STUVA e.V.	12650 N / 1
Name der Forschungsstelle(n)	AiF-Vorhaben-Nr. / GAG
	01.10.02 bis 31.12.02
	Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum : 01.10.02 bis 31.12.02

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die

AiF
Otto von Guericke

geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema : Vergleichende Untersuchung von Asphaltkonstruktionen für schwerste Beanspruchung

Köln, 30.6.2003
Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

STUVA
Studiengesellschaft für
unterirdische Verkehrs-
anlagen e.V.

Mathias-Brüggen-Str. 41
50827 Köln
0252-Schlussbericht-Endfassung

isac
Institut für Straßenwesen Aachen
RWTH Aachen

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen

AiF Forschungsvorhaben

Nr.: 12650 N/1

Vergleichende Untersuchungen von Asphaltkonstruktionen für schwerste Beanspruchung

Juni 2003

Stand 2003-08-14

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG 1

2 AUSWAHL DER ASPHALTKONSTRUKTIONEN 2

3 EIGNUNGSPRÜFUNGEN DER AUSGEWÄHLTEN ASPHALTMISCHGUTARTEN 4

4 VERSUCHSEINRICHTUNG 5

4.1 Allgemeines 5

4.2 Rundlaufanlage 13

4.3 Temperierung 18

4.4 Stahlkonstruktion zur Aufnahme des Asphaltes 19

4.5 Messtechnik 22

5 HERSTELLUNG DER FAHRBAHNFELDER 26

5.1 Allgemeines 26

5.2 Vorbereitung der vier Einbaubahnen 26

5.3 Asphalteinbau und begleitende Kontrollprüfungen 27

5.3.1 Einbau der Tragschichten 27

5.3.2 Einbau der Binderschichten 28

5.3.3 Höhenausgleich der Binder- und Einbau der Deckschichten 30

5.4 Einbau der Testfelder in die Rundlaufprüfanlage 33

6 VERSUCHE AUF DER RUNDLAUFPRÜFANLAGE 36

6.1 Versuchsparameter 36

6.1.1 Temperatur 36

6.1.2 Achslast 40

6.1.3 Reifeninnendruck 42

6.1.4 Geschwindigkeit 43

6.1.5 Grenzwert für Verformung der Fahrbahnoberfläche 44

6.1.6 Fahrbahnüberrollungen 45

6.2 Versuchsdurchführung 47

7 VERSUCHSBEGLEITENDE MESSUNGEN 49

7.1 Temperatur, Geschwindigkeit und Überrollung 50

7.2 Geometrische Aufnahme der Oberfläche im Querprofil 55
7.3 Nivellement der Versuchsplatten 57
7.4 Nivellement des Längsprofil 57
8 ZUSTANDSERFASSUNG DER FAHRBAHNFELDER NACH VERSUCHSENDE 58
8.1 Allgemeines 58
8.2 Fertige Schicht 59
8.3 Mischgutuntersuchung der fertigen Schicht 60
9 BEWERTUNG DER PRÜFERGEBNISSE 61
9.1 Verformung der Oberfläche in den Querprofilen 61
9.2 Verformungen der Spurrinne im Längsprofil 65
9.3 Haftverbund 70
9.4 Verformungen in den Schichtgrenzen im Querprofil Mitte 72
9.5 Risse 76
9.6 Mischgutuntersuchung 76
9.7 Ergebnis 80
10 ZUSAMMENFASSENDE SCHLUSSFOLGERUNGEN 84
11 LITERATUR 85
ANHANG

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Auf deutschen Autobahnen werden die höchsten jährlichen Fahrleistungen Europas erreicht (Tabelle 3, [1]). Der Güterverkehr belastet die Straßen aufgrund seiner hohen Achslasten überproportional [2, 3, 4, 5]. Beispielsweise entspricht die Straßenbeanspruchung von nur einer 10 t-LKW-Achse etwa 160.000 PKW-Achsen (0,5 t pro Achse) [49]. In Zukunft wird der Güterverkehr noch weiter ansteigen.

Für Deutschland wird mit der Zunahme der Transportleistung im Güterverkehr um etwa 30% ein Anstieg von derzeit ca. 250 Mrd. t km auf etwa 325 Mrd. t km im Jahr 2010 prognostiziert [6]. In anderen Untersuchungen wird für die nächsten 15 Jahre sogar ein Zuwachs des Verkehrsaufkommens im Güterverkehr von 60% vorhergesagt [7]. Diese Güterverkehrssteigerung wird deshalb in Zukunft zu noch höheren Belastungen der Straßenbeläge führen [8, 9]. Niedrige Fahrgeschwindigkeiten der LKW, z.B. auf Kriechspuren und infolge zunehmender Staus, insbesondere in Kombination mit hohen Temperaturen im Sommer, führen zu zusätzlichen Beanspruchungen der Asphaltkonstruktionen [10 bis 12]. Diese hohen Beanspruchungen führen verstärkt zu Spurrinnen auf der Fahrbahnoberfläche [13].

Als weitere Ursachen für verstärkte Spurrinnenbildung sind jedoch insbesondere z.B. Materialschwankungen beim Mischgut, die Art der Bindemittel, Einbaubedingungen etc. zu nennen [14, 15, 16]. Durch Spurrinnen wird die Verkehrssicherheit durch zunehmende Aquaplaninggefahr und die Beeinträchtigung der Lenkbarkeit von Fahrzeugen gefährdet [17, 18]. Tiefe Spurrinnen müssen deshalb beseitigt werden. Aufgrund der zu erwartenden Belastungserhöhung auf Fernstraßen ist folglich mit kürzeren Erneuerungszyklen der Fahrbahndecken als bisher zu rechnen.

Ein systematischer Vergleich von verschiedenen Asphaltkonstruktionen für schwerste Belastungen fehlt, um optimale Asphaltbeläge einbauen zu können. Dies ist auch unter dem Aspekt zu beachten, dass in den neuen Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) zur Bestimmung der bemessungsrelevanten Beanspruchung die zugrunde zu legende Nutzungsdauer für den Regelfall auf 30 Jahre angehoben wurde [19]. Im Vergleich hierzu beträgt in der derzeit gültigen RStO 86 der Nutzungszeitraum in der Regel nur 20 Jahre [20].

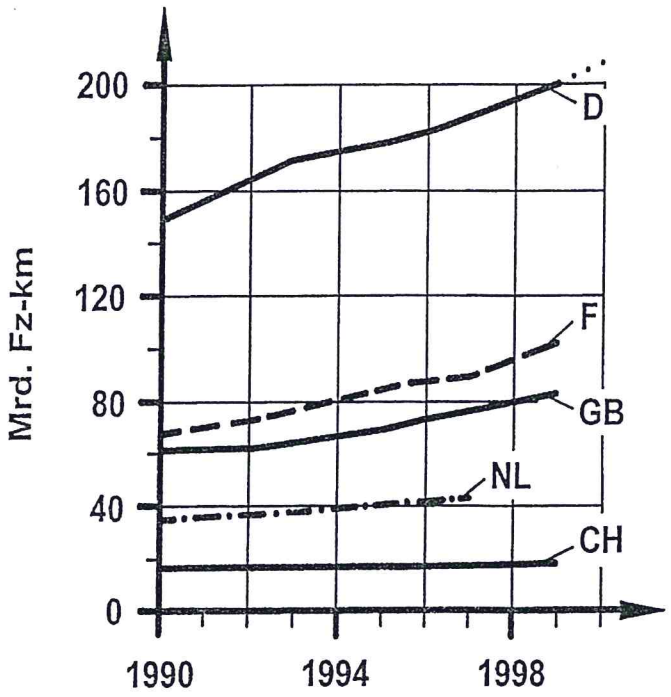


Abbildung 1: Jährliche Fahrleistungen auf Autobahnen [1]

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es daher, ausgewählte Asphaltkonstruktionen mit unterschiedlichen Verformungseigenschaften unter gleichen, weitestgehend praxisnahen Einbau- und Belastungsbedingungen zu untersuchen und zu vergleichen. Damit sollen Erkenntnisse erarbeitet werden, mit deren Hilfe die Funktionsfähigkeit von Asphaltkonstruktionen unter den in Zukunft zu erwartenden Beanspruchungen verbessert werden können.

Die Zusammensetzung der hier zu prüfenden Asphaltkonstruktionen wurde auf Basis von Eignungsprüfungen im Labor und zusätzlichen Untersuchungen der Verformungsbeständigkeit durch das Institut für Straßenwesen (*isac)* der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen bestimmt. Die praxisorientierten Belastungsversuche wurden auf der Rundlaufprüfanlage der STUVA in Köln durchgeführt.

2 Auswahl der Asphaltkonstruktionen

Die im folgenden aufgeführten Asphaltkonstruktionen wurden zum einen gewählt, da die einzelnen Gemische hinsichtlich ihrer Zusammensetzungen unterschiedliche Steifigkeiten (unterschiedliche Korngrößen, Sieblinien, Bindemittelgehalt und -sorte) aufweisen, zum anderen soll damit auch versucht werden, die Funktionsfähigkeit

von Asphaltkonstruktionen unter den in Zukunft zu erwartenden Beanspruchungen zu verbessern.

Bei den ausgewählten Mischgutarten und -sorten handelt es sich bei den Deckschichten um einen Gussasphalt 0/11 S und einen Splittmastixasphalt 0/11 S sowie 0/8 S. Als Binderschicht kamen die Asphaltbinder 0/16 S und 0/22 S sowie als Asphalttragschicht 0/22 CS zum Einsatz. Des Weiteren wurde beim Splittmastixasphalt 0/11 S und beim Asphaltbinder das eingesetzte Bindemittel variiert. Alle Mischgutarten und -sorten sowie die jeweils verwendeten Bindemittel sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Mischgutart	Mischgutsorte	Bindemittel/Bitumen
Gussasphalt	0/11 S	20/30
Splittmastixasphalt	0/8 S	PmB 45 A
	0/11 S	50/70
		PmB 45 A
Asphaltbinder	0/16 S	30/45
		PmB 45 A
	0/22 S	30/45
		PmB 45 A
Asphalttragschicht	0/22 CS	30/45

Tabelle 1: Zusammenstellung der Mischgutarten und ásorten sowie der jeweils verwendeten Bindemittel

Als Gesteine wurden ausschließlich Basalt und Grauwacke verwendet, wobei der Basalt bei der Variante des Gussasphaltes und bei allen Varianten des Asphaltbinders und die Grauwacke in der Asphalttragschicht und den unterschiedlichen Splittmastixasphaltvarianten zum Einsatz kam.

Durch die Variation von vorhandenem Größtkorn und eingesetztem Bindemittel, ist es möglich zum einen den Einfluss der Sieblinie und zum anderen den Einfluss des Bindemittels zu untersuchen bzw. nach Abschluss der Versuche auch zu beurteilen.

Aufgrund der Abmessungen der Rundlaufanlage wurden aus den gewählten Mischgütern 16 unterschiedliche Asphaltkonstruktionen zusammengestellt (siehe auch Tabelle 2, die im folgenden mit V01 bis V16 bezeichnet werden.

Bezeichnung	Varianten															
	V03	V08	V10	V13	V07	V04	V14	V09	V15	V12	V02	V05	V11	V16	V06	V01
Deckschicht 4 cm	GA 0/11 S, B 20/30				SMA 0/11 S, B 50/70				SMA 0/11 S, PmB 45				SMA 0/8 S, PmB 45			
	Basalt				Grauwacke				Grauwacke				Grauwacke			
					Einfluss Bitumen											
									Einfluss Steifheit							
Binderschicht 8 cm	Basalt				Basalt				Basalt				Basalt			
	Bi 0/22 S, B 30/45	Bi 0/22 S, PmB 45	Bi 0/16 S, PmB 45	Bi 0/16 S, B 30/45	Bi 0/22 S, B 30/45	Bi 0/22 S, PmB 45	Bi 0/16 S, PmB 45	Bi 0/16 S, B 30/45	Bi 0/22 S, B 30/45	Bi 0/22 S, PmB 45	Bi 0/16 S, PmB 45	Bi 0/16 S, B 30/45	Bi 0/22 S, B 30/45	Bi 0/22 S, PmB 45	Bi 0/16 S, PmB 45	Bi 0/16 S, B 30/45
	Einfluss Bitumen				Einfluss Bitumen				Einfluss Bitumen				Einfluss Bitumen			
			Einfluss Bitumen				Einfluss Bitumen				Einfluss Bitumen				Einfluss Bitumen	
		Einfluss Steifheit				Einfluss Steifheit				Einfluss Steifheit				Einfluss Steifheit		
	Einfluss			Steifheit	Einfluss			Steifheit	Einfluss			Steifheit	Einfluss			Steifheit
ATS 8 cm	ATS 0/22 CS, B 30/45				ATS 0/22 CS, B 30/45				ATS 0/22 CS, B 30/45				ATS 0/22 CS, B 30/45			
	Grauwacke				Grauwacke				Grauwacke				Grauwacke			

Tabelle 2: Darstellung der unterschiedlichen Asphaltkonstruktionen

Die eingebauten Schichtdicken der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht entsprechen mit 4 cm für die Deck- und 8 cm für die Binderschicht den Anforderungen den RStO 86/89 [51] für die Bauklasse SV. Die Tragschicht ist mit den eingebauten 8 cm allerdings zu gering für die Bauklasse SV bei der Regelbauweise Bituminöse Tragschicht auf Frostschutzschicht dimensioniert, nach RStO 86/89 wäre eine Schichtdicke von etwa 22 cm erforderlich. Die hierbei eingebauten Schichtdicken (Betrachtung des Gesamtpaketes aus Trag-, Binder- und Deckschicht) ist nach RStO 86/89 ausreichend für eine Bauklasse III bei den Bauweisen Bituminöse Tragschicht und Schottertragschicht/Kiestragschicht mit $E_{v2} \geq 180$ MN/m² auf Frostschutzschicht und Bituminöse Tragschicht und hydraulisch gebundene Tragschicht auf Frostschutzschicht.

3 Eignungsprüfungen der ausgewählten Asphaltmischgutarten

Die Eignungsprüfungen der ausgewählten Mischgüter (s. Tabelle 2) wurden gemäß der durch die ZTVT-StB 95/98 [52] für Tragschichten und die ZTV Asphalt-StB 94/98 [53] für Binder- und Deckschichten vorgegebenen Grenzen und Richtwerte vom *isac* mit den im Kapitel 2 erwähnten Gesteinen und Bindemitteln nach dem Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt [54] erstellt und durch den Betreuungsausschuss als auch durch die Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirates genehmigt.

Die Einzelheiten zu den Ergebnissen der Eignungsprüfungen der einzelnen Mischgüter sind im Anhang 1 dargestellt.

Weiterhin wurden im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen gemäß der ZTV Asphalt-StB an den Binder- und Deckschichtvarianten Spurbildungsversuche und

statische Druckschwell-Versuche durchgeführt. Die einaxialen Druck-Schwellversuche wurden zusätzlich an Proben des Asphalttragschichtmischgutes durchgeführt. Durch den Spurbildungsversuch wird die Spurrinnentiefe als Kenngröße für den Widerstand gegen Verformungen durch wiederholte Belastungen bestimmt und durch den Einaxialen Druckschwellversuch wird das Verformungsverhalten von Asphalt bei höheren Temperaturen bewertet.

Diese beiden Untersuchungen wurden gewählt, weil die Asphaltkonstruktionen bzw. die einzelnen Schichten im Rahmen dieses Projektes durch den Einsatz in der Rundlaufanlage überwiegend hinsichtlich ihrer Verformungseigenschaften bei hohen Temperaturen und dynamischen Lasten geprüft werden.

Die Spurbildungsversuche wurden für die Binderschichten (0/22 S und 0/16 S) gemäß der áTP A-StB Teil: Spurbildungsversuch á Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad" [55] bei 50°C mit dem Stahlrad durchgeführt. Für die Deckschichten (Splittmastixasphalt und Gussasphalt) wurden die Versuchsbedingungen abweichend von der TP A-StB Teil: Spurbildungsversuch dahingehend modifiziert, dass für Splittmastixasphalt eine Prüftemperatur von 60°C und für Gussasphalt von 50°C sowie als Temperiermedium nicht das Wasserbad sondern ein Luftbad und ebenfalls für beide Mischgüter anstelle des Stahlrades das Gummirad verwendet wurde.

Die statischen Druckschwellversuche wurden im Auftrag des *isac* durch das Institut für Straßen und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe gemäß der áTP A-StB Teil: Einaxialer Druckschwellversuch á Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme"[56] an allen Mischgütern durchgeführt.

Die Ergebnisse der erweiterten Eignungsprüfungen sind im Anhang 4 aufgeführt.

4 Versuchseinrichtung

4.1 Allgemeines

Folgende Anlagen zur Prüfung von Asphaltkonstruktionen können prinzipiell unterschieden werden (Tabelle 3):

a) Versuchsstrecken
   Versuchsstrecken sind Straßenabschnitte einer öffentlichen Straße, die vom unbeeinflussten Verkehr befahren werden. Meistens werden hierfür Autobahnen mit einem hohen Anteil an Schwerverkehr gewählt. Zur Beurteilung der Beanspruchung ist die kontinuierliche Aufzeichnung der Achslasten (z.B. mit dynamischen Achslastwaagen) und der Umweltbedingungen (Temperatur, Nie-

derschlag usw.) erforderlich. Nachteilig ist, dass weder Verkehrsbelastung noch Umweltbedingungen beeinflussbar sind, so dass kein zeitraffender Effekt eingestellt werden kann. Die Prüfdauer kann deshalb zehn Jahre und länger dauern, bis sichtbare Schäden auftreten [21].

b) Versuchsstraßen

Versuchsstraßen werden nicht vom öffentlichen Verkehr beansprucht. Sie sind meist schleifenförmig angelegt und verfügen über Fahrbahnlängen von bis zu ca. 1.500 m mit einer Vielzahl von Testfeldern. Die Versuchsstraßen sind den reellen Umwelteinflüssen ausgesetzt, können jedoch im Gegensatz zu öffentlichen Straßen mit einer gezielten Verkehrsbelastung beansprucht werden. Aufgrund der hohen Kosten für den Bau und Betrieb von Versuchsstraßen werden diese nur selten gebaut. Die bekannteste Versuchsstraße befindet sich in der Nähe von Ottawa, Illinois, USA, auf der der AASHO-Straßentest durchgeführt wurde, der die Verhaltensbeschreibung von Straßenbefestigungen zum Ziel hatte [2].

c) Linearmaschinen

Bei einer Linearmaschine wird das Belastungsrad unmittelbar nach Überrollen des Versuchsfeldes abgebremst und in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt (Abbildung 2).

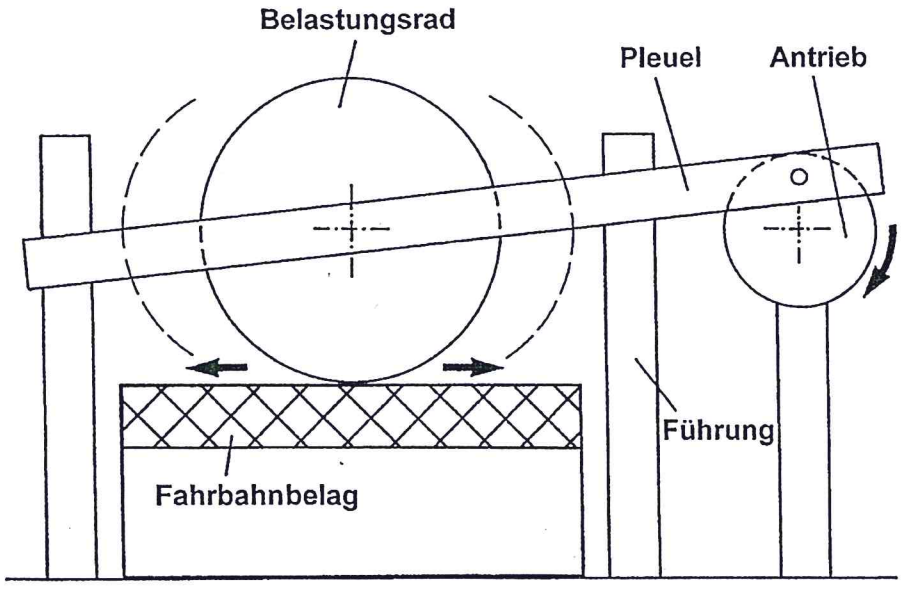


Abbildung 2: Prinzip einer Linearmaschine

Aufgrund des ständigen Richtungswechsels des Belastungsrades sind mit solchen Prüfeinrichtungen vergleichsweise große Versuchszeiten erforderlich, um Ermüdungserscheinungen des Asphaltes zu testen. Je nach Radlast sind teilweise erhebliche Massen immer wieder zu beschleunigen, was einen relativ hohen Energieaufwand erfordert [26]. Günstiger sind in diesem Zusammenhang kreisringförmige Prüfanlagen, die ringförmig angeordnete Versuchsfelder besitzen und kontinuierlich von Lasträdern überrollt werden. Hierbei wird zwischen Innentrommelprüfmaschinen und Rundlaufanlagen unterschieden.

d) Innentrommelprüfmaschinen

Innentrommelprüfmaschinen bestehen in der Regel aus einer Trommel (Durchmesser z.B. 1,5 m bis 5,5 m) mit nach innen gekehrter „Straßenoberfläche" aus entsprechend gekrümmten Testfeldern (Abbildung 3). Die hintereinanderliegenden gekrümmten Testfelder werden von angetriebenen Lasträdern kontinuierlich mit hoher Geschwindigkeit (z.B. 100 km/h bis 260 km/h) überfahren (Tabelle 3). Es können beispielsweise nur die Lasträder allein angetrieben werden, wie beim Innentrommelprüfstand des Zementforschungsinstituts Wien. Es gibt jedoch Anlagen, bei denen zusätzlich die Trommel rotiert (z.B. Innentrommelprüfstand der BASt, Bergisch Gladbach). Je nach Aufstellungsart der Trommel rotieren die Lasträder um eine vertikale oder horizontale Achse. Lastradrotationen um eine horizontale Achse können nachteilig sein, wenn bei obenliegendem Lastrad der Lastdruck entgegen der Schwerkraft aufgebracht werden muss. Ferner sind gekrümmte Testfelder generell von Nachteil, da die Herstellung des Straßenbelages mit gekrümmter Oberfläche aufwendig und praxisfremd ist.

Wegen der Kompaktheit von Innentrommelprüfmaschinen können sie leicht klimatisiert und beregnet werden. Bei Innentrommelprüfmaschinen können aufgrund der hohen Lastradgeschwindigkeit und der kurzen Testfahrbahnlänge in kurzer Zeit sehr viele Radüberrollungen durchgeführt werden. Die im Jahr 1991 in Betrieb genommene Innentrommelprüfmaschine der BASt wird vorrangig zur Untersuchung der vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Fahrzeugrad und Fahrbahnoberfläche verwendet [24].

e) Rundlaufprüfanlagen

Rundlaufprüfanlagen besitzen kreisringförmig angeordnete Versuchsfelder, die von Lasträdern mit relativ hoher Geschwindigkeit überrollt werden (Abbildung 4). Die Testfahrbahnen von Rundlaufprüfanlagen besitzen Durch-

messer zwischen 3 m und 35 m, was einer Testfahrbahnlänge zwischen 9 m und 110 m entspricht (Tabelle 3).

Lfd. Nr.	Land	Institution / Standort	Baujahr [1]	Type: Innentrommel Rundlauf Linearmaschine Teststrecke	Standort [1]: Halle im Freien	Klimatisierung [1] [°C]	Fahrbahnlänge [m]	Durchmesser [m]	max. Last pro Halbachse [1] [kN]	max. Geschwindigkeit [1] [km/h]	Überrollungen pro Stunde [1]	Radlaufspur [1] [3]
1	A	Zementforschungsinstitut Wien	1968	I	H	keine	5	1,6	40	100	40.000	F
2	D	BASt, Köln	1974	I	H	-30 bis +50	12	4	10	150	24.000	F
3	D	BASt, Bergisch Gladbach	1991	I	H	k.A.	17	5,5	10	260	15.000	F
4	DK	TH Lyngby	1975	L	H	-10 bis +40	30	-	65	30	1000	V
5	GB	University Nottingham		L	H	klimatisiert	25	-	10	22	880	V
6	ZA	NIRR, Pretoria	1970	L	F	natürlich	9	-	100	20	2200	V
7	D	Shell AG Hamburg	1965	L	F	natürlich	60	-	20	50	840	V
8	USA	AASHO, Illinois	1958	T	F	natürlich	[2]	-	68	56	100	V
9	USA	State University, Pennsylvania	1972	T	F	natürlich	1600	-	40	80	400	V
10	SP	CEDEX, Madrid	1987	T	F	natürlich	304	-	65	40	130	V
11	H	Inst. f. Straßenwesen, Budapest	k.A.	R	k.A.	k.A.	50	16,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
12	R	Forschungsinstitut Bukarest	1961	R	k.A.	k.A.	94	30,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
13	SU	Kiew	k.A.	R	k.A.	k.A.	30	16,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
14	SU	DORNII-Institut Leningrad	k.A.	R	H	k.A.	25	8,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
15	CH	ETH Zürich	1978	R	F	natürlich	100	32,0	80	80	2400	V,A
16	CFS	VUIS Bratislava	1963	R	F	natürlich	100	32,0	65	50	500	V,A
17	D	Universität Karlsruhe	1928	R	F	natürlich	63	20,0	30	35	4400	V,E
18	F	LRPC Nancy/Pont-à-Mousson	1970	R	F	natürlich	100	32,0	74	60	1600	F
19	F	LCPC Nantes	k.A.	R	F	natürlich	119	38,0	80	100	3400	V,R
20	NL	Heidemaatschappij, Arnheim	1965	R	F	natürlich	63	20,0	40	50	1200	F
21	PL	Forschungsinstitut Warschau	1972	R	F	natürlich	156	40,0	60	80	1260	V,R
22	USA	State University, Washington	1963	R	F	natürlich	80	25,4	50	80	2000	V,E
23	GB	TRRL, Harmsworth	1937	R	F/H	natürlich	107	34,0	68	32	600	V,A
24	USA	Dep. of Highways, Kentucky	vor 1940	R	H	klimatisiert	11	3,6	16	15	2700	F
25	NL	Shell-Laboratorium, Amsterdam	1963	R	H	bis +50	9	3,0	18	20	4400	F
26	USA	University of Illinois	1961	R	H	bis +60	15	5,0	16	25	3300	V,R
27	SF	Neste Oy-Forschungszentrum Kulloo	1972	R	H	-40 bis +40	11	3,5	100	30	5400	V,E
28	SF	Techn. Forschungszentrum Espoo	1972	R	H	-5 bis +20	11	3,5	10	35	12700	F
29	MEX	Univ. Nacional, Mexico City	1970	R	H	k.A.	31	10,0	50	40	3900	V,E
30	D	BASt, Köln	1981	R	H	bis á6	20	6,4	40	120	24000	V,R
31	USA	Esso Co., Withing (Indiana)	k.A.	R	H	k.A.	14	4,6	7,5	65	18500	F
32	S	Forschungsinstitut Linköping	1943	R	H	-10 bis +40	17	5,5	15	70	25000	F
33	NZ	University of Canterbury	1970	R	H	natürlich	58	18,5	60	50	1700	V,E
34	D	STUVA, Köln	1992	R	H	-20 bis +60	31	10,0	50	100	6300	F

1) k.A. = keine Angabe in gesichteter Literatur
2) 6 Schleifen von ca. 1.300 m bis ca. 5.000 m. Die Teststrecken je Schleife lagen zwischen ca. 1.200 m und ca. 4.000 m
3) V = Variabel während des Rundlaufbetriebes, A = Änderung der Auslegerlänge, E = Exzenterlager, R = Radverschiebung, F = Fest

Tabelle 3: Merkmale einiger bestehender Versuchsanlagen [2, 4, 21 bis 25]

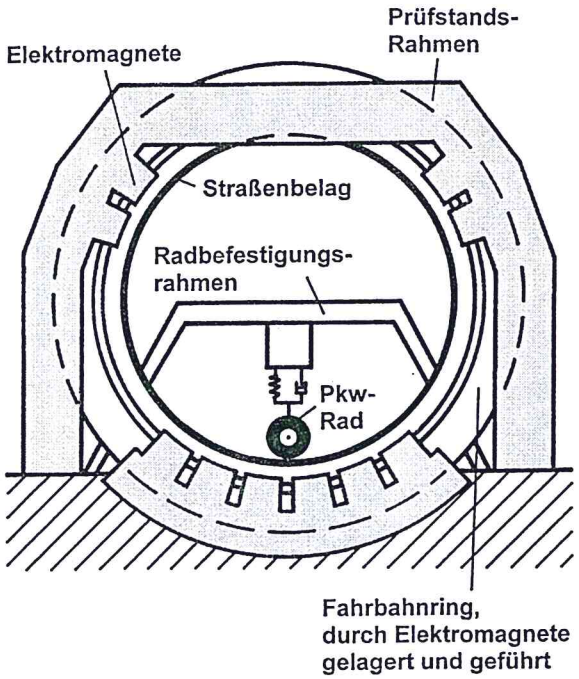


Abbildung 3: Prinzip einer Innentrommelprüfmaschine [24]

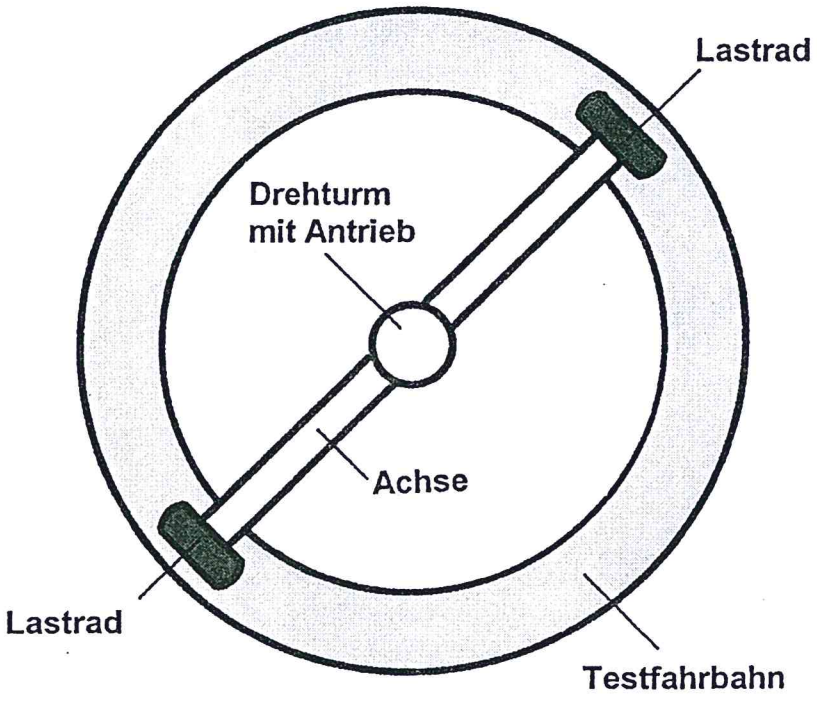


Abbildung 4 : Prinzip einer Rundlaufprüfanlage (Draufsicht)

Zu beachten ist jedoch, dass bei Rundlaufprüfanlagen der Reifen auf der Innenseite der Lauffläche (zum Rotationsmittelpunkt hin) eine kürzere Kreisbahn zurücklegen muss als an der Außenseite [27].

Geht man davon aus, dass beide unterschiedlich langen Kreisbahnen bei einer Achsumdrehung in der gleichen Zeit überfahren werden, so muss die Reifenaußenseite aufgrund der längeren Kreisbahn beschleunigt und die Reifeninnenseite bedingt durch die kürzere Kreisbahn abgebremst werden. Dies ist jedoch nur durch einen Schlupf zwischen Reifen und Fahrbahn möglich.

Der Schlupf beschreibt die Abweichung der Rotationsgeschwindigkeit der äußeren Reifenbreite von der mittleren Bahngeschwindigkeit [28, 29]. Durch den Schlupf entstehen Schubkräfte auf der Fahrbahnoberfläche. Die Kräfte werden umso größer, je kleiner der Radius der Kurve und je breiter der Reifen ist. Durch diese Zusatzbelastung aus ständiger Kurvenfahrt wird der Zeitraffungseffekt erhöht. Die Zusatzbelastung durch den Schlupf kann durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

a) Schmierung der Fahrbahn mit Talkpulver, damit die Reifenhaftung und damit die Schubkräfte reduziert werden [21].

b) Minderung der Achslast in Verbindung mit schmaleren Reifen, was jedoch aufgrund der niedrigeren Achslast einen geringen Zeitraffungseffekt zur Folge hat. Um dies zu kompensieren, muss eine entsprechend längere Versuchszeit gewählt werden.

c) Einsatz von Zwillingsreifen unter Beibehaltung der Achslast, wodurch die Schubkräfte deutlich reduziert werden. Eine Zwillingsbereifung verursacht jedoch andere Belastungszustände als eine Einzelbereifung.

d) Vergrößerung des Durchmessers der Testfahrbahn, denn ab einem Testfahrbahnradius von 150 m ist der Einfluss der Kurvenfahrt vernachlässigbar gering [30]. Testfahrbahnen mit so großen Radien erfordern jedoch ein großes Investitionsvolumen. Für eingehauste Rundlaufprüfanlagen sind deshalb solche Testfahrbahnradien wirtschaftlich nicht realisierbar.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine gewisse Schlupfbeanspruchung als Zeitraffereffekt erwünscht ist. Nur wenn der Schlupf zu groß ist und hierdurch bedingt z.B. Reifen sehr schnell abgenutzt werden oder die Fahrbahnoberfläche zu stark beansprucht wird, sollten Maßnahmen zur Verringerung des Schlupfes vorgenommen werden [21, 22, 31].

Die Aufstellung der Rundlaufprüfanlage kann in einer Halle oder im Freien erfolgen. Freianlagen haben den Vorteil, dass aufgrund der fehlenden Einhausung relativ große Durchmesser gebaut werden können, wie beispielsweise die Rundlaufprüfanlage der TRRL in Harmsworth, Großbritannien (Durchmesser ca. 34 m), die Anlage des LCPC in Nantes, Frankreich (Durchmesser von bis zu 38 m) und die in Warschau, Polen (mittlerer Durchmesser etwa 40 m), (Tabelle 3). Bei der Freianlage der TRRL in Harmsworth können ferner die Fahrbahnfelder temperiert werden, so dass während des Versuchs möglichst konstante Temperaturbedingungen in den Testfeldern herrschen.

Eingehauste Rundlaufprüfanlagen bieten den Vorteil, dass sie unabhängig von der Witterung sind und im Idealfall sogar künstlich temperiert werden können. Aufgrund der hohen Kosten für künstliche Temperierung und Einhausung besitzen solche Anlagen im Vergleich zu den Freianlagen in der Regel nur kleine Durchmesser, wie beispielsweise die Rundlaufprüfanlage der BASt (Durchmesser 6,4 m), des Forschungsinstituts Linköping in Schweden (Durchmesser 5,5 m), der University of Illinois (Durchmesser 5,0 m) und zwei finnische Anlagen (Durchmesser jeweils 3,5 m), (Tabelle 3).

