

# **Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysesysteme**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 298**

**bast**

# **Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysysteme**

von

Henning Balck

HELLER Ingenieurgesellschaft mbH  
Darmstadt

Hagen Schüller  
Michael Balmberger

PTV Transport Consult GmbH  
Stuttgart

unter Mitarbeit von  
Christian Rossol  
PTV AG

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 298

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen  
veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse  
in der Schriftenreihe **Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe  
besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter  
dem Namen der Verfasser veröffentlichten  
Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des  
Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe,  
auch auszugsweise, nur mit Genehmigung  
der Bundesanstalt für Straßenwesen,  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen** können  
direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH,  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen,  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre  
Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im  
Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet.  
Dieser Dienst wird kostenlos angeboten;  
Interessenten wenden sich bitte an die  
Bundesanstalt für Straßenwesen,  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)**  
zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen  
BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

#### **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt: FE 09.0186/2011/DRB:**  
Verfahren zur Zusammenführung von Informationen  
unterschiedlicher Netzanalysesysteme

**Fachbetreuung:**  
Thomas Jährig

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-350-3

Bergisch Gladbach, September 2017

## Kurzfassung – Abstract

### Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalyse-systeme

Ziel des Forschungsvorhabens war die Untersuchung des Einflusses einzelner Zustandsparameter auf das Unfallgeschehen unter Berücksichtigung von Verkehrs- und Infrastrukturmerkmalen. Durch die Zusammenführung von Informationen aus den beiden Netzanalyse-systemen „Zustandserfassung und -bewertung“ (ZEB) und der (Empfehlungen für die) „Sicherheitsanalyse von Straßennetzen“ (ESN) sollten Verbesserungspotenziale für die Optimierung des Sicherheitsmanagement der Straßeninfrastruktur abgeleitet werden.

Daten aus drei Analyse-ländern für Bundesautobahnen sowie Bundes- und Landesstraßen wurden datentechnisch durch neu geschaffene Aggregations- und Auswerte-verfahren auf ein gemeinsames Netzmodell aufbereitet.

In Pilotanalysen wurden deskriptive Auswertungen des Unfallgeschehens und der Zustandsparameter durchgeführt. Verschiedene Analysemethoden für die Quantifizierung eines Zustandseinflusses auf das Unfallgeschehen wurden vergleichend gegenübergestellt und zentrale Randbedingungen (z. B. Abschnittslängen, Verteilungskennwerte der Zustandsparameter) definiert. Anhand multikriterieller Analyseansätze wurden Zusammenhänge zwischen Zustandsgrößen (z. B. Griffigkeit, Quer- und Längsebenheit), Infrastrukturparametern (z. B. Fahrstreifenanzahl, Längs- und Querneigung oder Kurvigkeitsäquivalent), den Verkehrsmengen und dem Unfallgeschehen modellhaft beschrieben. Für die Griffigkeit lassen sich signifikante und verallgemeinerbare Zusammenhänge mit Fahr- und Längsverkehrsunfällen auf Bundes- und Landesstraßen ableiten. Bei den übrigen untersuchten Zustandsgrößen – z. B. Ebenheit in Längs und Querrichtung – ergaben sich keine einheitlichen Ergebnisse.

Aus den Modellen wurde ein allgemeingültiges Verfahren entwickelt, welches vermeidbare Unfallkosten pro Jahr für Veränderungen in der Griffigkeit bei gegebenen Infrastrukturgrößen abschätzt. Das dargestellte DV-Verfahren ermöglicht den bidirektionalen Datenaustausch zwischen der ZEB und der ESN und die Berücksichtigung der zusammengeführten Informationen im Rahmen des Erhaltungsmanagements.

### Method of integrating information provided by different network analysis procedures

Main objective of the research project was the analysis of the influence of road surface condition on the accident situation considering surrounding infrastructure and traffic conditions. Potential for improvement for the safety management of road infrastructure should be identified by combining data and results from two network analysis procedures. These are the survey and assessment of road condition (ZEB) and the network safety management (NSM).

Data from three federal states regarding the motorway as well as the federal and state highway network was processed through new aggregation and investigation methods on a common analytical network.

Descriptive statistics for accident situation and road surface condition were performed as pilot tests. Different analytical methods for quantifying the influence of the road surface on road safety were compared and central boundary conditions were defined (e. g. section length, distribution parameters of the surface condition). Accident prediction models were analyzed for potential correlations between road surface (e. g. friction coefficient, unevenness), infrastructure attributes (e. g. number of lanes, cross and longitudinal slope, curvature), traffic volumes and road accidents. There are significant results for the influence of friction on wet surface accident occurrence of driving accidents and accidents in longitudinal traffic on federal and state highways. There are no consistent results for other road surface parameters so far.

Based on the models a generalizable procedure was developed that predicts avoidable economic accident costs per year resulting from changes in the friction coefficient under consideration of the local infrastructure and traffic situation. The newly developed procedure allows a bi-directional exchange of data and results between the two before mentioned network analysis procedures (ZEB & NSM) and in this way supports the road maintenance management.

## Summary

### Method of integrating information provided by different network analysis procedures

#### 1 Project definition

Road administrations on federal and state level have two main objectives when organizing their maintenance and reconstruction programs:

- Construction, design and traffic conditions of roads should be of good quality and safety for road users.
- Economic cost resulting from accidents should be as low as possible and, regarding the available resources, on an economically justifiable level.

In order to meet the above objectives and requirements two independent procedures have been defined for a standardized investigation of the quality of the road network:

The survey and assessment of road condition (ZEB) is a method in regular intervals based on detailed parameters of the road surface condition. The results are used for road maintenance management. Although roughness and unevenness are considered as relevant for road safety, there is a lack of objective research with quantifiable results on that issue (at least in Germany).

The network safety management procedure (NSM) is used for the assessment of the road safety situation in the network. The assessment is based on historical accident data and results in a parameter that is called safety improvement potential. This parameter can be used for e.g. the prioritization of constructional measures. The regular and state-wide implementation of the procedure is up to now only partially achieved in contrary to the ZEB. There are still problematic issues with the network division and the link to specific countermeasures resulting from the analysis.

The main objective of this research is the optimization of the existing procedures in order to further improve the safety management of rural roads. Safety will be evaluated from the perspective of the road surface condition. There is a need for a better analysis based on bigger samples, with more robust statistical methods and under consideration of design attributes to control for correlation between different safety influence factors.

One result of the analysis should be a procedure for the prediction of potential benefits of surface condition improvements. ZEB would achieve a more objective foundation for assessment and

prioritization of maintenance measures. NSM could profit from a more specific identification of countermeasures. Possibilities for the exchange and usage of data and results in both procedures are tested in a pilot project.

#### 2 Research method

International literature was screened for analytical approaches and results on the issues of surface conditions at its influence on road safety. The procedures of ZEB and NSM were evaluated on current deficits regarding methodical issues and practical implementation.

Complete rural road networks of motorways, federal and state highways constitute the research sample. The focus is on sections rather than junctions, because the major part of the rural accidents is located on sections. The road networks are complemented with data on road surface condition, road accidents, traffic volumes and available attributes on design and operation of the road infrastructure.

The raw data from the surface condition survey is processed in order to create several parameters with potential relevance for the occurrence of accidents. Parameters are e.g. minimum, maximum or moving average values but also referring to different section lengths than what is standard in the ZEB.

Descriptive analysis for accident and surface condition data are performed to derive some first ideas on further detailed investigation. Pilot tests are conducted to compare different statistical methods and section lengths (as a trade-off between microscopic surface data and requirements for the macroscopic analysis of accident data and risk parameters at network level).

Advanced statistical methods are used to integrate several influences into accident prediction models for different accident samples (mainly accident type based models). Accident model relationships are described with variables of traffic volume, infrastructure and road surface. They are interpreted in terms of their informative value for practical applications. Valid and generalizable models will be used as a basis for the new procedure on the assessment of benefits resulting from surface condition benefits. These models and their results are superimposed with the results from ZEB and NSM for a sample network. Advices on visualization and practical implementation complete the research project.

### 3 Results

The relationship between surface friction and accidents has been analyzed in several international studies. There is a significant correlation between the two parameters. There are almost no reliable results from German studies on this topic.

Some correlation have been found for other parameters of the road surface like unevenness, but the results regarding their safety relevance are not as clear as in the case of surface friction.

Based on a sample of 16.000 kilometers of road network with about 140.000 accident counts the following results could be achieved in the research:

- A wet road surface condition, which is often associated with insufficient surface friction, relates to a comparable higher percentage of driving accidents, accidents in curves and accidents with car-involvement.
- The accident situation during wet conditions shows a tendency to a lower accident severity in relation to dry surface conditions.
- 400 m and 500 m (motorways) sections lengths are an optimum for the accident modelling process from a statistical perspective.
- Weak drainage areas and critical changes in the cross slope do show correlations with higher accident occurrences on motorways. Other surface condition parameters including surface friction do not show any valid results. Increased longitudinal slope does also show higher accident occurrences (mainly on downhill sections).
- There is a distinct and valid correlation between surface friction and driving accident as wells as accidents in longitudinal traffic on federal and state rural roads. A lowered surface friction shows a tendency to more frequent accident especially when there is a higher curvature. In some cases this also applies to increased longitudinal slopes. Also in some case there were hints on decreased accident frequencies for increased rut depth.
- The results are in accordance to the outcomes of most of the international studies on the topic.
- Alternative definitions of road surface friction (minimum or moving average) mostly lead to accident predictions models with poorer quality in terms of a worse Goodness-of-fit. Average friction was therefor used in the models.

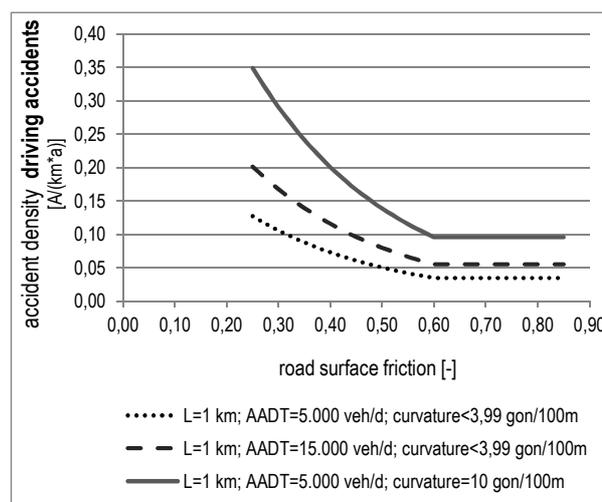


Fig. 1: Relation of accident density for driving accidents to surface friction for different traffic road parameters

From the results different models regarding accident severity category and accident type were developed that take traffic volume, surface friction coefficient, curvature and longitudinal slope into account. Using accident cost units in combination with the models economic benefits can be calculated resulting from changes in the surface friction under certain road and traffic conditions.

The final models were tested for a rural federal road network. Potential benefits were visualized and categorized in different priority classes. The cost of simple surface improvement measures were compared to the benefits resulting from the models. In comparison to the existing surface assessment (based on simple limit values) further optimization potentials were shown, that allow for less resurfacing measures with higher benefits in the network at the same time.

When the new procedure for the estimation of resurfacing benefits was integrated into the network safety management procedure, it could be shown that:

- about 20% of the safety improvement potential in the network is due insufficient road surface friction but
- sections with high safety improvement potential do not necessarily have a high potential for surface friction improvement.

Different approaches for integrating the results in existing procedures as well as visualization examples complete the research report.

### 4 Practical implications

For the first time regarding a German rural road network a quantifiable correlation between road surface condition, traffic volume, infrastructure

attributes and road accidents has been proven on a large sample.

Based on the models potential improvement in road surface friction can be assessed and prioritized. Global and local benefits can be estimated in order to improve the maintenance management. In contrary to existing procedures with limit values, now sections with high risks resulting from insufficient surface friction can be identified more precisely under consideration of the surrounding local conditions. At the same time sections are prioritized higher that also have a high potential for avoidable accident cost. If needed the procedure (models) can be calibrated with the historical local accident situation.

Regarding the network safety management the surface improvement potential can be used for specification of the results. Approaches for countermeasures can be directly derived by including the surface improvement potential into the NSM procedure.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>42</b>
1.1	Problemstellung .....	10	5.1	Einleitung.....	42
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung.....	10	5.2	<b>Variablen</b> .....	<b>43</b>
<b>2</b>	<b>Verfahrensbeschreibung</b> .....	<b>12</b>	5.2.1	Zustand .....	43
2.1	<b>ZEB</b> .....	<b>12</b>	5.2.2	Infrastruktur.....	45
2.2	<b>ESN</b> .....	<b>16</b>	5.2.3	Unfälle.....	46
2.2.1	Hintergrund und Historie .....	16	<b>5.3</b>	<b>Netzeinteilung</b> .....	<b>47</b>
2.2.2	Verfahrensablauf.....	18	<b>5.4</b>	<b>Analyse</b> .....	<b>48</b>
2.2.3	Datengrundlagen.....	19	5.4.1	Deskriptive Auswertungen .....	48
2.2.4	Ausblick.....	19	5.4.2	Pilotanalysen.....	49
<b>2.3</b>	<b>Vergleich und Handlungsbedarf</b> .....	<b>20</b>	5.4.3	Modellrechnung .....	50
<b>3</b>	<b>Literaturanalyse</b> .....	<b>21</b>	5.4.4	Sensitivitätsanalysen .....	51
3.1	<b>Einflüsse Infrastruktur</b> .....	<b>21</b>	5.4.5	Grenzwertdiskussion .....	52
3.2	<b>Einflüsse Fahrbahnzustand</b> .....	<b>22</b>	<b>5.5</b>	<b>Verfahrensentwicklung</b> .....	<b>52</b>
3.2.1	Einleitung .....	22	5.5.1	Zustandspotenzial.....	52
3.2.2	Rauheit.....	23	5.5.2	Vergleich mit ESN-Verfahren.....	53
3.2.3	Ebenheit im Querprofil .....	29	<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>55</b>
3.2.4	Ebenheit im Längsprofil.....	31	6.1	<b>Deskriptive Auswertungen</b> .....	<b>55</b>
3.2.5	Sonstige Zustandsmerkmale .....	33	6.1.1	Zustandsgrößen.....	55
<b>3.3</b>	<b>Bewertung der Sicherheit aus Sicht der Zustandsgrößen der ZEB</b> .....	<b>33</b>	6.1.2	Unfallgeschehen .....	67
3.3.1	Erfassungsprinzip Fiktive Wassertiefe .	34	<b>6.2</b>	<b>Unfallmodelle</b> .....	<b>71</b>
3.3.2	Messprinzip Griffigkeit.....	35	6.2.1	Pilotanalysen.....	71
3.3.3	Abschnittsbildung .....	35	6.2.2	Unfallmodelle .....	74
3.3.4	Zustandsgrößenermittlung .....	36	6.2.3	Sensitivitätsanalysen und Grenzwertdiskussion .....	79
3.3.5	Bewertung .....	37	<b>7</b>	<b>Praktische Anwendung</b> .....	<b>81</b>
3.3.6	Grenzwerte.....	38	7.1	<b>Verfahrensentwicklung Zustandspotenzial</b> .....	<b>81</b>
<b>3.4</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>39</b>	7.2	<b>Verfahrensanwendung Zustandspotenzial</b> .....	<b>83</b>
<b>4</b>	<b>Datengrundlagen</b> .....	<b>40</b>	7.2.1	Netzweite modellbasierte Anwendung	83
4.1	Einleitung .....	40	7.2.2	Kalibrierung und Vergleich mit grenzwertbasierten Verfahren .....	84
4.2	Straßenzustand .....	40	<b>7.3</b>	<b>Vergleich mit ESN-Verfahren</b> .....	<b>86</b>
4.3	Infrastruktur .....	40	<b>7.4</b>	<b>Visualisierungen</b> .....	<b>87</b>
4.4	Verkehrsdaten .....	41	<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>90</b>
4.5	Unfallgeschehen.....	41	8.1	Hintergrund und Ziele.....	90
4.6	Analysenetz .....	41	8.2	Methodik .....	90
			8.3	<b>Erkenntnisse</b> .....	<b>91</b>
			8.3.1	Zusammenhang Zustandsgrößen und Unfallgeschehen .....	91

8.3.2	Verfahrenstechnische und organisatorische Aspekte.....	91
-------	--	----

## **9 Empfehlungen..... 93**

9.1	Grundlagen .....	93
-----	------------------	----

9.2	Verfahren und Daten .....	93
-----	---------------------------	----

## **10 Literatur..... 95**

## **11 Anhang..... 99**

<b>A.1</b>	<b>Gegenüberstellung der Verfahren ZEB und ESN .....</b>	<b>99</b>
------------	--	-----------

<b>A.2</b>	<b>Ergänzung Literaturanalyse .....</b>	<b>102</b>
------------	---	------------

<b>A.3</b>	<b>Detaillierte Beschreibung Handlungsbedarf ZEB.....</b>	<b>104</b>
------------	---	------------

<b>A.4</b>	<b>Aufbereitung von Datengrundlagen... ..</b>	<b>107</b>
------------	---	------------

<b>A.5</b>	<b>Datengrundlagen .....</b>	<b>113</b>
------------	------------------------------	------------

<b>A.6</b>	<b>Deskriptive Auswertungen .....</b>	<b>117</b>
------------	---------------------------------------	------------

A.6.1	Zustandsgrößen .....	117
-------	----------------------	-----

A.6.2	Elementares Raster der Zustandsdaten .....	148
-------	--	-----

A.6.3	Aggregationsverfahren der ZEB zur Bildung der Zustandsgrößen.....	149
-------	---	-----

A.6.4	Regeln zur Bildung des ZEB-Rasters und Erfassungsumfang .....	150
-------	---	-----

A.6.5	Typische Aggregationsverfahren der ZEB und alternativ denkbare Verfahren.....	151
-------	---	-----

A.6.6	Lagegenauigkeit der elementaren ZEB Zustandsdaten.....	152
-------	--	-----

A.6.7	Untersuchung der Abschnittslängen mit homogenem Zustand .....	153
-------	---	-----

A.6.8	Unfallgeschehen.....	165
-------	----------------------	-----

<b>A.7</b>	<b>Pilotanalysen .....</b>	<b>168</b>
------------	----------------------------	------------

A.7.1	Methodenvergleich .....	168
-------	-------------------------	-----

A.7.2	Netzeinteilung.....	170
-------	---------------------	-----

<b>A.8</b>	<b>Unfallmodelle .....</b>	<b>172</b>
------------	----------------------------	------------

A.8.1	Bundesautobahnen .....	172
-------	------------------------	-----

A.8.2	Bundestraßen .....	175
-------	--------------------	-----

A.8.3	Landstraßen .....	177
-------	-------------------	-----

<b>A.9</b>	<b>Sensitivitätsanalysen .....</b>	<b>179</b>
------------	------------------------------------	------------

<b>A.10</b>	<b>Grundlagenmodelle für Ermittlung Zustandspotenzial.....</b>	<b>182</b>
-------------	--	------------

<b>A.11</b>	<b>Überprüfung Abschnitte mit hohem Zustandspotenzial auf Objektebene... ..</b>	<b>184</b>
-------------	---	------------

<b>A.12</b>	<b>Vergleich ESN-Verfahren und Zustandspotenzial.....</b>	<b>185</b>
-------------	---	------------

<b>A.13</b>	<b>Ergebnisdarstellung .....</b>	<b>186</b>
-------------	----------------------------------	------------

Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter: <http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar

## Abkürzungsverzeichnis

ASB .....	Anweisung Straßeninformationsbank	LS .....	Landesstraße
AFLI .....	Aufgebrachte Flickstellen (betroffene Fläche) [%]	LQRL .....	Längs-, Querrisse (mittlere Länge) [m]
AUN .....	Allgemeine Unebenheit (spektrale Dichte) [cm <sup>3</sup> ]	LQRP .....	Längs-, Querrisse (betroffene Platten) [%]
BAB .....	Bundesautobahn	LV .....	Längsverkehrsunfall
BASt .....	Bundesanstalt für Straßenwesen	Mo .....	Motorrad
BS .....	Bundesstraße	movGri20 ...	Minimum des gleitenden Mittelwerts der Griffigkeit mit einer Fenstergröße von 20 m innerhalb des 400 m-Abschnitts
BIN .....	Bindemittelanreicherung	Mw .....	Mittelwert
BMVI .....	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	N .....	Nässe
DTV .....	Durchschnittlich täglicher Verkehr [Kfz/d]	OD .....	Ortsdurchfahrt
EABF .....	Eckabbrüche (mittlere Anzahl) [-]	RISS .....	Netzrisse, Risshäufungen (betroffene Fläche) [%]
EABP .....	Eckabbrüche (betroffene Platten) [%]	SFC .....	Sideway-Force Coefficient
EFLI .....	Eingelegte Flickstellen (betroffene Fläche) [%]	SIPO .....	Sicherheitspotenzial
ESN .....	Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen	SIS .....	Signifikanzschwelle
EWS .....	Entwässerungsschwache Zone	SKM .....	Seitenkraftmessverfahren
F .....	Fahrerfall	SPT .....	Spurrinnentiefe [mm]
FGSV .....	Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen	SPH .....	Fiktive Wassertiefe [mm]
FLI .....	Flickstellen (betroffene Fläche) [%]	SPHV .....	Volumen Fiktiver Wasserrückhalt in Quer- richtung [Liter/Auswerteabschnitt]
FS .....	Freie Strecke	Tr .....	Trocken
gUKR .....	Grundunfallkostenrate	TWSUB .....	Teilwert Substanz
GRI_60/80 .	Griffigkeit [-] bei 60/80 km/h	TWGEB .....	Teilwert Gebrauch
GRIMin .....	niedrigste mittlere Griffigkeit eines 100 m-Abschnitts innerhalb des 400 m- Abschnitts	QN	Querneigung ZEB (im Entwurf mit „q“ bezeichnet)
GRIMw .....	Mittelwert der Zustandsgröße GRI_60 über 400 m	QN_ANZ	abschnittsbezogene Anzahl der Quernei- gungswechsel
GRI_POT ...	Potenzial [€], welches sich bei einer Ver- besserung der Griffigkeit ergibt	U .....	Unfall
GW .....	Gesamtwert	U(P) .....	Unfall mit Personenschaden
IRI .....	International Roughness Index	U(SP) .....	Unfall mit schwerem Personenschaden
K .....	Krümmung 1/R [1/100 m]	U(LP) .....	Unfall mit leichtem Personenschaden
KASL .....	Kantenschäden (mittlere Länge) [m]	U(S) .....	Unfall mit Sachschaden
KASP .....	Kantenschäden (betroffene Platten) [%]	WH .....	Herbst- und Wintermonate
Kvk .....	Kurvigkeit [gon/100 m]	ZEB .....	Zustandserfassung und -bewertung
L .....	Länge Abschnitt [km]	ZG .....	Zustandsgröße
LN .....	Längsneigung ZEB [%] (im Entwurf mit „s“ bezeichnet)	ZPOT .....	Potenzial [€] welches sich bei einer Verbes- serung des Zustands ergibt
		ZR .....	Zeitraum [a]
		ZTV	Zusätzliche technische Vertragsbedingungen
		ZW .....	Zustandswert

# 1 Einführung

## 1.1 Problemstellung

Die Straßenbauverwaltungen des Bundes und der Länder verfolgen bei der Erstellung Ihrer Erhaltungs- und Ausbauprogramme zwei sehr wesentliche Ziele:

- 1) Die bauliche, gestalterische und verkehrsbedingte Qualität der Straßennetze soll dem Verkehrsteilnehmer eine möglichst hochwertige Nutzung und einen sicheren Gebrauch der Infrastruktur gewährleisten.
- 2) Die Unfallkosten sollen für die Verkehrsteilnehmer auf einem möglichst niedrigen und unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Mittel, für die Volkswirtschaft vertretbarem Niveau gehalten werden.

Gleichzeitig haben die Verkehrsteilnehmer gewisse, zum großen Teil subjektive Erwartungen an die Qualität der Straßen. Dieses kann immer dann gefährlich sein, wenn die subjektiven Erwartungen nicht mit den objektiv vorhandenen Eigenschaften der Straße übereinstimmen.

Um den vorgenannten Zielen bzw. Ansprüchen gerecht zu werden, sind unabhängig voneinander zwei Prozesse (Verfahren) mit ganz unterschiedlichen Zielstellungen definiert worden:

Die Zustandserfassung und -bewertung (**ZEB**) ist ein turnusmäßig durchgeführtes und standardisiertes Verfahren zur Analyse der Qualität des Straßenzustands. Hierbei werden messtechnisch und sehr detailgenau Messgrößen zur Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche erfasst. Die ZEB-Ergebnisse geben den Zustand einzelner fester Zustandsabschnitte wieder und werden als Grundlage für die Erhaltungsplanung genutzt. Es wird zwischen Zustandsgrößen und -werten unterschieden. Merkmale werden getrennt für die Qualität der Substanz und die Qualität des Gebrauchs beschrieben. Der Begriff „Gebrauch“ umfasst hierbei u. a. potenziell sicherheitsrelevante Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche.

Die ZEB erfährt - zumindest im höherrangigen Netz - eine weitestgehend flächendeckende Anwendung. Unbefriedigend ist die Tatsache, dass einzelnen Zustandsgrößen der Fahrbahnoberfläche wie z. B. Rauheit und Unebenheit eine Sicherheitsrelevanz attestiert werden, diese aber bisher in Deutschland nicht ausreichend statistisch nachgewiesen und quantifiziert wurde. Die Berücksichtigung der Ergebnisse unfallbasierter Verfahren des Sicherheitsmanagements ist aktuell vor allem durch unterschiedliche Netzgrundlagen sowie Verfahren zur Abschnittsbildung eingeschränkt.

Die Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (**ESN**) beschreiben einen Prozess zur Analyse der Qualität der Infrastruktursicherheit. Der Fokus liegt auf der Bewertung des Sicherheits(verbesserungs)potenzials der Straße hinsichtlich Gestaltung und Betrieb. Dieses Potenzial steht für die vermeidbaren Unfallkosten in Euro je Kilometer und Jahr und kann z. B. für die Priorisierung von Aus- und Umbaumaßnahmen verwendet werden. Die Bewertung erfolgt auf Basis von Unfalldaten. Die Netzeinteilung erfolgt bisher entweder in Abhängigkeit der optischen Unfalldichte von schwerwiegenden Unfällen oder Abschnittsgrenzen, welche sich aus anderen Belangen ergeben (wie z. B. Netzknoten, Ortsdurchfahrtsgrenzen, relevante Änderungen des DTV oder der Straßenklasse). Ähnlich wie bei der ZEB ist auch für das ESN-Verfahren eine regelmäßige Anwendung z. B. in Mehrjahreszeiträumen zielführend, um einen aktuellen netzweiten Überblick zur Verkehrssicherheit zu erhalten.

Das ESN-Verfahren wird im Gegensatz zur ZEB nur bedingt flächendeckend und selten regelmäßig in der Praxis angewendet. Gründe hierfür sind methodische Probleme bei der Abschnittsbildung, der bisher nicht ausreichend beschriebene Weg zur Maßnahmenplanung auf Basis der ESN-Ergebnisse und vor allem auch die fehlende gesetzliche Basis (im Gegensatz bspw. zur Örtlichen Unfalluntersuchung).

## 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Das übergeordnete Ziel dieser Forschung ist die Optimierung bestehender Verfahren, um die Verkehrssicherheit der Infrastruktur von Außerortsstraßen weiter verbessern zu können. Andere Zielfelder wie etwa die Qualität des Straßenoberbaus stehen nicht im Fokus.

Verkehrssicherheit soll maßgeblich aus Sicht des potenziellen Einflussbereichs des Zustands der Fahrbahnoberfläche beurteilt werden. Der Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen und dem Unfallgeschehen soll dafür auf einer umfassenden Datengrundlage analysiert und - soweit möglich - auch quantifiziert werden. Hierbei werden auch weitere Merkmale der Straßeninfrastruktur berücksichtigt, um Abhängigkeiten zwischen den sicherheitsrelevanten Einflüssen zu ermitteln.

Beide Verfahren ESN und ZEB werden vor allem durch zusätzliche Informationen ergänzt und damit effektiver gestaltet. Der Kerngedanke der ESN, d. h. die Beschreibung von Verbesserungspotenzialen (quantifizierte Nutzenabschätzung für Sicherheitsmaßnahmen) wird für die ZEB bzw. für Defizite im Zustand der Straße konkretisiert. Das ESN-Verfahren kann seinerseits von spezifischen Maßnahmen sowie zusätzlichen Informationen des

Straßenraums aus den Zustandserhebungen profitieren. Hierfür müssen Harmonisierungspotenziale zwischen beiden Verfahren ermittelt und Möglichkeiten der Umsetzung identifiziert werden.

Datengrundlagen sollen die vorhandenen Quellen zum Straßenzustand sowie zum Unfallgeschehen sein. Darauf aufbauend werden neue Indikatoren und Auswertemethoden zur Detektion sicherheitsrelevanter Bereiche im Netz erarbeitet.

Möglichkeiten zur Zusammenführung der Informationen aus beiden Netzanalysesystemen werden geprüft und zielführende Ansätze in einer beispielhaften Anwendung aufgezeigt.

## 2 Verfahrensbeschreibung

### 2.1 ZEB

Die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) ist ein standardisiertes Verfahren für die netzweite messtechnische Erfassung und Bewertung des Straßenzustands. Sie liefert wichtige Inputdaten primär für die Bilanzierung des Anlagevermögens der Straßeninfrastruktur, für die Dokumentation des Ist-Zustands und Prognose der Zustandsentwicklung sowie für das systematische Erhaltungsmanagement auf strategischer wie auch auf operativer Ebene. Darüber hinaus finden die Daten bundesweit bei der Anwendung des Merkblatts zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (MB Griff) Verwendung.

Durch eine weitreichende Standardisierung der Messverfahren und Auswerteprozesse ermöglicht die ZEB die transparente und nachvollziehbare Bewertung des Zustands.

Die ZEB wurde zu Beginn der 90er Jahre durch den Bund initiiert und zunächst nach der Einführungsphase primär für die Untersuchung des Bundesfernstraßennetzes eingesetzt. Mittlerweile hat sie sich als Routineverfahren für die Bewertung der Bundesautobahnen, Bundes- und Landesstraßen bzw. teilweise auch im Kommunalbereich (Kreis- und Gemeindestraßen) etabliert.

Die Bearbeitung des Regelwerkes ist im Arbeitskreis 4.1.3 Zustandserfassung und -bewertung der FGSV angesiedelt in dem Vertreter des Bundes, der Bundesanstalt für Straßenwesen der Baulastträger der Länder und Kommunen, der Forschungseinrichtungen und der Privatwirtschaft (Messgerätebetreiber und Ingenieurbüros) sitzen.

Die Weiterentwicklung der ZEB ist als sogenannter kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP) aufgesetzt, bei dem alle Änderungen im Verfahren zielorientiert zwischen den Stakeholdern (Bund inkl. Bundesanstalt für Straßenwesen, FGSV, Länder, Forschungseinrichtungen) abgestimmt und mit einer entsprechenden Planung umgesetzt werden.

Von großer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Vergleichbarkeit der Daten aus den jeweiligen Messkampagnen. Auf Bundesebene werden nach den Ersterfassungen in den 90er Jahren alle 4 Jahre neue Daten erhoben. Auf Landesebene liegt der Regelzyklus ebenfalls bei 4 Jahren, wobei einige Länder auch einen 5 Jahres-Zyklus fahren. Die Erfassung der Bundesautobahnen und Bundesstraßen ist jeweils auf zwei Jahre aufgeteilt. Siehe auch Bild 1.

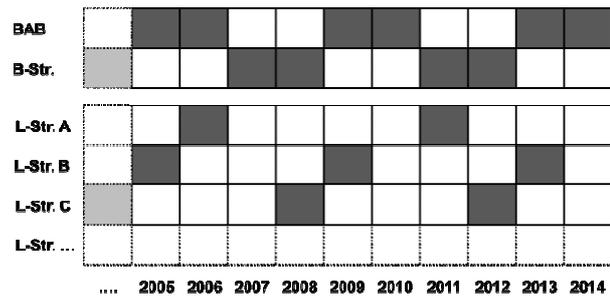


Bild 1: Zyklen der ZEB in der Übersicht

Damit die erforderliche Vergleichbarkeit der Daten gewährleistet und über große Zeiträume möglich ist - die ZEB überspannt einen Zeitraum von fast 20 Jahren - werden die Zustandsdaten seit 10 Jahren als sogenannte standardisierte Geo-Rohdaten vorgehalten. Diese Rohdaten beinhalten die (physikalischen) Messgrößen bzw. Parameter in einer sehr kleinteiligen Aggregationsstufe und ermöglichen jederzeit die Anwendung verbesserter Auswerteverfahren bzw. die Nutzung der Daten in weiteren Fachanwendungen wie z. B. in dem vorliegenden Forschungsprojekt.

Alle technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen zur Vorbereitung, Durchführung, Auswertung, Bewertung und Qualitätssicherung der Zustandserfassung mit schnell fahrenden Messfahrzeugen sind in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen (ZTV ZEB-StB 2006) festgelegt. Darüber hinaus wird zurzeit das FGSV-Arbeitspapier zur „Messtechnischen Zustandserfassung und -bewertung mit schnell fahrenden Messsystemen“ überarbeitet. Dieses stellt die Ziele, Methoden und Ergebnisse der ZEB in allgemeinverständlicher Form dar.

#### Teilprojekte der ZEB

Die ZEB gliedert sich in sogenannte Teilprojekte (TP). Siehe auch Bild 2. Nachfolgend sind die wesentlichen Aufgaben der Teilprojekte aufgeführt.

- **TP0 Bereitstellung der Netzgrunddaten**  
Die beteiligten Straßenbauverwaltungen stellen aktuelle Grunddaten als Export aus der Straßeninformationsbank zur Verfügung. Diese werden durch den Auftragnehmer des TP4 geprüft und für die Auswerteprozesse in Standardformate (alphanumerische Daten und Netzgraph) überführt.
- **TP1 Erfassung der Ebenheit und TP3 Erfassung der Substanzmerkmale Oberfläche**  
Die in den Grunddaten ausgewiesenen Netzabschnitte und Fahrstreifen werden durch den Auftragnehmer der TP1 und 3 mit speziell dafür vorgesehenen Messfahrzeugen (die Teil-

projekte 1 und 3 werden immer gemeinsam erfasst) befahren. Der Erfasser liefert die Ergebnisse (standardisierte Georohdaten bzw. Streck- und Oberflächenbilder) an den Auftragnehmer des TP4 aus.

#### – TP2 Erfassung der Griffigkeit

Die in den Grunddaten ausgewiesenen Netzabschnitte und Fahrstreifen werden durch den Auftragnehmer des TP2 mit einem speziell dafür vorgesehenen Messfahrzeug (Seitenkraftmessverfahren, SKM) befahren. Der Erfasser liefert die Ergebnisse (standardisierte Georohdaten bzw. Streck- und Oberflächenbilder) auf Datenträger an den Auftragnehmer des TP4 aus.

#### – TP4 Aus- und Bewertung, bzw. qualitätssichernde Maßnahmen

Das Teilprojekt umfasst die Durchführung der sogenannten standardisierten Netzzuordnung der Georohdaten, sämtliche Aus- und Bewertungen sowie die Qualitätssicherung. Für die Referenzierung zum Bezugssystem und Auswertung werden die von der Bundesanstalt für Straßenwesen bereitgestellten Standardprogramme eingesetzt.

Zusammenspiel der unterschiedlichen Projektpartner (Bund, Länder, Auftragnehmer TP1-3 und TP4) ermöglicht. Hierbei sind die einzelnen Datenübergaben und Qualitätsprüfungen sowie des Berichtswesens und der Ergebnisbereitstellung strikt vorgegeben. Während die Länder die Erfassung beauftragen, wird der gesamte Prozess der Aus- und Bewertung sowie das Qualitätsmanagement stellvertretend durch die Bundesanstalt für Straßenwesen geleitet.

Bei ZEBen auf Landesstraßen obliegt die gesamte Vergabe und Organisation der Leistungen dem Land.

#### Zustandsmerkmale

Ende der 1980er Jahre wurden die Anforderungen an die (messtechnische) Zustandserfassung definiert. Nachdem bereits umfangreiche und z. T. unbefriedigende Erfahrungen aus der visuell-sensitiven Zustandserfassung - diese sind durch den subjektiven Einfluss der manuellen Bewertung geprägt - vorlagen, sollte das neue Verfahren netzweite, vergleichbare und wiederholbare Aussagen zum Zustand der Bundesfernstraßen ermöglichen. Die Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit des Verfahrens war dabei ebenso von großer Bedeutung.

Die Wünsche der Verfahrensbeteiligten an die Ergebnisse der Zustandserfassung waren vielschichtig und den unterschiedlichen vorgehend benannten Einsatzzwecken geschuldet. Von zentraler Bedeutung war (und ist auch noch heute) der Bedarf für sachgerechte Daten zum Zustand der Substanz, um daraus Aussagen zur Restlebensdauer (bzw. zum Restwert) treffen zu können, sowie den Erhaltungsbedarf und geeignete Maßnahmen daraus ableiten zu können. Daneben sollten die mit der Nutzung der Straßen verknüpften Anforderungen, Fahrkomfort und Sicherheit, mit entsprechenden Datengrundlagen messbar gemacht werden.

Mit den seinerzeit zur Verfügung stehenden Technologien konnten die vorgenannten Ziele nur zum Teil erreicht werden. Versuche einer schnelfahrenden Tragfähigkeitsmessung, wie sie für die Bewertung der Substanz der einzelnen Schichten des gebundenen Aufbaus der Straßen erforderlich sind, erzielten nicht die erwarteten Ergebnisse. Man einigte sich daher darauf, bei der Zustandsbewertung auf Merkmalen aufzubauen, die sich aus der Beschaffung der Oberfläche ableiten ließen. Die zu erfassenden Merkmale beschreiben im Wesentlichen die vorhandene und an der Fahrbahnoberseite erkennbare Schädigung als Abweichung zu einem Sollzustand. Der Sollzustand ist als planeben, ohne Flickstellen, ohne Risse bzw. griffig definiert.

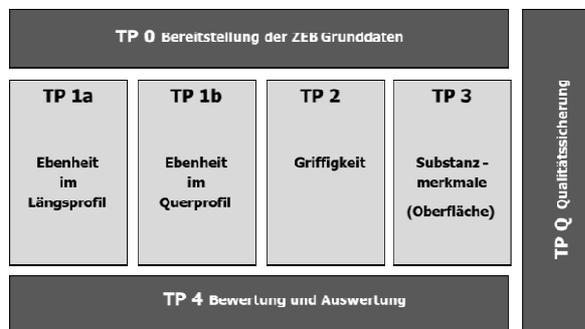


Bild 2: Übersicht Teilprojekte

#### Erfassungsumfang

Bei der ZEB auf Bundesautobahnen werden zu sämtlichen Fahrstreifen Daten erfasst. Die Erfassung des Zustands der Äste an den Bundesautobahnen besitzt noch Pilotcharakter und erfolgte bisher in 2 Bundesländern.

Bei den Bundes- und Landesstraßen werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit in einbahnigen Streckenabschnitten nur die Hauptfahrbahnen in Stationierungsrichtung erfasst. Bei mehrbahnigen Abschnitten werden die Hauptfahrstreifen auch gegen die Stationierungsrichtung erfasst.

#### Verfahrensablauf

Für die Bundesprojekte existiert ein langjährig erarbeiteter und im Projektvorhaben vertraglich vereinbarter Projektablauf, welcher das effiziente

Der Straßenzustand wurde in Merkmalsgruppen gegliedert:

- Ebenheit im Längs- bzw. Querprofil
- Rauheit
- Substanzmerkmale (Oberfläche)

Jede dieser vier Merkmalsgruppen umfasst dabei einzelne Zustandsmerkmale wie z. B. Spurrinnentiefe oder Flächenanteil an Rissen, die in Form von messbaren (physikalischen) Zustandsgrößen beschrieben sind. Im Laufe der vergangenen 20 Jahre wurde der Umfang der Zustandsmerkmale stetig erweitert und an die Erkenntnisse der Forschung angepasst. Aktuell wird durch die BAST eine Aufnahme des Merkmals „Bewertetes Längsprofil“ (BLP) in die Standardbewertung geprüft.

Eine aktuelle Übersicht über die gebräuchlichen Zustandsmerkmale ist im Kapitel 3.3 wiedergegeben.

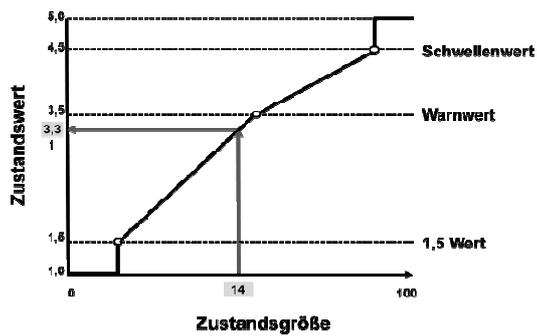
**Zustandsbewertung**

Für die Verknüpfung der einzelnen Zustandsgrößen im Sinne einer allgemeinverständlicheren Betrachtung und globaleren Bewertung der Substanz- bzw. der Gebrauchseigenschaften, werden alle Zustandsgrößen zunächst in einheitliche dimensionslose Zustandswerte (1 bis 5) überführt (analog Bild 3) und danach anhand von Verknüpfungsregeln gewichtet zu Teilwerten bzw. zu einem Gesamtwert synthetisiert. Die Normierungsfunktionen der ZEB sind jeweils über drei Fixpunkte definiert:

- **1,5-Wert**  
beschreibt einen idealen Straßenzustand und entspricht bei der Ebenheit den Toleranzen für die Abnahme
- **Warnwert**  
Anlass zur intensiven Beobachtung und Analyse, ggf. Planung von Maßnahmen
- **Schwellenwert**  
Einleitung baulicher oder verkehrsbeschränkender Maßnahmen

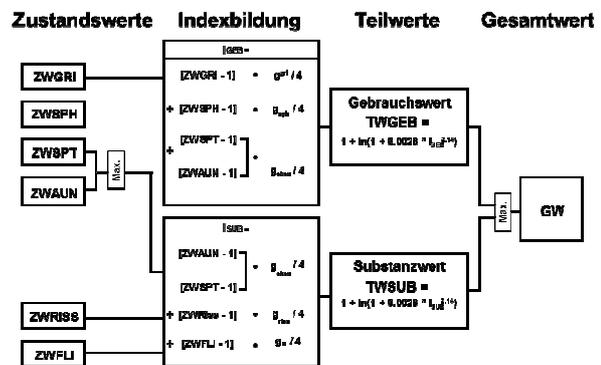
Auf die genauen Prozesse der Normierung und Wertesynthese (Bild 4) wird in Kapitel 3.3.5 näher eingegangen. Der Datenfluss ist in Bild 5 dargestellt.

Die einzelnen Normierungsparameter und deren Verknüpfung wurden durch die Arbeitskreise der FGSV nach ingenieurmäßigen Kriterien bereits Ende der 1980er Jahre festgelegt.



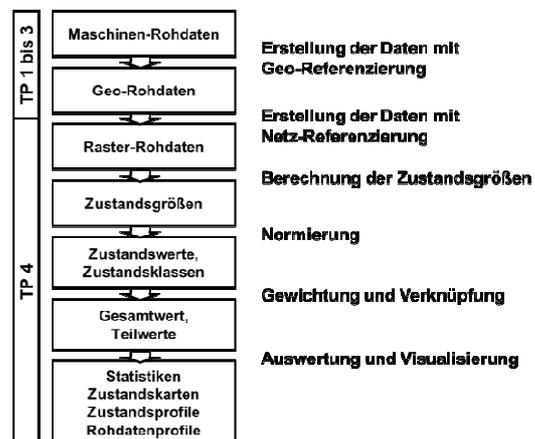
**Bild 3:** Überführung der Zustandsgrößen in Zustandswerte (Normierung)

Grundlage der Bewertung ist eine Aggregation der elementaren Zustandsinformationen, z. B. einzelne von Rissen betroffene Flächenrasterelemente, auf die Länge von Auswerteabschnitten.



**Bild 4:** Wertesynthese für Asphaltbefestigungen

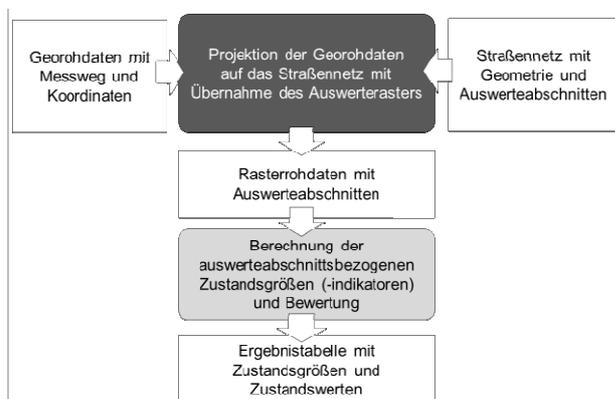
Das zugrundeliegende Raster wurde bereits zu Beginn der ZEB festgelegt. Es orientiert sich an den Anforderungen des Erhaltungsmanagements und eignet sich daneben für statistische Auswertungen und die Bewertung der Zustandsentwicklung. Die Rasterlängen betragen 100 m für Bereiche der Freien Strecke und 20 m für Ortsdurchfahrten. Die kürzeren Abschnitte sollten dem in Ortsdurchfahrten durch Aufbrüche z. T. sehr wechselhaften Zustand der Fahrbahnoberfläche gerecht werden.



**Bild 5:** Datenfluss und Teilprozesse

## Standardsoftware

Für die Bereitstellung verlässlicher Planungsgrundlagen bedarf es einer transparenten und damit nachvollziehbaren Auswertung. Bei der ZEB umfasst die Datenverarbeitung u. a. die Zuordnung der Daten zum Straßennetz, die Aggregation der elementaren Rohdaten zu Auswerteabschnitten und den gesamten Komplex der Bewertung. Die BAST hat hierzu im Rahmen des Bundesprojektes IT-ZEB Standardsoftware entwickelt lassen, die für die Bearbeitung der vorbenannten Aufgaben eingesetzt werden müssen und stellt diese für die Projektvorhaben des Bundes und der Länder zur Verfügung. An dieser Stelle sind vor allem die Programme „GeoRohRaster“, für die automatisierte Zuordnung der Geo-Rohdaten zum Straßennetz, und „RohZGZW“, zur Aggregation und Bewertung der Zustandsgrößen, zu benennen.



**Bild 6:** Prozess der Rasterung und Abschnittsbildung

Gegenüber den üblichen im Straßenwesen angewandten Verfahren zeichnet sich die ZEB insbesondere durch die koordinatenbasierte Zuordnung von Fachdaten zum Straßennetz aus (siehe Bild 6). Hiermit konnte nicht nur die Effizienz bei der Verarbeitung der Daten gesteigert, sondern vielmehr eine verlässliche Zuordnung der Daten erreicht werden.

## Qualitätssicherung

Zustandsdaten bilden die Grundlage für weitreichende Investitionsentscheidungen. Aus diesem Grund wurde ein umfangreiches und mehrstufiges Qualitätssicherungskonzept eingeführt. Dieses umfasst:

- Betriebszulassung der Messgeräte für das jeweilige Erfassungsjahr
- Fremdüberwachung der Messsysteme durch die BAST
- Eigenüberwachungen der Messergebnisse durch die Erfasser
- Stichprobenartige Kontrollprüfungen zu den Erfassungsergebnissen durch die BAST

- Prüfung von Ergebnissen und Erfassungsrohdaten zu Teildatenbeständen durch den Auftragnehmer TP4

Die genauen Prüfprozeduren sind der ZTV ZEB-StB 06, den QM-Handbüchern der BAST und den Vertragsunterlagen zum TP4 zu entnehmen.

## Datengrundlagen

Die Datengrundlagen der ZEB sind standardisiert und in entsprechenden Formatbeschreibungen dokumentiert. Die Eingangsdaten umfassen die Beschreibung des Straßennetzes (Grunddaten) und die bereits weiter oben erwähnten elementaren Zustandsdaten.

### TP0-Netz

Straßennetzdaten gemäß ASB (Netzabschnitte, Fahrstreifenanzahl, Fahrbahnanzahl, Ortslagen und Freie Strecke, Verwaltungsschlüssel, geometrischer Netzgraph).

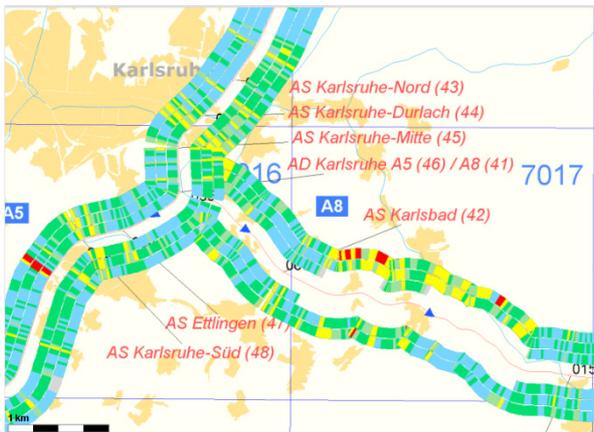
### Geo-Rohdaten

Elementare Zustandsdaten zu den Teilprojekten 1a (Längsebenheit), TP1b (Querebenheit), TP2 (Griffigkeit) und TP3 Substanzmerkmale Oberfläche mit Lagebezug über Geokoordinaten.

## Ergebnisse

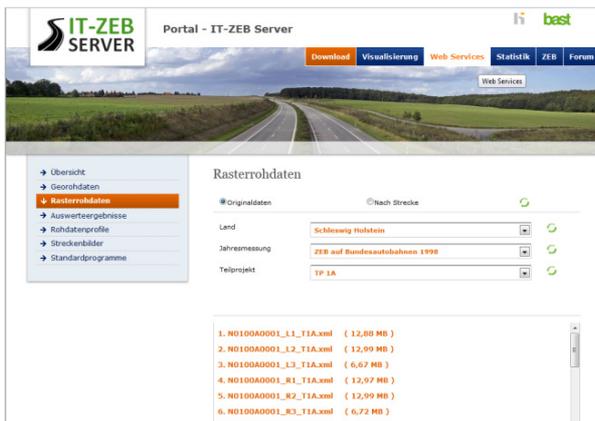
Nach dem Durchlauf durch die in Bild 5 dargestellten Teilprozesse liefert die ZEB standardmäßig folgende Ergebnisse:

- **Ergebnistabelle (ERG)** mit den auswerteabschnittsbezogenen Zustandsgrößen bzw. -werten und einigen Hilfsgrößen (Erfassungsfahrzeug, Erfassungsdatum, Erfassungsgeschwindigkeit, Krümmung und Längsneigung)
- **Statistiken** zu den einzelnen Zustands-, Teil- und Gesamtwerten
- **Zustandskarten** je Merkmal, Teil- und Gesamtwert (Bild 7)
- **Zustandsprofile** mit synchronisierter Darstellung der Zustandswerte bzw. Zustandsgrößen und dem Straßennetzbezug
- **Rohdatenprofile** für die detaillierte Analyse des Zustands auf Objektebene
- **Strecken- und Oberflächenbilder** zur Nutzung für unterschiedlichste Verwaltungsaufgaben
- **Rasterrohdaten** elementare Zustandsinformationen mit Netzbezug



**Bild 7:** Zustandskarte mit Darstellung der Allgemeinen Unebenheit auf Bundesautobahnen

Sämtliche Ergebnisse der ZEBen auf Bundesfernstraßen werden von der BAST in einem zentralen Datenarchiv, dem IT-ZEB Server (Bild 8), gehostet und online für den berechtigten Teilnehmerkreis zur Betrachtung bzw. zum Download Verfügung gestellt. Bezugsquelle: <http://itzeb.bast.de>



**Bild 8:** Bereitstellung der Daten der Bundes: IT-ZEB Server

Die ZEB-Daten dienen wie eingangs bereits erwähnt primär zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs, die Mittelverteilung und als Grundlage für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen.

Auf Landesebene gibt es eine Reihe von weiteren Anwendungszwecken, etwa die Analyse von Unfallhäufungsstellen gemäß dem Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (MB Griff).

Darüber hinaus werden die ZEB-Daten des IT-ZEB Servers im Rahmen von Forschungsprojekten eingesetzt.

## 2.2 ESN

### 2.2.1 Hintergrund und Historie

Die EU-Direktive 2008/96/EG (EU 2008) beschreibt verschiedene Verfahren für das Sicherheitsmanagement der Straßenverkehrsinfrastruktur. Diese werden im Rahmen des Allgemeinen Rundschreibens Straßenbau Nr. 26/2010 mindestens für die Straßen des TERN verpflichtend und für die Anwendung auf den restlichen Straßen empfohlen.

Unter dem Punkt „Sicherheitseinstufung und -management des in Betrieb befindlichen Straßennetzes“ wird gefordert „Teile des bestehenden Straßennetzes anhand ihres Potenzials zur Verbesserung der Sicherheit und Senkung der Unfallkosten“ zu ermitteln, zu analysieren und zu klassifizieren (EU 2008). Laut Allgemeinem Rundschreiben Straßenbau Nr. 26/2010 soll diese Sicherheitseinstufung des gesamten Straßennetzes nach den „Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen - ESN“ (FGSV 2003) erfolgen.

Erste Ansätze zur Beschreibung eines „Potenzials zur Verbesserung der Sicherheit“ von Straßen wurden im Rahmen der Methodik der „Verkehrssicherheitsüberprüfung - VSP“ durch die damalige Beratungsstelle für Schadenverhütung formuliert. Ziel war die Identifizierung von Abschnitten bei den eine „grundlegende Verringerung der Verkehrssicherheit“ (durch Maßnahmen der Straßengestaltung) erreicht werden kann (Meewes & Butterwegge 1996). Die Beschreibung der Methodik sowie erste Ergebnisse finden sich in den Mitteilungen Nr. 9 („Planung und Entwurf von Landstraßen - PELa“; HUK-Verband 1993) sowie Nr. 36 („VSP - Verfahren, Ergebnisse aus Mecklenburg-Vorpommern“; Meewes & Butterwegge 1996). Darin taucht erstmals der auch heute verwendete Begriff des „Sicherheits(verbesserungs)potenzials“ auf. Dieses beschreibt die vermeidbaren Unfallkosten je Kilometer Straßennetzlänge. Dazu werden die tatsächlichen Unfallkosten (Anzahl und Schwere von Verkehrsunfällen beschrieben über volkswirtschaftlichen Kosten) in Relation zu einem Grundunfallniveau beschrieben. Das entspricht dem Fall, wenn der Planer den Ermessensspielraum für die Gestaltung und den Betrieb eines betrachteten Netzteils „optimal“ unter Beachtung der spezifischen Situation für die Sicherheit ausschöpft. Der Ausbaustandard richtet sich - soweit es die örtlichen Randbedingungen zulassen - nach den Vorgaben der Regelwerke und den Erkenntnissen aus der Verkehrssicherheitsforschung. Das Grundunfallniveau kann damit nur bedingt durch den Eigentümer der Infrastruktur beeinflusst werden und wird anhand der Grundunfallkostenrate beschrieben (siehe Bild 9).

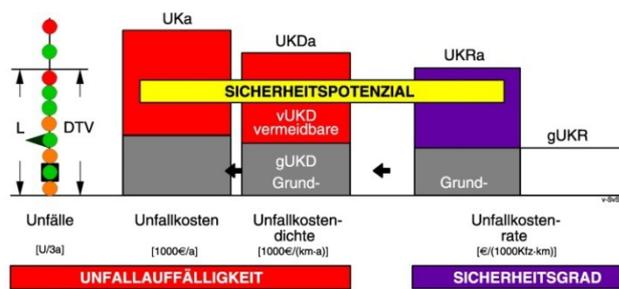


Bild 9: Konzept Grundunfallniveau

Das Verfahren wurde 2003 in einem FGSV-Regelwerk publiziert (FGSV 2003). Mit einem grünen Einlegeblatt wurde schon damals auf den Pilotcharakter des Verfahrens hingewiesen. Es sollten Erfahrungen mit dem Verfahren gesammelt werden, welche ggf. zu einem späteren Zeitpunkt zu einer Anpassung der Methodik führen könnten.

Zahlreiche Pilotprojekte sowohl Innerorts (Labahn 2003, Baier et al. 2005 oder Ebersbach & Schüller 2008) als auch Außerorts (Weinert & Vengels 2008, Lehmann 2006 oder Färber et al. 2011) zeigten die grundsätzliche Anwendbarkeit des Verfahrens auf. Gleichzeitig wurden noch bestehende methodische Defizite festgestellt, welche sich auf die Aussagefähigkeit der Ergebnisse beziehen und vorrangig im Zusammenhang mit der Abschnittsbildung (siehe Abschnitt 2.2.2) stehen. Aus diesem Grund wird aktuell das Regelwerk in einem FGSV-Arbeitskreis (AK 2.13.1) überarbeitet.

Das ESN-Verfahren wird trotz methodischer Defizite von versierten Anwendern als Verfahren in der Praxis angewendet. Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht regelmäßig Karten mit Sicherheitspotenzialen auf BAB (Grundlagen hierfür in Pöppel-Decker 2003; Karten unter [http://www.bast.de/cln\\_033/nn\\_42256/DE/Aufgabe\\_n/abteilung-u/referat-u2/analyse/pdf-Dateien/sicherheitspotenzial.html](http://www.bast.de/cln_033/nn_42256/DE/Aufgabe_n/abteilung-u/referat-u2/analyse/pdf-Dateien/sicherheitspotenzial.html)). Die Unfallforscher der Versicherer zeigten die Machbarkeit der automatisierbaren Analyse für die Landstraßennetze in 6 Bundesländern mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen auf (UDV 2011). Innerorts wurde am Beispiel der Stadt Stuttgart ein weiterer Einsatzbereich für das ESN-Verfahren im Rahmen von Grundlagenermittlung bzw. der Identifizierung des Handlungsbedarfs für Verkehrsentwicklungspläne aufgezeigt (Stuttgart 2010).

In einer deutsch-französischen Kooperation von BAST und Sètra wurde das ESN-Verfahren internationalisiert und läuft auf EU-Ebene unter der Bezeichnung „Network Safety Management“ (Lemke 2006, BAST & Sètra 2005, CEDRE 2008). Auf diesem Weg fand die grundsätzliche Methodik der Beschreibung von Potenzialen zur Unfallverringerung den Weg in die EU-Direktive zum Sicher-

heitsmanagement der Straßeninfrastruktur (EU 2008).

International werden z. T. methodisch stark unterschiedliche Verfahren unter dem Network Safety Management substituiert. Das hier beschriebene Verfahren darf nicht mit den iRAP / EuroRAP Verfahren des „Star Ratings“ oder der „Risk Maps“ verwechselt werden. Das Star Rating ist eine subjektive Beurteilung der Sicherheitsausstattung von Straßen und kann in starkem Widerspruch zu den ESN-Ergebnissen stehen (Bild 10). Die Risk Maps stellen eine alleinige Bewertung anhand der Unfallkostenrate (Unfallrisiko) dar und sind für die Identifizierung von Verbesserungspotenzialen nicht geeignet (siehe hierzu auch Ausführungen von Lemke 2006).

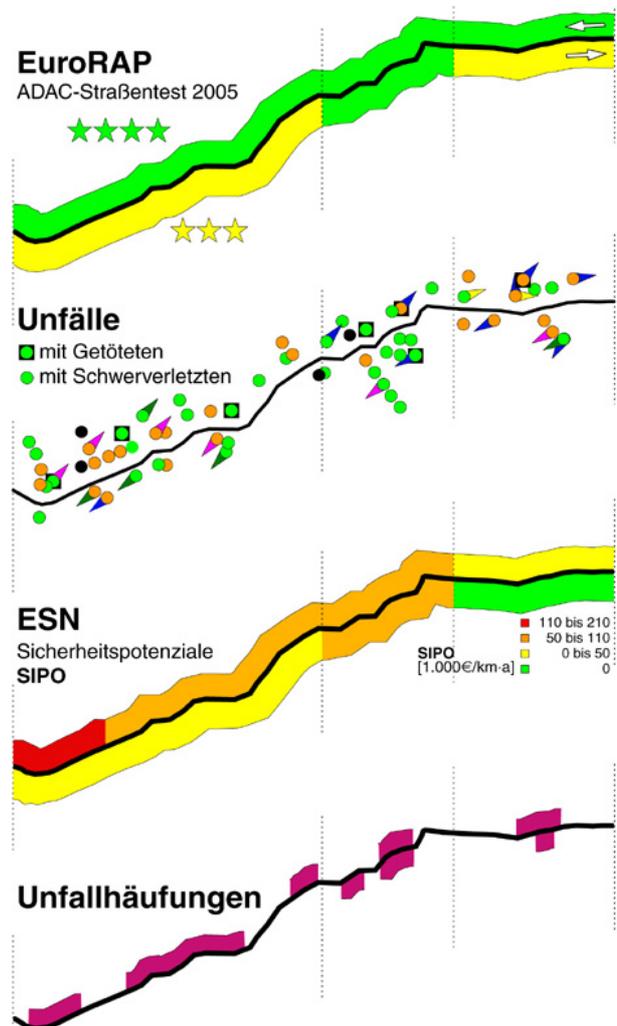
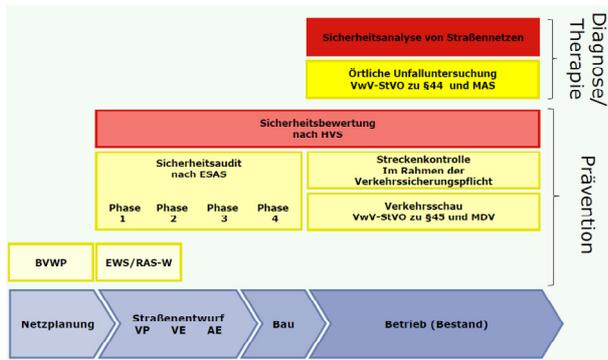


Bild 10: Vergleich verschiedener Verfahren zur Sicherheitsbewertung (Quelle: www.udv.de)

Die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen lässt sich in den Prozessablauf von Planung und Betrieb einer Straßenverkehrsanlage einordnen (Bild 11). Es werden Straßen im Betrieb (existierendes Straßennetz) bewertet und auf diese Weise der Handlungsbedarf aus Sicht der Verkehrssicherheit z. B.

für die Netzplanung oder das Erhaltungsmanagement definiert.



