

## Kurzfassung - Abstract

### Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten

Gegenstand des Forschungsvorhabens war es, aus den Ergebnissen zerstörungsfrei arbeitender Messsysteme und erweiterten Informationen (z.B. Aufbau, Alter und Zustand der Strecken) eine Systematik zu entwickeln, mit der die Ermittlung von repräsentativen homogenen Abschnitten möglich ist.

Auf vier ausgewählten Beton- und drei Asphaltabschnitten erfolgte die Analyse der ZEB-Daten und der nur lückenhaft vorliegenden Bestandsdaten. Parallel dazu erfolgten Messungen mit dem Georadar. Zur Verifizierung der ZEB-Ergebnisse und zur Interpretation der Ergebnisse der Georadarmessungen wurde zusätzlich eine Streckenbegehung mit visueller Zustandserfassung durchgeführt. Gleichzeitig konnten mit der visuellen Zustandserfassung in begrenztem Umfang fehlende Angaben zur Erhaltungsgeschichte der Fahrbahnen gesammelt werden. Anhand von Bohrkernentnahmen wurden Schichtaufbauten und Schichtdicken ermittelt, die einerseits dem Abgleich mit Bestandsdaten und andererseits zur Kalibrierung der Georadarmessungen dienen.

Zu den relevanten Einzelmerkmalen hinsichtlich der strukturellen Substanz wurden homogene Abschnitte gebildet, die in einem weiteren Schritt zu übergeordneten homogenen Abschnitten zusammengefasst wurden.

Zur Untersuchung dieser Abschnittsbildung wurden FWD-Messungen durchgeführt und die Abschnittsbildung aufgabenbezogen interpretiert. Aus zwei parallel dazu laufenden Forschungsarbeiten wurden die Ergebnisse von Laborversuchen aus den an diesen Strecken entnommenen Bohrkernen zur Untersuchung der übergeordneten Abschnitte hinzugezogen.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass eine Abschnittsbildung für eine spätere Bewertung der strukturellen Substanz prinzipiell erfolgen kann, wenn relevante ZEB-Daten mit einer visuellen Zustandserfassung präzisiert und mit qualitativ hochwertigen Georadardaten kombiniert werden. Letztere müssen momentan jedoch noch mit großem Aufwand ausgewertet werden. FWD-Daten waren bei den untersuchten Strecken als Ergänzung und Präzisierung nur in einigen Fällen sinnvoll.

Bei Strecken mit relativ homogenen Randbedingungen und geringem Schädigungsgrad sind statistisch repräsentative Bohrkernentnahmen dennoch erforderlich, um Abschnittsgrenzen von Ho-

mogenbereichen zu detektieren, die dann nur noch von den mechanischen Kenngrößen des gebundenen Oberbaus abhängig sind.

### Determining representative substance values in homogeneous sections

Subject of the research project was to develop a system from the results of non-destructively working measurement systems and advanced information (e.g. construction, age and condition of roadways) by which the determination of representative homogeneous sections is possible.

On four selected concrete and three asphalt sections ZEB data and only fragmentary present inventory data were analysed. In parallel, measurements with the ground penetrating radar (GPR) were made. To verify the ZEB results and to interpret the results of GPR measurements additional route inspections with visual condition detection were carried out. At the same time missing data according to the maintain history of pavements could be collected to a limited extent during the visual condition detection. By means of core withdrawals layer structures and layer thicknesses were determined. They were used to review existing data and also to calibrate GPR measurements.

Regarding the structural substance homogeneous sections were formed from the relevant individual characteristics, which were summarized to superior homogeneous sections in a further step.

To test the section definition FWD measurements were performed, which interprets the task-related section definition. Of two parallel running research projects, the results of laboratory tests on drill cores taken from the same routes were consulted to check the superior sections

As a result, it can be determined that in principle a section definition for a subsequent evaluation of the structural substance can be made, if relevant ZEB-data are specified with visual condition detection and combined with high-quality GPR data. However, these need currently to be evaluated with great effort. Only in some cases FWD data were useful for the examined sections as a supplement and clarification.

For systems with relatively homogeneous boundary conditions and low degree of damage statistically representative core withdrawals are still required to detect section borders of homogeneous regions which are then only dependent on the mechanical characteristics of the bound superstructure.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>9</b>	4.2.2.9	Zusammenfassung - Messung für die Zustandserfassung .....	23
1.1	Kenntnisstand in Wissenschaft und Technik .....	9	4.2.2.10	Qualitätskontrolle .....	23
1.2	Gesamtziel .....	10	4.2.2.11	Zusammenfassung - Messung für die Qualitätskontrolle .....	23
1.3	Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung.....	10	4.2.2.12	Auswertung .....	23
1.4	Methodik des Vorgehens .....	10	4.2.2.13	Messprotokoll.....	24
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Substanzbewertung.....</b>	<b>12</b>	4.2.2.14	Datenbearbeitung .....	24
2.1	Status quo – ZEB .....	12	4.2.2.15	Auswertung und Interpretation.....	24
2.1.1	Allgemeines .....	12	4.2.3	Messdurchführung auf den Prüfabschnitten .....	24
2.1.2	Zustandsaufnahme .....	12	4.2.4	Messdurchführung auf den Betonstrecken .....	25
2.1.3	Normierung .....	13	4.2.5	Messdurchführung auf den Asphaltstrecken .....	26
2.1.4	Ermittlung von Teilwerten und des Gesamtwertes.....	14	4.2.6	Ergebnisse.....	28
2.1.5	Prognose der Zustandsentwicklung, Lebenszyklusprognose .....	14	4.3	Falling Weight Deflectometer (FWD) .....	28
2.2	Ableitung repräsentativer Substanzwerte .	15	4.3.1	Durchführung und Auswertung von Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer .....	29
2.3	Schlussfolgerungen für die Restsubstanzbewertung.....	16	4.3.1.1	FWD-Messungen auf Betonbauweisen	29
<b>3</b>	<b>Untersuchungsverlauf – gewählte Vorgehensweise .....</b>	<b>18</b>	4.3.1.2	FWD-Messungen auf Asphaltbauweisen .....	31
3.1	Untersuchungsprogramm.....	18	4.3.2	Durchführung der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf Bundesautobahnen .....	34
3.2	Arbeitsschritte.....	18	4.4	Visuelle Zustandsaufnahme.....	35
<b>4</b>	<b>Angewandte Mess- und Prüfverfahren ....</b>	<b>20</b>	4.4.1	Strecken mit Betonbefestigung .....	35
4.1	Allgemeines .....	20	4.4.2	Strecken mit Asphaltbefestigung.....	36
4.2	Georadar .....	20	4.5	Bohrkernentnahmen und -unter- suchungen .....	38
4.2.1	Funktionsprinzip des Georadars.....	20	4.5.1	Strecken mit Betonbefestigung .....	38
4.2.2	Durchführung von Radarmessungen auf Straßen - Grundsätzliches .....	20	4.5.2	Strecken mit Asphaltbefestigung.....	39
4.2.2.1	Messungen in Längsrichtung .....	21	<b>5</b>	<b>Bildung und Untersuchung übergeordneter homogener Abschnitte..</b>	<b>40</b>
4.2.2.2	Erzeugung von Querprofilen .....	22	5.1	Bewertung der Ergebnisse aus Georadarmessungen .....	40
4.2.2.3	Digitales Video .....	22	5.2	Überlagerung mit ZEB- und Bestandsdaten und Daten der visuellen Zustandsaufnahme .....	41
4.2.2.4	Wegmessung / Lagezuordnung .....	22	5.3	Bildung homogener Abschnitte aus Einzelmerkmalen.....	42
4.2.2.5	Anmerkungen zum Einsatz von Hornantennen .....	22	5.3.1	Georadar-Detektionen von Inhomogenitäten.....	42
4.2.2.6	Ausrichtung der Antennen und Anbringung von GPS, Kameras.....	22	5.3.2	Georadar-Detektionen der Unterkante Beton .....	42
4.2.2.7	Datenkontrolle und Datensicherung.....	23			
4.2.2.8	Messprotokoll .....	23			

5.3.3	Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze .....	43	6.4.3	Analysen für VS 3 .....	92
5.3.4	Visuelle Zustandsaufnahme von Rissbildungen .....	43	6.4.4	Analysen für VS 4 .....	92
5.3.5	Zustandswert Längs- und Querrisse der ZEB .....	44	6.5	Untersuchung der Ergebnisse mithilfe von punktuellen Substanzwerten .....	92
5.3.6	Bildung übergeordneter homogener Abschnitte .....	44	6.5.1	Allgemeines .....	92
5.4	Auswertung der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer .....	45	6.5.2	Analysen für VS 1 .....	92
5.4.1	Strecken in Betonbauweise .....	46	6.5.3	Analysen für VS 2 .....	93
5.4.2	Zusammenfassung zur Validierung der gebildeten homogenen Abschnitte auf Betonbefestigungen .....	61	6.5.4	Analysen für VS 3 .....	94
5.4.3	Strecken in Asphaltbauweise .....	61	6.5.5	Analysen für VS 4 .....	95
5.4.4	Ermittlung von zusätzlichen Strukturparametern mittels Schwingungsanalysen .....	78	<b>7</b>	<b>Analyse der Asphaltstrecken .....</b>	<b>96</b>
5.4.4.1	Auswertung mittels Schwingungsanalyse von Straßenbefestigungen in Betonbauweise .....	78	7.1	Allgemeines .....	96
5.4.4.2	Auswertung mittels Schwingungsanalyse von Straßenbefestigungen in Asphaltbauweise .....	81	7.2	Bildung homogener Abschnitte auf Basis von Zustandswerten .....	96
5.4.4.3	Auswertung der gewählten Streckenabschnitte mittels Schwingungsanalyse .....	84	7.2.1	Allgemeines .....	96
<b>6</b>	<b>Analyse der Betonstrecken .....</b>	<b>88</b>	7.2.2	Analysen für VS 5 .....	96
6.1	Allgemeines .....	88	7.2.3	Analysen für VS 6 .....	97
6.2	Bildung homogener Abschnitte je Einzelmerkmal .....	88	7.2.4	Analysen für VS 7 .....	98
6.2.1	Allgemeines .....	88	7.3	Bildung homogener Einzelabschnitte auf Basis von Georadarmessungen .....	99
6.2.2	Analysen für VS 1 .....	88	7.3.1	Allgemeines .....	99
6.2.3	Analysen für VS 2 .....	88	7.3.2	Analysen für VS 5 .....	99
6.2.4	Analysen für VS 3 .....	89	7.3.3	Analysen für VS 6 .....	100
6.2.5	Analysen für VS 4 .....	89	7.3.4	Analysen für VS 7 .....	100
6.3	Bildung übergeordneter homogener Abschnitte .....	90	7.4	Bildung homogener Einzelabschnitte auf Basis von FWD-Messungen .....	101
6.3.1	Analysen für VS 1 .....	90	7.4.1	Allgemeines .....	101
6.3.2	Analysen für VS 2 .....	90	7.4.2	Analysen für VS 5 .....	101
6.3.3	Analysen für VS 3 .....	91	7.4.3	Analysen für VS 6 .....	101
6.3.4	Analysen für VS 4 .....	91	7.4.4	Analysen für VS 7 .....	102
6.4	Untersuchung der Bildung homogener Abschnitte anhand der Ergebnisse der FWD-Messungen .....	91	7.5	Untersuchung der Ergebnisse mithilfe von punktuellen Substanzwerten .....	102
6.4.1	Analysen für VS 1 .....	91	7.5.1	Allgemeines .....	102
6.4.2	Analysen für VS 2 .....	91	7.5.2	Analysen für VS 5 .....	103
			7.5.3	Analysen für VS 6 .....	105
			7.5.4	Analysen für VS 7 .....	106
			7.6	Ergebnisbewertung für die Asphaltstrecken .....	108
			<b>8</b>	<b>Zusammenfassende Betrachtung .....</b>	<b>111</b>
			<b>9</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>113</b>
			<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>115</b>

---

**11 Verwendete Regelwerke..... 116**

- Anhang 1:** Streckenbänder für Substanzbewertung aus visueller Zustandserfassung und zerstörungsfreien Messungen
- Anhang 2:** Bildung homogener Abschnitte anhand von Einzelmerkmalen
- Anhang 3:** Bildung übergeordneter homogener Abschnitte auf Versuchsstrecken mit Betonfahrbahnen
- Anhang 4:** Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen auf Versuchsstrecken mit Betonfahrbahnen
- Anhang 5:** Ermittlung der Restnutzungsdauer für die Versuchsstrecken mit Asphaltaufbau

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BASTArchiv ELBA unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar



# 1 Aufgabenstellung

## 1.1 Kenntnisstand in Wissenschaft und Technik

Die Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten ist unabdingbar, wenn Fragen der Wirtschaftlichkeit oder Fragen der Restnutzungsdauer genügend genau beantwortet werden sollen. Oberflächeneigenschaften lassen hingegen zum größten Teil nur Schlüsse zu, die zur Bestimmung von Gebrauchseigenschaften und deren Entwicklung geeignet sind.

Für eine netzweite oder teilnetzweite Ermittlung von Substanzwerten ist es erforderlich, geeignete homogene Abschnitte zu bilden, in denen stichprobenhaft Substanzwerte bestimmt werden, welche den jeweiligen Abschnitt repräsentieren. Dabei sollten aus wirtschaftlichen Gründen möglichst zerstörungsfreie Prüfmethoden zum Einsatz kommen, die zudem eine Aussagekraft über den gesamten Abschnitt haben. Neben kontinuierlichen Messverfahren sind auch Verfahren geeignet, die eine genügend große Stichprobenzahl aufweisen.

Die Restnutzungsdauer ist nicht nur im Rahmen der klassischen Erhaltungsplanung wichtig, sie betrifft auch die Abwicklung von Funktionsbauverträgen und Konzessionsverträgen (ÖPP-Modelle), bei denen eine turnusmäßige Überprüfung der Gebrauchs- und Substanzwerte vereinbart wird, wobei letztere momentan ausschließlich aus dem Merkmal Oberflächenbild abgeleitet werden. Die strukturelle Substanz des befestigten Oberbaus kann damit zurzeit nicht berücksichtigt werden. Dies betrifft auch den Zeitpunkt der Abnahme am Ende der Vertragszeit, z.B. nach 30 Jahren.

Die theoretischen Grundsätze für eine Bewertung der strukturellen Eigenschaften liefert die rechnerische Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen mit Asphaltdeckschicht oder mit Betondecke, die in den vergangenen Jahren aufgestellt und schrittweise weiterentwickelt wurde. Die hieraus resultierenden Softwareprodukte PaDesTo bzw. AWDSTAKO wurde zur Ermittlung bzw. Überprüfung der Gleichwertigkeit unterschiedlicher Konstruktionen, insbesondere im Rahmen von funktionalen Ausschreibungen vom BMVBS eingeführt. Die Verfahren der rechnerischen Dimensionierung sind in den [RDO Asphalt 09] bzw. [RDO Beton 09] beschrieben und bilden gleichzeitig die Grundlage für eine Bewertung der strukturellen Substanz. Die dort zugrunde gelegten Stoffmerkmale und das Ermüdungsverhalten sowie die Randbedingungen aus Geometrie, Schichtdicken und Unterlage können für eine erste Bewertung herangezogen werden.

Ansätze für ein Schadensakkumulationsmodell, auf denen aufgebaut werden kann, sind in [VI/KI/RI 2011] zu finden. Die Ermittlung von praxisnahen Ausfallwahrscheinlichkeiten kann hierdurch von der Dimensionierung auf die Ermittlung der strukturellen Substanz von Betonbefestigungen überführt werden. Eine analoge Vorgehensweise für Asphaltbefestigungen wird zurzeit innerhalb [FE 04.0215/2008/AGB] erforscht.

Zur Thematik der Ermüdungsfestigkeit und Nacherhärtung von Betondecken werden zurzeit Untersuchungen innerhalb des [FE 04.0433/2009/DGB] auch an bestehenden Streckenabschnitten durchgeführt. Erste Erfolg versprechende Versuche zur zerstörungsfreien Prüfung der Lagerungsbedingungen von Betondecken in situ wurden innerhalb des Innovationsprogramms [VI/KIE/MU/NIE/RI 2011] durchgeführt. Darin wurden u.a. die Grundlagen zur Beschreibung der Restnutzungsdauer gelegt.

Für Asphaltbefestigungen erlaubt das in [FE 04.199/2004/ARB] beschriebene Verfahren eine detaillierte Bestimmung der Materialkennwerte und Einflussgrößen, die zur Beschreibung der Restnutzungsdauer notwendig sind. Nachteilig sind jedoch der vergleichsweise hohe Versuchsaufwand und Probenbedarf sowie die notwendige Anwendung zerstörender Prüfverfahren.

In neueren Forschungsarbeiten, wie [FE 04.227/2009/ARB] erfolgt eine Fortschreibung der Verfahrensweise zur Substanzbewertung. Die Kombination zerstörender Prüfverfahren mit Ergebnissen von zerstörungsfreien Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) stellt dabei einen Schwerpunkt dar.

Tragfähigkeitsmessungen erlauben allein keine Bestimmung des Nutzungsausfallzeitpunktes, können jedoch in Kombination mit der o.g. Vorgehensweise wichtige Kennwerte liefern. Aus Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD können mechanische Reaktionen der gesamten Konstruktion zum Messzeitpunkt ermittelt und beurteilt werden, woraus Kenngrößen zu Asphaltsschichten, gebundenen oder ungebundenen Tragschichten und zum Untergrund oder Unterbau abgeleitet werden können. Ähnliche Ergebnisse können auch bei Oberbauten mit Betondecke erzielt werden.

Untersuchungsergebnisse an diskreten Punkten (wie z.B. Bohrkernuntersuchungen) sind nur dann für gesamte Abschnitte repräsentativ, wenn sichergestellt werden kann, dass die ermittelten Eigenschaften im gesamten Betrachtungsabschnitt gültig sind. Deshalb sind die o.g. Verfahren mit aussagekräftigen zerstörungsfreien Prüfverfahren zu kombinieren, die eine genügend große Stichprobenzahl aufweisen.

## 1.2 Gesamtziel

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, eine Systematik zu entwickeln, mit der die Ermittlung von repräsentativen homogenen Abschnitten möglich ist. Dabei sollen die Ergebnisse zerstörungsfrei arbeitender Messsysteme mit erweiterten Informationen (z.B. Aufbau, Alter und Zustand der Strecken) kombiniert werden, um anschließend übergeordnete homogene Abschnitte zu bilden und diese nach Möglichkeit zu klassifizieren.

Weiterhin ist eine Untersuchung des Verfahrens zur Bildung homogener Abschnitte anhand von Tragfähigkeitsmessungen und von stichprobenartigen Materialuntersuchungen durchzuführen.

## 1.3 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Der strukturelle Zustand von Straßenbefestigungen ist im Hinblick auf Strukturschäden und die Restnutzungsdauer im Rahmen der klassischen Erhaltungsplanung und für Funktionsbauverträge während und am Ende der Vertragslaufzeit von besonderer Bedeutung. Für eine ausgereifte Anwendung der neuen Bauvertragsformen ist es wichtig, die Bewertung der strukturellen Substanz in das Gesamtkonzept der funktionalen Ausschreibung einzubinden, da dies bislang noch nicht Bestandteil war.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen in Ergänzung zur bisherigen Vorgehensweise die Grundlagen geschaffen werden, welche die Beurteilung längerer Streckenabschnitte (mit mehreren homogenen Einzelabschnitten) erlauben. Damit kommt nicht nur die Einzelbetrachtung ausgewählter Strecken in Betracht, sondern es können zukünftig Betrachtungen im größeren Umfang bis hin zu netzweiten Betrachtungen erfolgen.

## 1.4 Methodik des Vorgehens

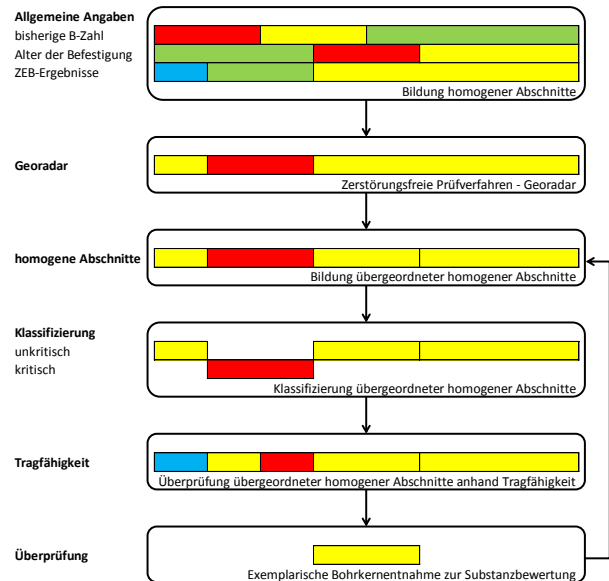
Zur systematischen Vorgehensweise ist es erforderlich, prinzipiell die gleichen Schritte in eindeutiger Reihenfolge für die Asphalt- und die Betonbauweise anzuwenden. Dabei können bzw. müssen sich einige Schritte in der Art der Ausführung bauweisenbedingt signifikant voneinander unterscheiden. Im Einzelnen sind folgende Hauptarbeitsschritte in der aufgeführten Reihenfolge vorgesehen:

- Auswahl von drei geeigneten Asphaltstrecken aus dem Fundus der untersuchten Strecken des [FE 04.227/2009/ARB] unter der Maßgabe, dass die dort ermittelten Temperatursteifigkeits- und Ermüdungsfunktionen für dieses FE nutzbar sind (Übernahme der Ergebnisse). Dabei soll die jeweilige Betrachtungslänge auf 5 bis
- 10 km je Strecke erweitert werden, so dass diese den üblichen Abschnittslängen von Funktionsbauverträgen entspricht.
- Verwendung der drei Betonstrecken aus dem [FE 04.433/2009/DGB] unter der Maßgabe, dass die dort durchgeführten statischen Spaltzugversuche und Ermüdungsversuche für dieses FE nutzbar sind (Übernahme der Ergebnisse). Dabei soll die jeweilige Betrachtungslänge auf 5 bis 10 km je Strecke erweitert werden, so dass diese den üblichen Abschnittslängen von Funktionsbauverträgen entspricht. Eine vierte nur 4 Jahre alte Betonstrecke wird zusätzlich in die Untersuchungen einbezogen.
- Georadaruntersuchungen an den sieben ausgewählten Strecken durch Messung im Hauptfahrstreifen (Messbreite ca. 2,40 m). Je Messabschnitt werden zwei Messfahrten mit einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/h durchgeführt, wobei für jede Strecke ein Profil in Längsrichtung mit einer Eindringtiefe von maximal 0,7 m und einem Abstand von ca. 0,4 m erzeugt wird. Die horizontale Auflösung beträgt 40 scans/m. Nach durchzuführender Kalibrierung liegt die Messgenauigkeit der Schichtdicken des gebundenen Oberbaus im Bereich von 1 cm. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem Innovationsprogramm [VI/KIE/MU/NIE/RI 2011] erfolgt eine Ermittlung der Hohllagen mit einer Dicke ab ca. 1 cm.
- Übernahme der zur Verfügung gestellten Zustandsdaten (ZEB) sowie der gegebenenfalls zur Verfügung gestellten Verkehrs- und Witterungsdaten, datentechnische Übernahme von Informationen zum Aufbau und Alter der Schichten des Fahrbahnoberbaus.
- Digitale Zusammenführung der Daten in einem Auswertesystem (gegebenenfalls Datenbank) und grafische Aufbereitung
- Bildung von homogenen Abschnitten für die einzelnen Kenngrößen nach dem mathematischen Verfahren im Arbeitspapier „Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen“ [FGSV 431]
- Kombinierte Auswertung der Daten und Bildung übergeordneter homogener Abschnitte, gegebenenfalls teilautomatisiert.
- Entwicklung einer Systematik zur Klassifizierung der übergeordneten homogenen Abschnitte und Anwendung einer Systematik für jede Strecke unter Berücksichtigung der jeweiligen Abschnittslängen
- Untersuchung und Abgrenzung der übergeordneten homogenen Abschnitte mit Hilfe von Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD unter Anmietung des in der Bundesanstalt für Straßenwesen vorhandenen Messgerätes. Dazu werden die Tragfähigkeitsmessungen mit dem im Innovationsprogramm „Strukturelle Sub-

stanzbewertung und Restwertermittlung von Verkehrsflächenbefestigungen“ [GR/LI/HÜ/ZA 2012] erarbeiteten Verfahren ausgewertet. Mit diesem Verfahren kann versucht werden, die Steifigkeiten der einzelnen gebundenen und ungebundenen Schichten im Gesamtaufbau getrennt voneinander zu bestimmen und zu bewerten. Da das Verfahren auf physikalischen Zusammenhängen basiert, wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse deutlich zuverlässiger sind und direkt für Dimensionierungsrechnungen verwendet werden können. Bei der Auswertung der Falling Weight Deflectometer-Messungen werden auch die übrigen Kennwerte der Befestigungen betrachtet. Für Betonbefestigungen sind das die Relativbewegung und der Wirksamkeitsindex  $W$  und für die Asphaltbefestigungen die Verformung im Lastzentrum  $D_0$  und der Krümmungsradius  $R_0$  bzw. die abgeleiteten Jendia-Parameter wie  $T_z$  für die Tragfähigkeit des Oberbaus und  $U_I$  für die des Unterbaus/Untergrundes. Zudem sind Messungen auf den Betonbefestigungen zur Beurteilung der Auflagerbedingungen mit verschiedenen Laststufen vorgesehen.

- Zur Festlegung des für die homogene Abschnittsbildung herangezogenen Parameters werden Relativbetrachtungen mit den übrigen Aufbaukennwerten durchgeführt.
- Es folgt die Anwendung von Substanzbewertungsverfahren an den sechs ausgewählten Strecken (3x Asphalt, 3x Beton) durch Verwendung der Ergebnisse aus den [FE04.433/2009/DGB] und [FE04.2272009/ARB]. Zusätzlich wird an einer Beton- und an einer Asphaltstrecke, exemplarisch die Bestimmung der relevanten Materialkennwerte durchgeführt, um die zuvor gebildeten übergeordneten homogenen Abschnitte nachzuweisen. Diese Prüfungen werden jedoch in einem anderen übergeordneten homogenen Abschnitt durchgeführt.
- Anschließend wird ein Vorschlag für die Standardisierung des Verfahrens zur Bildung von homogenen Abschnitten für Autobahnen in Asphaltbauweise und in Betonbauweise unterbreitet.

Diese Arbeitsschritte sind prinzipiell für Beton- und Asphaltbefestigungen identisch und in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Durch die Nutzung der Forschungsergebnisse aus [FE04.0227/2009/ARB] und [FE04.0433/2009/DGB] stehen Laborergebnisse zur Substanzbewertung zur Verfügung (3x Asphalt, 3x Beton), mit deren Hilfe die Klassifizierung der Abschnittsbildung untersucht werden kann. Zusätzlich wird die Abschnittsbildung durch Laborergebnisse exemplarisch an zwei weiteren übergeordneten Abschnitten innerhalb der o.g. Strecken untersucht.



**Abbildung 1:** Vorgehensweise für FE 04.0249 und Arbeitsschritte

Die oben beschriebenen Arbeitsschritte führen jeweils zu homogenen Abschnitten, die merkmalsbezogen ermittelt werden. Nach Klassifizierung (Normierung) und Wichtung ist eine Zusammenfassung der Einzelabschnitte zu übergeordneten homogenen Abschnitten möglich. In Abbildung 1 ist diese Differenzierung qualitativ durch eine farbige Kennzeichnung dargestellt (fiktives Beispiel).

Eine Untersuchung der Verfahrensweise wird mit Hilfe von Tragfähigkeitsmessungen und Laboruntersuchungen erreicht. Durch eine iterative Vorgehensweise ist es möglich, die in den vorherigen Arbeitsschritten getroffenen Annahmen zu verifizieren. Folgende Punkte werden dabei untersucht und ggf. iterativ angepasst:

- Bildung homogener Abschnitte anhand von Einzelmerkmalen (Arbeitsschritte 1 bis 3)
- Wichtung der Einzelmerkmale zur Bildung übergeordneter homogener Abschnitte (Arbeitsschritt 4)
- Klassifizierung der übergeordneten homogenen Abschnitte (Arbeitsschritt 5)
- Bewertung der Ergebnisse von Tragfähigkeitsmessungen (Arbeitsschritt 6)

## 2 Grundlagen der Substanzbewertung

### 2.1 Status quo – ZEB

#### 2.1.1 Allgemeines

Seit 1991 wird die „Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen“ (ZEB) regelmäßig im Bundesfernstraßennetz durchgeführt. Die Erfassung auf Bundesfernstraßen wird messtechnisch mit schnell fahrenden Messfahrzeugen in einem regelmäßigen Turnus von 4 Jahren in 3 Teilprojekten vorgenommen. Im ersten Teilprojekt wird die Längs- und Querebenheit, im zweiten Teilprojekt die Griffigkeit und im dritten Teilprojekt das Oberflächenbild erfasst. Die Bewertung und Auswertung der Daten erfolgt im Teilprojekt 4 (siehe Abbildung 2). Grundsätzlich gelten die Mess- und Auswertevorschriften, die in den [ZTV ZEB-StB 06] geregelt sind.

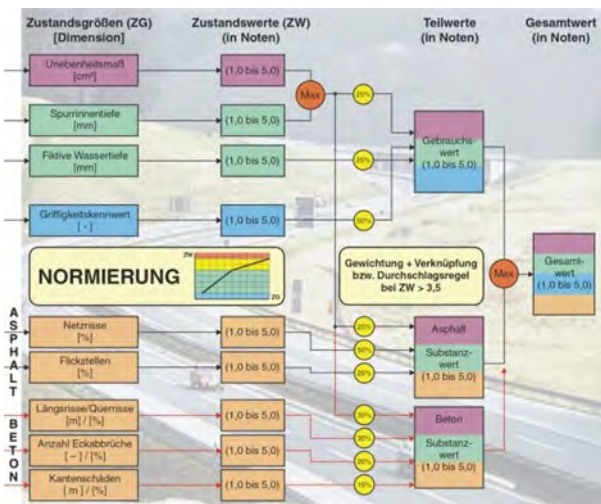


Abbildung 2: Erfassung von ZEB-Daten (TP 1 bis TP 3) und Zustandsbewertung (TP 4) [BASt, Teilprojekte ZEB]

#### 2.1.2 Zustandsaufnahme

Die Erfassung im Rahmen der ZEB erfolgt nach den in Tabelle 1 beschriebenen Zustandsindikatoren, diese sind den Zustandsmerkmalen und Merkmalsgruppen untergeordnet. Als Auswertebereich ist dabei ein Fahrstreifenabschnitt mit der Regellänge von 100 m (bzw. 20 m bei Ortsdurchfahrten) definiert. Die Fahrstreifen- bzw. Erfassungsbreite bei Asphaltfahrbahnen wird begrenzt durch den inneren Rand der Randmarkierung und die Mitte der Markierung benachbarter Fahrstreifen. Auf Betonfahrbahnen beträgt die Erfassungs- bzw. Fahrstreifenbreite die volle Plattenbreite.

Im Ergebnis liefert die messtechnische Erfassung für jeden Auswertebereich die in Tabelle 1 dar-

gestellten und für die weitere Bewertung relevanten Zustandsgrößen als quantitativen Ausdruck für die Ausprägung und/oder Häufigkeit des Auftretens der Zustandsmerkmale.

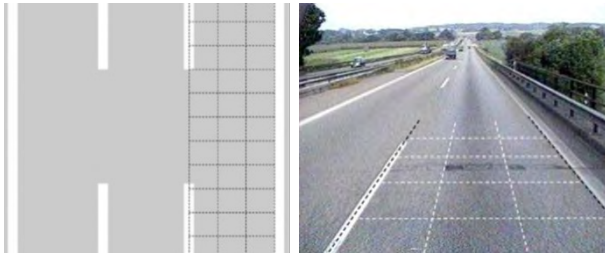
Merkmalsgruppe	Zustandsmerkmal	Zustandsindikator	Zustandsgröße
Ebenheit im Längsprofil	Allgemeine Unebenheit	Unebenheitsmaß, spektrale Dichte der Unebenheitshöhen $\Phi_n(\Omega_0)$ [cm <sup>3</sup> ]	AUN
		Längsebenheitswirkindex <sup>1)</sup> [-]	LWI <sup>1)</sup>
Ebenheit im Querprofil	Spurrinnen	Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken Spurrinnentiefe [mm]	MSPT
		Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken fiktiven Wassertiefe [mm]	MSPH
Rauheit	Griffigkeit	Seitenreibungsbeiwert (temperatur- und geschwindigkeitskorrigiert auf 40,	GRI_40 GRI_60 GRI_80
Substanzmerkmale (Oberfläche), Asphalt	Netzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse	Netzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse, betroffener Flächenanteil [%]	RISS
	Flickstellen	Flickstellen, betroffener Flächenanteil [%]	FLI
Substanzmerkmale (Oberfläche), Beton	Längs- und Querrisse	Längs- und Querrisse, mittlere Länge [m]	LQRL
		Längs- und Querrisse, betroffener Plattenanteil [%]	LQRP
	Eckabbrüche	Eckabbrüche, mittlere Anzahl [-]	EABF
		Eckabbrüche, betroffener Plattenanteil [%]	EABP
Kantenschäden	Kantenschäden, mittlere Länge [m]	KASL	
	Kantenschäden, betroffener Plattenanteil [%]	KASP	

<sup>1)</sup> geht derzeit nicht in die Berechnung der Teilwerte und des Gesamtwertes ein

Tabelle 1: Bewertungsrelevante Zustandsgrößen der ZEB, rot umrandet: Substanzmerkmale (Oberfläche) [ZTV ZEB-StB 06]

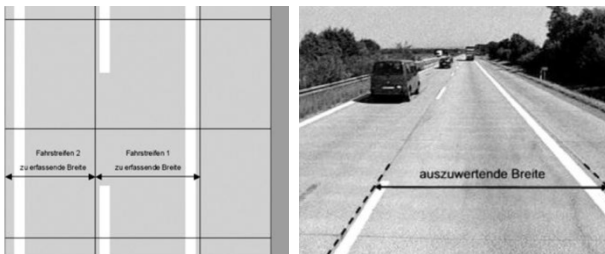
Eine Besonderheit hierbei stellen die Zustandsgrößen für die Substanzmerkmale (Oberfläche) dar. Sie werden nicht auf direktem Wege aus den Messgrößen ermittelt, sondern auf der Basis von Auswertungen film- oder videoteknischer Aufzeichnungen der Fahrbahnoberfläche gebildet. Aus Längen, Flächenanteilen und Anzahl von Oberflächenschäden werden die Zustandsgrößen erzeugt.

Für die Ermittlung der Zustandsgrößen der Substanzmerkmale (Oberfläche) von Asphaltfahrbahnen wird der Fahrstreifen mit einem Flächenraster derart belegt, dass in Querrichtung drei gleich breite Teilstreifen und in Längsrichtung Teilabschnitte mit einer Länge von 1 m entstehen (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Einteilung der Fahrstreifen für die Auswertung und Veranschaulichung der Rasterfelder (Asphalt) [ZTV ZEB-StB 06]

Die Erfassung von Substanzmerkmalen (Oberfläche) von Betonfahrbahnen erfolgt Fahrstreifenweise, wobei die zum jeweiligen Fahrstreifen gehörige Platte in ihrer gesamten Plattenbreite berücksichtigt wird (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Skizze der zu erfassenden Breite und Veranschaulichung der auszuwertenden Breite (Beton) [ZTV ZEB-StB 06]

Der Substanzwert (Oberfläche) beschreibt und klassifiziert verschiedene unmittelbar an der Fahrbahnoberfläche sichtbare Schäden (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Schadensbilder der Oberfläche [BASt, Schadensbilder]

Verschiedene Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass anhand des im Rahmen der ZEB rein aus dem Oberflächenbild abgeleiteten "Substanzwertes (Oberfläche)" keine hinreichende Substanzbewertung möglich ist [GRO/VI 2009].

Die rein aus dem Oberflächenbild abgeleiteten Zustandsdaten liefern wichtige Informationen hinsichtlich der Verkehrssicherheit und Befahrbarkeit, sie geben allerdings keine hinreichenden Hinweise auf Strukturschäden einer Konstruktion. Darüber hinaus stehen anhand dieser Messungen keine Frühindikatoren für sich abzeichnende Strukturver-

änderungen zur Verfügung. Insofern ermöglicht der Substanzwert (Oberfläche) im Rahmen der systematischen Erhaltungsplanung nur eine erste Einschätzung zur vorhandenen Substanz auf Netzebene.

Ergänzt wird der Substanzwert (Oberfläche) bei der systematischen Erhaltungsplanung durch den Substanzwert (Bestand) [FGSV AP 9 S]. Der dort berechnete Bemessungsindex stellt für Betrachtungen auf Netzebene eine Ergänzung zum Substanzwert (Oberfläche) dar, für eine Anwendung auf Objektebene genügt dieser Ansatz jedoch nicht.

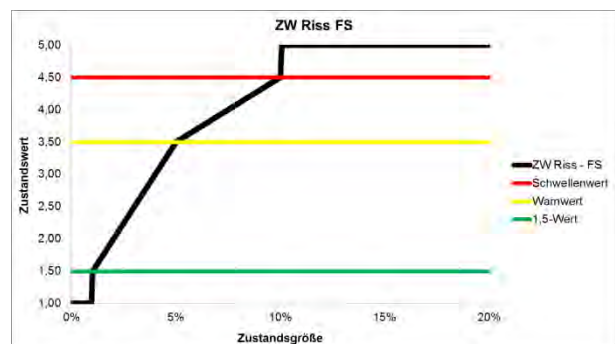
### 2.1.3 Normierung

Die Bewertung der Zustandsgrößen ist der erste Schritt zur Normierung. Dabei werden die Größen einzelner Zustandsindikatoren in Zustandswerte unter Verwendung merkmalspezifischer Normierungsfunktionen überführt. Die aus den Messdaten ausgewerteten abschnittsbezogenen Zustandsgrößen (ZG) werden in dimensionslose Zustandswerte (ZW) zwischen 1 und 5 überführt (siehe Tabelle 2). Dabei wird das jeweilige Anforderungsniveau der Straßenabschnitte, das durch die Einteilung in Funktionsklassen charakterisiert ist, berücksichtigt.

Funktionsabschnitt	Zustandsgröße (ZG)	Zustandswert (ZW)
(1)	$ZG < 1,5\text{-Wert}$ $ZG < ZG I$	1,00
(2)	$1,5\text{-Wert} \leq ZG < \text{Warnwert}$ $ZG I \leq ZG < ZG II$	$1,5 + 2,0 \cdot (ZG - ZG I) / (ZG II - ZG I)$
(3)	$\text{Warnwert} \leq ZG \leq \text{Schwellenwert}$ $ZG II \leq ZG \leq ZG III$	$3,5 + (ZG - ZG II) / (ZG III - ZG II)$
(4)	$ZG > \text{Schwellenwert}$ $ZG > ZG III$	5,00

**Tabelle 2:** Abschnitte der Normierungsfunktion [ZTV ZEB-StB 06]

Die Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Normierungsfunktion für den Zustandswert RISS bei Asphaltbefestigungen auf freier Strecke.



**Abbildung 6:** Verlauf der Normierungsfunktion am Beispiel ZWRISS [ZTV ZEB-StB 06]

Die Normierungsfunktion verläuft durch drei Kennwerte, deren Erreichen unterschiedliche Zustandsstufen beschreibt:

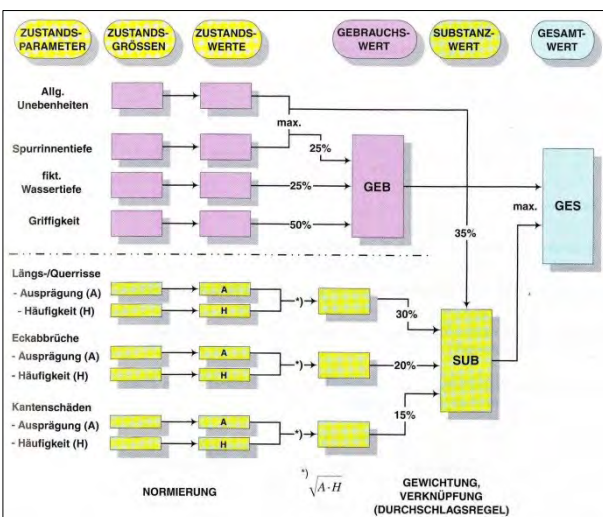
- ZW = 1,5: 1,5-Wert, Abnahmetoleranz erreicht,
- ZW = 3,5: Warnwert, der intensive Beobachtung und ggf. Planung von Erhaltungsmaßnahmen erfordert,
- ZW = 4,5: Schwellenwert, der Prüfung von baulichen oder verkehrsbeschränkende Maßnahmen erfordert.

Durch die Normierung wird die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Zustandsindikatoren ermöglicht und somit die Ausgangsposition für den zweiten Schritt, nämlich die Ermittlung der Teilwerte und des Gesamtwertes geschaffen.

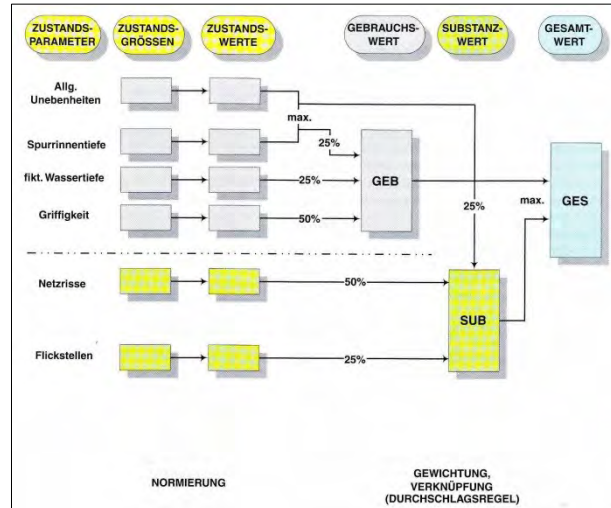
### 2.1.4 Ermittlung von Teilwerten und des Gesamtwertes

Durch Wichtung und Verknüpfung von Zustandswerten der für den jeweiligen Teilwert maßgebenden Einzelmerkmale werden der Gebrauchswert TWGEB und der Substanzwert (Oberfläche) TWSUB ermittelt. Die Berechnungsschritte sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 für Beton- und Asphaltfahrbahnen dargestellt.

Über die Verknüpfung hinaus gilt die sogenannte Durchschlagregel, die besagt, dass der Teilwert nicht kleiner sein darf, als ein teilwertrelevanter Zustandswert, der den Warnwert erreicht hat. Der Gesamtwert ist identisch mit dem schlechtesten Teilwert.



**Abbildung 7:** Verknüpfung der Teilwerte und des Gesamtwertes für Fahrbahndecken aus Beton [RPE-Str 01]



**Abbildung 8:** Verknüpfung der Teilwerte und des Gesamtwertes für Fahrbahndecken aus Asphalt [RPE-Str 01]

Wegen ihres Einflusses auf die strukturelle Substanz der Straßenbefestigung haben Rissbildungen sowohl bei Beton- als auch Asphaltfahrbahnen eine herausragende Bedeutung. In die Berechnung des Substanzwertes gehen diese als ZWLQR auf Betonfahrbahnen zu 30 % und als ZWRISS bei Asphaltfahrbahnen zur Hälfte ihres Wertes ein.

### 2.1.5 Prognose der Zustandsentwicklung, Lebenszyklusprognose

Prognosefunktionen für eine Zustandsentwicklung sind in den [RPE-Str 01] enthalten. Die Prognose erfolgt dabei auf Grundlage der Zustandsnote und nicht der Zustandsgröße. Dies ist insofern methodisch falsch, da in der Normierungsfunktion Sprünge enthalten sind (vgl. Abbildung 6).

In den [RPE-Str 01] sind drei charakteristische Klassen von Verhaltensfunktionen angegeben:

- Allgemeine Unebenheiten (als Indikator für die Längsebenheit)
- Spurrinnen (als Indikator für die Querebenheit)
- Risse und Schäden (als Indikator für das Oberflächenbild und den Substanzwert (Oberfläche))

Die Zustandsgröße Flickstellen kann nicht prognostiziert werden, da diese überwiegend von äußeren Faktoren abhängt (z.B. Aufgrabungen).

Um den Zustandsverlauf und damit die Zustandsänderung der übrigen Zustandswerte beschreiben zu können, ist in den [RPE-Str 01] folgender mathematischer Zusammenhang angegeben:

$$ZW(t) = 1 + a \cdot t^b \quad \text{Gl. 1}$$

mit:

ZW(t) Zustandswert für das gewählte Merkmal

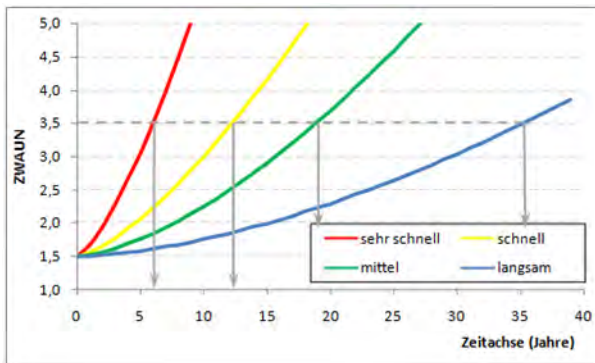
a, b Verlaufscoeffizienten

In Tabelle 3 sind je Einzelmerkmal die Koeffizienten für diese Verhaltensfunktionen dargestellt. Dabei wird jeweils in vier Stufen zur zeitlichen Entwicklung der Zustandsentwicklung unterschieden (langsamer bis sehr schneller Schädigungsverlauf).

Verlauf ZW(t) = 1 + a · t <sup>b</sup>	Verhaltens- klasse	Koeffizien- ten	Allgemeine Unebenheiten	Spurrinnen	Risse und Schäden
langsam	1	a	0,0060	0,2051	0,0000088
		b	1,6310	0,5850	3,5420000
mittel	2	a	0,0210	0,3520	0,0000356
		b	1,5510	0,6320	3,4190000
schnell	3	a	0,0577	0,5246	0,0004370
		b	1,4150	0,6660	3,0000000
sehr schnell	4	a	0,1685	0,8394	0,0051000
		b	1,3800	0,6781	2,6000000

**Tabelle 3:** Koeffizienten a, b zur Beschreibung der Zustandsentwicklung [RPE-Stra 01]

In Abbildung 9 ist beispielhaft der Verlauf für den Zustandswert ZWAUN für alle vier Verhaltensklassen dargestellt. Ersichtlich ist, dass z.B. ein Zustandswert von ZWAUN = 3,5 (Warnwert) je nach gewählter Verhaltensfunktion nach ca. 6 bis 35 Jahren erreicht wird.



**Abbildung 9:** Beispielhafte Zustandsentwicklung für ZWAUN [RPE-Stra 01]

Dabei muss jedoch beachtet werden, dass bei dieser Vorgehensweise die Zustandsprognose ausschließlich in Abhängigkeit des Alters erfolgt. Dadurch sind die beschriebenen Verhaltensfunktionen nicht allgemein gültig und ihre Anwendbarkeit ist stark eingeschränkt, da die für die Zustandsentwicklung eigentlich ursächliche Verkehrsbelastung unberücksichtigt bleibt.

Bei Anwendung der in den [RPE-Stra 01] angegebenen Prognosefunktionen ist generell zu berücksichtigen, dass die empirisch ermittelten Funktionen nur für Bundesfernstraßen anwendbar sind, da u.a. ein [RStO 01] gerechter Aufbau unterstellt wird. Selbst bei Annahme standardisierter Aufbau-

ten sind die zu einer Schädigung führenden Material- und Geometrieparameter nicht identisch. Deshalb ist eine Verallgemeinerung der Prognosefunktionen auf alleiniger Basis von ZEB-Daten nicht zielführend.

## 2.2 Ableitung repräsentativer Substanzwerte

Als strukturelle Substanz bezeichnet man die vom Gesamtaufbau zu einem Zeitpunkt noch ertragbare Anzahl an Lastwechseln durch den Verkehr, beispielsweise in Form von äquivalenten 10-t-Achsen bis zum Erreichen des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit (GZG) [FR/GR 2003], [FGSV AP 9 S]. Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist bei Straßenbefestigungen definiert durch eine mindestens 10 % bis maximal 30 % gerissene Asphalttragschicht bzw. Betondecke (in Abhängigkeit der Funktionsklasse).

Daher stellt sich bei der Zustandsbewertung nach [ZTV ZEB-Stb 06] zum aktuellen Zeitpunkt die Bildung des Substanzwerts als problematisch dar. Der Substanzwert soll eigentlich garantieren, dass am Ende der normativen Nutzungsdauer bei der Übergabe des Bauwerks eine gewisse Mindestsubstanz, Restsubstanz beziehungsweise Restnutzungsdauer vorhanden ist. Nach Erreichen oder Überschreiten des Grenzzustandes ist eine weitere Nutzung der Straße nur mit unwirtschaftlichen Maßnahmen möglich und sollte nur in Einzelfällen realisiert werden.

Momentan wird der Substanzwert im System ZEB jedoch ausschließlich von den visuell erfassten Oberflächenmerkmalen abgeleitet. Diese Merkmale sind jedoch rein oberflächenbezogen und geben keinerlei Aufschluss über den tatsächlichen strukturellen Straßenzustand.

Kritisch wird diese Vorgehensweise insbesondere dann, wenn die Oberfläche durch entsprechende Erhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen saniert wurde und dort keine Schäden mehr sichtbar sind. Dies suggeriert eine Verbesserung des Substanzwertes, obwohl der strukturelle Aufbau bzw. Zustand der Straße nicht verbessert wurde.

In der Vergangenheit wurden sowohl national als auch international enorme Anstrengungen unternommen, um das Verhalten von Straßenbefestigungen zu erforschen und daraus mögliche Hintergründe für eine strukturelle Bewertung abzuleiten. Dabei sind generell zwei empirische Ansätze zu unterscheiden:

- Ansätze, die auf Tragfähigkeitsmessungen basieren und
- Ansätze, die den Schichtenaufbau der Befestigung zu Grunde legen.

Beiden Ansätzen ist der jeweilige empirische Bewertungshintergrund gemein. Dieser Umstand ist nur wenig zufrieden stellend, da die Bewertungsverfahren stets an standardisierte Bauweisen (z.B. [RStO 01]) gebunden sind. Für Funktionsbauverträge, in denen der Auftragnehmer u.a. gefordert ist, neue und innovative Bauweisen zu entwickeln, ist diese Vorgehensweise als unbefriedigend einzuschätzen.

Vor diesem Hintergrund wurden für Asphalt- und Betonbefestigungen die Forschungsvorhaben [VI/KIE/MU/NIE/RI 2011] und [FE04.199/2004/ARB] bearbeitet.

Die Abbildung 10 zeigt den prinzipiellen Werdegang bei der (monetären) Restwertermittlung mit Hilfe der Bestimmung der Restnutzungsdauer, welche maßgeblich von der strukturellen Substanz bestimmt wird.

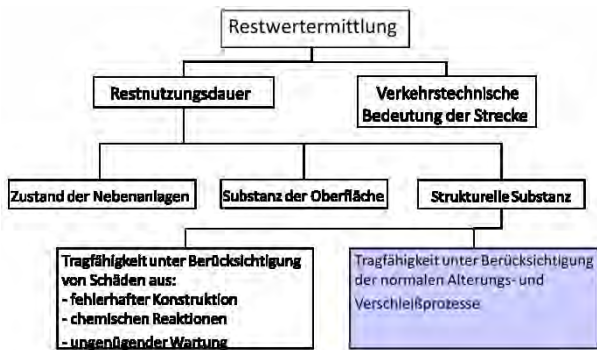


Abbildung 10: Restwertermittlung abgeleitet aus der strukturellen Substanz

Der prinzipielle Ablauf der Substanzbewertung zur Ermittlung der Restnutzungsdauer folgt dem Schema der Abbildung 11.

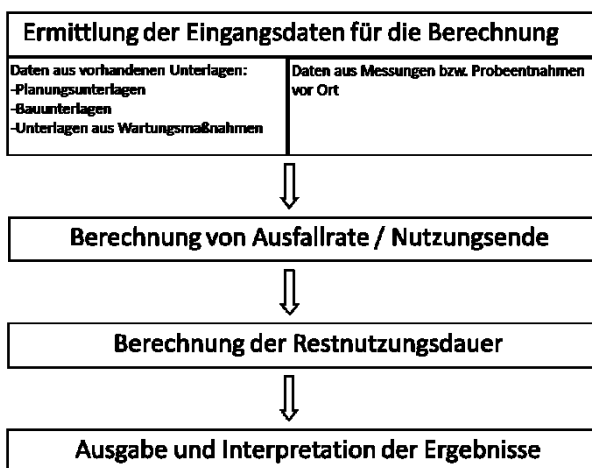


Abbildung 11: Prinzipieller Ablauf zur Ermittlung der Restnutzungsdauer

Soll eine Substanzbewertung zu einem definierten Bewertungszeitpunkt erfolgen, so ist eine Vorgehensweise gemäß Abbildung 12 für die Betonbauweise und gemäß Abbildung 13 für die Asphaltbauweise möglich.



Abbildung 12: Bewertung der Strukturellen Substanz für Betonbefestigungen

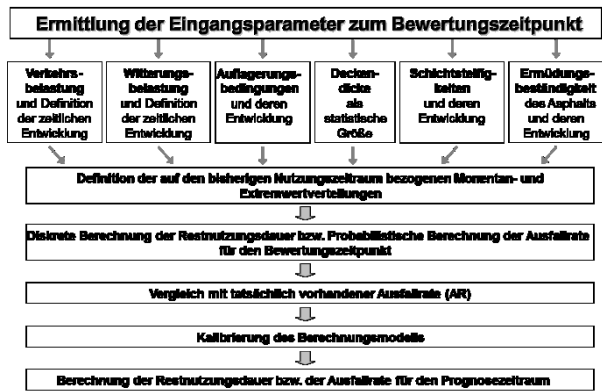


Abbildung 13: Bewertung der Strukturellen Substanz für Asphaltbefestigungen

Zur Ableitung repräsentativer Substanzwerte sind deshalb die relevanten Eingangsparameter zu bestimmen. Dabei gehen Parameter wie Deckendicke, Schichtsteifigkeiten sowie Ermüdungs- bzw. Spaltzugfestigkeit direkt in die Bewertung der Restsubstanz ein. Weitere Faktoren, wie z.B. Zustandswerte und Tragfähigkeitskennwerte, geben indirekte Informationen und können zur Bildung homogener Abschnitte herangezogen werden.

### 2.3 Schlussfolgerungen für die Restsubstanzbewertung

Für eine Bewertung der strukturellen Restsubstanz ist es erforderlich, Aussagen zu den direkten Merkmalen (Schichteigenschaften) und den indirekten Merkmalen (Zustandswerte) zu treffen. Anhand dieser Kenngrößen kann eine fundierte Restsubstanzbewertung erfolgen, der Detaillierungsgrad der einzelnen Merkmale wird dabei von den jeweils eingesetzten Messverfahren bestimmt.

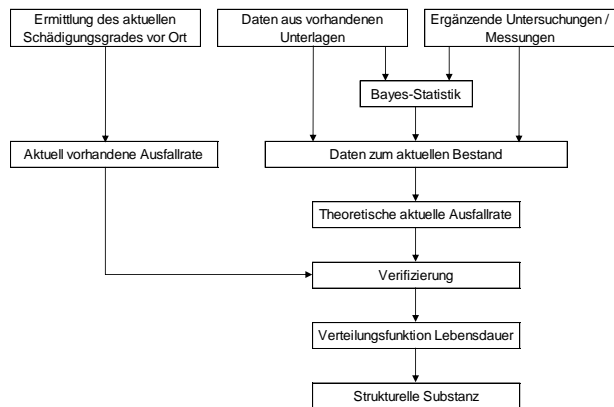
Eine große Bedeutung kommt deshalb dem Einsatz von Messverfahren mit hoher Erfassungsdichte sowie mit möglichst geringer Verkehrsbeeinträchtigung zu, wie es z.B. bei schnellfahrenden bzw. zerstörungsfreien Systemen der Fall ist.

Beispiele zur Bestimmung direkter Kenngrößen sind u.a. die zerstörungsfreie Ermittlung des

Schichtenaufbaus und der Schichtdicken mit dem Georadar oder die Bestimmung von Tragfähigkeitskennwerten und Schichtsteifigkeiten mit dem FWD.

Die anzuwendende Untersuchungsmethodik muss diesen Randbedingungen Rechnung tragen, um eine Bewertung der strukturellen Restsubstanz ermöglichen zu können.

Beispielsweise können unvollständige oder unsichere statistische Daten durch zusätzliche Stichproben ergänzt und mit Hilfe der Bayes Statistik verbessert werden, so dass eine Berechnung der strukturellen Substanz dennoch möglich ist. Für die Betonbauweise lässt sich die theoretische Ermittlung durch die Bestimmung der aktuell vorhandenen Ausfallrate verifizieren und führt somit zu einer präziseren Prognose (Abbildung 14).

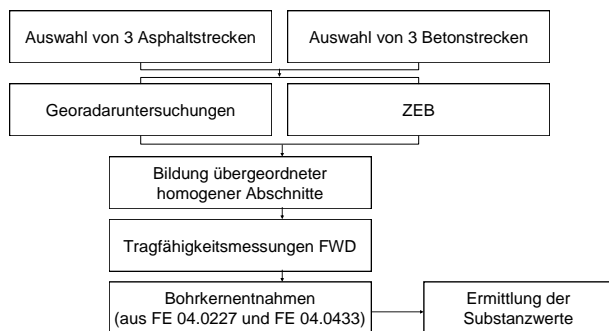


**Abbildung 14:** Ermittlung der strukturellen Substanz mit Verifizierung für Betonbefestigungen

### 3 Untersuchungsverlauf – gewählte Vorgehensweise

#### 3.1 Untersuchungsprogramm

Die Ermittlung der Substanzwerte für die ausgewählten Versuchsstrecken erfolgt in nacheinander folgenden Arbeitsschritten (Abbildung 15). Ausgangspunkt ist jeweils die Analyse der ZEB-Daten und der Bestandsdaten (soweit vorhanden). Parallel dazu erfolgten Messungen mit dem Georadar und eine Streckenbegehung mit visueller Zustandserfassung.



**Abbildung 15:** Vorgehensweise und Arbeitsablauf

Im Anschluss erfolgt eine Überlagerung der streckenbezogen ermittelten Daten und eine erste Abschnittsbildung nach dem Arbeitspapier „Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen“ [FGSV 431].

Eine Untersuchung der ermittelten homogenen Abschnitte soll anschließend anhand der Ergebnisse von Tragfähigkeitsmessungen und Bohrkernentnahmen erfolgen.

Zusätzlich zu den vereinbarten Versuchsstrecken wurde eine vierte Betonstrecke betrachtet. Diese ist im Gegensatz zu den anderen betrachteten Betonabschnitten erst wenige Jahre unter Verkehr und erlaubt somit die Prüfung der Verfahrensweise für junge Streckenabschnitte mit geringer aktuell vorhandener Ausfallrate.

#### 3.2 Arbeitsschritte

Für die Bearbeitung des Forschungsthemas wurde folgende Untersuchungsreihenfolge gewählt:

##### 1. Festlegung der Versuchsstrecken

Festlegung von vier Versuchsstrecken mit Beton- und drei Abschnitten mit Asphaltfahrbahn-befestigungen (siehe Tabelle 4). Unter der laufenden Nummer 1 ist dabei der zusätzlich betrachtete junge Betonabschnitt angegeben.

Versuchs-strecke	Land	von km	bis km	Länge [km]	Aufbau
VS 1	ST	109,900	99,500	10,400	Beton
VS 2	ST	55,965	69,150	13,185	Beton
VS 3	ST	79,880	69,150	10,730	Beton
VS 4	NRW	81,800	86,660	4,860	Beton
VS 5	By	395,500	388,500	7,000	Asphalt
VS 6	SN	35,000	42,000	7,000	Asphalt
VS 7	RP	18,800	28,000	9,200	Asphalt

**Tabelle 4:** Untersuchte Streckenabschnitte

##### 2. Visuelle Zustandsaufnahme

Im Rahmen von Streckenbegehungen erfolgen visuelle Zustandserfassungen des Hauptfahrstreifens hinsichtlich relevanter Oberflächenmerkmale, die auf ein Tragfähigkeitsversagen hinweisen.

##### 3. Georadarmessung

Der Schichtenaufbau und ggf. vorhandene Hohllagerungen werden mittels Georadar erfasst. Die Messungen erfolgen mit einem fahrenden System mit hoher Erfassungsdichte in Längs- und Querrichtung.

##### 4. Auswertung der ZEB-Daten

Die ZEB- und Bestandsdaten werden zur Ableitung relevanter Eingangsparameter analysiert.

##### 5. Bildung homogener Abschnitte

Nach der Überlagerung der streckenbezogenen ermittelten Daten mit den Ergebnissen der Georadarmessungen erfolgt eine erste Bildung homogener Abschnitte zur Substanzbewertung.

##### 6. Validierung der homogenen Abschnitte anhand von FWD-Messungen

Die im Arbeitsschritt 5 gebildeten homogenen Bereiche werden anhand von Tragfähigkeitskennwerten validiert. Für Beton- und Asphaltbefestigungen werden dazu im Detail abweichende Verfahrensweisen bei den FWD-Messungen angewandt. Bei Betonbefestigungen werden ausschließlich die Abschnittsgrenzen der homogenen Abschnitte untersucht. Bei Asphaltbefestigungen werden die FWD-Messungen über die gesamte Streckenlänge durchgeführt und

deren Ergebnisse in die Bildung homogener Abschnitte einbezogen.

7. Auswertung vorhandener Bohrkernanalysen

Relevante Materialkennwerte, welche belastbare Aussagen zur strukturellen Restsubstanz erlauben, werden bisher an Bohrkernen ermittelt. Durch die Verwendung der Ergebnisse aus den Forschungsvorhaben [FE 04.227/2009/ARB] und [FE 04.433/2009/DGB] können entsprechende Aussagen zur strukturellen Restsubstanz getroffen werden. Damit soll die entwickelte Verfahrensweise zur Bildung homogener Abschnitte validiert werden.

## 4 Angewandte Mess- und Prüfverfahren

### 4.1 Allgemeines

Die ausschließliche Anwendung zerstörungsfreier Mess- und Prüfverfahren zur Bildung homogener Abschnitte für eine strukturelle Substanzbewertung ist das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens.

Die so ermittelten homogenen Abschnitte sollen im Anschluss durch zerstörungsfreie Tragfähigkeitsmessungen und labortechnische Untersuchungen an Bohrkernen untersucht und validiert werden.

Es ist vorgesehen, dazu

- Georadarmessungen,
- visuelle Zustandserfassungen,
- FWD-Messungen und
- Bohrkernuntersuchungen

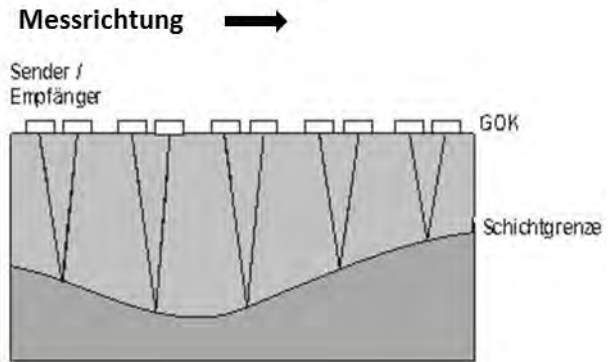
durchzuführen.

In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten Mess- und Prüfverfahren vorgestellt.

