

Schlußbericht

Bewährung speziell konzipierter Asphalte in der Praxis

Antragsteller: Deutsches Asphalt Institut
Bonn

Forschungsstelle: Prüfamnt für Bituminöse Baustoffe
und Kunststoffe der TU München

Bearbeiter: AOR Dr.-Ing. Thomas Wörner
Dipl.-Ing. Martin Kern

München 1998

Schlußbericht

Bewährung speziell konzipierter
Asphalte in der Praxis

Antragsteller: Deutsches Asphalt Institut
Bonn

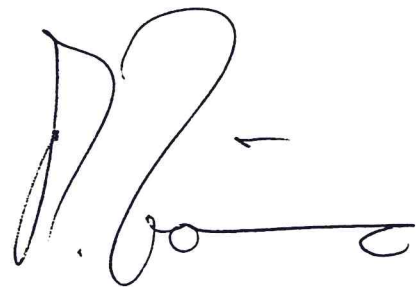
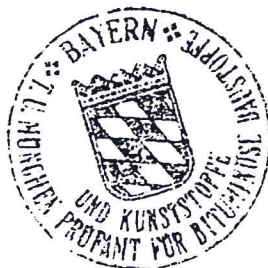
Forschungsstelle: Prüfamnt für Bituminöse Baustoffe und
Kunststoffe der TU München

Bearbeiter: AOR Dr.-Ing. Thomas Wörner
Dipl.-Ing. Martin Kern

München, im Mai 1998



Dipl.-Ing. M. Kern
Sachbearbeiter



AOR Dr.-Ing. Th. Wörner
Projektleiter

PRÜFAMT FÜR BITUMINÖSE BAUSTOFFE UND KUNSTSTOFFE DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Dir.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schießl

AIF-Forschungsvorhaben 10695 N/1

Bewährung speziell konzipierter Asphalte in der Praxis

Kurzfassung

Ziel der Forschungsarbeit zur Bewährung speziell konzipierter Asphalte in der Praxis war es, am Beispiel von Splittmastixasphalt 0/11S zu untersuchen, ob sich ein Zusammenhang zwischen der im dynamischen Druck-Schwell-Versuch (DSV) am Marshallprobekörper ermittelten Dehnungsrate und der sich bei Straßen mit über den DSV konzipiertem Asphalt unter Praxisbedingungen einstellenden Verformungsrate herstellen läßt.

Zur Ermittlung dieses Zusammenhangs wurden zunächst die vorliegenden Prüfergebnisse aus dem DSV im Rahmen der erweiterten Eignungsprüfungen ausgewertet. Aus allen zu Verfügung stehenden Datensätzen konnte ein oberer Anhaltswert für die Dehnungsrate von $4,2\text{‰}/10^4$ Lastwechsel ($2,5 \cdot 10^{-5}$ mm/Lastwechsel) abgeleitet werden. In weiterführenden Laboruntersuchungen wurden im DSV Proben untersucht, die ausgehend von einer optimierten Eignungsprüfung in ihrer Korngrößenverteilung, ihrem Bindemittelgehalt und Verdichtungsgrad im zulässigen Toleranzbereich der ZTV bit-StB 84/90 variiert wurden. Die Ergebnisse aus dieser Untersuchung bestätigten den zuvor genannten Anhaltswert, unterhalb dessen sich ein Mischgut im Labor als standfest identifizieren läßt. Die Laboruntersuchungen deuteten an, daß bei Ausnutzung der im Technischen Regelwerk verankerten Toleranzen Asphalte mit ungünstigem Gebrauchsverhalten zum Einsatz kommen können.

Für die Analyse des Verformungsverhaltens der Splittmastixasphalte 0/11S in der Praxis konnten 47 Deckenbaulose, bei denen im Rahmen der Eignungsprüfung dynamische Druck-Schwell-Versuche durchgeführt worden waren, zusammengestellt werden. Die Deckenbaulose wiesen Verkehrsbelastungszahlen bis zu 9000 auf. Bei 20 ausgewählten Baulose wurden Untersuchungen an Bohrkernen vorgenommen. Für alle näher untersuchten Deckenbaulose konnten die gemessenen Spurtiefen auf die Deckschicht zurückgeführt werden. Eine funktionale Beziehung zwischen den Verformungsraten der vergleichbaren Splittmastixasphalte aus Labor und Praxis konnte nicht gefunden werden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die verwendeten Splittmastixasphalte 0/11S sehr ähnlich zusammengesetzt waren und ein sehr gutes Gebrauchsverhalten aufwiesen. Zur Festlegung eines Grenzwertes wären auch Strecken mit ungünstigerem Verhalten erforderlich gewesen.

Durch den Vergleich einer theoretischen Spurrinnentiefe mit einem in der Praxis üblichen Warnwert, konnte für die Spurrinnentiefe ein Richtwert für die Verformungsrate der untersuchten Deckschichten in der Praxis ermittelt werden. An Hand des Vergleichs der Verformungsraten aus Labor und Praxis wurde für die Dehnungsrate im DSV ein Orientierungswert abgeleitet. In Verbindung mit dem Richtwert für die Verformungsrate der Deckschichten in situ ließ sich mit diesen Werten ein Bereich abgrenzen, in welchen sich standfestes Mischgut einordnen läßt. Für die weitere Anwendung des DSV sollte ein erweiterter Bewertungshintergrund geschaffen und die Präzision des Verfahrens bestimmt werden.

Die Eignung des dynamischen Druck-Schwell-Versuchs für die Optimierung der Wärmestandfestigkeit von Splittmastixasphalt im Labor konnte gezeigt und ein Orientierungswert für die Dehnungsrate für die Gewährleistung der Standfestigkeit des Asphaltes in der Praxis abgeleitet werden. Das Forschungsziel wurde erreicht.

1 Einleitung - Problemstellung	1
2 Vorgehensweise	3
3 Theoretische Grundlagen	1
3.1 Begriffsbestimmungen	7
3.2 Stoffeigenschaften von Asphalt	7
3.3 Rheologische Grundmodelle	7
3.4 Rheologische Asphaltmodelle	9
3.5 Zum Verformungsverhalten von Asphalt	12
3.5.1 Allgemeine Betrachtung	12
3.5.2 Betrachtung unter Laborbedingungen	15
3.5.2.1 Theoretische Ansätze	15
3.5.2.2 Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern	16
3.5.3 Betrachtung unter Praxisbedingungen	19
3.5.3.1 Empirische Ansätze	19
3.5.3.2 Klimatische Einflüsse	23
3.5.3.3 Verkehrseinflüsse	25
3.5.3.4 Einflüsse der Linienführung	27
3.5.3.5 Einflüsse des Regelquerschnitts	28
3.6 Laborverfahren zur Prüfung der Verformungsbeständigkeit von Asphalt	29
3.6.1 Übersicht	29
3.6.2 Spurbildungsversuche	30
3.6.3 Druckversuche	30
3.6.3.1 Der statische Kriechversuch	30
3.6.3.2 Der dynamische Kriechversuch	31
3.6.3.3 Der dynamische Druck-Schwell-Versuch	31
3.7 Statistik	34
3.7.1 Voraussetzungen für statistische Anwendungen	35
3.7.2 Meßwertverträglichkeit	37
3.7.3 Prüfung der Verteilungsart der Daten	38
3.7.4 Verteilungsunabhängige Abhängigkeitsmaße	39
4 Auswertung vorhandener Untersuchungen	41
4.1 Untersuchungsprogramm	41
4.2 Mischgutdaten für die Datenanalyse	41
4.3 Aufbereitung des Datenmaterials	42
4.3.1 Funktionsanpassung	43
4.3.2 Charakteristische Kenngrößen	43

4.4 Ergebnisse der Datenanalyse	44
4.4.1 Funktionsanpassung	44
4.4.2 Meßwertverträglichkeit und Mittelwertbildung	46
4.4.3 Streuungen	48
4.4.4 Bedeutung der Korngrößenverteilung	50
4.4.5 Einfluß der Bindemittelart	53
4.4.6 Untersuchung von Asphaltkenngrößen	55
4.4.6.1 Prüfung der Verteilungsart	55
4.4.6.2 Bedeutung von Asphaltkenngrößen	56
4.4.7 Allgemeine Betrachtung der Streuung der Dehnungsrate	59
5 Laboruntersuchungen	62
5.1 Untersuchungsprogramm	62
5.2 Beschreibung der Versuchseinrichtung	63
5.3 Versuchsdurchführung	64
5.4 Versuchsauswertung	65
5.4.1 Funktionsanpassung und Ausreißerprüfung	65
5.4.2 Einfluß des Bindemittelgehaltes	67
5.4.3 Einfluß des Verdichtungsgrades	68
5.4.4 Einfluß der Korngrößenverteilung	70
5.4.5 Folgerungen für die Praxis	72
6 Untersuchungen in situ	74
6.1 Streckendaten und -beschreibung	74
6.1.1 Relevante Deckenbaulose	74
6.1.2 Betrachtung der Deckschichtzusammensetzung	76
6.1.2.1 Mischgutart	76
6.1.2.2 Korngrößenverteilung	76
6.1.2.3 Eingesetzte Bindemittel	77
6.1.3 Klimadaten	77
6.1.4 Verkehrsdaten	81
6.1.5 Linienführung und Regelquerschnitt	83
6.1.6 Bauweisen	83
6.2 Untersuchung des Querprofils	84
6.2.1 Zustandserfassung	84
6.2.2 Auswertung der Zustandserfassung	85
6.3 Untersuchungen zu den einzelnen Deckenbaulosen	88
6.3.1 Auswahl der Baulose für Bohrkernentnahmen	88
6.3.2 Bohrkernentnahmen	91
6.4 Messung des Querprofils an den Bohrkernentnahmestellen	93

7 Auswertung der Untersuchungsergebnisse aus Labor und Praxis	98
7.1 Vorgehensweise	98
7.2 Untersuchungsmerkmale an Bohrkernen	99
7.3 Prüfung auf den Erhalt des Einbauzustandes	101
7.4 Analyse der Schichtenverformung	103
7.4.1 Ergebnisse aus der Schichtdickenmessung	103
7.4.1.1 Deckschichten	105
7.4.1.2 Binderschichten	107
7.4.2 Untersuchungsergebnisse der Bohrkerneigenschaften	107
7.4.2.1 Deckschichten	109
7.4.2.2 Binderschichten	110
7.5 Prüfung auf Vergleichbarkeit der Asphalte zwischen Labor und Praxis	111
7.5.1 Vergleichbarkeit der Korngrößenverteilung zwischen Labor und Praxis	111
7.5.2 Bindemittelgehalt und Mischgutrohdichte	116
7.6 Untersuchung der Verformungen in der Praxis	116
7.6.1 Verformungsrate der Deckenbaulose	116
7.6.2 Auswirkungen von Asphaltkenngößen auf die Verformungsrate in der Praxis	119
7.7 Vergleich der Verformungsraten aus Labor und Praxis	120
8 Bewertung und Ausblick	126
9 Zusammenfassung	128
10 Literaturverzeichnis	131

1 Einleitung - Problemstellung

An Straßen mit einem Oberbau aus Asphalt können plastische Deformationen in Form von Spurrinnen auftreten. Seit dem Sommer 1994 und durch die in den neuen Bundesländern bei Neubau- und Erhaltungsmaßnahmen vermehrt aufgetretenden Verformungen ist in diesem Zusammenhang in der Fachwelt die Diskussion über die Standfestigkeit von Asphalt wieder in den Vordergrund getreten /1/.

Für den Verkehrsteilnehmer ist die Spurrinnenbildung eine Einschränkung seiner Fahrsicherheit (Aquaplaning, Zwangsführung) und seines Fahrkomforts (Unebenheiten). Für die Straßenbauverwaltungen sind Unebenheiten im Querprofil (Spurrinnen) ein Zustandsmerkmal, das nach Erreichen eines Warnwertes Erhaltungsmaßnahmen zwingend erforderlich macht.

Um u.a. die Verkehrssicherheit aufrecht zu erhalten und die Kosten der Straßenerhaltung zu minimieren, ist es ein Ziel der Asphalttechnologie, für schwer beanspruchte Straßen entsprechend standfeste Asphalte zu konzipieren.

Da sich die Bewährung eines standfesten Mischgutes nicht erst in der Praxis herausstellen darf, ist man bestrebt, durch entsprechende Prüfverfahren das Verformungsverhalten von Asphalt im Labor zu prognostizieren.

Im "Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt" der Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen /57/ wird zur Prüfung des Verformungsverhaltens u.a. der dynamische Druck-Schwell-Versuch genannt. Im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen, wie sie von einigen Straßenbauverwaltungen gefordert werden, findet dieser Versuch Anwendung.

Die Einteilung von Asphalt in Kategorien wie z.B. "standfest" oder "weniger standfest" macht Anforderungen und für das eingesetzte Prüfverfahren einen Bewertungshintergrund notwendig. Sowohl die Anforderungen als auch der Bewertungshintergrund für die Ergebnisse des dynamischen Druck-Schwell-Versuchs liegen in der Praxis bisher nicht vor. Dadurch reduziert sich die Einsatzmöglichkeit des Versuchs auf die Optimierung von Asphalt im Labor, und erschwert eine Anwendung im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen, die die Beurteilung von Gebrauchseigenschaften eines Asphaltes zum Ziel haben.

In der hier vorgestellten Arbeit wird der dynamische Druck-Schwell-Versuch, als einaxialer, dynamischer Druckversuch ohne Behinderung der Seitendehnung, auf seine Eignung zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Asphaltmischungen für Deckschichten untersucht.

Die Verformbarkeit eines Probekörpers bei vorgegebenen Versuchsbedingungen gilt dabei als Maß für den Verformungsverlauf des Asphaltmischgutes in der Praxis.

Berücksichtigung finden dabei im wesentlichen Asphalte, die nach dem Splittmastixprinzip zusammengesetzt sind.

Untersuchungsziel ist die Ermittlung eines Zusammenhanges zwischen den gemessenen Verformungsdaten an Asphalten aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch im Labor und den sich auf Straßen, deren Deckschicht aus dem zugehörigen speziell konzipierten Mischgut aufgebaut ist, unter Praxisbedingungen einstellenden Verformungen.

Bei Vorhandensein eines Zusammenhanges könnten Anforderungen abgeleitet werden, um eine Einteilung der geprüften Asphalte vorzunehmen.

Über korrelative Betrachtungen der verschiedenen Einflußgrößen in Labor und Praxis kann dann festgestellt werden, ob sie in einem Zusammenhang stehen und sich hieraus gegebenenfalls ein Bewertungshintergrund für das Prüfverfahren ableiten läßt.

Liegt ein Zusammenhang vor, erscheint eine Anwendung des dynamischen Druck-Schwell-Versuches im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen als sinnvoll.

Die vorliegende Untersuchung wurde mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) durchgeführt; dem BMWi und der AiF sei an dieser Stelle hierfür gedankt.

Ein weiterer Dank geht an die Autobahndirektion Nordbayern, Dezernat 12, für die sehr kooperative Zusammenarbeit und umfangreiche Zusammenstellung von Daten der im praktischen Teil dieser Arbeit untersuchten Deckenbaulose.

2 Vorgehensweise

Am Prüfamnt für Bituminöse Baustoffe und Kunststoffe der TU München wurden in der Vergangenheit im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen dynamische Druck-Schwell-Versuche für unterschiedliche Asphalte durchgeführt. Das aus diesen Laborversuchen gewonnene Datenmaterial wird aufbereitet und ausgewertet.

Die Auswertung hat zum Ziel, einen Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der dynamisch geprüften Probekörper - wie Hohlraumgehalt, Ausfüllungsgrad, Korngrößenverteilung, Bindemittelart, etc. - und den Ergebnissen des dynamischen Druck-Schwell-Versuchs herzustellen.

In dieser Auswertung konnten aufgrund der von der Autobahndirektion Nordbayern zur Verfügung gestellten Unterlagen, von zwei weiteren Prüfinstituten Ergebnisse aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch mit einbezogen werden, die ebenfalls bei erweiterten Eignungsprüfungen gewonnen wurden.

Zunächst werden alle vorhandenen Prüfergebnisse aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch von Asphalten für Deckschichten zusammengestellt und nach ihrer Mischgutart (Splittmastixasphalt, Asphaltbeton) sortiert.

Eine weitere Berücksichtigung im Rahmen dieser Arbeit finden jedoch nur Splittmastixasphalt 0/8S und 0/11S sowie Asphaltbeton 0/11S, da nur für diese Mischgutsorten ausreichend Datensätze zur Verfügung stehen.

Für die genannten Mischgutsorten werden die Prüfergebnisse des Druck-Schwell-Versuchs einer mathematischen Aufbereitung unterzogen (siehe Kapitel 3.6.3.3), so daß Kenngrößen (siehe Kapitel 3.6.3.3) ermittelt werden können, die eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse ermöglichen.

An Hand der Zusammenstellung der Eignungsprüfungen für die untersuchten Asphalte können die Eigenschaften der Probekörper (Hohlraumgehalt, Ausfüllungsgrad, etc.) ermittelt und über korrelative Betrachtungen in Bezug zu den zugehörigen Kenngrößen für die jeweilige Asphaltzusammensetzung gesetzt werden. Hieraus läßt sich feststellen, ob die Eigenschaften der Probekörper signifikante Einflußgrößen auf die aus dem Druck-Schwell-Versuch ermittelten Kenngrößen darstellen und wie sie sich auswirken.

Die aus dieser Auswertung gewonnen Erkenntnisse dienen der Orientierung für weiterführende Laboruntersuchungen.

Die Laboruntersuchungen haben zum Ziel, die Auswirkung von nicht optimal - also abweichend von der Eignungsprüfung - hergestellten Asphalten auf die Kenngrößen im dynamischen Druck-Schwell-Versuch festzustellen. Hierzu werden Probekörper hergestellt und geprüft, die - ausgehend von einer einzigen optimierten Eignungsprüfung - hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung, ihres Bindemittelgehaltes und der erreichten Verdichtung in den maximal zulässigen Bereichen der ZTV bit-StB 84/90 /56/ von den Werten der Eignungsprüfung abweichen.

An Hand der Auswertung vorhandener Daten und den Ergebnissen aus den Laborversuchen läßt sich beurteilen, in welcher Größenordnung die Kenngrößen aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch bei Probekörpern mit optimierter Zusammensetzung nach Eignungsprüfung liegen und ob sich Probekörper, die abweichend von der Eignungsprüfung aufgebaut sind, als solche identifizieren und als geeignet oder ungeeignet einteilen lassen.

Durch diese Erkenntnisse läßt sich beurteilen, ob sich der dynamische Druck-Schwell-Versuch eignet das Verformungsverhalten von Asphaltprobekörpern im Labor ausreichend anzusprechen und zu differenzieren.

Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen den Laborergebnissen von dynamisch geprüften Asphalten und deren Praxisverhalten werden neben der Erfassung der Labordaten (in Form von Ergebnissen aus Eignungsprüfungen mit zusätzlichem dynamischen Druck-Schwell-Versuch) die Deckenbaulose auf Bundesautobahnen im Dienstbereich der Autobahndirektion Nordbayern, bei denen Daten aus dem Druck-Schwell-Versuch für das eingesetzte Mischgut vorhanden sind, ermittelt. Für die entsprechenden Baulose erfolgt eine Zusammenstellung der zugehörigen Eignungs- und Kontrollprüfungen.

Die erfaßten Baulose werden zur Gliederung in Gruppen mit gleicher Mischgutart (z.B. Asphaltbeton, Splittmastixasphalt) unterteilt, an Hand von Betriebskilometern zur eindeutigen Zuordnung von Zustandsdaten an örtliche Geltungsbereiche untergliedert und für eine Charakterisierung hinsichtlich ihrer Verkehrsbelastung und ihrem Aufbau den Bauklassen der RStO 86/89 /51/ zugeordnet.

Darauf hin erfolgt eine visuelle Zustandserfassung der Baulose unter Berücksichtigung von allgemeinen Unebenheiten (Befahrbarkeit), Spurrinnen, Rissen, Flickstellen, Ausmagerungen

und Splittverlusten. Im Anschluß an die visuelle Datenerfassung wird eine Auswertung von im Rahmen einer Zustandserfassung der Autobahndirektion Nordbayern in engen Abschnitten erfaßten Querprofilen zur Ermittlung der Oberflächenverformung vorgenommen.

Zur Analyse der gefundenen Zustandsmerkmale werden als maßgebliche Einflußgrößen in situ

- a) die klimatischen Verhältnisse,
- b) Einflüsse aus Verkehr und
- c) Einflüsse aus Linienführung und Regelquerschnitt

erachtet.

Eine Einteilung der Baulose in Klimazonen gemäß RStO 86/89 /51/ und die Ermittlung der zugehörigen Verkehrsbelastungszahlen, zur Berücksichtigung der Einflüsse aus b) und c), ermöglichen eine weitere Unterscheidung in Bezug auf die Standfestigkeit.

Aus der Zuordnung der gemessenen Spurtiefen zu den jeweiligen Baulosen, den erfaßten Verkehrsdaten und möglicherweise unter Berücksichtigung von klimatischen Einflüssen wird ein sogenannter Verformungsvergleichswert ermittelt, dessen Verteilung eine Reihung der Streckenabschnitte in ihrer Verformungsentwicklung ermöglicht. Dieser Verformungsvergleichswert stellt ein Maß für die Verformungsrate der Baulose dar.

Verteilt über die ermittelte Spannweite der berechneten Verformungsraten der Strecken (geringe, mittlere und größere Verformungsvergleichswerte), werden Bohrkerne entnommen, um unter anderem festzustellen, aus welcher oder welchen Schichten die gemessene Einsenkung an der Oberfläche anteilmäßig herrührt.

Für die Suche nach einem Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des dynamischen Druck-Schwell-Versuchs und den sich in situ einstellenden Verformungen dürfen nur die Verformungen der Deckschicht Berücksichtigung finden, da nur für deren Mischgut Laboruntersuchungen vorliegen.

Am Bohrkern selbst werden Verdichtungsgrad, Hohlraumgehalt, Schichtdicken, Bindemittelgehalt, Bindemittelart und Kornzusammensetzung bestimmt, um

- a) die Übereinstimmung des eingebauten Mischgutes mit der Eignungsprüfung und der Laboruntersuchung festzustellen,

Schichtdicken zwischen unbelasteten Bereich (zwischen den Rollspuren oder Standspur) und Rollspurbereich des untersuchten Fahrstreifens die Schichten, die an der Verformung beteiligt sind und deren Verformungsanteile festzustellen und

- c) zu prüfen, welcher Art die festgestellte Verformung ist (nicht volumenkonstante Verformung als Nachverdichtung / volumenkonstante Verformung als Materialtransport).

Aufbauend auf den Auswertungen der Labordaten der dynamischen Druck-Schwell-Versuche und den an den Baulosen vorgenommenen Untersuchungen, ist bei gegebener Vergleichbarkeit der geprüften bzw. eingebauten Asphalte eine Korrelation zwischen der Dehnungsrate des Druck-Schwell-Versuchs und der Verformungsrate der Streckenabschnitte zulässig.

Bei Bestehen einer solchen Korrelation wäre ein Rückschluß aus den Ergebnissen des dynamischen Druck-Schwell-Versuchs auf die Standfestigkeit des geprüften Asphaltes in der Praxis möglich.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Begriffsbestimmungen

Für die Bestimmung der in dieser Arbeit verwendeten Begriffe wird auf die „Begriffsbestimmungen, Teil Straßenbautechnik, Ausgabe 1990 und Teil Straßenplanung und Straßenverkehrstechnik, Ausgabe 1989“ der FGSV verwiesen /58/.

3.2 Stoffeigenschaften von Asphalt

Da Asphalt aus mehreren Komponenten zusammen gesetzt ist, lassen sich seine mechanischen Eigenschaften unter Belastung aus dem Verhalten der Einzelkomponenten beschreiben:

Die Gesteinskörner für sich verhalten sich bei Belastung elastisch, im Haufwerk haben sie allerdings plastische Eigenschaften, die u.a. auf Veränderungen der Haufwerksgeometrie und Kornzertrümmerungen zurückzuführen sind.

Das Bindemittel Bitumen ändert sein Verformungsverhalten in Abhängigkeit von Zeit, Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit und ist somit als viskos zu bezeichnen.

Asphalt ist daher ein visko-elastisch-plastischer Stoff.

3.3 Rheologische Grundmodelle

Um Asphalt in Stoffgesetzen erfassen zu können, bedient man sich mechanischer Grundmodelle aus der Rheologie (Lehre über das Verhalten von Stoffen unter äußerer Beanspruchung).

Drei grundsätzlich verschiedene idealisierte Verhaltensarten bei äußerer Beanspruchung lassen sich aufstellen:

- ♦ das ideal elastische Stoffverhalten („ut tensio sic vis“):

Die auf Grund einer äußeren Beanspruchung in einem Stoff entstehenden Dehnungen sind dieser direkt proportional (rheologische Bezeichnung: HOOKE'sche Feder)

Gleichung 3-1:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma$$

mit	ε	= Dehnung [%]
	E	= Elastizitätsmodul [N/mm ²]
	σ	= Spannung [N/mm ²]

Das zugehörige Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abhängigkeit von der Zeit ist Abbildung 3-1 zu entnehmen.

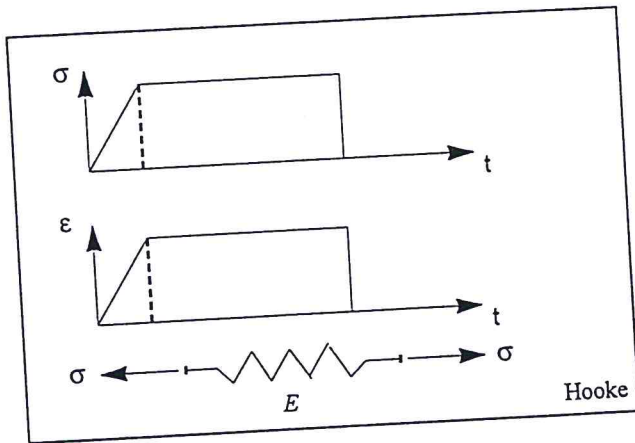


Abbildung 3-1:
Spannungs-Dehnungs-Beziehung
für die HOOKE'sche Feder

♦ das ideal viskose Stoffverhalten:

Die auf Grund einer äußeren Beanspruchung in einem Stoff entstehende Schergeschwindigkeit ist dieser direkt proportional (rheologische Bezeichnung: NEWTON'scher Dämpfer)

Gleichung 3-2:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta} \sigma$$

mit

$\dot{\gamma}$

=

Schergeschwindigkeit [1/s]

η

=

Viskosität [Ns/mm²]

σ

=

Spannung [N/mm²]

Das zugehörige Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abhängigkeit der Zeit ist Abbildung 3-2 zu entnehmen.

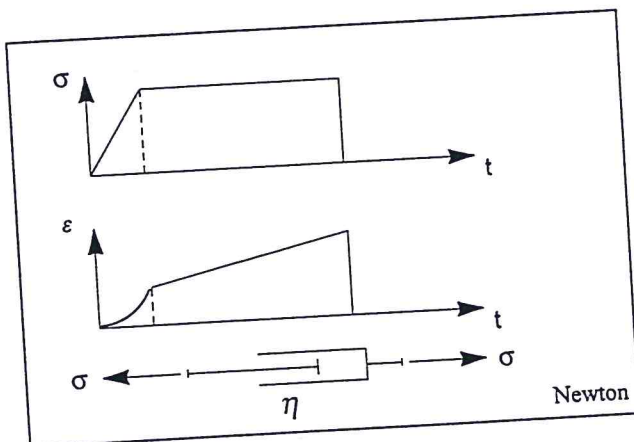


Abbildung 3-2:
Spannungs-Dehnungs-Diagramm
des NEWTON'schen Dämpfers

♦ ideal plastisches Stoffverhalten:

Überschreitet die innere Beanspruchung eines Stoffes auf Grund äußerer Belastung eine Grenzspannung, so tritt eine plastische Deformation unbestimmter Größe ein (rheologische Bezeichnung: ST.-VENANT'sches Reibungselement)

Gleichung 3-3:

$$\tau^2 \geq \vartheta^2$$

mit $\tau^2 =$ Quadrat der Spannung
 $[(N/mm^2)^2]$
 $\vartheta^2 =$ Quadrat der Spannung,
 oberhalb derer plastisches
 Fließen einsetzt $[(N/mm^2)^2]$

Das zugehörige Spannungs-Dehungs-Diagramm in Abhängigkeit der Zeit ist Abbildung 3-3 zu entnehmen.

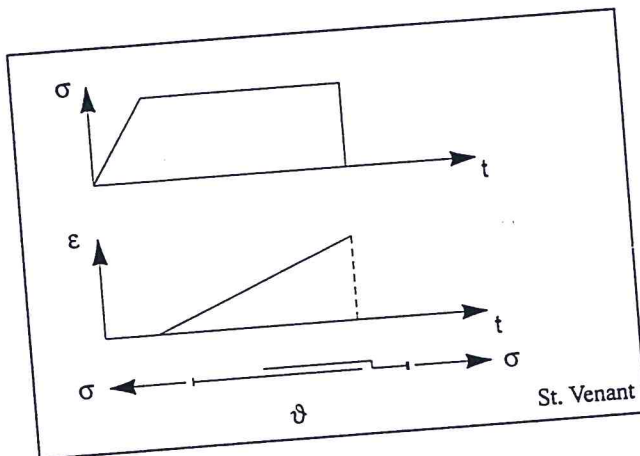


Abbildung 3-3
 Spannungs-Dehungs-Diagramm
 des ST.-VENANT-Elementes

Das zweite Axiom der Rheologie besagt, daß die oben dargestellten grundlegenden rheologischen Eigenschaften in jedem Material, wenn auch in unterschiedlichem Maß, vertreten sind /14/. Zur Beschreibung von realen Stoffen sind somit Kombinationen der Grundelemente notwendig, die in Reihen- oder Parallelschaltungen vorgenommen werden können.

3.4 Rheologische Asphaltmodelle

Bei Asphalt als visko-elastisch-plastischem Stoff sind für eine rheologische Beschreibung Kombinationen aus den Grundmodellen notwendig.

Reihenschaltung aus HOOKE' und NEWTON'schem Element ergibt das MAXWELL-Modell und Parallelschaltung dieser Grundelemente ergeben das KELVIN-Modell. Mit Hilfe des MAXWELL-Modells wird elastoviskoses Stoffverhalten beschrieben, das sich bei konstanter Lasteinwirkung in zeitlich verzögerter Formänderung, die sich nach Entlastung nicht zurückstellt, äußert.

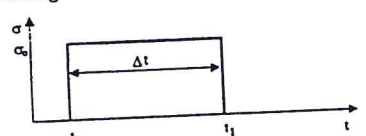
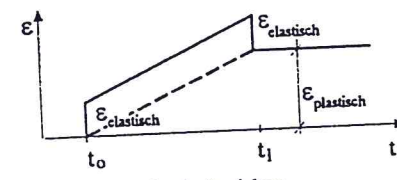
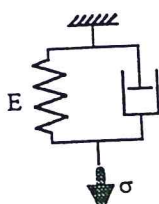
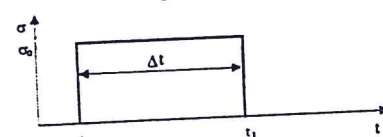
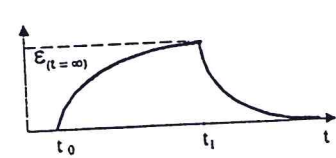
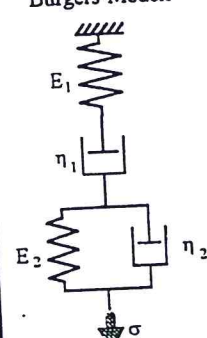
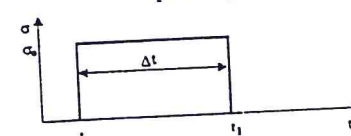
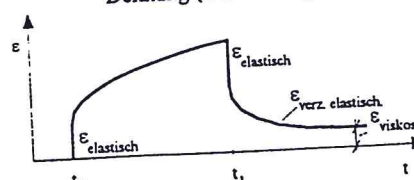
Das KELVIN-Modell beschreibt viskoelastische Verformungen: zeitlich verzögerte Formänderung unter konstanter Lasteinwirkung, die auf einen Grenzwert zuläuft und sich nach Entlastung zeitverzögert wieder rückstellt.

Die Ursachen des Stoffverhaltens von Asphalt nach den beiden oben genannten Modellen sind in den viskosen Eigenschaften und Rückstellkräften des Bindemittels zu finden.

Die Reihenschaltung des MAXWELL- und KELVIN-Modells führt weiter zum BURGERS-Modell.

Die beschriebenen Modelle sind mit ihren Spannungs-Dehnungs-Beziehungen in Abbildung 3-4 dargestellt /18/.

Abbildung 3-4: Modelle zur Beschreibung von viskoelastischem und elastoviskosem Materialverhalten /18/

Modell	Spannungs-Dehnungs-Beziehung	Spannung und Dehnung als Funktion der Zeit
Maxwell-Modell 	mit $\sigma_0 = \frac{F}{A}$ und $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ $\sigma_0 = \sigma_{\text{elastisch}} = \sigma_{\text{viskos}} = \text{const.}$ $\varepsilon = \sum \varepsilon_i = \varepsilon_{\text{elastisch}} + \varepsilon_{\text{viskos}}$ $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} \cdot t$	Spannung  Dehnung (Verformung)  elastisch-viskos
Kelvin-Modell 	$\varepsilon = \varepsilon_{\text{elastisch}} = \varepsilon_{\text{viskos}}$ $\sigma_0 = \sum \sigma_i = \sigma_{\text{elastisch}} + \sigma_{\text{viskos}}$ $\sigma_0 = \varepsilon \cdot E + \eta \cdot \dot{\varepsilon}$ $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \cdot (1 - e^{-\frac{E}{\eta} t})$ mit Retardationszeit $\tau = \frac{\eta}{E}$ $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ Entlastung bei $\varepsilon(t > t_0)$: $\varepsilon = \varepsilon(t > t_0) \cdot e^{-\frac{E}{\eta} t}$	Spannung  Dehnung (Verformung)  visko-elastisch
Burgers-Modell 	$\sigma_0 = \sigma_{\text{Maxwell}} = \sigma_{\text{Kelvin}}$ $\varepsilon = \sum \varepsilon = \varepsilon_{\text{Maxwell}} + \varepsilon_{\text{Kelvin}}$ $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} \cdot t + \frac{\sigma_0}{E_2} \cdot (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t})$	Spannung  Dehnung (Verformung)  $\varepsilon_{\text{elastisch}}$, $\varepsilon_{\text{verz. elastisch.}}$, $\varepsilon_{\text{viskos}}$

Den aufgeführten Modellen ist gemein, daß sie kein plastisches Materialverhalten im ST-
VENANT'schen Sinn berücksichtigen.

KRAß schlägt daher ein auf dem BURGERS-Modell aufbauendes modifiziertes 5-Parameter-
Modell vor /16/, um die plastischen Deformationen durch Kornverschiebungen und -umlage-
rungen bei verdichteten Asphaltgemischen unter äußerer Belastung theoretisch mit zu erfassen.
Dieses Modell ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

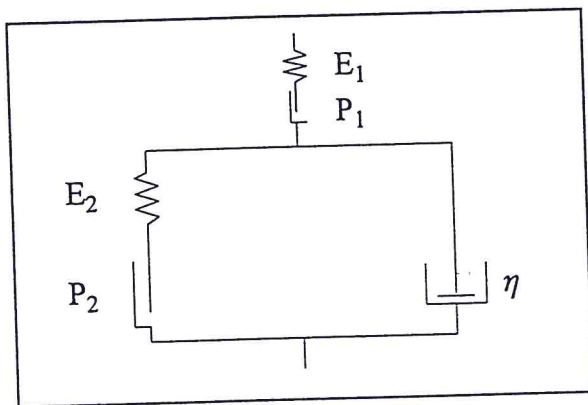


Abbildung 3-5:

5-Parameter Modell nach KRAß /16/

KRAß setzt für das Reibungselement voraus, daß zum einen die Haftreibung gleich der Gleitreibung ist und zum anderen "das Reibungsmodell unter einer konstanten Kraft nach einem bestimmten Weg zur Ruhe kommt". Ein solches Reibungselement beschreibt Formänderungen, die unter Lasteinwirkung spontan auftreten und sich nicht wieder rückstellen (plastisch), und Formänderungen, die unter konstanter Last asymptotisch zeitlich verzögert ablaufen und sich ebenfalls nach Lastwegnahme nicht rückstellen (viskoplastisch).

Mit diesen Grundannahmen und der Einführung eines Plastizitätsmoduls berücksichtigt KRAß in seinem Modell die Erscheinung des plastischen Fließens und, daß bei Asphalt dieses Fließen nicht grenzenlos anwächst; vielmehr zeigt dieser Baustoff bei wiederholter Beanspruchung einen Verfestigungseffekt /19/. Somit wird durch das "5-Parameter-Modell nach KRAß" Asphalt als ein viskoelastischer und viskoplastischer Stoff beschrieben.
Das Verformungszeitdiagramm des 5-Parameter-Modells ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

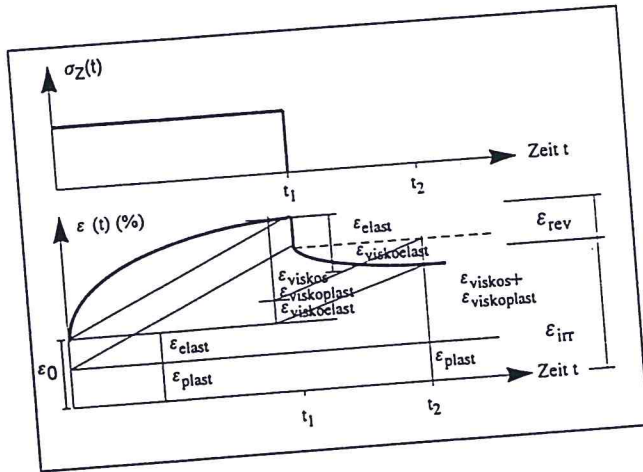


Abbildung 3-6:
Verformungszeitdiagramm
nach dem 5-Parameter-Modell

Die im obigen Diagramm dargestellten plastischen Verformungsanteile sind bei Asphalt auf irreversible Verschiebungen und Umlagerungen der mit Bindemittel umhüllten Körner und auf dessen viskose Eigenschaften zurückzuführen. Die dargestellte Kurve wird bei statischer Belastung als Kriechkurve bezeichnet (Kapitel 3.6.3.1).

Für Asphalt lassen sich, in Anlehnung an das 5-Parameter-Modell auftretende, Verformungen nach Tabelle 3-1 einteilen.

Bezeichnung	Zeitabhängigkeit	Reversibilität
elastisch	zeitunabhängig	reversibel
plastisch		zeitabhängig
viskos		
viskoplastisch		
viskoelastisch	reversibel	

Tabelle 3-1:
Zuordnung der Verformungs-
anteile im 5-Parameter-Modell /53/

3.5 Zum Verformungsverhalten von Asphalt

3.5.1 Allgemeine Betrachtung

BUSECK und HÜRTGEN stellen in /30/ fest: "Spurrinnenbildung in folge bleibender Verformungen in der Asphalttschicht ist unvermeidbar." Dies führt dazu, daß Asphalttechnologen den Verformungswiderstand im Straßenoberbau erhöhen wollen. Das Verformungsverhalten von Asphalt ist von sehr komplexer Natur und wird von einer Reihe qualitativer und quantitativer Faktoren beeinflusst. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien hier einige dieser Einflußfaktoren aufgeführt /12/:

I. Mischgutveränderliche Einflußfaktoren

A) Mineralstoffe

1. Korngröße
2. Kornzusammensetzung
3. Kornform
4. Oberflächenbeschaffenheit
5. Mineralogie

B) Bindemittel

1. Sorte (Straßenbaubitumen, PmB)
2. Härte (Viskosität)
3. Mengenanteil

C) Wasser

D) Hohlräume

1. Volumenanteil
2. Größe
3. Form

E) Herstellungsmerkmale

1. Raumdichte
2. Grad der Anisotropie
3. Temperatur

F) Homogenität

II. Belastungsveränderliche Einflußfaktoren

A) Belastungsvorgeschichte (Verdichtungsart)

1. Nicht wiederholte Belastung
2. Wiederholte Belastung

B) Anfangsspannungszustand
(Größe und Richtung der Normal- und Schubspannungen)

C) Eigentliche Belastung

1. Art der Belastung (Spannung oder Dehnung)
2. Belastungsintensität
3. Spannungsverlauf (Beziehung zwischen Normal- und Schubspannung)
4. Zeitverlauf (Statisch, Dynamisch)
5. Homogenität der Spannungen

III. Umweltveränderliche Einflußfaktoren

A) Temperatur

B) Feuchtigkeit

C) Veränderung der Materialeigenschaften

1. Thixotropie¹
2. Alterung
3. Aushärtung
4. Nachverdichtung

Aus dieser Aufstellung wird deutlich, daß zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt die Kenntnis einer Reihe von Einflußfaktoren notwendig ist, die z.T. nur schwer oder gar nicht (z.B. Form der Hohlräume, Inhomogenität durch Entmischung) bestimmbar sind.

Für Laborbetrachtungen werden daher vereinfachende Annahmen über die Einflußgrößen gemacht, diese konstant gehalten oder nur in festen Grenzen variiert.

