

Schlussbericht

**Überprüfung der Eignung des dynamischen
Stempeleindringversuches zur Beurteilung der
Verformungseigenschaften von Asphalt und Schaffung eines
Bewertungshintergrundes**

Antragsteller: Deutsches Asphaltinstitut e.V.
Schieffelingweg 6
53123 Bonn

Forschungsnehmer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner
Institut für Straßenwesen
Technische Universität Braunschweig
Pockelsstr. 3, 38106 Braunschweig

Bearbeiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner
Dr.-Ing. Peter Renken
Dipl.-Inform. Stephan Büchler
Dipl.-Ing. Thomas Lobach

Inhaltsverzeichnis

0. Kurzfassung	3
1. Einführung	5
1.1 Problemstellung	5
1.2 Administratives	6
2. Untersuchungsmethodik	8
2.1 Versuchsmethodik	8
2.2 Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltvarianten.....	11
2.2.1 Bindemittel.....	11
2.2.2 Gesteine	12
2.2.3 Ergebnisse der Eignungsprüfungen	13
2.3 Probekörperherstellung	18
2.4 Beschreibung der Prüfmaschine und Durchführung der Versuche.....	19
2.5 Erfassung der Prüfergebnisse	20
2.6 Mathematische Instrumentarien zur Auswertung der Versuchsergebnisse	23
2.6.1 Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation	23
2.6.2 Varianzanalyse der zweifachen / vierfachen Klassifikation.....	29
2.6.3 Einfacher Varianzvergleich	29
2.6.4 Einfacher Mittelwertvergleich.....	30
2.6.5 Einfache Varianzanalyse und modifizierter LSD-Test.....	32
3. Darstellung der Ergebnisse	35
3.1 Ergebnis des dynamischen Stempel Eindringversuchs	35
3.2 Asphaltbeton 0/11.....	37
3.3 Splittmastixasphalt 0/11 S	40
3.4 Asphaltbinder 0/16.....	41
3.5 Offenporiger Asphalt 0/8.....	43
3.6 Gussasphalt 0/8.....	46
3.7 Zusammenfassung und Interpretation der Versuchsergebnisse	52
4. Statistische Interpretation der Ergebnisse	54
4.1 Varianzanalyse über die Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart.	54

4.2	Varianzanalyse über die Probekörperhöhe und -durchmesser.....	70
4.3	Statistische Vergleiche der Einflussgrößen	76
4.4	Standardversuchsbedingungen	81
5.	Ergebnisse mit Standardversuchsbedingungen	86
5.1	Asphaltbeton 0/11	86
5.2	Splittmastixasphalt 0/11 S	88
5.3	Asphaltbinder 0/16.....	90
5.4	Offenporiger Asphalt 0/8.....	92
5.5	Gussasphalt 0/8.....	93
6.	Zusammenfassung und offen gebliebene Probleme.....	96
6.1	Zusammenfassung	96
6.2	Offen gebliebene Probleme	99
7.	Literatur	100

0. Kurzfassung

In diesem Forschungsauftrag wird die Eignung des dynamischen Stempel Eindringversuchs zur Beurteilung des Verformungswiderstandes von Asphalt untersucht.

Das Versuchsprinzip des dynamischen Stempel Eindringversuchs besteht darin, eine in einem Rahmen eingespannte Asphaltprobeplatte mit 200 mm Durchmesser und 40 mm Höhe (Deckschichtasphalte) bzw. 50 mm Höhe (Asphaltbinder) mit einem Stempel von 80 mm Durchmesser axial mit einer sinusförmigen Druckspannung zu belasten.

Im Rahmen dieses Forschungsauftrages wurden fünf Asphaltarten untersucht, an denen die folgenden Prüfbedingungen variiert wurden:

- Belastungsart: Sinusförmige Druckschwellbelastung mit einer Lastzeit von 0,1 s ohne Lastpause und mit einer Lastzeit von 0,2 s mit einer Lastpause von 1,5 s
- Oberspannungen: Walzasphalte: 0,6; 0,8 und 1,0 MPa
Gussasphalte: 0,1, 0,2 und 0,3 MPa
- Prüftemperatur: +40 °C, +45 °C und +50 °C
- Probekörperhöhe: 40 mm bzw. 50 mm, 60 mm und 80 mm
- Probekörper- / Stempeldurchmesser: 200 / 80 mm und 150 / 60 mm

Das Ergebnis des dynamischen Stempel Eindringversuchs war bislang die relative Stempel Eindringtiefe nach 20.000 Lastwechseln, wobei alternativ die Stempel Eindringtiefe nach 2.500 und 10.000 Lastwechseln untersucht wurde.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass im Vergleich der Asphaltarten untereinander die bisher anhand von Erfahrungswerten eingesetzten Prüfbedingungen als zu „schwach“ anzusehen sind. Erst mit „schärferen“ Prüfbedingungen - wie eine erhöhte Prüftemperatur, höhere Oberlast oder die Belastungsart mit Lastpause - zeigen sich die Charakteristika der einzelnen Asphaltarten. Eine Ausnahme bildet der Gussasphalt, für den andere Prüfbedingungen gewählt werden müssen, um plausible Ergebnisse zu erhalten. Als prüftechnisch einfachste Variation wurde für den Gussasphalt die Reduzierung der Oberspannung auf 0,15 MPa gewählt.

Die Variation der Probekörpergeometrie zeigte einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Mit steigender Probekörperhöhe erhöht sich die Stempeleindringtiefe. Bei der Reduzierung des Probekörper- / Stempeldurchmessers auf 150 mm / 60 mm erhöht sich die Stempeleindringtiefe für alle Walzasphalte, für den Gussasphalt bleibt sie gleich. Damit ist eine Variation der Probekörpergeometrie innerhalb einer Versuchsreihe nicht zulässig.

Abschließend wurden die Asphalte in ihrer Zusammensetzung variiert und unter den schärferen Prüfbedingungen untersucht. Ein Einfluss der Variationen konnte nicht immer statistisch, jedoch tendenziell nachgewiesen werden.

Als Resultat der Untersuchungen wurden folgende Prüfbedingungen zum Standard gewählt:

- Probekörperdurchmesser: 200 mm
- Probekörperhöhe: 40 mm für Deckschichtasphalte,
50 mm für Asphaltbinder
- Stempeldurchmesser: 80 mm
- Prüftemperatur: + 50 °C
- Belastungsart: Sinusförmiger Lastimpuls von 0,2 s Dauer mit einer
Lastpause von 1,5 s Dauer
- Unterspannung: 0,02 MPa
- Oberspannung: **Walzasphalte:** 0,8 MPa
Gussasphalt: 0,15 MPa
- Versuchsdauer: 10.000 Lastwechsel (entspricht 4,7 h)
- Ergebnis: Bleibende Verformung nach 10.000 Lastwechsel in ‰

Mit den festgelegten Prüfbedingungen steht ein Prüfverfahren zur Verfügung, welches den Verformungswiderstand von Asphalt praxisnah bewerten kann. Es können alle Walzasphalte unter einheitlichen Prüfbedingungen miteinander verglichen werden. Gussasphalte können lediglich untereinander und nicht mit Walzasphalten verglichen werden. Mit diesen Ergebnissen wurde das Ziel des Forschungsvorhabens erreicht.

1. Einführung

1.1 Problemstellung

Die Zusammensetzung von Asphaltmischgut ist das Ergebnis eines Optimierungsprozesses, der im Rahmen der Eignungsprüfung bei Beachtung einer Reihe von Randbedingungen durchzuführen ist. Die unterschiedlichen Eigenschaften des Asphaltes müssen gleichermaßen Berücksichtigung finden. Neben der Kältebeständigkeit und der Dauerhaftigkeit wird der Verformungsbeständigkeit von Asphaltbefestigungen aufgrund der steigenden Achslasten und des anwachsenden Verkehrsaufkommens eine besondere Bedeutung zugemessen.

Es kann nur im Sinne eines hochwertigen Qualitätssicherungssystems von Asphalt sein, die Verformungseigenschaften eines zu konzipierenden Asphaltmischguts bereits bei der Eignungsprüfung zu ermitteln. Aus diesem Grunde empfiehlt das Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt für Asphaltmischgut der Bauklassen SV und I sowie Verkehrsflächen mit besonderen Beanspruchungen, aber auch für offenporige Asphalte die Durchführung von zusätzlichen Prüfungen, sogenannte erweiterte Eignungsprüfungen. Verbindliche Angaben über das zur Beurteilung des Verformungswiderstandes von Asphalt anzuwendende Prüfverfahren fehlen in dem Merkblatt. Es werden lediglich Hinweise auf Erfahrungen mit den in den Technischen Prüfvorschriften beschriebenen Spurbildungsversuchen [4] und Druckschwellversuchen [3] gegeben. Eine allgemeine Anwendung dieser Prüfverfahren auf alle Asphaltarten unterliegt jedoch Einschränkungen.

Mit dem dynamischen Stempeldringversuch wurde im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Q 27 "Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung; Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau - behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes" [6] ein Verfahren entwickelt, welches den Gedanken eines seitlichen Stützdrucks auf die Asphaltprobe aufnimmt und sich somit an den Triaxialversuch anlehnt. Der Versuch ist mit gleichem Aufwand und Equipment durchzuführen, wie der dynamische Druckschwellversuch [3, 11].

Bei den dynamischen Stempelleindringversuchen wird in der Regel eine Bohrkernprobe mit einem Durchmesser von 200 mm aus einer mittels Walz-Sektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphaltprobepalte gebohrt. Der Probekörper kann auch als Bohrkernprobe unmittelbar aus der Straßenbefestigung entnommen werden. Die Bohrkernprobe wird in eine kreisrunde Form eingespannt und anschließend mit einem Stempel von 80 mm Durchmesser sinusförmig belastet.

Diese Versuchsanordnung zeigt einige praxisnahe Vorteile: Die Dicke des Probekörpers entspricht der jeweiligen Schichtdicke des Asphaltes in der Straße und durch die Einspannung kann das nicht durch den Druckstempel axial belastete Asphaltmaterial einen seitlichen, radialen Stützdruck aktivieren. Da der Stempel nicht die komplette Probekörperoberfläche belegt, wird praxisgerecht eine gewisse Verdrückung und seitliche Aufwölbung des Asphaltmaterials bewusst zugelassen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, optimierte und praxisgerechte Prüfbedingungen zu schaffen, mit denen möglichst alle Asphaltarten mit dem dynamischen Stempelleindringversuch prüftechnisch angesprochen werden können. Die so optimierten Prüfbedingungen bilden schließlich die Grundlage für eine Verfahrensbeschreibung, mit der der Verformungswiderstand von praxisgerechten Asphaltarten und -sorten überprüft werden soll. Mit diesen Ergebnissen können dann Ansätze für die Schaffung eines Bewertungshintergrundes mit Angaben zur Präzision des Verfahrens unter Wiederholbedingungen erarbeitet werden.

1.2 Administratives

Der ausgearbeitete Forschungsantrag zum Thema „Überprüfung der Eignung des dynamischen Stempelleindringversuches zur Beurteilung der Verformungseigenschaften von Asphalt und Schaffung eines Bewertungshintergrundes“ wurde vom Deutschen Asphaltinstitut (DAI) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) dem Bundesministerium für Wirtschaft zur Förderung im Rahmen der Gemeinschaftsforschung eingereicht. Als ausführende Forschungsstelle wurde das Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig mit

dem Forschungsnehmer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner vorgeschlagen. Auf Empfehlung der Gutachtergruppe der AiF wurde der Antrag vom Bewilligungsausschuss befürwortet, so dass mit der Durchführung der Forschungsarbeit im Juli 2000 begonnen werden konnte.

2. Untersuchungsmethodik

2.1 Versuchsmethodik

Für die experimentellen Untersuchungen des dynamischen Stempel Eindringversuchs wurden fünf unterschiedliche Asphaltarten eingesetzt:

- Asphaltbeton 0/11,
- Splittmastixasphalt 0/11 S,
- Asphaltbinder 0/16,
- Offenporiger Asphalt 0/8 und
- Gussasphalt 0/8

Für die fünf genannten Asphaltarten wurden die Prüfmodalitäten teilweise systematisch, teilweise hierarchisch variiert. Die hierarchische Variation stützte sich auf die Standard-Versuchsbedingungen, die aus Erfahrungswerten gewählt wurden [7, 8, 9 und 10].

Die Belastungsart wurde zweifach variiert. Zum einen erfolgte die Lastaufbringung in einer sinusförmigen Druckschwellbelastung mit einer Frequenz von 10 Hz (= 0,1 s = 100 ms) ohne Lastpausen – abgekürzt mit 0,1 s oLp – wie in Abbildung 2.1 dargestellt.

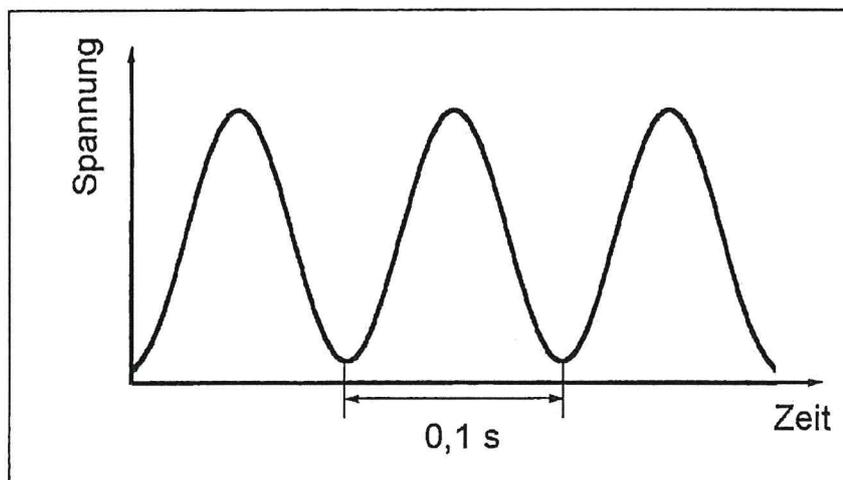


Abbildung 2.1: Belastungsart 0,1 s oLp mit einer Druckschwellbelastung bei einer Frequenz von 10 Hz = 0,1 s ohne Lastpause

Die alternative Belastungsart sah eine Lastpause von 1,5 s zwischen zwei Lastimpulsen vor, bei einer Impulsdauer von 0,2 s = 200 ms. Diese Belastungsart entspricht der des Druckschwellversuches nach [3] und ist in Abbildung 2.2 wiedergegeben und wird im weiteren mit *0,2 s mLp* abgekürzt.

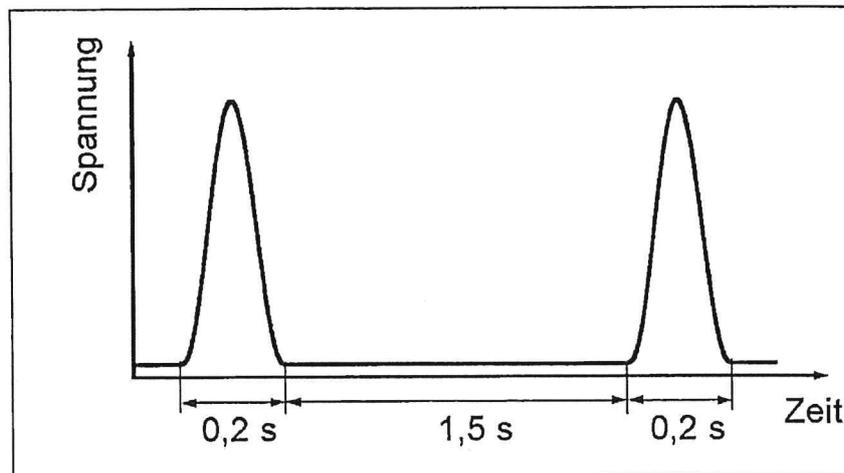


Abbildung 2.2: Belastungsart 0,2 s mLp mit einer Druckschwellbelastung von 0,2 s und einer Lastpause von 1,5 s

Die Oberlast wurde für beide Belastungsarten zwischen 0,6; 0,8 und 1,0 MPa variiert. Für den Gussasphalt wurde im Verlauf der Untersuchungen die Oberlast auf 0,1, 0,2 und 0,3 MPa reduziert. Als Unterlast wurde eine permanente Belastung von 0,02 MPa aufgebracht. Die Unterlast kann prüftechnisch nicht auf Null gesetzt werden, da der Stempel aufgrund der leichten Zeitverzögerung der Regelung abheben würde und mit starkem Druck wieder auf die Probe herabfährt. Bei der Aufbringung der Unterlast ist eine durch das Gewicht des lose aufliegenden Stempels erzeugte, permanente Unterlast zu berücksichtigen.

Die Probekörperhöhe wurde als Standard auf 40 mm festgelegt. Um das Größtkorn des Asphaltbinders zu berücksichtigen [10], wurde die Höhe auf 50 mm heraufgesetzt. Als Variation wurden Probekörperhöhen von 60 mm und 80 mm untersucht. Der Durchmesser der Probekörper wurde als Standard auf 200 mm bei einem Stempeldurchmesser von 80 mm festgelegt. Als Variation wurde der Probekörperdurchmesser auf 150 mm und der Stempeldurchmesser auf 60 mm reduziert. Damit blieb das Verhältnis Stempeldurchmesser zu Probekörperdurchmesser gleich.

Prüf-temperatur	Oberlast	Belastungsart Lastimpulsdauer [s] ohne Lastpause = oLp mit Lastpause = mLp	Probekörper- höhe	Probekörper- / Stempel- durchmesser
40 °C	0,6 MPa	0,1 s oLp	40 mm	200/80 mm
		0,2 s mLp		
	0,8 MPa	0,1 s oLp		
		0,2 s mLp		
	1,0 MPa	0,1 s oLp		
		0,2 s mLp		
45 °C	0,6 MPa	0,1 s oLp		
		0,2 s mLp		
	0,8 MPa	0,1 s oLp		
		0,2 s mLp		
	1,0 MPa	0,1 s oLp		
		0,2 s mLp		
50 °C	0,6 MPa	0,1 s oLp		
		0,2 s mLp		
	0,8 MPa	0,1 s oLp		
		0,2 s mLp		
	1,0 MPa	0,1 s oLp		
		0,2 s mLp		
40 °C	0,8 MPa	0,1 s oLp	40 mm	200/80 mm
			60 mm	
			80 mm	
			40 mm	150/60 mm
			60 mm	
			80 mm	

Tabelle 2.1: Übersicht der Prüfmerkmale und aller durchgeführten Variationen dieser Merkmale für jede Asphaltart

Die Prüfmodalitäten wurden in zwei Gruppen systematisch variiert:

- Zum einen wurde die Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart per Kreuzklassifikation untersucht. Dies bedeutet, dass alle möglichen Kombinationen dieser drei Merkmale geprüft wurden.
- Zum anderen wurden die Probekörperhöhe und Probekörper- / Stempeldurchmesser systematisch variiert.

2.2 Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltvarianten

Die präparative Aufbereitung der Baustoffkomponenten sowie die Herstellung der Asphaltgemische und der Probekörper erfolgten im Laboratorium. Dazu waren zunächst die Eigenschaften der Baustoffkomponenten zu ermitteln und zu beschreiben. Dann wurde mittels Eignungsprüfung die optimale Zusammensetzung der Asphaltgemische festgelegt.

2.2.1 Bindemittel

Als Bindemittel für die präparativ hergestellten fünf Asphaltarten wurden vier Bitumen der Firma Deutsche Shell GmbH eingesetzt. Dabei handelte es sich um die Arten oder Sorten 30/45, 50/70, PmB 45 A (Caribit 45) und PmB 40/100-65 H (Cariphalte OPA). Die Materialkennwerte der Originalbitumen sind in Tabelle 2.01 zusammengestellt.

Für die Herstellung des Gussasphalts 0/8 kam zusätzlich Trinidad-Epuré vom Typ TE-Z 0/8 der Firma Trinidad Lake Asphalt GmbH & Co KG, Carl Ungewitter zum Einsatz. Die ermittelten Kenndaten des Epurés sind in der Tabelle 2.02 zusammengestellt.

Merkmal	Dimension	Bitumen			
		30/45	50/70	PmB 45 A	PmB 40/100-65 H
Dichte bei T=25°C	g/cm³	1,028	1,025	1,031	1,020
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	57,5	51,0	61,8	72,6
Penetration bei T=25°C	mm/10	33	55	32	79
Brechpunkt nach Fraaß	°C	-8	-12,5	-10	-17
Duktilität bei T = +25 °C	cm	-	-	> 100	60
Elastische Rückstellung bei T = +25 °C	%	-	-	68	97

Tabelle 2.01: Eigenschaften der für die Untersuchung eingesetzten Bitumen im Anlieferungszustand

Merkmal	Dimension	TE-Z 0/8
Bindemittelgehalt	M.-%	52,95
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	93,0 (Glyzerin)
Dichte bei T=25°C	g/cm³	1,406
Nadelpenetration des extrahierten Bindemittels	1/10 mm	10
Erweichungspunkt Ring und Kugel des extrahierten Bindemittels	°C	79,5 (Glyzerin) 75,5 (Wasser)
Dichte es extrahierten Bindemittels	g/cm³	1,064

Tabelle 2.02: Eigenschaften des für die Untersuchung eingesetzten Trinidad - Epurés im Anlieferungszustand

2.2.2 Gesteine

Als Füller wurde für alle Asphaltvarianten ein Kalksteinmehl der Firma Fels-Werke GmbH aus Seesen/Harz verwendet. Die Rohdichte wurde zu $\rho_R = 2,709 \text{ g/cm}^3$ ermittelt.

Im Sandbereich wurde ein rundkörniger Natursand aus Bortfeld bei Braunschweig mit einer Rohdichte von $\rho_R = 2,637 \text{ g/cm}^3$ eingesetzt. Der Brechsand wurde zusammen mit den Splitten von Halden im Steinbruch der Fa. Harzburger-Gabbro-Steinbruchs-Gesellschaft mbH aus Bad Harzburg entnommen.

Die Rohdichten der Einzelkornklassen im Brechsand- und Splittbereich zwischen 0,09 und 22,4 mm sind in Tabelle 2.03 aufgelistet.

Merkmal		Dimen- sion	Gabbro
Brechsand 0,09/2,0 mm	ρ_{RM}	g/cm^3	2,871
Splitt 2,0/5,0 mm	ρ_{RM}	g/cm^3	2,898
Splitt 5,0/8,0 mm	ρ_{RM}	g/cm^3	2,868
Splitt 8,0/11,2 mm	ρ_{RM}	g/cm^3	2,865
Splitt 11,2/16,0 mm	ρ_{RM}	g/cm^3	2,810
Splitt 16,0/22,4 mm	ρ_{RM}	g/cm^3	2,867

Tabelle 2.03: Rohdichten ρ_{RM} des Brechsandes und der Einzelkornklassen der eingesetzten Splitte

Für die Herstellung des Splittmastixasphalts 0/11 S und des Offenporigen Asphalts 0/8 kam zusätzlich der Faserstoff Arbocel Typ ZZ 8/1 der Firma J. Rettenmaier & Söhne GmbH & Co KG aus Holzmühle zur Anwendung.

Allen oben genannten Firmen sei an dieser Stelle für die kostenfreie Bereitstellung der Baustoffe gedankt.

2.2.3 Ergebnisse der Eignungsprüfungen

Die Zusammensetzung der Mischgutarten und -sorten erfolgte unter Berücksichtigung der ZTV Asphalt-StB 94 [1] und des Merkblattes für den Bau offenerporiger Asphaltdeckschichten [2] und wurde in Eignungsprüfungen unter dreifacher Variation des Bindemittelgehalts festgelegt. In der Tabelle 2.04 sind die daraus resultierenden

Zusammensetzungen sowie die Kenndaten der einzelnen Asphaltarten für den ersten Untersuchungsteil dokumentiert.

In einem zweiten Untersuchungsteil wurde der Einfluss der Zusammensetzung bei dreifacher Variation der fünf Asphaltarten untersucht. Gegenüber den Asphaltarten des ersten Untersuchungsteils wurde für jede Sorte der Bindemittelgehalt um 0,3 M.-% bei konstanter Korngrößenverteilung sowie die Korngrößenverteilung bei konstantem Bindemittelgehalt verändert. Diese Variationen sind in den Tabellen 2.05a und 2.05b dokumentiert. Die Änderungen gegenüber dem ersten Untersuchungsteil sind in den Tabellen jeweils hervorgehoben.

Merkmal	Dimension	Asphaltart						
		AB 0/11	SMA 0/11 S	ABi 0/16	OPA 0/8	GA 0/8		
Korngrößenverteilung	≤ 0,09 mm	M.-%	7,0	8,7	5,0	4,0	23,1	
	NS	0,09/0,25 mm	M.-%	2,0				4,2
		0,25/0,71 mm	M.-%	2,0				11,3
		0,71/2,00 mm	M.-%	4,5				4,5
	BS	0,09/0,25 mm	M.-%	6,0	3,9	4,5	1,2	2,7
		0,25/0,71 mm	M.-%	8,0	4,3	8,5	2,1	1,9
		0,71/2,00 mm	M.-%	10,5	7,8	14,0	2,2	4,4
	2,0/5,0 mm	M.-%	27,0	11,0	13,0	12,0	25,3	
	5,0/8,0 mm	M.-%	18,0	22,0	10,0	78,0	21,7	
	8,0/11,2 mm	M.-%	15,0	42,0	15,0			
	11,2/16,0 mm	M.-%			30,0			
	16,0/22,4 mm	M.-%						
	Summe	M.-%	100	99,7	100	99,5	99,0	
	BS:NS-Verhältnis	-	3:1	1:0	1:0	1:0	1:2	
Arbocel	M.-%		0,3		0,5			
Trinidad-Epuré	M.-%					2,0		
Bindemittelsorte	-	50/70	50/70	PmB 45 A	PmB 40/100-65 H	30/45+TE		
Bindemittelgehalt	M.-%	5,9	6,5	4,6	5,8	7,6		
Rohdichte ρ_{RAS}	g/cm ³	2,592	2,576	2,664	2,616			
Raumdichte ρ_A	g/cm ³	2,536	2,485	2,551	2,056	2,442		
Hohlraumgehalt H_{bit}	V.-%	2,2	3,5	4,2	21,4			
Marshall-Stabilität	kN	12,0	8,2	18,4	4,8			
Marshall-Fließwert	mm/10	4,6	2,8	4,1	2,2			
Eindringtiefe	mm					2,2		
Zunahme der Eindringtiefe	mm					0,23		
Verdichtungswiderstand D	21 Nm	22,0	45,7	37,2	52,9			

Tabelle 2.04: Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphaltarten gemäß Eignungsprüfungen für den ersten Untersuchungsabschnitt

Merkmal		Dimension	Asphaltart					
			AB 0/11	AB 0/11	SMA 0/11 S	SMA 0/11 S	ABi 0/16	
Korngrößenverteilung	≤ 0,09 mm	M.-%	7,0	7,0	8,7	11,7	5,0	
	NS	0,09/0,25 mm	M.-%	2,0	2,0			
		0,25/0,71 mm	M.-%	2,0	2,0			
		0,71/2,00 mm	M.-%	4,5	4,5			
	BS	0,09/0,25 mm	M.-%	6,0	6,0	3,9	2,7	4,5
		0,25/0,71 mm	M.-%	8,0	8,0	4,3	4,5	8,5
		0,71/2,00 mm	M.-%	10,5	10,5	7,8	7,8	14,0
	2,0/5,0 mm	M.-%	27,0	18,0	11,0	13,0	13,0	
	5,0/8,0 mm	M.-%	18,0	20,0	22,0	20,0	10,0	
	8,0/11,2 mm	M.-%	15,0	22,0	42,0	40,0	15,0	
	11,2/16,0 mm	M.-%					30,0	
	Summe	M.-%	100	100	99,7	99,7	100	
	BS:NS-Verhältnis	-	3 : 1	3 : 1	1 : 0	1 : 0	1 : 0	
	Arbocel	M.-%			0,3	0,3		
Trinidad-Epuré	M.-%							
Bindemittelsorte	-	50/70	50/70	50/70	50/70	PmB 45 A		
Bindemittelgehalt	M.-%	6,2	5,9	6,8	6,5	4,3		
Rohdichte ρ_{RAS}	g/cm ³	2,539	2,565	2,550	2,552	2,659		
Raumdichte ρ_A	g/cm ³	2,495	2,521	2,498	2,509	2,475		
Hohlraumgehalt H_{bit}	V.-%	1,7	1,7	2,0	1,7	6,9		
Marshall-Stabilität	kN	12,3	13,0	10,1	9,6	17,9		
Marshall-Fließwert	mm/10	5,0	4,6	4,95	4,75	4,7		
Eindringtiefe	mm							
Zunahme der Eindringtiefe	mm							
Verdichtungswiderstand D	21 Nm	20,4	20,6	36,1	27,7	40,0		

Tabelle 2.05a: Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphalte für den zweiten Untersuchungsabschnitt

Merkmal		Dimen- sion	Asphaltart					
			ABi 0/16	OPA 0/8	OPA 0/8	GA 0/8	GA 0/8	
Korngrößenverteilung	≤ 0,09 mm	M.-%	5,0	4,0	4,0	23,1	26,1	
	NS	0,09/0,25 mm	M.-%				4,2	4,2
		0,25/0,71 mm	M.-%				11,3	11,3
		0,71/2,00 mm	M.-%				4,5	4,5
	BS	0,09/0,25 mm	M.-%	3,5	1,2	1,2	2,7	2,7
		0,25/0,71 mm	M.-%	7,5	2,1	2,1	1,9	1,9
		0,71/2,00 mm	M.-%	12,0	2,2	2,2	4,4	4,4
		2,0/5,0 mm	M.-%	14,0	12,0	7,0	25,3	24,0
		5,0/8,0 mm	M.-%	11,0	78,0	83,0	21,7	20,0
		8,0/11,2 mm	M.-%	17,0				
		11,2/16,0 mm	M.-%	30,0				
		Summe	M.-%	100	99,5	99,5	99,1	99,1
		BS:NS-Verhältnis	-	1 : 0	1 : 0	1 : 0	1 : 2	1 : 2
	Arbocel	M.-%		0,5	0,5			
	Trinidad-Epuré	M.-%				2,0	2,0	
	Bindemittelsorte	-	PmB 45 A	PmB 40/100-65 H	PmB 40/100-65 H	30/45+TE	30/45+TE	
	Bindemittelgehalt	M.-%	4,6	6,1	5,8	7,9	7,6	
	Rohdichte ρ_{RAs}	g/cm ³	2,644	2,576	2,589			
	Raumdichte ρ_A	g/cm ³	2,463	2,042	1,999	2,410	2,427	
	Hohlraumgehalt H_{bit}	V.-%	6,8	20,7	22,8			
	Marshall-Stabilität	kN	16,1	4,4	4,0			
	Marshall-Fließwert	mm/10	4,9	2,1	2,4			
	Eindringtiefe	mm				2,2	1,8	
	Zunahme der Ein- dringtiefe	mm				0,31	0,22	
	Verdichtungswider- stand D	21 Nm	42,2	52,2	51,3			

Tabelle 2.05b: Zusammensetzung und Eigenschaften der Asphalte für den zweiten Unter-
suchungsabschnitt

2.3 Probekörperherstellung

Für die Versuche waren als Standardvariante Bohrkern von 4 cm (oder 5 cm Höhe für den Asphaltbinder) aus präparativ zusammengesetzten und im Walzsektor-Verdichter hergestellten Asphalten vorgesehen. Als Variation wurde die Probekörperhöhe auf 6 cm und 8 cm sowie der Durchmesser verändert.

Vor Beginn der Herstellung wurden Gesteine in ausreichender Menge - in einem Gesamtumfang von etwa 2,5 t - bevorratet. Alle Gesteine größer 0,09 mm wurden nach Anlieferung präparativ gewaschen und nass gesiebt, anschließend getrocknet und in die Kornklassen trocken gesiebt, um Über- und Unterkornanteile zu entfernen. Das im Füllbereich eingesetzte Kalksteinmehl wurde lediglich getrocknet, da es keinen Überkornanteil beinhaltet.

Die Herstellung der einzelnen Walzasphaltgemische erfolgte im Labormischer in Anlehnung an DIN 1996 Teil 20. Zunächst wurden die erforderlichen Gesteinsmengen - beginnend mit der größten Körnung - in einen Blecheimer eingewogen und über Nacht in einem Wärmeschrank auf $T = + 170 \text{ °C}$ temperiert. Am nächsten Tag wurde die entsprechende Bindemittelmenge in einem Topf auf eine Temperatur von ca. $T = + 150 \text{ °C}$ erwärmt und nach den Mineralstoffen dem Labormischer zugegeben.

Bei den Walzasphalten erfolgte die Herstellung der Probekörper mit dem Walzsektor-Verdichter. Anschließend wurden aus den Platten Probekörper mit einem Durchmesser von 200 mm bzw. 150 mm gebohrt. Zur Kontrolle der Raumdicke wurde der Probekörper nach der Tauchwägung mindestens eine Woche bei Raumtemperatur getrocknet und gewogen.

Zur Herstellung der Gussasphaltprobekörper wurden die Mineralstoffe auf 240 °C und das Bitumen/TE-Gemisch auf 180 °C erwärmt. Nach dem Mischen mit einer Dauer von 1 min wurde die Rührgeschwindigkeit gesenkt und der Gussasphalt verweilte weitere 15 min im Labormischer. Anschließend wurden die Probekörper in Anlehnung an DIN 1996 Teil 4 hergestellt. Der Gussasphalt wurde in runde Formen mit 200 mm bzw. 150 mm Durchmesser und entsprechender Höhe gegossen und die Oberfläche glatt abgerieben.

2.4 Beschreibung der Prüfmaschine und Durchführung der Versuche

Die Probekörper wurden in zwei ringförmige Halbschalen gelegt, welche durch Schrauben zusammengezogen wurden und einen geschlossenen Ring ergeben. Aufgrund der Toleranzen der Bohrkronen lagen die Durchmesser der Proben nicht immer bei exakt 200 mm. Bei kleineren Durchmessern wurde zwischen Ring und Probe ein dünner Metallstreifen geschoben, um die Probe bündig an den Ring anschließen zu lassen. Größere Durchmesser konnten nicht geprüft werden. Ring und Probe wurden anschließend mindestens 2 Stunden in einem Wärmeschrank oder in der Klimakammer der Prüfmaschine auf die erforderliche Prüftemperatur erwärmt. Neben der Erwärmung wurden auch eventuell vorhandene Spannungen, die beim Einbau des Probekörpers in den Ring entstanden sind, aufgrund der Relaxationsfähigkeit des Asphalts abgebaut. Um eine einaxiale Lasteinbringung sicherzustellen, konnte sich der Stempel über ein Kugelgelenk der Probekörperoberfläche anpassen. Der Stempel wurde während der Erwärmungsphase bereits auf die Probe aufgelegt. Abbildung 2.1 zeigt eine Skizze der Prüfvorrichtung und Abbildung 2.2 ein Foto der Anlage.

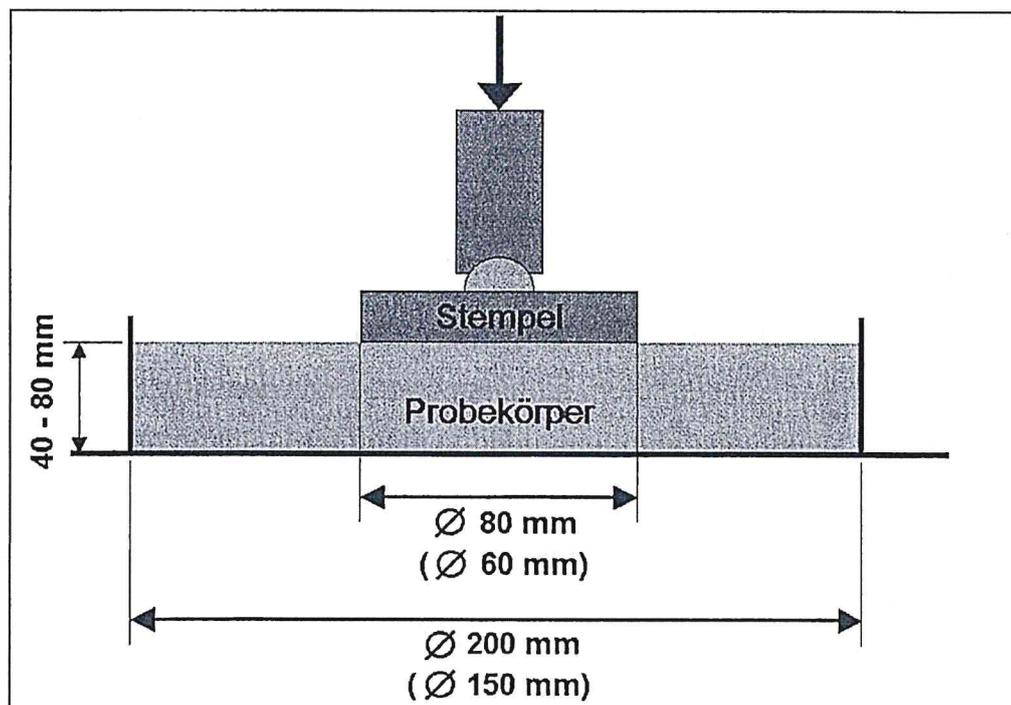


Abb. 2.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus des dynamischen Stempel-eindringversuchs

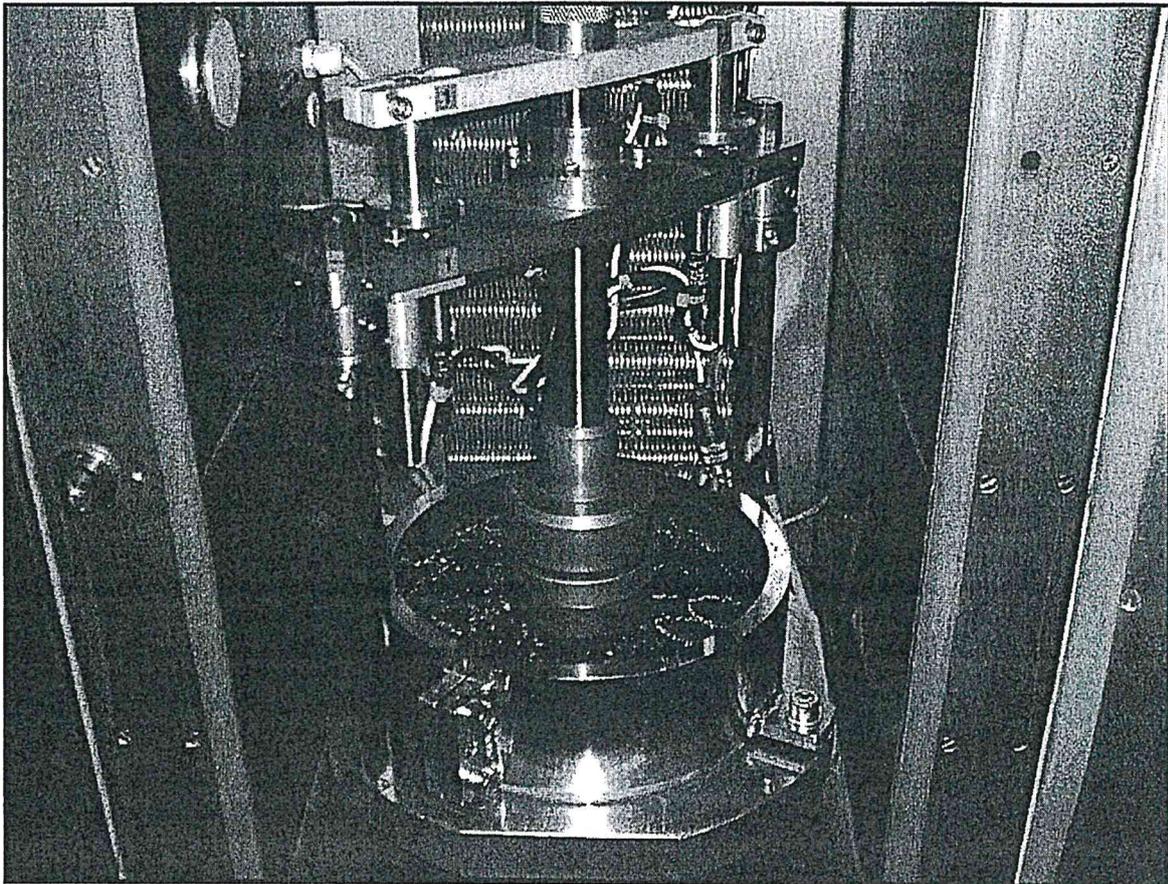


Abb. 2.2: Prüfmaschine mit eingebautem Probekörper

Der Versuch wurde nach 20.000 Lastwechseln beendet. Für die Belastungsart 0,1 s oLp lag somit die reine Versuchsdauer bei 34 Minuten, bei 0,2 s mLp lag sie bei 9 Stunden und 27 Minuten. Zusätzlich war eine Temperierdauer von mindestens 2 Stunden zu berücksichtigen.

2.5 Erfassung der Prüfergebnisse

Während der Belastungsdauer erfasst ein Computer für die Messgrößen Last und Verformung jedes aufgezeichneten Zyklusses zehn äquidistante Messwerte. Mittels eines Householderalgorithmus lassen sich diese Messwerte über die Methode der kleinsten Abstandsquadrate durch eine Fourierreihenentwicklung (1) bei der das Summenglied aus nur einem Summanden besteht ($n = 1$), anpassen.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot t) + b_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f \cdot t)) \quad (1)$$

Die so gefundene Funktion beschreibt mit den Koeffizienten a_0 , a_1 und b_1 eine ideale Sinuskurve. Einige wenige Informationen über eventuelle Abweichungen der originalen Messwerte von einer Sinuskurve gehen hierbei verloren. Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge dient Abbildung 2.3.

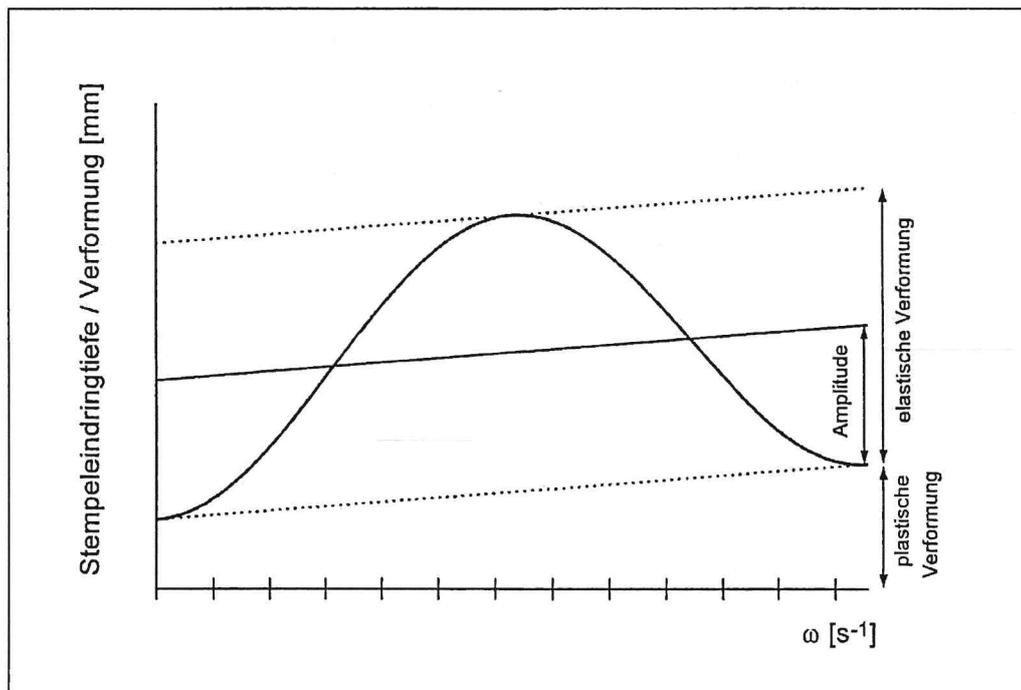


Abbildung 2.3: Prinzipskizze zur Erläuterung der bleibenden und elastischen Verformungsanteile während eines beliebigen Lastimpulses

Die Amplitude der eingerechneten Sinuskurve schwingt um einen infolge der zunehmenden Eindringung des Stempels in den Asphaltprobekörper stetig ansteigenden Graphen. Die Differenz zwischen oberem und unterem Scheitelwert einer jeden Schwingung stellt die elastische Verformung des Probekörpers während eines Lastwechsels dar. Für die Ermittlung des Verformungswiderstandes wird für jede Sinusschwingung als maßgebliche Verformung die bleibende Stempel Eindringtiefe in den Asphaltprobekörper beim unteren Scheitelwert der Schwingungsamplitude bestimmt. Tritt zwischen zwei Belastungszyklen eine Lastpause auf, wird diese bei der Messwertaufnahme nicht berücksichtigt, d.h. die Lastpause geht nicht in die Berechnung der Sinusschwingung mit ein.

Im Anfangsbereich der Dehnungskurven kann es zu unplausiblen Messwerten infolge von Einschwingvorgängen der Hydrauliksysteme kommen. Dieser Einfluss kann durch eine Korrekturrechnung eliminiert werden (siehe Abbildung 2.4).