### 4.2 Georadar

#### 4.2.1 Funktionsprinzip des Georadars

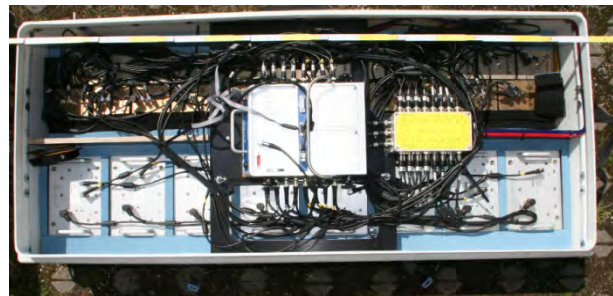
Beim Georadar-Verfahren wird mittels zerstörungsfreier Prüfung ein Befestigungsaufbau untersucht. Das Messprinzip beruht auf der Aussendung extrem kurzer elektromagnetischer Impulse in den Untergrund, welche an Schichtgrenzen (Materialwechsel) reflektiert werden. Materialien im Schichtenaufbau haben verschiedene physikalische Eigenschaften, so auch unterschiedliche dielektrische Kennwerte, d.h. die Materialien besitzen unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten ( $\epsilon_x$ ) (siehe Abbildung 16). Die elektromagnetischen Impulse werden dann an Grenzen, an denen sich die Materialeigenschaften, also die Dielektrizitätskonstante ändern, reflektiert. Anhand der Laufzeit der empfangenen Signale kann auf Lage und Größe der detektierten Auffälligkeit, z.B. lockere Lagerungsdichte, geschlossen werden.



**Abbildung 16:** Funktionsprinzip des Georadar-Verfahrens

Das Georadar-Verfahren eignet sich somit besonders gut zur Detektion von Objekten (z.B. Leitungen) und Auffälligkeiten (z.B. lockere Lagerungsdichte) im Untergrund. Die Erkundungstiefe ist abhängig von der gewählten Messfrequenz. Für eine Erkundung tiefliegender Objekte wird eine niedrige Messfrequenz, z.B. 200 MHz oder 400 MHz, gewählt. Damit werden Tiefen von bis zu 10 m (200 MHz) bzw. 4 m (400 MHz) erreicht. Sollen oberflächennahe Strukturen untersucht werden, werden hohe Messfrequenzen, z.B. 1000 MHz oder 2600 MHz, gewählt. Hier werden Erkundungstiefen von 1,5 m (1000 MHz) bzw. 0,5 m (2600 MHz) erzielt.

In Abbildung 17 ist eine Antennenkonfiguration mit acht 400 MHz-Antennen und 32 hochfrequenten Antennen mit 1,3 GHz dargestellt



**Abbildung 17:** Beispiel einer Antennenkonfiguration

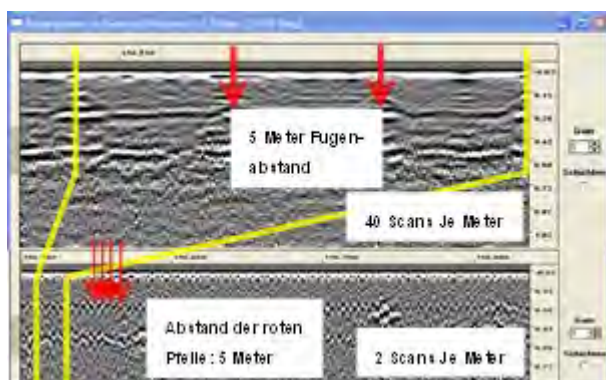
#### 4.2.2 Durchführung von Radarmessungen auf Straßen - Grundsätzliches

Es gibt zwei grundsätzliche Anwendungen für das Georadar-Verfahren auf Straßen. Zum einen ist das der Zustand beziehungsweise der Aufbau bestehender Strecken und zum anderen die Qualität nach Neu- bzw. Umbaumaßnahmen. Es werden für große Messabschnitte vorzugsweise Hornantennen angewendet, da mit diesen sowohl die Oberflächen der Straßen als auch die rasche Schichtenfolge aufgelöst und detektiert werden kann. Für kleinflächige Untersuchungen ist auch der Einsatz anderer Antennentypen möglich. Folgende Fragestellungen sind zu erwarten:

1. Schichtenfolge, Schichtdicken
2. Schichtenverbund / Feuchtigkeit zwischen den Schichten
3. Ablösungen / Hohlräume innerhalb der gebundenen Schichten sowie darunter
4. Querprofil der Fahrbahnoberfläche
5. Spurrinnen an der Oberfläche / in der Binderschicht
6. Zustand der Tragschicht / Frostschutzschicht
7. Eigenschaften des Untergrundes

#### 4.2.2.1 Messungen in Längsrichtung

Aufgabenbezogen muss vor Beginn der Messungen ingenieurtechnisch festgelegt werden, mit welcher horizontalen Auflösung gearbeitet werden muss. Die in bisherigen öffentlichen Ausschreibungstexten geforderten 2 scans/m - manchmal sogar nur 1 scans/m sind definitiv zu wenig. Der Grund für diese nicht mehr zeitgemäßen Vorgaben ist die geforderte hohe Messgeschwindigkeit, die je nach Straßentyp zwischen 30 km/h bis 80 km/h betragen kann. Ältere Geräte liefern aber nur geringe maximale Scanraten (scans/sec), mit denen man bei hohen Geschwindigkeiten nur unzureichende horizontale Auflösungen erzielt. Folgende Beispiele verdeutlichen die Problematik, bzw. die Notwendigkeit der Diskussion.

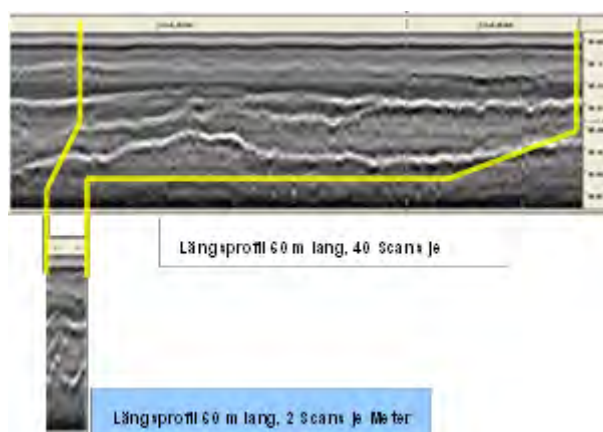


**Abbildung 18:** Radargrammausschnitte mit unterschiedlicher horizontaler Auflösung, Betonfahrbahn

Abbildung 18 zeigt zwei Radargrammausschnitte, die durch die gelbe horizontale Linie getrennt sind. Die Daten sind auf einer Autobahn mit Betondecke erzeugt worden. Der etwa 17 m lange Abschnitt im oberen Radargramm wurde mit 40 Scans je Meter erzeugt. Die Scheinfugen (rote Pfeile), die Platten und Schichten sind gut erkennbar. Das untere Radargramm repräsentiert mit einer Fahrbahnlänge von ca. 340 m und 2 Scans je Meter die gleiche Anzahl von Scans. Eine Bewertung des Zustandes anhand des unteren Radargrammes oder die Platzierung eines Bohrkernes zur Bewertung ist nicht möglich.

Bei Messungen auf Asphaltstraßen sind wegen der fugenlosen Bauweise andere Randbedingungen

maßgebend. Der in Abb. 18 dargestellte Verlauf bleibt quasi kontinuierlich. Allerdings ist die horizontale Auflösung auch hier zu gering, da Störungen im Meterbereich, deren Detektion in den Ausschreibungen gefordert wird, nicht erkannt werden. Ein Abgleich mit Bohrkernen ist ebenfalls nicht möglich, weil nur alle 50 cm ein Scan generiert wird, der Bohrkern aber nur 100 mm Durchmesser hat. Die Zuordnung der Aufschlusslage zum Radargramm ist zu ungenau, da Wechsel der Schichtdicken im Verlauf von einzelnen Metern durchaus anzutreffen sind, die folgende Abbildung zeigt das.



**Abbildung 19:** Dieselben Längsprofile mit unterschiedlichen horizontalen Auflösungen: 40 Scans je Meter (oben) und 2 Scans je Meter (unten)

Die oben gezeigten, 60 m langen Profile wurden mit 2.000 MHz-Hornantennen und 40 Scans je Meter erzeugt. Die ungleichmäßigen Schichtdicken sind in Abbildung 19 gut erkennbar. Darunter in Abbildung 19 ist derselbe Abschnitt dargestellt - diesmal mit 2 Scans je Meter. Die horizontale Ausdehnung in Messrichtung beträgt nur ein Zwanzigstel.

Generell ergibt sich bei der Betrachtung der derzeit möglichen Messgeschwindigkeiten folgende Situation:

Der für dieses F+E Projekt benutzte 14-kanalige Scanner vom Hersteller MALA, Typ Mira, erlaubt bei der hier verwendeten vollen Auflösung Messgeschwindigkeiten von ca. 30 km/h. Die zu diesem Scanner parallel benutzte Anlage des Herstellers GSSI, Typ SIR-30, ist in der Lage bei 40 Scans je Meter mit mehr als 100 km/h betrieben zu werden. Das System arbeitet mit vier parallelen, gleichwertigen Kanälen.

Derzeit ist ein zweites SIR-30 System in Zulauf welches mit dem vorhandenen gekoppelt werden wird. Insgesamt stehen somit acht gleichwertige hochauflösende Kanäle zur Verfügung. Durch Interpolation werden im Labor weitere acht Kanäle erzeugt. Somit ist ein gleichwertiges System verfügbar, welches mit mindestens vierfacher Ge-

schwindigkeit betrieben werden kann. Das Gerät wird im Mai 2014 verfügbar sein. Außerdem ist der Betrieb mit allen anderen verfügbaren (GSSI-) Antennen möglich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mit Geschwindigkeiten oberhalb 100 km/h hätte gemessen werden können – allerdings dann nur mit einem Antennentyp.

Um in Querrichtung eine höhere Datendichte (höhere Profildichte) im Tiefenbereich bis 1,7 m zu erreichen wurde für die Durchführung der Messungen diese vergleichsweise geringe Geschwindigkeit gewählt.

Um quer zur Fahrtrichtung Vergleichswerte zu erhalten, empfiehlt sich mindestens ein weiteres paralleles Profil mit identischer Antenne und identischen sonstigen Parametern zu erzeugen.

#### 4.2.2.2 Erzeugung von Querprofilen

Je nach Aufgabenstellung ist es erforderlich, Querprofile über die gesamte Fahrbahnbreite zu erzeugen. Insbesondere wenn Spurrinnen, die unter Umständen bis in die Binderschicht hineinreichen, erfasst werden sollen. Dann allerdings muss mit 2.000 MHz-Antennen gearbeitet werden, um den sehr oberflächennahen Verlauf verfolgen zu können. Wenn darüber hinaus auch das Oberflächenrelief der Spurrinnen von Interesse ist, muss eine nicht leitfähige Platte mit entsprechendem Abstand zur Fahrbahnoberfläche über das gesamte Querprofil gelegt werden. Die Antennen werden dann mit gleichem Abstand zur Solllinie gezogen.

#### 4.2.2.3 Digitales Video

Zwecks Korrelation der Untergrunddaten mit der Beschaffenheit der Oberfläche hat es sich als äußerst nützlich erwiesen, ein synchrones Video zu jeder Messfahrt zu erzeugen. Dies hilft bei der Auswertung vor allem dann, wenn Schäden an der Oberfläche, wie größere Risse oder Ähnliches, Wasser in den Untergrund eindringen lassen.

Ein weiterer Vorteil eines Videos ist die Darstellung beziehungsweise Festlegung der Lage von notwendigen Aufschlusspunkten, die man mit Besonderheiten in der Messumgebung synchronisieren kann. Der Bohrtrupp findet den gewünschten Punkt besser. Als positiv hat sich der Einsatz der Full-HD-Videotechnik (1080p) wegen der überlegenen Bildqualität gezeigt.

#### 4.2.2.4 Wegmessung / Lagezuordnung

Stand der Technik und auch gut mit derzeitigen Radarsystemen kombinierbar sind GPS, Odometer oder auch geeignete Doppler-Messsysteme. GPS sollte immer eingesetzt werden, da erfahrungsgemäß selbst bei enger und hoher Bebauung gelegentlich Ortung möglich ist. Sinnvollerweise sollten die Weg- oder Lageinformationen in einer zeitbasierten Datenbank parallel zu den Radar-Scans bereitgestellt werden. Damit ist sichergestellt, dass eine nachträgliche Lagekorrektur relativ einfach durchführbar ist. Die Wegmesssysteme müssen regelmäßig kalibriert werden. Die erwartete Lagegenauigkeit aller verwendeten Systeme muss im Messprotokoll angegeben werden.

Während der relativ schnellen Datenaufnahme sollte sich der Führer des Messfahrzeuges z.B. an Begrenzungs- oder Trennlinien orientieren. Bei unter Umständen erforderlichen Mehrfachfahrten kann die Fahrbahnmarkierung als Orientierung dienen. Auch Parallelfahrhilfen können für den Messeinsatz berücksichtigt werden. Allerdings sind aktive Systeme derzeit nur für relativ geringe Geschwindigkeiten (bis 40 km/h) zugelassen.

#### 4.2.2.5 Anmerkungen zum Einsatz von Hornantennen

Beim Einsatz von Hornantennen ist für die Korrektur des Bezugshorizontes und zur automatisierten Auswertung der Messdaten eine Kalibrierung des Messsystems mit Hilfe einer Metallplatte notwendig. Nach der Aufwärmphase des Systems wird unter die Hornantenne zur Kontrolle eine Metallplatte mit einer Mindestgröße von 100 cm \* 120 cm auf die Straßenoberfläche gelegt. Es sind mindestens 2000 Scans vor und nach der eigentlichen Messung aufzuzeichnen und zu prüfen.

Diese Kalibrierung dient der Prüfung der Funktionalität der Anlage, verbessert die Auflösung und ermöglicht die automatisierte Geschwindigkeitsberechnung der ersten beiden Schichten.

Das System ist im Anschluss sofort messbereit. Für eine qualitative Vorauswertung der Daten ist keine weitere Kalibrierung der Daten notwendig. Zur Bestimmung quantitativer Werte für Schichtdicken, etc. ist eine Kalibrierung der Daten anhand von Bohrkernen erforderlich. Die Genauigkeit der Aussagen erhöht sich durch die Kalibrierung erheblich.

#### 4.2.2.6 Ausrichtung der Antennen und Anbringung von GPS, Kameras

Generell hängt die Ausrichtung (Polarisierung) der verwendeten Antennen von der Aufgabenstellung ab und muss vorher festgelegt werden. Reflexio-

nen von z.B. Fahrzeugflächen müssen zugunsten guter, störungsfreier Messdaten vermieden werden. Wegmesssysteme müssen so platziert werden, dass die aufgezeichneten Wegmessdaten eindeutig auf alle Radarmessprofile projizierbar sind.

#### 4.2.2.7 Datenkontrolle und Datensicherung

Bereits während der Messungen werden die Daten auf Qualität und Vollständigkeit geprüft. Idealerweise sollten die Daten schon während der Aufnahme in zweifacher Ausführung auf unterschiedlichen Speichermedien gesichert und geprüft werden. Bei Nutzung von mehrkanaligen Arrays ist dies manchmal nicht möglich. In diesen Fällen sollten vor Messbeginn kleinere Messabschnitte festgelegt werden. Die Daten können dann abschnittsweise auf das BackUp-Medium übertragen und parallel dazu kontrolliert werden. Wiederholungsmessungen aufgrund von Datenverlust oder unzureichender Qualität können so auf ein Minimum beschränkt werden.

#### 4.2.2.8 Messprotokoll

Während der Messungen ist ein Messprotokoll zu führen. Sollten keine speziellen Vorgaben seitens des Auftraggebers vorliegen, empfiehlt sich die Nutzung einer eigenen, speziell für die Messung bzw. das Projekt kreierten Vorlage. Diese Informationen sollten dort zu finden sein:

- Projektnummer
- Verantwortlicher vor Ort, Unterschrift
- Messort
- Datum
- Aufgabenstellung
- Wettersituation
- Gerätetyp (en)
- Genauigkeit der Wegmessung
- Antennentypen
- wichtige Messparameter: Auflösung, Laufzeit, Triggerart, Messgeschwindigkeit ...
- Wegmessung
- Daten-File-Nummern mit Messrichtung usw.
- Check-Liste

Um Fehler zu vermeiden und einen geordneten Messablauf zu gewährleisten, ist die Abarbeitung einer Checkliste mit Haken und Namenskürzeln wünschenswert.

#### 4.2.2.9 Zusammenfassung - Messung für die Zustandserfassung

- zwei parallele Profile je Fahrstreifen mit z.B. 1.000 MHz-Horn-Antennen

- Quermessungen (Spurrinnen) mit 2.000 MHz-Horn-Antennen
- Erfassung der Fahrbahnoberfläche, des kompletten Aufbaus, der Tragschicht und einige Dezimeter des anstehenden Bodens, Eindringtiefe ca. 100 cm bis 130 cm mit Horn-Strahlern
- Kalibrierung des Messsystems, siehe auch unter 3.6.
- Die Messgeschwindigkeit muss der Verkehrssituation anpassbar sein
- Horizontale Auflösung mindestens 20 scans/m, weil sonst der Abgleich mit Bohrkernen nicht möglich ist
- Wegmessung mit GPS und Messrad, ggf. Montage an einem Fahrzeuggrad, Doppler-Radar
- Erzeugung des Messprotokolls
- Datenkontrolle und Datensicherung

#### 4.2.2.10 Qualitätskontrolle

Bei der Qualitätskontrolle ist die Vorgehensweise grundsätzlich dieselbe. Anstatt der 1.000 MHz-Antennen sind hier allerdings 2.000 MHz-Antennen angesagt. Alternativ können auch 1.000 MHz- und 2.000 MHz Hornstrahler parallel benutzt werden. Die nachstehend angepasste Zusammenfassung zeigt die Unterschiede.

#### 4.2.2.11 Zusammenfassung - Messung für die Qualitätskontrolle

Folgende Randbedingungen und Arbeitsschritte sind maßgebend:

- zwei parallele Profile je Fahrstreifen mit z.B. 2.000 MHz-Horn-Antennen
- Quermessungen (Spurrinnen) mit 2.000 MHz-Horn-Antennen
- Erfassung der Fahrbahnoberfläche, des kompletten Aufbaus, der Tragschicht und einige Dezimeter des anstehenden Bodens, Eindringtiefe ca. 50 cm bis 80 cm mit Horn-Strahlern
- Kalibrierung des Messsystems, siehe auch unter 3.6.
- Die Messgeschwindigkeit muss der Verkehrssituation anpassbar sein
- Horizontale Auflösung mindestens 20 scans/m, weil sonst der Abgleich mit Bohrkernen nicht möglich ist
- Wegmessung mit GPS und Messrad, ggf. Montage an einem Fahrzeuggrad, Doppler-Radar
- Erzeugung des Messprotokolls
- Datenkontrolle und Datensicherung

#### 4.2.2.12 Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgt computer-gestützt. Während der Messung werden folgende Daten aufgezeichnet: Signallaufzeit, Reflexions-

amplitude, Länge der Messstrecke und weitere Parameter. Die Daten werden über die Länge der Messstrecke in einem sogenannten Radargramm graphisch dargestellt. Die unterschiedlichen Reflexionsamplituden werden durch einen vorher ausgewählten Farbcode oder als Graustufen dargestellt.

#### 4.2.2.13 Messprotokoll

Nach den Messungen ist eine akkurate Datenbearbeitung vorzunehmen. Dies geschieht vorzugsweise durch das Messteam, da die Messteilnehmer die Örtlichkeiten kennen. Das oftmals händisch und vor Ort in großer Eile ausgeführte Messprotokoll ist in eine für jedermann lesbare Form zu übertragen. Dies bedeutet vor allem, dass Lage und Richtung der Messprofile eindeutig erkennbar sind. Außerdem müssen die Bezeichnungen der Messprofile im Protokoll mit denen auf dem Speichermedium identisch sein. Im Verlauf der nachfolgend beschriebenen Datenbearbeitung werden immer wieder Anpassungen im Protokoll notwendig werden.

#### 4.2.2.14 Datenbearbeitung

Bevor mit der eigentlichen Auswertung begonnen werden kann, sind folgende, beispielhafte Datenbearbeitungsschritte erforderlich:

1. ggf. Splitten
2. Ausgleich Fahrzeugbewegung (Kalibrierfile)
3. Lagezuordnung / auf Solllänge bringen (Sizing, GPS, Messrad, ...)
4. Reversieren, falls notwendig
5. Filtern und Verstärken
6. Synchronisierung mit dem Video

Nach vollendeter Datenbearbeitung muss das Protokoll entsprechend angepasst werden. Da nun alle Profillängen bekannt sind, kann das Protokoll auch gleich als Aufmaß für die irgendwann folgende Rechnungslegung herangezogen werden. Messdaten und Protokoll sind nun soweit aufgearbeitet, dass auch ortsunkundige nach kurzer Einführung mit der Weiterbearbeitung der Daten beginnen können.

#### 4.2.2.15 Auswertung und Interpretation

Die weitere Bearbeitung kann nun durch geotechnisches Fachpersonal erfolgen. Der erste Schritt ist die Kalibrierung der Tiefenlagen anhand von Erfahrungswerten, bekannten Materialparametern und der daraus abgeleiteten Ausbreitungsgeschwindigkeit und direkten Aufschlüssen. Dieser Vorgang muss immer dann wiederholt werden, wenn im Radargramm erkennbar ist, dass Aufbau- oder Materialwechsel stattfinden. Ist diese Kalibrie-

rung erfolgt, kann das Legen der Schichtgrenzen erfolgen. Dies geschieht teilautomatisch anhand entsprechender Algorithmen. Die Sollstärken der entsprechenden Schichten können ebenfalls einblendet werden. Die gescannten bzw. gemessenen Schichtdicken können nun mit den Sollvorgaben verglichen (Ermittlung der Abweichung) und graphisch dargestellt werden. Für die Auswertung werden die Videodaten zwecks Korrelation herangezogen.

Neben dem Schichtenverlauf sind noch weitere Eigenschaften von Interesse, siehe hierzu auch Punkt 4.2.2.

Diese weiteren Merkmale werden - falls gefordert - in einer Tabelle kontinuierlich erfasst. Kilometrierung und Tiefenlagen werden ebenfalls dokumentiert und graphisch dargestellt.

#### 4.2.3 Messdurchführung auf den Prüfab-schnitten

Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt sieben Autobahnabschnitte mit einer Gesamtlänge von ca. 60 km mit dem Georadar befahren. Bei vier der Abschnitte handelt es sich um einen Beton- und Asphaltbau (VS 1 bis VS 4) und bei drei Abschnitten um Asphaltpflasterbau (VS 5 bis VS 7).

Im Rahmen der Messung wurden eine 1.000 MHz Antenne und eine 2.000 MHz Antenne eingesetzt. Mit diesen Antennen wurde der Aufbau der Beton- und Asphaltstraßen bis zu einer Tiefe von ca. 1 bis 1,5 m detektiert. Zu Testzwecken kam des Weiteren ein Radarscanner zum Einsatz. Dieser Scanner verfügt über zwölf 1.300 MHz Antennen und vier 400 MHz Antennen. Die 1.300 MHz Antennen sind parallel zueinander angeordnet und haben einen Messabstand von ca. 14 cm. Dahinter sind die 400 MHz Antennen mit einem Messabstand von ca. 50 cm angeordnet. Somit wird bei einer Messfahrt ein ca. 2 m breiter Messstreifen untersucht (siehe Abbildung 20 und Abbildung 21).

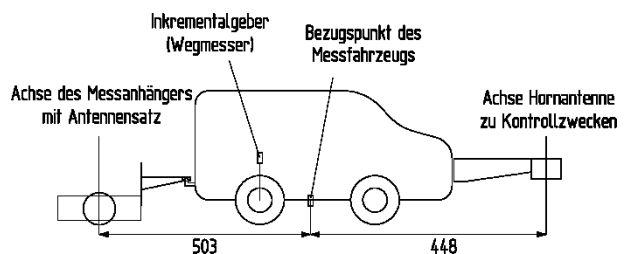
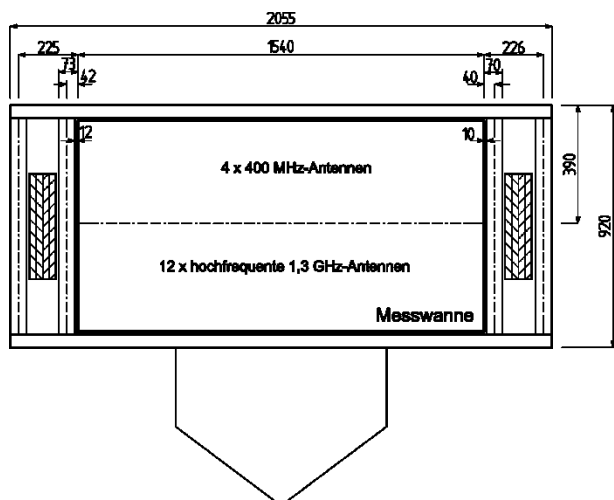


Abbildung 20: Prinzipskizze des Messfahrzeuges



**Abbildung 21:** Draufsicht des Messanhängers

Der jeweilige Fahrstreifen wurde zwei Mal befahren, so dass mit den Messungen die gesamte Breite des Fahrstreifens erfasst wurde. Bei der ersten Messfahrt erfolgte die Orientierung an der Markierung des Seitenstreifens und bei der zweiten Messung an der jeweiligen Markierung zum zweiten Fahrstreifen. Somit ergeben sich für die 1.000 bzw. 2.000 MHz Einzelantennen jeweils zwei Messspuren pro Fahrstreifen, sowie 32 Profile für die 1.300 MHz und acht Profile mit der 400 MHz Antenne. Bei jeder Messung wurde synchron ein Video aufgezeichnet.

Für eine genaue Lagezuordnung wurden entlang der zu befahrenden Abschnitte im Vorfeld Markierungen im Abstand von 500 m festgelegt. An diesen Markierungen wurden entsprechende Marker in den Georadardaten gesetzt, um eine präzise Lagezuordnung zu gewährleisten.

#### 4.2.4 Messdurchführung auf den Betonstrecken

Die Messfahrten auf den zu untersuchenden Streckenabschnitten mit Betonbefestigungen erfolgten im Mai 2012.

Vor den Messfahrten erfolgte eine Begehung der Strecke zur visuellen Zustandsaufnahme des ersten Fahrstreifens (siehe Kapitel 4.4). Dabei wurde an jeder 500m-Tafel eine farbliche Markierung der Plattennummer auf dem ersten Fahrstreifen vorgenommen, so dass während der Messfahrt Marker gesetzt werden konnten, die somit eine plattengenaue Zuordnung der Messwerte zu den Ergebnissen der visuellen Zustandsaufnahme möglich machen (Abbildung 22).



**Abbildung 22:** Plattengenaue Markierung auf der Fahrbahn an der Stationierungstafel

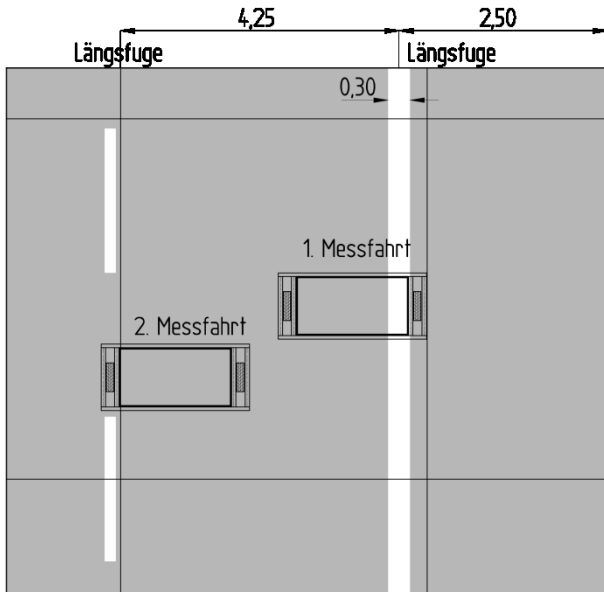
Auf jeder Versuchsstrecke wurden zwei Messfahrten durchgeführt. Die jeweils erste Messfahrt wurde dabei in der rechten Hälfte des Hauptfahrstreifens bis zur Längsfuge zum Seitenstreifen durchgeführt (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Der übrige Bereich des Hauptfahrstreifens wurde analog der Verfahrensweis bei Asphaltfahrbahnen bei den jeweils zweiten Messfahrten mit dem Georadar erfasst. Das Prinzip der Messung und die Position des Messanhängers auf Betonbefestigungen sind in Abbildung 25 erkennbar.



**Abbildung 23:** Position des Messanhängers während der ersten Messfahrt (Betonbefestigung)



**Abbildung 24:** Rückansicht der Position des Messanhängers während der ersten Messfahrt (Betonbefestigung)



**Abbildung 25:** Position des Messanhängers bei den Messfahrten auf Betonbefestigungen

#### 4.2.5 Messdurchführung auf den Asphaltstrecken

Die Messungen mit dem Georadar erfolgten im Mai und Juni 2012. Vor Beginn der Georadarmessungen erfolgte eine Begehung der Versuchsstrecken vom Seitenstreifen aus (siehe Kapitel 4.4), dabei wurde Stationierungsmarkierungen aller 500 m aufgesprüht (siehe Abbildung 26). Anhand dieser Daten war ein späterer Abgleich des Wegmesssystems des Georadars mit der Streckenkilometrierung möglich. In diesem Zusammenhang wurde festgestellt, dass die Stationierungstafeln der Betriebskilometrierung nicht exakt alle 500 m angeordnet sind und somit nur eine grobe Orientierung erlauben.



**Abbildung 26:** Anbringen von Stationierungsmarkierungen aller 500m

Die Messvorbereitung erfolgte in der Nähe der Messstrecken in Autobahnmeistereien oder auf Rastanlagen an Autobahnen. Dabei wurden die jeweiligen Messgeräte im Zugfahrzeug installiert, sowie der Messanhängers angeschlossen (Abbildung 27 und Abbildung 28).



**Abbildung 27:** Messvorbereitung - Installation der Messtechnik im Zugfahrzeug



**Abbildung 28:** Messvorbereitung - Installation des Messanhängers mit dem Radarscanner

Aufgrund von Messgeschwindigkeiten von ca. 20 km/h war eine Verkehrssicherung für den Hauptfahrstreifen notwendig, welche von den zuständigen Autobahnmeistereien zur Verfügung gestellt wurden (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).



**Abbildung 29:** Verkehrssicherung während der Georadarmessungen (Ansicht von hinten)



**Abbildung 30:** Verkehrssicherung während der Georadarmessungen (Ansicht von vorn)

Die Messfahrten auf den zu untersuchenden Streckenabschnitten erfolgten für Asphaltbefestigungen entsprechend der in Kapitel 4.2.5 beschriebenen Verfahrensweise.

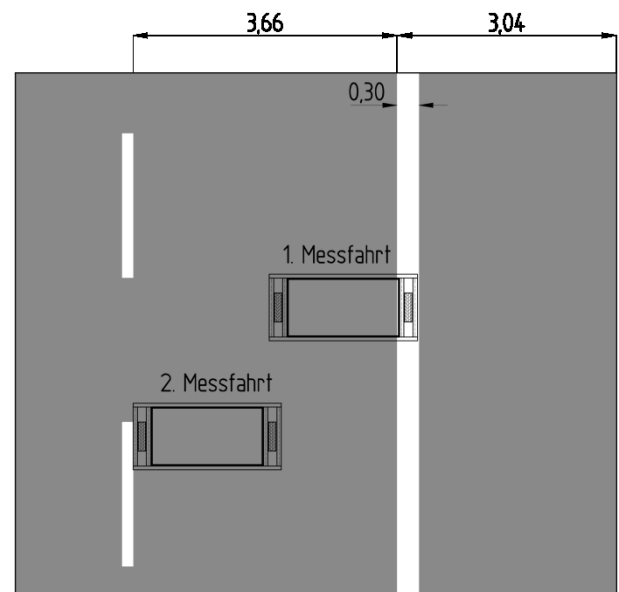
Die jeweils erste Messfahrt wurde dabei in der rechten Hälfte des Hauptfahrstreifens durchgeführt, dabei wurde der Bereich bis zur rechten Fahrbahnmarkierung erfasst (siehe Abbildung 31 und Abbildung 32). Der übrige Bereich des Hauptfahrstreifens wurde bei den jeweils zweiten Messfahrten mit dem Georadar erfasst (Abbildung 33).



**Abbildung 31:** Erfassung des rechten Bereiches im Hauptfahrstreifen mit den jeweils ersten Messfahrten (Asphaltbefestigungen)



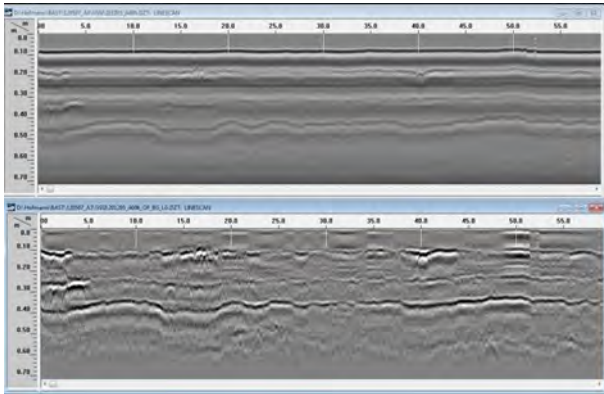
**Abbildung 32:** Position des Messanhängers bei der jeweils ersten Messfahrt auf Asphaltbefestigungen



**Abbildung 33:** Position des Messanhängers bei den Messfahrten auf Asphaltbefestigungen

### 4.2.6 Ergebnisse

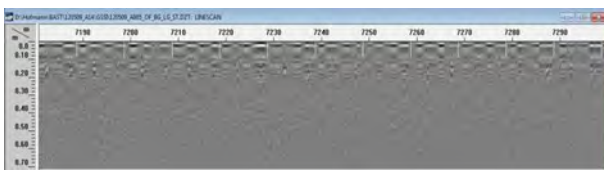
Die Auswertung erfolgt einzeln für jeden Streckenabschnitt. Es wurden alle signifikanten Auffälligkeiten ermittelt und dokumentiert. Für die Auswertung wurden alle 32 vorhandenen Profile des 14-kanaligen MALA-Scanners sowie die parallel mitlaufenden Antennen der GSSI-Anlage herangezogen. Alle Daten wurden gefiltert und verstärkt, um u.a. das Signal- Rausch- Verhältnis und die Erkennbarkeit der einzelnen Schichtgrenzen zu optimieren (siehe Abbildung 34).



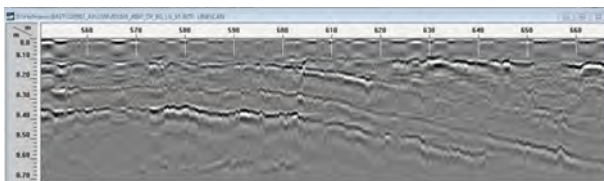
**Abbildung 34:** Beispielhafte Darstellung gefilterter und ungefilterter Daten in einem Radargramm

In Abbildung 34 sind ca. 60 m eines Radargramms dargestellt. Die obere Abbildung zeigt die ungefilterten, die untere die gefilterten Daten. Im unteren Bild sind die Schichtgrenzen nach der Verstärkung deutlicher zu erkennen.

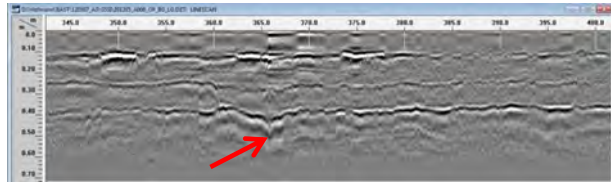
Die Ergebnisse wurden in tabellarischer Form dokumentiert. Änderungen entlang der Messstrecke wurden mit Tiefenangabe und Kilometerangabe abgelegt. Dabei wurden Bereiche mit erhöhter Feuchtigkeit, Änderungen im Aufbau, mögliche Schadstellen (Hohllagen) etc. dokumentiert.



**Abbildung 35:** Gleichförmig ungeschädigter Abschnitt einer Betonfahrbahn

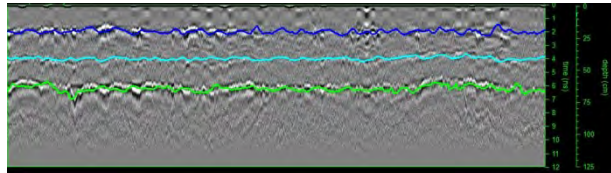


**Abbildung 36:** Änderung der Schichtenfolge einer Asphaltfahrbahn



**Abbildung 37:** Feuchtigkeit im Untergrund einer Asphaltfahrbahn

Die Abbildung 38 zeigt den Ausschnitt einer teilautomatisierten Schichtgrenzenbestimmung.



**Abbildung 38:** Halbautomatische Schichtgrenzenbestimmung

Die Detektion der einzelnen Schichtgrenzen erfolgt halbautomatisch. Mit einem speziellen Programm wird der Bereich, in dem die Schichtgrenze detektiert werden soll, zunächst grob eingegrenzt. Anschließend tastet ein Algorithmus den Verlauf der Signalamplitude oder den Bereich des Nulldurchganges automatisch ab. Anschließend besteht die Möglichkeit, nicht eindeutige Bereiche und fehlerhafte Ergebnisse mittels eines Werkzeuges zur Feinstimmung zu korrigieren.

Nachdem alle Schichtgrenzen qualitativ ermittelt und in einer Datenbank abgelegt wurden, erfolgt eine Kalibrierung der Tiefenlage mittels direkter Aufschlüsse – wie z.B. Bohrkerne.

Die Ergebnisse (Tiefen) können dann in einer Tabelle ausgelesen werden (siehe Tabelle 5).

Es ist möglich, Werte aufgabenbezogen alle 1 m oder auch alle 10 m auszulesen.

Messmeter	Unterkante BS [cm]	Unterkante HGT [cm]	Unterkante FSS [cm]
0,040	21,441	38,583	61,753
1,040	20,216	40,658	63,448
2,040	18,381	39,777	61,630
3,040	21,726	39,490	64,083
4,040	19,664	38,029	65,089
5,040	19,056	38,742	64,674
6,040	18,949	38,760	63,518
7,040	21,836	39,717	62,733
⋮	⋮	⋮	⋮

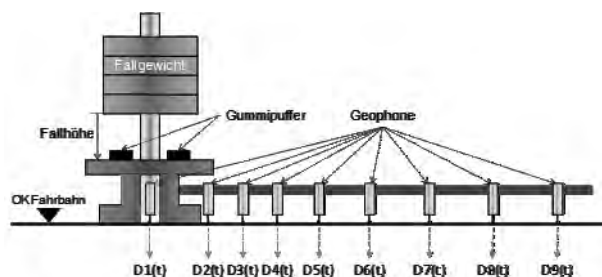
**Tabelle 5:** Ergebnisse der halbautomatischen Schichtgrenzenbestimmung

### 4.3 Falling Weight Deflectometer (FWD)

Das Falling Weight Deflectometer ist ein Prüfgerät zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Verkehrsbefestigungen. Zur Messung der für die Tragfähigkeit

maßgeblichen Einsenkung der Fahrbahnbefestigung wird ein definierter Kraftstoß von üblicherweise 50 kN aus einer Fallhöhe von 12 cm ausgeführt. Das Fallgewicht übt über eine segmentierte, kreisförmige Grundplatte im Kraftschluss mit der Fahrbahnoberfläche einen Impuls aus, der sich in die Straßenbefestigung als Schwingungen überträgt und an der Fahrbahnoberfläche spür- und messbar ist. Die aus diesen Schwingungen resultierenden vertikalen Verformungsanteile werden durch neun an einem horizontalen Balken angebrachte Geofone aufgenommen und können über die Entfernung zum Lastzentrum zu einer Verformungsmulde zusammengesetzt werden. Die Geofone sind in definierten Abständen von der Grundplatte an einem Messbalken angebracht (vgl. Abbildung 39) und werden beim automatisierten oder manuellen Ablassen des Messbalkens antastend an die Oberfläche der Verkehrsbefestigung herangeführt und abgesetzt.

Die von den Geofonen aufgenommenen Verformungen der Straßenbefestigung lassen sich durch Interpretation der Verformungsmulde sowie aus anderen geometrischen Abhängigkeiten bestimmten Schadensursachen und -orten zuweisen. Aufgrund der grundsätzlich verschiedenen Konstruktionsweise von Beton- und Asphaltbefestigungen wird in der Auswertung der Messungen entsprechend unterschiedlich vorgegangen.



**Abbildung 39:** Schematischer Aufbau eines Falling Weight Deflectometers [GR/LI/HÜ/ZA 2012]

### 4.3.1 Durchführung und Auswertung von Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer

Die Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer werden grundsätzlich gemäß Arbeitspapier Tragfähigkeit B 2.1 [FGSV 433 B 2.1] durchgeführt.

#### 4.3.1.1 FWD-Messungen auf Betonbauweisen

Für die Messungen der Tragfähigkeit von Verkehrsbefestigungen in Betonbauweise wird das Falling Weight Deflectometer vorrangig am Rand der zu untersuchenden Betonplatten positioniert.

Hierdurch werden die vermeintlich schwächsten Auflagerpunkte unter Berücksichtigung des Zustands der Dübel, die die Verformung der Betonplatte unter dem Fallgewicht auch bei Hohlagerung deutlich verringern können, betrachtet.

Messungen in Plattenmitte vervollständigen die Bewertung der Verkehrsbefestigung hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit, indem das Ausmaß der Hohlagerung unter der Betondecke sowie eventuelle Gefügestörungen erfasst werden.

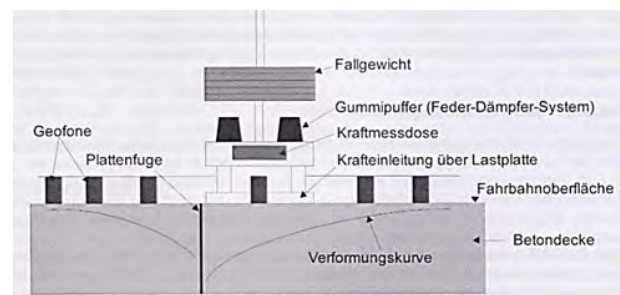
In diesem Forschungsprojekt werden die Messungen sowohl am Plattenrand als auch in Plattenmitte mit drei Kraftstößen differierender Laststufen durchgeführt. Die Lastniveaus betragen dabei 50 kN, 75 kN und 100 kN.

Für die Messungen am Plattenrand wird die Lastplatte jeweils auf das in Fahrtrichtung hinten liegende Plattenende gestellt. Die Geofone sind dann gemäß Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil B 2.2 [FGSV 433 B 2.2] auf der belasteten bzw. unbelasteten Platte entsprechend den in Tabelle 6 angegebenen Abständen vom Fallgewicht angeordnet sein (vgl. Abbildung 40 und Abbildung 41):

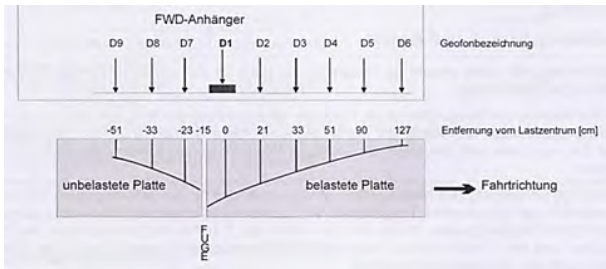
Geofon	9	8	7	1	2	3	4	5	6
Abstand	-510	-330	-230	0	210	330	510	900	1.270

**Tabelle 6:** Abstände der Geophone [mm] vom Lastzentrum für die Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf Betonbefestigungen

Die Auswertung der an jedem Messpunkt aufgenommenen Daten erfolgt, wie bei der Auswertung von entsprechenden Messungen auf Asphaltbefestigungen, anhand von auf einen Bezugskraftstoß normierten Werten nach Gl. 2. Dabei werden die gewonnenen Verformungsdaten zunächst durch eine quadratische Funktion ( $y=ax^2+bx+c$ ) angepasst, um die Verformungswerte direkt an der Fuge als Durchbiegungen am belasteten und unbelasteten Plattenrand ( $d_{\text{bel}}$  und  $d_{\text{unbel}}$ ) ermitteln zu können.



**Abbildung 40:** Prinzipskizze des Messverfahrens für Betonbauweise [FGSV 433 B 2.2]



**Abbildung 41:** Empfohlene Anordnung der Geofone D1 bis D9 und Lage der Fuge mit jeweiliger Entfernung vom Lastzentrum [cm] für FWD-Anhänger [FGSV 433 B 2.2]

Abbildung 42, Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen den FWD-Anhänger mit der Anordnung der Geofone im laufenden Betrieb.



**Abbildung 42:** FWD-Messung in Plattenmitte des ersten Fahrstreifens (Betonbefestigung)



**Abbildung 43:** Anordnung der Geofone an Messbalken (Rückansicht)



**Abbildung 44:** Anordnung der Geofone an Messbalken (Seitenansicht)

Anhand der Durchbiegungen an den Plattenrändern unter der Einwirkung des normierten Kraftimpulses mit einem Fallgewicht von 50 kN können nach [FIE/WO 2005] die folgenden für die Tragfähigkeit von Betonbefestigungen maßgeblichen Kennwerte bestimmt werden:

- die relative Fugenbewegung  $f$  (vgl. Gl. 2)
- der Wirksamkeitsindex  $W$  (vgl. Gl. 3)

$$f = d_{bel} - d_{unbel} \quad \text{Gl. 2}$$

mit

- $f$  relative vertikale Fugenbewegung
- $d_{bel}$  approximierte Verformung der belasteten Platte in der Fuge
- $d_{unbel}$  approximierte Verformung der unbelasteten Platte in der Fuge

$$W = \frac{2 * d_{unbel}}{d_{bel} + d_{unbel}} \cdot 100 \quad \text{Gl. 3}$$

mit

- $W$  Wirksamkeitsindex
- $d_{bel}$  approximierte Verformung der belasteten Platte in der Fuge
- $d_{unbel}$  approximierte Verformung der unbelasteten Platte in der Fuge

Für die Beurteilung der Tragfähigkeit am Plattenrand wird zusätzlich, ebenso wie in Plattenmitte, ein Zusammenhang zwischen den Verformungen der verschiedenen starken Kraftstöße hergestellt. Bei dieser Betrachtung geht man davon aus, dass sich die Platte und der darunter befindliche Raum gleichmäßig komprimieren lassen müssten, wenn in der Plattenmitte keine Hohlagerung oder sonstige Störungen vorhanden sind. Sollte dies nicht der Fall sein, lässt sich die vorhandene Hohlagerung beispielsweise durch eine Auftragung der Verformungen über der Größe des Kraftstoßes anhand des sich ergebenden Bestimmtheitsmaßes für eine durch die Messwerte verlaufende Regressionsgerade erkennen. Dabei weist ein hohes Bestimmtheitsmaß gute Auflagerungsbedingungen, also keine Hohlagerungen aus.

Nach [FIE/WO 2005] ist es möglich, eine qualitative Aussage und Bewertung des Zustands der Plattenbettung in Abhängigkeit von der Steigung und dem Ordinatenschnittpunkt über den Verlauf der Funktion aus dem Zusammenhang der Lasteintragung und der entstehen Verformungen zu tätigen. Dazu wird zunächst der Verlauf der Funktion mit einem Polynom 2. Grades  $y=ax^2+bx+c$  angenähert. Bei Auftragung des Kraftstoßes auf der Abszisse kann das Polynom wie folgt beschrieben werden:

$$y = a \cdot \text{Kraftsto\ss}^2 + b \cdot \text{Kraftsto\ss} + c \quad \text{Gl. 4}$$

Die erste Ableitung der Funktion nach x (bzw. dem Kraftsto\ss) ergibt die Steigung gem\ass Gl. 5.

$$y' = 2a \cdot \text{Kraftsto\ss} + b \quad \text{Gl. 5}$$

Unter Verwendung des oben erw\ahnten mathematischen Ansatzes und der allgemeinen Geradengleichung

$$y = m \cdot x + b \quad \text{Gl. 6}$$

kann die Funktion unter der Annahme, dass der Faktor 2a der Steigung und der Summand b dem Ordinatenabschnitt entspricht, folgenderma\ssen umgeschrieben werden:

$$y = \text{stg} \cdot \text{Kraftsto\ss} + y_s \quad \text{Gl. 7}$$

mit

stg	Steigung der Kraftsto\ss-Verformungsfunktion
ys	y-Achsenabschnitt der Kraftsto\ss-Verformungsfunktion

Mit den beiden Kennwerten der Kraftsto\ss-Verformungsfunktion liegen damit die entscheidenden Gr\o\ss en f\ur die Beurteilung der Plattenbettung im Randbereich der Platte sowie in Plattenmitte vor. Sie erlauben eine Einteilung der Ergebnisse in vier Bereiche, die nachfolgend dargestellt werden. Abh\angig von der Anordnung der Wertepaare k\onnen in den jeweiligen Diagrammen die verschiedenen Tragf\ahigkeitsbereiche angeordnet werden (Abbildung 45).

#### Bereich 1:

Die Querfugen weisen eine geringe Verformung am belasteten Plattenrand bei vergleichsweise kleiner relativer vertikaler Fugenbewegung und relativ gro\ss em Wirksamkeitsindex auf.

Die Plattenbettung ist nicht zu beanstanden.

Entsprechende Querfugen sind ausreichend tragf\ahig.

#### Bereich 2:

Die Querfugen weisen eine relativ geringe Verformung am belasteten Plattenrand bei vergleichsweise gro\ss er relativer vertikaler Fugenbewegung und relativ geringem Wirksamkeitsindex auf. Die Querkraft\ubertragung ist also vergleichsweise schlecht.

Die Plattenbettung ist nicht zu beanstanden.

Die Tragf\ahigkeit der entsprechenden Querfugen ist aufgrund der mangelhaften Querkraft\ubertragung potentiell gef\ahrdet.

#### Bereich 3:

Die Querfugen weisen eine relativ gro\ss e Verformung am belasteten Plattenrand bei vergleichsweise kleiner relativer vertikaler Fugenbewegung und relativ gro\ss em Wirksamkeitsindex auf. Die Querkraft\ubertragung ist also vergleichsweise gut.

Die Plattenbettung ist weicher, evtl. aber schon teilweise gesch\adigt. Das Schichtensystem reagiert bei Achs\uberrollungen nachgiebiger als in den Bereichen I und II, was zu h\oheren inneren Spannungen f\uhrt.

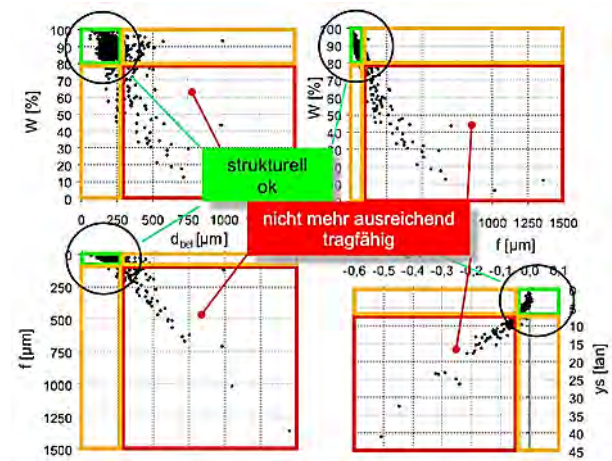
Die Tragf\ahigkeit der entsprechenden Querfugen ist aufgrund der nachgiebigeren bis gesch\adigten Bettung potentiell gef\ahrdet.

#### Bereich 4:

Die Querfugen weisen eine relativ gro\ss e Verformung am belasteten Plattenrand bei vergleichsweise gro\ss er relativer vertikaler Fugenbewegung und relativ kleinem Wirksamkeitsindex auf.

Die Plattenbettung ist gesch\adigt.

Entsprechende Querfugen sind nicht mehr ausreichend tragf\ahig. Umso mehr, je weiter die Wertepaare vom Kreuzungspunkt der vier Bereiche entfernt liegen.



**Abbildung 45:** Definition der Bewertungsbereiche nach [WOLF 2009] zur Bewertung von Betonbefestigungen am Plattenrand und in Plattenmitte

#### 4.3.1.2 FWD-Messungen auf Asphaltbauweisen

Auf Asphaltbefestigungen ist vorgesehen, dass diese Messungen \uber den zu beurteilenden Streckenabschnitt mit einem Messpunktabstand von 25 m angeordnet werden. Das Ger\at wird stets so positioniert, dass der Bereich innerhalb der Rollspur erfasst wird.

Vor der eigentlichen Messung wurde zunächst ein Kraftstoß zur Anpassung der Lastplatte und der Messeinrichtung an die Fahrbahnoberfläche aufgebracht, ehe im Anschluss daran in der Regel drei vollständige Messungen pro Messpunkt durchgeführt werden. Der Kraftstoß wird dabei mit einer Gewichtskraft von 50 kN und einer Einwirkdauer von 25 bis 30 ms ausgeführt.

Die für die Aufnahme der vertikalen Verformungen erforderlichen Geofone sind in festen Abständen vom Lastzentrum anzuordnen. Diese Abstände wurden für die Messungen im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wie in Tabelle 7 dargestellt gewählt.

Geofon	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Abstand	0	200	300	450	600	900	1.200	1.500	1.800

**Tabelle 7:** Abstände der Geofone [mm] vom Lastzentrum für die Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf Asphaltbefestigungen

Um die Ergebnisse mehrerer Messungen vergleichen zu können, müssen die ermittelten Messwerte auf einen Bezugskraftstoß von 50 kN (10 t-Achse) normiert werden. Die Normierung erfolgt gemäß dem Entwurf des Arbeitspapiers Tragfähigkeit Teil C2 „Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung“ [FGSV 433 C 2] als lineare Umrechnung zwischen der tatsächlichen und der Radlast nach der dort angegebenen Gleichung Gl.8.

$$w_i = w_{gemessen;i} \cdot \frac{F_{Soll}}{F_{gemessen}} \quad \text{Gl. 8}$$

mit

$w_i$  auf den Bezugskraftstoß linear bezogene Verformung für Geofon i [mm]

$w_{gemessen;i}$  unter  $F_{gemessen}$  gemessene Verformung für Geofon i [mm]

$F_{gemessen}$  Größe des Kraftstoßes [kN]  
 $F_{Soll}$  Bezugskraftstoß [kN]; i.A. 50 kN

Auf der Grundlage aller normierten Verformungen und der daraus ableitbaren Verformungsmulde werden für Asphaltbefestigungen die folgenden die Tragfähigkeitskennwerte ermittelt:

- die Verformung um Lastzentrum  $D_0$
- die elastische Länge  $l$
- der Schichtmodul  $M_0$

Während die zwei erstgenannten Kenngrößen zur Bewertung der Tragfähigkeit des gebundenen Oberbaus herangezogen werden, repräsentiert der Schichtmodul  $M_0$  die Steifigkeit aller ungebundenen Schichten der Straßenbefestigung auch unterhalb des Planums. Eine Auswahl möglicher Ori-

entierung bzw. Richtwerten für den Schichtmodul  $M_0$  und der elastischen Länge ist in Abbildung 46 dargestellt. Bei diesen Orientierungswerten muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass für diese Orientierungswerte die Zeile 1 der [RStO 01] als Grundlage gewählt wurde. Da es sich bei den gewählten Messstrecken auf den Versuchsstrecken VS 5 bis VS 7 um Oberbaukonstruktionen der Zeile 2 handelt, sind die nachfolgenden Werte lediglich als „grobe Orientierungswerte“ anzusehen.

Dabei sind die Beharrungsphase (überwiegend elastisches Verformungsverhalten) und die Ermüdungsphase (überwiegend plastisches Verformungsverhalten) nach [RO/FR/TH 2008] folgendermaßen definiert:

„Diese Phase (Beharrungsphase) ist gekennzeichnet durch weitgehend gleich bleibende Steifigkeitsverhältnisse im Jahresmittel. Veränderungen der E-Moduln sind lediglich durch klimatische Einflüsse zu erwarten. Bleibende Verformungen nehmen, wenn sie überhaupt auftreten, nur sehr langsam zu. Die Beharrungsphase nimmt den längsten Zeitraum der Nutzungsdauer ein.“

„Diese letzte Phase (Ermüdungsphase) kündigt das Ende der Lebensdauer einer Straßenbefestigung, einer ihrer Schichten oder des Untergrundes an. Die Materialermüdung äußert sich in einer progressiven Spurrinnen- und Rissbildung, vornehmlich im bituminös oder hydraulisch gebundenen Teil der Befestigung.“

Bauklasse	Kennwert	Beharrungsphase	Ermüdungsphase
SV	Tragfähigkeit (elastische Länge l) [mm]	600	300
	Schichtmodul $M_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150	150
I	Tragfähigkeit (elastische Länge l) [mm]	550	275
	Schichtmodul $M_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150	150
II	Tragfähigkeit (elastische Länge l) [mm]	500	250
	Schichtmodul $M_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150	150
III	Tragfähigkeit (elastische Länge l) [mm]	400	200
	Schichtmodul $M_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150	150
IV	Tragfähigkeit (elastische Länge l) [mm]	350	175
	Schichtmodul $M_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150	150
V	Tragfähigkeit (elastische Länge l) [mm]	300	150
	Schichtmodul $M_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	150	150
VI	Tragfähigkeit (elastische Länge l) [mm]	130	65
	Schichtmodul $M_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	125	125

**Abbildung 46:** Bauklassenabhängige Grenzwerte der aus FWD-Messungen ermittelten Tragfähigkeitskennwerte Schichtmodul  $M_0$  und elastische Länge  $l$  bei einer Temperatur von 20 °C [BALD 1999]; entnommen aus (Kehrer, 2011)

Für die Ermittlung von Tragfähigkeitskenngrößen ist es von großer Wichtigkeit, dass sich die Rückrechnung auf ein grundlegendes mechanisches Modell der Straßenbefestigung beruft. Möglich ist die Rückrechnung des Schichtmoduls z.B. über die Mehrschichtentheorie mit der Annahme einer Platte auf einem isotropen Halbraum oder mit der Finiten Element Methode (FEM). Dabei ist jedoch zu

beachten, dass bei jedem zugrunde gelegten Berechnungsansatz gewisse Parameter bekannt sein müssen und die Verwendung von komplexen Ansätzen zu erhöhtem Fehlerpotenzial, mit schlechter Vergleichbarkeit führen kann. Für die Ermittlung der Tragfähigkeitskennwerte wird bei diesem Forschungsprojekt die Platten-Halbraumtheorie als Grundlage gewählt. Unter dieser Annahme erfolgt die Berechnung der elastischen Länge  $l$  und des Schichtenmoduls  $M_0$  gemäß AP Tragfähigkeit, Teil C2 [FGSV 433 C 2] mit den nachfolgenden Formeln.

$$M_0 = \frac{E_0}{1 - \mu_0^2} = F \cdot \frac{B}{A} \quad \text{Gl. 9}$$

mit

$M_0$	Schichtenmodul des Halbraums bestehend aus den Tragschichten ohne Bindemittel und dem Untergrund / Unterbau [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_0$	E-Modul des Halbraums
$\mu_0$	0,5: Querdehnzahl des Halbraums bestehend aus den Tragschichten ohne Bindemittel und dem Untergrund/Unterbau [-]
$F$	Bezugskraftstoß, i.d.R. 50 kN
$B$	Regressionsparameter n. [FGSV 433 C 2]
$A$	Regressionsparameter n. [FGSV 433 C 2]

$$w_{Abstand_i} = A \cdot (a_0 \cdot e^{B \cdot a_1 \cdot Abstand_i} + a_2) \quad \text{Gl. 10}$$

mit

$a_0$	= 0,392948
$a_1$	= -0,398483
$a_2$	= 0,0137024
$A$	Regressionsparameter
$B$	Regressionsparameter

Da Gl. 10 nur durch Anwendung eines nichtlinearen Regressionsverfahrens gelöst werden kann, wurde der Ansatz für die Bestimmung der Tragfähigkeitskenngrößen am ifs Institut für Straßenwesen wie folgt modifiziert.

$$w(Abstand_i) = A_1 \cdot B \cdot [a_1 \cdot e^{(a_2 \cdot B \cdot x^{(n)})} + a_3] \quad \text{Gl. 11}$$

mit

$w(Abstand_i)$	auf den Bezugskraftstoß normierte Verformung an den Geofonen $i=1$ bis 9
$A_1, B$	Regressionsparameter
$a_0$	Konstante ( $a_0 = 0,392948$ )
$a_1$	Konstante ( $a_1 = 0,392948$ )
$a_2$	Konstante ( $a_0 = 0,392948$ )

Vergleichsuntersuchen am ifs Institut für Straßenwesen in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Straßenwesen haben gezeigt, dass die Anwen-

dung von Gl. 11 dieselben Tragfähigkeitskenngrößen ohne die Verwendung eines nichtlinearen Regressionsverfahrens ergibt wie bei der Verwendung von Gl. 10.

Die Auswertung der Messungen auf Verkehrsflächenbefestigung in Asphaltbauweise beruht auf dem Verfahren gemäß Grätz [GRÄTZ 2009]. Dieses wird derzeit im Zuge der Erstellung des Arbeitspapiers „Teil C2 „Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung“ als Stand des Wissens dokumentiert. Aus dem Entwurf zu diesem Dokument sind die Parameter  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  für die mathematische Beschreibung der Verformungsmulde und die darauf basierende Ableitung von Tragfähigkeitskenngrößen entnommen. Im Zuge des vorliegenden Forschungsprojekts konnten diese Parameter bisher nicht validiert werden. Stichprobenhafte Berechnungen haben jedoch gezeigt, dass die Parameter  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  zum Teil beträchtlichen Schwankungen (abhängig vom Messpunkt) unterliegen. Die Prüfung der Anwendbarkeit dieser Parameter muss jedoch weiteren Forschungsarbeiten vorbehalten bleiben. Bis zur Klärung dieses Sachverhaltes werden zunächst die durch Grätz angegebenen Parameter für die Auswertung und Bewertung von FWD-Messungen auf Verkehrsflächenbefestigung in Asphaltbauweise beibehalten.

$$l = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot D}{M_0}} = \frac{1}{B} \quad \text{Gl. 12}$$

mit

$l$	elastische Plattenlänge [mm]
$D$	Plattensteifigkeit [N*mm]
$M_0$	Schichtenmodul des Halbraums bestehend aus den Tragschichten ohne Bindemittel und dem Untergrund / Unterbau [N/mm <sup>2</sup> ]
$B$	Regressionsparameter nach

$$R_0 = 24,494 \cdot (w_0 - w_{210})^{-0,899} \quad \text{Gl. 13}$$

mit

$w_0$	Gemessene, normierte Verformung im Lastzentrum [mm]
$w_{210}$	Gemessene, normierte Verformung am Geofon 2 (210 mm)

Ein Vergleich der Verformungsmulden untereinander kann grundsätzlich erste Erkenntnisse im Hinblick auf Abweichungen, die z.B. auf Besonderheiten an den jeweiligen Messstellen hinweisen, ergeben. Hierzu kann vereinfacht auch die Verformung  $D_0$  im Lastzentrum herangezogen werden. Eine vergleichsweise größere Verformung  $D_0$  am Messpunkt stellt hierbei eine geringere Tragfähig-

keit dar, ohne jedoch Aufschluss auf die Ursache dieser Tragfähigkeitsdefizite aufzuzeigen.

Die Bewertung der Tragfähigkeit erfolgt i.d.R. auf der Grundlage der zuvor beschriebenen Tragfähigkeitskenngrößen. Hierbei ist die nachfolgend aufgeführt Vorgehensweise einzuhalten gemäß [FGSV 431].

- Darstellung der Verformung  $D_0$  über die Stationierung der Messlinie
- Darstellung ausgewählter Tragfähigkeitskenngrößen über die Stationierung der Messlinie. Im Zuge des Forschungsprojektes wurden diese Tragfähigkeitsbänder für die elastische Länge  $l$  und das Schichtmodul  $M_0$  dargestellt.