¹Mit Thixotropie bezeichnet man die Eigenschaft eines Körpers, durch die das Verhältnis Schubspannung zu Verformungsgeschwindigkeit infolge der vorangegangenen Verformung zeitweilig reduziert wird. Der Zeitfaktor ist wesentlich, da dadurch die Thixotropie von der Strukturviskosität unterschieden wird /14/.

3.5.2 Betrachtung unter Laborbedingungen

3.5.2.1 Theoretische Ansätze

Für die Beurteilung des Verformungsverhaltens von Asphalt ist die Kenntnis seiner Spannungs-Dehnungs-Beziehung notwendig.

Für einen ersten Ansatz wird entsprechend der Elastizitätstheorie das HOOKE'sche Gesetz in seiner allgemeinen Form mit zeitunabhängigen Größen der Spannung, Dehnung und Materialparameter herangezogen. In Matrizenform geschrieben lautet es /19/:

Gleichung 3-4:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{I}(E, \nu) \cdot \underline{\sigma}$$

mit	ε	=	Matrix der Dehnungen
	I	=	Nachgiebigkeitsmatrix
	σ	=	Matrix der Spannungen
	E	=	E-Modul
	ν	=	Belastungsfrequenz

Mit Gleichung 3-4 wird ein ideales Stoffverhalten beschrieben, das durch das rheologische Modell der Feder veranschaulicht wird.

Für Asphalt als visko-elastisch-plastischem Stoff mit erweiterter rheologischer Modellbeschreibung z. B. nach Abbildung 3-5, geht Gleichung 3-4 in allgemeiner Form - nach Lösung im FOURIER-Raum und Rücktransformation - in Gleichung 3-5 über /3/:

Gleichung 3-5:

$$\varepsilon(t) = \int_{\tau=0}^t I(t-\tau) \cdot \dot{\sigma}(\tau) d\tau$$

mit	ε	=	Dehnungsmatrix
	$I(t)$	=	Kriechfunktion
		=	Änderung der Beanspruchung über der Zeit
	τ, t	=	Zeit

Im Gegensatz zu Gleichung 3-4 sind in Gleichung 3-5 die Materialparameter zeitabhängige Größen. Hierin zeigt sich der grundlegende Unterschied in der Beschreibung des Stoffverhaltens nach der Elastizitätstheorie oder der Viskoelastizitätstheorie von Materialien. Um das im Labor an Asphaltprobekörpern festgestellte Verformungsverhalten beschreiben zu können ist somit die Kenntnis der zeitabhängigen Kriechfunktion notwendig.

3.5.2.2 Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörper

Die Ermittlung der zeitabhängigen Kriechfunktion aus dem vorigen Kapitel, zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens von Asphaltprobekörpern, erfolgt meist auf experimentelle Weise: ein Probekörper einer ausgewählten Asphaltzusammensetzung wird im Labor bei definierten Prüfbedingungen (z.B. Temperatur, seitlicher Stützdruck am Probekörpermantel, Belastungsfrequenz, -art und -größe) beansprucht und die sich einstellenden Dehnungen während Be- und Entlastungsphase gemessen. Als Meßkurve stellt sich prinzipiell die in Abbildung 3-6 dargestellte Kriechkurve ein.

Zur mathematischen Formulierung der gesuchten Spannungs-Dehnungs-Beziehung werden u.a. die in Kapitel 3-4 vorgestellten rheologischen Modelle angewandt, deren gelöste Bewegungsgleichungen die gemessenen Kriechkurven mittels entsprechender Materialparameter beschreiben.

KRAß setzt in /16/ zur Beschreibung von gemessenen Kriechkurven bei statischer Belastung und anschließender Entlastung das 5-Parameter-Modell an.

Dabei konnte für die axiale Formänderung eine Funktion gefunden werden, welche die Kriechkurve aus der Addition von vier Termen zur Beschreibung von elastischen, plastischen, elasto-viskosen und plastoviskosen Deformationen nachbildet; eine Zerlegung der Gesamtverformung in die einzelnen Komponenten ist demnach möglich. Der Dehnungsverlauf in der Entlastungsphase läßt sich bei KRAß prinzipiell nach Gleichung 3-6 darstellen.

Gleichung 3-6:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_{t\infty} (1 - e^{-\lambda t})$$

mit	$\varepsilon(t)$	=	plastischer Dehnungsanteil nach Entlastung
	ε_0	=	spontaner plastischer Dehnungsanteil
	$\varepsilon_{t\infty}$	=	viskoplastischer Dehnungsanteil bei Versuchsende
	λ	=	reziproke Retardationszeit [1/s]

Die im rheologischen Modell eingeführten Materialparameter E_1 , P_1 , E_2 , P_2 und η konnten über die Meßergebnisse berechnet und physikalisch interpretiert werden; sie wurden als zeitunabhängig betrachtet. Für die Moduln der zeitabhängigen und zeitunabhängigen Formänderungen ergaben sich keine Abhängigkeiten vom radialen Stützdruck, jedoch von der

Temperatur, die auf die Viskosität des Bindemittels zurückgeführt werden konnten; für den Materialparameter η wurde eine Abhängigkeit vom seitlichen Stützdruck und der Temperatur festgestellt.

In /13/ wird von JÄGER das 5-Parameter-Modell auf Kriechkurven angewandt, die an Probekörpern mit dynamischer Belastung (sinusförmige Schwellast) gemessen wurden.

In Erweiterung von /16/ konnte eine Prognosefunktion für plastische Dehnungen bei Versuchsende als Funktion der Temperatur, axiale Belastung, Frequenz der Belastung und Belastungszeit gefunden werden.

In dieser Prognosefunktion fanden dabei noch die folgenden festgestellten Erscheinungen Berücksichtigung:

- ♦ Eine Erhöhung der Belastungsfrequenz hat eine Reduzierung der bleibenden Dehnung zur Folge.
- ♦ Der Belastung ist die größte Bedeutung auf die Entstehung von plastischer Dehnung, erst an zweiter Stelle der Temperatur und dann der Frequenz zuzuordnen.
- ♦ Das Zusammenwirken von hoher Belastung und hoher Temperatur wirkt sich stark fördernd auf plastische Deformationen aus.

Der prinzipielle Aufbau der Prognosefunktion nach JÄGER für die bleibende Dehnung ist Gleichung 3-7 zu entnehmen.

Gleichung 3-7:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-\lambda t} + \varepsilon_{t_\infty} (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{mit} \quad \varepsilon(t), \varepsilon_0, \varepsilon_{t_\infty}, \lambda \text{ siehe Gleichung 3-6.}$$

Wie bei KRAB /16/ sind auch bei JÄGER /13/ die Modellparameter Funktionen der Temperatur, der Belastung und zusätzlich noch der Frequenz, jedoch zeitunabhängige Größen.

Von WEILAND wurden in /29/ - aufbauend auf JÄGER - Prognosefunktionen vorgeschlagen, welche die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung plastischer Dehnungen verbesserten. Diese Funktionen haben den folgenden prinzipiellen Aufbau:

Gleichung 3-8:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1(1 - e^{-\lambda_1 t}) + \varepsilon_2(1 - e^{-\lambda_2 t})$$

mit $\varepsilon(t)$	=	Dehnungsanteil als Funktion der Zeit
ε_0	=	spontaner Dehnungsanteil
$\varepsilon_{1,2}$	=	Dehnungsanteile der KELVIN-Modelle
$\lambda_{1,2}$	=	reziproke Retardationszeiten der KELVIN-Modelle [1/s]

Die Gleichung 3-8 mit ihren ebenfalls zeitunabhängigen Modellparametern wurde aus einem rheologischen Modell, das eine Erweiterung des 5-Parameter-Modells ist, abgeleitet; es ist in Abbildung 3-7 dargestellt und enthält 8-Parameter.

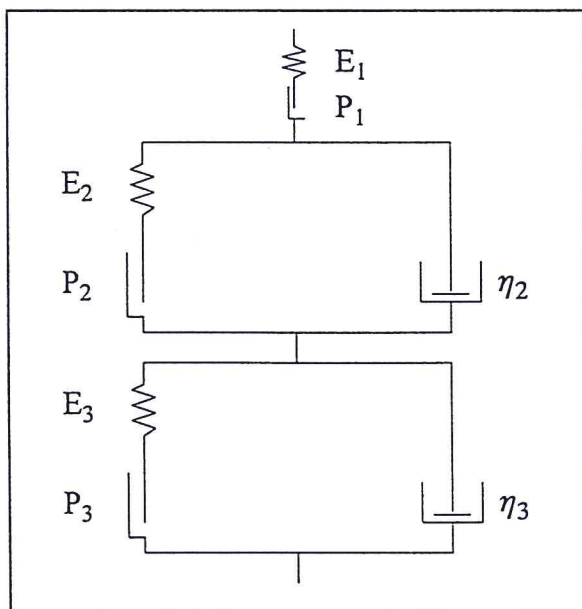


Abbildung 3-7:
8-Parameter-Modell als
Modifikation des 5-Parameter-
Modells /29/

Wesentlicher Nachteil der Erweiterung des rheologischen Modells in /29/ ist die nicht mehr mögliche exakte Bestimmung der Modellparameter aus den Meßwerten.

WEILAND schlägt daher auf Grund von Meßergebnissen vor, die reziproke Retardationszeit in der Formel zur Beschreibung des Dehnungsverlaufes mit dem 5-Parameter-Modell als Funktion der Zeit aufzufassen. Dabei wird für λ folgender Ansatz gemacht:

Gleichung 3-9:

$$\lambda = \frac{1}{b \cdot t^c}$$

mit λ = reziproke Retardationszeit [1/s]
 t = Zeit [s]
 b, c = Konstanten

Mit Gleichung 3-9 und Gleichung 3-6 entsteht Gleichung 3-10:

Gleichung 3-10:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_{t_\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{b \cdot t^c}} \right)$$

Physikalisch bedeutet die eingeführte Zeitabhängigkeit der Retardationszeit, daß die Viskosität des Dämpfers im 5-Parameter-Modell mit der Zeit veränderlich ist /29/.

An Hand von Gleichung 3-10 läßt sich bei Kenntnis der unbekannten Parameter ε_0 , ε_{t_∞} , b und c (z.B. aus Versuchen) der axiale Verformungsverlauf zu jedem Zeitpunkt t bei jeder beliebigen Last-Temperatur-Kombination in dem von WEILAND untersuchten Bereich berechnen.

Bei Kenntnis der Materialparameter eines geprüften Asphaltes ist somit im von WEILAND untersuchten Last- und Temperaturbereich die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des Asphaltes bestimmt.

3.5.3 Betrachtung unter Praxisbedingungen

3.5.3.1 Empirische Ansätze

Neben den Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Asphalt an Probekörpern im Labor, sind auch Untersuchungen an Asphalt bekannt /20, 21, 24, 25, 50/, die in Großversuchsanlagen durchgeführt wurden.

Gegenüber den Laboruntersuchungen haben die Großversuche zum Ziel, das Verformungsverhalten von Asphalt nicht an Modellen in Form von verkleinerten oder in ihren Abmessungen nicht den tatsächlichen Verhältnissen der Praxis entsprechenden Probekörpern durchzuführen, sondern möglichst praxisnahe Verhältnisse zu untersuchen; dabei finden auch konstruktive Merkmale, wie Schichtdicke, Aufbau der gesamten Befestigung und Verdichtungsart Berücksichtigung. Die Laboruntersuchungen nach Kapitel 3.5.2 haben dagegen ausschließlich die Untersuchung des mechanischen Verhaltens des Baustoffes Asphalt zum Gegenstand.

Eine Abgrenzung von Großversuchsanlagen und angelegten Versuchsstrecken läßt sich u.a. durch eine zeitraffende Verkehrssimulation vornehmen.

Aus den genannten Untersuchungen ist bekannt, daß sich die Entstehung von plastischen Deformationen (Spurrinnen) bei Asphaltbefestigungen in zwei grundsätzliche Vorgänge aufspalten läßt:

- ♦ Eine senkrechte Verformung ohne seitliche Verdrückungen
(nicht volumenkonstante Verformung) und
- ♦ Eine mit seitlichen Verdrückungen
(volumenkonstante Verformung).

Die nicht volumenkonstante Verformung entspricht einer Nachverdichtung der eingebauten Schicht oder Schichten und hat ihre Ursache in einer mangelnden Stabilität.

Die volumenkonstante Verformung ist ein Materialtransport aus der Lastachse in den seitlichen Bereich und äußert sich dort in Form von Aufwölbungen. Ursache hierfür sind die außerhalb der Lastachse wirkenden Spannungen aus der Überrollung eines belasteten Rades.

Der prinzipielle zeitliche Verlauf der in Großversuchen festgestellten Spurrinnenbildung ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

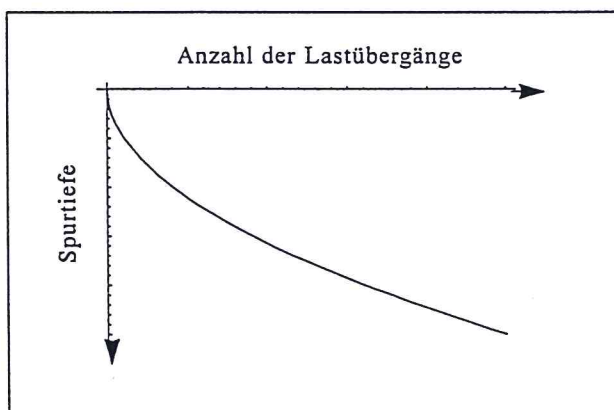


Abbildung 3-8: Prinzipieller Verlauf der Spurrinnenentwicklung in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastübergänge /8/

In obiger Abbildung ist deutlich zu erkennen, daß die Entwicklung der Spurrinnentiefe über der Zeit degressiv ist, d.h. mit zunehmenden Belastungszyklen setzt die Asphaltbefestigung der äußeren Beanspruchung einen Widerstand entgegen; es tritt ein Verfestigungseffekt auf.

Für die mathematische Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Spurrinnentiefe wird in /20, 24, 25, 50/ ein Potenzansatz nach Gleichung 3-11 aufgezeigt.

Gleichung 3-11:

$$w = m \cdot N^k$$

mit w = bleibende Einsenkung der
Straßenoberfläche [mm]
 N = Überfahrten, Radüberrollungen,
Belastung [-]
 k, m = Parameter

Dieser Ansatz wird formal in /20/ und /24/ ebenfalls zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Spurrinnentiefe gewählt, wobei sich bei den Untersuchungen für k ein Wert von ca. 0,5 ergab.

Im amerikanischen VESYS-Spurrinnenmodell wird die zeitliche Entwicklung der Spurrinnen durch eine Funktion vom Typ der Gleichung 3-12 angesetzt /21/.

Gleichungen 3-12:

$$dw_p = a_1 \cdot \frac{dN}{N^m}$$

mit dw_p = infinitesimale plastische
Deformation [mm]
 N = Anzahl der Radübergänge [-]
 a_1, m = Parameter

Die plastische Deformation w_p ergibt sich dann nach Integration zu:

Gleichung 3-13:

$$w_p(N) = a \cdot N^k \quad \text{mit} \quad a = \frac{a_1}{1-m} \quad \text{und} \quad k = 1-m$$

In /23/ wird ein anderer Ansatz zur Berechnung der Spurrinnentiefe gewählt. LOIZOS geht von einer Versteifungsfunktion aus, welche die Einsenkung des homogenen Halbraumes durch veränderliche E-Moduln beschreibt. Die Versteifungsfunktion für die entsprechende Schicht wird beschrieben durch nachstehende Gleichung:

Gleichung 3-14:

$$E^* = E \frac{N^\alpha}{N^\alpha - \mu}$$

mit E^* = variable Entlastungssteifigkeit
 E = konstante Belastungssteifigkeit
 α, μ = Kennwerte zur Beschreibung der Steifigkeitsveränderung der entsprechenden Schicht
 N = Anzahl der Lastwiederholungen

Durch entsprechende Transformationen ist es möglich die Gültigkeit der Versteifungsfunktion auch dann zu erhalten, wenn bei ansonsten gleicher Belastung die Entlastungssteifigkeiten in etwa konstant und die Belastungssteifigkeiten geringer sind; die Kennwerte α, μ ändern sich hierdurch nicht.

Durch Umformen von Gleichung 3-14 erhält man Gleichung 3-15:

Gleichung 3-15:

$$E^* = \frac{E}{1 - \mu \cdot N^{-\alpha}}$$

Gleichung 3-12 beschreibt den momentanen bleibenden Verformungsanteil einer Schicht und kann daher in Gleichung 3-15 eingesetzt werden, so daß hieraus der Zusammenhang zwischen der Versteifungsfunktion und dem Ansatz nach dem VESYS-Spurrinnenmodell folgt:

Gleichung 3-16:

$$E^* = \frac{E}{1 - \frac{dw_p}{dN}}$$

Damit sind die Zusammenhänge zwischen den Ansätzen nach /21/, /23/ und /25/ gegeben.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ansätze zur Berechnung der zeitlichen Entwicklung von Spurrinnen sind aus Beobachtungen in Großversuchen oder im Labor bei Simulationen der Verhältnisse auf der Straße abgeleitet. Die Gleichungen sind im Vergleich zu den in Kapitel 3.5.2 vorgestellten deutlich unterschiedlich. Dies veranschaulicht die Problematik der Übertragbarkeit von an Probekörpern im Labor gewonnen Erkenntnissen auf das Praxisverhalten von Asphaltsschichten.

3.5.3.2 Klimatische Einflüsse

Die Bedeutung von klimatischen Einflüssen auf das Verformungsverhalten von Asphalt ist vor allem im Wärmehaushalt der Straße zu sehen.

Bei sich höher einstellenden Asphaltkörpertemperaturen² in flexiblen Fahrbahnbefestigungen verliert das Bitumen an Zähigkeit, die Kohäsion und Viskosität des Mörtels wird reduziert, und sein Volumen vergrößert sich. Asphalt neigt dadurch zu plastischen Verformungen .

Im Kapitel 3.5.2.2 wurde aufgeführt, daß sich die Wirkung einer Belastung auf die Entstehung von plastischen Deformationen bei höheren Temperaturen noch verstärkt. Zur Beurteilung der Verformungsentwicklung von Asphaltstraßen ist somit die Kenntnis der Temperaturverteilung bei einwirkender Last notwendig.

Nach /38, 39/ wird der Wärmehaushalt einer Straßenoberfläche durch die Wärmehaushaltsgleichung beschrieben.

Gleichung 3-17:

	mit	Q	=	Strahlungsbilanz [W/m ²]
		B	=	Bodenwärmestrom [W/m ²]
$Q + B + L + V = 0$		L	=	Wärmeübergang zur Luft [W/m ²]
		V	=	Wärmestrom infolge Verdunstung und Kondensation von Wasser [W/m ²]

Die Ermittlung der notwendigen Wärmeströme läßt sich bei Kenntnis des Oberflächentemperaturganges einer Straße über thermodynamische Bestimmungsgleichungen berechnen /38./.

² Arand bezeichnet in /42/ Tage mit einer Lufttemperatur von über 30°C als heiße Tage, die für das Entstehen von Spurrinnen von Interesse sind.

Unter Vernachlässigung des Wärmestroms infolge Verdunstung und Kondensation von Wasser läßt sich die Wärmehaushaltsgleichung nach /39/ auch folgendermaßen angeben:

Gleichung 3-18:

$$G\varepsilon_K - T_0^4 \sigma \varepsilon_L + T_L^4 \varepsilon_L \sigma (a - b 10^{-c f_{rel} E_L}) + \alpha (T_L - T_0) + \lambda \frac{dT}{dx} = 0$$

mit G	=	Globalstrahlung [W/m ²]
T_0	=	Oberflächentemperatur des Straßenkörpers [°C]
T_L	=	Lufttemperatur [°C]
E_L	=	Sättigungsdampfdruck [Pa]
a	=	0,79 [-]
b	=	0,174 [-]
c	=	$9,5 \times 10^{-4}$ [1/Pa]
f_{rel}	=	relativer Luftfeuchte [%]
ε_K	=	Absorptionskoeffizient kurzwelliger Strahlung [-]
ε_L	=	Absorptionskoeffizient langwelliger Strahlung [-]
α	=	Wärmeübergangszahl [W/(m ² K)]
σ	=	Stephan-Boltzmann-Konstante [W/(K ⁴ m ²)]
λ	=	Wärmeleitzahl [W/(mK)]

Zur Berechnung der Asphaltkörpertemperatur ist mit Gleichung 3-18 ein Ansatz gegeben, der nur noch die meteorologischen Einflußgrößen

- ♦ Globalstrahlung,
- ♦ Lufttemperatur,
- ♦ relative Luftfeuchte und
- ♦ Windgeschwindigkeit

voraussetzt.

Mit Hilfe von umfangreichem Datenmaterial über die genannten meteorologischen Einflußgrößen konnten in /39/ repräsentative Häufigkeitsverteilungen der Oberflächentemperaturen von unter Verkehr liegenden Asphaltstraßen für die drei Klimazonen der RStO 86/89 /51/ ermittelt werden.

Mit diesen Häufigkeitsverteilungen ist es möglich, für eine Straße im Verlauf eines Jahres mit

durchschnittlichen meteorologischen Verhältnissen die Anzahl der Stunden zu ermitteln, in denen sich die Oberflächentemperatur in den jeweiligen Temperaturklassen befindet /14/.

3.5.3.3 Verkehrseinflüsse

Die Belastung von Fahrbahnbefestigungen durch Verkehr stellt die wesentliche mechanische Beanspruchung dar und wird dabei durch mehrere Größen beeinflusst.

Als wichtigste Einflußgröße ist die Achslast nach §34 der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) zu nennen. In diesem Paragraphen ist die höchst zulässige Last einer Einzelachse festgelegt; im Rahmen der EG-Harmonisierung ist hier jedoch mit einer möglichen Erhöhung zu rechnen.

Aus Achslastmessungen an Bundesautobahnen ist bekannt, daß die tatsächlichen Achslasten oft oberhalb des zulässigen Maximums liegen und dadurch eine entsprechende Mehrbeanspruchung einer Straßenkonstruktion verursachen.

Die Achslast bestimmt aber nicht nur die Beanspruchung sondern auch die Nutzungsdauer einer Straße. Aufbauend auf dem amerikanischen AASHO-Road-Test, ist in /47/ ein Zusammenhang vorgestellt worden, bei welchem die Auswirkungen eines LKW's auf die Schädigung oder Nutzungsdauer einer Straße durch eine Einflußzahl in Abhängigkeit von der Radlast und den dynamischen Radlastschwankungen beschrieben wird. Diese Einflußzahl ist in der 4. Potenz von der Last eines Rades abhängig.

In der Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RStO 86/89 /51/ werden für die Dimensionierung einer Straße u.a. die Einflüsse aus dem Verkehr durch die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der Fahrzeugarten des Schwerverkehrs und durch einen Mehrbeanspruchungsfaktor infolge der erhöhten Achslasten im Rahmen der EG-Harmonisierung berücksichtigt.

Durch eine nach dieser Vorschrift zu ermittelnde Verkehrsbelastungszahl, die zur Einteilung von Straßen in ein Bauklassensystem dient, ist allerdings kein direkter Zusammenhang zum Gebrauchsverhalten einer Straße gegeben, da - wie bereits erläutert - dieses Verhalten stark von den tatsächlichen Achslasten abhängt.

Ein geeigneter Bewertungsmaßstab in Form eines einfachen Ausdrucks, z.B. einer einzigen Lasthöhe und deren Anzahl an Wiederholungen, zur Beschreibung der Wirkung von Lastkollektiven auf den Gebrauchswert einer Straße wäre mehr als wünschenswert /50/.

Theoretisch könnten die Achslastäquivalenzfaktoren des AASHO-Road-Tests eine Lösung für dieses Problem sein. Durch solche Faktoren lassen sich die Auswirkungen von Übergängen einer beliebigen Achslast auf die Gebrauchseigenschaften einer Straße in Übergänge z.B. einer einheitlichen 10t-Achse umrechnen. Hierfür müßten aber beim vollkommen ungesteuerten Verkehr auf einer öffentlichen Straße alle veränderlichen Größen der Belastung und gleichzeitig die jeweiligen Wirkungen eines jeden Einzelvorganges bekannt sein.

Dies war für diese Arbeit nicht zu erfüllen, so daß auf eine Berücksichtigung der tatsächlichen Achslasten verzichtet werden muß. Eine Unterscheidung des Verkehrs erfolgt daher nur in Schwer- und Leichtverkehr.

Neben der Achslasthöhe ist auch die Verkehrsdichte und -geschwindigkeit für die Straßenbeanspruchung von Bedeutung. Sehr dichter und langsam fahrender Verkehr haben wegen der Häufigkeit und Einwirkzeit der Spannungen im Straßenkörper ungünstigere Auswirkungen auf dessen Gebrauchseigenschaften als geringer und schnell fahrender Verkehr.

Das System Reifen-Fahrbahn, beeinflußt ebenfalls die Straßenbeanspruchung, wobei hier u.a. der Kontaktdruck zwischen Reifen und Fahrbahn, die Reifenaufstandsfläche und die Radanordnung von Bedeutung sind /7, 43, 44, 45, 46/.

Der Kontaktdruck hängt hauptsächlich von der Belastung des Fahrzeuges, vom Reifenaufbau, vom Reifeninnendruck, von der Reifengröße und von der Fahrgeschwindigkeit ab.

Die Aufstandsfläche ist im wesentlichen eine Funktion der Reifenart, der Belastung und des Reifeninnendruckes. Unter der Radanordnung ist dabei eine Einzel- oder Zwillingsbereifung zu verstehen.

Gerade in der Radanordnung ist heutzutage eine deutliche Tendenz zu erkennen, die weg von der Zwillingsbereifung hin zur Einzelbereifung mit Super-Single-Reifen führt. Der Vorteil der lastverteilenden Wirkung von Zwillingsbereifung geht hierbei verloren, wodurch es zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Straßen durch den Super-Single-Reifen kommt.

Die durch den Verkehr in der Straßenkonstruktion erzeugten Spannungen werden von den einzelnen Schichten aufgenommen und in den Straßenunterbau verteilt. Für eine unkritische Übertragung dieser Spannungen im gebundenen Oberbau ist ein ausreichender Verbund zwischen den jeweiligen Schichten und Lagen unerlässlich, da es sonst zu Relativbewegungen - bedingt durch ein unterschiedliches Dehnungsverhalten der einzelnen Schichten - kommen kann.

In /48/ ist nachgewiesen worden, daß ein nicht ausreichender Verbund zwischen Asphaltsschichten das Verformungsverhalten einer Straße ungünstig beeinflusst.

3.5.3.4 Einflüsse der Linienführung

Kurvenführung und Längsneigung einer Straße haben in ihren fahrdynamischen Auswirkungen Einfluß auf die Beanspruchung und damit auch auf das Verformungsverhalten der Fahrbahn.

Die Auswirkungen der Längsneigung einer Straße durch Gewichtsverlagerungen am Fahrzeug und damit verbundenen Änderungen der Achslasten, wird in der Berechnung der Verkehrsbelastungszahl der RStO 86/89 /51/ berücksichtigt. Der überproportionale Einfluß der Achslast in der 4. Potenz auf die Nutzungsdauer einer Straße macht die Notwendigkeit dieser Berücksichtigung deutlich.

Neben der Längsneigung entstehen auch durch Querneigung und Kurven Achslastverschiebungen. In Abbildung 3-9 ist das Zusammenspiel der Kräfte bei Querneigung schematisch dargestellt, wobei q die Querneigung, V die Vertikallast, H die Horizontallast, G die Gewichtskraft und s die Spurweite bezeichnen.

Bei Kurvenfahrten bleiben diese Kraftverhältnisse erhalten, außer daß sich die Wirkungsrichtung der Horizontalkräfte umkehrt und im Schwerpunkt eine Fliehkraft mit Wirkrichtung entgegen der Hangabtriebskraft angreift; zu berücksichtigen ist dabei, daß im Kurvenbereich die Querneigung meist entgegen der Fliehkraft erfolgt.

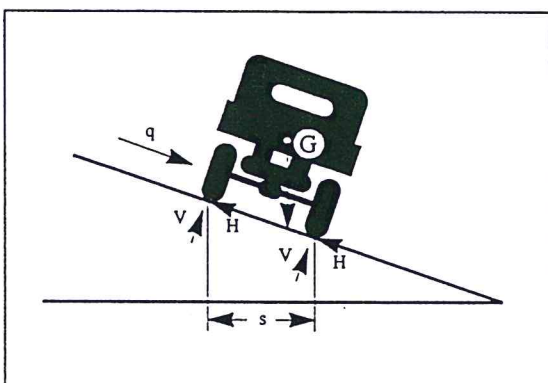


Abbildung 3-9:
Radlastverlagerung durch
Querneigung /49/

Die obige Abbildung verdeutlicht, daß durch die Querneigung, die bei Straßen mit Richtungsfahrbahnen in der Geraden stets einseitig und im Regelfall nach außen ausgeführt wird, das tiefer liegende Rad einer Achse eine Mehrbelastung erhält. Die rechte Rollspur des rechten Fahrstreifens einer Richtungsfahrbahn wird daher gegenüber der linken einer Mehrbeanspruchung ausgesetzt. Bei Kurvenfahrten bleiben diese Verhältnisse i.d.R. unberührt, da die Fliehkraft von der eingestellten Querneigung nicht vollkommen aufgenommen wird /49/.

3.5.3.5 Einflüsse des Regelquerschnitts

Die Bedeutung der Straßenquerschnittsgestaltung für die Spurrinnenbildung ist in dessen Auswirkung auf das Spurverhalten von Kraftfahrzeugen zu sehen.

Die Anzahl und Breite von Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn, die Fahrzeugart und die Fahrgeschwindigkeit beeinflussen dabei maßgeblich dieses Spurverhalten.

Im hier betrachteten Zusammenhang ist nur die Fahrzeugart LKW und ein Geschwindigkeitsbereich bis 100 km/h von Interesse. Aus Untersuchungen /22, 50/ ist bekannt, daß das Spurverhalten von LKW's gegenüber PKW's kanalisierter ist. In Abbildung 3-10 ist die prozentuale Verkehrsquerverteilung je Spur für LKW einer Richtungsfahrbahn dargestellt; deutlich ist die engere Verteilung der Radübergänge in der rechten Fahrspur im Vergleich zur überwiegend von PKW benutzten linken Fahrspur zu erkennen.

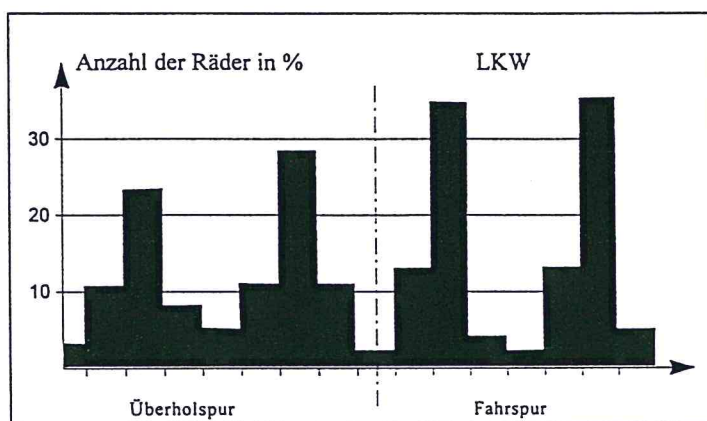


Abbildung 3-10: Prozentuale Verkehrsquerverteilung je Fahrstreifen für LKW /50/

Die Auswirkungen dieser Kanalisierung des Schwerverkehrs läßt sich wie folgt ausdrücken: "je schmaler also die Fahrspuren sind, umso mehr konzentriert sich die Belastung auf schmale Bereiche, ein Umstand, der zu einem schnelleren Verbrauch an diesen Stellen führt" /50/.

Die Ausführungen in Kapitel 3.5.3 zeigen, daß zur Beurteilung der Standfestigkeit von Asphaltstraßen der rechte Rollspurbereich des rechten Fahrstreifens einer Richtungsfahrbahn zu betrachten ist, da dieser einer systematischen Mehrbeanspruchung ausgesetzt ist.

3.6 Laborverfahren zur Prüfung der Verformungsbeständigkeit von Asphalt

3.6.1 Übersicht

In der Asphaltprüfung kommen heutzutage in Deutschland verschiedene Prüfverfahren zur Beurteilung der Standfestigkeit von Asphalt zum Einsatz. Es ist jedoch anzunehmen, daß sich immer stärker "performance orientierte" Prüfverfahren (Verfahren zur Prüfung geforderter Gebrauchseigenschaften) durchsetzen werden, da die bisherigen konventionellen Verfahren nicht mehr ausreichen. Die sich bisher im Einsatz befindlichen Verfahren lassen sich in Spurbildungsversuche und statische oder dynamische Druckversuche einteilen. Die nachstehende Tabelle enthält eine Übersicht.

Spurbildungsversuche		Druckversuche	
		statische	dynamische
Spurbildungstest	Spurinnen-testmaschine	Marshall-Test	dynamischer einaxialer Druckversuch
		statischer einaxialer Druckversuch	dynamischer dreiaxialer Druckversuch mit konstantem Seitendruck
		statischer dreiaxialer Druckversuch mit konstantem Seitendruck	dynamischer dreiaxialer Druckversuch mit variablen Seitendruck

Tabelle 3-2:
Übersicht über Prüfverfahren zur Verformungsbeständigkeit von Asphalt

3.6.2 Spurbildungsversuche

Bei den Spurbildungsversuchen sind zwei verschiedene Verfahren im Einsatz, die sich in ihrer konstruktiven Gestaltung unterscheiden:

- ♦ der Spurbildungstest und
- ♦ die Spurrinntest-Maschine.

Während die Spurrinntest-Maschine bisher nur für Forschungszwecke zum Einsatz kam /7, 8/, ist der Spurbildungstest durch eine technische Prüfvorschrift /2/ festgelegt und wird auch in der Praxis angewandt.

So fordern die Bundesländer Hamburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen Spurbildungsversuche im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen und Kontrollprüfungen, um das Verformungsverhalten der Asphaltgemische zu beurteilen.

Beim Spurbildungstest wird ein belastetes Stahlrad über einer im Labor hergestellten Probeplatte oder einen Bohrkern (Durchmesser 300 mm) hin- und herbewegt, wobei die sich einstellende Spurtiefe über die Dickenabnahme der Probeplatte/des Bohrkerns als Maß für die Standfestigkeit herangezogen wird. Die Herstellung der Probeplatte ist bisher für diesen Versuch nicht festgelegt und die Präzision des Verfahrens noch nicht bestimmt worden /4, 5,6/.

3.6.3 Druckversuche

3.6.3.1 Der statische Kriechversuch

Der statische Kriechversuch wird als einaxialer Kriechversuch ohne Seitendruck oder als dreiaxialer Kriechversuch mit konstantem oder variablem Seitendruck ausgeführt.

Der zylindrische Probekörper wird bei dieser Versuchsart für ein bestimmtes Zeitintervall mit einer konstanten Normalspannung stirnseitig oder stirn- und mantelseitig beansprucht; die sich hierbei einstellende zeitabhängige Dehnung $\epsilon(t)$ wird gemessen und kann als Kriechkurve dargestellt werden (siehe Abbildung 3-6). Zum Zeitpunkt $t = t_1$ beginnt mit der Entlastung die Rückverformungsphase, die auf den elasto-viskosen Eigenschaften von Asphalt beruht.

Aus dem statischen Kriechversuch läßt sich während der Belastungsphase die Kriechfunktion ermitteln (siehe Kapitel 3.5.2.1).

Dieser Versuch wird auch zur Ermittlung des effektiven E-Moduls von Asphalt eingesetzt.

3.6.3.2 Der dynamische Kriechversuch

Beim dynamischen Kriechversuch wirkt eine Schwellbeanspruchung mit einer festgelegten Periode ohne Pause stirnseitig normal auf einen ebenfalls zylindrischen Probekörper, der entweder keinem, einem konstanten oder variablen Seitendruck ausgesetzt ist, ein. Wie beim statischen Kriechversuch wird auch hier die sich einstellende Dehnung, in diesem Fall als dynamische Kriechkurve, gemessen. Beim dynamischen Kriechversuch stellt sich die Dehnung zeitverzögert ein, was in einer Phasenverschiebung zwischen Spannung und Dehnung zum Ausdruck kommt.

Der dynamischen Kriechversuch kann als Druck-Versuch zur Bestimmung des absoluten oder komplexen E-Moduls /3/ oder zur Simulation von Verkehrslasten bei der Beurteilung der Standfestigkeit von Asphalt herangezogen werden.

3.6.3.3 Der dynamische Druck-Schwell-Versuch

Wird bei einem dynamischen einaxialen Kriechversuch die periodische Schwellbeanspruchung mit Pausen zwischen den einzelnen Lastimpulsen ausgeführt, so wird dieser Versuch als einaxialer dynamischer Druck-Schwell-Versuch (DSV) bezeichnet.

Bei diesem Versuch wird ein zylindrischer Asphaltprobekörper, i.d.R. Marshallprobekörper, bei isothermen Versuchsablauf einer auf die Grundflächen des Probekörper gleichmäßig verteilten haversine-impulsförmigen Druckschwellbelastung unterworfen /32/.

In Abbildung 3-11 ist der prinzipielle Lastverlauf und der sich einstellende irreversible Verformungsverlauf dargestellt.

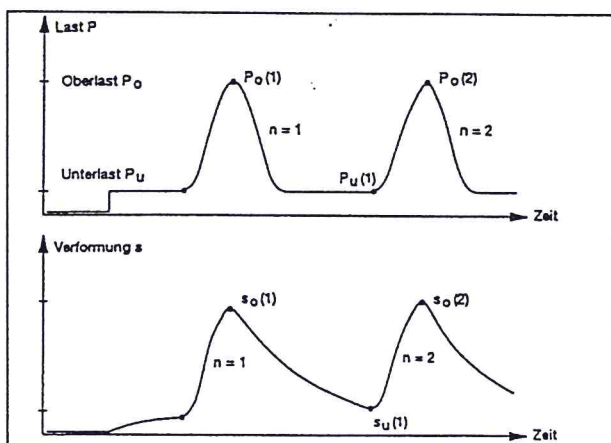


Abbildung 3-11:
Schematischer Schwelllast- und
Verformungsverlauf im Druck-
Schwell-Versuch /32/

Den zwischen den Impulsfolgen befindlichen Lastpausen kommt eine besondere Bedeutung zu. Bei Betrachtung von einem Belastungszyklus (Belastungsimpuls + Lastpause) wirkt die Beanspruchung des Probekörpers wie bei einem statischen Kriechversuch, so daß sich als

Dehnungskurve der in Abbildung 3-6 dargestellte Verformungsverlauf ergibt.

Abhängig von der gewählten Pausenzeit und Versuchstemperatur wird sich der viskoelastische Verformungsanteil mehr oder weniger zurückbilden; die zum Zeitpunkt des folgenden Belastungsimpulses bestehende Dehnung am Probekörper kann sich somit neben plastischen und viskoplastischen auch aus einem viskoelastischen Anteil zusammensetzen.

In /13/ wird berichtet, daß bei Untersuchungen über die Auswirkung von Pausenzeiten auf die bleibenden Dehnungen von Asphaltprobekörpern kein Einfluß feststellbar war; dies wird auch durch weitere Literaturangaben bestätigt.

In /6/ wird die Vermutung geäußert, daß die in den Untersuchungen festgestellten Einflüsse der Pausenzeiten nicht auf diese selbst, sondern auf die Gesamtversuchszeit zurückzuführen sind. Bei größeren Pausenzeiten und damit verlängerten Versuchszeiten wirkt auch die versuchs-technisch bedingte Unterlast, die ein statisches Kriechen bewirkt, auf den Probekörper verlängert ein und trägt hierdurch, vor allem bei höheren Temperaturen, zur Bildung von bleibenden Verformungen bei.

Als Versuchsergebnis des dynamischen Druck-Schwell-Versuchs wird für den jeweiligen Probekörper der plastische Verformungsanteil vor Beginn eines nächsten Lastimpulses aufgenommen und in einem Dehnungs-Lastwechsel-Diagramm als Impulskriechkurve (IPK) aufgezeichnet.

In Abbildung 3-12 ist der prinzipielle Verlauf einer Impulskriechkurve mit ihren einzelnen Phasen und dem zur Beschreibung des Verformungsverhaltens eines Asphaltes als charakteristisch erachteten Wendepunktes /6/ dargestellt.

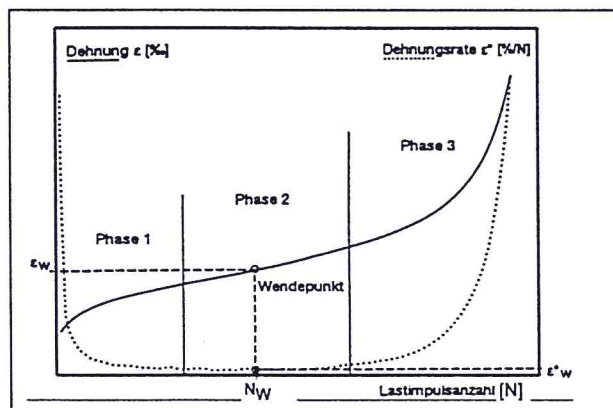


Abbildung 3-12:
Schematischer Verlauf einer
Impulskriechkurve mit ihren
Phasen, Wendepunkt und
Dehnungsrate /32/

Die differentielle Änderung der Dehnung über der Lastwechselzahl bei einer Impulskriechkurve wird als Dehnungsrate bezeichnet; sie stellt die Steigung der Impulskriechkurve dar. Der Verlauf der Impulskriechkurve läßt sich grundsätzlich in drei Phasen gliedern /32/:

- Phase 1: Einer zu Beginn starken Verformung mit progressiv abnehmender Verformungsgeschwindigkeit (Konsolidierung) folgt
- Phase 2: Ein Bereich mit nahezu konstanter Verformungsgeschwindigkeit mit einem Wendepunkt (volumenkonstante Formänderung).
- Phase 3: Die Verformung nimmt progressiv zu (beginnende und fortschreitende volumendilatante Gefügezerstörung des Probekörpers).