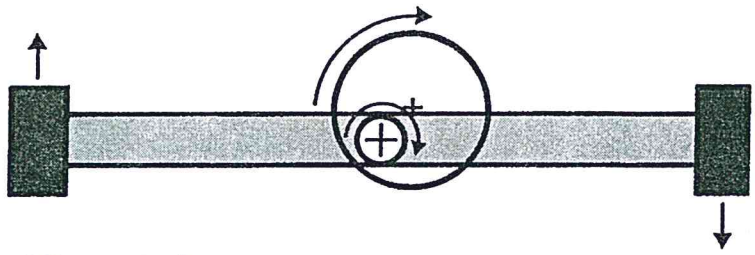
Die Lagerung der Lastradachse kann so erfolgen, dass die Lasträder die Testfahrbahn in einer festen Spur überrollen oder aber die Auslegerlänge der Lasträder variabel verändert werden kann, um so eine Laufspurvariation zu erhalten. Die Laufspurvariation kann durch ein Exenterlager, die Änderung der Auslegerlänge oder eine Radverschiebung geschehen (Abbildung 5).

Beim Exenterlager ist die vertikale Drehachse der Lastachse bzw. der Auslegerarme exzentrisch auf einer Kreisscheibe befestigt, welche sich während des Rundlaufbetriebs langsam dreht. Dadurch werden die Lastachse und die Lasträder seitlich verschoben. Bei der Veränderung der Lastachsenlänge können die Auslegerarme, an denen die Lasträder befestigt sind, während des Rundlaufbetriebs verlängert bzw. verkürzt werden und so die Radspur variiert werden. Nach ähnlichem Prinzip funktioniert die Radspurvariation durch Verschiebung der Lasträder, die während des Rundlaufbetriebs langsam auf der Lastachse nach innen oder außen verschoben werden.

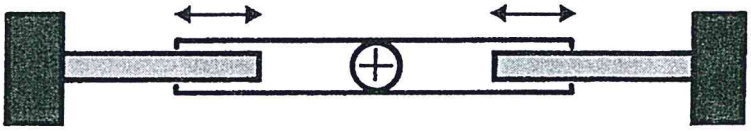
Die Variante mit Laufspurvariation gibt in der Regel die Bedingungen der Praxis besser wieder als eine feste Spur. Jedoch ist diese Variante, insbesondere bei hohen Rundlaufgeschwindigkeiten, wesentlich teuerer. Die Versuchsanlagen der ETH Zürich, der Universität Karlsruhe, der University of Canterbury (Neuseeland), der University of Illinois und der Universität von Mexico City sind beispielsweise mit

Laufspurvariationen ausgestattet (Tabelle 3). Rundlaufanlagen mit fester Laufspur sind beispielsweise die Heidemaatschappij in Arnheim, die LRPV in Nancy, die des Shell Laboratoriums in Amsterdam, der Esso Co. in Indiana und der STUVA (Tabelle 3).

Sowohl der Schlupfeffekt als auch eine hohe Überrollungsanzahl führen zu einem zeitraffenden Effekt bei der Prüfung mit Rundlaufanlagen. Bei eingehausten Anlagen, die künstlich temperiert werden können, kann durch extreme Temperaturbedingungen der zeitraffende Effekt noch verstärkt werden. Der Durchmesser der Rundlaufanlage muss jedoch ausreichend groß gewählt werden, so dass durch den Schlupfeffekt keine zu große Belastung entsteht. Bei Durchmessern ab ca. 10 m konnten keine negativen Auswirkungen aufgrund des Schlupfes für die Fahrbahndecke oder die Reifen beobachtet werden, wie dies Versuche auf der Rundlaufprüfanlage der Universität Mexico City zeigten [22], (Tabelle 3).



a) Exzenterlager



b) Achsverschiebung

c) Radverschiebung

Abbildung 5: Möglichkeiten zur Variation der Radspur

Als Anfang der 90er Jahre die Entscheidung anstand bei der STUVA eine neu Prüfanlage für Straßenbeläge zu bauen, wurde aufgrund der Vorteile von Rundlaufanlagen, insbesondere in Bezug auf den zeitraffenden Effekt durch die Überrollung der Testfelder mit einer relativ hohen Geschwindigkeit, die Versuchsanlage als Rundlaufprüfanlage konzipiert.

Die Rundlaufprüfanlage der STUVA wurde unter anderem mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Verkehr, Bonn, gebaut.

4.2 Rundlaufanlage

Die Rundlaufprüfanlage der STUVA besteht aus einer 10 m langen, horizontalen Achse mit je einem LKW-Rad an beiden Enden und zugehöriger Antriebseinrichtung (Abbildung 5 und Abbildung 7). Mittels dieser LKW-Räder wird die ca. 31,5 m lange Testfahrbahn überrollt. Die Achse wird in der Mitte nicht abgestützt, wohl aber durch einen Drehturm geführt. Dieser Drehturm wird über einen Drehkranz durch einen Elektromotor mit Getriebe und Kupplung so angetrieben, dass die Radachse entsprechend rotiert. Dies bedeutet, dass die Lasträder selbst nicht angetrieben werden, sondern frei mitlaufen.

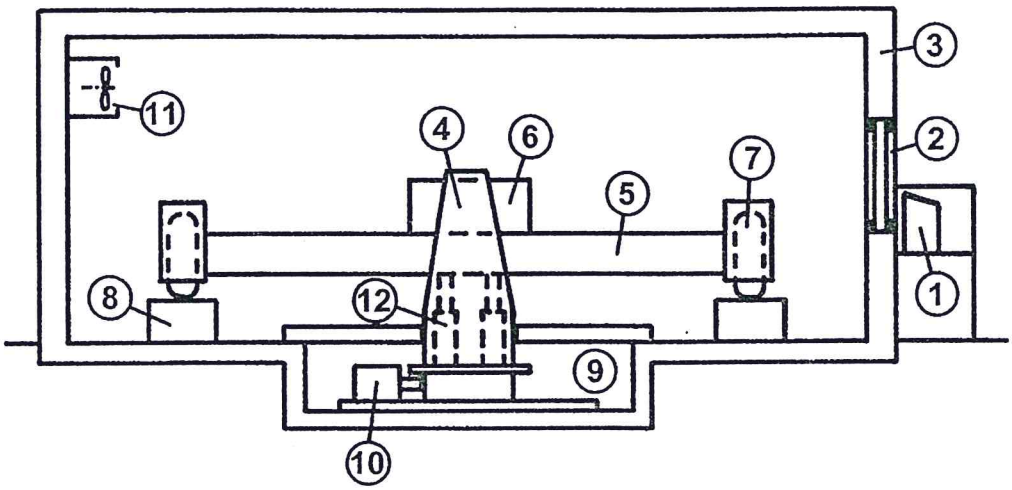
Unter der Achse des Rundläufers ist im Drehturmbereich eine Hubhydraulik angeordnet, um u.a. beim Start des Rundläufers die Achse zur Verringerung des Anfahrwiderstandes anheben zu können (Abbildung 5).

Die Abbremsung der Lastachse erfolgt nicht durch Bremsen an den Lasträdern, sondern durch ein gegenläufiges Drehmoment des Elektromotors. Drehkranz, Elektromotor, Getriebe und Kupplung liegen geschützt in einer abgedeckten, ca. 1 m tiefen Widerlagergrube. Die Widerlagergrube ist beheizbar, da der Elektromotor nicht für Minustemperaturen ausgelegt ist.

Die Belastung pro Rad beträgt durch mittig auf der Achse positionierten Gewichte zur Zeit 50 kN (5,0 t) und kann bei Bedarf auf bis zu ca. 65 kN (6,5 t) erhöht werden. Die Geschwindigkeit der Räder kann bei Radlasten von 5 t (LKW-Betrieb) etwa zwischen 15 km/h bis zu 100 km/h beliebig gewählt werden.

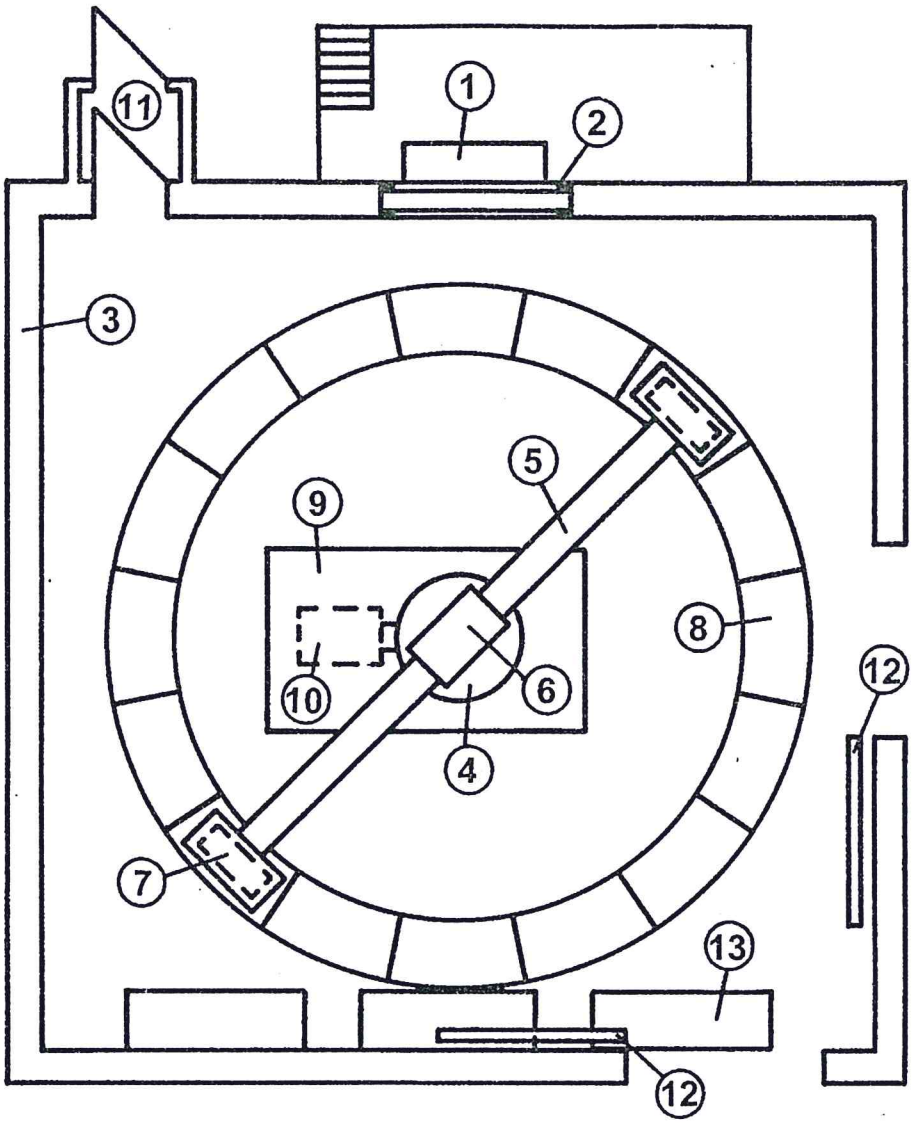
Die Räder sind mit Kontermuttern und Splinten sowie durch einen Radfangkorb gesichert. Der Radfangkorb soll helfen, sich lösende Teile des Reifens festzuhalten, damit diese nicht andere Anlagenteile beschädigen können (z.B. Deckenverdampfer).

Bei einem geplatzten Reifen wird die Lastachse von den beiden Hydraulikzylindern am Drehturm so aufgefangen, dass die Felge nicht auf die Fahrbahn aufschlägt und die Asphaltoberfläche beschädigt. Letzteres muss unbedingt vermieden werden, da die Verformungen auf der Asphaltoberfläche ein wichtiges Beurteilungskriterium für die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Asphaltkonstruktionen ist.



① Steuerstand
② Beobachtungsfenster
③ Widerlagerwand
④ Drehturm
⑤ Achse
⑥ Belastungsgewichte
⑦ Rad mit Radfangkorb
⑧ Fahrbahnfeld
⑨ Widerlagergrube
⑩ Motor
⑪ Deckenverdampfer
⑫ Hydraulikzylinder zum Anheben der Achse

Abbildung 6: Schema der Versuchsanlage (Seitenansicht)



1. Steuerstand
2. Beobachtungsfenster
3. Widerlagerwand
4. Drehturm
5. Achse
6. Belastungsgewichte
7. Rad mit Radfangkorb
8. Fahrbahnfeld
9. Widerlagergrube
10. Motor
11. Personenschleuse
12. Tore
13. Deckenverdampfer

Abbildung 7: Schema der Versuchsanlage (Draufsicht)

Abbildung 9: Reifentyp XZA [32]

Abbildung 8: Reifentyp XZY [32]

Die Räder am Ende der Lastachse sind mit Reifen unterschiedlicher Profile bestückt (Abbildung 9 und Abbildung 8), um Aufwölbungen auf der Fahrbahn im Bereich der Reifenlängsrillen möglichst gering zu halten. Die beiden gleichzeitig verwendeten Reifentypen sind die Reifen XZY und XZA von der Firma Michelin in der Größe 445/65 R 22,5 (Abbildung 9 und Abbildung 8), [32]. Der Reifen des Typs XZA hat fünf Längsrillen, aber keine Querrillen (Abbildung 9). Dagegen hat der Reifen des Typs XZY nur drei Längsrillen und eine ausgeprägte Querprofilierung (Abbildung 8). In der Laufspur kommen nur noch die mittig liegenden Längsrillen zur Deckung, so dass sich bei geringer Reifenverformung nur in der Mitte der Laufspur eine Asphaltaufwölbung bilden kann.

Der Versuchsbereich der Rundlaufprüfanlage ist von 25 cm dicken Stahlbetonwänden rahmenförmig umgeben (Abbildung 6 und Abbildung 7). Die Stahlbetonwände sind ca. 4,50 m hoch. Durch die Anordnung dieser Widerlagerwände soll sichergestellt werden, dass keine Personen außerhalb des Versuchsraumes durch z.B. sich lösende Räder oder Radteile verletzt werden. In die Wiederlagerwände sind zwei Tore, eine Tür und ein Beobachtungsfenster integriert. Die Tore und die Tür sind mit entsprechend schweren Stahltoren bzw. einer Stahltür als Rammschutz verschließbar. Vor dem Beobachtungsfenster ist innenseitig ein schweres Schutzgitter

angeordnet. Beide Tore und die Türen müssen verschlossen und elektronisch verriegelt sein, damit der Antrieb der Rundlaufprüfanlage gestartet werden kann. Dies soll sicherstellen, dass niemand in den Versuchsraum gelangen kann, wenn sich die Lasträder bewegen. Der Versuchsraum kann durch die Tür nur über eine Schleuse betreten werden, damit beim Öffnen der Tür keine zu großen Temperaturschwankungen im Versuchsraum entstehen.

Erste Überlegungen gingen von einer gelenkigen Anbindung des Rades an die Achse aus. Dieser Vorschlag musste jedoch wieder verworfen werden, da die relativ hohen Fliehkräfte dann eine aufwändigere Konstruktion für die Radaufhängung erforderlich gemacht hätten. Stattdessen ist das Rad starr an der Radnarbe befestigt. In speziellen Führungen kann sich das Rad in vertikaler Richtung verschieben. Zusätzlich sind Kippbewegungen der Radachse möglich. Diese beiden Bewegungsmöglichkeiten gestatten das Überfahren von unebenen Testfahrbahnen. Zwischen Radaufhängung und Achse ist wie bei einem LKW ein Luft-Feder-System (Balg) angeordnet, um die Rad- und Achsmasse schwingungstechnisch voneinander zu entkoppeln. Hierdurch lassen sich Resonanzschwingungen gering halten. Ferner sind an jedem Rad zwei LKW-Öldruckstoßdämpfer angeordnet, um die Schwingungsenergie abzubauen, die in erster Linie durch Fahrbahnunebenheiten hervorgerufen wird.

Folgende zwei wesentliche Betriebsarten der Rundlaufprüfanlage können unterschieden werden:

a) Automatikbetrieb

Der Automatikbetrieb ist für Mindestgeschwindigkeiten von v > 15 km/h vorgesehen. Die Steuerung der Rundlaufprüfanlage im Automatikbetrieb erfolgt außerhalb des Versuchsraumes an einem Bedienpult. Von hier aus kann durch das Sicherheitsfenster in den Versuchsraum eingesehen werden. Die Versuchsanlage kann im Automatikbetrieb nur gestartet werden, wenn beide Tore und die Tür elektronisch verschlossen sind. Beim Start der Anlage beginnen die angehobenen Lasträder sich zunächst langsam zu drehen, ohne dabei die Testfahrbahn zu berühren. Sie bewegen sich ca. 3 Minuten lang nur im Schritttempo, um Personen, die sich irrtümlich noch im Versuchsraum befinden, die Möglichkeit zu geben, sich noch rechtzeitig aus dem Gefahrenbereich zu entfernen und einen der insgesamt sechs Notaus-Schalter zu betätigen. Nach der dreiminütigen Langsamfahrt wird die Radachse mittels im Drehturmbereich angeordneter Hydraulikpressen langsam so weit abgesenkt, dass die Lasträder die Testfahrbahn gerade berühren. Die Geschwindigkeit wird nun in Stufen auf die geforderte Endge-

schwindigkeit erhöht. Erst anschließend fährt die Hubhydraulik automatisch weiter ein, damit die volle Radlast auf die Testfahrbahn wirken kann. Wenn der Fahrbetrieb gestoppt wird, wird die Achse wieder mittels der genannten Hydraulikpressen automatisch in den Ausgangszustand gehoben, um die Testfahrbahn nicht unkontrolliert zu belasten.

b) Handbetrieb

Der Handbetrieb gestattet den Betrieb der Anlage bei geöffneten Toren bzw. offener Tür mit Personen im Versuchsraum. Die Anlage kann im Handbetrieb nur sehr langsam ($v < 5$ km/h) verfahren werden. Dies ist erforderlich, damit bei Montagearbeiten im Versuchsraum das Personal nicht gefährdet wird. Die Steuerung der Geschwindigkeit kann im Handbetrieb sowohl vom Bedienpult außerhalb des Versuchsraums als auch mittels einer Handflasche innerhalb des Versuchsraumes erfolgen.

Die Summe der Radüberrollungen wird im Automatik- und Handbetrieb am Bedienpult außerhalb des Versuchsraumes an einem Zählwerk angezeigt.

Die Testfahrbahn ist unterteilt in 16 Fahrbahnfelder (Abbildung 7). Jedes Fahrbahnfeld ist ca. 2 m lang und etwa 1 m breit. Alle Felder sind trapezförmig ausgebildet, so dass sie aneinandergelegt eine kreisringförmige Testfahrbahn ergeben. Jedes Fahrbahnfeld besteht aus einer Asphalt-Trägerplatte und einem Wärmetauscher zur Temperierung (Kapitel 4.4). Oberhalb der Asphalt-Trägerplatten befindet sich der zu prüfende Fahrbahnbelag.

4.3 Temperierung

Die Testfahrbahn der Rundlaufprüfanlage kann zur Simulierung der am Asphaltaufbau auftretenden thermischen Beanspruchung auf Temperaturen zwischen -30°C und +60°C mit Hilfe einer speziellen Temperieranlage eingestellt werden. Dieses System sieht die Temperierung der Luft im umhausten Versuchsraum und die Temperierung der Fahrbahnfelder von unten mit einer Sole folgendermaßen vor:

a) Temperierung der Luft im Versuchsraum

In den Deckenverdampfern wird die Luft des Versuchsraums temperiert. Im Versuchsraum sind insgesamt drei Deckenverdampfer angeordnet, die etwa eine 60-fache Luftumwälzung pro Stunde im Versuchsraum erlauben. Durch diese hohe Luftumwälzung wird sichergestellt, dass sich nur geringe Lufttemperaturunterschiede im Versuchsraum einstellen. Ferner können Temperaturänderungen,

wie sie z.B. beim Wechsel einer Jahreszeit auftreten, in relativ kurzer Zeit realisiert werden.

b) Temperierung der Fahrbahnfelder von unten

Um den Asphalt auch von unten temperieren zu können, besitzt jedes Fahrbahnfeld sogenannte Wärmetauscher. Eine spezielle Soleflüssigkeit wird mit Hilfe von Pumpen über entsprechende Ringleitungen zu den stählernen Wärmetauschern transportiert. Im Wärmetauscher läuft die Sole mäanderförmig hin und her. Auf diese Weise wird die jeweilige Asphaltkonstruktion vollflächig von unten temperiert. Die Sole kann ebenfalls zwischen á30° C und +60° C eingestellt werden.

Die Temperierung der Luft und der Fahrbahnfelder von unten ist getrennt voneinander regelbar.

Durch diese Temperierungsanlage ist sichergestellt, dass auch bei z.B. Schwankungen in der Lufttemperatur durch einen kurzzeitigen Ausfall eines Verdampfers alle Versuchsfelder den gleichen Temperaturbelastungen ausgesetzt sind. Die Vergleichbarkeit aller Versuchsfelder miteinander ist stets gegeben.

Die Temperaturmessdaten werden während des Versuchs kontinuierlich von der Messwerterfassungsanlage aufgezeichnet und können anschließend mit einer geeigneten Software ausgewertet werden.

4.4 Stahlkonstruktion zur Aufnahme des Asphaltes

Die kreisförmige Testfahrbahn ist in 16 einzelne Fahrbahnfelder unterteilt. Jedes Fahrbahnfeld besteht aus einem Wärmetauscher mit darüber angeordneter Asphalt-Trägerplatte, auf die der zu prüfende Asphalt aufgebracht wird. Die Stahlkonstruktion (Wärmetauscher und Asphalt-Trägerplatte) hat im Vergleich zu einer Stahlbetonkonstruktion als Applikationsoberfläche für den Asphalt folgende Vorteile:

- Die Konstruktion aus Stahl ist flacher, und es können deshalb dickere Beläge geprüft werden.
- Die Stahlkonstruktion ist baukastenartig zusammengesetzt. Bei einem Defekt des Wärmetauschers kann der Asphaltbelag des betreffenden Fahrbahnfeldes durch Abheben der Asphalt-Trägerplatte entfernt werden, ohne dass der Asphalt abgestemmt werden muss. Nach Reparatur des Wärmetauschers kann die Asphalt-Trägerplatte mit dem Asphaltbelag wieder zurückgebaut und der Versuch fortgesetzt werden. Ein Abriss des Asphaltes und damit ein Abbruch des Versu-

ches, wie dies bei einer Unterkonstruktion aus Stahlbeton notwendig ist, wenn ein einbetonierter Wärmetauscher ausgebaut werden muss, ist nicht erforderlich.

Die Stahlkonstruktionen sind in der Mitte unterteilt (Teilfelder Typ A und Typ B), um bei Bedarf Fugensysteme in der Asphaltkonstruktion prüfen zu können. Die beiden Teilfelder (Typ A und Typ B) der Stahlkonstruktionen sind so angeordnet, dass sich zwischen ihnen ein 20 mm breiter Ausgangsfugenspalt ergibt. Über diese Fugen können bei Bedarf verschiedene Fugenübergangskonstruktionen angeordnet und mit Hilfe montierter Spindeln gestaucht oder bis zu einer maximalen Fugenspaltweite von 100 mm gedehnt werden (Abbildung 10). So ist es möglich, Fugenverformungen im Bauwerk z.B. infolge jahreszeitlicher Temperaturschwankungen zu simulieren.

Werden, wie bei der hier durchgeführten Untersuchung, keine Dehnungsfugen geprüft, so müssen die beiden Teilfelder eines Fahrbahnfeldes durch entsprechende Anschlüsse und Verbindungsbleche starr miteinander verbunden werden und der Asphalt wird ohne Fuge auf beide Asphalt-Trägerplatten (Typ A und Typ B) aufgebracht.

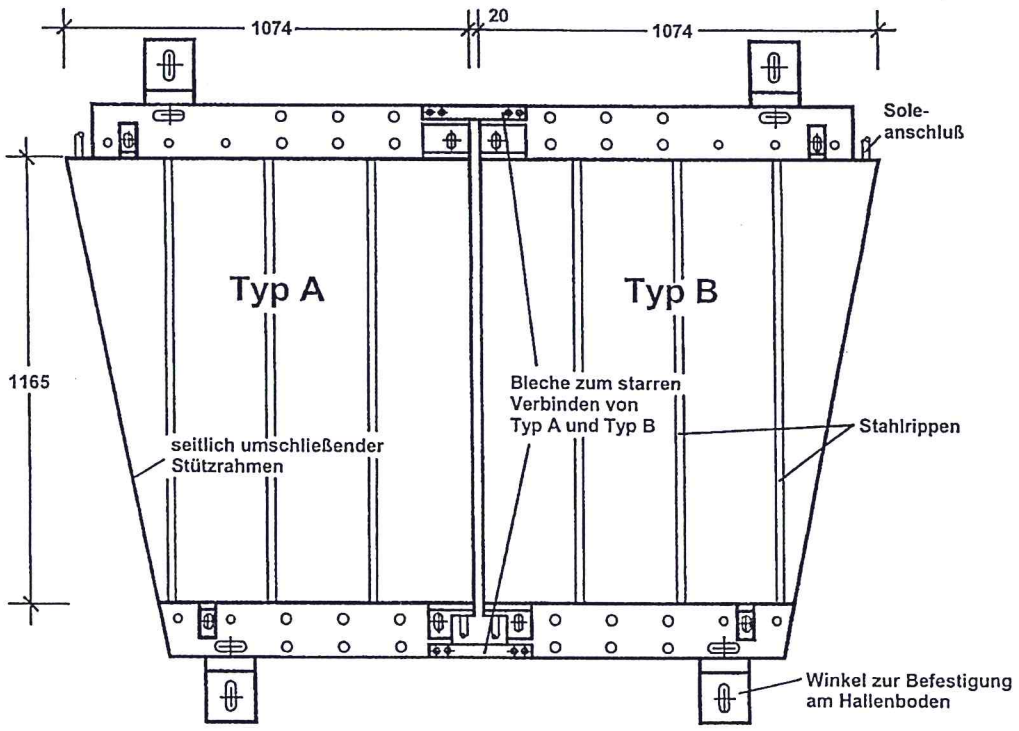


Abbildung 10: Stahlprobekörper mit starr verbundenen Teilfeldern Typ A und Typ B (Draufsicht, keine Fugenverformung möglich)

Auf die Oberseite der Asphalt-Trägerplatte sind senkrecht zur Radlaufrichtung über die gesamte Fahrbahnbreite Stahlrippen (h x b = 10 mm x 10 mm, l = 1165 mm) aufgeschweißt, damit der Asphalt beim Einbau und während des Rundlaufversuchs nicht auf der Asphalt-Trägerplatte verschoben wird (Abbildung 10).

Wärmetauscher und Asphalt-Trägerplatten werden sowohl miteinander als auch mit dem Hallenboden im Versuchsraum kraftschlüssig verbunden. Hierdurch sollen bei den Radüberrollungen unzulässige Verschiebungen der Fahrbahnfelder und ihrer Komponenten vermieden werden. Zwischen Wärmetauscher und Asphalt-Trägerplatte ist ein guter Wärmetransport sicherzustellen, der bei direktem Kontakt von Stahl auf Stahl problemlos erfolgt. Hierfür werden die Kontaktflächen von Wärmetauscher und Asphalt-Trägerplatte vor dem Zusammenbau gereinigt, so dass sich keine Fremdkörper zwischen den Stahlplatten befinden, die den direkten Kontakt Stahl auf Stahl behindern.

Zwischen Wärmetauscher und dem darunter liegenden Hallenboden ist zunächst als Isolierung, Lärmschutz und Unebenheitsausgleich eine Zellkautschukplatte (Dicke 10 mm) gelegt worden. Die durchgeführten Erprobungsversuche zeigten jedoch, dass die Zellkautschukplatte durch das Lastrad stark zusammengedrückt wird. Nach der Überfahrt verformte sich die Kautschukplatte wieder zurück. Hierdurch entstand eine ständige Auf- und Abbewegung des jeweiligen Fahrbahnfeldes mit den zugehörigen Asphaltkonstruktionen. Um diese Bewegungen zu vermeiden wurde die Zellkautschukmatte gegen eine besondere Dachpappe V 13 (Dicke ca. 1,3 mm) getauscht (Abbildung 11).

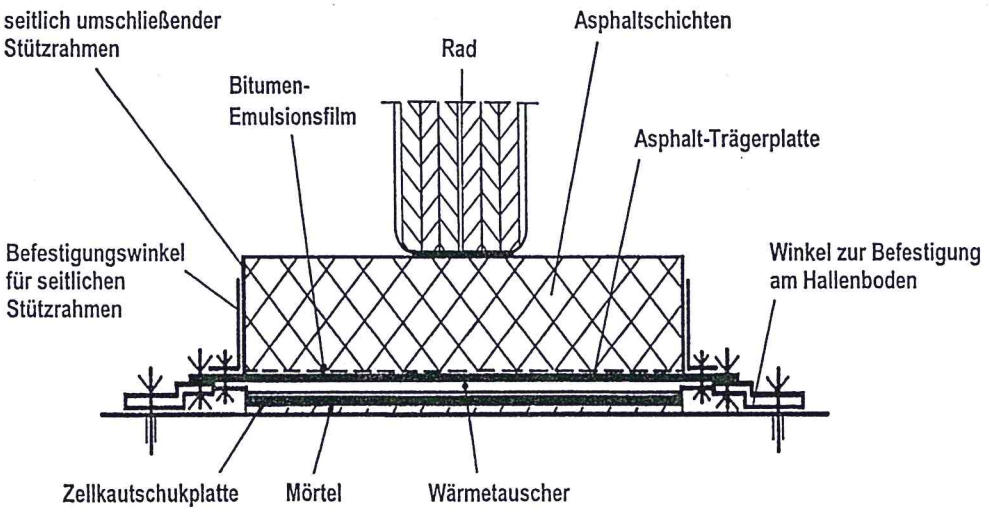


Abbildung 11: Querschnitt Fahrbahnfeld mit Stahlprobekörper und Asphaltbelag

4.5 Messtechnik

Während des laufenden Rundlaufversuchs werden folgende wichtige Daten gemessen:

- Überrollungszahl,
- Rundlaufgeschwindigkeit,
- Temperatur der Asphaltbeläge
- Lufttemperatur im Versuchsraum und
- Sole-Zulauf sowie Sole-Rücklauf-Temperatur

Die Überrollungszahl kann während des Versuchs regelmäßig an einem Zählwerk abgelesen und protokolliert werden. Die Rundlaufgeschwindigkeit und die Temperaturmesswerte werden kontinuierlich vom Versuchsrechner erfasst. Der Schwerpunkt der Messwerterfassung liegt in der Temperaturüberwachung der Fahrbahnfelder. Da sich die Temperaturen im Asphalt in der Rundlaufanlage nicht sekündlich verändern, ist die Erfassung aller Temperaturmessdaten alle 5 Minuten in der Regel ausreichend.

Hierfür ist folgendes Messprogramm aufgestellt worden:

a) Temperatur in den Asphaltbelägen

Ziel ist es, an der Oberfläche der Asphaltdeckschicht ca. 40° C bzw. 50 °C und an der Unterseite der Tragschicht etwa 20° C einzustellen. Da der Asphalt ein guter Wärmeisolator ist, ist eine Temperierung der Asphaltbeläge alleine durch die Umgebungsluft im Versuchsraum unzureichend. Die genannte Temperaturdifferenz im Asphalt kann nur relativ genau eingeregelt werden, wenn der Belag auch zusätzlich von unten temperiert wird. Die Sole zur Temperierung von unten fließt pro Fahrbahnfeld mäanderförmig durch zwei Wärmetauscher (Typ A und Typ B), die separat mit Soleflüssigkeit beschickt werden. Störungen beim Durchfluss der Sole durch die beiden Wärmetauscher können rechtzeitig erkannt werden, da die Temperaturmessungen in beiden Teilfeldern (Typ A und Typ B) erfolgen. Um den Messaufwand sinnvoll zu begrenzen, sind folgende Messungen durchgeführt worden:

á Haupt- und Kontrollmessbereich

Jedes Fahrbahnfeld wird in einen Haupt- (Teilfeld A) und Kontrollmessbereich (Teilfeld B) unterteilt (Abbildung 12).

á Hauptmessbereich

Alle 16 Fahrbahnfelder erhalten im Hauptmessbereich (Teilfelder A) im Bereich der Radlaufspur jeweils einen Temperaturfühler aus Nickel-Chrom-Nickel (Abbildung 12 und Abbildung 13) an folgender Position:

- Unterseite der Asphalttragschicht (entspricht der Oberfläche der Wärmetauscherplatte)
- Oberfläche der Asphalttragschicht (entspricht Unterseite der Asphaltbinderschicht)
- Oberfläche der Asphaltbinderschicht (entspricht Unterseite der Deckschicht) und
- Oberfläche der Asphaltdeckschicht (in der Radlaufspur).

Hierfür sind 16 Fahrbahnfelder x 4 Temperaturfühler = 64 Temperaturfühler erforderlich. Die Temperaturfühler im Hauptmessbereich (in den Teilfeldern A) sollen einen detaillierten Aufschluss über den Temperaturverlauf im Asphalt geben.

- Kontrollmessbereich

Bei jedem der 16 Fahrbahnfelder wird im Kontrollmessbereich (Teilfelder B) zur Überprüfung der Temperierung die Temperatur im Bereich der Radlaufspur nur an der Unterseite der Asphalttragschicht gemessen. Hierfür sind insgesamt 16 weitere Temperaturfühler erforderlich.

Ferner wird bei zwei Fahrbahnfeldern an der Oberfläche der Asphaltdeckschicht die Temperatur auch neben der Radlaufspur gemessen.

Die 82 (64+16+2) Temperaturfühler zur Messung der Asphalttemperatur werden senkrecht zur Radlaufrichtung eingebaut (Abbildung 13). Die Möglichkeit, die Temperaturfühler direkt in den Walzasphalt einzubauen wurde verworfen, da dann die Gefahr besteht, dass beim Asphalteinbau (hohe Einbautemperatur, hohe Belastung durch Walze) und beim Schneiden des Asphaltes die Temperaturfühler beschädigt werden. Die Temperaturfühler werden deshalb mit der Fühlerspitze bis zur Fahrbahnmitte in Hüllrohre eingeschoben, die beim Walzasphalteinbau mit eingebaut werden. Die Hüllrohre (Außendurchmesser ca. 6 mm, Innendurchmesser ca. 4 mm; Edelstahl) befinden sich ungefähr in Teilfeldmitte (Abbildung 12), da hier die Randeinflüsse geringer sind. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, werden die Temperaturfühlerspitzen (Außendurchmesser ca. 3 mm) in den Hüllrohren in eine spezielle Wärmeleitpaste eingebettet.