**Bild 11:** Sicherheitsmanagementsystem Straße  
(Quelle: Lerner 2012)

### 2.2.2 Verfahrensablauf

Ausgangspunkt des Verfahrens sind entsprechend aufbereitete Datengrundlagen zum Unfall- und Verkehrsgeschehen, referenziert auf dem zu untersuchenden Straßennetz.

Im nächsten Schritt ist das Netz in Abschnitte bzw. Straßennetzbereiche einzuteilen. Dies kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen und orientiert sich an der Zielsetzung für das Verfahren. In der aktuellen Fassung der ESN (FGSV 2003) wird grundsätzlich zwischen der Abschnittsbildung nach dem Unfallgeschehen und nach der Netzstruktur unterschieden. Die Abschnittsbildung nach dem Unfallgeschehen ergibt aussagekräftigere Ergebnisse wie in einem Vergleich festgestellt wurde (Ebersbach & Schüller 2008). Es hat sich aber in der Praxis nicht bewährt, d. h. es wurde vor allem aus Aufwandsgründen aber auch wegen Auswirkungen im Zusammenhang mit dem zufallsbedingten Auftreten von Verkehrsunfällen nicht akzeptiert. Aktuell wird aus diesen Gründen nur noch die Abschnittsbildung nach der Netzstruktur im Rahmen der Überarbeitung der ESN verfolgt. Damit ist auch eine klare Abgrenzung gegenüber der Örtlichen Unfalluntersuchung nach M UKO (FGSV 2012), welche lokal, unfallauffällige Bereiche nach dem Unfallgeschehen abgrenzt gegeben.

Die Abschnittsbildung nach der Netzstruktur kann sich u. a. an den folgenden Kriterien orientieren:

- Straßenklasse (BAB, Bundes-, Landes- und Kreisstraße, Ortsdurchfahrten),
- Netzknoten,
- DTV,
- Verkehrsknotenpunkte und dazwischenliegende Straßenzüge aus freier Strecke und Anschlussknotenpunkten (nur innerorts),
- Entwurfskriterien wie z. B. Regelquerschnitt, oder Kurvigkeit.

Die daraus folgenden Abschnittslängen variieren, d. h. es gibt keine statische Einteilung.

Die Art der Abschnittsbildung beeinflusst das Ergebnis des ESN-Verfahrens in hohem Maße. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass vor allem sehr kurze Abschnittslängen zu ungerechtfertigten - da nicht aussagekräftigen - Ergebnissen führen (siehe hierzu auch Ebersbach & Schüller 2008 oder Färber et al. 2011).

Nach der Einteilung des Straßennetzes in Abschnitte ist das Sicherheits(verbesserungs-)potenzial SIPO (vermeidbare Unfallkostendichte) zu berechnen.

<b>Sicherheitsverbesserungspotenzial SIPO</b>	[1000 €/(km•a)]
$SIPO / vUKD = UKD - gUKD$	

Das SIPO ergibt sich aus der Differenz zwischen:

- der Unfallkostendichte UKD auf einem Abschnitt unter Berücksichtigung des Unfallgeschehens aus mindestens 3 Jahren (UKD entspricht den jährlichen Unfallkosten je Kilometer Straße) und
- der Grundunfallkostendichte gUKD. Diese ergibt sich aus der Grundunfallkostenrate, welche eine (theoretische) Eingangsgröße des Verfahrens darstellt.

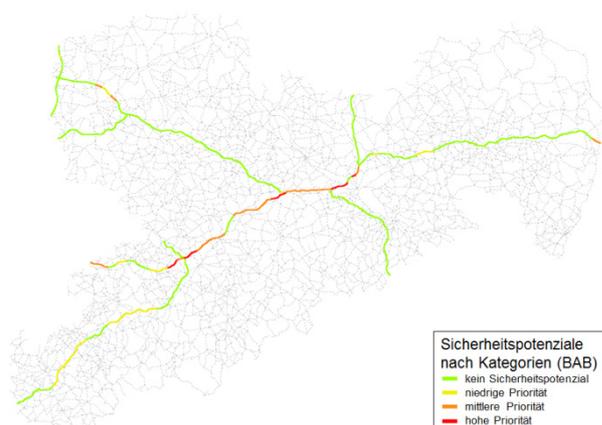
<b>Grundunfallkostendichte gUKD</b>	[1000 €/(km•a)]
$gUKD = \frac{gUKR \cdot DTV \cdot 365}{10^6}$	(9)

Die Grundunfallkostendichte stellt diejenige zu erwartende mittlere jährliche Anzahl und Schwere von Straßenverkehrsunfällen je Kilometer dar, die bei Gestaltung entsprechend den Entwurfsrichtlinien und bei der vorhandenen Verkehrsstärke DTV erreicht werden kann.

Die ESN stellt verschiedene Grundunfallkostenraten gUKR für Autobahnen, Landstraßen und Hauptverkehrsstraßen innerorts bereit. Aktuelle und empirisch ermittelte Grundunfallkostenraten sind in Maier et al. (2012) zusammengestellt.

Die Abschnitte werden anschließend nach dem berechneten Sicherheitsverbesserungspotenzial priorisiert. Es ist dabei zu empfehlen diese Rangfolge in Kategorien einzuteilen, wie z. B. in Abschnitte mit hoher, mittlerer und niedriger Priorität.

Die Ergebnisse werden dann sowohl in Listen mit den entsprechenden Grundlagendaten und Ergebnissen sowie in Karten mit einer farblichen Darstellung der SIPOs bzw. Priorität (Bild 12) aufbereitet.



**Bild 12:** Sicherheitspotenzialkarte für Autobahnen in Sachsen  
(Quelle: modifiziert auf Basis UDV 2011)

An dieser Stelle endet das Verfahren der ESN. Die Ergebnisse - vor allem die vermeidbaren Unfallkosten pro Jahr und Kilometer Straße (SIPO) - dienen als Grundlage zur Ableitung und Definition des Handlungsbedarfs für zukünftige Maßnahmen in Planung und Erhaltung.

Zusätzlich gibt die ESN noch Hinweise, wie spezifische Auffälligkeiten im Unfallgeschehen und damit Defizite in der Infrastruktur im Rahmen von Detailanalysen identifiziert werden können. Dazu werden mittlere Kostenanteile (bundesdeutscher Durchschnitt) für verschiedene Unfallattribute (z. B. Unfalltyp, Verkehrsbeteiligung) in der ESN bereitgestellt. Durch einen Vergleich mit der Unfallstruktur (Verteilung über die Attribute) von Abschnitten mit Sicherheitspotenzial lassen sich so Hinweise zu spezifischen Defiziten ableiten.

### 2.2.3 Datengrundlagen

Kern jeder ESN-Analyse sind Unfallkarten. In diesem Fall werden Straßenkarten mit entsprechenden Netzabschnitten und den darauf referenzierten Unfällen benötigt. Da die Polizei üblicherweise Einzelunfälle über geografische Koordinaten referenziert bedarf es entsprechender Bearbeitungsschritte, um die Unfälle den entsprechenden Abschnitten zuzuweisen. Vor allem dann, wenn im Analysezeitraum Umwidmungen von Straßen oder Netzänderungen erfolgt sind.

Es sind immer mindestens Unfälle aus 3 Jahren zu bewerten, da erst ab diesem Mehrjahreszeitraum entsprechende Auffälligkeiten im Unfallgeschehen mit Personenschaden deutlich werden. Diese Zeiträume können verlängert werden z. B. auf 5 Jahre, allerdings nimmt dann die Häufigkeit von Veränderungen im Netz wieder zu.

Den Unfällen sind entsprechende DTV-Werte des Kfz-Verkehrs zuzuweisen. Diese können sowohl aus Zählungen oder Modellrechnungen ermittelt werden. Gerade bei Zählwerten wurden bei prakti-

schen Anwendungen (z. B. in Färber et al. 2011) immer wieder DTV-Lücken im Netz festgestellt. Es wird aktuell empfohlen, keine Bewertung statt einer Bewertung auf Basis von groben Abschätzungen vorzunehmen. Auf diese Weise wird auf die Lücken hingewiesen und im nächsten Analysezyklus kann dann ggf. ein Nachtrag erfolgen.

Für die Abschnittseinteilung werden zusätzliche Infrastrukturdaten, welche ebenfalls auf das Netz referenziert sind, benötigt. Es hat sich gezeigt, dass die flächendeckende Qualität verfügbarer Daten für Autobahnen besser ist als auf den Straßen des nachgeordneten Netzes (Vieten et al. 2010).

### 2.2.4 Ausblick

Durch die zahlreichen Anwendungen der ESN haben sich folgende wesentliche Defizite bzw. offenen Fragen in der Praxis ergeben:

- Umgang mit kurzen Abschnittslängen bzw. Aussagefähigkeit von Ergebnissen (z. B. Relevanz SIPO eines Einzelabschnitts)
- konkrete Empfehlungen zur Abschnittsbildung (dabei u. a. die Berücksichtigung des DTV bei der Abschnittsbildung, Zuordnung von Unfällen an Knotenpunkten / Abschnittsgrenzen, Abschnittsbildung Innerorts oder Umgang mit Ortsdurchfahrten bei der Bewertung des Landstraßennetzes)
- Abgrenzung zur Örtlichen Unfalluntersuchung
- Weiterverwendung der Ergebnisse

All diese Punkte werden aktuell bei der Überarbeitung der ESN berücksichtigt. Es ist geplant, eine stärkere Konkretisierung bei bisher unzureichend beschriebenen Sachverhalten zu erreichen. Einen wesentlichen Punkt für die zukünftige flächendeckende Anwendung des Verfahrens in der Praxis stellt die Weiterverwendung der Ergebnisse dar. Bisherige Anwendungen kamen nicht über die Erstellung von Listen und Sicherheitspotenzialkarten hinaus. Es bedarf zusätzlicher Referenzbeispiele wie die ESN-Ergebnisse in anderen Prozessen der Planung und des Betriebs integriert werden können, um auf diese Weise die Aspekte der Verkehrssicherheit stärker zu berücksichtigen.

An dieser Stelle setzt das vorliegende Forschungsvorhaben an. Die ESN liefert eine Bewertung anhand des tatsächlichen und gesamten Unfallgeschehens im Straßennetz. Die ZEB (in Teilbereichen) bewertet einen kleinen Teil der Einflussfaktoren des Unfallgeschehens und beschreibt die Verkehrssicherheit indirekt über Indikatoren des Fahrbahnzustandes. Dafür ist das ZEB-Verfahren gut etabliert und ist akzeptierter Teil des Erhaltungsmanagements. Durch die Kombination

der Vorteile beider Verfahren sollen Synergien für eine weitere Verbesserung der Verkehrssicherheit im bestehenden Straßennetz abgeleitet werden. Auf welche Weise dies ggf. in Zukunft geschehen kann, ist Untersuchungsgegenstand dieses Forschungsprojekts.

### 2.3 Vergleich und Handlungsbedarf

Eine kompakte Übersicht der Eigenschaften von ZEB und ESN-Verfahren finden sich im Anhang in Tab. 19.

Beide Verfahren ähneln sich in ihrem netzweiten Ansatz. Das ESN-Verfahren fokussiert das Gesamtunfallgeschehen wird aber wenig konkret hinsichtlich spezifischer Maßnahmen. Im Gegensatz dazu ist die Verkehrssicherheit nur eines unter mehreren Zielfeldern bei der ZEB. Es wird ausschließlich der Einflussbereich der Fahrbahnoberfläche betrachtet, wodurch spezifische Maßnahmen angesprochen werden.

Die jeweiligen Schwächen des einen Verfahrens sind häufig die Stärken des anderen Verfahrens, was Potenzial für Verbesserungen durch eine Zusammenführung der Ergebnisse birgt.

Der Output beider Verfahren ESN und ZEB liefert abschnittsbezogene Informationen, die jeweils nach einer weitergehenden ingenieurtechnischen Präzisierung und beim Vorliegen einer entsprechenden Dringlichkeit zu verkehrlichen und baulichen Maßnahmen führen. Insofern wäre es zielführend, die Ergebnisse im Sinne einer ganzheitlichen und koordinierten Bauplanung zusammenzuführen. Darüber hinaus wäre es wichtig, für die ESN-Abschnitte mit hohem Potenzial Informationen zu den möglichen unfallauslösenden Faktoren zu erhalten. Bisher ist dieses nur durch eine anschließende ingenieurtechnische Betrachtung (z. B. Bestandsaudits) möglich und mit erhöhtem Aufwand verknüpft. Die ZEB könnte hier neben unfallrelevanten Zustandsdaten auch ausgewählte Informationen zum Bestand liefern. Die Nutzung des Sicherheitspotenzials, bzw. daraus abgeleiteter Größen, wäre wiederum für das Pavement Management System (PMS) von Bedeutung, da Unfallkosten bei einer ganzheitlichen Betrachtung eine wichtige Eingangsgröße zur Priorisierung von Baumaßnahmen sind.

Damit die vorgenannten Punkte im Sinne einer praxisnahen Anwendung gelöst bzw. angewandt werden können, bedarf es ggf. einer Anpassung der Verfahren.

Aufgrund der starken Standardisierung der ZEB in der praktischen Anwendung sowie aus ersten Gesprächen mit der Begleitgruppe wurde deutlich, dass eine Modifizierung der ZEB nur bedingt gewünscht bzw. möglich sein wird.

Das ESN-Verfahren bewertet das gesamte Unfallgeschehen, wovon die durch den Straßenzustand „direkt“ beeinflussten Unfallsituationen nur einen Teil ausmachen.

Hieraus werden folgender Handlungsbedarf bzw. Zielrichtungen für die Projektbearbeitung abgeleitet:

- Entwicklung eines separaten Verfahrens, dessen Ergebnisse optional durch die ZEB und das ESN-Verfahren genutzt werden können,
- Überprüfung und Analyse der Zusammenhänge zwischen dem Unfallgeschehen und den Zustandsgrößen,
- Entwicklung einer quantifizierten Nutzenermittlung (Zustandspotenzial) aufgrund von Veränderungen in den Zustandseigenschaften der Fahrbahnoberfläche,
- Überprüfung möglicher Zusammenhänge zwischen Sicherheits(verbesserungs)- und Zustandspotenzial,
- Dokumentation von Möglichkeiten zur wechselseitigen Datennutzung in beiden Verfahren (u. a. Harmonisierung von Zyklen und Netzbzug harmonisieren um Verschneidung der Abschnitte zu ermöglichen).

Die aus dem Handlungsbedarf abgeleitete Projektausrichtung ist überblicksmäßig in Bild 13 dargestellt.

	ZEB	Zustands- potenzial	ESN
Daten	Zustandsgrößen Straßennetz (Infrastrukturattribute)		Unfälle Straßennetz DTV
Bewertung / Ergebnis	Zustandsbewertung (Priorisierung von Erhaltungsmaßnahmen)	Potenzial für Verbesserung des Zustands der Fahrbahnoberfläche (vermiedene Unfallkosten)	Potenzial für Verbesserung der gesamten Infrastruktur (Priorisierung von Infrastrukturmaßnahmen inklusive Zustand)
Input Projekt	Effektivere Priorisierung durch verbesserte Nutzenabschätzung  ggf. Anpassung Grenzwerte		Hinweis/Verknüpfung zu/mit Maßnahmen im Erhaltungsmanagement  Berücksichtigung netzweiter Daten aus ZEB-Anwendung

Bild 13: Einordnung Projektziele

Daneben wäre es wünschenswert, wenn die Datengrundlagen und Auswerteverfahren der ESN analog zur ZEB standardisiert würden.

### 3 Literaturanalyse

#### 3.1 Einflüsse Infrastruktur

Der Fokus der Forschungsarbeit liegt auf der Verkehrssicherheit von Landstraßen und Autobahnen außerhalb bebauter Gebiete. Die Verkehrssicherheit wird objektiv über die Anzahl und Schwere von Straßenverkehrsunfällen beschrieben. Der Großteil an Untersuchungen - wie auch die vorliegende Arbeit - bezieht sich auf die Analyse von Zusammenhängen zwischen den polizeilich registrierten Unfällen sowie verschiedenen Parametern zur Gestaltung und dem Betrieb von Straßen.

Generell werden die Einflussfaktoren der Straßenverkehrssicherheit in die drei Bereiche:

- Mensch,
- Fahrzeug und
- Straßeninfrastruktur

eingeteilt. Diese stellen gleichzeitig die Maßnahmenbereiche für die Verbesserung der Verkehrssicherheit dar. Die Literaturrecherche sowie alle Analysen der vorliegenden Arbeit beziehen sich vorrangig auf den Teilbereich der Straßeninfrastruktur. Die Bereiche Mensch und Fahrzeug werden nur für Interpretationszwecke der Einflüsse aus der Infrastruktur herangezogen.

Die Merkmale des Straßenzustandes wirken sich in den meisten Fällen - wie auch viele andere Sicherheitseinflüsse - erst in Kombination mit anderen Faktoren wie z. B. bestimmten Trassierungsparametern auf die Entstehung von Unfällen aus.

Für ein Fahrzeug, welches sich bei trockenem Fahrbahnzustand auf einer gerade Strecke bei geringem Verkehr fortbewegt, spielt z. B. die Griffigkeit eine untergeordnete Rolle (ggf. mit Ausnahmen von z. B. starken Seitenwinden). Erst das Auftreten von bspw. engen Kurven und geringen Sichtweiten zieht ggf. in Verbindung mit nasser Fahrbahn einen unfallbegünstigenden Einfluss der Griffigkeit nach sich. Andererseits kann sich aber auch ein schlechter Fahrbahnzustand positiv auf die Verkehrssicherheit auswirken. Dieser Effekt ist unter dem Begriff „Risikokompensation“ bekannt und spielt bei der Interpretation von Analyseergebnissen eine Rolle (z. B. Weller et al. 2006). Während bei der Griffigkeit dieser Effekt eine untergeordnete Rolle spielt, sind mit Wasser gefüllte Spurrinnen deutlich für die Fahrzeugführer zu erkennen und bewirken damit ggf. eine (sicherheitsverbessernde) Verringerung der Geschwindigkeit. Ein anderes Beispiel betrifft das Motorradfahren. Ist z. B. ein Belagswechsel erkennbar, kann das Verhalten entsprechend angepasst werden. Ist ein

potenzielles Defizit aber nicht als solches erkennbar, kann es sicherheitsrelevant werden.

Aus diesem Grund sollen zuerst auszugsweise, wesentliche sicherheitsrelevante Merkmale der Gestaltung und des Betriebs diskutiert werden. Eine Auseinandersetzung mit weiteren Einflüssen (wie z. B. Wahrnehmungsmodellen aus der Psychologie) ist an dieser Stelle nur bedingt zielführend, da sich daraus kaum Ansätze für die Straßeninfrastruktur ableiten lassen.

Wesentliche sicherheitsrelevante Einflüsse neben dem Straßenzustand lassen sich in die Bereiche Querschnitt, Trassierung im Lageplan, Trassierung im Höhenplan (inkl. räumliche Linienführung) sowie Ausstattung und Charakteristik des Seitenraums kategorisieren.

Der **Querschnitt** wird im Wesentlichen durch die sicherheitsrelevanten Merkmale: Anzahl und Breite der Fahrstreifen, Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung oder von Seitenstreifen sowie der Breite der Randstreifen charakterisiert.

Der Großteil der Untersuchungen bringen größere Fahrstreifenbreiten mit einer erhöhten Verkehrssicherheit in Zusammenhang (z. B. Brannolte et al. 1993, Lamm et al. 1999, Hammerschmidt 2007 oder Maier et al. 2013). Es gibt aber auch davon abweichende bzw. einschränkende Analyseergebnisse. Leutzbach & Zoellmer (1989) finden den Zusammenhang nur für Strecken mit geringem DTV, Dietze et al. (2008) finden nur Hinweise auf den umgekehrten Fall (Einfluss nur bei hohem DTV) und Vieten et al. (2009) können den oben beschriebenen Einfluss nur für zweistreifige Querschnitte nachweisen. Gerade überbreite Querschnitte zeigten teilweise ein auffälliges Unfallgeschehen mit schweren Überholunfällen, was zur Entwicklung des wechselseitigen Überholfahrstreifens (RQ 15,5) geführt hat.

Mehrstreifige Querschnitte werden häufig als sicherer beurteilt, dass zeigen bspw. Brannolte et al. (1993) oder Maier et al. (2013) für den RQ 15,5 sowie den RQ 21. Grund hierfür ist die Sicherung des Überholvorgangs. Milton & Mannering (1996) finden einen gegenläufigen Trend und begründen diese mit den vermehrten Fahrstreifenwechsellagen.

Größere Randstreifenbreiten begünstigen das Sicherheitsniveau laut AASHTO (2009), Haarwood (2000) oder Maier et al. (2013). Unabhängig davon zeigen erstere Quellen aber auch einen negativen Einfluss auf die Verkehrssicherheit, wenn die vorgegebene Querneigung nicht eingehalten wird.

Die **Trassierung im Lageplan** wird maßgeblich durch die sicherheitsrelevanten Merkmale Kurvenradius, Kurvigkeit und der Größe aufeinander folgender Entwurfs-elemente (Relationstrassierung)

charakterisiert. Kleine Kurvenradien gelten im Vergleich zu größeren Radien als unfallbegünstigend. Lamm et al. (1999) schätzen Radien mit  $R \leq 100$  m als kritisch und Radien ab  $R \geq 400$  m als nicht mehr sicherheitsrelevant ein. In Maier et al. (2013) zeigen sich für Radien kleiner 250 m auf dem Querschnittstyp 11 nach RAL negative Auswirkungen auf das Unfallgeschehen.

Dietze et al. (2008) beschreiben die Abhängigkeit des Radieneinflusses von der gefahrenen Geschwindigkeit, Ebersbach (2006) sieht die Grenze für relevante Geschwindigkeitsanpassungen bei  $R = 200$  m. Zusammenhänge zwischen steigender Kurvigkeit und Unfallrisiko finden Dietze et al. (2008) und Taylor et al. (2002). Dies kann (ursächlich) auch die Folge eines unausgewogenen Verhältnisses aufeinander folgender Radien (Relationstrassierung) sein, dessen negative Auswirkungen ausführlich in Lippold (1997) beschrieben sind.

Die **Trassierung im Höhenplan** wird vor allem durch die sicherheitsrelevanten Merkmale der Längsneigung sowie der „räumlichen Linienführung“ charakterisiert. Leutzbach & Zoellmer (1989), Harwood (2000) sowie AASHTO (2009) weisen höhere Unfallrisiken bei steigender Längsneigung nach. Neigungen unter rund 4 % sind dabei als unkritisch anzusehen. Vor allem Gefällestrrecken zeigen erhöhte Auffälligkeiten im Unfallgeschehen laut Lamm et al. (1999). Die räumliche Linienführung wird aufgrund geringer Sichtweiten sicherheitsrelevant. Der Straßenverlauf wird nicht erkannt bzw. falsch eingeschätzt (siehe Hasan et al. 2005). Lamm et al. (1999) schätzt vor allem Sichtweiten von unter 100 m als kritisch ein. Laut Krebs & Klöckner (1977) sind diese vor allem in engen Kurven und bei mittleren Verkehrsstärken sicherheitsrelevant. In Maier et al. (2013) wurden die Definitionen der aktuellen RAL für Fehler in der Relationstrassierung bestätigt und hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit dem Unfallgeschehen für alle Querschnittstypen quantifiziert.

**Ausstattung und Seitenraum** werden durch die sicherheitsrelevanten Merkmale zulässige Höchstgeschwindigkeit, Hindernisse oder eben Schutzeinrichtungen im Seitenraum sowie Fahrbahnmarkierungen charakterisiert.

Der Einfluss der zulässigen Höchstgeschwindigkeit lässt sich nur mit erhöhtem statistischen Aufwand nachvollziehbar beschreiben. Deutlich wird dies an den Ergebnissen von z. B. Hadi et al. (1999), welche ein höhere (beschilderte) zulässige Höchstgeschwindigkeiten mit geringeren Unfallrisiken in Zusammenhang bringen. Tatsächlich bedeuten höhere Geschwindigkeiten grundsätzlich mehr und schwerere Unfälle (Elvik et al. 2004). Die Widersprüche tauchen auf, da hohe zulässige Höchstgeschwindigkeiten grundsätzlich an großzügig

trassierten Straßen mit einer besseren Ausstattung (z. B. Autobahnen oder andere mehrstreifige Querschnitte mit Mitteltrennung) angeordnet werden. Andererseits werden gefahrenreiche Straßen reaktiv als auch proaktiv mit niedrigeren Tempolimits versehen. Werden diese Randbedingungen bei Unfallanalysen nicht kontrolliert, ergeben sich widersprüchliche Zusammenhänge (Scheinkorrelationen).

Hindernisse im Seitenraum - egal ob mit oder ohne passive Schutzeinrichtung - stehen im Zusammenhang mit einem ungünstigeren Unfallgeschehen. Hierbei erhöhen Schutzplanken aber das Sicherheitsniveau im Vergleich zu Straßen mit ungeschützten Hindernissen (Meewes & Kuler 2001, Maier et al. 2013).

Der Zusammenhang zwischen Längsmarkierungen (Vorhandensein, Strich-Lücken-Verhältnis, Breite) und Unfallgeschehen ist immer wieder Bestandteil von Diskussionen. Markierungen können das Fahrverhalten und damit unter Umständen die Verkehrssicherheit beeinflussen. Untersuchungen zeigen Ergebnisse für beide Richtungen, d. h. sowohl sicherheitsfördernd als auch sicherheitsmindernd (Elvik & Vaa 2004, Gates & Hawkins 2002).

## 3.2 Einflüsse Fahrbahnzustand

### 3.2.1 Einleitung

Bei der Beschreibung der bisherigen Erkenntnisse zum Einfluss der Fahrbohnoberfläche bzw. dessen Zustands auf das Unfallgeschehen ist deutlich zwischen folgenden Ansätzen zu unterscheiden:

- Analyse des direkten Zusammenhangs zwischen Anzahl und Schwere von Unfällen und den Kenngrößen des Fahrbahnzustandes
- Analyse von (indirekten) Stellvertretergrößen für das Unfallgeschehen (z. B. Geschwindigkeit und Bremsweg).

Unabhängig vom gewählten Ansatz gilt es eine Kausalität zwischen veränderten Zustandsgrößen und dem Unfallgeschehen herzustellen, da sonst der Erhaltung des Fahrbahnzustandes aus Sicherheitsperspektive die Grundlage fehlt bzw. eine entsprechender Nutzen aus vermiedenen Unfällen nicht aufgeführt werden kann. Der zweite Ansatz wurde in der Vergangenheit unter der nicht belegten Annahme, dass veränderte physikalische Parameter tatsächlich zu einer Veränderung der Verkehrssicherheit führen, häufig gewählt. Der Fokus der hier vorliegenden Recherche liegt vorrangig auf dem ersten (direkten) Ansatz. Dies entspricht der Ausrichtung des Projektes und lässt ggf. Hinweise erwarten, wie ein kausaler Zusammenhang nachgewiesen werden kann.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche lassen sich weiter kategorisieren hinsichtlich:

- Methodik der statistischen Unfallanalyse (u. a. monokausale Betrachtung von Unfallraten, multikriterielle Regressionsanalysen, Vergleiche von Verteilungen / Perzentilen oder Vorher-Nachher-Vergleiche)
- Charakteristik der Stichprobe hinsichtlich Betrachtung der Straßenklasse, Bandbreite der festgestellten Zustandsindikatoren oder betrachtete Netzlänge
- netzweite Analyse (Vergleich von Abschnitten unterschiedlichen Sicherheitsniveaus) vs. Analyse von Unfallhäufungen (lokal begrenzte Netzbereiche mit erhöhter Anzahl an Unfällen)
- Betrachtung alle Unfälle vs. Teilkollektiv des Unfallgeschehens (z. B. nur Nässeunfälle)
- Art und Messtechnik der analysierten Zustandsindikatoren / -messgrößen

Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Literaturrecherche - vor allem hinsichtlich ihrer Effektgröße - nur bedingt miteinander vergleichbar - und auch nicht verallgemeiner- bzw. übertragbar. Sie geben aber Ansätze, wie die eigene Analyse aufgebaut und strukturiert sowie die daraus resultierenden Ergebnisse interpretiert werden können.

Zum Verständnis ist es wichtig die internationalen (englischsprachigen) Begriffe für Zustandsindikatoren den bekannten Begriffen der ZEB zuzuordnen. Das bedeutet nicht, dass sie ähnlich gemessen wurden oder skaliert sind. Es gibt aber Hinweise, welcher Zustand grundsätzlich beschrieben werden soll.

Internat. Begriff (engl.)	ZEB-Äquivalent
International roughness index (IRI)	Längsebenheit (AUN bzw. LWI)
Skid resistance, Surface friction coefficient (SFC)	Griffigkeit (GRI)
Texture (Oberflächenstruktur)	NN
Spray (Sprühfahnenbildung)	NN
Rutting / rut depth	Spurrinntiefe (SPT), Fiktive Wassertiefe (SPH)
Present Serviceability Index (PSI)	Teilwerte (Gebrauchswert, Substanzwert) bzw. Gesamtwert

### 3.2.2 Rauheit

Die Rauheit wird in Literatur mehrheitlich über den Parameter der Griffigkeit beschrieben. Untersuchungen zur Griffigkeit stellen den Großteil der Analysen zum Einfluss des Straßenzustandes auf die Verkehrssicherheit dar.

Einen guten Einstieg in die Thematik liefert Teekmann (2011) mit einer ausführlichen Literaturstudie zum Einfluss der Griffigkeit auf das Unfallgeschehen (siehe Übersicht in Tab. 20 im Anhang). Daraus geht hervor, dass die meisten Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen Unfallgeschehen und Griffigkeit belegen. Teekmann (2011) schlussfolgert aber, dass aufgrund der sehr unterschiedlichen Ergebnisse sowie der angewendeten Methoden kein klarer Zusammenhang ableitbar ist. Seine eigene Analyse, welcher eine Stichprobe von Class-A-Roads (vergleichbar mit Autobahnen) in einem County in Großbritannien zugrunde liegt, ergibt keine signifikanten Ergebnisse. Auch mit der angewendeten multikriteriellen Analyse (binomial logistic regression) unter Berücksichtigung von DTV, Längsneigung, Querneigung und Kurvigkeit ließ sich kein signifikanter Einfluss der Griffigkeit auf das Unfallgeschehen ableiten. Unterstützt werden diese Ergebnisse durch die Analysen vor allem von Lindenmann (2006) sowie teilweise durch Viner et al. (2005).

Spahn (2012) zeigt den Zusammenhang zwischen der Unfallrate und der Griffigkeit für 100 m Abschnitte auf Bundes- und Staatsstraßen in Bayern (Bild 14). Aus der genannten Quelle lassen sich jedoch keine Hintergründe der Analyse ableiten.

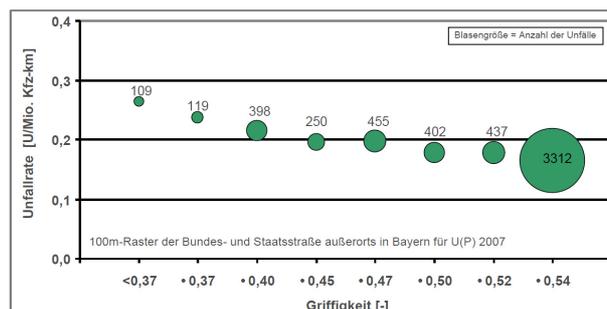


Bild 14: Ergebnisse von Spahn 2012 zum Griffigkeitseinfluss

Rallings (2011) zeigt die Schwellwerte für die Griffigkeit, wie sie von Straßenverwaltungen in Australien benutzt werden. Hieraus wird deutlich, dass Schwellwerte in Abhängigkeit des Risikos für Unfälle (als Resultat einer geringen Griffigkeit) in Netzbereichen unterschiedlicher Charakteristik gewählt wurden (Bild 15).

Site Category	Site Description	INVESTIGATORY LEVELS OF SFC <sub>50</sub> (at 50 km/h or equivalent)						
		0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
		CORRESPONDING RISK RATINGS						
		1	2	3	4	5	6	7
1 (see notes)	Traffic light controlled intersections Pedestrian/school crossings Railway level crossings Roundabout approaches							
2 (see notes)	Curves with radius <= 250m Gradients => 5% and => 50m long Freeway/highway on/off ramps							
3 (see notes)	Intersections							
4	Manoeuvre-free areas of undivided roads							
5	Manoeuvre-free areas of divided roads							

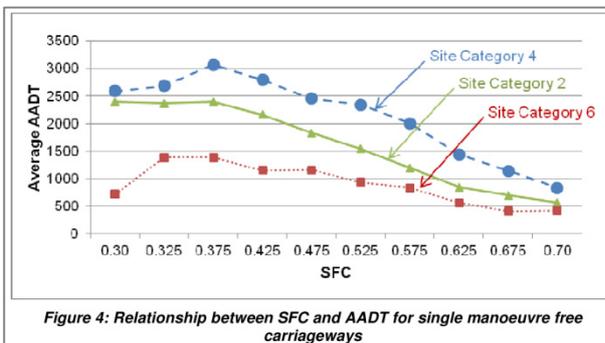
Site Category	Site Description	INVESTIGATORY LEVELS OF SFC <sub>20</sub> (at 20 km/h or equivalent)						
		0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
		CORRESPONDING RISK RATINGS						
		1	2	3	4	5	6	7
6	Curves with radius <= 100m							
7	Roundabouts							

KEY TO THRESHOLDS AT OR BELOW WHICH INVESTIGATION IS ADVISED:

**Bild 15:** Schwellwerte für Analyse der Situation in Australien nach VicRoads/RTA (Quelle: Rallings 2011)

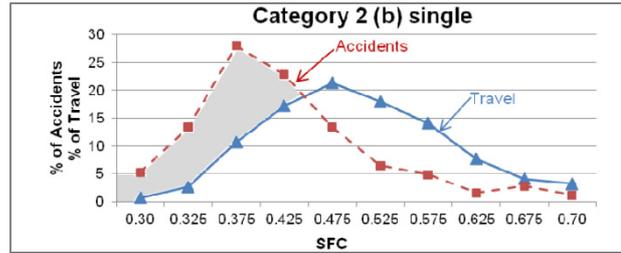
Die Intention des Artikels von Rallings (2011) ist zu zeigen, dass bestimmte Schwellwerte der Griffigkeit (Category 5) zu niedrig sind, auch wenn für die Erhaltung dieser Bereiche vglw. hohe Kosten bzw. Aufwände in Relation zum Nutzen notwendig wären. Unabhängig davon zeigt er aber unterschiedliche Analyseansätze und Hinweise, welche auch für die hier vorliegende Untersuchung von Interesse sind.

Abschnitte mit geringer Griffigkeit treten nach Rallings (2011) vor allem an Straßen mit einer vergleichsweise hohen Verkehrsbelastung auf (Bild 16). Dies könnte einerseits dazu führen, dass bei der Verwendung von Unfallraten (lineare Berücksichtigung der Expositionsgröße DTV) ggf. ein Teil des Griffigkeitseinflusses über den DTV abgebildet und damit verzerrt wird. Andererseits wäre es möglich, dass Abschnitte mit einer guten Griffigkeit und folglich einem niedrigen DTV ungegerechtfertigter Weise eine hohe Unfallrate erhalten und somit beim Vergleich von Abschnitten unterschiedlicher Griffigkeit der Griffigkeitseinfluss nivelliert wird.



**Bild 16:** Zusammenhang zwischen Griffigkeit und DTV (Quelle: Rallings 2011)

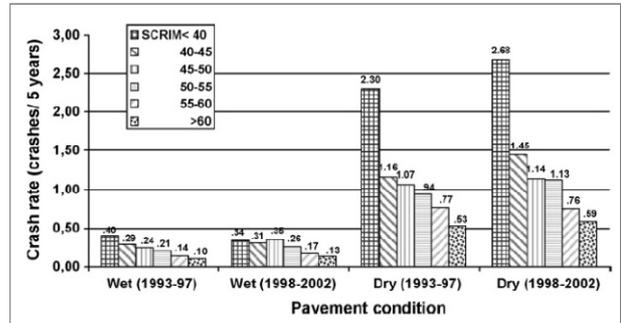
Durch den Vergleich der Verteilung von Nässeunfällen mit den Fahrleistungen illustriert Rallings (2011), dass das Auftreten von Unfällen nicht allein die Folge eines erhöhten Verkehrsaufkommens ist (Bild 17).



**Figure 5:** Distribution of Wet Road Accidents and Travel Distances across the SFC range, for Site Category 2

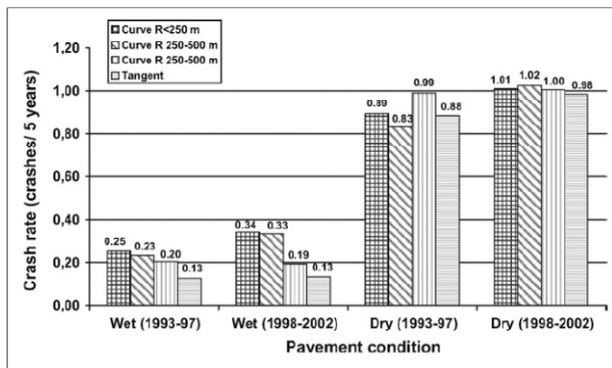
**Bild 17:** Verteilung von Unfällen und Fahrleistung über der Griffigkeit (Quelle: Rallings 2008)

Mayora et al. (2009) analysierten zweistreifige Außerortsstraßen im Rahmen von Vorher-Nachher-Analysen in Spanien. Dabei wurde sowohl eine Vergleichsgruppe als auch verschiedene Radienklassen berücksichtigt. Bild 18 und Bild 19 zeigen eine Übersicht der Resultate.



**Bild 18:** Unfallrate in Abhängigkeit der „average SCRIM coefficient measurement“ (Ergebnisse des V-N-Vergleichs von Mayora et al. 2009)

Mayora et al. (2009) leiten aus ihren Analysen Verbesserungspotenziale für verschiedene Unfallkollektive ab. Bei einer Verbesserung des SCRIM-Wertes von < 50 auf > 60 werden Rückgänge von 68 % bei Nässeunfällen sowie 84 % bei Kurvenunfällen festgestellt. Einschränkend muss aber angemerkt werden, dass in der eingerechneten Vergleichsgruppe extreme Anstiege der Unfallzahlen auftreten, welche dieses Ergebnis stark beeinflussen und nur bedingt nachvollziehbar sind. Ein wesentliches Ergebnis ist die hohe Relevanz der Nässeunfälle in Kurven.

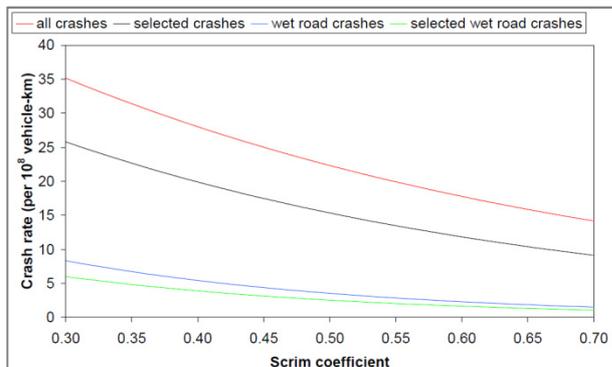


**Bild 19:** Unfallrate in Abhängigkeit des Straßenzustandes in Kurven und auf der Strecke (Ergebnisse des V-N-Vergleichs von Mayora et al. 2009)

Eine sehr detaillierte Analyse (Vielzahl an Geometrievariablen berücksichtigt) verschiedener Zustandsparameter findet sich bei Davies et al. (2008). Für rund 10.000 km Straßen in Neuseeland wurde eine Vielzahl an Variablen untersucht:

- Geometrie/Verkehr: DTV, Radius, Längsneigung, Kurvigkeit, Fahrbahnbreite, Ortslage
- Zustand: IRI, Scrim Coefficient, T/10Skid Site Category, rut depth, texture

Die Variablen wurden in einem komplexen und einem einfachen Vorhersagemodell integriert, die Ergebnisse kommen daher den isolierten Einflüssen der einzelnen Zustandsparameter auf die Sicherheit sehr nahe (Bild 20).



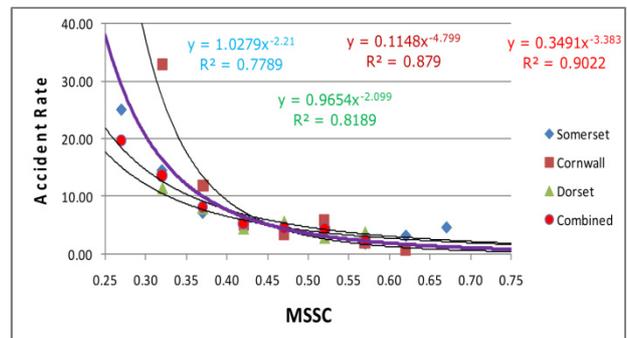
**Bild 20:** Ergebnisse der Analyse des Einflusses der Griffigkeit (Quelle: Davies et al. 2008)

Davies et al. (2008) definieren ein Teilkollektiv des Unfallgeschehens, dem sie eine erhöhte Relevanz für Unfälle im Zusammenhang mit der Griffigkeit zuweisen. Das sind folgende Unfallsituationen:

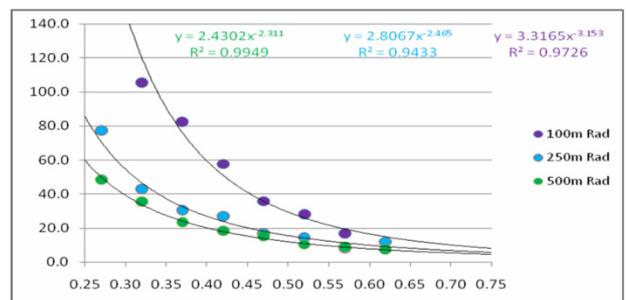
- Überholen, Fahrstreifenwechsel,
- Frontalkollision,
- Fahrunfälle (Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug auf Strecken und in Kurven),
- Auffahrnfälle.

Hieran wird deutlich, dass sich das von der Griffigkeit betroffene Unfallgeschehen vorrangig auf der freien Strecke konzentriert. Die Definition diese Teilkollektivs wird durch die Ergebnisse zum Griffigkeitseinfluss bestätigt, da sich für diese Unfälle jeweils stärkere Einflüsse gegenüber allen Unfällen (gesamte Stichprobe) nachweisen lassen (Davies et al. 2008, siehe auch Bild 20).

Kennedy et al. (2008) haben für local roads (Gemeindestrassen) in UK anhand von Einfachregressionen die Griffigkeit (Parameter MSSC) der Unfallrate gegenübergestellt. Zusammenhänge zeigen sich vor allem auf der freien Strecke (Bild 21) und in Kurven (Bild 22). Annäherungsbereiche an Querungsstellen von Fußgängern und an Kreisverkehren sowie extreme Gefällestrassen ( $s \geq 10\%$ ) wurden ebenfalls analysiert, zeigten aber keine Zusammenhänge.

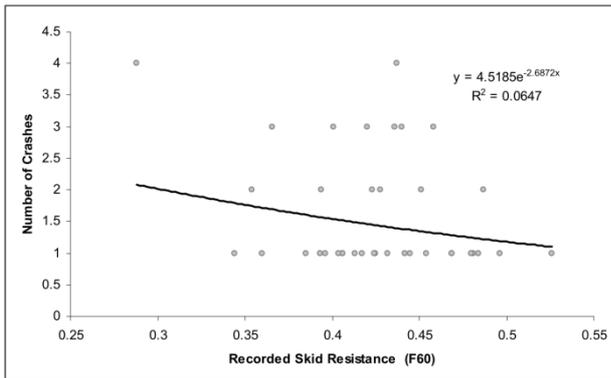


**Bild 21:** Unfallrate in Abhängigkeit der Griffigkeit für einbahnige Streckenabschnitte (Ergebnisse der Untersuchung von Kennedy et al. 2008)

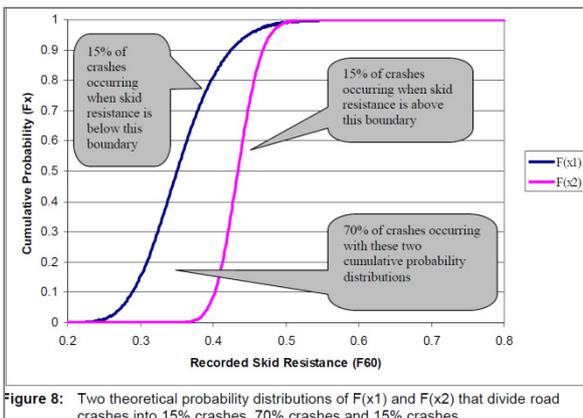


**Bild 22:** Unfallrate in Abhängigkeit der Griffigkeit für Kurven (Ergebnisse der Untersuchung von Kennedy et al. 2008)

Ein nicht untypischer Untersuchungsverlauf zeigt sich bei Piyatrapoomi et al. (2008). Da eine einfache bivariate Regression keine Ergebnisse ergab, wurde auf die Darstellung von Verteilungsfunktionen ausgewichen, um entsprechende Zustandsindikatoren für die Griffigkeit aus der Verteilung über das Netz ablesen zu können (Bild 23 und Bild 24).



**Bild 23:** Unfallzahl in Abhängigkeit der Griffigkeit für Abschnitte mit DTV zw. 3.000 und 10.000 (Ergebnisse von Piyatrapoomi et al. 2008)

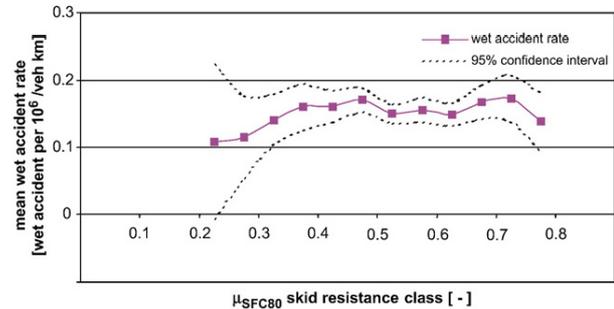


**Bild 24:** Summenhäufigkeiten der Griffigkeit zur Abgrenzung der 15%-Perzentile des Unfallgeschehens (Ergebnisse von Piyatrapoomi et al. 2008)

Caliendo et al. (2007) haben mit multikriterieller Regressionsanalyse das Unfallgeschehen auf italienischen Autobahnen untersucht. Dabei wurde neben DTV, Längsneigung, Sichtweiten, Kurvigkeit und Surface Friction Coefficient (SFC) auch der Straßenzustand (trocken/nass) analysiert. In keinem der Modelle zeigte die Griffigkeit einen signifikanten Einfluss. Allerdings war der Straßenzustand hoch signifikant und wirkt sich jeweils stärker in Kurven als auf der Strecke sowie stärker auf Unfälle mit Personenschaden als auf Sachschadensunfälle aus.

Lindenmann (2006) untersuchte das Unfallgeschehen auf Autobahnen in der Schweiz. Dazu wurden Unfallhäufungsstellen für Nässeunfälle bestimmt entsprechend der VSS-Norm 640 009, welche Häufungsstellen in Abhängigkeit des DTV und gegenüber vergleichbaren Strecken (erhöhte Auffälligkeit) identifiziert. Für diese Stellen wurde die Griffigkeit analysiert. Nur 19 von 790 unfallauffälligen Abschnitten zeigten gleichzeitig eine „schlechte“ Griffigkeit ( $\mu < 0,32$ ). Dies führte zur Schlussfolgerung von Lindenmann, dass kein Zusammenhang zwischen Griffigkeit und der Entstehung von Nässe-Häufungsstellen auf Autobahnen

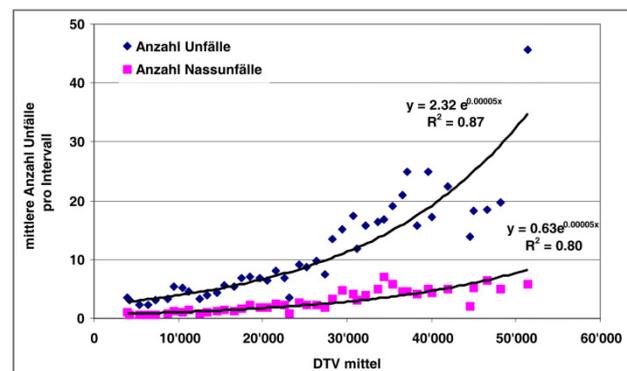
besteht. Auch eine Einfachregression für alle Autobahnabschnitte erbrachte keine Ergebnisse (Bild 25).



**Bild 25:** mittlere Unfallrate von Nässeunfällen in Abhängigkeit der Griffigkeit (Ergebnisse von Lindenmann 2006)

Dumont et al. (2006) dokumentieren drei Untersuchungen aus Frankreich, Deutschland und der Schweiz. In verschiedenen Einfachregressionen werden Zusammenhänge zwischen Unfallraten und der Griffigkeit festgestellt. Auf Autobahnen ist kein Zusammenhang feststellbar. Im nachgeordneten Straßennetz findet sich nur dann ein Zusammenhang, wenn die Geometrie mit berücksichtigt wird. Vor allem für Radien unter 200 m wird ein erhöhter Einfluss für unzureichende Griffigkeit auf das Unfallgeschehen gesehen.

Exemplarisch werden zwei Grafiken gezeigt, welche einerseits das Analyseproblem von Raten illustrieren (nicht-linearer Einfluss zwischen Unfallhäufigkeit und DTV in Bild 26) und andererseits Zweifel an dem Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallrisiko (Raten) aufkommen lassen.

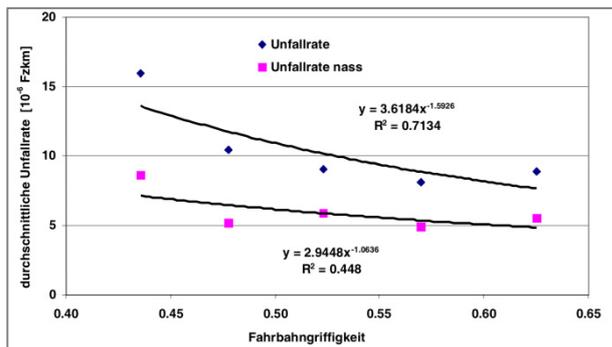


**Bild 26:** Anzahl Unfälle pro Intervall in Abhängigkeit des DTV (Ergebnisse von Dumont et al. 2006)

Unfälle bei Trockenheit weisen im Gegensatz zu Unfällen bei Nässe unterschiedliche (nicht-lineare) Zusammenhänge mit dem DTV auf. Dies deutet einerseits auf unterschiedliche Unfalltypen hin, andererseits bedeutet es, dass der Verwendung von Raten (setzen lineare Zusammenhänge mit dem DTV voraus) bei Analysen klare Grenzen gesetzt sind.

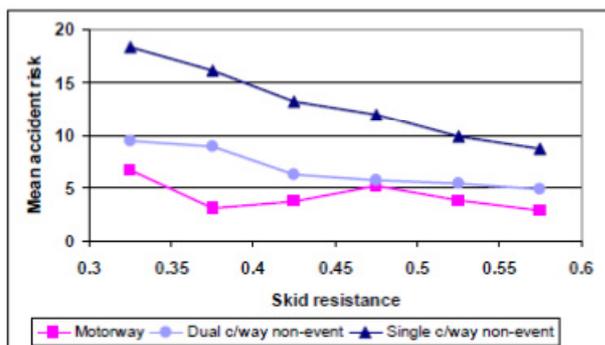
Im Vergleich der Zusammenhänge von Griffigkeit und den Unfallraten (Bild 27) zeigt sich ein ähnlicher Zusammenhang für Nass- und Trockenunfälle. Dies könnte ein Hinweis auf folgende Zusammenhänge sein:

- Aufgrund einer fehlerhaften Unfallerhebung finden sich auch unter den Trockenunfällen falsch attribuierte Nässeunfälle.
- Scheinkorrelationen, welche durch nicht berücksichtigte Einflussgrößen entstehen, die ihrerseits mit der Griffigkeit korrelieren.



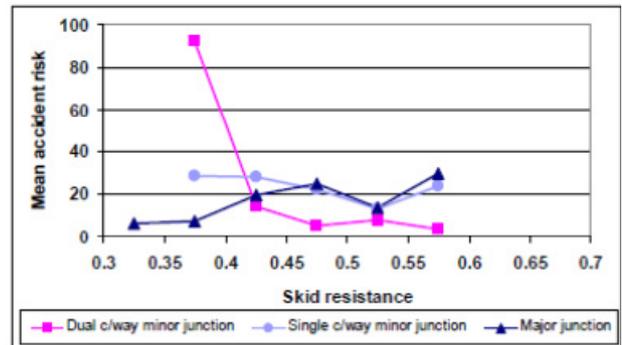
**Bild 27:** Unfallraten für alle und für Nässeunfälle in Abhängigkeit der Griffigkeit (Ergebnisse von Dumont et al. 2006)

Eine häufig zitierte Arbeit stammt von Viner et al. (2005), welche auch für die Neufassung der Griffigkeitsindikatoren in Großbritannien herangezogen wurde. 500m-Autobahn- und 200m-Landstraßenabschnitte wurden hinsichtlich der Griffigkeit (scrim coefficient values) ausgewertet.

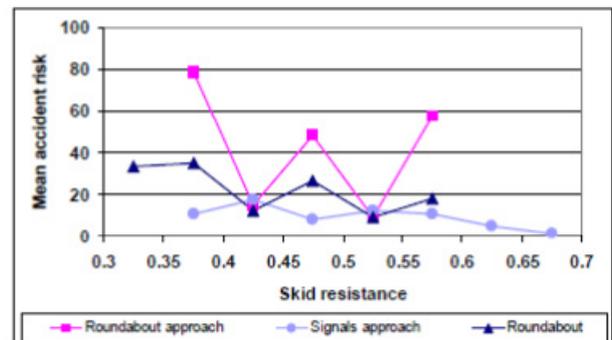


**Bild 28:** „Unfallrisiko“ für verschiedene Straßenklassen in Abhängigkeit der Griffigkeit (Ergebnisse von Viner et al. 2005)

Es wurde ein Einfluss der Griffigkeit auf ein- und zweibahnigen Landstraßen festgestellt (Bild 28). Vor allen bei Radien von unter 500m stellt die Griffigkeit eine erhöhte Gefahr für die Entstehung von Unfällen dar. Für Unfälle auf Autobahnen, an Knotenpunkten (junctions) sowie in deren Zufahrten ließen sich keine signifikanten Einflüsse der Griffigkeit nachweisen (Bild 29 und Bild 30).

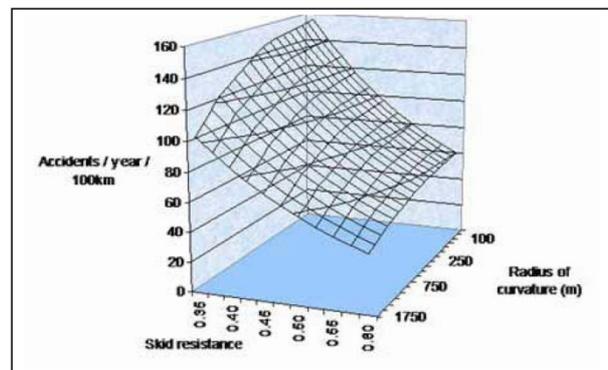


**Bild 29:** „Unfallrisiko“ für verschiedene Fahrbahntypen und Knotenpunkte in Abhängigkeit der Griffigkeit (Ergebnisse von Viner et al. 2005)



**Bild 30:** „Unfallrisiko“ für verschiedene Formen und Verkehrsregelungen an Knotenpunkten in Abhängigkeit der Griffigkeit (Ergebnisse von Viner et al. 2005)

In Anlehnung an die Untersuchung wurden differenzierte Schwellwerte für die Griffigkeit im Erhaltungsmanagement festgelegt. Auf Autobahnen liegt die Schwelle dementsprechend hoch (Griffigkeitswert gering), für Abschnitte mit Radius  $R < 500$  m liegt die Schwelle entsprechend niedrig. Eine gute Darstellung dieser „Dreiecksbeziehung“ (Unfälle, Griffigkeit und Kurvenradius) von Viner (2004) findet sich in Bild 31.



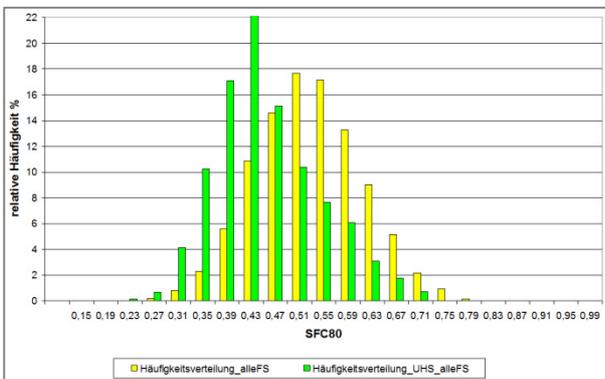
**Bild 31:** Zusammenhang zwischen Unfalldichte, Kurvenradius und Griffigkeit (Ergebnisse von Viner 2004)

Im „Handbook for Road Safety Measures“ von Elvik & Vaa (2004) werden auf Basis von Meta-Analysen (Auswertung einer Vielzahl an Forschungsarbeiten und Ableitung eines durchschnitt-

lichen Effekts einer Maßnahme auf die Sicherheit) ebenfalls Angaben zur Sicherheitswirkung von Griffigkeitsverbesserungen gemacht. Bei Verbesserung des Griffigkeitsniveaus um 0,10 wird im Mittel ein Rückgang der Nässeunfälle um 15 % bezogen auf Unfälle mit Personenschaden aber auch auf nur Sachschadensunfälle erwartet. Es bleibt dabei aber offen, inwiefern die bisher dokumentierten Wechselwirkungen der Griffigkeit mit anderen Einflussgrößen berücksichtigt wurden.

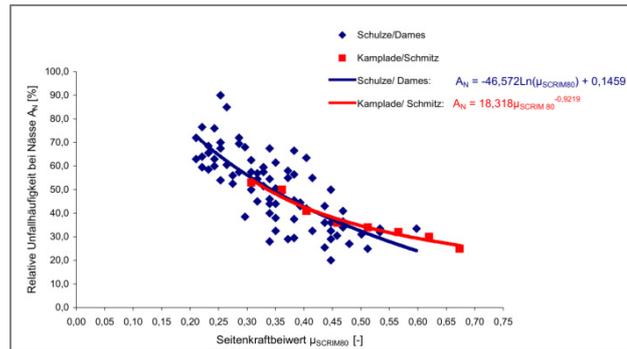
In der Forschungsarbeit von Mayer & van der Sluis (2000) wurde das Unfallgeschehen auf Autobahnen in Bayern und Nordrhein-Westfalen hinsichtlich des Griffigkeitseinflusses analysiert. In der netzweiten Analyse wurde jedem Unfall ein Griffigkeitswert zugewiesen und die Kollektive: Alle Unfälle, Nassunfälle und Trockenunfälle anhand verschiedener Unfallkenngrößen analysiert. Es zeigte sich dabei kein Einfluss der Griffigkeit auf das Unfallgeschehen.

Aus diesem Grund wurden alternativ Unfalhäufungen sowohl für Trocken- als auch für Nassunfälle analysiert. Die Verteilung der Unfälle in den Häufungsstellen über die Griffigkeit zeigt dann einen Zusammenhang (Bild 32). Aus diesen Verteilungsvergleichen wurde in Abhängigkeit der Griffigkeit die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Unfalhäufung abgeleitet.



**Bild 32:** Vergleich der Griffigkeitsverteilungen für alle Untersuchungsabschnitte und Abschnitte in Unfalhäufungen mit Nässeunfällen (Ergebnisse von Mayer & van der Sluis 2000)

In der Arbeit von Stütze (2004) werden Interventionswerte für die Erhaltung der Bundesautobahnen abgeleitet. Dafür hat er zwei ältere Untersuchungen aus den Jahren 1975 und 1984 herangezogen, um daraus den Anteil der Nässeunfälle an allen Unfällen zu prognostizieren (Bild 33).