Die Versuchsauswertung beinhaltet die Angabe der charakteristischen Kenngrößen im charakteristischen Punkt:

$$\begin{aligned} N_W &= \text{Lastimpulszahl im Wendepunkt [-]} \\ \varepsilon_W &= \text{Dehnung im Wendepunkt [\%]} \\ \varepsilon_W^* &= \text{Dehnungsrate im Wendepunkt [\%/10^4 N]} \end{aligned}$$

Als charakteristischer Punkt gilt dabei immer der Wendepunkt, wenn die aufgenommene Impulskriechkurve diesen während der Versuchszeit aufweist.

Wird im Versuchsablauf der Wendepunkt nicht erreicht, so gilt der Punkt der Impulskriechkurve bei Versuchsende als charakteristischer Punkt und die Steigung der Kurve im quasi-linearen Bereich (Phase 2) als Dehnungsrate.

Die Ermittlung der genannten Kenngrößen aus einer Impulskriechkurve kann auf simultane, mathematische und grafische Weise erfolgen, wobei in der vorliegenden Arbeit dem mathematischen Ansatz der Vorzug gegeben wird.

Für die Ermittlung der charakteristischen Kenngrößen einer Impulskriechkurve wird eine Funktionsanpassung mit allen zur Verfügung stehenden Wertepaaren nach folgendem Ansatz durchgeführt:

Gleichung 3-19:

$$f(N) = y_0 + a \cdot N^k + b \cdot (e^{c \cdot N} - 1) \quad \begin{aligned} \text{mit } N &= \text{Lastwechselzahl [-]} \\ y_0, a, b, c, k &= \text{freie Parameter [-]} \end{aligned}$$

Dieser Ansatz wurde in /6/ von HÜRTGEN auf Grund von Untersuchungen vorgeschlagen und spiegelt die Ansätze aus Kapitel 3.5.2.1 und 3.5.3.1 wieder.

In /6/ wurde weiterhin untersucht, inwieweit sich für die Ausgleichsrechnungen die ermittelten Meßwerte eignen. Hierbei wurde vorgeschlagen, den Nullpunkt für die Kurvenanpassungen auszuschließen und entweder mit den Meßwerten ab dem einhundertsten oder fünfhundertsten Lastwechsel zu beginnen und alle im folgenden aufgenommenen Meßwerte zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine genauere Anpassung der Gleichung 3-19 an die jeweilige gemessene Impulskriechkurve.

Nachdem die Parameter der Gleichung 3-19 aus der Ausgleichsrechnung bekannt sind, kann die Dehnungsrate aus Gleichung 3-20 errechnet werden.

Gleichung 3-20:

$$f'(N) = akN^{k-1} + bce^{cN}$$

Die Anpassung der Gleichung 3-19 an gemessene Impulskriechkurven wurde mit Hilfe von /26/ durchgeführt. In dieser Software wird der LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus verwendet, der die Kurvenanpassung nach dem Prinzip des Minimums der Summe der Abstandsquadrate optimiert. In den Ausgleichsrechnungen nach Gleichung 3-19, die in dieser Arbeit mit dem einhundertsten und jedem folgenden Meßwert durchgeführt wurden, ist der Exponent k als freier Parameter zugelassen.

Im Anschluß an die Parameterbestimmung wird eine lineare Regression durchgeführt, um die Güte der Anpassung festzustellen. Für die Regressionsrechnung kam /27/ zum Einsatz.

Ziel der Anpassung ist es, für die theoretisch ermittelten Funktionswerte ein Bestimmtheitsmaß von über 95% der zu erklärenden Gesamtabweichungsquadratsumme zu erhalten.

3.7 Statistik

Die Auswertung der aus erweiterten Eignungsprüfungen gewonnenen Daten kann mit unterschiedlichen statistischen Methoden erfolgen. Für die Anwendung solcher Verfahren sind im Vorfeld die notwendigen Voraussetzungen zu prüfen.

Bei Anwendung von statistischen Methoden wird auf die Darstellung der mathematischen Grundlagen (z.B. /27, 34, 33, 35/) verzichtet.

Auf die Darstellung der Bedeutung von angewandten Methoden und Tests, und die Aussagekraft bestimmter Parameter wird jedoch im gegebenen Zusammenhang eingegangen.

Bei der Anwendung von Testverfahren ist eine Entscheidung hinsichtlich der Annahme oder Ablehnung einer aufgestellten Nullhypothese zu treffen. Läßt eine ermittelte Signifikanz eine deutliche Ablehnung ($\alpha \ll$ gewähltes Signifikanzniveau) der Nullhypothese nicht zu, so impliziert dies nicht die Richtigkeit der Nullhypothese - es bedeutet nur, die Nullhypothese *könnte* richtig sein (ohne Wahrscheinlichkeitsaussage). Eine deutliche Ablehnung der Nullhypothese besagt dagegen, daß die Daten nicht mit der Nullhypothese verträglich sind. Eine Nichtablehnung der Nullhypothese erlaubt weder eine Aussage über deren Gültigkeit noch über deren Nicht-Gültigkeit /35/.

Für die eigentlichen Rechenvorgänge wurde das Statistiksoftware-Paket SPSS 7.5 /27/ eingesetzt.

3.7.1 Voraussetzungen für statistische Anwendungen

An Anwendbarkeit von statistischen Methoden sind Voraussetzungen an das zu untersuchende Datenmaterial gestellt, deren Erfüllung vor der Auswertung zu prüfen ist.

Grundsätzlich lassen sich die zu untersuchenden Datensätze durch das Hauptmerkmal Mischgutart (Asphaltbeton oder Splittmastixasphalt) unterscheiden. Als Untergruppe eines Hauptmerkmals wäre die Mischgutsorte (z.B. Splittmastixasphalt 0/8S oder 0/11S) zu nennen. Innerhalb der Gruppe Mischgutsorte ist jede einzelne Mischgutzusammensetzung durch eine unabhängige Eignungsprüfung im Labor an die frei gewählten Parameter Mineralstoffart, Korngrößenverteilung, Bindemittelart angepaßt.

An dieser Stelle wird nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es keinen Zusammenhang und auch keine Systematik in der Auswahl der vorstehend genannten Parameter zwischen den auszuwertenden Eignungsprüfungen gab. Alle im dynamischen Druck-Schwell-Versuch geprüften Mischgutzusammensetzungen sind als unabhängig von einander zu betrachten. Probekörper, die aus der gleichen Mischgutzusammensetzung stammen und vergleichbare Raumdichten besitzen, sind demnach Mehrfachbestimmungen und können damit zu einer Stichprobe zusammengefaßt werden.

Bei entsprechender Verträglichkeit der Einzelwerte, kann dann für weiterführende Untersuchungen ein Stichprobenmittelwert gebildet werden; im Kapitel 3.7.2 wird hierauf näher eingegangen.

In nachstehender Abbildung ist die gewählte Gliederung der Datensätze am Beispiel des Splittmastixasphaltes veranschaulicht.

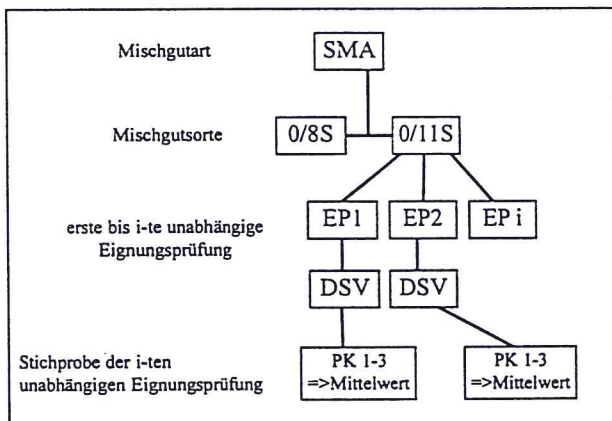


Abbildung 3-13:

**Einteilung der gewonnenen
Datensätze am Beispiel des
Splittmastixasphaltes**

Für die Analyse des gewonnenen Datenmaterials wären u.a. eine multiple Re-gressionsanalyse, zur Klärung des Einflusses von asphalttechnologischen Kenngrößen, wie z.B. Hohlraumgehalt, Ausfüllungsgrad, und/oder eine multiple Varianzanalyse, zur Klärung des Einflusses von kompositionellen Faktoren, wie z.B. Mischgutart, Größtkorn, Bindemittelart, eingesetzter Natursand, Mineralstoffart, auf die charakteristischen Kenngrößen des DSV, von Interesse.

Die Anwendung verteilungsabhängiger varianzanalytischer Verfahren stößt hier auf das Problem der Anzahl der geprüften Probekörper für die jeweiligen Eignungsprüfungen, die in der Regel zwei betrug. In diesem Fall kann eine Varianz nur ungenau geschätzt werden; erst gar nicht anwendbar sind sie, wenn nur Einfachbestimmungen vorliegen. Weiterhin sind die kompositionellen Faktoren völlig unsystematisch variiert worden, so daß eine Zuordnung von Effekten sehr erschwert oder unmöglich wird, so daß auf eine Varianzanalyse daher verzichtet werden muß.

Für die Anwendung von Testverfahren oder die Angabe von Vertrauensbereichen bei einer multiblen Regressionsanalyse wird, wie bei einer multiplen Varianzanalyse, eine zumindest angenäherte Normalverteilung der Meßdaten vorausgesetzt.

Für die zur jeweiligen Eignungsprüfung gehörenden Prüfergebnisse aus dem Druck-Schwell-Versuch kann die Voraussetzung der Normalverteilung nur logisch begründet werden, da die vorhandenen Stichprobenumfänge der jeweiligen dynamischen Prüfung für eine Verifizierung viel zu gering sind: bei der Prüfung von normgerechten Marshallprobekörpern im dynamischen Druck-Schwell-Versuch ist für jede einzelne Eignungsprüfung wegen der Gleichheit der Prüflinge eine Normalverteilung der Prüfergebnisse zu erwarten.

Von solch einer Verteilung der aus den dynamischen Einzelprüfungen ermittelten Mittelwerte innerhalb einer Mischgutsorte oder gar einer Mischgutart auszugehen, ist eher unwahrscheinlich, da von der dargestellten Gleichheit der Proben nicht mehr ausgegangen werden kann (die Wahl von Kornzusammensetzung, Mineralstoffart, Bindemittelart, etc. ist im Prinzip willkürlich).

Bei allen im folgenden durchgeführten Tests wird von einem Signifikanzniveau von 5% (Sig. = 0,05) ausgegangen.

3.7.2 Meßwertverträglichkeit

Für statistische Untersuchungen innerhalb der Gruppe Mischgutsorte werden nicht die Einzelergebnisse der dynamischen Prüfung der zur untersuchten Mischgutsorte gehörenden Eignungsprüfung herangezogen, sondern deren Mittelwerte.

Die Bildung von Stichprobenmittelwerten setzt voraus, daß alle Meßwerte miteinander verträglich sind, statistisch ausgedrückt: alle Meßwerte stammen aus derselben normalverteilten Meßreihe /33/.

Eine Ausreißerprüfung nach /33/ setzt die Kenntnis von mindestens drei Realisierungen einer Stichprobe voraus, was für die vorliegenden Daten der dynamischen Prüfung nicht immer der Fall ist.

Bei solchen Prüfungen, bei denen drei unabhängige Meßwerte vorliegen, wird eine Ausreißerprüfung nach /33/ vorgenommen; bei allen anderen wird, um zumindest eine Verträglichkeitsprüfung der Meßwerte durchführen zu können, die tatsächliche Spannweite mit der zulässigen Spannweite für Einzelwerte d_a als Prüfgröße verglichen. Für eine Meßwertverträglichkeit muß dann die tatsächliche Spannweite kleiner als die zulässige sein /33/. Mit einer statistischen Sicherheit von 95% berechnet sich d_a gemäß nachstehender Gleichung:

Gleichung 3-21:

	mit	d_a	=	zulässige Spannweite von Einzelwerten
$d_a = 2,77 \cdot \sigma_a$		σ_a	=	Standartabweichung von Einzelwerten unter Wiederholbedingungen

Die unbekannte Standardabweichung σ_a wäre nach /33/ aus Ringversuchen zu ermitteln; da für den DSV die Präzision noch nicht bestimmt ist, liegen Ergebnisse zu σ_a bisher nicht vor. Daher wird versucht σ_a aus dem gewonnenen Datenmaterial zu schätzen.

Innerhalb einer Mischgutsorte werden in einer ersten Näherung die dynamischen Prüfergebnisse als Ergebnisse, die unter Wiederholbedingungen entstanden sind, aufgefaßt³. Aus korrespondierenden dynamischen Prüfungen wird die Spannweite gebildet und über die jeweilige Mischgutsorte arithmetisch gemittelt. Diese mittlere Spannweite dient zur Schätzung von σ_a gemäß nachstehendem Zusammenhang /35/:

Gleichung 3-22:

$$\hat{\sigma}_a = R_m \cdot \left(\frac{1}{d_n} \right) \quad \text{mit} \quad \begin{array}{ll} \hat{\sigma}_a & = \text{geschätzte Standardabweichung} \\ R_m & = \text{gemittelte Spannweite} \\ 1/d_n & = \text{Tabellenwert /35/} \end{array}$$

Mittels $\hat{\sigma}_a$ läßt sich dann die Prüfbedingung für eine Meßwertverträglichkeit von Einzelwerten innerhalb einer Mischgutsorte wie folgt aufstellen:

Gleichung 3-23:

$$\frac{R_{\max}}{2,77} < \hat{\sigma}_a \quad \text{mit} \quad R_{\max} = \text{maximale Spannweite innerhalb einer Mischgutsorte}$$

Wird die Bedingung nach Gleichung 3-23 von den Prüfergebnissen einer Eignungsprüfung nicht erfüllt, so werden deren Daten in die statistische Betrachtung nicht mit aufgenommen.

3.7.3 Prüfung der Verteilungsart der Daten

In der Asphalttechnologie wird bei der Anwendung von statistischen Methoden meist die Normalverteilung vorausgesetzt.

In der vorliegenden Arbeit ist, durch die Unabhängigkeit der erweiterten Eignungsprüfungen untereinander, eine Normalverteilung der gewonnenen Ergebnisse aus den Eignungsprüfungen und der Mittelwerte aus den dynamischen Prüfungen nicht zu erwarten.

Eine Prüfung, ob die Daten dieser Verteilungsart gehorchen, soll daher erfolgen; bei Nichterfüllung dieser Voraussetzung muß dann auf die Anwendung verteilungsunabhängiger Abhängigkeitsmaße ausgewichen werden.

³ Alle dynamischen Prüfungen, für die zwei Einzelwerte vorliegen, sind vom gleichen Laboranten am gleichen Meßgerät durchgeführt worden.

Bei der Prüfung auf Normalität wird generell vorausgesetzt, daß die untersuchten Daten einer Grundgesamtheit entstammen. Dies läßt sich wie folgt begründen: die Einstellungsmöglichkeiten von Mischgut z.B. nach dem Splittmastixprinzip, ist durch Vorschriften eingeschränkt und somit einer Abgrenzung unterlegen; innerhalb dieses Bereiches sind alle Varianten einer entsprechenden Mischgutsorte einer Grundgesamtheit zurechenbar.

Für die Prüfung auf Normalität von Variablen innerhalb einer Mischgutsorte (hierbei werden alle Eignungsprüfungen mit ihren Ergebnissen - auch die der dynamischen Prüfung - zu einer Stichprobe zusammengefaßt) bietet sich als verteilungsunabhängiger Test der χ^2 -Anpassungstest an.

Da aber im vorliegenden Fall der Stichprobenumfang klein ist (für den Splittmastixasphalt 0/11S lagen 34 voneinander unabhängige Eignungsprüfungen vor → in /35/ wird für die Prüfung auf Abweichung vom Typ der Normalverteilung mit dem χ^2 -Anpassungstest ein Stichprobenumfang von $n \geq 60$ angegeben), wird auf die Lilliefors-Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff-Test für die Güte einer Anpassung ausgewichen, da dieser Test auch bei kleinen Stichprobenumfängen in der Lage ist Abweichungen von der Normalverteilung aufzudecken /35/.

In der Lilliefors-Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff-Test wird die Nullhypothese geprüft, daß die Werte der getesteten Variablen aus einer Normalverteilung stammen; die statistische Prüfgröße, die Anzahl der Freiheitsgrade und die entsprechende Signifikanz werden angegeben.

3.7.4 Verteilungsunabhängige Abhängigkeitsmaße

Ist die Bedingung der Normalverteilung von Meßwerten auch nicht näherungsweise erfüllt, so kann man nach /35/ den Rangkorrelations-Koeffizienten von Spearman (Symbol: r_s) nutzen, um auch bei kleinen Stichprobenumfängen Zusammenhänge von nichtnormalverteilten Meßwerten zu ermitteln.

Bei diesem Verfahren werden die Ränge der Meßwerte für die Untersuchung eines Zusammenhanges herangezogen und eine mögliche Beziehung zwischen diesen ermittelt. Vorausgesetzt wird dabei zumindest eine Ordinalskalierung der Stichprobenvariablen.

Diese Voraussetzung führt dazu, daß mit dem Verfahren ein Einfluß z.B. der Bindemittelart oder ob Natursand eingesetzt wurde oder nicht, nicht untersucht werden kann, da diese Merkmale nominalskaliert sind; die Voraussetzung ist bei den untersuchten Variablen (z.B.

Dehnungsrate, Hohlraumgehalt, Ausfüllungsgrad) in einer Eignungsprüfung erfüllt. Weiterhin darf die Anzahl von Bindungen (Beobachtungen, die dem Wert nach gleich sind) nicht zu hoch sein, da sonst eine Überschätzung (zu hoher Korrelationskoeffizient) auftreten kann.

Neben den Korrelationskoeffizienten wird zusätzlich noch die Nullhypothese, daß in der Grundgesamtheit kein Zusammenhang zwischen den Rängen besteht ($r_S = 0$), geprüft und die Signifikanz hierfür bei zweiseitiger Fragestellung ($r_S > 0$ oder $r_S < 0$) angegeben.

4 Auswertung vorhandener Untersuchungen

4.1 Untersuchungsprogramm

Die im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen am Prüfamts für Bituminöse Baustoffe und Kunststoffe der TU München gewonnenen Ergebnisse aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch sollen zunächst einer Auswertung unterzogen werden.

Für die Datenanalyse werden die Eignungsprüfungen und die Ergebnisse des DSV zusammengestellt und anschließend mittels einer statistischen Untersuchung ausgewertet.

Ziel dieser Analyse ist die Erfassung von Einflußfaktoren auf das Verhalten der Probekörper im Druck-Schwell-Versuch.

Eine besondere Berücksichtigung finden dabei folgende Parameter:

- ♦ Mischgutart (Asphaltbeton, Splittmastixasphalt)
- ♦ Größtkorn (8 mm, 11 mm)
- ♦ Mineralstoffanteile (Splitt, Sand, Füller)
- ♦ Bindemittelart
- ♦ Raumdichte
- ♦ Hohlraumgehalt
- ♦ fiktiver Hohlraumgehalt der Mineralmasse
- ♦ Ausfüllungsgrad

Die Versuchsbedingungen und die Versuchseinrichtung, die bei der Erstellung des untersuchten Datenmaterials vorlagen, sind in Kapitel 5.2 und 5.3 beschrieben.

4.2 Mischgutdaten für die Datenanalyse

Die Daten des jeweils dynamisch untersuchten Mischgutes und die Eigenschaften der geprüften Marshallprobekörper sind in Anlage I für Splittmastixasphalt 0/11S, in Anlage III für Splittmastixasphalt 0/8S und in Anlage V für Asphaltbeton 0/11S zusammengestellt.

Die Datensätze für den Splittmastixasphalt wurden im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen, die für den Asphaltbeton bei Kontrollprüfungen ermittelt.

Die Verteilung der Sieblinien im zulässigen Band der ZTVbit - StB 84/90 /56/ sind für die jeweilige Mischgutart in den Anlagen II, IV bzw. VI dargestellt.

4.3 Aufbereitung des Datenmaterials

Die bei den erweiterten Eignungsprüfungen im dynamischen Druck-Schwell-Versuch analog aufgezeichneten Impulskriechkurven mußten für die Bestimmung der charakteristischen Kenngrößen digitalisiert werden. Hierfür wurde die jeweils von einem X-Y-Schreiber erstellten Impulskriechkurven durch einen Scanner digitalisiert und anschließend mit einem Rechenprogramm so bearbeitet, daß Wertepaare für eine obere und untere Hüllkurve entstanden.

Die obere Hüllkurve stellt dabei die Meßwerte bei Aufliegen der Oberlast und die untere die Meßwerte bei Anliegen der Unterlast dar; das jeweilige Meßwertpaar wurde immer kurz vor Änderung der Belastung aufgenommen.

Die Auflösung des Scanners war für die Digitalisierung auf 300 dpi⁴ eingestellt; somit ist der Scanner in der Lage Pixel ab einem Durchmesser von 85 µm aufzulösen. Wird für die Strichbreite des Meßschreibers ein Wert von 200 µm angesetzt, so ist ein einfacher Stich mit mindestens 2 Pixel des Scanners aufgelöst; die Auflösung des Digitalisierungsgerätes ist somit höher als die des Schreibers zur Meßdatenprotokolierung.

Das Rechenprogramm zum Einlesen der digitalisierten Impulskriechkurven ist in Anlage VII mit seinem Quellcode aufgelistet⁵.

Für die Umsetzung der digitalen Daten der Impulskriechkurven in X-Y-Wertepaare der oberen und unteren Hüllkurve geht das Programm wie folgt vor:

Für die Digitalisierung sind drei Koordinaten der Impulskriechkurve zu definieren:

1. Ursprung der Impulskriechkurve
2. Endpunkt der Impulskriechkurve
3. Bezugspunkt zur Winkelkorrektur des Lotes bei der Digitalisierung

Vom Endpunkt in Richtung Ursprung der Impulskriechkurve werden die oberen und unteren Wertepaare der Hüllkurven in Scannerauflösung eingelesen. Im Anschluß wird eine Winkelkorrektur vorgenommen, die den Fehler eines nicht lotrechten Scannvorganges berichtigt. Hiernach werden zur Ermittlung der Hüllkurvenkoordinaten 5 Meßwerte zu einem gleitenden Mittelwert zusammengefaßt. Als Ergebnis entsteht eine Matrix aus Wertepaaren für die obere und untere Hüllkurve in Bezug auf ein orthogonales Koordinatensystem.

Diese Wertematrix dient als Vorlage für die Funktionsanpassungen nach Gleichung 3-19.

⁴ dpi = dots per inch / 1 inch = 25,4 mm

Die Definition des Nullpunktes ist für die Absolutwerte der Dehnung von wesentlicher Bedeutung. Da die Nullpunkte aber auf den Datenblättern der Impulskriechkurven nicht eindeutig vorhanden waren und für die Digitalisierung die Nullage durch die Definition des Ursprungs der Impulskriechkurve nur horizontale Verschiebungen erfahren kann, ist der gewählte Ursprung zwar für die Dehnung relevant aber nicht für die Dehnungsrate.

Dies bedeutet, daß für die Auswertung der Versuchsergebnisse aus den digitalen Impulskriechkurven nur die charakteristischen Kenngrößen Dehnungsrate und die zugehörige Lastwechselzahl herangezogen werden können.

Die aus Gleichung 3-20, mit den aus den Anlagen VIII bis X bekannten Parametern der analog erfaßten Impulskriechkurven, berechneten Dehnungsraten beziehen sich auf ein Koordinatensystem in Pixel. Für eine Vergleichbarkeit aller ermittelten Dehnungsraten ist eine Koordinatentransformation notwendig, damit eine Unabhängigkeit von den Maßstäben der analogen Aufzeichnungen der Impulskriechkurven erfolgt.

Die Transformation der Abszisse ist durch die Definition des Endpunktes der Impulskriechkurve als Wert für 10.000 Lastwechsel gegeben. Die Ordinate wird mittels der Scannerauflösung und des auf dem Datenscrib der analogen Aufzeichnung festgelegten Maßstabes berechnet. Mit Hilfe der nun bekannten Transformationsbeziehungen wird dann die Dehnungsrate mit der Einheit [Ordinaten-Pixel / Abszissen-Pixel] in die Einheit [mm Verformung / Lastwechsel] umgerechnet. Als Datengrundlage diente hierbei die untere Hüllkurve.

4.3.1 Funktionsanpassung

Mit den Wertepaaren für die unteren Hüllkurven werden mit allen zur Verfügung stehenden Datensätzen Anpassungen nach Kapitel 3.6.3.3 durchgeführt.

In den Anlagen VIII, IX und X sind die ermittelten Parameter und das Bestimmtheitsmaß für die Anpassung der aus Gleichung 3-19 berechneten Funktionswerte an die digitalisierten Impulskriechkurven enthalten.

4.3.2 Charakteristische Kenngrößen

Aufbauend auf den Ergebnissen der Funktionsanpassungen aus Kapitel 4.3.1 wurde zur Ermittlung der charakteristischen Kenngrößen gemäß Kapitel 3.6.3.3, für jede gemessene Impulskriechkurve auf numerischem Weg eine Bestimmung des Wendepunktes durchgeführt.

Die Berechnung des Wendepunktes wurde allerdings nur mit den Meßdaten während der Versuchsdauer durchgeführt, so daß eine extrapolierte Berechnung eines Wendepunktes oberhalb von 10.000 Lastwechseln nicht erfolgte. Trat bei einer Impulskriechkurve während der

⁵ Herrn A. Deimer sei an dieser Stelle für die Ausarbeitung des Rechenprogramms gedankt!

Versuchszeit kein Wendepunkt auf, wurde der Punkt bei Versuchsende als charakteristischer Punkt mit seinen entsprechenden Koordinaten herangezogen. Die Kenngröße Lastwechselzahl N_W wird dann zu einer Konstanten mit dem Wert 10.000 Lastwechsel.

Auf die Aufnahme der erreichten Dehnung im charakteristischen Punkt in die Auswertung mußte - wie oben dargestellt - verzichtet werden.

4.4 Ergebnisse der Datenanalyse

4.4.1 Funktionsanpassung

Die Gleichung 3-19 ist additiv aus drei Termen zusammengesetzt, wobei der erste Term einen Ordinatenabschnitt darstellt, der zweite und dritte den Funktionsverlauf bestimmen.

Die eigentliche Charakteristik der mathematischen Anpassung der Impulskriechkurve wird dabei vom Exponent des zweiten Terms und dem Parameter c der Exponentialfunktion und weniger durch die Vorfaktoren bestimmt.

Eine nähere Betrachtung dieser Parameter zeigt dabei beispielhaft für die Mischgutsorte Splittmastixasphalt 0/11S, daß der Exponent k im Mittel bei 0,261 und c bei $-2,242 \cdot 10^{-4}$ liegt.

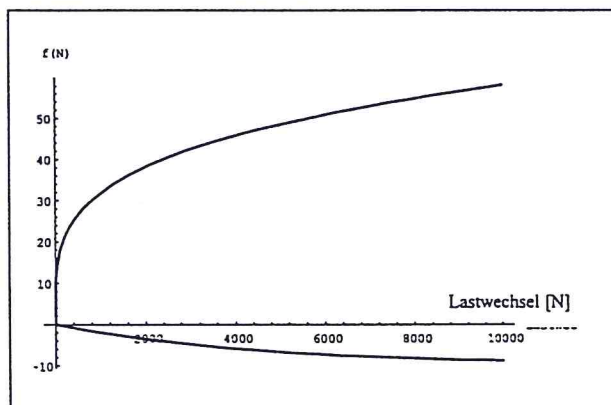


Abbildung 4-1:
Darstellung des zweiten und
dritten Terms der Gleichung 3-19
für Mittelwerte aus Anlage VIII

In Abbildung 4-1 sind die Verläufe des zweiten Terms (1. Quadrant) und dritten Terms (4. Quadrant) der Gleichung 3-19 für die Mittelwerte von k und c und die Mediane von $a = 5,2694$ und $b = 9,9258$ dargestellt; für a und b wurden die Mediane wegen unsymmetrischen Häufigkeitsverteilungen gewählt.

In diesem Diagramm ist deutlich zu erkennen, daß für die vorliegenden Daten der prinzipielle Verlauf der Impulskriechkurven, wenn sie während der Versuchszeit keinen Wendepunkt erreichen, im wesentlichen durch den zweiten Term der Gleichung 3-19 beschrieben wird.

Der Zusammenhang zu den in Kapitel 3.5.2.1 und 3.5.3.1 vorgestellten mathematischen Ansätzen ist damit gegeben.

Allerdings ergibt sich hieraus kein "[...] die Vorgänge vollständig und umfassend beschreibender Formalismus [...]" /6/.

Vielmehr wird aufgezeigt, auf welche physikalischen Hintergründe (siehe Kapitel 3) der zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalt im dynamischen Druck-Schwell-Versuch angesetzte mathematische Ansatz nach Gleichung 3-19 beruht.

Wie aus Abbildung 4-1 zu ersehen ist, kommt für die Beschreibung des Verlaufes einer Impulskriechkurve dem Parameter k die größte Bedeutung zu, wobei hier k allerdings nicht in der Größenordnung um 0,5 - wie dies auch in /6/ der Fall ist - einzuordnen ist.

Die Häufigkeitsverteilung von k gibt Abbildung 4-2 wieder.

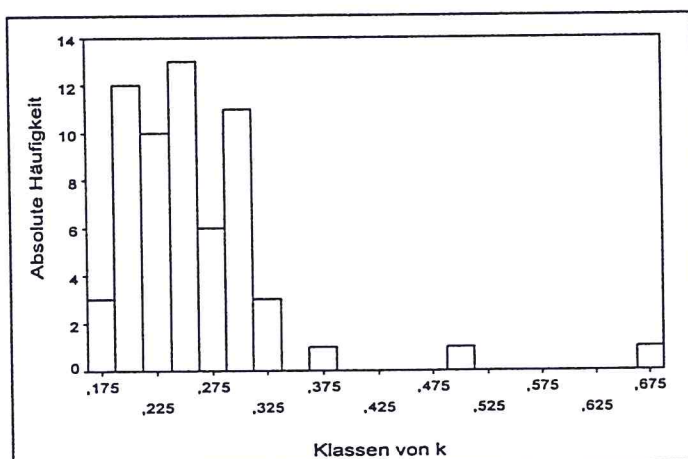


Abbildung 4-2:
Häufigkeitsverteilung des
Exponenten k für SMA 0/11S

Hieraus ist zu erkennen, daß k fast ausschließlich kleiner als 0,5 ist und somit die Impulskriechkurve einen flacheren Kurvenverlauf aufweist als in der Größenordnung um 0,5.

Zum Verlauf der Anpassungen sei noch angemerkt, daß der Erfolg der durchgeführten Ausgleichsrechnungen stark von der Wahl der Anfangswerte der Parameter abhängig war. Bei ungünstigen Ausgangswerten konnten z.T. keine zuverlässigen Anpassungen erzielt werden, z.T. war es möglich mit unplausiblen Anfangswerten (z.B. k negativ) akzeptable Anpassungen zu erreichen.

4.4.2 Meßwertverträglichkeit und Mittelwertbildung

In einem ersten Schritt zur Prüfung der Meßwertverträglichkeit wurden bei allen digitalisierten Impulskriechkurven, bei welchen unter den in Kapitel 5.3 genannten Versuchsbedingungen ein Wen-depunkt errechnet wurde, eine visuelle Plausibilitätsprüfung der Scannvorlage durchgeführt. Daten, die auf einer schlechten Digitalisierungsvorlage beruhten, die nicht zu verbessern war, wurden von einer weiteren Untersuchung ausgeschlossen.

Für die ermittelten Meßwerte der Dehnungsrate wurde dann in einem zweiten Schritt eine Ausreißerprüfung gemäß Kapitel 3.7.2 durchgeführt.

Bei der Mischgutart SMA 0/11S wurden drei Probekörper wegen Unverträglichkeit der Dehnungsrate und einer wegen Unverträglichkeit der Anzahl der Lastwechsel und bei Splittmastixasphalt 0/8S vier Prüfungen wegen Unverträglichkeit der Dehnungsrate als Ausreißer identifiziert. Diese Datensätze sind von der weiteren Auswertung ausgeschlossen worden.

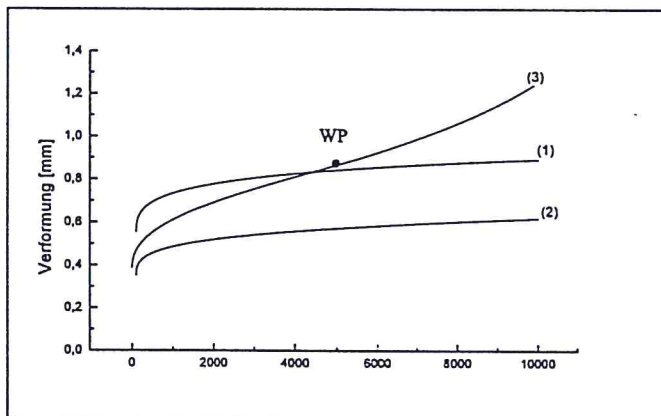


Abbildung 4-3:
Impulskriechkurven der
Probekörper für eine
Prüfung mit Ausreißer

Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft die Impulskriechkurven einer Prüfung, bei welcher die ermittelte Dehnungsrate des dritten Probekörpers einen Ausreißer darstellt; die Impulskriechkurve weist bei 4329 Lastwechsel einen Wendepunkt auf.

Die Dehnungsrate dieses Probekörpers beträgt im Wendepunkt $5,493 \cdot 10^{-5}$ mm/LW; die bei 10.000 Lastwechsel ermittelten Dehnungsraten der Probe 1 und 2 betragen $7,2041 \cdot 10^{-6}$ mm/LW und $6,662 \cdot 10^{-6}$ mm/LW.

Die Ausreißerprüfung der Lastwechselzahlen ergab, daß neben der Dehnungsrate auch die Lastwechselzahl des charakteristischen Punktes der Impulskriechkurve des dritten Probekörpers mit der der anderen beiden charakteristischen Punkte unverträglich ist.

Das Erreichen des Wendepunktes ist demnach nicht mit den Ergebnissen des Druck-Schwell-Versuchs der anderen beiden Probekörper verträglich.

Das Erreichen eines Wendepunktes einer Impulskriechkurve muß nicht automatisch zu einer entsprechend hohen Dehnungsrate führen.

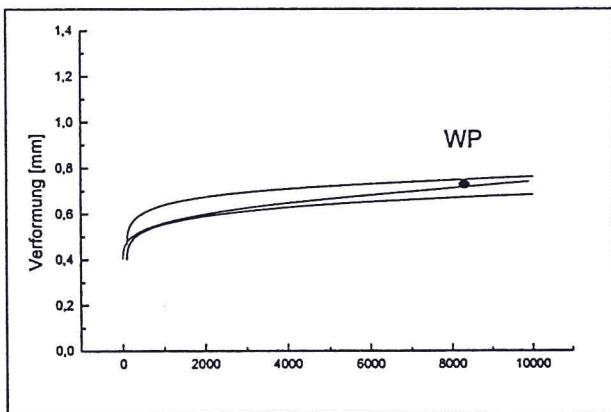


Abbildung 4-4:
Impulskriechkurven der
Probekörper für eine Prüfung
ohne Ausreißer

Abbildung 4-4 zeigt die Impulskriechkurven von drei Probekörpern der gleichen Mischgutzusammensetzung. Bei zwei dieser Kurven wird der Wendepunkt während der Versuchszeit nicht, bei der dritten (mittlere Impulskriechkurve) bei 8723 Lastwechsel erreicht. Obwohl dies der Fall ist, ist die in diesem Punkt auftretende Dehnungsrate mit denen der anderen beiden Kurven bei Versuchsende (10.000 Lastwechsel) verträglich.

Mit dem Erreichen des Wendepunktes wird, wie in Kapitel 3.6.3.3 dargelegt, die einsetzende Gefügezerstörung der Probe in Verbindung gebracht, so daß ein Probekörper mit einer bestimmten Mischgutzusammensetzung gegenüber einer Probe mit einer anderen Zusammensetzung als weniger standfest einzustufen ist, wenn der Wendepunkt früher erreicht wird.

Aus diesem Grund werden Probekörper, deren dynamische Prüfung einen Wendepunkt in der Impulskriechkurve ergab, von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Dies war je einmal für den Splittmastixasphalt 0/11S und Asphaltbeton 0/11S der Fall.

Aus dem Dargestellten wird deutlich, daß nicht allein die Dehnungsrate im charakteristischen Punkt sondern auch dessen Lastwechselzahl zur Beurteilung einer Mischgutzusammensetzung heranzuziehen ist.

Die Prüfung der Meßwertverträglichkeit bei der Mischgutart Asphaltbeton wies keine Ausreißer in den Ergebnissen der dynamischen Prüfung auf.

Bei Vorlage von vertraglichen Meßwerten, sind diese zu einem arithmetischen Mittel, welches dann für die weitere Untersuchung verwendet wurde, zusammengefaßt worden; lagen nur Einzelergebnisse vor, wurden diese verwendet.

Die errechneten Mittelwerte sind in den Anlagen VIII, IX und X angegeben.

4.4.3 Streuungen

Zur Beurteilung des Streuverhaltens innerhalb einer Stichprobe der i-ten unabhängigen Eignungsprüfung (siehe Abbildung 3-13) eignet sich der Variationskoeffizient als Verhältniswert von Standardabweichung zu Mittelwert.

Bei Eignungsprüfungen mit Dreifachbestimmungen im dynamischen Druck-Schwell-Versuch konnte dieser Koeffizient ermittelt werden und reicht von 0% bis ca. 35%.

Ein Wert von 35% ist als sehr hoch zu bezeichnen. Einzelwerte, die zu einem Mittelwert zusammengefaßt wurden, streuen somit ganz erheblich um diesen.

Zur weiteren Veranschaulichung der Meßergebnisse und der Streuung für die Dehnungsrate der jeweiligen Mischgutsorten sind in den nachstehenden drei Abbildungen die Einzelwerte der Dehnungsraten für die jeweilige Eignungsprüfung dargestellt.

Prüfungen als Ausreißer (bei der Dehnungsrate und/oder bei der Lastwechselzahl) sind mit einem ♦, Prüfungen die einen Wendepunkt erreicht haben mit einem ● und Prüfungen, deren Dehnungsrate bei Versuchsende (10.000 Lastwechsel) ermittelt wurde, mit einem ■ dargestellt.

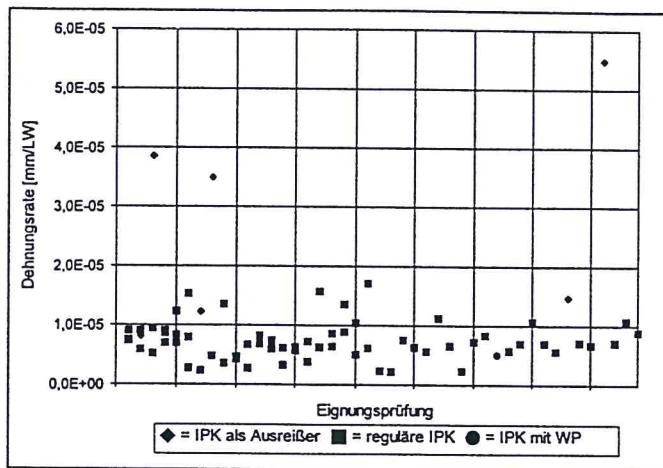


Abbildung 4-5:
Streuungsdiagramm der
Dehnungsrate von SMA 0/11S

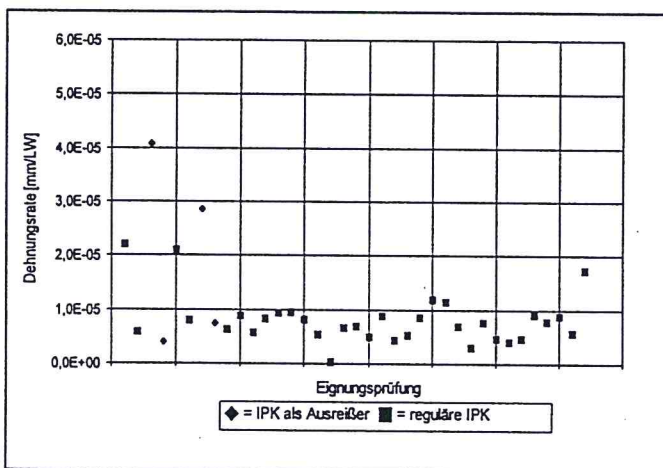


Abbildung 4-6:
Streuungsdiagramm der
Dehnungsrate von SMA 0/8S

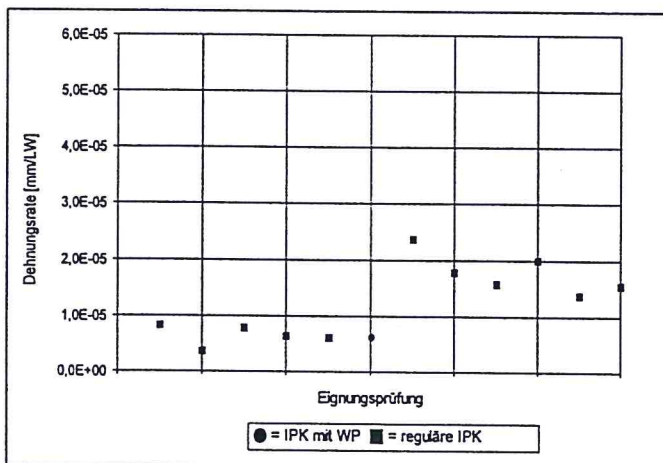


Abbildung 4-7:
Streuungsdiagramm der
Dehnungsrate von AB 0/11S

Aus den dargestellten Streuungsdiagrammen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- ♦ Unabhängig von der Mischgutart (Asphaltbeton oder Splittmastixasphalt) und dem eingesetzten Größtkorn treten keine Dehnungsraten der einzelnen Prüfungen größer $2,5 \cdot 10^{-5}$ mm/LW auf. Bei Bezug auf eine Marshallprobekörper-Höhe von 60 mm ergibt sich ein Grenzwert von $4,167 \text{ ‰}/10^4$ LW. Speziell für den Splittmastixasphalt 0/11S liegt dieser Anhaltswert noch etwas tiefer bei $2,0 \cdot 10^{-5}$ mm/LW ($= 3,333 \text{ ‰}/10^4$ LW).