Durch diese Darstellung kann zunächst eine Aussage über die Homogenität der Ergebnisse getroffen und nach [FGSV 431] in homogene Abschnitte unterteilt werden. Dazu empfiehlt es sich, für die Abschnittsbildung die mechanischen Tragfähigkeitskenngrößen zu verwenden.

#### 4.3.2 Durchführung der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf Bundesautobahnen

Die Messungen der Tragfähigkeit mit dem Falling Weight Deflectometer waren für alle im Forschungsprojekt berücksichtigten vier Bundesautobahnabschnitte in Betonbauweise (Tabelle 8) und drei Abschnitte in Asphaltbauweise (Tabelle 9) vorgesehen. Sie wurden vom Institut für Straßenwesen der Universität Siegen in Kooperation mit der Bundesanstalt für Straßenwesen im Zeitraum von Juni bis August 2012 durchgeführt (Tabelle 10)

Bei den Messungen waren die Wetterverhältnisse überwiegend in einem für die Messung und die Bohrkernentnahme unkritischen Bereich. Allein auf der Bundesautobahn A 3 traten größere Temperaturschwankungen auf, die die in [FGSV 433 B2.1] und [FGSV 433 B2.2] angegebenen Maximalwerte überschritten.

Versuchsstrecke	Land	von km	bis km	Länge [km]	Aufbau
VS 1	ST	109,900	99,500	10,400	Beton
VS 2	ST	55,965	69,150	13,185	Beton
VS 3	ST	79,880	69,150	10,730	Beton
VS 4	NRW	81,800	86,660	4,860	Beton

**Tabelle 8:** Übersicht der Messstrecken in Betonbauweise

Versuchsstrecke	Land	von km	bis km	Länge [km]	Aufbau
VS 5	By	395,500	388,500	7,000	Asphalt
VS 6	SN	35,700	40,200	4,500	Asphalt
VS 7	RP	18,800	29,000	10,200	Asphalt

**Tabelle 9:** Übersicht der Messstrecken in Asphaltbauweise

Versuchsstrecke	Datum
VS 1	20.06.2012
VS 2	14.06.2012
VS 3	21.06.2012
VS 4	30.10.2012
VS 5	14.08.2012
VS 6	12.06.2012
VS 7	11.07.2012

**Tabelle 10:** Übersicht über die einzelnen Messtage

Auf den Versuchsstrecken in Betonbauweise wurden die Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer jeweils in Plattenmitte und am Plattenrand durchgeführt. Neben sechs Messungen auf jeder zweiten Platte am Bauanfang und Bauende folgten an der ersten und zweiten Abschnittsgrenze jeweils 30 Messungen auf jeder zweiten Platte.

In Abbildung 47 ist ein Messschema für die Versuchsstrecken in Betonbauweise am Beispiel der VS 2 zu sehen.

Auf Asphaltbefestigungen wurden die Messungen über den gesamten Streckenabschnitt mit einem Messpunkt Abstand von 25 m durchgeführt. Das Gerät wird stets so positioniert, dass der Bereich innerhalb der Rollspur erfasst wird.

Im Gegensatz zu den Versuchsstrecken in Asphaltbauweise wurde somit keine homogene, durchgehende Messreihe angestrebt.

Die Auswertung der gewonnenen Daten erfolgt nachfolgend unterteilt nach der Bauweise zum einen für Straßenbefestigungen in Beton- und zum anderen in Asphaltbauweise (vgl. Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2). Das Forschungsprojekt sieht nicht vor, dass die Bildung der homogenen Abschnitte anhand der ausgewerteten Messergebnisse des Falling Weight Deflectometers vollzogen wird, vielmehr sollen die bereits auf der Grundlage der Zustandserfassung und -bewertung, der Georadaruntersuchungen sowie der visuellen Bewertung

ermittelten homogenen Abschnitte anhand der Falling Weight Deflectometermessungen validiert werden. Diese Validierung wird im Folgenden für Beton- und Asphaltbefestigungen unterschiedlich angegangen:

- Für die Betonbefestigungen werden die Messergebnisse des Falling Weight Deflectometers an den bereits definierten Grenzen der homogenen Abschnitte zu Mittelwerten zusammengefasst und anschließend in einem Mittelwertvergleich gegenübergestellt. Auf der Grundlage dieser statistischen Analyse können die vorab definierten Grenzen der homogenen Abschnitte bestätigt oder verworfen werden.
- Für die Asphaltbefestigungen werden homogene Abschnitte aus den Ergebnissen der Tragfähigkeitsmessungen gebildet und können dann mit den homogenen Abschnitten aus ZEB, Visueller Zustandserfassung und Georadaruntersuchung verglichen werden.

Tragfähigkeitsmessung VS 2							
Bauanfang		Abschnittsgrenze 1		Abschnittsgrenze 2		Bauende	
Platte	Km	Platte	Km	Platte	Km	Platte	Km
1900	55,994	72	67,048	210	68,115	13	69,075
1898	56,006	70	67,060	208	68,125	11	69,085
1896	56,018	68	67,072	206	68,135	9	69,095
1894	56,030	66	67,084	204	68,145	7	69,105
1892	56,042	64	67,096	202	68,155	5	69,115
1890	56,054	62	67,108	200	68,165	3	69,125
		60	67,120	198	68,175		
		58	67,132	196	68,185		
		56	67,144	194	68,195		
		54	67,156	192	68,205		
		377	67,166	190	68,215		
		375	67,176	188	68,225		
		373	67,186	186	68,235		
		371	67,196	184	68,245		
		369	67,206	182	68,255		
		367	67,216	180	68,265		
		365	67,226	178	68,275		
		363	67,236	176	68,285		
		361	67,246	174	68,295		
		359	67,256	172	68,305		
		357	67,266	170	68,315		
		355	67,276	168	68,325		
		353	67,286	166	68,335		
		351	67,296	164	68,345		
		349	67,306	162	68,355		
		347	67,316	160	68,365		
		345	67,326	158	68,375		
		343	67,336	156	68,385		
		341	67,346	154	68,395		
		339	67,356	152	68,405		

Abbildung 47: FWD-Messschema für VS 2 in Betonbauweise

### 4.4 Visuelle Zustandsaufnahme

Die visuelle Zustandsaufnahme erfolgte während der vor der Georadarmessung zu Markierungs-

zwecken notwendigen Begehung der Strecken (siehe Kapitel 4.2.4 und 4.2.5).

### 4.4.1 Strecken mit Betonbefestigung

Für die Strecken mit Betonbefestigung wurde ein Formblatt entwickelt, das plattengenau die Erfassung der einzelnen Schadensmerkmale für eine Beeinflussung der strukturellen Substanz erlaubt (Abbildung 48). Die Schadensaufnahme erfolgte hier für den ersten Fahrstreifen und den Seitenstreifen.

Zustandsaufnahme Strecke mit Betondecke		BAB A 14 Dresden															
RIFA:		Plattenummer															
		SS	FS1	FS2	FS3	SS	FS1	FS2	FS3	SS	FS1	FS2	FS3	SS	FS1	FS2	FS3
<b>Risse</b>																	
Längerrisse	lfd.m																
Querrisse	lfd.m																
schräg über die Fahrbahn verlaufende Risse	Anzahl																
<b>Markierungen</b>																	
Ankermarkierung vorhanden	ankreuzt n																
Dübelmarkierung vorhanden	ankreuzt n																
Dunkelfärbung der Oberfläche an Querfugen, (Mikrorissbildung)	ankreuzt n																
fächerhafte Mikrorissbildung	Anzahl d. Platten																
fächerhaftes Ausbrechen der Oberfläche	Anzahl d. Platten																
<b>Ausbrüche / Abplatzungen</b>																	
Ausplatzungen an Querfugenkanten, Breite > 1,5 cm bei Länge > 3 cm	Anzahl																
Ausplatzungen an Längsfugenkanten, Breite > 1,5 cm bei Länge > 3 cm	Anzahl																
Abplatzungen am Fugenkreuz > 20 mm in Richtung Quer- oder Längsfuge	Anzahl																
<b>Fugenverschluss : Profil</b>																	
Abriss innerhalb des Profils im Kreuz	Anzahl																
Abriss innerhalb des Profils in den Längsfugen	Anzahl																
Abriss innerhalb des Profils in den Querfugen	Anzahl																
Absacken nach unten in den Längsfugen $\geq 1,2$ cm unter OK Beton	lfd.m																
Absacken nach unten in den Querfugen $\geq 1,2$ cm unter OK Beton	lfd.m																
<b>Fugenverschluss : Verguss</b>																	
Abriss von der Fugenwandung in den Längsfugen	Anzahl d. Platten																
Abriss von der Fugenwandung in den Querfugen	lfd.m																
Herausquellen in den Querfugen nach oben > 5 mm über OK Beton	lfd.m																
Querfugen offen	lfd.m																
Längsfuge offen	lfd.m																
<b>Zusätzliches</b>																	
Stufe > 5 mm zwischen erstem Fahrstreifen und Standstreifen	Anzahl d. Platten																
Stufe > 5 mm zwischen den Platten des ersten Fahrstreifen	Anzahl d. Platten																
Plattenbewegung, hörbar	ankreuzt n																
Plattenbewegung, sichtbar	ankreuzt n																
Bei Dammlage, Unterspülung der Befestigungsänder	lfd.m																
Regenfelder	Anzahl d. Platten																
Betonschutzwand - Risse	ankreuzt n																
Betonschutzwand - Ausbrüche	ankreuzt n																

Abbildung 48: Erfassungsblatt zur visuellen Zustandsaufnahme auf Betonfahrbahnen

In Einzelnen wurden auf den Strecken mit Betonbefestigung folgende Schädigungen festgestellt:

- Längs-, Quer- und Schrägrisse (Abbildung 49)



**Abbildung 49:** Durchgehender Querriss mit Ausbrüchen und Schrägriss

- Abplatzungen an Plattenkanten, -ecken und Fugenkreuzen (Abbildung 50)



**Abbildung 50:** Kantenschäden und Eckabbruch

- Netzrissbildung und Ausbrüche (Abbildung 51)



**Abbildung 51:** Netzrissbildung

- Anker- und Dübelschäden (Abbildung 52)



**Abbildung 52:** Ankermarkierungen

- Tagesansätze zur vergleichenden Betrachtung mit Georadar-Detektionen zu Änderungen im Aufbau (Abbildung 53)



**Abbildung 53:** Tagesansatz mit Kantenschäden und Eckabbruch

In die im Anhang 1 enthaltenen Streckenbänder sind die erfassten Rissbildungen aufgenommen worden, um einen direkten Vergleich mit den 100m-Werten des ZWLQR der ZEB herzustellen.

#### 4.4.2 Strecken mit Asphaltbefestigung

Für Asphaltbefestigungen erfolgte ebenfalls die Erfassung von Zustandsmerkmalen, wobei der Fokus auf den Merkmalen des Oberflächenbildes lag. Einzelne Beispiele dafür sind nachfolgend in Abbildung 54 bis Abbildung 61 abgebildet:



**Abbildung 54:** Risse in der Asphaltdeckschicht (unvergossene Einzel- und Netze)



**Abbildung 55:** Risse in der Asphaltdeckschicht (teilweise vergossene Einzelrisse)



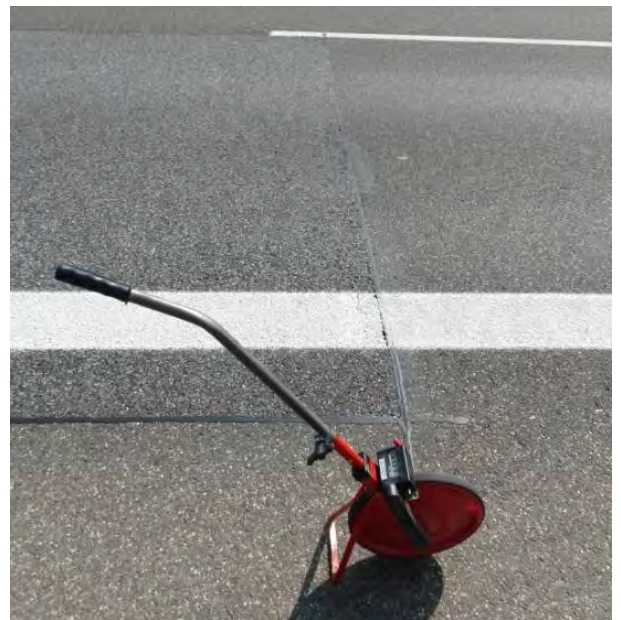
**Abbildung 56:** Flickstellen in der Asphaltdeckschicht



**Abbildung 57:** Ausbrüche in der Asphaltdeckschicht



**Abbildung 58:** Erneuerung der Asphaltdeckschicht im Hauptfahrstreifen



**Abbildung 59:** Erfassung von Abschnittsgrenzen (Ende der Deckschichterneuerung)



**Abbildung 60:** Erfassung von Abschnittsgrenzen (Tagesansatz in der Asphaltdeckschicht)



**Abbildung 61:** Erfassung von Abschnittsgrenzen (Querfugen an Bauwerken)

## 4.5 Bohrkernentnahmen und -untersuchungen

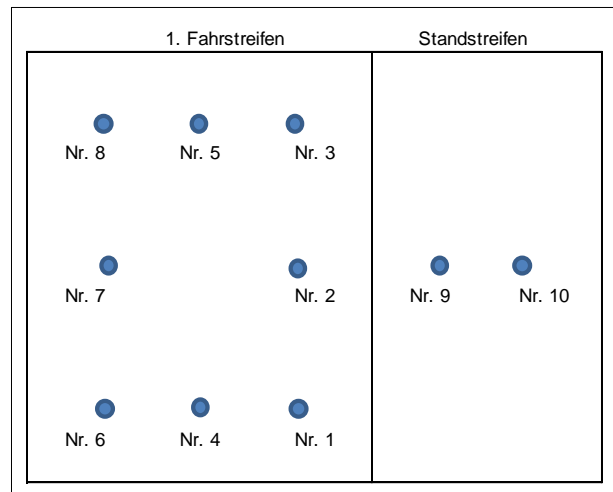
### 4.5.1 Strecken mit Betonbefestigung

Auf den Versuchsstrecken mit Betonbefestigung erfolgten die Bohrkernentnahmen im Zuge der FWD-Messungen, so dass die dafür notwendige Absperrung des ersten Fahrstreifens genutzt werden konnte (Abbildung 62).



**Abbildung 62:** Bohrkernentnahme im ersten Fahrstreifen, hinten im Bild FWD-Messung

In jeweils zwei vorher festgelegten Untersuchungsabschnitten, in denen sich nach Auswertung aller bis dahin vorliegenden Unterlagen und Messergebnisse Grenzen von homogenen Abschnitten befinden könnten, wurden auf einer Platte des ersten Fahrstreifens acht Bohrkernentnahmen und zwei Bohrkernentnahmen im Seitenstreifen mit Nenndurchmesser 100 mm entsprechend dem Bohrkernentnahmeschema in Abbildung 63 entnommen. Jeweils drei Bohrkernentnahmen wurden in der rechten, drei in der linken Rollspur und zwei Bohrkernentnahmen in Fahrstreifenmitte entnommen. Zu Vergleichszwecken bei der Prüfung der Spaltzugfestigkeit sollen die beiden im Seitenstreifen entnommenen Bohrkernentnahmen dienen, die nicht der Belastung durch Verkehr unterliegen, wie im ersten Fahrstreifen



**Abbildung 63:** Bohrkernentnahmeschema auf Versuchsstrecken mit Betonbefestigung

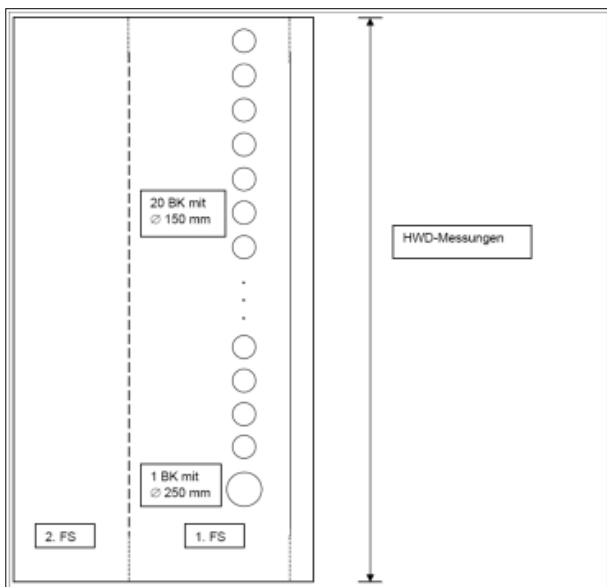
Die entnommenen Bohrkernentnahmen wurden entsprechend dem Entnahmeschema beschriftet (Abbildung 64) und zur Bestimmung der Deckendicke vermessen



**Abbildung 64:** Bohrkern mit Beschriftung

#### 4.5.2 Strecken mit Asphaltbefestigung

Für die betrachteten Versuchsstrecken in Asphaltbauweise standen je Abschnitt zwanzig Bohrkern mit Nenndurchmesser 150 mm und ein Bohrkern mit Nenndurchmesser 250 mm zur Verfügung, die zugehörigen Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens [FE 04.227/2009/ARB] (Weiterführende Untersuchungen zur Vervollständigung des Verfahrens zur Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen) durchgeführt. In Abbildung 65 ist die Anordnung der Bohrlöcher in der rechten Rollspur schematisch dargestellt.



**Abbildung 65:** Bohrkernentnahmeschema für Asphaltbefestigungen nach [FE 04.227/2009/ARB]

## 5 Bildung und Untersuchung übergeordneter homogener Abschnitte

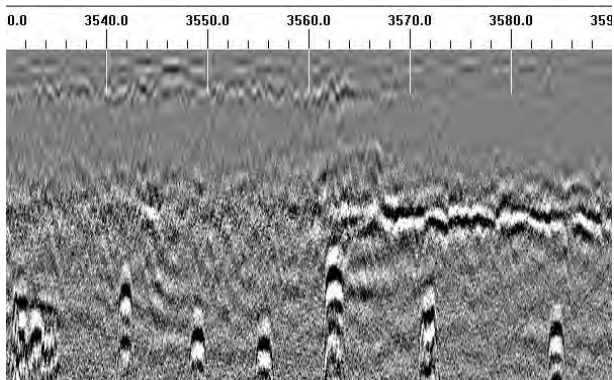
### 5.1 Bewertung der Ergebnisse aus Georadarmessungen

Folgende Merkmalsgruppen wurden vorausgewertet und in die Streckenbänder (Anhang 1) übernommen:

- Bauwerksbereiche
- Schichtgrenzen
- Änderungen im Aufbau, in der Schichtenfolge
- Absenkungen unterhalb der Betondecke, Hohlagerungen
- Feuchtbereiche
- inhomogene Bereiche
- unregelmäßige Schichtverläufe
- Einzelmerkmale

Die Vielzahl von unterschiedlichen Detektionen erfordert zu ihrer Bewertung die Zuhilfenahme vorhandener Unterlagen über den Fahrbahnaufbau und der Erhaltungsgeschichte. Diese Unterlagen konnten von den zuständigen Ämtern nicht zur Verfügung gestellt werden, so dass die Ergebnisse der visuellen Zustandsaufnahme sowie aus Bohrkernentnahmen einbezogen werden mussten, um Detektionen von Einzelereignissen sowie Detektionen über längere Streckenabschnitte richtig zu bewerten.

So war auf der VS 4 ein oberflächennah auffälliger Aufbau detektiert worden, der an einigen Stellen markante Lücken aufweist. Abbildung 66 zeigt den Übergang vom oberflächennah auffälligen Aufbau (links) zum Aufbau mit z.T. Absenkungen unterhalb des Betons, die auf Hohlagerungen hindeuten.



**Abbildung 66:** Grenze des oberflächennah auffälligen Aufbaus

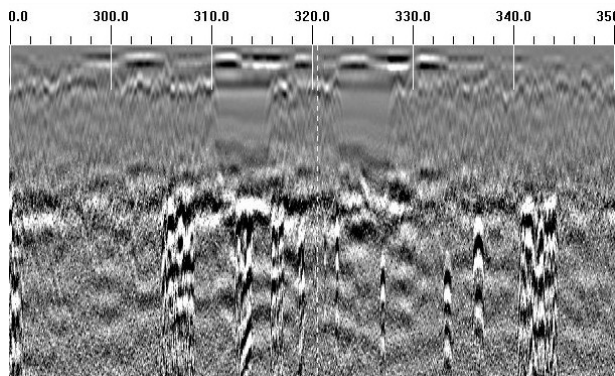
Die Interpretation dieser Auffälligkeiten gelang nur mit Hilfe der entnommenen Bohrkern (Abbildung 67), die zeigten, dass hier Stahlfaserbeton zum Einsatz kam. Der weitere Schichtverlauf ist mit

Georadarmessungen in diesen Bereichen nicht erkennbar.



**Abbildung 67:** Bohrkern aus Stahlfaserbeton

Die Interpretation von kurzen Lücken im oberflächennah auffälligen Aufbau (Abbildung 68) war indes mit Hilfe der Ergebnisse der visuellen Zustandserfassung möglich.



**Abbildung 68:** Lücken im oberflächennah auffälligen Aufbau

Plattenersatz oder Teilplattenersatz (Abbildung 69) führten zu den in Abbildung 68 erkennbaren lückenhaften Strukturen.



**Abbildung 69:** Plattenersatz im ersten Fahrstreifen

## 5.2 Überlagerung mit ZEB- und Bestandsdaten und Daten der visuellen Zustandsaufnahme

Wegen der plattengenauen Erfassung der Oberflächenschäden im Zuge der visuellen Zustandsaufnahme auf den Versuchsstrecken mit Beton- und Asphaltbau erreichen die in den Streckenbändern (Anhang 1) dargestellten Ergebnisse einen wesentlich höheren Genauigkeitsgrad als die im Rahmen der ZEB auf Basis von 100m-Abschnitten gebildeten Zustandswerte. Des Weiteren ermöglicht die visuelle Zustandsaufnahme die Erfassung wesentlich feinerer Strukturen, z.B. bei Rissbildungen, als das bei der Auswertung film- oder videotechnischer Aufzeichnungen der Fahrbahnoberfläche im Rahmen des Teilprojektes 4 der ZEB möglich ist.

Bei den Begehungen wurden an den Versuchsstrecken mit Asphaltaufbau inzwischen ausgeführte Erhaltungsmaßnahmen festgestellt (z.B. Erneuerung der Deckschicht). Informationen zum Ausführungszeitpunkt und zum Umfang liegen nicht vor, anhand der Straßendatenbanken waren derartige Aussagen nicht möglich. Ursache für Maßnahmen waren mit hoher Wahrscheinlichkeit Risse in der Asphaltdeckschicht, teilweise waren diese im noch unsanierten Seitenstreifen sichtbar (siehe Abbildung 70 und Abbildung 71).



**Abbildung 70:** Beispielhafte Darstellung des sanierten Hauptfahrstreifens und der verbliebenen Risse im Seitenstreifen



**Abbildung 71:** Beispielhafte Darstellung des sanierten Hauptfahrstreifens und der verbliebenen Risse im Seitenstreifen

Diese Erhaltungsmaßnahmen sind bei der Beurteilung der ZEB-Daten zu beachten, da deren Ausführung auch erst nach der messtechnischen Zustandserfassung erfolgt sein kann und somit zu Fehlinterpretationen führen können.

Weiterhin wurde bei den Streckenbegehungen festgestellt, dass vereinzelt die o.g. erneuerten Deckschichtbereiche inzwischen wieder schadhaft sind und in Teilbereichen Risse und Ausbrüche vorhanden sind. Ein derartiger Bereich ist in Abbildung 72 und Abbildung 73 abgebildet. Die Ausbrüche in der neu aufgetragenen Deckschicht sind deutlich zu erkennen, in der Detailansicht sieht man zudem deutlich die Spuren vom Anfräsen der alten Befestigung.



**Abbildung 72:** Beispielhafte Darstellung Ausbrüchen in der Asphaltdeckschicht



**Abbildung 73:** Beispielhafte Darstellung Ausbrüchen in der Asphaltdeckschicht

### 5.3 Bildung homogener Abschnitte aus Einzelmerkmalen

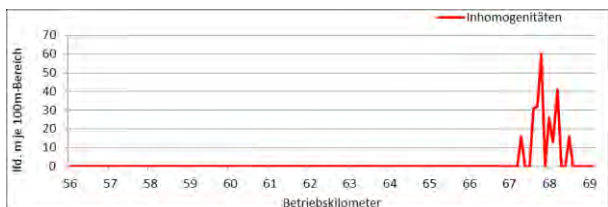
Voraussetzung der Bildung homogener Unterabschnitte innerhalb einer Versuchsstrecke ist, dass die Spannweite der Messwerte über die gesamte Versuchsstrecke bei mindestens 10% liegt [FGSV 431].

Danach sind für jedes relevante Einzelmerkmal nach dem Verfahren der kumulativen Summenbildung Unterabschnitte zu bilden und auf ihre Gültigkeit mit dem t-Signifikanztest an Steigungsänderungen zu prüfen.

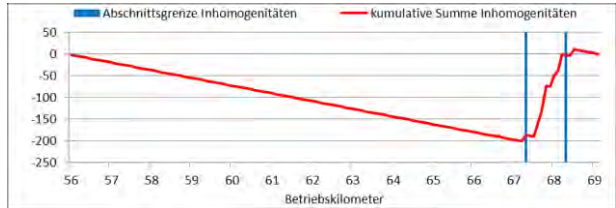
Nachfolgend ist die Bildung von Unterabschnitten bis zur Unterabschnittsselection nach [FGSV 431] am Beispiel der VS 2 dargestellt.

#### 5.3.1 Georadar-Detektionen von Inhomogenitäten

Die Inhomogenitäten im Radargramm zeigen Schwankungen des Materials der Betondecke und der Tragschicht. Dieses Merkmal ist daher ein indirektes Indiz für schwankende Festigkeiten bzw. Tragfähigkeiten.



**Abbildung 74:** Georadar-Detektionen des Merkmals Inhomogenitäten



**Abbildung 75:** Georadar-Detektionen von Inhomogenitäten - Unterabschnittsbildung nach dem Verfahren der kumulativen Summen

Unterabschnitt		Anzahl 100m-Bereiche	Inhomogenitäten je 100m-Bereich	
Bezeichnung	Messkilometer		Mittelwert	Varianz
A	56,0 - 67,2	113	0,00	0,00
B	67,3 - 68,2	10	21,90	396,77
C	68,3 - 69,1	9	1,78	28,44

**Tabelle 11:** Georadar-Detektionen von Inhomogenitäten – erste Einteilung der Messwerte in Unterabschnitte

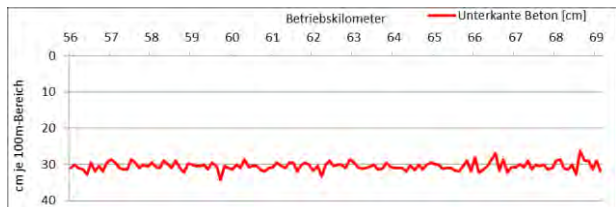
Unterabschnitte	Gemeinsame Varianz	t-Wert	Wert Student-t-Verteilung	Signifikanzkriterium
A - B	44,09	3,30	1,980	WAHR
B - C	47,64	2,92	2,069	WAHR

**Tabelle 12:** Georadar-Detektionen von Inhomogenitäten - Auswertung der ersten Unterabschnittsselection

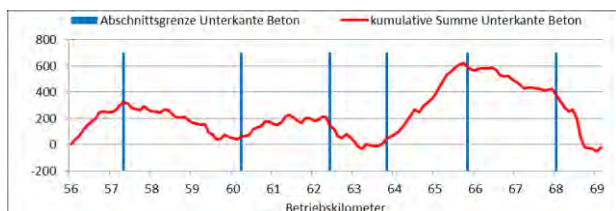
Der Signifikanztest nach [FGSV 431] ist bestanden. Es wurden drei Unterabschnitte gebildet.

#### 5.3.2 Georadar-Detektionen der Unterkante Beton

Die Detektion der Unterkante der Betondecke weist auf Schwankungen der Deckendicke hin, die direkt in eine Substanzbewertung eingeht.



**Abbildung 76:** Georadar-Detektionen der Unterkante Beton



**Abbildung 77:** Georadar-Detektionen der Unterkante Beton - Unterabschnittsbildung nach dem Verfahren der kumulativen Summen

Unterabschnitt		Anzahl 100m-Bereiche	Unterkannte Beton je 100m-Bereich	
Bezeichnung	Messkilometer		Mittelwert	Varianz
A	56 - 57,2	13	30,64	1,43
B	57,3 - 60,1	29	30,51	1,22
C	60,2 - 62,3	22	30,62	1,07
D	62,4 - 63,7	14	30,32	0,68
E	63,8 - 65,7	20	30,74	0,57
F	65,8 - 67,9	22	30,32	1,99
G	68 - 69,1	12	29,99	3,32

**Tabelle 13:** Georadar-Detektionen der Unterkante Beton – erste Einteilung der Messwerte in Unterabschnitte

Unterabschnitte	Gemeinsame Varianz	t-Wert	Wert Student-t-Verteilung	Signifikanzkriterium
A - B	0,16	0,32	2,020	FALSCH
B - C	0,09	0,35	2,009	FALSCH
C - D	0,10	0,93	2,028	FALSCH
D - E	0,08	1,47	2,034	FALSCH
E - F	0,12	1,19	2,020	FALSCH
F - G	0,40	0,52	2,040	FALSCH

**Tabelle 14:** Georadar-Detektionen der Unterkante Beton - Auswertung der ersten Unterabschnittsselection



**Abbildung 78:** Georadar-Detektionen der Unterkante Beton – Sechste Unterabschnittsbildung nach dem Verfahren der kumulativen Summen

Unterabschnitt		Anzahl 100m-Bereiche	Unterkante Beton je 100m-Bereich	
Bezeichnung	Messkilometer		Mittelwert	Varianz
E	56 - 65,7	98	30,57	0,98
G	65,8 - 69,1	34	30,21	2,40

**Tabelle 15:** Georadar-Detektionen der Unterkante Beton – sechste Einteilung der Messwerte in Unterabschnitte

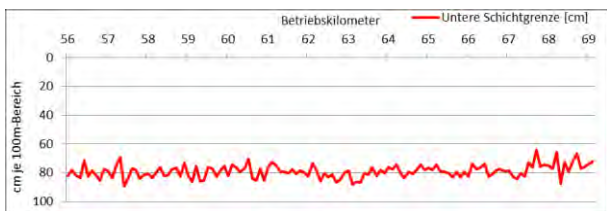
Unterabschnitte	Gemeinsame Varianz	t-Wert	Wert Student-t-Verteilung	Signifikanzkriterium
E - G	0,08	1,27	1,979	FALSCH

**Tabelle 16:** Georadar-Detektionen der Unterkante Beton - Auswertung der sechsten Unterabschnittsselection

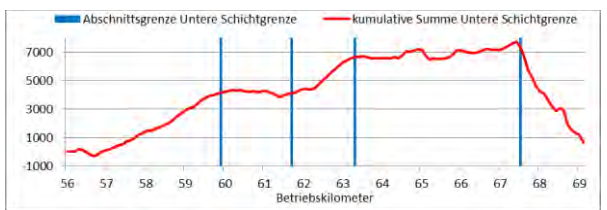
Der Signifikanztest nach [FGSV 431] ist nicht bestanden. Es wurden keine Unterabschnitte gebildet.

### 5.3.3 Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze

Die Detektion der unteren Schichtgrenze zeigt die Schwankungen der Dicke des gesamten Oberbaus. Dieses Merkmal hat indirekten Einfluss auf die strukturelle Substanz (frostsicherer Aufbau).



**Abbildung 79:** Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze



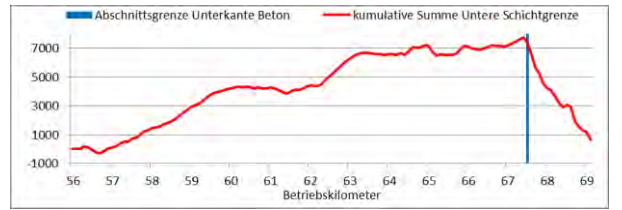
**Abbildung 80:** Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze – erste Unterabschnittsbildung nach dem Verfahren der kumulativen Summen

Unterabschnitt		Anzahl 100m-Bereiche	Untere Schichtgrenze je 100m-Bereich	
Bezeichnung	Messkilometer		Mittelwert	Varianz
A	56 - 59,8	39	80,02	18,44
B	59,9 - 61,6	18	78,08	17,58
C	61,7 - 63,2	16	81,65	14,87
D	63,3 - 67,4	42	79,16	9,05
E	67,5 - 69,1	17	73,97	29,37

**Tabelle 17:** Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze – erste Einteilung der Messwerte in Unterabschnitte

Unterabschnitte	Gemeinsame Varianz	t-Wert	Wert Student-t-Verteilung	Signifikanzkriterium
A - B	1,52	1,57	2,003	FALSCH
B - C	2,03	2,50	2,035	WAHR
C - D	1,21	2,26	2,002	WAHR
D - E	2,06	3,62	2,002	WAHR

**Tabelle 18:** Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze - Auswertung der ersten Unterabschnittsselection



**Abbildung 81:** Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze – Vierte Unterabschnittsbildung nach dem Verfahren der kumulativen Summen

Unterabschnitt		Anzahl 100m-Bereiche	Untere Schichtgrenze je 100m-Bereich	
Bezeichnung	Messkilometer		Mittelwert	Varianz
D	56 - 67,4	115	79,63	15,06
E	67,5 - 69,1	17	73,97	29,37

**Tabelle 19:** Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze – vierte Einteilung der Messwerte in Unterabschnitte

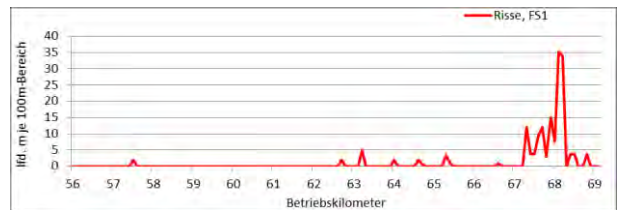
Unterabschnitte	Gemeinsame Varianz	t-Wert	Wert Student-t-Verteilung	Signifikanzkriterium
D - E	1,97	4,04	1,079	WAHR

**Tabelle 20:** Georadar-Detektionen der unteren Schichtgrenze - Auswertung der vierten Unterabschnittsselection

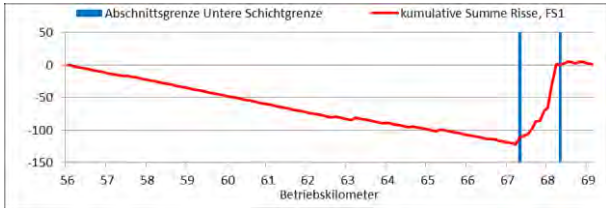
Der Signifikanztest nach [FGSV 431] ist bestanden. Es wurden zwei Unterabschnitte gebildet.

### 5.3.4 Visuelle Zustandsaufnahme von Rissbildungen

Die erkannten Rissbildungen aus der visuellen Zustandsaufnahme sind ein Maß für das örtliche Versagen der Betondecke und haben direkten Einfluss auf die strukturelle Substanz.



**Abbildung 82:** Visuelle Zustandsaufnahme von Rissbildungen



**Abbildung 83:** Visuelle Zustandsaufnahme von Rissbildungen – erste Unterabschnittsbildung nach dem Verfahren der kumulativen Summen

Unterabschnitt	Messkilometer	Anzahl 100m-Bereiche	Risse je 100m-Bereich	
			Mittelwert	Varianz
A	56,0 - 67,2	113	0,16	0,45
B	67,3 - 68,2	10	13,55	138,03
C	68,3 - 69,1	9	1,25	3,52

**Tabelle 21:** Visuelle Zustandsaufnahme von Rissbildungen – erste Einteilung der Messwerte in Unterabschnitte

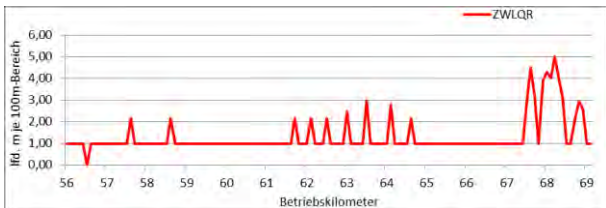
Unterabschnitte	Gemeinsame Varianz	t-Wert	Wert Student-t-Verteilung	Signifikanzkriterium
A - B	15,34	3,42	1,980	WAHR
B - C	15,78	3,10	2,069	WAHR

**Tabelle 22:** Visuelle Zustandsaufnahme von Rissbildungen - Auswertung der ersten Unterabschnittsselection

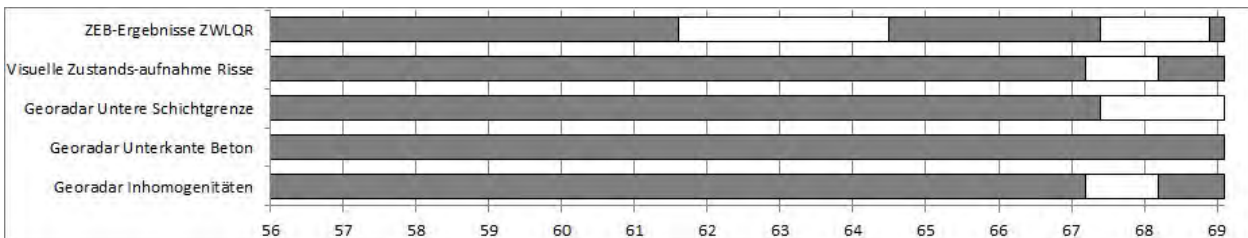
Der Signifikanztest nach [FGSV 431] ist bestanden. Es wurden drei Unterabschnitte gebildet.

### 5.3.5 Zustandwert Längs- und Querrisse der ZEB

Die erkannten Rissbildungen aus der ZEB sind ebenfalls ein Maß für das örtliche Versagen der Betondecke und haben direkten Einfluss auf die strukturelle Substanz. Im Gegensatz zur visuellen Zustandserfassung liegen hier jedoch Ergebnisse in 100m-Abschnitten vor, die die Ergebnisgenauigkeit deutlich beeinträchtigen.

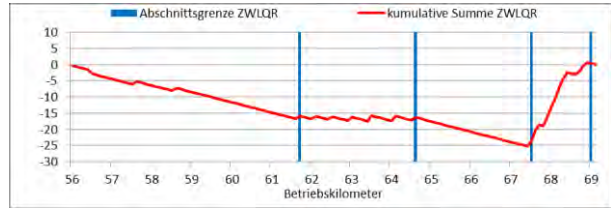


**Abbildung 84:** ZWLQR der ZEB



**Abbildung 86:** Streckenband homogener Abschnitte anhand von Einzelmerkmalen

Im nächsten Schritt ist eine Wichtung der Einzelmerkmale und somit der entstandenen homogenen Unterabschnitte vorzunehmen. Dies kann zunächst empirisch erfolgen, bedarf jedoch einer ausreichenden Sachkunde.



**Abbildung 85:** ZWLQR der ZEB – erste Unterabschnittsbildung nach dem Verfahren der kumulativen Summen

Unterabschnitt	Messkilometer	Anzahl 100m-Bereiche	ZWLQR je 100m-Bereich	
			Mittelwert	Varianz
A	56,0 - 61,6	57	1,02	0,07
B	61,7 - 64,5	29	1,30	0,39
C	64,6 - 67,4	29	1,04	0,05
D	67,5 - 68,9	15	3,04	1,70
E	69,0 - 69,1	2	1,00	0,00

**Tabelle 23:** ZWLQR der ZEB – erste Einteilung der Messwerte in Unterabschnitte

Unterabschnitte	Gemeinsame Varianz	t-Wert	Wert Student-t-Verteilung	Signifikanzkriterium
A - B	0,01	2,28	1,988	WAHR
B - C	0,02	2,10	2,002	WAHR
C - D	0,12	5,70	2,015	WAHR
D - E	0,12	5,86	4,303	WAHR

**Tabelle 24:** ZWLQR der ZEB - Auswertung der ersten Unterabschnittsselection

Der Signifikanztest nach [FGSV 431] ist bestanden. Im Gegensatz zur Auswertung der visuellen Zustandserfassung sind hier fünf Unterabschnitte gebildet worden.

### 5.3.6 Bildung übergeordneter homogener Abschnitte

Die Bildung übergeordneter homogener Abschnitte wurde ebenfalls nach dem Verfahren gemäß [FGSV 431] vorgenommen. Dazu wurden alle fünf Einzelmerkmale mit den entstandenen homogenen Unterabschnitten übereinander im Streckenband dargestellt (Abbildung 86).

Abbildung 87 zeigt das Ergebnis der gebildeten übergeordneten homogenen Abschnitte. Die Wichtung der einzelnen homogenen Unterabschnitte erfolgte wegen der hohen Erfassungsgenauigkeit zugunsten der visuellen Erfassung des Oberflächenbildes gegenüber der ZEB. Des Weiteren

ren wurde die streckenbezogene Übereinstimmung mit den homogenen Unterabschnitten des Merkmals Inhomogenitäten der Georadar-Messung als

signifikant eingestuft. Demzufolge entstanden drei übergeordnete homogene Abschnitte.

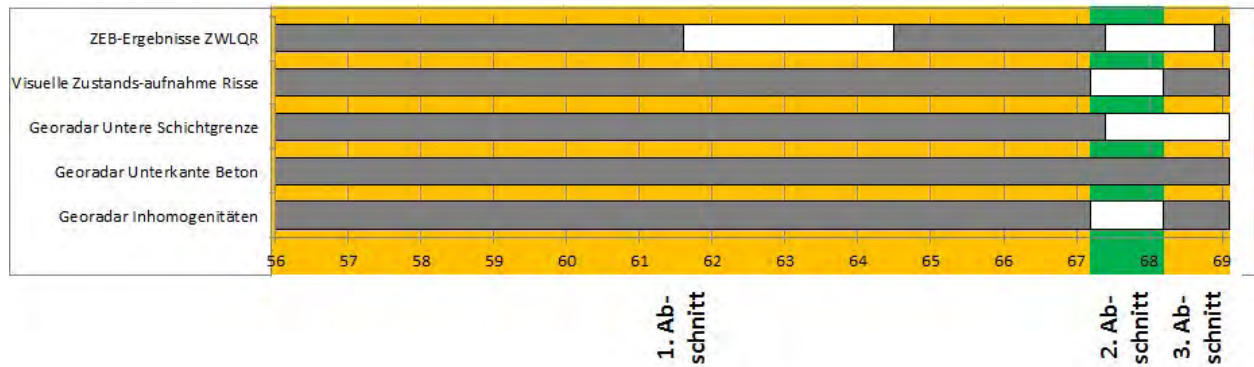


Abbildung 87: Streckenband mit drei übergeordneten homogenen Abschnitten

Bei der weiteren Verfolgung der angewandten Methode kann das Verfahren mathematisch gefasst werden, wenn eine ausreichende statistisch auswertbare Datenmenge für alle maßgebenden Kriterien vorliegt. Zur Validierung sind außerdem entsprechende Prüfungen, z.B. in Form von Tragfähigkeitsmessungen und zusätzlichen (d.h. flächendeckenden) Bohrkernuntersuchungen erforderlich.

gegangen werden, das der t-Test selbst bei leichten Abweichungen von der Normalverteilung verlässliche Ergebnisse liefert.

### 5.4 Auswertung der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer

Eine endgültige Prüfung, ob ein signifikanter Unterschied der Messniveaus in den betrachteten Abschnitten vorliegt, erfolgt durch den Vergleich des ermittelten t-Werts mit den Schwellenwerten aus [SACHS 2006] unter Verwendung eines Signifikanzniveaus von  $\alpha = 0,05$  und der Annahme, dass es sich um eine zweiseitige Verteilung handelt. Ist der berechnete t-Wert größer als der tabellierte Schwellenwert, muss die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese

Die Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer wurden nach der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Verfahrensweise durchgeführt. Im Folgenden werden diese Messungen mit dem Ziel ausgewertet, die anhand der bisher betrachteten Kennwerte vollzogene Bildung homogener Abschnitte durch die Tragfähigkeitskennwerte zu bestätigen oder in Frage zu stellen.

$$H_A: \mu_1 \neq \mu_2 \quad \text{Gl. 16}$$

Das dafür angewendete statistische Verfahren formuliert die Nullhypothese, dass die Mittelwerte der untersuchten Stichproben gleich sind:

angenommen werden.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad \text{Gl. 15}$$

Hierzu wird unter Verwendung der Mittelwerte und deren Varianzen zunächst die statistische Prüfgröße t ermittelt und die Anzahl der Freiheitsgrade bestimmt (Tabelle 25).

FG	Wahrscheinlichkeiten $P(t \leq t_{1-\alpha})$			
	0.99 $\nu$ (0.01)	0.975 (0.025)	0.95 (0.05)	0.90 (0.10)
1	31.8205	12.7062	6.3138	3.0777
2	6.9646	4.3027	2.9200	1.8856
3	4.5407	3.1824	2.3534	1.6377
4	3.7469	2.7764	2.1318	1.5332
5	3.3649	2.5706	2.0150	1.4759
6	3.1427	2.4469	1.9432	1.4398
7	2.9980	2.3646	1.8946	1.4149
8	2.8965	2.3060	1.8595	1.3968
9	2.8214	2.2622	1.8331	1.3830
10	2.7638	2.2281	1.8125	1.3722
11	2.7181	2.2010	1.7959	1.3634
12	2.6810	2.1788	1.7823	1.3562
13	2.6503	2.1604	1.7709	1.3502
14	2.6245	2.1448	1.7613	1.3450
15	2.6025	2.1314	1.7531	1.3406
16	2.5835	2.1199	1.7459	1.3368
17	2.5669	2.1098	1.7396	1.3334
18	2.5524	2.1009	1.7341	1.3304
19	2.5395	2.0930	1.7291	1.3277
20	2.5280	2.0860	1.7247	1.3253
22	2.5083	2.0739	1.7171	1.3212
24	2.4922	2.0639	1.7109	1.3178
26	2.4786	2.0555	1.7056	1.3150
28	2.4671	2.0484	1.7011	1.3125
	0.98	0.95	0.90	0.80
	„zweiseitige“ Wahrsch. $P(t \leq t_{1-\alpha/2})$			

FG	Wahrscheinlichkeiten $P(t \leq t_{1-\alpha})$			
	0.99 $\nu$ (0.01)	0.975 (0.025)	0.95 (0.05)	0.90 (0.10)
30	2.4573	2.0423	1.6973	1.3104
32	2.4487	2.0369	1.6939	1.3086
34	2.4411	2.0322	1.6909	1.3070
36	2.4345	2.0281	1.6883	1.3055
38	2.4286	2.0244	1.6860	1.3042
40	2.4233	2.0211	1.6839	1.3031
42	2.4185	2.0181	1.6820	1.3020
44	2.4141	2.0154	1.6802	1.3011
46	2.4102	2.0129	1.6787	1.3002
48	2.4066	2.0106	1.6772	1.2994
50	2.4033	2.0086	1.6759	1.2987
55	2.3961	2.0040	1.6730	1.2971
60	2.3901	2.0003	1.6706	1.2958
65	2.3851	1.9971	1.6686	1.2947
70	2.3808	1.9944	1.6669	1.2938
75	2.3771	1.9921	1.6654	1.2929
80	2.3739	1.9901	1.6641	1.2922
85	2.3710	1.9883	1.6630	1.2916
90	2.3685	1.9867	1.6620	1.2910
95	2.3662	1.9853	1.6611	1.2905
100	2.3642	1.9840	1.6602	1.2901
250	2.3414	1.9695	1.6510	1.2849
500	2.3338	1.9647	1.6479	1.2832
1000	2.3301	1.9623	1.6464	1.2824
	0.98	0.95	0.90	0.80
	„zweiseitige“ Wahrsch. $P(t \leq t_{1-\alpha/2})$			

Abbildung 88: Darstellung maßgeblicher t-Werte in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit und der Freiheitsgrade [SACHS 2006]

Stichproben- umfänge	Varianzen	
	gleich: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	ungleich: $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$
gleich: $n_1 = n_2 = n$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}}$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}}$
	$FG = 2n - 2$	$FG = n - 1 + \frac{2n - 2}{\frac{s_1^2}{s_2^2} + \frac{s_2^2}{s_1^2}}$
ungleich: $n_1 \neq n_2$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\left[\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}\right] \cdot \left[\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}\right]}}$	$\hat{t} = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$
	$FG = n_1 + n_2 - 2$	$FG = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$

**Tabelle 25:** Formeln zur Ermittlung der Prüfgröße t und der Anzahl der Freiheitsgrade für die Durchführung des Mittelwertvergleichs

Zur Veranschaulichung der statistischen Auswertung der einzelnen Abschnitte auf den verschiedenen Strecken werden die Ergebnisse des Abschnittsvergleichs am Ende jeder Messstrecke tabellarisch zusammengefasst. Wie in Tabelle 26 beispielhaft dargestellt, werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen der jeweiligen Abschnitte für die Kenngröße (Verformung  $D_0$ , relative Fugenbewegung f und Wirksamkeitsindex W für Strecken in Betonbauweise bzw. Verformung  $D_0$ , elastische Länge l und Schichtmodul  $M_0$  für Strecken in Asphaltbauweise) aufbereitet und vergleichend dargestellt. Dabei werden neben den für den t-Test benötigten Kennwerten – Mittelwert und Varianz – ebenfalls die Ergebnisse der Tests für die einzelnen Abschnitte aufgezeigt, wobei nicht nur die unmittelbar nebeneinander liegenden homogenen Abschnitte miteinander, sondern auch die restlichen Abschnitte untereinander verglichen werden. Diese Vergleiche bestätigen eine Grenze eines homogenen Abschnitts zwischen den betrachteten Abschnitten („ja“) oder verwerfen diese Nullhypothese („nein“).

Im Anschluss an diese Analyse erfolgt ein Ranking der einzelnen homogenen Abschnitte hinsichtlich der ermittelten Werte jeweils in der Reihenfolge von „1“ (vorteilhaft) bis „n“ (weniger gut). Dabei erhalten Abschnitte, die nach den statistischen Tests dem selben homogenen Abschnitt entstammen, als gleichwertig behandelt. Das Ranking wird durch eine farbliche Kennzeichnung unterstützt,

damit zusammengehörige Abschnitte besser erkannt werden.

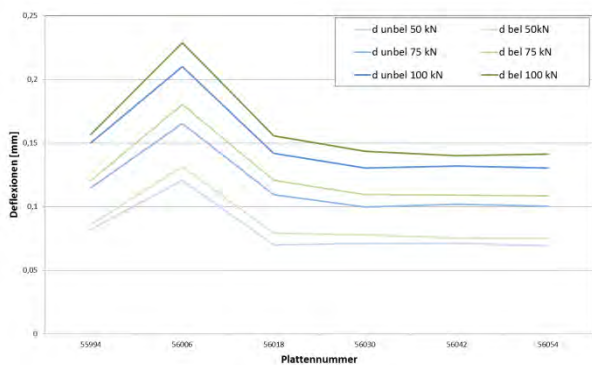
		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Verformung <math>D_0</math></b>				
Mittelwert		0,081	0,069	0,087
Varianz		0,000638	0,000173	0,000315
homogene Grenze?	I		nein	nein
	II			ja
Ranking		2	1	2

**Tabelle 26:** Beispiel einer Ergebnisdarstellung des statistischen Mittelwertvergleichs für ein mit dem Falling Weight Deflectometer gemessenen Kennwert

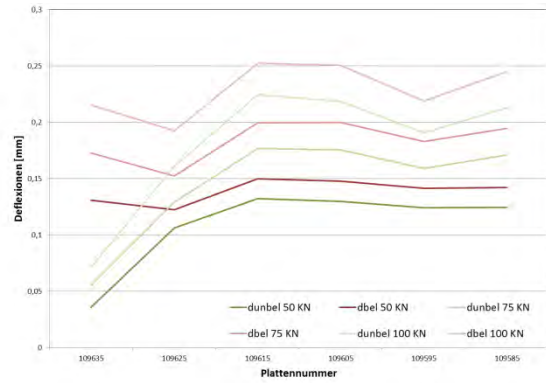
### 5.4.1 Strecken in Betonbauweise

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Messungen auf Straßenbefestigungen in Betonbauweise an jeder zweiten Platte am Plattenrand in der rechten Rollspur mit identischer Geofongeometrie durchgeführt.

Die Auswertung der gewonnenen Messdaten erfolgt auf den Straßenbefestigungen in Betonbauweise nach dem in Kapitel 4.3.1.1 vorgestellten Verfahren. Neben der Betrachtung der üblichen Tragfähigkeitskennwerte  $d_{bel}$ ,  $f$  und  $W$  wurden auch die aus den Messungen bei drei unterschiedlichen Kraftstoßgrößen zu ermittelnden Kennwerte  $y_s$  und  $stg$  nach [FIE/WO 2005] ausgewertet. Hierzu wurde in einem ersten Schritt eine grafische Gegenüberstellung der gemessenen bzw. approximierten Werte jedes Abschnitts erstellt. In den meisten Fällen ist dabei erkennbar, dass die Kurven der drei verschiedenen Laststufen parallel laufen (Abbildung 89). Eine solche Entwicklung der Messwerte deutet darauf hin, dass die Platten eine über den Messabschnitt hinweg hinreichende bzw. ausreichende Plattenbettung besitzen. Ist dies nicht der Fall, besteht zwischen den Werten des belasteten und unbelasteten Plattenrandes eine größere Differenz und der Einfluss der höheren Laststufen wächst, was dazu führt, dass sich die Graphen schneiden oder sie unregelmäßig verlaufen (Abbildung 90). Hier besteht der Verdacht einer gestörten Plattenauflagerung. Um diese These zu stützen, wurde im Weiteren die Auswertung nach [FIE/WO 2005] durchgeführt. Diese betrachtet – wie eingangs ausgeführt – den Verlauf der Messwerte hinsichtlich ihrer Steigungsänderung und des Ordinatenabschnittes zwischen den drei Lastimpulsstufen.

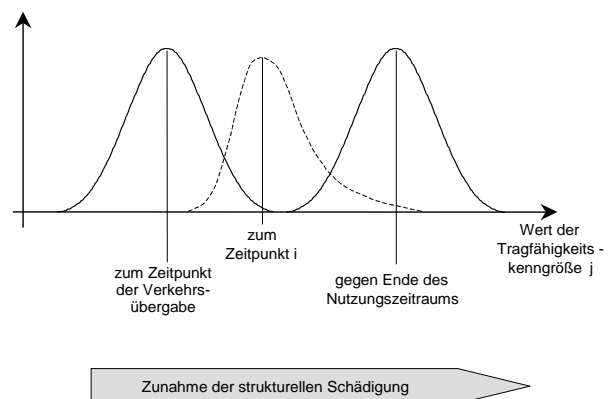


**Abbildung 89:** Grafische Gegenüberstellung der Verformungen am unbelasteten und belasteten Plattenrand im ersten Abschnitt der Untersuchungsstrecke



**Abbildung 90:** Grafische Gegenüberstellung der Verformungen am unbelasteten und belasteten Plattenrand und in Plattenmitteim ersten Abschnitt der Untersuchungsstrecke

Für alle ausgewerteten Tragfähigkeitskenngrößen wurde der Bewertungsbereich nach [WOLF 2009] ermittelt. Die hierfür erforderliche Ermittlung der Grenzen erfolgt über die Gruppierung und statistische Auswertung der Messwerte. Dabei ist jedoch hervorzuheben, dass die statistische Auswertung nicht Abschnittsweise, sondern über die gesamte Messstrecke durchgeführt wird. Bei der statistischen und grafischen Auswertung wurde sich an den Ausführung in [FIE/WO 2005] orientiert. Die Grenzwertermittlung bei der statistischen Auswertung beruht auf der Annahme, dass die Schiefe der Tragfähigkeitskenngrößenverteilung in Abhängigkeit von der strukturellen Schädigung zunimmt. Weiterhin wird angenommen, dass sich die Verteilung bei einer gleichmäßigen Schädigung der einzelnen Fugen ohne Instandsetzungsmaßnahmen wieder einer Normalverteilung annähert (Abbildung 91).



**Abbildung 91:** Schematische Darstellung der Entwicklung und Lage der Häufigkeitsverteilung einer Tragfähigkeitskenngröße im Nutzungszeitraum [FIE/WO 2005]

Da eine Beurteilung auf der oben beschriebenen Grundlage der Grenzverteilungen nicht möglich ist, wird für eine Beurteilung jeder einzelnen Fuge das 95%- bzw. 5%-Quantil als Grenzwerte auf Basis der Grenzverteilungen angenommen. Tabelle 27

zeigt die Verwendung der Quantile in Abhängigkeit von den Tragfähigkeitskenngrößen.

Tragfähigkeitskenngröße	Quantil
Verformung am belasteten Plattenrand $d_{bel}$	95%- Quantil
relative vertikale Fugenbewegung $f$	95%- Quantil
Ordinatenschnittpunkt $y_s$	95%- Quantil
Wirksamkeitsindex $W$	5%- Quantil
Steigung $stg$	5%- Quantil

**Tabelle 27:** Darstellung der Tragfähigkeitskenngrößen mit den zugehörigen Quantilen

Auf der Basis der ermittelten Grenzwerte ist es nun möglich, die verschiedenen Diagramme in vier Bereiche zu unterteilen.

Für die Validierung der zuvor gewählten Abschnitte jeder Bundesautobahn und zur Untersuchung, ob an den vorgegebenen Grenzen ein signifikanter Abschnittswechsel an den vorgegebenen Grenzen vorliegt, werden folgende Kenngrößen

- Verformung im Lasteintragungspunkt  $D_0$  (Plattenmitte)
- relative Fugenbewegung  $f$
- Wirksamkeitsindex  $W$

unter dem Einfluss der Kraftstoßgrößen zunächst graphisch über den Streckenverlauf aufgetragen. In den Abbildungen sind auch die Abschnittsgrenzen der im Vorfeld der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf der Grundlage der Zustandserfassung, der Georadarmessungen und einer visuellen Begutachtung der Fahrbahnoberfläche festgelegten Abschnittsgrenzen aufgenommen.

### Versuchsstrecke VS 1

Die auf der VS 1 gewonnenen Messdaten wurden gemäß dem in Kapitel 4.3.1.1 beschriebenen Verfahren ausgewertet.

Im ersten Schritt wird die Auswertung hinsichtlich der Querkraftübertragung durchgeführt, wofür die Parameter Wirksamkeitsindex  $W$  und relative Fugenbewegung  $f$  als Grundlage angenommen werden können. Der Wirksamkeitsindex der VS 1 weist bei einem Mittelwert von 90,9 % ein Maximum von 99,6 % und ein Minimum von 13,9 % auf. Bei dieser Betrachtung ist jedoch festzuhalten, dass der minimale Wirksamkeitsindex am Übergang der Asphaltbefestigung auf die Betonbefestigung detektiert wurde. Abbildung 92 stellt den Wirksamkeitsindex in Abhängigkeit von den Verformungen des belasteten Plattenrandes dar.

Die visuelle Begutachtung von Abbildung 92 bis Abbildung 94 zeigt, dass sich der Großteil der

Messungen im ersten Quadranten bewegt. Weiterhin kann festgestellt werden, dass eine Tendenz der Messpunkt hin zum zweiten Quadranten besteht. Aufgrund dieses Diagramms und der in Kapitel 4.3.1.1 beschriebenen Systematik der Quadranten kann an dieser Stelle festgestellt werden, dass sich die VS 1 hinsichtlich der Querkraftübertragung in einem guten Zustand befindet, eine Schädigung der Dübel an einzelnen Platten nicht ausgeschlossen werden kann.

Zusätzlich zur Querkraftübertragung ist die Plattenbettung von entscheidender Bedeutung. Als Grundlage für die Beurteilung werden nach Kapitel 4.3.1.1 die Kenngrößen Ordinatenschnitt  $y_s$  und Steigung  $stg$  gewählt. Diese beiden Kenngrößen stellen nach der Ableitung der quadratischen Funktion, die den Zusammenhang der Verformung und des Lastimpulses beschreibt, einen Index zur Beurteilung der Plattenbettung dar. Als Auswertungsgrundlage wurde auf der VS 1 die Steigung  $stg$  gewählt. Diese ist in Abbildung 93 und Abbildung 94 in Abhängigkeit vom Wirksamkeitsindex  $W$  und von der relativen Fugenbewegung  $f$  dargestellt.

Bei der Betrachtung der beiden Abbildungen ist auffällig, dass sich die meisten Messungen in den Quadranten eins und drei befinden. Bei den in Quadranten eins befindlichen Messungen ist zusätzlich erkennbar, dass häufig eine Tendenz hin zum Quadranten zwei vorhanden ist. Auf Grundlage der visuellen Betrachtung und der Quadrantenunterteilung nach Kapitel 4.3.1.1 ist es möglich, eine Aussage bezüglich der Plattenbettung zu treffen. Die Plattenbettung weist in den meisten Bereichen keine Schädigung auf. Aufgrund der Tendenz – der Messungen in Quadrant eins – hin zum Quadranten drei und einzelnen Messungen, welche sich bereits innerhalb dieses Quadranten befinden, kann eine Schädigung der Plattenbettung in einzelnen Bereichen nicht ausgeschlossen werden.

Bei anschließender Überlagerung der Auswertungen der einzelnen Kenngrößen  $y_s$ ,  $stg$ ,  $f$  und  $W$  kann die VS 1 – bei einzelnen Ausreißern in die restlichen Quadranten – in Quadrant eins eingeordnet werden.

