

Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 84

bast

Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen

von

Günther Maerschalk
Ingenieurbüro SEP Maerschalk,
München

Stefan Oertelt
Dießen a. Ammersee

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 84

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](http://elba.bast.bvdm.de) zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 29.0222/2009/:
Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen

Fachbetreuung

Karen Scharnigg

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

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-108-0

Bergisch Gladbach, September 2014

Kurzfassung – Abstract

Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen

Für den in den vergangenen Jahren stark wachsenden Radwegebestand sollten die weitgehend noch fehlenden Verfahrensgrundlagen einer systematischen baulichen Erhaltung erarbeitet werden. Untersuchungsgegenstand waren dabei Radwege mit Asphalt-, Beton- und Pflasterdecken sowie wassergebundenen Decken in Baulast des Bundes.

Die Ziele der baulichen Erhaltung bestehen bei den Radwegen ähnlich wie bei Fahrbahnen in der Gewährleistung einer angemessenen Verkehrssicherheit und Befahrbarkeit sowie in einer rechtzeitigen wirtschaftlichen Substanzerhaltung. Als Zustandsmerkmale zur umfassenden Beschreibung der für die Zielkriterien relevanten Schäden und Mängel dienen die vertikalen Schwingbeschleunigungen (Effektivwert in m/s^2 pro m) oder die Höhenlängsprofile (pro cm) zur Kennzeichnung der Längsebenheit sowie Risse und sonstige Oberflächenschäden zur Beschreibung des Substanzzustands. Die Substanzmerkmale werden ebenso wie konstruktiv bedingte Mängel (überstehende/abgesackte Einbauten, Bordsteine, Wurzelhebungen) im 1-m-Raster ausgewertet. Das für die Zustandserfassung auf Basis vorliegender in- und ausländischer Erfahrungen entwickelte Messfahrzeug ermöglicht mit Elektrounterstützung (Pedelec) eine weitgehend konstante Fahrtgeschwindigkeit von 25 km/h und eine Tagesbefahrungsleistung ≥ 50 km. Aufgezeichnet werden digitale Videos, GPS-Tracks, die vertikale Schwingbeschleunigung (mit Beschleunigungsaufnehmer) und Tonsignale für besondere Markierungen.

Bei der Zustandsbewertung werden die für homogene Auswerteabschnitte ermittelten dimensionsbehafteten Zustandsgrößen in dimensionslose Zustandswerte (Noten von 1 bis 5) überführt, um eine Verknüpfung unterschiedlicher Merkmale zum Gebrauchs- und Substanzwert zu ermöglichen. Der Gebrauchswert, der für die Zielkriterien Sicherheit und Befahrbarkeit steht, entspricht bei Radwegen dem Zustandswert der vertikalen Schwingbeschleunigung. Beim Substanzwert werden vereinfachend nur die Risse mit den zusammengefassten restlichen Schäden („Restschadensfläche“) verknüpft. Die mitgeführten Informationen zu den konstruktiv bedingten Mängeln dienen nur zur Steuerung des Erhaltungsgeschehens.

Für die Erhaltungsplanung werden zusätzlich zu den Ergebnissen der Zustandserfassung/-bewertung und den Netzkenngößen mindestens noch die Radwegbreiten, die Deckschichtarten sowie grobe Angaben zum Befestigungsaufbau (standardisiert/nicht standardisiert) und zum Deckenalter benötigt. Derzeit müssen die Daten im Regelfall in einer lokalen Datei für die Erhaltungsplanung vorgehalten werden, die bezüglich der Netzdaten häufig mit der jeweiligen Straßendatenbank abgestimmt werden sollte. Aus den homogenen Auswerteabschnitten dieser Datei werden längere Erhaltungsabschnitte gebildet. Danach können Bereiche ausgesondert werden, für die punktuelle/kleinflächige Maßnahmen der baulichen Unterhaltung zur Beseitigung örtlicher Schäden bzw. konstruktiv bedingter Mängel oder auch Sondermaßnahmen (z. B. bei Wurzelhebungen) zweckmäßig sind. Der Bedarf an Instandsetzungen und Erneuerungen kann auf Basis von Mängelklassen, die ab Zustandswerten von 3,5 (Warnwert) mit Hilfe von Bestands- und Zustandskonstellationen abgrenzbar sind, in ein erstes einfaches, nach Dringlichkeiten sortiertes Erhaltungsprogramm überführt werden. Zuvor kann eine Zustandsfortschreibung mit pragmatisch festgelegten Verlaufsfunktionen erfolgen. Die Kostenwerte für die Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmenarten für Radwege sind derzeit noch in Analogie zur Fahrbahnerhaltung abgeschätzt. Die ausgearbeiteten Verfahren zur Bewertung der Maßnahmenutzen und zur netzweiten Optimierung von Maßnahmealternativen sind auch für kleine Radwegenetze letztlich nur mit einem IT-Verfahren („PMS-Radwege“) umsetzbar.

Im Projektablauf waren vielfach zeitintensive grundlegende Analysen erforderlich. Es ist jedoch gelungen, ein Verfahren zu entwickeln und durch Tests zur Anwendungsreife zu bringen, das auf dem naheliegenden Fahrzeug für die Zustandserfassung von Radwegen, dem Fahrrad, basiert. Auch aufgrund einer sehr eingeschränkten Verwendbarkeit von Daten aus vorliegenden netzweiten Erfassungen sind zur Überprüfung und Verifizierung der entwickelten Verfahren insbesondere zur Erfassung und Auswertung der vertikalen Schwingbeschleunigung wie auch zur Erhaltungsplanung weitere Untersuchungen und Sensitivitätsanalysen erforderlich.

Requirements for the maintenance of bicycle lanes

For the inventory of cycle lanes, growing considerably in the past years, the still largely missing foundations of a systematic process for structural maintenance should be developed. The subjects of investigation are federal cycle lanes with asphalt, concrete and paving stone surfaces as well as water-bound surfaces.

Similar as for roadways the objectives of structural maintenance for cycle lanes consist in ensuring an adequate safety and user comfort as well as in a timely economic substantial maintenance. As condition attributes for a comprehensive description of the relevant damages and defects related to the objectives, the vertical vibration acceleration (RMS in m/s^2 per m) or the amount of longitudinal profiles (per cm) to identify the longitudinal evenness and cracks and other surface damage for the description of the state of substance are used. The substantial attributes are determined as well as constructional deficiencies (supernatant/sagging gullies or curbs, root heaves) in 1-m grids. The bicycle for condition survey, developed on the basis of existing domestic and foreign experiences, permits with electric support (Pedelec) a largely constant speed of 25km/h and a daily driving rate \geq 50km. Recorded are digital videos, GPS tracks, the vertical acceleration (with an acceleration sensor) and audio signals for special markings.

Condition evaluation transfers the dimension affected condition variables of homogeneous assessment sections into dimensionless condition grades (1.0-5.0) to allow the linking of the different condition attributes to a performance index and a substantial index. The performance index, representing the objectives of safety and user comfort, corresponds for cycle lanes with the grade of the vertical vibration acceleration. The substantial index simplifying combines cracks and remaining damages ("residual damage area"). The accompanying information on constructional deficiencies only serves to control maintenance action.

For maintenance planning in addition to the results of condition evaluation and the network parameters at least the cycle lane width, the kind of surface, and general information of pavement structure (standardized/non-standardized) and pavement age is needed. Currently, the data for maintenance

planning must be retained as a rule in a local file, which should be often coordinated with the road database concerning the network parameters. The homogeneous assessment sections are combined to longer maintenance sections. Then, areas can be identified where small-scale treatments of routine maintenance repairing local damage or defects caused by constructional deficiencies respectively special treatments (caused by root heave) are useful. The need for rehabilitation and reconstruction can be transferred in a first simple maintenance program on base of deficiency classes that are distinguished starting from condition grades of 3.5 (alert value) with the help of inventory and condition combinations. Previously, the condition grades can be updated with pragmatically defined progress functions. The cost values for the rehabilitation and reconstruction treatments of cycle lanes are currently estimated in analogy to road maintenance. The elaborated methods of evaluation of treatment benefits and of network-wide optimization of treatment alternatives can be applied even for small cycle lane networks ultimately only on base of IT processes ("PMS for cycle lanes").

The project investigations required frequently time consuming fundamental analysis. However, it was possible to develop and test a process ready for application which is based on the obvious vehicle for the condition survey of cycle lanes, the bicycle. Due also to a very limited applicability of existing data from network-wide cycle lane surveys, the developed methods especially for collecting and analyzing the vertical acceleration as well as for maintenance planning must be tested and verified to the desired degree in additional sensitivity analyzes.

Inhalt

1	Einleitung	7	4.2.1	Untersuchung des Schwingkomforts an Fahrrädern 1988 durch PIVIT	33
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	7	4.2.2	Untersuchung des Schwingkomforts an Fahrrädern 1999 durch WÄCHTER et al.	34
1.2	Untersuchungsablauf und Abgrenzung der Aufgabe	8	4.2.3	Untersuchungen der Schwingbeschleunigungen durch die Uni BW München.	35
2	Zielkriterien und Anforderungsprofile	10	5	Zustandserfassung von Radwegen	36
2.1	Ziele der Radwegeerhaltung	10	5.1	Ausgangssituation in Deutschland	36
2.2	Typisierung von Radwegen	10	5.2	Visuelle Zustandserfassung	37
2.3	Nutzergruppen und Fahrradtypen	11	5.3	Messtechnische Zustandserfassung	38
2.4	Bauliche Eigenschaften von Radwegen.	12	5.3.1	Messfahrrad der Universität der Bundeswehr München	39
3	Beschreibung des baulichen Zustands von Radwegen	16	5.3.2	Messsystem ARGUS®-AGIL der Firma TÜV Rheinland Schniering	39
3.1	Zustandsmerkmale	16	5.3.3	Ausländische Systeme	41
3.1.1	Ebenheit und Textur	16	6	Zustandsbewertung von Radwegen	42
3.1.2	Griffigkeit.	17	6.1	Verfahren der Zustandsbewertung	42
3.1.3	Substanzmerkmale (Oberfläche)	18	6.2	Zustandsbewertung nach dem Verfahren der Uni BW München.	44
3.1.4	Konstruktiv bedingte Mängel	21	6.3	Zustandsbewertung nach dem modifizierten ZEB-Verfahren	44
3.2	Zustandsindikatoren	22	6.3.1	Normierung.	44
3.3	Zustandsgrößen	23	6.3.2	Wertsynthese	46
3.3.1	Bildung von Auswerteabschnitten.	23	7	Entwicklung und Erprobung einer alternativen Erfassungsmethode	46
3.3.2	Zustandsgrößen der Längsebenheit	25	7.1	Entwicklung des Messfahrrads.	46
3.3.3	Zustandsgrößen der Substanzmerkmale (Oberfläche).	25	7.2	Eigene Untersuchungen zur Messung und Auswertung der Schwingbeschleunigungen.	48
3.3.4	Zustandsgrößen der konstruktiv bedingten Mängel.	27	7.3	Vergleich eigener Messergebnisse mit Ergebnissen aus verschiedenen Untersuchungen	50
4	Auswirkungen der Längsunebenheit von Radwegen auf den Radfahrer	27			
4.1	Mechanische Schwingungen	28			
4.1.1	Grundlagen	28			
4.1.2	Aktuelles Regelwerk	30			
4.1.3	Älteres Regelwerk	31			
4.2	Bisherige Untersuchungen	33			

7.4	Zustandserfassung von Radwegen an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein	51	8	Erhaltungsplanung von Radwegenetzen	80
7.4.1	Vorbereitung der Zustandserfassung	51	8.1	Zusammenführung der Netz-, Bestands-, Verkehrs- und Zustandsdaten	80
7.4.2	Durchführung der Messfahrten	51	8.1.1	Umsetzung in der Straßendatenbank	81
7.4.3	Auswertungen	53	8.1.2	Separate Radwegedatei für die Erhaltungsplanung	81
7.5	Verifizierung der erhobenen Zustandsdaten	63	8.2	Bildung von Erhaltungsabschnitten	83
7.5.1	Berechnung der Schwingstärke aus Längsprofilen mit SIMBIKE	64	8.3	Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen: bauliche Unterhaltung und Sondermaßnahmen	84
7.5.2	Das Fahrradmodell der BASt	64	8.3.1	Bauliche Unterhaltung von Radwegen	85
7.5.3	Voruntersuchungen	66	8.3.2	Sondermaßnahmen aufgrund konstruktiv bedingter Mängel	86
7.5.4	Prüfung der Längsprofile der ZEB-Radwege BB 2008	67	8.4	Ermittlung von Erhaltungsmaßnahmen: Instandsetzung und Erneuerung	86
7.5.5	Prüfung der Längsprofile der ZEB-Radwege SH 2009/2010	67	8.4.1	Datengrundlagenvoraussetzungen und Modellgrundlagen	86
7.5.6	Prüfung der Längsprofile ausgewählter Strecken der ZEB-Staatsstraßen BY 2011	67	8.4.2	Ablauf der Planung	87
7.5.7	Prüfung der Längsprofile der Vergleichserfassung auf Radwegen in SH 2012	68	8.4.3	Zustandsprognose und Eingreifzeitpunkt	88
7.5.8	Zusätzliche Messungen auf ausgewählten Staatsstraßen in Bayern	68	8.4.4	Auswahl der zur Erhaltung anstehenden Abschnitte und Eingreifzeitraum	91
7.5.9	Vergleiche von gemessener und berechneter Schwingbeschleunigung	69	8.4.5	Ermittlung der bautechnisch möglichen Erhaltungsmaßnahmen	91
7.6	Alternative Zustandsbewertung für Radwege	73	8.4.6	Mängelanalyse zur Ermittlung der wahrscheinlichen Schadensursache(n)	91
7.6.1	Ermittlung von Zustandswerten (Normierung)	74	8.4.7	Kosten-Wirksamkeits-Bewertung von alternativen Erhaltungsmaßnahmen	94
7.6.2	Ermittlung des Gebrauchs- und Substanzwertes (Wertsynthese)	75	8.4.8	Netzweite Optimierung von alternativen Erhaltungsmaßnahmen	99
7.7	Testrechnungen und Sensitivitätsanalysen	75	8.4.9	Erhaltungsprogramm	100
7.7.1	ZEB-Radwegeteilnetz an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein 2011	75	8.5	Praktische Anwendung	100
7.7.2	ZEB-Radwegenetz an Bundes- und Landesstraßen in Brandenburg 2008	79	9	Zusammenfassung	102
			10	Literatur	107

1 Einleitung

In Deutschland besitzen gut 80 % der Bevölkerung mindestens ein Fahrrad [ALRUTZ, BOHLE 2007]. Mit den rund 70 Mio. Fahrrädern werden pro Jahr ca. 30 Milliarden Kilometer zurückgelegt. Angesichts dieses Potenzials, das derzeit bereits etwa 10 % der Gesamtverkehrsleistung abdeckt, geht das Bestreben der Bundesregierung dahin, die Wegeanteile des Null-Emissionsfahrzeugs Fahrrad weiter zu erhöhen. Seit der durch die Bundesregierung im Jahr 2002 erfolgten Vorlage des „Nationalen Radverkehrsplanes 2002-2012“ [BMVBW 2002], der bereits als Entwurf in der Weiterentwicklung bis 2020 vorliegt [BMVBS 2012], wird daher der Radverkehr als Teil der nachhaltigen Verkehrsentwicklung in vielfältiger Form gefördert. Dies manifestiert sich auch im finanziellen Engagement des Bundes. So wurden ab 2002 die Mittel für den Radwegbau an Bundesstraßen verdoppelt und zur Umsetzung des NRVP seit 2004 zudem jährlich 2 Mio. Euro für nicht investive Maßnahmen (z. B. Öffentlichkeitsarbeit wie Konferenzen, Tagungen, Ausstellungen und Messen) zur Verfügung gestellt. Im Jahr 2007 wurden im Bundeshaushalt 80 Mio. Euro für den Erhalt und den Bau von Radwegen an Bundesstraßen bereitgestellt [BMVBW 2002]. Auch durch dieses Engagement hat der Radverkehr im Zeitraum von 2002 bis 2008 bezogen auf alle Wege bundesweit um 17 % und damit stärker als alle anderen Verkehrsträger zugenommen [BMVBS 2012].

Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung vom 11. November 2005 wird ausdrücklich an der weiteren Umsetzung des NRVP gemeinsam mit den Ländern und Gemeinden festgehalten. Wie auch im Entwurf des „Nationalen Radverkehrsplanes 2020“ [BMVBS 2012] ausgeführt, kommt dem weiteren Ausbau des Radwegenetzes zukünftig eine bedeutende Rolle zu. Damit gewinnt auch eine zielgerichtete und wirtschaftliche Erhaltung des Radwegebestandes immer mehr an Bedeutung.

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Für ein zielgerichtetes und wirtschaftliches Vorgehen müssen die bisher größtenteils noch fehlenden Grundlagen für die Einbeziehung der Radwege in die systematische Straßenerhaltung geschaffen werden. Dazu sind zunächst die Anforderungen des Nutzers und des Baulastträgers an die Erhaltung von Radwegen zu definieren und zu präzisieren.

Voraussetzung dafür ist eine aufgabenbezogen umfassende Typisierung der straßenbegleitenden bzw. eigenständigen Radwege im Außerortsbereich sowie der Radwege in Ortsdurchfahrten bzw. in kommunalen Netzen. Hauptgegenstand der Untersuchung sind die Radwege in Baulast des Bundes.

Das Hauptziel von Maßnahmen zur baulichen Erhaltung von Radwegen besteht in einer Verbesserung ihres Zustands. Dafür müssen zunächst die bislang fehlenden einheitlichen systematischen Grundlagen zur Erfassung und Bewertung des Zustandes und, darauf aufbauend, zur Erstellung von Erhaltungsprogrammen für Radverkehrsanlagen erarbeitet werden.

Voraussetzung für eine differenzierte Zustandserfassung und -bewertung ist eine Definition von Anforderungsprofilen für die verschiedenen Radverkehrsanlagen sowie die Festlegung der in Abhängigkeit davon zu erfassenden Zustandsmerkmale und Zustandsgrößen. Darauf aufbauend kann analog zum Vorgehen bei Fahrbahnen ein Verfahren für die Zustandsbewertung von Radwegen entwickelt werden. Dazu gehören die funktionsabhängige Normierung der Zustandsgrößen zur Bildung von Zustandswerten sowie die Verknüpfung dieser Zustandswerte zu Teilwerten und zu einem Gesamtwert. Als Hintergrund für diese Bewertung und Verknüpfung müssen Zielkriterien für die Erhaltung der Radwege abgeleitet werden. Die Bewertungsergebnisse liefern die Grundlagen für die Konzeption von Erhaltungsprogrammen für Radwege.

Das zu entwickelnde Verfahren für die Zustandserfassung und -bewertung ist der erste und grundlegende Baustein eines Systems für eine technisch und wirtschaftlich optimierte Erhaltungsplanung der Radwege. Allein die Anwendung dieses Verfahrens ermöglicht bereits eine Vielzahl der dabei anfallenden aufgabenbezogenen Auswertungen und gewährleistet durch die vereinheitlichte Vorgehensweise die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit und damit die Transparenz von Aussagen z. B. zur Angebotsqualität von Radverkehrsflächen.

Einheitliche und transparente Entscheidungsgrundlagen für die Erhaltung der Radwege sind erforderlich, weil in vielen Bundesländern bereits umfangreiche aus verschiedenen Radwegtypen bestehende Radwegenetze definiert und beschrieben sind, die erhebliche touristische und wirtschaftliche Bedeutung haben können. Ein systematisches und nachvollziehbares Verfahren für die Erhaltung von Radwegen füllt zudem eine noch bestehende

Lücke im Rahmen eines umfassenden Management-Systems aller Straßenverkehrsanlagen („Asset-Management-System“).

1.2 Untersuchungsablauf und Abgrenzung der Aufgabe

Im Rahmen der Untersuchung werden ausschließlich befestigte Radwege betrachtet, d. h. Radwege mit Asphaltbelägen, Beton- und Pflasterdecken sowie wassergebundenen Decken. Nicht einbezogen werden aufgrund der erheblichen Unterschiede in der Zustandscharakteristik und im Erhaltungshandeln die unbefestigten Radwege. Unberücksichtigt bleiben auch Radverkehrsflächen auf Fahrbahnen oder Gehwegen (z. B. Radfahrstreifen, Schutzstreifen), die dem Erhaltungsbedarf dieser Verkehrsflächen zuzurechnen sind.

In Bild 1-1 ist der Untersuchungsablauf stichpunktartig zusammengefasst. Im methodischen Ablauf sind zunächst theoretische Analysen zur Entwicklung eines Verfahrens für die Zustandserfassung und -bewertung von Radwegen vorgesehen. Dazu gehören Betrachtungen zu den Zielen der Radwegeerhaltung, zu einer verkehrlichen und funktionalen Typisierung von Radwegen sowie zu den Nutzergruppen und den baulichen Eigenschaften. In Abhängigkeit der Bauweisen müssen für eine Zustandserfassung Merkmale zur möglichst umfassenden Beschreibung des baulichen Zustands defi-

niert werden. Da für die Radwegnutzer vor allem auch Wirkungen aus dem Zustand, speziell aus Unebenheiten, von großer Bedeutung sind, können die für Fahrbahnen verwendeten Zustandsmerkmale nicht vollständig übertragen werden. Die Zustandsmerkmale und die Indikatoren bzw. Zustandsgrößen zu ihrer Quantifizierung liefern die Basis zur Entwicklung und Ausarbeitung eines Konzepts für die Zustandsbewertung.

Flankierend zur Entwicklung eines Erfassungs-/Bewertungskonzepts werden zunächst vorliegende Verfahren zur Zustandserfassung/-bewertung analysiert. Dabei werden vor allem auch die Erfahrungen, methodischen Ansätze und Ergebnisse der bereits erfolgten messtechnischen Erfassungen der Radwegnetze in Brandenburg (Bundesfernstraßen und Landesstraßen) und Schleswig-Holstein (Landesstraßen) und – soweit möglich – der laufenden messtechnischen Erfassung des Radwegernetzes in Niedersachsen (Landesstraßen) berücksichtigt und in allen einzelnen Aspekten hinterfragt.

Nach dieser Bestandsaufnahme vorhandener Ansätze kann entschieden werden, ob und in welchem Umfang ein alternatives Auswertungs- und Bewertungsverfahren für Radwege zu entwickeln und einer Erprobung unter wechselnden Randbedingungen zu unterziehen ist. Diese Erprobung erfordert Testerhebungen und -rechnungen hinsichtlich der Anwendbarkeit, Plausibilität und Praxistauglichkeit insbesondere auch im Hinblick auf die zweckmäßigen homogenen Auswerteabschnitte für die Ermittlung von Zustandsgrößen. Die Ergebnisse des als tauglich angesehenen Auswertungs-/Bewertungsverfahrens sind eine wesentliche Grundlage zur Erstellung eines Erhaltungsprogramms für Radwegenetze.

Für eine systematische Erhaltungsplanung für Radwegenetze wird eine digitale Datenhaltung benötigt. Bei den bisher durchgeführten messtechnischen Zustandserfassungen/-bewertungen von Radwegenetzen wurden die aufgenommenen und ausgewerteten Daten nicht in den vorhandenen Datenbanken (z. B. TTSIB, NWSIB), sondern in separaten Dateien abgespeichert. Dies ist eine derzeit notwendige Zwischenlösung, die aufgrund der erforderlichen Anbindung an häufig zu aktualisierende Straßennetze auf Dauer nicht zielführend ist. Für fahrbahnbegleitende Radwege können gemäß „Anweisung Straßendatenbank (ASB)“ derzeit bereits die Querschnittsdaten (Streifenart und -breite) in den bestehenden Datenbanken hinterlegt werden.

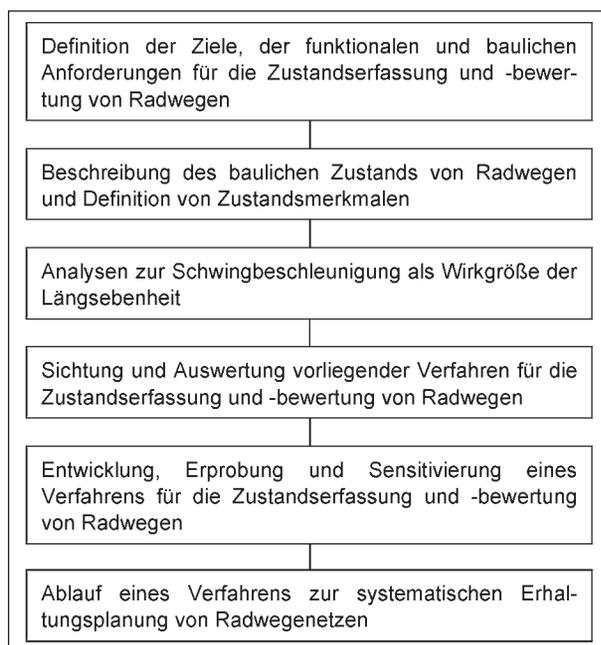


Bild 1-1: Untersuchungsablauf

Bei Radwegen, die in größeren Entfernungen von Fahrbahnen verlaufen, sowie bei den selbstständigen Radwegen ist dies momentan nicht möglich. Im Zusammenhang mit der Vorbereitung von Zustandserfassungen für Radwegenetze muss daher als Basis für eine Erhaltungsplanung auch auf diese IT-Frage mit der Zielrichtung eingegangen werden, Lösungsvorschläge für eine Umsetzung in den vorhandenen Straßendatenbanken zu entwickeln. Dies gilt sinngemäß auch für die Aufbau- und Bestandsdaten (Art, Dicke und Einbaujahr der Befestigungsschichten) sowie die erfassten und ausgewerteten Zustandsdaten der Radwege. Die IT-Umsetzung selbst muss bei den Anbietern der Straßendatenbank-Software erfolgen.

Für Radwege in Baulast von Kommunen können keine Lösungsvorschläge für eine Datenhaltung und IT-Umsetzung entwickelt werden, da vielfach keine oder sehr unterschiedliche Straßendatenbank-Systeme vorhanden sind. Die Frage, inwieweit Radwege in Baulast von Kommunen überhaupt einzubeziehen sind, ist zumindest offen. Bei strenger Auslegung der Aufgabenstellung wären zunächst nur Radwege an Bundesstraßen zu betrachten. Da sich Radwege an anderen klassifizierten Straßen (Landes- und Kreisstraßen) weder in ihrer Funktion noch in ihrer Zustandscharakteristik signifikant von den Radwegen an Bundesstraßen unterscheiden, sind die Untersuchungsergebnisse problemlos übertragbar. Auch in Bezug auf die kommunalen Radwege kann davon ausgegangen werden, dass zumindest die Inhalte und Verfahrensweisen der Zustandserfassung, z. B. hinsichtlich der Art der berücksichtigten Zustandsmerkmale, übertragbar sind. Eventuellen Abweichungen oder örtlichen Besonderheiten in den funktionalen Einstufungen von Radwegen kann allerdings nicht näher nachgegangen werden.

Für eine systematische Erhaltungsplanung muss zunächst geklärt werden, was unter „Erhaltung“ zu verstehen ist. Definitionsgemäß gehören zum Bereich „Erhaltung“ der Straßenbetrieb und die bauliche Erhaltung. Nachfolgend wird der Teilbereich der baulichen Erhaltung mit den in Bild 1-2 kurz erläuterten Maßnahmekategorien „Instandsetzung“ und „Erneuerung“ betrachtet. Nicht berücksichtigt werden damit die Kriterien und Faktoren, die für den Neubau oder den Um-/Ausbau von Radwegen maßgeblich sind. Um-/Ausbau und bauliche Erhaltung sind allerdings häufiger eng verknüpft, da Radwege vielfach in Verbindung mit baulichen Erhaltungsmaßnahmen ausgebaut (z. B. verbreitert)

werden oder, umgekehrt, die bestehenden Flächen von Radwegen, die zum Ausbau anstehen, bei den Ausbaumaßnahmen i. Allg. erneuert werden. Im Mittelpunkt der nachfolgenden Analysen stehen zwar die für die bauliche Erhaltung maßgeblichen Faktoren, es werden jedoch stets auch Kriterien einbezogen, die, wie z. B. die Radwegbreite, in erster Linie einen Ausbaubedarf beschreiben.

Ausgehend von den jeweils in Datenbanken oder separaten Dateien vorgehaltenen Netz-, Bestands- und Zustandsdaten (s. o.) ist es für eine systematische Erhaltungsplanung zweckmäßig, eine „Erhaltungsdatei“ für die homogenen Auswertabschnitte der Zustandserfassung zu erstellen. Aus diesen teilweise sehr kurzen homogenen Auswertabschnitten müssen zunächst längere Erhaltungsabschnitte gebildet werden, die den Anforderungen der Erhaltungspraxis entsprechen. Für die Abgrenzung dieser Erhaltungsabschnitte, die bei den Fahrbahnen auf Basis eines eigenständigen umfangreichen Forschungsprojekts [RÜBENSAM, SCHULZE 1996] erfolgt und in naher Zukunft nochmals systematisch überarbeitet werden soll, kann hier nur eine vorläufige pragmatische Vorgehensweise empfohlen werden, die neben einer rechnergestützten Voreinteilung eine weitgehend manuelle Überarbeitung durch den Erhaltungsingenieur vorsieht.

Die Erhaltungsabschnitte ermöglichen in einem ersten Durchlauf die Identifizierung der Bereiche, die zur baulichen Unterhaltung vorgeschlagen werden können und die aufgrund konstruktiv bedingter Mängel spezielle Maßnahmen erfordern. Die Vorschläge für Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen können mit einem vergleichsweise einfachen Verfahren auf der Grundlage der zu Mängelklassen zusammengefassten Bestands- und Zustandskonstellationen ermittelt werden. Die Anwendung dieses Verfahrens ist aufgrund der Daten-

Straßenbetrieb (Wartung) (z. B. Winterdienst, Reinigung, Grünpflege)		
Bauliche Erhaltung	Bauliche Unterhaltung (Instandhaltung) (z. B. kleinflächiges Vergießen von Rissen, Flicker)	
	Instandsetzung (größere flächige Maßnahmen)	I1 – auf der Deckschicht (z. B. Dünnschichtbelag, OB)
		I2 – an der Deckschicht (z. B. Tiefeinbau der Deckschicht)
		E1 – an der Decke (Hoch- oder Tiefeinbau der Decke)
Erneuerung	E2 – an Tragschicht/Oberbau (z. B. Verstärkung, Tiefeinbau)	

Bild 1-2: Begriffssystematik der Erhaltung

situation derzeit der Regelfall. Ein deutlich differenzierteres Verfahren mit einer Zustandsprognose, einer Bewertung der Nutzen und Kosten von Maßnahmealternativen und ihrer netzweiten Optimierung erfordert weitergehende Untersuchungen, so z. B. zur Ermittlung von Maßnahmekosten für Radwege, zu Funktionen für die Fortschreibung der Zustandsentwicklung oder zur Quantifizierung der Maßnahmenutzen. Eine zielführende Erhaltungsplanung auf Basis der momentan weitestgehend pragmatischen Vorschläge zu diesen Kriterien ist nur rechnergestützt durchführbar. Der dargestellte Ablauf der Erhaltungsplanung für Radwege kann als Grundgerüst mit ersten Vorschlägen für eine Parameterbelegung eines „PMS-Radwege“ gewertet werden.

2 Zielkriterien und Anforderungsprofile

Die Grundvoraussetzung für eine systematische Erhaltung mit einem konsistenten Verfahren für die Zustandserfassung und -bewertung ist, dass die Erhaltungsziele mit ihren Anforderungsprofilen eindeutig definiert sind.

2.1 Ziele der Radwegeerhaltung

Mit der baulichen Erhaltung von Verkehrsflächen werden generell Ziele verfolgt, die sich aus den Straßen- und Wegegesetzen sowie aus Haushaltsatzungen/-bestimmungen ableiten. Danach gehören zu diesen Erhaltungszielen vor allem die Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit („Verkehrssicherungspflicht“), die Gewährleistung einer angemessenen Befahrbarkeit sowie die wirtschaftliche (Substanz-)Erhaltung des in Verkehrsflächen investierten Anlagevermögens. In Bild 2-1 sind diese Zielkriterien, die auch für die Fahrbahnerhaltung gelten, näher erläutert. Das Zielkriterium „Umweltverträglichkeit und (Wirkungen auf) Dritte“, das derzeit bei Fahrbahnerhaltung nicht berücksichtigt wird, aber zunehmend Bedeutung bekommt (Lärm), kann bei Betrachtung von Radwegen ausgeblendet werden.

Beim Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen wird den Zielkriterien „Verkehrssicherheit/Befahrbarkeit“ und „Substanzerhalt“ eine gleich große Bedeutung zugemessen. Die Frage, wie diese Zielkriterien bei Radwegen zu gewichten sind, hängt sehr stark von

Zielkriterien	Erhaltungsziele – Radwegebefestigungen
Verkehrssicherheit	Vermeidung jeglicher vom Befestigungszustand ausgehender Unfallgefahr für die Radfahrer
Befahrbarkeit	Vermeidung unangemessener physischer Beanspruchungen der Radwegenutzer sowie der Fahrräder (und ihrer Nutzlast)
Substanzerhalt	Wirtschaftliche Erhaltung des in Radwegflächen investierten Anlagevermögens (des „Substanzwertes“ der Radwege)
Umweltverträglichkeit, Dritte	Minimale zustandsbedingte Lärm-/Spritz-/Sprühwasseremissionen und minimale optische Beeinträchtigungen des Straßenbildes

Bild 2-1: Zielkriterien der Radwegeerhaltung

verkehrlichen, funktionalen und baulichen Faktoren sowie der Nutzerstruktur ab. Nachfolgend wird daher auf die unterschiedlichen Radwegtypen und die relevanten Nutzergruppen eingegangen.

2.2 Typisierung von Radwegen

Bei einer Typisierung nach verkehrlichen und funktionalen Kriterien kann zunächst unterschieden werden zwischen dem Verlauf von

- Radwegen innerhalb bebauter Gebiete (Verlauf innerorts) und
- Radwegen außerhalb bebauter Gebiete (Verlauf außerorts).

Radwege im Innerorts- und Außerortsbereich unterscheiden sich vielfach in der Frequentierung (= Verkehrsstärke) und in bestimmten baulichen Gegebenheiten (z. B. Einbauten, Bordstein, s. Kapitel 3.4). Im Hinblick auf die Bedeutung der Zielkriterien „Verkehrssicherheit“, „Befahrbarkeit“ und „Substanzerhaltung“ wird nicht erkennbar, dass nur aufgrund des Verlaufs innerorts bzw. außerorts abweichende Zielprioritäten anzusetzen sind. Wichtiger als der Verlauf erscheint in dieser Hinsicht der Faktor „Verkehrsstärke“.

Ein Einfluss des verkehrlichen Verlaufs als

- fahrbahnbegleitender Radweg und als
- selbstständiger Radweg

auf Zielprioritäten kann ebenfalls ausgeschlossen werden. Allein aus dem verkehrlichen Verlauf ergeben sich keine unterschiedlichen Anforderungen an die Verkehrssicherheit, die Befahrbarkeit oder die Wirtschaftlichkeit der Substanzerhaltung.



Bild 2-2: StVO-Zeichen 237, 240, 241, 244

Unterschiede in den Anforderungen, insbesondere an die Verkehrssicherheit und die Befahrbarkeit, sind in hohem Maße gegeben:

- mit den StVO-Zeichen 237, 240, 241 bzw. 244 (s. Bild 2-2) angeordneten benutzungspflichtigen Radwegen und den
- nicht angeordneten Radwegen.

Radfahrer, die mit den in Bild 2-2 dargestellten StVO-Zeichen zur Benutzung eines Radwegs veranlasst werden, dürfen einen höheren Standard in Bezug auf die Verkehrssicherheit und die Befahrbarkeit erwarten als Radfahrer, die legal auf andere Verkehrsflächen, z. B. auf die Fahrbahn, ausweichen können. Selbstverständlich müssen auch für nicht angeordnete Radwege eine angemessene Verkehrssicherheit und Befahrbarkeit gewährleistet sein.

Radwege auf Fahrbahn- oder Gehwegflächen werden nicht betrachtet (s. Kapitel 1.2).

2.3 Nutzergruppen und Fahrradtypen

Eine Bestandsaufnahme und Kategorisierung der Nutzer bzw. Nutzergruppen von Radwegen und von verwendeten Fahrradtypen können für die Definition von Anforderungsniveaus an den Zustand von Radwegen hilfreich sein.

Erste Erkenntnisse hinsichtlich der Nutzergruppen und Fahrradtypen können aus dem ADFC-Monitor [Sinus 2011] gewonnen werden. Beim ADFC-Monitor handelt es sich um eine jährliche Untersuchung des Meinungsforschungsinstituts Sinus Sociovision auf der Basis einer Online-Befragung mit einer Stichprobengröße von 2.000 Fällen aus der Grundgesamtheit der deutschsprachigen Wohnbevölkerung ab 14 Jahren. Wie Bild 2-3 beispielhaft zeigt, können daraus Häufigkeiten von Nutzergruppen bzw. Fahrtzwecken abgeschätzt werden.

Die Analyse der Nutzergruppen erlaubt zusätzlich Aussagen zur

- zeitlichen Häufigkeit der Fahrradnutzung,

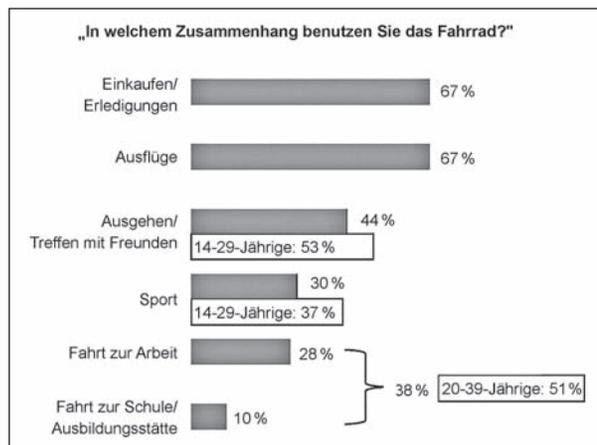


Bild 2-3: Anlass der Fahrradnutzung [Sinus 2011]

- Länge der Fahrtwege,
- Erwartungen und Ansprüche an Wegequalität.

Die Frage, ob in Abhängigkeit von Nutzergruppen bzw. Fahrtzwecken unterschiedliche Anforderungen an den baulichen Zustand zu stellen sind, ist bisher zumindest bei den Fahrbahnen nicht eindeutig beantwortet. Bei der ZEB der Bundesfernstraßen werden, stellvertretend für Fahrtzwecke, Fahrtgeschwindigkeiten und Fahrtweiten, Straßenklassen (Bundesautobahnen und Bundesstraßen) für eine Unterscheidung von Anforderungsniveaus zugrunde gelegt. Trotz der unterschiedlichen Geschwindigkeitsverteilungen werden jedoch die Anforderungen an den Zustand für die Bundesautobahnen und die freien Strecken der Bundesstraßen gleichgesetzt. Bei der Zustandsbewertung von Ortsdurchfahrten der Bundesstraßen und vielfach auch bei Landesstraßen werden geringere Anforderungen gestellt.

Im Zusammenhang mit der Zustandsbewertung von Radwegen erscheint es grundsätzlich sinnvoll, die Anforderungen an den Zustand unter Berücksichtigung von (überwiegenden) Nutzergruppen bzw. Fahrtzwecken zu relativieren, also höhere Anforderungen zu stellen, z. B. an die Längsebenheit bei häufiger Frequentierung und/oder größeren Fahrtweiten oder auch bei überwiegender Nutzung eines Radweges für Fahrten zur Schule/Ausbildungsstätte. Derzeit wäre eine derartige funktionale Relativierung nur von theoretischem Nutzen, da für eine praktische Anwendung die Nutzergruppenmischung bzw. die Fahrtzweckverteilung nicht nur netzweit, sondern für einzelne Radwege oder sogar Radwegabschnitte bekannt sein und darüber hinaus entsprechend digital aufbereitet werden müsste. Ein Substitut für die eigentlichen Einfluss-



Bild 2-4: Genutzter Fahrradtyp [Sinus 2011]

faktoren wie die Straßenklasse bei den Fahrbahnen (s. o.) wird für Radwege nicht ersichtlich. Aufgrund der fehlenden objektbezogenen Informationen ist eine unterschiedliche Zustandsbewertung in Abhängigkeit von Nutzergruppen bzw. Fahrtzwecken allenfalls eine Zukunftsoption.

Als Zukunftsoption kann auch eine Zustandsbewertung in Abhängigkeit von Fahrradtypen angesehen werden. Bild 2-4 zeigt exemplarisch eine Verteilung aus dem ADFC-Monitor [Sinus 2011]. Eine Analyse der Fahrradtypen erlaubt Aussagen zur

- Fahrgeschwindigkeit und somit zur Intensität von Beschleunigungen und Vibrationen infolge Unebenheit und Textur,
- Sitzposition (siehe Bild 2-5) und somit zu unterschiedlichen kontaktpunktspezifischen Belastungen und Auswirkungen auf Ganzkörper- und Teilkörperschwingungen (s. Kapitel 4.1),
- Federungs- und Dämpfungscharakteristik der Fahrradtypen und somit zur Intensität der verbleibenden Beschleunigungen und Vibrationen infolge Unebenheit und Textur.

Die Verteilung der Fahrradtypen ändert sich derzeit gravierend, da E-Bikes bzw. Pedelecs in den vergangenen Jahren prozentual zweistellige Zuwachsraten aufwiesen und ein Ende dieses Trends nicht absehbar ist [BMVBS 2012]. Für die Anwendung einer relativierten Zustandsbewertung entsprechend den Anforderungen unterschiedlicher Fahrradtypen müsste bekannt und datentechnisch unterlegt sein, welche Fahrradtypen an

Radtyp				
Kontaktpunkt	Rennrad	Reiserad	Hollandrad	City-Rad
Lenker	20 %	20 %	10 %	5 %
Sattel	10 %	30 %	50 %	70 %
Pedale	70 %	50 %	40 %	25 %

Bild 2-5: Belastung der Kontaktpunkte bei unterschiedlichen Sitzpositionen und Radtypen [ADFC 2012]

definierten Radwegeabschnitten besonders häufig auftreten.

2.4 Bauliche Eigenschaften von Radwegen

Die baulichen Eigenschaften von Radwegen werden durch die eingebauten Befestigungsschichten gekennzeichnet. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der obersten Schicht, der Deckschicht, zu.

Die empfohlenen Bauweisen für den Neubau gebundener Radwege sind in den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2001 (RStO 01)“ [FGSV 2001] zusammengestellt. Als oberste Schicht (Deckschicht) kommen danach Asphalt-, Beton- und (Beton-)Pflasterbeläge in Betracht. Diese Beläge liegen auf einer Schicht aus frostunempfindlichem Material, einer Kombination aus einer Schotter- bzw. Kiestragschicht und frostunempfindlichem Material oder nur auf einer Schotter- bzw. Kiestragschicht.

Der Belag von Radwegen soll eine ebene und auch bei Nässe griffige Oberfläche garantieren. Hinsichtlich dieser Zielsetzung sind maschinell gefertigte Decken aus Asphalt anderen Belägen vorzuziehen. Beim Handeinbau von Asphaltdeckschichten wird das o. g. Ziel am ehesten bei Verwendung weicher Bitumensorten erreicht. Betondecken und Betonpflasterdecken (auch: Betonplattendecken) weisen wegen der Quertugen eine schlechtere Befahrbarkeit auf als bituminöse Decken. Natursteinpflasterbeläge sind wegen ihrer Unebenheit für längere Radwegeabschnitte ungeeignet; sie kommen gele-

gentlich in historisch geprägten Ortsbereichen vor. Pflaster- und Plattenbeläge aus Betonsteinen haben bei den häufiger erforderlichen Aufbrüchen zur Leitungsverlegung oder -reparatur im Innerortsbereich Vorteile. Um die im Vergleich zu Asphaltbelägen schlechtere Befahrbarkeit möglichst gering zu halten, sind großformatige ungefaste Betonsteine zweckmäßig.

Radwege mit hydraulisch gebundener Decke („wassergebunden“) entsprechen nicht der Standardisierung nach RStO. Wassergebundene Decken haben einen mehr als doppelt so hohen Rollwiderstand wie Asphaltdecken oder Betonsteindecken [FGSV 1995] und sollten deshalb nur auf Freizeitwegen in Grünanlagen und in landschaftlich sensiblen Bereichen eingesetzt werden. Um die Befahrbarkeit auch bei Nässe zu verbessern und um den Unterhaltungsaufwand zu verringern, wird ein Dachprofil mit 3 % Querneigung empfohlen. Bewährt hat sich ein dreischichtiger Aufbau mit Tragschicht, Zwischenschicht und einer feinkörnigen (Korngröße 0/3 mm) 3-4 cm dicken Deckschicht mit hohem bindigem Anteil. Im Zusammenhang mit der Erhaltungsplanung stellt sich bei wassergebundenen Decken vor allem die Frage, wann der Aufwand für die bauliche Unterhaltung so groß wird (z. B. bei einem Gefälle > 6 %, [FGSV 1995]), dass der Einbau einer gebundenen Decke wirtschaftlich wird.

Für eine für die Erhaltungsplanung verwendbare Beschreibung der baulichen Eigenschaften von Radwegebefestigungen werden folgende Informationen benötigt:

- Art der Decke und der Tragschicht(en),
- Dicken dieser Schichten und
- Einbaujahre dieser Schichten.

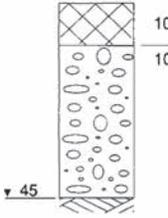
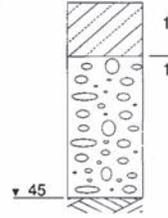
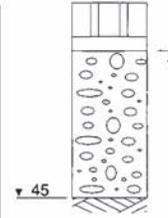
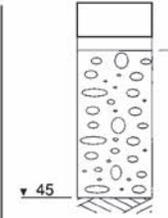
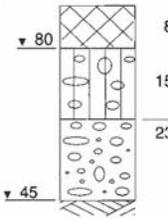
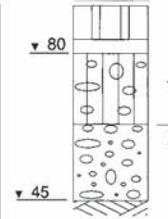
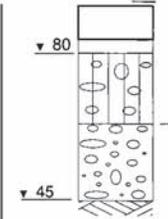
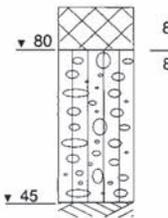
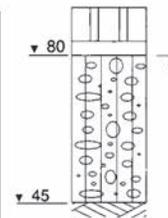
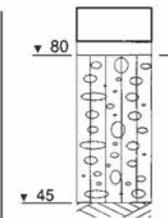
Die genannten Informationen kennzeichnen den Befestigungsaufbau von Radwegen und werden daher auch als „Aufbaudaten“ bezeichnet.

Einen standardisierten Aufbau nach RStO 12 (Bild 2-6, [FGSV 2012]) oder RStO 01 (Bild 2-7, [FGSV 2001]) können nur neuere ab 2012 bzw. nach 2001 gebaute Radwege haben. Es ist daher davon auszugehen, dass viele Radwege einen Aufbau gemäß der früheren Standardisierung der RStO 86/89 (Bild 2-8, [FGSV 1989]) haben. Wie aus den Bildern 2-6 bis 2-8 hervorgeht, unterscheiden sich diese Befestigungen nicht gravierend von den Standards gemäß RStO 01. Vorhandene Befestigungen nach RStO 86/89 können daher der Kategorie „standardisiert (und vergleichbar)“ zugerechnet werden.

Vor allem bei kommunalen Radwegen, aber auch bei Radwegen im Außerortsbereich ist zu vermuten, dass viele Radwegebefestigungen weder dem

(Dickenangaben in cm; ▼ E _{v2} – Mindestwerte in MPa)									
Zeile	Bauweisen	Asphalt		Beton		Pflaster (Plattenbelag)		ohne Bindemittel	
		30	40	30	40	30	40	30	40
Schotter- oder Kiestragschicht auf Schicht aus frostunempfindlichem Material									
1	Decke								
	Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material ¹⁶⁾	-	15	-	13	-	13	-	11
ToB auf Planum									
2	Decke								
	Dicke der Schotter-, Kiestragschicht oder Frostschuttschicht	20	30	18	28	18	28	26	36
⁷⁾ Tragschicht oder Trag- und Deckschicht, siehe auch Kapitel 3.3.3 ¹⁴⁾ Auch geringere Dicke möglich ¹⁶⁾ Aus 12 cm aus frostunempfindlichem Material, geringere Restdicke ist mit dem darüber liegenden Material auszugleichen ¹⁷⁾ Bei einer 12 cm dicken Betondecke ist keine Verdübelung bzw. Verankerung möglich ²⁰⁾ Bei Belastung durch Fahrzeuge (Wartungs/Unterhaltungsanspruch) E _{v2} = 100 MPa									

Bild 2-6: Bauweisen für Rad- und Gehwege gemäß RStO 12 [FGSV 2012]

(Dickenangaben in cm; ▼ E _{v2} – Mindestwerte in MN/m ²)													
Zeile	Bauweisen mit	Asphaltdecke			Betondecke			Pflasterdecke			Plattenbelag		
		20	30	40	20	30	40	20	30	40	20	30	40
Schicht aus frostunempfindlichem Material													
1	Decke												
	Schicht aus frostunempfindlichem Material												
	Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material	10	20	30	-	18	28	-	19	29	-	19	29
Schotter- oder Kiestragschicht auf Schicht aus frostunempfindlichem Material													
2	Decke												
	Schotter- oder Kiestragschicht												
	Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material	-	-	17				-	-	14	-	-	14
Schotter- oder Kiestragschicht auf Planum													
3	Decke												
	Schotter- oder Kiestragschicht												
	Dicke der Schotter- oder Kiestragschicht	-	22	32				-	19	29	-	19	29

⁶⁾ Tragschicht, siehe auch Kapitel 3.3.3
¹⁴⁾ Auch geringere Dicke möglich

Bild 2-7: Bauweisen für Rad- und Gehwege gemäß RStO 01 [FGSV 2001a]

Standard der RStO 01 noch dem Standard der RStO 86/89 entsprechen. Diese z. T. „historisch gewachsenen“ Befestigungen können als „nicht standardisiert“ kategorisiert werden.

Der vorhandene Befestigungsaufbau charakterisiert das investierte Anlagevermögen, d. h. die Substanz von Radwegen. Diese Substanz soll möglichst wirtschaftlich erhalten werden. Im Hinblick auf die Erhaltung der baulichen Eigenschaften von Radwegen ist somit das Zielkriterium „Substanzerhalt“ zu berücksichtigen. Dabei sind die Anforderungen umso höher, je wertvoller die vorhandene Substanz ist. Es bietet sich daher an, substanzrelevante Schäden und Mängel entsprechend der Wertigkeit der vorhandenen Substanz zu relativieren.

Für eine Einstufung dieser Wertigkeit erscheint die oben erläuterte Kategorisierung nach

- „standardisiert (und vergleichbar)“ sowie
- „nicht standardisiert“

insbesondere im Ablauf der Erhaltungsplanung (s. Kapitel 8) zweckmäßig. Diese Einstufung kann vielfach auch ohne detaillierte Angaben zu den Aufbaudaten vorgenommen werden. Die Erfahrungen mit der Verfügbarkeit von Aufbaudaten für die Fahrbahnen lassen nämlich erwarten, dass für Radwege derzeit nur in Ausnahmefällen genauere Informationen zum Befestigungsaufbau vorliegen und eine differenziertere Kategorisierung daher nicht praktisch umsetzbar ist.

(Dickenangaben in cm, Angaben des Verformungsmoduls E_{v2} in MN/m²)

Zeile	Bauweisen mit	bituminöser Decke				Betondecke				Pflasterdecke				Plattenbelag			
		20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50	20	30	40	50
Frostschuttschicht																	
1	Decke																
	Frostschuttschicht	$\frac{10^{9)}$ 10				$\frac{12}{12}$				$\frac{8}{3}$ 11				$\frac{6}{3}$ 9			
Dicke der Frostschuttschicht		10	20	30	40	-	18	28	38	-	19	29	39	11	21	31	41
Kies- oder Schottertragschicht auf Frostschuttschicht																	
2	Decke																
	Kies- oder Schottertragschicht	$\frac{8^{9)}$ 15				$\frac{8}{3}$ 15				$\frac{6}{3}$ 15				$\frac{6}{3}$ 15			
Dicke der Frostschuttschicht		-	-	17	27	-	-	-	-	-	-	14	24	-	-	16	26
Kies- oder Schottertragschicht auf Planum																	
3	Decke																
	Kies- oder Schottertragschicht	$\frac{8^{9)}$ 8				$\frac{8}{3}$ 11				$\frac{6}{3}$ 9				$\frac{6}{3}$ 9			
Dicke der Kies- oder Schottertragschicht		12	22	32	42	-	-	-	-	-	19	29	39	11	21	31	41
Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel auf Frostschuttschicht																	
4	Decke																
	Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel	$\frac{6^{9)}$ 12				$\frac{8}{3}$ 12				$\frac{6}{3}$ 12				$\frac{6}{3}$ 12			
Dicke der Frostschuttschicht		-	12	22	32	-	-	-	-	-	-	17	27	-	-	19	29
Bodenverfestigung auf Frostschuttschicht																	
5	Decke																
	Bodenverfestigung	$\frac{6^{9)}$ 12 ⁴⁾				$\frac{8}{3}$ 12				$\frac{6}{3}$ 12				$\frac{6}{3}$ 12			
Dicke der Frostschuttschicht		-	12	22	32	-	-	-	-	-	-	17	27	-	-	19	29

⁴⁾ Mit zusätzlichen Maßnahmen zur gezielten Rissbildung (z. B. gemäß ZTVT-StB)
⁹⁾ Tragdickschicht oder eine andere ein- oder zweischichtige bituminöse Befestigung
¹⁰⁾ Bei notwendiger Abdichtung Anordnung einer 8 cm dicken bituminösen Tragschicht

Bild 2-8: Bauweisen für Rad- und Gehwege gemäß RStO 86 [FGSV 1989]

Zu den baulichen Eigenschaften von Radwegen gehören im weiteren Sinne auch alle Arten von Einbauten (z. B. Schieberkappen) sowie Bordsteine bei den Übergängen zu Fahrbahnen. Diese Einbauten und Übergänge, die vor allem bei Radwe-

gen im Innerortsbereich auftreten, sind unvermeidlich und bei guter Ausführung auch unproblematisch. Sie können jedoch bei schlechter Ausführung zu starken punktuellen Unebenheiten („Stufen“ bzw. „Einzelhindernissen“) an Radwegen führen.

Die Beseitigung derartiger punktueller Unebenheiten kann und sollte bei der Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen erfolgen, sie sind jedoch, ähnlich z. B. wie stufige Übergangskonstruktionen von Brücken bei Fahrbahnen, nicht ursächlich für Erhaltungsmaßnahmen. Es ist jedoch zu prüfen, inwieweit schlecht ausgeführte Einbauten und Übergänge, insbesondere bei Häufungen für kurze Abschnitte, bei einer Priorisierung von Erhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind.

3 Beschreibung des baulichen Zustands von Radwegen

Die definierten, von verkehrlichen und funktionalen Faktoren mitbestimmten Erhaltungsziele werden vom baulichen Zustand der Radwegbefestigungen beeinflusst. Bei der Beschreibung dieses baulichen Zustands sind daher grundsätzlich alle Schäden und Mängel zu berücksichtigen, die sich auf die Zielkriterien auswirken. Diese Schäden oder Mängel können sich für die verschiedenen Deckenarten von Radwegen (z. B. Asphalt, Beton, Pflaster) unterscheiden.

Vorkommende Schäden und Mängel werden durch sog. Zustandsmerkmale kategorisiert. Ihre Ausprägung und/oder ihr Umfang werden mit Hilfe quantitativer oder qualitativer Maßstäbe, der Zustandsindikatoren und Zustandsgrößen, gekennzeichnet.

3.1 Zustandsmerkmale

Zustandsmerkmale bezeichnen i. Allg. Schäden und Mängel eines bestimmten Typs. Da die den baulichen Zustand kennzeichnenden Schäden und Mängel weniger von Verkehrsflächenarten als vielmehr von den unterschiedlichen Bauweisen bestimmt werden, können bei einer Typisierung Erfahrungen zugrunde gelegt werden, die für den Fahrbahnbereich vorliegen. Darüber hinaus kann auf vorliegende Ergebnisse aus erfolgten messtechnischen Radwegeerfassungen (Brandenburg, Schleswig-Holstein) und visuellen Radwegeerfassungen (u. a. Dresden) zurückgegriffen werden.

3.1.1 Ebenheit und Textur

Ein sehr wesentlicher Typ eines Mangels im baulichen Zustand von Verkehrsflächen ist die Beeinträchtigung der Ebenheit. Die Ebenheit einer Ver-

kehrfläche ist gekennzeichnet durch die Abweichungen der tatsächlichen Schichtoberfläche (Ist-Oberfläche) von der Form der projektierten oder aus Bestandsdaten definierten Oberfläche (Soll-Oberfläche). Abweichungen von der Soll-Oberfläche, die als Unebenheiten bezeichnet werden, sind zunächst grundsätzlich geometrische Unregelmäßigkeiten der Straßenoberfläche, die nicht der Textur zuzurechnen sind. Die Höhenabweichungen von der planmäßigen Oberflächengeometrie können in Längsrichtung (parallel zur Achse des Radwegs) und in Querrichtung (rechtwinklig zur Achse des Radwegs) auftreten. Es wird daher meist unterschieden zwischen Längsunebenheit und Querunebenheit. Als Längsprofil gilt dementsprechend ein vertikaler Schnitt durch die tatsächliche Oberfläche i. d. R. parallel zu ihrer Achse. Ein Querprofil ergibt sich aus einem vertikalen Schnitt durch die tatsächliche Oberfläche quer zu ihrer Achse. Da eine im Sinne der o. a. Definition eigentlich erforderliche flächenhafte Erfassung der Ebenheit derzeit noch nicht möglich ist, unterscheidet die Systematik der Straßenerhaltung dementsprechend beim Zustandsmerkmal Ebenheit zwischen den Merkmalsgruppen „Ebenheit im Längsprofil“, „Ebenheit im Querprofil“ und „Rauheit“ [FGSV 2006]. Für Radwege ist dabei die „Ebenheit im Querprofil“ von untergeordneter Bedeutung.

Als Grenze zwischen der Ebenheit im Längsprofil und der durch die sog. (Oberflächen-)Textur gekennzeichneten Rauheit ist nach EU-weiter Übereinkunft eine Wellenlänge von 0,5 m definiert [FGSV 2009]. Beeinträchtigungen der Ebenheit resultieren aus den beispielhaft in Bild 3-1 dargestellten längeren mulden- bzw. wellenartigen Verformungen oder aus Stufen.

Der Texturbereich wird unterteilt in (s. Bild 3-2)

- Mikrotextrur mit Wellenlängen von 0 mm bis 0,5 mm,
- Makrotextrur mit Wellenlängen von 0,5 mm bis 50 mm,
- Megatextrur (Straßen) mit Wellenlängen von 50 mm bis 500 mm.

Während Texturen bis zu einer Größenordnung von 0,01 mm einen sehr großen Einfluss auf die Nassreibung zwischen Gummi und Fahrbahnoberfläche haben, ist das bei der Makrotextrur nur teilweise der Fall. Kurze Makrotextrur-Wellen (bis etwa 5 mm) liefern auf nasser Oberfläche Reibung, längere Wel-

len erhöhen den Rollwiderstand. Die mittlere Profiltiefe der Makrotextur sollte bei etwa 1 mm liegen. Gänzlich unerwünscht ist die Megatextur (50 bis 500 mm), da sie maßgeblich den Rollwiderstand und bei Kraftfahrzeugen das Reifen-Fahrbahngeräusch erhöht.

Die Textur beeinflusst somit die Fahrzeug-Reifen-Interaktion. Wie aus Bild 3-2 hervorgeht, liegt der für den Radfahrer hinsichtlich der Befahrbarkeit relevante Wellenlängenbereich ungefähr zwischen 10 m und 10 mm und umfasst somit einen Teilbereich der Längsebenheit, die gesamte Megatextur und einen Teilbereich der Makrotextur. Für Radwege erscheint es somit sinnvoll und erforderlich, die erwähnten Bereiche der Mega- und Makrotextur einzubeziehen und somit von einer gegenüber den Fahrbahnen abweichenden Definition des Zustandsmerkmals „Ebenheit im Längsprofil“ auszugehen.



Bild 3-1: Mulden-/wellenartige Verformung

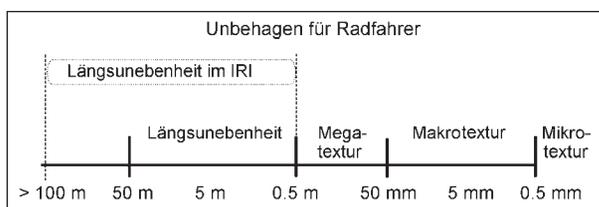


Bild 3-2: Ebenheit und Textur als relevante Wellenlängen für Radfahrer [NISKA, SJÖGREN 2007]

Untersuchungen des VTI [NISKA, SJÖGREN 2007] zeigen, dass der o. a. Grenzwert der Wellenlänge von 0,5 m für Radfahrer nicht zutrifft, da aufgrund der deutlich niedrigeren Fahrgeschwindigkeit auch Amplituden mit Wellenlängen kleiner 0,5 m vom Radfahrer als Unebenheit empfunden werden.