Zur Ermittlung des Korrekturwertes wird bei logarithmischer Darstellung der Anzahl der Lastwechsel auf der Abszisse und logarithmischer Darstellung der relativen Stempel Eindringtiefen auf der Ordinate eine Gerade zwischen die Messpunkte des ersten plausiblen und des 1000sten Lastwechsels eingerechnet. Durch eine Verlängerung der Gerade zum ersten Lastwechsel wird eine theoretische relative Stempel Eindringtiefe während des ersten Lastwechsels ermittelt. Diese theoretische relative Stempel Eindringtiefe ist der Korrekturwert, um den alle gemessenen Eindringtiefen verringert werden. Abbildung 2.4 zeigt exemplarisch das Korrekturverfahren graphisch. Für die Auswertung des Datenmaterials werden die Korrekturen jedoch rechnerisch durchgeführt.

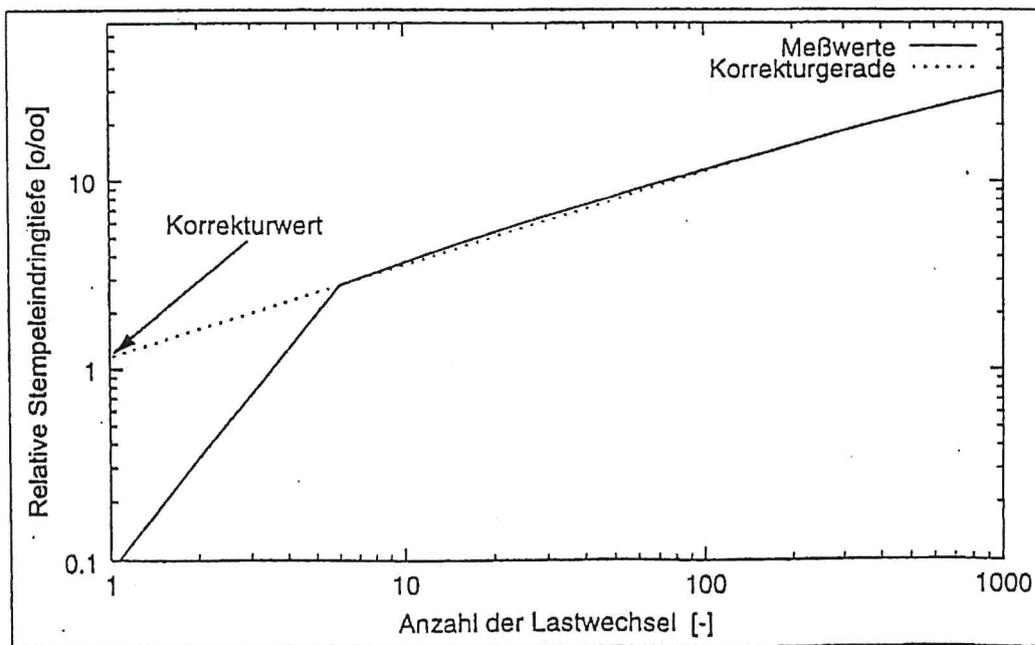


Abbildung 2.4: Ermittlung eines Korrekturwertes zur Kurvenanpassung der gemessenen relativen Stempel Eindringtiefe

Ergebnis des dynamischen Stempel Eindringversuches ist die durch Quotientenbildung aus bleibender Stempel Eindringtiefe [mm] und ursprünglicher Probekörperhöhe

[mm] ermittelte, bleibende Dehnung in ‰ nach dem 20.000. Lastwechsel. Alternativ wird die Dehnung nach 2.500 Lastwechseln – in Anlehnung an den Stempel Eindringversuch mit ebenen Stempel [5] – und 10.000 Lastwechseln – in Anlehnung an den einaxialen Druckschwellversuch [3,14] – betrachtet.

2.6 Mathematische Instrumentarien zur Auswertung der Versuchsergebnisse

Für die in dieser Forschungsarbeit experimentell ermittelten Messwerte liegen Rohdatensätze mit drei Einzelwerten je Teilkollektiv vor. Die Einzelwerte der Teilkollektive können folglich nicht mittels Testverteilungen auf das Vorhandensein von Ausreißern (abweichenden Messwerten) geprüft werden. Die Eliminierung ausreißerverdächtiger Einzelwerte erfolgt - gegebenenfalls - anhand von Plausibilitätserwägungen; eliminierte Einzelwerte werden durch das arithmetische Mittel der verbliebenen Einzelwerte ersetzt, um bei weiteren statistischen Analysen mit vollständigen Datensätzen arbeiten zu können.

2.6.1 Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation

Mit Hilfe multipler Varianzanalysen können die Einflüsse von zwei und mehr Faktoren auf die Gesamtvariabilität einer Merkmalsgröße und gleichzeitig die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren erkannt und quantitativ ermittelt werden. Das Berechnungsprinzip besteht darin, die Faktoren so einzusetzen, dass sich ihre Effekte und Wechselwirkungen sowie die Variabilität dieser Effekte messen, untereinander vergleichen und gegen die zufällige Variabilität abgrenzen lassen.

Gemäß der Klassifikation von Eisenhart [12] können zur Lösung von Problemen mit varianzanalytischen Methoden grundsätzlich drei Modelle unterschieden werden:

- Modell I mit festen Effekten, wobei die Stufen der Einflussfaktoren gezielt ausgewählt und festgelegt werden,
- Modell II mit zufälligen Effekten, wobei die Stufen der Einflussfaktoren auf Zufallsstichproben aus einer Grundgesamtheit beruhen sowie

- Modell III mit gemischten Effekten, wobei sich die Einflussfaktoren sowohl aus dem Modell I als auch aus dem Modell II ergeben.

Ferner unterscheidet man bei multiplen Varianzanalysen zwischen einer Kreuzklassifikation und einer hierarchischen Klassifikation. Bei der Kreuzklassifikation treten alle Stufen des einen Einflussfaktors in allen Stufen aller anderen Einflussfaktoren auf. Bei der hierarchischen Klassifikation hingegen treten alle Stufen einer Einflussgröße immer nur mit einer Stufe einer anderen Einflussgröße gemeinsam auf.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche sind so angelegt, dass auch Varianzanalysen mit Kreuzklassifikation nach dem Modell I (mit festen Effekten) auf das vorliegende Datenmaterial angewendet werden können.

Zur Verdeutlichung dieser Methode wird eine Drei-Variablen-Klassifikation mit Wiederholungen genommen, nämlich für die Variationsursachen Prüftemperatur, Belastungsart und Oberspannung mit systematisch ausgewählten Stufen der drei Faktoren. Da die Variabilitätsanteile der einzelnen Einflüsse und ihre Wechselwirkungen an der Gesamtvarianz interessieren, werden die zu prüfenden Daten einer Merkmalsgröße zunächst in folgende Gruppen unterteilt:

Faktor A mit den Stufen $i = 1$ bis $i = a$, wobei a Stufen in der Grundgesamtheit auftreten,
(Prüftemperatur)

Faktor B mit den Stufen $j = 1$ bis $j = b$, wobei b Stufen in der Grundgesamtheit auftreten,
(Belastungsart)

Faktor C mit den Stufen $k = 1$ bis $k = c$, wobei c Stufen in der Grundgesamtheit auftreten.
(Oberspannung)

Da angenommen werden darf, dass durch die systematische Auswahl der Stufen a , b und c jeweils der ganze relevante Bereich der Faktoren A, B und C erfasst wird, kann das Modell I für alle betrachteten Faktoren zugrunde gelegt werden.

Die Anzahl der Stufen beträgt $a = 3$ (bei der Prüftemperatur), $b = 2$ (bei der Belastungsart) und $c = 3$ (bei der Oberspannung). Total sind $a \cdot b \cdot c = 18$ Stufen vorhanden. Jede Stufe für die Ergebnisse der dynamischen Stempfeleindringversuche umfasst $n = 3$ Werte ("Beobachtungen").

Die Gesamtzahl der Messwerte ist in diesem Beispiel gleich $N = a \cdot b \cdot c \cdot n = 54$.

Für das Untersuchungsmaterial wurde ein varianzanalytisches lineares Modell gewählt mit der Modellgleichung:

$$x_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}.$$

Hierbei bezeichnet der Index i stets die Nummer der Stufe des Faktors A, der Index j die des Faktors B, der Index k die des Faktors C, während der Index l die Nummer der Beobachtung von $l = 1$ bis n angibt.

Dabei bedeuten:

- x_{ijkl} = einen Beobachtungswert, der in der i -ten Stufe des Faktors A, j -ten Stufe des Faktors B, k -ten Stufe des Faktors C und l -ten Beobachtung liegt,
- μ = Gesamtmittel,
- α_i bis γ_i = Stufeneffekt der Faktoren A bis C; die Abweichung der Stufenmittel vom Gesamtmittel,
- $(\alpha\beta)_{ij}$ bis $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ = Wechselwirkungseffekt zwischen den im Index angegebenen Stufen der betreffenden Faktoren; so bezeichnet zum Beispiel $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ den Wechselwirkungseffekt zwischen der i -ten Stufe des Faktors A, der j -ten Stufe des Faktors B und der k -ten Stufe des Faktors C,
- ε_{ijkl} = Effekt der zufälligen Einflüsse.

In diesem Modell wird vorausgesetzt, dass die Stichproben zufällig aus den $a \cdot b \cdot c$ Grundgesamtheiten entnommen worden sind und dass jede dieser Grundgesamtheiten normalverteilt ist mit statistisch gleicher Varianz σ^2 ; das heißt, die x_{ijk} sollen unabhängig und normalverteilt mit der Varianz σ^2 sein. Für die notwendigen Berech-

nungen der SQ (Summen der quadratischen Abweichungen) wird folgender Weg gewählt. Zunächst wird die Hilfsgröße K bestimmt:

$$K = \frac{\sum x_{ijkl}^2}{N},$$

wobei x die durch Indizierung gekennzeichneten Messwerte darstellt. Mit der Hilfsgröße K ergeben sich die Einzeleffekte der Faktoren zu:

$$SQ(A) = \sum_i \frac{x_{i\dots}^2}{n \cdot b \cdot c} - K; \quad v = a - 1,$$

$$SQ(B) = \sum_j \frac{x_{\dots j \dots}^2}{n \cdot a \cdot c} - K; \quad v = b - 1,$$

$$SQ(C) = \sum_k \frac{x_{\dots \dots k}^2}{n \cdot a \cdot b} - K; \quad v = c - 1,$$

sowie die Wechselwirkungseffekte zwischen zwei Faktoren zu:

$$SQ(AB) = \sum_i \sum_j \frac{x_{ij\dots}^2}{n \cdot c} - K - SQ(A) - SQ(B); \quad v = (a-1) \cdot (b-1),$$

$$SQ(AC) = \sum_i \sum_k \frac{x_{i\dots k}^2}{n \cdot b} - K - SQ(A) - SQ(C); \quad v = (a-1) \cdot (c-1).$$

Die übrigen Summen SQ(BC) und deren Freiheitsgrade v werden durch entsprechenden Umtausch der Indices und der jeweiligen Anzahl der Stufen analog berechnet. Für die Wechselwirkungseffekte zwischen drei Faktoren gilt:

$$SQ(ABC) = \sum_i \sum_j \sum_k \frac{x_{ijk}^2}{n} - K - SQ(A) - SQ(B) - SQ(C) - SQ(AB) - SQ(AC) - SQ(BC); \quad v = (a-1) \cdot (b-1) \cdot (c-1).$$

Die Gesamtabweichungsquadratsumme (Total) kann mit der Gleichung

$$SQ(T_o) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l x_{ijkl}^2 - K; \quad v = (a \cdot b \cdot c \cdot n) - 1 = N - 1$$

bestimmt werden.

Die Rest- oder Fehlerquadratsumme wird wie folgt festgestellt:

$$\begin{aligned} SQ(R) &= SQ(T_o) - SQ(A) - SQ(B) - SQ(C) - SQ(AB) - SQ(AC) \\ &\quad - SQ(BC) - SQ(ABC) \\ v &= a \cdot b \cdot c \cdot (n-1). \end{aligned}$$

Die Mittleren Quadrate MQ lassen sich durch Teilung der Summen der Abweichungsquadrate SQ durch die zugehörigen Freiheitsgrade ermitteln.

Mit Hilfe des F-Tests ist dann zu untersuchen, ob die Effekte der Einflussfaktoren und der Wechselwirkungen signifikante Änderungen der Merkmalsgröße bewirken. Gemäß der gestellten Aufgabe sind folgende Null-Hypothesen zu prüfen: Die Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen bewirken in allen Stufen jeweils keinen Effekt. Wird die Null-Hypothese angenommen, so besteht kein Unterschied zwischen den Mittelwerten der Stufen des zu prüfenden Effekts, was bedeutet, dass die Unterschiede zwischen den Stufen dieses Effekts keinen Einfluss auf die Merkmalsänderungen ausüben.

Die Prüfung der Null-Hypothesen erfolgt jeweils durch Vergleich eines rechnerischen \hat{F} -Werts, gebildet aus dem Quotienten des jeweiligen Mittleren Quadrats MQ und dem Mittleren Quadrat des Resteinflusses, mit einem theoretischen F-Wert. Ist die Prüfgröße \hat{F} größer als der tabellierte F-Wert der Fisher-Verteilung, so wird die entsprechende Null-Hypothese nicht akzeptiert, das heißt, die der geprüften Variationsursache zugeordnete Varianz ist nicht zufällig, sondern signifikant unterschiedlich von der Fehlervarianz.

Die rechnerischen \hat{F} -Werte und die zugehörigen Freiheitsgrade lassen sich für das gewählte varianzanalytische Modell mit festen Effekten aus folgenden Beziehungen ermitteln:

$$\hat{F}(A) = \frac{MQ(A)}{MQ(R)} ; \quad v_1 = (a - 1), v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(B)$; $\hat{F}(C)$ und deren zugehörige Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(AB) = \frac{MQ(AB)}{MQ(R)} ; \quad v_1 = (a - 1) \cdot (b - 1), v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

$\hat{F}(AC)$; $\hat{F}(BC)$ und deren zugehörige Freiheitsgrade werden analog ermittelt.

$$\hat{F}(ABC) = \frac{MQ(ABC)}{MQ(R)} ; \quad v_1 = (a - 1) \cdot (b - 1) \cdot (c - 1),$$

$$v_2 = a \cdot b \cdot c \cdot (n - 1).$$

Die theoretischen F-Werte werden jeweils für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ für die zugehörigen Freiheitsgrade v_1 und v_2 ermittelt.

Weiterhin werden die Varianzkomponenten der Haupt- und Wechselwirkungen ermittelt, um die Effekte dieser Wirkungen abschätzen zu können. In Anlehnung an Weber [13] erweisen sich die Mittleren Quadrate MQ als Summen von Varianzkomponenten, die die Wirkungen und Wechselwirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren charakterisieren. Für das gewählte Modell mit festen Effekten lassen sich so nach [13] die Varianzkomponenten s^2 aus folgenden Gleichungen bestimmen:

$$\begin{aligned} MQ &= E(MQ), \\ MQ(A) &= s_R^2 + b \cdot c \cdot n \cdot s_A^2, \\ MQ(B) &= s_R^2 + a \cdot c \cdot n \cdot s_B^2, \\ MQ(C) &= s_R^2 + a \cdot b \cdot n \cdot s_C^2, \\ MQ(AB) &= s_R^2 + c \cdot n \cdot s_{AB}^2, \\ MQ(AC) &= s_R^2 + b \cdot n \cdot s_{AC}^2, \\ MQ(BC) &= s_R^2 + a \cdot n \cdot s_{BC}^2, \end{aligned}$$

$$MQ(ABC) = s_R^2 + n \cdot s_{ABC}^2 ,$$

$$MQ(R) = s_R^2 .$$

Die dadurch ermittelten s^2 können als prozentuale Anteile an der Gesamtvarianz angegeben werden:

$$s_A^2 + s_B^2 + s_C^2 + s_{AB}^2 + s_{AC}^2 + s_{BC}^2 + s_{ABC}^2 + s_R^2 ,$$

mit der Bedingung: $s_{(T_0)}^2 \hat{=} 100 \%$.

2.6.2 Varianzanalyse der zweifachen / vierfachen Klassifikation

Die Gleichungen für die Varianzanalyse der zweifachen Klassifikation ergeben sich aus den Gleichungen für die Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation durch Schluss von n auf $(n-1)$.

Die Gleichungen für die Varianzanalyse der vierfachen Klassifikation ergeben ebenfalls sich aus den Gleichungen für die Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation durch Schluss von n auf $(n+1)$.

2.6.3 Einfacher Varianzvergleich

Soll die Gleichheit der Varianzen zweier normalverteilter, von Ausreißern bereinigter Datensätze überprüft werden, so wird nach [14] zunächst die Null-Hypothese aufgestellt, die Varianzen seien gleich:

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 .$$

Die Null-Hypothese wird abgelehnt, wenn die aus den Stichprobenvarianzen berechnete Testgröße

$$\hat{F} = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

bei einer angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ den für die Freiheitsgrade $v_1 = (n_1 - 1)$ und $v_2 = (n_2 - 1)$ (mit $n_1, n_2 =$ Stichprobenumfang) in [14] tabellierten Schwellenwert der F-Verteilung überschreitet; dann wird die Alternativhypothese

$$H_A : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

angenommen, das heißt, die Hypothese der Varianzhomogenität verworfen. Für die Berechnung der Testgröße \hat{F} wird die Stichprobe mit der größeren Varianz als Nr. 1 mit s_1^2 und die andere als Nr. 2 mit s_2^2 bezeichnet.

2.6.4 Einfacher Mittelwertvergleich

Stellt sich die Aufgabe, über einen Mittelwertvergleich festzustellen, ob sich im statistischen Sinne die Mittelwerte zweier Messreihen mit den Anzahlen n_1 und n_2 der verträglichen Einzelwerte unterscheiden, so wird nach [14] die Null-Hypothese formuliert, dass die Mittelwerte gleich seien, das heißt, die Differenz der Mittelwerte im statistischen Sinne gleich Null ist:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 .$$

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

Tabelle 2.2 : Vergleich zweier Mittelwerte unabhängiger Stichproben normalverteilter Grundgesamtheiten

Die Testgröße \hat{t} zur Überprüfung der Null-Hypothese ist für die Fälle gleicher und ungleicher Stichprobenumfänge sowie gleicher und nichtgleicher Varianzen formelmäßig in Tabelle 2.2 angegeben. Überschreitet die Testgröße \hat{t} bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ die für die Anzahl der Freiheitsgrade v in [12] angegebene Signifikanzschanke der t-Verteilung, so wird die Alternativhypothese

$$H_A = \mu_1 \neq \mu_2$$

akzeptiert; das heißt, die Null-Hypothese auf Homogenität der Stichprobenmittelwerte wird abgelehnt.

2.6.5 Einfache Varianzanalyse und modifizierter LSD-Test

Mit Hilfe einer einfachen Varianzanalyse lässt sich die Gleichheit der Mittelwerte mehrerer Stichprobengruppen überprüfen [14]. Die k Gruppen mit je n_i Stichprobenelementen und insgesamt n Elementen müssen normalverteilt sein und gleiche Varianzen aufweisen.

Für die einfache Varianzanalyse wird die Summe der Abweichungsquadrate der Stichprobenwerte um das Gesamtmittel (Q_{gesamt}) in zwei Anteile, die Summe der Abweichungsquadrate aller Einzelwerte x_{ij} um die Gruppenmittelwerte \bar{x}_i ($Q_{\text{innerhalb}}$) und die Summe der Abweichungsquadrate der Gruppenmittelwerte \bar{x}_i um das Gesamtmittel \bar{x} (Q_{zwischen}), zerlegt.

Die zugehörigen Varianzen oder mittleren Quadrate (MQ) werden als Quotienten aus der Summe der Abweichungsquadrate und dem zugehörigen Freiheitsgrad ν berechnet:

$$-MQ_{\text{zwischen}} = s_{\text{zw}}^2 = \frac{1}{\nu_1} \sum_i n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2,$$

$$-MQ_{\text{innerhalb}} = s_{\text{in}}^2 = \frac{1}{\nu_2} \sum_{ij} (x_{ij} - \bar{x})^2,$$

mit $\nu_1 = k - 1$, $\nu_2 = n - k$.

MQ_{zwischen} wird als Stichprobenfehler und $MQ_{\text{innerhalb}}$ als Versuchsfehler bezeichnet.

Entstammen alle Gruppen einer Grundgesamtheit, dann sollten die Varianzen MQ_{zwischen} und $MQ_{\text{innerhalb}}$ etwa gleich groß sein. Ist aber der Quotient aus MQ_{zwischen} und $MQ_{\text{innerhalb}}$ größer als der kritische Wert der F-Verteilung, so befinden sich unter den Gruppen solche mit unterschiedlichen Mittelwerten μ_i . Die Null-Hypothese, alle Mittelwerte seien gleich:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i = \dots = \mu_k = \mu_n$$

wird somit anhand der Prüfgröße

$$\hat{F} = \frac{MQ_{\text{zwischen}}}{MQ_{\text{innerhalb}}},$$
$$\hat{F} = \frac{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}$$

abgelehnt, wenn bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ $\hat{F} > F(v_1; v_2; \alpha)$ ist.

In diesem Fall sind mindestens zwei Mittelwerte μ_i voneinander verschieden und die Alternativhypothese $\mu_i \neq \mu$ wird für bestimmte i akzeptiert. Die Ablehnung der Null-Hypothese lässt jedoch nicht den Schluss zu, dass alle Mittelwerte signifikant voneinander verschieden sind. Es ist also herauszufinden, welche Mittelwerte oder welche Gruppen von Mittelwerten sich unterscheiden.

Ein multipler Mittelwertvergleich mit Hilfe des modifizierten LSD-Tests gibt darüber Auskunft, welche Mittelwerte zu homogenen Gruppen zusammengefasst werden können, das heißt, der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Dazu werden die k Mittelwerte der Größe nach absteigend geordnet und es wird geprüft, ob benachbarte Mittelwerte eine größere Differenz Δ aufweisen als die kleinste signifikante Differenz (least significant difference = LSD).

Die kleinste signifikante Differenz berechnet sich bei gleichen Stichprobenumfängen einer Messreihe zu:

$$\text{LSD} = t_{n-k, \alpha} \cdot \sqrt{\frac{2}{n_i} \cdot \text{MQ}_{\text{innerhalb}}},$$

- mit t = Schwellenwert der t-Verteilung bei der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$,
 n_i = Stichprobenumfang einer Messreihe,
 $\text{MQ}_{\text{innerhalb}}$ = Varianz der Einzelwerte um die Gruppenmittelwerte.

Bei ungleichen Stichprobenumfängen gilt für die kleinste signifikante Differenz benachbarter Mittelwerte:

$$\text{LSD}(a,b) = t_{n-k, \alpha} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_a + n_b}{n_a \cdot n_b}\right) \cdot \text{MQ}_{\text{innerhalb}}},$$

mit n_a, n_b = Stichprobenumfang der benachbarten Mittelwerte.

Wenn $\Delta \leq \text{LSD}$ ist, lässt sich die Hypothese der Gleichheit benachbarter Mittelwerte nicht ablehnen. Die Grenzen homogener Gruppen von Mittelwerten werden durch eine gemeinsame Linie unterstrichen.

Ist bei der Berechnung der einfachen Varianzanalyse mit nachgeschaltetem LSD-Test zwar ein signifikanter Unterschied der Mittelwerte festgestellt worden, aber lassen sich keine Grenzen homogener Gruppen ermitteln, befindet sich in der Auswertung ein entsprechender Hinweis.

3. Darstellung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des dynamischen Stempeleindringversuches präsentiert. Eine graphische Darstellung der einzelnen Versuche erfolgt aufgrund des großen Versuchsumfangs nicht. In den folgenden Diagrammen werden zunächst die Mittelwerte der relativen Stempeleindringtiefe des Stempels nach 20.000 Lastwechseln dargestellt. Die Unterteilung der Diagramme berücksichtigt die jeweiligen Einflussgrößen – Asphaltart, Prüftemperatur, etc. Im Anhang A1.1 bis A1.5 werden die Diagramme mit den Mittelwerten aller Stempeleindringtiefen über die Anzahl der Lastwechsel dargestellt. Anhang 2.1 bis 2.5 enthält die Stempeleindringtiefe für alle Versuche tabellarisch nach 2.500, 10.000 und 20.000 Lastwechseln.

3.1 Ergebnis des dynamischen Stempeleindringversuchs

Ziel des dynamischen Stempeleindringversuches ist es, die Verformungsbeständigkeit eines Asphaltes zu bewerten. Da diese Bewertung i.d.R. einen Vergleich mehrerer Asphalte beinhaltet, kann das Ergebnis auch mit statistischen Mitteln ausgewertet werden. Hierzu bietet ein einzelner Zahlenwert als Ergebnis für einen dynamischen Stempeleindringversuch Vorteile gegenüber einer grafischen Verformungskurve. Die Ermittlung dieses Zahlenwertes kann rechnerisch erfolgen, sollte im Ausnahmefall aber auch ohne Computer zu ermitteln sein.

Weiterhin sollte ein dynamischer Stempeleindringversuch in einer möglichst einfachen Form und hoher Aussagekraft präsentiert werden.

Abbildung 3.1 zeigt zunächst drei beliebige, aber typische Versuchsabläufe unterschiedlich steifer Asphalte.

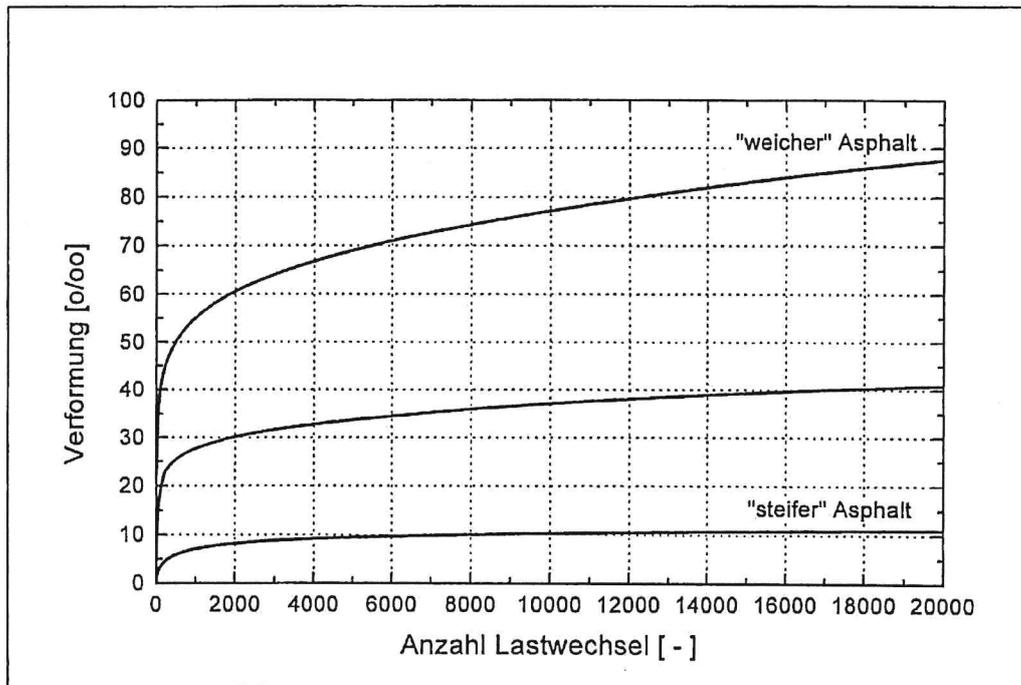


Abbildung 3.1: Drei typische Verläufe der relativen Verformung beim dynamischen Stempelpenetrationsversuch über die Anzahl der Lastwechsel

Diese drei Beispiele zeigen die typischen Verformungsverläufe während der Versuchsdauer. Es werden keine Kriechkurven wie beim einaxialen Druckschwellversuch [3] gemessen. Auch Testversuche über 100.000 Lastwechsel zeigen keine typischen Kriechkurven, der Kurvenverlauf tendiert gegen Versuchsende zu einer Parallele zur Abszisse.

Aufgrund dieser Kurvenverläufe wurde zunächst versucht eine charakteristische Funktion zu finden, die die gemessenen Daten möglichst gut beschreibt. Eine logarithmische Darstellung der Abszisse mit anschließender linearen Regression ergab keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da die Kurvenform unterschiedlich starke Anfangsverformungen zeigt. Einfache Exponentialfunktion oder logarithmische Funktion können die Verläufe nur zum Teil sehr gut beschreiben. Es treten vereinzelte Kurvenverläufe auf, die nur geringe Bestimmtheitsmaße zulassen. Funktionen mit mehreren Parametern können die gemessenen Verläufe ebenfalls sehr gut beschreiben, sind in der Auswertung jedoch komplexer. Somit wurde aufgrund der sehr kontinuierlichen und gleichbleibenden Form der Kurven die relative Verformung nach 20.000 Lastwechseln als Ergebnis festgelegt.

Die Skalierung der Verformung erfolgt in ‰, um eine Vergleichbarkeit mit anderen Versuchen, wie dem bereits angesprochenen einaxialen Druckschwellversuch, zu ermöglichen. Dabei sei auf eine wichtige Bedingung hingewiesen: Diese Darstellungform ist nur für annähernd gleichbleibende Probekörperhöhen gültig. Bei der Variation der Probekörperhöhe zeigt die Darstellung in [‰] keine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Probekörperhöhe, während die Darstellung in [mm] den Einfluss sehr deutlich zeigt.

Die vorgeschlagenen Alternativen zur Methode der Auswertung – nach 2.500 oder 10.000 Lastwechseln – werden in Kapitel 4 untersucht.

3.2 Asphaltbeton 0/11

Im Folgenden werden die Ergebnisse bei Variation der Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart dargestellt. Es werden die Mittelwerte der Stempелеindringtiefe in [‰] nach 20.000 Lastwechseln präsentiert.

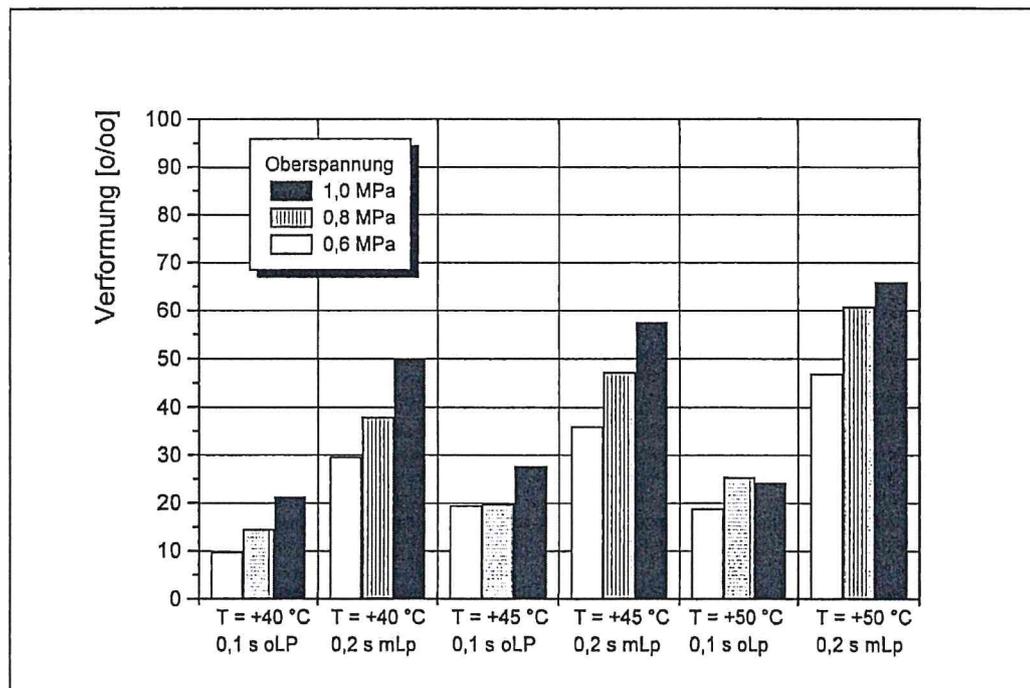


Abbildung 3.2.1: Relative Verformungen beim dynamischen Stempелеindringversuch nach 20.000 Lastwechseln bei Variation von Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart

hier: AB 0/11, $\varnothing = 200/80$ mm, $h = 40$ mm

Für beide Belastungsarten ist erkennbar, dass sich die Stempeleindringtiefe mit steigender Oberspannung erhöht - einzige Ausnahme bilden die Werte bei +50 °C, 0,1 s oLp und der Oberspannung von 1,0 MPa. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass die Belastungsart 0,2 s mLp für alle Temperaturen eine höhere Stempeleindringtiefe als die Belastungsart 0,1 s oLp erzielt. Weiterhin steigen die Stempeleindringtiefen mit steigender Prüftemperatur für beide Belastungsarten und alle Oberspannungen oder liegen auf gleichem Niveau.

In den folgenden Abbildungen wird die Höhe der Probekörper h von 40 auf 60 und 80 mm variiert. Die weiteren Versuchsbedingungen wurden konstant gehalten. Die Darstellung erfolgt in mm, da die Darstellung in ‰ durch die unterschiedlichen Höhen die Ergebnisse verfälschen würde. Um diesen Effekt zu demonstrieren sind in der Abbildung 3.2.2 die Ergebnisse in ‰ und in Abbildung 3.2.3 in mm gezeigt.

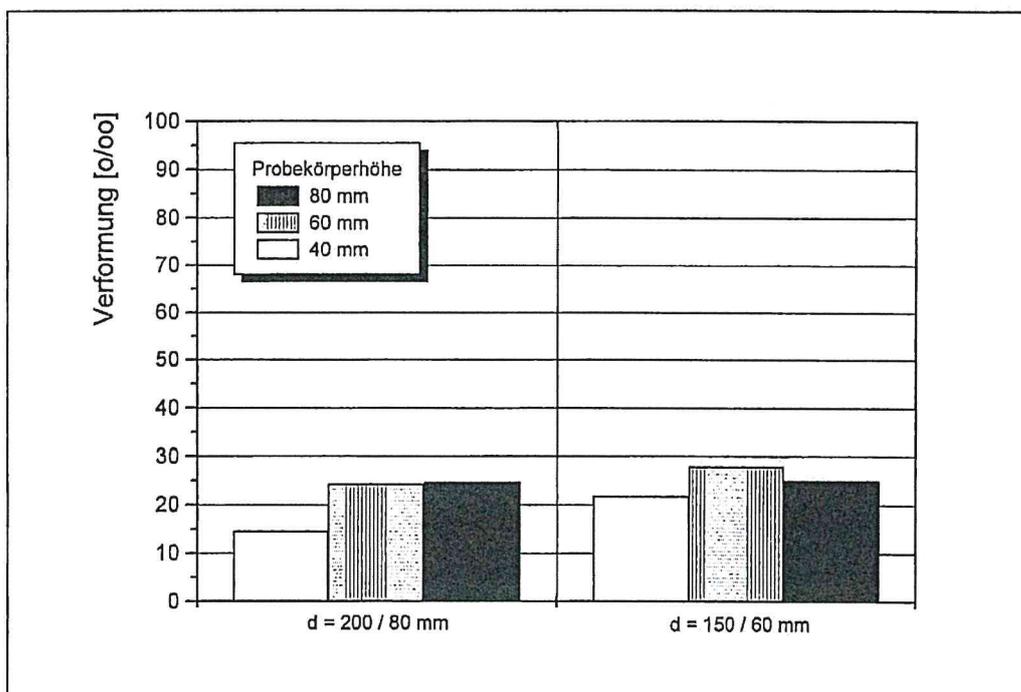


Abbildung 3.2.2: Verformungen beim dynamischen Stempeleindringversuch nach 20.000 Lastwechseln in ‰ bei Variation der Probekörper- und Stempeldurchmesser sowie Probekörperhöhe
hier: AB 0/11, T = +40 °C, 0,1 s oLp, $\sigma_0 = 0,8$ MPa

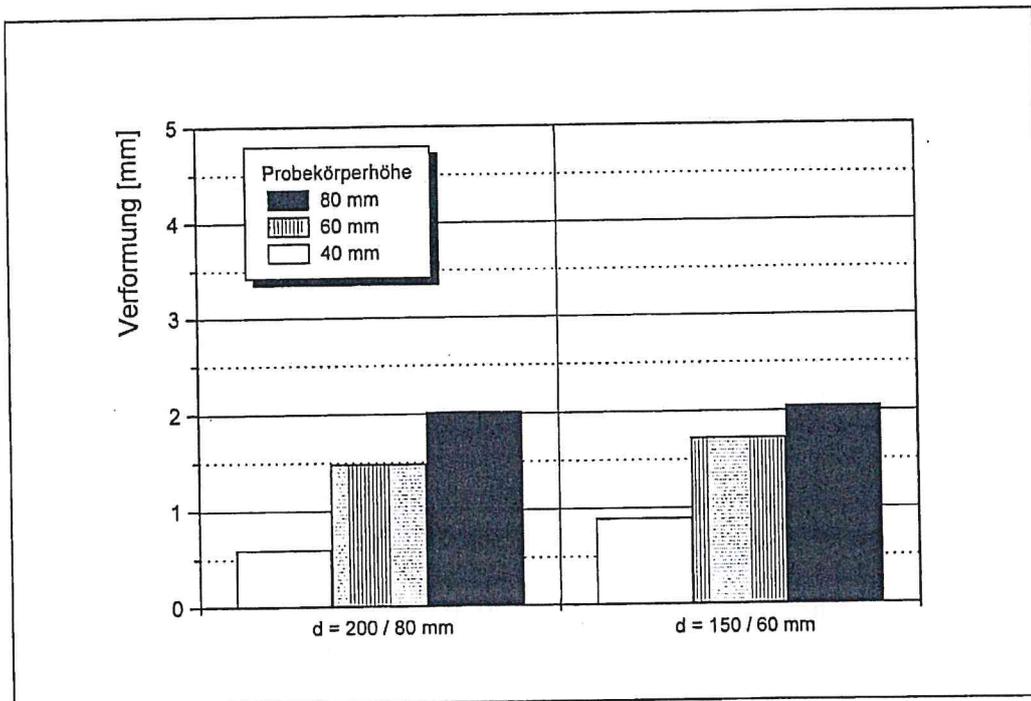


Abbildung 3.2.3: Verformungen beim dynamischen Stempelindringversuch nach 20.000 Lastwechseln in mm bei Variation der Probekörper- und Stempeldurchmesser sowie Probekörperhöhe
hier: AB 0/11, T = +40 °C, 0,1 s oLp, $\sigma_0 = 0,8$ MPa

Während Abbildung 3.2.2 – % – keinen großen oder systematischen Unterschied für die Probekörperhöhen 60 und 80 mm zeigt, ist in Abbildung 3.2.3 – mm – eine deutliche Abhängigkeit zu erkennen. Bei anderen Asphalten – ohne Abbildung – gleichen sich die Stempelindringtiefen, in % bewertet, teilweise sogar für alle Probekörperhöhen.

In Abbildung 3.2.3 ist eindeutig zu erkennen, dass mit steigender Probekörperhöhe die Stempelindringtiefe zunimmt. Weiterhin liegen die Stempelindringtiefen für die kleineren Probekörperdurchmesser 150 mm leicht über den Größeren mit 200 mm Durchmesser.

3.3 Splittmastixasphalt 0/11 S

Nachfolgend werden die Ergebnisse bei Variation der Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart als Mittelwerte der Stempel Eindringtiefe in [‰] nach 20.000 Lastwechseln präsentiert.

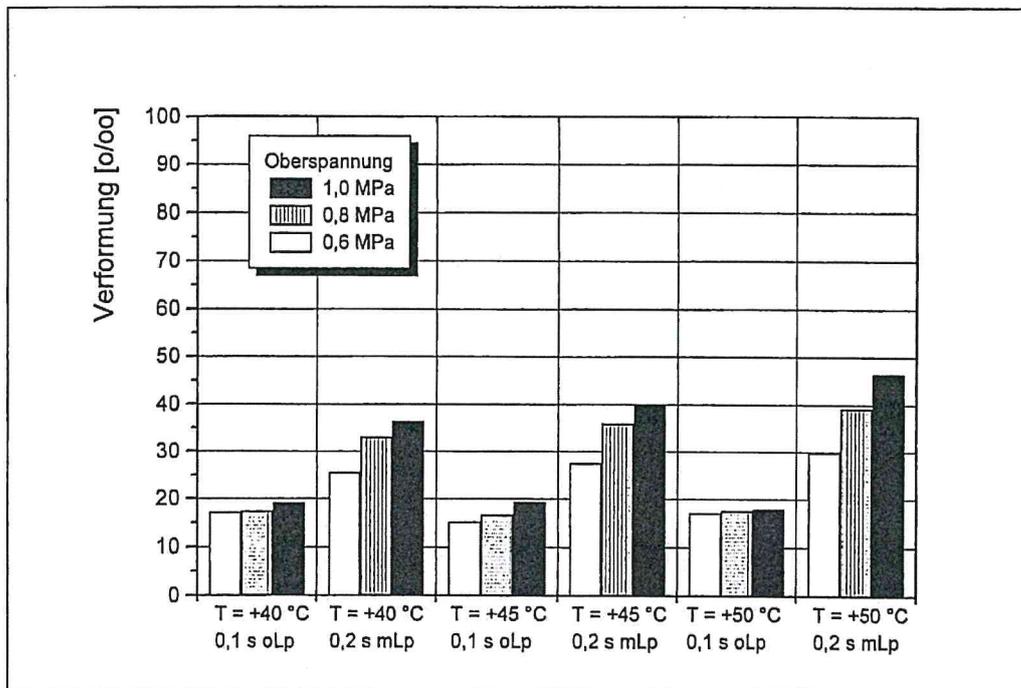


Abbildung 3.3.1: Relative Verformungen beim dynamischen Stempel Eindringversuch nach 20.000 Lastwechseln bei Variation von Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart

hier: SMA 0/11 S, $\varnothing = 200/80$ mm, $h = 40$ mm

Wieder ist für beide Belastungsarten erkennbar, dass sich die Stempel Eindringtiefe mit steigender Oberspannung erhöht oder auf annähernd gleichem Niveau bleibt. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass die Belastungsart 0,2 s mLp eine höhere Stempel Eindringtiefe als 0,1 s oLp erzielt. Weiterhin steigt die Stempel Eindringtiefe mit steigender Prüftemperatur für die Belastungsart 0,2 s mLp an, während sie für die Belastungsart 0,1 s oLp annähernd konstant bleibt.

Im folgenden Diagramm wird die Höhe der Probekörper variiert. Die weiteren Versuchsbedingungen wurden konstant gehalten. Die Darstellung erfolgt auch hier abweichend in mm.

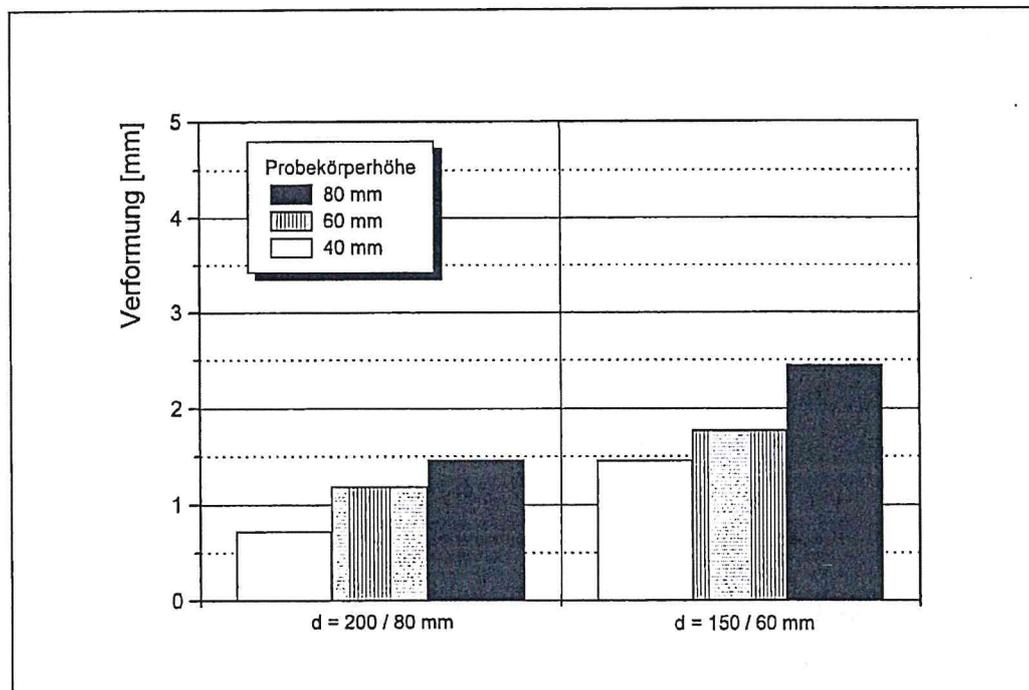


Abbildung 3.3.2: Verformungen beim dynamischen Stempeleindringversuch nach 20.000 Lastwechseln bei Variation der Probekörper- und Stempeldurchmesser sowie Probekörperhöhe
hier: SMA 0/11 S, T = +40 °C, 0,1 s oLp, $\sigma_0 = 0,8$ MPa

Mit steigender Probekörperhöhe h nimmt die Stempeleindringtiefe zu. Ebenso liegt die Stempeleindringtiefe für den kleineren Probekörper- und Stempeldurchmesser von 150 / 60 mm über denen des großen Durchmessers von 200 / 80 mm.