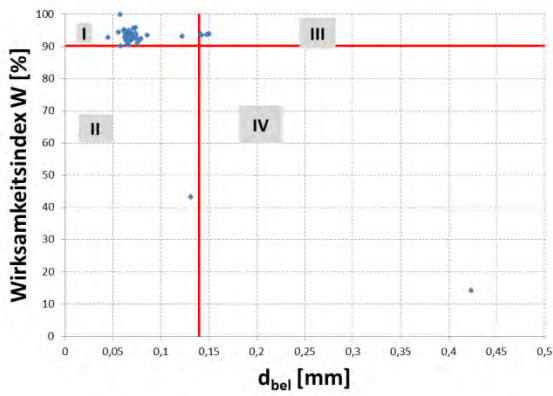


Abbildung 92: Gegenüberstellung  $d_{bel}$  und Wirkungsindex  $W$  auf der VS 1

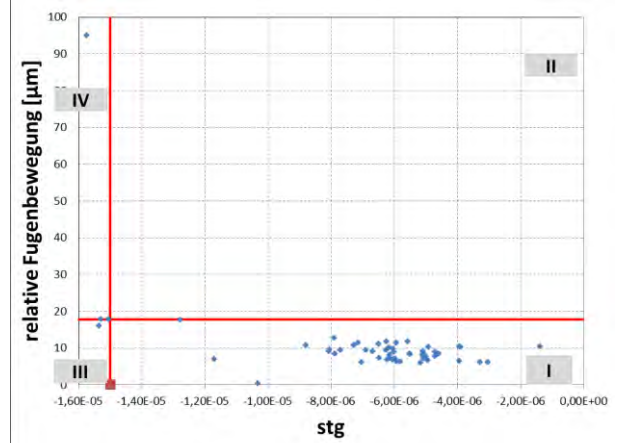


Abbildung 94: Gegenüberstellung der Steigung  $stg$  und der relativen Fugenbewegung  $f$  auf der VS 1

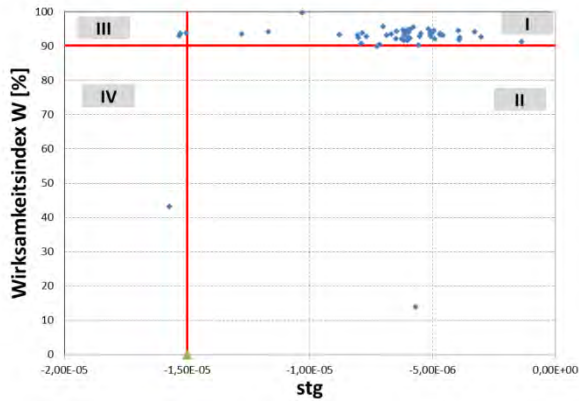


Abbildung 93: Gegenüberstellung der Steigung  $stg$  und Wirkungsindex  $W$  auf der VS 1

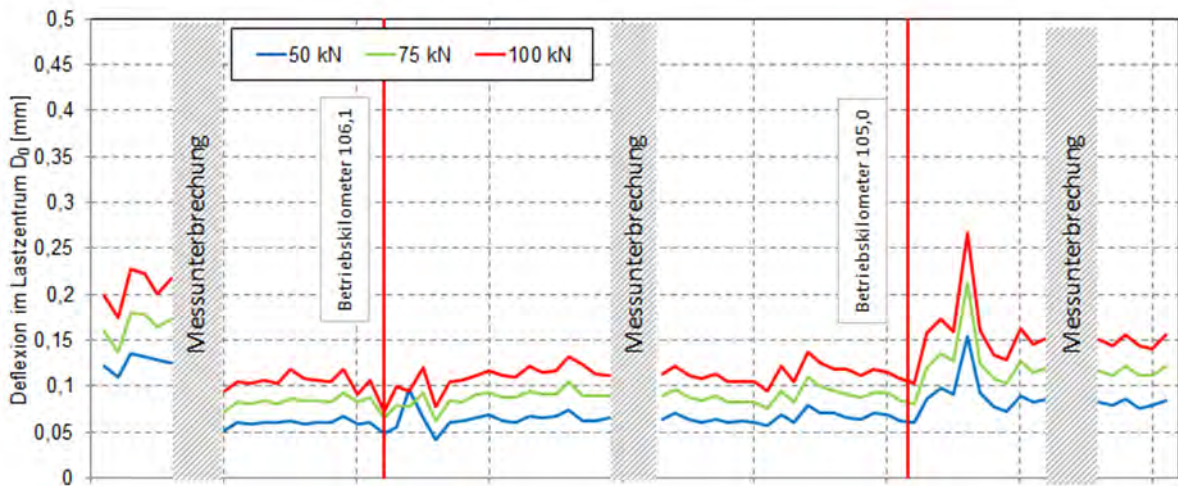
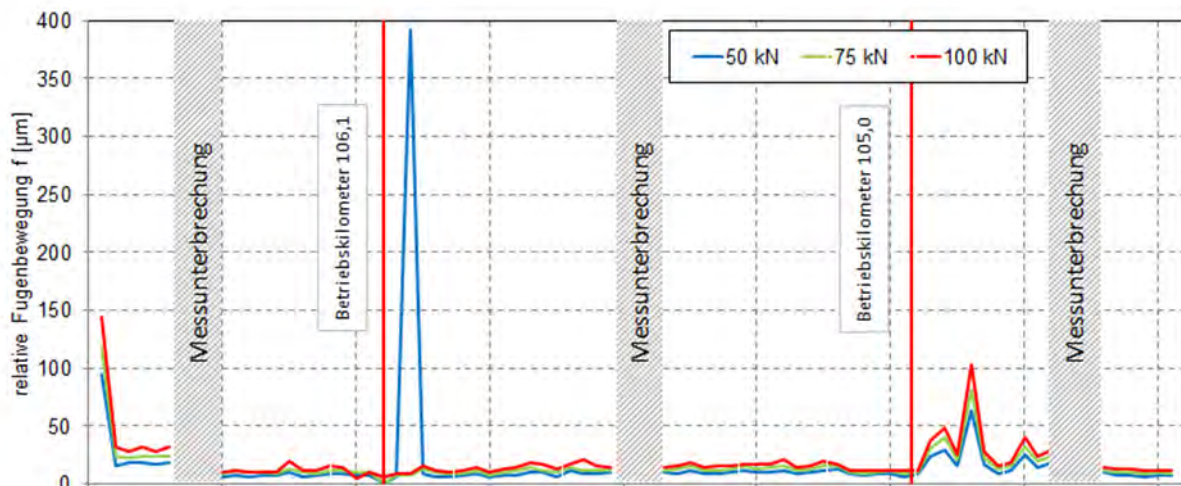
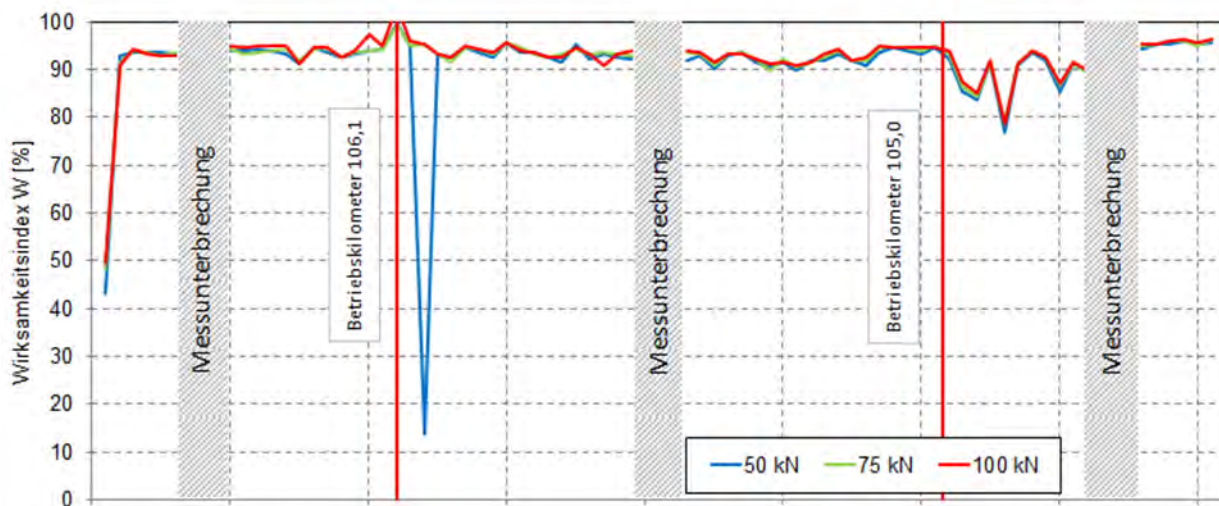


Abbildung 95: Darstellung der Verformung  $D_0$  [mm] in Plattenmitte bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 1



**Abbildung 96:** Darstellung der relativen Fugenbewegung  $f$  [ $\mu\text{m}$ ] bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 1



**Abbildung 97:** Darstellung des Wirksamkeitsindex  $W$  [%] bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 1

Die Auftragung der Tragfähigkeitsmesswerte über den Streckenverlauf in Abbildung 95 bis Abbildung 97 offenbaren keinen visuell eindeutig auszumachenden Abschnittswechsel. Die im Vorfeld festgelegten Grenzen homogener Abschnitte bestätigen sich augenscheinlich nicht durch die Tragfähigkeitskennwerte.

Die grafische Auswertung der Messwerte  $D_0$  in Abbildung 95 zeigen darüber hinaus, dass innerhalb der Messunterbrechung in Abschnitt I mindestens eine Abschnittsgrenze auftreten könnte, ZEB-Ergebnisse, Georadaruntersuchung und visuelle Zustandsaufnahme schließen dies jedoch aus. Daraus lässt sich folgern, dass bei der Verwendung des FWD eine kontinuierliche Messung über die gesamte Versuchsstrecke für eine umfassende Betrachtung notwendig ist. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens ließ sich dies aber nicht realisieren.

Diesen Eindruck bestätigen auch die Ergebnisse der durchgeführten Mittelwertvergleiche zwischen den drei Abschnitten. Die Grenze zwischen den homogenen Abschnitten I und II wird in allen drei statistischen Tests abgelehnt, die zwischen den homogenen Abschnitten II und III jedoch wird in zwei von drei Fällen bestätigt. Daraus kann hinsichtlich der Schäden der Betonbefestigung geschlossen werden, dass im Abschnitt III bereits eine geringere Hohllagerung vorhanden sein kann, die jedoch noch nicht zur Beeinträchtigung des Wirksamkeitsindex geführt hat. Die Dübel sind somit offensichtlich noch voll intakt.

Die statistische Auswertung der Daten der Messung mit dem Falling Weight Deflectometer in Tabelle 28 bis Tabelle 31 zeigt, dass es sich insgesamt bei den gemessenen Abschnitten der VS 1 um eine hinsichtlich der Tragfähigkeit unauffällige Strecke handelt. Die in Abschnitt III detektierten

Schäden befinden sich offensichtlich noch im Anfangsstadium.

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Verformung <math>D_0</math></b>				
Mittelwert		0,0778	0,0633	0,0977
Varianz		0,00099	0,00003	0,00207
homogene Grenze?	I		nein	nein
	II			ja
Ranking		1		2

**Tabelle 28:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die mit dem Falling Weight Deflectometer gemessenen Verformungen  $D_0$  auf der VS 1

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>relative Fugenbewegung <math>f</math></b>				
Mittelwert		9,931	8,605	17,836
Varianz		26,197	3,217	408,784
homogene Grenze?	I		nein	nein
	II			ja
Ranking		1		2

**Tabelle 29:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die berechnete relative Fugenbewegung  $f$  auf der VS 1

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Wirksamkeitsindex <math>W</math></b>				
Mittelwert		93,921	93,167	91,244
Varianz		2,629	1,662	48,057
homogene Grenze?	I		nein	nein
	II			nein
Ranking		1		

**Tabelle 30:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für den berechneten Wirksamkeitsindex  $W$  auf der VS 1

Parameter	Abschnitte	
Verformung $D_0$	1	2
rel. Fugenbewegung $f$	1	2
Wirksamkeitsindex $W$	1	

**Tabelle 31:** Vergleich der resultierenden Abschnitte auf der VS 1

### Versuchsstrecke VS 2

Die Auswertung für die Querkraftübertragung zeigt auf der VS 2 ein insgesamt akzeptables Ergebnis. Bei der Gegenüberstellung des Wirksamkeitsindex und der eingepprägten Verformung (Abbildung 98) ist ersichtlich, dass sich eine hohe Anzahl der Messungen im ersten Quadranten befindet. Dies lässt darauf schließen, dass die Querrfugen am Plattenrand bei einer relativ geringen Fugenbewegung und einem hohen Wirksamkeitsindex eine geringe Verformung aufweisen.

Eine geringe Anzahl an Messungen befindet sich allerdings auch in den Quadranten zwei, drei und vier (Abbildung 98). Bei den Messungen, die sich in den Quadranten zwei, drei und vier befinden ist die Querkraftübertragung teilweise geschädigt bzw. nicht mehr vorhanden. Die reine Betrachtung der Zahlenwerte des Wirksamkeitsindex mit einem Mittelwert von 92,19 % bei einem Maximum von 97,89 % und einem Minimum von 38,56 %, zeigt auf den ersten Blick keine großen Defizite, da sich der Mittelwert oberhalb des 5% Quantils befindet.

Bei der Auswertung der Plattenbettung über den Ordinatenabschnitt  $y_s$  mittels Quadranten ist bei der Gegenüberstellung des Wirksamkeitsindex (Abbildung 99) und der relativen Fugenbewegung

(Abbildung 100) mit dem Ordinatenabschnitt  $y_s$  festzustellen, dass sich eine hohe Anzahl der Messungen an der Grenze des dritten Quadranten befinden und teilweise in den ersten und vierten Quadranten diffundieren. Da sich jedoch die größte Anzahl im dritten Quadranten befindet, kann die Plattenbettung bei einer Vielzahl von Betonplatten als weich bzw. teilweise geschädigt bezeichnet werden.

Die Auswertung der verschiedenen Diagramme zeigt unterschiedliche Ergebnisse auf. Zum einen befinden sich die Messungen hauptsächlich im ersten Quadranten, was auf eine gute Querkraftübertragung und Bettung schließen lässt, auf der anderen Seite befinden sich auch Messungen im dritten Quadranten, was auf eine vergleichsweise gute Querkraftübertragung und weiche Unterlage hindeutet. Durch die Überlagerung der beiden Bereiche kann darauf geschlossen werden, dass sich die Querkraftübertragung über den gesamten Streckenabschnitt hinweg in einem guten Bereich befindet. Bei der Plattenbettung wird davon ausgegangen, dass sie sich im Grenzzustand befindet.

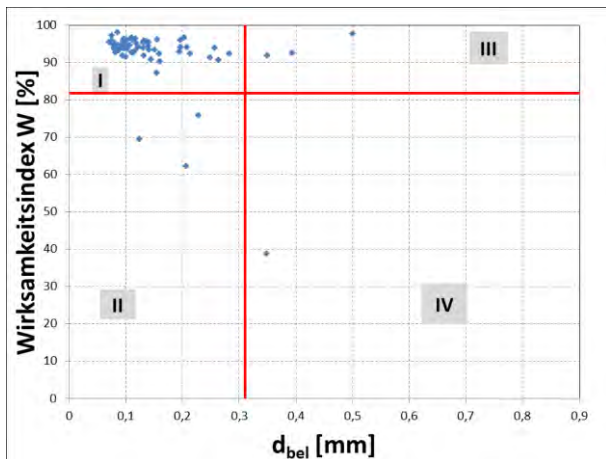


Abbildung 98: Gegenüberstellung  $d_{bel}$  und Wirkungsindex  $W$  auf der VS 2

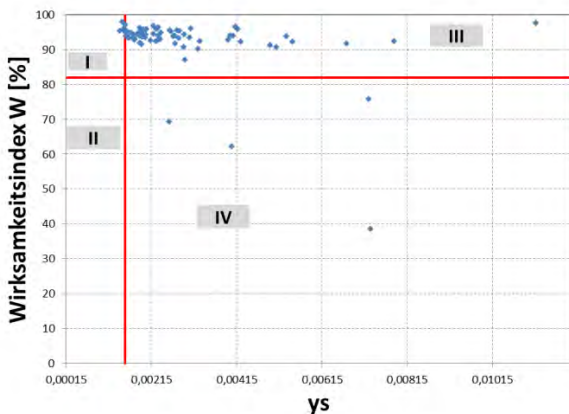


Abbildung 99: Gegenüberstellung Ordinatenabschnitt  $y_s$  und Wirkungsindex  $W$  auf der VS 2

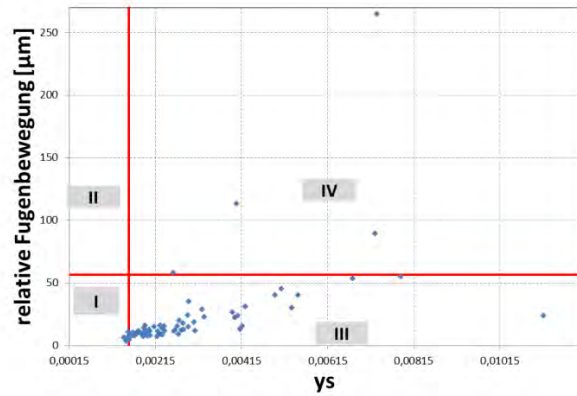


Abbildung 100: Gegenüberstellung Ordinatenabschnitt  $y_s$  und relative Fugenbewegung  $f$  auf der VS 2

Bei Inaugenscheinnahme der graphischen Auftragung der Messwerte über den gesamten Messabschnitt hinweg (Abbildung 101 bis Abbildung 103) ist erkennbar, dass zwischen den Abschnitten II und III für alle dargestellten Parameter tatsächlich ein Abschnittwechsel vorliegen kann. Hingegen sind für den anderen Abschnittwechsel zunächst keine eindeutigen Aussagen möglich.

Die Messwerte in Abbildung 101 zeigen auch hier, dass innerhalb einer Messunterbrechung (hier Abschnitt II) mindestens eine Abschnittsgrenze auftreten könnte. Auch hier schließen alle anderen angewandten Messverfahren (ZEB, Georadar und visuelle Zustandsaufnahme) die Existenz einer Abschnittsgrenze aus. Die Verwendung des FWD für eine kontinuierliche Messung über die gesamte Versuchsstrecke könnte auch hier für eine umfassende Betrachtung notwendig sein. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens ließ sich dies aber nicht realisieren.

Die statistische Auswertung der aufgenommenen Daten der Messung mit dem Falling Weight Deflectometer ist in Tabelle 32 bis Tabelle 35 dargestellt. In allen drei Mittelwertvergleichen wird die Grenze zwischen den homogenen Abschnitten I und II bestätigt, wobei Abschnitt I die geringeren Schäden hinsichtlich der Tragfähigkeit besitzt. Die Abschnitte II und III hingegen werden ebenso eindeutig als zusammengehörig detektiert, die Existenz der Grenze zwischen den homogenen Abschnitten wird also durch die Kennwerte der Tragfähigkeit widerlegt.

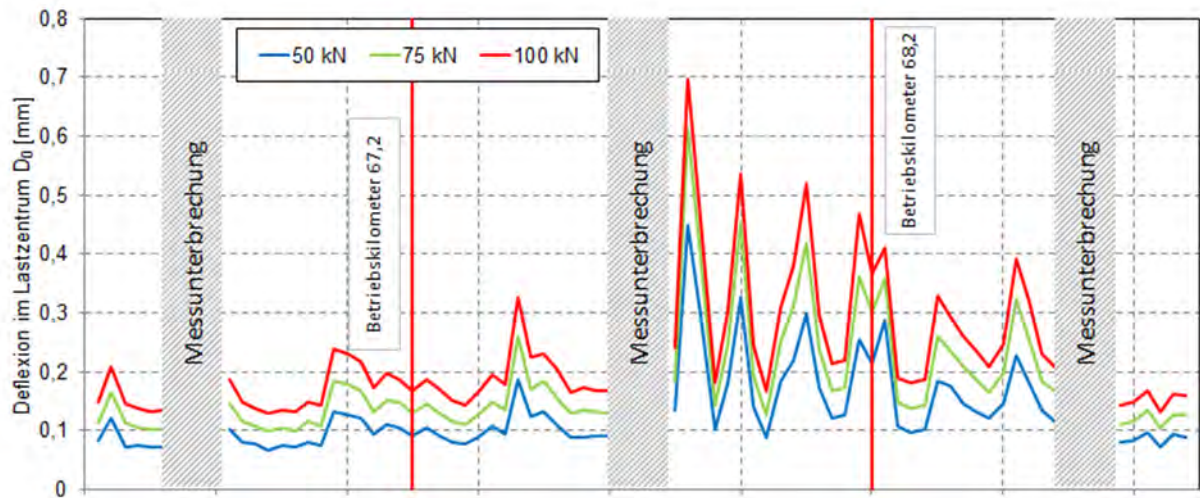


Abbildung 101: Darstellung der Verformung  $D_0$  [mm] in Plattenmitte bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 2

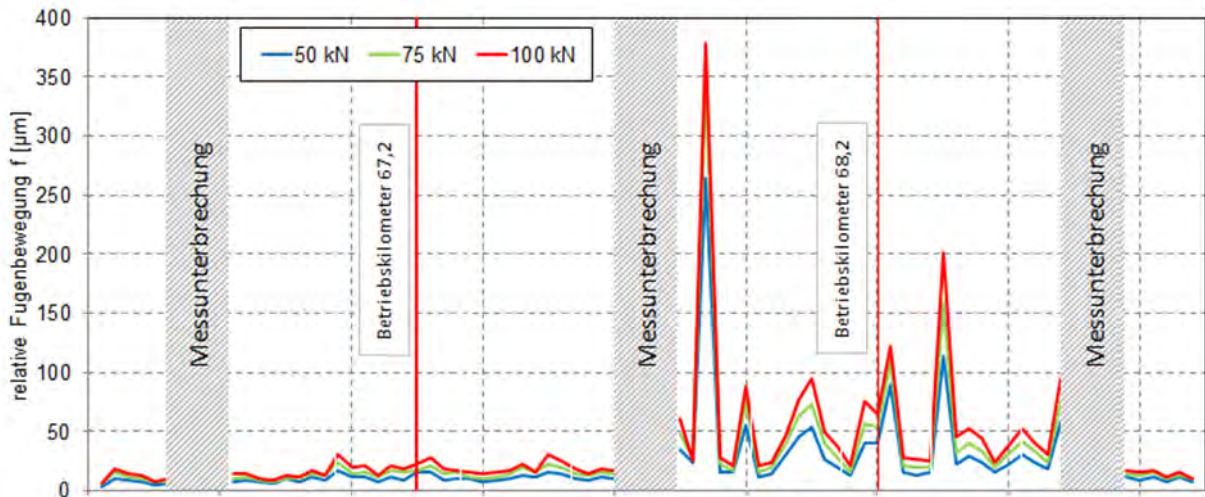


Abbildung 102: Darstellung der relativen Fugenbewegung  $f$  [ $\mu\text{m}$ ] bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 2

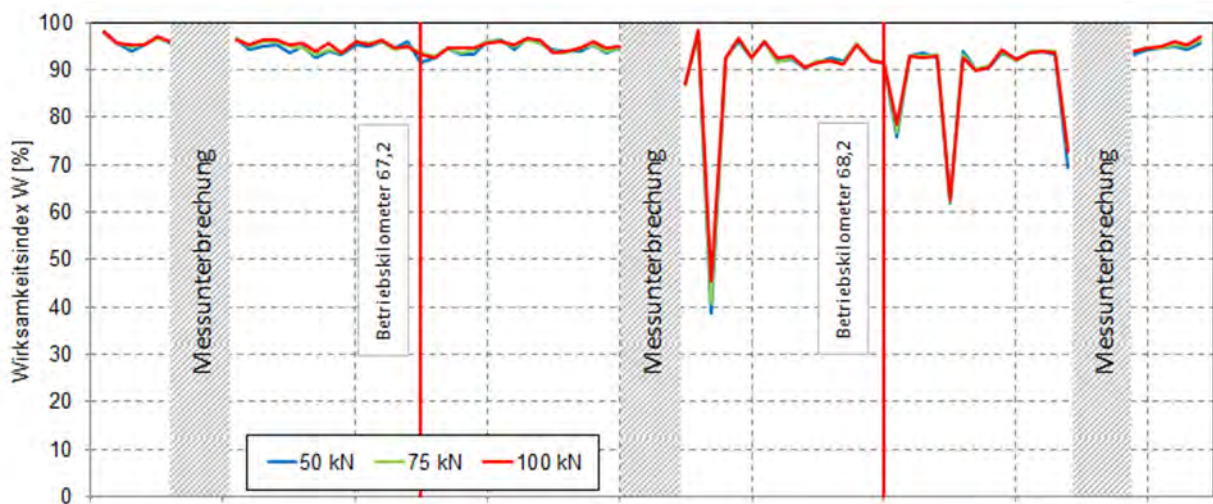


Abbildung 103: Darstellung des Wirksamkeitsindexes  $W$  [%] bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf VS 2

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Verformung <math>D_0</math></b>				
Mittelwert		0,0911	0,1572	0,1337
Varianz		0,00045	0,00784	0,00304
homo-gene Grenze?	I		ja	ja
	II			nein
Ranking		1	2	

Tabelle 32: Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die mit dem Falling Weight Deflectometer gemessenen Verformungen  $D_0$  auf der VS 2

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>relative Fugenbewegung <math>f</math></b>				
Mittelwert		9,268	28,148	27,404
Varianz		10,762	2116,829	782,458
homo-gene Grenze?	I		ja	ja
	II			nein
Ranking		1	2	

Tabelle 33: Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die berechnete relative Fugenbewegung  $f$  auf der VS 2

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Wirksamkeitsindex <math>W</math></b>				
Mittelwert		94,809	91,883	89,757
Varianz		1,848	102,551	86,356
homogene Grenze?	I		nein	ja
	II			nein
Ranking		1	2	

Tabelle 34: Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für den berechneten Wirksamkeitsindex  $W$  auf der VS 2

Parameter	Abschnitte	
Verformung $D_0$	1	2
rel. Fugenbewegung $f$	1	2
Wirksamkeitsindex $W$	1	2

Tabelle 35: Vergleich der resultierenden Abschnitte auf der VS 2

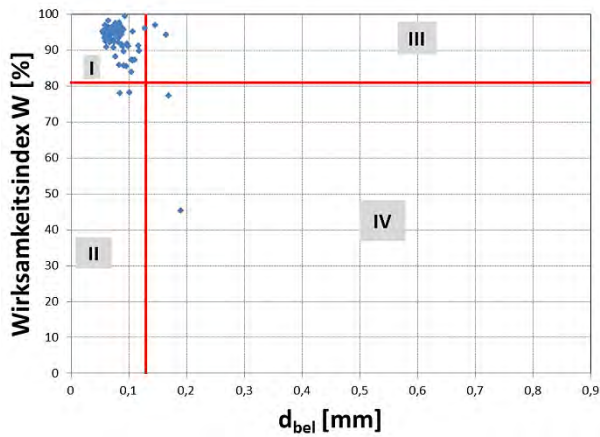
### Versuchsstrecke VS 3

Die Auswertung der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf der VS 3 ergeben, dass sich die Verkehrsbefestigungen in Betonbauweise im Bereich der Querkraftübertragung insgesamt in einem guten Zustand befinden. Dies wird bei der Betrachtung des Wirksamkeitsindex ersichtlich. Dieser weist bei einem Mittelwert von 91,9 % ein Maximum von 99,3 % und ein Minimum von 45,5% auf, wobei im Zuge dieser Werte zu erwähnen ist, dass der minimale Wirksamkeitsindex auf dem Übergang einer Asphaltbefestigung zur einer Betonbefestigung gemessen wurde und der zugrunde gelegte Berechnungsansatz nicht konkret dafür ausgelegt ist.

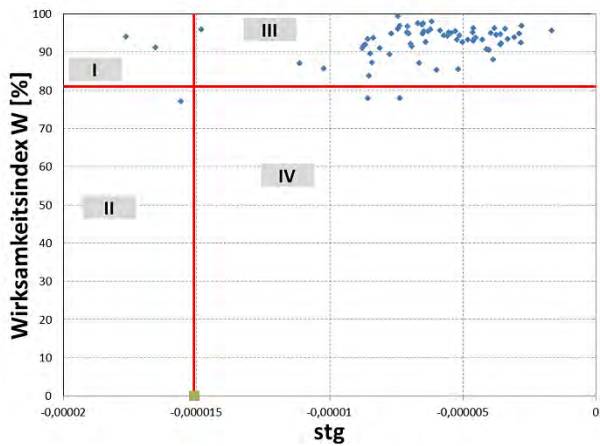
In Abbildung 104 wird der Wirksamkeitsindex in Abhängigkeit von der gemessenen Verformungen dargestellt. Auf Grundlage der in Kapitel 4.3.1.1 dargestellten Beurteilungsgrundlage mittels Quadranten ist erkennbar, dass sich der Großteil der Messwerte in Bereich I befindet. Dies lässt darauf schließen, dass die Querkraftübertragung als gut zu bezeichnen ist. Weiterhin ist bei der Auswertung der durchgeführten Messungen mittels Unterteilung der Quadranten erkennbar, dass sich die Plattenbettung in einem ausreichenden Zustand befindet.

Bei der weiteren Betrachtung der Plattenbettung über die Kenngröße der Steigung  $stg$  – in Abhängigkeit vom Wirksamkeitsindex  $W$  – kann festgestellt werden, dass die Plattenbettung in weiten Bereichen nicht optimal ist, da sich viele der Messwerte im 3. Quadranten befinden (Abbildung 105). Zusätzlich kann zur Validierung dieser Beurteilung der Plattenbettung der Ordinatenabschnitt  $y_s$  betrachtet werden. Er wird in Abbildung 106 in Abhängigkeit vom Wirksamkeitsindex  $W$  dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich – ebenso wie bei der Betrachtung der Steigung – die meisten Messwerte im dritten Quadranten befinden. Dies lässt auf keine ausreichende Plattenbettung im Querrfugenbereich schließen.

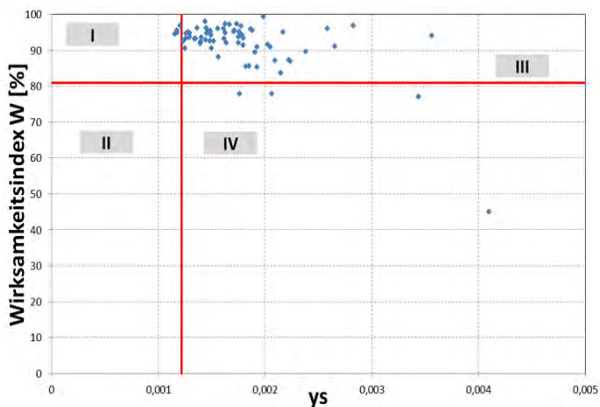
Die Auswertung der drei Diagramme lässt erkennen, dass die Querkraftübertragung in den Abschnitten der VS 3 als gut einzuschätzen ist. Die Plattenbettung kann auf Grundlage der Steigung und des Ordinaten Schnittpunktes als „weich“ bzw. teilweise geschädigt angesehen werden.



**Abbildung 104:** Gegenüberstellung  $d_{bel}$  und Wirkungsindex  $W$  auf der VS 3



**Abbildung 105:** Gegenüberstellung Steigung  $stg$  und Wirkungsindex  $W$  auf der VS 3



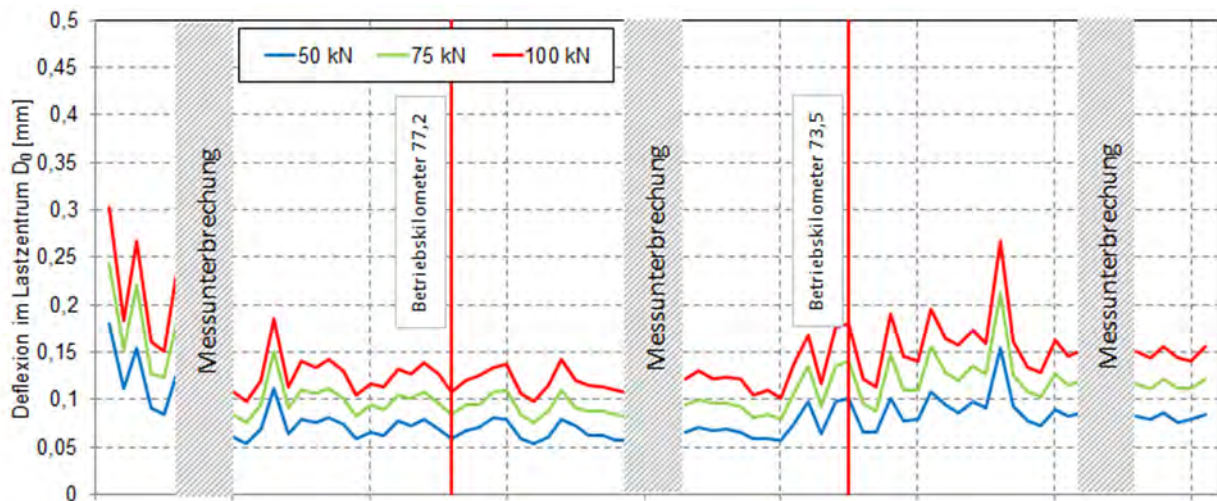
**Abbildung 106:** Gegenüberstellung Ordinatenabschnitt  $ys$  und Wirkungsindex  $W$  auf der VS 3

Bei der visuellen Begutachtung der Messwerte über den Streckenabschnitt in Abbildung 107 bis Abbildung 109 erscheinen die visuell festgelegten homogenen Abschnitte für alle drei Tragfähigkeitsgrößen zunächst nicht unbedingt widersprüchlich. Unter Umständen könnte auf Grundlage der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer eine geringfügig abweichende Unterteilung der Abschnitte vorgenommen werden. Dabei sei aber darauf hingewiesen, dass hier wie bei allen anderen Strecken die aufgetragenen Messpunkte nicht in konstanten Abständen aufgenommen wurden, sondern jeweils im Bereich der vermuteten Grenzen der homogenen Abschnitte verdichtet wurden. Die Diagramme ignorieren diesen Sachverhalt vereinfachend.

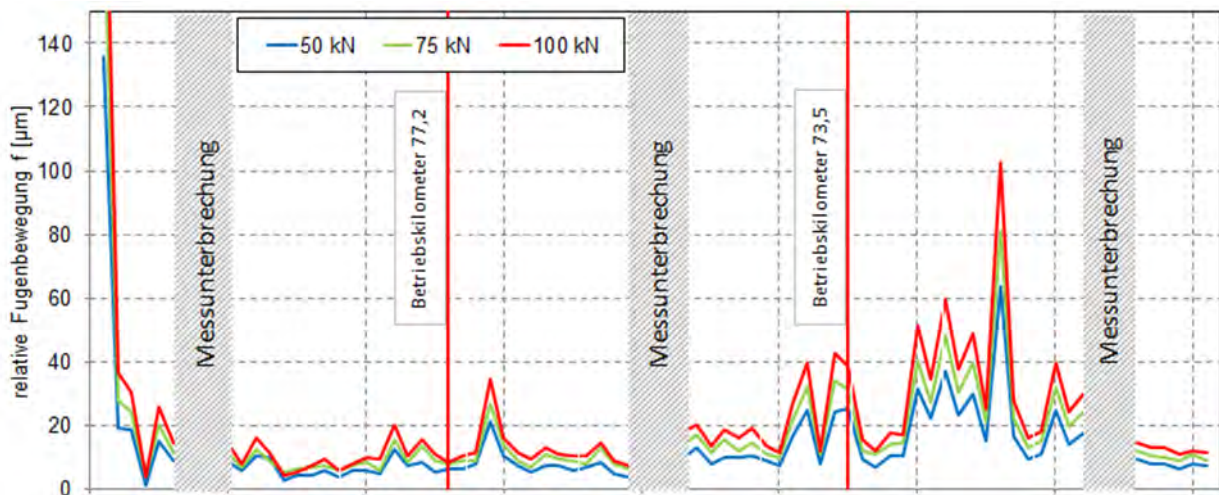
Für die statistische Untersuchung dieser Grenzen werden – wie eingangs dieses Abschnitts beschrieben – abschnittsweise Mittelwerte für alle Messergebnisse bestimmt und einander gegenüber gestellt. Auf diese Weise wird untersucht, ob die im Vorfeld definierten homogenen Abschnitte anhand der Messwerte des Falling Weight Deflectometers bestätigt werden können.

Die Ergebnisse des Mittelwertvergleichs werden in Tabelle 36 bis Tabelle 39 wiedergegeben. Daraus ist ersichtlich, dass die Existenz der homogenen Grenzen grundsätzlich statistisch nachgewiesen werden können. Das in Tabelle 39 zusammengestellte Ranking aller ermittelter Tragfähigkeitskenngrößen zeigt aber auch, dass sich die Grenzen teilweise aufgrund unterschiedlicher Kennwerte ergeben. Lediglich die Verformungen im Lastzentrum weisen alle vorgegebenen homogenen Bereiche aus. Dabei werden die Abschnitte I und III wiederum als zusammengehörig ermittelt.

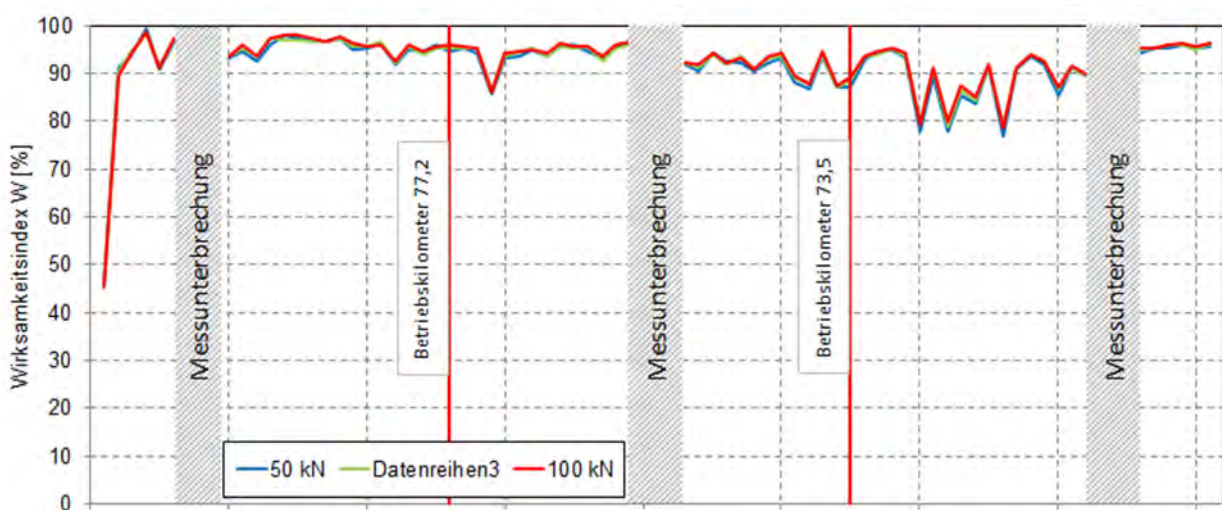
Bestätigt wird durch die Statistik auch der bereits visuell erkennbare Eindruck, dass Abschnitt III in allen Kennwerten die schlechtesten Daten aufweist und damit jeweils signifikant größere Schädigungen aufweist als die übrigen Abschnitte. Demgegenüber fällt Abschnitt I lediglich durch erhöhte Verformungen im Lastzentrum und Abschnitt II durch einen geringeren Wirkungsindex auf, ohne dass damit größere Schäden verbunden wären.



**Abbildung 107:** Darstellung der Verformung  $D_0$  [mm] in Plattenmitte bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 3



**Abbildung 108:** Darstellung der relativen Fugenbewegung  $f$  [µm] bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 3



**Abbildung 109:** Darstellung des Wirksamkeitsindexes  $W$  [%] bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 3

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Verformung <math>D_0</math></b>				
Mittelwert		0,081	0,069	0,087
Varianz		0,000638	0,000173	0,000315
homo-gene Grenze?	I		nein	nein
	II			ja
Ranking		2	1	2

**Tabelle 36:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die mit dem Falling Weight Deflectometer gemessenen Verformungen  $D_0$  auf der VS 3

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>relative Fugenbewegung <math>f</math></b>				
Mittelwert		7,971	10,786	17,421
Varianz		22,903	40,204	179,362
homo-gene Grenze?	I		nein	ja
	II			ja
Ranking		1		2

**Tabelle 37:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die berechnete relative Fugenbewegung  $f$  auf der VS 3

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Wirksamkeitsindex <math>W</math></b>				
Mittelwert		95,20	92,44	90,17
Varianz		4,948	9,738	36,622
homogene Grenze?	I		ja	ja
	II			nein
Ranking		1	2	

**Tabelle 38:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für den berechneten Wirksamkeitsindex  $W$  auf der VS 3

Parameter	Abschnitte		
Verformung $D_0$	2	1	2
rel. Fugenbewegung $f$	1		2
Wirksamkeitsindex $W$	1	2	

**Tabelle 39:** Vergleich der resultierenden Abschnitte auf der VS 3

#### Versuchsstrecke VS 4

Wie bei den bereits beschriebenen Auswertungen erfolgt auch diese Auswertung auf der Grundlage des in Kapitel 4.3.1.1 beschriebenen Verfahrens. Dabei wird nachfolgend im ersten Schritt die Plattenbettung und im zweiten Schritt die Querkraftübertragung dargestellt.

In Abbildung 112 und Abbildung 113 sind die für die Plattenbettung maßgeblichen Kenngrößen in Abhängigkeit des Wirksamkeitsindex  $W$  und der relativen Fugenbewegung  $f$  dargestellt. Bei der visuellen Begutachtung der beiden Abbildungen ist sofort ersichtlich, dass im dritten Quadranten eine Vielzahl der Messungen inhärent ist. Weiterhin ist erkennbar, dass sich eine geringe Anzahl an Messungen in den übrigen Bereichen befindet.

Aus der Systematik der Quadranteneinteilung unter Verwendung des 5 %-Quantils (Tabelle 27) und der grafischen Darstellung in diesem Kapitel ist es möglich, die Plattenbettung der Messstrecke auf der VS 4 mit dem Ergebnis zu beurteilen, dass diese erheblich Defizite aufweist.

Für die Auswertung der Querkraftübertragung werden die Parameter der relativen Fugenbewegung und des Wirksamkeitsindex  $W$  in Abhängigkeit von den Verformungen am belasteten Plattenrand als Grundlage gewählt. Abbildung 110 und Abbildung 111 stellen diesen Zusammenhang zur Beurteilung der Querkraftübertragung grafisch dar. Bei der Betrachtung dieser Abbildungen ist ersichtlich, dass sich die meisten Messpunkte innerhalb des ersten Quadranten bewegen, stellenweise weisen sie eine Tendenz in Richtung des dritten Quadranten auf. Lediglich 4 der 71 Messungen (ca. 6%) befinden sich im vierten Quadranten. Durch die Unterteilung der einzelnen Quadranten unter Verwendung des 5 %- bzw. 95 %-Quantils kann mit Hilfe der grafischen Darstellung eine Beurteilung der Querkraftübertragung vorgenommen werden. Bei einer Einordnung der Messpunkte in den ersten Quadranten wird davon ausgegangen, dass sich die Querkraftübertragung in einwandfreier Funktion befindet. Da sich die meisten Punkte auf dieser Messstrecke im ersten Quadranten bewegen, können keine größeren Schäden detektiert werden. Lediglich bei den vier Messungen des vierten Quadranten ist festzustellen, dass an diesen Messstellen eine Schädigung sowohl der Querkraftübertragung als auch der Plattenbettung vorliegt.

Durch die Überlagerung der beiden Auswertungen (Plattenbettung und Querkraftübertragung) ist weiterhin ableitbar, dass sich die Messpunkte bei der Auswertung der Plattenbettung hauptsächlich in Bereich drei befinden, was auf eine Schädigung der Plattenbettung und eine intakte Querkraftübertragung hindeutet. Die Auswertung der Querkraftübertragung lässt darauf schließen, dass diese als intakt bezeichnet werden kann. Dabei ist jedoch auffällig, dass der Bereich eins der Auswertung der Kenngrößen  $W$  und  $f$  auf eine intakte Plattenbettung hindeutet, was durch die Auswertung der Kenngrößen  $stg$  und  $y_s$  relativiert wird. Da die Messpunkte des ersten Quadranten ( $W$  und  $f$ ) jedoch eine Tendenz in Richtung des dritten Bereichs besitzen, was diese Aussage untermauern würde, kann zusammenfassend gesagt werden, dass die Querkraftübertragung intakt ist, die Plattenbettung in einzelnen Bereichen schon eine beginnende Schädigung erfahren hat.

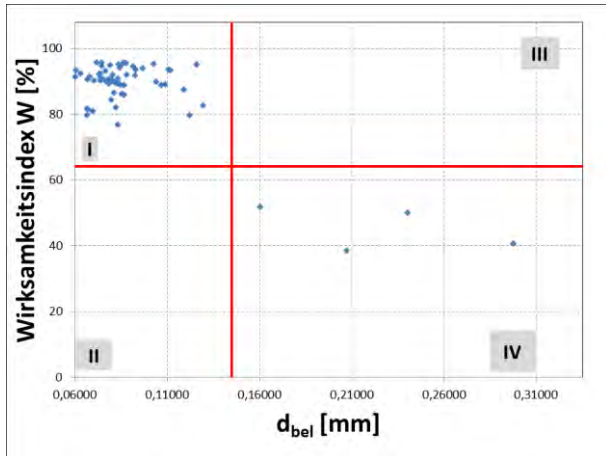


Abbildung 110: Gegenüberstellung  $d_{bei}$  und Wirksamkeitsindex  $W$  auf der VS 4

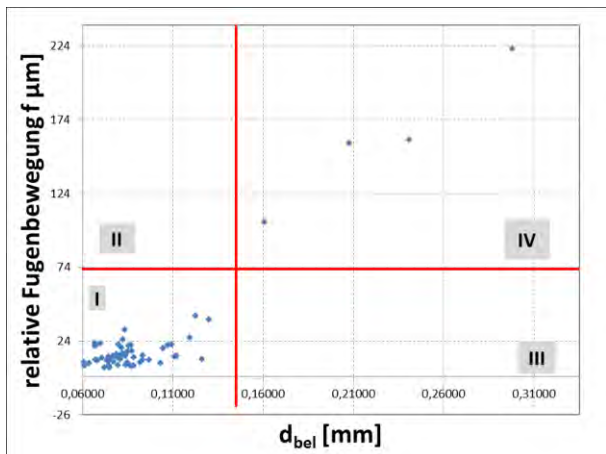


Abbildung 111: Gegenüberstellung  $d_{bei}$  und der relativen Fugenbewegung  $f$  auf der VS 4

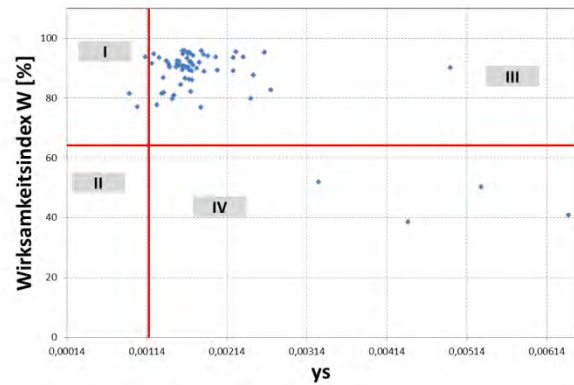


Abbildung 112: Gegenüberstellung des Ordinatenabschnitts  $y_s$  und des Wirksamkeitsindex  $W$  auf der VS 4

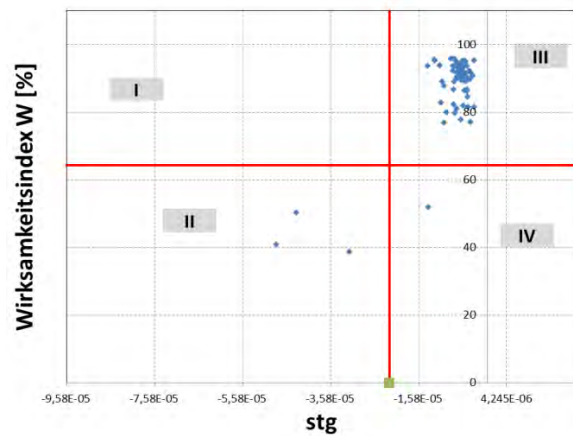
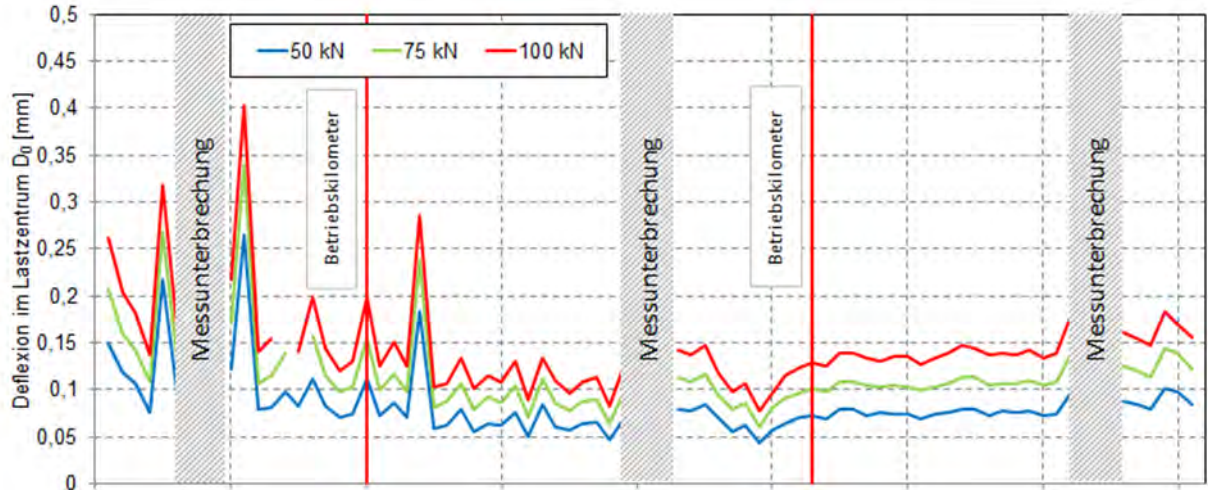
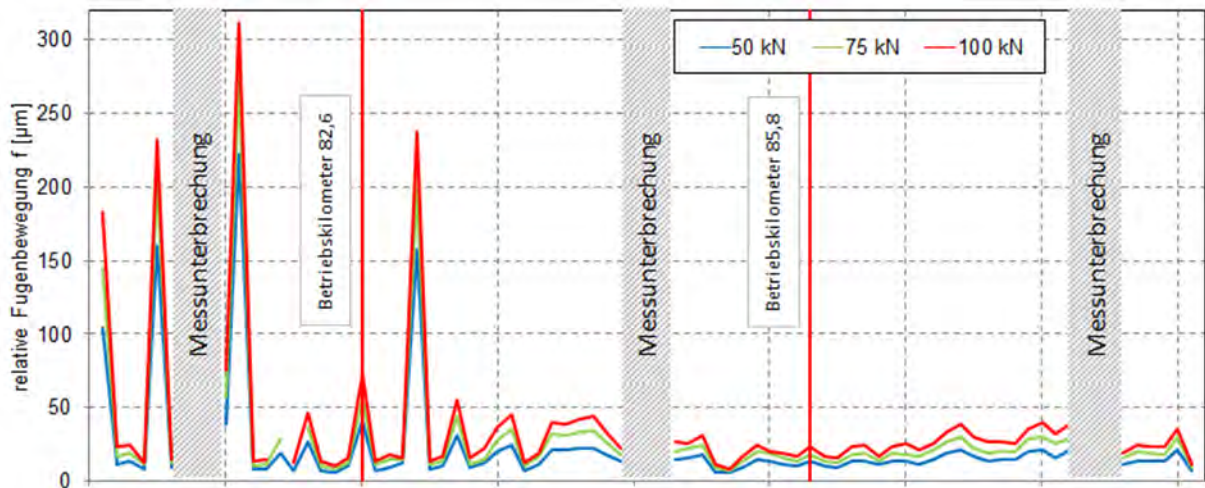


Abbildung 113: Gegenüberstellung der Steigung  $stg$  und der relativen Fugenbewegung  $f$  auf der VS 4

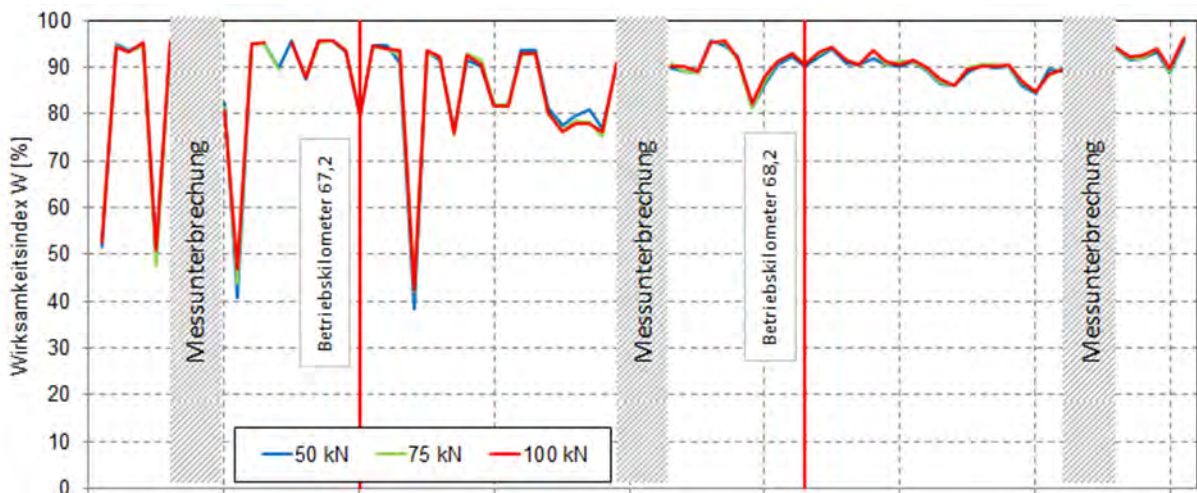
Für die visuelle Auswertung werden die gewonnenen Daten in Abbildung 114 bis Abbildung 116 grafisch dargestellt. Aufgrund der anfänglich großen Streuungen aller Tragfähigkeitswerte und ihr allmähliches Abklingen ist es vergleichsweise schwierig, eine Grenze eines homogenen Abschnitts auszumachen. Nach dem visuellen Eindruck könnten durchaus drei homogene Abschnitte existieren, deren Grenzen lägen jedoch bei alleiniger Betrachtung der Tragfähigkeitskennwerte voraussichtlich an anderen Stellen als denen, die vorab aufgrund der Streckenbegehung und der Materialfestigkeiten festgelegten Abschnitte.



**Abbildung 114:** Darstellung der Verformung  $D_0$  [mm] in Plattenmitte bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 4



**Abbildung 115:** Darstellung der relativen Fugenbewegung  $f$  [ $\mu\text{m}$ ] bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 4



**Abbildung 116:** Darstellung des Wirksamkeitsindex  $W$  [%] bei Kraftstoßgrößen von 50, 75 und 100 kN auf der VS 4

Trotz dieses Sachverhalts werden die homogenen Abschnitte selbstverständlich in ihren festgelegten Grenzen statistisch anhand von Mittelwertvergleichen untersucht. Wie die in Tabelle 40 bis Tabelle 43 dargestellten Analyseergebnisse offenbaren, werden die definierten Grenzen der homogenen Abschnitte jedoch tatsächlich in zwei von drei Fällen nicht bestätigt. Sowohl hinsichtlich der relativen Fugenbewegung als auch hinsichtlich des Wirkungsindex ist der gesamte Messbereich als durchweg gleichwertig anzusehen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Streuungen in den Abschnitten I und II so groß sind, dass sie die Detektion eines statistisch signifikanten Unterschieds untereinander und auch zum Abschnitt III praktisch verhindern. Gleichzeitig gilt für alle drei Abschnitte, dass die relative Fugenbewegung und der Wirkungsindex dafür sprechen, dass hier bereits entsprechende Schädigungen vorhanden sind.

Die Verformungen in Plattenmitte ( $D_0$ ) hingegen sind in den drei betrachteten homogenen Abschnitten statistisch besser voneinander abzugrenzen. Für alle drei vorab festgelegten Bereiche konnte ein signifikanter Unterschied des Mittelwertes detektiert werden, d.h. die Grenzen zwischen ihnen werden bestätigt. Dabei weist Abschnitt II die geringsten Verformungen und Abschnitt I die größten auf.

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Verformung <math>D_0</math></b>				
Mittelwert		0,1122	0,0700	0,0796
Varianz		0,00289	0,00058	0,00007
homogene Grenze?	I		ja	ja
	II			ja
Ranking		3	1	2

**Tabelle 40:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die mit dem Falling Weight Deflectometer gemessenen Verformungen  $D_0$  auf der VS 4

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>relative Fugenbewegung f</b>				
Mittelwert		37,297	19,222	15,063
Varianz		3858,062	728,504	15,571
homogene Grenze?	I		nein	nein
	II			nein
Ranking		1		

**Tabelle 41:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die berechnete relative Fugenbewegung f auf der VS 4

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Wirksamkeitsindex W</b>				
Mittelwert		86,224	86,356	90,337
Varianz		281,1876	116,943	7,193
homogene Grenze?	I		nein	nein
	II			nein
Ranking		1		

**Tabelle 42:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für den berechneten Wirksamkeitsindex W auf der VS 4

Parameter	Abschnitte		
Verformung $D_0$	3	1	2
rel. Fugenbewegung f	1		
Wirksamkeitsindex W	1		

**Tabelle 43:** Vergleich der resultierenden Abschnitte auf der VS 4

### 5.4.2 Zusammenfassung zur Validierung der gebildeten homogenen Abschnitte auf Betonbefestigungen

Im Anschluss an die tabellarische Auswertung der einzelnen homogenen Abschnitte auf Basis der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer und dem anschließenden Vergleich der einzelnen Abschnitte zwischen den Messwerten des Falling Weight Deflectometers und den Messwerten aus der Zustandserfassung und -bewertung werden nachfolgend die Ergebnisse der tabellarischen Auswertung der einzelnen Versuchstrecken visuell dargestellt (Abbildung 117 bis Abbildung 120).

Dabei werden als Grundeinteilung die ermittelten übergeordneten homogenen Abschnitte aus ZEB,

Georadar und visueller Zustandserfassung gewählt. Darauf aufbauend werden die – mittels t-Test – nachgewiesenen homogenen Abschnitte für die Kenngrößen Verformung  $D_0$ , relative Fugenbewegung  $f$  und Wirksamkeitsindex abgetragen und verglichen. In der letzten Zeile der grafischen Darstellungen sind die Ergebnisse der jeweiligen Kenngrößen zusammenfassend dargestellt. In dieser Zeile kann nachvollzogen werden, welche Abschnitte der Zustandserfassung und -bewertung auch mit dem Falling Weight Deflectometer ebenfalls detektiert werden könnten. Wie sich zeigt, finden sich auf allen vier untersuchten Strecken weitgehende Übereinstimmungen, wobei aber eine Auswertung aller Kennwerte aus den Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer erforderlich ist.

ZEB, Georadar, visuell			
Verformung $D_0$			
rel. Fugenbewegung $f$			
Wirksamkeitsindex $W$			
FWD gesamt			

**Abbildung 117:** Vergleichende Darstellung der homogenen Abschnitte (aus ZEB, Georadar und visueller Zustandserfassung) und Falling Weight Deflectometer auf der VS 1

ZEB, Georadar, visuell			
Verformung $D_0$			
rel. Fugenbewegung $f$			
Wirksamkeitsindex $W$			
FWD gesamt			

**Abbildung 118:** Vergleichende Darstellung der homogenen Abschnitte (aus ZEB, Georadar und visueller Zustandserfassung) und Falling Weight Deflectometer auf der VS 2

ZEB, Georadar, visuell			
Verformung $D_0$			
rel. Fugenbewegung $f$			
Wirksamkeitsindex $W$			
FWD gesamt			

**Abbildung 119:** Vergleichende Darstellung der homogenen Abschnitte (aus ZEB, Georadar und visueller Zustandserfassung) und Falling Weight Deflectometer auf der VS 3

ZEB, Georadar, visuell			
Verformung $D_0$			
rel. Fugenbewegung $f$			
Wirksamkeitsindex $W$			
FWD gesamt			

**Abbildung 120:** Vergleichende Darstellung der homogenen Abschnitte Abschnitte (aus ZEB, Georadar und visueller Zustandserfassung) und Falling Weight Deflectometer auf der VS 4

### 5.4.3 Strecken in Asphaltbauweise

Die Auswertung der gewonnenen Daten auf Asphaltbefestigungen erfolgt zunächst nach dem in Kapitel 4.3.1.2 vorgestellten Verfahren. Dabei werden

als auszuwertende Kenngrößen die Verformung im Lastzentrum  $D_0$ , der Schichtmodul  $M_0$  und die elastische Länge  $l$  gewählt.

In einem weiteren Schritt erfolgt die Auswertung der gewonnenen Messergebnisse hinsichtlich der

sich ergebenen homogenen Abschnitte. Die Auswertung basiert auf dem Arbeitspapier „Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen“ [FGSV 431] und auf der Bildung von kumulativen Summen. Im Rahmen der grafischen Auswertung wurden die gewonnenen Daten  $D_0$  als kumulative Summe aufgetragen und nach Augenschein unterteilt [FGSV 431]. Bei der weiteren visuellen Auswertung wurden die bereits unterteilten homogenen Abschnitte durch das Abtragen der kumulativen Summe  $D_0$ ,  $M_0$  und  $I$  validiert. Bei der grafischen Auswertung ist erkennbar, dass sich die bereits für  $D_0$  gewählten homogenen Abschnitte mit den homogenen Abschnitten von  $M_0$  und  $I$  oftmals überlagern.

Die Auswertung gemäß dem Arbeitspapier erfolgt ebenfalls über die kumulative Summe, beruht aber auf einem mathematischen Ansatz. Bei diesem Ansatz wird sich auf den Mittelwert des Gesamtabschnitts gestützt und untersucht, ob eine Abweichung von mehr als 10% vorliegt. Sollte sich die relative Spanne innerhalb dieser 10% bewegen kann dieser Abschnitt formal als ein homogener Abschnitt angenommen werden. Wird diese Grenze überschritten kann das Vorliegen von weiteren homogenen Abschnitten nicht ausgeschlossen werden. Die relative Spanne berechnet sich wie folgt:

$$x = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_m} \cdot 100\% \quad \text{Gl. 14}$$

mit

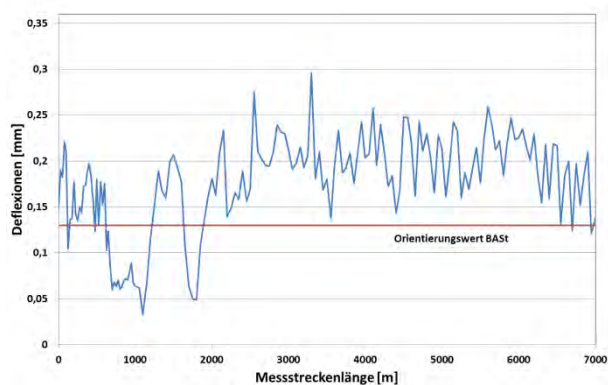
$x$	relative Spanne der Messwerte über den Gesamtabschnitt
$d_{\max}$	maximaler Messwert im Gesamtabschnitt
$d_{\min}$	minimaler Messwert im Gesamtabschnitt
$d_m$	Mittelwert der Messwerte über den Gesamtabschnitt

Nach [FGSV 431] sind die so ermittelten homogenen Abschnitte nochmals anhand der Ausgangsdaten auf Plausibilität zu prüfen, da das Arbeitspapier lediglich als Hilfsmittel dient. Bei der Plausibilitätsprüfung und der genauen Betrachtung der Messergebnisse ist festzustellen, dass die Einteilung nach [FGSV 431] nicht sinnvoll erscheint, da das FWD großen Schwankungen unterliegt und die Messpunkte untereinander einen großen Abstand aufweisen. Auf diesen Grundlagen wurde bei der Ermittlung der homogenen Abschnitte vom Arbeitspapier abgewichen und die homogenen Abschnitte wurden nach logischer Auswertung in drei homogene Abschnitte unterteilt. Die Grundlage für diese Unterteilung war die übergeordnete Steigungsänderung [FGSV 431].

### Versuchsstrecke VS 5

Bei dieser Auswertung wird mit der grafischen Bewertung der Kennwerte  $D_0$ ,  $M_0$  und  $I$  begonnen. Nach der grafischen Auswertung erfolgt die Einteilung der Strecke in verschiedene homogene Abschnitte für jeden Kennwert.