**Bild 33:** Anteil Nässeunfälle in Abhängigkeit der Griffigkeit (Ergebnisse von Schulze & Dames 1975 sowie Kamplade & Schmitz 1984 zum Griffigkeitseinfluss; aufbereitete Darstellung von Stütze 2004)

Dies soll nur ein kleiner Ausschnitt aus der Vielzahl an Untersuchungen zum Thema Griffigkeit und Unfallgeschehen sein. Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die hier vorliegende Untersuchung ziehen:

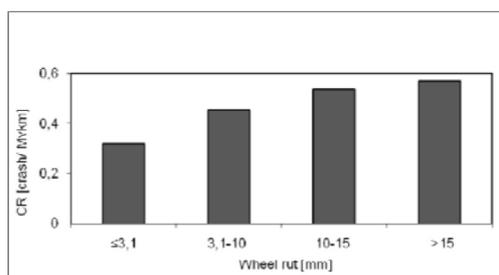
- Der Einfluss der Griffigkeit zeigt sich vorrangig auf Straßen mit eingeschränkten Trassierungskenngrößen (z. B. kleine Radien) bzw. geringeren Geschwindigkeitsniveaus (auch wenn dies explizit nicht bei den Untersuchungen berücksichtigt wurde). Das bedeutet im Umkehrschluss, dass auf Autobahnen häufig kein Einfluss mehr festgestellt wird.
- Im Vergleich älterer Untersuchungen mit aktuelleren Analysen zeigt sich ein abnehmender Trend bezüglich des Einflusses der Griffigkeit. Es kann nicht gesagt werden, ob dies die Folge einer netzweit besseren Griffigkeit, die Folge verbesserter aktiver Sicherheitssysteme in Fahrzeugen (z. B. ABS, ESP) oder verbesserter Analysemethoden bei aktuelleren Untersuchungen ist.
- Kurven und nasse Fahrbahnzustände zeigen einen erhöhten Einfluss der Griffigkeit auf das Unfallgeschehen.
- Fahr- und Auffahrunfälle sowie Unfälle beim Überholen (Unfalltypen 1 und 6) sind in höherem Maße von der Griffigkeit abhängig als die restlichen Unfalltypen.
- Bei der Analyse des Griffigkeitseinflusses sollten grundsätzlich weitere potenzielle Einflussfaktoren berücksichtigt werden (z. B. Radianrelation). Außerdem ist die Verwendung von Raten aufgrund des nicht-linearen Zusammenhangs von Unfällen mit dem DTV nur bedingt zu empfehlen.

### 3.2.3 Ebenheit im Querprofil

Die Spurrinntentiefe sowie die daraus berechnete fiktive Wassertiefe beschreiben die Ebenheit im Querprofil und stellen beide potenzielle Einflussfaktoren für das Aquaplaning und daraus resultierender Unfälle dar.

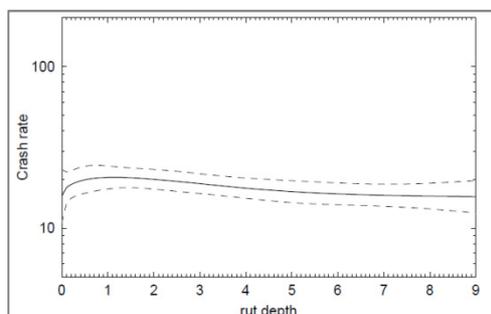
Neben den beiden genannten Parametern werden z. B. von Sjörgen (2011) weitere Indikatoren wie *distance between rut bottoms* (Abstand zwischen den tiefsten Punkten der Spurrinnen), *rut area* (Fläche der Spurrinnen) oder *width of rut* (Breite der Spurrinnen) vorgeschlagen.

Othmann et al. (2009) analysierten den Einfluss verschiedener Zustandsparameter u. a. Spurrinntentiefe auf das Unfallgeschehen (Unfälle bei nasser und trockener Fahrbahn) auf Straßen mit baulicher Mittelrennung in West-Schweden. Dazu wurden einfache Regressionsanalysen zwischen Geometrie- und Zustandsparametern sowie den Unfallraten durchgeführt. Bild 34 zeigt, dass mit steigender Spurrinntentiefe sich gleichzeitig die Unfallraten erhöhen.



**Bild 34:** Unfallrate in Abhängigkeit der Spurrinntentiefe (Ergebnisse von Othmann et al. 2009)

Davies et al. (2008) finden in ihrer multikriteriellen Analyse auf Straßen in Neuseeland keinen Nachweis eines Einflusses der Spurrinntentiefe auf das Unfallgeschehen (Bild 35). Es ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Analyse Griffigkeit und IRI mit einem signifikanten Einfluss nachgewiesen aber auch der Einfluss auf die Nässeunfälle berücksichtigt wurden.



**Bild 35:** Unfallrate in Abhängigkeit der Spurrinntentiefe (Ergebnisse von Davies et al. 2008)

Christensen et al. (2006) untersuchte für Straßen in Norwegen den Einfluss der Spurrinntentiefe, des

IRI sowie von Querneigungswechseln auf das Unfallgeschehen. Dazu wurden 100 m-Analyseabschnitte gebildet, welche gemittelte Zustandswerte aus 20 m-Abschnitten enthielten. Es wurden sowohl verschiedene Zeitintervalle (als eine Art Vorher-Nachher-Analyse) analysiert aber auch eine Regressionsanalyse (logistic regression) vorgenommen. Unfälle wurden einzelnen Fahrstreifen zugeordnet. Unfälle an Knotenpunkten wurden nicht berücksichtigt. In der Zeitreihenanalyse konnte kein Einfluss der Spurrinntentiefe festgestellt werden. Im Rahmen der Regressionsanalyse ergab sich nur dann ein signifikanter Zusammenhang, wenn der DTV-Einfluss als linear angenommen wurde (ggf. erneuter Hinweise auf Korrelation zwischen Zustandsattribut und DTV). Ein deutliches Ergebnis konnte also nicht abgeleitet werden, trotzdem wurde für praktische Belange folgender Zusammenhang abgeleitet: Mit einer Zunahme der Spurrinntentiefe erhöht sich das Unfallrisiko um 0,6 %.

Graves et al. (2005) analysierten verschiedene Zustandsparameter (u. a. auch die Spurrinntentiefe) und deren Zusammenhänge mit dem Auftreten von Unfällen. In einer einfachen Analyse werden die Verteilung des Zustandsparameters (*pav*) sowie der Unfälle (*acc*) übers das Netz miteinander verglichen (Bild 36). Graves et al. (2005) schlussfolgern aus den Verteilungsunterschieden, dass ein Zusammenhang zwischen Spurrinntentiefe und Unfallgeschehen besteht.

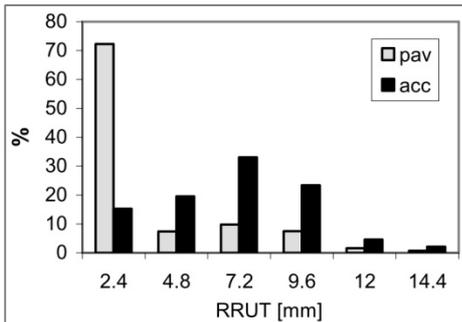


Figure 4-1 Right side wheel path rutting

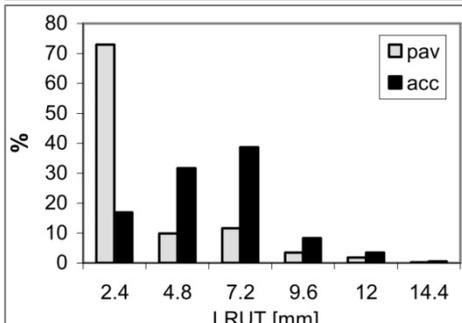


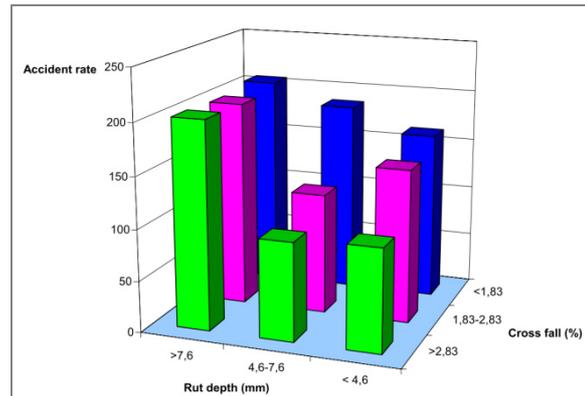
Figure 4-2 Left-side wheel path rutting

**Bild 36:** Verteilung der Häufigkeit von Spurrinntiefen und Unfällen im Netz in Abhängigkeit von Spurrinntiefenklassen (Ergebnisse von Graves et al. 2005)

Ihs (2004) untersuchte neben anderen Parametern auch den Einfluss der Spurrinntiefe auf das Unfallgeschehen auf Straßen in Schweden. In Regressionsanalysen wurde der Einfluss der maximalen Spurrinntiefe auf die Unfallrate geprüft. Dabei wurde das Straßennetz in homogene Abschnitte hinsichtlich Tempolimit, Straßentyp, DTV, Straßenbelag und Straßenbreite eingeteilt. Die maximal festgestellte Spurrinntiefe innerhalb der Stichprobe beträgt 15,4 mm, weswegen die Autorin von einem hohen Niveau des Straßenzustandes spricht. Dies wird als Erklärung für den im Folgenden nicht gefundenen Zusammenhang herangezogen.

Die Regressionsanalyse ergibt keinen wesentlichen Einfluss der Spurrinntiefe, dies wird auch durch eine zusätzliche Varianzanalyse bestätigt. Dafür spricht auch, dass sich die Unfallrate im Winter mit steigender Spurrinntiefe leicht erhöht, im Sommer aber genau das Gegenteil festgestellt wurde.

Zusätzlich wurde von Ihs (2004) die Hypothese aufgestellt, dass sich eine erhöhte Spurrinntiefe vor allem bei geringer Querneigung auf Aquaplaning-Unfälle auswirkt. Eine einfache Analyse dieser drei Variablen bestätigt diese Hypothese (Bild 37). (Anm. d. Verf.: Dieser Zusammenhang ist auch die Basis für die Berechnung der fiktiven Wassertiefe.)



**Bild 37:** Zusammenhang zwischen Unfallrate, Querneigung und Spurrinntiefe (Ergebnisse von Ihs 2004 zum Einfluss der Spurrinntiefe; nur für Unfälle bei einem Regenereignis von mehr als 10 mm Niederschlag)

Die Ergebnisse von Ihs (2004) werden durch eine umfangreichere Studie auf Straßen in Norwegen, Schweden und Finnland bestätigt (Ihs et al. 2011): Ein Zusammenhang zwischen Spurrinntiefe und Unfallrisiko kann nicht bestätigt werden, auch wenn vereinzelt Hinweise auf Zusammenhänge bestehen (siehe Beispiel Aquaplaning-Unfälle sowie vereinzelt Zusammenhänge für Spurrinntiefen über 15 mm auf Hochgeschwindigkeitsstraßen).

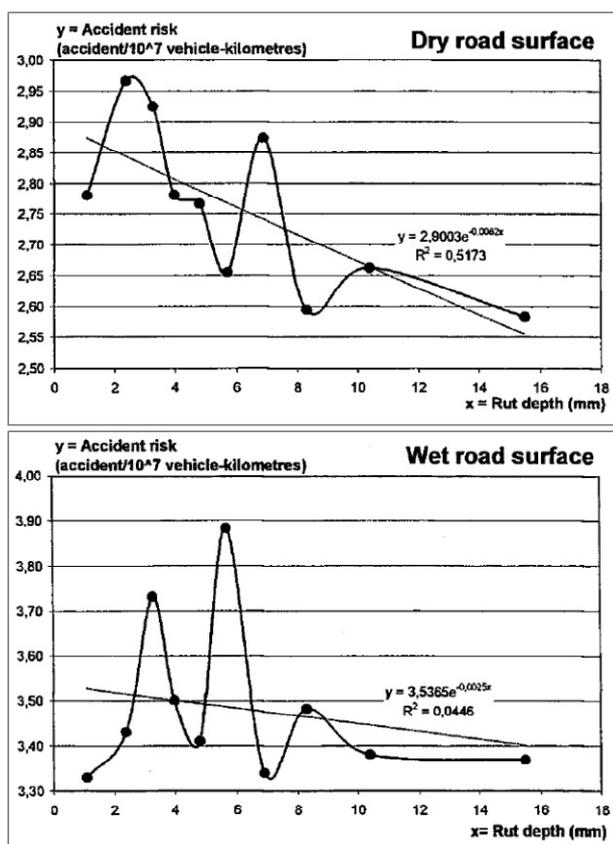
Butterwegge (2001) analysierte Unfallhäufungslinien mit einem auffälligen Nässeunfallgeschehen im Straßennetz des Oberbergischen Kreises. Dabei wurden diese UHL ähnlichen Vergleichsstrecken ohne ein auffälliges Unfallgeschehen paarweise gegenübergestellt. Zustandsindikatoren wurden manuell an ausgewählten Messquerschnitten entlang der Strecken erhoben (u. a. auch Breite und Tiefe von Spurrinnen).

Signifikante Zusammenhänge mit dem Unfallgeschehen wurden dabei für die Spurrinnenbreite (kritisch ab 70 mm) aber nicht für die Spurrinntiefe festgestellt. Dies schränkt die Aussagekraft dieser Ergebnisse deutlich ein.

Hollo et al. (2000) analysierten das Unfallgeschehen im Zusammenhang mit der Spurrinntiefe auf Straßen in Ungarn. In einer einfachen Regressionsanalyse wurde der Einfluss der Spurrinntiefe auf die Unfallrate sowohl bei trockenem als auch bei nassem Straßenzustand (meteorologische Daten, keine Angaben aus der Unfallerbhebung) untersucht. Dabei wurden die Daten entsprechend der Annahme korrigiert, dass bei nassem Straßenzustand bzw. Regenwetter ca. 20 % weniger Verkehr aufgrund nicht angetretener Wege zu erwarten ist.

Die Ergebnisse in Bild 38 zeigen tendenziell eine Abnahme des Unfallrisikos (vor allem bei trockenem Wetter) mit steigender Spurrinntiefe. Die Autoren erklären dies mit dem Effekt der Risiko-

kompensation, tiefe Spurrinnen werden von den Fahrzeugführern erkannt und es erfolgt eine entsprechende Verhaltensanpassung (z. B. Reduzierung der Geschwindigkeit). Gleichzeitig könnte dieser Effekt aber davon überlagert werden, dass geringe Spurrinntiefen schlechter erkannt werden und gerade bei nasser Fahrbahn zu erhöhten Risiken führen (Maximum der Unfallraten liegt bei nasser Fahrbahn bei 6 mm Spurrinntiefe im Gegensatz zu trockenen Fahrbahnen mit einem Maximum bei 3 mm).



**Bild 38:** Unfallraten bei trockenem und nassen Straßenzustand in Abhängigkeit der Spurrinntiefe (Ergebnisse von Hollo et al. 2000)

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich zum Einfluss der Ebenheit im Querprofil auf das Unfallgeschehen ziehen:

- Der Einfluss der Spurrinnen auf das Unfallgeschehen lässt sich bisher nicht klar ableiten bzw. beschreiben. Auch umfangreiche Analysen mit hohem statistischen Aufwand (z. B. Ihs et al. 2011) finden keine signifikanten Zusammenhänge.
- Ein Grund dafür könnten auch die Überlagerung verschiedener Auswirkungen von Spurrinnen auf Fahrverhalten und Unfallgeschehen sein. Tiefe Spurrinnen sind deutlich erkennbar und führen ggf. zu Risikokompensationen, welche geringere Unfallrisiken nach sich ziehen. Tendenziell flachere Spurrinnen, welche

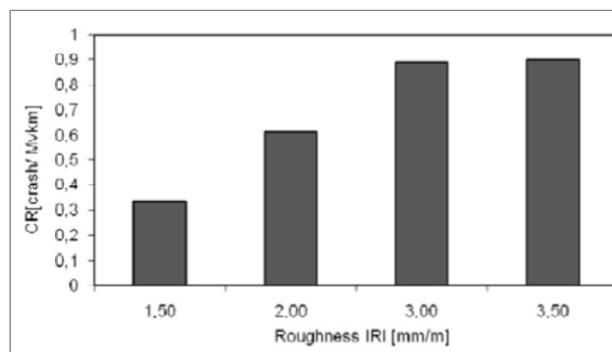
nicht deutlich erkennbar sind, resultieren ggf. nicht in Fahrverhaltensanpassungen und wirken deswegen u. U. unfallbegünstigend.

- Einzelne Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Kombination von Querneigung und Spurrinntiefe (fiktive Wassertiefe) eher einen Zusammenhang mit dem Unfallgeschehen erwarten lässt. Auch Hochgeschwindigkeitsstraßen sind u. U. stärker durch Spurrinnen gefährdet (aufgrund hoher Geschwindigkeiten reichen schon geringere Wassertiefen für Aquaplaning und den Verlust über die Kontrolle des Fahrzeuges aus).

### 3.2.4 Ebenheit im Längsprofil

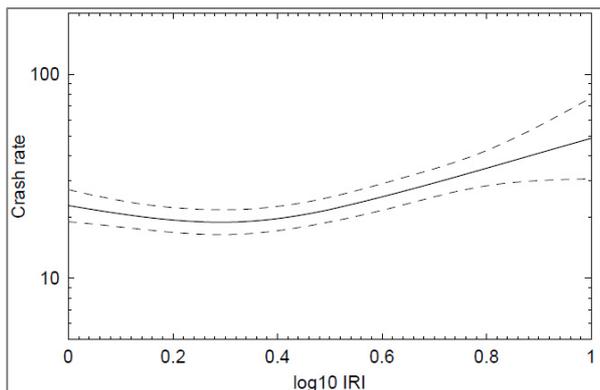
Die Ebenheit im Längsprofil wird in Deutschland über die Allgemeine Unebenheit (AUN) und im internationalen Umfeld häufig durch den International Roughness Index (IRI) beschrieben. Die Längsebenheit verschlechtert sich mit steigendem IRI.

Othmann et al. (2009) analysierten neben der Spurrinntiefe auch den IRI. Die Ergebnisse sind in Bild 39 dargestellt. Laut den Autoren besteht ein Zusammenhang zwischen dem IRI und den Unfallraten, welcher im Vergleich zum Einfluss der Spurrinntiefe stärker ausgeprägt ist.



**Bild 39:** Unfallrate in Abhängigkeit des IRI (Ergebnisse von Othmann et al. 2009)

In den Untersuchungen von Davies et al. (2008) zeigt sich ein leichter Zusammenhang zwischen dem IRI und dem Unfallgeschehen (Bild 40).



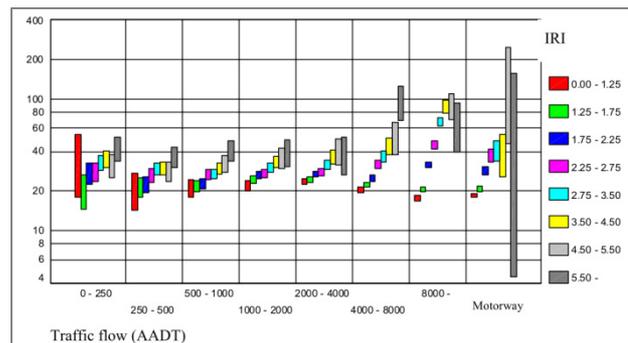
**Bild 40:** Unfallrate in Abhängigkeit des IRI (Ergebnisse von Davies et al. 2008)

In einer anderen (einfacheren) Modellierung von Davies et al. weist der IRI aber einen umgekehrten Einfluss auf (negativer Regressionskoeffizient, d. h. steigender IRI korreliert mit sinkendem Unfallrisiko). Dieser Einfluss verstärkt sich noch für die typischen zustandsrelevanten Unfalltypen wie Fahr- und Auffahrunfälle.

In der Untersuchung von Christensen et al. (2006) zeigt sich ebenfalls ein negativer Zusammenhang zwischen IRI und dem Unfallgeschehen. Dieser Zusammenhang ist signifikant und bleibt auch bei Untergruppen des Unfallkollektives signifikant. Die Autoren leiten im Mittel einen Anstieg der Unfälle um 3 % bei Erhöhung des IRI um 1 mm/m ab.

Elvik & Vaa (2004) gehen im Rahmen Ihrer Metaanalyse durchschnittlich von einem Anstieg der Unfallhäufigkeit von 10 % bei Wiederherstellung der Ebenheitsanforderungen aus. Die Autoren erklären den Zusammenhang mit niedrigeren Geschwindigkeiten bei einem höheren IRI.

Ihs (2004) finden im Gegensatz dazu einen (signifikanten) positiven Zusammenhang zwischen IRI und der Unfallrate für schwedische Straßen. Mit abnehmender Längsebenheit nimmt die Unfallrate zu (Bild 41). Dieser Zusammenhang zeigt sich vor allem für Straßen mit einem geringen Geschwindigkeitsniveau. Elvik & Vaa (2004) beurteilen die unterschiedlichen Ergebnisse von Ihs (2004) im Vergleich zu Christensen et al. (2006) damit, dass in der schwedischen Untersuchung die Randbedingungen weniger streng kontrolliert wurden und dass grundsätzlich eine geringere Bandbreite des IRI auf schwedischen Straßen festzustellen ist.



**Bild 41:** Zusammenhang zwischen Unfallrate, DTV und IRI (Ergebnisse von Ihs 2004 zum Einfluss der Längsebenheit; y-Achse entspricht Unfallrisiko/Unfallrate)

Bester (2003) untersuchte den Einfluss des Present Serviceability Index (PSI) auf das Unfallgeschehen auf Straßen in Südafrika. Der PSI kann auch aus dem IRI abgeleitet bzw. berechnet werden. Er verhält sich aber umgekehrt proportional, d. h. ein hoher PSI steht für einen guten Straßenzustand. Der Einfluss wird anhand einer Korrelationsmatrix, direkten Vergleichen und einer Regressionsanalyse unter Berücksichtigung der Anzahl und Breite der Fahrstreifen, Breite und Art der Bankette, der Hügeligkeit („terrain type“ als Stellvertretergröße für die Trassierung) sowie des DTV untersucht.

Es zeigen sich uneinheitliche Ergebnisse je nach Methodik und Berücksichtigung verschiedener Merkmalskombinationen. Der Autor interpretiert die Ergebnisse auf folgende Weise:

- im hügeligen Terrain ergeben sich für ein hohes PSI (hohe Längsebenheit) tendenziell geringere Unfallrisiken
- im flachen Terrain ist der Einfluss des PSI nicht mehr signifikant

Ohne Berücksichtigung der Hügeligkeit ergibt sich bei Interpretation der multikriteriellen Unfallmodelle von Bester (2003) eine Zunahme der Unfallrisiken bei verbessertem Straßenzustand (beschrieben über einen hohen PSI).

Butterwegge (2001) findet bei der Analyse von Häufungsstellen von Nässeunfällen einen unfallbegünstigenden Einfluss der Unebenheit (zusammen mit dem Auftreten von Netzfalten und Flickstellen).

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich zum Einfluss der Ebenheit im Längsprofil auf das Unfallgeschehen ziehen:

- Der Einfluss der Längsebenheit auf das Unfallgeschehen kann nicht abschließend geklärt werden, da heterogene Ergebnisse (entgegenstehende Zusammenhänge) gefunden wurden.

- Die Annahme eines steigenden Unfallrisikos bei einer verbesserten Längsebenheit wird aber als eher wahrscheinlich eingeschätzt, da die inhaltliche Begründung mit reduzierten Geschwindigkeiten und deren positiven Einfluss auf das Unfallgeschehen hier nachvollziehbar ist.
- Erneut zeigt sich, dass eine Berücksichtigung von entwurfstechnischen Merkmalen der Straße zwingend notwendig für eine aussagekräftige Analyse ist.

### 3.2.5 Sonstige Zustandsmerkmale

Neben den bereits analysierten Zustandsmerkmalen werden teilweise auch Substanzmerkmale wie Flickstellen, Risse sowie Eckabbrüche (Beton) und Kantenschäden (Beton) sowie die Sicherheitsauswirkungen von Sprühhahnen diskutiert. In Butterwegge (2001) finden sich gering signifikante Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Unfalldüfungslinien sowie dem kombinierten Auftreten von Netzrissen, Schäden und Flickstellen. Graves (2005) stellt einen Zusammenhang zwischen Rissen in der Fahrbahnoberfläche sowie einer höheren Wahrscheinlichkeit für Unfälle fest. In Bullas (2004) sowie Hall et al. (2009) werden die potenzielle Auswirkungen von Sprühhahnen auf das Unfallgeschehen diskutiert. Es wird deutlich, dass davon direkt betroffene Unfälle eine sehr kleine bzw. untergeordnete Rolle spielen (sehr geringer Anteil am Gesamtunfallgeschehen).

Elvik & Greibe (2005) konnten auf Basis einer Metaanalyse keinen eindeutigen Einfluss von offenporigem Asphalt auf die Sicherheit nachweisen.

Greene et al. (2008) fanden einen signifikanten Zusammenhang zwischen neuen Fahrbahnbelägen (vor allem auf Autobahnen) und einem leichten Anstieg in den Unfallzahlen. Dieser Effekt hält bis zu 6 Monaten nach Verkehrsfreigabe an. In Leden et al. (1998) wurden die Auswirkungen von Fahrbahnoberflächenverbesserungen analysiert. Es wurden erhöhte Geschwindigkeiten bei trockener Straße festgestellt sowie ein leichter Anstieg der Unfallzahlen.

Simpson (2008) fand Rückgänge in den Unfallzahlen beim Aufbringen von hochgriffigen Materialien, vor allem in Zufahrten von Knotenpunkten. Allerdings zeigte ein Teil der Analyseabschnitte auch einen Anstieg in den Unfallzahlen.

## 3.3 Bewertung der Sicherheit aus Sicht der Zustandsgrößen der ZEB

Die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) wurde wie in Kapitel 2.1 beschrieben Ende der 1980er Jahre durch den Bund eingeführt. Sie wird

seitdem für die Zustandsbewertung der Bundes- und Landesstraßen, wie auch für einen Teil der Kommunalstraßen angewandt. Die Ziele der ZEB lagen ursprünglich in der Dokumentation des Zustands der Substanz sowie der Angebotsqualität für den Straßennutzer. Der letztgenannte Aspekt umfasst die Befahrbarkeit (Fahrkomfort) und Sicherheit. Der Fokus lag primär auf einem Vergleich der einzelnen Bundesfernstraßennetze der Länder zur Steuerung der Mittelverteilung und der Möglichkeit Aussagen zum Gesamtzustand, dessen Entwicklung und den erforderlichen Erhaltungsmitteln treffen zu können. Erst in zweiter Linie ging es darum, auf der Objektebene Defizite aufzuzeigen und daraus Bauprogramme abzuleiten.

Aus diesen Gründen gibt es in sämtlichen Dokumenten zur ZEB nur sehr wenige Aussagen zur Sicherheitsrelevanz der Zustandsgrößen. Das derzeit geltende Regelwerk - hier ist ausschließlich die ZTV ZEB-StB, 2006 zu benennen - enthält zum Themenkomplex der Verkehrssicherheit nur einen Satz, der an dieser Stelle zitiert werden soll: *„Der Gebrauchswert TWGEB ist als Summenparameter von Befahrbarkeit und Verkehrssicherheit zu verstehen. Durch eine gewichtete Verknüpfung der hierfür relevanten Merkmale wird dieser Teilwert gebildet.“*

Es wird nichtklar, welche der Zustandsgrößen für die Befahrbarkeit und welche für die Verkehrssicherheit steht. Zusammenfassen muss festgestellt werden, dass es derzeit in der ZEB keine präzise Aussage zur Sicherheitsrelevanz der Zustandswerte gibt.

Folgende Merkmale bzw. Zustandswerte finden bei der Bildung des Gebrauchswertes im Rahmen der Wertesynthese zur Zustandsbewertung Verwendung:

- ZWAUN (Längsebenheit)
- ZPSPT (Spurrinntiefe)
- ZWSPH (Fiktive Wassertiefe)
- ZWGRI (Griffigkeit)

Um die Merkmale hinsichtlich ihrer Relevanz für die Verkehrssicherheit eingrenzen zu können wurden daher ältere, der ZEB vorangehende Dokumentationen untersucht, die als Grundlagen in die Erarbeitung des ZEB-Verfahrens bzw. als Dokumentation genutzt wurden.

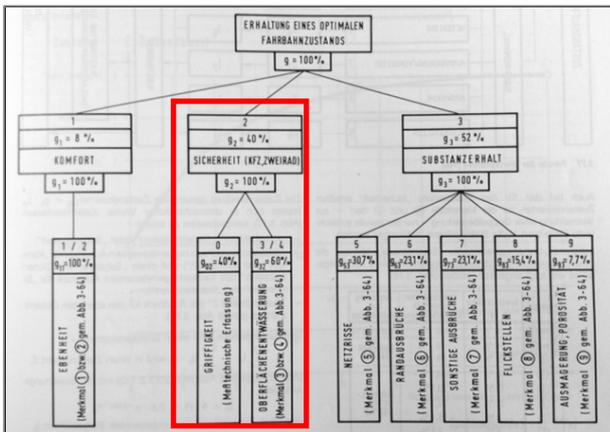
In der Fachliteratur (Alfred Schmuck, 1997) werden die Einflussgrößen des Straßenzustands detailliert erörtert und gleich mehrere für die Sicherheit relevante Kriterien benannt (Bild 42):

- **Ansammlung von Wasser auf der Fahrbahn infolge von Unebenheiten** und Wegfall der Reibkraft (Aquaplaning)

- **Spurrinnen**, die den Lenkvorgang behindern / beeinflussen (Fahrstreifenwechsel, Lenkkorrekturen)
- reduzierter Kraftschluss durch Radlastschwankungen infolge von **Unebenheiten** (Wellenlängen 0,3 m bis 20 m)
- reduzierter Kraftschluss durch fehlende **Griffigkeit**

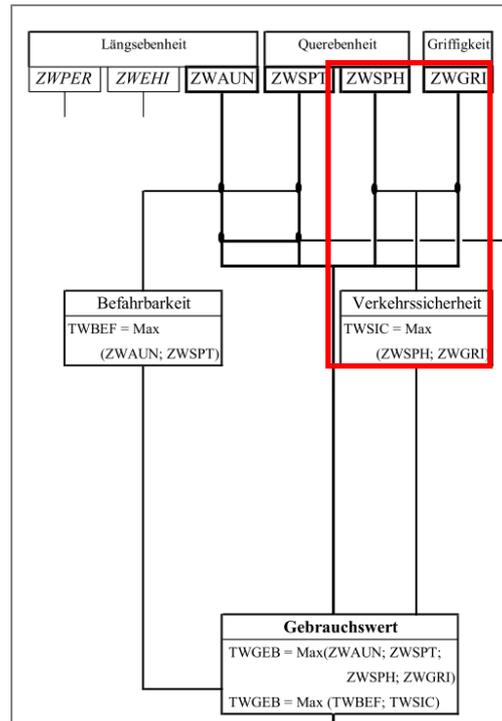
In die Wertesynthese gehen bei Schmuck zwei Merkmale in den Teilwert „Sicherheit“ ein (Bild 42):

- **Griffigkeit**
- **Oberflächenentwässerung**  
Die Oberflächenentwässerung wird definiert als:
- **Wasserrückhalt infolge von Spurrinnen**
- **Wasserrückhalt infolge allgemeiner Oberflächen- / Konstruktionsmängel**



**Bild 42:** älterer Ansatz für Wertesynthese mit sicherheitsrelevanten Kriterien nach Schmuck, (Quelle: Straßenerhaltung mit System - Grundlagen des Managements)

In den zurzeit in Überarbeitung befindlichen Arbeitspapieren der FGSV zur Zustandserfassung und -bewertung Reihe A ist eine von der im aktuellen ZEB-Verfahren eingesetzten Verknüpfung abweichende Wertesynthese dargestellt. Diese gibt jedoch Hinweise zur Sicherheitsrelevanz einzelner in der ZEB verwandten Merkmale. In Bild 43 ist erkennbar, dass die Größen ZWSPH (Fiktive Wassertiefe und ZWGRI (Griffigkeit) wie bei Schmuck (Bild 42) zu einem Teilwert Sicherheit verknüpft wurden.



**Bild 43:** Wertesynthese der Teil- und Gesamtwerte, Ausschnitt, (Quelle: FGSV-Arbeitspapier zur Zustandserfassung und -bewertung, 2001)

Da im Rahmen der ZEB der Wasserrückhalt ausschließlich über die „Fiktive Wassertiefe“ beschrieben wird und allgemeine Oberflächen- / Konstruktionsmängel unberücksichtigt bleiben, lässt sich zusammenfassend schlussfolgern, dass die Zustandsmerkmale

- **Fiktive Wassertiefe (SPH)**
- **Griffigkeit (GRI)**

als sicherheitsrelevant einzustufen sind, auch wenn diese in der ZTV ZEB-StB, 2006 nicht explizit benannt sind.

### 3.3.1 Erfassungsprinzip Fiktive Wassertiefe

Die technischen Grundlagen für die Bestimmung der „Fiktiven Wassertiefe“ sind in der TP Eben - Berührungslose Messungen, 2009, formuliert, die der Griffigkeit in der TP Griff-StB (SKM), 2007:

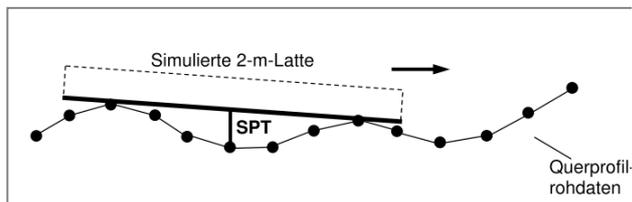
#### Spurrinentiefe und fiktive Wassertiefe

„Das Querprofil besteht aus einer Folge von Höhenmesspunkten, wobei der Messpunktabstand in Querrichtung 10 cm beträgt. Die Messbreite beträgt auf BAB mindestens 3,20 m und auf Bundesstraßen bzw. im nachgeordneten Netz mindestens 3,00 m. Querprofile sind in Fahrtrichtung im Abstand von 1 m auszuweisen.“

Die Messtoleranz aller verwendeten Laserabstandssensoren darf für eine einzelne Abstandsmessung 0,2 mm nicht überschreiten, der Linear-

tätsfehler darf im gesamten genutzten Messintervall nicht größer als 0,2 mm sein.....

Die Spurrinnentiefe SPT ist nach dem 2-m-Lattenprinzip mittels gleitender 2-m-Latte zu berechnen (vgl. DIN EN 13036-8:2008-06 [1]). Für die rechte und die linke Rollspur sind jeweils die maximalen Abstände zwischen Latte und Fahrbahnoberfläche anzugeben. Als Grenze zur Zuordnung dient die Mitte des Querprofils. Es ist sinngemäß nach Anhang 1, Abschnitt (b) zu verfahren. Eine Berücksichtigung des Schwerpunktes in Bezug auf die Auflagepunkte (etwaige unstabile Lage) erfolgt jedoch nicht.“

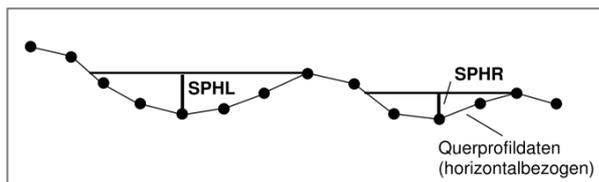


**Bild 44:** Bestimmung der „Spurrinnentiefe“  
(Quelle: TP Eben - Berührungslose Messungen, 2009)

„Die fiktive Wassertiefe wird aus dem Querprofil jeder Einzelmessung ermittelt (unter Zugrundelegung der Mittelwerte des Querneigungsbezuges des Systems über 10 m). Die Wassertiefe ist ausschließlich zwischen den aktuellen Aufstandspunkten der Latte aus der Spurrinnentiefenberechnung für die rechte und linke Rollspur zu bestimmen. Als Grenze zur Zuordnung dient die Mitte des Querprofils. Für die fiktiven Wassertiefen und die Querneigung sind Mittelwerte für jeweils 10 m zu berechnen und als Einzelwerte zu betrachten:

- **SPHR** fiktive Wassertiefe rechts [mm]
- **SPHL** fiktive Wassertiefe links [mm]

Obige 10-m-Einzelwerte werden für einen 100-m-Abschnitt \*) wiederum zu Mittelwerten zusammengefasst.“ \*) Ergänzung: bzw. zu 20 m-Werten (Ortsdurchfahrten).“



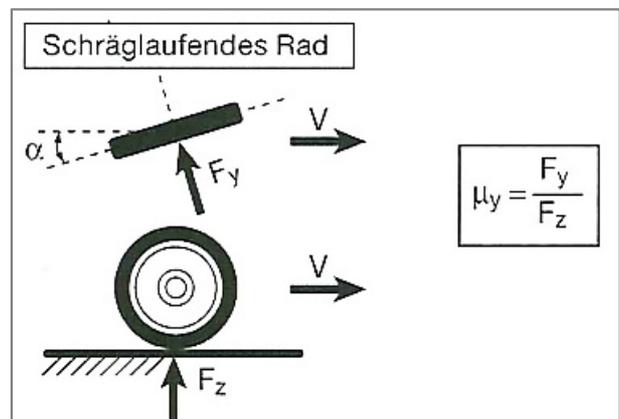
**Bild 45:** Bestimmung der „Fiktiven Wassertiefe“  
(Quelle: TP Eben - Berührungslose Messungen, 2009)

### 3.3.2 Messprinzip Griffigkeit

„Beim Griffigkeitsmessverfahren SKM wird die Seitenkraft am definiert schräglaufenden Messrad (zusätzliches frei drehendes Rad in der Mitte der rechten Rollspur des Messfahrzeuges) bestimmt. Der Quotient aus der gemessenen Seitenführungskraft  $F_y$  und der bekannten Radlast (Normalkraft)  $F_z$  ergibt den Seitenkraftbeiwert  $\mu_y$ ...“

Der mittlere Seitenkraftbeiwert  $\mu_y$  von 1 m-Messlänge ist als 1 m-Einzelwert aus mindestens 10 Einzelabtastungen abzuspeichern“

Die 1 m-Einzelwerte werden zu 100 m- (Freie Strecke) bzw. 20 m-Zustandsgrößen (Ortsdurchfahrten) aggregiert.

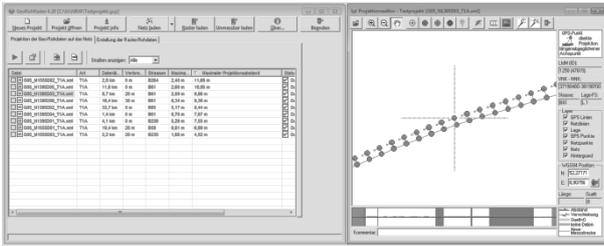


**Bild 46:** Erfassung der Griffigkeit mit dem SKM-Verfahren  
(Quelle: TP Griff-StB (SKM), 2007)

### 3.3.3 Abschnittsbildung

Das Straßennetz der ZEB besteht zuerst aus einzelnen Straßenabschnitten, die durch sogenannte Netzknoten - in der Regel Verknüpfungspunkte mit Straßen - begrenzt werden. Darunter existiert ein festes Raster von Auswerteabschnitten. Die Abschnittslängen betragen außerorts (Freie Strecke) 100 m und innerorts (Ortsdurchfahrt) 20 m. Im Rahmen der Zustandsgrößenermittlung werden sämtliche Zustandsinformationen diesem Auswertearaster zugeordnet.

Bis zum Jahr 2005 wurden die Zustandsdaten ausschließlich über die bei der Erfassung aufgezeichneten Weginformationen dem Straßennetz zugeordnet. Dies führte in der Anfangsphase der ZEB oft zu Fehlern, wenn z. B. Differenzen zwischen dem Messweg und der Länge des Straßennetzes in der Datenbank bestanden. Im Jahr 2005 wurde daher das Verfahren der „Standardisierten Netzzuordnung“ eingeführt (Bild 47). Hierbei erfolgt die Zuordnung der Daten anhand der während der Messung erfassten GPS-Koordinaten und des ebenfalls in den Geo-Rohdaten abgelegten Messwegs.

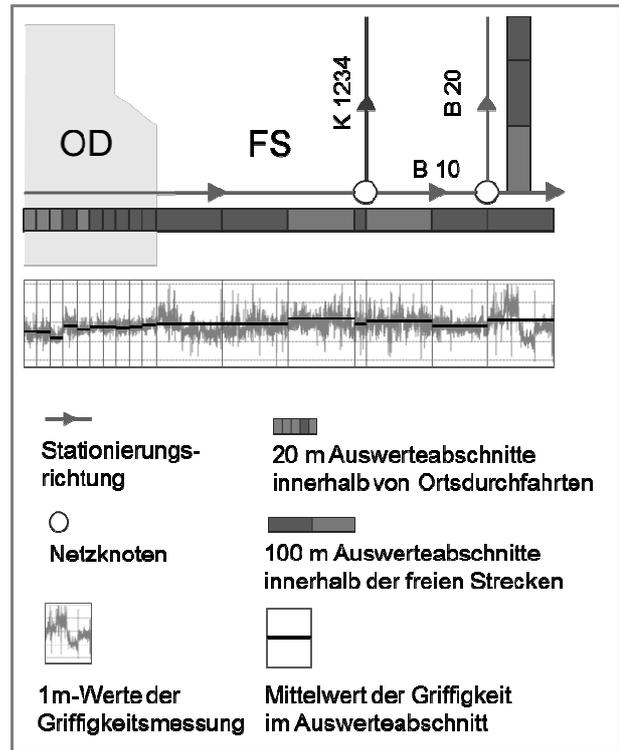


**Bild 47:** Standardprogramm zur Rasterung der Erfassungsdaten

Für die Zuordnung wird die Standardsoftware GeoRohRaster (BASr) genutzt. Diese verwendet ein komplexes Projektionsverfahren und ordnet die Koordinaten unter Verwendung des Messwegs und verschiedene Steuerparameter der Geometrie des Straßennetzes zu. Im Ergebnis werden den Geo-Rohdaten Angaben zur Position im Straßennetz zugewiesen. Jede Position erhält die Angaben zur Straße (Nummer), zum Abschnitt (Von Netzknoten - Nach Netzknoten) und zur Station. Die Positionsangaben werden jeweils an den oben genannten Start- bzw. Endpunkten des Rasters gesetzt. Die von der Software erweiterten Dateien werden daher als Raster-Rohdaten bezeichnet. An den Enden der ASB-Abschnitte können sich aufgrund der Tatsache, dass am Beginn des ASB-Abschnitts das Raster immer neu ansetzt wird, auch kürzere (theoretisch auch 1 m lange Zustandsabschnitte) bilden. Siehe hierzu Bild 48.

Im Ergebnis besitzen die Rasterrohdaten immer noch die elementaren Zustandsinformationen (z. B. 1 m-Griffigkeitswerte) und enthalten keine aggregierte Zustandsgrößen.

Die Berechnung der Zustandsgrößen und deren Bewertung zu Zustandswerten erfolgt in einem separaten Schritt.



**Bild 48:** Abschnittsbildung am Beispiel der Griffigkeit

### 3.3.4 Zustandsgrößenermittlung

Aus den vorangehend beschriebenen Raster-Rohdaten werden auswerteabschnittsweise Zustandsgrößen ermittelt.

Sowohl bei der Griffigkeit als auch bei der Fiktiven Wassertiefe erfolgt dieses über eine Mittelung von 1 m-Einzelwerten. Siehe dazu exemplarisch Bild 48.

#### Griffigkeit

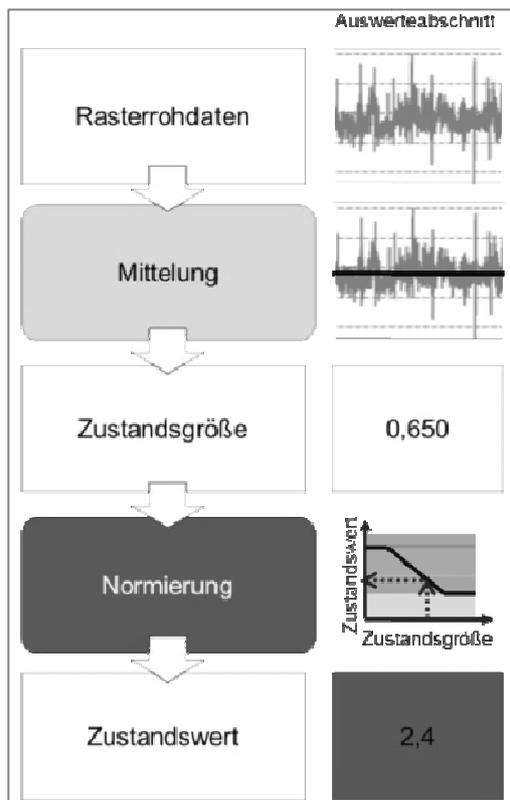
Die in den Rasterrohdaten enthaltenen 1 m-Griffigkeitswerte werden zunächst gem. ZTV-ZEB-StB, 2006 anhand der Wasser- und Fahrbahntemperaturen sowie der Geschwindigkeit korrigiert. Danach erfolgt eine Prüfung, ob die für den Auswerteabschnitt vorhandenen Werte in das vorgegebene Geschwindigkeitsspektrum passen und ob eine ausreichende Werteanzahl vorhanden ist. Die Prüfung der Geschwindigkeit erfolgt dabei für einen gleitenden 20 m-Mittelwert. Danach erfolgt die Mittelung. Das Ergebnis wird als Zustandsgröße (GRI\_60, GRI\_80 oder GRI\_40, die Zahlen stehen für die jeweilige Bezugsgeschwindigkeit) zusammen mit dem Erfassungsdatum und der Messgeschwindigkeit in die sogenannte Ergebnistabelle (ERG.dbf) übernommen.

#### Fiktive Wassertiefe

Wie im vorangehenden Kapitel beschrieben basiert die Berechnung der Fiktiven Wassertiefe auf einer Auswertung der zu 1 m-Werten gemittelten

Einzelsondenwerten des Querprofileraufnahmegeräts. Bei den Bundesautobahnen sind dies jeweils 33 Werte = 3,20 m Breite, bei den Bundesstraßen 31 Werte = 3,00 m Breite.

Je 1 m-Querprofil werden für die linke und rechte Spurrinne Werte für die Fiktive Wassertiefe ermittelt. Diese werden bei der Zustandsgrößenermittlung für den Auswerteabschnitt gemittelt und danach als Zustandsgrößen SPHL und SPHR in die Ergebnistabelle gespeichert.



**Bild 49:** Teilprozesse in der Übersichtsübersicht am Beispiel der Griffigkeit

### 3.3.5 Bewertung

Das Bewertungsprinzip wird in dem FGSV-Arbeitspapier zur Zustandserfassung und -bewertung Reihe A Abschnitt A1 Unterabschnitt A1.1: Zustandsbewertung bei messtechnischer Erfassung wie folgt beschrieben:

„Bei der Zustandsbewertung werden die Zustandsmerkmale in ihren Wirkungen auf die Teilziele beurteilt. Dabei wird zunächst gefragt, ob das jeweilige Zustandsmerkmal überhaupt eine Wirkung auf das betrachtete Teilziel hat. Ist dies der Fall, muss festgelegt werden, bei welcher Ausprägung oder bei welcher Häufigkeit der Schäden bzw. Mängel vernachlässigbare, schwache, mittlere, starke oder sehr starke Wirkungen vorhanden sind, d. h. der Zustand eines Merkmals in Bezug auf das Teilziel sehr gut, gut, mittelmäßig, schlecht

oder sehr schlecht ist. Die vor Ort erfassten Zustandsgrößen bzw. -indikatoren (z. B. mm, % betroffene Fläche) werden dazu in eine Notenskala überführt, die von 1,0 bis 5,0 reicht und Wertbegriffe enthält (z. B. 1,0 = „sehr gut“, 5,0 = „sehr schlecht“). Aus den Zustandsgrößen werden auf diese Weise Zustandswerte. Für die Überführung der Zustandsgrößen in dimensionslose Zustandswerte, die sog. „Normierung“, werden drei Festpunkte auf der Werteskala vorgegeben:

- Der erste Festpunkt kennzeichnet den Zustandswert 1,5.
- Der zweite Festpunkt kennzeichnet den Zustandswert 3,5, der mit Warnwert bezeichnet wird. Der Warnwert beschreibt einen Zustand, dessen Erreichen Anlass zu intensiver Beobachtung, zur Analyse der Ursachen für den schlechten Zustand und ggf. zur Planung von geeigneten Maßnahmen gibt.
- Der dritte Festpunkt kennzeichnet den Zustandswert 4,5, der mit Schwellenwert bezeichnet wird. Der Schwellenwert beschreibt einen Zustand, bei dessen Erreichen die Einleitung von baulichen oder verkehrsbeschränkenden Maßnahmen geprüft werden muss.“

Die Normierungsgrenzen der Zustandsgrößen (Griffigkeit und Fiktive Wassertiefe), siehe Bild 50 und Bild 51, wurden bereits Ende der 1980er Jahre durch die Gremien der FGSV ingenieurmäßig festgelegt. Die Normierung orientierte sich ursprünglich an den Anforderungen, die an Bundesautobahnen gestellt werden. Mittlerweile - und durch die Verbreitung des ZEB-Verfahrens - finden die Normierungsgrenzen (siehe Tab. 1) bei den meisten ZEBen auf den übrigen klassifizierten Netzen Anwendung - auch wenn allein durch die unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten abweichende Anforderungen bestehen müssten. Einzelne Bundesländer verwenden für Landesstraßen bei der Normierung der Fiktiven Wassertiefe eigene Parameter.

	Zustandswert		
	1,5-Wert	Warnwert	Schwellenwert
Zustandsgröße	Freie Strecke		
MSPH [mm]	0,1	4	6
GRI_60 [-]	0,58	0,44	0,37
GRI_80 [-]	0,53	0,39	0,32
	Ortsdurchfahrten		
MSPH [mm]	0,1	8	12
GRI_40 [-]	0,63	0,49	0,42

**Tab. 1:** Normierungsgrenzen gem. ZTV ZEB-StB, 2006 für die Bundesfernstraßen in Asphalt- und Betonbauweise

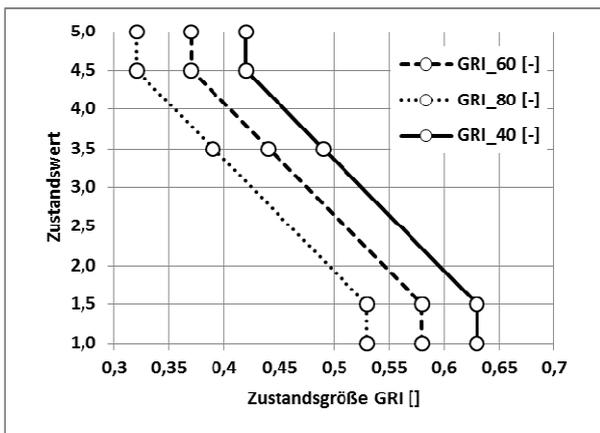


Bild 50: Normierung der Griffigkeit gem. ZTV ZEB-StB, 2006

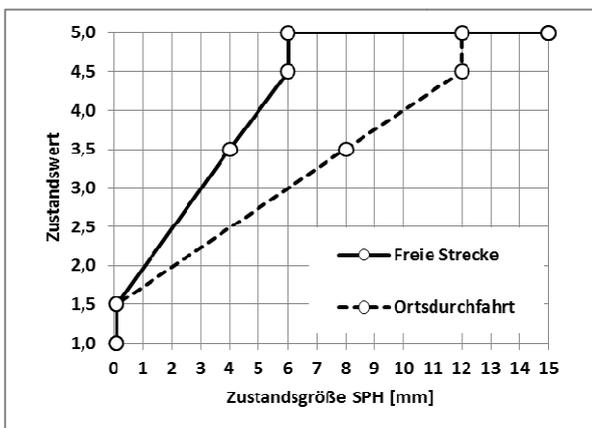


Bild 51: Normierung der Fiktiven Wassertiefe gem. ZTV ZEB-StB, 2006

### 3.3.6 Grenzwerte

Dem FGSV-Arbeitspapier zur Zustandserfassung und -bewertung Reihe A ist zu entnehmen, dass bei der Straßenerhaltung „ein Höchstmaß an Sicherheit bei gleichzeitig gesamtwirtschaftlich minimalen Kosten“ angestrebt wird. Bei Schmuck (1997), steht: „Nach den gültigen Rechts- und Haushaltsbestimmungen hat der Straßenbaulastträger entsprechend seiner Leistungsfähigkeit einen Straßenzustand aufrecht zu erhalten, der dem Verkehrsteilnehmer ein Höchstmaß an Sicherheit und eine angemessene Befahrbarkeit bei gleichzeitig minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten und höchstmöglicher Umfeldverträglichkeit gewährleistet.“

Insgesamt kann festgestellt werden, dass es für die Festlegung der Grenzwerte bisher an präzisen Vorgaben fehlte. Die Definition von Grenzwerten ist jedoch auch aus mehrerer Hinsicht nicht trivial. Bei den hier zu betrachtenden sicherheitsrelevanten Merkmalen ist eine Definition von Grenzwerten strenggenommen nur nach einer wissenschaftlichen Untersuchung und der Quantifizierung des Einflusses der untersuchten Merkmale auf die Sicherheit möglich. Dieses war jedoch bei der Im-

plementierung des ZEB-Verfahrens aufgrund unzureichender Datengrundlagen (Zustand, Unfälle, Verkehr und sonstige sicherheitsrelevante Größen) nicht gegeben. Man hat sich daher nach Aussage von Verfahrensbeteiligten im Fall der Fiktiven Wassertiefe bei der Festlegung an ingenieurmäßigen Erfahrungen orientiert. Bei der Griffigkeit erfolgte die Festlegung der Warn- und Schwellenwerte auf Basis statistischer Kenngrößen (Quantile). Als Datengrundlage diente die Ersterfassung eines Teils der Bundesautobahnen. Die entsprechenden Auswertungen sind noch verfügbar, zeigen jedoch auch, dass die Bestimmung der Quantile nicht alle Fahrstreifen berücksichtigte. Dem Ziel-, Warn- und Schwellenwert wurden ursprünglich folgende Perzentilwerte der Verteilungsfunktion zugeordnet: dem Zielwert 70 %, dem Warnwert 15 % und dem Schwellenwert 5 %. Siehe auch Becker (1992). Aus den Verteilungsfunktionen wurden über die vorgegebenen Prozentwerte die entsprechenden Quantilwerte (Zustandsgrößen) ermittelt. Die Zustandswerte und die Quantilwerte bilden die Stützstellen der Normierungsfunktion. Als charakteristische Punkte wurden nur noch der Schwellen- und der Warnwert verwendet. Die aktuelle Normierungsfunktion der Griffigkeit ist in Bild 50 dargestellt.

Die Zustandsgrößen für die Messgeschwindigkeiten 40 und 60 km/h wurden aus den Zustandsgrößen der Normierungsfunktion für 80 km/h abgeleitet. Dazu wurde versuchsweise der Zusammenhang dem Griffigkeitsmesswert und die Messgeschwindigkeit genutzt. Danach fällt der Griffigkeitsmesswert mit steigender Messgeschwindigkeit. Der angesetzte Faktor beschreibt einen allgemeinen Ansatz. Der Geschwindigkeitseinfluss ist nachgewiesener Maßen örtlich von den jeweiligen Oberflächeneigenschaften und den Temperaturen (Messreifen, Wasser, Fahrbahnoberfläche) abhängig.

Im Jahr 2002 wurde der Bewertungshintergrund an der RWTH Aachen durch Mayer und van der Sluis anhand von Bremsversuchen bestätigt. Unter Berücksichtigung der Messtoleranzen des SKM-Verfahrens wurden für unterschiedliche Szenarien (Fahrzeuge, Strecken, Nässebedingungen) Schwellenwerte ermittelt. Diese decken sich im Wesentlichen mit den Schwellenwerten der ZEB. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die ermittelten Größen für Fahrzeuge ohne ABS und mit aus heutiger Sicht veralteter technischer Ausstattung gilt.

Die Warn- und Schwellenwerte sind damit eher vor dem Hintergrund ingenieurtechnisch festgelegter Ziele zu verstehen und berücksichtigen die im Straßenbau aus technischer und finanzieller Sicht bestehenden Restriktionen.

Sie weisen damit nicht unmittelbar eine quantifizierbare Verbindung zum Unfallgeschehen auf. Strenggenommen müsste dazu auch definiert werden, welcher volkswirtschaftliche Beitrag zur Bewältigung der Unfallkosten oder zur Herstellung unfallärmer Straßen noch im Bereich des Akzeptablen liegt. Da das Unfallgeschehen zudem nie singular mit einzelnen Zustandsgrößen zu betrachten ist, sondern bekanntermaßen im Kausalzusammenhang mit einer breiten Auswahl an Einflussgrößen steht, wäre die Festlegung global geltender Grenzwerte auch nicht zielführend, sondern es müssten Abhängigkeiten zur Fahrgeschwindigkeit, zur Haltesichtweite, zur Trassierung, zur Verkehrsmenge, zum Ausbauzustand, zum technischen Zustand der Fahrzeuge und zu allen weiteren relevanten Parametern berücksichtigt werden. Dies zeigt auch die Dissertation von Van der Sluis (2002) in der sehr detailliert auf die Wechselwirkungen und Einflussfaktoren eingegangen wird.

### 3.4 Fazit

Aus der Literaturanalyse lässt sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Das Unfallgeschehen auf Außerortsstraßen wird durch eine Vielzahl an Infrastrukturparametern beeinflusst. In den letzten Jahren wurden im Rahmen der Entwicklung des Handbuchs für die Bewertung der Verkehrssicherheit von Straßen (HVS) entsprechende Bewertungsmodelle ermittelt.
  - Im internationalen Umfeld wurde durch eine Vielzahl von Untersuchungen der Zusammenhang zwischen Griffigkeit und dem Unfallgeschehen nachgewiesen, auch wenn sich bisher noch kein allgemeingültiger Zusammenhang ableiten ließ.
  - Im deutschsprachigen Raum konnte dieser Zusammenhang mit einzelnen Ausnahmen weder stichhaltig nachgewiesen noch quantifiziert werden. Aktuelle Grenzwerte der ZEB basieren auf der Analyse physikalischer Zusammenhänge zwischen Griffigkeit und Geschwindigkeit und wurden aus Verteilungsanalysen abgeleitet.
  - Weitere Parameter des Zustandes der Fahrbahnoberfläche vor allem hinsichtlich Längs- und Querebenheit wurden sowohl international als auch vereinzelt im deutschsprachigen Raum untersucht. Es ließen sich aber keine eindeutigen Ergebnisse zum Zusammenhang mit dem Unfallgeschehen ableiten.
  - Die Verkehrssicherheit stellt neben der Befahrbarkeit eines der Zielfelder der ZEB dar. Es kann nicht abschließend geklärt werden, auf Basis welcher Zustandsgrößen die Bewertung der Sicherheit einer Fahrbahnoberfläche vorgenommen werden soll.
  - Im Rahmen der ZEB-Erhebung wird aber eine Vielzahl von Daten erhoben. Diese könnten für eine Analyse und damit auch Bewertung der Verkehrssicherheit herangezogen werden. Hierzu gehören die Griffigkeit, Längsebenheit, Spurrinntiefe und fiktive Wassertiefe. Dazu gehören aber auch Infrastrukturparameter wie die Quer- und Längsneigung sowie die Krümmung.
- Aus diesen Erkenntnissen lässt sich der Handlungsbedarf für diese Projekt weiter konkretisieren:
- Überprüfung vorhandener Zustandsgrößen hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit dem Unfallgeschehen unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen:
    - Verwendung größerer Datengrundlagen als bei bisherigen Untersuchungen im deutschsprachigen Raum (Unfalldatenbanken mit Georeferenzierung, digitale Straßennetze)
    - Überprüfung der Verwendung von modifizierten Zustandsgrößen sowie angepassten Auswerteabschnittslängen bei der Zustandsgrößenermittlung
    - Anwendung komplexerer statistischer Verfahren, welche den Einfluss mehrerer Zustands- und Infrastrukturmerkmale im Zusammenspiel auf das Unfallgeschehen abbilden können
    - Verwendung der flächendeckend zur Verfügung stehenden Infrastrukturparameter aus der ZEB
  - Ableitung quantifizierbarer und verallgemeinerbarer Zusammenhänge zwischen Zustand, Infrastruktur und Verkehrssicherheit (sofern signifikante Zusammenhänge existieren), um konkrete Nutzenpotenziale für die Erhaltung der Fahrbahnoberfläche ableiten zu können

## 4 Datengrundlagen

### 4.1 Einleitung

Es werden Unfall-, Verkehrs-, Netz- und Zustandsdaten von Außerortstraßen aus verschiedenen Bundesländern analysiert. Durch die Auswahl unterschiedlicher Bundesländer sollen potenzielle länderspezifische Spezifika möglichst ausgeglichen werden, um allgemeingültige Ergebnisse zu erhalten.