3.4 Asphaltbinder 0/16

Wie zuvor werden die Ergebnisse bei Variation der Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart dargestellt. Es werden die Mittelwerte der Stempeleindringtiefe in [%] nach 20.000 Lastwechseln präsentiert.

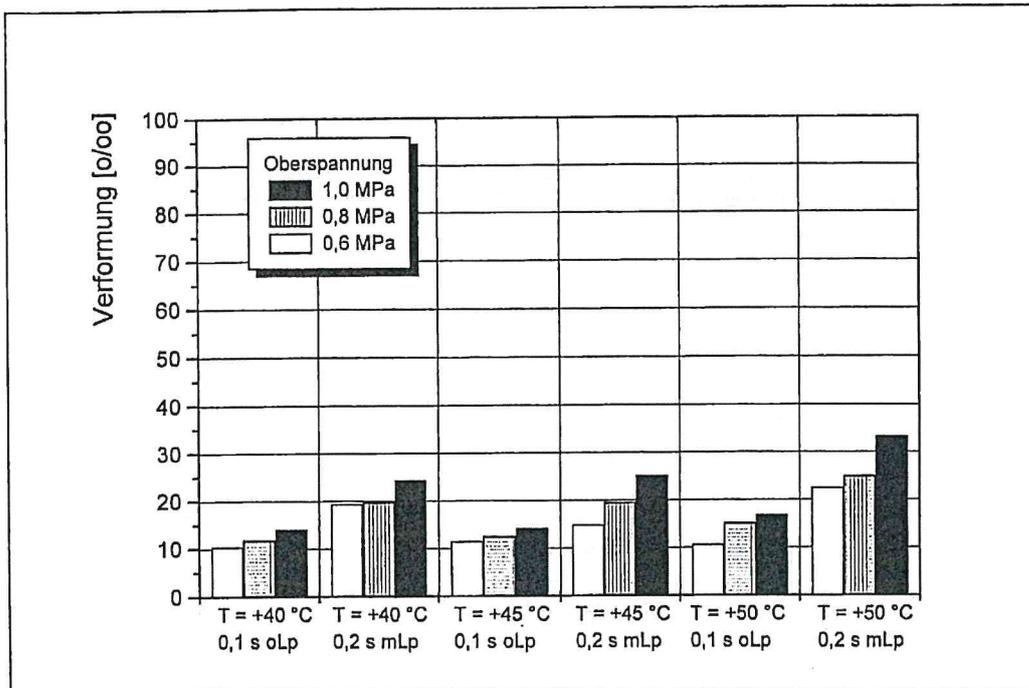


Abbildung 3.4.1: Relative Verformungen beim dynamischen Stempelndringversuch nach 20.000 Lastwechseln bei Variation von Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart

hier: **ABi 0/16**, $\varnothing = 200/80$ mm, $h = 50$ mm

Für beide Belastungsarten und alle Temperaturen erhöhen sich die Stempelndringtiefen mit steigender Oberspannung. Die Belastungsart 0,2 s mLp erzielt eine höhere Stempelndringtiefe als 0,1 s oLp. Mit steigender Prüftemperatur nehmen die Stempelndringtiefen tendenziell zu oder bleiben auf annähernd gleichem Niveau. Lediglich die Ergebnisse bei $T = +45$ °C, $\sigma = 0,6$ MPa und 0,2 s mLp bestätigen nicht diese Tendenz.

Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse bei Variation der Höhe der Probekörper. Die weiteren Versuchsbedingungen wurden konstant gehalten. Die Darstellung erfolgt in mm.

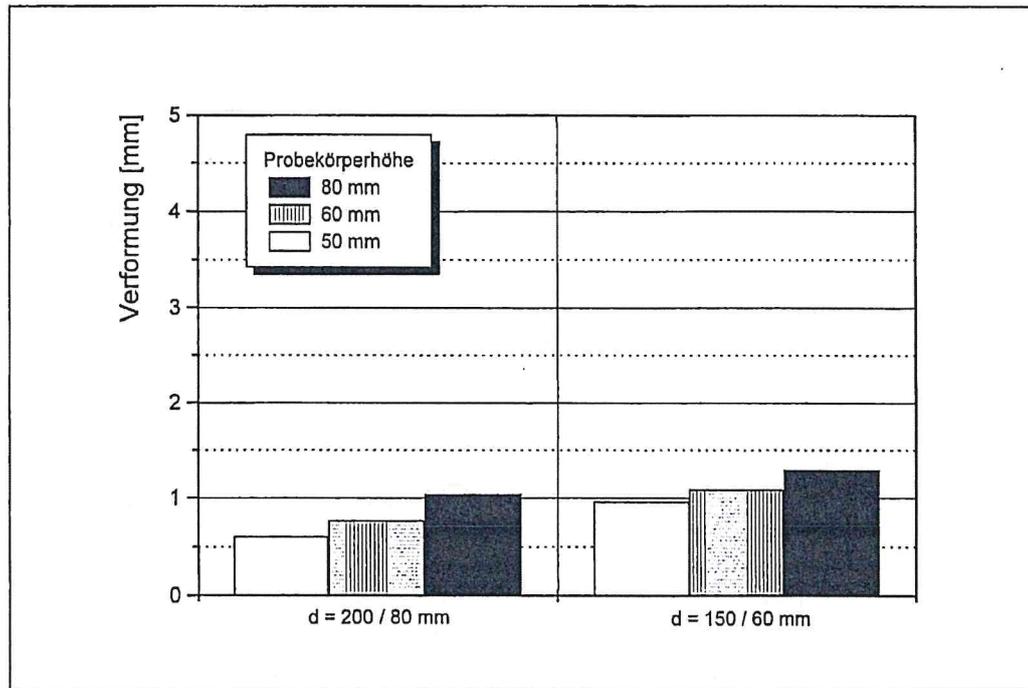


Abbildung 3.4.2: Verformungen beim dynamischen Stempelindringversuch nach 20.000 Lastwechseln bei Variation der Probekörper- und Stempeldurchmesser sowie Probekörperhöhe
hier: **ABi 0/16**, $T = +40\text{ °C}$, $0,1\text{ s oLp}$, $\sigma_0 = 0,8\text{ MPa}$

Auch hier ist eindeutig zu erkennen, dass mit steigender Probekörperhöhe die Stempelindringtiefe zunimmt. Die Stempelindringtiefe für den kleineren Probekörper- / Stempeldurchmesser von 150 / 60 mm übertrifft die Werte des Durchmessers von 200 / 80 mm.

3.5 Offenporiger Asphalt 0/8

Wie zuvor werden die Ergebnisse bei Variation der Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart dargestellt. Es werden die Mittelwerte der Stempelindringtiefe in [%] nach 20.000 Lastwechseln präsentiert.

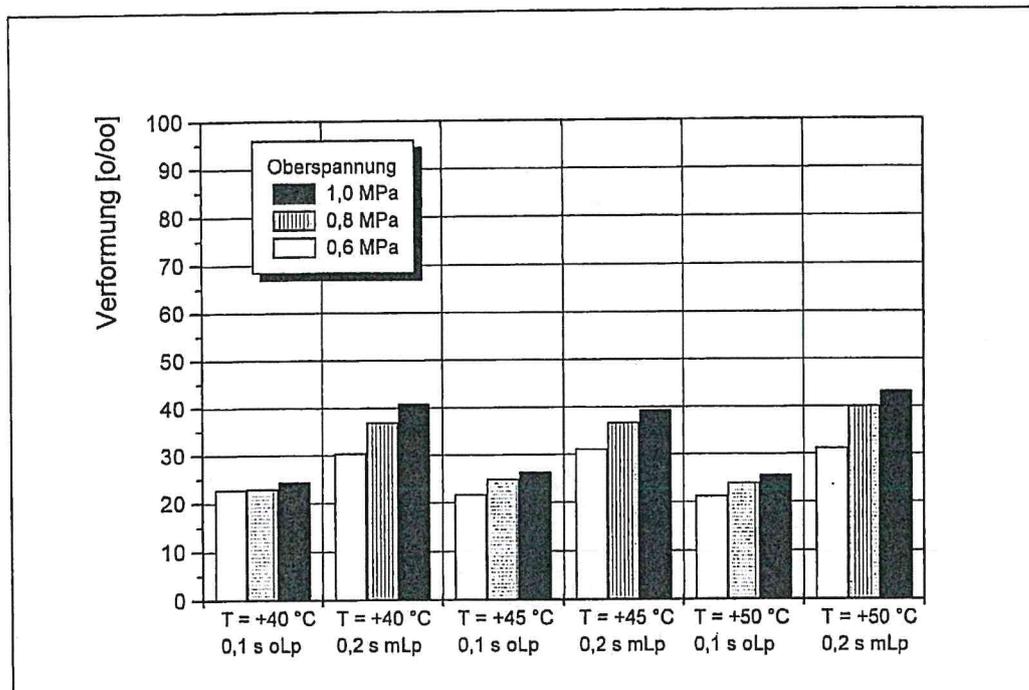


Abbildung 3.5.1: Relative Verformungen beim dynamischen Stempelerindringversuch nach 20.000 Lastwechseln bei Variation von Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart
hier: **OPA 0/8**, $\varnothing = 200/80$ mm, $h = 40$ mm

Wie bei den vorherigen Asphalten ist erkennbar, dass die Stempelerindringtiefen mit steigender Oberspannung zunehmen und zwar unabhängig von der Prüftemperatur oder Belastungsart. Die Belastungsart 0,2 s mLp zeigt höhere Stempelerindringtiefen als 0,1 s oLp. Im Gegensatz zu den bisher beobachteten Asphalten kann ein Anstieg der Stempelerindringtiefen mit steigender Prüftemperatur nicht eindeutig festgestellt werden.

Im folgenden Diagramm werden die Ergebnisse der Variation der Höhe der Probekörper gezeigt. Alle weiteren Versuchsbedingungen wurden konstant gehalten. Die Darstellung erfolgt abweichend in mm.

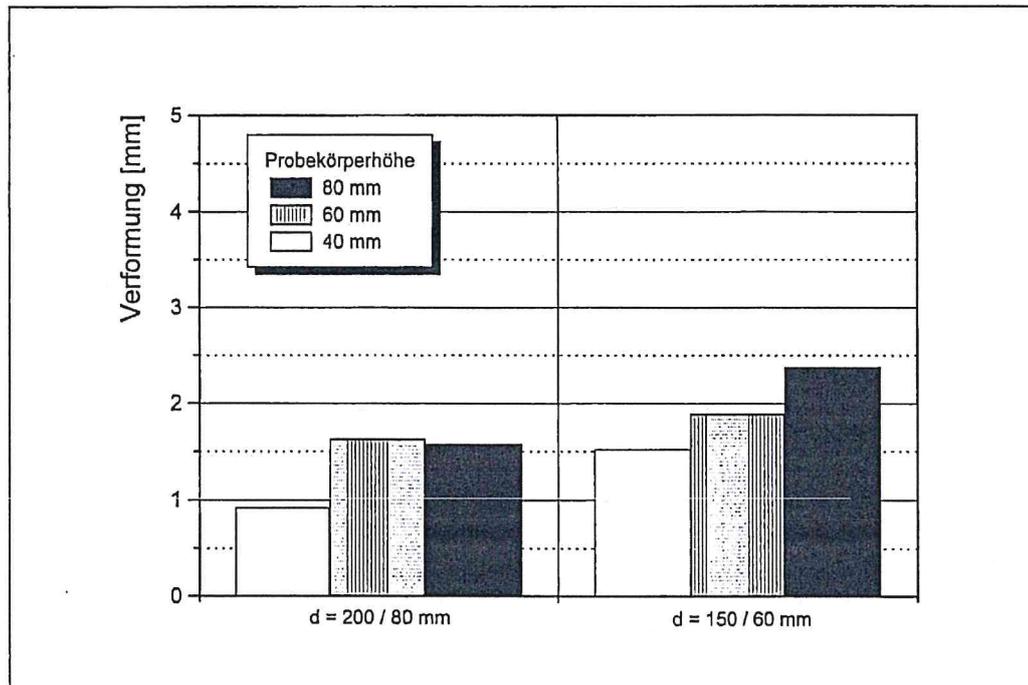


Abbildung 3.5.2: Verformungen beim dynamischen Stempelndringversuch nach 20.000 Lastwechseln bei Variation der Probekörper- und Stempeldurchmesser sowie Probekörperhöhe
hier: OPA 0/8, T = +40 °C, 0,1 s oLp, $\sigma_0 = 0,8$ MPa

Es ist zu erkennen, dass mit steigender Probekörperhöhe die Stempelndringtiefe zunimmt – mit der Ausnahme $\varnothing = 200 / 80$ mm und einer Probekörperhöhe von 80 mm. Auch liegt die Stempelndringtiefe für die kleineren Probekörper- / Stempeldurchmesser von 150 / 60 mm wieder über denen des Durchmessers von 200 / 80 mm.

3.6 Gussasphalt 0/8

Abweichend von den bisher vorgestellten Ergebnissen, werden die Untersuchungsergebnisse des Gussasphalts zunächst graphisch präsentiert. Die Stempel Eindringtiefen nach 20.000 Lastwechseln können größtenteils nicht angegeben werden, da bereits zuvor die messtechnisch maximale Auslenkung der Wegaufnehmer erreicht wurde. Aus diesem Grund werden zunächst die Mittelwerte der Verformungskurven [%] über die Anzahl der Lastwechsel für die Prüftemperatur $T = +40\text{ °C}$ und anschließend die Mittelwerte der Stempel Eindringtiefen nach 2.500 Lastwechseln dargestellt.

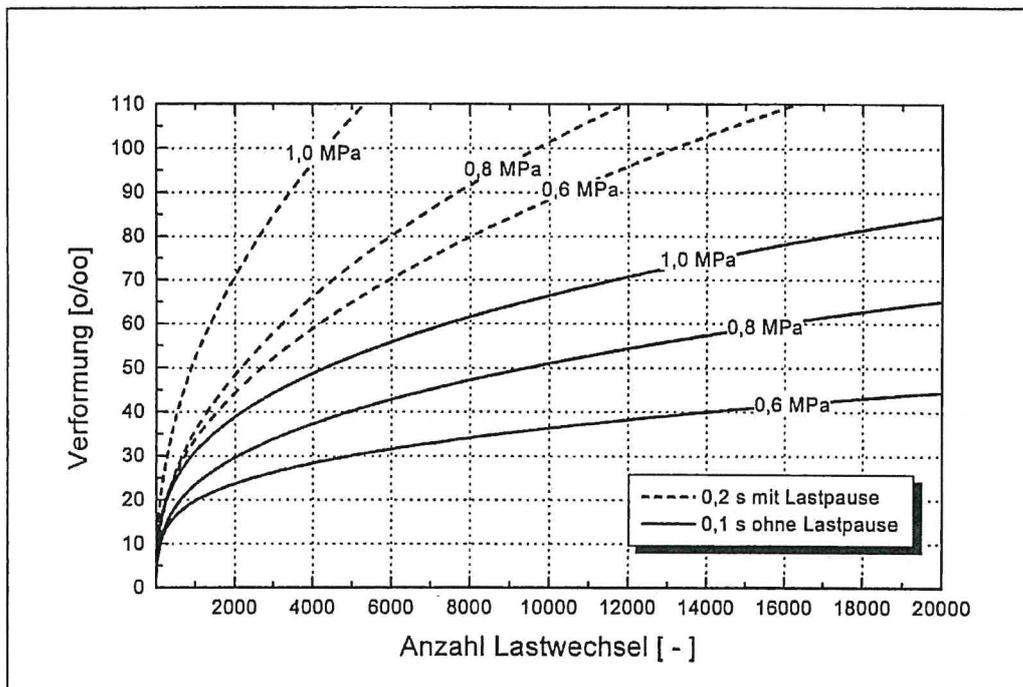


Abbildung 3.6.1: Relative Verformungen beim dynamischen Stempel Eindringversuch über die Anzahl der Lastwechsel bei Variation von Oberspannung und Belastungsart für den Gussasphalt 0/8

hier: GA 0/8, $\varnothing = 200/80\text{ mm}$, $h = 40\text{ mm}$

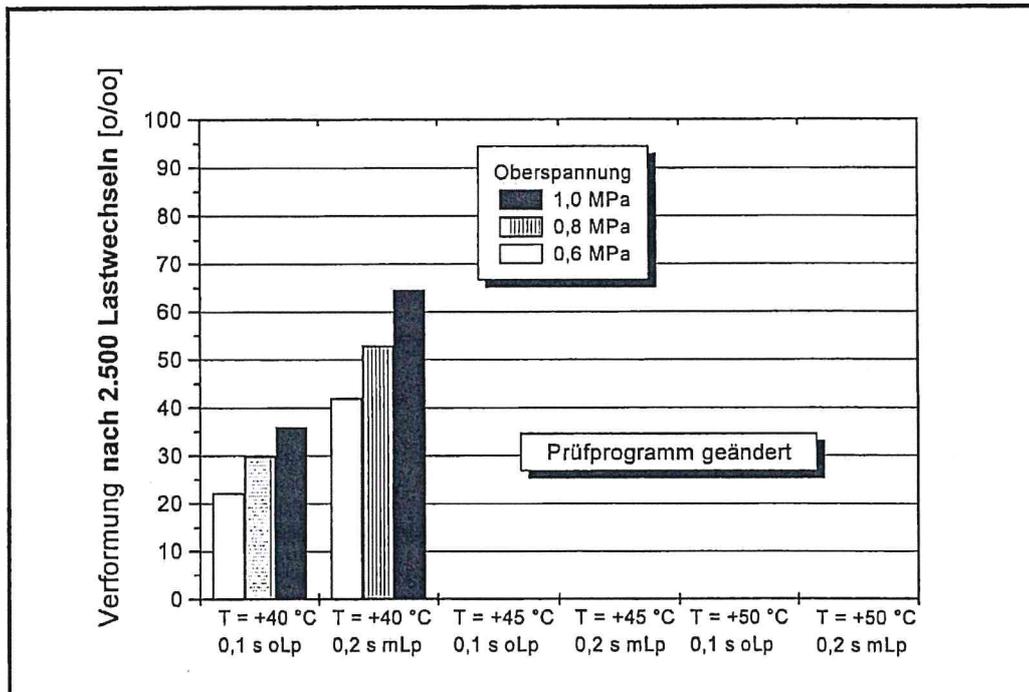


Abbildung 3.6.2: Relative Verformungen beim dynamischen Stempel Eindringversuch **nach 2.500 Lastwechselln** bei Variation von Oberspannung und Belastungsart für den Gussasphalt 0/8

hier: **GA 0/8**, $\varnothing = 200/80$ mm, $h = 40$ mm

Der Gussasphalt zeigt wesentlich höhere Stempel Eindringtiefen, als dies für die geprüften Walzasphalte der Fall ist. Diese großen Verformungen sind vermutlich auf die Fließigenschaften des GA zurückzuführen. Ohne ein stützendes Korngerüst weicht der Gussasphalt dem Druck aus – bei leichter seitlicher Aufwölbung – und erlaubt so hohe Stempel Eindringtiefen.

Da diese Ergebnisse nicht der Praxis entsprechen – Gussasphalt gilt als bewährter, hochstandfester Belag – müssen die Versuchsbedingungen für Gussasphalte modifiziert werden. Eine direkte Vergleichbarkeit mit Walzasphalten ist dann jedoch nicht mehr gegeben. Da ein Vergleich der bisherigen Ergebnisse für Walzasphalte mit den Ergebnissen für Gussasphalt ebenso fragwürdig erscheint, kann dieses Vorgehen als praktikable Lösung angesehen werden.

Die Modifikation der Prüfbedingungen sollte möglichst einfach und leicht zu erreichen sein. Neben der Möglichkeit der Absenkung der Prüftemperatur – was eine längere Temperierphase benötigt und damit die Versuchsdauer erhöht -, kann auch die Oberspannung reduziert werden. In Anlehnung an den dynamischen Eindringversuch am Gussasphalt [5] wird ein Wert zwischen 0,3 MPa und 0,1 MPa vorgege-

ben. Anhand der bisherigen Ergebnisse (siehe Abbildung 3.6.1) lässt sich abschätzen, dass mit diesen Oberspannungen die Eindringtiefen bei praxiskonformen Gussasphalten auch nach mindestens 10.000 Lastwechseln noch im prüfbaren Bereich liegen. Der ähnliche Versuch nach [5] benutzt die Oberspannung 0,35 MPa bei einer Prüftemperatur von +50 °C und der Belastungsart 0,2 s mLp. Er wird allerdings nach 2.500 Lastwechseln oder bei Erreichen einer Eindringtiefe von 5 mm abgebrochen. Mit diesen geänderten Versuchsbedingungen würde der ohnehin schon gesondert zu betrachtende Gussasphalt auch ein anderes Auswerteverfahren benötigen. Für die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurde die Oberspannung in den Schritten 0,1 – 0,2 – 0,3 MPa variiert. Die Variation der Prüftemperatur wurde auf T = +40 °C und T = +50 °C festgelegt. Das Belastungsschema wurde beibehalten.

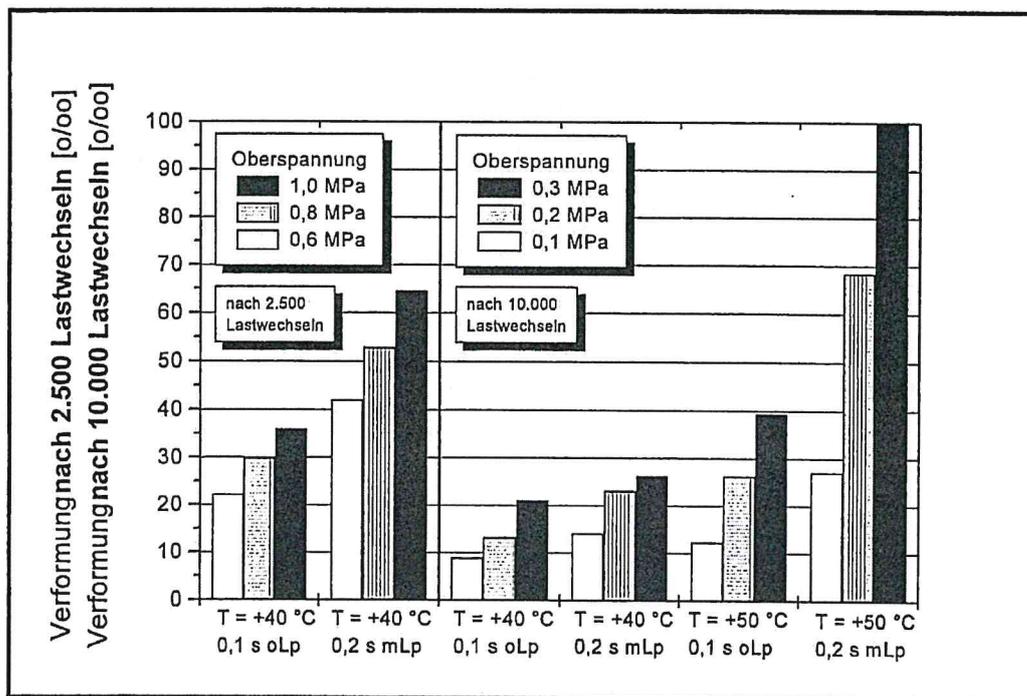


Abbildung 3.6.3: Relative Verformungen beim dynamischen Stempелеindringversuch nach 2.500 und 10.000 Lastwechseln bei Variation von Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart
hier: GA 0/8, $\varnothing = 200/80$ mm, h = 40 mm

Bei beiden Belastungsarten erhöht sich die Eindringtiefe mit steigender Oberspannung. Es ist zu erkennen, dass die Belastungsart 0,2 s mLp eine höhere Eindringtiefe als 0,1 s oLp erzielt. Weiterhin steigen die Stempелеindringtiefen mit steigender Prüftemperatur für beide Belastungsarten.

In den folgenden Diagrammen wird die Höhe der Gussasphaltprobekörper variiert. Die Versuchsbedingungen wurden bereits nach den in Kapitel 4.4 festgelegten Standardbedingungen geändert. Die Darstellung erfolgt in mm.

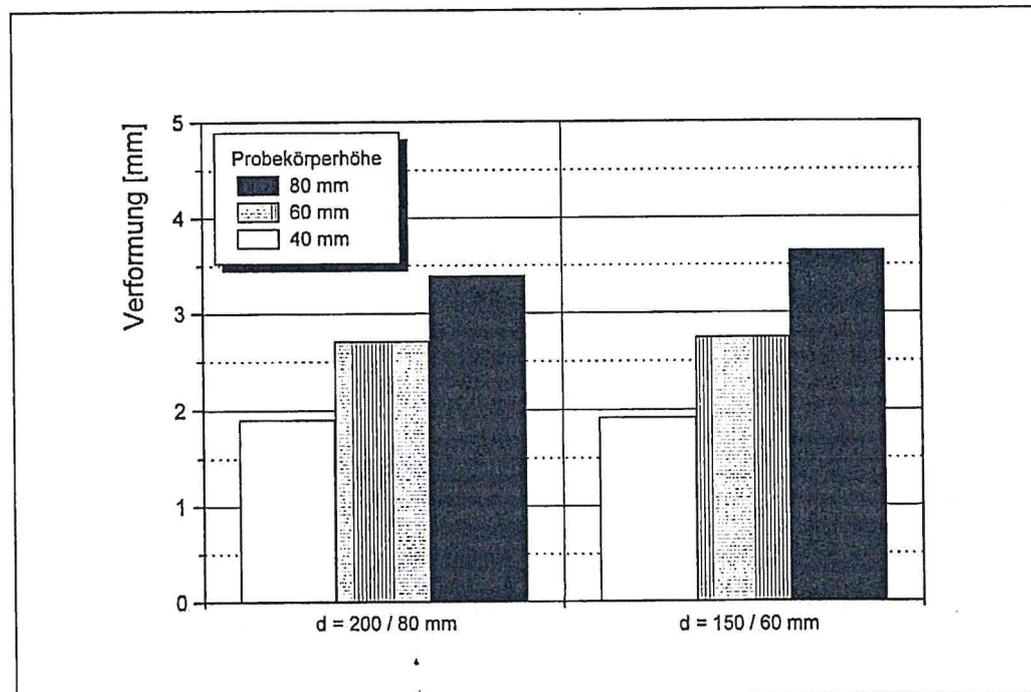


Abbildung 3.6.4: Verformungen beim dynamischen Stempel Eindringversuch nach 10.000 Lastwechseln bei Variation der Probekörper- und Stempeldurchmesser sowie Probekörperhöhe
hier: **GA 0/8**, $T = +50\text{ °C}$, $0,2\text{ s mLp}$, $\sigma_0 = 0,15\text{ MPa}$

Wiederum ist eindeutig zu erkennen, dass mit steigender Probekörperhöhe die Eindringtiefe zunimmt. Im Gegensatz zu den Walzasphalten liegt die Eindringtiefe für den kleineren Probekörper- / Stempeldurchmesser von 150 / 60 mm auf nahezu gleichem Niveau wie die Werte des Durchmessers von 200 / 80 mm.

Zur Untersuchung dieses Effektes wurde zusätzlich zum Prüfprogramm bei konstantem Durchmesser des Probekörpers der Stempeldurchmesser variiert. Bei einem Probekörperdurchmesser von 200 mm und der Höhe von 4 cm wurden die Stempeldurchmesser 60 mm und 100 mm untersucht. Die weiteren Prüfbedingungen entsprechen den in Kapitel 4.4 festgelegten Standardbedingungen. Die Flächenlast blieb bei diesen Variationen gleich (0,15 MPa).

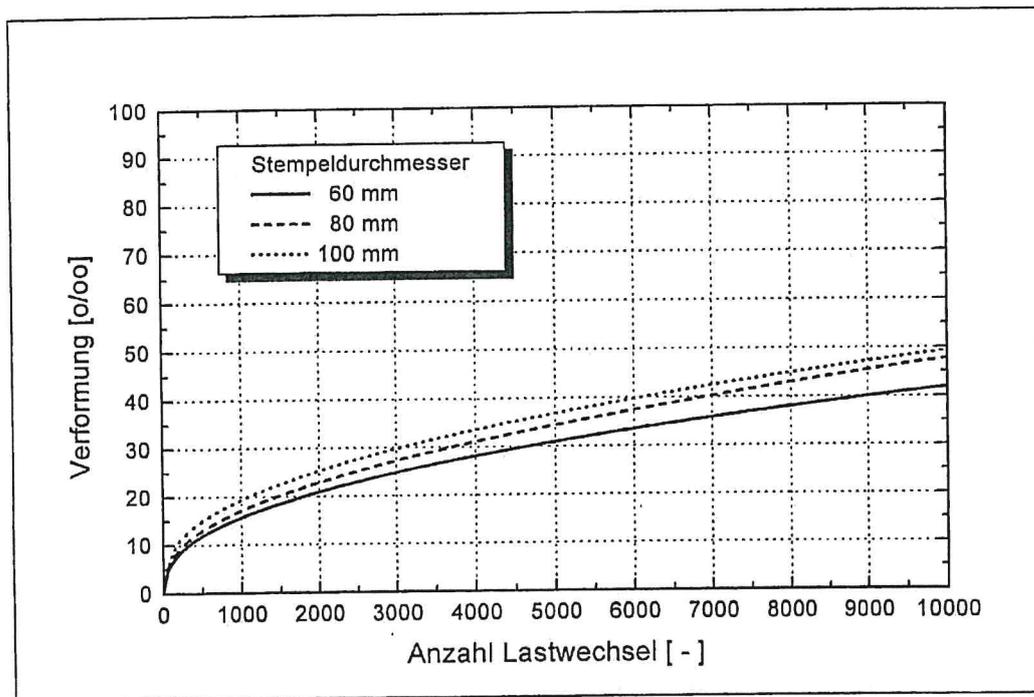


Abbildung 3.6.5: Verformungen beim dynamischen Stempeldringversuch nach 10.000 Lastwechseln bei Variation der Probekörper- und Stempeldurchmesser sowie Probekörperhöhe
hier: GA 0/8, T = +50 °C, 0,2 s mLp, $\sigma_0 = 0,15$ MPa

Für diese Variation wurde vermutet, dass die Eindringtiefen für alle Stempeldurchmesser annähernd gleich bleiben. Der Gussasphalt sollte als stark viskoses Element auf alle Belastungen (gleiche Flächenlast) mit der gleichen Verformung reagieren. Entgegen den Erwartungen ist die Tendenz zu erkennen, dass mit steigendem Stempeldurchmesser auch die Eindringtiefe steigt. Aus diesem Grund wurde ein einfacher Mittelwertvergleich über alle untersuchten Probekörper- / Stempeldurchmesser durchgeführt, siehe Tabelle 3.1.

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich				
200/60 – 200/80	$\hat{F} = 6,45 < 18,52 = F(1;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 1,53 > 3,18 = t(3;0,05)$	gleich
200/60 – 200/100	$\hat{F} = 1,14 < 18,52 = F(1;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 4,35 > 3,18 = t(3;0,05)$	ungleich
200/60 – 150/60	$\hat{F} = 1,93 > 18,52 = F(1;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 4,14 > 3,18 = t(3;0,05)$	ungleich
200/80 – 200/100	$\hat{F} = 8,23 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 0,49 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich
200/80 – 150/60	$\hat{F} = 13,98 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 0,07 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich
200/100 – 150/60	$\hat{F} = 1,70 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 1,02 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich
T = +50 °C	$\sigma_0 = 0,15$ MPa	h = 40 mm	0,2 s mLp	

Tabelle 3.1: Einfacher Mittelwertvergleich über alle Variationen der Probekörper- zu Stempeldurchmesser für den GA 0/8

Der statistische Vergleich zeigt, dass die Ergebnisse für die Stempeldurchmesser von 80 und 100 mm sowie die der 60 mm Stempel bei 150 mm Probekörperdurchmesser im statistischen Sinne gleich sind. Lediglich der kleinste Stempel von 60 mm Durchmesser auf dem Probekörperdurchmesser von 200 mm weist in 2 von 3 Fällen signifikant kleinere Stempeleindringtiefen auf.

Entgegen den Vermutungen lässt sich nachweisen, dass für den Gussasphalt der Probekörper- oder Stempeldurchmesser einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Bei einem kleinen Stempeldurchmesser auf einem „großen“ Probekörper überlagern weitere Effekte die viskosen Einflüsse.

3.7 Zusammenfassung und Interpretation der Versuchsergebnisse

Die mit dem dynamischen Stempeleindringversuch gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erwartungsgemäß nimmt die Stempeleindringtiefe mit steigender Prüftemperatur zu, unabhängig von der Asphaltart.
- Ebenso erwartungsgemäß steigt die Stempeleindringtiefe mit höherer Oberlast – unabhängig von der Asphaltart.
- Die Belastungsart 0,2 s mit Lastpause erzeugt höhere Stempeleindringtiefen, als die Belastungsart 0,1 s ohne Lastpause – unabhängig von Asphaltart, Prüftemperatur und Oberspannung. Vermutlich lassen die Lastpausen dem Material Zeit für kleinste Kornumlagerungen und erzeugen damit höhere Stempeleindringtiefen.
- Eine erhöhte Probekörperhöhe bewirkt größere Stempeleindringtiefen – unabhängig von der Art der Asphalte. Da dieser Effekt unabhängig vom Korngerüst auftritt, wird vermutet, dass das Material entweder nachträglich verdichtet wird oder, was plausibler scheint, es tritt ein Verdrängen des Bitumens bzw. der Mörtelphase zwischen den Körnern ein.
- Ein kleinerer Durchmesser sowohl des Probekörpers als auch des Stempels bewirkt eine erhöhte Eindringtiefe – unabhängig von der Art der Walzasphalte. Hier zeigt sich, dass das Material die aufgebrachte Last auch radial weiterleitet. Je größer der Durchmesser des Probekörpers, desto größer ist die Möglichkeit die aufgebrachten Spannungen elastisch aufzufangen. Wird der Durchmesser verkleinert, erhöht sich der plastische Anteil der Eindringung, der durch Fließen oder Kornumlagerungen die Spannungen abfängt.
- Unter schwachen Prüfbedingungen zeigt der eingesetzte „normale“ Asphaltbeton sehr geringe, unplausible Eindringtiefen. Da Asphaltbeton – im Verhältnis zum Splittmastixasphalt oder offenporigen Asphalt - kein so ausgeprägtes Korngerüst besitzt, werden die aufgebrachten Belastungen elastisch aufgefangen. Die Asphalte mit besonders ausgeprägtem Korngerüst – Splittmastixasphalt und Offenporiger Asphalt – befinden sich während des Versuches in einer Konsolidierungsphase, in der das Korngerüst nicht greift. Erst bei schärferen Prüfbedingungen zeigen sich dann die Vorteile dieser speziellen Art des Korngerüstes. Der untersuchte „norma-

le“ Asphaltbeton erreicht bei diesen Prüfbedingungen erwartungsgemäß hohe Stempeldringtiefen.

- Der untersuchte Asphaltbinder weist die geringsten Eindringtiefen auf – unabhängig von den durchgeführten Variationen der Prüfbedingungen. Da außerdem der Asphaltbinder mit polymermodifizierten Bitumen hergestellt wurde, können diese niedrigen Stempeldringtiefen als plausibel angesehen werden.
- Der geprüfte Gussasphalt zeigt unter den zunächst vorgesehenen Prüfbedingungen unplausibel hohe Eindringtiefen und muss gesondert betrachtet werden. Mit geänderten Prüfbedingungen zeigt er aber ein mit den Walzasphalten vergleichbares Verhalten. Aufgrund des fehlenden Korngerüsts zeigt Gussasphalt keinen Einfluss bei der Variation der Probekörper-/Stempeldurchmesser. Die Variation der Stempeldurchmesser zeigt lediglich eine tendenzielle Abhängigkeit, die allerdings statistisch nur für kleine Stempel auf großen Probekörpern nachweisbar ist.

4. Statistische Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst mit Hilfe der Varianzanalyse der zwei- bis vierfachen Klassifikation die Einflussgrößen der Ergebnisse ermittelt. Anschließend wird untersucht, welche Versuchsbedingungen eine eindeutige Spreizung der Eindringtiefen zulassen. Anhand dieser Untersuchungen werden Standardversuchsbedingungen festgelegt. Abschließend wird ermittelt, ob die Versuche auch nach 2.500 oder 10.000 Lastwechseln eine statistisch signifikante Differenzierung zulassen.

4.1 Varianzanalyse über die Prüftemperatur, Oberspannung und Belastungsart

Die Ergebnisse des dynamischen Stempelindringversuchs – die bleibende Verformung nach 20.000 Lastwechseln – werden nachfolgend einer vierfachen Varianzanalyse unterzogen. Als Einflussfaktoren werden

- A die Asphaltart,
- B die Prüftemperatur,
- C die Belastungsart und
- D die Oberspannung

einbezogen. Es werden ausschließlich die Walzasphalthe betrachtet, da für den Gussasphalt die Oberspannung verändert wurde.

Probekörperhöhe und –durchmesser können nicht berücksichtigt werden, da diese nicht in dieser Kreuzklassifikation variiert wurden.

Das Ergebnis der statistischen Untersuchung ist in Tabelle 4.1.1 dargestellt.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	4	Asphalt AB/SMA/ABI/OPA		
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Prüftemperatur 40/45/50		
Anzahl der Stufen für Faktor C :	2	Belastungsart 0.1/0.2		
Anzahl der Stufen für Faktor D :	3	Oberspannung 0.6/0.8/1.0		
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe		
Anzahl der Stufen insgesamt :	72			
Gesamtzahl der Einzelwerte :	216			
Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	7749.102888	3	2583.034296	308.313255
B	1064.396876	2	532.198438	63.523676
C	15656.020017	1	15656.020017	1868.716378
D	2875.064892	2	1437.532446	171.585143
AB	830.063688	6	138.343948	16.512856
AC	2525.192718	3	841.730906	100.469744
AD	374.312793	6	62.385466	7.446384
BC	401.137711	2	200.568855	23.940076

BD	50.492407	4	12.623102	1.506705
CD	627.284285	2	313.642143	37.436603
ABC	155.607999	6	25.934667	3.095585
ABD	117.608315	12	9.800693	1.169819
ACD	118.640248	6	19.773375	2.360167
BCD	22.239920	4	5.559980	0.663644
ABCD	94.464281	12	7.872023	0.939612
Fehler	1206.425389	144	8.377954	
Total	33868.054427	215		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	3	144	2.670	ja	29.411309	12.07
B	2	144	3.060	ja	2.973415	1.22
C	1	144	3.909	ja	132.809945	54.50
D	2	144	3.060	ja	14.946441	6.13
AB	6	144	2.160	ja	6.137812	2.52
AC	3	144	2.670	ja	29.773885	12.22
AD	6	144	2.160	ja	2.260190	0.93
BC	2	144	3.060	ja	4.915173	2.02
BD	4	144	2.430	nein	0.213936	0.09
CD	2	144	3.060	ja	8.227245	3.38
ABC	6	144	2.160	ja	2.006960	0.82
ABD	12	144	1.820	nein	0.321445	0.13
ACD	6	144	2.160	ja	1.322372	0.54
BCD	4	144	2.430	nein	-0.192670	
ABCD	12	144	1.820	nein	-0.168644	
Fehler					8.377954	3.44
Summe					243.698082	100.00

Tabelle 4.1.1: Ergebnis der vierfachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] für alle Walzasphalte nach 20.000 Lastwechseln

Zunächst sei darauf hingewiesen, dass in der Varianzanalyse die Ursache „Fehler“ die Ergebnisse beschreibt, die keiner Einflussgröße oder Einflussgrößenkombination eindeutig zugeordnet werden können. Mit steigender Streuung der Ergebnisse steigt auch der Fehleranteil.

Die Belastungsart (Ursache C) – 0,1 s oLp oder 0,2 s mLp – hat mit 54,5 % den höchsten Einfluss auf die Ergebnisse des dynamischen Stempelindringversuchs. Dieser dominierende Einfluss wurde nicht erwartet, dagegen wurde ein höherer Einfluss der Asphaltart (Ursache A) vermutet.

Als nächstgroßer Einfluss folgt die Kombination aus Asphaltart und Belastungsart (Ursache AC) mit 12,2 %. Hier zeigen sich bestimmte Kombinationen als besonders auffällig, was aber keine eindeutigen Schlussfolgerungen zulässt.

Der Einfluss der Asphaltart (Ursache A) folgt dicht darauf mit 12,0 %. Dieser Einfluss liegt deutlich über dem von Oberspannung und Prüftemperatur.

Der Einfluss der Oberspannung (Ursache D) liegt mit 6,1 % über dem der Prüftemperatur (Ursache B) mit 1,2 %, womit beide Einflussgrößen in dieser Betrachtung nur untergeordnete Bedeutung haben.

Im nächsten Schritt wird das Datenmaterial ohne den höchsten Einflussfaktor – die Belastungsart – einer Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation unterzogen. In der folgenden Tabelle 4.1.2 wird die Belastungsart 0,1 s oLp statistisch untersucht.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	4	Asphalt AB/SMA/ABI/OPA				
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Prüftemperatur 40/45/50				
Anzahl der Stufen für Faktor C :	3	Oberspannung 0,6/0,8/1,0				
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,1 s oLp				
Anzahl der Stufen insgesamt :	36					
Gesamtzahl der Einzelwerte :	108					
Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)		
A	1561.496822	3	520.498941	174.909767		
B	106.352885	2	53.176442	17.869545		
C	409.733445	2	204.866722	68.843926		
AB	244.364313	6	40.727385	13.686133		
AC	91.083798	6	15.180633	5.101338		
BC	35.558213	4	8.889553	2.987268		
ABC	96.239185	12	8.019932	2.695038		
Fehler	214.258611	72	2.975814			
Total	2759.087271	107				
Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	3	72	2.730	ja	17.504106	54.31
B	2	72	3.120	ja	0.321651	1.00
C	2	72	3.120	ja	5.244902	16.27
AB	6	72	2.230	ja	3.634161	11.28
AC	6	72	2.230	ja	0.795633	2.47
BC	4	72	2.500	ja	0.072468	0.22
ABC	12	72	1.890	ja	1.681373	5.22
Fehler					2.975814	9.23
Summe					32.230109	100.00

Tabelle 4.1.2: Ergebnis der dreifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] für alle Walzasphalte nach 20.000 Lastwechseln für die **Belastungsart 0,1 s oLp**

Für die Belastungsart 0,1 s oLp stellt sich erwartungsgemäß eindeutig die Asphaltart mit 54,3 % als größter Einflussfaktor heraus. Danach folgt die Oberspannung mit 16,3 %. Nur wenig geringer ist der Einfluss der Kombination aus Asphaltart und Prüftemperatur mit 11,3 %. Diese Anteile bestätigen die in der Varianzanalyse der vierfachen Klassifikation ermittelten Ergebnisse in Tabelle 4.1.1 .

Anzahl der Stufen für Faktor A :	4	Asphalt AB/SMA/ABI/OPA
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Prüftemperatur 40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor C :	3	Oberspannung 0.6/0.8/1.0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,2s mLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	36	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	108	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	8712.798784	3	2904.266261	210.758086
B	1359.181702	2	679.590851	49.316851
C	3092.615733	2	1546.307867	112.213157
AB	741.307374	6	123.551229	8.965921
AC	401.869244	6	66.978207	4.860504
BC	37.174114	4	9.293528	0.674417
ABC	115.833411	12	9.652784	0.700488
Fehler	992.166778	72	13.780094	
Total	15452.947140	107		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	3	72	2.730	ja	100.866282	53.02
B	2	72	3.120	ja	15.455524	8.12
C	2	72	3.120	ja	41.102470	21.61
AB	6	72	2.230	ja	12.655383	6.65
AC	6	72	2.230	ja	6.369491	3.35
BC	4	72	2.500	nein	-0.029938	
ABC	12	72	1.890	nein	-1.375770	
Fehler					13.780094	7.24
Summe					190.229244	100.00

Tabelle 4.1.3: Ergebnis der dreifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] für alle Walzasphalte nach 20.000 Lastwechseln für die **Belastungsart 0,2 s mLp**

Auch bei der Belastungsart 0,2 s mLp zeigt sich die Asphaltart mit 53,0 % als dominierende Einflussgröße, gefolgt von der Oberspannung mit 21,6 %. Abweichend von Tabelle 4.1.2 folgt die Prüftemperatur mit 8,1 % sowie die Kombination aus Asphaltart und Prüftemperatur mit 6,7 %.

In einem weiteren Schritt werden schließlich die Ergebnisse getrennt nach den Asphaltarten und Belastungsarten betrachtet.

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der dreifachen Varianzanalyse mit den Einflussgrößen

- A Prüftemperatur und
- B Oberspannung.

dargestellt.