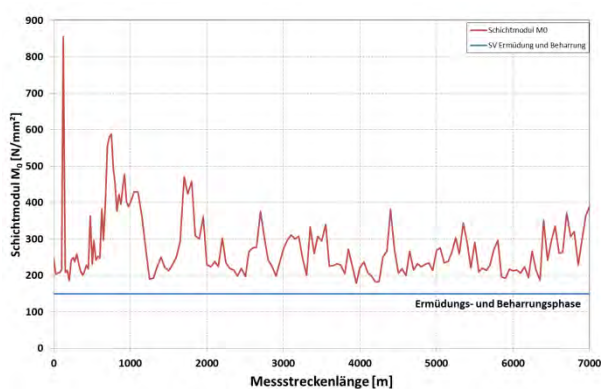
Die erste Betrachtung der Messwerte für die Verformungen  $D_0$  zeigt, dass sich lediglich 15 % (24 Messungen) der Messwerte unterhalb des auf der Modellstraße der Bundesanstalt für Straßenwesen unter Laborbedingungen ermittelten Orientierungswerts [JU/WO 2005] befinden. Bei der weiteren Auswertung kann festgestellt werden, dass sich ein Mittelwert von 172  $\mu\text{m}$  bei einem Maximum von 296  $\mu\text{m}$  und einem Minimum von 30  $\mu\text{m}$  einstellt. Somit liegen die Messungen im Mittel ca. 60  $\mu\text{m}$  oberhalb des Orientierungswerts. Die Verformungen im Lastzentrum stellen ein Maß zur Beurteilung der Gesamttragfähigkeit der Straßenbefestigung in Asphaltbauweise dar. Somit kann an dieser Stelle festgestellt werden, dass die VS 5 in dem Untersuchungsabschnitt deutliche Schädigungen ausweist. Stellenweise ist – basierend auf Abbildung 121 – jedoch erkennbar, dass sich die Messwerte unterhalb des Orientierungswerts befinden (Station 0+675 – 1+150). Diese Unterschreitung lässt auf eine gute Gesamttragfähigkeit innerhalb der Straßenbefestigung schließen. Insgesamt überwiegt aber die Schädigung der Straßenbefestigung in Asphaltbauweise ab Station 2+000 (Abbildung 121).



**Abbildung 121:** Darstellung der Verformungen [mm] auf der VS 5

Zusätzlich zu der Bewertung der Gesamttragfähigkeit des Straßenaufbaus wird das Schichtmodul  $M_0$  beurteilt. Dieser Kennwert steht für die Tragfähigkeit aller ungebundenen Schichten unterhalb des gebundenen Aufbaus. Das Schichtmodul  $M_0$  ist in Abbildung 122 dargestellt. Ebenfalls ist in der Abbildung der Orientierungswert für die Ermüdungs- und Beharrungsphase für Asphaltbefestigungen der Bauklasse SV dargestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass der Wert für die Ermüdungs- und Beharrungsphase für die Betrachtung des Schichtmoduls  $M_0$  bei allen Bauklassen zusammenfällt (Abbildung 46) und eine Beurteilung über die Differenzierung der Grenzwerte nur bedingt möglich ist.

Grundsätzlich ist bei der visuellen Betrachtung der Messwerte in Abbildung 122 ersichtlich, dass sich alle Messwerte oberhalb der Ermüdungs- und Beharrungsphase befinden. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass ein hohes Schichtmodul  $M_0$  für gute mechanische Eigenschaften der ungebundenen Schichten steht und somit eine hohe Tragfähigkeit gegeben ist. Bei der Messung auf der VS 5 schwanken die Messwerte zwischen einem Maximum von 855 MPa und einem Minimum von 179 MPa und weisen dabei einen Mittelwert von 279 MPa auf. Bei der Unterteilung durch die Ermüdungs- und Beharrungsphase ist festzuhalten, dass Teilstrecken, die ein geringeres Schichtmodul  $M_0$  als 150 MPa aufweisen, als im Untergrund / Unterbau geschädigt angesehen werden können. Auf der gemessenen VS 5 sind keine Messwerte mit einem geringeren Schichtmodul als 150 MPa vorhanden.



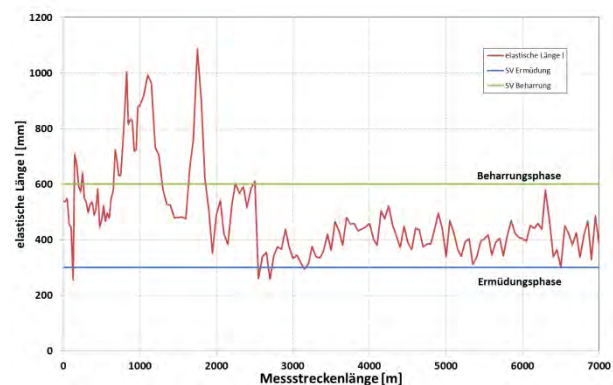
**Abbildung 122:** Darstellung des Schichtmoduls  $M_0$  [N/mm<sup>2</sup>] auf der VS 5

Weiterhin wird bei der Beurteilung der Straßenbefestigung der VS 5 die elastische Länge  $l$  bewertet. Der Kennwert der elastischen Länge  $l$  steht für die Gesamttragfähigkeit der Straßenbefestigung in Asphaltbauweise. Generell ist festzuhalten, dass ein hoher Wert der elastische Länge  $l$  für eine hohe Tragfähigkeit der Straßenbefestigung steht. Ähnlich wie beim Kennwert  $M_0$  existieren auch für die elastische Länge  $l$  Orientierungswerte nach Bald & Grätz (Abbildung 46). Bald & Grätz geben einen Wert von 600 mm für die Beharrungs- und 300 mm für die Ermüdungsphase an.

Diese Orientierungswerte sind zusammen mit den Messwerten für die elastische Länge  $l$  der VS 5 in Abbildung 123 dargestellt. Bei der ersten visuellen Betrachtung der Mess- und Orientierungswerte ist erkennbar, dass sich der Großteil der Messung (97,5 %) oberhalb der Ermüdungsphase befindet. Weiterhin ist ersichtlich, dass 18 % der Messwerte oberhalb von 600 mm (Beharrungsphase) liegen.

Somit kann festgestellt werden, dass sich 18 % der Messstrecke in einem Beharrungszustand und ca. 80 % der Messstrecke in einem Übergangszustand zwischen Beharrungs- und Ermüdungsphase be-

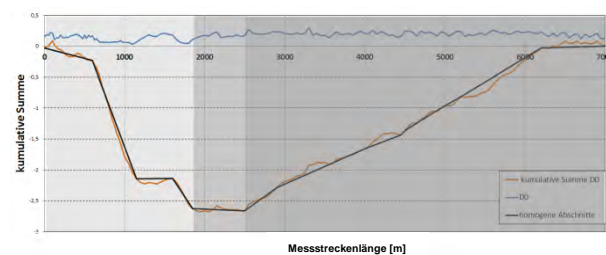
finden. Eine Schädigung der Straßenbefestigung kann somit nicht ausgeschlossen werden.



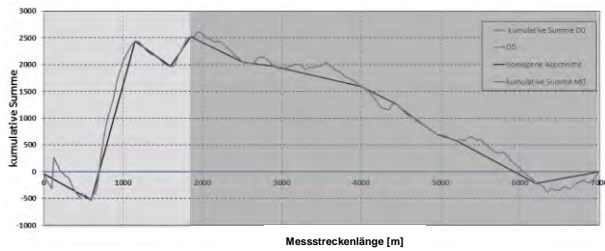
**Abbildung 123:** Darstellung der elastischen Länge  $l$  [m] auf der VS 5

Vergleichbar mit der Unterteilung der homogenen Abschnitte in Kapitel 4.3.1.2 wird auch bei dieser Strecke eine Unterteilung der Messstrecke anhand der visuellen Begutachtung der kumulativen Summe durchgeführt. Diese Unterteilung weicht von der Unterteilung gemäß AP 431 ab, da mit diesem Vorgehen 24 homogene Abschnitte mit einer durchschnittlichen Länge von 290 m entstanden wären, behält aber das Grundprinzip der Unterteilung durch Steigungsänderungen bei.

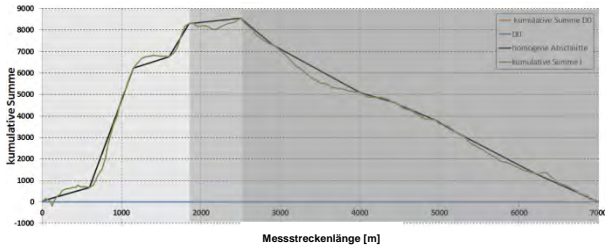
Bei der visuellen Begutachtung der kumulativen Summe werden für die Kennwerte der Gesamttragfähigkeit drei homogene Abschnitte gebildet. Die kumulativen Summen der Kennwerte  $D_0$  und  $l$  korrespondieren und bilden die gleichen homogenen Abschnitte ab (Abbildung 124 und Abbildung 126). Nur bei der Betrachtung des Schichtmoduls  $M_0$  ist anzumerken, dass diese homogenen Abschnitte nicht zu 100 % mit den homogenen Abschnitten der Kennwerte der Gesamttragfähigkeit übereinstimmen. Für den Verlauf des Schichtmoduls  $M_0$  werden nur zwei homogene Abschnitte gebildet (Abbildung 125). In den nachfolgenden Abbildungen ist jedoch auch erkennbar, dass der zweite homogene Abschnitt bei allen Kennwerten ( $D_0$ ,  $l$  und  $M_0$ ) bei der gleichen Stationierung beginnt und endet.



**Abbildung 124:** Darstellung der homogenen Abschnitte für die Verformungen im Lastzentrum  $D_0$  auf der VS 5



**Abbildung 125:** Darstellung der homogenen Abschnitte für den Schichtmodul  $M_0$  auf der VS 5

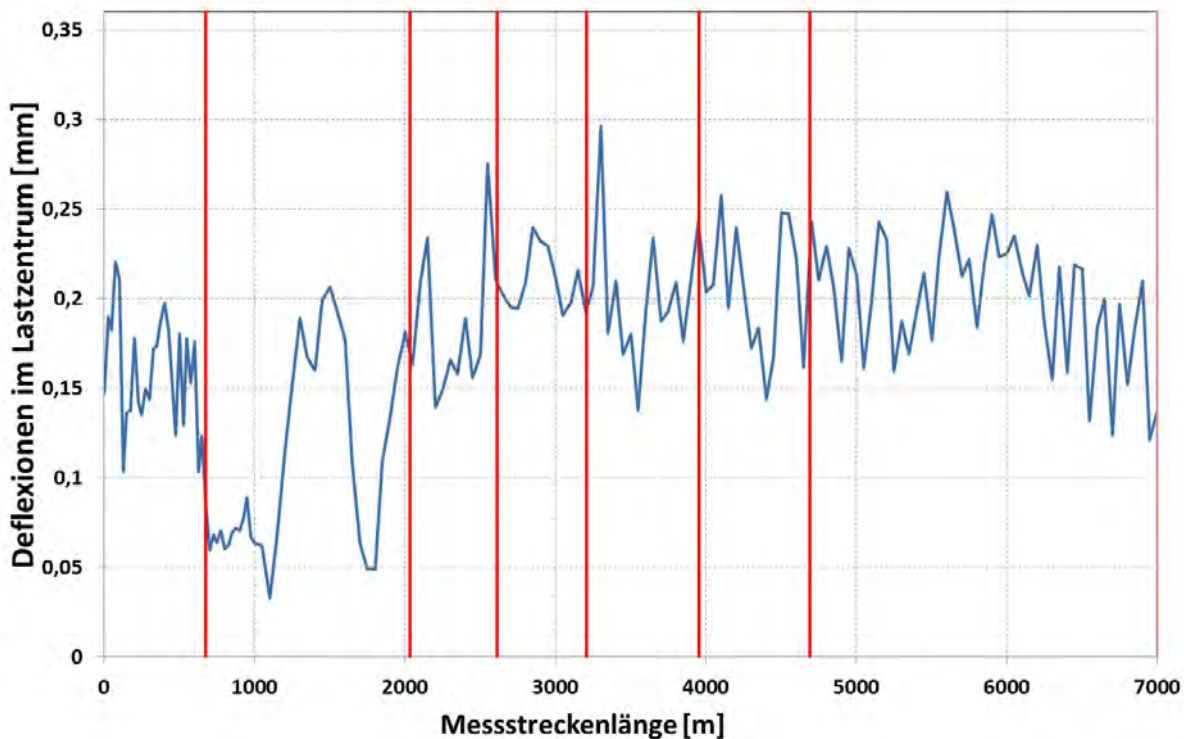


**Abbildung 126:** Darstellung der homogenen Abschnitte für die elastischen Länge I auf der VS 5

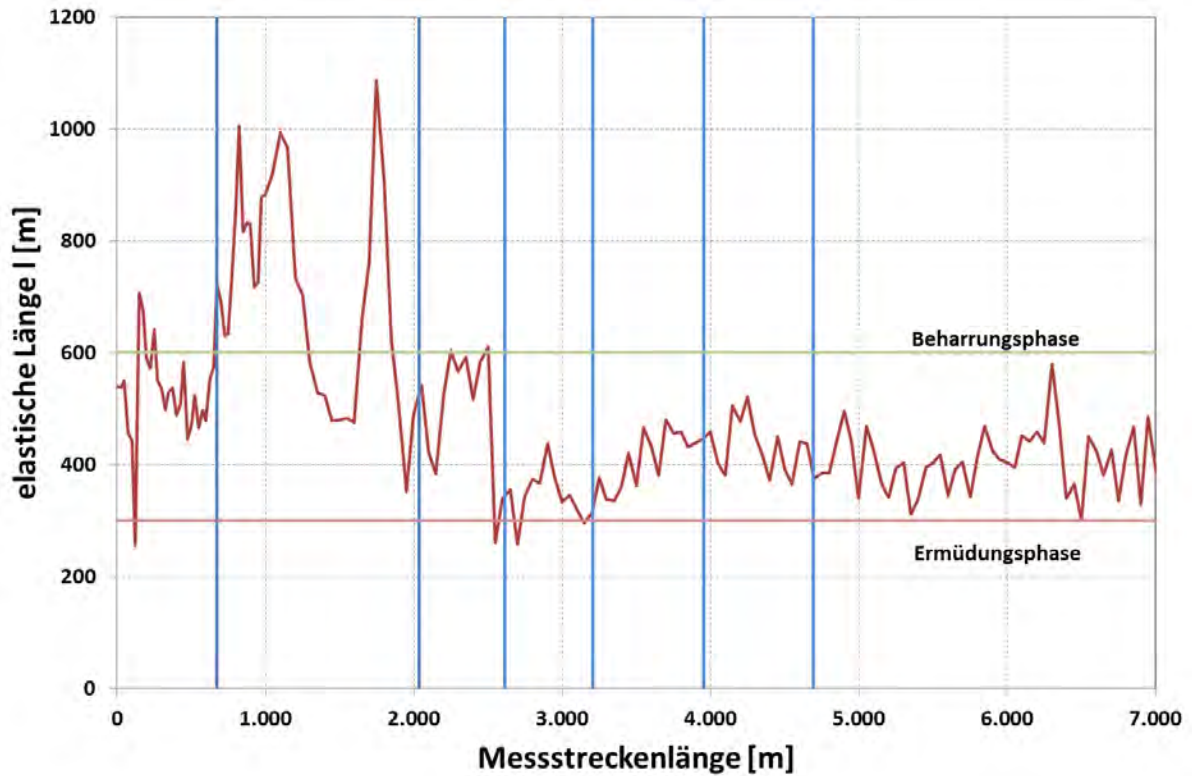
Nachfolgend werden in Abbildung 127 bis Abbildung 129 die Tragfähigkeitskenngrößen  $D_0$ , I und  $M_0$  unter Verwendung der über die Georadarmessungen festgelegten homogenen Abschnitte dargestellt. Bei der visuellen Begutachtung der Messwerte über den Streckenabschnitt erscheinen die

durch das Georadar definierten homogenen Abschnitte für alle drei Tragfähigkeitsgrößen zunächst nicht ausgeschlossen. Für die statistische Untersuchung dieser Grenzen werden wiederum abschnittsweise Mittelwerte für alle Messergebnisse bestimmt und einander gegenüber gestellt. Auf diese Weise wird untersucht, ob die im Vorfeld definierten homogenen Abschnitte auf Basis der Messungen mit dem Georadar anhand der Messwerte des Falling Weight Deflectometers bestätigt werden können.

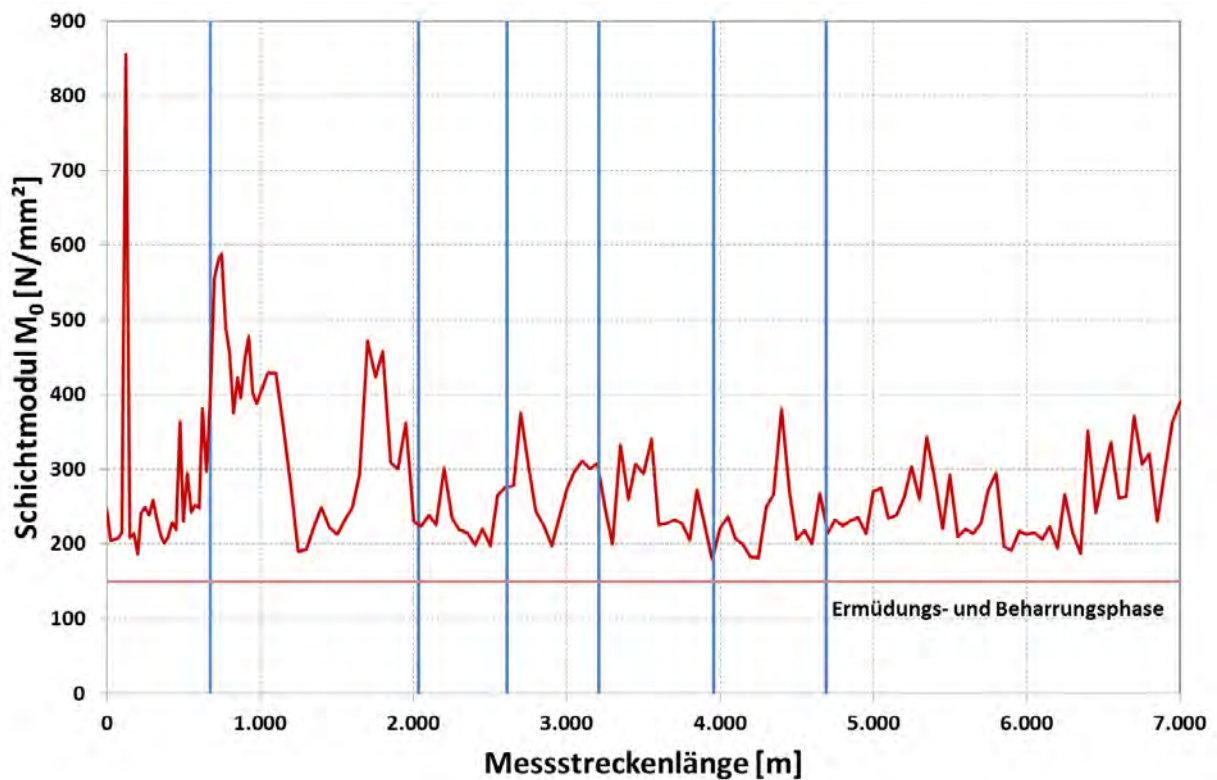
Die Ergebnisse der Mittelwertvergleiche werden in Tabelle 44 bis Tabelle 47 wiedergegeben. Daraus ist ersichtlich, dass die Existenz von zwei homogenen Grenzen auch für die Tragfähigkeitskenngrößen statistisch nachgewiesen werden kann. Demgegenüber werden jedoch die übrigen Grenzen abgelehnt. In einzelnen Fällen werden zwar zwischen Abschnitten signifikante Unterschiede bestätigt, allerdings müssen bei der Gesamtsicht über alle durchgeführten Mittelwertvergleiche die Abschnitte III bis VII für alle Tragfähigkeitskennwerte zusammengefügt werden.



**Abbildung 127:** Darstellung der Verformungen im Lastzentrum mit den homogenen Abschnitten auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 5



**Abbildung 128:** Darstellung der elastischen Länge  $l$  mit den homogenen Abschnitten auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 5



**Abbildung 129:** Darstellung des Schichtmoduls  $M_0$  mit den homogenen Abschnitten auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 5

		Abschnitt						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
<b>Verformung <math>D_0</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>								
Mittelwert		156,993	106,723	187,495	209,336	200,738	206,688	198,091
Varianz		1104,644	2902,007	1600,495	279,094	1448,454	1384,769	1153,444
homogene Grenze?	I		ja	ja	ja	ja	ja	ja
	II			ja	ja	ja	ja	ja
	III				nein	nein	nein	nein
	IV					nein	nein	nein
	V						nein	nein
	VI							nein
Ranking		2	1	3				

**Tabelle 44:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die mit dem Falling Weight Deflectometer gemessenen Verformungen  $D_0$  auf der VS 5

		Abschnitt						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
<b>elastische Länge I [m]</b>								
Mittelwert		706,85	479,497	479,497	344,676	514,957	427,380	406,185
Varianz		34778,25	14810,007	14810,007 <sub>8</sub>	2158,628	2546,488	2514,7173	3014,361
homogene Grenze?	I		ja	ja	ja	ja	ja	ja
	II			ja	ja	ja	ja	ja
	III				ja	nein	nein	nein
	IV					ja	nein	ja
	V						nein	nein
	VI							nein
Ranking		1	2	3				

**Tabelle 45:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die elastische Länge I auf der VS 5

		I	II	III	IV	V	VI	VII
<b>Schichtmodul <math>M_0</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>								
Mittelwert		269,502	362,099	238,965	276,220	251,803	234,251	250,887
Varianz		16129,5 3	13396,48	1131,044	2376,257	2543,182	2693,737	3499,668
homogene Grenze?	I		ja	ja	ja	ja	ja	ja
	II			ja	ja	ja	ja	ja
	III				ja	nein	nein	nein
	IV					nein	nein	ja
	V						nein	nein
	VI							nein
Ranking		2	1	3				

**Tabelle 46:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für d das Schichtmodul  $M_0$  auf der VS 5

Parameter	Abschnitte		
Verformung $D_0$	2	1	3
elastische Länge $l$	1	2	3
Schichtmodul $M_0$	2	1	3

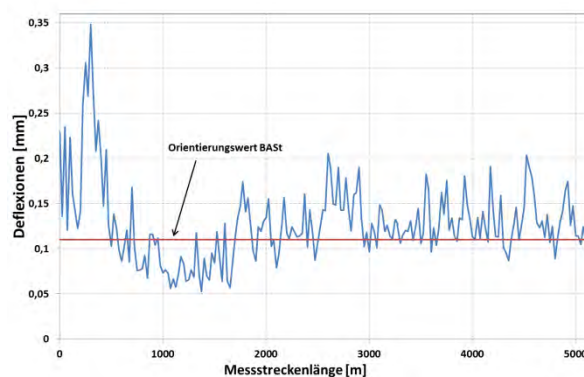
**Tabelle 47:** Vergleich der resultierenden Abschnitte auf der VS 5

### Versuchsstrecke VS 6

Der erste Schritt der Auswertung umfasst die grafische Betrachtung der im Lastzentrum gemessenen Verformungen  $D_0$ , des Schichtmoduls  $M_0$  und der elastischen Länge  $l$ .

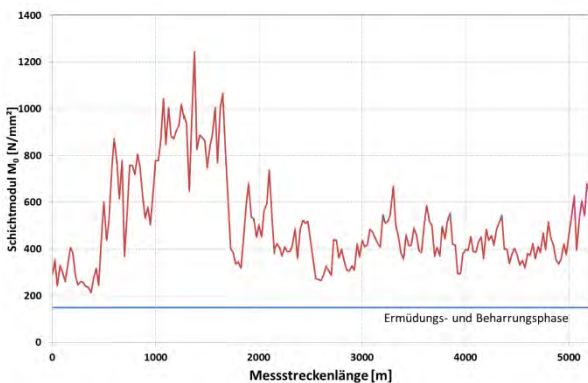
Die Verformungen im Lastzentrum auf der Versuchsstrecke VS 6 inklusive eines hier als Orientierungswert herangezogenen Mittelwerts von Verformungen, der von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) auf der Modellstraße der Bauklasse SV ermittelt worden ist, werden in Abbildung 130 gezeigt. Es ist erkennbar, dass die Verformungen in weiten Teilen oberhalb des Orientierungswerts liegen und bei einem Mittelwert von 127  $\mu\text{m}$  zwischen 50 und 350  $\mu\text{m}$  schwanken. Für die Bauklasse SV ist laut Orientierungswert der BASt ein Mittelwert von 110  $\mu\text{m}$  vorgesehen. Bei einem Vergleich der Messwerte mit diesem ist erkennbar, dass der Mittelwert der Messung im Schnitt 17  $\mu\text{m}$  über dem Orientierungswert liegt. Da die Verformungen im Lastzentrum als Indikator

für die Tragfähigkeit der gesamten Straßenbefestigung angesehen werden, kann auf dieser Strecke festgestellt werden, dass die ungebundenen und gebundenen Schichten der Straßenbefestigung zu Beginn der Messstrecke deutliche Defizite aufweisen, welche sich im weiteren Verlauf der Kilometrierung auf eine geringe Abweichung relativieren.



**Abbildung 130:** Darstellung der Verformungen [mm] auf der VS 6

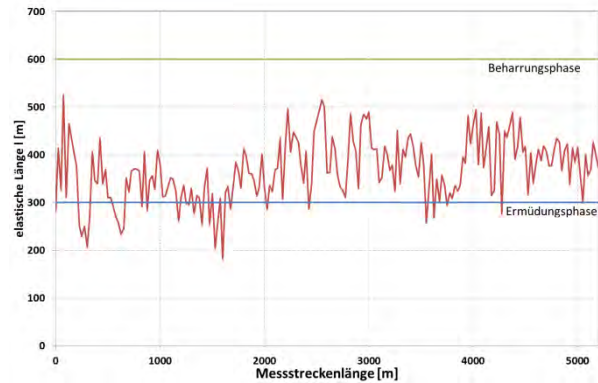
Im Rahmen der weiteren Betrachtung wird weiterhin der Schichtmodul  $M_0$  entsprechend Abschnitt 4.3.1.2 ausgewertet. Dieser steht für die Tragfähigkeit aller ungebundenen Schichten unterhalb des gebundenen Aufbaus. Das Schichtmodul  $M_0$  weist auf der vorliegenden Messstrecke bei einem Maximum von 1.242 MPa und einem Minimum von 213 MPa einen Mittelwert von 507 MPa auf. Dieser Wert liegt deutlich über den von Grätz & Bald [BALD 1999] geforderten Werten (Abbildung 131) Bereiche, die einen geringeren Schichtmodul als 150 MPa besitzen, sind tendenziell als im Untergrund/Unterbau geschädigt anzusehen. Solche Werte sind auf dieser Messstrecke nicht vorhanden.



**Abbildung 131:** Darstellung des Schichtmoduls  $M_0$  [N/mm<sup>2</sup>] und der Ermüdungs- und Beharrungsphase nach Abbildung 46 auf der VS 6

Zur Validierung der bereits gewonnenen Erkenntnisse wird zusätzlich der ebenfalls von Grätz vorgeschlagene Tragfähigkeitskennwert der elastischen Länge  $l$  ermittelt. Dieser beschreibt – ähnlich wie der Verformungswert  $D_0$  – die Gesamttragfähigkeit des Straßenaufbaus.

Die elastische Länge  $l$  weist bei einem Mittelwert von 366 mm ein Maximum von 525 mm und ein Minimum von 180 mm auf. Der Vergleich mit den von Grätz & Bald generierten Werten (Abbildung 46) für die elastische Länge  $l$  einer Straßenbefestigung in Asphaltbauweise der Bauklasse SV (600 N/mm<sup>2</sup> für die Beharrungs- bzw. 300 N/mm<sup>2</sup> für die Ermüdungsphase) zeigt, dass sich die ermittelten Werte der elastischen Länge durchweg unterhalb den von Grätz & Bald geforderten Werte für die Beharrungsphase befinden. Stellenweise liegen die Messwerte auch unterhalb der geforderten Werte für die Ermüdungsphase. Dies lässt darauf schließen, dass die Straßenbefestigung in Asphaltbauweise bereits eine Schädigung erlitten hat.

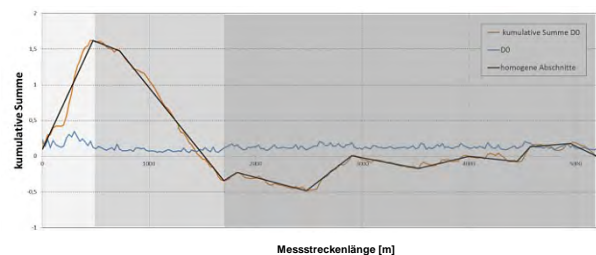


**Abbildung 132:** Darstellung der elastischen Länge  $l$  [mm] und der Ermüdungs- und Beharrungsphase nach Abbildung 46 auf der VS 6

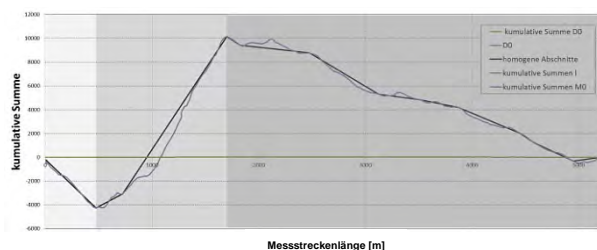
Auf Grundlage des in Abschnitt 4.3.1.2 beschriebenen Verfahrens gemäß [FGSV 431] unter Verwendung des Tragfähigkeitswertes der Verformungen im Lastzentrum, des Schichtmoduls  $M_0$  und der elastischen Länge  $l$  ergeben sich für die Messstrecke von 5.200 m auf der VS 6 insgesamt 37 homogene Abschnitte. Bei dieser Anzahl ergibt sich eine durchschnittliche Abschnittslänge von 140 m.

Da das Arbeitspapier allerdings betont, dass diese Auswertung lediglich als Arbeitshilfe und Grundlage angesehen werden soll und die Ergebnisse nach der Ermittlung grundsätzlich noch einmal auf deren Plausibilität geprüft werden sollen, wird eine gröbere Abschnittsbildung vorgenommen. Hierbei wird das grundsätzliche Vorgehen des AP [FGSV 431] mit der Bildung kumulativer Summen beibehalten, die Abschnittsbildung erfolgt aber visuell anhand der Steigungsänderung dieser Summen über den Streckenverlauf in zwei bis drei Abschnitte (Abbildung 133 bis Abbildung 135). Es sei betont, dass sich weder aus der Steigung der kumulativen Summe noch aus deren Vorzeichen eine Wertung der Tragfähigkeit schließen lässt.

In den Abbildungen ist erkennbar, dass sich die Unterteilung für alle drei ausgewerteten Tragfähigkeitsmessgrößen in gleicher Weise vollziehen lässt.

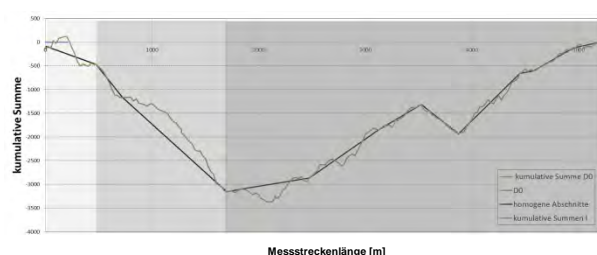


**Abbildung 133:** Darstellung der homogenen Abschnitte für die Verformungen im Lastzentrum  $D_0$  auf der VS 6



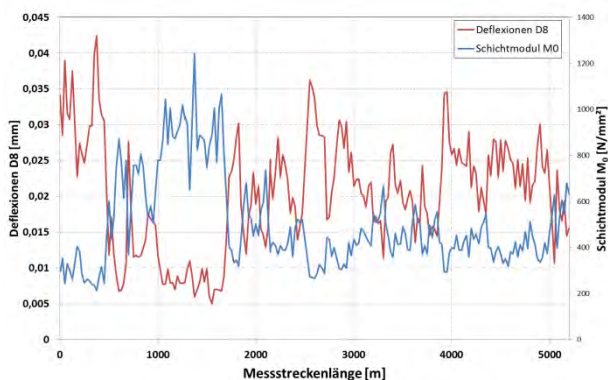
**Abbildung 134:** Darstellung der homogenen Abschnitte für den Schichtmodul  $M_0$  auf der VS 6

Zur Validierung der Aussage bezüglich des Kennwertes  $M_0$  kann das Geofon in einem Abstand von 1800 mm (Geofon 9) ebenfalls zur Beurteilung der ungebundenen Schichten genutzt werden. Die Bedeutung der einzelnen Schichten nimmt jedoch mit steigender Entfernung vom Lasteintragungspunkt ab. So ist für die Einsenkung am Lastzentrum der gesamte Straßenaufbau relevant. Diese Relevanz ändert sich jedoch mit steigender Entfernung vom Lastzentrum, so dass am Geofon 9 die Einsenkung hauptsächlich von den ungebundenen Schichten abhängt [STR/HAS/HAR 2008].



**Abbildung 135:** Darstellung der homogenen Abschnitte für die elastische Länge  $I$  auf der VS 6

Den Zusammenhang zwischen der Verformung am Geofon 9 (D8) und dem Schichtmodul  $M_0$  stellt Abbildung 136 dar. In der Abbildung ist erkennbar, dass die beiden Werte gegensätzlich verlaufen. Dies ist aber auch zu erwarten, da eine geringe Verformung am Geofon 9 ein großes Schichtmodul  $M_0$  bedingt. So kann für die Beurteilung der ungebundenen Schichten zusätzlich zum Schichtmodul  $M_0$  ebenfalls die Verformung am äußersten Geofon genutzt werden.



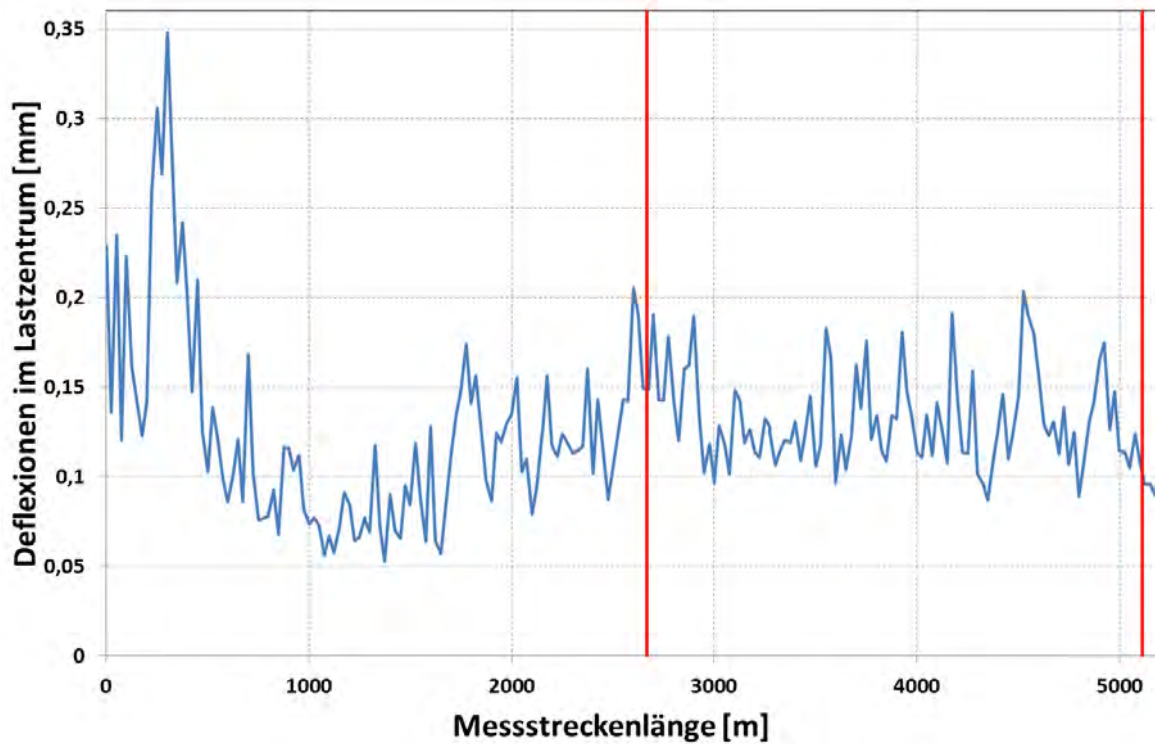
**Abbildung 136:** Gegenüberstellung von D8 und  $M_0$  für die VS 6

In Abbildung 137 bis Abbildung 139 wurden die ermittelten Tragfähigkeitskenngrößen über den Streckenablauf zusammen mit den auf der Grundlage der Georadarmessungen zuvor festgelegten homogenen Abschnitten aufgetragen. Durch diese Darstellung soll nachvollzogen werden, ob die homogenen Abschnitte aufgrund der Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer bestätigt werden können. Dabei sei aber darauf hingewiesen, dass bei der Untersuchung der Strecke im Gegensatz zum Georadar mit dem Falling Weight Deflectometer lediglich eine Strecke von 5.200 m untersucht werden konnte.

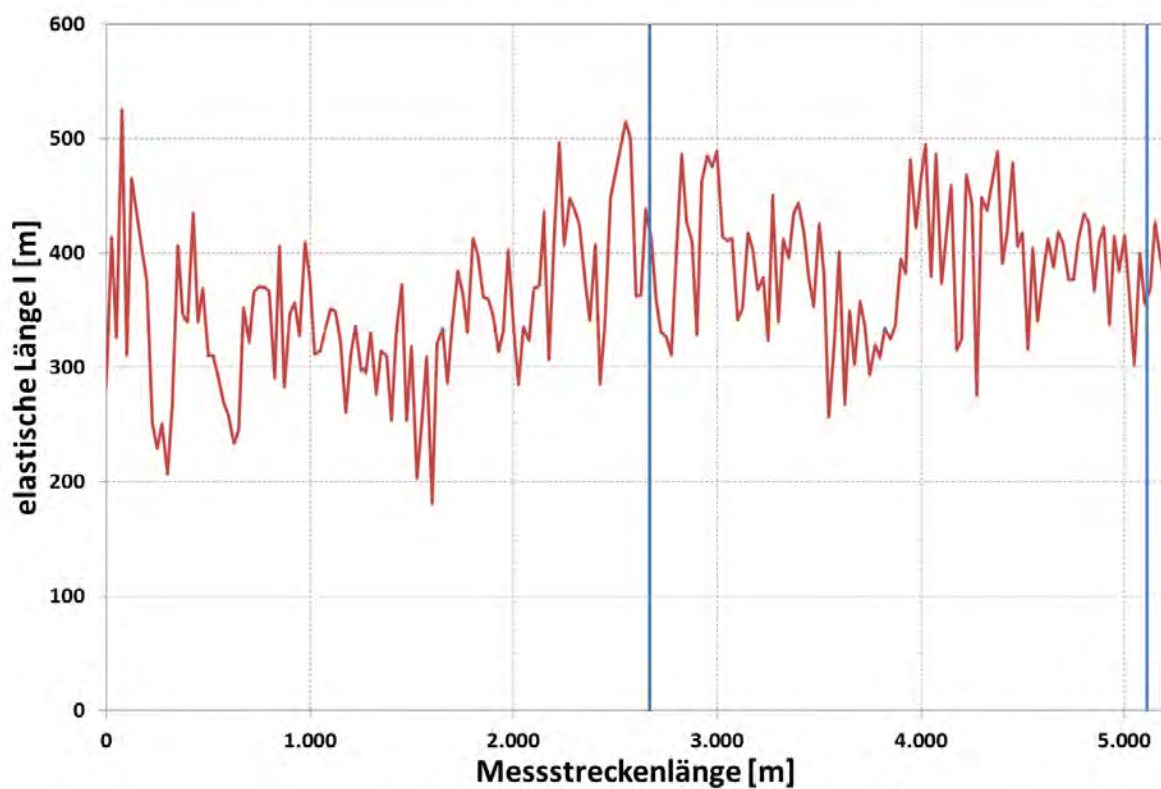
Nach einem visuellen Eindruck erscheinen die homogenen Abschnitte für alle drei Tragfähigkeitsgrößen zunächst nicht widersprüchlich. Dieser Eindruck soll durch eine statistische Untersuchung dieser Grenzen anhand von abschnittswisen Mittelwertvergleichen validiert werden. Auf diese Weise wird untersucht, ob die im Vorfeld definierten homogenen Abschnitte anhand der Messwerte des Falling Weight Deflectometers bestätigt werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf Grund der verkürzten Messstrecke im letzten Abschnitt nur vier Messwerte vorliegen und somit eine Untersuchung der Abschnitte – auf Grundlage des Mittelwertvergleichs – statisch nicht als „abgesichert“ bezeichnet werden kann.

Die Ergebnisse des Mittelwertvergleichs werden in Tabelle 48 bis Tabelle 51 wiedergegeben. Dabei zeigt das jeweils in der untersten Zeile angeordnete Ranking anhand der eingetragenen Zahlen, welche Abschnitte gleichen homogenen Abschnitten zugeordnet werden können. Die Reihenfolge der Zahlen sowie die farbliche Markierung weist darüber hinaus die Rangfolge der homogenen Abschnitte hinsichtlich der Tragfähigkeit von tragfähig bis weniger tragfähig aus. Die Kennzeichnung von grün oder rot ist dabei jedoch lediglich als Relativwertung aufzufassen. Eine grüne Markierung ist also nicht absolut als tragfähig zu werten.

Aus den Ergebnissen der Mittelwertvergleiche ist ersichtlich, dass die Existenz der homogenen Grenzen grundsätzlich statistisch nachgewiesen werden kann. Das in Tabelle 51 zusammengestellte Ranking aller ermittelten Tragfähigkeitskenngrößen zeigt aber auch, dass sich die Grenzen teilweise aufgrund unterschiedlicher Kennwerte ergeben. So wird der Abschnitt III zwar durchweg als der mit der strukturell stärksten Befestigung und Abschnitt II mit dem zweitstärksten Aufbau detektiert, Abschnitt I fällt jedoch durch die geringste elastische Länge  $I$  auf, während die anderen beiden Tragfähigkeitskennwerte im sehr guten Bereich liegen. Ein genauere Blick auf den Sachverhalt zeigt aber, dass die elastischen Längen  $I$  in allen drei Abschnitten in einem sehr vergleichbaren, wenn auch nicht guten Bereich liegen.



**Abbildung 137:** Darstellung der Verformungen mit den homogenen Abschnitten auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 6



**Abbildung 138:** Darstellung der elastischen Länge I mit den homogenen Abschnitten auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 6

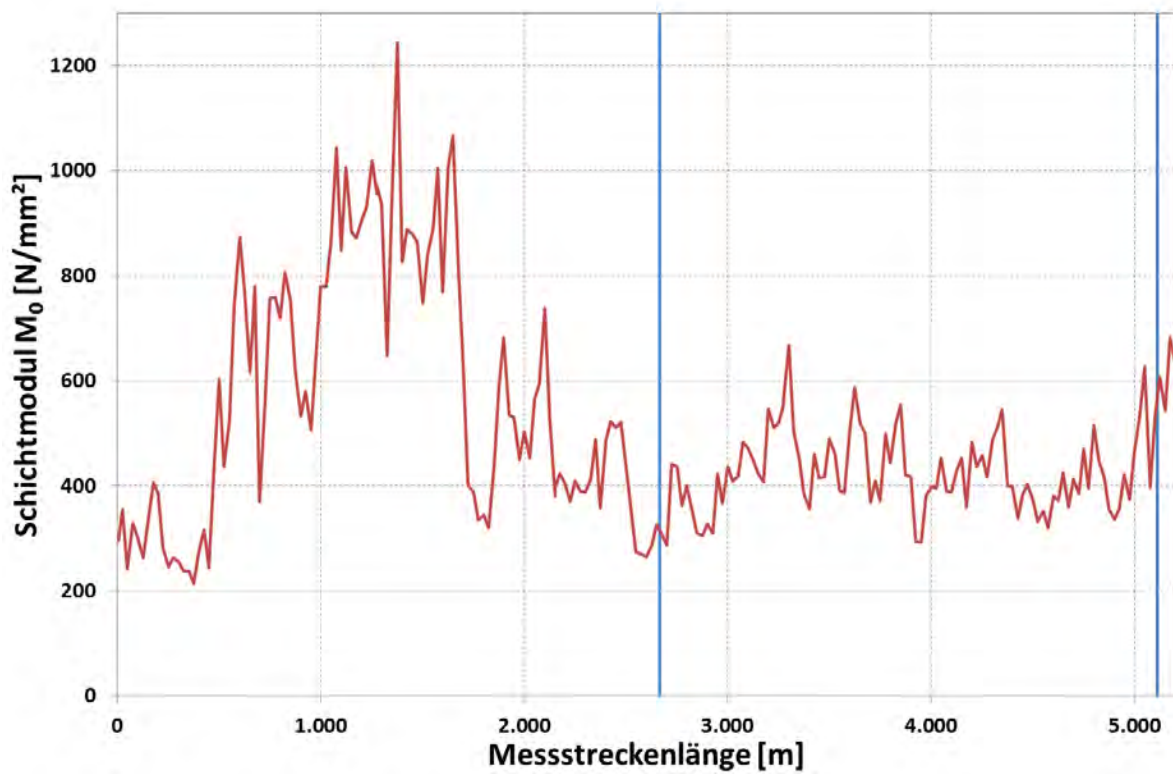


Abbildung 139: Darstellung des Schichtmoduls  $M_0$  mit den homogenen Abschnitten auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 6

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Verformung <math>D_0</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>				
Mittelwert		125,010	131,204	96,127
Varianz		3226,598	667,986	42,917
homogene Grenze?	I		ja	nein
	II			ja
Ranking		1	2	1

Tabelle 48: Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die mit dem Falling Weight Deflectometer gemessenen Verformungen  $D_0$  auf der VS 6

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>elastische Länge I [m]</b>				

Mittelwert		343,449	390,332	399,202
Varianz		4431,951	3112,222	735,329
homogene Grenze?	I		ja	ja
	II			ja
Ranking		3	2	1

Tabelle 49: Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die elastische Länge I auf der VS 6

		Abschnitt		
		I	II	III
<b>Schichtmodul <math>M_0</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>				
Mittelwert		576,410	425,698	618,723
Varianz		63172,54	5921,148	4846,068
homogene Grenze?	I		ja	nein
	II			ja
Ranking		1	2	1

**Tabelle 50:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für das Schichtmodul  $M_0$  auf der VS 6

Parameter	Abschnitte		
	I	II	III
Verformung $D_0$	1	2	1
elastische Länge $l$	3	2	1
Schichtmodul $M_0$	1	2	1

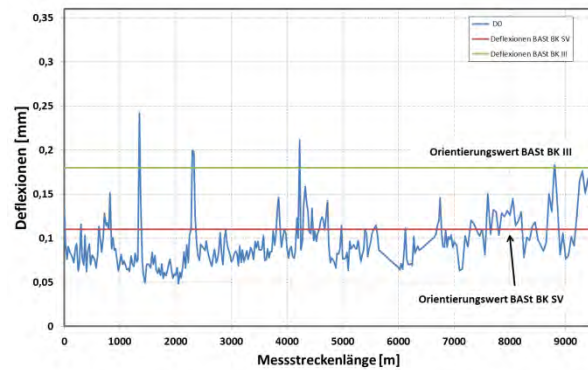
**Tabelle 51:** Vergleich der resultierenden Abschnitte auf der VS 6

### Versuchsstrecke VS 7

Wie bereits bei den anderen Messstrecken (VS 5 und VS 6) beschrieben, wird in diesem Kapitel eine Bewertung der Tragfähigkeit (Verformungen im Lastzentrum  $D_0$ , Schichtmodul  $M_0$  und elastische Länge  $l$ ) des Straßenaufbaus durchgeführt und endet abschließend in der Bildung / Darstellung einzelner homogener Abschnitte.

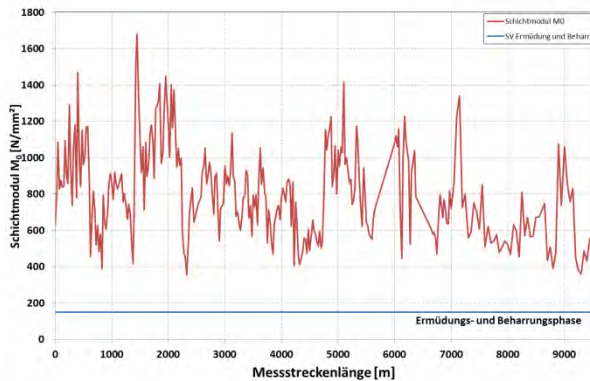
Die erste Auswertung erfolgt über die visuelle Begutachtung der Messwerte der Verformungen im Lasteintragungspunkt  $D_0$ . Diese Messwerte sind zusammen mit den auf der Modellstraße der Bundesanstalt für Straßenwesen unter Laborbedingungen ermittelten Orientierungswerten für die Bauklasse SV und III in Abbildung 140 dargestellt. Da kein Orientierungswert für die Bauklasse II vorliegt, wird sich in der folgenden Auswertung auf die Werte der BAST [JU/WO 2005] für die Bauklasse SV und III bezogen. Bei der visuellen Begutachtung ist erkennbar, dass sich ca. 80 % der Messwerte oberhalb des Orientierungswertes für die Bauklasse SV befinden. Weiterhin ist festzustellen, dass sich lediglich 1,6% der Messwerte unterhalb der Orientierung der Bauklasse III befinden. Somit kann ermittelt werden, dass sich ca. 17% der

Messwerte zwischen den beiden Orientierungswerten befinden. Aufgrund dieser Darstellung und der Tatsache, dass es sich bei der VS 7 um eine Straßenbefestigung der Bauklasse II handelt, kann festgestellt werden, dass die Gesamttragfähigkeit der Straßenbefestigung als gut bezeichnet werden kann.



**Abbildung 140:** Darstellung der Verformungen [mm] auf der VS 7

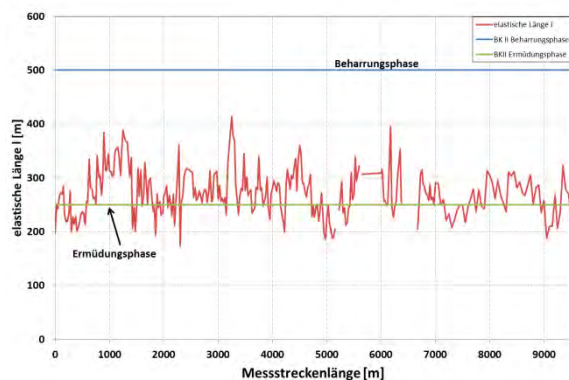
Zur Beurteilung der ungebundenen Schichten unterhalb des gebundenen Aufbaus wird im Folgenden das Schichtmodul  $M_0$  ausgewertet. Bei der Auswertung ist anzumerken, dass ein hoher Schichtmodul für hohe Tragfähigkeit bzw. gute mechanische Eigenschaften der ungebundenen Schichten steht. In Abbildung 141 sind die Messwerte der VS 7 inklusive der Orientierungswerte (150 N/mm<sup>2</sup>) nach Bald & Grätz (Abbildung 46) dargestellt. Die Teilstrecke auf der VS 7 weist bei einem Mittelwert von 803 MPa ein Minimum von 355 MPa und ein Maximum von 1.679 MPa auf. Die visuelle Begutachtung zeigt, dass sich die Messwerte durchweg oberhalb der von Bald & Grätz geforderten Werte befinden. Da das Schichtmodul als Indikator für die ungebundenen Schichten im Straßenaufbau steht, kann an dieser Stelle trotz großer Schwankungen festgestellt werden, dass die ungebundenen Schichten auf der Versuchsstrecke keine Defizite aufweisen, die auf eine Materialermüdung schließen lassen.



**Abbildung 141:** Darstellung des Schichtmoduls  $M_0$  [N/mm<sup>2</sup>] auf der VS 7

Zur Absicherung der aus der Verformung im Lastzentrum gewonnen Erkenntnisse wird nachfolgend – die ebenfalls von Grätz vorgeschlagene Kenngröße – der elastischen Länge  $l$  ausgewertet. Diese Kenngröße stellt – ähnlich wie die Verformung im Lastzentrum – eine Möglichkeit zur Beurteilung der Gesamttragfähigkeit des Straßenaufbaus dar. Die Messwerte der elastischen Länge  $l$  auf der VS 7 sind in Abbildung 142 zusammen mit den Beharrungs- und Ermüdungswerten nach Grätz & Bald dargestellt. Auf der VS 7 schwanken die Messwerte zwischen einem Maximum von 413 mm und einem Minimum von 173 mm um einen Mittelwert von 271 mm.

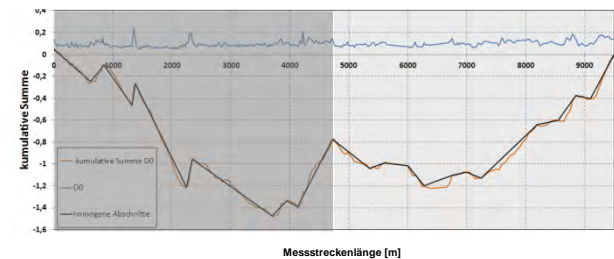
Bei der visuellen Betrachtung der Messwerte ist erkennbar, dass sich der Großteil der Werte zwischen der Beharrungs- und der Ermüdungsphase der Bauklasse II befinden. Dies lässt darauf schließen, dass die Straßenbefestigung in Asphaltbauweise bereits ein gewisses Maß an Schädigung aufweist. Da sich der Mittelwert der Messstrecke näher an der Ermüdungs- als an der Beharrungsphase befindet, kann nicht ausgeschlossen werden, dass bereits plastische irreversible Schäden im Straßenoberbau vorliegen.



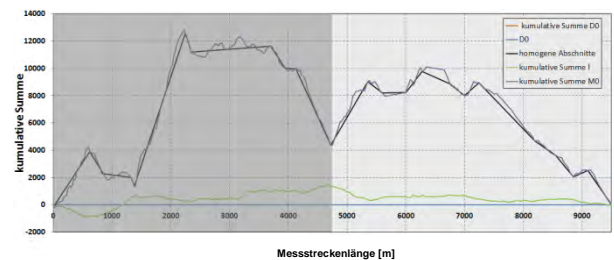
**Abbildung 142:** Darstellung der elastischen Länge  $l$  [m] auf der VS 7

In Anlehnung an das in Kapitel 4.3.1.2 beschriebene Verfahren gemäß [FGSV 431], werden nachfolgend die gebildeten homogenen Abschnitte dargestellt (Abbildung 143 bis Abbildung 145). Eine Auswertung gemäß dem Arbeitspapier bedingt eine Anzahl von 43 homogenen Abschnitten mit einer durchschnittlichen Länge von 220 m. Da dies als Bewertungsgrundlage nicht plausibel erscheint, wird die Anzahl der homogenen Abschnitte – wie in den bereits vorher beschriebenen Abschnitten – auf 2 homogene Abschnitte reduziert.

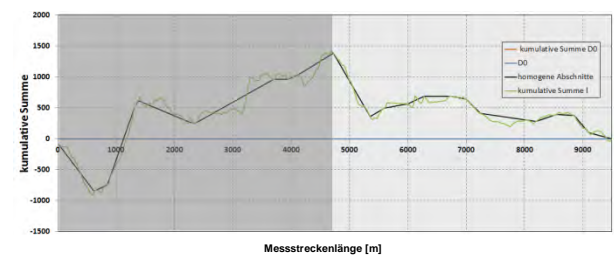
Für die Unterteilung in die beiden homogenen Abschnitte wird die Station 4+700 als Grundlage gewählt, da sich die markante Ausprägung in allen kumulativen Summen widerspiegelt. Grundsätzlich muss aber noch daraufhin gewiesen werden, dass weder die Steigungsänderung noch der Vorzeichenwechsel eine direkte Beurteilung der Tragfähigkeit des Straßenaufbaus bzw. des Unterbaus / Untergrundes mit sich bringt. Ein Vorzeichenwechsel bzw. eine Steigungsänderung gibt laut [FGSV 431] lediglich einen Hinweis auf eine mögliche Veränderung der vorherrschenden Bedingungen.



**Abbildung 143:** Darstellung der homogenen Abschnitte mittels der Verformungen im Lastzentrum  $D_0$  auf der VS 7



**Abbildung 144:** Darstellung der homogenen Abschnitte für den Schichtmodul  $M_0$  auf der VS 7



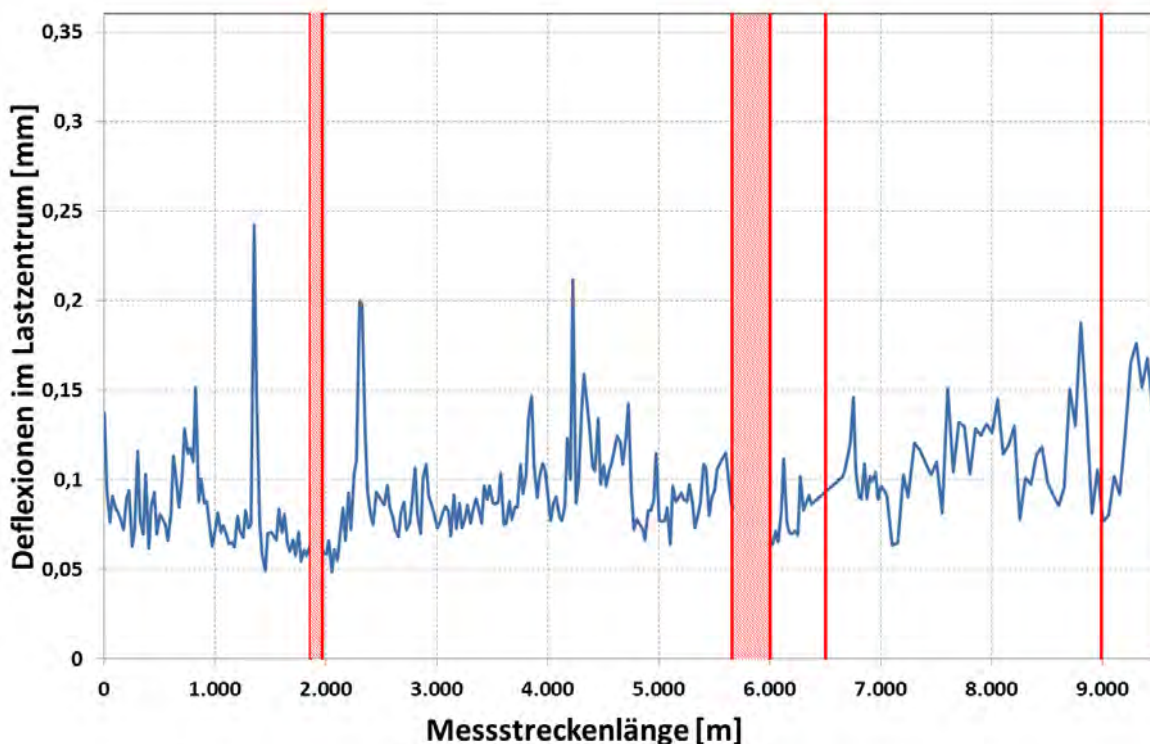
**Abbildung 145:** Darstellung der homogenen Abschnitte mittels der elastischen Länge  $l$  auf der VS 7

Für eine weitere Auswertung und Untersuchung, ob eine Übereinstimmung der homogenen Abschnitte des Falling Weight Deflectometers und

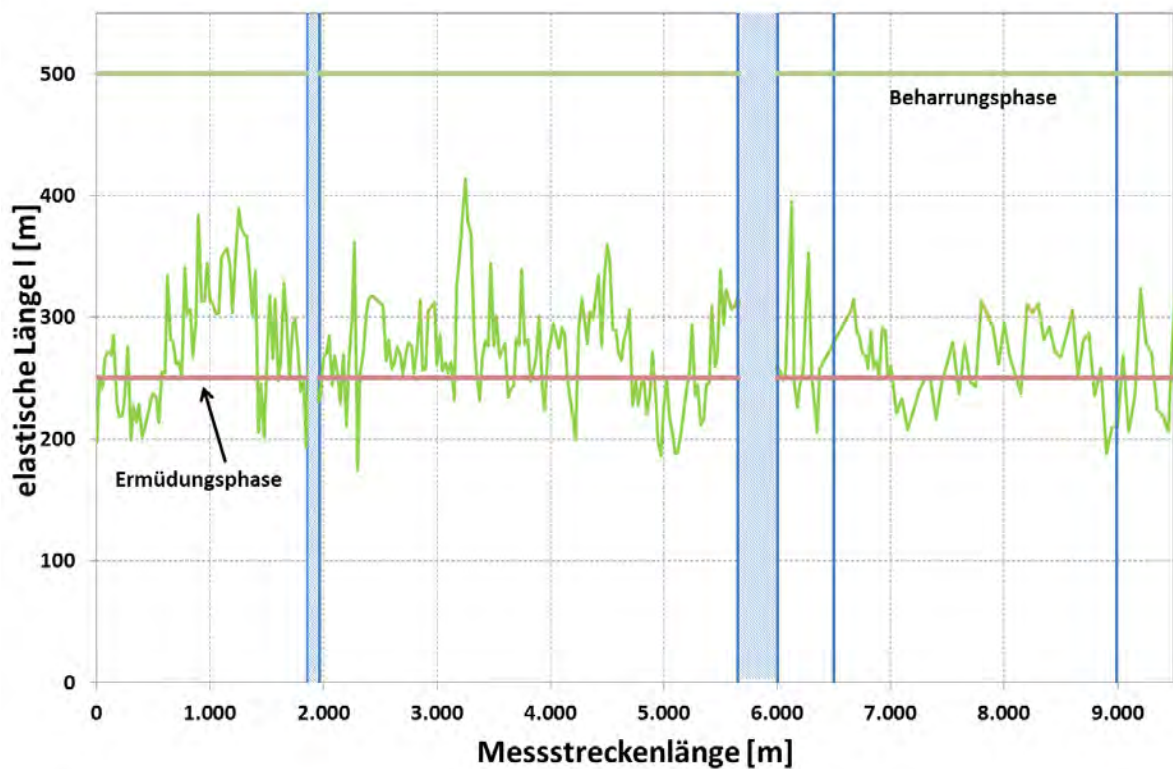
des Georadar vorliegt, wurden die Tragfähigkeitswerte in Abbildung 146 bis Abbildung 148 wie zuvor schon für die anderen Asphaltbefestigungen über den Streckenverlauf mitsamt der aus den Georadarmessungen stammenden Unterteilung in homogene Abschnitte dargestellt. Dabei wurden auf der Messstrecke zwei Bauwerke, auf denen nicht gemessen wurde, mit eingezeichnet.

