



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la
communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle
comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade**

Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests

**Amélioration des informations fournies par l'essai
d'orniérage LCPC**

**Improving information on materials behavior obtained
from the LCPC wheel tracking test**

**Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und
Forschungsanstalt, Abteilung Strassenbau/Abdichtungen**

**M.N. Partl, Prof. Dr. sc. techn. dipl. Ing. ETH/SIA
K. Sokolov, dipl. Bauing.**

**Forschungsauftrag ASTRA 2001/052 auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und
Verkehrsfachleute (VSS)**

Februar 2009

1241

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	9
2	ZIELSETZUNG	9
3	STAND DER FORSCHUNG UND DES WISSENS	10
3.1	Prüftechnische Aspekte	10
3.2	Ausgewählte Resultate bisheriger Spurbildungsprüfungen	15
3.2.1	Splittmastix	15
3.2.2	Offenporiger Asphalt	16
4	FORSCHUNGSPROGRAMM	18
4.1	Experimentelle Untersuchungen	18
5	LCPC-SPURBILDUNGSTEST	19
5.1	Einrichtungen	19
5.2	Durchführung	20
5.3	Auswertung	20
6	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	21
6.1	Untersuchungen an Belagsausschnitten aus dem EMPA-Bestand	21
6.1.1	Verwendete Belagsausschnitte	21
6.1.2	Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen	25
6.1.3	Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C, D, E, F, G, H	31
6.1.4	Belagsausschnitte aus dem ETH-Rundlauf (U2000)	36
6.1.5	Übrige Belagsausschnitte: Ergebnisse	42
6.2	Parameterstudie an neu verdichteten Prüfkörpern	44
6.2.1	Mischguteigenschaften	44
6.2.2	Einfluss des Reifendruckes	46
6.2.3	Einfluss der Halterung (seitliche Abstützung in der Form)	48
6.2.4	Einfluss der Prüftemperatur	50
6.2.5	Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen	56
6.2.6	Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung	57
6.2.7	Einfluss der Prüfkörperdicke	58
6.3	Nationale Ringanalyse	64
6.3.1	Methodik	64
6.3.2	Mischgutsorten	65
6.3.3	Prüfkörper	65
6.3.4	Zuordnung der Profile und der Messpunkte	67
6.3.5	Ergebnisse	67
6.3.6	Kommentar zu den Ergebnissen	75
6.4	Spezielle Untersuchungen	76
6.4.1	Temperaturausbreitung im LCPC-Verdichter	76
6.4.2	Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters	82

7	FOLGERUNGEN	84
7.1	Spurbildungstest an Belagsausschnitten bzw. Bohrkernen	84
7.1.1	Untersuchung an zusammengesetzten Prüfkörpern aus Bohrkernen:	84
7.1.2	Belagsausschnitte aus dem ETH-Rundlauf (U2000):	85
7.1.3	Übrige Belagsausschnitte:	86
7.2	Allgemeine Folgerungen aus den durchgeführten Spurbildungstests	86
7.3	Massgebende Parameter	87
7.3.1	Einfluss des Reifendruckes:	87
7.3.2	Einfluss der Halterung (seitliche Abstützung in der Form)	88
7.3.3	Einfluss der Temperatur	88
7.3.4	Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen	88
7.3.5	Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung	88
7.3.6	Einfluss der Prüfkörperdicke	88
7.3.7	Temperaturausbreitung im LCPC Verdichter	89
7.3.8	Spannungsverteilung unter dem Rad des Spurbildungstesters	89
7.4	Zusammenfassende Empfehlungen und Hinweise	89
8	VERZEICHNIS DER TABELLEN	90
9	VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	92
10	LITERATURVERZEICHNIS	96
11	ANHANG	99
11.1	Resultate der nationalen Ringanalyse	99
11.1.1	Labor A	99
11.1.2	Labor B	101
11.1.3	Labor C	103
11.1.4	Labor D	105
11.2	Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen	107
11.3	Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C, D, E, F, G, H	109
11.3.1	Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke C	110
11.3.2	Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke D	112
11.3.3	Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke E	114
11.3.4	Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke F	115
11.3.5	Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke G	117
11.3.6	Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke H	119
11.4	Belagsausschnitte aus dem ETH-Rundlauf (U2000)	121
11.4.1	Belagsausschnitt R1	121
11.4.2	Belagsausschnitt R2	122
11.4.3	Belagsausschnitt R3	123
11.4.4	Belagsausschnitt R4	124
11.4.5	Belagsausschnitt R5	125
11.5	Übrige Belagsausschnitte	126
11.5.1	Belagsausschnitt Arisdorf, Ari	126
11.5.2	Belagsausschnitt A3-GA	126
11.5.3	Belagsausschnitt A3-SMA, Birrfeld	127
11.5.4	Belagsausschnitt Oftringen Oft A1, Offenporiger Asphalt	128
11.5.5	Belagsausschnitt Chiasso, Chi	129

11.6	Einfluss des Reifendruckes	130
11.7	Einfluss der Randbedingungen	133
11.7.1	Vergleich verschiedener Halterungssysteme	133
11.7.2	Seitliche Vermörtelung	134
11.8	Einfluss der Prüftemperatur	135
11.9	Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen	141
11.10	Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung	143
11.11	Einfluss der Prüfkörperdicke	145
11.12	Temperaturausbreitung im LCPC-Verdichter	147
11.13	Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters	150
11.13.1	Technische Beschreibung der Druck-Kraftsensorfolie	150
11.13.2	Spannungsverteilung, Reifendruck 3 bar	151
11.13.3	Spannungsverteilung, Reifendruck 4.5 bar	152
11.13.4	Spannungsverteilung, Reifendruck 6 bar	153

Zusammenfassung

Die vorliegende Forschungsarbeit ASTRA2001/52, „Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests“, basiert auf umfangreichen Vorarbeiten, der Zusammenarbeit mit anderen Laboratorien sowie eigenen experimentellen und numerischen Untersuchungen der Empa Dübendorf.

Zunehmende Verkehrslasten und –beanspruchungen führten 1997 in der Schweizer Norm SN 640 431b „Asphaltbetonbeläge: Konzeption, Anforderungen, Ausführung“ zur Einführung einer neuen Mischgutklasse H für sehr schwer und extrem schwer belastete Beläge. Zur Beurteilung der Standfestigkeit solcher Beläge wurde der LCPC Spurbildungstest vorgeschrieben, wobei für die Festlegung von Normanforderungen weitgehend auf die besonders in Frankreich vorhandenen Erfahrungen zurückgegriffen wurde.

Wenige Jahre nach Einführung des LCPC Spurbildungstests zeigte sich aber bereits deutlich, dass eine systematische und auf die Situation in der Schweiz und die dort verwendeten Asphaltbetonbeläge zugeschnittene Validierung und Verifizierung der Prüfung nötig ist. Hierbei ging es einerseits um die Klärung verschiedener je nach Asphaltbelag unterschiedlicher versuchstechnischer Fragen, namentlich um die Auswirkungen von Belagsdicke, Temperatur und Alter der verdichteten Prüfkörper sowie den Einfluss von Labor und in situ Verdichtung; zum anderen ging es um die Frage einer Korrelation zwischen dem Verhalten eines im Labor mit Hilfe des Spurbildungstesters verdichteten Mischguts und dem Verhalten eines Asphaltbelags in situ.

Es zeigt sich, dass die Beherrschung dieser Parameter sich auf die Aussagekraft des Spurbildungstests positiv auswirkt. Dies wird untermauert durch eine in dieser Arbeit durchgeführte nationale Ringanalyse mit vier Labors. Es zeigt sich auch, dass zusätzlich zu den in der Norm vorgesehenen massgebenden Ergebnis-Werten des Tests eine Bestimmung der Geschwindigkeit der Spurbildung im Langzeitbereich sowie des Wertes der Spurbildung unmittelbar nach Überrollungsbeginn stark von der Konzeption des Mischgutes abhängen. Beim Vergleich unterschiedlichen Mischguts trägt die Bestimmung dieser zusätzlichen Kennwerte zur Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstesters bei.

Résumé

Le présent travail de recherche ASTRA2001/52, „Amélioration des informations fournies par l'essai d'orniérage LCPC“, repose sur des travaux préliminaires de grande ampleur, menés en partie en collaboration avec d'autres laboratoires, ainsi que sur des études expérimentales et numériques effectuées par l'Empa Dübendorf.

L'augmentation des charges et des sollicitations exercées par le trafic ont conduit en 1997 à l'introduction dans la norme suisse SN 640 431b, "Revêtements en béton bitumineux, Conception, exigences, exécution", d'un nouveau type de béton bitumineux H pour les revêtements soumis à des sollicitations très sévères et extrêmes. L'essai d'orniérage LCPC fut prescrit par la norme pour l'évaluation de la résistance de ces revêtements, la fixation des performances requises s'appuyant dans une large mesure sur les expériences acquises en particulier en France.

Quelques années déjà après l'introduction de l'essai d'orniérage LCPC il est toutefois apparu clairement qu'une validation et une vérification systématique de cet essai adaptée à la situation suisse et aux revêtements de béton bitumineux utilisés ici était nécessaire. Il s'agissait là d'une part d'éclaircir diverses questions techniques touchant l'essai, à savoir celles de l'influence de l'épaisseur du revêtement, de la température et de l'âge des éprouvettes compactées ainsi que de l'influence du compactage réalisé en laboratoire et in situ; d'autre part il s'agissait aussi d'établir s'il existait une corrélation entre le comportement d'un enrobé compacté en laboratoire avec l'orniéreur et celui d'un revêtement bitumineux in situ.

Il apparaît que la maîtrise de ces paramètres exerce une influence positive sur la pertinence des informations fournies par l'essai d'orniérage. Ce résultat est appuyé par des essais interlaboratoires nationaux réalisés avec quatre laboratoires. Il s'est aussi révélé que, en plus des valeurs des résultats de l'essai prévues par la norme, la valeur de la vitesse de l'orniérage à long terme et de celle de l'orniérage immédiatement après le début du roulage dépendent fortement de la conception de l'enrobé. Lors de la comparaison de différents enrobés, la détermination de ces caractéristiques contribue à améliorer la pertinence des informations fournies par l'orniéreur LCPC.

Abstract

The research project ASTRA2001/52 "Improving information on materials behavior obtained from the LCPC wheel tracking test", is based on extensive preparatory work, the collaboration with other laboratories as well as own experimental and numerical investigations by Empa Dübendorf.

Increasing traffic loads and stress on pavements resulted in introducing a new mixture class H for very heavily and extremely heavily loaded pavements in the 1997 version of Swiss Standard SN 640 431b "Asphalt concrete pavements: Conception, Requirements and Construction". In order to assess bearing capacity of such pavements, the LCPC wheel tracking test has to be used. The requirements in the standards were fixed particularly based on French experience.

Only a few years after adopting the LCPC wheel tracking test it became obvious that a systematic validation and verification of the test was necessary to comply with the situation in Switzerland and the asphalt concrete pavements used in this country. On the one hand different test specific questions had to be clarified depending on the type of asphalt concrete, such as the effect of pavement thickness, temperature and age of the compacted specimens as well as the influence of lab and in situ compaction. On the other hand the correlation between the behavior of a mixture compacted in the lab with the wheel tracking compactor device and an asphalt concrete from the field was still under question.

It was found that the control of these parameters positively influences the information on material behavior obtained from the LCPC wheel tracking test. This is supported by a round robin test with four labs conducted during this research. It was also found that in addition to the standardized characteristics a determination of both the long term rutting speed and the rut deformation immediately after starting the test strongly depends on the mixture concept. When comparing different mixtures, the determination of these additional characteristics helps improving the information on materials behavior obtained from the LCPC wheel tracking test

1 Einleitung

Zunehmende Verkehrslasten und -beanspruchungen führten 1997 in der Schweizer Norm SN 640 431b "Asphaltbetonbeläge: Konzeption, Anforderungen, Ausführung" zur Einführung einer neuen Mischgutklasse H für sehr schwer und extrem schwer belastete Beläge. Zur Beurteilung der Standfestigkeit solcher Beläge wurde der LCPC Spurbildungstest vorgeschrieben, wobei für die Festlegung von Normanforderungen weitgehend auf die besonders in Frankreich vorhandenen Erfahrungen zurückgegriffen wurde.

Wenige Jahre nach Einführung des LCPC Spurbildungstests zeigte sich aber bereits deutlich, dass eine systematische und auf die Situation in der Schweiz und die dort verwendeten Asphaltbetonbeläge zugeschnittene Validierung und Verifizierung der Prüfung nötig ist.

Hierbei geht es einerseits um die Klärung verschiedener je nach Asphaltbelag unterschiedlicher versuchstechnischer Fragen (z.B. Verdichtung, Belagsdicke, Temperatureinfluss, Einfluss von Messunterbrüchen, seitliche Aufwölbung und Hohlraumverteilung), zum anderen um die Herstellung einer Korrelation zwischen dem Verhalten eines im Labor mit Hilfe des Spurbildungstesters verdichteten Mischguts und dem Verhalten eines Asphaltbelags in situ.

Da experimentelle Arbeiten vor der Einführung der neuen Normen durchgeführt wurden und auch Material von Belagsausschnitten untersucht wurde, enthält der Bericht die alten Mischgutbezeichnungen, d.h. AB für AC, HMT für ACT, GA für MA etc.

Der Bericht gliedert sich in drei Experimentelle Hauptteile, welche dem allgemein erläuternden Teil des Standes der Forschung, des durchgeführten Versuchsprogrammes und der versuchstechnischen Beschreibung des Spurbildungstests folgt:

- **Untersuchungen an Belagsausschnitten bzw. Bohrkernen** aus dem Empa-Bestand bzw. aus dem ETH Rundlauf, zwecks Vergleich der Verdichtung, namentlich zwischen Labor und in situ Verdichtung
- **Untersuchungen an neu verdichteten Prüfkörpern** aus verschiedenem Mischgut, zwecks Studie des Einflusses von Reifendruck, seitlicher Abstützung in der Prüfkörperhalterung, Prüftemperatur, Pausenzeit zwischen den Messungen, Dauer der Prüfkörperlagerung, und Dicke bzw. Höhe der Prüfkörper
- **Nationale Ringanalyse** mit vier schweizerischen Labors an je einem für Deckschicht und Tragschicht gebräuchlichen Asphaltbetonmischgut.

Zudem wurden noch spezielle experimentelle und theoretische Untersuchungen betreffend Temperaturentbreitung und -verteilung im LCPC Verdichter nach Einfüllen des Mischgutes durchgeführt und die statische Kontakt-Spannungsverteilung zwischen dem Reifen und der Laufebene des Rades im Spurbildungstester experimentell bestimmt.

Der Bericht enthält viele Daten und Versuchsergebnisse. Diese sind notwendig für allfällige künftige Betrachtungen und als Dokumentation der Nachvollziehbarkeit. Wo immer möglich sind diese Daten im Anhang wiedergegeben.

2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojekts ist eine systematische Validierung und Verifizierung des LCPC Spurbildungstests im Hinblick auf die in der Schweiz gebräuchlichsten stark und sehr stark beanspruchten bitumenhaltigen Deck- und Tragschichten.

Das Projekt bezweckt eine Erweiterung des Kenntnisstandes bezüglich mechanischer Wirkung, Aussagekraft und Leistungsfähigkeit des LCPC Spurbildungstests als Basis für Normierung und

Mischgutbewertung. Es wird ausdrücklich keine Änderung des Verfahrens nach EN angestrebt doch wird untersucht, inwiefern bei gleichem Prüfaufwand für die in der Schweiz gebräuchlichsten Belagsarten zusätzliche verwertbare Erkenntnisse gewonnen werden können. Schliesslich wird durch eine Abklärung prüftechnischer Fragen sowie durch Vergleichsversuche mit anderen Schweizer Labors eine Verbesserung der einheitlichen Durchführung der Prüfung angestrebt.

Das Projekt enthält einen Vergleich von LCPC-Laborverdichtung und Praxisverdichtung. Darüber hinaus werden versuchstechnische Modifikationen sowie Verbesserungen im Hinblick auf die Aussagekraft der Prüfmethode aufgezeigt.

Insbesondere wird abgeklärt, inwieweit aus dem zeitlichen Verlauf der Spurrinnenbildungskurve zusätzliche Charakterisierungsgrössen und performanceorientierte Aussagen gewonnen werden können.

3 Stand der Forschung und des Wissens

3.1 Prüftechnische Aspekte

Zur versuchstechnischen und methodologischen Problemstellung im Zusammenhang mit der Spurbildung im Labormassstab einschliesslich verschiedenster Modellierungsmodelle besteht eine Vielzahl, kaum vollständig überblickbarer Literatur (z.B. Cooley et al. 2000, Szydlo et al. 2003, Soenen et al. 2006). Besonders zahlreich sind Arbeiten, welche die praktische Anwendung im Sinne von Fallstudien in den Vordergrund stellen (z.B. Bouwmeester et al. 2007, Mohammad et al. 2007, Olard et al. 2007). Der nachstehende kurze Blick auf den Stand der Forschung kann daher nur punktuell sein und keinesfalls den Anspruch der Vollständigkeit erheben. Allerdings wird versucht beispielhaft einige massgebende Arbeiten zur Thematik des LCPC Spurbildungstests hervorzuheben, wobei auch einige eigenen Arbeiten vorgestellt werden, die im internationalen Umfeld ausserhalb dieses Projektes in mit englischsprachigen Partnern durchgeführt wurden und deshalb hierzulande weniger präsent sind.

Grundsätzlich gibt es heutzutage verschiedene Spurbildungsprüfverfahren (bei verschiedenen Temperaturen, teils trocken oder unter Wasser), die jedoch alle nach dem ähnlichem Prinzip des Hin- und Herrollen eines Rades (Gummiräder, Stahlräder, Luftreifen) funktionieren. Bekannt sind reine Laborprüfverfahren teils normiert teils entwickelt zu reinen Forschungszwecken, namentlich der vom LCPC entwickelte Spurbildungstest (Abbildung 5.1) aber auch solche, die sich im Grenzbereich zu eigentlichen Verkehrslastimulatoren bewegen (Raab et al. 2005).

Der vom französischen LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) entwickelte Spurbildungstest ist einer der am besten etablierten Geräte und wird auch in der europäischen Normung EN 12697-22 akzeptiert.

Neben dem französischen Spurbildungstest findet auch jener mit einem kleinen Stahlrad Verwendung (sog. Hamburg Spurbildungstest). Die Belastung erfolgt dabei an Prüfkörpern, die mit Wasser überdeckt sind. Dabei geht es weniger um die Spurbildung als um die Bindemittelablösung vom Gestein (Stripping). In den USA ist zudem der sog. „Asphalt Pavement Analyzer“ gebräuchlich. Dabei fährt ein Stahlrad in Längsrichtung auf einem Gummischlauch, der unter Druck steht und auf der Oberfläche des Prüfkörpers aufliegt.

Das Europäische Normenwerk erlaubt die Verwendung verschiedener Tests, macht sie aber abhängig für die Dimensionierungsgrundlagen. Für die Schweiz ist das problematisch. Es wird die Normachlast von 8,16 t verwendet. Dafür sieht die EN das Gerät mit kleinem Rad vor. Da für dieses Prüfverfahren aber in der Schweiz keine Erfahrungswerte vorliegen und zudem sämtliche durchgeführten Erstprüfungen auf dem Gerät mit dem grossen Rad beruhen, wird bis auf Weiteres in der Schweiz auch weiterhin das Gerät mit dem grossen Rad verwendet.

Obwohl die Spurbildungstester alle inspiriert vom Phänomen der Spurrinnenbildung konzipiert wurden, ist die Zielsetzung eindeutig die möglichst praxisnahe Bewertung des Spurbildungswiderstandes im Sinne der Materialcharakterisierung und keineswegs die Simulation oder gar Prognose der in der Praxis auftretenden Spurrinnenbildung. Korrelationen in dieser Richtung werden zwar immer wieder gesucht, doch war diesen Bemühungen bisher nur sehr eingeschränkt Erfolg beschieden.

Beispielsweise wurden in einem Ringversuch der RILEM (Partl und Piber, 2001) von den teilnehmenden Labors verschiedener Länder aufgrund der jeweiligen individuellen Untersuchungen mit teilweise verschiedenen Spurbildungstestern und Methodologien für die zwei untersuchten neu eingebauten Versuchsstrecken aus Asphaltbeton mit ca. 35mm Deckschicht (eine in Österreich-Villach und eine in Portugal-Mindelo) auf 10 Jahre hinaus recht unterschiedliche Verhaltensweisen prognostiziert. Demnach wurde die Strecke in Mindelo allgemein als Spurrinnenanfälliger beurteilt. Besonders bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass der direkte Vergleich des Spurbildungsverhaltens alleine eine gegensätzliche Bewertung ergeben hätte, d.h. höheres Spurbildungsrisiko bei der Strecke in Villach als in Mindelo (Abbildung 3.1)

Tabelle 3.1 10Jahres- Prognose des Spurbildungsverhaltens aufgrund verschiedener Spurbildungstests für 2 Strecken aus Asphaltbeton gemäss RILEM-Ringversuch 2001 (* LCPC Test)

	Vertikale bleibende Deformationen (mm)					
	CCRIPPE Villach			WWRIPPE Mindelo		
	<5	≤5 -<10	≤10 -<20	<5	≤5 -<10	≤10 -<20
Lab. Nr:	8*	9*			8*	9*
	10	12*			12*	10
	11					11

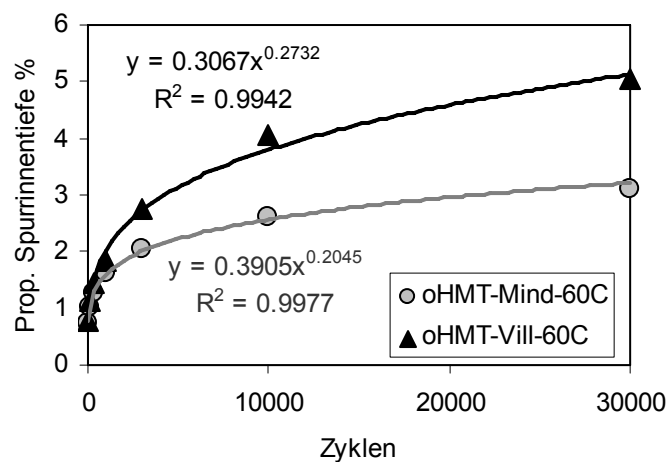


Abbildung 3.1 Resultate des Spurbildungstests für obere Tragschichten gemäss LCPC Spurbildungstests eines Labors des RILEM-Ringversuchs 2001

Im Falle des LCPC Spurbildungstests liegt ein Grund sicherlich darin, dass in der Praxis kaum von einer gleichmässig über eine Höhe 100mm verteilten Temperatur von 60°C ausgegangen werden kann weshalb je nach Mischgut eine zum tatsächlich in der Praxis herrschenden Temperaturregime vollständig unterschiedliche Tragwirkung vorliegt. Zudem schafft auch die hin- und herwalkende Überrollung andere Verhältnisse als in der Realität.

Ein weiterer Grund dürfte auch in der Problematik der Herstellung der Prüfkörper mittels Laborverdichtungsgerät begründet sein. Einerseits entsprechen die Prüfkörper hinsichtlich Dicke und Korngerüst (einschliesslich Orientierung) kaum den in der Praxis vorkommenden Verhältnissen der obersten Schichten andererseits sind auch hinsichtlich Homogenität und volumetrischer Kenngrössen erhebliche Unterschiede Vorhanden. Letzteres wurde beispielsweise in einer durch

Röntgen- Computertomographie unterstützten Untersuchung der Empa an einem Standard Asphaltbeton AC 11 (5.68 Mass-% Bitumen 50/70, Soll- Hohlraumgehalt 4.5 Vol %) veranschaulicht (Partl et al., 2007). Dabei wurden jeweils die Hohlraumgehaltverteilungen in der oberen und unteren Hälfte der 100mm dicken Asphaltbetonprüfkörper nach verschiedenen Verdichtungsstadien mit dem Pneurad untersucht, namentlich nach Überrollungen links:mitte:rechts = 0:0:0 (initial); 8:4:8 (medium); 32:16:32 (final).

Wie aus Abbildung 3.2 hervorgeht, ist im *Initialzustand*, d.h. nach der Vorverdichtung mit der starren Luftreifen-Achse die Verteilung des Hohlraumgehaltes noch recht homogen. Sie variiert zwischen 13 und 15.8 Vol-% im unteren bzw. 11.9 und 15.4 Vol-% im oberen Bereich der Prüfkörpers.

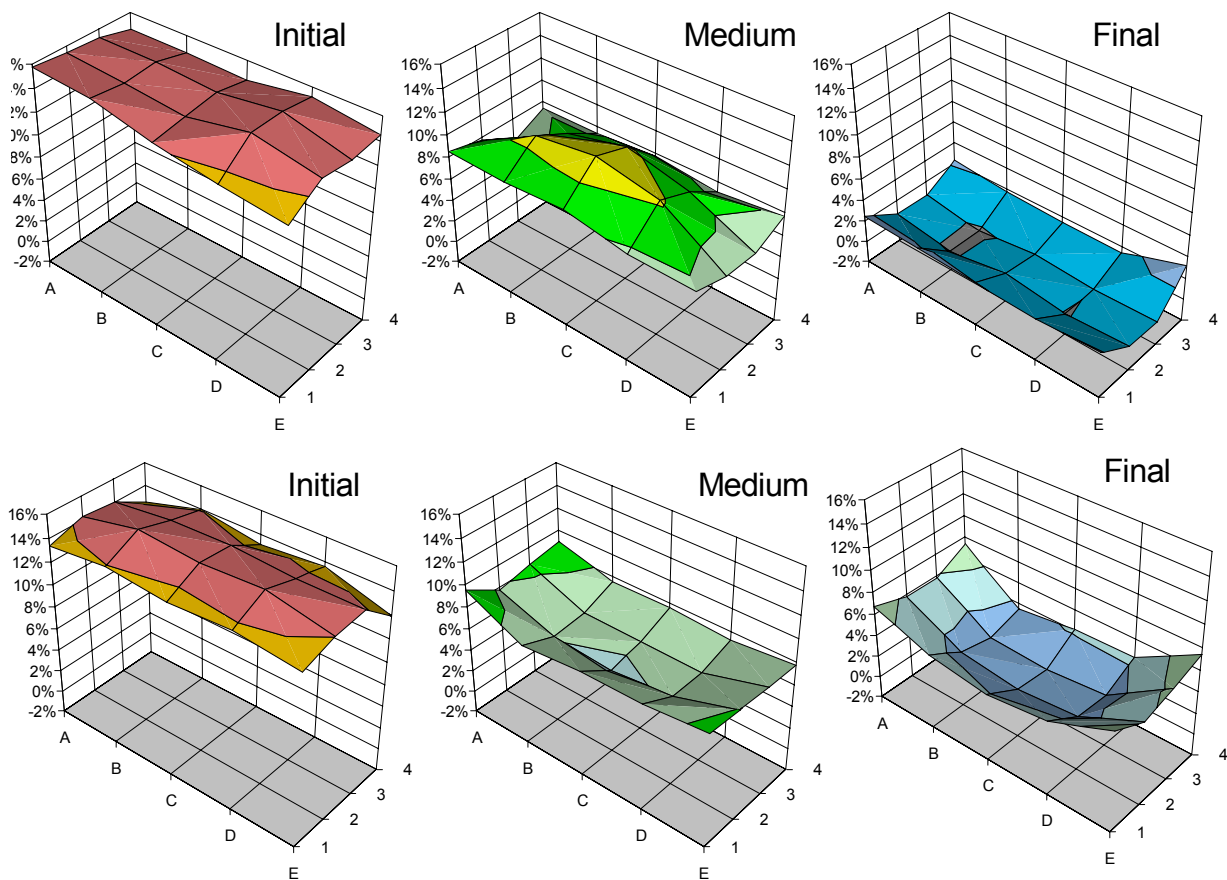


Abbildung 3.2 Verteilung des Hohlraumgehalts in der oberen (Bildreihe oben) und unteren (Bildreihe unten) Prüfkörperhälfte aus AC11 nach Anfangs-, Mittel- und Endverdichtung (initial, medium, final) im Verdichter für den LCPC Spurbildungstest

Nach der *Medium-Verdichtung* ist die Hohlraumverteilung in der oberen und unteren Prüfkörperhälfte deutlich starken Schwankungen unterworfen und ist auf Werte zwischen 5.5 und 11 Vol-% im jeweils zentralen Bereich der oberen und unteren Hälfte abgesunken. Dabei scheint die untere Hälfte mit einem um 0,9 Vol-% tieferen Mittelwert stärker verdichtet zu sein als die obere Hälfte. Der zentrale Bereich der oberen Hälfte weist einen um 2.6 Vol-% höheren Hohlraumgehalt auf als die entsprechende Partien im Randbereich. Ursache dafür ist das wandernde Verdichtungsregime welches beim Überrollvorgang im Zentrum der obersten Hälfte des noch wenig verdichteten Mischgutes eine gewisse Hebung und damit einen der Verdichtung entgegenwirkenden Effekt verursacht. Während der seitlichen Überfahrten wird das Mischgut jeweils wieder in die Mitte geschoben. Dadurch wird die Verdichtung reduziert. Die in der Mitte verglichen mit den Seiten nur halb so grosse Anzahl Überfahrten reicht nicht aus, um diese reduzierte Verdichtung auszugleichen. Im unteren Bereich des Prüfkörpers ist die Situation dagegen völlig unterschiedlich. Dort ist im zentralen Bereich gegenüber den Rändern ein 1.8 Vol-% tieferer Hohl-

raumgehalt festzustellen. Dies weil hier das seitliche Überfahren das Material hinunterdrückt und somit einen zusätzlichen Verdichtungseffekt erzeugt. Dies lässt sich auch sehr deutlich in der Tomografieaufnahme in Abbildung 3.3 erkennen (Hinweis: die ebenfalls angegebenen kurzen Stahlnadeln dienen zur Beobachtung der Materialbewegung). Während das linke Bild für den Initialzustand visuell noch recht homogen aussieht, ist im mittleren Bild im oberen Bereich eine stark aufgelockerte Zone mit Aufwölbungen zu erkennen (markiert mit Gleitebene).

Im *Final-Zustand*, d.h. der Endverdichtung, hat der Hohlraumgehalt schliesslich Werte zwischen -0.1 bis 7.4 Vol-% erreicht. Der theoretisch nicht zulässige negative Hohlraumgehalt zeigt, dass die gemessene Rohdichte eines bestimmten Prüfkörperbereichs höher ist als jene der ganzen Mischung. Dies scheint auf den ersten Blick nicht plausibel, ist aber tatsächlich möglich und zwar in Fällen wo lokal eine Konzentration schwerer Zuschlagstoffe auf Kosten des leichteren ausgequetschten Bindemittels auftritt. Es fällt auf, dass die dichteste Zone sich nunmehr in der mittleren Längsachse der oberen Hälfte des Prüfkörpers befindet, während die Eckregionen und die untere Hälfte deutlich weniger verdichtet sind. Tatsächlich beträgt der Unterschied zwischen oberer und unterer Hälfte ca. 3.5 Vol-%. Die untere Hälfte weist auch verglichen mit der oberen Hälfte eine deutlich geringere Verdichtung an den Enden des Überrollweges auf. Oben beträgt der Unterschied ca. 1.5 Vol% und in der unteren ca. 2.9 Vol-%. Offenbar ist in der oberen Hälfte auch die anfänglich geringere Verdichtung im zentralen Bereich verschwunden. Der Grund dürfte darin liegen, dass sich während des Verdichtungs Vorganges das Material an den Prüfkörper-Aussenbereichen schneller abkühlt und somit insbesondere gegen Verdichtungsende auch schwerer verdichten lässt.

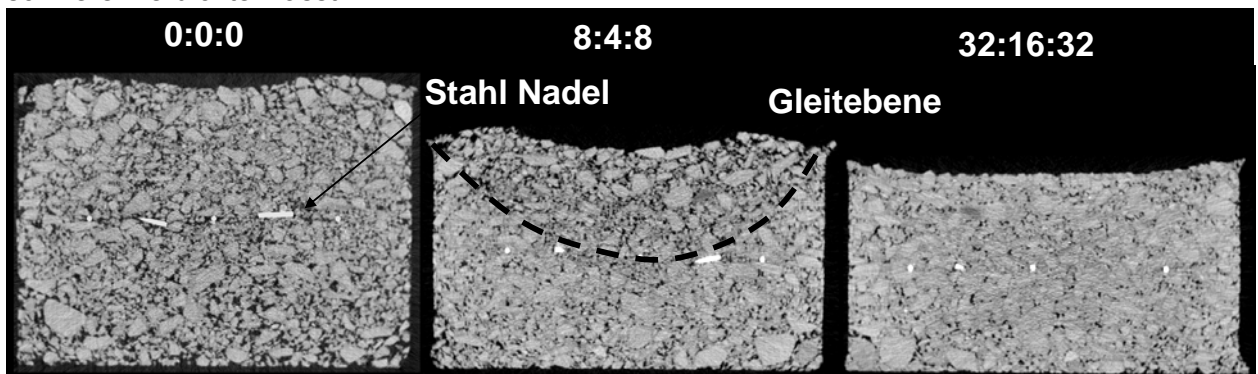


Abbildung 3.3 Röntgen Computertomogramm eines Vertikalquerschnittes in der Mitte eines Prüfkörpers aus AC11 nach Anfangs-, Mittel- und Endverdichtung (0:0:0, 8:4:8, 32:16:32) im Verdichter für den LCPC Spurbildungstest

Die Materialbewegungen wurden auch in einer speziellen Untersuchung studiert, welches die Empa mit einem anderen Spurbildungsgerät zusammen mit der University in Hokkaido an zwei Belagsriegeln aus der Schweiz (Belagsausschnitt G und H siehe Abschnitt 6.1) durchführte (Abd Alla et al., 2006). Das mit einem Vollgummirad bestückte Gerät erlaubte die optische Registrierung der Dehnungen im Querschnitt (Abbildung 3.4) sowie die Darstellung des Materialtransportes in Funktion der Überrollungen (Abbildung 3.5) bei Prüfkörpern mit variabler Temperatur über den Querschnitt. Der Materialtransport ist im Falle des Belagsabschnittes G deutlich stärker als bei H.

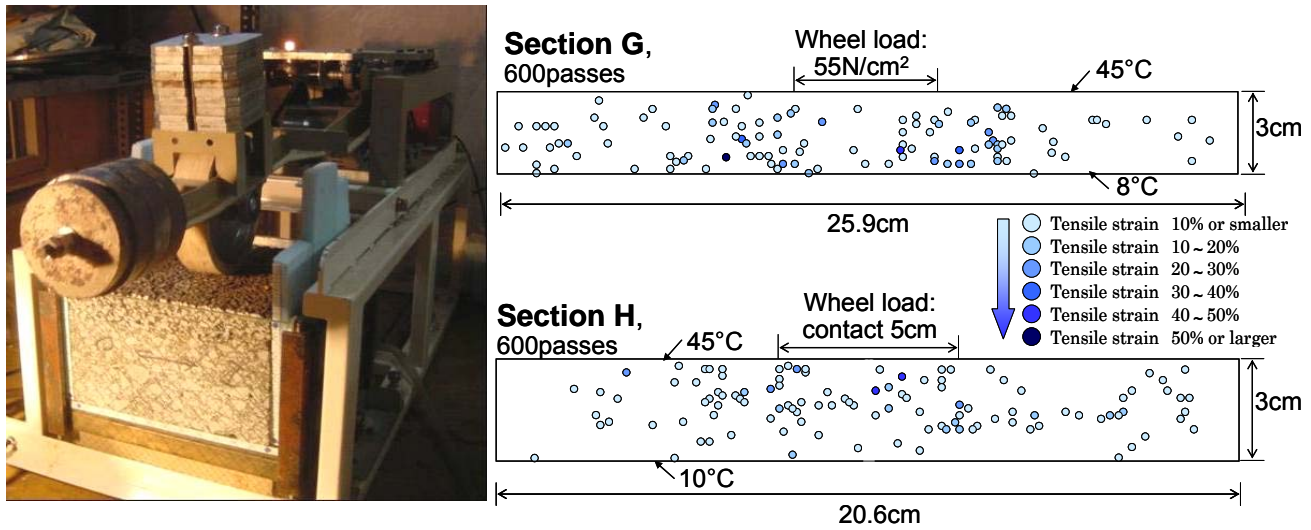


Abbildung 3.4 Spurbildungsgerät an der Universität in Hokkaido inkl. Resultate der Dehnungs-Untersuchung bei den Belagsabschnitten G und H

Section G

Section H

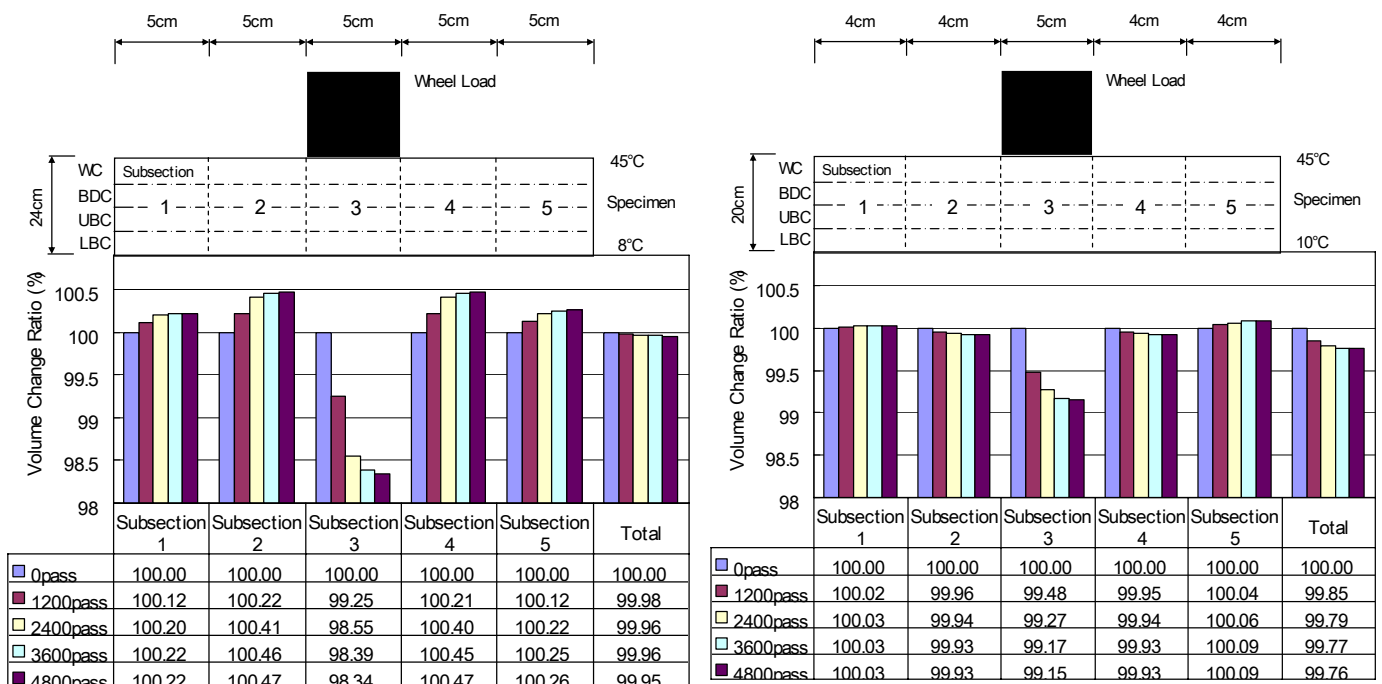


Abbildung 3.5 Veränderung des Volumens der Teilflächen während des Spurbildungstestes an der Universität von Hokkaido bei den Belagsabschnitten G und H

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen des RILEM TC 206 ATB Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials Task Group 3 „Mechanical Testing“ zwei Serien von Vergleichsversuche mit Spurbildungstestern realisiert werden: Eine erste Serie mit Reinbitumen und eine zweite Serie mit Polymerbitumen als Bindemittel. In der ersten Serie, an der sich 9 Laboratorien mit insgesamt fünf verschiedenen Spurbildungstestern beteiligen werden auch zwei verschiedene Belagsausschnitte aus der Schweiz untersucht (vgl. Abschnitt 6.1.1). Es handelt sich dabei um A3-GA und A3-SMA. Gegenwärtig liegen noch keine Resultate vor.

3.2 Ausgewählte Resultate bisheriger Spurbildungsprüfungen

Im Rahmen bisheriger Forschungsprojekte wurden an der Empa an verschiedenen Mischgutsorten Spurbildungsprüfungen durchgeführt, die als Hintergrund für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind. Erwähnt seien namentlich die Untersuchungen an SMA (Neubauer et al., 2002) und an offenporigem Asphalt, bzw. Drainasphalt (Takahashi et al., 1999 und Poulikakos et al., 2006b)

3.2.1 Splittmastix

Im einem Forschungsprojekt über die volumetrische und mechanische Optimierung von Splittmastixasphalt (Neubauer et al., 2002) wurde das Spurbildungsverhalten von Splittmastixasphalten mit unterschiedlichen Filler-Bindemittel-Kombinationen bei nahezu optimalem Bindemittelanteil untersucht (Tabelle 3.2).

Abbildung 3.6 zeigt, dass nach 30'000 Zyklen bei den verschiedenen Mischungen Spurrinnentiefen im Bereich von 3,9 % bis 5,5 % auftreten. Aus den unterschiedlichen Steigungen der Kurven des SMA 11 geht zudem hervor, dass die verschiedenen Bindemitteltypen der Mischungen einen wesentlichen Einfluss auf die Grösse der bleibenden relativen Deformation der Prüfkörper bei 60 °C nehmen.

Tabelle 3.2 Schematische Darstellung der Kombinationen von Bindemittel und Filler für die Untersuchung im LCPC-Spurbildungstester

Bindemittel	Filler	Abkürzung	SMA 11	SMA 16
Bitumen 50/70 ohne Zusätze	Kalkfiller	NB	x	x
	Phonolithfiller	ZB	x	x
Polymerbitumen ohne Zusätze	Kalkfiller	NO	x	x

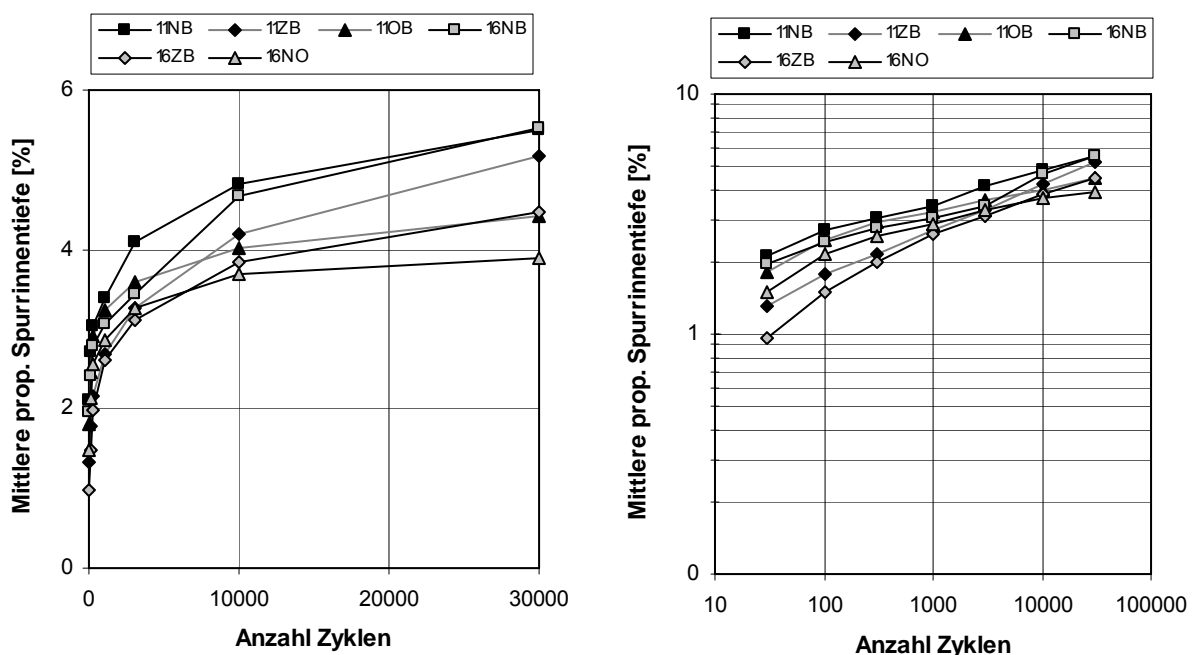


Abbildung 3.6 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an SMA gemäss Neubauer et al (2002)

Dies geht auch aus Abbildung 3.7 hervor, wo die Regressionsparameter a und q der als Potenzfunktion der Form

$$s = az^q$$

(z: Zyklenzahl, s: Spurrinnentiefe, a und b sind die Parameter der Regressionskurve) angenäherten Spurbildungskurven aufgetragen sind. Der Parameter a entspricht der bleibenden Deformation, die sich zu Beginn der Überrollungen einstellt, und q der Steigung der Spurbildungskurven und somit der Spurbildungsgeschwindigkeit nach längerem Überrollen.

Offenbar verläuft die Spurrinnentiefe des SMA mit Phonolithfiller (ZB) nach längerem Überrollen steiler als bei der Mischung mit Kalkfiller (NB und NO). Die Verwendung von Phonolithfiller in der Mischung reduziert anfänglich die durch den a-Wert charakterisierte bleibende Deformation um etwa 0.7 %. Ansonsten scheint die Zunahme der bleibenden Deformationen weitgehend unabhängig von der verwendeten Füllersorte. Demgegenüber nimmt die Spurrinnentiefe bei der Mischung mit dem Polymerbitumen (NO) weniger rasch zu (geringste Steigung).

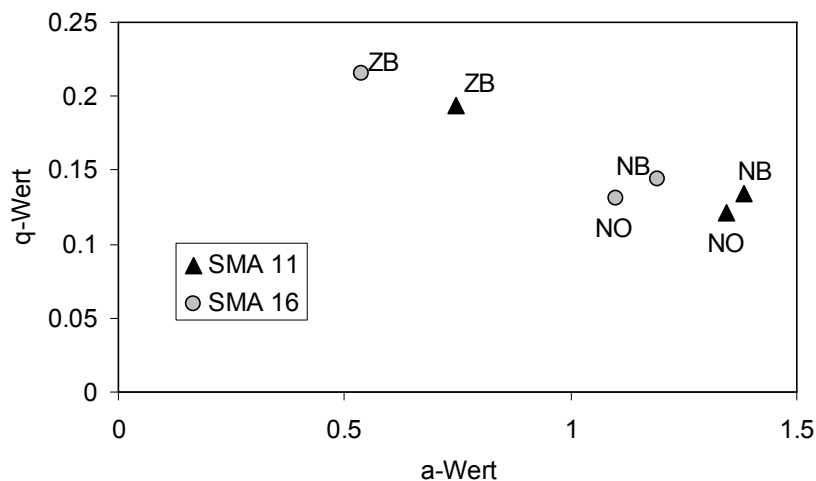


Abbildung 3.7 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und b für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an SMA gemäss Neubauer et al (2002)

3.2.2 Offenporiger Asphalt

Es ist nicht einfach, Mischgut für offen porigen Asphalt zu 100m hohen Prüfkörpern für die Spurbildungsprüfung zu verdichten, da die bei Verdichtung mit dem Gummireifen, das Mischgut nur verdrängt, nicht aber verdichtet wird Takahashi et al (1999). Diese Schwierigkeiten können bei Verwendung einer Stahlwalze vermieden werden, obwohl auch hier wegen Schiebungen auftreten können, die mit nötiger Sorgfalt auf ein Minimum reduziert werden können (Poulikakos et al., 2006)

Takahashi et al (1999) führte Spurbildungstests an Prüfkörpern aus Belagsausschnitten durch, die einen Tag nach dem Einbau aus den obersten 100mm der A1 entnommen wurden. Die Prüfkörper bestanden aus 40mm offenporigem Asphalt DRA11S über 60mm HMT22. Die Spurbildungsuntersuchung ergab eine Reduktion des maximalen Hohlraumgehaltes infolge 30'000 Überrollzyklen von 21.6 % auf 16.9 % bei einer gleichzeitigen Verringerung der Wasserdurchlässigkeit mit dem Standrohr von 0.764 cm/s auf 0.133 cm/s.

Zusätzlich wurden Spurbildungstests an Prüfkörpern aus verschiedenem offenporigen Asphaltmischgut durchgeführt, die teilweise mit dem Konzept der dichtesten Packung hergestellt wurden und mit Ausnahme des mit SPA bezeichneten Mischgutes SBS-Polymerbitumen enthielten (Takahashi et al, 2003). Die Spurbildungsprüfung erfolgte sowohl vor als auch nach thermischer Kurzzeit- (4h bei Verdichtungstemperatur) mit anschliessender Langzeitalterung (120h bei

85°C). Wie aus Abbildung 3.8 hervorgeht, hat sich infolge thermischer Alterung das Spurbildungsverhalten der einzelnen offenporigen Mischungen praktisch angeglichen. Bei SPA, der Mischung ohne Polymerbitumen hat das Spurbildungsrisiko durch Alterung abgenommen; bei den übrigen Mischungen ist keine eindeutige Tendenz feststellbar. Nähert man die Spurbildungskurven wieder durch eine Potenzfunktion der Form

$$s = az^q$$

(z: Zyklenzahl, s: Spurrinnentiefe, a und b sind die Parameter der Regressionskurve) an, ergibt sich zwischen den Regressionsparametern a und q der in Abbildung 3.9 dargestellte Sachverhalt, der sich vor allem durch eine Variation der a-Werte (d.h. einer raschen bleibenden Konsolidation zu Beginn der Spurbildungsprüfung) und nur durch geringe Unterschiede im q-Wert, d.h. in der Geschwindigkeit der Spurbildung, auszeichnet. Generell sind die q-Werte als niedrig zu bezeichnen.

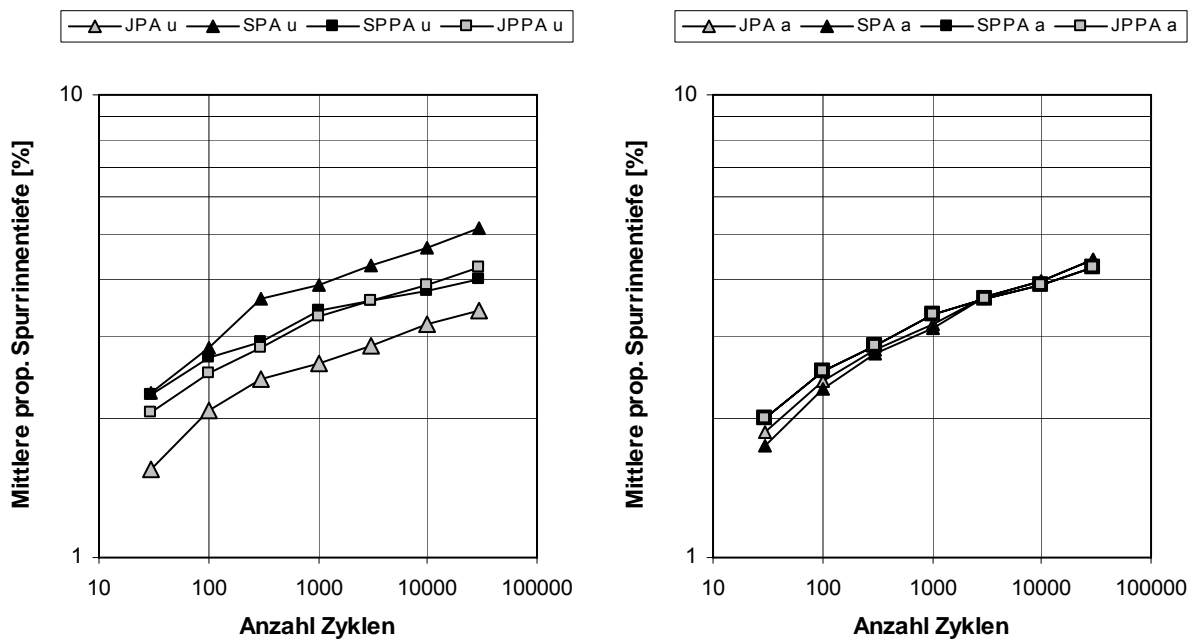


Abbildung 3.8 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an offenporigem Asphalt-Mischgut gemäss Takahashi et al (2003)

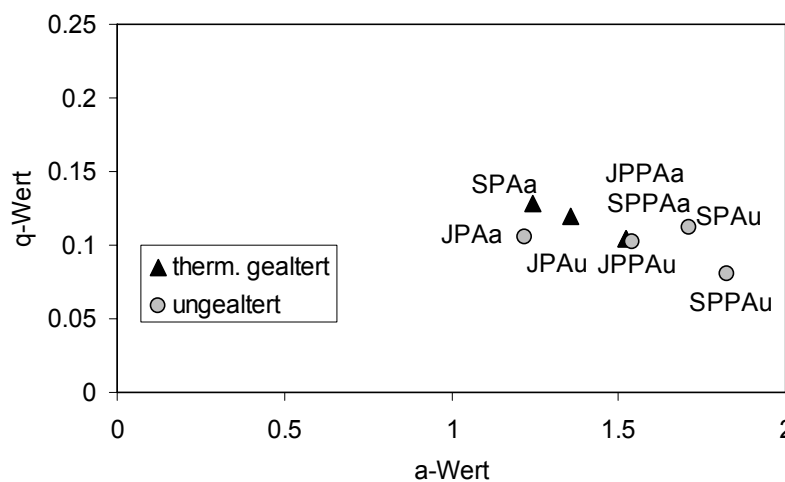


Abbildung 3.9 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und b für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an offenporigem Asphalt-Mischgut gemäss Takahashi et al (2003)

4 Forschungsprogramm

4.1 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen lassen sich in drei Hauptgruppen unterteilen:

- Untersuchungen an Belagsausschnitten aus dem Empa-Bestand
- Untersuchungen an neu verdichteten Prüfkörpern
- Nationale Ringanalyse an Mischgut

Mit den *Untersuchungen an Belagsausschnitten* aus dem Empa-Bestand sollten jeweils in der Praxis verdichtete Prüfkörper untersucht werden; dies im Hinblick auf das Verhalten unterschiedlicher Mischgutsorten. Damit sollte einerseits der Einfluss der Laborverdichtung ausgeschaltet werden andererseits aber auch eine möglicher Verbindung mit dem Praxisverhalten hergestellt werden. Gleichzeitig wurde untersucht, inwieweit auch Bohrkerne unterschiedlicher Höhe anstelle von Belagsausschnitten im Spurbildungstester untersucht werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass jeweils nur die obersten 100mm der Asphaltdecke untersucht wurden.

Da die Prüfkörper nicht in der eigentlichen Prüfform hergestellt wurden, sondern in diese in festem Zustand eingepasst werden musste, war zudem abzuklären, auf welche Weise eine zwingungsfreier seitlich aber trotzdem gut abgestützter Einbau in die Form erreicht werden könne.

Die Untersuchung erfolgte an folgenden Belagsausschnitten des Empa-Bestandes:

- Bohrkerne aus Autobahn A3-SMA (Raab et al. 1999)
- Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C,D,E,F,G,H (Fritz et al, 1992; Partl et al 1996; Partl et al, 1997)
- Belagsausschnitte aus dem Rundlauf U2000 (Rabaiotti et al. 2006)
- Belagsausschnitte übriger Asphaltdecken (Raab et al. 1999, Gubler, 2006, Poulikakos, 2006b)

Einzelheiten über die verwendeten Materialien und die Entnahmeorte finden sich in den entsprechenden Abschnitten

Mit den *Untersuchungen an neu verdichteten Prüfkörpern* sollten vor allem prüftechnische Aspekte bzw. die Einflüsse verschiedener Parameter in Bezug auf die Normanwendung abgeklärt werden, Namentlich:

- Einfluss des Reifendruckes sowie die Verteilung des Kontaktdruckes zwischen Reifen und Prüfkörper
- Einfluss der Randbedingungen (seitliche Abstützung in der Form)
- Einfluss der Prüftemperatur
- Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen
- Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung
- Einfluss der Prüfkörperdicke
- Einfluss der Bindemittelsorte

Die *Nationale Ringanalyse* an zwei Mischgutsorten diente dazu, Angaben über die Präzision im Vergleich verschiedener Labors zu gewinnen, dies als Grundlage für die Normierung aber auch im Sinne der Qualitätssicherung der einzelnen Labors.