Die Tabellen 4.1.4 und 4.1.5 zeigen die zweifache Varianzanalyse für den Asphaltbeton 0/11.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	3	Prüftemperatur 40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0.6/0.8/1.0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,1s oLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	9	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	27	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	327.307824	2	163.653912	33.357327
B	318.037537	2	159.018768	32.412552
AB	87.954672	4	21.988668	4.481917
Fehler	88.309547	18	4.906086	
Total	821.609581	26		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	2	18	3.550	ja	15.740583	37.87
B	2	18	3.550	ja	15.225567	36.63
AB	4	18	2.930	ja	5.694194	13.70
Fehler					4.906086	11.80
Summe					41.566429	100.00

Tabelle 4.1.4: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die Belastungsart 0,1s oLp und Asphaltbeton 0/11

Anzahl der Stufen für Faktor A :	3	Prüftemperatur 40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0,6/0,8/1,0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,2 s mLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	9	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	27	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	1590.696648	2	795.348324	20.482641
B	1858.057850	2	929.028925	23.925324
AB	45.328772	4	11.332193	0.291838
Fehler	698.946469	18	38.830359	
Total	4193.029739	26		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	2	18	3.550	ja	87.112903	38.22
B	2	18	3.550	ja	101.966304	44.74
AB	4	18	2.930	nein	-9.166056	
Fehler					38.830359	17.04
Summe					227.909566	100.00

Tabelle 4.1.5: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die Belastungsart 0,2s mLp und Asphaltbeton 0/11

Für den **Asphaltbeton 0/11** haben bei der Belastungsart 0,1 s oLP die Prüftemperatur und die Oberspannung mit 37,9 % und 36,6 % einen annähernd gleich großen Einfluss auf das Ergebnis. Erst mit deutlichem Abstand folgt die Kombination aus beiden Einflüssen und der Fehler. Für die Belastungsart 0,2s mLp ist der Einfluss der Oberspannung mit 44,7 % etwas deutlicher als der der Prüftemperatur mit 38,2 %. Dieses Ergebnis zeigt, dass für den Asphaltbeton die stark bitumenhaltige Mörtelphase und weniger das Korngerüst die verformungsrelevanten Eigenschaften prägt. Eine Erwärmung der Mörtelphase durch die Erhöhung der Prüftemperatur verursacht eindeutig eine Erhöhung der Verformungsanfälligkeit.

Die Tabellen 4.1.6 und 4.1.7 zeigen die zweifache Varianzanalyse für den Splittmastixasphalt 0/11 S.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	3	Prüftemperatur 40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0.6/0.8/1.0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,1s oLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	9	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	27	

Ursache	SQ	FG	MQ	F (Ursache)
A	3.006268	2	1.503134	0.584931
B	25.413387	2	12.706693	4.944691
AB	9.122948	4	2.280737	0.887528
Fehler	46.255766	18	2.569765	
Total	83.798369	26		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	2	18	3.550	nein	-0.086400	
B	2	18	3.550	ja	1.158440	31.07
AB	4	18	2.930	nein	-0.096343	
Fehler					2.569765	68.93
Summe					3.728204	100.00

Tabelle 4.1.6: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die Belastungsart 0,1 s oLp und **Splittmastixasphalt 0/11 S**

Anzahl der Stufen für Faktor A :	3	Prüftemperatur	40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung	0,6/0,8/1,0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe	0,2 s mLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	9		
Gesamtzahl der Einzelwerte :	27		

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	215.348238	2	107.674119	14.429150
B	812.518301	2	406.259150	54.441811
AB	28.074323	4	7.018581	0.940543
Fehler	134.320747	18	7.462264	
Total	1190.261608	26		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	2	18	3.550	ja	11.183949	17.75
B	2	18	3.550	ja	44.360063	70.41
AB	4	18	2.930	nein	-0.147894	
Fehler					7.462264	11.84
Summe					63.006276	100.00

Tabelle 4.1.7: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die Belastungsart **0,2 s mLp** und **Splittmastixasphalt 0/11 S**

Beim **Splittmastixasphalt** wird für die Belastungsart 0,1 s oLp der Einfluss der Prüftemperatur verworfen. Der Einfluss der Oberspannung liegt mit 31,1 % deutlich unter dem Fehler mit 68,9 %. Daraus lässt sich schließen, dass sich beim Splittmastixasphalt unter den Prüfbedingungen 0,1 s oLp unabhängig von der verwendeten Prüftemperatur und der Oberspannung statistisch betrachtet gleiche Eindringtiefen ergeben.

Für die Belastungsart 0,2 s mLp werden die Einflüsse präziser festgestellt. Hier hat die Oberspannung mit 70,4 % den größten Einfluss auf das Ergebnis. Danach folgt die Prüftemperatur mit 17,8 %.

Für die Ergebnisse der beiden Belastungsarten ist vermutlich das Korngerüst des Splittmastixasphalts verantwortlich, da dieses offenbar von der Prüftemperatur unabhängiger reagiert. Auf eine Erhöhung der Oberspannung reagiert der Splittmastixasphalt lediglich bei der Belastungsart mit Lastpause. Dieses Belastungsschema lässt bei den gewählten Oberspannungen möglicherweise eine Verlagerung des Korngefüges zu, was in erhöhten Eindringtiefen resultiert.

Es folgen die Tabellen 4.1.8 und 4.1.9, die die zweifache Varianzanalyse für den Asphaltbinder 0/16 zeigen.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	3	Prüftemperatur 40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0.6/0.8/1.0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,1s oLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	9	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	27	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	19.807858	2	9.903929	11.935762
B	77.705046	2	38.852523	46.823284
AB	13.336793	4	3.334198	4.018223
Fehler	14.935847	18	0.829769	
Total	125.785545	26		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	2	18	3.550	ja	0.729970	11.51
B	2	18	3.550	ja	3.946481	62.24
AB	4	18	2.930	ja	0.834810	13.17
Fehler					0.829769	13.09
Summe					6.341030	100.00

Tabelle 4.1.8: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die Belastungsart **0,1 s oLp** und **Asphaltbinder 0/16**

Anzahl der Stufen für Faktor A :	3	Prüftemperatur 40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0.6/0.8/1.0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,2s mLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	9	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	27	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	257.275376	2	128.637688	26.300058
B	355.791136	2	177.895568	36.370864
AB	38.225124	4	9.556281	1.953788
Fehler	88.040808	18	4.891156	
Total	739.332445	26		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	2	18	3.550	ja	13.231267	34.47
B	2	18	3.550	ja	18.704365	48.73
AB	4	18	2.930	nein	1.555042	4.05
Fehler					4.891156	12.74
Summe					38.381830	100.00

Tabelle 4.1.9: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die Belastungsart **0,2 s mLp** und **Asphaltbinder 0/16**

Der **Asphaltbinder 0/16** zeigt für beide Belastungsarten die Oberspannung mit 62,2 % und 48,7 % den größten Einfluss. Für die Belastungsart 0,1s oLp folgt dann die Kombination aus Prüftemperatur und Oberspannung mit 13,2 %, welche aber gleichauf mit dem Fehler von 13,1 % liegt. Danach folgt schließlich der Einfluss der Temperatur mit 11,5 %.

Bei den „schärferen“ Versuchsbedingungen - der Belastungsart 0,2 s mLp - folgt dagegen die Prüftemperatur mit 34,5 % als zweitgrößter Einfluss. Den geringsten Einfluss hat die Kombination beider Einflüsse mit 4,1 %, welche unterhalb des Fehlers mit 12,7 % liegt.

Die Ergebnisse für den Asphaltbinder liegen tendenziell zwischen dem Asphaltbeton und dem Splittmastixasphalt. Das verwendete, harte Bitumen in der Mörtelphase bewirkt bei „schwachen“ Versuchsbedingungen nur einen kleinen Einfluss, während sich bei den „schärferen“ Versuchsbedingungen der Einfluss deutlicher zeigt.

Die Tabellen 4.1.10 und 4.1.11, zeigen die zweifache Varianzanalyse für den Offener Asphalt 0/8.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	3	Prüftemperatur 40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0.6/0.8/1.0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0.1s oLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	9	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	27	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	0.595248	2	0.297624	0.082728
B	79.661272	2	39.830636	11.071335
AB	21.382985	4	5.345746	1.485905
Fehler	64.757450	18	3.597636	
Total	166.396955	26		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	2	18	3.550	nein	-0.560902	
B	2	18	3.550	ja	3.831654	47.82
AB	4	18	2.930	nein	0.582703	7.27
Fehler					3.597636	44.90
Summe					8.011994	100.00

Tabelle 4.1.10: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die Belastungsart **0,1 s oLp** und **Offenporiger Asphalt 0/8**

Anzahl der Stufen für Faktor A :	3	Prüftemperatur 40/45/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0,6/0,8/1,0
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,2s mLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	9	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	27	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	37.168814	2	18.584407	4.720932
B	468.117690	2	234.058845	59.457145
AB	41.379305	4	10.344826	2.627860
Fehler	70.858754	18	3.936597	
Total	617.524564	26		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	2	18	3.550	ja	0.915509	2.87
B	2	18	3.550	ja	24.857113	78.06
AB	4	18	2.930	nein	2.136076	6.71
Fehler					3.936597	12.36
Summe					31.845296	100.00

Tabelle 4.1.11: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die Belastungsart **0,2 s mLp** und **Offenporiger Asphalt 0/8**

Die statistische Auswertung zeigt für den **Offenporigen Asphalt 0/8** vergleichbare Einflüssen wie beim Splittmastixasphalt. So hat auch beim Offenporigen Asphalt bei Betrachtung der Belastungsart 0,1 s oLp die Prüftemperatur keinen statistisch nachweisbaren Einfluss auf das Ergebnis. Der Einfluss der Oberspannung wird mit 47,8 % angegeben und liegt damit nur knapp über dem Fehler mit 44,9 %.

Für die Belastungsart 0,2 s mLp besitzt die Oberspannung mit 78,1 % den stärksten Einfluss. Die Prüftemperatur liegt mit 2,9 % unterhalb des Einflusses des Fehlers von 12,4 %. Die Kombination der beiden Einflussgrößen Prüftemperatur und Oberspannung übt trotz der Angabe von 6,7 % keinen Einfluss auf das Ergebnis aus.

Auch diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass – wie beim Splittmastixasphalt – beim Offenporigen Asphalt vermutlich das Korngerüst den wesentlichen Einfluss ausübt. Die Verformung ist annähernd unabhängig von der Prüftemperatur, zeigt aber eine deutliche Reaktion bei der Belastungsart mit Lastpause.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des **Gussasphalts 0/8** einer dreifachen Varianzanalyse unterzogen. Als Einflussgrößen werden Prüftemperatur, Belastungsart und Oberspannung per Kreuzklassifikation variiert.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Prüftemperatur 40/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	2	Belastungsart 0,1/0,2
Anzahl der Stufen für Faktor C :	3	Oberspannung 0,1/0,2/0,3
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe
Anzahl der Stufen insgesamt :	12	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	36	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	7645.432990	1	7645.432990	300.021144
B	5388.269557	1	5388.269557	211.445814
C	6601.848358	2	3300.924179	129.534462
AB	2804.426197	1	2804.426197	110.050949
AC	2635.120670	2	1317.560335	51.703541
BC	1109.117582	2	554.558791	21.761928
ABC	1106.961508	2	553.480754	21.719624
Fehler	611.591533	24	25.482981	
Total	27902.768394	35		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	24	4.260	ja	226.495956	20.33
B	1	24	4.260	ja	143.486962	12.88
C	2	24	3.400	ja	165.190484	14.82
AB	1	24	4.260	ja	250.105049	22.45
AC	2	24	3.400	ja	127.346597	11.43
BC	2	24	3.400	ja	0.179673	0.02
ABC	2	24	3.400	ja	175.999258	15.79
Fehler					25.482981	2.29
Summe					1114.286960	100.00

Tabelle 4.1.12: Ergebnis der dreifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für den **Gussasphalt 0/8**

Im Gegensatz zu den bisher untersuchten Asphalten zeigt der Gussasphalt nicht die Belastungsart als dominierenden Einfluss, sondern die Kombination aus Prüftemperatur und Belastungsart mit 22,5 %. Es folgen die Prüftemperatur mit 20,3 % und die Kombination aus allen drei Einflussgrößen mit 15,8 %. Weiterhin folgt die Oberspannung mit 14,8 % und die Belastungsart mit 12,9 %. Anhand dieser Ergebnisse kann man erkennen, dass die drei Einflussgrößen einen nahezu gleich großen Einfluss auf das Ergebnis haben und damit keine eindeutigen Aussagen zulassen. Aus diesem Grund wird in den weiteren Tabellen für jede Einflussgröße eine zweifache Varianzanalyse durchgeführt.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Belastungsart 0,1/0,2
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0,1/0,2/0,3
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe +40 °C
Anzahl der Stufen insgesamt :	6	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	209.060352	1	209.060352	32.229117
B	448.597471	2	224.298736	34.578294
AB	21.284599	2	10.642300	1.640636
Fehler	77.840302	12	6.486692	
Total	756.782724	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	ja	22.046450	33.64
B	2	12	3.890	ja	35.609406	54.34
AB	2	12	3.890	nein	1.385203	2.11
Fehler					6.486692	9.90
Summe					65.527751	100.00

Tabelle 4.1.13: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die **Prüftemperatur +40°C** und den **Gussasphalt 0/8**

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Belastungsart 0,1/0,2
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0,1/0,2/0,3
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe +50 °C
Anzahl der Stufen insgesamt :	6	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	7983.635401	1	7983.635401	179.491155
B	8788.371557	2	4394.185778	98.791771
AB	2194.794491	2	1097.397245	24.672106
Fehler	533.751231	12	44.479269	
Total	19500.552680	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	ja	765.137573	44.74
B	2	12	3.890	ja	549.464756	32.13
AB	2	12	3.890	ja	350.972659	20.52
Fehler					44.479269	2.60
Summe					1710.054256	100.00

Tabelle 4.1.14: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die **Prüftemperatur +50 °C** und den **Gussasphalt 0/8**

Die zweifachen Varianzanalysen über die Prüftemperatur zeigen ebenfalls keine einheitlichen Ergebnisse. Während bei +40 °C die Oberspannung mit 54,3 % den größten Einfluss ausübt, gefolgt von der Belastungsart mit 33,6 %, ist es bei +50 °C umgekehrt. Hier übt die Belastungsart mit 44,7 % den größten Einfluss aus, gefolgt von der Oberspannung mit 32,1 %.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Prüftemperatur 40/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0,1/0,2/0,3
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,1s oLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	6	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	594.481174	1	594.481174	24.009938
B	1160.259669	2	580.129835	23.430316
AB	169.266025	2	84.633013	3.418163
Fehler	297.117552	12	24.759796	
Total	2221.124421	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	ja	56.649796	30.80
B	2	12	3.890	ja	82.582804	44.89
AB	2	12	3.890	nein	19.957739	10.85
Fehler					24.759796	13.46
Summe					183.950134	100.00

Tabelle 4.1.15: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die **Belastungsart 0,1 s oLp** und den **Gussasphalt 0/8**

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Prüftemperatur 40/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Oberspannung 0,1/0,2/0,3
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,2s mLp
Anzahl der Stufen insgesamt :	6	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	9855.378012	1	9855.378012	376.070973
B	6550.706270	2	3275.353135	124.984068
AB	3572.816152	2	1786.408076	68.167474
Fehler	314.473981	12	26.206165	
Total	20293.374416	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	ja	896.552215	51.01
B	2	12	3.890	ja	248.157510	14.12
AB	2	12	3.890	ja	586.733970	33.38
Fehler					26.206165	1.49
Summe					1757.649860	100.00

Tabelle 4.1.16: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die **Belastungsart 0,2 s mLp** und den **Gussasphalt 0/8**

Auch die zweifachen Varianzanalysen über die Belastungsart zeigen keine einheitlichen Ergebnisse. Bei 0,1s oLp besitzt die Oberspannung mit 44,9 % den größten Einfluss, gefolgt von der Prüftemperatur mit 30,8 %. Bei 0,2s mLp übt die Prüftemperatur mit 51,1 % den größten Einfluss aus, gefolgt von der Kombination aus Prüftemperatur und Oberspannung mit 33,4 %. Danach folgt erst die Oberspannung mit 14,1 %.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Prüftemperatur 40/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	2	Belastungsart 0,1/0,2
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe 0,1 MPa
Anzahl der Stufen insgesamt :	4	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	12	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	204.311269	1	204.311269	71.445065
B	307.010484	1	307.010484	107.357681
AB	69.972211	1	69.972211	24.468397
Fehler	22.877579	8	2.859697	
Total	604.171543	11		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	8	5.318	ja	22.389843	25.70
B	1	8	5.318	ja	39.506379	45.34
AB	1	8	5.318	ja	22.370838	25.68
Fehler					2.859697	3.28
Summe					87.126757	100.00

Tabelle 4.1.17: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die **Oberspannung 0,1 MPa** und den **Gussasphalt 0/8**

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Prüftemperatur 40/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	2	Belastungsart 0,1/0,2
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe für 0,2 MPa
Anzahl der Stufen insgesamt :	4	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	12	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	2526.510220	1	2526.510220	64.321706
B	2048.931734	1	2048.931734	52.163171
AB	791.423934	1	791.423934	20.148637
Fehler	314.234228	8	39.279278	
Total	5681.100116	11		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	8	5.318	ja	289.181048	36.66
B	1	8	5.318	ja	209.584633	26.57
AB	1	8	5.318	ja	250.714885	31.79
Fehler					39.279278	4.98
Summe					788.759845	100.00

Tabelle 4.1.18: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die **Oberspannung 0,2 MPa** und den **Gussasphalt 0/8**

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Prüftemperatur	40/50
Anzahl der Stufen für Faktor B :	2	Belastungsart	0,1/0,2
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe	0,3 MPa
Anzahl der Stufen insgesamt :	4		
Gesamtzahl der Einzelwerte :	12		

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	7549.732171	1	7549.732171	220.044876
B	4141.444920	1	4141.444920	120.706763
AB	3049.991560	1	3049.991560	88.895209
Fehler	274.479726	8	34.309966	
Total	15015.648377	11		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	8	5.318	ja	749.956768	38.04
B	1	8	5.318	ja	181.908893	9.23
AB	1	8	5.318	ja	1005.227198	50.99
Fehler					34.309966	1.74
Summe					1971.402826	100.00

Tabelle 4.1.19: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [%] nach 20.000 Lastwechseln für die **Oberspannung 0,3 MPa** und den **Gussasphalt 0/8**

Es zeigt sich bei der 2fachen Varianzanalyse über die Oberspannung wiederum kein einheitliches Bild. Während bei 0,1 MPa die Belastungsart mit 45,3 % einen dominierenden Einfluss zeigt, nimmt dieser bei 0,2 MPa auf 26,6 % und bei 0,3 MPa auf 9,2 % ab. Dagegen steigt der Einfluss der Prüftemperatur bei 0,1 MPa von 25,7 % auf 36,7 % bei 0,2 MPa und bei 0,3 MPa auf 38,0 %. Der Einfluss beider Größen steigt ebenso von 25,7 % (0,1 MPa) auf 31,8 % (0,2 MPa) auf 50,99 % (0,3 MPa). Hier zeigt sich die ausgeprägte Mörtelphase, die bei niedrigeren Belastungen auf unterschiedliche Belastungsarten auch unterschiedlich reagiert, bei hohen Belastungen jedoch ausgesprochen viskos und damit sehr temperaturabhängig reagiert.

Beim Gussasphalt kann kein eindeutiger Einfluss festgestellt werden. In Abhängigkeit von Prüftemperatur, Belastungsart oder Oberspannung werden unterschiedliche Einflüsse als relevant angegeben. Es lässt sich aber festhalten, dass mit „schärferen“ Prüfbedingungen, wie eine Erhöhung der Oberlast oder der Belastungsart 0,2 s mLp, der Einfluss der Temperatur zunimmt.

4.2 Varianzanalyse über die Probekörperhöhe und -durchmesser

Um den Einfluss der Probekörperhöhe und des Durchmessers von Probekörper und Stempel zu ermitteln, wird eine Varianzanalyse der dreifachen Klassifikation durchgeführt. Die Variation der Einflussgrößen erfolgt per Kreuzklassifikation. Als Einflussgrößen werden

- A die Asphaltart,
 - B die Probekörperhöhe und
 - C der Probekörperdurchmesser / Stempeldurchmesser
- angegeben.

Wie bereits beschrieben, können in diese Varianzanalyse die Ergebnisse des Gussasphalts nicht aufgenommen werden, da keine einheitlichen Versuchsbedingungen vorlagen.

Die Ergebnisse der Varianzanalyse sind in Tabelle 4.2.1 dokumentiert.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	4	Asphalt AB/SMA/ABi/OPA				
Anzahl der Stufen für Faktor B :	2	Durchmesser 200/80 150/60				
Anzahl der Stufen für Faktor C :	3	Probekörperhöhe 40(50)/60/80				
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe				
Anzahl der Stufen insgesamt :	24					
Gesamtzahl der Einzelwerte :	72					
Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)		
A	4.918909	3	1.639636	44.363394		
B	3.732504	1	3.732504	100.989804		
C	8.152099	2	4.076050	110.285071		
AB	0.897893	3	0.299298	8.098053		
AC	1.477352	6	0.246225	6.662083		
BC	0.098950	2	0.049475	1.338642		
ABC	0.314649	6	0.052442	1.418903		
Fehler	1.774042	48	0.036959			
Total	21.366399	71				
Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	3	48	2.800	ja	0.063697	15.14
B	1	48	4.044	ja	0.095449	22.69
C	2	48	3.190	ja	0.159700	37.96
AB	3	48	2.800	ja	0.027428	6.52
AC	6	48	2.290	ja	0.032297	7.68
BC	2	48	3.190	nein	-0.000247	
ABC	6	48	2.290	nein	0.005161	1.23
Fehler					0.036959	8.79
Summe					0.420692	100.00

Tabelle 4.2.1: Ergebnis der dreifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [mm] für alle Walzasphalte nach 20.000 Lastwechseln

Die Probekörperhöhe hat mit 38,0 % eindeutig den größten Einfluss auf die Ergebnisse des dynamischen Stempel Eindringversuchs. Es folgt der Probekörper-/Stempeldurchmesser mit 22,7 % und die Asphaltart mit 15,1 %. Hier zeigt sich ein eminent großer Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Ergebnisse.

Trotz des geringen Einflusses der Asphaltart ist es von Interesse, ob alle untersuchten Asphalte gleich empfindlich auf die Probekörpergeometrie reagieren. Die Ergebnisse der zweifachen Varianzanalyse, getrennt nach Asphaltart, sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Durchmesser 200/80	150/60
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Probekörperhöhe 40/60/80	
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe	
Anzahl der Stufen insgesamt :	6		
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18		

Ursache	SQ	FG	MQ	F (Ursache)
A	0.164738	1	0.164738	7.219320
B	5.157301	2	2.578650	113.004292
AB	0.060878	2	0.030439	1.333927
Fehler	0.273829	12	0.022819	
Total	5.656745	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	ja	0.014922	3.21
B	2	12	3.890	ja	0.424702	91.34
AB	2	12	3.890	nein	0.002540	0.55
Fehler					0.022819	4.91
Summe					0.464983	100.00

Tabelle 4.2.2: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [mm] nach 20.000 Lastwechseln für **Asphaltbeton 0/11**

Beim **Asphaltbeton** besitzt die Probekörperhöhe mit 91,3 % den größten Einfluss auf das Ergebnis, während der Probekörper-/Stempeldurchmesser praktisch keinen Einfluss ausübt. Dieses Verhalten wurde bereits in Kapitel 3.7 erläutert.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Durchmesser 200/80 150/60
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Probekörperhöhe 40/60/80
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe
Anzahl der Stufen insgesamt :	6	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	2.663663	1	2.663663	33.785736
B	2.238091	2	1.119046	14.193905
AB	0.122216	2	0.061108	0.775087
Fehler	0.946078	12	0.078840	
Total	5.970048	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	ja	0.289173	53.12
B	2	12	3.890	ja	0.176323	32.39
AB	2	12	3.890	nein	-0.005911	
Fehler					0.078840	14.48
Summe					0.544336	100.00

Tabelle 4.2.3: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [mm] nach 20.000 Lastwechseln für **Splittmastixasphalt 0/11 S**

Beim **Splittmastixasphalt** ist der Durchmesser von Probekörper und Stempel mit 53,1 % der dominierende Einfluss. Es folgt die Probekörperhöhe in deutlichem Abstand mit 32,4 %.

Das Korngerüst wird bei einer kleineren Aufstandsfläche bzw. bei einer schmalen Probe offenbar höher belastet: daraus resultieren höhere plastische Verformungen. Der geringe Einfluss der Probekörperhöhe und der höhere Einfluss der Probekörper-/ Stempeldurchmesser zeigt, dass die Tragwirkung des Korngerüsts offenbar weniger von seiner Höhe, sondern vielmehr von einem seitlichen Stützgerüst abhängig ist.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Durchmesser 200/80 150/60
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Probekörperhöhe 50/60/80
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe
Anzahl der Stufen insgesamt :	6	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	0.426796	1	0.426796	14.605474
B	0.439466	2	0.219733	7.519543
AB	0.008077	2	0.004039	0.138205
Fehler	0.350659	12	0.029222	
Total	1.224999	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	ja	0.046973	41.89
B	2	12	3.890	ja	0.035949	32.06
AB	2	12	3.890	nein	-0.008394	
Fehler					0.029222	26.06
Summe					0.112144	100.00

Tabelle 4.2.4: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [mm] nach 20.000 Lastwechseln für **Asphaltbinder 0/16**

Auch beim **Asphaltbinder** zeigt der Durchmesser von Probekörper und Stempel mit 41,9 % den größten Einfluss. Es folgt die Probekörperhöhe mit 32,1 %. Der Anteil des Fehlers ist mit 26,1 % vergleichsweise hoch. Der Asphaltbinder liegt mit diesem Verhalten zwischen dem Splittmastixasphalt und dem Asphaltbeton. Da er gegenüber den Splittmastixasphalten oder den offenporigen Asphaltten kein ausgeprägtes Korngerüst besitzt, aber ein polymermodifiziertes Bitumen eingesetzt wurde, sind diese Anteile als plausibel anzusehen.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Durchmesser 200/80 150/60
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Probekörperhöhe 40/60/80
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe
Anzahl der Stufen insgesamt :	6	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	1.375201	1	1.375201	81.102481
B	1.794593	2	0.897297	52.918092
AB	0.222429	2	0.111214	6.558877
Fehler	0.203476	12	0.016956	
Total	3.595699	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	ja	0.140443	43.91
B	2	12	3.890	ja	0.131014	40.96
AB	2	12	3.890	ja	0.031419	9.82
Fehler					0.016956	5.30
Summe					0.319832	100.00

Tabelle 4.2.5: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [mm] nach 20.000 Lastwechseln für **Offenporigen Asphalt 0/8**

Die dynamischen Stempelleindringtiefen vom **Offenporigen Asphalt** sind vom Durchmesser von Probekörper und Stempel mit 43,9 % und der Probekörperhöhe mit 41,0 % nahezu gleich beeinflusst. Für den hohen Einfluss des Probekörper-/Stempeldurchmessers kann – wie auch beim Splittmastixasphalt – das ausgeprägte Korngerüst als ursächlich angesehen werden.

Im Folgenden wird der **Gussasphalt** einer zweifachen Varianzanalyse unterzogen.

Anzahl der Stufen für Faktor A :	2	Durchmesser 200/80 150/60
Anzahl der Stufen für Faktor B :	3	Probekörperhöhe 40/60/80
Anzahl der Einzelwerte je Stufe:	3	Eindringtiefe
Anzahl der Stufen insgesamt :	6	
Gesamtzahl der Einzelwerte :	18	

Ursache	SQ	FG	MQ	F(Ursache)
A	0.047217	1	0.047217	0.703751
B	7.766140	2	3.883070	57.876091
AB	0.053557	2	0.026779	0.399130
Fehler	0.805114	12	0.067093	
Total	8.672028	17		

Ursache	FG1	FG2	F	Verwerfung der Ho-Hypothese	Var.komponente	Var.anteil [%]
A	1	12	4.752	nein	0.002271	0.32
B	2	12	3.890	ja	0.642715	90.26
AB	2	12	3.890	nein	-0.013438	
Fehler					0.067093	9.42
Summe					0.712079	100.00

Tabelle 4.2.6: Ergebnis der zweifachen Varianzanalyse über die Eindringtiefe [mm] nach 20.000 Lastwechseln für **Gussasphalt 0/8**

Wie auch der Asphaltbeton 0/11 zeigt für den Gussasphalt 0/8 die Probekörperhöhe mit 90,3 % den höchsten Einfluss.

Der Probekörper-/Stempeldurchmesser hat damit praktisch keinen Einfluss, was bereits in Kapitel 3.6 nachgewiesen wurde. Dort wurde aber auch nachgewiesen, dass ein kleinerer Stempeldurchmesser von 60 mm mit einem Probekörperdurchmesser von 200 mm einen Einfluss ausüben kann.

4.3 Statistische Vergleiche der Einflussgrößen

Nachdem die einzelnen Einflussgrößen untersucht wurden, soll im Folgenden ermittelt werden, ob die Prüfbedingungen eine eindeutige Differenzierung der Ergebnisse zulassen. Dazu werden die Ergebnisse der 18 Variationen – Temperatur 3fach, Belastungsart 2fach und Oberspannung 3fach – mittels einer Varianzanalyse und anschließend mit einem multiplen Mittelwertvergleich untersucht. Der Gussasphalt kann nicht vollständig in die Bewertung eingehen, da nur ein Teil unter gleichen Versuchsbedingungen geprüft wurde. Eine vollständige Dokumentation der statistischen Auswertungen ist im Anhang 3.1 bis 3.4 enthalten.

Zunächst werden anhand eines Beispiels die statistischen Untersuchungen erläutert. Für die Variante Prüftemperatur $T = +40\text{ °C}$, Belastungsart 0,1 s oLp und Oberspannung 0,6 MPa werden die Mittelwerte der relativen Stempel Eindringtiefe gegeneinander verglichen (vgl. Anhang 3.1).

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte	
Mittelwert der Gruppe 1	:= 9.7817
Standardabweichung	:= 2.0965

Mittelwert der Gruppe 2	:= 17.2253
Standardabweichung	:= 2.0044

Mittelwert der Gruppe 3	:= 10.4770
Standardabweichung	:= 0.5162

Mittelwert der Gruppe 4	:= 22.8680
Standardabweichung	:= 2.1927

Ergebnisse der Varianzanalyse	
Gesamtmittelwert	= 15.0880 N = 12
Mittleres Mittel	= 15.0880
Q innerhalb	= 26.9749 (FG2 = 8)
Q zwischen	= 343.5451 (FG1 = 3)
Q gesamt	= 370.5200 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen	= 6.1783
Stand.innerh.d.Gru	= 1.8363
Varianz.innerh.d.Gru	= 3.3719
Gesamtstandardabw.	= 5.8038
Testquotient $F^* = 33.96 > 4.07$ (Alpha = 0.05)	
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***	

LSD-Test:	

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$					
Gruppe	n_i	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
4	3	22.8680	5.6427	3.4574	Grenze homogener Gruppen
2	3	17.2253	6.7483	3.4574	Grenze homogener Gruppen
3	3	10.4770	0.6953	3.4574	
1	3	9.7817			
Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen					
4-5	$\hat{F} = 31,70 > 19,0 = F(2;2;0,05)$		ungleich	$\hat{t} = 8,70 > 4,30 = t(2;0,05)$	
$T = +40 \text{ °C}$	$\varnothing = 200/80 \text{ mm}$	$\sigma_0 = 0,6 \text{ MPa}$	$h = 40 \text{ mm}$	$0,1 \text{ s oLp}$	

- Gruppe 1 = Asphaltbeton
- Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
- Gruppe 3 = Asphaltbinder
- Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt
- Gruppe 5 = Gussasphalt

Tabelle 4.3.1: Mittelwertvergleich über die Eindringtiefe [%] aller Walzasphalte unter den angegebenen Prüfbedingungen

Die Varianzanalyse zeigt, dass sich mindestens ein Ergebnis der 4 Gruppen der Walzasphalte trennen lässt, also nicht der Grundgesamtheit entspricht. Der anschließende LSD-Test teilt die 4 Gruppen in drei Blöcke:

- Block 1 = Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt
- Block 2 = Gruppe 2 = Splittmastixasphalt und
- Block 3 = Gruppen 3 und 1 = Asphaltbinder und Asphaltbeton

Die Reihenfolge der Blöcke zeigt die Mittelwerte der relativen Stempleindringtiefe absteigend sortiert - Block 1 weist die höchsten und Block 3 die niedrigsten Eindringtiefen auf. Der Asphaltbeton zeigt in dieser Reihenfolge eine unplausibel niedrige Eindringtiefe, die später noch erläutert wird.

Wurde der Gussasphalt unter gleichen Prüfbedingungen untersucht, folgt anschließend ein einfacher Mittelwertvergleich des Gussasphalts mit dem Walzasphalt mit der höchsten Eindringtiefe. Als Ergebnis wird in der letzten Spalte angegeben, ob die Mittelwerte beider Asphalte gleich oder ungleich sind. In diesem Beispiel sind die Eindringtiefen ungleich, d.h. der Gussasphalt besitzt eine statistisch signifikant höhere Eindringtiefe.

Treten beim multiplen Mittelwertvergleich Blöcke mit mehr als zwei Gruppen auf – was in diesem Beispiel nicht der Fall ist –, wird mit dem einfachen Mittelwertvergleich untersucht, ob die höchsten und niedrigsten Werte im statistischen Sinne gleich sind.

In der folgenden Tabelle 4.3.2 werden die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen zusammengefasst.

Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Gruppen statistisch gleicher Ergebnisse hoch → relative Eindringtiefe → niedrig				
			GA	OPA	SMA	ABi	AB
+ 40 °C	0,1 s oLp	0,6 MPa	GA	OPA	SMA	ABi	AB
		0,8 MPa	GA	OPA	SMA	AB	ABi
		1,0 MPa	GA	OPA	AB	SMA	ABi
	0,2 s mLp	0,6 MPa		OPA	AB	SMA	ABi
		0,8 MPa		AB	OPA	SMA	ABi
		1,0 MPa		AB	OPA	SMA	ABi
+ 45 °C	0,1 s oLp	0,6 MPa		OPA	AB	SMA	ABi
		0,8 MPa		OPA	AB	SMA	ABi
		1,0 MPa		AB	OPA	SMA	ABi
	0,2 s mLp	0,6 MPa		AB	OPA	SMA	ABi
		0,8 MPa		AB	SMA	OPA	ABi
		1,0 MPa		AB	OPA	SMA	ABi
+ 50 °C	0,1 s oLp	0,6 MPa		OPA	AB	SMA	ABi
		0,8 MPa		AB	OPA	SMA	ABi
		1,0 MPa		OPA	AB	SMA	ABi
	0,2 s mLp	0,6 MPa		AB	OPA	SMA	ABi
		0,8 MPa		AB	OPA	SMA	ABi
		1,0 MPa		AB	SMA	OPA	ABi

Tabelle 4.3.2: Ergebnisse des multiplen Mittelwertvergleiches für die Variationen: Prüf-temperatur, Belastungsart und Oberspannung.

Die Tabelle 4.3.2 zeigt alle Asphaltarten in den einzelnen Zeilen sortiert nach geringer werdender Stempelleindringtiefe von links nach rechts. Die Gruppen statistisch gleicher Mittelwerte sind zusammengefügt, d.h. nicht durch einen Strich getrennt.

Der Asphaltbinder zeigt mit Ausnahme der Prüfbedingung $T = +40\text{ °C}$, $0,1\text{ s oLp}$ und $0,6\text{ MPa}$ die geringsten Eindringtiefen und kann in 13 von 18 Fällen auch von den restlichen Asphalten im statistischen Sinne getrennt werden.

Bei „schwachen“ Prüfbedingungen – niedrige Temperatur, kleine Oberspannung, Belastungsart $0,1\text{ s oLp}$ – zeigt der Asphaltbeton geringe Eindringtiefen, während die Asphalte mit ausgeprägtem Korngerüst tendenziell höhere Eindringtiefen aufweisen. Mit schärferen Prüfbedingungen kehrt sich dieses Verhalten um; der Asphaltbeton weist dann höhere Eindringtiefen auf. Die Ursache wurden bereits in Kapitel 3.7 und 4.1 erläutert.

Der Splittmastixasphalt zeigt in allen Fällen höhere Stempelleindringtiefen, als der Asphaltbinder.

Der Offenporige Asphalt liegt in 16 von 18 Fällen über den Werten des Splittmastixasphalts. Asphaltbeton und Offenporiger Asphalt wechseln sich in der Reihenfolge mit schärfer werdenden Prüfbedingungen ab, wobei der Asphaltbeton die höchsten Eindringtiefen zeigt. Für die „schärfsten“ Prüfbedingungen $T = +50\text{ °C}$, $0,2\text{ s mLp}$ und $1,0\text{ MPa}$ liegt der Offenporige Asphalt unterhalb der Eindringtiefen des Splittmastixasphalts. Als Ursache kann das stark ausgeprägte Korngerüst des Offenporigen Asphalts angesehen werden, welches erst bei den schärfsten Prüfbedingungen seine Vorteile zeigt.

Zusammenfassend fällt der Asphaltbinder auf, der in 13 von 18 Fällen mit den niedrigsten Eindringtiefen einen eigenen Block bildet. Weiterhin stellt der Offenporige Asphalt für die „schwächsten“ Prüfbedingungen $T = +40\text{ °C}$ und $0,1\text{ s oLp}$ den Block mit den höchsten Eindringtiefen. Für die „schärfsten“ Prüfbedingungen stellt der Asphaltbeton mit den höchsten Eindringtiefen einen eigenen Block dar.

Mit schärfer werdenden Prüfbedingungen zeigen die Asphalte mit einem ausgeprägten Korngerüst höhere Verformungswiderstände auf. Splittmastixasphalt und offenporiger Asphalt werden dann als nahezu gleichwertig beurteilt.

Zur Auswahl von optimalen Prüfbedingungen (siehe Kapitel 4.4) sollten die Ergebnisse durch die statistischen Untersuchungen ideal in vier Blöcke getrennt werden. Dies erfolgt aber nur in einem Fall. Bei der Prüftemperatur $T = +40\text{ °C}$, der Belastungsart 0,2 s oLp und der Oberspannung 0,6 MPa lassen sich die untersuchten Asphaltarten eindeutig und plausibel differenzieren. Aus dem Anhang können die entsprechenden Zahlenwerte entnommen werden.

In einem weiteren Schritt werden die Einflüsse der Probekörperhöhe und des Durchmessers von Probekörper und Stempel untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2.3 zusammengefasst, die vollständige Dokumentation ist im Anhang 3.4 enthalten. Der Gussasphalt kann aufgrund der geänderten Prüfbedingungen nicht in diese Auswertung einbezogen werden.

Durchmesser Probekörper / Stempel	Probekörperhöhe	Gruppen statistisch gleicher Werte hoch → relative Eindringtiefe → niedrig			
200 / 80 mm	40 mm	OPA	SMA	ABi	AB
	60 mm	OPA	AB	SMA	ABi
	80 mm	AB	OPA	SMA	ABi
150 / 60 mm	40 mm	OPA	SMA	ABi	AB
	60 mm	OPA	SMA	AB	ABi
	80 mm	SMA	OPA	AB	ABi
$T = +40\text{ °C}$		$\sigma_0 = 0,8\text{ MPa}$		0,1 s oLp	

Tabelle 4.2.3: Ergebnisse des multiplen Mittelwertvergleiches der Eindringtiefen für die Variationen Probekörperdurchmesser und Probekörperhöhe für alle Walzasphalte

Auch hier sind die Asphaltarten in den einzelnen Zeilen nach abnehmender Stempel Eindringtiefe von links nach rechts sortiert. Die Gruppen statistisch gleicher Mittelwerte sind zusammengefügt, d.h. nicht durch einen Strich getrennt.

Die Reihenfolge der Eindringtiefen ist nicht unbedingt als plausibel anzusehen. Aufgrund der nur „schwachen“ Prüfbedingungen, erreicht der Asphaltbeton vergleichs-

weise niedrige Eindringtiefen, während die Asphalte mit ausgeprägtem Korngerüst tendenziell höhere Eindringtiefen aufweisen.

Es ist auffällig, dass beim Durchmesser 200 / 80 mm die Gruppen deutlicher getrennt werden können, als bei 150 / 60 mm. Ursächlich hierfür sind die größeren Streuungen bei 150 / 60 mm, wie die Standardabweichungen im Anhang 2 zeigen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse für den Probekörper-/Stempeldurchmesser 200 / 80 mm deutlicher differenzieren, die Reihung der Eindringtiefen aber aufgrund der schwächeren Prüfbedingungen Unplausibilitäten aufweist. Insbesondere der Asphaltbeton erreicht zum Teil sehr geringe Eindringtiefen.

4.4 Standardversuchsbedingungen

Die Festlegung der Standardversuchsbedingungen orientiert sich an den folgenden Punkten:

- plausible (praxisnahe) Eindringtiefen für alle Asphalte
- gute Differenzierbarkeit der Ergebnisse
- möglichst kurze Versuchsdauer

Da die Versuchsbedingungen für den Gussasphalt bereits modifiziert wurden, müssen diese im Anschluss getrennt angesprochen werden. Somit folgt zunächst die Festlegung der Standardversuchsbedingungen für die vier Walzasphalte.

Aufgrund des hohen Einflusses wird die Belastungsart zuerst festgelegt. Die Belastungsart 0,1 s oLp zeigt nur unter „schärferen“ Prüfbedingungen, d.h. höhere Prüftemperaturen und höhere Oberspannungen plausible Ergebnisse. Für die Belastungsart 0,2 s mLp können alle Ergebnisse als plausibel und praxisnah angesehen werden.

Der Vorteil der Belastungsart 0,1 s oLp liegt in der kurzen Versuchsdauer von unter einer Stunde gegenüber 9,5 Stunden bei 0,2 s mLp. Für eine Reduzierung der Prüf-

dauer könnte die Anzahl der Lastwechsel auf 10.000 bzw. 2.500 (4,7 h bzw. 1,2 h) verringert werden. Hierfür müsste jedoch untersucht werden, ob dann noch eine ausreichende Spreizung der Ergebnisse erreicht wird.

Da erst mit „schärferen“ Prüfbedingungen die charakteristischen Eigenschaften der Asphaltarten hervortreten, können zunächst als Standardbedingung vorgeschlagen werden:

- Belastungsart 0,2 s mLp (sinusförmiger Impuls von 0,2 s Dauer, Lastpause von 1,5 s),
- Prüftemperatur von +50 °C und
- Oberspannung von 0,8 MPa

Die Untersuchungen bezüglich der Probekörpergeometrie zeigen eindeutig, dass der Durchmesser auf 200 mm und der Stempeldurchmesser auf 80 mm festgelegt werden sollten. Die größeren Durchmesser von Probekörper und Stempel stellen praxisnähere Bedingungen dar und weisen geringere Streuungen auf.

Die Probekörperhöhe wird mit 40 mm auf eine praxisnahe Größe für Deckschichten festgelegt. Werden Asphaltbinderschichten untersucht, wird aufgrund des Größtkorns die Probekörperhöhe auf 50 mm festgelegt.

Abschließend wird untersucht, ob die Ergebnisse bei einer Reduzierung der Versuchsdauer auf 10.000 oder 2.500 Lastwechsel noch eine eindeutige Differenzierung der Asphalte zulassen. Die bisherige Auswertung erfolgte nach 20.000 Lastwechseln.

Es folgt eine Varianzanalyse mit anschließendem LSD-Test für die drei Ergebnisse Eindringtiefe [%] bei 2.500, 10.000 und 20.000 Lastwechseln bei den als Standard festgelegten Prüfbedingungen.

Anzahl der Lastwechsel	Gruppen gleicher Werte			
	hoch → relative Eindringtiefe → niedrig			
2.500	AB 36,593	OPA 27,838	SMA 25,850	ABi 17,349
10.000	AB 51,716	OPA 35,547	SMA 34,070	ABi 22,210
20.000	AB 60,882	OPA 40,114	SMA 39,257	ABi 25,065

Tabelle 4.4.1: Ergebnisse des multiplen Mittelwertvergleiches für die Prüfbedingungen Belastungsart: 0,2s mLp, Prüftemperatur: +50 °C, Oberspannung: 0,8 MPa und Probekörper- / Stempeldurchmesser: 200 / 80 mm

Die Asphaltarten sind je Zeile mit abnehmenden Eindringtiefen von links nach rechts sortiert. Die Gruppen statistisch gleicher Mittelwerte sind zusammengefügt, d.h. nicht durch einen Strich getrennt.

Es zeigt sich, dass keine eindeutige Differenzierung der Ergebnisse für alle Asphalte erfolgt. Der Asphaltbinder hat für alle Lastwechsel die geringste Eindringtiefe während der Asphaltbeton eindeutig die größte Eindringtiefe aufweist. Der Offenporige Asphalt hat zwar tendenziell größere Eindringtiefen als der Splittmastixasphalt, diese lassen sich aber statistisch nicht differenzieren.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist bereits nach 2.500 Lastwechseln eine Differenzierung der untersuchten Asphalte möglich. Aufgrund der geringen Belegung der Versuche (3fach) kann der Einfluss der Streuungen nicht ausreichend abgeschätzt werden, so dass die Anzahl der Lastwechsel auf 10.000 festgelegt wird. Durch die Erhöhung der Versuchsdauer spreizen die Ergebnisse, so dass der Einfluss der Streuungen zurücktritt.

Der Gussasphalt sollte im Idealfall mit den gleichen Prüfbedingungen untersucht werden wie die Walzasphalte. Doch bereits nach den ersten Versuchen zeigte sich, dass mit diesen Prüfbedingungen unplausibel hohe Eindringtiefen erzielt werden. Für den Gussasphalt wurden daher Prüfbedingungen festgelegt, die denen der Walzasphalt möglichst nahe kommen und plausible Ergebnisse liefern.