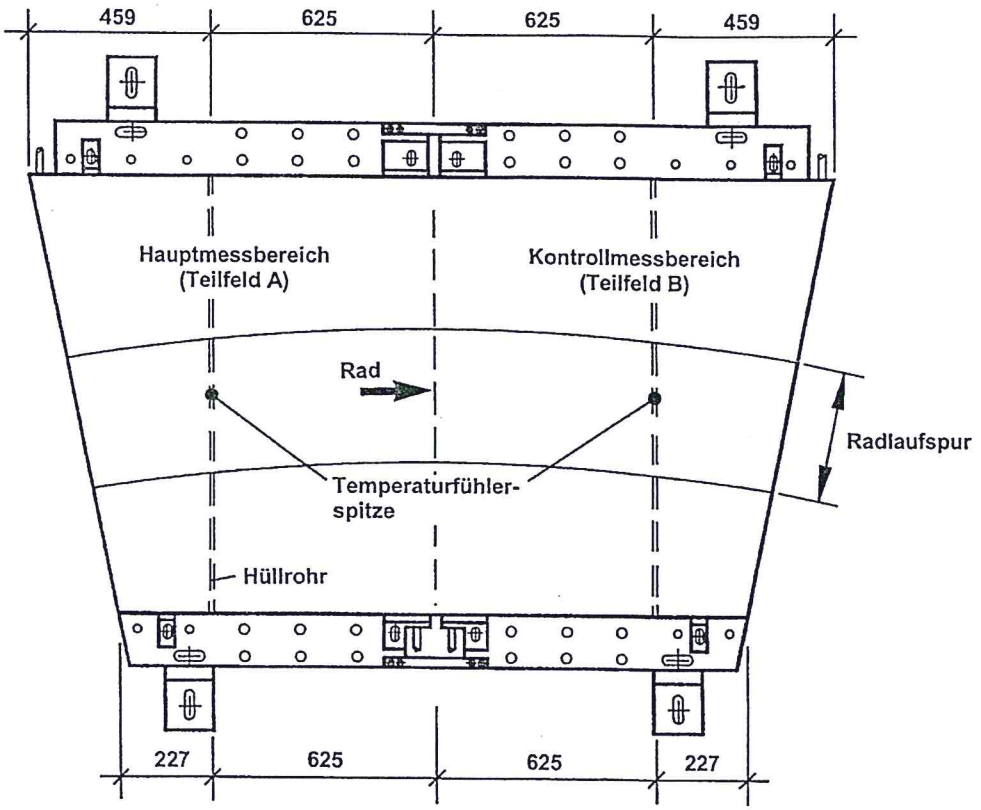


Abbildung 12: Lage der Temperaturfühlerspitzen und Hüllrohre im Haupt- und Kontrollmessbereich (Draufsicht)

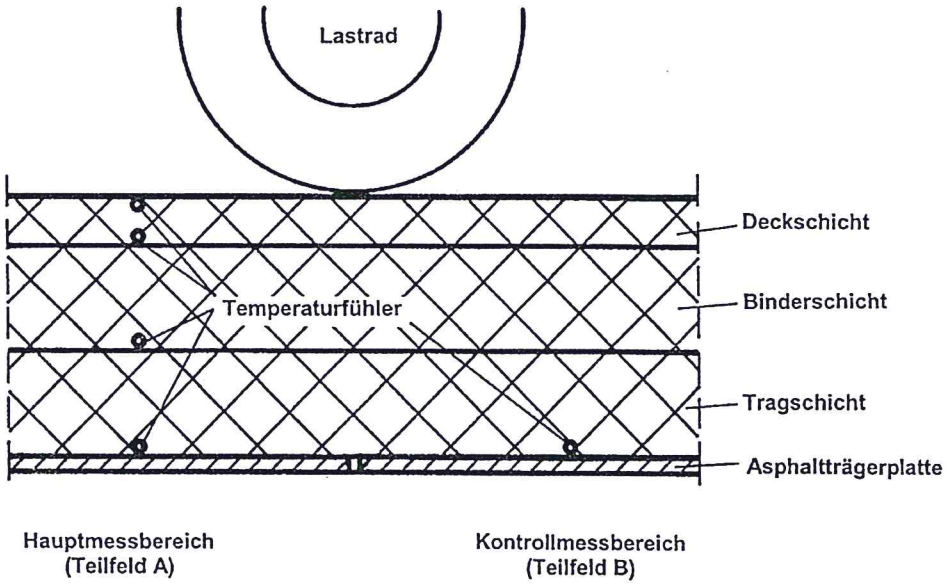


Abbildung 13: Lage der Temperaturfühler im Haupt- und Kontrollmessbereich

Vorbereitend für den Einbau der Hüllrohre in die Trag- und Binderschicht werden zunächst Vollrundeisen auf der jeweiligen Asphaltoberfläche positioniert. Diese Rundeisen werden beim Überfahren mit der Walze in den Asphalt eingedrückt und hinterlassen nach ihrer Entfernung eine Mulde zur Aufnahme der Hüllrohre. Die Hüllrohre werden in diese Mulden eingelegt und befestigt. Nachfolgend wird die nächste Asphaltschicht eingebaut. Die Hüllrohre reichen über die gesamte Fahrbahnfeldbreite und stehen an den Seiten geringfügig über. Durch diese Anordnung ist es möglich, den Temperaturfühler von der einen oder anderen Seite in das Hüllrohr einzusetzen. Dies ist vorteilhaft, da auch dann der Temperaturfühler in das Hüllrohr geschoben werden kann, wenn beim Schneidvorgang der Querschnitt eines der beiden Hüllrohrenden so stark verformt wird, dass der Temperaturfühler hier nicht mehr, aber am anderen Ende noch eingeführt werden kann.

Nach dem Rundlaufversuch können die Temperaturfühler wieder aus den Hüllrohren entnommen und für weitere Versuche verwendet werden.

Zur Aufnahme der 18 Temperaturfühler (16 Fühler in der Radlaufspur und 2 Fühler neben der Radspur), die auf der Asphaltdeckschicht der 16 Fahrbahnfelder appliziert werden, wird auf der Fahrbahnoberfläche der entsprechenden Fahrbahnfelder eine Rinne senkrecht zur Radlaufrichtung geflext. In jede dieser Rinnen wird ein Hüllrohr entsprechend seiner Position in bzw. neben die Radspur eingelegt und mit Epoxid-Harz fest verklebt. In diese Hüllrohre werden nachfolgend die Temperaturfühler eingesteckt.

b) Lufttemperatur im Versuchsraum

Im Versuchsraum der Rundlaufprüfanlage wird an zwei Stellen mittels Temperaturfühlern (Nickel-Chrom-Nickel) die Lufttemperatur gemessen und vom Versuchsrechner erfasst.

c) Soletemperatur

Zur Überwachung der Sole (Temperierung der Fahrbahnfelder von unten) wird sowohl die Sole-Zulauf-Temperatur als auch die Sole-Rücklauf-Temperatur gemessen. Auch diese Messdaten werden vom Rechner erfasst.

Alle Temperaturmesswerte und die Lastradgeschwindigkeit werden durch die Versuchssoftware erfasst. Diese Daten stehen dadurch in digitaler Form für die weitere Auswertung (z.B. mit Excel) zur Verfügung.

5 Herstellung der Fahrbahnfelder

5.1 Allgemeines

Zur Herstellung der 16 Fahrbahnfelder wurden in den ersten beiden Arbeitsschritten auf vier Bahnen die Tragschicht hergestellt und anschließend vier verschiedene Asphaltbinderschichten eingebaut. Um sämtliche Konstruktionskombinationen zu erhalten, mussten die Platten zerschnitten und neu sortiert werden, damit die vier verschiedenen Deckschichten asphaltiert werden konnten. In der Abbildung 14 sind die Lage der Platten beim Einbau, getrennt nach den beiden Arbeitsschritten 1+2 (ATS und ABi) und 3 (DS) dargestellt.

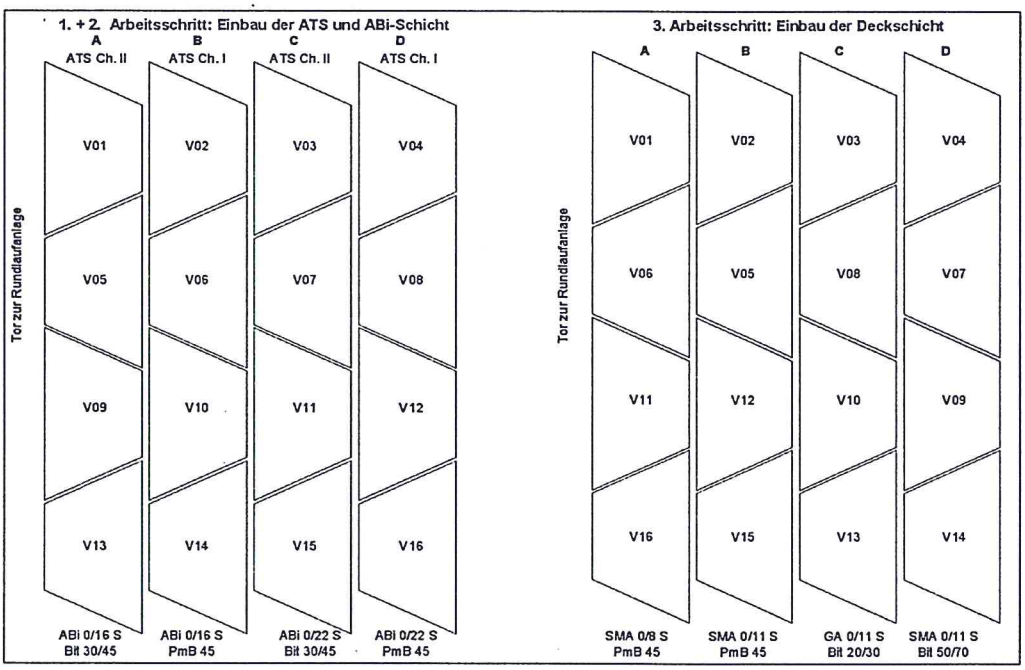


Abbildung 14: Herstellung der Fahrbahnfelder: Lage der Versuchsfelder beim Einbau der ATS und ABi (links) und DS (rechts)

5.2 Vorbereitung der vier Einbaubahnen

Auf dem in der Versuchshalle der STUVA bereits vorbereiteten Estrichuntergrund wurden je vier Asphaltträgerplatten in vier Bahnen ausgelegt. Nach den vier Trapezplatten (in Einbaurichtung gesehen) wurde eine Abschlussplatte fest angeordnet. Diese verhinderte einerseits eine Verschiebung der Trapezplatten durch den Asphalteinbau und schuf andererseits die gleichen Untergrundbedingungen für die Verdichtungskontrollen wie im Bereich der Probeplatten.

Das gesamte Einbaufeld war etwas größer als der mit Stahlplatten ausgelegte Bereich. Auf der Estrichfläche war ein Anfahrbereich von ca. 1,5 m und ein Auslaufbereich von ca. 5 m angeordnet. Im Auslaufbereich sollten Bohrkerne für zusätzliche Untersuchungen entnommen werden können. Vor den Anfahr- und Auslaufbereichen wurden zusätzlich Rampen aus Splitt aufgeschüttet.

Das gesamte Einbaufeld wurde vor dem Einbau mit einer PmB-Emulsion angesprüht. An den Längsseiten des Einbaufeldes wurde eine Holzschalung aufgestellt. Um die Asphaltträgerplatten bei der Überfahrt des Fertigers und der Walze zu schützen, wurden in den Randbereichen der Platten Bretter ausgelegt. Die Fugen zwischen den Asphaltträgerplatten wurden anschließend eingemessen, um sie später beim Schneiden der Elemente wieder genau lokalisieren zu können.

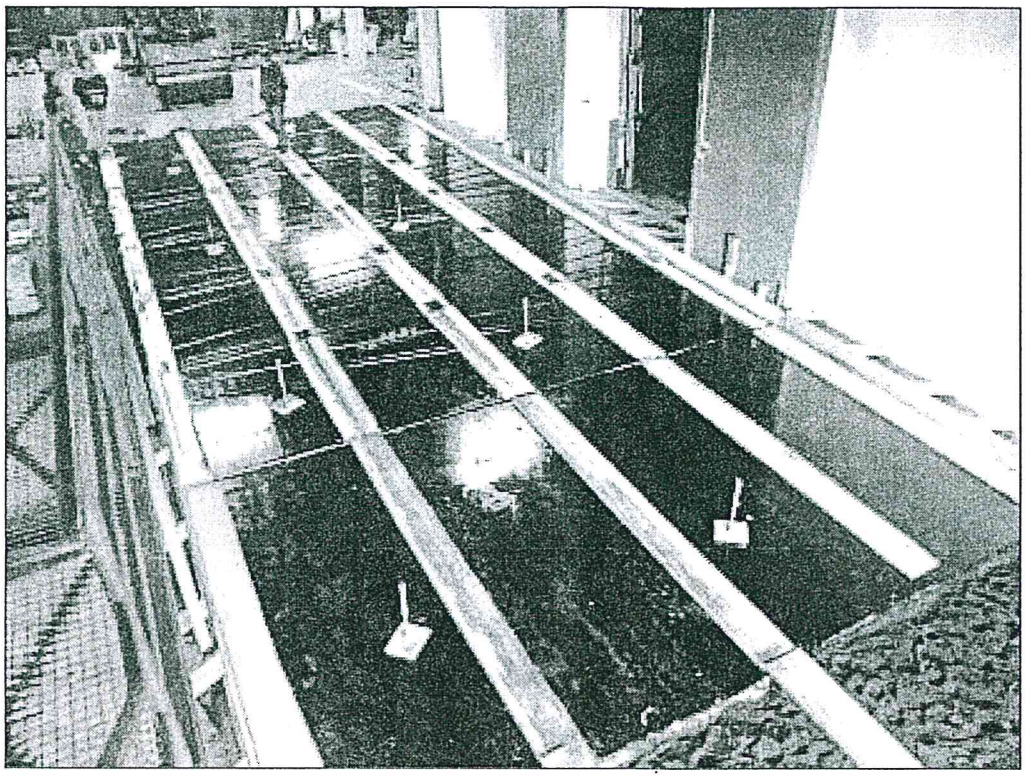


Abbildung 15: Vorbereitung der Einbaubahnen zur Herstellung der ATS

5.3 Asphalteinbau und begleitende Kontrollprüfungen

5.3.1 Einbau der Tragschichten

Vor der Auslieferung des Mischgutes wurde die Qualität des Mischgutes im Labor der Firma von der Wetter (vdW) überprüft. Zusätzlich wurden durch das *isac* bei Anlieferung des Mischgutes Proben aus dem Fertigerkübel entnommen und die Tem-

peratur des Mischgutes gemessen. Parallel zum Einbau der Tragschichten wurden die Kontrollprüfungen am Mischgut durch das *isac* durchgeführt.

Die Tragschichten wurden mit einem konventionellen Gehwegfertiger eingebaut, der mit einem Radlader kontinuierlich beschickt wurde. Als Höhenreferenz dienten dabei zwei höhenmäßig eingemessene Spanndrähte.

Der Einbau begann auf der Bahn C. Die vorverdichtete Bahn wurde zunächst mit einer kleinen Walze angedrückt und anschließend mit einer schweren 11 t-Walze verdichtet. Sobald die gewalzte Bahn begehbar war, wurde die Plattenbreite darauf markiert. Mit einem Kantenschneidrad wurden die unverdichteten Randbereiche entlang der Markierung abgeschnitten. Die Bahnen A, B und D wurden in der gleichen Art und Weise hergestellt.

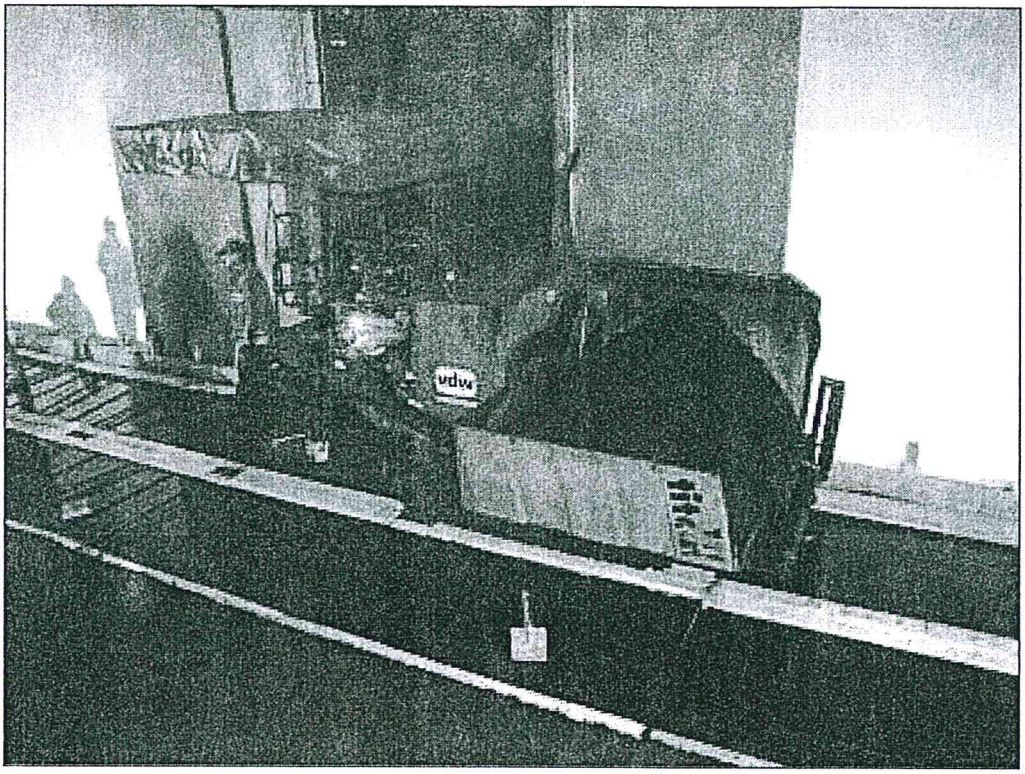


Abbildung 16: Einbau der Asphalttragschicht

5.3.2 Einbau der Binderschichten

Die Qualitätskontrolle der vier Bindervarianten erfolgte analog zu den Tragschichten, eingebaut wurden die vier Bahnen wiederum mit dem Gehwegfertiger. Als Höhenreferenz dienten die fertigen Tragschichten. Begonnen wurde mit der Bahn A (ABi 0/16 S mit Bitumen 30/45). Anschließend folgten die Bahnen D (ABi 0/22 S mit PmB 45), B (ABi 0/16 S mit PmB 45) und C (ABi 0/22 S mit Bitumen 30/45). Die

beiden äußeren Bahnen A und D wurden zuerst eingebaut, damit für die beiden inneren Bahnen B und C Widerlager für die Walzverdichtung vorhanden waren. Auch die Binderschichten wurden zuerst mit einer kleinen Walze angedrückt und danach mit der schweren Walze verdichtet. Die schlechter verdichteten Randbereiche wurden wiederum mit dem Schneidrad entfernt.

Nach der Fertigstellung der gesamten Fläche wurde die Lage der Schnittfugen anhand der vorherigen Vermessung auf den Binderschichten markiert. Sämtliche Platten wurden entsprechend des vorgesehenen Schemas durchnummeriert.

Bohrkernentnahme Binder- und Tragschichten

In den Bereichen der Abschlussplatten der Fertigungsbahnen wurden durch das *i-sac* jeweils 2 Bohrkerne mit 150 mm Durchmesser zur Kontrolle der Verdichtungsgrade an den Trag- und Binderschichten entnommen. Die Verdichtungsgrade wurden sofort im Anschluss an die Bohrkernentnahme bestimmt, so dass die Ergebnisse noch am gleichen Tag vorlagen. Alle Schichten erfüllten die Anforderungen der ZTVT bzw. der ZTV Asphalt-StB 01.

Schneiden und Umsortieren der Elemente

Zeitgleich mit der BK-Entnahme wurden die einzelnen Probeplatten entlang der markierten Schnittkanten herausgeschnitten. Die zwischen den Längsseiten der Platten liegenden, herausgeschnittenen Bereiche wurden anschließend entfernt.

Nach dem Freischneiden wurden die Probeplatten mit Hilfe eines Mobilkranes so umsortiert, dass in allen vier Bahnen jede Bindervariante einmal vorhanden war (vgl. Abbildung 14). Vor dem Absetzen einer Platte an ihrem neuen Einbauort wurde sowohl der Untergrund als auch die Plattenunterseite gründlich gereinigt, damit alle Platten satt auf dem Estrich aufliegen.

Beim Umsortieren der Platten stellte sich heraus, dass sich beim Einbau unterschiedliche Dicken der Binderschichten ergeben hatten. Dies begründet sich durch das unterschiedliche Verdichtungsverhalten der verschiedenen Bindervarianten (insbesondere zwischen den Bindern 0/16 und 0/22) bei unterschiedlichen Randeinspannungsbedingungen der Bahnen in Abhängigkeit der Einbaureihenfolge. Für eine gleichmäßige Herstellung der Deckschicht mussten die einzelnen Platten auf eine möglichst einheitliche Höhe gebracht werden. Es wurde beschlossen, die Platten mit einer Feinfräse auf ein einheitliches Höhenniveau zu bringen. Zunächst wurden dazu die Höhen der vier Eckpunkte jeder Platte vermessen, so dass genau feststand wie tief jeweils gefräst werden musste.

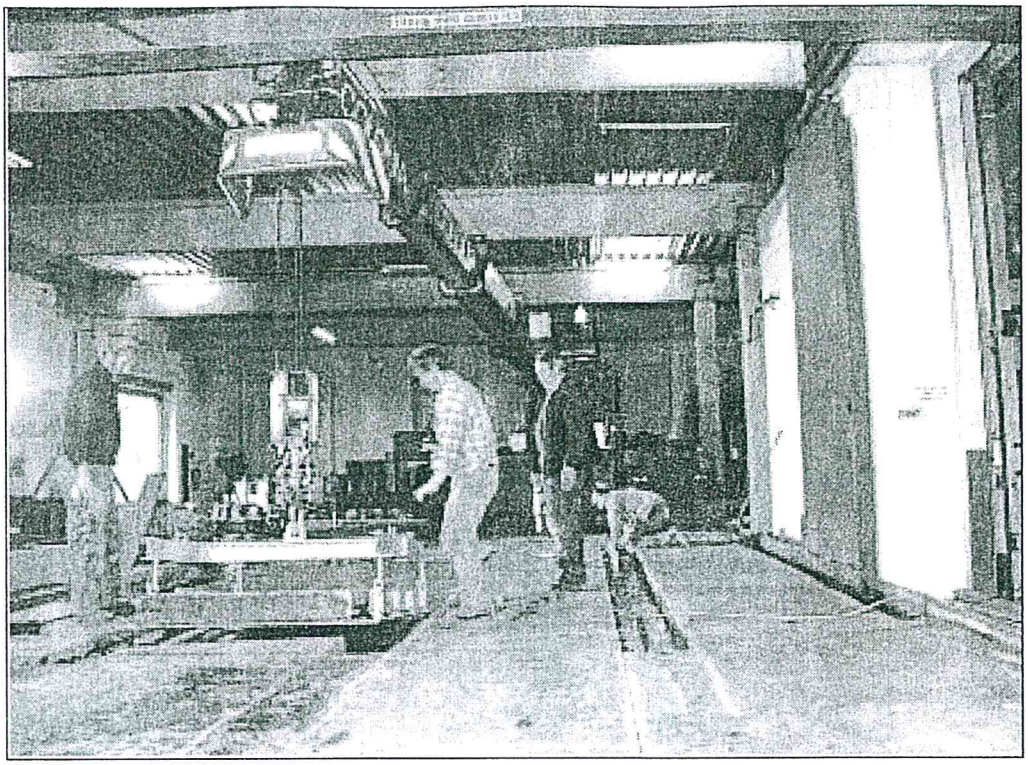


Abbildung 17: Umsortierung der Versuchsfelder zur Herstellung der Deckschicht

5.3.3 Höhenausgleich der Binder- und Einbau der Deckschichten

Vor dem Fräsen wurden die Zwischenräume zwischen den Bahnen mit einem Bindermischgut 0/11 verfüllt. Nach dem Feinfräsen der betroffenen Platten wurde die gesamte Fläche gesäubert und mit einer Emulsion angespritzt.

Sämtliche Deckschichtmischgutvarianten wurden vor der Auslieferung im Labor der Firma vdW im Beisein eines *isac*-Vertreters überprüft. Außerdem wurden durch das *isac* Proben im Lieferzustand genommen, an denen jeweils parallel zum Einbau die Kontrollprüfungen stattfanden.

Anschließend wurde auf der Bahn C der Gussasphalt 0/11 S mit einem Gussasphaltfertiger eingebaut. Eine gleichmäßige Schichtdicke wurde durch höhenmäßig ausgerichtete Stahlschienen gewährleistet. Nach dem Einbau des Mischgutes wurde der Gussasphalt manuell abgesplittet und der Splitt entsprechend eingewalzt.

Anschließend wurde auf der Bahn A der SMA 0/8 S mit PmB 45 eingebaut. Da sich beim Einbau mit dem Fertiger zu starke Höhenunterschiede bei den Bindern ergeben hatten, wurde festgelegt, die Walzasphaltdeckschichten im Handeinbau herzustellen. Als Referenz für die Einbaustärke wurden auch hier Stahlschienen

Abbildung 18: Deckschichteinbau per Hand zur Gewährleistung der richtigen Konstruktionshöhe

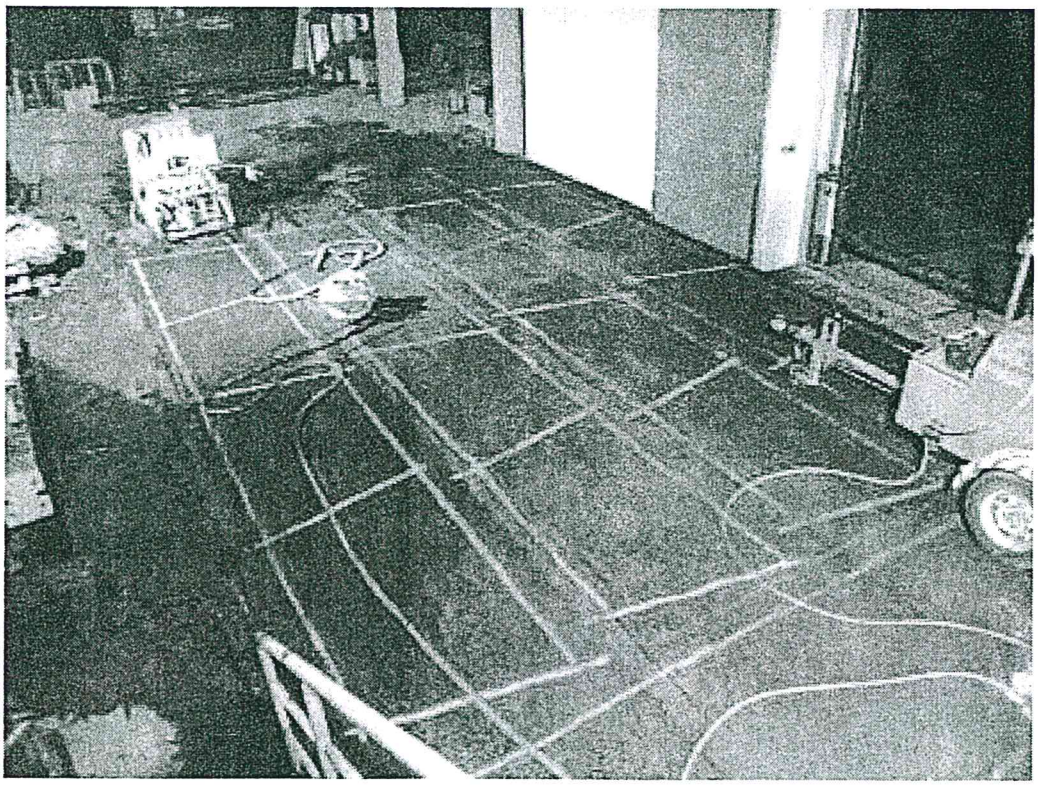


Abbildung 19: Schneiden der angezeichneten Fahrbahnplatten

ausgelegt, die höhenmäßig ausgerichtet waren. Eine einheitliche Gesamtstärke der Fahrbahnfelder ist von wesentlicher Bedeutung, denn in der Rundlaufanlage selbst müssen die Höhenunterschiede der aufeinander folgenden Platten möglichst minimal sein, um die Entstehung zusätzliche dynamische Belastungen weitgehend auszuschließen. Nach der Walzverdichtung wurde der Splittmastixasphalt abgestumpft.

Nachfolgend fand analog der Einbau der anderen zwei Splittmastixasphalte statt. Begonnen wurde mit der Bahn D (SMA 0/11 S mit Bit 50/70), es folgte Bahn B (SMA 0/11 S mit PmB 45).

Bohrkernentnahme Deckschichten

Bei der Kontrollprüfung der Mischgutzusammensetzung von Bahn D (SMA 0/11 S mit Bit 50/70) stellte sich heraus, dass der Anteil der Körnung 8/11 zu gering war. Es wurde festgelegt, diese Bahn neu einzubauen. Aus diesem Grund entfiel die Bohrkernentnahme auf Bahn D.

Auf den anderen Bahnen wurden im Bereich der Abschlussbleche je zwei Bohrkerne mit 150 mm Durchmesser für die Verdichtungskontrolle gezogen. Im Auslaufbereich wurden weitere Bohrkerne (300 mm und 150 mm Durchmesser) für zusätzliche Untersuchungen entnommen. Die anschließenden Verdichtungskontrollen ergaben auf Bahn A (SMA 0/8 S mit PmB 45) einen zu großen Hohlraumgehalt, so dass auch hier ein erneuter Einbau vorgesehen wurde. Die Deckschichten der anderen Bahnen waren nicht zu beanstanden.

Ausbau der Deckschichten auf den Bahnen A und D

Mit Hilfe einer normalen Straßenfräse sowie einer Feinfräse wurden die Deckschichten der Bahnen A und D wieder vollständig beseitigt. Die freigelegte Binderschicht wurde gesäubert und anschließend mit einer Bitumenemulsion angespritzt.

Zweiter Deckschichteinbau auf den Bahnen A und D

Der erneute Einbau sowie die Qualitätskontrolle dieser Deckschichten erfolgten analog zum ersten Einbau. Die Kontrollprüfung an den Mischgutproben ergab keine unzulässigen Abweichungen.

Bohrkernentnahme auf den Bahnen A und D

Erneut wurden auf den Bahnen A und D Bohrkerne für die Verdichtungskontrolle der Deckschichten entnommen. In den anschließenden Kontrollprüfungen an den fertigen Schichten wurden keine unzulässigen Abweichungen festgestellt.

Schneiden der Probeplatten

Analog zu Schritt 5 wurden die fertig eingebauten Asphaltprobeplatten freigeschnitten. Die Anfahr- und Auslaufbereiche sowie die Bereiche zwischen den Einbaustreifen wurden wiederum entfernt und anschließend entsorgt.

5.4 Einbau der Testfelder in die Rundlaufprüfanlage

Im Versuchsraum des Rundläufers ist ein höhengleicher Estrich von ca. 3 cm bis 5 cm Dicke auf dem Hallenboden im Bereich der kreisringförmigen Fahrbahn aufgebracht worden, um Unebenheiten des Hallenbodens auszugleichen. Auf den Estrich wird eine Dachpappe V 13 (Dicke ca. 1,3 mm) als Isolierung, Lärmschutz und als Ausgleich für kleine Unebenheiten gelegt. Auf die Dachpappe werden die Wärmetauscher aufgesetzt und ausgerichtet (Abbildung 11).

Nachdem die Fahrbahnfelder aus den jeweiligen Herstellungsbahnen herausgeschnitten worden sind (Kapitel 5.3), wurden die seitlichen Asphaltbereiche, die nicht zu den Fahrbahnfeldern gehörten, entfernt. Anschließend wurden die Fahrbahnfelder angehoben und vollflächig so abgesetzt, dass alle Seiten der Fahrbahnfelder gut zugänglich sind.

Bevor die Asphaltkonstruktionen in den Versuchsraum des Rundläufers transportiert wurden, sind an ihren seitlichen Begrenzungsflächen umschließende Stützrahmen aus Stahl montiert worden. Diese Stahlrahmen sollen den Asphalt gegen seitliches Ausweichen infolge der schweren Radlasten stützen (Abbildung 11). Die Stützrahmen müssen für alle Fahrbahnfelder individuell angepasst werden, da aufgrund der Toleranzen beim Schneiden der Fahrbahnfelder aus den Herstellungsbahnen die Abmessungen der Felder entsprechend variieren. Die Stützrahmen üben zum Zeitpunkt der Montage keinerlei Kräfte auf die Asphaltkonstruktion aus (keine Verspannung).

Mit dem Hallenkran und der speziellen Traverse (Abbildung 21 und Abbildung 22) werden die Fahrbahnfelder bestehend aus Asphaltträgerplatte und Asphaltkonstruktion in den Versuchsraum des Rundläufers transportiert, auf die Wärmetauscher aufgesetzt und nachfolgend am Hallenboden befestigt. Auf diese Weise entsteht eine kreisringförmige Asphalt-Testfahrbahn (Abbildung 20) mit ca. 3 cm bis 4 cm breiten Fugen zwischen den einzelnen Fahrbahnfeldern. Diese Fugen sind mit Holzplatten bis zur Oberkante der Binderschicht zugestellt worden. Der restliche Fugenschluss wird mit mineralischem Mörtel verfüllt. Diese Mörtelschicht ist in der Regel nach 4 Tagen Überrollung zerstört und wird danach ausgewechselt.