- ♦ Das in Kapitel 3.7.2 vorgestellte Verfahren zur Ausreißerprüfung bei den digitalisierten Impulskriechkurven erfaßt alle Prüfungen, die auch augenscheinlich als Ausreißer zu bezeichnen sind.
- ♦ Ein Wendepunkt wurde beim SMA 0/11S in vier Fällen, beim SMA 0/8S und AB 0/11S nur in einem Fall erreicht - alle diese Prüfungen werden nicht in eine Auswertung mit aufgenommen.
- ♦ Die beim Asphaltbeton 0/11S über $1,0 \cdot 10^{-5}$ [mm/LW] liegenden Dehnungsraten sind möglicherweise auf die geringen Hohlraumgehalte der Prüfkörper zurückzuführen. Die Prüfung 84, die ebenfalls einen geringen Hohlraumgehalt aufweist aber in der erreichten Dehnungsrate deutlich niedriger als die Prüfkörper mit vergleichbarem Hohlraumgehalt liegt, weist gegenüber diesen einen reinen Eigenfülleranteil aus dem Amphibolit-Edelbrechsand auf, der vermutlich zu einer erhöhten Stabilität des Mörtels und damit zu einer steiferen Probe führt.
- ♦ Die Ausreißerprüfung und die Elimination der dynamischen Prüfungen, die einen Wendepunkt erreicht haben, führt dazu, daß die Lastwechselzahl im charakteristischen Punkt $N_W = 10.000$ Lastwechsel beträgt und für die weitere Untersuchung keinen Informationsbeitrag liefern kann. Auf eine weitere Berücksichtigung wird daher verzichtet, so daß nunmehr die Dehnungsrate als alleiniges Merkmal aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch zur Beurteilung der geprüften Asphalte zur Verfügung steht.
- ♦ Die geringe Spreizung der Prüfergebnisse bei den eingestellten Prüfbedingungen für alle untersuchten Asphalte deutet auf sehr standfest konzipiertes Mischgut hin.

4.4.4 Bedeutung der Korngrößenverteilung

Die unabhängige Erstellung der erweiterten Eignungsprüfungen hat eine entsprechende Variationsbreite der Korngrößenverteilungen zur Folge.

In nachstehender Abbildung ist das zulässige Band der Korngrößenverteilung für Splittmastixasphalt 0/11S gemäß ZTV bit-StB 84/90 /56/ dargestellt. Innerhalb dieses Bandes sind die obere und untere Grenzsieblinie, die alle Korngrößenverteilungen der erweiterten Eignungsprüfungen eingrenzen, eingezeichnet; die Kornverteilungskurven für Splittmastixasphalt 0/8S und Asphaltbeton 0/11S finden sich in den Anlagen IV und VI.

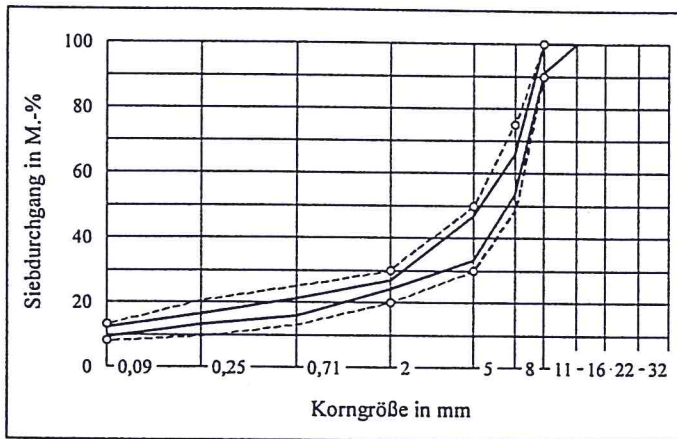


Abbildung 4-8:
Grenzsieblinien des
Splittmastixasphaltes 0/11S

Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß für alle Eignungsprüfungen die eingestellte Korngrößenverteilung innerhalb des zulässigen Bandes gemäß ZTV bit-StB 84/90 /56/ liegen und hier den mittleren Bereich einnehmen. Insgesamt sind somit weder sehr sand- noch splittreiche Mineralstoffzusammensetzungen gewählt worden.

Das gleiche Erscheinungsbild zeigen die Kurven der Korngrößenverteilung des Splittmastixasphaltes 0/8S.

Beim Asphaltbeton 0/11S verlaufen die in den Kontrollprüfungen ermittelten Körnungskurven im Grobsand- und Feinsplittbereich außerhalb des zulässigen Bereiches der ZTV bit-StB 84/90 /56/ für Asphaltbeton 0/11S. Die Mineralstoffzusammensetzungen der untersuchten Asphaltbetonprobekörper sind somit als eher sandreich zu bezeichnen.

Zur Charakterisierung der jeweiligen Splitt-, Sand- und Fülleranteile sind in nachstehender Tabelle die Mittelwerte, Spannweiten und Maximal-, Minimalwerte für die entsprechende Mischgutsorte angegeben.

N ist dabei die Anzahl der aufgenommenen Eignungsprüfungen.

Splittmastixasphalt 0/11S					
	N	Mittel	Spannweite	Min.	Max.
FÜLLER	34	10,9	2,90	9,4	12,3
SAND	34	14,5	3,50	13,1	16,6
SPLITT	34	74,6	2,90	73,0	75,9

Splittmastixasphalt 0/8S					
	N	Mittel	Spannweite	Min.	Max.
FÜLLER	27	12,2	2,30	11,0	13,3
SAND	27	14,8	6,10	10,8	16,9
SPLITT	27	73,1	5,90	70,5	76,4

Asphaltbeton 0/11S					
	N	Mittel	Spannweite	Min.	Max.
FÜLLER	8	9,9	0,90	9,3	10,2
SAND	8	43,8	2,60	42,8	45,4
SPLITT	8	46,4	2,90	44,6	47,5

Tabelle 4-1:
Mittlere Füller-, Sand- und
Splittanteile mit deren Streuungen
für die untersuchten Mischgutsorten

Aus der Tabelle 4-1 kann folgendes abgelesen werden:

- ♦ Beim Splittmastixasphalt 0/11S liegen die eingestellten Mineralstoffanteile in Bezug auf den Mittelwert als auch auf die Extremwerte im zulässigen Bereich der ZTV bit-StB 84/90; für den Splittmastixasphalt 0/8S gilt das gleiche, nur daß hier der Maximalwert des Füllers um 0,3 Gew.-% oberhalb des zulässigen Grenzwertes liegt; beim Asphaltbeton 0/11S ist ebenfalls der obere Füllergrenzwert beim Maximalwert um 0,2 Gew.-% überschritten und außerdem sind die Splittanteile zu niedrig gegenüber dem vorgeschriebenen Bereich von 50-60 Gew.-% - hier zeigt sich ebenfalls der erhöhte Sandanteil im Asphaltbeton.
- ♦ Die auftretenden Spannweiten sind sehr gering und liegen für alle Anteile weit unterhalb den zulässigen Toleranzen der ZTV bit-StB 84/90.
- ♦ Obwohl eine deutliche Unterscheidung bei den Sand- und Splittanteilen zwischen Asphaltbeton und Splittmastixasphalt besteht und außerdem die Prüftemperatur im dynamischen Druck-Schwell-Versuch beim Asphaltbeton 10K unter der des Splittmastixasphaltes lag, gilt für beide Mischgutarten der gleiche Grenzwert für die Dehnungsrate!

Im Hinblick auf den Verlauf der einzelnen Korngrößenverteilungen für den Asphaltbeton 0/11S (Anlage VI) sind die Mineralstoffzusammensetzungen durchaus als vergleichbar einzustufen.

Beim Splittmastixasphalt sind die Streubänder der Grenzsieblinien dagegen etwas größer, so daß hier eine eingehendere Betrachtung am Beispiel des Splittmastixasphalt 0/11S erfolgt.

Für die bessere Beurteilung der Korngrößenverteilungen für den Splittmastixasphalt 0/11S werden dessen Splittanteile in folgende Klassen aufgespalten:

Kornanteil > 8 mm,

Kornanteil > 5 mm und

Kornanteil > 2 mm.

In nachstehender Tabelle sind die jeweiligen Kornanteile aufgelistet.

Splittmastixasphalt 0/11S			
Kornanteil (Gew.-%)	maximal	minimal	Anforderung gem. ZTV bit- StB 84
>11 mm	8,9	0,0	≤ 10
>8mm	46,2	34,0	≥ 25
>5mm	66,9	53,2	50-70
>2mm	75,9	73,0	70-80

Tabelle 4-2:
Kornanteile des
Splittmastixasphalt 0/11S

Die Tabelle 4-2 zeigt ein weiteres Mal die normgerechte Zusammensetzung aller untersuchten Splittmastixasphalte 0/11S.

Abhängigkeiten der Dehnungsrate vom Massenanteil der Kornanteile in den genannten Klassen und von einzelnen Kornfraktionen konnten nicht festgestellt werden.

4.4.5 Einfluß der Bindemittelart

Von den insgesamt 34 in der Auswertung befindlichen Eignungsprüfungen für Splittmastixasphalt 0/11S sind 5 mit einem polymer- oder anders modifizierten Bitumen und 29 mit Straßenbaubitumen B65 ausgeführt.

Beim Splittmastixasphalt 0/8S sind von den insgesamt 27 vorliegenden Eignungsprüfungen 19 mit einem polymer- oder anders modifizierten Bitumen und 8 mit Straßenbaubitumen B80 erstellt worden.

Die 8 Eignungsprüfungen des Asphaltbeton 0/11S sind alle mit B65 ausgeführt.

Die jeweiligen Bindemittelgehalte sind im Rahmen der Eignungsprüfungen ermittelt worden und können damit als optimiert angesehen werden.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Bindemittelarten auf die Dehnungsrate im dynamischen Druck-Schwell-Versuch festzustellen, sind in nachstehender Abbildung die gemessenen Dehnungsraten über den Bindemittelarten Straßenbaubitumen und modifiziertes Bitumen für die entsprechenden Mischgutarten dargestellt.

Bei den modifizierten Bindemittel handelt es sich um Straßenbaubitumen denen Zusätze wie Trinidad Naturasphalt, Chemcrete oder ähnliches beigegeben wurde.

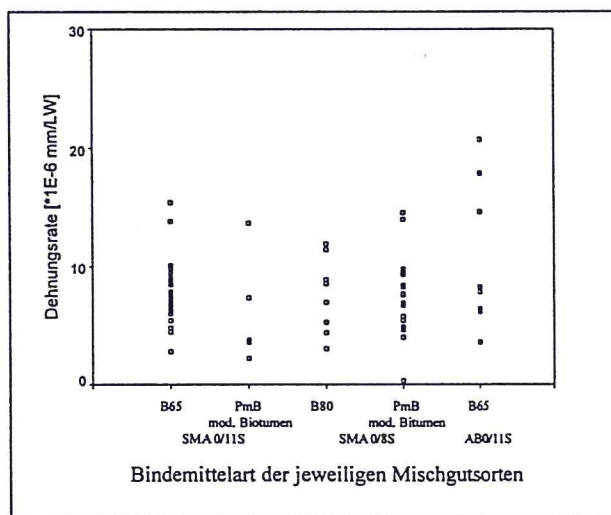


Abbildung 4-9:
Darstellung der Dehnungsrate
in Abhängigkeit der Bindemittelart
für die untersuchten Mischgutsorten

Aus dem Streuverhalten der Dehnungsrate in Abbildung 4-9 ist zu erkennen, daß es keine erkennbare Abhängigkeit zwischen der Bindemittelart, der Mischgutsorte und der Dehnungsrate gibt.

Berücksichtigt man, daß die Prüfungen der Probekörper im dynamischen Druck-Schwell-Versuch bei 50°C erfolgt und die Erweichungspunkte Ring und Kugel der eingesetzten Bindemittel in dieser Größenordnung liegen, wird deutlich, daß hierbei die veränderten Eigenschaften der polymer- oder anders modifizierten Bindemittel in den Hintergrund treten. Eine weitere Unterscheidung der Ergebnisse der Dehnungsrate im Hinblick auf das eingesetzte Bindemittel erfolgt daher nicht.

4.4.6 Untersuchung von Asphaltkenngrößen

4.4.6.1 Prüfung der Verteilungsart

Für die Anwendbarkeit der in Kapitel 3.7.1 aufgeführten statistischen Methoden wird hier die Voraussetzung auf Normalverteilung der Dehnungsrate und der Asphaltkenngrößen Raumdichte (ρ_A), Hohlraumgehalt (H_{bit}), fiktiver Hohlraumgehalt der Mineralmasse ($H_{M,bit}$) und Ausfüllungsgrad (HFB) geprüft.

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse des Lilliefors-modifizierten Kolmogoroff-Smirnoff-Tests für die genannten Variablen aufgeführt.

Die erste Spalte enthält die untersuchten Variablen, die zweite die Größe der Testvariablen, die dritte die Anzahl der Datensätze und die vierte die Signifikanz der geprüften Nullhypothese (H_0 : Normalverteilung der Variablen).

Die Entscheidungsregel bei diesem Test lautet: wenn die Signifikanz $< 0,05$ ist, dann ist die Nullhypothese zurückzuweisen und die Daten sind nicht mit der Annahme der Normalverteilung verträglich.

Test auf Normalität			
	Kolmogorov-Smirnov ^(a)		
	Statistik	N	Sig.
Dehnungsrate	,122	34	,200
ρ_A	,212	34	,000
H_{Mbit}	,114	34	,200
H_{bit}	,190	34	,003
HFB	,176	34	,009
a	Lilliefors Signifikanz Korrektur		

Tabelle 4-4:
Ergebnisse des K+S-Testes für
die Asphaltkenngrößen beim
Splittmastixasphalt 0/11S

Test auf Normalität			
	Kolmogorov-Smirnov ^(a)		
	Statistik	N	Sig.
Dehnungsrate	,091	27	,200
ρ_A	,202	27	,006
H_{Mbit}	,166	27	,054
H_{bit}	,235	27	,001
HFB	,203	27	,006
a	Lilliefors Signifikanz Korrektur		

Tabelle 4-5:
Ergebnisse des K+S-Testes für die
Asphaltkenngrößen beim Splitt-
mastixasphalt 0/8S

Test auf Normalität			
	Kolmogorov-Smirnov(a)		
	Statistik	N	Sig.
Dehnungsrate	,276	8	,074
ρ_A	,296	8	,038
H_{Mbit}	,240	8	,194
H_{bit}	,268	8	,093
HFB	,255	8	,134
a	Lilliefors Signifikanz Korrektur		

Tabelle 4-6:

**Ergebnisse des K+S-Testes für die
Asphaltkenngrößen beim
Asphaltbeton 0/11S**

Die in den Tabellen angegebenen Signifikanzen zeigen, daß die Nullhypothese - Normalverteilung der Variablen - meist mit deutlicher Sicherheit zurückgewiesen werden kann, die Daten folglich nicht normalverteilt sind.

Damit ist gezeigt, daß die Anwendung verteilungsunabhängiger statistischer Methoden gegenüber den verteilungsabhängigen vorzuziehen ist.

4.4.6.2 Bedeutung von Asphaltkenngrößen

In der Tabelle 4-7 bis Tabelle 4-9 sind die Ergebnisse der Rangkorrelation der Asphaltkenngrößen für die jeweilige Mischgutsorte zusammengefaßt.

Rangkorrelation Splittmastixasphalt 0/11S		
		Dehnungsrate
Spearman's Korrelations- Koeffizient	H_{bit}	,027
	H_{Mbit}	,045
	HFB	,035
	ρ_A	,092
Signifikanz (2-seitig)	H_{bit}	,879
	H_{Mbit}	,801
	HFB	,843
	ρ_A	,605
N	H_{bit}	34
	H_{Mbit}	34
	HFB	34
	ρ_A	34
	Dehnungsrate	34

Tabelle 4-7:

**Rangkorrelation der
Asphaltkenngrößen für
Splittmastixasphalt 0/11S**

Rangkorrelation Splittmastixasphalt 0/8S		
		Dehnungsrate
Spearman's Korrelations-Koeffizient	H_{bit}	,189
	H_{Mbit}	,076
	HFB	,167
	ρ_A	,164
Signifikanz (2-seitig)	H_{bit}	,345
	H_{Mbit}	,707
	HFB	,405
	ρ_A	,414
N	H_{bit}	27
	H_{Mbit}	27
	HFB	27
	ρ_A	27
	Dehnungsrate	27

Tabelle 4-8:
Rangkorrelation der
Asphaltkenngrößen für
Splittmastixasphalt 0/8S

Rangkorrelation Asphaltbeton 0/11S		
		Dehnungsrate
Spearman's Korrelations-Koeffizient	H_{bit}	,643
	H_{Mbit}	,209
	HFB	,643
	ρ_A	,241
Signifikanz (2-seitig)	H_{bit}	,086
	H_{Mbit}	,620
	HFB	,086
	ρ_A	,565
N	H_{bit}	8
	H_{Mbit}	8
	HFB	8
	ρ_A	8
	Dehnungsrate	8

Tabelle 4-9:
Randkorrelation der Asphalt-
kenngrößen für Asphaltbeton 0/11S

Für Signifikanzwerte $> 0,05$ ist kein Zusammenhang zwischen den Variablen nachweisbar.
 N ist die Anzahl der Beobachtungen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß aus der Untersuchung über die Rangkorrelation kein Zusammenhang zwischen den als maßgeblich erachteten Asphaltkenngrößen und der gemessenen Dehnungsrate besteht.

Die Korrelationskoeffizienten sind für einen gesicherten Zusammenhang zwischen Dehnungsrate und Asphaltkenngrößen zu klein und die Signifikanzwerte zu groß.

Um dies zu verdeutlichen sind in den folgenden Abbildungen - beispielhaft für die Mischgut-sorte Splittmastixasphalt 0/11S - die Streuungsdiagramme der Dehnungsrate über den unter-suchten Asphaltkenngrößen der geprüften Marshallprobekörper dargestellt.

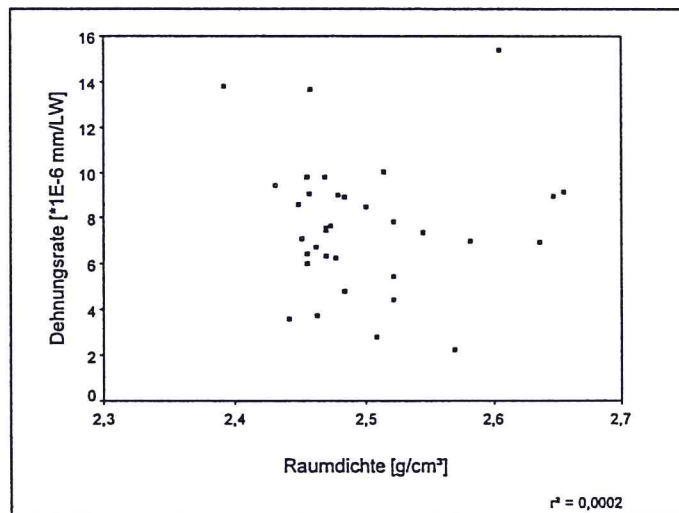


Abbildung 4-10:
Streuungsdiagramm der
Dehnungsrate über der
Raumdicke der Prüfkörper

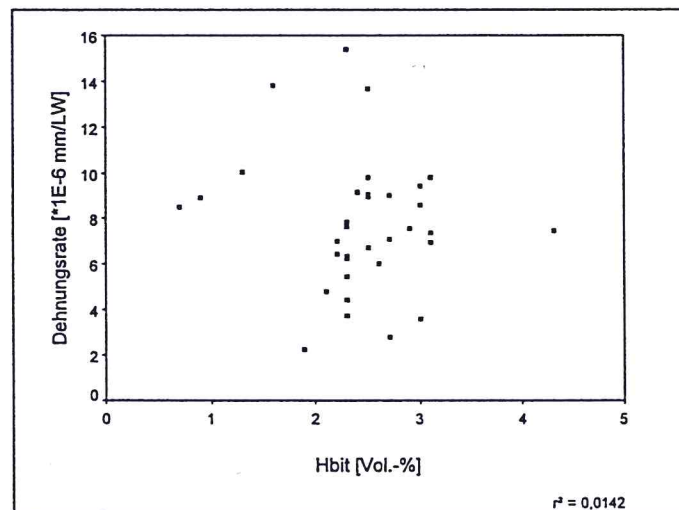


Abbildung 4-11:
Streuungsdiagramm der
Dehnungsrate über dem
Hohlraumgehalt der Prüfkörper

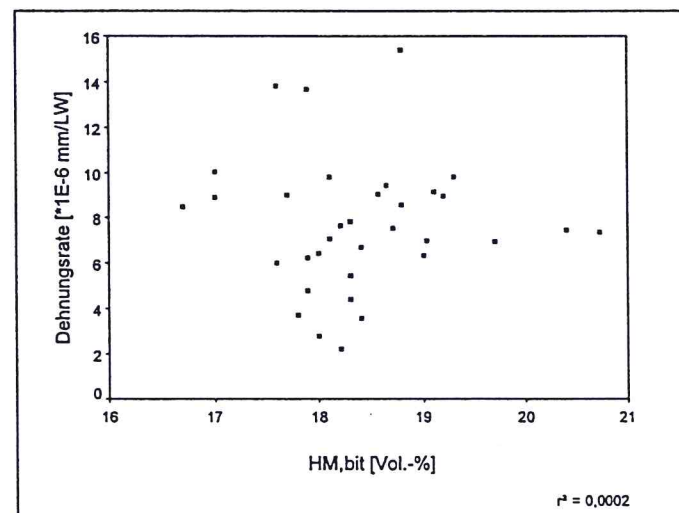


Abbildung 4-12:
Streuungsdiagramm der
Dehnungsrate über dem fiktiven
Hohlraumgehalt der Mineralmasse
der Prüfkörper

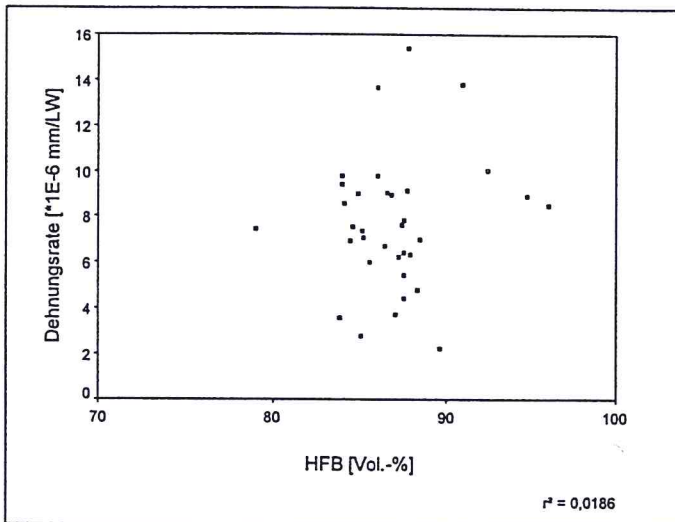


Abbildung 4-13:
Streudiagramm der
Dehnungsrate über dem
Ausfüllungsgrad der Prüfkörper

Aus diesen Diagrammen kann das stochastische Verhalten der Dehnungsrate in Abhängigkeit der Asphaltkenngrößen deutlich erkannt werden.

In den vorstehenden Abbildungen ist jeweils rechts unten für jedes Streudiagramm das Bestimmtheitsmaß einer linearen Regression angegeben. Die kleinen Werte belegen deutlich, daß zwischen der Dehnungsrate und den Asphaltkenngrößen kein linearer Zusammenhang besteht.

4.4.7 Allgemeine Betrachtung der Streuung der Dehnungsrate

Aus den bisherigen Darstellungen geht hervor, daß zwischen der Zielgröße Dehnungsrate und den Asphaltkenngrößen kein statistisch signifikanter Zusammenhang besteht.

Eine allgemeinere Betrachtung der Streuung der Dehnungsrate wird daher vorgenommen.

In Tabelle 4-10 sind Verteilungskenngrößen der Dehnungsrate für die untersuchten Mischgutsorten zusammengestellt.

	Dehnungsrate (*1E-6 mm/LW)		
	SMA 0/11S	SMA 0/8S	AB 0/11S
N	34	27	8
Mittelwert	7,7	7,44	10,7
Median	7,51	7,59	8,03
Spannweite	13,1	14,2	17,2
Minimum	2,26	1,13	3,56
Maximum	15,4	14,4	20,7
Quartile			
25%	6,19	4,90	6,19
50%	7,51	7,59	8,03
75%	9,08	9,32	17,1

Tabelle 4-10:
Häufigkeitskenndaten der
Dehnungsrate für die
untersuchten Mischgutsorten

Interessanterweise zeigt sich hier, daß der Median (Mittelwert bei Rangordnung der Daten) für alle drei Mischgutsorten in einer vergleichbaren Größenordnung liegt.

Weiterhin deutet die Vergleichbarkeit zwischen Median und arithmetischem Mittel bei der Mischgutart Splittmastixasphalt auf eine tendenziell symmetrische Verteilung hin. Beim Asphaltbeton zeigt sich dagegen ein deutlicherer Unterschied zwischen Median und Mittelwert, der aber vermutlich auf die geringe Anzahl an Datensätzen zurückzuführen ist. Ebenfalls deuten die 25% und 50% Quartilwerte im Zusammenhang mit den Maximalwerten auf symmetrisch verteilte Dehnungsraten hin - abgesehen vom Asphaltbeton 0/11S.

Zur besseren Veranschaulichung sind folgend die Häufigkeitsverteilungen der Dehnungsrate für die untersuchten Mischgutsorten aufgeführt.

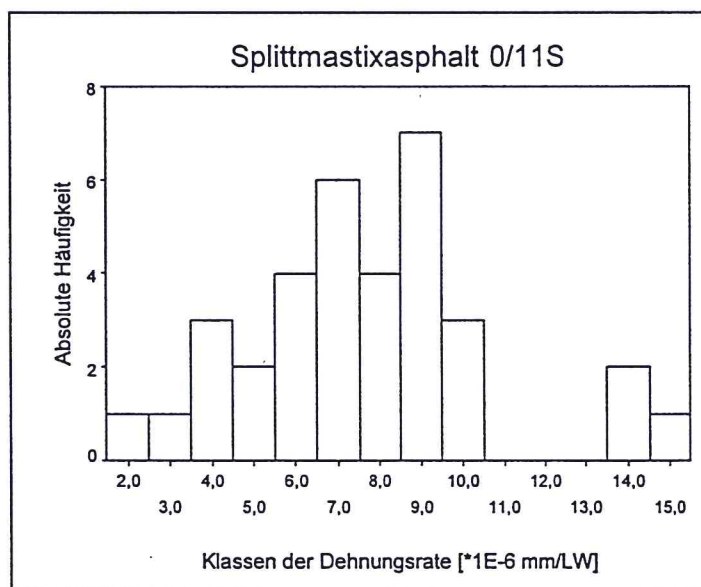
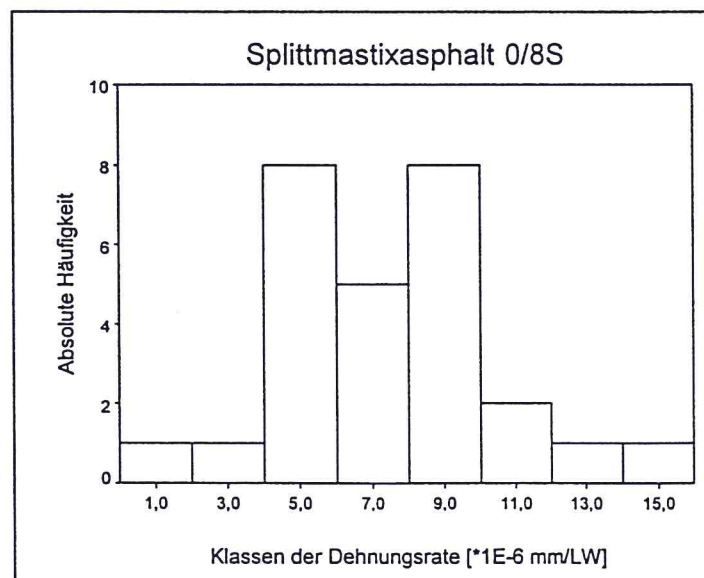
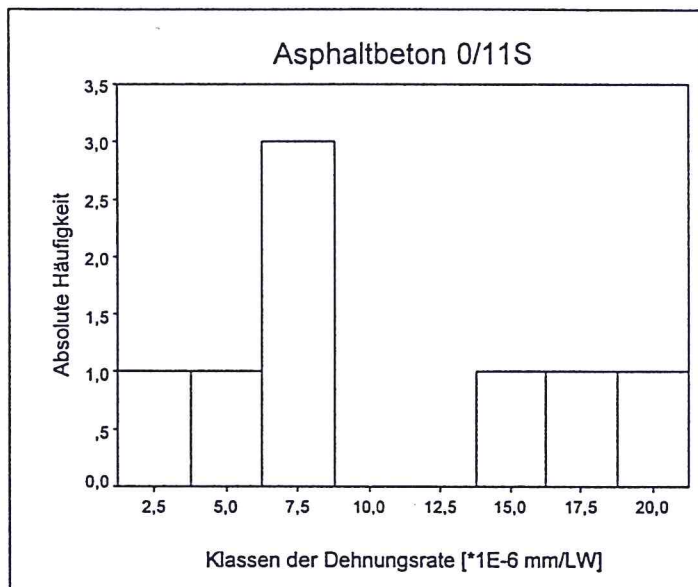


Abbildung 4-14:
Häufigkeitsverteilungen der
Dehnungsrate für die
untersuchten Mischgutsorten





Die beim Splittmastixasphalt 0/11S und 0/8S tendentielle symmetrische Verteilung der Dehnungsrate zeigt sich schon in der Tabelle 4-4 und der Tabelle 4-5. Die dort angegebenen Signifikanzen für die Dehnungsrate haben eine Größenordnung, welche die Ablehnung der Nullhypothese nicht zulässt, die Dehnungsrate somit angenähert normalverteilt sein könnte.

5 Laboruntersuchungen

5.1 Untersuchungsprogramm

Aufbauend auf den Erkenntnissen des Kapitel 4 wurden Versuche im dynamischen Druck-Schwell-Versuch durchgeführt, die eine Abgrenzung der Kenngrößen Dehnungsrate und Lastwechselzahl im charakteristischen Punkt hinsichtlich des Einflusses

- ♦ Bindemittelgehalt,
 - ♦ Verdichtungsgrad und
 - ♦ Korngrößenverteilung
- zum Ziel hatten.

Ausgehend von einem Splittmastixasphalt 0/11S, dessen Zusammensetzung in einer konventionellen Eignungsprüfung optimiert wurde, erfolgte eine Variation der Parameter Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung in den maximal zulässigen Toleranzen der ZTV bit-StB 84/90 /56/.

Für die Untersuchung über den Einfluß des Bindemittelgehaltes wurden Probekörper mit um $\pm 0,5$ Gew.-% vom optimalen Wert der Eignungsprüfung abweichenden Bindemittelgehalten hergestellt. Die Korngrößenverteilung des Mineralstoffgemisches entsprach dabei dem der Eignungsprüfung.

Zur Feststellung des Einflusses der Korngrößenverteilung wurde - wieder ausgehend von der Zusammensetzung aus der Eignungsprüfung - der Splittgehalt so weit wie möglich erhöht bzw. erniedrigt, daß die sich damit ergebenden Sand- und Fülleranteile nicht die zulässigen Toleranzen über- oder unterschritten.

Der Einfluß des Verdichtungsgrades wurde durch die Herstellung von Probekörpern mit 95%, 97%, 100% Verdichtungsgrad untersucht.

Diese Vorgehensweise läßt eine Abschätzung zu, in wieweit sich Veränderungen in der Zusammen-setzung von Splittmastixasphalt im Bereich der zulässigen Toleranzen der ZTV bit-StB 84/90 /56/ und unterschiedliche Verdichtungsgrade auf die Ergebnisse im dynamischen Druck-Schwell-Versuch auswirken.

Die Eignungsprüfung für den Splittmastixasphalt 0/11S, der als Mischgutsorte in Anlehnung an die im Kapitel 6 hauptsächlich festgestellte Deckschichtvariante ausgewählt wurde, ergab folgende Zusammensetzung:

74,8 Gew.-% Basaltedelsplitt,
14,1 Gew.-% Basaltedelbrechsand
11,1 Gew.-% Kalksteinfüller und
6,6 Gew.-% Straßenbaubitumen B65.

Die Asphaltzusammensetzung, die Ergebnisse der Eignungsprüfung und der dynamischen Prüfung der untersuchten Varianten sind in Anlage XI zusammengefaßt.

5.2 Beschreibung der Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung besteht aus einer Universalprüfmaschine 1255 der Fa. Instron. Bei dieser Maschine ist es über eine Hydraulik möglich sowohl eine Kolbenstange als auch ein Querhaupt in einem Prüfraumen zu bewegen.

Für die Steuerung der Maschine stehen digitale Einrichtungen zur Verfügung.

Der Bereich im Prüfraumen der Instron 1255, in welchen das Ende der Kolbenstange des Querhauptes und der unteren Kolbenstange (im Folgenden als Zylinder bezeichnet) hinein ragen, ist mit einer Wärmekammer umgeben, so daß eine isotherme Prüfung von Probekörpern möglich ist.

Die Wärmekammer ist in der Lage die nach /32/ geforderte Temperaturkonstanz von $\pm 0,1\text{K}$ einzuhalten.

Die Lastaufbringung erfolgt über den Zylinder gegen das fixierte Querhaupt, in welchem sich auch die Kraftmeßeinrichtung befindet.

Die Wege, die der Zylinder während eines kraftgeregelten Versuches zurücklegt, werden mit einem induktiven Wegaufnehmer, welcher sich im Inneren des Zylinders befindet, gemessen.

Die Druckprüfmaschine entspricht der Klasse 1 gemäß /36/ und /37/.

Die folgende Abbildung zeigt die eingesetzte Universalprüfmaschine.

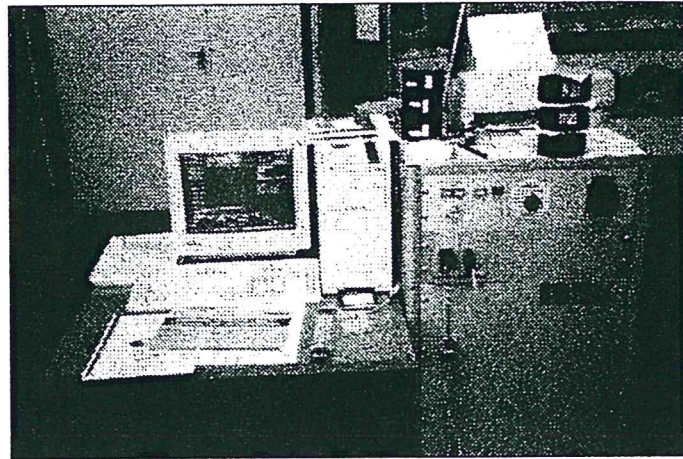
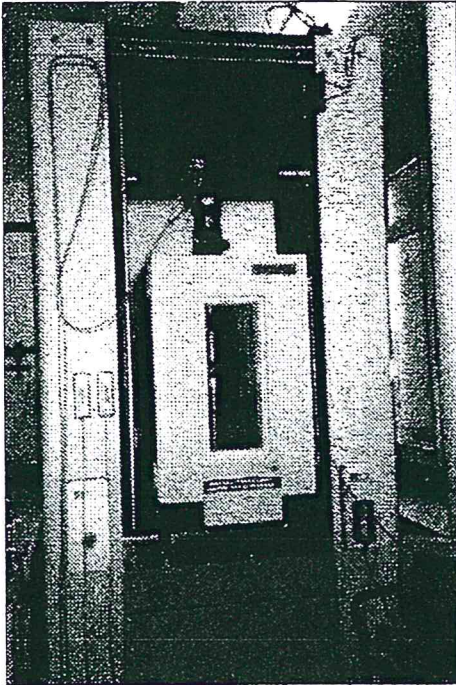


Abbildung 5-1:
Eingesetzte Universalprüfmaschine
Instron 1255

Im Gegensatz zu den in Kapitel 4 ausgewerteten Datensätzen, die im Vorfeld zu dieser Forschungsarbeit gewonnen wurden, war es bei den hier vorgestellten Laboruntersuchungen möglich, die analoge Auswerteeinheit der Instron 1255 für die Meßwerterfassung durch einen PC zu erweitern. Hierdurch war eine digitale Meßwerterfassung während des Versuchs möglich. Der Nullpunkt der Impulskriechkurven konnte somit eindeutig definiert und die Dehnung als weitere charakteristische Kenngröße ermittelt werden.

5.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsvorbereitung und -durchführung der Vorversuche erfolgte gemäß /32/ an Marshallkörpern.

Die untersuchten Probekörper wurden vor Versuchsbeginn auf eine einheitliche Probekörperhöhe von 60 mm planparallel geschliffen.

Anstatt einer haversine-impulsförmigen Druckschwellbelastung erfolgte aus steuerungstechnischen Gründen die Belastung in Form eines Trapezes.

Die Größe der Oberlast betrug dabei $P_O = 1460 \text{ N}$ und die der Unterlast $P_U = 186 \text{ N}$; dies entspricht einer Spannung von $\sigma_O = 0,18 \text{ N/mm}^2$ bzw. ca. $\sigma_U = 0,02 \text{ N/mm}^2$. Die Impulsdauer betrug $t_B = 0,4 \text{ s}$ und die Lastpause $t_E = 1,3 \text{ s}$, so daß sich ein Belastungszyklus von $t_Z = 1,7 \text{ s}$ ergibt. Die Versuchstemperatur betrug 50°C .

Der grundsätzliche Last-Zeit-Verlauf des Versuchs ist in nachstehender Abbildung schematisch dargestellt.

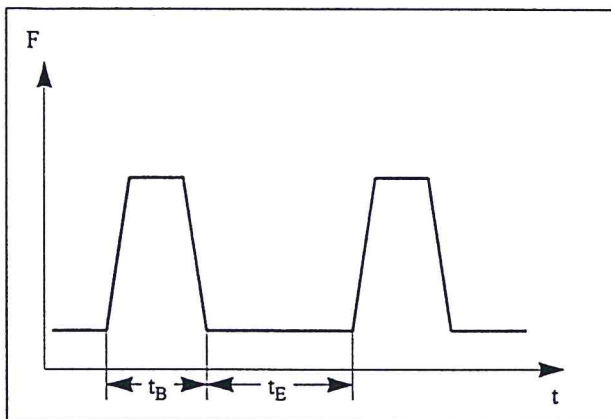


Abbildung 5-2:
Schematischer Last-Zeit-Verlauf
des durchgeführten DSV

Die in /32/ aufgeführten Prüfbedingungen sind in ihrer Größenordnung den Bedingungen in der Praxis angelehnt. So wird z.B. die eingestellte Prüftemperatur von 50°C in Deckschichten von Straßen - wie schon mehrfach durch Messungen bestätigt werden konnte /6/ - bei sommerlichen Tagen durchaus erreicht.

Weiterhin können die Höhe der Belastung und die Anzahl der Lastwechsel im dynamischen Druck-Schwell-Versuch ebenfalls als realitätsnah gelten, wie dies in /6/ am Beispiel der Versuchsstrecke Hilpoltstein /50/ bestätigt wurde.

5.4 Versuchsauswertung

5.4.1 Funktionsanpassung und Ausreißerprüfung

Abweichend von den im Kapitel 3.6.3.3 angegebenen Einheiten der charakteristischen Kenngrößen wird für eine bessere Vergleichbarkeit mit den Datensätzen des Kapitels 4 die Dehnungsrate in mm/LW angegeben. Die angegebenen Dehnungen und Dehnungsraten sind am Wendepunkt oder, wenn dieser nicht erreicht wurde, bei Versuchsende ermittelt und beziehen sich auf die Probekörperhöhe von 60 mm.

Die aus den Laborversuchen ermittelten Impulskriechkurven wurden gemäß Kapitel 3.6.3.3 ausgewertet und die charakteristischen Kenngrößen ermittelt. Die Ergebnisse sind in der Anlage XII enthalten.