3.1.2 Griffigkeit

Der Begriff „Griffigkeit“ kennzeichnet die Wirkung der Textur und der stofflichen Beschaffenheit einer Fahrbahnoberfläche auf den Reibungswiderstand des Fahrzeugreifens unter festgelegten Randbedingungen, wie Nässezustand der Fahrbahnoberfläche, Reifenmerkmale, Fahrgeschwindigkeit und Temperatur ([FGSV 2003], siehe auch Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau).

Die Griffigkeit ist dementsprechend ein Maß für die Größe des Kraftschlusses zwischen Reifen und Fahrbahn. Trockene Fahrbahnoberflächen weisen grundsätzlich relativ hohe Kraftschlusswerte auf. Bei nassen Fahrbahnoberflächen kann der Kraftschluss demgegenüber stark reduziert sein. Auf vereisten Fahrbahnoberflächen ist der Kraftschluss sehr stark verringert. Bei der systematischen Straßenerhaltung ist die Griffigkeit daher ein wichtiges Merkmal für die Verkehrssicherheit neuer oder bestehender Straßenoberflächen.

Die Griffigkeit wird von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- Makro- und Mikrotextur der Fahrbahnoberfläche,
- Wasserfilmdicke in der Kontaktfläche,
- Reifenmerkmale,
- Fahrgeschwindigkeit,
- Fahrbahn-, Reifen-, Wasser- und Lufttemperatur.

Die genannten Faktoren wirken sich auf die Griffigkeitswerte aus, die dementsprechend nicht als primäre Kennwerte für die Fahrbahn, sondern als abgeleitete Wirkungsgrößen anzusehen sind. Von entscheidender Bedeutung ist dabei zunächst die durch die Mikrotextur gekennzeichnete Rauheit („Schärfe“) in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn bzw. Radweg. Durch die polierende Wirkung des Verkehrs (insbesondere des Schwerverkehrs) wird die Griffigkeit im Laufe der Zeit be-

einträchtig. Die Griffigkeit und ihre zeitliche Entwicklung sind daher stark abhängig von der Ausbildung einer ausreichenden Anfangsgriffigkeit bei der Herstellung der Verkehrsflächen. Wird eine geforderte Anfangsgriffigkeit nicht erreicht, kann durch das Einwalzen von Sand oder Splitt direkt bei der Herstellung („Abstumpfen“) die Rauheit der Oberfläche erhöht werden. Bei Betondecken muss die Oberflächenrauheit ebenfalls bei der Herstellung geschaffen werden. Hierzu werden Maßnahmen, wie beispielsweise der so genannte Besenstrich oder das nachgezogene Jutetuch, angewendet. Der bei Fahrbahnen eingebaute Waschbeton ist für Radwege ungeeignet.

Bei Asphaltbelägen sollte bei der Herstellung der Radwegebefestigung die verwendete Gesteinskörnung gebrochen und in hohem Maße polierresistent sein. Des Weiteren sollte der Bitumengehalt gering gehalten werden, um ein „Überfetten“ des Asphaltbelages zu vermeiden. Für den Radwegbau muss das Mischgut allerdings grundsätzlich etwas anders zusammengesetzt werden als im Fahrbahnbau üblich: Der Verzicht auf volle Frostsicherheit, die geringeren Schichtdicken und ggf. die Rücksichtnahme auf darunter befindliche Leitungen verlangen ein leicht verdichtbares, besonders bitumenreiches Mischgut, mit dem sich dichte und sehr flexible Asphaltbefestigungen herstellen lassen.

Sofern eine ausreichende Anfangsgriffigkeit beim Einbau gewährleistet wird, erscheint, auch unter Abwägung des Messaufwands und des Ertrags, das Zustandsmerkmal „Griffigkeit“ bei Radwegen von untergeordneter Bedeutung, da zum einen die gefahrenen Geschwindigkeiten weit unter denen von Fahrbahnen liegen und somit deutlich geringere Anforderungen an den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn zu stellen sind und zum anderen der Poliereffekt durch Fahrradreifen zu vernachlässigen ist. Durch die fehlende Walkwirkung, die durch Kfz- und insbesondere Lkw-Reifen erzeugt wird, ergibt sich bei den Radwegen im Laufe der Zeit eher eine Ausmagerung mit Versprödung der Oberfläche (s. Kapitel 3.1.3), die sich im Allgemeinen positiv auf die Griffigkeit auswirkt. Örtlichpunktuell vorhandene glatte Radwegeoberflächen können durch geeignete Maßnahmen wie z. B. „Aufrauen“ relativ unaufwändig saniert werden.

Die Frage, inwieweit Griffigkeitsdefizite, die im Streckenverlauf von Radwegen i. d. R. vernachlässigbare Beeinträchtigungen bewirken, in Kurvenbereichen oder vor Furten bei Querungsstellen zu

einer relevanten Gefährdung führen, sollte nach gezielten Griffigkeitsmessungen für derartige Bereiche vertieft werden.

3.1.3 Substanzmerkmale (Oberfläche)

Unter der Sammelbezeichnung „Substanzmerkmale“ werden verschiedene Zustandsmerkmale wie z. B. Risse und sonstige Oberflächenschäden zusammengefasst. Die Substanzmerkmale unterscheiden sich für Radwege nicht grundsätzlich von den entsprechenden Merkmalen der Fahrbahnen, da sie nicht nur durch verkehrliche Beanspruchungen, sondern zum wesentlichen Anteil auch durch witterungsbedingte Einwirkungen verursacht werden. Wie nachfolgend detailliert dargestellt, unterscheiden sich die Substanzmerkmale für die einzelnen Bauweisen.

Substanzmerkmale von Asphaltdecken

Bei Asphaltdecken werden die nachfolgend genannten Schäden zu den Substanzmerkmalen gerechnet.

Risse sind feine bis klaffende Brüche in einer gebundenen Oberbauschicht. Sie treten als einzelne Risse und als Häufung von Rissen auf, die netzartig miteinander verbunden sein können (s. Bild 3-3), wobei die Maschenweite des Netzes sehr unterschiedlich sein kann.

Risse ermöglichen den Eintritt von Oberflächenwasser in die Verkehrsflächenbefestigung. Bei Frost- und Tauwechseln führt dieses eingedrungene Wasser zur Zerstörung der Decke. Risse müssen bei Zustandserfassungen identifiziert und dementsprechend als eigenes Zustandsmerkmal definiert werden.



Bild 3-3: Risse

Die o. g. Rissarten (Einzelrisse, Risshäufungen, Netzrisse) können Hinweise zu den Schadensursachen liefern (z. B. Spannungsrisse infolge Beanspruchung, thermisch bedingte Risse, Reflexionsrisse, Randrisse). Die Schadensursachen sind insbesondere für die Erhaltungsplanung der Fahrbahnflächen von Interesse; aus Aufwandsgründen wird allerdings bei der Zustandserfassung der Fahrbahnen derzeit keine Differenzierung nach Rissarten vorgenommen.

Bei Radwegen können Spannungsrisse nur in Bereichen auftreten, die von Kfz befahren oder beparkt werden. Wird von Sondersituationen (z. B. Reflexionsrisse bei dünnen Asphaltbelägen auf Betonunterlage) abgesehen, sind bei Radwegen mit Asphaltbelägen in erster Linie thermisch bedingte Risse zu erwarten. Es erscheint daher ausreichend, bei den Radwegen ohne weitere Differenzierung nur das Zustandsmerkmal „Risse“ vorzusehen.

Eine Flickstelle bezeichnet einen örtlich begrenzten Bereich einer (z. B. durch Risse) geschädigten Verkehrsfläche, der durch Ausbessern wiederhergestellt wurde (s. Bild 3-4). Das Ausbessern durch örtlich begrenztes Flicken gehört zu den Maßnahmen der baulichen Unterhaltung (auch: Instandhaltungsmaßnahmen). Flickstellen bezeichnen somit Bereiche, für die bereits vorhandene Schäden beseitigt wurden. Sie beeinträchtigen als „Fremdkörper“ i. Allg. die Homogenität der vorhandenen Decken und weisen an den Rändern Anschlussnähte als besondere Schwachstelle auf.

Flickstellen sind daher ein potenzieller Gefahrenbereich für Folgeschäden, der bei einer Zustandserfassung registriert werden sollte. Dazu wird ein eigenes Zustandsmerkmal „Flickstellen“ vorgesehen.



Bild 3-4: Flickstellen

Risse werden vielfach nicht durch Flickern, sondern durch Vergießen mit Bitumen abgedichtet. Bereiche mit vergossenen Rissen sind als Flickstellen einzustufen. Zwischen diesen vergossenen und noch offenen Rissen ist zu unterscheiden, da ansonsten ein Vergießen im Rahmen der baulichen Unterhaltung unsinnig wäre. Bei der ZEB der Fahrbahnen wird nicht zwischen offenen und vergossenen Rissen unterschieden, obwohl seit langem begründete Vorschläge für diese Unterscheidung vorliegen [BÜHLER et al. 2002].

Insbesondere in Ortsbereichen treten, vielfach auch über größere Längen, Flickstellen infolge wiederhergestellter Aufgrabungen der Versorgungs- und Leitungsträger auf. Auch diese wiederhergestellten Grabungsflächen sind dem Zustandsmerkmal „Flickstellen“ zuzuordnen. Für das Erhaltungsmanagement in Kommunen wird diese Sonderform von Flickstellen gelegentlich besonders gekennzeichnet („Flickstelle infolge Grabung“). Für Radwege wird auf diese besondere Kennzeichnung verzichtet.

Schlecht ausgeführte, „aufgesetzte“ Flickstellen stellen vielfach stufenartige Einzelhindernisse dar, die sich auf die Längsebenheit auswirken können.

Ausmagerungen zeigen sich durch das Herauslösen von bituminösem Mörtel aus der Oberfläche, wodurch Mineralkörner freigelegt werden (Bild 3-5); im weiteren Zeitablauf tritt stets ein Verlust von Splittkörnern auf („Splittverlust“).

Ausmagerungen sind trotz angepasster Zusammensetzung der Asphaltdecke (bitumenreiches, leicht verdichtbares Mischgut) aufgrund der fehlenden Walkwirkungen von Kfz-Reifen eine Schädigung, die auf Radwegen mit Asphaltbelägen sehr häufig vorzufinden ist. Ausmagerung an sich stellt



Bild 3-5: Ausmagerung, Splittverlust

noch keine größere Beeinträchtigung der Substanz dar; die freigelegten Mineralkörner verbessern i. Allg. sogar die Griffigkeit. Als Vorstufe zu einem im Zeitablauf mit Sicherheit zu erwartenden Splittverlust ist Ausmagerung jedoch als potenzielle Gefährdung der Substanz anzusehen. Es ist daher zweckmäßig, ein eigenes Zustandsmerkmal vorzusehen.

Da auf Videobildern, aber auch in der Örtlichkeit nur sehr schwer feststellbar ist, ob bereits ein Verlust von Splittkörnern vorhanden ist, wird das speziell für Asphaltbeläge relevante Zustandsmerkmal mit „Ausmagerung/Splittverlust“ bezeichnet.

Das „Gegenteil“ von Ausmagerungen sind sog. Bindemittelanreicherungen („Schwitzstellen“). Bindemittelanreicherungen ergeben sich durch ein Ausreten von bituminösem Bindemittel an der Fahr- bahnoberfläche. Bindemittelanreicherungen treten vorwiegend an alten Asphaltdecken auf und werden durch Sonneneinstrahlung und die Walk-/Saugwirkung von Kfz-Reifen wesentlich verursacht. Der letztere Effekt kann bei Fahrradreifen ausgeschlossen werden. Sofern bei Asphaltbelägen von Radwegen trotzdem Bindemittelanreicherungen auftreten, besteht die Gefahr, dass die betroffenen und i. Allg. gut erkennbaren Bereiche „glatt“ sind, d. h. eine schlechte Griffigkeit aufweisen. Wie schon in Kapitel 3.1.2 erläutert, dürften beim Geschwindigkeitsniveau von Radwegen die dadurch verursachten Beeinträchtigungen der Verkehrssicherheit zumindest im Streckenverlauf vernachlässigbar sein. Es wird daher kein eigenständiges Zustandsmerkmal für Bindemittelanreicherungen vorgesehen.

Ausbrüche ergeben sich durch Herauslösen von Teilen der Oberfläche infolge von Verkehr, Verwitterung oder Witterungseinfluss (Bild 3-6). Im Vergleich zu Splittverlust (Bild 3-5) kennzeichnen Ausbrüche („Schlaglöcher“) deutlich umfangreichere



Bild 3-6: Ausbrüche

Materialverluste der Befestigung. Neben dieser Wirkung eines Substanzverlustes stellen Ausbrüche vielfach auch stufenartige Einzelhindernisse dar, die einen erheblichen Einfluss auf die Längsebenheit haben können.

Ausbrüche sind stets eine Folge von bereits vorhandenen Schädigungen, meist in Form von Netzen, gelegentlich auch in Form von Ausmagerung/Splittverlust. Prinzipiell ist es daher nicht erforderlich, ein eigenes Zustandsmerkmal vorzusehen. Es erscheint ausreichend festzustellen, ob bereits Ausbrüche vorhanden sind („ja/nein“). Bei automatisierten Zustandserfassungen mit Videobildaufnahme und -auswertung (s. Kapitel 7.4.3) ist es jedoch zweckmäßig, auch Ausbrüche als Zustandsmerkmal zu definieren.

Bei der Herstellung von Asphaltbelägen und insbesondere bei der Wiederherstellung von Aufgrabungen sind Arbeitsnähte unvermeidlich. Diese Arbeitsnähte stellen kein Problem dar, solange sie ordnungsgemäß vergossen sind. Sind sie fein bis klaffend aufgebrochen und/oder nicht vergossen, handelt es sich um „offene (Arbeits-)Nähte“.

Offene Nähte ermöglichen das Eindringen von Oberflächenwasser und sind daher eine ähnliche Gefährdung der Befestigungssubstanz wie Risse. Bei offenen Längsnähten, z. B. am Rande von wiederhergestellten Aufgrabungen, können sich, bei entsprechender Öffnungsweite, auch Beeinträchtigungen der Querebenheit in Form von (schmalen) spurrinnenartigen Vertiefungen ergeben; für schmale Fahrradreifen ist dabei eine unerwünschte Spurführung („Schieneneffekt“) nicht auszuschließen. Offene Nähte sollten daher bei einer Zustandserfassung registriert werden. Da Nähte bei ordnungsgemäßer Ausführung jedoch vergossen sind, ist nicht unbedingt ein eigenes Zustandsmerkmal notwendig. Es reicht prinzipiell aus, offene Nähte zu registrieren („ja/nein“). Ähnlich wie bei den Ausbrüchen ist es jedoch für automatisierte Zustandserfassungen mit Videobildaufnahme und -auswertung hilfreich, ein eigenes Zustandsmerkmal für offene Nähte festzulegen:

- (offene) Risse,
- Flickstellen (und vergossene Risse, Flickstellen infolge Grabungen und sonstige Flickstellen),
- Ausmagerung/Splittverlust.
- Ausbrüche,
- offene Nähte.

Substanzmerkmale von Beton- und Betonpflasterdecken

Bei Radwegen mit Beton- oder Betonpflasterdecken sind ähnliche Schäden zu erwarten wie bei Betonfahrbahnen. Dazu gehören:

- Längs- und Querrisse als feine bis klaffende Brüche in Betonplatten, die nicht ausschließlich im unmittelbaren Bereich der Plattenecken oder Plattenränder auftreten.
- Eckabbrüche als feine bis klaffende Brüche oder Zerstörungen im Bereich der Ecken von Betonbahnplatten.
- Kantenschäden als feine bis klaffende Brüche oder Zerstörungen im Bereich der Kanten von Betonplatten.
- Nester und Abplatzungen durch Herauslösen von Teilen der Beton- oder Betonpflasterdecke infolge von Verwitterung.
- Schadhafte Fugenfüllungen, wenn der Fugenfüllstoff von der Fugenkante gelöst, in sich gerissen, abgesackt, porös oder nicht mehr vorhanden ist.
- Flickstellen und bituminöser Teilersatz in Form von an der Plattenoberfläche mit Asphalt ausgebesserten oder aufgefüllten Teilbereichen sowie in Form eines teilweisen oder vollständigen Ersatzes der Zementbetonplatte durch Asphalt. Anders als bei der ZEB der Fahrbahnen werden vergossene Risse, reparierte Eckabbrüche und reparierte Kantenschäden ebenfalls als Flickstellen eingestuft.

Eckabbrüche unterscheiden sich von Längs- und Querrissen lediglich durch ihre Lage an den Plattenecken (s. o.). Bei Radwegen mit Beton- oder Betonpflasterdecken werden die Eckabbrüche daher vereinfachend den Rissen zugerechnet. Damit verbleiben die folgenden Zustandsmerkmale für Beton:

- Längs-/Querrisse (entsprechend dem Merkmal „Riss“ bei Asphalt),
- Flickstellen/bituminöser Teilersatz (entsprechend dem Merkmal „Flickstellen“ bei Asphalt),
- Kantenschäden (anstelle des Merkmals „Ausmagerung/Splittverlust“ bei Asphalt),
- Nester/Abplatzungen (anstelle von „Ausbrüchen“ bei Asphalt),
- schadhafte Fugenfüllung (anstelle von „offenen Nähten“ bei Asphalt).

Substanzmerkmale von wassergebundenen Decken

Bei hydraulisch gebundenen Radwegedecken ist nur das folgende Zustandsmerkmal von Bedeutung:

- Materialverluste in Form von Ausbrüchen.

Bei Ausbrüchen ist im Hinblick auf die Erhaltungsplanung in erster Linie ihr Umfang bzw. ihre Häufigkeit von Interesse (s. Kapitel 3.3.1). Damit kann z. B. analysiert werden, wann eine hydraulisch gebundene Decke durch eine gebundene (Asphalt- oder Beton-)Befestigung ersetzt werden sollte.

3.1.4 Konstruktiv bedingte Mängel

Alle Verkehrsflächen weisen Elemente auf, die ihre Funktion ergänzen oder zusätzliche Funktionen ermöglichen. Bei Radwegen gehören dazu vor allem

- Bordsteine beim Queren von Fahrbahnen,
- Metall- oder Betonabdeckungen der Einbauten von Leitungsträgern.

Diese konstruktiven Elemente sind, hauptsächlich in Ortsbereichen, unvermeidlich. Für das Erhaltungsmanagement von Radwegen sind diese Elemente von Belang, wenn sie bei der Zustandserfassung als Stufen bzw. Einzelhindernisse registriert werden, die Schwingungen bzw. Beschleunigungen verursachen. Bordsteine oder Abdeckungen von Einbauten müssen in diesen Fällen zunächst als Mängel in der Längsebene erfasst und bewertet werden. Es ist jedoch zusätzlich erforderlich, sie als konstruktiv bedingte Mängel besonders zu kennzeichnen, die bei der Erhaltungsplanung im Regelfall nur örtlich-punktuell und spezielle Einzelmaßnahmen, aber keineswegs Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen über größere Längen verursachen.

Als Sonderform eines „konstruktiven Mangels“ kann gewertet werden, wenn Bäume so nah am Rand von Radwegen stehen, dass ihre Wurzeln Hebungen und damit Wellen in der Decke verursachen. Diese Wurzelhebungen können zu erheblichen Unebenheiten in Längsrichtung führen. Beim Erhaltungsmanagement sind in Bereichen mit Wurzelhebungen spezielle Maßnahmen erforderlich. Wurzelhebungen müssen daher nachrichtlich registriert werden.

3.2 Zustandsindikatoren

In Bild 3-7 sind die in Kapitel 3.1 beschriebenen Zustandsmerkmale und die darüber hinaus relevanten konstruktiv bedingten Mängel in einer Übersicht zusammengestellt.

Die Erfassung der Ausprägung und/oder des Umfangs der durch die Zustandsmerkmale typisierten Schäden und Mängel erfolgt mit Hilfe von Zustandsindikatoren und Zustandsgrößen. Dabei ist

- der Zustandsindikator ein Kriterium zur quantitativen Beschreibung eines Zustandsmerkmals,
- die Zustandsgröße der anhand eines Zustandsindikators ermittelte quantitative Ausdruck für die Ausprägung bzw. den Umfang eines Zustandsmerkmals.

Als Zustandsindikator der Längsebenheit kann z. B. die Vertikalbeschleunigung herangezogen werden. Die zugehörige Zustandsgröße wäre dann das konkrete Ausmaß dieser Beschleunigung. Die Zustandsgröße ist meist das Ergebnis einer Auswertung und weniger das direkte Resultat der Erfassung. Bei einer rein visuellen Zustandserfassung werden allerdings die Zustandsgrößen bereits während der Erhebung vor Ort für längere, als homogen angenommene Abschnitte abgeschätzt.

Als Zustandsindikatoren werden für die in Bild 3-7 aufgelisteten Merkmale vorgesehen:

- Für die Längsebenheit die
 - für 1-m-Abschnitte erfasste vertikale Schwingbeschleunigung (s. Kapitel 4) oder
 - die im 1-cm-Abstand erfassten Höhenlängsprofile.

Die Profilwerte müssen in Beschleunigungswerte umgerechnet werden. Aufgrund der für den Radwegenutzer zweifelsfrei überragenden Bedeutung des Zustandsmerkmals „Längsebenheit“ wird auf diese Zustandsindikatoren und die daraus ermittelten Zustandsgrößen in Kapitel 4 gesondert und ausführlich eingegangen.

- Für alle anderen Zustandsmerkmale (Substanzmerkmale) der
 - binäre Zustandsindikator „ja/nein“ bzw. „vorhanden/nicht vorhanden“.

Die durch die Substanzmerkmale gekennzeichneten Schäden werden aus Videobildern ermit-

telt, die im 1-m-Längsraster vorliegen. Aufgrund der Qualität dieser Bilder, aber vor allem aus Aufwandsgründen ist es nicht möglich, das Ausmaß der Schäden (z. B. cm-Risslänge, m²-Flickstelle) für die einzelnen Bilder zu bestimmen. Es wird nur registriert, ob ein durch die Substanzmerkmale typisierter Schaden in einem Bild erkennbar ist oder nicht.

Da Substanzschäden vielfach verstärkt in den Randbereichen der Befestigung auftreten, ergibt sich die Frage, ob eine Unterscheidung zwischen „Mitte“ und „Rand“ des Radwegs getroffen werden soll. Bei den Fahrbahnen wird auf diese Differenzierung aus Aufwandsgründen derzeit verzichtet, jedoch insbesondere bei Landesstraßen immer wieder gefordert. Bei Radwegen erscheint eine derartige Unterscheidung auch im Hinblick auf die geringere Breite nicht erforderlich.

- Der binäre Zustandsindikator der Substanzmerkmale gilt auch für die konstruktiv bedingten Mängel (s. Bild 3-7).

Bordsteine bei Fahrbahnquerungen und Metall- oder Betonabdeckungen der Einbauten von Leitungsträgern sind unvermeidlich und per se keine Mängel. Dies ist erst der Fall, wenn sie stark überstehen oder stark abgesackt sind. Dabei ist zu beachten, dass Bordsteine aus entwässerungstechnischen Gründen nicht ohne Überstand verlegt werden können. Bei der Frage, welches Maß als „stark überstehend“ (oder „stark abgesackt“) einzustufen

Zustandsmerkmale	Bauweisen
Längsebenheit	alle
Risse Längs-/Querrisse	Asphalt Beton(-pflaster)
Flickstellen Flickstellen/bitumin. Teilersatz	Asphalt Beton(-pflaster)
Ausmagerung/Splittverlust Kantenschäden	Asphalt Beton(-pflaster)
Ausbrüche Nester/Abplatzungen Materialverluste (Ausbrüche)	Asphalt Beton(-pflaster) wassergebunden.
Offene Nähte Schadhafte Fugenfüllung	Asphalt Beton(-pflaster)
Konstruktiv bedingte Mängel	
Einbauten (> ±3 cm)	alle
Bordsteine (> ±3 cm)	alle
Wurzelhebungen	alle

Bild 3-7: Zustandsmerkmale und konstruktiv bedingte Mängel für Radwegebauweisen

ist, kann zunächst auf die für das Abtasten mit Blindenstock als erforderlich angesehene Höhe verwiesen werden, die mit 3,0 cm angegeben wird [VDK 2008]. Eine Stufenhöhe von 3,0 cm erscheint allerdings für Radwege eher grenzwertig. Es wird daher, auch im Hinblick auf die Erkennbarkeit in Videobildern oder aus Einzelausschlägen der aufgezeichneten vertikalen Schwingbeschleunigungen (s. Kapitel 4), festgelegt, dass Überstände oder Absackungen mit einer Stufenhöhe > 3 cm als Mangel zu werten sind (s. Bild 3-7).

Die Ermittlung der Zustandsindikatoren kann Hinweise zu erforderlichen örtlich-punktuellen Instandhaltungsmaßnahmen vermitteln, speziell in Bezug auf konstruktiv bedingte Mängel. Für die Planung von Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen ist die 1-m-Rasterung nicht geeignet.

3.3 Zustandsgrößen

Die Zustandsgrößen bei rein visuell/sensitiven Zustandserfassungen werden in der Örtlichkeit für längere als zustandshomogen eingestufte Abschnitte erfasst. Bei messtechnischen Zustandserfassungen müssen auf der Grundlage der 1-m-Rasterung erst nach der Erfassung vor Ort längere Auswerteabschnitte gebildet werden. Die auf diese längeren Auswerteabschnitte bezogenen Zustandsgrößen ergeben sich aus Auswertungen der Zustandsindikatoren.

3.3.1 Bildung von Auswerteabschnitten

Am einfachsten nachvollziehbar ist eine Abschnittsbildung mit einer festen Rasterung, wie sie z. B. bei der ZEB der Fahrbahnen mit 100-m-Auswerteabschnittslängen bei freien Strecken und 20-m-Auswerteabschnittslängen bei Ortsdurchfahrten (und Ästen) derzeit angewendet wird. Dabei ergeben sich Auswerteabschnitte mit sehr unterschiedlichen Längen an Netzknoten und anderen berücksichtigten Grenzpunkten (sowie beim Wechsel von Asphalt- und Betondecken). Änderungen des baulichen Zustands bleiben bei einer festen Rasterung vollkommen unberücksichtigt.

Bei den Radwegen erscheint es notwendig, zusätzlich zu den o. g. Zwangspunkten für Abschnittsgrenzen (Netzknoten, Grenzpunkte, Bauweisewechsel) auch Abschnittsunterteilungen vorzusehen, wenn ein einseitig straßenbegleitender Radweg die Straßenseite wechselt.

Im Grundraster der genannten Zwangspunkte für Abschnittsgrenzen, d. h. der

- Netzknoten,
- Grenzpunkte,
- Bauweisewechsel und
- Straßenseitenwechsel einseitiger Radwege,

wird angestrebt, für Radwege eine Verfahrensweise zur Auswerteabschnittsunterteilung mit flexiblen Längen unter Berücksichtigung von Zustandsänderungen heranzuziehen. Die abgegrenzten Auswerteabschnitte sollen dabei, anders als bei einer festen Rasterung, eine möglichst homogene Zustandscharakteristik aufweisen.

Zur Problematik der Abschnittsbildung ist vor allem eine Verfahrensweise anzuführen, die auf statistischen Entscheidungstheorien basiert [THOMAS 2000]. Bei diesem für das österreichische Pavement-Management-System der Fahrbahnen zur Abgrenzung von homogenen Erhaltungsabschnitten angewendeten Verfahren [WENINGER-VYCUDIL 2001] erfolgt die Definition der Abschnittsgrenzen durch die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei einer bestimmten Stelle der Messreihe tatsächlich um eine Abschnittsgrenze handelt („change point problem“, [THOMAS 2000]). Für das Verfahren ist eine kostenfreie IT-Anwendung verfügbar. Das Verfahren, das sowohl zur Abgrenzung von homogenen Auswerteabschnitten als auch zur Bildung von homogenen Erhaltungsabschnitten (s. Kapitel 8.3) anwendbar ist, soll, aufgrund des damit verbundenen Aufwands, im Rahmen einer geplanten Untersuchung zur Modifizierung der Abschnittseinteilung für Fahrbahnen getestet werden.

Ein relativ einfaches und nachvollziehbares Verfahren zur Bildung homogener Auswerteabschnitte bei Radwegen scheint möglich, wenn davon ausgegangen wird, dass die Längsebenheit für den Radwegnutzer eine überragende Bedeutung hat. Es liegt dann nahe, der Längsebenheit auch bei der Abschnittsabgrenzung eine übergeordnete Funktion einzuräumen, d. h.

- die Abschnittsgrenzen nach Homogenitätsanforderungen der Längsebenheit festzulegen und
- die durch Umfang bzw. Ausprägung gekennzeichneten Zustandsgrößen der Substanzmerkmale für diese „ebenheits-homogenen“ Abschnitte

te zu ermitteln und gleichsam als gegeben hinzunehmen.

Diese Verfahrensweise entspricht in Bezug auf die Substanzmerkmale dem Vorgehen bei der ZEB der Fahrbahnen. Die Zustandsgrößen werden dabei für willkürlich gebildete Abschnitte mit einer festen 100-m- oder 20-m-Rasterung ausgewertet. Bei einer Abschnittseinteilung nach Homogenitätskriterien der Längsebenheit werden die Zustandsgrößen für aus der Sicht der Substanzmerkmale ebenfalls willkürliche Abschnitte mit flexiblen Längen ermittelt. Bei beiden Vorgehensweisen ist es jedoch möglich, Abschnitte zu identifizieren, die nur aufgrund ihres Substanzzustands zur Erhaltung anstehen.

Bei der Abschnittsabgrenzung nach Homogenitätsanforderungen der Längsebenheit werden, beginnend an einem Startpunkt, kontinuierlich die Mittelwerte und die Standardabweichungen der erfassten vertikalen Schwingbeschleunigungen berechnet. Kontinuierlich bedeutet dabei, dass zunächst der Wert der vertikalen Schwingbeschleunigung für den Startpunkt und den unmittelbar darauffolgenden Punkt, danach für den Startpunkt, den zweiten Punkt und den darauffolgenden Punkt usw. betrachtet werden. Dabei gilt jeweils:

$$\bar{a}_n = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

$$s_n = \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n a_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n a_i\right)^2}{n^2}}$$

mit

a_i vertikale Schwingbeschleunigung für Punkt i

\bar{a}_n Mittelwert der a_i am Punkt n ($n > i$)

s_n Standardabweichung der a_i bei n

Da die Größe der Standardabweichung nicht unabhängig von der Größe des Mittelwerts ist, wird zusätzlich der Variationskoeffizient v_n berechnet. Der Variationskoeffizient v_n normiert als Maßzahl für die relative Streuung die Standardabweichung mit der Größe des Mittelwerts. Damit können Streuungen unterschiedlicher Häufigkeitsverteilungen verglichen werden. Es gilt:

$$v_n = \frac{s_n}{\bar{a}_n}$$

Aufgrund der verfügbaren Analysedaten erscheint es zweckmäßig, Abschnittsgrenzen wie folgt zu setzen:

- Variationskoeffizient $v_n > 0,5$ und/oder
- Änderung von $a_i > 3 \cdot s_n$.

Bild 3-8 zeigt die Häufigkeit der Abschnittslängen für eine 45-km-Teststrecke (s. dazu Kapitel 6.2) bei einer Abschnittsabgrenzung unter Beachtung der o. a. Bedingungen. Es ergeben sich

- 3.247 Abschnitte,
- Abschnittslängen einer Spannweite von 1 m bis ca. 348 m,
- Durchschnittslänge von ca. 13,9 m,
- Standardabweichung von ca. 22,9 m.

Bild 3-8 zeigt, dass fast zwei Drittel der 3.247 Abschnitte eine Länge von bis zu 10 m aufweisen. Das genannte Verfahren liefert somit einen hohen Anteil sehr kurzer homogener Abschnitte. Diese sehr kurzen Abschnitte können, wenn sie isoliert liegen, Hinweise zu Bereichen geben, für die örtlich begrenzte Maßnahmen der baulichen Unterhaltung (z. B. Flicker, Risse vergießen) in Betracht kommen. Bild 3-9 zeigt exemplarisch die Abschnittsfolge für einen kurzen Ausschnitt aus der Teststrecke. Es wird erkennbar, dass durchaus Abschnittslängen für die bauliche Unterhaltung aufscheinen.

Aus Bild 3-9 wird auch ersichtlich, dass sich bereits bei der hier exemplarisch vorgenommenen Bildung

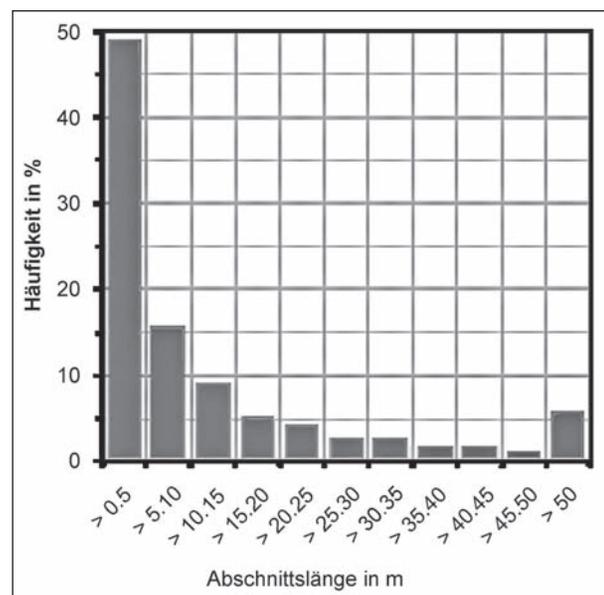


Bild 3-8: Häufigkeit der Abschnittslängen für eine 45-km-Teststrecke



Bild 3-9: Abschnittsfolge für einen Ausschnitt der Teststrecke

homogener Auswerteabschnitte Längen ergeben, die Basis für Instandsetzungen oder Erneuerungen sein können (s. auch Bild 3-8, ca. 6 % mit Abschnittslängen > 50 m). Für die Erhaltungsplanung zu Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen muss die Abschnittseinteilung auf der Grundlage der homogenen Auswerteabschnitte noch überarbeitet werden. Diese Überarbeitung, bei der Erhaltungsabschnitte mit größeren Längen gebildet werden, kann mit Hilfe von Plänen erfolgen, wie sie in Bild 3-9 beispielhaft und abschnittsweise veranschaulicht sind. Allerdings müssen darin nicht nur die Abschnittsgrenzen, sondern auch die Zustandsausprägungen erkennbar werden. Auf die Bildung von Erhaltungsabschnitten wird in Kapitel 8.2 näher eingegangen.

3.3.2 Zustandsgrößen der Längsebenheit

Als Zustandsgröße der Längsebenheit wird die vertikale Schwingbeschleunigung herangezogen, auf die aufgrund ihrer besonderen Bedeutung in Kapitel 4 ausführlich eingegangen wird. Durch Auswertung der gemessenen Höhenlängsprofile können auch Schwingbeschleunigungen rechnerisch ermittelt werden. Auf diese wichtige Auswertemöglichkeit wird in Kapitel 7.3 eingegangen.

Bei den bisherigen Zustandserfassungen und -bewertungen von Radwegen (Brandenburg, Schleswig-Holstein) wurden als Zustandsgrößen die Ergebnisse der Simulation der gleitenden Richtlatte (4 m, „Planografen-Simulation“) herangezogen.

Die Verwendung der Ergebnisse der Simulation der gleitenden Richtlatte (4 m) als kennzeichnende und bewertungsrelevante Zustandsgrößen für die Ebenheit im Längsprofil von Radwegen erfolgt in Analogie zur messtechnischen Zustandserfassung von Innerortsstraßen gemäß E EMI 2012

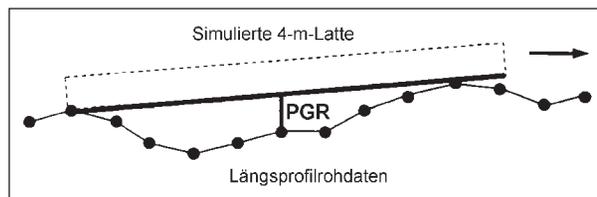


Bild 3-10: Simulation der gleitenden 4-m-Richtlatte [FGSV 2009]

[FGSV 2012] und dem Abnahmeverfahren bei Funktionsbauverträgen gemäß den Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung TP Eben – Berührungslose Messungen [FGSV 2009].

Bei der rechnerischen Simulation der gleitenden Richtlatte (4 m) wird die rechnerische Latte auf die Stützpunkte des Höhenlängsprofils aufgelegt (Verbindungsline zwischen zwei Stützpunkten) und der Abstand PGR zur Latte (senkrecht zur Fahrtrichtung) in Lattenmitte ermittelt (ein Wert größer null ergibt sich hierbei nur bei Mulden). Dieser Wert stellt eine Näherung für das aktuelle Stichmaß unter der Latte dar. Folgend wird die Latte im Stützpunktabstand Stützpunkt um Stützpunkt weitergeschoben. Es erfolgt hierbei eine Überprüfung, ob sich die Auflagepunkte auf unterschiedlichen Seiten der Lattenmitte (des Schwerpunktes) befinden. Nur in diesem Fall erfolgt eine Berechnung (andernfalls würde die Latte nicht stabil aufliegen und kippen). Die resultierenden Werte dieses Berechnungsvorganges bilden wiederum ein Profil (abgeleitetes Profil) im gleichen Stützpunktabstand (das heißt 1.000 Werte für einen 100-m-Auswerteabschnitt). Die Zustandsgröße PGR_AVG (auch mit PGR-A abgekürzt) ist der 100-m-abschnittbezogene Mittelwert dieses Profils. Die Zustandsgröße PGR_MAX (auch mit PGR-M abgekürzt) ist die betragsmäßig größte Abweichung im 100-m-Auswerteabschnitt.

Die beiden Komponenten aus der Simulation der gleitenden 4-m-Richtlatte gehen in die Zustandsbewertung ein.

3.3.3 Zustandsgrößen der Substanzmerkmale (Oberfläche)

Die für Radwege durch die Zustandsmerkmale Risse, Flickstellen und Ausmagerung/Splittverlust (Asphaltdecken) bzw. Längs-/Querrisse, Kantenschäden und bituminöser Teilersatz (Betondecken) typisierten Schäden können als Zustandsgrößen für Auswerteabschnitte prinzipiell in zwei Dimensionen quantifiziert werden:

- Mit ihrem Umfang bzw. ihrer Häufigkeit, gemessen in absoluten Längen- oder Flächeneinheiten (z. B. m, m²) oder in relativen Längen- oder Flächenanteilen (z. B. %-Anteil betroffene Länge/Fläche).
- Mit ihrer Ausprägung, gemessen in absoluten geometrischen Einheiten (z. B. Rissweite oder Ausbruchtiefe in mm) oder in qualitativen Einstufungen (z. B. schwach, deutlich oder stark ausgeprägte Ausmagerungen).

Da die beiden Dimensionen i. Allg. unterschiedliche Wirkungen der Substanzmerkmale kennzeichnen, besteht grundsätzlich der Wunsch, pro Merkmal zwei Zustandsindikatoren zu erfassen. Diesbezügliche Versuche (z. B. [PINGEL, MAERSCHALK 1984]) zeigen allerdings, dass der Aufwand für eine zweidimensionale Erfassung erheblich höher ist als die Beschränkung auf eine Dimension. Bei den Fahrbahnen wird aus diesem Grund und aufgrund der Erkennbarkeit auf den Videobildern bei der messtechnischen Zustandserfassung für Asphaltdecken nur ein Indikator ausgewertet. Dieser insbesondere auch für die Erhaltungsplanung relevantere Indikator beschreibt den Umfang bzw. die Häufigkeit der durch die Substanzmerkmale gekennzeichneten Schäden.

Bei der Festlegung der Zustandsindikatoren für die Substanzmerkmale der Radwege wurde, ebenfalls aus Aufwands- und Erkennbarkeitsgründen, bereits eine Vorentscheidung in Richtung Umfang bzw. Häufigkeit getroffen. Als Zustandsindikatoren liegen für 1-m-Abschnitte jeweils die binären Informationen „ja/nein“ bzw. „vorhanden/nicht vorhanden“ vor (s. Kapitel 3.2).

Nach dieser Festlegung der Zustandsindikatoren ist für die Substanzmerkmale der Radwege bei der Ermittlung der Zustandsgrößen nur eine Auswertung nach Schadensumfang bzw. Schadenshäufigkeit möglich. Dabei kann vereinfachend die Abschnittslänge als Bezugsbasis zugrunde gelegt werden, weil aufgrund der vergleichsweise geringeren Breite der Radwege pro Querschnitt nur ein Videobild auszuwerten ist und nicht, wie bei den Fahrbahnen, drei nebeneinander liegende Bilder zu berücksichtigen sind. Auch bei einer rein visuellen Erfassung können Längen sehr viel schneller und präziser abgeschätzt werden als Flächen.

Restschadensfläche

Die durch die Zustandsmerkmale Risse, Flickstellen, Ausmagerung/Splittverlust und Ausbrüche

(Asphaltdecken) bzw. Längs-/Querrisse, Kantenschäden und bituminöser Teilersatz (Betondecken) typisierten Schäden werden bei der Berechnung der Zustandsgrößen einer Synthese zur Berechnung der Restschadensfläche [OERTELT, MAERSCHALK 2006] unterzogen.

Für die Bauweise Asphalt werden zunächst die Vereinigungsmenge der Schadensflächen von Rissen, Flickstellen, Ausmagerung/Splittverlust und Ausbrüchen sowie zusätzlich und separat die Fläche mit Rissen (RISS) bestimmt. Durch Subtraktion ergibt sich die nicht von Rissen betroffene Restschadensfläche (RSFA).

Für die Bauweise Beton werden zunächst die Vereinigungsmenge der Schadensflächen mit Längs- und Querrissen (inklusive Eckabbrüchen), Kantenschäden, Abplatzungen/Nestern und bituminösem Teilersatz und separat die Fläche mit Längs-/Querrissen (+ Eckabbrüchen) bestimmt. Aus der Differenz ergibt sich die nicht von Längs-/Querrissen betroffene Restschadensfläche (RSFB).

Bei der Ermittlung der Zustandsgrößen für die Zustandsmerkmale Risse, Flickstellen und Ausmagerung/Splittverlust (Asphaltdecken) bzw. Längs-/Querrisse, Kantenschäden und bituminöser Teilersatz (Betondecken) wird dementsprechend wie folgt verfahren:

- Für die homogenen Auswerteabschnitte unterschiedlicher Länge (s. Kapitel 4.3.1) wird pro Zustandsmerkmal ermittelt, für wie viele 1-m-Abschnitte „(Schaden) vorhanden“ markiert ist. Die summierten 1-m-Abschnitte mit Schäden werden ins Verhältnis zu der Gesamtlänge des homogenen Abschnitts gesetzt. Daraus ergibt sich als Maß für die Schadenshäufigkeit der Prozentanteil der von Schäden betroffenen Länge oder, genauer, der Prozentanteil als schadhaft markierter 1-m-Abschnitte.
- Bei einem homogenen Auswerteabschnitt von 1 m Länge, der als schadhaft markiert ist, ergibt sich damit eine Schadenshäufigkeit von 100 %. Bei einem homogenen Auswerteabschnitt von 10 m Länge ändert sich z. B. die Schadenshäufigkeit je nach Anzahl schadhaft markierter 1-m-Abschnitte in Intervallen von 10 %, bei einem 20-m-Abschnitt von 5 %.

Bei rein visuellen Zustandserfassungen werden für einen vorher abgegrenzten Erfassungsabschnitt die Längen der Schadensbereiche für die relevan-

ten Substanzmerkmale abgeschätzt und ins Verhältnis zur Abschnittslänge gesetzt. Daraus ergibt sich direkt der prozentuale Längenanteil des jeweiligen Schadenbereichs als Zustandsgröße.

Bei den Schäden, die den Zustandsmerkmalen

- Ausbrüche (bei Asphalt),
- Nester/Abplatzungen (bei Beton),
- Materialverluste (Ausbrüche bei wassergebundenen Decken),
- offene Nähte (bei Asphalt),
- schadhafte Fugenfüllung (bei Beton)

zugerechnet werden, könnte prinzipiell so verfahren werden wie bei den o. a. Substanzmerkmalen, d. h. der Prozentanteil betroffener 1-m-Abschnitte ermittelt und als Zustandsgröße registriert werden. Bei einer automatisierten Auszählung fällt der Auswerteaufwand nicht ins Gewicht. Die letztgenannten Zustandsmerkmale haben, verglichen mit den eingangs aufgeführten Substanzmerkmalen (Risse usw.), einen etwas anderen Rang:

- Ausbrüche und auch Nester/Abplatzungen treten i. Allg. nur an Stellen auf, die bei Asphalt- oder Betondecken bereits eine Vorschädigung, z. B. in Form von Splittverlust oder Rissen, aufweisen. Die Schäden signalisieren lediglich ein fortgeschrittenes Stadium einer ohnehin bereits vorhandenen Substanzschädigung. Aus Gründen der Verkehrssicherheit werden diese gravierenden Materialverluste umgehend im Rahmen der baulichen Unterhaltung durch örtlich-punktuellen Maßnahmen (z. B. Flicker) beseitigt (möglicherweise bei Fahrbahnen schneller und konsequenter als bei Radwegen).
- Offene Nähte und schadhafte Fugenfüllungen sind Vorbedingungen für nachfolgende Substanzschädigungen. Offene Nähte sollten daher umgehend vergossen, schadhafte Fugenfüllungen umgehend ausgetauscht werden. Dabei handelt es sich jeweils um Maßnahmen der baulichen Unterhaltung.

Bei einem System der Zustandsauswertung und -bewertung, das als Grundlage für die Planung von Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen dienen soll, wäre es für die homogenen Abschnitte prinzipiell ausreichend, lediglich zu vermerken, ob Ausbrüche, Nester/Abplatzungen, offene Nähte oder schadhafte Fugen vorhanden sind. Da jedoch

Materialverluste in Form von Ausbrüchen bei den wassergebundenen Decken das einzige Substanzmerkmal sind, wird eine Kompromisslösung vorgeschlagen:

- Bei Ausbrüchen und Nestern/Abplatzungen wird als Zustandsgröße die Häufigkeit in Form des Längenanteils betroffener 1-m-Abschnitte ausgewertet.
- Bei offenen Nähten und schadhafte Fugen wird, als Hinweis für erforderliche Unterhaltungsmaßnahmen, nur das Vorhandensein („ja/nein“) für die jeweiligen homogenen Abschnitte vermerkt.

3.3.4 Zustandsgrößen der konstruktiv bedingten Mängel

Bei den konstruktiv bedingten Mängeln, d. h.

- überstehenden/abgesackten Einbauten ($> \pm 3$ cm),
- überstehenden/abgesackten Bordsteinen ($> \pm 3$ cm) und
- Wurzelhebungen,

ist es ausreichend, als Zustandsgröße das Vorhandensein („ja/nein“) des jeweiligen Mangels für die homogenen Abschnitte zu vermerken. Überstehende/abgesackte Bordsteine und Einbauten verursachen örtlich-punktuellen Maßnahmen, die der baulichen Unterhaltung zuzurechnen sind. Das Vorhandensein von Wurzelhebungen liefert den Hinweis, dass standardmäßige Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen i. d. R. nicht ausreichen, um das Problem dauerhaft zu lösen.

4 Auswirkungen der Längsunebenheit von Radwegen auf den Radfahrer

Die für die Erhaltung relevanten Zustandsgrößen der Radwege müssen in qualitativer und quantitativer Hinsicht in ihren Wirkungen auf die definierten Zielkriterien eingestuft werden. Dabei ist insbesondere festzulegen, bei welchen Ausprägungen der Zustandsgrößen Warn- und Schwellenwerte erreicht sind. Die Lage der Warn- und Schwellenwerte wird von den aus der verkehrlichen und funktionalen Kategorisierung abgeleiteten Anforderungsprofilen von Radwegen abhängen.

Für einige Zustandsmerkmale wie die Substanzmerkmale (Oberfläche) können Analogien für die Wirkungen der erhobenen Zustandsgrößen auf die Zielkriterien zwischen Radweg und Fahrbahn zugrunde gelegt werden.

Für die Merkmalsgruppen Ebenheit und Textur ist dies nicht möglich, da zum einen Beschleunigungen und Schwingungen bei gleicher Fahrbahnoberfläche in völlig anderen Größenordnungen auf den Radfahrer und den Pkw-Fahrer einwirken und zum anderen der Rollwiderstand für den Radfahrer von ungleich größerer Bedeutung ist als für den Pkw-Fahrer.

4.1 Mechanische Schwingungen

4.1.1 Grundlagen

Die physikalischen und arbeitsmedizinischen Grundlagen hierzu wurden der Internetveröffentlichung „Exposition gegenüber physikalischen Arbeitsumweltfaktoren“ [MÜNZBERGER 2005] des Instituts für Arbeits- und Sozialmedizin der Uni Rostock entnommen.

Mechanische Schwingungen sind Bewegungen fester Masseteilchen um eine Ruhelage. Bei kraftschlüssigem Kontakt mit einem in Schwingung befindlichen Gegenstand kann eine Schwingungsübertragung auf den menschlichen Organismus erfolgen.

Man unterscheidet Ganzkörperschwingungen, wenn diese über die Füße, das Gesäß und/oder den Rücken eingeleitet werden, sowie Teilkörperschwingungen, wenn sie über das Hand-Arm-System eingeleitet werden.

Eine mechanische Schwingung wird charakterisiert durch

- Schwingweg (Maßeinheit m):
Komponente der Auslenkung des schwingenden Masseteilchens,
- Schwinggeschwindigkeit (Maßeinheit m/s):
Geschwindigkeit des schwingenden Masseteilchens zu einem bestimmten Zeitpunkt,
- Schwingbeschleunigung (Maßeinheit m/s²):
Änderung der Schwinggeschwindigkeit in der Zeiteinheit. Sie wird für die Bewertung und Grenzwertfestlegung verwandt,
- Frequenz (Maßeinheit Hz):
Anzahl der gleichsinnigen Umkehrungen der Schwingrichtung in der Sekunde. Für Ganzkör-

pervibration ist unter arbeitsmedizinischen Aspekten der Bereich von 1 bis 80 Hz, für Teilkörperschwingungen von 8 bis 1.000 Hz von Bedeutung,

- Schwingstärke (K-Wert, ohne Maßeinheit):
Früher verwendete Kenngröße für die Schwingungsbeanspruchung auf den menschlichen Körper. Die Schwingstärke wird mit Hilfe von spezifischen Frequenzbewertungskurven für Ganzkörperschwingungen und Hand-Arm-Schwingungen aus gemessenen Schwingbeschleunigungen errechnet.

Ganzkörperschwingungen

Ganzkörperschwingungen sind besonders Werk-tätige ausgesetzt, deren Arbeitsplätze sich auf mobilen Arbeitsmitteln wie selbstfahrenden Bau- und Landmaschinen, Traktoren, Baggern, Hebezeugen, militärtechnischen Geräten und Verkehrsmitteln befinden. Große Maschinen in Werkhallen können Schwingungen erzeugen, die über den Baukörper fortgeleitet werden und außer dem Bedienpersonal auch Werk-tätige in entfernten Gebäudeteilen erreichen.

Ganzkörperschwingungen werden beim stehenden oder sitzenden Menschen überwiegend in der Z-Richtung eingeleitet. Sie regen biomechanische Schwingungen an, die in den einzelnen Körperteilen wegen der komplizierten Masse-, Dämpfungs- und Federeigenschaften der Gewebe und Organe sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können. Besondere Resonanzfrequenzen des Körpers und seiner Teile sind die Ursache dafür, dass bereits relativ geringfügige Schwingungen intensive biomechanische Schwingungen auslösen können und dass viele Reaktionen des Organismus eine deutliche Frequenzabhängigkeit aufweisen. Der Mensch verfügt über kein spezielles Rezeptororgan für mechanische Schwingungsreize. Statische und dynamische Muskelkontraktionen im Sinne einer Abwehrreaktion und Veränderungen von Organfunktionen (Anstieg der Herzschlagfrequenz, des Blutdrucks, des Atemvolumens, Reflexveränderungen) müssen als Antwort auf ein besonderes Erregungsmuster vor allem der Mechanorezeptoren in Haut und Muskulatur, des Vestibularapparates und im Extremfall der Schmerzrezeptoren bzw. als unmittelbare Reaktion auf die Massebewegungen im angeregten Organ oder Gewebsareal angesehen werden. Durch intensive Schwingungen im Frequenzband 15 bis 20 Hz ist der Bewegungsapparat,

besonders die Wirbelsäule in ihren Lendenabschnitten, mechanisch erhöht belastet.

Bei akuter Einwirkung sind vielfältige, im Allgemeinen rasch rückbildungsfähige Wirkungen zu beobachten:

- verstärkte Ermüdbarkeit, Verminderung der Leistungsfähigkeit, insbesondere Konzentrationsschwäche und Beeinträchtigung der feinmotorischen Koordination,
- Verschlechterung der Sehschärfe durch die Bewegungsunruhe des auf die Netzhaut projizierten Bildes,
- Beeinträchtigung des Wohlbefindens bis zur Empfindung der Unerträglichkeit der einwirkenden Schwingungen oder gar Schmerzen in bestimmten Körperabschnitten oder Organen.

Teilkörperschwingungen

Eine Exposition mit Gesundheitsrisiko ist beim Umgang mit vibrations- und ruckstoßintensiven Werkzeugen möglich. Vorrangig gilt das für pressluft- oder elektrisch betriebene Hämmer, Meißel, Schlagbohrer und Schleifmaschinen (Bergbau, Natursteingewinnung, Hoch- und Tiefbau, Gussnachbehandlung), Schlag- und Elektroschrauber (Montagearbeiten), handgeführte Verdichter (Bauproduktion, Formereien, Verkehrsbau) und Motorsägen (Forstwirtschaft, Fleischverarbeitung). Teilkörperschwingungen treten aber auch bei kräftigem Andruck von Arbeitsgegenständen an schlagende oder rotierende Arbeitsmittel auf (Anklopfmaschinen in der Schuhindustrie, Guss Schleifmaschinen).

Die Schwingungen werden über die Führungs- und Andruckhand eingeleitet. Art und Ausmaß der dadurch angeregten biomechanischen Schwingungen sowie deren örtliche Verteilung sind neben der physikalischen Charakteristik der einwirkenden Schwingung von den aufzuwendenden Andruck- und Haltekräften, von den mehrmaligen Richtungsänderungen des Kraftlinienflusses im Hand-, Ellenbogen- und Schultergelenk, von Gelenkstellungen und der Muskelverspannung, von der Konstitution des Exponierten sowie von Beziehungen des einwirkenden Frequenzspektrums zu Resonanzfrequenzen abhängig. Letztere liegen für das Hand-Arm-System zwischen 30 und 40 Hz.

Es lassen sich zwei Gruppen von Reaktionen abgrenzen:

- Niederfrequente Anteile des Spektrums führen zu einer mechanischen Belastung des Skeletts, insbesondere der Gelenke im Verlauf des Kraftflusses bis hin zur Wirbelsäule („Rückstoßwirkung“).
- Hochfrequente mechanische Schwingungen sind mehr von Irritationen des peripheren Gefäß- und Nervensystems sowie daraus erklärlichen Störungen und Schädigungen gefolgt („Vibrationswirkung“). Bereits unmittelbar nach Beginn der Einwirkung von Teilkörperschwingungen sind akute Reaktionen wie eine Abnahme des Hautwiderstandes und Veränderungen der Fingerpulsamplitude sowie eine Verminderung der Schwingungsempfindung (Pallaesthesie) zu beobachten. Nach Expositionsbeendigung klingen sie rasch ab, oft besteht jedoch über einige Zeit eine poststimulatorische Durchblutungssteigerung. Bei Langzeitexposition kann sich eine durch Irritationen peripherer Nerven verursachte Durchblutungsstörung entwickeln. Die Konstitution des Exponierten ist von gewisser Bedeutung für die Art der vorrangig zu erwartenden Wirkungen: Leptosomen und Asthener weisen oft schon nach kurzen Expositionszeiten Gelenkveränderungen mit Krankheitswert auf. Athletischen Menschen gelingt es durch Muskelanspannung besser, das passive Aufeinander schlagen artikulierender Gelenkflächen etwas zu dämpfen, so dass Störungen der peripheren Gefäßfunktionen vor oder neben den Skelettveränderungen häufiger zu beobachten sind. Eine Kombination mit Schwerarbeit, besonders statische Belastung und lokale Kälteeinwirkung können die pathophysiologischen Mechanismen verstärken.

Messung von Ganz- und Teilkörperschwingungen

Die Messung erfolgt nach folgenden Prinzipien: Schwingungsmessgeräte wandeln mittels eines piezoelektrischen Sensors mechanische Schwingungen in eine elektrische Größe. Sie sind mit Bewertungsfiltren ausgestattet, deren Dämpfungseigenschaften die Frequenzabhängigkeit der biologischen Wirkung berücksichtigen. Für Ganz- und Teilkörperschwingungen existieren gesonderte Filter. Grundlage für die Bewertung ist der Effektivwert der frequenzbewerteten Schwingbeschleunigung. Die Messung muss in den drei Richtungen eines dreidimensionalen Koordinatennetzes durchgeführt werden (siehe Bild 4-1).

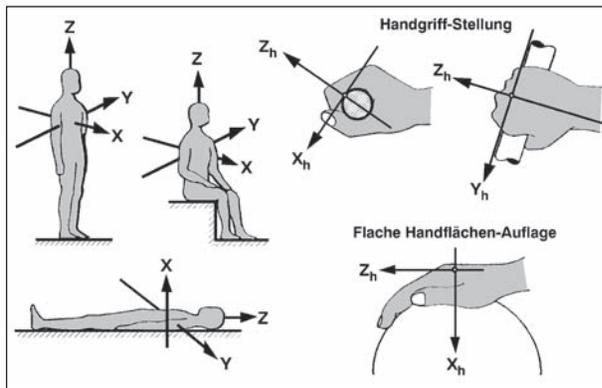


Bild 4-1: Körperbezogenes Koordinatensystem für Ganzkörperschwingungen (links) und Hand-Arm-Schwingungen (rechts) [STRASSER 1993]

4.1.2 Aktuelles Regelwerk

Die Ermittlung und Beurteilung der Belastung durch Ganzkörper- und Teilkörperschwingungen sind aktuell im Wesentlichen in folgenden Normen geregelt:

- VDI 2057, Blatt 1:2002-09, Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörperschwingungen,
- VDI 2057, Blatt 2:2012-05, Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Hand-Arm Schwingungen,
- ISO 2631-1:1997-05, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements,
- ISO 2631-1, AMD 1:2010-07, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements; Amendment 1,
- ISO 2631-5:2004-02, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks.

Die VDI-Richtlinie 2057, Blatt 1:2002-09, Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörperschwingungen hat den Zweck, ein einheitliches Verfahren zur Beurteilung der Einwirkung mechanischer Ganzkörperschwingungen auf den Menschen und allgemeine Hinweise zur Ermittlung der Beurteilungsgrößen anzugeben.

Aus den physikalischen Daten von Schwingungsmessungen wird unter Berücksichtigung unterschiedlicher frequenzabhängiger Wirkungen der Effektivwert a_w der frequenzbewerteten (siehe Bild 4-2 und Bild 4-3) Beschleunigung $a_w(t)$ als Kenngröße der Schwingungsbelastung gebildet.

Unter Einbeziehung der Einwirkungs-dauer T ist eine Abschätzung von Einschränkungen des Wohlbefindens, der Leistungsfähigkeit und des Risikos für Gesundheitsschädigungen möglich. Die Kenntnis von a_w ist in Verbindung mit der Einwirkungs-dauer T somit eine Voraussetzung für Maßnahmen zur Vermeidung oder Begrenzung der genannten Beeinträchtigungen. Es werden in dieser Richtlinie keine Grenzwerte für die Zumutbarkeit oder Zulässigkeit von Schwingungsbelastungen angegeben. Die Richtlinie enthält jedoch einige Anhaltswerte und Hinweise für die Beurteilung bestimmter Belastungen im Hinblick auf die zu erwartenden Wirkungen auf den Menschen.

Die VDI-Richtlinie 2057, Blatt 2:2012-05, Einwirkung mechanische Schwingungen auf den Menschen – Hand-Arm-Schwingungen enthält die Zusammenstellung allgemeiner Hinweise für die Ermittlung der Belastung durch Hand-Arm-Schwingungen und die Angabe eines einheitlichen Verfahrens für die Beurteilung dieser Schwingungsexposition. Aus den physikalischen Daten der Schwingungsmessungen wird unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Wirkung der Effektivwert α_{hw} der frequenzbewerteten Beschleunigung als Kenngröße der Schwingungsbelastung gebildet. Es werden in dieser Richtlinie keine Grenzwerte für die Zumutbarkeit oder Zulässigkeit von Schwingungsbelastungen gegeben. Die Richtlinie enthält jedoch Richtwerte und Hinweise für die Beurteilung der Belastung durch Hand-Arm-Schwingungen im Hinblick auf die zu erwartenden Wirkungen auf den Menschen. In der Richtlinie werden zwei unterschiedliche Beurteilungsmethoden aufgezeigt:

Mit der Kenntnis der frequenzbewerteten Schwingbeschleunigung und der täglichen Einwirkungs-dauer T lässt sich eine Abschätzung für das mögliche Auftreten einer allgemeinen Gesundheitsgefährdung durchführen. Dies ist Voraussetzung für Präventionsmaßnahmen zur Vermeidung und Begrenzung der Schwingungsgefährdung.