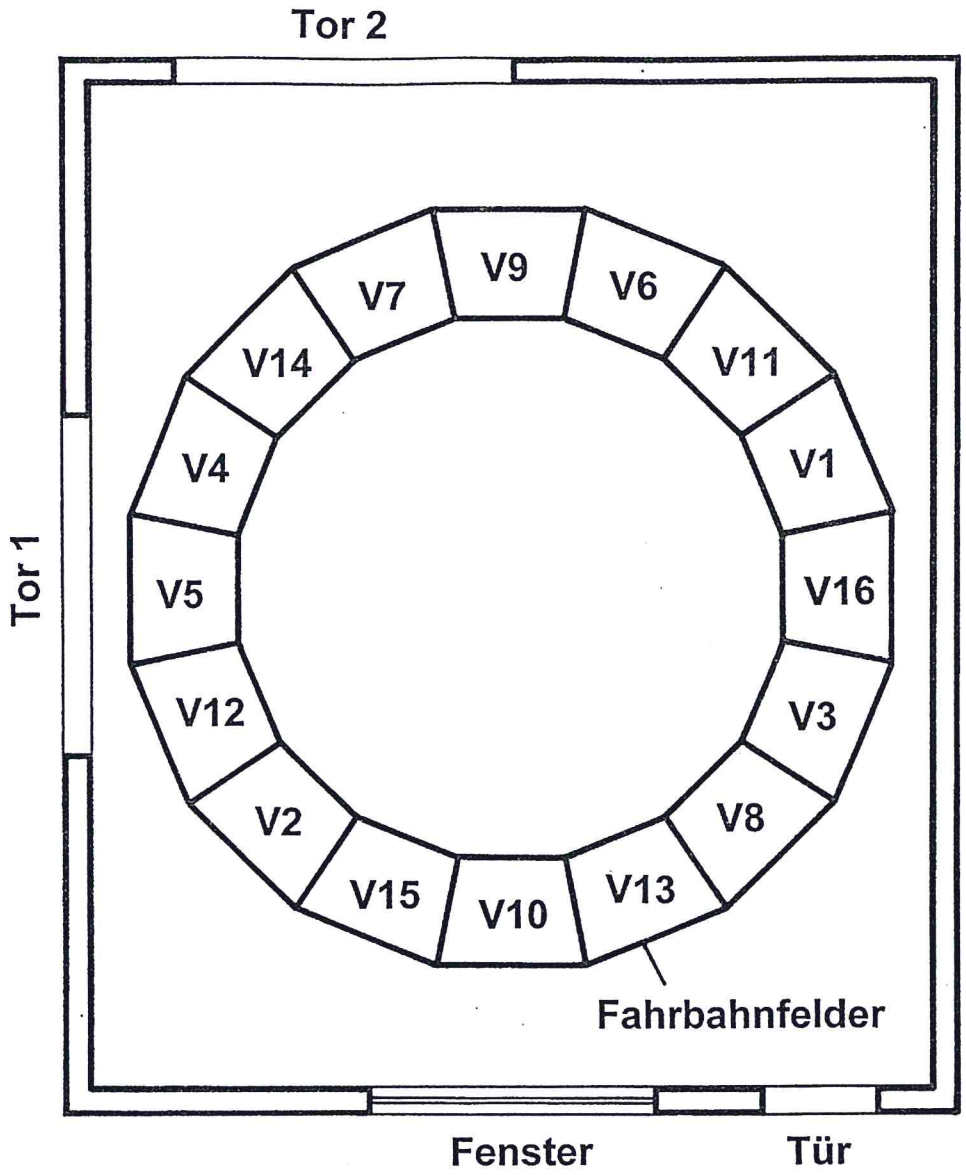


Abbildung 20: Asphalt-Varianten Testfahrbahn

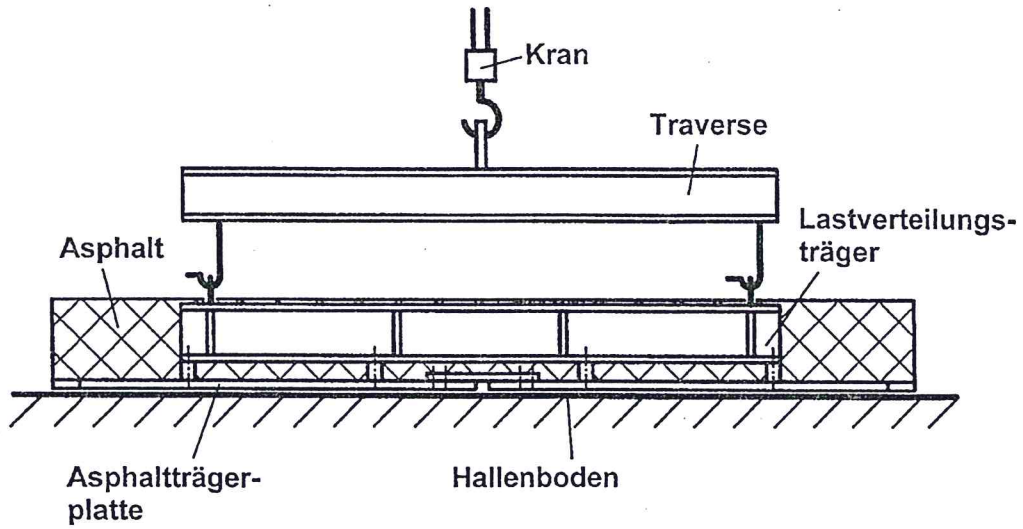


Abbildung 21 : Asphaltträgerplatte mit Asphalt sowie Lastverteilungsträgern und Traverse (Seitenansicht)

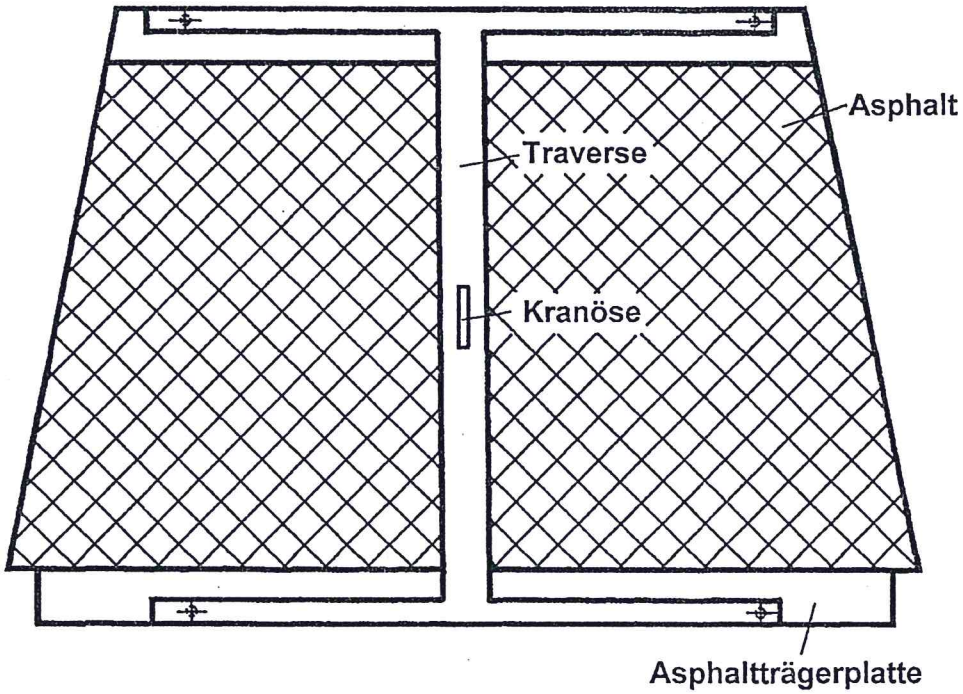


Abbildung 22 : Asphaltträgerplatten mit Asphalt sowie Lastverteilungsträgen und Traverse (Draufsicht)

6 Versuche auf der Rundlaufprüfanlage

6.1 Versuchsparameter

6.1.1 Temperatur

Bei starker Aufheizung von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt wird die Viskosität des Bindemittels herabgesetzt, das Mörtelvolumen vergrößert sich und der Widerstand gegen das Auftreten bleibender Verformungen verringert sich [33]. Hohe Temperaturen der Fahrbahnbefestigung aus Asphalt bei gleichzeitiger hoher Auflast begünstigen die Entstehung von Spurrinnen. Im Rundlaufversuch sollen deshalb Asphaltbeläge hohen Temperaturen ausgesetzt werden. Die Temperatur an der Asphaltoberfläche und der Temperaturgradient im Versuch wurden deshalb in Anlehnung an ungünstige Verhältnisse in der Praxis wie folgt festgelegt:

a) Asphalttemperaturen in der Praxis

Der Temperaturverlauf in der Praxis in verschiedenen Tiefen von Asphaltschichten wird in der Literatur mehrfach beschrieben [34 bis 38]. Beispielsweise wurden an einem unbeschatteten Straßenabschnitt in jeder Asphaltschicht mit Fühlern die Temperatur gemessen (Abbildung 23) und aus den Messwerten für die einzelnen Schichten die Tagestemperaturganglinien dargestellt [35], (Abbildung 24). Hier wurden zum Beispiel an einem heißen Frühjahrstag im unbeschatteten Straßenabschnitt zur Mittagszeit an der Fahrbahnoberfläche Temperaturen von etwa 55 °C ermittelt. Zum gleichen Zeitpunkt wurden in diesem Straßenabschnitt in 19 cm Tiefe noch Temperaturen von ca. 30 °C bis 35 °C gemessen [35], (Abbildung 24).

Ferner wurden während des áJahrhundertsommers“ 1976 auf einer Versuchsstrecke der BASt im Raum Köln/Bonn an 15 Tagen an der Asphaltdeckschicht Temperaturen zwischen 50 °C und 54°C und 30 cm unterhalb der Fahrbahnoberfläche nie geringere Temperaturen als 30 °C gemessen [39].

b) Asphalttemperaturen im Versuch

Die Extremwerte aus der Praxis (Oberflächendeckschicht + 50° C und Unterseite Asphalttragschicht + 30° C) wurden nicht im Versuch eingestellt und zwar aus folgenden Gründen:

- An der Fahrbahnoberfläche und in 20 cm Tiefe von der Fahrbahnoberfläche treten jedoch so hohe Temperaturen selbst im Sommer in Deutschland nur äußerst selten auf. Beispielsweise beträgt in der Klimazone I die relative

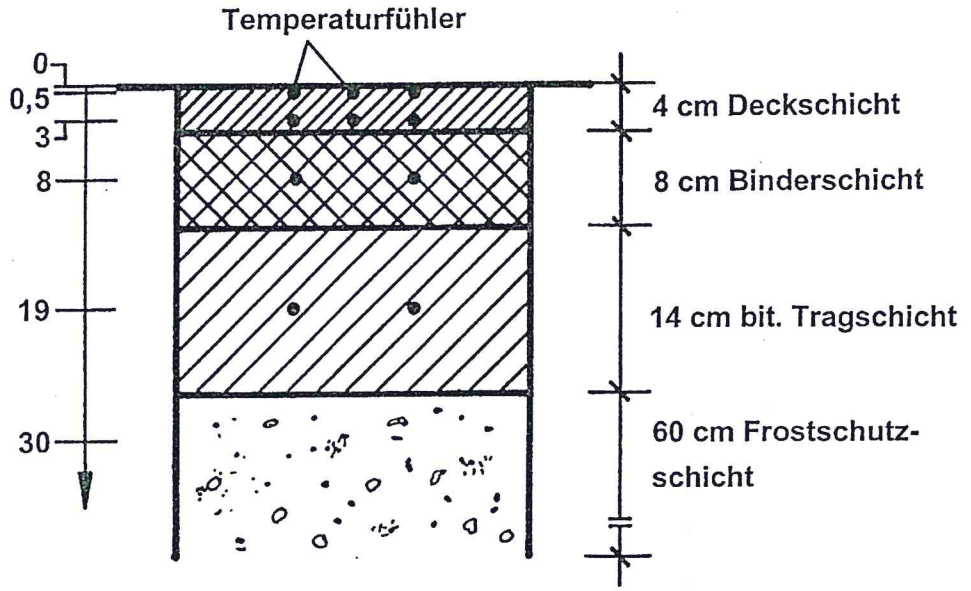


Abbildung 23: Querschnittsaufbau eines unbeschatteten Straßenabschnitts mit Temperaturfühlern [35]

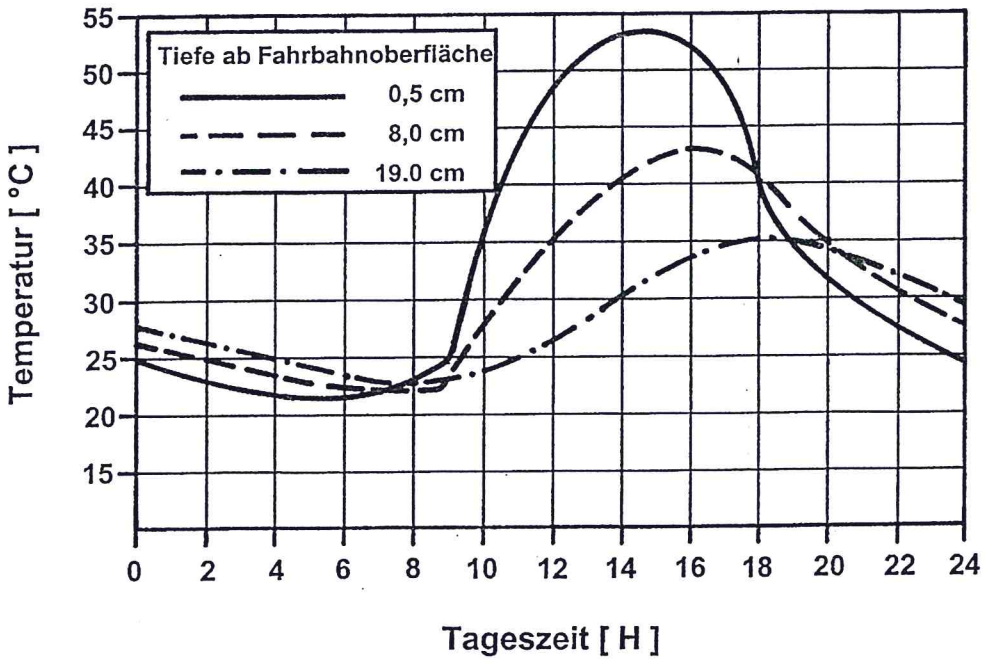


Abbildung 24: Temperaturganglinien des unbeschatteten Straßenabschnittes (vgl. Abbildung 19) (Stundenmittelwerte) [35]

Summenhäufigkeit der Asphalttemperaturen an der Fahrbahnoberfläche zwischen 49 °C und 51 °C nur 0,01 % und in 20 cm Tiefe zwischen 29 °C und 31 °C nur 0,02 % [40], (Tabelle 4).

- Die Temperaturen im Asphalt sinken über Nacht deutlich (Abbildung 24). Permanent sehr hohe Temperaturen im Asphalt sind daher praxisfremd.

Im Forschungsantrag wurden daher folgende Temperatureinstellungen vorgeschlagen:

- Temperatur an der Oberfläche der Asphaltdeckschicht: + 50° C und
- Temperatur an der Unterseite der Asphalttragschicht: + 20° C

Die Versuche wurden mit diesen Temperatureinstellungen zunächst begonnen. Nach etwa 8.950 Überrollungen der Testfahrbahn mit der 10 t-Achse, zeigten sich jedoch bereits relativ große Spurrinnen. Daher wurde vom projektbegleitenden Ausschuss des Forschungsvorhabens für die Fortsetzung des Versuches (etwa noch weitere 800.000 Fahrbahn-Überrollungen) die Soll-Temperatur an der Oberfläche der Asphaltdeckschicht in der Radlaufspur von + 50° C auf + 40° C reduziert. Die Temperatur an der Unterseite der Asphalttragschicht sollte unverändert nach wie vor + 20° C betragen.

Zu Versuchsende sollte noch einmal der große Einfluss der Temperatur an der Deckschichtoberfläche auf die Spurrinnenbildung nachgewiesen werden. Die Temperatur an der Deckschichtoberfläche wurde daher wieder auf + 50° C angehoben. Die Temperatur an der Unterseite blieb bei + 20° C unverändert. Mit diesen Temperatureinstellungen wurden die Fahrbahnfelder etwa 67.500 mal überrollt.

Asphaltkörpertemperatur [°C]		relative Summenhäufigkeiten [%] der Asphaltkörpertemperaturen in der Tiefe ... cm unter Fahrbahnoberfläche																	
von	bis unter	0	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
-00	-23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-23	-21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-21	-19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-19	-17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-17	-15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-15	-13	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-13	-11	0,40	0,28	0,21	0,16	0,12	0,07	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-11	-9	1,36	1,16	0,97	0,82	0,68	0,43	0,27	0,17	0,12	0,07	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-9	-7	2,85	2,62	2,40	2,20	2,00	1,60	1,25	0,92	0,66	0,47	0,34	0,24	0,16	0,11	0,07	0,05	0,02	0,00
-7	-5	5,01	4,71	4,44	4,17	3,91	3,44	3,02	2,63	2,30	1,91	1,54	1,21	0,93	0,71	0,50	0,37	0,29	0,21
-5	-3	8,17	7,77	7,40	7,08	6,79	6,23	5,64	5,17	4,73	4,25	3,85	3,45	3,02	2,62	2,26	1,89	1,56	1,24
-3	-1	12,97	12,46	12,04	11,64	11,27	10,56	9,95	9,39	8,88	8,32	7,78	7,22	6,64	5,99	5,47	4,91	4,48	4,10
-1	+1	18,53	18,04	17,65	17,28	16,96	16,33	15,77	15,29	14,82	14,27	13,83	13,43	12,97	12,57	12,08	11,54	11,02	10,58
1	3	25,05	24,71	24,42	24,12	23,85	23,27	22,74	22,28	21,90	21,49	21,10	20,73	20,36	20,00	19,63	19,29	18,98	18,71
3	5	32,57	32,18	31,84	31,54	31,29	30,94	30,60	30,40	30,20	30,04	29,88	29,72	29,59	29,42	29,23	29,07	28,89	28,68
5	7	40,85	40,43	40,08	39,79	39,59	39,22	38,99	38,82	38,75	38,73	38,77	38,82	38,86	38,94	39,03	39,10	39,15	39,18
7	9	49,48	49,07	48,71	48,42	48,21	47,85	47,52	47,39	47,29	47,18	47,09	47,03	47,03	47,03	47,01	47,07	47,21	47,44
9	11	57,68	57,33	57,05	56,82	56,59	56,24	55,98	55,82	55,73	55,60	55,63	55,70	55,85	56,00	56,19	56,33	56,44	56,48
11	13	64,98	64,64	64,34	64,10	63,91	63,62	63,43	63,32	63,34	63,44	63,59	63,75	63,85	63,91	63,96	64,08	64,18	64,34
13	15	71,75	71,53	71,36	71,15	70,97	70,71	70,63	70,66	70,74	70,79	70,90	71,06	71,24	71,44	71,72	72,05	72,31	72,67
15	17	77,67	77,62	77,56	77,59	77,58	77,64	77,71	77,86	78,02	78,22	78,51	78,88	79,26	79,79	80,37	81,02	81,68	82,34
17	19	82,21	82,45	82,66	82,91	83,13	83,51	83,94	84,33	84,74	85,28	85,93	86,58	87,22	87,89	88,58	89,29	90,04	90,79
19	21	85,80	86,26	86,67	87,07	87,44	88,19	88,82	89,42	90,12	90,88	91,66	92,38	93,09	93,84	94,58	95,33	96,07	96,76
21	23	88,77	89,31	89,84	90,30	90,68	91,58	92,45	93,24	93,95	94,70	95,49	96,26	97,01	97,71	98,28	98,73	99,06	99,35
23	25	91,15	91,69	92,19	92,71	93,21	94,16	94,98	95,70	96,41	97,19	97,95	98,60	99,04	99,37	99,58	99,74	99,83	99,88
25	27	93,01	93,61	94,20	94,67	95,10	95,96	96,76	97,49	98,15	98,83	99,28	99,56	99,75	99,86	99,91	99,94	99,97	100,00
27	29	94,64	95,19	95,65	96,09	96,50	97,36	98,11	98,77	99,24	99,57	99,78	99,89	99,94	99,96	99,98	100,00	100,00	100,00
29	31	95,88	96,35	96,81	97,25	97,66	98,44	99,07	99,46	99,71	99,88	99,95	99,97	99,98	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
31	33	96,91	97,35	97,80	98,22	98,57	99,21	99,59	99,81	99,92	99,96	99,98	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
33	35	97,78	98,21	98,61	98,96	99,25	99,63	99,86	99,95	99,97	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
35	37	98,52	98,91	99,21	99,43	99,61	99,87	99,96	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
37	39	99,10	99,37	99,58	99,73	99,85	99,95	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
39	41	99,47	99,67	99,81	99,91	99,95	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
41	43	99,73	99,86	99,94	99,96	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
43	45	99,89	99,95	99,97	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
45	47	99,96	99,97	99,99	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
47	49	99,98	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
49	51	99,99	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
51	53	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
53	55	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
55	57	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
57	59	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
59	61	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
61	+00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabelle 4: Relative Summenhäufigkeiten der Asphaltkörpertemperaturen in der Klimazone I in verschiedenen Tiefen unter der Fahrbahnoberfläche [40]

6.1.2 Achslast

Im ASHOO Straßentest wurde das Verformungsverhalten von Fahrbahndecken bei verschiedenen Achslasten in Großversuchen umfangreich getestet. Diese Untersuchung zeigt, dass die Achslast nicht linear, sondern im Mittel in der 4. Potenz die Fahrbahn belastet [2, 8, 12]. Demnach entsprechen beispielsweise 400 Übergänge einer 7-t-Achse etwa 100 Übergängen einer 10-t-Achse (Abbildung 25). Im Rundlaufversuch sollte deshalb eine hohe Achslast gewählt werden, um die Asphaltkonstruktionen auch unter schwersten Beanspruchungen prüfen zu können. Die maximal zugelassene Achslast auf deutschen Straßen ist wie folgt festgelegt:

a) Zugelassene Achslasten in der Praxis

Nach StVZO sind auf deutschen Straßen derzeit und auch zukünftig folgende Achslasten erlaubt:

- angetriebene Einzelachse mit Zwillingsbereifung 11,5 t
- nicht angetriebene Einzelachse mit Super-Single- oder Zwillingsbereifung 10,0 t

Straßen werden jedoch nicht ununterbrochen mit diesen hohen Achslasten beansprucht, selbst wenn der Schwerlastverkehrsanteil hoch ist. Achslastmessungen auf Bundesfernstraßen und Autobahnen belegen, dass beispielsweise auf einer Bundesstraße (B16, AS Abensberg - Anschluss B299) ca. 40% des Schwerverkehrs eine Achslast zwischen 2 t und 4 t und weniger als 5% eine Achslast zwischen 10 t und 12 t besaßen [41, 42]. Auf einem ausgewählten Abschnitt einer Bundesautobahn (A 3, AS Geiselwind á AS Schlüsselfeld) betrug von ca. 30% des Schwerverkehrs die gemessene Achslast zwischen 6 t und 8 t und von etwas mehr als 5% lag die Achslast zwischen 10 t und 12 t [41, 42].

b) Achslast im Versuch

Im Versuch werden die Asphaltbeläge neben der Größe der Achslast auch durch die anderen extremen Randbedingungen bereits stark beansprucht, wie z.B. durch hohe Temperatur, die ständige Kurvenfahrt und den Einsatz von Single-Reifen (Abbildung 26). Deshalb bestand die Befürchtung, dass unter diesen Versuchsbedingungen bei einer zu hohen Achslast die Asphaltbeläge unzulässig stark beansprucht werden. Unter Berücksichtigung dieser Punkte beträgt im Einklang mit der StVZO die Achslast im Rundlaufversuch (mit Single-Bereifung) 10 t. Falls die Versuchsergebnisse nach z.B. einem Monat Überrollungszeit ergeben, dass die Versuchsbedingungen verschärft werden müssen, so sollte

sen, so sollte die Achslast bei Beibehaltung der Single-Bereifung von 10 t auf 11,5 t erhöht werden. Dies war jedoch nicht erforderlich.

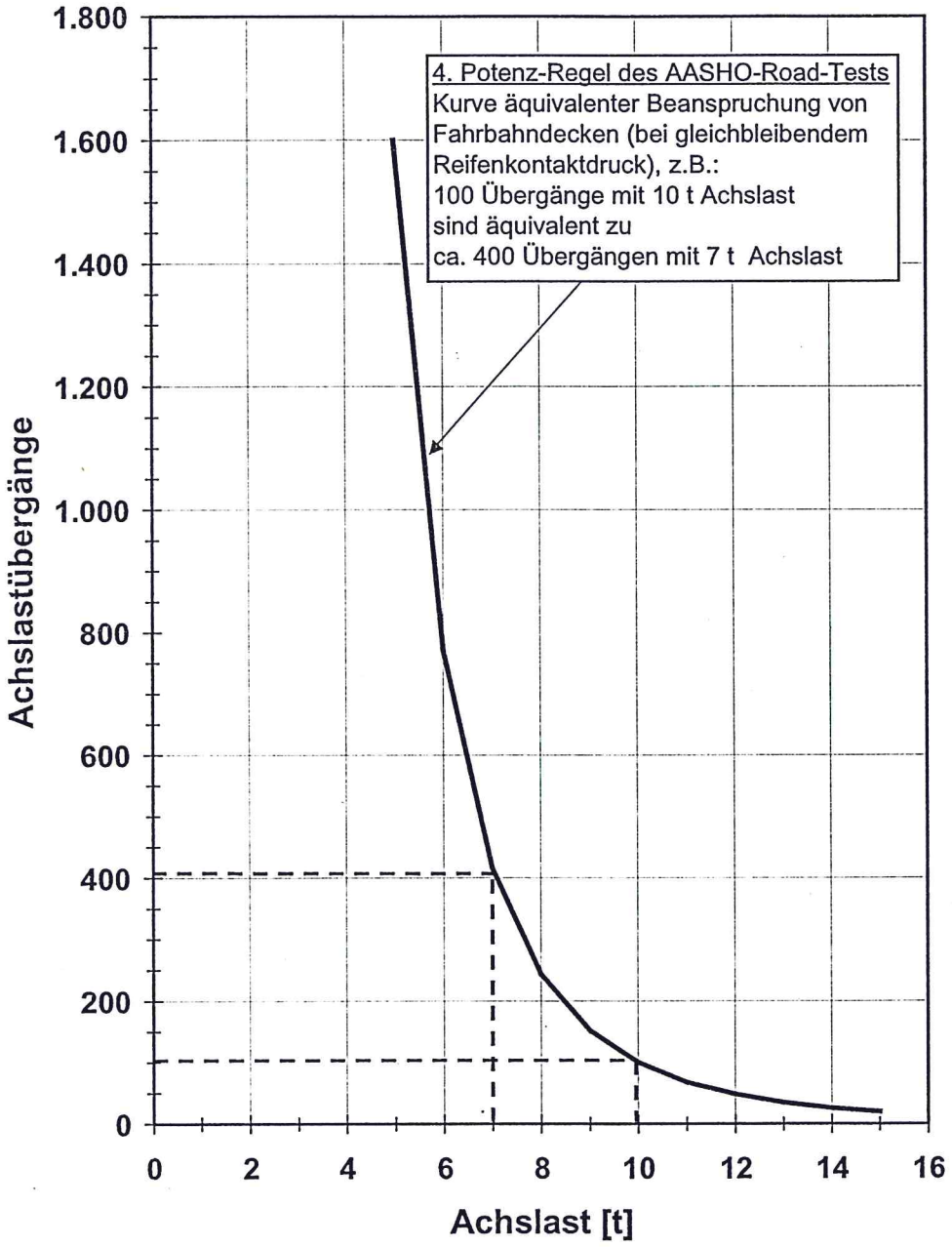


Abbildung 25: Einfluss der Achslast auf die Beanspruchung der Fahrbahndecke [2, 7, 11]

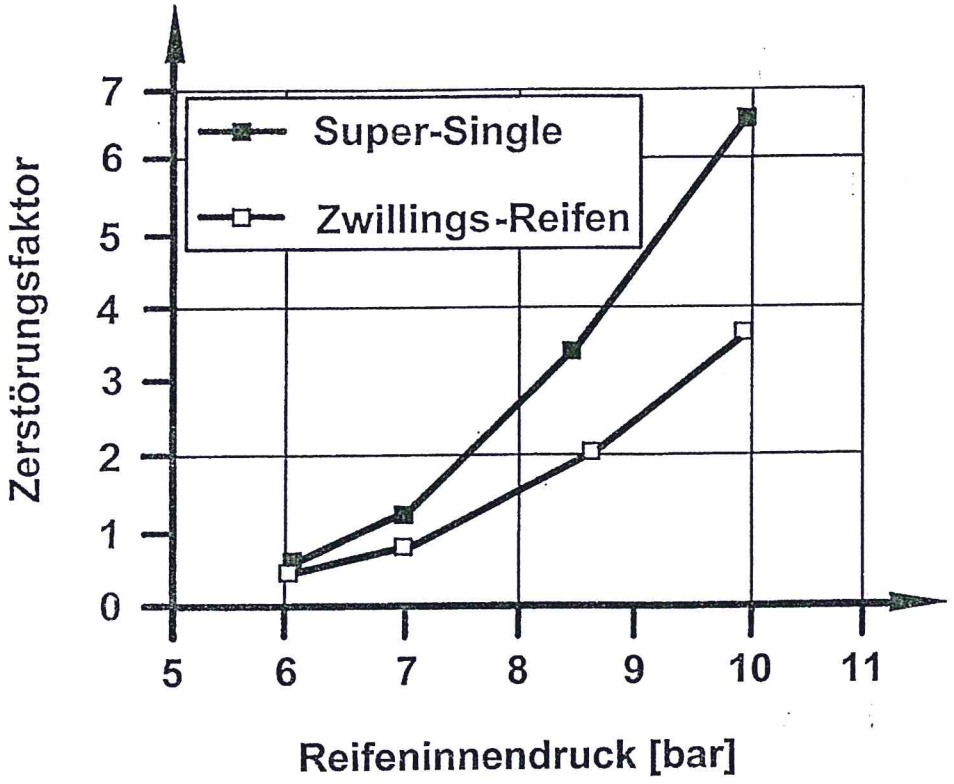


Abbildung 26: Zerstörungsfaktor bei steigendem Reifeninnendruck von Super-Single-Reifen und Zwillingsreifen, nach [10]

6.1.3 Reifeninnendruck

Mit größer werdendem Reifeninnendruck wird die Spurrinnenbildung verstärkt (Abbildung 26), [10]. Im Rundlaufversuch sollte daher der Reifeninnendruck zwar praxisgerecht aber so groß wie möglich gewählt werden, damit die Voraussetzungen für eine starke Spurrinnenbildung gegeben sind. Der Reifeninnendruck wurde daher in Anlehnung an die Praxis wie folgt festgelegt:

a) Reifeninnendruck in der Praxis

Für die Tragfähigkeit von 10 Tonnen Traglast pro Achse wird laut Reifenhersteller der Reifenfülldruck je nach Reifentyp für eine Einzelbereifung etwa zwischen 7,5 und 8,5 bar und für Zwillingsbereifung zwischen ca. 6,5 bar und 8,5 bar angegeben [32, 43]. Der „richtige" Reifenfülldruck wird auf das voll beladenen Fahrzeug bezogen, dass heißt bei leerem Fahrzeug wird mit relativ zu hohem Fülldruck gefahren [9].

b) Reifeninnendruck im Versuch

Für die im Rundlaufversuch verwendeten Single-Reifen (Größe 445/65 R 22,5) wird für die Achslast von 10 Tonnen vom Reifenhersteller ein Fülldruck von 7,5 bar angegeben [32]. Eine Untersuchung zum Innendruck von LKW-Reifen auf deutschen Straßen bezeichnet eine Abweichung von 10 % auf den Solldruck als akzeptabel [44]. Deshalb werden die Reifen im Versuch bei Raumtemperatur und nicht abgesenkter Lastradachse mit einem Innendruck von 7,5 bar bis 8,0 bar versehen, um den Verhältnissen in der Praxis zu entsprechen und durch den hohen Reifendruck eine entsprechende Schädigung der Fahrbahndecke zu erreichen.

6.1.4 Geschwindigkeit

Mit abnehmender Fahrzeuggeschwindigkeit nimmt die Neigung zur Spurrinnenbildung der Fahrbahnoberfläche zu. Insbesondere bei Geschwindigkeiten unterhalb von 10 km/h steigt der relative Zerstörungsfaktor für die Spurrinnenbildung im Asphalt sehr stark an (Abbildung 26) [10]. Für den Rundlaufversuch sollte deshalb eine möglichst geringe Geschwindigkeit gewählt werden, die einerseits eine hohe Belastung für die Asphaltkonstruktion bedeutet und andererseits vom Schwerlastverkehr auf Fernstraßen auch gefahren wird. Die Geschwindigkeit der Lasträder im Versuch wurde in Anlehnung an die Praxis wie folgt festgelegt:

a) Geschwindigkeiten auf Langsamfahrspuren in der Praxis

Das Geschwindigkeitsprofil für ein Bemessungs-Schwerfahrzeug nach RAS-Q beträgt beispielsweise für eine Steigung von 7% mit einer Mindestlänge von 1.200 m etwa 20 km/h [45]. Dies entspricht auch in etwa der Geschwindigkeit von LKW, die auf Kriechspuren von Fernstraßen fahren.

b) Geschwindigkeit im Versuch

Zunächst war beabsichtigt eine Rundlaufgeschwindigkeit von 10 km/h zu wählen. Diese Geschwindigkeit wurde jedoch aus folgenden Gründen auf 20 km/h angehoben:

- Etwa 20 km/h fahren LKW auf Kriechspuren, die gewählte Geschwindigkeit entspricht damit der Praxis.
- Der relative Zerstörungsfaktor ist bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h und 20 km/h ungefähr gleich groß (Abbildung 27) [10].

- Durch die höhere Versuchsgeschwindigkeit wurde gleichzeitig die Anzahl der Überrollungen im vorgesehenen Versuchszeitraum verdoppelt und damit die Beanspruchung des Asphaltes entsprechend vergrößert.
- Vorversuche auf der Rundlaufprüfanlage mit 10 km/h zeigten darüber hinaus, dass bei starken Verformungen der Asphaltoberfläche die Radachse vom Antrieb nicht mehr gleichmäßig bewegt werden konnte. Es traten unerwünschte Abbremsungen und Beschleunigungen je nach Beschaffenheit der Asphaltoberfläche auf. Eine gleichmäßigere Überrollung und damit auch Belastung aller Fahrbahnfelder war erst ab ca. 20 km/h möglich.

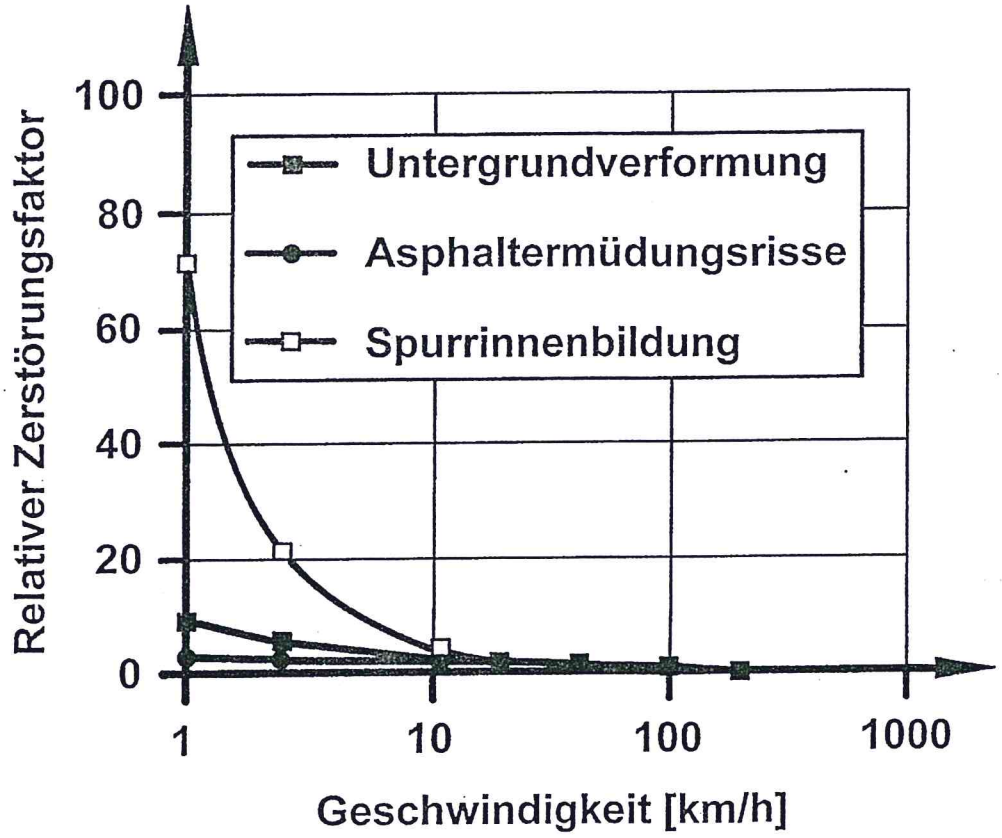


Abbildung 27: Einfluss der Geschwindigkeit auf den Zerstörungsfaktor [10]

6.1.5 Grenzwert für Verformung der Fahrbahnoberfläche

Der Fahrbahnoberflächenzustand hat einen entscheidenden Einfluss auf die Verkehrssicherheit. Ab einer Spurtiefe von 15 mm lässt sich der Fahrzeuglenker einfach von der Spurrinne führen [14], so dass man schon von einer Schienenfüh-

rung sprechen kann [16]. Spurrinnen erschweren das Lenken von Fahrzeugen z.B. beim Spurwechsel und erhöhen bei Nässe die Aquaplaninggefahr.