Es wird ausschließlich das Unfallgeschehen auf der freien Strecke analysiert. Die Abgrenzung der freien Strecke erfolgt über die Zuordnung der Unfälle und ist in Kapitel 4.5 beschrieben. Das Unfallgeschehen an Knotenpunkten (zwischen klassifizierten Straßen) ist nicht Bestandteil der Analysen, da:

- einerseits die Literaturanalyse vor allem den typischen Streckenunfälle einen Zusammenhang mit dem Fahrbahnzustand attestieren und
- andererseits die Unfallanalyse von Knotenpunkten wesentlich komplexer aber auch mit zusätzlichen Datenanforderungen (z. B. detaillierter Verkehrsdaten, exaktere Verortung von Unfällen nach Zufahrten) verbunden ist, welche aktuell nicht gewährleistet werden können.

### 4.2 Straßenzustand

Für die Analyse wurde die letzte vollständig verfügbare ZEB auf Bundesautobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen (Zeitraum 2007 - 2012) ausgewählt. Die Auswahl berücksichtigt einen möglichst hohen, zeitlichen Deckungsgrad der Unfalldaten mit den Informationen der Zustandserfassung, um mögliche Zusammenhänge zwischen Straßenzustand und Unfallgeschehen zweifelsfrei nachweisen zu können.

Es wurden die originalen Datenquellen aus den TP4-Projekten verwendet. Alle Projekte wurden ursprünglich bei der HELLER Ingenieurgesellschaft mbH bearbeitet. Die Herkunft der Daten, deren Qualität und alle Parameter der Bewertung waren somit bekannt. Es wurden jeweils die originalen Raster-Rohdaten und die originalen Ergebnistabellen verwendet. Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass für die Bewertung der Bundesfernstraßen z. T. andere Normierungen und Wertesynthesen verwendet wurden, als bei den Landesstraßen. In die weitere Analyse gingen daher nur die nicht bewerteten Zustandsgrößen ein, die wiederum bei allen verwendeten Datengrundlagen vergleichbar sind.

Der Datenumfang wurde auf die Bereiche der freien Strecke (100 m-Abschnitte) eingegrenzt, um die

sehr heterogenen Einflüsse an Knotenpunkten oder in Ortsdurchfahrten von der Analyse abzugrenzen.

Der Datenumfang der Analyseabschnitte (100 m-Abschnitte) umfasst somit:

- rd. 185.000 Abschnitte Bundesautobahnen,
- rd. 105.000 Abschnitte Bundesstraßen und
- rd. 195.000 Abschnitte Landes- bzw. Staatsstraßen.

Für die Analyse wurden aus den ZEB-Daten zunächst diejenigen bereits standardmäßig berechneten Zustandsgrößen übernommen, denen auch aus der Literaturanalyse heraus ein möglicher Kausalzusammenhang mit dem Unfallgeschehen unterstellt wurde:

- Griffigkeit
- Fiktive Wassertiefe
- Spurrinntiefe
- Längsebenheit (Allgemeine Unebenheit, Längsebenheitswirkindex, Standardabweichungen der Differenz zum gleitenden Mittelwert bei festgelegten Mittelungslängen)
- Flickstellen

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden darüber hinaus neue bzw. modifizierte Zustandsgrößen berechnet (siehe auch Kapitel 5.2.1):

- Minimalwert des gleitenden Mittelwertes der Griffigkeit
- Maximalwert des gleitenden Mittelwertes der Fiktiven Wassertiefe
- Maximalwert des gleitenden Mittelwertes der Spurrinntiefe
- Fiktiver Wasserrückhalt

### 4.3 Infrastruktur

Die Straßennetzdaten wurden aus den einzelnen ZEB-Kampagnen entnommen und stammen ursprünglich aus den Straßeninformationsdatenbanken SIB. Hierzu gehören jeweils die Straßenachsen mit den entsprechenden Netzknoten und Stationierungen, immer bezogen auf das Jahr der ZEB-Erhebung.

Informationen zur Gestaltung der Straßen konnten ebenfalls aus den ZEB-Datensätzen übernommen werden. Das sind im Einzelnen:

- Anzahl Fahrstreifen und Fahrbahnen

- Ortslage (freie Strecke außerorts oder Ortsdurchfahrt; orientiert sich am OD-Stein und entspricht den Festlegungen der SIB<sup>1</sup>)
- Krümmung (bezogen auf die durch das Erfassungsfahrzeug gemessene Krümmung)
- Längsneigung (bezogen auf die durch das Erfassungsfahrzeug gemessene Neigung)
- Querneigung (bezogen auf die durch das Erfassungsfahrzeug gemessene Neigung)

#### 4.4 Verkehrsdaten

Die Verkehrsdaten stammen aus den Straßenverkehrszählungen SVZ der Jahre 2005 oder 2010, je nachdem welche Daten verfügbar waren. Maßgebend ist hier der durchschnittlich tägliche Verkehr in Kfz/d.

Auch hier ergeben sich je nach Straßenklasse unterschiedlich große Datenlücken im Netz. Straßen ohne DTV-Angaben können grundsätzlich nicht in der Unfallanalyse berücksichtigt werden, da der DTV einen der wichtigsten Expositionsgrößen des Unfallgeschehens darstellt.

#### 4.5 Unfallgeschehen

Es wurden die polizeilich erhobenen Unfälle mit entsprechenden Lokalisierungsinformationen (geografische Koordinate) für den Untersuchungsraum beschafft. Hierbei wurden nur anonymisierte Daten verwendet, d. h. es finden sich keine persönlichen Informationen zu Personen und Fahrzeugen in den Daten.

Es stehen die Unfälle aller Schwere Kategorien, d. h. sowohl Unfälle mit Personen- als auch mit nur schwerwiegendem sonstigem Sachschaden, zur Verfügung (Kategorien 1 bis 6). In der Regel umfassen die Unfalldaten jeweils einen Zeitraum von 3 Jahren. Für einen Teil des untersuchten Straßennetzes liegen Sachschadensunfälle jedoch nur für 2 Jahre vor.

Die Unfalldaten sind in einem höheren Maße dem „Postprocessing“ unterworfen, d. h. sie wurden nach der Erhebung nachbearbeitet mit dem Ziel einer genauen Referenzierung auf das Straßennetz. Bedingt durch eine unterschiedliche Erfassungsmethodik und Datenhaltung in den Bundesländern kann es vorkommen, dass einzelne Unfälle

le nicht referenziert werden können. Deren Anteil und die Auswirkung auf das Ergebnis können jedoch nur bedingt abgeschätzt werden.

#### 4.6 Analysenetz

Im Ergebnis stehen für einen Großteil der 100-m-ZEB-Abschnitte für Außerortsstraßen im Analysenetz Zustands-, Unfall-, Bestands- / Infrastruktur- und Verkehrsdaten zur Verfügung.

Aufgrund von Lücken oder Fehlern in Verkehrs- und ZEB-Daten lässt sich nur ein Teil der zur Verfügung stehenden Abschnitte tatsächlich analysieren. Im Durchschnitt können ca. 75 % des Netzes analysiert werden, d. h. ein Viertel der ursprünglichen Netzlänge fällt aus der Analyse heraus. Eine Übersicht der Netzlängen und analysierten Unfälle findet sich im Anhang 5 in Tab. 26.

Daraus geht hervor, dass insgesamt 15.960 Kilometer Straßennetz analysiert werden konnten. Das sind:

- 6.593 km auf BAB (Fahrtrichtungen getrennt),
- 3.135 km auf Bundesstraßen und
- 6.232 km auf Landes- und Staatsstraßen.

Diesem Netz konnten insgesamt rund 140.779 Unfälle auf der Strecke zugewiesen und damit analysiert werden. Das sind:

- 7.368 Unfälle mit schwerem Personenschaden U(SP),
- 19.347 Unfälle mit leichtem Personenschaden U(LP) und
- 114.064 Unfälle mit nur Sachschaden U(S).

Für die Interpretation der Ergebnisse sind auch die unterschiedlichen Erhebungszeiträume von ZEB-, Unfall- und Verkehrsdaten zu berücksichtigen. Eine Übersicht hierzu findet sich im Anhang 5 in Tab. 27.

Die unterschiedlichen Zeiträume haben sich häufig aus Einschränkungen der Datenverfügbarkeit aber auch aus der Datenbereitstellung durch die Bundesländer ergeben.

Eine Übereinstimmung bzw. Überlappung der Erhebungszeiträume von Unfall- und Verkehrsdaten ist wünschenswert. Es gilt aber zu berücksichtigen, dass die Veränderungen in den DTV-Werten innerhalb von 5 Jahren für den Großteil des Netzes nur marginal sind. Zur Überprüfung wurden beispielhaft vorhandene DTV-Daten des Bundeslandes Bayern herangezogen ([www.baysis.bayern.de](http://www.baysis.bayern.de)). Im Mittel lagen die Abweichungen unter 10 %, häufig nur bei 5 %. Der Einfluss dieser Abweichungen auf die hier vorgesehene großräu-

<sup>1</sup> Diese Abgrenzung stimmt nicht mit den Ortstafeln überein (siehe z. B. Färber et al. 2011). Eine Korrektur ist möglich (Fotodokumentation Zustandsdaten) aber aus Aufwandgründen nichtvertretbar. Aufgrund der geringen Geschwindigkeiten in diesen Bereichen wird der potenzielle Einfluss des Straßenzustandes tendenziell unterschätzt.

mige Netzanalyse wird daher als gering eingeschätzt.

Netzänderungen (Neu-, Um- und Ausbaumaßnahmen) sind in hohem Maße relevant für die Analyse. Änderungen in der Netzgeometrie (neue Achsen oder Netzknoten) konnten aber teilweise in der Unfallzuordnung berücksichtigt bzw. identifiziert und damit aus der Analyse ausgeschlossen werden.

Schwieriger ist die Beurteilung der Abweichungen in den Erhebungszeiträumen von ZEB- und Unfalldaten. Der Fahrbahnzustand unterliegt in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen zeitlichen Veränderungen. Dem steht die Notwendigkeit nach längeren Analysezeiträumen für das Unfallgeschehen entgegen. Damit kann die optimale Zuordnung eines zum Unfallgeschehen passenden Erhebungszeitraums für ZEB-Daten inhaltlich nur bedingt abgeleitet werden. Zusätzlich wird dies durch Erhaltungsmaßnahmen erschwert, welche starke Veränderungen im Fahrbahnzustand innerhalb eines kurzen Zeitraumes nach sich ziehen.

Tatsächlich konnte in den wenigsten Fällen eine freie Auswahl der Erhebungszeiträume stattfinden. Eine Vielzahl an Kombinationen von Erhebungszeiträumen liegt in den Daten vor und kann bzw. muss bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden.

## 5 Methodik

### 5.1 Einleitung

#### Konzept

Auf Basis der Literaturrecherche, der Bestandsanalyse der Netzanalyseverfahren sowie der zur Verfügung stehenden Datengrundlage sollen folgende Forschungsfragen adressiert werden:

- Überprüfung und Quantifizierung von Zusammenhängen zwischen Zustandsparametern der Fahrbahnoberfläche und dem Unfallgeschehen mit:
  - Analyse neuer / angepasster Zustandsparameter
  - exemplarischer Überprüfung verschiedener Analysemethoden
  - Einbezug vorhandener Infrastrukturparameter zur Kontrolle von wechselseitigen Abhängigkeiten
  - Umfangreichen Datengrundlagen, um auch gering signifikante Zusammenhänge identifizieren zu können
  - Überprüfung unterschiedlicher Netzabgrenzungen bzw. Abschnittsbildungen (Länge Analyseabschnitt)

- Identifizierung möglicher Grenzwerte, ab denen ein potenzieller Einfluss von Zustandsparameter nachweisbar ist
- Entwicklung einer quantifizierten Nutzenabschätzung (Zustandspotenzial) für Veränderungen des Zustands der Fahrbahnoberfläche
- Abgleich und Einordnung der Nutzenabschätzung bzw. des Zustandspotenzials mit dem Sicherheits(verbesserungs)potenzial des ESN-Verfahrens

In Bild 52 ist die dafür vorgesehene Methodik überblicksartig dargestellt.

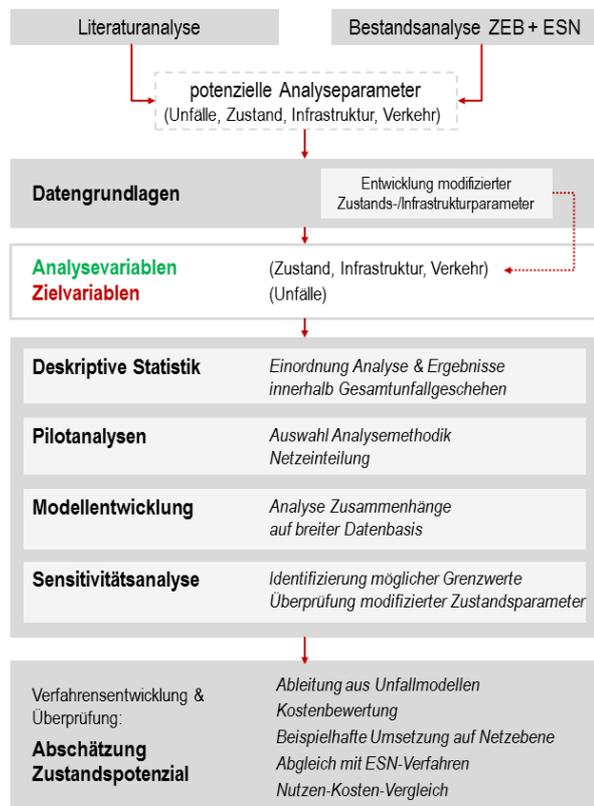


Bild 52: Übersicht Vorgehensweise / Projektschritte

Eine Übersicht zu den analysierten Zustands, Netz-, Verkehrs- und Infrastrukturdaten geben Tab. 23 und Tab. 24 in Anhang 5.

#### Werkzeuge und Datenfluss

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden parallele Ansätze zur Berechnung neuer, für die Zwecke der Unfallanalyse geeigneter Indikatoren erarbeitet. Ausgangsdaten waren ausschließlich die Rasterrohdaten der ZEB. Hier liegen die benötigten Informationen, etwa zu den Hilfsgrößen Quer- und Längsneigung, zur Krümmung und zu den Zustandsgrößen bzw. physikalischen Messgrößen in der elementarsten Form gemeinsam mit dem jeweiligen Netzbezug (Straße, Netzabschnitt, Station, Richtung, Fahrstreifen) vor.

Zur Vereinfachung wurden aus den Rasterrohdaten zunächst große Datenbanken mit den einzelnen zu jedem Meter vorhandenen Informationen gefüllt. Diese wurden dann in einem zweiten Schritt entsprechend rechentechnisch interpretiert bzw. zu neuen auswertungsabschnittsbezogenen Indikatoren aggregiert.

Zu einzelnen für geeignet befundenen Indikatoren wurden in einem dritten Schritt Softwarewerkzeuge entwickelt, die direkt auf den Rasterrohdaten aufsetzen und die erforderlichen Indikatoren ermitteln, und zwar ohne vorgenannte komplexe Datenbanken anzulegen. Das grundsätzliche Verfahren gleicht hier dem in der ZEB angewandten Prozess der Erzeugung der Ergebnistabelle (ERG) mit der Standardsoftware der BAST RohZGW, die aus den Rasterrohdaten die erforderlichen Informationen Straßenweise ausliest und mit den berechneten Zustandsgrößen bzw. -werten die sogenannte ERG-Tabelle füllt.

Für die Berechnung der neuen Indikatoren wurde aus Gründen der Kombinierbarkeit der Verfahren bewusst auf das bewährte Auswerterraster der ZEB zurückgegriffen. Hinweis: Die Berechnung der Indikatoren erfolgte ausschließlich für die Auswertungsabschnitte der freien Strecke.

In Bild 53 ist der Datenfluss in der Übersicht dargestellt. Wichtig ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Berechnung neuer Indikatoren zukünftig bzw. nach vorheriger Etablierung des Verfahrens in das Standardprogramm RohZGW aufgenommen werden kann, so dass die manuell aufwändige Verschneidung der Ergebnisse (ERG-Tabelle / Erweiterte Indikatoren) entfallen könnte.

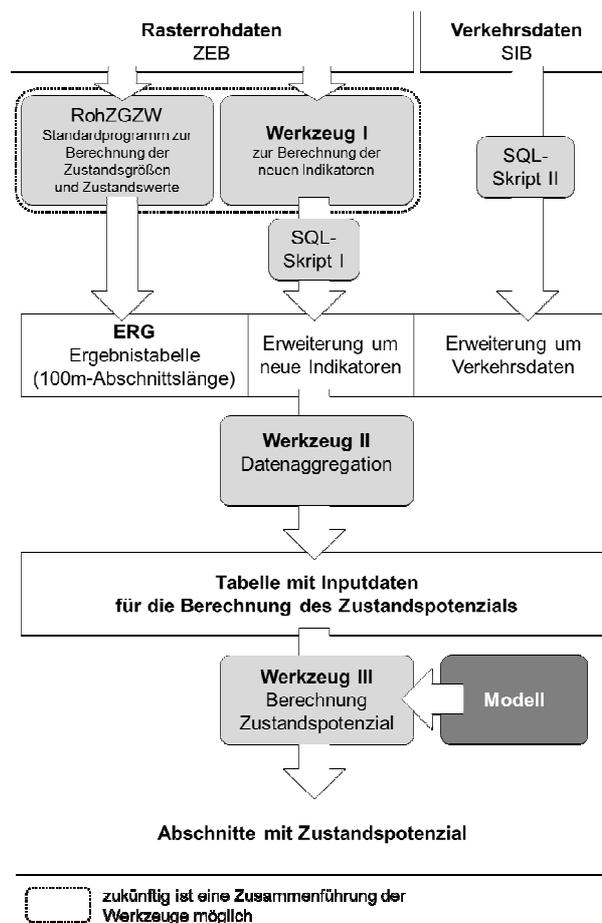


Bild 53: Datenfluss Inputdaten Zustand / Infrastruktur mit Output Zustandspotenzial

## 5.2 Variablen

### 5.2.1 Zustand

Nachfolgend sind die aus der ZEB entnommenen Zustandsgrößen mit der angewandten Berechnungsmethodik (für den 100 m-Wert der freien Strecke) dargestellt:

- Griffigkeit **GRI** [-]  
Mittelwert aus einhundert 1 m - Griffigkeitseinzelnwerten gemäß TP Griff-StB (SKM).
- Fiktive Wassertiefe **SPH** [mm]  
Mittelwert aus einhundert 1 m - Einzelwerten des Maximalwertes der Fiktiven Wassertiefe der linken und rechten Spurrinne der 1 m - Querprofile, Standardberechnung gemäß TP Eben - Berührungslose Messungen.
- Spurrinntentiefe **SPT** [mm]  
Mittelwert aus einhundert 1 m - Einzelwerten des Maximalwertes der Spurrinntentiefe der linken und rechten Spurrinne der 1 m - Querprofile, Standardberechnung TP Eben - Berührungslose Messung.

- Allgemeine Unebenheit **AUN** [cm<sup>3</sup>]  
Aus dem Höhenlängsprofil bestimmtes Unebenheitsmaß  $\Phi h(\Omega)$  gemäß TP Eben - Berührungslose Messung berechnet.
- Flickstellen **FLI** [%]  
Von Flickstellen betroffener Flächenanteil, gemäß ZTV ZEB-StB, 2006, Anhang 8.

Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit neu berechneten Zustandsgrößen aufgeführt. Zu jeder Größe wird die Berechnungsmethodik gezeigt.

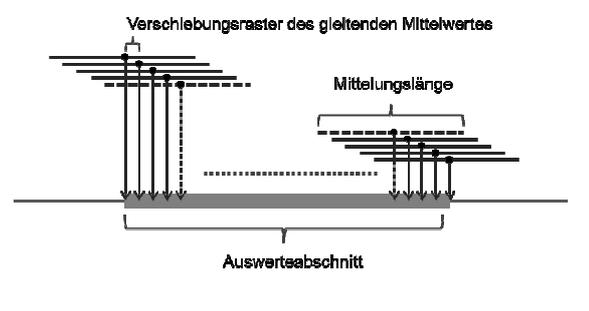
- Minimalwert des gleitenden Mittelwertes der Griffigkeit für feste Mittelungslängen **MIN\_GRI\_MW**[-]

Das hier verwendete Verfahren wurde durch Heller (2007) erstmals genutzt. Mittlerweile hat es sich im Rahmen der Anwendung des MB Griff als Verfahren zur Ermittlung von Bereichen mit schlechter Griffigkeit in 4 Bundesländern etabliert.

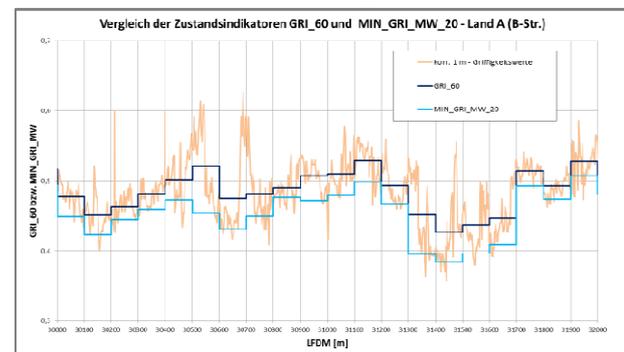
Zur Bestimmung des Minimalwertes wird zunächst ein gleitender Mittelwert (Schrittweite 1 m, bei fester Mittelungslänge) berechnet. Die Mittelung beginnt jeweils mit dem ersten verfügbaren 1 m-Wert der Straße und schiebt sich jeweils in 1 m - Schritten (Bild 54) auch über die Netzknoten hinweg durch das Netz. Danach wird jedem Zustandsabschnitt der ZEB (100 m-Raster, freie Strecke) der jeweils niedrigste Wert zugewiesen. Im Rahmen dieser Forschung erfolgte die Berechnung für jeweils unterschiedliche Mittelungslängen von 20 m, 30 m, 40 m und 50 m. Theoretisch hätten auch noch kürzere oder längere Mittelungslängen berechnet werden können, jedoch wurde darauf aus folgenden Gründen verzichtet. Das Messsystem der Griffigkeit wird durch den Kraftschluss mit der Textur und durch Unebenheiten in der Fahrbahn mechanisch ange-regt. Daraus resultiert eine vertikale Schwin-gung, die sich wiederum in der Seitenkraft 1 : 1 abbildet. Man kann diese „Schwingungen“ des Griffigkeitswertes bereits bei den aufeinander folgenden 1 m-Werten beobachten. Aus ingenieurtechnischer Sicht ist daher eine Mittelung über mindestens 4 Werte (4 m) geboten. In der Anfangsphase der Griffigkeitsmessung wurde aus diesen Gründen bereits ein 20 m-Mittelwert verwendet, welcher auch im das MB Griff 2003 als maßgebliche Analysegröße für die Untersuchung der Verkehrssicherheit aufgenommen wurde. Bild 55 zeigt exemplarisch die 1 m-Werte der Griffigkeit und die dazu im Rahmen der ZEB berechneten 100m-Mittelwerte (GRI\_60). Die über das Verfahren des gleitenden Mittelwertes (hier 20 m Mit-

lungslänge) bestimmten und auf das 100 m – Raster projizierten Werte (MIN\_GRI\_MW\_20) zeigen, wie zu erwarten, ein niedrigeres Niveau.

An jedem Start und Ende bzw. bei Unterbrechungen der Straße fehlt naturgemäß ein Vor- bzw. Nachlauf für den gleitenden Mittelwert. In die betroffenen Abschnitte gehen demzufolge weniger (100 m - 0,5 \* Mittelungslänge) möglichen Werte (freie Strecke) ein. Dies ist jedoch aufgrund der geringen Anzahl an Start- und Endpunkten aus Sicht des Forschungsnehmers vertretbar.



**Bild 54:** Darstellung der gleitenden Mittelwerte und der Projektion auf den Auswerteabschnitt



**Bild 55:** Vergleich der Zustandsindikatoren GRI\_60 (klassisch) und MIN\_GRI\_MW\_20, 2 km

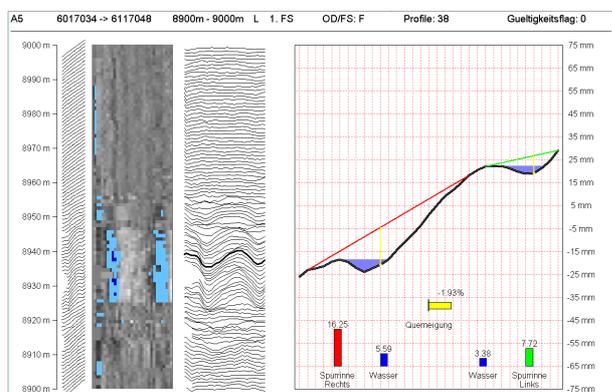
Weitere Auswertungen sind im Anhang A.6 aufgeführt.

- Fiktiver Wasserrückhalt **SPHV** [Liter/100 m]

Diese Zustandsgröße beschreibt das Volumen des Wasserrückhalts in Querrichtung. Ziel sollte es sein, die mögliche Gefährdung durch Aquaplaning besser als mit der Zustandsgröße SPH quantifizieren zu können. Bei der klassischen fiktiven Wassertiefe wird die Breite der aufgespannten Wasserfläche nicht berücksichtigt. Theoretisch kann sich ein SPH-Wert aus einer 20 cm (3 Lasersonden) breiten Vertiefung ergeben.

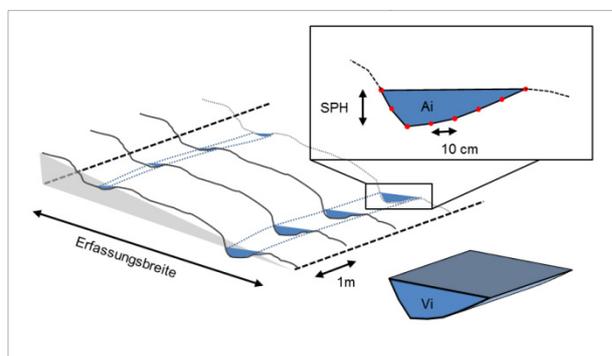
Anhand der einzelnen Sondenwerte der 1 m - Querprofile und der Querneigung (Regressionsgerade durch die Profilmesspunkte, Bild

56) werden die Flächen ( $A_i$ ) bestimmt (siehe Bild 57), welche sich theoretisch mit Wasser füllen können. Durch eine Extrusion der Flächen um jeweils einen Meter und Aggregation der Volumina wird die theoretische Staumenge [Liter] je Auswerteabschnitt berechnet.



**Bild 56:** Visualisierung des Wasserrückhalts in Querrichtung

Es ist hierbei zu beachten, dass diese theoretischen Werte sich nur auf die Entwässerung in Querrichtung beziehen. Die Längsneigung geht modellseitig nicht ein, da datenseitig zwischen den einzelnen Querprofilen keine geometrische Beziehung besteht und somit kein echtes 3D-Modell für entsprechende Abflussberechnungen erzeugt werden kann.



**Bild 57:** Prinzipskizze zur Bestimmung des Wasserrückhalts in Querrichtung

- Maximalwert des gleitenden Mittelwertes der Fiktiven Wassertiefe für feste Mittelungslängen **MAX\_SPH\_MW** [mm]

Verfahren und Mittelungslängen wurden analog zur Zustandsgröße **MIN\_GRI\_MW** angewandt. Es wurden jedoch die 1 m - Werte der Fiktiven Wassertiefe (Maximum der Fiktiven Wassertiefe der linken und rechten Spürinne) verwendet.

- Maximalwert des gleitenden Mittelwertes der Spürinntentiefe für feste Mittelungslängen **MAX\_SPT\_MW** [mm]

Verfahren und Mittelungslängen wurden analog zur Zustandsgröße **MIN\_GRI\_MW** ange-

wandt. Es wurden jedoch die 1 m - Werte der Spürinntentiefe (Maximum der Spürinntentiefe der linken und rechten Spürinne) verwendet.

Die meist auf 100 m-Abschnittslängen ausgelegten Zustandsgrößen wurden für die untersuchten Aggregationsstufen (Zusammenfassung von 100 m-Abschnitten) entweder als Mittelwert sowie Minimum oder Maximum eines 100 m-Abschnitts innerhalb des aggregierten Abschnitts zusammengefasst.

## 5.2.2 Infrastruktur

Das Netz ist um Rampen und Verbindungsstraßen an planfreien Knotenpunkten (vor allem an BAB) bereinigt. Das bedeutet, dass ein Knotenpunkt immer der Kreuzungspunkt zwischen zwei Straßenachsen ist. Hierbei sind zwei Einschränkungen für den Analysedatensatz zu beachten:

- Teilplanfreie Knotenpunkte (z. B. Anschlussstellen an BAB) weisen üblicherweise zwei plangleiche Knotenpunkte im Anschluss der Rampen ans nachgeordnete Netz auf. Das Analysenetzt enthält nur einen Kreuzungspunkt der beiden Hauptachsen (Über- oder Unterführungsbauwerk) ohne die Rampen und deren Anschlüsse. Dies spielt vor allem für die Unfallzuordnung zum Netz eine Rolle, da potenzielle Knotenpunktunfälle im aggregierten Netz im Bereich der freien Strecke liegen. Um diese Knotenpunktunfälle trotzdem gegenüber dem Streckenunfallgeschehen abzugrenzen, wird das Unfallattribut „Charakteristik der Unfallstelle“ mit den Ausprägungen „Kreuzung“ oder „Einmündung“ verwendet.
- Auch im Bundes- und Landesstraßennetz werden z. B. aufgelöste Knotenpunkte in der ZEB reduziert auf einen Kreuzungspunkt. Damit liegen Knotenpunktunfälle und Netzknotenpunkt z. T. an unterschiedlichen Orten bzw. sind zueinander versetzt. Auch dies wird versucht weitestgehend über die alleinige Betrachtung von Streckenunfällen sowie durch eine entsprechende Unfallreferenzierung auszugleichen.

Auf Autobahnen werden Fahrrichtungen getrennt bewertet, im nachgeordneten Netz wird immer nur der Querschnitt bewertet. Straßenachsen mit mehr als einer Fahrbahn auf Bundes- und Landesstraßen werden nur als eine Achse dargestellt aber mit dem Attribut „zwei Fahrbahnen“ versehen. Dies ist meist gleichbedeutend mit dem Vorhandensein einer baulichen Mitteltrennung, wofür allerdings keine eindeutigen Daten vorlagen.

Ortsdurchfahrten und alle anderen innerörtlichen Straßen sind zwar noch im Netz enthalten werden aber nicht in der Analyse berücksichtigt.

Aus den Infrastrukturdaten wurden folgende Variablen für die Analyse abgeleitet:

- Anzahl Fahrstreifen (**FS**)
- Anzahl Fahrbahnen (**FB**)
- Krümmung **K** (1/Radius bezogen auf Messintervalle; bezogen auf die durch das Erfassungsfahrzeug gemessene Krümmung)
- Kurvigkeitsäquivalent **KU\*** ([gon/100 m]; aus Krümmung berechnet)
- Längsneigung **LN** ([%])
- Querneigung **QN** ([%])

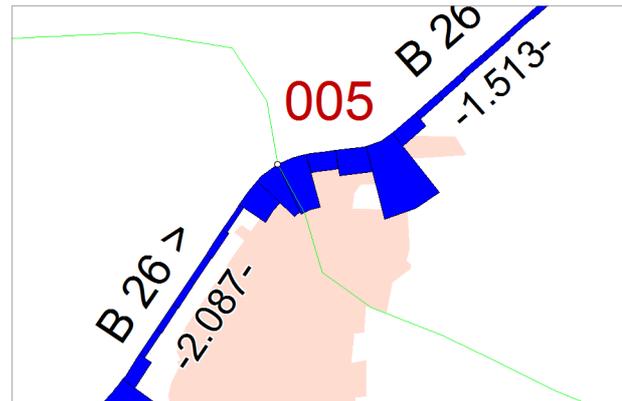
Das Kurvigkeitsäquivalent wurde aus den 1 m-Rohdaten der Krümmung abgeleitet bzw. aggregiert. Dieser Indikator ist nur bedingt mit der Kurvigkeit des Straßenentwurfs vergleichbar. Ein erhöhter Wert des **KU\*** für einen 100 m-Abschnitt deutet auf die Lage innerhalb bzw. entlang einer Kurve hin (siehe Bild 58). Ein erhöhter Wert der **KU\*** für einen längeren/aggregierten Abschnitt kann sowohl eine kurze Kurve mit einem geringen Radius entlang einer geraden Strecke (tendenziell kritisch) als auch eine langgestreckte Kurve mit einem sehr großem Radius (tendenziell unkritisch) beschreiben.

Aus den Daten zur Längsneigung, Querneigung und Krümmung wurden weitere Variablen generiert:

- Die Längsneigung (ohne Vorzeichen) wurde einmal in vier Kategorien (**LNKat1**: < 4 % / 4-6 % / 6-8 % / > 8 %) und einmal in zwei Kategorien (**LNKat2**: < 4 % / > 4 %) aufgeteilt. Die Untergrenze wurde aus den Angaben der Literatur abgeleitet, welche sich allerdings nur auf Gefällestrecken bezieht. Eine fahrtrichtungsgetrennte Beschreibung ist außerhalb der Autobahnen nicht möglich. Auf Autobahnen wurde im Rahmen von stichprobenhaften Sensitivitätsanalysen Gefälle- und Steigungsstrecken differenziert untersucht. Bei der weiteren räumlichen Aggregation wurde jeweils der Maximalwert eines 100-m-ZEB-Abschnitts innerhalb des aggregierten Analyseabschnitts bei der Untersuchung berücksichtigt.
- Aus der Längs- und Querneigung wurden entwässerungsschwache Bereiche (**ESZKat**) in Anlehnung an das Vorgehen in Maier et al. (2013) abgeschätzt. Das ist immer dann der Fall, wenn innerhalb von 100 m eine Längsneigung in den Grenzen  $-2\% < LN(s) < +2\%$  und gleichzeitig eine Querneigung in den Grenzen  $-2,5\% < QN(q) < +2,5\%$  festgestellt wird.

- Aus der Längs- und Querneigung wurden die Anzahl und das Vorhandensein von Querneigungswechseln ermittelt (**QNW** und **QNWKat**).
- Die Kurvigkeit wurde in fünf Kategorien eingeteilt (>32 gon/100 m; 32-16 gon/100 m; 16-8 gon/100 m; 8-4 gon/100 m; <4 gon/100 m).

Eine ausführliche technische Beschreibung der Aufbereitung von Datengrundlagen zu Infrastrukturvariablen findet sich im Anhang A.4.



**Bild 58:** Darstellung Kurvigkeitsäquivalent für 100-m-Abschnitte im Lageplan

### 5.2.3 Unfälle

Für die Analyse werden unterschiedliche Teilkollektive des Unfallgeschehens analysiert. Dabei werden vor allem Kollektive mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für den Einfluss des Zustandes im Rahmen der Unfallentstehung verwendet.

U(SP)	Unfälle mit schwerem Personenschaden (Kategorien 1-2)
U(P)	Unfälle mit Personenschaden (Kategorien 1-3)
U(S)	Unfälle mit ausschließlich Sachschaden (Kategorien 4-6)
NU(X) / TrU(X)	U(X) mit Unfallattribut „Straßenzustand nass/feucht“- NU(X); restliche Trockenunfälle TrU(X)
yU(P/S)	U(X) differenziert nach Nass- / Trockenunfällen für: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahrunfälle / Unfalltyp 1 -FU(X)</li> <li>- Längsverkehrsunfälle / Unfalltyp 6 - LVU(X)</li> <li>- Restliche Unfalltypen / Unfalltyp 2,3,4,5,7 (nicht auf BAB) - RestU(X)</li> <li>- Unfälle in Herbst- / Wintermonaten (September - Februar) - WHU(X)</li> <li>- Unfälle bei denen der erste Unfallbeteiligte eine Motorradfahrer war -MoU(X)</li> </ul>

Vor allem Nässeunfälle als auch Fahr- und Längsverkehrsunfälle zeigten einen erhöhten Einfluss von Zustandsmerkmalen im Rahmen der in der Literaturanalyse ausgewerteten Untersuchungen

(siehe Fazit zu Kapitel 3.2.2). Dies wird auch aufgrund der veränderten Witterung den Unfällen in Herbst- und Wintermonaten attestiert. Zusätzlich werden auch Motorradunfälle berücksichtigt.

Die Sachschadenskategorien 4 bis 6 werden in einem Kollektiv zusammengefasst, da vor allem Unfälle mit schwerwiegendem Sachschaden (Kategorie 4) nur eine geringe Stichprobengröße aufweisen. Es wird vermutet, dass vor allem hinsichtlich der Kategorie-5-Unfälle relevante Erhebungsunterschiede zwischen den Bundesländern bestehen. Dies wird einerseits durch die separate Analyse nach Bundesländern abgefangen. Andererseits sollen aus möglichen Zusammenhängen zwischen Zustandsparametern und Unfällen Nutzenpotenziale für die Verbesserung des Zustandes abgeleitet werden. Die vorliegenden Unfallzahlen weisen u. a. aufgrund der Erhebungsunterschiede vor allem bei den Sachschadensunfällen eine Dunkelziffer auf, d. h. die vorliegenden Unfallzahlen unterschätzen das tatsächliche Unfallniveau. Daraus abgeleitete Nutzenpotenziale sind daher immer auch eine (eher konservative) Unterschätzung des tatsächlichen Potenzials. Dies wird aber als unkritisch eingeschätzt.

Während Netz-, Infrastruktur- und ZEB-Daten schon referenziert auf einem Analysenetzt vorliegen, müssen die Unfalldaten noch entsprechend darauf referenziert bzw. den Straßenachsen zugewiesen werden. Werden die Unfälle direkt über geografische x-y-Koordinaten lokalisiert, hat das den Vorteil, dass man nicht von Netzänderungen abhängig ist.

Für die Referenzierung wurden die Netzdaten und die Unfälle in PTV VISUM Safety zusammengeführt. Jedem einzelnen Unfall wurde dafür ein 100 m-ZEB-Abschnitt oder ein Netzknoten zugewiesen. Dafür kann der implementierte Algorithmus in VISUM Safety verwendet werden, welcher folgende Kriterien und Prozessschritte berücksichtigt:

- Es wird eine maximale Entfernung von Unfall zum Link (Achse) und Knotenpunkt definiert, innerhalb dessen der Unfall dem Netzelement zugewiesen wird.
- Der am nächsten liegende Knotenpunkt innerhalb der maximalen Entfernung wird dem Unfall zugeordnet.
- Wird kein Knotenpunkt gefunden, wird der am nächsten liegende Link innerhalb der maximalen Entfernung dem Unfall zugeordnet.
- Im Rahmen dieser Zuordnung können weiterhin die Angaben des Unfallprotokolls zu:
  - Unfall auf Strecke / am Knotenpunkt

- Straßenklasse
- Straßennummer

verwendet werden. Diese können dann prioritär oder nachgeordnet berücksichtigt werden.

Die Referenzierung wurde iterativ durchgeführt, wobei verschiedene Teilkollektive des Unfallgeschehens sowie noch nicht zugeordnete Unfälle separat berücksichtigt werden können. Damit konnte auch für die hier verwendete große Menge an Unfalldaten eine hohe Qualität der Zuordnung erreicht werden.

Die Referenzierung muss für die entsprechenden Straßenklassen justiert werden und ermöglicht so eine sehr genaue Zuordnung der Unfälle zu den Straßenachsen. Es wurden nur die Unfälle im direkten Knotenpunktbereich diesem zugeordnet. Der direkte Knotenbereich wird über einen Radius von 50 m definiert. Dabei wurde sich an den Vorgaben zur Identifizierung von Unfalldaten an Knotenpunkten Außerorts des neuen Merkblatts zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen orientiert (FSGV 2012). Unfälle in Annäherungsbereichen wurden den Strecken bzw. Straßenachsen zugeordnet.

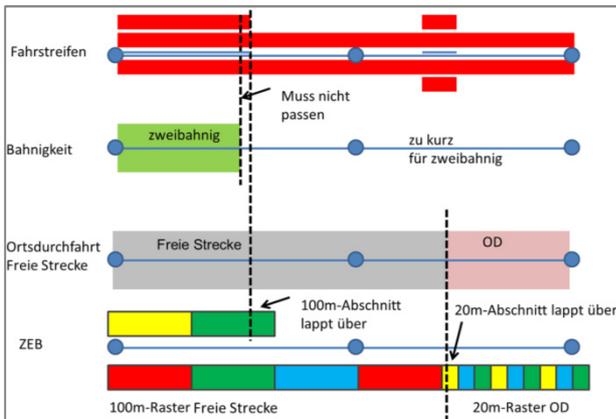
### 5.3 Netzeinteilung

Die Netz- und Infrastrukturdaten wurden in der für die ZEB üblichen Aggregation von 100 m-Abschnitten übernommen und als Grundlage für weitere Zusammenfassungen in der Analyse verwendet. 100 m-Abschnitte stellen für eine netzweite Unfallanalyse die unterste Grenze dar bzw. sind eigentlich immer noch zu detailliert. Dies ergibt sich vorrangig durch:

- die Erfassungsgenauigkeit der Polizei vor Ort,
- die inhaltlich sinnvolle Zuordnung eines Unfalls zu einem Defizit in der Infrastruktur (Auslöser Unfallereignis vs. Beginn Bremsvorgang vs. Kollisionspunkt vs. Standpunkte der Fahrzeug nach Ende des Unfallereignisses) und
- die Aussagefähigkeit von Einzelunfalldaten über die Sicherheit eines Netzbereichs (Unfälle sind seltene Ereignisse, welche statistischen Streuungen unterliegen).

Bei der Bildung der 100 m-Abschnitte ergeben sich unterschiedliche Abschnittsgrenzen im Vergleich zu den Bestandsdaten (Bild 59). Das bedeutet, dass bspw. die Abschnittsgrenze eines ZEB-Abschnitts nicht notwendigerweise direkt mit einer möglichen Querschnittsänderung von ein- auf zweibahnig zusammenfällt. Außerdem ergeben sich am Rand der Netzknotenabschnitte teilweise kürzere ZEB-Abschnitte mit Längen unter 100 m. Die sich daraus ergebenden Ungenauigkeiten

können aber im Rahmen der Unfallanalyse als eher geringfügig eingeordnet werden.



**Bild 59:** mögliche Abweichungen zwischen Bestands- und ZEB-Daten (Farben stehen für unterschiedliche Infrastruktur- und Zustandsattribute sowie deren Ausprägungen)

Eine zentrale Frage der Analyse ist die Festlegung passender Abschnittslängen für die Überprüfung des Einflusses des Fahrbahnzustandes auf das Unfallgeschehen. Diese Festlegung darf nicht mit den Längen der Abschnittsbildung von ZEB und ESN auf operativer Ebene verwechselt werden. Dort geht es um eine aussagefähige Bewertung lokaler Zustände (ZEB: Zustand Fahrbahnoberfläche / ESN: Sicherheitsniveau Netzbereich) auf einem einzelnen Abschnitt. Hier im Rahmen des Projektes geht es um die Analyse genereller Zusammenhänge zwischen Zustand und Unfallgeschehen auf Basis eines Kollektivs einer Vielzahl von Abschnitten. Die Diskussion angepasster Abschnittslängen innerhalb der Verfahren ZEB und ESN ist nur bedingt notwendig, da ein eigenes Verfahren entwickelt wird (siehe Bild 13), dessen Ergebnisse den bestehenden Netzanalyseverfahren zugeführt werden. Für die Definition einer zielführenden Analyseabschnittslänge im Forschungsprojekt muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen:

- der Genauigkeit des ZEB-Verfahrens (z. T. kurze Abschnitte mit schlechtem Zustand, exakt abgrenzbar) und
- der Notwendigkeit längerer Abschnitte für aussagekräftige Unfallanalysen (Stichwort: Lokalisierungsgenauigkeit, Variationen in der Festlegung des Unfallorts, d. h. Konfliktsituation vs. Kollision vs. Endpunkt der Fahrzeuge nach dem Unfall).

Es sollen drei verschiedene Aggregationsstufen untersucht werden, wobei Anzahl an Fahrstreifen und Fahrbahnen als Randbedingungen mit berücksichtigt wird (innerhalb der Abschnitte homogene Ausprägung):

- **200-m-Abschnitte:** Jeweils zwei nebeneinanderliegende 100-m-ZEB-Abschnitte wurden innerhalb eines Netzknotenabschnitts zusammengefasst.
- **400 / 500-m-Abschnitte:** Jeweils vier (Bundes- / Landesstraßen) oder fünf (BAB) nebeneinanderliegende 100-m-ZEB-Abschnitte wurden innerhalb eines Netzknotenabschnitts zusammengefasst.
- **homogene Netzknotenabschnitte:** Netzknotenabschnitte wurden weiter in homogene Teilabschnitte unter Berücksichtigung der Anzahl an Fahrstreifen sowie der Bahnigkeit unterteilt.

Als Kriterium für die Auswahl einer passenden Aggregationsstufe werden verschiedene Kennwerte der Unfallmodellierung verwendet. Weitere Hinweise dazu finden sich in Kapitel 5.4.3.

## 5.4 Analyse

### 5.4.1 Deskriptive Auswertungen

#### Zustandsparameter

Im Rahmen der deskriptiven Analyse der Zustandsgrößen wurde deren typische Ausprägung und Verteilung je Straßenklasse untersucht. Daneben wurde der Zustand des Analysenetzes dem Bundesdurchschnitt gegenübergestellt. Die im Rahmen dieser Forschung neu berechneten Zustandsgrößen wurden anschließend mit den bekannten Größen verglichen. Bei allen Größen mit variabler Mittelungslänge wurden verschiedene Varianten berechnet. Die Ergebnisse wurden exemplarisch für ein Teilnetz und eine Mittelungslänge von 20 m dargestellt. Die berechneten Quantilwerte dienen der Einstufung eines möglichen Einflusses des Zustands auf das Unfallgeschehen. Es wurden jeweils nur die Zustände der Außerortsbereiche betrachtet (siehe Anhang A.6.1).

#### Unfallgeschehen

Ziel der deskriptiven Analyse des Unfallgeschehens sind die Einordnung der Analysestichprobe sowie die Ausarbeitung von Auffälligkeiten im Unfallgeschehen, denen ein Zusammenhang mit dem Zustand der Fahrbahnoberfläche attestiert wird.

Es soll beispielhaft das außerörtliche Unfallgeschehen eines Teilnetzes analysiert werden. Es wird jeweils differenziert nach den Straßenklassen Bundesautobahn, Bundesstraße und Landesstraße. Auffälligkeiten werden im Unfallgeschehen der Strecke untersucht.

Alle analysierten Merkmale werden direkt aus den Attributen des Unfallprotokolls abgeleitet. Folgende Attribute werden herangezogen:

- Ortslage,
- Straßenklasse,
- Charakteristik der Unfallstelle mit den Ausprägungen Knotenpunkt (Kreuzung + Einmündung) sowie Kurve und Steigung/Gefälle,
- Unfalltypen,
- Straßenzustand differenziert nach Nässe (nass+feucht) sowie den restlichen Ausprägungen,
- Verkehrsbeteiligung auf Basis der ersten beiden im Unfallprotokoll genannten Beteiligten.

Es werden Verteilungen über die Unfallzahlen als auch Unfallkosten ermittelt. Die Unfallkostenberechnung erfolgt auf Basis Unfalltyp-spezifischer Kostensätze der BAST zum Preisstand 2009 (siehe Tab. 21 im Anhang).

## 5.4.2 Pilotanalysen

### Methodenvergleich

Im Rahmen der Literaturanalyse wurden drei grundsätzlich unterschiedliche Analysemethoden für die Überprüfung der Zusammenhänge zwischen Zustandsparametern und dem Unfallgeschehen identifiziert, welche auf Basis einer kleinen Stichprobe miteinander verglichen werden:

- a) monokriterielle Analysen mit relativen Unfallkenngrößen wie Unfalldichten und Unfallraten

Unfalldichten und Unfallraten werden nach folgenden Formeln berechnet:

<b>Unfalldichte UD</b>	[U/(km·a)]
$UD = \frac{U}{L \cdot t} = \frac{UR \cdot DTV \cdot 365}{10^6} \quad (1)$	
<b>Unfallrate UR</b>	[U/(10 <sup>6</sup> Kfz·km)]
$UR = \frac{10^6 \cdot U}{365 \cdot DTV \cdot L \cdot t} \quad (2)$	
U	Anzahl Unfälle [U] in t Jahren
L	Abschnittslänge [km]
t	Betrachtungszeitraum in Jahren [a]
DTV	Verkehrsstärke [Kfz/d]

Zusätzlich werden auch die Anteile der Unfälle bei Nässe (Straßenzustand) an allen Unfällen als eine Kenngröße berechnet. Damit können aber nur diejenigen Abschnitte bewertet werden, welche mindestens einen Unfall aufweisen. Vorteil dieser Kenngröße ist die Bereinigung um weitere Einflüsse wie DTV oder Länge des Abschnitts.

- b) Verteilungsvergleiche von Zustandsparametern und Unfällen im Netz

Im Rahmen von Verteilungsvergleichen werden unterschiedlich abgegrenzte Netzbereiche hin-

sichtlich der Verteilung von Zustandsparametern und Unfallkenngrößen untersucht. Eine mögliche Hypothese zur Beurteilung des Griffigkeitseinflusses wäre der Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von Griffigkeiten im gesamten Netz mit den Abschnitten, welche mindestens einen Unfall bei Nässe aufweisen. Unterscheiden sich beide Verteilungen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Griffigkeit einen Einfluss auf die Entstehung von Nässeunfällen aufweist.

- c) multikriterielle mit komplexeren statistischen Modellen

Im Rahmen der Bearbeitung hat sich Methode c) als zielführend erwiesen. Die zugrunde liegende Methodik wird daher in einem separaten Kapitel (5.4.3) dokumentiert.

Die Pilotanalysen zur Methodenauswahl werden nur für die Bundesstraßen aus einem Teilnetz beispielhaft überprüft. Hierfür wird der Zustandsparameter der Griffigkeit herangezogen, da dessen Einfluss auf das Unfallgeschehen laut Literaturanalyse am wahrscheinlichsten ist (siehe Kapitel 3.4). Das bedeutet, es bedarf einer Analyse des Teilkollektivs der Unfälle bei Nässe. Im Vergleich zu Unfällen auf trockener Fahrbahn wirkt sich eine eingeschränkte Griffigkeit (im Zusammenspiel mit z. B. der Geschwindigkeit und der Trassierung) aus physikalischen Gesichtspunkten nur auf die Unfälle bei Nässe aus.

### Netzeinteilung

Für das Beispielanalysenetz werden drei verschiedene Aggregationsstufen für alle drei Straßenklassen untersucht, wobei Anzahl an Fahrstreifen und Fahrbahnen als Randbedingungen mit berücksichtigt werden (innerhalb der Abschnitte homogene Ausprägung):

- 200-m-Abschnitte: Jeweils zwei nebeneinanderliegende 100 m-ZEB-Abschnitte wurden innerhalb eines Netzknotenabschnitts zusammengefasst.
- 400 / 500 m-Abschnitte: Jeweils vier (Bundes-/ Landesstraßen) oder fünf (BAB) nebeneinanderliegende 100 m-ZEB-Abschnitte wurden innerhalb eines Netzknotenabschnitts zusammengefasst.
- homogene Netzknotenabschnitte: Netzknotenabschnitte wurden weiter in homogene Teilabschnitte unter Berücksichtigung der Anzahl an Fahrstreifen sowie der Bahnigkeit unterteilt.

Ein Abschnitt endet immer am Netzknoten. Es ist daher grundsätzlich möglich, das innerhalb einer Aggregationsstufe auch kürzer Abschnitte auftreten können. Innerhalb der Modelle wird dies aber über die tatsächliche Länge berücksichtigt bzw. korrigiert.

Es wird die Griffigkeit im Zusammenhang mit den Fahrurfällen bei Nässe analysiert, da hier ein Einfluss auf das Unfallgeschehen laut Literaturanalyse am wahrscheinlichsten ist (siehe Fazit in Kapitel 3.2.2). Als Kriterium für die Auswahl einer passenden Aggregationsstufe sind Höhe oder Signifikanz der Regressionskoeffizienten nicht zielführend, da diese stark von der Stichprobengröße und der Bandbreite der untersuchten Variablen abhängen. Diese unterscheiden sich aber zwischen den Aggregationsstufen. Aussagekräftiger sind Kriterien zur Anpassungsgüte der Modelle. Die Anpassungsgüte ist u. a. ein Maß dafür, wie gut das Modell die systematische (also durch die potenziellen Einflussvariablen hervorgerufene Zusammenhänge) Varianz in den Unfallzahlen beschreibt. Anders ausgedrückt: Je höher die Anpassungsgüte eines Modells ist, umso besser bildet es die Realität ab und ist damit auch ein Maß für die Güte der Vorhersagekraft der Modelle, was ein Ziel dieser Analyse sein soll (siehe Kapitel 6). Es wird sich an den Ausführungen in Aurich (2012) und Schüller (2010) orientiert. Dort werden Kriterien für die Bewertung der Anpassungsgüte aus praktischer Sicht der Unfallmodellierung diskutiert. Folgende Kriterien werden herangezogen:

- Verteilungsparameter der negativen Binomialverteilung zur Anpassung der Stichprobe an die Verteilungsfunktion: Je näher der Parameter im Bereich von Eins liegt, umso stärker entspricht die Verteilung einer Poissonverteilung, d. h. umso besser wird die systematische Varianz erklärt.
- Veränderung der Pearsonabweichung bei Hinzunahme des Zustandsparameters: Je größer diese Veränderung ist, umso mehr trägt der Zustandsparameter zur Erklärung der systematischen Varianz bei. Die Anpassungsgüte wird aus dem Quotienten von Pearsonabweichung und Anzahl Freiheitsgrade berechnet. Die Referenzanpassungsgüte ergibt sich aus dem Modell, welches nur die Expositionsgrößen Länge und DTV enthält.
- Veränderung des Informationskriteriums nach Akaike (AIC) bei Hinzunahme des Zustandsparameters: Dieses Kriterium dient der Bewertung der „Einfachheit“ der Modelle, d. h. mit wenigen Parametern wird möglichst viel systematische Varianz im Unfallgeschehen erklärt. Grundsätzlich sind Modelle mit einem niedrigen Wert zu bevorzugen, allerdings ist der Vergleich der absoluten Werte bei Modellen mit unterschiedlichen Stichproben nicht zulässig. Aus diesem Grund wird die Höhe der prozentualen Veränderung des AIC zwischen Modell A ohne und Modell B mit Zustandsparameter herangezogen.

Weiterführende Erklärungen finden sich im folgenden Kapitel zur Modellrechnung sowie den genannten Quellen und der darin aufgeführten Primärliteratur.

### 5.4.3 Modellrechnung

Die Entwicklung der Unfallmodelle erfolgt in Anlehnung an die auf europäischer Ebene definierten Modellformen für Streckenabschnitte (in Anlehnung an Reurings et al. 2005):

$$\mu = \alpha \cdot L^{\beta_1} \cdot DTV^{\beta_2} \cdot e^{\sum \gamma_i \cdot x_i} \quad (3)$$

$\mu$	Erwartungswert der Unfälle pro Jahr
$\alpha$	Konstante
$L$	Länge eines Streckenabschnitts
$DTV$	Verkehrsstärke
$x$	Variablen zur Beschreibung der Infrastruktur und des Zustandes
$\beta$	Koeffizienten der Exposition
$\gamma$	Koeffizienten der Infrastrukturattribute
$i$	Indices

Die Analysen des multikriteriellen Ansatzes basieren auf dieser Modellform. Es können mehrere Einflussvariablen (potenzielle Risikofaktoren) in diesen Modellen gleichzeitig berücksichtigt werden. Zusätzlich ist die Abbildung nicht-linearer Zusammenhänge möglich. Die Zielvariable bzw. der durch das Modell abgeschätzte Erwartungswert wird jeweils in Unfällen pro Jahr ausgewiesen. Grundsätzlich können durch spezifische Festlegung der Expositionsgrößen aus den Modellen auch Unfalldichten und Unfallraten abgeleitet werden.

Ziel der Modellierung ist es, einen möglichst großen Teil der Varianz der Stichprobe (Analysenetz) hinsichtlich der Unfallhäufigkeit zwischen den Analyseabschnitten über potenzielle Einflussvariablen zu erklären. Die Varianz ergibt sich sowohl aus der stochastischen Charakteristik von Unfällen als auch aus den strukturellen Unterschieden zwischen den Abschnitten aufgrund der Netz- sowie Infrastrukturcharakteristik, des Straßenzustands und des Verkehrs.

Die Expositionsgrößen sind als Potenzfunktionen im Modell abgebildet. Nähern sich Verkehrsstärke oder Länge eines Abschnitts Null an, besteht kein Risiko für Unfälle des motorisierten Verkehrs. Wird der DTV als Potenzfunktion abgebildet, geht bei einem DTV von Null auch der Erwartungswert der Unfallzahl auf Null. Im Gegensatz dazu werden die Risikofaktoren als Exponentialfunktion abgebildet. Weist ein Merkmal eine Ausprägung von Null auf bzw. ist das Merkmal nicht vorhanden, wird der Faktor innerhalb der Modellgleichung mit Eins angesetzt. Der resultierende Erwartungswert bleibt dementsprechend unverändert.

Die (Regressions-)Koeffizienten können nur hinsichtlich ihrer Richtung direkt interpretiert werden. Positive Koeffizienten bedeuten höhere, negative Koeffizienten bedeuten niedrigere Unfallzahlen als in vergleichbaren Situationen. Bei stetigen bzw. metrisch skalierten Variablen (z. B. Länge und DTV) kann anhand des Koeffizienten die Form des Zusammenhangs abgelesen werden. Ein Koeffizient nahe eins beschreibt einen linearen Zusammenhang (proportional). Positive Koeffizienten kleiner eins beschreiben einen degressiv ansteigenden (ähnlich Wurzelfunktion), negative Koeffizienten einen progressiv ansteigenden Zusammenhang (ähnlich quadratischer Funktion). Die Höhe des Koeffizienten kann nicht direkt interpretiert werden, da dieser von der Form der beschriebenen Variable abhängig ist. Ausnahme bilden die Regressionskoeffizienten der gleichen Stichprobe in Bezug auf die gleiche Einflussvariable. Ein Vergleich der Regressionskoeffizienten für die Griffigkeit innerhalb der Abschnitte auf Bundesstraßen eines Landes ist möglich. Der Vergleich der Regressionskoeffizienten von Griffigkeit und Längsebenheit ist außer hinsichtlich der Richtung (positiv oder negativ) nicht möglich. Für den Vergleich eines Regressionskoeffizienten einer Variable über Straßenklassen und Bundesländer hinweg sollten immer auch die Verteilungen (z. B. Mittelwerte oder Anteile) der Variablen berücksichtigt werden (Anhang: Tab. 23, Tab. 24 und Tab. 25).

Die Ermittlung der Regressionskoeffizienten und der zugehörigen Signifikanzniveaus erfolgt anhand der Methodik der verallgemeinerten linearen Modelle (Generalized Linear Models). Ziel ist die Anpassung der Verteilung der Untersuchungsstichprobe auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Unfälle (Poissonverteilung). Im Vergleich verschiedener Abschnitte werden durch signifikante Einflussvariablen möglichst viele Unterschiede zwischen den Abschnitten bzw. die systematische Varianz modelliert. Übrig sind in einem optimal angepassten Modell dann nur noch stochastische Abweichungen der Unfälle, welche über die Charakteristik der Verteilungsfunktion abgebildet sind. Als Verteilungsfunktion wird vorrangig die negative Binomialverteilung gewählt. Diese eignet sich für die Modellierung von Überzufälligkeit, d. h. nicht optimal angepasste Modelle. Das kann die Folge von nicht berücksichtigten Einflussgrößen sein. Da in dieser Untersuchung eine Vielzahl an Infrastrukturparametern nicht berücksichtigt werden kann, sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Überzufälligkeiten zu erwarten.

Nur signifikante Einflussgrößen werden in den Ergebnistabellen aufgelistet. Das notwendige Signifikanzniveau liegt bei  $< 0,05$ , was eine übliche Größe in wissenschaftlichen Untersuchungen darstellt. Ausnahme davon werden entsprechend

gekennzeichnet und sind nur bedingt interpretierbar.

Die Modelle werden auch hinsichtlich ihrer Anpassungsgüte untersucht, d. h. wie gut damit das tatsächliche Unfallgeschehen abbildbar ist. In diesem Zusammenhang wird auf die Ausführungen in Schüller (2010), Aurich (2102) und Maier et al. (2013) verwiesen.

Die Unfallmodelle werden anhand der Statistiksoftware R (MASS Package) berechnet.

Die Modellierung erfolgt getrennt nach Unfällen mit Personenschaden und ausschließlich Sachschaden. Gründe hierfür liegen in der teilweise unterschiedlichen Unfallstruktur aber auch der späteren Möglichkeit, die getrennten Erwartungswerte mit einem Unfallkostensatz multiplizieren zu können.

Auch wenn aus Gründen der Vollständigkeit und des Interesses teilweise Unfälle mit schwerem Personenschaden U(SP) separat modelliert werden, wird eine gemeinsame Betrachtung aller Unfälle mit Personenschaden favorisiert. Grund hierfür ist vor allem die häufig geringere Stichprobengröße der U(SP), womit ein Verlust der Aussagefähigkeit einhergeht. Im Rahmen der Verfahrensentwicklung werden daher auch Modelle für alle Unfälle mit Personenschaden entwickelt, welche dann über Anteilswerte nach schwerem und leichtem Personenschaden aufgeteilt werden.