Die Einschätzung langjähriger Schwingungsbelastung, die zu chronischen Schäden führen kann, erfolgt auf der Grundlage der für einen Arbeitstag repräsentativen Schwingungsbelastung und der Ge-

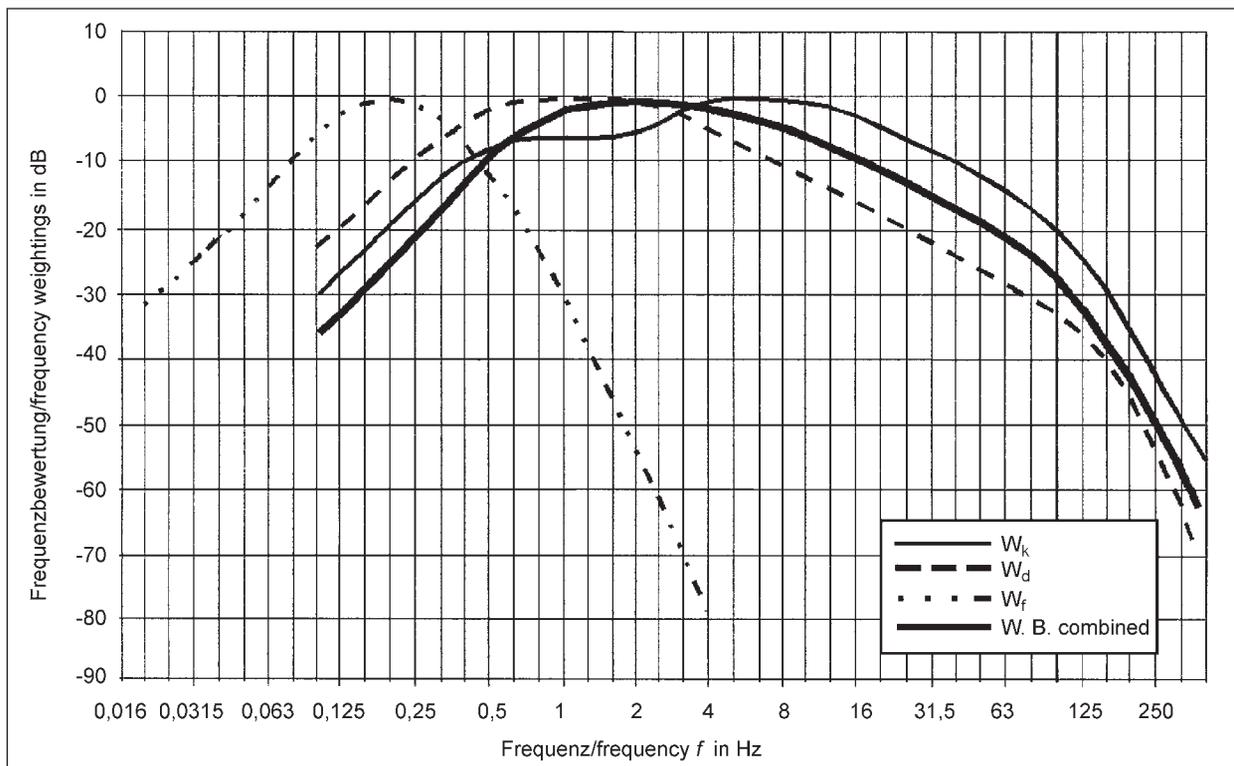


Bild 4-2: Frequenzbewertungskurven W_k (Schwingungsbelastung im Sitzen, Stehen und Liegen in vertikaler Richtung z), W_d (Schwingungsbelastung im Sitzen, Stehen und Liegen in den horizontalen Richtungen x und y), W_m (kombinierte Schwingungsbelastung bei unbestimmter Körperhaltung) und W_f (niederfrequente vertikale Schwingungen) für Ganzkörperschwingungen [VDI 2002]

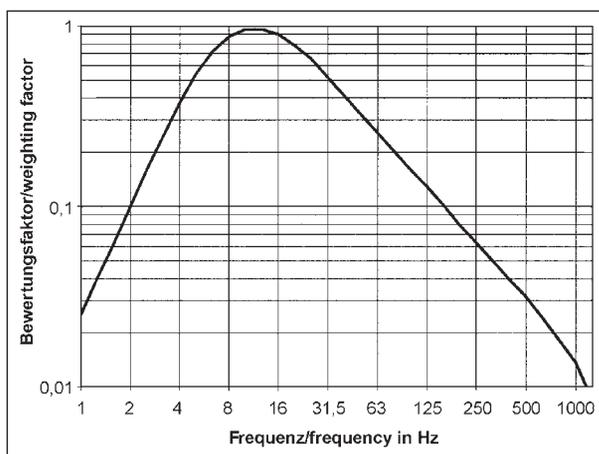


Bild 4-3: Frequenzbewertungskurven für Hand-Arm-Schwingungen [VDI 2012]

samtdauer dieser Belastung. Um dem Anwender eine vollständige Anleitung für die Beurteilung der langjährigen Belastung durch Hand-Arm-Schwingungen vorzulegen, wurden die Kriterien zur Abschätzung des Risikos für die Entstehung von Durchblutungs- und Nervenfunktionsstörungen (VVS) aus DIN EN ISO 5349-1 in die vorliegende VDI-Richtlinie übernommen und es wird zusätzlich ein Vorschlag zur Beurteilung des Risikos für die Entstehung von Knochen- und Gelenkschäden vorgestellt.

4.1.3 Älteres Regelwerk

Zum besseren Verständnis der in den folgenden Kapiteln vorgestellten Untersuchungen aus den Jahren 1988 und 1999 sollen die Bewertung und Beurteilung der mechanischen Schwingungen kurz gemäß folgender damals gültiger technischer Regelwerke erläutert werden:

- ISO 2631/1(E): Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements 1985,
- ISO 5349(E): Guidelines for the Measurement and Assessment of Human Exposure to Hand-Transmitted Vibration, 1986,
- VDI 2057 – Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen:
 - Blatt 1: Grundlagen, 1983,
 - Blatt 2: Schwingungseinwirkung auf den menschlichen Körper, 1981,
 - Blatt 3: Schwingungsbeanspruchung des Menschen, 1979,
- VDI 2057 – Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen:

Blatt 1: Grundlagen, Gliederung, Begriffe, Mai 1987,

Blatt 2: Bewertung, Mai 1987,

Blatt 3: Beurteilung, Mai 1987.

Im Gegensatz zur jetzigen Vorgehensweise erfolgte die Beurteilung aller Arten der Schwingungseinwirkung (Ganzkörperschwingungen und Hand-Arm-Schwingungen) mit nur einer Richtwertkurve anhand der bewerteten Schwingstärke (K-Wert). Der K-Wert wurde mit Hilfe von spezifischen Frequenzbewertungskurven für Ganzkörperschwingungen und Hand-Arm-Schwingungen aus den gemessenen Schwingbeschleunigungen errechnet (siehe Bild 4-4).

Bild 4-5 oben enthält Grenzlinien im Intensitäts-Expositionsdauer-Diagramm gemäß VDI 2057, Blatt 3 von 1979, bei deren Überschreiten mit Beeinträchtigungen des Komforts, der Leistung und der Gesundheit gerechnet werden muss [STRASSER 1993]. Schwingbeschleunigungen (gekennzeichnet durch K-Werte), die beispielsweise im Minutenbereich ohne nennenswerte Komfortbeeinträchtigung erträglich bzw. zumutbar sind, können bei langfristiger täglicher Einwirkung zu gesundheitlichen Schäden führen. Die in Bild 4-5 oben angegebenen Grenzlinien sind nicht als Fixpunkte, sondern als Orientierungswerte für Bereiche aufzufassen. Die Grenzen zwischen den Bereichen sind fließend, insbesondere ist die Vorgabe einer exakten „Leistungsgrenze“ unmöglich, weil nicht von einer Leistung auszugehen ist, sondern der Leistungsbereich menschlicher Arbeit ein breites undifferenziertes Spektrum umfasst.

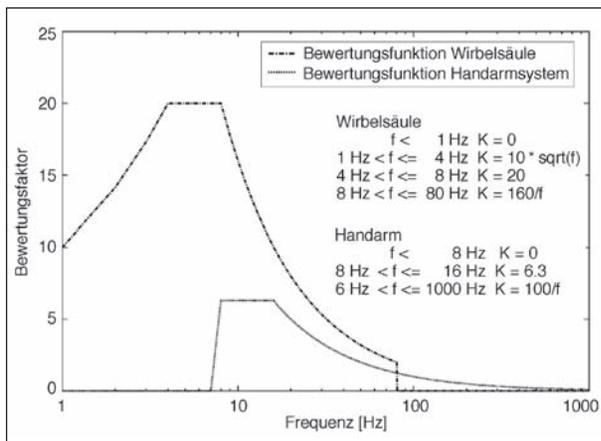
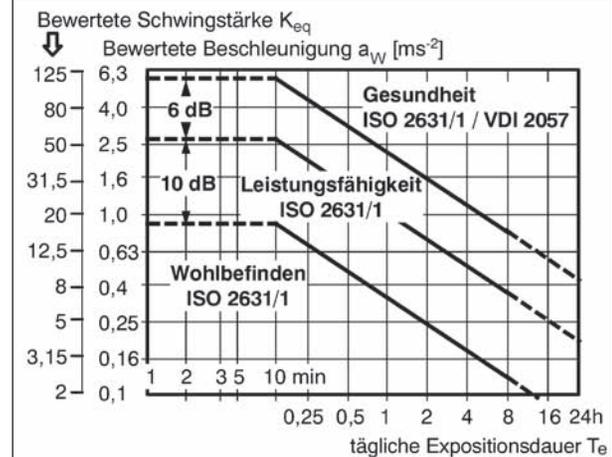
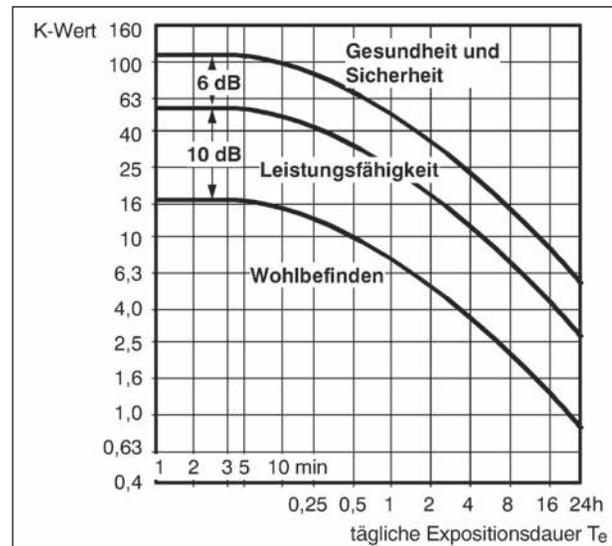


Bild 4-4: Frequenzbewertungskurven für Ganzkörperschwingungen und Hand-Arm-Schwingungen [WÄCHTER et al. 1999]

Die überarbeitete Fassung von VDI 2057 von Mai 1987 beschränkt sich auf eine begründete Richtkurve für das Kriterium „Gesundheit“. Den in einem doppelt-logarithmischen Koordinatensystem dargestellten Richtwert-Kurven (siehe Bild 4-5, Mitte) kann entnommen werden, dass nunmehr mit den Eckwerten $K = 16,2$ anstatt vorher $12,5$ für 8 Stunden und $K = 1,12$ für 10 min (anstatt früher für nur 1 min) zumindest in den Randbereichen des Beurteilungszeitraumes keine Ver-



Einwirkdauer	„Wohlbefinden“ (1979)		„Gesundheit“ (1979) (1987)	
	„Wohlbefinden“ (1979)	„Leistung“ (1979)	„Gesundheit“ (1979)	„Gesundheit“ (1987)
1min	18,0	56,0	112	112 (10 min!)
16 min	13,2	42,5	85	88,5
25 min	11,2	35,5	71	70,8
1h	7,5	23,6	47,5	45,7
2,5h	4,5	14,0	28	28,9
4h	3,35	10,6	21,2	22,9
8h	2,0	6,3	12,5	16,2
16h	1,32	4,25	8,5	-
24h	0,90	2,8	5,6	-

Bild 4-5: Intensitäts-Expositionsdauer-Diagramme [STRASSER 1993]

besserung, sondern eine Verschlechterung unter Humanaspekten verbunden sein muss. Durch die energieäquivalente Beurteilung wurde für das Kriterium „Gesundheit“ die schwierige und bislang weniger exakte Einschätzung der psycho-physiologischen Eigenschaften des Menschen zugunsten einer einfachen mathematischen Funktion aufgegeben.

In Bild 4-5 unten sind für einige Expositionsdauern die nach VDI 2057 (1979) gerade noch zulässigen K-Werte verzeichnet. Ab 1987 galt nach VDI 2057 nur noch die (geänderte) Grenzkurve für das Kriterium „Gesundheit“.

4.2 Bisherige Untersuchungen

4.2.1 Untersuchung des Schwingkomforts an Fahrrädern 1988 durch PIVIT

Die direkte Übertragung dieser arbeitsmedizinischen Messverfahren und Bewertungen der Messergebnisse auf das Fahrrad wurde von PIVIT in seiner Untersuchung „Erschütternde Radwege – Untersuchung des Schwingkomforts an Fahrrädern“ [PIVIT 1988] an der Universität Oldenburg versucht.

Hierbei wurden Straßen und Radwege mit verschiedenen Oberflächen im Stadtgebiet Oldenburg

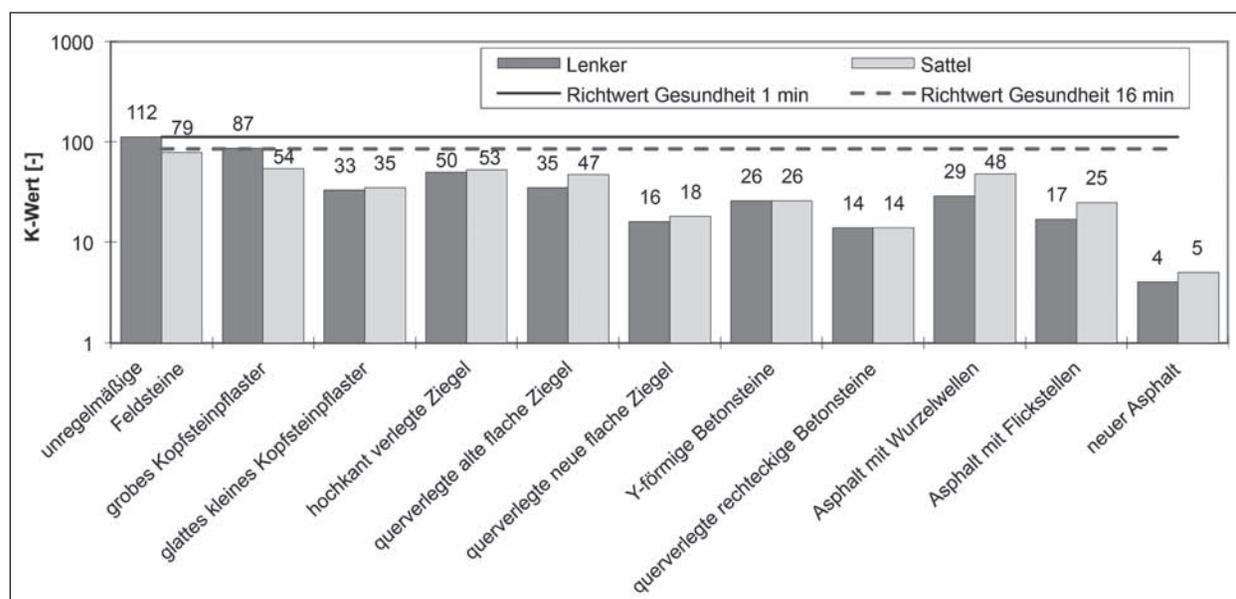


Bild 4-6: Gemessene Schwingstärken auf Untersuchungsstrecken für ein Hollandrad [PIVIT 1988]

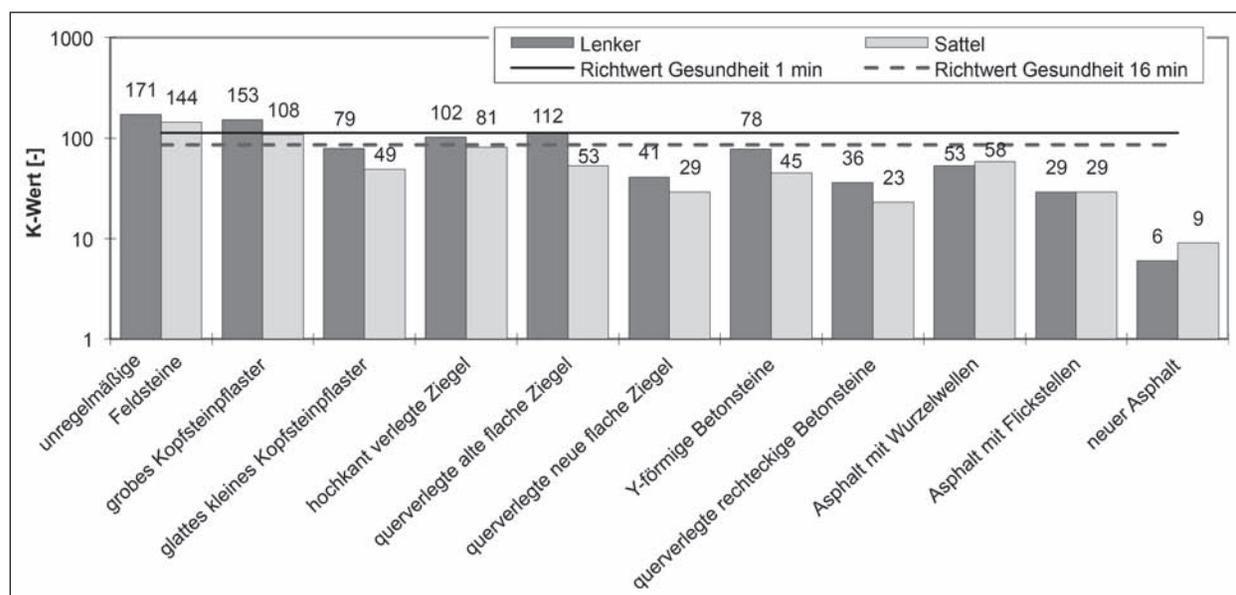


Bild 4-7: Gemessene Schwingstärken auf Untersuchungsstrecken für Reiserad 1 [PIVIT 1988]

mit 4 verschiedenen Fahrrädern (1 Hollandrad, 2 Reiseräder, 1 vollgefedertes Moulton-Fahrrad), einem Prototyp eines 3-rädrigen Liegerads (Oldenburger Leichtfahrzeug – OLF) und einem Pkw (VW Golf Bj. 1980) bei 15-20 km/h befahren. Alle Fahrzeuge waren mit Beschleunigungsaufnehmern jeweils an der Sattelunterseite (bei Fahrrädern in Richtung der Wirbelsäule, beim Liegerad und Pkw senkrecht) und am Lenker (in Richtung des Arms) ausgerüstet.

Die Auswertung, Bewertung und Beurteilung der gemessenen Schwingbeschleunigungen erfolgten gemäß ISO 2631/1 (1985) und VDI 2057 (1979 bzw. 1987). In Bild 4-6 und Bild 4-7 sind die Ergebnisse der Messungen auszugsweise vor den Orientierungswerten für Gesundheit der VDI 2057 (1979) dargestellt. Für mehrere Strecken wurden insbesondere beim Reiserad 1 Schwingstärken (K-Werte) ermittelt, die bereits im Bereich der Gesundheitsbeeinträchtigung liegen.

4.2.2 Untersuchung des Schwingkomforts an Fahrrädern 1999 durch WÄCHTER et al.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Simulation des Schwingkomforts gefederter Fahrräder“ [WÄCHTER et al. 1999] wurde an der Universität Oldenburg eine computergestützte Konstruktionshilfe zur Entwicklung gefederter Fahrräder entwickelt, die den damaligen Kenntnisstand zur Wirkungsweise und Auslegung von Federungen enthielt, abgesichert durch eine große Menge von objektiven Messungen der Schwingungsbelastung des Fahrers oder der Fahrerin während der Fahrt. Das Forschungsprojekt bestand aus folgenden Arbeitsschritten:

- Objektivierung der Begriffe Fahrkomfort und Schwingungsbelastung und Entwicklung eines entsprechenden Messverfahrens,
- Erstellung eines mathematischen Modells der Schwingungsanregung des Radfahrers und Umsetzung in ein Rechen- bzw. Simulationsprogramm,
- Erzeugung einer umfangreichen Datenbasis von Schwingungsbelastungsmessungen auf gefederten und ungefederten Fahrrädern,
- Validierung des Modells durch den Vergleich von Simulation und Messung,
- die messtechnische Bereitstellung der empirischen Ausgangsdaten für die Simulation.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden umfangreiche Messungen des Schwingkomforts mit mehreren Fahrrädern und Fahrern auf unterschiedlichen Oberflächen durchgeführt. Ziel dieser Messungen war die Validierung der Simulationssoftware anhand des Vergleichs der Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit denen der Messungen.

Folgende Fahrräder kamen zum Einsatz:

- 2 ungefederte Normalräder,
- 2 Prototypen von gefederten Normalrädern,
- 1 Rad vollgefedert mit kleinen (20 Zoll) Lauf-rädern,
- 1 Liegerad mit Federung hinten und mittlerem Radstand,
- 1 Liegerad vollgefedert mit langem Radstand.

Folgende Oberflächen wurden befahren:

- 8 Betonsteinpflaster,
- 5 Kopf- und Feldsteinpflaster,
- 3 Ziegelpflaster,
- 2 Asphaltflächen.

Die Bewertung und Beurteilung der ermittelten Schwingungseinwirkung erfolgten anhand der zum damaligen Zeitpunkt gültigen Regelwerke (ISO 2631 bzw. VDI 2057:1987).

Ergebnisse der Messungen sind auszugsweise für die ungefederten Normalräder (Hollandrad und Reiserad) und den Fahrer mit einem Körpergewicht von 98 kg in den Bildern 4-8 und 4-9 dargestellt. Auch hier sind wie bereits bei den Messungen von PIVIT auf Feldsteinen und Kopfsteinen Überschreitungen des Richtwertes G 1 (Gesundheitsbeeinträchtigung bei einer Einwirkdauer von 1 bzw. 10 Minuten: $K = 112$) zu beobachten. Prinzipiell ist die gleiche Rangfolge der Bauweisen hinsichtlich des untersuchten Fahrkomforts festzustellen.

Bei der Durchführung der Messfahrten wurde zwar eine möglichst gleiche und konstante Fahrgeschwindigkeit angestrebt. Dennoch sind Abweichungen für die befahrenen Oberflächen und Fahrer festzustellen. Bei den Messungen mit den beiden ungefederten Normalrädern streute die Geschwindigkeit bei dem Fahrer (98 kg) zwischen 12,0 und 29,0 km/h.

Zum Einfluss der Fahrgeschwindigkeit wird im Forschungsbericht ausgeführt, dass die gemessene

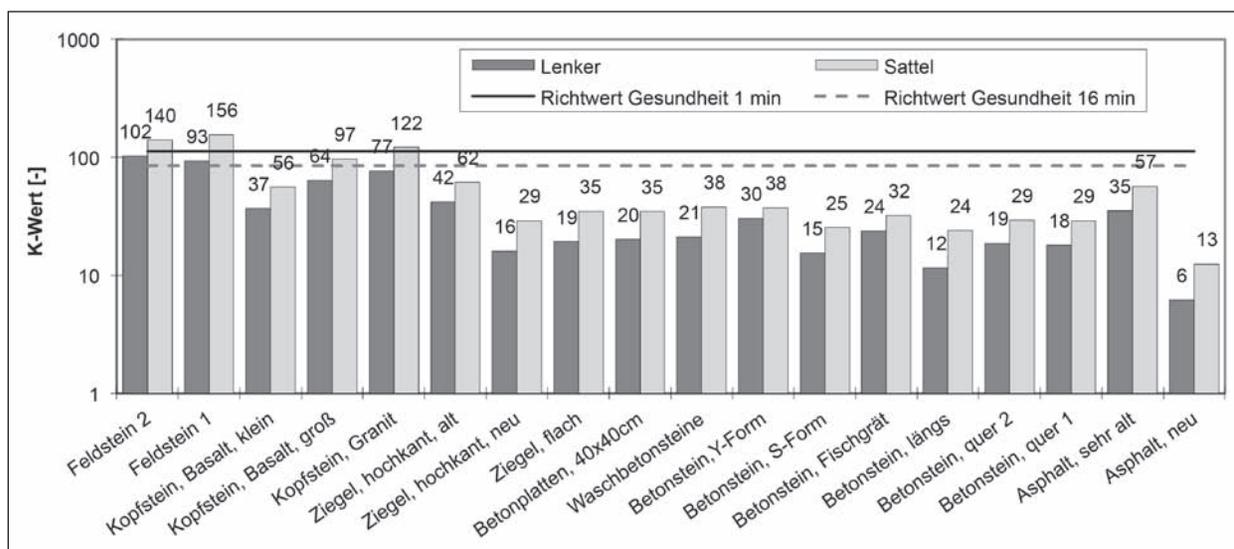


Bild 4-8: Gemessene Schwingstärken auf Untersuchungsstrecken für ein Hollandrad [WÄCHTER et al. 1999]

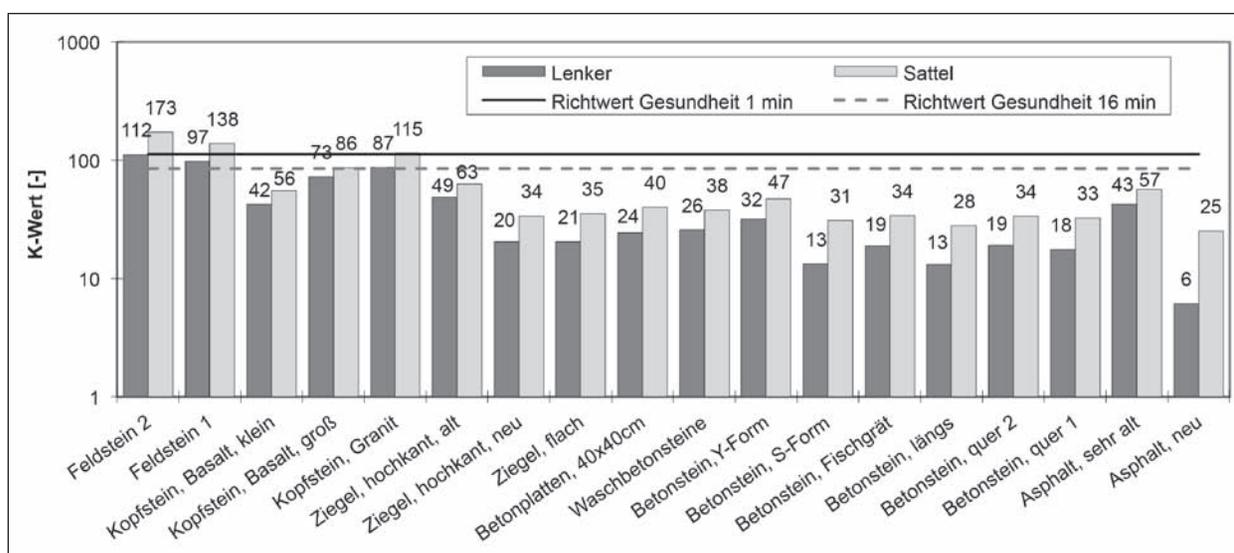


Bild 4-9: Gemessene Schwingstärken auf Untersuchungsstrecken für ein Reiserad [WÄCHTER et al. 1999]

Schwingstärke prinzipiell mit steigender Geschwindigkeit anwächst. Dieser prinzipielle Anstieg kann jedoch bei Oberflächen mit periodischen Unebenheiten außer Kraft gesetzt werden. Anhand eines Beispiels wird aufgezeigt, dass nicht immer bei schnellerer Befahrung größere Schwingstärken gemessen wurden als bei langsamerer Befahrung.

4.2.3 Untersuchungen der Schwingbeschleunigungen durch die Uni BW München

Die Universität der Bundeswehr München untersuchte mit ihrem Messfahrrad den Zustand von Radwegen mit Hilfe von Messungen der Schwingbeschleunigung. Diese Messungen erfolgten nicht

konform zu den einschlägigen geltenden VDI-Richtlinien, sondern folgten einem deutlich vereinfachten Ansatz [SOBOTTA, DEING, GLAHE, 2005].

Die an der Vorderachse und unter dem Sattel gemessenen Vertikalbeschleunigungen wurden keiner frequenzabhängigen Filterung und Bewertung unterzogen, sondern direkt zur Berechnung des quadratischen Mittelwerts (Effektivwert, RMS) für einen Untersuchungsabschnitt herangezogen.

$$\bar{y} = \sqrt{\frac{\sum y^2}{n}}$$

Diese Effektivwerte der Vertikalbeschleunigung wurden im Rahmen der Messungen des Radwege-

Wertebereich (RMS) [m/s ²]	Bewertung
$\bar{y} \leq 0,145 \cdot g$	++ (sehr gut)
$0,145 \cdot g < \bar{y} \leq 0,290 \cdot g$	+ (gut)
$0,290 \cdot g < \bar{y} \leq 0,435 \cdot g$	- (ausreichend)
$\bar{y} > 0,435 \cdot g$	-- (nicht ausreichend)

Bild 4-10: Bewertung der gemessenen Vertikalbeschleunigung

netzes der Stadt Nordhorn [SOBOTTA et al. 2005] und bei den Messungen auf Radwegen in Rosenheim [CALISKAN, STINTZING 2011] für homogene Abschnitte mit typischen Längen zwischen 50 und mehreren 100 Metern berechnet. Die Bewertung erfolgte anhand der in Bild 4-10 dargestellten Grenzwerte, deren Herkunft nicht bekannt ist.

Die vereinfachte Erfassung und Bewertung der Schwingbeschleunigung abweichend von den Vorgaben der VDI 2057 schließen formal zunächst prinzipiell den direkten Bezug auf die in der früheren Ausgabe der VDI 2057 genannten Grenzwerte bzw. auf die in der aktuellen Fassung der VDI 2057 genannten Anhaltswerte und Hinweise für die Beurteilung bestimmter Belastungen im Hinblick auf die zu erwartenden Wirkungen auf den Menschen aus.

Die Berücksichtigung der unbewerteten Schwingbeschleunigung als Zustandsgröße für das Zustandsmerkmal „Allgemeine Unebenheit“ hat jedoch gegenüber den bisher verwendeten Zustandsgrößen PGR_MAX und PGR_AVG der Simulation der gleitenden Richtlatte (4 m, „Planografsimulation“) den Vorteil, dass eine z. B. auf empirischer Basis ermittelte Zustandsbewertung dieses Merkmals das subjektive Empfinden des Schwingkomforts weitestgehend treffend abbildet.

Die Uni BW München misst die Schwingbeschleunigung mit Beschleunigungsaufnehmern an der Vorderachse und an der Sattelstange. Sowohl bei den Messungen in Nordhorn als auch bei den Messungen in Rosenheim wurden zur Beurteilung der Längsebenheit und des Fahrkomforts nur die Messergebnisse des Sensors an der Vorderachse berücksichtigt. Auf die Auswertung der Messergebnisse des Sensors am Sattel wurde verzichtet, weil hier im Vergleich zur Vorderachse stets geringere Schwingbeschleunigungen gemessen wurden (siehe Bild 4-11).

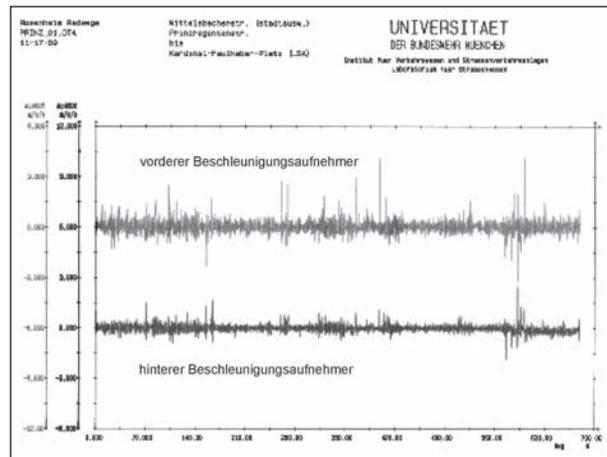


Bild 4-11: Messschrieb der Schwingbeschleunigungsmessung der Uni BW München [CALISKAN, STINTZING 2011]

5 Zustandserfassung von Radwegen

Bei den Recherchen zu bestehenden und verwendeten Verfahren für die Zustandserfassung von Radwegen wird nach einer Darstellung der Ausgangssituation in Deutschland auf visuelle und messtechnische Methoden und Systeme aus dem In- und Ausland eingegangen. Für Radwege ist die Situation in Bezug auf die Zugänglichkeit von Unterlagen deutlich schwieriger als bei den Fahrbahnen, sodass die nachfolgende Zusammenstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

5.1 Ausgangssituation in Deutschland

Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) unterteilt die in Deutschland von den Gremien erarbeiteten Technischen Veröffentlichungen in die Hauptkategorien R (für Regelwerke) und W (für Wissensdokumente). Regelwerke oder Wissensdokumente, in denen spezifische Inhalte und Verfahren für die Zustandserfassung von Radwegen festgelegt sind, existieren bisher noch nicht.

Für die Radwege in der Baulast der Kommunen werden in den FGSV-Arbeitspapieren Nr. 9/K2.2 „Vorbereitung und Durchführung der visuellen Zustandserfassung für innerörtliche Verkehrsflächen“ [FGSV 2005a] und Nr. 9/K2.3 „Schadenskatalog für die messtechnische und visuelle Zustandserfassung“ [FGSV 2005b] Vorschläge zur Vorgehensweise formuliert, die sich auf alle öffentlichen Verkehrsflächen beziehen und somit die Radwege einbeziehen.

In den „Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen E EMI 2012“ [FGSV 2012] werden Radwege als Teil der Nebenflächen dem Geltungsbereich der E EMI zugeordnet.

Die Vorschläge der E EMI 2012 und der flankierenden Arbeitspapiere basieren im Falle von Radwegen in Großstädten im Wesentlichen auf visuellen Zustandserfassungen (HINSCH, KRAUSE, MAERSCHALK 1992; KRAUSE, MAERSCHALK 1996; KRAUSE, MAERSCHALK, HINSCH 1997a; HINSCH, MAERSCHALK 1997b) und einem darauf aufbauenden Forschungsprojekt (MAERSCHALK 2000).

Für die Zustandserfassung und Zustandsbewertung von Radwegen im Außerortsbereich existieren in Deutschland bisher weder Wissensdokumente oder Regelwerke noch allgemein zugängliche Unterlagen. Für die bereits abgeschlossenen messtechnischen Zustandserfassungen und Zustandsbewertungen von Radwegen (ZEB-Radwege in Brandenburg und Schleswig-Holstein) liegen interne Dokumentationen des Verfahrens vor. Für die noch laufende ZEB-Radwege in Niedersachsen können die wesentlichen Informationen zum Verfahren der Ausführungsbeschreibung in den Ausschreibungsunterlagen für die ZEB auf Radwegen an Landesstraßen 2010 in Niedersachsen [NLSV 2010] entnommen werden. Technisch und vertraglich orientieren sich all diese Erfassungen an den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen – ZTV ZEB-StB“ [FGSV 2006], deren Geltungsbereich sich jedoch ausdrücklich auf die Fahrbahnen beschränkt.

Einzelheiten zu den bei den o. g. Erhebungen übernommenen Verfahrensweisen der Zustandserfassung/-bewertung der Fahrbahnen finden sich in den erwähnten ZTV ZEB-StB und den darin aufgeführten Technischen Prüfvorschriften (TP) und Arbeitspapieren. Auf einige Details zu diesen Verfahren wird an geeigneter Stelle (Kapitel 7) noch eingegangen.

5.2 Visuelle Zustandserfassung

Bei der visuell-sensitiven Zustandserfassung werden Zustandsinformationen visuell bei Begehungen und/oder Befahrungen (mit Pkw oder Fahrrad) durch Abschätzen der sichtbaren bzw. spürbaren Schadensausbreitung und Schadensschwere für

sogenannte homogene Abschnitte erhoben. Diese Abschnitte, die zunächst von Netzknoten oder administrativen Festpunkten (z. B. Stadtbezirksgrenze, Bauamtsgrenze) begrenzt sind, werden i. Allg. während der Erfassung anhand von Änderungen des Bestands (Bauweise, Breite etc.) und/oder deutlich wahrnehmbaren Zustandsänderungen gebildet. Die quantitative Zustandsbeschreibung erfolgt häufig 4- bis 5-stufig und nimmt somit vielfach die Bewertung des Zustands über die Notenstufen 1 bis 5 vorweg.

Die Registrierung der beobachteten Schäden erfolgte früher in der Regel über Erfassungsformulare aus Papier, deren Inhalte nach der Erfassung zur Weiterverarbeitung meist manuell in Computer zu überführen waren. Heute werden die Schadensbeobachtungen überwiegend direkt in portable Kleincomputer eingegeben. Die Lokalisierung der Schadensbeobachtungen kann dabei durch GPS-Systeme unterstützt werden.

Für die Befahrungen im Rahmen der visuell-sensitiven Zustandserfassung von Radwegen werden häufig Fahrräder benutzt, da hiermit die Auswirkungen von Unebenheiten am besten abgeschätzt werden können. Für Befahrungen im Innerortsbereich kommen andere Fahrzeuge vor allem wegen der mit der Erfassungsfahrt verbundenen Verkehrsbeeinträchtigung für Radfahrer und Fußgänger kaum infrage.

Bild 5-1 zeigt beispielhaft ein Inspektionsfahrrad für die visuelle Zustandserfassung. Bild 5-2 veranschaulicht exemplarisch die Verwendung eines Notebooks zur Registrierung von Radwegschäden, Bild 5-3 enthält ein Beispiel einer Eingabemaske für die visuelle Zustandserfassung von Fahrbahnen und Radwegen.



Bild 5-1: Inspektionsfahrrad von NCC Roads [NCC 2009]



Bild 5-2: Notebook zur Registrierung von Radwegschäden [NCC 2009]

Bewertung Radwege	
Numerus	1
Kenntung Links	Rechts
Fahrbahnbedeckung	12345
Unterbau	12
allg. Unebenh.	12345
Spurmarken	12345
Wasserrückhalt	12345
Netzzisse	123450
Auslagerung	123450
Flickstellen	12345
Ausbrüche	12345
Einzelrisse	123400
Einzel-Anz.	123450
Entwässerung	123
Bankett zerf.	1239
Gesamt FB-Oberfl.	12345
Fahrbahnbedeckung	1234
Aufwölbungen im Wurzelbereich	1234
allg. Unebenheiten	12345
Fahrbahnbelag	12345
Befahrbarkeit	1234

Bild 5-3: Eingabemaske für visuelle Zustandserfassung von Fahrbahnen und Radwegen [VOGT 2007]



Bild 5-4: Videoerfassungssystem der Firma Ramböll RST (SE)

Den Übergang von der visuell-sensitiven Zustandserfassung zur messtechnischen Zustandserfassung vollziehen die bildgestützten Erfassungssysteme, die eine vollständige georeferenzierte Bilderfassung (ggf. mit fotogrammetrischen Stereoaufnahmen) der Radwege ermöglichen. Das aufgenommene Bildmaterial und die registrierten Lageinformationen bilden die Grundlage für rechnergestützte Bildauswertungen zur Inventarisierung der Infrastruktur, aber auch zur Zustandserfassung, wobei hier die erreichbare Genauigkeit und Repro-



Bild 5-5: Erfassungssystem ATLAS von Lehmann & Partner



Bild 5-6: Erfassungssystem der Firma eagle eye technologies

duzierbarkeit weit über denen der klassischen visuellen Zustandserfassung liegen.

Als Beispiele (siehe Bilder 5-4 bis 5-6) sind hier das System von Ramböll RST (Schweden), das System ATLAS der Firma Lehmann & Partner und das System von eagle eye technologies (Berlin) zu nennen.

5.3 Messtechnische Zustandserfassung

Mit einer messtechnischen Zustandserfassung werden physikalische Eigenschaften der Straßen- bzw. Radwegdecken ermittelt, die visuell und bildhaft nicht erfasst werden können. Dazu gehören bei den

Fahrbahnen die visuell nur sehr grob erfassbare Ebenheit und die visuell nicht erfassbare Griffigkeit. Die sogenannten Substanzmerkmale (Oberfläche), d. h. bauweisespezifische Schäden der Decke wie z. B. im Falle von Asphaltdecken Risse, Ausmagerung, Bindemittelanreicherung (s. Kapitel 3.1.3), können auch bei einer messtechnischen Zustandserfassung nicht direkt „gemessen“ werden. Für diese Merkmale, die Hinweise auf eine unzureichende Substanz der Befestigung geben, werden geeignete Bilder der Straßen- bzw. Radwegoberfläche aufgezeichnet, aus denen mit entsprechender Rechnerunterstützung im Rahmen einer visuellen Bildauswertung die Schadensinformationen gewonnen werden.

5.3.1 Messfahrrad der Universität der Bundeswehr München

Das Messfahrrad der Universität der Bundeswehr (Uni BW) München ist das erste Erfassungssystem zur messtechnischen Erfassung von Radwegen in Deutschland.

Das Messfahrrad der Universität der Bundeswehr München (siehe Bild 5-7) verfügt über 2 Beschleunigungsaufnehmer der Vertikalbeschleunigung, die an der Vorderradgabel und der Sattelstange angeordnet sind, ein Notebook zur Aufzeichnung der Signale der Beschleunigungsgeber und eine Stromversorgung für die Messtechnik.

Diesem verhältnismäßig einfachen System liegt die Idee zugrunde, dass das für den Radwegnutzer alles entscheidende Zustandsmerkmal die Längsebenheit ist, die den Fahrkomfort in Form von Erschütterungen und Vibrationen mindert. Zur Be-

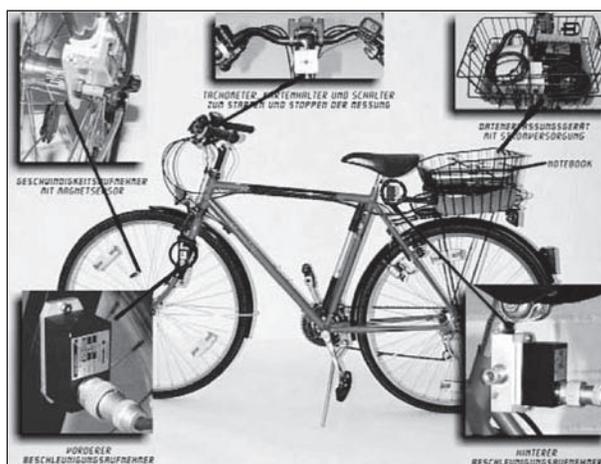


Bild 5-7: Messfahrrad der Uni BW München [SOBOTTA, DEING, GLAHE, 2005]

schreibung dieser Wirkung ist die direkte Messung der Vertikalbeschleunigung als Wirkgröße deutlich einfacher als die technisch aufwendige und nicht unproblematische Berechnung eines Längsprofils aus den Beschleunigungswerten über doppelte Integration.

Bei der Zustandserfassung und Dringlichkeitsreihung von Unterhaltungsmaßnahmen für das Radwegenetz der Stadt Nordhorn [SOBOTTA, DEING, GLAHE 2005] wurde neben der Vertikalbeschleunigung als Kennwert für die Ebenflächigkeit eine Querschnittsüberprüfung durchgeführt. Hierbei wurde anhand der Kriterien Breite des Radweges, Vorhandensein eines Schutzstreifens, Einrichtungs-/Zweirichtungsradweg, vorhandene Beschilderung, Konformität zur StVO und zur ERA 95 [FGSV 1995], Mängel in der Linienführung und sonstige Mängel ein 4-stufiger Querschnittswert ermittelt, der zusammen mit dem 4-stufigen Wert für die Ebenflächigkeit in die Gesamtbewertung eingeht (siehe Kapitel 6.2). In dem Projekt „Erfassung der Längsebenheit verschiedener Radwegbefestigungen in Rosenheim“ [CALISKAN, STINTZING 2011] wurden Asphalt und Plattenbeläge verschiedenen Alters hinsichtlich des ermittelten Fahrkomforts verglichen und in eine Reihung überführt.

5.3.2 Messsystem ARGUS®-AGIL der Firma TÜV Rheinland Schniering

Das bisher am häufigsten zur messtechnischen Zustandserfassung von Radwegen eingesetzte Erfassungssystem ist der ARGUS®-AGIL der Firma TÜV Rheinland Schniering GmbH. Der ARGUS®-AGIL stellt gewissermaßen die Miniaturisierung des ARGUS® dar, bei dem eine Vielzahl von Komponenten, die für das Muttersystem ARGUS® über einen Zeitraum von ca. 15 Jahren entwickelt und optimiert worden sind, auf ein Quad portiert wurden (s. Bilder 5-8 und 5-9).

ARGUS®-AGIL besteht aus:

- Quad als Trägerfahrzeug,
- Laserabstandssensoren und Beschleunigungsaufnehmer zur Erfassung des Längsprofils in der linken und rechten Radspur nach dem Erfassungsprinzip der kombinierten Beschleunigungs- und Abstandsmessung,
- hochauflösende digitale Videokamera zur Erfassung von Oberflächenbildern,



Bild 5-8: Erfassungssystem ARGUS®-AGIL

- Neigungssensoren und Kreisel zur Bestimmung der Längs- und Querneigung,
- Standortbestimmungssystem bestehend aus inertialgestütztem GPS-System und Wegstreckenzähler.

Der ARGUS®-AGIL wurde 2011 modifiziert:

- Utility Vehicle als Trägerfahrzeug,
- Längsebenheitsmessung mit Laserdistanzsensoren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM-Prinzip) in der linken und rechten Radspur,
- Videoaufnahmen mit digitaler Front- und Heckkamera sowie weiteren Kameras nach Bedarf,
- Erfassung der Makrotextur mit einem Lasermakrotextursensor zwischen den Rollspuren,
- Georeferenzierung über GPS, Kurskreisel und Wegstreckenmessung.

In weitestgehender Konformität zur ZTV ZEB-StB [FGSV 2006] werden Rohdaten als sogenannte Georohdaten im xml-Format erstellt, die zusammen mit den digitalen Streckenbildern für die nachfolgende Bildauswertung und Ermittlung der Zustandsgrößen dienen.



Bild 5-9: Erfassungssystem ARGUS®-AGIL

Bei den Erfassungsfahrten werden neben den Informationen zur Lokalisierung mit Hilfe der Beschleunigungsaufnehmer und Laserabstandssensoren Höhenlängsprofile (Punktabstand 1 cm) für die linke und rechte Radspur gemessen und Bilder für konstante Wegintervalle aufgenommen und gespeichert. Dieser Teil der Zustandserfassung wird in Analogie zur Vorgehensweise bei der vertraglichen Gestaltung der ZEB von Fahrbahnen mit Teilprojekt (TP) 1 (Erfassung der Ebenheit) bzw. mit Teilprojekt (TP) 1a (Erfassung der Ebenheit im Längsprofil) bezeichnet.

Bei der Bildauswertung werden bauweisenspezifische Schadensbeobachtungen wie Risse (Asphalt), Flickstellen (Asphalt), sonstige Oberflächenschäden (Asphalt), Eckabbrüche (Beton), Kantenschäden (Beton), schadhafte Fugenfüllung (Beton), Verkantungen (Pflaster) und fehlende Pflastersteine (Pflaster) in den entsprechenden Rohdatendateien kodiert. Die Bildaufnahmen und die Bildauswertung werden in Analogie zur Vorgehensweise bei der vertraglichen Gestaltung der ZEB von Fahrbahnen mit Teilprojekt (TP) 3 (Erfassung der Substanzmerkmale (Oberfläche)) bezeichnet.

Im nächsten Schritt werden die Georohdaten nach entsprechender Prüfung anhand der Lokalisierungsdaten (GPS und Odometer) auf das Netz projiziert und die sogenannten Netz- oder Rasterrohdaten erstellt. Dieser und die folgenden Arbeitsschritte werden in Analogie zur Vorgehensweise bei der vertraglichen Gestaltung der ZEB von Fahrbahnen mit Teilprojekt (TP) 4 (Auswertung und Bewertung) bezeichnet.

Aus den Rasterrohdaten werden als bewertungsrelevante Zustandsgrößen für die Ebenheit im

Längsprofil die aus der messtechnischen Zustandserfassung von Innerortsstraßen (siehe E EMI 2012 [FGSV 2012]) und dem Bauvertragswesen bekannten Zustandgrößen PGR_MAX und PGR_AVG für die sogenannte Planografsimulation bzw., genauer gesagt, für die Simulation der gleitenden Richtlatte (4 m) gemäß den Technischen Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung TP Eben – Berührungslose Messungen [FGSV 2009] errechnet.

Zur Kennzeichnung der Substanzmerkmale (Oberfläche) werden aus den Rasterrohdaten die Zustandsgrößen für Risse (Asphalt), Flickstellen (Asphalt), sonstige Oberflächenschäden (Asphalt), Eckabbrüche (Beton), Kantenschäden (Beton), schadhafte Fugenfüllung (Beton), Verkantungen (Pflaster) und fehlende Pflastersteine (Pflaster) errechnet.

5.3.3 Ausländische Systeme

Das neue Erfassungsfahrzeug für Radwege (siehe Bild 5-10) der Firma Ramböll RST (Schweden) ist mit Lasereinheiten zur Messung der Längsebenheit, Videotechnik zur Aufnahme von Oberflächenbildern und Standortbestimmungssystemen ausgestattet.

Das Erfassungssystem Fietscomfortmeter FCM Firma KOAC-NPC (Niederlande und Belgien) ist mit 2 Messanhängern zur Messung der Längsebenheit (Fahrräder mit Beschleunigungsaufnehmern, Videotechnik zur Aufnahme von Oberflächen-



Bild 5-10: Erfassungssystem für Radwege der Firma Ramböll RST (SE)

bildern, Eingabetastatur zur direkten Eingabe von Schadensbeobachtungen und Standortbestimmungssystemen ausgestattet (siehe Bild 5-11). Die Fahrtgeschwindigkeit bei den Messfahrten beträgt 15 km/h.

Beim neuen FCM (siehe Bild 5-12) wurden die Messanhänger durch 2 Ebenheitsmesseinrichtungen auf der Basis der kombinierten Beschleunigungs- und Abstandsmessung ersetzt.

Das Messfahrrad (Pedelec) der Katholischen Universität (KU) Leuven und der Hogeschool-Universiteit Brussel (HUB) ist mit einem Beschleunigungsaufnehmer an der Vorderachse und einem Standortbestimmungssystem ausgestattet (siehe Bild 5-13). Bei dem weiterentwickelten Messfahrrad der KU Leuven und der HUB wurde die Beschleunigungsmessung in einen Einspuranhänger ausgelagert, dessen definierter konstanter Ballast und die Entkoppelung vom Fahrrad jeglichen Einfluss hinsichtlich Gewichts und Fahrweise des Fahrers eliminieren sollen (siehe Bild 5-14). Das System ist zusätzlich mit einem Tabletcomputer ausgestattet.



Bild 5-11: Fietscomfortmeter (FCM) von KOAC-NPC (NL)



Bild 5-12: Neuer Fietscomfortmeter (FCM) von KOAC-NPC (NL)



Bild 5-13: Messfahrrad der KU Leuven und der HUB



Bild 5-14: Weiterentwickeltes Messfahrrad der KU Leuven und der HUB



Bild 5-14: Vel'Audit des Centre d'Etudes et de Conception de Prototypes des CETE de l'Ouest (FR)

Das französische Messfahrrad (Pedelec) Vel'Audit ist mit einem Beschleunigungsaufnehmer, einer Videokamera und einem Standortbestimmungssystem ausgestattet (siehe Bild 5-15). Das System ist vor allem für die Untersuchung innerörtlicher Radverkehrsanlagen konzipiert. Erfasst werden neben Bestandseigenschaften (Radwegtyp, Breite, Bauweise, Markierung etc.) und dem baulichen Zustand (Ebenheit, Oberflächenschäden) auch sicherheitsrelevante Beobachtungen (Hindernisse durch Einbauten, parkende Fahrzeuge etc.).

6 Zustandsbewertung von Radwegen

Für Aussagen zum Erhaltungsmanagement müssen Zustandsgrößen, die direkt visuell erfasst oder aus den messtechnisch ermittelten Zustandsindikatoren für homogene Auswerteabschnitte ausgewertet werden und i. Allg. physikalische Dimensionen aufweisen, Wertinhalte zugewiesen werden. Diese Zuweisung ist Gegenstand eines Bewertungsverfahrens.

Nachfolgend wird zunächst grundsätzlich auf die Bewertungsmethodik eingegangen. Anschließend werden bereits vorliegende Bewertungsansätze vorgestellt. In Kapitel 7 wird in Verbindung mit dem neu konzipierten Erfassungsverfahren auf den neu entwickelten und darauf abgestimmten Bewertungsansatz für Radwege eingegangen.

6.1 Verfahren der Zustandsbewertung

Die Zustandsbewertung erfolgt in den folgenden zwei Verfahrensschritten:

- der Überführung von dimensionsbehafteten Zustandsgrößen in dimensionslose Zustandswerte („Normierung“) sowie der
- Verknüpfung von Zustandswerten unterschiedlicher Zustandsmerkmale zu sog. Teilwerten („Wertsynthese“).

Durch die Abbildung der Zustandsgrößen auf einer normierten dimensionslosen Skala lassen sich die Zustandsgrößen von Merkmalen, die unterschiedliche Dimensionen haben, direkt vergleichen. Dies ist vor allem erforderlich, wenn die Zustandswerte mehrerer Zustandsmerkmale verknüpft werden sollen. Darüber hinaus sind die Zustandswerte für gra-

fische Darstellungen von großer Bedeutung. Die nach der Normierung vorliegenden „Zustandswerte“ bezeichnen dabei keinen (monetären) Wert im ökonomischen Sinne; sie sind lediglich als Notenwerte zu verstehen.

Bei der Normierung werden die Zustandsgrößen in ihren Wirkungen auf die in Kapitel 2 erläuterten Zielkriterien beurteilt, die der Straßenerhaltung generell und der Radwegeerhaltung speziell zugrunde liegen. Diese Zielkriterien sind (s. Bild 2-1):

- Verkehrssicherheit, d. h. die Vermeidung der vom baulichen Zustand ausgehenden Unfallgefahr für Radfahrer,
- Befahrbarkeit (bzw. Fahrkomfort), d. h. die Vermeidung unangemessener physischer Beanspruchungen für die Radfahrer, ihre Fahrzeuge und ihre Nutzlast,
- Substanzerhalt, d. h. eine wirtschaftliche Erhaltung des in Radwegflächen investierten Anlagevermögens (des „Substanzwerts“).

Die Zielkriterien „Verkehrssicherheit“ und „Befahrbarkeit“ kennzeichnen dabei die Angebotsqualität für den Radwegnutzer. Das Zielkriterium „Substanzerhalt“ steht für die Anforderungsgerechtigkeit der Befestigungssubstanz und betrifft damit in erster Linie den Baulastträger bzw. den Betreiber.

Bei der Normierung ergibt sich zunächst die Frage, ob die jeweilige Zustandsgröße überhaupt eine Wirkung auf das betrachtete Zielkriterium hat. Ist dies der Fall, muss festgelegt werden, bei welcher Ausprägung oder bei welchem Umfang der durch die Zustandsgrößen beschriebenen Schäden bzw. Mängel vernachlässigbare, schwache, mittlere, starke oder sehr starke Wirkungen vorhanden sind, d. h. der Zustand in Bezug auf das betrachtete Zielkriterium sehr gut, gut, mittelmäßig, schlecht oder sehr schlecht einzustufen ist. Für diese Einstufung wird bei den Fahrbahnen eine bei 1,0 und 5,0 begrenzte Notenskala verwendet, die Wertbegriffe enthält (1,0 = „sehr gut“, 5,0 = „sehr schlecht“). Diese Skala wird auch für die Normierung der Zustandsgrößen der Radwege zugrunde gelegt.

Bei der verfahrensmäßigen Umsetzung der Normierung kann zunächst definiert werden, dass für den technologisch bestmöglichen baulichen Zustand der Zustandswert 1,0 („sehr gut“) gesetzt wird [OERTELT, MAERSCHALK 2006]. Nach dieser Vorgabe werden für die Überführung der Zustands-

größen in dimensionslose Zustandswerte zwei weitere Festpunkte auf der Werteskala definiert:

- Ein Festpunkt beim Zustandswert (Note 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.
- Ein Festpunkt beim Zustandswert (Note 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.

Zur Berechnung von Zustandswerten werden i. Allg. der 1,0-Wert sowie der Warnwert (Note 3,5) und der Schwellenwert (Note 4,5) linear verbunden (lineare „Normierungsfunktionen“). In Anlehnung an die Vorgehensweise bei den Fahrbahnen werden nach Berechnung der Zustandswerte zwei Nachkommastellen mitgeführt.

Bei der Festlegung von Warn- und Schwellenwerten stellt sich die Frage, welche Anforderungen an den Zustand von Radwegen zu stellen und ob diese Anforderungen für alle Radwegtypen gleich sind. Wenn unterschiedliche Anforderungen angenommen werden, muss bei der Bewertung der Wirkungen von Zustandsgrößen auf die Zielkriterien das jeweilige Anforderungsniveau mit spezifischen Warn- und Schwellenwerten berücksichtigt werden. Bei der ZEB der Fahrbahnen der Bundesfernstraßen wurde bis einschließlich der Kampagne von 2001/02 (Bundesautobahnen) keine Differenzierung der Anforderungen vorgenommen, obwohl für die Kennzeichnung von Anforderungsniveaus vier sog. Funktionsklassen verfügbar waren [OERTELT, MAERSCHALK 2006]. Bei der ZEB-Kampagne 2003/04 (Bundesstraßen) wurden die Anforderungen bei der Bewertung der Ortsdurchfahrten der Bundesstraßen aufgrund der geringeren zulässigen Fahrgeschwindigkeit gegenüber den freien Strecken der Bundesstraßen und den Autobahnen reduziert. Bei der Bewertung der Fahrbahnen von Landes- bzw. Staatsstraßen werden seither ebenfalls niedrigere Anforderungen vorgegeben (s. dazu auch Kapitel 2.3).

Wenn Zustandswerte, ggf. für unterschiedliche Anforderungsniveaus, ermittelt wurden, können die verschiedenen Zustandsmerkmale zu einem umfassenderen Ausdruck für eine Beschreibung der Wir-

kungen auf die jeweiligen Zielkriterien verknüpft werden. Aus dieser Verknüpfung im Rahmen einer „Wertsynthese“ ergeben sich die sog. Teilwerte (z. B. Teilwert „Sicherheit/Befahrbarkeit“, Teilwert „Substanzerhalt“). Aus vorwiegend darstellerischen Gründen kann, wie z. B. bei den Fahrbahnen, mit den Teilwerten schließlich ein Gesamtwert gebildet werden.

6.2 Zustandsbewertung nach dem Verfahren der Uni BW München

Im Falle der Zustandserfassung der Radwege in Nordhorn [SOBOTTA, DEING, GLAHE 2005] und Rosenheim [CALISKAN, STINTZING 2011] durch die Uni BW München wurde der Radwegzustand nur in Form der Längsebenheit über die Vertikalbeschleunigung erfasst. Die Normierung der mittleren effektiven Vertikalbeschleunigung erfolgte in 4 Stufen sehr gut, gut, ausreichend, nicht ausreichend (siehe Bild 6-1 und Bild 4-10).

Die Gesamtbewertung erfolgte über eine Matrixverknüpfung der 4-stufigen Ebenheitswerte mit den 4-stufigen Werten für die Ergebnisse der Querschnitts- und Ausstattungsüberprüfung. Der resultierende Gesamtwert ist 4-stufig.

Wertebereich (RMS) [m/s ²]	Bewertung
$a_v \leq 1,42$	++ (sehr gut)
$1,42 < a_v \leq 2,84$	+ (gut)
$2,84 < a_v \leq 4,27$	- (ausreichend)
$a_v > 4,27$	-- (nicht ausreichend)

Bild 6-1: Bewertung der gemessenen Vertikalbeschleunigung

Gesamtbewertung		Querschnittsüberprüfung			
		++ (sehr gut)	+ (gut)	- (ausreichend)	-- (nicht ausreichend)
Ebenfähigkeit	++ (sehr gut)	++	++	+	-
	+ (gut)	+	+	+	-
	- (ausreichend)	+	-	-	-
	-- (nicht ausreichend)	-	-	--	--

Bild 6-2: Gesamtbewertung über Matrixverknüpfung [SOBOTTA, DEING, GLAHE 2005]

Bei der Gesamtbewertung nach Bild 6-2 wird eine Bewertung des baulichen Zustands (Ebenheit), die eine Lokalisierung und Priorisierung anstehender Erhaltungsmaßnahmen ermöglicht, mit einer Bewertung des Ausbauzustands im Hinblick auf ggf. erforderliche Verbreiterungen verknüpft. Es ist sicherlich von Interesse, ob die Breite eines Radwegs gut oder nicht ausreichend ist, mit Maßnahmen der baulichen Erhaltung kann ein derartiges Defizit jedoch nicht behoben werden. Bei Erneuerungsmaßnahmen an Radwegen, die aufgrund des Zustands anstehen, sollte stets hinterfragt werden, ob die Radwegbreite den Anforderungen entspricht, bei einer evtl. fälligen Verbreiterung sind jedoch völlig andere Kriterien maßgeblich (z. B. erforderlicher Grunderwerb) als bei der Erhaltung. Eine Vermischung dieser sinnvollerweise hierarchisch anzuordnenden Kriterien erscheint weder transparent noch zielführend.