Von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen wurde ein Konzept für die Erfassung und Bewertung des Zustandes der Bundesfernstraßen entwickelt [46]. Die Beurteilung erfolgt hier an Zustandsmerkmalen wie Ebenheit (z.B. Spurrinnen), Rauheit (z.B. Griffigkeit) und Substanz (z.B. Netzrisse, Ausmagerungen) [46]. Die Beurteilung des Zustandes des jeweiligen Merkmals erfolgt über sogenannte Ziel, Warn- und Schwellenwerte. Der Zielwert entspricht i.d.R. dem Abnahmewert für neue Straßen, der Warnwert beschreibt den Zustand, dessen Erreichen Anlass zur intensivierten Beobachtung gibt und beim Erreichen des Schwellenwertes muss die Einleitung von baulichen oder verkehrsbeschränkenden Maßnahmen geprüft werden. Als Schwellenwert für Bundesfernstraßen ist eine maximale Spurrinnentiefe von 20 mm festgelegt [46].

Beim Rundlaufversuch soll die Beurteilung der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche anhand der Ebenheit in Querrichtung (Spurrinnentiefe) erfolgen und nicht in Anlehnung an den Schwellenwert für Bundesfernstraßen. Als Leistungsgrenze der Asphaltkonstruktionen im Rundlaufversuch wurde das Kriterium „Befahrbarkeit der Testfahrbahn durch die Schwerlasträder" vereinbart. Wenn aufgrund zu großer Unebenheiten die Lasträder nicht mehr gleichmäßig laufen, sondern springen und hierdurch vermehrt die Fahrbahnfelder dynamisch belasten, soll der Versuch abgebrochen werden.

6.1.6 Fahrbahnüberrollungen

Untersuchungen an Splittmastixasphaltkonstruktionen auf deutschen Straßen mit getrennten Richtungsfahrbahnen zeigten, dass die Spurrinnentiefe mit steigenden Schwerverkehr-Lastübergängen zunimmt [47]. Im Rundlaufversuch sollte deshalb die Anzahl der Überrollungen möglichst groß gewählt werden, damit signifikante Schäden an der Fahrbahnoberfläche (Spurrinnen) entstehen. Die Anzahl der erforderlichen Überrollungen im Rundlaufversuch wurde in Anlehnung an Überrollungszahlen, bei denen in der Praxis Spurrinnentiefen entstehen, wie folgt festgelegt:

a) Fahrbahnüberrollungen für praxisrelevante Fahrbahnschäden

In der Praxis werden Fahrbahnerneuerungen bei Spurrinnentiefen ab 20 mm erforderlich [46]. Im Rundlaufversuch soll die Anzahl der Fahrbahnüberrollun-

gen so groß gewählt werden, dass möglichst eine Spurrinnentiefe von ca. 10 bis 20 mm erreicht wird. In der Praxis wurden solche Spurrinnentiefen beispielsweise bei der BAB A7 in Hamburg vor dem Elbtunnel nach 12-jähriger Befahrung von insgesamt ca. 25 Millionen Lastwechseln mit Schwerfahrzeugen ab einer Achslast von 2,8 t gemessen [14].

Versuche der OECD (Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) auf der Rundlaufprüfanlage in Nantes (Freianlage) zeigten, dass je nach Asphaltkonstruktion nach 1,2 bis 2,5 Millionen Lastwechseln mit einer 10 t- und 11,5 t-Achse Spurrinnentiefen zwischen 10 mm und 20 mm entstanden [25].

Versuche auf verschiedenen anderen Rundlaufprüfanlagen [17, 22, 48] und die Erfahrungen der STUVA haben gezeigt, dass je nach Asphaltkonstruktion bereits nach etwa 500.000 bis 1 Millionen relativ große Spurrinnentiefen (Testfeld) erreicht wurden. Bei Versuchen mit aufgeheizter Oberfläche war sogar bereits nach 250.000 Überrollungen das Versuchsziel erreicht [21, Seite 45].

b) Überrollungen im Versuch

Aufgrund der hohen Oberflächentemperatur (50° C bzw. 40° C an Fahrbahnoberfläche) und den anderen verschärften Bedingungen im Rundlaufversuch (z.B. permanente hohe Achslast von 10 Tonnen) wurde eine Anzahl von ca. 750.000 Überrollungen bis zum Erreichen des Versuchsziels (Spurrinnentiefe, bzw. signifikante Unterschiede der verschiedenen Asphaltkonstruktionen) abgeschätzt. Die Versuchsdauer beträgt dann etwa drei Monate. In dieser Zeit werden die Fahrbahnfelder 10 Stunden täglich an 5 Tagen in der Woche überrollt. Für zwei Lasträder mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h und einer Testfahrbahnlänge von ca. 31,4 m ergeben sich somit ca. 12.700 Überrollungen pro Tag und insgesamt in 3 Monaten ca. 750.000 Überrollungen. Falls diese abgeschätzte Überrollungszahl nicht ausreichend ist, wird die Testfahrbahn weiter mit bis zu maximal 900.000 Überrollungen belastet. Sollte vor dem Erreichen der angestrebten Überrollungszahl bei einem Großteil der Fahrbahnfelder der Grenzwert für die Verformung der Fahrbahnoberfläche festgestellt werden (vgl. 6.1.5, Punkt (2)), ist das Versuchziel vor dem Abschluss von 750.000 Überrollungen erreicht und der Versuch wird beendet.

6.2 Versuchsdurchführung

Nach Einbau aller Versuchsfelder und abgeschlossener Erprobungsphase wurde die jeweilige Luft- und Soletemperatur so eingestellt, dass die vorgegebenen Solltemperaturen sicher erreicht wurden. Die Temperieranlage wurde freitags nachmittags entsprechend eingestellt. Am Montagmorgen wurden zunächst die Temperatureinstellungen überprüft gegebenenfalls angepasst und nachfolgend der Rundläufer gestartet.

Zu Versuchsbeginn muss besonderes Augenmerk auf die Temperatur der Deckschichtoberfläche im Bereich der Radlaufspur gelegt werden. Bedingt durch die entstehende Reibungswärme zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche steigt die Temperatur im Radlaufbereich zunächst an. Um nicht zu hohe Temperaturen in der Radspur zu erhalten, wird der Rundläufer i.d.R. mit ca. 5° C niedrigeren Temperaturen auf der Deckschicht gestartet. Durch die entstehende Reibungswärme wird die Temperatur in der Radlaufspur in der Startphase allmählich ansteigen, die Solltemperatur erreichen und evtl. die vorgegebene Solltemperatur für kurze Zeit geringfügig überschreiten (Abbildung 30). Eine andere Vorgehensweise zur Anpassen der Solltemperatur auf der Deckschicht der Fahrbahn ist wenig erfolgreich, da schnellere oder größere Temperaturänderungen als Vorgabe für die Regelung der Temperieranlage stets zu Abweichungen der Solltemperatur über einen längeren Zeitraum führen.

Nach dieser Startphase wird auch auf der Deckschicht im Bereich der Radlaufspur die vorgeschriebene Solltemperatur erreicht.

Je nach Bedarf wird der Rundläufer nach z.B. 4 Betriebsstunden angehalten, um die Anlagenteile (z.B. Stoßdämpfer, Radaufhängung, Reifen) und die Fahrbahnoberfläche inspizieren zu können. In der Zeit in der der Rundläufer z.B. zu Wartungszwecken steht, wird der Fahrbahn-Überrollungszähler automatisch gestoppt. Wenn die Prüfungen abgeschlossen sind (nach ca. 15 Minuten), wird der Rundlaufversuch wie beschrieben fortgesetzt.

In den ersten Versuchswochen liefen die Lasträder relativ gleichmäßig über die Testfahrbahn. Mit zunehmender Versuchsdauer ergaben sich jedoch unterschiedliche Spurrinnentiefen in den verschiedenen Fahrbahnfeldern. Dies führte insbesondere im Fugenbereich zwischen den Versuchsfeldern zu einem unruhigeren Lauf des Rundläufers. Dies konnte durch ein entsprechendes Schwingen der Lastachse festgestellt werden. Die Räder sind jedoch durch Stoßdämpfer und ein Luftfedersystem (Balg) schwingungstechnisch von der Radachse entkoppelt, so

dass das Schwingen der Lastachse nicht zu einem augenscheinlich erkennbaren Schwingen des Lastrades führte. Wie jedoch die Längsprofilaufnahme ergeben hat, sind insbesondere die Fahrbahnfeldbereiche, die direkt nach Überrollen der Fuge zwischen den Feldern befahren werden, stärker durch dynamische Kräfte der Lasträder beansprucht worden. Dies konnte in der Längsprofilaufnahme durch deutlich stärkere Spurrinnentiefen nachgewiesen werden (Abbildung 36).

Die Versuchsreihe musste unterbrochen werden, als Probleme an der Radaufhängung auftraten. Ferner gab es Probleme mit einigen Wärmetauscherplatten, die aufgrund eines schweißtechnischen Fehlers nicht dicht waren. In einem solchen Fall lief Sole langsam aus dem betreffenden Wärmetauscher. Da jedoch der Solevorrat im Solekreislauf ausreichend groß war, konnten diese Verluste bis zum Stopp des Rundläufers kompensiert werden. Der undichte Wärmetauscher musste dann ausgebaut und im Leckagebereich wieder dicht geschweißt werden. Hierzu war es erforderlich, mit den speziellen Lastverteilungsträgern und der Traverse (Abbildung 21 und Abbildung 22) die Asphaltträgerplatte mit der Asphaltkonstruktion anzuheben und den defekten Wärmetauscher auszubauen. Nach der Reparatur des Wärmetauschers wurde dieser wieder an seine ursprüngliche Position gesetzt, die Asphaltträgerplatte mit der Asphaltkonstruktion wieder auf dem Wärmetauscher positioniert und das jeweilige Fahrbahnfeld wieder fest mit dem Hallenboden verschraubt. Anschließend wurden die Fugen zu den Nachbarfeldern wieder mit Mörtel verfüllt. Nach einer ausreichenden Erhärtung des Mörtels konnte der Rundlaufbetrieb wieder fortgesetzt werden. Die Versuchsauswertung hat keinen negativen Einfluss aufgrund des Ein- und Ausbaus von Versuchsfeldern aufgrund der Reparatur von Wärmetauschern gezeigt.

Abends wurde die Rundlaufanlage gestoppt (kein Nachtbetrieb). Die Radachse wurde hierbei durch die im Drehturm gelagerten hydraulischen Pressen (Abbildung 6) automatisch angehoben, damit die Schwerlasträder nicht über Nacht die Asphaltfahrbahn statisch belasten. Die Lufttemperatur wurde über Nacht geringfügig abgesenkt. Die Soletemperatur blieb konstant.

Am nächsten Tag wurde dann der Rundläufer wie beschrieben wieder in Betrieb genommen. Der Rundläufer war normalerweise montags bis freitags in Betrieb. Samstags wurden Profilaufnahmen durch das isac durchgeführt. In dieser Zeit wurde die Lufttemperatur im Versuchsraum abgesenkt (Abbildung 29). Am späten Samstagnachmittag und am Sonntag wurde der Versuchsraum entsprechend dem Versuchsprogramm wieder auf die vorgeschriebene Lufttemperatur gebracht. Gegen Ende der Versuchsreihe wurde die Profilaufnahme der Fahrbahnplatten von

samstags auf freitags verschoben. Die Temperaturabsenkung wurden in diesen Fällen entsprechend früher vorgenommen. Die Anhebung der Lufttemperatur erfolgte nach wie vor erst im Laufe des Samstags.

7 Versuchsbegleitende Messungen

Während des Versuches wurde ein umfangreiches Messprogramm zur Dokumentation der Oberflächenveränderungen und sämtlicher Randbedingungen durchgeführt. Die Messungen wurden an den Versuchsablauf, d. h. an den veränderten Versuchparameter Temperatur angepasst. Die erste Messung des gesamten Messprogramms erfolgte nach 8.944 Überrollungen bei 50°C. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Höhen der Fahrbahnfelder über ein Nivellement in der Höhe aufgenommen sowie Oberflächen der Querprofile links, Mitte und rechts gemessen. Während des folgenden Versuchsabschnittes bei 40°C Oberflächentemperatur wurde das Querprofil Mitte in regelmäßigen Abständen (insgesamt 14 Messungen aufgenommen.

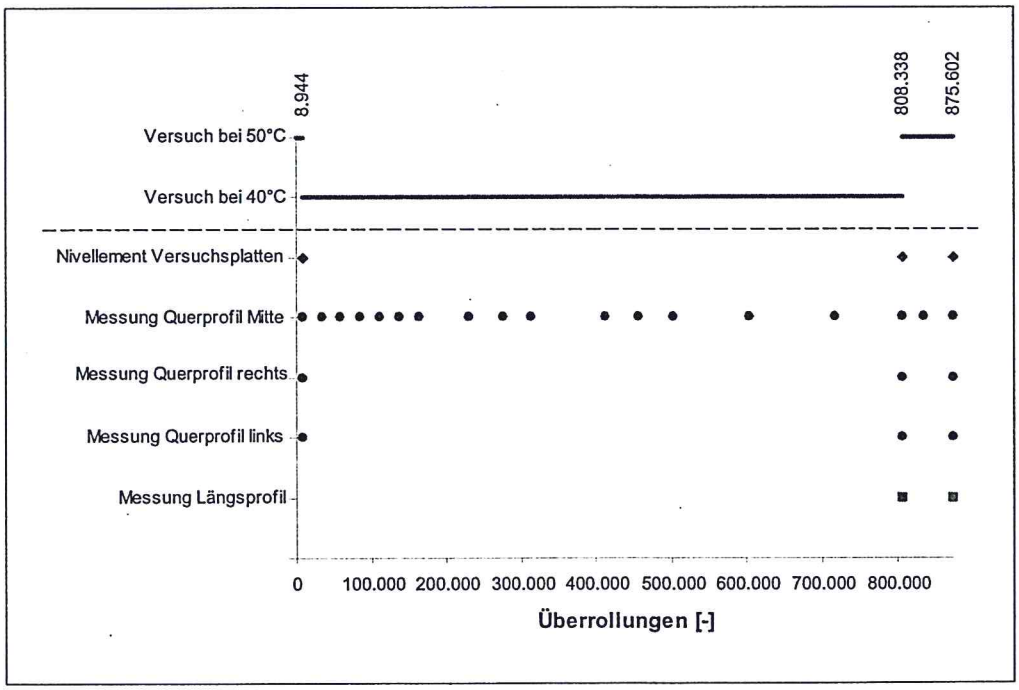


Abbildung 28: Messprogramm während des Rundlaufversuchs

Zum Ende dieses Abschnittes bei 808.338 Überrollungen wurden wieder sämtliche Messungen wie zu Versuchsbeginn vorgenommen. Bedingt durch die aufgetretenen ungleichmäßigen Verformungen im Längsprofil, wurde im Betreuungsaus-

schuss beschlossen zusätzlich das Längsprofil über ein Nivellement in der Radspur zu dokumentieren. Nach der Erhöhung der Oberflächentemperatur von 40°C auf 50°C wurde eine Messung des Querprofils Mitte vorgenommen und zum Versuchsende nach 875.602 Überrollungen erneut das gesamte Messprogramm incl. Längsprofilmessung durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt das Messprogramm in einem Diagramm.

7.1 Temperatur, Geschwindigkeit und Überrollung

Während des Rundlaufversuches wurden die Temperierung, die Anzahl der Überrollungen durch die Lasträder und die Geschwindigkeit des Rundläufers gemessen.

Die genannten Messwerte konnten alle an digitalen Anzeigen abgelesen und protokolliert werden. Die Geschwindigkeit und die Temperaturen wurden darüber hinaus noch mit einem Rechner in der Regel alle 5 Minuten erfasst. Die einzelnen Messwerte streuen je nach Lage (Deckschicht, Binderschicht, Tragschicht) der Temperaturfühler unterschiedlich stark. Die Ursachen für die Streuungen der Temperaturmesswerte sind in erster Linie zurückzuführen auf:

- Messungenauigkeit des jeweiligen Temperaturfühlers und der gesamten Messkette
- Ungleichmäßige Verteilung der Wärmeleitpaste im Hüllrohr
- Unterschiedliche Dicke des Fahrbahnbelages aufgrund der jeweiligen Spurrinnentiefe (Abbildung 10).

Die Mittelwerte der Temperaturmessungen geben einen guten Überblick über die Temperaturbelastung der Fahrbahnfelder im Rundlaufversuch. Die installierte Messtechnik ließ Temperaturmessungen mit einer Genauigkeit von ca. ± 2° K zu. Die Temperaturmessungen (vgl. Kapitel 4.5) haben folgendes ergeben:

a) Versuche mit einer Soll-Temperatur auf der Deckschicht von + 40° C (Abbildung 30)

Die Temperaturen im Versuchsraum wurden wie in Abbildung 29 schematisch dargestellt vorgegeben. Die nachfolgende Bewertung der Temperaturmessungen bei +40° C auf der Deckschicht wird beispielhaft an den Messdaten vom 29.11.2002 durchgeführt. Im Diagramm sind stets die Mittelwerte der Temperaturmessungen aller Fahrbahnfelder dargestellt. In den Asphaltkonstruktionen wurden folgende Temperatur-Mittelwerte gemessen:

- Deckschicht (Abbildung 30)

Zu Versuchsbeginn steigen die Temperaturen, da durch die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn zusätzliche Wärme an der Oberfläche der Deckschicht entsteht. Ohne den Anfahrbereich zu betrachten, liegen die Temperaturen auf der Deckschicht der Fahrbahnoberfläche im Bereich der Radlaufspur im Mittel bei ca. 41° C.

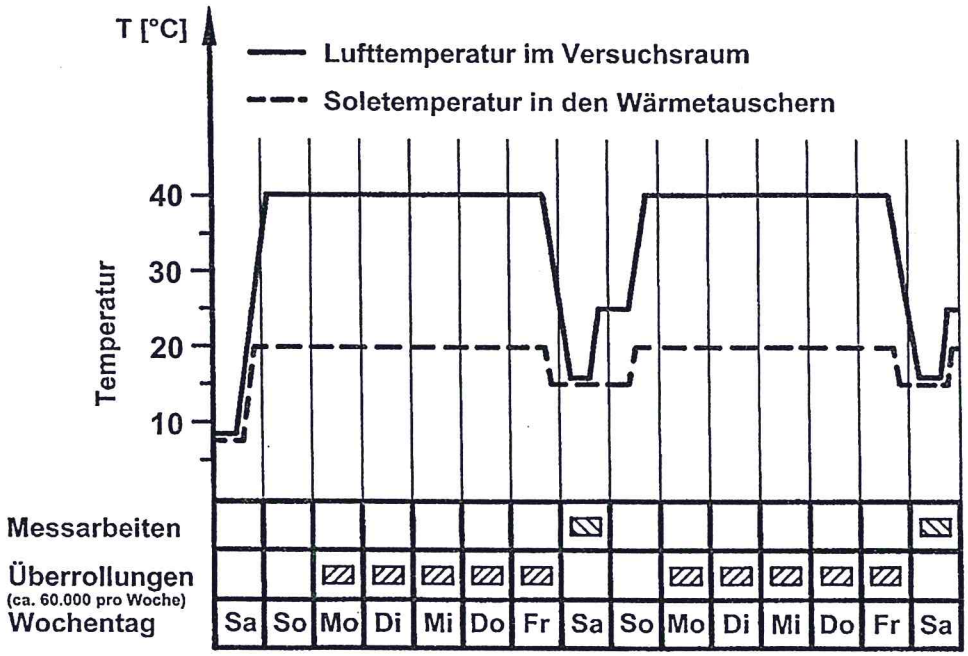


Abbildung 29: Beispiel eines Wochenplans für die Temperierung des Versuchsraumes (Schema)

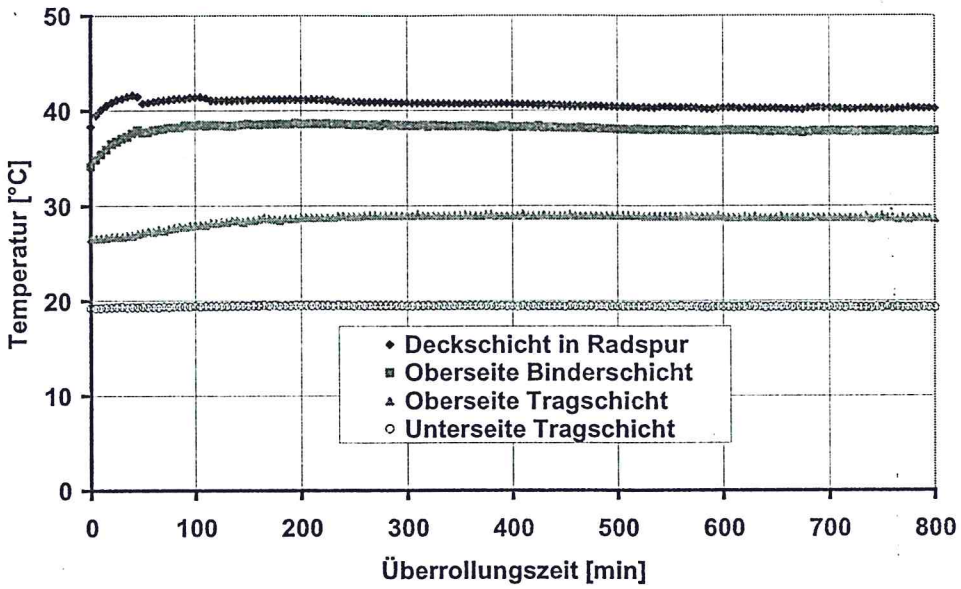


Abbildung 30 : Temperaturen (Mittelwerte aller Fahrbahnfelder) in den verschiedenen Asphaltschichten bei einer Temperatur in der Radlaufspur der Deckschicht von +40° C (Soll-Temperatur)

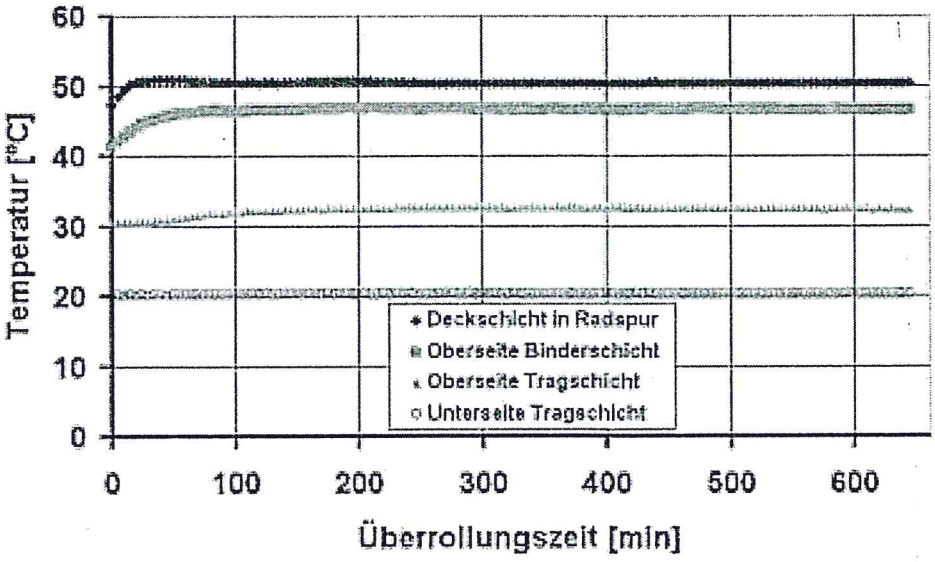


Abbildung 31: Temperaturen (Mittelwerte aller Fahrbahnfelder) in den verschiedenen Asphaltschichten bei einer Temperatur in der Radlaufspur der Deckschicht von +50° C (Soll-Temperatur)

- Oberseite Binderschicht (Abbildung 30)

Mit Beginn des Versuches steigen die Temperaturen auch in der Binderschicht aufgrund des Wärmeeintrags durch die Lasträder (Reibungswärme) an. Die übrigen Temperaturmesswerte betragen im Mittel ca. + 38° C.

- Oberseite Tragschicht (Abbildung 30)

  Die Messwerte liegen im Mittel bei ca. 29° C.

- Unterseite Tragschicht (Abbildung 30)

  Die Messwerte betragen im Mittel ca. 20° C.

Zusammenfassend kann für die Versuche mit einer Temperatur auf der Deckschicht von +40° C (Soll-Temperatur) im Hinblick auf die gemessenen Temperaturen in den verschiedenen Asphaltschichten folgendes festgestellt werden:

- Die Soll-Temperatur von +40° C in der Radlaufspur wurde geringfügig überschritten. Sie lag im Mittel bei ca. 41° C.
- Auf der Unterseite der Tragschicht wurden im Mittel ca. 20° C gemessen. Dies entspricht der vorgegebenen Soll-Temperatur.
- An der Oberseite der Binderschicht bzw. an der Oberseite der Tragschicht wurden im Mittel ca. 38° C bzw. 29° C gemessen.

b) Versuche mit einer Soll-Temperatur auf der Deckschicht von +50° C (Abbildung 31)

Die nachfolgende Bewertung der Temperaturmessungen bei einer Soll-Temperatur von +50° C auf der Deckschicht wird beispielhaft an den Messdaten vom 16.01.2003 durchgeführt. Im Diagramm sind stets die Mittelwerte der Temperaturmessungen aller Fahrbahnfelder dargestellt. Die einzelnen Messwerte streuen je nach Lage der Temperaturfühler in den verschiedenen Asphaltschichten unterschiedlich stark. In den Asphaltkonstruktionen wurden folgende Temperatur-Mittelwerte gemessen:

- Deckschicht (Abbildung 31)

  Zu Versuchsbeginn steigen die Temperaturen, da durch die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn zusätzliche Wärme an der Oberfläche der Deckschicht entsteht. Ohne den Anfahrbereich zu betrachten, liegen die Temperaturen an der Deckschicht im Bereich der Radlaufspur im Mittel bei ca. 51° C.

- Oberseite Binderschicht (Abbildung 31)

Mit Beginn des Versuches steigen die Temperaturen auch in der Binderschicht aufgrund des Wärmeeintrags durch die Lasträder (Reibungswärme) an. Die übrigen Temperaturmesswerte betragen im Mittel ca. +46° C.

- Oberseite Tragschicht (Abbildung 31)

  Die Messwerte liegen im Mittel bei ca. 32,5° C.

- Unterseite Tragschicht (Abbildung 31)

  Die Messwerte betragen im Mittel ca. 20° C.

Zusammenfassend kann für die Versuche mit einer Soll-Temperatur auf der Deckschicht von +50° C im Hinblick auf die gemessenen mittleren Temperaturen folgendes festgestellt werden:

- Die Soll-Temperatur von +50° C in der Radlaufspur wurde geringfügig überschritten. Sie lag im Mittel bei ca. 51° C.
- Auf der Unterseite der Tragschicht wurden im Mittel ca. 20° C gemessen. Diese Temperatur entspricht der Soll-Temperatur.
- An der Oberseite der Binderschicht bzw. an der Oberseite der Tragschicht wurden im Mittel ca. 46° C bzw. 32,5° C gemessen.

Die eingeregelten Temperaturgradienten in den Asphaltkonstruktionen zeigt Abbildung 32.

Die Sole-Zulauf-Temperatur schwankte aufgrund der Regelgenauigkeit der Temperierungsanlage in der Regel um ca. 2 K und die der Sole-Rücklauf-Temperatur nur um ca. 1 K. Die Sole-Zulauf-Temperatur wurde über die gesamte Versuchszeit nahezu konstant gehalten. Hingegen wurde die Lufttemperatur im Versuchsraum so variiert, dass die geforderte Temperatur (40° C bzw. 50° C) auf der Deckschicht in der Radlaufspur eingehalten werden konnte. Veränderungen der Lufttemperatur waren insbesondere zu Versuchsbeginn erforderlich, um die entstehende Reibungswärme zwischen Lastrad und Fahrbahn kompensieren zu können (Abbildung 30 und Abbildung 31). Da alle Fahrbahnfelder der gleichen jeweiligen Lufttemperatur ausgesetzt waren, wird auch bei einer Anpassung der Lufttemperaturen an die Gegebenheiten die Vergleichbarkeit der Fahrbahnfelder durch gleiche Temperaturbelastung gewahrt.

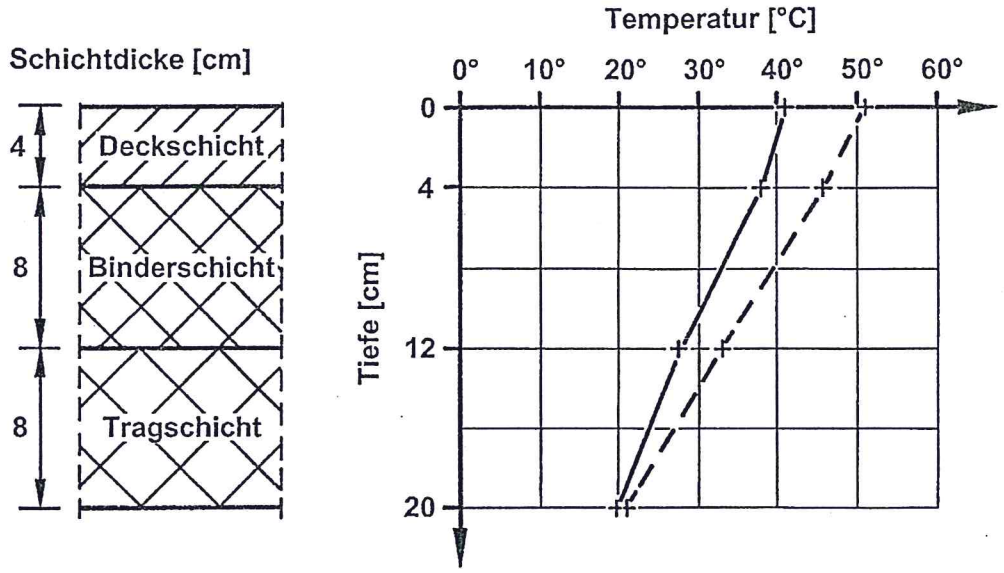


Abbildung 32: Temperaturgradienten in den Asphaltkonstruktionen

7.2 Geometrische Aufnahme der Oberfläche im Querprofil

Zur Erfassung der Spurrinnentiefenzunahme wurde die Oberfläche in mit dem Betreuungskreis festgelegten Querprofilen regelmäßig aufgenommen. In Abbildung 33 ist die Lage der Querprofilmessungen für die Querprofile links, Mitte und rechts zu erkennen. Vor der ersten Messung wurden Markierungsnägel an den Anfangs- und Endpunkte eingeschlagen, damit sämtliche Messungen exakt im gleichen Profil vorgenommen wurden.

Die Messung erfolgte über eine horizontierte Richtlatte über dem Querprofil, auf der ein elektronischer Messschieber verschoben werden kann (vgl. Abbildung 34). Der Messschieber wurde senkrecht auf die Fahrbahnoberfläche aufgesetzt. Bezugspunkt ist die Nagelhöhe an der Innenseite der Fahrbahn. Außerhalb der Radspur wurden die Messungen alle 5 cm vorgenommen, innerhalb der Radspur im Abstand von 1 cm. Der letzte Messpunkt ist der Begrenzungsnagel auf der Außenseite des Querprofils. Die erste Messung, aus der das Nullprofil ermittelt ist, erfolgte nach 8.944 Überrollungen. Die weiteren 17 Messungen wurden in regelmäßigen Abständen über den Versuchszeitraum durchgeführt, wobei die 17. und 18. Messung im letzten Versuchsabschnitt bei 50°C Oberflächentemperatur erfolgte.

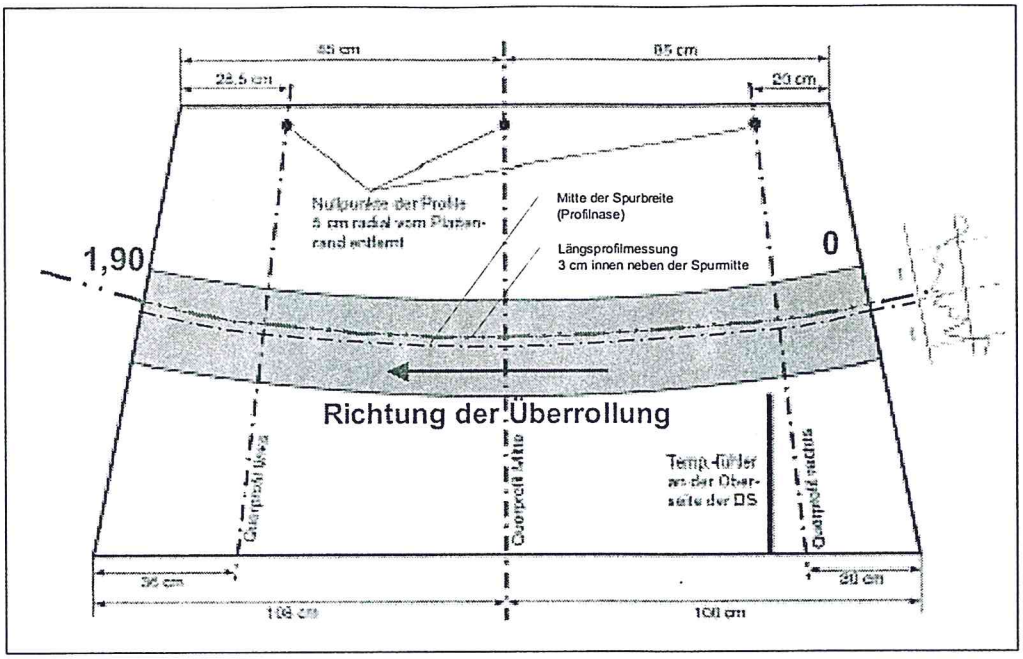


Abbildung 33: Lage der Profilabschnitte auf den Fahrbahnoberflächen

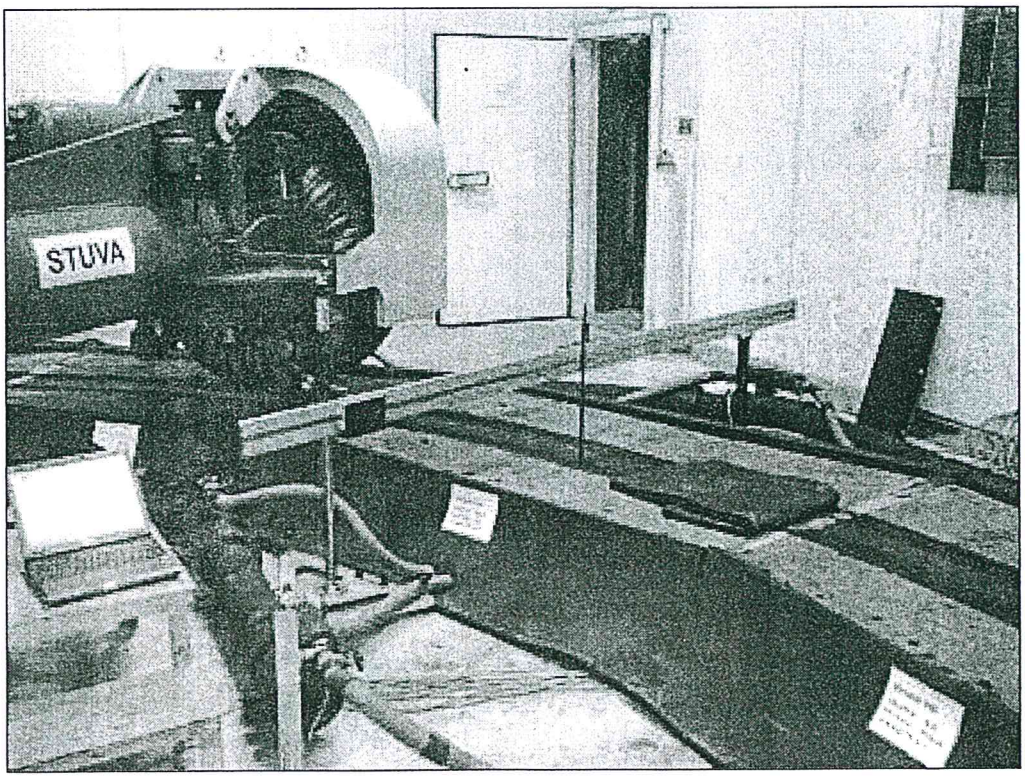


Abbildung 34: Querprofilmessung

Durch die z. T. stark fortschreitenden Spurrinnenbildung in der Radspur und der damit verbundenen Aufwölbung neben der Radspur, die durch die exakte

Spurtreue des Laufrades nicht verdrückt wurde, mussten die Aufwölbungen in regelmäßigen Abständen weggestemmt werden. Andernfalls hätten die Radflanken auf diesen Wulsten aufgesessen und die Radspur wäre nicht mit dem vollen Gewicht von 5 t Radlast belastet worden.