Die Geometrie von Probekörper und Stempel wurde nicht verändert. Es soll möglichst nur ein Einflussfaktor variiert werden. Dazu bieten sich die Variation der Prüftemperatur, der Belastungsart oder der Oberspannung an.

Eine Variation der Prüftemperatur wird nicht angestrebt, um eine längere Temperierphase im Versuchsablauf zu vermeiden.

Für die Belastungsart 0,2 s mLp bei gleicher Oberspannung von 0,8 MPa liegen die Eindringtiefen bei +40 °C bereits so hoch, dass eine einheitliche Prüftemperatur von +50 °C nicht zum Erfolg führen würde.

Soll die Belastungsart 0,2 s mLp beibehalten werden, muss die Oberspannung variiert werden.

Eine Oberspannung von 0,1 MPa erscheint im Verhältnis zur Unterspannung von 0,02 MPa zu niedrig. Die Oberspannung von 0,2 MPa weist bereits Eindringtiefen in der oberen Hälfte des Messbereiches auf, so dass bei weicheren Gussasphalten eine vorzeitige Überschreitung des Messbereiches zu vermuten ist.

Es wird eine Oberspannung von 0,15 MPa für die Prüfung von Gussasphalten festgelegt.

Alle weiteren Prüfbedingungen werden von den Walzasphalten übernommen.

Aufgrund der Untersuchungen des ersten Untersuchungsabschnittes werden für den dynamischen Stempleindringversuch folgende Prüfbedingungen als Standard festgelegt:

- | | |
|---------------------------|--|
| - Probekörperdurchmesser: | 200 mm |
| - Probekörperhöhe: | 40 mm (50 mm für Asphaltbinder) |
| - Stempeldurchmesser: | 80 mm |
| - Prüftemperatur: | + 50 °C |
| - Belastungsart: | Sinusförmiger Lastimpuls von 0,2 s Dauer mit einer Lastpause von 1,5 s Dauer |
| - Unterspannung: | 0,02 MPa |
| - Oberspannung: | Walzasphalte: 0,8 MPa
Gussasphalte: 0,15 MPa |
| - Versuchsdauer: | 10.000 Lastwechsel (entspricht 4,7 h) |
| - Ergebnis: | Bleibende Verformung in ‰
nach 10.000 Lastwechseln |

5. Ergebnisse mit Standardversuchsbedingungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des zweiten Untersuchungsabschnittes mit den vorab erarbeiteten und festgelegten Standardversuchsbedingungen vorgestellt. Es werden die Ergebnisse der zuvor als Referenz festgelegten Asphaltes sowie eine Variante mit verändertem Bindemittelgehalt und eine Variante mit veränderter Korngrößenverteilung dargestellt. Die graphischen Darstellungen zeigen die Mittelwerte der Stempelleindringtiefe über die Anzahl der Lastwechsel. Anschließend werden die Einzelergebnisse sowie die Mittelwerte der relativen Eindringtiefe des Stempel nach 10.000 Lastwechseln tabellarisch dargestellt.

5.1 Asphaltbeton 0/11

Gegenüber dem Asphaltbeton des ersten Abschnittes wurde zum einen der Bindemittelgehalt um 0,3 M.-% erhöht und zum anderen der Größtkornanteil reduziert.

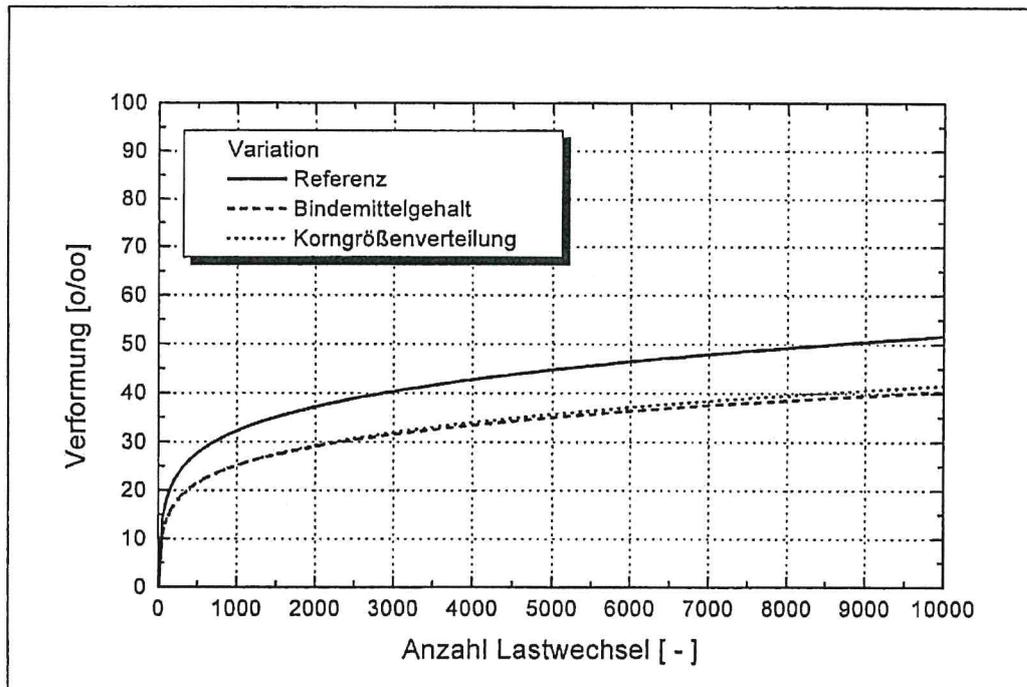


Abbildung 5.1: Relative Verformungen beim dynamischen Stempelleindringversuch über die Anzahl der Lastwechsel bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **AB 0/11**

Probenummer	Relative Stempel Eindringtiefe nach 10.000 Lastwechseln		
	Referenz	Variation Bindemittelgehalt	Variation Korngrößenverteilung
	‰	‰	‰
1	56,848	38,413	42,336
2	46,584	41,837	42,824
3	-	40,891	39,716
Mittel	51,716	40,380	41,625
Standardabw.	7,258	1,768	1,671

Tabelle 5.1a: Ergebnisse des dynamischen Stempel Eindringversuchs bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **AB 0/11**

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich				
Referenz – Bindemittelgehalt	$\hat{F} = 8,42 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 3,62 > 2,78 = t(4;0,05)$	ungleich
Referenz – Korngrößenverteilung	$\hat{F} = 9,43 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 3,24 > 2,78 = t(4;0,05)$	ungleich

Tabelle 5.1b: Einfacher Mittelwertvergleich über die Variationen der Zusammensetzung für den Asphaltbeton 0/11

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Zusammensetzung des Asphaltbetons 0/11 mit den Standardversuchsbedingungen statistisch nachgewiesen werden kann. Bei der Erhöhung des Bindemittelgehaltes um 0,3 M.-% sowie bei der Verringerung des Größtkornanteil erhöht sich der Verformungswiderstand. Dieses zeigt deutlich, dass dieser Asphaltbeton im Rahmen der Eignungsprüfung nicht auf einen hohen Verformungswiderstand optimiert wurde.

5.2 Splittmastixasphalt 0/11 S

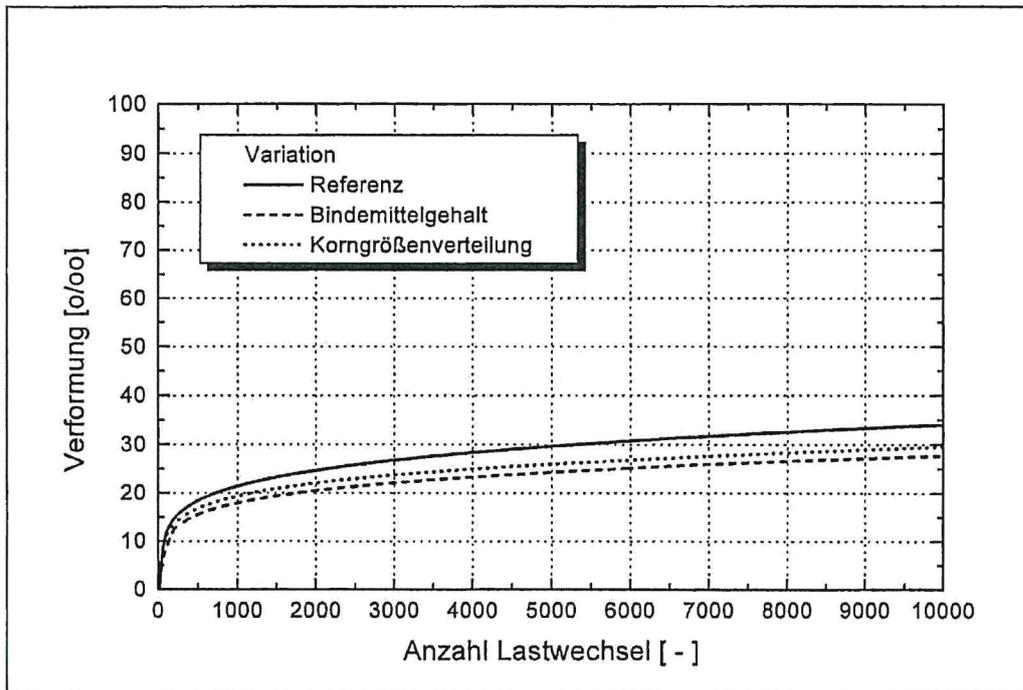


Abbildung 5.2: Relative Verformungen beim dynamischen Stempeldringversuch über die Anzahl der Lastwechsel bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **SMA 0/11 S**

Probenummer	Relative Stempeldringtiefe nach 10.000 Lastwechseln		
	Referenz	Variation Bindemittelgehalt	Variation Korngrößenverteilung
	‰	‰	‰
1	31,530	26,990	29,010
2	36,137	29,254	29,885
3	34,544	26,785	29,772
Mittel	34,070	27,676	29,556
Standardabw.	2,340	1,370	0,476

Tabelle 5.2a: Ergebnisse des dynamischen Stempeldringversuchs bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **SMA 0/11 S**

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich				
Referenz – Bindemittelgehalt	$\hat{F} = 2,92 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 4,08 > 2,78 = t(4;0,05)$	ungleich
Referenz – Korngrößenverteilung	$\hat{F} = 24,17 > 19,0 = F(2;2;0,05)$	ungleich	$\hat{t} = 3,28 < 4,30 = t(2;0,05)$	gleich

Tabelle 5.2b: Einfacher Mittelwertvergleich über die Variationen der Zusammensetzung für den Splittmastixasphalt 0/11 S

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erhöhung des Bindemittelgehaltes beim Splittmastixasphalt 0/11 S mit den Standardversuchsbedingungen statistisch nachgewiesen werden kann. Die Variation der Korngrößenverteilung kann nur tendenziell nachgewiesen werden.

Die Erhöhung des Bindemittelgehaltes um 0,3 M.-% sowie bei der Verringerung des Größtkornanteils verringert die Eindringtiefe. Auch hier zeigt das Ergebnis, dass dieser Splittmastixasphalt im Rahmen der Eignungsprüfung nicht hinsichtlich des Verformungswiderstandes optimiert wurde.

5.3 Asphaltbinder 0/16

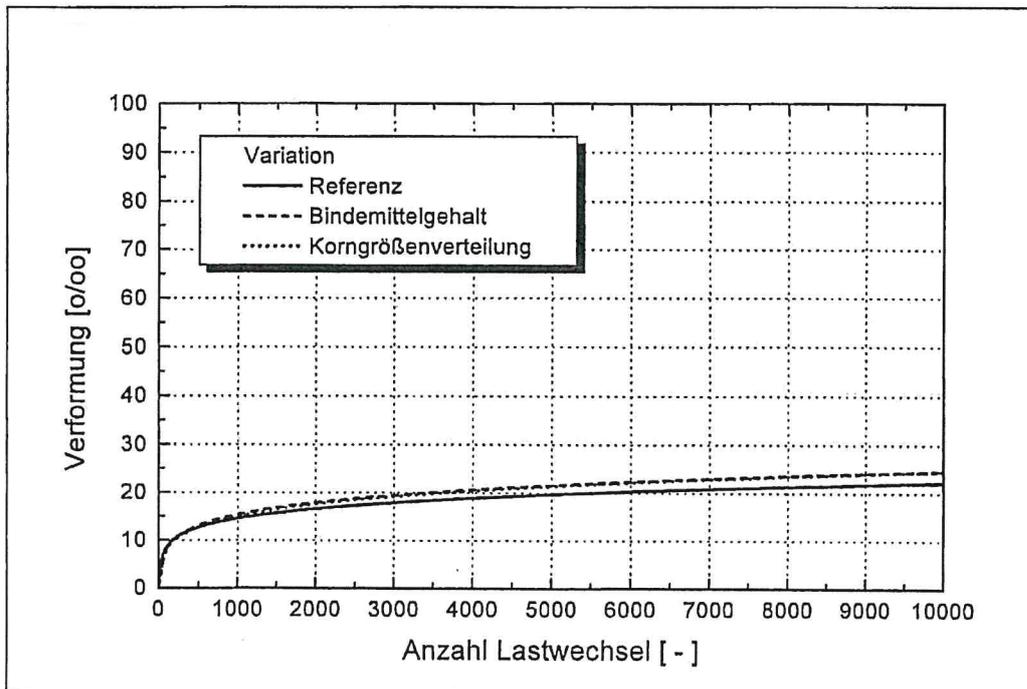


Abbildung 5.3: Relative Verformungen beim dynamischen Stempelerdringversuch über die Anzahl der Lastwechsel bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **ABi 0/16**

Probenummer	Relative Stempelerdringtiefe nach 10.000 Lastwechseln		
	Referenz	Variation Bindemittelgehalt	Variation Korngrößenverteilung
	‰	‰	‰
1	22,332	24,755	-
2	-	25,598	23,752
3	22,088	23,454	22,540
Mittel	22,210	24,602	23,146
Standardabw.	0,172	1,080	0,857

Tabelle 5.3a: Ergebnisse des dynamischen Stempelerdringversuchs bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **ABi 0/16**

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich				
Referenz – Bindemittelgehalt	$\hat{F} = 78,38 > 19,0 = F(2;2;0,05)$	ungleich	$\hat{t} = 3,81 < 4,30 = t(2;0,05)$	gleich
Referenz – Korngrößenverteilung	$\hat{F} = 24,67 > 19,0 = F(2;2;0,05)$	ungleich	$\hat{t} = 2,62 < 4,30 = t(2;0,05)$	gleich

Tabelle 5.3b: Einfacher Mittelwertvergleich über die Variationen der Zusammensetzung für den Asphaltbinders 0/16

Ein Einfluss der Zusammensetzung des Asphaltbinders 0/16 kann mit den Standardversuchsbedingungen statistisch nicht nachgewiesen werden.

Die Verringerung des Bindemittelgehaltes um 0,3 M.-% sowie die Erhöhung des Größtkornanteil zeigen zwar plausible Änderungen in den Eignungsprüfungen, lassen beim dynamischen Stempeleindringversuch jedoch keine eindeutigen Aussagen zu. Die Ursache liegt vermutlich in der Verwendung von PmB 45 A, welches eine hohe versteifende Wirkung hat.

5.4 Offenporiger Asphalt 0/8

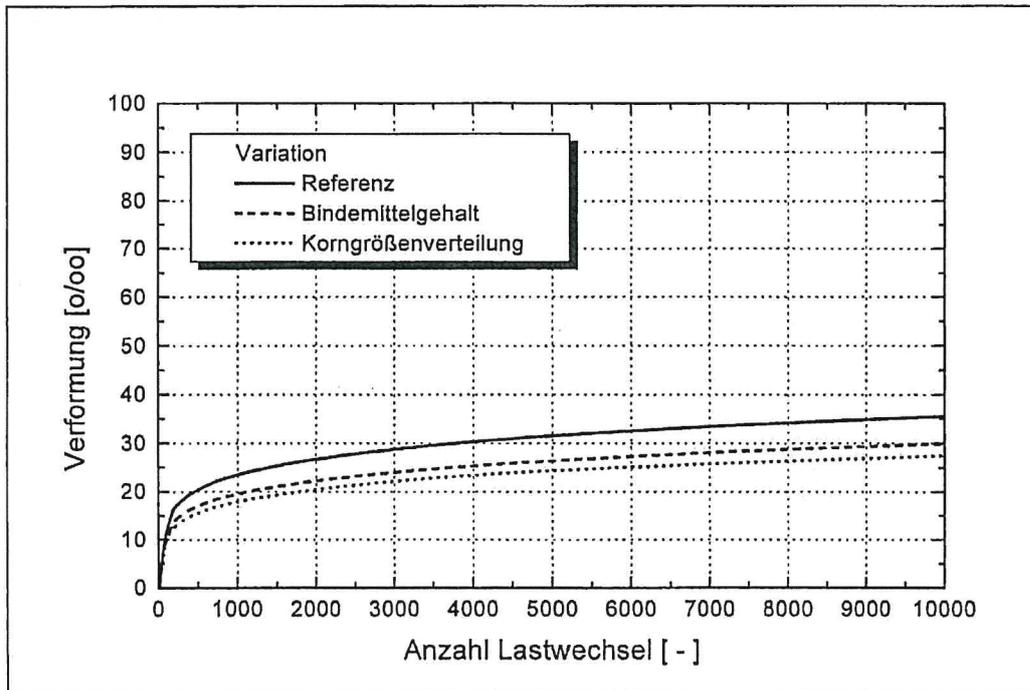


Abbildung 5.4: Relative Verformungen beim dynamischen Stempfeindringversuch über die Anzahl der Lastwechsel bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **OPA 0/8**

Probennummer	Relative Stempfeindringtiefe nach 10.000 Lastwechseln		
	Referenz	Variation Bindemittelgehalt	Variation Korngrößenverteilung
	‰	‰	‰
1	37,117	35,085	26,928
2	35,706	25,176	33,817
3	33,819	29,587	27,457
Mittel	35,547	29,949	28,709
Standardabw.	1,655	4,964	2,641

Tabelle 5.4a: Ergebnisse des dynamischen Stempfeindringversuchs bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **OPA 0/8**

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich				
Referenz – Bindemittelgehalt	$\hat{F} = 9,00 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 1,85 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich
Referenz – Korngrößenverteilung	$\hat{F} = 5,37 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 2,55 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich

Tabelle 5.4b: Einfacher Mittelwertvergleich über die Variationen der Zusammensetzung für den offenporigen Asphalt 0/8

Auch beim offenporigen Asphalt kann ein Einfluss der Zusammensetzung mit den Standardversuchsbedingungen statistisch nicht nachgewiesen werden.

Sowohl bei der Erhöhung des Bindemittelgehaltes um 0,3 M.-% als auch bei der Erhöhung des Größtkornanteils kann lediglich tendenziell eine Verringerung der Stempeleindringtiefen nachgewiesen werden.

5.5 Gussasphalt 0/8

Für den Gussasphalt werden zunächst die Mittelwerte der relativen dynamischen Stempeleindringtiefe grafisch dargestellt. In der anschließenden Tabelle werden die Ergebnisse des dynamischen Stempeleindringversuchs – die Eindringtiefe nach 10.000 Lastwechseln - präsentiert. Es ist zu beachten, dass die Oberspannung von 0,8 MPa auf 0,15 MPa reduziert wurde.

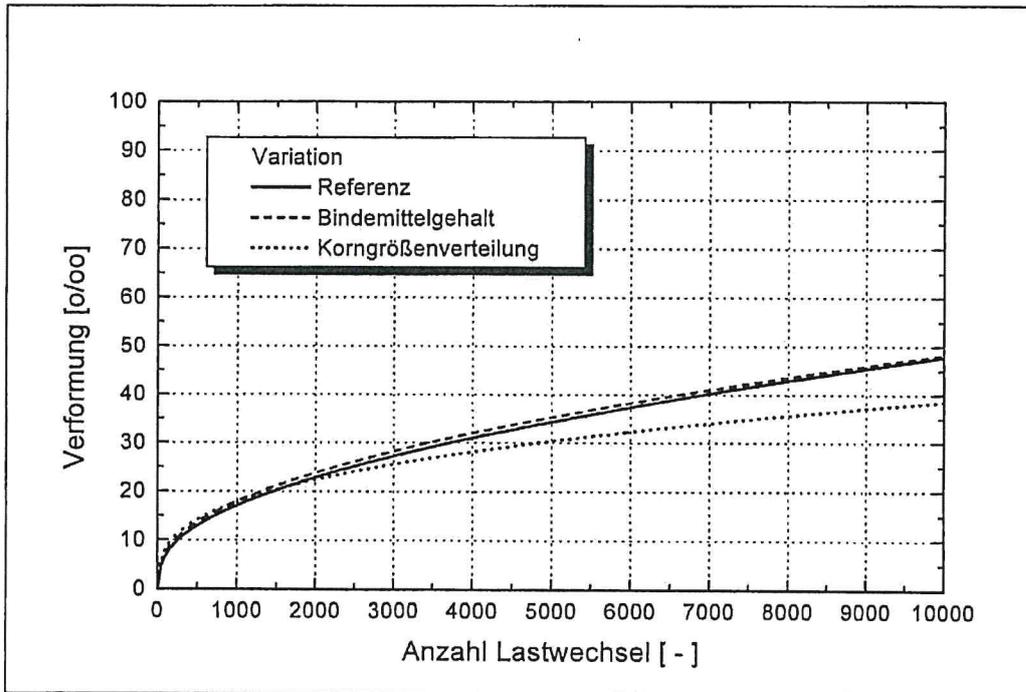


Abbildung 5.5: Relative Verformungen beim dynamischen Stempelindringversuch über die Anzahl der Lastwechsel bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **GA 0/8**

Probennummer	Relative Stempelindringtiefe nach 10.000 Lastwechseln Oberspannung 0,15 MPa		
	Referenz	Variation Bindemittelgehalt	Variation Korngrößenverteilung
	‰	‰	‰
1	43,564	45,037	39,042
2	53,752	46,464	41,944
3	46,123	53,044	34,674
Mittel	47,813	48,182	38,553
Standardabw.	5,300	4,271	3,660

Tabelle 5.5a: Ergebnisse des dynamischen Stempelindringversuchs bei Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung, hier: **GA 0/8**

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich				
Referenz – Bindemittelgehalt	$\hat{F} = 1,54 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 0,09 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich
Referenz – Korngrößenverteilung	$\hat{F} = 2,10 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 2,49 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich

Tabelle 5.5b: Einfacher Mittelwertvergleich über die Variationen der Zusammensetzung für den Gussasphalt 0/8

Beim Gussasphalt 0/8 kann der Einfluss der Zusammensetzung mit den Standardversuchsbedingungen statistisch nicht nachgewiesen werden.

Die Erhöhung des Bindemittelgehaltes um 0,3 M.-% zeigt nahezu keinen Einfluss auf die Stempelindringtiefe. Auch die Eignungsprüfung zeigt bei dieser Variation keine erhöhte statische Stempelindringtiefe. Die Reduzierung des Größtkornanteils erhöht den Verformungswiderstand. Trotz der Differenz der Stempelindringtiefen von ca. 9,3 ‰ ist ein statistischer Unterschied aufgrund der Prüfstreuung nicht nachweisbar.

6. Zusammenfassung und offen gebliebene Probleme

6.1 Zusammenfassung

Das Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt empfiehlt für Asphaltmischgut der Bauklassen SV und I sowie Verkehrsflächen mit besonderen Beanspruchungen, aber auch für offenporige Asphalte die Durchführung von zusätzlichen Prüfungen: erweiterte Eignungsprüfungen. Verbindliche Angaben über das zur Beurteilung des Verformungswiderstandes von Asphalt anzuwendende Prüfverfahren im Rahmen der erweiterten Eignungsprüfung sind in dem Merkblatt nicht angegeben.

In diesem Forschungsauftrag wird die Eignung des dynamischen Stempeleindringversuchs zur Beurteilung des Verformungswiderstandes von Asphalt untersucht. Das Versuchsprinzip besteht darin, einen runden, eingespannten Asphaltprobekörper mit einem runden Stempel geringeren Durchmessers axial mit einer sinusförmigen Druckschwellspannung zu belasten.

Anhand der vorliegenden Erfahrungen [7, 8, 9 und 10] erfolgte die Belastung bisher mit einer Frequenz von 10 Hz ohne Lastpause mit einer Oberlast von 0,8 MPa und einer Prüftemperatur von 40 °C. Im Rahmen dieses Forschungsauftrages wurden als alternative Belastungsart eine Lastzeit von 0,2 s mit einer Lastpause von 1,5 s (vergleichbar mit dem Druckschwellversuch [3]) sowie die Oberspannungen 0,6; 0,8 und 1,0 MPa und die Prüftemperaturen +40 °C, +45 °C und +50 °C gegeneinander variiert. Weiterhin wurde die Probekörpergeometrie variiert. Unter den bisherigen Prüfbedingungen – Probekörperhöhe: 40 mm, Probekörperdurchmesser: 200 mm und Stempeldurchmesser: 80 mm - wurde die Probekörperhöhe auf 60 mm und 80 mm erhöht sowie der Probekörperdurchmesser auf 150 mm und gleichzeitig der Stempeldurchmesser auf 60 mm reduziert – auch hier wurde alle Variationen gegeneinander untersucht.

Das Ergebnis des dynamischen Stempeleindringversuchs war bislang die relative Stempeleindringtiefe nach 20.000 Lastwechseln. Alternativ wurde die Eindringtiefe nach 2.500 und 10.000 Lastwechseln untersucht.

Die Untersuchungen wurden an fünf Asphalten – AB 0/11, SMA 0/11 S, ABi 0/16, OPA 0/8 und GA 0/8 – durchgeführt.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass im Vergleich der Asphaltarten untereinander die bisher eingesetzten Prüfbedingungen als zu „schwach“ anzusehen sind. Die anhand von Erfahrungswerten angewandten Prüfbedingungen erlauben zwar eine ausreichende Differenzierung innerhalb einer Asphaltart/-sorte, wurden bislang aber nicht im Vergleich mehrerer Asphaltarten untereinander untersucht. Erst mit „schärferen“ Prüfbedingungen - wie eine erhöhte Prüftemperatur, eine höhere Oberlast oder die Belastungsart mit Lastpause - zeigen sich die Charakteristika der einzelnen Asphaltarten.

Eine Ausnahme bildet der Gussasphalt, für den andere Prüfbedingungen gewählt werden mussten, um plausible und praxisrelevante Ergebnisse zu erhalten. Als rationellste Variation wurde die Reduzierung der Oberspannung auf 0,15 MPa gewählt. Mit diesen Prüfbedingungen sind die Eindringtiefen des Gussasphaltes im Verhältnis zu den Walzasphalten zwar immer noch hoch, doch bei noch geringeren Oberspannungen würde der dynamische Effekt in den Hintergrund treten. Ein Vergleich mit dem dynamischen Eindringversuch für Gussasphalt [5] ist nicht möglich, da sich die Prüfbedingungen, insbesondere die Probekörper- und Stempelgeometrie, zu stark unterscheiden.

Die Variation der Probekörpergeometrie zeigte einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Mit steigender Probekörperhöhe erhöht sich die Eindringtiefe. Bei der Reduzierung des Probekörper- / Stempeldurchmessers auf 150 mm / 60 mm erhöht sich – mit Ausnahme des Gussasphalts - ebenfalls die Eindringtiefe. Damit kann eine Variation der Probekörpergeometrie innerhalb einer Versuchsreihe nicht zugelassen werden.

Als Resultat der Untersuchungen wurden folgende Prüfbedingungen als Standard festgelegt:

- Probekörperdurchmesser:	200 mm
- Probekörperhöhe:	40 mm (50 mm für Asphaltbinder)
- Stempeldurchmesser:	80 mm
- Prüftemperatur:	+ 50 °C
- Belastungsart:	Sinusförmiger Lastimpuls von 0,2 s Dauer mit einer Lastpause von 1,5 s Dauer
- Unterspannung:	0,02 MPa
- Oberspannung:	Walzasphalte: 0,8 MPa Gussasphalt: 0,15 MPa
- Versuchsdauer:	10.000 Lastwechsel (4,7 Stunden)
- Ergebnis:	Bleibende Eindringtiefe in ‰ nach 10.000 Lastwechseln

Abschließend wurde für jede Asphaltart der Bindemittelgehalt um 0,3 M.-% und die Korngrößenverteilung variiert. Diese Varianten wurden mit den als Standard festgelegten Prüfbedingungen untersucht. Der Einfluss der Variationen ist nicht bei allen Asphalten statistisch signifikant nachweisbar. Eine tendenzielle Änderung der Stempleindringtiefen kann jedoch festgestellt werden.

Anhand der Auswertung der vorliegenden Untersuchungsergebnisse kann zusammengefasst werden:

Mit den hier festgelegten Prüfbedingungen steht ein Prüfverfahren zur Verfügung, das den Verformungswiderstand von Asphalt praxisnah bewerten kann. Es können alle Walzasphalte mittels einheitlicher Prüfbedingungen untereinander verglichen werden. Lediglich Gussasphalte bedürfen einer veränderten Prüfbedingung um plausible Ergebnisse zu erzielen. Ein direkter Vergleich mit den Walzasphalten ist nicht möglich.

6.2 Offen gebliebene Probleme

Die hier durchgeführten Untersuchungen belegen, dass der dynamische Stempel-eindringversuch geeignet ist, das Verformungsverhalten der untersuchten Asphalte zu beschreiben. Da in diesem Forschungsauftrag nur eine begrenzte Anzahl von Asphaltarten/-sorten und deren Variation untersucht werden konnte, sollte in nachfolgenden Untersuchungen der Nachweis für eine größere Breite an Asphaltarten geführt werden.

Eine Präzision des Verfahrens unter Wiederhol- oder Vergleichsbedingungen kann hier nicht angegeben werden und müsste in Ringversuchen über mehrere Laboratorien ermittelt werden.

Da für Gussasphalte nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Stempелеindring-tiefen vorzeitig den Messbereich überschreiten, sollte untersucht werden, ob eine Regression der Kurvenverläufe mit anschließender Extrapolation plausible Ergebnisse liefern kann.

Da neue Erkenntnisse für den Druckschwellversuch [11] nur noch die Steigung im Wendepunkt betrachten, sollte überprüft werden, ob diese Vorgehensweise – Regression und Betrachtung der Steigung am Versuchsende – auch für den dynamischen Stempелеindringversuch zielführend sein kann.

Um zu untersuchen, ob Verformungen nur an der Deckschicht auftreten, oder auch die darunter liegenden Schichten geschädigt werden, ist es von Interesse ganze Schichtpakete zu prüfen. Die dazu notwendigen Probekörper können sowohl aus Straßen als auch aus im Labor hergestellten Probepplatten gebohrt werden.

Braunschweig, Mai 2003

Der Sachbearbeiter



(Dipl.-Inform. Stephan Buechler)

Der Forschungsbeauftragte



(Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner)

7. Literatur

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt – ZTV Asphalt-StB 94, Ausgabe 1994 und ZTV Asphalt-StB 01, Ausgabe 2001 , FGSV-Verlag, Köln

- [2] Merkblatt für den Bau offenporiger Asphaltdeckschichten, Ausgabe 1998, FGSV-Verlag, Köln

- [3] Technische Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau, TPA-StB Teil: Einaxialer Druck-Schwellversuch, Bestimmung des Verformungswiderstandes von Walzasphalten bei Wärme, Ausgabe 1997, FGSV-Verlag, Köln

- [4] Technische Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau, TPA-StB Teil: Spurbildung unter Wasser, Ausgabe 19, FGSV-Verlag, Köln

- [5] Schellenberg, Eulitz: Ansprache des Verformungswiderstandes von Gussasphalt mit dem dynamischen Eindringversuch mit ebenem Stempel – Weiterentwicklung und Bewertungshintergrund, FE 7.184, 2000,
- [6] Arand W.; von der Decken, S.: Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung; Qualitätsplanung im Asphaltstraßenbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes. AiF Forschungsauftrag Nr. Q 27, Braunschweig, 1996

- [7] Arand W., Zander U.: Einfluß von Temperatur und Temperaturrate auf den Verformungswiderstand frisch verlegter Asphaltdeckschichten während der Abkühlung und Wiedererwärmung, AiF-Forschungsauftrag Nr. 9.975, Braunschweig, 1998

- [8] Renken P.: Optimierung und Qualitätssicherung offenporiger Asphaltdeckschichten, FE 07.174/1996/CR, Braunschweig, 1998

- [9] Arand W., Zander U., Renken P., Böhler St.: Einfluß des Bindemittelgehaltes auf das mechanische Verhalten von Splittmastixasphalten mit unterschiedlichen stabilisierenden Zusätzen, FE 7.167 G 95 F, Braunschweig, 1998
- [10] Leutner R., Renken P., Lühje U.: Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad, AiF-Forschungsauftrag 11239, Braunschweig, 2000
- [11] Roos, Charif, Karcher: Schaffung eines Bewertungshintergrundes zur Prognostizierung der Standfestigkeit von Asphalten mit dem Druckschwellversuch – Hauptphase, FE 07.165/1999/EGB, Karlsruhe, 2002
- [12] Eisenhart, C.: Assumptions underlying the Analyses of Variance. Biometrics 3, 1951
- [13] Weber, E.: Grundriß der biologischen Statistik, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 9. Auflage, 1986
- [14] Sachs, L.: Angewandte Statistik, Springer-Verlag, Berlin, 5. Auflage, 1978

Anhang

Anhang 1.1 Grafische Darstellung der Ergebnisse - Asphaltbeton 0/11

Anhang 1.2 Grafische Darstellung der Ergebnisse - Splittmastixasphalt 0/11 S

Anhang 1.3 Grafische Darstellung der Ergebnisse - Asphaltbinder 0/16

Anhang 1.4 Grafische Darstellung der Ergebnisse - offenporiger Asphalt 0/8

Anhang 1.5 Grafische Darstellung der Ergebnisse - Gussasphalt 0/8

Anhang 2.1 Tabellarische Darstellung der Ergebnisse - Asphaltbeton 0/11

Anhang 2.2 Tabellarische Darstellung der Ergebnisse - Splittmastixasphalt 0/11 S

Anhang 2.3 Tabellarische Darstellung der Ergebnisse - Asphaltbinder 0/16

Anhang 2.4 Tabellarische Darstellung der Ergebnisse - offenporiger Asphalt 0/8

Anhang 2.5 Tabellarische Darstellung der Ergebnisse - Gussasphalt 0/8

Anhang 3.1 Multiple Mittelwertvergleiche für alle Walzasphalte für $T = +40\text{ °C}$

Anhang 3.2 Multiple Mittelwertvergleiche für alle Walzasphalte für $T = +45\text{ °C}$

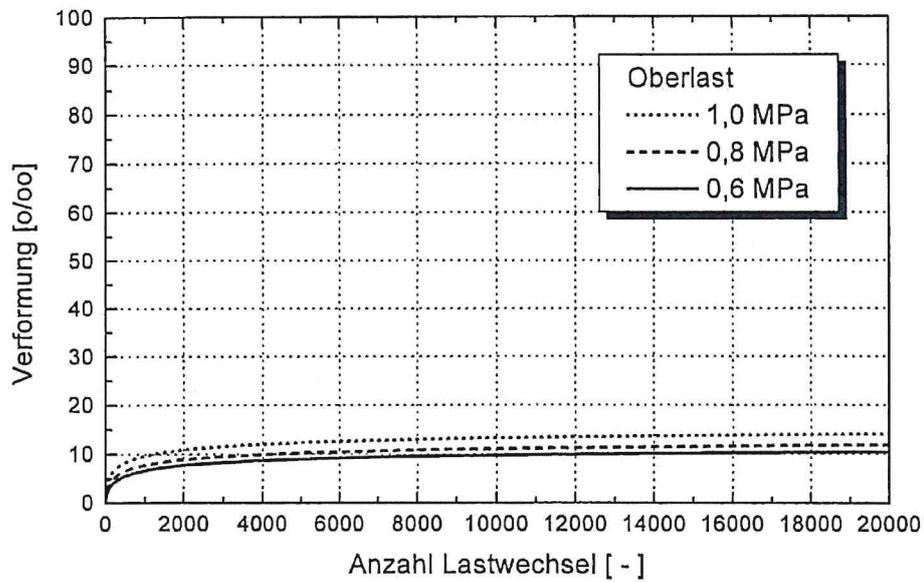
Anhang 3.3 Multiple Mittelwertvergleiche für alle Walzasphalte für $T = +50\text{ °C}$

Anhang 3.4 Multiple Mittelwertvergleiche für alle Walzasphalte unter Variation der
Probekörper- und Stempelgeometrie

Anhang 3.5 Multiple Mittelwertvergleiche für alle Walzasphalte unter Variation der
Versuchsdauer

Anhang 1.1

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



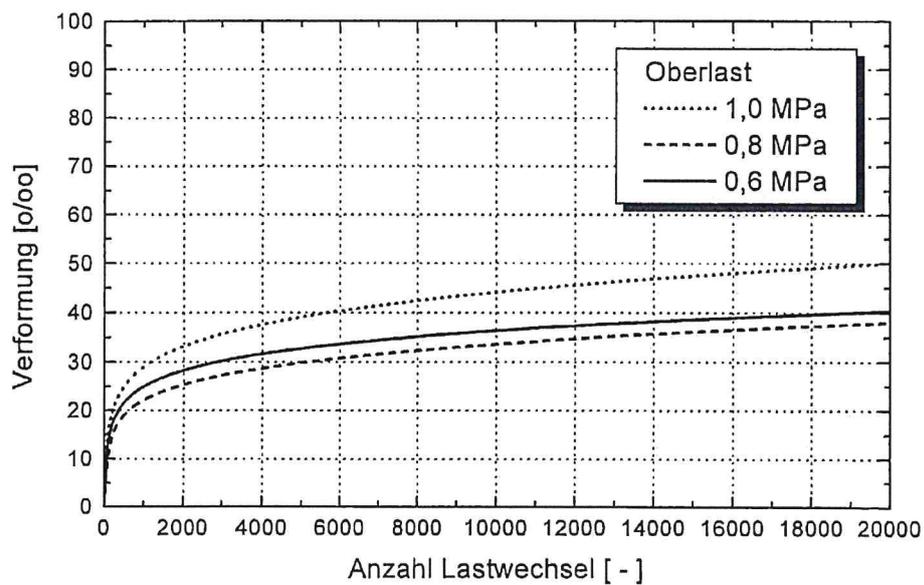
AB 0/11

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLP



AB 0/11

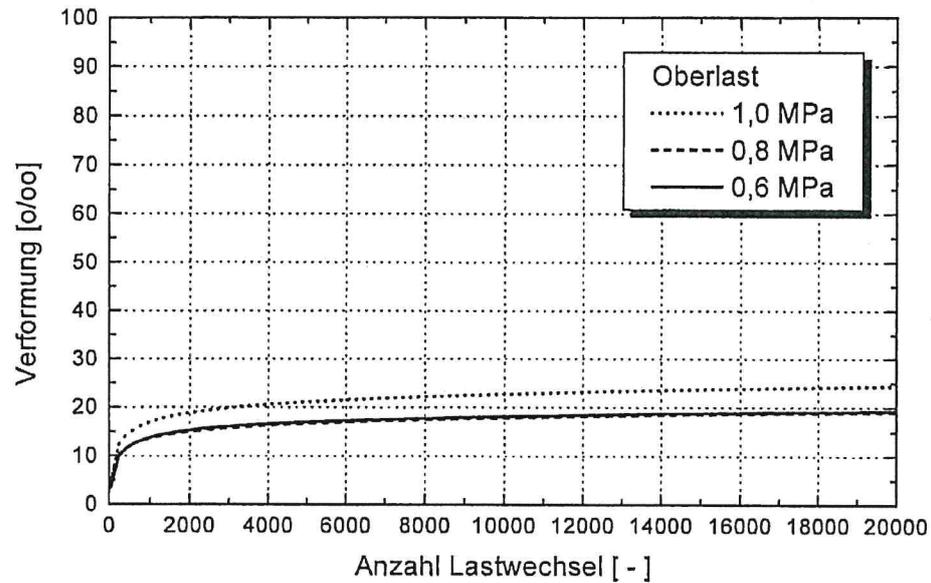
T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



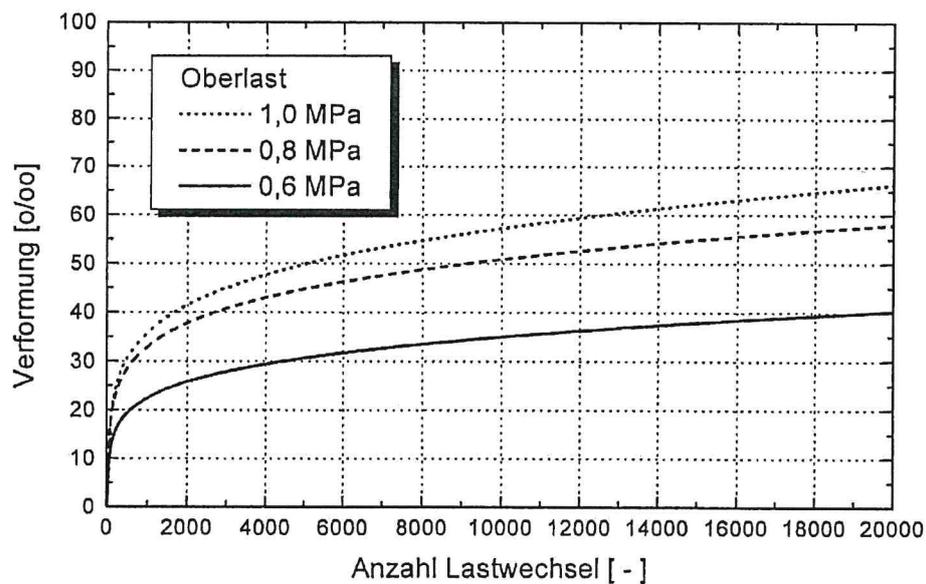
AB 0/11

T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLP



AB 0/11

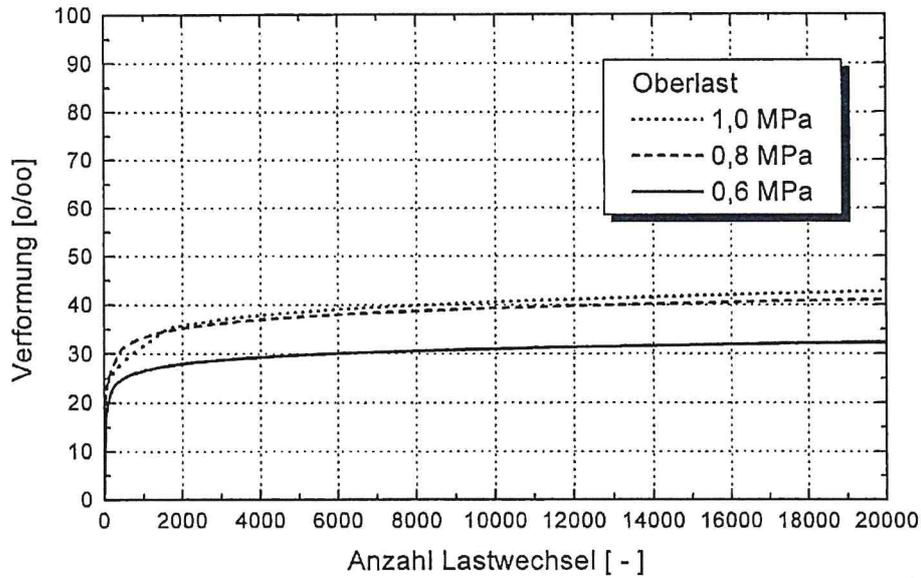
T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



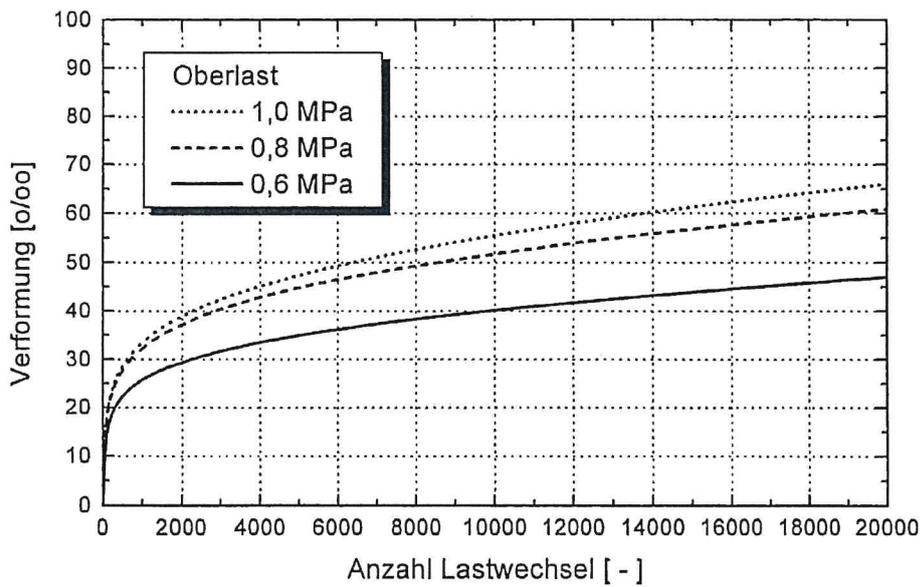
AB 0/11

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLP



AB 0/11

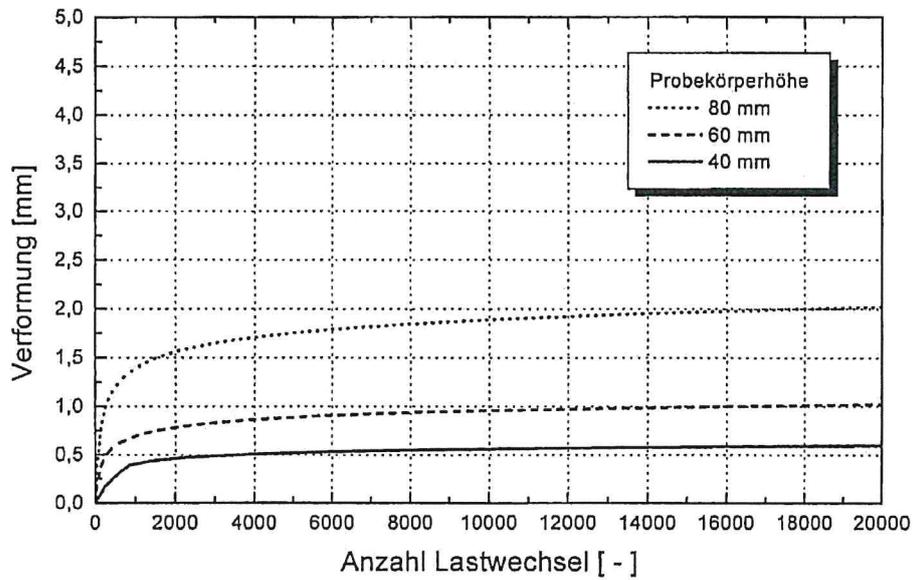
T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Probekörperhöhe in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