5 LCPC-Spurbildungstest

5.1 Einrichtungen

Der vom LCPC entwickelte Spurbildungstests ist in der EN 12697-22 (2003) unter dem Titel „Gerät mit grossem Rad“ detailliert beschrieben. Es werden immer zwei Prüfkörper gleichzeitig geprüft. Der Spurbildungstest besteht aus zwei Hauptelementen: Dem Verdichter zur Herstellung der Prüfkörper und dem eigentliche Spurbildungstester (Abbildung 5.1).

Mit dem *Verdichter (BBPAC)* können typischerweise prismatische Prüfkörper mit einer Länge von 500 mm, einer Breite von 180 mm und mit 50mm oder 100mm Höhe hergestellt werden. Dabei werden die Verdichtungsformen im Wärmeschrank bei Verdichtungstemperatur während mindestens 2.5 h gelagert und anschliessend im Verdichtungsgerät für den Spurbildungstest eingebaut. Die Verdichtung erfolgt über ein Rad mit profillosem Luftreifen, der einen Durchmesser von 400mm und eine Breite 80mm aufweist. Der Maximaldruck im Reifen beträgt 0.6MPa.

Der Spurbildungstester (*Orniéreur*) besteht aus einer Temperierkammer mit zwei links und rechts von der Gleitschiene der starrachsigen Radaufhängung angeordneten Tischen, welche mit je einem Prüfkörper bestückt sind und hydraulisch in horizontaler Lage gegen die hin- und herrollenden Luftreifen gleicher Spezifikation wie beim Verdichter gedrückt werden. In Tabelle 5.1 sind die nach den massgebenden Normen zugelassenen Abweichungen der Kalibrationsparameter für beide Prüfeinrichtungen aufgelistet.

a)



(b)



Abbildung 5.1 Prüfeinrichtungen: (a) – LCPC-Spurbildungstester (Orniéreur); (b) – LCPC-Verdichter (BBPAC).

Tabelle 5.1 Prüfeinrichtungen: Kalibrationsparameter

Prüfeinrichtung	Parameter	Vorschrift
BBPAC	Reifenluftdruck (1bar=0.1MPa)	Stufen: 1 bar, 6 bar; max. Abweichung ± 0.3 bar
	Angebrachte Rolllast	5000 N $\pm 5\%$
ORNIÉREUR	Rollstrecke	410 mm ± 5 mm
	Frequenz der relativen Bewegung	1 Hz ± 0.1 Hz
	Angebrachte Rolllast	5000 N ± 50 N
	Unebenheit der Prüfkörperunterlagsplatte	< 1 mm
	Reifenluftdruck	6 bar ± 0.1 bar
	Reifenspurbreite	8 cm ± 0.5 cm
	Schräglaufwinkel	< 0.2°

5.2 Durchführung

Die Verdichtung der Mischungen erfolgt durch zyklisches Hin- und Herrollen des Luftreifens gemäss EN 12697-33 (2003) nach genau vorgeschriebener Prozedur und Verdichtungstemperatur. Dabei wird die Bodenplatte des Verdichters sukzessive hochgefahren, um die beim Verdichten abnehmende Prüfkörperhöhe auszugleichen. Bei den einzelnen Verdichtungszyklen wird darauf geachtet, dass zuerst die linke, dann die rechte Seite der Probe und am Schluss die Mitte (mit der halben Zahl Überrollungen) verdichtet wird.

Die Prüfkörper werden nach Einbau in den Spurbildungstester bei Raumtemperatur mit 1000 Zyklen überrollt. Jeder Zyklus umfasst dabei zwei Überrollungen innerhalb 1 s. Anschliessend werden die Prüfkörper während mindestens 12 Stunden bei 60°C temperiert. Die Prüfkörper werden ausgemessen und so die Ausgangsdicke als Bezugsgrösse für das Bestimmen der Spurrinnentiefe ermittelt. Dann wird die Prüfung bei 60°C durchgeführt. Dafür werden die Prüfkörper bis zu einer maximalen Anzahl von 30'000 Zyklen überrollt. Die Prüfung wird jeweils nach 30, 100, 300, 1000, 3000, 10'000 und 30'000 Zyklen unterbrochen und je Prüfkörper 3 Messungen in 5 Querprofilen bestimmt (Abbildung 5.2). Die Spurrinnentiefe wird nach der erfolgten Anzahl von Zyklen von jedem Prüfkörper jeweils durch Mitteln der 15 Messwerte in Prozent der Ausgangsdicke berechnet. Die massgebenden Werte ergeben sich jeweils durch Mitteln der Messwerte der beiden Prüfkörper. Der nach Norm massgebende Anforderungswert für die Spurrinnentiefe ist der Mittelwert der bleibenden Deformation von zwei Prüfkörpern nach 30'000 Zyklen bei 60 °C.

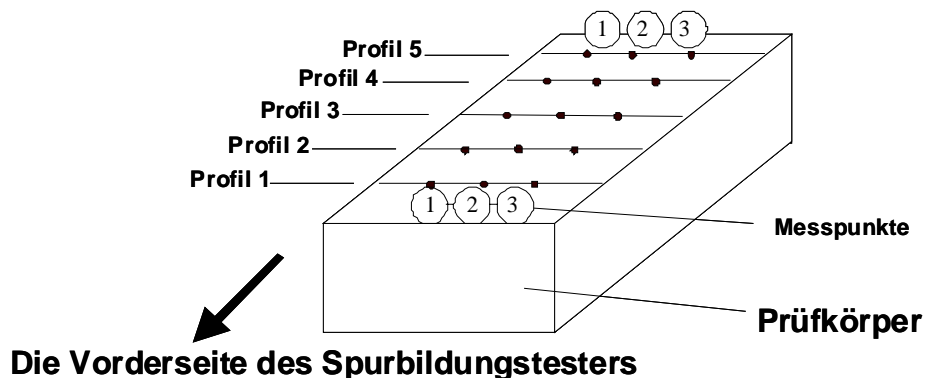


Abbildung 5.2. Prüfkörper des Spurbildungstesters: Messpunkte und Messprofile.

5.3 Auswertung

Für alle 15 Punkte auf der Prüfkörperoberfläche (siehe Abbildung 5.2) werden die Werte von m_{ijk} (in Millimeter) erfasst, die dem örtlichen Abstand zwischen einer Bezugsebene und dem jk -ten Punkt bei der i -ten Messreihe entsprechen. j ist dabei die Nummer des Profils, k ist die Nummer des Messpunktes (j variiert zwischen 1 und 5, k variiert zwischen 1 und 3). Der Wert $(m_{ijk} - m_{0jk})$ ergibt die Spurrinnentiefe im Punkt jk , wobei m_{0jk} den Anfangswert (Nullmessung) am jk -ten Punkt darstellt. Aus den Spurrinnentiefen werden die mittleren proportionalen Spurrinnentiefen P_i für die Messreihe i gemäss EN12697-22 berechnet:

$$P_i = \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^3 \frac{(m_{ijk} - m_{0jk})}{15 \cdot h} \quad (1)$$

Hierin bedeutet

P_i	proportionale Spurrinnentiefe, in Prozent (%);
i	Nummer der Messreihe;
j	Nummer des Profils;
k	Nummer des Messpunktes;
h	Prüfkörperdicke, in Millimeter.

Für die Untersuchung der Entwicklung der Spurrinnentiefen entlang der Reifenspur wird der Mittelwert P'_{ij} der proportionalen Spurrinnentiefen über 3 Messwerte des Profils j für jede Messreihe i berechnet:

$$P'_{ij} = \sum_{k=1}^3 \frac{(m_{ijk} - m_{0jk})}{3 \cdot h} \quad (2)$$

wobei

P'_{ij}	proportionale Spurrinnentiefe, in Prozent (%);
i	Nummer der Messreihe;
j	Nummer des Profils;
k	Nummer des Messpunktes;
h	Prüfkörperdicke, in Millimeter.

Für die Untersuchung der Entwicklung der Spurrinnentiefen quer zur Reifenspur wird der Mittelwert P''_{ik} der proportionalen Spurrinnentiefen über 5 Messwerte des Messpunktes k für jede Messreihe i berechnet:

$$P''_{ik} = \sum_{j=1}^5 \frac{(m_{ijk} - m_{0jk})}{5 \cdot h} \quad (3)$$

mit

P''_{ik}	proportionale Spurrinnentiefe, in Prozent (%);
i	Nummer der Messreihe;
j	Nummer des Profils;
k	Nummer des Messpunktes;
h	Prüfkörperdicke, in Millimeter.

6 Experimentelle Untersuchungen

6.1 Untersuchungen an Belagsausschnitten aus dem EMPA-Bestand

6.1.1 Verwendete Belagsausschnitte

Für die Untersuchung wurde eine Reihe von Belagsausschnitten herangezogen, welche von der Empa im Rahmen früherer Forschungsarbeiten aus stark befahrenen Autobahnen entnommen wurden und daher hinsichtlich ihrer allgemeinen Eigenschaften gut dokumentiert sind. Im Spurbildungstest wurden jeweils die obersten 100mm unmittelbar unterhalb der Fahrbahnoberfläche untersucht. Es handelt sich im Einzelnen um folgende Ausschnitte (Abbildung 6.1):

- Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken **C, D, E, F, G, H** der Forschungsarbeit Fritz et al (1992); vgl. auch Partl et al (1996) und (1997); Bezeichnungen nach damaliger Norm; Entnahmeort gemäss Abbildung 6.1; Charakteristika gemäss Tabelle 6.1
- Belagsausschnitte **R1, R2, R3, R4, R5** aus dem Rundlauf U2000 (Rabaiotti et al., 2006); Charakteristika gemäss Tabelle 6.2
- Übrige Belagsausschnitte; Charakteristika gemäss Tabelle 6.3:
 - **Ari**: Arisdorf Richtung Basel, A2 (Gubler, 2006)
 - **A3-SMA** (Raab et al., 1999)
 - **A3-GA**: (Raab et al., 1999)
 - **Oft**: Oftringen A1 (Poulikakos et al 2006b)
 - **Chi**: Chiasso A2 (Gubler, 2006)

Wie ersichtlich wiesen einige der Belagsausschnitte wegen ihres beträchtlichen Alters noch TB auf (E, H, Ari). Diese Prüfkörper wurden aus methodischen Gründen miteinbezogen, um breiter abgestützte allgemeine Auskünfte über die Aussagekraft des Spurbildungstests zu erhalten.

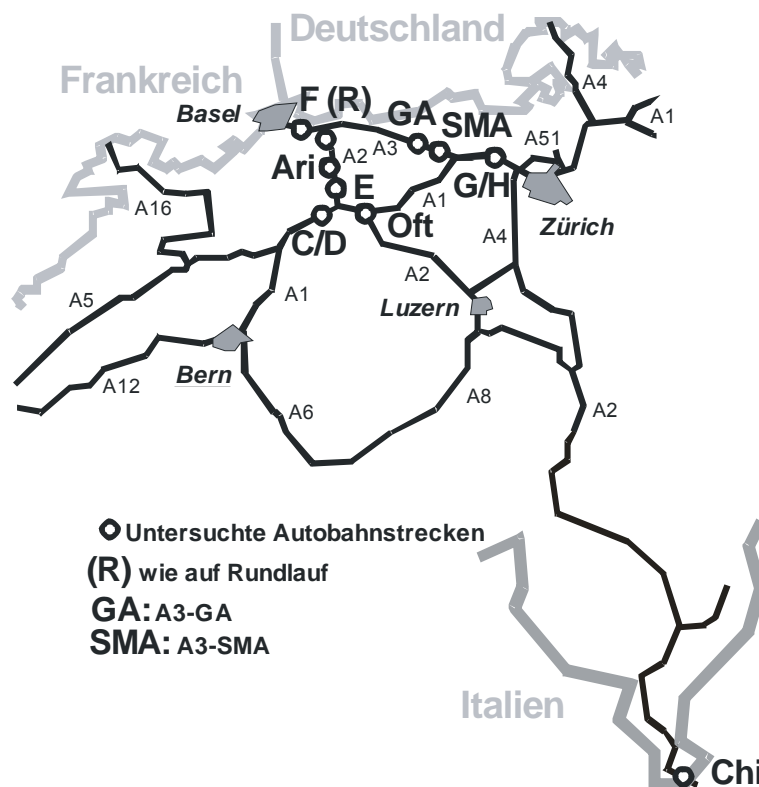


Abbildung 6.1 Entnahmestellen der Belagsausschnitte C... H, Ari, Oft, Chi, A3-GA, A3-SMA; R gleiches Tragschichtmaterial wie im Rundlauf.

Tabelle 6.1 Charakteristika der obersten 100mm der Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C,...H gemäss Fritz et al (1992); nb: nicht bestimmt, kB: keine Binderschicht

Autobahnstrecken, Belagsausschnitte		C	D	E	F	G	H	
<u>Deckschicht</u>		Mischgut	AB16s	AB10	TA16	AB16s	AB16	TA16
Bindemittelsorte		B40/50	B180/220	TB2000	B40/50	B80/100	TB2000	
						Trinidad	Trinidad	
Grösstkorn	mm	16	10	16	16	16	16	
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	5.31	5.67	5.71	4.95	6.14	5.64	
Hohlraumgehalt	V%	2.7	2	3.4	7.3	3.5	2.6	
Schichtdicke	mm	47	23	36	50	30	37	
Stabilität (Marshall) <i>an Bohrkern</i>	kN	15.2	9.6	13.5	19.7	11.7	16.7	
Fliessen (Marshall) <i>an Bohrkern</i>	mm	3.4	3.4	3.7	3.9	4.1	4.2	
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	4	11	8	3	6	6	
<u>Binderschicht</u>		Mischgut	kB	AB16u	TA25u	kB	AB16	TA16
Bindemittelsorte		kB	B180/220	TB2000	kB	B80/100	TB2000	
Grösstkorn	mm	kB	16	25	kB	16	16	
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	kB	4.92	4.74	kB	5.44	5.3	
Hohlraumgehalt	V%	kB	4.7	4	kB	4.7	4.8	
Schichtdicke	mm	kB	41	47	kB	43	31	
Stabilität (Marshall) <i>an Bohrkern</i>	kN	<i>kB</i>	8.5	11.3	<i>kB</i>	10.9	16.1	
Fliessen (Marshall) <i>an Bohrkern</i>	mm	<i>kB</i>	2.8	3.3	<i>kB</i>	3.5	3.1	
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	kB	11	8	kB	6	6	
<u>Obere Tragschicht</u>		Mischgut	HMT40s	HMT32	HMT B32	HMT40s	HMT32	HMT32
Bindemittelsorte		B40/50	TB200/500	TB2000	B40/50	B80/100	TB2000	
Grösstkorn	mm	40	32	32	40	32	32	
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	3.77	3.69	4.01	4	4.06	4.24	
Hohlraumgehalt	V%	2.1	3.3	5.2	3.8	2.6	3.7	
Schichtdicke	mm	99	107	51	95	77	53	
Stabilität (Marshall) <i>an Bohrkern</i>	kN	17.5	6.2	11.4	<i>nb</i>	9.0	15.0	
Fliessen (Marshall) <i>an Bohrkern</i>	mm	3.1	2.5	2.9	<i>nb</i>	2.4	2.5	
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	4	11	8	3	6	6	

Tabelle 6.2 Charakteristika der obersten 100mm der Belagsausschnitte aus dem Rundlauf gemäss Rabaïotti et al (2006); na: nicht anwendbar da Mischgutentnahme

Autobahnstrecken, Belagsausschnitte		R1	R2	R3	R4	R5
<u>Deckschicht</u>	Mischgut	AB11 S	AB11 S	AB11 S	AB11 S	AB11 S
Bindemittelsorte		50/70	50/70	50/70	50/70	50/70
Grösstkorn	mm	11	dito	dito	dito	dito
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	5.98	dito	dito	dito	dito
Hohlraumgehalt	V%	8.5	dito	dito	dito	dito
Schichtdicke	mm	40	dito	dito	dito	dito
Stabilität (Marshall) an Mischgut	kN	14.5	dito	dito	dito	dito
Fliessen (Marshall) an Mischgut	mm	3.1	dito	dito	dito	dito
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	na	dito	dito	dito	dito
<u>Obere Tragschicht</u>	Mischgut	HMT22	HMT22	HMT 22	HMT22	HMT22 (EME2)
Bindemittelsorte		50/70	50/70	50/70	PmB C70/100-48	10/20
Grösstkorn (TG: teilw. gebrochen)	mm	22 TG	22	22	22	22
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	4.5	4.5	4.6	4.5	5.4
Hohlraumgehalt	V%	2.3	5.7	3.8	5.4	5.4
Schichtdicke	mm	70	70	70	70	70
Stabilität (Marshall) an Mischgut	kN	13.4	11.8	12.5	14.5	22.4
Fliessen (Marshall) an Mischgut	mm	3.2	2.5	3.1	3.5	3.9
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	na	na	na	na	na
<u>Untere Tragschicht</u>	Mischgut	HMT22	HMT22	HMT 22	HMT22	HMT22 (EME2)
Bindemittelsorte		50/70	50/70	50/70	PmB C70/100-48	10/20
Grösstkorn (TG: teilw. gebrochen)	mm	22 TG	22	22	22	22
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	4.1	4.6	4.2	4.3	4.9
Hohlraumgehalt	V%	4.7	5.0	4.7	6.2	3.8
Schichtdicke	mm	70	70	70	70	70
Stabilität (Marshall) an Mischgut	kN	10.5	13.0	12.5	12.1	13.9
Fliessen (Marshall) an Mischgut	mm	3.2	3.1	3.1	2.6	3.3
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	na	na	na	na	na

Tabelle 6.3 Charakteristika der obersten 100mm der übrigen Belagsausschnitte gemäss Raab et al, (1999), Gubler, (2006), Poulidakos (2006b); nb: nicht bestimmt, kB: keine Binderschicht, na: nicht anwendbar

Autobahnstrecken, Belagsausschnitte		Ari	A3-GA	A3-SMA	Oft	Chi
Deckschicht	Mischgut	TA16U (alt)		SMA 11 S	DRA11 (alt)	AB10 (alt)
Bindemittelsorte		TB durch Empa fest-gestellt	B40/50 Trinidad	B80/100 Trinidad	B 55/70S Trinidad NAF 501	Bitumen Pen. unbek.
Trinidad Epuré	M%	-			-	-
Trinidad Powder 50/50	M%	-			-	-
Grösstkorn	mm	11.2	11	11	11	8
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	5.3	7.2	6.8	4.8	6.6
Hohlraumgehalt	V%	3.1	1.2	3.5	26.1	2.8
Schichtdicke	mm	39	43	42	40	21
Stabilität (Marshall) an Mischgut	kN	nb	na	6.9	na	nb
Fliessen (Marshall) an Mischgut	mm	nb	na	3.1	na	nb
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	~26	0	0	5	~31
Binderschicht	Mischgut	Keine Angaben	GA16 S	kB	kB	AB16 u (alt)
Bindemittelsorte		-	PmB 45	kB	kB	TB2000
Grösstkorn	mm	nb weil TB	16	kB	kB	11.2
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	nb weil TB	6.7	kB	kB	5.3
Hohlraumgehalt	V%	nb weil TB	1.8	kB	kB	2.9
Schichtdicke	mm	nb weil TB	47	kB	kB	41
Stabilität (Marshall) an Mischgut	kN	nb weil TB	na	kB	kB	nb
Fliessen (Marshall) an Mischgut	mm	nb weil TB	na	kB	kB	nb
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	~26	0	kB	kB	~31
Tragschicht	Mischgut	HMT B25 (alt)	HMT22	HMT22 S	HMT 22 SAB25 (alt)	
Bindemittelsorte		TB durch Empa fest-gestellt	B55/70	B55/70	B20/30	Bitumen Pen unbek
Grösstkorn	mm	22	22	22	22	16
Bindemittelgehalt (rückgewonnen)	M%	3.5	4.5	4.4	5.3	4.4
Hohlraumgehalt	V%	4.5	3.5	4.3	3.7	7.1
Schichtdicke	mm	45	69	80	74	53
Stabilität (Marshall) an Mischgut	kN	nb	nb	15.7	na	nb
Fliessen (Marshall) an Mischgut	mm	nb	nb	2.3	na	nb
Gebrauchdauer bei Entnahme	Jahre	~26	0	0	5	~31

6.1.2 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen

Die Entnahme grösserer rechteckiger Prüfkörper aus den bestehenden Belägen ist meistens mit einem beträchtlichen zeitlichen und materiellen Aufwand verbunden. Die Entnahme der zylindrischen Bohrkernen hingegen stellt in diesem Sinne eine günstigere Alternative dar. Darum wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine kurze Prüfserie durchgeführt, in welcher die aus den Bohrkernen unterschiedlicher Grössen zusammengesetzten Orniéreur-Prüfkörper im LCPC-Spurbildungstest geprüft wurden (Serien B150 und B220 weiter unten in diesem Abschnitt). Die Resultate dieser Prüfungen wurden sowohl untereinander als auch mit den Resultaten für die Orniéreur-Standardprüfkörper verglichen, die aus dem gleichen Material voll ausgeschnitten und anschliessend geprüft wurden (Serie S vgl. Tabelle 6.4).

Die Prüfkörper wurden aus einem Riegel A3-SMA gebohrt und ausgeschnitten, der 1995 aus der Autobahn A3 (Basel-Zürich) entnommen wurde (Raab et al. 1999). Die oberen zwei Schichten des Belagsausschnitts bestanden aus dem Splittmastixasphalt SMA 11 S und einer HMT 22 S. Die Dicke der Deckschicht betrug ca. **42mm** und die Gesamtdicke der oberen zwei Schichten betrug mehr als 100 mm. Die Untersuchung erfolgte an SMA, weil dieses Mischgut auf dem Prinzip der Korn-zu-Korn Abstützung beruht und daher besonders sensibel auf Probleme der seitlichen Abstützung reagiert (vgl. Partl et al, 1995). Da die seitliche Abstützung bei diesen Vergleichsversuchen zur Thematik des Zusammensetzens von Prüfkörpern aus kleineren Teilstücken, namentlich von Bohrkernen, von zentraler Bedeutung ist, wurde SMA als besonders aussagekräftig eingestuft.

Es wurden die Bohrkern mit zwei unterschiedlichen Durchmessern gebohrt, 150 mm und 220 mm. Die 150 mm – Bohrkern wurden zweiseitig und die 220 mm – Bohrkern allseitig abgeschnitten. Abbildung 6.2 zeigt die Geometrie der Prüfkörperteile. Die Prüfkörperteile wurden gemäss Abbildung 6.3 zusammengebaut. Dabei bestanden die aus den 150 mm – Bohrkernen zusammengesetzten Prüfkörper aus 5 Prüfkörperteilen, diejenige aus den 220 mm – Bohrkernen aus 4 Prüfkörperteilen. Die Prüfkörperteile wurden an den abgeschnittenen Grenzflächen mit einem bitumenhaltigen Haftvermittler zusammengeklebt, um das Eindringen des Mörtels zwischen die Prüfkörperteile beim Einbau in den Prüfraumen zu verhindern. Es wurden die Prüfkörper der Dicke 50 mm und 100 mm hergestellt.

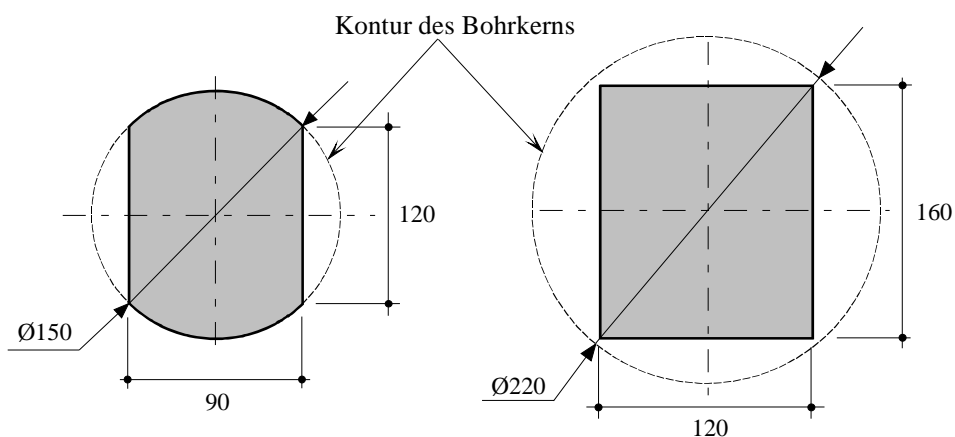


Abbildung 6.2 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen: Prüfkörperteile.



Abbildung 6.3 Vergleichsversuche an SAM Bohrkernen: Zusammengesetzte Prüfkörper.

Die Prüfkörper wurden in den Prüfraumen des Orniéreur mit dem handelsüblichen schwindkompensierten Fugenmörtel SikaGrout® 314 eingemörtelt. Abbildung 6.4 zeigt die Geometrie der eingebauten Prüfkörper. Die Einzelheiten in Bezug auf die Prüfkörper sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

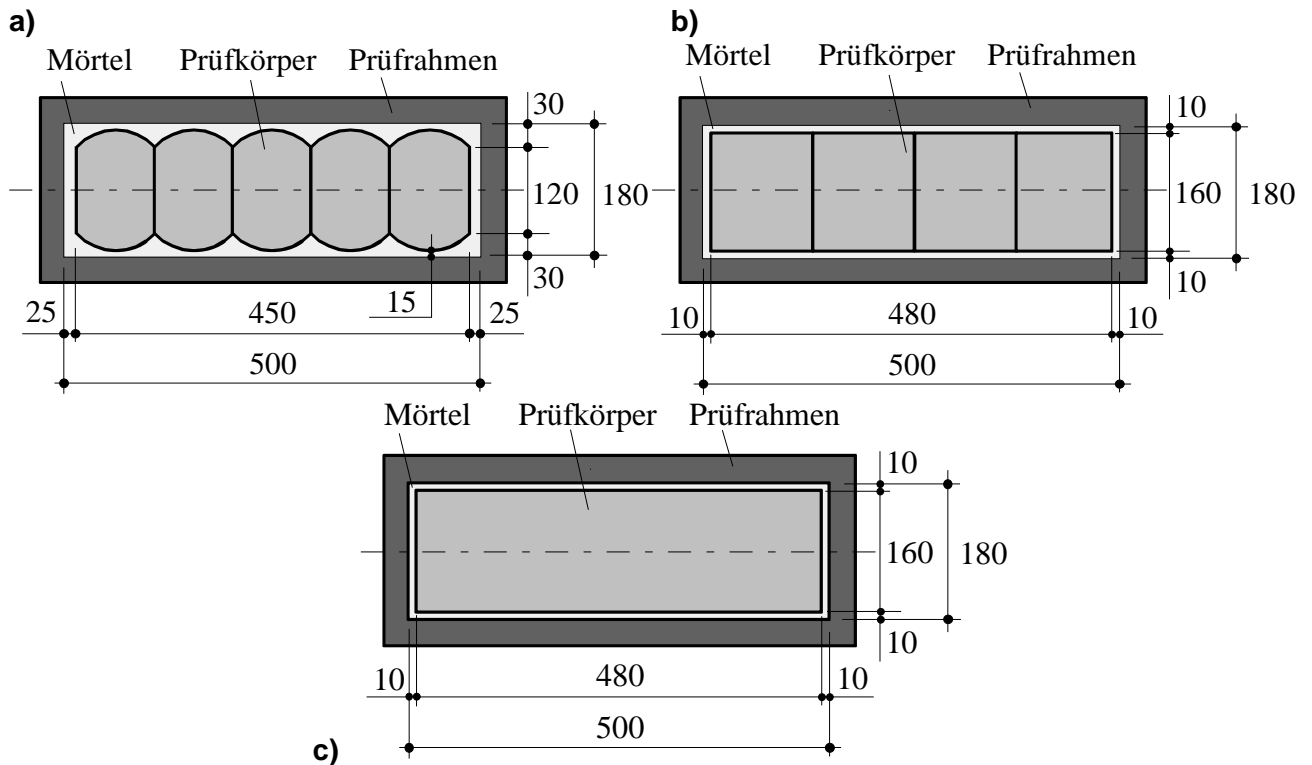


Abbildung 6.4 Geometrie der fertigen Orniéreur-Prüfkörper: (a) – Serie B150; (b) – Serie B220; (c) – Serie S.

Tabelle 6.4 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen: Prüfkörper

Serie	Zusammengesetzt aus den Prüfkörperteilen	Anzahl Prüfkörperteile	Prüfkörper-Bezeichnung (je 2 Prüfkörper)	Dicke [mm]
B150	aus Bohrkernen Ø150mm	5	B150H50-1(2)	50
			B150H100-1(2)	100
B220	aus Bohrkernen Ø220mm	4	B220H50-1(2)	50
			B220H100-1(2)	100
S	-	1	S50-1(2)	50
			S100-1(2)	100

Prüftemperatur betrug 60° C. Alle Prüfungen wurden bei 1000 Belastungszyklen abgebrochen da sich hier bereits relativ starke Verformungen einstellen. Dabei wurden die Spurrinntiefen bei 30, 100, 300 und 1000 Belastungszyklen gemessen. Tabelle 6.5 zeigt die wichtigsten Prüfergebnisse. Als Indikator für die Streuung ist zudem die Varianz als prozentuales Verhältnis zwischen Standardabweichung zum Mittelwert aus Doppelbestimmung angegeben.

Demzufolge betragen die maximalen Varianzen im untersuchten Bereich mit Ausnahme von B150H50 bei Zyklenzahlen über 100 weniger als 20%. Alle Prüfergebnisse sind im Anhang 11.2 aufgeführt.

Tabelle 6.5 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen: Ergebnisse

Prüfkörperdicke [mm]	Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der Spurrinnentiefe [mm]	Varianz [%]	Mittelwert der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i [%]
50	B150H50-1(2)	30	0.65	16.4	1.29
		100	1.18	4.8	2.36
		300	1.98	11.1	3.95
		1000	2.87	27.9	5.73
	B220H50-1(2)	30	1.26	26.5	2.53
		100	1.86	13.1	3.72
		300	3.00	17.8	6.00
		1000	4.24	14.3	8.48
	S50-1(2)	30	1.14	0.1	2.29
		100	1.86	6.3	3.72
		300	2.61	0.6	5.23
		1000	3.47	3.1	6.95
100	B150H100-1(2)	30	0.52	3.1	0.52
		100	1.23	2.5	1.23
		300	2.68	2.0	2.68
		1000	5.17	4.4	5.17
	B220H100-1(2)	30	0.55	21.0	0.55
		100	1.95	1.0	1.95
		300	3.66	2.4	3.66
		1000	7.24	4.0	7.24
	S100-1(2)	30	1.58	25.6	1.58
		100	2.50	7.1	2.50
		300	4.07	5.1	4.07
		1000	6.96	3.6	6.96

Abbildung 11.1 im Anhang zeigt die Einzelresultate der Prüfserien. Die mittleren proportionalen Spurrinnentiefen \bar{P}_i sind für alle Prüfkörper sowohl in proportionalen als auch in doppellogarithmischen Achsen grafisch dargestellt.

Abbildung 6.5 liefert den Vergleich der Mittelwerte (gemittelt über jeweils zwei Werte für zwei Prüfkörper gleicher Geometrie und Zusammensetzung) der proportionalen Spurrinnentiefen für die Prüfkörper unterschiedlicher Höhen. Demzufolge lassen sich Spurbildungsprüfkörper nur mit Vorbehalt aus Bohrkernen zusammensetzen. Dies gilt insbesondere für kleine Durchmesser und geringe Prüfkörperhöhen. Gute Übereinstimmung mit dem entsprechenden monolithischen Körper der Serie S ergibt sich im vorliegenden Fall lediglich bei Bohrkernen mit dem Durchmesser 220mm und einer Höhe von 100mm. Im Übrigen ist es bemerkenswert, dass bei den Prüfkörpern der Serie S jene mit der geringeren Höhe zu Beginn eine grössere proportionale Spurrinnentiefe erleiden als jene mit 100mm Höhe (Abbildung 6.7). Ähnliches wurde auch für die aus Bohrkernen zusammengesetzten Prüfkörper festgestellt. Dies ist auf die nichtlineare Tiefenwirkung der Beanspruchung im Prüfkörper zurückzuführen, die schon aus der einfachen klassischen Betrachtung am unendlichen elastischen Halbraum nach Boussinesq oder durch Annahme eines einfachen linearen sich in Tiefenrichtung z öffnenden Lastverteilungskegels ($\sigma \sim 1/z^2$) resultiert. Die Untersuchung bestätigt die praktische Erfahrung mit dem Spurbildungstest, dass der direkte Vergleich proportionaler Spurrinnentiefen von Asphalt-Prüfkörpern verschiedener Höhe allgemein nicht zulässig ist.

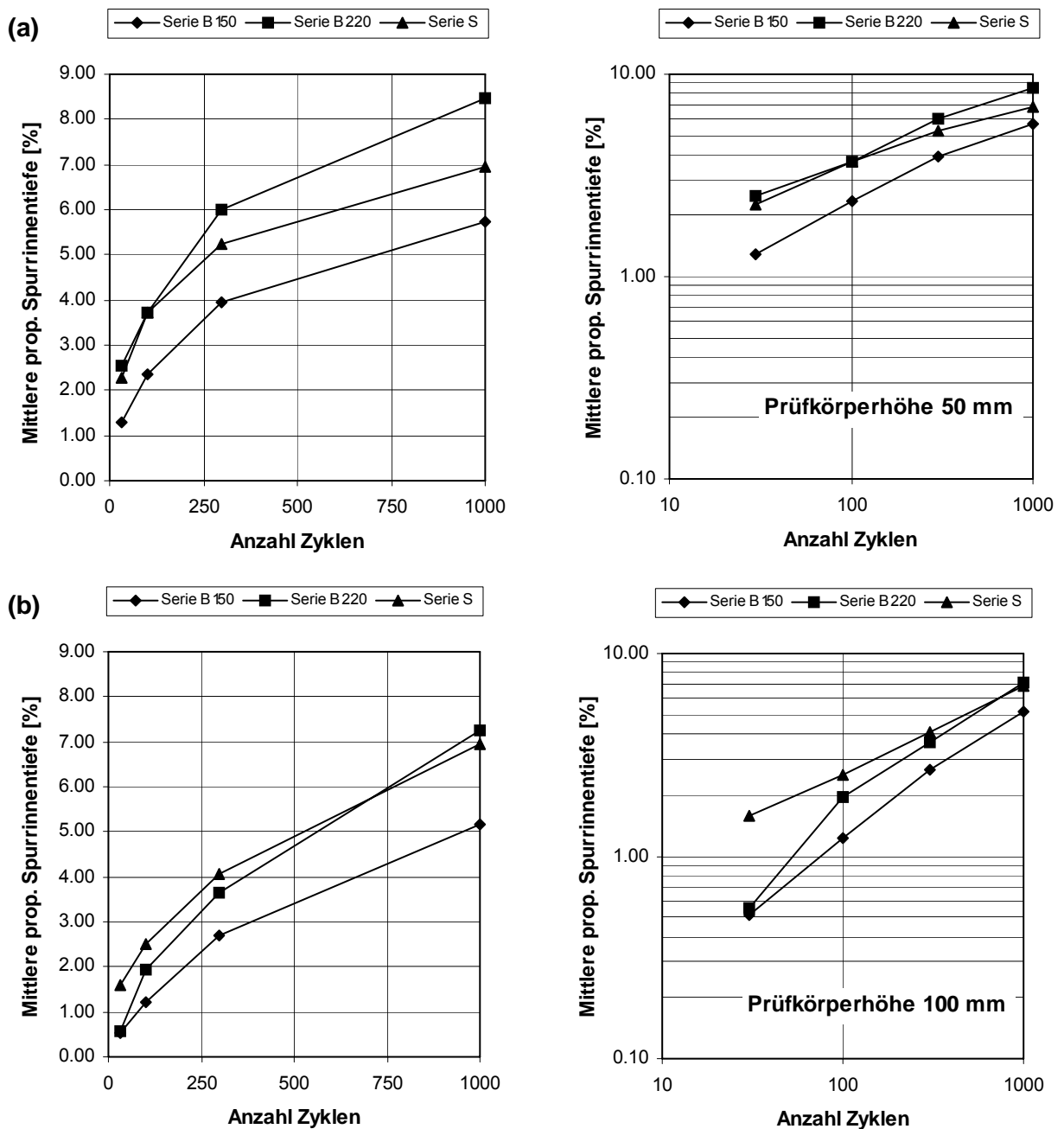


Abbildung 6.5 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen, Mittelwerte der proportionalen Spurrinnentiefen für die Prüfkörper der Höhe: (a) – 50 mm; (b) – 100 mm.

Wie aus Abbildung 6.5b hervorgeht, kann im doppeltlogarithmischen Massstab der Verlauf der Spurbildung durch Geraden, d.h. Potenzfunktionen, angenähert werden. Dabei lässt die Abbildung vermuten, dass die Spurrinnentiefe nach 30 Zyklen bei den Bohrkernen mit einem Durchmesser von 220 mm und einer Höhe von 100 mm etwas zu gering war, wurde doch praktisch der gleiche Wert wie bei den Prüfkörpern mit 150mm erreicht. Da dies bei der Berechnung der Regressionsparameter offensichtlich zu einer nicht zutreffenden Überschätzung des Spurbildungsverhaltens bei höherer Zyklenzahl geführt hätte, wurde dieser Wert bei der Berechnung der Regressionsparameter in Tabelle 6.6 nicht berücksichtigt. Dort sind entsprechenden Regressionsparameter a und q samt zugehörigem Bestimmtheitsmass r^2 für eine Potenzfunktion der Form

$$s = az^q$$

(z : Zyklenzahl, s : Spurrinnentiefe, a, q : Regressionsparameter) angegeben.

Bei der Verwendung einer Potenzfunktion zur Charakterisierung der Spurbildungsentwicklung ist zu beachten, dass dieser mathematische Ansatz nur für den spezifischen Datenbereich gilt, d.h. für ca. 10% der Spurrinnentiefe bezogen auf die Prüfkörperhöhe. Für grössere Spurrinnen, namentlich für solche, die sich theoretisch im Bereich der Prüfkörperhöhe bewegen, sind die angegebenen Regressionsparameter selbstverständlich nicht mehr anwendbar. Im Extremfall kann rein rechnerisch mit der Potenzfunktion der Wert der Prüfkörperdicke überschritten werden (beispielsweise im Falle von S100 nach 552'824 Zyklen), was selbstverständlich nicht möglich ist. Aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen muss daher der Verlauf der Spurbildungsentwicklung einem Endwert zustreben, d.h. die im doppellogarithmischen Massstab linear verlaufende Potenzfunktion muss bei hoher Zyklenzahl in eine sich sukzessive horizontal abflachende Kurve übergehen.

Im Vergleich zu den zusammengesetzten Prüfkörpern fällt auf, dass die monolithischen Prüfkörper der Serie S unabhängig von der Prüfkörperhöhe bei höherer Zyklenzahl jeweils die geringsten Geschwindigkeit der Spurbildung aufweisen (Parameter q), jedoch zu Beginn die deutlichste Spurrinnenbildung erleiden (Parameter a). Offenbar wird bei diesen Prüfkörpern die Stützfunktion des Korngerüsts rascher dafür aber langfristig effektiver mobilisiert.

Bemerkenswerterweise ergibt sich unabhängig von der Prüfkörperhöhe und der Art der Spurbildungsprüfkörper ein empirischer Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q (Abbildung 6.6). Es liegt die Vermutung nahe, dass dieser Zusammenhang ein Materialcharakteristikum für den untersuchten SMA darstellt.

Tabelle 6.6 Regressions-Parameter für die proportionale Spurrinnentiefe der Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen, Determinationskoeffizient r^2

Variante	a	q	r^2
B150H50	0.3155	0.4291	0.9885
B220H50	0.756	0.3535	0.9942
S50	0.8201	0.3165	0.9852
B150H100	0.0566	0.6625	0.9958
B220H100	0.1428	0.5684	1 *)
S100	0.3645	0.4246	0.9985

*) Ohne Punkt nach 30 Zyklen bestimmt

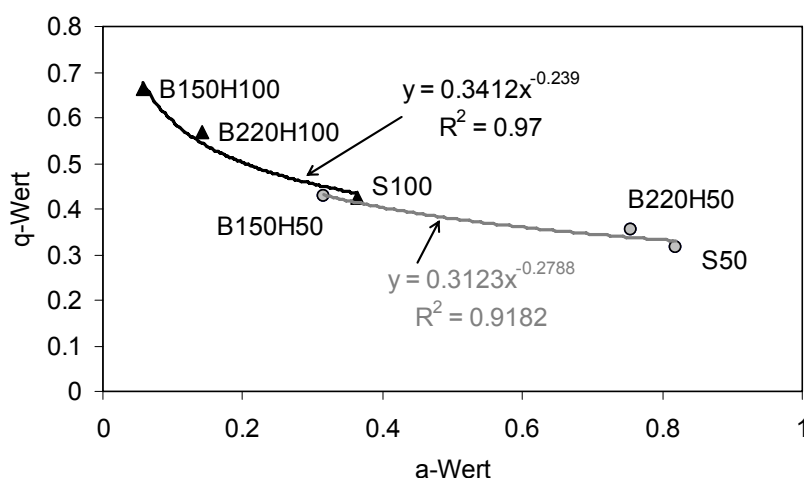


Abbildung 6.6 Zusammenhang zwischen Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinnentiefe der Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen

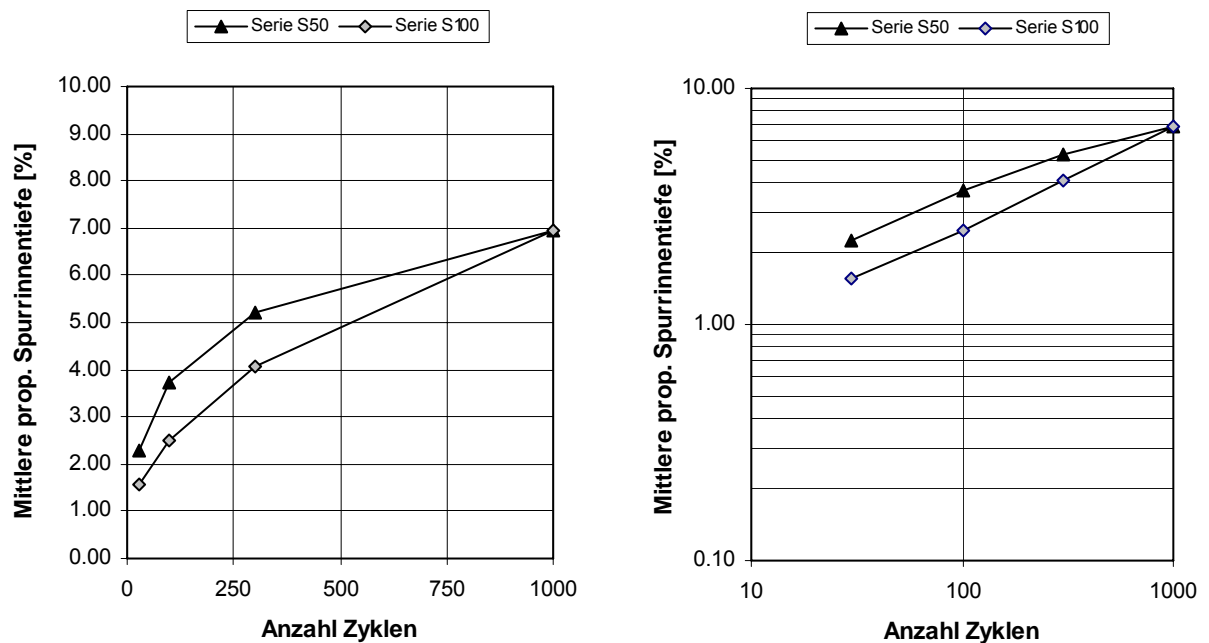


Abbildung 6.7 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen, Mittelwerte der proportionalen Spurrinnentiefen für die monolithischen Prüfkörper S50 und S100

6.1.3 Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C, D, E, F, G, H

In der Forschungsarbeit von Fritz et al (1992) sowie den Arbeiten von Partl et al (1996) und (1997) wurde das Langzeitverhalten dieser Belagsausschnitte gemäss Tabelle 6.7 ausführlich mit verschiedenen Laboruntersuchungsergebnissen verglichen. Auch wenn diese Belagsmaterialien nicht mehr dem neuesten Stand entsprechen (insbesondere bezüglich Verwendung von TB), wurde der Umfang der Materialpalette und der vorliegenden Erkenntnisse insbesondere auch betreffend Praxiserfahrung als besonders wertvoll angesehen, um grundsätzliche performancebezogene Hinweise an realistisch hergestellten Asphaltdecken zur Beurteilung der Aussagekraft des Spurbildungstests zu erhalten. Hinweise wurden weniger in quantitativer sondern eher in qualitativer Hinsicht erwartet, d.h. im Sinne einer relativen Rangierung. Dabei war selbstverständlich zu berücksichtigen, dass das Spurbildungsverhalten der obersten 100mm im Orniéreur auf die in der Praxis beobachtete bleibenden vertikalen Verformungen der ganzen Belagsdecke zurückgeführt werden kann (Abbildung 6.8).

Auch darf nicht übersehen werden, dass zwischen den früheren Arbeiten und den in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen bereits geraume Zeit verstrichen war und die an der Empa noch verfügbaren bei gleichmässigem Raumklima gelagerten Belagsausschnitte einer gewissen von Partl et al (1997) ausführlich analysierten und diskutierten Alterung unterworfen waren. Beispielsweise wurde festgestellt, dass sich der Erweichungspunkt R&K während ca. 17 Jahren Langzeitlagerung im Labor bei Raumtemperatur allgemein nicht signifikant veränderte andererseits aber aufgrund der Penetrationsänderung eine merkliche Versteifung des Bindemittels zu beobachten war; dies, obwohl die Belagsausschnitte, aus denen das Bindemittel rückgewonnen wurde, beachtliche Dimensionen auswiesen.

Tabelle 6.7 Langzeit-Performance von Deckschicht DS, Binderschicht BS, Obere und untere Tragschicht OT u. UT der Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C...H (+: Wiederholte Reparaturen; s: stark; m: mittel; k: nein), nach Fritz et al (1992)

Belagsausschnitte					1990		Schäden		Massnahmen
Nr	Schicht				Gebrauchdauer (Jahre)	Totale äquiv. Verkehrslast pro Fahrriichtung (mio)	Spurrinnen & bleib. Deform.	Risse	
	DS	BS	OT	UT					
C	X	-	X	X	16	15.3	m n	m -	Risse nach 9 Jahren & Kornausbrüche DS ist zu ersetzen
D	X	X	X	-	11	6.8	s m s	n - -	Totalersatz im Entnahmezeitpunkt 1990
E	X	X	X	X	8 20	4.2 13.2	s n	n -	Obere 120mm ersetzt im Entnahmezeitpunkt 1990
F	X	-	X	X	12 15	18.1 23	n n	s -	Ersatz der DS infolge Rissbildung
G	X	X	X	X	6.1+ 18	6.1+ 20.9	m s m	n - -	Wiederholtes Auffüllen von Spurrinnen
H	X	X	X	X	18	20.9	m n	m -	Langsame Spurrinnenbildung, Risse bei Ersatz der DS 1991/92

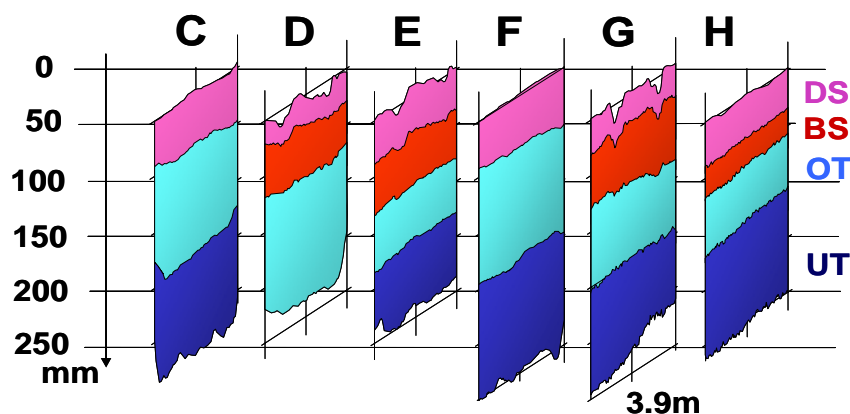


Abbildung 6.8 Schichtenverlauf der Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C...H bei Entnahme nach Verkehrsbelastung nach Fritz et al (1992)

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Spurbildungsprüfung enthält Tabelle 6.8. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte und Varianzen für die Belagsausschnitte der Autobahnstrecken C...H. Im Falle der Strecke E wurden zwei Prüfkörper untersucht, da nur ein Belagsausschnitt verfügbar war. In allen übrigen Fällen wurden jeweils vier Prüfkörper berücksichtigt. Die Mittelwerte für die einzelnen Belagsausschnitte der Autobahnstrecken (z.B. C.2.2 und C3.2) sind in Tabelle 11.6 aufgeführt. Weitere Einzeldaten sowie Diagramme der Einzelwerte finden sich im Anhang 11.3.

Wegen übermässiger Spurbildung konnten lediglich die Prüfungen der Strecken C, F, H vollständig durchgeführt werden. Die Prüfkörper der Strecken D, E, G erwiesen sich in der Spurbildungsprüfung als besonders spurbildungsanfällig. Dies deckt sich im Wesentlichen auch mit den Beobachtungen in situ (vgl. Abbildung 6.8). Wie ersichtlich ist die Varianz aufgrund der teilweise deutlichen Unterschieden zwischen den Einzelergebnissen aber auch zwischen den einzelnen

Belagsausschnitten auch bei steigenden Zyklenzahlen mit Werten in der maximalen Grössenordnung von 60% beträchtlich.

Tabelle 6.8 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken C...H: Mittelwerte und Varianz der Spurbildungsprüfung

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i [%] für die Prüfserie					
	C	D	E	F	G	H
30	0.81	0.58	1.20	0.71	1.34	0.78
100	1.23	0.99	2.83	0.92	2.85	1.20
300	1.67	1.59	5.23	1.15	5.59	1.66
1000	2.37	2.82	11.32	1.36	11.60	2.20
3000	3.66	5.45		1.66		3.15
10000	6.32	8.07		2.04		4.57
30000	9.00			2.37		5.42
Anzahl Belastungszyklen	Varianz [%] der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i für die Prüfserie					
	C	D	E	F	G	H
30	19.4	42.6	8.8	46.9	14.9	27.4
100	16.2	48.4	11.6	34.1	10.1	29.1
300	12.6	51.8	6.3	27.9	11.0	32.0
1000	12.9	61.7	6.0	25.0	10.6	39.5
3000	14.5	64.4		19.3		48.4
10000	29.9	63.7		14.8		56.4
30000	34.1			12.7		56.5

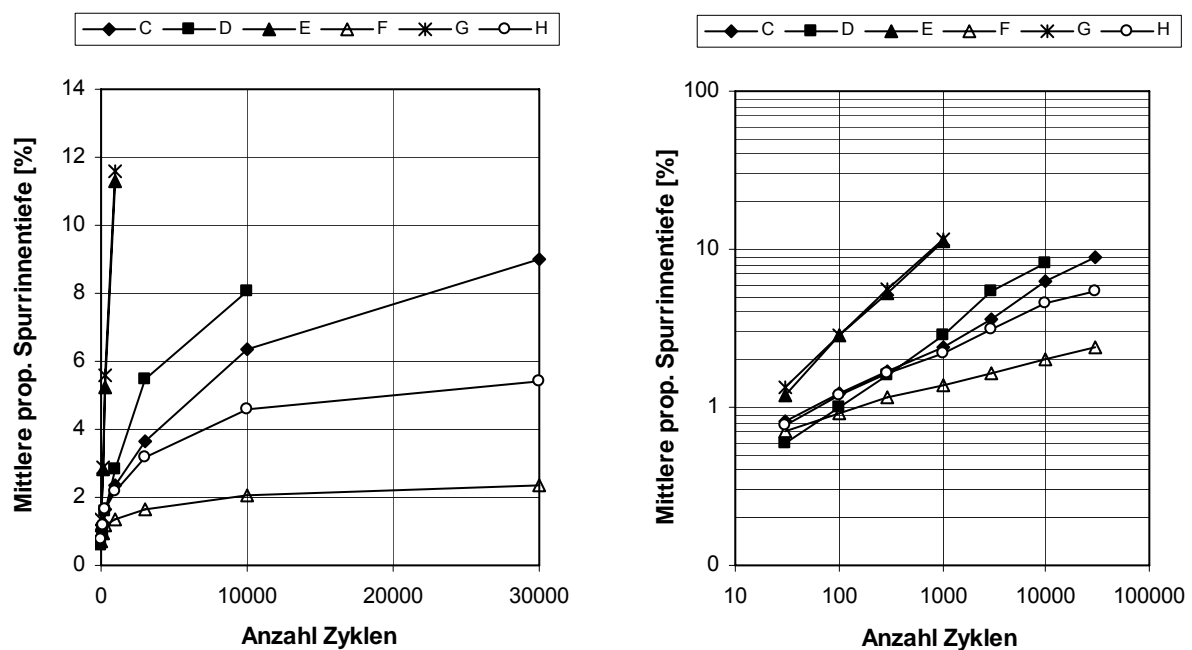


Abbildung 6.9 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C, ..., H

Abbildung 6.9 veranschaulicht die grossen Unterschiede der Spurrinnenbildung bei den einzelnen Belagsausschnitten. Stärkste Spurrinnenbildung ergaben sich für die Autobahnstrecken E und G, während die geringste sich bei Strecke F einstellt. Dies lässt sich auch verdeutlichen indem man die Entwicklung der Spurrinnen mittels Regressionsanalyse durch eine Potenzfunktion der Form

$$s=az^q$$

(z: Zyklenzahl; s: Spurrinnentiefe; a und q: Regressionsparameter) annähert. Die entsprechenden Regressionsparameter a und q samt zugehörigem Bestimmtheitsmass r^2 finden sich in Tabelle 6.9.

Die Abbildung zeigt aber auch klar, dass es nicht genügt, aus dem Spurbildungstest nur einen einzigen Wert als Charakteristikum für die Spurrinnenbildung definieren zu wollen. Würde man beispielsweise die Spurrinnentiefe nach 300 Zyklen als charakteristische Grösse definieren, würde sich für H und D keine unterschiedliche Beurteilung ergeben, obwohl die Spurbildungsverläufe beider Abschnitte klar voneinander abweichen.