#### 5.4.4 Sensitivitätsanalysen

Vertiefte Analysen werden für die Zustandsgröße Griffigkeit durchgeführt.

Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass modifizierte Griffigkeitsparameter den Zustand der Fahrbahnoberfläche „effektiver“ beschreiben. Im Rahmen dieses Projektes wird geprüft, inwiefern sich diese Parameter für die Berücksichtigung in den Unfallmodellen eignen.

Es werden folgende zusätzliche Griffigkeitsparameter neben dem Mittelwert der Griffigkeit im 400 m-Abschnitt geprüft:

- GriMin: niedrigste mittlere Griffigkeit eines 100 m-Abschnitts innerhalb des 400 m-Abschnitts
- movGri20: Minimum des gleitenden Mittelwerts der Griffigkeit mit einer Fenstergröße von 20 m innerhalb des 400 m-Abschnitts
- movGri50: Minimum des gleitenden Mittelwerts der Griffigkeit mit einer Fenstergröße von 50 m innerhalb des 400 m-Abschnitts

Durch die letzten beiden Parameter sollen lokale Spitzen von Griffigkeitsdefiziten in den 400 m-Abschnitten eingefangen werden. Solche lokalen Griffigkeitsdefizite können sicherheitsrelevant sein, werden aber ggf. durch Mittelungen über 100 m-

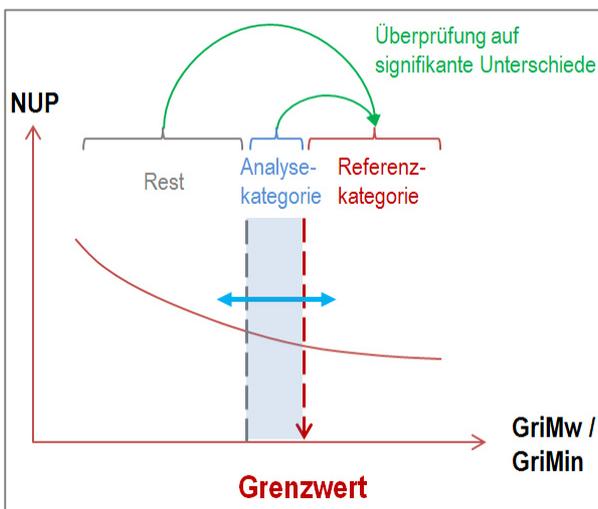
Abschnitte nivelliert. Die berücksichtigten Fenstergrößen sollen die Bandbreite der in Frage kommenden Fenstergrößen abdecken.

Die Überprüfung erfolgt erneut anhand der Kriterien zur Bewertung der Anpassungsgüte, welche in Kapitel 5.4.2 (Netzeinteilung) dokumentiert sind. Es werden nur die Fahrurfälle bei Nässe analysiert, da hier die stärksten Zusammenhänge mit der Griffigkeit festgestellt wurden (siehe Fazit Kapitel 3.2.2 und Ergebnisse in Kapitel 6.2.2). Grundlage ist eine kombinierte Stichprobe aus den Beispielländern A und B auf Bundes- und Landesstraßen.

#### 5.4.5 Grenzwertdiskussion

Eine weitere Forschungsfrage betrifft die Ableitung eines Grenzwertes, bis zu dem eine negative Auswirkung einer niedrigen Griffigkeit auf das Unfallgeschehen festgestellt werden kann.

Die Analysemethode ist grafisch in Bild 60 dargestellt. Es bedarf einer kategorialen Einteilung der bisher als stetige Variable betrachteten Griffigkeit. Es werden drei Gruppen von Abschnitten in Abhängigkeit der Griffigkeit definiert. Die Grenzen zwischendiesen Gruppen bzw. Kategorien werden dann verschoben, um signifikante Unterschiede zwischen den Kategorien hinsichtlich ihres Einflusses auf die Nässeunfälle aufzuzeigen. Als Referenzkategorie wird die Gruppe mit den höchsten Griffigkeiten bezeichnet. Die Analyse-kategorie befindet sich zwischen der Referenzkategorie und dem Rest.



**Bild 60:**Methodik Überprüfung Grenzwert für Griffigkeit

Die Analyse-kategorie wird auf eine Breite von ca. 0,05 bezogen auf die Griffigkeit festgelegt. Die Analyse-kategorie wird dann entlang des Griffigkeitsniveaus verschoben. Es wird diejenige Stelle auf dem Griffigkeitsniveau gesucht, ab dem ein signifikanter Unterschied zwischen Referenz- und Analyse-kategorie nachweisbar ist. Um diese Gren-

ze zu illustrieren, werden jeweils zwei Modelle identifiziert, welche den Übergang vom signifikanten Unterschied zu keinem nachweisbaren Unterschied markiert.

Die Analyse erfolgt auf Basis aller Nässeunfälle mit Personenschaden, welche vorrangig durch die für die Griffigkeit auffälligen Fahr- und Längsverkehrsunfälle dominiert sind (im Gegensatz zu den Analysen in Kapitel 5.4.4 sind größere Stichproben aufgrund der Einteilung in mehrere Analysekollektive unterschiedlicher Griffigkeitsklassen notwendig). Es werden Grenzwerte getrennt für Land A und B sowie getrennt für Bundes- und Landesstraßen identifiziert. Es werden sowohl GriMw (Mittelwert der Zustandsgröße GRI\_60 über 400 m) als auch GriMin (Minimaler Mittelwert eines 100 m-Abschnitts GRI\_60 innerhalb des 400 m-Abschnitts) untersucht. GriMin wird analysiert, um auch ein Wert für die aktuell gültige Netzeinteilung nach ZEB im 100 m-Raster ableiten zu können.

## 5.5 Verfahrensentwicklung

### 5.5.1 Zustandspotenzial

Ziel der Entwicklung des neuen Verfahrens als Bindeglied zwischen ZEB und ESN-Verfahren ist die Abschätzung eines Zustandspotenzials. Dies entspricht dem potenziellen Nutzen, welcher sich aus der Verbesserung des Zustandes ergibt. Der Nutzen wird anhand vermeidbarer Unfallkosten beschrieben.

Hierfür müssen aus der Vielzahl der im Rahmen der Modellrechnung ermittelten Unfallmodelle möglichst stabile und aussagekräftige Zusammenhänge ausgewählt und darauf aufbauend Prognosemodelle abgeleitet werden. Diese Prognosemodelle sollen möglichst verallgemeinerbar, d. h. deutschlandweit anwendbar sein. Aus diesen Prognosemodellen können dann Erwartungswerte des Unfallgeschehens abgeleitet und mit Kostensätzen monetarisiert werden. Aus der Differenz zwischen zwei Modellen, welche unterschiedliche Zustandsgrößen vor (Ausgangswert) und nach (Zielwert) Verbesserung der Fahrbahnoberfläche berücksichtigen, werden dann vermeidbare Unfallkosten abgeleitet. Diese stellen einen volkswirtschaftlichen Nutzen für das Erhaltungsmanagement dar.

Es werden Teilmodelle für die einzelnen Unfalltypen angestrebt, um eine exaktere Abschätzung der Auswirkung von Erhaltungsmaßnahmen treffen zu können. Diese Teilmodelle werden addiert, um den Gesamtnutzen zu erhalten.

Für eine differenzierte Kostenbewertung wären Modelle für nahezu jede Unfallkategorie notwendig. Dies ist grundsätzlich möglich. Es hat sich aber gezeigt, dass z. B. Unterschiede zwischen

Land A und B in den Modellen für Unfälle mit Personenschaden vor allem auf die unterschiedlichen Anteile der schweren Personenschäden an allen Personenschäden zurückzuführen ist. Daher werden nur Teilmodelle für U(P) und U(S) entwickelt. Um diese Modelle und damit das Verfahren für ein jeweiliges Bundesland zu kalibrieren, werden die jeweiligen lokalen Anteile der Unfallkategorien verwendet, um nach der Schwere differenzierte Erwartungswerte für die Unfallkostenberechnung abzuleiten.

Die Unfallkostensätze stammen aus einer BAST-internen-Berechnung (siehe Tab. 21 im Anhang). Die Kostensätze wurden auf Basis des gesamtdeutschen Unfallgeschehens für verschiedene Straßenklassen, Unfallkategorien und Unfalltypen zum Preisstand 2009 berechnet. Die Kostensätze können ggf. zu einem späteren Zeitpunkt an aktuellere oder andere Preisstände oder Berechnungen angepasst werden.

Es wird vorerst eine rein modelltechnische Abschätzung der vermeidbaren Unfallkosten für eine netzweite Anwendung anvisiert (siehe Kapitel 7.2.1). Damit wird sich an der Vorgehensweise im Handbuch für die Verkehrssicherheit von Straßen HVS orientiert, welches aktuell in der FGSV und durch die BAST entwickelt wird (siehe u. a. Baier et al. 2008).

Grundsätzlich sind aber auch andere Ansätze z. B. zur Kombination von Unfalldaten mit Erwartungswerten aus Unfallmodellen wie bei dem Empirical-Bayes-Ansatz denkbar (siehe bspw. im Highway Safety Manual HSM, AASHTO 2009). Der Empirical-Bayes-Ansatz wird mit dem rein modellbasierten Verfahren des Zustandspotenzials auf Basis eines kleineren Teilnetzes verglichen. Außerdem werden über eine reine Nutzenbewertung hinaus auch Nutzen-Kosten-Vergleiche angestellt, mit dem Ziel rein grenzwertbasierte Verfahren (aktuelle ZEB-Vorgehensweise) mit einem modellbasierten Verfahren (Zustandspotenzial) zu vergleichen (siehe Kapitel 7.2.2).

Im Ergebnis können mit dem Verfahren folgende Kennwerte bzw. Hilfestellungen für bestehende Verfahren zur Verfügung gestellt werden:

- Abschnittsbezogenes und netzweites Nutzenpotenzial durch Zustandsverbesserung
- Nutzen-Kosten-Verhältnisse für Erhaltungsmaßnahmen durch Hinzunahme der Maßnahmenkosten
- Berücksichtigung des Nutzenpotenzials für die Priorisierung von Erhaltungsmaßnahmen
- Berücksichtigung des Nutzenpotenzials zur Konkretisierung von Maßnahmenansätzen bei ESN-Abschnitten mit einem hohen Sicherheits(verbesserungs)potenzial

- Qualitative bzw. visuelle Ergänzung bestehender Karten und Streckenbänder der ZEB

Das Verfahren trifft keine Entscheidung darüber, ob die Zustandsverbesserung der Fahrbahnoberfläche in einem Abschnitt die effektivste und effizienteste Maßnahme ist. So wären Geschwindigkeitsbeschränkungen mit entsprechender Überwachung eine denkbare Alternative, falls die Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit die Hauptursache für schwere Unfälle ist oder die Abstimmung aufeinanderfolgender Entwurfselemente, falls ein Mangel in der Relationstrassierung der Straße besteht. Das Verfahren hilft aber diese Entscheidung auf Basis einer objektiven Abschätzung des Nutzens zu treffen. Dies kann dann sowohl lokal als auch global für das gesamte Netz erfolgen. Der zweite Punkt besitzt vor allem für die Budgetplanung eine höhere Relevanz.

### 5.5.2 Vergleich mit ESN-Verfahren

Das entwickelte Verfahren zum Zustandspotenzial ist stark auf die Sicherheitswirkung der Fahrbahnoberfläche fokussiert. Dieser Einflussfaktor ist aber nur einer von vielen sicherheitsrelevanten Merkmalen der Straßeninfrastruktur. Das ESN-Verfahren versucht das Unfallgeschehen in seiner Gesamtheit zu bewerten und eine Aussage zum Verbesserungspotenzial der Baulastträger bzw. aus Sicht der Gestaltung, Erhaltung und Betrieb der Infrastruktur zu treffen. Aufgrund der eingangs identifizierten Schwäche des ESN-Verfahrens - wenig konkret hinsichtlich möglicher Maßnahmenansätze (siehe Kapitel 2.2.4) - sollen Zustandspotenzial und ESN-Verfahren für ein Teilnetz der Bundesstraßen im Land A gegenübergestellt werden. Folgende Ziele bzw. Fragestellungen werden damit verfolgt:

- Korrelieren Abschnitte mit einem hohen Zustandspotenzial mit ESN-Abschnitten mit einem hohen Sicherheitsverbesserungspotenzial? Treten also Probleme mit dem Zustand der Fahrbahnoberfläche gemeinsam mit Infrastrukturdefiziten auf?
- Welchen Anteil weist das Zustandspotenzial am Sicherheitsverbesserungspotenzial auf?
- Welche verfahrenstechnischen Möglichkeiten zur Datenweitergabe zwischen den Verfahren sind zielführend?

Es wird eine ESN-Analyse durchgeführt, welche aktuelle Anforderungen aus dem Entwurf der ESN-Überarbeitung berücksichtigt. Das betrifft vorrangig Festlegungen zur Mindest- und Maximalabschnittslänge. Zusätzlich werden aktuelle Grundunfallkostenraten aus der Untersuchung von Maier et al. (2013) abgeleitet.

Für Außerortsstraßen sind für den neuen ESN-Entwurf Mindestlängen von 2 km sowie maximale Längen von 5 km vorgesehen.

In Maier et al. (2013) werden Grundunfallkostenraten getrennt für Strecke und Knotenpunkte angegeben. Das ESN-Verfahren sieht bisher aber eine Straßenzugbewertung auf Außerortsstraßen vor (Strecke und Knotenpunkt kombiniert). Aus diesem Grund müssen die Grundunfallkostenraten für Strecken und Knotenpunkte von Maier et al. (2013) über die Berücksichtigung einer Knotenpunktdichte miteinander kombiniert werden (siehe Formel 4). Diese wurde für das zu untersuchende Teilnetz mit einem Knoten je 1,358 km abgeschätzt. Es werden damit auch Knoten der Bundesstraße mit einer untergeordneten Straßenklasse berücksichtigt.

Es werden die Grundunfallkostenraten für den Querschnitt Q 11 verwendet<sup>2</sup>. Aus Vereinfachungsgründen werden damit auch andere Querschnitte bewertet, welche aber nur einen vergleichsweise geringen Anteil der Netzlänge ausmachen. Im Bericht von Maier et al. (2013) werden nur für verkehrszeichengeregelte Einmündungen Grundunfallkostenraten angegeben, da in der Untersuchung nur diese eine ausreichend große Stichprobe aufwiesen. Es wird von der Annahme ausgegangen, dass diese auch die häufigste Knotenpunktform bzw. Verkehrsregelung im Bestand des Außerortsstraßennetzes darstellt. Diese Knotengrundunfallkostenrate wird auf eine Länge von 1,358 (bzw. 3) km bezogen, um das Knotenunfallgeschehen auf der Strecke bzw. linienhaft abzubilden. Die 1,358 km entsprechen der mittleren Abschnittslänge der Netzknotenabschnitte im untersuchten Straßennetz. Dies stellt eher eine Unterschätzung des mittleren Knotenpunktabstandes dar. Aus diesem Grund wird parallel auch mit einer Grundunfallkostenrate auf Basis eines Knotenpunktabstands von 3 km gerechnet. Der wahre Wert liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen diesen beiden Annahmen. Die abgeleitete Grundunfallkostenrate für Straßenzüge außerorts ist in Formel (4) dargestellt.

Grundunfallkostenrate <b>gUKR</b>		[€ / (1000 Kfz·km)]
$gUKR_{\bar{A}} = 270 \times DTV^{-0,308} + \frac{18 \times DTV^{0,146}}{1,358}$		(4)
$\underbrace{\hspace{10em}}$ Streckenanteil	$\underbrace{\hspace{10em}}$ Knotenanteil	
$gUKR_{\bar{A}}$	Äquivalent zur Grundunfallkostenrate (aus Funktionsgleichung für gUKR in	

<sup>2</sup> Definition laut Maier et al. (2013): „...einbahnig zweistreifige Streckenabschnitte mit einer Fahrstreifenbreite > 2,9 m und keiner doppelten Fahrstreifenbegrenzungslinie, die nicht Bestandteil eines Netzknotenabschnittes sind, der einen oder mehrere einbahnig dreistreifige Abschnitte aufweist.“

	Abhängigkeit des DTV aus Maier et al. 2013)
DTV	Verkehrsstärke [Kfz/d]

Die so abgeleitete Grundunfallkostenrate enthält zwei Ungenauigkeiten:

- Der Streckenanteil bezieht sich auf ein Kollektiv von Strecken außerhalb der Annäherungsbereiche von Knotenpunkten. Eigentlich müsste der Streckenanteil im Bereich von Knoten noch in Abhängigkeit der Verkehrsregelung in der Knotenzufahrt abgemindert werden. Da diese Informationen aber nicht zur Verfügung stehen, wird dieser Punkt vernachlässigt.
- Der DTV für den Knotenanteil bezieht sich auf den Knotenpunkt DTV, d. h. die Summe aller zufließenden Ströme. Es stehen aber nur die Ströme der Hauptrichtung zur Verfügung. Daraus resultiert eine leichte Unterschätzung des tatsächlichen Grundunfallniveaus bzw. der Grundunfallkosten.

In der aktuell gültigen ESN wird eine Grundunfallkostenrate für Landstraßen von 35 [€/ (1.000 Kfz·km)] angegeben. Die hier berechnete Grundunfallkostenrate ergibt für:

- DTV 15.000 Kfz/d → 17,2 [€/ (1000Kfz·km)]
- DTV 5.000 Kfz/d → 23,4 [€/ (1000Kfz·km)]

Diese Kennwerte liegen damit weiter unter dem bisherigen Wert.

Darüber hinaus erfolgt eine weitere Berechnung des Sicherheitsverbesserungspotenzial (ESN-Verfahren) ohne die Berücksichtigung von Knotenpunkten (nur für die freie Strecke), um:

- eine bessere Vergleichbarkeit mit dem auf die Streckenunfälle bezogenen Zustandspotenzial zu ermöglichen und
- die Ungenauigkeiten, welche aus der Berechnung des Knotenanteils an der Grundunfallkostenrate resultiert zu vermindern.

Ergänzend werden die Ergebnisse der ESN-Analyse bzw. die Rangfolge in vier Kategorien in Abhängigkeit der absoluten vermeidbaren Unfallkosten (vUK) eingeteilt:

- hohe Priorität: obere 20 % vUK
- mittlere Priorität: 20 % - 60 % vUK
- niedrige Priorität: 60 % - 100 % vUK
- keine Sicherheitsverbesserungspotenzial

Diese Einteilung findet sich in der Spalte Prio der Tabelle mit den ESN-Ergebnissen im Anhang A.12.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Deskriptive Auswertungen

#### 6.1.1 Zustandsgrößen

Zu einzelnen relevanten Zustandsgröße wurde die Verteilung und Ausprägung des Zustands je Straßenklasse und Analysenetz untersucht. Weitere Auswertungen hierzu sind im Anhang aufgeführt.

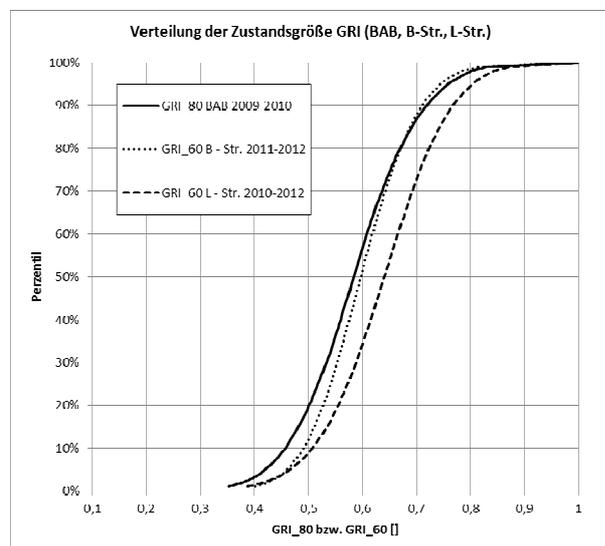
Hinweis: Zu den Analysenetzen A und B wurden je Straßenklasse Daten der auch in den Modellen verwendeten ZEB-Kampagnen ausgewählt.

#### Griffigkeit GRI

Zum besseren Verständnis der Ausprägung des Indikators Griffigkeit wurden zunächst die Verteilung der in der ZEB verwendeten 100 m - Griffigkeitswerte (GRI\_60 bzw. GRI\_80 Freie Strecke) bundesweit je nach Straßenklasse verglichen.

Folgende Datengrundlagen wurden untersucht.

- Bundesautobahnen: 2009 / 2010
- Bundesstraßen: 2011 / 2012
- Landesstraßen 2010 - 2012



**Bild 61:** Verteilung der Zustandsgrößen der Griffigkeit je Straßenklasse (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

Interpretation Bild 61: Der Median der Autobahnen und Bundesstraßen ist vergleichbar, die Landesstraßen weisen ein deutlich besseres Niveau der Griffigkeit auf. Während die Summenlinien der BAB und Landesstraßen annähernd parallel verlaufen, verläuft die Linie der Bundesstraßen deutlich steiler. Eine Begründung für die sehr unterschiedliche Verteilung bei den Bundesstraßen kann nicht gegeben und müsste aufgrund der Vielzahl möglicher Einflüsse separat untersucht wer-

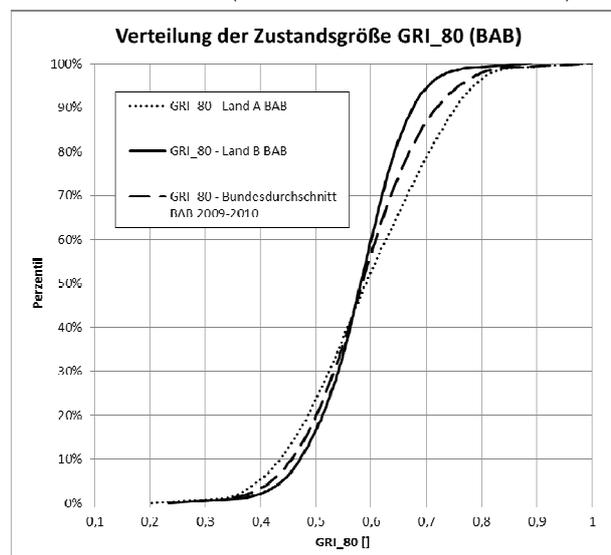
den. Denkbar wäre die unterschiedliche Altersstruktur der Netze (Erhaltung, Neubau) oder die unterschiedliche Verkehrsbeanspruchung (vorwiegend Schwerverkehr).

Das Niveau des 5 %-Quantils der BAB liegt heute mit 0,420 deutlich höher als der Schwellenwert von 0,320, der aus den Daten der Erfassung 1991 gewonnen und zur Festlegung des Schwellenwertes verwendet wurde (Klinghammer & Gast, 1992). Dies ist u. a. dadurch begründet, dass in die Berechnung für 2009 / 2010 die Zustandsdaten aller Fahrstreifen eingingen und die Griffigkeit auf den Überholfahrstreifen aufgrund des fehlenden Schwerverkehrs und der niedrigeren Anzahl an Überrollungen höher als auf dem Hauptfahrstreifen ausfällt.

Die obere Grenze der 5 % schlechtesten Griffigkeitswerte (Tab. 2) zeigt im Bundesdurchschnitt für alle Straßenklassen vergleichbare Größen.

Quantil	GRI_80 bzw. GRI_60		
	BAB 09/10	B-Str. 11/12	L-Str. 10/12
5%	0,420	0,460	0,466
10%	0,457	0,491	0,507
15%	0,481	0,511	0,534
50%	0,584	0,597	0,640
85%	0,691	0,688	0,743
90%	0,719	0,711	0,767

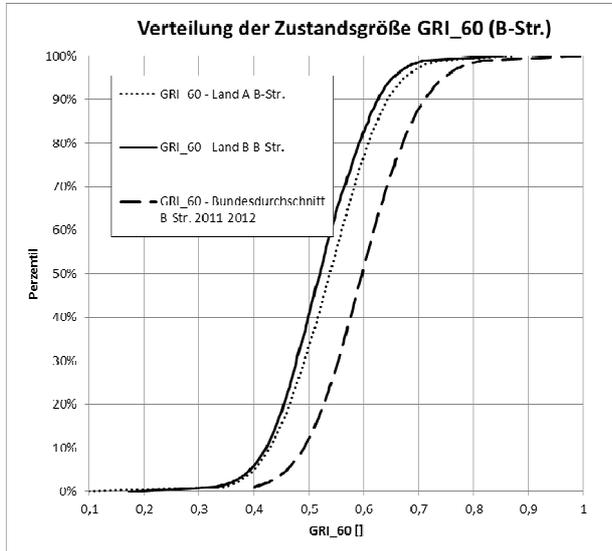
**Tab. 2:** Quantile der Zustandsgrößen der Griffigkeit je Straßenklasse (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)



**Bild 62:** Verteilung der Zustandsgrößen der Griffigkeit (Freie Strecke) BAB

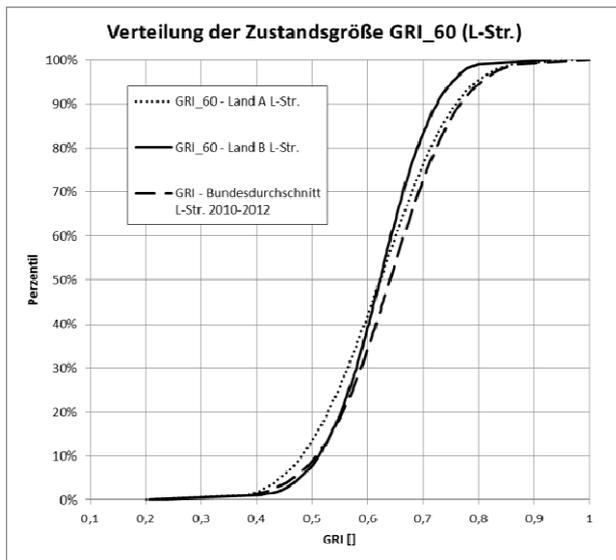
Anhand der Verteilungen der Zustandsgrößen der BAB aus dem Analysenetz in Bild 62 zeigt sich, dass die Medianwerte mit dem Bundesdurchschnitt übereinstimmen. Die Steigung der Summenlinie unterscheidet sich aber deutlich. Es wird vermutet, dass hier die Altersstruktur und / oder die verkehrliche Nutzung differiert. Die Verteilung der

Zustandsgrößen der Bundesstraßen in Bild 63 zeigt dagegen ein anderes Bild. Die Verteilungen sind vergleichbar, jedoch horizontal verschoben. Damit liegen die Griffigkeitswerte im Analysenetz deutlich unter dem Bundesdurchschnitt.



**Bild 63:** Verteilung der Zustandsgrößen der Griffigkeit (Freie Strecke, Bundesstraßen)

Die Verteilung der Zustandsgrößen der Landes- bzw. Staatsstraßen in Bild 64 zeigen, dass für diese Straßenklassen unterschiedliche Verteilungen in den Analysenetzen A und B vorliegen. Der Medianwert stimmt überein, weist aber gegenüber dem Bundesdurchschnitt ein schlechteres Niveau auf.



**Bild 64:** Verteilung der Zustandsgrößen der Griffigkeit (Freie Strecke, Landesstraßen)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verteilungen abhängig von der Straßenklasse und dem Analysenetz sehr unterschiedlich (im Median und in der Spreizung) ausfallen. Gesetzmäßigkeiten lassen sich nach jetziger Erkenntnis nicht ab-

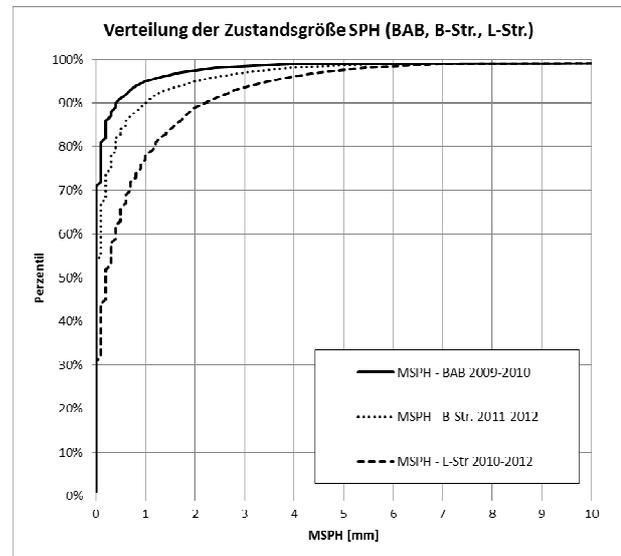
leiten. Es wird angenommen, dass die Unterschiede aus der regional abweichenden Altersstruktur (z. B. Ost / West), dem allgemeinen Erhaltungszustand, der Verkehrsbelegung bzw. dem Einsatz unterschiedlicher Oberbauarten (Asphalt-/ Betonstrecken) und Einbauverfahren herrührt. Es ist auch möglich, dass die Niveauunterschiede bei den Bundesstraßen durch klimatische oder messtechnische Phänomene bedingt sind. Ähnliche Vermutungen äußert auch Hess (2013) und konnte von Heller (2014) in einer bundesweiten Untersuchung gezeigt werden. Alle weiteren Auswertungen zur Griffigkeit sind im Anhang A.6.1 aufgeführt.

**Fiktive Wassertiefe SPH**

Die Verteilung der Zustandsgröße SPH wurde anhand folgender Datengrundlagen untersucht.

- ZEB Bundesautobahnen: 2009 / 2010
- ZEB Bundesstraßen: 2011 / 2012
- ZEB Landesstraßen 2010 - 2012

Bereits vorab ist anzumerken, dass die u. U. zur Entwässerung beitragende Längsneigung in die Betrachtung nicht mit eingeht. Diese wird später modellseitig betrachtet. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Straßenklassen. Das Zustandsniveau verschlechtert sich von den Bundesautobahnen über die Bundesstraßen zu den Landesstraßen (Bild 65). Während bei den Autobahnen die schlechtesten 5 % der Strecken einen Zustandswert größer 1,0 mm Fiktive Wassertiefe aufweisen, besitzen bei den Bundesstraßen die schlechtesten 5 % Zustandsabschnitte einen Wert größer 2 mm und bei den Landesstraßen größer 3,5 mm (siehe Bild 66).



**Bild 65:** Verteilung der Zustandsgröße Fiktive Wassertiefe

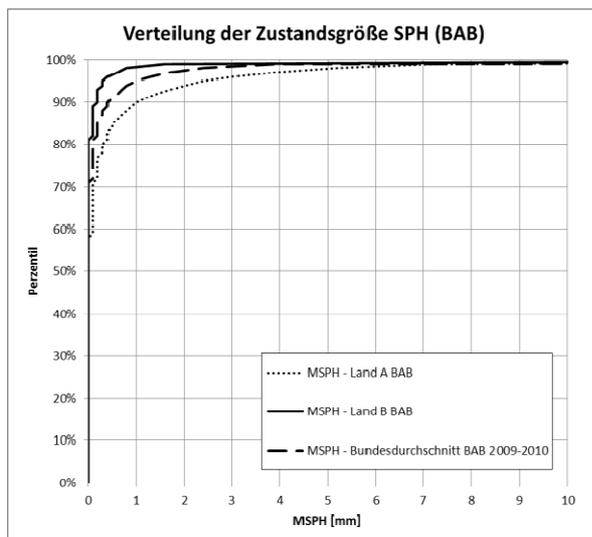
Quantil	SPH		
	BAB 09/10	B-Str. 11/12	L-Str. 10/12
95%	1,0	2,0	3,5
90%	0,4	1,0	2,2
85%	0,2	0,6	1,6
50%	0,0	0,0	0,2
10%	0,0	0,0	0,0
5%	0,0	0,0	0,0

**Tab. 3:** Quantile der Zustandsgröße Fiktive Wassertiefe je Straßenklasse (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

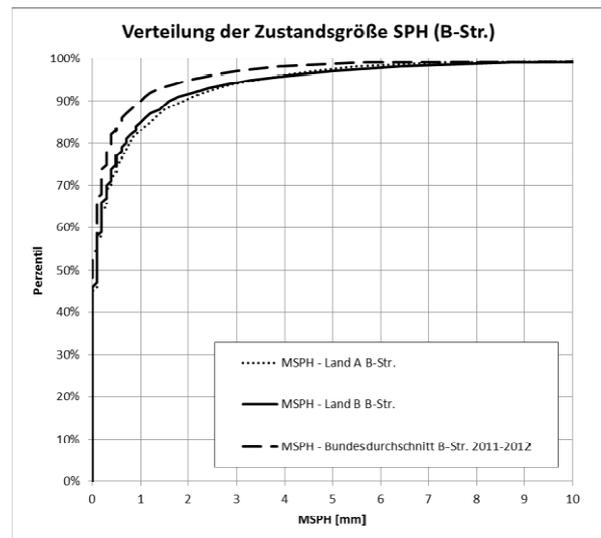
Eine große Differenz zeigt sich bei der Verteilung der Zustandsgröße Fiktive Wassertiefe auf Autobahnen zwischen den Analysenetzen A und B. Dies ist dadurch erklärbar, dass es in Land B einen deutlich höheren Anteil an Betonstrecken gibt und daher Spurrinnen weitestgehend ausgeschlossen sind. Land A wiederum besitzt im Vergleich zum Bundesdurchschnitt mehr Asphaltstrecken und einen höheren Schwerverkehrsanteil als Land B, was sich in dem deutlich höheren Streckenanteil mit einer signifikanten fiktiven Wassertiefe ausdrückt (Bild 66).

Bei den Bundesstraßen zeigt sich zwischen den Analyseländern eine identische Verteilung (Bild 67). Die Fiktive Wassertiefe ist aber deutlicher ausgeprägter, als im Bundesdurchschnitt.

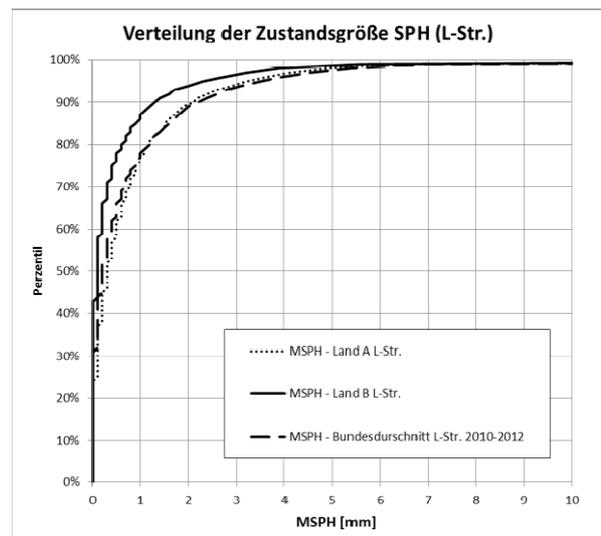
Die Landesstraßen des Landes B weisen deutlich weniger Streckenanteile mit einer Fiktiven Wassertiefe auf, als Land A. Land A liegt sehr nahe am Bundesdurchschnitt (Bild 68). Land B zeigte einen besseren Zustand, als der Bundesdurchschnitt.



**Bild 66:** Verteilung der Zustandsgröße Fiktive Wassertiefe (Freie Strecke, BAB)



**Bild 67:** Verteilung der Zustandsgröße Fiktive Wassertiefe (Freie Strecke, Bundesstraßen)



**Bild 68:** Verteilung der Zustandsgröße Fiktive Wassertiefe (Freie Strecke, Landesstraßen)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Vergleich der Verteilung der Fiktiven Wassertiefe ein sehr heterogenes Bild in den untersuchten Netzen abgibt. Eine Begründung könnte z. B. sein, dass die Erhaltung der Bundesfern- und Landesstraßen durch die getrennte Finanzierung zu sehr unterschiedlichen Zuständen führt. Dazu ist das Schwerverkehrsaufkommen deutschlandweit sehr unterschiedlich ausgeprägt. Je nach örtlicher Entwicklung des Netzes weicht der Schwerverkehr von den Landes- auf die Bundesstraßen bzw. Bundesautobahnen aus und führt damit zu einer geringeren Belastung der Landesstraßen. Ohne die genauen Werte der durchschnittlichen Querschnittsbreiten der einzelnen Straßenklassen zu kennen, liegt darin vermutlich begründet, dass die meist schmalere Landesstraßen im Zustandsvergleich schlechter ausfallen. Bei schmalen Straßen sind auch die Spurrinnen deutlich schmaler

und damit tiefer. Die von Gallaway (1979) und Reed (1984) entwickelten Gleichungen zeigen, dass oberhalb einer Wasserfilmdicke von 2,5 mm die Reifenprofiltiefe keinen wesentlichen Einfluss auf die Aquaplaning-Geschwindigkeit mehr hat (Bereich 70-80 km/h).

In Tab. 4 sind die davon betroffenen Streckenanteile im Bundesdurchschnitt dargestellt. Der Anteil verdoppelt sich von den BAB über die Bundesstraßen zu den Landesstraßen.

Anteil SPH > 2,5 mm		
BAB 2009-2010	B-Str. 2011-2012	L-Str 2010-2012
2%	4%	8%

Tab. 4: Streckenanteil mit einer Fiktiven Wassertiefe > 2,5 mm, Freie Strecke Bundesdurchschnitt je Straßenklasse

Alle weiteren Auswertungen zur Fiktiven Wassertiefe sind im Anhang A.6.1 aufgeführt.

### Spurrinntiefe SPT

Die Verteilung der Zustandsgröße SPT wurde anhand folgender Datengrundlagen untersucht.

- ZEB Bundesautobahnen: 2009 / 2010
- ZEB Bundesstraßen: 2011 / 2012
- ZEB Landesstraßen 2010 - 2012

Der Vergleich der Verteilungen zeigt analog zur Fiktiven Wassertiefe ein deutliches Zustandsgefälle von den Bundesautobahnen über die Bundesstraßen zu den Landesstraßen (siehe dazu Bild 69).

Während bei den Autobahnen 5 % der Strecken einen Zustandswert größer 7,0 mm Spurrinntiefe aufweisen, besitzen bei den Bundesstraßen die schlechtesten 5 % der Zustandsabschnitte einen Wert größer 8,6 mm und bei den Landesstraßen größer 10,6 mm (siehe Tab. 5).

Der Vergleich der Zustandsgrößen SPT der Analysenetze A und B zeigt bei den Autobahnen deutliche Verteilungsunterschiede. Dies ist dadurch erklärbar, dass es in Land B einen höheren Anteil an Betonstrecken gibt und daher Spurrinnen weitestgehend ausgeschlossen sind. Land A wiederum besitzt im Vergleich zum Bundesdurchschnitt mehr Asphaltstrecken und einen höheren Schwerverkehrsanteil als Land B, was sich in dem deutlich höheren Streckenanteil mit Spurrinnen ausdrückt (Bild 70).

Bei den Bundesstraßen zeigt sich in den Analyseländern eine identische Verteilung (Bild 71). Die Spurrinnen sind deutlich ausgeprägter, als im Bundesdurchschnitt.

Die Landesstraßen des Landes B weisen deutlich weniger Streckenanteile mit (tiefen) Spurrinnen auf, als Land A. Beide liegen bei der Spurrinntiefe unter dem Bundesdurchschnitt (Bild 72).

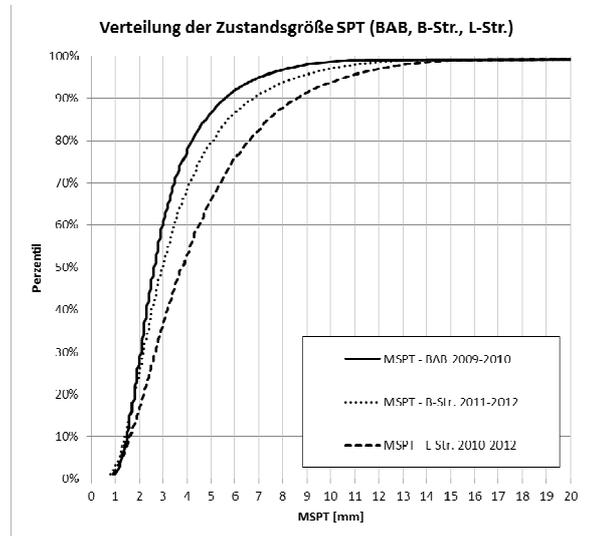


Bild 69: Verteilung der Zustandsgröße Spurrinntiefe je Straßenklasse (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

Quantil	SPT		
	BAB 09/10	B-Str. 11/12	L-Str. 10/12
95%	7,0	8,6	10,6
90%	5,6	6,8	8,6
85%	4,8	5,7	7,4
50%	2,6	3,0	3,8
10%	1,5	1,4	1,6
5%	1,3	1,2	1,3

Tab. 5: Quantile der Zustandsgröße Spurrinntiefe je Straßenklasse (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

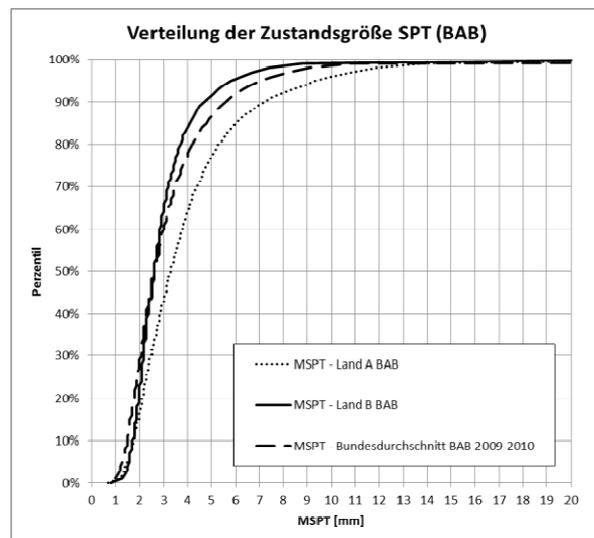
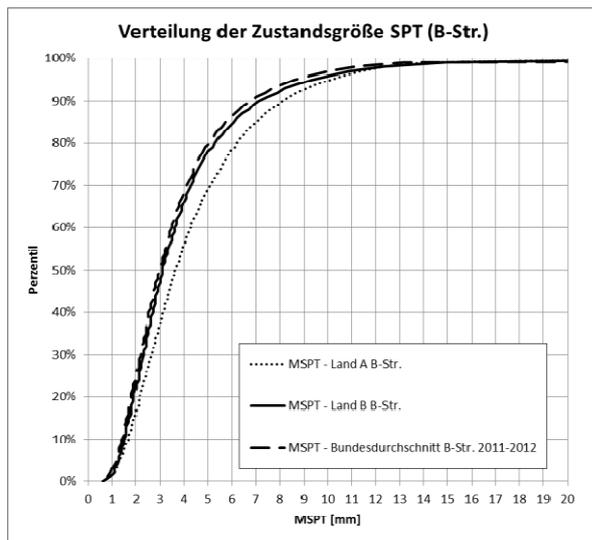
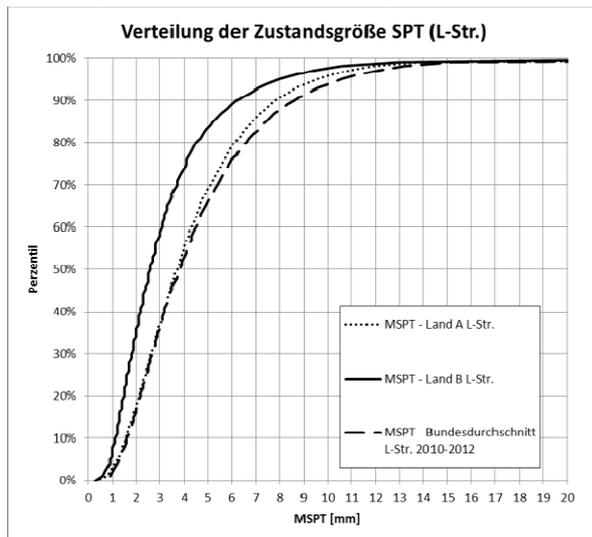


Bild 70: Verteilung der Zustandsgröße Spurrinntiefe (Freie Strecke, BAB)



**Bild 71:** Verteilung der Zustandsgröße Spurrinntiefe (Freie Strecke, Bundesstraßen)



**Bild 72:** Verteilung der Zustandsgröße Spurrinntiefe (Freie Strecke, Landesstraßen)

Alle weiteren Auswertungen zur Spurrinntiefe sind im A.6.1 aufgeführt.

### Allgemeine Unebenheit AUN

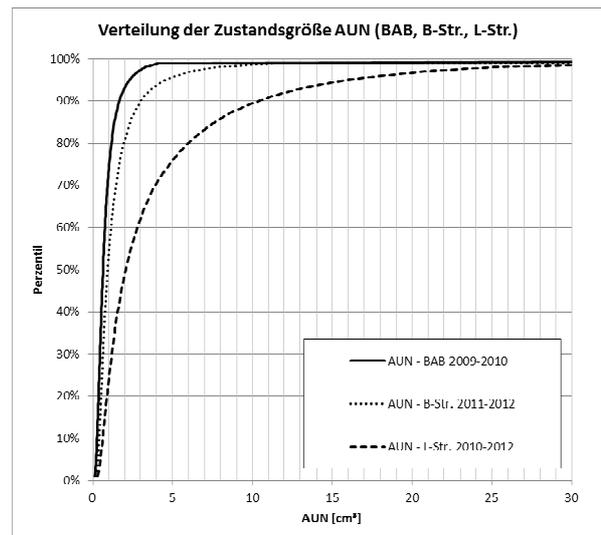
Die Verteilung der Zustandsgröße AUN wurde anhand folgender Datengrundlagen untersucht.

- ZEB Bundesautobahnen: 2009 / 2010
- ZEB Bundesstraßen: 2011 / 2012
- ZEB Landesstraßen 2010 - 2012

Aufgrund der topologischen Gegebenheiten, der unterschiedlichen Linienführung und des unterschiedlichen Erhaltungszustands sind die Bundesautobahnen ebener als die Bundes- und Landesstraßen. Die Allgemeine Unebenheit ist bei den Landesstraßen jedoch noch einmal deutlich

schlechter als bei den Bundesstraßen (siehe Bild 73). Jedoch ist die Zustandsgröße AUN, die die Verteilung der im Längsprofil enthaltenen Wellenanteile beschreibt, keine ingenieurtechnisch erfassbare Größe wie z. B. die Spurrinntiefe. Das erschwert die Bewertung der Ergebnisse an dieser Stelle.

Die Quantilwerte der 5 % schlechtesten Abschnitte sind in Tab. 6 aufgeführt.

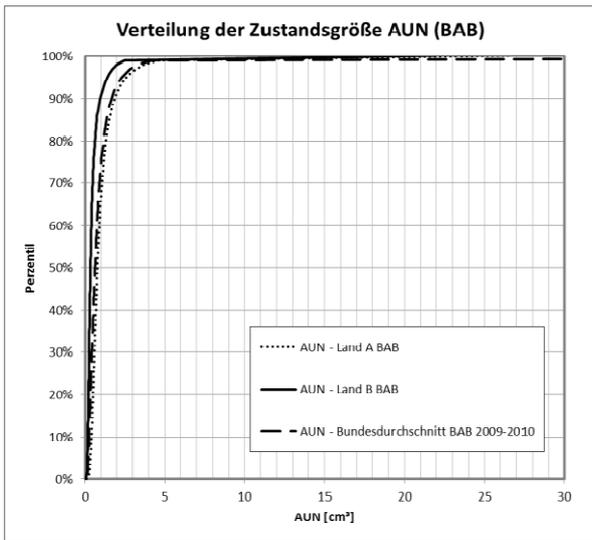


**Bild 73:** Verteilung der Zustandsgröße Allgemeine Unebenheit je Straßenklasse (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

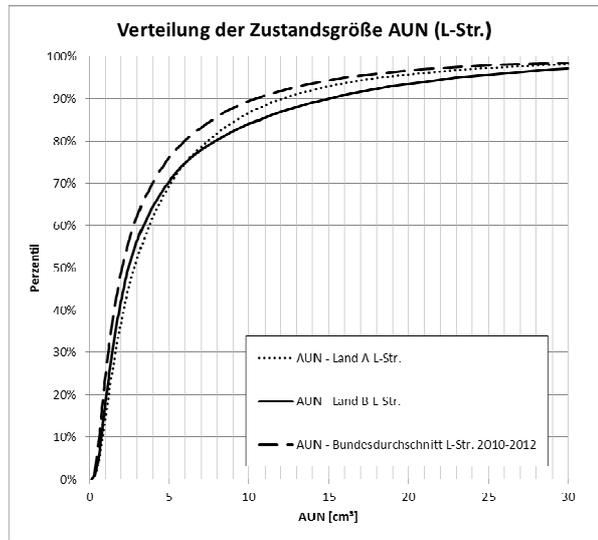
Quantil	AUN		
	BAB 09/10	B-Str. 11/12	L-Str. 10/12
95%	2,30	4,56	15,93
90%	1,68	3,03	10,42
85%	1,36	2,36	7,68
50%	0,64	0,93	2,07
10%	0,26	0,39	0,62
5%	0,21	0,32	0,47

**Tab. 6:** Quantile der Zustandsgröße Allgemeine Unebenheit je Straßenklasse (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

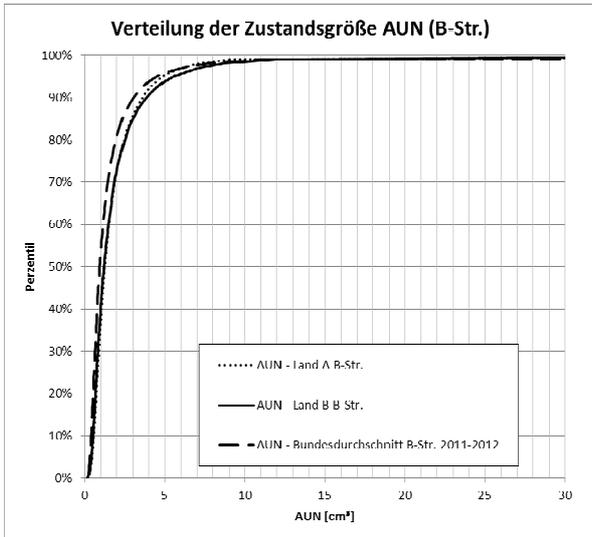
Die Verteilung der Allgemeinen Unebenheit der Analyseländer A und B ist bei den Bundesstraßen sehr ähnlich und folgt dem Bundestrend (Bild 75). Bei den Landesstraßen besitzt Land B einen größeren Anteil unebener Straßen. In beiden Ländern ist die Unebenheit schlechter als beim Bundesdurchschnitt (Bild 76). Bei den Bundesautobahnen sind die Autobahnen von Land A unebener als bei Land B (Bild 74). Dies liegt aller Wahrscheinlichkeit an dem bereits erwähnten kleineren Anteil an Betonstrecken. Betonfahrbahnen sind beim AUN der Erfahrung nach immer unauffällig. Dies liegt daran, dass die Unebenheiten in der Regel aus Wellen in Plattenlänge bestehen und damit nur einen einzelnen Peak im Spektrum der Wellenlängen erzeugen, der einen kaum messbaren Einfluss auf den AUN hat.



**Bild 74:** Verteilung der Zustandsgröße Allgemeine Unebenheit (Freie Strecke, BAB)



**Bild 76:** Verteilung der Zustandsgröße Allgemeine Unebenheit (Freie Strecke, Landesstraßen)



**Bild 75:** Verteilung der Zustandsgrößen Allgemeine Unebenheit (Freie Strecke, Bundesstraßen)

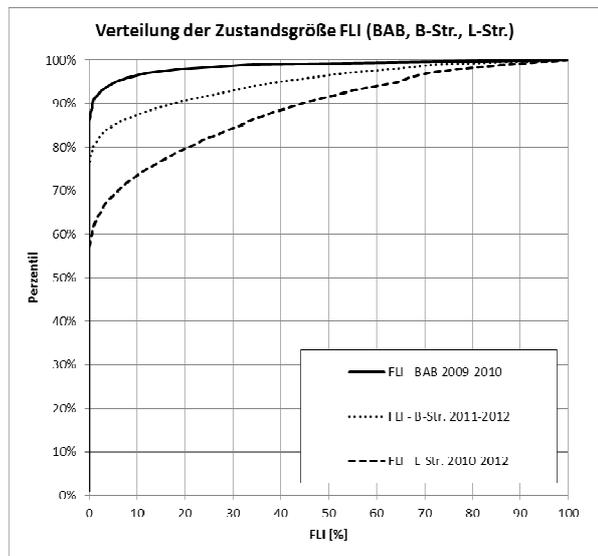
Alle weiteren Auswertungen zur Allgemeinen Unebenheit sind im A.6.1 aufgeführt.

**Flickstellen FLI**

Die Verteilung der Zustandsgröße FLI wurde anhand folgender Datengrundlagen untersucht.

- ZEB Bundesautobahnen: 2009 / 2010
- ZEB Bundesstraßen: 2011 / 2012
- ZEB Landesstraßen 2010 - 2012

Der im Vergleich zu den übrigen Straßenklassen verhältnismäßig gute Zustand der Bundesautobahnen zeigt sich sehr deutlich (Bild 77). Insbesondere bei den 5 % schlechtesten Abschnitten ist ein extremer Unterschied zu erkennen. Bei den Landesstraßen haben die schlechtesten 5 % der Zustandsabschnitte einen Flickstellenanteil größer 64 %, bei den Autobahnen größer 5 %.

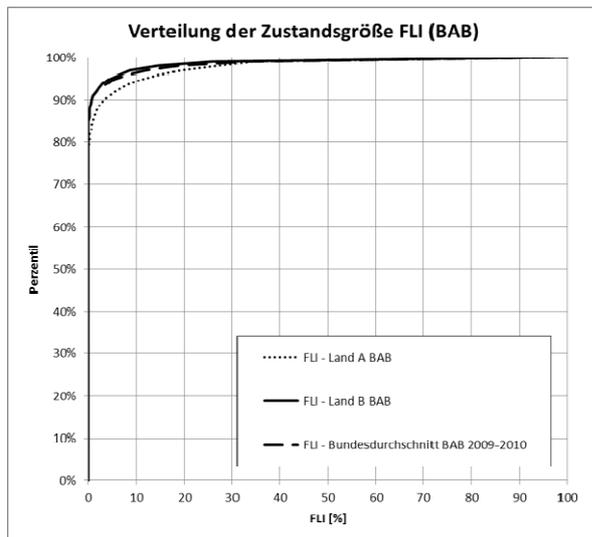


**Bild 77:** Verteilung der Zustandsgröße Flickstellen (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

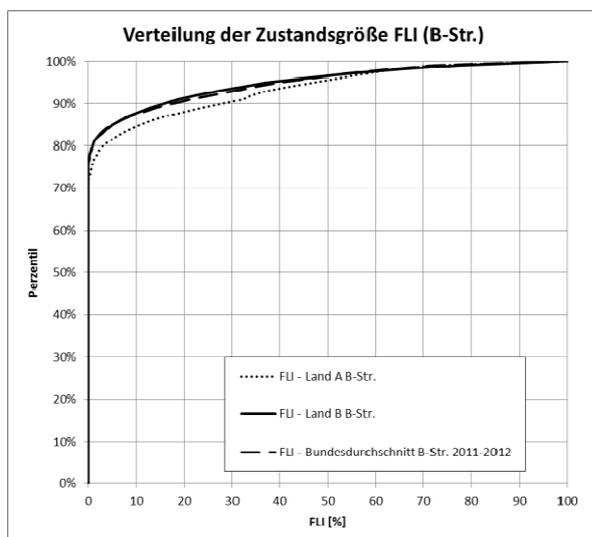
Quantil	FLI		
	BAB 09/10	B-Str. 11/12	L-Str. 10/12
95%	5,4	39,5	64,7
90%	0,7	17,3	44,3
85%	0,0	5,0	31,7
50%	0,0	0,0	0,0
10%	0,0	0,0	0,0
5%	0,0	0,0	0,0

**Tab. 7:** Quantile der Zustandsgröße Flickstellen (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

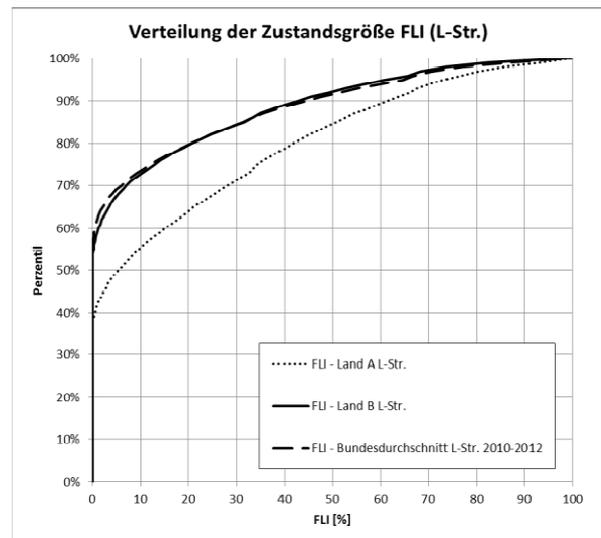
Die Verteilung der Zustandsgrößen ist bei den Flickstellen in den Analyseländern A und B vergleichbar. Land A weist in beiden Fällen einen schlechteren Zustand auf. Bei den Landesstraßen ist der Unterschied in der Verteilung sehr extrem. Dies lässt auf eine deutlich unterschiedliche Erhaltung schließen.



**Bild 78:** Verteilung der Zustandsgröße Flickstellen (Freie Strecke, BAB)



**Bild 79:** Verteilung der Zustandsgröße Flickstellen (Freie Strecke, Bundesstraßen)



**Bild 80:** Verteilung der Zustandsgröße Flickstellen (Freie Strecke, Landesstraßen)

Bei den Autobahnen wurden nur die Asphaltstrecken betrachtet, da es für die Betonfahrbahnen kein analoges bzw. vergleichbares Merkmal zu Flickstellen gibt. Land B besitzt einen größeren Anteil an Betonstrecken. Insofern sind die Aussagen hier eingeschränkt. Betonplatten, die z. B. durch schnellhärtenden Beton ersetzt wurden und ähnliche Unebenheiten darstellen, wie aufgetragenen Flickstellen, werden nicht erfasst. Das Merkmal Bituminöser Teilersatz kommt in der Praxis relativ selten vor.

Insgesamt besitzen die Landesstraßen im Bundesdurchschnitt zehnmal mehr Flickstellen, als die Autobahnen, die Bundesstraßen fünfmal so viel (siehe Tab. 8)

Mittelwert FLI [%]		
BAB 2009-2010	B-Str. 2011-2012	L-Str 2010-2012
1,2	5,1	11,2

**Tab. 8:** Mittelwerte der Zustandsgröße Flickstellen (Freie Strecke, Bundesdurchschnitt)

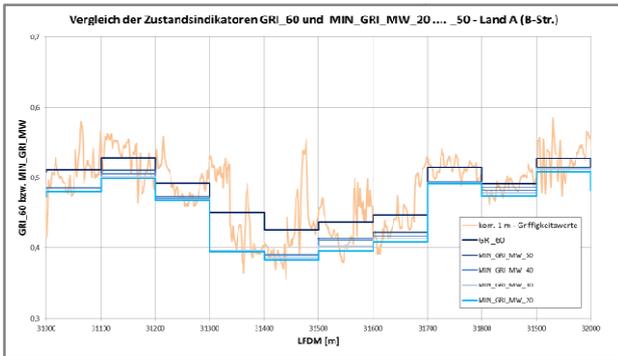
Alle weiteren Auswertungen zur Zustandsgröße Flickstellen sind im A.6.1 aufgeführt.

### Minimalwert des gleitenden Mittelwertes der Griffigkeit für feste MittelungslängenMIN\_GRI\_MW

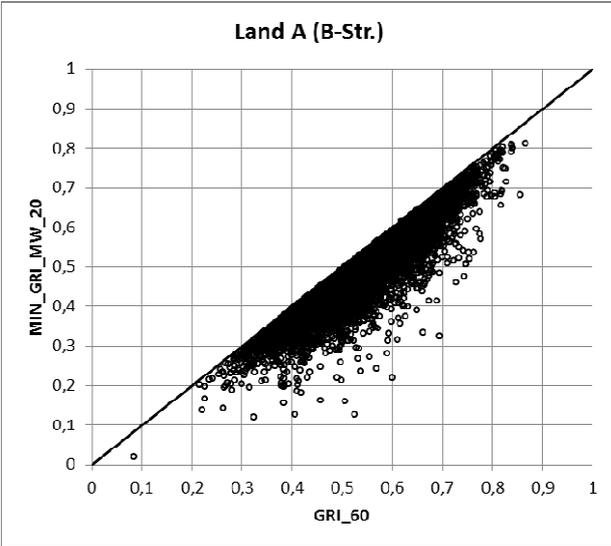
Das Verfahren der gleitenden Mittelung liefert bei den Zustandsgrößen MIN\_GRI\_MW erwartungsgemäß kleinere Griffigkeitswerte für den 100 m - Abschnitt (siehe Bild 81). Je kürzer die Mittelungslänge, desto niedriger sind die Werte. Begründen lässt sich dieses durch kurze Abschnitten mit einer niedrigeren Griffigkeit, die dann bei kürzeren Mittelungslängen stärker ins Gewicht fallen. Ursache hierfür können, wie im Bild 85 und Bild 86 darge-

stellt Flickstellen, Brücken, Baunähte etc. sein. Nachfolgend ist das Ergebnis für Daten einer Bundesstraße des Analyselandes A dargestellt (Bild 81).