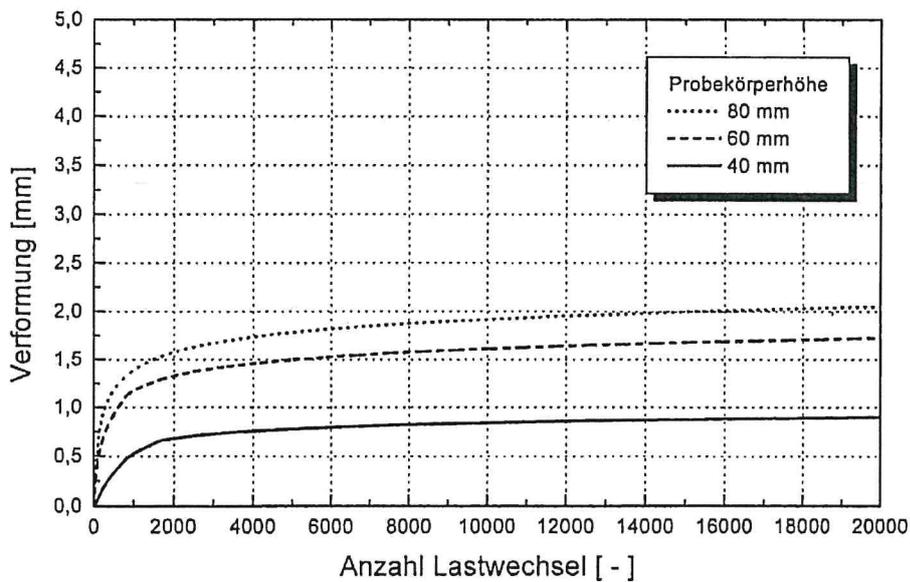
AB 0/11

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

 $\sigma_0 = 0,8 \text{ MPa}$

0,1 s oLp



AB 0/11

T = +40 °C

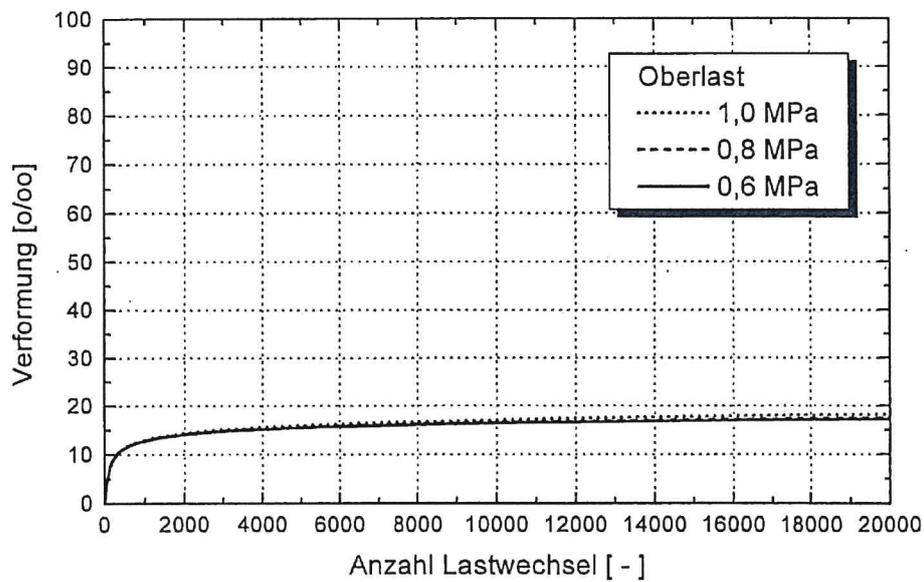
Ø = 150/60 mm

 $\sigma_0 = 0,8 \text{ MPa}$

0,1 s oLp

Anhang 1.2

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



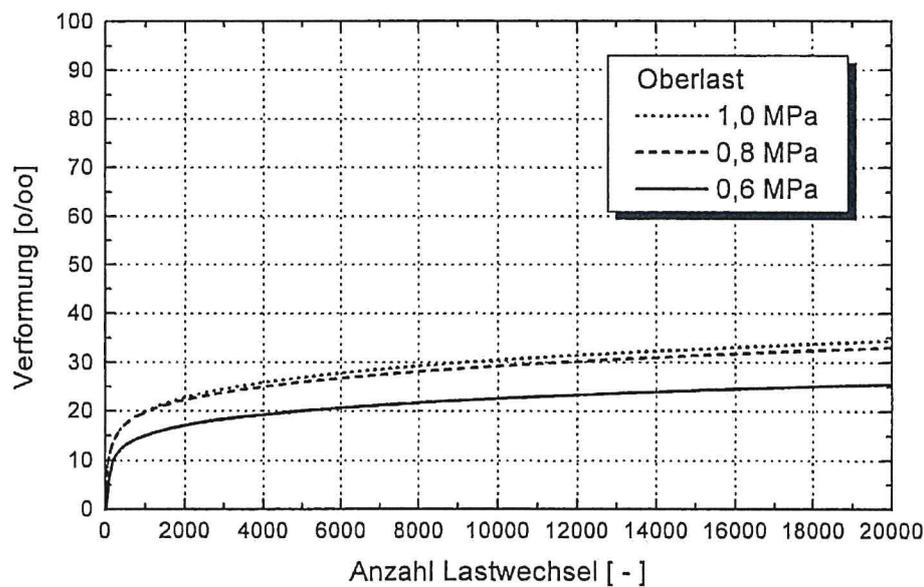
SMA 0/11 S

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



SMA 0/11 S

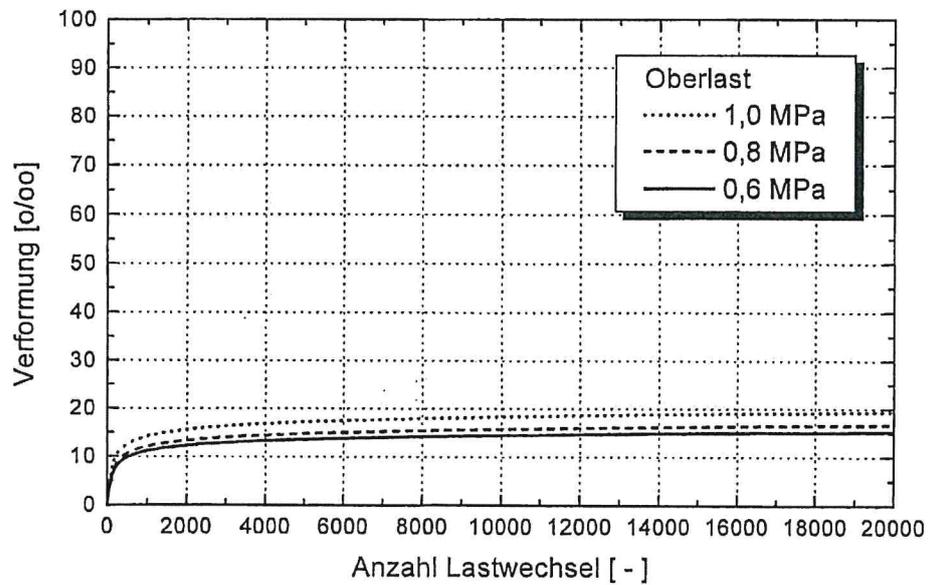
T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



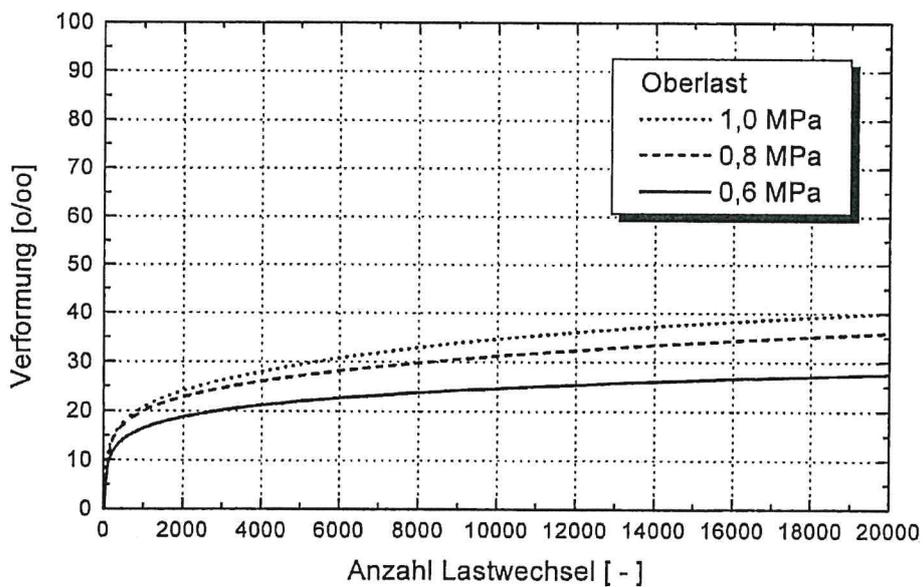
SMA 0/11 S

T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



SMA 0/11 S

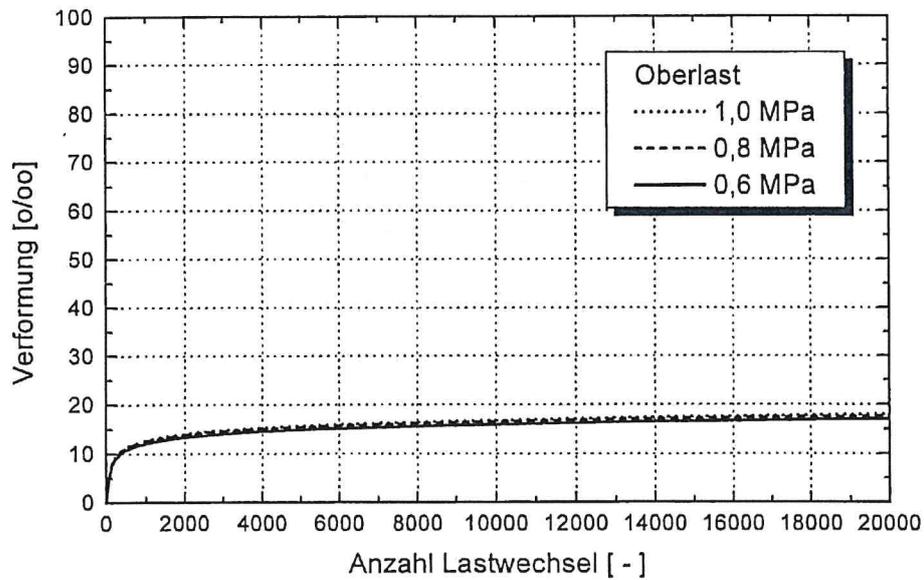
T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



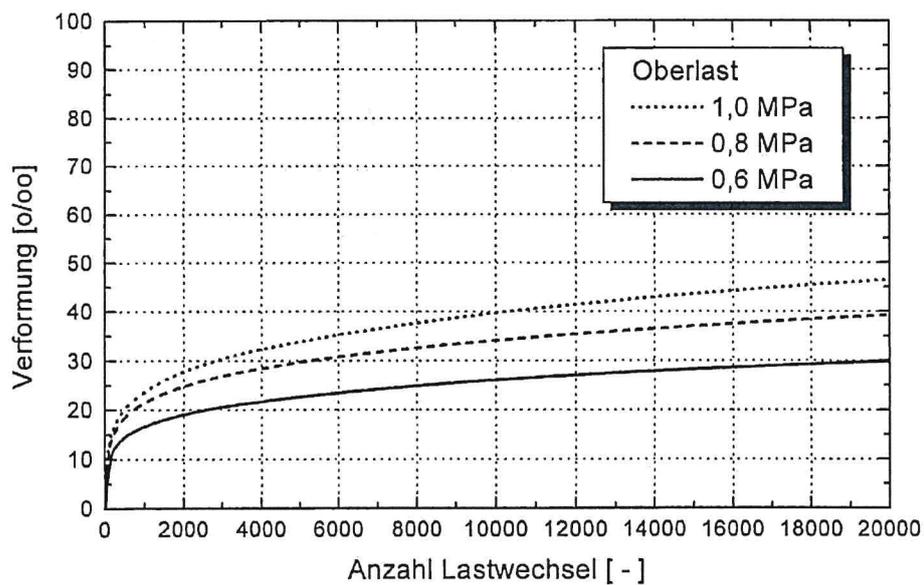
SMA 0/11 S

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



SMA 0/11 S

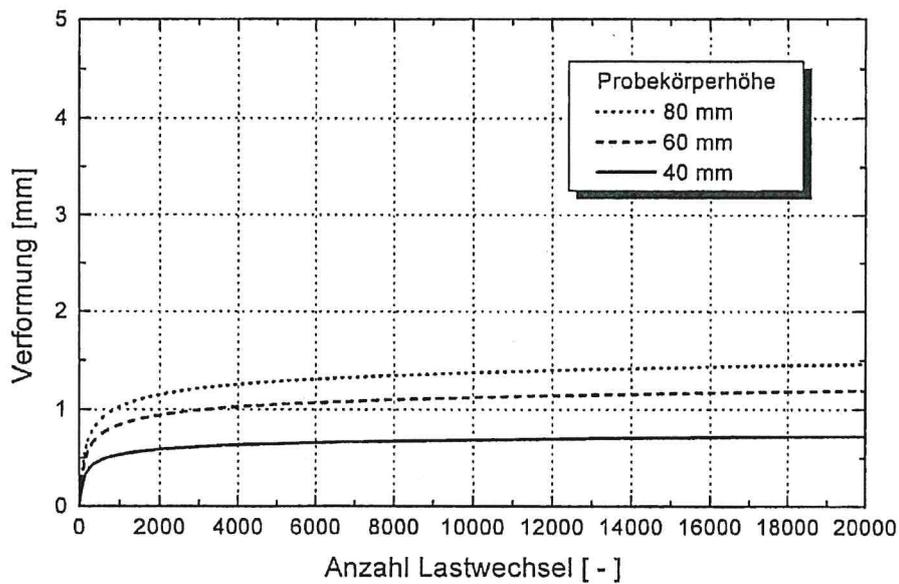
T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Probekörperhöhe in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel

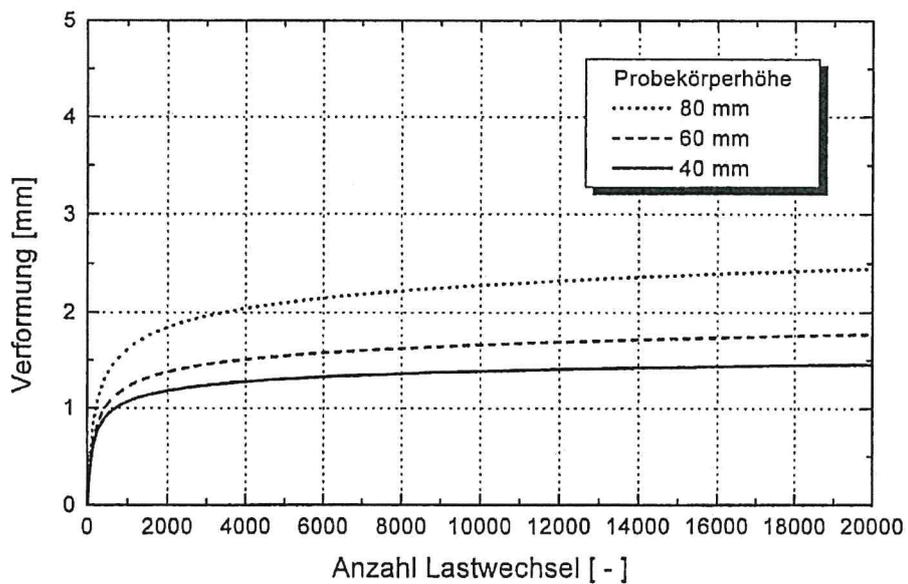


SMA 0/11 S

T = +40 °C

 $\varnothing = 200/80$ mm $\sigma_0 = 0,8$ MPa

0,1 s oLp



SMA 0/11 S

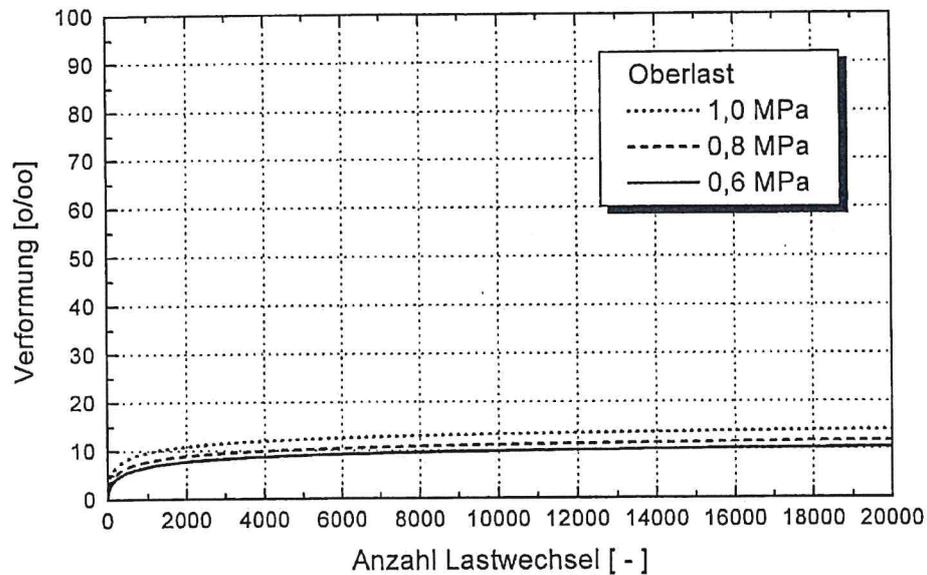
T = +40 °C

 $\varnothing = 150/60$ mm $\sigma_0 = 0,8$ MPa

0,1 s oLp

Anhang 1.3

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



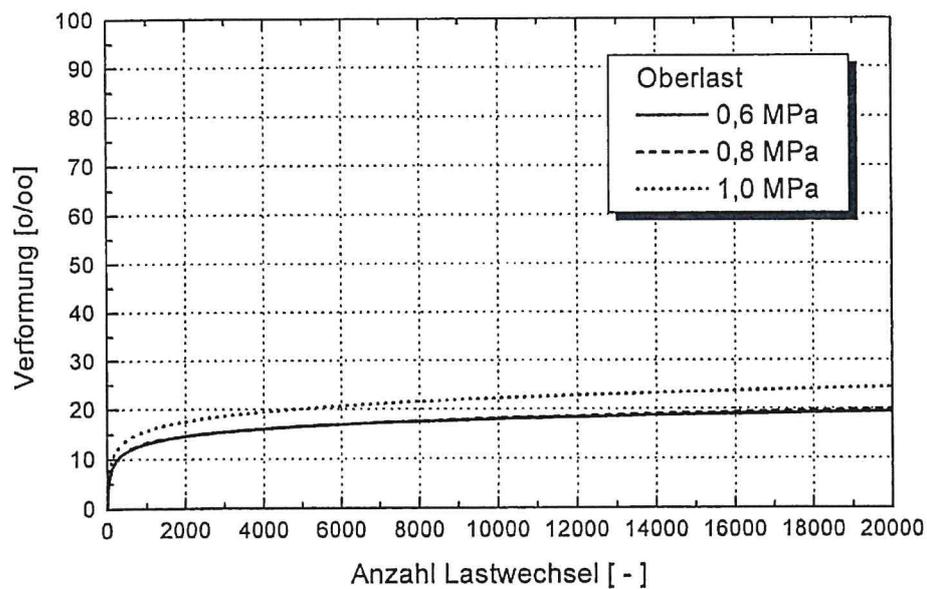
ABi 0/16

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 50 mm

0,1 s oLp



ABi 0/16

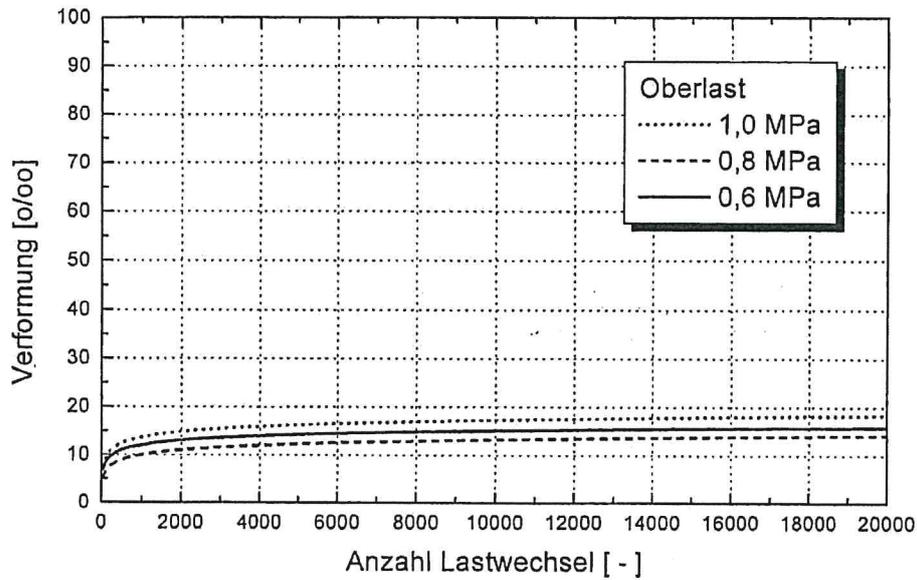
T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 50 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



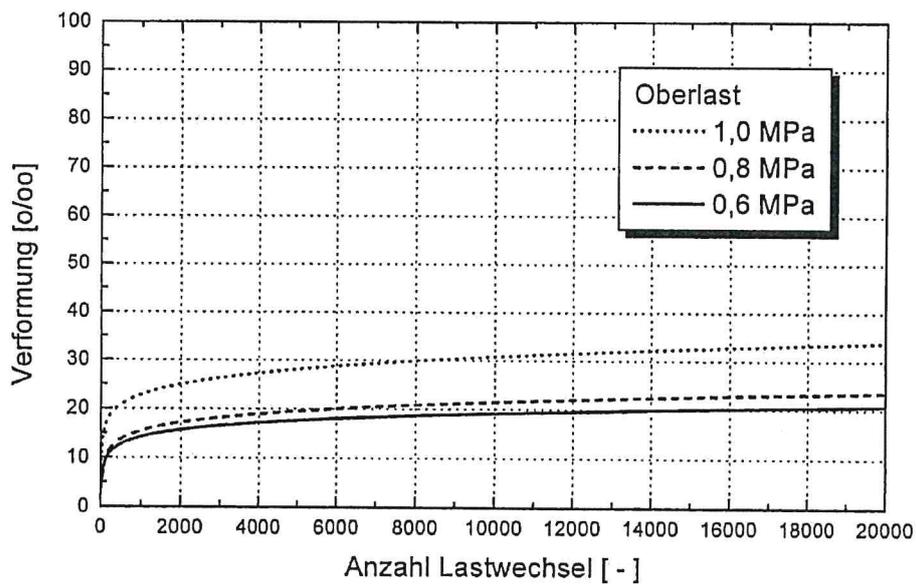
ABi 0/16

T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

h = 50 mm

0,1 s oLp



ABi 0/16

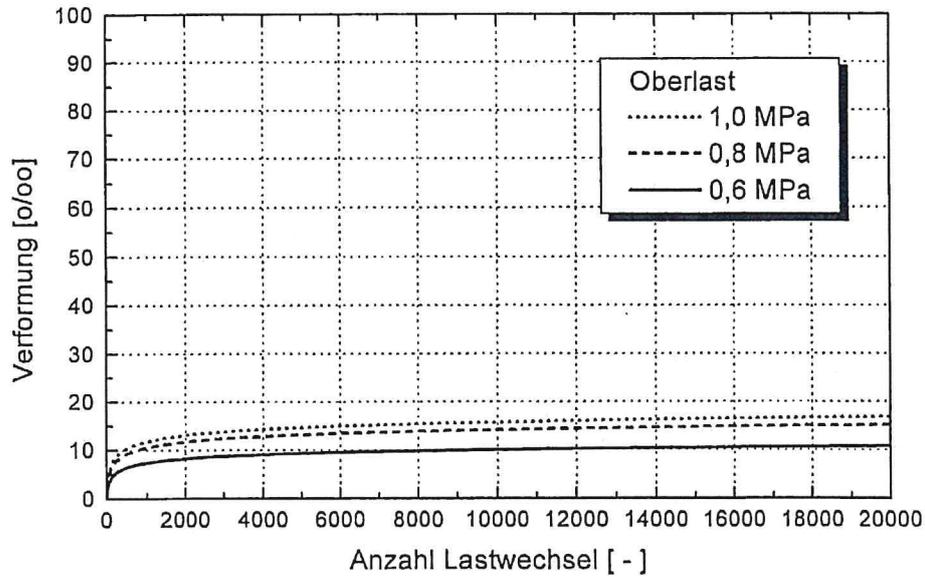
T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

h = 50 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel

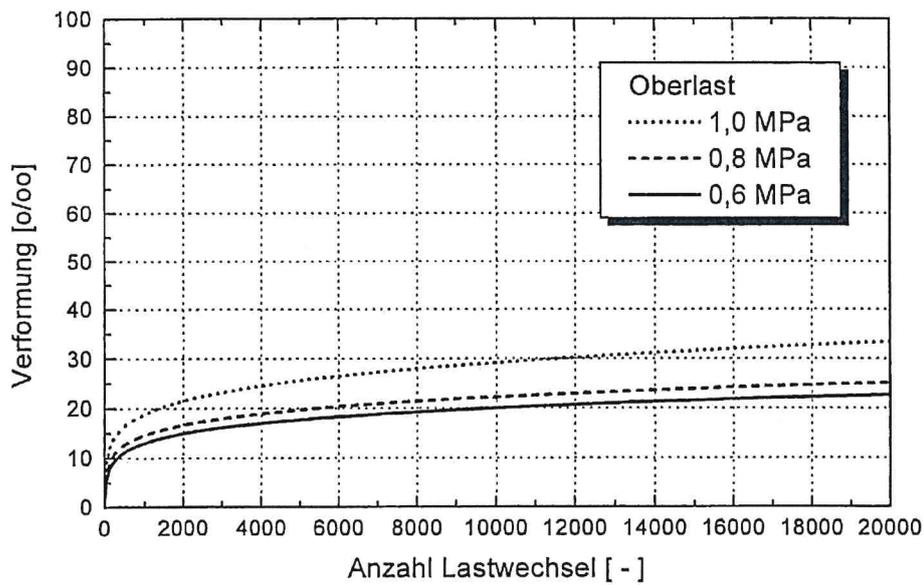


ABi 0/16

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 50 mm

0,1 s oLp

ABi 0/16

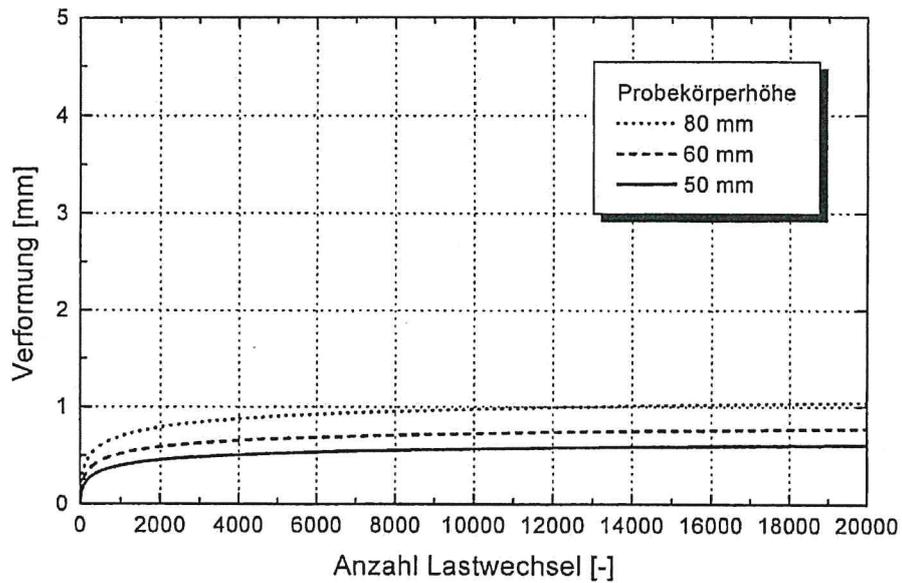
T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 50 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Probekörperhöhe in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



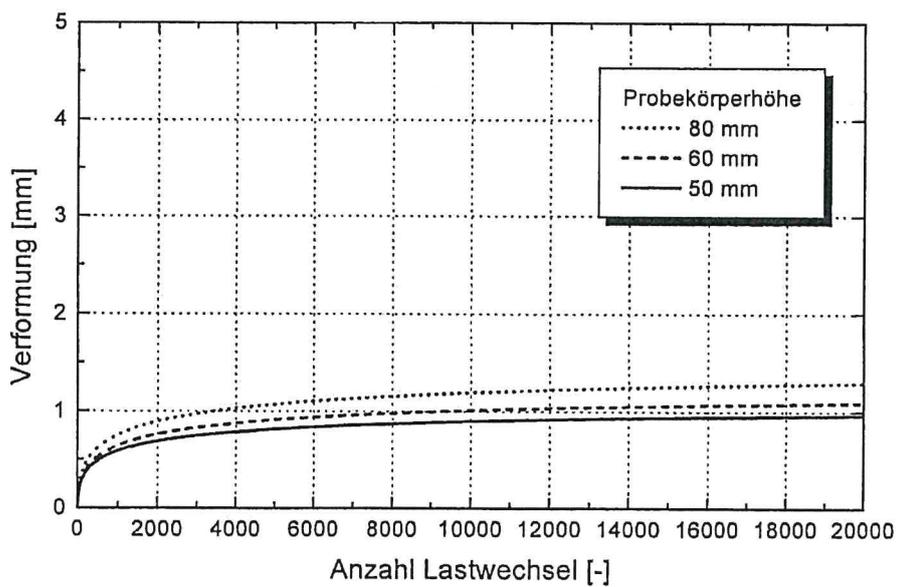
ABi 0/16

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

 $\sigma_0 = 0,8 \text{ MPa}$

0,1 s oLp



ABi 0/16

T = +40 °C

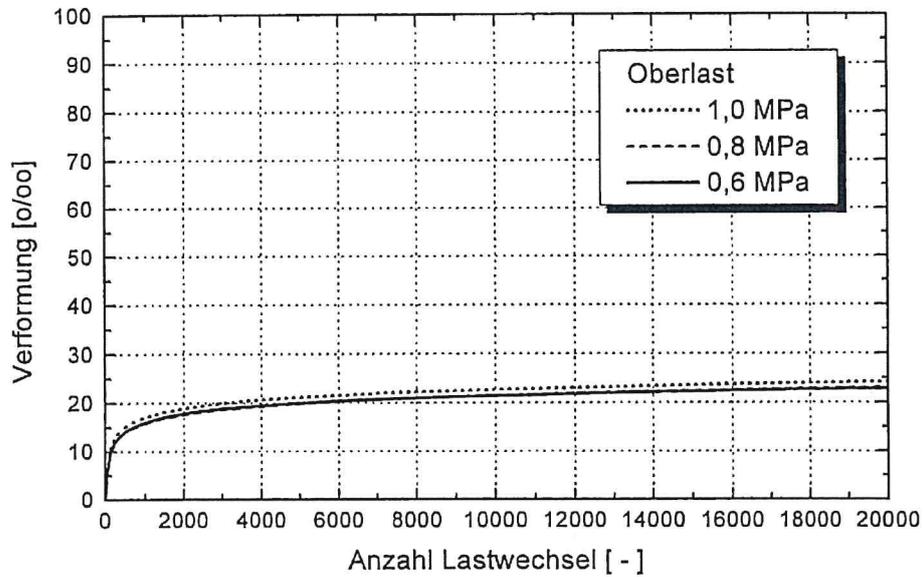
Ø = 150/60 mm

 $\sigma_0 = 0,8 \text{ MPa}$

0,1 s oLp

Anhang 1.4

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



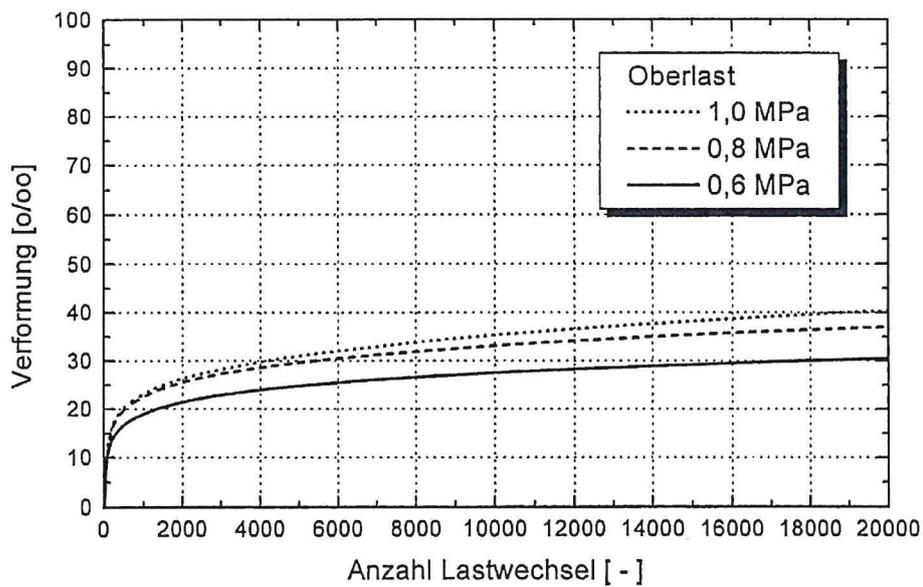
OPA 0/8

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



OPA 0/8

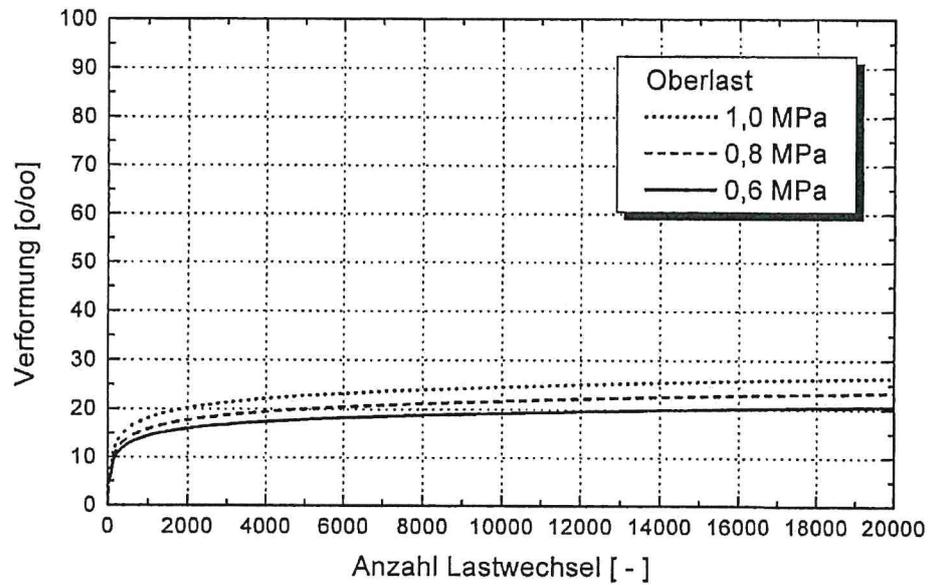
T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



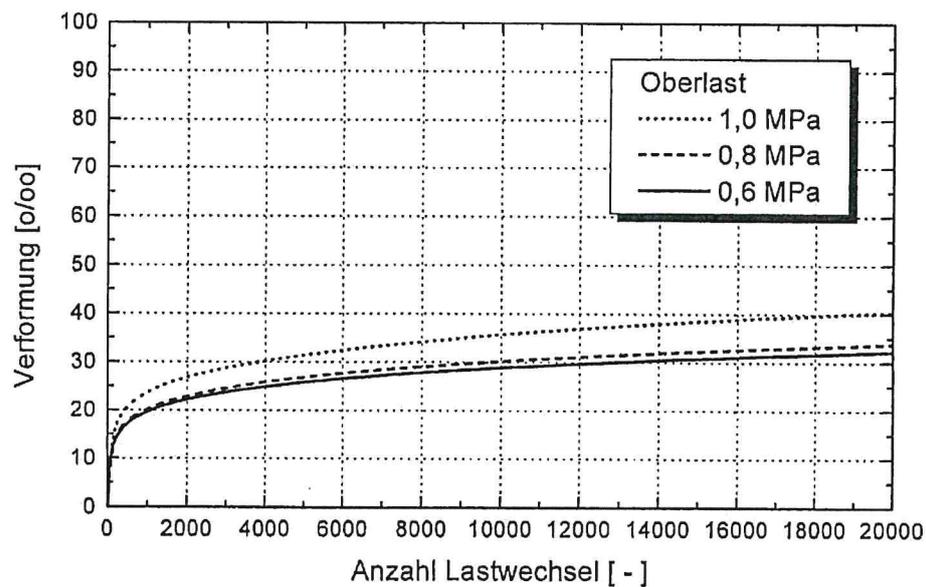
OPA 0/8

T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



OPA 0/8

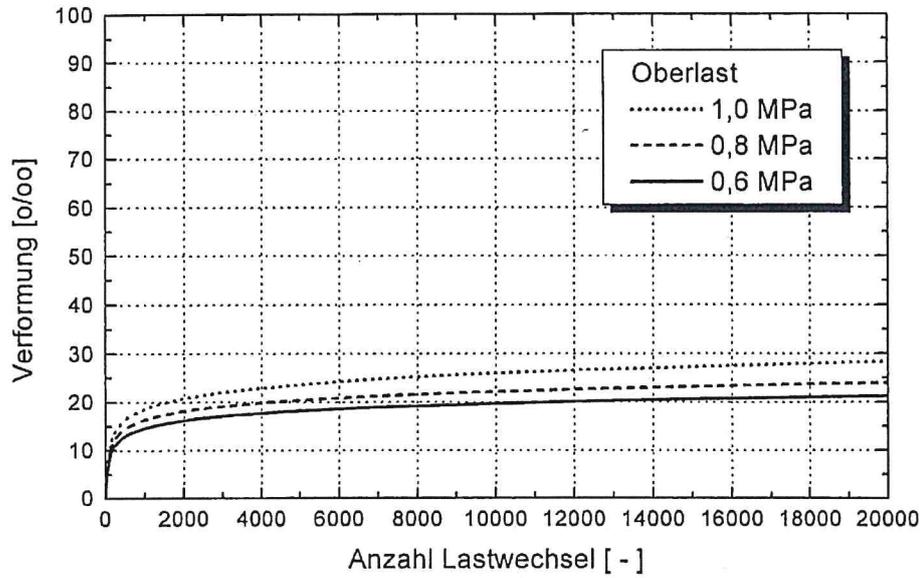
T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



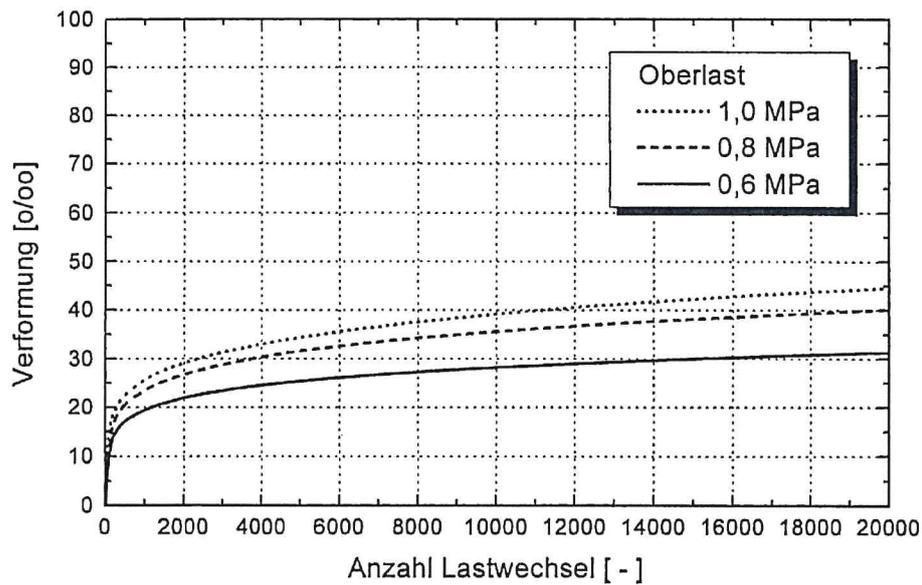
OPA 0/8

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



OPA 0/8

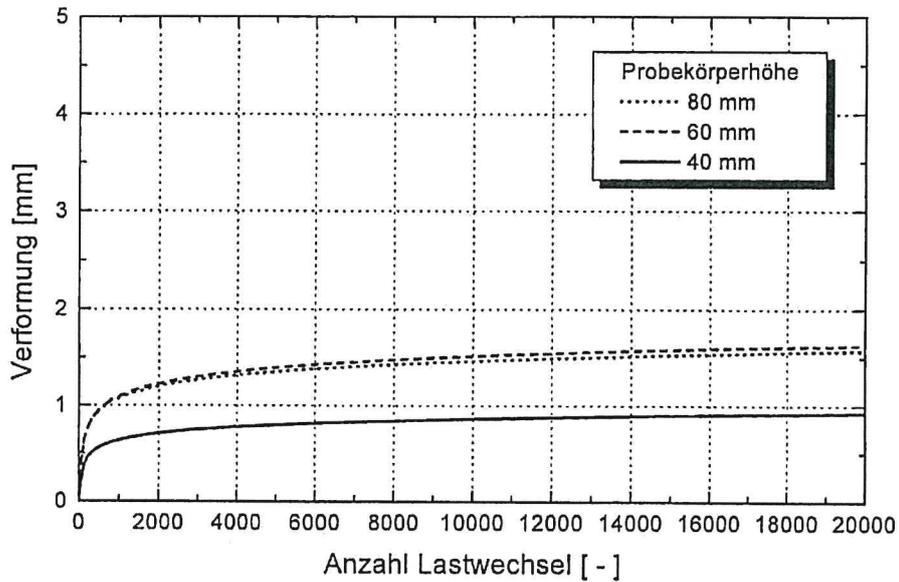
T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Probekörperhöhe in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