Tabelle 6.9 Regressions-Parameter für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C...H, Determinationskoeffizient r^2

Ausschnitt	a	q	r^2
C	0.2340	0.3503	0.9944
D	0.1175	0.4649	0.9961
E	0.1440	0.6332	0.9980
F	0.4097	0.1733	0.9952
G	0.1666	0.6150	0.9999
H	0.3161	0.2835	0.9940

Wie aus Abbildung 6.10 ersichtlich, besteht zwischen den Regressionsparametern a und q ein qualitativer Zusammenhang, indem Näherungs-Potenzfunktionen für die Spurrinnenbildung mit hohem a-Wert einen relativ geringen q-Wert und damit eine geringe Geschwindigkeit der Spurrinnenbildung aufweisen. Dies wird durch die für die untersuchten Belagsausschnitte der Autobahnteilstrecken C..H ermittelten Regressionsfunktion angedeutet. Dabei ist es bemerkenswert, dass sich überhaupt eine solche Regressionsfunktion ergibt, da die untersuchten Materialien zwar alle damals normkonformem Asphaltbeton entsprachen, jedoch bezüglich Bindemittelsorte, Hohlraumgehalt etc. recht unterschiedlich waren. Allerdings liegen die Werte der Strecken D, E, G, die sich in der Praxis als besonders spurbildungsanfällig erwiesen (Abbildung 6.8) relativ weit von der Regressionskurve entfernt. Übrigens verläuft die Regressionsfunktion verglichen mit der entsprechenden Kurve an SMA Bohrkernen (Abbildung 6.6) deutlich steiler.

Praktisch heisst dieser durch die Regressionskurve beschriebene Zusammenhang, dass Beläge, welche nach wenigen Zyklen grosse Spurrinnen erleiden, sich bei höherer Zyklenzahl weniger rasch weiter deformieren als solche mit umgekehrten Verhalten. Im vorliegenden Fall lagen die spurrinnenanfälligen Beläge der Strecken D,E;G im oberen Bereich der Kurve, d.h. in der Zone der hohen q- und geringen a-Werte, die weniger kritischen, eher rissanfälligen Beläge der Strecken F und H, dagegen im unteren Bereich der Kurve mit tiefen q- und hohen a-Werten.

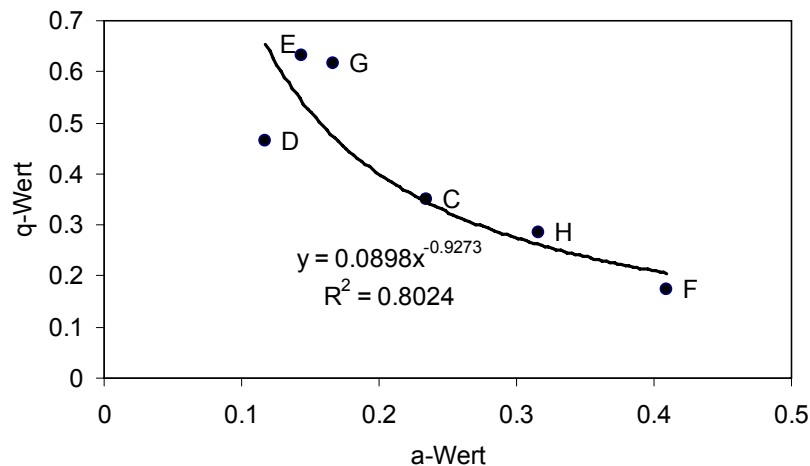


Abbildung 6.10 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C...H

Gemäss Abbildung 6.11 a) besteht zwischen dem maximalen Deformationsanteil der einzelnen Schicht an der Gesamtdeformation in situ infolge Verkehrsbelastung und den bleibenden Deformationen gemäss Fritz et al (1992) im einachsigen Druckkriechversuch nach 1 h bei 40°C tendenziell ein gewisser qualitativer Zusammenhang, indem hohe in der Praxis bei Entnahme festgestellte bleibenden Deformationen der einzelnen Schichten mit deutlichen bleibenden Kriechdeformationen im Labor einhergehen. Allerdings ist dieser Zusammenhang naturgemäss (Verkehr, Witterung etc.) relativ grob und kann nicht für Feinvergleiche und Rangierungen verwendet werden. Die in der Abbildung strichlierten Linien stellen den Bezug zwischen DS, BS und OT der einzelnen Belagsausschnitte dar. Demzufolge wies die obere Tragschicht OT von Autobahnstrecke D im Kriechversuch relativ grosse bleibende Deformationen auf, die sich allerdings wegen der tieferen Lage der Schicht im Oberbau nicht stark auf die Gesamtdeformationen auswirkte. Ähnliches gilt für OT von Strecke C und die Binderschicht BS von Strecke E.

Entsprechend resultiert auch eine gute Korrelation zwischen den Regressionsparametern a und q der jeweiligen als Potenzfunktion angenäherten Spurrinnentiefe aus der Spurbildungsprüfung und den aus einzelnen Schichtanteilen grob abgeschätzten totalen maximalen Deformationsanteile der obersten 100mm (Abbildung 6.11 b). Dabei ergibt sich für die beiden Parameter a und q in Abhängigkeit der bei Entnahme festgestellten bleibenden in situ Deformationsanteile ein jeweils gegenläufiger potentiell angenommener Zusammenhang.

Abbildung 6.12 zeigt den direkten Vergleich zwischen bleibenden Deformationen der Spurbildungsprüfung nach 1000Zyklen (für höhere Zyklen liegen wegen frühzeitigem Abbruch der Prüfung von Strecken E und G keine Vergleichswerte vor) und den maximalen in situ Deformationsanteilen der obersten 100mm. Während die Strecken G und E durch die Spurbildungsprüfung als deutlich spurbildungsgefährdet erkannt werden, wird Strecke D als nicht kritisch eingestuft. Dies zeigt die Problematik, als Charakteristikum für die Spurbildung nur die Deformationen bei einer einzigen Zyklenzahl zu betrachten und die Tendenz der Entwicklung, z.B. die Werte a und q , ausser Acht zu lassen. Zwar wird auch mit dem Wert q der Potenzfunktion, welcher die Geschwindigkeit der Spurbildung repräsentiert, gemäss Abbildung 6.11 die Spurbildungsgefährdung der Strecke D unterschätzt, doch liegt der q -Wert deutlich in der Nachbarschaft der Ergebnisse anderen beiden kritischen Autobahnstrecken E und G und entspricht daher eher der in der Praxis beobachteten Realität.

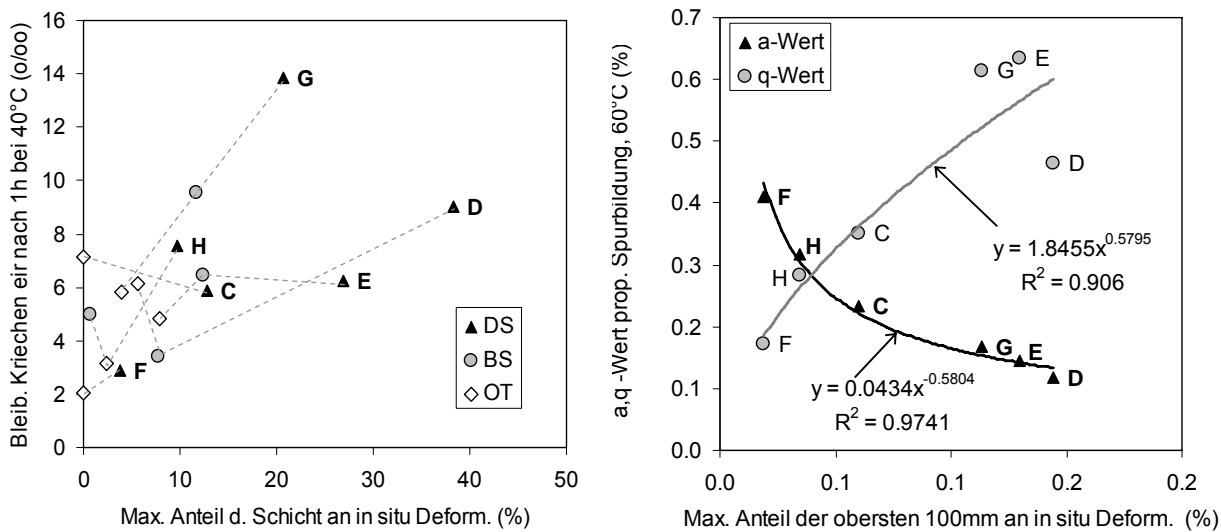


Abbildung 6.11 a) Vergleich der bleibenden Kriechdeformationen nach 1 h bei 40°C mit den maximalen in situ Deformationsanteilen pro Schicht infolge Verkehrsbelastung der Autobahnstrecken C...H, wobei die strichlierten Linien den Bezug zwischen DS,BS und OT der einzelnen Belagsausschnitte darstellen; b) Vergleich der a- und q-Werte aus der Spurbildungsprüfung bei 60°C an Belagsausschnitten der obersten 100mm mit entsprechenden proportionalen Deformationsanteilen, linear hochgerechnet für den Schichtaufbau

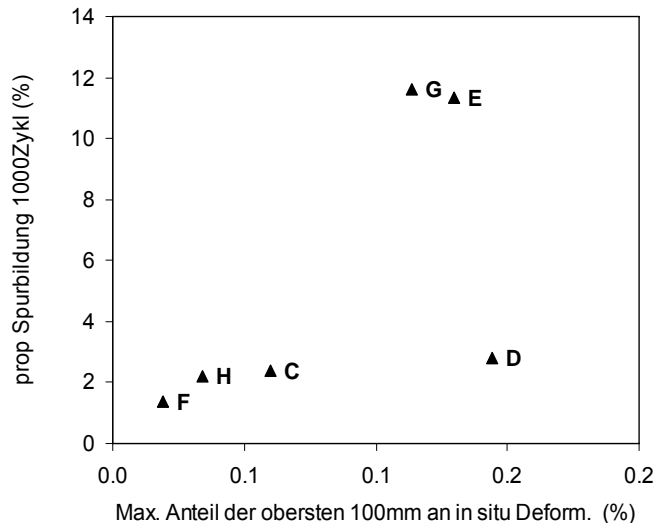


Abbildung 6.12 Vergleich der proportionalen Spurbildung der Spurbildungsprüfung an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C...H nach 1000 Zyklen bei 60°C mit den maximalen in situ Deformationsanteilen der obersten 100mm an der maximalen Gesamtdeformation infolge Verkehrsbeanspruchung

6.1.4 Belagsausschnitte aus dem ETH-Rundlauf (U2000)

Belagsausschnitte R1, R2, R3, R4, R5 aus dem Rundlauf wurden nach Abschluss der Untersuchung für U2000 (Rabaiotti et al., 2006) aus den äusseren nicht überrollten Partien der Rundlaufstrecke entnommen. Die Belagsausschnitte wiesen eine Grösse von 60 x 60 cm und wurden gemäss Abbildung 6.13. Im Rahmen von U2000 wurden zudem aus entsprechendem Mischgut (Mischgut der Felder 11...15 auf der A2 an der Stelle (R) gemäss Abbildung 6.1) Spurbildungs-

prüfkörper hergestellt und an der Empa untersucht. Diese Resultate sind im Bericht Gubler (2006) enthalten und informationshalber für 30'000 Zyklen in Tabelle 6.12 wiedergegeben.

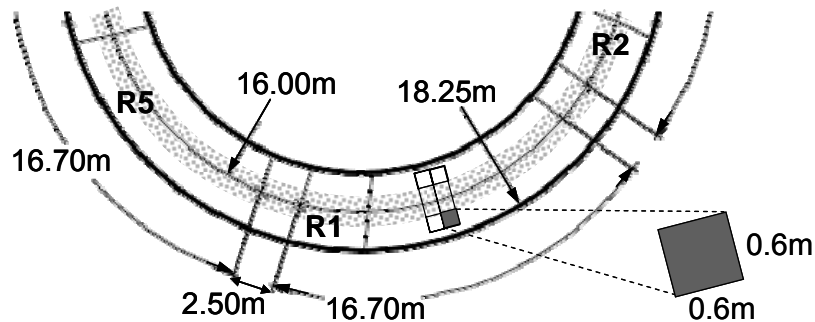


Abbildung 6.13 Entnahme der Belagsausschnitte R1...R5 für die Spurbildungsprüfung aus dem ETH-Rundlauf

Wie bei den Belagsausschnitten den Strecken C...H, wurden wieder die obersten 100mm in Spurbildungsprüfung untersucht, d.h. die verschiedenen Heissmischtragschichten HMT22 inklusive der 40mm dicken Deckschicht AB11s (vgl. Tabelle 6.2). Da die Deckschicht in allen Fällen gleich war, konnte davon ausgegangen werden, dass die Rangierung der Tragschichten im Spurbildungstest vergleichbar war. Weil aber die hinsichtlich ihrer Eigenschaften variierenden HMT 22 Schichten somit im unteren Bereich der Prüfkörper lagen und zudem alle diese Schichten hinsichtlich Tragfähigkeit relativ ähnlich widerstandsfähig konzipiert waren, war nicht mit extremen Unterschieden der totalen Spurrinntiefen zu rechnen.

Tabelle 6.10 Belagsausschnitte aus dem ETH-Rundlauf R1...R5: Ergebnisse

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinntiefe \bar{P}_i [%] für die Prüferserie:				
	R1	R2	R3	R4	R5
30	0.74	0.80	0.99	0.95	1.13
100	1.12	1.12	1.61	1.40	1.74
300	1.55	1.44	2.25	1.87	2.40
1'000	2.11	1.63	3.06	2.44	3.15
3'000	2.80	2.27	3.77	3.12	4.06
10'000	3.49	2.76	4.79	3.86	4.99
30'000	4.14	3.38	6.24	4.51	5.71

Wie aus Tabelle 6.10 und Abbildung 6.14 hervorgeht, traten bei Riegel R3 nach 30'000 Zyklen im Spurbildungstest die grössten und bei R2 die geringsten Spurrinntiefen auf (vgl. auch Anhang 11.4). Insbesondere liefert R3 bei der Regressionsanalyse mittels Potenzfunktion den grössten q-Wert und damit die grösste Geschwindigkeit der Spurrinnenbildung auf (Tabelle 6.11 und Abbildung 6.15) während R2 den geringsten Wert zeigt. Generell liegen die q-Werte bei allen Riegeln verglichen mit den a-Werten relativ nahe beieinander.

Dies gilt auch für die ergänzend ebenfalls in Abbildung 6.15 eingetragenen Parameter für die Spurrinnenbildungsprüfung am entsprechenden einzelnen Mischgut. Im Vergleich zu dem für die Riegel C...H ermittelten Zusammenhang liegen sämtliche Mischungen eher im unteren Kurvenbereich, in einem Bereich also, der in der Grobselektion bezüglich Spurrinnenbildung als nicht sehr kritisch einzustufen ist. Die Verteilung der Daten im in diesem Bereich bestätigt aber auch, dass eine Feinselektion aufgrund der Spurbildungsprüfung eher fraglich ist, zumal die q-Werte sowohl für die Riegel als auch für das Mischgut in einem relativ engen Band beieinander liegen. Dabei scheint die Geschwindigkeit der Spurbildung beim Mischgut infolge der geringeren q-Werte eher weniger rasch abzulaufen als bei den Riegeln. Andererseits sind die a-Werte weiter gestreut und beim Mischgut tendenziell grösser als bei den Riegeln, d.h. beim Mischgut erfolgt die Spurbildung mehrheitlich in der Anfangsphase schon nach wenigen Zyklen. Dabei fällt auf, dass sich in der gegenseitigen Rangierung gewisse Unterschiede ergeben. Während Riegel R1 den kleinsten a-Wert aufweist und R4 im Mittelfeld liegt, ergibt sich beim Mischgut für R4 bzw.

des Feldes 14 der geringste a-Werte und bei Mischgut für R1 bzw. des Feldes 11 ein solcher, der im Mittelfeld situiert ist.

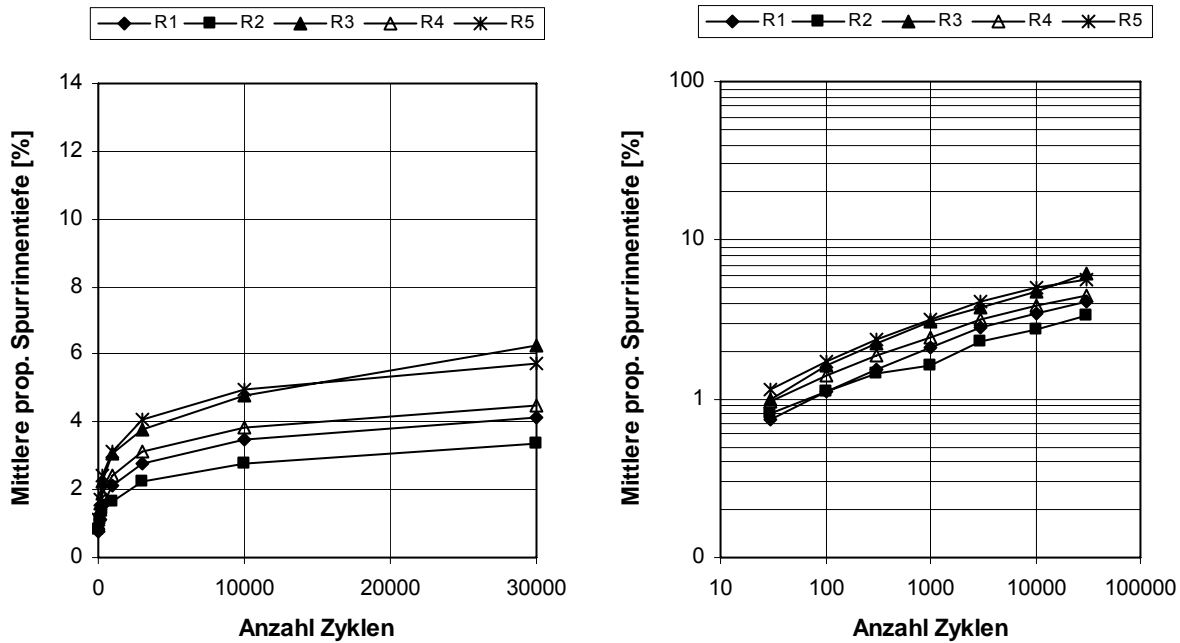


Abbildung 6.14 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an den Belagsausschnitten aus dem ETH Rundlauf R1...R5

Tabelle 6.11 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den Belagsausschnitten aus dem ETH Rundlauf R1...R5, Determinationskoeffizient r^2

Belagsriegel	a	q	r^2
R1	0.3511	0.2496	0.9843
R2	0.4216	0.2043	0.9909
R3	0.4785	0.2551	0.9814
R4	0.492	0.2236	0.9848
R5	0.5859	0.2324	0.9756

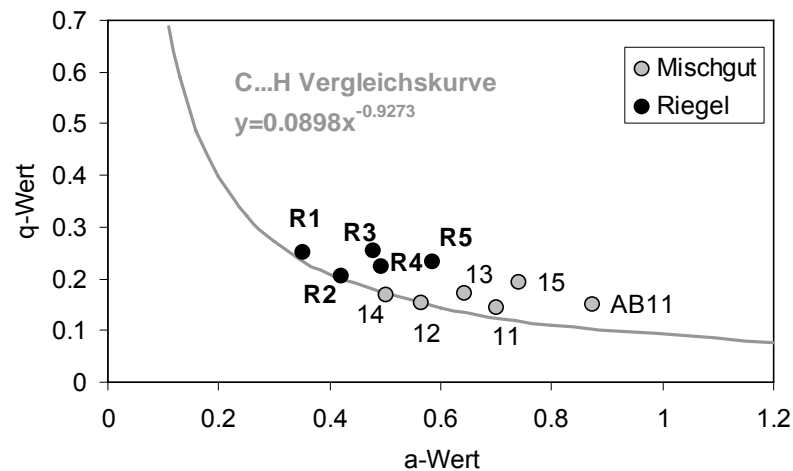


Abbildung 6.15 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den Belagsausschnitten aus dem ETH Rundlauf R1...R5 und aus Mischgut der zugehörigen Felder 11...12 auf der A2; zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve der Strecken C...H eingezeichnet.

Betrachtet man den in Abbildung 6.16 dargestellten Zusammenhang zwischen dem Hohlraumgehalt der Spurbildungsprüfkörper aus Mischgut der Felder 11...15 und jenem der Einzelschichten der Bohrkerne aus dem ETH Rundlauf R1...R5 bzw. aus den Feldern 11...12 der A2, lässt sich feststellen, dass der Hohlraumgehalt bei den Einzelschichten der Bohrkerne R1...R5 aus dem ETH Rundlauf stark und bei den Schichten der Felder 11...15 der A2 weniger streut. Tendenziell liegen die Hohlraumgehalte der Schichten der A2 tiefer, was auf eine bessere Verdichtung hindeutet. Der Streubereich des Hohlraumgehaltes am Mischgut der Felder 11...15 für den Spurbildungstest liegt dazwischen.

Bezüglich Spanne der Rangierung der Bohrkerne von ETH-Rundlauf und A2 sind erhebliche Differenzen festzustellen Abbildung 6.16. Während z.B. die Werte der Bohrkerneinzelschichten von R1 und R4 stark auseinander liegen, befinden sich die entsprechenden Werte der Bohrkerne von A2 aber auch der Spurbildungskörper aus Mischgut in unmittelbarer Nachbarschaft (Feld 11 und 14). Auch weicht die Reihenfolge der Rangierung voneinander ab. Beispielsweise haben die Spurbildungsprüfkörper aus Mischgut von Feld 15 und die zugehörige Schicht der Bohrkerne der A2 jeweils den geringsten Hohlraumgehalt, während der Wert für dieses Mischgut (R5) im Rundlauf relativ zwar relativ hoch aber immer noch im mittleren Feld der anderen Werte liegt. Andererseits ist die Einzelschicht von R1 im Rundlauf am meisten verdichtet, während die Werte für die Spurbildungskörper aus Mischgut und für die Bohrkerneinzelschicht von A2 praktisch gleich sind, wie bei den anderen Prüfkörpern.

Dieser Sachverhalt zeigt, dass sich die in Abbildung 6.15 festgestellten Differenzen nicht einfach auf Unterschiede im Hohlraumgehalte zurückführen lassen. Dies zeigt sich auch in Abbildung 6.17 wo z.B. die Bohrkerne der Einzelschichten von R1 und R2 aus dem ETH Rundlauf im Vergleich zu den entsprechenden Riegeln starke Unterschiede im Hohlraumgehalt jedoch kaum beim a -Wert aufweisen. Beim q -Wert besteht allerdings ein etwas deutlicherer Unterschied. Bzw. R5 und 15 die jeweils gleiches a , aber unterschiedlichen Hohlraumgehalt aufweisen. Vergleicht man die Spurbildungskörper aus Mischgut und Bohrkerneinzelschicht scheint ebenfalls kein eindeutiger Einfluss des Hohlraumgehaltes zu bestehen. Beispielsweise ist bei R2 der Hohlraumgehalt praktisch identisch, während bei den a - und q -Werten (allerdings gegenläufige) Differenzen bestehen.

Abbildung 6.17 wirft aber auch andere Fragen auf. Einerseits ist es bemerkenswert, dass im Falle der Einzelschichten der Bohrkerne aus dem ETH-Rundlauf mit steigendem a -Wert ein Anstieg des Hohlraumgehaltes und bei den Spurbildungskörpern aus Mischgut ein Abfall zu verzeichnen ist. Andererseits stellt sich die Frage, warum generell mit steigendem Hohlraumgehalt

der q-Wert, d.h. die Geschwindigkeit der Spurbildung, abnimmt und bei den Spurbildungskörpern der Hohlraumgehalt generell geringer ist als bei den Einzelschichten der Bohrkerne. Während im ersten Fall der Zusammenhang zwischen den Einzelschichten der Bohrkerne und dem a-Wert an den Riegeln plausibel erscheint, da ein hohlraumreiches, schwaches Asphaltbeton-Korngerüst durchaus zu Beginn stärkere Verformungen erleiden kann, ist bei den Spurbildungskörpern aus Mischgut, das beobachtete Verhalten nur durch zusätzliche Einflüsse qualitativ nachvollziehbar. Zu erwähnen ist unter anderem die zur Praxis vergleichsweise unterschiedlichen Verdichtungsart (Stichwort: Anisotropie der Kornstruktur) und der daraus resultierende veränderte Einflüsse des Bindemittels (ähnlich wie Proktorkurve). Da aber für weitere Interpretationen keine schlüssigen Daten vorliegen, ist an dieser Stelle keine weitere Interpretation der beobachteten Phänomene möglich.

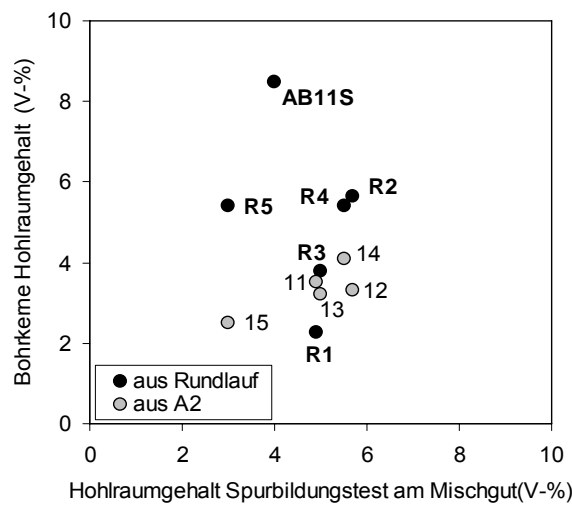


Abbildung 6.16 Zusammenhang zwischen dem Hohlraumgehalt der Spurbildungsprüfkörpern aus Mischgut und jenem der Einzelschichten der Bohrkerne aus dem ETH Rundlauf R1...R5 bzw. aus den Felder 11...12 der A2

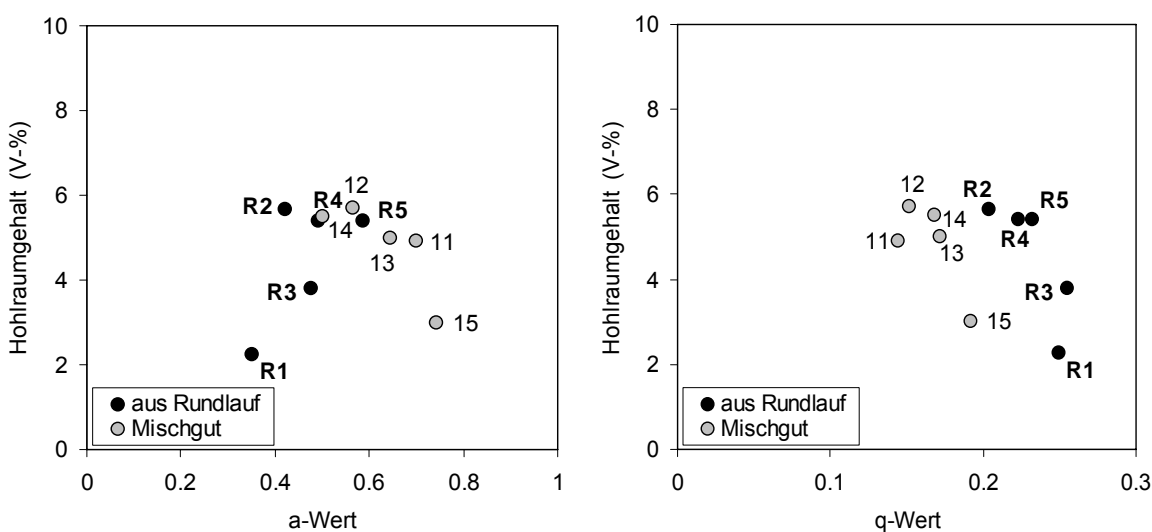
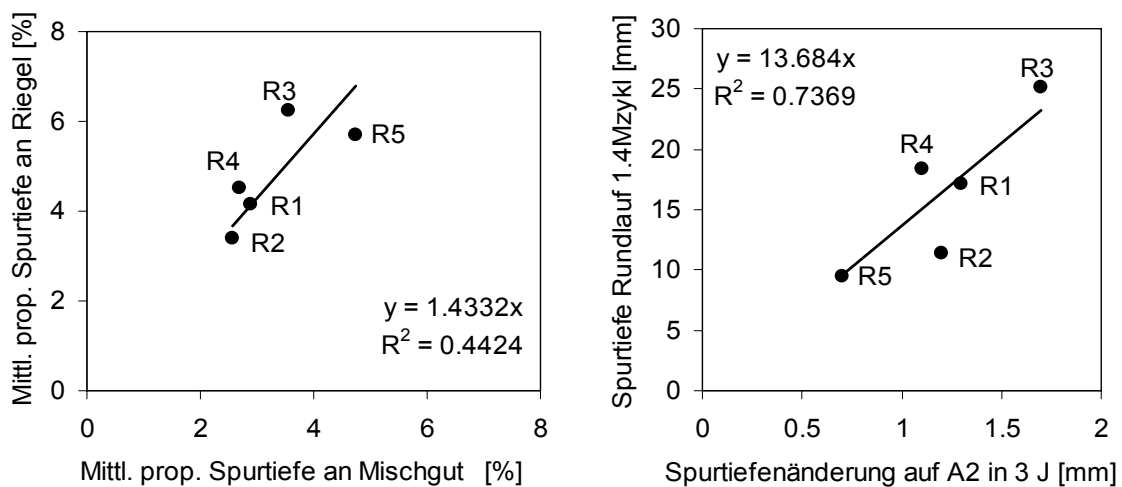


Abbildung 6.17 Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und a-Wert bzw. q-Wert in der Spurbildungsprüfung an Riegeln R1...R5 des ETH Rundlaufs für Mischgut und aus den Einzelschichten aus Bohrkerne des ETH-Rundlaufs

Im Zusammenhang mit den a- und q-Werten wurde bereits festgestellt, dass zwar eine Feinselektion des Mischgutes auf Basis der Spurbildungsprüfung eher fraglich ist. Dies bedeutet aller-

dings nicht, dass bei Grobbetrachtung nicht gewisse Zusammenhänge zwischen der Spurbildungsprüfung an Prüfkörpern aus Mischgut und den praxisverdichteten Belagsriegeln R1...R2 des ETH Rundlaufs zu vermuten wären. Gemäss Abbildung 6.18 a), ergibt sich im vorliegenden Fall ein, wenn auch sehr schwacher Trend, der durch eine vom Ursprung ausgehende Regressionsgerade (mit einem statistisch eigentlich unzulässigen Korrelationskoeffizienten von $R^2=0.44$) angedeutet ist. Ähnliche, allerdings weniger ausgeprägte Korrelationsprobleme ergeben sich auch, wenn man die durch realistische Lastüberrollungen in situ hervorgerufenen Spurbildungstiefen auf dem Rundlauf und den Felder der A2 vergleicht. Die in Abbildung 6.18 b) vorgenommene Gegenüberstellung der Spurrinnentiefe auf dem Rundlauf nach 1.4mio Lastzyklen und der Änderung der T-Werte in 3 Jahren seit der ersten Querebenheitsmessung auf der A2 mit dem ARAN-Gerät (T-Wert: grösste Muldentiefe gegenüber der Verbindungslinie der höchsten Punkte innerhalb einer Messlänge von 4 m, gemäss SN 640 520a, 1977) liefert immerhin eine lineare Regression durch den Ursprung mit einem Korrelationskoeffizienten $R^2= 0.73$. Dabei fällt auf, dass bei allen in Abbildung 6.18 dargestellten Fällen die Rangierung der bleibenden Verformungen für R3, R1 und R2 gleich sind während sich bei R4 und R5 Widersprüche zwischen Spurbildungsprüfung und Realität ergeben. Ein Blick auf Tabelle 6.2 zeigt, dass R4 und R5 hinsichtlich Bindemittelsorte extrem unterschiedlich waren. R4 enthielt Polymerbitumen und R5, die Hochmodulmischung, ein extrem hartes Bitumen. Offenbar führt in diesen extremen Fällen die Spurbildungsprüfung an 60°C durchwärmten Prüfkörpern zu anderen Resultaten, als in der Realität, wo Tragschichten diese hohe Temperatur bekanntlich nicht erreichen. Inwieweit die Spurbildungsprüfung bei einer Einheitstemperatur von 60°C in solchen Fällen realistisch ist, muss daher mit einem Fragezeichen versehen werden.



a)

b)

Abbildung 6.18 a) Vergleich der Spurrinnentiefen an Mischgut und Belagsriegeln R1...R5 des ETH Rundlaufs; b) Vergleich der Spurrinnentiefen nach 1.4 mio Lastzyklen im Rundlauf und der Spurrinnentiefenänderung auf der A2 in 3 Jahren (T-Wert-Differenz zum Ausgangswert)

Tabelle 6.12 Mischgut der Belagsausschnitte aus dem ETH Rundlauf R1..R5 (Feld 11...15); Ergebnisse nach Gubler (2006)

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i [%] für die Prüfserie:				
	Feld 11 (R1)	Feld 12 (R2)	Feld 13 (R3)	Feld 14 (R4)	Feld 15 (R5)
30	1.01	0.83	1.09	0.82	1.19
100	1.47	1.24	1.38	1.1	1.88
300	1.65	1.41	1.83	1.38	2.45
1000	2.07	1.7	2.28	1.71	3.17
3000	2.31	1.97	2.65	1.95	3.7
10000	2.64	2.23	3.13	2.34	4.24
30000	2.89	2.56	3.55	2.68	4.74

6.1.5 Übrige Belagsausschnitte: Ergebnisse

Die Ergebnisse der Spurbildungsuntersuchung der Belagsausschnitte **Ari**, **A3-GA**, **A3-SMA**, **Oft** und **Chi** sind in Tabelle 6.13 und in Abbildung 6.19 aufgeführt. Die entsprechenden Einzeldaten finden sich im Anhang 11.5. Lediglich die Prüfkörper mit der offenporigen Deckschicht **Oft** konnten bei 60°C bis zu maximal 30'000 Belastungszyklen beansprucht werden, ohne die in der Schweizer Norm SN 640 431-1aNA angegebene maximal zulässige mittlere proportionale Spurrinnentiefe von 7.5% bzw. 10% zu überschreiten. Das relativ schlechte abschneiden der Belagsausschnitte Ari und Chi war einigermaßen unerwartet, da das Praxisverhalten nach nach 26 bzw. 31 Jahren keine Spurbildung erkennen liess. Ähnliches gilt auch für A3-GA und A3-SMA, wo sich nach ca. 10 Jahren in der Praxis Spurrinnentiefen in der Grössenordnung von nur 7mm einstellten.

Tabelle 6.13 Übrige Belagsausschnitte: Ergebnisse

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i [%] für die Prüfserie:				
	Ari	A3-GA	A3-SMA	Oft	Chi
30	0.79	3.02	1.05	0.80	0.80
100	1.54	4.41	2.07	1.20	1.38
300	2.71	9.33	3.41	1.51	2.40
1'000	4.61	-	5.78	1.93	4.20
3'000	9.25	-	10.20	2.36	8.49
10'000	-	-	12.81	2.74	-
30'000	-	-	-	3.61	-

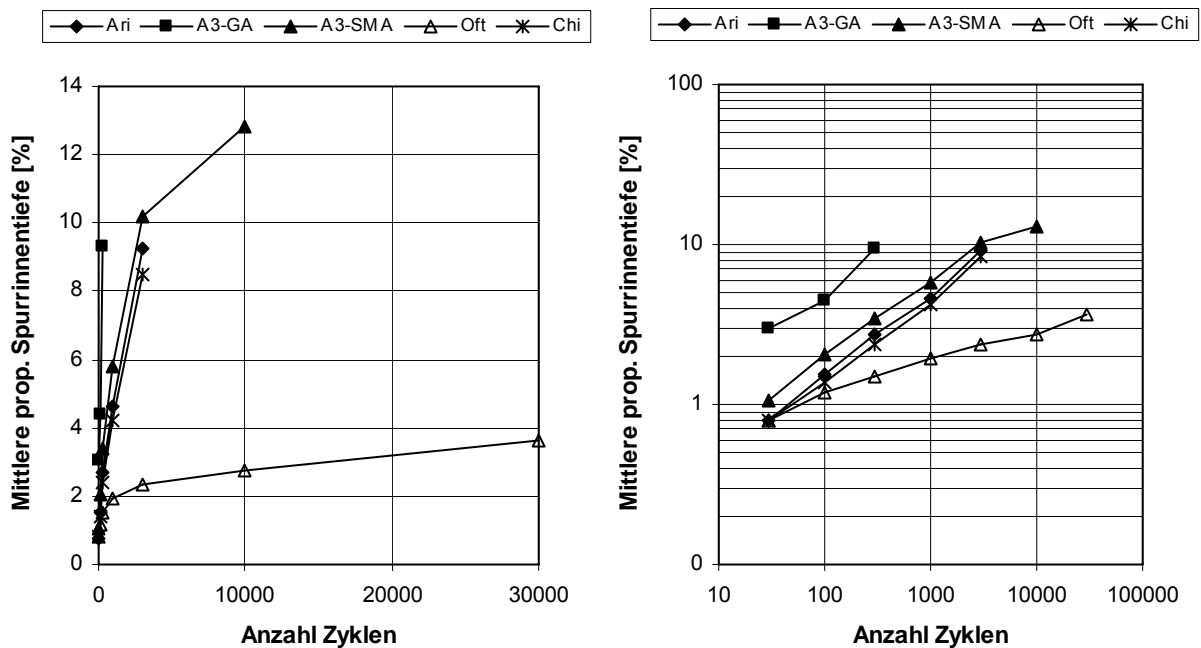


Abbildung 6.19 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an den übrigen Belagsausschnitten

Eine Zusammenstellung der Regressions-Parameter a und q der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe liefert Tabelle 6.14. Wie aus Abbildung 6.20 hervorgeht, liegen die gefundenen a - und q -Werte mit Ausnahmen von A3-GA in der Nähe der Vergleichskurve für die Belagsriegel C...H, wobei die im Spurbildungstest verformungsempfindlicheren Mischungen Ari, A3-SMA, Chi eher im oberen Bereich der Kurve angesiedelt sind. Es fällt auf, dass die Spurbildungsergebnisse von A3-GA sehr stark von jenen der anderen Mischungen abweichen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Mastixasphaltemischung sich hinsichtlich Hohlraumgehalt und Bindemittelgehalt stark von den übrigen Mischgutgruppen unterscheidet. Die Beziehung zwischen a - und q -Wert hängt somit stark von der Konzeption des Mischgutes ab.

Tabelle 6.14 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den übrigen Belagsausschnitten, Determinationskoeffizient r^2

Belagsriegel	a	q	r^2
Arisdorf	0.1349	0.5225	0.9843
A3-GA	0.5394	0.4868	0.9909
A3-SMA	0.2623	0.4403	0.9814
Oftringen	0.4443	0.2049	0.9848
Chiasso	0.1367	0.5066	0.9756

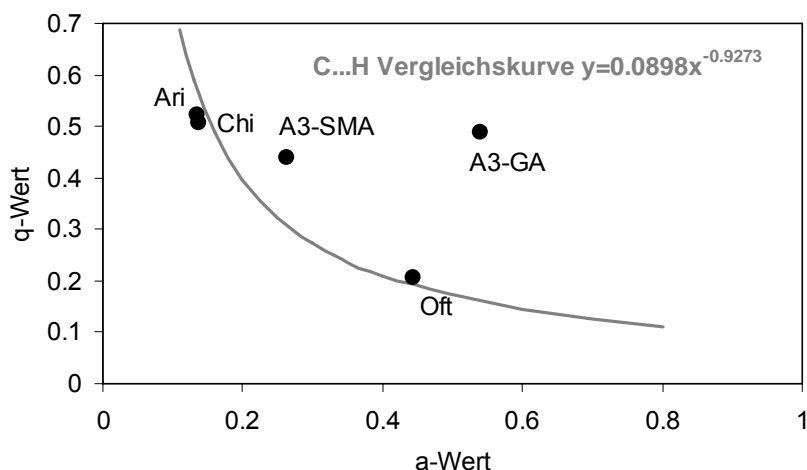


Abbildung 6.20 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den übrigen Belagsausschnitten; zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve der Strecken C...H eingezeichnet.

6.2 Parameterstudie an neu verdichteten Prüfkörpern

Dieser Abschnitt enthält die Ergebnisse zur Abklärung verschiedener Einflussparameter auf das Verhalten neu verdichteter Prüfkörper im Spurbildungstest. Die Untersuchungen, die insbesondere auch Hinweise auf spezifische versuchstechnische Fragen liefern sollten, wurden an typischen Mischgut, einem AB 11 S und HMT22 (bzw. nach neuer Bezeichnung AC 11S und ACT 22), durchgeführt. Namentlich wurde untersucht der Einfluss von:

- Reifendruck, bzw. des Kontaktdruck zwischen Reifen und Prüfkörper
- Halterung, bzw. seitlicher Abstützung in der Form
- Prüftemperatur
- Messunterbrüchen und Pausenzeiten zwischen den Messungen
- Dauer der Prüfkörperlagerung
- Prüfkörperdicke

6.2.1 Mischguteigenschaften

Die erhaltenen Angaben und die durch die Empa ermittelten massgebenden Werte für die in dieser Arbeit für die Parameterstudie am häufigsten verwendeten Mischgutsorten sind in Tabelle 6.15 bis Tabelle 6.18 zusammengefasst. Die Korngrössenverteilungen sind in Abbildung 6.21 und Abbildung 6.22 dargestellt. Bisweilen wurden aus Verfügbarkeitsgründen auch anderes Mischgut verwendet (z.B. AB11 S mit B 80/100). Wo dies zutrifft, wird darauf gesondert hingewiesen.

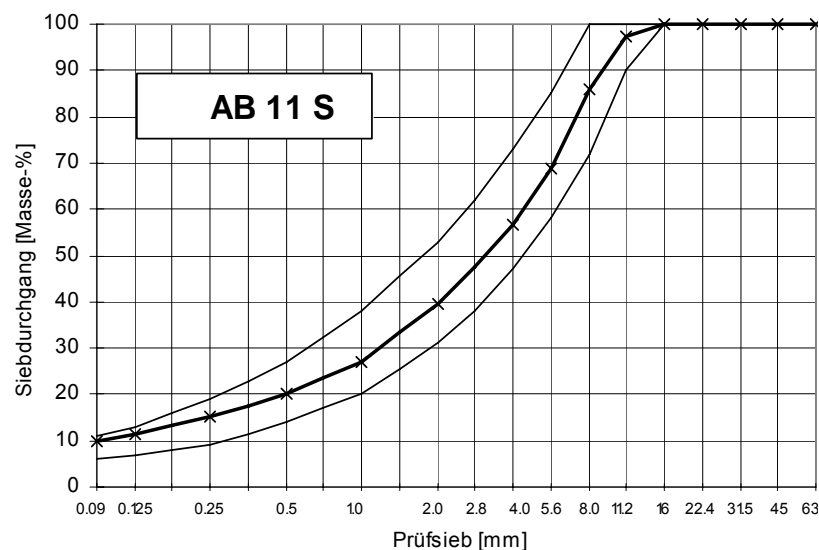
Es sei angemerkt, dass die Werte der Mischgutrohndichte (in Tabelle 6.16 und Tabelle 6.18 fett hervorgehoben) einem Mittelwert aus zwei Einzeluntersuchungen entsprechen. Die übrigen Werte sind Resultate der zeitlich letzten Mischgutuntersuchung.

Tabelle 6.15 Mischgut AB 11 S (d.h. AC 11 S): Erhaltene Angaben

Hersteller des Mischgutes	BAV, Belag AG, Volketswil
Entnahmedatum	20.01.2002
Temperatur des Mischgutes bei der Entnahme	145 °C
Entnommen durch	Mitarbeiter der EMPA
Mischgutsorte	AB 11
Typ	S
Bindemittel	B55/70

Tabelle 6.16 Mischgut AB 11 S (d.h. AC 11 S): Massgebende Werte, ermittelt durch EMPA

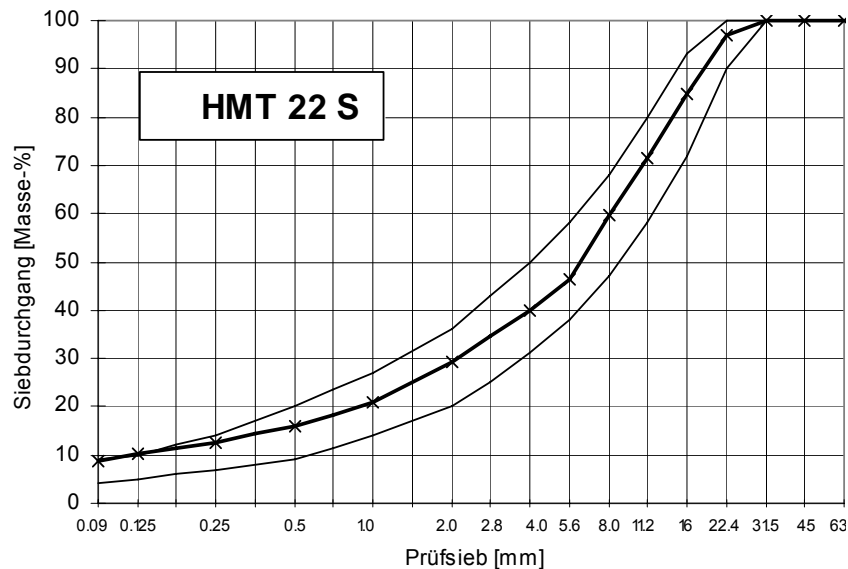
		Parameter	Einheit	Wert
Rückgewonnenes Bindemittel		Dichte	$t \cdot m^{-3}$	1.046
		Penetration	$10^{-1} mm$	26
		Erweichungspunkt Ring und Kugel	$^{\circ}C$	60.2
		Penetrationsindex	-	-0.3
Mischgut		Anteile an löslichem Bindemittel	Masse-%	5.39
		Rohdichte	$t \cdot m^{-3}$	2.473
	Marshall-Prüfkörper	Raumdichte	$t \cdot m^{-3}$	2.386
		Hohlraumgehalt	Vol.-%	3.7
		Hohlraumfüllungsgrad mit Bitumen	Vol.-%	76.8
	Marshall-Prüfung	Stabilität	kN	14
		Fliesen	mm	3.2
Datum der letzten Untersuchung: 21.04.2004				

**Abbildung 6.21 Mischgut AB 11 S (d.h. AC 11 S): Grafische Darstellung der Korngrössenverteilung inkl. Sollwertbereich, dargestellt nach SN 670810.****Tabelle 6.17 Mischgut HMT 22 S (d.h. ACT 22S): Erhaltene Angaben**

Hersteller des Mischgutes	BAV, Belag AG, Volketswil
Entnahmedatum	29.01.2002
Temperatur des Mischgutes bei der Entnahme	145 $^{\circ}C$
Entnommen durch	Mitarbeiter der EMPA
Mischgutsorte	HMT 22
Typ	S
Bindemittel	B 55/70

Tabelle 6.18 Mischgut HMT 22 S (d.h. ACT 22 S): Massgebende Werte, ermittelt durch EMPA

		Parameter	Einheit	Wert
Rückgewonnenes Bindemittel		Dichte	t·m ⁻³	1.050
		Penetration	10 ⁻¹ mm	25
		Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	62.7
		Penetrationsindex	-	0.0
Mischgut		Anteile an löslichem Bindemittel	Masse-%	4.13
		Rohdichte	t·m ⁻³	2.531
		Raumdichte	t·m ⁻³	2.390
	Marshall-Prüfkörper	Hohlraumgehalt	Vol.-%	5.6
		Hohlraumfüllungsgrad mit Bitumen	Vol.-%	62.6
	Marshall-Prüfung	Stabilität	kN	12.9
		Fliesen	mm	2.6
Datum der letzten Untersuchung: 22.04.2004				

**Abbildung 6.22 Mischgut HMT 22 S (d.h. ACT 22 S): Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung inkl. Sollwertbereich, dargestellt nach SN 670810.**

6.2.2 Einfluss des Reifendruckes

An Mischgut AB11 S (d.h. AC 11 S) wurden Spurbildungsprüfungen bei Reifendruck von 3, 4.5 und 6 bar durchgeführt (Bezeichnung der Prüfkörper gemäss Tabelle 6.19).

Tabelle 6.19 Einfluss des Reifendruckes: Bezeichnung der untersuchten Prüfkörper

Serie	Reifendruck [bar]	Prüfkörper-Bezeichnung (je 2 Prüfkörper)
RD3	3	RD3-1(2)
RD4.5	4.5	RD4.5-1(2)
RD6	6	RD6-1(2)

Die Mittelwerte der proportionalen Spurrinnentiefe enthält Tabelle 6.20; die Einzelwerte finden sich in Abschnitt 11.6. Es scheint, dass generell mit steigendem Raddruck infolge veränderter Kontaktfläche und stärker konzentrierter Lasteinleitung der Spurbildungswiderstand abnimmt (Abbildung 6.23). Im konkreten wurden nach 30'000 Überrollzyklen mit 6bar gegenüber 4.5 bar

Reifendruck 1% tiefere proportionale Spurrinntiefen erzielt. Bemerkenswerterweise sind allerdings die Spurrinnen bei 3 bar höher als bei 4.5 bar, ein Umstand, der auf die durch die mechanischen Eigenschaften des Reifens bedingte bei 3 bar ungünstigere Kontaktdruckverteilung zwischen Reifen und Prüfkörper zurückgeführt werden könnte (vgl. Abschnitt 6.4.2).

Tabelle 6.20 Einfluss des Reifendruckes: Ergebnisse (Mittelwerte)

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinntiefe \bar{P}_i [%]		
	3 bar	4.5 bar	6 bar
30	1.84	1.19	1.64
100	2.52	1.76	2.29
300	2.94	2.22	2.84
1'000	3.32	2.51	3.34
3'000	3.75	2.88	3.92
10'000	4.26	3.62	4.68
30'000	4.62	4.01	5.23

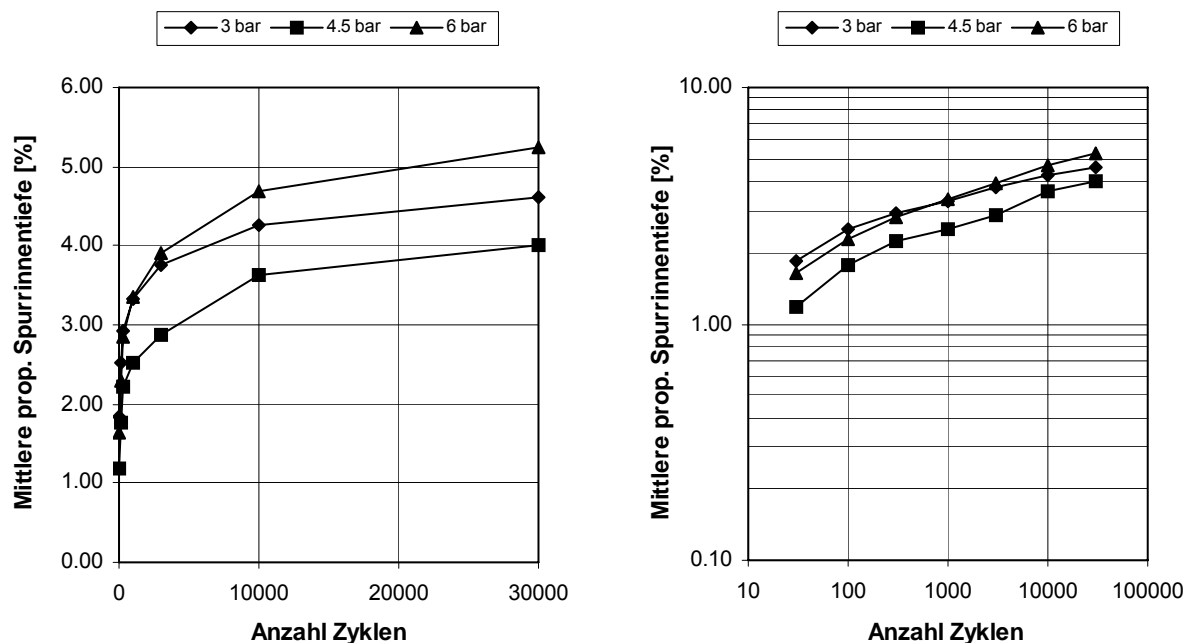


Abbildung 6.23 Einfluss des Reifendruckes, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen

Die Regressions-Parameter a und q der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinntiefe sind aus Tabelle 6.21 ersichtlich. Auch in diesem Falle folgen gemäss Abbildung 6.24 die ermittelten a - und q -Werte der Vergleichskurve für die Belagsriegel C...H. Die Untersuchung zeigt, dass der Reifendruck einen relativ starken Einfluss auf das Spurbildungsverhalten ausübt und daher bei der Versuchsdurchführung tatsächlich genau einzuhalten ist.

Tabelle 6.21 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinntiefe an Prüfkörpern aus Mischgut AB11 S für verschiedene Reifendrucke, Determinationskoeffizient r^2

Reifendruck	a	q	r^2
3bar	1.3406	0.1259	0.9591
4.5bar	0.773	0.166	0.9638
6bar	1.0467	0.1624	0.9768

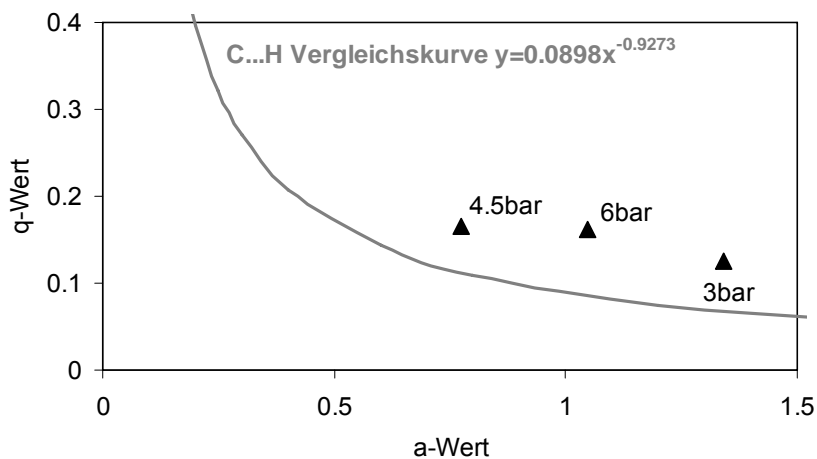


Abbildung 6.24 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinnentiefe an Prüfkörpern aus Mischgut AB11 S für verschiedene Reifendrücke; zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve der Strecken C...H eingezeichnet.

6.2.3 Einfluss der Halterung (seitliche Abstützung in der Form)

6.2.3.1 Vergleich verschiedener Halterungssysteme

In einer ersten Versuchsserie wurde an einem AB 11 S, der aus Verfügbarkeitsgründen anders war als der in Abschnitt 6.2.1 angegebene und aus Bitumen B80/100 mit einem Bindemittelgehalt von 5.25% und leicht unterschiedlicher Korngrößenverteilung bestand, ein Prüfkörper mit den Abmessungen 500 mm×185 mm×100 mm und drei Prüfkörper mit den Abmessungen 500 mm×180 mm×100 mm hergestellt. Anschliessend wurden bei zwei der kleineren Prüfkörper allseitig 10 mm abgeschnitten (vgl. auch Abbildung 6.25 (a)). Je ein zugeschnittener Prüfkörper wurden mit Hilfe von Epoxydharz bzw. Zementmörtel in die Prüfform eingegossen. Der dritte Prüfkörper wurde in der ursprünglichen Verdichtungsform belassen und diente als Referenz. Der 185mm breite Prüfkörper wurde in die Prüfform eingeklemmt.

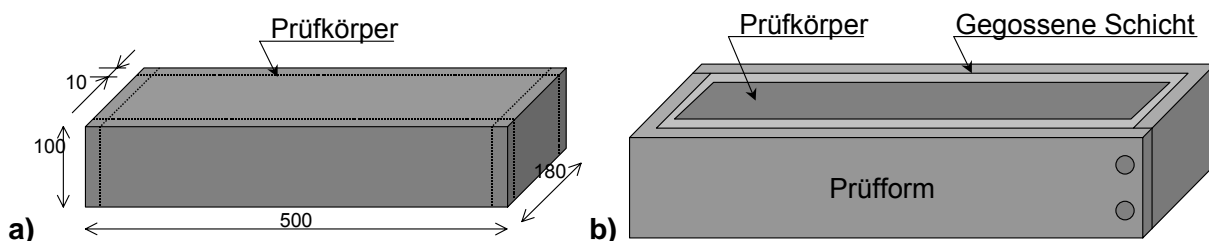


Abbildung 6.25 Prüfkörper schematisch

In den Abbildung 6.26 sind die Spurbildungstest-Ergebnisse der unterschiedlich in der Prüfform fixierten Prüfkörper dargestellt. Offenbar führt der etwas grösser zugeschnittene Prüfkörper zu ähnlichen Resultaten wie der in der Mulde belassene Referenzprüfkörper, während die mit Epoxydharz bzw. Zementmörtel eingegossenen Prüfkörper eine deutlich raschere Spurrinnenbildung erleiden. Diese Art der Prüfkörperfixierung ist somit nicht zu empfehlen.