Für den Parameter k ist zu bemerken, daß er in einer vergleichbaren Größenordnung wie in Kapitel 4.4.1 ermittelt liegt, jedoch bei Erreichen eines Wendepunktes der Impulskriechkurve in einen Bereich um 0,5 einzuordnen ist.

Der Parameter c wechselt i.d.R. bei einer Impulskriechkurve mit Wendepunkt sein Vorzeichen.

Ausgehend von Gleichung 3-19, haben das Verhalten der Parameter k und c folgende Auswirkungen auf den Verlauf einer Impulskriechkurve:

- ♦ Für $k < 0,5$ und $c < 0$ verlaufen die Impulskriechkurven mit steigender Lastwechselzahl relativ flach, so daß auf eine standfeste Mischgutzusammensetzung geschlossen werden kann (das Nichterreichen des Wendepunktes während des Versuches entspricht einer erst bei sehr hohen Lastwechselzahlen einsetzenden Gefügezerstörung - siehe Verlauf der Kurven (1) und (2) in Abbildung 4-3).
- ♦ Für $c < 0$ geht die Exponentialfunktion in Gleichung 3-19 für steigende Lastwechselzahlen gegen null, so daß der Verlauf der Impulskriechkurve im wesentlichen nur noch vom Potenzausdruck bestimmt wird. Die Exponentialfunktion degeneriert zu einer quasi-Konstanten.
- ♦ Für $c > 0$ bewirkt die Exponentialfunktion, daß die Dehnungsrate ein Minimum durchlaufen kann; der Potenzausdruck selbst verläuft mit steigender Lastwechselzahl flacher (siehe Verlauf der Kurve 3 in Abbildung 4-3).

Bei der Ausreißerprüfung für die Dehnungsrate ergaben sich formal unverträgliche Meßwerte für den Probekörper 1 der Vergleichsmischung Verdichtungsgrad ($k = 100\%$) und beim Probekörper 3 mit reduziertem Bindemittelgehalt.

Für die weitere Auswertung wird der Wert des Probekörpers 3 mit reduziertem Bindemittelgehalt trotzdem mit aufgenommen, da sich aus einem Größenvergleich der Streuungen die festgestellte als unverhältnismäßig klein erwies.

Der Meßwert des Probekörper 1 der Vergleichsmischung für den Verdichtungsgrad bleibt dagegen unberücksichtigt.

Die Verträglichkeitsprüfung der Lastwechselzahl zeigt keine zusätzlichen Ausreißer.

An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, daß das in /33/ empfohlene Verfahren zur Ausreißerprüfung nicht mehr angewendet werden sollte, wenn bei einer Dreifachbestimmung zwei Meßwerte gleich sind, da dadurch der kleinste oder größte Meßwert immer einen Ausreißer darstellt, weil die Prüfgröße konstant und größer dem Schwellenwert wird.

5.4.2 Einfluß des Bindemittelgehaltes

Als Ergebnisse der dynamischen Prüfung für die Untersuchung über den Einfluß des Bindemittelgehaltes ergaben sich die in Tabelle 5-1 dargestellten aus den Einzelergebnissen gemittelten Kennwerte im charakteristischen Punkt der Impulskriechkurven.

	Mittelwerte		
	Dehnungsrate [mm/LW]	Lastwechsel [-]	Dehnung [%]
+0,5 Gew.-%	$4,139 \cdot 10^{-05}$	6952	2,02
-0,5 Gew.-%	$1,161 \cdot 10^{-05}$	10000	1,35
EP	$9,475 \cdot 10^{-06}$	10000	1,20

Tabelle 5-1:

**Charakteristische Kennwerte
aus der Untersuchung zum
Einfluß des Bindemittelgehaltes**

Ein deutlicher Verlust an Wärmestandfestigkeit bei der Mischung mit erhöhtem Bindemittelgehalt wird durch den nach ca. 2/3 der Versuchsdauer erreichten Wendepunkt angezeigt.

Die Dehnungsrate, die deutlich oberhalb der in Kapitel 4.4.7 festgestellten Verteilung liegt, weist ebenfalls auf eine mangelnde Standfestigkeit bei Wärme hin.

Die größere Dehnung der Mischung mit erhöhtem Bindemittelgehalt erscheint durch die dickeren Bindemittelfilme erklärbar, die zu einem besseren Abgleiten der umhüllten Mineralstoffkörner gegeneinander führen.

Die Wärmestandfestigkeit der Asphaltmischung mit reduziertem Bindemittelgehalt scheint hinsichtlich der festgestellten Dehnungsrate und des während der Versuchsdauer nicht erreichten Wendepunktes gegenüber der als Eignungsprüfung angesetzten Vergleichsmischung nicht eingeschränkt worden zu sein.

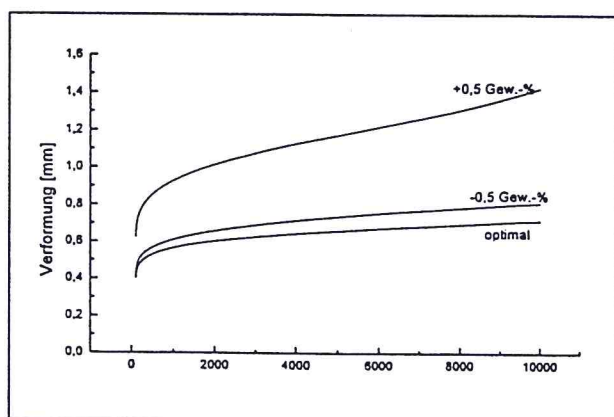


Abbildung 5-3:

**Impulskriechkurven aus der
Variation des Bindemittelgehaltes**

Die geschilderten Zusammenhänge lassen sich aus Abbildung 5-3 entnehmen, in der die aus den Einzelversuchen gemittelten Impulskriechkurven dargestellt sind.

Die Unterschiede in der Lage des charakteristischen Punktes und der in ihm ermittelten Kenngrößen sind klar erkennenbar.

Aus Tabelle 5-1 und Abbildung 5-3 geht hervor, daß sich ein gegenüber der Eignungsprüfung reduzierter Bindemittelgehalt im Vergleich zu einem erhöhten kaum nachteilig auf die Wärmestandfestigkeit im Druck-Schwell-Versuch auswirkt.

Allerdings steht zu befürchten, daß bei Asphalten mit einem derart erniedrigten Bindemittelgehalt die Dauerhaftigkeit entsprechend reduziert wird.

5.4.3 Einfluß des Verdichtungsgrades

Für die Analyse des Einflusses des Verdichtungsgrades auf die charakteristischen Kenngrößen im dynamischen Druck-Schwell-Versuch wurden, aufbauend auf der zuvor genannte Eignungsprüfung für den Splittmastixasphalt 0/11S, Marshallprobekörper mit unterschiedlichen Verdichtungsschlägen hergestellt.

Neben den Probekörpern mit einem Verdichtungsgrad mit 100% (Normverdichtung) wurden Probekörper mit Verdichtungsgraden von 95%, 97% erzeugt.

Die Herstellung von Probekörpern mit einem Verdichtungsgrad von 102% konnte im Labor ohne Erhöhung der Mischguttemperatur allerdings nicht erzielt werden.

Die Eignungsprüfungen der gezielt variierten Asphalte sind in Anlage XI aufgeführt.

Bei den dynamischen Prüfungen der Probekörper mit einem Verdichtungsgrad von ca. 95% konnten keine Ergebnisse ermittelt werden, da die Proben schon nach ca. 3000 Lastwechseln deutliche Gefügezerstörungen aufwiesen und der Versuch abgebrochen werden mußte.

Eine Anpassung an die aufgezeichneten Impulskriechkurven war nicht möglich, da die Kurve im Prinzip nur aus einer Phase 1 und 3 bestand; ein quasi-linearer Bereich nach Abbildung 3-12 trat nicht auf.

Der Versuchsablauf bei der Prüfung der Proben mit einem Verdichtungsverhältnis von 95% zeigt, daß Probekörper mit extrem geringer Verdichtung sofort im dynamischen Druck-Schwell-Versuch identifiziert werden können.

Die charakteristischen Kennwerte der Proben mit Verdichtungsgraden von 97% und 100% sind in Tabelle 5-2 zusammengefaßt.

	Mittelwerte		
	Dehnungsrate [mm/LW]	Lastwechsel [-]	Dehnung [%]
k = 97 %	1,644E-04	2497	1,76
k = 100 %	8,448E-06	10000	1,36

Tabelle 5-2:

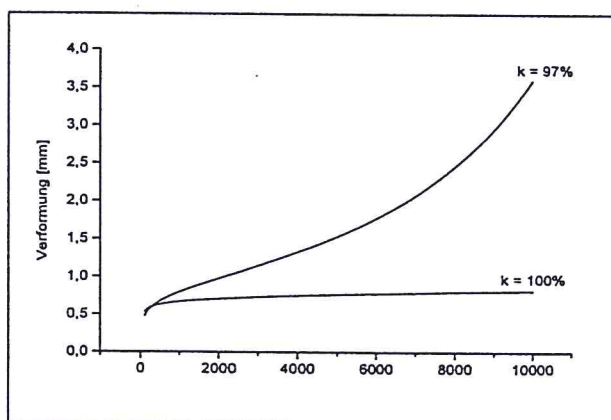
Kennwerte im charakteristischen Punkt aus der Untersuchung des Verdichtungsgrades

Aus den aufgelisteten Werte für die Probe mit 97% Verdichtungsgrad ist deren frühzeitiges Versagen deutlich zu erkennen.

Der Verlauf der Dehnung während des Versuchs erreichte sogar das hierfür in /32/ festgelegte Abbruchkriterium von maximal 40%. Die Lage des Wendepunktes bei einer sehr niedrigen Lastwechselzahl verweist auf einen frühen Überergang in die Phase 3, die mit einer laufenden Zerstörung der Probe verbunden ist.

Die um ca. eine 10er Potenz über dem Maximum der Verteilung der Dehnungsrate nach Kapitel 4.4.7 liegende Dehnungsrate zeigt deutlich, daß Proben mit einem Verdichtungsgrad von 97% keine ausreichende Wärmestandfestigkeit aufweisen.

Die Werte der Dehnungsrate und Lastwechsel der normverdichteten Probekörper liegen dagegen alle innerhalb der genannten Verteilung der Dehnungsrate und deuten auf eine gute Wärmestandfestigkeit hin.

**Abbildung 5-4:**

Impulskriechkurven aus der Variation des Verdichtungsgrades

In Abbildung 5-4 sind die Impulskriechkurven für die mit unterschiedlichen Verdichtungsgraden hergestellten Probekörper dargestellt.

Deutlich ist die Auswirkung einer zu geringen Verdichtung auf den Verlauf der Impulskriechkurve zu erkennen.

Aus der Untersuchung zum Einfluß des Verdichtungsgrades auf die Wärmestandfestigkeit von Asphaltproben im DSV kann gefolgert werden, daß dieser Versuch auf eine mangelnde Verdichtung von Proben schnell und zuverlässig anspricht.

5.4.4 Einfluß der Korngrößenverteilung

Die zur Untersuchung des Einflusses der Korngrößenverteilung eingestellten Sieblinien sind in Abbildung 5-5 dargestellt.

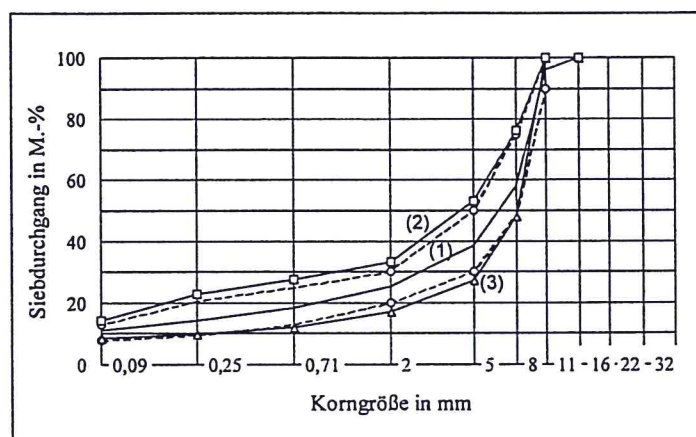


Abbildung 5-5:
Kornverteilungskurven der
Asphalte für die Laborversuche

In dieser Abbildung stellen die gestrichelten Linien die Begrenzungslinien für Splittmastixasphalt 0/11S gemäß ZTV bit-StB 84/90 /56/ und die durchgezogene [Kurve (1)] die Korngrößenverteilung des Splittmastixasphaltes 0/11S, wie er in der Eignungsprüfung zusammengesetzt wurde, dar.

Die Kurve (2) stellt die Korngrößenverteilung mit reduziertem Splittanteil und entsprechend angepaßten Sand- und Fülleranteilen dar. Diese Anteile betragen bei dieser Kurve:

- 66,8 Gew.-% Basalteselsplitt
- 19,1 Gew.-% Basalteselbrechsand und
- 14,1 Gew.-% Kalksteinfüller.

Bei der Kurve (3) sind die Verhältnisse umgekehrt, d.h. erhöhter Splittanteil und entsprechend angepaßte Sand- und Fülleranteile. Die Mineralstoffanteile bei dieser Kurve betragen:

- 82,8 Gew.-% Basalteselsplitt
- 8,6 Gew.-% Basalteselbrechsand und
- 8,6 Gew.-% Kalksteinfüller.

Der in der Eignungsprüfung festgelegte Bindemittelgehalt blieb sowohl für die splittreiche wie splittarme Asphaltzusammensetzung konstant bei 6,6 Gew.-%.

Die Daten für die Asphaltmischungen sind in Anlage XI aufgeführt.

Die Kenngrößen aus der dynamischen Prüfung sind in Tabelle 5-3 zusammengestellt.

	Mittelwerte		
	Dehnungsrate [mm/LW]	Lastwechsel [-]	Dehnung [%]
splittreich	7,317E-05	5200	1,61
splittarm	2,357E-05	10000	2,66
EP	9,475E-06	10000	1,20

Tabelle 5-3:
Kennwerte im charakteristischen Punkt aus der Untersuchung über den Einfluß der Korngrößenverteilung

Die Lage des charakteristischen Punktes der Impulskriechkurve der splittreichen Zusammensetzung unterscheidet sich - wie Tabelle 5-3 zu entnehmen ist - deutlich von der der splittarmen Mischung und der Eignungsprüfung, deren Impulskriechkurven während der Versuchszeit keinen Wendepunkt erreichten.

Das frühe Erreichen des Wendepunktes und die damit angezeigten Gefügezerstörung der splittreichen Probekörper belegt deren mangelnde Wärmestandfestigkeit. Der hohe Wert der Dehnungsrate im Wendepunkt dieser Mischung weist ebenfalls auf ein nicht ausreichend standfestes Mischgut hin.

Die sandreiche Zusammensetzung zeigt zwar bei Versuchsende gegenüber der Vergleichsmischung eine höhere Dehnung, liegt aber mit der Dehnungsrate noch innerhalb der in Kapitel 4.4.7 ermittelten Streubreite.

Aufgrund des Nichterreichens eines Wendepunktes und der bei Versuchsende ermittelten Dehnungsrate läßt sich der splittarm zusammengesetzte Splittmastixasphalt nicht als unzureichend wärmestandfest ansprechen.

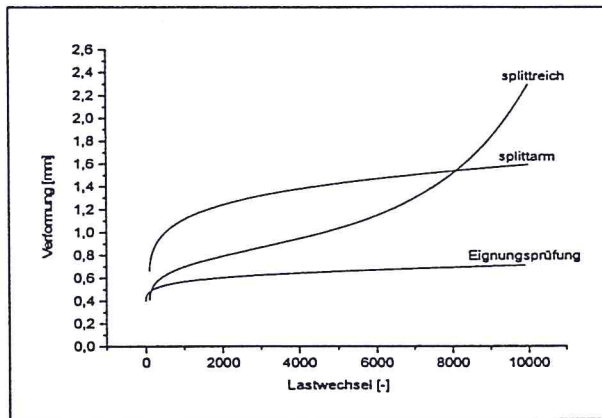


Abbildung 5-6:
Impulskriechkurven aus der
Variation von
Kornverteilungskurven

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 5-6 die gemittelten Impulskriechkurven der gemessenen Proben dargestellt.

Aus der Abbildung wird erkennbar, daß sich die erhöhte Dehnung der sandreicheren Mischung auf eine ausgeprägtere Phase 1 zurückführen läßt. Eine deutliche Konsolidierung ist erkennbar.

Dies erscheint auch im Hinblick auf die Ausbildung von Korn-zu-Korn-Kontaktstellen bei einer sandreicheren Mischung plausibel, da das Durchbrechen und Verdrängen der Bindemittelfilme nicht so leicht erfolgen kann wie bei splittreichen Mischungen.

Die Auswirkungen der Variation der Sieblinie zeigen, daß eine in ihren Splitt-, Sand- und Fülleranteilen optimierte Korngrößenverteilung wesentlicher Bestandteil bei der Konzeption von Asphalten mit hoher Wärmestandfestigkeit ist.

Ein zu hoher Splittanteil erscheint in diesem Zusammenhang für die Wärmestandfestigkeit als nicht geeignet.

5.4.5 Folgerungen für die Praxis

Zur Veranschaulichung der vorstehend dargestellten Ergebnisse werden diese in Zusammenhang mit den Dehnungsraten der aus Kapitel 4 untersuchten Splittmastixasphalte 0/11S gebracht.

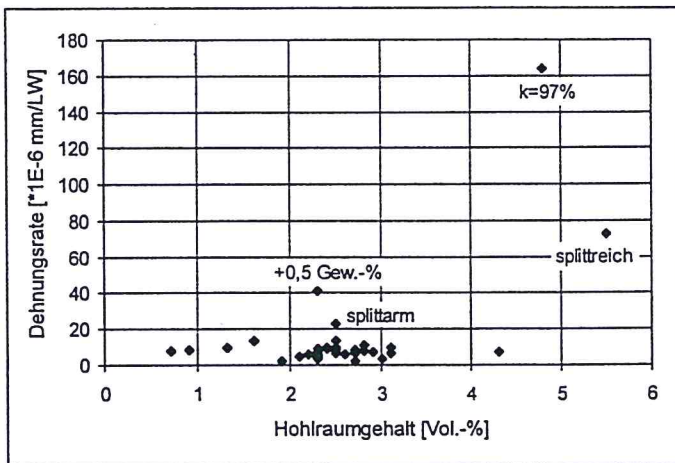


Abbildung 5-7:
Vergleich der Dehnungsraten
zwischen Laborversuchen und
aus Kapitel 4 vorhandenen
Untersuchungen

In Abbildung 5-7 sind die Dehnungsraten der Laboruntersuchungen und die der Datensätze aus der Untersuchung in Kapitel 4 über dem Hohlraumgehalt der geprüften Probekörper aufgetragen.

Diese Darstellung wurde gewählt, da der Hohlraumgehalt eine der wesentlichen Zielgrößen bei der Erstellung von Asphaltzusammensetzungen ist.

Aus den Laboruntersuchungen an innerhalb der Toleranzen der ZTV bit-StB 84/90 /56/ variiertem Splittmastixasphalt 0/11S lassen sich für die Praxis folgende Rückschlüsse ziehen:

- ♦ Ausgehend von einer in der Eignungsprüfung festgelegten Korngrößenverteilung kann die volle Inanspruchnahme der zulässigen Toleranzen gemäß ZTV bit-StB 84/90 /56/ für den Bindemittelgehalt ($\pm 0,5$ Gew.-%) und die Splittanteile (± 8 Gew.-%) zu Asphaltzusammensetzungen führen, die keine ausreichende Wärmestandfestigkeit aufweisen. Die Spannweite der Toleranz sollte entsprechend eingengt werden.
- ♦ Extrem splittreiche Mineralstoffzusammensetzungen weisen ungünstigeres Wärmeverhalten auf als sandreichere. Auf eine gute Kornabstufung zwischen Splitt- und Sandanteil ist daher auch bei Gemischen mit Ausfallkörnung zu achten.
- ♦ Eine untere Begrenzung des Verdichtungsgrades auf 97% erscheint zu niedrig. Unter dem Aspekt einer ausreichenden Wärmestandfestigkeit wäre ein unterer Verdichtungsgrad in der Größenordnung von 100% wünschenswert.

6 Untersuchungen in situ

6.1 Streckendaten und -beschreibung

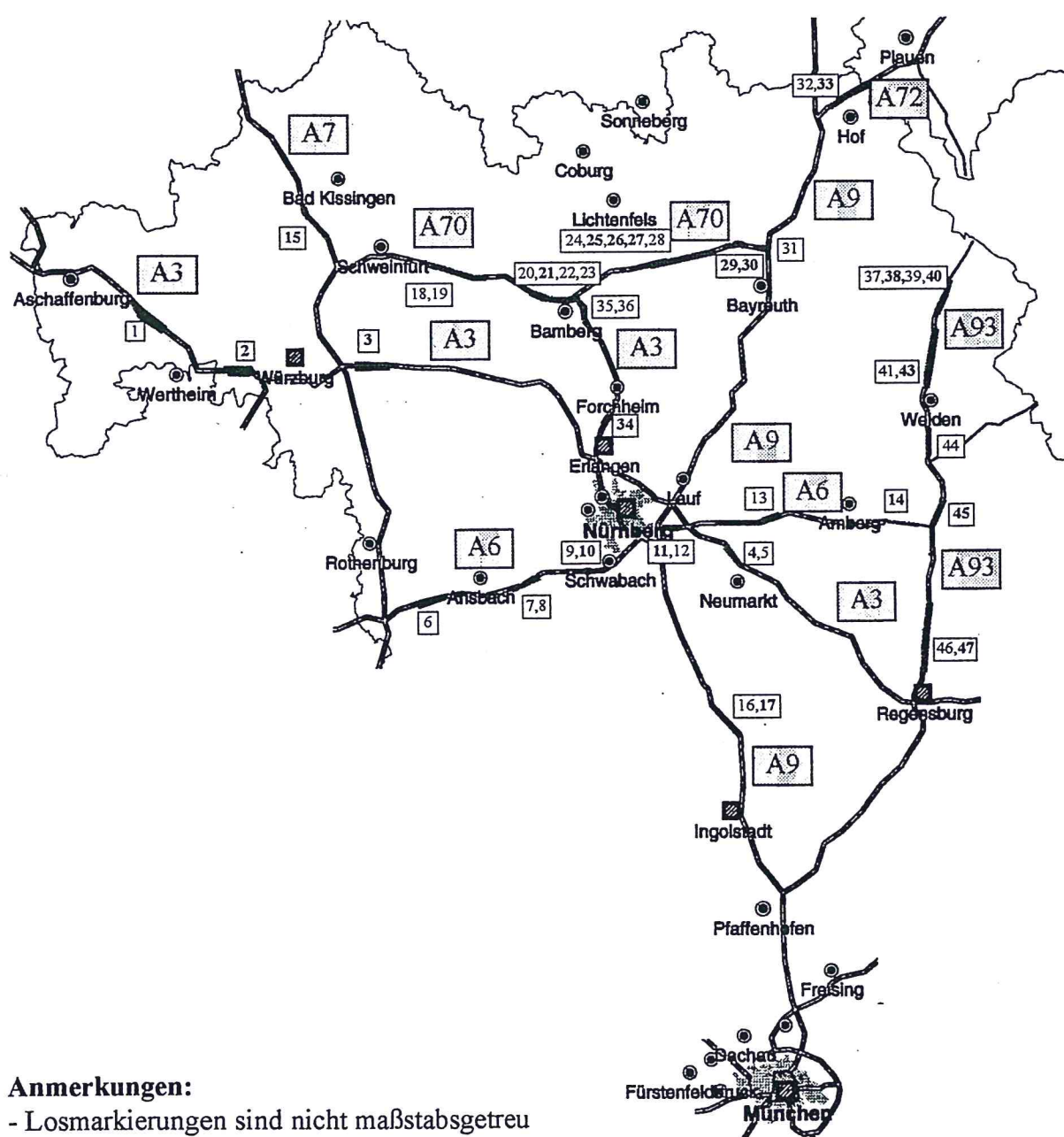
6.1.1 Relevante Deckenbaulose

Um eine Beurteilung der Standfestigkeit der im Labor mit dem Druck-Schwell-Versuch geprüften Asphalte vornehmen zu können, ist es notwendig deren Praxisverhalten zu kennen. Seit ca. Ende der 80er Jahre fordert die Autobahndirektion Nordbayern in ihrem Dienstbereich bei Deckenbaumaßnahmen auf Bundesautobahnen für das Deckschichtmischgut Eignungsprüfungen, die um eine Prüfung mit dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch erweitert sind.

Ausgehend von diesen erweiterten Eignungsprüfungen wurde vom Dezernat Oberbau, Grundbau und Bodenmechanik der Direktion eine umfassende Zusammenstellung erarbeitet, aus der eine Zuordnung der Eignungsprüfungen zu Deckenbaulosen auf Bundesautobahnen im Dienstbereich der Autobahndirektion möglich war.

An Hand dieser Zusammenstellung konnten 47 Streckenabschnitte erfaßt werden, für die zum einen die notwendigen Daten wie z.B. die erweiterte Eignungsprüfung, die Kontrollprüfung, Verkehrszählungen, Aufbau gemäß RStO 86/89 /51/, zur Verfügung gestellt werden konnten und die zum anderen auch schon eine längere Zeit unter Verkehr lagen.

Zur Übersicht über die räumliche Verteilung der Streckenabschnitte im Bereich Nordbayerns sind die Deckenbaulose in der folgenden Übersichtskarte eingetragen.

Abbildung 6-1:**Übersichtskarte der relevanten Deckenbaulose in Nordbayern****Anmerkungen:**

- Losmarkierungen sind nicht maßstabsgetreu
- Losnummern siehe Anlage XIII
- Bohrkernentnahme bei fettgedruckten Losnummern

Anlage XIII enthält eine tabellarische Aufstellung der Deckenbaulose mit Bezeichnung der Bundesautobahn und des Loses selbst, der Kilometerierung auf der entsprechenden Richtungsfahrbahn, die Fahrtrichtung und die Lage in der Klimazone nach RStO 86/89 /51/.

6.1.2 Betrachtung der Deckschichtzusammensetzung

6.1.2.1 Mischgutart

Bei 44 der untersuchten 47 Baulose wurde Splittmastixasphalt 0/11S eingesetzt, bei zwei Baulosen Splittmasitxasphalt 0/8S und in einem Baulos Asphaltbeton 0/11S.

Diese Verteilung macht deutlich, daß sich die Untersuchung über das Praxisverhalten der eingestzten Asphalte auf die Mischgutsorte Splittmasitxasphalt 0/11S konzentriert.

Die anderen beiden Mischgutsorten können lediglich zur näherungsweisen Abgrenzung zwischen Mischgutart und -sorte dienen.

Die 44 Deckenbaulose aus Splittmastixasphalt 0/11S sind nach 23 unterschiedlichen Eignungsprüfungen zusammengesetzt worden; der Splittmastixasphalt 0/8S und der Asphaltbeton 0/11S haben jeweils unabhängige Eignungsprüfungen.

6.1.2.2 Korngrößenverteilung

Die zu den jeweiligen Baulosen gehörigen Eignungs- und Kontrollprüfungen sind in den Datenblättern der Anlage XIV zusammengefaßt.

Der Bereich, in welchem sich die gesamten Korngrößenverteilungen nach Eignungsprüfung der relevanten Deckenbaulose mit Splittmastixasphalt 0/11S befinden ist in Abbildung 6-2 dargestellt; zusätzlich ist die obere Grenzsieblinie (mit □ gekennzeichnet) nach den Empfehlungen für die Zusammensetzung, die Herstellung und den Einbau von Splittmastixasphalt /54/ eingetragen.

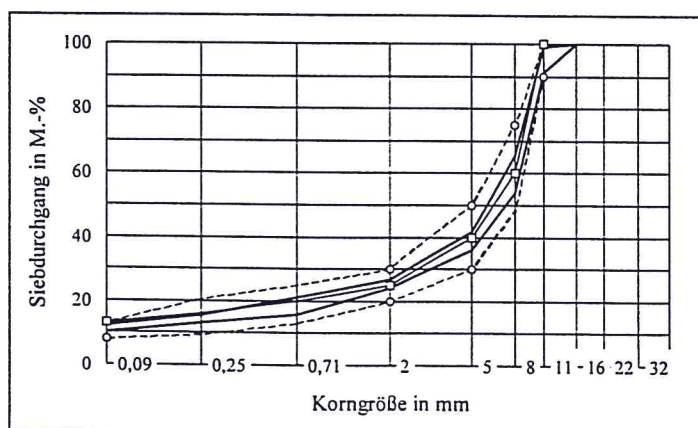


Abbildung 6-2:
Grenzbereiche der
Kornverteilungskurven der
Baulose mit SMA 0/11S

Die nach den Eignungsprüfungen, für die auf den Autobahnen zum Einsatz gekommenen Splittmastixasphalte 0/11S, gewählten Korngrößenverteilungen befinden sich alle in einem sehr engen Band im mittleren zulässigen Bereich gemäß ZTV bit-StB 84/90 /56/.

Die Korngrößenverteilungen aller 47 untersuchten Streckenabschnitte können der Anlage XIV entnommen werden.

Für einen besseren Überblick ist in nachstehender Tabelle eine Einteilung der insgesamt 47 Baulose hinsichtlich Mischgutart und -sorte und der eingesetzten Bindemittelart dargestellt.

Baulose			
47			
SMA		AB	
0/11S	0/8S	0/11S	
44	2	1	
PmB	B 65	PmB	B 65
3	41	2	1

Tabelle 6-1:
Charakterisierung der Baulose
durch Mischgutsorte und
Bindemittelart

6.1.2.3 Eingesetzte Bindemittel

Von den untersuchten Splittmastixasphalte 0/11S wurden 41 mit Straßenbaubitumen B 65 ausgeführt und drei mit einem polymermodifizierten Bitumen der Härte 65.

Die untersuchten Splittmastixasphalte 0/8S wurden zum einem mit einem PmB 65 und zum anderen mit modifiziertem Bindemittel hergestellt.

Der einzige Asphaltbeton 0/11S enthielt ein Straßenbaubitumen B 65 als Bindemittel (siehe Tabelle 6-1).

6.1.3 Klimadaten

In Kapitel 3 ist auf die Bedeutung der klimatischen Einflüsse auf das Verformungsverhalten von Asphalt eingegangen worden.

Eine explizite Berechnung von Asphaltkörpertemperaturen der zu untersuchenden Baulose über die Ermittlung von Oberflächentemperaturen am Straßenkörper nach Gleichung 3-18 war in der vorliegenden Arbeit aufgrund fehlender Daten nicht möglich.

Um dennoch eine Beurteilung der untersuchten Baulose hinsichtlich ihrer Asphaltkörpertemperaturen vornehmen zu können, wurden auf der Grundlage von /41/ repräsentative Asphaltkörpertemperaturen für verschiedene Tiefen unter der Fahrbahnoberfläche ermittelt. Hierfür erfolgte eine Zuordnung der Baulose zu den Frosteinwirkungszonen gemäß der RStO 86/89 /51/.

In der Abbildung 6-3 sind diese Zonen für die Bundesrepublik Deutschland dargestellt.

Eine grobe räumlich Abgrenzung für die betroffenen Streckenabschnitte läßt sich dabei im Süden über Regensburg - Ingolstadt - Feuchtwangen, im Westen über Feuchtwangen - Würzburg - Hammelburg, im Norden über Schweinfurt - Bad Kissingen - Kulmbach - Hof und im Osten über Hof und der Grenze nach Tschechien bis Regensburg vornehmen (siehe Übersichtskarte Seite 75).

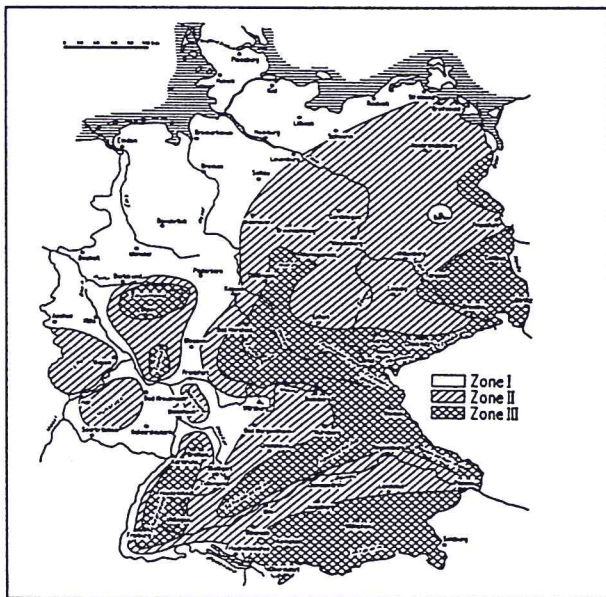


Abbildung 6-3:
Frosteinwirkungszonen
gemäß RStO 86, Fassung 1996

Damit ergibt sich eine Zuordnung der Baulose zu den jeweiligen Klimazonen, die der Anlage XIII entnommen werden kann.

Mittels /41/ können für die jeweilige Klimazone, bei gegebenen Temperaturklassen und Tiefen unterhalb der Straßenoberfläche, die Jahresstundenhäufigkeiten der Asphaltkörpertemperaturen berechnet werden.

Dabei ist eine Aussage über die Häufigkeit des Auftretens einer Temperaturklasse möglich, aber nicht über den Zeitpunkt.

In Anlage XV sind die Jahresstundenhäufigkeiten der Baulose in Abhängigkeit der Klimazonen für Temperaturklassen von 19-31°C, 31-41°C, 41-51°C, 51-61°C und für Tiefen von 0, 4 und 8 cm aufgelistet.

Die Verteilung der Jahresstunden in den Temperaturklassen lässt sich mit Hilfe von Abbildung 6-4 erklären, in der die relativen Häufigkeitsverteilungen der Oberflächentemperaturen für unter Verkehr liegenden Asphaltstraßen in einem Temperaturband von -30°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ für die drei Klimazonen nach RStO 86/89 /51/ dargestellt sind.

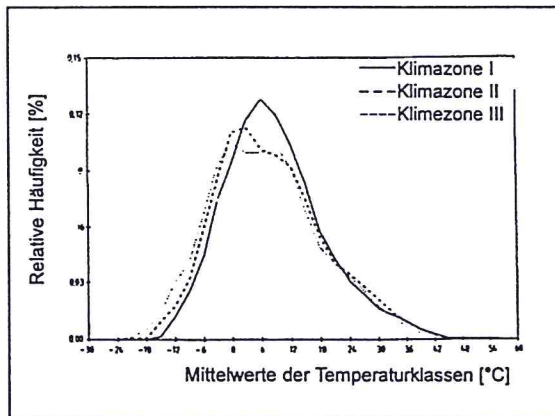


Abbildung 6-4:
Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen unter Verkehr liegender Asphaltstraßen für die drei Klimazonen gemäß RStO 86, Fassung 1996 /51/

Man erkennt in diesem Diagramm eine deutliche Unterscheidung in den relativen Häufigkeiten für die jeweilige Klimazone unterhalb einer Oberflächentemperatur von 18°C . Oberhalb von 18°C bis ca. 36°C übersteigt die Häufigkeit von Jahresstunden der Zone II die der Zone I; im Bereich oberhalb von 36°C treten dagegen kaum noch Unterschiede zwischen den Zonen auf.

Betrachtet man diesen Zusammenhang für die Jahresstunden der jeweiligen Temperaturklassen in Abhängigkeit von den Klimazonen und stellt dies grafisch dar, so ergibt sich Abbildung 6-5.

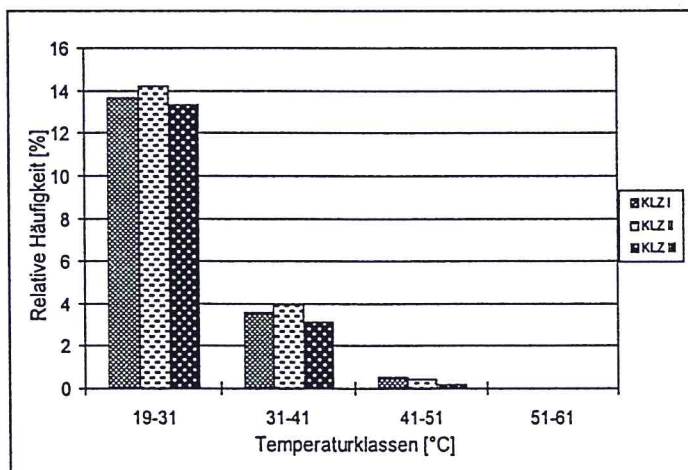


Abbildung 6-5:
Relative Häufigkeit der jeweiligen Temperaturklasse an der Fahrbahnoberfläche für die Klimazonen gemäß RStO 86, Fassung 1996

Für einen Prüftemperaturbereich von $40 - 50^{\circ}\text{C}$ lässt sich zwischen den Klimazonen kaum eine Unterscheidung in der relativen Häufigkeit feststellen, mit der Oberflächentemperaturen in dieser Klasse auftreten.

Eine differenzierte Betrachtung der Lose hinsichtlich ihrer Lage in den Klimazonen erfolgt daher nicht.

Mit Hilfe der Anlage XV und dem Jahr der Verkehrsübergabe für das jeweilige Los, lassen sich die Gesamtstunden berechnen, in denen der entsprechende Streckenabschnitt während seiner Liegezeit eine Oberflächentemperatur in den festgelegten Temperaturklassen hatte; eine Zusammenstellung findet sich in Anlage XVI.

Für den genannten Prüftemperaturbereich könnte hiermit eine Berücksichtigung für die mit der Temperatur progressiv zunehmende Spurbildungsrate erfolgen. Dabei würde allerdings die Spurrinnenbildung der untersuchten Abschnitte nur in diesen Temperaturbereich verlagert und die Gesamtstunden der unteren Temperaturklassen für die Bildung plastischer Deformationen vernachlässigt.

Die Gesamtstunden der Oberflächentemperaturen in den niedrigeren Temperaturbereichen sind gegenüber den höheren aber viel größer, weshalb auch die Anzahl der Überrollungen, während deren sich der Straßenkörper in diesen Temperaturbereichen befindet, viel höher sein werden. Die Entwicklung von bleibenden Verformungen in der Straßenoberfläche auf Grund der Verkehrsbelastung kann somit in einem niedrigeren Temperaturbereich der in einem höheren Temperaturbereich gleichwertig sein.

Da die zur Beurteilung der Auswirkungen des beschriebenen Sachverhalts notwendigen Abhängigkeiten der Spurbildungsrate von der Temperatur für die hier untersuchten Asphalte nicht bekannt sind, muß auf eine Berücksichtigung des Temperatureinflusses verzichtet werden.

In /40/ wurden für die Berücksichtigung der Abhängigkeit zwischen Spurbildung und Temperatur für die aus dem mittleren und südlichen Bundesgebiet ausgewählten Streckabschnitte Gewichtungsfaktoren zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses berechnet. Dabei ergab sich eine maximale Unterscheidung zwischen dem größten und kleinsten Gewichtungsfaktor von ca. 7%.

Bei ausschließlicher Berücksichtigung von Strecken aus Nordbayern ist noch mit einem geringeren Unterschied zu rechnen, so daß auch unter diesem Hintergrund die Vernachlässigung solcher Gewichtungsfaktoren gerechtfertigt erscheint.

6.1.4 Verkehrsdaten

Im Kapitel 3.5.3.3 wurde auf die aus dem Verkehr herrührenden Einflußfaktoren für die Spurrinnenbildung eingegangen.

Für die Entwicklung der Spurrinnen in den 47 Deckenbaulosen findet allerdings nur der Faktor Schwerverkehranteil Berücksichtigung. Wie Kapitel 3 zu entnehmen ist, stellt der Schwerverkehrsanteil den wichtigsten Einflußfaktor - noch vor der Temperatur - auf das Verformungsverhalten von Asphalt dar.

Um für die untersuchten Baulose den Einfluß aus der Verkehrsbelastung erfassen zu können, wurden für die jeweiligen Streckenabschnitte die entsprechenden Verkehrsbelastungszahlen nach /51/ berechnet, wobei als Berechnungszeitpunkt das Jahr der Zustandserfassung 1996 angesetzt wurde.

Die hierfür notwendige $DTV^{(SV)}$ zum Zeitpunkt der Verkehrsübergabe wurde dabei wie folgt ermittelt:

- ♦ liegt das Jahr der Verkehrsübergabe zwischen den Bundesverkehrszählungen von 1985 und 1993 - diese Daten wurden von der Autobahndirektion-Südbayern zur Verfügung gestellt und sind in Anlage XVII aufgeführt -, so wird die relevante $DTV^{(SV)}$ durch lineare Interpolation zwischen den beiden Zählungen ermittelt.
- ♦ Sind die Daten der Zählung von 1985 nicht bekannt, so wird vom Wert der Zählung 1993 bis zum Jahr der Verkehrsübergabe eine jährliche Zuwachsrate von 3% abgezogen.
- ♦ Liegt das Jahr der Verkehrsübergabe nach der Zählung von 1993, wird eine jährliche Zunahme von 3% bis zum Zeitpunkt der Freigabe zur Zählung von 1993 addiert.

Zur Berechnung des Faktors für die Änderung der $DTV^{(SV)}$ wurde eine jährliche Zuwachsrate von 3% bis zum Berechnungszeitpunkt angesetzt /51/.

