



REIHE 12
VERKEHRSTECHNIK/
FAHRZEUGTECHNIK



Fortschritt- Berichte VDI

Thorsten Lajewski, M. Sc.
Nufringen

NR. 816

Friction Potential Estimation for Autonomous Driving

BAND
1 | 1

VOLUME
1 | 1

Friction Potential Estimation for Autonomous Driving

vorgelegt von
Thorsten Lajewski, M. Sc.
geb. in Remscheid

an der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technische Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Utz von Wagner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller

Gutachter: Prof. Dr.techn. Manfred Plöchl

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 20.09.2021

Berlin 2021



REIHE 12
VERKEHRSTECHNIK/
FAHRZEUGTECHNIK

Fortschritt- Berichte VDI



Thorsten Lajewski, M. Sc.,
Nufringen

NR. 816

Friction Potential Estimation for Autonomous Driving

BAND
1 | 1

VOLUME
1 | 1

VDI verlag

Lajewski, Thorsten, M. Sc.

Friction Potential Estimation for Autonomous Driving

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 816. Düsseldorf: VDI Verlag 2022.

192 Seiten, 62 Bilder, 25 Tabellen.

ISBN 978-3-18-381612-5, E-ISBN 978-3-18-681612-2, ISSN 0178-9449

67,00 EUR/VDI-Mitgliederpreis: 60,30

Für die Dokumentation: Reifen – Reibwert – Autonomes Fahren – Trajektorienplanung – Straßenbau – Straßenwetter – Klassifizierungsverfahren

Keywords: Tyre – Friction – Autonomous Driving – Trajectory Planning – Road Maintenance – Road Weather – Classification Methods

Autonomous vehicles need information about the environment for trajectory planning. This information is usually stored in a high-definition map. This map is made available to the vehicle. This thesis deals with the friction potential, which is important for planning. The unitless value determines the maximum forces that can be transmitted between tyre and road. The friction potential is a function of many influencing factors. In this work, possibilities are evaluated to capture the most important of these influencing factors, the road surface and the intermediate layer, via external data sources. To determine the influence of the road surface, friction measurement methods established in road construction are compared with vehicle measurements. To determine the intermediate layer, data from weather stations, rain radar and a test vehicle are evaluated.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek (German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

Zugl.: Berlin, Technische Universität, Diss., 2021

© VDI Verlag GmbH | Düsseldorf 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten. Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 978-3-18-381612-5, E-ISBN 978-3-18-681612-2, ISSN 0178-9449

Danksagung

Die vorliegende Promotionsschrift ist das Ergebnisse mehrerer Jahre intensiver Arbeit. Die Resultate wurden von vielen Menschen mit geformt oder erst ermöglicht. Zualererst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller für die Betreuung der Arbeit danken. Die Treffen in Berlin und die Forschungsergebnisse des Fachgebiets Kraftfahrzeugtechnik haben viel zur Ausrichtung der Arbeit beigetragen. Mein weiterer Dank gilt Prof. Dr.techn. Manfred Plöchl für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Einen großen Beitrag zu der Dissertation haben auch viele meiner Kollegen der Daimler AG geleistet, bei der ich zu dem spannenden Thema Reibwertpotentialschätzung forschen konnte. Insbesondere gilt hier der Dank Alex Wütherich, mit dem ich unter anderem zahlreiche Tage mit Messfahrten und Datenaufbereitung verbracht habe. Zusätzlich hat der Austausch mit Dr.-Ing. Jochen Rauh und Prof. Dr.-Ing Dieter Ammon viele Impulse bei der Umsetzung der Arbeit gesetzt. Zudem hat auch mein ehemaliger Büronachbar Josef Dürnberger viel geholfen, indem er den initialen Aufbau des Messfahrzeugs geplant und mir viel zum Thema Messtechnik beigebracht hat. Auch unsere Werkstatt hat bei den zahlreichen nötigen Auf- und Umbauten des Messfahrzeugs große Unterstützung geleistet.