Die Entwicklung der Spurrinnen ist für jede Fahrbahnfläche in Anhang 6 zusammengestellt.

7.3 Nivellement der Versuchsplatten

Nach 8.944 Überrollungen, nach Abschluss des Versuchabschnittes bei 40°C Oberflächentemperatur und nach Versuchsende wurde die Lage der Fahrbahnflächen mit einem Nivellier aufgemessen. Die Höhen wurden an ein lokales Höhennetz im Versuchsraum angeschlossen.

Zu Beginn des Versuchs wurden die Höhen der vier Eckpunkte und vier weitere Punkte neben den Radspuren vermessen. Durch die Aufwölbungen neben den Spurrinnen, die größtenteils weggestemmt werden mussten, damit die Reifen uneingeschränkt in der Radspur auflagen, gingen diese Punkte im Laufe des Versuchs verloren und konnten bei den weiteren Nivellements nicht vermessen werden. Die ermittelten absoluten Höhen der Feldecken sind in Anhang 5 zusammengestellt.

7.4 Nivellement des Längsprofil

Bedingt durch die dynamischen Zusatzlasten die sich mit der statischen Radlast von 5 t überlagerten, zeigten die Fahrbahnfelder im Längsprofil einen zum Teil stark unterschiedlichen Spurtiefenverlauf (s. Abbildung 35).

Im Betreuungsausschuss wurde daher beschlossen mit Hilfe eines Nivellements die Spurrinnentiefe im Längsprofil aufzunehmen. Für die Messung wurde eine Spur 3 cm innen neben der Radspurmitte gewählt. Diese Spur zeichnet sich durch das Reifenprofil deutlich ab (vgl. Abbildung 33). Die Messpunkte liegen im Abstand von 10 cm. Das Nullprofil wurde am Anfang des Versuches nicht ermittelt, so dass es aus den Querprofilen links, mitte und rechts rekonstruiert wurde. In Abbildung 36 sind beide Längsprofilmessungen über alle Fahrbahnfelder sowie das rekonstruierte Nullprofil stark überhöht dargestellt.

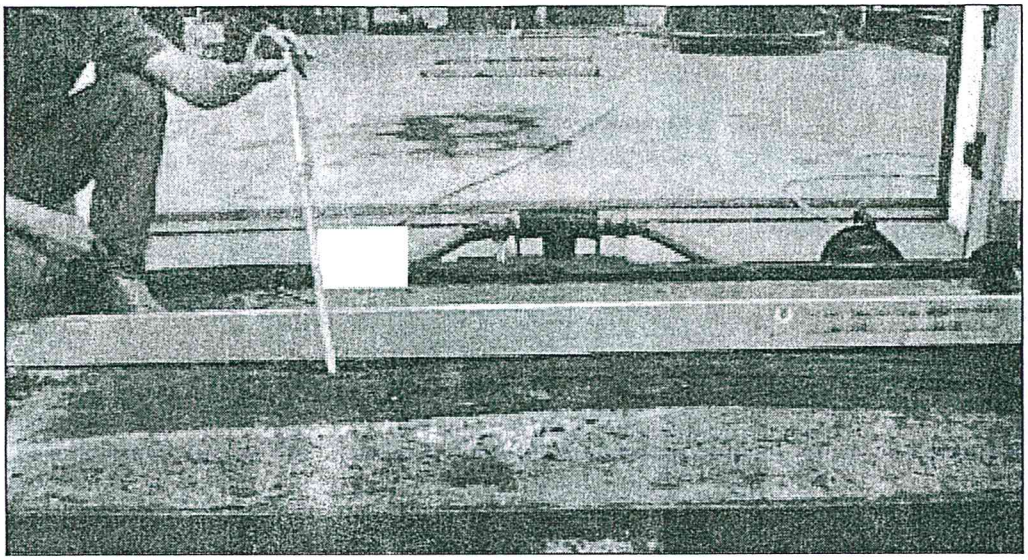


Abbildung 35: Verformungen im Längsprofil der Fahrbahn V05 nach 808.338 Überrollungen

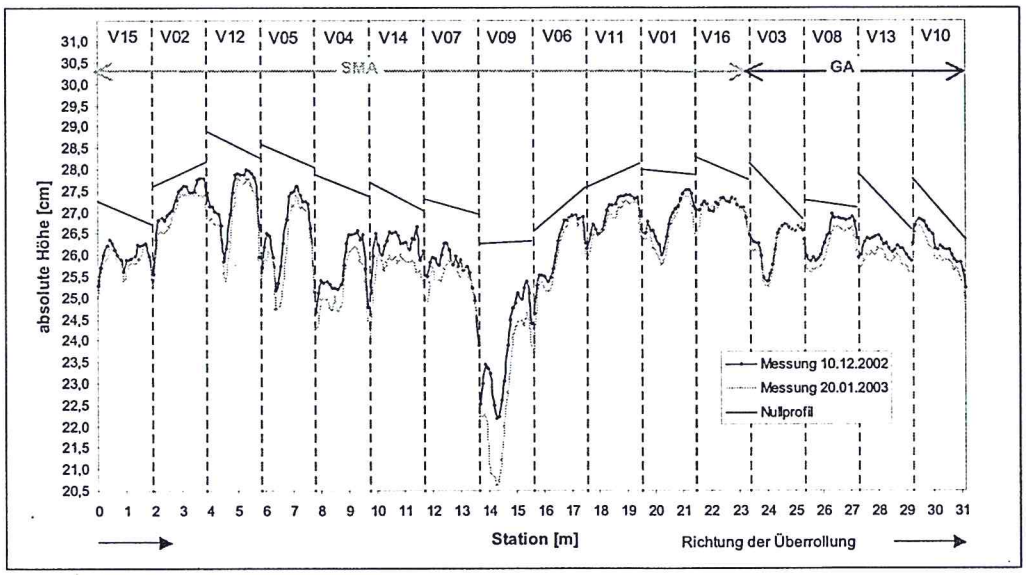


Abbildung 36: Darstellung des Längsprofils in der Radspur über alle Fahrbahnfelder

8 Zustandserfassung der Fahrbahnfelder nach Versuchsende

8.1 Allgemeines

Nach Ende der Versuche wurden umfangreiche Untersuchungen an den Versuchsplatten durchgeführt. Zunächst wurde das gesamte Messprogramm für die

geometrische Aufnahme von Messdaten an den Platten im eingebauten Zustand so durchgeführt, wie in den Kapiteln 7.2, 7.3 und 7.4 beschrieben wurde. Nach Ausbau der Versuchsplatten wurden diese in Abstimmung mit dem Betreuerkreis im Querprofil Mitte getrennt. Anschließend erfolgte eine geometrische Erfassung der Trennflächen. Weiterhin wurden sie visuell auf Besonderheiten wie Risse und Schichtdeckenabhebungen untersucht. Aus der hinteren Plattenhälfte an das Querprofil Mitte anschließend wurden für die Prüfung des Schichtenverbundes und die Mischgutuntersuchungen ein ca. 30 cm breiter Streifen herausgeschnitten, der wiederum in drei Teile (unbelastete Innenseite, belastete Radspur, unbelastete Außenseite) zerteilt wurde.

8.2 Fertige Schicht

In der folgenden Abbildung ist die Lage der untersuchten Probestreifen dargestellt.

Diese Streifen wurden weiterhin in drei Abschnitte unterteilt: den inneren und äußeren unbelasteten Abschnitt sowie den mittleren Abschnitt, der im Bereich der Radspur liegt und somit die Verformungen aufwies. Die Schnittfläche wurde visuell auf Homogenität der Schicht sowie vorhandene Risse untersucht. Für die Darstellung der Schichtdicken und die Verformungen innerhalb der Schichtgrenzen wurden die Schnittflächen der rechten Versuchsfeldhälften mit einem Messschieber wie bei der Querprofilmessung vermessen. Die ermittelten Werte sind in Anhang 7 zusammengestellt, weiterhin werden die Diagramme durch Fotos der Schnittflächen im Querprofil Mitte ergänzt. Aufgenommen wurden die Schichtgrenzenverläufe aus denen die mittlere Spurtiefe in der Radspur durch Integration berechnet wurde. Eine schematische Darstellung eines aufgenommenen Querschnitts zeigt die Abbildung 38. Die Messung erfolgte wie bei der Querprofilaufnahme vom inneren Rand aus (x=0).

Neben der Aufnahme der Schichtgrenzenverläufe wurde aus der Innenseite des Probestreifens ein Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm gewonnen (vgl. Abbildung 39), an dem der Haftverbund nach Leutner bestimmt wurde.

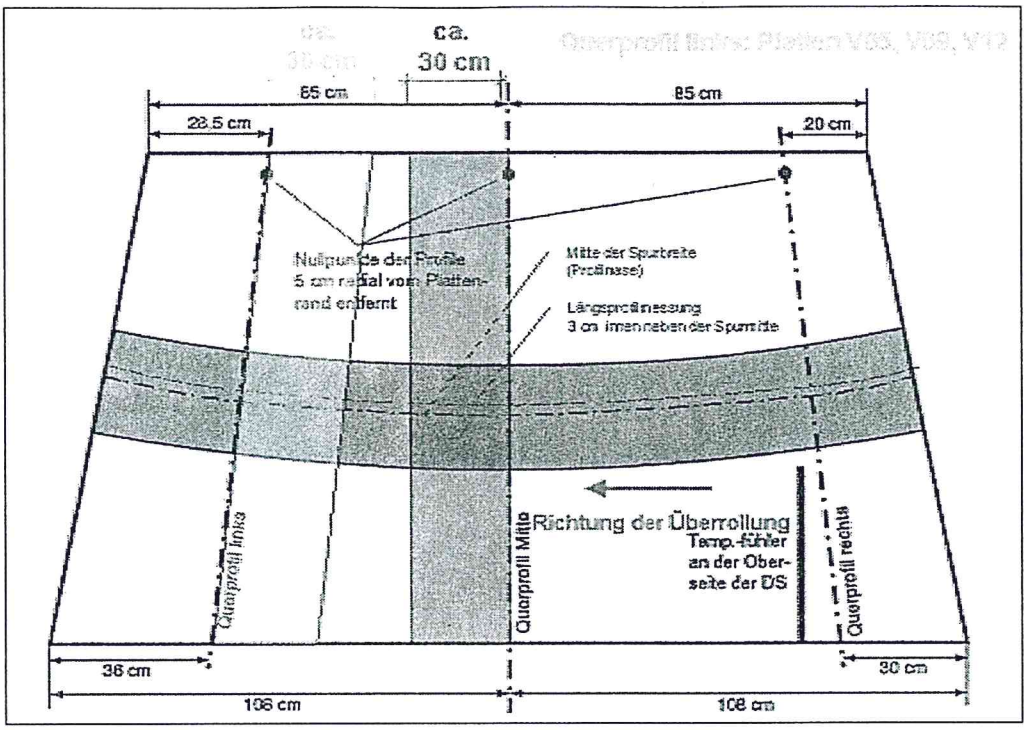


Abbildung 37: Lage der für die Mischgutuntersuchung relevanten Bereiche

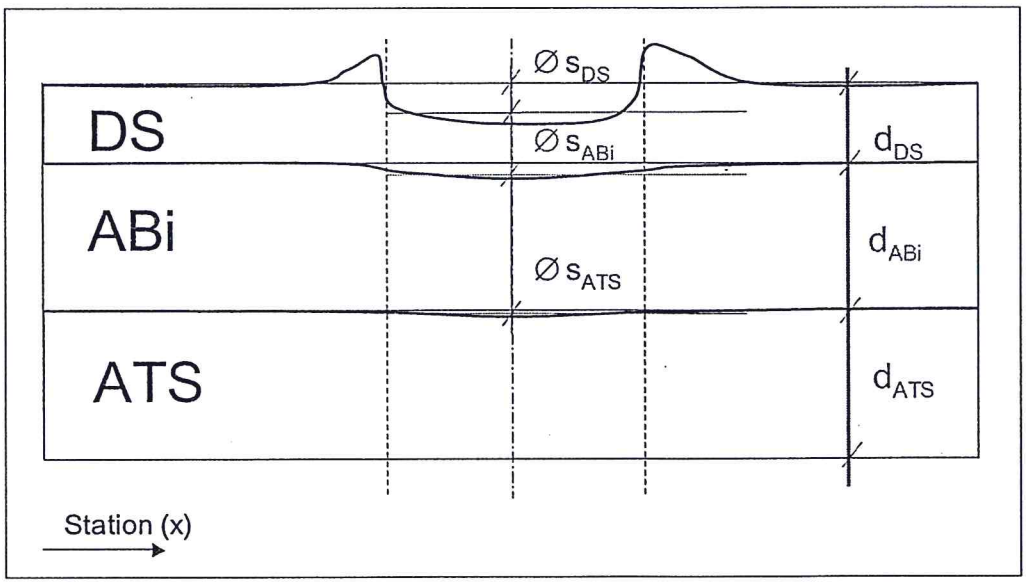


Abbildung 38: schematische Darstellung der aufgenommenen Querschnitte

8.3 Mischgutuntersuchung der fertigen Schicht

Für die anstehenden Kontrollprüfungen nach Versuchsende bei 875.602 Überrollungen wurden die gewonnenen Probestreifen weiter zerschnitten. Aus den mittle-

ren gestörten Bereichen, d. h. durch die Überrollungen belasteten Abschnitte, wurden Probekörper der einzelnen Schichten gewonnen. Analog dazu wurden Probekörper aus dem äußeren Bereich, d. h. dem ungestörten Bereich herausgeschnitten. Die Übergangsbereich zwischen dem gestörten und dem ungestörten Bereich wurde dabei entfernt, damit Auflockerungen durch die Aufwölbung nicht die Messdaten verfälschen. In Abbildung 39 sind die jeweils sechs Proben (zwei je Schicht) schematisch dargestellt. Aus dem Anhang 3 können sämtliche Daten der Kontrollprüfung entnommen werden.

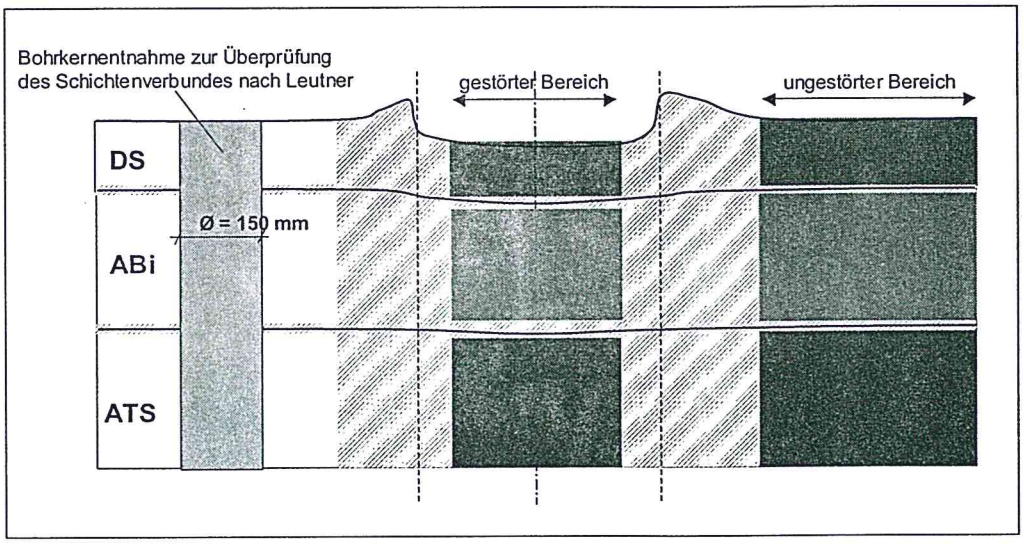


Abbildung 39: Untersuchungen am Probestreifen

9 Bewertung der Prüfergebnisse

Im folgenden werden die Prüfergebnisse für die jeweiligen Untersuchungen dargestellt und bewertet.

9.1 Verformung der Oberfläche in den Querprofilen

Die Verformungen in der Radspur nahmen während der ersten 8.944 Überrollungen z. T. stark zu, so dass die Oberflächentemperatur für den weiteren Versuchsablauf auf 40°C abgesenkt wurde. Im weiteren Versuchsverlauf war bei sämtlichen Fahrbahnfeldern eine stetige kontrollierte Zunahme der mittleren Spurrinnentiefe zu beobachten. Bei der Betrachtung der Querprofile ist keine gleichmäßig tiefe Spur zu erkennen, sondern es bilden sich Längsrinnen und áWülste. Dies ist damit zu erklären, dass sich trotz der Wahl zweier verschiedener LKW-Reifen mit unterschiedlichem Profil einzelne Profilstrukturen überlagerten und durch die

Spurtreue im Asphalt abbildeten. In der Abbildung 40 ist diese Abbildung der Profile in der Spurrinne beispielhaft dargestellt.

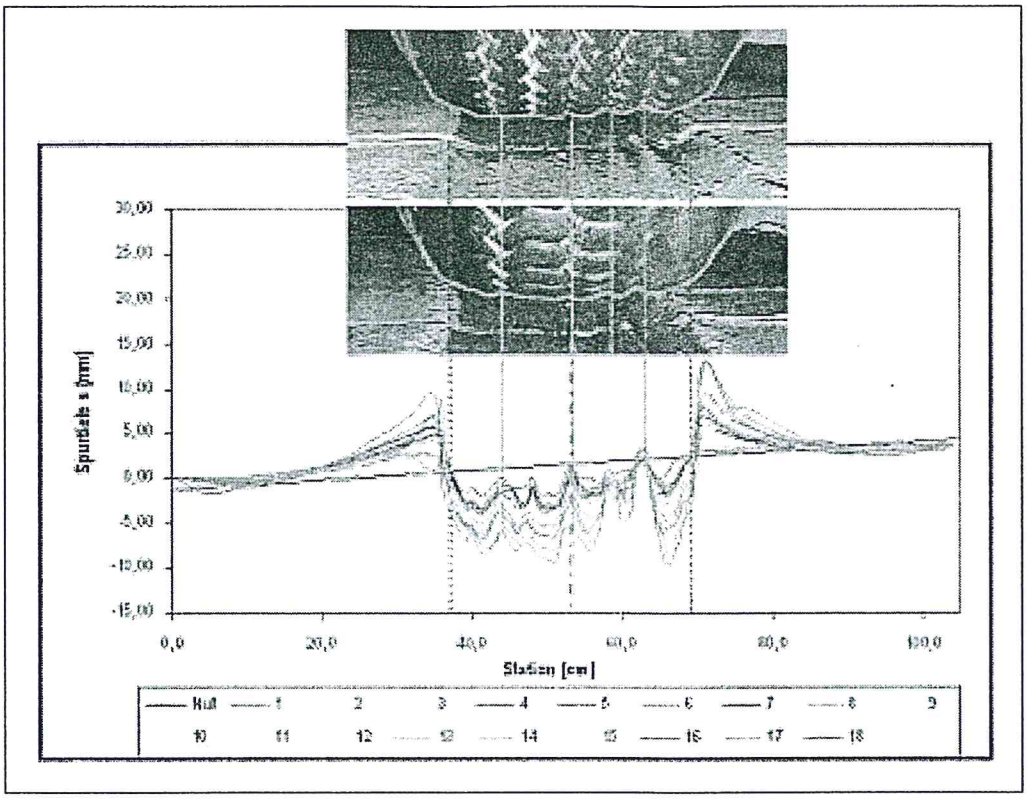


Abbildung 40: Überlagerung der unterschiedlichen Reifenprofile und deren Abbildung in der Spurrinne

Beim Vergleich der mittleren Spurtiefen in den Querprofilen links, Mitte und rechts ist zu erkennen, dass diese nicht gleichmäßig zunehmen. I. d. R. sind die mittleren Spurtiefen des Querprofils rechts größer als die im Querprofil links. Dies ist auf die ungleichmäßig verlaufende Spurtiefe im Längsprofil durch die sich überlagernde dynamische Zusatzlast infolge der Fugenübergänge zurückzuführen.

Bei sämtlichen Versuchsfeldern ist eine stetige Zunahme der mittleren Spurtiefe mit steigender Überrollungszahl festzustellen. Mit Beginn des Versuchsabschnittes nach 808.338 Überrollungen und der zu diesem Zeitpunkt um 10°C erhöhten Oberflächentemperatur nimmt die Spurtiefe deutlich zu. In den Diagrammen zur mittleren Spurtiefe des Anhangs 6 ist dies durch einen Knick gut zu erkennen.

In den folgenden Tabellen sind die mittleren Spurtiefen nach Ende des Versuchsabschnittes 40°C (808.338 Überrollungen) und nach Ende des Abschnittes bei 50°C Oberflächentemperatur (875.602 Überrollungen) zusammengestellt, wobei die Sortierung in Tabelle 5 nach der Nummerierung der Fahrbahnfelder und in

Tabelle 6 nach der mittleren Spurrinnentiefe im Querprofil Mitte zum Versuchsende geordnet sind. Die farblichen Darstellungen zeigen eine Sortierung nach der verwendeten Bitumensorte in den gewählten Konstruktionskombinationen aus Deckschicht und Asphaltbinderschicht

							808.338 Überrollungen	875.602 Überrollungen
	Deckschicht			Binder			10.12.2002	21.01.2003
V01	SMA	0/8 S	PmB 45	Abi	0/16 S	Bit 30/45	11,5 mm	14,7 mm
V02	SMA	0/11 S	PmB 45	Abi	0/16 S	PmB 45	2,0 mm	2,8 mm
V03	GA	0/11 S	Bit 20/30	Abi	0/22 S	Bit 30/45	9,2 mm	12,1 mm
V04	SMA	0/11 S	Bit 50/70	Abi	0/22 S	PmB 45	18,8 mm	22,7 mm
V05	SMA	0/11 S	PmB 45	Abi	0/16 S	Bit 30/45	8,5 mm	14,0 mm
V06	SMA	0/8 S	PmB 45	Abi	0/16 S	PmB 45	4,5 mm	6,2 mm
V07	SMA	0/11 S	Bit 50/70	Abi	0/22 S	Bit 30/45	10,0 mm	12,9 mm
V08	GA	0/11 S	Bit 20/30	Abi	0/22 S	PmB 45	3,0 mm	5,0 mm
V09	SMA	0/11 S	Bit 50/70	Abi	0/16 S	Bit 30/45	24,6 mm	34,8 mm
V10	GA	0/11 S	Bit 20/30	Abi	0/16 S	PmB 45	4,9 mm	5,6 mm
V11	SMA	0/8 S	PmB 45	Abi	0/22 S	Bit 30/45	4,0 mm	5,7 mm
V12	SMA	0/11 S	PmB 45	Abi	0/22 S	PmB 45	6,4 mm	9,5 mm
V13	GA	0/11 S	Bit 20/30	Abi	0/16 S	Bit 30/45	5,9 mm	8,4 mm
V14	SMA	0/11 S	Bit 50/70	Abi	0/16 S	PmB 45	9,8 mm	11,8 mm
V15	SMA	0/11 S	PmB 45	Abi	0/22 S	Bit 30/45	10,0 mm	13,6 mm
V16	SMA	0/8 S	PmB 45	Abi	0/22 S	PmB 45	5,6 mm	7,3 mm

Tabelle 5: mittlere Spurrinnentiefe nach 808.338 und 875.602 Überrollungen, sortiert nach Nummerierung der Fahrbahnfelder

							808.338 Überrollungen	875.602 Überrollungen
	Deckschicht			Binder			10.12.2002	21.01.2003
V02	SMA	0/11 S	PmB 45	Abi	0/16 S	PmB 45	2,0 mm	2,8 mm
V08	GA	0/11 S	Bit 20/30	Abi	0/22 S	PmB 45	3,0 mm	5,0 mm
V10	GA	0/11 S	Bit 20/30	Abi	0/16 S	PmB 45	4,9 mm	5,6 mm
V11	SMA	0/8 S	PmB 45	Abi	0/22 S	Bit 30/45	4,0 mm	5,7 mm
V06	SMA	0/8 S	PmB 45	Abi	0/16 S	PmB 45	4,5 mm	6,2 mm
V16	SMA	0/8 S	PmB 45	Abi	0/22 S	PmB 45	5,6 mm	7,3 mm
V13	GA	0/11 S	Bit 20/30	Abi	0/16 S	Bit 30/45	5,9 mm	8,4 mm
V12	SMA	0/11 S	PmB 45	Abi	0/22 S	PmB 45	6,4 mm	9,5 mm
V14	SMA	0/11 S	Bit 50/70	Abi	0/16 S	PmB 45	8,9 mm	11,8 mm
V03	GA	0/11 S	Bit 20/30	Abi	0/22 S	Bit 30/45	9,2 mm	12,1 mm
V07	SMA	0/11 S	Bit 50/70	Abi	0/22 S	Bit 30/45	10,0 mm	12,9 mm
V15	SMA	0/11 S	PmB 45	Abi	0/22 S	Bit 30/45	10,0 mm	13,6 mm
V05	SMA	0/11 S	PmB 45	Abi	0/16 S	Bit 30/45	8,5 mm	14,0 mm
V01	SMA	0/8 S	PmB 45	Abi	0/16 S	Bit 30/45	11,5 mm	14,7 mm
V04	SMA	0/11 S	Bit 50/70	Abi	0/22 S	PmB 45	18,8 mm	22,7 mm
V09	SMA	0/11 S	Bit 50/70	Abi	0/16 S	Bit 30/45	24,6 mm	34,8 mm

Tabelle 6: mittlere Spurrinnentiefe nach 808.338 und 875.602 Überrollungen, sortiert nach der Spurtiefe bei Versuchsende

In den beiden folgenden Diagrammen (Abbildung 41 und Abbildung 42) sind Tabelle 5 und Tabelle 6 graphisch dargestellt. Die Spurrinnentiefe sind zum einen den Bitumenkonstruktionen in der Deckschicht und in der Asphaltbinderschicht zugeordnet, zum anderen sind sie nach der Körnung in der Deckschicht und der Asphaltbinderschicht sortiert.

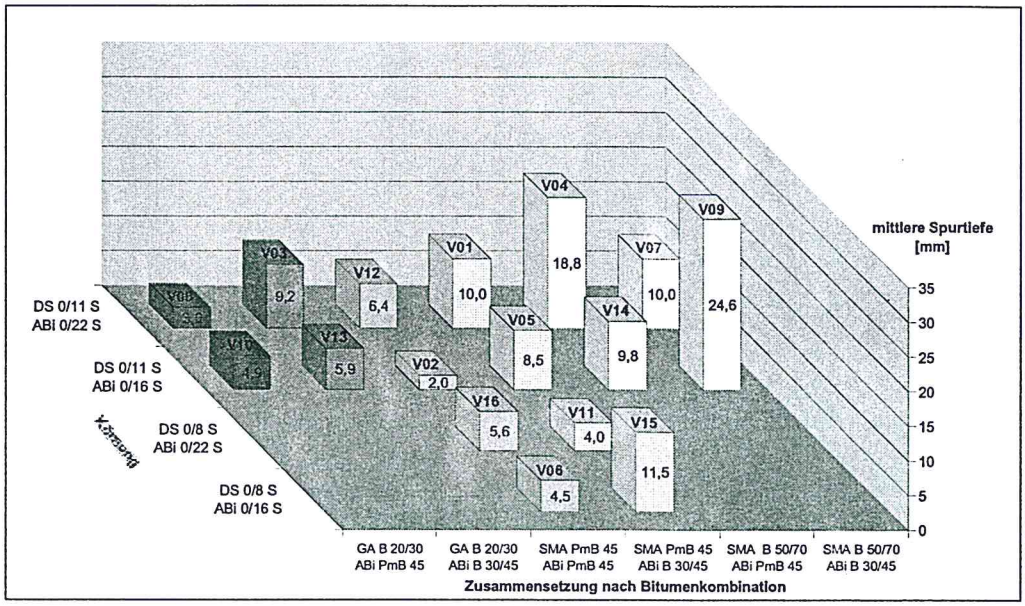


Abbildung 41: Darstellung der mittleren Spurtiefen nach 808.338 Überrollungen (Ende des Versuchsabschnitts 40°C)

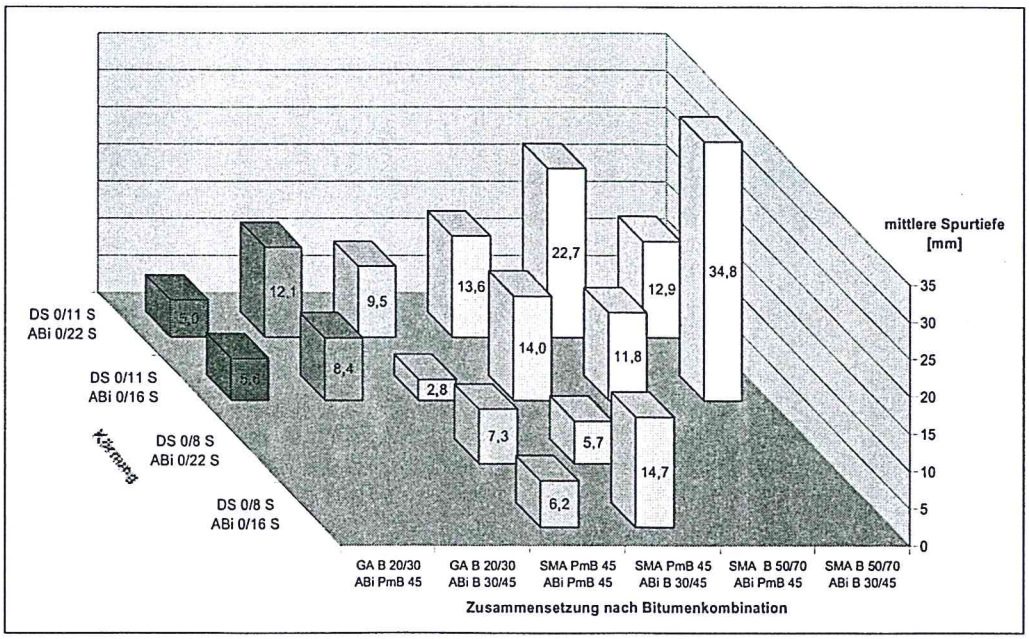


Abbildung 42: Darstellung der mittleren Spurtiefen nach 875.602 Überrollungen (Ende des Versuchsabschnitts 50°C und Versuchsende)

9.2 Verformungen der Spurrinne im Längsprofil

Die Höhenmessung des Längsprofils über ein Nivellement zeigt den in der Abbildung 36 dargestellten Verlauf. Weiterhin ist dort das aus den Querprofilen Links, Mitte, und Rechts rekonstruierte Nullprofil vor Versuchsbeginn eingetragen. Zur direkten Vergleichbarkeit der Längsprofilverläufe sind in der Abbildung 44 die Nivellementmessungen übereinander zusammengefasst, wobei diese auf das jeweilige Nullprofil horizontiert sind.

In dieser Darstellung ist deutlich der unterschiedliche Verlauf der Längsprofile sämtlicher Fahrbahnfelder zu erkennen. Der typische Verlauf ist ein Tiefpunkt im Feldanfang und Feldende im Bereich der Fugen. Beim Abrollen des Rades passiert dieses den weniger steifen Fugenbereich, stößt auf den steifen Plattenanfang und bekommt dadurch eine senkrechte Beschleunigung nach oben, die sich in der ersten Fahrbahnhälfte in eine senkrechte Beschleunigung nach unten umwandelt. Durch diese dynamische Zusatzlast, die im weiteren Verlauf der Überrollung abklingt, ergibt sich in der ersten Fahrbahnhälfte bei ca. der Station 0,70 m ein Tiefpunkt im Längsprofil. Je nach Konstruktion ist dieser Tiefpunkt unterschiedlich stark ausgebildet.

Um die einzelnen Platten miteinander vergleichen zu können, werden die Reihenfolgen der Spurtiefen an jeder Station verglichen und in einem Ranking zusammengefasst. Dabei werden die durch die Fuge gestörten Bereiche nicht betrachtet, d. h. nur der Bereich zwischen 0,20 m und 1,70 m (bei 1,90 m Fahrspurlänge) wird analysiert. In der Abbildung 43 werden die Platzierungen aller Versuchsfelder entlang der Überrollungsrichtung aufgetragen.

Wenn sämtliche Platten im Vergleich stets über die gesamte Länge den gleichen Platz im Ranking einnehmen würden, so würde das Diagramm horizontale Linien zeigen (wie V09 auf Platz 16). Das kreuzen der einzelnen Linien zeigt, dass die Reihenfolge der Spurtiefen an der Stelle x nicht gleich der an der Stelle x+1 ist. Zur Verdeutlichung der Situation und um eine Aussage zur gesamten Qualität der Konstruktionen machen zu können wurden in Abbildung 45 (Station 0,20 m bis 1,70 m) und Abbildung 46 (Station des Querprofils Mitte 0,94 m bis 1,70 m) die Summenlinien der Platzierungen dargestellt.