6.3 Zustandsbewertung nach dem modifizierten ZEB-Verfahren

Bei den erfolgten Zustandserfassungen/-bewertungen der Radwege in Brandenburg und in Schleswig-Holstein mit dem ARGUS®-AGIL (s. Kapitel 5.3.2) wurde das nachfolgend kurz beschriebene Bewertungsverfahren angewendet, das eine Modifikation der ZEB-Bewertung der Fahrbahnen darstellt und auf den Verfahrensweisen aus dem Innerortsbereich beruht.

6.3.1 Normierung

Bei der Bewertung der Ebenheit im Längsprofil werden bei der ZEB der klassifizierten Straßen (Bundesautobahnen sowie Bundesstraßen, Landes- und Kreisstraßen jeweils mit Ortsdurchfahrten und freien Strecken) die Zustandsgrößen für die Allgemeine Unebenheit (AUN) und künftig voraussichtlich die Zustandsgrößen des Bewerteten Längsprofils (BLP) mit den Komponenten DBL (Spanne) und SBL (Streuung) berücksichtigt.

Anstelle des AUN bzw. des BLP werden als Zustandsgrößen für die Ebenheit im Längsprofil

- bei der ZEB auf Innerortsstraßen und im Rahmen des Bauvertragswesens bei Funktionsbauverträgen der „maximale Abstand unter (rechnerischer) Richtlatte über 4 m“ PGR_MAX und

- zusätzlich bei der ZEB auf Innerortsstraßen der „mittlere Abstand unter (rechnerischer) Richtlatte über 4 m“ PGR_AVG

herangezogen.

Bild 6-3 bis Bild 6-5 enthalten die Normierungsfestpunkte der E EMI 2012, der ZTV MtFunktion – StB 08 und die vorgeschlagenen Normierungsfestpunkten der ZEB-Radwege Brandenburg 2009. Die vorgeschlagenen Normierungsfestpunkte der ZEB-Radwege Brandenburg 2009 (Bild 6-5) wurden für die Planografsimulation aus einem statistischen Bewertungshintergrund abgeleitet, indem sich der Schwellenwert, der Warnwert und der 1,5-Wert entsprechend an den Perzentilen 5 %, 15 % und 50 % (Median) orientierten.

Bei einem Vergleich der Bewertungsfestpunkte für PGR_MAX lässt sich Folgendes anmerken:

- Die Bewertungsfestpunkte der E EMI 2012 beziehen sich auf Auswerteabschnitte mit einer Regellänge von 10 m, wogegen sich die Bewertungsfestpunkte der ZTV MtFunktion – StB 08 auf Auswerteabschnitte mit einer Regel-

länge von 100 m beziehen. Hierdurch werden unterschiedliche Anforderungsniveaus abgebildet.

- Beim 1,5-Wert stellt der Vorschlag für die ZEB in Brandenburg geringfügig strengere Anforderungen als die ZTV MtFunktion – StB 08 und die E EMI 2012.
- Beim Warnwert stellt der Vorschlag für die ZEB in Brandenburg die gleichen Anforderungen wie die ZTV MtFunktion – StB 08, welche deutlich strenger sind als die der E EMI 2012.
- Beim Schwellenwert stellt der Vorschlag für die ZEB in Brandenburg geringere Anforderungen als die E EMI 2012 und wesentlich geringere Anforderungen als die ZTV MtFunktion – StB 08.

Die Normierungsfestpunkte der Substanzmerkmale „Risse“, „Flickstellen“ und „Oberflächenschäden“ für die ZEB-Radwege in Brandenburg (Bild 6-5) sind identisch mit den Festpunkten der Fahrbahnen aus der E EMI 2012 (Bild 6-4), welche wiederum deutlich unter den Anforderungen der ZTV MtFunktion StB 08 (Bild 6-3) liegen.

Zustandsindikator	Einheit	1,5-Wert	Warnwert	Schwellenwert
Planografsimulation – Maximalwert	mm	4	12	16
Planografsimulation – Mittelwert	mm	1	2,5	3,5
Risse	%	1	15	25
Flickstellen	%	1	15	25
Oberflächenschäden	%	1	15	25

Bild 6-3: Normierungsfestpunkte für Asphaltbauweisen gemäß E EMI 2012 [FGSV 2012]

Zustandsindikator	Einheit	1,5-Wert	Warnwert	Schwellenwert
Planografsimulation – Maximalwert	mm	4	7	10
Risse	%	1	5	10
Flickstellen	%	1	10	15

Bild 6-4: Normierungsfestpunkte für Asphaltbauweisen gemäß ZTV MtFunktion – StB 08 [BMVBS 2008]

Zustandsindikator	Einheit	1,5-Wert	Warnwert	Schwellenwert
Planografsimulation – Maximalwert	mm	3	7	18
Planografsimulation – Mittelwert	mm	0,6	1,6	2,1
Risse	%	1	15	25
Flickstellen	%	1	15	25
Oberflächenschäden	%	1	15	25

Bild 6-5: Vorschlag für Normierungsfestpunkte bei der ZEB von Radwegen in Brandenburg 2009 [HELLER 2009]

6.3.2 Wertsynthese

Der Vorschlag zur Wertsynthese für die ZEB-Radwege in Brandenburg sieht vor, dass, in Analogie zur Vorgehensweise bei den Fahrbahnen, ein

- Gebrauchswert TWGEB und ein
- Substanzwert (Oberfläche) TWSUB

gebildet werden (s. Bild 6-6). Zur Ermittlung des Gebrauchswerts TWGEB wird, zunächst getrennt für die linke und rechte Messspur des ARGUS®-AGIL (s. Kapitel 5.3.2), aus den Einzelzustandswerten für den Maximalwert und Mittelwert der Planografsimulation der schlechtere Wert ausgewählt (ZWPGR_R und ZWPGR_L in Bild 6-6). Der schlechtere Wert der beiden Messspuren wird schließlich als maßgeblicher Zustandswert der Längsebenheit gemäß Planografsimulation herangezogen (ZWPGR in Bild 6-6). Dieser Zustandswert ZWPGR ist identisch mit dem Gebrauchswert TWGEB.

Der Zustandswert ZWPGR der Längsebenheit geht mit einem Gewicht von 30 % in den durch lineare Mittelwertbildung errechneten Substanzwert TWSUB ein (s. Bild 6-6). Die Substanzmerkmale werden mit 30 % für Risse und jeweils 20 % für Flickstellen und sonstige Oberflächenschäden in den Substanzwert TWSUB eingerechnet. Der Gesamtwert wird aus dem Maximum des Gebrauchswerts TWGEB und des Substanzwerts TWSUB gebildet. Der Vorschlag enthält zudem die Empfehlung, neben dem gewichteten Mittelwert die sog. „Durchschlagregel“ anzuwenden, nach der jeder Einzelzustandswert größer oder gleich 3,5 den gewichteten Mittelwert ersetzt, sofern dieser kleiner als der Einzelzustandswert ist. Wie bei der ZEB der Fahrbah-

nen wird dabei angenommen, dass das Verknüpfungsverfahren gemäß Bild 6-6 den Substanzwert nicht repräsentativ und umfassend abbildet.

7 Entwicklung und Erprobung einer alternativen Erfassungsmethode

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine fahrradbasierte visuell-/messtechnische Erfassungsmethode entwickelt. Diese Erfassungsmethode wurde nach Abschluss der Entwicklungsphase auf einem Teilnetz der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein erprobt. Für dieses Erfassungssystem wurden in Anlehnung an das ZEB-Verfahren auf Fahrbahnen unter Berücksichtigung der spezifischen Erfordernisse bei der Erfassung von Radwegen Vorschläge für Geo- und Rasterrohdaten der zu ermittelnden Zustandsgrößen erarbeitet, die auch die Streckenbilder beinhalten.

7.1 Entwicklung des Messfahrrads

Der Entwicklung der alternativen visuell-/messtechnischen Erfassungsmethode auf der Basis eines Messfahrrads (siehe Bild 7-2) lagen folgende Grundsätze und Ziele zugrunde:

- das Fahrrad als Träger für das Messsystem als Grundlage für eine authentische Sensitivität bei der Erfassung,
- keinerlei Beeinträchtigung der Radwegnutzer durch die Zustandserfassung,

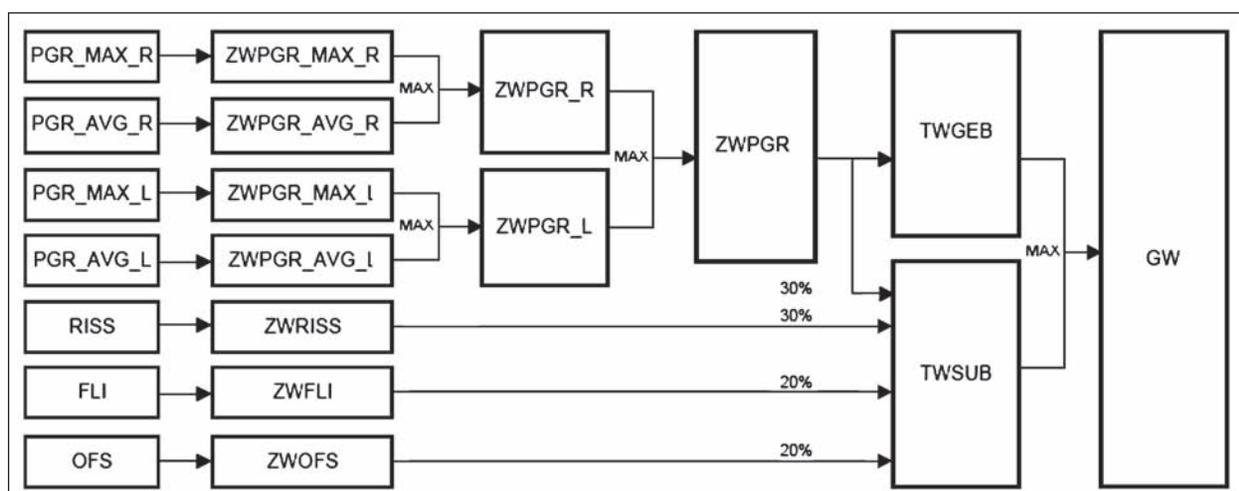


Bild 6-6: Vorschlag für das Ablaufschema der Wertsynthese bei der ZEB von Radwegen in Brandenburg 2009 [HELLER 2009]

- niedrige Beschaffungs- und Betriebskosten sowie einfache Multiplizierbarkeit,
- möglichst geringer Aufwand bei der Nachbearbeitung, Aufbereitung und Auswertung der Messungen,
- Messfahrrad mit Elektrounterstützung bis 25 km/h (Pedelec) zur Gewährleistung einer weitgehend konstanten Fahrtgeschwindigkeit (ca. 7 m/s bzw. ca. 25 km/h) und zur Erhöhung der Reichweite (angestrebte Tagesbefahrungsleistung > 50 km).

Das erste Konzept für das Messfahrrad beinhaltete eine wegkonstant ausgelöste Digitalkamera mit integrierter Einrichtung zur Geokodierung der Bilder und einer synchronisierten digitalen Aufnahme der gemessenen Vertikalbeschleunigung. Schnelle Bildfolgen (bis zu 6 Bilder/Sekunde) sind derzeit im Bereich der Consumergeräte nur mit digitalen Spiegelreflexkameras realisierbar, deren Energieverbrauch jedoch viel zu hoch ist, sodass eine Akkulation nur für ca. 600 Bilder ausreicht, was einer Wegstrecke von 600 m entspricht. Kompaktkameras, die deutlich weniger Energie verbrauchen, benötigen bei längeren Bildfolgen in der Regel mindestens 1 Sekunde Pause zwischen den einzelnen Bildaufnahmen, was bei der angestrebten Fahrtgeschwindigkeit von 25 km/h in eine Bilddichte von 1 Bild alle 7 Meter resultieren würde.

Der zweite Ansatz für die Aufnahmetechnik basierte auf der Aufnahme weggetriggelter Einzelbilder mit GPS-Daten und Aufnahme der Beschleunigungswerte in einem Smartphone. Entgegen den



Bild 7-1: Der Prototyp des Messfahrrads

ursprünglichen Annahmen erwiesen sich die Hardware und die Systemsoftware des gewählten Smartphones als ungeeignet.

Das letztendliche Entwicklungskonzept ging von einer Aufnahme eines digitalen Videos aus, dessen Tonspuren das Signal des Beschleunigungsgebers und kodierte Schadensbeobachtungen beinhalten. Während der Befahrung wird mittels eines GPS-Loggers im Sekundentakt die jeweilige Position des Messsystems ermittelt und gespeichert.

Nach Abschluss der Aufnahmen werden mit Hilfe des zeitkodierte GPS-Tracks die Abspielzeitpunkte bzw. die Framenummern ermittelt, anhand derer die Einzelbilder für konstante Wegintervalle (z. B. 1 Meter) aus dem Video extrahiert werden, welche dann mit den errechneten Positionsdaten versehen werden. Diesen solchermaßen errechneten Weg- bzw. Zeitsegmente liegt die Auswertung der Beschleunigungssignale und der kodierten Schadensbeobachtungen zugrunde.

Die Zustandserfassung bei der Befahrung besteht aus folgenden Bestandteilen:

- Aufnahme von Videos (typische Auflösung 1.280 x 720 optional auch 1.920 x 1.080 oder 848 x 480, jeweils 29,97 fps),
- Aufnahme eines GPS-Tracks (zeitkonstant 1 Wegpunkt pro Sekunde),
- Aufnahme der an der Vorderradachse bzw. Gabel gemessenen Vertikalbeschleunigung (Auflösung 0,01 m/s²),
- Aufnahme von Tonsignalen als Markierungen der Schadensbeobachtungen bei der Befahrung.

Die Datenaufbereitung und Auswertung nach der Befahrung beinhalten:

- Ermittlung von 1-Meter-Aufnahmesegmenten über Interpolation des GPS-Tracks,
- Extraktion von Einzelbildern im Meterabstand aus dem Video über errechnete Abspielzeitpunkte (Framenummern),
- Extraktion der Vertikalbeschleunigungen für Metersegmente und Berechnung des Effektivwerts aus der rechten Audiospur der Videoaufnahme (siehe Bild 7-2),
- Extraktion der kodierten Schadensbeobachtungen für Metersegmente aus der linken Audiospur der Videoaufnahme (siehe Bild 7-2),

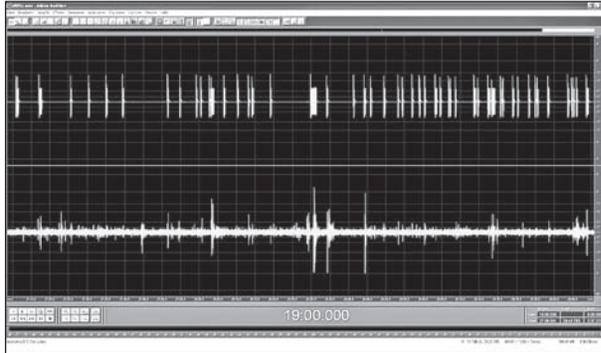


Bild 7-2: Audiospuren der Videoaufnahme mit den Signalen der Schadensmarkierungen und des Beschleunigungsaufnehmers

- EXIF-Einträge in die Einzelbilder mit Geoinformationen (Aufnahmezeitpunkte, Koordinaten, Höhe, Bildrichtung, Geschwindigkeit),
- Erzeugen von Rohdatendateien für Längsebenheit und Substanzmerkmale (Oberfläche),
- Bildauswertung zur Kontrolle und Präzisierung der Schadensmarkierungen.

7.2 Eigene Untersuchungen zur Messung und Auswertung der Schwingbeschleunigungen

Aus Kostengründen wurde auf eine VDI-2057-konforme Messtechnik verzichtet. Die vertikale Schwingbeschleunigung wird mit nur einem Beschleunigungsaufnehmer (Messbereich ± 3 g) an der Vorderradgabel in unmittelbarer Nähe der Vorderachse gemessen und das Messsignal auf einer der beiden Tonspuren des Videos (PCM unkomprimiert, 16 bit, 48,1 kHz) aufgezeichnet.

Das Messfahrrad verfügt (in beiden Entwicklungsstufen) über eine gedämpfte und gefederte Vorderadgabel. Der Messpunkt der Schwingbeschleunigungsmessung wurde an den ungefederten Teil der Gabel verlegt, um die Schwingbeschleunigungen möglichst unverfälscht erfassen zu können und somit quasi ein ungefedertes Fahrrad zu simulieren (Bild 7-3).

Bei der Auswertung der – vereinfachend gesagt – am Vorderrad gemessenen vertikalen Schwingbeschleunigungen werden zunächst Zeitabschnitte errechnet, die jeweils 1 Meter Wegstrecke entsprechen. Für diese Zeitabschnitte, die bei der angestrebten Befahrungsgeschwindigkeit von 25 km/h eine Länge von 0,144 Sekunden haben, wird der



Bild 7-3: Beschleunigungssensor in der Nähe der Vorderachse des Messfahrrads

Effektivwert aus den zuvor bei 50 Hz tiefpassgefilterten Schwingbeschleunigungen errechnet.

Bei den Messungen der Schwingbeschleunigung im Rahmen von Zustandserfassungen von Radwegen wird eine Fahrgeschwindigkeit von 25 km/h angestrebt. Die Festlegung auf 25 km/h als Soll- und Bezugsgeschwindigkeit zur Beurteilung des Fahrkomforts gründet sich, mangels greifbarer Zahlen zu den tatsächlich auf Radwegen gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten, auf die in den Empfehlungen für Radverkehrsanlagen ERA 2010 [FGSV 2010] als Anforderungen für Verbindungskategorien im Alltagsverkehr für Radverkehrsverbindungen außerhalb bebauter Gebiete genannten angestrebten Fahrgeschwindigkeiten von 20-30 km/h. Für diese Bezugsgeschwindigkeit von 25 km/h spricht zudem der zunehmend steigende Anteil an Pedelecs bei den genutzten Fahrradtypen.

Im Rahmen dieses Projekts wurden neben den Erfassungsfahrten für die Zustandserfassung eines Radwegeteilnetzes in Schleswig-Holstein zahlreiche Messungen zur Erprobung und Kalibrierung des Messsystems durchgeführt.

Im Hinblick auf die Zielsetzung einer möglichst einfachen und doch aussagekräftigen quantitativen Beschreibung der Längsebenheit von Radwegen über Schwingbeschleunigungsmessungen wurden Untersuchungen zur rechnerischen Kompensation der unvermeidbaren Abweichungen der tatsächlich gefahrenen von der angestrebten Geschwindigkeit von 25 km/h bei den Messfahrten durchgeführt.

In Bild 7-4 sind die gemessenen und für 100-Meter-Abschnitte gemittelten Schwingbeschleunigungen einer Messstrecke von ca. 2.200 Metern Länge bei

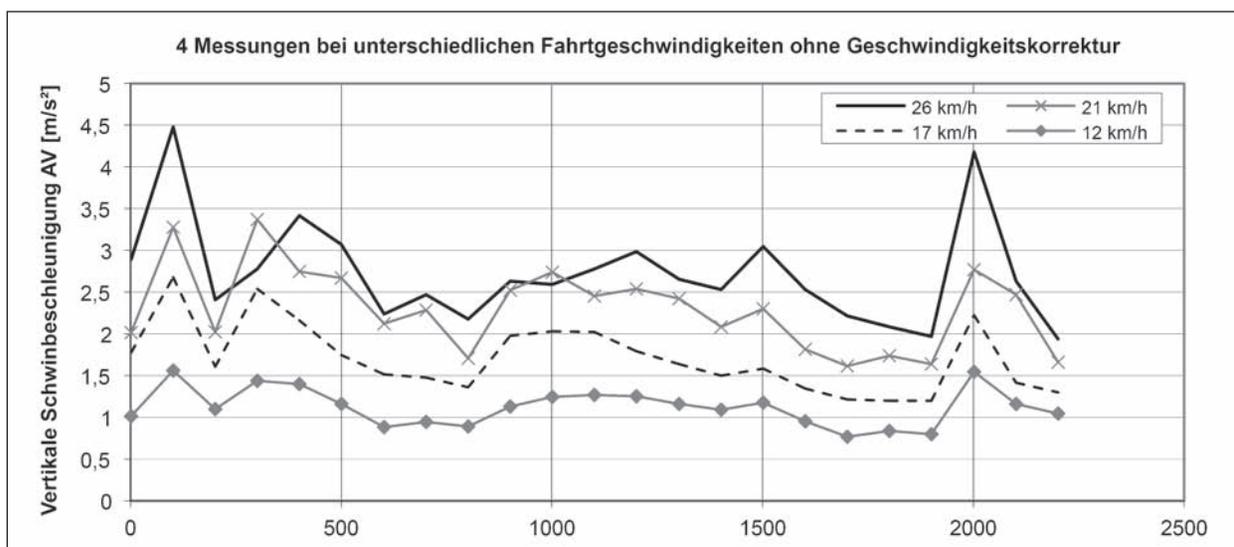


Bild 7-4: Vergleich der vertikalen Schwingbeschleunigung (100-m-Mittelwerte) bei unterschiedlichen Fahrtgeschwindigkeiten ohne Geschwindigkeitskorrektur

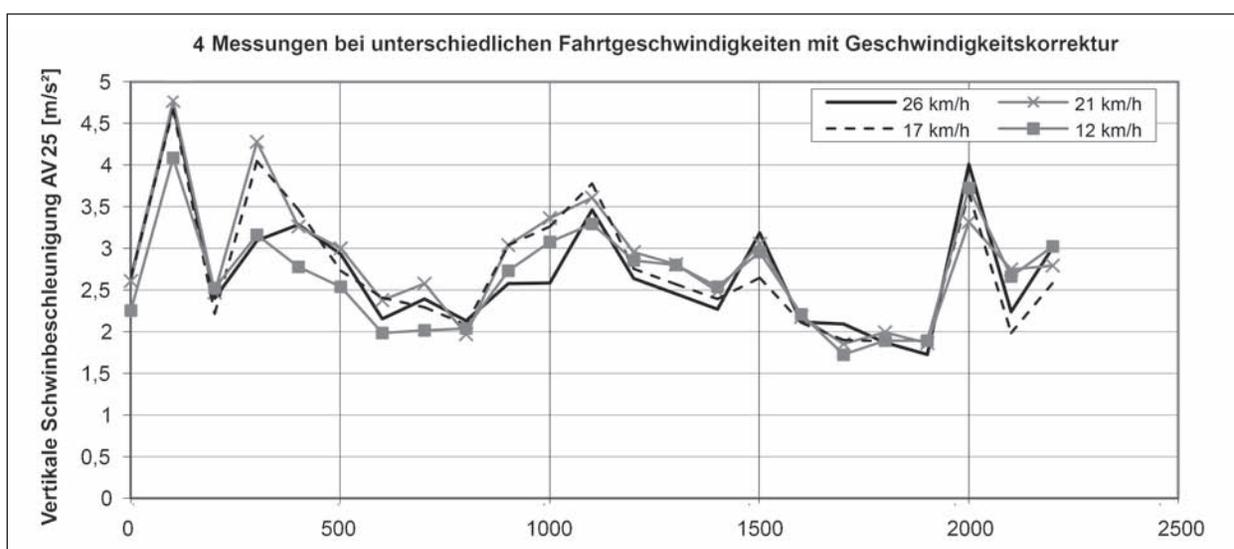


Bild 7-5: Vergleich der vertikalen Schwingbeschleunigung (100-m-Mittelwerte) bei unterschiedlichen Fahrtgeschwindigkeiten mit Geschwindigkeitskorrektur auf 25 km/h

4 Messfahrten mit mittleren Fahrtgeschwindigkeiten von 12, 17, 21 und 26 km/h dargestellt. Die Abhängigkeit der gemessenen Schwingbeschleunigung von der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit ist deutlich zu erkennen. Als Ansatz für die rechnerische Korrektur der Abweichung von der Soll-Fahrtgeschwindigkeit wurde folgende Beziehung gewählt:

$$\alpha_v = 25 \text{ km/h} = \alpha_v \left(\frac{25}{v} \right)^{\frac{w-1}{2}}$$

mit

a_v vertikale Schwingbeschleunigung

v Fahrtgeschwindigkeit

w Welligkeit

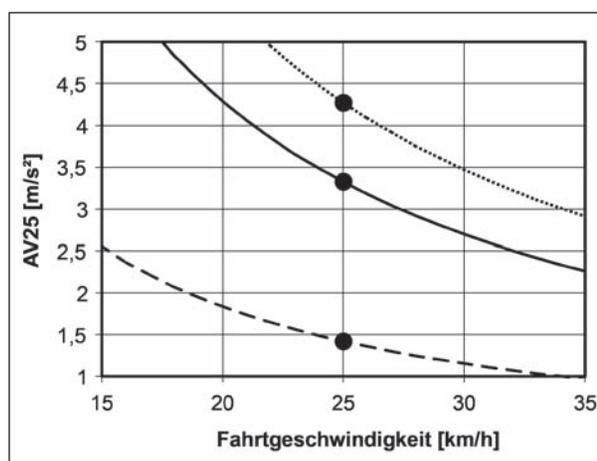


Bild 7-6: Einfluss der Geschwindigkeitskorrektur für 3 charakteristische Messwerte

Da die Welligkeit der jeweils zu untersuchenden Strecke rechnerisch nur über PSD-Analysen (siehe Kapitel 7.5.3) aus dem gemessenen Längsprofil errechnet werden kann, wurde eine mittlere, für Radwege charakteristische Welligkeit von 3,29 empirisch über Iterationsrechnungen der bestmöglichen Geschwindigkeitskorrektur aus einer Reihe von Messungen auf geeigneten Messstrecken ermittelt.

Dieser Korrekturansatz gilt streng genommen nicht für Einzelhindernisse und nicht für periodische Unebenheiten, sondern nur für regellose Unebenheiten. Netzbezogen treten regellosen Unebenheiten bei weitem am häufigsten auf, sodass der resultierende Fehler durch die rechnerische Geschwindigkeitskorrektur von Radwegen mit Anteilen von Einzelhindernissen und periodischen Unebenheiten als deutlich geringer einzuschätzen ist als ein gänzlicher Verzicht auf eine Geschwindigkeitskorrektur (siehe Bild 7-4 und 7-5).

7.3 Vergleich eigener Messergebnisse mit Ergebnissen aus verschiedenen Untersuchungen

Es wurde versucht, die eigenen Ergebnisse der Schwingbeschleunigungsmessungen den Ergebnissen der vorgestellten Schwingbeschleunigungsmessungen von PIVIT [PIVIT 1998], WÄCHTER [WÄCHTER et al. 1999] und der Uni BW München [SOBOTTA et al. 2005; CALISKAN, STINTZING 2011] gegenüberzustellen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die Messungen und Auswertungen in wesentlichen Punkten unterscheiden und ein direkter Vergleich der Messergebnisse somit nicht möglich ist:

- Die Messergebnisse liegen bei den Untersuchungsergebnissen von PIVIT und WÄCHTER als (bewertete) Schwingstärke in Form von K-Werten vor. Die Umrechnung der Schwingstärke in frequenzbewertete Schwingbeschleunigungen ist zwar möglich über [HVBG 2006]:

$$\alpha_{hw} = \frac{K}{6,3} \text{ für Teilkörperschwingungen}$$

$$\alpha_{wz} = \frac{K}{20} \text{ für Ganzkörperschwingungen}$$

Der Einfluss der Frequenzbewertung bzw. ein Umrechnungsfaktor von der bewerteten auf eine unbewertete Schwingbeschleunigungen ist jedoch in hohem Maße von der Frequenzverteilung

der Schwingbeschleunigungen abhängig und kann ohne entsprechende Frequenzanalysen nicht abgeschätzt werden.

- Die Messergebnisse liegen für unterschiedliche Fahrräder und unterschiedliche Messpunkte an diesen Fahrrädern vor. Bei den mit dem eigenen Messrad am ehesten vergleichbaren Fahrradtypen Reiserad und Hollandrad beziehen sich die Untersuchungsergebnisse von PIVIT und WÄCHTER auf den Sattel (vertikal), den Lenker des Reiserads (in Armrichtung ca. 50°) bzw. den Lenker des Hollandrads (in Armrichtung ca. 45°) und berücksichtigen somit besonders stark die Federungs- und Dämpfungseigenschaften des gesamten Fahrrads, während sich der Messpunkt der Uni BW in unmittelbarer Nähe der Vorderachse (vertikal) befindet, um die spezifischen Eigenschaften des Fahrrads möglichst klein zu halten.
- Ergänzende eigene Messungen (siehe Kapitel 7.5.8) mit zusätzlichen vertikal ausgerichteten Beschleunigungsaufnehmern am Lenker und Sattel zeigen auf, dass die (unbewertete) vertikale Schwingbeschleunigung am Lenker ca. 71 % und am Sattel ca. 45 % des am Vorderrad gemessenen Werts beträgt. Diese Verhältniszahlen kennzeichnen in erster Linie die Federungs- und Dämpfungseigenschaften des eigenen Messfahrrads und sind nicht für die Umrechnung der von PIVIT und WÄCHTER mit anderen Fahrradtypen ermittelten (bewerteten) Schwingstärken geeignet.
- Die Messungen wurden bei unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten durchgeführt, welche größtenteils nur in Form von Geschwindigkeitsbereichen benannt sind. Die Messungen von PIVIT beziehen sich auf einen Geschwindigkeitsbereich von 13 bis 22 km/h, die Messungen von WÄCHTER beziehen sich auf einen Geschwindigkeitsbereich von 12 bis 29 km/h, die der Uni BW auf einen Geschwindigkeitsbereich von 14 bis 19 km/h. In den genannten Geschwindigkeitsbereichen ist demnach gemäß dem zuvor dargestellten Korrekturansatz für die Messgeschwindigkeit bezogen auf 25 km/h mit rechnerischen Erhöhungen von mehr als 100 % bei 12 km/h bzw. mit einer Absenkung von ca. 16 % bei 29 km/h zu rechnen.

Zusammenfassend muss deshalb festgestellt werden, dass ein Vergleich der unterschiedlichen Ergebnisse aufgrund der fehlenden Informationen

hinsichtlich des Einflusses der Frequenzbewertung, aber vor allem hinsichtlich der tatsächlich gefahrenen Messgeschwindigkeiten seriös nicht möglich ist.

In Ermangelung der Umrechnungsmöglichkeit der am Vorderrad gemessenen vertikalen Schwingbeschleunigung in frequenzbewertete Schwingbeschleunigungen am Lenker und Sattel zur Orientierung an den Grenzwerten der VDI 2057 wurde daher für die Normierung der am Vorderrad gemessenen vertikalen Schwingbeschleunigung vorläufig der Ansatz der Uni BW übernommen.

7.4 Zustandserfassung von Radwegen an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein

Als erste Erprobung des entwickelten Messfahrrads für Radwege wurde ein Teilnetz der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein erfasst.

7.4.1 Vorbereitung der Zustandserfassung

Zur Beschreibung des Messauftrags und zur Vorbereitung der Erfassungsfahrten wurde vom Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr eine Straßenkarte (Maßstab 1:250 000) mit handschriftlichen Einträgen für die zu erfassenden Radwege sowie den ZEB-Grunddaten (einschließlich der MAPINFO-Relationen) der Bundesstraßen in Schleswig-Holstein übergeben. Die ZEB-Grunddaten bezogen sich auf die Fahrbahnen der Bundesstraßen und enthielten keine spezifischen Informationen zu den fahrbahnbegleitenden Radwegen.

Für die Routenplanung der Messfahrten konnten die wesentlichen Informationen über die Radwege (Lage links oder rechts im Bezug auf die Richtung der Netzknotenfolge) häufig, jedoch nicht immer zweifelsfrei aus OpenStreetMap-Karten (siehe Bild 7-7) oder Google-Satellitenbildern entnommen werden.

Wesentlichen Einfluss auf die Routenplanung und auf die erzielbare Tagesmessleistung hat die Frage, ob bei den Messfahrten ein Begleitfahrzeug mit eigenem Fahrer zur Verfügung steht. Ist dies der Fall, so kann das Messfahrrad am Ende einer jeden Etappe vom Begleitfahrzeug aufgenommen werden, andernfalls muss das Messfahrrad stets zum Startpunkt der Etappe zurückfahren, was die erreichbare Tagesmessleistung halbiert.

7.4.2 Durchführung der Messfahrten

Die Messungen zur Zustandserfassung von Radwegen an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein fanden im Zeitraum vom 10. bis 12.07.2011 statt. An den ersten beiden Messtagen stand für das Begleitfahrzeug ein Fahrer zur Verfügung. Am dritten Messtag wurden ohne separaten Fahrer für das Begleitfahrzeug nur noch punktuelle Ergänzungsmessungen durchgeführt. Der Ablauf eines Messtages gestaltete sich folgendermaßen:

- Transfer vom Hotel (in Kiel) zum Startpunkt der ersten Messstrecke,
- Ausladen und Vorbereiten des Messfahrrads (Funktionsprüfung der Messtechnik, Kontrolle des Reifendrucks von 4 bar, Vereinbarung des nächsten Treffpunkts),
- Messung einer Teilstrecke von ca. 15 Kilometern bzw. ca. 45 Minuten Fahrzeit,
- Treffen mit dem Begleitfahrzeug, Datensicherung, Datenkontrolle, Funktionsprüfung der Messtechnik, Kontrolle des Reifendrucks, Vereinbarung des nächsten Treffpunkts,
- Messung weiterer Teilstrecken von ca. 15 Kilometern bzw. ca. 45 Minuten Fahrzeit,
- ggf. Transfer zur nächsten Messstrecke bzw. zum Hotel.

Am ersten Messtag, den 10.07.2011, wurde in der Zeit von 10:00 bis 13:00 zunächst der Radweg entlang der B 202 von Raisdorf nach Oldenburg in Holstein mit einer Länge von ca. 46 km in 3 Etappen erfasst. Nach dem Transfer von Oldenburg in

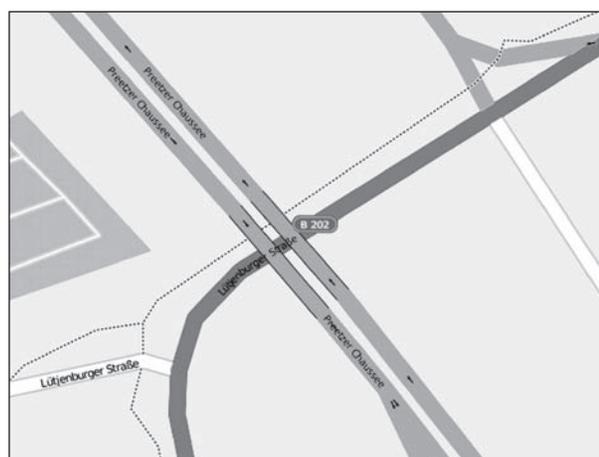


Bild 7-7: Radweg (gestrichelte Linie) im Kartenmaterial von OpenStreetMap



Bild 7-8: Erfasste Radwege an den Bundesstraßen B 76 zwischen Middelburg und Preetz und B 202 zwischen Ralsdorf und Oldenburg in Holstein

Holstein zur AS Eutin der BAB A 1 wurde die Erfassung des Radwegs entlang der B 76 von Süsel/Middelburg nach Preetz begonnen (siehe Bild 7-8). Aufgrund von Orientierungsproblemen und Falschfahrten konnten die Messungen im Zeitraum von 14:00 bis 15:00 nur bis kurz vor Plön durchgeführt werden. Da der Akku des Fahrrads danach leer war, wurden die Messungen für diesen Messtag beendet. Bei den Messungen entlang der B 76 traten unerwartete Probleme auf, als auf 2 Teilabschnitten der B 76 gar kein Radweg existierte und zudem die Fahrbahn der B 76 mit dem Zeichen 254 (Verbot für Radfahrer) für Radfahrer gesperrt war. Dies war bei der Routenvorbereitung nicht erkannt worden bzw. nicht zu erkennen gewesen. Mangels geeigneten Kartenmaterials und Fehlfunktionen der GPS-Einheit des Mobiltelefons kam es zu zeitraubenden Falschfahrten. Die verwertbare Länge der Erfassungsfahrt betrug ca. 10 km.

Am zweiten Messtag, den 11.07.2011, wurde in der Zeit von 10:00 bis 12:00 zunächst der Radweg entlang der B 203 von Heide nach Westermühlen mit einer Länge von ca. 32 km in 2 Etappen erfasst. Nach dem Transfer von Westermühlen nach Christiansholm wurde im Zeitraum von 13:00 bis 14:00 der Radweg entlang der B 202 von Christiansholm nach Fockbek mit einer Länge von ca. 17 km er-

fasst (siehe Bild 7-9). Anschließend wurden die Messungen für diesen Messtag beendet.

Am dritten Messtag, den 12.07.2011, wurden in der Zeit von 13:00 bis 16:00 die noch fehlenden Teilstücke des Radwegs entlang der B 76 von Süsel/Middelburg nach Preetz mit einer Gesamtlänge von ca. 15 km in 3 Etappen erfasst.

Die Erfahrungen aus den Messfahrten lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Bei durchgängigen Radwegen, guter Routenvorbereitung und mit Hilfe eines Begleitfahrzeugs für den Transfer zur Vermeidung von Leerfahrten sind Tageserfassungsleistungen von 50 bis 70 Kilometern realisierbar.
- Die in dieser Piloterfassung bei jedem Etappenstopp durchgeführten Datensicherungen und Datenkontrollen können optimiert bzw. reduziert werden.
- Die Wirtschaftlichkeit der Radwegerfassungen kann im Hinblick auf das eingesetzte Personal deutlich gesteigert werden, wenn ein Begleitfahrzeug mit Fahrer 2 bis 3 Messfahrräder betreut.
- Begegnungen mit anderen Verkehrsteilnehmern (Radfahrer und Fußgänger) kamen bei den Messfahrten selten vor und verliefen jederzeit

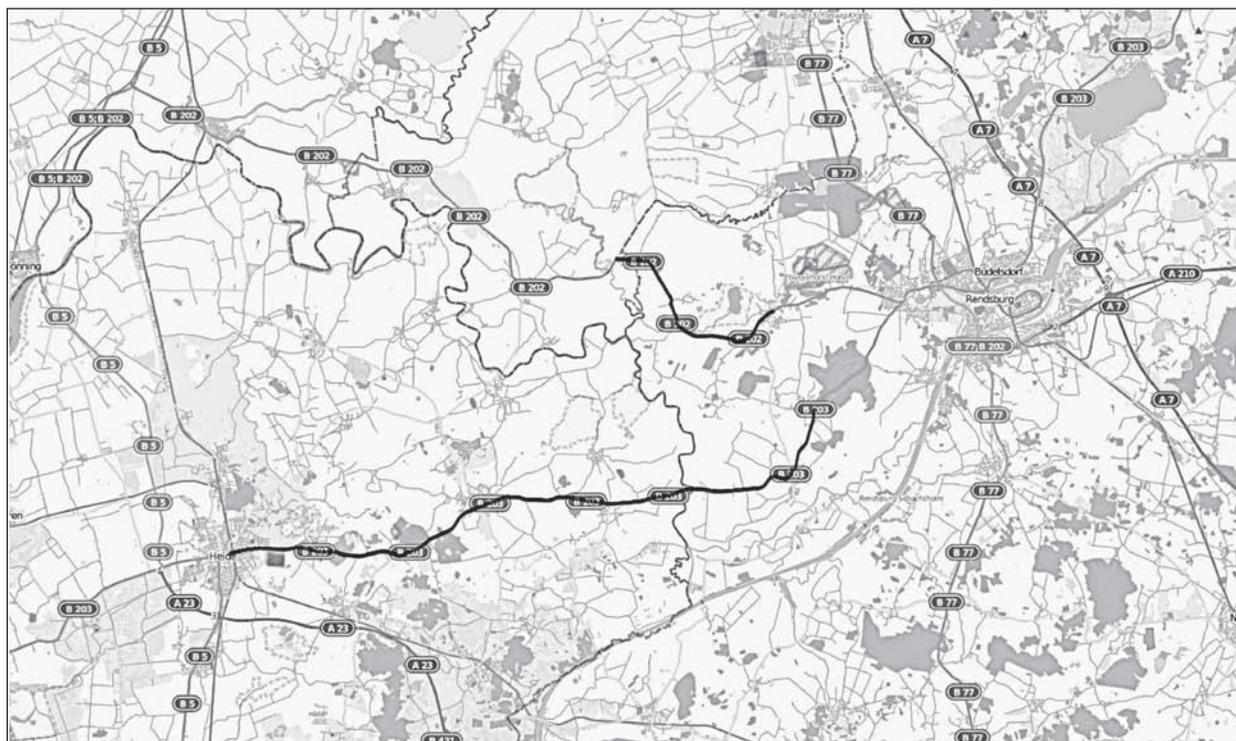


Bild 7-9: Erfasste Radwege an den Bundesstraßen B 202 zwischen Heide und Westermühlen und B 203 zwischen Christiansholm und Hohn

unproblematisch. Bei hoher Verkehrsdichte und eingeschränkten Überholmöglichkeiten auf Radwegen kann das Einhalten der Zielgeschwindigkeit von 25 km/h problematisch werden.

- Die Wetterverhältnisse waren an den drei Mess Tagen sehr günstig. Messungen sind jedoch auch problemlos bei weniger günstigem Wetter und feuchter bis nasser Radwegoberfläche durchführbar, solange das Objektiv der Kamera trocken gehalten werden kann. Sprühnebel, Staub oder lockeres auf der Radwegoberfläche beeinflussen die Schwingbeschleunigungsmessung nicht.

7.4.3 Auswertungen

Erstellung von Georohdaten

Wie bereits zuvor ausgeführt, besteht die Auswertung der Messungen zunächst in der Synchronisierung des Quicktime-Films mit dem GPS-Track (siehe Bild 7-13). Hierzu wird zuerst der GPS-Track auf dem relevanten Teil der aufgezeichneten Wegstrecke reduziert. Für diesen Teil werden die GPS-Messpunkte, die für volle Sekunden im Sekundenraster vorliegen, in Wegsegmente von 1 Meter Länge umgerechnet, d. h., die Koordinaten und die Zeitpunkte werden entsprechend interpoliert. Weg- und

Zeitdaten aus dem GPS-Track bilden die Grundlage zur Berechnung der Fahrtgeschwindigkeit.

Für die Zeitpunkte des Beginns eines jeden Metersegments werden die Einzelbilder aus dem Video über errechnete Abspielzeitpunkte bzw. Framenummern extrahiert.

Aus der Videodatei werden die Tonspuren in Audiodateien extrahiert. Aus den Audiodateien werden für die jeweils einem Meter Wegstrecke entsprechenden Zeitsegmente die Effektivwerte der vertikalen Schwingbeschleunigung errechnet und die als Tonsignale vorliegenden Schadensmarkierungen analysiert. Diese Daten bilden die Grundlage für die Rohdatendatei im dBase-Format (siehe Bild 7-11).

Geschwindigkeitskorrektur

Die für Metersegmente berechneten Effektivwerte der am Vorderrad gemessenen Vertikalbeschleunigung werden mithilfe der in Kapitel 7.2 erläuterten Formel und der berechneten Fahrtgeschwindigkeit für Metersegmente auf 25 km/h normiert.

Bei den Messungen der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein (Gesamtlänge 102,238 km) wurden folgende Kennwerte für die Fahrtgeschwindigkeit bei den Messfahrten ermittelt:

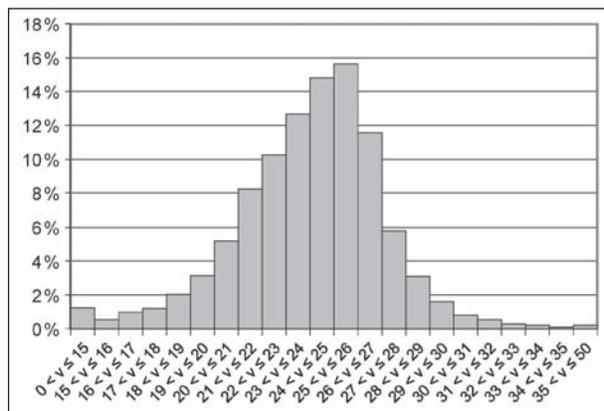


Bild 7-10: Häufigkeitsverteilung der Fahrtgeschwindigkeit bei den Messungen auf dem Radwegeteilnetz an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein

Mittelwert:	24,05 km/h,
Standardabweichung:	3,17 km/h,
Minimum:	4,04 km/h,
Maximum:	42,98 km/h.

Bei 95 % der Messwerte ist die absolute Abweichung von der angestrebten Fahrtgeschwindigkeit (25 km/h) kleiner als 6,8 km/h (siehe Bild 7-10).

Bildauswertung

Mit Hilfe einer Datenbanksoftware werden die Datensätze der Rohdatendatei mit den Bildern verknüpft und visualisiert. Hierfür wurde FileMakerPro verwendet, mit dem dieser Arbeitsschritt besonders komfortabel erledigt werden kann. In der anschließenden Bildauswertung werden die Streckenbilder auf die in Bild 3-7 beschriebenen Zustandsmerkmale hin untersucht. Hierbei werden die bei der Befahrung markierten Bereiche bevorzugt untersucht. Bilder ohne Schadensmarkierungen werden im Schnelldurchlauf gesichtet.

Für die Bildauswertung wurde eine Eingabemaske (siehe Bild 7-12) erstellt, mit deren Hilfe die Bilder auf einfache Weise ausgewertet werden können. Ein Hilfsraster zur Abschätzung der Radwegbreite und zur Verdeutlichung der Grenze zum nächsten Meterabschnitt kann eingeblendet werden.

In den Bildern 7-14 bis 7-27 werden Beispiele für unterschiedliche Radwegtypen, Bauweisen, Schäden und konstruktiv bedingte Problemstellen aufgezeigt.

Netzprojektion

Die in Abschnitten für 1 Meter vorliegenden Ergebnisse der Zustandserfassung von Radwegen wur-

Feldname	Bedeutung	Beispiel
ABSCHNITT	Abschnittsnummer	660
TEIL	Unterabschnittsnummer	1
KLASSE	Straßenklasse	B
NUMMER	Straßennummer	202
BUCHSTABE	Buchstabe	
LAGE	Erfassungsrichtung R = in Stationierungsrichtung L = gegen Stationierungsrichtung	R
VNK	Von Netzknoten	1728002
NNK	Nach Netzknoten	1729001
VST	Von Station	0,00
BST	Bis Station	1,00
RADWEG	Radwegname	B 202
TYP	Radwegtyp: rechts, links, auf der Fahrbahn, Fahrbahninsel, Brücke	Fahrbahn
MESSUNG	Name der Messung	z001b
TRACK	Name des GPS-Tracks	m072901
METER	laufender Messmeter	3198
FRAME	Bildnummer im Videofilm	16072
BAUWEISE	Bauweise	Asphalt
BREITE	Radwegbreite	2,00
DATUM	Datum der Messung	10.07.2011
ZEITUTC	Uhrzeit (UTC)	08:37:52.672
LATITUDE	Breitengrad WGS84	54,289851
LONGITUDE	Längengrad WGS84	10,430767
HEIGHT	Höhe über NN	48
DIRECTION	Azimut	98,2
SPEED	Geschwindigkeit [km/h]	22,18
AV	Vertikalbeschleunigung [m/s ²] (Effektivwert)	1,82
AV25	Vertikalbeschleunigung [m/s ²] bei 25 km/h (Effektivwert)	2,23
MAV25	mittlere Vertikalbeschleunigung [m/s ²] bei 25 km/h im homogenen Abschnitt (Effektivwert)	1,62
SAV25	Standardabweichung der Vertikal- beschleunigung [m/s ²] bei 25 km/h im homogenen Abschnitt (Effektiv- wert)	0,45
TAG	Schadensmarkierung	0
RIS	Riss	0
ASV	Ausmagerung, Splittverlust	0
FLI	Flickstelle	0
AUS	Ausbruch	0
ONA	offene Arbeitsnaht	0
EIN	Einbau (Kanal, Schieber etc.)	0
BOR	Bordstein	0
WUR	Wurzelhebung	0
HANUMMER	Nummer d. homogenen Abschnitts	2350
HAMETER	lfd. Meter im homogenen Abschnitt	1
INFO	Erfassungsabschnitt	Raisdorf- Oldenburg Teil 2
BILD	Bilddateiname	z001b16072.jpg

Bild 7-11: Rohdatendatei im dBase-Format

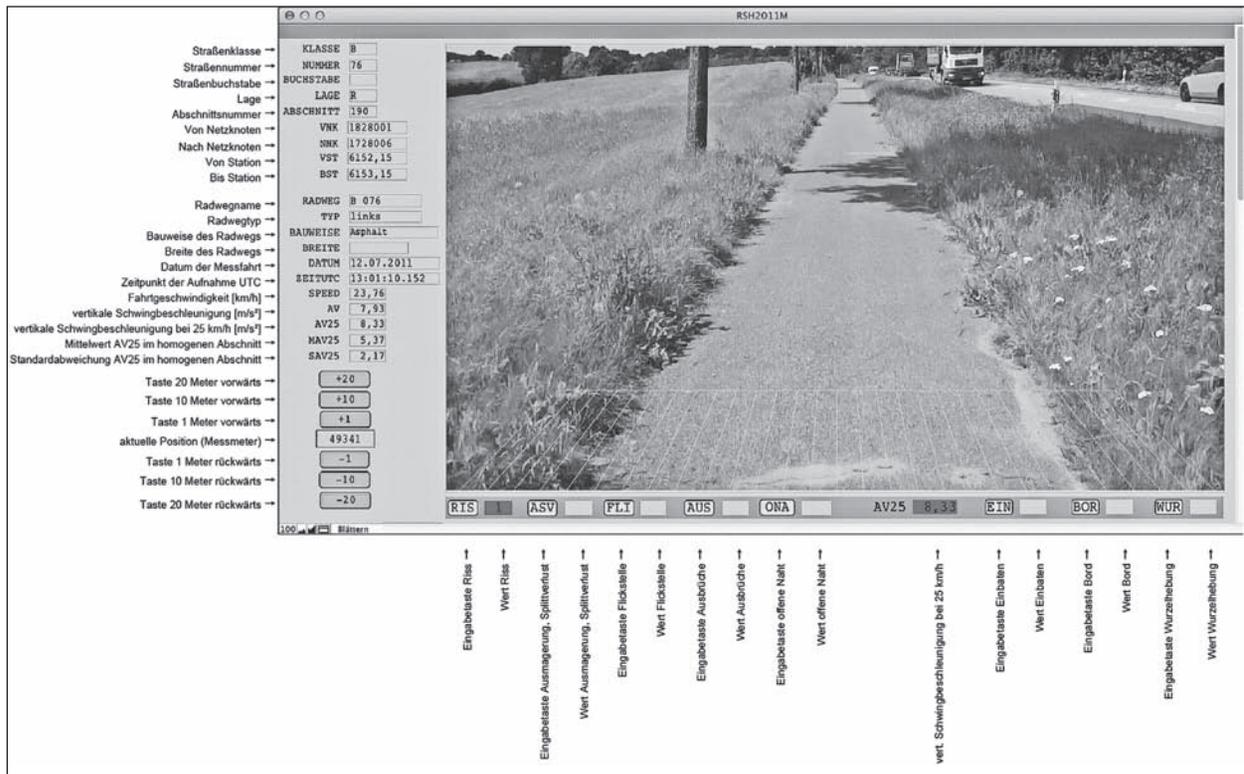


Bild 7-12: Eingabemaske für die Bildauswertung mit eingeblendetem Hilfsraster

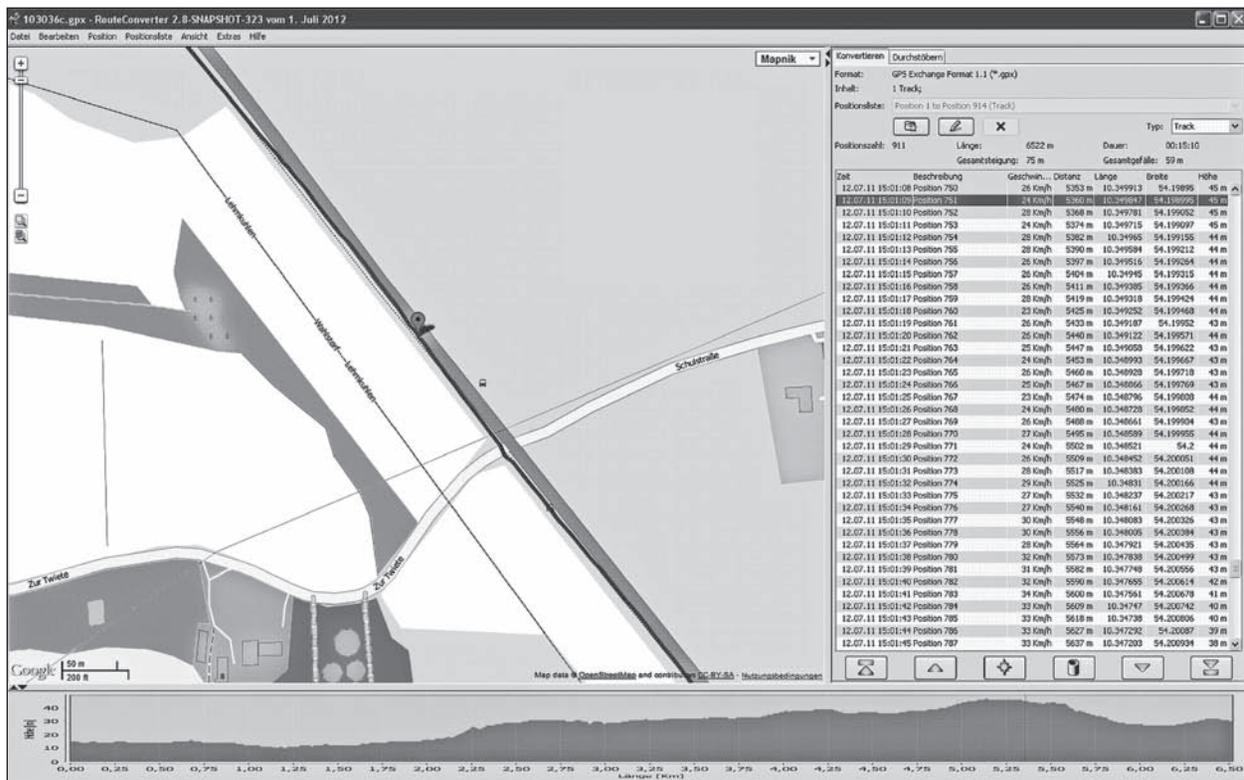


Bild 7-13: Darstellung des GPS-Tracks mit der Software RouteConverter



Bild 7-14: Beispiel für Radweg Typ „rechts“ der Bauweise Asphalt mit Riss



Bild 7-15: Beispiel für Radweg Typ „links“ der Bauweise Asphalt mit Riss und Flickstelle



Bild 7-16: Beispiel für Radweg Typ „Fahrbahn“ der Bauweise Asphalt



Bild 7-17: Beispiel für Typ „Insel“ der Bauweise Betonsteinpflaster



Bild 7-18: Beispiel für Radweg Typ „Brücke“ der Bauweise Beton



Bild 7-19: Beispiel für Radweg Typ „rechts“ der Bauweise Betonsteinpflaster



Bild 7-20: Beispiel für Radweg Typ „rechts“ der Bauweise Natursteinpflaster



Bild 7-21: Beispiel für Radweg Typ „rechts“ der Bauweise Asphalt mit Ausmagerung



Bild 7-22: Beispiel für Radweg Typ „rechts“ der Bauweise Asphalt mit Flickstelle



Bild 7-23: Beispiel für Radweg Typ „links“ der Bauweise Asphalt mit Ausbruch



Bild 7-24: Beispiel für Radweg Typ „Fahrbahn“ der Bauweise Asphalt mit offener Arbeitsnaht



Bild 7-25: Beispiel für Radweg Typ „rechts“ der Bauweise Asphalt mit Einbau und Riss



Bild 7-26: Beispiel für Radweg Typ „Fahrbahn“ der Bauweise Asphalt mit Bordstein



Bild 7-27: Beispiel für Radweg Typ „links“ der Bauweise Asphalt mit Riss und Wurzelhebung

den anhand der aufgenommenen Koordinaten auf die Achse der zugehörigen Fahrbahnen projiziert. Dieser Vorgang wird bei der ZEB von Fahrbahnen als standardisierte Netzuordnung bezeichnet und erfolgt bei Fahrbahnen und Ästen mittels der ZEB-Standardsoftware der BAST (GeoRohRaster).

Aufgrund sehr spezieller und zudem unzureichend dokumentierter Anforderungen der ZEB-Standardsoftware GeoRohRaster an das Eingangsformat der zu projizierenden Daten ist es derzeit leider

nicht möglich, Zustandsdaten von Radwegen auf diese Art dem Netz zuzuordnen. Im Falle der vorliegenden Daten wurde daher alternativ eine vereinfachte Netzprojektion durchgeführt. Die Lage der Netzknotennullpunkte in den Rohdaten wurden als kleinste Abstände zwischen den NK-Koordinaten und den meterweise vorliegenden Koordinaten der Erfassungsergebnisse ermittelt. Der Längenausgleich zwischen der Messlänge und der Netzlänge erfolgte vereinfachend linear über die gesamte Abschnittslänge.

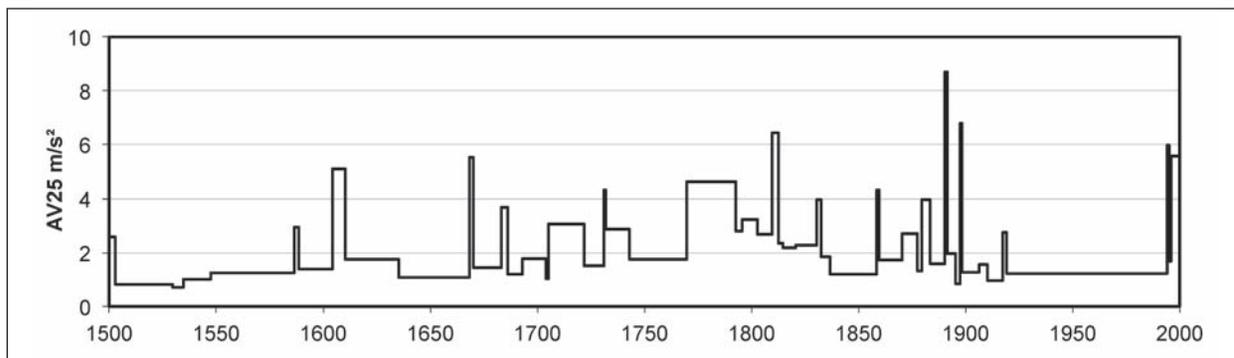


Bild 7-28: Verlauf der Vertikalbeschleunigung bei variabler Abschnittslänge

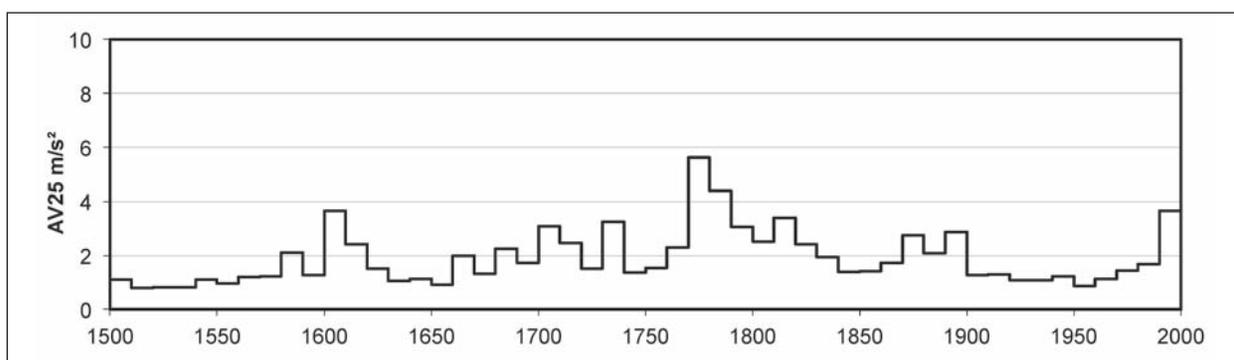


Bild 7-29: Verlauf der Vertikalbeschleunigung bei konstanter Abschnittslänge

Bildung von Auswerteabschnitten

Für die weiteren Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Verfahren zur Abschnittsbildung angewendet:

- dynamische Abschnittsbildung für Abschnitte homogener Ebenheit (siehe Kapitel 3.3.1) bei variabler Abschnittslänge (Variationskoeffizient kleiner 0,5 und Differenz zwischen benachbarten Messwerten kleiner als dreifache Standardabweichung),
- statische Abschnittsbildung für Abschnitte mit konstanter Abschnittslänge von 10 Metern.

Bei dynamischer Abschnittsbildung lassen sich die nicht zur baulichen Erhaltung anstehenden Teile des Radwegenetzes präzise separieren (z. B. Fahrbahnquerungen, Brücken, Verkehrsinseln etc.). Die Bauweisengrenzen werden von den Abschnitten exakt abgebildet. Bei der statischen Abschnittsbildung ist dies nicht der Fall.