Die Durchführung der Messungen mit den Mess-LKWs SKM und RoadSTAR wäre ohne die Unterstützung weiterer Personen nicht möglich gewesen. Ein Dank gilt Dr. Ulrike Stöckert von der Bundesanstalt für Straßenwesen, die mir einen ersten Einblick in die Daten der Zustandserfassung und Bewertung (ZEB) ermöglicht hat. Für die Durchführung der SKM Messungen danke ich dem Aalener Baustoffprüfinstitut. Die RoadSTAR Messungen konnten nur durch den großen Einsatz des Teams des Austrian Institute of Technology (AIT) und die Betreuung durch das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) durchgeführt werden.

Zu guter letzt möchte ich mich auch meiner Familie für die Unterstützung während meines gesamten Studiums und der Promotionszeit danken.

Böblingen, Februar 2021

Thorsten Lajewski

Contents

Abbreviations	VIII
Symbols	X
Abstract	XVI
Kurzfassung	XVIII
1 Introduction	1
1.1 Motivation	2
1.2 State of the Art	11
1.2.1 Friction Potential Measurement Methods	11
1.2.2 Friction Potential Estimation Methods	23
1.3 Objectives	33
1.4 Outline	34
2 Fundamentals of Tyre Friction and its Effect in Tyre Models	36
2.1 Important Influencing Factors	36
2.1.1 Road Surface	37
2.1.2 Tyre	39
2.1.3 Intermediate Layer	46
2.1.4 Vehicle	50
2.2 Tyre Models	50
3 Development of a Friction Potential Measurement Method	55
3.1 Test Vehicle	55
3.2 Measurement Method - Single Wheel Braking	57
3.2.1 Safety Considerations	58
3.2.2 Measurement Data Processing	61
3.2.3 Comparison with Full Braking Measurements	67
3.3 Measurements on Public Roads	70
3.3.1 Variation of Measured Friction Potential Values	71

3.3.2	Influence of the Road Surface	74
3.3.3	Influence of the Road Condition	75
3.3.4	Influence of the Surface Temperature	77
3.3.5	Influence of the Velocity	78
4	Grip Map	81
4.1	SKM Measurements	83
4.1.1	Test Track	83
4.1.2	Public Road	87
4.1.3	Comparison with Single Wheel Braking	90
4.2	RoadSTAR Measurements	92
4.2.1	Test Track	93
4.2.2	Public Road	97
4.2.3	Comparison with Single Wheel Braking	101
5	Intermediate Layer Classification	104
5.1	Input Sources	104
5.1.1	Road Weather Information System	105
5.1.2	Radar	106
5.1.3	Vehicle Data	106
5.2	Ground Truth	107
5.3	Classification methods	110
5.3.1	Established Intermediate Layer Classification Methods	111
5.3.2	Application of Classification Methods	117
5.4	Comparison of Classification Results	125
6	Remaining Risk of Overestimating the Friction Potential	127
6.1	Friction Requirements for Normal Driving	127
6.2	Risk Estimation	131
7	Conclusions	136
	Appendix	139
A	Vehicle Model	139
B	Vehicle Measurements	142
B.1	Friction Measurements on FAT track	142
B.2	Hydroplaning Example	142

B.3 Measurements on Snow/Ice	145
C Continuous Friction Potential Measurements	147
Bibliography	155

Abbreviations

Abbreviation	Description
ABS	Anti-lock Braking System
AD	Autonomous Driving
ADAS	Advanced Driving Assistance System
ADC	Analogue Digital Converter
AIT	Austrian Institute of Technology
ANN	Artificial Neural Network
ASCII	American Standard Code for Information Inter- change
AV	Autonomous Vehicle
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BPN	British Pendulum Number
BUFR	Binary Universal Form for the Representation of meteorological data
CAN	Controller Area Network
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFI	European Friction Index
ESC	Electronic Stability Control
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IFI	International Friction Index
LQR	Linear Quadratic Regulator
MASS	Mean Acceleration to Standstill
MFDD	Mean Fully Developed Deceleration
MLR	Multinomial Logistic Regression

Abbreviation	Description
MPD	Mean Profile Depth
MTD	Mean Texture Depth
PBFC	Peak Brake Force Coefficient
RWIS	Road Weather Information System
SAE	Society of Automotive Engineers
SCRIM	Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine
SKM	Seitenkraftmessverfahren
SRM	Stuttgarter Reibwertmesser
SRTT	Standard Reference Test Tyre
SWB	Single Wheel Braking
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
XBS	Extended Brake Stiffness