Der Fahrstreifenfaktor ist entsprechend der Erfassung der $DTV^{(SV)}$ in beiden Fahrtrichtungen für die jeweilige Anzahl von Fahrstreifen eingesetzt worden.

Bei der Bestimmung des Fahrstreifenbreitenfaktors ist zu berücksichtigen, daß die Regelquerschnitte entsprechend den RAS-Q vor der Ausgabe 1996 ausgeführt wurden und somit bei den untersuchten Strecken eine Fahrstreifenbreite von 3,75 m vorhanden ist.

Die zur Bestimmung des Steigungsfaktors notwendige Höchstlängsneigung ist den Höhenplänen der jeweiligen Baulose entnommen worden.

Die sich für die Baulose ergebende Verkehrsbelastungszahl ist in Anlage XVII aufgeführt. In der Abbildung 6-6 ist eine Häufigkeitsverteilung der für die relevanten Deckenbaulose ermittelten Verkehrsbelastungszahl dargestellt.

Von den 47 Baulosen sind nach RStO 86789 /51/ 11 in die Bauklasse II, 18 in die Bauklasse I, 7 in die Bauklasse SV und 11 in die Bauklasse SV mit besonderer Beanspruchung (im Diagramm als SV* bezeichnet) nach /55/ einzuteilen.

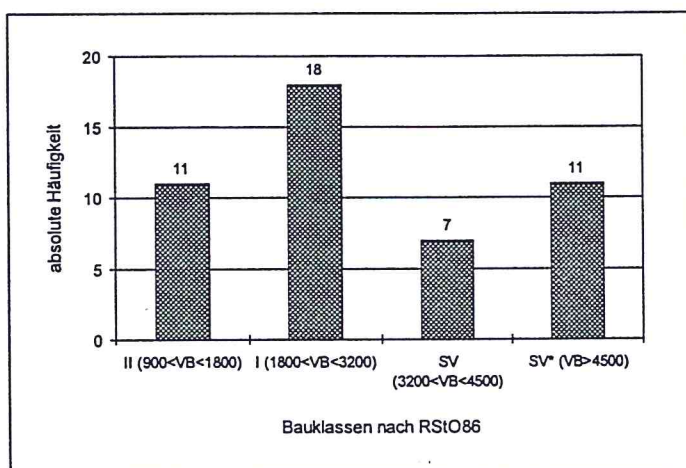


Abbildung 6-6:
Häufigkeitsverteilung der Verkehrsbelastungszahl für die relevanten Deckenbaulose

Zur weiteren Gliederung der Verkehrsbelastung für die relevanten Deckenbaulose, vorallem in der Bauklasse SV mit besonderer Beanspruchung, ist in Abbildung 6-7 die Verteilung der Verkehrsbelastungszahl über den einzelnen Baulosen dargestellt.

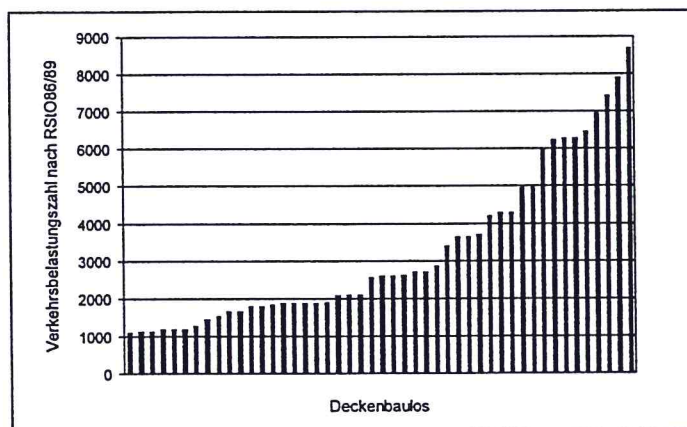


Abbildung 6-7:
Verteilung der Verkehrsbelastungszahl für die einzelnen Deckenbaulose

Der Abbildung ist zu entnehmen, daß die Bauklasse SV mit besonderer Beanspruchung Baulose mit einer maximalen Verkehrsbelastungszahl von nahezu 9000 enthält. Derartige Verkehrsbelastungszahlen sind als außerordentlich hoch zu bezeichnen.

Zur Beurteilung der aufgenommenen Verkehrsmengen der Deckenbaulose seit deren Verkehrsübergabe ist die Verkehrsbelastungszahl nur bedingt geeignet, da sie in ihrer Berechnung nicht die Liegezeit eines Bauloses berücksichtigt.

Um für die untersuchten Strecken dennoch eine Beurteilung der Belastungskollektive vorneh-

men zu können, sind aus den Daten der Verkehrszählung Überrollungen des Schwerverkehrs bis zum Zeitpunkt der Zustandserfassung (siehe Kapitel 6.2.1) ermittelt worden. Dabei wurde ebenfalls von einer jährlichen Verkehrszunahme von 3% ausgegangen.

Damit ist die direkte und nach Kapitel 3.5.2.2 auf das Verformungsverhalten von Asphalt wichtigste Belastungsgröße der Deckenbaulose bestimmt.

Aus Kapitel 3.5.3.1 ist bekannt, daß sich die Spurrinnenentwicklung durch eine Potenzfunktion mit einem Exponenten von 0,5 annähern läßt.

Um dem dort beschriebenen Verfestigungseffekt Rechnung zu tragen, wird bei weiteren Untersuchungen zur Spurrinnenentwicklung der untersuchten Baulose nicht die Beanspruchung in Form von Überrollungen des Schwerverkehrs, sondern die Wurzel aus diesen Überrollungen angesetzt.

6.1.5 Linienführung und Regelquerschnitt

Für eine genaue Abschätzung des Einflusses der Linienführung und des Regelquerschnittes auf die Spurrinnenbildung der hier betrachteten Baulose wären Verkehrsanalysen z.B. in Form von Achslastmessungen unumgänglich (siehe Kapitel 3.5.3.4).

Da dies nicht möglich war, wurde dem Einfluß der Linienführung dahingehend Rechnung getragen, daß der Höchstlängsneigungsfaktor für die Verkehrsbelastungszahl genau bestimmt wurde und die spätere Bohrkernentnahme aus den Baulosen nicht in Kurven, Steigungs- oder Gefällstrecken erfolgte.

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Regelquerschnitte wurde eine Betrachtung nur der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens einer Richtungsfahrbahn als ausreichend erachtet (siehe Kapitel 3.5.3.5).

6.1.6 Bauweisen

In der zweitletzten Spalte der Anlage XVIII sind die Bauweisen der Baulose gemäß Tafel 1, RStO 86/89 /51/ zusammengestellt.

Hiernach weisen alle Streckenabschnitte einen Aufbau mit einer 4 cm dicken Deckschicht und einer 8 cm dicken Binderschicht auf.

Nur hinsichtlich der Dicke der Asphalttragschicht und der ungebundenen Schichten gibt es auf Grund des Alters und der Vorgeschichte der Baulose Unterschiede.

6.2 Untersuchung des Querprofils

6.2.1 Zustandserfassung

Nach dem die Streckenabschnitte, bei welchen Asphalt zum Einsatz kam, der in der Eignungsprüfung dynamisch geprüft wurde, bekannt waren, mußte eine Erfassung der Querprofile erfolgen, um eine Beurteilung der Deckenbaulose hinsichtlich der vorhandenen Spurrinnen vornehmen zu können.

Einen ersten Eindruck vom Zustand der zu untersuchenden Streckenabschnitte lieferte im Sommer 1996 eine visuelle Zustandserfassung. Hierbei wurden der Oberflächenzustand in Form von allgemeinen Unebenheiten (Befahrbarkeit), Spurrinnen, Rissen, Flickstellen und Ausmagerungen erfaßt.

Als Arbeitsgrundlage diente das "Arbeitspapier zur Systematik der Straßenerhaltung" (Abschnitt C 1.1: visuelle Zustandserfassung - Außerortsstraßen, Asphalt -).

Als Ergebnis konnte ein insgesamt guter Zustand der Strecken festgestellt werden.

Im November 1996 wurde dann von der Autobahndirektion Nordbayern in ihrem Direktionsbereich eine Zustandserfassung für das Querprofil von flexiblen Fahrbahnbefestigungen durchgeführt.

Zum Einsatz kam hierfür das Spurrinnenmeßgerät SPM 2000 der Fa. FVS, Nürnberg.

Bei diesem Gerät handelt es sich um einen 4 Meter breiten Querbalken, an welchem 100 Meßfühler in einem konstanten Abstand von 4 cm befestigt sind. Die Meßfühler sind über eine Mechanik mit Laufrädern verbunden, die auf die Straßenoberfläche aufgedrückt werden und sich dieser flexibel anpassen. Da sich die 100 Meßräder unabhängig voneinander bewegen können, ist ein genaues Querprofil der Straßenoberfläche in einem Meßabstand von 4 cm möglich.

Als Referenzlinie dient dabei eine Bezugsgrade, die von der Auswerteelektronik zwischen den Meßwerten der beiden äußeren Fühler rechnerisch gezogen wird.

Die Spurrinnentiefe ergibt sich dann als Stichmaß von der Bezugsgeraden bis zur Lage des jeweiligen Meßrades.

Eine Auswertung der 100 Einzelwerte erfolgt in Form von Spurrinnentiefen in der linken und rechten Rollspur und für die Wulste links von der linken Rollspur, zwischen den Rollspuren

und rechts der rechten Rollspur.

Die gesamte Datenerfassungs- und Auswerteeinheit ist beim SPM 2000 so konzipiert, daß Messungen unter Verkehr bei Geschwindigkeiten von ca. 30-50 km/h möglich sind.

Der Meßabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Querprofilmessungen beträgt dabei für die gesamte Zustandserfassung 20 m, so daß für alle Deckenbaulose ein kontinuierliches Bild des Spurrinnenverlaufes über deren Länge erstellt werden konnte.

Die folgende Fotografie zeigt die Meßeinheit des Spurrinnenmeßgerät SPM 2000.

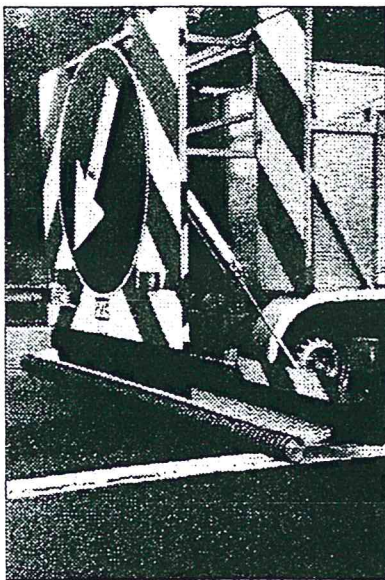


Abbildung 6-7a:

**Abbildung der Meßeinheit des
Spurrinnenmeßgerätes SPM 2000 .**

6.2.2 Auswertung der Zustandserfassung

Die Auswertung des Datenmaterials aus der Zustandserfassung sah eine gleitende Mittelwertbildung für die Merkmale Spurrinne in der linken und rechten Rollspur vor.

Wulste neben der Rollspur blieben unberücksichtigt, da diese auf den volumenkonstanten Materialtransport aus der Rollspur zurückzuführen sind (siehe Kapitel 3.5.3.1) und somit in einem Zusammenhang mit der Spurrinnentiefe stehen.

Die Auswertung der Querprofile für die relevanten Deckenbaulose zeigte, daß die rechte Rollspur immer, bis auf drei Ausnahmen, im Mittel die höhere Verformung aufwies und somit in der weiteren Auswertung berücksichtigt wird.

Dies bestätigt die in Kapitel 3.5.3.4 dargestellte systematische Mehrbeanspruchung der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens.

In die Untersuchungen über die der Verformungsursache (Nachverdichtung / Materialtransport) wird der Wulst neben der rechten Rollspur mit einbezogen.

Die Ausprägung der Spurrinne über die gesamte Loslänge wird für die Charakterisierung des Loses bezüglich der Verformung als ausschlaggebend erachtet.

Um die untersuchten Baulose aufgrund der aufgetretenden Verformung zu differenzieren, ist aus den gleitenden Mittelwerten der in der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens über die jeweilige Loslänge gemessenen Spurtiefe eine Häufigkeitsverteilung und ein arithmetischer Mittelwert errechnet worden.

Die Häufigkeitsverteilung und der arithmetische Mittelwert dienen zur Einteilung der Baulose in folgende Verformungsklassen.

- 0-4 mm,
- 5-7 mm,
- 8-10 mm,
- 11-13 mm usw.

Maßgebend für die Zuordnung eines Loses war die am häufigsten belegte Verformungsklasse. Weiterhin sollte der Mittelwert der Spurrinnentiefe in der Verformungsklasse mit der größten relativen Häufigkeit liegen oder zumindest nicht um mehr als 1mm von den Intervallgrenzen der Verformungsklasse abweichen.

In den Datenblättern der Deckenbaulose in Anlage XIV sind für alle 47 Deckenbaulose die Häufigkeitsverteilungen und Mittelwerte zusammengefaßt.

In Anlage XIX ist die Zuordnung der Deckenbaulose in die jeweilige Verformungsklasse dargestellt. Zur Bezeichnung der oben dargestellten Verformungsklassen wird dabei der Mittelwert der angegebenen Größenbereiche herangezogen.

Die Häufigkeitsverteilung der Deckenbaulose in den einzelnen Verformungsklassen kann der Abbildung 6-8 entnommen werden.

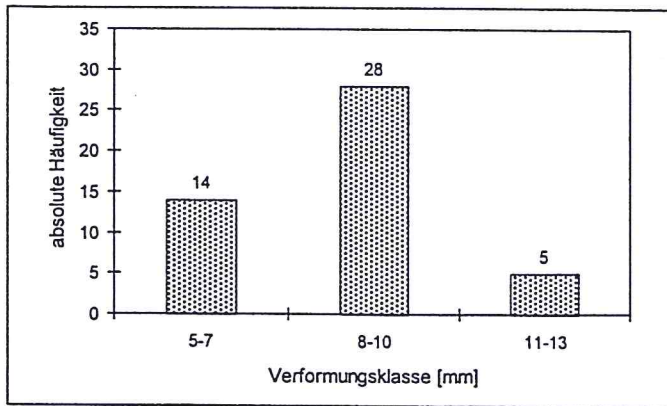


Abbildung 6-8:
Häufigkeitsverteilung der
Deckenbaulose in den
einzelnen Verformungsklassen

Die relativ geringe Anzahl von ca. 10% der Baulose in der höchsten festgestellten Verformungsklasse bestätigt nochmals den insgesamt guten Zustand der untersuchten Streckenabschnitte.

An Hand der nun vorliegenden Verformungsdaten der Deckenbaulose läßt sich zwischen diesen eine Vergleichbarkeit herstellen, wenn die gebildeten Mittelwerte der Spurtiefen eines Loses in Zusammenhang mit der bis zur Messung aufgetretenen Anzahl an Überrollungen des Schwerverkehrs gebracht wird.

Durch Verhältnisbildung von Spurtiefe zur Anzahl der Überrollungen erhält man bei Unterstellung eines linearen Zusammenhangs, ein Maß für die zeitliche Entwicklung der gemessenen Einsenkungen an der Straßenoberfläche.

Unberücksichtigt bleibt bei diesem, für eine Vorauswahl der zu untersuchenden Baulose erforderlichen Schritt, die Ursache der Verformung.

In Anlehnung an die charakteristische Kenngröße Dehnungsrate im dynamischen Druck-Schwell-Versuch wird eine Verformungsrate für die Deckenbaulose definiert und im Folgenden als Verformungsvergleichswert (V_{vw}) bezeichnet.

Der Verformungsvergleichswert errechnet sich aus dem Mittelwert der Spurrinnentiefen der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens nach folgender Gleichung:

Gleichung 6-1:

$$V_{vw} = \frac{s}{\sqrt{\ddot{U}R}}$$

mit s = Mittelwert der Spurrinnentiefe [mm]
 $\ddot{U}R$ = Anzahl der Überrollungen des Schwerverkehrs

Die Einheit des Verformungsvergleichswertes wäre mit $[\text{mm}/\ddot{U}R^{0,5}]$ anzugeben.

Durch den Bezug auf die Quadratwurzel aus den Überrollungen wird dem beschriebenen Verfestigungseffekt aus Kapitel 3.4 und 3.5.3.1 Rechnung getragen.

In Anlage XIX sind die Daten zur Berechnung des Verformungsvergleichswertes und dieser selbst für die relevanten Deckenbaulose zusammengestellt.

Der Verformungsvergleichswert berücksichtigt in der dargestellten Form nicht, aus welcher Schicht die gemessene Verformung stammt; er ist ein Maß für die Verformungsrate des gesamten Straßenkörpers.

Erst wenn Erkenntnisse vorliegen, aus welcher Schicht die Verformung stammt, kann der Verformungsvergleichswert anteilmäßig auf die Deckschicht umgerechnet werden. Diese Erkenntnisse können aber nur aus Bohrkernuntersuchungen gewonnen werden, die aber erst im Anschluß an die Bestimmung des Verformungsvergleichswertes erfolgen.

Daher ist nach der Bohrkernuntersuchung zu prüfen, ob die gemachte Übertragung der gemessenen Verformung auf den gesamten Straßenkörper zu Fehlschlüssen geführt hat oder nicht.

Aus diesem Grund wird in Kapitel 6-4 ein Vvw-TU definiert, der nur bei den Deckenbaulosen mit Bohrkernentnahme errechnet wird und auf einer genaueren Bestimmung der Oberflächenverformung beruht; er ist daher nicht mit dem hier vorgestellten Verformungsvergleichswert zu verwechseln.

Bei der Zusammenstellung der zur Beschreibung der Deckenbaulose notwendigen Informationen wurde festgestellt, daß die Baulose BAB A6 - D731R, BAB A70 - EO11L und BAB A93 - EO11West in allen Datensätzen dem jeweiligen Baulos auf der anderen Richtungsfahrbahn (BAB A6 - D731L, BAB A70 - EO11R, BAB A93 - EO11Ost) entsprechen, so daß diese Abschnitte für die weitere Betrachtung außer Acht gelassen werden können.

6.3 Untersuchungen zu den einzelnen Deckenbaulosen

6.3.1 Auswahl der Baulose für Bohrkernentnahmen

Der Verformungsvergleichswert stellt ein Maß für die zeitliche Entwicklung der Spurrinnen der untersuchten Strecken dar.

Über eine Häufigkeitsverteilung dieser Daten ist damit eine Einteilung der eingebauten Asphaltsschichten hinsichtlich ihrer Standfestigkeit z.B. in standfest (niedriger Vvw) oder weniger standfest (hoher Vvw) möglich.

In Abbildung 6-9 ist die Häufigkeitsverteilung des Vvw für alle in der Auswertung befindlichen Lose nach Anlage XIX dargestellt.

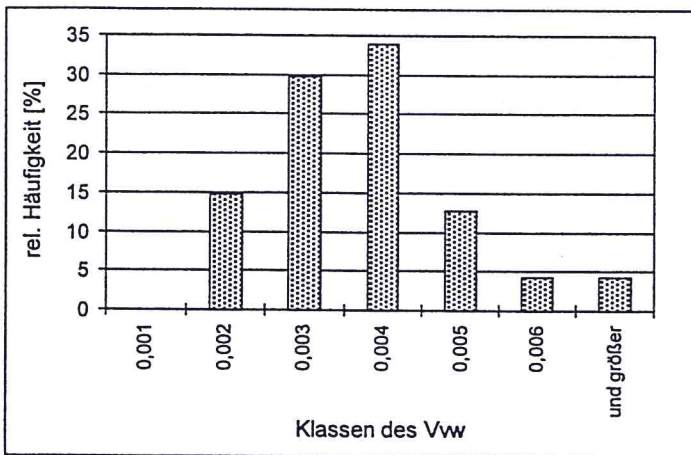


Abbildung 6-9:
Grafik zur Häufigkeitsverteilung des Verformungsvergleichswertes. Sie läßt eine annähernd normalverteilte Struktur erkennen.

Ausgehend von diese Struktur werden Lose für die Bohrkernentnahmen ausgewählt, die einen niedrigen, mittleren und hohen Bereich des Verformungsvergleichswertes repräsentieren. Dadurch wird gewährleistet, daß die unterschiedlichen Verformungseigenschaften der Asphalte von langsamer bis schneller Verformungsentwicklung berücksichtigt werden.

In der Abbildung 6-10 ist eine nach Größe sortierte Reihung des Verformungsvergleichswertes für die 47 Deckenbaulose mit Balken dargestellt.

Namentlich sind die Baulose gekennzeichnet, die für eine Bohrkernentnahme ausgewählt wurden. Die Verteilung der Lose mit Entnahmen von langsamer bis zu schneller Verformungsgeschwindigkeit wird deutlich.

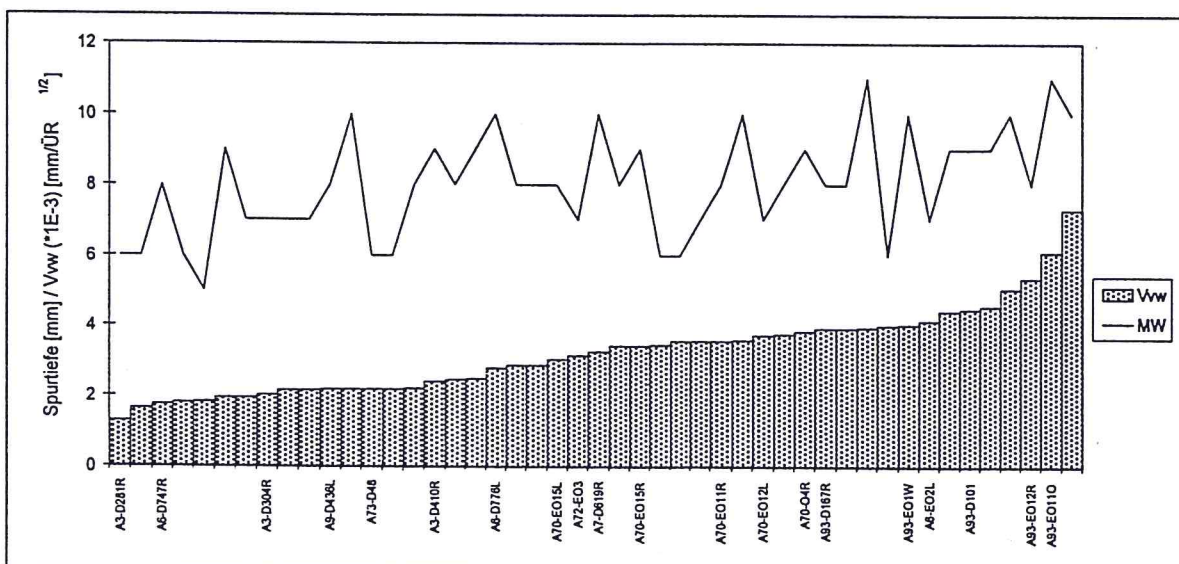


Abbildung 6-10:
Darstellung des Vvw (Balken) der 47 Deckenbaulose mit entsprechendem Mittelwert der Spurtiefe (Linie)

Zur Veranschaulichung ist in der Abbildung 6-10 neben dem Verformungsvergleichswert der zu den jeweiligen Baulosen gehörende Mittelwert der Spurtiefe als Linie mit aufgenommen.

Ein grundsätzlicher Trend, daß mit steigendem Verformungsvergleichswert auch die Spurtiefe zunimmt ist erkennbar.

Weiterhin ist der Abbildung zu entnehmen, daß nicht die Spurtiefe allein ein Entscheidungskriterium für die Standfestigkeit eines Asphaltes sein kann, sondern die Kombination aus Spurtiefe und ertragener Belastung.

Aus Anlage XIX geht z.B. hervor, daß das Deckenbaulos BAB A6 - D747L eine Spurtiefe im Mittel von 10 mm besitzt und bis zum Meßzeitpunkt ca. 20 Mio. Überrollungen aus dem Schwerverkehr ertragen hat. Das Baulos BAB A93 - O2 hat dagegen nur 6 mm Spurtiefe im Mittel aber nur ca. 3 Mio. Überrollungen aus dem Schwerverkehr ertragen.

Die Qualität der Standfestigkeit ist somit beim Deckenbaulos der BAB A6 - D747L erheblich besser als beim Los BAB A93 - O2.

In Tabelle 6-2 sind die zur Bohrkernentnahme ausgewählten Deckenbaulose zusammengestellt und in Anlage XX in der Reihung des Verformungsvergleichswertes mit allen Deckenbaulosen fett hervorgehoben.

BAB	Los	Verformungsklassen [mm]	MW [mm]	Vvw
A3	D281R	6	6	0,001285
A6	D747R	6	8	0,001751
A3	D304R	9	7	0,002029
A9	D436L	9	8	0,002185
A73	D48	6	6	0,002193
A3	D410R	9	9	0,002423
A6	D776L	9	10	0,002798
A70	EO15L	9	8	0,003046
A72	EO3	6	7	0,003149
A7	D619R	12	10	0,003272
A70	EO15R	9	9	0,003427
A70	EO11R	9	8	0,003580
A70	EO12L	6	7	0,003727
A70	O4R	12	9	0,003847
A93	D167R	9	8	0,003915
A93	EO1West	9	10	0,004043
A6	EO2L	6	7	0,004140
A93	D101	9	9	0,004487
A93	EO12R	9	8	0,005363
A93	EO11Ost	12	11	0,006096

Tabelle 6-2: Liste der Baulose mit Bohrkernentnahme

Zur Erklärung der Unterschiede zwischen Mittelwert und Verformungsklasse der Baulose wird auf Kapitel 6.2.2 verwiesen.

Das Los mit dem höchsten Verformungsvergleichswert wurde für die Bohrkernentnahme nicht ausgewählt, da es sich hier um eine Versuchsstrecke mit einer ca. 2,5 cm dicken SMA 0/11S-Deckschicht auf einem vollgebundenen Betonoberbau handelt.

Die Vergleichbarkeit dieses Bauloses mit den anderen ist wegen der unterschiedlichen Schichtensteifigkeiten im Bereich von Deck- und Binderschicht, in welchem die größten Schubspannungen übertragen werden, nicht gewährleistet.

6.3.2 Bohrkernentnahmen

Zur Bestimmung des Betriebskilometers der Entnahmestelle wurden die aus der Zustandserfassung bekannten Spurtiefen der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens eines jeden Bauloses über die gesamte Länge grafisch aufgetragen und Bereiche ausgewählt, in denen die örtli-

chen Verformungen in der Größenordnung des für das gesamte Los bestimmten Mittelwertes lagen.

Bei einer Vorortbesichtigung wurde die Entnahmestelle dann so ausgewählt, daß sie sich zum einen in einem Bauabschnitt, der durch bekannte Kontrollprüfungen bestimmt war, und sich zum anderen nicht in exponierten Lagen, wie z.B. Gefäll- oder Steigungsstrecken, Kurven, Auf- oder Ausfahrtsbereiche, befand.

Hierdurch wurde gewährleistet, daß die Bohrkerne an einer die mittlere Spurrinnentiefe des Loses repräsentierenden Stelle entnommen wurden.

Abhängig von der vorliegenden Verformung wurden i.d.R. 3-4 Kerne mit einem Durchmesser von 150 mm aus dem rechten Rollspurbereich des rechten Fahrstreifens und drei Bohrkerne aus dem Bereich zwischen den Rollspuren oder der Standspur entnommen.

In Abbildung 6-11 ist eine Skizze für die Entnahme von Bohrkernen aus dem rechten Fahrstreifen dargestellt; der Pfeil im linken Fahrstreifen zeigt die Fahrtrichtung an.

Die Nummerierung beginnt immer am Bohrkern, der aus dem äußeren linken Rollspurbereich entnommen wurde und steigt bis zum äußeren Bohrkern aus dem rechten Rollspurbereich auf; die höchsten Ziffern wurden für die Kerne aus dem unbelasteten Teil vergeben.

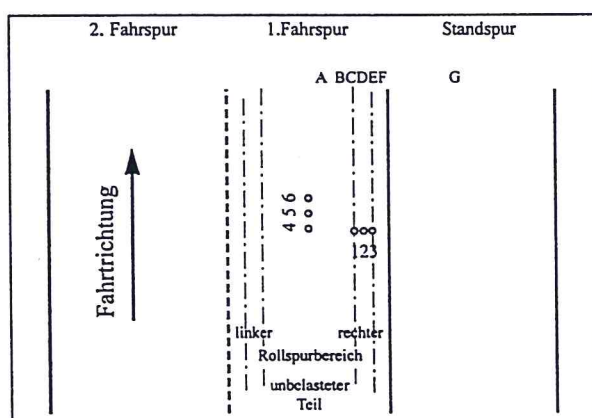


Abbildung 6-11:
Entnahmeskizze der Bohrkkerne
aus dem rechten Fahrstreifen

Die Bohrkkerne aus dem Rollspurbereich des rechten Fahrstreifens der Richtungsfahrbahn dienen ausschließlich den Verformungsuntersuchungen.

Die für die Mischgutuntersuchungen notwendigen drei Bohrkkerne wurden entweder aus dem

unbelasteten Teil des rechten Fahrstreifens oder, wenn dies auf Grund der gleichen Fertigerbahn möglich war, aus der Standspur entnommen.

Die Entnahmestellen (Betriebskilometer) und die jeweilige Anzahl der gezogenen Bohrkern kann der Tabelle 6-3 entnommen werden.

BAB	Los	Entnahme- stelle [km]	Bohrkernanzahl
A3	D281R	285,4	6
A3	D304R	304,5	6
A3	D410R	411,9	6
A6	D747R	752,75	6
A6	D776L	777,9	8
A6	EO2L	847,4	6
A7	D619R	620,75	8
A9	D436L	437,5	6
A70	EO15L	111	6
A70	EO15R	110,9	6
A70	EO11R	88,95	6
A70	EO12L	95	6
A70	O4R	51	8
A72	EO3	10,1	6
A73	D48	49,8	6
A93	D167R	170,42	6
A93	EO1 West	142	8
A93	D101	106	6
A93	EO12R	84,5	6
A93	EO11 Ost	89,7	8

Tabelle 6-3:
Liste der Entnahmestellen für
die Bohrkern und die an
dieser Stelle entnomme Anzahl

6.4 Messung des Querprofils an den Bohrkernentnahmestellen

Die Streckenauswahl für die Bohrkernentnahmen basierte auf der Zustandserfassung der Autobahndirektion Nordbayern.

Für die Verformungsuntersuchungen im Labor sind die Daten jedoch nicht ausreichend gewesen, da kein kontinuierliches Profil im Querschnitt (Meßabstand 4 cm) erstellt wurde.

Um eine eindeutige Zuordnung der Verformung zu den entnommenen Bohrkernen vornehmen zu können, wurde am Prüfamts für Bituminöse Baustoffe und Kunststoffe der TU München ein Querprofilmeßgerät mit kontinuierlicher Datenerfassung entwickelt.

Das folgende Bild zeigt eine Fotografie dieser Konstruktion.

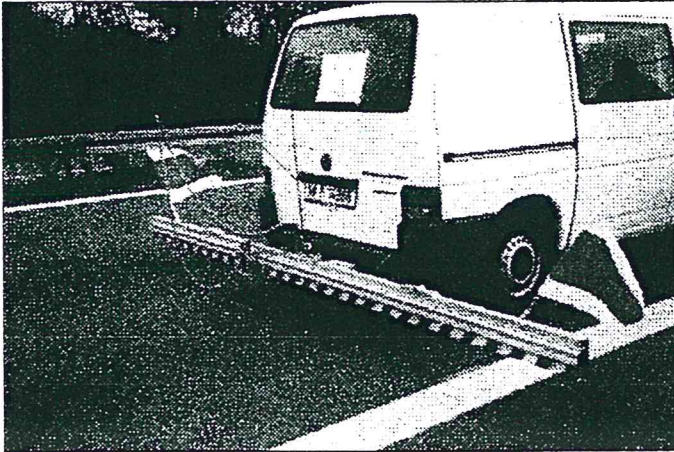


Abbildung 6-12:
Laser-Querprofilaufnahme-
gerät des Prüfamtes für
Bituminöse Baustoffe und
Kunststoffe der TU-München

Hierbei handelt es sich um ein hochpräzises Laser-Querprofilaufnahmegerät, bei welchem eine optische Meßeinheit mittels eines angetriebenen Führungswagens über einen 4 m langen Balken transportiert wird und dabei das Straßenprofil mit einer Genauigkeit in Fahrbahnquerrichtung von ± 1 mm aufnimmt; die Tiefenauflösung beträgt $\pm 0,1$ mm.

Am Balken befindet sich ein Querneigungssensor, der die Neigung des Balkens zur Horizontalen mißt. Die Querneigung wird bei der Auswertung des Querprofils direkt berücksichtigt. Für eine Messung ist ein Zeitaufwand von ca. 1 min. erforderlich.

In Abbildung 6-13 ist zur Veranschaulichung ein Querprofil, das mit dem Laser-Querprofilaufnahmegerät erfaßt wurde, exemplarisch dargestellt.

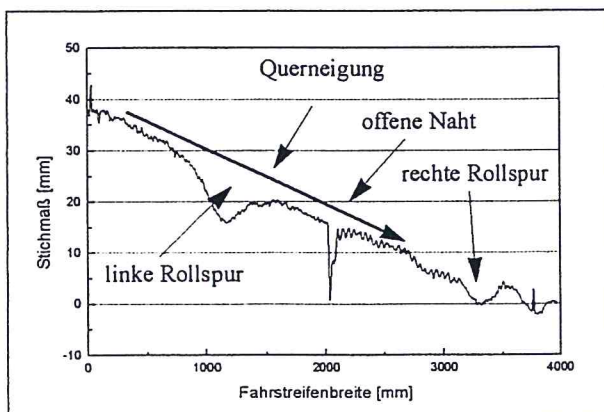


Abbildung 6-13:
Querprofildarstellung mit
Laser-Querprofilaufnahmegerät
der BAB A3-D410R

Aus den so erfaßten Querprofilen können nun an den Entnahmestellen der Bohrkerne exakte Stichmaße für die Oberflächenverformung errechnet werden.

Für die Ermittlung dieser Stichmaße ist die Festlegung einer Bezugslinie notwendig.

Bei der im Straßenbau üblichen Erfassungsart von Stichmaßen für das Querprofil wird eine 4 m lange Richtlatte eingesetzt, die auf die Straßenoberfläche aufgesetzt wird und somit eine Bezugsgerade über die Hochpunkte des Querprofils erstellt.

Von dieser Systematik ist im vorliegenden Fall jedoch abgewichen worden, da schon bei der Zustandserfassung eine andere Bezugslinie gewählt wurde (siehe Kapitel 6.2.1) und nach Möglichkeit eine systematische Abweichung in den Spurtiefen zwischen der Zustandserfassung und dem Laser-Querprofilaufnahmegerät vermieden werden sollte.

Als Bezugslinie für die Messungen mit dem Laser-Querprofilaufnahmegerät wurde eine Gerade erstellt, die die äußeren Meßwerte der Straßenoberfläche berührt.

Sie steht auf Grund der gleichen Meßlänge wie bei der Zustandserfassung somit zu dieser Bezugsgeraden im Zusammenhang.

Die Oberflächenverformung an den jeweiligen Bohrkernentnahmestellen wurde als Mittelwert aus den drei Stichmaßen zwischen Bezugslinie und Straßenoberfläche am Mittelpunkt und den beiden quer zur Fahrtrichtung liegenden äußern Randpunkten des jeweiligen Bohrkerns ermittelt.

Die nach dem beschriebenen Verfahren ermittelten Oberflächenverformungen an den Bohrkernentnahmestellen sind in der Tabelle 6-4 aufgelistet.

BAB	Los	Entnahmestelle (siehe Abbildung 6-11)						
		A	B	C	D	E	F	G
A3	D281R	2,6		1,7	1	-0,5		
A3	D304R	1		1,7	1,1	0,4		
A3	D410R	2,9	3,9	4,3	6,1	1,4	2,7	
A6	D747R			3,1	5,5	4,3		0
A6	D776L	0,7	0,7	4	7,9	4,8		
A6	EO2L			3,7	2,8	1,9		0
A7	D619R		6,5	7,2	6,8	4,6		0
A9	D436L			3,2	4,5	2,4		0
A70	EO15L			3,4	3,9	0,4		0
A70	EO15R			6,2	7,7	7,5		0
A70	EO11R			5,4	5,6	2,8		0
A70	EO12L			3,1	3,5	0,4		0
A70	O4R		5,3	6	6,7	2,7		0
A72	EO3			0,2	1	-0,1		0
A73	D48	-2,1		0,1	1,2	0,6		
A93	D167R			-1,7	-2	-1,1		0
A93	EO1 West		3,6		8,1	11	3,8	
A93	D101			7,2	4,9	3,3		0
A93	EO12R			4,2	4,6	1,5		0
A93	EO11 Ost			4,7	5,4	3,7		0

Tabelle 6-4: Oberflächenverformungen in mm an den Entnahmestellen der Bohrkerne

Die Bohrkerne, die aus dem unbelasteten Teil des Fahrstreifens oder der Standspur entnommen wurden, dienen als Bezugsbohrkerne für die Verformungsuntersuchungen (siehe Kapitel 7.2) und haben bei einer Entnahme in der Standspur keine Oberflächenverformung, da hier keine aufgenommen wurde.

In den Datenblättern der Deckenbaulose (Anlage XIV) sind die aus den Bohrkernuntersuchungen ermittelten Schichtenprofile dargestellt.

Aus diesen Profilen ist zu erkennen, daß die Bezugsgerade im Prinzip die ideal ebene Straßenoberfläche nach dem Einbau repräsentiert und somit auch Aufwölbungen in Form von negativen Verformungswerten erfaßt.

Damit wäre eine Aufspaltung von Oberflächenverformungen in Gestalt- und Volumenänderungsanteile gemäß /52/ möglich.

Eine genauere Betrachtung der Schichtenprofile (Anlage XIV) zeigt jedoch, daß eine solche Aufspaltung nicht erforderlich ist, da keine Aufwölbungen rechts oder links der betrachteten Rollspur zu ermitteln waren.

Den genannten Anlagen ist ferner eine gute Übereinstimmung der Bezugslinie zur manuellen Erfassungsart mit der 4 m langen Richtlatte zu entnehmen, da die ausgeprägten Hochpunkte meist den äußeren Auflagebereichen, an denen die Bezugsgerade verankert ist, entsprechen.

Die Messungen des Querprofils mit dem Laser-Querprofilaufnahmegerät dienen zur Ermittlung eines neuen Verformungsvergleichswertes für die Strecken mit einer Bohrkernentnahme.

Dieser Verformungsvergleichswert - im Folgenden VVW-TU genannt - dient als Grundlage für die weitere Auswertung, seine Berechnung erfolgt analog der Gleichung 6-1, allerdings mit der mit dem Laser-Querprofilaufnahmegerät gemessenen Spurrinnentiefe.

7 Auswertung der Untersuchungsergebnisse aus Labor und Praxis

7.1 Vorgehensweise

Um das in Kapitel 2 beschriebene Untersuchungsziel der Korrelation der Dehnungsrate aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch und einer Verformungsrate der Deckenbaulose zu erreichen, sind in Kapitel 4 die Dehnungsraten aus den Laboruntersuchungen ermittelt und ausgewertet worden.

Zur weiteren Auswertung müssen nun aus den Verformungen der Deckenbaulose der Bundesautobahnen Verformungsraten bestimmt werden.

Da es sich bei den im Labor dynamisch geprüften Asphalte nur um solche für Deckschichten gehandelt hat, ist die zu ermittelnde Verformungsrate nur auf diese zu beziehen.

An den aus den Deckenbaulosen entnommenen Bohrkernen ist folgender Untersuchungsgang einzuhalten:

1. Welche Schichten sind an der gemessenen Verformung beteiligt?
2. Welcher Art ist die festgestellte Verformung
(Nachverdichtung und/oder Materialtransport)?
3. Zuteilung der Verformungsanteile zu den jeweiligen Schichten.
4. Prüfung auf Vergleichbarkeit der in der Praxis und im Labor eingesetzten Asphalte.
5. Definition einer Verformungsrate für die Deckenbaulose.
6. Untersuchungen zum Einfluß der Asphaltkenngrößen auf die Verformungsrate der Baulose.
7. Korrelation der Verformungsraten aus Labor und Praxis.

Nach dem die dargestellten Untersuchungsgegenstände bekannt sind, ist es möglich, für die an der gemessenen Verformung beteiligten Schichten eine Verformungsrate in Anlehnung an die Dehnungsrate des dynamischen Druck-Schwell-Versuchs aus Verformung und der Belastung, die zu dieser Verformung geführt hat, zu definieren (Punkt 5).

Bei gegebener Vergleichbarkeit der untersuchten Asphalte aus Labor und Praxis kann die korrelative Betrachtung der Dehnungsraten aus Labor und Praxis erfolgen (Punkt 7).

7.2 Untersuchungsmerkmale an Bohrkernen

Die aus den Deckenbaulosen entnommen Bohrkern wurden für die an ihnen durchzuführenden Untersuchungen in zwei Gruppen aufgeteilt:

- a) Bohrkern für die Verformungsuntersuchung und
- b) Bohrkern für die Asphaltuntersuchung.

Die Bohrkern für die Verformungsuntersuchung sind aus dem Rollspurbereich und die Bohrkern für die Asphaltuntersuchung aus dem unbelasteten Teil des rechten Fahrstreifens oder der Standspur entnommen worden (siehe Abbildung 6-11).

Die Anzahl der Bohrkern für die Asphaltuntersuchungen betrug immer drei.