Vergleiche von Ergebnissen unterschiedlicher Erfassungen sind praktisch nur auf der Basis der statischen Abschnittsbildung realisierbar.

Berechnung der Zustandsgrößen

Für die jeweils gebildeten Abschnitte wurden die Zustandsgrößen, Zustandswerte und Teilwerte berechnet. In Bild 7-28 und Bild 7-29 sind für eine Strecke von 500 m Länge exemplarisch die Verläufe der Schwingbeschleunigung für dynamische und statische Abschnitte dargestellt.

7.5 Verifizierung der erhobenen Zustandsdaten

Zur Verifizierung der mit dem Messfahrrad erhobenen Zustandsdaten waren zum Zeitpunkt der Angebotsabgabe für dieses Projekt Messungen auf Radwegen vorgesehen, für die bereits Zustandsdaten aus früheren Zustandserfassungen vorlagen (z. B. Radwege an Bundes- und Landesstraßen in Brandenburg und Radwege an Landesstraßen in Schleswig-Holstein). Dieses Vorhaben wurde aufgrund erheblicher zeitlicher Verzögerungen bei der Vergabe des Forschungsprojekts und jahreszeitlich bedingter Verzögerungen bei der Ausführung dieser Messungen wegen des zu großen zeitlichen Abstands zur Ersterfassung nicht weiter verfolgt.

Ersatzweise sollten zeitnah zu den im Juli 2011 mit dem Messfahrrad durchgeführten Messungen Vergleichsmessungen auf dem Radwegeteilnetz mit ARGUS®-AGIL durchgeführt werden. Diese Vergleichserfassungen wurden im November 2011 erstmalig durchgeführt, konnten allerdings erst im März 2012 abgeschlossen werden. Der Übergabezeitpunkt für die Ergebnisse dieser Messungen war bis unmittelbar vor der letztendlichen Übergabe Mitte April 2012 ungewiss. Die Berücksichtigung dieser Messdaten für Vergleichsuntersuchungen war deshalb nicht mehr vorgesehen.

Im Rahmen einer Erweiterung dieses Projekts wurden ersatzweise Messungen mit dem Messfahrrad auf ausgewählten Staatsstraßen in Bayern beauftragt und im April und Mai 2012 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen bildeten die Grundlage für den Vergleich von gemessenen und aus Längsprofilen (Quelle ZEB LStr. BY 2011) berechneten vertikalen Schwingbeschleunigungen

7.5.1 Berechnung der Schwingstärke aus Längsprofilen mit SIMBIKE

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Simulation des Schwingkomforts gefederter Fahrräder“ [WÄCHTER et al. 1999] wurde an der Universität Oldenburg eine computergestützte Konstruktionshilfe zur Entwicklung gefederter Fahrräder entwickelt, die den damaligen Kenntnisstand zur Wirkungsweise und Auslegung von Federungen enthielt, abgesichert durch eine große Menge von objektiven Messungen der Schwingungsbelastung des Fahrers oder der Fahrerin während der Fahrt.

Ein Ergebnis dieses Forschungsprojekts war die Simulationssoftware SIMBIKE, mit deren Hilfe für parametrisierte Fahrradmodelle Überfahrten von Weg- oder Straßenoberflächen bei wählbaren Geschwindigkeiten und Fahrergewichten simuliert werden können. Bei dieser Simulation werden neben den Schwingbeschleunigungsspektren die Schwingstärken für Lenker und Sattel berechnet. Die Wegoberflächen müssen als Längsprofile für 20-m-Segmente mit einer Auflösung von 1 cm vorliegen.

Mit Hilfe dieses Simulationsprogramms sollten für die bereits erfassten Radwegenetze Schwingstärken und daraus wiederum die im aktuellen Projekt vorgeschlagene Zustandsgröße vertikale Schwingbeschleunigung AV25 rechnerisch aus den vorhandenen Längsprofilen ermittelt werden. Aufgrund

von Kompatibilitätsproblemen war die in JAVA programmierte Software aus dem Jahr 1999 leider nicht mehr lauffähig.

7.5.2 Das Fahrradmodell der BAST

Aufgrund der zuvor dargelegten Problematik wurde bei der BAST durch Herrn Dr. Andreas UECKERMANN ein Fahrradmodell [UECKERMANN 2012] entwickelt und in eine Software umgesetzt, die es ermöglicht, Überfahrten über erfasste Längsprofile bei wählbaren Geschwindigkeiten zu simulieren und die Schwingbeschleunigung an beliebigen Stellen des modellierten Fahrrads zu berechnen. Dieses Fahrradmodell wurde den physikalischen Eigenschaften des Messfahrrads entsprechend parametrisiert. Die Längsprofile müssen bei der simulierten Überfahrt in einer Auflösung von 1 cm vorliegen. Die bei der ZEB von Fahrbahnen erfassten Längsprofile in der typischen Auflösung von 10 cm können auf die erforderliche Auflösung durch lineare Interpolation umgerechnet werden (Bild 7-30).

Mit der Software werden standardmäßig folgende Kenngrößen ermittelt:

- simulierte vertikale Schwingbeschleunigung AV25sim an der Vorderachse im 1-Meter-Raster,
- Differenz zum gleitenden Mittelwert bei der Mittelungslänge von 1 Meter S01 im 1-Meter-Raster [FGSV 2001c],
- Unebenheitsmaß AUN und Welligkeit w der Leistungsdichtespektren (PSD) für eine Fenstergröße von 10 m im 10-Meter-Raster.

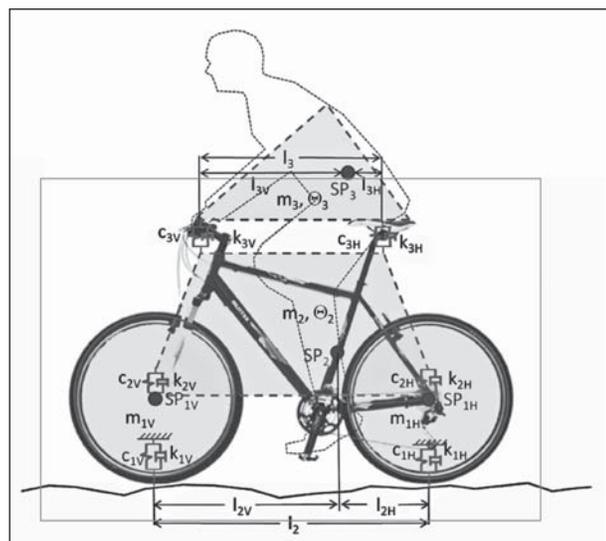


Bild 7-30: Schwingungsmodell des Fahrrades

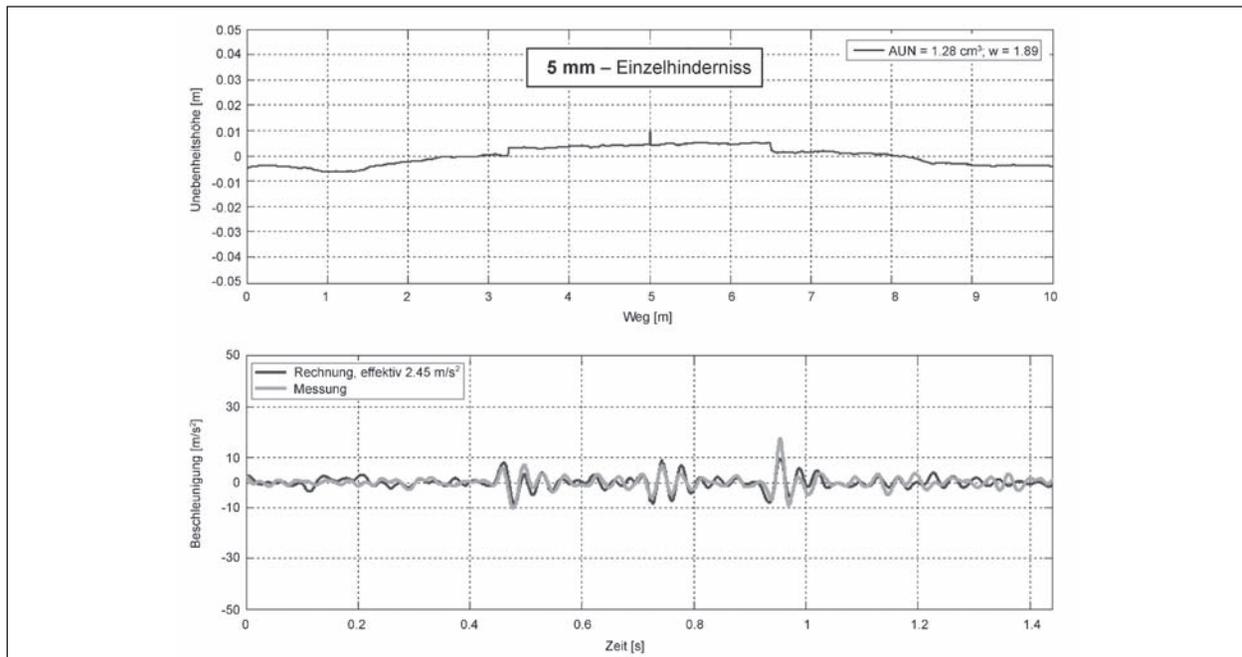


Bild 7-31: Berechnete und gemessene Beschleunigungen (unten) bei der Überfahrt über ein 5-mm-Einzelhindernis (Längsprofil oben)

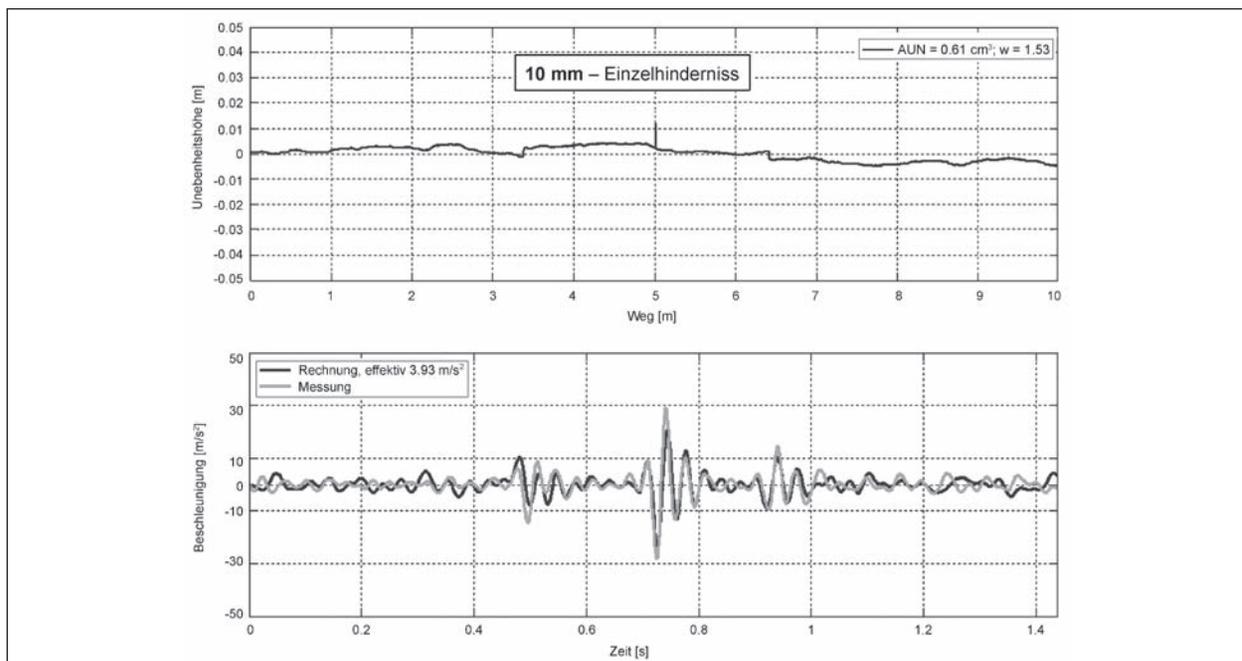


Bild 7-32: Berechnete und gemessene Beschleunigungen (unten) bei der Überfahrt über ein 10-mm-Einzelhindernis (Längsprofil oben)

Das Schwingungsmodell des für die Messfahrten eingesetzten Fahrrads wurde mit Hilfe von Messungen bei Überfahrten über definierte Hindernisse mit unterschiedlichen Fahrtgeschwindigkeiten validiert. Hierbei konnten durchwegs gute bis sehr gute Übereinstimmungen der gemessenen und berechneten Werte für die Schwingbeschleunigung festgestellt werden (siehe Bilder 7-31 bis 7-33).

Die Eigenschaften des Fahrradmodells zur rechnerischen Ermittlung von Schwingbeschleunigungen aus Längsprofilen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Das entwickelte Modell kann Achsbeschleunigungen realistisch abbilden.
- Das Modell berücksichtigt auch gefederte Vorder- und Hinterachsen.

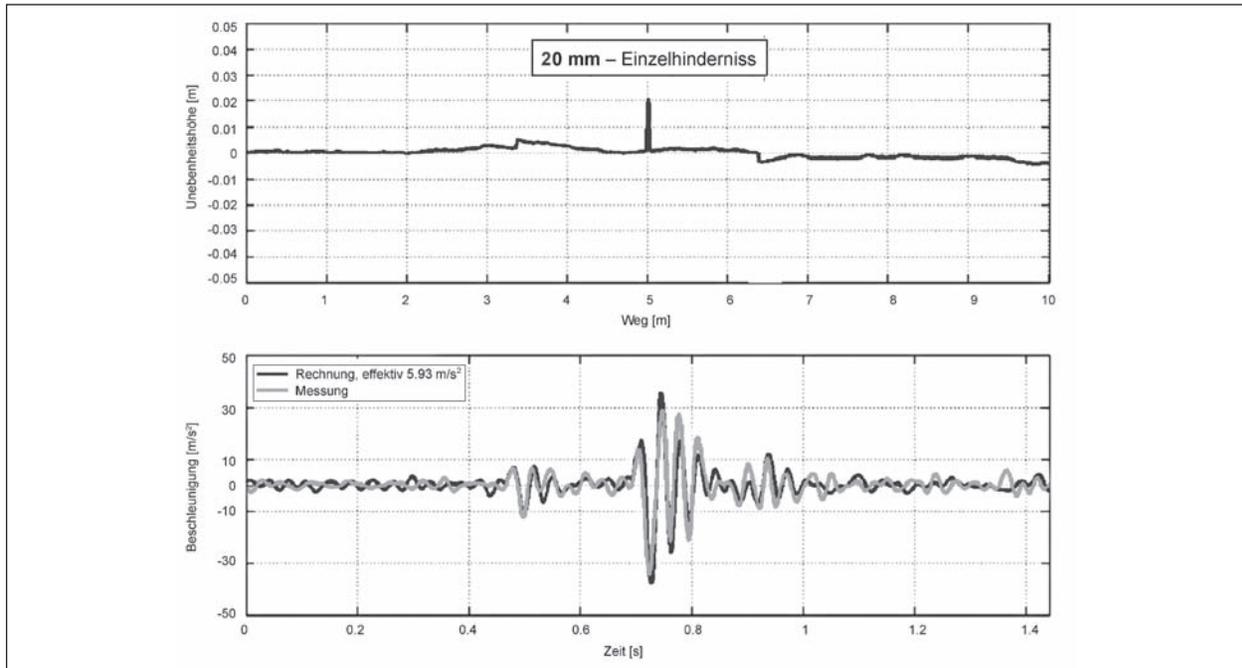


Bild 7-33: Berechnete und gemessene Beschleunigungen (unten) bei der Überfahrt über ein 20-mm-Einzelhindernis (Längsprofil oben)

- Das Modell berücksichtigt auch den Fahrer und ist vielseitig einsetzbar.
- Kräfte und Beschleunigungen können an mehreren Systempunkten (Lenker, Sattel etc.) ermittelt werden.

7.5.3 Voruntersuchungen

Vor der Berechnung der Schwingbeschleunigung aus Längsprofilen wurden aufgrund von stichprobenhaft festgestellten Anormalitäten (invertierte Profile, gänzlich fehlende Wellenlängenanteile für Wellenlängen > 10 cm) vorab umfangreiche Untersuchungen zur Gültigkeit der Längsprofile durchgeführt.

In Bild 7-34 ist ein typisches Leistungsdichtespektrum (PSD) eines Fahrbahn- oder Radweglängsprofils dargestellt. Dieses Spektrum wird durch 2 Kennzahlen beschrieben:

- das Unebenheitsmaß $\Phi_h(\Omega_0)$ [cm³] (spektrale Leistungsdichte der Unebenheitsamplitude Φ_h bei der Wegkreisfrequenz $\Omega_0 = 1$) in diesem Fall: $\Phi_h(\Omega_0) = 2,29$ cm³,
- die Welligkeit w [-] (die negative Steigung der Ausgleichsgeraden durch das Leistungsdichtespektrum im doppelt-logarithmischen Maßstab) in diesem Fall: $w = 2,43$.

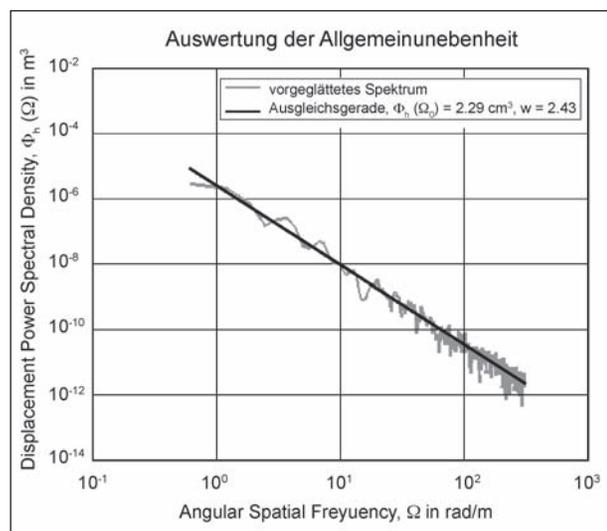


Bild 7-34: Verlauf der spektralen Unebenheitsdichte bei einer für Straßen und Radwege üblichen Verteilung der Wellenlängen

Im Gegensatz hierzu ist in Bild 7-35 das Leistungsdichtespektrum (PSD) eines anomalen Längsprofils mit fehlenden langwelligen Anteilen dargestellt. Dieses Spektrum wird beschrieben durch:

- $\Phi_h(\Omega_0) = 0,00$ cm³,
- $w = -0,92$.

Die für die Berechnung der Schwingbeschleunigung vorgesehenen Längsprofile wurden vollständigen PSD-Analysen unterzogen (eine PSD-Analyse

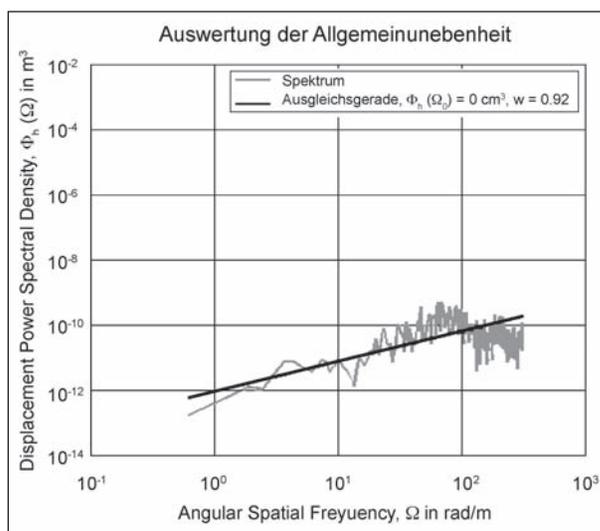


Bild 7-35: Verlauf der spektralen Unebenheitsdichte bei fehlenden langwelligeren Anteilen

se pro 10 m). Die Ergebnisse dieser Analysen wurden in Form von Wertepaaren für AUN (= $\Phi_h(\Omega_0)$) und w grafisch dargestellt.

Mit Hilfe der von der BAST entwickelten Software wurden folgende Datenbestände untersucht:

- Längsprofile der ZEB von Radwegen an Bundes- und Landesstraßen in BB 2008 (ca. 1.700 km),
- Längsprofile der ZEB von Radwegen an Landesstraßen in SH 2009/2010 (ca. 2.200 km),
- Längsprofile ausgewählter Staatsstraßen der ZEB von Staatsstraßen in BY 2011 (ca. 190 km),
- Längsprofile der Vergleichserfassung 2012 auf dem in diesem Projekt untersuchten Radwegeteilnetz an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein (ca. 150 km).

7.5.4 Prüfung der Längsprofile der ZEB-Radwege BB 2008

Die Längsprofile aus der Zustandserfassung von Radwegen an Bundes- und Landesstraßen in Brandenburg aus dem Jahr 2008 liegen mit einer Auflösung in Wegrichtung von 1 cm jeweils für die rechte und linke Rollspur des eingesetzten Messfahrzeugs (Quad) vor.

Die PSD-Analysen ergaben zum weitaus größten Teil unplausible Verteilungen des Unebenheitsmaßes AUN und der Welligkeit w (AUN größtenteils $< 0,01 \text{ cm}^3$ bei sehr kleinem und vielfach negativem w , siehe Bild 7-36).

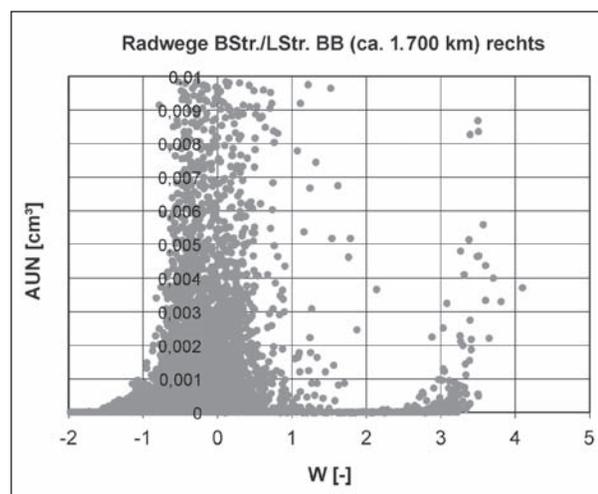


Bild 7-36: Ergebnisse der PSD-Analysen der Längsprofile aus der ZEB-Radwege BB 2008

Die Längsprofile wurden als ungültig eingestuft und von der Berechnung der simulierten vertikalen Schwingbeschleunigung ausgeschlossen.

7.5.5 Prüfung der Längsprofile der ZEB-Radwege SH 2009/2010

Die Längsprofile aus der Zustandserfassung von Radwegen an Landesstraßen in Schleswig-Holstein aus den Jahren 2009 und 2010 liegen mit einer Auflösung in Wegrichtung von 1 cm jeweils für die rechte und linke Rollspur des eingesetzten Messfahrzeugs (Quad) vor.

Die PSD-Analysen ergaben zum weitaus größten Teil unplausible Verteilungen des Unebenheitsmaßes AUN und der Welligkeit w (AUN größtenteils $< 0,01 \text{ cm}^3$ bei sehr kleinem und vielfach negativem w , siehe Bild 7-37).

Die Längsprofile wurden als ungültig eingestuft und von der Berechnung der simulierten vertikalen Schwingbeschleunigung ausgeschlossen.

7.5.6 Prüfung der Längsprofile ausgewählter Strecken der ZEB-Staatsstraßen BY 2011

Die Längsprofile aus der Zustandserfassung von Staatsstraßen (Fahrbahnen) in Bayern 2011 liegen mit der für die ZEB von Fahrbahnen typischen Auflösung von 10 cm für die rechte Rollspur des untersuchten Fahrstreifens vor.

Die PSD-Analysen ergaben die für diese Straßenkategorie typischen Verteilungen des Unebenheitsmaßes AUN und der Welligkeit w (AUN überwie-

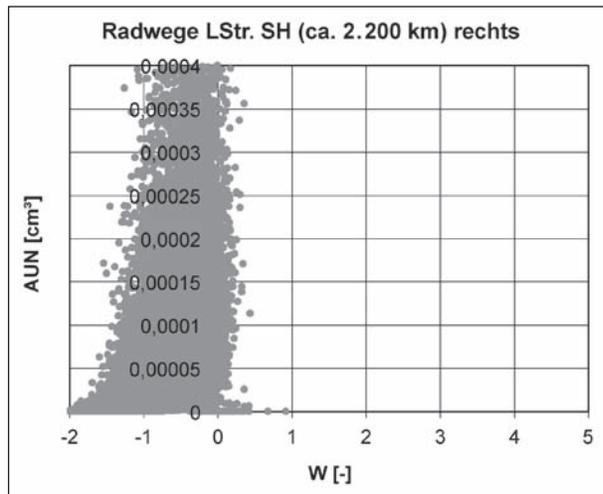


Bild 7-37: Ergebnisse der PSD-Analysen der Längsprofile aus der ZEB-Radwege SH 2009/2010

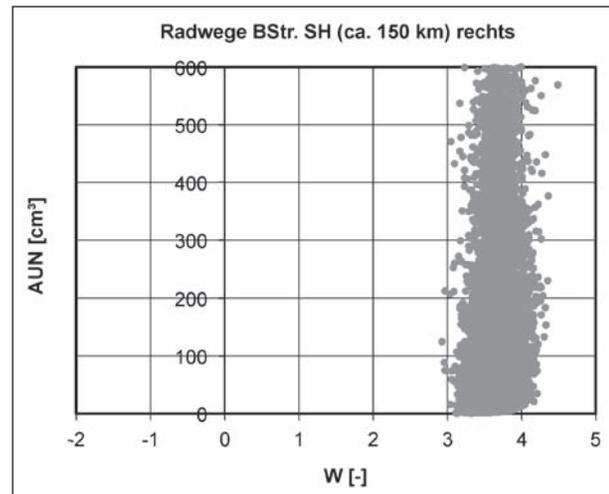


Bild 7-39: Ergebnisse der PSD-Analysen der Längsprofile aus der Vergleichserfassung auf Radwegen in SH 2012

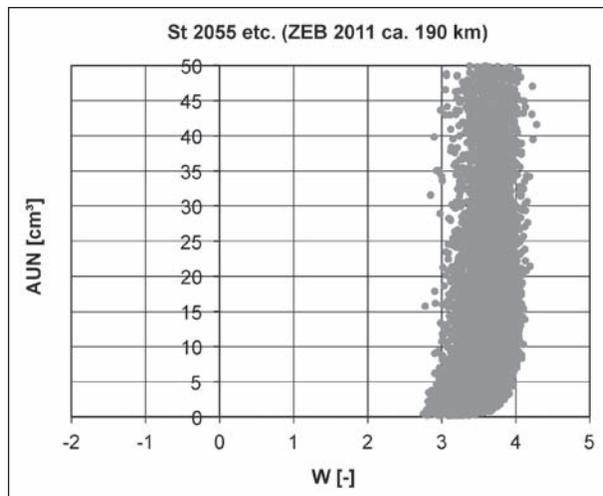


Bild 7-38: Ergebnisse der PSD-Analysen der Längsprofile aus der ZEB-Staatsstraßen BY 2011

gend im Bereich bis 50 cm^3 bei zugehöriger Welligkeit $> 2,5$, siehe Bild 7-38).

Die Längsprofile wurden als gültig eingestuft und für die Berechnung der simulierten vertikalen Schwingbeschleunigung zugelassen.

7.5.7 Prüfung der Längsprofile der Vergleichserfassung auf Radwegen in SH 2012

Die Vergleichserfassung von Radwegen auf dem in diesem Projekt untersuchten Radwegeteilnetz an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein wurde zunächst im Herbst 2011 durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden vom Messgerätebetreiber jedoch für ungültig erklärt und die Messungen wurden im Frühjahr 2012 wiederholt.

Die letztendlich vom Messgerätebetreiber im April 2012 übergebene und für gültig erklärten Längsprofile liegen mit einer Auflösung von 10 cm für die rechte und linke Rollspur des Messfahrzeugs vor. Die PSD-Analysen ergaben plausible Verteilungen des Unebenheitsmaßes AUN und der Welligkeit w (AUN überwiegend im Bereich bis 500 cm^3 bei zugehöriger Welligkeit $> 3,0$, s. Bild 7-39).

7.5.8 Zusätzliche Messungen auf ausgewählten Staatsstraßen in Bayern

Wie zuvor erläutert, wurde zur Validierung der mit dem Messfahrrad erhobenen Schwingbeschleunigungen ersatzweise auf Längsprofile von Fahrbahnen zurückgegriffen.

Die Längsprofile von 2 ausgewählten zusammenhängenden Streckenzügen (St 2055: ca. 21 km und St 2056: ca. 15 km) stammen aus der ZEB auf Staatsstraßen 2011 in Bayern. Die betreffenden Strecken sind im Rahmen der ZEB am 05.06.2011 erfasst worden. Neben den Längsprofilrohdaten standen die ZEB-Streckenbilder der Messfahrten für Plausibilitätsprüfungen zur Verfügung. Die Befahrungen mit dem Messfahrrad wurden im Zeitraum vom 19.04. bis 15.05.2012 durchgeführt.

Die beiden Streckenzüge wurden jeweils dreimal befahren. Da die Befahrungen ausschließlich der Validierung der Schwingbeschleunigungsmessung dienen, wurde auf die Registrierung von Oberflächenschäden bzw. die anschließende Bildauswertung verzichtet.

Abweichend vom üblichen Setup wurde die Messung der vertikalen Schwingbeschleunigung mit 3

gleichen Beschleunigungsaufnehmern am Vorderrad, Lenker und Sattel durchgeführt. Die Messsignale der zusätzlichen Beschleunigungssensoren wurden mit einem digitalen Audiorecorder mit ansonsten identischen Aufnahmeparametern durchgeführt.

Eine Gegenüberstellung von 2 Messungen auf der St 2056 auf der Basis von 10-m-Auswerteabschnitten und 100-m-Auswerteabschnitten ist auszugsweise in den Bildern 7-40 und 7-41 dargestellt.

Die in Anlehnung an die ZTV-ZEB-StB [FGSV 2006] durchgeführten Vergleiche der jeweils 3 Messungen anhand der Analyse der Differenzen zwischen 20 aufeinander folgenden Zustandsgrößen (100-m-Mittelwerte) von Original- und Vergleichsmessungen ergaben folgendes Ergebnis:

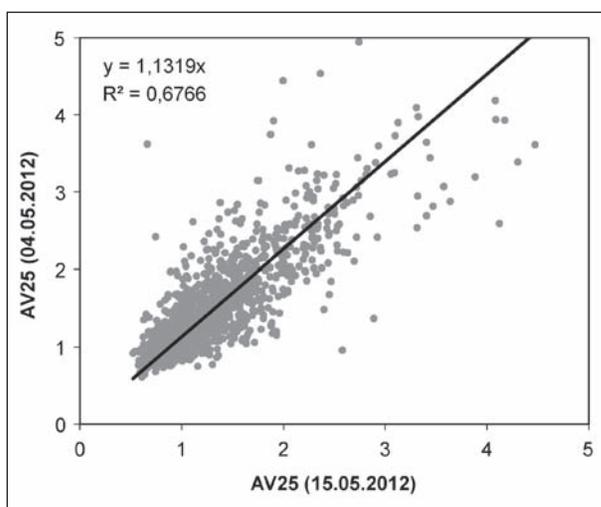


Bild 7-40: Gemessene vertikale Schwingbeschleunigung zweier Messungen (10-m-Mittelwerte)

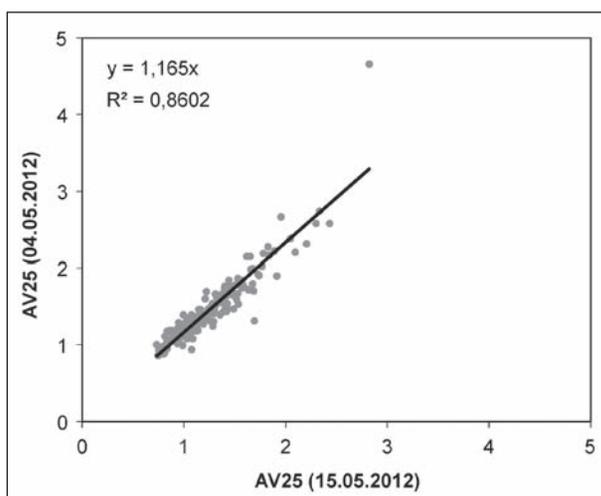


Bild 7-41: Gemessene vertikale Schwingbeschleunigung zweier Messungen (100-m-Mittelwerte)

Aus der Vielzahl von möglichen Vergleichsbereichen von 2 km Länge innerhalb der Gesamtlänge von ca. 15 km ergaben sich als schlechteste aller untersuchten Konstellationen ein $\Delta AV25$ von 0,33 m/s² und ein $\delta AV25$ von 0,36 m/s². Dies entspricht einem $\Delta ZWAV25$ von 0,31 und einem $\delta ZWAV25$ von 0,34, was jeweils deutlich kleiner als eine halbe Zustandsnote ist.

Die bestmögliche Konstellation ergab ein $\Delta AV25$ von 0,00 m/s² und ein $\delta AV25$ von 0,08 m/s², was einem $\Delta ZWAV25$ von 0,00 und einem $\delta ZWAV25$ von 0,08 entspricht.

Die Übereinstimmung der Ergebnisse der 3 Messfahrten mit dem Messfahrrad ist nach diesen Kriterien als gut bis befriedigend einzuschätzen.

7.5.9 Vergleiche von gemessener und berechneter Schwingbeschleunigung

Längsprofile aus der ZEB der Staatsstraßen in Bayern 2011

Mit Hilfe der Fahrradmodellsoftware der BAST wurde aus den Längsprofilen der rechten Rollspur die vertikale Schwingbeschleunigung bei 25 km/h errechnet und mit der gemessenen vertikalen Schwingbeschleunigung verglichen (siehe Bilder 7-47 und 7-48).

Beispielhaft ist für eine Messung eine Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten vertikalen Schwingbeschleunigung auf der St 2056 auf der Basis von 10-m-Auswerteabschnitten und 100-m-Auswerteabschnitten in den Bildern 7-42 und 7-43 dargestellt.

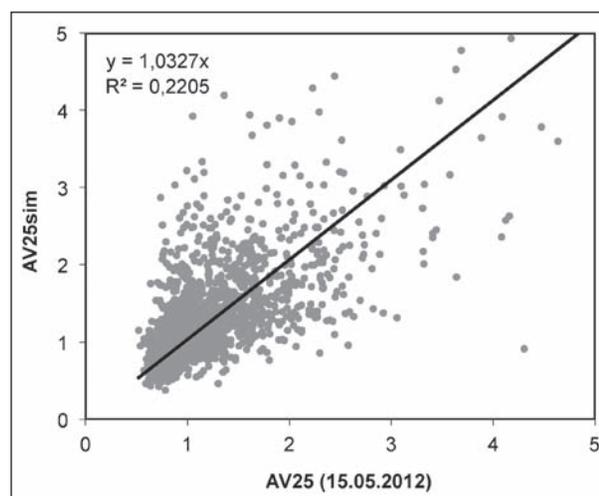


Bild 7-42: Gemessene und berechnete vertikale Schwingbeschleunigungen (10-m-Mittelwerte)

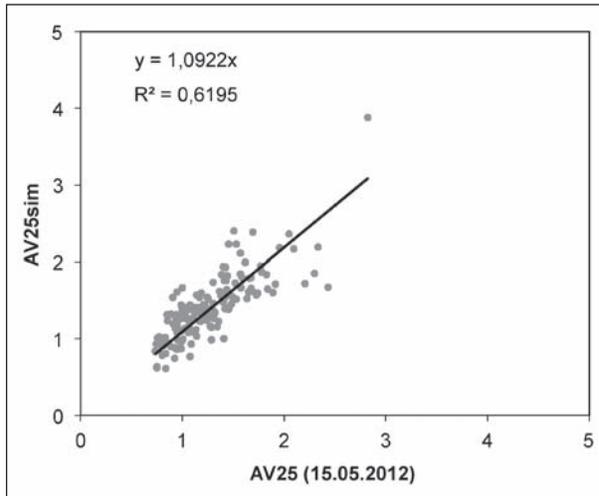


Bild 7-43: Gemessene und berechnete vertikale Schwingbeschleunigungen (100-m-Mittelwerte)

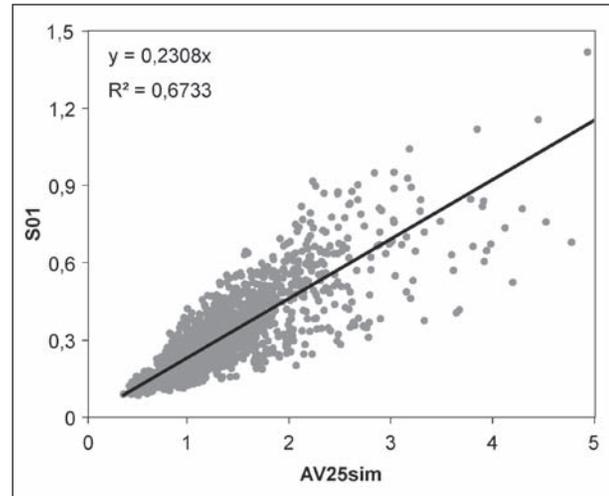


Bild 7-44: Berechnete vertikale Schwingbeschleunigung und Differenz zum gleitenden Mittelwert S01 (10-m-Mittelwerte)

Wie bereits beim Vergleich der Wiederholungsmessungen in Kapitel 7.5.8 wurden die gemessenen Schwingbeschleunigungen der 3 Messungen jeweils mit den berechneten Schwingbeschleunigungen nach dem Verfahren der ZTV-ZEB-StB [FGSV 2006] auf der Basis von 100-m-Abschnitten verglichen.

Aus der Vielzahl von möglichen Vergleichsbereichen von 2 km Länge innerhalb der Gesamtlänge von ca. 15 km ergaben sich als schlechteste aller untersuchten Konstellationen ein $\Delta AV25$ von $0,25 \text{ m/s}^2$ und ein $\delta AV25$ von $0,27 \text{ m/s}^2$. Dies entspricht einem $\Delta ZWAV25$ von $0,24$ und einem $\delta ZWAV25$ von $0,26$, was jeweils deutlich kleiner als eine halbe Zustandsnote ist.

Die bestmögliche Konstellation ergab ein $\Delta AV25$ von $0,02 \text{ m/s}^2$ und ein $\delta AV25$ von $0,14 \text{ m/s}^2$, was einem $\Delta ZWAV25$ von $0,02$ und einem $\delta ZWAV25$ von $0,13$ entspricht.

Die Übereinstimmung ist nach diesen Kriterien als gut bis befriedigend einzuschätzen.

In den Bildern 7-44 und 7-45 werden exemplarisch für die St 2056 die aus den Längsprofilen berechnete vertikale Schwingbeschleunigung und die berechnete Differenz zum gleitenden Mittelwert S01 auf der Basis von 10-m-Mittelwerten bzw. 100-m-Mittelwerten verglichen.

Als Ergebnis dieser Teiluntersuchungen lässt sich zusammenfassend feststellen:

- Es besteht eine hohe Übereinstimmung der aus den Profilen errechneten Werte für AV25sim mit den aus den Profilen errechneten Werten für

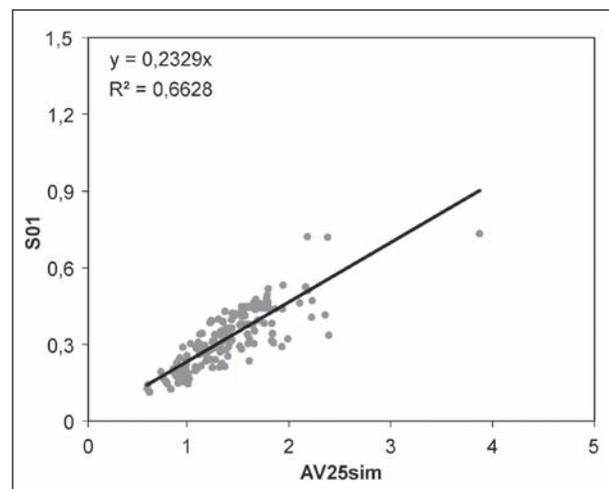


Bild 7-45: Berechnete vertikale Schwingbeschleunigung und Differenz zum gleitenden Mittelwert S01 (100-m-Mittelwerte)

S01 (siehe Bilder 7-44 bis 7-46). Es ist daher ggf. zu prüfen, ob künftig anstelle der rechnerischen Simulation der Schwingbeschleunigung aus vorhandenen Längsprofilen nicht die rein geometrisch und somit wesentlich einfacher zu ermittelnde Differenz zum gleitenden Mittelwert bei der Mittelungslänge von 1 Meter S01 zur Abschätzung der vertikalen Schwingbeschleunigung herangezogen werden kann.

- Die Übereinstimmung zwischen den 3 Messfahrten mit dem Messfahrrad ist gut bis befriedigend (siehe Bild 7-35 und 7-36).
- Die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Schwingbeschleunigungen ist als gut bis befriedigend einzuschätzen.

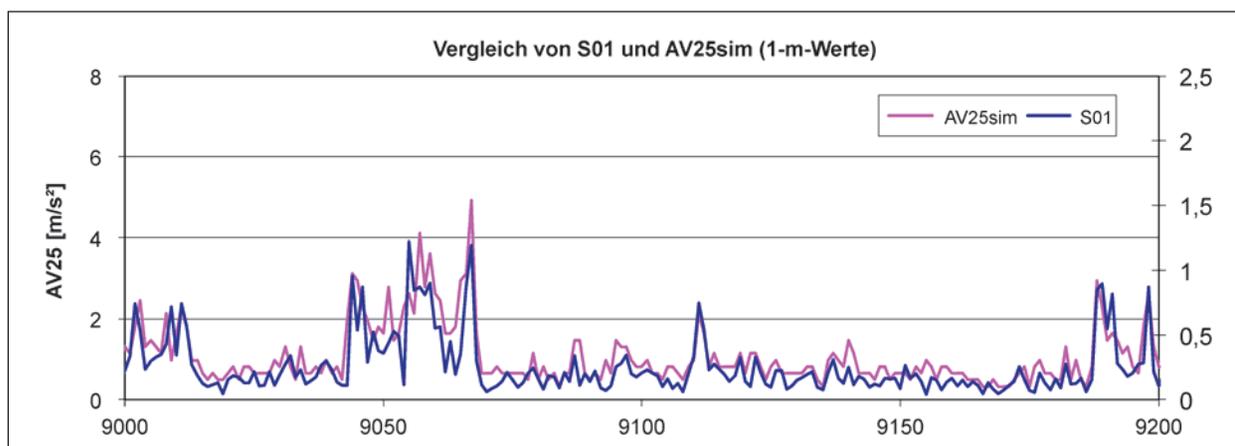


Bild 7-46: Vergleich der Standardabweichung der Differenz zum gleitenden Mittelwert bei der Mittelungslänge von 1 Meter S01 mit der simulierten Schwingbeschleunigung AV25

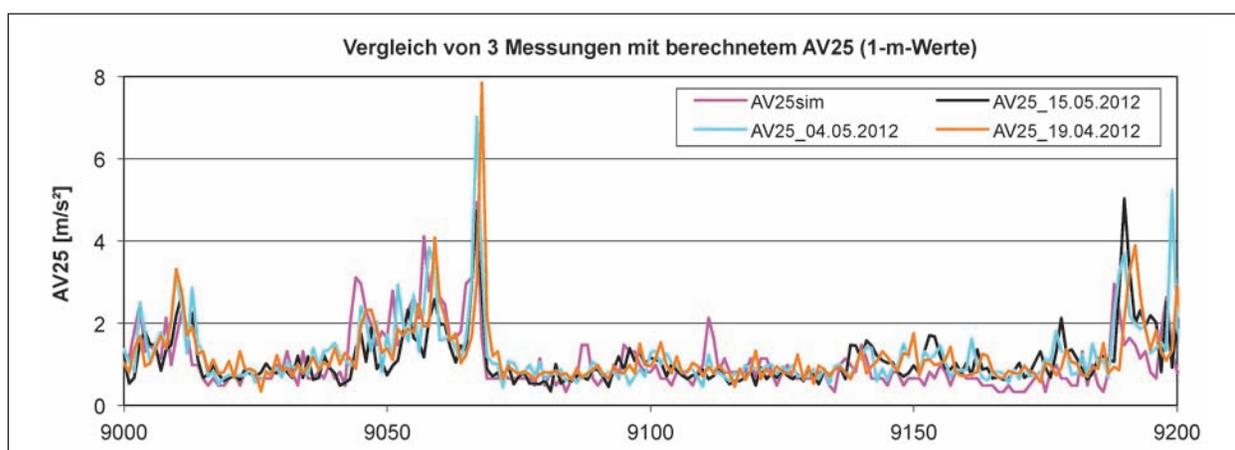


Bild 7-47: Vergleich der gemessenen und der berechneten Schwingbeschleunigung AV25 auf Staatsstraßen in Bayern

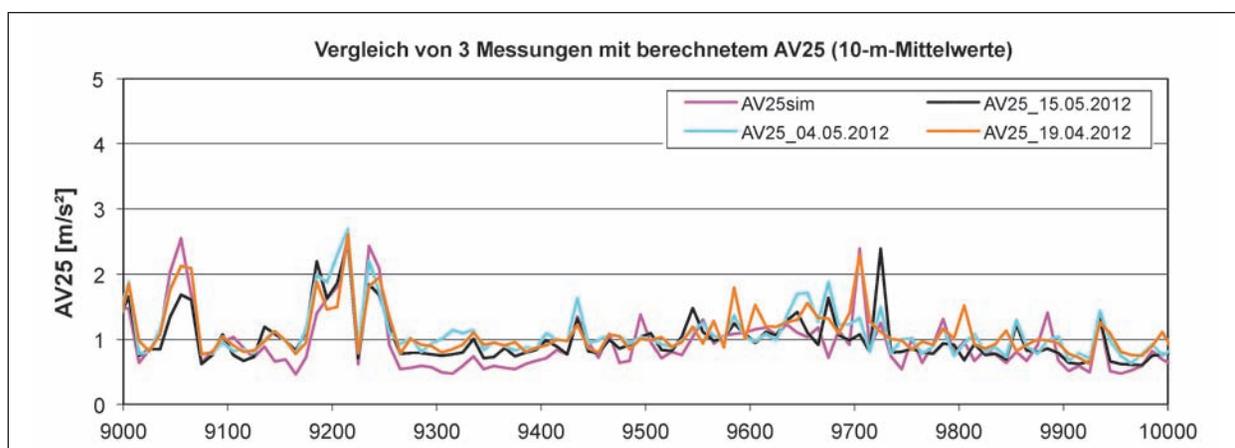


Bild 7-48: Vergleich der gemessenen und der berechneten Schwingbeschleunigung AV25 auf Staatsstraßen in Bayern

Längsprofile aus der Vergleichserfassung der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein

Aus der Vergleichserfassung der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein standen letztend-

lich nur für einen zusammenhängenden Streckenzug (B 202: ca. 10 km) Längsprofile zur Verfügung, da die übrigen erfassten Abschnitte der Vergleichserfassung nicht mit den Strecken dieses Projekts übereinstimmen bzw. nicht in der gleichen Richtung

(Stationierungsrichtung) aufgenommen worden waren. Die Befahrung des Vergleichsstreckenab-

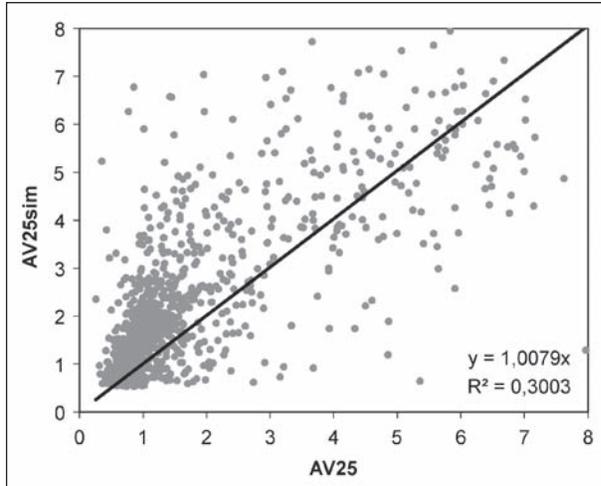


Bild 7-49: Gemessene und berechnete vertikale Schwingbeschleunigungen (10-m-Mittelwerte)

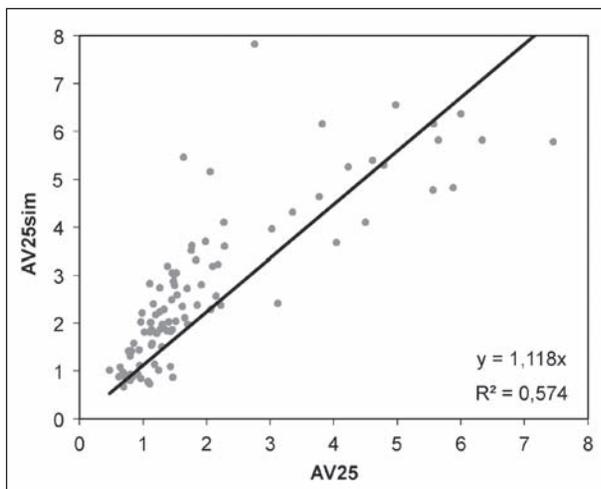


Bild 7-50: Gemessene und berechnete vertikale Schwingbeschleunigungen (100-m-Mittelwerte)

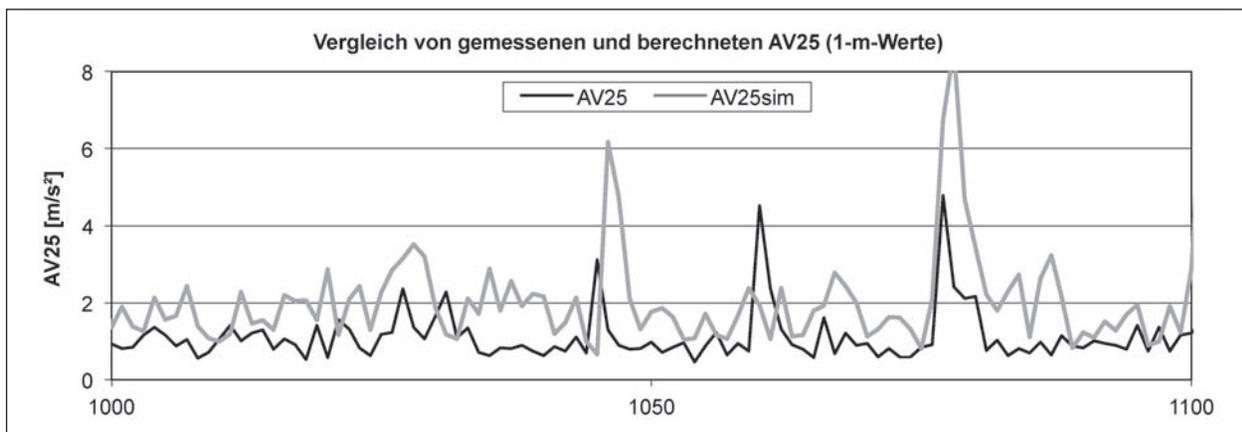


Bild 7-51: Vergleich der gemessenen und der berechneten Schwingbeschleunigung AV25 aus der Vergleichserfassung der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein

schnitts mit dem Messfahrrad fand am 10.07.2011, die Vergleichserfassung am 02. und 03.03.2012 statt.

Der zeitliche Abstand zwischen den beiden Befahrungen beträgt somit 8 Monate. Dies hat zur Folge, dass aufgrund des Einflusses der Witterung sowie durch ausgeführte Maßnahmen der baulichen Unterhaltung und/oder Erhaltung Veränderungen der Ebenheitssituation nicht auszuschließen sind, zumal keine Streckenbilder der Vergleichserfassung für Plausibilitätsprüfungen zur Verfügung standen.

Mit Hilfe der Fahrradmodellsoftware der BAST wurde aus den erfassten Längsprofilen der rechten Rollspur die vertikale Schwingbeschleunigung bei 25 km/h errechnet und mit der gemessenen vertikalen Schwingbeschleunigung verglichen (siehe Bilder 7-49 bis 7-51).

Die gemessenen und die berechneten vertikalen Schwingbeschleunigungen sind auf der Basis von Auswerteabschnitten mit 10 m und 100 m Länge in den Bildern 7-49 und 7-50 gegenübergestellt.

Wie bereits zuvor wurden die gemessenen Schwingbeschleunigungen mit den berechneten Schwingbeschleunigungen nach dem Verfahren der ZTV-ZEB-StB [FGSV 2006] auf der Basis von 100-m-Abschnitten verglichen.

Aus der Vielzahl von möglichen Vergleichsbereichen von 2 km Länge innerhalb der Gesamtlänge von ca. 10 km ergaben sich als schlechteste aller untersuchten Konstellationen ein $\Delta AV25$ von $1,51 \text{ m/s}^2$ und ein $\delta AV25$ von $1,20 \text{ m/s}^2$. Dies entspricht einem $\Delta ZWAV25$ von $1,43$ und einem $\delta ZWAV25$ von $1,14$, was jeweils deutlich über der

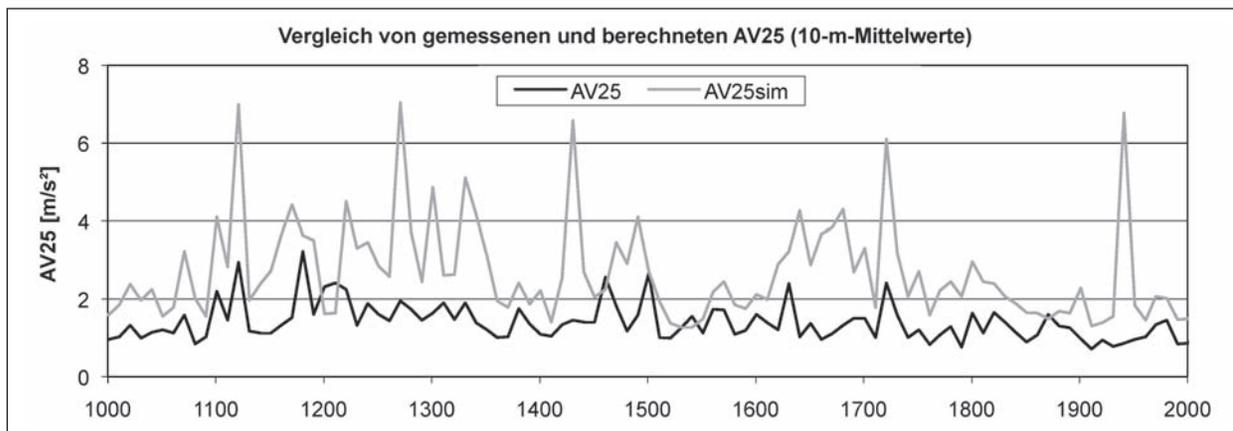


Bild 7-52: Vergleich der gemessenen und der berechneten Schwingbeschleunigung AV25 aus der Vergleichserfassung der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein

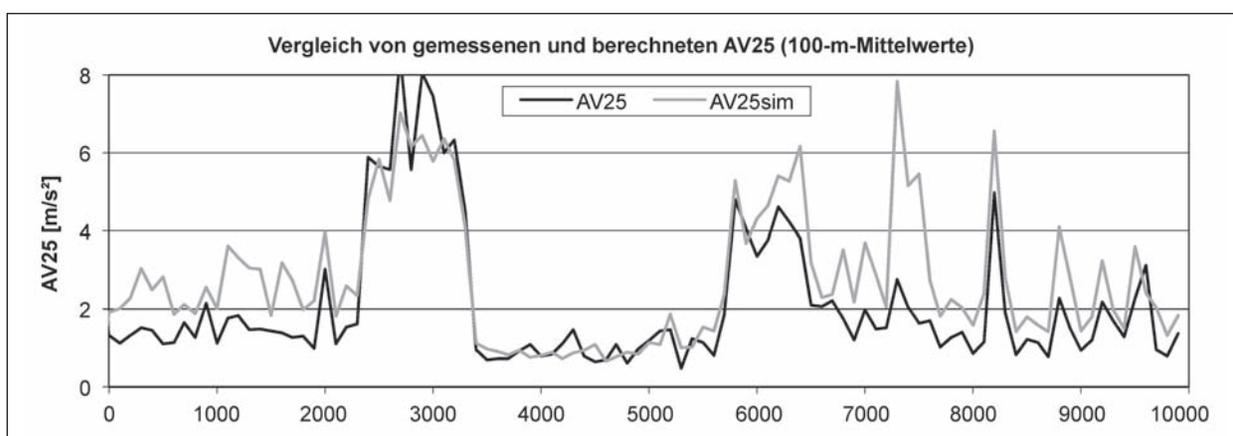


Bild 7-53: Vergleich der gemessenen und der berechneten Schwingbeschleunigung AV25 aus der Vergleichserfassung der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein

grundsätzlich angestrebten halben Zustandsnote liegt.

Die bestmögliche Konstellation ergab ein $\Delta AV25$ von $0,00 \text{ m/s}^2$ und ein $\delta AV25$ von $0,30 \text{ m/s}^2$, was einem $\Delta ZWAV25$ von $0,00$ und einem $\delta ZWAV25$ von $0,28$ entspricht.

Die Übereinstimmung ist nach diesen Kriterien als nicht befriedigend einzuschätzen.

Die Abweichungen sind vor dem Hintergrund der auf den Staatsstraßen ermittelten Übereinstimmungen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die unterschiedlichen Messspuren (Fahrrad = Radwegmitte, linke und rechte Rollspur des Quad = Radwegränder) zurückzuführen.

7.6 Alternative Zustandsbewertung für Radwege

Aus der Auswertung der Zustandserfassung mit dem neu entwickelten Messfahrrad liegen für die homogenen Abschnitte folgende Zustandsgrößen vor:

- die vertikale Schwingbeschleunigung AV25 (in m/s^2 für 25 km/h) zur Kennzeichnung der Längsebenheit;
- die Längenanteile von 1-m-Abschnitten mit Rissen, Flickstellen, Ausmagerung/Splittverlust und Ausbrüchen bei Asphaltbelägen;
- die Längenanteile von 1-m-Abschnitten mit Längs-/Querrissen, Kantenschäden, bituminösem Teilersatz und Nestern/Abplatzungen bei Betondecken;
- der Längenanteil von 1-m-Abschnitten mit Materialverlusten (Ausbrüchen) bei wassergebundenen Decken.

Die Zustandsgrößen der einzelnen Merkmale werden bei der Erhaltungsplanung für die Auswahl der Erhaltungsmaßnahmearten benötigt. Für die Zustandsbewertung, die lediglich eine Vorsortierung maßnahmebedürftiger Abschnitte liefert, kann insofern eine Vereinfachung getroffen werden, als für die homogenen Abschnitte unterschieden wird zwischen dem

- Längenanteil mit Rissen bei Asphalt bzw. Längs-/Querrissen bei Beton und
- Längenanteil mit den restlichen Schäden, d. h. der Restschadensfläche mit Flickstellen, Ausmagerung/Splittverlust und Ausbrüchen bei Asphalt bzw. der Restschadensfläche mit Kantenschäden, bituminösem Teilersatz und Nestern/Abplatzungen bei Beton.
- Bei wassergebundenen Decken entspricht die Restschadensfläche dem Anteil mit Materialverlusten (Ausbrüchen).

Für die homogenen Abschnitte wird zusätzlich nachrichtlich mitgeführt das Vorhandensein von

- offenen Nähten bei Asphaltbelägen bzw. schadhafte Fugenfüllungen bei Betondecken,
- überstehenden/abgesackten Einbauten,
- überstehenden/abgesackten Bordsteinen,
- Wurzelhebungen.

Bei der Zustandsbewertung werden lediglich die Zustandsgrößen berücksichtigt; die restlichen Informationen dienen zur Steuerung des Erhaltungsgeschehens.

7.6.1 Ermittlung von Zustandswerten (Normierung)

Bei der Bewertung der vertikalen Schwingbeschleunigung AV25 zur Kennzeichnung der Wirkungen der Längsebenheit ist beabsichtigt, den Schwellenwert auf der Grundlage einschlägiger Normen (s. dazu Kapitel 5) endgültig festzulegen. Dies ist beim derzeitigen Analysestand noch nicht möglich, da für die Umrechnung der am Vorderrad gemessenen vertikalen Schwingbeschleunigung auf die frequenzbewerteten Schwingbeschleunigungen an Lenker und Sattel die entsprechenden Faktoren noch fehlen (s. Bild 7-54).