Das Eingiessen von Belagsausschnitten mit Epoxydharz bzw. Zementmörtel hat sich somit nicht bewährt und führt verglichen mit den in der Mulde belassenen Referenzprüfkörpern zu unterschiedlichen Spurbildungskurven. Eher zu empfehlen ist dagegen das Zuschneiden und Einklemmen von Prüfkörpern mit leichter seitlicher Übergrösse, obwohl auch hier erhebliche Unterschiede festgestellt wurden.

Da jedoch sämtliche hier untersuchten Halterungssysteme nicht vollumfänglich zu befriedigen vermochten, wurde zusätzlich eine Untersuchung mit einer speziellen seitlichen Vermörtelung durchgeführt (vgl. nächster Abschnitt)

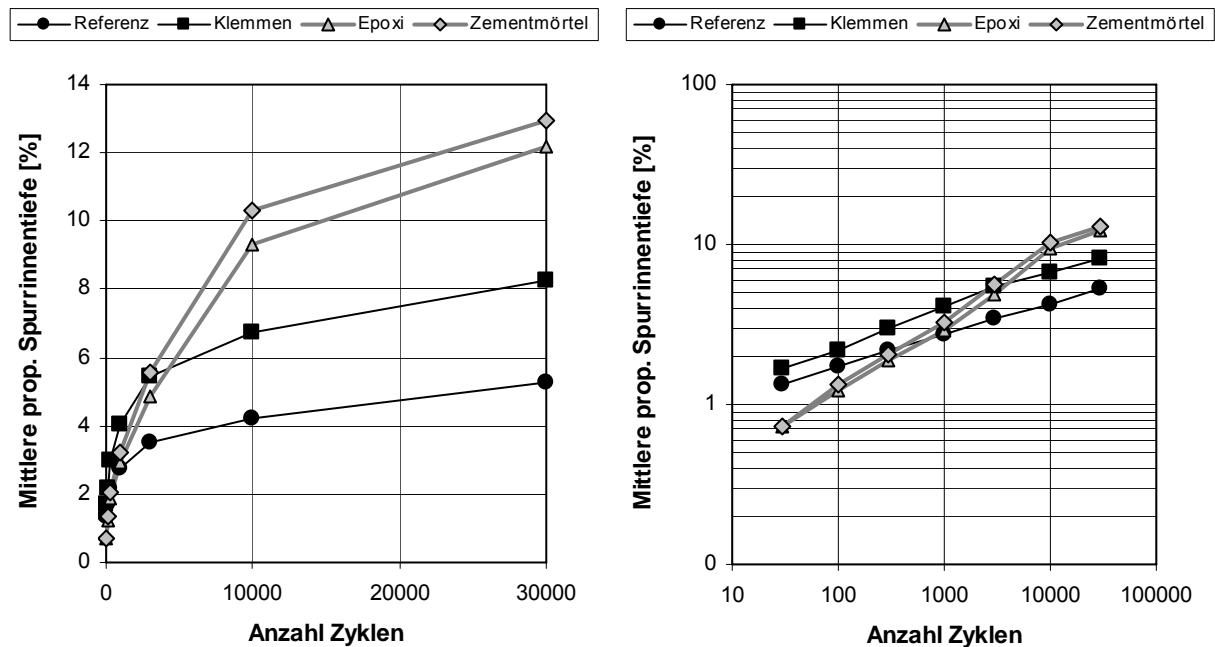


Abbildung 6.26 Einfluss der Halterungssysteme: Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen.

6.2.3.2 Seitliche Vermörtelung

Die Werte der ausschliesslich in der 100mm hohen Form verdichteten Prüfkörper aus Mischgut AB 11 S sind identisch mit den Werten der Prüfserie in Abschnitt 6.2.2 für einen Reifendruck von 6bar. Um den Einfluss der Einmörtelung mit schwindkompensiertem Fugenmörtel SikaGrout® 314 gemäss Abschnitt 6.1.2 zu untersuchen, wurde zusätzlich eine Serie Prüfkörper zunächst ausgeformt, dann zugeschnitten und anschliessend eingemörtelt. Gemäss Abbildung 6.27 ergibt sich zwischen in der Form verdichteten und eingemörtelten Prüfkörpern mit einer Differenz der mittleren proportionalen Spurrinntiefe von ca. 0.5 % und damit ein Unterschied, der durchaus im üblichen Streubereich liegt. Tatsächlich ist statistisch gesehen der Unterschied nach 30'000 Zyklen zwischen beiden Fällen im konkreten Fall nur sehr schwach signifikant (auf dem 91% Niveau). Somit kann geschlossen werden, dass von direkt in der Verdichtungsform geprüften und nachträglich sorgfältig eingemörtelten Prüfkörpern gleichen Resultate erwartet werden dürfen. Insgesamt erwies sich die seitliche Vermörtelung mit schwindkompensiertem Fugenmörtel als die beste Lösung.

Tabelle 6.22 Einfluss der Vermörtelung: Ergebnisse

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinntiefe \bar{P}_i [%]	
	nur in Form verdichtet	eingemörtelt
30	1.64	1.34
100	2.29	1.77
300	2.84	2.17
1'000	3.34	2.57
3'000	3.92	3.38
10'000	4.68	4.09
30'000	5.23	4.74

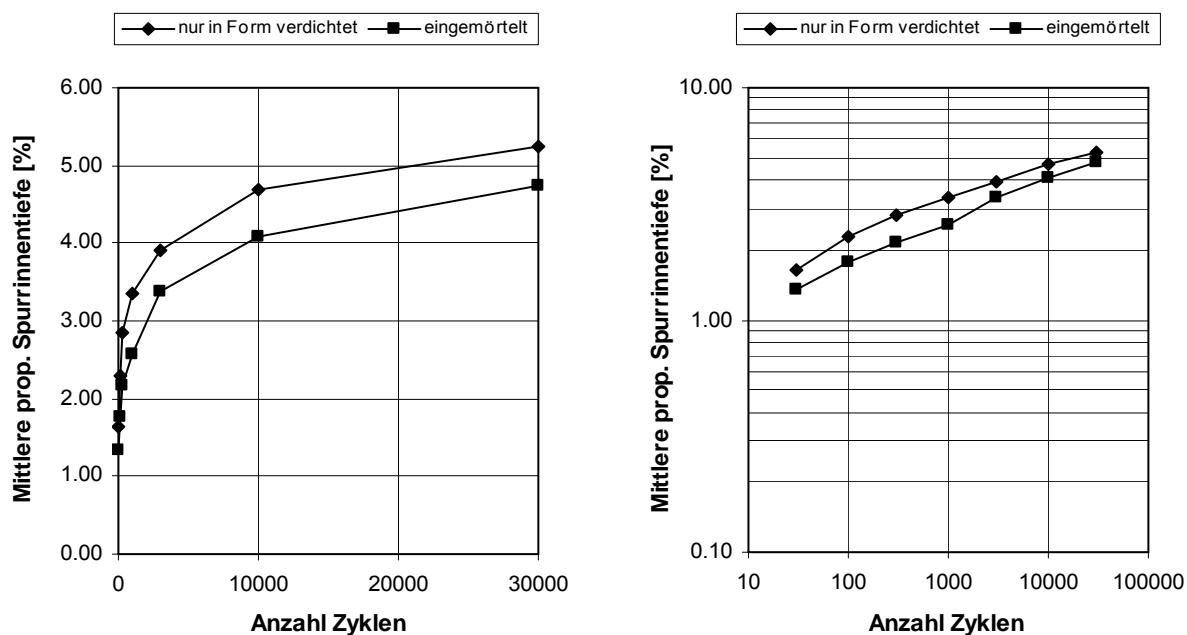


Abbildung 6.27 Einfluss der Vermörtelung: Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen.

6.2.4 Einfluss der Prüftemperatur

Zur Untersuchung des Einflusses der Prüftemperatur wurden drei grundsätzlich verschiedene Mischgutsorten herangezogen (Tabelle 6.23). Da es sich beim Mastixasphalt GA 8 (bzw. MA8) um ein relativ feinkörniges Material handelte, konnten in diesem Fall sinnvollerweise keine ausschliesslich aus Mastixasphalt bestehende Prüfkörper mit einer Höhe von 100mm im Spurbildungstest geprüft werden. Diese Prüfkörper wiesen daher unter einer 35mm dicken GA8 Schicht noch eine 65mm dicke Asphaltbetonschicht AB 11 S auf, wobei die Schichten mit einer Bitumenemulsion verbunden waren. Massgebende Werte zum Mastixasphalt GA8 enthält

Tabelle 6.24 und Abbildung 6.28. Gemäss Hersteller wurde ein Bitumen B 40/50 verwendet.

Tabelle 6.23 Einfluss der Prüftemperatur: Prüfkörper

Serie	Material	Prüftemperatur [°C]	Prüfkörper-Bezeichnung (je 2 Prüfkörper)
T-AB11	AB 11 S	40	T-AB11-40-1(2)
		50	T-AB11-50-1(2)
		60	T-AB11-60-1(2)*
T-HMT22	HMT 22 S	40	T-HMT22-40-1(2)
		50	T-HMT22-50-1(2)
		60	T-HMT22-60-1(2)
T-GA8	oben GA 8, unten AB 11 S	40	T-GA8-40-1(2)
		50	T-GA8-50-1(2)

*Bemerkung: Die Prüfbedingungen von T-AB11-60-1(2) und RD6-1(2) (siehe Abschnitt 6.2.2) sind äquivalent. Darum wurden im aktuellen Abschnitt die Ergebnisse von RD6-1(2) übernommen. Zusätzliche Prüfungen für T-AB11-60-1(2) wurden nicht durchgeführt, um den Zeitaufwand zu verringern. Die Bezeichnung T steht für Temperatureinfluss-Untersuchung

Tabelle 6.24 Mastixasphalt GA8, massgebende Werte ermittelt durch EMPA

Parameter	Einheit	Wert
Anteil an löslichem Bindemittel	Masse-%	7.36
Raumdichte Mischgut	t·m ⁻³	2.392
Rohdichte	t·m ⁻³	2.367
Hohlraumgehalt	Vol-%	1.1
Eindringtiefe Gussasphalt 30 min	mm	2.0
Eindringtiefe Gussasphalt 60 min	mm	2.4
Zunahme zwischen 30 und 60 min	mm	0.4

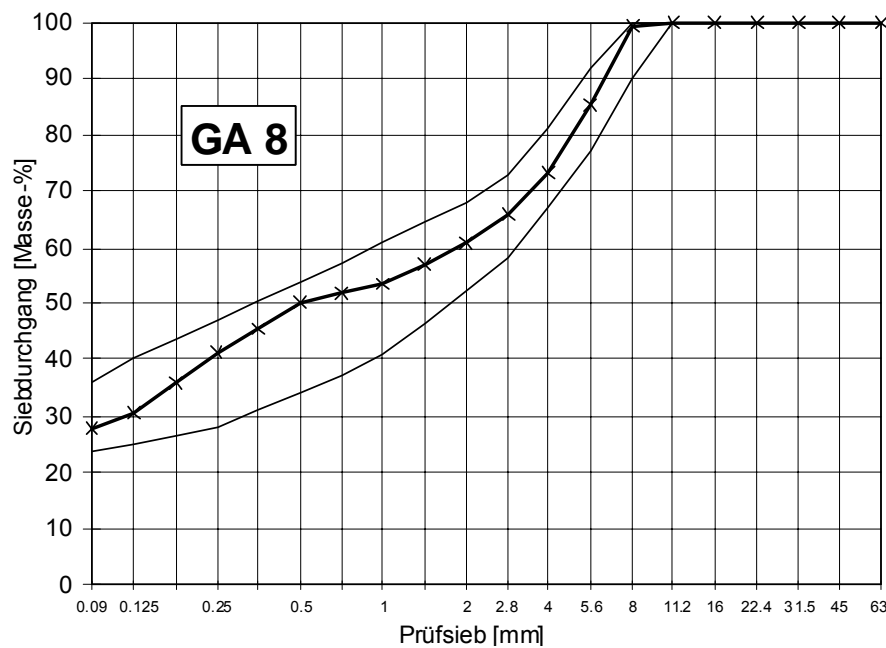
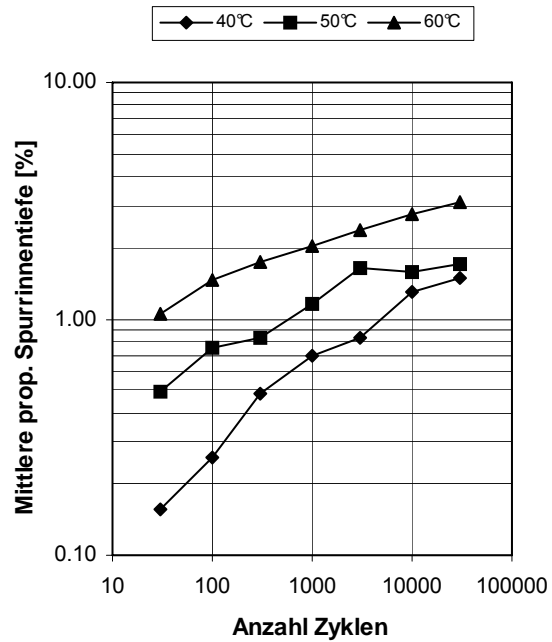
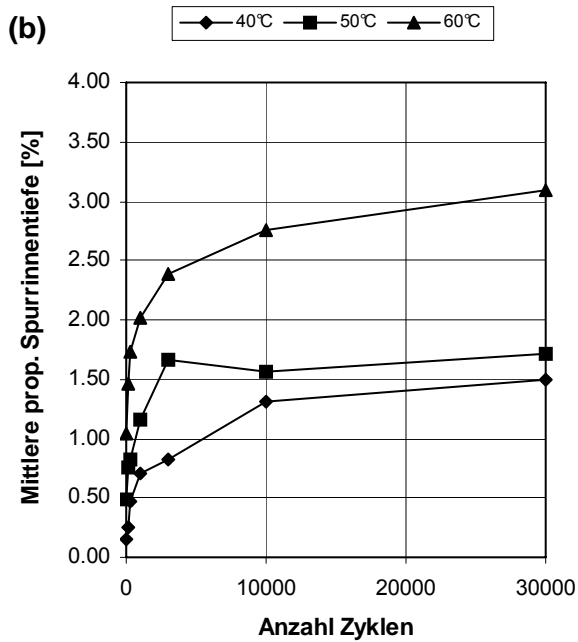
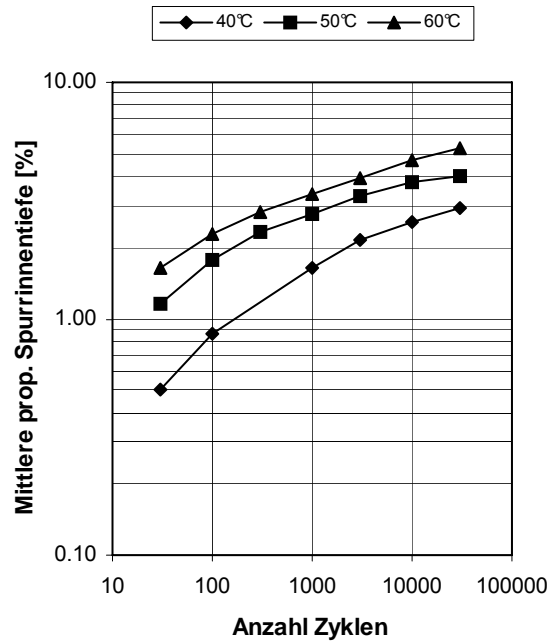
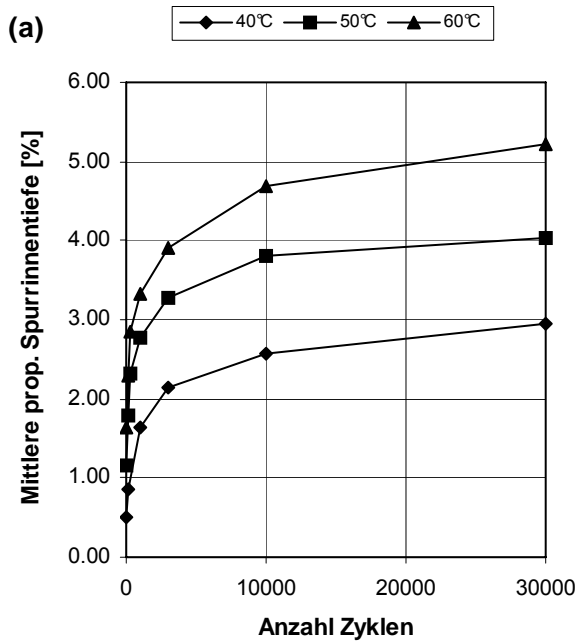


Abbildung 6.28 Mastixasphalt GA 8 (d.h. MA8): Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung inkl. Sollwertbereich dargestellt nach SN 670810.

Die Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefe enthält Tabelle 6.25 und Abbildung 6.29; die Einzelwerte finden sich in Abschnitt 11.8. Es fällt auf, dass trotz geringer Schichtdicke des Mastixasphaltes die Untersuchungen der kombinierten GA8 – AB11 S Prüfkörper bei 50°C wegen übermässiger Spurbildung schon nach 10'000 Zyklen abgebrochen werden mussten und daher auch auf eine Prüfung bei 60°C verzichtet werden musste.

Tabelle 6.25 Einfluss der Prüftemperatur: Ergebnisse

Serie	Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinntiefe \bar{P}_i [%]		
		40 °C	50 °C	60 °C
T-AB11	30	0.50	1.16	1.64
	100	0.87	1.79	2.29
	300	-	2.31	2.84
	1'000	1.63	2.77	3.34
	3'000	2.14	3.29	3.92
	10'000	2.57	3.82	4.68
	30'000	2.96	4.04	5.23
T-HMT22	30	0.15	0.49	1.05
	100	0.26	0.76	1.46
	300	0.48	0.82	1.74
	1'000	0.70	1.17	2.02
	3'000	0.83	1.66	2.38
	10'000	1.31	1.56	2.76
	30'000	1.50	1.72	3.10
T-GA8	30	0.27	1.36	nicht geprüft
	100	0.73	2.38	
	300	1.20	3.74	
	1'000	1.98	6.03	
	3'000	3.28	9.09	
	10'000	4.84	15.50	
	30'000	6.89	abgebrochen	



Fortsetzung der Abbildung siehe nächste Seite

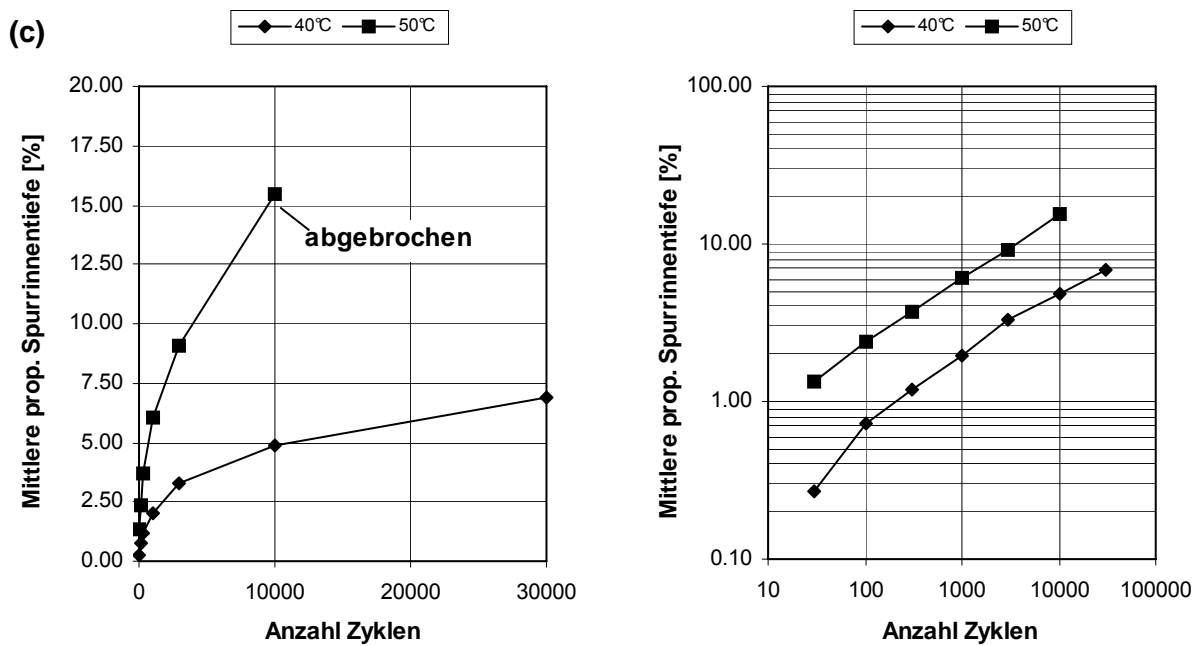


Abbildung 6.29 Einfluss der Prüftemperatur, Mittelwerte der proportionalen Spurrinnentiefen: (a) – Serie T-AB11; (b) – Serie T-HMT22; (c) – Serie T-GA8.

Grundsätzlich ist mit zunehmender Temperatur eine immer stärkere nichtproportionale Zunahme der Spurbildung zu erwarten. Da die Prüfung von Gussasphalt frühzeitig abgebrochen wurde und eine Prüfung bei 60°C nicht vorgenommen werden konnte, wurde zur Ermittlung der Regressionsparameter a und q der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe $s = az^q$ eine Abschätzung des Spurbildungsverhaltens unter Annahme des Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips für thermorheologisch einfache Stoffe via Masterkurven vorgenommen. Dabei wurde für die Masterkurve bei 60°C ein sigmoidaler Ansatz gewählt

$$\log(s) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(z_r)}} = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma (\log z - \log a_T)}}$$

wobei:

- s = proportionale Spurrinnentiefe (%)
- z_r = Zyklenzahl bei Referenztemperatur der Masterkurve T_0 (hier $T_0=60^\circ\text{C}$)
- z = Aktuelle Zyklenzahl
- δ, α = Minimaler bzw. maximaler Wert von s
- β, γ = Parameter zur Beschreibung der sigmoidalen Kurvenform; γ beeinflusst den Anstieg der Funktion zwischen Minimum und Maximum und β die horizontale Position des Wendepunktes
- a_T = Shiftfaktor (Horizontalverschiebung im $\log(s)$ - $\log(z)$ -Raum, $\log a_T = \log z - \log z_r$)

Unter Verwendung der WLF Gleichung für den Shiftfaktor a_T mit den Konstanten C_1, C_2 und unter Berücksichtigung der aktuellen Temperatur T

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{(T - T_0) + C_2}$$

wird daraus

$$\log(s) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \left(\log z + \frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \right)}}$$

Die Resultate der Bestimmung der sigmoidalen Masterkurve für $T_0=60^\circ\text{C}$ aus den Spurbildungskurven bei 40°C, 50°C und 60°C nach der Methode der kleinsten Quadrate sind in Tabelle 6.26

und Abbildung 6.30 dargestellt. Die Ergebnisse an verschiedenem Mischgut zeigen, dass sich das Spurbildungsverhalten bei verschiedenen Temperaturen gut durch das Zeit-Temperaturprinzip mittels Masterkurven beschrieben lässt, wobei α und insbesondere auch die Parameter der WLF Gleichung C_1 und C_2 kaum variieren. Deutlich wird das extreme Spurbildungsverhalten von GA8 auf AB11 im Spurbildungstest und das in diesem Fall gegenüber HMT22 etwas stärkere Risiko zu bleibenden Deformationen bei AB11. Um bei Gussasphalt nach 30'000 Zyklen vergleichbare Spurrinnenbildung wie bei AB11 und HMT22 zu erhalten, müsste im vorliegenden Falle gemäss Masterkurve für T-GA8 die Prüftemperatur um fast 25.. 30°C, d.h. auf 36...31°C gesenkt werden. Eine tolerable proportionale Spurrinntiefe von 7.5% würde für T-GA8 demzufolge noch bei einer Prüftemperatur von 39.4°C erreicht.

Da über das Praxisverhalten für T-GA8 keine Informationen existieren, lassen sich gewisse diesbezügliche Abschätzungen höchstens durch Analogiebetrachtung mit dem ebenfalls untersuchten A3-GA vornehmen, wo sich in der Praxis auch nach 10 Jahren Verkehr nur Spurrinntiefen in der Grössenordnung von 7mm einstellten. Wie in Abschnitt 6.1.5 festgestellt, ergaben die Prüfkörper aus diesen Belagsriegeln bei 60°C schon nach 300 Zyklen übermässige Spurrinnen (vgl. Tabelle 6.13). Bestimmt man aus den wenigen Punkten unter Annahme ähnlicher Shiftfaktoren wie für T-GA8 die sigmoidale Masterkurve für 60°C (Tabelle 6.26), erhält man vor allem für δ , β , γ unterschiedliche Werte. Für eine tolerable proportionale Spurrinntiefe von 7.5 lässt sich daraus eine theoretische Prüftemperatur von 41,7°C % berechnen. Aufgrund dieser Betrachtungen und aufgrund von Prüfungen an Belagsriegeln im Vergleich mit 10-jährigem Verhalten in der Praxis lässt sich somit folgern, dass für Gussasphalt eine Prüftemperatur von 60°C zu hoch ist und die Spurbildungsprüfung an Gussasphalt bei gleicher tolerabler proportionaler Spurrinntiefe von 7.5% nach 30000 Zyklen realitätsbezogener bei 40°C durchzuführen ist.

Tabelle 6.26 Parameter der sigmoidalen Masterkurve für die proportionale Spurrinntiefe s in (%) von Mischgut AB11 S, HMT 22S und GA8+AB11 bei 60°C; inkl. Vergleich mit A3-GA

Material	δ	α	β	γ	C_1	C_2
AB11 S	0.9046	-9543.87	9.0865	0.3666	9476.4	110095.3
HMT 22 S	0.6736	-9542.95	9.0688	0.3562	12763.3	109812.3
GA8 und AB11 S	2.8576	-9542.95	8.1023	0.1808	12763.3	109812.3
A3-GA (zum Vergleich)	14.0868	-9542.95	6.4957	0.0363	12763.3	109812.3

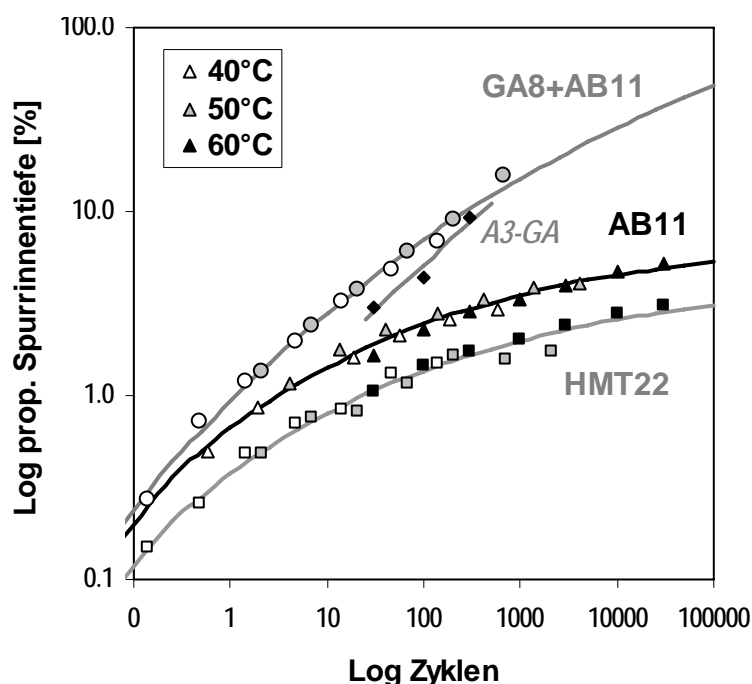


Abbildung 6.30 Sigmoidale Masterkurven für 60°C bestimmt aus den Spurbildungskurven für Mischgut AB11 S, HMT 22S und GA8+AB11 bei 40°C (weisse Punkte), 50°C (graue Punkte) und 60°C (schwarze Punkte); inkl. Vergleich mit A3-GA

Tabelle 6.27 und Abbildung 6.31 liefern Angaben über die Regressionsparameter a und q Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe $s=az^q$. Offenbar ändern sich die a -Werte verglichen mit den q -Werten in Funktion der Temperatur deutlich stärker, wo die Veränderung einer Beziehung gehorchen, die erstaunlich nahe zur Vergleichskurve liegt. Mit höherer Temperatur nehmen vor allem die Spurrinnen in der Frühphase der Prüfung zu (a -Werte). Durch die rasche anfängliche Stabilisierung des Korngerüstes wird die weitere Spurbildung behindert, weshalb die Geschwindigkeit der Spurbildung in Funktion der Temperatur im betrachteten Temperaturbereich bei AB11 und insbesondere bei HMT22 abnimmt (q -Wert). Die strukturelle Stabilisierung bzw. das Ineinanderverkeilen des Gesteins wirkt sich somit stärker aus, wie die temperaturbedingte Veränderung der Viskosität im Bindemittel. Damit ist Verhalten im Spurbildungstest im vorliegenden Fall deutlich anders wie beim reinen seitlich unbehinderten Kriechversuch, wo auch die Verformungsgeschwindigkeit im Sekundär-Kriechbereich in Funktion der Temperatur zunimmt.

Etwas unterschiedlich ist das Verhalten beim Prüfkörper GA8+AB11. Dort nimmt zwar der a -Wert ebenfalls mit der Temperatur zu, doch verändert sich der q -Wert in Funktion der Temperatur kaum. Es scheint, dass im betrachteten Temperaturbereich bei Mastixasphalt, der ja nicht wie Asphaltbeton nach dem Betonprinzip mit dichtester Packung sondern nach dem Prinzip einer eingefrorenen Flüssigkeit aufgebaut ist, die zu erwartende Abnahme der Verformungsgeschwindigkeit infolge struktureller Stabilisierung durch die thermisch bedingte Zunahme der Fliesseigenschaften im Kriech-Sekundärbereich kompensiert wird, was zu annähernd konstanten von der Temperatur unabhängigen q -Werten führt. Für die Praxis heisst dies, dass die Spurbildungsprüfung von Mastixasphalt bei 60°C als unrealistisch anzusehen ist und deshalb bei tieferen Temperaturen, z.B. bei 40°C, durchgeführt werden sollte, zumal sich hier Werte ergeben, die näher bei der durch Praxisverhalten untermauerten Vergleichskurve liegen.

Tabelle 6.27 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die prop. Spurrinnentiefe an Mischgut AB11 S, HMT 22S und GA8+AB11 für verschiedene Temperaturen, Determinationskoeffizient r^2

Material	°C	a	q	r^2	Bemerkungen
AB11	40	0.2489	0.2543	0.9656	
	50	0.7622	0.1747	0.9379	
	60	1.0467	0.1624	0.9768	
HMT22	40	0.0589	0.3319	0.9644	
	50	0.3025	0.1835	0.915	
	60	0.697	0.1501	0.9762	
GA8+AB11	40	0.0793	0.4503	0.9747	
	50	0.347	0.412	0.999	
	60	0.9157	0.441	0.9845	(mit WLF, Masterkurve berechnet)

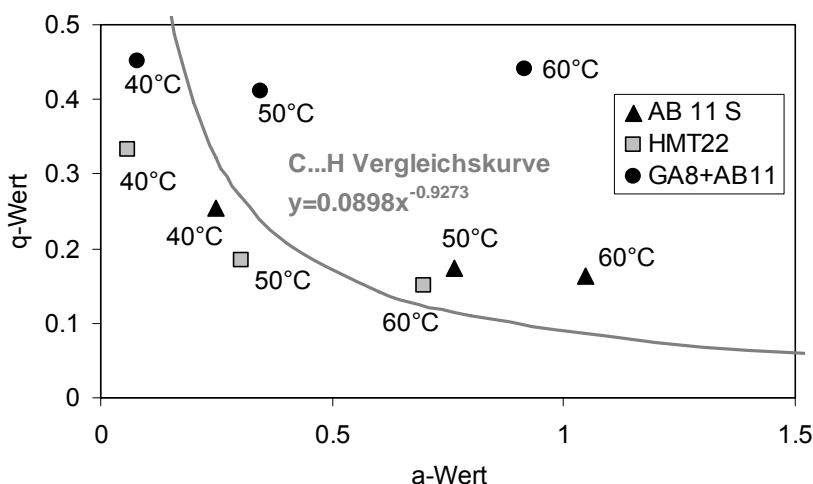


Abbildung 6.31 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinnentiefe an Prüfkörpern aus Mischgut AB11 S, HMT 22S und GA8+AB11 für verschiedene Temperaturen; zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve der Strecken C...H eingezeichnet.

6.2.5 Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen

An Prüfkörpern aus Mischgut AB11 S gemäss Abschnitt 6.2.2 wurde der Einfluss bestimmt, der sich durch Messunterbrüche bzw. aus der zeitlichen Verzögerung zwischen den einzelnen Messungen bei der Ermittlung der Messprofile gemäss Abbildung 5.2 ergibt. Die Pausenzeiten zwischen den Messungen wurden zwischen 1 und 4 Minuten variiert (Tabelle 6.28). Die Mittelwerte der Ergebnisse finden sich in Tabelle 6.29 und Abbildung 6.32; die Einzelwerte sind in Abschnitt 11.9 aufgeführt. Statistisch gesehen sind die Mittelwerte ähnlich und es lässt sich kein Hinweis auf eine signifikante Beeinflussung der Messung durch die gewählten Pausenzeiten ableiten (Unterschied nur auf 77%-Niveau).

Tabelle 6.28 Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen: Prüfkörper

Serie	Pausenzeit zwischen den Messungen [min]	Prüfkörper-Bezeichnung (je 2 Prüfkörper)
Z-E	1	Z-E-1(2) *
Z-M	4	Z-M-1(2)

*Bemerkung: Die Prüfbedingungen von Z-E-1(2) und RD6-1(2) (siehe Abschnitt 6.2.2) sind äquivalent. Darum wurden im aktuellen Abschnitt die Ergebnisse von RD6-1(2) übernommen. Zusätzliche Prüfungen für Z-E-1(2) wurden nicht durchgeführt, um den Zeitaufwand zu verringern.

Tabelle 6.29 Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen: Ergebnisse

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i [%]	
	Z-E	Z-M
30	1.64	2.00
100	2.29	2.64
300	2.84	3.17
1'000	3.34	3.61
3'000	3.92	4.25
10'000	4.68	5.03
30'000	5.23	5.55

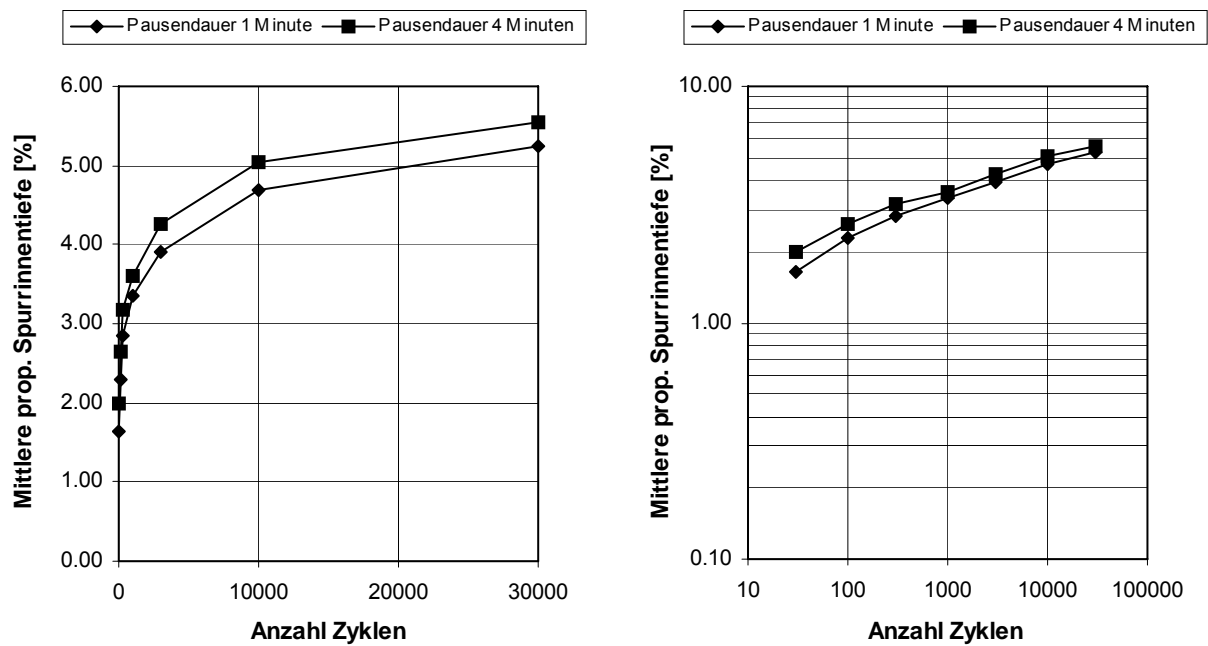


Abbildung 6.32 Einfluss der Pausendauer zwischen den Messungen, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen.

6.2.6 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung

In ähnlicher Weise wie unter Abschnitt 6.2.5 wurde an AB 11S auch der Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung untersucht. Im ersten Fall betrug die Lagerung bei Raumtemperatur vor der Prüfung eine Woche, im zweiten Fall 6 Monate (Tabelle 6.30). Die Mittelwerte der Ergebnisse finden sich in Tabelle 6.31 und Abbildung 6.33, die Einzelwerte enthält Abschnitt 11.10. Offenbar wirkt sich die Dauer der Prüfkörperlagerung bedeutend stärker auf die Ergebnisse aus als z.B. die Pausenzeit. Statistisch gesehen ist der Unterschied schwach signifikant (auf dem 94%-Niveau). Bedingt durch die Alterung während der Lagerung findet eine gewisse Verhärtung statt, welche sich im vorliegenden Fall in einer leichten Reduktion der proportionalen Spurrinntiefe nach 30'000 Zyklen um ca. 15% äusserte.

Tabelle 6.30 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung: Prüfkörper

Serie	Dauer der Prüfkörperlagerung vor der Prüfung	Prüfkörper-Bezeichnung (je 2 Prüfkörper)
A-1W	1 Woche	A-1W -1(2) *
A-6M	6 Monate	A-6M -1(2)

*Bemerkung: Die Prüfbedingungen von A-1W-1(2) und RD6-1(2) (siehe Abschnitt 6.2.2) sind äquivalent. Darum wurden im aktuellen Abschnitt die Ergebnisse von RD6-1(2) übernommen. Zusätzliche Prüfungen für A-1W -1(2) wurden nicht durchgeführt, um den Zeitaufwand zu verringern.

Tabelle 6.31 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung: Ergebnisse

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinntiefe \bar{P}_i [%]	
	A-1W	A-6M
30	1.64	1.42
100	2.29	1.68
300	2.84	2.50
1'000	3.34	2.95
3'000	3.92	3.43
10'000	4.68	3.99
30'000	5.23	4.42

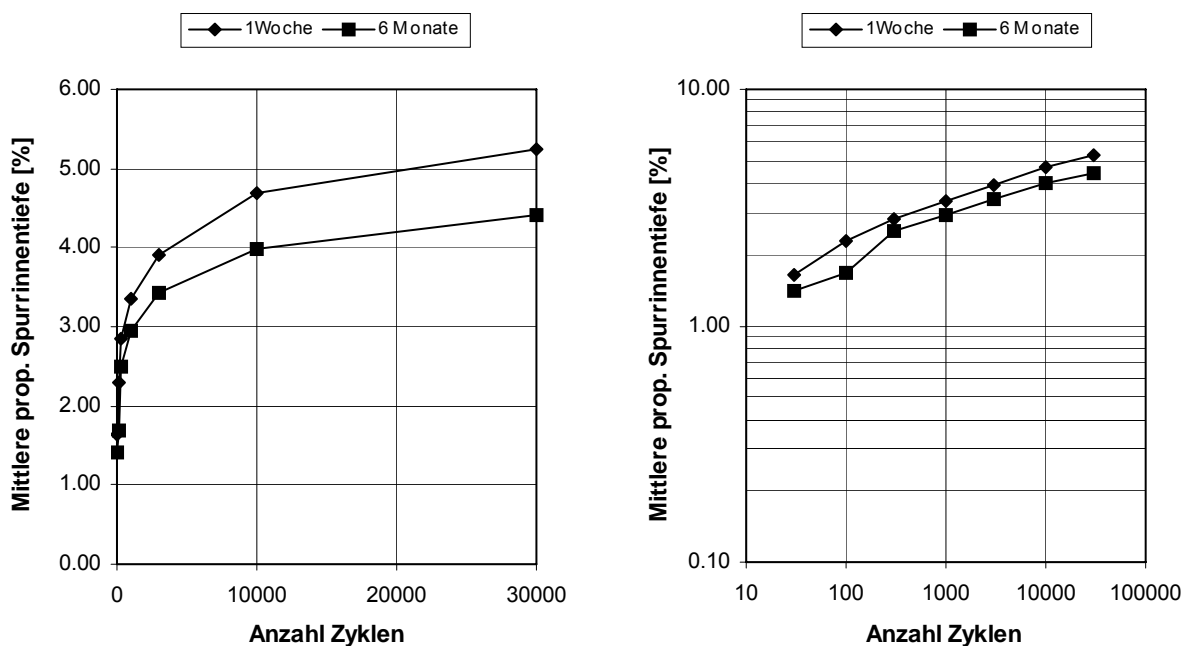


Abbildung 6.33 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung, Mittelwerte der proportionalen Spurrinnentiefen für AB11 S

Bezüglich Regressionsparameter a und q der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe $s=az^q$ lässt sich feststellen, dass sich im vorliegenden Fall die Lagerungsdauer vor allem in einer Veränderung des a-Wertes, und damit in einer vertikalen Parallelverschiebung der Spurbildungskurve äusserte, während der q-Wert gleich blieb (Tabelle 6.32).

Tabelle 6.32 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die prop. Spurrinnentiefe an Mischgut AB11 S, für verschiedene Lagerungsdauern, Determinationskoeffizient r^2

Lagerungsdauer	a	q	r^2
1 Woche	1.0474	0.1623	0.977
6 Monate	0.8455	0.1693	0.9607

6.2.7 Einfluss der Prüfkörperdicke

In dieser Teil-Untersuchung wurde die Hohlraumgehaltsverteilung von Prüfkörpern aus AB11 der Dicke 50 mm bzw. 100 mm für den Spurbildungstest bestimmt sowie ein Vergleich des Spurbildungsverhaltens von verschiedenen dicken Prüfkörpern vorgenommen. Dabei handelte es sich aus Verfügbarkeitsgründen um einen anderen AB11 S als der in Abschnitt 6.2.1 erwähnte. Der hier verwendete AB 11 S wurde mit Bitumen B80/100 hergestellt und wies u.a. einen etwas tieferen Bindemittelgehalt von 5.25% und eine leicht unterschiedliche Korngrössenverteilung auf. Bezüglich Einfluss der Prüfkörperdicke an Belagsausschnitten SMA 11S sei ausserdem auch auf den Abschnitt 6.1.2 verwiesen.

6.2.7.1 Hohlraumgehalt

Für die Untersuchung wurden jeweils 4 Prüfkörper mit einer Dicke 100 mm und 50 mm hergestellt (Prüfkörper-Bezeichnungen siehe Abschnitt 11.11). Alle Prüfkörper wurden mit dem Verdichter des Spurbildungstesters verdichtet. Jeweils zwei Prüfkörper mit 100 mm und 50 mm Dicke wurden vor und nach der Untersuchung im Spurbildungstest zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes in Teile zerschnitten. Dabei wurden die 100mm dicken Prüfkörper zunächst in

zwei Hälften getrennt (obere und untere) und dann in jeweils 4 x 5 Teile zerschnitten; jene Prüfkörper mit der Dicke 50mm wurden nur einmal in 4 x 5 Teile zerschnitten.

Gemäss Einzelwerten in Abschnitt 11.11 ergibt sich eine Tendenz zu einem niedrigeren Hohlraumgehalt für die Prüfkörper mit der Dicke 50 mm. Der Vergleich der Mittelwerte des Hohlraumgehaltes zeigt, dass die 100 mm dicken Prüfkörper etwa 0.5 Vol.-% mehr Hohlräume aufweisen als jene mit der Dicke 50 mm

Abbildung 6.34(a) und Abbildung 6.35(a) zeigen die Hohlraumgehaltsverteilung der oberen und unteren Hälfte in einem Prüfkörper nach der Herstellung mittels Verdichter. Der mittlere Hohlraumgehalt der beiden verdichteten Prüfkörper beträgt 5.7 Vol.-% (Mittelwert aus jeweils zwei Prüfkörpern von beiden Hälften). Der Unterschied des Hohlraumgehaltes ist bemerkbar, aber nicht so stark als im Prüfkörper nach dem Spurbildungstest. Vor der Spurbildungsprüfung beträgt der Hohlraumgehalt im Randbereich zwischen 4.10 und 6.41 Vol.-% in der oberen Hälfte und zwischen 6.32 und 10.25 Vol.-% in der unteren Hälfte. In Prüfkörpermitte der beiden Hälften ist der Hohlraumgehalt niedriger als im Randbereich; er variiert von 2.74 bis 4.23 Vol.-% in der oberen und zwischen 4.33 bis 8.54 Vol.-% in der unteren Hälfte. Der mittlere Hohlraumgehalt der unteren Hälfte ist mit 7.09 Vol.-% um 2.8 Vol.-% höher als der mittlere Hohlraumgehalt der oberen Hälfte.

Abbildung 6.34(b) und Abbildung 6.35(b) zeigen die Hohlraumgehaltsverteilung der oberen und unteren Hälfte in einem Prüfkörper nach dem Spurbildungstest. Der mittlere Hohlraumgehalt aller Teile der beiden geprüften Prüfkörpern beträgt 4.98 Vol.-%. Besonders in der oberen Hälfte des Prüfkörpers ist die durch die Spurbildungsprüfung verursachte starke Nachverdichtung des Mischguts deutlich erkennbar: Während der Hohlraumgehalt im Randbereich bis zu ca. 8 Vol.-% beträgt, findet sich in der "Spurrinne" nur ein Hohlraumgehalt von ca. 1.5 bis 2.5 Vol.-%. Auch in der unteren Hälfte des Prüfkörpers liegt der Hohlraumgehalt in der Radspur mit 3 bis 6.5 Vol.-% deutlich unter jenem der Randbereiche mit 5 bis 8.5 Vol.-%. Zudem ist hier der Hohlraumgehalt an beiden Prüfkörperenden ebenfalls wesentlich höher als in Prüfkörpermitte. Der mittlere Hohlraumgehalt der unteren Hälfte ist mit 5.47 Vol.-% um 1 Vol.-% höher als der mittlere Hohlraumgehalt der oberen Hälfte.

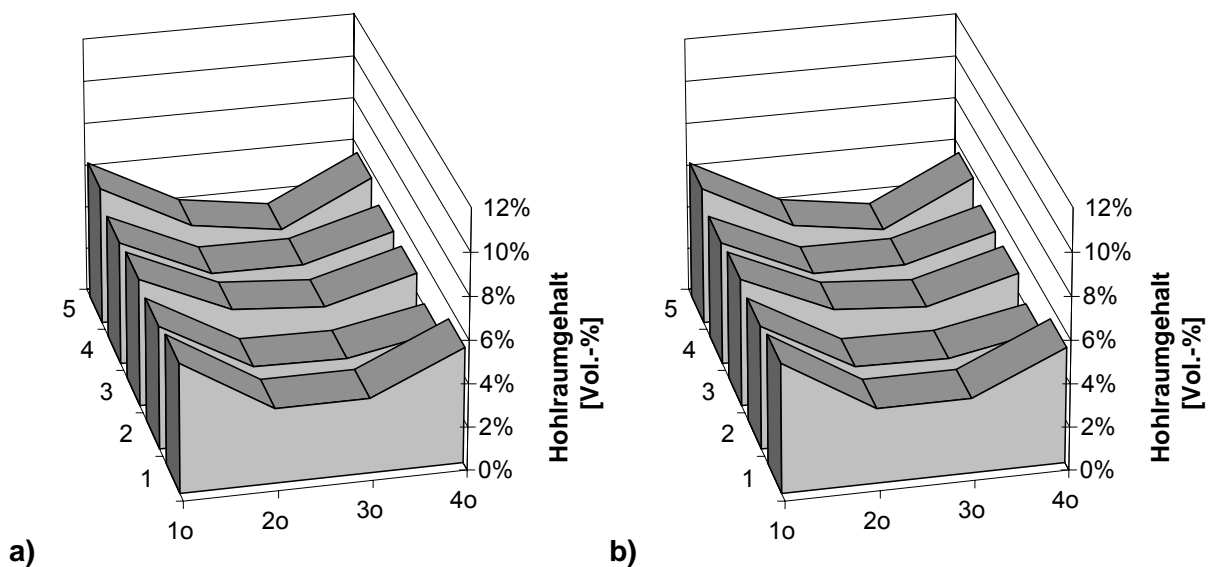


Abbildung 6.34 obere Hälfte, Prüfkörper AB11 mit der Dicke 100 mm a) Prüfkörper 3.1 vor dem Spurbildungstest; b) Prüfkörper 4.2 nach dem Spurbildungstest.

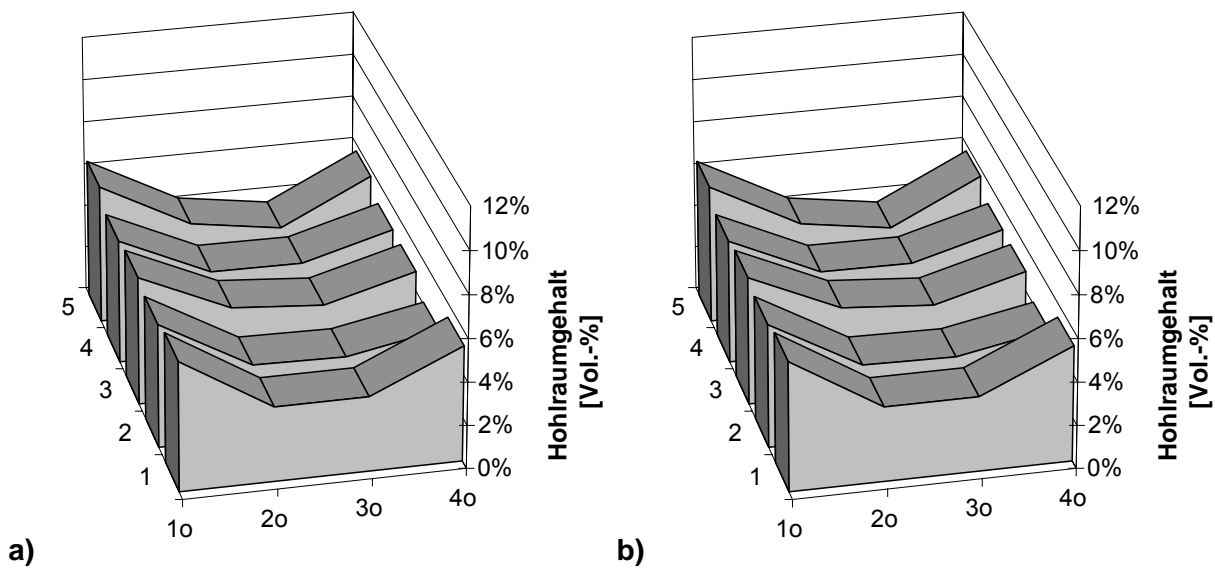


Abbildung 6.35 untere Hälfte, Prüfkörper AB11 mit der Dicke 100 mm mm a) Prüfkörper 3.1 vor dem Spurbildungstest; b) Prüfkörper 4.2 nach dem Spurbildungstest.

Die Hohlraumgehaltsverteilung ist bei den Prüfkörpern vor und nach der Spurbildungsprüfung ähnlich. An den seitlichen Rändern und an den Prüfkörper-Enden sind die Hohlraumgehalte generell höher als in der Spur, wobei die Hohlraumgehaltsunterschiede nach dem Spurbildungstest in der Spur viel grösser sind als zuvor.

Abbildung 6.36 zeigt die Verteilung des Hohlraumgehalts im Prüfkörper mit der Dicke 50 mm. Die Hohlraumgehaltsverteilung im niedrigen Prüfkörper ist sehr ähnlich wie in der oberen Hälfte des 100 mm dicken Prüfkörpers.

Abbildung 6.36 (a) veranschaulicht die Hohlraumgehaltsverteilung im Prüfkörper 1.2 nach der Herstellung. Der mittlere Hohlraumgehalt der beiden verdichteten Prüfkörpern betrug 5.0 Vol.-%. Abbildung 6.36 (b) zeigt die Hohlraumgehaltsverteilung im Prüfkörper 2.1 nach dem Spurbildungstest. Der mittlere Hohlraumgehalt aller Teile der beiden geprüften Prüfkörpern beträgt 4.5 Vol.-%. Der Hohlraumgehalt im Randbereich liegt zwischen 4.4 und 7.8 Vol.-%. In der "Spurrinne" findet sich nur ein Hohlraumgehalt von ca. 2.2 bis 3.5 Vol.-%. Auch bei dieser Prüfkörperdicke ist der Unterschied des Hohlraumgehaltes unmittelbar nach der Herstellung nicht so stark als im Prüfkörper nach dem Spurbildungstest. Der Hohlraumgehalt im Randbereich liegt in diesen Fall zwischen 4.7 und 6.9 Vol.-%. In Prüfkörpermitte ist der Hohlraumgehalt niedriger als im Randbereich, d.h. zwischen 3.5 und 5.1 Vol.-%.

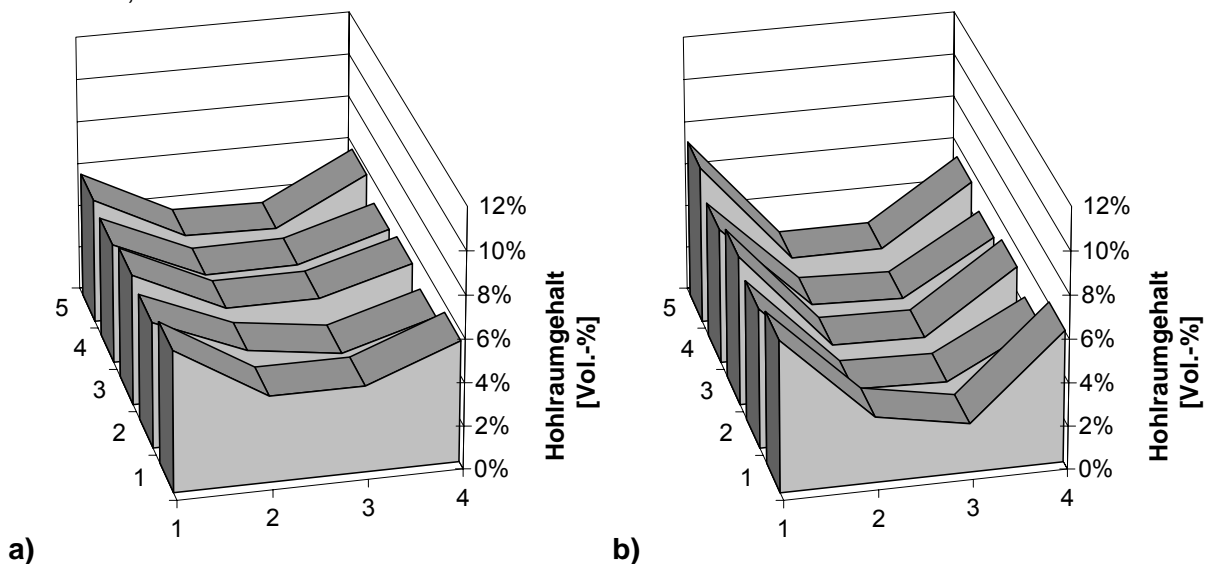


Abbildung 6.36 Prüfkörper AB11 mit der Dicke 50 mm a) Prüfkörper 1.2 vor dem Spurbildungstest
a) Prüfkörper 2.1 nach dem Spurbildungstest

Abbildung 6.37 liefert einen Vergleich des Hohlraumgehalts im mittleren Querprofil (Mittelwert aus jeweils zwei Prüfkörpern) der 100mm dicken Prüfkörper vor und nach dem Spurbildungstest. Betrachtet man die untere Prüfkörperhälfte vor und nach der Prüfung, so ergibt sich praktisch eine parallele Verschiebung hin zu einem niedrigeren Hohlraumgehalt nach der Prüfung (siehe auch Abbildung 6.38). In der oberen Hälfte des Prüfkörpers kommt es durch die Nachverdichtung des Spurbildungstests zu einer sehr starken Verdichtung in der Radspur, die bezogen auf den Hohlraumgehalt des Prüfkörpers nach der Prüfkörperherstellung zu einer Erhöhung des Hohlraumgehalts am Prüfkörpertrand führt.