Symbols

Roman

Symbol	Description	Unit
A	Area of Contact Patch	m^2
ABS	Flag to Include ABS Operation in Friction Potential Estimation	
A_{ifi}	IFI Friction Device Parameter A	
B_{ifi}	IFI Friction Device Parameter B	
B_{MF}	Magic Formula Parameter B	
C	Height Correlation Function	m^3
C_1	WLF Equation Emperical Constant C_1	
C_2	WLF Equation Emperical Constant C_2	
C_{ifi}	IFI Friction Device Parameter C	
C_{MF}	Magic Formula Parameter C	
D	Set of Observations	
D_f	Fractal Dimension	
D_{MF}	Magic Formula Parameter D	
E	Young's Modulus	Pa
$EIML$	Estimated Intermediate Layer Class	
E_{MF}	Magic Formula Parameter E	
E'	Storage Modulus	Pa
E''	Loss Modulus	Pa
E^*	Loss Modulus	Pa
F_{30}	European Friction Index	
F_{60}	International Friction Index	
F	Input/ Feature	
\mathbf{F}	Input/ Feature Vector	
F_{adh}	Adhesion Component of Tyre Force	N
$F_{cohesion}$	Cohesion Component of Tyre Force	N

F_h	Horizontal Force acting in the X-Y-Plane	N
F_{hyst}	Hysteresis Component of Tyre Force	N
F_L	Lift Force	N
F_{vis}	Viscous Component of Tyre Force	N
F_x	Longitudinal Force	N
F_y	Lateral Force	N
F_z	Vertical Force	N
G	Shear Modulus	Pa
G	Ratio of Deceleration of Tested Tyre compared to Reference Tyre	
G_w	Weighting Function	
I	Number of Inputs	
IML	Intermediate Layer Class	
I_{yy}	Rotational Inertia of the Wheel	kg m ²
I_{zz}	Yaw Inertia	N m
K	Scaling Parameter K	
L	Length of Tyre Contact Patch	m
L_D	Diameter of Contact Area	m
M	Number of Features	
M_{brk}	Brake Torque	N m
M_z	Yaw Moment	N m
N	Number of Measurements / Observations	
O	Class	
P	Probability	%
R	Corner Radius	m
S	Number of Segments	
SD	Spin-down of Free Rolling Tyre Due to (Partial) Aquaplaning	%
S_p	IFI Corrected Surface Texture	
T	Temperature	K
TD	Thread Depth of the Tyre	mm
T_g	Glass Transition Temperature	T _g
TXD	Texture Depth of the Road Surface	mm
Tyre	Correlation Parameter for the Tyre Performance	
U	Number of Classes	
V	Viewing Distance	m

W	Width of Tyre Contact Patch	m
WD	Water Depth on the Road	mm
X	Random Variable	
X	Position X in Global Coordinate System	m
Y	Random Variable	
Y	Position Y in Global Coordinate System	m
a	Real Part of Complex Number	
α	Acceleration	m s^{-2}
α_{3s}	Mean Deceleration in the Three Seconds Interval starting from ABS Control Start	m s^{-2}
α_{mass}	Mean Deceleration in the Interval between ABS Control Start and Standstill	m s^{-2}
α_{mean}	Mean Deceleration in the Interval between Brake Pedal Application and Standstill	m s^{-2}
α_{mffd}	Mean Fully Developed Deceleration in the Interval between Brake Pedal Application and Standstill	m s^{-2}
α_x	Longitudinal Acceleration of Vehicle in Body Coordinate System	m s^{-2}
α_y	Lateral Acceleration of Vehicle in Body Coordinate System	m s^{-2}
α_{FAT}	Parameter a of Decision Function used in FAT Project	
α_{ifi}	IFI Surface Measurement Device Parameter a	
α_T	WLF Equation Superposition Parameter	
b	Imaginary Part of Complex Number	
b_{FAT}	Parameter b of Decision function used in FAT Project	
b_{ifi}	IFI Surface Measurement Device Parameter b	
c_{FAT}	Parameter c of Decision Function used in FAT Project	
c_k	Longitudinal Slip Stiffness	
c_L	Lift Coefficient	
c_{rot}	Rotational Spring Stiffness	N rad^{-1}
dT	Evaluation Interval Length	s
f	Decision Function	
fl	Front Left Tyre	