Für erforderliche Auswertungen werden daher Normierungseckwerte festgelegt, die sich aus den

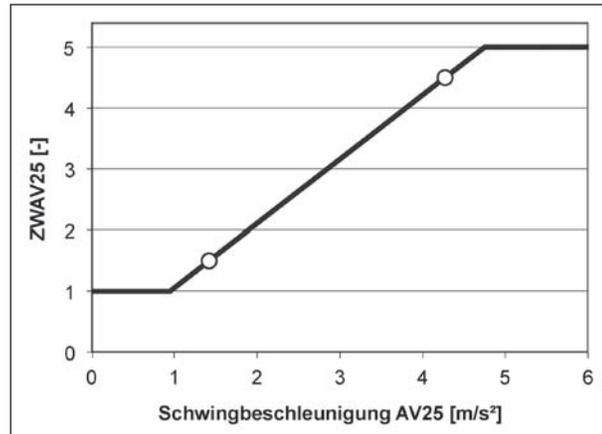


Bild 7-54: Normierungsfunktion für die Schwingbeschleunigung

Übergängen von „sehr gut“ zu „gut“ als Fixpunkt für $ZW = 1,5$ und von „ausreichend“ zu „nicht ausreichend“ als Fixpunkt für $ZW = 4,5$ der Uni BW [SOBOTTA, DEING, GLAHE 2005] durch Umrechnung von g (Erdbeschleunigung) in Beschleunigung ableiten (siehe Bild 6-1). Die Normierungsfunktion lautet somit:

$$ZW_{AV25} = \text{MIN} (5; \text{MAX} (1; 1,5 + 3 \cdot (AV25 - 1,42) / (4,27 - 1,42)))$$

Die Längsebenheit (oder die Querebenheit) wird bei den Fahrbahnen neben den eigentlichen Substanzmerkmalen auch zur Ermittlung des Substanzwertes berücksichtigt (s. dazu auch Bild 6.6). Dies liegt darin begründet, dass die Reifen des auf unebenen Fahrbahnen abrollenden Schwerverkehrs schlagartige Impulse einleiten, die sich auf das Befestigungsgefüge auswirken können („Hammer-Amboss“-Wirkung) und im Laufe der Zeit die Substanz beeinträchtigen.

Bei den Radwegen kann der erwähnte Effekt selbst in Bereichen, die von Kfz beparkt oder überfahren werden, ausgeschlossen werden. Die Längsebenheit wirkt sich nur auf den Fahrkomfort und die Verkehrssicherheit aus. Beim Substanzwert der Radwege wird daher die Längsebenheit nicht berücksichtigt. In den Substanzwert gehen nur die Risse und die Restschadensflächen ein.

Bei den Rissen und den in der Restschadensfläche zusammengefassten Schäden gibt es keine wissenschaftlich untermauerten Erkenntnisse zu Längen- oder Flächenanteilen, die eine Einleitung von baulichen oder verkehrsbeschränkenden Maßnahmen vordringlich erscheinen lassen. Alle angewendeten Schwellenwerte beruhen letztlich auf einer

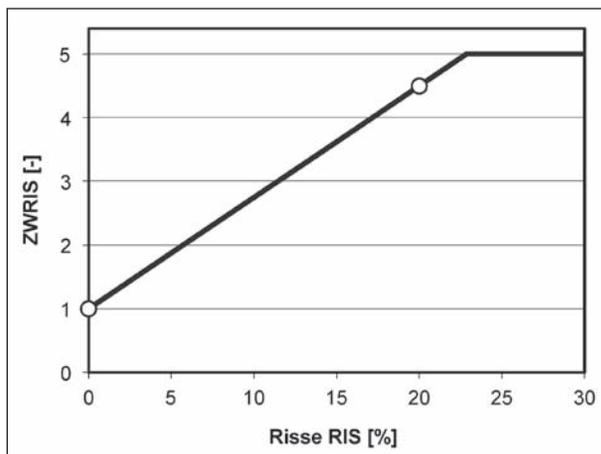


Bild 7-55: Normierungsfunktion für Risse

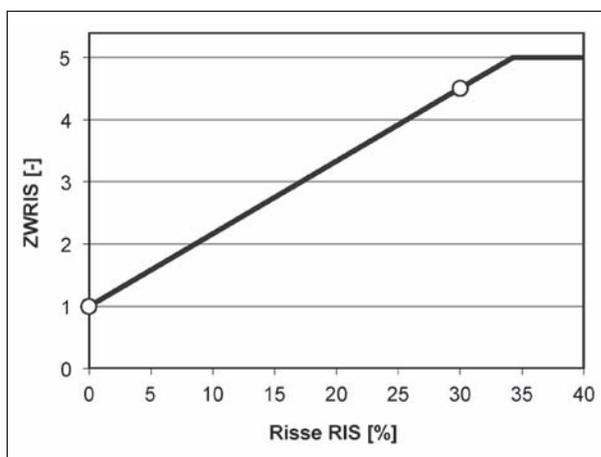


Bild 7-56: Normierungsfunktion für Restschadensfläche

kollektiven Übereinkunft von Experten aus der Erhaltungspraxis. Es scheint daher zweckmäßig, die Bewertung der Wirkungen der Zustandsgrößen auf das Zielkriterium „Substanzerhalt“ für Radwege an vorhandene Vorgehensweisen bei den Fahrbahnen anzulehnen.

Ähnlich wie bei den Ortsdurchfahrten der Fahrbahnen [OERTELT, MAERSCHALK 2006] werden für die Radwege folgende Werte vorgesehen:

- 20 % Längenanteil als 4,5-Schwellenwert für die Risse und
- 30 % Längenanteil als 4,5-Schwellenwert für die Restschadensfläche.

Anders als nach Bild 6-5 wird kein Polygon, sondern eine Gerade als Normierungsfunktion herangezogen. Danach gilt:

$$\text{ZWRIS} = \text{Min} (5; 1 + \text{RIS} \cdot 3,5/20)$$

$$\text{ZWRISF} = \text{Min} (5; 1 + \text{RSF} \cdot 3,5/30)$$

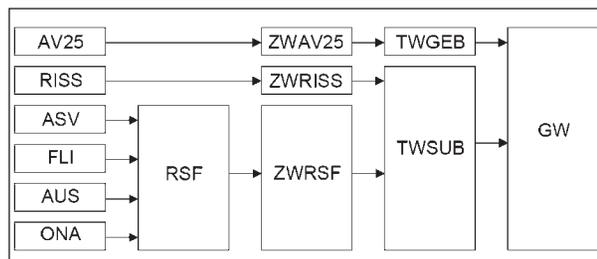


Bild 7-57: Schema der Wertsynthese

mit

RIS %-Längenanteil Risse

RSF %-Längenanteil Restschadensfläche

7.6.2 Ermittlung des Gebrauchs- und Substanzwertes (Wertsynthese)

Die Befahrbarkeit bzw. der Fahrkomfort und die Verkehrssicherheit von Radwegen hängen, was den baulichen Zustand betrifft, so maßgeblich von der Längsebenheit ab, dass als Gebrauchswert TWGEB der entsprechende Zustandswert, ermittelt aus der vertikalen Schwingbeschleunigung bei 25 km/h, angenommen werden kann (siehe Bild 7-57), dementsprechend gilt:

$$\text{TWGEB} = \text{ZWAV25} = \text{Min} (5; 1 + \text{AV25} \cdot 3,5/1,0)$$

Für die Ermittlung des Substanzwertes TWSUB wird eine einfache Beziehung herangezogen, die für die entsprechende Verknüpfung bei Fahrbahnen entwickelt und ausführlich analysiert wurde [OERTELT, MAERSCHALK 2006]. Dabei werden keine Ausnahmeregelungen, wie z. B. eine „Durchschlagsregel“, benötigt. Für den Substanzwert TWSUB der Radwege gilt danach:

$$\text{TWSUB} = \text{Min} (5; \text{ZWRIS} + \text{ZWRISF} - 1)$$

Für wassergebundene Decken gilt:

$$\text{TWSUB} = \text{ZWRISF}.$$

7.7 Testrechnungen und Sensitivitätsanalysen

7.7.1 ZEB – Radwegeteilnetz an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein 2011

Die Zustandsdaten der Erfassung der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein wurden der zuvor dargestellten Normierung und Wertsynthese unterzogen. Die Zustandsbewertung wurde verglei-

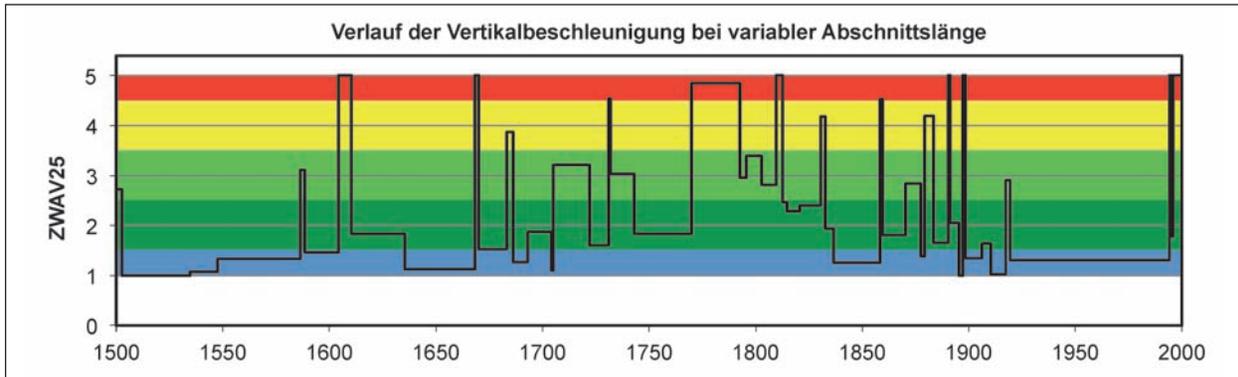


Bild 7-58: Beispielhafter Verlauf von ZWAV25 (= TWGEB) bei variabler Abschnittslänge

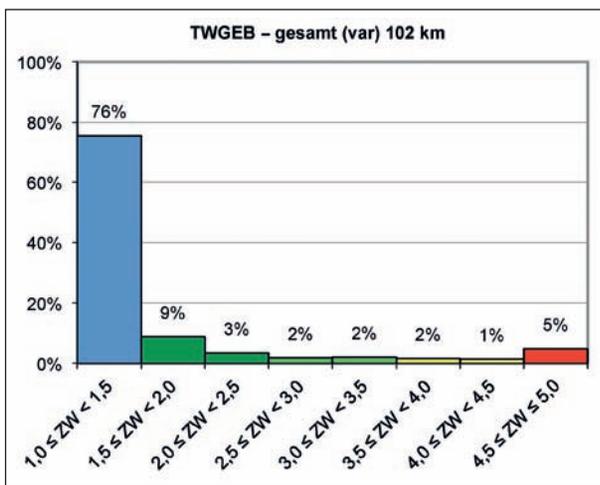


Bild 7-59: Häufigkeitsverteilung Gebrauchswert TWGEB bei variabler Abschnittslänge

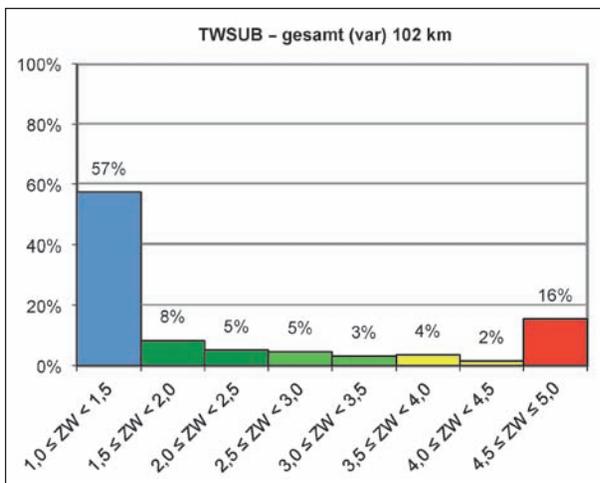


Bild 7-60: Häufigkeitsverteilung Substanzwert TWSUB bei variabler Abschnittslänge

chend für die Daten auf der Basis variabler und statischer Auswertlänge gerechnet. Hierbei sind folgende Punkte zu beachten:

- Bei variabler Abschnittslänge lassen sich die nicht zur baulichen Erhaltung anstehenden Teile des Radwegenetzes präzise separieren (z. B. Fahrbahnquerungen, Brücken, Verkehrsinseln etc.). Die Bauweisengrenzen werden von den Abschnitten exakt abgebildet.
- Bei der statischen Abschnittslänge ist dies nicht der Fall.
- Vergleiche von Ergebnissen unterschiedlicher Erfassungen sind praktisch nur auf der Basis der statischen Abschnittslänge realisierbar.
- Nennenswerte Unterschiede in den Häufigkeitsverteilungen infolge variabler Abschnittslänge treten nur beim Substanzwert TWSUB auf (siehe Bild 7-60).
- Der Gebrauchswert TWGEB ist für das gesamte Radwegenetz auszuweisen. Dieses beinhaltet auch Radwegteile wie Fahrbahnquerungen, Verkehrsinseln und Brücken, die nicht Bestandteil der baulichen Erhaltung von Radwegen sind (siehe Bild 7-59).
- Für die Erhaltungsplanung ist jedoch nur das eigentliche Radwegenetz (ohne Fahrbahnquerungen, Brücken etc.) relevant (Bilder 7-61 bis 7-66).

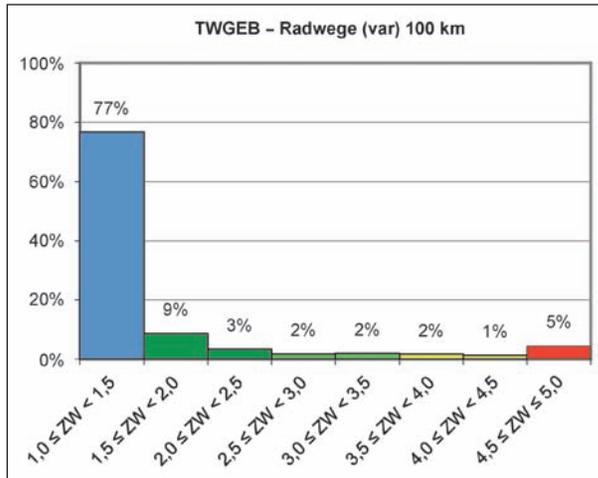


Bild 7-61: Häufigkeitsverteilung Gebrauchswert TWGEB nur Radwege

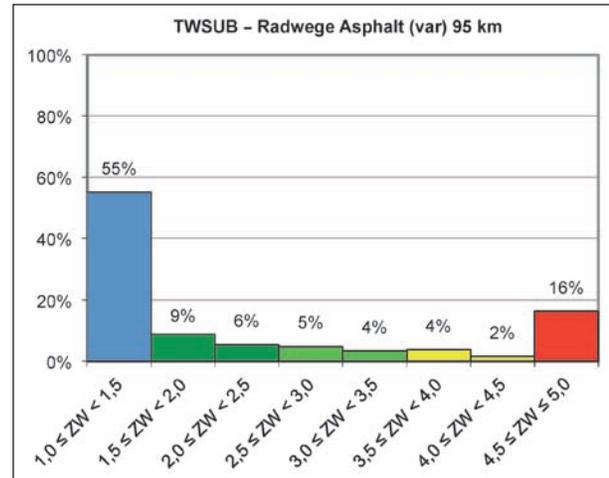


Bild 7-64: Häufigkeitsverteilung TWSUB nur Radwege in Asphaltbauweise

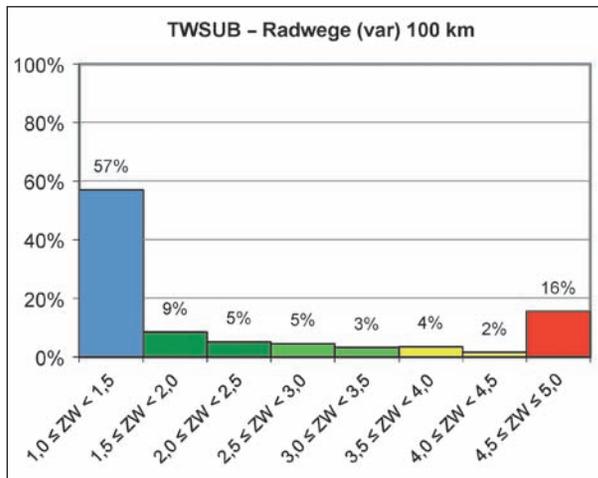


Bild 7-62: Häufigkeitsverteilung Substanzwert TWSUB nur Radwege

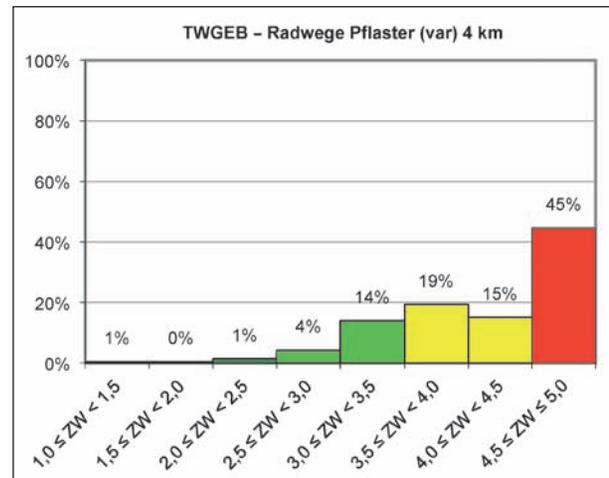


Bild 7-65: Häufigkeitsverteilung TWGEB nur Radwege in Pflasterbauweise

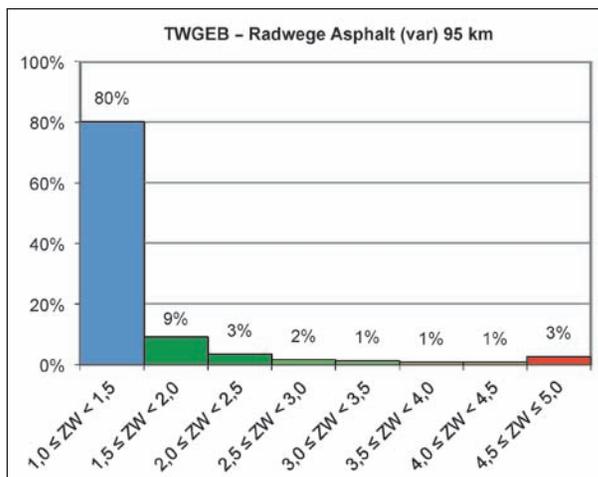


Bild 7-63: Häufigkeitsverteilung TWGEB nur Radwege in Asphaltbauweise

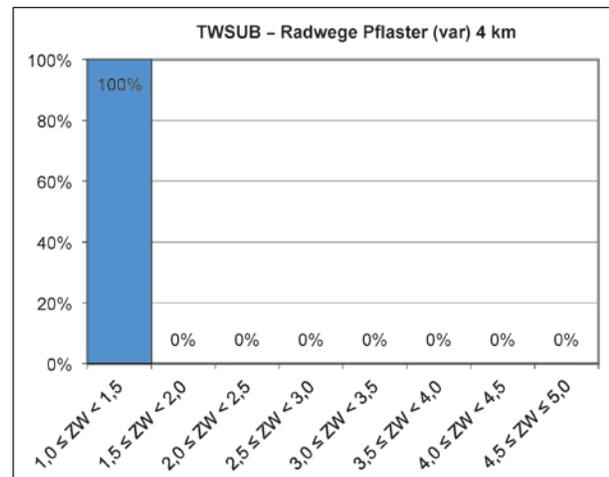


Bild 7-66: Häufigkeitsverteilung TWSUB nur Radwege in Pflasterbauweise

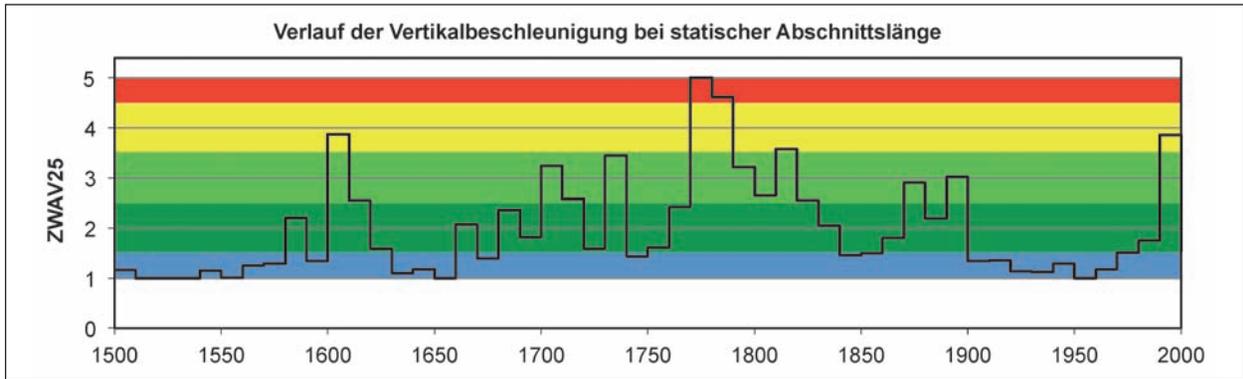


Bild 7-67: Beispielhafter Verlauf von ZWA25 (= TWGEB) bei konstanter Abschnittslänge

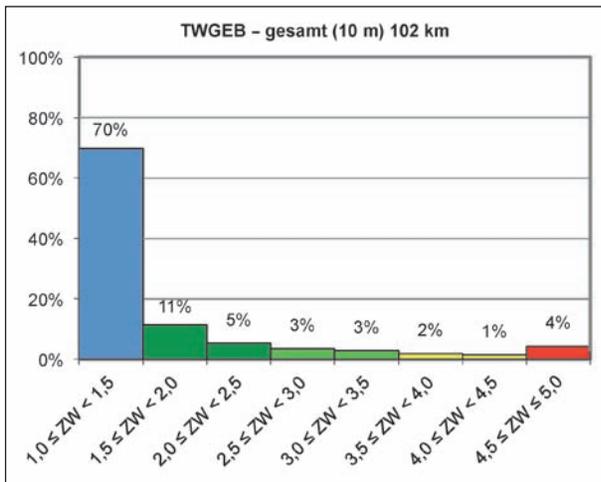


Bild 7-68: Häufigkeitsverteilung Gebrauchswert TWGEB bei konstanter Abschnittslänge

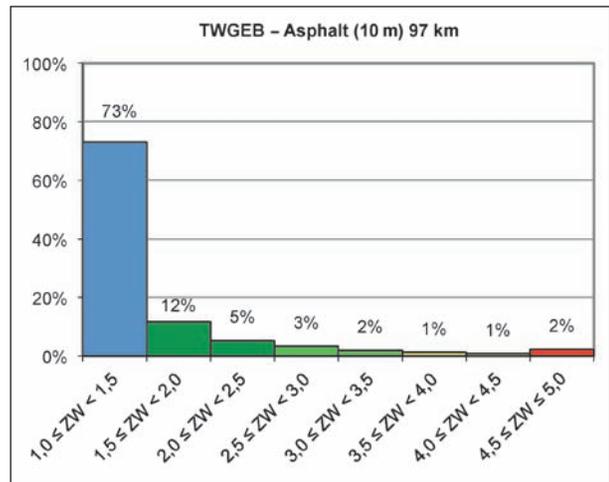


Bild 7-70: Häufigkeitsverteilung TWGEB für Asphaltbauweise

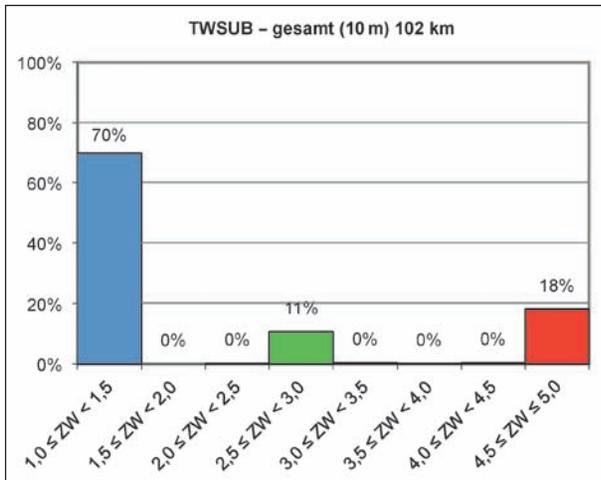


Bild 7-69: Häufigkeitsverteilung Substanzwert TWSUB bei konstanter Abschnittslänge

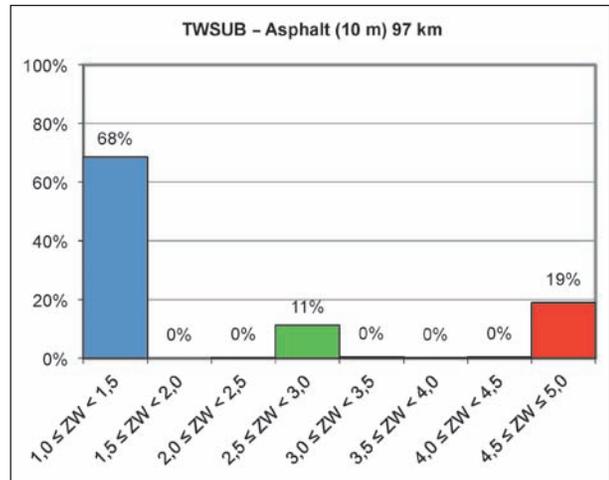


Bild 7-71: Häufigkeitsverteilung TWSUB für Asphaltbauweise

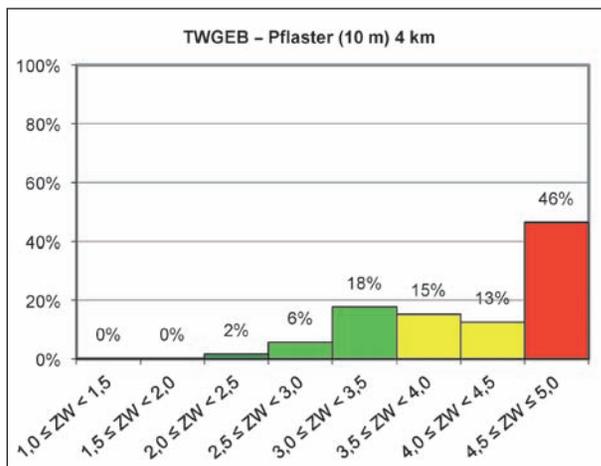


Bild 7-72: Häufigkeitsverteilung TWGEB für Pflasterbauweise

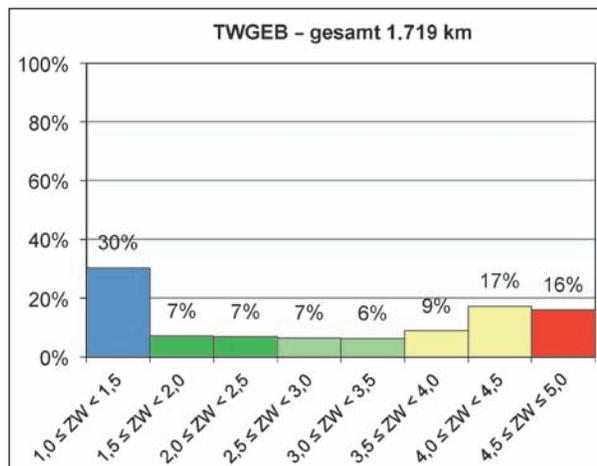


Bild 7-74: Häufigkeitsverteilung Gebrauchswert TWGEB

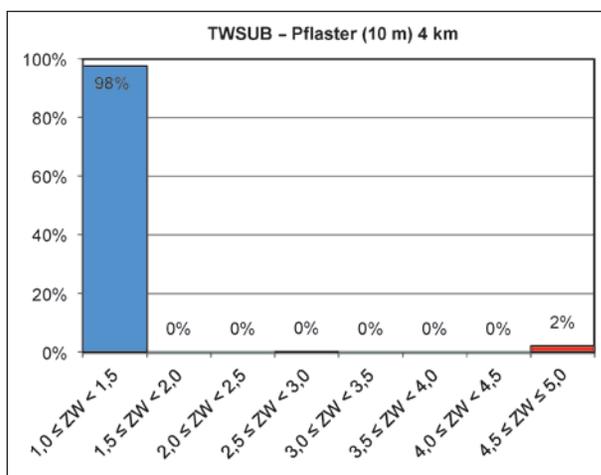


Bild 7-73: Häufigkeitsverteilung TWSUB für Pflasterbauweise

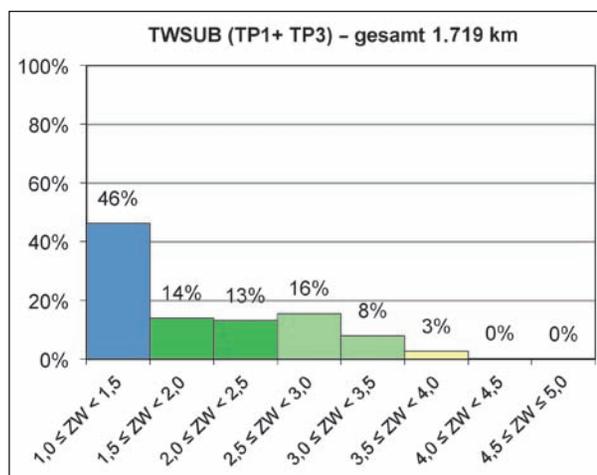


Bild 7-75: Häufigkeitsverteilung Substanzwert TWSUB (aus TP1 und TP3)

7.7.2 ZEB-Radwegenetz an Bundes- und Landesstraßen in Brandenburg 2008

Die Ergebnisse für Vergleichsuntersuchungen zur Zustandsbewertung der Zustandserfassung von Radwegen an Bundes- und Landesstraßen in Brandenburg 2008 liegen für Auswertungsabschnitte mit konstanten Regellängen von 10 m vor. Die Zustandsbewertung erfolgte nach dem modifizierten ZEB-Verfahren für Fahrbahnen (siehe Kapitel 6.3). Die Häufigkeitsverteilungen der Zustandswerte, Teilwerte und der Gesamtwert wurden aus der verfügbaren Ergebnistabelle längenbezogen für acht Zustandsklassen ermittelt.

Bild 7-74 zeigt die längenbezogene Häufigkeitsverteilung des Gebrauchswertes TWGEB der Radwege in Brandenburg. Diese Ergebnisse sind im Hinblick auf die in Kapitel 7.5.4 dargestellten Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Gültigkeit der aufgenommenen und für die Berechnung der Simulation

der gleitenden Richtlatte (4 m, „Planografen-Simulation“) stark in Zweifel zu ziehen.

Bild 7-75 zeigt die längenbezogene Häufigkeitsverteilung des Substanzwertes TWSUB der Radwege in Brandenburg. Der Substanzwert wurde über eine Verknüpfung der Zustandswerte der Ebenheitsmessung und der Substanzmerkmale (Oberfläche) gebildet. Da in die Berechnung die Ergebnisse der Ebenheitsmessungen einfließen, sind auch diese Ergebnisse kritisch zu betrachten.

Bild 7-76 schließlich zeigt die längenbezogene Häufigkeitsverteilungen des Gesamtwertes GW der Radwege in Brandenburg. Die Gültigkeit dieser Verteilung ist als kritisch anzusehen.

In Bild 7-74 sind die Längenanteile pro Zustandsklasse für den Substanzwert (Oberfläche) bei unveränderter Anwendung der Substanzbewertung nach dem modifizierten ZEB-Verfahren dargestellt

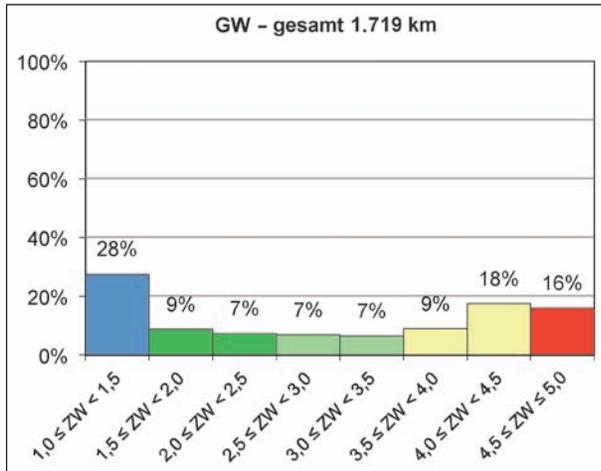


Bild 7-76: Häufigkeitsverteilung Gesamtwert GW

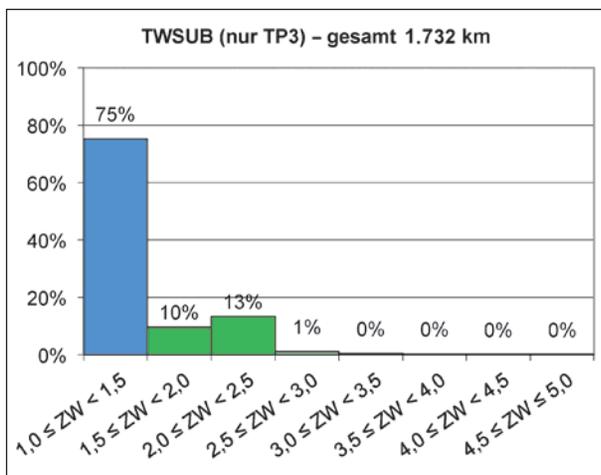


Bild 7-77: Häufigkeitsverteilung Substanzwert TWSUB (nur aus TP3)

(s. Kapitel 6.3). Der Substanzwert (Oberfläche) wird demnach als gewichteter Mittelwert aus dem Zustandswert der Planografsimulation (30 %), dem Zustandswert der Risse (30 %), dem Zustandswert der Flickstellen (20 %) und dem Zustandswert der sonstigen Oberflächenschäden (20 %) errechnet. Die Längsebeneheit wird also nicht im Gebrauchswert, sondern auch im Substanzwert (Oberfläche) berücksichtigt. Diese Doppelbewertung der Längsebeneheit bewirkt, dass ca. 46 % des erfassten Netzes einen Substanzwert TWSUB unter 1,5 aufweisen. Gut 3 % liegen im Zustandsbereich vom Warn- bis zum Schwellenwert (3,5 bis < 4,5), aber nur 0,04 % (68 10-m-Abschnitte) erreichen oder überschreiten den Schwellenwert.

Im Vergleich hierzu sind in Bild 7-77 die Längenanteile pro Zustandsklasse für den Substanzwert (Oberfläche) ohne Berücksichtigung der Längsebeneheit dargestellt. Der Substanzwert (Ober-

fläche) wurde in diesem Fall als gewichteter Mittelwert aus dem Zustandswert der Risse (ca. 42 %), dem Zustandswert der Flickstellen (ca. 29 %) und dem Zustandswert der sonstigen Oberflächenschäden (ca. 29 %) errechnet. Der Längenanteil mit einem Substanzwert TWSUB unter 1,5 beträgt 75 %. Rund 0,26 % liegen danach im Zustandsbereich vom Warn- bis zum Schwellenwert (3,5 bis < 4,5), ca. 0,02 % haben den Schwellenwert von 4,5 erreicht oder überschritten.

8 Erhaltungsplanung von Radwegenetzen

Zur Erhaltungsplanung für Radwegenetze müssen alle verfügbaren Netz-, Bestands-, Verkehrs- und Zustandsdaten zusammengeführt werden (Kapitel 9.1). Unter Berücksichtigung all dieser Informationen können aus den homogenen Auswertebereichen, die mit unterschiedlichen Längen auf der Grundlage des Zustands abgegrenzt wurden (s. Kapitel 4.3.1), Erhaltungsabschnitte gebildet werden (Kapitel 9.2). Aus der Länge und der Abfolge dieser Erhaltungsabschnitte ergeben sich, zusammen mit entsprechenden Zustandsausprägungen, Hinweise für sinnvolle Instandhaltungsmaßnahmen (bauliche Unterhaltung, Kapitel 9.3). Nach Aussonderung dieser Bereiche für die bauliche Unterhaltung und von Bereichen mit Sondermaßnahmen (z. B. infolge von Wurzelhebungen) kann mit den Erhaltungsabschnitten, die aufgrund ihres Zustands zur Instandsetzung bzw. Erneuerung anstehen, der eigentliche Gegenstand der Erhaltungsplanung betrachtet werden (Kapitel 9.4).

8.1 Zusammenführung der Netz-, Bestands-, Verkehrs- und Zustandsdaten

Für eine zielgerichtete Erhaltungsplanung müssen alle verfügbaren relevanten Daten bereitgestellt werden. Dazu gehören:

- Das Ordnungssystem mit Netzknotenbezeichnungen und Längenstationierung zur Ermittlung der Längen. Zum Ordnungssystem im weiteren Sinne gehören auch die Straßenbezeichnungen (z. B. B xy, L xy), administrative Angaben (z. B. Straßenbauamt, -meisterei) und die Lage von Radwegen (links bzw. rechts in Stationierungsrichtung bzw. beidseitig).

- Die Querschnittsdaten, d. h. im Falle der Radwege die (mittleren) Radwegebreiten.
- Alle vorhandenen Angaben zur Bauweise, dabei zwingend die Deckenart, sofern verfügbar auch die Arten, Dicken und Einbaujahre der Decken und der darunter liegenden Schichten (Aufbaudaten).
- Die Frequentierung bzw. Verkehrsbelastung der Radwege (z. B. durchschnittliche Anzahl an Fahrrädern pro Tag).
- Die Zustandsgrößen und Zustandswerte (gemäß Kapitel 3 bzw. Kapitel 7.6).

8.1.1 Umsetzung in der Straßendatenbank

Für eine Zusammenführung aller relevanten Straßendaten sind die Straßendatenbanken wie z. B. TTSIB oder NWSIB vorgesehen. Ein Hauptgrund für diese Zusammenführung ist, dass bei Netzänderungen alle Sachdaten, d. h. Querschnitts-, Bauweise-, Verkehrs- und Zustandsdaten, relativ einfach dem neuen Netzverlauf angepasst werden können (bzw. teilweise sogar angepasst werden müssen). Auf diese Weise kann das Chaos, das bei separater Datenhaltung in unterschiedlichen Dateien aufgrund abweichender Netzstände i. Allg. auf längere Sicht zu erwarten ist, weitestgehend vermieden werden.

Mit dem Ordnungssystem der Straßendatenbanken können die Radwege referenziert werden, sofern sie straßenbegleitende Radwege und keine selbstständigen Radwege sind. Straßenbegleitende Radwege werden, ganz ähnlich wie die Fahrbahnen, als Querschnittsstreifen zwischen aufeinander folgenden Netzknoten mitgeführt und über die Stationierungen in ihrer Länge erfasst. Radwege, die in größeren Entfernungen von den Fahrbahnen verlaufen, können, ähnlich wie getrennt voneinander verlaufende Richtungsfahrbahnen, im Ordnungssystem eingebunden werden. Völlig selbstständige Radwege, die nicht an den hinterlegten Netzknoten beginnen oder enden, können derzeit nicht in die Straßendatenbank integriert werden (s. u. Sachsen-Anhalt).

Sofern Radwege in der Straßendatenbank als Querschnittsstreifen referenziert sind, können auch die Radwegebreiten und die Aufbaudaten problemlos hinterlegt werden. Verkehrs- und Zustandsdaten können derzeit allerdings nur für Fahrbahnen abgespeichert werden. Für Radwege müssten

dazu neue Objektklassen definiert und informationstechnisch umgesetzt werden, ein Vorgang, der erfahrungsgemäß einen längeren Zeitraum erfordert.

Das Land Sachsen-Anhalt hat aufgrund der genannten Problematik einen Lösungsansatz entwickelt, der schlüssig ist und auch auf andere Bundesländer übertragbar scheint. In Sachsen-Anhalt existiert nach Aussage des zuständigen Administrators eine eigene Radwegedatenbank („LRVN“ für „Landesradverkehrsnetz“), die

- entsprechend der Systematik und Konventionen der Straßendatenbank TTSIB aufgebaut ist und die
- mit dieser Straßendatenbank verknüpft ist, so dass alle Informationen, insbesondere aber die Netzdaten, die in der Straßendatenbank aktualisiert werden, automatisch in die Radwegedatenbank übernommen werden.

In der Radwegedatenbank können alle Datengruppen, die auch in der Straßendatenbank vorgesehen sind, speziell für die Radwege abgespeichert werden, also z. B. auch Verkehrs- und Zustandsdaten. Durch die automatische Aktualisierung ist gewährleistet, dass das Radwegenetz stets mit dem Straßennetz abgestimmt ist, sofern Verknüpfungen vorhanden sind. Selbstständige Radwege können in der Radwegedatenbank separat mitgeführt werden.

8.1.2 Separate Radwegedatei für die Erhaltungsplanung

Da derzeit nicht absehbar ist, inwieweit der Lösungsansatz aus Sachsen-Anhalt auf andere Bundesländer übertragen werden kann, muss eine zeitnahe Möglichkeit gefunden werden, um die Datengrundlagen zur Erhaltungsplanung bereitzustellen. Trotz der in Kapitel 8.1.1 angesprochenen Problematik wird dazu vorgeschlagen, eine separate Radwegedatei zu erstellen, die zunächst unabhängig von der Straßendatenbank ist, dafür aber Strukturen für die erforderlichen Erweiterungen bietet. Nach der Festlegung einer Dateistruktur (s. Bild 8-1) kann dabei wie folgt vorgegangen werden:

- Manuelle (bzw. so weit wie möglich automatisierte) Übernahme aller Daten, die in der Straßendatenbank hinterlegt sind, insbesondere der Netzdaten (Netzknotennummern und Längestationierung, administrative Angaben), aber auch aller anderen evtl. in der Straßendaten-

bank vorgehaltenen Radwegedaten (Lage, Radwegebreiten, Bauweisedaten).

- Übernahme der Zustandsgrößen und der Zustandswerte für die homogenen Auswerteabschnitte aus der Datei mit den Ergebnissen der Zustandserfassung und -bewertung.
- Falls verfügbar: Übernahme (oder Eingabe) von Daten zur Verkehrsbelastung.

Eine derartige separate Radwegedatei für die Erhaltungsplanung erfordert einen regelmäßigen manuellen Abgleich der aus der Straßendatenbank übernommenen Informationen mit dem aktuellen Stand der Straßendatenbank (z. B. halbjährlich).

Bild 8.1 zeigt eine mögliche Struktur einer separaten Radwegedatei für die Erhaltungsplanung.

Die Radwegedatei gemäß Bild 8-1 enthält alle Angaben, die für die Lokalisierung erforderlich und für die Erhaltungsplanung wünschenswert sind; auf viele Datenfelder wird nachfolgend noch näher eingegangen. Wie z. B. in der Radwegedatenbank „LRVN“ des Landes Sachsen-Anhalt vorgesehen, können auch beliebig zusätzliche Datenfelder ergänzt werden (z. B. UI-Vereinbarungen, Verwaltungsbezirk, Widmung, identische Netzteile, kreuzende Bahnen, Kreuzung Straße – Weg, Längsneigung, Unfalldaten, Bauwerke, Schutzeinrichtungen, Durchlässe, Schächte, Hindernisse, Schutzplanken, wegweisende Beschilderung, touristische Beschilderung). Zu berücksichtigen ist allerdings, dass diese Datenfelder auch gefüllt und aktualisiert werden müssen.

Als Bezugseinheit der Radwegedatei gemäß Bild 8-1 sind homogene Auswerteabschnitte vorgesehen. Daraus resultiert z. B. im Hinblick auf die Lokalisierungs- oder die Bauweisekenngrößen eine stark redundante Datenhaltung. Die Redundanz wird aber aufgewogen durch eine große Flexibilität bei der Zusammenführung von homogenen Auswerteabschnitten zu Erhaltungsabschnitten. Den homogenen Auswerteabschnitten muss lediglich die Kennung (z. B. Abschnittsnummer) des Erhaltungsabschnitts zugewiesen werden, dem sie zugeordnet werden sollen. Dadurch sind auch Änderungen bei der Einteilung von Erhaltungsabschnitten einfach und schnell umsetzbar.

Die Auslagerung der für die Erhaltungsplanung wünschenswerten bzw. erforderlichen Daten in eine separate „Erhaltungsdatei“ ist auch dann zu empfehlen, wenn, wie z. B. in Sachsen-Anhalt, eine mit

Name	Inhalt
KLASSE	Straßenklasse (z. B. B, L)
NUMMER	Straßennummer
BUCHSTABE	Buchstabenzusatz bei NUMMER
ABSCHNITT	Abschnittsnummer
VON_NKA	Startnetzknottennummer Abschnittsbeginn
BIS_NKA	Endnetzknottennummer Abschnittsbeginn
STA_ANF	Station Abschnittsbeginn
VON_NKE	Startnetzknottennummer Abschnittsende
BIS_NKE	Endnetzknottennummer Abschnittsende
STA_END	Station Abschnittsende
ZENDI	Code für Administrationseinheit
OD_FS	Ortsdurchfahrt/freie Strecke
LAG_STR	Lage Radweg (links/rechts von Straße in Stationierungsrichtung)
ANZ_STR	Anzahl Fahrstreifen
STR_NUM	Ausgew. Streifen (links/rechts in Stationierungsrichtung/beide)
RAD_BRT	Radwegbreite/Streifenbreite
DCK_ART	Deckenart
DCK_DIC	Deckendicke
DCK_JHR	Einbaujahr Decke
TSC_ART	Art der Tragschicht
TSC_DIC	Dicke der Tragschicht
TSC_JHR	Einbaujahr der Tragschicht
FSS_DIC	Dicke der Frostschutzschicht
FSS_JHR	Einbaujahr der Frostschutzschicht
AUF_KAT	Aufbau standardisiert (bzw. vergleichbar)/ nicht standardisiert
LMA_ART	Art letzte Maßnahme
LMA_JHR	Jahr letzte Maßnahme
FIX_ART	Art einer fest vorgesehenen Erhaltungsmaßnahme
FIX_JHR	Jahr feste Maßnahme
FIX_KST	Kosten feste Maßnahme
AUS_JHR	Jahr geplanter Radwegausbau
DTV_RAD	Durchschnittliche tägliche Radfahrerbelegung
ZGR_EBN	Zustandsgröße Längsebenheit (Vertikalbeschleunigung)
ZST_EBN	Standardabweichung der Zustandsgröße Längsebenheit
ZGR_RIS	% Risse (Asphalt) % Längs-/Querrisse (Beton)
ZGR_FLI	% Flickstellen (Asphalt) % bituminöser Teilersatz (Beton)
ZGR_AKS	% Ausmagerung/Splittverlust (Asphalt) % Kantenschäden (Beton)
ZGR_AUS	% Ausbrüche (Asphalt/wassergebunden) % Nester/Abplatzungen (Beton)
ZGR_RSf	% Restschadensfläche
ZOF_J/N	offene Nähte-Asphalt (Ja/Nein), schadhafte Fugen-Beton (Ja/Nein)
ZEL_ANZ	Einbauten > ± 3 cm (Anzahl)
ZBO_ANZ	Bordsteine > ± 3 cm (Anzahl)
ZWU_ANZ	Wurzelhebungen (Anzahl)
ZWT_EBN	Zustandswert Längsebenheit (= Gebrauchswert TWT_GEB)
ZWT_RIS	Zustandswert Risse
ZWT_RSf	Zustandswert Restschadensfläche
TWT_SUB	Substanzwert-Oberfläche
ERH_ABS	Nummer Erhaltungsabschnitt (nach Zuordnung des homogenen Abschnitts)

Bild 8-1: Beispiel einer Radwegedatei zur Erhaltungsplanung

der Straßendatenbank verknüpfte Radwegedatei existiert. Auch bei den Fahrbahnen erfolgt die Erhaltungsplanung, z. B. mittels des Pavement-Management-Systems (PMS), nicht in direkter Anbindung an die Straßendatenbank, sondern mit Rückgriff auf eine eigens dafür erzeugte Datenhaltung mit der Bezeichnung „PMSI/O“ (= PMS Input und Output), die lediglich die für die Erhaltungsplanung notwendigen Informationen enthält. PMSI/O kann allerdings automatisch, gleichsam auf „Knopfdruck“, mit den relevanten Inhalten der Straßendatenbank gefüllt bzw. aktualisiert werden. Dies muss mittelfristig auch bei der Erhaltungsdatei für die Radwege angestrebt werden.

8.2 Bildung von Erhaltungsabschnitten

Die Ergebnisse einer Zustandserfassung/-bewertung von Radwegenetzen liegen für (zustands-)homogene Abschnitte vor, die eine Mindestlänge von 1 m und eine aus den Homogenitätskriterien resultierende flexible Maximallänge aufweisen (s. Kapitel 3.3.1). Die Unterteilung in homogene Abschnitte ist, insbesondere bei einer großen Anzahl sehr kurzer Abschnitte, i. Allg. nicht für die Erhaltungsplanung geeignet. Auf der Grundlage der homogenen Abschnitte müssen daher im Regelfall Erhaltungsabschnitte gebildet werden. Diese Erhaltungsabschnitte, die für die Erhaltungsplanung den räumlichen Bezug zum Radwegenetz herstellen, liefern die Mengengrundlage für die Erstellung von Erhaltungsprogrammen oder die Ermittlung des Erhaltungsbedarfs.

Bei den Fahrbahnen werden Erhaltungsabschnitte derzeit mit Hilfe eines vorliegenden IT-Verfahrens gebildet [RÜBENSAM, SCHULZE 1996]. Als repräsentativ für ihren Zustand werden die längengewichteten Mittelwerte der Zustandswerte der eingeschlossenen (100-m- bzw. 20-m-)ZEB-Auswerteabschnitte angenommen. Das Verfahren weist allerdings methodische Schwächen derart auf, dass bei einer Anwendung von Punkt A nach B andere Abschnittsgrenzen zu erwarten sind als bei einer Anwendung von Punkt B nach A. Auch aus diesem Grund wird seit längerer Zeit versucht, ein eigenständiges Forschungsprojekt zur Problematik der Abschnittseinteilung für Fahrbahnen zu initiieren, das einen deutlich größeren Finanzrahmen vorsieht als das gesamte vorliegende Projekt. Dabei soll analysiert werden, welche Informationen zur Kennzeichnung der Homogenität ermittelt und unabhän-

gig von der Länge von Abschnitten mitgeführt werden sollten. Darüber hinaus soll untersucht werden, wie repräsentative Zustandsgrößen und -werte ermittelt werden können, ohne die Häufigkeitsverteilung der Zustandsgrößen der jeweils zugrunde liegenden kürzeren Abschnitte netzweit markant zu verändern.

Es ist im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht möglich, ein schlüssiges Konzept zur automatisierten Abgrenzung von Erhaltungsabschnitten für Radwegenetze zu entwickeln und umzusetzen. Es kann daher nur eine pragmatische vorläufige Lösung vorgeschlagen werden, die eine ingenieurmäßige Nachbearbeitung per Hand mit Hilfe von Plänen (s. z. B. Bild 3-9) erfordert.

Bei der Bildung homogener Auswerteabschnitte für die Zustandserfassung wurden folgende Zwangspunkte für Abschnittsgrenzen berücksichtigt:

- Netzknoten,
- Grenzpunkte (Verwaltungsgrenzen wie z. B. Bauamtsgrenzen, OD-Grenzen),
- Bauweisewechsel und
- Straßenseitenwechsel einseitig angeordneter Radwege.

Es erscheint sinnvoll, diese Zwangspunkte auch für die Abgrenzung von Erhaltungsabschnitten zu übernehmen.

Die in das Grundgerüst dieser Zwangspunkte eingepassten, nach Homogenitätskriterien der Längsebenheit gebildeten homogenen Auswerteabschnitte der Zustandserfassung, die flexible Längen aufweisen (nach bisherigen Erfahrungen 1 m bis ca. 350 m), sind die Basis für die Abgrenzung der Erhaltungsabschnitte. Um zu einem automatisch erstellbaren Grundgerüst für die später manuell zu modifizierende Abgrenzung von Erhaltungsabschnitten zu gelangen, wird vorgeschlagen, methodisch prinzipiell wie bei der Bildung homogener Auswerteabschnitte zu verfahren. Das bedeutet, dass, beginnend an einem homogenen Startauswerteabschnitt, jeweils für aufeinander folgende homogene Auswerteabschnitte die berechneten und vorliegenden Mittelwerte (= Zustandsgrößen, s. Bild 8-1) und die Standardabweichungen der für die Längsebenheit repräsentativen vertikalen Schwingbeschleunigungen verglichen werden. Analog der Abgrenzung homogener Auswerteabschnitte gilt dann:

$$\bar{a}_n = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

$$s_n = \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n a_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n a_i\right)^2}{n^2}}$$

mit

a_i Zustandsgröße der vertikalen Schwingbeschleunigung für den homogenen Auswertabschnitt i

\bar{a}_n Mittelwert der a_i beim homogenen Auswertabschnitt n ($n > i$)

s_n Standardabweichung der a_i beim homogenen Auswertabschnitt n ($n > i$)

Als Kriterium für die Abgrenzung der Erhaltungsabschnitte wird der Variationskoeffizient v_n (beim homogenen Auswertabschnitt n) herangezogen. Es gilt:

$$v_n = \frac{s_n}{\bar{a}_n}$$

Abschnittsgrenzen der Erhaltungsabschnitte werden wie folgt gesetzt:

- Variationskoeffizient $v_n > 0,667$ oder
- Änderung von $a_i > 4 s_n$

Diese aufgrund der verfügbaren Analysedaten derzeit pragmatisch festgelegten Homogenitätskriterien sind deutlich großzügiger als bei der Bildung von homogenen Auswertabschnitten. Aus diesem Grund erscheint es problematisch, den möglicherweise stark nivellierten Mittelwert der vertikalen Schwingbeschleunigung als repräsentative Zustandsgröße für die Erhaltungsabschnitte heranzuziehen. Es wird daher vorgeschlagen, die repräsentative Zustandsgröße der vertikalen Schwingbeschleunigung der Erhaltungsabschnitte n wie folgt zu berechnen:

$$a_n = \bar{a}_n + s_n$$

Als Zustandsgrößen der Substanzmerkmale für die Erhaltungsabschnitte werden die längengewichteten Prozentwerte der homogenen Auswertabschnitte ermittelt. Die Zahl der konstruktiv bedingten Mängel der Erhaltungsabschnitte ergibt sich als Summe der entsprechenden Anzahlen der ein-

geschlossenen homogenen Auswertabschnitte (s. Bild 8-1).

Es ist im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht leistbar, einen IT-Modul für die Abgrenzung von Erhaltungsabschnitten einschließlich der Berechnung der repräsentativen Zustandsgrößen zu erstellen. Zusätzlich zu den bereits genannten Kriterien wären dabei zu berücksichtigen:

- die Mindestlänge von Erhaltungsabschnitten (Vorschlag 20 m),
- die Maximallänge von Erhaltungsabschnitten (aufgrund der o. g. Abgrenzungskriterien nur von theoretischer Bedeutung, Vorschlag 1.000 m),
- zulässige Länge von Bereichen mit fehlenden Zustandsdaten, die bei der Abschnittsbildung überbrückt werden dürfen (Vorschlag 5 % der Länge).

Solange ein IT-Modul nicht verfügbar ist, muss die definitive Abgrenzung der Erhaltungsabschnitte mit Hilfe von Plänen ingenieurmäßig erfolgen. Die Erfahrungen bei der Abschnittseinteilung für Fahrbahnen zeigen, dass auch Software-Lösungen noch Nachbearbeitungen erfordern. Das Hauptproblem bei einer Nachbearbeitung ist, dass bei einer manuellen Veränderung von Abschnittsgrenzen auch die als repräsentativ angenommenen Zustandsgrößen neu ermittelt werden müssen. Für die Fahrbahnen existiert ein IT-Modul, das diese Berechnungen nach interaktiver Veränderung von Abschnittsgrenzen am Bildschirm im Hintergrund abwickelt („PMSI/O“). Es kann hier aus Zeit- und Aufwandsgründen nicht geprüft werden, welche Voraussetzungen für die Übernahme von Radwegenetzen in dieses Modul erfüllt sein müssen; grundsätzlich erscheint dies jedoch möglich (s. auch Kapitel 8.1).

8.3 Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmearten: bauliche Unterhaltung und Sondermaßnahmen

Bei der Erstellung eines Konzepts für die Erhaltungsplanung müssen den aufgrund des Zustands aktuell oder in einen vorgegebenen Prognosezeitraum zur Erhaltung anstehenden Erhaltungsabschnitten Maßnahmearten der baulichen Erhaltung zugewiesen werden. In Bild 8-2 sind die in Betracht kommenden Erhaltungsmaßnahmearten zusammengestellt.

U	Bauliche Unterhaltung (Instandhaltung) (Abfräsen, Vergießen von Rissen, Flicken)
I1	Dünnschichtbelag, Schlämme
I2	Fräsen/Tiefereinbau einer 4-cm-Schicht
I2	Hocheinbau einer 4-cm-Schicht
I2	Umpflastern von Betonpflaster
E1	Tiefereinbau der Decke
E2	Tiefereinbau der Trag-/Frostschuttschicht
E2+	Sondermaßnahmen beim Tiefereinbau der Trag-/Frostschuttschicht (z. B. bei Wurzelhebungen)

Bild 8-2: Maßnahmentypen der baulichen Erhaltung von Radwegen

Gegenstand der Erhaltungsplanung sind Maßnahmen, die einigermaßen zuverlässig planbar sind. Dies gilt für Instandsetzungsmaßnahmen (I in Bild 8-2) und Erneuerungsmaßnahmen (E in Bild 8-2); auf diese Maßnahmekategorien wird in Kapitel 8.4 näher eingegangen. Maßnahmen der baulichen Unterhaltung sind nur sehr eingeschränkt planbar, sie werden häufig, insbesondere bei Beeinträchtigungen der Verkehrssicherheit, spontan ausgeführt. Aufgrund dieser Sonderstellung wird nachfolgend zunächst auf diese Maßnahmen der baulichen Unterhaltung eingegangen (Kapitel 9.3.1).

Nur sehr eingeschränkt planbar sind auch Maßnahmen, die zwar der Kategorie „Erneuerung“ zugeordnet werden können, die jedoch aufgrund konstruktiver Mängel im weitesten Sinne, wie z. B. abgesackten Einbauten oder Wurzelhebungen, erforderlich werden (E2+ in Bild 8-2). Auch auf diese Maßnahmen wird gesondert eingegangen (Kapitel 8.3.2).

8.3.1 Bauliche Unterhaltung von Radwegen

Unterhaltungs- oder Instandhaltungsmaßnahmen sind bauliche Maßnahmen kleineren Umfangs zur Wiederherstellung der Verkehrssicherheit und/oder zur Substanzerhaltung von Verkehrsflächen, die mit geringem Aufwand in der Regel sofort nach dem Auftreten eines örtlich begrenzten Schadens von Hand oder maschinell ausgeführt werden (z. B. Flickarbeiten, Verfüllen von Rissen, Abfräsen örtlich begrenzter Verformungen [FGSV 1998]). Abgesehen von den angewendeten Techniken besteht ihre wesentliche Kennzeichnung in

- Maßnahmen kleineren Umfangs beim Auftreten örtlich begrenzter Schäden.

Eine verbindliche Definition nach Maß und Zahl für „kleineren Umfang“ und „örtlich begrenzt“ existiert

nicht. In der Erhaltungspraxis muss letztlich der dafür zuständige Ingenieur entscheiden, ob und an welchen Stellen Unterhaltungsmaßnahmen ausgeführt werden sollen. Hilfestellung können dabei Pläne mit den Zustandswerten der Erhaltungsabschnitte leisten.

Ausgehend von der Länge und der örtlichen Lage der Erhaltungsabschnitte können auch automatisiert Hinweise geliefert werden, bei welcher Konstellation Maßnahmen der baulichen Unterhaltung in Betracht kommen. So kann z. B. festgelegt werden, dass

- Erhaltungsabschnitten bis zu einer definierten Maximallänge (Vorschlag $LU \leq 10 \text{ m}$),
- die einen bestimmten Mindestabstand $LDiff$ zu den nächstliegenden Erhaltungsabschnitten aufweisen (Vorschlag $LDiff = 10 \cdot LU \text{ [m]}$),

eine Markierung („Flag“) für bauliche Unterhaltung zugewiesen wird. Über die Zustandskonstellationen der betreffenden Abschnitte können sogar Empfehlungen zu Maßnahmentypen gegeben werden (z. B. „Flicker“ bei Ausbrüchen).

Die Maximallängen und die Mindestabstände für einen Algorithmus zur Markierung von Erhaltungsabschnitten, für die bauliche Unterhaltung vorgeschlagen werden sollte, müssen in einem Praxistest erprobt werden. Auch nach Festlegung entsprechender Randbedingungen können allerdings nur Hinweise für Abschnitte vermittelt werden, die aktuell aufgrund ihres Zustands zur Erhaltung anstehen. Entsprechende Hinweise für einen Prognosezeitraum wären nur möglich, wenn die Abschnittseinteilung des gesamten betrachteten Radwegenetzes für jedes Prognosejahr modifiziert wird. Die möglichen Vorteile einer zeitlich flexiblen Abschnittseinteilung werden durch die dadurch entstehende Unübersichtlichkeit mehr als aufgewogen.

Bei der Zustandserfassung wird nachrichtlich registriert, ob offene Nähte bei Asphaltdecken oder schadhafte Fugenfüllungen bei Betondecken vorhanden sind (vgl. Kapitel 3.3.3). Die Maßnahmen „Vergießen von offenen Nähten“ und „Ersatz schadhafte Fugenfüllungen“ werden der baulichen Unterhaltung zugerechnet, auch wenn die betroffenen Erhaltungsabschnitte länger als die Maximallänge (z. B. 10 m) sind (und sonst keine Schäden und Mängel aufweisen).

Sofern die Radwegquerungen von Fahrbahnen als eigene Erhaltungsabschnitte geführt werden (s. Ka-

pitel 8.2), können insbesondere bei sicherheitsrelevanten Mängeln auch dafür Unterhaltungsmaßnahmen vorgeschlagen werden.

8.3.2 Sondermaßnahmen aufgrund konstruktiv bedingter Mängel

Sondermaßnahmen aufgrund konstruktiv bedingter Mängel kommen in Betracht bei

- stark überstehenden Bordsteinen ($> \pm 3$ cm),
- überstehenden oder abgesackten Einbauten ($> \pm 3$ cm),
- Wurzelhebungen.