Abbildung 6.37 enthält ausserdem einen Vergleich des Hohlraumgehalts im mittleren Querprofil (Mittelwert aus jeweils zwei Prüfkörpern) der 50mm dicken Prüfkörper vor und nach dem Spurbildungstest, welcher die Nachverdichtung durch den Spurbildungstest verdeutlicht. Wie aus Abbildung 6.38 hervorgeht, ist bei den 50mm dicken Prüfkörpern die Nachverdichtung während dem Spurbildungstest geringer als in der oberen Hälfte der 100mm dicken Prüfkörper.

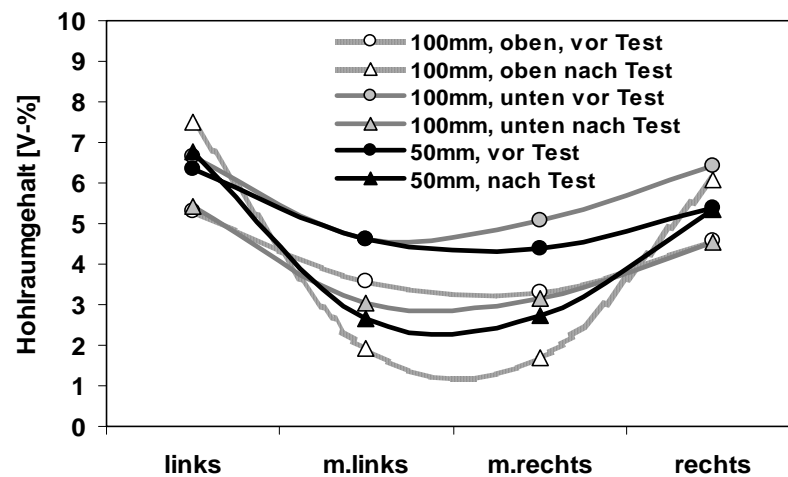


Abbildung 6.37 Hohlraumgehalt im mittleren Querprofil der 100mm und 50mm dicken Prüfkörper vor und nach dem Spurbildungstest (Mittelwert aus je zwei Prüfkörpern).

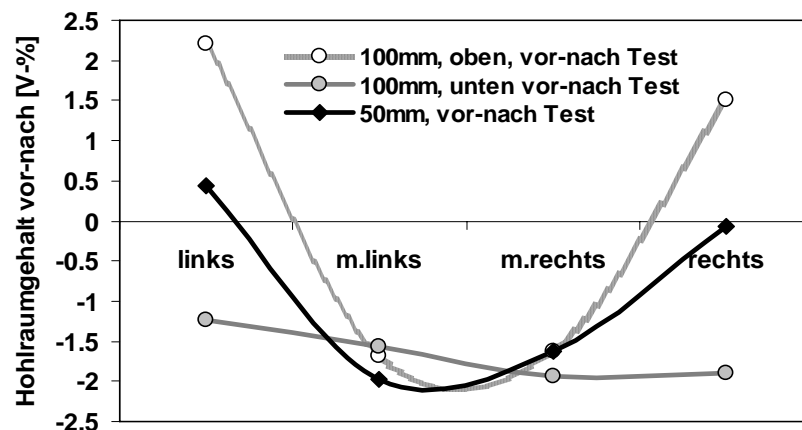


Abbildung 6.38 Differenz zwischen den Werten im Hohlraumgehalt des mittleren Querprofils vor und nach dem Spurbildungstest

Das durch die Aufteilung der 100mm dicken Prüfkörper gewonnene differenzierte Bild der Hohlraumgehalt-Verteilung ändert sich, wenn man gemäss Abbildung 6.39 jeweils den Hohlraumgehalt über die Gesamtdicke betrachtet. Dadurch könnte man den Eindruck gewinnen, dass beide Prüfkörper unabhängig von der Dicke fast gleich verdichtet sind. Da jedoch, wie gezeigt wurde, die obere Hälfte des Prüfkörpers mit der Dicke 100 mm tatsächlich mehr verdichtet ist als die untere Hälfte und somit ein deutlicher Unterschied zwischen Prüfkörpern mit 50 und 100mm

Dicke besteht, folgt daraus, dass die Betrachtung der gesamten Prüfkörper irreführend ist und zu falschen Schlussfolgerungen führen kann.

50mm und 100mm dicke Prüfkörper sind zwar hinsichtlich ihrer mittleren Hohlraumgehalte vergleichbar, doch liefern sie aufgrund differierender Materialverschiebungen während der Verdichtung eine signifikant unterschiedliche Hohlraumverteilung. Die Vergleichbarkeit von Spurbildungstest-Resultaten stark unterschiedlich dicker Prüfkörper ist daher nicht a priori gegeben.

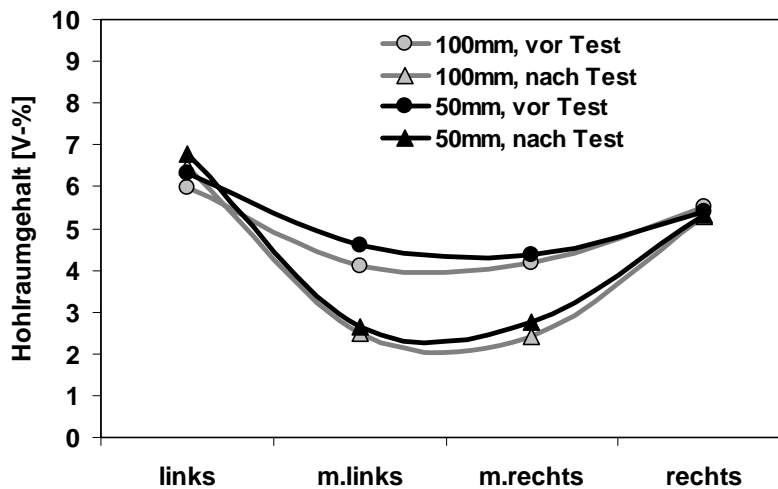


Abbildung 6.39 Hohlraumgehalt über die Gesamtdicke im mittleren Querprofil der 100mm und 50mm dicken Prüfkörper vor und nach dem Spurbildungstest (Mittelwert aus je zwei Prüfkörpern).

6.2.7.2 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Die Mittelwerte der Ergebnisse an AB 11 Ergebnisse sind in Abbildung 6.40 dargestellt. Es scheint, als würden die Prüfkörper mit einer Dicke von 50mm gegenüber den 100mm dicken etwas stärkere Spurbildungstendenz aufweisen, ähnlich wie bei SMA 11 S gemäss Abbildung 6.41, doch ist dieser Wegen der grossen Streuung der AB 11 Resultate der 50mm dicken Prüfkörper (vgl. Einzelwerte in 11.11) statistisch nicht signifikant. Bei SMA 11 S ist der Unterschied nach 300 Zyklen dagegen auf dem 98% Niveau statistisch signifikant.

Der generelle auf den Ergebnissen der Spurbildungsprüfung beruhende allfällige Verdacht, dass bei Prüfkörpern mit nur 50mm Dicke ein Risiko zu ungünstigerem Verhalten im Spurbildungstest besteht, konnte in diesen Versuchen statistisch nicht bestätigt werden. Hiezu müssten noch eingehender Untersuchungen durchgeführt werden.

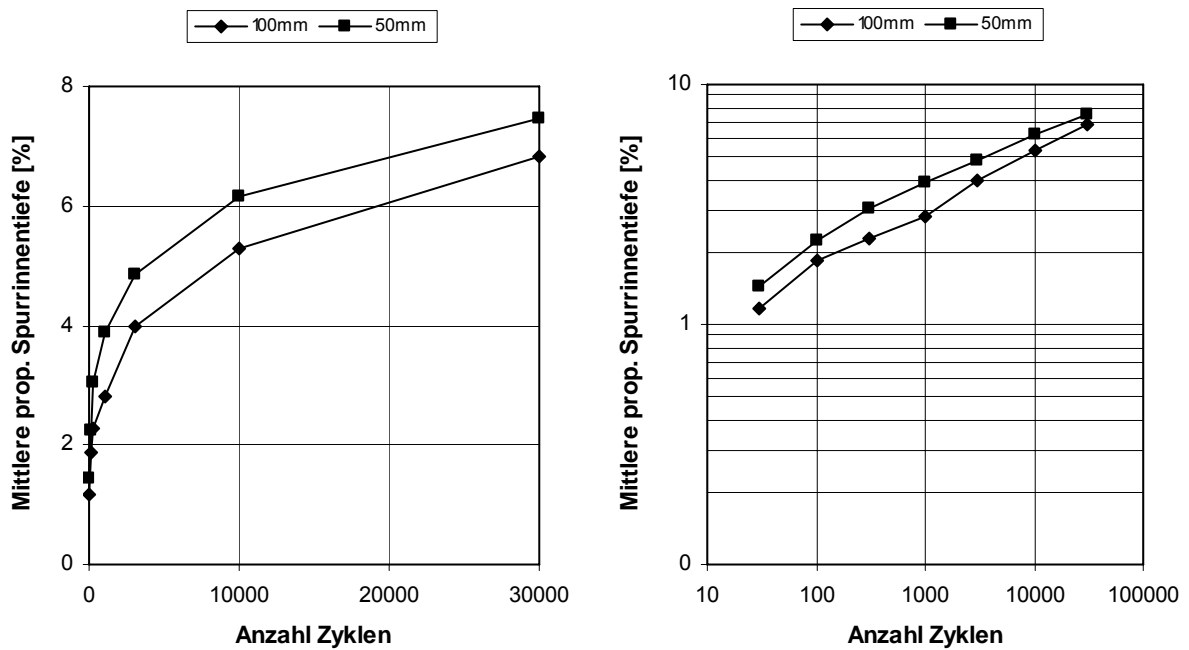


Abbildung 6.40 Einfluss der Prüfkörperdicke an AB 11 S, Mittelwerte der proportionalen Spurrinentiefen.

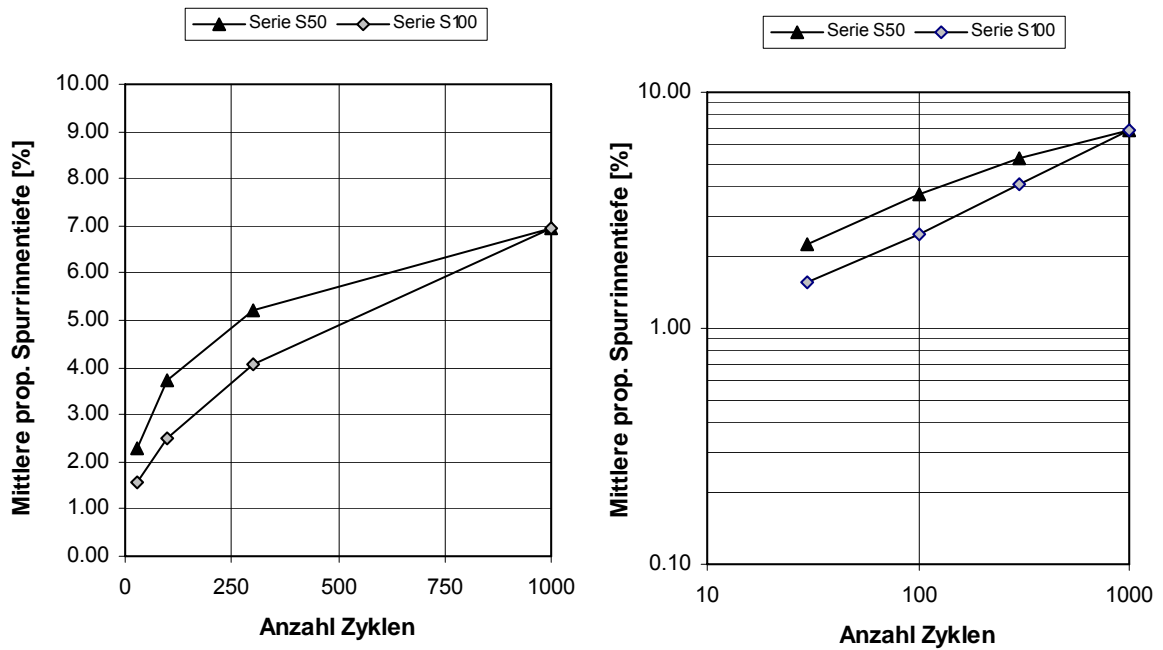


Abbildung 6.41 Einfluss der Prüfkörperdicke an 50 und 100mm dicken SMA11 S Belagsriegeln gemäss Abschnitt 6.1.2, Mittelwerte der proportionalen Spurrinentiefen

6.3 Nationale Ringanalyse

6.3.1 Methodik

6.3.1.1 Allgemeines

Im Rahmen des vorliegenden Projektes ASTRA2001/052 „Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurrinentests“ wurde eine Ringanalyse für LCPC Spurbildungstest an 2 Mischgutsorten durchzuführen. Insgesamt nahmen einschliesslich der Empa vier Laboratorien teil, die im Folgenden mit **A**, **B**, **C**, **D** bezeichnet werden.

Grundlage für die Planung und das Durchführen dieser Vergleichsprüfung bildet die „Standard-Checkliste für Vergleichsprüfungen (Ringversuche) bei Bauprodukten“ des EAM (Eidgenössisches Amt für Messwesen), Dokument Nr. 727d, Ausgabe November 1999, Rev. 00. Entsprechend diesem Dokument wurden mit Vertretern aller beteiligten Labors vor Beginn der Arbeiten die Verantwortlichkeit, die Vertraulichkeit und der Ablauf der Untersuchungen diskutiert und vereinbart. Es wurde abgemacht, dass die Empa Dübendorf, Abteilung Strassenbau/Abdichtungen die Auswertung der Resultate und die Erstellung des Schlussberichtes übernimmt.

Für die Ausführung der Verdichtung des bitumenhaltigen Mischgutes und des Spurbildungstests wurden in den Labors vorhandene LCPC Verdichter vom Typ BBPAC bzw. LCPC Spurbildungstester vom Typ ORNIÉREUR verwendet.

Die Experimente wurden grundsätzlich gemäss französischen Normen durchgeführt: a) Herstellung der Prüfkörper – NF P 98-250-2 „Préparation des mélanges hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des plaques“; b) Spurbildungstest – NF P 98-253-1 „Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés“. Bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse und Vorbereitung dieses Schlussberichtes wurden ausserdem die europäischen Normen EN 12697-8: Bestimmung der volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern, Ausgabe März 2003 und EN 12697-22: Spurbildungstest, Ausgabe Dezember 2003 verwendet.

Alle Labors verwendeten Prüfeinrichtungen vom gleichen Typ:

- für die Herstellung der Prüfkörper – das LCPC Verdichtungsgerät *BBPAC*
- für den Spurbildungstest – den LCPC Spurbildungstester *Orniéreur*

Dabei wurden alle Vorschriften in Bezug auf die Kalibrationsparameter, die für beide Prüfeinrichtungen nach den massgebenden Normen zugelassen sind, streng eingehalten.

Vor dem Beginn der Ringanalyse haben sich alle beteiligten Laboratorien auf die weiter unten in diesem Kapitel beschriebenen Vereinbarungen bezüglich der Herstellung der Prüfkörper und des Spurbildungstests geeinigt.

6.3.1.2 Herstellung der Prüfkörper

- Es wurden Standardkörper mit der Höhe 100 mm vorbereitet und geprüft.
- Für das Verdichten der Prüfkörper wurde das Schema starke Kompaktierung (compactage fort) verwendet.
- Die einzuwägenden Mischgutmengen pro Prüfkörper für beide Mischgutsorten wurden von der Empa anderen beteiligten Labors mitgeteilt.
- Aufwärmen des Mischguts:
 - ✓ Die Solltemperatur der ersten Aufwärmphase beträgt 130°C. Nachdem die Solltemperatur erreicht war, wurde das Mischgut aus dem Ofen genommen, geteilt und wieder in den Ofen gelegt.
 - ✓ Die Solltemperatur der zweiten Aufwärmphase betrug 155°C.
 - ✓ Es wurde ein konventioneller Ofen angewendet (kein Mikrowellenofen).
 - ✓ Die Schachteln mit dem Mischgut wurden während beider Aufwärmphasen mit einem Deckel gedeckt.
 - ✓ Zwei Schachteln mit dem Mischgut gleicher Sorte, die für die Herstellung von zwei Prüfkörpern bestimmt sind, wurden gleichzeitig in den Ofen gelegt.

- Verdichtung des Mischguts, Nachbehandlung:
 - ✓ Nachdem die Solltemperatur der zweiten Aufwärmphase erreicht war, wurde die erste Schachtel aus dem Ofen für die Verdichtung genommen. Die zweite Schachtel blieb im Ofen, die Solltemperatur von 155°C wurde eingehalten. Der zweite Prüfkörper wurde unmittelbar nach dem ersten verdichtet.
 - ✓ Für die Verdichtung wurde ein Standardrad mit einem Gummireifen verwendet.
 - ✓ Die Bodenplatte des LCPC Verdichters wurde nicht geheizt.
 - ✓ Die Prüfkörper wurden nach dem Verdichten nicht nachbehandelt.

6.3.1.3 Spurbildungstest

- Die Prüfkörper wurden ohne Behandlung der Randflächen in den Prüfraumen eingeklemmt.
- Die Spurrinntiefen wurden nach 30, 100, 300, 1000, 3000, 10000 und 30000 Zyklen gemessen.
- Die Messung der Spurrinntiefen erfolgte auf die für jedes Labor übliche Art (manuell oder elektronisch). Die Dauer einer vollen Messung bei jeder Anzahl der Zyklen (Erfassung von insgesamt 30 Messwerten für beide Prüfkörper) betrug 10 Minuten. Eine Tür des Orniéreurs blieb während dieser Zeit offen, und die Heizung des Orniéreurs blieb eingeschaltet.
- Nach jeder Messung wurde die Prüfkörpertemperatur auf den Sollwert von 60°C gebracht. Die Prüfung wurde 5 Minuten nach dem Erreichen der Solltemperatur fortgesetzt.

6.3.2 Mischgutsorten

Für die Ringanalyse wurden zwei Mischgutsorten verwendet: AB 11 S und HMT 22 S. Die erhaltenen Angaben und die massgebenden Werte für beide Mischgutsorten (ermittelt durch die Empa) sind im Abschnitt 6.2.1 dargestellt

6.3.3 Prüfkörper

Für alle Prüfkörper beider Mischgutsorten wurde jeweils eine Sammelprobe entnommen. Jedes Labor untersuchte insgesamt 8 Prüfkörper: 4 von der Sorte AB 11 S und 4 von der Sorte HMT 22 S. Jeweils 2 Prüfkörper beider Mischgutsorten wurden an der EMPA hergestellt und an die beteiligten Labors geliefert. Für die weiteren zwei Prüfkörper, die jedes Labor selbst herstellte, erhielten die Labors genügend Mischgut beider Sorten.

Die für die Herstellung der Prüfkörper notwendigen Werte der Mischgutrohndichten wurden an der EMPA ermittelt (siehe Tabelle 6.16 und Tabelle 6.18). Die Mischguteinwaage pro Prüfkörper betrug für AB 11 S: 21.25 kg, für HMT 22 S: 21.75 kg. Alle Prüfkörper hatten die Abmessungen von 100x180x50 mm. Weitere massgebende Informationen über alle untersuchten Prüfkörper sind in Tabelle 6.33 und Tabelle 6.34 dargestellt.

Tabelle 6.33 Prüfkörper: allgemeine Informationen

Prüfendes Labor	Kennzeichnung des Prüfkörpers	Mischgutsorte	Datum der Herstellung	Datum des Spurbildungstests
A	A_AB11_53	AB 11 S	23.02.2004	26/27.07.2004
	A_AB11_55	AB 11 S	23.02.2004	26/27.07.2004
	A_AB11_1	AB 11 S	05.08.2004	09/10.08.2004
	A_AB11_2	AB 11 S	05.08.2004	09/10.08.2004
	A_HMT22_1_EMPA	HMT 22 S	09.03.2004	05/06.08.2004
	A_HMT22_3	HMT 22 S	09.03.2004	05/06.08.2004
	A_HMT22_1	HMT 22 S	12.08.2004	16/17.08.2004
	A_HMT22_2	HMT 22 S	12.08.2004	16/17.08.2004
B	B_AB11_56	AB 11 S	23.02.2004	02.08.2004
	B_AB11_57	AB 11 S	23.02.2004	02.08.2004
	B_AB11_1	AB 11 S	16.07.2004	19.07.2004
	B_AB11_2	AB 11 S	16.07.2004	19.07.2004
	B_HMT22_4	HMT 22 S	09.03.2004	23.08.2004
	B_HMT22_5	HMT 22 S	09.03.2004	23.08.2004
	B_HMT22_1	HMT 22 S	26.07.2004	26.07.2004
	B_HMT22_2	HMT 22 S	26.07.2004	26.07.2004
C	C_AB11_58	AB 11 S	24.02.2004	21.07.2004
	C_AB11_59	AB 11 S	24.02.2004	21.07.2004
	C_AB11_1	AB 11 S	29.07.2004	03.08.2004
	C_AB11_2	AB 11 S	29.07.2004	03.08.2004
	C_HMT22_6	HMT 22 S	09.03.2004	23.07.2004
	C_HMT22_7	HMT 22 S	10.03.2004	23.07.2004
	C_HMT22_1	HMT 22 S	29.07.2004	05.08.2004
	C_HMT22_2	HMT 22 S	29.07.2004	05.08.2004
D	D_AB11_62	AB 11 S	24.02.2004	15/16.07.2004
	D_AB11_63	AB 11 S	24.02.2004	15/16.07.2004
	D_AB11_1	AB 11 S	22.07.2004	27.07.2004
	D_AB11_2	AB 11 S	22.07.2004	27.07.2004
	D_HMT22_11	HMT 22 S	10.03.2004	20/21.07.2004
	D_HMT22_13	HMT 22 S	11.03.2004	20/21.07.2004
	D_HMT22_1	HMT 22 S	22.07.2004	23.07.2004
	D_HMT22_2	HMT 22 S	22.07.2004	23.07.2004

Tabelle 6.34 Prüfkörper: massgebende Werte (extremale Werte des Hohlraumgehaltes sind fett hervorgehoben)

Mischgutsorte	Prüfendes Labor	Kennzeichnung des Prüfkörpers	Dauer der ersten Aufwärmphase (130 °C) [Stunden]	Dauer der zweiten Aufwärmphase (155 °C) [Stunden]	Hohlraumgehalt, ermittelt im prüfenden Labor [Vol.-%]
AB11 S	A	A_AB11_53	4.0	3.0	4.04
		A_AB11_55	4.0	3.3	3.75
		A_AB11_1	6.5	3.5	4.11
		A_AB11_2	6.5	4.0	4.36
	B	B_AB11_56	4.0	3.0	4.30
		B_AB11_57	4.0	3.3	4.10
		B_AB11_1	2.0	3.0	4.10
		B_AB11_2	2.0	3.0	4.10
	C	C_AB11_58	4.0	3.0	3.90
		C_AB11_59	4.0	3.3	3.80
		C_AB11_1	0.3	2.5	5.00
		C_AB11_2	0.3	2.8	4.30
	D	D_AB11_62	4.0	3.0	4.42
		D_AB11_63	4.0	3.3	4.03
		D_AB11_1	4.0	3.0	3.77
		D_AB11_2	4.0	3.3	3.89
HMT22 S	A	A_HMT22_1_Empa	4.0	3.0	5.23
		A_HMT22_3	4.0	3.3	4.99
		A_HMT22_1	6.5	3.5	4.88
		A_HMT22_2	6.5	4.0	4.76
	B	B_HMT22_4	4.0	3.0	5.50
		B_HMT22_5	4.0	3.3	5.50
		B_HMT22_1	2.0	3.0	5.10
		B_HMT22_2	2.0	3.0	5.10
	C	C_HMT22_6	4.0	3.0	5.10
		C_HMT22_7	4.0	3.3	5.10
		C_HMT22_1	0.3	3.0	6.10
		C_HMT22_2	0.3	3.3	5.90
	D	D_HMT22_11	4.0	3.0	5.36
		D_HMT22_13	4.0	3.3	5.49
		D_HMT22_1	4.0	3.0	4.95
		D_HMT22_2	4.0	3.3	4.89

6.3.4 Zuordnung der Profile und der Messpunkte

Für die Darstellung der Daten wurde eine einheitliche Zuordnung der Messprofile und der Messpunkte vereinbart. In die Checklisten für den Spurbildungstest wurden die gemessenen Spurrinntiefen von jedem Prüfkörper gemäss dem in Abbildung 5.2 angegebenen Schema eingetragen. Dieses Schema wurde für die Darstellung der Untersuchungsergebnisse.

6.3.5 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Messergebnisse wurden die in Kapitel 4.3 eingeführten Werte der proportionalen Spurrinntiefen P_i , P'_{ij} und P''_{ik} berechnet. Alle berechneten Werte für alle Prüfkörper sind im Anhang 11.1 tabellarisch dargestellt.

6.3.5.1 Mischgut AB 11 S: Proportionale Spurrinntiefen, gemittelt über alle Messpunkte

Abbildung 6.42 zeigt die Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen P_i für jedes Labor und jeden Prüfkörper, berechnet nach Formel (1) gemäss Abschnitt 5.3. In Abbildung 6.43 sind die Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen P_i für jedes Labor dargestellt, gemittelt über alle 4 getesteten Prüfkörper des Mischguts AB 11 S.

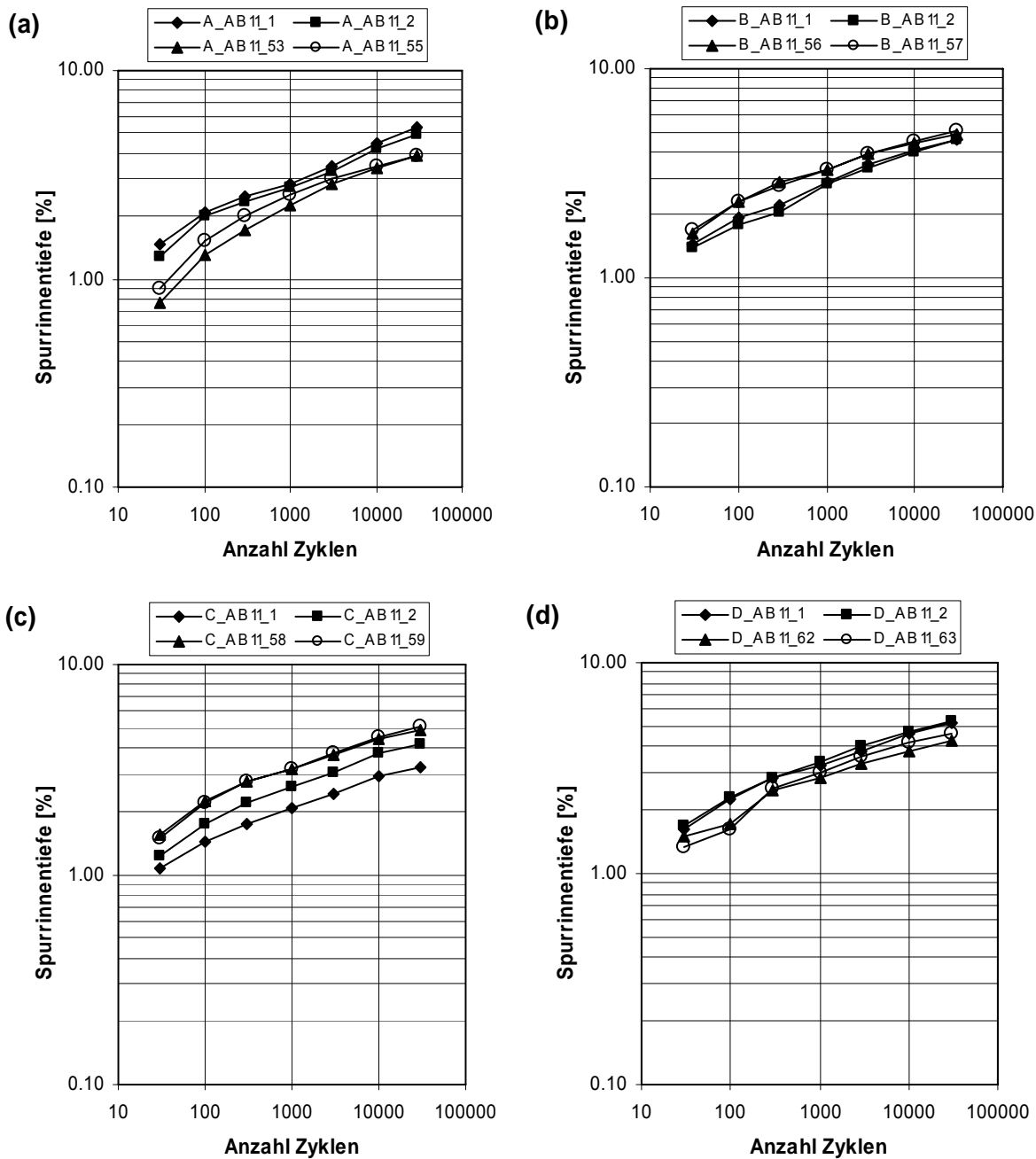


Abbildung 6.42 Mischgut AB 11 S, Einzelwerte P_i für jedes Labor: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D.

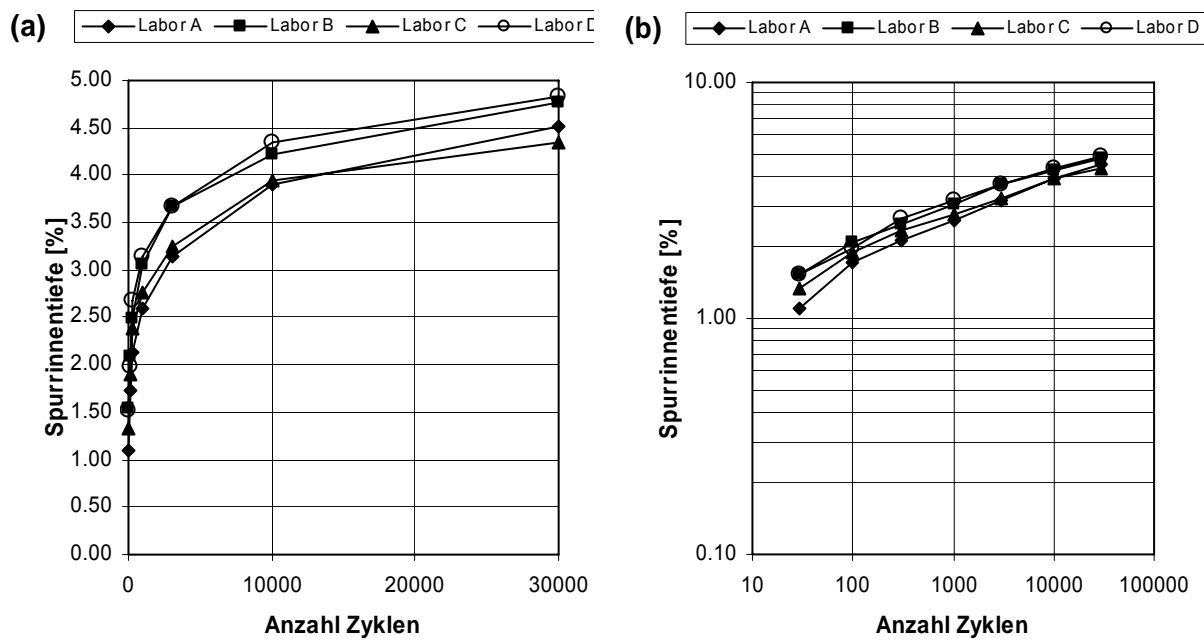


Abbildung 6.43 Mischgut AB 11 S, Mittelwerte P_i , gemittelt über alle 4 getesteten Prüfkörper: (a) – in proportionalen Koordinaten; (b) – in logarithmischen Koordinaten.

6.3.5.2 Mischgut AB 11 S: Proportionale Spurrinnentiefen, Entwicklung entlang der Reifenspur

Abbildung 6.44 zeigt die Mittelwerte (gemittelt über alle 4 durch jedes Labor geprüften Körper) von proportionalen Spurrinnentiefen P'_{ij} , berechnet nach Formel (2).

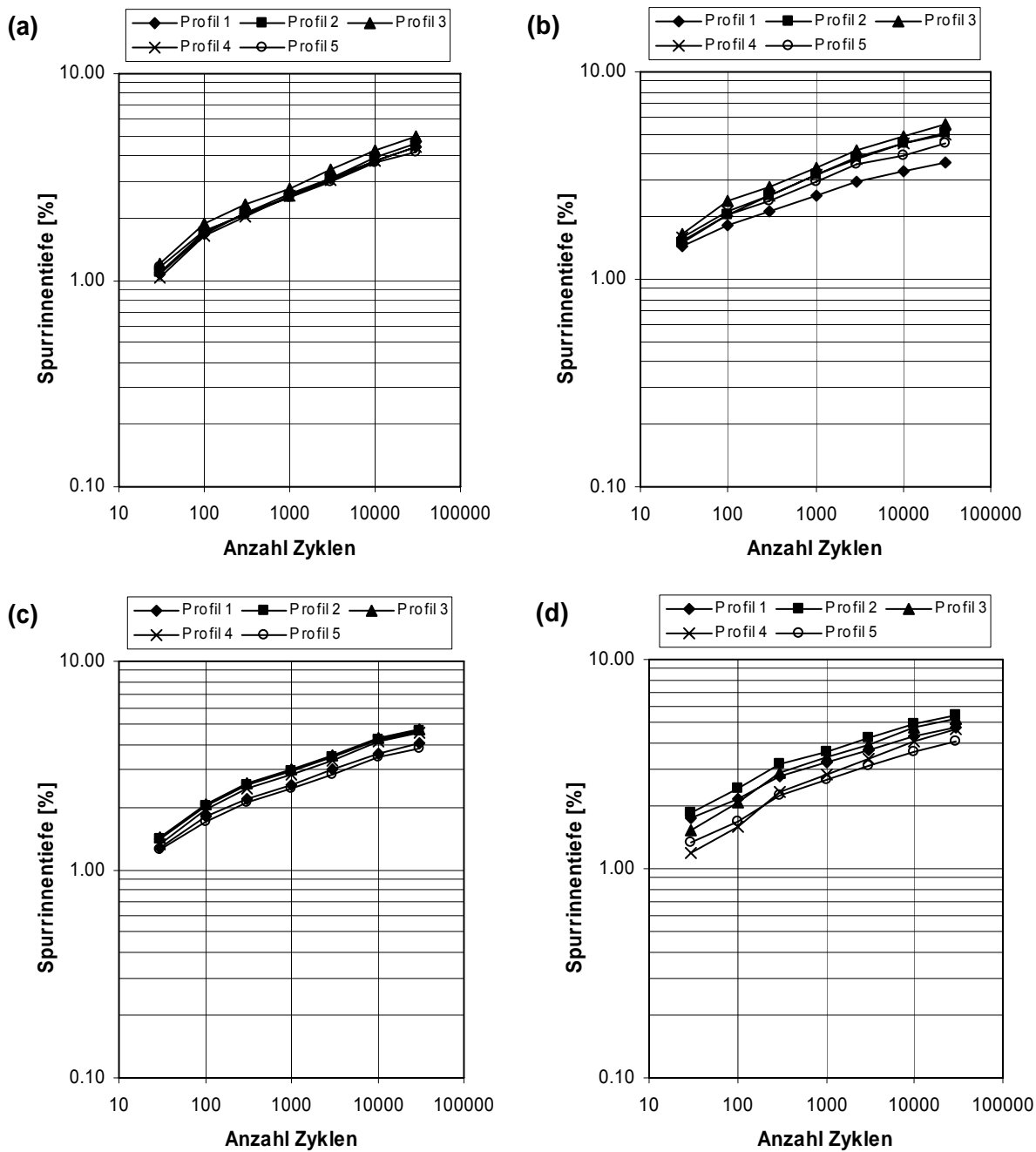


Abbildung 6.44 Mischgut AB 11 S, Mittelwerte P'_{ij} über alle 4 durch jedes Labor geprüfte Körper: (a), (b), (c), (d) – Labors A, B, C, D.

6.3.5.3 Mischgut AB 11 S: Proportionale Spurrinnentiefen, Entwicklung quer zur Reifenspur

In Abbildung 6.45 sind die Mittelwerte (gemittelt über alle 4 durch jedes Labor geprüften Körper) der proportionalen Spurrinnentiefen P''_{ik} , berechnet nach Formel (3) angegeben.

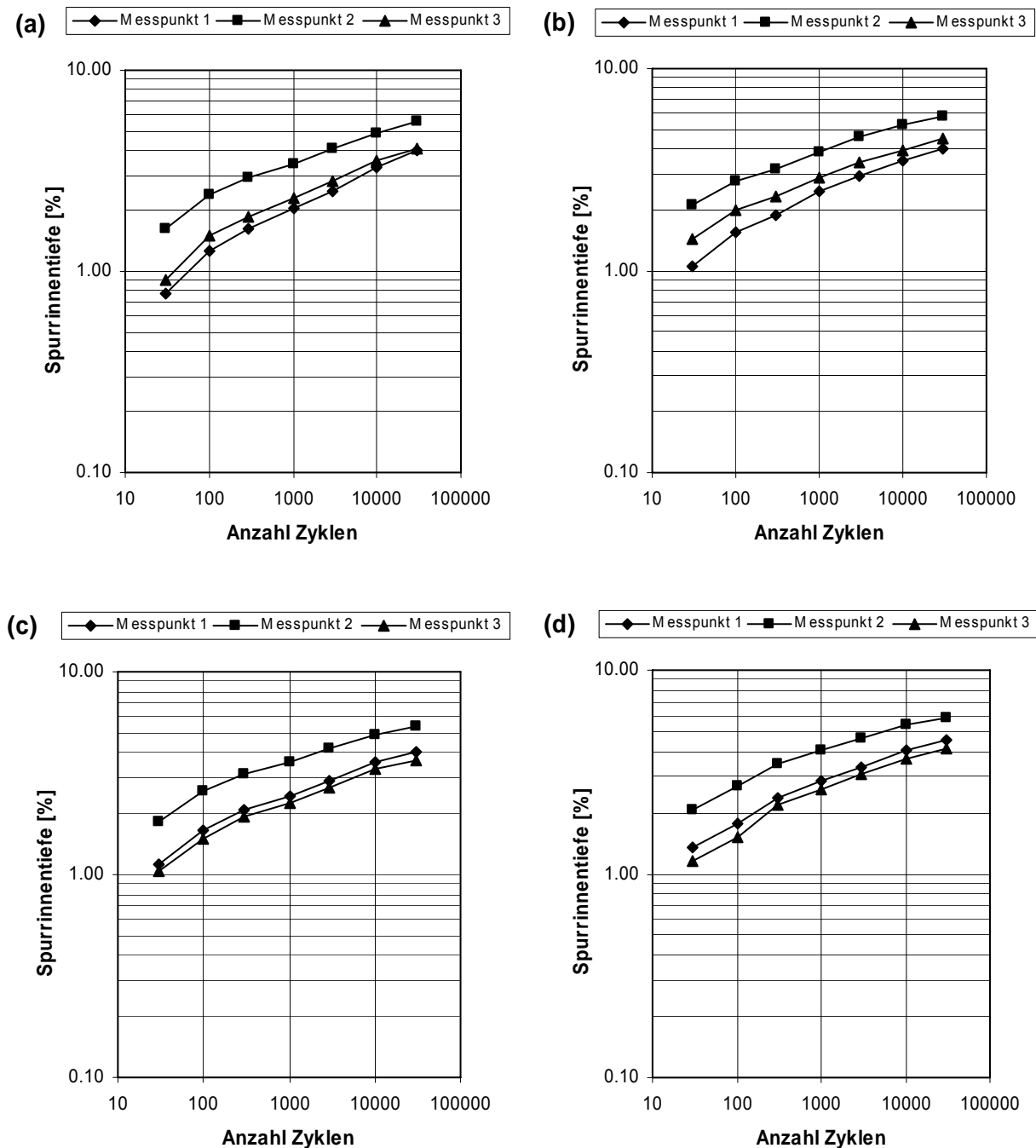


Abbildung 6.45 Mischgut AB 11 S, Mittelwerte P_{ik}'' über alle 4 durch jedes Labor geprüfte Körper: (a), (b), (c), (d) – Labors A, B, C, D.

6.3.5.4 Mischgut HMT 22 S: Proportionale Spurrinnentiefen, gemittelt über alle Messpunkte

Abbildung 6.46 zeigt die Mittelwerte von proportionalen Spurrinnentiefen P_i für jedes Labor und jeden Prüfkörper, berechnet nach Formel (1). In Abbildung 6.47 sind die Mittelwerte der proportionalen Spurrinnentiefen P_i für jedes Labor, gemittelt über alle 4 getesteten Prüfkörper des Mischguts HMT 22 S.

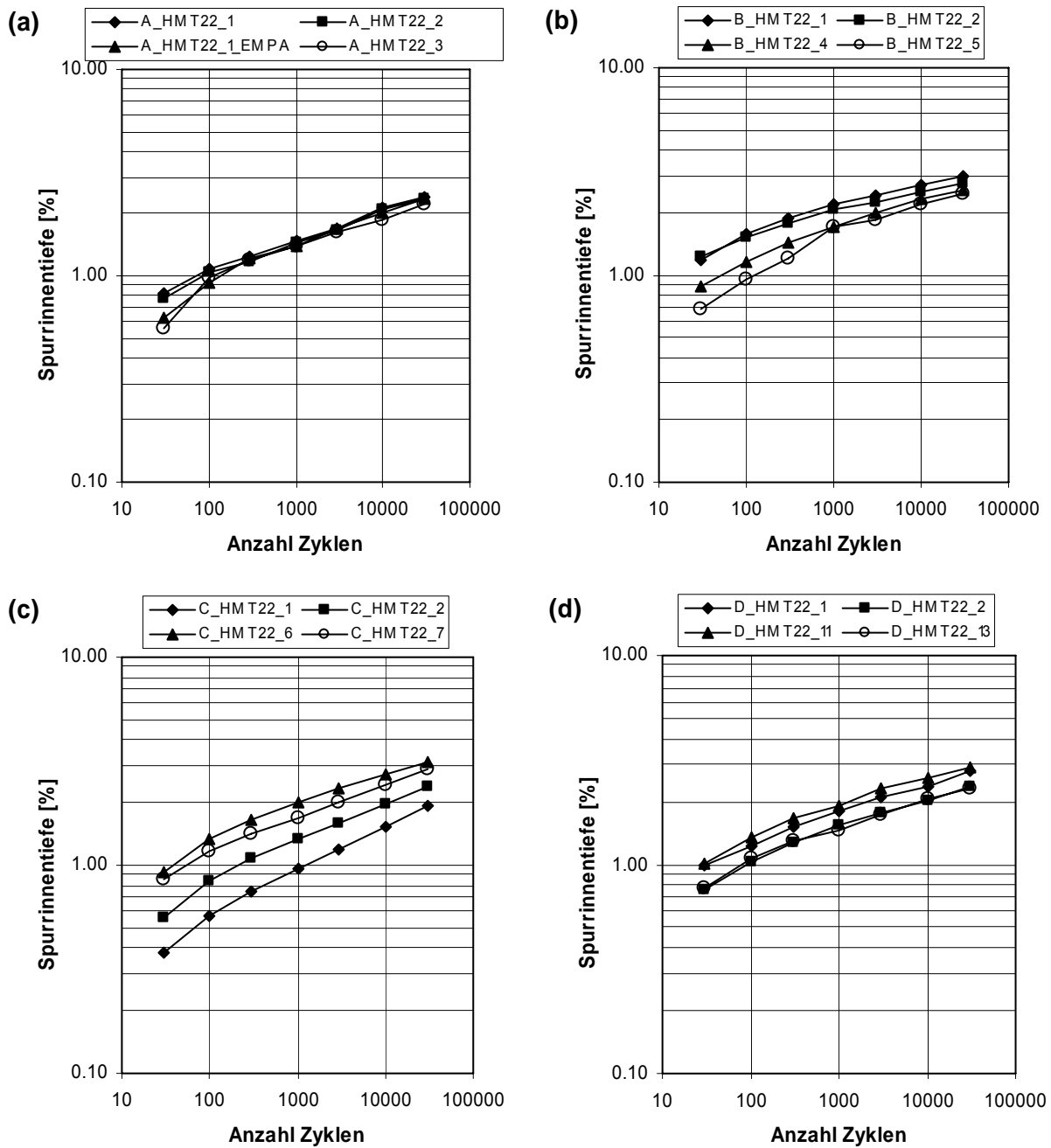


Abbildung 6.46 Mischgut HMT 22 S, Einzelwerte P_i für jedes Labor: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D.

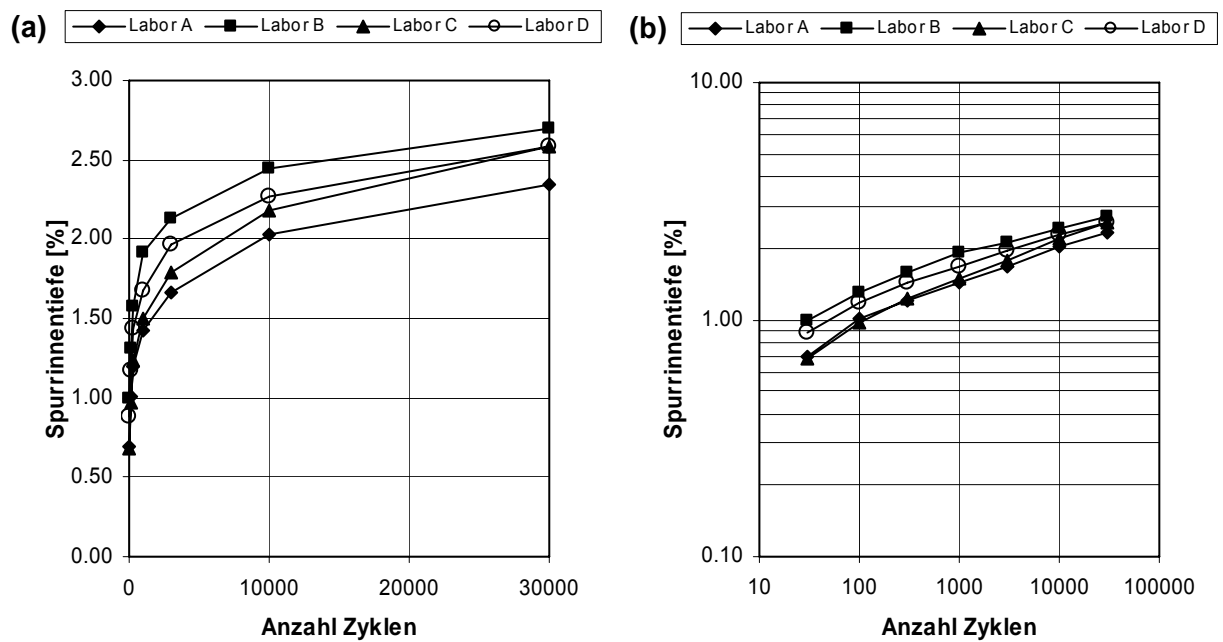


Abbildung 6.47 Mischgut HMT 22 S, Mittelwerte P_i , gemittelt über alle vier getesteten Prüfkörper:
(a) – in proportionalen Koordinaten; (b) – in logarithmischen Koordinaten.

6.3.5.5 Mischgut HMT 22 S: Proportionale Spurrinnentiefen, Entwicklung entlang der Reifenspür

Abbildung 6.48 zeigt die Mittelwerte (gemittelt über alle 4 durch jedes Labor geprüften Körper) von proportionalen Spurrinnentiefen P'_{ij} , berechnet nach Formel (2).

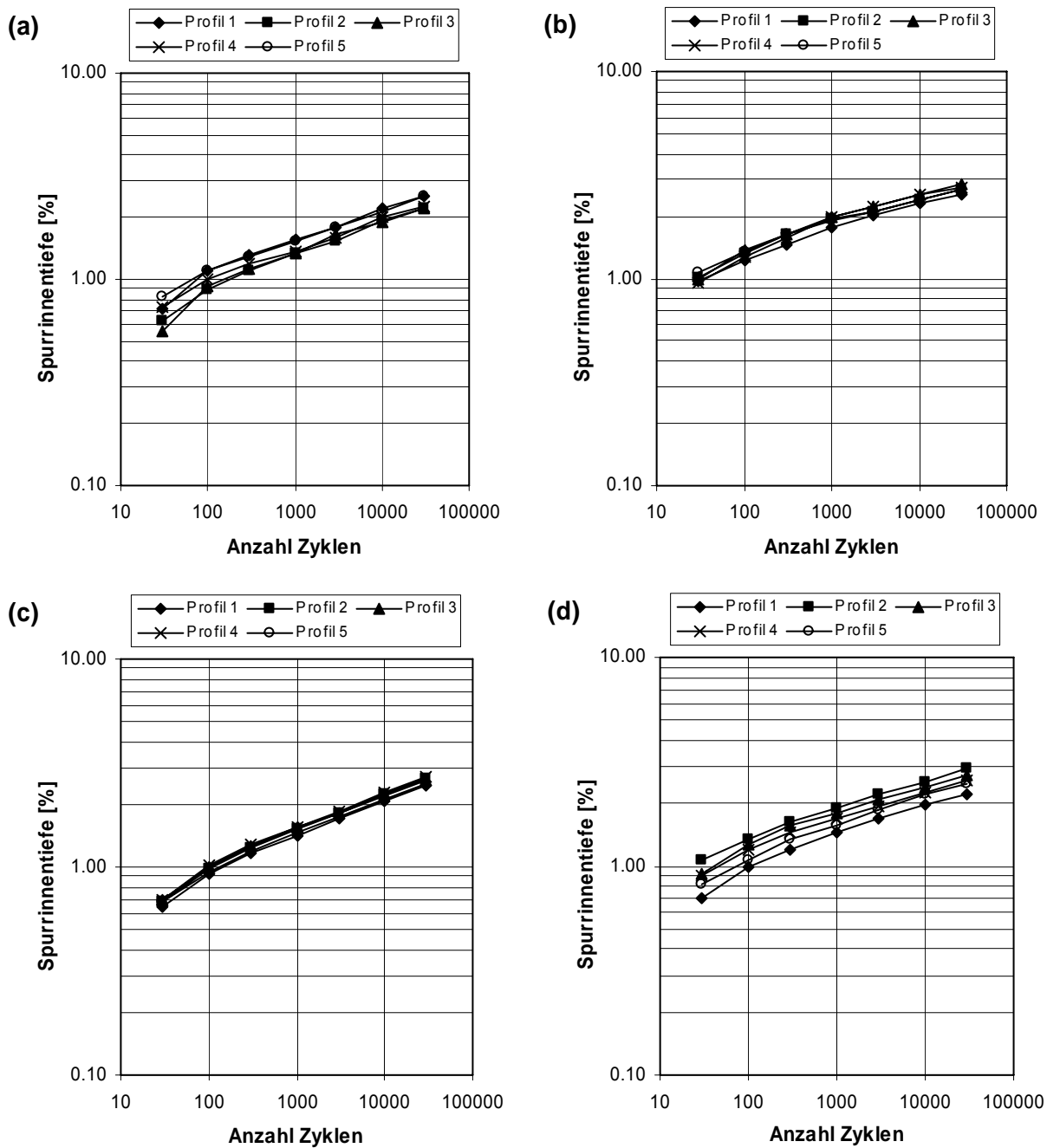


Abbildung 6.48 Mischgut HMT 22 S, Mittelwerte P'_{ij} über alle 4 durch jedes Labor geprüften Körper: (a), (b), (c), (d) – Labors A, B, C, D..

6.3.5.6 Mischgut HMT 22 S: Proportionale Spurrinnentiefen, Entwicklung quer zur Reifenspür
 Abbildung 6.49 zeigt die Mittelwerte (gemittelt über alle 4 durch jedes Labor geprüften Körper) der proportionalen Spurrinnentiefen P''_{ik} , berechnet nach Formel (3).

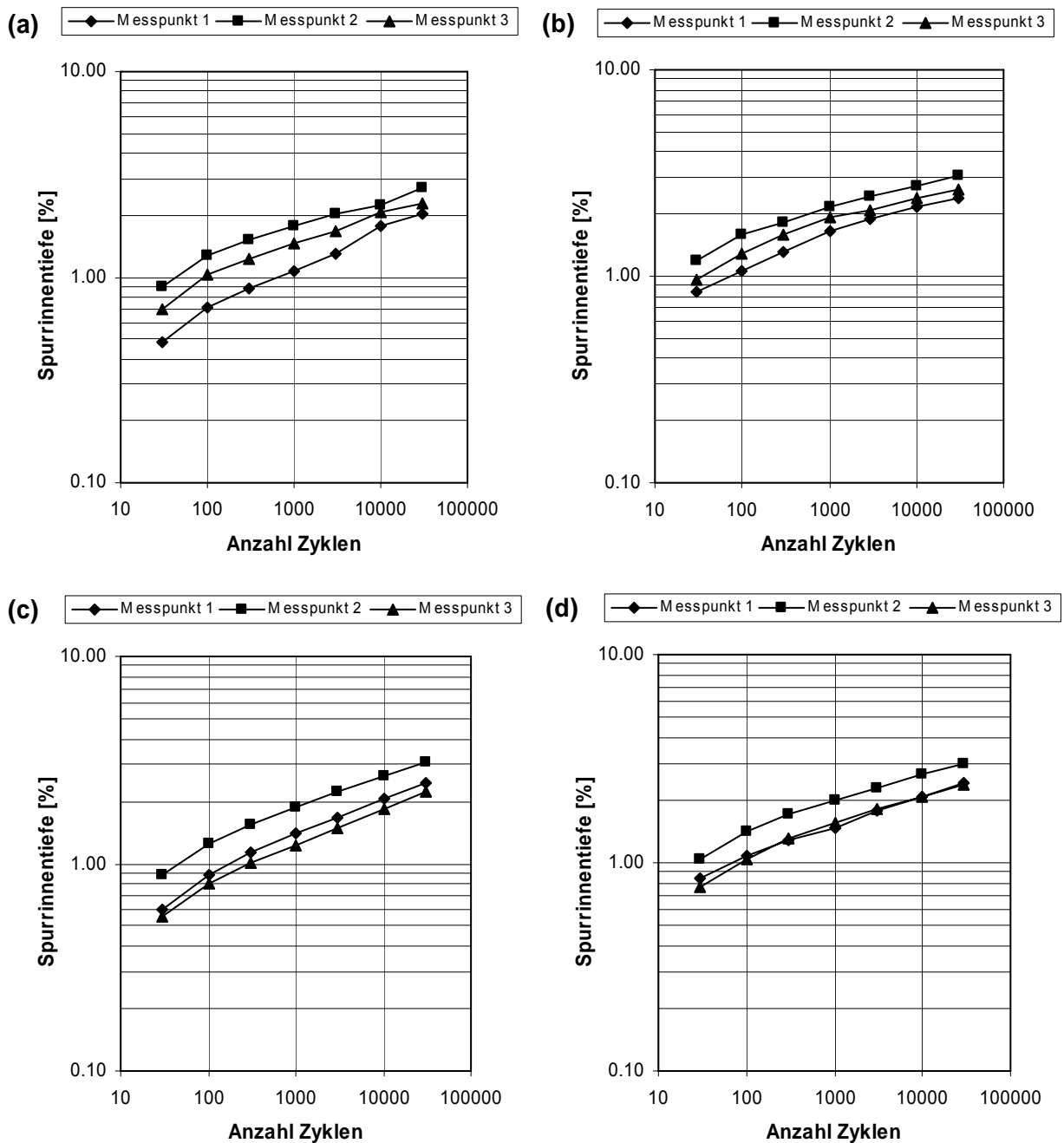


Abbildung 6.49 Mischgut HMT 22 S, Mittelwerte P_{ik}'' über alle 4 durch jedes Labor geprüften Körper: (a), (b), (c), (d) – Labors A, B, C, D.