fr	Front Right Tyre	
g	Gravitational Constant 9.81 m s^{-2}	g
h	Height of Road Asperities	m
h_{cog}	Height of Center of Gravity over Ground	m
i	Feature Index	
i	Measurement Index	
j	Segment Index	
k	Brush Stiffness	N m^{-1}
k_s	Factor Accounting for the Role Stiffness Distribution between Front and Rear Axle	
l	Weight Based on Correct Class	
l_{wb}	Wheel Base	m
l_f	Distance Center of Gravity to Front Axle	m
l_r	Distance Center of Gravity to Rear Axle	m
m	Vehicle Mass	kg
o	Correct Class for Training	
o	Set of Correct Classes used for Training	
p_i	Internal Tyre Pressure	Pa
q	Wave Vector	1/m
r	Absolute Value of Complex Number	
r_0	Unloaded Tyre Radius	m
r_e	Effective Tyre Radius	
rl	Rear Left Tyre	
r_L	Loaded Tyre Radius	m
rr	Rear Right Tyre	
r_{xy}	Pearson Correlation Coefficient	
r	Yaw Velocity	rad s^{-1}
s	Driven Distance	m
sig	Sigmoid Function	
s_N	Standard Deviation	
t	Time	s
t_f	Track Width Front	m
t_r	Track Width Rear	m
u	Weight based on Correct Class and Estimated Class	
v	Velocity	m s^{-1}
v_{safe}	Safe Driving Velocity of the vehicle	m s^{-1}

v_{crit}	Critical Aquaplaning Velocity	$m s^{-1}$
\tilde{v}	Velocity	kph
v_0	Start Velocity of Braking Test	$m s^{-1}$
v_x	Longitudinal Velocity of Vehicle in Body Coordinate System	$m s^{-1}$
v_y	Lateral Velocity of Vehicle in Body Coordinate System	$m s^{-1}$
w	Weight	
\mathbf{w}	Weight Vector	
x	Outcome of Random Variable X	
x_{in}	Input of a Neuron	
y	Outcome of Random Variable Y	
z	Output of a Neuron	
z	Complex Number	

Greek

Symbol	Description	Unit
E	Error	
Ω	Heading Angle	°
Φ	Log Odds	
α	Lateral Slip	rad
χ	Value of Road Friction Potential Measurement	
δ	Phase Angle	rad
δ_W	Front Wheel Steering Angle	°
ϵ	Strain	
η	Dynamic Viscosity	Pa s
η_D	Parameter of a Probability Distribution D	
κ	Longitudinal Slip	
κ_e	Ordinate of Slip-force Curve	
λ	Length of Road Asperities	m
μ	Friction	
μ_{pot}	Friction Potential	
$\mu_{Roadstar}$	Friction Potential measured by the RoadSTAR Truck	
ν	Poisson's Ratio	
$\dot{\omega}$	Rotational Acceleration of the Wheel	$rad s^{-2}$

ω_f	Angular Frequency	Hz
ω	Wheel Rotational Velocity	rad s^{-1}
ϕ	Sliding Direction	rad
ψ	Twist Angle of the Suspension	rad
ρ	Density	kg m^{-3}
σ	Stress	Pa
ζ	Zoom Factor	

Abstract

The friction potential is a unitless parameter of the maximal longitudinal and lateral forces transferable between vehicle and road normalized by the tyre contact forces. Exact knowledge of this parameter can improve advanced driver assistance systems. Autonomous vehicles require information about the friction potential for route and trajectory planning. Based on the friction potential the planned velocity has to be adopted in a way that the trajectory can be followed and that the stopping distance is inside the visible range of the vehicle sensors.

In order to meet these requirements, continuously available friction potential information must be provided. This requires knowledge of the friction potential with a preview of more than 100m. Instead of estimating the exact friction potential, it is sufficient to be able to guarantee a lower boundary.