Bei stark überstehenden Bordsteinen und überstehenden oder abgesackten Einbauten kann aus der Radwegedatei zur Erhaltungsplanung (Bild 8-1) entnommen werden, wie häufig diese Ereignisse an einem Erhaltungsabschnitt auftreten. Bei stark überstehenden Bordsteinen kann in aller Regel davon ausgegangen werden, dass es sich um isolierte Einzelereignisse handelt. Die unerwünschten Stufen werden i. Allg. im Rahmen der baulichen Unterhaltung beseitigt. Dabei ist es besonders hilfreich, wenn Radwegquerungen von Fahrbahnen, die in aller Regel durch Bordsteine abgegrenzt sind, als eigenständige Erhaltungsabschnitte definiert sind (s. Kapitel 8.2).

Auch überstehende oder abgesackte Einbauten treten vielfach isoliert auf und werden dann ebenfalls im Rahmen der baulichen Unterhaltung ausgerichtet. Sofern überstehende oder abgesackte Einbauten innerhalb eines Erhaltungsabschnitts häufiger vorhanden sind, sollte zunächst geprüft werden, ob dieser Abschnitt aktuell oder in absehbarer Zeit, z. B. innerhalb von fünf Jahren (s. Kapitel 8.4.3), ohnehin zur Instandsetzung oder Erneuerung ansteht. In diesem Fall werden die Stufen infolge von Einbauten im Rahmen der standardmäßigen Erhaltung beseitigt. Ansonsten ist eine Sondermaßnahme „Ausrichten“ vorzusehen.

Verformungen infolge von Baumwurzeln (Wurzelhebungen) treten i. d. R. gehäuft auf, seltener als Einzelereignisse. Unabhängig davon sind in jedem Fall oft aufwändige Sondermaßnahmen erforderlich, um diese Verformungen dauerhaft zu verhindern. Die Vorgehensweise hängt sehr stark von der örtlichen Situation ab, sodass „Patentrezepte“ kaum möglich sind.

8.4 Ermittlung von Erhaltungsmaßnahmen: Instandsetzung und Erneuerung

Der eigentliche Gegenstand der Erhaltungsplanung sind Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen [FGSV 1998]:

- Instandsetzungen sind bauliche Maßnahmen zur Substanzerhaltung oder zur Verbesserung von Oberflächeneigenschaften von Verkehrsflächen, die auf zusammenhängenden Flächen in der Regel in Fahrstreifenbreite bis zu einer Dicke von 4 cm ausgeführt werden.
- Erneuerungen sind bauliche Maßnahmen zur vollständigen Wiederherstellung einer Verkehrsflächenbefestigung oder Teilen davon, sofern mehr als 4 cm betroffen sind, entweder durch Aufbringen neuer Schichten auf die vorhandene Befestigung im Hocheinbau oder durch Ersatz entsprechender Schichten im Tiefeinbau oder durch eine Kombination von Hoch- und Tiefeinbau.

Die Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen für Radwege werden an geeigneter Stelle spezifiziert (Kapitel 8.4.6, Bild 8-8).

8.4.1 Datengrundlagenvoraussetzungen und Modellgrundlagen

Auf die Ausgangsinformationen zu Erhaltungsabschnitten wurde bereits in Kapitel 8.1 eingegangen (s. Bild 8-1). Für die Erhaltungsplanung kann noch unterschieden werden zwischen Daten, die unbedingt erforderlich sind, und Daten, die nicht unabdingbar sind, die aber in Form von Randbedingungen die Aussagegenauigkeit und den Praxisbezug verbessern können. Falls, wie derzeit eher die Regel, keine differenzierten Aufbaudaten der Radwege verfügbar sind, müssen mindestens die Deckenart und die Einstufung „Aufbau standardisiert (bzw. vergleichbar)/nicht standardisiert“ (Variable „AUF_KAT in Bild 8-1) bekannt sein. Angaben zur letzten Erhaltungsmaßnahme sind hilfreich, aber nicht unbedingt erforderlich. Alle anderen in Bild 8-1 aufgenommenen Informationen sind unabdingbar.

Jede Erhaltungsplanung basiert auf Modellverfahren. Auch bei den dafür benötigten Modellparametern, die unabhängig von einzelnen Erhaltungsabschnitten jeweils für Merkmalsgruppen oder „Fami-

Modellparameter	Beschreibung der Parameter
Regeln für Zustandsbewertung	Funktionen zur Umwandlung von Zustandsgrößen in Zustandswerte und Verknüpfung (Gebrauchs-/Substanzwert)
Regeln für Substanzbewertung	Funktionen zur Ermittlung eines Substanzwerts.
Verhaltensfunktionen	Funktionstypen zur Beschreibung der zeitlichen Zustandsentwicklung
Mängelklassen	kategorisierte Schadensursachen aus Zustandskonstellationen
Maßnahmearten	Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmearten
Maßnahmekosten	Einheitskosten der Maßnahmearten (z. B. Euro/qm)
Maßnahmewirkungen	Rücksetzbereiche der Zustands- bzw. Teilzielwerte und Zustandsverläufe nach Maßnahmen (in Abhängigkeit der Mängelklassen)

Bild 8-3: Modellvorgaben für die Erhaltungsplanung

lien“ von Radwegeabschnitten gelten, gibt es Mindestanforderungen. In Bild 8-3 sind zunächst die Parameter zusammengestellt, die für eine optimale Erhaltungsplanung benötigt werden.

Zu den Modellvorgaben, die zwingend erforderlich sind, gehören zunächst Parameterdateien mit aktuellen Bewertungsfunktionen (Normierungs- und Verknüpfungsfunktionen, Warn- und Schwellenwerte, s. Kapitel 7.4), da vor allem bei Ergebnisdarstellungen verknüpfte Teilwerte (z. B. Gebrauchs- und Substanzwert) verwendet und zu ihrer Berechnung Zustandswerte (bewertete Zustandsgrößen) benötigt werden. Essenziell sind darüber hinaus die infrage kommenden Erhaltungsmaßnahmearten, die in Bild 8-8 spezifiziert sind und die i. Allg. deutlich unterschiedliche Kosten und Wirkungen haben. Zu jeder Maßnahmeart werden daher Angaben zu ihren Kosten sowie ihren sofortigen bzw. längerfristigen Wirkungen benötigt. Längerfristige Maßnahmewirkungen können nur beurteilt werden, wenn die künftige Zustandsentwicklung mittels Verhaltensfunktionen abschätzbar ist und mittels Mängelklassen eingrenzbar ist, inwieweit Schadensursachen mit den jeweiligen Maßnahmen auch tatsächlich behoben wurden.

Während die in Bild 8-1 aufgeführten Querschnitts-, Aufbau-, Verkehrs- und Zustandsdaten in der Örtlichkeit gemessen oder gezählt werden können, stammen die derzeit verfügbaren Informationen zu den Modellparametern aus Expertenbefragungen,

Analysen zur Erhaltungsgeschichte, punktuellen Langzeitbeobachtungen und Erhebungen bei Bauverwaltungen und Baufirmen im Rahmen von Forschungsarbeiten; die wesentlichen Erkenntnisse für die Fahrbahnen sind in den RPE Stra 01 [FGSV 2001b] zusammenfassend dargestellt. Bestands-, Verkehrs- und Zustandsdaten einerseits sowie die Modellparameter andererseits sind sowohl untereinander als auch gegenseitig in vielfältiger Weise verflochten. Wie oben schon erwähnt, gelten die Parameter meist für Merkmalsgruppen, die, aufgrund der Ausprägungen der Sachdaten, eine ähnliche Charakteristik aufweisen.

Für Radwege gibt es, abgesehen von der Zustandsbewertung, derzeit so gut wie keine empirisch oder gar wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnisse zu den in Bild 8-3 aufgeführten Modellvorgaben. Bei der Erhaltungsplanung sind daher vielfach die nachfolgend angesprochenen pragmatischen Lösungsansätze erforderlich.

8.4.2 Ablauf der Planung

Die in der benötigten Form strukturierten Daten- und die Modellparameter werden im Ablauf der Erhaltungsplanung zur Ermittlung wirtschaftlich günstigster Erhaltungsmaßnahmearten, der daraus resultierenden Zustandsentwicklung und des kurz-, mittel- und langfristigen Erhaltungsbedarfs eingesetzt. Ausgehend von den für einzelne Erhaltungsabschnitte ermittelten Maßnahmen sind darüber hinaus auch netzbezogene Analysen zu den Auswirkungen auf den Gebrauchs- und Substanzwert möglich, die bei begrenzten Erhaltungsmitteln und, damit zusammenhängend, bei anspruchsvollen oder einfacheren Erhaltungsmaßnahmen bzw. bei zeitlich aufgeschobenen Erhaltungsmaßnahmen zu erwarten sind. Der Planungsablauf ist in Bild 8-4 in modularer Form dargestellt. Nachfolgend wird näher auf diese Planungsschritte eingegangen.

Die in Bild 8-4 dargestellten Planungsschritte entsprechen in ihrer Art und Abfolge weitestgehend den Modulen des Pavement-Management-Systems (PMS) der Fahrbahnen [MAERSCHALK, KRAUSE 2004]. Die informationstechnische Aufbereitung der, im Vergleich zu den Fahrbahnen deutlich einfacheren, Algorithmen der dargestellten Module in einem „PMS-Radwege“ könnte, nach einer Test- und Eichungsphase, ein gutes Hilfsmittel sein, das die Berechnungen im Rahmen der Erhaltungsplanung weitestgehend automatisiert.

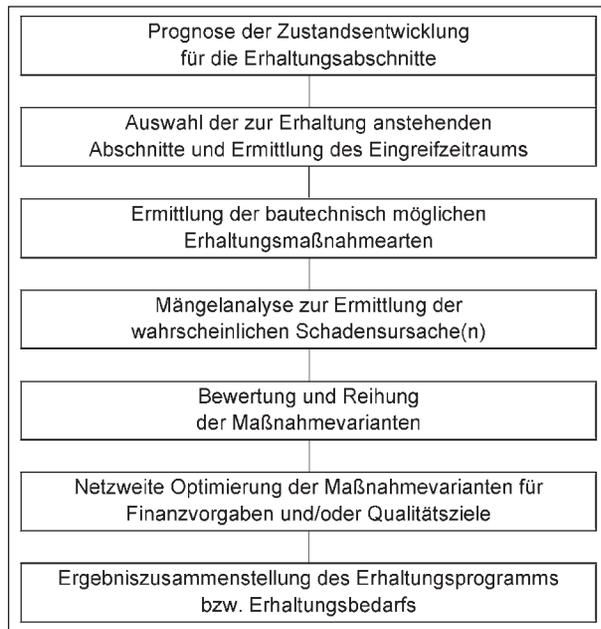


Bild 8-4: Planungsablauf

8.4.3 Zustandsprognose und Eingreifzeitpunkt

Der erste Schritt einer Erhaltungsplanung besteht zweckmäßigerweise darin, die voraussichtliche Entwicklung der aktuellen, im Rahmen einer Zustandserfassung ermittelten Zustandsgrößen bzw. Zustandswerte eines Erhaltungsabschnitts über einen vorgegebenen Prognosezeitraum abzuschätzen. Als Basis für alle späteren Analysen muss diese zeitliche Fortschreibung des Zustands zunächst für den Bezugsfall „ohne Erhaltungsmaßnahme“ („Nichts-tun“-Fall) durchgeführt werden.

Als eine weitestgehend gesicherte Randbedingung für die Beschreibung des Zustandsverlaufs kann angenommen werden, dass der Zustand eines Radwegs nach der Herstellung bzw. nach einer Erneuerung am besten ist. Der Radweg ist komfortabel und sicher zu befahren, die Substanz ist intakt.

Der durch die einzelnen Merkmale charakterisierbare Zustand ändert sich im Laufe der Zeit, er wird schlechter. Das Ausmaß der künftigen Verschlechterung kann für einen betrachteten Erhaltungsabschnitt relativ zuverlässig abgeschätzt werden, wenn

- das Jahr der Herstellung bzw. der letzten Instandsetzung oder Erneuerung bekannt ist,
- pro Merkmal eine Zustandsgröße aus der letzten Zustandserfassung verfügbar ist und
- Erkenntnisse zu den Typen der Funktionen (z. B. Gerade, Exponentialfunktion o. Ä.) vorlie-

gen, die sich zur Beschreibung der zeitlichen Änderungen der jeweiligen Zustandsgrößen eignen.

Wie in Bild 8-5 für einen Erhaltungsabschnitt schematisch am Beispiel von Zustandswerten eines betrachteten Zustandsmerkmals erläutert, lässt sich bei gegebenem Alter (= Jahr der Zustandserfassung – Jahr der Herstellung/Erneuerung mit Zustandswert = 1,0) und bekanntem Typ der Verlaufsfunktion die weitere Entwicklung abschätzen, indem die Koeffizienten der Verlaufsfunktion so gewählt werden, dass der Zustandswert aus einer aktuellen Erfassung auf der Verlaufslinie liegt. Dabei wird angenommen, dass sich in den aktuellen merkmalspezifischen Zustandsgrößen bzw. -werten einer Radwegbefestigung alle Faktoren abbilden, die, wie z. B. die Bauweise, der Ausbauzustand, die Qualität der Bauausführung oder die vorhandene Klimabeanspruchung, Einfluss auf die Zustandsentwicklung haben.

Eine noch zuverlässigere Abschätzung des künftigen Zustandsverlaufs erscheint möglich, wenn neben dem Alter und den Zustandswerten einer aktuellen Erhebung auch (historische) Zustandswerte aus früheren Erfassungen vorliegen. In diesem Fall können der Typ und die den Verlauf der Verhaltensfunktion bestimmenden Koeffizienten mit Hilfe mathematisch-statistischer Verfahren (z. B. einer Regressionsanalyse) ermittelt werden. Allerdings muss dabei sichergestellt sein, dass identische Erhaltungsabschnitte der berücksichtigten Erfassungen korrekt zugeordnet sind und zwischenzeitlich keine Erhaltungsmaßnahmen erfolgten. Diese Voraussetzungen sind derzeit auch bei den Fahrbahnen noch nicht problemlos erfüllbar.

Wenn das Alter der Radwegbefestigung und eine Zustandsgröße bzw. ein Zustandswert bekannt sind, kann die Abschätzung der Zustandsentwicklung wie o. a. erfolgen. Wenn weder das Alter noch der Zustand vorliegt, muss der betreffende Erhaltungsabschnitt aus den Analysen zur Erhaltungsplanung ausgeschlossen werden. Wenn, wie bei den derzeitigen Datengrundlagen möglicherweise der Regelfall, nur einer der beiden Faktoren verfügbar ist, können mit Hilfe von standardisierten Verlaufsfunktionen für Merkmalsgruppen (s. u.) Aussagen zur Zustandsentwicklung abgeleitet werden. Auch bei relativ neuen Radwegdecken, die zum Zeitpunkt einer Zustandserfassung (z. B. ein Jahr nach einer Erneuerung) noch keinerlei Schäden zeigen, müssen derartige Standardfunktionen für die Zustandsfortschreibung angesetzt werden.

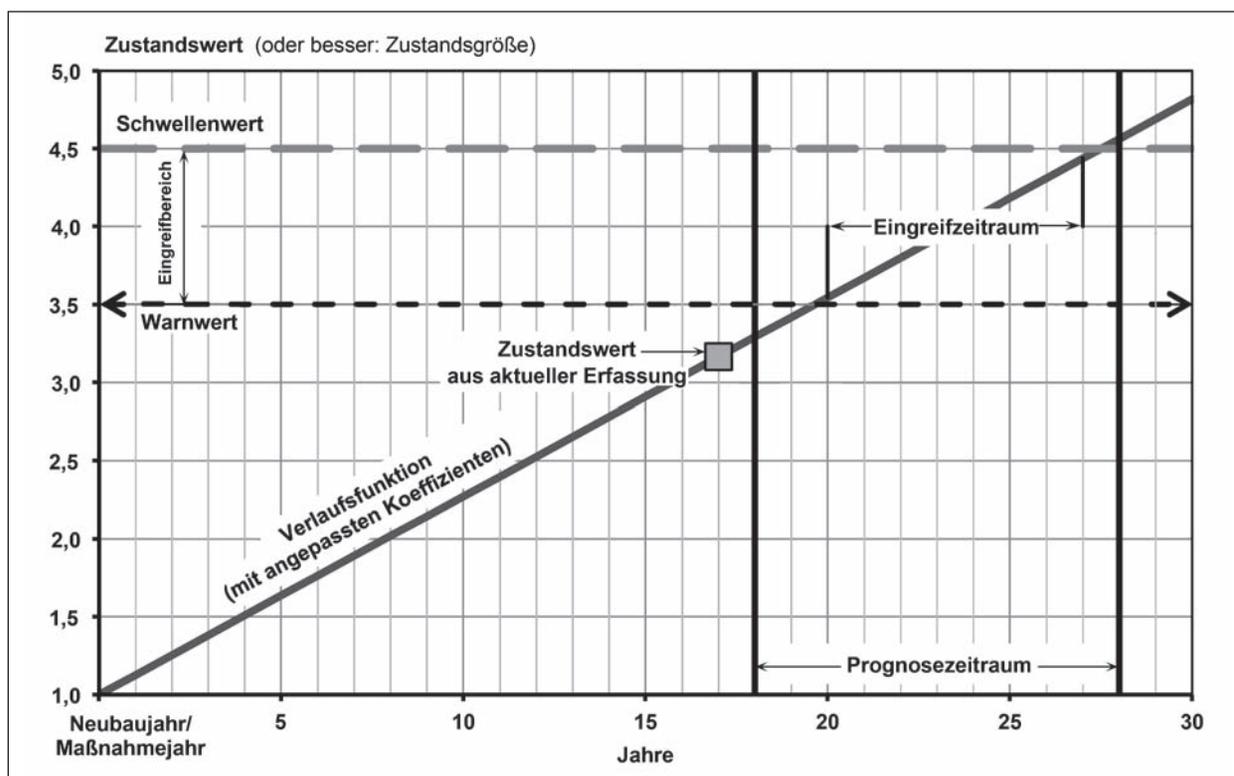


Bild 8-5: Schematische Darstellung zur Abschätzung der Zustandsentwicklung und des Eingreifzeitraums für einen Erhaltungsabschnitt und ein Zustandsmerkmal auf Basis des Neubau-/letzten Maßnahmejahrs und einer aktuellen Zustandserfassung

Wissenschaftlich abgesicherte Untersuchungsergebnisse zu Funktionen, die den Verlauf von Zustandsänderungen in Abhängigkeit von der Zeit (oder Nutzungseinheiten, z. B. Achslastübergängen) beschreiben, liegen auch für Fahrbahnen derzeit allenfalls ansatzweise vor [FGSV 2001b; HINSCH, KRAUSE, MAERSCHALK, RÜBENSAM 2005; OERTELT 2007]. Auch aus diesem Grund wurde die Zustandsprognose für Fahrbahnen bei der Einführung des PMS auf der Basis von Zustandswerten und nicht, wie es plausibler wäre, auf der Basis von Zustandsgrößen konzipiert; auch derzeit werden im PMS für Fahrbahnen noch Zustandswerte berücksichtigt. Für Radwege sind zum Verlauf von Zustandsänderungen keinerlei Erfahrungswerte oder gar empirisch abgesicherte Ergebnisse bekannt. Daher erscheint es zweckmäßig, für die Zustandsprognose derzeit ebenfalls Zustandswerte heranzuziehen. Beim Neubau von Radwegen und unmittelbar nach Erhaltungsmaßnahmen kann dann mit relativ großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass der Zustandswert bei 1,0 liegt. Bei der Verwendung von Zustandsgrößen wäre diese Ausgangssituation ohne ausreichende empirische Erkenntnisse wesentlich schwieriger einschätzbar.

Bei Radwegen fehlen, abgesehen von örtlich begrenzten befahrenen oder reparierten Abschnitten,

die Beanspruchungen durch Verkehrslasten, die bei den Fahrbahnen, insbesondere in Form des Schwerverkehrs, wesentlich zu den Zustandsverschlechterungen beitragen. Für die Radwege kommen demgemäß als Ursachen für Zustandsverschlechterungen hauptsächlich die folgenden Faktoren in Betracht:

- Witterungs- und sonstige Umwelteinflüsse;
- Baustoffeigenschaften und Bedingungen beim Einbau der Radwegbefestigung (z. B. Mischguttemperatur und -zusammensetzung, Regen und/oder zu niedrige Temperaturen beim Einbau);
- die Qualität der Bauausführung beim Einbau der Radwegbefestigung (z. B. Verdichtung, Gleichmäßigkeit der Schichtdicken u. Ä.).

Witterungs- und sonstige Umwelteinflüsse können als Einflussfaktoren zur Beschreibung von Zustandsänderungen über einen Prognosezeitraum nicht herangezogen werden, da eine notwendige kleinräumige (abschnittsbezogene) Vorhersage ihrer eigenen zeitlichen Entwicklung nicht möglich ist. Baustoffeigenschaften und Bedingungen sowie die Qualität der Bauausführung beim Einbau können durch Bohrkernentnahmen und Laborunter-

suchungen evtl. für einzelne Abschnitte, nicht aber netzweit ermittelt werden. Die fehlenden bzw. netzweit nicht ermittelbaren Einflussfaktoren und die Tatsache, dass Verkehrslasten bei Radwegen allenfalls örtlich-punktuell von Bedeutung sind, haben zwangsläufig zur Folge, dass zur Beschreibung der Zustandsverschlechterungen von Radwegen

- als Einflussfaktor ersatzweise die Liegezeit anzunehmen ist und
- die Zustandsentwicklungen in Abhängigkeit davon abschnittsweise mit Hilfe erfasster Zustandsdaten darzustellen sind (s. Bild 8-5).

Die Erfahrung zeigt, dass Radwege im Laufe der Zeit vielfach thermisch bedingte Risse aufweisen oder ausmagern (Asphalt) bzw. verspröden (Beton), weil u. a. die Walkwirkung durch Kfz-Räder fehlt. In späteren Stadien ist bei ungestörtem Zustandsverlauf sowohl bei Rissen als auch bei Ausmagerungen/Versprödungen mit Materialverlusten z. B. in Form von Ausbrüchen zu rechnen. Materialverluste beeinträchtigen die Ebenheit, sodass auch größere Vertikalbeschleunigungen zu erwarten sind. Es lässt sich derzeit allerdings nur vermuten, wie sich der Zustand der einzelnen Merkmale im Zeitablauf entwickelt, d. h., ob eher ein progressiver, linearer oder degressiver Verlauf anzunehmen ist. Es wird daher vorgeschlagen, so lange von einer linearen Entwicklung auszugehen, bis andere fundierte Erkenntnisse vorliegen. Der Zustandsverlauf kann dann wie folgt beschrieben werden:

$$ZW_{i,j}(t) = 1 + a_{i,j} \cdot t^{b_{i,j}}$$

mit

$ZW_{i,j}$ Zustandswert für das Merkmal i und Erhaltungsabschnitt j

t Zeit seit Neubau/letzter Erhaltung in Jahren

$a_{i,j}$, $b_{i,j}$ Verlaufs-Koeffizienten (Zustandsmerkmal i , Erhaltungsabschnitt j)

Bei linearem Verlauf gilt stets:

$$b_{i,j} = 1$$

Für die merkmals- und abschnittsspezifischen Koeffizienten gilt:

$$a_{i,j} = (ZW_{Z,i,j} - 1)/t_Z$$

mit

$ZW_{Z,i,j}$ Zustandswert für das Merkmal i , Erhaltungsabschnitt j zum Zeitpunkt der Zustandserfassung Z

t_Z Jahre seit Neubau/letzter Erhaltung bis zur Zustandserfassung Z

Für die Definition von Standardfunktionen muss vorgegeben werden, in welchem Jahr voraussichtlich ein bestimmter Zustand erreicht ist. Der Koeffizient a kann dann sinngemäß nach der o. a. Beziehung ermittelt werden. So gilt z. B. bei der Annahme

- Erreichen des Schwellenwerts von 4,5 nach 30 Jahren: $a = 0,117$,
- Erreichen des Schwellenwerts von 4,5 nach 20 Jahren: $a = 0,175$.

Aufgrund der o. a. Arten der im Zeitablauf zu erwartenden Schäden und der weitestgehend fehlenden Beanspruchung durch Verkehrslasten wird vorgeschlagen, bis zum Vorliegen fundierter Erkenntnisse folgende Standardfunktionen zu verwenden:

- für Radwege mit Asphaltdecken und Radwege mit Betondecken, die einen standardisierten (oder vergleichbaren) Aufbau aufweisen, die erstgenannte Version (4,5 nach 30 Jahren: $a = 0,117$),
- für Radwege mit Asphaltdecken und Radwege mit Betondecken, die einen nicht standardisierten Aufbau aufweisen, und Radwege mit wassergebundenen Decken die zweitgenannte Version (4,5 nach 20 Jahren: $a = 0,175$).

Eine separate zeitliche Fortschreibung der Zustandswerte der Substanzmerkmale, d. h. der Risse, Flickstellen, Ausmagerungen bei Asphaltdecken bzw. der Längs-/Querrisse, (bituminösen) Flickstellen, Kantenschäden und Nester/Abplatzungen bei Betondecken, ist schwierig, wenn nicht gar unmöglich. Das liegt vor allem daran, dass vielfach Maßnahmen der baulichen Unterhaltung wie z. B. „Flicken“ oder „Vergießen von Rissen“ durchgeführt werden. Die durch das ursprünglich erfasste Zustandsmerkmal charakterisierten Schäden, z. B. Risse, werden dann anderen Zustandsmerkmalen, z. B. Flickstellen, zugewiesen. Da es, auch bei Fahrbahnen, bisher nicht möglich ist, Maßnahmen der baulichen Unterhaltung vollständig und örtlich präzise zu dokumentieren, erscheint es sinnvoll, die Substanzmerkmale gemeinsam zu prognostizieren. Ein Ausdruck, der alle Substanzmerkmale verknüpft, ist der Substanzwert TWSUB (s. Kapitel 7.4). Es wird daher vorgeschlagen, die o. a. Funktionsparameter für TWSUB anzuwenden. Die Zu-

standsfortschreibung vereinfacht sich damit erheblich, da zusätzlich nur noch die Entwicklung der für die Längsebenheit repräsentativen Wirkgröße „Vertikalbeschleunigung“, die identisch mit dem Gebrauchswert TWGEB ist, abgeschätzt werden muss.

8.4.4 Auswahl der zur Erhaltung anstehenden Abschnitte und Eingreifzeitraum

Nach der Prognose der Zustandsentwicklung können für die Erhaltungsabschnitte die möglichen Eingreifjahre im Prognosezeitraum bestimmt werden. Wie Bild 8-5 zeigt, muss dazu ein Eingreifbereich festgelegt werden, der prinzipiell frei wählbar ist und für die Zustandsmerkmale und die Erhaltungsmaßnahmearten unterschiedlich sein kann. Der Eingreifzeitraum umfasst die Jahre des Prognosezeitraums, für die Erhaltungsmaßnahmen analysiert werden.

Entsprechend den Definitionen der Skala für die Zustandsbewertung (s. Kapitel 6.4) wird der Eingreifbereich durch den Warnwert bei 3,5 und den Schwellenwert bei 4,5 begrenzt. Mit dieser Begrenzung kann der Eingreifzeitraum auf Basis der angesetzten Verlaufsfunktion zur Beschreibung der Zustandsentwicklung eindeutig definiert werden (s. Bild 8-5).

8.4.5 Ermittlung der bautechnisch möglichen Erhaltungsmaßnahmearten

Bei der Ermittlung der bautechnisch möglichen Erhaltungsmaßnahmearten ist zunächst der triviale Fall auszuschließen, dass Maßnahmen für Asphaltdecken bei Radwegen mit Betondecken analysiert werden (und umgekehrt). Prinzipiell sind alle den jeweiligen Bauweisen zugeordneten Maßnahmearten (s. dazu Bild 8-8) zu berücksichtigen.

Falls spezielle Informationen zur örtlichen Situation vorliegen, können einzelne Erhaltungsmaßnahmearten ausgeschlossen werden. Das betrifft z. B. Hocheinbaumaßnahmen, wenn bekannt ist, dass strikte Höhenbindungen vorhanden sind.

8.4.6 Mängelanalyse zur Ermittlung der wahrscheinlichen Schadensursache(n)

Sofern ausreichend Finanzmittel verfügbar sind, sollte angestrebt werden, mit einer Erhaltungsmaßnahme nicht nur die Oberflächeneigenschaften zu

verbessern, sondern möglichst auch die zugrunde liegende Schadensursache (bzw. Schadensursachen) zu beheben. Dazu muss die Schadensursache bekannt sein.

Schadensursachen können am sichersten mit Bohrkernentnahmen und Laboranalysen ermittelt werden. Dies ist allerdings nur für aktuell zur Erhaltung anstehende Erhaltungsabschnitte möglich, nicht aber für Abschnitte, die aktuell noch keine Schäden aufweisen und erst in der Zukunft erhaltungsbedürftig werden. Für diese Abschnitte müssen auf der Grundlage vorhandener bzw. zeitlich fortgeschriebener Informationen wahrscheinliche Schadensursachen abgeschätzt werden.

Zur Bestimmung wahrscheinlicher Schadensursachen stehen Zustands- und Bauweisedaten zur Verfügung. Für die Kennzeichnung der Schadensursachen können sog. Mängelklassen dienen. Für die Fahrbahnen wurde zur Abgrenzung derartiger Mängelklassen ein eigenständiges Forschungsprojekt durchgeführt [KRAUSE 2000], was bei den Radwegen aufgrund der etwas weniger komplexen Ausgangssituation für ein erstes Grobkonzept nicht unbedingt erforderlich scheint.

Für die Abgrenzung von Mängelklassen bei Radwegen werden folgende Angaben benötigt:

- die Deckenarten (Asphalt, Beton(-pflaster), wassergebunden),
- das Alter der Befestigung (evtl. geschätztes Alter),
- die aktuellen und zeitlich fortgeschriebenen Zustandswerte der für Schadensanalysen relevanten Zustandsmerkmale, die in Bild 8-6 bauweisebezogen aufgeführt sind (vgl. auch Kapitel 7.4).

Zustandsmerkmale	Bauweisen
Vertikalbeschleunigung (Längsebenheit)	alle Bauweisen
Risse Längs-/Querrisse	Asphalt Beton(-pflaster)
Flickstellen Flickstellen/bitum. Teilersatz	Asphalt Beton(-pflaster)
Ausmagerung/Splittverlust Kantenschäden	Asphalt Beton(-pflaster)
Ausbrüche Nester/Abplatzungen Materialverluste (Ausbrüche)	Asphalt Beton(-pflaster) wassergebunden

Bild 8-6: Relevante Zustandsmerkmale zur Mängelklassenbildung

Für eine erste Konzeption von Mängelklassen der Radwege werden, auch wegen des entsprechenden Vorschlags zur Zustandsfortschreibung (s. Kapitel 8.4.3), vereinfachend verknüpfte Zustandswerte, d. h. der Gebrauchswert TWGEB und der Substanzwert TWSUB, herangezogen. Dabei ist der Gebrauchswert TWGEB unabhängig von der Bauweise identisch mit dem zur Beurteilung der Ebenheitswirkungen verwendeten Zustandswert der Vertikalbeschleunigung. Der Substanzwert TWSUB verknüpft, je nach Bauweise, die Risse und die restlichen in Bild 8-6 aufgeführten Oberflächenschäden (s. dazu auch Kapitel 6.4.2).

Schadensursachen und Mängelklassen werden nur ermittelt, wenn die mit den aktuell erfassten oder den prognostizierten Zustandswerten bestimmten Teilwerte TWGEB bzw. TWSUB in einem Bereich liegen, für den Erhaltungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden. Dieser Zustandsbereich beginnt definitionsgemäß mit dem Warnwert von 3,5. Bei der Abgrenzung von Mängelklassen wird daher jeweils ein bestimmter Teilwert in den Mittelpunkt gestellt („Hauptbedingung“) und logisch mit einer „Nebenbedingung“, z. B. dem Befestigungsalter oder dem anderen Teilwert, verknüpft. Bild 8-7 veranschaulicht und beschreibt das aus diesen Verknüpfungen gebildete Grobkonzept für Mängelklassen.

Das in Bild 8-7 dargestellte Grobkonzept für die Abgrenzung von Mängelklassen bei Radwegen basiert auf den folgenden Annahmen:

- Ausgeprägte Vertikalbeschleunigungen sind auf Unebenheiten zurückzuführen, die, sofern sie nicht schon einbaubedingt sind (z. B. bei Handeinbau), nur auf kurzen, von Kfz überquerten Radwegeabschnitten aus Verkehrsbeanspruchungen resultieren. Die Hauptursachen für Unebenheiten bei Radwegen sind Setzungen des Untergrunds und/oder Nachverdichtungen der ungebundenen oder auch gebundenen Befestigungsschichten.

Bei verbreiteten Oberflächenschäden (TWSUB $\geq 3,5$), z. B. Ausbrüchen, Abplatzungen oder schlecht ausgeführten Flickstellen, sind zusätzlich oder auch ausschließlich daraus resultierende Vertikalbeschleunigungen wahrscheinlich. Eine eindeutige Zuordnung, ob Vertikalbeschleunigungen auf mulden-/wellenartige Verformungen bzw. Stufen oder auf die genannten Oberflächenschäden zurückzuführen sind, ist allenfalls bei einer Sonderauswertung von Höhenlängsprofilen (z. B. als „Bewertetes Längsprofil“ [UECKERMANN 2005]), nicht aber bei einer darauf basierenden Planografen-Simulation oder bei direkter Erfassung von Beschleunigungen möglich. Eine separate Mängelklasse „ausgeprägte Vertikalbeschleunigungen infolge von Oberflächenschäden“ kann somit nicht eindeutig abgegrenzt werden, zumal es auch eher unwahrscheinlich ist, dass bei unebenen Radwegeabschnitten keinerlei Verformungen infolge von Setzungen/Nachverdichtungen vorhanden sind.

Die Konstellationen mit verbreiteten Rissen/Oberflächenschäden werden mit gesonderten Mängelklassen abgedeckt (s. Bild 8-7).

- Setzungen und Nachverdichtungen werden i. Allg. im Zeitablauf seltener und geringer. Das für die Mängelklassenabgrenzung angenommene Alter von 15 Jahren wurde mangels besserer, aus Wissenschaft oder Erfahrung abgeleiteter Werte pragmatisch unter Berücksichtigung der Tatsache gesetzt, dass auch die Liegezeit von Radwegebefestigungen vielfach nur geschätzt werden kann. Wie die Bilder 8.9 und 8.10 zeigen, wird dadurch auch die Maßnahmenauswahl beeinflusst.
- Bei den Mängelklassen für verbreitete Risse/Oberflächenschäden (TWSUB $\geq 3,5$) ist es für eine Maßnahmenauswahl zweckmäßig, zwischen einer mittelmäßigen Ebenheit und einer guten/sehr guten Ebenheit zu unterscheiden (s. Bild 8-7).

Bedingung	Mängelklasse	Beschreibung
TWGEB $\geq 3,5$ Alter ≤ 15 Jahre, TWSUB beliebig	V_LE15	stark ausgeprägte Vertikalbeschleunigungen infolge Setzungen/Nachverdichtungen (bei TWSUB $\geq 3,5$ auch infolge von Oberflächenschäden)
TWGEB $\geq 3,5$ Alter > 15 Jahre, TWSUB beliebig	V_GT15	stark ausgeprägte Vertikalbeschleunigungen infolge Setzungen/Nachverdichtungen (bei TWSUB $\geq 3,5$ auch infolge von Oberflächenschäden)
TWSUB $\geq 3,5$ $2,0 \leq$ TWGEB $< 3,5$, Alter beliebig	RO_VM	verbreitet Risse und/oder Oberflächenschäden und deutlich ausgeprägte Vertikalbeschleunigungen infolge von Oberflächenschäden
TWSUB $\geq 3,5$ TWGEB $< 2,0$, Alter beliebig	RO_VG	verbreitet Risse und/oder Oberflächenschäden und schwach ausgeprägte Vertikalbeschleunigungen infolge von Oberflächenschäden

Bild 8-7: Grobkonzept zur Mängelklassenbildung

I1	Dünnschichtbelag, Schlämme (bei Asphalt)
I2t	Fräsen/Tiefereinbau einer 4-cm-Asphaltschicht
I2h	Hocheinbau einer 4 cm- Asphaltschicht
I2p	Umpflastern von Betonpflaster
E1t	Tiefereinbau einer Asphaltdecke
E1h	Hocheinbau einer Asphaltdecke
E1p	Tiefereinbau der Beton(pflaster)decke
E2t	Tiefereinbau (Neubau) Asphaltoberbau
E2p	Tiefereinbau (Neubau) Beton(pflaster)oberbau

Bild 8-8: Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmeanarten für Radwege

In Bild 8-8 sind die Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmeanarten für Radwege aufgeführt.

Ausgehend von Bild 8-8 enthalten Bild 8-9 (Asphaltdecken), Bild 8-10 (Betonpflasterdecken) und Bild 8-11 (wassergebundene Decken) die Maßnahmevorschläge zur Behebung der durch die jeweiligen Mängelklassen kategorisierten Schadensursachen.

Die Zuordnung von Mängelklassen und Maßnahmeanarten hängt bei den Radwegen mit Asphaltdecken und Betonpflasterdecken auch von der Einstufung des vorhandenen Befestigungsaufbaus (standardisiert bzw. vergleichbar, nicht standardisiert) ab. Beim Ansatz von Hocheinbaumaßnahmen für Asphaltdecken muss bekannt sein, inwieweit Höhenbindungen zu beachten sind; standardmäßig sind daher Tiefereinbaumaßnahmen gesetzt. Beim Umpflastern von Betonpflaster ist i. Allg. ein Ersatz von Platten erforderlich; der Anteil der zu ersetzenden Platten, der wesentlichen Einfluss auf die Maßnahmekosten hat, kann aus dem Prozentanteil mit Rissen und sonstigen Oberflächenschäden ermittelt werden. Bei wassergebundenen Decken mit stark ausgeprägten Unebenheiten (TWGEB) und/oder verbreiteten Oberflächenschäden (TWSUB = Zustandswert für Ausbrüche) besteht nur die Wahl zwischen (aufwändigen) Maßnahmen der baulichen Unterhaltung oder einer Erneuerung des Oberbaus (in Asphalt- oder Betonbauweise).

In den Bildern 8-9 bis 8-11 sind die Maßnahmen aufgeführt, die unmittelbare, durch Zustandskonstellationen, Alter und Grobeinstufung des Aufbaus in Form von Mängelklassen kategorisierte Schadensursachen beheben. Alternativ kommen bei Erhaltungsabschnitten einer bestimmten Mängelklasse i. Allg. auch andere Maßnahmen in Betracht, z. B. einfachere und kostengünstigere Maßnahmen aufgrund einer geringen Finanzmittelausstattung

Asphaltdecken		
Mängelklasse	standardisiert (+ vergleichbar)	nicht standardisiert
V_LE15	E2t	E2t
V_GT15	E1t (evtl. E1h)	E2t
RO_VM	I2t (evtl. I2h)	E1t (evtl. E1h)
RO_VG	I1	I2t (evtl. I2h)

Bild 8-9: Mängelklassen und Maßnahmeanarten zur Behebung der Schadensursachen für Radwege mit Asphaltdecken

Betonpflasterdecken		
Mängelklasse	standardisiert (+ vergleichbar)	nicht standardisiert
V_LE15	E2p	E2p
V_GT15	E1p	E2p
RO_VM	I2p	E1p
RO_VG	I2p	I2p

Bild 8-10: Mängelklassen und Maßnahmeanarten zur Behebung der Schadensursachen für Radwege mit Betonpflasterdecken

Mängelklasse	Wassergebundene Decken
alle	E2t oder E2p

Bild 8-11: Mängelklassen und Maßnahmeanarten zur Behebung der Schadensursachen für Radwege mit wassergebundenen Decken

oder auch tiefgründigere und teurere Maßnahmen aufgrund einer günstigeren Langzeitwirkung (s. Kapitel 8.4.7).

Wenn keine vergleichende Bewertung von Maßnahmeanalternativen vorgesehen ist, kann auch nur auf der Grundlage der Zuordnung zu Mängelklassen ein kurzfristiges Erhaltungsprogramm erstellt werden. Dabei kann wie folgt vorgegangen werden:

- Ermittlung der Erhaltungsabschnitte, die einen Gebrauchswert TWGEB und/oder einen Substanzwert TWSUB aufweisen, der gleich oder größer als der Warnwert von 3,5 ist.
- Zuordnung der Mängelklassen für diese Erhaltungsabschnitte gemäß Bild 8-7.
- Zuordnung der Erhaltungsmaßnahmeanarten in Abhängigkeit der Mängelklassen gemäß Bild 8-9 bis Bild 8.11.
- Ermittlung der Maßnahmekosten pro Erhaltungsabschnitt (s. Kapitel 9.4.7).

- Dringlichkeitsreihung der Erhaltungsabschnitte, z. B. in der Gruppenabfolge
 - $TWGE \geq 4,5$,
 - $TWSUB \geq 4,5$,
 - $4,0 \leq TWGE < 4,5$,
 - $4,0 \leq TWSUB < 4,5$,
 - $3,5 \leq TWGE < 4,0$,
 - $3,5 \leq TWSUB < 4,0$

und Sortierung innerhalb dieser Gruppen nach dem jeweils anderen Teilwert.
- Abarbeitung der Dringlichkeitsreihung entsprechend den jährlich verfügbaren Erhaltungsmitteln oder Auswahl der in den einzelnen betrachteten Jahren gewünschten Maßnahmen und Aufsummierung des erforderlichen Finanzbedarfs.

8.4.7 Kosten-Wirksamkeits-Bewertung von alternativen Erhaltungsmaßnahmearten

Wenn im Hinblick auf eine Optimierung von Erhaltungsprogrammen, d. h. im Hinblick auf eine Minimierung der Kosten und eine Maximierung des Nutzens, für die einzelnen Erhaltungsabschnitte alternative Erhaltungsmaßnahmearten analysiert werden sollen, ist eine vergleichende Bewertung dieser Alternativen erforderlich. Bei einer derartigen Bewertung werden dementsprechend die Kosten und der Nutzen (bzw. Wirkungen) der alternativen Erhaltungsmaßnahmearten ermittelt und verglichen. Getrennt zu betrachten sind dabei nur alternative Maßnahmearten, die sich in ihren Kosten und/oder ihren Wirkungen unterscheiden. Haben z. B. zwei Alternativen identische Wirkungen, aber unterschiedliche Kosten, wird stets die kostengünstigere Alternative besser bewertet.

Bei der Bewertung der für die Erhaltungsabschnitte technisch möglichen Erhaltungsmaßnahmearten werden Kosten und Nutzen bzw. Wirkungen des Planungsfalls „mit“ Maßnahme dem Vergleichsfall „ohne“ Maßnahme gegenüber gestellt. Mit Erhaltungsmaßnahmen soll der Zustand verbessert werden; daher stehen in beiden Fällen die Änderungen im Mittelpunkt, die sich im Zustand ergeben. Es wird geprüft, inwieweit die höheren Kosten im Planungsfall „mit“ Maßnahme durch die Verbesserungen im Zustand gegenüber dem Vergleichsfall „ohne“ Maßnahme gerechtfertigt sind.

Die Bewertung der Nutzen alternativer Maßnahmearten kann in monetärer Form oder qualitativ in Form einer Maßnahmewirksamkeit erfolgen. Die vorliegenden Richtlinien für die monetäre Bewertung von Ausbaumaßnahmen (z. B. EWS-97) sind mit ihren derzeitigen Ansätzen auch bei den Fahrbahnen noch nicht für den Bereich der Erhaltung verwendbar. Daher wird momentan eine qualitative Wirksamkeitsbewertung angewendet. Diese qualitative Bewertung kann durch einen Vergleich der durch die Verläufe der einzelnen Zustandsmerkmale „ohne Maßnahme“ und „mit Maßnahme“ abgegrenzten Flächen („unter den Verhaltenskurven“) vorgenommen werden. Die daraus abgeleitete Wirksamkeit von Erhaltungsmaßnahmen kann anschließend mit den jeweiligen Kosten verglichen werden. Voraussetzung dafür ist, dass Maßnahmekosten und Maßnahmewirkungen quantifiziert werden können.

Maßnahmekosten

Als Maßnahmekosten gelten nachfolgend alle Aufwendungen, die für den Straßenbaulastträger bei Instandsetzungen oder Erneuerungen anfallen. Bei den Fahrbahnen werden dafür regionalisierte Einheitskosten (i. Allg. Euro/m²) herangezogen, die aus einer mehrfach überprüften und aktualisierten Basis-kalkulation verschiedener Straßenbauunternehmen stammen und mit dem bei vielen Straßenbauverwaltungen verfügbaren Programm „ECost“ berechnet werden können [OEFNER, KRMEK, NUSSRAINER 2004]. In Bild 8-12 sind die dabei in den Maßnahmekosten enthaltenen Einzelkomponenten aufgelistet. Bei ihrer Ermittlung wurden zu den Teilleistungen für die Maßnahmedurchführung spezifische vereinfachte Leistungskataloge vorgegeben.

Die Version des Programms „ECost“ [OEFNER, KRMEK, NUSSRAINER 2004] stand bereits 2003 zur Verfügung. Zwischenzeitlich erfolgte eine Aktualisierung der Kostendaten [ZANDER, BIRBAUM 2011] unter Berücksichtigung der Bauloslängen. Die Ergebnisse dieser Aktualisierung weichen bei der überwiegenden Anzahl der Erhaltungsmaßnahmearten nicht oder nur geringfügig von bereits 2003 verfügbaren Kostenwerten ab, sodass diese nach Anpassung mit den Baupreisindizes des Statistischen Bundesamtes an den jeweiligen Kostenstand weiterhin herangezogen werden können.

Zu Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen von Radwegen gibt es keine Kostenwerte aus einer der Basiskalkulation entsprechenden Erhebung.

Summe der Einzelkosten der Teilleistungen für die Maßnahmedurchführung
+ Baustellenkosten (Einrichten/Räumen)
+ Kosten der Verkehrsführung
= Unmittelbare Herstellungskosten
+ Gemeinkosten der Baustelle (Bauleitung, Abrechnung, Versicherungen usw.)
= Herstellkosten
+ Allgemeine Geschäftskosten (3 %)
= Selbstkosten
+ Zuschlag für Wagnis und Gewinn (5 %)
= Angebotssumme – netto
+ Mehrwertsteuer (19 %)
= Angebotsendsumme

Bild 8-12: Zusammensetzung der Kosten für Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmearten [OEFNER, KRMEK, NUSSRAINER 2004]

Mit einer Erhebung der Kosten von durchgeführten Maßnahmen bei Straßenbauverwaltungen, die hier aus Aufwandsgründen nicht möglich ist, könnte zumindest eine größenordnungsmäßige Abschätzung erfolgen, wobei allerdings die erfassten Werte konjunktur- und saisonbedingte Einflüsse aufweisen und damit letztlich keine Kosten, sondern Preise repräsentieren.

Um erste Anhaltswerte für Maßnahmekosten bei Radwegen abzuschätzen, muss auf die vorliegenden Kostenwerte für Fahrbahnen zurückgegriffen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass

- die Verkehrsführung/-sicherung bei Radwegen weniger aufwändig sind als bei Fahrbahnen,
- die Gemeinkosten der Baustelle (s. Bild 8-12) vermutlich niedriger sind als bei Fahrbahnen,
- aufgrund der vergleichsweise kleinen Flächen, auch wegen spezieller Geräteanforderungen (z. B. Fertiger), aber i. d. R. höhere flächenbezogene Kosten für die Maßnahmedurchführung anfallen.

In Bild 8-13 sind die unter Beachtung dieser Randbedingungen auf der Grundlage der Maßnahmekosten für Fahrbahnen von Landesstraßen ermittelten Schätzwerte der Einheitskosten (Euro pro m²) für Radwege zusammengestellt (Kostenstand: 01.01.2010). Wie schon erwähnt, müssen die Kostenwerte durch Erhebungen bei Straßenbauverwaltungen verifiziert werden. Dies betrifft insbesondere die Einheitswerte für Betonpflaster, z. B. für das Umpflastern von Betonpflaster mit einem exemplarisch angenommenen Materialersatz von 30 %, da diese Bauweise bei den Fahrbahnen unterrepräsentiert ist.

Maßnahmeart		€/m ²
I1	Dünnschichtbelag (Asphalt)	5,75
I2t	Tiefereinbau 4-cm-Asphaltschicht	12,00
I2h	Hocheinbau 4-cm-Asphaltschicht	9,00
I2p	Umpflastern von Betonpflaster (30 % Materialersatz)	52,00
E1t	Tiefereinbau einer Asphaltdecke	21,50
E1h	Hocheinbau einer Asphaltdecke	16,50
E1p	Tiefereinbau Beton(-pflaster-)decke (= 100 % Umpflastern)	93,00
E2t	Tiefereinbau Asphaltoberbau	35,00
E2p	Tiefereinbau Beton(-pflaster-)oberbau	151,50

Bild 8-13: Erste Schätzwerte der Einheitskosten für Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmearten bei Radwegen

Maßnahmewirkungen

Mit Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen soll der Zustand von Radwegen verbessert werden. Bei der angestrebten Verbesserung können rein physikalisch die folgenden Maßnahmewirkungen unterschieden werden:

- die Verbesserung des vor der Maßnahmedurchführung vorhandenen, die jeweilige Maßnahme letztlich auslösenden Zustands („Rücksetzung“),
- die weitere Zustandsentwicklung nach einer Maßnahme.

Beide Komponenten sind abhängig vom Zustand und Zustandsverlauf „vor“ der Maßnahme und von der Art der durchgeführten Maßnahme.

Die Zustandsverbesserungen unmittelbar nach der Maßnahmedurchführung lassen sich durch das Ausmaß bestimmen, in dem die Zustandsgrößen oder -werte der einzelnen Merkmale vom schlechteren zum besseren Zustandsbereich zurückgesetzt werden. Dieses Ausmaß der Verbesserungen kann am genauesten durch eine Zustandserfassung bei der Abnahme einer Maßnahme festgestellt werden. Bei prognostizierten Maßnahmevorschlägen müssen Erfahrungswerte für das Zurücksetzen des Zustands herangezogen werden. Für Fahrbahnen liegen erste empirische Erkenntnisse zu Rücksetzwerten vor [HINSCH, KRAUSE, MAERSCHALK, RÜBENSAM, 2005, OERTELT 2007]. Für die Radwege muss auf diese Erkenntnisse zurückgegriffen werden.

Wie in Kapitel 8.4.3 erläutert, ist es bei dem derzeitigen Erkenntnisstand zweckmäßig, Zustandsfort-

schreibungen auf der Basis von Zustandswerten vorzunehmen. Die Rücksetzung muss daher für Zustandswerte erfolgen. Dabei gibt es die folgenden Möglichkeiten:

- absolute Rücksetzung auf einen maßnahmeabhängigen definierten Zustandswert $Z_{j,R}$ (z. B. auf $Z_{i,j,R} = 1,5$ oder $Z_{i,j,R} = 2,0$ für Zustandsmerkmal i und Abschnitt j),
- absolute Rücksetzung um einen maßnahmeabhängigen Anteil der maximal möglichen Rücksetzung, d. h. bei einer Notenskala von $Z_{\min} = 1,0$ bis $Z_{\max} = 5,0$ um einen Anteil von $Z_{\max} - Z_{\min} = 4,0$ (z. B. bei Anteil von 25 % Rücksetzung um eine Note),
- relative Rücksetzung um einen definierten maßnahmeabhängigen Anteil des Zustandswerts vor der Maßnahme.

Eine absolute Rücksetzung auf einen maßnahmeabhängigen definierten Zustandswert ist wenig flexibel, da der Ausgangszustand vor der Maßnahme unberücksichtigt bleibt. Für eine absolute Rücksetzung um einen maßnahmeabhängigen Anteil der maximal möglichen Rücksetzung gilt:

$$Z_{i,j,R,m} = \text{Max}(1,0; Z_{i,j} - (Z_{\max} - Z_{\min}) \cdot P_m/100)$$

Für eine relative Rücksetzung um einen definierten maßnahmeabhängigen Anteil des Zustandswerts vor der Maßnahme gilt:

$$Z_{i,j,R,m} = Z_{i,j} - (Z_{i,j} - 1) \cdot P_m/100$$

mit

$Z_{i,j,R}$ Zustandswert für Merkmal i und Abschnitt j nach der Rücksetzung für Maßnahme m

$Z_{i,j}$ Zustandswert für vor der Maßnahme (Merkmal i , Abschnitt j)

Z_{\max} maximaler Zustandswert (5,0)

Z_{\min} minimaler Zustandswert (1,0)

P_m Rücksetzanteil der Maßnahmeart m in %

Für Radwege scheint bei dem derzeitigen Kenntnisstand eine absolute Rücksetzung um einen maßnahmeabhängigen Anteil der maximal möglichen Rücksetzung zweckmäßig. Bild 8-14 enthält die auf Basis der Rücksetzungen für Fahrbahnen abgeleiteten Vorschläge zu den maßnahmeabhängigen Rücksetzanteilen. Aufgrund der derzeitigen Verfahrensweise bei der Zustandsfortschreibung

Maßnahmeart		Ebenheit	Risse, Schäden
		Rücksetzung [%]	
I1	Dünnschichtbelag (Asphalt)	25	100
I2t	Tiefeinbau 4-cm-Asphalt	75	100
I2h	Hocheinbau 4-cm-Asphalt	50	100
I2p	Umpflastern Betonpflaster	100	P_{ME}
E1t	Tiefeinbau Asphaltdecke	100	100
E1h	Hocheinbau Asphaltdecke	90	100
E1p	Tiefeinbau Betondecke	100	100
E2t	Tiefeinbau Asphaltoberbau	100	100
E2p	Tiefeinbau Betonoberbau	100	100

Bild 8-14: Rücksetzanteile der Maßnahmearten bei Radwegen (P_{ME} = Prozentanteil Materialersatz)

(s. Kapitel 8.4.3) werden mit diesen Anteilen direkt die Teilwerte zurückgesetzt, d. h. TWGEB (= Vertikalbeschleunigung = Längsebenheit) und TWSUB (= Risse und sonstige Schäden).

Bild 8-15 veranschaulicht schematisch die Rücksetzung und den Zustandsverlauf nach einer Erhaltungsmaßnahme m für ein Zustandsmerkmal i und einen Erhaltungsabschnitt j . Es wird erkennbar, dass der in Bild 8-15 gestrichelt fortgesetzte Zustandsverlauf ohne Maßnahme, anders als in der Realität, aufgrund der geschlossenen Skala für die Zustandsbewertung bei 5,0 endet. Diese Begrenzung wird für die nachfolgend erläuterte Wirksamkeitsbewertung von Maßnahmen aufgehoben, d. h., es werden rechnerisch Werte $> 5,0$ zugelassen.

Bei der qualitativen Bestimmung der MaßnahmeWirksamkeit werden die Flächen „unter den Verlaufskurven“ der einzelnen Zustandsmerkmale i für einen Abschnitt j für den „Nichts-tun“-Fall ohne Maßnahme und für den Planungsfall mit Maßnahme ermittelt und verglichen. Als qualitatives Maß für die Wirksamkeit einer Erhaltungsmaßnahme wird die Differenz dieser Flächen herangezogen, die das Ausmaß der Zustandsverbesserung vom Zeitpunkt einer Maßnahme t_m bis zum Ende des Betrachtungszeitraums t_b kennzeichnet. Die Zustandsänderungen nach der Maßnahmedurchführung beschreiben, in welchem Ausmaß sich der Zustand der einzelnen Merkmale im Zeitablauf wieder verschlechtert und wann der kritische Zustandsbereich erneut erreicht wird. Empirisch abgesicherte Verhaltensfunktionen für den Zustandsverlauf nach den einzelnen Erhaltungsmaßnahmearten können derzeit auch bei Fahrbahnen noch nicht angegeben

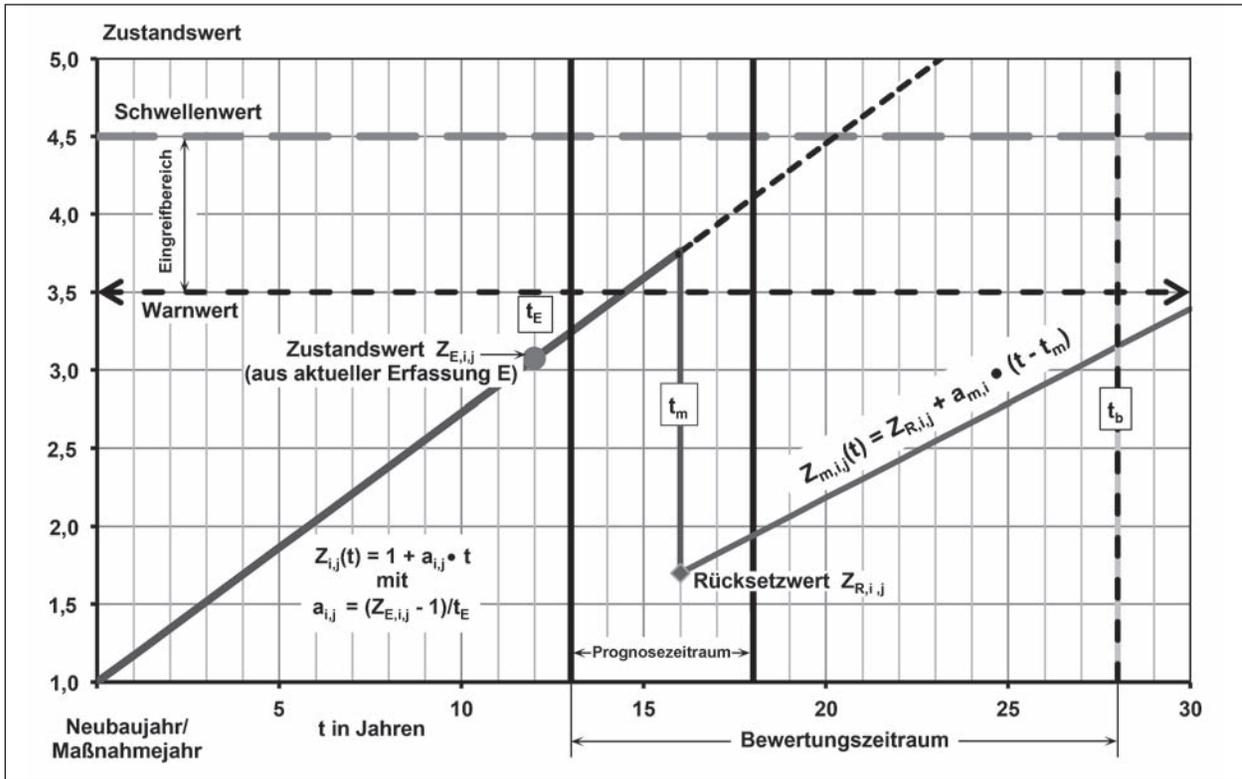


Bild 8-15: Schematische Darstellung der Rücksetzung und des Zustandsverlaufs nach einer Erhaltungsmaßnahme

Verhaltensklasse	Zustandsverschlechterung	Standardfunktion (alle Merkmale i)
1	langsam	$Z_i = Z_S + 0,083 \cdot t_S$
2	mittel	$Z_i = Z_S + 0,125 \cdot t_S$
3	schnell	$Z_i = Z_S + 0,250 \cdot t_S$
4	sehr schnell	$Z_i = Z_S + 0,500 \cdot t_S$
Dabei gilt (siehe Bild 8-15)		
vor Maßnahmen: $Z_S = 1$ $t_S = t$		
nach Maßnahmen: $Z_S = Z_{R,i}$ $t_S = (t - t_m)$		

Bild 8-16: Vorschlag zur Definition von Verhaltensklassen für Radwege

werden. Eine Möglichkeit, den Zustandsverlauf nach Maßnahmen für die einzelnen Merkmale zu bestimmen, besteht darin,

- eine Verhaltensklasse vor der Maßnahme mit ihrer zugehörigen Standardfunktion zu ermitteln und
- diese Verhaltensklasse in Abhängigkeit von der jeweiligen Maßnahmenteart und dem Ausmaß, in dem die durch Mängelklassen gekennzeichneten Schadensursachen beseitigt werden, ggf. zu verändern. Für die Beschreibung des Zustandsverlaufs nach Maßnahmen kommt dann die Standardfunktion der veränderten Verhaltensklasse zum Ansatz.

Bild 8-16 enthält einen ersten Vorschlag zur Definition von vier Verhaltensklassen (Vkl) für Radwege.

Für die praktische Anwendung wird zunächst (pro Merkmal i und Erhaltungsabschnitt j) diejenige Verhaltensklasse rechnerisch ermittelt, die den Zustandsverlauf vor einer Maßnahme am besten repräsentiert. Diese Verhaltensklasse dient als Basis für die Beschreibung des Zustandsverlaufs nach einer Maßnahme. Je nach Mängelklasse und Maßnahmenteart (und Merkmal i) erfolgt nach Maßnahmen eine Beibehaltung oder eine Rücksetzung der Verhaltensklasse. Zur Beschreibung des Zustandsverlaufs nach Maßnahmen dient die jeweilige Standardfunktion (s. Bild 8-16) der beibehaltenen bzw. zurückgesetzten Verhaltensklasse. Mit dieser Verfahrensweise sollen nur die Voraussetzungen für eine Bewertung von Maßnahmewirkungen geschaffen, nicht aber Zeitpunkte für Folgemaßnahmen ermittelt werden.