6.3.6 Kommentar zu den Ergebnissen

Tabelle 6.35 und Tabelle 6.36 zeigen den Vergleich zwischen den maximalen absoluten Abweichungen der Einzelwerte der proportionalen Spurrinnentiefen P_i und den Richtwerten der Vergleichsbedingungen R nach Norm EN 12697-22. Es ist ersichtlich, dass die angegebenen Richtwerte der Vergleichsbedingungen nirgends überschritten werden. Aus den genannten Abbildungen ist ersichtlich, dass das Labor A im Vergleich zu anderen Labors generell etwas niedrigere Werte der proportionalen Spurrinnentiefen lieferte. Die Ursache dafür könnte ein wiederholbarer Fehler sein (z.B. zu niedrige Radlast).

Die Untersuchung der Entwicklung der proportionalen Spurrinnentiefen entlang und quer zur Reifenspur zeigte keine eindeutigen Hinweise auf systematische Fehler.

Allerdings verwendete Labor C für die erste Aufwärmphase einen Mikrowellenofen (vergleiche Tabelle 6.34). Das könnte eine der Ursachen der relativ grossen Streuung der Messwerte beim Mischgut HMT 22 S sein, vergleiche Abbildung 6.46 (c).

Tabelle 6.35 Präzisionsdaten für die proportionalen Spurrinntiefen, Mischgut AB 11 S

Anzahl der Belastungszyklen	Vergleichsbedingungen R (nach Norm EN 12697-22) %	Maximale absolute Abweichung zwischen den Werten P_i (vergleiche Abbildung 6.43(a)) %
30	---	0.43
100	0.97	0.36
300	---	0.54
1000	1.32	0.55
3000	---	0.53
10000	1.20	0.44
30000	1.16	0.48

Tabelle 6.36 Präzisionsdaten für die proportionalen Spurrinntiefen, Mischgut HMT 22 S

Anzahl der Belastungszyklen	Vergleichsbedingungen R (nach Norm EN 12697-22) %	Maximale absolute Abweichung zwischen den Werten P_i (vergleiche Abbildung 6.47 (a)) %
30	---	0.32
100	0.97	0.34
300	---	0.38
1000	1.32	0.49
3000	---	0.47
10000	1.20	0.41
30000	1.16	0.36

6.4 Spezielle Untersuchungen

6.4.1 Temperatursausbreitung im LCPC-Verdichter

Bereits in Abschnitt 3.1 wurde auf die Problematik der Herstellung der Prüfkörper und deren Einfluss auf das Verhalten im Spurbildungstest hingewiesen. Insbesondere wurden die beim Verdichten auftretenden Unterschiede im Hohlraumgehalt während des Verdichtungsprozesses erläutert. Als eine mögliche Ursache wurde dabei das in der Norm vorgegebene hin und her wachsende Verdichtungsregime angegeben. Da jedoch für die inhomogene Verdichtung nicht nur die Abfolge der mechanischen Verdichtung massgebend sein kann, sondern auch ein Einfluss durch Temperaturänderung im Prüfkörper während des Verdichtungsprozesses zu erwarten ist, wurden ergänzend zu diesem Projekt entsprechende Zusatzuntersuchungen mit Thermoelement Messungen und in einem Fall auch mit Thermografienmessungen durchgeführt, deren Resultate der Vollständigkeit halber hier kurz wiedergegeben werden.

6.4.1.1 Versuchserie mit Thermoelementen an Holzrahmen

Die Untersuchung wurde mit einem Asphaltbeton AB11 S durchgeführt, der in etwa jenem in Abschnitt 6.2.1 entsprach (Partl et al 2005). Vor dem Einbringen des Mischgutes wurde ein repräsentatives Raumviertel der 100mm hohen Verdichtungsform mit 18 Thermoelementen bestückt, wobei zur räumlichen Positionierung ein leichtes Holzgestell verwendet wurde (Abbildung 6.50). Um thermische Extremsituationen erfassen zu können wurde die Verdichtungsform nicht im Ofen vorgeheizt und bei Raumtemperatur (24..30°C) belassen. Beim Einfüllen des 150°C heissen Mischgutes wurde darauf geachtet, dass der Holzrahmen vor Beginn des Verdichtens dicht mit Mischgut umgeben war. Selbstverständlich war von Anfang an klar, dass das Holzge-

stell einen Einfluss auf die Verdichtung und damit auf den Hohlraumgehalt des Mischgutes haben würde. Da jedoch das Interesse der Untersuchung dem thermischen Transport und nicht der Frage der Verdichtung galt und angenommen wurde, dass beim Verdichten das Holzgestell jeweils allseitig in gutem Kontakt mit dem Mischgut bleiben würde, wurde der nachteilige Einfluss des Holzrahmens auf die Verdichtung zu Gunsten der Stabilität der Position der Thermoelemente in Kauf genommen.

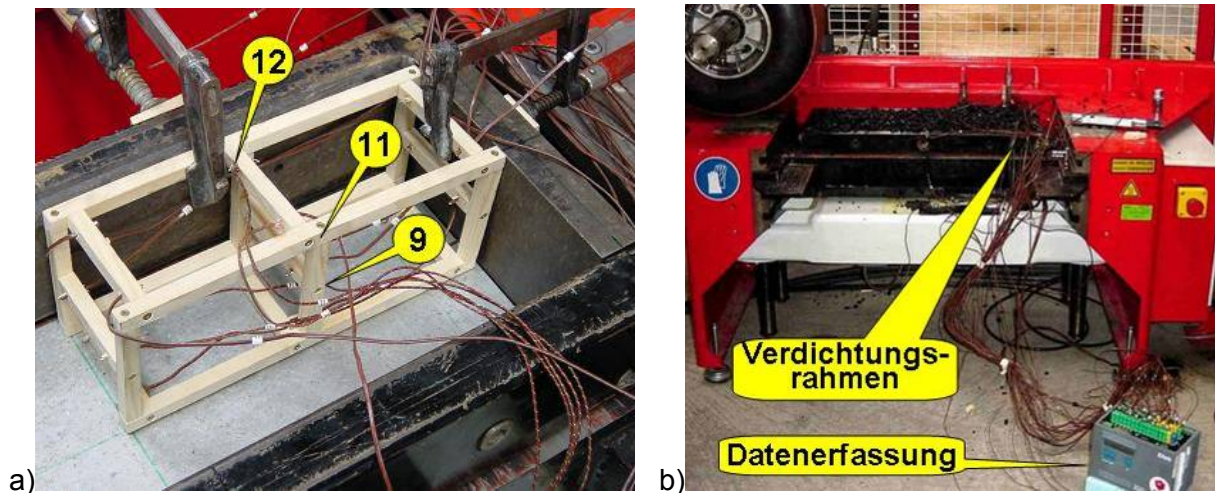


Abbildung 6.50 (a) Installation der 18 Thermoelemente mittels Holzrahmen im Raumviertel der Verdichtungsform; (b) Messanordnung mit Datenerfassung nach Einfüllen des Mischgutes

Wie aus Abbildung 6.51 hervorgeht, findet im Falle raumtemperierter stählerner Verdichtungsformen in der Mitte der oberen Kante (Ch12) ein anfänglich starker und in der Mitte der Oberfläche (Ch11) ein etwas langsamer Temperaturabfall statt, der auf den unterschiedlichen Wärmeübergang und die unterschiedliche Leitfähigkeit von Stahl und Luft zurückzuführen ist. Im Raumzentrum des Prüfkörpers (Ch9) dagegen bleibt die Temperatur anfänglich während etwa 1000s praktisch konstant, um dann mit gleicher Geschwindigkeit wie an der Oberfläche abzunehmen.

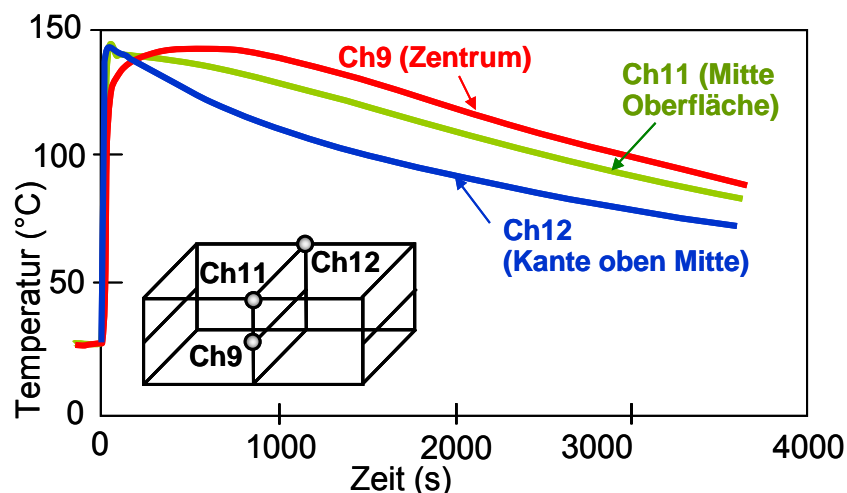


Abbildung 6.51 Zeit-Temperatur-Kurven in 100mm hohen AB11 S Prüfkörpern während Verdichtung für Thermoelemente Ch9, Ch11, CH12

6.4.1.2 Simulation des Abkühlungsverlaufs mit Abaqus

Der Abkühlungsverlauf auf dem Verdichtungstisch während des Verdichtens wurde mittels Finite Element Programm Abaqus/CAE Version 6.2 simuliert. Die Berechnung des Verlaufes unter der Annahme einer Wärmeleitfähigkeit für Asphalt von $k = 0.062 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ führte zu den in Abbildung

6.52 dargestellten Temperaturverteilungen in den Zeitpunkten 0s, 70s, 150s, 300s, 500s und 1000s. Nach 1000s wird ein Temperaturabfall an der Oberfläche von 150 auf 132°C und an der oberen Kante auf 110°C berechnet. Dieses Resultat ist in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen in Abbildung 6.51. Deutlich wird auch, dass eine Dissipation der Hitze in den Verdichtungstisch erfolgt, der sich lokal auf über 50°C erwärmt.

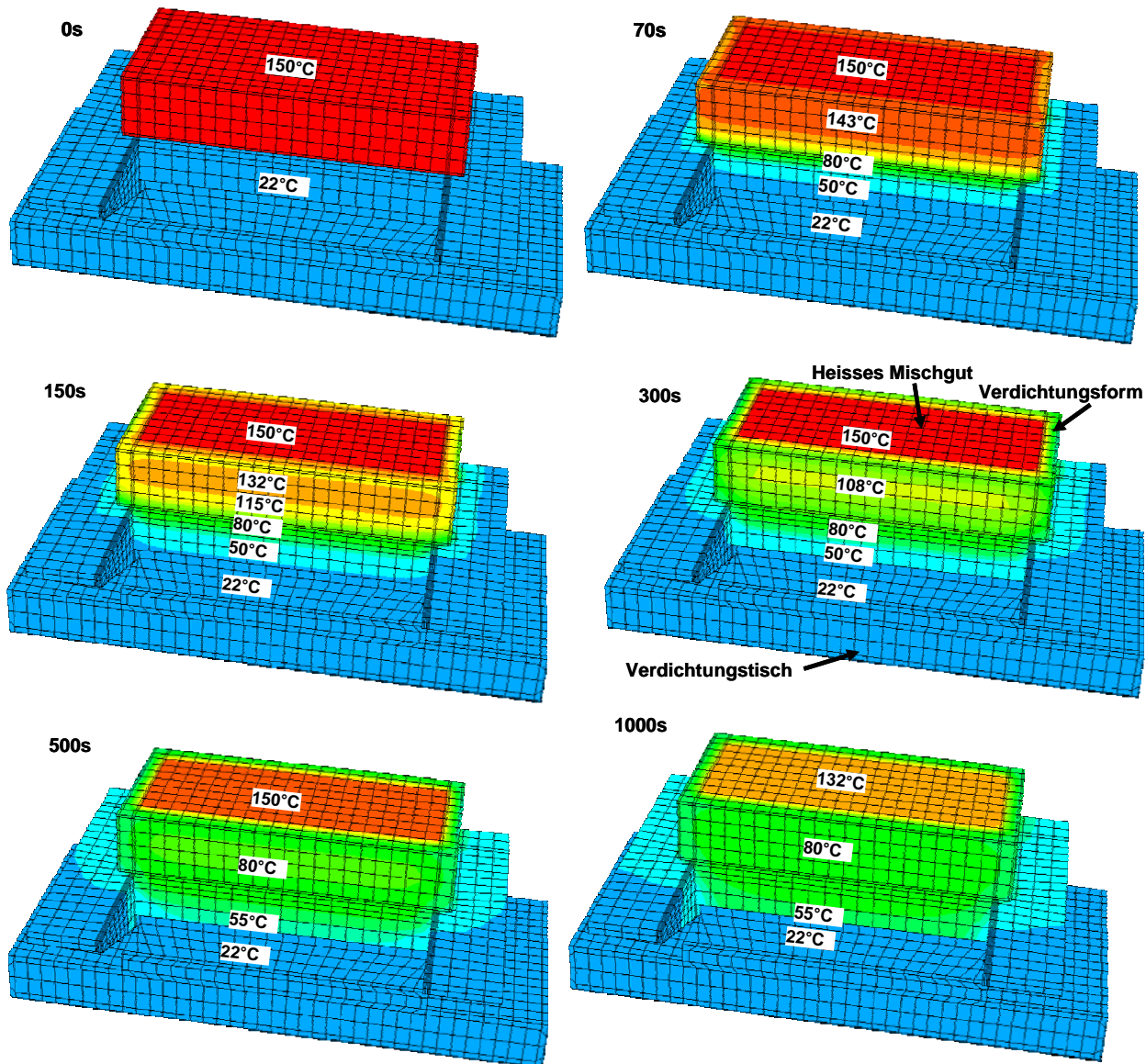


Abbildung 6.52 Temperaturverteilung im Verdichter bei ursprünglich raumwarmer Verdichtungsform während des Abkühlens in verschiedenen Zeitpunkten, berechnet mit FE-Methode (Abaqus)

6.4.1.3 Ermittlung des Abkühlungsverlaufes mit Thermoelementen an Metallstiften

Da betreffend des Einflusses des Holzrahmens auf die Messung gewisse Bedenken bestanden, wurden alternativ auch Temperaturmessungen während dem Verdichten mit Thermoelementen durchgeführt, die mittels Metallstiften positioniert waren. Diese erlaubten ein engeres Messraster. Untersucht wurden sowohl Prüfkörper mit 100mm als auch 50mm Höhe (Abbildung 6.53 und Abbildung 6.54).

Erneut wurde AB11S verwendet. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Holzrahmen wurden die Verdichtungsformen diesmal aber auf Verdichtungstemperatur im Ofen vorewärmt. Dieses Vorwärmen wirkte sich positiv auf den Temperaturverlauf aus (Abbildung 6.55). Demnach ergibt sich sowohl eine konstantere Temperaturverteilung als auch ein langsamerer Temperaturabfall. Im Übrigen bestätigten sich die Erkenntnisse der früheren Versuchsserie.

Was den Einfluss der Höhe der Verdichtungsform betrifft, wirkt sich eine höhere Form günstig auf das Abkühlverhalten aus. Wie aus Abbildung 6.56 hervorgeht, stellt sich in der Mitte der Unterkante (Ch1) der 100mm hohen Verdichtungsformen eine höhere Temperatur ein als bei den 50mm hohen Formen; ebenso im Zentrum der Bodenplatte (Ch7) und im Zentrum der Oberfläche (Ch 8 bzw. Ch 9), wobei der Temperaturverlust im letzten Fall zusätzlich langsamer abläuft. Die Einzelwerte der Durchgeführten Messungen enthält Abschnitt 11.12 .

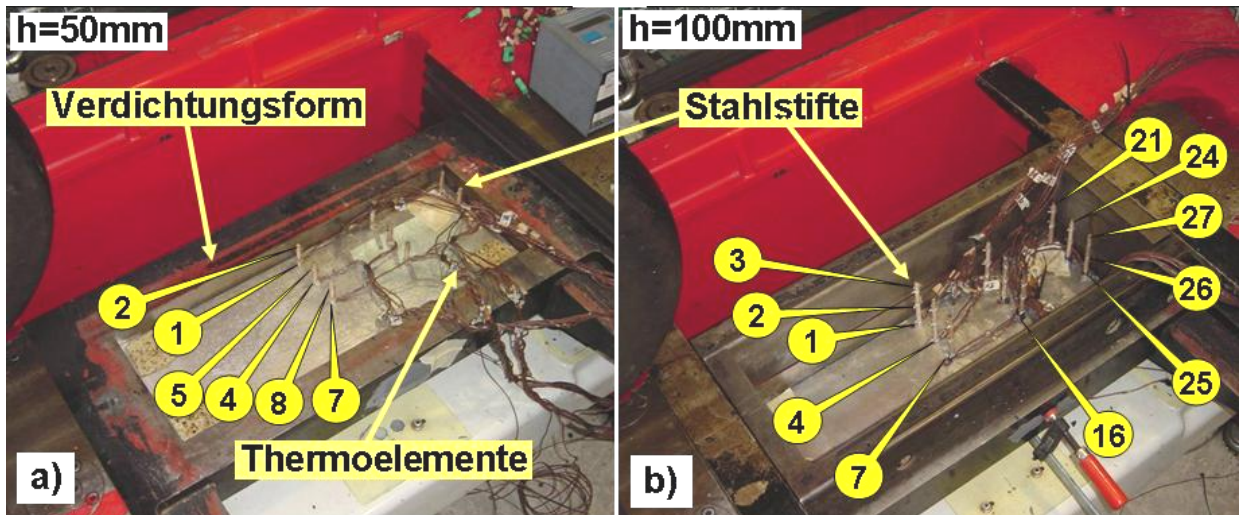


Abbildung 6.53 (a) Installation von Thermoelementen mittels Stahlstiften im Raumviertel der Verdichtungsform: (a) Höhe der Form 50mm, (b) Höhe der Form 100mm



Abbildung 6.54 Zustand nach dem Verdichten

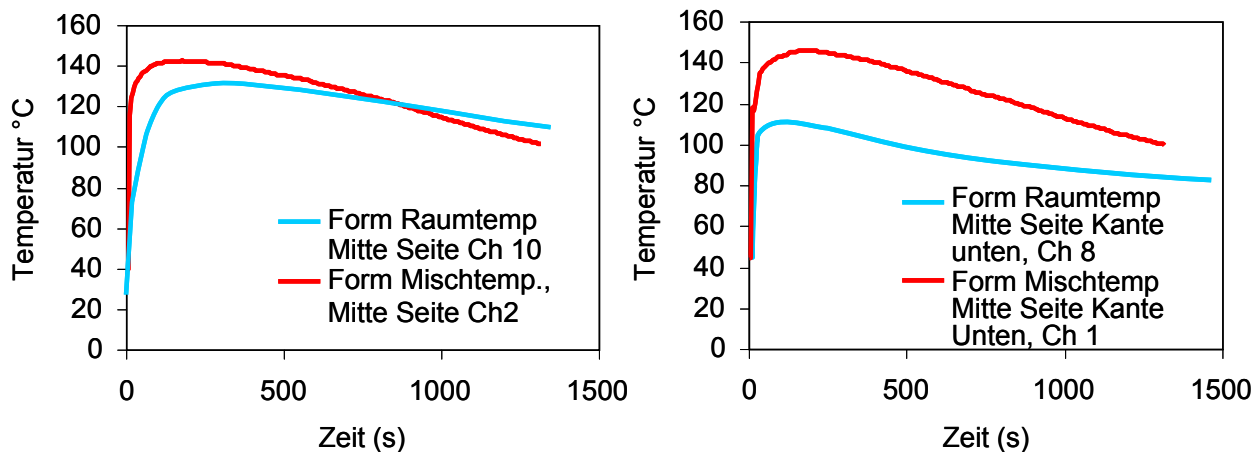


Abbildung 6.55 Einfluss des Vorheizens der Verdichtungsform (Mitte Seitenfläche und Mitte Seitenfläche Kante unten, $h=100\text{mm}$)

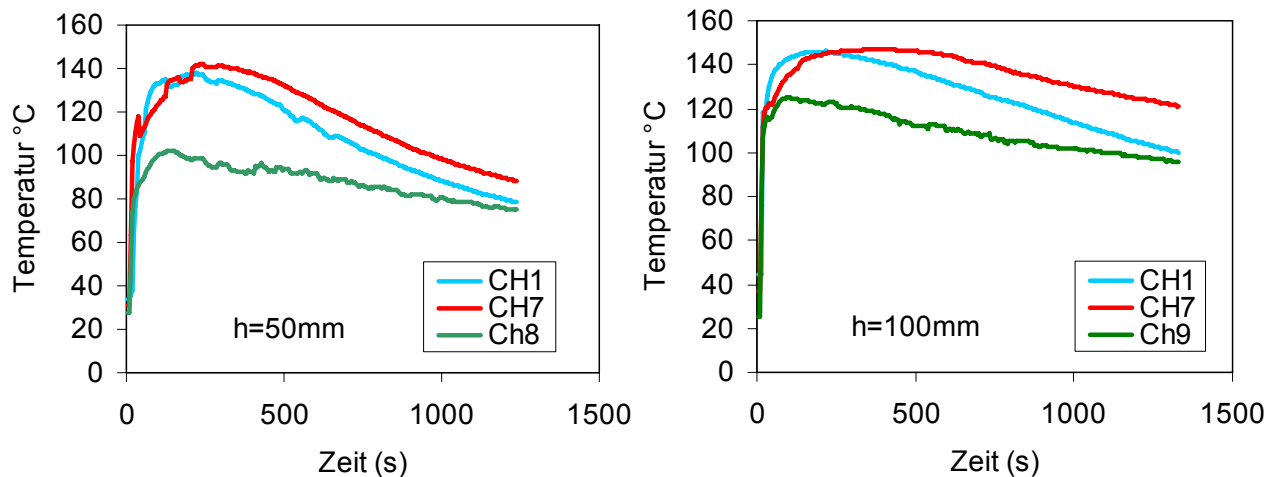


Abbildung 6.56 Vergleich charakteristischer Abkühlungsverläufe bei Verdichtungsformen mit 50mm und 100mm Höhe

6.4.1.4 Erfassung des Abkühlungsverlaufes an der Oberfläche mittels Thermografiemessungen

Die Oberflächentemperatur hängt vom Wärmefluss, dem Emissionskoeffizient ϵ der Oberfläche und den Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur, Luftfluss und thermischer Strahlung des Hintergrunds ab. Die Infrarot Temperaturmessung hängt zusätzlich von der Luftfeuchtigkeit ab.

Die Infrarot Thermografie ist eine Technik für die Messung einer grossen Anzahl an Oberflächentemperatur-Daten. Die Technik benutzt die relative Messung der thermischen Strahlungsenergie.

Um brauchbare quantitative Oberflächentemperaturen zu messen, muss der korrekte Emissionskoeffizient ϵ im Thermogramm eingegeben werden.

Zur Bestimmung des Emissionskoeffizienten ϵ wurde die Oberflächentemperatur gemessen und ϵ solange geändert, bis die gemessene Temperatur mit der Temperatur im Thermogramm übereinstimmte. Daraus ergab sich ein ϵ von 0.98.

Die Thermografie-Kamera wurde mit einem Abstand vom 1.4m zum Objekt aufgestellt. Die Umgebungstemperatur betrug ca. 19°C und die relative Luftfeuchtigkeit ca. 30%. Die Kamera wurde entsprechend dieser Daten eingestellt. Während der Abkühlphase wurde alle 5 Sekunden ein Thermogramm aufgezeichnet. Für die Auswertung der Wärmebilder wurde aufgrund der Symmetrie nur ein Viertel des Prüfkörpers betrachtet. Auf dieser Fläche wurde die Temperatur in 16 Spots ausgewertet. Die Spots sind gemäss Abbildung 6.57 verteilt worden. Aufgrund des Gradienten wurden die Abstände im Randbereich kleiner gewählt.

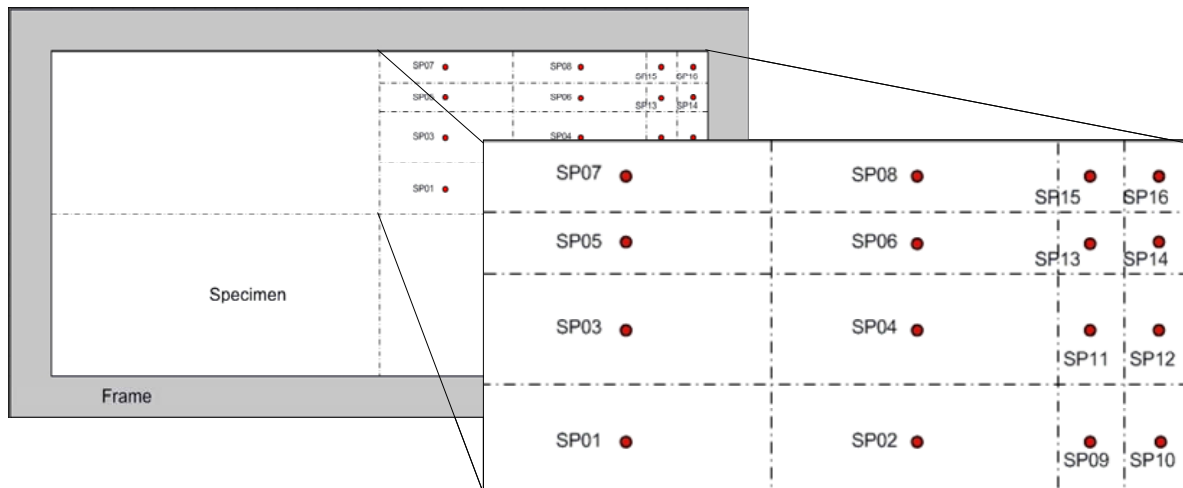
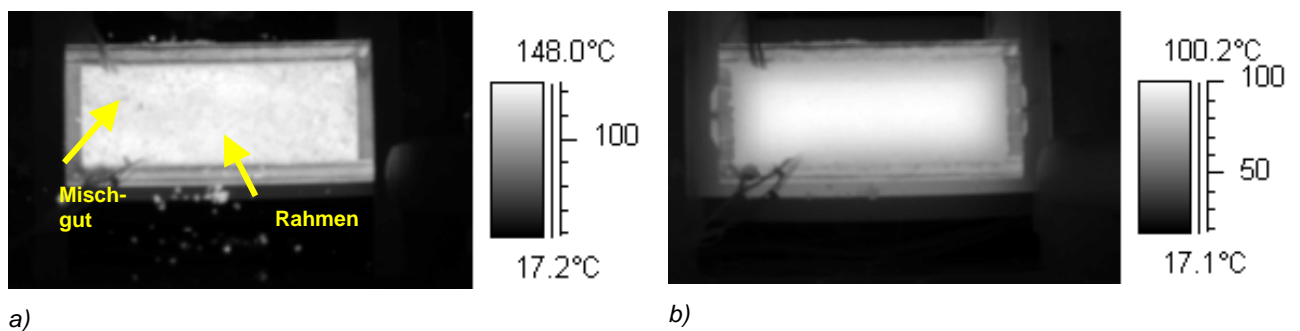


Abbildung 6.57 Position der Temperatur-Spots für die Messung

Abbildung 6.58 (a) zeigt ein Thermogramm, das kurz nach dem Einfüllen des Mischgutes aufgenommen wurde. Die Temperaturverteilung im Mischgut ist relativ homogen. Nach dem Verdichtungsvorgang erfolgte vor allem im Randbereich eine starke Abkühlung Abbildung 6.58 (b). Die Temperaturdifferenz zwischen Spot01 und Spot16 beträgt während der Verdichtung ca. 20-25°C.



a)

b)

Abbildung 6.58 Temperaturverteilung kurz nach dem Einfüllen des Mischguts (a) und nach dem Verdichten (b)

Wie aus Abbildung 6.59 hervorgeht bestehen zwischen den Temperaturen der 50mm und 100mm hohen Verdichtungsformen erhebliche Unterschiede. Aufgrund der grösseren Masse bei den hohen Prüfkörpern verläuft die Abkühlung hier bedeutend langsamer. Die sägezahnartigen Temperaturverläufe kommen daher, dass bei der Überrollung durch das Verdichtungsrad kurzzeitig Wärme abgeführt wird, der Prüfkörper diesen Verlust an der Oberfläche aber wieder auszugleichen vermag. Die Temperaturen im Eckpunkt Spot16 sind erwartungsgemäss tiefer als jene im Oberflächenzentrum (Spot01). Weitere Resultate finden sich in Abschnitt 11.12. Dort ist ersichtlich, dass die Temperaturverläufe der Spots01-04 sehr nahe beieinander liegen. Ein bisschen tiefere Temperaturen zeigen SP05, 06, 09 und 11, während die niedrigste Temperatur in der Ecke des Prüfkörpers bei Spot16 liegt.

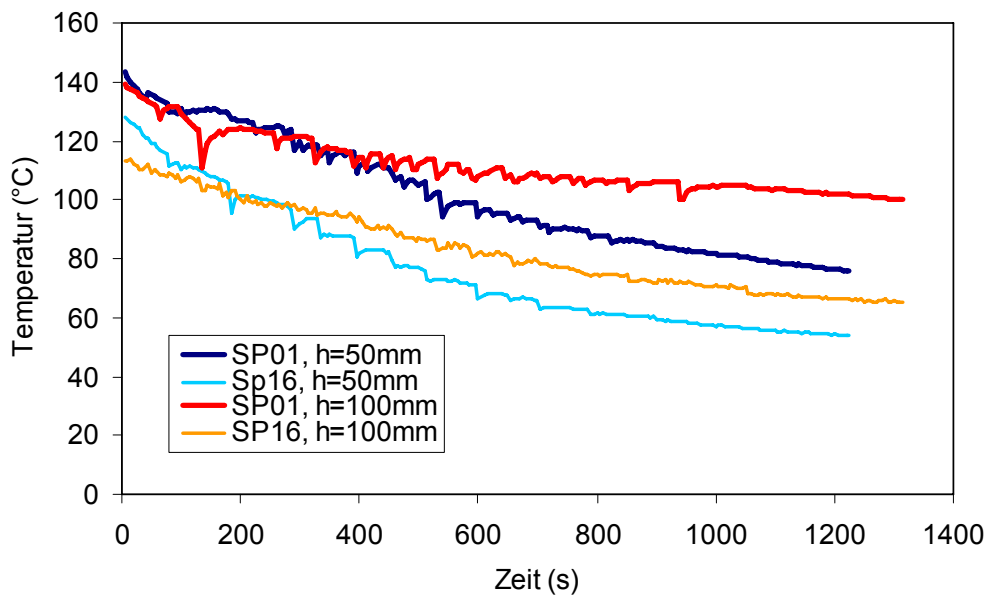


Abbildung 6.59 Resultate der Thermografiemessungen im Punkt SP001 und Sp16 für verschieden hohe Verdichtungsformen

6.4.2 Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters

Als Ergänzung zur experimentellen Untersuchung der Spurrinnentiefen bei verschiedenen Reifendrücken (siehe Abschnitt 6.2.2) wurde die Verteilung der Kraftintensität (Spannung) unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters bei verschiedenen Reifendrücken (3, 4.5 und 6 bar) experimentell untersucht. Die untersuchte Spannungsverteilung kann einerseits als eine unmittelbare Grundlage für die Beurteilung des Verformungsverhaltens der Prüfkörper dienen. Andererseits ist die Spannungsverteilung für eine geplante umfassende numerische Untersuchung der Spurrinnenbildung unumgänglich.

Weiter unten in diesem Abschnitt werden die wichtigsten Daten in Bezug auf die genannte Prüfserie zusammengefasst. Eine ausführliche Darstellung enthält Ebschner (2002).

6.4.2.1 Prüfkörper und Durchführung der Prüfungen

Für die Messung wurde eine dünne Druck-Kraftsensorfolie FlexiForce verwendet. Eine technische Beschreibung der Folie ist in Anhang 11.13.1 beigefügt. Die Folie wies eine Messfläche mit dem Durchmesser von ca. 9.5 mm auf. Diese konstruktive Besonderheit erlaubte die Erfassung der Druckverteilung unter dem Rad in mehreren Schritten. Im ersten Schritt wurde das mit einem pulvrigen Material (Filler) bestreute Rad gegen die Unterlage (Aluminiumplatte) mit der kalibrierten effektiven Kraft F_{eff} von 5 kN (Standard LCPC-Spurbildungstest) angedrückt. Der dadurch auf der Unterlage entstandene Abdruck der Aufstandsfläche bestimmte die künftige Messfläche gemäss Abbildung 6.60 (a). Im zweiten Schritt wurde der Messpunkteraster mit dem Abstand der Messpunkte von 10 mm entlang der beiden Symmetrieachsen der elliptischen Aufstandsfläche eingezeichnet, Abbildung 6.60 (b). Dabei wurde nur ein Viertel der Aufstandsfläche in die Messung einbezogen, um den Messaufwand zu verringern. Die Kraftsensorfolie wurde anschliessend über jeden Messpunkt positioniert, das Rad des Spurbildungstesters wurde jeweils gegen die Unterlage angedrückt und der gemessene Wert der Kraft wurde erfasst und gespeichert. Die Messwerte wurden über eine Dauer von 20 Sekunden gemessen. Für die Datenanalyse relevant waren jedoch nur die maximalen Werte. Gewöhnlich traten die grössten Messwerte bereits zu Beginn der Prüfung auf, da mit zunehmender Dauer die Empfindlichkeit des Sensors abnahm.

Die Aufstandsflächen wurden von der Aluminiumplatte auf Papier abgepaust. Anschliessend erfolgte eine Wägung der herausgeschnittenen Aufstandsfläche auf einer Präzisionswaage. Mit der bekannten Stärke (80 g/m²) des Papiers liess sich somit die Grösse der Aufstandsfläche bestimmen.

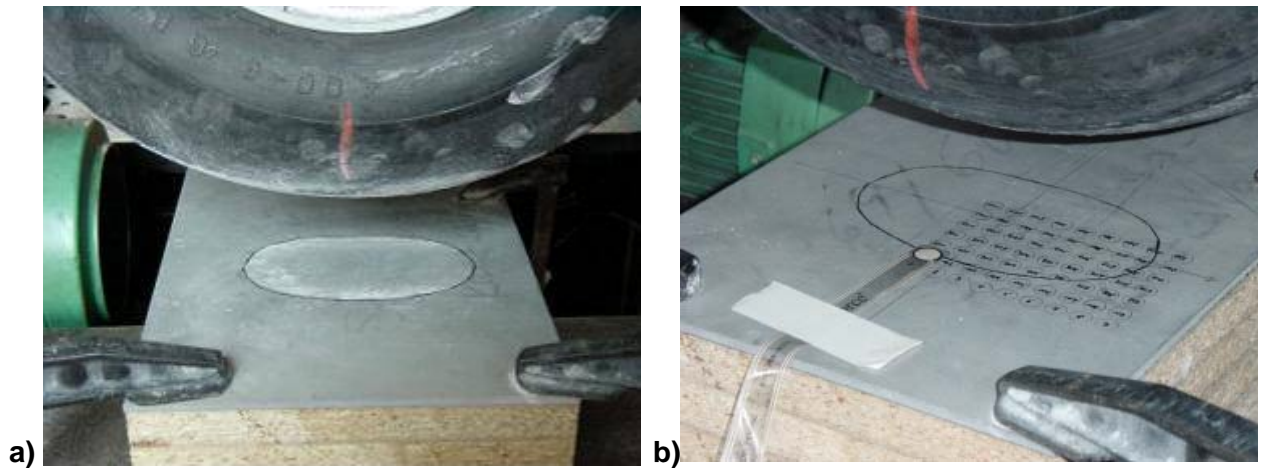


Abbildung 6.60 Vorbereitung der Prüfungen: (a) – Aufstandsfläche; (b) – Messpunkte und die positionierte Kraftsensorfolie.

6.4.2.2 Datenanalyse

Die Spannungen in den Messpunkten wurden als Quotient von den gemessenen Kräften und der Messfläche der Kraftsensorfolie berechnet. Die Messfläche der Kraftsensorfolie betrug 71.26 mm². Die so bestimmte Spannungsverteilungs-Oberfläche wurde anschliessend um zwei Symmetrieachsen der elliptischen Aufstandsfläche gespiegelt und über der Messfläche numerisch integriert. Das Resultat der Integration ergab die rechnerische Kraft F_{rech} , die an die effektive Kraft F_{eff} durch eine iterative lineare Veränderung der Spannungen angeglichen wurde. Die angepasste Spannungsverteilungs-Oberfläche behielt somit die Form der gemessenen Kraftverteilung und entsprach dem integralen Wert der effektiven Kraft.

6.4.2.3 Prüfergebnisse

Tabelle 6.37 zeigt die bestimmten Aufstandsflächen und die maximalen Werte der korrigierten (an die effektive Kraft angepassten) Spannungen. Die Tabellen mit den Spannungswerten sind in Anhang 11.13 dargestellt.

Tabelle 6.37 Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters: Aufstandsflächen

Reifendruck [bar]	3	4.5	6
Aufstandsfläche [cm ²]	103.75	91.25	77.50
Max. Spannung [MPa]	0.59	0.72	0.85

Die Untersuchungsergebnisse in Abbildung 6.61 zeigen deutlich, dass die Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters stark vom Reifendruck abhängig ist. Erhöhung des Reifendrucks führt zur Reduktion der Aufstandsfläche und damit zur starken Erhöhung der Spannungen: beim Erhöhen des Reifendrucks von 3 bar auf 6 bar führt zur Erhöhung der Spannung von 0.59 auf 0.85 MPa (maximale Werte).

Die Spannungen sind über die elliptische Aufstandsfläche ungleichmässig verteilt. Bei den Randzonen der Aufstandsfläche sind die Spannungen grösser als im zentralen Teil. Dieser „Muldeneffekt“ ist bei den Reifendrücken von 3 bar und 4.5 bar relativ stark, bei 6 bar ist er aber weniger ausgeprägt.

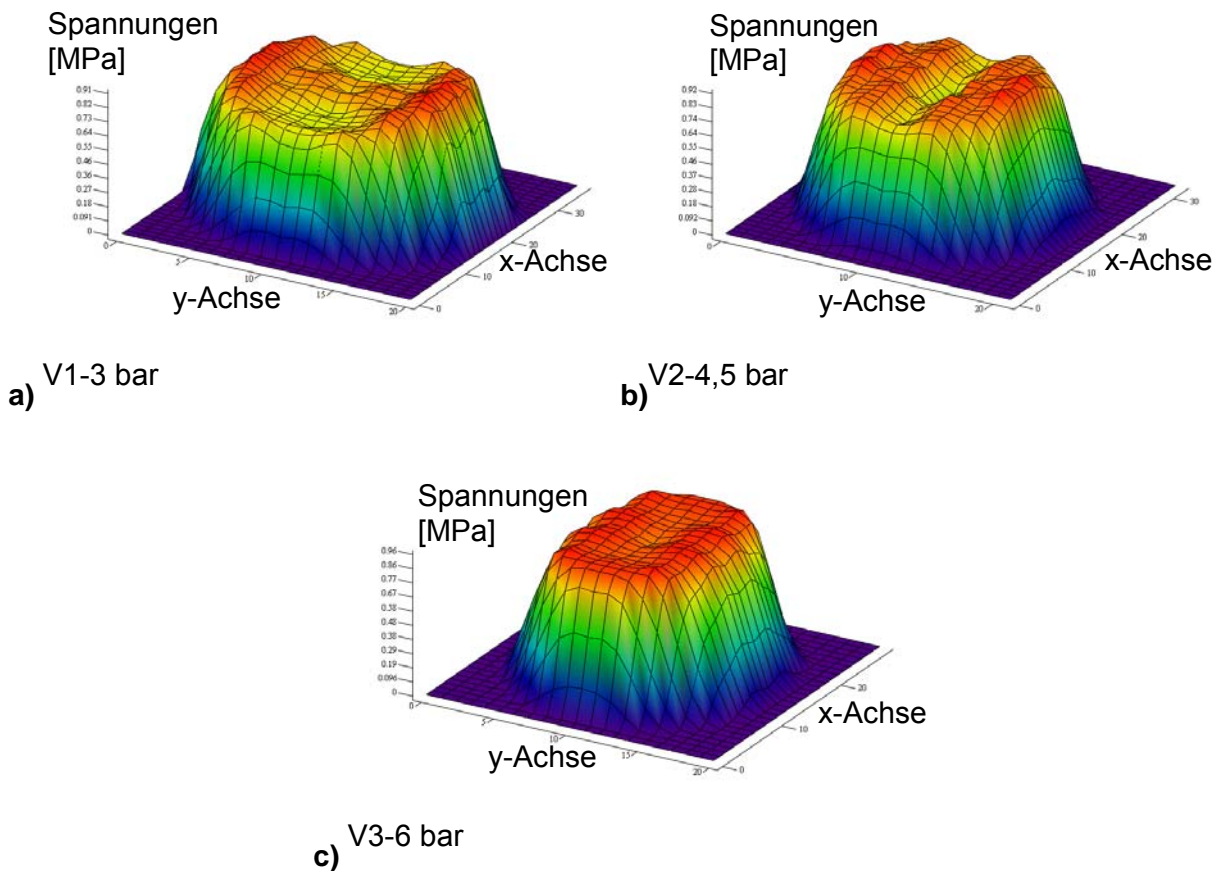


Abbildung 6.61 Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters bei dem Reifendruck von: (a) –3 bar; (b) – 4.5 bar; (b) – 6 bar.

7 Folgerungen

7.1 Spurbildungstest an Belagsausschnitten bzw. Bohrkernen

7.1.1 Untersuchung an zusammengesetzten Prüfkörpern aus Bohrkernen:

Die Untersuchungen, die wegen des als besonders kritischen eingestuftes Stützgerüstkonzeptes an SMA aus Belagsabschnitten durchgeführt wurden, zeigten, dass sich **Spurbildungsprüfkörper nur mit Vorbehalt aus Bohrkernen zusammensetzen lassen**. Dies gilt insbesondere für kleine Bohrkerndurchmesser (150mm) und geringe Prüfkörperhöhen (50mm). Gute Übereinstimmung mit dem entsprechenden monolithischen Körper wurde lediglich bei Bohrkernen mit dem Durchmesser 220mm und einer Höhe von 100mm festgestellt. Verglichen mit den zusammengesetzten Prüfkörpern weisen die monolithischen Prüfkörper der Serie S unabhängig von der Prüfkörperhöhe bei höherer Zyklenzahl jeweils die geringsten Geschwindigkeit der Spurbildung auf, erleiden jedoch zu Beginn die deutlichste Spurbildung erleiden.

Bei den monolithischen Prüfkörpern der Serie S aber auch bei den aus Bohrkernen zusammengesetzten Prüfkörpern zeigte es sich, dass jene mit der geringeren Höhe zu Beginn eine grössere proportionale Spurrinnentiefe erleiden als jene mit 100mm Höhe. **Ein direkter Vergleich**

proportionaler Spurrinntiefen von Prüfkörpern verschiedener Höhe ist somit nicht zulässig.

Untersuchungen an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C...H:

Die Spurbildungsprüfung an **Belagsausschnitten scheint grundsätzlich geeignet, um stark spurbildungsanfällige Deckschichten von weniger anfälligen grob zu selektieren**, dies u.a. aufgrund der Tatsache, dass jene Autobahnstrecken (D,E,G), deren Prüfkörper aus den obersten 100mm im Spurbildungstest wegen zu grosser Deformationen nicht zu Ende geprüft werden konnten, auch in der Praxis grosse bleibende Verformungen in den Deckschichten aufwiesen. **Eine Feinselektion erscheint dagegen eher fraglich**, weil bei dieser Art der Prüfung mit erheblichen **Varianzen** zu rechnen, die einerseits auf Belags- und Herstellungsvariationen (Praxisverdichtung) andererseits auf das etwas schwerfällige Handling (Zuschnitt, Einbetten in den Prüfraumen) beruhen können.

Die Ergebnisse zeigen, dass es **offenbar nicht genügt, aus dem Spurbildungstest nur einen einzigen Wert als Charakteristikum für die Spurrinnenbildung definieren** zu wollen (z.B. Spurrinntiefe bei 30'000 Zyklen). Bessere Aussagen erhält man, wenn man auch die **Tendenz** der Entwicklung berücksichtigt, beispielsweise durch Approximation des Spurbildungsverlaufes mittels Potenzfunktion der Form $s=az^q$ (z: Zyklenzahl, s: Spurrinntiefe, a,q: Regressionsparameter). Mit dem **Wert q** der Potenzfunktion, welcher die Geschwindigkeit der Spurbildung repräsentiert wurde eine zutreffender Einschätzung der praktischen Spurringefährdung erzielt, als mit der blossen Betrachtung eines Deformationswertes bei einer bestimmten Zyklenzahl (Strecke D im Vergleich zu E und G).

Bemerkenswerterweise wurde im vorliegenden Fall eine eindeutige **Regressionsfunktion** zwischen den Parametern a und q ermittelt, derzufolge hohe q-Werte (hohe Spurbildungsgeschwindigkeiten) geringen a-Werten (geringen Anfangsdeformationen) entsprechen und umgekehrt. Dies ist deshalb bemerkenswert, weil die untersuchten Materialien zwar alle damals normkonformem Asphaltbeton entsprachen, jedoch bezüglich Bindemittelsorte, Hohlraumgehalt etc. recht unterschiedlich waren.

Praktisch heisst dies, dass sich Beläge, welche nach wenigen Zyklen grosse Spurrinnen erleiden, bei höherer Zyklenzahl weniger rasch weiter deformieren als solche mit umgekehrten Verhalten. Im vorliegenden Fall lagen die **spurrinnenanfälligen Beläge im oberen Bereich** der Kurve, d.h. in der Zone der hohen q- und geringen a-Werte, die weniger kritischen, eher rissanfälligen Beläge, dagegen im unteren Bereich der Kurve mit tiefen q- und hohen a-Werten.

Eine ähnliche Beziehung wurde auch für die SMA Bohrkern gefunden. Allerdings verläuft die Kurve dort eindeutig steiler, was möglicherweise darauf hindeutet, dass diese Beziehung zwischen den Parametern a und q ein Charakteristikum für den Mischguttyp oder die Mischgutsorte darstellt.

7.1.2 Belagsausschnitte aus dem ETH-Rundlauf (U2000):

Die Untersuchung bestätigt, dass eine **Feinselektionierung aufgrund der Spurbildungsprüfung problematisch ist**. Unterschiedliches Spurbildungsverhalten lässt sich, wie in der Praxis übrigens auch, nicht einfach auf Unterschiede im **Hohlraumgehalt** zurückführen.

Was den **Einfluss der Verdichtung** (namentlich im Vergleich Labor und in situ Verdichtung) betrifft, kann zwischen der Spurbildungsprüfung an Prüfkörpern aus Mischgut und den praxisverdichteten Belagsriegeln R1...R2 des ETH Rundlaufs aufgrund der Ergebnisse ein nur sehr schwacher Zusammenhang vermutet werden. Ähnliche, allerdings weniger ausgeprägte Korrelationsprobleme ergaben sich auch, wenn man die durch realistische Lastüberrollungen in situ hervorgerufenen Spurbildungstiefen auf dem Rundlauf und den Felder der A2 vergleicht.

Ein Vergleich der Rangierung der Spurbildungsprüfung und der Spurbildung in situ (sowohl beim Rundlauf als auch auf der A2) zeigt, dass sich bei ähnlichem Mischgut ähnliche, bei **stark unterschiedlichem Mischgut** aber durchaus extrem gegenläufige Beurteilungen ergeben können. Inwieweit die die Spurbildungsprüfung bei einer Einheitstemperatur von 60°C bei Trag-

schichten realistisch ist (die diese Temperatur in der Praxis ja nie erreichen), muss daher grundsätzlich mit einem Fragezeichen versehen werden.

7.1.3 Übrige Belagsausschnitte:

Die Beziehung zwischen a- und q-Wert hängt offenbar stark von der Konzeption des Mischgutes ab

7.2 Allgemeine Folgerungen aus den durchgeführten Spurbildungstests

Aus der Gesamtheit der bei 60° durchgeführten Spurbildungstests ergeben sich folgende Beobachtungen:

- 1) Aus Abbildung 7.1 folgt, dass sämtliche Prüfungen, die abgebrochen werden mussten, hohe q-Werte aufwiesen. Die untersuchten Prüfkörper mit einem q-Wert unter 0.3 führten wies nach 30'000 Zyklen in der Regel bleibenden Deformationen im Bereich von 5% auf (vgl. auch Abbildung 7.3)
- 2) Gemäss Abbildung 7.2 besteht ein deutlicher Unterschied zwischen dem Verhalten von Riegeln und verdichtetem Mischgut. Während im ersten Fall die Spurbildung vor allem durch die q-Werte (d.h. die Spurbildungsgeschwindigkeit bei hoher Zyklenzahl) beeinflusst wurde, sind im zweiten Fall vor allem die a-Werte (d.h. die Initialverformungen) massgebend. Dies zeigt, dass zwischen In-Situ-Prüfkörpern und Körpern aus Labormischgut mit grundsätzlichen Unterschieden im Verhalten zu rechnen ist.

Zwischen dem In-Situ-Verhalten und der Spurbildung im Spurbildungstest lässt sich offenbar keine eindeutige allgemeine Verbindung herstellen. Tatsächlich war in drei Fällen mit hohen q-Werten übermässige Spurbildung in situ festzustellen: Andererseits traf dies für die anderen Punkte mit hohem q-Werten, insbesondere aber für Mastixasphalt (Punkte mit q-Werten um 0.5 und a-Werten zwischen 0.5 und 1) nicht zu. Der Spurbildungstest in der Standardversion mit 60°C ist für dieses Mischgut offenbar nicht geeignet (vgl. auch Abschnitt 7.3.1).

- 3) Wie aus Abbildung 7.3 hervorgeht, besteht zwischen den q- bzw. a-Werten und der gemessenen maximalen Spurrinnentiefe kein gesicherter Zusammenhang. Dies zeigt, dass es sich bei den Parametern a und q um zusätzliche Informationen handelt. Die a-Werte verteilen sich über einen breiteren Bereich und erlauben somit ein feineres Ranking als die Spurrinnentiefen. Das Ranking aufgrund der q-Werte ist dagegen ähnlich wie bei den Spurrinnentiefen.

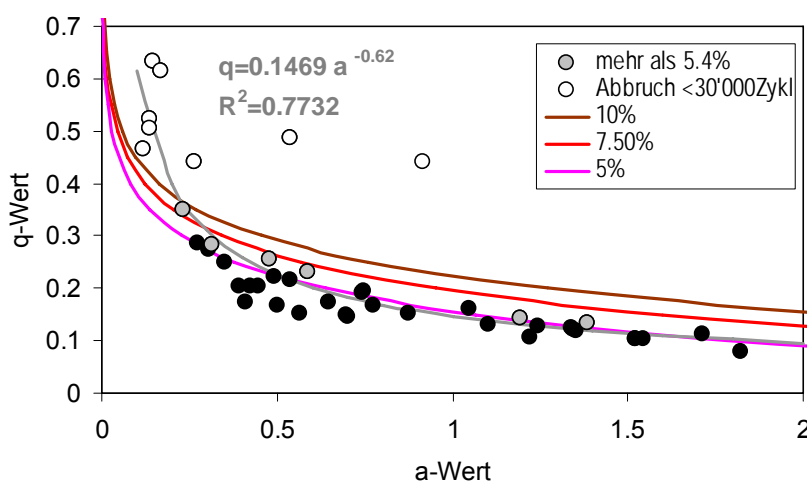


Abbildung 7.1 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die Test die vor 30'000 Zyklen abgebrochen werden mussten und jene, die bei Versuchsende mehr bzw weniger

als 5.4% bleibende Verformungen aufwiesen. Angegeben sind zudem die theoretischen 5%, 7.5% und 10% Kurven sowie die Regression aller Messpunkte

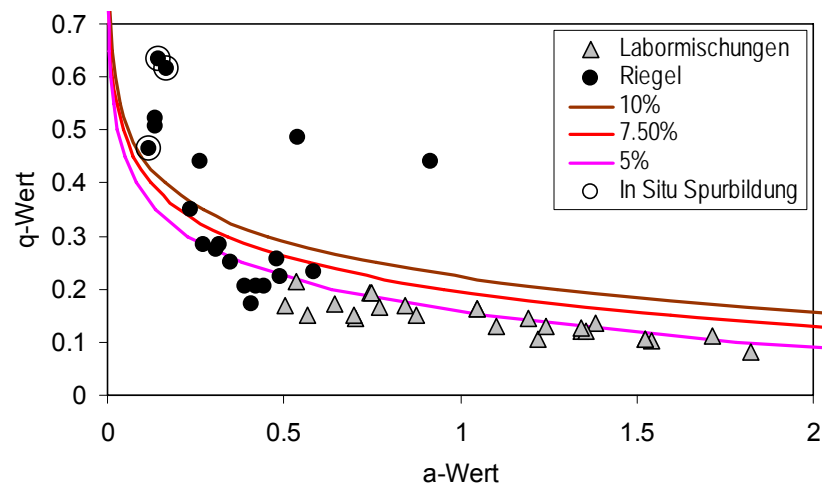


Abbildung 7.2 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die Test an Riegeln und an Labormischgut. Angegeben sind zudem jene Riegel, welche in situ übermässige Spurbildung zeigten sowie die theoretischen 5%, 7.5% und 10% Kurven.