Im Labor wurden an den Bohrkernen folgende Bestimmungen gemäß DIN 1996 vorgenommen:

- ♦ Ermittlung der Schichtdicken sämtlicher Schichten.
- ♦ Ermittlung der Raumdichte an den Deck- und Binderschichten.
- ♦ Ermittlung des Hohlraumgehaltes an allen Deckschichten und ausgewählten Binderschichten.
- ♦ Ermittlung der Kornzusammensetzung, der Mischgutrohdichte, des Bindemittelgehaltes und des Erweichungspunktes Ring und Kugel bei allen Deckschichten und ausgewählten Binderschichten an den Bohrkernen der Asphaltuntersuchung.
- ♦ Herstellung von Marshallprobekörpern aus den wiedererwärmten Deckschichten der Bohrkern für die Asphaltuntersuchung mit Bestimmung der Raumdichte und des Hohlraumgehaltes.
- ♦ Ermittlung des Verdichtungsgrades aller Deckschichten und ausgewählter Binderschichten an den Bohrkernen der Verformungsuntersuchung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen über die Schichtdicken, die Raumdichte, den Hohlraumgehalt und den Verdichtungsgrad an den Bohrkernen für die Verformungsuntersuchung sind in Anlage XXI für die einzelnen Kerne des jeweiligen Deckenbauloses aufgelistet.

Die Ergebnisse aus der Ermittlung der Kornzusammensetzung, der Mischgutrohdichte, des Bindemittelgehaltes und des Erweichungspunktes Ring und Kugel sind neben den Eignungs- und Kontrollprüfungen in den einzelnen Datenblätter der Deckenbaulose aufgeführt. Bei den Extraktionsergebnissen handelt es sich ausschließlich um Untersuchungen an Deckschichten. Die angegebenen Raumdichten, Hohlraumgehalte, fiktiven Hohlraumgehalte und Ausfüllungsgrade beziehen sich auf die Bohrkern, die für die Asphaltuntersuchungen entnommen wurden und stellen einen arithmetischen Mittelwert aus drei Bestimmungen dar.

Das Ziel der Untersuchung an den einzelnen Bohrkernen besteht darin, festzustellen, ob und wenn ja inwieweit sich die Eigenschaften der Schichten im Bereich der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens hinsichtlich Schichtdicke, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad gegenüber dem Einbauzustand verändert haben. Hierbei wird angenommen, daß der unbelastete Bereich oder die Standspur dem Einbauzustand entspricht.

Um Veränderungen des Rollspurbereiches hinsichtlich der Standfestigkeit erkennen zu können, wird ein Vergleich zu den Bohrkernen aus dem unbelasteten Bereich oder der Standspur angestellt.

Eine Überprüfung dieser Voraussetzung läßt sich an Hand der Asphaltuntersuchungen (Extraktion) und den in Anlage XIV mitaufgeführten Kontrollprüfungen vornehmen, da die Entnahmestellen der Bohrkern für die Asphaltuntersuchungen aus Bereichen der Kontrollprüfung gewählt wurden.

Für den Erweichungspunkt Ring und Kugel des aus der Deckschicht extrahierten Bindemittels gilt es zu beachten, daß dieser möglicherweise systematisch höher liegt als der in der Kontrollprüfung festgestellte. Die Ursache hierfür wären durch die Liegezeit der Deckschichten bedingte Verhärtungserscheinungen (Oxidationsvorgänge zwischen Bindemittel und Luftsauerstoff) des Bindemittels.

Liegt eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der Asphaltuntersuchung (Extraktion) und der Kontrollprüfung vor, so ist der Bezug zum Einbauzustand beim Vergleich der Eigenschaften von Deck- und Binderschichten aus dem Rollspurbereich und der Standspur oder dem unbelasteten Teil des rechten Fahrstreifens gegeben.

7.3 Prüfung auf den Erhalt des Einbauzustandes

Die Überprüfung, ob die Eigenschaften der Standspur oder des unbelasteten Bereiches des rechten Fahrstreifens dem des Einbauzustandes gemäß Kontrollprüfung entsprechen, erfolgt an Hand

- a) der Korngrößenverteilung,
- b) dem Bindemittelgehalt,
- c) dem Erweichungspunkt Ring und Kugel,
- d) dem Hohlraumgehalt und
- e) dem Verdichtungsgrad.

Die Auswertung ergibt für die oben aufgeführten Parameter folgende Ergebnisse:

zu a) Korngrößenverteilung:

Die maximalen und minimalen Unterschiede in den Mineralstoffanteilen Splitt, Sand und Füller zwischen der Extraktion und der Kontrollprüfung sind in Tabelle 7-1 aufgeführt. Die Werte in der Spalte "min." stellen Unterschreitungen, die der Spalte "max." Überschreitungen gegen-über der Kontrollprüfung dar.

	min.	max.
Splitt	-2,6	3,9
Sand	-3,9	3,7
Füller	-1,9	2,1

Tabelle 7-1:

Maximale und minimale Über- bzw. Unterschreitungen der Mineralstoffanteile in Gew.-% zwischen Extraktion und Kontrollprüfung

Die festgestellten Über- oder Unterschreitungen der Mineralstoffanteile sind als gering zu betrachten.

Auf Grund dieser geringen Abweichungen der Mineralstoffanteile zwischen Kontrollprüfung und Extraktion und der geringen Schwankungen in den Verteilungen der einzelnen Korngruppen der Korngrößenverteilung (maximal $\pm 2-3$ Gew.-%) kann von einer guten Vergleichbarkeit zwischen Ist- und Einbauzustand hinsichtlich der Mineralstoffzusammensetzungen der untersuchten Asphalte ausgegangen werden, große Veränderungen sind nicht aufgetreten.

zu b) Bindemittelgehalt:

Die maximale Unter- oder Überschreitung im Bindemittelgehalt der Extraktion im Vergleich zur Kontrollprüfung beträgt 1,0 Gew.-% bzw. 0,3 Gew.-%.

Die Unterschreitung von einem Gewichtsprozent tritt nur einmal auf; die nächst geringere Unterschreitung beträgt 0,6 Gew.-%.

Die Unterschreitungen treten mehr als dreimal häufiger auf als die Überschreitungen, so daß in den Asphaltuntersuchungen im Vergleich zur Kontrollprüfung eher magere Asphalte festgestellt wurden.

Läßt sich die in Kapitel 5.4.2 dargestellte geringe Auswirkung eines reduzierten Bindemittelgehaltes auf die Wärmestandfestigkeit im dynamischen Druck-Schwell-Versuch auf die Praxis übertragen, ist auch in diesem Fall von einer Vergleichbarkeit zwischen Ist- und Einbauzustand auszugehen.

zu c) Erweichungspunkt Ring und Kugel:

Die in der Extraktion ermittelten Erweichungspunkte Ring und Kugel waren bis auf vier Ausnahmen höher als die der Kontrollprüfung.

Bei diesen erhöhten Erweichungspunkten handelt es sich um die unvermeidbare Bindemittelverhärtung während der Liegezeit, sie betrug im Mittel nur ca. 3K.

Von einer Verhärtung auf Grund von Oxidationsvorgängen während der Liegezeit der Deckenbaulose ist daher nur in geringem Umfang auszugehen.

zu d) Hohlraumgehalte:

Die an den Bohrkernen für die Asphaltuntersuchung ermittelten Hohlraumgehalte sind bis auf drei Ausnahmen geringer als die Hohlraumgehalte der Bohrkern aus der Kontrollprüfung.

zu e) Verdichtungsgrad:

Die sowohl bei der Kontrollprüfung als auch bei der Bohrkernuntersuchung ermittelten Verdichtungsgrade lagen oberhalb des Mindestverdichtungsgrades von 97%.

Die aus der Bohrkernuntersuchung bestimmten Verdichtungsgrade sind bis auf drei Ausnahmen höher als die aus der Kontrollprüfung.

Die Erhöhung des Verdichtungsgrades betrug im Mittel ca. 2% im Vergleich zur Kontrollprüfung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Asphalteigenschaften der Deckschichten, die an den Bohrkernen aus der Standspur oder dem unbelasteten Teil des rechten Fahrstreifens ermittelt wurden, in allen untersuchten Parametern gut mit denen des Einbauzustandes - festgestellt mittels der Kontrollprüfungen - übereinstimmen.

Somit ist es im folgenden zulässig die Ergebnisse aus den Analysen der Bohrkern für die Verformungsuntersuchung in Bezug zu den Ergebnissen der Asphaltuntersuchung (Extraktion) zu bringen.

Für die weitere Auswertung werden daher die Bohrkern aus der Standspur oder dem unbelasteten Teil des rechten Fahrstreifens als Bezugsbohrkerne bezeichnet.

7.4 Analyse der Schichtenverformung

7.4.1 Ergebnisse aus der Schichtdickenmessung

Die an der Straßenoberfläche gemessenen Verformungen sind Relativmaße von einer Bezugsgeraden bis zur Oberfläche der Deckschicht; welche Schichten dabei an dieser Verformung beteiligt sind, ist hieraus nicht zu erkennen.

Für eine Zuordnung der gemessenen Verformung zu den einzelnen Schichten, sind u.a. Schichtdickenmessungen erforderlich.

Diese Messungen wurden durchgeführt, indem die Schichtgrenzen an den Mantelflächen aller Bohrkern markiert wurden und dann - in Fahrtrichtung betrachtet - die Schichtdicke links, zweimal in der Mitte und rechts bestimmt wurde.

Bei diesem Verfahren kann eine Genauigkeit von ca. $\pm 1\text{mm}$ angesetzt werden, wobei die Streuung im wesentlichen durch Einzelkörner im Verlauf der Schichtgrenzen bedingt ist.

Aus den ermittelten Schichtdicken der einzelnen Bohrkern wurden Schichtenprofile und Schichtdickenprofile erstellt.

Die Abbildung 7-1 enthält beispielhaft das Schichtenprofil des Deckenbauloses BAB A3 D410R.

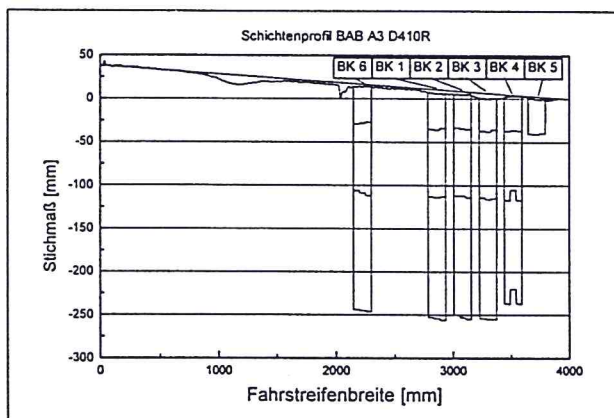


Abbildung 7-1:
Schichtenprofil des
Deckenbauloses
BAB A3 D410R

Das Schichtenprofil zeigt das Querprofil mit der Bezugsgeraden und die Bohrkernbohrungen mit den zugehörigen Schichtgrenzen an den jeweiligen Entnahmestellen im rechten Fahrstreifen.

Wurden die Bohrkernbohrungen für die Asphaltuntersuchung aus der Standspur entnommen, sind diese in den Schicht- und Schichtdickenprofilen im unbelasteten Teil des rechten Fahrstreifens eingetragen.

Aus den Schichtenprofilen läßt sich folgendes entnehmen:

- ♦ die Entnahmestellen der Bohrkernbohrungen im rechten Fahrstreifen,
- ♦ die festgestellte Ebenheit im Querprofil,
- ♦ über den Verlauf der eingetragenen Schichtgrenzen die Beteiligung von Schichten an der Oberflächenverformung (Volumenänderung),
- ♦ die Ausprägung der Oberflächenverformung in der Tiefe (Spurrinne),
- ♦ die Bildung von Aufwölbungen seitlich der Rollspur (Gestaltänderungen),
- ♦ die Abweichungen der Straßenoberfläche im Querprofil von der Bezugsgeraden.

Die Eigenschaften der Bohrkernbohrungen aus dem rechten Rollspurbereich des rechten Fahrstreifens sind immer in Bezug zu dem Mittelwert der Bohrkernbohrungen aus der Standspur oder dem unbelasteten Teil des rechten Fahrstreifens zu setzen.

Die Voraussetzung der Vergleichbarkeit ist in Kapitel 7.3 geprüft und bestätigt worden.

In Abbildung 7-2 ist das zur Abbildung 7-1 gehörende Schichtdickenprofil dargestellt.

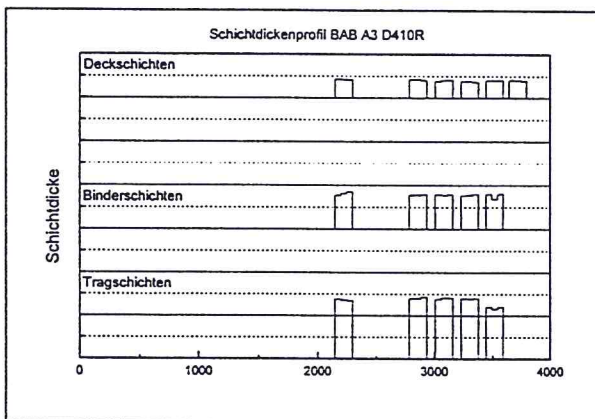


Abbildung 7-2:
Schichtdickenprofil des
Deckenbauloses BAB A3 D410R

Aus dem Schichtdickenprofil kann deutlicher als im Schichtenprofil erkannt werden, ob sich im Rollspurbereich des untersuchten Fahrstreifens Reduzierungen der Schichtdicken ergeben haben und an welcher Stelle.

In Anlage XIV sind für alle Deckenbaulose mit Bohrkernentnahme die Schichten- und Schichtdickenprofile zusammengestellt.

Die z.T. sehr unregelmäßigen Tragschichtdicken sind im wesentlichen auf Unebenheiten der ungebundenen Schicht zurückzuführen. Eine zuverlässige Bestimmung von Schichtdickenänderungen war dadurch in der Tragschicht nicht möglich, so daß auf eine Aufnahme der Tragschichten in die weitere Untersuchung verzichtet wird.

7.4.1.1 Deckschichten

Zur Feststellung der möglicherweise veränderten Schichtdicken im rechten Rollspurbereich des rechten Fahrstreifens werden diese mit den an den entsprechenden Schichten der Bezugsbohrkerne ermittelten Dicken verglichen.

In Abbildung 7-3 sind die Unterschiede der Deckschichtdicken zwischen dem aus den Bezugsbohrkernen gebildeten Mittelwert und den Schichtdicken der jeweiligen Bohrkerne aus dem Bereich der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens dargestellt.

Die Kürzel "li Rsp", "Rsp" und "re Rsp" bezeichnen die Bereiche "links neben der Rollspur (li Rsp)", "in der Rollspur (Rsp)" und "rechtes neben der Rollspur (re Rsp)".

Negative Abweichung in der Abbildung 7-3 bedeuten geringere Schichtdicken im Rollspurbereich gegenüber dem Bezugsbohrkern.

Treten keine Unterschiede in den zu vergleichenden Schichtdicken auf, fehlt die Darstellung in Balkenform.

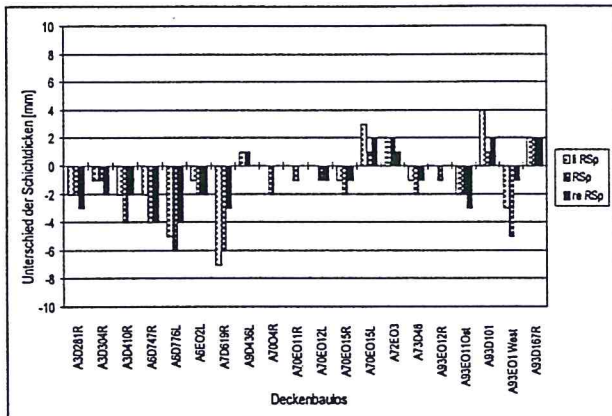


Abbildung 7-3:
Unterschiede in den Dicken
der Deckschichten zwischen
Bezugsbohrkern und
Rollspurbereich

Auf Grund der Genauigkeit der Schichtdickenmessung sind absolute Abweichungen von 2 mm beim Vergleich der Schichtdicken zwischen den Bohrkernen der jeweiligen Bereiche möglich. Für die oben stehende Abbildung bedeutet dies, daß nur negative Abweichungen von mehr als zwei Millimetern eine eindeutige Reduzierung der Schichtdicke anzeigen.

Die nachstehend aufgelisteten Deckenbaulose haben somit eine zuweisbare Reduzierung der Dicke ihrer Deckschicht erfahren:

- ♦ BAB A3 D410R
- ♦ BAB A6 D747R
- ♦ BAB A6 D776L
- ♦ BAB A93 EO1W

Die Querprofile dieser Baulose zeigen auch in den Schichtenprofilen die entsprechenden Verformungen im Bereich der rechten Rollspur.

Bei allen anderen Baulosen lassen sich keine eindeutigen Reduzierungen der Schichtdicken feststellen.

Die verhältnismäßig großen Abweichungen der Schichtdicken zwischen Bezugsbohrkern und Rollspurbereich beim Los BAB A7 D619R scheinen systematischer Natur zu sein, da die gemessenen Schichtdicken kontinuierlich vom linken Bereich der Rollspur bis zu Standspur zunehmen.

Eine mögliche Ursache hierfür ist in den Einbaubedingungen zu sehen.

Die gleiche Ursache gilt wahrscheinlich für die Baulose, die in Abbildung 7-3 positive Unterschiede aufweisen, also am Bezugsbohrkern dünnere Schichtdicken aufweisen als im Rollspurbereich.

Die Betrachtung der Schichtenprofile und Schichtdickenprofile läßt - bis auf die oben aufgeführten Baulose - ebenfalls keine Reduzierung der Schichtdicken im Rollspurbereich erkennen.

Bei den oben aufgelisteten Baulosen ist aus den Untersuchungen zur Schichtdicke ein Anteil der gemessenen und in Abbildung 7-4 für den Rollspurbereich dargestellten Verformungen den Deckschichten zuzuordnen.

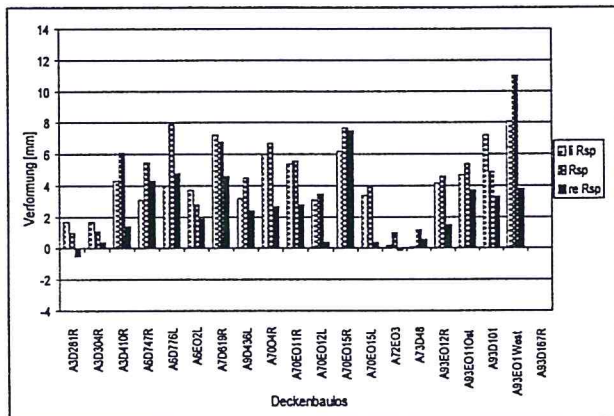


Abbildung 7-4:
Oberflächenverformungen
an den Entnahmestellen der
Bohrkerne im Rollspurbereich

7.4.1.2 Binderschichten

Bei allen untersuchten Binderschichten läßt sich aus den Messungen der Schichtdicken keine Reduzierung der Dicken feststellen.

Einzige Ausnahme bildet das Baulos BAB A70 EO15R. Da sich aber eine Verminderung der Schichtdicke ohne seitliche Aufwölbungen an der Oberfläche auch in einer Reduzierung des Hohlraumgehaltes bemerkbar machen müßte und hier ein Widerspruch besteht, ist bei diesem Los davon auszugehen, daß die Vergleichbarkeit zwischen den Eigenschaften der Binderschicht in der Standspur und denen aus dem Rollspurbereich nicht gegeben ist.

7.4.2 Untersuchungsergebnisse der Bohrkerneigenschaften

Nachdem sich bei der Mehrzahl der untersuchten Streckenabschnitte aus der Untersuchung über die Veränderung der Schichtdicken keine eindeutige Zuordnung der an der Verformung beteiligten Schichten ableiten ließ, ist zur Ermittlung der an der Verformung beteiligten Schichten und der Verformungsart eine weitere Betrachtung hinsichtlich der Raumdichte, des Hohlraumgehaltes und des Verdichtungsgrades erforderlich.

Diese Meßdaten sind Anlage XXI zu entnehmen.

Die an den Deck- und Binderschichten ermittelten Raumdichten können im Vergleich zum Bezugsbohrkern durch ihren Verlauf im Rollspurbereich eine Nachverdichtung der Schichten anzeigen.

Für eine exakte Abgrenzung der Meßwerte von nicht vermeidbaren Streuungen, werden Unterschiede in den Raumdichten dann als signifikant betrachtet, wenn sie höher oder niedriger der Raumdichte des Bezugsbohrkerns plus bzw. minus der halben zulässigen Spannweite für Raumdichten gemäß DIN 1996, Teil 7 sind.

In Anlage XXI sind die Raumdichten, die der Ungleichung 7-1 zuzuordnen sind unterstrichen, die Raumdichten, die der Ungleichung 7-2 zuzuordnen sind kursiv und unterstrichen dargestellt. Raumdichten, die keine Kennzeichnung besitzen, weisen somit keinen signifikanten Unterschied zur Bezugsraumdichte auf und sind Ungleichung 7-3 zuzuordnen.

Ungleichung 7-1

$$\rho_A > \rho_A^{bez} + \frac{1}{2} a_{zul}$$

mit ρ_A = Raumdichte der Bohrkernschicht

Ungleichung 7-2

$$\rho_A < \rho_A^{bez} - \frac{1}{2} a_{zul}$$

ρ_A^{bez} = Raumdichte der Schicht des Bezugsbohrkerns

a_{zul} = zulässige Spannweite der Raumdichte nach dem Tauchwägevorgang der

Ungleichung 7-3

$$\rho_A^{bez} - \frac{1}{2} a_{zul} < \rho_A < \rho_A^{bez} + \frac{1}{2} a_{zul}$$

DIN 1996 Teil 7

Erfährt die zu untersuchende Schicht eine Nachverdichtung, muß deren Raumdichte der Ungleichung 7-1 zuzuordnen sein, da die Ungleichung 7-2 eine Gefügauflockerung beschreibt.

In /24/ wird von Untersuchungen berichtet, bei denen Materialauflockerungen in den seitlichen Aufwölbungen neben Spurrinnen festgestellt wurden.

Den Schichtenprofilen in Anlagen XIV ist jedoch zu entnehmen, daß solche Aufwölbungen bei den untersuchten Baulosen nicht auftraten und daher Gefügauflockerungen nicht vorlagen.

Die in Anlage XXI angegebenen Meßwerte des Bezugsbohrkerns stellen das jeweilige arithmetische Mittel aus drei an im Bezugsbereich gezogenen Bohrkernen festgestellten Einzelwerten dar.

Die in der Anlage XXI angegebenen Hohlraumgehalte korrespondieren mit den Raumdichten, da die über den Straßenquerschnitt entnommenen Bohrkern der gleichen Fertigerbahn entstammen und somit die Mischgutrohdichte als konstant angenommen wird; sie dienen zur Verdeutlichung möglicher Dichteunterschiede im Rollspurbereich.

Die in der gleichen Anlage mit angegebenen Verdichtungsgrade sollen wie der Hohlraumgehalt über einen entsprechenden Unterschied zwischen Rollspur- und Bezugsbereich eine Gefügeveränderung anzeigen.

Die Verdichtungsgrade können nur dann mit denen der Kontrollprüfung verglichen werden, wenn sich die Raumdichte der Marshallprobekörper innerhalb der zulässigen Spannweite für Marshallprobekörper in Bezug auf die in der Kontrollprüfung ermittelte Raumdichte bewegt. Dies ist bei der Untersuchung aller Baulose der Fall gewesen, bis auf:

- ♦ BAB A9 D436L
- ♦ BAB A72 EO3
- ♦ BAB A93 D101

Bei den ersten beiden Baulosen ist die Differenz der Raumdichten der Marshallprobekörper zwischen Extraktion und Kontrollprüfung nur geringfügig größer als die zulässige Spannweite nach DIN 1996.

Bei der Extraktionsuntersuchung des Bauloses BAB A93 D101 wurde festgestellt, daß die Deckschicht entgegen den Ergebnisse aus der Kontrollprüfung ein Gemisch aus zwei unterschiedlichen Gesteinsarten enthielt. Dadurch ist die Vergleichbarkeit mit dieser Kontrollprüfung nicht gegeben und die im Labor ermittelten Werte werden für den Verdichtungsgrad angesetzt.

Eine Absolutbetrachtung von Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad der Deckschichten ergab in allen Fällen eine Erfüllung der Anforderungen gemäß ZTV bit-StB 84/90.

7.4.2.1 Deckschichten

Die Auswertung der Raumdichten der Deckschichten ergab, in erster Linie bei Betrachtung der Rollspur und in zweiter des Rollspurbereiches, bei zwei Strecken (10%) unplausible Ergebnisse gemäß Ungleichung 7-2 (BAB A6 D776L; BAB A73 D48).

Bei 50% der Strecken wurde keine signifikante Veränderung im Vergleich zur Bezugsraumdichte festgestellt.

Bei 40% der Strecken konnte eine signifikante Erhöhung der Raumdichte in der Rollspur festgestellt werden; im einzelnen sind dies:

- ♦ BAB A3 D304R
- ♦ BAB A6 EO2L, D747R
- ♦ BAB A7 D619R
- ♦ BAB A70 EO11R, EO12L, EO15R, EO15L

Die Betrachtung des Verdichtungsgrades zeigt insgesamt Werte i.d.R. von $\geq 100\%$.

Ein Vergleich mit den in der Kontrollprüfung ermittelten Verdichtungsgraden (Anlage XXI) zeigt fast ausnahmslos eine Erhöhung der in den Bohrkernuntersuchungen ermittelten Werte und weist damit auf Nachverdichtungen der Deckschichten hin.

Ein Vergleich der Verdichtungsgrade der Deckschichten aus dem Bezugsbereich mit dem des rechten Rollspurbereichs zeigt ebenfalls in einigen Fällen durch erhöhte Verdichtungsgrade des Rollspurbereichs die Nachverdichtung an.

7.4.2.2 Binderschichten

Die Analyse der Raumdichte aller Binderschichten der Bohrkerns zeigt nur in drei Fällen im Rollspurbereich eine Zunahme der Raumdichte.

Alle anderen Schichten haben keine signifikante Veränderung ihrer Raumdichten erfahren.

Im Einzelnen sind den folgenden Deckenbaulose Veränderungen der Raumdichte im Rollspurbereich zuzuordnen:

- ♦ BAB A70 EO12L, EO15L
- ♦ BAB A93 EO11O

An diesen Schichten wurden im Labor die Untersuchungen wie bei den Deckschichten durchgeführt.

Die Ergebnisse sind Anlage XXI zu entnehmen.

Die Ergebnisse aus Anlage XXI und die grafische Darstellung des Querprofils in den Datenblättern der Deckenbaulose (Anlagen XIV) lassen für diese Abschnitte Verformungen in Form einer Nachverdichtung erkennen.

Eine anteilmäßige Aufspaltung der gemessenen Oberflächenverformung ist wegen der fehlenden Schichtdickenreduzierung nicht möglich, weshalb sich die weitere Betrachtung ausschließlich auf die Deckschichten bezieht.

Zusammenfassend kann aus der Untersuchung über die Schichtenverformung festgestellt werden, daß es sich bei den gemessenen Oberflächenverformungen ausnahmslos um Nachverdichtungen handelt, bei welchen nur die Deckschichten beteiligt waren.

7.5 Prüfung auf Vergleichbarkeit der Asphalte zwischen Labor und Praxis

Nach dem die Frage geklärt ist, welche Schichten der flexiblen Fahrbahnbefestigung an den gemessenen Verformungen beteiligt sind, ist zu überprüfen, ob sich das auf den Strecken eingebaute Mischgut von dem in der dynamischen Prüfung eingesetzten Mischgut unterscheidet.

Für die untersuchten Deckenbaulose liegen die Eignungsprüfung, die Kontrollprüfung und bei den Baulosen mit einer Bohrkernentnahme zusätzlich die Ergebnisse der Bohrkernuntersuchung aus dem Labor vor.

Aus den Unterschieden zwischen den Massenanteilen an Splitt, Sand und Füller sowie Bindemittelgehalt, Mischgutrohddichte und Raumdichte, der Eignungsprüfung und den Untersuchungsergebnissen der Lose im Labor (Extraktion), kann eine Beurteilung über die Vergleichbarkeit der Asphalte aus der dynamischen Prüfung und den Deckschichten der entsprechenden Deckenbaulose erfolgen.

In Anlage XXI sind die Differenzen zwischen der Extraktionsuntersuchung, der Eignungsprüfung und der Kontrollprüfung für die Mischgutkenngößen Bindemittelgehalt, Mineralstoffanteile und Mischgutrohddichte der Baulose mit Bohrkernentnahme dargestellt. Die Zeile der Raumdichte enthält bei der Eignungsprüfung die des dynamisch geprüften Marshallprobekörper, bei der Kontrollprüfung die der Deckschicht am Bohrkern.

Die Tabellenabschnitte der Anlage XXI haben dabei folgende Systematik im Aufbau: ist die Differenz zwischen den Ergebnissen der Extraktion und der Eignungsprüfung $<$ oder > 0 , dann sind die Werte der Eignungsprüfung größer bzw. kleiner als die der Extraktion; gleiches gilt für die Kontrollprüfung.

7.5.1 Vergleichbarkeit der Korngrößenverteilung zwischen Labor und Praxis

In nachstehender Tabelle sind die maximalen und minimalen Kornanteile, an die in der ZTV bit-StB 84/90 /56/ Anforderungen gestellt werden, der in der Extraktion untersuchten Deckenbaulose mit den entsprechenden Anteilen der Eignungsprüfung angegeben.

Splittmastixasphalt 0/11S					
	Eignungspr.		Extraktion		
Kornanteil [Gew.-%]	max.	min.	max.	min.	Anforderung gem. ZTV bit-StB 84/90
> 11 mm	8,9	0,9	5,0	1,2	≤ 10
> 8 mm	46,2	34,4	45,6	32,0	≥ 25
> 5 mm	63,9	58,4	62,6	53,9	50 - 70
> 2 mm	75,9	73,3	75,3	71,7	70 - 80
< 0,09 mm	12,3	10,0	12,7	9,5	8 - 13

Tabelle 7-2:
Körnungsanteile des
Splittmastixasphalt
0/11S gemäß Eignungs-
prüfung und Extraktion
für die Deckenbaulose
mit Bohrkernentnahme

Der Tabelle ist zu entnehmen, daß

- ♦ alle eingesetzten Asphalte den Anforderungen der ZTV bit-StB 84/90 /56/ genügen,
- ♦ die Schwankungsbreiten in den Fraktionen 5/8 mm und 8/11 mm relativ groß sind aber innerhalb der zulässigen Toleranzen liegen.

Aus Anlage XXI können die maximalen Abweichungen der Splitt-, Sand- und Fülleranteile zwischen den aus der Extraktion ermittelten Kornverteilungskurven und denen der Eignungsprüfung entnommen werden.

Hierbei zeigen sich nur geringe Unterschiede, die in nachstehender Tabelle aufgeführt sind. Die Werte ergeben sich aus der Subtraktion des Extraktionswertes vom Wert der Eignungsprüfung.

	maximal	minimal
Splitt	-3,4	0,4
Sand	3,7	-0,5
Füller	1,8	-1,6

Tabelle 7-3:
Maximale und minimale Unterschiede
der Mineralstoffanteile zwischen
Extraktion und Eignungsprüfung

Für die weitere Untersuchung der Schwankungen der einzelnen Fraktionen sind für diese in der Tabelle 7-4 die Unterschiede in den Gewichtsanteilen der Fraktionen für die Korngrößenverteilung der im Labor untersuchten Deckenbaulose und den zugehörigen Eignungsprüfungen in Form von Maximal-, Minimal- und arithmetischen Mittelwerte, Standardabweichung und Median für den Splittmastixasphalt 0/11S angegeben.

Fraktion	Max.	Min.	MW	Stabw.	Median
[mm]	[Gew.-%]				
11-16	2,0	-6,7	-1,2 (-1,4)	2,4	-0,7 (-1,1)
8-11	3,2	-12,4 (-5,5)	-2,6 (-1,5)	4,2 (2,9)	-2,6 (-2,0)
5-8	10,2 (7,3)	-5,4	1,6 (1,0)	3,6 (3,1)	0,8 (0,3)
2-5	6,5 (5,1)	-4,2	1,0 (0,6)	2,8 (2,6)	1,3 (1,2)
0,71-2	4,6	-2,4	0,9 (1,0)	1,5 (1,6)	1 (1,1)
0,25-0,71	3,0	-2,5	0,4 (0,4)	1,3	0,4
0,09-0,25	1,5	-0,9	0,3 (0,4)	0,6	0,4 (0,5)
0-0,09	1,8	-1,6	-0,4	0,8 (0,7)	-0,3

Tabelle 7-4: Unterschiede in der Korngrößenverteilung zwischen der Deckschicht der Deckenbaulose und der zugehörigen Eignungsprüfung

Bei positiven Werten ist der im Labor (Extraktion) festgestellte Wert um den ausgewiesenen Betrag größer, bei negativen Werten entsprechend kleiner als der der Eignungsprüfung.

Die ausgewiesenen Maximal- und Minimalwerte zeigen, daß die Korngrößenverteilungen beim Füller- und Sandanteil keinen größeren Schwankungen unterliegen, in den Splittfraktionen treten dagegen Unterschiede zwischen Laboruntersuchung und entsprechender Eignungsprüfung auf.

Der Vergleich von arithmetischem Mittelwert und Median der Verteilung in den dargestellten Differenzen weist auf Grund der geringen Unterschiede auf eine relativ symmetrische Verteilung hin. Die Standardabweichung dient damit als Streuungsmaß.

Unter Berücksichtigung des angegebenen arithmetischen Mittelwertes für die Abweichungen in den Fraktionen 5/8 mm und 8/11 mm und der zugehörigen Standardabweichung wird deutlich, daß die großen Schwankungen zwischen diesen Anteilen in der Extraktion und der Eignungsprüfung auf Einzelfälle zurückgehen müssen, da 62,5% aller Abweichungen im Intervall "Mittelwert der Abweichungen $\pm$ Standardabweichung" liegen.

Eine Überprüfung der Unterschiede in der Korngrößenverteilung für die einzelnen Deckenbaulose und ihre Eignungsprüfung ergab für die Baulose BAB A70 EO11R und EO15L die größten Spannweiten.

Werden diese Lose aus der Betrachtung herausgenommen, so nimmt die Verteilung die in Klammern aufgeführten Werte an.

Für alle untersuchten Deckenbaulose treten damit Abweichungen zwischen Extraktion und Eignungsprüfung auf, die innerhalb der zulässigen Toleranzen der ZTV bit-StB 84/90 /56/ liegen.

Unter besonderer Berücksichtigung der Deckenbaulose

- ♦ BAB A70 EO11R und
- ♦ BAB A70 EO15L

kann hinsichtlich der Korngrößenverteilung von einer Vergleichbarkeit zwischen den untersuchten Deckschichten und der Eignungsprüfung ausgegangen werden.

Im folgenden sollen die eingesetzten Splittmastixasphalte hinsichtlich ihrer Kornzusammensetzung untereinander verglichen werden.

In Abbildung 7-5 ist das Streuband der Kornverteilungskurven, innerhalb dessen sich alle Korngrößenverteilungen der Asphalte gemäß der jeweiligen Eignungsprüfungen befinden, ohne Markierung mit einer durchgezogenen Linie dargestellt.

Die ebenfalls durchgezogenen Linien, die mit einem Δ markiert sind stellen die obere und untere Abgrenzung der in der Laboruntersuchung für die Deckenbaulose festgestellten Korngrößenverteilungen dar.

Weiterhin ist die obere Grenzsieblinie nach /54/ aufgenommen - sie ist mit $\square$ gekennzeichnet.

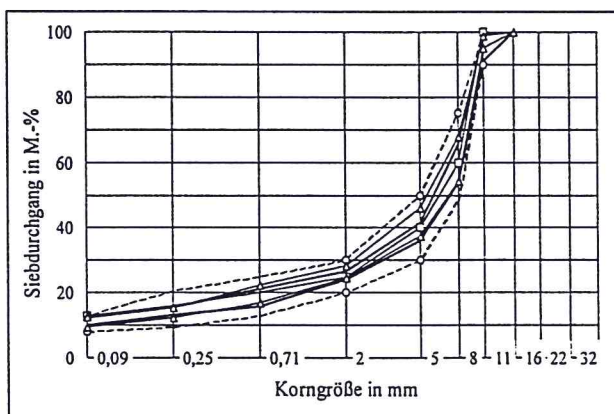


Abbildung 7-5:
Maximale und minimale Kornverteilungskurven für SMA 0/11S aus den Laboruntersuchungen (Extraktion - Δ Linie) und den Eignungsprüfungen (durchgezogene Linie)

Aus Abbildung 7-5 geht hervor, daß die in der Eignungsprüfung festgestellte Korngrößenverteilung der untersuchten Baulose sehr eng beieinander liegen. Nur im Bereich der größeren Splittfraktionen treten Abweichungen bis zu maximal ± 7 Gew.-% auf.

Eine nähere Betrachtung der Variation der einzelnen Kornfraktionen zwischen den einzelnen Deckschichten zeigt gewisse Spannweiten auf.

In der Tabelle 7-5 sind die Maximal-, Minimal- und arithmetischen Mittelwerte, die Standardabweichung und der Median der Kornfraktionen für die im Labor extrahierten Deckschichten aufgeführt.

Fraktion	Max.	Min.	MW	Stabw.	Median
[mm]	[Gew.-%]				
11-16	5,0	1,2	2,4	1,0	2,5
8-11	42,4	30,6	34,5	3,2	33,4
5-8	26,4	14,0	21,5	2,9	21,7
2-5	18,5	10,8	15,3	2,1	15,7
0,71-2	10,0	4,9	7,3	1,4	7,3
0,25-0,71	7,7	3,7	5,1	1,2	4,8
0,09-0,25	4,8	2,5	3,4	0,7	3,2
0-0,09	12,7	9,5	10,6	0,8	10,5

Tabelle 7-5:
Variationsbreite in den Kornfraktionen der im Labor
extrahierten Deckschichten der Baulose

Die Tabelle zeigt durch die relative Gleichheit von arithmetischem Mittelwert und Median für die jeweilige Kornfraktion, daß der Anteil einer Kornfraktion über die untersuchten Deckenbaulose eine angenäherte Symmetrie aufweist; die Standardabweichung ist mit angegeben.

Weiterhin ist aus der Tabelle der Schwankungsbereich der Splittfraktionen in einer Größenordnung von 8 bis 12 Gew.-% zu entnehmen.

Im Zusammenhang mit /54/ ist in Abbildung 7-5 zu erkennen, daß die Kornverteilungskurven der Deckschichten um die obere Grenzsieblinie nach /54/ schwanken. Die eingesetzten Asphalte sind somit nicht extrem splittreich zusammengesetzt.

Vor dem Hintergrund von Kapitel 5 sind die Zusammensetzungen der hier untersuchten Asphalte im Bezug auf die Wärmestandfestigkeit im Labor als ausgewogen zu bezeichnen.

7.5.2 Bindemittelgehalt und Mischgutrohdichte

Die Betrachtung des Bindemittelgehaltes zeigt nur bei einem Los eine unzulässige Abweichung zwischen Extraktion, der Eignungsprüfung und der Kontrollprüfung.

Diese Abweichung von über 1,0 Gew.-% beim Los

♦ BAB A93 EO11O

ist auffallend, da die Differenz zwischen Eignungsprüfung und Kontrollprüfung nur 0,2 Gew.-% beträgt.

Beim Los

♦ BAB A70 EO12L

ist die Differenz von 0,8 Gew.-% zwischen Extraktion und Eignungsprüfung außerhalb der Toleranz.

Alle anderen Bauabschnitte weisen keine Abweichungen außerhalb der Toleranz auf. Sie wiesen jedoch alle bis auf zwei Ausnahmen in der Laboruntersuchung einen niedrigeren Bindemittelgehalt auf als nach Eignungsprüfung vorhanden sein müßte.

Die auf den Bundesautobahnen eingebauten Splittmastixasphalte 0/11S sind gegenüber den entsprechenden Eignungsprüfungen im Bindemittelgehalt magerer eingestellt.

Bei Betrachtung der Differenzen zwischen den jeweiligen Mischgutrohdichten sind der Einfluß der Schwankungen des Bindemittelgehaltes und, wie aus Anlage XIV zu entnehmen ist, die z.T. abweichend von der Eignungsprüfung eingesetzten Mineralstoffe zu berücksichtigen; die vereinzelt größeren Abweichungen sind hierdurch erklärbar.

7.6 Untersuchung der Verformungen in der Praxis

7.6.1 Verformungsrate der Deckenbaulose

Im Kapitel 6.4 ist auf die Aufnahme des Queprofils an den Entnahmestellen der Bohrkerne in den ausgewählten Deckenbaulosen eingegangen worden.

Die Ergebnisse der gemessenen Verformungen sind dort ebenfalls aufgelistet.

Die ausschließliche Beteiligung der Deckschichten an den gemessenen Oberflächen-einsenkungen und die festgestellte Vergleichbarkeit der Splittmastixasphalte 0/11S zwischen Labor und Praxis ermöglicht es, eine Verformungsrate für die Deckenbaulose basierend auf den mit dem Laser-Querprofilaufnahmegerät gemessenen Einsenkungen und den ermittelten Überrollungen zu definieren.

