 m langen Testfelds gemessen. Zur Egalisierung von partiellen Oberflächenunebenheiten wurden drei Längsschnitte untersucht. Insgesamt konnten 18 Punktwerte pro Testlauf gemessen werden. Diese Punkte wurden zu Beginn der Messreihen festgelegt und ihre Position fixiert, sodass sie immer rekonstruierbar war.

Die Versuchsergebnisse ergaben die gewünschten Parameter für die Validierung des Rechenmodells.

2.3.2 Zusammenhang Wasserfilmdicke – Aquaplaninggefahr

Für den Zusammenhang zwischen Wasserfilmdicke und Aquaplaninggefahr wurden vorhandene empirische und physikalische Modelle aus der Literatur untersucht. Für die Aquaplaning-Performance ist die sichere Befahrbarkeit der Straßenoberfläche (ohne Aufschwimmen eines oder mehrerer Reifen) zwingende Voraussetzung. Als praktikabler Indikator für die Aquaplaninggefahr wird im Allgemeinen die Aquaplaning-Geschwindigkeit als einziger operationaler, kurzfristig beeinflussbarer Faktor angesehen. Von Bedeutung ist dabei die tangentielle Aquaplaning-Geschwindigkeit (längs der Fahrtrichtung). Die radiale Aquaplaning-Geschwindigkeit ist nur bei der Fahrt durch enge Kurven von Bedeutung und daher in Verwindungsbereichen nicht maßgebend.

Aus der Literatur sind nur wenige Regressionsmodelle zwischen Wasserfilmdicke und Aquaplaning-Geschwindigkeit bekannt. Am zuverlässigsten sind empirische Modelle, bei denen Testreihen von Fahrversuchen durchgeführt wurden. Aus die-

sen wurde ein älteres Regressionsmodell verwendet und über eine Kopplung mit Auswertungen aktueller Reifentypen um den Faktor "Reifenprofiltiefe" erweitert.

2.4 Modellrechnung

Das physikalische Modell berechnet zu jedem Gitterelement der modellierten Fahrbahnoberfläche den Wert der Wasserfilmdicke und den korrespondierenden Wert der Aquaplaning-Geschwindigkeit. In das Modell sind Statistik-Module integriert, die die Aquaplaning-Performance mittels Indikatoren beschreiben.

Beispielsweise können die fahrstreifen- bzw. fahrspurenbezogene Aquaplaning-Geschwindigkeit (Pkw-Reifen), Geschwindigkeits-Profile bei der Fahrt durch den Modellierungsbereich und Überschreitungs-längen definierter Geschwindigkeitsklassen dargestellt werden. Für die Kontrolle bestehender kritischer oder geplanter mehrstreifiger Straßenabschnitte wurde ein Rechenprogramm in C++ entwickelt. Zur Evaluierung von Sanierungsmethoden wurde zusätzlich ein Modul für den beliebigen Einsatz von Entwässerungsrinnen integriert. Dieses Softwaretool "PlanUS" wurde der BAST zur eigenen Anwendung bzw. zum Einsatz in der Straßenbauverwaltung und interessierten Ingenieurbüros übergeben.

2.5 Unfallauswertungen

Zur grundsätzlichen Untersuchung der Aquaplaninggefahr auf Verwindungsstrecken breiter Richtungsfahrbahnen wurden mehrere hundert Autobahnkilometer mit dreistreifigen Richtungsfahrbahnen in Bayern untersucht. Einbezogen wurden sämtliche Unfälle der Jahre 2001 und 2002.

Von besonderer Bedeutung war die Eingrenzung der Verwindungsbereiche. Über die in der Straßendatenbank abgelegten Querneigungen konnten Querneigungswechsel lokalisiert und über Korrelationsrechnungen die Einflussbereichslänge eines Querneigungswechsels hinsichtlich der Unfallgefährdung bestimmt werden, um damit die Klassenzuordnung (Verwindungsbereich/Reststrecke) herzustellen. Sämtliche Trassierungs- und Unfalldaten wurden in 100-m-Klassen umcodiert und die Korrelation zwischen Unfall- und Trassierungsdaten klassenweise untersucht.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Ergebnisse der Unfalluntersuchungen