Für die statistische Untersuchung, ob diese Grenzen homogener Abschnitte anhand der Messwerte des Falling Weight Deflectometers bestätigt werden können, werden abschnittsweise Mittelwertvergleiche durchgeführt und die Ergebnisse in Tabelle 52 bis Tabelle 55 wiedergegeben. Diese offenbaren zunächst ein heterogenes Feld: Wäh-

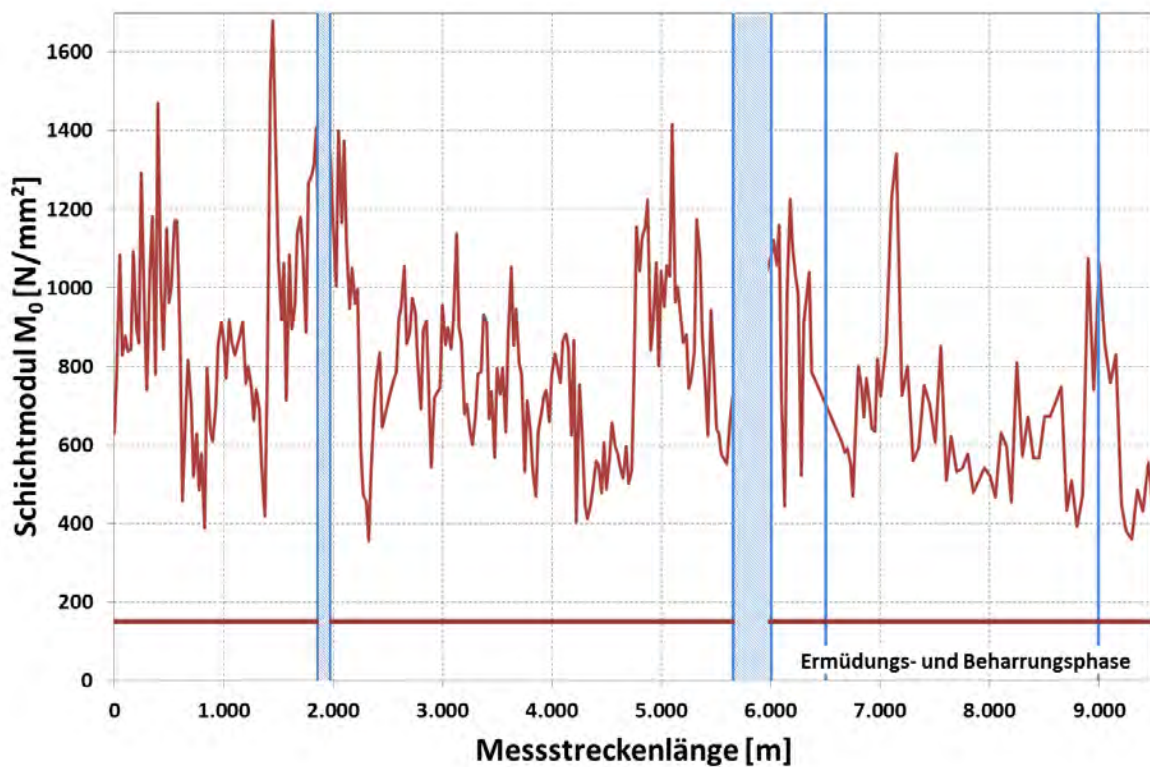
rend sich für die elastische Länge  $l$  nur ein durchgehender homogener Abschnitt ergibt, werden für die Verformungen und den Schichtmodul zwar die gleichen Grenzen homogener Abschnitte bestätigt, jedoch fällt das Ranking von gut nach schlecht exakt gegensätzlich aus (Tabelle 55). Wie aber bereits ausgeführt wurde, befindet sich die Strecke offensichtlich bereits in der geschädigten Phase, was sich in entsprechend schlechten Tragfähigkeitskennwerten ausdrückt. So liegen die Schichtmoduli über alle fünf betrachteten Abschnitte in einem so geringen Bereich, dass sich eine Unterteilung in homogene Abschnitte erübrigt. Insgesamt ergibt sich aufgrund der Tragfähigkeitsmessungen also ein durchweg geschädigter Streckenabschnitt.



**Abbildung 146:** Darstellung der Verformungen im Lastzentrum mit den homogenen Abschnitten inkl. Messlücken (Bauwerke) auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 7



**Abbildung 147:** Darstellung der elastischen Länge  $l$  mit den homogenen Abschnitten inkl. Messlücken (Bauwerke) auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 7



**Abbildung 148:** Darstellung des Schichtmoduls  $M_0$  mit den homogenen Abschnitten inkl. Messlücken (Bauwerke) auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar auf der VS 7

		Abschnitt				
		I	II	III	IV	V
<b>Verformung D<sub>0</sub> [μm]</b>						
Mittelwert		83,153	93,542	78,607	109,672	128,432
Varianz		766,439	627,928	195,464	521,081	1302,692
homogene Grenze?	I		ja	nein	ja	ja
	II			ja	ja	ja
	III				ja	ja
	IV					nein
Ranking		1	2	1	3	

**Tabelle 52:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die mit dem Falling Weight Deflectometer gemessenen Verformungen D<sub>0</sub> auf der VS 7

		Abschnitt				
		I	II	III	IV	V
<b>elastische Länge I [m]</b>						
Mittelwert		278,893	272,98	272,111	265,518	250,728
Varianz		2613,499	1740,459	2572,75	898,365	1830,284
homogene Grenze?	I		nein	nein	ja	ja
	II			nein	nein	nein
	III				nein	nein
	IV					nein
Ranking		1				

**Tabelle 53:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für die elastische Länge I auf der VS 7

		Abschnitt				
		I	II	III	IV	V

Schichtmodul $M_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]						
Mittelwert		14,643	17,043	15,563	21,175	26,722
Varianz		23,012	24,930	9,343	21,388	71,209
homogene Grenze?	I		ja	nein	ja	ja
	II			ja	ja	ja
	III				ja	ja
	IV					nein
Ranking		3	2	3	1	

**Tabelle 54:** Ergebnis des statistischen Mittelwertvergleichs für das Schichtmodul  $M_0$  auf der VS 7

Parameter	Abschnitte			
Verformung $D_0$	1	2	1	3
elastische Länge $l$	1			
Schichtmodul $M_0$	3	2	3	1

**Tabelle 55:** Vergleich der resultierenden Abschnitte auf der VS 7

Äquivalent zur Auswertung der Versuchsstrecken in Betonbauweise werden nachfolgend die Ergebnisse des statistischen Abschnittsvergleichs der Versuchsstrecken in Asphaltbauweise grafisch darstellt (Abbildung 149 bis Abbildung 151).

Dabei werden für die Strecken in Asphaltbauweise die Messungen mit dem Georadar als Grundlage für diesen Vergleich gewählt. Diesen Abschnitten werden die nachgewiesenen homogenen Abschnitte für die Kenngrößen Verformung in Lastzentrum  $D_0$ , elastische Länge  $l$  und Schichtmodul  $M_0$  gegenübergestellt und verglichen. Der letzten Zeile der Abbildung 149 bis Abbildung 151 kann das

zusammengefasste Ergebnis der Vergleichsanalyse entnommen werden.

Wie schon bei den Strecken mit Betonbefestigungen festgestellt werden konnte, bestätigt eine Auswertung sämtlicher Tragfähigkeitskenngrößen aus den FWD-Messungen überwiegend die homogenen Abschnitte, die aus den Georadarmessungen abgeleitet wurden. Dabei ist aber klar hervorzuheben, dass hier nur die Grenzen bestehender homogener Abschnitte auch für die Tragfähigkeitskennwerte bescheinigt werden. Würden die homogenen Abschnitte auf der Grundlage dieser Tragfähigkeitskennwerte gebildet werden, ergäben sich andere Grenzen.

ZEB, Georadar, visuell						
Verformung $D_0$						
elastische Länge $l$						
Schichtmodul $M_0$						
FWD gesamt						

**Abbildung 149:** Vergleichende Darstellung der homogenen Abschnitte ermittelt anhand der Messungen mit dem Georadar und dem Falling Weight Deflectometer auf der VS 5

ZEB, Georadar, visuell			
Verformung $D_0$			
elastische Länge $l$			
Schichtmodul $M_0$			

FWD gesamt			
------------	--	--	--

**Abbildung 150:** Vergleichende Darstellung der homogenen Abschnitte ermittelt anhand der Messungen mit dem Georadar und dem Falling Weight Deflectometer auf der VS 6

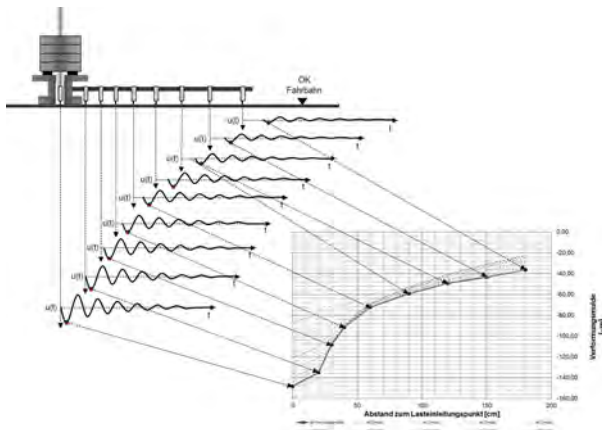
ZEB, Georadar, visuell			
Verformung $D_0$			
elastische Länge $l$			
Schichtmodul $M_0$			
FWD gesamt			

**Abbildung 151:** Vergleichende Darstellung der homogenen Abschnitte ermittelt anhand der Messungen mit dem Georadar und dem Falling Weight Deflectometer auf der VS 7

### 5.4.4 Ermittlung von zusätzlichen Strukturparametern mittels Schwingungsanalysen

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Nationales Innovationsprogramm Straße - Bewertung der strukturellen Substanz und Restwertermittlung von Asphaltstraßenbefestigungen“ [GR/LI/HÜ/ZA 2012] wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem anhand der Wellenausbreitung innerhalb eines Asphaltpakets auf Materialeigenschaften wie die Steifigkeit geschlossen werden kann. Dazu wurden ebenfalls Messungen mit dem in Kapitel 4.3 beschriebenen Falling Weight Deflectometer mit dem Ziel durchgeführt, die Strukturparameter der einzelnen Schichten auf der Grundlage der Zusammenhänge zwischen Wellenausbreitung und mechanischen Eigenschaften zu bestimmen.

Bei den bislang angewendeten statistischen Auswertungsverfahren für die Messergebnisse hinsichtlich der Tragfähigkeitskennwerte der zu untersuchenden Verkehrsbefestigungen in Asphaltbauweise werden die als Funktion der Zeit erfassten Messwerte für die Verformung auf eine zeitunabhängige Hüllkurve der Maximalwerte reduziert (Abbildung 152)



**Abbildung 152:** Schematischer Ablauf der Bildung der zeitunabhängigen Verformungsmulde auf der Grundlage

der erfassten Verformungs-Zeit-Verläufe an den einzelnen Geofonen [GROHS 2012]

Die Übertragung der Maximalwerte hat bei allen Vorteilen der Einfachheit und Übersichtlichkeit den Nachteil, dass ein Verlust der einzelnen in den Schwingungen enthaltenen Materialparametern existiert. So wird beispielsweise die Phasenverschiebung zwischen den erfassten Schwingungen der jeweiligen Geofone nicht ausgewertet, wodurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwingung und damit die Dämpfungseigenschaften, also das viskose Verhalten des gebundenen Asphaltpakets nicht bestimmt werden kann.

Die Grundidee bei der Aufnahme der Daten mit der modifizierten Messanordnung ist die Aufschlüsselung der verschiedenen Frequenzen, welche beim Lasteintrag durch das Falling Weight Deflectometer in die Verkehrsflächenbefestigung entstehen, und die Bestimmung deren Geschwindigkeiten. Da sich verschiedenen Frequenzen unterschiedlich schnell und in verschiedenen Wirtiefen bewegen, ist es möglich, über die Auswertung verschiedener Sensorpaare auf Materialkennwerte der jeweiligen Schichten zu schließen.

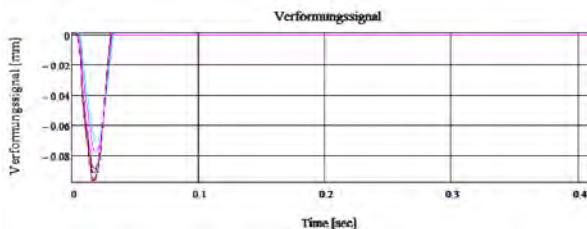
Dazu wird zunächst das durch den Kraftstoß des Falling Weight Deflectometers eingeprägte Schwingungsspektrum mit Hilfe der Fast Fourier Transformation in seine Einzelschwingungen zerlegt und für jede einzelne Frequenz die Phasendifferenz zwischen den Geofonen bestimmt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwingungen wird im Weiteren auf eine Tiefenlage im Aufbau bezogen und die dort vorhandene Schicht der Steifigkeitsmodul abgeleitet.

#### 5.4.4.1 Auswertung mittels Schwingungsanalyse von Straßenbefestigungen in Betonbauweise

Nachfolgend wird exemplarisch versucht, das im Rahmen des Forschungsprojekts „Nationales Innovationsprogramm Straße – Bewertung der strukturellen Substanz und Restwertermittlung von Asphaltstraßenbefestigungen“ [GR/LI/HÜ/ZA 2012] entwickelte Verfahren auf Straßenbefestigungen in

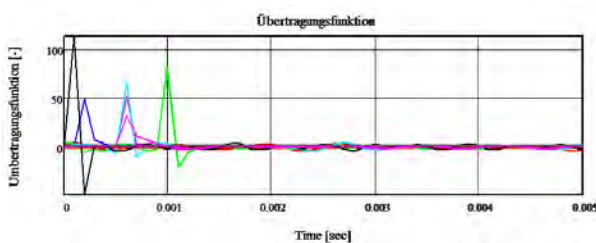
Betonbauweise zu übertragen. Dabei wird das Verfahren nach [Wolf 2009], beschrieben in Kapitel 5.4.1 als Beurteilungsgrundlage angenommen. Das entwickelte Verfahren bezieht sich auf den Zusammenhang der Wellenausbreitung und der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Schichten der Straßenbefestigung in Asphaltbauweise. Durch die Auswertung des Frequenzspektrums der aufgenommenen Wellensignale wird im weiteren Verlauf versucht, Anhaltswerte für Steifigkeiten zu ermitteln. Dabei wird eine Modifikation am Falling Weight Deflectometer der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vorgenommen, um eine Schwingungsanalyse der Straßenbefestigung aufzeichnen und auswerten zu können.

In Abbildung 153 ist das Verformungssignal unterhalb des Laststempels während des Lasteintrags in die Betonbefestigung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.



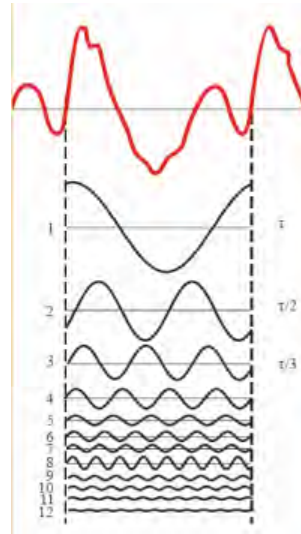
**Abbildung 153:** Darstellung des Verformungssignals bei einem Lasteintrag (entnommen aus dem Auswertalgorithmus des dynamischen Verfahrens)

Für die weitere Auswertung der verschiedenen Betonplatten ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der einzelnen Wellen bzw. Frequenzen von entscheidender Bedeutung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der einzelnen Wellen bzw. Frequenzen bildet zusammen mit der Übertragungsfunktion zwischen dem Zeit- und Frequenzraum die Grundlage für die weitere Berechnung zur Beurteilung der Steifigkeiten. Eine mögliche Übertragungsfunktion zwischen Zeit- und Frequenzraum ist in Abbildung 154 dargestellt.



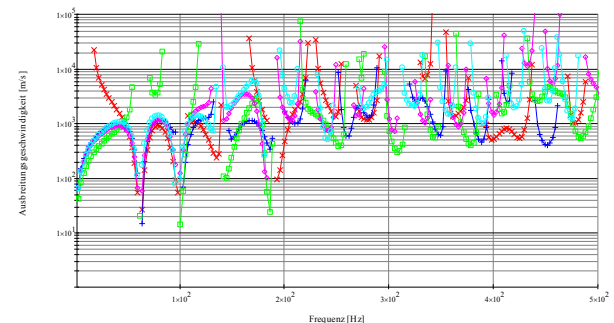
**Abbildung 154:** Darstellung einer Übertragungsfunktion zwischen Zeit- und Frequenzraum

In Abbildung 155 ist exemplarisch die Zerlegung einer undefinierten Schwingung – wie sie bei der Herstellung einer Übertragungsfunktion an Verkehrsflächenbefestigungen in Asphalt- und Betonbauweise vorkommen kann – dargestellt.



**Abbildung 155:** Exemplarische Darstellung der Zerlegung einer undefinierten Schwingung mit Hilfe der Fast Fourier Transformation [BASt 2013]

Über diese Übertragungsfunktion ist es im Weiteren möglich, die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz darzustellen. Dabei ist zu erwähnen, dass diesem Rechenansatz zugrunde gelegt wird, dass eine Dichte von  $2,4 \text{ g/cm}^3$  und eine Querkontraktionszahl von  $0,35$  vorhanden sind. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz kann beispielhaft Abbildung 156 entnommen werden.



**Abbildung 156:** Exemplarische Darstellung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz für Straßenbefestigungen in Betonbauweise

Für die Auswertung in diesem Forschungsprojekt wird wie bereits beschreiben das Verfahren nach Wolf als Beurteilungsgrundlage (Kapitel 5.4.1) angenommen. Das Verfahren nach [Wolf 2009] ermöglicht eine Aussage über die Plattenbettung und Querkraftübertragung an/in den einzelnen Fugen zwischen einer belasteten und unbelasteten Platte.

Diese Aussage bildet die Grundlage für das vom Institut für Straßenwesen angedachte Verfahren. Bei dem entwickelten Verfahren wird ein Vergleich der Ausbreitungsgeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Geofonen durchgeführt und untersucht, ob Änderungen unabhängig vom Trägheitsmoment der Platte festgestellt werden können.

Für die Untersuchung wurden verschiedene Betonplatten auf der VS 3 ausgewählt und klassifiziert. Für die Auswertung wurde eine Platte auf der Messstrecke nach dem Verfahren von [FIE/WO 2005] ausgewählt, deren Zustand sich nach herkömmlicher Auswertung im vierten Quadranten befindet. Gemäß Kapitel 5.4.1 können die Platten auf Grund des zugeordneten Bereiches wie folgt beschrieben werden:

#### Bereich 4:

Die Querfugen weisen eine relativ große Verformung am belasteten Plattenrand bei vergleichsweise großer relativer vertikaler Fugenbewegung und relativ kleinem Wirksamkeitsindex auf.

Die Plattenbettung ist geschädigt.

Entsprechende Querfugen sind nicht mehr ausreichend tragfähig. Umso mehr, je weiter die Wertepaare vom Kreuzungspunkt der vier Bereiche entfernt liegen

Nachfolgend wird die Schwingungsanalyse des Instituts für Straßenwesen in Abbildung 157 bis Abbildung 162 für die belasteten und in Abbildung 160 bis Abbildung 162 für die unbelasteten Plattenränder dargestellt. Dabei werden bei der Untersuchung der Plattenbettung und der Querkraftübertragung alle 3 Laststufen (50 kN, 75 kN 100 kN) berücksichtigt.

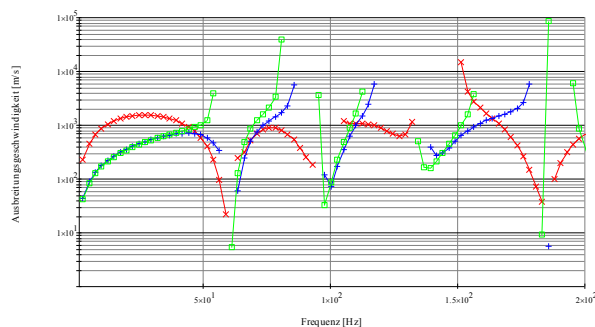
Für die Zuordnung der verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten wird folgende Farbgebung gewählt:

#### belastete Platte:

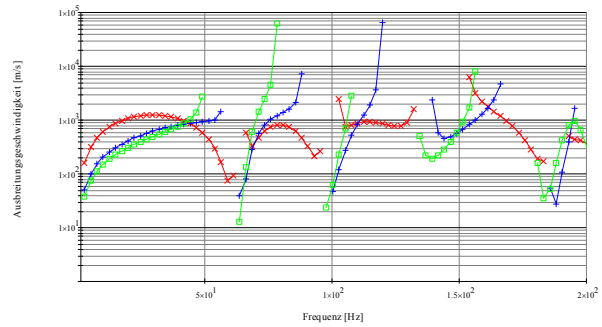
rot  $V_{\text{Rayleigh}}$  von Geophon 1 nach Geophon 0  
 blau  $V_{\text{Rayleigh}}$  von Geophon 2 nach Geophon 1  
 grün  $V_{\text{Rayleigh}}$  von Geophon 3 nach Geophon 2

#### unbelastete Platte:

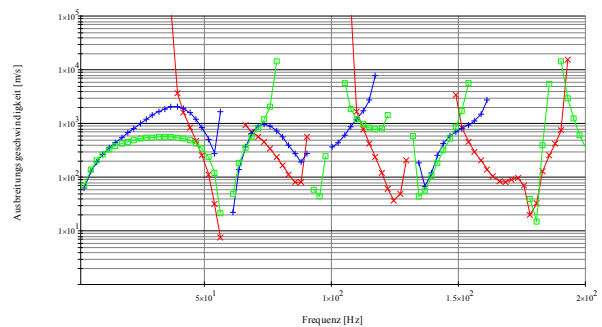
rot  $V_{\text{Rayleigh}}$  von Geophon 6 nach Geophon 0  
 blau  $V_{\text{Rayleigh}}$  von Geophon 7 nach Geophon 6  
 grün  $V_{\text{Rayleigh}}$  von Geophon 8 nach Geophon 7



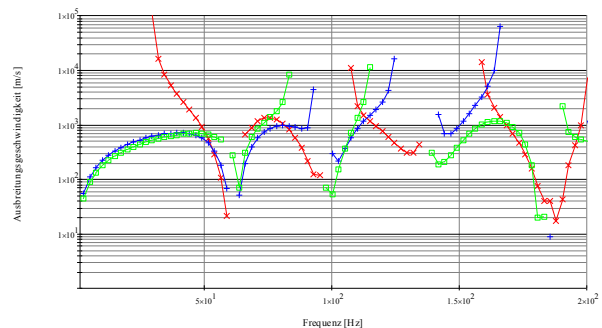
**Abbildung 157:** Exemplarische Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen benachbarten Geofonen der belasteten Platte bei einem Kraftstoß von 50 kN



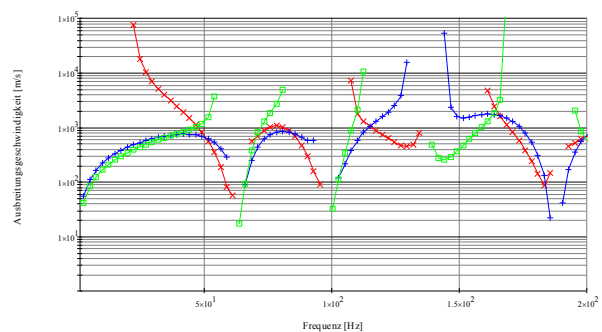
**Abbildung 158:** Exemplarische Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen benachbarten Geofonen der belasteten Platte bei einem Kraftstoß von 75 kN



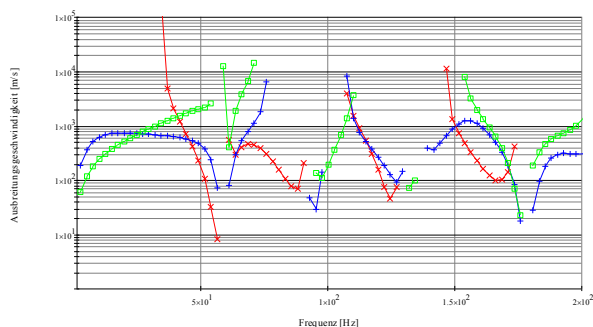
**Abbildung 159:** Exemplarische Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen benachbarten Geofonen der belasteten Platte bei einem Kraftstoß von 100 kN



**Abbildung 160:** Exemplarische Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen benachbarten Geofonen der unbelasteten Platte bei einem Kraftstoß von 50 kN



**Abbildung 161:** Exemplarische Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen benachbarten Geofonen der unbelasteten Platte bei einem Kraftstoß von 75 kN



**Abbildung 162:** Exemplarische Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen benachbarten Geofonen der unbelasteten Platte bei einem Kraftstoß von 100 kN

Bei der Auswertung ist ersichtlich, dass sich die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten bis ca. 70 Hz zwischen dem Lasteintrag von 50 kN und 75 kN nicht anpassen bzw. nicht ändern. In Abbildung 162 ist der der Kraftstoß in Höhe von 100 kN dargestellt. Dort ist erkennbar, dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten ähnlich verhalten (rote Kurve bis ca. 70 kN). Durch die Überlegung, dass nur eine gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit erreicht werden kann, welche Verhältnisse des Untergrundes / Unterbaus vorliegen und der Tatsache, dass sich erst bei einem Lasteintrag von 100 kN die Kurven ähnlich bzw. gleich verhalten, lässt dies auf eine Hohlagerung bzw. ein Problem im Bereich der Plattenbettung schließen.

Die Anwendung des Verfahrens zur Wellenausbreitung wird für die Betonbefestigungen in diesem Forschungsvorhaben nur dargelegt, um einen Ausblick auf eine mögliche Entwicklung einer Auswertung für eine Bewertung der strukturellen Substanz zu geben.

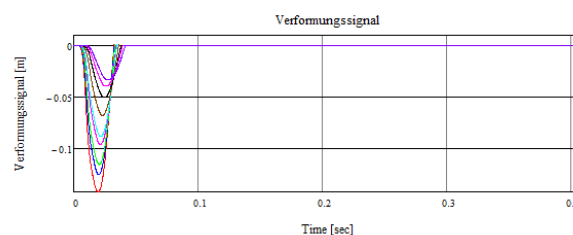
#### 5.4.4.2 Auswertung mittels Schwingungsanalyse von Straßenbefestigungen in Asphaltbauweise

Im Vorfeld dieser Auswertung wurden alle mit dem Falling Weight Deflectometer durchgeführten Messungen nach den Ansätzen von Grätz [GRÄTZ 2009] ausgewertet. Für den weiteren Verlauf der Auswertung werden diese Kenngrößen

- des Schichtmodul  $M_0$
- der elastische Länge  $l$  und
- der Verformungen im Lastzentrum

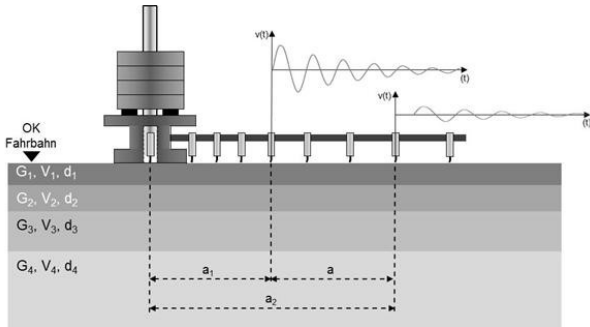
als Grundlage zur Beurteilung der Tragfähigkeit von Straßenbefestigungen in Asphaltbauweise gewählt. Nach der Auswertung der Kenngrößen nach Grätz, wird im Anschluss eine Auswertung mittels Schwingungsanalyse durchgeführt. Durch die Auswertung des Frequenzspektrums der aufgenommenen Wellensignale wird im weiteren Verlauf versucht zu ermitteln, welche Steifigkeitsverhältnisse im Aufbau vorhanden sind.

Der ersten Schritt der dynamischen Auswertung befasst sich mit der Auswertung der sich während des Belastungsimpulses direkt unter der Lastplatte entwickelnden Verformungsmulde. Die Verformungsmulde beschreibt die Reaktion der Asphaltstraßenbefestigung auf den Lasteintrag des Fallgewichts. Abbildung 163 stellt das Verformungssignal der Straßenbefestigung vor, während und nach dem Lasteintrag, also in den Phasen des Einfederns, Ausfederns und Pendelns dar.



**Abbildung 163:** Darstellung des Verformungssignals bei einem Lasteintrag (entnommen aus dem Auswertalgorithmus des dynamischen Verfahrens)

Im Verlauf einer Messung mit dem Falling Weight Deflectometer wird ein Kraftstoß bestehend aus theoretisch unendlich vielen Frequenzen eingeleitet. Aufgrund der Impulsbreite und Impulsform sowie der Abtastrate können Frequenzen bis zu 150 Hz für die weitere Auswertung zur Verfügung gestellt werden. Jede dieser Frequenzen kann an allen Geofonen detektiert werden. Bei der Auswertung der Ausbreitungsgeschwindigkeit stellt sich jedoch das Problem, dass abhängig von der Wellenlänge des jeweiligen Schwingungsanteils die Phasenlage nicht eindeutig bestimmt werden kann. Um dies zu umgehen, ist es erforderlich, bestimmte geometrische Verhältnisse zwischen den in Korrelation gesetzten Geofonen (Sensorpaaren) und dem Lastzentrum einzuhalten. Berücksichtigt man den Zusammenhang von Wirtiefe  $d$  zur Wellenlänge mit  $\lambda=3d$ , kann direkt die Wirtiefe abgeleitet werden. Der funktionale Zusammenhang zwischen der Wellenlänge  $\lambda$  und den geometrischen Verhältnissen sowie die daraus ableitbare Wirtiefe ist in Tabelle 56 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass nur 12 von 45 möglichen Sensorkombinationen aufgrund der derzeitigen Sensoranordnung für die Auswertung der Messungen nutzbar sind.

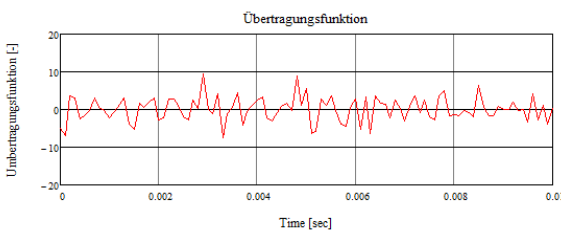


**Abbildung 164:** Schematische Darstellung der geometrischen Abmessungen für die Bildung von Sensorpaaren

geometrisches Verhältnis	Wellenlänge	Wirktiefe
$\frac{a_2}{a_1} \geq 4$	$\frac{\lambda}{3} \leq a \leq 3\lambda$	$\frac{a}{9} \leq d \leq a$
$\frac{a_2}{a_1} = 2$	$\lambda \leq a_1$	$d \leq \frac{a_1}{3}$

**Tabelle 56:** Zusammenhang Sensoranordnung – Wellenlänge – Wirktiefe [SY/AL/RO 1994]

Für die Auswertung der durchgeführten Messungen hinsichtlich der Steifigkeit bzw. der strukturellen Substanz der einzelnen Schichten der Straßenbefestigung in Asphaltbauweise ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der einzelnen Wellen von großer Bedeutung. Um die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen zu ermitteln, ist zum einen die beschriebene Bildung von Sensorpaaren von entscheidender Bedeutung, zum anderen bildet die Übertragungsfunktion zwischen dem Zeit- und dem Frequenzraum die Grundlage für die weitere Berechnung zur Beurteilung der Steifigkeiten. Eine mögliche Übertragungsfunktion zwischen Zeit- und Frequenzraum ist in Abbildung 165 dargestellt.

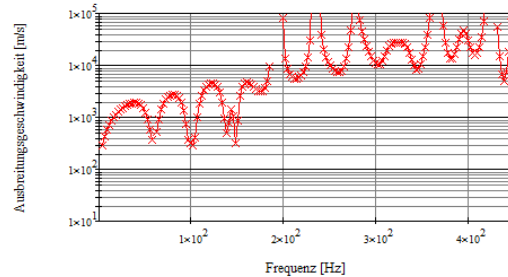


**Abbildung 165:** Darstellung einer Übertragungsfunktion zwischen Zeit- und Frequenzraum

In Abbildung 155 ist exemplarisch die Zerlegung einer undefinierten Schwingung – wie sie bei der Herstellung einer Übertragungsfunktion an Verkehrsflächenbefestigungen in Asphaltbauweise vorkommt kann – dargestellt.

Über diese Übertragungsfunktion und die Bildung von Sensorpaaren ist es im Weiteren möglich die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz darzustellen. Dabei ist zu

erwähnen, dass diesem Rechenansatz zugrunde gelegt wird, dass eine Dichte von 2,0 g/cm<sup>3</sup> und eine Querkontraktionszahl von 0,5 vorhanden sind. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz kann beispielhaft Abbildung 166 entnommen werden.



**Abbildung 166:** Darstellung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz am Beispiel der VS 5, Station 395+000, Abschnitt I

Die Bestimmung der Wirktiefe der jeweiligen Schwingung des gemessenen Spektrums erfolgt über die Zuordnung des Schwerpunkts der Rayleigh-Welle. Hierfür kann der Literatur entnommen werden, dass dieser bei etwa 1/15λ liegt. Auf der Grundlage dieser Angaben kann die Wirktiefe entsprechend formuliert werden.

$$z_w = \frac{1}{15} \lambda \tag{Gl. 17}$$

mit

- $z_w$  vertikale Bewegungskomponente der Rayleigh-Welle
- $\lambda$  Wellenlänge [m]

Auf Grundlage verschiedener physikalischer Gesetzmäßigkeiten, die im Zuge von [GROHS 2012] zur Ermittlung der Steifigkeitsverhältnissen von Verkehrsflächenbefestigungen in Asphaltbauweise in einen physikalischen Zusammenhang gestellt wurden, ergibt sich die Steifigkeit nach der in Gleichung 18 dargestellten Formel.

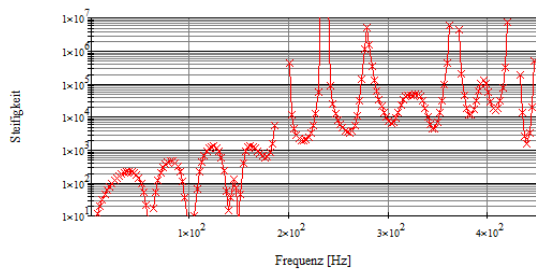
$$S(f) = \frac{2,0 * \rho * (v(f))^2 * (v + 1,0)^3}{(1,12 * v + 0,87)^2} \tag{Gl. 18}$$

mit

- $S(f)$  Steifigkeit als Funktion der Frequenz [MPa]
- $\rho$  Dichte [g/cm<sup>3</sup>]
- $v$  Querdehnzahl [-]
- $v(f)$  Ausbreitungsgeschwindigkeit als Funktion der Frequenz  $f$  [m/s]

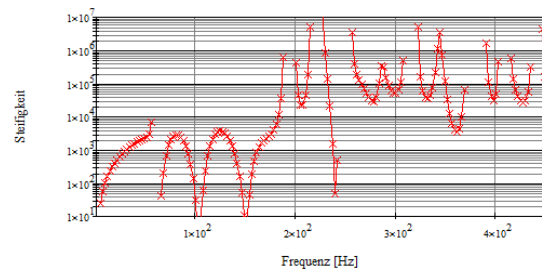
Die Annahmen für die Erstermittlung der notwendigen Einflussparameter betragen gemäß [GROHS 2012] in einem ersten Schritt für die Dichte 2,0 g/cm<sup>3</sup> und für eine Querkontraktionszahl 0,35. Gemäß der resultierenden Ausbreitungsgeschwin-

digkeiten wird in einem zweiten Schritt entsprechend der aus der Literatur entnommen Ausbreitungsgeschwindigkeit die Querkontraktionszahl für ungebundenen Befestigungen mit 0,5 bzw. 0,35 für gebundene Schichten sowie 2,0 g/cm<sup>3</sup> für Schichten ohne Bindemittel bzw. 2,5 g/cm<sup>3</sup> für gebundene Schichten angesetzt. Mit der unter [GROHS 2012] gewonnen Erkenntnis und der vorher bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit ist es möglich, auf die Steifigkeitsverläufe der einzelnen Schichten zu schließen. Ein möglicher Verlauf der Steifigkeiten kann Abbildung 167 entnommen werden.

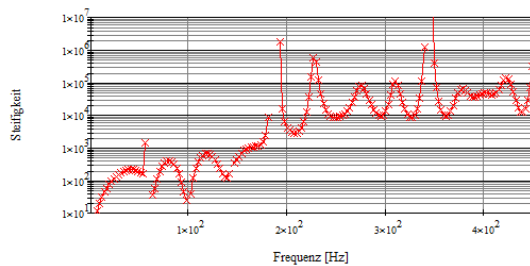


**Abbildung 167:** Darstellung des Steifigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Frequenz am Beispiel der VS 5, Station 395+000, Abschnitt I

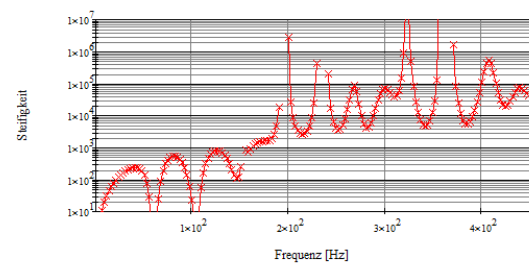
Die Auswertung der einzelnen Stationen in den jeweiligen homogenen Abschnitten ist in den nachfolgenden Abbildung 168 bis Abbildung 173 dargestellt.



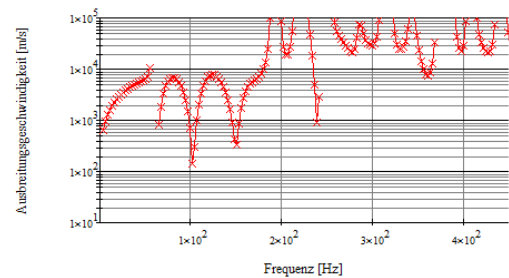
**Abbildung 168:** Darstellung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 394+500, Abschnitt II



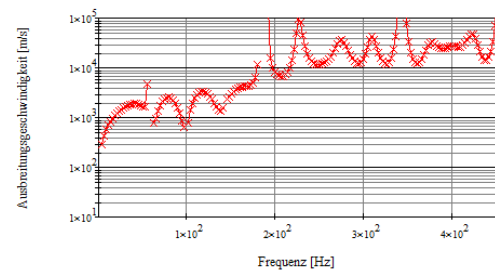
**Abbildung 169:** Darstellung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 393+600, Abschnitt III



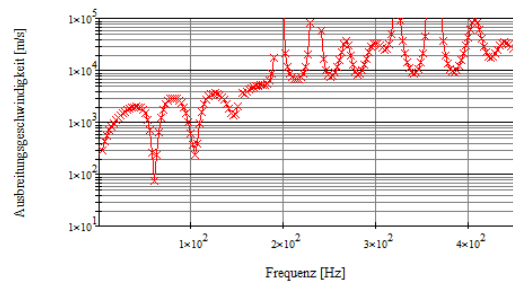
**Abbildung 170:** Darstellung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 391+950, Abschnitt IV



**Abbildung 171:** Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 394+500, Abschnitt II



**Abbildung 172:** Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 393+600, Abschnitt III

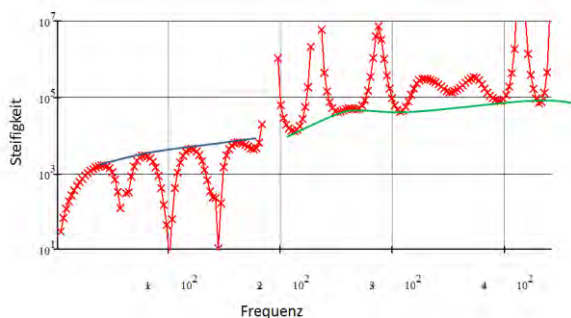


**Abbildung 173:** Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 391+950, Abschnitt IV

Für die im Rahmen des Forschungsprojekts ausgewählten Strecken wurde wie in diesem Kapitel beschrieben eine Schwingungsanalyse durchgeführt. Für die Auswertung der maßgeblichen Pa-

parameter wie Ausbreitungsgeschwindigkeit und Steifigkeit wurden unter Abbildung 167 bis Abbildung 173 erste Verläufe dieser Kenngrößen dargestellt.

Nachfolgend wird ein weiterer Verlauf einer Ausbreitungsgeschwindigkeit für die gesamte Konstruktion der Straßenbefestigung (ungebundene und gebundene Schichten) in Abbildung 174 schematisch dargestellt.



**Abbildung 174:** Schematische Darstellung des Verlaufs einer Ausbreitungsgeschwindigkeit über den ungebundenen (blau) und gebundenen (grün) Bereich der Straßenbefestigung an einem Messpunkt

In der Abbildung ist erkennbar, dass sich die Verläufe der Kurvenabschnitte für die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Frequenzbereich bis ca. 200 Hz nach unten öffnen. Im weiteren Frequenzbereich bis hin zu 450 Hz ist ersichtlich, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit einen parabelförmigen Verlauf annimmt. Diese Unterscheidung kann auf einen „signifikanten“ Materialwechsel – beispielsweise zwischen gebundenem und ungebundenem Bereich – hindeuten. Weiterhin kann festgestellt werden, dass Unstetigkeitsstellen auftreten, welche einen Schicht- bzw. Lagenwechsel innerhalb einer Schicht anzeigen können. Bei der Darstellung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abbildung 174 muss darauf hingewiesen werden, dass für die Errechnung stets eine konstante Temperatur von 20 °C angenommen wurde, obwohl in den verschiedenen Schichten unterschiedliche Temperaturen während der Messungen vorherrschen haben werden.

Für eine erste Auswertung wurden in Abbildung 174 zwei mathematisch nicht definierte Funktionen mit vier Stützstellen eingeführt, um den Steifigkeitsverlauf der ungebundenen (blau) und der gebundenen (grün) Schichten quantitativ darzustellen.

#### 5.4.4.3 Auswertung der gewählten Streckenabschnitte mittels Schwingungsanalyse

Für die detaillierte Auswertung der einzelnen Strecken wird nachfolgend für jede Strecke bzw. jeden

homogenen Abschnitt eine Beurteilung auf Grundlage der errechneten Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Frequenz durchgeführt. Für die Beurteilung der einzelnen – durch das Georadar bestimmten – homogenen Abschnitte wird sich – wie in Kapitel 5.4.4.2 beschrieben – darauf konzentriert, eine Beurteilung bzw. Unterscheidung für die ungebundenen Schichten der Straßenbefestigung in Asphaltbauweise vorzunehmen (vgl. Abbildung 174). Bereits in [SY/AL/RO 1994] wurde ausgeführt, dass es derzeit mit dem Verfahren der Steifigkeitsermittlung über die Wellenausbreitung im Straßenaufbau nicht oder nicht hinreichend genau möglich ist, die Asphaltsschichten des Oberbaus zu bewerten. An den in diesem Forschungsprojekt untersuchten Streckenabschnitten wurde eine Reihe von Messpunkten auch für den Wellenbereich ausgewertet, der sich auf die Asphaltsschichten beziehen muss. Als Ergebnis dieser Anwendungen muss konstatiert werden, dass die Steifigkeitsfunktionen in Abhängigkeit von der Frequenz in den weitaus meisten Fällen im Bereich um 180 Hz den beschriebenen signifikanten Verlaufssprung (Abbildung 174) aufweisen. Der Funktionsverlauf im Frequenzbereich unterhalb dieser Grenze ist zwischen den Messpunkten innerhalb eines Streckenabschnitts in der Regel vergleichbar und steht damit zur Auswertung zur Verfügung. Demgegenüber ist der Funktionsverlauf im Frequenzbereich von etwa 200 Hz an oft im Verlauf zwar ähnlich, jedoch schwer interpretierbar. Da in diesem Bereich zusätzlich die Steifigkeiten über eine große Spannweite streuen, muss von einer Auswertung abgesehen werden. Die Auswertung der Steifigkeiten anhand der Wellengeschwindigkeit beschränkt sich somit auf das bestehende Verfahren für die ungebundenen Befestigungsschichten. Hierfür werden für jeden homogenen Abschnitt zwei Messpunkte zufällig gewählt und ausgewertet. Beide Ergebnisse werden dann zu einem Mittelwert zusammengefasst, der im Weiteren als Bewertungsergebnis für den jeweiligen Abschnitt genutzt wird. Für die Auswertung der Messpunkte wird jeweils der dritte von drei Schlägen des Falling Weight Deflectometers bei einer Kraftgröße von 50 kN verwendet und die sich ergebende Steifigkeits-Frequenz-Funktion allein anhand der Maxima bis zu einer Frequenz von 150 Hz ausgewertet.

#### Versuchsstrecke VS 5

Die Messungen auf der VS 5 zwischen Kilometer 395+500 und Kilometer 388+500 konnten mit dem Falling Weight Deflectometer wie geplant durchgeführt werden, so dass auch die drei Bereiche, in denen Bohrkerne entnommen wurden, mittels Schwingungsanalyse gemessen, geprüft und dargestellt werden können. Dadurch, dass bei den Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer ein Messpunktabstand von 25 bzw. 50 m vorgege-

ben wird, ist eine exakte Übereinstimmung von Messpunkt und dem Ort der Bohrkernentnahme nicht möglich. Tabelle 57 zeigt die exakten Stationen der Messungen und Bohrkernentnahmestellen.

Station der Bohrkernentnahme	Station der Messung mit dem Falling Weight Deflectometer
0+310	0+300
0+790	0+800
6+620	6+600

**Tabelle 57:** Gegenüberstellung der Stationen der Bohrkernentnahme und der Messpunkte mit dem Falling Weight Deflectometer

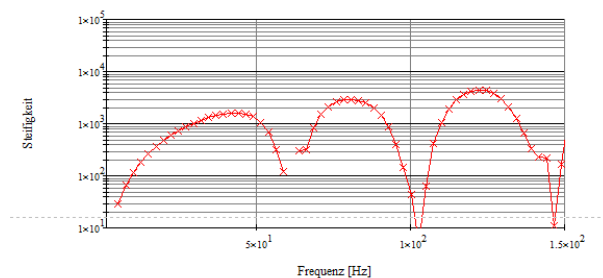
Nachfolgend wird in Abbildung 175 bis Abbildung 177 die Steifigkeits-Frequenz-Funktion in Abhängigkeit von der Frequenz für die Bohrkernentnahmestellen in jedem Bereich grafisch dargestellt. Die jeweils weiteren zwei Messpunkte pro Abschnitt werden graphisch nicht dargestellt, wurden aber bei der Ermittlung der Mittelwerte der Steifigkeiten für jeden Abschnitt selbstverständlich berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 58.

Die Abbildungen der drei exemplarischen Steifigkeits-Frequenz-Funktionen offenbaren, dass mehrere Steifigkeitsmaxima auftreten, die voraussichtlich verschiedenen Lagen einer oder mehrere Schichten ohne Bindemittel zugewiesen werden können. In Abschnitt VII (Abbildung 177) weist die oberste Lage, d.h. der Bereich mit den höchsten Frequenzen, eine deutlich höhere Steifigkeit als die niederfrequenten Bereiche auf. Dieser Sachverhalt, der sich auch an anderen Punkten nachvollziehen ließ, grenzt den Abschnitt VII von den als gleichwertig angesehenen Abschnitten III bis VI ab. Die Abschnitte I und II hingegen werden im Ranking vor Abschnitt VII auf die ersten beiden Ränge platziert.

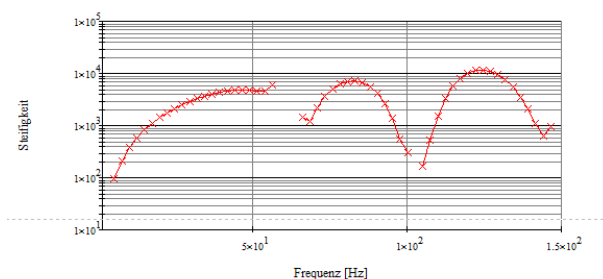
Das sich auf diese Weise ergebende Ranking weist gegenüber dem, das sich aus der Auswertung anhand des Schichtmoduls  $M_0$  ergeben hat (Tabelle 46) Ähnlichkeiten auf. Zwar werden die Abschnitte I und II hier in einer Reihenfolge bewertet, liegen jedoch bei beiden Verfahren auf den Rängen 1 und 2. Die Abschnitte III bis VI werden übereinstimmend als die schlechtesten Abschnitte der Strecke detektiert. Die Wellenauswertung weist

dem Abschnitt VII einen gegenüber diesen Abschnitten etwas besseren Rang zu, während sie anhand des Schichtmoduls in die Gruppe der Abschnitte III bis VI integriert wird.

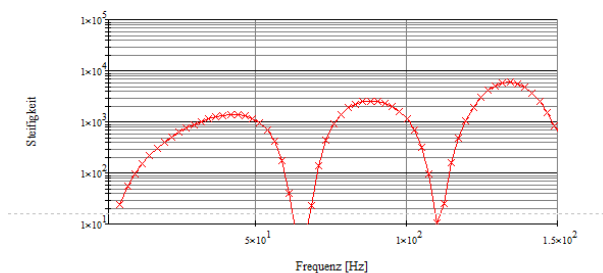
In Tabelle 58 sind wiederum auch die Schichtmoduli  $M_0$ , die aus den gleichen Messungen resultieren, mit aufgeführt.



**Abbildung 175:** Darstellung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 0+300, Abschnitt I



**Abbildung 176:** Darstellung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 0+800, Abschnitt II



**Abbildung 177:** Darstellung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 5, Station 6+600, Abschnitt VII

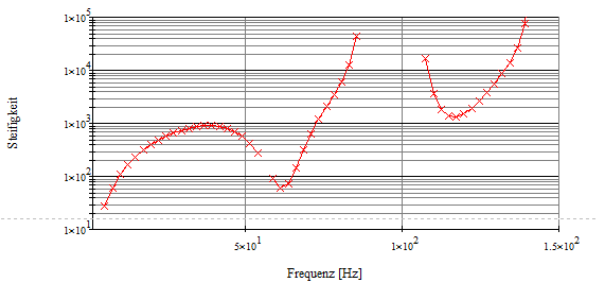
	Abschnitt						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
S-Modul $M_0$	391	403	255	288	270	323	353
Steifigkeit	4.662*	3.937*	2.970	3.100	3.133	3.216	3.541*

Ranking	1	2	4	3
---------	---	---	---	---

**Tabelle 58:** Zusammenfassende Darstellung der mittels Schwingungsanalyse ermittelten Steifigkeiten (MPa) der ungebundenen Befestigungsschichten in den Abschnitten auf der VS 5

**Versuchsstrecke VS 6**

Auf der VS 6 konnte – wie in Kapitel 5.4.3 bereits beschrieben – lediglich eine Strecke von 5.200 m mit dem FWD gemessen werden, so dass eine wellendynamische Auswertung an der Bohrkernentnahmestelle (Station 5+500) nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurde für die wellendynamische Beurteilung des Abschnitts 3 die Station 5+150 als Grundlage gewählt. Die Steifigkeiten der ungebundenen Schichten sind in Abhängigkeit von der Frequenz in Abbildung 178 grafisch dargestellt.



**Abbildung 178:** Darstellung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 6, Station 5+150, Abschnitt III

Für die nachfolgende Auswertung der Schichten ohne Bindemittel wurden für den Abschnitt I und II jeweils zwei und für Abschnitt III drei Messpunkte ausgewählt, analysiert und die resultierenden Steifigkeiten an den verschiedenen Messpunkten zu einem Mittelwert verrechnet. Anhand dieser Mittelwerte wurde das in \* incl. Bohrkernentnahmen

Tabelle 59 dargestellte Ranking der betrachteten homogenen Abschnitte erstellt.

	Abschnitt		
	I	II	III
S-Modul $M_0$	606	602	534
Steifigkeit	3.830	6.125	1.000*
Ranking	2	1	3

\* incl. Bohrkernentnahmen

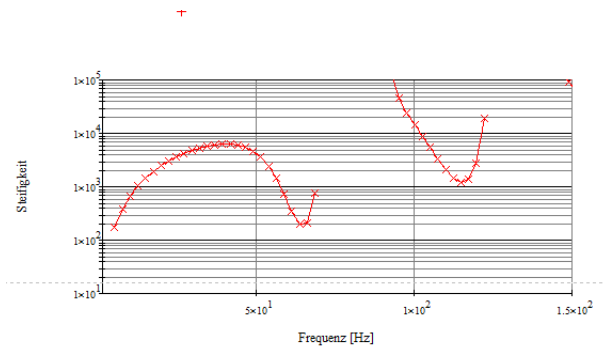
**Tabelle 59:** Zusammenfassende Darstellung der mittels Schwingungsanalyse ermittelten Steifigkeiten (MPa) der ungebundenen Befestigungsschichten in den Abschnitten auf der VS 6

Ein Vergleich dieses Ranking mit dem, das sich auf der Grundlage des ebenfalls die tieferen Schichten der Straßenbefestigung beschreibenden Schichtmoduls  $M_0$  ergibt (Tabelle 50), offenbart deutliche Unterschiede. So wird der Abschnitt III hinsichtlich des Schichtmoduls auf Rang 1 und Abschnitt II auf den schlechteren Rang platziert. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Werte im Abschnitt I deutlichen Schwankungen unterliegen und somit die hier durchgeführte Auswertung an nur wenigen Messpunkten nicht repräsentativ für den Abschnitt sein kann. In \* incl. Bohrkernentnahmen

Tabelle 59 sind deshalb auch die sich jeweils aus den gleichen Messungen ergebenden Schichtmoduli  $M_0$  mit angegeben. Ein direkter Vergleich mit diesen lässt zwar Abschnitt III in beiden Auswertungen als den schlechtesten erkennen, zeigt für die beiden anderen Abschnitte jedoch kein einheitliches Bild.

**Versuchsstrecke VS 7**

Ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Auswertungen wird bei der VS 7 unter Berücksichtigung der homogenen Abschnittsgrenzen, die sich auf Grundlage der Messungen mit dem Georadar ergaben, die Auswertung der Schwingungsanalyse (Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz) für die Bohrkernentnahmestelle in einem ersten Schritt bis zu einer Frequenz von 150 Hz grafisch dargestellt (Abbildung 179).



**Abbildung 179:** Darstellung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz auf der VS 7, Station 2+800, Abschnitt II

Zusätzlich zu dem sich in Abschnitt II befindlichen Messpunkt der Bohrkernentnahme wurden für jeden homogenen Abschnitt zwei Messpunkte als Grundlage für die Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Steifigkeit gewählt. Die sich auf Basis der Ausbrei-

tungsgeschwindigkeiten ergebenden Steifigkeiten sind in Tabelle 60 abschnittsweise dargestellt.

Wie schon für die VS 6 ergibt sich auch hier ein gegenüber der Auswertung hinsichtlich des Schichtmoduls  $M_0$  unterschiedliches Bild, das sich einer globalen Bewertung entzieht. Beide Verfahren ermitteln hier unterschiedliche Ergebnisse, die an dieser Stelle nicht mit den real vor Ort tatsächlich vorliegenden Materialkennwerten abgeglichen

werden können. Da es sich bei den Ergebnissen aus der Auswertung der Wellenausbreitung jedoch um Mittelwerte aus nur wenigen Einzelwerten handelt, wurden in Tabelle 60 wiederum auch die Schichtmoduli  $M_0$  an den gleichen Messpunkten mit aufgeführt. Diese bestätigen die Ergebnisse der Wellenauswertung in vier der betrachteten 5 Abschnitte.

	Abschnitt				
	I	II	III	IV	V
S-Modul $M_0$	953	1.424	1.004	632	844
Steifigkeit	3.687	4.750	4.666	3.600	3.166
Ranking	2	1		2	3

**Tabelle 60:** Zusammenfassende Darstellung der mittels Schwingungsanalyse ermittelten Steifigkeiten der ungebundenen Befestigungsschichten in den Abschnitten auf der VS 7

Nach den einzelnen Auswertungen des Falling Weight Deflectometers auf Straßenbefestigungen in Asphalt- und Betonbauweise, kann an dieser Stelle festgestellt werden, dass die durch die visuelle Begehung detektierten einzelnen homogenen Abschnitte durch die Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer stellenweise nachgewiesen werden konnten. Im Rahmen der Schwingungsauswertung kann zu diesem Sachverhalt keine Einschätzung vorgenommen werden, da die Auswertung der Schwingung nur an einzelnen Punkten vorgenommen wurde und dies keine repräsentative Wirkung der gesamten Messstrecke bzw. der einzelnen Abschnitte darstellen kann.

Dabei sei an dieser Stelle, dass es für die Auswertung der Messungen hinsichtlich der Schwingungsanalyse noch kein automatisierter Auswertesoftware vorliegt, was einen erheblich zeitlichen Aufwand bei der Auswertung bedeutet.

- Baujahr 1986
- Länge 4,86 km

Das unterschiedliche Alter der Versuchsstrecken hat zur Folge, dass die Art und Anzahl der erfassten Zustandsmerkmale sowie deren Ausprägung große Unterschiede aufweisen.

## 6.2 Bildung homogener Abschnitte je Einzelmerkmal

### 6.2.1 Allgemeines

Ausgehend von den substanzrelevanten Zustandsmerkmalen der ZEB und den Detektionen aus den Georadarmessungen sind je Einzelmerkmal homogene Abschnitte gebildet worden. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der visuellen Zustandserfassung konnten die Ergebnisse der ZEB mit ihren 100m-Mittelwerten und die Ergebnisse der Georadarmessungen präzisiert werden.

### 6.2.2 Analysen für VS 1

Bei der VS 1 handelt es sich um den jüngsten in die Untersuchungen einbezogenen Streckenabschnitt. Entsprechend gering waren die im Rahmen der ZEB, der Georadarmessung und der visuellen Zustandsaufnahme erfassten Schädigungen. Das Streckenband in Anhang 1 verdeutlicht dies.

Entsprechend der Aufgabenstellung konnte in die weitere Betrachtung nur das Zustandsmerkmal Kantenschäden ZWKAS aus der ZEB einbezogen werden. Die Schadensausprägung reicht jedoch nicht aus, um nach [FGSV 431] unterschiedliche homogener Abschnitte bilden zu können.

Aushilfsweise konnte eine Abschnittsbildung nur aus Spaltzugfestigkeiten von Bohrkernen durchgeführt werden, die zu Kontrollprüfungszwecken gezogen wurden (Abbildung 180).

## 6 Analyse der Betonstrecken

### 6.1 Allgemeines

Neben den drei Betonstrecken VS 2 bis VS 4 aus dem [FE 04.433/2009/DGB] wurde mit VS 1 ein Streckenabschnitt in die Untersuchungen einbezogen, dessen Alter zum Zeitpunkt der Erfassung der Zustandsmerkmale vier Jahre betrug. Das Alter der Versuchsstrecken lag somit zwischen 4 und 26 Jahren und deren Länge zwischen ~ 5 und 13 km:

- Versuchsstrecke VS 1
  - Baujahr 2008
  - Länge 10,4 km
- Versuchsstrecke VS 2
  - Baujahr 1996
  - Länge 13,185 km
- Versuchsstrecke VS 3
  - Baujahr 1998
  - Länge 10,73 km
- Versuchsstrecke VS 4

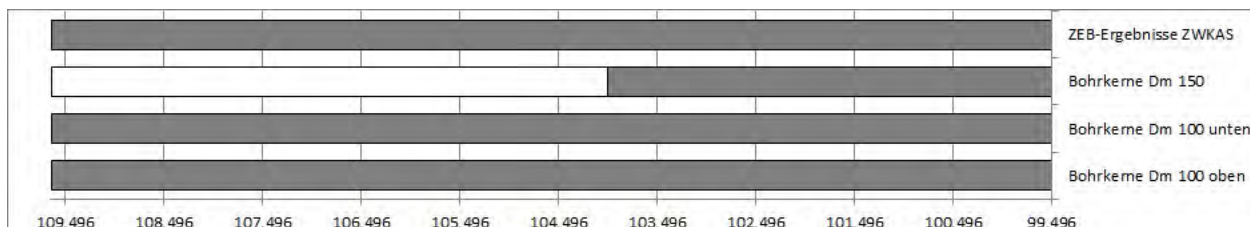


Abbildung 180: Homogene Abschnitte je Einzelmerkmal auf der VS 1

### 6.2.3 Analysen für VS 2

Die VS 2 weist bei einem Alter von 16 Jahren z.T. erhebliche Schädigungen an der Fahrbahnoberfläche und den darunter liegenden Schichten auf.

Die unterschiedliche Merkmalsausprägung sowohl der ZEB-Ergebnisse als auch der Ergebnisse aus visueller Zustandsaufnahme und Georadarmessung ermöglichte die Bildung homogener Abschnitte für folgende Einzelmerkmale:

- Zustandswert Längs- und Querrisse ZWLQR aus der ZEB
- Rissbildungen aus der visuellen Zustandsaufnahme
- Verlauf der unteren Schichtgrenze aus der Georadarmessung
- Verlauf der Unterkante der Betondecke aus der Georadarmessung

- Inhomogenitäten aus der Georadarmessung

Die Prüfung der Messergebnisse nach [FGSV 431] ließ bei 4 der 5 Merkmale die Bildung von mehreren homogenen Unterabschnitten zu (Abbildung 181).

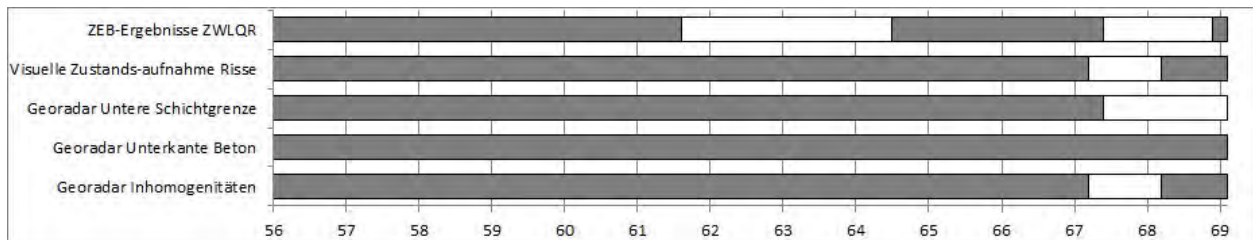


Abbildung 181: Homogene Abschnitte je Einzelmerkmal auf der VS 2

### 6.2.4 Analysen für VS 3

Auch die VS 3 bietet für die Bildung homogener Abschnitte „gute“ Voraussetzungen im Hinblick auf die detektierten Schadensmerkmale an der Fahrbahnoberfläche und den darunter liegenden Schichten.

ZEB-Ergebnisse, Ergebnisse aus visueller Zustandsaufnahme und Ergebnisse der Georadarmessung ermöglichte die Bildung homogener Abschnitte für folgende Einzelmerkmale:

- Zustandswert Längs- und Querrisse ZWLQR aus der ZEB
- Rissbildungen aus der visuellen Zustandsaufnahme
- Absenkungen unterhalb der Betondecke aus der Georadarmessung
- Feuchtebereiche aus der Georadarmessung
- Inhomogenitäten aus der Georadarmessung

Die Prüfung der Messergebnisse nach [FGSV 431] ließ auch hier bei vier der fünf Merkmale die Bildung von mehreren homogenen Unterabschnitten zu (Abbildung 182).

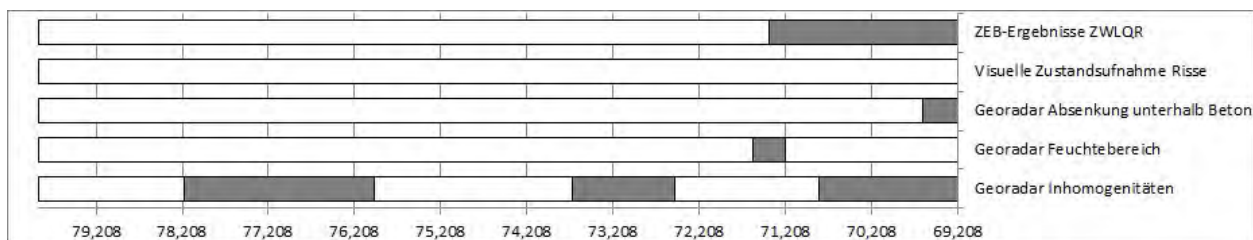


Abbildung 182: Homogene Abschnitte je Einzelmerkmal auf der VS 3

### 6.2.5 Analysen für VS 4

Die VS 4 hat von Betriebskilometer 82,2 bis 85,67 eine Decke aus Beton mit eingelagerten Metallfasern. Eine Untersuchung des Schichtenaufbaus mittels Georadar ist wegen der Störsignale der Metallfasern in diesem Bereich nicht möglich und führt bei Betriebskilometer 85,665 zwangsläufig für die vom Georadar erfassten Merkmale zu Grenzen homogener Abschnitte. Das Merkmal ist als auffälliger Aufbau oberflächennah in die Ergebnisse der Georadarmessung eingegangen.

ZEB-Ergebnisse, Ergebnisse aus visueller Zustandsaufnahme und Ergebnisse der Georadar-

messung ermöglichte die Bildung homogener Abschnitte für die Einzelmerkmale:

- Zustandswert Längs- und Querrisse ZWLQR aus der ZEB
- Zustandswert Kantenschäden ZWKAS aus der ZEB
- Rissbildungen aus der visuellen Zustandsaufnahme
- Auffälliger Aufbau oberflächennah aus der Georadarmessung
- Absenkungen unterhalb der Betondecke aus der Georadarmessung
- Inhomogenitäten aus der Georadarmessung
- Zweite Schichtgrenze aus der Georadarmessung

Die Prüfung der Messergebnisse nach [FGSV 431] ließ auch hier bei sechs der sieben Merkmale die

Bildung von mehreren homogenen Unterabschnitten zu (Abbildung 183).