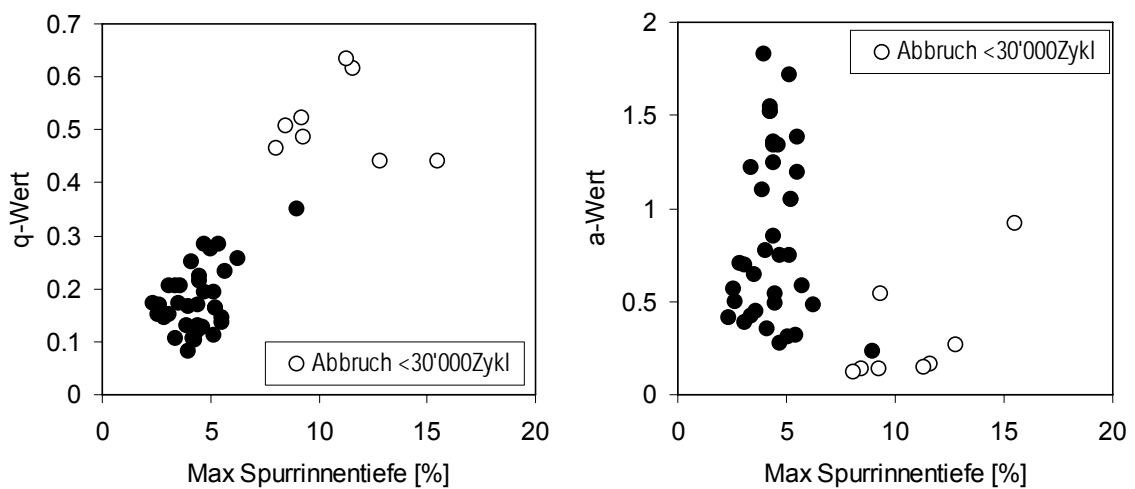


Abbildung 7.3 Zusammenhang zwischen Regressionsparametern a und q mit den maximalen Spurrinntiefen nach 30'000 Zyklen bzw. bei Abbruch des Tests.

7.3 Massgebende Parameter

7.3.1 Einfluss des Reifendruckes:

Die Untersuchung zeigt, dass der Reifendruck einen relativ starken Einfluss auf das Spurbildungsverhalten ausübt und daher bei der Versuchsdurchführung tatsächlich genau einzuhalten ist.

7.3.2 Einfluss der Halterung (seitliche Abstützung in der Form)

Das Eingiessen von Belagsausschnitten mit Epoxydharz bzw. Zementmörtel hat sich im vorliegenden Fall nicht bewährt und führt verglichen mit den in der Mulde belassenen Referenzprüfkörpern zu unterschiedlichen Spurbildungskurven. Zu empfehlen ist dagegen das Zuschneiden und Einklemmen von Prüfkörpern mit leichter seitlicher Übergrösse, obwohl auch hier erhebliche Unterschiede festgestellt wurden.

Zwischen dem Spurbildungsverhalten von direkt in der Verdichtungsform geprüften einerseits und nachträglich sorgfältig mit schwindkompensiertem Fugenmörtel SikaGrout® 314 eingemörtelten Prüfkörpern aus AB 11 S andererseits wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Somit dürfen in diesem Fall grundsätzlich gleiche Resultate erwartet werden. Insgesamt erwies sich die seitliche Vermörtelung mit schwindkompensiertem Fugenmörtel als die beste Lösung.

7.3.3 Einfluss der Temperatur

Grundsätzlich tritt mit zunehmender Temperatur eine immer stärkere nichtproportionale Zunahme der Spurbildung auf. Die Ergebnisse an verschiedenem Mischgut zeigen, dass sich das Spurbildungsverhalten bei verschiedenen Temperaturen gut durch das Zeit-Temperaturprinzip mittels Masterkurven beschrieben lässt. Aufgrund dieser Betrachtungen und aufgrund von Prüfungen an Belagsriegeln im Vergleich mit 10-jährigem Verhalten in der Praxis lässt sich folgern, dass für Gussasphalt eine Prüftemperatur von 60°C zu hoch ist und die Spurbildungsprüfung an Gussasphalt bei gleicher tolerabler proportionaler Spurrinntiefe von 7.5% nach 30000 Zyklen realitätsbezogener bei 40°C durchzuführen ist.

7.3.4 Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen

Statistisch gesehen sind die Mittelwerte ähnlich und es lässt sich kein Hinweis auf eine signifikante Beeinflussung der Messung durch die gewählten Pausenzeiten ableiten.

7.3.5 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung

Im Vergleich zur Lagerung bei Raumtemperatur von einer Woche vor Prüfbeginn kann nach 6 Monaten eine signifikante Verhärtung auftreten (im vorliegenden Fall eines AB11 S um 15%), welche sich in einer vertikalen Parallelverschiebung der Spurbildungskurve im Sinne einer Reduktion der Spurrinntiefe äussert.

7.3.6 Einfluss der Prüfkörperdicke

Bei unterschiedlich dicken Prüfkörpern aus AB 11 S findet sowohl bei der Herstellung als auch durch die Spurbildungsprüfung eine unterschiedliche Verdichtung, bzw. Nachverdichtung statt. Zwar ist der Hohlraumgehalt über die Gesamthöhe jeweils gleich, doch wird die obere Hälfte der 100mm dicken Prüfkörper erheblich stärker verdichtet. Generelle wurde eine Tendenz zu einem niedrigeren Hohlraumgehalt für die Prüfkörper mit der Dicke 50 mm als mit der Dicke 100mm festgestellt. Der Vergleich der Mittelwerte des Hohlraumgehaltes zeigt, dass die 100 mm dicken Prüfkörper etwa 0.5 Vol-% mehr Hohlräume aufweisen als jene mit der Dicke 50 mm

50mm und 100mm dicke Prüfkörper sind zwar hinsichtlich ihrer mittleren Hohlraumgehalte vergleichbar, doch liefern sie aufgrund differierender Materialverschiebungen während der Verdichtung eine signifikant unterschiedliche Hohlraumverteilung. Die Vergleichbarkeit von Spurbildungstest-Resultaten stark unterschiedlich dicker Prüfkörper ist daher nicht a priori gegeben.

Der generelle auf den Ergebnissen der Spurbildungsprüfung beruhende allfällige Verdacht, dass bei Prüfkörpern mit nur 50mm Dicke ein Risiko zu ungünstigerem Verhalten im Spurbildungstest besteht, konnte in diesen Versuchen statistisch nicht bestätigt werden. Hiezu müssten noch eingehender Untersuchungen durchgeführt werden.

Wie Messungen des Abkühlungsverlaufes während dem Verdichten mittels Thermoelementen und Thermografiekamera zeigen, ist die Temperaturverteilung bei den Prüfkörpern mit 50mm hohen Verdichtungsformen deutlich inhomogener und rascheren Wärmeverlusten unterworfen als bei 100mm hohen Prüfkörperformen. Auch dieser Umstand trägt dazu bei, dass unterschiedlich dicker Prüfkörper im Spurbildungstest nicht unkritisch verglichen werden dürfen.

7.3.7 Temperaturentbreitung im LCPC Verdichter

Im Falle raumtemperierter stählerner Verdichtungsformen findet in der Mitte der oberen Kante ein anfänglich starker und in der Mitte der Oberfläche ein etwas langsamer Temperaturabfall statt, der auf den unterschiedlichen Wärmeübergang und die unterschiedliche Leitfähigkeit von Stahl und Luft zurückzuführen ist. Im Raumzentrum des Prüfkörpers dagegen bleibt die Temperatur anfänglich, d.h. während etwa 1000s, praktisch konstant, um dann mit gleicher Geschwindigkeit wie an der Oberfläche abzunehmen.

Werden die Verdichtungsformen im Ofen dagegen vor dem Einfüllen des Mischgutes auf Verdichtungstemperatur vorgeheizt Demnach ergibt sich sowohl eine konstantere Temperaturverteilung als auch ein langsamerer Temperaturabfall. Was den Einfluss der Höhe der Verdichtungsform betrifft, wirkt sich eine höhere Form günstig auf das Abkühlverhalten aus.

7.3.8 Spannungsverteilung unter dem Rad des Spurbildungstesters

Die Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters hängt stark vom Reifendruck ab. Die Erhöhung des Reifendrucks führt zur Reduktion der Aufstandsfläche und damit zur starken Erhöhung der Spannungen: Eine Verdoppelung des Reifendrucks von 3 bar auf 6 bar führt zur Erhöhung der maximalen statischen Kontaktspannung von 0.59 auf 0.85 MPa d.h. um 45%.

Die Spannungen sind über die elliptische Aufstandsfläche ungleichmässig verteilt. Bei den Randzonen der Aufstandsfläche sind die Spannungen grösser als im zentralen Teil. Dieser „Muldeneffekt“ ist bei den Reifendrücken von 3 bar und 4.5 bar relativ stark, bei 6 bar ist er aber weniger ausgeprägt.

7.4 Zusammenfassende Empfehlungen und Hinweise

Aufgrund der vorliegenden Untersuchung wird generell empfohlen, zusätzlich zu den in der Norm vorgesehenen Kenngrössen eine Bestimmung der Geschwindigkeit der Spurbildung im Langzeitbereich sowie des Wertes der Spurbildung unmittelbar nach Überrollungsbeginn in die Beurteilung des Spurbildungsrisikos von Mischgut einzubeziehen.

Zudem wird empfohlen, die erarbeiteten Erkenntnisse in das Normenwerk geeignet einfließen zu lassen. Dies gilt insbesondere mit Bezug auf das Zusammensetzen von Spurbildungsprüfkörpern aus Bohrkernen, den direkten Vergleich von Prüfkörpern unterschiedlicher Höhe, die Problematik der Feinselektionierung von ähnlichem Mischgut, die stark mischgutabhängige Aussagekraft sowie die Einspanntechnik im Falle der Prüfung von Belagsriegeln etc.

Ferner wird empfohlen, in der Schweiz auch weiterhin den LCPC Spurbildungstest mit dem grossen pneumatischen Rad als Kriterium zu verwenden und zur Beurteilung der Spurbildungsanfälligkeit von Mischgut keinesfalls auf Tests mit noch kleineren Rädern und noch konzentrierter Lasteinwirkung (z.B. schmales Vollgummirad) abzustützen.

Schliesslich wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich der Spurbildungstest offenbar zwar zur Charakterisierung der Spurbildungsanfälligkeit, bzw. der „Trennung von Spreu und Weizen“ bei Asphaltbeton-Mischgut im Sinne einer relativen Beurteilung sowie Grobselektionierung von Mischgut eignet, nicht aber als Simulator für das Spurbildungsverhalten von reellem Belägen aus diesem Mischgut angesehen werden darf. Insbesondere bestätigt die Literatur, dass sich das Gerät nicht oder nur sehr eingeschränkt zur Prognose der Spurbildung eines Belages eig-

net. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass die im Spurbildungstest geprüften Prüfkörperhöhe den jeweiligen in der Praxis vorkommenden Schichtdicken nur ungenügend entspricht und die Temperatur im Gegensatz zur Realität keinen Vertikalgradienten aufweist sondern relativ homogen über die Prüfkörperhöhe verteilt ist, dies auf relativ hohem Niveau von 60°C, nota bene. Zudem ist die sowohl die Tragwirkung im der relativ kleinen Stahlmulde als auch die Beanspruchung infolge Hin- und Her-Rollbewegung zu stark von der Wirklichkeit entfernt, um mit dem realen Spurbildungsverhalten in erforderlicher Zuverlässigkeit korreliert werden zu können.

Hingewiesen sei ferner darauf, dass bezüglich Anwendung auf Mischgut, welches nicht auf dem Betonprinzip beruht, d.h. dem Prinzip der dichtesten Korngrössenpackung, mit dem in der EN vorgeschriebenen Verfahren nicht a priori zutreffende Resultate erwartet werden dürfen. Für Mischgut auf dem Stützgerüstprinzip (z.B. SMA und offenporiger Asphalt) sowie solches auf dem Mastix-Prinzip müssten erst die entsprechenden Anpassungen erarbeitet und die notwendigen Validierungen vorgenommen werden. Insbesondere wurden deutliche Hinweise gefunden, dass die Spurbildungsprüfung von Mastixasphalt bei 60°C als unrealistisch anzusehen ist und deshalb bei tieferen Temperaturen, z.B. bei 40°C, durchgeführt werden sollte, zumal sich hier Werte ergaben, die näher bei der durch Praxisverhalten untermauerten Vergleichskurve für die Belagsausschnitte der Autobahnstrecken C...H lagen.

8 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3.1 10Jahres- Prognose des Spurbildungsverhaltens aufgrund verschiedener Spurbildungstests für 2 Strecken aus Asphaltbeton gemäss RILEM-Ringversuch 2001 (* LCPC Test).....	11
Tabelle 3.2 Schematische Darstellung der Kombinationen von Bindemittel und Filler für die Untersuchung im LCPC-Spurbildungstester	15
Tabelle 5.1 Prüfeinrichtungen: Kalibrationsparameter	19
Tabelle 6.1 Charakteristika der obersten 100mm der Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C,...H gemäss Fritz et al (1992); nb: nicht bestimmt, kB: keine Binderschicht.....	23
Tabelle 6.2 Charakteristika der obersten 100mm der Belagsausschnitte aus dem Rundlauf gemäss Rabaiotti et al (2006); na: nicht anwendbar da Mischgutentnahme.....	24
Tabelle 6.3 Charakteristika der obersten 100mm der übrigen Belagsausschnitte gemäss Raab et al, (1999), Gubler, (2006), Poulikakos (2006b); nb: nicht bestimmt, kB: keine Binderschicht, na: nicht anwendbar	25
Tabelle 6.4 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen: Prüfkörper	27
Tabelle 6.5 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen: Ergebnisse	28
Tabelle 6.6 Regressions-Parameter für die proportionale Spurrinnentiefe der Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen, Determinationskoeffizient r^2	30
Tabelle 6.7 Langzeit-Performance von Deckschicht DS, Binderschicht BS, Obere und untere Tragschicht OT u. UT der Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C...H (+: Wiederholte Reparaturen; s: stark; m: mittel; k: nein), nach Fritz et al (1992)	32
Tabelle 6.8 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken C...H: Mittelwerte und Varianz der Spurbildungsprüfung	33
Tabelle 6.9 Regressions-Parameter für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C...H, Determinationskoeffizient r^2	34
Tabelle 6.10 Belagsausschnitte aus dem ETH-Rundlauf R1...R5: Ergebnisse	37
Tabelle 6.11 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den Belagsausschnitten aus dem ETH Rundlauf R1...R5, Determinationskoeffizient r^2	38

Tabelle 6.12 Mischgut der Belagsausschnitte aus dem ETH Rundlauf R1..R5 (Feld 11...15); Ergebnisse nach Gubler (2006)	42
Tabelle 6.13 Übrige Belagsausschnitte: Ergebnisse	42
Tabelle 6.14 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe der Spurbildungsprüfungen an den übrigen Belagsausschnitten, Determinationskoeffizient r^2	43
Tabelle 6.15 Mischgut AB 11 S (d.h. AC 11 S): Erhaltene Angaben	44
Tabelle 6.16 Mischgut AB 11 S (d.h. AC 11 S): Massgebende Werte, ermittelt durch EMPA ...	45
Tabelle 6.17 Mischgut HMT 22 S (d.h. ACT 22S): Erhaltene Angaben	45
Tabelle 6.18 Mischgut HMT 22 S (d.h. ACT 22 S): Massgebende Werte, ermittelt durch EMPA	46
Tabelle 6.19 Einfluss des Reifendrucks: Bezeichnung der untersuchten Prüfkörper	46
Tabelle 6.20 Einfluss des Reifendrucks: Ergebnisse (Mittelwerte)	47
Tabelle 6.21 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die proportionale Spurrinnentiefe an Prüfkörpern aus Mischgut AB11 S für verschiedene Reifendrücke, Determinationskoeffizient r^2	47
Tabelle 6.22 Einfluss der Vermörtelung: Ergebnisse	49
Tabelle 6.23 Einfluss der Prüftemperatur: Prüfkörper	50
Tabelle 6.24 Mastixasphalt GA8, massgebende Werte ermittelt durch EMPA	50
Tabelle 6.25 Einfluss der Prüftemperatur: Ergebnisse	51
Tabelle 6.26 Parameter der sigmoidalen Masterkurve für die proportionale Spurrinnentiefe s in (%) von Mischgut AB11 S, HMT 22S und GA8+AB11 bei 60°C; inkl. Vergleich mit A3-GA	54
Tabelle 6.27 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die prop. Spurrinnentiefe an Mischgut AB11 S, HMT 22S und GA8+AB11 für verschiedene Temperaturen, Determinationskoeffizient r^2	55
Tabelle 6.28 Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen: Prüfkörper	56
Tabelle 6.29 Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen: Ergebnisse	56
Tabelle 6.30 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung: Prüfkörper	57
Tabelle 6.31 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung: Ergebnisse	57
Tabelle 6.32 Regressions-Parameter der Potenzfunktion für die prop. Spurrinnentiefe an Mischgut AB11 S, für verschiedene Lagerungsdauern, Determinationskoeffizient r^2	58
Tabelle 6.33 Prüfkörper: allgemeine Informationen	66
Tabelle 6.34 Prüfkörper: massgebende Werte (extremale Werte des Hohlraumgehaltes sind fett hervorgehoben)	67
Tabelle 6.35 Präzisionsdaten für die proportionalen Spurrinnentiefen, Mischgut AB 11 S	76
Tabelle 6.36 Präzisionsdaten für die proportionalen Spurrinnentiefen, Mischgut HMT 22 S	76
Tabelle 6.37 Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters: Aufstandsflächen	83
Tabelle 11.1 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung von Labor A	99
Tabelle 11.2 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung von Labor B	101
Tabelle 11.3 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung von Labor C	103
Tabelle 11.4 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung von Labor D	105
Tabelle 11.5 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung.	107
Tabelle 11.6 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken C...H: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung	109
Tabelle 11.7 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken C: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung	110
Tabelle 11.8 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken D: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung	112
Tabelle 11.9 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken E: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung	114
Tabelle 11.10 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken F: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung	115
Tabelle 11.11 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken G: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung	117

Tabelle 11.12 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken H: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung	119
Tabelle 11.13 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R1	121
Tabelle 11.14 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R2	122
Tabelle 11.15 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R3	123
Tabelle 11.16 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R4	124
Tabelle 11.17 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R5	125
Tabelle 11.18 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt Arisdorf.....	126
Tabelle 11.19 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt A3-GA	126
Tabelle 11.20 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt A3-SMA.....	127
Tabelle 11.21 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt Oftringen A1.....	128
Tabelle 11.22 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt Chiasso	129
Tabelle 11.23 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung an AB11 S für verschiedene Reifendrücke	130
Tabelle 11.24 Bezeichnung und Zuordnung der Prüfkörper.....	133
Tabelle 11.25 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für AB 11 S	133
Tabelle 11.26 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für AB11 S	134
Tabelle 11.27 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für verschiedene Mischgutsorten	135
Tabelle 11.28 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für AB11 S	141
Tabelle 11.29 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für AB11 S	143
Tabelle 11.30 Bezeichnung und Zuordnung der Prüfkörper innerhalb des Prüfprogramms	145
Tabelle 11.31 Mittelwerte Hohlraumgehalte AB11	145
Tabelle 11.32 Einzelwert des Spurbildungstest AB 11 (Prüfkörper 2.1 und 2.2).....	146
Tabelle 11.33 Einzelwert des Spurbildungstest AB 11 (Prüfkörper 4.1 und 4.2).....	146

9 Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 3.1 Resultate des Spurbildungstests für obere Tragschichten gemäss LCPC Spurbildungstests eines Labors des RILEM-Ringversuchs 2001	11
Abbildung 3.2 Verteilung des Hohlraumgehalts in der oberen (Bildreihe oben) und unteren (Bildreihe unten) Prüfkörperhälfte aus AC11 nach Anfangs-, Mittel- und Endverdichtung (initial, medium, final) im Verdichter für den LCPC Spurbildungstest.....	12
Abbildung 3.3 Röntgen Computertomogramm eines Vertikalquerschnittes in der Mitte eines Prüfkörpers aus AC11 nach Anfangs-, Mittel- und Endverdichtung (0:0:0, 8:4:8, 32:16:32) im Verdichter für den LCPC Spurbildungstest.....	13
Abbildung 3.4 Spurbildungsgerät an der Universität in Hokkaido inkl. Resultate der Dehungs-Untersuchung bei den Belagsabschnitten G und H	14
Abbildung 3.5 Veränderung des Volumens der Teilflächen während des Spurbildungstestes an der Universität von Hokkaido bei den Belagsabschnitten G und H.....	14
Abbildung 3.6 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an SMA gemäss Neubauer et al (2002).....	15
Abbildung 3.7 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und b für die proportionale Spurrinntiefe der Spurbildungsprüfungen an SMA gemäss Neubauer et al (2002).....	16
Abbildung 3.8 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an offenporigem Asphalt-Mischgut gemäss Takahashi et al (2003).....	17
Abbildung 3.9 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und b für die proportionale Spurrinntiefe der Spurbildungsprüfungen an offenporigem Asphalt-Mischgut gemäss Takahashi et al (2003).....	17
Abbildung 5.1 Prüfeinrichtungen: (a) – LCPC-Spurbildungstester (Orniéreur); (b) – LCPC-Verdichter (BBPAC).	19
Abbildung 5.2. Prüfkörper des Spurbildungstesters: Messpunkte und Messprofile.	20
Abbildung 6.1 Entnahmestellen der Belagsausschnitte C... H, Ari, Oft, Chi, A3-GA, A3-SMA; R gleiches Tragschichtmaterial wie im Rundlauf.	22
Abbildung 6.2 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen: Prüfkörperteile.	26
Abbildung 6.3 Vergleichsversuche an SAM Bohrkernen: Zusammengesetzte Prüfkörper.....	26

Abbildung 6.4 Geometrie der fertigen Ornièreur-Prüfkörper: (a) – Serie B150; (b) – Serie B220; (c) – Serie S	27
Abbildung 6.5 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen für die Prüfkörper der Höhe: (a) – 50 mm; (b) – 100 mm.....	29
Abbildung 6.6 Zusammenhang zwischen Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinntiefe der Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen	30
Abbildung 6.7 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen für die monolithischen Prüfkörper S50 und S100	31
Abbildung 6.8 Schichtenverlauf der Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C...H bei Entnahme nach Verkehrsbelastung nach Fritz et al (1992)	32
Abbildung 6.9 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C, ...H.....	33
Abbildung 6.10 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinntiefe der Spurbildungsprüfungen an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C...H.....	35
Abbildung 6.11 a) Vergleich der bleibenden Kriechdeformationen nach 1 h bei 40°C mit den maximalen in situ Deformationsanteilen pro Schicht infolge Verkehrsbelastung der Autobahnstrecken C...H, wobei die strichlierten Linien den Bezug zwischen DS,BS und OT der einzelnen Belagsausschnitte darstellen; b) Vergleich der a- und q-Werte aus der Spurbildungsprüfung bei 60°C an Belagsausschnitten der obersten 100mm mit entsprechenden proportionalen Deformationsanteilen, linear hochgerechnet für den Schichtaufbau.....	36
Abbildung 6.12 Vergleich der proportionalen Spurbildung der Spurbildungsprüfung an den Belagsausschnitten der Autobahnstrecken C...H nach 1000 Zyklen bei 60°C mit den maximalen in situ Deformationsanteilen der obersten 100mm an der maximalen Gesamtdeformation infolge Verkehrsbeanspruchung	36
Abbildung 6.13 Entnahme der Belagsausschnitte R1...R5 für die Spurbildungsprüfung aus dem ETH-Rundlauf.....	37
Abbildung 6.14 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an den Belagsausschnitten aus dem ETH Rundlauf R1...R5	38
Abbildung 6.15 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinntiefe der Spurbildungsprüfungen an den Belagsausschnitten aus dem ETH Rundlauf R1...R5 und aus Mischgut der zugehörigen Felder 11...12 auf der A2 ; zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve der Strecken C...H eingezeichnet.....	39
Abbildung 6.16 Zusammenhang zwischen dem Hohlraumgehalt der Spurbildungsprüfkörpern aus Mischgut und jenem der Einzelschichten der Bohrkern aus dem ETH Rundlauf R1...R5 bzw. aus den Felder 11...12 der A2	40
Abbildung 6.17 Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und a-Wert bzw. q-Wert in der Spurbildungsprüfung an Riegeln R1...R5 des ETH Rundlaufs für Mischgut und aus den Einzelschichten aus Bohrkernen des ETH-Rundlaufs.....	40
Abbildung 6.18 a) Vergleich der Spurrinntiefen an Mischgut und Belagsriegeln R1...R5 des ETH Rundlaufs; b) Vergleich der Spurrinntiefen nach 1.4 mio Lastzyklen im Rundlauf und der Spurtiefenänderung auf der A2 in 3 Jahren (T-Wert-Differenz zum Ausgangswert)	41
Abbildung 6.19 Mittelwerte der Spurbildungsprüfung an den übrigen Belagsausschnitten.....	43
Abbildung 6.20 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinntiefe der Spurbildungsprüfungen an den übrigen Belagsausschnitten; zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve der Strecken C...H eingezeichnet.	44
Abbildung 6.21 Mischgut AB 11 S (d.h. AC 11 S): Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung inkl. Sollwertbereich, dargestellt nach SN 670810.	45
Abbildung 6.22 Mischgut HMT 22 S (d.h. ACT 22 S): Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung inkl. Sollwertbereich, dargestellt nach SN 670810.	46
Abbildung 6.23 Einfluss des Reifendruckes, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen ..	47
Abbildung 6.24 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinntiefe an Prüfkörpern aus Mischgut AB11 S für verschiedene	

Reifendrücke; zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve der Strecken C...H eingezeichnet.	48
Abbildung 6.25 Prüfkörper schematisch.....	48
Abbildung 6.26 Einfluss der Halterungssysteme: Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen.	49
Abbildung 6.27 Einfluss der Vermörtelung: Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen. ...	50
Abbildung 6.28 Mastixasphalt GA 8 (d.h. MA8): Grafische Darstellung der Korngrößenverteilung inkl. Sollwertbereich dargestellt nach SN 670810.	51
Abbildung 6.29 Einfluss der Prüftemperatur, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen: (a) – Serie T-AB11; (b) – Serie T-HMT22; (c) – Serie T-GA8.....	53
Abbildung 6.30 Sigmoidale Masterkurven für 60°C bestimmt aus den Spurbildungskurven für Mischgut AB11 S, HMT 22S und GA8+AB11 bei 40°C (weisse Punkte), 50°C (graue Punkte) und 60°C (schwarze Punkte); inkl. Vergleich mit A3-GA	54
Abbildung 6.31 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die proportionale Spurrinntiefe an Prüfkörpern aus Mischgut AB11 S, HMT 22S und GA8+AB11 für verschiedene Temperaturen; zu Vergleichszwecken ist auch die Kurve der Strecken C...H eingezeichnet.	56
Abbildung 6.32 Einfluss der Pausendauer zwischen den Messungen, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen.	57
Abbildung 6.33 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen für AB11 S.....	58
Abbildung 6.34 obere Hälfte, Prüfkörper AB11 mit der Dicke 100 mm a) Prüfkörper 3.1 vor dem Spurbildungstest; b) Prüfkörper 4.2 nach dem Spurbildungstest.	59
Abbildung 6.35 untere Hälfte, Prüfkörper AB11 mit der Dicke 100 mm mm a) Prüfkörper 3.1 vor dem Spurbildungstest; b) Prüfkörper 4.2 nach dem Spurbildungstest.	60
Abbildung 6.36 Prüfkörper AB11 mit der Dicke 50 mm a) Prüfkörper 1.2 vor dem Spurbildungstest a) Prüfkörper 2.1 nach dem Spurbildungstest.....	60
Abbildung 6.37 Hohlraumgehalt im mittleren Querprofil der 100mm und 50mm dicken Prüfkörper vor und nach dem Spurbildungstest (Mittelwert aus je zwei Prüfkörpern).....	61
Abbildung 6.38 Differenz zwischen den Werten im Hohlraumgehalt des mittleren Querprofils vor und nach dem Spurbildungstest.....	61
Abbildung 6.39 Hohlraumgehalt über die Gesamtdicke im mittleren Querprofil der 100mm und 50mm dicken Prüfkörper vor und nach dem Spurbildungstest (Mittelwert aus je zwei Prüfkörpern).	62
Abbildung 6.40 Einfluss der Prüfkörperdicke an AB 11 S, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen.	63
Abbildung 6.41 Einfluss der Prüfkörperdicke an 50 und 100mm dicken SMA11 S Belagsriegeln gemäss Abschnitt 6.1.2, Mittelwerte der proportionalen Spurrinntiefen	63
Abbildung 6.42 Mischgut AB 11 S, Einzelwerte P_i für jedes Labor: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D.....	68
Abbildung 6.43 Mischgut AB 11 S, Mittelwerte P_i , gemittelt über alle 4 getesteten Prüfkörper: (a) – in proportionalen Koordinaten; (b) – in logarithmischen Koordinaten.	69
Abbildung 6.44 Mischgut AB 11 S, Mittelwerte P'_{ij} über alle 4 durch jedes Labor geprüfte Körper: (a), (b), (c), (d) – Labors A, B, C, D.	70
Abbildung 6.45 Mischgut AB 11 S, Mittelwerte P''_{ik} über alle 4 durch jedes Labor geprüfte Körper: (a), (b), (c), (d) – Labors A, B, C, D.	71
Abbildung 6.46 Mischgut HMT 22 S, Einzelwerte P_i für jedes Labor: (a) A, (b) B, (c) C, (d) D..	72
Abbildung 6.47 Mischgut HMT 22 S, Mittelwerte P_i , gemittelt über alle vier getesteten Prüfkörper: (a) – in proportionalen Koordinaten; (b) – in logarithmischen Koordinaten.	73
Abbildung 6.48 Mischgut HMT 22 S, Mittelwerte P'_{ij} über alle 4 durch jedes Labor geprüften Körper: (a), (b), (c), (d) – Labors A, B, C, D.	74
Abbildung 6.49 Mischgut HMT 22 S, Mittelwerte P''_{ik} über alle 4 durch jedes Labor geprüften Körper: (a), (b), (c), (d) – Labors A, B, C, D.	75

Abbildung 6.50 (a) Installation der 18 Thermoelemente mittels Holzrahmen im Raumviertel der Verdichtungsform; (b) Messanordnung mit Datenerfassung nach Einfüllen des Mischgutes	77
Abbildung 6.51 Zeit Temperatur-Kurven in 100mm hohen AB11 S Prüfkörpern während Verdichtung für Thermoelemente Ch9, Ch11, CH12	77
Abbildung 6.52 Temperaturverteilung im Verdichter bei ursprünglich raumwarmer Verdichtungsform während des Abkühlens in verschiedenen Zeitpunkten, berechnet mit FE-Methode (Abaqus)	78
Abbildung 6.53 (a) Installation von Thermoelementen mittels Stahlstiften im Raumviertel der Verdichtungsform: (a) Höhe der Form 50mm, (b) Höhe der Form 100mm	79
Abbildung 6.54 Zustand nach dem Verdichten	79
Abbildung 6.55 Einfluss des Vorheizens der Verdichtungsform (Mitte Seitenfläche und Mitte Seitenfläche Kante unten, h=100mm)	80
Abbildung 6.56 Vergleich charakteristischer Abkühlungsverläufe bei Verdichtungsformen mit 50mm und 100mm Höhe	80
Abbildung 6.57 Position der Temperatur-Spots für die Messung	81
Abbildung 6.58 Temperaturverteilung kurz nach dem Einfüllen des Mischguts (a) und nach dem Verdichten (b)	81
Abbildung 6.59 Resultate der Thermografiemessungen im Punkt SP001 und Sp16 für verschieden hohe Verdichtungsformen	82
Abbildung 6.60 Vorbereitung der Prüfungen: (a) –Aufstandsfläche; (b) – Messpunkte und die positionierte Kraftsensorfolie	83
Abbildung 6.61 Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters bei dem Reifendruck von: (a) –3 bar; (b) – 4.5 bar; (b) – 6 bar	84
Abbildung 7.1 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die Test die vor 30'000 Zyklen abgebrochen werden mussten und jene, die bei Versuchsende mehr bzw weniger als 5.4% bleibende Verformungen aufwiesen. Angegeben sind zudem die theoretischen 5%, 7.5% und 10% Kurven sowie die Regression aller Messpunkte	86
Abbildung 7.2 Zusammenhang zwischen den Regressionsparametern a und q für die Test an Riegeln und an Labormischgut. Angegeben sind zudem jene Riegel, welche in situ übermässige Spurbildung zeigten sowie die theoretischen 5%, 7.5% und 10% Kurven. ..	87
Abbildung 7.3 Zusammenhang zwischen Regressionsparametern a und q mit den maximalen Spurrinntiefen nach 30'000 Zyklen bzw. bei Abbruch des Tests	87
Abbildung 11.1 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen, Einzelresultate: (a) – Serie B150; (b) – Serie B220; (c) – Serie S	109
Abbildung 11.2 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke C, Einzelresultate	111
Abbildung 11.3 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke D, Einzelresultate.	113
Abbildung 11.4 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke E, Einzelresultate	114
Abbildung 11.5 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke F, Einzelresultate	116
Abbildung 11.6 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke G, Einzelresultate	118
Abbildung 11.7 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke H, Einzelresultate.	120
Abbildung 11.8 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R1, Einzelresultate	121
Abbildung 11.9 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R2, Einzelresultate	122
Abbildung 11.10 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R3, Einzelresultate	123
Abbildung 11.11 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R4, Einzelresultate	124
Abbildung 11.12 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R5, Einzelresultate	125
Abbildung 11.13 Belagsausschnitt Arisdorf, Einzelresultate.	126
Abbildung 11.14 Belagsausschnitt A3-GA, Einzelresultate.	127
Abbildung 11.15 Belagsausschnitt A3-SMA, Einzelresultate.	128
Abbildung 11.16 Belagsausschnitt Oftringen, Einzelresultate.	129
Abbildung 11.17 Belagsausschnitt Chiasso, Einzelresultate	130
Abbildung 11.18 Einfluss des Reifendruckes, Einzelresultate: (a) – Serie RD3; (b) – Serie RD4.5; (c) – Serie RD6.	133
Abbildung 11.19 Einfluss der Randbedingungen: Einzelresultate für die eingemörtelten Prüfkörper	134
Abbildung 11.20 Einfluss der Prüftemperatur, Einzelresultate für das Mischgut AB 11 S: (a) – Serie T-AB11-40; (b) – Serie T-AB11-50; (c) – Serie T-AB11-60.	138

Abbildung 11.21 Einfluss der Prüftemperatur, Einzelresultate für das Mischgut HMT 22 S: (a) – Serie T-HMT22-40; (b) – Serie T-HMT22-50; (c) – Serie T-HMT22-60.....	139
Abbildung 11.22 Einfluss der Prüftemperatur, Einzelresultate für das Mischgut GA 8: (a) – Serie T-GA8-40; (b) – Serie T-GA8-50.....	140
Abbildung 11.23 Einfluss der Pausendauer zwischen den Messungen, Einzelresultate: (a) – Serie Z-E; (b) – Serie Z-M.....	142
Abbildung 11.24 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung, Einzelresultate: (a) – Serie A-1W; (b) – Serie A-6M.....	144
Abbildung 11.25 Bezeichnung der Prüfkörper a) mit Dicke 50 mm; b) mit Dicke 100 mm.....	145
Abbildung 11.26 Messpunkte.....	147
Abbildung 11.27 Abkühlungsverläufe bei Verdichtungsformen mit einer Höhe von h=50mm...	147
Abbildung 11.28 Abkühlungsverläufe bei Verdichtungsformen mit einer Höhe von h=100mm.	148
Abbildung 11.29 Resultate der Thermografiemessungen (Abkühlung an der Oberfläche), h=50mm.....	148
Abbildung 11.30 Resultate der Thermografiemessungen (Abkühlung an der Oberfläche), h=100mm.....	149

10 Literaturverzeichnis

- Abd Alla E.M., Moriyoshi A., Partl, M.N., Takahashi K., Kondo, T, Tomoto T.(2006): *A New Wheel Tracking Test to Analyze Movements of Aggregates in Multi-Layered Asphalt Specimens*. Journal of the Japan. Petroleum Institute, Vol.49,No.5, pp 274...279
- Angst, C. (2007): *Unterhalt 2000, Forschungspaket 7: Vergleichsstrecken mit verschiedenen Tragschichten auf einer Nationalstrasse*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen (Entwurf Februar 2007)
- Bouwmeester, M., Bredenhann, S.J. (2007): *The Use of Steel Slag Aggregate in Hot-mix Asphalt in South Africa* Proc. ISAP 2008 int Symposium on Asphalt Pavements and Environment, August 18...20, Zürich, ISBN 978-3-905594-51-5, pp 52...63
- Cooley, L.A., Kandhal, P.S., Buchanan, M.S., Fee, F., Epps, A. (2000): *Loaded Wheel Testers in the United States*, State of Practice, Transportation Research E-Circular, Number E-C016
- Ebschner, P. (2002): *Spannungsverteilung unter dem Rad im LCPC Spurrinentester*, Empa-Bericht FE 840682/3
- EAM (1999): *Standard-Checkliste für Vergleichsprüfungen (Ringversuche) bei Bauprodukten des EAM* (Eidgenössisches Amt für Messwesen), Dokument Nr. 727d, Ausgabe November 1999, Rev. 00
- Europäische Norm EN 12697-8: *Bestimmung der volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern*, Ausgabe März 2003.
- Europäische Norm EN12697-22: *Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 22: Spurbildungstest* (2003)
- Europäische Norm EN 12697-33: *Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät* (2003)
- Fritz,H.W.,Seeberger,M.,Partl,M.N. (1992): *Untersuchung stark beanspruchter bituminöser Autobahnbeläge*. Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, Report Nr.256

- FGSV (200): *Merkblatt über die statistische Auswertung der Prüfergebnisse. Teil 1: Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren*, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e.V., Köln
- Gubler, R. (2007): *Unterhalt 2000, Forschungspaket 2: Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten*, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. (Entwurf Juni 2007)
- Mohammad L., Saadeh, S., Zhang, c., Cooper, S., Abadie, c., Khattak, J. (2007): *Comparative Study of the Mechanical Properties of HMA Mixture: Field vs Laboratory*, Journal of AAPT, p 887...918
- Neubauer, O., Partl, M.N. (2002): *Volumetrische und Mechanische Optimierung von Splittmastixasphalt*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. Report Nr1018
- NF P 98-250-2 „*Préparation des mélanges hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des plaques*“;
NF P 98-253-1 „*Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés*“.
- Olard, F., Héritier, B., Beduneau, E. (2007): *Low energy asphalt LEA®: new half-warm mix asphalt for minimizing impacts from asphalt plant to job site*. Proc. ISAP 2008 int Symposium on Asphalt Pavements and Environment, August 18...20, Zürich, ISBN 978-3-905594-51-5, pp 207...217
- Partl, M.N., Vinson, T.S., Hicks, R.G., Younger, K. (1995): *Performance-Related Testing of Stone Mastic Asphalt*. 75th Annual Meeting AAPT, Portland, Vol64 of AAPT Journal, p96- 29
- Partl, M.N., Vinson, T.S., Leahy, R.B. (1996): *Performance-related Testing of Heavy Loaded Swiss Asphalt Concrete Surface Courses*. 76th Annual Meeting AAPT, Baltimore, Vol65 of AAPT Journal, p608-626
- Partl, M.N., Fritz, H.W. (1997): *Do Superpave Binder Tests Reflect Long Term Pavement Performance Better Than Traditional Tests?*. Proceedings 8th Int. Conf. on Asphalt Pavements, ISAP, Seattle, Vol. II. pp1279...1288,
- Partl, M., Piber, H.: (2001): *Pavement Performance Prediction and Evaluation (PPPE) - Report of RILEM TC 152-PBM and 182-PEB*, RILEM Report rep029:e-ISBN: 2912143683, available online on www.rilem.net
- Partl, M.N., Gubler, R., Poulikakos, L.D., Sokolov, K. (2005): *Innovations in Testing of Bituminous Pavement Materials*. Journal of Applied Asphalt Binder Rheology, pp 128...142
- Partl, M.N., Flisch, A., Jönsson, M. (2007): *Comparison of Laboratory Compaction Methods Using X-ray Computer Tomography*. International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Science Publications, Vol 8/2, pp139...164
- Poulikakos, L.D., Takahashi, S., Partl, M.N. (2006): *Evaluation of Improved Porous Asphalt by Various Test Methods*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Report No. 113/13 (EMPA No. FE 860076), ISBN 3-905594-47-1, October,
- Poulikakos, L.D., Pittet, M., Arnaud, L., Junod, A., Gubler, R., Simond, E., Partl, M.N., Dumont, A.-G. (2006b): *Mechanical Properties of Porous Asphalt, Recommendations for Standardization*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. FA1999/280 auf Antrag der VSS, Report Nr. 1185
- Raab, C., Partl, M.N. (1999): *Methoden zur Beurteilung des Schichtenverbunds von Asphaltbelägen*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. Report Nr442, November
- Raab, C., Partl, M.N., Jenkins, K., Hugo, F. (2005): *Determination of Rutting and Water Susceptibility of Selected Pavement Materials using MMLS3*. 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRA'05, Trondheim

- Rabaiotti, C., Caprez, M. (2006): *Unterhalt 2000, Forschungspaket 4: Dauerhafte Beläge*, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. (Entwurf Oktober)
- Soenen, H., De Visscher, J., Tanghe, T., Vanelstraete, A., Redelius, P. (2006): *Selection of Binder Performance Indicators for Asphalt Rutting Based on Triaxial and Wheel Tracking Tests*, Journal of AAPT, p 165...202
- Szydlo, A., Mackiewicz, P. (2003): *Model for Forecasting Ruts in Rutting Tester*, Proc. of 6th Int. RILEM Symp. on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials PTEBM03, Zürich, RILEM Publications S.A.R.L., ISBN 2-912143-35-7, pp490-497
- Takahashi, S., Partl, M.N. (1999): *Improvement of Mix Design for Porous Asphalt*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Report No. 113/11 (EMPA No.FE 840221), November, (1999)
- Takahashi, S., Poulidakos, L., Partl, M.N (2003): *Evaluation of Improved Porous Asphalt by Various Test Methods*. Proc. of 6th Int. RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials PTEBM03, Zürich, Switzerland, 14-16April, RILEM Publications S.A.R.L., ISBN 2-912143-35-7, pp230-236

11 Anhang

11.1 Resultate der nationalen Ringanalyse

Folgende Tabellen zeigen die ausgewerteten Prüfergebnisse für alle beteiligten Labors und alle getesteten Prüfkörper. Die Definition der Werte P_i , P'_{ij} und P''_{ik} ist durch die Formeln (1), (2) bzw. (3) gegeben.

11.1.1 Labor A

Tabelle 11.1 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung von Labor A

Körper A_AB11_1									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.47	1.20	1.80	1.42	1.40	1.50	1.67	1.43	1.37
100	2.10	1.72	2.68	1.90	1.90	2.07	2.47	2.13	1.93
300	2.47	2.08	3.02	2.30	2.37	2.40	2.90	2.40	2.27
1000	2.87	2.48	3.50	2.62	2.83	2.80	3.20	2.83	2.67
3000	3.44	2.88	4.28	3.16	3.40	3.47	3.90	3.40	3.03
10000	4.52	3.94	5.50	4.12	4.30	4.57	5.03	4.60	4.10
30000	5.38	4.84	6.42	4.88	5.07	5.50	6.00	5.47	4.87
Körper A_AB11_2									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.28	0.92	1.56	1.36	1.27	0.97	1.57	1.27	1.33
100	2.01	1.40	2.42	2.20	2.10	1.77	2.20	1.97	2.00
300	2.33	1.68	2.82	2.50	2.47	2.10	2.53	2.30	2.27
1000	2.75	2.08	3.28	2.88	2.90	2.30	3.00	2.77	2.77
3000	3.27	2.52	3.94	3.34	3.33	2.97	3.60	3.17	3.27
10000	4.22	3.46	4.88	4.32	4.27	3.87	4.77	4.07	4.13
30000	4.91	4.28	5.72	4.74	5.00	4.70	5.50	4.70	4.67
Körper A_AB11_53									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.77	0.46	1.54	0.32	0.63	0.90	0.80	0.63	0.90
100	1.29	0.96	2.24	0.68	1.20	1.53	1.37	1.07	1.30
300	1.73	1.24	2.90	1.04	1.60	2.00	1.87	1.47	1.70
1000	2.25	1.76	3.46	1.52	2.03	2.60	2.33	2.13	2.13
3000	2.83	2.30	4.12	2.08	2.57	3.10	3.10	2.67	2.73
10000	3.39	2.92	4.72	2.54	3.13	3.83	3.63	3.20	3.17
30000	3.88	3.54	5.18	2.92	3.63	4.30	4.13	3.80	3.53
Körper A_AB11_55									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.77	0.46	1.54	0.32	0.63	0.90	0.80	0.63	0.90
100	1.29	0.96	2.24	0.68	1.20	1.53	1.37	1.07	1.30
300	1.73	1.24	2.90	1.04	1.60	2.00	1.87	1.47	1.70
1000	2.25	1.76	3.46	1.52	2.03	2.60	2.33	2.13	2.13
3000	2.83	2.30	4.12	2.08	2.57	3.10	3.10	2.67	2.73
10000	3.39	2.92	4.72	2.54	3.13	3.83	3.63	3.20	3.17
30000	3.88	3.54	5.18	2.92	3.63	4.30	4.13	3.80	3.53

Körper A_HMT22_1									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.82	0.72	1.18	0.56	0.93	0.80	0.63	0.90	0.83
100	1.07	0.94	1.50	0.78	1.23	1.10	1.00	1.00	1.03
300	1.24	1.04	1.70	0.98	1.43	1.23	1.20	1.17	1.17
1000	1.47	1.24	1.96	1.20	1.60	1.60	1.53	1.33	1.27
3000	1.69	1.46	2.18	1.42	1.80	1.77	1.77	1.57	1.53
10000	2.15	2.12	2.40	1.94	2.30	2.23	2.17	2.13	1.93
30000	2.40	2.20	2.92	2.08	2.67	2.43	2.40	2.30	2.20
Körper A_HMT22_2									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.77	0.68	1.08	0.56	0.63	0.63	0.57	0.83	1.20
100	1.03	0.84	1.40	0.86	1.07	0.87	0.80	1.13	1.30
300	1.17	0.98	1.62	0.92	1.17	1.00	1.03	1.27	1.40
1000	1.44	1.20	1.90	1.22	1.40	1.13	1.23	1.60	1.83
3000	1.65	1.42	2.08	1.46	1.60	1.37	1.53	1.73	2.03
10000	2.08	1.96	2.28	2.00	2.07	1.80	1.90	2.20	2.43
30000	2.36	2.12	2.66	2.30	2.30	2.13	2.17	2.43	2.77
Körper A_HMT22_1_EMPA									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.63	0.32	0.62	0.94	0.63	0.63	0.60	0.53	0.73
100	0.93	0.44	1.06	1.30	0.93	0.80	0.97	0.93	1.03
300	1.21	0.66	1.44	1.52	1.30	1.00	1.23	1.23	1.27
1000	1.41	0.84	1.64	1.74	1.60	1.27	1.33	1.30	1.53
3000	1.70	1.10	1.96	2.04	1.87	1.50	1.73	1.57	1.83
10000	2.02	1.42	2.28	2.36	2.30	1.77	1.93	1.93	2.17
30000	2.36	1.76	2.80	2.52	2.60	2.07	2.27	2.23	2.63
Körper A_HMT22_3									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.55	0.20	0.72	0.74	0.67	0.47	0.43	0.67	0.53
100	0.97	0.62	1.12	1.18	1.13	0.80	0.97	0.90	1.07
300	1.19	0.84	1.28	1.44	1.37	1.17	1.07	1.07	1.27
1000	1.39	0.98	1.56	1.64	1.63	1.37	1.27	1.27	1.43
3000	1.63	1.26	1.84	1.78	1.87	1.50	1.53	1.53	1.70
10000	1.87	1.58	1.98	2.04	2.20	1.87	1.53	1.77	1.97
30000	2.24	2.02	2.52	2.18	2.50	2.17	2.00	2.07	2.47

11.1.2 Labor B

Tabelle 11.2 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung von Labor B

Körper B_AB11_1									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.45	0.90	2.09	1.38	1.45	1.43	1.38	1.31	1.70
100	1.96	1.42	2.64	1.81	1.91	1.96	2.21	1.65	2.05
300	2.21	1.70	2.92	2.00	2.02	2.32	2.49	1.92	2.28
1000	2.86	2.31	3.68	2.59	2.59	3.04	3.12	2.72	2.85
3000	3.51	2.78	4.51	3.23	3.26	3.70	3.88	3.24	3.46
10000	4.04	3.24	5.05	3.82	3.69	4.25	4.55	3.90	3.78
30000	4.58	3.70	5.74	4.30	4.11	4.86	5.21	4.38	4.36
Körper B_AB11_2									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.38	0.94	1.78	1.42	1.26	1.19	1.57	1.49	1.39
100	1.81	1.34	2.23	1.85	1.37	1.61	2.08	2.05	1.93
300	2.07	1.52	2.50	2.21	1.47	2.00	2.32	2.38	2.19
1000	2.79	2.20	3.36	2.82	1.95	2.56	3.25	3.22	2.98
3000	3.37	2.71	4.04	3.35	2.27	3.30	3.86	3.86	3.56
10000	4.02	3.34	4.78	3.94	2.64	4.10	4.70	4.64	4.01
30000	4.60	3.90	5.41	4.50	2.98	4.61	5.61	5.21	4.61
Körper B_AB11_56									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.62	1.23	2.36	1.28	1.65	1.60	1.65	1.63	1.58
100	2.31	1.92	3.13	1.86	2.26	2.35	2.52	2.27	2.12
300	2.86	2.46	3.78	2.34	2.81	2.89	3.19	2.82	2.61
1000	3.31	2.91	4.28	2.75	3.12	3.53	3.56	3.37	2.98
3000	3.90	3.47	5.00	3.25	3.48	4.06	4.33	4.05	3.59
10000	4.37	3.90	5.55	3.67	3.80	4.59	4.92	4.61	3.93
30000	4.88	4.38	6.09	4.17	4.08	5.14	5.53	5.12	4.53
Körper B_AB11_57									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.70	1.12	2.29	1.67	1.39	1.74	1.96	1.91	1.49
100	2.30	1.50	3.04	2.38	1.82	2.34	2.68	2.57	2.12
300	2.78	1.90	3.59	2.85	2.18	2.85	3.25	3.07	2.55
1000	3.27	2.38	4.13	3.30	2.49	3.54	3.84	3.43	3.05
3000	3.91	2.90	4.92	3.91	2.79	4.31	4.55	4.19	3.72
10000	4.46	3.42	5.57	4.40	3.18	5.03	5.22	4.83	4.06
30000	5.04	3.92	6.18	5.03	3.56	5.63	5.89	5.39	4.73

Körper B_HMT22_1									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.19	1.18	1.23	1.15	1.03	1.07	1.78	0.99	1.07
100	1.59	1.51	1.75	1.52	1.31	1.47	2.37	1.43	1.38
300	1.88	1.73	1.94	1.97	1.59	1.82	2.61	1.69	1.68
1000	2.21	2.04	2.26	2.32	1.91	2.12	2.97	2.12	1.93
3000	2.42	2.26	2.49	2.52	2.21	2.27	3.21	2.31	2.12
10000	2.72	2.47	2.79	2.91	2.41	2.58	3.55	2.66	2.42
30000	3.00	2.75	3.12	3.13	2.71	2.79	3.92	2.93	2.63
Körper B_HMT22_2									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.22	1.02	1.66	0.98	1.24	1.28	1.04	1.15	1.38
100	1.52	1.30	2.12	1.14	1.53	1.57	1.31	1.58	1.63
300	1.79	1.57	2.33	1.46	1.67	1.92	1.53	1.93	1.88
1000	2.07	1.86	2.65	1.70	1.97	2.03	1.88	2.25	2.21
3000	2.26	2.04	2.86	1.88	2.13	2.23	2.02	2.53	2.40
10000	2.54	2.34	3.17	2.11	2.35	2.54	2.32	2.85	2.63
30000	2.76	2.54	3.43	2.31	2.54	2.84	2.52	3.05	2.83
Körper B_HMT22_4									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.88	0.38	1.16	1.11	1.00	0.88	0.53	0.95	1.05
100	1.16	0.51	1.42	1.57	1.25	1.23	0.83	1.20	1.31
300	1.44	0.72	1.77	1.84	1.46	1.51	1.11	1.56	1.58
1000	1.71	0.95	2.03	2.15	1.85	1.80	1.36	1.75	1.81
3000	1.99	1.21	2.35	2.40	2.16	2.10	1.73	1.93	2.02
10000	2.32	1.44	2.76	2.76	2.53	2.41	2.11	2.16	2.41
30000	2.59	1.63	3.12	3.02	2.83	2.72	2.27	2.40	2.72
Körper B_HMT22_5									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.69	0.78	0.67	0.62	0.59	0.78	0.62	0.71	0.74
100	0.96	0.96	1.04	0.88	0.83	0.98	1.01	0.86	1.11
300	1.21	1.27	1.30	1.07	1.07	1.25	1.27	1.12	1.36
1000	1.69	1.82	1.71	1.56	1.38	1.87	1.69	1.82	1.71
3000	1.86	2.10	1.95	1.52	1.63	1.75	1.86	2.10	1.93
10000	2.18	2.45	2.25	1.85	1.88	2.09	2.29	2.42	2.24
30000	2.47	2.70	2.58	2.13	2.14	2.46	2.61	2.64	2.50

11.1.3 Labor C

Tabelle 11.3 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung von Labor C

Körper C_AB11_1									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.07	0.89	1.40	0.93	1.05	1.17	1.20	1.10	0.84
100	1.43	1.17	1.85	1.27	1.38	1.56	1.62	1.48	1.13
300	1.75	1.43	2.23	1.57	1.68	1.90	1.95	1.82	1.39
1000	2.06	1.71	2.61	1.87	1.98	2.26	2.26	2.14	1.68
3000	2.41	2.01	3.03	2.18	2.36	2.65	2.55	2.48	1.98
10000	2.94	2.51	3.66	2.65	2.96	3.21	3.03	3.02	2.48
30000	3.24	2.79	3.98	2.95	3.30	3.53	3.31	3.29	2.77
Körper C_AB11_2									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.22	1.07	1.70	0.90	1.14	1.24	1.23	1.27	1.23
100	1.74	1.55	2.42	1.25	1.67	1.77	1.78	1.83	1.64
300	2.19	1.97	2.99	1.60	2.07	2.30	2.28	2.33	1.97
1000	2.63	2.40	3.53	1.97	2.49	2.81	2.73	2.80	2.35
3000	3.08	2.82	4.07	2.35	2.91	3.28	3.22	3.27	2.73
10000	3.81	3.52	4.90	3.00	3.58	4.07	4.01	4.04	3.33
30000	4.18	3.90	5.29	3.35	3.96	4.45	4.41	4.43	3.66
Körper C_AB11_58									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.54	1.37	2.16	1.10	1.48	1.63	1.71	1.48	1.41
100	2.24	2.04	3.01	1.66	2.08	2.42	2.55	2.19	1.95
300	2.79	2.59	3.65	2.12	2.59	3.02	3.20	2.72	2.40
1000	3.17	2.98	4.09	2.44	2.94	3.45	3.64	3.11	2.70
3000	3.75	3.52	4.72	3.00	3.51	4.04	4.33	3.69	3.17
10000	4.45	4.27	5.51	3.59	4.05	4.87	5.17	4.41	3.76
30000	4.90	4.70	5.98	4.01	4.48	5.36	5.66	4.86	4.15
Körper C_AB11_59									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.50	1.18	2.08	1.23	1.45	1.57	1.55	1.46	1.47
100	2.21	1.79	2.97	1.86	2.02	2.32	2.35	2.22	2.12
300	2.78	2.32	3.64	2.38	2.47	2.91	3.01	2.87	2.64
1000	3.19	2.71	4.13	2.73	2.80	3.32	3.48	3.34	3.01
3000	3.75	3.24	4.77	3.24	3.27	3.87	4.13	3.94	3.54
10000	4.55	4.04	5.62	3.99	3.92	4.65	5.00	4.92	4.26
30000	5.07	4.59	6.17	4.45	4.38	5.17	5.57	5.51	4.73