Ein Unfall wird von der aufnehmenden Polizei dort detektiert, wo das Fahrzeug zum Stillstand kommt. Die Stelle der Unfallursache (unfallauslösendes Ereignis) ist in der Regel davon verschieden. Die Auswertung ergab, dass sich der Einflussbereich eines Querneigungswechsels und damit des Verwindungsbereichs bis ca. 350 m in Fahrtrichtung erstreckt. Danach stellt sich keine signifikante Unterscheidung der Unfallraten im Vergleich zur sonstigen Strecke dar. In den Verwindungsbereichen der untersuchten Autobahnabschnitte in Bayern konnte bei nasser Fahrbahn eine erhöhte Unfallgefahr festgestellt werden. Hier wurden doppelt so viele Fahrnfälle (Unfallrate) wie auf der restlichen Strecke erfasst, bei sonst gleichen Witterungsbedingungen. Bei nasser Fahrbahn erhöht sich generell das Risiko für Fahrnfälle gegenüber einer trockenen Fahrbahn. Auf "normaler", knotenpunkts- und verwindungsbereichsfreier Strecke verdoppelt sich das Risiko, in Verwindungsbereichen verfünffacht es sich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass nasse Fahrbahnoberflächen zu einem Anstieg der Fahrnfälle führen. In Verwindungsbereichen ist dieser Anstieg gegenüber der Vergleichsstrecke überproportional und kann mit großer Wahrscheinlich-

keit auf den Aquaplaningeffekt zurückgeführt werden, da andere Faktoren (z. B. Griffigkeit, Spurrinntiefe) ausgeschlossen wurden.

3.2 Ergebnisse der Modellrechnungen

Bei den Modellrechnungen wurden nur aus Trassierungsparametern rekonstruierte und gerechnete Topographien untersucht. Variiert wurde jeweils ein Parameter, alle anderen wurden als Konstanten gerechnet:

1. Die Längsneigung im Verwindungsbereich beeinflusst die Wasserfilmdicke entscheidend. In Bereichen geringer Querneigung muss die Längsneigung den ausreichenden Gefälleanteil für die Mindestschrägneigung zur Verfügung stellen. Der geltende Grenzwert der RAS-L liegt bei 0,7 % (besser: 1,0 %). Die Erhöhung des Mindestgrenzwerts der Längsneigung auf 1,5 % bei sonst gleich bleibenden Trassierungsparametern im Verwindungsbereich führt bei jährlich einmal vorkommenden Regenereignissen zu einer Aquaplaning-Geschwindigkeit in Höhe der Richtgeschwindigkeit von 130 km/h und wird daher in zukünftigen Regelwerken empfohlen.
2. Die Mindestquerneigung (Grenzwert: 2,5 % aus entwässerungstechnischen Gründen) wurde variiert. Der Mindestwert von 2,5 % konnte bestätigt werden. Eine Absenkung auf $\min q < 2,5 \%$ bewirkt eine deutliche Anhebung der Wasserfilmdicken, dagegen hatte eine Anhebung von $\min q$ keinen Einfluss.
3. Die Mindestanrampungsneigung (Grenzwert: $\min \Delta s = 0,10 a$ aus entwässerungstechnischen Gründen) wurde ebenso variiert. Die Erhöhung der Mindestanrampungsneigung und damit eine Verkürzung der zentralen Verwindungsstrecke unter den Wert von 50 m ergeben niedrigere Wasserfilmdickenverteilungen. Der Grenzwert für die Anrampungsneigung sollte jedoch nicht geändert werden, da fahrdynamische Belange gegensätzlich beeinflusst werden.
4. Die Fahrbahnbreite beeinflusst die Wasserfilmdicke linear. Je breiter die Fahrbahn, desto höhere – von der Falllinienlänge abhängige – Wasserfilmdicken stellen sich ein.
5. Die Anhebung der Reifenmindestprofiltiefe von derzeit 1,6 mm auf 2,0 mm hebt die Aquaplaning-Geschwindigkeit deutlich an und führt zu einer signifikanten Reduzierung der Aquaplaninggefahr in Verwindungsbereichen.

Neben den Trassierungsparametern wurde der Einfluss der Fahrbahnverwindung gegenüber der normalen Streckensituation (bei sonst gleich bleibenden Randbedingungen) untersucht. Bei bestimmten Konstellationen von Reifenprofiltiefe und Regenintensität kommt es zu einer deutlichen Absenkung der Aquaplaning-Geschwindigkeit (Größenordnung ca. 20–60 km/h je nach Wahl der Modellkonstanten) infolge des "Überraschungseffekts" beim Übergang von der normalen Strecke in den Verwindungsbereich. Es liegt die Vermutung nahe, dass es bei diesen Fahrzeugen häufiger zu Aquaplaningunfällen kommt.

Handelsübliche Entwässerungsrinnen können bei den für Autobahnen üblichen Belastungsfällen (Zuflussmenge, Sohlneigung) sämtliches zufließendes Wasser auffangen; dies belegen gesondert durchgeführte Abflussversuche. Aus theoretischen Überlegungen folgt jedoch, dass im Normalfall ein sehr dichtes Rinnenraster erforderlich ist, da die Wasserfilmdicke mit der Fließweglänge je nach Belag im Verhältnis $WFD \sim L^{-0,46 \dots -0,62}$

zunimmt, unmittelbar hinter einer Rinne der Wasserpegel überproportional ansteigt und somit in kurzen Abständen wieder in den kritischen Bereich der Wasserfilmdicken kommt.