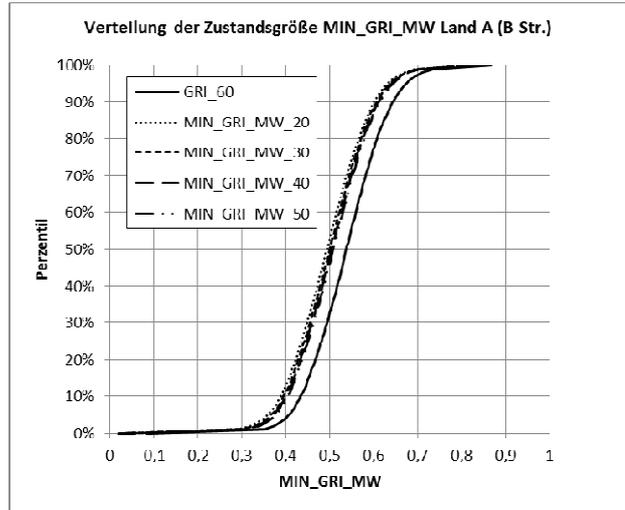
Die Differenzen zwischen den Zustandsgrößen GRI und MIN\_GRI\_MW sind gleichförmig verteilt (Bild 81). Wie zu erwarten, kommt es bei den meisten MIN\_GRI\_MW-Zustandswerte zu einem niedrigeren Wertenniveau als bei den originalen GRI<sub>60</sub> und GRI<sub>80</sub>-Werten (exemplarische Darstellung der Bundesstraße Bild 82 und Bild 81).



**Bild 81:** Vergleich der Zustandswerte GRI<sub>60</sub> (klassisch) mit dem wert MIN\_GRI\_MW mit unterschiedlichen Mittelungslängen, 1 km - Ausschnitt, Land A (Freie Strecke Bundesstraßen)

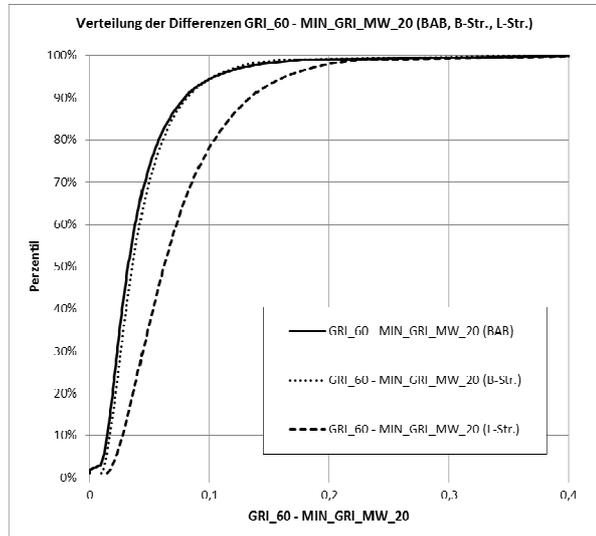


**Bild 82:** Zusammenhang GRI<sub>60</sub> / MIN\_GRI\_MW<sub>20</sub>, Land A (Freie Strecke, Bundesstraßen)



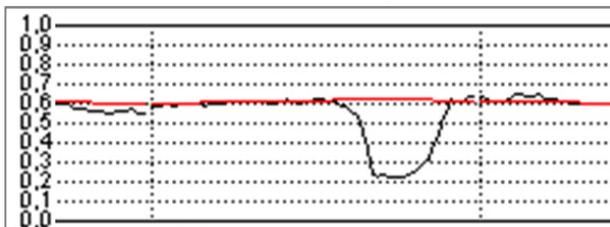
**Bild 83:** Verteilung der Zustandsgröße MIN\_GRI\_MW, Gegenüberstellung der Mittelungslängen Land A (Freie Strecke, Bundesstraßen)

Wie in Bild 84 zu erkennen ist, zeigt das Verfahren des Minimalwertes des gleitenden Mittelwertes der Griffigkeit bei den Bundesautobahnen den kleinsten und bei den Landesstraßen die größten Effekte. Dies ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass der Zustand bei den Autobahnen deutlich homogener und besser ist, als bei den Landesstraßen.

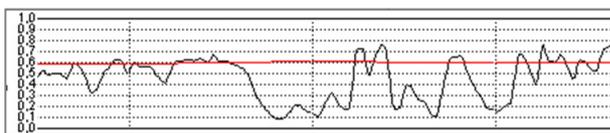


**Bild 84:** Darstellung der Verteilung der Differenzen zwischen den MIN\_GRI\_MW<sub>20</sub> und GRI, alle Straßenklassen Land A

In Bild 85 und Bild 86 werden zwei typische Beispiele dargestellt, bei denen sich ein deutlich niedrigerer Wert für MIN\_GRI\_MW gegenüber GRI ergibt. Die schlechten Straßenabschnitte wären mit der klassischen Mittelung der ZEB unentdeckt geblieben.



**Bild 85:** Beispiel für ein Delta von 0,250 zwischen GRI\_60 und MIN\_GRI\_MW\_20, Brückenbauwerk, Bundesstraßen Land A



**Bild 86:** Beispiel für ein Delta von 0,300 zwischen GRI\_60 und MIN\_GRI\_MW\_20, OB mit Bindemittelanreicherung, Bundesstraßen Land A

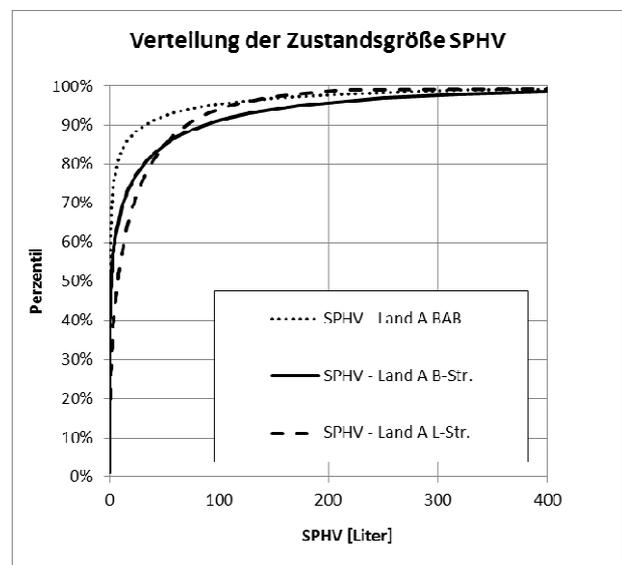
Alle weiteren Auswertungen zur Zustandsgröße MIN\_GRI\_MW sind im A.6.1 aufgeführt.

### Fiktiver Wasserrückhalt SPHV

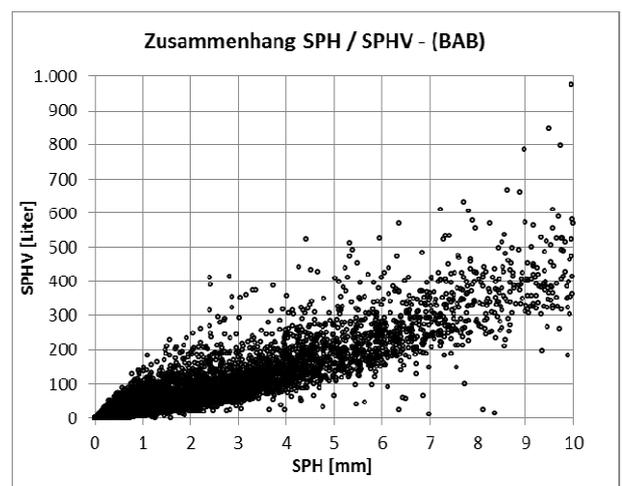
Für das Netz A wurde das Volumen des fiktiven Wasserrückhalts (SPHV) für die Bundesautobah-

nen, Bundes- und Landesstraßen pilotmäßig berechnet. Bereits vorab ist zu bemerken, dass die u. U. zur Entwässerung beitragende Längsneigung in die Betrachtung nicht mit eingeht. Diese wird später modellseitig betrachtet.

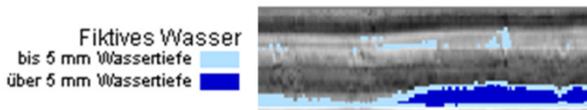
In Bild 87 wird die Verteilung der Zustandsgrößen in Abhängigkeit von der Straßenklasse dargestellt. Das Netz der Bundesstraßen zeigt den größten Anteil an Auswertungsabschnitten mit einem hohen Wasserrückhalt. Die Kurvenverläufe ähneln stark der Verteilung bei der Fiktiven Wassertiefe (siehe A.6.1). Es gibt verständlicherweise einen klaren Zusammenhang zwischen der Fiktiven Wassertiefe und des Fiktiven Wasserrückhalts (Bild 88).



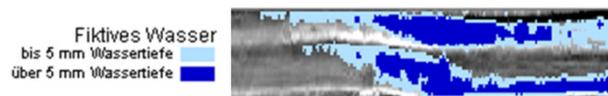
**Bild 87:** Verteilung der Zustandsgröße SPHV, Land A (Freie Strecke, alle Straßenklassen)



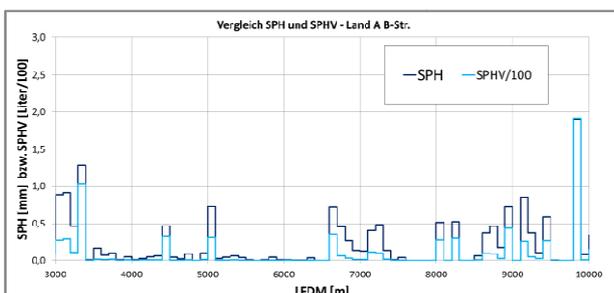
**Bild 88:** Zusammenhang SPH / SPHV am Beispiel der Bundesstraßen des Landes A (Freie Strecken)



**Bild 89:** Beispiel für einen Abschnitt SPH von 3 mm mit einem SPHV von 300 l / 100 m - Ausschnitt, Bundesstraßen Land A



**Bild 90:** Beispiel für einen Abschnitt mit einem SPH von 7 mm und einem SPHV von 730 l / 100 m - Ausschnitt, Bundesstraßen Land A



**Bild 91:** Vergleich der Zustandswerte SPH (klassisch) mit dem Wert SPHV, Bundesstraßen Land A

In Abhängigkeit von der Breite der Spurrinne und deren Form, kann sich mehr oder weniger Wasser in der Spurrinne sammeln (Tab. 9).

Quantil	SPHV		
	BAB	B-Str.	L-Str.
95%	89	173	110

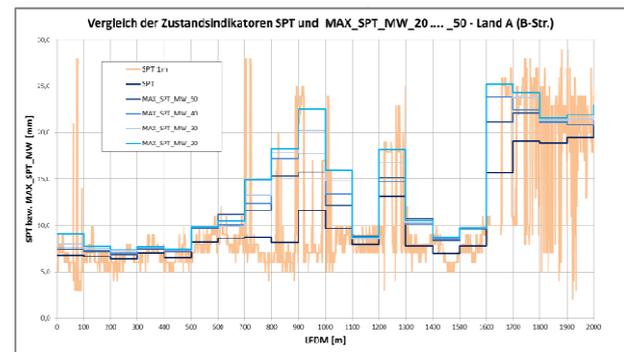
**Tab. 9:** Quantil der Zustandsgröße Spurrinntentiefe je Straßenklasse, 5% schlechteste Abschnitte (Freie Strecke, Land A)

Aquaplaning ist besonders dort möglich, wo breite und tiefe mit Wasser gefüllte Spurrinnen auftreten. SPHV liefert hier als neu geschaffene Zustandsgröße zur Zustandsgröße SPH wichtige zusätzliche Informationen.

Alle weiteren Auswertungen zum Fiktiven Wasserrückhalt sind im Anhang A.6.1 aufgeführt.

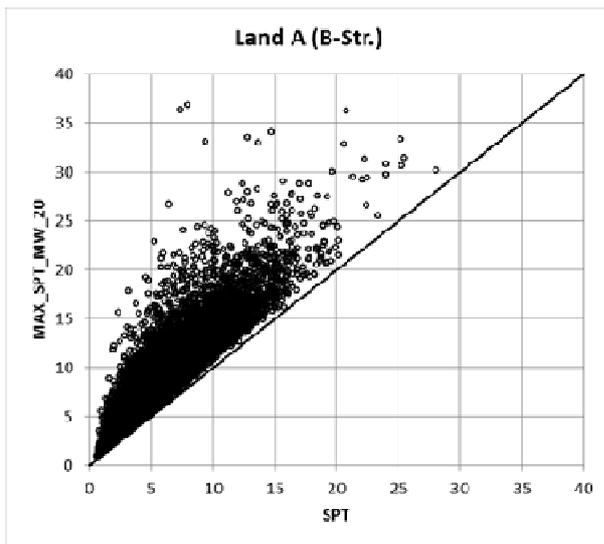
**Maximalwert des gleitenden Mittelwertes der Spurrinntentiefe für feste Mittelungslängen MAX\_SPT\_MW [mm]**

Das Verfahren der gleitenden Mittelung liefert bei den Zustandsgrößen MAX\_SPT\_MW erwartungsgemäß größere Spurrinntentiefen für den 100 m - Abschnitt. Je kürzer die Mittelungslänge ist, desto höher sind die Werte. Begründen lässt sich dieses durch kurze Bereiche mit tiefen Spurrinnen, die dann bei kürzeren Mittelungslängen zu einem höheren Wert führen. Im A.6.7 sind dazu Beispiele aufgeführt. Nachfolgend ist das Ergebnis für Daten einer Bundesstraße des Landes A dargestellt (Bild 92).

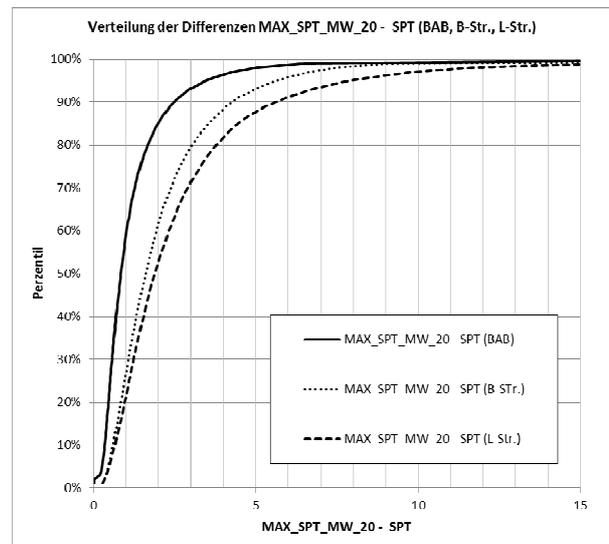


**Bild 92:** Vergleich der Zustandswerte SPT (klassisch) mit dem Wert MAX\_SPT\_MW mit unterschiedlichen Mittelungslängen, 1 km - Ausschnitt, Land A (Freie Strecke Bundesstraßen)

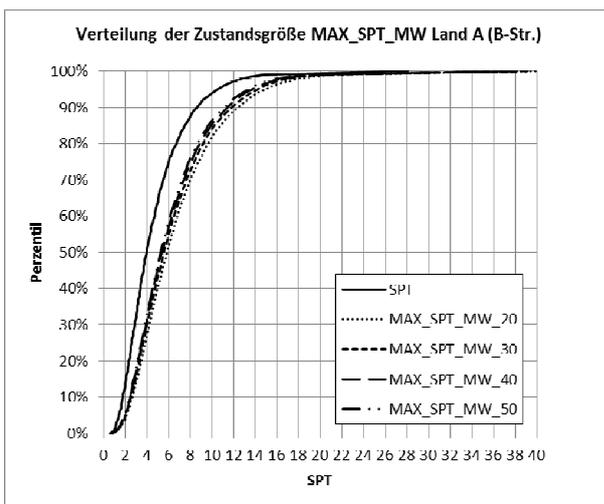
Die Differenzen zwischen den Zustandsgrößen MAX\_SPT\_MW und SPT sind gleichmäßig verteilt. Wie zu erwarten, kommt es bei den meisten MAX\_SPT\_MW-Zustandswerten zu einem höheren Wertenniveau als bei den originalen SPT-Werten (exemplarische Darstellung zu den Bundesstraßen siehe Bild 93).



**Bild 93:** Zusammenhang MAX\_SPT\_MW und SPT, Land A (Freie Strecke, Bundesstraßen)



**Bild 95:** Darstellung der Verteilung der Differenzen zwischen den MAX\_SPT\_MW\_20 und SPT, alle Straßenklassen Land A



**Bild 94:** Verteilung der Zustandsgröße MAX\_SPT\_MW, Gegenüberstellung der Mittelungslängen Land A (Freie Strecke, Bundesstraßen)

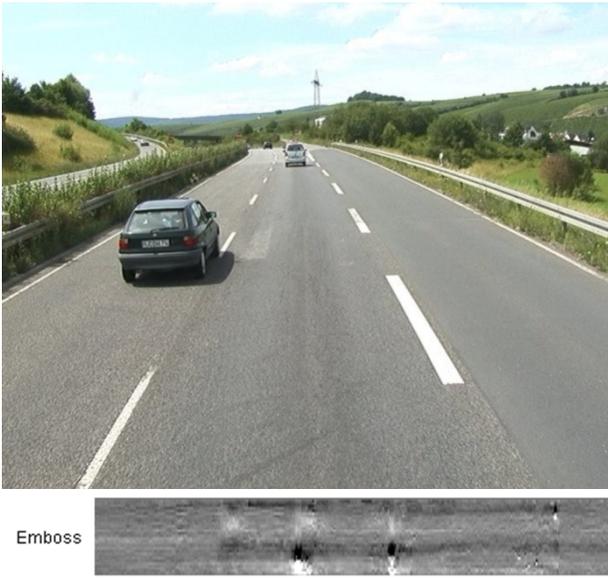
Wie in Bild 95 zu erkennen ist, zeigt das Verfahren des Maximalwertes des gleitenden Mittelwertes bei den Bundesautobahnen den kleinsten und bei den Landesstraßen den größten Effekt. Dies ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass der Zustand bei den Autobahnen, bzw. Bundesstraßen deutlich homogener und besser ist. Bei den BAB werden sehr lange Erhaltungsabschnitte realisiert, kurzes „Flickwerk“ ist eher selten anzutreffen.

In

Bild 96 und Bild 97 sind zwei typische Beispiele dargestellt, bei denen sich ein deutlich höherer Wert für MAX\_SPT\_MW gegenüber SPT ergibt. Die schlechten Straßenabschnitte wären mit der klassischen Mittelung der ZEB unentdeckt geblieben.



**Bild 96:** Beispiel für einen Abschnitt mit einem SPT von 6 mm und einem MAX\_SPT\_MW\_20 von 12 mm, Bundesstraßen Land A

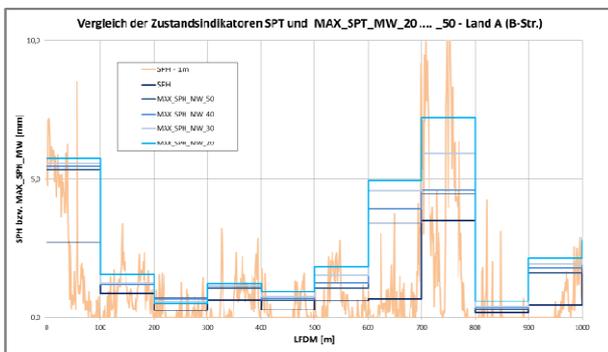


**Bild 97:** Beispiel für einen Abschnitt mit einem SPT von 5,5 mm und einem MAX\_SPT\_MW\_20 von 10,5 mm, Bundesstraßen Land A

Alle weiteren Auswertungen zur Zustandsgröße MAX\_SPT\_MW sind im A.6.1 aufgeführt.

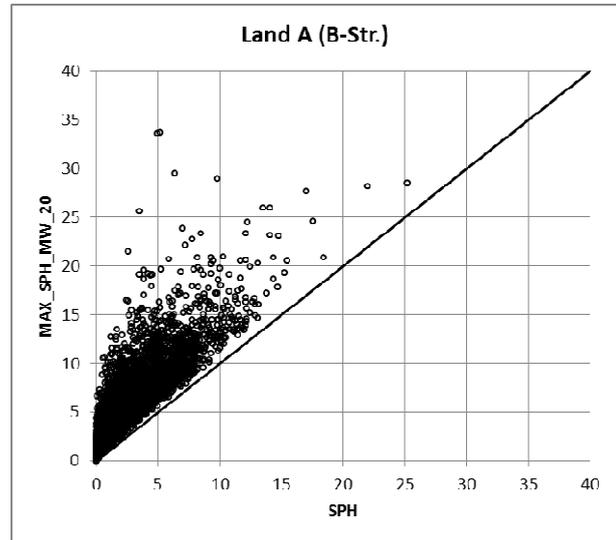
**Maximalwert des gleitenden Mittelwertes der Fiktiven Wassertiefe für feste Mittelungslängen MAX\_SPH\_MW [mm]**

Das Verfahren der gleitenden Mittelung liefert bei den Zustandsgrößen MAX\_SPH\_MW erwartungsgemäß größere Wassertiefen für den 100 m - Abschnitt. Je kürzer die Mittelungslänge ist, desto höher sind die Werte. Der Grund liegt in den kurzen Abschnitten mit tiefen Spurrinnen, die bei entsprechenden Mittelungslängen höhere Werte liefern. Im Anhang sind dazu Beispiele aufgeführt. Nachfolgend ist das Ergebnis für Daten einer Bundesstraße des Landes A dargestellt (Bild 98).

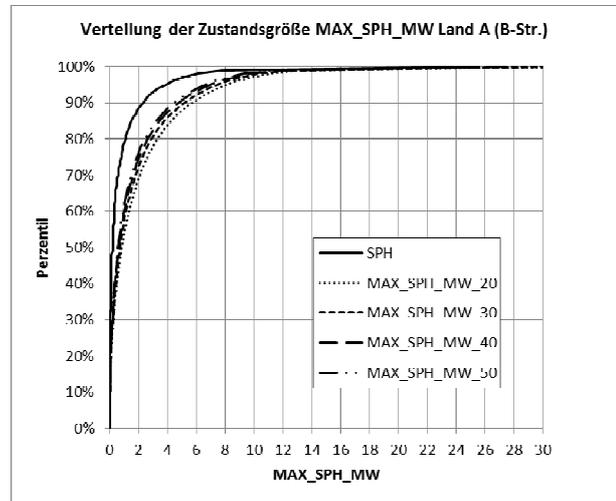


**Bild 98:** Vergleich der Zustandswerte SPH (klassisch) mit dem Wert MAX\_SPH\_MW mit unterschiedlichen Mittelungslängen, 1 km - Ausschnitt, Land A (Freie Strecke Bundesstraßen)

Die Differenzen zwischen den Zustandsgrößen MAX\_SPH\_MW und SPH sind gleichförmig verteilt. Wie zu erwarten, kommt es bei den meisten MAX\_SPH\_MW-Zustandswerten zu einem höheren Wertenniveau als bei den originalen SPH-Werten (exemplarische Darstellung zu den Bundesstraßen siehe Bild 99).

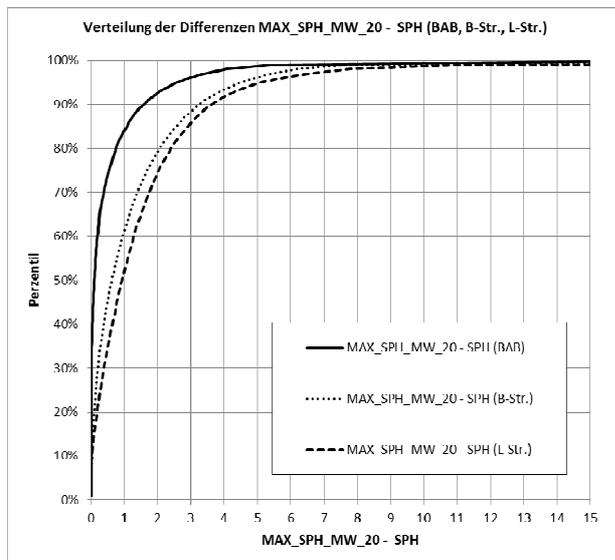


**Bild 99:** Zusammenhang MAX\_SPH\_MW und SPH, Land A (Freie Strecke, Bundesstraßen)



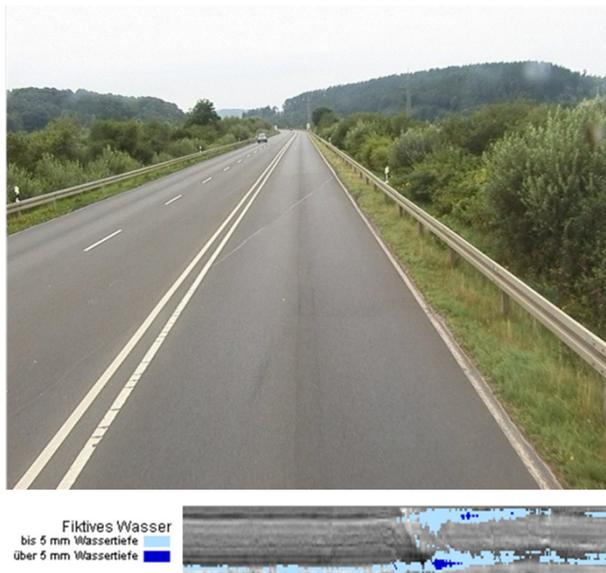
**Bild 100:** Verteilung der Zustandsgröße MAX\_SPH\_MW, Gegenüberstellung der Mittelungslängen Land A (Freie Strecke, Bundesstraßen)

Wie in Bild 101 zu erkennen ist, zeigt das Verfahren des Maximalwertes des gleitenden Mittelwertes bei den Bundesautobahnen den kleinsten und bei den Landesstraßen die größten Effekte. Dies ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass der Zustand bei den Autobahnen, bzw. Bundesstraßen deutlich homogener und besser ist. Bei den BAB werden sehr lange Erhaltungsabschnitte realisiert, kurzes „Flickwerk“ ist eher selten anzutreffen.

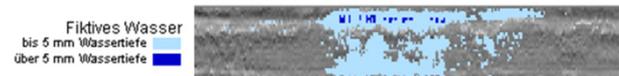


**Bild 101:** Darstellung der Verteilung der Differenzen zwischen den MAX\_SPH\_MW\_20 und SPH, alle Straßenklassen Land A

In Bild 102 und Bild 103 sind zwei typische Beispiele dargestellt, bei denen sich ein deutlich höherer Wert für MAX\_SPT\_MW gegenüber SPT ergibt. Die schlechten Straßenabschnitte wären mit der klassischen Mittelung der ZEB unentdeckt geblieben.



**Bild 102:** Beispiel für einen Abschnitt mit einem SPH von 2,4 mm und einem MAX\_SPH\_MW\_20 von 4 mm, Bundesstraßen Land A



**Bild 103:** Beispiel für einen Abschnitt mit einem SPH von 1,2 mm und einem MAX\_SPH\_MW\_20 von 5 mm, Bundesstraßen Land A

Alle weiteren Auswertungen zur Zustandsgröße MAX\_SPH\_MW sind im Anhang A.6.1 aufgeführt.

### 6.1.2 Unfallgeschehen

Am Beispiel des Unfallgeschehens auf Außerortsstraßen im Land A wird eine Einordnung von zwei zentralen Kollektiven des Forschungsprojektes vorgenommen:

- Analytestichprobe für die Entwicklung der Unfallmodelle
- Teilkollektiv des Unfallgeschehens, welches von dem später entwickelten Verfahren zur Abschätzung des Zustandspotenzials betroffen ist (betrifft ausschließlich Unfälle der freien Strecke auf Außerortsstraßen).

Im Bild 104 sind die Unfälle von Kategorie 1 bis 6 auf Außerortsstraßen im Land A dargestellt. Im Rahmen der Analyse wurden nur Unfälle der freien Strecke betrachtet, welche einen Anteil von 89 % ausmachen. Von diesen Streckenunfällen wurden nur die Straßenklassen Bundesautobahnen (BAB), Bundesstraßen (BS) und Landesstraßen (LS) untersucht. Damit stehen rund 78 % des Außerortsunfallgeschehens im Land A - das sind rund 36.000 Unfälle pro Jahr - im Fokus der Analysen des Forschungsprojektes.

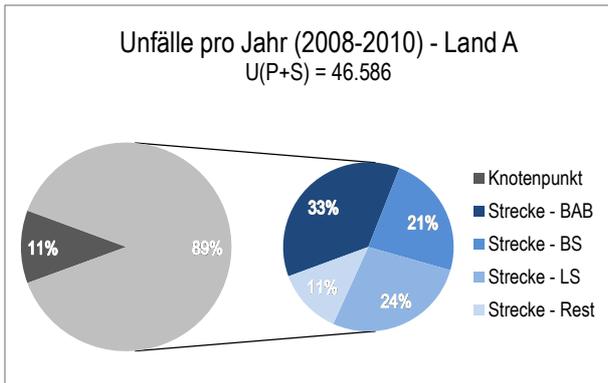


Bild 104: Unfälle auf Außerortsstraßen im Land A

Im Bild 105 sind die Unfallkosten von Kategorie 1 bis 6 auf Außerortsstraßen im Land A dargestellt. Bezogen auf die Unfallkosten stehen rund 73 % des Außerortsunfallgeschehens im Land A - das sind rund 829 Millionen Euro pro Jahr - im Fokus der Analysen des Forschungsprojektes.

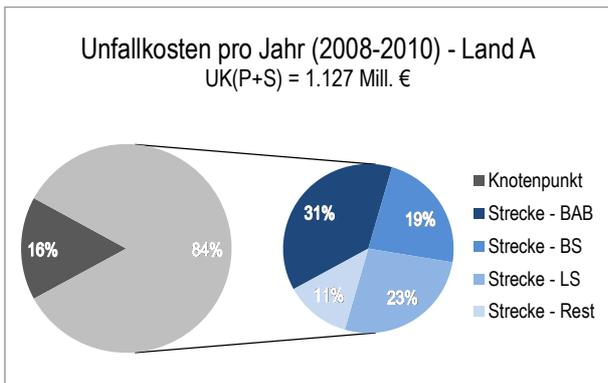


Bild 105: Unfallkosten auf Außerortsstraßen im Land A

Im Folgenden werden vorrangig die Unfallkosten bzw. deren Anteil gezeigt. Unfallkosten sind ein Maß zur Beschreibung von Anzahl und Schwere von Unfällen innerhalb einer Kenngröße. Ausnahme sind die Analysen, welche nur eine geringe Stichprobenbesetzung aufweisen und somit keine aussagefähige Kostenbewertung zulassen.

Im Bild 106 sind die Unfallkostenanteile nach Unfalltypen aufgetragen (differenziert nach der Straßenklasse). Das Streckenunfallgeschehen wird erwartungsgemäß stark durch Fahr- und Längsverkehrsunfälle geprägt. Auch die sonstigen Unfälle sind mit ca. 20 % an den Unfallkosten auf der Strecke beteiligt. Auf Bundesautobahnen dominieren die Längsverkehrsunfälle. Auf Bundes- und Landesstraßen dominieren die Fahrurfälle. Dies wird als Folge eines unterschiedlichen Verkehrsaufkommens bzw. Verkehrsdichte aber auch der unterschiedlichen Trassierung und Art sowie Gestaltung von Seitenräumen interpretiert.

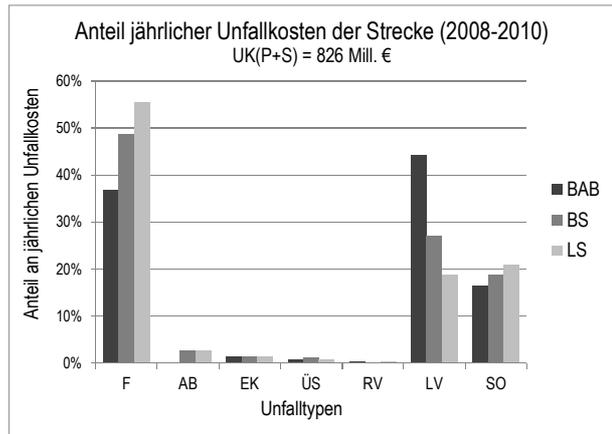
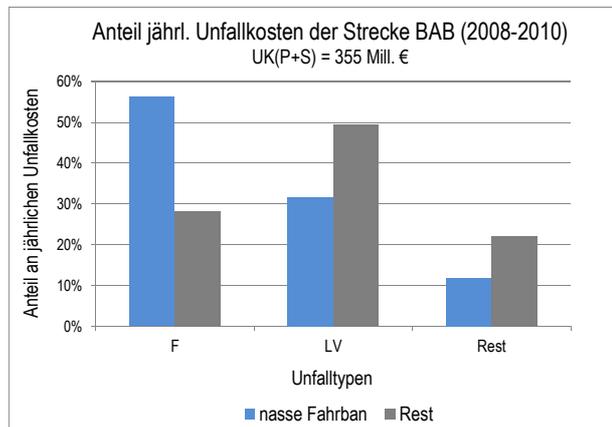


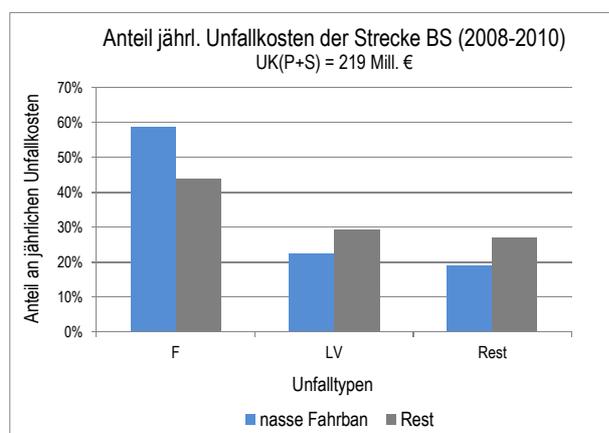
Bild 106: Anteile jährlicher Unfallkosten von Streckenunfällen an den Unfalltypen auf BAB, BS und LS im Land A

Im Bild 107 sind die Unfallkostenanteile der maßgebenden Unfalltypen auf BAB nach dem Straßenbenutzungsstatus differenziert dargestellt. Der nassen Fahrbahn wird eine hohe Relevanz für, durch eine ungenügende Griffbarkeit beeinflusste, Unfälle attestiert. Bei nasser Fahrbahn ergibt sich eine deutliche Verschiebung hin zu den Fahrurfällen, deren Anteil verdoppelt sich fast im Vergleich zur Verteilung der Unfalltypen auf trockener Fahrbahn (Rest). Im Vergleich mit der Verteilung über die Unfallzahlen in Bild 213 im Anhang wird deutlich, dass Fahrurfälle bei Nässe nicht schwerer (eher geringfügig leichter), sondern nur häufiger als Fahrurfälle bei trockener Fahrbahn sind. Längsverkehrsunfälle sind bei nasser Fahrbahn seltener und ebenfalls (geringfügig) leichter im Vergleich zur trockenen Fahrbahn.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auf Bundesstraßen (siehe Bild 108), wobei die Verschiebung zwischen den Unfalltypen geringer ausfällt. Allerdings ist der Anteil der Fahrurfälle schon bei trockener Fahrbahn dominierend. Auf Landstraßen dominieren die Fahrurfälle noch stärker das Unfallgeschehen, dementsprechend fällt die Verschiebung noch etwas kleiner als auf Bundesstraßen aus. Weitere Diagramme hierzu befinden sich im Anhang.

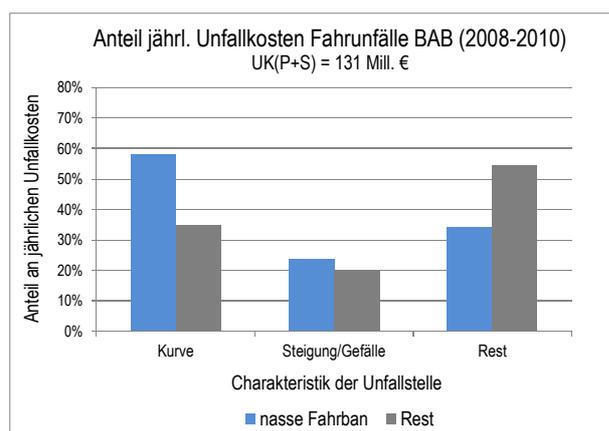


**Bild 107:** Anteile jährlicher Unfallkosten der Strecken an den Unfalltypen differenziert nach Straßenzustand auf BAB im Land A



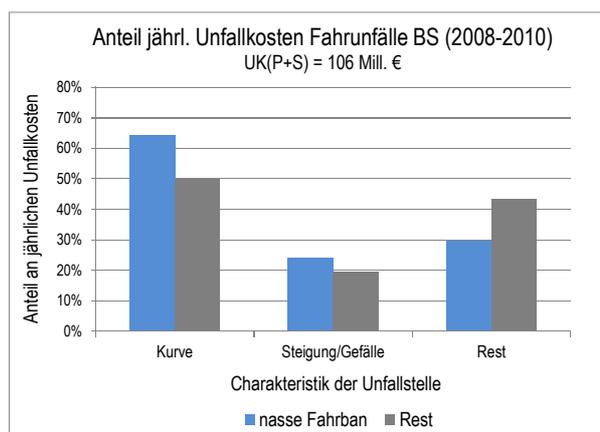
**Bild 108:** Anteile jährlicher Unfallkosten der Strecken an den Unfalltypen differenziert nach Straßenzustand auf BS im Land A

Im Bild 109 sind die Anteile der Unfallkosten für Fahrnfälle auf BAB im Land A differenziert nach dem Straßenzustand dargestellt. Es gilt zu beachten, dass Unfälle sowohl das Attribut Kurve als auch Steigung aufweisen können. Die Anteile können sich somit zu mehr als 100 % addieren. Bei nasser Fahrbahn ergibt sich eine deutliche Verschiebung zum Unfallgeschehen in der Kurve sowie eine leichte Verschiebung zum Unfallgeschehen bei Steigung / Gefälle. Dies wird indirekt bestätigt durch die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse, da die Griffbarkeit sich überdurchschnittlich stark in Kurven auf das Unfallgeschehen auswirkt.



**Bild 109:** Anteile jährlicher Unfallkosten der Strecken an der Charakteristik der Unfallstelle differenziert nach Straßenzustand auf BAB im Land A

Für Bundes- und Landesstraßen ergibt sich ein ähnliches Bild wie auf BAB (siehe Bild 110 und Bild 215 im Anhang). Allerdings fallen die Verschiebungen zu Kurvenunfällen weniger stark und die zu Unfällen bei Steigung/Gefälle etwas stärker aus. Generell dominieren aber die Streckenunfälle in Kurven auf Bundes- und Landesstraßen das Unfallgeschehen.



**Bild 110:** Anteile jährlicher Unfallkosten der Strecken an der Charakteristik der Unfallstelle differenziert nach Straßenzustand auf BS im Land A

Eine ähnliche Auswertung der Charakteristik der Unfallstelle nur für Längsverkehrsunfälle findet sich im Anhang (siehe Bild 216 und Bild 217). Im Unterschied zu den Fahrnfällen findet hier kaum eine Verschiebung bei Nässe statt. Es sind nur (geringfügig) höhere Anteile bei Kurven und Steigung / Gefälle erkennbar.

Im Anhang sind die Verteilungen nach den wesentlichen Verkehrsbeteiligungen an Fahr- und Längsverkehrsunfällen differenziert nach dem Straßenzustand dargestellt (siehe Bild 218, Bild 219, Bild 220 und Bild 221). Daraus wird deutlich, dass bei Nässe eine Verschiebung von Lieferwagen, leichten und schweren Lkw sowie den Motorrädern hin zu den Pkw erfolgt. Der Anteil an Unfällen mit Motorradbeteiligung geht besonders stark zurück, was als eine Folge des geringeren Verkehrsaufkommens bei schlechtem Wetter interpretiert wird. Die Verschiebungen bei leichtem und schwerem Schwerverkehr werden auf die geringeren Geschwindigkeiten dieser Verkehrsmittel zurückgeführt. Niedrigen Geschwindigkeiten wird eine geringere Relevanz für durch ungenügende Griffbarkeit beeinflusste Unfälle attestiert.

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus den deskriptiven Unfallauswertungen zusammenfassen:

- Rund drei Viertel des Unfallgeschehens auf Außerortsstraßen werden im Rahmen der folgenden Analysen berücksichtigt.
- Streckenunfälle auf Außerortsstraßen werden durch Fahr- und Längsverkehrsunfälle dominiert.
- Ein nasser Straßenzustand wirkt sich überdurchschnittlich stark auf Fahrnfälle, Unfälle in Kurven sowie auf Unfälle mit Pkw-Beteiligung aus.
- Geschwindigkeit und Trassierung werden somit als wesentliche Einflussfaktoren des Unfallgeschehens bei Nässe eingeordnet, wel-

ches potenziell auch von der Griffigkeit (z. T. auch Spurrinnentiefe) abhängig ist.

- Auffälligkeiten im Unfallgeschehen bei Nässe (z. B. höhere Anteil bestimmter Unfallsprägungen im Vergleich zu trockenen Fahrbahn) resultieren vorrangig aus einer erhöhten Häufigkeit und nicht aus einer erhöhten Unfallschwere.
- Das zentrale Unfallkollektiv dieser Untersuchung (Fahr- und Längsverkehrsunfälle bei Nässe) stellt rund 25 % aller Unfälle bzw. rund 15 % aller Unfallkosten des Unfallgeschehens der Strecke dar.

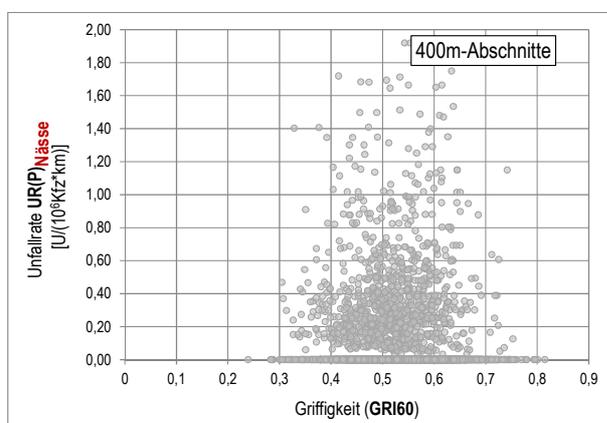
## 6.2 Unfallmodelle

### 6.2.1 Pilotanalysen

#### Methodenvergleich

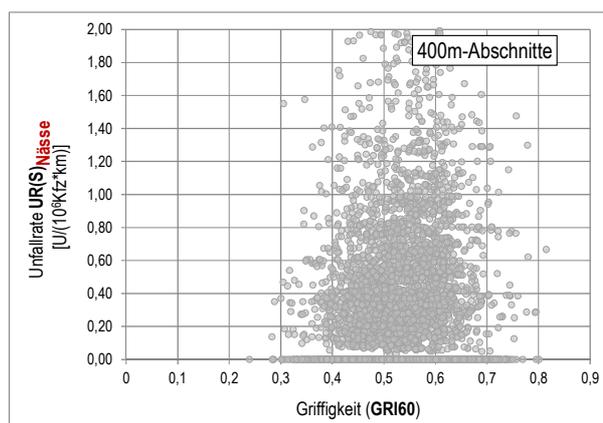
##### Monokriterielle Analysen

In den folgenden Abbildung (Bild 111 und Bild 112) sind die Unfallraten der einzelnen Abschnitte über der Griffigkeit aufgetragen. Weder für Unfälle mit Personenschaden noch mit ausschließlich Sachschaden ist ein Zusammenhang nachweisbar, auch wenn eine leichte Tendenz zu mehr Unfällen mit Personenschaden bei geringerer Griffigkeit erkennbar ist.



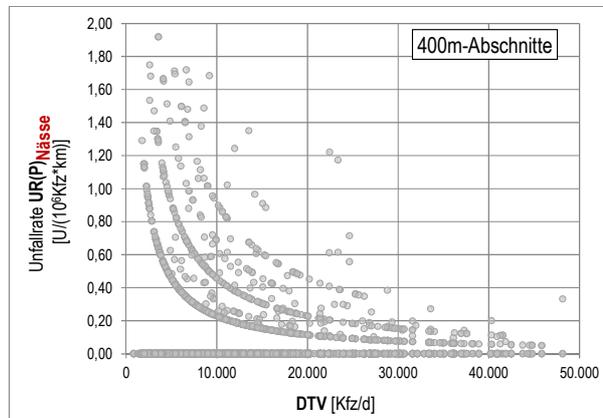
**Bild 111:** Unfallraten U(P) für Unfälle bei Nässe in Abhängigkeit der Griffigkeit (400 m-Abschnitte)

Exemplarisch dafür sollen die Streudiagramme zwischen der Griffigkeit und den Unfallraten der Nässeunfälle mit Personenschaden dargestellt werden. In Bild 112 wird deutlich, dass kein Zusammenhang nachweisbar ist. Eine Vielzahl an Abschnitten weist keine Nässeunfälle auf (Punkte auf x-Achse). Es wird vermutet, dass diese Abschnitte das Ergebnis verzerren, d. h. Abschnitte ohne Nässeunfälle nivellieren potenzielle Zusammenhänge zwischen Griffigkeit und Nässeunfällen bei Abschnitten mit mindestens einem Nässeunfall. Allerdings kann auch bei einer höheren Aggregationsstufe (Eben Netzknodenabschnitte) mit einem geringeren Anteil an Abschnitten ohne Nässeunfälle keine Zusammenhang festgestellt werden (siehe hierzu Bild 222).



**Bild 112:** Unfallraten U(S) für Unfälle bei Nässe in Abhängigkeit der Griffigkeit (400 m-Abschnitte)

Zusätzlich wurde nach weiteren Ursachen für dieses Ergebnis gesucht. Die starken Streuungen in den Diagrammen lassen sich grundsätzlich auf andere Einflüsse als den Zustand zurückführen. Hier sind mit hoher Wahrscheinlichkeit maßgeblich Einflüsse der Gestaltung und des Betriebs der Straße verantwortlich. Ein wesentliches Problem stellt aber auch der nicht-lineare Zusammenhang des DTV (als maßgebende Einflussgröße des Unfallgeschehens) mit der Unfallhäufigkeit dar. Deutlich wird dies an dem Streudiagramm in Bild 113.



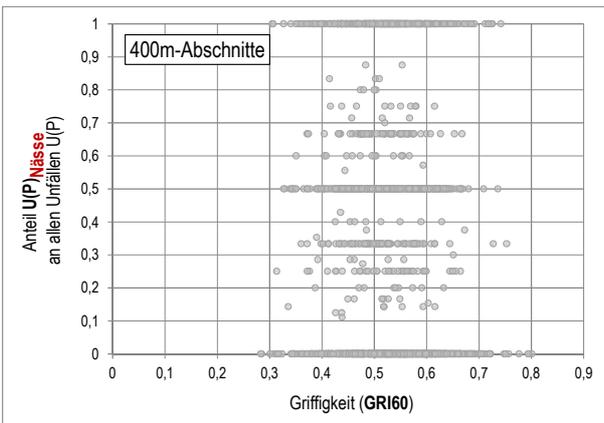
**Bild 113:** Unfallraten U(P) für Unfälle bei Nässe in Abhängigkeit des DTV

Für die Verwendung von Unfallraten muss ein linearer Zusammenhang zwischen Unfallhäufigkeit und DTV bzw. eine Gleichverteilung der Unfallraten über den DTV vorliegen. Dies ist offensichtlich nicht der Fall, es deutet sich ein nicht-linearer Zusammenhang an, welcher die Aussagefähigkeit von Unfallraten und damit deren Verwendung erheblich einschränkt.

Um den DTV-Einfluss zu minimieren wurden nur Abschnitte innerhalb der am stärksten besetzten DTV-Klasse von 7.500 bis 12.500 Fahrzeuge anhand von Unfallraten und Unfalldichten analysiert. Die Auswertungen dazu finden sich im Anhang (Bild 223). Aber auch bei dieser Einschränkung

bleibt das Ergebnis unverändert, d. h. es kann mit der monokriteriellen Analyse kein Zusammenhang zwischen den Unfallkenngrößen Unfallrate bzw. Unfalldichte bei Nässe und der Griffigkeit nachgewiesen werden.

Eine andere Möglichkeit zur Überprüfung des Griffigkeitseinflusses unabhängig vom DTV stellt der Anteil der Nässeunfälle an allen Unfällen dar (Bild 114). Aber auch hierfür kann kein Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallgeschehen nachgewiesen werden.

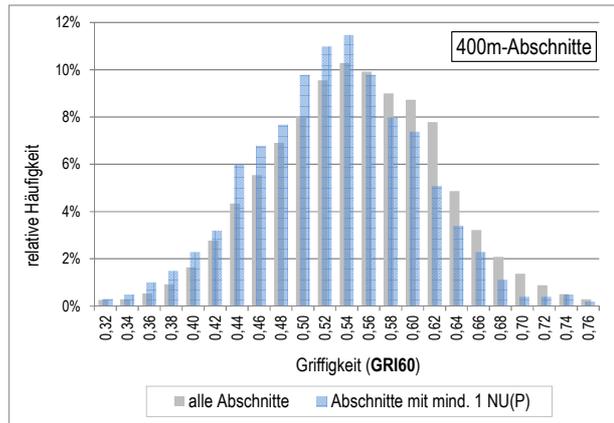


**Bild 114:** Anteil der U(P) für Unfälle bei Nässe an allen Unfällen U(P) in Abhängigkeit der Griffigkeit

Es wurde deutlich, dass einfache monokriterielle Analysen anhand von Unfallkenngrößen wie der Unfallrate zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen führen bzw. der in der Literatur häufig gefundene Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Nässeunfällen nicht nachweisbar ist. Nachteil dieser Methode ist die Voraussetzung des linearen Zusammenhangs zwischen DTV und Unfallhäufigkeit sowie die Schwierigkeit weitere Einflussmerkmale der Infrastruktur innerhalb der Analyse zu kontrollieren bzw. zu berücksichtigen.

Verteilungsvergleich

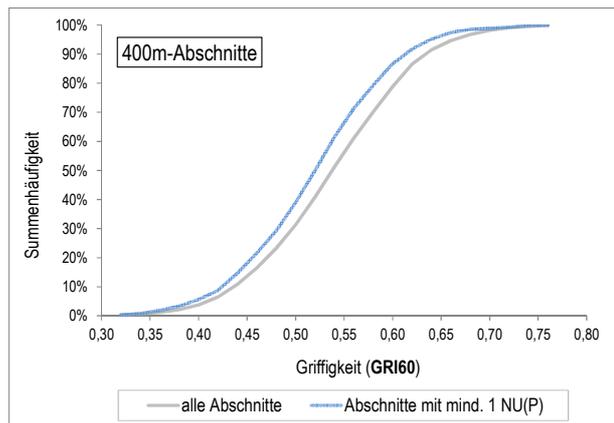
Für die Verteilungsvergleiche werden immer paarweise, unterschiedliche Kollektive von 400 m - Abschnitten hinsichtlich ihrer mengenmäßigen Verteilung über die Griffigkeit miteinander verglichen. Hierfür werden sowohl die relativen Häufigkeiten als auch die Summenhäufigkeiten herangezogen.



**Bild 115:** relative Häufigkeiten alle Abschnitte vs. Abschnitte mit mind. 1 NU(P)

Es wurden folgende Analysen durchgeführt:

- alle Abschnitte vs. Abschnitte mit mindestens 1 U(P) bei Nässe (Bild 115 und Bild 116)
- alle Abschnitte vs. Abschnitte mit mindestens 1 U(S) bei Nässe (Bild 224 im Anhang)
- Abschnitte mit einem DTV kleiner 7.500 Kfz/d vs. Abschnitte mit einem DTV größer 12.500 Kfz/d (Bild 225 im Anhang)
- Abschnitte mit mindestens 1 U(P) vs. Abschnitte mit mindestens 1 U(P) bei Nässe (Bild 226 im Anhang)
- Abschnitte mit mindestens 1 Fahrnfall FU(P) vs. Abschnitte mit mindestens 1 Fahrnfall NFU(P) bei Nässe (Bild 227 im Anhang)



**Bild 116:** Summenhäufigkeiten alle Abschnitte vs. Abschnitte mit mind. 1 NU(P)

Grundsätzlich zeigen sich Unterschiede in den Verteilungen zwischen allen Unfällen und Unfällen bei Nässe in den Diagrammen der Verteilungsvergleiche. Dies deutet auf einen Einfluss der Griffigkeit auf die Nässeunfälle hin, da Abschnitte mit geringer Griffigkeit einen höheren Anteil an Nässeunfällen im Vergleich zu allen Unfällen aufweisen. Das bedeutet, auf Abschnitten mit geringer Griffigkeit ist die Wahrscheinlichkeit für Nässeun-

fälle erhöht im Vergleich zur Betrachtung von allen Unfällen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Griffigkeit auch mit dem DTV korreliert. Abschnitte mit einem DTV > 12.500 Kfz/d weisen tendenziell geringere Griffigkeiten auf (siehe Bild 225 im Anhang). Damit sind den Verteilungsvergleichen gewisse Grenzen gesetzt, da der DTV sowie weitere Infrastruktureigenschaften nicht gleichzeitig kontrolliert werden. Es kann sein, dass die Verschiebung der Kollektive mit Nässeunfällen (ggf. nur zum Teil) einfach die Folge eines höheren DTV oder einer veränderten Zusammensetzung hinsichtlich z. B. bestimmter Trassierungsmerkmale ist.

Dies kann etwas mit dem Ausschluss von Abschnitten ohne Unfälle mit Personenschaden abgemildert werden (Bild 226 und Bild 227). Dann verringert sich auch der Unterschied zwischen den Verteilungen.

Es wurde deutlich, dass sich – vor allem für Unfälle mit Personenschaden – ein Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallhäufigkeit bei Nässe andeutet. Eine abschließende Beurteilung mit Einbezug mehrere potenzieller Einflussparameter ist aber mit dieser Methodik nur bedingt möglich, ebenso wie die Quantifizierung des Griffigkeitseinflusses.

Diese Methodik eignet sich aber für die Anpassung potenzieller Grenzwert an die praktischen Belange des Erhaltungsmanagements. Beispielsweise können für unterschiedliche Grenzwerte der Zustandsindikatoren der zu „sanierende“ Anteil des Straßennetzes bzw. der Netzlänge bestimmt werden.

#### Multikriterielle Unfallmodelle

Es wurden beispielhaft vier Teilmodelle auf Bundesstraßen im Land A für den Unfalltyp „Fahrerunfall“ berechnet. In Tab. 10 sind die Regressionskoeffizienten sowie die p-Werte (geben Aussage zum Signifikanzniveau) für die Unfallmodelle dargestellt. Es wurde von den Zustandsparametern ausschließlich die Griffigkeit berücksichtigt. In Tab. 10 sind diejenigen Einflussgrößen dargestellt, die in der Modellrechnung berücksichtigt und für die eine Signifikanz nachgewiesen werden konnte (5%-Niveau). Es wird deutlich, dass nur für die Fahrerunfälle bei Nässe ein Griffigkeitseinfluss nachweisbar ist (Regressionskoeffizienten von -2,6 und -1,8 in Tab. 10). Ein zahlenmäßiger Vergleich der Regressionskoeffizienten zwischen den Variablen ist nicht möglich.

400m-Abschnitte	NFU(P)	NFU(S)	TrFU(P)	TrFU(S)
n	672	1526	1067	2304
k	-2,50 **	-8,51 ***	-5,15 ***	-8,31 ***
Länge	(1)	(1)	(1)	(1)
DTV	0,14 *	0,82 ***	0,34 ***	0,77 ***
Kurvigkeits- äquivalent $\emptyset$	0,05 ***	0,05 ***	0,04 ***	0,03 ***
LNKat2 (>4%)		0,38 **		0,28 ***
GriMw	-2,60 ***	-1,80 ***		

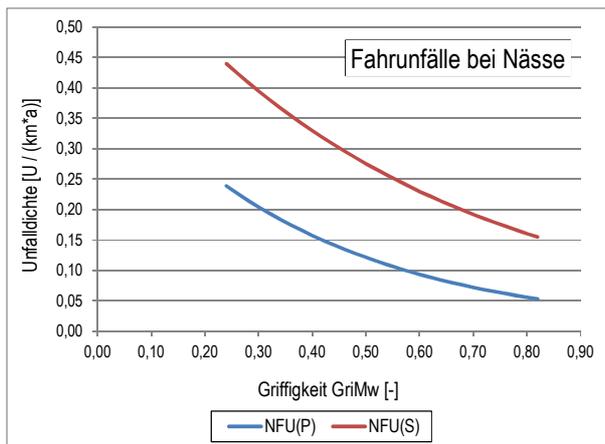
\*\*\* p < 0,001 / \*\* p < 0,01 / \* p < 0,05

**Tab. 10: signifikante** Regressionskoeffizienten der Teilmodelle für 400 m - Abschnitte auf Bundesstraßen im Land A

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass anhand des Kurvigkeitsäquivalents keine Bewertung der Aufeinanderfolge von Entwurfselementen bewertet werden kann (siehe auch Kapitel 5.2.2).

Für die Fahrerunfälle bei Nässe (Spalte 2 und 3 in Tab. 10) sind weiter unten die Modellformeln sowie grafisch der Griffigkeitseinfluss in Bild 117 dargestellt. Aufgrund des multikriteriellen Modells gelten die grafischen Darstellungen für bestimmte Randbedingungen, welche neben den Diagrammen aufgeführt sind. Für bspw. einen anderen DTV würden andere Unfallniveaus gelten, welche aber ebenfalls aus den Modellen berechnet werden können.

<b>NFU(P)</b>	[U/a]
$U = e^{-2,5 \times L \times DTV^{0,14}} \times e^{0,05 \times KU^* - 2,60 \times GriMw}$	
<b>NFU(S)</b>	[U/a]
$U = e^{-2,5 \times L \times DTV^{0,14}} \times e^{0,05 \times KU^* + 0,38 \times LNKat2 - 2,60 \times GriMw}$	
<i>U</i>	Anzahl Unfälle pro Jahr
<i>L</i>	Abschnittslänge [km]
<i>DTV</i>	Verkehrsstärke [Kfz/d]
<i>KU*</i>	mittleres Kurvigkeitsäquivalent [gon/100 m]
<i>LNKat2</i>	Längsneigung: 1 wenn LN >4%
<i>GriMw</i>	Griffigkeit [-]



**Bild 117:** Darstellung der Modellzusammenhänge zwischen Griffigkeit und Unfällen je Kilometer und Jahr (gilt jeweils für DTV = 11.000 [Fz/d] und einer mittlere Kurvigkeitäquivalent  $KU^* = 8,45$  [gon/100 m]; Längsneigung < 4%)

Aus der grafischen Darstellung wird deutlich, wie anhand der Unfallmodelle ein quantifizierbarer Einfluss der Griffigkeit auf das Unfallgeschehen abgeleitet werden kann.

Die gleichzeitige Berücksichtigung mehrere Einflussgrößen, die Überprüfung der Signifikanz einzelner Modellparameter aber auch die Berücksichtigung von nicht-linearen Zusammenhängen (wie z. B. zwischen DTV und Unfallhäufigkeit) sind wesentliche Vorteile dieser Methode gegenüber den monokausalen Analysen sowie der Vergleichsvergleiche. Aus diesem Grund soll diese Methode weiter angewendet werden.

### Netzeinteilung

Die Ergebnisse der Unfallmodelle inklusive der Kriterien zur Beurteilung deren Anpassungsgüte finden sich für die Straßenklassen Bundesautobahn, Bundesstraße und Landesstraße im Land A in Tab. 29, Tab. 30 und Tab. 31 im Anhang. Folgende Schlussfolgerungen lassen sich daraus ableiten:

- Der **Verteilungsparameter** als Kriterium der Anpassungsgüte für das gesamte Modell nähert sich dem Wert Eins an, je größer die Aggregationsstufe ist. Je länger die Abschnitte sind, umso weniger Varianz und vor allem umso weniger Abschnitte ohne Unfälle treten auf. Dementsprechend gelingt auch mit den wenigen Einflussparametern eine vergleichsweise gute Anpassung bzw. höhere Aussagefähigkeit. Dies ist auch der Grund, warum im ESN-Verfahren eher längere Abschnitte angestrebt werden.
- Der **erklärte Varianzanteil für GriMw** ist am höchsten bei kürzeren Abschnittslängen. Dies verdeutlicht, dass Defizite der Griffigkeit vor allem lokal begrenzt auftauchen. Die Ausnahme bilden Landesstraßen, welche für alle Ab-

schnittslängen ähnliche Werte aufweisen. Für Autobahnen lässt sich nur bedingt eine gute Anpassung für die Griffigkeit an das Modell der Fahrerunfälle bei Nässe erreichen. Die Anpassungsgüte verschlechtert sich dort bei Hinzunahme der Griffigkeit.

- Die **Veränderung des AIC für GriMw** ist bei den kürzeren Abschnitten am größten, wobei die Unterschiede zwischen 200 m- und 400 m-Abschnitten eher klein sind.