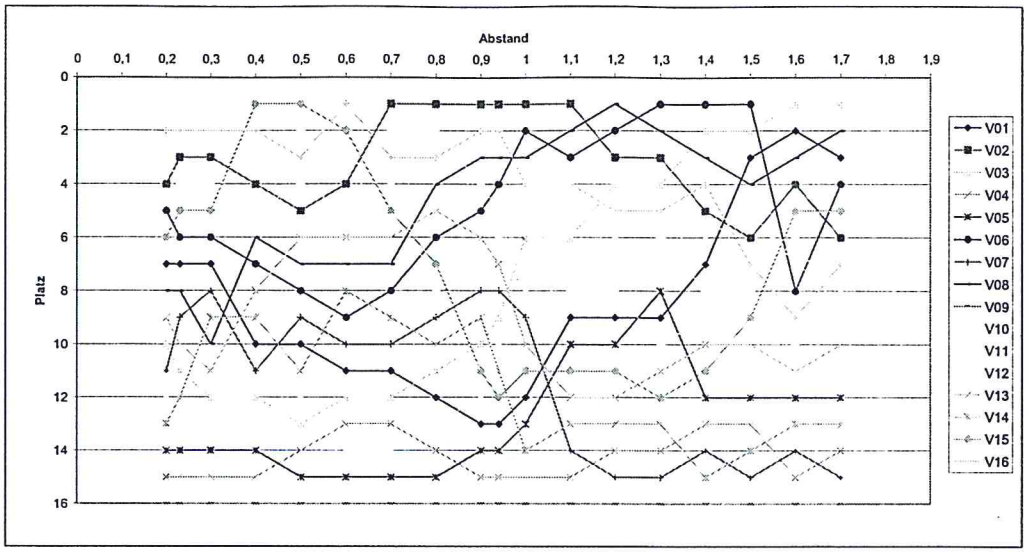


Abbildung 43: . Ranking im Längsprofil entlang der Überrollungsrichtung im Intervall zwischen 0,20 m und 1,70 m (ohne Fugen)

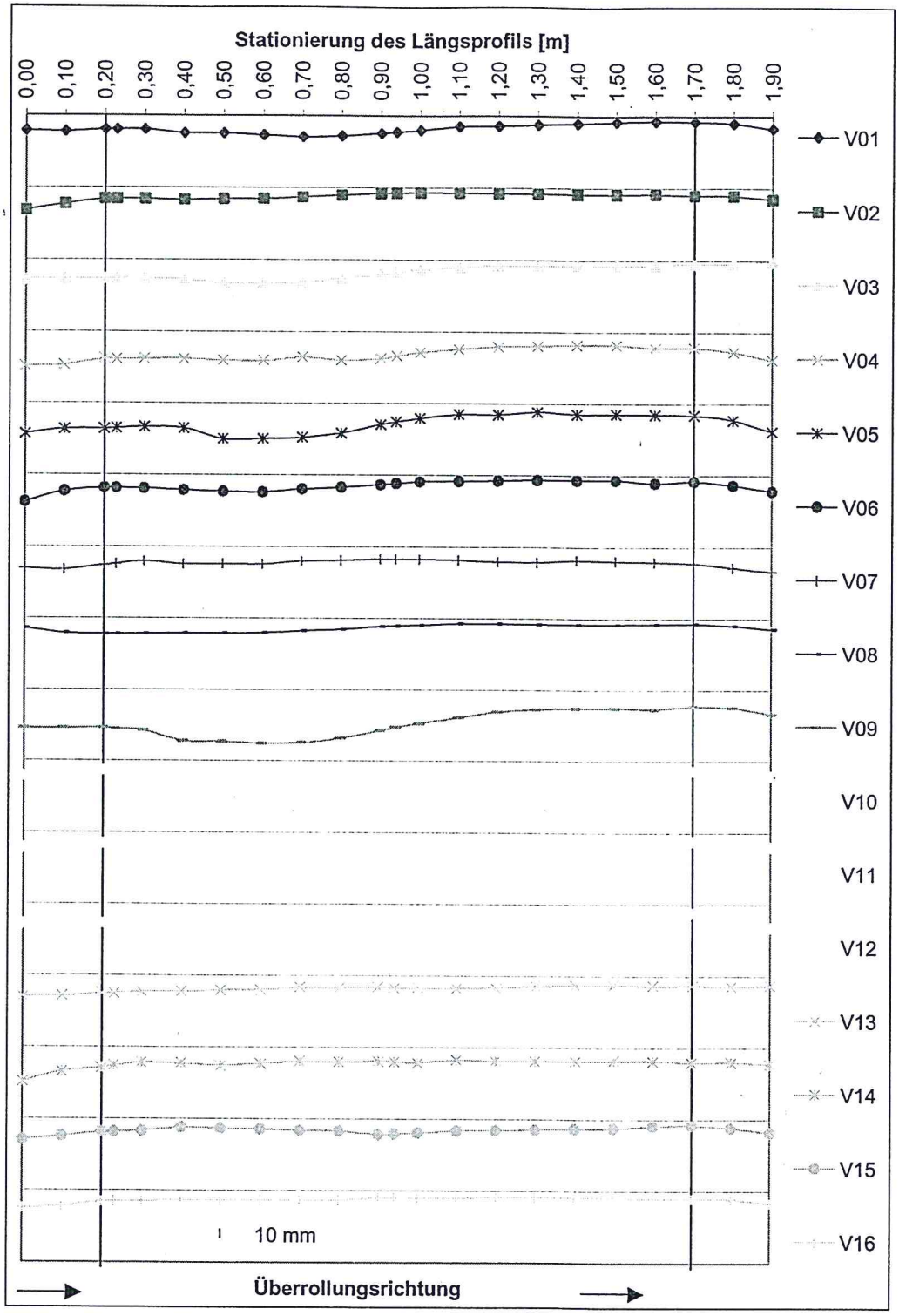


Abbildung 44: Übersicht der Längsprofile aller Versuchsplatten (Darstellung des Nullprofils horizontiert)

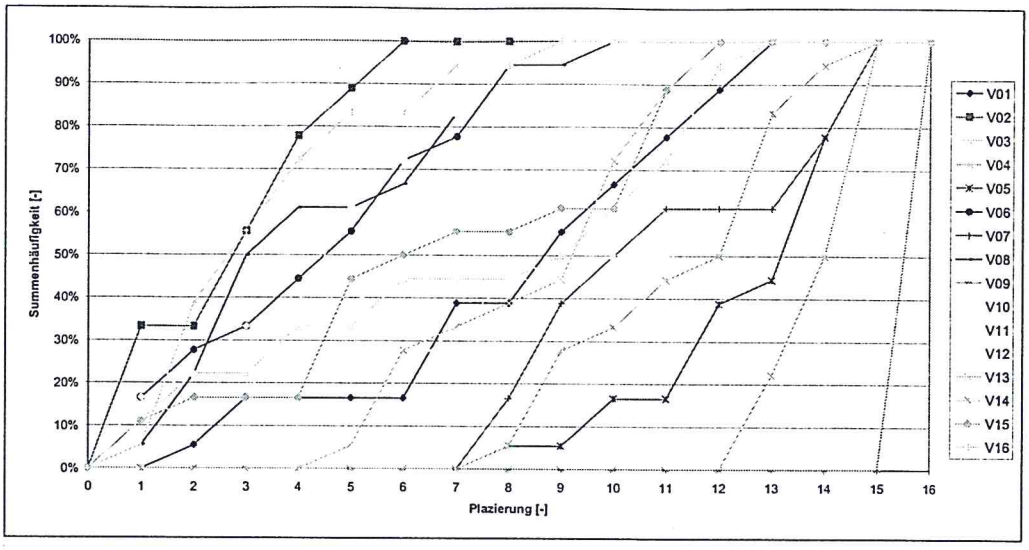


Abbildung 45: Summenlinien der Platzierungen für den Vergleich der Spurrinnentiefe im Längsprofil nach Versuchsende (betrachteter Bereich: 0,20 m bis 1,70 m)

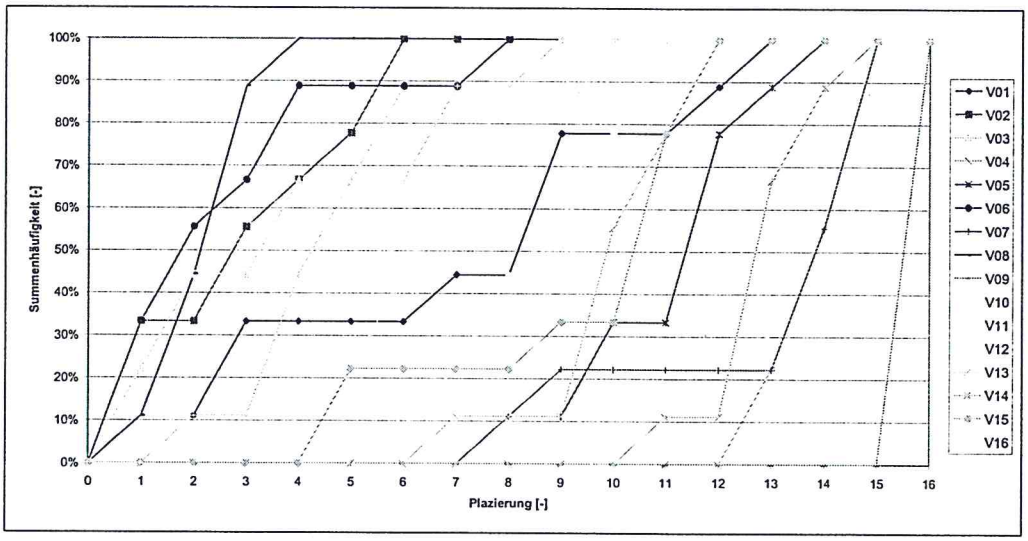


Abbildung 46: Summenlinien der Platzierungen für den Vergleich der Spurrinnentiefe im Längsprofil nach Versuchsende (betrachteter Bereich: 0,94 m (QPM) bis 1,70 m)

Die gesonderte Betrachtung der zweiten Plattenhälfte genügt der Überlegung einen möglichst von dynamischen Zusatzlasten verschonten Bereich zu bewerten. Bei einer eindeutigen Rangfolge ergäben sich parallel stehende steil ansteigende Geraden (wie bei V09), die von einer Platzierung zur nächsten von 0 % auf 100 % springen würden. Da die Platten jedoch über das Längsprofil im Vergleich mit den anderen Platten verschiedene Platzierungen einnehmen, verlaufen die Kurven unterschiedlich steil. Um eine Platte insgesamt beurteilen zu können, wird die Rei-

henfolge der horizontal getroffenen Linien bei dem Kriterium 90 % bestimmt. Sollten dabei mehrere Linien übereinander liegen, wird als Entscheidungskriterium die 70 %-Linie herangezogen. So ist eine eindeutige Reihenfolge der Versuchsplatten für die Spurrinnentiefe im Längsprofil festzulegen.

Die durch diese Methode erzielte Reihenfolge ist in Tabelle 7 dargestellt. Die hierbei für die Platten verwendeten Farben entsprechen denen der Summenlinien.

Platz	Spurtiefe im Längsprofil	
	90% (+70%) Kriterium 0,20-1,70	90% (+70%) Kriterium 0,94-1,70
1	V 02	V 08
2	V 16	V 02
3	V 11	V 06
4	V 08	V 03
5	V 06	V 16
6	V 10	V 11
7	V 13	V 12
8	V 15	V 10
9	V 03	V 13
10	V 01	V 15
11	V 12	V 01
12	V 14	V 05
13	V 07	V 14
14	V 05	V 07
15	V 04	V 04
16	V 09	V 09

Tabelle 7: Gesamtplatzierung der Versuchsfelder im Längsprofil nach Auswertung der Summenlinien

Das 90% Kriterium wurde gewählt um annähernd den gesamten Bereich der Platzierungen zu erreichen, Ausreißer nach unten jedoch eliminieren zu können. Werden die Ergebnisse für die gesamte Plattenlänge mit denen der hinteren Plattenhälfte verglichen, sind größere Verschiebungen in der Rangfolge deutlich erkennbar. Dies unterstützt die These, dass die beiden Plattenhälften durch eine abklingende dynamische Zusatzlast unterschiedlich stark belastet werden und dementsprechend verschiedene Ergebnisse liefern.

9.3 Haftverbund

Der Haftverbund wurde an den gewonnenen Prüfkörpern für die Abschnitte Innen, Mitte und Außen nach Augenschein bestimmt. Die Ergebnisse lauteten „ja" für Haftverbund bzw. „nein" für keinen Haftverbund. Zusätzlich wurden aus den Prüfkörpern auf der Innenseite Bohrkerne gewonnen (s. Abbildung 39). Die Haftung in den Schichtgrenzen wurden anschließend nach Leutner bestimmt. Eine Übersicht über die Haftung in den Schichtgrenzen zeigt die Tabelle 8.

Fahrbahnfläche	Innen (nach Leutner) Scherkraft [KN]	Innen (nach Leutner) Scherweg [mm]	Mitte (visuell)	Außen (visuell)	Fahrbahnfläche	Innen (nach Leutner) Scherkraft [KN]	Innen (nach Leutner) Scherweg [mm]	Mitte (visuell)	Außen (visuell)
V01	40,3	5,7	ja	ja	V09	25,8	3,4	ja	ja
	nein		nein	nein		nein		nein	nein
V02	50,1	2,9	ja	ja	V10	50,0	2,5	ja	ja
	45,1	3,3	ja	ja		50,0	2,9	ja	ja
V03	50,0	3,5	ja	ja	V11	41,9	3,2	ja	ja
	44,5	3,6	ja	nein		32,5	2,5	ja	ja
V04	26,5	4,0	ja	ja	V12	nein		ja	nein
	nein		nein	ja		21,0	1,9	nein	ja
V05	nein		ja	ja	V13	50,0	2,6	ja	ja
	nein		ja	ja		38,3	2,4	ja	ja
V06	36,4	3,1	ja	ja	V14	24,9	1,9	ja	ja
	50,0	3,0	ja	ja		50,0	2,7	ja	ja
V07	39,9	4,0	ja	ja	V15	nein		ja	ja
	nein		nein	nein		nein		ja	ja
V08	50,0	2,5	ja	ja	V16	29,4	1,9	ja	ja
	50,0	2,6	ja	ja		26,6	1,6	ja	ja

Schichtgrenze DS/ABi

Schichtgrenze ABi/ATS

Tabelle 8: Schichtenverbund in den Schichtgrenzen DS/ABi (grau hinterlegt) und ABi/ATS

Aus den Erkenntnissen des Haftverbundes am Probestreifen zeigt die Abbildung 47 graphisch die Versuchsfelder bei der Herstellung. Die Stellen, an

denen kein Haftverbund in den Probekörpern (Lage der Probekörper ist rot markiert) vorlagen sind farblich hervorgehoben.

In der Schichtgrenze ATS/ABi sind insgesamt acht der sechzehn Platten von Haftungsproblemen in mindestens einem Teilbereich betroffen. Die Probebalken der Platten V01, V07 und V09 zeigten über die gesamte Breite keinen Verbund. Die Platten V03, V04, V05, V12 und V15 waren nur in Teilbereichen ohne Haftung, wobei bei den Platten V04 und V12 die fehlende Haftung in der Mitte, also in der Radspur war.

Bei der Betrachtung der Schichtgrenze zwischen der Asphaltbinderschicht und der Deckschicht traten nur bei drei Platten (V05, V12 und V15) bereichsweise Haftverbundprobleme auf. Diese lagen aber alle außerhalb der Radspur.

Ein Zusammenhang zwischen dem vollflächigen bzw. bereichsweisen Abfräsen der Binderschicht, das zur Herstellung einer gleichmäßigen Deckschichtdicke erforderlich war, und Haftungsproblemen zwischen diesen beiden Schichten besteht nicht. Auf den Einfluss des Haftverbundes zwischen den einzelnen Schichten wird in Kapitel 9.7 erläutert.

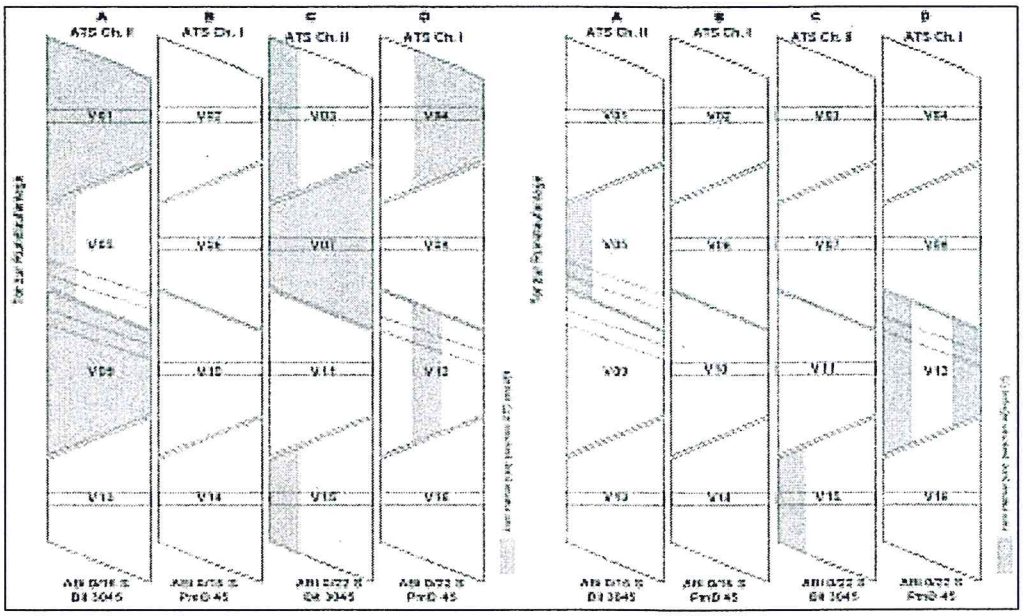


Abbildung 47: Haftverbund in den Schichtgrenzen ATS/ABi (links) und ABi/DS
Darstellung in der Lage des Einbaus der Einbauschritte 1+2

9.4 Verformungen in den Schichtgrenzen im Querprofil Mitte

Die Datenblätter für sämtliche Versuchsfelder sind im Anhang 7 zusammengestellt. Die Darstellung der Schichtgrenzenverläufe erfolgt in einer ähnlichen Form wie die der Entwicklung der Querprofilmessung, d. h. im oberen Teil des Blattes sind die wesentlichen Parameter zur Charakterisierung der Versuchsplatte und die Ergebnisse der Berechnung zusammengestellt. Im unteren Teil des Datenblattes ist der Schichtgrenzenverlauf graphisch aufbereitet.

Da die Schichtdicken nicht in der ursprünglichen Lage in der Rundlaufanlage ermittelt werden konnten und bei der Trennung der Versuchsplatten im Querprofil Mitte die Markierungsnägel für das zu messende Profil durch das Sägeblatt verloren gingen, weicht das Ergebnis der Messung unbearbeitet von dem der Querprofilmessung in der horizontalen Lage und der Querneigung der Oberfläche ab. So wurde die Schichtdickenmessung an der letzten Messung des Querprofils Mitte (18. Messung nach 875.602 Überrollungen) kalibriert und auf die tiefer liegenden Schichtgrenzenverläufe übertragen. Zusätzlich zu den Schichtdicken im Querprofil Mitte sind wegen des stark veränderlichen Längsprofils die Schichtdicken der Versuchsplatten V05, V09 und V12 im Querprofil Links dargestellt. Die Messungen mussten an den zerteilten Prüfkörpern vorgenommen werden, die aus der Mitte der Plattenhälfte herausgehoben wurde. Bei der Platte V12 konnte der Prüfkörper nur so unvollständig gewonnen werden, dass er für die hier beschriebene Messung nur begrenzt zur Verfügung stand.

In den Diagrammen des Anhangs 7 sind die folgenden Linien dargestellt:

f) Oberflächenprofil nach 8.944 Überrollungen (1. Messung) mit der daraus resultierenden Nulllage (Null DS)
g) Oberflächenprofil nach 875.602 Überrollungen (Versuchsende, 18. Messung)
h) Oberfläche aus Schichtdickenmessung
i) Schichtgrenzenverlauf zwischen ABi und DS mit der daraus ermittelten Ursprungslage (Null ABi)
j) Schichtgrenzenverlauf zwischen ATS und ABi mit der daraus ermittelten Ursprungslage (Null ATS)
k) Schichtgrenzenverlauf zwischen Stahlträgerplatte und ATS mit der daraus ermittelten Ursprungslage (Null Stahl)

Aus den Messergebnissen wurden die im Tabellenkopf über den Diagrammen aufgeführten Werte ermittelt. Für sämtliche Werte, die die Oberfläche der Deckschicht betreffen, wurde die 18. Messung des Querprofils genutzt, da hier der

Messschieber auf der Oberfläche aufgesetzt werden konnte und so verlässlichere Werte garantiert sind.

Im einzelnen wurden neben den Asphaltkenndaten die folgenden Werte ermittelt und aufgeführt:

a) Einbaudicken am Innen- und Außenrand sowie die mittlere Einbaudicke getrennt nach DS, ABi und ATS
b) Angaben zum Schichtenverbund
c) Angaben, ob zur Herstellung der Deckschicht das Abfräsen der Binderschicht erforderlich war
d) Die durchschnittliche Spurtiefe Øs in den einzelnen Schichten. Die Werte wurden durch die Integration der Spurtiefe über die Breite der Radspur berechnet
e) Die mittlere Schichtdicke in Radspurmitte zu Versuchsbeginn und Versuchsende
f) Die prozentuale Abnahme der Schichtdicke, getrennt aufgeführt nach den einzelnen Schichten und der Gesamtkonstruktionshöhe
g) Die maximale Spurtiefe max. t und die Lage x-Pos. (t)
h) Die Querneigung der jeweiligen Schichtgrenzen zum Zeitpunkt des Einbaus in die Rundlaufanlage

Die Sollstärke der gesamten Asphaltkonstruktion von 20 cm wird gut eingehalten. Abweichungen liegen hier zwischen á6,8 % und +1,6 %. Die Sollschichtdicken der einzelnen Asphaltschichten wird jedoch in einem größeren Maß über- bzw. unterschritten. Bei der DS liegen die Abweichungen zwischen á27,0 % und +29 %, für den ABi zwischen á26,4 % und +8,5 % und für die ATS zwischen á8,5 % und +12,2 %. Bei sechs Platten liegt der Betrag der Abweichung für alle Schichten unter 15 %, bei weiteren 6 Platten liegt die Abweichung mindestens einer Schicht zwischen 15% und 20 % und bei den verbleibenden vier Platten liegt die Abweichung einer Schicht über 20 %. Eine gesamte Übersicht über die Schichtdicken und deren Abweichung von den Sollwerten ist in Tabelle 9 zusammengefasst.

Platte	Schicht	Einbaudicke			Abweichung vom Soll		
		Innen-rand	Außen-rand	Ød	Innen-rand	Außen rand	Ø
		[cm]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[%]
V01	DS	4,60	4,09	4,35	15,1%	2,2%	8,7%
	ABi	6,80	6,60	6,70	-15,0%	-17,5%	-16,3%
	ATS	8,05	8,58	8,32	0,6%	7,3%	3,9%
	gesamt	**19,45**	**19,27**	**19,36**	**-2,8%**	**-3,6%**	**-3,2%**
V02	DS	4,58	4,67	4,62	14,6%	16,7%	15,6%
	ABi	7,50	6,62	7,06	-6,3%	-17,3%	-11,8%
	ATS	7,68	7,89	7,79	-4,0%	-1,4%	-2,7%
	gesamt	**19,76**	**19,18**	**19,47**	**-1,2%**	**-4,1%**	**-2,6%**
V03	DS	4,04	4,26	4,15	0,9%	6,4%	3,6%
	ABi	8,71	8,65	8,68	8,8%	8,1%	8,5%
	ATS	7,27	7,38	7,32	-9,1%	-7,8%	-8,5%
	gesamt	**20,01**	**20,29**	**20,15**	**0,1%**	**1,4%**	**0,7%**
V04	DS	2,62	3,22	2,92	-34,5%	-19,5%	-27,0%
	ABi	7,01	8,36	7,68	-12,4%	4,4%	-4,0%
	ATS	8,72	7,64	8,18	9,0%	-4,5%	2,2%
	gesamt	**18,35**	**19,21**	**18,78**	**-8,3%**	**-3,9%**	**-6,1%**
V05	DS	4,69	5,64	5,16	17,2%	40,9%	29,0%
	ABi	6,94	6,90	6,92	-13,3%	-13,8%	-13,5%
	ATS	8,35	8,13	8,24	4,3%	1,6%	3,0%
	gesamt	**19,97**	**20,67**	**20,32**	**-0,1%**	**3,3%**	**1,6%**
V06	DS	3,38	4,14	3,76	-15,5%	3,4%	-6,1%
	ABi	7,24	7,31	7,27	-9,5%	-8,7%	-9,1%
	ATS	8,34	8,04	8,19	4,3%	0,5%	2,4%
	gesamt	**18,96**	**19,48**	**19,22**	**-5,2%**	**-2,6%**	**-3,9%**
V07	DS	4,01	2,91	3,46	0,3%	-27,2%	-13,5%
	ABi	7,71	7,87	7,79	-3,7%	-1,7%	-2,7%
	ATS	7,22	7,56	7,39	-9,8%	-5,5%	-7,7%
	gesamt	**18,93**	**18,33**	**18,63**	**-5,3%**	**-8,3%**	**-6,8%**
V08	DS	4,65	4,08	4,36	16,2%	1,9%	9,0%
	ABi	6,56	6,21	6,39	-18,0%	-22,4%	-20,2%
	ATS	8,27	9,46	8,86	3,3%	18,3%	10,8%
	gesamt	**19,47**	**19,75**	**19,61**	**-2,6%**	**-1,3%**	**-1,9%**
V09	DS	3,43	3,33	3,38	-14,3%	-16,7%	-15,5%
	ABi	7,23	7,39	7,31	-9,7%	-7,7%	-8,7%
	ATS	8,04	8,69	8,37	0,5%	8,7%	4,6%
	gesamt	**18,70**	**19,41**	**19,05**	**-6,5%**	**-2,9%**	**-4,7%**
V10	DS	3,84	3,51	3,68	-3,9%	-12,2%	-8,0%
	ABi	7,16	6,63	6,90	-10,5%	-17,1%	-13,8%
	ATS	8,40	8,66	8,53	5,0%	8,2%	6,6%
	gesamt	**19,40**	**18,80**	**19,10**	**-3,0%**	**-6,0%**	**-4,5%**
V11	DS	3,92	3,35	3,64	-1,9%	-16,2%	-9,1%
	ABi	7,95	8,64	8,30	-0,6%	8,0%	3,7%
	ATS	7,50	7,16	7,33	-6,2%	-10,5%	-8,4%
	gesamt	**19,38**	**19,15**	**19,26**	**-3,1%**	**-4,2%**	**-3,7%**
V12	DS	5,06	4,32	4,69	26,5%	8,1%	17,3%
	ABi	6,45	7,48	6,97	-19,4%	-6,5%	-12,9%
	ATS	8,42	7,63	8,02	5,2%	-4,7%	0,3%
	gesamt	**19,93**	**19,43**	**19,68**	**-0,3%**	**-2,8%**	**-1,6%**
V13	DS	3,86	3,42	3,64	-3,5%	-14,5%	-9,0%
	ABi	6,98	7,77	7,38	-12,8%	-2,8%	-7,8%
	ATS	8,44	7,91	8,17	5,4%	-1,1%	2,1%
	gesamt	**19,27**	**19,10**	**19,19**	**-3,6%**	**-4,5%**	**-4,1%**
V14	DS	4,44	3,28	3,86	10,9%	-18,0%	-3,5%
	ABi	5,49	6,29	5,89	-31,4%	-21,4%	-26,4%
	ATS	8,89	9,06	8,98	11,1%	13,2%	12,2%
	gesamt	**18,81**	**18,63**	**18,72**	**-5,9%**	**-6,8%**	**-6,4%**
V15	DS	4,39	5,11	4,75	9,8%	27,7%	18,8%
	ABi	7,63	7,19	7,41	-4,6%	-10,1%	-7,3%
	ATS	7,49	7,76	7,63	-6,3%	-3,0%	-4,7%
	gesamt	**19,52**	**20,06**	**19,79**	**-2,4%**	**0,3%**	**-1,0%**
V16	DS	4,09	4,52	4,30	2,1%	12,9%	7,5%
	ABi	7,03	6,51	6,77	-12,1%	-18,6%	-15,3%
	ATS	7,65	8,41	8,03	-4,4%	5,1%	0,4%
	gesamt	**18,77**	**19,44**	**19,10**	**-6,1%**	**-2,8%**	**-4,5%**

Abweichung: Unterschreitung zw. -10 % und -15 %, Überschreitung zw. +10 % und +15 %.

Abweichung: Unterschreitung < -15 %, Überschreitung > +15 %

Tabelle 9: Einhaltung der Schichtdicken bei der Herstellung

Reihenfolge der Konstruktionen

Eine Reihung der Platten kann grundsätzlich nach zwei verschiedenen Methoden erfolgen. Eine Reihenfolge ist nach der mittleren Spurtiefe und der prozentualen Abnahme der Konstruktionshöhe möglich. Eine Reihung nach der Abnahme der Höhe bereinigt die herstellungsbedingten Unterschiede. Weiterhin kann bei beiden Verfahren als Kriterium der Haftverbund in der Schichtgrenze vorgeschaltet werden. In Tabelle 10 sind die Platzierung der einzelnen Platten für diese Kriterien aufgeführt.

Platz	mittl. Spurtiefe		Abnahme Konstruktionshöhe	
	vollständiger Verbund	mit teilw. Gestörtem Verbund	vollständiger Verbund	mit teilw. Gestörtem Verbund
1	V 02	V 02	V 02	V 02
2	V 08	V 08	V 10	V 10
3	V 10	V 10	V 08	V 08
4	V 11	V 11	V 11	V 11
5	V 06	V 06	V 06	V 06
6	V 16	V 16	V 16	V 16
7	V 13	V 13	V 13	V 13
8	V 14	V 12	V 14	V 12
9	V 12	V 14	V 12	V 14
10	V 03	V 03	V 03	V 03
11	V 07	V 07	V 05	V 05
12	V 15	V 15	V 15	V 15
13	V 05	V 05	V 07	V 07
14	V 01	V 01	V 01	V 01
15	V 04	V 04	V 04	V 04
16	V 09	V 09	V 09	V 09

Tabelle 10: Gesamtplatzierung der Versuchsfelder im Querprofil Mitte nach dem Kriterium SpurrinnentiefE und Abnahme der Gesamtkonstruktionshöhe

Für die beiden Kriterien mittlere Spurtiefe und Abnahme der Gesamtkonstruktion werden jeweils die Gesamtreihenfolge und die Reihenfolge unter der Voraussetzung, dass uneingeschränkter Haftverbund in allen Schichtgrenzen vorliegt, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Platten, die in mindestens einer Schichtgrenze keinen Haftverbund haben auch am Ende der Platzierungen sind. Daraus lässt sich ableiten, dass die Vorschaltung des Kriteriums Haftverbund auf das Gesamtergebnis bei dieser Untersuchung keinen Einfluss hat. Sowohl für die mittlere Spurtiefe als auch für die Abnahme der Konstruktionsdicke ist die Reihenfolge bei vollständigem Verbund und teilweise gestörtem Verbund gleich. Lediglich die Felder V12 und V14 wechseln die Platzierung.

Vergleicht man die Platzierungen der mittleren Spurtiefe und der Abnahme der Konstruktionshöhe, d. h. die Bereinigung der unterschiedlichen Einbaudicken, so ist qualitativ ein ähnliches Bild zu erkennen. Zum einen tauschen die Platten V08 und V10 die benachbarten Platzierungen 2 und 3, zum anderen tauschen die Platten V05 und V07 die Plätze 11 und 13. Insgesamt führen die Kriterien jedoch zum annähernd gleichen Ergebnis.

9.5 Risse

Bei einigen Platten konnten in der Radspur Biegerisse am Plattenanfang, im Querprofil Mitte und am Plattenende beobachtet werden, die von der Stahlplatte ausgehend nach oben in die ATS, teilweise in den ABi reichen. Die Lage der Risse lässt auf eine Durchbiegung der gesamten Platte unter der Radlast von 5 t schließen. Die genaue Lage der Risse im mittleren Querschnitt ist in den Querschnitten des Anhangs 7 dokumentiert. Insgesamt weisen dort 4 Fahrbahnfelder Biegerisse auf.

9.6 Mischgutuntersuchung

Sämtliche Prüfergebnisse der Mischgutuntersuchung nach Versuchsende sind in Anhang 3 zusammengestellt, wobei die Einzeldaten auf den ersten vier Seiten des Anhangs so zusammengefasst sind, dass die relevanten Daten für die gesamte Fahrbahnflächenkonstruktion erkennbar ist. Für einen weiter zusammenfassenden Überblick sind in der Tabelle 11 die wichtigsten Mittelwerte für die Deckschichten und in der Tabelle 12 für die Asphaltbinderschichten enthalten.