In Anlehnung an den Verformungsvergleichswert der Zusanderfassung wird die Verformungsrate der Baulose ebenfalls als Verhältniswert aus dem errechneten Abstand zwischen Straßenoberfläche und Bezugsgerade im Querprofil der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens zur Quadratwurzel der zum Baulos gehörenden Überrollungen gebildet.

Diese Verformungsrate wird - wie schon in Kapitel 6 erwähnt - im weiteren als Verformungsvergleichswert-TU (Vvw-TU) bezeichnet.

BAB	Los	Vvw	Vvw- TU
		[*1E-3 mm/ÜR ^{1/2}]	[*1E-3 mm/ÜR ^{1/2}]
A3	D281R	0,1285	0,0214
A3	D304R	0,2029	0,03189
A73	D48	0,2193	0,0439
A72	EO3	0,3149	0,045
A6	D747R	0,1751	0,1204
A9	D436L	0,2185	0,1229
A70	EO15L	0,3046	0,1485
A3	D410R	0,2423	0,1643
A6	EO2L	0,414	0,1656
A70	EO12L	0,3727	0,1864
A6	D776L	0,2798	0,221
A7	D619R	0,3272	0,225
A93	D101	0,4487	0,2443
A70	EO11R	0,358	0,2506
A70	O4R	0,3847	0,2864
A70	EO15R	0,3427	0,2932
A93	EO11O	0,6096	0,2993
A93	EO12R	0,5363	0,3084
A93	EO1W	0,4043	0,4286

Tabelle 7-6:
Errechnete Vervormungs-
vergleichswerte für die
Deckenbaulose mit Bohr-
kernentnahme

In der Tabelle 7-6 sind die Verformungsvergleichswerte der Deckenbaulose mit ansteigendem Vvw-TU aufgelistet. Zur Berechnung des Vvw-TU wurden die in Tabelle 6-4 für die Rollspur angegebenen Spurtiefen angesetzt; die Anzahl der Überrollungen sind aus Anlage XIX zu entnehmen.

Der Vvw-TU beschreibt wie der Vvw die lastabhängige Verformungsentwicklung der Deckschichten der untersuchten Baulose, wobei die Genauigkeit der Einsenkungsmessung für den Vvw-TU deutlich besser war, dieser Wert somit der Realität viel näher kommt.

Wenn es einen Zusammenhang zwischen dem Vvw-TU und dem Vvw gibt, so wären die Ergebnisse aus den Untersuchungen zu den Deckenbaulose auf die anderen Baulose, für die nur der Vvw vorliegt übertragbar.

Andererseits sind bei Bestehen eines Zusammenhanges die für die Bohrkernentnahmen ausgewählten Baulose auch repräsentativ aus den 47 Deckenbaulosen ausgewählt.

Für die Untersuchung eines Zusammenhanges zwischen den genannten Verformungsvergleichswerten wird auf den verteilungsunabhängigen Korrelationskoeffizienten nach Spearman zurück gegriffen.

Bei einer Berechnung dieses Koeffizienten für die 18 untersuchten Splittmastixasphalte 0/11S beträgt dieser 0,841 und ist signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,01.

In Abbildung 7-6 ist das Streuungsdiagramm der Verformungsvergleichswerte mit einer linearen Regressionsgeraden dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen dem Vvw und Vvw-TU ist deutlich zu erkennen.

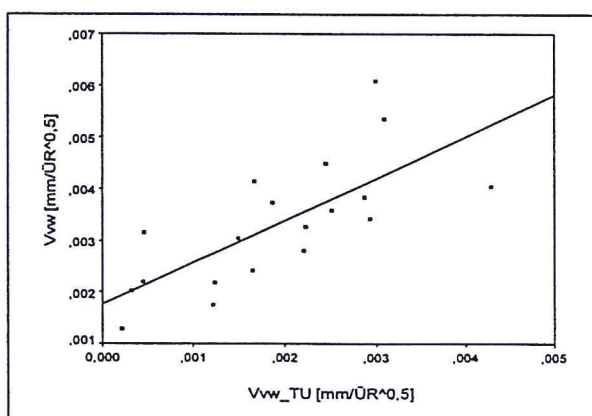


Abbildung 7-6:
Streuungsdiagramm der
Verformungsvergleichswerte
mit Regressionsgerade

Die nicht voll gesicherte funktionale Abhängigkeit zwischen den Verformungsvergleichswerten führt in Tabelle 7-6 zu geringfügigen Unterschieden in der Rangordnung der Baulose.

Wie aus Anlage XXI hervorgeht ist für das Baulos BAB A93 D167R, dessen Deckschicht aus einem Splittmastixasphalt 0/8S (Vergleichslos) besteht, eine negative Verformung aus der Querprofilaufnahme ermittelt worden. Das zugehörige Schichtenprofil in Anlage XIV zeigt, daß es sich hier um eine mögliche Absenkung in der Straßenoberfläche handelt, die im unbelasteten Teil und im linken Bereich der rechten Rollspur vorliegen. Auf eine weitere Berücksichtigung dieses Vergleichsloses wird daher verzichtet, so daß nunmehr nur das Baulos BAB A93 EO1W mit seiner Deckschicht aus Asphaltbeton 0/11S als Vergleichslos übrig bleibt.

7.6.2 Auswirkungen von Asphaltkenngrößen auf die Verformungsrate in der Praxis

Im Kapitel 4.4.6.2 ist für die Dehnungsrate aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch untersucht worden, wie diese von Asphaltkenngrößen der geprüften Probekörper abhängt. In gleicher Weise wird nun bei den in der Praxis festgestellten Spurtiefen verfahren.

Für die Deckenbaulose mit Bohrkernentnahme nach Tabelle 6-4 wird untersucht, ob die Asphaltkenngrößen Hohlraumgehalt, Ausfüllungsgrad, Verdichtungsgrad, Bindemittelgehalt und Raumdichte Auswirkungen auf die Verformungsentwicklung haben.

In diese Untersuchung werden noch zusätzlich der in der Kontrollprüfung an den Deckschichten festgestellte Bindemittelgehalt und Verdichtungsgrad mit aufgenommen.

Damit soll ein zusätzlicher Bezug zur Ausgangssituation der Strecken hergestellt werden, da die aus der Extraktion ermittelten Daten wie z.B. Bindemittelgehalt der Bohrkern-deckschichten während der Liegezeit dieser Schichten verändert worden sein könnten.

Die z.B. gegenüber Eignungsprüfung und Kontrollprüfung verringerten Bindemittelgehalte der Bohrkern-deckschichten sind hierfür kennzeichnend.

Zur Feststellung der möglicherweise bestehenden Zusammenhänge zwischen der meßtechnisch ermittelten Spurtiefe der Deckenbaulose und den Asphaltkenngrößen wird eine Rangkorrelation wie in Kapitel 3.7.4 beschrieben durchgeführt.

In Anlage XXII sind die Ergebnisse dieser Rangkorrelation angegeben.

Der Anlage kann entnommen werden, daß die sich ergebenden Korrelationskoeffizienten sehr gering sind und somit kein Zusammenhang zwischen der Spurtiefe und den Eigenschaften der Deckschichten bestehen.

Die aus der Prüfung der Nullhypothese, daß kein Zusammenhang zwischen den Rängen der Asphaltkenngrößen in der Grundgesamtheit bestehen, errechneten Signifikanzen lassen eine Ablehnung dieser Hypothese nicht zu.

Wie im Kapitel 4.4.3 so muß auch hier festgehalten werden, daß sich keine Einflußgrößen aus den Zusammensetzungen der Splittmastixasphalte auf die Spurrinnentiefe selbst und auf die Verformungsrate der Deckschichten ergeben haben.

7.7 Vergleich der Verformungsraten aus Labor und Praxis

In den zuvor dargestellten Untersuchungen über die Eigenschaften der im Labor zusammengesetzten Asphalte (Eignungsprüfung) und denen auf den Bundesautobahnen eingebauten, (Kontrollprüfung und Laborextraktion) konnte in allen Bereichen die Erfüllung der gestellten Anforderungen konstatiert werden.

Nachdem die auf den Deckenbaulosen festgestellten Oberflächenverformungen ausschließlich den Deckschichten zugeschrieben werden konnten und sich die im Labor dynamisch geprüften Asphalte mit den auf den Baulosen eingebauten vergleichen lassen, ist eine vergleichende Betrachtung der am Marshallprobekörper im dynamischen Druck-Schwell-Versuch ermittelten Dehnungsrate und der an den Deckschichten der Baulose festgestellten Verformungsrate möglich.

Für diesen Vergleich werden die Dehnungs- und Verformungsrate der Deckenbaulose mit Bohrkernentnahme in einem gemeinsamen Streudiagramm eingetragen, aus dem dann möglicherweise ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Verformungsrate aus Labor und Praxis gefunden oder ein Orientierungswert für eine tolerierbare Verformungsrate ermittelt werden kann.

In Abbildung 7-7 ist das Streudiagramm zwischen der im dynamischen Druck-Schwell-Versuch ermittelten Dehnungsrate und dem Verformungsvergleichswert-TU als Maß für die Verformungsrate der Deckenbaulose dargestellt.

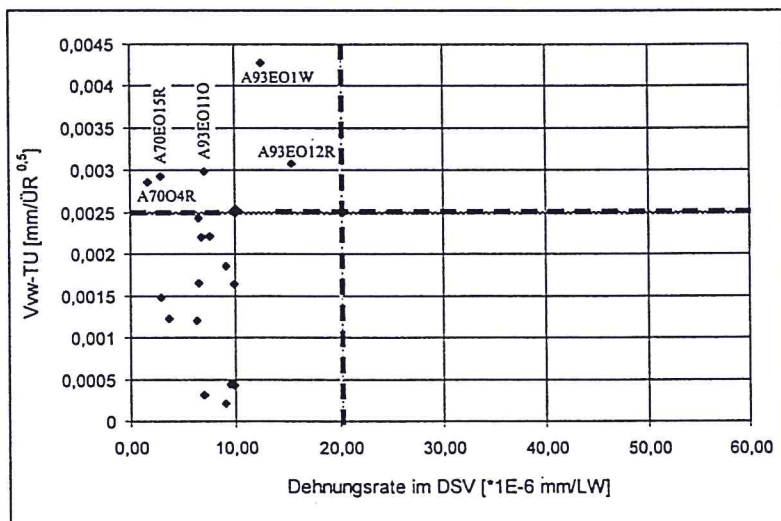


Abbildung 7-7:
Streudiagramm
zwischen Dehnungsrate im
Druck-Schwell-Versuch
und Vvw-TU

Die sich in Abbildung 7-7 einstellende Punktwolke läßt keinen funktionalen Zusammenhang zwischen der im Labor aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch ermittelten Dehnungsrate und der Verformungsrate aus den Praxisuntersuchungen der untersuchten Asphalte erkennen.

Dieser nicht erkennbare Zusammenhang zwischen der Dehnungsrate aus dem Labor und der Verformungsrate in der Praxis läßt sich auch statistisch durch eine verteilungsunabhängige Rangkorrelation nach Spearman nachweisen (siehe Kapitel 3.7.4).

In der Tabelle 7-7 sind die Ergebnisse dieser korrelativen Betrachtung aufgeführt.

Rangkorrelation Splittmastixasphalt 0/11S		
		Vvw-TU
Spearman's Korrelationskoeffizient	Dehnungsrate	-0,063
Signifikanz (2-seitig)	Dehnungsrate	0,804
Anzahl	Dehnungsrate	18

Tabelle 7-7:
Rangkorrelation der
Dehnungsrate im DSV und
des Vvw-TU

Aus der Rangkorrelation läßt sich folgendes entnehmen:

- ♦ Der negative Korrelationskoeffizient bedeutet bei physikalischer Interpretation, daß mit abnehmender Dehnungsrate im Druck-Schwell-Versuch die Verformungsrate in der Praxis zunimmt. Einer im Labor festgestellten erhöhten Wärmestandfestigkeit stünde eine erhöhte Spurrinnenentwicklung in der Praxis entgegen; eine Interpretation, die nicht sinnvoll ist.
- ♦ Der Korrelationskoeffizient ist von seinem Betrag so gering, daß nicht von einem funktionalen Zusammenhang ausgegangen werden kann.
- ♦ Die Signifikanz der Nullhypothese, daß kein Zusammenhang zwischen den korrelierten Variablen in der Grundgesamtheit besteht, ist so hoch, daß diese fast angenommen werden könnte.

Somit ist auch statistisch nachgewiesen, daß kein funktionaler Zusammenhang zwischen den Verformungsraten aus Labor und Praxis besteht.

Nachdem ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Verformungsraten aus Labor und Praxis nicht gefunden werden konnte, stellt sich die Frage, ob sich aus den vorliegenden Daten Bereiche unterscheiden lassen, nach denen die Verformungsraten im Druck-Schwell-Versuch als akzeptabel einzustufen sind.

Aus Kapitel 4 ist ein Anhaltswert bekannt, unterhalb dessen bei den untersuchten Varianten der optimierten Splittmastixasphalte alle im dynamischen Druck-Schwell-Versuch gemessenen Dehnungsraten lagen.

Für den Splittmastixasphalt 0/11S betrug dieser Anhaltswert $20 \cdot 10^{-6}$ mm/LW.

Unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnisse aus Kapitel 5 sind Splittmastixasphalte der Sorte 0/11S, deren dynamische Prüfung im Labor Dehnungsraten unterhalb des genannten Anhaltswertes ergaben, als wärmestandfest zu bezeichnen.

Für die Umsetzung dieses Anhaltswertes auf das Praxisverhalten der Baulose wird zugrundegelegt, daß bei der Autobahndirektion Nordbayern und den zugehörigen Straßenmeistereien eine Spurtiefe von 11 mm als Warnwert für Erhaltungsmaßnahmen gilt. Bei standfesten Asphalten sollte dieser Warnwert erst nach einer Gebrauchsdauer von 10 Jahren erreicht werden.

Ausgehend von den ermittelten Verformungsraten Vvw-TU der Deckschichten aus den untersuchten Baulosen ist die Spurtiefe nach einer Gebrauchsdauer von 10 Jahren zu berechnen.

Hierfür werden für die untersuchten Deckenbaulose ausgehend von den DTV^(SV) zum Zeitpunkt der Verkehrsübergabe (siehe Kapitel 6.1.4) die Überrollungen für einen Zeitraum von 10 Jahren berechnet und das arithmetische Mittel der Überrollungen bestimmt; eine jährlichen Zunahme des Schwerverkehrs von 3% wurde berücksichtigt.

Die Umrechnung des Mittelwertes der Überrollungen in eine Verkehrsbelastungszahl wird unter Berücksichtigung einer Höchstlängsneigung von 4%, einer Fahrstreifenbreite von 3,75 m und einem Fahrstreifenfaktor von 0,45 vorgenommen.

Die sich hieraus ergebende Verkehrsbelastungszahl beträgt 3866. Die Belastung entspricht einem durchschnittlichen täglichen Schwerverkehr von 5455 Fahrzeugen, was einer Überrollung des Schwerverkehrs in Abständen von ca. 16 Sekunden gleichkommt.

Eine Straße mit der genannten Verkehrsbelastungszahl ist nach RStO 86/89 /51/ in die Bauklasse SV einzustufen.

Ein Vergleich mit Abbildung 6-6 zeigt die Einordnung der zuvor theoretisch ermittelten Verkehrsbelastung in den oberen Bereich der untersuchten Deckenbaulose.

Aus der Quadratwurzel des arithmetischen Mittels der Überrollungen nach 10 Jahren Gebrauchsdauer der Deckenbaulose und dem meßtechnisch ermittelten Verformungsvergleichswert-TU der Baulose läßt sich die theoretisch ergebende Spurtiefe nach diesem Gebrauchszeitraum errechnen.

Eine lineare zeitliche Entwicklung der Spurtiefe aus der Deckschicht wird dabei vorausgesetzt.

Ist die theoretisch errechnete Spurrinnentiefe kleiner oder gleich dem Warnwert von 11 mm, wird das Mischgut als standfest bezeichnet.

In Tabelle 7-8 sind die für den genannten Gebrauchszeitraum ermittelten Überrollungen, die gemessene Verformungsrate der Deckschichten der Baulose (Vvw-TU) und die sich theoretisch einstellende Spurtiefe bei der mittleren Anzahl an Überrollungen angegeben.

BAB	Los	Überrollungen	Vvw-TU	theor. Spurtiefe
3	D281R	52573312	0,000214	1
3	D304R	49324294	0,000319	1
3	D410R	23056338	0,001642	7
6	D747R	30049906	0,001204	5
6	D776L	39109757	0,00221	10
6	EO2L	6895397	0,001656	7
7	D619R	28600704	0,002225	10
9	D436L	41026443	0,001229	5
70	EO11R	15291419	0,002506	11
70	EO12L	10798893	0,001864	8
70	EO15L	9934047	0,001485	7
70	EO15R	9934047	0,002932	13
70	O4R	10836292	0,002864	13
72	EO3	15123125	0,00045	2
73	D48	14813078	0,000439	2
93	D101	7965937	0,002443	11
93	EO11Ost	6446612	0,002993	13
93	EO12R	6811250	0,003084	14
93	EO1West	6834624	0,004286	19
arithm. Mittel:		19910559		

Tabelle 7-8:
Theoretische Spurtiefen der untersuchten Bauabschnitte nach 10 Jahren Gebrauchsdauer

Tabelle 7-8 zeigt, daß von den neunzehn untersuchten Streckenabschnitten fünf als weniger standfest zu bezeichnen wären (Darstellung im Fettdruck).

Der Warnwert von 11 mm Spurtiefe wird ab einem Betrag des Vvw-TU von 0,0025 [mm/ÜR^{0.5}] erreicht.

Damit ist ein Orientierungswert für die Abgrenzung einer akzeptablen Verformungsrate in der Praxis gefunden.

Trägt man nun die Grenzwerte aus den Labor- und den Praxisuntersuchungen in Abbildung 7-7 ein (gestrichelte Linien), ergibt sich ein Bereich zwischen 0 und $20 \cdot 10^{-6}$ mm/LW für die Dehnungsrate aus dem dynamischen Druck-Schwell-Versuch und zwischen 0 und 0,0025 mm/ÜR^{0.5} für die Verformungsrate der Deckschichten in der Praxis, in welchem Asphalte als standfest zu bezeichnen sind.

Der Anhaltswert für die Dehnungsrate aus Kapitel 4 läßt sich als Orientierungswert zur Beurteilung der Standfestigkeit in die Praxis übertragen.

Zu den Deckenbaulosen, die sich in Abbildung 7-7 oberhalb der Grenze für die Verformungsrate in der Praxis finden, sind folgende Anmerkungen zu machen:

- ♦ Für alle Baulose wurde festgestellt, daß es sich bei den Oberflächenverformungen um Nachverdichtungen handelt. Dieser Prozeß ist offensichtlich bei den Deckenbaulosen oberhalb eines Verformungsvergleichswertes-TU von 0,0025 mm/ÜR^{0.5} deutlicher ausgeprägt.
- ♦ Bei den Losen BAB A70 EO15R und O4R wurde nach der Extraktion Natursand festgestellt, der gemäß Eignungsprüfung nicht vorgesehen war. Es ist davon auszugehen, daß der Natursand in der Praxis zu höheren Verformungswerten führt.
- ♦ Das Baulos BAB A93 EO11O weist - wie das Los BAB A70 O4R - einen niedrigeren Bindemittelgehalt als die Eignungsprüfung auf. Auch dies führt zu einem veränderten Verformungsverhalten.
- ♦ Das Baulos BAB A93 EO1W ist das Vergleichslos aus Asphaltbeton 0/11S, für das wegen dem unterschiedlichen konzeptionellen Aufbau ein anderer Grenzwert der Verformungsrate aus der Praxis anzusetzen wäre, was jedoch nicht Gegenstand des vorliegenden Auftrags war, da Asphaltbetone i.d.R. verformungswilliger als Splittmastixasphalte sind und für sie normalerweise auch keine erweiterten Eignungsprüfungen durchgeführt werden.

Die dargestellte Untersuchung kann daher nur tendenzielle Aussagen treffen, die an Hand von Extremen (z.B. starke Ausbildung von Spurrinnen) weiter zu überprüfen sind.

Außerdem ist für die Zukunft die Präzision des dynamischen Druck-Schwell-Versuchs noch zu bestimmen.

8 Bewertung und Ausblick

Die Ergebnisse über das Streuverhalten der Dehnungsrate im dynamischen Druck-Schwell-Versuch aus Kapitel 4 weisen für die untersuchten und vergleichbar zusammengesetzten Asphalte keine Abhängigkeit von den Asphaltkenngößen auf. Diese Aussage läßt sich direkt auf die in die Auswertung einbezogenen Bohrkerne übertragen.

Der gefundene Orientierungswert für die Dehnungsrate, der bei keiner Asphaltvariante in der dynamischen Prüfung überschritten wurde, zeigt die grundsätzliche Eignung der eingesetzten Asphalte für hoch belastete Straßen. Auf Grund der vergleichbaren Zusammensetzungen war keine große Spreizung der Prüfergebnisse feststellbar.

Mit den in Kapitel 5 durchgeführten Untersuchungen konnte festgestellt werden, daß der dynamische Druck-Schwell-Versuch in der Lage ist, Asphalte, die in ihrer Zusammensetzung, ihrem Bindemittelgehalt oder der erreichten Verdichtung ungünstigen Randbedingungen entsprechen, als Asphalte mit verringerter Wärmestandfestigkeit zu identifizieren.

Für die Optimierung von Asphalten im Labor ist der dynamische Druck-Schwell-Versuch daher als besonders geeignet zu bewerten.

Die hohe Wärmestandfestigkeit der im Labor untersuchten Asphalte konnte auch bei der Untersuchung der Spurrinnentiefen der Deckenbaulose, die mit so konzipierten Asphalten hergestellt sind, bestätigt werden.

Nach Liegezeiten der Deckenbaulose von zwei bis neun Jahren und Verkehrsbelastungszahlen von 1100 bis nahezu 9000 wurden für die Deckschichten aus Splittmastixasphalt 0/11S keine Spurtiefen über 10 mm festgestellt.

Eine Reihung der Deckenbaulose hinsichtlich ihrer Standfestigkeit konnte nur über die Definition einer Verformungsrate (in situ) vorgenommen werden.

Mit dieser Verformungsrate war es dann aber möglich einen Orientierungswert zur Beurteilung einer ausreichenden Standfestigkeit von Splittmastixasphalte zu bestimmen.

Vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit untersuchten Splittmastixasphalte und deren Bewährung auf Streckenabschnitten von Bundesautobahnen kann der in Kapitel 4 dargestellte und in Kapitel 7 bestätigte Orientierungswert der Dehnungsrate zur Beurteilung der Wärmestandfestigkeit herangezogen werden.

Die gefundenen Zusammensetzungen der Splittmastixasphalte sind daher als günstig zu bewerten.

Die Beurteilung der Standfestigkeit von Asphalten ist damit schon in der Phase der Konzeptionierung im Labor möglich, und sollte im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen regelmäßig durchgeführt werden, um schon im Vorfeld einer Baumaßnahme mögliche Verformungsschäden abzuwehren.

Um den ermittelten Orientierungswert als Anforderungswert in die Praxis umsetzen zu können, ist es allerdings zwingend erforderlich

- ♦ den Bewertungshintergrund zu erweitern und
- ♦ die Präzision des Prüfverfahrens zu ermitteln.

Zur Schaffung des Bewertungshintergrundes empfiehlt es sich, bei Baumaßnahmen an Strecken mit einer hohen Verkehrsbelastung einerseits auch im Rahmen von Kontrollprüfungen dynamische Druck-Schwell-Versuche durchzuführen und andererseits eine Beobachtung der Strecken mit der Erfassung der in diesem Bericht als Kriterien herangezogenen Kennwerte (Verkehrsbelastung, Entwicklung der Spurrinnentiefe, asphaltechnologische Kennwerte) durchzuführen.

Bei der Schaffung des Bewertungshintergrundes müssen auch Strecken einbezogen werden, die sich in der Praxis nicht bewährt haben. Nur hierdurch wird es möglich eine Abgrenzung zwischen günstigen und ungünstigen Asphaltvarianten zu finden. Auf Grund der durchgeführten Untersuchungen sind für diese Abgrenzung Schadensfälle im Druck-Schwell-Versuch näher zu untersuchen.

Die Kenntnis der Präzision des Verfahrens ist unabdingbar, da in verschiedenen Prüfstellen der dynamische Druck-Schwell-Versuch durchgeführt wird, Aussagen zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse z.Zt. aber nicht möglich sind. Nur bei Kenntnis der Präzision können Anforderungswerte formuliert werden.

9 Zusammenfassung

Im Asphaltstraßenbau finden performanceorientierte Prüfverfahren immer mehr Beachtung. Im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen fand in der Vergangenheit der dynamische Druck-Schwell-Versuch (DSV) zur Beurteilung der Wärmestandfestigkeit von Asphalt vermehrt Anwendung, ohne daß für diesen Versuch ein Bewertungshintergrund besteht oder Anforderungen an die Prüfergebnisse gestellt wurden.

Ziel der Forschungsarbeit zur Bewährung speziell konzipierter Asphalte in der Praxis ist es, am Beispiel von Splittmastixasphalt 0/11S zu untersuchen, ob sich ein Zusammenhang zwischen der im DSV am Marshallprobekörper ermittelten Dehnungsrate und der sich bei Straßen, deren Deckschicht aus über den DSV konzipierten Asphalt besteht, unter Praxisbedingungen einstellenden Verformungsrate herstellen läßt.

Zur Ermittlung dieses Zusammenhangs wurden zunächst die vorliegenden Prüfergebnisse aus dem DSV im Rahmen der erweiterten Eignungsprüfungen ausgewertet.

Diese Auswertung ergab für das Streuverhalten der Dehnungsrate ein stochastisches Verhalten in Abhängigkeit von Eigenschaften der geprüften Marshallprobekörper wie Korngrößenverteilung, Bindemittelart, Hohlraumgehalt, Ausfüllungsgrad, etc.

Aus allen zu Verfügung stehenden Datensätzen konnte ein Anhaltswert von $4,2 \text{ } \mu\text{m}/10^4 \text{ Lastwechsel}$ ($= 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ mm/Lastwechsel}$) abgeleitet werden.

In weiterführenden Laboruntersuchungen wurden im DSV Proben untersucht, die ausgehend von einer optimierten Eignungsprüfung in ihrer Korngrößenverteilung, ihrem Bindemittelgehalt und Verdichtungsgrad im entsprechend zulässigen Toleranzbereich der ZTV bit-StB 84/90 variiert wurden.

Die Auswertung der Versuchsdaten ergab für die untersuchten Splittmastixasphalte eine günstige Wärmestandfestigkeit bei sandreicheren und bindemittelärmeren Zusammensetzungen. Bei normverdichteten Probekörpern konnte eine gute Wärmestandfestigkeit ermittelt werden. Ungünstig wirken sich dagegen sehr splittreiche Korngrößenverteilungen, hohe Bindemittelgehalte und zu gering verdichtete Proben auf die Wärmestandfestigkeit aus.

Die Ergebnisse aus dieser Untersuchung bestätigten den zuvor genannten Anhaltswert, unterhalb dessen sich ein Mischgut im Labor als standfest identifizieren läßt.

Im nächsten Schritt zum Erreichen des Forschungszieles wurden im Dienstbereich der Autobahndirektion Nordbayern die Deckenbaulose auf Bundesautobahnen zusammengestellt, bei welchen im Rahmen der erweiterten Eignungsprüfung die Ergebnisse aus der dynamische

Prüfungen im DSV vorlagen.

Insgesamt konnten 47 Deckenbaulose, bei denen Eignungs- und Kontrollprüfungen vorlagen, zusammengestellt werden.

§

Diese Deckenbaulose wurden dann hinsichtlich des in der Deckschicht eingesetzten Asphaltes (Zusammensetzung, Bindemittelart, etc.), des Verkehrsaufkommens, des Aufbaus gemäß RStO 86/89, der klimatischen Verhältnisse und des Oberflächenzustands untersucht, eingeordnet und beurteilt.

Basierend auf einer Zustandserfassung im Herbst 1996 wurden für alle 47 Deckenbaulose an Hand der gemessenen Spurtiefen und den aus den Daten der Bundesverkehrszählung aus den Jahren 1986 und 1993 für die Baulose seit Verkehrsübergabe ermittelten Überrollungen des Schwerverkehrs Verformungsraten berechnet.

Ausgehend von dieser Verformungsrate wurden 20 Strecken für eine eingehendere Untersuchung ausgewählt.

18 dieser Strecken waren mit einer Deckschicht aus Splittmastixasphalt 0/11S, eine mit Splittmastixasphalt 0/8S und eine mit Asphaltbeton 0/11S ausgeführt. Die Baulose, die keine Deckschicht aus Splittmastixasphalt 0/11S aufwiesen dienten nur zu Vergleichszwecken.

Für die genauere Untersuchung der Spurtiefen an den einzelnen Deckenbaulosen wurde eine exakte Aufnahme des Querprofils mit einem Laser-Querprofilaufnahmegerät und Bohrkernentnahmen aus dem rechten Rollspurbereich des rechten Fahrstreifens vorgenommen.

Die Laboruntersuchungen der Bohrkern hatten zum Ziel, die Art der Oberflächenverformung (Nachverdichtung / Materialtransport) und die beteiligten Schichten, die Asphaltzusammensetzungen und mögliche Veränderungen zum Einbauzustand der Deckschichten zu ermitteln.

Für alle im Labor an Bohrkernen untersuchten Deckenbaulose konnten die gemessenen Spurtiefen auf die Deckschicht zurückgeführt werden.

✓

Mit den exakt ermittelten Oberflächenverformungen der Deckschichten und den zuvor schon errechneten Überrollungen aus dem Schwerverkehr konnte für diese Schichten die effektive Verformungsrate ermittelt werden.

Auf Grund der nachgewiesenen Vergleichbarkeit der im Labor mit dem Druck-Schwell-Versuch geprüften Asphalte und den auf den Baulosen eingebauten, war eine korrelative Betrachtung zwischen der im DSV festgestellten Dehnungsrate und der berechneten Verformungsrate für die Deckschichten der Deckenbaulose möglich.

Die statistische Auswertung der aus dem Labor und der Praxis gewonnen Datensätze erbrachte keinen funktionalen Zusammenhang zwischen der Dehnungsrate im DSV und der Verformungsrate in situ. Dies ist darauf zurückzuführen, daß in allen Baulosen vergleichbares Mischgut mit einer sehr hohen Standfestigkeit eingebaut worden war.

Für die zwanzig im Labor untersuchten Deckenbaulose wurde dann eine theoretische Spurrinnentiefe in einem Gebrauchszeitraum von 10 Jahren berechnet.

Durch den Vergleich der theoretischen Spurrinnentiefe mit einem in der Praxis üblichen Warnwert, konnte ein Richtwert für die Verformungsrate der untersuchten Deckschichten in der Praxis abgeleitet werden.

An Hand des Orientierungswertes für die Dehnungsrate im DSV und des Richtwertes für die Verformungsrate der Deckschichten in situ ließ sich ein Bereich abgrenzen, in welchen sich standfestes Mischgut einordnen läßt.

Eine Verifizierung der gefunden Bereichsgrenzen konnte auf Grundlage des vorliegenden Datenkollektives nicht vorgenommen werden, da die ausgewerteten Daten keine ausreichende Spreizung aufwiesen.

Weiteren Forschungsarbeiten ist es daher vorbehalten durch die Untersuchung von Deckschichten mit deutlich höheren Spurrinnentiefen die festgestellten Orientierungswerte für die Verformungsrate in situ und die sich aus den dynamischen Prüfungen solcher in der Praxis nicht bewährten Asphalte ergebenden Dehnungsraten zu überprüfen.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der dynamische Druck-Schwell-Versuch im Rahmen der erweiterten Eignungsprüfung zur Optimierung der Mischgutzusammensetzung im Labor eingesetzt werden sollte. Die Festlegung von Anforderungswerten ist allerdings noch nicht möglich, da u.a. die in die Untersuchungen einbezogenen Baulose als insgesamt sehr standfest bezeichnet werden können, und somit keine ausreichende Spreizung der Ergebnisse vorlag.



München, den 29.05.98

AOR Dr. - Ing. Th. Wörner
Projektleiter

10 Literaturverzeichnis

- [1] NN: Seminar für Straßenwesen der TU Berlin. Straße und Autobahn, April 1996, S. 213 ff.
- [2] Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau (TPA-StB), Teil 2: Spurrinnenversuch; Ausgabe 1997, FGSV Köln
- [3] Merkblatt über die mechanischen Eigenschaften von Asphalt; Ausgabe 1985, FGSV Köln
- [4] Kast O., v.d. Weppen W.: Beurteilung der Standfestigkeit von Asphaltbeton-Deckschichten mit Hilfe des Spurbildungstestes. Bitumen 6, 1978
- [5] Domnick, R.; Beecken, G.: Spurbildungsversuch - Vergleichende Untersuchungen mit dem Gummi- und Stahlrad. Bitumen 3, 1990.
- [6] Forschungsbericht FE 07.142 G 88 E: Festlegung von einheitlichen Prüf- und Auswertekriterien im dynamischen Druck-Schwell-Versuch im Hinblick auf die Entwicklung eines standardisierten dynamischen Prüfgerätes. Band 1 - 6, Juli 1992.
- [7] Neumann, U.: Auswirkungen unterschiedlicher Bereifungen von Nutzfahrzeugen auf die Spurrinnenbildung von bituminösen Decken. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der TU München. Heft 63, 1991.
- [8] Eisenmann, J.; Hilmer, A.: Versuche zur Quantifizierung der Spurrinnenbildung. Straße und Autobahn, Heft 4, 1982.
- [9] Hürtgen, H.: Zur Verwendung von Kriechversuchen für die Bestimmung der bleibenden Verformung von Asphalt. Bitumen 2, 1981.
- [10] DIN 55 946, Teil 1, 1983. Beuth Verlag, Berlin.
- [11] Reinsch, D.: Natursteinkunde. Enke Verlag Stuttgart, 1991.
- [12] Krebs, H. G.: Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern. Teil I - Literaturlauswertung, Arand, W. und Dengiz, A.. FSS, Heft 334, 1981.
- [13] Krebs, H. G.: Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern. Teil II - Versuche, Jäger, W.. FSS, Heft 334, 1981.
- [14] Reiner, M.: Rheologie in elementarer Darstellung. Hanser Verlag München, 1969.
- [15] Arand, W.: Zur Theorie des Verformungsverhaltens von Asphalt. Bitumen-Teere-Asphalte-Peche, 26, 1975.
- [16] Kraß, K.: Kriechuntersuchungen an zylindrischen Asphaltprobekörpern. Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 5, 1971.
- [17] Tiniç, A. C.: Näherungsverfahren zur Berechnung des zeit- und temperaturabhängigen Verhaltens eines Gussasphalts unter einaxialer Beanspruchung. Dissertation, ETH Zürich, 1978.

- [18] Schmalz, M.: Eigenschaften von Bitumen und polymermodifizierten Bitumen bei tiefen Temperaturen. Dissertation, TU München, 1995.
- [19] Hürtgen, H.: Zum viskoelastischen und viskoplastischen Verhalten von Asphalt. FSS, Heft 361, 1982.
- [20] Eisenmann, J.; Birmann, D.; Hilmer, A.: Auswirkung der Nutzfahrzeugkonstruktion auf die Straßenbeanspruchung - straßenseitige Forschungsergebnisse. Straße und Autobahn, Heft 6, 1986.
- [21] Hürtgen, H.: Dauerbelastungsversuche an Modellstraßen mit Hilfe von Impulsgebern. FSS, Heft 581, 1990.
- [22] Beckedahl, H.: Zur Querunebenheitsentwicklung von Asphaltstraßen. Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, Universität Hannover, Heft 7, 1987.
- [23] Loizos, A.: Zur theoretischen Ermittlung der Spurrinnenbildung flexibler Fahrbahnbefestigungen. Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau, Universität Hannover, Heft 6, 1987.
- [24] Eisenmann, J.; Neumann, U.: Untersuchung des Einflusses der Brechkornzusätze in bituminösen Tragschichten auf die Spurrinnenbildung. FSS, Heft 577, 1990.
- [25] Buseck, H.; Hürtgen, H.: Bemerkungen zur Straßenbeanspruchung bei gemischtem Verkehr und zur Bestimmung eines Achslastfaktors. Straße und Tiefbau, 34, Heft 10, 1980.
- [26] ORIGINTM 4.0, Technical Graphics and Data Analysis in WINDOW^{STM}. Ó 1995 MICROCALTM Software, Inc.. Software und User's Manual.
- [27] SPSS^Ò Base 7.5 for WINDOWS^Ò, Release 7.5. Ó 1997 SPSS Inc.. Software und User's Guide.
- [28] Arbeitsanleitung für die Ansprache des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme mit Hilfe des einaxialen Druckschwellversuchs. FGSV, AK 7.3.2 Entwicklung von Prüfverfahren, 1994.
- [29] Hiersche, E.-U.; Weiland, N.: Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern, III. Teil. FSS, Heft 499, 1987.
- [30] Buseck, H.; Hürtgen, H.: Über den Mechanismus der Entstehung bleibender Verformung an flexiblen Fahrbahnbefestigungen. Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover, Heft 5, 1987.
- [31] Peffekoven, W.: Standfeste bituminöse Beläge. Bitumen 3, 1980.
- [32] Technische Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau, Teil: Einaxialer

- Druckschwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme. FGSV Köln, 1997.
- [33] Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 1 und Teil 2. FGSV 926/1, Köln, 1986.
- [34] Bleymüller, J.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. Vahlen, 6. Auflage, München, 1989.
- [35] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Springer, 7. Auflage, 1992.
- [36] DIN 51 220: Werkstoffprüfmaschinen, Allgemeine Richtlinien, Oktober 1976. Beuth Verlag, Berlin.
- [37] DIN 51 223: Druckprüfmaschinen, Allgemeine Anforderungen, Entwurf Dezember 1981. Beuth Verlag, Berlin.
- [38] Krebs, H.G.; Böllinger, G.: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper. FSS, Heft 347, 1981.
- [39] Pohlmann, P.: Simulation von Temperaturverteilungen und thermisch induzierten Zugspannungen in Asphaltstraßen. Schriftenreihe Institut für Straßenwesen, TU Braunschweig, Heft 9, 1989.
- [40] Arand, W.; v.d. Decken, S.: Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung; Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau - behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes. AiF- Forschungsbericht Nr. Q27, 1996.
- [41] FGSV-Arbeitspapier Nr. 25/B 2.1: Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt B 2.1, Repräsentative Temperaturverteilungen in Asphaltbefestigungen. Köln, 1990.
- [42] Arand, W.: Asphaltstraßen für Schwerverkehr nach neuesten Erkenntnissen. Straße und Autobahn, 11/94.
- [43] Mais, R.; Siebel, P.; Gnad, H.: Zur Beanspruchung von bituminösen Fahrbahnbefestigungen. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, BMV, Abt. Straßenbau, Heft 138, Bonn 1973.
- [44] Eisenmann, J.; Hilmer, A.: Einfluß der Radlasten und Reifeninnendrucke auf die Spurrinnenbildung bei Asphaltstraßen - Experimentelle und theoretische Untersuchungen -. Vergleich von Einzelbereifung und Zwillingsbereifung bezüglich ihres Einflusses auf die Spurrinnenbildung. FSS, Heft 463, 1986.
- [45] von Becker, P.: Auswirkungen des Schwerverkehrs auf die Straßenbefestigung. Bitumen 4, 1989.
- [46] Eisenmann, J.: Beanspruchung von bituminösen Straßendecken unter besonderer

- Berücksichtigung des Zustandes Sommer. Straße und Autobahn 5/79.
- [47] Eisenmann, J.: Dynamische Radlastschwankungen - Straßenbeanspruchung. Straße und Autobahn 4/75.
- [48] Eisenmann, J.; Neumann, U.: Auswirkung von Verbundstörungen auf die Spurrinnenbildung. FSS, Heft 677, 1994.
- [49] Lenker, S.: Beanspruchung von bituminösen Straßenbefestigungen durch horizontale und vertikale Verkehrsbelastungen. FSS, Heft 236, 1977.
- [50] Lücke, H.; Gerlach, A.; David, M.: Gesamtauswertung der Untersuchungen auf der Versuchsstrecke Hilpoltstein. FSS, Heft 306, 1980.
- [51] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RStO 86. Ausgabe 86, Ergänzte Fassung 1989. (incl. Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 32/1996 - Betr.: Frosteinwirkungszonen).
- [52] Hiersche, E.-U.: Trennung der Volumenänderungen und Gestaltsänderungen von flexiblen Belägen und Prognostizierung ihrer Trends aus Messreihen. Schlußbericht zum Forschungsauftrag FE 04.089 G80F
- [53] Huschek, S.: Die Beurteilung des Verformungswiderstandes bituminöser Mischungen durch den Kriechversuch. Bitumen 2/1980.
- [54] Empfehlungen für die Zusammensetzung, die Herstellung und den Einbau von Splittmastixasphalt. Straße und Autobahn, Heft 2, 1996.
- [55] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/1996. Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 18.01.1996.
- [56] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken auf Asphalt, ZTV bit-StB 84, Ausgabe 1984, Fassung 1990. Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau.
- [57] Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt. Ausgabe 1991, FGSV, Köln.
- [58] Begriffsbestimmungen, Teil Straßenbautechnik, Ausgabe 1990 und Teil Straßenplanung und Straßenverkehrstechnik, Ausgabe 1989. FGSV, Köln.