Insgesamt zeigt sich kein einheitliches Bild. Während längere Abschnitte sich hinsichtlich Expositionsgrößen und Infrastrukturmerkmalen besser modellieren lassen, sind kürzere Abschnitte eher geeignet für die Abbildung der Griffigkeit. Auch wenn 200 m- und 400 m - Abschnitte dort vergleichsweise ähnlich abschneiden, zeigen sich Vorteile für die 400 m-Abschnitte bei der Modellierung des Griffigkeitseinflusses auf Unfälle mit Personenschaden. Aus diesen Grund sowie der Feststellung unterschiedlich gerichteter Tendenzen (Zustand vs. Exposition/Infrastruktur) wird die mittlere Aggregationsstufe mit Abschnittslängen von 400 m (Bunders- und Landesstraßen) bzw. 500 m (Bundesautobahnen) für die weiteren Analysen gewählt.

Diese Abschnittslängen liegen weit unter den aktuell diskutierten Mindestlängen von 2 km für ESN-Abschnitte auf Außerortsstraßen. Hier muss aber folgendes berücksichtigt werden:

- Im Rahmen der ESN erfolgt die Bewertung auf Basis eines Einzelabschnitts, d. h. dieser muss möglichst lang sein, um eine aussagefähige Bewertung zu ermöglichen.
- Im Rahmen der Modellierung erfolgt die Bewertung auf Basis einer Vielzahl von Abschnitten einer ähnlichen Charakteristik. Es sind daher nicht ganz so lange Abschnittslängen notwendig.

Die Modellierung von Trassierungseigenschaften ist nur bedingt anhand der Abschnittslängen von z. B. 400 m möglich, dies ist aber auch nicht vorrangiges Ziel dieser Untersuchung.

### 6.2.2 Unfallmodelle

Im ersten Schritt wurde für jedes Teilnetz, jede Straßenklasse sowie jede Unfallstichprobe ein Unfallmodell abgeleitet. Insgesamt wurden so anhand von über 230 Unfallmodellen die Zusammenhänge zwischen Verkehrs-, ZEB- und Unfalldaten beschrieben. Die Unfallmodelle sind den Tab. 32 bis Tab. 38 des Anhangs dokumentiert. Die Unfallmodelle beschreiben nur das Ergebnis der Regressionsanalyse, erst durch die Interpretation können mögliche Kausalzusammenhänge herausgearbeitet werden. Es wird an dieser Stelle bewusst darauf verzichtet, einzelne Ergebnisse

grafisch aufzubereiten, um diesen Ergebnissen eine nicht zu hohe Bedeutung beizumessen. Aussagekräftiger sind die Ergebnisse im Rahmen der Verfahrensentwicklung Zustandspotenzial in Kapitel 7.1.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sind folgende Sachverhalte zu berücksichtigen:

- Vor der Erstellung des Unfallmodells wurden Korrelationsanalysen zwischen den untersuchten Variablen durchgeführt. Ergab sich ein Korrelationskoeffizient von größer 0,5 (Spearman's Rho), wurden beide Variablen nicht gemeinsam im Modell berücksichtigt (Grund: Bei einer großen Korrelation bzw. hohen Interdependenzen können die Ergebnisse - d. h. Regressionskoeffizienten und Signifikanzen - z. T. stark verzerrt werden). Nennenswerte Korrelationen bestehen für manche Straßenklassen zwischen:
  - Anzahl an Fahrstreifen (↑) und DTV (↑)
  - DTV (↑) und Griffigkeit (↑) mit mäßigen Korrelationen
  - DTV (↓) und AUN (↑) mit mäßigen Korrelationen auf Bundes- und Landesstraßen
  - AUN (↑) und KvkMw (↑) sowie LNKat (↑) mit mäßigen Korrelationen auf Bundes- und Landesstraßen
  - MSPT (↑) und MSPH (↑) mit sehr starken Korrelationen
  - MSPH (↑) und Griffigkeit (↓) mit mäßigen Korrelationen
  - QNWKat (↑) und ESZKat (↑) mit eher leichten Korrelationen
  - ESZKat (↓) und KvkMw (↑) mit leichten Korrelation auf Bundes- und Landesstraßen sowie mäßigen Korrelationen auf BAB
  - QNWKat (↑) und KvkMw (↑) auf Bundes- und Landesstraßen
- Erwähnenswert ist vor allem die Korrelation (0,3 - 0,5) zwischen DTV und Griffigkeit. Bei höherem DTV treten tendenziell niedrigere Griffigkeitswerte auf. Beide Größen müssen aufgrund der Ausrichtung des Projektes zusammen im Modell analysiert werden. Es ist bei der Interpretation zu berücksichtigen, dass beide sich hinsichtlich der Höhe ihrer Regressionskoeffizienten beeinflussen können.
- Bei sehr kleinen Unfallstichproben (häufig bei den Motoradunfällen bei Nässe) sowie bei sehr geringen Ausprägungen einzelner Variablen (z. B. Abschnitte mit 4 Fahrstreifen im Landesstraßennetz) werden keine Modelle gerechnet.
- Aufgrund der umfangreichen Datengrundlage (teilweise an die 20.000 Fälle / Abschnitte in einem Modell berücksichtigt) weisen schon sehr geringe bzw. schwache Zusammenhänge eine hohe Signifikanz auf. Der Grund dafür liegt in der Berechnung des

Signifikanzniveaus, in das die Stichprobengröße mit eingeht. Damit ist auch eine Signifikanzniveaus von  $> 0,001$  („\*\*\*\*“) nur als ein mäßiger bis schwacher Zusammenhang einzuschätzen.

- Vorerst wurden nur Mittelwerte der Zustandsindikatoren berücksichtigt. Ein Grund sind hier Aufwandsbeschränkungen und Gründe der Übersichtlichkeit. Für eine kleinere Stichprobe werden an anderer Stelle auch noch zusätzliche detaillierte Kenngrößen des Zustandes analysiert und diskutiert (Kapitel 6.2.3 Sensitivitätsanalysen).
- Für die Interpretation der Ergebnisse des Griffigkeitseinflusses sollten immer die Nässe- und Trockenunfälle im Vergleich betrachtet werden. Nach physikalischen Gesichtspunkten kann ein potenzieller Einfluss der Griffigkeit auf den Bremsweg/Haftung nur bei nasser Fahrbahn festgestellt werden. Ähnliches gilt für die fiktive Wassertiefe (MSPH), mit der Einschränkung, dass Spurrinnen auch bei trockenem Wetter zu sehen sein können und sich damit auf das Fahrverhalten auswirken könnten.

Aufgrund der Ausrichtung des Projektes auf Zustandsparameter und der umfangreichen Datengrundlage konnten nur bereits flächendeckend zur Verfügung stehende Infrastrukturparameter berücksichtigt werden. Diese stellen neben weiteren Parametern wie Ausstattungsmerkmalen, Entwurfsparametern in Lage- und Höhenplan sowie Hindernissen im Seitenraum nur einen kleinen Teil der relevanten Einflussgrößen der Infrastruktur dar (siehe z. B. Maier et al. 2013). Damit ist die Aussagefähigkeit der Ergebnisse (vor allem) zur Infrastruktur teilweise eingeschränkt.

Für den Sicherheitseinfluss der Griffigkeit besitzt mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Geschwindigkeit einen Einfluss. Die Griffigkeit in Kombination mit der freien Geschwindigkeit sind die zentralen Einflussparameter (aus physikalischer Sicht) auf die Länge des Bremsweges oder den Kraftschluss bei Kurvenfahrt und damit indirekt auf das Unfallgeschehen. Flächendeckende tatsächliche Geschwindigkeitsniveaus stehen nicht zur Verfügung. Allerdings ist die Geschwindigkeit auch eine Folge der Linienführung und des Querschnitts (siehe bspw. Ebersbach 2006). Damit ist es für die Analyse von Zusammenhängen zielführender die (ursächlichen) Einflussgrößen der Infrastruktur als das daraus folgende Geschwindigkeitsverhalten in den Modellen zu berücksichtigen. Wird dies nicht berücksichtigt, können sich physikalische nicht begründbare Ergebnisse ergeben. Eine Beispiel hierfür sind der Rückgang der Unfallzahlen bei höheren Geschwindigkeiten, welcher sich aber aus den grundsätzlich anderen Straßencharakteristiken bei höheren Tempolimits ergibt. Ähnliches gilt für

zulässige Höchstgeschwindigkeiten. Laut Maier et al. (2013) kann nur ein indirekter Einfluss auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit unterstellt werden. So werden vor allem dann niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeiten angeordnet, wenn ein Abschnitt unfallauffällig geworden ist (ohne Hinweis auf eine Überschreitung des Tempolimits) oder ein erhöhtes Risiko attestiert wird (z. B. enge Kurve). Eine Ausnahme stellen hier sicherlich die Abschnitte mit Geschwindigkeitsüberwachung dar (siehe u. a. bei Jährig 2012), welche aber in der Fläche nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Geschwindigkeit wird somit – mit Einschränkungen (siehe Kapitel 5.2.2) – ansatzweise über das Kurvigkeitsäquivalent berücksichtigt. Fahrbahnbreiten standen leider nicht zur Verfügung, deren Einfluss auf Geschwindigkeit und Verkehrssicherheit kann somit nicht untersucht werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse differenziert nach den Variablengruppen dokumentiert sowie kurz zusammengefasst:

### Verkehrsaufkommen Kfz

Der Zusammenhang zwischen DTV und dem Unfallgeschehen ist in den meisten Fällen nicht-linear (verschieden von 1). Dies unterstreicht nochmals die Probleme bei der Anwendung und Interpretation von Unfallraten, welche diesen linearen Zusammenhang voraussetzen. Tendenziell wird in den meisten Fällen ein degressiver Zusammenhang zwischen DTV und Unfallgeschehen festgestellt (Regressionskoeffizient  $< 1$ ), d. h. mit steigendem DTV wird der Anstieg in den Unfallzahlen geringer. Dies kann gut mit den Fahr- und Längsverkehrsunfällen erklärt werden. Vor allem bei Fahrnfällen ist diese Tendenz stark ausgeprägt. Bei einem Fahrnfall geht der Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug ohne Mitwirkung anderer Verkehrsteilnehmer einer möglichen Kollision voraus. Das bedingt auch eine eher geringe Verkehrsdichte mit der Möglichkeit die eigene Wunschgeschwindigkeit fahren zu können. Diese Situation besteht häufiger auf gering belasteten Straßen. Hieraus resultiert dann auch der degressive Zusammenhang mit dem DTV, weil auf höher belasteten Straßen der Anteil der Fahrnfälle meist geringer ist (siehe hierzu auch Kapitel 5.5 in Schüller 2010). Im Gegensatz dazu bedarf es für Längsverkehrsunfälle immer mindestens zwei Konfliktpartner, deren Wahrscheinlichkeit aufeinander zu treffen mit steigendem DTV überproportional ansteigt. Daher werden bei den Längsverkehrsunfällen vereinzelt auch Regressionskoeffizienten von größer Eins festgestellt.

Ein weiterer Grund für die stark degressiven Zusammenhänge der Unfälle mit dem DTV ist die gleichzeitige Berücksichtigung der Griffigkeit. Bei

de Einflussvariablen weisen eine negative Korrelation auf. Das führt in den Modellen dazu, dass der Zusammenhang bzw. die Höhe des einen Regressionskoeffizienten durch Hinzunahme der jeweils anderen Variablen abgeschwächt wird, was bei dem Modellaufbau festgestellt wurde. Hierzu können zwei Hypothesen formuliert werden:

- Der Einfluss der Griffigkeit wird bei Analysen ohne deren Berücksichtigung stellvertretend über den DTV abgebildet. Bei Hinzunahme der Griffigkeit wird durch beide Variablen jeweils nur der von ihnen hervorgerufene Effekt abgebildet.
- Die Griffigkeit besitzt keinen Einfluss. Bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Griffigkeit und DTV wird ein Teil des DTV-Einflusses fälschlicherweise von der Griffigkeit abgebildet.

Welche dieser beiden Hypothesen zutrifft und in welchem Maße, kann anhand des hier verwendeten „Versuchsaufbaus“ (Mit-Ohne-Vergleich) nicht abschließend geklärt werden. Vorher-Nachher-Analysen wären u. U. zielführender, mit den vorliegenden Daten war dies aber aktuell nicht möglich.

Das Unfallgeschehen mit Motorädern lässt sich nur bedingt über den DTV der KFZ abbilden.

### Infrastruktur

Es wurden die Variablen:

- Anzahl Fahrstreifen  $n = 3$  und  $n > 3$  (3 oder 4 Fahrstreifen je Fahrbahn (BAB) bzw. je Querschnitt (BS und LS)),
- Längsneigung  $> 4\%$  (100 m-Maximalwert im 400 m / 500 m-Abschnitt) und
- Kurvigkeit (Mittelwert über 400 m)

analysiert. Bei einer detaillierteren Einteilung der Längsneigung ergeben sich nur für die Kategorie 4-6 % signifikante Ergebnisse. Dies wird auf die im Vergleich geringe Besetzung der Kollektive mit noch höheren Längsneigungen zurückgeführt. Aus diesem Grund wurden alle Längsneigungen oberhalb von 4 % zu einer Gruppe zusammengefasst.

Die Ergebnisse zum Einfluss der Fahrstreifen- oder Fahrbahnanzahl sind nur bedingt aussagekräftig, da beide Parameter vergleichsweise stark mit dem DTV korrelieren. Häufig wurden sie daher aus der Analyse ausgeschlossen, wenn bei Hinzunahme der Regressionskoeffizient des DTV stark reagiert hat. Eine Ausnahme stellt Land A dar, mit teilweise nur mäßigen Korrelation zwischen Anzahl Fahrstreifen und DTV sowie dem größten Anteil an Straßen mit mehr als 2 Fahrstreifen (siehe Tab. 23). Auf Autobahnen zeigte sich für Land A bei 3 statt 2 Fahrstreifen je Fahrtrichtung ein leicht erhöhtes Sicherheitsniveau, d. h. weniger Unfälle mit Personen- und Sachschaden.

Auf Bundesstraßen zeigt sich eine Tendenz, dass bei 3 oder 4 Fahrstreifen je Fahrbahn das Sicherheitsniveau erhöht ist. Mögliche Ursache für diesen Effekt sind die bei diesen Querschnitten häufiger verwendeten baulichen Gegenverkehrstrennungen sowie das gesicherte Überholen durch einen Überholfahrstreifen (wird auch in Maier et al. 2013 anhand niedrigerer Grundunfallkostenraten deutlich).

Auf Landestraßen sind die Kollektive für Abschnitte mit mehr als 2 Fahrstreifen zu klein. Aufgrund der mit der geringen Fallzahl einhergehenden eingeschränkten Aussagekraft, werden diesbezüglich auch signifikante Ergebnisse nicht berücksichtigt.

Eine erhöhte Längsneigung verschlechtert häufig das Sicherheitsniveau auf BAB, dies ist unabhängig vom Straßenzustand. Für die BAB in Land A wurde der Einfluss differenziert nach Steigung und Gefälle analysiert (siehe Tab. 39). Der Einfluss (Verschlechterung Sicherheitsniveau) zeigt sich für Unfälle mit Personenschaden nur auf Gefällestrecken. Bei den Unfällen mit Sachschaden kann der Einfluss sowohl auf Gefälle- als auch Steigungstrecken festgestellt werden.

Auch auf den anderen untersuchten Straßenklassen steht eine höhere Längsneigung im Zusammenhang mit einem geringeren Sicherheitsniveau. Allerdings kann dieser nur für einzelne Unfallkollektive nachgewiesen werden.

Die Kurvigkeit steht nur auf Autobahnen im Land A in einem Zusammenhang mit dem Unfallgeschehen (senkt das Sicherheitsniveau). Dort vor allem mit den Nässeunfällen. In den anderen Bundesländern wird dies nicht festgestellt, daher sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten.

Die Kurvigkeit auf Bundes- und Landesstraßen zeigt vglw. eindeutige Ergebnisse über das gesamte Analysenetz hinweg. Die Kurvigkeit steht im Zusammenhang mit einem schlechteren Sicherheitsniveau. Das Kurvigkeitsäquivalent stellt keine direkte Beschreibung von Fehlern in der Relationstrassierung dar. Trotzdem kann bei einer hohen Kurvigkeit auf einem vglw. kurzen Abschnitt von 400 m davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit für Fehler in der Relationstrassierung und vor allem für die Unterschreitung des Mindestradius erhöht ist (z. B. gegenüber geraden Strecken). Für diese beiden Merkmale wurde bei Maier et al. (2013) ein negativer Einfluss auf die Verkehrssicherheit nachgewiesen. Aus diesem Grund wird das Kurvigkeitsäquivalent hier als stellvertretende Kenngröße für diese Merkmale interpretiert. Eine abschließende Bewertung der Relationstrassierung wird somit erst durch die getrennte Berücksichtigung von Radiengrößen und Bewertung Relationstrassierung möglich.

Das Kurvigkeitsäquivalent ist die maßgebliche Größe für die Erklärung des Motorradunfallgeschehens. Dahinter werden aber zwei Ursachen vermutet. Einerseits ist die Wahrscheinlichkeit für eine ungenügende Trassierung im Lageplan erhöht, was sich auch und vor allem auf die Motorradfahrer negativ auswirkt. Andererseits ziehen „kurvige“ Strecken viele Motorradfahrer an, vor allem auch diejenigen Fahrer, welche tendenziell „sportlich“ bzw. schnell fahren. Auch wenn der Anteil der Motorradfahrer schon im DTV enthalten ist, wird dieser durch das Kurvigkeitsäquivalent ggf. mit im Modell abgebildet.

### Zustandsindikatoren

Querneigungswechsel zeigen vor allem auf Autobahnen und bei Nässe (nicht oder kaum bei Trockenunfällen) einen negativen Zusammenhang mit dem Unfallgeschehen (schlechteres Sicherheitsniveau). Dieser Effekt ist aus der Praxis und der Forschung bekannt (siehe u. a. Lippold et al. 2013) und konnte entsprechend in den Modellen abgebildet werden. Es gilt allerdings zu berücksichtigen, dass an solchen Stellen (sofern sie unfallauffällig geworden sind) häufig auch abgesenkte zulässige Höchstgeschwindigkeiten angeordnet werden. Dies könnte auch der Grund dafür sein, dass häufiger und manchmal stärker die Unfälle mit Sachschaden auf die Querneigungswechsel im Modell reagieren. Auffällig ist, dass vor allem im Land A dieser Einfluss nachgewiesen wurde bzw. teilweise auch die entwässerungsschwachen Zonen (ESZ) auffällig sind. Ebenfalls nur im Land A wird auf BAB ein Einfluss der Kurvigkeit nachgewiesen, diese steht allerdings in mäßiger Korrelation zu ESZ. Es wird daher vermutet, dass zwar ein Einfluss von Querneigungswechseln bzw. entwässerungsschwachen Zonen vorhanden ist, dieser aber wesentlich schwächer ausfällt als in den BAB-Modellen von Land A dokumentiert.

Bei den anderen Straßenklassen ist der Einfluss des Querneigungswechsels sowie entwässerungsschwacher Zonen nur sehr selten nachweisbar. Hier wird ggf. schon ein Teil über die häufig signifikante Kurvigkeit stellvertretend im Modell abgebildet.

Ein Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallgeschehen kann auf Autobahnen in Land B und C nicht nachgewiesen werden. Im Gegenteil dazu stehen im Land A sowohl Fahr- als auch Längsverkehrsunfälle (vorrangig bei Nässe) im Zusammenhang mit der Griffigkeit. Eine mögliche Erklärung hierfür wäre die größere Streuung/Bandbreite an Griffigkeiten auf BAB im Land A im Vergleich zu Land B und C (siehe Bild 62). Das Ergebnis steht (mit Ausnahme Land A) im Einklang mit der Literatur. Auch dort wird für Autobahnen (z. B. Lindenmann 2006 für Schweizer Autobahnen) bzw. Stra-

Ben mit einem hohen Ausstattungsgrad und einer „großzügigen“ Trassierung häufig kein oder nur ein geringer Zusammenhang mit der Griffigkeit festgestellt.

Auf Bundesstraßen lässt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Griffigkeit und den Fahr- sowie Längsverkehrsunfällen bei Nässe nachweisen (alle Länder). In Land B ist der Zusammenhang stärker ausgeprägt als in Land A. Hierfür kommen vor allem zwei Ursachen in Frage:

- Land B weist eine schwächere Korrelation zwischen DTV und der Griffigkeit auf. Hierdurch wird ggf. der Effekt der Griffigkeit weniger stark durch den DTV überlagert bzw. im Modell verringert.
- Land B weist einen höheren Anteil an Unfällen mit schweren Personenschäden auf. Dies wird u. a. als Folge eines geringeren Verkehrsaufkommens und damit auch höheren Geschwindigkeiten interpretiert. Hohen Geschwindigkeiten wird vor allem aus physikalischer Sicht im Zusammenhang mit geringer Griffigkeit (und auch hoher Kurvigkeit) ein negativer Einfluss auf das Sicherheitsniveau attestiert. Dies wird auch durch die stärkeren Zusammenhänge zwischen Griffigkeit und Unfällen mit Personenschaden (Fahr- und Längsverkehrsunfälle) im Vergleich zu Sachschadensunfällen deutlich.

Der Griffigkeitseinfluss tritt nahezu immer in Kombination mit dem zuvor dokumentierten Einfluss eines erhöhten Kurvigkeitsäquivalents auf. Dies wird durch die Ergebnisse der Literatur bestätigt (siehe Kapitel 3.2.2). Ein erhöhter Einfluss der Griffigkeit wurde vor allem auf sehr angepasst trassierten Straßen vor allem in Kurvenbereichen nachgewiesen. Teilweisetritt auch eine Längsneigung von mehr als 4 % im Zusammenhang mit einem Griffigkeitseinfluss auf. Hohe Längsneigungen resultieren aus einem eher bewegten Gelände, was seinerseits auch in einer Trassierung mit kleineren Entwurfssegmenten mündet. Es könnte aber auch stellvertretend für die in Maier et al. (2013) als signifikante Einflussgrößen identifizierte Hügeligkeit sowie auf Unterschreitungen von Kuppenmindesthalbmessern in Bezug auf die vorhandenen Haltesichtweiten stehen.

Auf Landesstraßen lassen sich ähnliche Zusammenhänge für die Griffigkeit feststellen. Es muss allerdings einschränkend bemerkt werden, dass dieser Zusammenhang auch in stärkerem Maße für die Trockenunfälle nachgewiesen wurde. Das lässt Zweifel am kausalen Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallgeschehen aufkommen. Mögliche Gründe hierfür sind:

- Die zuvor diskutierten Korrelationen zwischen der Griffigkeit und dem DTV könnten unter

Umständen dazu führen, dass im Modell Teile des DTV-Einflusses über die Griffigkeit abgebildet wurden.

- Die Erfassung des Straßenzustandes durch die Polizei erfolgt nur mit eingeschränkter Zuverlässigkeit, d. h. in der Stichprobe der Trockenunfälle befinden sich auch Unfälle bei nasser Fahrbahn. Aus Gründen der Vereinfachung wurden Unfälle ohne Angabe des Straßenzustandes im Unfallprotokoll den Trockenunfällen zugeordnet.
- Nicht berücksichtigte Einflussvariablen korrelieren mit der Griffigkeit und dem Unfallgeschehen und führen dazu, dass „fälschlicherweise“ ein Zusammenhang mit der Griffigkeit im Modell auftaucht. Eine Möglichkeit wäre das Auftreten geringer Griffigkeiten in Annäherungsbereichen von Knotenpunkten, welche u. U. tendenziell mehr Auffahrunfälle aufweisen. Hierfür würde der im Vergleich zu Fahrunfällen stärkere Zusammenhang zwischen Längsverkehrsunfällen bei trockener Fahrbahn und der Griffigkeit sprechen. Es kann aber nicht der alleinige Grund sein, da auch Fahrunfälle teilweise von dieser Auffälligkeit betroffen sind.

Ein Einfluss der Griffigkeit auf die Fahrunfälle bei Nässe mit Motorradbeteiligung konnten nur auf Landesstraßen im Land A festgestellt werden. Dort finden sich auch die größten Anteile von Abschnitten mit einer sehr hohen Kurvigkeit, denen eine besondere Anziehungskraft für Motorradfahrer attestiert wird.

Die signifikanten Zusammenhänge mit den Indikatoren zur Längsebenheit (AUN), Spurrinnentiefe (MSPT) und fiktiven Wassertiefe (MSPH) zeigen kein einheitliches Bild.

Eine erhöhte Längsebenheit (AUN) steht - vor allem auf Autobahnen - im Zusammenhang mit einem schlechteren Sicherheitsniveau. Dies ist nicht ohne weiteres nachvollziehbar (siehe Begründung bei Bundes- und Landesstraßen). Unter Umständen sind vor allem Abschnitte mit mangelhaften Betonoberflächen betroffen. Ein Indiz hierfür ist die Signifikanz des AUN bei Nässeunfällen mit Personenschaden (Vermutung von eingeschränkten Sichtweiten aufgrund von Sprühhahnen).

Vereinzelte Ergebnisse auf Landes- und Bundesstraßen zeigen das Gegenteil (Verbesserung Sicherheitsniveau bei höherem AUN). Dies ist eher nachvollziehbar, da aus der akustischen und haptischen Rückmeldungen an den Fahrer ggf. eine Anpassung des Geschwindigkeitsniveaus (Reduzierung) erfolgt. Allerdings korreliert AUN mit dem DTV (negativ), der Kurvigkeit und der Längsneigung (beide positiv). Das bedeutet eine hohe Längsebenheit tritt vor allem auf niedrig belasteten

Straßen in bewegtem Gelände und angepasster Trassierung auf. Unter Umständen überlagern sich hier verschiedene Einflüsse.

Zusammenhänge mit MSPT lassen sich nur für Land A auf Autobahnen einheitlich nachweisen. Diese treten tendenziell stärker bei Trockenunfällen auf. Eine höhere Spurrinnentiefe steht im Zusammenhang mit mehr Unfällen. Dies ist vor allem aufgrund der Auffälligkeit bei den Trockenunfällen nicht nachvollziehbar.

Auf Bundes- und Landesstraßen zeigen sich zum Teil negative Regressionskoeffizienten (höheres Sicherheitsniveau). Dies ist nachvollziehbar, da deutlich erkennbare Spurrinnen ggf. zu einer Fahrverhaltensanpassung führen (z. B. geringere Geschwindigkeiten). Auf Landesstraßen sind von diesem Effekt tendenziell häufiger Nässeunfälle betroffen, womit Wasser in der Spurrinne die Verhaltenskompensation ggf. noch verstärkt. Die Spurrinnentiefe (MSPT) zeigt häufiger einen signifikanten Einfluss als die fiktive Wassertiefe (MSPH). Dies könnte die Folge der höheren Streuung von MSPT im Vergleich zu MSPH sein. Allerdings korreliert MSPT auch im Gegensatz zu MSPH mit der Griffigkeit.

Der Indikator FLI zeigt weder einheitliche noch nachvollziehbare Ergebnisse.

### 6.2.3 Sensitivitätsanalysen und Grenzwertdiskussion

Vor allem für die Griffigkeit wurden durchgängig signifikante und ähnliche Zusammenhänge mit den Fahr- und teilweise Längsverkehrsunfällen bei Nässe auf Bundes- und Landestraßen festgestellt. Daher soll diese Zustandsgröße im Fokus der weiteren Betrachtungen liegen.

Für die Sensitivitätsanalysen der modifizierten Griffigkeitsparameter finden sich die Unfallmodelle in den Tab. 40 und Tab. 41 im Anhang. Es gilt zu beachten, dass movGri50 nur für einen Teil des Kollektivs berechnet wurde. Die Aussagefähigkeit ist somit eingeschränkt.

Im Vergleich zu den Ergebnissen im Zusammenhang mit dem 400 m-Mittelwert (GriMw) werden meist größere Regressionskoeffizienten für GriMin und movGri50 festgestellt. Die kleinere Fenstergröße von 20 m weist entgegen der Tendenz jedoch einen kleineren Koeffizienten auf. Der Grund für den Anstieg der Regressionskoeffizienten liegt vorrangig in dem Anstieg der Streuung der Variable, wobei movGri20 allerdings nicht ins Bild passt.

Eine Bewertung auf Basis der Koeffizienten ist somit nicht möglich. Die Kriterien zur Bewertung der Anpassungsgüte zeigen auch kein einheitliches Bild. Der Verteilungsparameter bleibt nahezu konstant. Die Veränderung der Anpassungsgüte

durch Hinzunahme des Griffigkeitsparameters ist für NFU(P) bei GriMw maximal und bei NFU(S) bei GriMin maximal. Die Veränderung des AIC zeigt keine einheitliche Tendenz aber einen Trend zu GriMin.

Es kann somit kein optimaler Griffigkeitsparameter abgeleitet werden. MovGri20 schneidet allerdings im Vergleich zu movGri50 konstant schlechter ab. Es wird vermutet, dass sehr kurze Defizite in der Griffigkeit sich somit nur bedingt im Unfallgeschehen niederschlagen.

Es wird weiterhin der GriMw (Mittelwert über 400 m) favorisiert, da für diesen einerseits längere Defizite der Griffigkeit entlang der Straße beschrieben werden und andererseits vor allem für die NFU(P) die höchste Aussagefähigkeit besteht. NFU(P) weisen die stärksten Zusammenhänge mit der Griffigkeit auf und sind aufgrund der Schwere volkswirtschaftlich in höherem Maße relevant.

Es bedarf der Abgrenzung des Einflusses der Griffigkeit auf die Verkehrssicherheit, um später daraus Potenziale (siehe Kapitel 7.1) ableiten zu können. Hierfür finden sich in Tab. 11 sogenannte Signifikanzschwellen für den Griffigkeitsmittelwert über 400 m (GriMw) sowie 100 m (GriMin).

Unabhängig von unterschiedlichen Verteilungen der Griffigkeit in den Ländern A und B sowie Unterschiede in den signifikanten Einflussgrößen der Unfallmodelle ergeben sich durchgängig ähnliche Signifikanzschwellen für GriMw. Dies liegt in beiden Ländern und sowohl auf Bundes- als auch Landestraßen bei 0,60. Dieser Werte wird als Zielwert für die Berechnung des Zustandspotenzials im Rahmen der Verfahrensentwicklung herangezogen.

GriMin entspricht den Griffigkeitswerten der 100 m-Abschnitte (niedrigster Wert innerhalb des 400 m-Abschnitts) und ist daher mit den aktuellen Grenzwerten vergleichbar. Für GriMin ergeben sich Unterschiede zwischen Bundes- und Landestraßen. Die Signifikanzschwellen liegen zwischen 0,55 und 0,66.

Stichprobe	Straßenklasse	Signifikanzschwelle der Griffigkeit für Nässeunfälle U(P)	
		GriMw	GriMin
Land A	BS	0,60	0,56
	LS	0,60	0,60
Land B	BS	0,60	0,55
	LS	0,60	0,65

**Tab. 11:** Signifikanzschwelle für Griffigkeitseinfluss

Auch wenn diese Werte oberhalb der bisherigen Grenzwerte liegen (laut ZEB ist Warnwert = 0,44 und Schwellwert = 0,37 auf Bundesstraßen) können diese Signifikanzschwellen nur bedingt für einen Vergleich bzw. eine potenzielle Modifikation der bestehenden Grenzwerte herangezogen werden. Hierfür sind folgende Gründe zu nennen:

- Die Ableitung des Griffigkeitseinflusses ist eine Schätzung, deren Aussagefähigkeit aktuell noch durch nicht berücksichtigte Einflüsse weitere Entwurfsmerkmale eingeschränkt ist.
- Aufgrund der vorhandenen Korrelation zwischen der Griffigkeit und dem DTV (siehe Anfang des Kapitels 6.2.2) ist es grundsätzlich möglich, dass ein Teil des DTV-Einflusses auf das Unfallgeschehen „fälschlicherweise“ über die Griffigkeit abgebildet wird. Deren Einfluss auf das Unfallgeschehen würde damit überschätzt.
- Der modellierte Griffigkeitseinfluss ist nicht linear, d. h. eine betragsmäßig ähnliche Veränderungen der Griffigkeit führt im Bereich höherer Griffigkeitsniveaus zu einer geringeren Veränderung im Unfallgeschehen als im Vergleich bei niedrigeren bzw. schlechteren Griffigkeitsniveaus.
- Der Griffigkeitseinfluss ist immer auch abhängig von der Infrastrukturcharakteristik, d. h. er ist tendenziell höher bei Abschnitten mit einem größeren Kurvigkeitsäquivalent. Ein absoluter Grenzwert ist somit auch wenig zielführend, wie Beispiele der internationalen Literatur auch zeigen (siehe u. a. Rallings 2011 oder Bild 15).
- Der absolute Griffigkeitseinfluss auf das Unfallgeschehen ist sehr gering. Der Griffigkeitseinfluss wurde nur für Fahr- und Längsverkehrsunfälle bei Nässe nachgewiesen, welche gerade einmal rund 15 % der Gesamtunfallkosten auf der freien Strecke ausmachen. Eine Veränderung der mittleren Griffigkeit von 0,45 auf 0,55 eines 400 m-Abschnitts mit einem DTV von 10.000 Kfz/Tag und einer ebenen und geraden Linienführung führt weiterhin nur zu einer Veränderung von 0,0226 Unfällen mit Personenschaden pro Jahr. Das entspricht gerade mal der Wahrscheinlichkeit eines Unfalls in rund 45 Jahren.
- Eine absolute Verkehrssicherheit ist aktuell für das Straßennetz nicht zu gewährleisten, auch aus diesem Grund existieren Zielniveaus (wie z. B. definiert durch die Grundunfallkostenrate der ESN), die üblicherweise eben nicht bei null Unfällen liegen. Auch wenn ein sicherer Zustand des Bestandsnetzes angestrebt werden sollte, so spielen bei der Umsetzung von Verkehrssicherheitsmaßnahmen in der Praxis Nutzen-Kosten-Überlegungen eine Rolle. Die-

ser Gedanke wird in Kapitel 7.1 nochmals aufgegriffen.

All diese Überlegungen verdeutlichen, dass die Höhe der Signifikanzschwelle der Griffigkeit nur einen Teil der Überlegungen zu möglichen Anpassungen der Warn- und Schwellwerte für die Griffigkeiten der Straßenoberfläche darstellen. Modelltechnisch wurden Zusammenhänge zwischen Griffigkeit und einem Teil des Unfallgeschehens nachgewiesen. Ob und in welchem Maße sich hieraus eine Notwendigkeit ergibt, die aktuellen Grenzwerte zu modifizieren, muss an anderer Stelle geklärt werden.

## 7 Praktische Anwendung

### 7.1 Verfahrensentwicklung Zustands- potenzial

Nachdem in den vorstehenden Abschnitten die Grundlagen für die Berechnung eines Zustandspotenzials gelegt wurden, wird darauf aufbauend ein praktisches Verfahren entwickelt. Damit lassen sich Zustandspotenziale bzw. der Nutzen aus der Verbesserung der Fahrbahnoberflächenzustandes für Teilnetze abschätzen.

Im ersten Schritt muss die Modellgrundlage für die Abschätzung des Zustandspotenzials quantifiziert werden.

Im Rahmen der Modellberechnung konnten für Fahr- und Längsverkehrsunfälle auf Bundes- als auch Landesstrassen signifikante Zusammenhänge für folgende Attribute nachgewiesen werden:

- 
- DTV
- Kurvigkeitsäquivalent (nur für Fahrnfälle)
- Längsneigungskategorie (außer Fahrnfälle mit Personenschaden)
- Griffigkeit

Für alle anderen betrachteten Zustandsgrößen (SPH, SPT, AUN, FLI, SPHV) konnten keine eindeutigen und/oder einheitlichen Zusammenhänge ermittelt werden.

Mit dem Ziel der Ableitung eines allgemeingültigen Modells wurde eine kombinierte Stichprobe aus allen Abschnitten in Land A und B sowohl auf Bundes- als auch Landesstraßen erstellt. Aus dieser Stichprobe wurden Teilmodelle für Fahr- und Längsverkehrsunfälle bei Nässe für Unfälle mit Personen- U(P) und ausschließlich Sachschaden U(S) ermittelt.

Bisher wurden in den Unfallmodellen alle signifikanten Einflussgrößen dargestellt. Es wurde noch nicht darauf geachtet, inwiefern sich die Anpassungsgüte und damit die Aussagekraft eines Vorhersagemodells bei Hinzunahme einer signifikanten Einflussgröße verändert. Für die neuen Teilmodelle gelten andere Rahmenbedingungen:

- Es muss ein signifikanter Griffigkeitseinfluss in Kombination mit einer verbesserten Anpassungsgüte des Modells für Nässeunfälle nachweisbar sein.
- Es darf kein Griffigkeitseinfluss für die Trockenunfälle nachweisbar sein. Tritt trotzdem ein signifikanter Einfluss auf, dann wird der Griffigkeitseinfluss wahrscheinlich vom Einfluss des DTV überlagert. In diesem Fall wird der Griffigkeitseinfluss bei den Nässeunfällen

durch den Zusammenhang mit den Trockenunfällen bereinigt.

- Weitere Infrastrukturmerkmale werden nur in das Modell aufgenommen, wenn sie signifikante Zusammenhänge mit dem Unfallgeschehen sowie eine Verbesserung der Anpassungsgüte des Modells aufweisen. Es wird stark auf die Merkmale Kurvigkeit und Längsneigung fokussiert, da diese Merkmale auch in der deskriptiven Auswertung eine mehr oder weniger starke Auffälligkeit bei Nässeunfällen gezeigt haben.

Die endgültigen Teilmodelle finden sich im Anhang in Tab. 44 und Tab. 45. Diese gelten für 400 m-Abschnitte. Für die Fahrnfälle bei Nässe wurden zusätzlich auch nochmal getrennte Teilmodelle für U(SP) und U(LP) dokumentiert. Nur bei getrennten Modellen werden Unterschiede zwischen Land A und B sowie zwischen den Straßenklassen signifikant. Dies kann auf die unterschiedlichen Anteile der Unfallkategorien in den Ländern und Straßenklassen zurückgeführt werden (siehe Tab. 46 im Anhang).

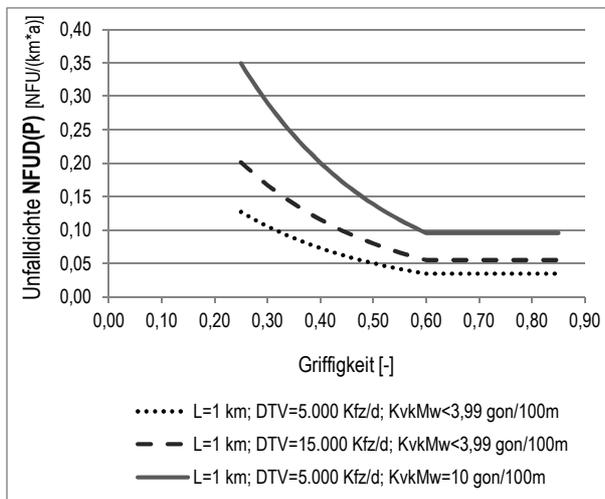
Die in den Tabellen aufgeführten Modelle lassen sich auch als Modellgleichungen formulieren. Mit Blick auf die praktische Anwendung wurde das Kurvigkeitsäquivalent als kategoriale Variable im Modell berücksichtigt. Damit sollen vor allem Ausreißer in den Krümmungsdaten nivelliert werden, welche nicht aus dem Straßenverlauf (sondern z. B. durch Fahrstreifenwechsel des Erhebungsfahrzeugs) resultieren.

<b>NFU(P)</b>	[U/a]
$U = e^{-4,7} \times L \times DTV^{0,419} \times e^{KUKat^* \times 3,69 \times GriMw}$	
<i>KUKat*</i> = 1,60 ( <i>KUMw*</i> > 15,89) <i>KUKat*</i> = 1,01 (15,89 ≥ <i>KUMw*</i> > 7,99) <i>KUKat*</i> = 0,45 (7,99 ≥ <i>KUMw*</i> > 3,99) <i>KUKat*</i> = 0 (3,99 ≥ <i>KUMw*</i> )	
<b>NFU(S)</b>	[U/a]
$U = e^{-7,64} \times L \times DTV^{0,78} \times e^{KUKat^* \times 0,38 \times LNKat2 - 2,77 \times GriMw}$	
<i>KUKat*</i> = 1,81 ( <i>KUMw*</i> > 15,89) <i>KUKat*</i> = 0,90 (15,89 ≥ <i>KUMw*</i> > 7,99) <i>KUKat*</i> = 0,35 (7,99 ≥ <i>KUMw*</i> > 3,99) <i>KUKat*</i> = 0 (3,99 ≥ <i>KUMw*</i> )	
<b>NLVU(P)</b>	[U/a]
$U = e^{-10,58} \times L \times DTV^{0,99} \times e^{0,15 \times LNKat2 - 2,44 \times GriMw}$	
<b>NLVU(S)</b>	[U/a]
$U = e^{-8,71} \times L \times DTV^{0,83} \times e^{0,33 \times LNKat2 - 1,17 \times GriMw}$	
U	Anzahl Unfälle pro Jahr NFU(P) - Fahrnfälle bei Nässe mit Personenschaden NFU(S) - Fahrnfälle bei Nässe mit aussch. Sachschaden NLVU(P) - Längsverkehrsunfälle bei Nässe mit Pers.sch. NLVU(S) - Längsverkehrsunfälle bei Nässe mit aus. Sch.s.

<i>L</i>	Abschnittslänge [km]
<i>DTV</i>	Verkehrsstärke [Kfz/d]
<i>KUMw*</i>	mittlere Kurvigkeit [gon/100 m] auf 400 m
<i>KUKat*</i>	Regressionskoeffizient Kurvigkeitsklasse
<i>LNKat2</i>	Längsneigung: 1 wenn maxLN >4% auf 400 m
<i>GRIMw</i>	Griffigkeit [-] (Mittelwert auf 400 m)

Am Beispiel der Fahrurfälle bei Nässe mit Personenschaden soll die Interpretation der Modellgleichung grafisch illustriert werden (siehe Bild 118). Die Abhängigkeit des Unfallgeschehens von der Griffigkeit ist für verschiedene Randbedingungen dargestellt. Es wird bspw. deutlich, dass bei Verdreifachung des DTV der Griffigkeitseinfluss um 50 % zunimmt, während bei Änderung um zwei Kurvigkeitssklassen bei gleichbleibenden DTV der Griffigkeitseinfluss um 150 % zunimmt. Die Grafik ist somit im Gegensatz zur Modellformel nicht verallgemeinerbar. Die Modellformel muss für jede Situation entsprechend der Randbedingungen angepasst werden. Es gilt weiterhin zu berücksichtigen, dass ein signifikanter Griffigkeitseinfluss für GriMw nur bis zum Wert 0,60 nachgewiesen wurde. Das Modell gilt also nur bis dahin, darüber bleibt der Erwartungswert der Unfallzahl konstant (siehe Bild 118).

Es soll nochmals erwähnt werden, dass die Signifikanzschwelle des Griffigkeitseinflusses in Bild 118 für sich alleine keinen Hinweis für die Anpassung eines Grenzwerts für griffigkeitsverbessernde Maßnahmen darstellt. Auf geraden Strecken mit einer vglw. geringen Verkehrsbelastung (gepunktete Linie in Bild 118) sind die Einflüsse der Griffigkeit auf die Verkehrssicherheit minimal. Ein möglicher Ansatz, um den Bedarf für Verbesserungen der Fahrbahnoberfläche zu identifizieren, wird in Kapitel 7.2.2 beschrieben. Für die Interpretation des Diagramms in Bild 118 sind in jedem Fall auch die Hinweise am Ende von Kapitel 6.2.3 zu berücksichtigen.



**Bild 118:** Darstellung Teilmodell der NFU(P) in Abhängigkeit der Griffigkeit für verschiedene Randbedingungen

Die aus diesen vier Modellformeln berechneten Erwartungswerte werden mit den Anteilswerten der Unfallkategorien sowie den entsprechenden Kostensätze multipliziert. Dann werden alle vier Erwartungswerte der Unfallkosten aufaddiert, um eine Abschätzung des gesamten von der Griffigkeit beeinflussten Unfallgeschehens bei Nässe zu erhalten.

Die Anteile der Unfallkosten der mit diesen Modellen beschriebenen Unfälle machen für Land A rund 18 % der gesamten Unfallkosten auf Außerortsstraßen bzw. rund 24 % der gesamten Streckenunfallkosten auf Außerortsstraßen aus.

Um Veränderungen im Unfallgeschehen bzw. den Unfallkosten aufgrund von griffigkeitsverbessernden Maßnahmen abschätzen zu können, muss die Differenz aus den Modellwerten mit der Griffigkeit vor (Ausgangswert) und nach (Zielwert) der Maßnahme berechnet werden. Der Ausgangswert ergibt sich aus einer beliebigen aktuellen ZEB-Kampagne. Als Zielwert werden die Signifikanzschwellen aus Tab. 11 verwendet. Für den Mittelwert der Griffigkeit, welcher hier verwendet wird, beträgt der Zielwert unabhängig vom Land und der Straßenklasse 0,60. Die Differenz der berechneten Unfallkosten bzw. die vermeidbaren Unfallkosten stellen dann das Zustandspotenzial bzw. in diesem Fall ein Griffigkeitspotenzial dar.

Die berechneten Werte sollten nicht als konkrete Unfallzahlen, sondern eher als Risikowerte interpretiert werden. Mit den Modellen ist keine exakte Prognose von Einzelunfällen möglich bzw. angestrebt, um bspw. voraussagen zu können, wann welcher Unfall wo passiert. Je höher die durch das Modell abgeschätzten Unfälle bzw. Unfallkosten sind, umso wahrscheinlicher ist es, dass sich tatsächlich ein Unfall ereignen kann.

Der gesamte Berechnungsalgorithmus wurde in einem Excel-Blatt hinterlegt. Auf Basis der Randbedingungen werden Nutzen - ausgedrückt durch vermeidbare Unfallkosten pro Jahr - ausgegeben (siehe Tab. 12). Im dokumentierten Beispiel ergibt sich für eine Veränderung der mittleren Griffigkeit von 0,30 auf 0,50 in einem 400 m-Abschnitt eine Verminderung der jährlichen Unfallkosten um 11.371 €.

Länge	Summe	L	[km]	0,4
DTV	Mittelwert	DTV	[Fz/d]	10.000
Kurvigkeit	Klassen*	KvkMw > 15,89	[gon/100m]	0
		15,89 ≥ KvkMw > 7,99	[gon/100m]	1
		7,99 ≥ KvkMw > 3,99	[gon/100m]	0
Längsneigung > 4%	Maximum**	LNkat2	[-]	0
Griffigkeit	Mittelwert	GriMw	[-]	0,30
		Zielwertwert Griffigkeit (GriMw)	[-]	0,50

		Anteil		
Fahrunfall bei Nässe	U(SP)	0,35	[€/U]	267.183
	U(LV)	0,65	[€/U]	24.134
	U(SS)	0,21	[€/U]	19.046
	U(LS)	0,79	[€/U]	6.035
Längsverkehrsunfall bei Nässe	U(SP)	0,17	[€/U]	309.998
	U(LV)	0,83	[€/U]	25.034
	U(SS)	0,08	[€/U]	19.046
	U(LS)	0,92	[€/U]	6.035

<b>Ergebnis</b>	vermeidbare Unfallkosten je Abschnitt	[€/a)]	<b>11.371 €</b>
-----------------	---------------------------------------	--------	-----------------

\* 1 eingetragen, wenn der Abschnitt in eine der KvkMw-Klassen fällt, sonst 0 eintragen

\*\* 1 eingetragen, wenn innerhalb des Abschnitts ein 100m-Abschnitt mit mehr als 4% Längsneigung auftritt, sonst 0 eintragen

**Tab. 12:** Tabellenblatt für Eingabe und Berechnung des Griffigkeitspotenzials

## 7.2 Verfahrensanwendung Zustands- potenzial

### 7.2.1 Netzweite modellbasierte Anwendung

Für das Land A wurde pilotmäßig eine Berechnung des Zustandspotenzials für die Netze der Bundes- und Landesstraßen durchgeführt. Anhand des in Tab. 12 dargestellten Modells und der Parameter in Tab. 46 im Anhang wurden für alle mit Daten gefüllten 400 m - Abschnitte Zustandspotenziale bestimmt.

In Tab. 13 und Tab. 14 werden die netzweiten Ergebnisse der Abschätzung des Zustandspotenzials auf Bundes- und Landesstraßen Land A exemplarisch dargestellt.

Bundesstraßen (Land A)			
<b>Zielwert GriMW = 0,6</b>			
Länge Freie Strecke		2.963	km
Länge GRI 60 gefüllt		2.834	km
Länge gebildete 400 m - Abschnitte		2.204	km
Anteil Freie Strecke mit GRI 60		95,6	%
Anteil 400 m - Abschnitte mit Zustandspotenzial gefüllt		74,4	%
Summe Zustandspotenzial		15.217.557	€ * a
durchschnittl. Zustandspotenzial je 400 m - Abschnitt		6.903	€/km * a

**Tab. 13:** Zustandspotenzial der Bundesstraßen (74% der freien Strecken), Land A

Diese Abschätzungen konnten nicht für das gesamte Netz berechnet werden, da sowohl Lücken in der Erfassung (keine Griffigkeitswerte) als auch (noch größere Lücken) in den DTV-Daten existieren. Eine Möglichkeit zur Verbesserung dieser Datenlage wäre bspw. die Verwendung von Modelldaten für den DTV. Auf Bundesstraßen konnten 74,4 % und auf Landesstraßen 67,8 % der Gesamtnetzlänge bewertet werden.

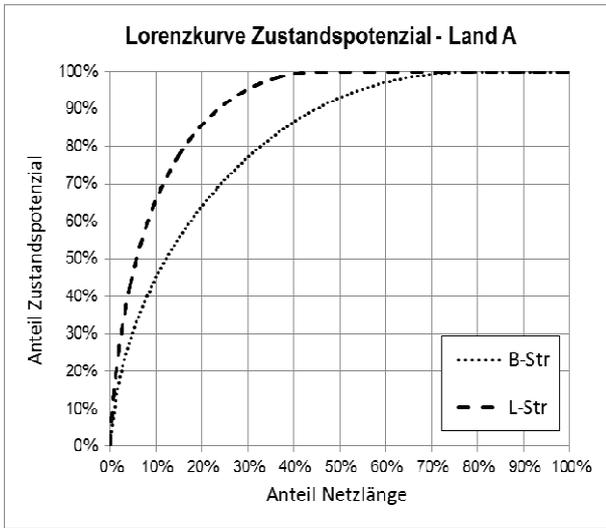
Landesstraßen (Land A)			
<b>Zielwert GriMW = 0,6</b>			
Länge Freie Strecke		5.535	km
Länge GRI 60 gefüllt		5.238	km
Länge gebildete 400 m - Abschnitte		3.754	km
Anteil Freie Strecke mit GRI 60		94,6	%
Anteil 400 m - Abschnitte mit Zustandspotenzial gefüllt		67,8	%
Summe Zustandspotenzial		9.394.202	€ * a
durchschnittl. Zustandspotenzial je 400 m - Abschnitt		2.502	€/km * a

**Tab. 14:** Zustandspotenzial der Landesstraßen (68% der freien Strecken), Land A

Insgesamt ergaben sich (nur) für den Teil des bewerteten Netzes rund 15,2 Millionen bzw. 9,4 Millionen Euro an potenziell vermeidbaren Unfallkosten pro Jahr aufgrund geringer Griffigkeit. Diese sind allerdings sehr ungleich über das Netz verteilt (Bild 119), damit ergibt sich nur an ausgewählten Stellen ein Handlungsbedarf, welcher über die Priorisierung nach dem Zustandspotenzial ggf. identifiziert werden kann.

Ähnlich wie im ESN-Verfahren können diese Potenziale auch über der Länge aufgetragen werden. Damit wird die Konzentration von Griffigkeitsdefiziten bzw. den damit verbundenen Potenzialen für Verbesserung im Netz illustriert (siehe Bild 119).

Die Verteilung zeigt, dass bei den Bundesstraßen deutlich höhere Anteile mit einem hohen Zustandspotenzial vorliegen. Dies wird maßgeblich durch die unterschiedlichen Griffigkeitsniveaus auf Bundes- und Landesstraßen im Land A zurückgeführt (siehe Bild 63 und Bild 64 bei den deskriptiven Auswertungen der Zustandsgrößen). An diesen deskriptiven Auswertungen wird aber auch deutlich, dass Landesstraßen im Bundesdurchschnitt ein höheres Griffigkeitsniveau als Bundesstraßen aufweisen. Hier wird die höhere Verkehrsbelastung auf Bundesstraßen als Ursache vermutet, was auch durch die erhöhten Korrelationen zwischen DTV und Griffigkeit bestätigt wird. Somit sind die Unterschiede in den Lorenzverteilungen im Bild 119 durchaus verallgemeinerbar, wenn auch nicht in diesem Ausmaß.



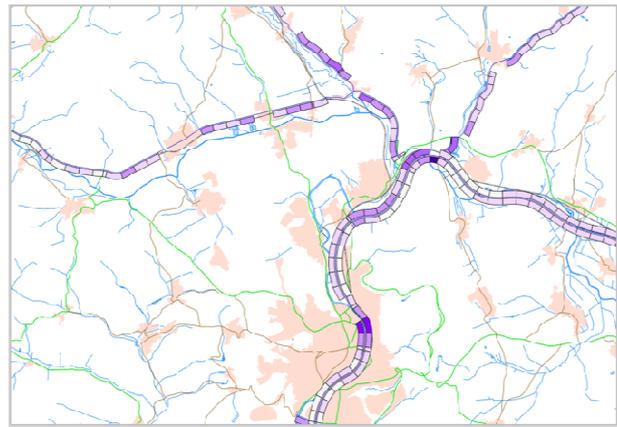
**Bild 119:** Lorenzkurve Zustandspotenzial, Bundes- und Landesstraßen (Freie Strecken), Land A

Das konkrete Zustandspotenzial ist für visuelle Darstellung eher ungeeignet. Hierfür bietet sich eine Klasseneinteilung an (siehe Tab. 15). In Anlehnung an das ESN-Verfahren wird eine vierteilige Einteilung in Abschnitte mit hoher, mittlerer und niedriger Priorität sowie Abschnitte ohne Potenzial gewählt. Diese Priorität kann als Dringlichkeit für Erhaltungsmaßnahmen interpretiert werden. Die Klasseneinteilung erfolgt auf Basis der kumulierten Zustandspotenziale. Die obersten 20 % bilden die Klasse der höchsten Priorität, die restlichen 80 % werden zur Hälfte auf die mittlere und niedrige Priorität aufgeteilt. Die Klassen werden entsprechend eingefärbt, es wurde eine Farbgebung gewählt, welche eine Verwechslung mit klassischen ZEB-Darstellungen ausschließt.

Land A			
Anteil Zustandspotenzial bezogen auf den Anteil der Netzlänge	untere Klassengrenze Zustandspotenzial [€ / 400 m * a]		Beschreibung
	B-Str.	L-Str.	
20%	14.500,00 €	10.400,00 €	hohe Priorität
60%	4.600,00 €	3.500,00 €	mittlere Priorität
100%	- €	- €	niedrige Priorität
			kein Potenzial

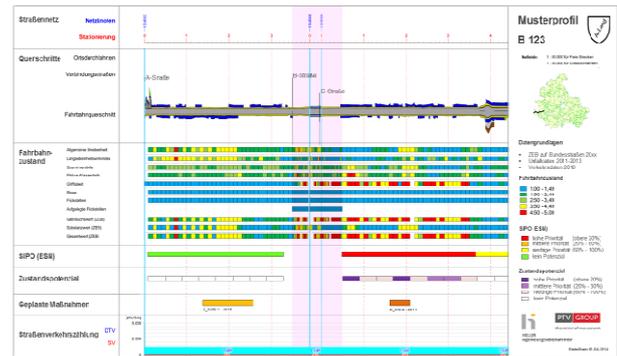
**Tab. 15:** Für die Visualisierung des Zustandspotenzials ermittelte Klassengrenzen, Bundes- und Landesstraßen (Freie Strecken), Land A

Die Umsetzung der Bewertung des Zustandspotenzials in eine Karte findet sich im Bild 120 (siehe auch im Anhang A.13). Die Farbenrepräsentiert die Priorität aus Tab. 15.



**Bild 120:** Karte mit Darstellung des Zustandspotenzials (Priorität) für die Bundesstraßen in Land A

Ergänzend wären Darstellungen in Form von Streckenbändern möglich. Hier lassen sich Bestandsdaten, Zustand (ZEB), SIPO (ESN) und Zustandspotenzial gemeinsam auswerten (siehe Bild 136 sowie Abbildung im Anhang A.13).



**Bild 121:** Profil mit Darstellung des Zustandspotenzials (Priorität) für die Bundesstraßen in Land A

Im Anhang A.11 finden sich Beispiele aus der Onlinevisualisierung der ZEB (OnKo2, Landesstraßen), welche zufällig herausgegriffene Abschnitte mit einem hohen Zustandspotenzial zeigen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse auf den ersten Blick plausibel wirken.

### 7.2.2 Kalibrierung und Vergleich mit grenzwertbasierten Verfahren

Die Signifikanzschwellen für den Griffigkeitseinfluss (aus Kapitel 6.2.2) geben direkt keinen Hinweis auf mögliche Grenzwertanpassungen in der ZEB. Trotzdem sollen Ansätze für eine Optimierung der Vorgehensweise zur Identifizierung von Bereichen für griffigkeitsverbessernde Maßnahmen entwickelt und diskutiert werden, um den praktischen Nutzen des Zustandspotenzials zu verdeutlichen.

Für ein Teil des Bundesstraßennetzes in Land A (~1.635 km) mit guter Datenqualität hinsichtlich Unfällen, Verkehr und Infrastrukturdaten werden insgesamt vier verschiedene Vorgehensweisen zur

Abgrenzung von 400 m-Abschnitten für griffigkeitsverbessernde Maßnahmen auf Basis des Zustandspotenzials angewendet und miteinander verglichen (siehe Tab. 16).

Nr.	Abgrenzung Bedarfsabschnitte		Zustandspotenzial
A1	Griffigkeit $\leq 0,37$		modellbasiert
A2.1	Nutzen-Kosten-Verhältnis $\geq 1,0$	Kosten 5€/m <sup>2</sup> , 2 Jahre	
A2.2	Verhältnis $\geq 1,0$	Kosten 7€/m <sup>2</sup> , 4 Jahre	
B1	Griffigkeit $\leq 0,37$		modellbasiert & kalibriert mit historischem Unfallgeschehen (Empirical-Bayes-Methode)
B2.1	Nutzen-Kosten-Verhältnis $\geq 1,0$	Kosten 5€/m <sup>2</sup> , 2 Jahre	
B2.2	Verhältnis $\geq 1,0$	Kosten 7€/m <sup>2</sup> , 4 Jahre	

**Tab. 16:** Szenarien/Methoden für die Abgrenzung von Abschnitten mit Bedarf für griffigkeitsverbessernde Maßnahmen

Für Methoden A 1 und B1 werden Abschnitte anhand eines Grenzwerts für die Griffigkeit abgegrenzt. Hierfür wird das Minimum der Griffigkeit aller vier 100 m-Abschnitte innerhalb eines 400 m-Abschnitts herangezogen.

Für Methoden A2 und B2 wird ein Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) aus Zustandspotenzial (Nutzen) und Kosten für folgende einfache griffigkeitsverbessernde Maßnahmen berechnet:

- Oberflächenbehandlung mit Fräse oder dem Entfernen von Bitumen für 5 €/m<sup>2</sup> mit einer Wirkungsdauer von 2 Jahren
- Aufragen einer Dünnschicht für 7 €/m<sup>2</sup> mit einer Wirkungsdauer von 4 Jahren

Die Kostensätze sollen eine Bandbreite an vergleichsweise einfachen Maßnahmen darstellen. Sie sollen vorrangig die Wirkungsweise der Verfahren am praktischen Beispiel verdeutlichen. Die Wirkungsdauer bezieht sich auf den Zeitraum für den das Zustandspotenzial angesetzt werden kann.

Die Methoden A1 und A2 basieren allein auf den modellbasierten Berechnungen des Zustandspotenzials analog zu Tab. 12. Für die Methoden B1 und B2 werden die modellbasierten Zustandspotenziale anhand des relevanten Unfallgeschehens der letzten 3 Jahre (Fahr- und Längsverkehrsunfälle bei Nässe) kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt in Abhängigkeit der Länge des Abschnitts, dem Verteilungsparameter des zugrunde liegenden Unfallmodells (als Indikator für die Modellgüte) sowie dem Zeitraum (Anzahl Jahre) des berücksichtigten historischen Unfallgeschehens (Details finden sich im Highway Safety Manual von AASHTO 2009). Hierdurch werden Ungenauigkeiten im Modell durch lokale Parameter des Unfallgeschehens ansatzweise ausgeglichen.