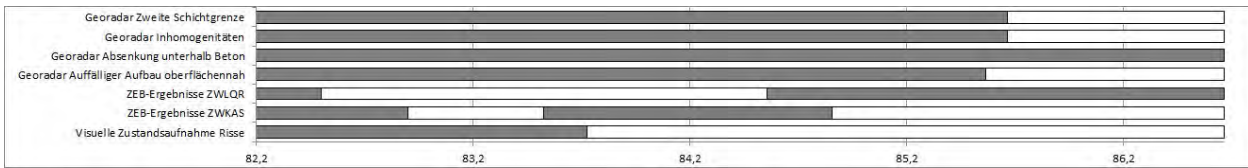


Abbildung 183: Homogene Abschnitte je Einzelmerkmal auf der VS 4

### 6.3 Bildung übergeordneter homogener Abschnitte

einheitlich guten Messergebnisse eine Bildung übergeordneter homogener Abschnitte allein aus der Spaltzugfestigkeit (Abbildung 184) sehr unsicher erscheint.

#### 6.3.1 Analysen für VS 1

Der Zustand der Betonfahrbahn befindet sich in einem sehr guten Zustand, so dass wegen der

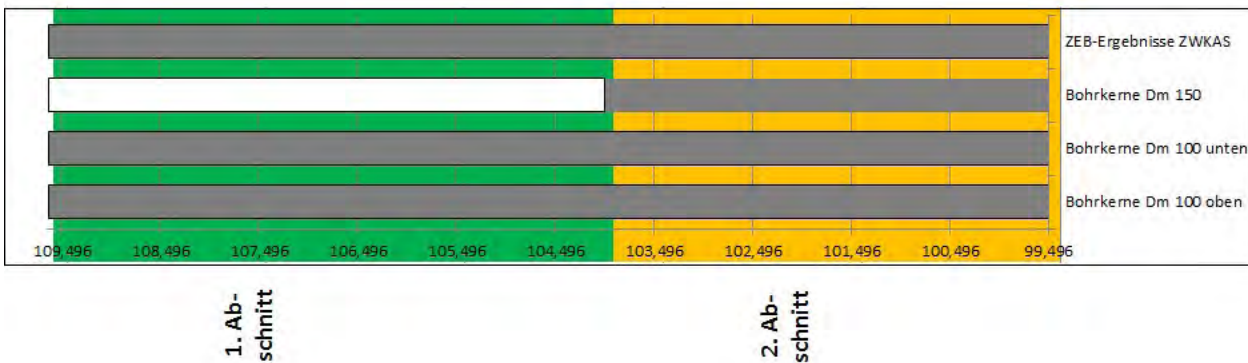


Abbildung 184: Übergeordnete homogene Abschnitte auf der VS 1

#### 6.3.2 Analysen für VS 2

Auf der VS 2 deutet die Mehrzahl der in die Bildung homogener Abschnitte einbezogenen Merkmale darauf hin, dass sich sowohl bei Betriebskilometer 67,2 als auch bei Betriebskilometer 68,2 markante Grenzen zwischen homogenen Abschnitten befinden.

Die Wichtung der einzelnen homogenen Abschnitte erfolgte wegen der hohen Erfassungsgenauigkeit zugunsten der visuellen Erfassung des Oberflächenbildes gegenüber der ZEB. Die streckenbezogene Übereinstimmung mit den homogenen Abschnitten des Merkmals Inhomogenitäten der Georadar-Messung wurde als signifikant eingestuft, so dass es zur Bildung von drei übergeordneten homogenen Abschnitten kam (Abbildung 185).

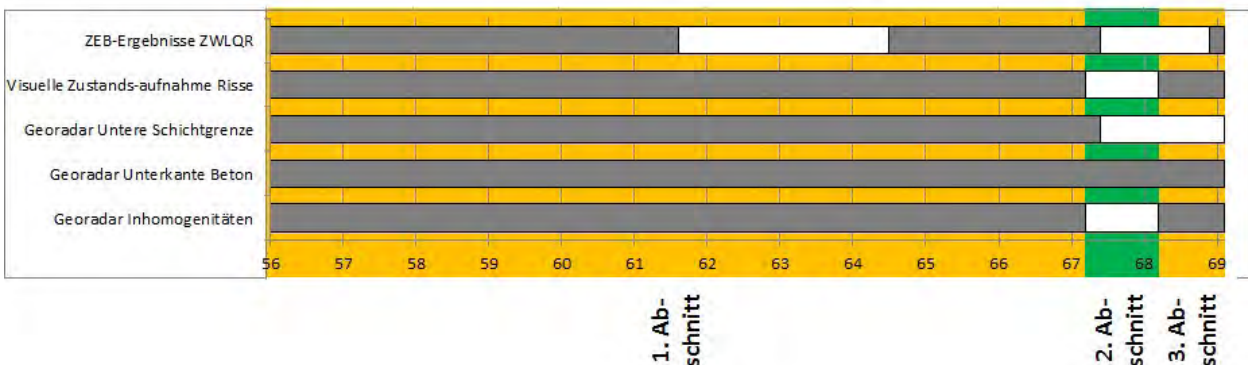


Abbildung 185: Übergeordnete homogene Abschnitte auf der VS 2

6.3.3 Analysen für VS 3

Die VS 3 bietet gegenüber der VS 2 ein weniger einheitliches Bild. Jedes Einzelmerkmal hat nach [FGSV 431] Abschnittsgrenzen, die untereinander örtlich weit voneinander entfernt liegen.

Die Wichtung der Einzelmerkmale erfolgte hier in Richtung der mittels Georadar festgestellte Inhomogenitäten, so dass angenommen wird, dass bei Betriebskilometer 78,2 und 73,5 übergeordnete Grenzen homogener Abschnitte liegen könnten (Abbildung 186).

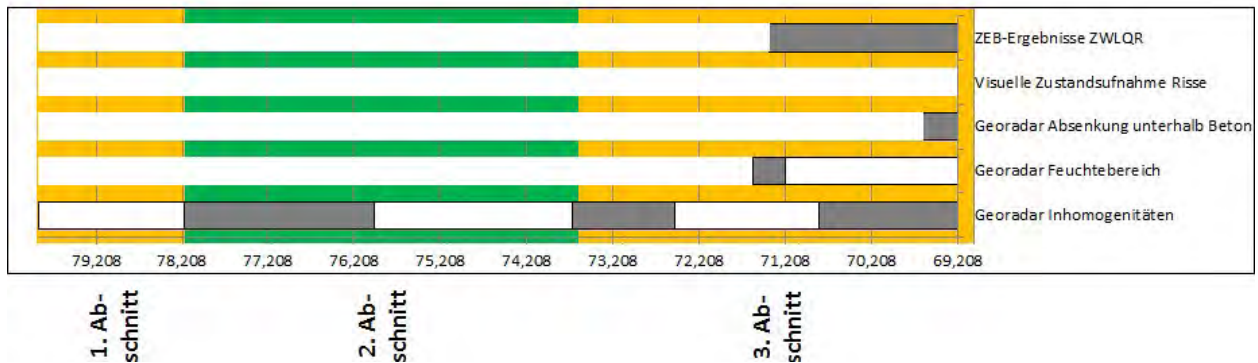


Abbildung 186: Übergeordnete homogene Abschnitte auf der VS 3

6.3.4 Analysen für VS 4

Der unter Kapitel 6.2.4 beschriebene Aufbau der Betondecke hat zur Folge, dass bei Betriebskilometer 85,67 eine markante Grenze von überge-

ordneten homogenen Abschnitten bestehen könnte.

Die Wichtung der erfassten Merkmale zugunsten der visuell erfassten Risse markiert eine zweite Grenze übergeordneter homogener Abschnitte bei Betriebskilometer 82,6 (Abbildung 187).

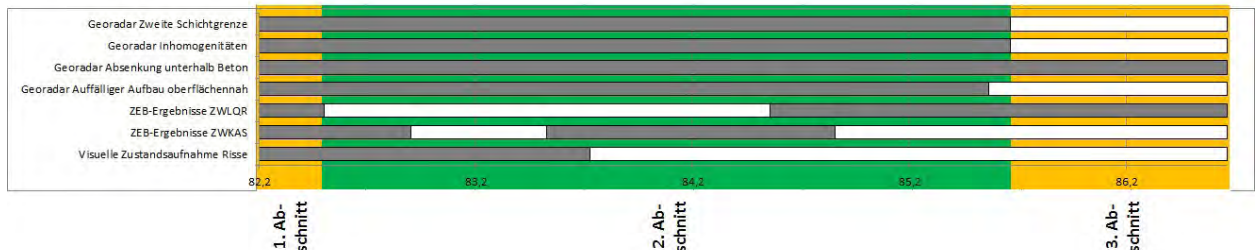


Abbildung 187: Übergeordnete homogene Abschnitte auf der VS 4

6.4 Untersuchung der Bildung homogener Abschnitte anhand der Ergebnisse der FWD-Messungen

Die Grenzen zwischen den übergeordneten homogenen Abschnitten I und II werden nach den Ergebnissen in Kapitel 5.4.1 für die Verformungen  $D_0$ , Fugenbewegung  $f$  und den Wirksamkeitsindex  $W$  mehrheitlich nicht bestätigt. Die angenommenen Grenzen zwischen den übergeordneten homogenen Abschnitten II und III werden jedoch in zwei von drei Fällen bestätigt.

6.4.1 Analysen für VS 1

VS 1 bot wegen des Fehlens oder der Zweifelhafigkeit von homogenen Abschnitten (siehe Kapitel 6.3.1) die Möglichkeit zu testen, ob willkürlich angenommene Grenzen übergeordneter homogener Abschnitte eine Bestätigung durch FWD-Messungen erhalten. Fiktive Abschnittsgrenzen wurden bei Betriebskilometer 106,1 und 105,0 angenommen.

6.4.2 Analysen für VS 2

VS 2 bot wegen der ausgeprägten Schadensentwicklung und der daraus resultierenden Bildung übergeordneter homogener Abschnitte eine gute Möglichkeit, um die gebildeten Abschnittsgrenzen zu testen.

Sowohl bei den Verformungen  $D_0$ , der Fugenbewegung  $f$  und dem Wirksamkeitsindex  $W$  wird die Grenze zwischen den homogenen Abschnitten I und II bestätigt. Die Abschnitte II und III hingegen werden eindeutig als zusammengehörig detektiert, die Existenz der Grenze zwischen den homogenen Abschnitten wird durch die Kennwerte der Tragfähigkeit widerlegt.

### 6.4.3 Analysen für VS 3

Trotz der insgesamt in größerem Umfang festgestellten Schadensausprägungen ergab sich kein einheitliches Bild hinsichtlich der Überlagerung von Abschnittsgrenzen einzelner Merkmale, so dass die Wichtung den Ausschlag zugunsten der mittels Georadar festgestellten Inhomogenitäten gab.

In Kapitel 5.4.1 ist dargelegt worden, dass die Existenz der homogenen Grenzen grundsätzlich statistisch nachgewiesen wurde, aber sich die Grenzen teilweise aufgrund unterschiedlicher Kennwerte ergeben.

### 6.4.4 Analysen für VS 4

Die Ergebnisse in Kapitel 5.4.1 belegen, dass sowohl hinsichtlich der relativen Fugenbewegung als auch hinsichtlich des Wirksamkeitsindex keine übergeordneten homogenen Abschnitte bestätigt werden konnten.

Bei den Verformungen in Plattenmitte ( $D_0$ ) konnten die Grenzen zwischen den übergeordneten homogenen Abschnitten bestätigt werden.

## 6.5 Untersuchung der Ergebnisse mithilfe von punktuellen Substanzwerten

### 6.5.1 Allgemeines

Im Rahmen des parallel laufenden FE-Vorhabens [FE 04.0433/2009/DGB] wurden pro untersuchtem Streckenabschnitt jeweils zwei Entnahmestellen ausgewählt, an denen jeweils zehn Bohrkerne  $\varnothing 100$  entsprechend Entnahmeschema in Abbildung 188 entnommen wurden. Ein Teil der Bohrkerne wurde zur Bestimmung der statischen Spaltzugfestigkeit zum Bewertungszeitpunkt verwendet. Die restlichen Bohrkerne wurden im Labor durch eine Spaltzugschwellbeanspruchung weiter belastet. Nach einer definierten Anzahl von Lastwechseln wurde an diesen Probekörpern die Spaltzugfestigkeit nach ertragener Schwellbelastung bestimmt. Bei allen Versuchen wurden Bohrkernscheiben aus den gewonnenen Bohrkernen verwendet, die gemäß [AI Sp-Beton06] erzeugt wurden

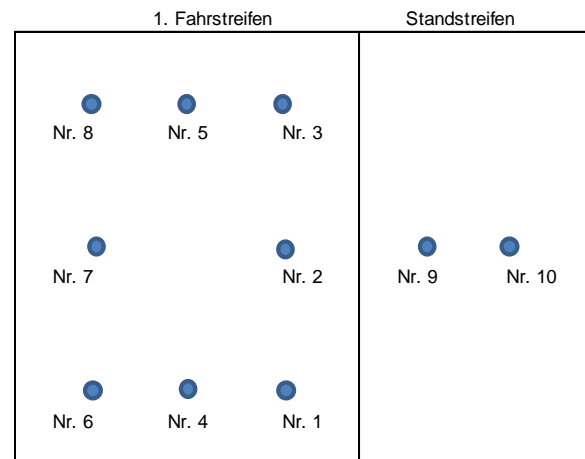


Abbildung 188: Bohrkernentnahmeschema

Im Rahmen des Forschungsprojektes FE 04.0249/2011/FGB war eine Prognose der Restnutzungsdauer nur möglich, da in Abstimmung mit dem Forschungsgeber auf die Untersuchungsergebnisse von FE 04.0433/2009/DGB zurückgegriffen werden konnte.

Zur Ermittlung der Restnutzungsdauer wurde das Programm AWDSTAKO Version 1.7 eingesetzt. Unter der weiteren Verwendung eines heuristischen Modells war es möglich, die Anzahl von ertragbaren Lastwechseln bis zum Eintritt einer definierten Ausfallrate rechnerisch abschätzen zu können.

In Überlagerung mit Verkehrsprognosen und den daraus abgeleiteten zukünftig prognostizierten Lastwechseln kann der zugehörige Zeitraum als Restnutzungsdauer abgeleitet werden.

Für die Untersuchung der ermittelten repräsentativen homogenen Abschnitte werden hier jedoch nur die ermittelten Spaltzugfestigkeiten herangezogen.

Die Ergebnisse der punktuellen Substanzwerte können dem Bericht FE 04.0433/2009/DGB entnommen werden.

### 6.5.2 Analysen für VS 1

Im Verlauf der Versuchsstrecke VS 1 wurden insgesamt an zwei Entnahmestationen jeweils zehn Bohrkerne entnommen.

Die Entnahmestationen liegen bei Betriebs-km 105+035 (Platten-Nr. 1252) und 106+070 (Platten-Nr. 1459).

Die Abbildung 189 zeigt die Lage der Platten mit Bezug auf die übergeordneten homogenen Abschnitte.

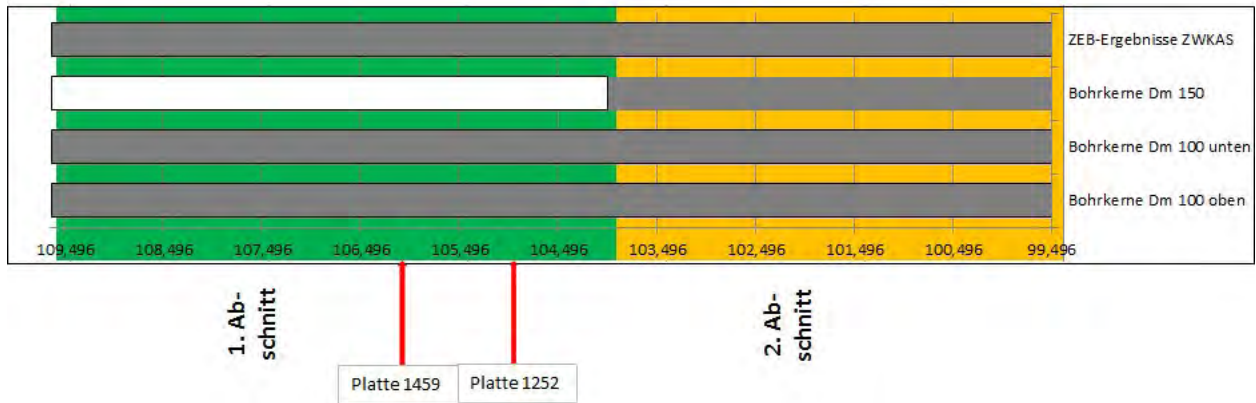


Abbildung 189: Lage der Entnahmestationen VS 1

Die Versuchsstrecke VS 1 ist, wie bereits in vorangegangenen Punkten beschrieben, anhand von ZEB-Werten, visueller Zustandserfassung und Georadaruntersuchungen nicht in mehrere übergeordnete homogene Abschnitte einteilbar. Eine Differenzierung in gegebenenfalls zwei Abschnitte ist allein aufgrund von zu Kontrollprüfungszwecken gezogenen Bohrkernen Ø 150 möglich. Danach würden beide Entnahmestellen im ersten Abschnitt liegen. Die mittleren Spaltzugfestigkeitswerte als auch die Druckfestigkeitswerte liegen in etwa im gleichen Niveau (Tabelle 61), so dass die bis dahin getroffenen Annahmen nicht widerlegt werden. Eine Bestätigung der dargestellten etwaigen Abschnittsgrenze ist jedoch in diesem Fall nicht möglich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der untersuchte Streckenabschnitt der VS 1 aufgrund seines relativ jungen Alters, seiner nahezu vorhandenen Schadensfreiheit an der Oberfläche sowie seiner homogenen Deckendicke und Auflagerung der Decke keine Abschnittsbildung zulässt. Die vorgenommenen FWD-Messungen und Ergebnisse aus Bohrkernentnahmen widerlegen diese These nicht.

### 6.5.3 Analysen für VS 2

Im Verlauf der Versuchsstrecke VS 2 wurden ebenfalls insgesamt an 2 Entnahmestationen jeweils 10 Bohrkern entnommen.

Die Entnahmestationen liegen bei Betriebs-km 67+166 (Platten-Nr. 377) und 68+165 (Platten-Nr. 187).

Die Abbildung 190 zeigt die Lage der Platten mit Bezug auf die übergeordneten homogenen Abschnitte.

BAB	Bohrkernentnahme Homogener Abschnitt 1					Abschnittsgrenze
	km	Platte	Spaltzug oben [N/mm <sup>2</sup> ]	Spaltzug unten [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	km
VS 1	106,070	1459	5,70	5,40	68,00	104,00
	105,035	1252	4,60	5,00	60,00	

Tabelle 61: Zuordnung der Ergebnisse an Bohrkernen zu homogenen Abschnitten VS 1

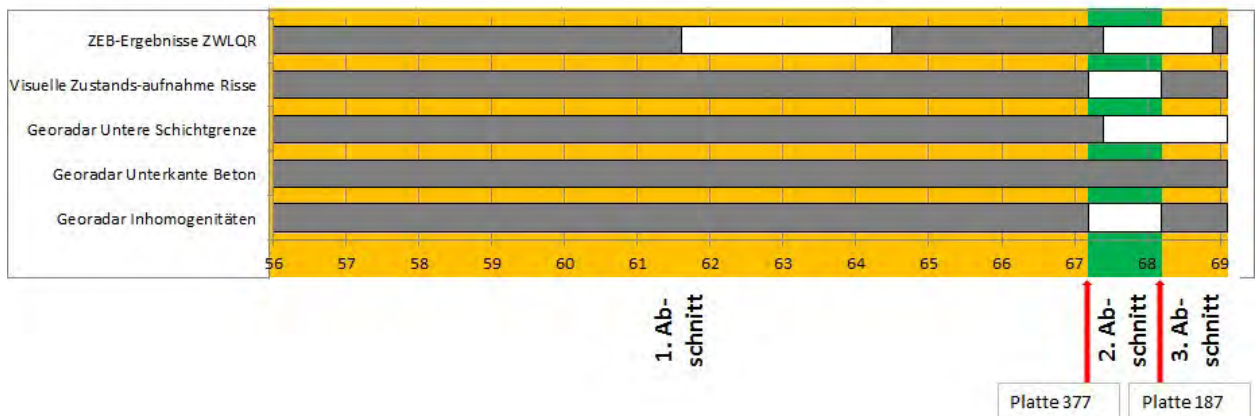


Abbildung 190: Lage der Entnahmestationen VS 2

Es ist gut zu erkennen, dass die Entnahmestationen jeweils an den Grenzen der

übergeordneten homogenen Abschnitte liegen, Platte 377 im ersten Abschnitt zum zweiten Ab-

schnitt und Platte 187 im zweiten Abschnitt zum dritten Abschnitt.

Die mittleren Spaltzugfestigkeitswerte als auch die Druckfestigkeitswerte liegen auf unterschiedlichem Niveau (Tabelle 62), so dass die bis dahin getroffenen Annahmen nicht widerlegt werden. Eine Bestätigung der dargestellten etwaigen Abschnittsgrenzen ist in diesem Fall möglich.

BAB	Bohrkernentnahme Homogener Abschnitt 1					Abschnittsgrenze km
	km	Platte	Spaltzug oben [N/mm <sup>2</sup> ]	Spaltzug unten [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	67,166	377	6,90	7,10	78,50	67,20
VS 2	Bohrkernentnahme Homogener Abschnitt 2					Abschnittsgrenze km
	km	Platte	Spaltzug oben [N/mm <sup>2</sup> ]	Spaltzug unten [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	68,165	187	5,00	6,20	62,20	68,20

**Tabelle 62:** Zuordnung der Ergebnisse an Bohrkernen zu homogenen Abschnitten VS 2

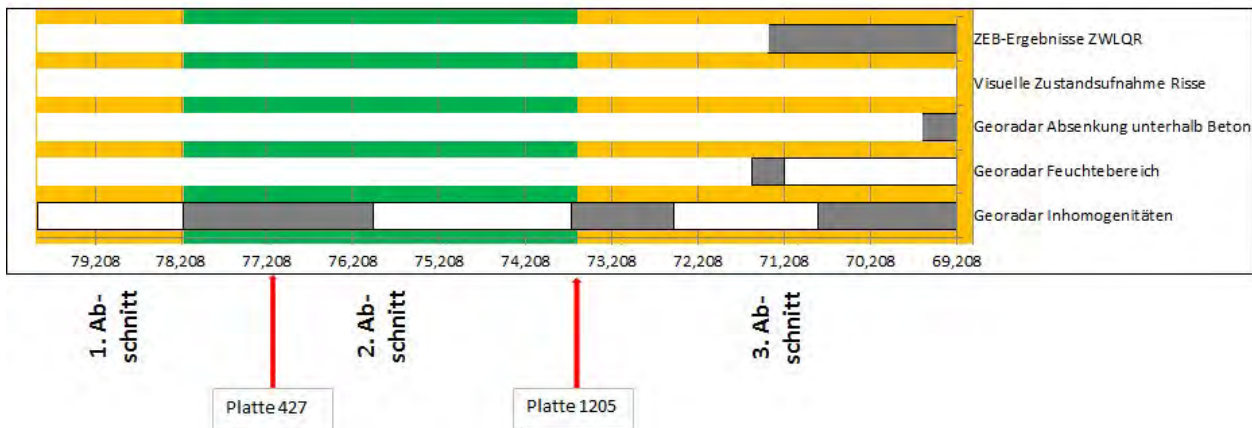
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Versuchsstrecke VS 2 aufgrund der ZEB-Ergebnisse, der visuellen Zustandsaufnahme und Georadar-Auswertungen in drei übergeordnete homogene Abschnitte eingeteilt werden kann. Die Ergebnisse aus Bohrkernentnahmen bestätigen diese These.

**6.5.4 Analysen für VS 3**

Im Verlauf der Versuchsstrecke VS 3 wurden insgesamt an 2 Entnahmestationen jeweils 10 Bohrkern entnommen.

Die Entnahmestationen liegen bei Betriebs-km 77+195 (Platten-Nr. 427) und 73+445 (Platten-Nr. 1205).

Die Abbildung 191 zeigt die Lage der Platten mit Bezug auf die übergeordneten homogenen Abschnitte.



**Abbildung 191:** Lage der Entnahmestationen VS 3

Es ist gut zu erkennen, dass die erste Entnahmestation im zweiten übergeordneten homogenen Abschnitt und die zweite Entnahmestation im dritten übergeordneten homogenen Abschnitt an der Grenze zum zweiten Abschnitt liegen.

Die mittleren Spaltzugfestigkeitswerte als auch die Druckfestigkeitswerte zeigen ein unterschiedliches Niveau (Tabelle 63), so dass die bis dahin getroffenen Annahmen weder widerlegt noch bestätigt werden können. Die dargestellten etwaigen Abschnittsgrenzen sind in diesem Fall durch die Untersuchungen an Bohrkernen nicht verifizierbar.

BAB	Bohrkernentnahme Homogener Abschnitt 2					Abschnittsgrenze km
	km	Platte	Spaltzug oben [N/mm <sup>2</sup> ]	Spaltzug unten [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	77,195	427	4,20	6,30	76,80	78,20
VS 3	Bohrkernentnahme Homogener Abschnitt 3					Abschnittsgrenze km
	km	Platte	Spaltzug oben [N/mm <sup>2</sup> ]	Spaltzug unten [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	73,445	1205	4,70	5,50	67,90	73,50

**Tabelle 63:** Zuordnung der Ergebnisse an Bohrkernen zu homogenen Abschnitten VS 3

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Versuchsstrecke 3 aufgrund der ZEB-Ergebnisse, der visuellen Zustandsaufnahme und Georadar-Auswertungen in drei übergeordnete homogene Abschnitte eingeteilt werden kann. Die Ergebnisse aus Bohrkernentnahmen können diese These weder bestätigen noch widerlegen.

### 6.5.5 Analysen für VS 4

Im Verlauf der Versuchsstrecke VS 4 wurden ebenfalls insgesamt an 2 Entnahmestationen jeweils 10 Bohrkern entnommen.

Die Entnahmestationen liegen bei Betriebs-km 82+066 (Platten-Nr. 1093) und 85+085 (Platten-Nr. 5001).

Die Abbildung 192 zeigt die Lage der Platten mit Bezug auf die übergeordneten homogenen Abschnitte.

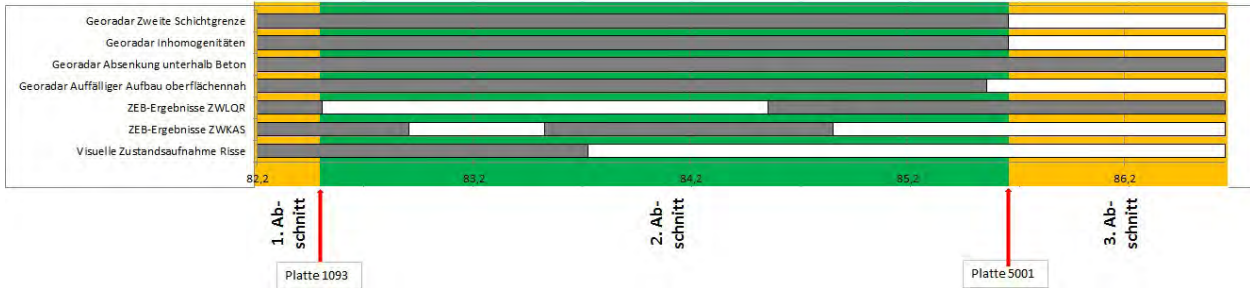


Abbildung 192: Lage der Entnahmestationen VS 4

Es ist gut zu erkennen, dass die Entnahmestationen jeweils an den Grenzen der übergeordneten homogenen Abschnitte liegen, Platte 1093 im zweiten Abschnitt zum ersten Abschnitt und Platte 5001 im dritten Abschnitt zum zweiten Abschnitt.

Die mittleren Spaltzugfestigkeitswerte als auch die Druckfestigkeitswerte liegen auf unterschiedlichem Niveau (Tabelle 64), so dass die bis dahin getroffenen Annahmen nicht widerlegt werden. Eine Bestätigung der dargestellten etwaigen Abschnittsgrenzen ist in diesem Fall möglich.

BAB	Bohrkernentnahme Homogener Abschnitt 2					Abschnittsgrenze
	km	Platte	Spaltzug oben [N/mm <sup>2</sup> ]	Spaltzug unten [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	km
VS 4	82,66	1093	6,30	6,10	90,20	82,60
	Bohrkernentnahme Homogener Abschnitt 3					Abschnittsgrenze
	km	Platte	Spaltzug oben [N/mm <sup>2</sup> ]	Spaltzug unten [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	km
	85,85	5001	5,60	5,20	72,00	85,67

Tabelle 64: Zuordnung der Ergebnisse an Bohrkernen zu homogenen Abschnitten VS 4

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Versuchsstrecke 4 aufgrund der ZEB-Ergebnisse, der visuellen Zustandsaufnahme und Georadar-Auswertungen in drei übergeordnete homogene Abschnitte eingeteilt werden kann. Die Ergebnisse aus Bohrkernentnahmen bestätigen diese These.

## 7 Analyse der Asphaltstrecken

### 7.1 Allgemeines

Neben den zuvor beschriebenen Beton-Bereichen wurden weitere drei Versuchsstrecken in Asphaltbauweise im Rahmen des Forschungsthemas FE 04.0249 untersucht (siehe auch Kapitel 3). Die Streckenabschnitte entsprechen der Asphaltbauweise auf hydraulisch gebundener Tragschicht Bauklassen SV bis II gemäß [RStO 86/89] (Tafel 1, Asphaltbauweise auf HGT). Zum Zeitpunkt der Untersuchungen betrug das Alter der untersten Asphalttragschichten jeweils mindestens 15 Jahre:

- Versuchsstrecke VS 4
  - Baujahr: 1980
  - bisher ertragene B-Zahl: ca. 62 Mio.
- Versuchsstrecke VS 5
  - Baujahr: 1996
  - bisher ertragene B-Zahl: ca. 33 Mio.
- Versuchsstrecke VS 6
  - Baujahr: 1993
  - bisher ertragene B-Zahl: ca. 12 Mio.

Alle diese Streckenabschnitte wurden bereits im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 04.0227/2009/ARB untersucht, für die nachfolgenden Analysen erfolgte ein Rückgriff auf die Ergebnisse der damaligen Untersuchungen.

Darüber hinaus bildeten Ergebnisse von ZEB-Messungen und von Georadarmessungen eine weitere Datengrundlage zur Beurteilung dieser Streckenabschnitte. Entsprechend der im Kapitel 5.3 beschriebenen Vorgehensweise erfolgte hierzu die Bildung von homogenen Abschnitten für ausgewählte Merkmale.

### 7.2 Bildung homogener Abschnitte auf Basis von Zustandswerten

#### 7.2.1 Allgemeines

Den Ausgangspunkt der nachfolgenden Auswertungen bilden die Überlagerungen der jeweiligen ZEB-Ergebnisse zu Streckenbändern. Entsprechend der allgemein gültigen Verfahrensweisen zur Bildung der Substanzwerte für die Oberfläche, wurden dafür die Zustandsmerkmale für die Ebenheit (ZWAUN, ZWSPT) sowie Risse und Flickstellen berücksichtigt (Abbildung 8). Die jeweiligen Zustandswerte wurden entsprechend der Vorbemerkungen zu homogenen Abschnitten zusammengefasst (siehe Kapitel 3 bis 5).

Zusätzlich werden dabei die Ergebnisse der visuellen Zustandserfassung für diese Asphaltstrecken mit berücksichtigt. Anhand der Darstellungen in Anhang 1 ist ersichtlich, dass die bei der ZEB er-

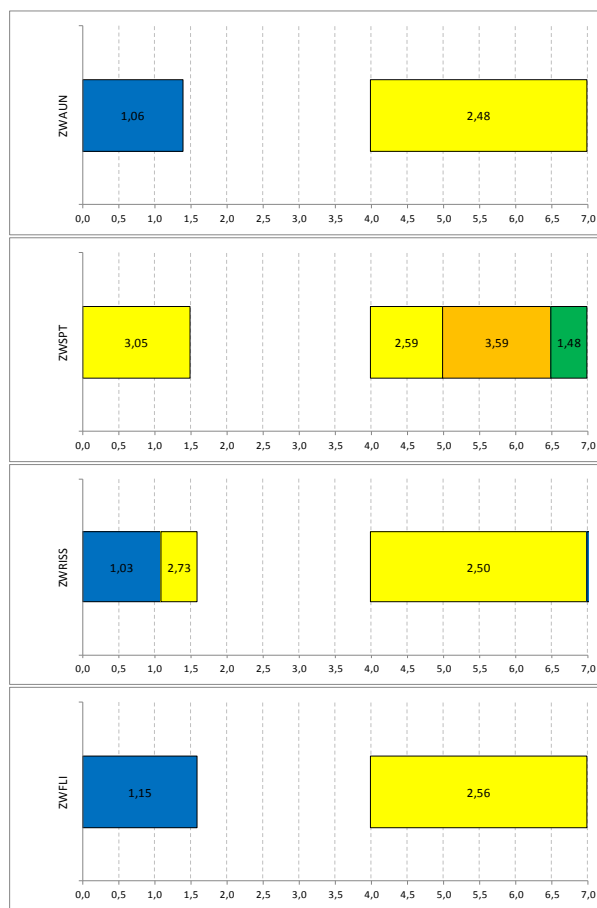
fassten Zustandsmerkmale qualitativ bestätigt werden konnten. Weiterhin wurde bei dieser Untersuchung deutlich, dass sich die Abschnittsgrenzen in der Realität tlw. anderes darstellen, was u.U. Umständen in der Bildung der 100 m - Mittelwerte im Rahmen der ZEB begründet liegt. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse der Streckenbegehungen, dass offenbar zwischen dem Zeitpunkt der ZEB-Messung im Jahr 2009 und den Untersuchungen im Jahr 2011 vereinzelt Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt wurden (Flickstellen). Als ein erstes Ergebnis kann deshalb zusammenfassend festgehalten werden, dass für detaillierte Auswertungen unbedingt eine Plausibilitätsprüfung der ZEB-Daten erfolgen sollte. Ergebnisse von visuellen Zustandserfassungen bei Streckenbegehungen haben sich hierzu gut bewährt.

#### 7.2.2 Analysen für VS 5

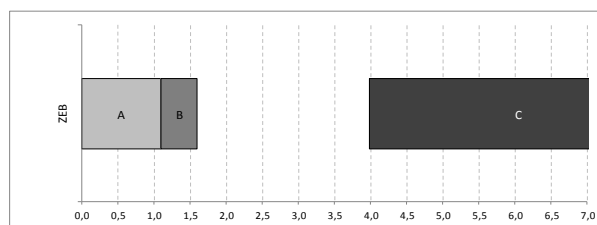
In Abbildung 193 sind die homogenen Abschnitte der einzelnen ZEB-Ergebnisse für VS 5 in Balkendiagrammen so angegeben, dass jeweils die ermittelten Abschnittsgrenzen und die mittleren Zustandswerte je Abschnitt dargestellt sind. So wird am Beispiel des Zustandswertes ZWAUN in Abbildung 193 deutlich, dass zwischen Messstation 0+000 und 1+400 der Zustandswert ZWAUN im Mittel 1,06 beträgt, die blaue Farbe dieses Datenfeldes kennzeichnet diese vergleichsweise sehr guten Zustandswerte. Ein weiterer homogener Bereich hinsichtlich der Längsebenheit ist zwischen Messstation 4+000 und 7+000 vorhanden, die Zustandswerte ZWAUN betragen im Mittel 2,48 (gelbe Markierung für befriedigende Zustandswerte).

Zwischen Messstation 1+400 und 4+000 wurden für die Teilprojekte TP 1 und TP 3 bei der Zustandserfassung 2009 keine Zustandswerte erfasst, die entsprechenden Datenfelder wurden deshalb frei gelassen.

Im nächsten Bearbeitungsschritt wurden die Streckenbänder der einzelnen ZEB-Zustandswerte zu Bereichen zusammengefasst, die nachfolgend als maßgebend für die ZEB-Daten gelten sollen. Ein entsprechendes Streckenband für VS 5 ist in Abbildung 194 dargestellt.



**Abbildung 193:** Darstellung einzelner ZEB-Ergebnisse als Streckenbänder für VS 5



**Abbildung 194:** Bildung homogener Abschnitte basierend auf ZEB-Werten für VS 5

Neben den einzelnen Abschnittsgrenzen, welche basierend auf den in Abbildung 193 dargestellten Abschnitten gebildet wurden, erfolgte zusätzlich eine Bewertung anhand des Betrages der Zustandswerte (bester Bereich: "A", schlechtester Bereich: "C"). Dementsprechend wurde ein Bereich "A" zwischen 0+000 und 1+100 festgelegt, die Zustandswerte sind mit Ausnahme der Spurrinnentiefe hier als gut bis sehr gut zu bewerten. Maßgebend für die Abgrenzung zum Bereich "B" zwischen 1+100 und 1+600 sind die zugehörigen Zustandswerte für ZWRISS, aufgrund derer eine Abstufung zum Bereich "B" erfolgte. Als dritter Abschnitt wurde der Bereich "C" zwischen 4+000 und 7+000 abgegrenzt, die zugehörigen Zustandswerte kennzeichnen die schlechtesten Zustandswerte im gesamten Verlauf von VS 5.

Hinsichtlich der einzelnen Merkmale ist anzumerken, dass vor allem die Zustandsmerkmale Risse und Flickstellen relevant sind, wenn eine Bewertung des Substanzwertes von Asphaltstraßen erfolgen soll (vergleiche hierzu Kapitel 2). Darüber hinaus bestätigen jedoch die Zustandswerte für die Ebenheit, dass es sich hier um unterschiedliche Abschnitte handelt, die durch unterschiedliche Aufbauten und/oder unterschiedliche bereits ertragene Verkehrsbelastungen gekennzeichnet sind. Im vorliegenden Fall, handelt es sich bei VS 5 um einen Streckenabschnitt einer Bundesautobahn, der 1980 grundhaft erneuert wurde und der eine annähernd konstante Verkehrsbelastung aufweist. Die unterschiedlichen Zustandswerte sind deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit auf unterschiedliche Aufbauten zurückzuführen. Im Einzelnen kann es sich hierbei um eine unterschiedliche Zusammensetzung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten handeln (begründet durch verschiedene Sanierungsmaßnahmen in diesen Abschnitten) bzw. durch unterschiedlich Aufbaudicken.

Derartige Mutmaßungen können allein auf Basis von an der Fahrbahnoberfläche gemessenen Zustandswerten nicht weiter spezifiziert werden, hierfür wären ergänzende Georadarmessungen ggf. in Kombination mit einigen wenigen Bohrkernentnahmen zur Kalibrierung erforderlich. Darüber hinaus könnten ggf. Tragfähigkeitsmessungen erforderlich weitere Informationen zur Verfügung stellen. Ausführungen zu diesen vertiefenden Untersuchungen sind in Kapitel 7.3 und 7.4 enthalten.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die im Rahmen der ZEB erfassten Risse und Flickstellen nur an der Fahrbahnoberfläche festgestellt werden und deren Verlauf über die Tiefe unbekannt ist. Aus diesem Grund sind hierzu auch keine Aussagen möglich, ob z.B. derartige Risse durch alle Asphaltschichten verlaufen und deshalb strukturelle Schäden vorhanden sind, oder, ob Risse z.B. "nur" in der Asphaltdeckschicht vorhanden sind. Dieser Sachverhalt ist generell zu berücksichtigen, wenn Schlussfolgerungen aus den Zustandswerten gezogen werden und darüber hinaus ein "Ranking" einzelner Bereiche erfolgen soll.

### 7.2.3 Analysen für VS 6

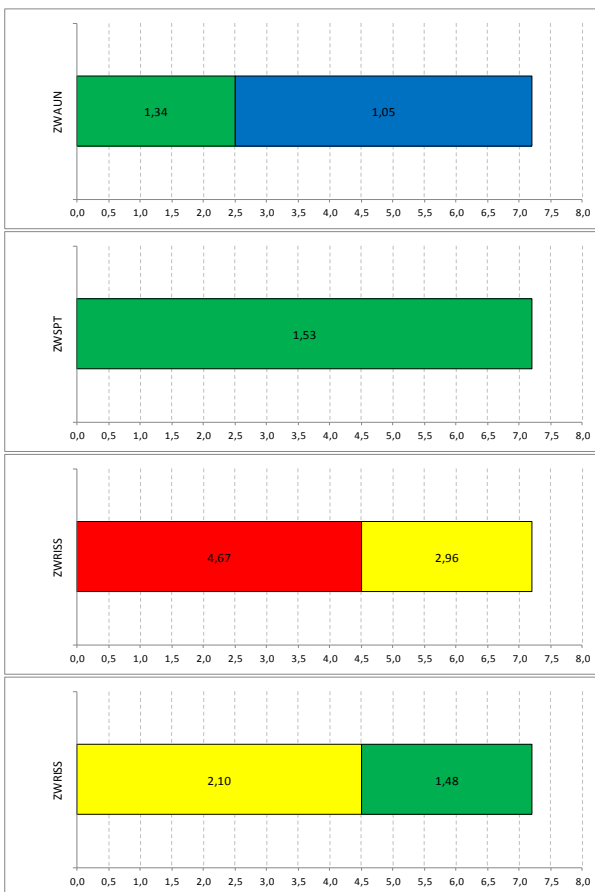
In Abbildung 195 sind analog zur vorhergehenden Darstellung in Kapitel 7.2.2 die homogenen Abschnitte der einzelnen ZEB-Ergebnisse in Balkendiagrammen für VS 6 angegeben. Dementsprechend sind jeweils die Abschnittsgrenzen und zugehörig die mittleren Zustandswerte je Abschnitt dargestellt.

Die Zustandswerte der Merkmale Ebenheit und Griffigkeit sind im gesamten Verlauf von VS 6 als gut bis sehr gut zu bewerten.

Demgegenüber zeigen die Merkmale des Substanzwertes-Oberfläche Risse und Flickstellen deutliche Schäden, die zwischen Messstation 0+000 und 4+500 auf einen befriedigend bis schlechten Zustand hindeuten. Zwischen 4+500 und 7+000 nimmt die Schadensschwere zwar deutlich ab, der Zustandswert ZWRISS beträgt im Mittel 2,96 und kennzeichnet zahlreiche Risse in der Asphaltdeckschicht.

Hinsichtlich der Aussagekraft der ZEB-Werte im Rahmen der strukturellen Substanzbewertung gelten jedoch auch für VS 6 die Einschränkungen, die am Ende von Kapitel 7.2.2 gegeben wurden.

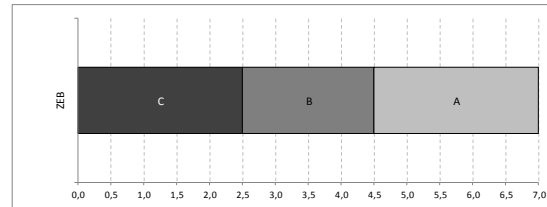
Die Überlagerung der einzelnen ZEB-Zustandswerte zu zusammenfassenden ZEB-Bereichen führt zu dem in Abbildung 196 dargestellten Streckenband.



**Abbildung 195:** Darstellung einzelner ZEB-Ergebnisse als Streckenbänder für VS 6

Zwischen 0+000 und 2+500 ist ein zusammenhängender Bereich festgestellt wurden, die Zustandswerte sind die schlechtesten im gesamten Verlauf von VS 6 (qualitative Bewertung: "C"). Zwischen 2+500 und 4+500 schließt sich ein Bereich mit etwas besseren Zustandswerten an (Bereich "B"). Die Abgrenzung zwischen Bereich "C" und "B"

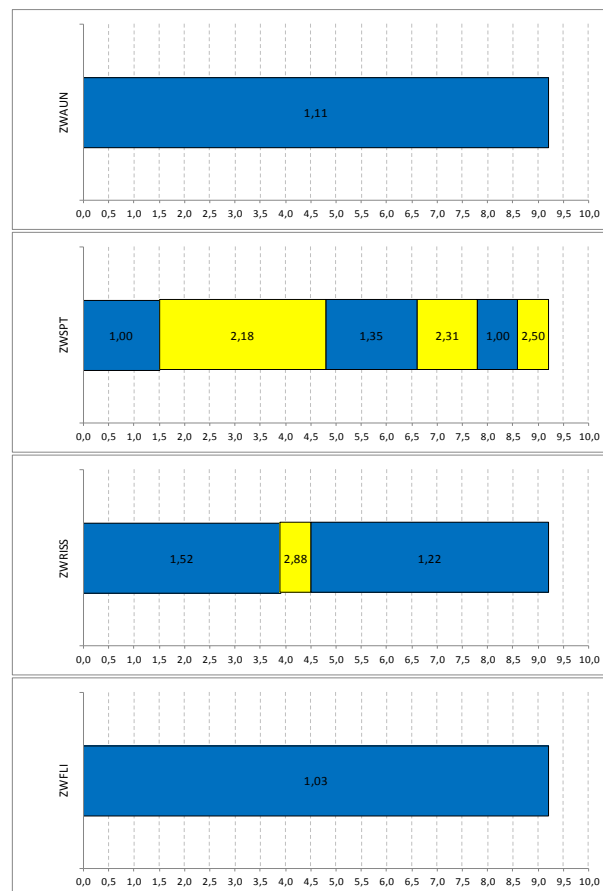
basiert hierbei jedoch v.a. auf den Indikatoren Längsebenheit, eine Prüfung anhand weiterführender Untersuchungen wie Georadarmessungen und/oder Tragfähigkeitsmessungen sollte hierzu erfolgen. Als dritter Abschnitt wurde zwischen 4+500 und 7+000 der Bereich "A" abgegrenzt, hier wurden im Verlauf von VS 6 die jeweils besten Zustandswerte ermittelt.



**Abbildung 196:** Bildung homogener Abschnitte basierend auf ZEB-Werten für VS 6

### 7.2.4 Analysen für VS 7

Analog zu den vorhergehenden Darstellungen in Kapitel 7.2.2 und 7.2.3 sind in Abbildung 197 die homogenen Abschnitte der einzelnen ZEB-Ergebnisse für VS 7 angegeben. Dementsprechend sind jeweils die Abschnittsgrenzen und zugehörig die mittleren Zustandswerte je Abschnitt dargestellt.

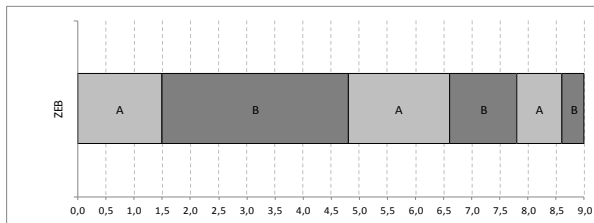


**Abbildung 197:** Darstellung einzelner ZEB-Ergebnisse als Streckenbänder für VS 7

Die Zustandswerte der Merkmale Längsebenheit sind im gesamten Verlauf von VS 7 als sehr gut zu bewerten, abschnittsweise sind jedoch Spurrinnen festgestellt wurden. Die Abschnittsgrenzen bei den homogenen Bereichen hinsichtlich der Spurrinnentiefe werden ungefähr auch bei den Bereichen homogener Griffigkeit ermittelt, das Ranking der einzelnen Abschnitte hinsichtlich des Betrages der Zustandswerte ist vergleichbar.

Hinsichtlich der Merkmale Risse und Flickstellen sind mit Ausnahme eines Bereiches zwischen Messstation 4+000 und 4+500 sehr gute Zustandswerte vorhanden.

Hinsichtlich der Aussagekraft der ZEB-Werte im Rahmen der strukturellen Substanzbewertung gelten auch für VS 7 die Einschränkungen, die in den Kapitel 7.2.2 bzw. 7.2.3 gegeben wurden.



**Abbildung 198:** Bildung homogener Abschnitte basierend auf ZEB-Werten für VS 7

In Abbildung 198 ist ein Streckenband dargestellt, in welchem die einzelnen ZEB-Zustandswerte zu zusammenfassenden ZEB-Bereichen überlagert wurden.

Zwischen 0+000 und 1+500 sowie 4+900 und 6+600 sowie 7+800 und 8+600 sind jeweils die Bereiche mit den vergleichsweise besten Zustandswerten zusammengefasst (Bereiche "A"). In den dazwischen liegenden Bereichen wurden im Vergleich dazu schlechtere Zustandswerte ermittelt (Bereiche "B").

Die Abgrenzung zwischen den Bereichen "A" und "B" basiert hierbei jedoch v.a. auf den Indikatoren der Spurrinnentiefe und Griffigkeit, eine Prüfung anhand weiterführender Untersuchungen wie Georadarmessungen und/oder Tragfähigkeitsmessungen ist empfehlenswert.

## 7.3 Bildung homogener Einzelabschnitte auf Basis von Georadarmessungen

### 7.3.1 Allgemeines

In Ergänzung zu den homogenen Abschnitten auf Basis der ZEB-Daten sind in einem nächsten Bearbeitungsschritt übergeordnete Abschnitte unter Zuhilfenahme von Aufbaudaten zu bilden. Basis hierfür sind die Untersuchungsergebnisse der Geo-

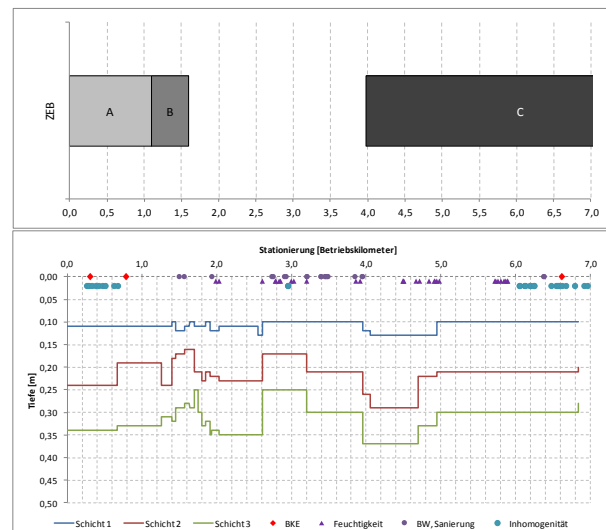
radarmessungen. Mit dieser Vorgehensweise ist es möglich, die anhand der ZEB-Daten ermittelten Abschnittsgrenzen auf Basis des Oberflächenbildes mit strukturellen Aufbaudaten wie Schichtdicken und/oder Inhomogenitäten im Befestigungsaufbau zu überlagern.

Im Detail werden hierzu die ZEB-Streckenbändern aus Kapitel 7.2 mit den Schichtdickenverläufen der zugehörigen Versuchsstrecken überlagert. Zusätzlich werden Besonderheiten wie Feuchtbereiche und Inhomogenitäten angegeben.

### 7.3.2 Analysen für VS 5

In Abbildung 199 sind die übergeordneten ZEB-Bereiche mit den Ergebnissen der Georadarmessungen überlagert (siehe hierzu Kapitel 4.2). Dabei wird deutlich, dass die vergleichsweise besten Zustandswerte (Bereich "A") dort ermittelt wurden, wo mit 33 bis 34 cm die größten Asphaltstärken vorhanden sind. Im Vergleich dazu wurden für den Bereich "B" deutlich geringere Asphaltstärken ermittelt.

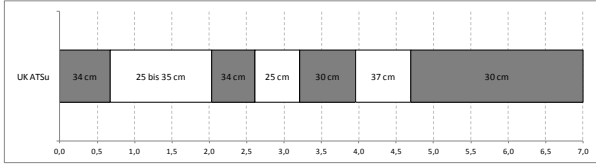
Im Bereich "C" wurde zwischen 5+000 und 7+000 ein 30 cm dicker Asphaltbau festgestellt, was etwa den Schichtdicken im Bereich "B" entspricht. Ergänzend hierzu ist jedoch festzuhalten, dass eine Abstufung des Straßenzustandes (Bereich "C") plausibel ist, wenn die zahlreichen Stellen mit Feuchtigkeit berücksichtigt werden, die zwischen 2+000 und 7+000 beobachtet wurden.



**Abbildung 199:** Gegenüberstellung der ZEB-Streckenbänder mit Ergebnissen der Georadarmessungen für VS 5

Derartige feuchte Bereiche wurden bei der Auswertung der Georadarmessungen in Tiefen zwischen 0,10 und 0,12 m festgestellt, was der Unterseite der Asphaltbinderschichten entspricht. Ursachen hierfür könnten mit hohlraumreichen Unterseiten dieser Schichten ggf. in Verbindung mit fehlendem Schichtenverbund zu den darunterlie-

genden Asphalttragschichten begründet sein. Derartige Merkmale bzw. Inhomogenitäten stellen eine wesentliche Erweiterung der an der Oberfläche aufgenommenen ZEB-Werte dar und erlauben Aussagen zu tiefer liegenden Schichten.

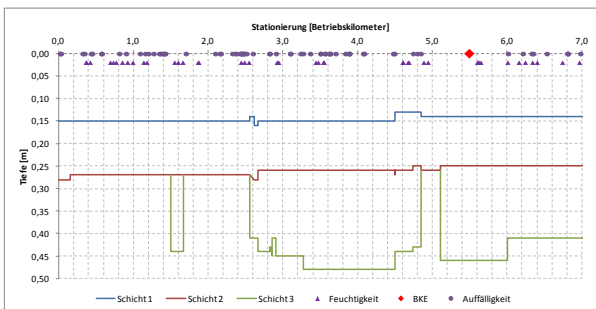
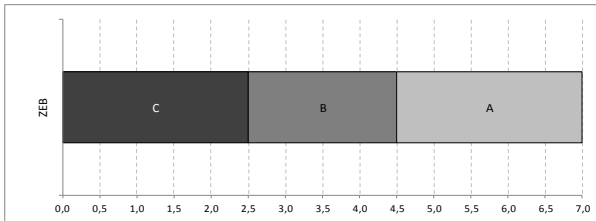


**Abbildung 200:** Homogene Bereiche auf Basis der Georadarmessungen für VS 5

In Abbildung 200 sind zusammenfassend die Gesamtdicken der Asphalttragschichten bereichsweise angegeben. Dabei wird deutlich, dass diese im Verlauf von VS 5 vergleichsweise stark schwanken zwischen 25 und 37 cm (siehe "Schicht 3" in Abbildung 199 untere Abbildung als Unterkante der Asphalttragschichten). Diese Spannweite erscheint vor dem Hintergrund, dass gemäß [RStO 12] eine Mehrdicke von jeweils 4 cm der nächsthöheren Bauklasse entspricht, als vergleichsweise hoch.

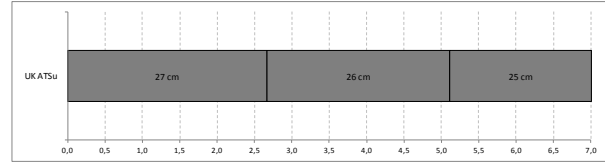
### 7.3.3 Analysen für VS 6

Analog zur Vorgehensweise in Kapitel 7.3.2 erfolgte auch für VS 6 eine Gegenüberstellung der zusammengefassten ZEB-Bereiche mit den Ergebnissen der Georadarmessungen (siehe Abbildung 201).



**Abbildung 201:** Gegenüberstellung der ZEB-Streckenbänder mit Ergebnissen der Georadarmessungen für VS 6

Wie auch schon bei der vorhergehenden Versuchsstrecke in Kapitel 7.3.2 sind bei VS 6 Abschnitte mit Feuchtigkeit an der Unterseite der Asphaltbinderschicht festgestellt wurden. Diese erstrecken sich weitgehend über die gesamte Versuchsstrecke.



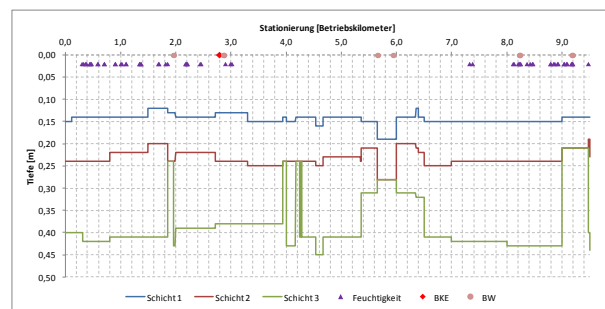
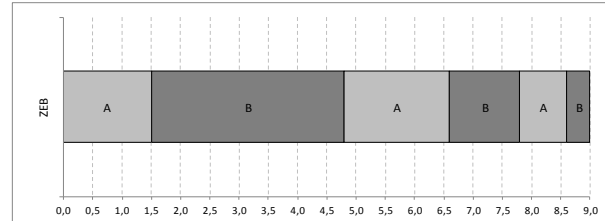
**Abbildung 202:** Homogene Bereiche auf Basis der Georadarmessungen für VS 6

Im Hinblick auf die ermittelten Schichtdicken wird deutlich, dass mit 25 bis 27 cm Gesamtasphaltdicke ein annähernd identischer Asphaltüberbau auf einer Länge von 7 km vorhanden ist (Abbildung 201). Unterschiede können vor allem in tiefer liegenden Schichten beobachtet werden. Die entsprechend der Bauakten vorhandene hydraulisch gebundene Tragschicht kann durchgängig erst ab Messstation 2+500 anhand der Georadarauswertungen bestätigt werden. Im Bereich davor zwischen 0+000 und 2+500 kann diese Schicht nicht mehr von den darunterliegenden Schichten abgegrenzt werden.

### 7.3.4 Analysen für VS 7

In Abbildung 203 sind analog zur Vorgehensweise in Kapitel 7.3.2 die übergeordneten ZEB-Bereiche mit den Ergebnissen der Georadarmessungen gegenübergestellt.

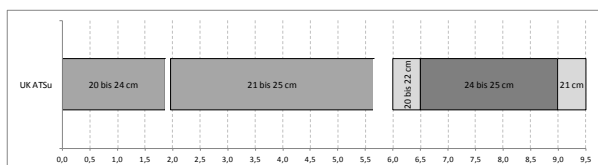
Abschnitte mit Feuchtigkeit an der Unterseite der Asphaltbinderschicht wurden zwischen 0+300 und 3+000 sowie 7+300 und 9+500 festgestellt.



**Abbildung 203:** Gegenüberstellung der ZEB-Streckenbänder mit Ergebnissen der Georadarmessungen für VS 7

Im Hinblick auf die ermittelten Schichtdicken wird deutlich, dass diese zwischen 20 und 25 cm Gesamtasphaltdicke schwanken (Abbildung 203). Diese Spannweite erscheint vor dem Hintergrund, dass gemäß [RStO 12] eine Mehrdicke von jeweils

4 cm der nächsthöheren Bauklasse entspricht, als vergleichsweise hoch.



**Abbildung 204:** Homogene Bereiche auf Basis der Georadarmessungen für VS 7

## 7.4 Bildung homogener Einzelabschnitte auf Basis von FWD-Messungen

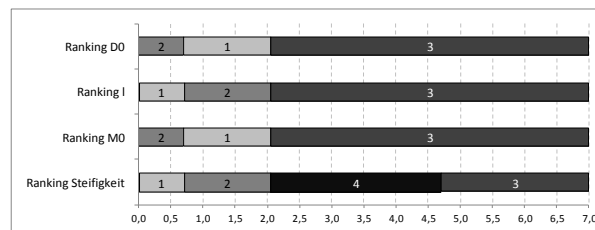
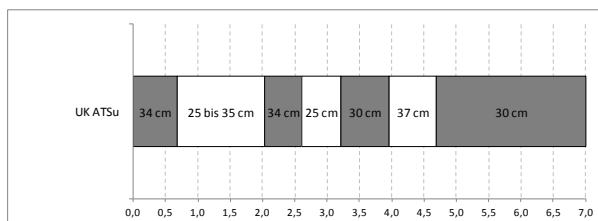
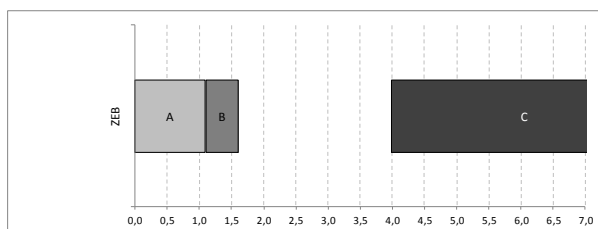
### 7.4.1 Allgemeines

Den Ausgangspunkt hinsichtlich der Beurteilung der Ergebnisse der Tragfähigkeitskennwerte bilden die Untersuchungsergebnisse des FWD. Entsprechend der in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Verfahrensweisen wurden dazu homogene Abschnitte gebildet und zugeordnet dazu folgende Kenngrößen analysiert:

- Verformung im Lastzentrum  $D_0$
- Krümmungsradius  $R_0$
- elastische Länge  $l$
- Schichtmodul  $M_0$
- Steifigkeit der ungebundenen Schichten (auf Basis der Wellenauswertung)

### 7.4.2 Analysen für VS 5

In Abbildung 205 sind die homogenen Bereiche auf Basis der FWD-Messungen dargestellt und ergänzend dazu die homogenen Bereiche der ZEB- und Georadar-Messungen dargestellt.



**Abbildung 205:** Homogene Bereiche auf Basis der FWD-Messungen für VS 5 und Vergleich zu ZEB- und Georadar-Bereichen

Anhand der FWD-Messungen konnte die Abschnittsgrenze bei 0+700, die anhand der unterschiedlichen Schichtdicken zu begründen ist, bestätigt werden. In diesem Sachverhalt liegt ein großer Unterschied zu den ZEB-Daten, anhand derer diese Grenze nicht verifiziert werden konnte.

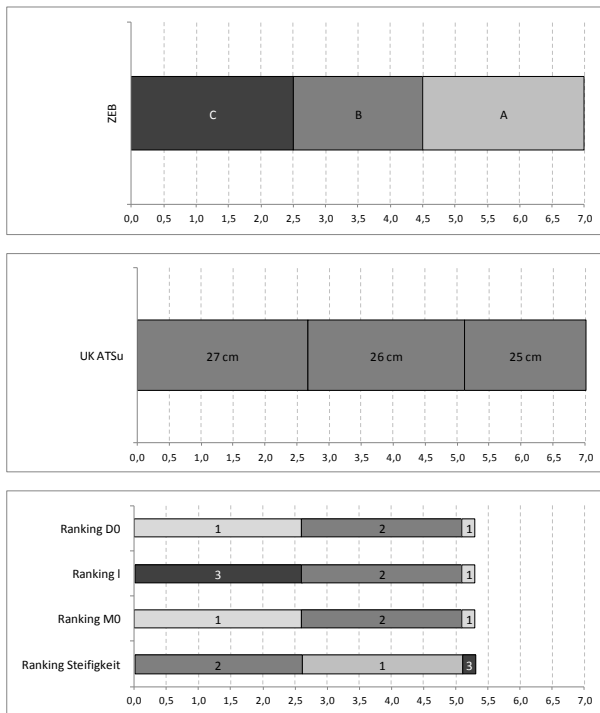
Die weiteren bei der Auswertung der FWD-Messungen ermittelten Abschnittsgrenzen bei 2+000 und 4+800 können ebenfalls mit Änderungen im Schichtaufbau begründet werden.

Hinsichtlich des Rankings der einzelnen Bereiche können sowohl anhand der ZEB-Messungen als auch anhand aller Einzelergebnisse der FWD-Messung die besten Bereiche ("A" und "B" bzw. "1" und "2") sowie der schlechteste Bereich "C" voneinander abgegrenzt werden. Die Zuordnung der insgesamt besten Bereiche zwischen 0+000 und 2+000 entspricht zudem genau jenen Abschnitten, in denen keine Feuchtigkeit an der Unterseite der Asphaltbinderschicht festgestellt wurde (siehe Abbildung 205)

Hinsichtlich der Differenzierung der besten Bereiche untereinander zwischen 0+000 und 0+700 sowie 0+700 und 2+000 führen die verschiedenen Auswerteverfahren des FWD zu unterschiedlichen Reihungen. Anhand dieses Sachverhaltes wird deutlich, dass anhand einzelner Tragfähigkeitskenngrößen eine abweichende Beurteilung benachbarter Streckenabschnitte erfolgt. Im Hinblick auf die Substanzbewertung ist dieser Sachverhalt zu beachten.