Übersicht der Mittelwerte						
Untersuchungsergebnisse der Ausbaustücke			EP	Kontr. n. E.	Mittelwerte	
					Außen	Mitte
Splittmastixasphalt 0/8 S mit PmB 45 A; 0,3 M.-% Technocel (Variante 4)						
Füller	(< 0,09 mm)	M.-%	12,2	14,8	14,5	14,7
Sand	(0,09 - 2 mm)	M.-%	13,8	12,5	13,2	13,1
Splitt	(> 2 mm)	M.-%	74,0	72,7	72,3	72,2
Kornanteil	(> 5 mm)	M.-%	55,3	55,1	52,1	51,6
Kornanteil	(> 8 mm)	M.-%	4,7	0,7	1,4	0,5
Kornanteil	(> 11,2 mm)	M.-%	0,0	0,0	0,4	0,0
Verhältnis Brechsand/Natursand		-	1:0	1:0	1:0	1:0
EP RuK (Bindemittelsorte)		°C	59,0	61,6	69,6	72,8
Gesamtbindemittelgehalt		M.-%	7,3	7,4	7,1	7,3
Hohlraumgehalt Marshall-Körper		Vol.-%	3,3	5,5	5,1	4,8
Hohlr. Mineralstoffgerüst HM, bit		Vol.-%	19,9	22,3		
Hohlraumfüllungsgrad HFB		%	83,4	75,3		
Hohlraumgehalt Schicht		Vol.-%		5,9	8,2	7,7
Verdichtungsgrad		%		99,6	97,1	97,6
Nadelpenetration		1/10 mm			19,7	15,3
Splittmastixasphalt 0/11 S mit PmB 45 A; 0,3 M.-% Technocel (Variante 3)						
Füller	(< 0,09 mm)	M.-%	12,2	13,8	14,2	14,1
Sand	(0,09 - 2 mm)	M.-%	13,8	13,4	13,1	13,4
Splitt	(> 2 mm)	M.-%	74,0	72,8	72,7	72,5
Kornanteil	(> 5 mm)	M.-%	62,9	60,8	60,0	59,6
Kornanteil	(> 8 mm)	M.-%	41,4	36,4	30,6	29,3
Kornanteil	(> 11,2 mm)	M.-%	1,4	0,3	0,5	0,4
Verhältnis Brechsand/Natursand		-	1:0	1:0	1:0	1:0
EP RuK (Bindemittelsorte)		°C	59,0	62,5	72,7	74,4
Gesamtbindemittelgehalt		M.-%	6,7	6,8	6,8	6,6
Hohlraumgehalt Marshall-Körper		Vol.-%	3,1	5,3	4,8	5,9
Hohlr. Mineralstoffgerüst HM, bit		Vol.-%	19,3	20,9		
Hohlraumfüllungsgrad HFB		%	83,9	74,7		
Hohlraumgehalt Schicht		Vol.-%		5,5	6,8	6,1
Verdichtungsgrad		%		99,8	98,5	99,5
Nadelpenetration		1/10 mm			17,0	17,2
Splittmastixasphalt 0/11 S mit Straßenbaubitumen Sorte 50/70; 0,3 M.-% Technocel (Variante 2)						
Füller	(< 0,09 mm)	M.-%	12,2	13,9	14,3	14,0
Sand	(0,09 - 2 mm)	M.-%	13,8	11,8	13,0	11,8
Splitt	(> 2 mm)	M.-%	74,0	74,3	72,8	74,0
Kornanteil	(> 5 mm)	M.-%	62,9	62,9	59,5	60,6
Kornanteil	(> 8 mm)	M.-%	41,4	43,2	33,3	33,4
Kornanteil	(> 11,2 mm)	M.-%	1,4	0,8	0,5	0,7
Verhältnis Brechsand/Natursand		-	1:0	1:0	1:0	1:0
EP RuK (Bindemittelsorte)		°C	51,0	53,5	62,7	60,8
Gesamtbindemittelgehalt		M.-%	6,7	7,0	6,9	6,8
Hohlraumgehalt Marshall-Körper		Vol.-%	3,3	3,5	4,0	6,7
Hohlr. Mineralstoffgerüst HM, bit		Vol.-%	18,7	19,7		
Hohlraumfüllungsgrad HFB		%	82,4	82,2		
Hohlraumgehalt Schicht		Vol.-%		4,5	8,2	4,6
Verdichtungsgrad		%		98,9	95,2	99,6
Nadelpenetration		1/10 mm			22,9	28,2
Gussasphalt 0/11 S mit Straßenbaubitumen Sorte 20/30; (Variante 1)						
Füller	(< 0,09 mm)	M.-%	24,5	23,9	26,0	25,9
Kornanteil	(> 2 mm)	M.-%	53,9	51,9	51,9	52,5
Kornanteil	(> 5 mm)	M.-%	39,3	37,2	34,7	35,1
Kornanteil	(> 8 mm)	M.-%	21,5	17,7	16,2	16,2
Kornanteil	(> 11,2 mm)	M.-%	0,8	2,9	1,6	1,7
Verhältnis Brechsand/Natursand		-	1:1	1:1	1:1	1:1
EP RuK (Bindemittelsorte)		°C	63,0	70,5	72,9	72,6
Gesamtbindemittelgehalt		M.-%	6,5	6,5	6,4	6,5
Nadelpenetration		1/10 mm			13,5	13,1
Stempeldruckversuch		mm	0,0	0,0		

Tabelle 11: Deckschicht: Zusammengefaßte Ergebnisse der Mischgutuntersuchen im Rahmen der Kontrollprüfung nach Versuchsende

Asphaltbinder 0/22 S mit Straßenbaubitumen Sorte 30/45 (Variante 6)						
Füller	(< 0,09 mm)	M.-%	6,3	6,8	8,8	8,5
Sand	(0,09 - 2 mm)	M.-%	21,0	18,8	21,0	19,5
Splitt	(> 2 mm)	M.-%	72,7	74,4	70,2	72,0
Kornanteil	(> 16 mm)	M.-%	26,1	34,5	19,3	21,7
Kornanteil	(> 22,4 mm)	M.-%	0,0	0,0	1,4	0,4
Verhältnis Brechsand/Natursand		-	1:0	1:0	1:0	1:0
EP RuK (Bindemittelsorte)		°C	56,0	59,0	70,2	72,0
Hohlraumgehalt Marshall-Körper		Vol.-%	5,8	7,6	7,5	7,5
Hohlr. Mineralstoffgerüst HM, bit		Vol.-%	15,8	17,2		
Hohlraumfüllungsgrad HFB		%	63,3	55,7		
Hohlraumgehalt Schicht		Vol.-%		5,9	5,0	4,9
Verdichtungsgrad		%		101,9	104,0	104,6
Nadelpenetration		1/10 mm			18,8	17,4
Asphaltbinder 0/22 S mit PmB 45 (Variante 5)						
Füller	(< 0,09 mm)	M.-%	6,3	6,7	8,5	8,7
Sand	(0,09 - 2 mm)	M.-%	21,0	19,6	19,3	18,9
Splitt	(> 2 mm)	M.-%	72,7	73,7	72,2	72,4
Kornanteil	(> 16 mm)	M.-%	26,1	24,6	18,4	18,0
Kornanteil	(> 22,4 mm)	M.-%	0,0	0,0	0,0	0,4
Verhältnis Brechsand/Natursand		-	1:0	1:0	1:0	1:0
EP RuK (Bindemittelsorte)		°C	59,0	62,5	72,2	72,4
Gesamtbindemittelgehalt		M.-%	4,0	3,9	4,4	4,4
Hohlraumgehalt Marshall-Körper		Vol.-%	6,0	7,9	6,6	7,4
Hohlr. Mineralstoffgerüst HM, bit		Vol.-%	16,0	17,7		
Hohlraumfüllungsgrad HFB		%	63,3	55,5		
Hohlraumgehalt Schicht		Vol.-%		8,4	6,7	6,4
Verdichtungsgrad		%		99,5	101,9	102,5
Nadelpenetration		1/10 mm			17,3	18,3
Asphaltbinder 0/16 S mit PmB 45 A (Variante 7)						
Füller	(< 0,09 mm)	M.-%	6,9	8,0	8,6	8,2
Sand	(0,09 - 2 mm)	M.-%	21,9	19,0	17,6	18,1
Splitt	(> 2 mm)	M.-%	71,2	73,0	73,8	73,7
Kornanteil	(> 11,2 mm)	M.-%	29,4	27,7	22,2	22,8
Kornanteil	(> 16 mm)	M.-%	0,0	0,7	0,7	1,2
Verhältnis Brechsand/Natursand		-	1:0	1:0	1:0	1:0
EP RuK (Bindemittelsorte)		°C	59,0	62,5	71,6	71,0
Gesamtbindemittelgehalt		M.-%	4,4	4,2	4,5	4,5
Hohlraumgehalt Marshall-Körper		Vol.-%	6,1	8,1	8,0	7,2
Hohlr. Mineralstoffgerüst HM, bit		Vol.-%	17,0	18,5		
Hohlraumfüllungsgrad HFB		%	64,1	56,2		
Hohlraumgehalt Schicht		Vol.-%		7,1	6,3	5,9
Verdichtungsgrad		%		101,1	102,6	103,1
Nadelpenetration		1/10 mm			15,8	16,2
Asphaltbinder 0/16 S mit Straßenbaubitumen, Sorte 30/45 (Variante 8)						
Füller	(< 0,09 mm)	M.-%	6,9	7,9	8,9	8,9
Sand	(0,09 - 2 mm)	M.-%	21,9	20,7	19,7	19,5
Splitt	(> 2 mm)	M.-%	71,2	71,4	71,5	71,7
Kornanteil	(> 11,2 mm)	M.-%	29,4	25,3	22,2	21,2
Kornanteil	(> 16 mm)	M.-%	0,0	1,0	0,8	1,0
Verhältnis Brechsand/Natursand		-	1:0	1:0	1:0	1:0
EP RuK (Bindemittelsorte)		°C	56,0	59,0	61,9	64,0
Gesamtbindemittelgehalt		M.-%	4,4	4,3	4,0	4,3
Vol. Bindemittelanteil		Vol.-%	11,1	10,6	4,1	4,3
Hohlraumgehalt Marshall-Körper		Vol.-%	5,7	7,9	8,9	8,1
Hohlr. Mineralstoffgerüst HM, bit		Vol.-%	16,8	18,5		
Hohlraumfüllungsgrad HFB		%	66,1	57,3		
Hohlraumgehalt Schicht		Vol.-%		5,4	5,2	5,0
Verdichtungsgrad		%		102,7	104,0	104,3
Nadelpenetration		1/10 mm			22,9	20,5

Tabelle 12: Asphaltbinderschicht: Zusammengefaßte Ergebnisse der Mischgutuntersuchen im Rahmen der Kontrollprüfung nach Versuchsende

Als wesentliches Ergebnis der Mischgutuntersuchung ist die Verhärtung des Bitumens sowohl in der Deckschicht als auch in der Asphaltbinderschicht zu nennen. Die Werte für die Deckschicht sind in Abbildung 48 visualisiert. Der Erweichungspunkt nach Ring und Kugel stieg bei den Splittmastixasphalten um 8 á 10°C im Versuchsverlauf an. Bei den polymermodifizierten SMA ist eine z. T. deutliche Erhöhung in der Radspur zu erkennen. Beim SMA mit Normalbitumen ist das Bild umgekehrt. Hier liegt die höhere Erweichungspunkttemperatur nach Versuchsende außerhalb der Radspur. Beim Gussasphalt ist diesbezüglich keine eindeutige Tendenz festzustellen.

Nach Versuchsende verfügen die beiden polymermodifizierten SMA und die Gussasphaltdeckschicht über ähnlich hohe Viskositäten. Der SMA mit Normalbitumen ist dagegen, wie schon bei Versuchsbeginn, deutlich weniger viskos.

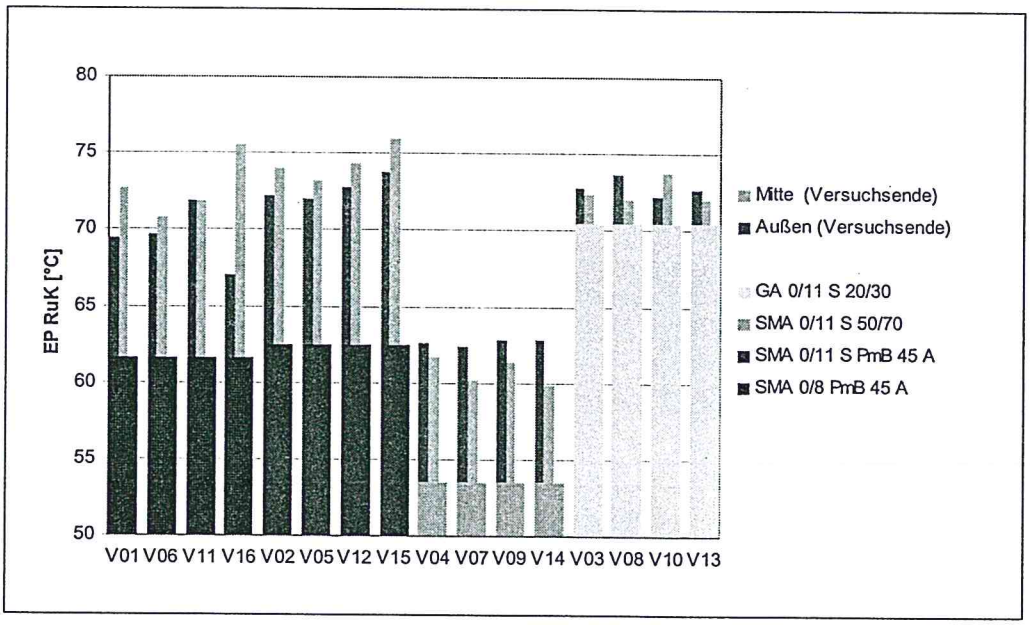


Abbildung 48: Erweichungspunktänderung zwischen Versuchsanfang und Versuchsende Deckschicht (DS)

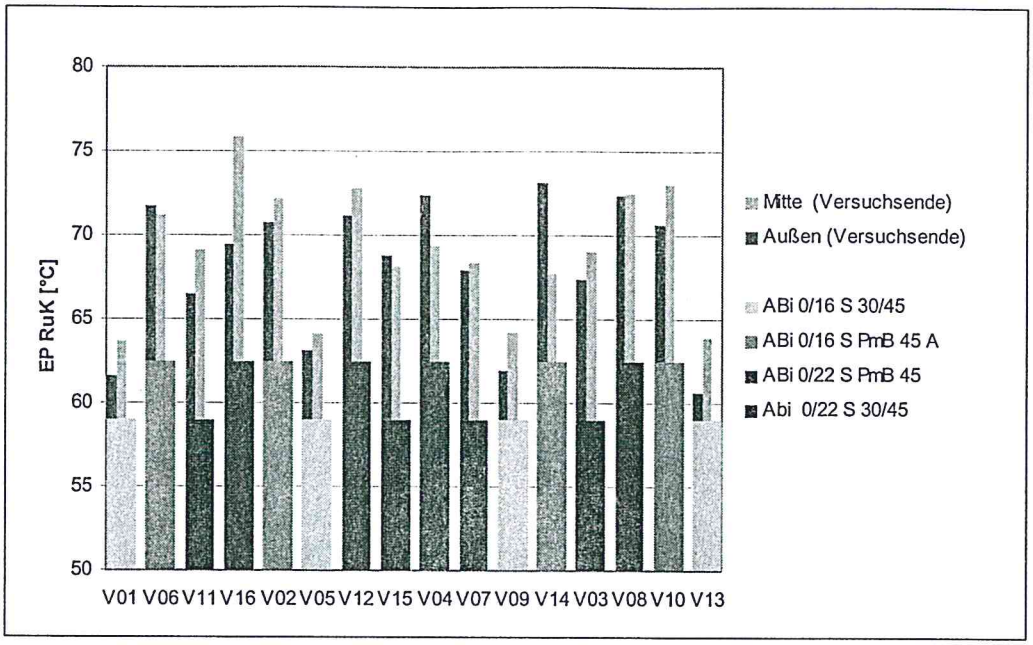


Abbildung 49: Erweichungspunktänderung zwischen Versuchsanfang und Versuchsende Asphaltbinderschicht (ABi)

Bei den Asphaltbindern (Abbildung 49) fällt bei dem ABi 0/16 S 30/45 im Vergleich zu den anderen Mischungen das deutlich geringere viskose Verhalten durch eine Alterung auf.

Weiterhin wurde im Rahmen der Mischgutuntersuchungen eine Kornverfeinerung und ein hoher Anteil schlecht geformter Körner festgestellt, die jedoch auf das Schneiden der Probekörper zurückzuführen ist.

9.7 Ergebnis

In der Tabelle 13 ist der Ansatz zur vergleichenden Beurteilung der Versuchsplatten zusammengestellt. Dabei ist die geometrische Verformung im Querprofil Mitte und im Längsprofil Grundlage der Bewertung.

Platz	Spurtiefe im Längsprofil		mittl. Spurtiefe		Abnahme Konstruktionshöhe	
	90% (+70%) Kriterium 0,20-1,70	90% (+70%) Kriterium 0,94-1,70	vollständiger Verbund	mit teilw. Gestörtem Verbund	vollständiger Verbund	mit teilw. Gestörtem Verbund
1	V 02	V 08	V 02	V 02	V 02	V 02
2	V 16	V 02	V 08	V 08	V 10	V 10
3	V 11	V 06	V 10	V 10	V 08	V 08
4	V 08	V 03	V 11	V 11	V 11	V 11
5	V 06	V 16	V 06	V 06	V 06	V 06
6	V 10	V 11	V 16	V 16	V 16	V 16
7	V 13	V 12	V 13	V 13	V 13	V 13
8	V 15	V 10	V 14	V 12	V 14	V 12
9	V 03	V 13	V 12	V 14	V 12	V 14
10	V 01	V 15	V 03	V 03	V 03	V 03
11	V 12	V 01	V 07	V 07	V 05	V 05
12	V 14	V 05	V 15	V 15	V 15	V 15
13	V 07	V 14	V 05	V 05	V 07	V 07
14	V 05	V 07	V 01	V 01	V 01	V 01
15	V 04	V 04	V 04	V 04	V 04	V 04
16	V 09	V 09	V 09	V 09	V 09	V 09
Gewichtung						
100%	15%	15%	0%	0%	0%	70%

Tabelle 13: Gewichtung der Platzierung im Längsprofil und Querprofil Mitte zur Ermittung der endgültigen Reihenfolge

Die Messungen im Querprofil Mitte sind wegen der hohen Genauigkeit der Messung, den gesicherten Urdaten und der günstigen Lage im Längsprofil für eine Beurteilung maßgebend heranzuziehen. Der Vergleich mit den Spurtiefen im Längsprofil über die gesamte Länge der Platte ergeben im Wesentlichen ähnliche Ergebnisse. Der Vergleich mit den Spurtiefen im Längsprofil der zweiten Plattenhälfte, führt zu einer größeren Abweichung. Diese Abweichungen lassen sich darauf zurückführen, dass die dynamischen Zusatzlasten infolge der Fugenübergänge und der nicht immer exakt gleichen Höhe benachbarter Platten unterschiedlich schnell, d. h. an verschiedenen Stationen, abklingen. So sind die echten Belastungen aus statischer Radlast und dynamischer Zusatzlast im Querprofil Mitte nicht für alle Versuchsplatten gleich.

Bewertungsmaßstab

Um den oben beschriebenen verschiedenen Einflüssen auf die Bildung von Spurrinnen gerecht zu werden, fließen für die Gesamtbeurteilung die Platzierungen aus den verschiedenen Betrachtungen über eine differenzierte Gewichtung ein (vgl. Tabelle 13 unten).

Wegen der sehr zuverlässigen Messergebnisse im Querprofil Mitte und der für eine Gesamtbeurteilung günstigen Lage werden die Ergebnisse der „Abnahme der Gesamtkonstruktion", die die abweichenden Einbaustärken bereinigen, mit 70 % gewertet. Da der Schichtenverbund offenbar in diesem Versuch keinen erheblichen Einfluss auf die Reihenfolge der Platzierung hat (lediglich die Felder V12 und V14 wechseln die Platzierungen), werden diese 70 % vollständig auf das Kriterium „teilweise gestörter Verbund" gewichtet. Eine Aufteilung auf die Reihe mit dem vorgeschalteten Kriterium „vollständiger Verbund" führt zu keinem anderen Ergebnis.

Da die Platten im Längsprofil unterschiedlich auf die wechselnden Lasten reagieren, ist die Betrachtung der Platzierungen im Längsprofil nicht unerheblich. Sie sollten aber nicht zuletzt wegen des rekonstruierten Nullprofils in einem geringeren Maße als die mittleren Werte im Querprofil Mitte in die Beurteilung einfließen. So fließen die Platzierungen aus dem Längsprofil zu 30 % ein. In Übereinstimmung mit dem Betreuerkreis wird die zweite Plattenhälfte als weitgehend ungestört bzgl. dynamischer Zusatzlasten betrachtet. Um dieses zu berücksichtigen werden die 30 % zu je einer Hälfte auf die Platzierung über das gesamte Längsprofil und die der zweite Plattenhälfte verteilt. Dadurch bekommt insgesamt die hintere Hälfte ein höheres Gewicht.

Ergebnis

Die in Tabelle 13 gewählte Gewichtung führt zu dem in der folgenden Tabelle dargestellten Ergebnis:

Platzierung mit Gewichtung		Mischgut				uneingeschränkter Verbund	Spurtiefe	Abnahme Konstruktionshöhe
		Deckschicht		Asphaltbinderschicht			[mm]	[%]
1,2	V 02	SMA 0/11 S	PmB 45	ABi 0/16 S	PmB 45	+	2,8	-0,9%
2,9	V 08	GA 0/11 S	Bit. 20/30	ABi 0/22 S	PmB 45	+	5,0	-2,6%
3,5	V 10	GA 0/11 S	Bit. 20/30	ABi 0/16 S	PmB 45	+	5,6	-2,5%
4,2	V 11	SMA 0/8 S	PmB 45	ABi 0/22 S	Bit. 30/45	+	5,7	-2,7%
4,7	V 06	SMA 0/8 S	PmB 45	ABi 0/16 S	PmB 45	+	6,2	-3,3%
5,3	V 16	SMA 0/8 S	PmB 45	ABi 0/22 S	PmB 45	+	7,3	-3,6%
7,3	V 13	GA 0/11 S	Bit 20/30	ABi 0/16 S	Bit. 30/45	+	8,4	-4,2%
8,3	V 12	SMA 0/11 S	PmB 45	ABi 0/22 S	PmB 45	-	9,5	-4,9%
9,0	V 03	GA 0/11 S	Bit. 20/30	ABi 0/22 S	Bit 30/45	-	12,1	-6,1%
10,1	V 14	SMA 0/11 S	Bit 50/70	ABi 0/16 S	PmB 45	+	11,8	-5,6%
11,1	V 15	SMA 0/11 S	PmB 45	ABi 0/22 S	Bit. 30/45	-	13,6	-6,8%
11,6	V 05	SMA 0/11 S	PmB 45	ABi 0/16 S	Bit. 30/45	-	14,0	-6,5%
13,0	V 01	SMA 0/8 S	PmB 45	ABi 0/16 S	Bit 30/45	-	14,7	-7,2%
13,2	V 07	SMA 0/11 S	Bit. 50/70	ABi 0/22 S	Bit. 30/45	-	12,9	-7,1%
15,0	V 04	SMA 0/11 S	Bit. 50/70	ABi 0/22 S	PmB 45	-	22,7	-11,6%
16,0	V 09	SMA 0/11 S	Bit. 50/70	ABi 0/16 S	Bit 30/45	-	34,8	-18,0%

Tabelle 14: Ergebnis des Gesamtrankings mit der Gewichtung entsprechend Tabelle 13

Der Verbund in der Schichtgrenze Deckschicht/Asphaltbinderschicht hat einen großen Einfluss auf die Standfestigkeit der gesamten Konstruktion. Die drei Platten V05, V12 und V15, die über einen nur teilweise vorhandenen Verbund außerhalb der Radspur in dieser Schichtgrenze verfügen, weisen bei den mittleren Spurtiefen deutlich größere Werte auf, als vergleichbare Platten, die keine Haftungsprobleme haben (z. B. V02, V06 und V11).

Als günstigste Konstruktionen stehen im vorderen Viertel der Reihenfolge annähernd gleichwertig SMA mit polymermodifiziertem Bitumen PmB 45 in der Deckschicht kombiniert mit einem Asphaltbinder mit Normalbitumen 30/45 oder PmB 45 und der GA mit Bitumen 20/30 auf einem Asphaltbinder mit Polymermodifiziertem Bitumen PmB 45. Innerhalb dieser Klasse steht die Platte V02 gemäß Tabelle 14 mit einem Splitt-Mastix-Asphalt in der Deckschicht mit einem deutlichen Abstand vorne.

Die Konstruktionen, die einen SMA 0/11 S mit Normalbitumen in der Deckschicht haben schnitten im Vergleich mit den anderen Konstruktionen deutlich schlechter ab. Dieses Ergebnis leitet sich direkt aus der Viskosität des Bitumens ab. Vor Versuchsbeginn lag der Erweichungspunkt nach Ring und Kugel ca. 8-9°C unter denen der anderen SMA mit PmB 45 und ca. 17°C unter dem Wert des Bitumens 20/30 im Gussasphalt. Nach Versuchsende liegt der Erweichungspunkt des SMA mit Bitumen 50/70 ca. 10°C unter dem Werte der anderen Konstruktionen.

Aussagen inwiefern der Schichtenverbund zwischen der Asphalttragschicht und der Asphaltbinderschicht direkten Einfluss auf die Spurrinnenbildung hat, kann aus diesen Versuchen nicht exakt abgeleitet werden. Hier sind gerade bei den Versuchsfeldern V04, V09, V07 und V01, die vollflächig keinen Haftverbund in dieser Schichtgrenze haben drei Konstruktionen mit dem deutlich geringer viskosen Bitumen 50/70 in der Deckschicht vorhanden. U. U. führt eine Überlagerung dieser Randbedingungen zum schlechten Abschneiden.

Der Einfluss des Größtkorns zeigt bei der Deckschicht die Tendenz, dass eine Kornabstufung 0/8 S zu geringeren Spurtiefen führt als die gröberen Mischungen mit 0/11 S. In der Binderschicht sind keine Tendenzen zu erkennen, d. h. die Sieblinie hat direkt keinen sichtbaren Einfluss auf das Verformungsverhalten.

Die Wahl eines polymermodifizierten Bitumens PmB 45 in der Deckschicht führt wie oben beschrieben zu geringeren Spurtiefen als das Normalbitumen Bit 50/70. Auf die Konstruktion der Binderschicht kann dieser Sachverhalt nicht direkt übertragen werden.

10 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass polymermodifizierte Splittmastix-Deckschichten und Gussasphaltdeckschichten sich gleich gut bewährt haben. Eine Erhöhung der Oberflächentemperatur von 40°C auf 50°C führt zu einer starken Zunahme der Spurrinnen in allen Fahrbahnfeldern.

Die in diesem Rundlaufversuch vorhandenen extremen Versuchsbedingungen, die in der Praxis in dieser Form, d. h. eine ständige Kurvenfahrt mit absoluter Spurtreue und der damit verbundenen Reibwirkung in Querrichtung zwischen Reifen und Splittkörnern sowie einer Radlast von 5 t bei bis zu 50°C, nicht vorkommen, prüfen die Asphaltkonstruktionen an der Leistungsgrenze. Die Rundlaufanlage ist damit für eine solche Prüfung hervorragend geeignet, da maßgebende Einflussfaktoren konstant gehalten werden können.

Für weitere Versuche können anlagenseitig durch eine Steifigkeitserhöhung der Segmente und der Möglichkeit die Spurtreue in einem realistischen Bereich pendeln zu lassen noch bessere Voraussetzungen geschaffen werden. Auch eine verbesserte Maßhaltigkeit der beim Einbau der Asphaltschichten führt zu verbesserten Randbedingungen. Weiterhin ist der Einsatz von profillosen Reifen sinnvoll.

Als weitere Einsatzgebiete bietet sich direkt abgeleitet aus diesem Versuch an, die besten Konstruktionen vertieft zu untersuchen und z. B. die Grenzen bezüglich des Kälteverhaltens mit den Möglichkeiten der Rundlaufanlage zu bestimmen.

Auch einer Untersuchung, welchen Einfluss die Geschwindigkeit auf das Spurrinnenverhalten der Asphaltkonstruktionen hat, ist ein sinnvoller Bereich für weitere Forschung. In diesem Zusammenhang kann auch die Griffigkeit der Oberfläche, d. h. die Poliereigenschaften verschiedener Gesteine unter realistischen Verhältnissen geprüft werden. Dazu ist allerdings ein weniger spurtreues überrollen und eine glatte Bereifung zwingend erforderlich.

11 Literatur

[1] Elsner, Axel; Reichwein, Susanne: „Verkehrssicherheit auf europäischen Autobahnen"; Straße und Autobahn, 1/2001, Seiten

[2] Balduzzi, F.: Der AASHO-Straßentest, Dokumente und Auswertung; Betonstraßenjahrbauch 1962/64; Fachverband Zement e.V. Köln; offiziell genehmigte Übersetzung des zusammenfassenden Berichtes 7 (Special Report 61 G über den AASHO-Straßentest); Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf

[3] Janssen, M.L.; Hall, G.L.: Effect of Ambient Temperature on Radial Tire Rolling Resistance; SAE Technical Papers 800 090, 1980

[4] OECD full-scale pavement test; Road Transport Research; Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD); Paris; 1991

[5] Toth, J.; Ferenczy, E.; Szilvasi, B.: How the loading sapacity of heavy goods vehicles is limited by the cost of road construction and maintance, Konferenzbericht aus: Straßen und Verkehr 2000, Internationale Straßen- und Verkehrskonferenz, Berlin 06.-09.09.1988; Brendow Druck, Moers

[6] Bundesverband Güterkraftverkehr und Logistik: Verkehrswissenschaftliche Zahlen 1997, Frankfurt 1998

[7] Nagel, Ralf: Verkehrsinfrastrukturausbau als Basis zukünftiger Mobilität in Deutschland; Forschung und Praxis, Band 39; Unterirdisches Bauen 2001; Vorträge der STUVA-Tagung 2001; ISBN: 3-980 3390-7-6; München, 20.11.-22.11.2001

[8] Wechsler, Michaela: Analyse des Schwerverkehr und Quantifizierung seiner Auswirkungen auf die Straßenbeanspruchung; Straße und Autobahn, 8/98

[9] Glaeser, Klaus-Peter: Auswirkungen von Super Single Reifen und Zwillingsreifen auf die Straßenbeanspruchung; Straße + Autobahn; 5/99

[10] European Asphalt Pavement Association (EAPA): Heavy Duty Pavements; The Arguments for Asphalt; Breukelen, Niederlande, 1995

[11] Arand, Wolfgang: Dauerhaft verformungsresistente Asphaltbefestigungen; Straße und Autobahn 8/95

[12] Eisenmann, Josef; Neumann, Uwe: Auswirkungen von Achslast und Bereifung auf die Spurrinnenbildung an Asphaltstraßen; Straße und Autobahn, 3/92

[13] Predel, Siegfried: Änderungen und Ergänzungen der ZTV Asphalt-StB 94 á Entstehung und Ausblick, Straße und Autobahn, 11/98

[14] Damm, Klaus-Werner: Langzeitverhalten von Asphaltdeck- und Binderschichten hochbelasteter Verkehrsflächen in Hamburg; Straße und Autobahn 7/98

[15] Großhans, Dieter; Pohlmann, Peter; Reuter, Hans-Reinhard: Ursachen für Verformungen in Asphaltbefestigungen mit Splittmastixasphaltdeckschichten am Beispiel des Autobahnnetzes in Brandenburg; Bitumen, 2/98

[16] Tappert, Axel: Asphaltbinder- und -deckschichten für hohe Beanspruchungen; Straße und Autobahn 8/95

[17] Blab, R.: Die Fahrspurverteilung als Einflussgröße bei der Bemessung des Straßenoberbaus; Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien; Heft 5; 1995

[18] Roßberg, Konrad; Eckert, Martin; Carraro, Ullrich; Bader, Ernst: Verwendung von Gesteinsbaustoffen für die Verbesserung der Wärmebilanz von Asphalt-Deckschichten; Straße und Autobahn 11/2000

[19] Werner, Heinrich: Die neuen Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen-Teil 1, Straße und Autobahn 11/2001

[20] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, RStO 86; Ausgabe 1986; Bundesministerium für Verkehr; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln; (Herausgeber)

[21] Breyer, Günter: Voruntersuchung für eine Rundlaufprüfanlage, Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 130, Wien, 1979

[22] Scazziga, I.: Der Rundlauf als Mittel der Oberbaudimensionierung, Vorstudien zu einem Forschungsprojekt; Institut für Straßen- und Untertagebau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilung 25; Zürich, 1973

[23] Pidwerbecky, B.: Accelorated Dynamic Loading of Pavements; Canterbury Acceloraated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF), University of Canterbury, Christchurch, New Zealand

[24] Lukaszewicz, Johannes: Der Prüfstand Fahrzeug-Fahrbahn (PFF) der Bundesanstalt für Straßenwesen; Straße und Autobahn, 5/93

[25] Buseck, Hermann: Ein internationaler Versuch auf der französischen Rundlaufanlage in Nantes, Eine Untersuchung der OECD á Expertengruppe I 4 "Full Scale Pavement Testsá Straße und Autobahn, 2/91

[26] Schreyer, Jörg: Neue Großversuchsanlage zur praxisnahen Prüfung von Fahrbahnbauten in Tunneln und Trögen (Rundlaufanlage); Tunnel 6/93, Seiten 359 bis 369

[27] áPraxisnahe Prüfungen von Fugenausbildungen in Belägen, auf Brücken, in Tunneln und Trögen mit Hilfe einer Rundlaufprüfanlage"; Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA), Köln, Mai 1996

[28] Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Bosch, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991, Seiten 581 - 585

[29] Buschmann; Koessler: Handbuch der Kraftfahrzeugtechnik; Band 1; Wilhelm Heine Verlag, München, 1976, Seiten 1 á 19

[30] Hahn, W.D.: Zeitraffende Belastungen von Straßenbefestigungen; Straße und Autobahn 2/95

[31] Bruzelius, N.: Straßenforschung in Schweden; Straße und Autobahn; 9/1964, S. 324-335

[32] Betriebsanleitungen für Michelin-Reifen, 1991/1992; 28. Auflage; Februar 1991, Michelin Reifenwerke KgaA

[33] Arand, Wolfgang: Asphaltstraßen für Schwerverkehr nach neuesten Erkenntnissen, Straße und Autobahn 11/94

[34] Schulte, W.: Analyse des Temperaturgeschehens im Straßenoberbau und dessen Einfluss auf die Ergebnisse von Einsenkungsmessungen nach Benkelmann, Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 423, 1984

[35] Krebs, H.G.; Böllinger, G.: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper, Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 347, 1981

[36] Buseck; Crantz; Kuhle; Lück; Siedeck: Unterbau-Versuchsstrecke B 288 Düsseldorf Nord, 1. Bericht, Wissenschaftliche Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft 5, 1965

[37] Crantz: Vergleichende Betrachtungen der Messergebnisse und Beobachtungen auf der Unterbauversuchsstrecke Lahr (B 36), Grunbach (B 29) und Düsseldorf Nord (B 288), Strabag-Schriftenreihe, 6. Folge, Heft 1

[38] Halfmann, U: Hitzeschäden an bituminösen Fahrbahnbefestigungen, Erfahrungen des Sommers 1976, Straße und Autobahn, 1977, Heft 2

[39] Reinboth, Kurt: Antworten auf steigende Anforderungen, Entwicklung im Asphaltstraßenbau von Mitte der 70er Jahre bis gegen Ende des 20. Jahrhunderts; Straße und Autobahn, 11/2000

[40] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitspapier Nr. 25/ B 2.1: Bemessung flexibler Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt B 2.1, Repräsentative Temperaturverteilungen in Asphaltbefestigungen, Köln, 1990

[41] Bundesanstalt für Straßenwesen: Die Datenbank áUntersuchungsstrecken“ (Handbuch), 1981

[42] Eisenmann, J.; Lempe, U.; Friedrich, M.: áAnalyse und Quantifizierung der Verkehrsbelastung an ausgewählten Straßenabschnitten“; Forschungsbericht Nr. 1511-III; Prüfamt für Bau von Landesverkehrswegen der Technischen Universität München, Juni 1995

[43] Technische Daten Nutzfahrzeugreifen; Goodyear S.A., Colmar-Berg/ G.D. Luxemburg

[44] Stanzel, M.; Faber, A.: Statistische Analyse der Reifenfülldrücke schwerer Nutzfahrzeuge, IKH Hannover 11/1996

[45] Richtlinien für die Anlage von Straßen; Teil: Querschnitte (RAS-Q); Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe áStraßenentwurf“, Ausgabe 1996

[46] Schönberger, G.: FGSV-Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung; Straße und Autobahn; 7/1991

[47] Pätzold, H.: Bewährung von Splittmastixasphalt auf hochbelasteten Strecken, Straße und Autobahn, 8/99

[48] Hofbauer, Thomas, E.; Litzka, Johann: Rundlaufversuch zur Untersuchung der Spurrinnensanierung, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung, Heft 463, Wien 1996

[49] NN: Substanzerhaltung der Straßen, Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure e.V., Hannover, Oktober 2001

[50] Werner, Heinrich: Die neuen Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus

[51] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 86/89); Köln; Ausgabe 1989

[52] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau ZTVT-StB 95 (Fassung 1998); Köln; 1998

[53] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinienfür den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt ZTV Asphalt-StB 94 (Ausgabe 1998); Köln; 1998

[54] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt; Köln; 1998

[55] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau (TP A-StB) Teil: Spurbildungsversuch á Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad; Köln; 1998

[56] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau (TP A-StB) Teil: Einaxialer Druckschwellversuch áBestimmung des Verformungsverhalten von Asphalten bei Wärme; Köln; 1999

[57] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsanleitung für die Prüfung von Asphalt (ALP A-StB) Teil 4: Prüfung des Schichtenverbundes nach Leutner; Köln; 1999