Für den Vergleich werden die folgenden Indikatoren zur Beschreibung der abgegrenzten Abschnitte herangezogen:

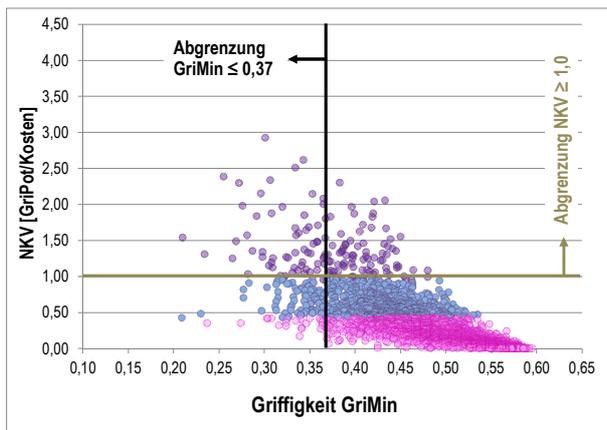
- Länge und Längenanteil am Gesamtnetz
- Zustandspotenzial
- Verhältnis Zustandspotenzial zu Länge

Die Ergebnisse des Vergleichs finden sich in Tab. 17. Folgende Schlussfolgerungen lassen sich daraus ziehen:

- Die Abgrenzung von Bedarfsabschnitten anhand eines einzelnen Grenzwertes der Griffigkeit (A1 und B1) erbringt den geringsten Nutzen (vermiedene Unfallkosten = Zustandspotenzial) in Relation zum Aufwand (Länge der Bedarfsabschnitte). Dies ist nachvollziehbar, da mit der Grenzwertbewertung auch Abschnitte identifiziert werden, welche einen vergleichsweise geringen Nutzen hinsichtlich der Verkehrssicherheit erbringen (unterer linker Bereich im Diagramm in Bild 122)
- Die Kalibrierung anhand des realen Unfallgeschehens (Vergleich A zu B) erbringt netzweit keine relevanten Unterschiede. Lokal betrachtet bzw. bezogen auf den einzelnen Abschnitt bestehen aber teilweise starke Unterschiede, welche sich global ausgleichen.
- In Abhängigkeit der griffigkeitsverbessernden Maßnahmen werden mehr oder weniger Bedarfsabschnitte identifiziert. Selbst wenn ein kleiner Anteil des Netzes betroffen ist, werden durch das modellbasierte Verfahren insgesamt höhere Nutzenpotenziale abgegrenzt.

Nr.	Länge	Anteil Netz	Zustandspotenzial	≈ Ø Zustandspotenzial je km
	[km]		[€/a]	[€/a]
A1	73,2	4,5%	1.338.429	18.000
A2.1	52,8	3,2%	1.512.130	29.000
A2.2	134,4	8,2%	2.854.329	21.000
B1	73,2	4,5%	1.265.640	17.000
B2.1	54,0	3,3%	1.554.700	29.000
B2.2	117,2	7,2%	2.613.644	22.000

**Tab. 17:** Vergleichsszenarien/Methoden für die Abgrenzung von Abschnitten mit Bedarf für griffigkeitsverbessernde Maßnahmen



**Bild 122:** Streudiagramm des Nutzen-Kostenverhältnisses zu Griffigkeit (GriMin – minimaler 100m-Griffigkeitswert innerhalb des 400 m-Abschnitts) für modellbasiertes Zustandspotenzial (5 €/km<sup>2</sup>) inklusive Einfärbung anhand der Priorität (analog zu Tab. 15)

Anhand des Vergleichs wurde deutlich, dass eine alleinige Abgrenzung von Bedarfsabschnitten anhand eines Grenzwertes für die Griffigkeit zu unbefriedigenden Ergebnissen führt (unabhängig davon, ob dieser bei 0,37, 0,44 oder 0,60 liegt). Grund hierfür ist, dass sowohl Abschnitte mit einem hohen als auch sehr niedrigen Zustandspotenzial bzw. NKV ( $NKV < 0,5$ ) abgegrenzt werden. Der modellbasierte Ansatz des Zustandspotenzials ermöglicht mit Hinzunahme der Kosten eine Abgrenzung von Abschnitten auf denen griffigkeitsverbessernde Maßnahmen einen relevanten (volkswirtschaftlichen) Nutzen erbringen.

### 7.3 Vergleich mit ESN-Verfahren

Für den Vergleich von Zustandspotenzial und ESN-Anwendung wurden folgende Kennwerte gegenübergestellt:

- Sicherheitsverbesserungspotenzial und vermeidbare Unfallkosten auf Basis des Gesamtunfallgeschehens
- Sicherheitsverbesserungspotenzial und vermeidbare Unfallkosten auf Basis des Streckenunfallgeschehens
- Nässeunfallgeschehen
- Zustandspotenzial und vermeidbare Unfallkosten für Griffigkeitsverbesserungen

Es gilt bei der Interpretation zu beachten, dass die ESN-Kennwerte das tatsächliche Unfallgeschehen berücksichtigen und das Zustandspotenzial rein modelltechnisch ermittelt wurden.

Eine Ergebnisübersicht für den oberen Bereich der Rangfolge (geordnet nach SIPO des Gesamtunfallgeschehens) findet sich im Anhang A.12.

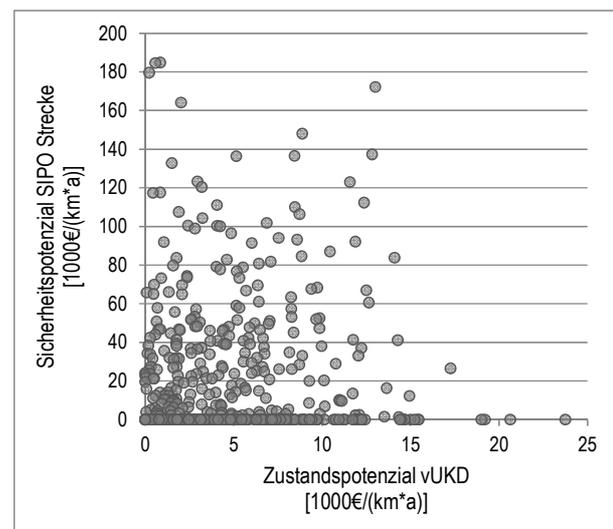
Es wurde ein Teilnetz der Bundesstraßen mit einer Länge von rund 1.640 km im Land A analysiert. Die mittlere Abschnittslänge beträgt 3,6 km. Es ist

zu beachten, dass für diese Analyse zusätzlich zur Aggregation auf 400 m-Abschnitte eine weitere Aggregation auf ESN-Abschnitten mit einer Mindestlänge von 2 km und einer Maximallänge von 5 km durchgeführt wurde (hierauf bezieht sich die mittlere Abschnittslänge von 3,6 km).

Aus dem Vergleich lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Bezogen auf das Gesamtunfallgeschehen ergeben sich insgesamt 58 Millionen Euro vermeidbare Unfallkosten für ein Jahr. Wird die Grundunfallkostenrate mit einem Knotenpunkt je 3 km statt 1,36 km berechnet, erhöht sich die vermeidbaren Unfallkosten auf 65 Millionen Euro pro Jahr.
- Wird nur das Streckenunfallgeschehen betrachtet, ergeben sich vermeidbare Unfallkosten von 39 Millionen Euro pro Jahr.
- Für das gleiche Netz wurden vermeidbare Unfallkosten auf Basis des Zustandspotenzials von 8,1 Millionen Euro berechnet. Das sind ca. 14 % bzw. rund 20 % der vermeidbaren Unfallkosten insgesamt bzw. bezogen auf das Streckenunfallgeschehen.

In Bild 123 sind für die ESN-Abschnitte die jeweiligen Sicherheitsverbesserungspotenziale (SIPO) der Streckenunfälle in Abhängigkeit des Zustandspotenzials abgebildet. Es lässt sich keinerlei Zusammenhang zwischen beiden Kennwerte ableiten. Das bedeutet, dass Abschnitte mit einem hohen SIPO nicht automatisch auch ein erhöhtes Zustandspotenzial aufweisen.



**Bild 123:** SIPO (nur Streckenunfälle) für ESN-Abschnitte in Abhängigkeit des Zustandspotenzials

Im Rahmen der ESN-Anwendung ist es somit nur zielführend das Zustandspotenzial als zusätzliche Kenngröße zum SIPO mit aufzuführen, um ggf. auf Maßnahmenansätze im Erhaltungsmanagement hinweisen zu können.

## 7.4 Visualisierungen

Im technischen Umfeld liefern Visualisierungen insbesondere bei Entscheidungs- und Planungsprozessen einen wichtigen Beitrag. Die Darstellungsform sollte dabei stets so gewählt sein, dass die Inhalte klar und verständlich bzw. mit der vorgesehenen Botschaft vermittelt werden können. Im Bereich des Straßenwesens werden für die Darstellung von straßenbezogenen Sachverhalten meist Karten verwendet. Diese eignen sich insbesondere zur Vermittlung netzweiter Zusammenhänge. Im Bereich der Zustandskarten werden die einzelnen Zustände als farbige Kästen, Streifen oder Linien (Zustandsabschnitt mit Fahrstreifenbezug) entlang der Straßenachse aufgetragen. Zum besseren Verständnis wird der Zustand mit Ampelfarben visualisiert, wobei zusätzlich zu den Tönen Rot (Schwellenwert), Gelb (Warnwert), Grün (guter Zustand) noch die Farbe Blau (sehr guter Zustand) verwendet wird.

Für die Darstellung des Sicherheitspotenzials (ESN) wird üblicherweise eine durchaus vergleichbare Farbgebung benutzt (Rot, Orange, Gelb und Grün). Im Unterschied zu den Zustandsabschnitten sind die Abschnitte der ESN verfahrensbedingt mit mehreren Kilometern länger und es gibt keine fahrestreifenscharfe Abbildung des Potenzials, sondern maximal für einzelne Richtungsfahrbahnen.

Die rot dargestellten Streifen signalisieren sowohl in den Karten der ESN als auch der ZEB Handlungsbedarf. Für eine gemeinsame Visualisierung beider Informationen müssten die Farben jedoch aufeinander abgestimmt werden (z. B. durch die Verwendung unterschiedlicher Rottöne), damit Verwechslungen ausgeschlossen wären. Gelb bedeutet bei der ESN klassischerweise ein niedriges Potenzial bei der ZEB steht es für den Warnwert und legt eine Beobachtung der Zustandsentwicklung nahe. Hier wäre eine Anpassung der Farbgebung der ESN zu empfehlen.

Um weitere Doppeldeutigkeiten zu vermeiden, wurde die Farbgebung für Darstellung des Zustandspotenzials über ein von der ZEB und ESN abweichendes Farbspektrum definiert. Ein dunkles Lila steht für eine hohe Priorität (bzw. Potenzial), ein helleres Violett beschreibt eine mittlere Priorität. Niedrige Prioritäten werden rosa visualisiert und Abschnitte ohne Potenzial Hellgrau (Bild 124).

Zustandspotenzial	
	hohe Priorität
	mittlere Priorität
	niedrige Priorität
	kein Potenzial

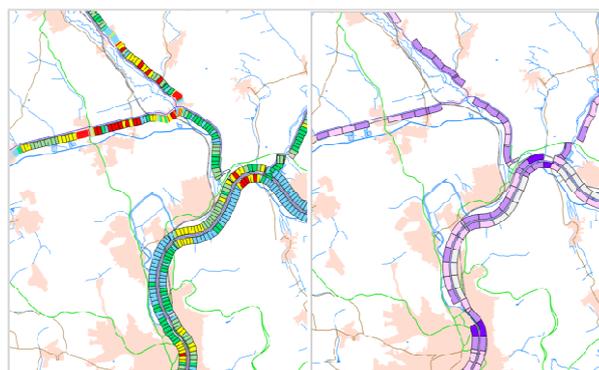


**Bild 124:** Umsetzung der Vorgaben in Karte und Streckenband

Für die Darstellung der Zustandsabschnitte haben sich bei der ZEB für netzweite Übersichtskarten maßstabsabhängig Streifenbreiten von 200 – 400 m und schwarze Umrisslinien bewährt. Die Darstellung der 400 m langen Zustandsabschnitte sollte sich an diesen Vorgaben orientieren (und vergrößerter Kartenausschnitt Anhang A.13).

Kartenmaßstab	Streifenbreite BS, LS, KS
1:125 000	200
1:150 000	250
1:200 000	300
1:250 000	400
1:300 000	500
1:400 000	600

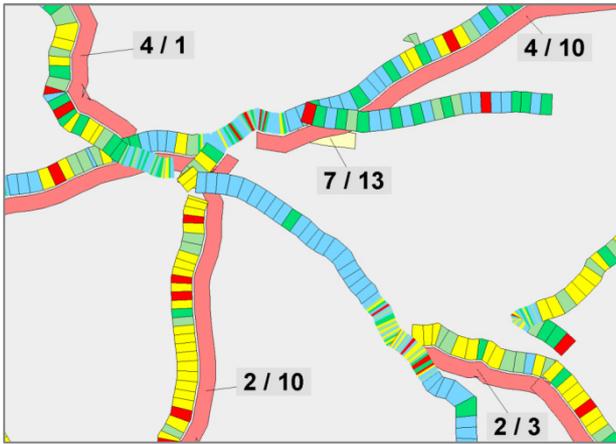
**Tab. 18:** Vorschläge für die Streifenbreiten



**Bild 125:** Gegenüberstellung Zustand (ZWGRI) und Zustandspotenzial

Um Artefakte bei der Streifendarstellung zu vermeiden wird für großmaßstäbliche Karten empfohlen (Tab. 18), die zur Generierung der Streifen verwendeten Straßenachsen künstlich zu Glätten. Andernfalls ergeben sich bei engen Kurvenradien Überlappungen (vergleiche Bild 126). Bei kleineren Maßstäben sollten die Streifenbreiten verringert werden. Hier kommt es gerade bei den Sicherheitsanalysen (z. B. beim Sicherheitspotenzial) darauf an, die Entwurfselemente des Netzes in

einer möglichst originalgetreuen Detaillierung darzustellen.



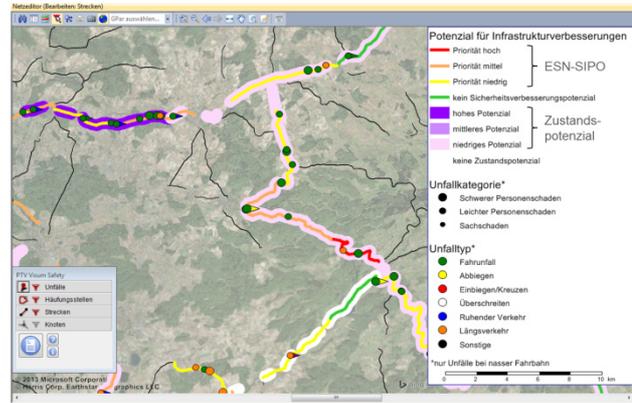
**Bild 126:** Beschränkte Darstellungsmöglichkeiten in der Karte  
 In Bild 126 ist sehr deutlich zu erkennen, dass in Karten immer nur eine beschränkte Anzahl an Informationen nebeneinander dargestellt werden kann.

Hier schaffen die im Straßenwesen gebräuchlichen Profile bzw. Streckenbänder Abhilfe. Bei dieser Darstellungsform werden alle Informationen parallel untereinander zu einem linear abgebildeten Netz visualisiert. In Bild 231 und im Anhang A.13 wird ein Entwurf für ein Streckenband mit Informationen zum Sicherheitsverbesserungspotenzial (ESN), den Zustandswerten (ZEB), dem Zustandspotenzial und ausgewählten Bestands-, Verkehrs- und Planungsdaten dargestellt. Die Farbgebung stimmt jeweils mit den Kartendarstellungen überein. Der Maßstab wurde für die Bundes- und Landesstraßen auf 1:50.000 festgelegt und erlaubt damit die Darstellung von ca. 10 Kilometern auf einer A4 Blatt im Querformat. Das vorgeschlagene Layout orientiert sich wesentlich an den Anforderungen der strategischen und operativen Ebene. Es ist denkbar, dass für den operativen Bereich noch weitere bzw. detailliertere Daten, insbesondere für die Zwecke für die Unfall- bzw. Zustandsanalyse hinzugefügt der Darstellung werden. Der Maßstab müsste dafür entsprechend angepasst werden.

Eine vereinfachte Kartendarstellung für die Überlagerung von Sicherheitsverbesserungspotenzial der ESN, Zustandspotenzial und Einzelunfällen (nur Fahr- und Längsverkehrsunfälle) zeigen die Karten in Bild 127 und Bild 128. Im ersten Bild sind jeweils nur die Unfälle bei nasser Fahrbahn und im zweiten Bild nur die Unfälle bei trockener Fahrbahn dargestellt.

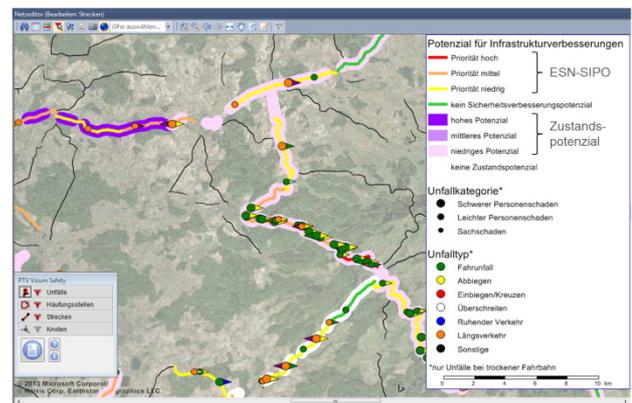
In Bild 127 findet sich der Fall, dass eine hohe Anzahl an Fahrnfällen bei Nässe (Abschnitt links oben im Bild) einen Bereich mit einem hohen Zustandspotenzial sowie einem niedrigen/mittleren

Sicherheitsverbesserungspotenzial abgrenzt. Dieser Abschnitt würde sowohl in der Rangfolge der ESN als auch des Zustandspotenzials auffallen. Aus Sicht der ESN wäre eine klare Zuordnung des Abschnitts zum Erhaltungsmanagement naheliegender.



**Bild 127:** Überlagerung von ESN-SIPO (Sicherheitsverbesserungspotenzial, Zustandspotenzial und den Unfällen bei nasser Fahrbahn

Im Vergleich dazu werden im Bild 128 nur die Unfälle bei trockener Fahrbahn visualisiert. Hier fällt hinsichtlich einer hohen optischen Unfalldichte vor allem der Abschnitt in der Mitte des Kartenausschnitts auf. Der Bereich ist geprägt durch eine Vielzahl an Fahrnfällen teilweise mit Beteiligung von Motorradfahrern, welches sich in einer hohen und mittleren Priorität für die ESN-Analyse niederschlägt. Da nur ein geringes Zustandspotenzial im Abschnitt vorliegt, sind eher Defizite im Bereich der Trassierung als Ursache für die Auffälligkeiten im Unfallgeschehen verantwortlich.



**Bild 128:** Überlagerung von ESN-SIPO (Sicherheitsverbesserungspotenzial, Zustandspotenzial und den Unfällen bei trockener Fahrbahn

Sinnvolle weitere Daten

- Querneigung
- Längsneigung
- Krümmung / Kurvigkeit
- Querschnittsbreiten [m]

- Fiktiver Wassertiefe (Emboss)
- Unfallhäufungsstellen
- Geschwindigkeitsbeschränkungen
- Alter der Asphaltbefestigung
- u.v.m.

## 8 Zusammenfassung

### 8.1 Hintergrund und Ziele

Die Straßenbauverwaltungen des Bundes und der Länder verfolgen bei der Erstellung Ihrer Erhaltungs- und Ausbauprogramme zwei wesentliche Ziele:

- Die bauliche, gestalterische und verkehrsbedingte Qualität der Straßennetze soll dem Verkehrsteilnehmer eine möglichst hochwertige Nutzung und einen sicheren Gebrauch der Infrastruktur gewährleisten.
- Die Unfallkosten sollen für die Verkehrsteilnehmer auf einem möglichst niedrigen und, unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Mittel, für die Volkswirtschaft vertretbarem Niveau gehalten werden.

Um den vorgenannten Zielen bzw. Ansprüchen gerecht zu werden, sind u. a. zwei unabhängige Prozesse (Verfahren) definiert worden, bei denen standardisierte Analysen zur Qualität des Straßennetzes durchgeführt werden:

- Die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) als turnusmäßig durchgeführtes Verfahren zur Analyse der Qualität des Straßenzustands auf Basis detailgenau erfasster Messgrößen zur Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche. Die Ergebnisse sind Grundlage für die Erhaltungsplanung. Einzelnen Zustandsgrößen der Fahrbahnoberfläche wie z. B. Rauheit und Unebenheit wird eine Sicherheitsrelevanz attestiert aber bisher in Deutschland nicht ausreichend statistisch nachgewiesen bzw. quantifiziert.
- Die Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN) beschreiben ein Verfahren zur netzweiten Analyse der Infrastruktursicherheit auf Basis von Unfalldaten. Als Ergebnis werden potenziell vermeidbare Unfallkosten abgeschätzt, welche z. B. für die Priorisierung von Aus- und Umbaumaßnahmen verwendet werden können. Das Verfahren wird bisher nur bedingt flächendeckend und selten regelmäßig angewendet. Methodische Probleme bei der Abschnittsbildung sowie der unzureichend beschriebene Weg zur Maßnahmenplanung stellen Probleme für die Praxis dar.

Das übergeordnete Ziel dieser Forschung war die Optimierung bestehender Verfahren, um die Verkehrssicherheit der Infrastruktur von Außerortsstraßen weiter zu verbessern. Verkehrssicherheit sollte aus Sicht des potenziellen Einflussbereichs des Zustands der Fahrbahnoberfläche beurteilt werden. Dabei sollten zusätzliche Infrastruktur-

und Verkehrsattribute berücksichtigt werden, welche netzweit zur Verfügung standen. Möglichkeiten zur Zusammenführung der Informationen aus beiden Netzanalysesystemen sowie der Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes sollten geprüft und zielführende Ansätze in einer beispielhaften Anwendung aufgezeigt werden.

### 8.2 Methodik

Die internationale Literatur wurde nach Ansätzen und Ergebnissen der Analyse des Sicherheitseinflusses des Fahrbahnzustandes analysiert. Die Verfahren ESN und ZEB wurden hinsichtlich ihrer aktuellen Defizite in der praktischen Anwendung bzw. der methodischen Grundlagen ausgewertet.

Basis der Analysen bilden die kompletten außerörtlichen Autobahn-, Bundes- und Landesstraßennetze aus mehreren Bundesländern. Der Fokus der Analysen richtete sich auf die freie Strecke, auf der sich ein Großteil des Unfallgeschehens außerorts ereignet. Die Straßennetze wurden mit Daten zum Zustand der Fahrbahnoberfläche, Einzelunfällen, Verkehrsaufkommen und vereinzelt Infrastrukturdaten ergänzt und auf einem Analysenetz zusammengeführt. Aus den Rohdaten wurden zahlreiche Kenngrößen bzw. Zustandsindikatoren für die Analyse aufbereitet, um deren Einsatz für die Beschreibung des Sicherheitseinflusses des Fahrbahnzustandes zu prüfen.

Parallel für das Unfallgeschehen und den Fahrbahnzustand wurden deskriptive Analysen durchgeführt, um eine Einordnung des Forschungsgegenstands sowie erste Ansätze für die Analyse abzuleiten. Anhand von Pilotanalysen wurden verschiedene statistischen Analysemethoden geprüft sowie unterschiedliche Netzeinteilungen untersucht.

Auf Basis komplexerer statistischer Verfahren wurden für die Analysebundesländer multikriterielle Unfallmodelle entwickelt. Für verschiedene Teilkollektive des Unfallgeschehens wurden auf Basis von Variablen zu Verkehr, Infrastruktur und Fahrbahnoberfläche Modellzusammenhänge beschrieben und hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit für die Praxis interpretiert. Aus den Modellen wurden allgemeingültige und verallgemeinerbare Zusammenhänge in einem einfachen Modell aufbereitet, welches die Grundlage für ein neues Verfahren zur Abschätzung des Zustandspotenzials (Nutzen aus Zustandsverbesserungen) darstellt. Die Ergebnisse dieses Verfahrens wurden mit den Ergebnissen aus ESN und ZEB beispielhaft für ein Analyseland überlagert und interpretiert. Hinweise zur Visualisierung und praktischen Anwendung geben Ansätze, wie die Ergebnisse in der Praxis verwertet werden können.

## 8.3 Erkenntnisse

### 8.3.1 Zusammenhang Zustandsgrößen und Unfallgeschehen

Anhand von deskriptiven Auswertungen, einfachen Analysen und Verteilungsvergleichen sowie der komplexeren Modellentwicklung wurden Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen verkehrlichen, infrastrukturellen und zustandsseitigen Merkmalen untereinander und mit dem Unfallgeschehen ermittelt.

Zusammenfassend werden an dieser Stelle die wichtigsten und verallgemeinerbaren Erkenntnisse kurz dokumentiert:

- Im internationalen Umfeld existiert eine Vielzahl an Untersuchungen, welche einen Zusammenhang zwischen der Griffigkeit und dem Unfallgeschehen nachweisen. Ein allgemeingültiger Zusammenhang wurde aber bisher nicht abgeleitet. In Deutschland konnte mit wenigen Ausnahmen bisher kein Zusammenhang nachgewiesen, noch quantifiziert werden.
- Auch für andere Zustandsgrößen (z. B. Längs- und Querebenheit) wurden vereinzelt Einflüsse auf das Unfallgeschehen attestiert. Es lassen sich aber keine einheitlichen Ergebnisse bzw. Tendenzen ableiten.
- Das Unfallgeschehen bei Nässe, welches in besonderem Maße von der Griffigkeit beeinflusst wird, zeichnet sich durch eine geringere Schwere im Vergleich zu den restlichen Unfällen aus.
- Das Unfallgeschehen bei Nässe zeigt eine erhöhte Auffälligkeit bei Fahrunfällen, Unfällen in der Kurve sowie bei der Beteiligung von Pkws.
- Zustandsgrößen korrelieren teilweise stark untereinander aber auch - vor allem die Griffigkeit - mit dem DTV.
- Es lässt sich über alle untersuchten Länder und Straßenklassen hinweg ein Zusammenhang zwischen verminderter Griffigkeit und der Zunahme an Fahr- und Längsverkehrsunfällen bei Nässe nachweisen. Dieser wird noch durch eine erhöhte Kurvigkeit verstärkt.
- Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden verallgemeinerbare Unfallmodelle für die Abschätzung von Griffigkeitsverbesserung der Fahrbahnoberfläche entwickelt. Damit lassen sich netzweit Potenziale ermitteln, die einen Nutzen von zustandsverbessernden Erhaltungsmaßnahmen quantifizieren.
- Die zentrale Größe des Zustandspotenzials kann im Rahmen des Erhaltungsmanagements für eine Verbesserung der Dringlichkeitsreihung bzw. der Prioritäten für Erhaltungsmaßnahmen verwendet werden. Im Rahmen des

ESN-Verfahrens kann das Zustandspotenzial zur Konkretisierung von Maßnahmenansätzen dienen.

### 8.3.2 Verfahrenstechnische und organisatorische Aspekte

#### Nutzung der in den ZEB-Daten enthaltenen Informationen zur Infrastruktur

Da in den Straßeninformationsbanken nicht zu allen Analyseländern Informationen zum Ausbauzustand verfügbar waren, wurde auf die Grunddaten der ZEB und die darin codierte Bahnigkeit und Fahrstreifenanzahl zurückgegriffen. Der Ansatz hat sich nach erster Erkenntnis bewährt.

Die bei der ZEB als Hilfsgrößen bezeichneten Daten Krümmung, Quer- und Längsneigung können als erklärende Größen des Unfallgeschehens verwendet werden, wenngleich es bisher im Rahmen der ZEB keine Qualitätsanforderungen an deren Erfassungsgenauigkeit gibt. Die Straßeninformationsbanken der Länder liefern hier in der Regel nicht die benötigten Informationen. Eine Grenze stellt die netzweite Beurteilung aufeinanderfolgender Trassierungselemente dar (Elementrelationen). Dafür sind noch geeignete Verfahren zu entwickeln, um sicherheitsrelevante Defizite der Infrastruktur zu detektieren.

#### Verwendung eines gemeinsamen Netzmodells

Die Verwendung des ASB-konformen Netzes der ZEB als gemeinsame Grundlage für die Zuordnung der Unfalldaten, die Berechnung der Sicherheitspotenziale (ESN), die Aggregation der Zustandsdaten und der Zustandspotenziale hat sich grundlegend als praxistauglich erwiesen. Da alle Bestandsinformationen, Verkehrsdaten und Verwaltungs- und Planungsdaten in den Straßeninformationsbanken mit derselben Systematik verortet sind, ist das Vorgehen auch für zukünftige Projekte zu empfehlen.

#### Synchronisierung der Inputdaten

Damit bei der netzweiten Anwendung des verfahrens die Inputdaten mit einem möglichst hohen Füllungsgrad bereitgestellt werden können, sind die unterschiedlichen Informationen über ein einheitliches Netzmodell zu verschneiden. In den Straßeninformationsbanken werden die Netzinformationen bei Netzänderungen angepasst und die Bestands-, Projekt und sonstigen Daten erhalten, sofern von der Netzänderung betroffen, einen neuen Straßenbezug. Bei der ZEB sind die Netze auf den Zeitpunkt vor der Erfassung „eingefroren“. Die Unfalldaten werden meist auf ein Analysenetz projiziert. Dieses Netz hat ebenso einen zeitlichen Bezug. Durch den vorbenannten Umstand kommt es bei der Verschneidung ZEB / Bestand / Unfall zwangsläufig zu Datenverlusten. Im vorliegenden

Projekt musste dieser Aspekt aufgrund fehlender Technologien (Straßeninformationsbanken) und Daten vernachlässigt werden. Bei der Implementierung eines praxistauglichen Verfahrens sollte die Synchronisierung jedoch erneut aufgegriffen und gelöst werden.

### **Eignung der 400 m - Abschnittsbildung**

Die Zustandsgrößen der ZEB lassen sich mit den gewählten Methoden netzweit aufbereiten und zu 400 m bzw. ESN - Abschnitten aggregieren. Für das Analysenetz konnten damit für die Berechnung des Zustandspotenzials, für ca. 65 – 75 % der Längen der freien Strecke Inputdaten bereitgestellt werden. Die Lücken resultieren im geringen Umfang aus Erfassungslücken der ZEB (z. B. Baustellen) und im weit größeren Umfang durch die an den Ortsdurchfahrten entstehenden Teilabschnitte mit Längen kleiner 400 m. Diese wurden im Projekt nicht betrachtet.

### **Eingesetzte IT-Verfahren, Datenformate**

Die im Projekt verwendeten Verfahren zur Plausibilisierung, Aggregation und Fusion der Informationen basieren auf komplexen (SQL-)Skripten. Insbesondere die Datenverarbeitung der umfangreichen Raster-Rohdaten der ZEB und der in den unterschiedlichen Datenquellen Informationen (Zustand, Bestand, Verkehr, Unfälle) erforderte einen sehr hohen Aufwand. Nicht zuletzt stellen die unterschiedlichen Datenformate Medienbrüchen dar. Hier müsste der OKSTRA (Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen) als einheitliche Objektbeschreibung für das Straßenwesen in den Ländern stärker genutzt und ggf. auf das Objekt Unfalldaten erweitert werden. Die im Projekt entwickelten Werkzeuge sind derzeit für einen anwenderfreundlichen Praxiseinsatz noch nicht geeignet. Analog zu den Standardprogrammen der ZEB müssten hierfür professionelle Tools erstellt und Datenformate vereinheitlicht werden.

### **Bedeutung der Griffigkeit**

Die durchgeführte umfangreiche Analyse und Berechnung der Zustandsgrößen war nur möglich, da die Messverfahren und die damit erzeugten Rohdaten der ZEB seit Jahren standardisiert sind und einem mehrstufigen Qualitätssicherungsprozess unterliegen. Jedoch ist auch bekannt, dass die Griffigkeit von den Umweltbedingungen beeinflusst wird und sehr kalte Winter mit vielen Frost-Tau-Zyklen zu einer natürlichen Aufräumung und einer temporären Verbesserung des Griffigkeitsniveaus führen können. Der Forschungsnehmer hat in dieser Arbeit gezeigt, dass sich das Modell zur Berechnung des Zustandspotenzials jeweils für ein einzelnes Analysenetz und die dazu zur Verfügung gestellten Zustandsdaten kalibrieren lässt. Hierdurch lassen sich zumindest von der Seite der

Zustandserfassung mehrjährige Einflüsse weitestgehend kompensieren. Es ist anzunehmen, dass sich die z. T. minimalen Veränderungen kaum auf die Häufigkeit des Unfallgeschehens auswirken dürften.

### **Ergebnisdarstellung**

Die Darstellung der Ergebnisse des Zustandspotenzials ist zwar in der Auflösung unschärfer als die 100 m - Zustandsabschnitte der ZEB. Die dargestellten 400 m - Abschnitten sind aber für die Ursachenforschung und Behebung von Gefahrenstellen deutlich besser geeignet, als die verhältnismäßig langen ESN - Abschnitte. Bei vielen geprüften Abschnitten mit hohem Sicherheitspotenzial zeigen die Streckenbilder und Zustandsdaten z. T. erhebliche Defizite, die als unfallbegünstigend interpretiert werden können.

Die erschaffenen Standards für die Karten- und Streckenbanddarstellung überzeugen durch die verständliche und mit anderen Informationen kombinierbare Darstellung des Potenzials und sind eine gute Grundlage für die Planung von Maßnahmen.

Die Online-Visualisierung der IT-ZEB (OnKo2-Verfahren) eignet sich sehr gut für eine erste Begutachtung der mit hoher Priorität markierten Abschnitte. Die möglichen Unfallursachen lassen sich so bereits am Bildschirm gut einschätzen.

### **Bedeutung der Ergebnisse für die Verbesserung der Sicherheit der Straßen**

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die ermittelten Abschnitte mit hohem Sicherheitspotenzial nach Überprüfung einer Stichprobe unter Verwendung der Streckenbilder und Rohdatenprofile der ZEB plausibel wirken. Es zeigt sich, dass bei den betrachteten Fällen neben der Griffigkeit jedoch oft auch noch andere mögliche bzw. z. T. offensichtliche Unfallursachen zu identifizieren sind. Der Forschungsnehmer ist davon überzeugt, dass die Ergebnisse dieser Forschung nachhaltig dazu beitragen können, dass zustandsverbessernde Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zielgerichteter als bisher geplant und umgesetzt werden können. Zudem wirkt der Ansatz präventiv und kann damit einen Beitrag dazu leisten, dass zukünftig früher eingegriffen werden kann und nicht zunächst das Unfallgeschehen zu identifizieren ist.

## 9 Empfehlungen

### 9.1 Grundlagen

Im Rahmen der Analyse haben sich eine Vielzahl an Fragestellungen hinsichtlich der Zusammenhänge von Zustand und Unfallgeschehen ergeben:

- Es konnten aktuell nur eingeschränkte Daten zur Beschreibung der Charakteristik der Infrastruktur verwendet werden, da die erforderlichen Daten nicht flächendeckend vorliegen bzw. mit hohem Aufwand (siehe Maier et al. 2013) erhoben werden müssten. Die Folge können Scheinkorrelationen oder nicht nachvollziehbare Zusammenhänge sein. Für eine abschließende Bewertung wäre die Zusammenführung von detaillierten Infrastrukturdaten wie z. B. aus Maier et al. (2013) mit flächendeckenden Zustandsdaten aus diesem Projekt in einem gemeinsamen Modell zielführend. Damit könnten dann auch zielgerichteter Maßnahmen für unterschiedliche Unfallsituationen miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet werden.
- Aktuell wurde ausschließlich das Unfallgeschehen der Strecke betrachtet. Durch Ausschluss der übrigen Bereiche, war keine zutreffende Analyse der Annäherungsbereiche bzw. der Knotenpunkte möglich. Durch eine detailliert Analyse der dort vorherrschenden Zusammenhänge zwischen Zustand und Unfallgeschehen würde den aktuellen Stand komplettieren.
- Das Forschungsprojekt war auf eine eher makroskopische bzw. netzweite Analyse ausgerichtet. Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse könnten nun detailliertere Analyse zu lokal begrenzten Defiziten beim Zustand der Fahrbahnoberfläche durchgeführt werden.
- Im Rahmen der Modellierung des Unfallgeschehens ergaben sich immer wieder Probleme mit wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den untersuchten Einflussvariablen (z. B. DTV und Griffigkeit). Dies könnte ggf. durch Vorher-Nachher-Analysen verringert werden. Mittlerweile stehen bundesweit auch für längere Zeiträume (bis zu 10 Jahren und mehr) digitale Unfalldaten zur Verfügung, um auch netzweite Analysen mit diesem Ansatz durchführen zu können.
- Das hier aufgezeigte netzweite Verfahren zur Abschätzung des Zustandspotenzials (Nutzen für Erhaltungsmaßnahmen) ist auch für andere Maßnahmenfelder denkbar. Beispielsweise wäre eine Konkretisierung des ESN-Verfahrens in Bezug auf Infrastrukturmaßnahmen denkbar. Die dafür notwendigen Unfall-

modelle stehen durch das HVS kurz- bis mittelfristig zur Verfügung.

### 9.2 Verfahren und Daten

#### Implementierung des Zustandspotenzials in das Erhaltungsmanagement

Das Erhaltungsmanagement, welches IT-technisch durch Pavement-Management-Systeme (PMS), unterstützt wird, nutzt bereits heute für die Optimierung und Priorisierung der vom System oder dem Ingenieur vorgeschlagenen Baumaßnahmen Größen, wie Zustand, Alter und Verkehrsbedeutung.

Das in der Forschung bestimmte Zustandspotenzial wäre hierfür ein weiteres und zudem sehr wichtiges Attribut. Im Rahmen einer Forschung sollte die Übernahme der in diesem Projekt gewonnenen Potenziale in das jeweilige Landes-PMS erforscht und der damit erzielbare Nutzen ermittelt werden.

#### Qualitätssicherung der Hilfsgrößen (ZEB)

Wie sich im Rahmen dieses Forschungsprojektes herausgestellt hat, sind die bei der ZEB als Hilfsgrößen bezeichneten Daten der Krümmung, der Quer- und Längsneigung von großem Nutzen für die Bewertung des Unfallgeschehens. Die Straßeninformationsbanken der Länder liefern meist nicht die benötigten Informationen. Bei der ZEB werden diese alle 4 Jahre neu erfasst. Die BAST, die im Rahmen der Qualitätssicherung der ZEB u. a. die zeitbefristete Betriebszulassung für die Messgeräte erteilt und dazu die Messsysteme intensiv prüft und abnimmt, weist bisher darauf hin, dass sie Hilfsgrößen Längsneigung und Krümmung nicht geprüft werden. Auch gibt es keine geeigneten Genauigkeitsanforderungen in der ZTV ZEB-StB, 2006. Der Forschungsnehmer empfiehlt daher, im Rahmen einer Forschung Anforderungen und für die spätere Qualitätssicherung Prüfverfahren zu implementieren.

#### Messverfahren und Zustandsgröße 3D-Ebenheit (ZEB)

Bisher wird in der ZEB ein Längsprofil und je Meter ein Querprofil erfasst. Die einzelnen Profile erlauben jedoch bisher keine realitätsgetreue dreidimensionale Abbildung der Fahrbahnoberfläche. Diese Einschränkung erschwert bzw. verhindert eine geeignete Bewertung der Befahrbarkeit bzw. der Fahrtsicherheit. In einer Forschung wären zunächst die Anforderungen, insbesondere geeignete Zustandsgrößen für die Bewertung der Unebenheit und der Entwässerungssituation, vorzuschlagen. Anhand geeigneter Messverfahren wäre abschließend der Ansatz zu validieren und bei Erfolg in die ZEB zu implementieren. Da 3D-Ebenheitsdaten eine präzisere Bewertung der

Substanz bzw. eine bessere Auswahl und Priorisierung der Erhaltungsmaßnahmen ermöglicht, könnte das Erhaltungsmanagement dadurch optimiert werden.

#### **Erfassungszyklus, Abdeckung**

Aufgrund der in der vorliegenden Arbeit aufgezeigten Bedeutung der Griffigkeit sollte erwogen werden, ob nicht ein kürzerer Erfassungszyklus gewählt werden sollte. Zudem wäre in Betracht zu ziehen, ob die Erfassung bei den Bundes- bzw. Landesstraßen immer in beiden Fahrrichtungen, ggf. auf allen vorhandenen Fahrstreifen, erfolgen sollte. Damit ließen sich mögliche Gefährdungspotenziale frühzeitiger und sicherer identifizieren.

## 10 Literatur

- AASHTO AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2009). *Highway Safety Manual (HSM) - 1<sup>st</sup> Edition*. (Entwurf des HSM vom 06.04.2009)
- AURICH, A. (2012). *Modell zur Beschreibung der Verkehrssicherheit innörtlicher Hauptverkehrsstrassennetze unter besonderer Berücksichtigung der Umfeldnutzung*. Dresden: Lehrstuhl für Straßenverkehrstechnik der TU Dresden (Dissertationsschrift)
- BAIER, R.; BARK, A.; KLEMP-SKOHNNEN, A.; KUTSCHERA, R. (2008). *Handbuch für die Verkehrssicherheit von Straßen - Entwurf eines Handbuches für die Bewertung der Verkehrssicherheit von Straßen*. (HVS) Unveröffentlichter Schlussbericht zum FE 03.389/2005/FGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Aachen/Gießen-Friedberg: BSV Büro für Stadt- und Verkehrsplanung / Fachhochschule Gießen-Friedberg
- BAIER, R.; KUNST, F.; MAIER, R. (2005). Sicherheitsanalyse von Straßennetzen am Beispiel der Bundeshauptstadt Berlin. In: *Straßenverkehrstechnik*, 49 (7)
- BAST; SÈTRA (2005). *Network Safety Management - NSM*.
- BECKER, W.(1992). Bewertungshintergrund für Griffigkeitsmessungen auf Bundesautobahnen mit der SCRIM.2. *Internationales Symposium über Oberflächeneigenschaften von Fahrbahnen*. Berlin: TU Berlin
- BESTER, C. J. (2003). The effect of road roughness on safety. In: *TRB 2003 Annual Meeting*
- BRANNOLTE, U.; BARTH, H.-B.; SCHWARZMANN, R.; JUNKERS, W.; LIU, Y.; SIGTHORSSON, H. ET AL. (1993):Sicherheitsbewertung von Querschnitten außerörtlicher Straßen. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Berichte der BAST, VerkehrstechnikV5)
- BULLAS, J.C. (2004). *Tyres, road surfaces, and reducing accidents: a review*, AA Foundation for Road SafetyResearch and the County Surveyors'Society
- BUTTERWEGGE, P. (2001). *Einfluss von Oberflächennässe auf das Entstehen von Unfallhäufungen (schwerer Unfälle) in einem ausgewählten Außerortsstraßennetz (Bundes- und Landesstraßen) des Oberbergischen Kreises (NRW)*.Köln: Diplomarbeit an der TU Dresden, Institut für Verkehrsanlagen
- CALIENDO, C.; GUIDA, M. J.; PARISI, A. (2007). A crash-prediction model for multilane roads. In: *Accident Analysis and Prevention*, 39 (2009), S. 657-670
- CEDR (2008). *Tools for Infrastructure Safety Management - Fact Sheet and Common Conclusions*, Paris: Technical Group of Road Safety.
- CHRISTENSEN, P.; ROGNOY, A. (2006). *The condition of the road surface and safety*. Oslo: Institute of Transport Economics.
- DAVIES, R. B.; CENEK, P. D.; HENDERSON, R. J. (2005). The Effect of Skid Resistance and Texture on Crash Risk. In: *International conference on Surface Friction of Roads and Runways*.Christchurch, New Zealand
- DIETZE, M.; EBERSBACH, D.; LIPPOLD, CH.; MALLSCHÜTZKE, K.; GATTI, G.; WIECZIENSKY, A. (2008). *Safety Performance Function*. Schlussbericht zum RIPCORD-ISEREST-Projekt - URL: <http://ripcord.bast.de> (05.06.2008)
- DUMONT, A.G.; ARNAUD, L.; CHENEVIÈRE, PH. (2006). *Griffigkeitsbedarf von Strassenbelägen*. Lausanne: EPFL (Forschungsarbeit des UVEK/ASTRA).
- EBERSBACH, D. (2006). *Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit*. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“(Dissertationsschrift)
- EBERSBACH, D.; SCHÜLLER, H. (2008). Praktische Anwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN) - Erfahrungen mit den Verfahren der Abschnittsbildung. In: *Straßenverkehrstechnik*, 52 (9), S. 515-527
- ELVIK, R.; CHRISTENSEN, P.; AMUNDSEN, A. (2004). *Speed and road accidents: An evaluation of the Power Model*. Oslo: Institute of Transport Economics (TOI report 740/2004)
- ELVIK, R.; VAA, T. (2004). *The Handbook of Road Safety Measures*. Oxford: ELSEVIER Ltd.
- ELVIK, R.; GREIBE, T. (2005). Safety Aspects related to low-noise surfaces. SILVIA project deliverable (EU-Projekt)
- EUROPÄISCHE UNION (2008). Richtlinie 2008/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über ein Sicherheitsmanagement für die Straßenverkehrsinfrastruktur. In: *Amtsblatt der Europäischen Union*. (29.11.2008)
- FÄRBER, N.; LERNER, M.; PÖPPEL-DECKER, M. (2011). *Sicherheitspotenzialkarten für Bundesstra-*

Ben nach ESN. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast-Bericht V206)

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (2003). *Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen - ESN*. Köln: FGSV-Verlag

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESEN (2012). *Merkblatt zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen - M Uko*. Köln: FGSV-Verlag

GALLAWAY, B.M.; ROSE, J.G.; SCHILLER JR., R.E. (1972). The Relative Effects of Several Factors Affecting Rainwater Depths on Pavement Surfaces. Highway Research Board (HRB), *Highway Research Record Nr. 396*, Washington D.C., USA

GRAVES, S.; ROCHOWIAK, D.(2005). *Mining and analysis of traffic safety and roadway condition data*.Alabama: UTCA (UTCA report 04310)

GREENE, M.J.; CUADWELL, L. (2008). *Early life skid resistance - an assessment of accident risk*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL)

HALL, J.W.; SMITH, K.L.; TITUS-GLOVER, L.(2000). Guide for pavement friction. TRB (NCHRP, Web-only document 108)

HARWOOD, D. W.; COUNCIL, F. M.; HAUER, E.; HUGHES, W.E.; VOGT, A. (2000). *Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways*. Report No. FHWA-RD-99-207. Federal Highway Administration, Washington, D.C.

HAMMERSCHMIDT, A. (2007). *Einfluss ausgewählter Entwurfsparameter auf die Verkehrssicherheit -fortführende Untersuchungen*. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ (Diplomarbeit am Lehrstuhl für die Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen)

HADI, M. A.; ARULDHAS, J.; CHOW, L-F.; WATTLEWORTH, J.A. (1995). *Estimating Safety Effects of CrossSection Design for Various Highway Types Using Negative Binomial Regression*. In: Transportation Research Record 1500. TRB, Washington, D.C. (S. 169-177)

HASAN, M.; SAYED, T.; HASSAN, Y. (2005). Influence of vertical alignment on horizontal curve perception: Effect of spirals and position of vertical curve. In: *Can. J. Civ. Eng.*, 32: 204-212.

HELLER, S. (2009). *Konzept zur verbesserten Bewertung der Ebenheit für die Stadt Erfurt*. Darmstadt: Heller IG

HELLER, S. (2007). *Berechnung eines gleitenden Mittelwerts der Griffigkeit zur Detektion von potenziell kritischen Abschnitten*. Darmstadt: Heller IG

HELLER, S. (2014) *Konzept zur Bewertung der Zustandsgröße Griffigkeit im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung von Bundesfernstraßen*. Forschungsprojekt FE 29.0295/2013/BASSt, BMVI

HESS, R. (2013) *Schaffung von Grundlagen und eines Bewertungshintergrundes für eine erweiterte Plausibilitätsprüfung bei TP2 Kontrollprüfungen im Rahmen der ZEB*.Forschungsprojekt FE 04.0260/2012/MRB des BMVBS

HOLLO, P.; KAJTAR, K.(2000). Rutting Survey with value analysis. In: *Save International conference proceedings*

HUK-VERBAND (1993). *Planung und Entwurf von Landstraßen - PELa*. Köln: Beratungsstelle für Schadenverhütung (Empfehlungen Nr. 9)

IHS, A. (2004). *The influence of road surface condition on traffic safety and ride comfort*.In: 6<sup>th</sup> International Conference on Managing Pavements, TRB

IHS, A.; GUSTAFSSON, M; ERIKSSON, O. ET AL.(2011). *Road user effect models - the influence of rut depth on traffic safety*.Linköping: VTI and Finnish Transport Agency

JÄHRIG, T. (2012). *Wirksamkeit von Maßnahmen zurVerbesserung der Verkehrssicherheit auf einbahnigenLandstraßen*. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“(Dissertationsschrift)

KAMPLADE, J.; SCHMITZ, H. (1984). *Erfassen und Bewerten der Fahrbahngriffigkeit mit den Messverfahren SRM und SCRIM*. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Straßenverkehrstechnik (Forschungsberichte, S.33-41, A10-A14)

KOMMA, Chr. (2004). *Untersuchung über einen möglichen Zusammenhang zwischen Trassierungsparametern der Straße und den Merkmalen der Fahrbahnoberfläche*. Diplomarbeit an der TU Darmstadt

KREBS, H.G.; KLÖCKNER, H.J. (1977). *Untersuchungen über Unfallraten in Abhängigkeit von Straßen- und Verkehrsbedingungen außerhalb geschlossener Ortschaften*. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr (Forschung Straßenbau und Straßenverkehr stechnik, Heft 223)

KENNEDY, C.; DONBAVAND, J. (2008). Relationship between skid resistance and accidents on local roads in the South West of England. In: *International conference on Surface Friction of Roads and Runways*.Christchurch, New Zealand

- LABAHN, S. (2003). *Verkehrssicherheitsanalyse für ausgewählte Hauptnetzstraßen der Stadt Cottbus - Vergleich mit den Ergebnissen des DUMAS-Projektes*. Cottbus: Brandenburgische Technische Universität (Diplomarbeit am Lehrstuhl für Straßenbau)
- LAMM, R.; BECK, A.; ZUMKELLER, K. (1999). *Analyse von Zusammenhängen zwischen Verkehrssicherheit und Straßenentwurf auf Außerortsstraßen*. In: Straßen- und Tiefbau; Heft 12, S. 6 - 12
- LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (2010). *VEK 2030 - Verkehrsentwicklungskonzept der Landeshauptstadt Stuttgart*. Stuttgart: Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung, Abteilung Verkehrsplanung und Stadtgestaltung
- LEDEN, L.; HÄMÄLÄINEN, O.; MANNINEN, E. (1998). The effect of resurfacing on friction, speeds and safety on main roads in Finland. In: *Accident Analysis and Prevention*, 30 (1), S. 75-85
- LEHMANN, T. (2006). *Sicherheitsanalyse eines Außerortsstraßennetzes*. Dresden: TU Dresden (Diplomarbeit am Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr)
- LEMKE, K. (2006). Sicherheit von Straßennetzen - Die ESN in der Praxis. In: *Straßenverkehrstechnik*, 50 (12), S. 706-712
- LERNER, M. (2012). Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen. In: *Fachveranstaltung: Sichere Landstraßen in Deutschland*. Hannover: Fachveranstaltung des ADAC am 10.09.2012 (Vortragsfolien)
- LEUTZBACH, W.; ZOELLMER, J. (1989). *Zusammenhang zwischen der Verkehrssicherheit und den Elementendes Straßenentwurfs*. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 545)
- LINDENMANN, H. P. (2006). New findings regarding the significance of pavement skid resistance for road safety on Swiss freeways. In: *Accident Analysis and Prevention*, 37 (2006), S. 395-400
- LIPPOLD, C. (1997). *Weiterentwicklung ausgewählter Entwurfgrundlagen von Landstraßen*. Darmstadt: Fachbereich Wasser und Verkehr der TU Darmstadt (Dissertationsschrift)
- LIPPOLD, C.; VETTERS, A.; LEHMANN, T.; RESSEL, W.; KLÖTZL, S. (2013). *Entwurfstechnische Möglichkeiten zur Vermeidung entwässerungsschwacher Zonen auf Richtungsfahrbahnen*. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1094)
- MAIER, R., BERGER, R.; SCHÜLLER, H.; HEINE, A. (2013). *Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Landstrassen*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Strassenwesen (Berichte der BASt, Verkehrstechnik, Heft V226)
- MAYER, G., VAN DER SLUIS, S. (2000). *Signifikante Griffigkeitswerte aus Verkehrssicherheitssicht*. Aachen: Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen (Schlussbericht zum Forschungsprojekt 04.182/1998/CGB)
- MAYORA, J. M. P.; PINA, R. J. (2009). An assessment of the skid resistance effect on traffic safety under wet-pavement conditions. In: *Accident Analysis and Prevention*, 41 (2009), S. 881-886
- MEEWES, V.; BUTTERWEGGE, P. (1996). *Verkehrssicherheitsprüfung -VSP- Verfahren Ergebnisse aus Mecklenburg-Vorpommern*. Köln: Beratungsstelle für Schadenverhütung des Verbands der Schadenversicherer e.V. (Mitteilungen Nr. 36)
- Meewes, V.; Kuler, H. (2001). *Abstand von Bäumen zum Fahrbahnrand*. Köln: Verkehrstechnisches Institut der Deutschen Versicherer (Mitteilung Nr. 39 des Institutes für Straßenverkehr Köln)
- MILTON, J.C.; MANNERING, F.L. (1996). *The relationships between highway geometrics, traffic related elements and motor vehicle accidents*. Seattle: Washington State Department of Transportation in cooperation with FHWA
- OTHMAN, S.; THOMSON, R.; LANNER, G. (2009). *Identifying Critical Road Geometry Parameters affecting crash rate and crash type*. In: 53<sup>rd</sup> AAAM Annual Conference Annals of Advances in Automotive Medicine, Okt. 5-7
- PÖPPEL-DECKER, M.; SCHEPERS, A.; KOßMANN, I. (2003). *Grundlagen streckenbezogener Unfallanalysen auf Bundesautobahnen*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast-Bericht M153)
- PIYATRAPOOMI, N.; WELIGMAGE, J.; KUMAR, A.; BUNKER, J. (2008). Identifying Relationship between Skid Resistance and Road Crashes using Probability-Based Approach. In: *Managing Road and Runway Surfaces to Improve Safety*. Cheltenham, England: Safer Roads
- RALLINGS, R. A. (2011). *Breaking the silence about road surfaces and accident rates*. Tasmanien, Australien Abstract During 2008-09, a committee of the Tasmanian Legislation
- REURINGS, M.; JANSSEN, T.; EENINK, R.; ELVIK, R.; CARDOSO, J.; STEFAN, C. (2005). Accident Prediction Models and Road safety Impact assessment: a state-of-the-art. Schlussbericht zum RIPCORDEREST-Projekt - URL: <http://ripcord.bast.de/>

- SCHMUCK, Alfred (1997). *Straßenerhaltung mit System - Grundlagen des Managements*. Kirschbaum Verlag
- SCHÜLLER, H. (2010). *Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der Straßengestaltung*. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ (Dissertationsschrift)
- SIMPSON, C. (2008). Performance of high skid resistance surfaces - crash trends. In: *International Safer Roads Conference: managing roads and runway surfaces to improve safety*. Cheltenham, United Kingdom, 11-14 May 2008
- SJÖGREN, L; LUNDBERG, T. (2011). *Swedish road condition indicators; past, present and future. Part 2: Present - year 2005-2009*. Linköping: Swedish Road Administration
- SPAHN, V. (2012). *Sonderprogramme zur Verbesserung der Verkehrssicherheit im Bestand*. Hannover: ADAC-Fachtagung am 10.09.12 (Vortragsfolien)
- STEINAUER; VAN DER SLUIS, S. (2002). *Abnahme-werte für die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen*. BMVBW
- STÜTZE, T. (2004). *Volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswerte für die Erhaltung von Bundesautobahnen*. Berlin: TU Berlin (Dissertationsschrift)
- TAYLOR, M. C.; BARUYA, A.; KENNEDY, J.V. (2002). *The relationship between speed and accidents on rural single-carriageway roads*. Crowthorne: Transport Research Laboratory (TRL Report 511)
- TEEKMAN, E. (2011). *The determination of the relationship between friction and traffic accidents*. Hasselt: University of Hasselt (Dissertationsschrift)
- THOMAS, F. (2003). Statistical Approach to Road Segmentation. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 129, No. 3, May 1, 2003; American Society of Civil Engineers ASCE; Reston; USA
- UNFALLFORSCHUNG DER VERSICHERER UDV (2011). *Sicherheitsanalyse von Straßennetzen: Erfahrungen mit einem automatisierten Verfahren*. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Unfallforschung der Versicherer (Unfallforschung Kompakt Band 14, basierend auf zwei Forschungsprojekten mit der PTV AG zur großräumigen Umsetzung des ESN-Verfahrens)
- VIETEN, M.; DOHMEN, R.; DÜRHAGER, U.; LEGGE, K. (2010). *Quantifizierung der Sicherheitswirkungen verschiedener Bau-, Gestaltungs- und Betriebsformen auf Landstraßen*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast-Bericht V201)
- VINER, H. E.; SINHAL, R.; PARRY, A. R. (2005). Linking Road Traffic Accidents With Skid Resistance - Recent UK Developments. In: *International Conference on Surface Friction of Roads and Runways*. Christchurch, New Zealand
- VINER, H. E.; SINHAL, R.; PARRY, A. R. (2004). *Review of United Kingdom Skid Resistance Policy*. Dossier on [www.piarc.org](http://www.piarc.org)
- WEHNER, B.; SCHULZE, K.-H.; DAMES, J.; LANGE, H. (1975). *Untersuchungen über die Verkehrssicherheit bei Nässe*. Bonn: BMV (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik BMV, Heft 189, S.3-31)
- WEINERT, R.; VENGELS, S. (2008). *Pilotanwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast-Bericht V171)
- WELLER, G.; SCHLAG, B.; GATTI, G.; JORNA, R.; VAN DE LEUR, M. (2006). *Human factors in road design. State of the art and empirical evidence*. (Internal report 8.1 RIPCORD-iSEREST)

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2014

V 243: Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen über den gesamten Lebenszyklus

Balmberger, Maibach, Schüller, Dahl, Schäfer € 17,50

V 244: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013

Fitschen, Nordmann € 28,50

V 245: Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunkte mit Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs

Friedrich, Hoffmann, Axer, Niemeier, Tengen, Adams, Santel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 246: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen

Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 247: Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw

Lippold, Schemmel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 248: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlagentermittlung

Burg, Röhling  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2015

V 249: Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsgerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen

Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 250: Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen mit Lang-Lkw

Lippold, Schemmel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 251: Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumgestaltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken

Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz € 18,50

V 252: Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen

Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx, Peters, Reimer, Zipf € 15,00

V 253: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen

Baier, Kemper  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 254: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw

Wellner, Uhlig  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 255: Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw

Zimmermann, Riffel, Roos  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 256: Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagenteile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Voraussetzung eines umfassenden Asset Managements

Zander, Birbaum, Schmidt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 257: Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen

Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier Hantschel, Otto € 18,00

V 258: Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten

Holldorff, Streich, Uhlig, Schäuferle € 18,00

V 259: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten

Geistefeldt, Sievers  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 260: Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst

Hausmann € 15,50

V 261: Nutzung von Radwegen

in Gegenrichtung – Sicherheitsverbesserungen  
Alrutz, Bohle, Busek € 16,50

V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung von Falschfahrten

Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl € 16,00

V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung der Verfahren

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 16,50

V 264: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen

Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 17,00

V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken

Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 266: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Hauptverkehrsstraßen

Baier, Hartkopf € 14,50

V 267: Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen

Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 268: Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur

Hegewald, Fürneisen, Tautz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften

Pohle, Maier € 16,50

- V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)  
Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe, Österle, Hoffmann € 17,50
- V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur  
Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen  
Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser, Geistefeldt, Hohmann € 16,00
- V 273: Autobahnverzeichnis 2016  
Kühnen € 25,50
- V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen  
Schulz, Zimmermann, Roos € 18,00
- V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf Bundesautobahnen  
Grahl, Skottke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die Verkehrsteilnehmer  
Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50
- V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen  
Kathmann, Roggendorf, Scotti  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014  
Fitschen, Nordmann € 30,50
- V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen  
Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug, Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00
- ## 2017
- V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien  
Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50
- V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren  
Maier, Berger, Kollmus € 17,50
- V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen  
Lippold, Vettors, Steinert € 19,50
- V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten  
Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50
- V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten  
Geistefeldt, Sievers  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz  
Kamptner, Thümmeler, Ohmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung  
Kleine, Lehmann € 16,50
- V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle  
Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50
- V 288: Überholungen von Lang-Lkw - Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf  
Roos, Zimmermann, Köhler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 289: Verkehrsqualität an verkehrsabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen  
Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais in Vorbereitung
- V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 19,00
- V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko  
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 18,50
- V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw  
Burg, Schrempf, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen  
Geistefeldt, Hohmann, Estel  
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50
- V 294: Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB  
Maibach, Tacke, Kießig in Vorbereitung
- V 295: Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss  
Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf in Vorbereitung
- V 296: Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergröße  
Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 297: Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plangleicher Knotenpunkte an Landstraßen  
Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- V 298: Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysesysteme  
Balck, Schüller, Balmberger, Rossol  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- 
- Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:
- Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH**  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. + (0)421/3 69 03-53 · Fax + (0)421/3 69 03-63
- Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
- [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)