Due to the wide range of possible applications of the friction potential, many methods for estimating the friction potential have already been researched. These can be divided into two main categories: effect-based methods and cause-based methods. Effect-based methods estimate the friction potential on the basis of the driving dynamics variables measured in the vehicle. Cause-based methods use vehicle sensors and/or Car2x data to try to determine parameters that influence the friction potential, and from this information defer changes of the friction potential. Only cause-based methods can determine the friction potential with a sufficient preview. Therefore, in this thesis, modules of a cause-based method were evaluated.

The basis for the evaluation of each friction potential estimation method is the measurement of the real friction potential. This is typically determined by full braking tests. Since these tests can only be carried out on test tracks, a new method has been developed which brakes only one wheel for a short time until ABS control is activated. This method was used to perform repeated friction potential measurements at 74 defined points along public roads over a period of 6 months. Based on this data, the main influencing factors intermediate layer and road surface were confirmed as expected. Furthermore, differences between sets of tyres, even of the same type, were shown. These were attributed to wear and thus excluded in the evaluation. No other influences known from literature, such as a change in the friction potential with the season or a speed dependence, were found. An influence of the road temperature on the friction potential could not be excluded, but the influence differs greatly depending on the braking point, so that this dependence was included in the measurement uncertainty.

In order to analyze the influence of the road surface, the friction potential meas-

urement methods Seitenkraftmessverfahren (SKM) and RoadSTAR, which are used in road maintenance, were compared with the created database. The results of the Seitenkraftmessverfahren show no correlation with the friction potential measurements conducted by the test vehicle. The RoadSTAR results, however, show a clear correlation. Adjustments of the RoadSTAR truck to further improve this correlation have failed due to limitations of the measurement technology used.

The intermediate layer between tyre and road was estimated using external data from road weather station, rain radar and from the test vehicle using various machine learning methods. It was shown that the correct intermediate layer can be classified more than 90 % of the time. The classification of potential aquaplaning conditions and the influence of winter services on the intermediate layer proved to be problematic.

A final evaluation shows that using road information determined by RoadSTAR and an intermediate layer estimation by external data and machine learning, a residual risk of exceeding the friction potential of 1.9 % remains. 1.5 % of this remaining risk is due to the misclassification of the intermediate layer ice/snow.

In the future, further improvements could be achieved by adapting the working conditions of the RoadSTAR truck's measurement tyre to those of a passenger car tyre during ABS braking. A significant improvement of the intermediate layer classification seems only possible by using ploughing and gridding information of the winter service provider. Furthermore, the detection of potential aquaplaning conditions must be improved. The overall methodology can be improved by including further estimation methods and sensors.

Kurzfassung

Das Reibwertpotential beschreibt als einheitenlose Kenngröße die auf die Reifenaufstandskräfte normierten maximalen Längs- und Querkkräfte zwischen Fahrzeug und Fahrbahn. Eine genaue Kenntnis des Reibwertpotentials kann viele Fahrassistenzsysteme verbessern. Autonome Fahrzeuge benötigen diese Größe zur Routen- und Trajektorienplanung. Sie wird verwendet, um die Geschwindigkeit anpassen zu können, sodass jederzeit der geplanten Trajektorie gefolgt werden kann und der Anhalteweg kleiner als die aktuelle Sichtweite ist. Um diese Anforderungen zu erfüllen, muss eine kontinuierlich verfügbare Information über das Reibwertpotential bereitgestellt werden. Dafür ist Wissen über das Reibwertpotential mit einer Vorschau von mehr als 100 m notwendig. Anstatt das genaue Reibwertpotential zu schätzen, ist es hierbei jedoch ausreichend, eine untere Schranke garantieren zu können.