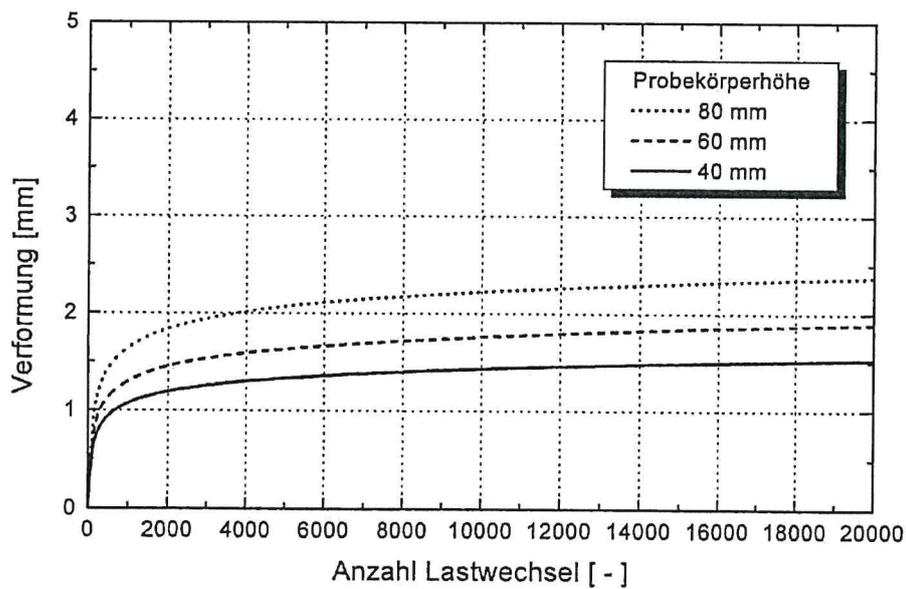
OPA 0/8

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

 $\sigma_0 = 0,8 \text{ MPa}$

0,1 s oLp



OPA 0/8

T = +40 °C

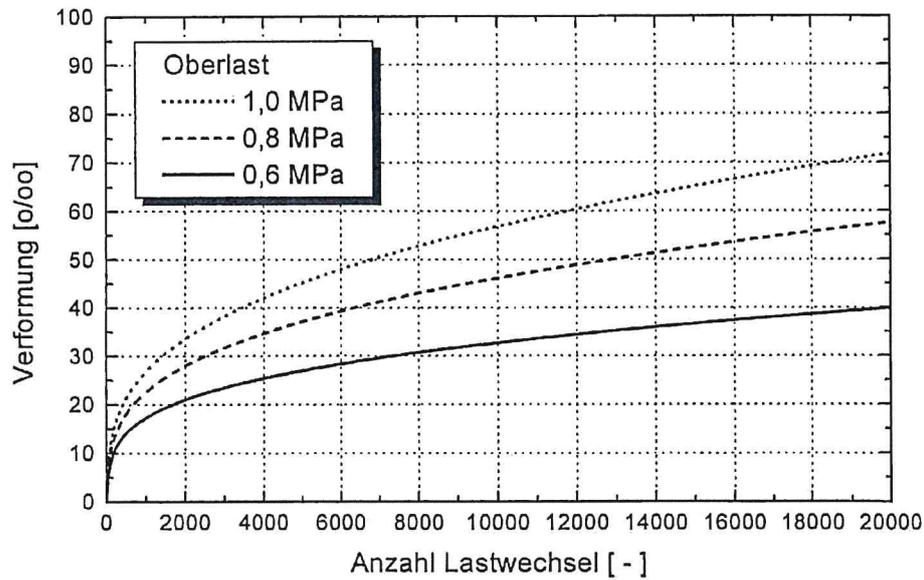
Ø = 150/60 mm

 $\sigma_0 = 0,8 \text{ MPa}$

0,1 s oLp

Anhang 1.5

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



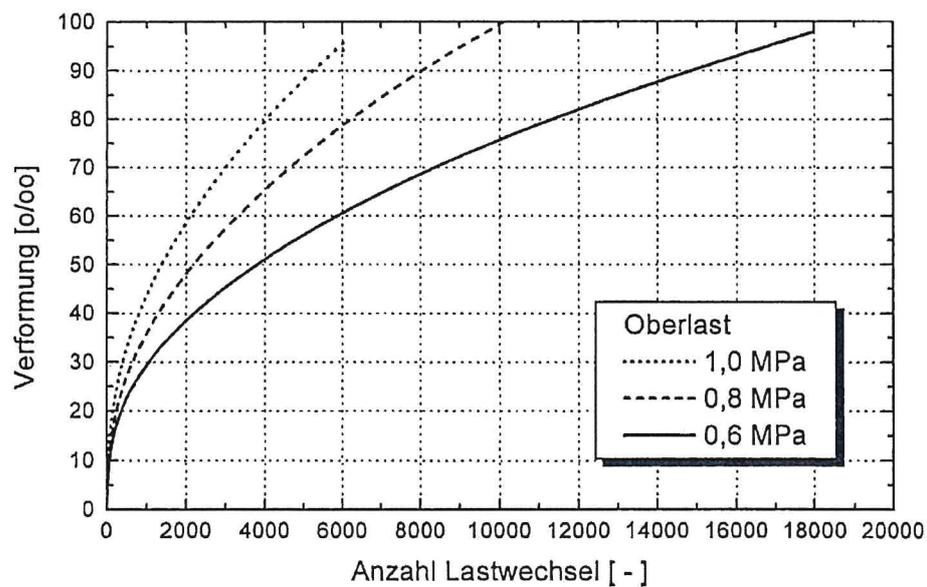
GA 0/8

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



GA 0/8

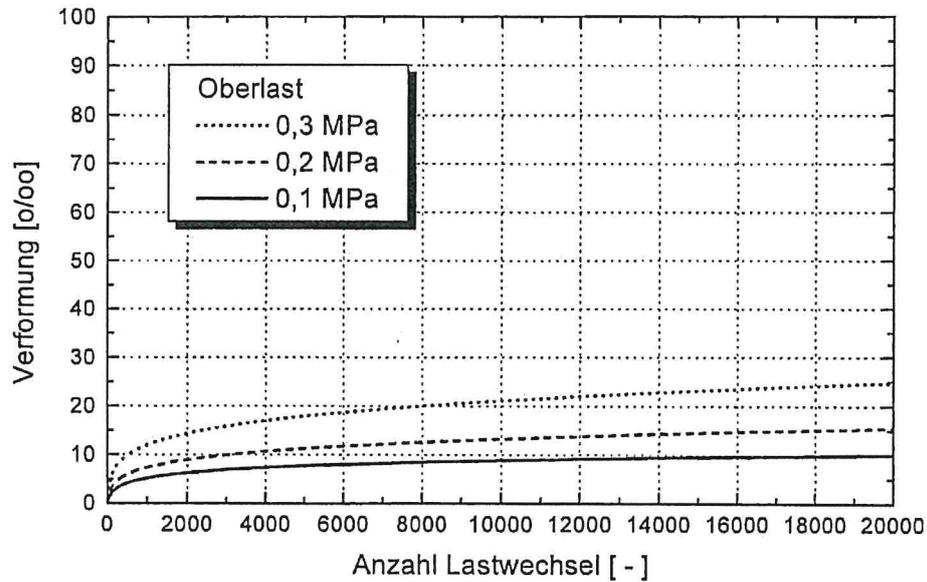
T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



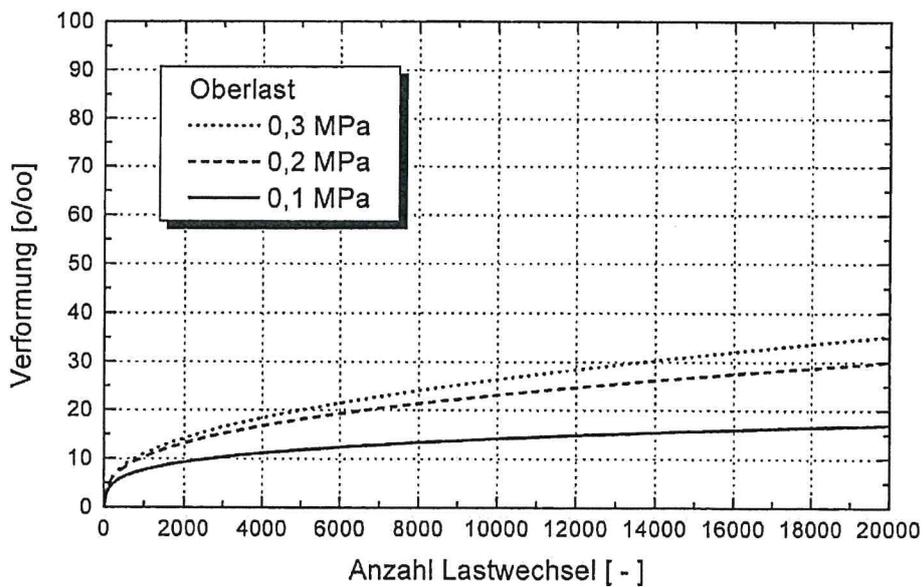
GA 0/8

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



GA 0/8

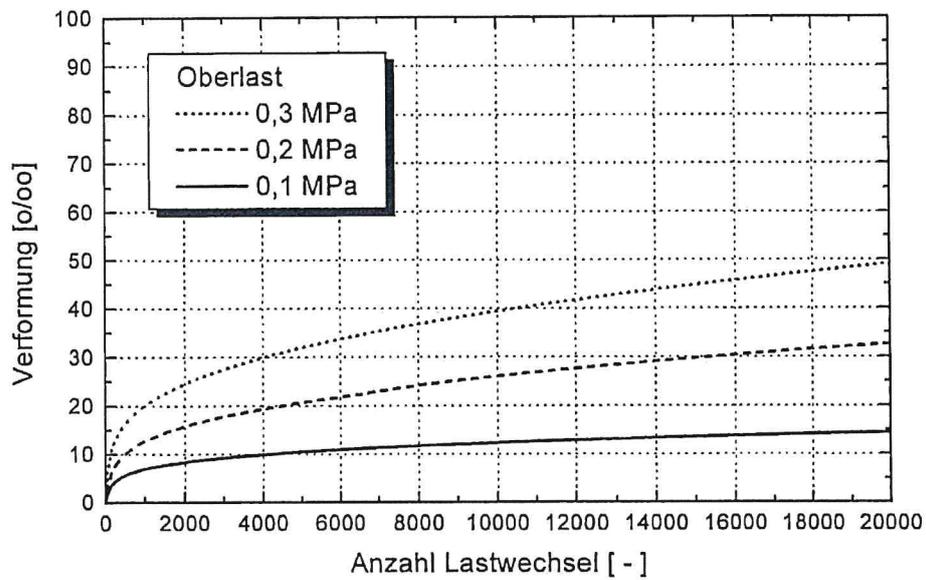
T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Oberlast in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



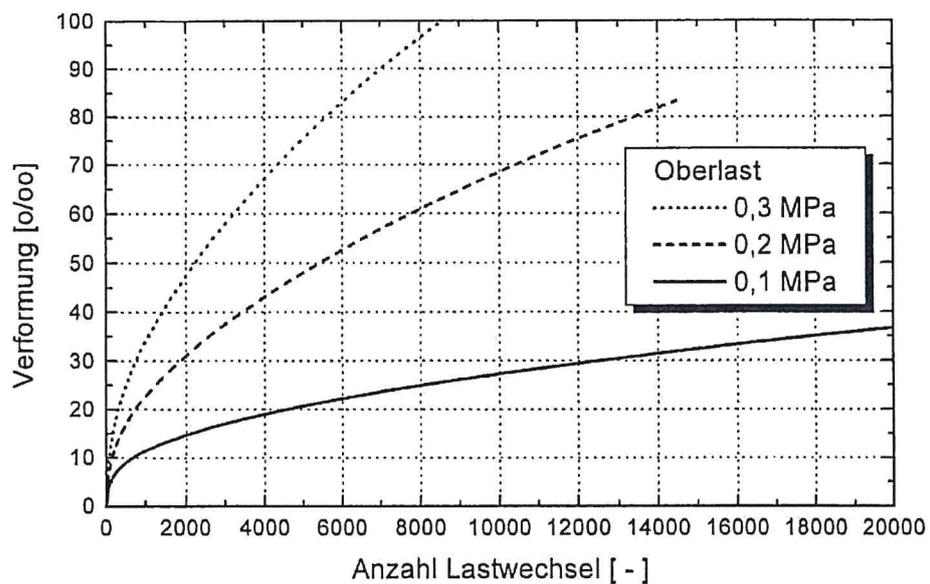
GA 0/8

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,1 s oLp



GA 0/8

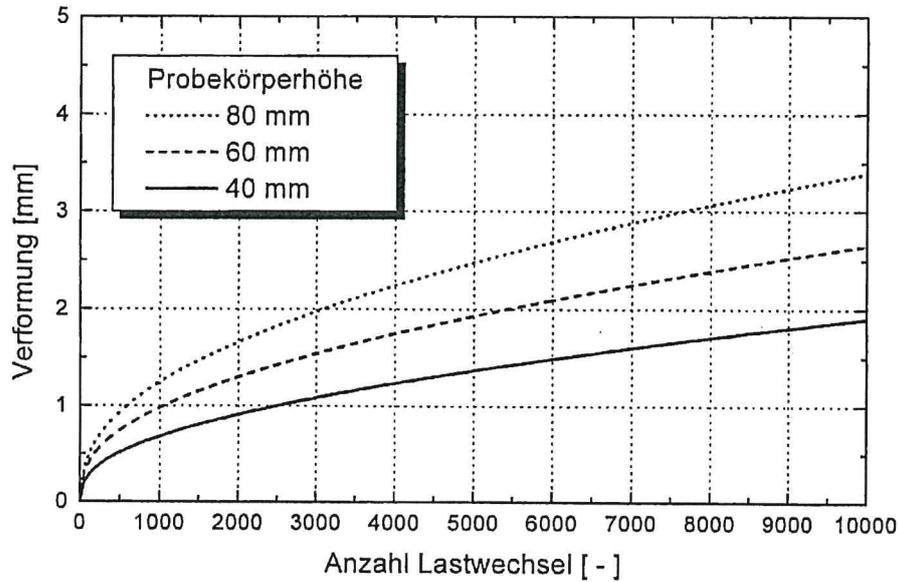
T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

h = 40 mm

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Probekörperhöhe in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



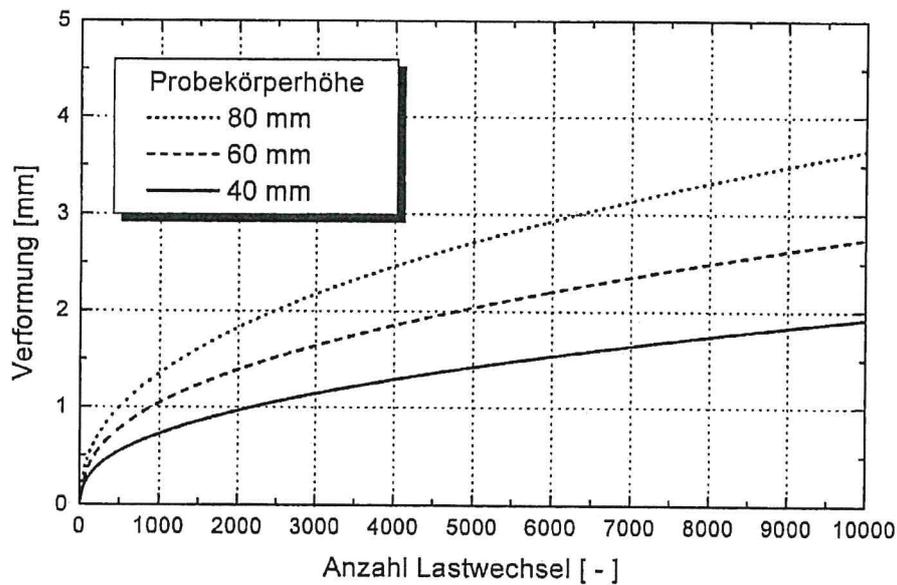
GA 0/8

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

 $\sigma_0 = 0,15$ MPa

0,2 s mLp



GA 0/8

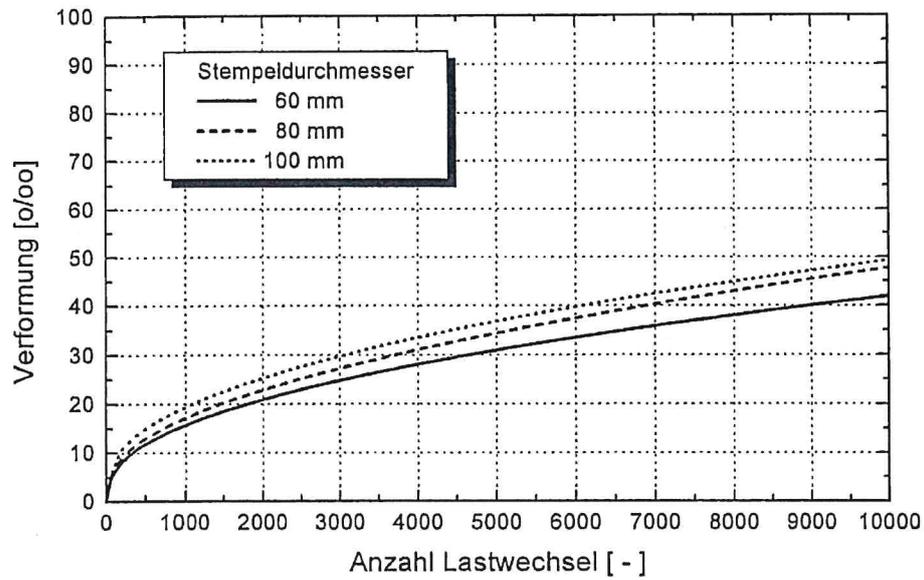
T = +50 °C

Ø = 150/60 mm

 $\sigma_0 = 0,15$ MPa

0,2 s mLp

Mittelwerte der Verformungskurven bei Variation der Stempeldurchmesser in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel



GA 0/8

 $T = +50 \text{ }^\circ\text{C}$ Probekörper
 $\varnothing = 200 \text{ mm}$ $\sigma_0 = 0,15 \text{ MPa}$

0,2 s mLp

Anhang 2.1

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
AB 0/11	40	0,1 s oLp	0,6	1	6,616	7,390	7,685
				2	9,174	11,042	11,878
				3	-	-	-
				Mittel	7,895	9,216	9,782
				Stdabw.	1,809	2,582	2,965
			0,8	1	10,041	11,974	12,856
				2	14,514	16,648	17,584
				3	10,349	12,362	13,325
				Mittel	11,635	13,661	14,588
				Stdabw.	2,498	2,594	2,605
			1,0	1	17,607	20,039	21,128
				2	15,860	18,431	19,651
		3		18,917	21,848	23,221	
		Mittel		17,461	20,106	21,333	
		Stdabw.		1,534	1,709	1,794	
		0,2 s mLp	0,6	1	27,295	33,201	36,699
				2	19,252	23,533	25,862
				3	19,071	23,739	26,502
				Mittel	21,873	26,824	29,688
				Stdabw.	4,697	5,523	6,080
			0,8	1	27,092	34,682	39,687
				2	26,440	33,545	37,723
				3	25,622	32,467	36,536
				Mittel	26,385	33,565	37,982
Stdabw.	0,737			1,108	1,591		
1,0	1		36,510	46,062	51,873		
	2		38,220	49,527	56,616		
	3	28,764	36,762	41,572			
	Mittel	34,498	44,117	50,020			
	Stdabw.	5,039	6,601	7,691			

Tabelle A2.1.1: Verformungen des Asphaltbetons 0/11 bei T = +40 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Prüf- temperatur	Belas- tungsart	Ober- spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
AB 0/11	45	0,1 s oLp	0,6	1	15,763	18,186	19,360
				2	-	-	-
				3	15,943	18,420	19,599
				Mittel	15,853	18,303	19,480
				Stdabw.	0,127	0,165	0,169
			0,8	1	15,435	17,889	19,143
				2	15,961	18,643	20,004
				3	16,499	19,128	20,395
				Mittel	15,965	18,557	19,847
				Stdabw.	0,532	0,619	0,641
			1,0	1	19,415	22,749	24,437
				2	26,138	30,022	32,128
		3		21,369	24,910	26,607	
		Mittel		22,307	25,894	27,724	
		Stdabw.		3,458	3,735	3,965	
		0,2 s mLp	0,6	1	26,951	35,002	40,257
				2	20,561	27,314	31,720
				3	-	-	-
				Mittel	23,756	31,158	35,989
				Stdabw.	4,518	5,436	6,037
			0,8	1	39,371	50,848	58,018
				2	26,063	35,049	41,847
				3	26,393	35,757	42,188
				Mittel	30,609	40,551	47,351
Stdabw.	7,590			8,924	9,239		
1,0	1		43,377	57,273	66,273		
	2		27,304	39,609	48,844		
	3	-	-	-			
	Mittel	35,341	48,441	57,559			
	Stdabw.	11,365	12,490	12,324			

Tabelle A2.1.2: Verformungen des Asphaltbetons 0/11 bei T = +45 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
AB 0/11	50	0,1 s oLp	0,6	1	14,584	17,138	18,577
				2	12,852	15,241	16,570
				3	17,309	20,062	21,464
				Mittel	14,915	17,480	18,870
				Stdabw.	2,247	2,429	2,460
			0,8	1	17,947	21,043	22,665
				2	19,859	23,705	25,686
				3	22,140	26,047	27,983
				Mittel	19,982	23,598	25,445
				Stdabw.	2,099	25,04	2,667
			1,0	1	17,974	21,727	23,795
				2	18,161	21,931	23,998
		3		18,263	22,725	25,034	
		Mittel		18,133	22,128	24,276	
		Stdabw.		0,147	0,527	0,665	
		0,2 s mLp	0,6	1	34,346	44,823	52,483
				2	26,812	35,406	41,499
				3	-	-	-
				Mittel	30,579	40,114	46,991
				Stdabw.	5,327	6,659	7,767
			0,8	1	(32,009)	-	-
				2	42,716	56,848	67,005
				3	35,054	46,584	54,759
				Mittel	36,593	51,716	60,882
				Stdabw.	5,517	7,258	8,659
			1,0	1	41,417	56,823	67,847
				2	40,118	54,145	64,036
3	48,076			66,808	-		
Mittel	43,204			59,259	65,942		
Stdabw.	4,269			6,674	2,695		

Tabelle A2.1.3: Verformungen des Asphaltbetons 0/11 bei T = +50 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Durchmesser Probekörper / Stempel	Probekörper- höhe	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	mm	mm	-	mm	mm	mm
AB 0/11	200 / 80	40	1	0,4127	0,4921	0,5284
			2	0,5965	0,6842	0,7227
			3	0,4212	0,5031	0,5423
			Mittel	0,4768	0,5598	0,5978
			Stdabw.	0,1038	0,1078	0,1084
		60	1	1,2195	1,4382	1,5411
			2	-	-	-
			3	1,1278	1,3400	1,4357
			Mittel	1,1736	1,3891	1,4884
			Stdabw.	0,0648	0,0694	0,0745
		80	1	1,6334	1,9129	2,0478
			2	1,5396	1,7999	1,9269
	3		1,6529	1,9470	2,0859	
	Mittel		1,6086	1,8866	2,0202	
	Stdabw.		0,0606	0,0770	0,0830	
	150 / 60	40	1	0,7750	0,9001	0,9570
			2	0,5632	0,6944	0,7461
			3	0,7745	0,9287	0,9948
			Mittel	0,7042	0,8411	0,8993
			Stdabw.	0,1221	0,1278	0,1340
		60	1	1,0722	1,3029	1,4089
			2	1,6231	1,8819	2,0001
			3	1,4340	1,6697	1,7823
			Mittel	1,3764	1,6182	1,7304
Stdabw.			0,2799	0,2929	0,2990	
80		1	1,7050	2,0054	2,1528	
		2	1,5908	1,8621	1,9818	
	3	1,5942	1,8888	2,0174		
	Mittel	1,6300	1,9188	2,0507		
	Stdabw.	0,0650	0,0762	0,0902		

Tabelle A2.1.4: Verformungen des Asphaltbetons 0/11 bei T = +40 °C
 Belastungsart = 0,1 s ohne Lastpause
 Oberspannung = 0,8 MPa

Asphalt	Variation	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	-	-	‰	‰	‰
AB 0/11	Referenz	1	(32,009)	-	-
		2	42,716	56,848	67,005
		3	35,054	46,584	54,759
		Mittel	36,593	51,716	60,882
		Stdabw.	5,517	7,258	8,659
	Bindemittel- gehalt	1	29,091	38,413	45,155
		2	31,341	41,837	-
		3	30,851	40,891	47,311
		Mittel	30,428	40,380	46,233
		Stdabw.	1,183	1,768	1,525
	Korngrößen- verteilung	1	31,749	42,336	-
		2	30,387	42,824	52,116
		3	29,922	39,716	-
		Mittel	30,686	41,625	52,116
		Stdabw.	0,949	1,671	-

Tabelle A2.1.5: Verformungen des Asphaltbetons 0/11 bei $T = +50\text{ °C}$
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm
 Oberspannung = 0,8 MPa
 Belastungsart = 0,2 s mit Lastpause

Wenn möglich werden auch die Verformungen nach 20.000 Lastwechseln angegeben, obwohl der Versuch nach 10.000 Lastwechseln beendet ist.

Anhang 2.2

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
SMA 0/11 S	40	0,1 s oLp	0,6	1	13,228	14,865	15,555
				2	16,048	18,342	19,448
				3	14,105	15,939	16,673
				Mittel	14,460	16,382	17,225
				Stdabw.	1,4432	1,7803	2,0044
			0,8	1	14,780	17,094	18,160
				2	14,673	16,500	17,383
				3	14,138	16,034	16,877
				Mittel	14,530	16,543	17,473
				Stdabw.	0,3440	0,5313	0,6463
			1,0	1	14,927	17,342	18,412
				2	17,541	19,750	20,774
				3	14,781	17,022	18,231
				Mittel	15,750	18,038	19,139
				Stdabw.	1,5531	1,4912	1,4188
		0,2 s mLp	0,6	1	15,611	18,717	-
				2	16,906	21,495	24,733
				3	18,623	23,630	26,390
				Mittel	17,047	21,281	25,562
				Stdabw.	1,5109	2,4635	1,1717
			0,8	1	25,973	32,170	36,081
				2	22,537	28,624	32,507
				3	20,792	26,821	30,530
				Mittel	23,101	29,205	33,039
				Stdabw.	2,6361	2,7214	2,814
			1,0	1	24,884	31,724	36,162
				2	25,466	33,080	38,574
3	23,732	30,465		34,400			
Mittel	24,694	31,756		36,379			
Stdabw.	0,882	1,308		2,0954			

Tabelle A2.2.1: Verformungen des Splittmastixasphalts 0/11 S bei T = +40 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
SMA 0/11 S	45	0,1 s oLp	0,6	1	13,815	15,686	16,553
				2	11,313	12,926	13,682
				3	12,740	14,682	15,593
				Mittel	12,623	14,431	15,276
				Stdabw.	1,255	1,397	1,462
			0,8	1	12,867	14,870	15,810
				2	12,957	15,081	16,136
				3	15,185	17,215	18,106
				Mittel	13,670	15,722	16,684
				Stdabw.	1,313	1,297	1,242
			1,0	1	16,823	19,540	20,858
				2	17,673	20,078	21,248
		3		13,473	15,300	16,180	
		Mittel		15,990	18,306	19,429	
		Stdabw.		2,221	2,617	2,820	
		0,2 s mLp	0,6	1	21,026	26,280	28,815
				2	19,956	25,402	28,996
				3	17,635	22,228	24,917
				Mittel	19,539	24,637	27,576
				Stdabw.	1,734	2,132	2,305
			0,8	1	27,146	36,349	41,966
				2	22,754	28,823	32,513
				3	21,476	28,487	33,307
				Mittel	23,792	31,220	35,929
Stdabw.	2,974			4,445	5,244		
1,0	1		24,751	34,737	40,362		
	2		24,207	32,804	37,906		
	3	26,739	36,434	41,770			
	Mittel	25,232	34,658	40,013			
	Stdabw.	1,333	1,816	1,956			

Tabelle A2.2.2: Verformungen des Splittmastixasphalts 0/11 S bei T = +45 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
SMA 0/11 S	50	0,1 s oLp	0,6	1	13,344	15,457	16,531
				2	14,397	16,707	17,927
				3	13,524	15,723	16,774
				Mittel	13,755	15,962	17,077
				Stdabw.	0,5632	0,6585	0,7458
			0,8	1	12,673	14,667	15,636
				2	14,197	16,637	17,863
				3	15,815	18,247	19,455
				Mittel	14,228	16,517	17,651
				Stdabw.	1,5712	1,793	1,9183
			1,0	1	15,046	17,569	18,891
				2	-	-	-
		3		13,822	15,954	17,090	
		Mittel		14,434	16,762	17,990	
		Stdabw.		0,8655	1,1420	1,2735	
		0,2 s mLp	0,6	1	20,103	27,818	32,948
				2	19,337	24,521	27,632
				3	20,082	25,786	29,086
				Mittel	19,841	26,042	29,889
				Stdabw.	0,4363	1,6633	2,7474
			0,8	1	24,789	31,530	36,121
				2	27,542	36,137	41,736
				3	25,520	34,544	39,915
				Mittel	25,950	34,070	39,257
Stdabw.	1,5531			2,3397	2,8647		
1,0	1		30,360	40,880	47,319		
	2		28,185	38,172	44,944		
	3	28,882	40,046	47,189			
	Mittel	29,142	39,699	46,484			
	Stdabw.	1,1106	1,3869	1,3353			

Tabelle A2.2.3: Verformungen des Splittmastixasphalts 0/11 S bei T = +50 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Durchmesser Probekörper / Stempel	Probekörper- höhe	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	mm	mm	-	mm	mm	mm
SMA 0/11 S	200 / 80	40	1	0,6178	0,7145	0,7591
			2	0,6119	0,6880	0,7249
			3	0,5825	0,6606	0,6953
			Mittel	0,6041	0,6877	0,7264
			Stdabw.	0,0189	0,0270	0,0319
		60	1	0,8415	0,9794	1,0431
			2	1,1035	1,2603	1,3409
			3	0,9860	1,1300	1,1909
			Mittel	0,9770	1,1232	1,1916
			Stdabw.	0,1312	0,1406	0,1489
		80	1	1,2229	1,4238	1,5173
			2	1,1966	1,3848	1,4767
			3	1,1371	1,3179	1,3988
			Mittel	1,1855	1,3755	1,4643
			Stdabw.	0,0440	0,0536	0,0602
	150 / 60	40	1	1,2138	1,3727	1,4354
			2	0,7975	0,9386	1,0103
			3	1,6377	1,8537	1,9430
			Mittel	1,2163	1,3883	1,4629
			Stdabw.	0,4201	0,4578	0,4670
		60	1	1,8230	2,0992	2,2262
			2	1,3246	1,5722	1,6928
			3	1,1258	1,3167	1,4139
			Mittel	1,4245	1,6627	1,7776
			Stdabw.	0,3592	0,3990	0,4127
		80	1	2,0938	2,4546	2,6267
			2	1,6449	1,9962	2,1761
			3	1,9961	2,3828	2,5469
			Mittel	1,9116	2,2779	2,4499
			Stdabw.	0,2361	0,2466	0,2405

Tabelle A2.2.4: Verformungen des Splittmastixasphalts 0/11 S bei T = +40 °C
 Belastungsart = 0,1 s ohne Lastpause
 Oberspannung = 0,8 MPa

Asphalt	Variation	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	-	-	‰	‰	‰
SMA 0/11 S	Referenz	1	24,789	31,530	36,121
		2	27,542	36,137	41,736
		3	25,520	34,544	39,915
		Mittel	25,950	34,070	39,257
		Stdabw.	1,5531	2,3397	2,8647
	Bindemittel- gehalt	1	21,240	26,990	-
		2	22,366	29,254	32,997
		3	20,532	26,785	30,478
		Mittel	21,379	27,676	31,738
		Stdabw.	0,925	1,370	1,781
	Korngrößen- verteilung	1	22,674	29,010	32,922
		2	22,837	29,885	-
		3	23,463	29,772	33,505
		Mittel	22,991	29,556	33,214
		Stdabw.	0,417	0,476	0,412

Tabelle A2.2.5: Verformungen des Splittmastixasphalts 0/11 S bei T = +50 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm
 Oberspannung = 0,8 MPa
 Belastungsart = 0,2 s mit Lastpause

Wenn möglich werden auch die Verformungen nach 20.000 Lastwechseln angegeben, obwohl der Versuch nach 10.000 Lastwechseln beendet ist.

Anhang 2.3

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
ABi 0/16	40	0,1 s oLp	0,6	1	7,566	9,214	9,946
				2	8,520	10,301	10,977
				3	8,104	9,838	10,508
				Mittel	8,063	9,784	10,477
				Stdabw.	0,478	0,546	0,516
			0,8	1	9,921	11,911	12,722
				2	9,465	11,246	11,960
				3	8,257	10,074	10,856
				Mittel	9,214	11,077	11,846
				Stdabw.	0,860	0,930	0,938
			1,0	1	10,644	12,592	13,453
				2	10,828	12,867	13,706
		3		12,220	14,291	15,162	
		Mittel		11,231	13,250	14,107	
		Stdabw.		0,862	0,912	0,922	
		0,2 s mLp	0,6	1	14,834	17,393	18,628
				2	15,405	18,632	20,341
				3	14,948	17,816	19,318
				Mittel	15,06	17,947	19,429
				Stdabw.	0,302	0,630	0,862
			0,8	1	15,838	18,429	20,064
				2	14,777	18,478	20,576
				3	14,407	17,373	18,964
				Mittel	15,007	18,093	19,868
Stdabw.	0,743			0,624	0,824		
1,0	1		21,817	26,515	28,977		
	2		17,011	20,715	22,845		
	3	15,732	19,201	21,165			
	Mittel	18,187	22,144	24,329			
	Stdabw.	3,208	3,861	4,112			

Tabelle A2.3.1: Verformungen des Asphaltbinder 0/16 bei T = +40 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 50 mm

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
ABi 0/16	45	0,1 s oLp	0,6	1	9,620	11,339	12,107
				2	8,364	10,084	10,797
				3	9,027	10,846	11,577
				Mittel	9,004	10,756	11,494
				Stdabw.	0,628	0,632	0,659
			0,8	1	8,714	10,586	11,564
				2	9,895	11,706	12,491
				3	10,662	12,772	13,716
				Mittel	9,757	11,688	12,590
				Stdabw.	0,981	1,093	1,079
			1,0	1	10,943	13,064	14,102
				2	10,847	13,075	14,092
		3		11,279	13,460	14,393	
		Mittel		11,023	13,200	14,196	
		Stdabw.		0,227	0,226	0,171	
		0,2 s mLp	0,6	1	12,870	15,823	17,354
				2	10,226	12,445	13,611
				3	9,876	12,398	13,699
				Mittel	10,991	13,555	14,888
				Stdabw.	1,637	1,964	2,136
			0,8	1	14,157	17,837	19,890
				2	13,584	17,260	19,360
				3	-	-	-
				Mittel	13,871	17,549	19,625
Stdabw.	0,405			0,408	0,375		
1,0	1		17,787	22,865	25,886		
	2		16,675	21,539	24,485		
	3	-	-	-			
	Mittel	17,231	22,202	25,186			
	Stdabw.	0,786	0,938	0,991			

Tabelle A2.3.2: Verformungen des Asphaltbinder 0/16 bei T = +45 °C
Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
Probekörperhöhe = 50 mm

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
ABi 0/16	50	0,1 s oLp	0,6	1	7,317	8,780	9,435
				2	9,516	11,088	11,840
				3	8,615	10,109	10,746
				Mittel	8,483	9,992	10,674
				Stdabw.	1,106	1,158	1,204
			0,8	1	10,879	13,090	14,041
				2	12,397	14,338	15,305
				3	12,787	14,963	15,978
				Mittel	12,021	14,130	15,108
				Stdabw.	1,008	0,954	0,983
			1,0	1	12,665	14,609	15,621
				2	13,506	15,707	16,723
				3	14,207	16,760	18,006
				Mittel	13,459	15,692	16,783
				Stdabw.	0,772	1,076	1,194
		0,2 s mLp	0,6	1	-	-	-
				2	16,486	21,191	23,898
				3	14,651	18,886	21,289
				Mittel	15,569	20,039	22,594
				Stdabw.	1,298	1,630	1,845
			0,8	1	17,236	22,332	25,420
				2	-	-	-
				3	17,462	22,088	24,710
				Mittel	17,349	22,210	25,065
				Stdabw.	0,160	0,173	0,502
			1,0	1	20,058	25,5090	28,921
				2	21,527	28,817	33,563
				3	25,634	33,131	37,571
				Mittel	22,406	29,152	33,352
				Stdabw.	2,890	3,822	4,329

Tabelle A2.3.3: Verformungen des Asphaltbinder 0/16 bei T = +50 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 50 mm

Asphalt	Durchmesser Probekörper / Stempel	Probekörper- höhe	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	mm	mm	-	mm	mm	mm
ABi 0/16	200 / 80	40	1	0,5099	0,6122	0,6539
			2	0,4856	0,5769	0,6135
			3	0,4285	0,5228	0,5634
			Mittel	0,4747	0,5706	0,6103
			Stdabw.	0,0418	0,0450	0,0453
		60	1	0,6177	0,7332	0,7831
			2	0,7156	0,8262	0,8705
			3	0,5039	0,6251	0,6725
			Mittel	0,6124	0,7282	0,7754
			Stdabw.	0,1059	0,1006	0,0992
		80	1	0,8916	1,0643	1,1322
			2	0,6822	0,8110	0,8642
			3	0,8917	1,0586	1,1266
			Mittel	0,8218	0,9780	1,0410
			Stdabw.	0,1209	0,1446	0,1531
	150 / 60	40	1	0,7097	0,8850	0,9526
			2	0,5345	0,6514	0,7056
			3	0,9227	1,1631	1,2384
			Mittel	0,7223	0,8998	0,9655
			Stdabw.	0,1944	0,2562	0,2666
		60	1	0,9370	1,1745	1,2640
			2	0,5722	0,7411	0,8093
			3	0,8930	1,1207	1,2013
			Mittel	0,8007	1,0121	1,0915
Stdabw.			0,1991	0,2362	0,2464	
80		1	0,9914	1,2838	1,3967	
		2	0,9027	1,1346	1,2290	
		3	0,9245	1,1631	1,2547	
		Mittel	0,9395	1,1938	1,2935	
		Stdabw.	0,0462	0,0792	0,0903	

Tabelle A2.3.4: Verformungen des Asphaltbinder 0/16 bei T = +40 °C
 Belastungsart = 0,1 s ohne Lastpause
 Oberspannung = 0,8 MPa

Asphalt	Variation	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	-	-	‰	‰	‰
ABi 0/16	Referenz	1	17,236	22,332	25,420
		2	-	-	-
		3	17,462	22,088	24,710
		Mittel	17,3490	22,210	25,065
		Stdabw.	0,1598	0,173	0,502
	Bindemittel- gehalt	1	19,313	24,755	27,694
		2	19,065	25,598	29,287
		3	17,861	23,454	26,614
		Mittel	17,746	24,602	27,865
		Stdabw.	0,777	1,080	1,345
	Korngrößen- verteilung	1	-	-	-
		2	18,816	23,752	-
		3	17,438	22,540	25,177
		Mittel	18,127	23,146	25,177
		Stdabw.	0,974	0,857	-

Tabelle A2.3.5: Verformungen des Asphaltbinders 0/16 bei T = +50 °C

Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm

Probekörperhöhe = 50 mm

Oberspannung = 0,8 MPa

Belastungsart = 0,2 s mit Lastpause

Wenn möglich werden auch die Verformungen nach 20.000 Lastwechseln angegeben, obwohl der Versuch nach 10.000 Lastwechseln beendet ist.

Anhang 2.4

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
OPA 0/8	40	0,1 s oLp	0,6	1	16,517	19,127	20,409
				2	19,717	22,954	24,620
				3	18,902	22,092	23,575
				Mittel	18,379	21,391	22,868
				Stdabw.	1,663	2,008	2,193
			0,8	1	17,647	20,658	22,093
				2	17,607	20,884	22,603
				3	19,334	22,771	24,390
				Mittel	18,196	21,438	23,029
				Stdabw.	0,986	1,160	1,206
			1,0	1	19,634	22,789	24,336
				2	19,861	23,274	24,801
		3		19,464	22,670	24,227	
		Mittel		19,653	22,911	24,455	
		Stdabw.		0,199	0,320	0,305	
		0,2 s mLp	0,6	1	23,190	29,278	32,999
				2	20,998	25,805	28,353
				3	22,400	27,318	30,169
				Mittel	22,196	27,467	30,507
				Stdabw.	1,110	1,741	2,341
			0,8	1	27,572	34,219	38,146
				2	24,499	31,120	35,096
				3	27,384	33,926	37,854
				Mittel	26,485	33,088	37,032
Stdabw.	1,723			1,711	1,683		
1,0	1		28,462	36,070	40,498		
	2		28,977	37,147	41,750		
	3	27,304	35,294	40,495			
	Mittel	28,248	36,170	40,914			
	Stdabw.	0,857	0,931	0,724			

Tabelle A2.4.1: Verformungen des Offenporigen Asphalts 0/8 bei T = +40 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
OPA 0/8	45	0,1 s oLp	0,6	1	17,617	20,364	21,769
				2	13,920	16,673	18,049
				3	15,335	18,108	19,473
				Mittel	15,624	18,382	19,764
				Stdabw.	1,865	1,861	1,877
			0,8	1	19,812	23,134	24,941
				2	16,298	19,635	21,319
				3	18,756	22,311	24,192
				Mittel	18,289	21,693	23,484
				Stdabw.	1,803	1,829	1,912
			1,0	1	21,174	24,632	26,345
				2	19,603	23,256	25,164
		3		21,649	25,875	27,891	
		Mittel		20,809	24,588	26,467	
		Stdabw.		1,071	1,310	1,368	
		0,2 s mLp	0,6	1	22,545	28,052	31,231
				2	23,806	29,959	33,463
				3	22,904	28,589	31,962
				Mittel	23,085	28,867	32,219
				Stdabw.	0,650	0,983	1,138
			0,8	1	25,260	32,546	36,787
				2	22,244	27,849	31,012
				3	23,863	30,103	33,502
				Mittel	23,789	30,166	33,767
Stdabw.	1,509			2,349	2,897		
1,0	1		27,412	34,777	39,384		
	2		27,176	35,410	40,132		
	3	29,036	36,918	41,751			
	Mittel	27,875	35,702	40,422			
	Stdabw.	1,013	1,100	1,210			

Tabelle A2.4.2: Verformungen des Offenporigen Asphalts 0/8 bei T = +45 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
OPA 0/8	50	0,1 s oLp	0,6	1	16,068	19,070	20,561
				2	15,269	17,900	19,264
				3	18,720	22,093	23,885
				Mittel	16,686	19,688	21,237
				Stdabw.	1,807	2,164	2,383
			0,8	1	20,467	24,454	26,522
				2	18,086	21,207	22,970
				3	17,518	20,733	22,508
				Mittel	18,690	22,131	24,000
				Stdabw.	1,565	2,025	2,196
			1,0	1	18,023	21,546	23,386
				2	18,900	22,834	24,945
		3		21,431	25,928	28,359	
		Mittel		19,451	23,436	25,563	
		Stdabw.		1,770	2,252	2,544	
		0,2 s mLp	0,6	1	21,099	26,390	29,253
				2	24,509	30,063	33,201
				3	22,636	28,159	31,504
				Mittel	22,748	28,204	31,319
				Stdabw.	1,708	1,837	1,981
			0,8	1	28,830	37,117	41,856
				2	27,820	35,706	40,444
				3	26,850	33,819	38,043
				Mittel	27,838	35,547	40,114
Stdabw.	0,990			1,655	1,928		
1,0	1		29,941	39,144	45,164		
	2		27,884	35,496	40,045		
	3	30,273	39,132	44,543			
	Mittel	29,366	37,924	43,251			
	Stdabw.	1,294	2,103	2,794			

Tabelle A2.4.3: Verformungen des Offenporigen Asphalts 0/8 bei T = +50 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Durchmesser Probekörper / Stempel	Probekörper- höhe	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	mm	mm	-	mm	mm	mm
OPA 0/8	200 / 80	40	1	0,7024	0,8222	0,8793
			2	0,7060	0,8374	0,9064
			3	0,7888	0,9292	0,9951
			Mittel	0,7324	0,8629	0,9269
			Stdabw.	0,0489	0,0579	0,0606
		60	1	1,2561	1,5027	1,6176
			2	1,2333	1,4549	1,5669
			3	1,3117	1,5901	1,7140
			Mittel	1,2670	1,5159	1,6328
			Stdabw.	0,0403	0,0686	0,0747
		80	1	1,2967	1,5056	1,6103
			2	1,2361	1,4800	1,6094
	3		1,1830	1,4092	1,5160	
	Mittel		1,2386	1,4649	1,5786	
	Stdabw.		0,0569	0,0499	0,0542	
	150 / 60	40	1	1,3041	1,4803	1,5575
			2	1,1418	1,3725	1,4889
			3	1,2335	1,4412	1,5342
			Mittel	1,2265	1,4313	1,5269
			Stdabw.	0,0814	0,0546	0,0349
		60	1	1,4398	1,6597	1,7796
			2	1,4989	1,7652	1,8830
			3	1,5481	1,8462	2,0160
			Mittel	1,4956	1,7570	1,8929
Stdabw.			0,0542	0,0935	0,1185	
80		1	1,6787	1,9990	2,1345	
		2	1,9118	2,2005	2,3246	
	3	2,0940	2,4760	2,6720		
	Mittel	1,8948	2,2252	2,3770		
	Stdabw.	0,2082	0,2395	0,2726		

Tabelle A2.4.4: Verformungen des Offenporigen Asphalts 0/8 bei T = +40 °C
 Belastungsart = 0,1 s ohne Lastpause
 Oberspannung = 0,8 MPa

Asphalt	Variation	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	-	-	‰	‰	‰
OPA 0/8	Referenz	1	28,830	37,117	41,856
		2	27,820	35,706	40,444
		3	26,850	33,819	38,043
		Mittel	27,838	35,547	40,114
		Stdabw.	0,990	1,655	1,928
	Bindemittel- gehalt	1	26,824	35,085	39,589
		2	19,882	25,176	28,526
		3	22,947	29,587	33,810
		Mittel	23,218	29,949	33,975
		Stdabw.	3,479	4,964	5,533
	Korngrößen- verteilung	1	21,763	26,928	29,862
		2	26,427	33,817	38,081
		3	21,381	27,457	30,959
		Mittel	23,190	29,401	32,971
		Stdabw.	2,810	3,834	4,468

Tabelle A2.4.5: Verformungen des Offenporigen Asphalts 0/8 bei $T = +50\text{ °C}$
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm
 Oberspannung = 0,8 MPa
 Belastungsart = 0,2 s mit Lastpause

Wenn möglich werden auch die Verformungen nach 20.000 Lastwechseln angegeben, obwohl der Versuch nach 10.000 Lastwechseln beendet ist.