Bild 8-17 bis Bild 8-19 enthalten erste Vorschläge zur Rücksetzung der Verhaltensklassen in Abhängigkeit von Bauweisen, Mängelklassen und Maßnahmentearten.

Nach der Abschätzung der Zustandsentwicklung „nach“ Maßnahmen durch Rücksetzung und Modifikation der Verhaltensklasse kann ermittelt werden,

Asphaltdecken			
Mängelklasse	Maßnahme	standardisiert (vergleichbar)	nicht standardisiert
V_LE15	I1	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	I2t	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	I2h	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	E1t	$V_N = \max(1; V_0 - 2)$	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$
	E1h	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$	$V_N = V_0$
	E2t	$V_N = 1$	$V_N = 1$
V_GT15	I1	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	I2t	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$	$V_N = V_0$
	I2h	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	E1t	$V_N = 1$	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$
	E1h	$V_N = \max(1; V_0 - 2)$	$V_N = V_0$
	E2t	$V_N = 1$	$V_N = 1$
RO_VM	I1	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	I2t	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$	$V_N = V_0$
	I2h	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$	$V_N = V_0$
	E1t	$V_N = 1$	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$
	E1h	$V_N = 1$	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$
	E2t	$V_N = 1$	$V_N = 1$
RO_VG	I1	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	I2t	$V_N = \max(1; V_0 - 2)$	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$
	I2h	$V_N = \max(1; V_0 - 2)$	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$
	E1t	$V_N = 1$	$V_N = 1$
	E1h	$V_N = 1$	$V_N = \max(1; V_0 - 2)$
	E2t	$V_N = 1$	$V_N = 1$

Bild 8-17: Verhaltensklassen nach Maßnahmen für Asphaltdecken (V_0 = Verhaltensklasse vor Maßnahme, V_N = Verhaltensklasse nach Maßnahme)

wie sich der Zustand infolge der jeweiligen Erhaltungsmaßnahmen innerhalb eines gewählten Bewertungszeitraums t_b verbessert hat. Das Ausmaß dieser Verbesserung lässt sich durch die Differenz der von den Verlaufslinien zur Beschreibung des Verhaltens „ohne“ („Nichts-tun“-Fall) und „mit“ Maßnahmen eingeschlossenen Flächen quantifizieren. Wie aus Bild 8-15 ersichtlich, gilt für ein Zustandsmerkmal i und einen Erhaltungsabschnitt j (Indices i und j werden nachfolgend nicht mitgeführt):

a) Nichts-tun-Fall „ohne“ Maßnahme

$$Z_{o,m}(t = t_m) = 1 + a_o \cdot t_m$$

$$Z_{o,b}(t = t_b) = 1 + a_o \cdot t_b$$

Beton(pflaster)decken			
Mängelklasse	Maßnahme	standardisiert (vergleichbar)	nicht standardisiert
V_LE15	I2p	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	E1p	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$	$V_N = V_0$
	E2p	$V_N = 1$	$V_N = 1$
V_GT15	I2p	$V_N = V_0$	$V_N = V_0$
	E1p	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$	$V_N = V_0$
	E2p	$V_N = 1$	$V_N = 1$
RO_VM	I2p	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$	$V_N = V_0$
	E1p	$V_N = \max(1; V_0 - 2)$	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$
	E2p	$V_N = 1$	$V_N = 1$
RO_VG	I2p	$V_N = \max(1; V_0 - 1)$	$V_N = V_0$
	E1p	$V_N = 1$	$V_N = \max(1; V_0 - 2)$
	E2p	$V_N = 1$	$V_N = 1$

Bild 8-18: Verhaltensklassen nach Maßnahmen für Betonpflasterdecken (V_0 = Verhaltensklasse vor Maßnahme, V_N = Verhaltensklasse nach Maßnahme)

Wassergebundene Decken		
Mängelklasse	Maßnahme	
alle	E1p	$V_N = 1$
	E2p	$V_N = 1$

Bild 8-19: Verhaltensklassen nach Maßnahmen für wassergebundene Decken (V_N = Verhaltensklasse nach Maßnahme)

mit

$Z_{o,m}$ Zustandswert zum Zeitpunkt t_m einer Maßnahme

$Z_{o,b}$ Zustandswert zum Ende des Bewertungszeitraums t_b (Z_b ist evtl. $> 5,0$)

a_o Verlaufskoeffizient (für Merkmal i und Erhaltungsabschnitt j) zur Beschreibung der Zustandsentwicklung „ohne“ Maßnahme

b) „mit“ Maßnahme

$$Z_{m,m}(t = t_m) = Z_R$$

$$Z_{m,b}(t = t_b) = Z_R + a_m \cdot (t - t_b)$$

mit

Z_R Rücksetzwert zum Zeitpunkt t_m einer Maßnahme

$Z_{m,b}$ Zustandswert „mit“ Maßnahme zum Ende des Bewertungszeitraums t_b (Z_b ist evtl. $> 5,0$)

a_m Verlaufskoeffizient (für Merkmal i und Erhaltungsabschnitt j) zur Beschreibung der Zustandsentwicklung „mit“ Maßnahme

Für die Beurteilung der Maßnahmewirksamkeit ist die Flächendifferenz unter den Verlaufslinien ab dem Zeitpunkt der Maßnahme t_b bis zum Ende des Bewertungszeitraums t_m relevant. Es gilt (s. auch Bild 8-15):

a) Nichts-tun-Fall „ohne“ Maßnahme

$$F_o = (Z_{o,m} + Z_{o,b})/2 \cdot (t_b - t_m)$$

mit

F_o Fläche unter der Verlaufslinie „ohne“ Maßnahme

$Z_{o,m}$ Zustandswert zum Zeitpunkt t_m einer Maßnahme

$Z_{o,b}$ Zustandswert zum Ende des Bewertungszeitraums t_b (Z_b ist evtl. $> 5,0$)

b) „mit“ Maßnahme

$$F_m = (Z_R + Z_{m,b})/2 \cdot (t_b - t_m)$$

mit

F_m Fläche unter der Verlaufslinie „mit“ Maßnahme

Z_R Rücksetzwert zum Zeitpunkt t_m einer Maßnahme

$Z_{m,b}$ Zustandswert „mit“ Maßnahme zum Ende des Bewertungszeitraums t_b

Als Maß für die Wirksamkeit einer Maßnahme (für ein Zustandsmerkmal i und einen Erhaltungsabschnitt j) kann gesetzt werden:

$$\Delta F_{i,j} = F_{o,i,j} - F_{m,i,j}$$

Die Maßnahme mit der größten Flächendifferenz $\Delta F_{i,j}$ bringt für das jeweilige Zustandsmerkmal i und den betrachteten Erhaltungsabschnitt j die höchste Wirksamkeit. Wenn die Maßnahme gesucht wird, die für alle Merkmale zusammen die höchste Wirksamkeit bringt, müssen die Flächendifferenzen für die einzelnen Merkmale i addiert werden:

$$\Delta F_j = \sum_i \Delta F_{i,j}$$

Die Maßnahme mit der größten Flächendifferenz ΔF_j bringt für den betrachteten Erhaltungsabschnitt

j unter Berücksichtigung aller Zustandsmerkmale die höchste Wirksamkeit. Dabei werden die Zustandsmerkmale als gleich wichtig eingestuft. Wenn diesbezüglich noch Unterschiede berücksichtigt werden sollen, können die Flächendifferenzen der berücksichtigten Zustandsmerkmale auch gewichtet werden. Diese als „Fläche unter der Kurve“ ermittelte und mit der Länge des jeweiligen Erhaltungsabschnitts noch gewichtete Wirksamkeit ist ein qualitatives Maß für den Nutzen einer Erhaltungsmaßnahme.

Nach der Ermittlung der Kosten und der Wirksamkeit können die Maßnahmevarianten für jeden Erhaltungsabschnitt gereiht werden („Variantenreihung“). Aufgrund der unterschiedlichen Dimensionen eignet sich dafür insbesondere das Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis. Für jeden im Prognosezeitraum zur Erhaltung anstehenden Erhaltungsabschnitt ergibt sich, gekennzeichnet durch Maßnahmeart und Maßnahmejahr, eine Maßnahmevariante, die für einen speziellen homogenen Abschnitt das günstigste Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis hat.

8.4.8 Netzweite Optimierung von alternativen Erhaltungsmaßnahmearten

Die Frage, ob bei der Betrachtung eines gesamten Analysenetzes für jeden Erhaltungsabschnitt die Maßnahme mit dem jeweils besten Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis ausgewählt wird, hängt von den verfügbaren Finanzmitteln des Erhaltungsbudgets ab. Wenn dieses Budget begrenzt ist, können in der Regel nicht die nach den Wirksamkeits-Kosten-Verhältnissen günstigsten, sondern nur die im Budgetrahmen optimalen Maßnahmen vorgeschlagen werden. Derartige Finanzszenarien mit begrenzten Erhaltungsmitteln sind in der Praxis der Regelfall. Für eine objektive Auswahl der netzweit unter Budgetrestriktionen optimalen Maßnahmen muss ein Optimierungsverfahren angewendet werden.

Während alle bisher erläuterten Schritte der Erhaltungsplanung, zumindest bei kleineren Analysenetzen, auch mit Standardsoftware umsetzbar sind, wird dies bei einer Optimierung auch bei wenigen Erhaltungsabschnitten bereits problematisch. Im Regelfall ist es erforderlich, ein vorhandenes Optimierungsverfahren anzuwenden (zum Vergleich von Optimierungsverfahren s. HELLER, BÜHLER, JEUTHE 1997). Abhängig vom gewählten Verfahren ist dabei vor allem zu klären, welche Informationen übergeben werden müssen.

Bei den Fahrbahnen hat sich ein heuristisches Verfahren bewährt, das unter der zusammenfassenden Bezeichnung „konvex Einhüllende“ eingeführt ist [HELLER, BÜHLER, JEUTHE 1997] s. auch [MAERSCHALK, KRAUSE 2004]. Die Optimierung erfolgt dabei unter Berücksichtigung von finanziellen Restriktionen aus den Budgetvorgaben mit der Zielfunktion „maximaler Wirksamkeitszuwachs bei ansteigenden Kosten“. Dabei kann auch eine Gewichtung von Erhaltungsabschnitten, z. B. mit geometrischen Dimensionen (Abschnittslänge bzw. -fläche) oder mit den Verkehrsstärken, eingebracht werden.

Nach einer Optimierung sollten allen zur Erhaltung anstehenden Abschnitten eines Analysenetzes die im verfügbaren Budgetrahmen optimalen Maßnahmevarianten zugeordnet sein; dabei ist auch „Nichts-tun“ eine zulässige Option.

8.4.9 Erhaltungsprogramm

Das Erhaltungsprogramm ergibt sich mit der Art und dem Jahr der für die Erhaltungsabschnitte optimalen Maßnahmen direkt aus den Berechnungen.

Wie schon erwähnt, ist eine Optimierung nur mit Hilfe eines vorliegenden und informationstechnisch aufbereiteten Verfahrens möglich. Die Einbindung eines derartigen Verfahrens ist letztlich nur im Rahmen eines PMS-Programms für Radwege („PMS-Radwege“) realistisch. Mit den erläuterten Teilschritten zur Erhaltungsplanung erscheint die Erstellung eines PMS-Radwege mit vertretbarem Aufwand möglich. Damit könnten auch die größtenteils pragmatisch vorgenommenen Festlegungen zu Modellparametern (z. B. Zustandsfortschreibung, Mängelklassen, Rücksetzung, Zustandsverlauf nach Maßnahmen), mit Sensitivitätsanalysen besser abgesichert werden.

Bis zu einer evtl. Erstellung eines PMS-Radwege kann das Erhaltungsprogramm entsprechend den Erläuterungen in Kapitel 8.4.6 (Mängelklassen) erstellt werden. Sofern zusätzlich eine Zustandsfortschreibung und eine Kosten-Wirksamkeits-Berechnung durchgeführt werden, kann wie folgt vorgegangen werden:

- Ermittlung der Koeffizienten zur Fortschreibung des Zustands für alle Zustandsmerkmale aller Erhaltungsabschnitte.
- Ermittlung der im vorgegebenen Prognosezeitraum zur Erhaltung anstehenden Erhaltungsab-

schnitte (TWGEB und/oder TWSUB gleich oder größer als der Warnwert von 3,5).

- Zuordnung der Mängelklassen für diese Erhaltungsabschnitte.
- Auswahl der möglichen Maßnahmevarianten der anstehenden Erhaltungsabschnitte in Abhängigkeit der Mängelklassen.
- Ermittlung der Maßnahmekosten für alle Varianten der Erhaltungsabschnitte.
- Rücksetzung und Ermittlung des Zustandsverlaufs „nach“ Maßnahmen in Abhängigkeit der Maßnahmentearten und der Mängelklassen.
- Berechnung der Maßnahmewirksamkeiten in Abhängigkeit von den Zustandsverläufen „ohne“ und „mit“ Maßnahmen.
- Ermittlung der Wirksamkeits-Kosten-Verhältnisse für alle Maßnahmevarianten aller Erhaltungsabschnitte.
- Reihung der Maßnahmevarianten pro Erhaltungsabschnitt nach dem Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis.
- Aufnahme der Varianten mit den abschnittsbezogenen günstigsten Wirksamkeits-Kosten-Verhältnissen in das Erhaltungsprogramm.
- Sortierung der in das Erhaltungsprogramm aufgenommenen Maßnahmevarianten nach dem Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis zur Erstellung einer Dringlichkeitsreihung.
- Abarbeitung der Dringlichkeitsreihung entsprechend den jährlich verfügbaren Erhaltungsmitteln oder der gewünschten Menge der Maßnahmen pro Jahr.

Bei der Abarbeitung der Dringlichkeitsreihung ist zu prüfen, ob neben der reinen baulichen Erhaltung noch zusätzliche Maßnahmen, z. B. Um-/Ausbaumaßnahmen wie eine Verbreiterung, vorgesehen oder erforderlich sind. In diesem Fall können sich Verzögerungen oder Änderungen bei der Abarbeitung der Dringlichkeitsreihung ergeben.

8.5 Praktische Anwendung

Für die praktische Anwendung der Modellvorgaben zur Erhaltungsplanung waren zunächst Teilnetze aus den Zustandserfassungen für Brandenburg oder Schleswig-Holstein vorgesehen. Aufgrund

der Unstimmigkeiten bei den gemessenen Längsprofilen konnten die wichtigsten Zustandsgrößen für Radwege, die aus den Längsprofilen abgeleiteten vertikalen Schwingstärken, nicht ermittelt werden. Die Daten aus den genannten Erhebungen sind daher für eine praktische Anwendung nicht geeignet.

Die im Rahmen des vorliegenden Projekts erfassten Daten aus der Testerhebung in Schleswig-Holstein umfassen zwar kein Radwegenetz, aber immerhin ca. 100 km Radwege. Für diese Teststrecke lagen zwar die Zustandsdaten, aber keine Querschnittsdaten (Radwegbreite) und, abgesehen von den optisch erkennbaren Deckenarten, keine Angaben zum Befestigungsaufbau oder gar zum Deckenalter vor. Da diese Bestandsdaten insbesondere bei der Bildung von Mängelklassen (s. Kapitel 8.4.6) benötigt werden, war nur eine stark eingeschränkte Anwendung möglich. Um zumindest den methodischen Ablauf nachzuvollziehen, wurde mit den Radwegen an der B 203 eine Teilmenge (ca. 30 %) der Testerfassung für eine Anwendung ausgewählt. Die Radwege an der B 203 weisen einen vergleichsweise schlechten Zustand auf. Maßgebend für die Auswahl einer Teilmenge war jedoch auch, dass sich die Bildung der Erhaltungsabschnitte auf der Grundlage der homogenen Auswertungsabschnitte mit Hilfe von Standardsoftware („MS-Excel“) sehr schwierig und zeitaufwändig gestaltete, da eine Beachtung der festen Abschnittsgrenzen (z. B. Netzknoten, Straßenseitenwechsel, OD-Grenze, s. Kapitel 8.2) ständige manuelle Eingriffe erfordert. Für eine netzweite Anwendung wäre die Anpassung einer vorhandenen Software zur Abschnittsabgrenzung an die Gegebenheiten bei Radwegen notwendig.

Bild 8.20 veranschaulicht eine Statistik zur Abschnittseinteilung der Testanwendung:

- Die Teststrecke mit der Gesamtlänge von ca. 31,4 km unterteilt sich in 2.589 homogene Auswertungsabschnitte, deren mittlere Länge bei 12,14 m und deren Spannweite zwischen 1,00 und knapp 230 m liegt.
- 147 homogene Auswertungsabschnitte wurden entfernt, da der Radweg auf der Fahrbahn, einem Fahrbahnteiler oder einer Brücke verläuft. Die mittlere Länge dieser Abschnitte liegt fast genau bei 5 m, die Spannweite reicht von 1 m bis 80 m. Die damit abgegrenzten Bereiche sind Gegenstand der Fahrbahn- oder Brückenerhaltung.

Homogene Auswertungsabschnitte	Anzahl	2.589
	Gesamtlänge [m]	31.432
	Mittlere Länge [m]	12,14
	Min. Länge [m]	1,00
	Max. Länge [m]	229,86
Verlauf auf Fahrbahn Insel Brücke	Anzahl	147
	Gesamtlänge [m]	733,21
	Mittlere Länge [m]	4,99
	Min. Länge [m]	1,00
	Max. Länge [m]	80,00
Erhaltungsabschnitte bauliche Unterhaltung	Anzahl	329
	Gesamtlänge [m]	868,16
	Mittlere Länge [m]	2,64
	Min. Länge [m]	1,00
	Max. Länge [m]	9,95
Erhaltungsabschnitte Instandsetzung/ Erneuerung	Anzahl	88
	Gesamtlänge [m]	10.325,90
	Mittlere Länge [m]	117,23
	Min. Länge [m]	10,11
	Max. Länge [m]	1.046,21
Erhaltungsabschnitte ohne Maßnahmen	Anzahl	318
	Gesamtlänge [m]	19.505,73
	Mittlere Länge [m]	61,34
	Min. Länge [m]	1,00
	Max. Länge [m]	898,00

Bild 8-20: Homogene Auswertungsabschnitte und Erhaltungsabschnitte der Testanwendung

- Für 329 Erhaltungsabschnitte mit einer Gesamtlänge von ca. 868 m (2,76 % von 31,4 km) werden aufgrund ihres schlechten Zustands (mindestens ein Merkmal $\geq 3,5$) und ihrer isolierten Lage für Maßnahmen der baulichen Unterhaltung vorgeschlagen. Die Längen dieser Abschnitte schwanken zwischen 1 m und 9,95 m, der Mittelwert liegt bei 2,64 m. Von den 329 Abschnitten weisen je 2 Abschnitte mit einer Länge von jeweils 1 m überstehende Einbauten und Bordsteine auf. Wurzelhebungen wurden auf den Radwegen an der B 203 nicht beobachtet.
- Für 88 Erhaltungsabschnitte mit einer Gesamtlänge von ca. 10.326 m (32,85 % von 31,4 km) werden Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen vorgeschlagen. Bei einer mittleren Länge der Instandsetzungs-/Erneuerungsab-

schnitte von ca. 117 m ergibt sich eine Spannweite von ca. 10 m bis ca. 1.046 m.

Wie schon erwähnt, ist es derzeit zweckmäßig, eine vereinfachte Erhaltungsplanung auf der Grundlage von Mängelklassen anzustreben, da eine Maßnahmenbewertung und -optimierung mit vertretbarem Aufwand nur IT-gestützt („PMS-Radwege“) möglich sind. Die fehlenden Bestandsdaten schränken allerdings die Möglichkeiten bei der Mängelklassenbildung ein. Bei durchgehenden Asphaltdecken wurden für eine Testrechnung die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Breite aller Radwege liegt bei 2 m.
- Es handelt sich um standardisierte (bzw. vergleichbare) Befestigungen.
- Das Alter aller Decken liegt unterhalb von 15 Jahren.

Bei diesen Festlegungen ergeben sich folgende Mängelklassen:

- für 18 Erhaltungsabschnitte mit einer Gesamtlänge von 1.512 m die Mängelklasse V_LE15 (TWGEB $\geq 3,5$ und Alter ≤ 15 Jahre, TWSUB beliebig),
- für 70 Erhaltungsabschnitte mit einer Gesamtlänge von 8.814 m die Mängelklasse RO_VM (TWSUB $\geq 3,5$ und $2,0 \leq$ TWGEB $< 3,5$).

Werden den Erhaltungsabschnitten die Standardmaßnahmen der Mängelklassen zugewiesen, ist zu setzen bei

- V_LE15 Tiefereinbau des Asphaltoberbaus (E2t),
- RO_VM Tiefereinbau der 4-cm-Asphaltdeckschicht (I2t).

Bei einer monetären Bewertung mit den derzeit angenommenen Maßnahmekosten (vgl. Bild 8.13) ergibt sich ein Erhaltungsbedarf von Euro 317.376 (Instandsetzung Euro 211.536, Erneuerung Euro 105.840).

9 Zusammenfassung

Aufgabenstellung

In Deutschland werden mit rund 70 Mio. Fahrrädern ca. 30 Milliarden Kilometer pro Jahr zurückgelegt, was etwa 10 % der Gesamtverkehrsleistung ent-

spricht. Bei anhaltend höheren Steigerungsraten als alle anderen Verkehrsträger wird der Radverkehr von Bund, Ländern und Kommunen in vielfältiger Form gefördert. Dazu gehören vor allem auch der Neu- und Ausbau von Radwegen.

Mit jedem Kilometer neuer Radwege gewinnt eine systematische, zielgerichtete und wirtschaftliche bauliche Erhaltung des Radwegebestandes immer mehr an Bedeutung. Für diese Einbeziehung der Radwege in die systematische Straßenerhaltung sollten die bisher größtenteils noch fehlenden Verfahrensgrundlagen erarbeitet werden. Damit sollte auch eine noch bestehende Lücke im Rahmen eines umfassenden Management-Systems aller Straßenverkehrsanlagen („Asset-Management-System“) geschlossen werden.

Hauptgegenstand der Untersuchung sind die Radwege in Baulast des Bundes. Da mit Erhaltungsmaßnahmen vor allem der bauliche Zustand verbessert werden soll, sind die Untersuchungsergebnisse weitestgehend auch auf andere Radwege im Außerortsbereich sowie in Ortsdurchfahrten bzw. kommunalen Netzen übertragbar. Näheren Aufschluss darüber sollten eine in Anhängigkeit dieser Radwegetypisierung vorzunehmende Definition und Präzisierung der Anforderungen des Nutzers und des Baulastträgers an die Erhaltung von Radwegen geben.

Voraussetzung für Aussagen zu Zustandsverbesserungen infolge baulicher Erhaltung ist, dass der Zustand zutreffend beschrieben wird. In Abhängigkeit der Bauweise sollten daher die für Radwege charakteristischen Schäden und Mängel insbesondere auch in Bezug auf die Ebenheit aufgezeigt und in Form von Zustandsmerkmalen kategorisiert werden. Ausgehend davon war zu analysieren, inwieweit die daraus ableitbaren Anforderungen an eine Zustandserfassung von vorliegenden in- und ausländischen Verfahren bereits erfüllt werden und in welchem Umfang noch eigene Entwicklungen erforderlich sind. Ausgehend von dem empfohlenen Verfahren zur Zustandserfassung sollte eine Methodik zur Auswertung der erfassten Indikatoren und zur Ermittlung von Zustandsgrößen entwickelt und erprobt werden. Darauf aufbauend war unter Berücksichtigung der relevanten Zielkriterien ein Verfahren für die Zustandsbewertung von Radwegen zu konzipieren und zu testen. Die Bewertungsergebnisse liefern die Grundlagen für die Konzeption von Erhaltungsprogrammen für Radwege. Ein entsprechendes Konzept zur Erhaltungsplanung sollte ausgearbeitet und getestet werden.

Methodische Vorgehensweise

Aufgrund gravierender Unterschiede im Zustand und im Erhaltungshandeln bei unbefestigten Radwegen werden ausschließlich befestigte Radwege mit Asphaltbelägen, Betondecken, Betonpflasterdecken (= Betonplattendecken) sowie wassergebundene Decken betrachtet. Durch Markierungen abgetrennte Radverkehrsflächen auf Fahrbahnen oder Gehwegen sind dem Erhaltungsbedarf dieser Verkehrsflächen zuzurechnen und werden daher nicht berücksichtigt.

Im methodischen Ablauf werden zunächst die Ziele der Radwegeerhaltung definiert. Flankierend dazu werden die Möglichkeiten einer verkehrlichen und funktionalen Typisierung und einer Unterscheidung von Nutzergruppen betrachtet. Von besonderer Bedeutung für die bauliche Erhaltung ist eine ergänzende Analyse der Bauweisen von Radwegen.

In Abhängigkeit der Bauweisen werden anschließend die für eine möglichst umfassende Beschreibung des baulichen Zustands benötigten Zustandsmerkmale definiert. Da für die Radwegennutzer vor allem Wirkungen aus Unebenheiten von großer Bedeutung sind, werden spezielle und ausführliche Analysen zu den zu erwartenden Schwingbeschleunigungen und zu den Möglichkeiten ihrer Ermittlung aus gemessenen Höhenlängsprofilen durchgeführt. Die abgeleiteten Zustandsmerkmale und die Indikatoren bzw. Zustandsgrößen zu ihrer Quantifizierung liefern die Basis zur Entwicklung

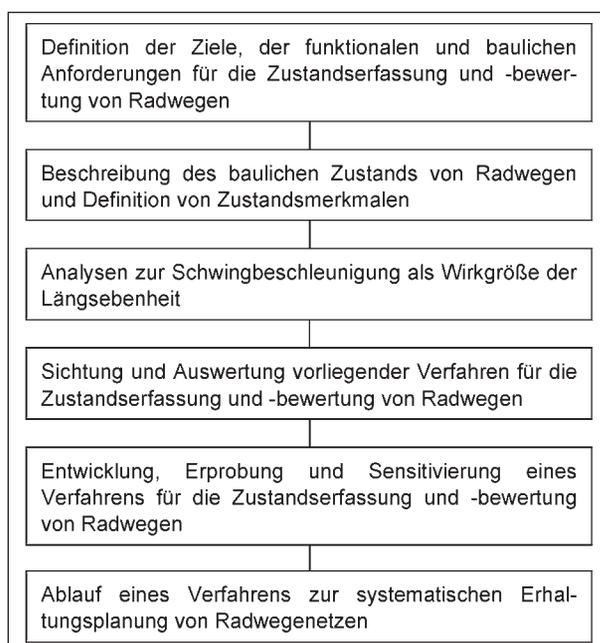


Bild 9-1: Untersuchungsablauf

und Ausarbeitung eines Konzepts für die Zustandsbewertung.

Auf der Grundlage der definierten Anforderungen an eine umfassende Beschreibung des baulichen Zustands werden im weiteren methodischen Ablauf unter Einbeziehung bereits erfolgter messtechnischer Erfassungen von Radwegnetzen (Brandenburg, Schleswig-Holstein) vorliegende Verfahren zur Zustandserfassung/-bewertung analysiert. Da die vorliegenden Verfahren die Anforderungen nicht befriedigend erfüllen und teilweise stark an die Zustandserfassung/-bewertung von Fahrbahnen anknüpfen, wird ein alternatives Erfassungs-, Auswertungs- und Bewertungsverfahren für Radwege entwickelt und einer Erprobung unter wechselnden Randbedingungen unterzogen. Dazu wurden Test-erhebungen und -rechnungen hinsichtlich der Anwendbarkeit, Plausibilität und Praxistauglichkeit insbesondere auch im Hinblick auf die zweckmäßigen homogenen Auswerteabschnitte für die Ermittlung von Zustandsgrößen durchgeführt.

Die Ergebnisse des entwickelten und empfohlenen Verfahrens zur Zustandserfassung, Auswertung und Bewertung sind eine unabdingbare Grundlage für eine systematische Erhaltungsplanung für Radwegenetze. Zu der dazu erforderlichen digitalen Datenhaltung wurden pragmatische und praxisnahe Vorschläge entwickelt.

Für die Erhaltungsplanung und Erstellung von Erhaltungsprogrammen müssen aus den teilweise sehr kurzen homogenen Auswerteabschnitten der Zustandserfassung längere, den Gegebenheiten der Praxis angepasste Erhaltungsabschnitte gebildet werden. Zu dieser methodisch schwierigen Problematik kann nur eine vorläufige pragmatische Vorgehensweise empfohlen werden. Darauf basierend werden Vorschläge zu einem vergleichsweise einfachen und zu einem deutlich anspruchsvolleren Konzept für die Erhaltungsplanung entwickelt.

Bild 9-1 veranschaulicht stichpunktartig den Untersuchungsablauf.

Untersuchungsergebnisse

Ähnlich wie bei den Fahrbahnen bestehen die Ziele der baulichen Erhaltung auch bei den Radwegen in der Gewährleistung einer angemessenen Verkehrssicherheit und Befahrbarkeit sowie in einer rechtzeitigen und wirtschaftlichen Substanzerhaltung. Die Ziele gelten prinzipiell für alle Radwegtypen, unabhängig vom Verlauf außerorts oder in-

nerorts bzw. als straßenbegleitender oder selbstständiger Radweg. Eine Differenzierung nach den Anforderungen an den Zustand erscheint sinnvoll zwischen nicht angeordneten und den mit den StVO-Zeichen 237, 240, 241 bzw. 244 angeordneten benutzungspflichtigen Radwegen. Diese Sicht ist allerdings nicht unumstritten.

Zu den Nutzergruppen von Radwegen und den verwendeten Fahrradtypen, die evtl. für eine Relativierung des Anforderungsniveaus an den Zustand in Betracht kommen, gibt es derzeit nur statistische Erkenntnisse. Für eine praktische Anwendung wären abschnitts- oder wenigsten radwegbezogene Informationen erforderlich. Die Verteilung der Fahrradtypen ändert sich zudem momentan gravierend, da E-Bikes bzw. Pedelecs prozentual zweistellige Zuwachsraten aufweisen.

Bezüglich der baulichen Eigenschaften von Radwegen kommt der obersten Schicht, der Deckschicht, eine besondere Bedeutung zu. Unterschieden werden danach Asphalt-, Beton- und (Beton-)Pflasterdecken sowie wassergebundene Decken. Für die Erhaltungsplanung ist die Information bedeutsam, ob es sich um eine standardisierte (bzw. vergleichbare) oder eine nicht standardisierte „historisch gewachsene“ Befestigung handelt.

Bild 9-2 zeigt zusammenfassend die Zustandsmerkmale, die eine umfassende Beschreibung von Schäden und Mängeln an Radwegen ermöglichen. Neben den kategorisierten Zustandsmerkmalen

Zustandsmerkmale	Bauweisen
Längsebenheit	alle
Risse Längs-/Querrisse	Asphalt Beton(-pflaster)
Flickstellen Flickstellen/bitumin. Teilersatz	Asphalt Beton(-pflaster)
Ausmagerung/Splittverlust Kantenschäden	Asphalt Beton(-pflaster)
Ausbrüche Nester/Abplatzungen Materialverluste (Ausbrüche)	Asphalt Beton(-pflaster) wassergebunden.
Offene Nähte Schadhafte Fugenfüllung	Asphalt Beton(-pflaster)
Konstruktiv bedingte Mängel	
Einbauten (> ±3 cm)	alle
Bordsteine (> ±3 cm)	alle
Wurzelhebungen	alle

Bild 9-2: Zustandsmerkmale und konstruktiv bedingte Mängel für Radwegbauweisen

sind auch konstruktiv bedingte Mängel wie überstehende oder abgesackte Einbauten bzw. Bordsteine und Wurzelhebungen von Interesse. Es erscheint zweckmäßig, eine Erfassung im 1-m-Raster vorzusehen. Als Indikatoren zur Ermittlung der Ausprägung und/oder des Umfangs von Schäden werden vorgeschlagen für

- die Längsebenheit die vertikale Schwingbeschleunigung (pro m, s. u.) oder die Höhenlängsprofile (pro cm),
- alle anderen Zustandsmerkmale (= Substanzmerkmale) und die konstruktiven Mängel der binäre Zustandsindikator „vorhanden/nicht vorhanden“.

Auf Basis dieser Indikatoren werden Zustandsgrößen als quantitativer Ausdruck für die Schadensausprägung bzw. -häufigkeit ermittelt. Diese Ermittlung erfolgt für Auswerteabschnitte, die mit Hilfe von Festpunkten (Netzknoten, administrative Grenzen, Bauweisewechsel, Straßenseitenwechsel einseitiger Radwege) und Homogenitätsanforderungen zur Längsebenheit abgegrenzt werden. Zur Bestimmung der Homogenitätsanforderungen der Längsebenheit wird ein einfaches Verfahren auf der Basis des Variationskoeffizienten der (1-m-)vertikalen Schwingbeschleunigungen vorgeschlagen. Als Zustandsgrößen der homogenen Auswerteabschnitte, die für eine Testerfassung Abschnittslängen zwischen 1 m und ca. 350 m aufweisen, werden für die Längsebenheit die vertikale Schwingbeschleunigung (s. u.), für die Substanzmerkmale und die konstruktiven Mängel die Häufigkeit in % herangezogen.

Bei unebenen Oberflächen treten als Wirkgröße Beschleunigungen und Schwingungen auf, die auf Radfahrer in völlig anderen Größenordnungen einwirken als auf Pkw-Fahrer. Für diese Schwingbeschleunigung existieren Richtlinien, die unter Einbeziehung der Einwirkungsdauer eine Abschätzung von Einschränkungen des Wohlbefindens, der Leistungsfähigkeit und des Risikos für Gesundheitsschädigungen erlauben. Auch aus diesem Grund wurde die Schwingbeschleunigung schon in der Vergangenheit als potenzieller Indikator zur Beurteilung der Längsebenheit in der Örtlichkeit erfasst, intensiv nach verschiedenen Aspekten wissenschaftlich analysiert und auch bereits für praktische Anwendungen herangezogen. Anknüpfend daran wurde ein Verfahren zur Erfassung der vertikalen Schwingbeschleunigung sowie zur Aufzeichnung und Auswertung des Messsignals entwickelt.

Bei den Recherchen zu bestehenden Verfahren für die Zustandserfassung von Radwegen wird nach einer Darstellung der Ausgangssituation in Deutschland auf visuelle und messtechnische Methoden und Systeme aus dem In- und Ausland eingegangen. Visuelle Verfahren können die o. a. Anforderungen nicht erfüllen. Bei den ausländischen messtechnischen Verfahren ist die Zugänglichkeit von Unterlagen stark eingeschränkt, sodass nur wenige verwertbare Informationen übernommen werden konnten. Das für die Zustandserfassungen der Radwege in Brandenburg und Schleswig-Holstein eingesetzte Messsystem „ARGUS®-AGIL“ erfasst das Höhenlängsprofil und ermöglicht über eine Auswertung von Videobildern eine Ermittlung von Rissen und anderen Oberflächenschäden. Die Bildung von Zustandsgrößen erfolgt für eine feste Auswerteabschnittslänge von 10 m. Die Zustandsgröße der Längsebenheit wird aus einer Planografsimulation ermittelt, als Zustandsgröße der Substanzmerkmale dient die Häufigkeit in %.

Bei der Zustandsbewertung werden die dimensionsbehafteten Zustandsgrößen in dimensionslose Zustandswerte („Normierung“) überführt, um eine Verknüpfung von Zustandswerten unterschiedlicher Zustandsmerkmale zu sog. Teilwerten („Wertsynthese“) zu ermöglichen. Ein vorhandenes und bereits angewendetes Verfahren der Universität der Bundeswehr München berücksichtigt keine Substanzmängel. Das für Brandenburg und Schleswig-Holstein angewendete Verfahren basiert sehr stark auf der Bewertung von Fahrbahnen für Innerorts- bzw. Außerortsstraßen („ZEB-Verfahren“). Dies gilt insbesondere für die Zustandsgröße der Längsebenheit, die aufgrund ihrer großen Bedeutung für Radwege für eine Übernahme ungeeignet scheint. Mit den erfassten Höhenlängsprofilen ist allerdings auch eine Ermittlung von Schwingbeschleunigungen möglich.

Da kein vorhandenes Zustandserfassungs-/bewertungsverfahren voll befriedigt, wurde eine fahrradbasierte visuell-/messtechnische Erfassungsmethode mit zugehörigem Bewertungskonzept entwickelt und für ein Teilnetz der Radwege an Bundesstraßen in Schleswig-Holstein erprobt. Ein Fahrrad als Träger für ein Messsystem ist für eine Radweg-erfassung authentisch, beeinträchtigt vor Ort keine anderen Radwegnutzer, verursacht nur niedrige Beschaffungs- und Betriebskosten, kann relativ problemlos nachgebaut und auch im kommunalen Bereich gut eingesetzt werden. Der Aufwand bei der Nachbearbeitung, Aufbereitung und Auswer-



Bild 9-3: Prototyp des Messfahrrads

tung der Messungen kann dabei gering gehalten werden.

Bild 9-3 zeigt den Prototyp des Messfahrrads, das mit Elektrounterstützung bis 25 km/h (Pedelec) eine weitgehend konstante Fahrtgeschwindigkeit und große Reichweite (angestrebte Tagesbefahrungsleistung ≥ 50 km) gewährleistet. Bei der Zustandserfassung während der Radwegbefahrung mit einer angestrebten Fahrgeschwindigkeit von 25 km/h werden folgende Informationen erfasst und aufgezeichnet:

- digitale Videos (typische Auflösung 1.280 x 720, auch andere Optionen),
- GPS-Tracks (zeitkonstant 1 Wegpunkt pro Sekunde),
- vertikale Schwingbeschleunigung mit einem Beschleunigungsaufnehmer an der Vorderradgabel in unmittelbarer Nähe der Vorderachse (s. Bild 9.3),
- Tonsignale zur Markierungen von Schadensbeobachtungen bei der Befahrung.

Die Datenaufbereitung und -auswertung nach der Befahrung beinhalten:

- Ermittlung von 1-Meter-Aufnahmesegmenten über Interpolation des GPS-Tracks,
- Extraktion von Einzelbildern im Meterabstand aus dem Video über errechnete Abspielzeitpunkte (Framenummern),
- Extraktion der Vertikalbeschleunigungen für errechnete Zeitabschnitte, die jeweils 1 Meter

Wegstrecke entsprechen, und Berechnung und Speicherung der maßgeblichen Kennwerte.

- Bildauswertung zur Kontrolle und Präzisierung der Schadensmarkierungen.

Die durchgeführten Voruntersuchungen und Testfahrten in Schleswig-Holstein bestätigten die volle Funktionsfähigkeit des Messsystems. Bei durchgängigen Radwegen, guter Vorbereitung und mit einem Begleitfahrzeug für Transfers sind Erfassungsleistungen von 50 km/Tag ohne Weiteres realisierbar.

Für die zusätzliche Absicherung der erfassten vertikalen Schwingbeschleunigungen wurden zusätzliche Sensitivitätsanalysen unter definierten Laborbedingungen durchgeführt. Definitive Aussagen zur Validität und Reliabilität der erfassten Werte sind jedoch erst möglich, wenn ein statistisch ausreichendes Kollektiv aus der Erfassung eines gesamten Radwegenetzes vorliegt. Obwohl eine Methode zur Ermittlung von vertikalen Schwingbeschleunigungen aus gemessenen Höhenlängsprofilen entwickelt wurde, konnten die vorliegenden Ergebnisse der Radwegeerfassungen in Brandenburg und Schleswig-Holstein dazu nicht herangezogen werden, da die Profilwerte Unstimmigkeiten aufweisen.

Aus der Auswertung einer Zustandserfassung mit dem neu entwickelten Messfahrrad können wie geplant für die homogenen Auswerteabschnitte die Zustandsgrößen der in Bild 9-2 aufgeführten Zustandsmerkmale bauweisebezogen ermittelt werden, d. h.

- vertikale Schwingbeschleunigungen (m/s^2) zur Kennzeichnung der Längsebenheit,
- Längenanteile der Substanzmängel in Prozent.

Für diese Zustandsgrößen wurde ein Bewertungsverfahren konzipiert. Da das Verfahren lediglich eine Vorsortierung maßnahmebedürftiger Abschnitte liefern soll, wird im Ablauf vereinfachend nur unterschieden zwischen den Längenanteilen mit Rissen und mit den restlichen Schäden („Restschadensfläche“). Nicht bewertet werden die zusätzlich mitgeführten Informationen (s. Bild 9-2) zu offenen Nähten (Asphalt) und schadhafte Fugenfüllungen (Beton) sowie zu den konstruktiv bedingten Mängeln, die nur zur Steuerung des Erhaltungsgeschehens dienen.

Bei der Normierung dimensionsbehafteter Zustandsgrößen zu dimensionslosen Zustandswerten

sind Festpunkte beim Zustandswert 3,5 (Warnwert, Planung von geeigneten Maßnahmen) und beim Zustandswert 4,5 (Schwellenwert, Einleitung von baulichen Maßnahmen) von besonderer Bedeutung, für die Längsebenheit zusätzlich auch der 1,5-Wert.

Bei der Normierung der vertikalen Schwingbeschleunigung war beabsichtigt, den Schwellenwert auf der Grundlage einschlägiger Richtlinien endgültig festzulegen. Dies ist beim derzeitigen Analysestand noch nicht möglich. Vorläufig werden daher Eckwerte festgelegt, die sich aus einer vorliegenden Anwendung der Universität der Bundeswehr München ableiten ($ZW = 1,5$ bei $1,42 m/s^2$ und $ZW = 4,5$ bei $4,27 m/s^2$). Für die Substanzmerkmale wurden Eckwerte in Anlehnung an die ZEB übernommen (Risse $ZW = 1,0$ bei 0 %, $ZW = 4,5$ bei 20 %; Restschadensfläche $ZW = 1,0$ bei 0 %, $ZW = 4,5$ bei 30 %).

Der Gebrauchswert, der die Zielkriterien Verkehrssicherheit und Befahrbarkeit zusammenfassend bewertet, kann bei Radwegen mit dem Zustandswert der vertikalen Schwingbeschleunigung gleichgesetzt werden. Da bei Radwegen keine Beanspruchung durch Schwerverkehr vorhanden ist, werden beim Substanzwert nur die Zustandswerte für Risse und die Restschadensfläche verknüpft.

Die Ergebnisse der Zustandserfassung/-bewertung sind die wichtigsten Eingangsinformationen für die Erhaltungsplanung. Neben den Netzkenngößen werden darüber hinaus mindestens noch die Radwegbreiten, die Deckschichtarten und eine grobe Angabe zum Befestigungsaufbau (standardisiert/nicht standardisiert) und Befestigungsalter benötigt. Obwohl in Sachsen-Anhalt bereits eine Radwegdatenbank mit automatisierter Anbindung an die Straßendatenbank existiert, wird i. d. R. auf absehbare Zeit eine lokale Datei für die Erhaltungsplanung von Radwegen erforderlich sein, die bezüglich der Netzdaten häufig mit der Straßendatenbank abgestimmt werden sollte.

In der Erhaltungsdatei sind die benötigten Ausgangsdaten für homogene Auswerteabschnitte abgelegt. Nach einer Abgrenzung von Erhaltungsabschnitten, die derzeit noch weitgehend manuell erfolgen muss, können zunächst Bereiche ausgesondert werden, für die punktuelle oder kleinflächige Maßnahmen der baulichen Unterhaltung zur Beseitigung örtlicher Schäden bzw. konstruktiv bedingter Mängel oder auch Sondermaßnahmen z. B. bei Wurzelhebungen zweckmäßig sind. Der Bedarf an

Instandsetzungen und Erneuerungen kann auf Basis von Mängelklassen ermittelt und in ein erstes einfaches, nach Dringlichkeiten sortiertes Erhaltungsprogramm überführt werden. Die Mängelklassen werden bei Erreichen von Warnwerten mithilfe von Bestands- und Zustandskonstellationen definiert. Zuvor kann eine Zustandsfortschreibung, allerdings derzeit auf der Grundlage pragmatisch festgelegter Verlaufsfunktionen, erfolgen.

Bei den für eine Erhaltungsbedarfsermittlung und der Abarbeitung von Erhaltungsprogrammen benötigten Kosten der Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmearten muss momentan auf Werte zurückgegriffen werden, die in Analogie zur Fahrbahnerhaltung abgeschätzt sind. Die ausgearbeiteten Verfahren zu Bewertung der Maßnahmenutzen in Form einer qualitativen Wirksamkeit und zur netzweiten Optimierung von Maßnahmealternativen sind auch für kleine Radwegenetze letztlich nur mit einem IT-Verfahren umsetzbar. Für die damit mögliche und im Endeffekt anzustrebende Erstellung von Erhaltungsprogrammen, die bezüglich der Nutzen und Kosten bewertet und optimiert sind, kann nach relativ unaufwändigen Anpassungsarbeiten am „Setup“ der Modellparameter die Software des Pavement-Management-Systems (PMS) der Fahrbahnen herangezogen werden. Mit einem „PMS-Radwege“ können die momentan pragmatischen Festlegungen zu den Modellparametern nach einer evtl. Zustandserfassung eines größeren Radwegenetzes überprüft und modifiziert werden.

Folgerungen für die Praxis

Im Rahmen des Projekts waren, teilweise in einem bei der Antragstellung nicht erwartetem Umfang, grundlegende Untersuchungen erforderlich, die den vorgegebenen Zeit- und Finanzrahmen grenzwertig beanspruchten. Es ist jedoch gelungen, ein Verfahren zu entwickeln und durch Tests zur Anwendungsreife zu bringen, das auf dem naheliegenden Fahrzeug für die Zustandserfassung von Radwegen, dem Fahrrad, basiert. Bei dem wichtigsten mit dem entwickelten Messfahrrad erfassten Zustandsindikator, der vertikalen Schwingbeschleunigung, sind allerdings noch zusätzliche Sensitivitätsanalysen insbesondere auf Basis einer umfangreichen netzweiten Anwendung erforderlich.

Bei der Zustandsbewertung wurde auf eine Relativierung der Anforderungen, z. B. für benutzungspflichtige und nicht benutzungspflichtige Radwege, verzichtet. Eine Verfeinerung des Bewertungsver-

fahrens unter stärkerer Berücksichtigung der Radwegenutzung erscheint jedoch erforderlich. Allerdings muss dabei stets auch die Datenverfügbarkeit berücksichtigt werden.

Ein sehr wichtiges und grundlegendes Ergebnis ist das in Regie der BAST entwickelte Verfahren zur Ermittlung der vertikalen Schwingbeschleunigung aus gemessenen Höhenlängsprofilen. Dadurch eröffnet sich eine zusätzliche Möglichkeit für die Zustandserfassung von Radwegen. Leider war eine Anwendung für vorliegende netzweite Erfassungen in Brandenburg und Schleswig-Holstein nicht möglich, da die dabei erfassten Höhenlängsprofile erhebliche Unstimmigkeiten aufweisen.

Die sehr eingeschränkte Verwendbarkeit der Daten aus vorliegenden netzweiten Erfassungen begrenzte die Möglichkeiten, die entwickelten Verfahren für Gesamtnetze zu testen und ggf. anzupassen. Dies gilt insbesondere auch für Sensitivitätsanalysen der bewerteten Schwingbeschleunigung und die Methodik zur Erhaltungsplanung. Mit einer Netzanwendung könnten Festlegungen zu Modellparametern, die pragmatisch in Anlehnung an die systematische Fahrbahnerhaltung erfolgten, verifiziert werden. Sinnvoll erscheint daher eine durch Forschungsaktivitäten begleitete Netzanwendung der entwickelten Verfahrensbausteine zur Erhaltungsplanung für Radwege. Bei einigen Aspekten, wie z. B. einer IT-gestützten Abgrenzung von Erhaltungsabschnitten oder der Ermittlung spezifischer Maßnahmekosten für Radwege, erscheinen noch zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Damit könnte jedoch eine valide Grundlage für ein „PMS-Radwege“ geschaffen werden.

10 Literatur

- ADFC – Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club (2012): Fachausschuss Technik: Richtig Sitzen. <http://www.fa-technik.adfc.de/Ratgeber/Sitzen/>
- ALRUTZ, D., BOHLE, W., et al. (2007): Zweiter Fahrradbericht der Bundesregierung. Schlussbericht zum FE 70.0760/2004. <http://www.nationaler-radverkehrsplan.de>
- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (2008): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen zur messtechnischen Zustandserfassung und -bewertung mit schnellfahrenden Messsystemen für Funktions-

- bauverträge – ZTV MtFunktion – StB 08. Fassung für Pilotprojekte, Ausgabe Juli 2008, unveröffentlicht
- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (2012): Nationaler Radverkehrsplan 2020 (Entwurf). Mai 2012. <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/85084/publicationFile/58147/nationaler-radverkehrsplan-nrvp-2020.pdf>
- BMVBW – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2002): „FahrRad! Nationaler Radverkehrsplan 2002-2012. Maßnahmen zur Förderung des Radverkehrs in Deutschland“. <http://www.nationaler-radverkehrsplan.de>
- BÜHLER, B., KLINKHAMMER, S., MAERSCHALK, G., KOCH, R., OERTELT, S. (2002): Erstellung eines Leitfadens für die Erfassung und Bewertung von Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 832, Bonn 2002
- CAIRNEY, P., KING, K. (2003): Development of a performance based specification for a major bicycle facility. Research Report ARR 358. ARRB Transport Research Ltd, 2003
- CALISKAN, S., STINTZING, J. (2011): Erfassung der Längsebenheit verschiedener Radwegbefestigungen in Rosenheim. Straße und Autobahn, Jg. 62 Heft 1, 2011
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Sonderaufgaben (1989): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen – RStO 86. Ausgabe 1986, ergänzte Fassung 1989, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf (1995): Empfehlungen für Radverkehrsanlagen – ERA 95, Ausgabe 1995, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen (1998): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Instandsetzung/Erneuerung von Verkehrsflächen – Asphaltbauweisen – ZTV-BEA-StB 98. Arbeitsgruppe Asphaltstraßen, Arbeitsausschuss Erhaltung von Asphaltstraßen, Köln, 1998
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn (2001a): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen – RStO 01, Ausgabe 2001, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Sonderaufgaben (2001b): Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen – RPE-Stra 01, Ausgabe 2001
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Sonderaufgaben (2001c): Arbeitspapier Nr. 9/M 2 zur ZEB, Messtechnische Zustandserfassung, Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen), Ausgabe 2001, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn (2003): Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe – M BGriff, Ausgabe 2003, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung (2005a): Arbeitspapier Nr. 9/K2.2, Reihe K: Kommunale Belange, Abschnitt K 2: Zustandserfassung, Unterabschnitt K2.2: Vorbereitung und Durchführung der visuellen Zustandserfassung für innerörtliche Verkehrsflächen, Ausgabe 2005, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung (2005b): Arbeitspapier Nr. 9/K2.3, Reihe K: Kommunale Belange, Abschnitt K 2: Zustandserfassung, Unterabschnitt K2.3: Schadenskatalog für die messtechnische und visuelle Zustandserfassung, Ausgabe 2005, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Sonderaufgaben (2006): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen – ZTV ZEB-StB, Ausgabe 2006, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanager (2009): Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen – TP Eben – Berührungslose Messungen, Ausgabe 2009, Köln

- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf (2010): Empfehlungen für Radverkehrsanlagen – ERA 2010, Ausgabe 2010, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement (2012): Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen – E EMI 2012, Ausgabe 2012, Köln
- FGSV – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen – RStO 12, Ausgabe 2012, Köln
- FISCHER, S., GÖRES, B., GONDEK, K., SAYN, D. (2006): Schwingungseinwirkung an Fahrerarbeitenplätzen von Kraftomnibussen. BGIA-Report 10/2006. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG). Sankt Augustin 2006. http://www.hvbg.de/d/bia/pub/rep/rep05/pdf_datei/biar1006/gesamt.pdf
- HELLER, S., BÜHLER, B., JEUTHE, U. (1997): Weiterentwicklung von Untersuchungsansätzen zur Optimierung der objektbezogenen Erhaltungsplanung in Teilnetzen unter Berücksichtigung finanzieller Restriktionen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 739, Bonn-Bad Godesberg, 1997
- HELLER, S., KÖHLER, M., SCHNIERING, A. (2005): Ergänzung der Bewertung des Straßenzustandes freier Strecken um eine gleichwertige Bewertung von Ortsdurchfahrten der Bundesstraßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 909, Bonn 2005
- HELLER, S. (2009): Zustandserfassung und -bewertung der Radwege in Brandenburg 2008, Ergebnisse der Zustandsbewertung, Vorschlag zu dem Bewertungsverfahren, unveröffentlicht, Darmstadt 2009
- HINSCH, K., KRAUSE, G., MAERSCHALK, G. (1992): Erfassung des Zustands und Prognose des Finanzbedarfs für die Erhaltung der Straßenbefestigungen in der Landeshauptstadt München. Schlussbericht zum Gutachten im Auftrag der Landeshauptstadt München, Baureferat, Hauptabteilung Tiefbau, Abteilung Straßenbau. PM-Consult. München, August 1992 und Mai 1994
- HINSCH, K., KRAUSE, G., MAERSCHALK, G.; RÜBENSAM, J. (2005): Katalogisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 915, Bonn 2005
- HINSCH, K., MAERSCHALK, G. (1997B): Ermittlung des Erhaltungsbedarfs für den Straßenoberbau unter Berücksichtigung des Zustands der Verkehrsflächen der Stadt Regensburg. Kurzbericht und Kurzfassung zum Gutachten im Auftrag des Tiefbauamts der Stadt Regensburg. SEP Maerschalk. München, November 1997
- HVBG – Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (2006): Vibrationseinwirkung an Arbeitsplätzen – Kennwerte der Hand-Arm- und Ganzkörper-Schwingungsbelastung, BGIA-Report 6/2006, Sankt Augustin 2006
- KRAUSE, G (2000): Abgrenzung von Mängelklassen zur Kennzeichnung von Schadensursachen mithilfe messtechnisch erfasster Bestands- und Zustandsmerkmale. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 790, Bonn-Bad Godesberg 2000
- KRAUSE, G., MAERSCHALK, G. (1996): Ermittlung des Erhaltungsbedarfs für die Fahrbahnen und Nebenflächen der Landeshauptstadt Dresden auf der Grundlage der Erfassung des Straßenzustands. Abschlussbericht zum Gutachten im Auftrag des Straßen- und Tiefbauamts der LH Dresden. PM-Consult, München, Dezember 1996
- KRAUSE, G., MAERSCHALK, G., HINSCH, K. (1997a): Ermittlung des Erhaltungsbedarfs für das Straßennetz der Stadt Leipzig unter Berücksichtigung des Straßenzustands. Abschlussbericht zum Gutachten im Auftrag des Tiefbauamts der Stadt Leipzig. SEP Maerschalk, München, April 1997
- MAERSCHALK, G. (2000): Richtlinien für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen. Schlussbericht zum Forschungsauftrag 77.418/1997 des Bundesministers für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen. SEP Maerschalk, München, Mai 2000

- MAERSCHALK, G., KRAUSE, G. (2004): Erstanwendung der vorliegenden Algorithmen für die Erhaltungsplanung in ausgewählten Bauämtern. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 878, Bonn 2004
- MÜNZBERGER, E. (2005): Modularer Lehrbrief „Einführung in die Arbeitsmedizin“, Exposition gegenüber physikalischen Arbeitsumweltfaktoren. Universität Rostock, Medizinische Fakultät, Institut für Arbeits- und Sozialmedizin. <http://arb.med.med.uni-rostock.de/lehrbrief/physik.htm>
- NCC AB (2009): NCC besiktigar cykelvägar med datorutrustad hybridcykel. Pressemitteilung (Oktober 2009). <http://www.mynewsdesk.com/se/pressroom/ncc/pressrelease/view/ncc-besiktigar-cykelvaegar-med-datorutrustad-hybridcykel-325526>
- NISKA, A., SJÖGREN, L. (2007): Measuring methods for assessing the condition of cycle paths. A review of existing knowledge. VTI rapport 584, VTI Swedish National Road and Transport Research Institute. 2007. <http://www.vti.se/EPIBrowser/Publikationer/R584.pdf>
- OEFNER, G., KRMEK, M., NUßRAINER, C. (2004): Kostenermittlung für Erhaltungsmaßnahmen zur Bestimmung der Kosteneingangsgrößen für das PMS (Pavement-Management-System). Institut für Verkehrswesen und Straßenverkehrsanlagen, Universität der Bundeswehr München, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 896, Bonn, 2004
- OERTELT, S., MAERSCHALK, G. (2006): Verbesserung der praxisnahen Bewertung des Straßenzustandes. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 950, Bonn 2006
- OERTELT, S. (2007): Empirische Absicherung der Verhaltensfunktionen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen und PMS-Anwendungen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 965, Bonn 2007
- PIVIT, R. (1988): Erschütternde Radwege – Untersuchung des Schwingungskomforts an Fahrrädern. *Pro Velo*, Nr. 12 (März 1988). <http://lust.aufzukunft.de/pivit/comfort/default.html>
- RÜBENSAM, J., SCHULZE, F. (1996): Entwicklung einer Methodik zur zweckmäßigen Zusammenfassung maßnahmebedürftiger Abschnitte der BAB-Betriebsstrecken auf der Grundlage von Zustands- und Bestandsdaten. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 736, Bonn 1996
- Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH (2011): *Fahrrad-Monitor Deutschland 2011*, Ergebnisse einer repräsentativen Online-Befragung, Heidelberg 2011. http://www.adfc.de/files/2/38/Fahrrad-Monitor2011-Sinus-Report_final.pdf
- SOBOTTA, R., DEING, J., GLAHE, B. (2005): Zustandserfassung und Dringlichkeitsreihung von Unterhaltungsmaßnahmen für das Radwegenetz der Stadt Nordhorn. *Straße und Autobahn*, Jg. 56 Heft 2, 2005
- SOCINA, M., LELUSZ, R. (2007): Rohdaten der Straßenzustandserfassung. Formatdefinition auf XML-Basis. Dokumentversion 1.0.0 vom 30.04. 2007. <http://www.bast.de>
- Sozialverband VdK Deutschland e. V. (2008): *Handbuch Barrierefreie Verkehrsraumgestaltung*. Bonn 2008
- STEINAUER, B., UECKERMANN, A., MAERSCHALK, G. (2006): Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen. Schlussbericht zum FE 77.469/2002, *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft S 46, 2006
- STRASSER, H. (1993): Mechanische Schwingungen. Kapitel 2.5.2. In: HETTINGER, Th. und WOBBE, G. (Hrsg.): *Kompodium der Arbeitswissenschaft*. Kiel Verlag, Ludwigshafen, 1993
- THOMAS, F. (2000): Partitioning a road into homogeneous sections based on road surface measurements. 1st European Pavement Management System Conference, Budapest 2000
- UECKERMANN, A. (2005): *Das Bewertete Längsprofil*. *Straße und Autobahn* 1 (2005)
- UECKERMANN, A. (2012): Entwicklung eines Fahrradmodells zur Berechnung der Schwingungseinwirkungen auf Radwegen. Präsentation zur 5. Betreuungssitzung zum FE 29.222 „Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen“ am 22.03.2012 in Berlin, unveröffentlicht
- UPI – Umwelt- und Prognose-Institut (2000): *Entwicklung und Potenziale des Fahrradverkehrs*,

- Maßnahmen zur Ausschöpfung des Fahrradpotenzials in der Verkehrsplanung. UPI-Bericht 41, 3. erw. Aufl., 2000, <http://www.upi-institut.de/upi41.htm>
- Verein deutscher Ingenieure (2002): Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörperschwingungen. VDI-Richtlinie VDI 2057, Blatt 1, Beuth Verlag, Berlin 2002
- Verein deutscher Ingenieure (2012): Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Hand-Arm-Schwingungen. VDI-Richtlinie VDI 2057, Blatt 2, Beuth Verlag, Berlin 2012
- VOGT, F. (2007): Visuelle ZEB auf Landesstraßen. 1. Erfahrungsaustausch ZEB auf Landesstraßen – Darmstadt, 16. und 17. Oktober 2007. Tagungsmitschrift, unveröffentlicht
- WÄCHTER, M., RIEß, F., ZACHARIAS, N. (1999): Simulation des Schwingkomforts gefederter Fahrräder. Abschlussbericht des Forschungsprojektes S383, Fachbereich Physik, Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg, Juni 1999
- WENINGER-VYCUDIL, A. (2001) Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches Pavement-Management-System. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften, Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Wien 2001
- WIRTH, W. (1998): Radwege planen und bauen mit Asphalt. Deutscher Asphaltverband e. V., Bonn 1998
- ZANDER, U., BIRBAUM, J. (2011): Aktualisierung der Kostendaten. Schlussbericht zum FE 29.0196/2008/ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Universität Siegen, Siegen, Juni 2011

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2003

S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Aufgeständerte Gründungspolster
Rogner, Stelter € 14,00

S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung der ZTV-M 02
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50

S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundesfernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 25./26. September 2000 in Saarbrücken € 13,00

S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saarbrücken € 13,50

2004

S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System € 19,50

S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues
Golkowski € 13,50

S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2002 in Saarbrücken € 13,50

S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 17,50

S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

2005

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

2006

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offener Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offener Asphalt (OPA)
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalserkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Ripke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de](http://bast.opus.hbz-nrw.de) heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offener Asphalt – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier
Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.