Aufgrund der weiten Einsatzmöglichkeiten des Reibwertpotentials wurden bereits viele Verfahren zur Reibwertpotentialschätzung erforscht. Diese lassen sich in zwei Hauptkategorien einteilen: effektbezogene Methoden und ursachenbezogene Methoden. Effektbezogene Methoden schätzen das Reibwertpotential auf Basis der im Fahrzeug gemessenen Fahrdynamikgrößen. Ursachenbezogene Methoden hingegen versuchen das Reibwertpotential über Fahrzeugsensorik und/ oder Car2x-Daten Parameter, die das Reibwertpotential beeinflussen, zu bestimmen und daraus auf Änderungen des Reibwertpotentials zu schließen. Nur diese Methoden können das Reibwertpotential mit einer ausreichenden Vorschau bestimmen. Daher wurden in dieser Arbeit Bausteine einer ursachenbezogenen Methode bewertet.

Gundlage für die Bewertung jeder Reibwertpotentialschätzmethode ist die Messung des realen Reibwertpotentials. Dieser wird typischerweise durch Vollbremsungen ermittelt. Da Vollbremsungen nur auf Testgeländen durchgeführt werden können, wurde eine neue Methode entwickelt, die nur ein Rad kurze Zeit bis in die ABS-Regelung bremst. Mit dieser Methode wurden über ein halbes Jahr hinweg wiederholte Reibwertbremsungen an 74 definierten Punkten entlang öffentlicher Straßen durchgeführt. Auf Basis dieser Daten wurden die erwarteten Haupteinflussfaktoren Zwischenschicht und Straßenoberfläche bestätigt. Zudem wurden Unterschiede zwischen Reifensätzen, sogar des gleichen Typs, gezeigt. Diese wurden auf Verschleiß zurückgeführt und für die weitere Bewertung nicht betrachtet. Keine weiteren in der Literatur gefundene Einflüsse, wie eine Veränderung des Reibwertpotentials mit der Jahreszeit oder eine Geschwindigkeitsabhängigkeit, wurden gefunden. Ein Einfluss der Straßentemperatur auf das Reibwertpotential konnte nicht ausgeschlossen werden, aber der Einfluss unterscheidet sich je nach Bremspunkt stark, daher wurde diese Abhängigkeit mit in die

Messunsicherheit aufgenommen.

Um den Einfluss der Straßenoberfläche zu analysieren, wurden die im Straßenbau verwendeten Reibwertpotentialbewertungsverfahren Seitenkraftmessverfahren (SKM) und RoadSTAR mit der erstellten Datenbasis verglichen. Die Ergebnisse des Seitenkraftmessverfahrens zeigen keine Korrelation mit den durch das Testfahrzeug bestimmten Reibwertpotentialmessungen. Die RoadSTAR-Ergebnisse hingegen zeigen einen deutlichen Zusammenhang. Anpassungen des RoadSTAR-LKW zur weiteren Verbesserung dieser Korrelation sind auf Grund von Limitierungen der verwendeten Messtechnik gescheitert.

Die Zwischenschicht zwischen Reifen und Straße wurde mit Hilfe von externen Daten aus Straßenwetterstation, Regenradar und aus dem Testfahrzeug mithilfe verschiedener Machine-Learning-Methoden geschätzt. Es wurde gezeigt, dass die richtige Zwischenschicht über 90 % der Zeit sicher eingeschätzt werden konnte. Problematisch erwies sich hierbei das Klassifizieren von potentiellen Aquaplaningbedingungen und die Beeinflussung der Zwischenschicht durch Winterdienste.

Eine abschließende Bewertung zeigt, dass unter Verwendung von Straßeninformationen ermittelt durch RoadSTAR und einer Zwischenschichtschätzung durch externe Daten und Machine-Learning ein Restrisiko einer Reibwertpotentialüberschreitung von 1.9 % bestehen bleibt. Davon entfallen 1.5 % auf das Fehlklassifizieren der Zwischenschicht Eis/ Schnee.

In Zukunft könnten weitere Verbesserungen erzielt werden, in dem die Arbeitsbedingungen des Messreifens des RoadSTAR-LKW an die eines PKW-Reifens während einer ABS-Bremung angepasst werden. Eine deutliche Verbesserung der Zwischenschichtprognose scheint nur unter Verwendung von Streu- und Räumungsdaten des Winterdienstes möglich. Außerdem muss die Erkennung von potentiellen Aquaplaningbedingungen verbessert werden. Die Gesamtmethodik kann verbessert werden durch das Einbeziehen weiterer Schätzverfahren und Sensoren.