### 7.4.3 Analysen für VS 6

Die homogenen Bereiche auf Basis der FWD-Messungen sind in Abbildung 206 dargestellt. Ergänzend dazu sind zusätzlich die homogenen Bereiche der ZEB- und Georadar-Messungen angegeben.



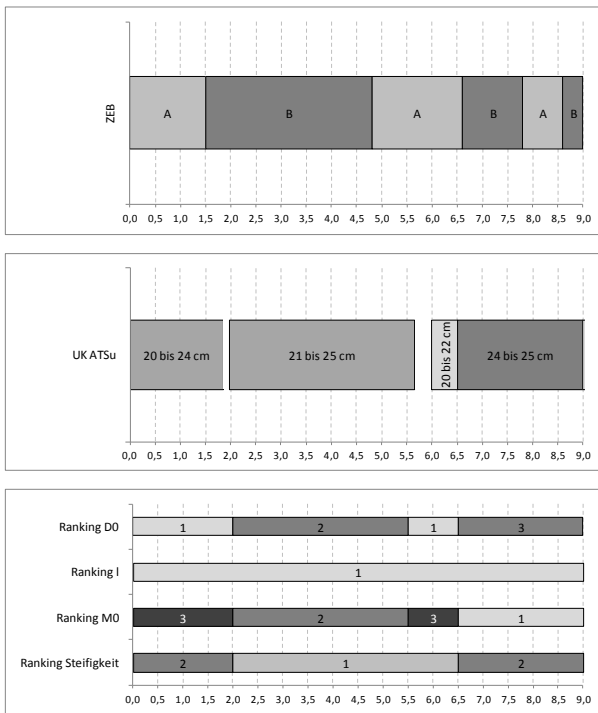
**Abbildung 206:** Homogene Bereiche auf Basis der FWD-Messungen für VS 6 und Vergleich zu ZEB- und Georadar-Bereichen

Sowohl anhand der ZEB-, der Georadar- und FWD-Messungen kann die erste Abschnittsgrenze bei 2+500 bestätigt werden. Die zweite Grenze wurde basierend auf den ZEB-Daten bei 4+500 und bei den Georadar- und FWD-Messungen bei 5+100 ermittelt.

Hinsichtlich der Reihung der einzelnen Bereiche ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Während die ZEB-Daten und die Tragfähigkeitskenngröße elastische Länge  $l$  zur gleichen Reihung der einzelnen Abschnitte führen, erhält man eine entgegengesetzte Tendenz auf Basis der übrigen Kennwerte der FWD-Messung. Anhand dieses Sachverhaltes wird deutlich, dass anhand einzelner Tragfähigkeitskenngrößen eine abweichende Beurteilung benachbarter Streckenabschnitte erfolgt. Im Hinblick auf die Substanzbewertung ist dieser Sachverhalt zu beachten.

**7.4.4 Analysen für VS 7**

In Abbildung 207 sind die homogenen Bereiche auf Basis der FWD-Messungen dargestellt und ergänzend dazu den homogenen Bereichen der ZEB- und Georadar-Messungen dargestellt.



**Abbildung 207:** Homogene Bereiche auf Basis der FWD-Messungen für VS 7 und Vergleich zu ZEB- und Georadar-Bereichen

Die Abschnittsgrenzen der ZEB-Messungen konnten anhand der Georadar- und FWD-Messungen nicht bestätigt werden. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass bei keiner der einzelnen ZEB-Zustandswerte diese Abschnittsgrenzen erfasst werden (siehe Abbildung 197).

Hinsichtlich der Reihung der einzelnen Bereiche ergibt sich (wie schon bei VS 6) ein uneinheitliches Bild. Vernachlässigt man den Versatz einzelner Abschnittsgrenzen von bis zu 700 m, so zeigen die ZEB-Daten und die Einsenkungen im Lastzentrum D0 eine vergleichbare Tendenz.

Im Gegensatz dazu führen die Kenngrößen  $M_0$  und Steifigkeit der ungebundenen Schichten zu einer entgegengesetzten Reihung.

Anhand dieses Sachverhaltes wird deutlich, dass anhand einzelner Tragfähigkeitskenngrößen eine abweichende Beurteilung benachbarter Streckenabschnitte erfolgt. Im Hinblick auf die Substanzbewertung ist dieser Sachverhalt zu beachten.

**7.5 Untersuchung der Ergebnisse mithilfe von punktuellen Substanzwerten**

**7.5.1 Allgemeines**

An ausgewählten Stationen innerhalb der Versuchsstrecken in Asphaltbauweise erfolgte die Entnahme von jeweils 20 Bohrkernen, um daran

Eingangswerte zur Bestimmung der Restnutzungsdauer nach den [RDO Asphalt 09] zu ermitteln. Die gewählte Vorgehensweise wurde für Bundesautobahnen in Deutschland im Forschungsvorhaben FE 04.0199/2004/ARB erstmals angewandt und im Rahmen neuerer Forschungsarbeiten, wie FE 04.0227/2009/ARB verfeinert. Grundlage hierfür ist die Durchführung von vergleichsweise zeit- und kostenintensiven Laboruntersuchungen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes FE04.0249/2011/FGB war eine dementsprechende Prognose der Restnutzungsdauer nur möglich, da in Abstimmung mit dem Forschungsmittelgeber auf die Untersuchungsergebnisse von FE04.0227/2009/ARB zurückgegriffen werden konnte. Im Einzelnen waren die folgenden Kenngrößen (siehe auch Anhang 5):

- Allgemeine Streckeninformationen
- Aussagen zum Schichtenaufbau der gebundenen Schichten
- Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen aller Asphaltdeckschichten
- Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschichten
- Aussagen zum Tieftemperaturverhalten der Asphalttragschichten

Zur Ermittlung der Restnutzungsdauer wurde das Programm PaDesTo 2008 Enterprise eingesetzt. Damit ist es möglich, die Anzahl von ertragbaren Lastwechseln bis zum Auftreten von Ermüdungsrissen in der Asphalttragschicht zu berechnen. In Überlagerung mit Verkehrsprognosen und den daraus abgeleiteten zukünftig prognostizierten Lastwechseln kann der zugehörige Zeitraum als Restnutzungsdauer abgeleitet werden. Diese Vorgehensweise ist Gegenstand der Überlegungen im Rahmen der deterministischen Betrachtungen nach dem Entwurf zu den Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaues von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht [RSO Asphalt].

### 7.5.2 Analysen für VS 5

Im Verlauf der Versuchsstrecke VS 5 wurden insgesamt an drei Entnahmestationen jeweils 20 Bohrkernentnommen (siehe Abbildung 208).

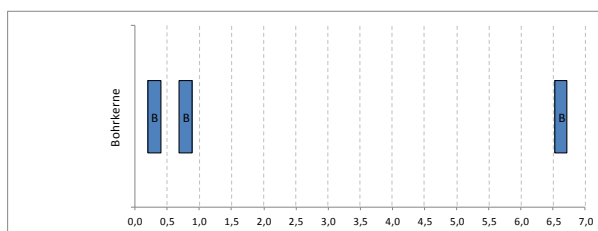


Abbildung 208: Bohrkerntnahmestationen für VS 4

Bei den Entnahmestationen 0+310 und 6+620 handelt es sich um die Versuchsstrecken VS 12 und VS 11 aus dem Forschungsvorhaben FE 04.0227/2009/ARB. Die Untersuchungen an den Bohrkernen von Stationen 0+790 erfolgten ergänzend dazu im Rahmen der Untersuchungen zu diesem Forschungsvorhaben, die zugehörigen Untersuchungsergebnisse sind in Anhang 5 angegeben.

Die in Abbildung 209 dargestellten Bilder verdeutlichen, dass an allen drei Stationen bereits in der Vergangenheit eine Erneuerung der Asphaltdeckschicht erfolgte (Baujahr des gesamten Streckenabschnittes: 1980). Dabei wurden offensichtlich jeweils unterschiedliche Gesteine in der Asphaltdeckschicht eingesetzt, was auf unterschiedliche Bauabschnitte und wahrscheinlich auch unterschiedliche Ausführungszeitpunkte schließen lässt. Dieser Sachverhalt ist unbedingt zu berücksichtigen, wenn die maßgeblich von der Straßenoberfläche bestimmten ZEB-Daten bewertet werden.



0+310



0+790



0+620

Abbildung 209: Streckenbilder der Versuchsstrecke VS 5 [System Stradivari]

Die jeweils entnommenen Bohrkern geben darüber hinaus wesentliche Informationen zu den tieferen Schichten. In Abbildung 210 sind die entsprechenden Ergebnisse zusammengefasst.

VS 5 Station	Schichtenverbund			
	ADS - ABi	ABi - ATS1	ATS1 - ATS2	ATS2 - ATS3
0+310	+	+	(+)	
0+790	+	+	+	-
6+620	+	+	-	

**Legende:**  
 + Schichtenverbund an allen BK vorhanden  
 (+) Schichtenverbund an einigen BK vorhanden  
 - Schichtenverbund an keinem BK vorhanden

VS 5 Station	mittlere Schichtdicken [cm]					
	ADS	ABi	ATS1	ATS2	ATS3	Σ Asphalt
0+310	4,8	6,8	12,2	10,0		33,8
0+790	4,8	4,8	11,2	8,0	6,9	35,7
6+620	5,2	4,3	10,5	6,4		26,4

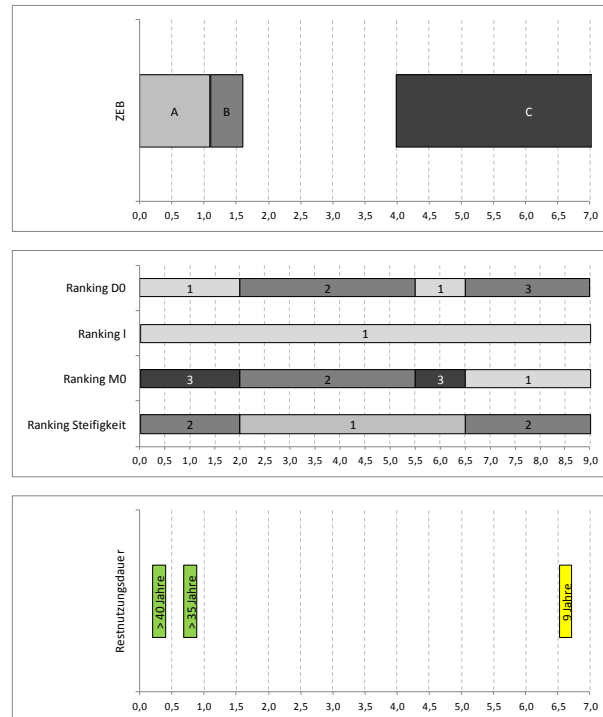
VS 5 Station		Bohrkernbegutachtung			
		keine Auffälligkeiten	Fehlstellen	Kornausbrüche	Rissbildung
0+310	ADS	x			
	ABi		x		
	ATSo		x		
	ATSu		x		
0+790	ADS	x			
	ABi		x		
	ATS1		x		
	ATS2		x		
6+620	ADS	x			
	ABi		x	x	
	ATSo		x	x	x
	ATSu		x	x	x

**Abbildung 210:** Anhand der Bohrkern gewonnene Erkenntnisse zu tiefer liegenden Asphaltsschichten für VS 5

Im Detail können anhand dieser Ergebnisse Aussagen zu den Schichtdicken der Asphaltdeck-, der Asphaltbinder- und der Asphalttragschichten gewonnen werden sowie zum Schichtenverbund zwischen benachbarten Schichten. Darüber hinaus können anhand einer Bohrkernbegutachtung Angaben zum strukturellen Zustand einzelner Schichten gemacht werden, Beispiele hierfür sind das eventuelle Vorhandensein von Fehlstellen, Kornausbrüchen bzw. Rissen.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die bei den Georadarmessungen festgestellten Inhomogenitäten an der Unterseite der Asphaltbinderschicht auch anhand der Bohrkernbegutachtung als Fehlstellen nachvollzogen werden können. Darüber hinaus wurde für die Bohrkernentnahmestation 6+620 festgestellt, dass zusätzlich auch Kornausbrüche und vereinzelt Risse in den Asphalttragschichten vorhanden sind.

Weitere wesentliche Eingangswerte zur Berechnung der Restnutzungsdauer stellen die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen aller Asphaltsschichten sowie die Ermüdungsfunktion der untersten Asphalttragschichten dar, welche nach den [AL SP-Asphalt 09] ermittelt wurden (siehe Anhang 5). Unter Verwendung dieser und weiterer Kenngrößen wird anschließend die Restnutzungsdauer nach dem Verfahren der [RDO Asphalt 09] ermittelt.



**Abbildung 211:** Ermittlung der Restnutzungsdauern für VS 5

In Abbildung 211 sind die Restnutzungsdauern für die drei Untersuchungsquerschnitte von VS 5 angegeben und gleichzeitig den übergeordneten homogenen Abschnitten gegenübergestellt. Im Einzelnen betragen diese zwischen 9 Jahren für den Untersuchungsquerschnitt bei Station 6+620 und über 35 Jahren für die beiden übrigen Bereiche. Diese Reihung bzw. diese Ranking ist plausibel vor dem Hintergrund der zugehörigen Gesamtasphaltstärken und den Ergebnissen der Bohrkernbegutachtung. Darüber hinaus erhält man anhand der ZEB-Ergebnisse die gleiche Reihung.

Hinsichtlich der Tragfähigkeitskenngrößen fällt auf, dass zwischen dem Trend der Restnutzungsdauer der einzelnen Bereiche und der Verformung  $D_0$  im Lastzentrum ein guter Zusammenhang besteht.

Im Gegensatz dazu ist festzuhalten, dass sowohl der Schichtmodul  $M_0$  als auch der Schichtmodul der ungebundenen Schichten auf Basis der Wellenauswertungen einen entgegengesetzten Trend ausweisen. Hierbei handelt es sich jedoch um Kennwerte, die tiefer liegende ungebundene

Schichten beschreiben, so dass ein Vergleich mit den übrigen Untersuchungsergebnissen nicht ohne weiteres möglich ist. Anhand der aktuell vorliegenden Ergebnisse kann ein Zusammenhang zur Restnutzungsdauer nicht abgeleitet werden.

Hinsichtlich der elastischen Länge  $l$  ist anzumerken, dass anhand dieser Kenngröße keine Differenzierung einzelner Bereiche innerhalb der Versuchsstrecke VS 5 möglich ist, alle Messwerte liegen auf einem vergleichbaren Niveau.

Zusammenfassend erlauben die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen eine Relativbetrachtung einzelner Untersuchungsabschnitte. Absolute Aussagen zur Restnutzungsdauer sind auf dieser Basis zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich. Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt beim Vergleich der Ergebnisse für die Stationen 0+310 und 0+790. Auf Basis sowohl der ZEB-Daten als auch der FWD-Ergebnisse werden beiden Bereiche zu einem homogenen Abschnitt zusammengefasst.

Betrachtet man zusätzlich die zugehörigen Ergebnisse der Ermüdungsversuche so wird deutlich, dass selbst bei ansonsten gleichen Schichtdicken und Schichtsteifigkeiten bei Station 0+310 eine größere Restnutzungsdauer zu erwarten wäre als an Station 0+790. Die Ursache hierfür liegt in der höheren Ermüdungsbeständigkeit des erstgenannten Bereiches begründet, was anhand der Ermüdungsparameter C1 und C2 nachvollzogen werden kann (siehe Anhang 5). Eine solche Differenzierung ist jedoch nach aktuellem Kenntnisstand nur anhand von Ermüdungsversuchen möglich, zerstörungsfreie Messverfahren geben hierzu leider keine Auskunft.

### 7.5.3 Analysen für VS 6

Im Verlauf dieser Versuchsstrecke wurden an der Entnahmestation 5+500 insgesamt

20 Bohrkern entnommen (siehe Abbildung 212). Es handelt sich hierbei um die Versuchsstrecke VS 9 aus dem Forschungsvorhaben FE 04.0227/2009/ARB, die zugehörigen Untersuchungsergebnisse sind in Anhang 5 angegeben.

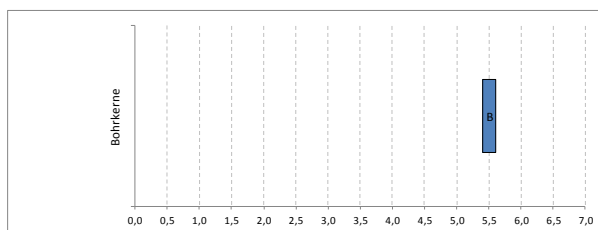


Abbildung 212: Bohrkernentnahmestationen für VS 6

Analog zur Darstellung in Abbildung 211 für VS 5 können anhand dieser Ergebnisse Aussagen zu den Schichtdicken der Asphaltdeck-, der Asphaltbinder- und der Asphalttragschichten gewonnen

werden sowie zum Schichtenverbund zwischen benachbarten Schichten. Zusätzlich sind Angaben zum strukturellen Zustand einzelner Schichten möglich, Beispiele hierfür sind das eventuelle Vorhandensein von Fehlstellen, Kornausbrüchen bzw. Rissen.

VS 6	Schichtenverbund			
Station	ADS - ABi	ABi - ATS		
5+500	+	+		

**Legende:**

- + Schichtenverbund an allen BK vorhanden
- (+) Schichtenverbund an einigen BK vorhanden
- Schichtenverbund an keinem BK vorhanden

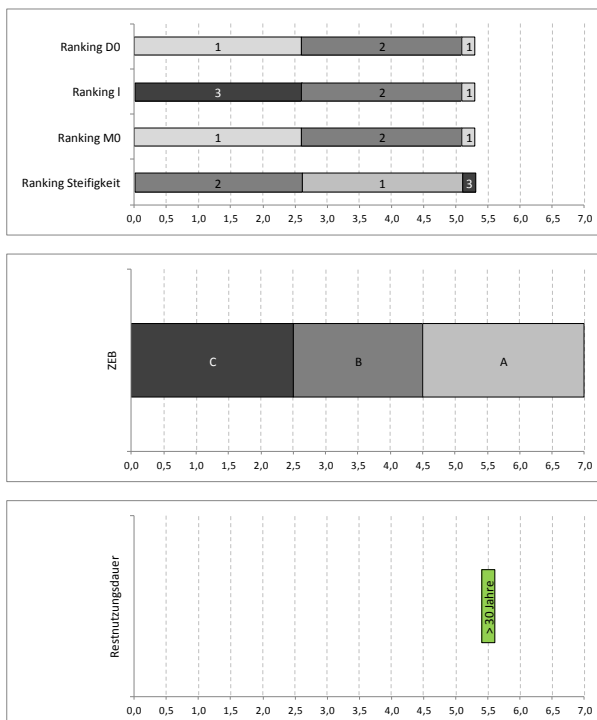
VS 6	mittlere Schichtdicken [cm]				
Station	ADS	ABi	ATS		$\Sigma$ Asphalt
5+500	4,2	9,2	14,9		28,3

VS 6	Bohrkernbegutachtung			
Station	keine Auffälligkeiten	Fehlstellen	Kornausbrüche	Rissbildung
5+500 ADS	x			
ABi		x		
ATS		x	x	

Abbildung 213: Anhand der Bohrkern gewonnene Erkenntnisse zu tiefer liegenden Asphaltschichten für VS 6

Wie schon bei VS 5 fällt auf, dass die bei den Georadarmessungen festgestellten Bereiche mit Auffälligkeiten an der Unterseite der Asphaltbinder-schicht auch anhand der Bohrkernbegutachtung nachvollzogen werden können (Abbildung 213). Zusätzlich wurden in diesen Bereichen, die als Fehlstellen an den Bohrkernen erkannt wurden, vereinzelt Feuchtebereiche in den Ergebnissen der Georadarmessungen erkannt.

Analog zur Vorgehensweise bei VS 5 erfolgte anschließend die Berechnung der Restnutzungsdauer auf Basis der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen aller Asphalt-schichten sowie der Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht nach dem Verfahren der [RDO Asphalt 09].



**Abbildung 214:** Ermittlung der Restnutzungsdauern für VS 6

Die Restnutzungsdauer für einen Bereich der Versuchsstrecke VS 6 ist in Abbildung 214 angegeben. Die angegebenen mehr als 30 Jahre sind dabei für den dritten homogenen Bereich ab Messstation 4+500 auf Basis der ZEB-Daten bzw. ab 5+100 auf Basis der FWD-Ergebnisse repräsentativ.

In den übrigen Bereichen wurden keine Bohrkern gezogen, so dass hierfür keine Prognose der Restnutzungsdauer nach dem Verfahren der RDO Asphalt möglich ist.

Anhand des Rankings, welches bei der Versuchsstrecke VS 4 beobachtet wurde, soll nachfolgend jedoch eine Tendenz abgeschätzt werden.

Eine Reihung anhand der ZEB-Ergebnisse lässt geringere Restnutzungsdauern zwischen 0+000 und 4+500 erwarten. Da gemäß der Vorbemerkungen die Aussagekraft der ZEB-Daten im Einzelfall eingeschränkt sein kann, sind zusätzlich die Ergebnisse der Georadarmessungen und Tragfähigkeitsmessungen zu berücksichtigen. Im Gegensatz zur vorherigen Versuchsstrecke zeigen die Kenngrößen  $D_0$  und  $M_0$  bei VS 6 den gleichen Trend. Demnach kann abgeschätzt werden, dass zwischen 0+000 und 2+600 eine höhere Restnutzungsdauer als zwischen 2+600 und 5+100 zu erwarten ist.

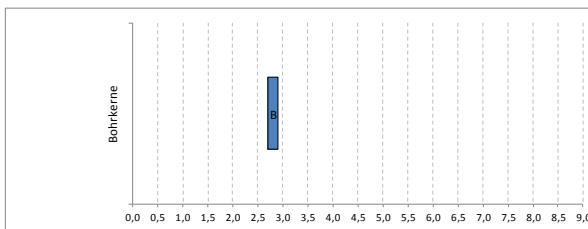
Die Kenngrößen I und Steifigkeit zeigen erneut eine davon abweichende Reihung. Auffällig ist vor allem der Bereich III zwischen 5+100 und 5+300, der anhand des Merkmals Steifigkeit die geringste Wertigkeit zugewiesen bekommt. Alle anderen

Tragfähigkeitskennwerte reihen diesen Bereich als besten Abschnitt, ebenso die Reihung auf Basis der ZEB-Ergebnisse.

Analog zu den bei VS 5 gezogenen Schlussfolgerungen kann nicht abgeschätzt werden welche Auswirkungen diese abweichende Reihung auf die zu erwartende Restnutzungsdauer haben kann. Anhand der aktuell vorliegenden Ergebnisse kann ein derartiger Zusammenhang nicht abgeleitet werden.

#### 7.5.4 Analysen für VS 7

Bei VS 7 handelt es sich um die Versuchsstrecke VS 10 aus dem Forschungsvorhaben FE 04.0227/2009/ARB, die zugehörigen Untersuchungsergebnisse sind in Anhang 5 angegeben. Die Entnahme von insgesamt 20 Bohrkernen erfolgte ab Entnahmestation 2+800 (siehe Abbildung 215).



**Abbildung 215:** Bohrkernentnahmestationen für VS 7

Anhand der entnommenen Bohrkern liegen detaillierte Informationen zur Beschaffenheit der tiefer liegenden Schichten vor (siehe Abbildung 216). Analog zu den entsprechenden Darstellungen für VS 5 und VS 6 können anhand dieser Ergebnisse Aussagen zu den Schichtdicken der Asphaltdeck-, der Asphaltbinder- und der Asphalttragschichten gewonnen werden sowie zum Schichtenverbund zwischen benachbarten Schichten. Zusätzlich sind Angaben zum strukturellen Zustand einzelner Schichten möglich, Beispiele hierfür sind das eventuelle Vorhandensein von Fehlstellen, Kornausbrüchen bzw. Rissen.

VS 7	Schichtenverbund			
Station	ADS - ABi	ABi - ATS		
2+800	+	+		

**Legende:**

- + Schichtenverbund an allen BK vorhanden
- (+) Schichtenverbund an einigen BK vorhanden
- Schichtenverbund an keinem BK vorhanden

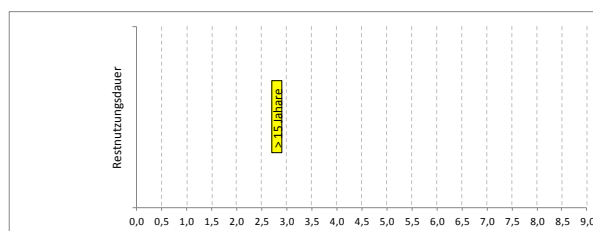
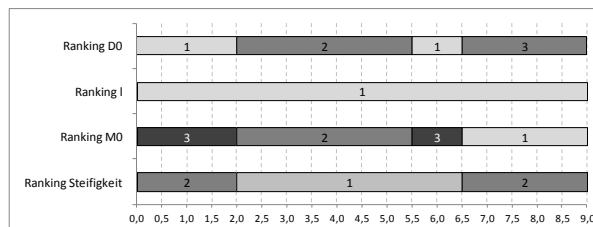
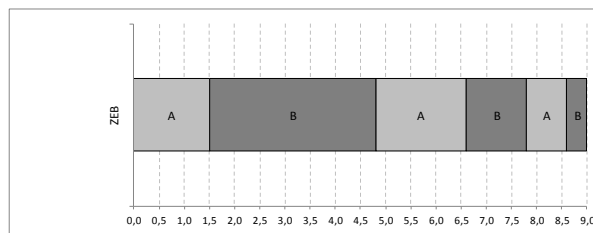
VS 7	mittlere Schichtdicken [cm]				
Station	ADS	ABi	ATS		$\Sigma$ Asphalt
2+800	4,6	8,9	8,3		21,8

VS 7		Bohrkernbegutachtung			
Station		keine Auffälligkeiten	Fehlstellen	Kornausbrüche	Rissbildung
2+800	ADS	x			
	ABi		x		
	ATS		x	x	

**Abbildung 216:** Anhand der Bohrkerne gewonnene Erkenntnisse zu tiefer liegenden Asphaltsschichten für VS 7

Wie schon bei VS 5 und VS 6 fällt auch hier auf, dass die bei den Georadarmessungen festgestellten Bereiche mit Auffälligkeiten an der Unterseite der Asphaltbinderschicht auch anhand der Bohrkernbegutachtung nachvollzogen werden können. Zusätzlich wurden in diesen Bereichen, die erneut als Fehlstellen an den Bohrkerne erkannt wurden, vereinzelt Feuchtebereiche in den Ergebnissen der Georadarmessungen erkannt.

In Abbildung 217 ist die Restnutzungsdauer für einen Abschnitt der Versuchsstrecke VS 7 angegeben und den übergeordneten homogenen Abschnitten gegenüber gestellt. Die Berechnung erfolgte gemäß der Vorbemerkungen unter Verwendung von Steifigkeitsmodul-Temperatur-funktionen sowie von Ermüdungsfunktionen nach Anhang 5.



**Abbildung 217:** Ermittlung der Restnutzungsdauern für VS 7

Die Restnutzungsdauer für einen Bereich der Versuchsstrecke VS 7 ist in Abbildung 217 angegeben. Dabei sind die angegebenen mehr als 15 Jahre für den zweiten homogenen Bereich zwischen den Messstationen 1+500 und 4+800 auf Basis der ZEB-Daten bzw. zwischen 2+000 und 5+500 auf Basis der FWD-Ergebnisse repräsentativ. In den übrigen Bereichen wurden keine Bohrkerne gezogen, so dass hierfür keine Prognose der Restnutzungsdauer nach dem Verfahren der [RDO Asphalt 09] möglich ist.

Analog zur Vorgehensweise bei VS 6 soll jedoch eine Tendenz der Restnutzungsdauer benachbarter Bereiche abgeschätzt werden.

Eine Reihung anhand der ZEB-Ergebnisse lässt höhere Restnutzungsdauern in den direkt angrenzenden Abschnitten erwarten, anhand der Reflexion im Lastzentrum  $D_0$  kann die gleiche Tendenz abgeschätzt werden. Dementsprechend ist für die Abschnitte zwischen 0+000 und 1+500 (bzw. 2+000) sowie 4+800 (bzw. 5+500) und 6+500 eine Restnutzungsdauer von deutlich über 15 Jahren zu erwarten.

Für die Bereiche zwischen 6+500 und dem Messende bei 9+000 ist eine derartige Abschätzung mit größeren Unsicherheiten behaftet, da die jeweiligen Merkmale keinen eindeutigen Trend aufzeigen. Nach aktuellem Kenntnisstand wird abgeschätzt, dass diese Bereiche eine Restnutzungsdauer von unter 15 Jahren aufweisen werden. Ursache hierfür sind die geringeren Verformungen  $D_0$  im Lastzentrum sowie die anhand der Geora-

darmessungen festgestellten Inhomogenitäten (siehe Abbildung 203).

Die übrigen Tragfähigkeitskenngrößen führen zu einer anderen Reihung der einzelnen Bereiche, wobei deren Relevanz im Rahmen einer Substanzbewertung gemäß den Vorbemerkungen noch unbekannt ist. Anzumerken ist jedoch, dass wie schon bei VS 5 die elastische Länge  $l$  keine Differenzierung der Versuchsstrecke erlaubt und einen einzigen homogenen Bereich ausweist.

## 7.6 Ergebnisbewertung für die Asphaltstrecken

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, homogene Abschnitte auf Basis unterschiedlicher Einzelmerkmale zu bilden und deren Relevanz im Rahmen der Substanzbewertung zu beurteilen. Dazu wurden in einem ersten Bearbeitungsschritt homogene Einzelabschnitte gebildet.

Als ein Ergebnis kann festgehalten werden, dass die alleinige Verwendung von Zustandsdaten aus Straßendatenbanken ohne zusätzliche Streckenbegehungen inklusive einer visuellen Zustandserfassung nicht empfehlenswert ist. Alternativ dazu kann geprüft werden, ob die Verwendung von Rohdaten aus der ZEB zielführend ist. Die Ursache hierfür liegt einerseits in der fehlenden Detaillierung der 100 m - Mittelwerte in den ZEB-Daten begründet. Die bautechnischen Besonderheiten, wie z.B. kurze A-Bauwerke, werden nicht erfasst. Darüber hinaus sollte anhand einer solchen Begehung unbedingt eine Plausibilitätsprüfung der weitgehend automatisch erfassten und manuell/visuell am Bildschirm bewerteten ZEB-Daten des Oberflächenbildes erfolgen.

Weiterhin ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass die im Rahmen der ZEB erfassten Zustandsmerkmale sich auf die Fahrbahnoberfläche beziehen und direkte Aussagen zu tiefer liegenden Schichten i.d.R. nicht möglich sind. Aus diesem Grund sind z.B. auch keine Aussagen darüber möglich, ob z.B. Risse durch alle Asphaltstrecken verlaufen und deshalb strukturelle Schäden vorhanden sind, oder, ob Risse z.B. nur in der Asphaltdeckschicht vorhanden sind. Diese Einschränkung ist bei der Beurteilung der ZEB-Werte generell zu berücksichtigen.

In einem nächsten Bearbeitungsschritt wurden deshalb zusätzliche Aufbaudaten zur Beurteilung der Versuchsstrecken herangezogen. Die Basis hierfür bildeten Untersuchungsergebnisse von Georadarmessungen. Mit dieser Vorgehensweise war es möglich, weitere homogene Einzelabschnitte auf Basis struktureller Aufbaudaten wie Schichtdicken und/oder Inhomogenitäten zu bilden. Beispiele hierfür sind im Einzelfall Feuchtebereiche, die einzelnen Schichtgrenzen zugeordnet werden

können (wobei hiermit aktuell noch ein großer Arbeitsaufwand verbunden ist). Daraus abgeleitet sind neben den Schichtdicken erste Tendenzen im Hinblick auf den strukturellen Zustand einzelner Schichten möglich.

Im Vergleich zu den Abschnittsgrenzen auf Basis der ZEB-Daten zeigte sich, dass anhand der größeren Erfassungsdichte beim Georadar wesentlich detailliertere Darstellungen möglich sind. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde den Abschnittsgrenzen auf Basis der Georadarmessungen der Vorzug bei der weiteren Auswertung gegeben.

Die derart ermittelten Abschnittsgrenzen wurden anschließend zur Bildung übergeordneter homogener Bereiche herangezogen, eine qualitative Reihung erfolgte anhand des Betrages der jeweiligen Merkmalsgrößen. Im Rahmen dieser Arbeitsschritte erfolgte bei den Versuchsstrecken in Asphaltbauweise hierzu die Berücksichtigung von Tragfähigkeitskennwerten, die anhand von FWD-Messungen ermittelt wurden.

Hinsichtlich der Aussagekraft der Tragfähigkeitskennwerte ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Bei VS 5 konnten plausible Ergebnisse aus der Verformung  $D_0$  im Lastzentrum festgestellt werden. Daraus abgeleitet konnten bei den übrigen Versuchsstrecken VS 6 und VS 7 Tendenzen für benachbarte Bereiche einer Bohrkernentnahmestation abgeleitet werden.

Hinsichtlich der elastischen Länge  $l$  ist anzumerken, dass diese bei zwei der drei Versuchsstrecken keine Differenzierung ermöglichte.

Die übrigen Tragfähigkeitskennwerte  $M_0$  und der Schichtmodul auf Basis der Wellenauswertungen beschreiben Eigenschaften der ungebundenen Schichten und geben dementsprechend Auskunft über tiefer liegende Schichten. Die Relevanz dieser Werte für die Abschätzung der Restnutzungsdauer kann zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht angegeben werden. Aus diesem Grund geht die teilweise entgegengesetzte Reihung der entsprechenden homogenen Abschnitte bisher auch nicht in die Bewertung der Substanz mit ein.

Wie auch schon bei den ZEB-Daten ist es bei der Auswertung der Tragfähigkeitsmessungen nicht auszuschließen, dass der relativ große Messpunktabstand von 50 m mit dafür verantwortlich ist, dass einige Abschnittsgrenzen nicht bzw. nicht exakt detektiert wurden und in der Folge tlw. eine andere Reihung der Abschnitte erfolgte.

Den Abschluss der Untersuchungen bildete eine Untersuchung der homogenen Abschnitte anhand von punktuellen Substanzwerten. Dazu erfolgte die Entnahme von Bohrkernen in einigen der übergeordneten homogenen Abschnitte. Diese Bohrkernentnahmen erlaubten es, die anhand der Georadarmessungen

ermittelten Imperfektionen im Großen und Ganzen zu bestätigen. Ergänzend dazu war es möglich, dimensionierungsrelevante Eingangsgrößen für die einzelnen Asphalt-schichten zu bestimmen und basierend darauf die Restnutzungsdauer für einzelne Abschnitte der drei Versuchsstrecken zu berechnen. Die hierzu aufgezeigten Ergebnisse sind statistisch in keiner Weise abgesichert und können vor diesem Hintergrund bis auf weiteres nicht als allgemeingültig angesehen werden. Trotzdem erlauben die vorliegenden Ergebnisse erste Schlussfolgerungen anhand der Tendenzen, die anhand der Untersuchungen aufgezeigt werden konnten. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die Versuchsstrecke VS 5, da hier innerhalb einer Beobachtungsstrecke von 7 km insgesamt 60 Bohrkern gezogen werden konnten. Damit war es möglich, die Reihung separater homogener Abschnitte mit den Restnutzungsdauern zu vergleichen. Im Einzelnen wurden hierzu Ergebnisse von ZEB-Messungen, Georadarmessungen und Tragfähigkeitsmessungen herangezogen.

Als wesentliches Ergebnis ist hierzu festzuhalten, dass die ermittelte Reihung einzelner homogener Bereiche anhand der rechnerisch ermittelten Restnutzungsdauer qualitativ bestätigt werden konnte. Somit erlaubt es die hier durchgeführte Bildung homogener Abschnitte im ersten Schritt, einzelne homogene Bereiche voneinander abzugrenzen. Darüber hinaus ist es damit möglich, eine vergleichende Bewertung benachbarter Abschnitte vorzunehmen und daraus eine Reihung abzuleiten. Im Hinblick auf eine strukturelle Substanzbewertung kann mit dieser Vorgehensweise zukünftig der Untersuchungsumfang unter Umständen deutlich reduziert werden, da Bohrkern dann nicht in jedem einzelnen Abschnitt gezogen werden müssten. In Abbildung 218 sind dementsprechend die bei den Versuchsstrecken VS 5 bis VS 7 beobachteten Tendenzen einzelner Kenngrößen angegeben. Dabei ist zu beachten, dass nur bei VS 5 Bohrkern in drei Bereichen gezogen wurden, während bei VS 6 und VS 7 jeweils nur eine Bohrkernentnahmestation vorhanden ist.

Merkmal	VS 5	VS 6	VS 7
Abschnittsgrenzen festlegen auf Basis von ZEB-Daten	-	-	-
Reihung homogener Abschnitte auf Basis von ZEB-Daten inkl. Untersuchung mit vis. Erfassung	+	(+)	(+)
Abschnittsgrenzen festlegen auf Basis Georadar	+	+	+
Reihung homogener Abschnitte auf Basis Georadar	+	(+)	(+)
Abschnittsgrenzen festlegen auf Basis FWD	-	-	-
Reihung homogener Abschnitte auf Basis FWD – Kenngröße $D_0$	+	(+)	(+)
Reihung homogener Abschnitte auf Basis FWD - Kenngröße I	-	(+)	(-)
Reihung homogener Abschnitte auf Basis FWD – Kenngröße $M_0$	-	(+)	(-)
Reihung homogener Abschnitte auf Basis FWD – Steifigkeit	-	(-)	(-)

Legende:

+ ... Tendenz erkennbar

- ... keine Tendenz erkennbar

( ) ... Werte in Klammern bei nur einer BK-Station

**Abbildung 218:** Beobachtete Tendenzen einzelner Kenngrößen der VS 5 bis VS 7

Die Zusammenfassung in Abbildung 218 verdeutlicht nochmals, dass anhand der ZEB-Daten auf Basis von 100 m - Mittelwerten keine zuverlässige Detektion einzelner Abschnittsgrenzen möglich ist. Erst anhand engmaschig aufgenommener Streckeninformationen ist das möglich. Im vorliegenden Fall haben sich hierzu Messwerte von Georadarmessungen, die in Längsrichtung aller 1 m einen Messwert ausweisen, bewährt. Im Hinblick auf die durchgeführten FWD-Messungen gilt ebenfalls diese Einschränkung. Die hier durchgeführten Messungen aller 50 m erlauben allein offenbar keine zuverlässige Bestimmung einzelner Abschnittsgrenzen, diese Abgrenzungen müssen anhand anderer Messungen ermittelt werden.

Hinsichtlich der Reihung der einzelnen homogenen Bereiche liefern alle hier untersuchten Messverfahren mit Einschränkungen brauchbare Ergebnisse und Tendenzen. Anhand der ZEB-Daten, die vorab anhand der Ergebnisse visueller Begehungen sowie anhand der mit Georadar erfassten Schichtdicken und Inhomogenitäten präzisiert wurden, ist es möglich, eine Reihung benachbarter Abschnitte vorzunehmen. Bei den Versuchsstrecken VS 5 bis VS 7 hat sich gezeigt, dass diese Vorgehensweise plausibel ist. Vergleichbare Tendenzen können auch anhand der Tragfähigkeitskenngröße  $D_0$  abgelesen werden. Bei den übrigen Ergebnissen der

FWD-Messungen ist es bei den untersuchten Strecken nicht gelungen, plausible Tendenzen aufzuzeigen.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass zurzeit eine zuverlässige Ermittlung der Restnutzungsdauer für Asphaltbefestigungen nur dann möglich ist, wenn jeden relevanten homogenen Abschnitt ausreichende Bohrkerne zur Anwendung des Verfahrens nach den RDO Asphalt gezogen werden. Nach der Bestimmung der entsprechenden Eingangsgrößen können dementsprechend Aussagen zum Substanzwert getroffen werden.

Aussagen zur Restnutzungsdauer benachbarten Abschnitte, für die keine Bohrkerne gezogen wurden, können vergleichend dazu getroffen werden, wenn für diese Bereiche gesicherte Aufbaudaten und Zustandsdaten vorliegen. Die Kombination von repräsentativen Zustandsdaten mit Ergebnissen von Georadarmessungen hat sich im vorliegenden Fall bewährt. Im Einzelfall kann die Überlagerung mit Kennwerten von Tragfähigkeitsmessungen sinnvoll sein. Bei einer solchen Vorgehensweise ist generell zu beachten, dass die derart (ohne Bohrkerne) gebildeten übergeordneten homogenen Abschnitte mit größeren Unsicherheiten behaftet sind, als es mit Prüfung einer ausreichenden Anzahl von Bohrkernen für jede Versuchsstrecke der Fall wäre.

## 8 Zusammenfassende Betrachtung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine Systematik zur Ermittlung von repräsentativen homogenen Abschnitten zu entwickeln, mit deren Hilfe strukturelle Substanzwerte besser ermittelt werden können. Dabei sollten die Ergebnisse zerstörungsfrei arbeitender Messsysteme mit erweiterten Informationen (z.B. Aufbau, Alter und Zustand der Strecken) kombiniert werden, um anschließend übergeordnete homogene Abschnitte zu bilden und diese nach Möglichkeit zu klassifizieren.

Weiterhin sollten die dementsprechend gebildeten homogenen Abschnitte anhand von Tragfähigkeitsmessungen und von stichprobenartigen Materialuntersuchungen untersucht werden.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen erfolgte auf vier ausgewählten Beton- und drei Asphaltabschnitten die Analyse der ZEB-Daten und der nur lückenhaft vorliegenden Bestandsdaten. Parallel dazu erfolgten Messungen mit dem Georadar. Zur Verifizierung der ZEB-Ergebnisse und zur Interpretation der Ergebnisse der Georadarmessungen wurde zusätzlich eine Streckenbegehung mit visueller Zustandserfassung durchgeführt. Gleichzeitig konnten mit der visuellen Zustandserfassung in begrenztem Umfang fehlende Angaben zum Aufbau und zur Erhaltungsgeschichte der Fahrbahnen gesammelt werden.

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wurden vertiefende Auswertungen durchgeführt. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass mit vier Strecken in Betonbauweise und drei Strecken in Asphaltbauweise der Stichprobenumfang insgesamt zu gering war, um die Ergebnisse für größere Netzabschnitte verallgemeinern zu können. Allerdings sind gute Tendenzen erkennbar, die weiter verfolgt werden können.

Eine alleinige Verwendung von Zustandsdaten aus Straßendatenbanken zur Substanzbewertung hat sich als nicht zielführend erwiesen. Ursache hierfür sind z.T. fehlerhafte bzw. unplausible Informationen in den Datenbanken. Aus diesem Grund ist eine Plausibilitätsprüfung vor Ort unbedingt erforderlich, wenn eine Substanzbewertung für eine definierte Strecke erfolgen soll (auf Objektebene). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens hat sich hierzu eine Begehung der Streckenabschnitte mit visueller Erfassung relevanter Zustandsmerkmale bewährt (sowohl für Asphalt- als auch für Betonbauweisen), wobei weitere relevante Schadensmerkmale erfasst wurden. Im Ergebnis dieser Vorgehensweise konnten zudem detaillierte Zustandsinformationen mit genauem Objektbezug erzielt werden, als es die 100 m - Mittelwerte der allgemein verfügbaren Zustandsdaten ansonsten erlauben. Gerade für die Festlegung von stationären

Folgeuntersuchungen, wie z.B. Bohrkernentnahmen, ist dieser Sachverhalt bedeutsam.

Eine deutlich höhere Detaillierung der Streckeninformationen konnte innerhalb des Forschungsvorhabens erreicht werden, indem Georadarmessungen zur Erfassung des Schichtenaufbaus erfolgten. Die hohe Messpunktdichte von bis zu 40 Scans pro Meter erlaubt eine annähernd lückenlose Erfassung der Schichtverläufe im Oberbau. Die dabei eingesetzte Gerätekonfiguration erlaubte dabei die Erfassung der Schichtgrenzen in Tiefen zwischen 0,10 m und 0,95 m, andere Tiefen könnten zukünftig mit weiteren Frequenzen erfasst werden.

Wie schon in der Vergangenheit hat sich auch in diesem Forschungsvorhaben gezeigt, dass mit Georadarmessungen nur dann genaue Angaben zu den Schichtdicken gegeben werden können, wenn eine Kalibrierung der Ergebnisse für die einzelnen Versuchsstrecken erfolgt. Erfolgt eine solche Abgleichung nicht, so sind die einzelnen Tiefenangaben mit größeren Ungenauigkeiten behaftet und erlauben dann nur noch die Auswertung von Schichtdickenschwankungen.

Neben der Ermittlung einzelner Schichtdicken wurden bei den durchgeführten Georadarmessungen zusätzlich Informationen zu Inhomogenitäten im Schichtenaufbau gewonnen, die wiederum auf Hohlstellen und/oder Wasseransammlungen zurückzuführen sein können. Diese Informationen waren zur Bewertung der Asphaltstrecken hilfreich, da diese Unstetigkeitsstellen zum Teil Tiefen von ca. 12 cm zugeordnet werden konnten, was der Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinder- und Asphalttragschicht entspricht.

Bei Betonabschnitten konnten ebenfalls detaillierte Informationen gewonnen werden. Dies betrifft die vorhandene Deckendicke, Hohllagerungen der Betonplatten, Wasseransammlungen sowie weitere Inhomogenitäten im Untergrund.

Im Rahmen der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens hat sich bei der Auswertung der Georadarmessung eine iterative Vorgehensweise bewährt, die einzelnen Arbeitsschritte sind in Abbildung 219 dargestellt.



**Abbildung 219:** Iterative Vorgehensweise im Rahmen der Georadarauswertung

Nach [FGSV 431] sind für jedes relevante Einzelmerkmal aus ZEB-Ergebnissen, Georadaruntersuchungen, Ergebnissen der visuellen Zustandserfassung und vorhandenen Bohrkernuntersuchungen nach dem Verfahren der kumulativen Summenbildung Unterabschnitte mit gleicher Merkmalsausprägung gebildet worden und auf ihre Gültigkeit geprüft worden.

Die Abschnittsbildung nach [FGSV 431] liefert nur bei großen Datenmengen und signifikant unterschiedlicher Merkmalsausprägung sinnvolle Ergebnisse.

Die Wichtung der Einzelmerkmale entsprechend ihrer Erfassungsgenauigkeit und die Bewertung der einzelnen homogenen Unterabschnitte nach ihrem Zustand führte dann zur Bildung übergeordneter homogener Abschnitte.

Eine erste Untersuchung der gebildeten Abschnitte erfolgte anhand von Tragfähigkeitsmessungen mit dem FWD. Eine Differenzierung der untersuchten Asphaltstrecken in Einzelabschnitte konnte anhand der FWD-Messungen belegt werden, jedoch wurden die Abschnittsgrenzen nicht eindeutig nachgewiesen. Die hier durchgeführten Tragfähigkeitsmessungen aller 50 m erlauben allein keine zuverlässige Bestimmung einzelner Abschnittsgrenzen.

Weiterhin hat sich dabei gezeigt, dass eine Kombination beider Verfahren einen wesentlichen Zugewinn an Informationen verspricht, da vorhandene Inhomogenitäten im Aufbau und Dickenschwankungen hinsichtlich der Tragfähigkeit beurteilt wer-

den können. Dadurch konnte eine umfassendere Bewertung der Strecken erfolgen, als es bei alleiniger Anwendung der Verfahren Georadar oder FWD möglich gewesen wäre.

Bei den Betonstrecken wurden die FWD-Messungen beiderseits der angenommenen übergeordneten homogenen Abschnitte durchgeführt, um Aussagen zur Existenz der bis dahin ermittelten Abschnittsgrenzen zu gewinnen. Das Ergebnisbild war uneinheitlich, so dass das Messverfahren zur Abschnittsbildung nur bedingt beitragen kann.

Der letzte Schritt der Untersuchung der ermittelten homogenen Abschnitte erfolgte anhand von Bohrkernentnahmen und der daran bestimmten Restnutzungsdauer nach den Verfahren der [RDO Beton] und [RDO Asphalt 09] bzw. RSO Beton und RSO Asphalt. Dabei hat sich bei den untersuchten Asphaltstrecken gezeigt, dass anhand einzelner Merkmalsgrößen innerhalb der übergeordneten Abschnitte eine vergleichbare Reihung abgeleitet werden kann. Diese Reihung ist konform zu den nach [RDO Asphalt 09] bzw. RSO Asphalt ermittelten Restnutzungsdauern. Aus diesem Vergleich können vor allem Tendenzen für Abschnitte abgeleitet werden, die benachbart zu Abschnitten mit Bohrkernentnahmen liegen. Eine solche Übertragbarkeit auf benachbarte Abschnitte kann bisher nur qualitativ erfolgen. Eine Quantifizierung der Restnutzungsdauer für Abschnitte, in denen keine Bohrkernentnahmen gezogen wurden, kann anhand der bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht abgeleitet werden.

Die Untersuchungen der ermittelten homogenen Abschnitte bei den Versuchsstrecken mit Betondecke ergaben überwiegend eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Bewertung der strukturellen Substanz aus Bohrkernentnahmen nach dem Verfahren der [RDO Beton 09] bzw. RSO Beton. Da im parallel laufenden [FE 04.433/2009/DGB] die Ermüdungskurven der [RDO Beton 09] bestätigt werden konnten, ist die Bewertung mit den zum Bewertungszeitpunkt ermittelten statischen Spaltzugfestigkeiten evident. Die Abweichungen einiger Ergebnisse sind dadurch erklärbar, dass einerseits die Bohrkernentnahme an den Versuchsstrecken nicht statistisch verteilt über die Fläche erfolgte und andererseits die statischen Randbedingungen der Betonplatten zusätzlich bewertet werden müssen. Dies betrifft insbesondere die Änderungen der Auflagerung durch Hohlagerungen und der seitlichen Querkraftübertragung.

## 9 Ausblick

Der weitere Forschungsbedarf leitet sich direkt aus der Ergebniszusammenfassung der Kapitel 6 und 7 ab.

Im Vordergrund steht dabei die Anwendung der hier eingesetzten Verfahrensweise für ein größeres Streckenkollektiv von Beton- und Asphaltstraßen.

Die beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse von präzisen Zustandserfassungen sinnvoll durch Ergebnisse von Georadarmessungen ergänzt werden können. Der Einsatz von 2,6 GHz-Antennen zur genaueren Schichtgrenzenerkennung ist wünschenswert. Anzumerken ist jedoch, dass die Auswertung der dabei entstehenden riesigen Datenmengen aktuell noch einen großen Arbeitsaufwand bedingt. Gegenstand zukünftiger Entwicklungen sollten deshalb teilautomatische oder automatische Auswerterroutinen sein, um neben dem Schichtverlauf und zugehörigen Schichtdicken auch Inhomogenitäten aufzeigen zu können.

Mittelfristig werden folgende Signaturen aus den Radargrammen heraus automatisch erfassbar sein:

### Nässe unter den Plattenfugen

Anhand der automatischen und kontinuierlichen Ermittlung der Reflektivitäten werden Nassbereiche von trockenen unterschieden und mit dezimetergenauem Lagebezug dokumentiert.

### Verläufe von Schichtgrenzen

Nach einer speziellen datentechnischen Aufbereitung (u.a. Kontrastverfahren) werden Schichtgrenzenverläufe zuverlässiger und schneller - auch für mehrere parallele Profile erfasst und dokumentiert.

Bei vorliegenden Bestandsdaten (Solldicken) kann ein erster statistischer Abgleich erfolgen, der anhand von Bohrkernen verifiziert wird.

### Hohlräume / Hohllagen

Größere Hohlräume werden anhand der aus den Daten automatisch erfassbaren Periodendauern detektiert und dokumentiert.

Bei kleinen Ablösungen und Hohllagen im Millimeterbereich findet das Interferenzverfahren Anwendung.

Dies geschieht nicht von selbst, sondern muss getragen von Fachleuten und Institutionen zielorientiert entwickelt bzw. weiterentwickelt werden.

Unter diesen Voraussetzungen und unter Berücksichtigung der Ergebnisse einer präzisierten ZEB (Zeilenkamera) ist eine netzweite Erfassung des „echten“ Zustandes und damit eine Prognose der

Restsubstanz bald möglich. Die Durchführung von Radarmessungen und die Erfassung des Oberflächenbildes können von einem Fahrzeug aus synchron durchgeführt werden.

Denn die auf Basis manueller Auswertungen gezeigten Tendenzen sind vielversprechend.

In diesem Zusammenhang sollte zusätzlich geprüft werden, ob perspektivisch die Kombination von schnellfahrenden Georadarmessungen mit schnellfahrenden Tragfähigkeitsmesssystemen umsetzbar wäre. Die gezeigten Tendenzen lassen erkennen, dass eine umso umfassendere Bewertung eines Streckenabschnittes möglich ist, je mehr Informationen vorliegen, die zeitgleich und somit unter gleichen Randbedingungen erzeugt werden.

Analog zur Versuchsstrecke VS 5 sollten an weiteren Strecken in Asphaltbauweise jeweils etwa 20 Bohrkern in benachbarten homogenen Bereichen gezogen werden, um daran die Dimensionierungseingangsgrößen zur Ermittlung der Restnutzungsdauer nach dem Verfahren der [RDO Asphalt 09] bzw. RSO Asphalt zu bestimmen. Im Anschluss daran bestünde die Möglichkeit, die Reihung unterschiedlicher homogener Bereiche mit den zugeordneten Restnutzungsdauern gegenüberzustellen. Dazu sollte vorab geprüft werden, ob zukünftig die Bohrkernentnahme weiterhin engräumig begrenzt erfolgen soll, oder ob eine Gleichverteilung der Bohrkern innerhalb eines homogenen Untersuchungsabschnittes ggf. vorteilhaft wäre. Voraussetzung hierfür wäre es jedoch, dass die dann eventuell auftretenden größeren Streuungen der Eingangsparameter (z.B. bei den absoluten E-Moduln und/oder den Ermüdungsfunktionen) gezielt bei der Ermittlung der Restnutzungsdauer berücksichtigt werden.

Bei den zu bewertenden Strecken in Betonbauweise sollte die Methode der statistisch zu entnehmenden Stichprobe (Bohrkerne) gemäß [AL Sp-Beton 06] beibehalten werden. Im Regelfall reichen die Aussagen aus der statischen Spaltzugfestigkeitsprüfung für eine Einschätzung zur homogenen Abschnittsbildung aus. Zur Ermittlung der Restnutzungsdauer sollte das Verfahren der [RDO Beton 09] sinngemäß angewendet werden bis eine in Bearbeitung befindliche RSO Beton fertig gestellt ist.

Für die zukünftige Bildung repräsentativer homogener Abschnitte zur Bewertung der Restsubstanz bzw. der Restnutzungsdauer können nach aktuellem Kenntnisstand folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- (1) Die Bildung repräsentativer homogener Abschnitte aus Zustandsdaten aus Straßendatenbanken allein ist zurzeit nicht zielführend.
- (2) Eine Verbesserung der Zustandsdaten aus Straßendatenbanken durch eine visuelle Zu-

standserfassung mit systematischer Aufnahme der relevanten Merkmale ist zurzeit unabhangigbar.

- (3) Die Überlagerung der aus (1) und (2) gewonnenen Daten mit Auswertungen präziser Georadarmessungen ist möglich. Es wird jedoch auf den beschriebenen weiteren Forschungsbedarf verwiesen.
- (4) Zur Verifizierung der Georadardaten sind Bohrkernentnahmen erforderlich, die in Lage und Menge den zu beurteilenden Abschnitt statistisch repräsentieren müssen. Die Bohrkernkerne können später zur direkten Bewertung der Restsubstanz hinzugezogen werden.
- (5) FWD Messungen sind auf Netzebene aufwendig und geben nur bedingt Auskunft zu Abschnittsgrenzen. Die Ergebnisse von Tragfähigkeitsmessungen hängen grundsätzlich stark von den Randbedingungen der Messung ab.
- (6) Darüber hinaus ist eine zuverlässige Ermittlung der strukturellen Substanz und der Restnutzungsdauer für Beton- und Asphaltbefestigungen nur dann möglich, wenn in jedem relevanten homogenen Abschnitt eine ausreichende Zahl an Bohrkernen zur Anwendung des Verfahrens nach den [RDO Beton 09] und [RDO Asphalt 09] bzw. RSO Beton und RSO Asphalt gezogen werden.

## Literatur

- [BALD 1999] Einfluss der Temperatur, der Belastungsfrequenz und der Impulskraft beim FWD auf die Größe der effektiven Schicht E-Moduln, Darmstadt, 1999
- BAST 2013] Bast.de  
[http://www.bast.de/cln\\_031/nn\\_157986/Zeb/DE/Teilprojekte/teilprojekt4/Teilprojekt\\_\\_4.html](http://www.bast.de/cln_031/nn_157986/Zeb/DE/Teilprojekte/teilprojekt4/Teilprojekt__4.html)
- [BAST, Schadensbilder], [http://www.bast.de/cln\\_031/nn\\_157986/Zeb/DE/Teilprojekte/teilprojekt3/Teilprojekt\\_\\_3.html](http://www.bast.de/cln_031/nn_157986/Zeb/DE/Teilprojekte/teilprojekt3/Teilprojekt__3.html)
- [BAST, Teilprojekte ZEB], [http://www.bast.de/cln\\_031/nn\\_157986/Zeb/DE/Teilprojekte/teilprojekt4/Teilprojekt\\_\\_4.html](http://www.bast.de/cln_031/nn_157986/Zeb/DE/Teilprojekte/teilprojekt4/Teilprojekt__4.html)
- [FE 04.199/2004/ARB], RESSEL, WELLNER, BENNER, LIPKE: Vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Asphaltbefestigungen nach langjähriger Verkehrsnutzung
- [FE 04.215/2008/AGB], WELLNER, KAYSER, KUHLSCH, KIEHNE: Erarbeitung probabilistischer Verfahrensweisen für die rechnerische Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen – Teil: Asphaltdecken
- [FE 04.227/2009/ARB], Weiterführende Untersuchungen zur Vervollständigung des Verfahrens zur Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen, unveröffentlichter Zwischenbericht - Bearbeitungsstand 2012
- [FE 04.433/2009/DGB], VILLARET, EICKSCHEN, PICHOTTKA; RIWE; ZANDER; TSCHERNACK: Grundlagen für eine vergleichende Bewertung der Restsubstanz von Fahrbahnbefestigungen in Betonbauweise nach mehrjähriger Verkehrsnutzung
- [FIE/WO 2005], FIELENBACH, WOLF: Bewertung der strukturellen Substanz von Betonbefestigungen mittels Falling Weight Deflectometer Messdaten – Ableitung von Grenzwerten zwischen Tragfähigkeitsbereichen, 2005
- [FR/GR 2003], FREUND, GROSSMANN: Substanzbewertung von Betonfahrbahnen, Vortrag auf der Betonstraßentagung 2003 in Stuttgart
- [GRÄTZ 2009], Habilitationsschrift, Bewertung der Tragfähigkeit und der Standfestigkeit bestehender Asphaltstraßen zur Wahl zweckmäßiger Erhaltungsmaßnahmenarten, Straße und Autobahn, Heft 9 und 10/2009
- [GR/LI/HÜ/ZA 2012], GROHS, LINDEMANN, HÜBELT, ZANDER: Schlussbericht FE Beurteilung der strukturellen Restsubstanz von Verkehrsbefestigungen in Asphaltbauweise auf der Grundlage von impulsförmiger Schwingungsanregung, 2012
- [GRA], Grapentin, Messen von mechanischen Schwingungen, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
- [GROHS 2012], GROHS, Manuskript zur Dissertation, unveröffentlicht, Stand 2012
- [GRO/VI 2009], GROSSMANN, VILLARET: Restwertermittlung von Asphalt- und Betonstraßen, Straße und Autobahn, 06/2009
- [JU/WO 2005], Jungfeld, I.; Wolf, A.; Vergleichsmessungen mit den Messsystemen Benkelman-Balken und Falling Weight Deflectometer (FWD) an der Modellstraße in der Halle 9 der BAST, Bergisch Gladbach 2005
- [Kehrer 2011], Kehrer, Erarbeitung eines Vorschlags zur Bewertung der Tragfähigkeit von Asphaltstraßen basierend auf „Curviometro-Messungen“, Konstanz 2011
- [RO/FR/TH 2008] ROOS, R.; FREUND, H.-J.; THIELE, T.: Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für Tragfähigkeitsmessungen auf Basis von Zustandsindikatoren nach Jendia, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 989, 2008
- [SACHS 2006] SACHS, L.: Angewandte Statistik, Springer Verlag, 12. Auflage 2006
- [STR/HAS/HAR 2008] STRAUSSENBERGER, D.; HASENSTAB, A.; HARTMANN, I.: Straßenuntersuchungen mit Radar, Ultraschall-echo und FWD, Beitrag zur Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008, Nürnberg, 2008
- [SY/AL/RO 1994] SYKORA, D. W.; ALEXANDER, D. R.; ROESSET, J. M.: Determination of Soil Moduli in Soil-Structure Systems on Highways, University of Texas at Austin: US Army Corps of Engineers, 1994
- [VI/KIE/MU/NIE/RI 2011], VILLARET, KIEHNE, MUSFELDT, NIESSEN, RIWE: Forschungsprogramm Innovationsprogramm Straße, „Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der strukturellen Substanz von Verkehrsflächen mit unbewehrter Betondecke“, 05/2011
- [VI/KI/RI 2011], VILLARET, KIEHNE, RIWE: Probabilistische Verfahrensweise für die Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen - Teil Betondecken, Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 1072 (2011)
- [WOLF 2009], Wolf, A: Grundlagen der zerstörungsfreien Bestimmung der Tragfähigkeit befestigter Verkehrsflächen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD). Vortrag in di-

versen Arbeitskreissitzungen, Bergisch Gladbach 2009

## Verwendete Regelwerke

[AL Sp-Asphalt 09] FGSV: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung AL Sp-Asphalt 09, Ausgabe 2009

[AL Sp-Beton 06] FGSV: Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzug-festigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen AL Sp-Beton 06, Ausgabe 2006

[FGSV 431], FGSV: Arbeitspapier - Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen, FGSV, Ausgabe 2009

[FGSV 433 B 2.1], Arbeitspapier Tragfähigkeit. Teil B 2.1: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung - Asphaltbauweisen, FGSV, Ausgabe 2008

[FGSV 433 B 2.2], Arbeitspapier Tragfähigkeit. Teil B 2.2: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung - Betonbauweisen, FGSV, Ausgabe 2012

[FGSV 433 C 2], Arbeitspapier Tragfähigkeit Teil C2 „Falling Weight Deflectometer (FWD) : Auswertung und Bewertung“ (ENTWURF)

[FGSV AP 9 S], Systematik der Straßenerhaltung - Reihe S Substanzwert (Bestand), FGSV, Ausgabe 2003

[RPE Stra 01], Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen, FGSV, Ausgabe 2001

[RDO Asphalt 09], Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, FGSV, Ausgabe 2009

[RDO Beton 09] FGSV: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen RDO-Beton 09, Ausgabe 2009

[RStO 86/89] FGSV: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen , Ausgabe 1986, Ergänzte Fassung 1989

[RStO 01] FGSV: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen , Ausgabe 2001

[RStO 12] FGSV: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen , Ausgabe 2012

[TL Beton-StB 07] Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton

[TP Beton] Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton

[ZTV ZEB-StB 06], Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, FGSV, Ausgabe 2006