Anhang 2.5

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
GA 0/8	40	0,1 s oLp	0,6	1	25,038	36,299	44,449
				2	22,277	32,777	39,894
				3	19,561	28,966	35,320
				Mittel	22,292	32,681	39,888
				Stdabw.	2,738	3,667	4,565
			0,8	1	31,794	50,930	65,149
				2	29,044	44,745	55,938
				3	28,976	42,640	51,898
				Mittel	29,938	46,105	57,662
				Stdabw.	1,608	4,309	6,792
			1,0	1	41,654	66,410	84,571
				2	32,494	53,457	69,207
				3	33,968	50,571	61,651
				Mittel	36,039	56,813	71,810
				Stdabw.	4,919	8,436	11,680
		0,2 s mLp	0,6	1	48,377	88,321	*1
				2	44,776	77,737	102,528
				3	33,003	61,036	84,687
				Mittel	42,052	75,698	93,607
				Stdabw.	8,041	13,756	12,615
			0,8	1	53,287	101,460	*1
				2	52,275	94,600	*1
				3	53,311	102,249	*1
				Mittel	52,958	99,436	-
				Stdabw.	0,591	4,207	-
			1,0	1	78,130	*1	*1
				2	57,252	109,159	*1
				3	58,435	103,771	*1
				Mittel	64,606	106,465	-
				Stdabw.	11,727	3,810	-

Tabelle A2.5.1: Verformungen des Gussasphalts 0/8 bei T = +40 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

*1 = Versuch beendet aufgrund maximaler Wegauslenkung

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
GA 0/8	40	0,1 s oLp	0,1	1	5,822	7,924	8,981
				2	7,328	9,665	10,832
				3	6,810	9,016	10,189
				Mittel	6,653	8,868	10,001
				Stdabw.	0,765	0,880	0,940
			0,2	1	6,834	9,685	11,424
				2	9,529	13,099	15,199
				3	12,156	16,991	19,901
				Mittel	9,506	13,258	15,508
				Stdabw.	2,661	3,656	4,247
			0,3	1	14,467	20,649	24,712
				2	14,592	21,255	25,548
		3		16,521	21,355	24,158	
		Mittel		15,193	21,086	24,806	
		Stdabw.		1,152	0,382	0,700	
		0,2 s mLp	0,1	1	8,801	12,645	15,123
				2	10,863	15,665	18,848
				3	-	-	-
				Mittel	9,832	14,155	16,986
				Stdabw.	1,458	2,136	2,634
			0,2	1	15,097	24,062	30,652
				2	11,842	18,512	23,658
				3	15,686	26,876	35,471
				Mittel	14,208	23,150	29,927
Stdabw.	2,070			4,256	5,940		
0,3	1		-	-	-		
	2		16,368	28,416	38,174		
	3	14,418	24,296	32,351			
	Mittel	15,393	26,356	35,262			
	Stdabw.	1,379	2,913	4,117			

Tabelle A2.5.2: Verformungen des Gussasphalts 0/8 bei T = +40 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

Asphalt	Prüf-temperatur	Belas-tungsart	Ober-spannung	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	°C	-	MPa	-	‰	‰	‰
GA 0/8	50	0,1 s oLp	0,1	1	7,320	10,133	11,896
				2	8,387	11,655	13,616
				3	10,797	15,086	17,793
				Mittel	8,835	12,291	14,435
				Stdabw.	1,781	2,537	3,033
			0,2	1	17,385	27,364	34,601
				2	18,348	28,415	35,431
				3	14,709	22,330	27,899
				Mittel	16,814	26,036	32,644
				Stdabw.	1,886	3,252	4,130
			0,3	1	24,110	39,090	50,575
				2	33,611	50,331	62,785
		3		20,565	28,679	34,269	
		Mittel		26,095	39,367	49,210	
		Stdabw.		6,746	10,829	14,307	
		0,2 s mLp	0,1	1	15,134	26,104	34,942
				2	15,619	26,811	36,724
				3	16,971	28,796	38,474
				Mittel	15,908	27,237	36,713
				Stdabw.	0,952	1,396	1,766
			0,2	1	39,677	80,719	*1
				2	31,505	61,046	87,861
				3	31,960	63,472	92,071
				Mittel	34,381	68,412	89,966
				Stdabw.	4,592	10,727	2,977
			0,3	1	50,762	105,295	*1
				2	51,815	107,070	*1
3	55,921			112,852	*1		
Mittel	52,833			108,406	-		
Stdabw.	2,726			3,952	-		

Tabelle A2.5.3: Verformungen des Gussasphalts 0/8 bei T = +50 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm

*1 = Versuch beendet aufgrund maximaler Wegauslenkung

Asphalt	Durchmesser Probekörper / Stempel	Probekörper- höhe	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	mm	mm	-	mm	mm	mm
GA 0/8	200 / 80	40	1	0,9234	1,7247	2,4315
			2	1,1108	2,1622	-
			3	0,9753	1,8345	2,5959
			Mittel	1,0032	1,9071	2,5137
			Stdabw.	0,0968	0,2276	0,1162
		60	1	1,3770	2,4817	-
			2	1,5449	2,9824	4,1726
			3	1,3600	2,6809	-
			Mittel	1,4273	2,7150	4,1726
			Stdabw.	0,1022	0,2521	-
		80	1	-	-	-
			2	1,9159	3,6286	-
			3	1,7361	3,1621	4,2764
			Mittel	1,8260	3,3954	4,2764
			Stdabw.	0,1271	0,3299	-
	150 / 60	40	1	1,0799	1,9454	2,6414
			2	1,1025	1,9388	-
			3	0,9974	1,8821	2,6201
			Mittel	1,0599	1,9221	2,6308
			Stdabw.	0,0553	0,0348	0,0151
		60	1	1,5033	2,7951	-
			2	1,7699	3,1377	4,1902
			3	1,2911	2,3205	3,1772
			Mittel	1,5214	2,7511	3,6837
			Stdabw.	0,2399	0,4104	0,7163
		80	1	2,0693	3,7066	-
			2	1,8644	3,3773	4,5545
3	2,0948		3,8709	-		
Mittel	2,0095		3,6516	4,5545		
Stdabw.	0,1263		0,2514	-		

Tabelle A2.5.4: Verformungen des Gussasphalts 0/8 bei T = +40 °C

Belastungsart = 0,2 s mit Lastpause

Oberspannung = 0,15 MPa

Wenn möglich werden auch die Verformungen nach 20.000 Lastwechseln angegeben, obwohl der Versuch nach 10.000 Lastwechseln beendet ist.

Asphalt	Variation	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	-	-	‰	‰	‰
GA 0/8	Referenz	1	23,282	43,564	61,425
		2	27,648	53,752	-
		3	24,465	46,123	65,299
		Mittel	25,132	47,813	63,362
		Stdabw.	2,258	5,300	2,739
	Bindemittel- gehalt	1	24,466	45,037	-
		2	24,717	46,464	36,050
		3	29,106	53,044	72,321
		Mittel	26,096	48,182	68,186
		Stdabw.	2,609	4,271	5,848
	Korngrößen- verteilung	1	24,639	39,042	-
		2	25,978	41,944	53,561
		3	21,603	34,674	-
		Mittel	24,073	38,553	53,561
		Stdabw.	2,242	3,660	-

Tabelle A2.5.5: Verformungen des Gussasphalts 0/8 bei T = +50 °C
 Durchmesser Probekörper / Stempel = 200 / 80 mm
 Probekörperhöhe = 40 mm
 Oberspannung = 0,15 MPa
 Belastungsart = 0,2 s mit Lastpause

Asphalt	Durchmesser Probekörper / Stempel	Nummer	Dehnung nach 2.500 Lastwechsel	Dehnung nach 10.000 Lastwechsel	Dehnung nach 20.000 Lastwechsel
-	-	-	‰	‰	‰
GA 0/8	200 / 60 mm	1	22,215	40,498	55,270
		2	23,664	43,281	-
		3	-	-	-
		Mittel	22,940	41,890	55,270
		Stdabw.	1,025	1,968	-
	200 / 80 mm	1	23,282	43,564	61,425
		2	27,648	53,752	-
		3	24,465	46,123	65,299
		Mittel	25,132	47,813	63,362
		Stdabw.	2,258	5,300	2,739
	200 / 100 mm	1	27,568	50,290	68,247
		2	28,823	50,627	67,702
		3	26,435	47,272	64,023
		Mittel	27,609	49,396	66,657
		Stdabw.	1,195	1,847	2,298

Tabelle A2.5.6: Verformungen des Gussasphalts 0/8 bei T = +50 °C
 Probekörperhöhe = 40 mm
 Oberspannung = 0,15 MPa
 Belastungsart = 0,2 s mit Lastpause

Wenn möglich werden auch die Verformungen nach 20.000 Lastwechseln angegeben, obwohl der Versuch nach 10.000 Lastwechseln beendet ist.

Anhang 3.1

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte				
Mittelwert der Gruppe 1	:=	9.7817		
Standardabweichung	:=	2.0965		

Mittelwert der Gruppe 2	:=	17.2253		
Standardabweichung	:=	2.0044		

Mittelwert der Gruppe 3	:=	10.4770		
Standardabweichung	:=	0.5162		

Mittelwert der Gruppe 4	:=	22.8680		
Standardabweichung	:=	2.1927		

Ergebnisse der Varianzanalyse				
Gesamtmittelwert	=	15.0880	N = 12	
Mittleres Mittel	=	15.0880		
Q innerhalb	=	26.9749	(FG2 = 8)	
Q zwischen	=	343.5451	(FG1 = 3)	
Q gesamt	=	370.5200	(FG = 11)	
Stand. zw. d. Gruppen	=	6.1783		
Stand. innerh. d. Gru	=	1.8363		
Varianz. innerh. d. Gru	=	3.3719		
Gesamtstandardabw.	=	5.8038		
Testquotient $F^* = 33.96 > 4.07$ (Alpha = 0.05)				
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***				

LSD-Test:				
Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$				
Gruppe	n_i	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD

4	3	22.8680	5.6427	3.4574 Grenze homogener Gruppen

2	3	17.2253	6.7483	3.4574 Grenze homogener Gruppen

3	3	10.4770	0.6953	3.4574
1	3	9.7817		

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen				
4-5	$\hat{F} = 31,70 > 19,0 = F(2;2;0,05)$	ungleich	$\hat{t} = 8,70 > 4,30 = t(2;0,05)$	ungleich
T = +40 °C	Ø = 200/80 mm	$\sigma_0 = 0,6$ MPa	h = 40 mm	0,1 s oLp

- Gruppe 1 = Asphaltbeton
- Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
- Gruppe 3 = Asphaltbinder
- Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt
- Gruppe 5 = Gussasphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Asphalte				
Mittelwert der Gruppe 1	:=	14.5883		
Standardabweichung	:=	2.6049		

Mittelwert der Gruppe 2	:=	17.4733		
Standardabweichung	:=	0.6463		

Mittelwert der Gruppe 3	:=	11.8460		
Standardabweichung	:=	0.9382		

Mittelwert der Gruppe 4	:=	23.0287		
Standardabweichung	:=	1.2062		

Ergebnisse der Varianzanalyse				
Gesamtmittelwert	=	16.7341	N = 12	
Mittleres Mittel	=	16.7341		
Q innerhalb	=	19.0767	(FG2 = 8)	
Q zwischen	=	205.9976	(FG1 = 3)	
Q gesamt	=	225.0742	(FG = 11)	
Stand.zw.d.Gruppen	=	4.7842		
Stand.innerh.d.Gru	=	1.5442		
Varianz.innerh.d.Gru	=	2.3846		
Gesamtstandardabw.	=	4.5234		
Testquotient $F^* = 28.80 > 4.07$ (Alpha = 0.05)				
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***				

LSD-Test:				
Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$				
Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD

4	3	23.0287	5.5553	2.9075 Grenze homogener Gruppen

2	3	17.4733	2.8850	2.9075
1	3	14.5883	2.7423	2.9075
3	3	11.8460		

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen				
4-5	$\hat{F} = 31,70 > 19,0 = F(2;2;0,05)$	ungleich	$\hat{t} = 8,70 > 4,30 = t(2;0,05)$	ungleich
2-3	$\hat{F} = 2,11 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 8,56 > 2,78 = t(4;0,05)$	ungleich
T = +40 °C	Ø = 200/80 mm	$\sigma_0 = 0,8$ MPa	h = 40 mm	0,1 s oLp

- Gruppe 1 = Asphaltbeton
- Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
- Gruppe 3 = Asphaltbinder
- Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt
- Gruppe 5 = Gussasphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 21.3333
Standardabweichung := 1.7938

Mittelwert der Gruppe 2 := 19.1390
Standardabweichung := 1.4188

Mittelwert der Gruppe 3 := 14.1070
Standardabweichung := 0.9224

Mittelwert der Gruppe 4 := 24.4547
Standardabweichung := 0.3048

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 19.7585 N = 12
Mittleres Mittel = 19.7585
Q innerhalb = 12.3493 (FG2 = 8)
Q zwischen = 170.5720 (FG1 = 3)
Q gesamt = 182.9213 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 4.3534
Stand.innerh.d.Gru = 1.2424
Varianz.innerh.d.Gru = 1.5437
Gesamtstandardabw. = 4.0779

Testquotient $F^* = 36.83 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
4	3	24.4547	3.1213	2.3393	Grenze homogener Gruppen
1	3	21.3333	2.1943	2.3393	
2	3	19.1390	5.0320	2.3393	Grenze homogener Gruppen
3	3	14.1070			

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen

4 - 5	$\hat{F} = 1468,4 > 19,0 = F(2;2;0,05)$	ungleich	$\hat{t} = 7,02 > 4,30 = t(2;0,05)$	ungleich
T = +40 °C	Ø = 200/80 mm	σ ₀ = 1,0 MPa	h = 40 mm	0,1 s oLp

- Gruppe 1 = Asphaltbeton
- Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
- Gruppe 3 = Asphaltbinder
- Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt
- Gruppe 5 = Gussasphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte				
Mittelwert der Gruppe 1	:=	29.6877		
Standardabweichung	:=	6.0804		

Mittelwert der Gruppe 2	:=	25.5617		
Standardabweichung	:=	0.8285		

Mittelwert der Gruppe 3	:=	19.4290		
Standardabweichung	:=	0.8619		

Mittelwert der Gruppe 4	:=	30.5070		
Standardabweichung	:=	2.3414		

Ergebnisse der Varianzanalyse				
Gesamtmittelwert	=	26.2963	N = 12	
Mittleres Mittel	=	26.2963		
Q innerhalb	=	87.7655	(FG2 = 8)	
Q zwischen	=	230.7925	(FG1 = 3)	
Q gesamt	=	318.5579	(FG = 11)	
Stand.zw.d.Gruppen	=	5.0640		
Stand.innerh.d.Gru	=	3.3122		
Varianz.innerh.d.Gru	=	10.9707		
Gesamtstandardabw.	=	5.3814		
Testquotient $F^* = 7.01 > 4.07$ (Alpha = 0.05)				
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***				

LSD-Test:				
Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$				
Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD

4	3	30.5070	0.8193	6.2364
1	3	29.6877	4.1260	6.2364
2	3	25.5617	6.1327	6.2364
3	3	19.4290		

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen				
4-2	$\hat{F} = 3,99 < 18,6 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 2,67 < 3,18 = t(2;0,05)$	gleich
4-3	$\hat{F} = 7,38 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 7,69 > 2,78 = t(2;0,05)$	ungleich
1-3	$\hat{F} = 49,76 > 19,0 = F(2;2;0,05)$	ungleich	$\hat{t} = 2,89 < 4,30 = t(2;0,05)$	gleich
$T = +40 \text{ }^\circ\text{C}$	$\varnothing = 200/80 \text{ mm}$	$\sigma_0 = 0,6 \text{ MPa}$	$h = 40 \text{ mm}$	$0,2 \text{ s mLp}$

Gruppe 1 = Asphaltbeton
 Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
 Gruppe 3 = Asphaltbinder
 Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 37.9820
Standardabweichung := 1.5914

Mittelwert der Gruppe 2 := 33.0393
Standardabweichung := 2.8135

Mittelwert der Gruppe 3 := 19.8680
Standardabweichung := 0.8237

Mittelwert der Gruppe 4 := 37.0320
Standardabweichung := 1.6830

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert	=	31.9803	N = 12
Mittleres Mittel	=	31.9803	
Q innerhalb	=	27.9186	(FG2 = 8)
Q zwischen	=	628.1085	(FG1 = 3)
Q gesamt	=	656.0270	(FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen	=	8.3540	
Stand.innerh.d.Gru	=	1.8681	
Varianz.innerh.d.Gru	=	3.4898	
Gesamtstandardabw.	=	7.7226	

Testquotient $F^* = 59.99 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	37.9820	0.9500	3.5173	
4	3	37.0320	3.9927	3.5173	Grenze homogener Gruppen
2	3	33.0393	13.1713	3.5173	Grenze homogener Gruppen
3	3	19.8680			

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 0,8$ MPa

h = 40 mm

0,2 s mLp

**Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle
Asphalte**

Mittelwert der Gruppe 1 := 50.0203
Standardabweichung := 7.6912

Mittelwert der Gruppe 2 := 36.3787
Standardabweichung := 2.0954

Mittelwert der Gruppe 3 := 24.3290
Standardabweichung := 4.1120

Mittelwert der Gruppe 4 := 40.9143
Standardabweichung := 0.7237

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 37.9106 N = 12
Mittleres Mittel = 37.9106
Q innerhalb = 161.9556 (FG2 = 8)
Q zwischen = 1027.4243 (FG1 = 3)
Q gesamt = 1189.3800 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 10.6845
Stand.innerh.d.Gru = 4.4994
Varianz.innerh.d.Gru = 20.2445
Gesamtstandardabw. = 10.3983

Testquotient $F^* = 16.92 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	50.0203	9.1060	8.4716	Grenze homogener Gruppen
4	3	40.9143	4.5357	8.4716	
2	3	36.3787	12.0497	8.4716	Grenze homogener Gruppen
3	3	24.3290			

T = +40 °C	Ø = 200/80 mm	σ ₀ = 1,0 MPa	h = 40 mm	0,2 s mLp
------------	---------------	--------------------------	-----------	-----------

Anhang 3.2

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte				
Mittelwert der Gruppe 1 := 19.4797				
Standardabweichung := 0.1195				

Mittelwert der Gruppe 2 := 15.2760				
Standardabweichung := 1.4615				

Mittelwert der Gruppe 3 := 11.4937				
Standardabweichung := 0.6590				

Mittelwert der Gruppe 4 := 19.7637				
Standardabweichung := 1.8770				

Ergebnisse der Varianzanalyse				
Gesamtmittelwert	=	16.5033	N =	12
Mittleres Mittel	=	16.5033		
Q innerhalb	=	12.2150	(FG2 =	8)
Q zwischen	=	138.2743	(FG1 =	3)
Q gesamt	=	150.4893	(FG =	11)
Stand.zw.d.Gruppen	=	3.9197		
Stand.innerh.d.Gru	=	1.2357		
Varianz.innerh.d.Gru	=	1.5269		
Gesamtstandardabw.	=	3.6988		
Testquotient $F^* = 30.19 > 4.07$ (Alpha = 0.05)				
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***				

LSD-Test:				
Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$				
Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD

4	3	19.7637	0.2840	2.3266
1	3	19.4797	4.2037	2.3266

2	3	15.2760	3.7823	2.3266

3	3	11.4937		

T = +45 °C	Ø = 200/80 mm	σ ₀ = 0,6 MPa	h = 40 mm	0,1 s oLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 19.8473
Standardabweichung := 0.6405

Mittelwert der Gruppe 2 := 16.6840
Standardabweichung := 1.2422

Mittelwert der Gruppe 3 := 12.5903
Standardabweichung := 1.0794

Mittelwert der Gruppe 4 := 23.4840
Standardabweichung := 1.9120

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 18.1514 N = 12
Mittleres Mittel = 18.1514
Q innerhalb = 13.5485 (FG2 = 8)
Q zwischen = 193.1747 (FG1 = 3)
Q gesamt = 206.7232 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 4.6329
Stand.innerh.d.Gru = 1.3014
Varianz.innerh.d.Gru = 1.6936
Gesamtstandardabw. = 4.3351

Testquotient $F^* = 38.02 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
4	3	23.4840	3.6367	2.4503	Grenze homogener Gruppen
1	3	19.8473	3.1633	2.4503	Grenze homogener Gruppen
2	3	16.6840	4.0937	2.4503	Grenze homogener Gruppen
3	3	12.5903			

T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 0,8$ MPa

h = 40 mm

0,1 s oLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 27.7240
Standardabweichung := 3.9653

Mittelwert der Gruppe 2 := 19.4287
Standardabweichung := 2.8202

Mittelwert der Gruppe 3 := 14.1957
Standardabweichung := 0.1710

Mittelwert der Gruppe 4 := 26.4667
Standardabweichung := 1.3676

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 21.9538 N = 12
Mittleres Mittel = 21.9537
Q innerhalb = 51.1530 (FG2 = 8)
Q zwischen = 360.6782 (FG1 = 3)
Q gesamt = 411.8312 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 6.3305
Stand.innerh.d.Gru = 2.5287
Varianz.innerh.d.Gru = 6.3941
Gesamtstandardabw. = 6.1188

Testquotient $F^* = 18.80 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	27.7240	1.2573	4.7611	
4	3	26.4667	7.0380	4.7611	Grenze homogener Gruppen
2	3	19.4287	5.2330	4.7611	Grenze homogener Gruppen
3	3	14.1957			

T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 1,0$ MPa

h = 40 mm

0,1 s oLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 35.9887
Standardabweichung := 4.2685

Mittelwert der Gruppe 2 := 27.5760
Standardabweichung := 2.3045

Mittelwert der Gruppe 3 := 14.8880
Standardabweichung := 2.1361

Mittelwert der Gruppe 4 := 32.2187
Standardabweichung := 1.1379

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 27.6678 N = 12
Mittleres Mittel = 27.6678
Q innerhalb = 58.7773 (FG2 = 8)
Q zwischen = 759.8367 (FG1 = 3)
Q gesamt = 818.6140 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 9.1884
Stand.innerh.d.Gru = 2.7106
Varianz.innerh.d.Gru = 7.3472
Gesamtstandardabw. = 8.6267

Testquotient $F^* = 34.47 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
1	3	35.9887	3.7700	5.1036
4	3	32.2187	4.6427	5.1036
2	3	27.5760	12.6880	5.1036 Grenze homogener Gruppen
3	3	14.8880		

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen

1-4	$\hat{F} = 6,86 < 18,5 = F(1;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 2,33 > 3,18 = t(3;0,05)$	gleich
T = +45 °C	Ø = 200/80 mm	$\sigma_0 = 0,6$ MPa	h = 40 mm	0,2 s mLp

Gruppe 1 = Asphaltbeton
Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
Gruppe 3 = Asphaltbinder
Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 47.3510
Standardabweichung := 9.2395

Mittelwert der Gruppe 2 := 35.9287
Standardabweichung := 5.2435

Mittelwert der Gruppe 3 := 19.6250
Standardabweichung := 0.2650

Mittelwert der Gruppe 4 := 33.7670
Standardabweichung := 2.8966

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 34.1679 N = 12
Mittleres Mittel = 34.1679
Q innerhalb = 242.6459 (FG2 = 8)
Q zwischen = 1165.6531 (FG1 = 3)
Q gesamt = 1408.2990 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 11.3806
Stand.innerh.d.Gru = 5.5073
Varianz.innerh.d.Gru = 30.3307
Gesamtstandardabw. = 11.3149

Testquotient $F^* = 12.81 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	47.3510	11.4223	10.3694	Grenze homogener Gruppen
2	3	35.9287	2.1617	10.3694	
4	3	33.7670	14.1420	10.3694	Grenze homogener Gruppen
3	3	19.6250			

T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 0,8$ MPa

h = 40 mm

0,2 s mLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 57.5587
Standardabweichung := 8.7145

Mittelwert der Gruppe 2 := 40.0127
Standardabweichung := 1.9555

Mittelwert der Gruppe 3 := 25.1857
Standardabweichung := 0.7005

Mittelwert der Gruppe 4 := 40.4223
Standardabweichung := 1.2099

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 40.7948 N = 12
Mittleres Mittel = 40.7948
Q innerhalb = 163.4424 (FG2 = 8)
Q zwischen = 1576.2682 (FG1 = 3)
Q gesamt = 1739.7105 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 13.2341
Stand.innerh.d.Gru = 4.5200
Varianz.innerh.d.Gru = 20.4303
Gesamtstandardabw. = 12.5760

Testquotient $F^* = 25.72 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	57.5587	17.1363	8.5104	Grenze homogener Gruppen
4	3	40.4223	0.4097	8.5104	
2	3	40.0127	14.8270	8.5104	Grenze homogener Gruppen
3	3	25.1857			

T = +45 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 1,0$ MPa

h = 40 mm

0,2 s mLp

Gruppe 1 = Asphaltbeton

Gruppe 2 = Splittmastixasphalt

Gruppe 3 = Asphaltbinder

Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt

Anhang 3.3

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle
Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 18.8703
Standardabweichung := 2.4602

Mittelwert der Gruppe 2 := 17.0773
Standardabweichung := 0.7458

Mittelwert der Gruppe 3 := 10.6737
Standardabweichung := 1.2041

Mittelwert der Gruppe 4 := 21.2367
Standardabweichung := 2.3834

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 16.9645 N = 12
Mittleres Mittel = 16.9645
Q innerhalb = 27.4786 (FG2 = 8)
Q zwischen = 184.4127 (FG1 = 3)
Q gesamt = 211.8913 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 4.5266
Stand.innerh.d.Gru = 1.8533
Varianz.innerh.d.Gru = 3.4348
Gesamtstandardabw. = 4.3889

Testquotient $F^* = 17.90 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
4	3	21.2367	2.3663	3.4895	
1	3	18.8703	1.7930	3.4895	
2	3	17.0773	6.4037	3.4895	Grenze homogener Gruppen
3.	3	10.6737			

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen

2-4	$\hat{F} = 10,21 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 2,88 > 2,78 = t(4;0,05)$	ungleich
T = +50 °C	Ø = 200/80 mm	$\sigma_0 = 0,6 \text{ MPa}$	h = 40 mm	0,1 s oLp

- Gruppe 1 = Asphaltbeton
- Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
- Gruppe 3 = Asphaltbinder
- Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Asphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 25.4447
Standardabweichung := 2.6672

Mittelwert der Gruppe 2 := 17.6513
Standardabweichung := 1.9183

Mittelwert der Gruppe 3 := 15.1080
Standardabweichung := 0.9834

Mittelwert der Gruppe 4 := 24.0000
Standardabweichung := 2.1963

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 20.5510 N = 12
Mittleres Mittel = 20.5510
Q innerhalb = 33.1692 (FG2 = 8)
Q zwischen = 221.6336 (FG1 = 3)
Q gesamt = 254.8028 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 4.9625
Stand.innerh.d.Gru = 2.0362
Varianz.innerh.d.Gru = 4.1461
Gesamtstandardabw. = 4.8129

Testquotient $F^* = 17.82 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	25.4447	1.4447	3.8339	
4	3	24.0000	6.3487	3.8339	Grenze homogener Gruppen
2	3	17.6513	2.5433	3.8339	
3	3	15.1080			

T = +50 °C	Ø = 200/80 mm	σ ₀ = 0,8 MPa	h = 40 mm	0,1 s oLp
------------	---------------	--------------------------	-----------	-----------

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 24.2757
Standardabweichung := 0.6645

Mittelwert der Gruppe 2 := 17.9903
Standardabweichung := 0.9005

Mittelwert der Gruppe 3 := 16.7833
Standardabweichung := 1.1936

Mittelwert der Gruppe 4 := 25.5633
Standardabweichung := 2.5435

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 21.1532 N = 12
Mittleres Mittel = 21.1532
Q innerhalb = 18.2934 (FG2 = 8)
Q zwischen = 174.8955 (FG1 = 3)
Q gesamt = 193.1890 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 4.4083
Stand.innerh.d.Gru = 1.5122
Varianz.innerh.d.Gru = 2.2867
Gesamtstandardabw. = 4.1908

Testquotient $F^* = 25.49 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
4	3	25.5633	1.2877	2.8472	
1	3	24.2757	6.2853	2.8472	Grenze homogener Gruppen
2	3	17.9903	1.2070	2.8472	
3	3	16.7833			

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 1,0$ MPa

h = 40 mm

0,1 s oLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte					
Mittelwert der Gruppe 1 := 46.9910					
Standardabweichung := 5.4920					

Mittelwert der Gruppe 2 := 29.8887					
Standardabweichung := 2.7474					

Mittelwert der Gruppe 3 := 22.5937					
Standardabweichung := 1.3045					

Mittelwert der Gruppe 4 := 31.3193					
Standardabweichung := 1.9805					

Ergebnisse der Varianzanalyse					
Gesamtmittelwert = 32.6982 N = 12					
Mittleres Mittel = 32.6982					
Q innerhalb = 86.6684 (FG2 = 8)					
Q zwischen = 948.5416 (FG1 = 3)					
Q gesamt = 1035.2100 (FG = 11)					
Stand.zw.d.Gruppen = 10.2661					
Stand.innerh.d.Gru = 3.2914					
Varianz.innerh.d.Gru = 10.8336					
Gesamtstandardabw. = 9.7010					
Testquotient F* = 29.19 > 4.07 (Alpha = 0.05)					
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***					

LSD-Test:					
Tabellenwert t(n-k)= 2.306 mit N-K=8					
Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	

1	3	46.9910	15.6717	6.1973	Grenze homogener Gruppen

4	3	31.3193	1.4307	6.1973	
2	3	29.8887	7.2950	6.1973	Grenze homogener Gruppen

3	3	22.5937			

T = +50 °C	Ø = 200/80 mm	σ ₀ = 0,6 MPa	h = 40 mm	0,2 s mLp	

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 60.8820
Standardabweichung := 6.1230

Mittelwert der Gruppe 2 := 39.2573
Standardabweichung := 2.8647

Mittelwert der Gruppe 3 := 25.0650
Standardabweichung := 0.3550

Mittelwert der Gruppe 4 := 40.1143
Standardabweichung := 1.9278

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 41.3297 N = 12
Mittleres Mittel = 41.3297
Q innerhalb = 99.0797 (FG2 = 8)
Q zwischen = 1957.8141 (FG1 = 3)
Q gesamt = 2056.8938 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 14.7491
Stand.innerh.d.Gru = 3.5192
Varianz.innerh.d.Gru = 12.3850
Gesamtstandardabw. = 13.6744

Testquotient $F^* = 52.69 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	60.8820	20.7677	6.6261	Grenze homogener Gruppen
4	3	40.1143	0.8570	6.6261	
2	3	39.2573	14.1923	6.6261	Grenze homogener Gruppen
3	3	25.0650			

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 0,8$ MPa

h = 40 mm

0,2 s mLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Asphalte

```

Mittelwert der Gruppe 1 := 65.9417
Standardabweichung      := 1.9055
-----
Mittelwert der Gruppe 2 := 46.4840
Standardabweichung      := 1.3353
-----
Mittelwert der Gruppe 3 := 33.3517
Standardabweichung      := 4.3289
-----
Mittelwert der Gruppe 4 := 43.2507
Standardabweichung      := 2.7935
-----

```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```

Gesamtmittelwert      = 47.2570   N = 12
Mittleres Mittel      = 47.2570
Q innerhalb           = 63.9132   ( FG2 = 8)
Q zwischen            = 1677.3699  ( FG1 = 3)
Q gesamt              = 1741.2831  ( FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen    = 13.6519
Stand.innerh.d.Gru    = 2.8265
Varianz.innerh.d.Gru = 7.9892
Gesamtstandardabw.   = 12.5817

```

Testquotient $F^* = 69.99 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	65.9417	19.4577	5.3219	Grenze homogener Gruppen
2	3	46.4840	3.2333	5.3219	
4	3	43.2507	9.8990	5.3219	Grenze homogener Gruppen
3	3	33.3517			

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 1,0$ MPa

h = 40 mm

0,2 s mLp

Anhang 3.4

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte				
Mittelwert der Gruppe 1 := 0.5978				
Standardabweichung := 0.1084				

Mittelwert der Gruppe 2 := 0.7264				
Standardabweichung := 0.0319				

Mittelwert der Gruppe 3 := 0.6103				
Standardabweichung := 0.0453				

Mittelwert der Gruppe 4 := 0.9269				
Standardabweichung := 0.0606				

Ergebnisse der Varianzanalyse				
Gesamtmittelwert	=	0.7154	N = 12	
Mittleres Mittel	=	0.7154		
Q innerhalb	=	0.0370	(FG2 = 8)	
Q zwischen	=	0.2093	(FG1 = 3)	
Q gesamt	=	0.2462	(FG = 11)	
Stand. zw. d. Gruppen	=	0.1525		
Stand. innerh. d. Gru	=	0.0680		
Varianz innerh. d. Gru	=	0.0046		
Gesamtstandardabw.	=	0.1496		
Testquotient $F^* = 15.09 > 4.07$ (Alpha = 0.05)				
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***				

LSD-Test:				
Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$				
Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
-----	-----	-----	-----	-----
4	3	0.9269	0.2005	0.1280 Grenze homogener Gruppen
-----	-----	-----	-----	-----
2	3	0.7264	0.1162	0.1280
3	3	0.6103	0.0125	0.1280
1	3	0.5978		
Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen				
2-1	$\hat{F} = 11,55 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 1,97 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich
$T = +40 \text{ °C}$	$\text{Ø} = 200/80 \text{ mm}$	$\sigma_0 = 0,8 \text{ MPa}$	$h = 40 \text{ mm}$	$0,1 \text{ s oLp}$

- Gruppe 1 = Asphaltbeton
 Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
 Gruppe 3 = Asphaltbinder
 Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 1.4884
Standardabweichung := 0.0527

Mittelwert der Gruppe 2 := 1.1916
Standardabweichung := 0.1489

Mittelwert der Gruppe 3 := 0.7754
Standardabweichung := 0.0992

Mittelwert der Gruppe 4 := 1.6328
Standardabweichung := 0.0747

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert	=	1.2721	N = 12
Mittleres Mittel	=	1.2721	
Q innerhalb	=	0.0808	(FG2 = 8)
Q zwischen	=	1.2904	(FG1 = 3)
Q gesamt	=	1.3712	(FG = 11)
Stand. zw. d. Gruppen	=	0.3787	
Stand. innerh. d. Gru	=	0.1005	
Varianz. innerh. d. Gru	=	0.0101	
Gesamtstandardabw.	=	0.3531	

Testquotient $F^* = 42.61 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
4	3	1.6328	0.1444	0.1892	
1	3	1.4884	0.2968	0.1892	Grenze homogener Gruppen
2	3	1.1916	0.4163	0.1892	Grenze homogener Gruppen
3	3	0.7754			

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 0,8$ MPa

h = 60 mm

0,1 s oLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 2.0202
Standardabweichung := 0.0830

Mittelwert der Gruppe 2 := 1.4643
Standardabweichung := 0.0602

Mittelwert der Gruppe 3 := 1.0410
Standardabweichung := 0.1531

Mittelwert der Gruppe 4 := 1.5786
Standardabweichung := 0.0542

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 1.5260 N = 12
Mittleres Mittel = 1.5260
Q innerhalb = 0.0738 (FG2 = 8)
Q zwischen = 1.4581 (FG1 = 3)
Q gesamt = 1.5319 (FG = 11)
Stand. zw. d. Gruppen = 0.4025
Stand. innerh. d. Gru = 0.0961
Varianz. innerh. d. Gru = 0.0092
Gesamtstandardabw. = 0.3732

Testquotient $F^* = 52.68 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	2.0202	0.4416	0.1809	Grenze homogener Gruppen
4	3	1.5786	0.1143	0.1809	
2	3	1.4643	0.4233	0.1809	Grenze homogener Gruppen
3	3	1.0410			

T = +40 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 0,8$ MPa

h = 80 mm

0,1 s oLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

```

Mittelwert der Gruppe 1 := 0.8993
Standardabweichung      := 0.1340
-----
Mittelwert der Gruppe 2 := 1.4629
Standardabweichung      := 0.4670
-----
Mittelwert der Gruppe 3 := 0.9655
Standardabweichung      := 0.2666
-----
Mittelwert der Gruppe 4 := 1.5269
Standardabweichung      := 0.0349
-----
    
```

Ergebnisse der Varianzanalyse

```

Gesamtmittelwert      = 1.2136   N = 12
Mittleres Mittel      = 1.2136
Q innerhalb           = 0.6166   ( FG2 = 8)
Q zwischen             = 0.9618   ( FG1 = 3)
Q gesamt               = 1.5785   ( FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen    = 0.3269
Stand.innerh.d.Gru    = 0.2776
Varianz.innerh.d.Gru = 0.0771
Gesamtstandardabw.   = 0.3788
    
```

Testquotient $F^* = 4.16 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD
4	3	1.5269	0.0640	0.5227
2	3	1.4629	0.4974	0.5227
3	3	0.9655	0.0662	0.5227
1	3	0.8993		

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen

4-3	$\hat{F} = 58,36 > 19,0 = F(2;2;0,05)$	ungleich	$\hat{t} = 3,62 < 4,30 = t(2;0,05)$	gleich	
4-1	$\hat{F} = 14,74 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 7,85 > 2,78 = t(4;0,05)$	ungleich	
2-1	$\hat{F} = 12,15 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 2,01 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich	
T = +40 °C		Ø = 150/60 mm	σ ₀ = 0,8 MPa	h = 40 mm	0,1 s oLp

- Gruppe 1 = Asphaltbeton
- Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
- Gruppe 3 = Asphaltbinder
- Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte				
Mittelwert der Gruppe 1	:=	1.7304		
Standardabweichung	:=	0.2990		

Mittelwert der Gruppe 2	:=	1.7776		
Standardabweichung	:=	0.4127		

Mittelwert der Gruppe 3	:=	1.0915		
Standardabweichung	:=	0.2464		

Mittelwert der Gruppe 4	:=	1.8929		
Standardabweichung	:=	0.1185		

Ergebnisse der Varianzanalyse				
Gesamtmittelwert	=	1.6231	N = 12	
Mittleres Mittel	=	1.6231		
Q innerhalb	=	0.6690	(FG2 = 8)	
Q zwischen	=	1.1722	(FG1 = 3)	
Q gesamt	=	1.8413	(FG = 11)	
Stand. zw. d. Gruppen	=	0.3609		
Stand. innerh. d. Gru	=	0.2892		
Varianz. innerh. d. Gru	=	0.0836		
Gesamtstandardabw.	=	0.4091		
Testquotient $F^* = 4.67 > 4.07$ (Alpha = 0.05)				
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***				

LSD-Test:				
Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$				
Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD

4	3	1.8929	0.1152	0.5445
2	3	1.7776	0.0472	0.5445
1	3	1.7304	0.6389	0.5445

3	3	1.0915		

Grenze homogener Gruppen				

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen				
4-1	$\hat{F} = 6,37 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 0,88 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich
T = +40 °C	Ø = 150/60 mm	$\sigma_0 = 0,8$ MPa	h = 60 mm	0,1 s oLp

- Gruppe 1 = Asphaltbeton
- Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
- Gruppe 3 = Asphaltbinder
- Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechsel für alle Walzasphalte

Mittelwert der Gruppe 1 := 2.0507
Standardabweichung := 0.0902

Mittelwert der Gruppe 2 := 2.4499
Standardabweichung := 0.2405

Mittelwert der Gruppe 3 := 1.2935
Standardabweichung := 0.0903

Mittelwert der Gruppe 4 := 2.3770
Standardabweichung := 0.2726

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 2.0428 N = 12
Mittleres Mittel = 2.0428
Q innerhalb = 0.2968 (FG2 = 8)
Q zwischen = 2.5170 (FG1 = 3)
Q gesamt = 2.8138 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 0.5288
Stand.innerh.d.Gru = 0.1926
Varianz.innerh.d.Gru = 0.0371
Gesamtstandardabw. = 0.5058

Testquotient $F^* = 22.61 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
2	3	2.4499	0.0729	0.3627	
4	3	2.3770	0.3264	0.3627	
1	3	2.0507	0.7572	0.3627	Grenze homogener Gruppen
3	3	1.2935			

Einfacher Varianz- und Mittelwertvergleich ausgewählter Gruppen

2-1	$\hat{F} = 7,11 < 19,0 = F(2;2;0,05)$	gleich	$\hat{t} = 2,69 < 2,78 = t(4;0,05)$	gleich
T = +40 °C	Ø = 150/60 mm	σ ₀ = 0,8 MPa	h = 80 mm	0,1 s oLp

Gruppe 1 = Asphaltbeton
Gruppe 2 = Splittmastixasphalt
Gruppe 3 = Asphaltbinder
Gruppe 4 = Offenporiger Asphalt

Anhang 3.5

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 2.500 Lastwechseln für die neu gewählten Standardversuchsbedingungen				
Mittelwert der Gruppe 1	:=	36.5930		
Standardabweichung	:=	5.5169		

Mittelwert der Gruppe 2	:=	25.9503		
Standardabweichung	:=	1.4261		

Mittelwert der Gruppe 3	:=	17.3490		
Standardabweichung	:=	0.1130		

Mittelwert der Gruppe 4	:=	27.8333		
Standardabweichung	:=	0.9901		

Ergebnisse der Varianzanalyse				
Gesamtmittelwert	=	26.9314	N = 12	
Mittleres Mittel	=	26.9314		
Q innerhalb	=	66.9260	(FG2 = 8)	
Q zwischen	=	560.8345	(FG1 = 3)	
Q gesamt	=	627.7605	(FG = 11)	
Stand.zw.d.Gruppen	=	7.8940		
Stand.innerh.d.Gru	=	2.8924		
Varianz.innerh.d.Gru	=	8.3658		
Gesamtstandardabw.	=	7.5544		
Testquotient $F^* = 22.35 > 4.07$ (Alpha = 0.05)				
*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***				

LSD-Test:				
Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$				
Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD

1	3	36.5930	8.7597	5.4459 Grenze homogener Gruppen

4	3	27.8333	1.8830	5.4459
2	3	25.9503	8.6013	5.4459 Grenze homogener Gruppen

3	3	17.3490		

T = +50 °C	Ø = 200/80 mm	$\sigma_0 = 0,8$ MPa	h = 40 mm	0,2 s mLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 10.000 Lastwechseln für die neu gewählten Standardversuchsbedingungen

Mittelwert der Gruppe 1 := 51.7160
Standardabweichung := 5.1320

Mittelwert der Gruppe 2 := 34.0703
Standardabweichung := 2.3397

Mittelwert der Gruppe 3 := 22.2100
Standardabweichung := 0.1220

Mittelwert der Gruppe 4 := 35.5473
Standardabweichung := 1.6547

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 35.8859 N = 12
Mittleres Mittel = 35.8859
Q innerhalb = 69.1295 (FG2 = 8)
Q zwischen = 1323.1000 (FG1 = 3)
Q gesamt = 1392.2295 (FG = 11)
Stand. zw. d. Gruppen = 12.1248
Stand. innerh. d. Gru = 2.9396
Varianz innerh. d. Gru = 8.6412
Gesamtstandardabw. = 11.2502

Testquotient $F^* = 51.04 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	51.7160	16.1687	5.5348	Grenze homogener Gruppen
4	3	35.5473	1.4770	5.5348	
2	3	34.0703	11.8603	5.5348	Grenze homogener Gruppen
3	3	22.2100			

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 0,8$ MPa

h = 40 mm

0,2 s mLp

Multipler Mittelwertvergleich über die Verformung nach 20.000 Lastwechseln für die neu gewählten Standardversuchsbedingungen

Mittelwert der Gruppe 1 := 60.8820
Standardabweichung := 6.1230

Mittelwert der Gruppe 2 := 39.2573
Standardabweichung := 2.8647

Mittelwert der Gruppe 3 := 25.0650
Standardabweichung := 0.3550

Mittelwert der Gruppe 4 := 40.1143
Standardabweichung := 1.9278

Ergebnisse der Varianzanalyse

Gesamtmittelwert = 41.3297 N = 12
Mittleres Mittel = 41.3297
Q innerhalb = 99.0797 (FG2 = 8)
Q zwischen = 1957.8141 (FG1 = 3)
Q gesamt = 2056.8938 (FG = 11)
Stand.zw.d.Gruppen = 14.7491
Stand.innerh.d.Gru = 3.5192
Varianz.innerh.d.Gru = 12.3850
Gesamtstandardabw. = 13.6744

Testquotient $F^* = 52.69 > 4.07$ (Alpha = 0.05)

*** Der Unterschied mindestens eines Mittelwertes ist signifikant ***

LSD-Test:

Tabellenwert $t(n-k) = 2.306$ mit $N-K=8$

Gruppe	ni	Sortierte Mittelwerte	Delta	LSD	
1	3	60.8820	20.7677	6.6261	Grenze homogener Gruppen
4	3	40.1143	0.8570	6.6261	
2	3	39.2573	14.1923	6.6261	Grenze homogener Gruppen
3	3	25.0650			

T = +50 °C

Ø = 200/80 mm

$\sigma_0 = 0,8$ MPa

h = 40 mm

0,2 s mLp