4 Folgerungen für die Praxis

4.1 Empfehlungen für die Planungspraxis

Bei der Planung von Bundesfernstraßen sollten die gültigen bzw. die neu vorgeschlagenen, entwässerungstechnisch bedingten Grenzwerte (siehe Kapitel 3) beachtet werden, auch wenn es sich um zweistreifige Richtungsfahrbahnen handelt, da ein späterer Ausbau bereits zu berücksichtigen ist. Eine Vorprüfung der Aquaplaning-Performance mittels Modellrechnungen sollte zusätzlich erfolgen. Im Bestandsnetz können Trassierungsparameter nur durch die Erhöhung der Querneigung verändert werden. Situationsverbesserungen können jedoch auch durch Belagsaustausch, Belagsaufrauhung (z. B. Rillenfräsung) und Einbau von Entwässerungsrinnen erreicht werden. Welche Maßnahme am geeignetsten und auch wirtschaftlich ist, sollte vorab mittels Modellrechnungen mit dem Softwaretool "PlanUS" erfolgen.

4.2 Forschungsbedarf

1. Der Zusammenhang zwischen Regenintensität, Wasserfilmdicke, Fahrgeschwindigkeit und Unfallgefahr sollte an ausgewählten, entwässerungskritischen Autobahnabschnitten näher untersucht werden. Der Einfluss der Regenintensitäten auf die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten ist weitgehend unbekannt. Bei Kenntnis dieser Zusammenhänge könnte die Aquaplaninggefahr mit dem Einsatz der Softwaretools "PlanUS" noch besser eingeschätzt werden.
2. Eine wissenschaftliche empirische Grundlage für den Zusammenhang Wasserfilmdicke – Aquaplaning-Geschwindigkeit fehlt für heutige Reifentypen. Reifenhersteller und sonstige Institutionen (z. B. ADAC, Autozeitschriften) führen zwar Reifentests durch, fast immer werden dabei Neureifen getestet und es wird nur eine Wasserfilmdicke (i. A. 6, 7 oder 8 mm) untersucht. Die einzige Variation pro Test besteht in der Untersuchung verschiedener Reifenprofilmuster. Aquaplaningtests mit Parametervariationen werden empfohlen. Das Testfahrzeug und die Profilmuster sollten repräsentativ sein.
3. Die Aquaplaning-Geschwindigkeit ist mit der Wasserfilmdicke und der Reifenprofiltiefe gekoppelt. Während die Wasserfilmdicke mit dem vorgestellten Rechenmodell für diverse Trassierungssituationen berechnet werden kann, ist über eine Verteilung von Profiltiefen, z. B. zur Schaffung eines Bewertungshintergrunds, keine Aussage möglich. Lediglich an der Stelle 1,6 mm (Mindestprofiltiefe) ist eine Verteilung bekannt (Messungen GTÜ). Eine Stichprobenerhebung im Straßenraum von tatsächlichen Profiltiefen wäre hilfreich.
4. Bei den Beregnungsversuchen wurden Fahrbahnbeläge eingebaut, die typisch für breite BAB-Fahrbahnen sind und zu Aquaplaningproblemen führen können. Um die Frage zu beantworten, welches Maß an Verbesserung durch den Austausch des Belags mit einem Dränbelag (z. B. offenporigen Asphalt) erreicht werden kann, sollten Beregnungsversuche an 2 bis 3 ausgewählten Dränbelägen durchgeführt werden. Wenn Fließgleichungen hierfür vorliegen, könnten mit dem Rechenmodell auch diverse Sanierungskonzepte – auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten – miteinander verglichen werden (z. B. i [St] Querrinnen vs. j [m²] Dränbeton vs. k [m] gefräste Rillen).
5. Das entwickelte Computerprogramm "PlanUS" behandelt ausschließlich freie Fahrbahnränder. Bei der Querneigung der Fahrbahn zur Fahrbahnmitte hin wird in der Regel die Entwässerung entlang eines Hochbords mit Abläufen geregelt. Diese entwässerungstechnische Besonderheit wurde nicht untersucht. Es sollte daher die Implementierung eines ergänzenden Moduls für sprunghafte entwässerungstechnische Änderungen an Fahrbahnrändern, z. B. bei Hochborden, zu ganzheitlichen Entwässerungsbetrachtungen angestrebt werden.