Körper C_HMT22_1									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.38	0.37	0.47	0.29	0.31	0.39	0.43	0.39	0.38
100	0.57	0.55	0.70	0.45	0.50	0.59	0.63	0.55	0.57
300	0.75	0.73	0.92	0.60	0.68	0.78	0.82	0.71	0.76
1000	0.97	0.94	1.19	0.78	0.91	1.01	1.06	0.91	0.96
3000	1.20	1.15	1.48	0.98	1.16	1.26	1.27	1.11	1.19
10000	1.54	1.46	1.88	1.29	1.48	1.65	1.61	1.45	1.53
30000	1.93	1.85	2.31	1.64	1.88	2.10	1.97	1.83	1.89
Körper C_HMT22_2									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.56	0.42	0.69	0.57	0.50	0.52	0.71	0.55	0.52
100	0.84	0.67	1.01	0.83	0.76	0.80	1.01	0.85	0.76
300	1.08	0.89	1.31	1.04	0.97	1.04	1.27	1.13	1.00
1000	1.33	1.13	1.61	1.25	1.19	1.30	1.52	1.40	1.24
3000	1.60	1.38	1.94	1.47	1.44	1.58	1.80	1.69	1.49
10000	1.99	1.76	2.41	1.79	1.81	1.99	2.17	2.09	1.88
30000	2.37	2.14	2.83	2.14	2.20	2.39	2.54	2.50	2.23
Körper C_HMT22_6									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.92	0.88	1.25	0.64	1.00	0.92	0.83	0.99	0.88
100	1.33	1.28	1.79	0.91	1.37	1.30	1.26	1.47	1.23
300	1.67	1.62	2.22	1.16	1.70	1.62	1.64	1.86	1.51
1000	2.00	1.96	2.64	1.39	2.03	1.93	1.99	2.22	1.82
3000	2.34	2.30	3.06	1.66	2.39	2.23	2.37	2.58	2.12
10000	2.76	2.74	3.55	1.98	2.82	2.63	2.81	3.06	2.47
30000	3.15	3.17	3.98	2.31	3.22	2.94	3.20	3.55	2.87
Körper C_HMT22_7									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.85	0.73	1.11	0.71	0.75	0.88	0.80	0.88	0.94
100	1.16	1.03	1.47	0.99	1.04	1.26	1.10	1.19	1.24
300	1.42	1.27	1.77	1.23	1.28	1.54	1.33	1.45	1.52
1000	1.69	1.53	2.09	1.47	1.51	1.81	1.59	1.75	1.82
3000	2.02	1.84	2.42	1.80	1.81	2.19	1.84	2.07	2.18
10000	2.43	2.22	2.82	2.26	2.19	2.71	2.23	2.48	2.55
30000	2.90	2.70	3.22	2.78	2.59	3.30	2.67	2.90	3.03

11.1.4 Labor D

Tabelle 11.4 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung von Labor D

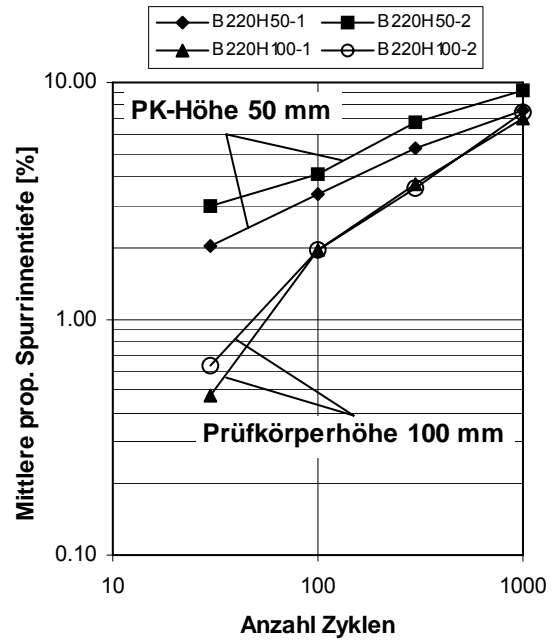
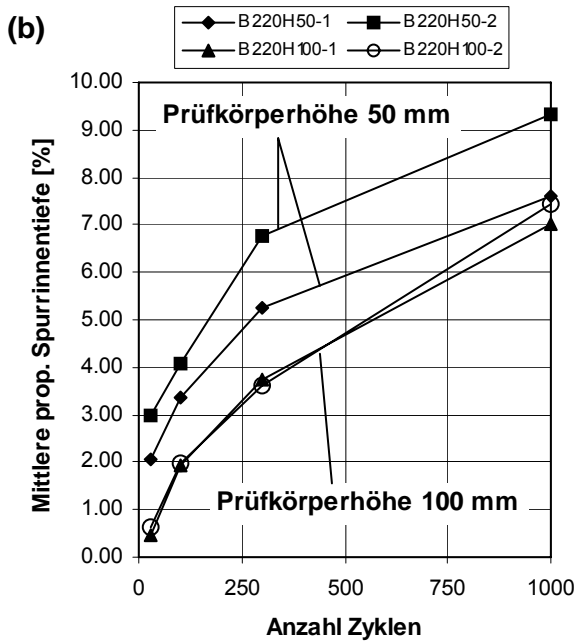
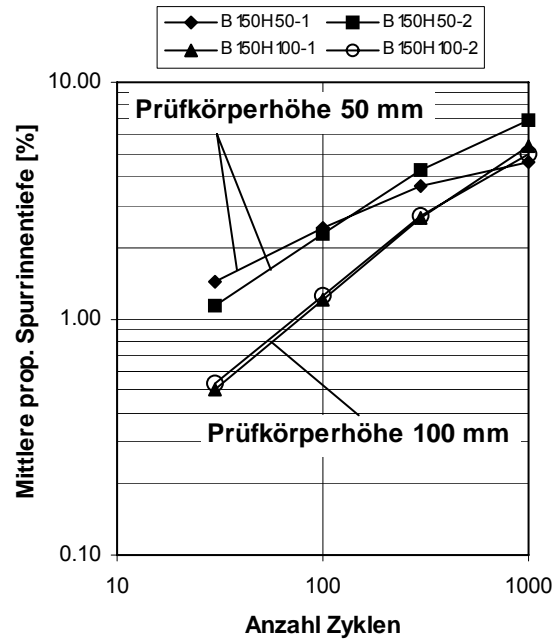
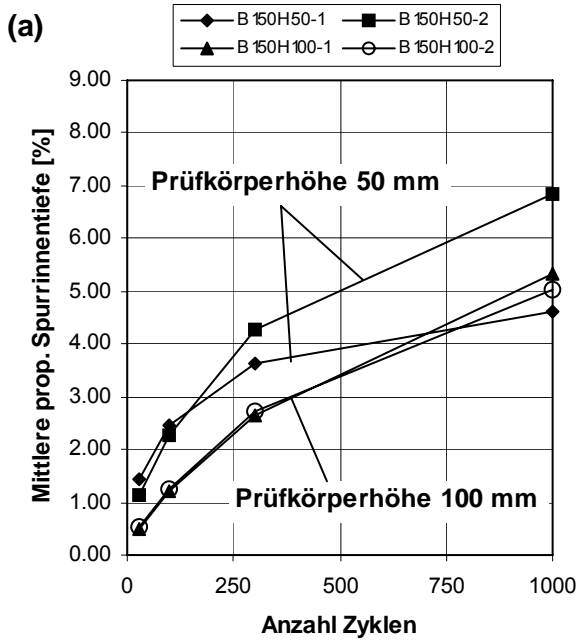
Körper D_AB11_1									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.61	1.21	2.21	1.39	1.64	1.87	1.94	1.19	1.39
100	2.27	1.69	3.06	2.05	2.20	2.66	2.84	1.71	1.93
300	2.82	2.16	3.74	2.55	2.69	3.22	3.55	2.27	2.35
1000	3.28	2.59	4.29	2.96	3.12	3.76	4.06	2.67	2.79
3000	3.83	3.13	4.90	3.45	3.67	4.41	4.49	3.30	3.27
10000	4.62	3.90	5.80	4.16	4.29	5.17	5.54	4.17	3.94
30000	5.14	4.43	6.37	4.62	4.73	5.73	5.90	4.88	4.46
Körper D_AB11_2									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.68	1.58	2.25	1.20	2.00	1.94	1.55	1.34	1.56
100	2.31	2.19	3.01	1.74	2.68	2.70	2.14	1.95	2.10
300	2.87	2.73	3.67	2.20	3.21	3.26	2.73	2.52	2.61
1000	3.40	3.28	4.28	2.64	3.73	3.79	3.35	3.12	3.02
3000	4.01	3.83	5.00	3.19	4.34	4.45	3.92	3.81	3.52
10000	4.75	4.57	5.84	3.82	5.08	5.23	4.72	4.59	4.10
30000	5.33	5.14	6.47	4.37	5.60	5.83	5.39	5.25	4.56
Körper D_AB11_62									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.50	1.49	1.98	1.02	1.70	1.86	1.69	1.10	1.14
100	1.72	1.78	2.31	1.07	1.83	2.14	2.13	1.31	1.19
300	2.49	2.48	3.14	1.85	2.52	2.95	3.06	2.09	1.84
1000	2.86	2.89	3.54	2.15	2.93	3.41	3.24	2.53	2.20
3000	3.31	3.35	4.05	2.53	3.37	3.87	3.80	2.95	2.56
10000	3.83	3.88	4.64	2.97	3.80	4.42	4.46	3.47	3.01
30000	4.25	4.33	5.08	3.33	4.23	4.84	4.83	3.93	3.40
Körper D_AB11_63									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.33	1.10	1.87	1.01	1.61	1.70	0.93	1.09	1.30
100	1.62	1.37	2.32	1.17	1.86	2.09	1.25	1.42	1.48
300	2.51	2.15	3.28	2.11	2.66	3.12	2.20	2.35	2.23
1000	3.04	2.63	3.91	2.57	3.08	3.62	2.94	2.87	2.68
3000	3.55	3.13	4.47	3.06	3.52	4.24	3.54	3.38	3.08
10000	4.16	3.74	5.13	3.60	4.06	4.93	4.19	4.05	3.55
30000	4.60	4.14	5.61	4.04	4.47	5.42	4.71	4.49	3.89

Körper D_HMT22_1									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.00	0.96	1.18	0.84	0.93	1.24	1.01	1.04	0.76
100	1.24	1.09	1.52	1.11	1.20	1.41	1.29	1.34	0.94
300	1.51	1.26	1.85	1.42	1.45	1.81	1.64	1.48	1.19
1000	1.80	1.53	2.16	1.71	1.70	2.22	1.88	1.77	1.44
3000	2.09	1.77	2.51	1.98	1.99	2.63	2.07	2.03	1.72
10000	2.38	2.05	2.87	2.22	2.26	2.89	2.38	2.31	2.06
30000	2.80	2.48	3.35	2.57	2.53	3.59	2.89	2.61	2.38
Körper C_HMT22_2									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.76	0.91	0.89	0.49	0.21	1.04	0.77	1.01	0.79
100	1.02	1.11	1.22	0.74	0.48	1.26	1.05	1.32	1.01
300	1.27	1.34	1.52	0.95	0.74	1.50	1.28	1.63	1.20
1000	1.54	1.60	1.82	1.19	1.02	1.76	1.55	1.93	1.42
3000	1.76	1.82	2.08	1.37	1.26	2.04	1.77	2.11	1.63
10000	2.02	2.10	2.34	1.63	1.51	2.34	2.07	2.34	1.86
30000	2.34	2.40	2.69	1.92	1.86	2.69	2.35	2.67	2.12
Körper C_HMT22_11									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	1.00	0.75	1.24	1.02	1.11	1.15	0.86	0.88	1.02
100	1.36	1.03	1.67	1.37	1.43	1.52	1.34	1.20	1.31
300	1.66	1.26	2.00	1.72	1.68	1.75	1.71	1.49	1.66
1000	1.90	1.40	2.29	2.00	1.94	2.06	1.86	1.68	1.94
3000	2.30	1.81	2.65	2.44	2.26	2.34	2.46	2.01	2.41
10000	2.61	2.10	3.02	2.70	2.49	2.65	2.67	2.41	2.83
30000	2.89	2.36	3.34	2.97	2.82	2.95	2.89	2.68	3.12
Körper C_HMT22_13									
Anzahl Belastungszyklen	P_i [%]	P''_{ik} [%]			P'_{ij} [%]				
30	0.77	0.76	0.88	0.68	0.56	0.85	1.03	0.69	0.73
100	1.06	1.06	1.21	0.92	0.82	1.15	1.37	0.96	1.02
300	1.31	1.31	1.45	1.17	0.98	1.44	1.66	1.18	1.28
1000	1.47	1.33	1.72	1.35	1.10	1.59	1.85	1.37	1.43
3000	1.72	1.71	1.92	1.52	1.26	1.90	2.12	1.62	1.69
10000	2.06	2.12	2.34	1.74	1.57	2.28	2.48	1.96	2.01
30000	2.30	2.39	2.57	1.95	1.70	2.51	2.71	2.31	2.26

11.2 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen

Tabelle 11.5 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Prüfkörperdicke [mm]	Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Spurrinntiefe [mm]	Proportionale Spurrinntiefe P_i [%]
50	B150H50-1	30	0.72	1.44
		100	1.22	2.44
		300	1.82	3.64
		1'000	2.3	4.60
	B150H50-2	30	0.57	1.14
		100	1.14	2.28
		300	2.13	4.26
		1'000	3.43	6.86
	B220H50-1	30	1.03	2.05
		100	1.69	3.38
		300	2.62	5.25
		1'000	3.81	7.62
	B220H50-2	30	1.50	3.00
		100	2.03	4.06
		300	3.38	6.76
		1'000	4.67	9.34
	S50-1	30	1.14	2.29
		100	1.94	3.88
		300	2.62	5.25
		1'000	3.55	7.10
S50-2	30	1.14	2.28	
	100	1.78	3.55	
	300	2.60	5.20	
	1'000	3.40	6.80	
100	B150H100-1	30	0.50	0.50
		100	1.20	1.20
		300	2.64	2.64
		1'000	5.34	5.34
	B150H100-2	30	0.53	0.53
		100	1.25	1.25
		300	2.72	2.72
		1'000	5.01	5.01
	B220H100-1	30	0.47	0.47
		100	1.94	1.94
		300	3.72	3.72
		1'000	7.03	7.03
	B220H100-2	30	0.63	0.63
		100	1.97	1.97
		300	3.60	3.60
		1'000	7.44	7.44
	S100-1	30	1.29	1.29
		100	2.37	2.37
		300	3.92	3.92
		1'000	6.78	6.78
S100-2	30	1.87	1.87	
	100	2.62	2.62	
	300	4.22	4.22	
	1'000	7.13	7.13	



Fortsetzung der Abbildung siehe nächste Seite

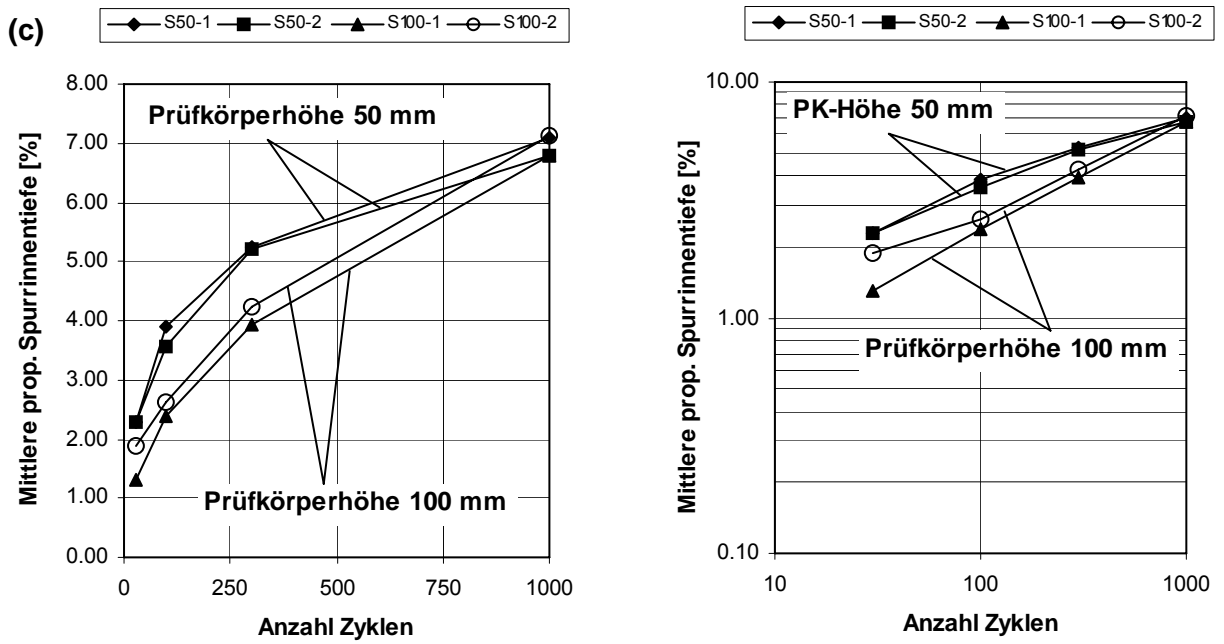


Abbildung 11.1 Vergleichsversuche an SMA Bohrkernen, Einzelresultate: (a) – Serie B150; (b) – Serie B220; (c) – Serie S.

11.3 Belagsausschnitte aus den Autobahnstrecken C, D, E, F, G, H

Tabelle 11.6 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken C...H: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i [%] für die Prüfserie:										
	C2.2	C3.2	D2.2	D4.2	E1.1	F1.2	F2.1	G1.1	G2.1	H2.1	H2.2
30	0.80	0.82	0.37	0.79	1.20	0.99	0.43	1.20	1.48	0.96	0.59
100	1.11	1.34	0.59	1.40	2.83	1.17	0.67	2.83	2.88	1.50	0.90
300	1.56	1.78	0.90	2.29	5.23	1.41	0.90	5.23	5.94	2.13	1.20
1'000	2.27	2.46	1.40	4.24	11.32	1.63	1.09	11.32	11.88	2.94	1.45
3'000	3.43	3.88	2.62	8.29	-	1.90	1.41	-	-	4.46	1.84
10'000	5.61	7.04	3.75	12.39	-	2.28	1.80	-	-	6.78	2.36
30'000	8.21	9.78	4.44	-	-	2.62	2.12	-	-	8.06	2.79

11.3.1 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke C

Tabelle 11.7 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken C: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Belagsausschnitt	Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyk- len	Proportionale Spurrin- nentiefe P_i [%]
C2.2	C2.2-1	30	0.98
		100	1.24
		300	1.74
		1'000	2.61
		3'000	3.94
		10'000	6.35
		30'000	9.49
	C2.2-2	30	0.62
		100	0.98
		300	1.38
		1'000	1.94
		3'000	2.92
		10'000	4.86
		30'000	6.93
C3.2	C3.2-1	30	0.88
		100	1.47
		300	1.89
		1'000	2.56
		3'000	3.64
		10'000	5.10
		30'000	6.43
	C3.2-2	30	0.75
		100	1.21
		300	1.67
		1'000	2.37
		3'000	4.12
		10'000	8.99
		30'000	13.14

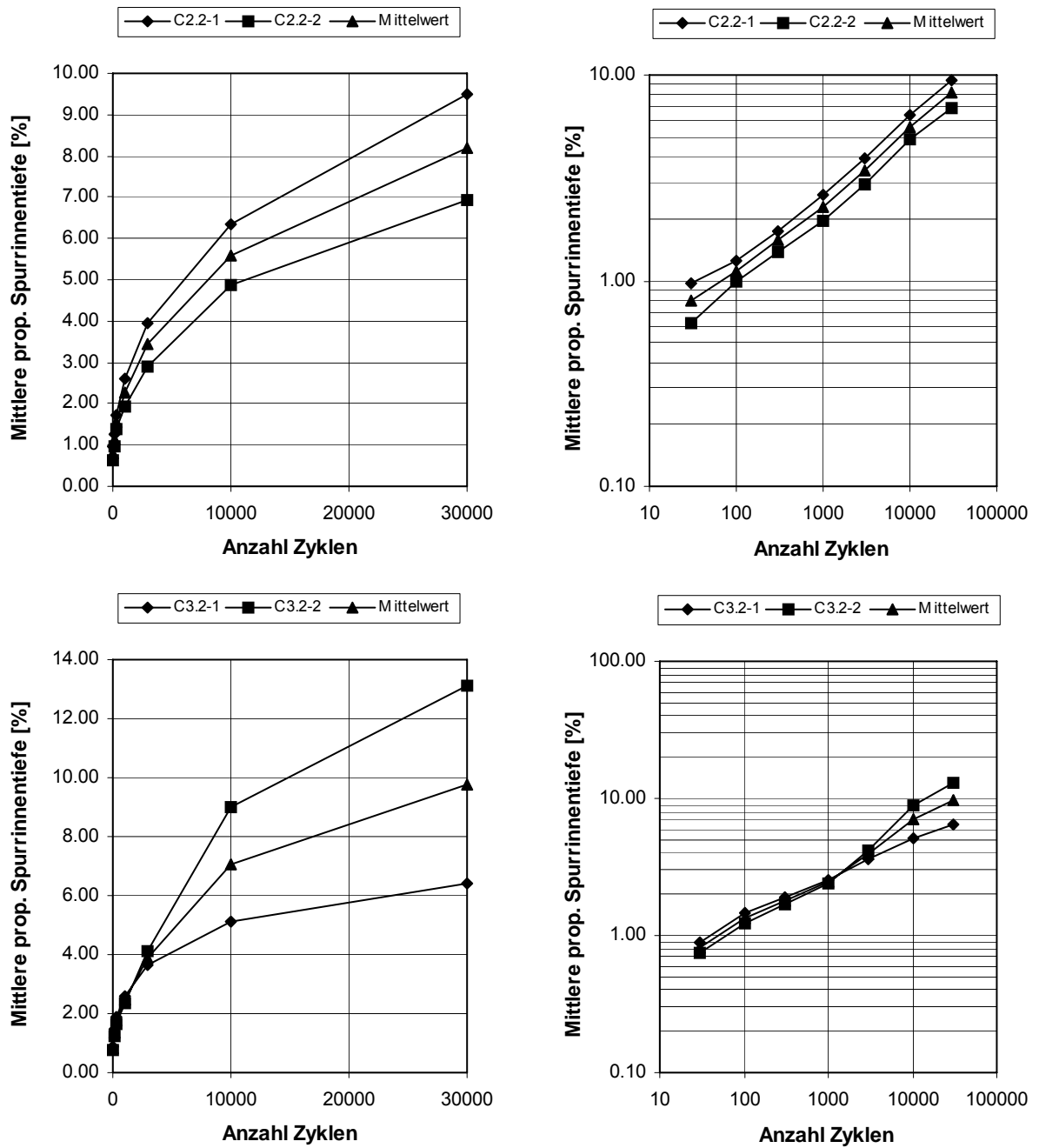


Abbildung 11.2 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke C, Einzelresultate

11.3.2 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke D

Tabelle 11.8 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken D: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Belagsausschnitt	Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyk- len	Proportionale Spurrin- nentiefe P_i [%]
D2.2	D2.2-1	30	0.42
		100	0.68
		300	1.04
		1'000	1.63
		3'000	3.24
		10'000	4.71
		30'000	5.54
	D2.2-2	30	0.32
		100	0.49
		300	0.76
		1'000	1.17
		3'000	2.00
		10'000	2.79
		30'000	3.34
D4.2	D4.2-1	30	0.77
		100	1.32
		300	2.10
		1'000	3.56
		3'000	6.86
		10'000	11.25
	D4.2-2	30	0.82
		100	1.48
		300	2.48
		1'000	4.92
		3'000	9.72
		10'000	13.53

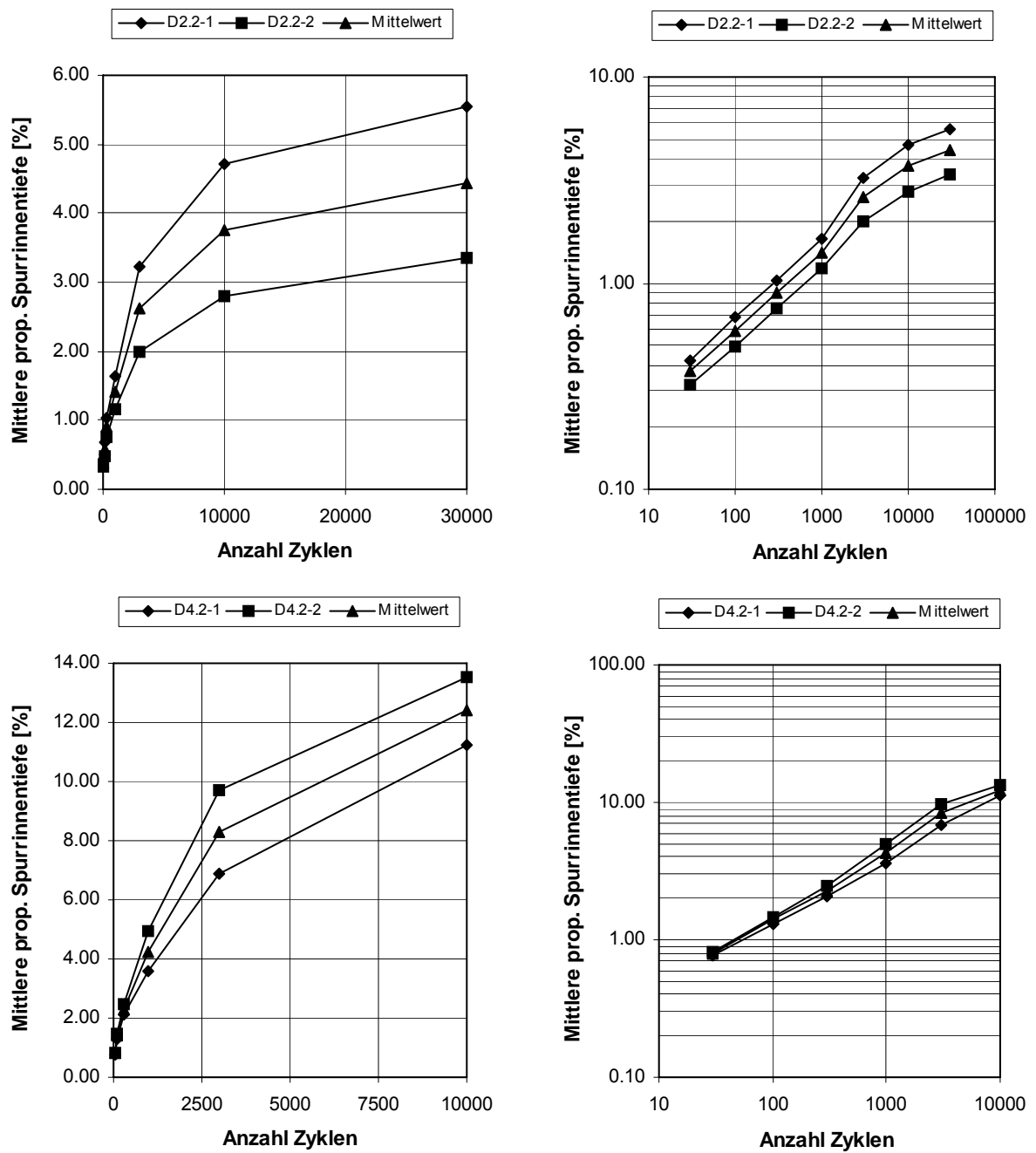


Abbildung 11.3 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke D, Einzelresultate.

11.3.3 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke E

Tabelle 11.9 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken E: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Belagsausschnitt	Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
E1.1	E1.1-1	30	1.12
		100	2.59
		300	5.00
		1'000	10.84
	E1.1-2	30	1.27
		100	3.06
		300	5.47
		1'000	11.79

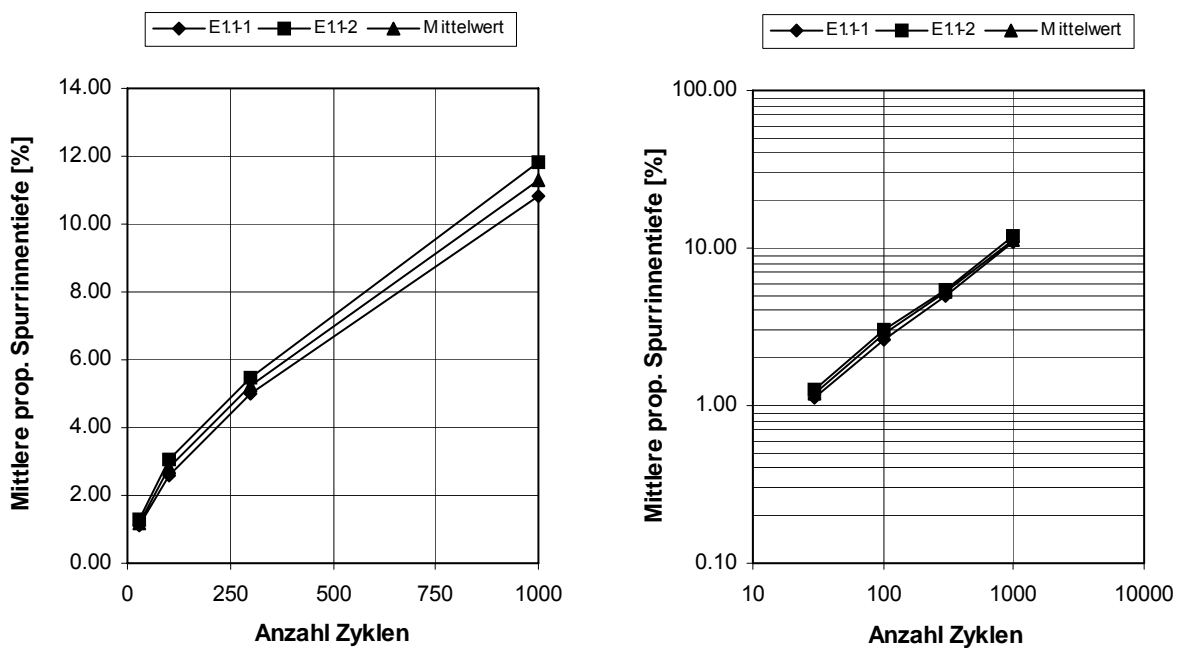


Abbildung 11.4 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke E, Einzelresultate.

11.3.4 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke F

Tabelle 11.10 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken F: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Belagsausschnitt	Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrin- nentiefe P_i [%]
F1.2	F1.2-1	30	0.91
		100	1.03
		300	1.25
		1'000	1.47
		3'000	1.74
		10'000	2.15
		30'000	2.51
	F1.2-2	30	1.06
		100	1.32
		300	1.56
		1'000	1.79
		3'000	2.06
		10'000	2.42
		30'000	2.73
F2.1	F2.1-1	30	0.39
		100	0.65
		300	0.85
		1'000	1.03
		3'000	1.34
		10'000	1.73
		30'000	2.06
	F2.1-2	30	0.46
		100	0.69
		300	0.94
		1'000	1.15
		3'000	1.48
		10'000	1.87
		30'000	2.18

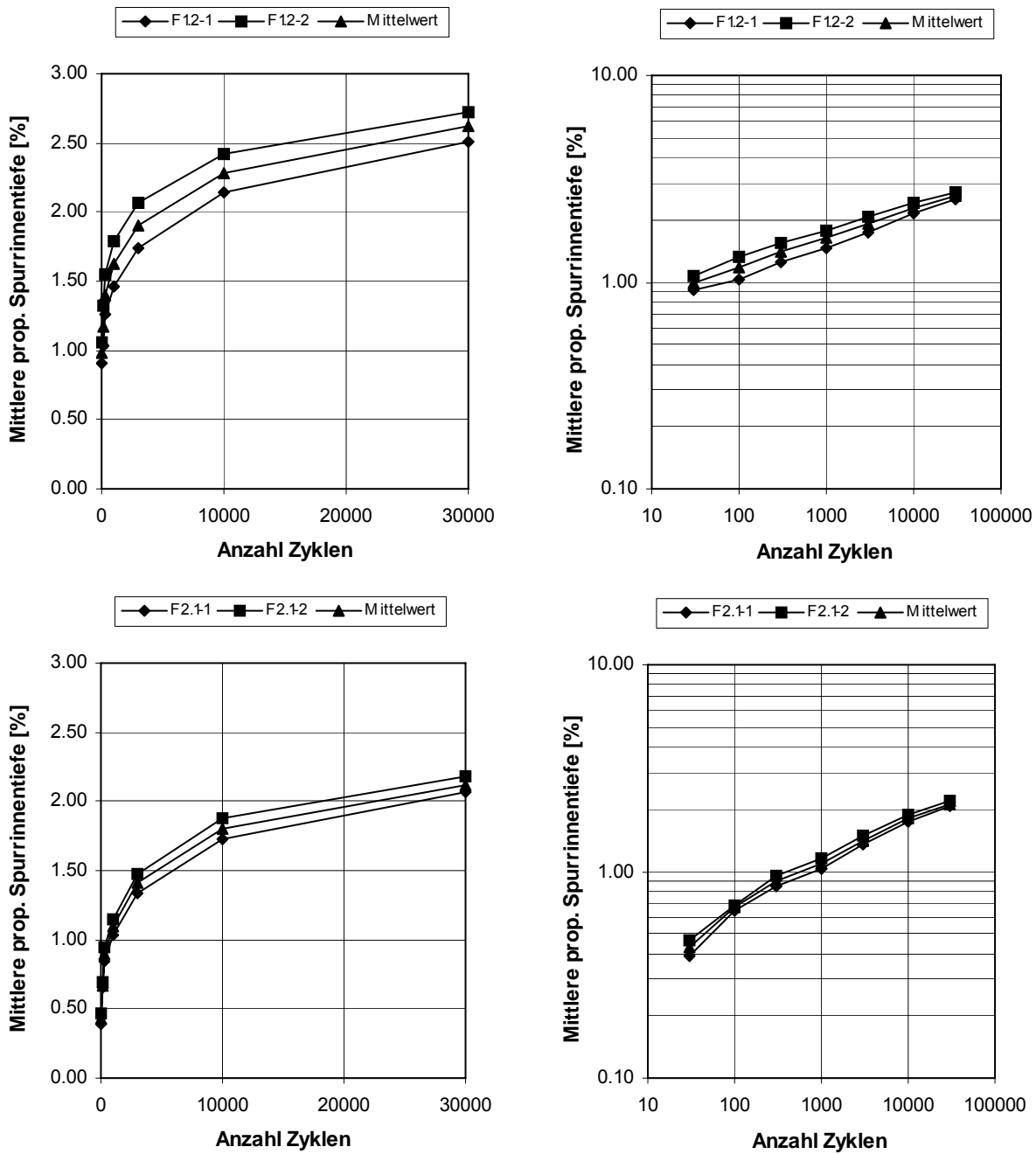


Abbildung 11.5 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke F, Einzelresultate.

11.3.5 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke G

Tabelle 11.11 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken G: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Belagsausschnitt	Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyk- len	Proportionale Spurrin- nentiefe P_i [%]
G1.1	G1.1-1	30	1.12
		100	2.59
		300	5.00
		1'000	10.84
	G1.1-2	30	1.27
		100	3.06
		300	5.47
		1'000	11.79
G2.1	G2.1-1	30	1.60
		100	3.14
		300	6.45
		1'000	13.25
	G2.1-2	30	1.36
		100	2.61
		300	5.42
		1'000	10.51

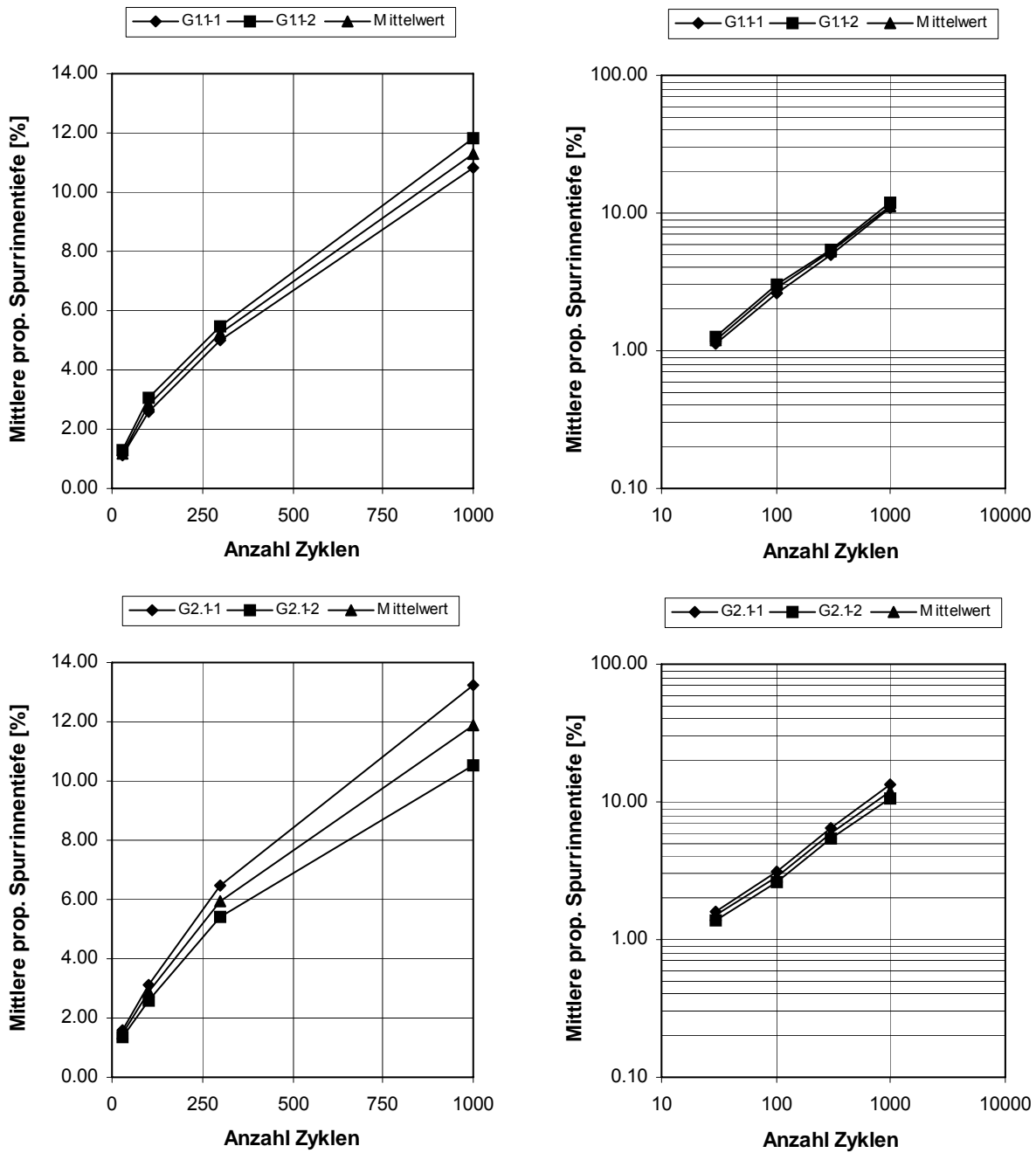


Abbildung 11.6 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke G, Einzelresultate.

11.3.6 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke H

Tabelle 11.12 Belagsausschnitte der Autobahnstrecken H: Ergebnisse der Spurbildungsprüfung

Belagsausschnitt	Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinentiefe P_i [%]
H2.1	H2.1-1	30	0.97
		100	1.54
		300	2.18
		1'000	3.05
		3'000	4.64
		10'000	7.21
		30'000	8.53
	H2.1-1	30	0.96
		100	1.47
		300	2.07
		1'000	2.83
		3'000	4.29
		10'000	6.36
		30'000	7.58
H2.2	H2.2-1	30	0.59
		100	0.88
		300	1.20
		1'000	1.36
		3'000	1.72
		10'000	2.29
		30'000	2.68
	H2.2-2	30	0.59
		100	0.92
		300	1.21
		1'000	1.55
		3'000	1.96
		10'000	2.44
		30'000	2.91

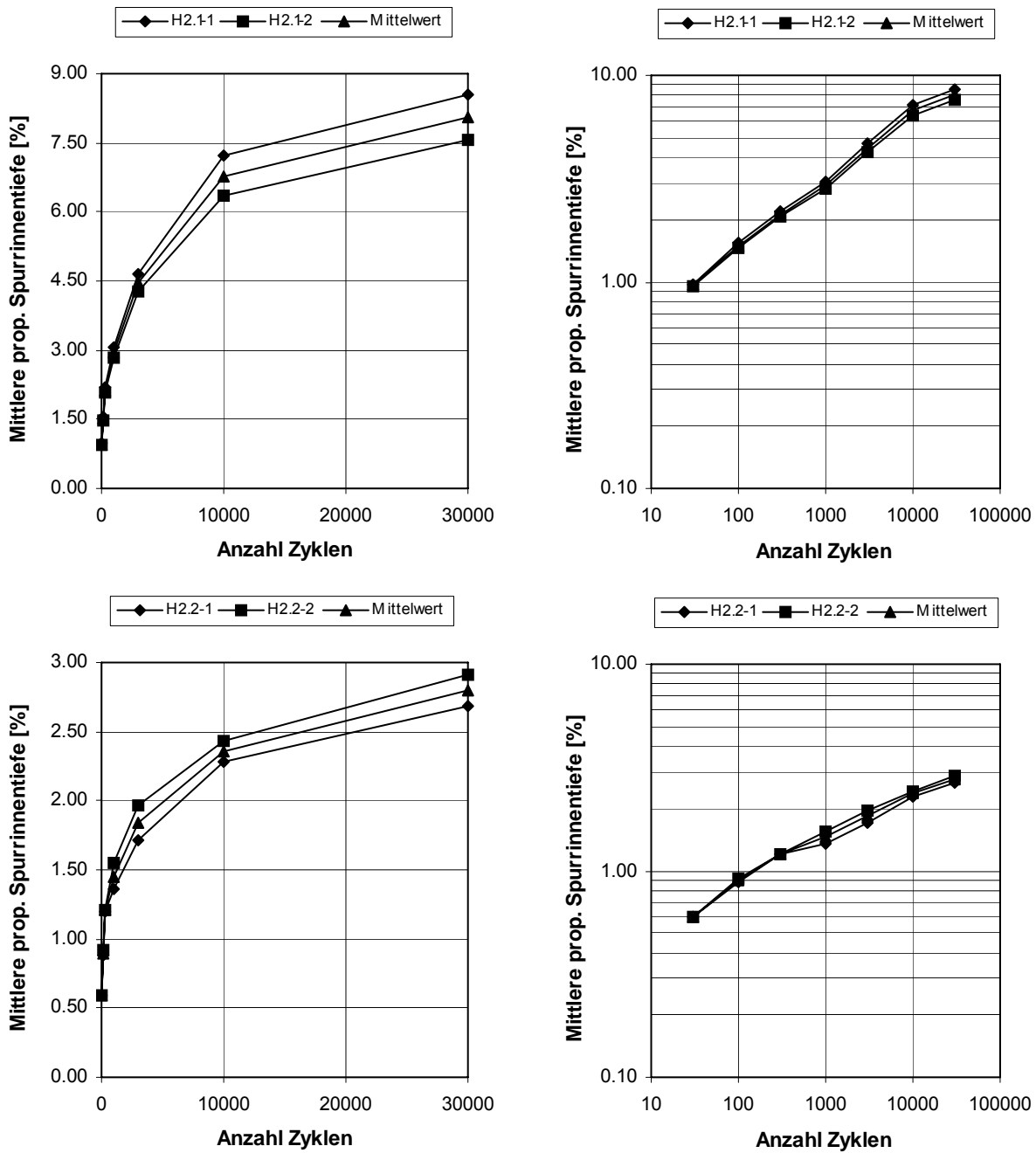


Abbildung 11.7 Belagsausschnitt aus Autobahnstrecke H, Einzelresultate.

11.4 Belagsausschnitte aus dem ETH-Rundlauf (U2000)

11.4.1 Belagsausschnitt R1

Tabelle 11.13 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R1

Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
R1-1	30	0.75
	100	1.16
	300	1.63
	1'000	2.28
	3'000	3.05
	10'000	3.85
	30'000	4.61
R1-2	30	0.73
	100	1.07
	300	1.46
	1'000	1.94
	3'000	2.54
	10'000	3.13
	30'000	3.67

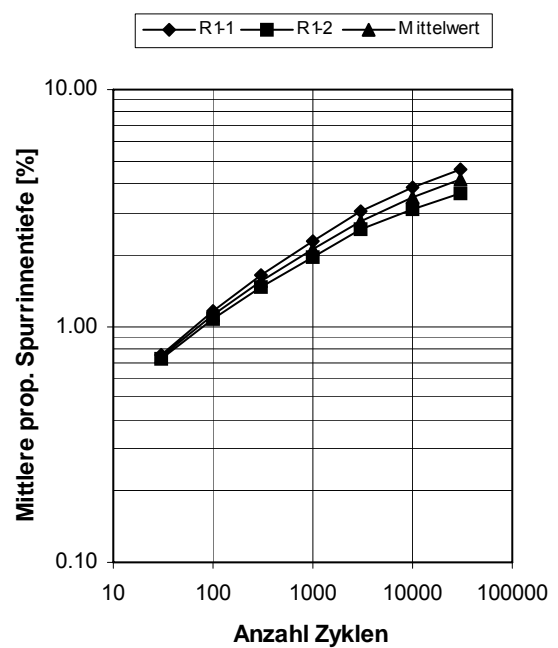
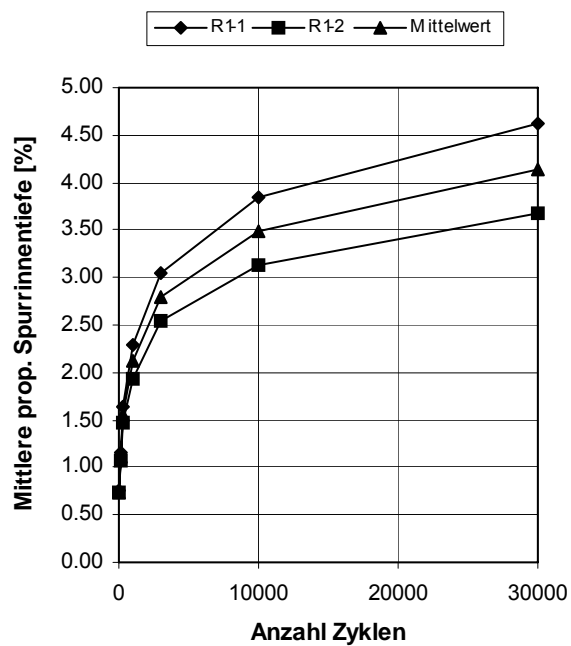


Abbildung 11.8 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R1, Einzelresultate.

11.4.2 Belagsausschnitt R2

Tabelle 11.14 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R2

Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinntiefe P_i [%]
R2-1	30	0.81
	100	1.16
	300	1.52
	1'000	1.73
	3'000	2.40
	10'000	2.96
	30'000	3.58
R2-2	30	0.79
	100	1.07
	300	1.36
	1'000	1.52
	3'000	2.13
	10'000	2.55
	30'000	3.19

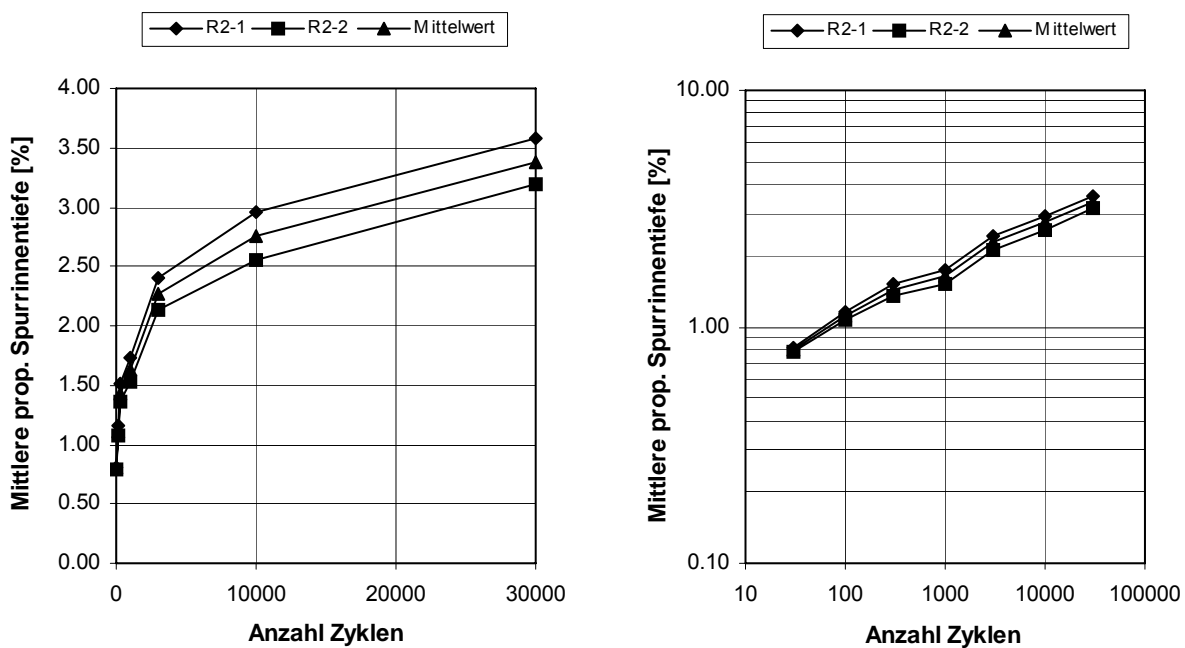


Abbildung 11.9 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R2, Einzelresultate.

11.4.3 Belagsausschnitt R3

Tabelle 11.15 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R3

Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
R3-1	30	1.04
	100	1.66
	300	2.26
	1'000	2.95
	3'000	3.59
	10'000	4.40
	30'000	5.17
R3-2	30	0.93
	100	1.56
	300	2.25
	1'000	3.17
	3'000	3.95
	10'000	5.17
	30'000	7.31

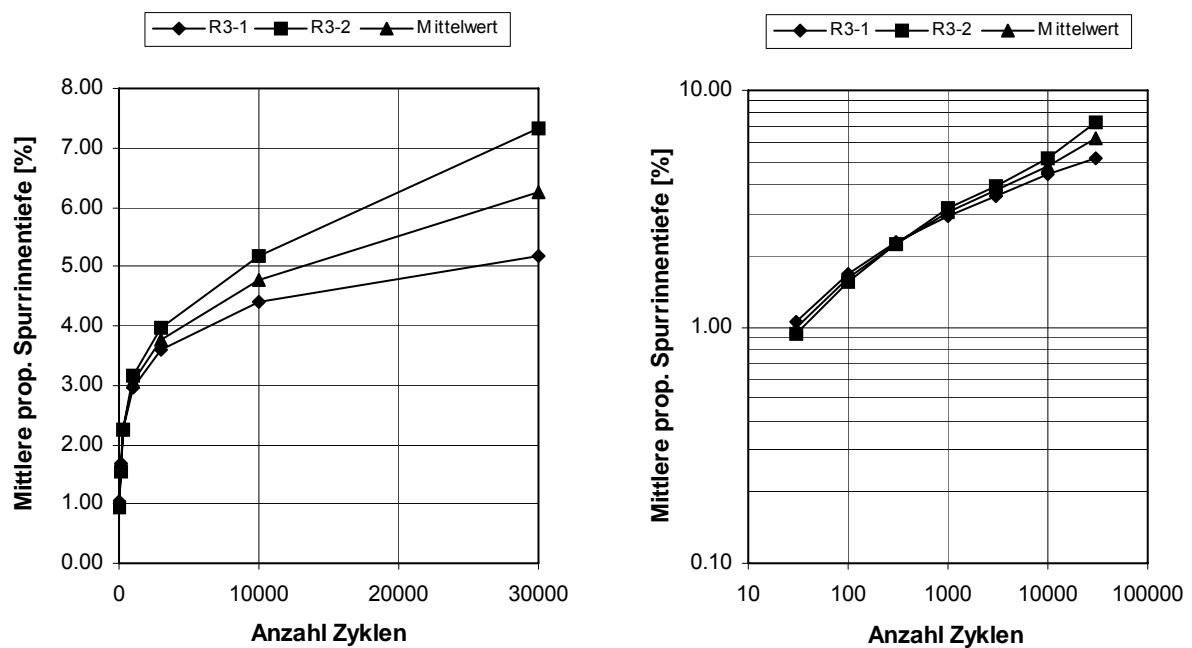


Abbildung 11.10 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R3, Einzelresultate.

11.4.4 Belagsausschnitt R4

Tabelle 11.16 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R4

Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinntiefe P_i [%]
R4-1	30	0.97
	100	1.45
	300	1.99
	1'000	2.66
	3'000	3.45
	10'000	4.29
	30'000	5.03
R4-2	30	0.94
	100	1.35
	300	1.75
	1'000	2.22
	3'000	2.79
	10'000	3.43
	30'000	3.98

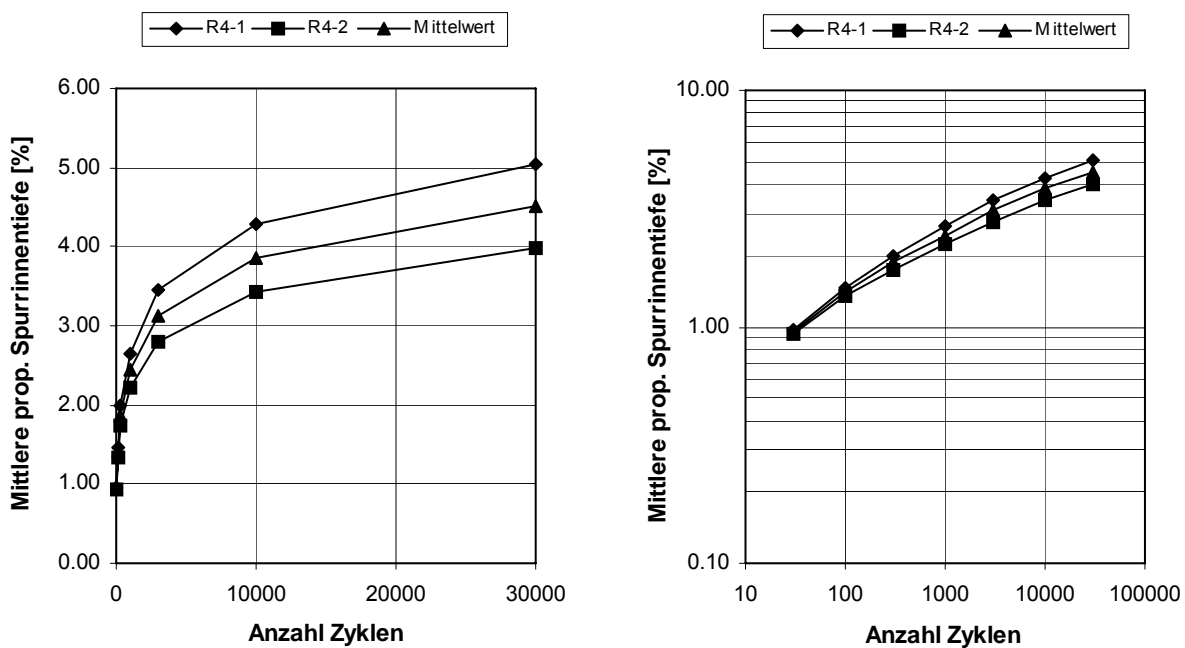


Abbildung 11.11 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R4, Einzelresultate.

11.4.5 Belagsausschnitt R5

Tabelle 11.17 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt R5

Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
R5-1	30	1.42
	100	2.11
	300	2.86
	1'000	3.71
	3'000	4.74
	10'000	5.74
	30'000	6.54
R5-2	30	0.84
	100	1.37
	300	1.93
	1'000	2.58
	3'000	3.37
	10'000	4.23
	30'000	4.88

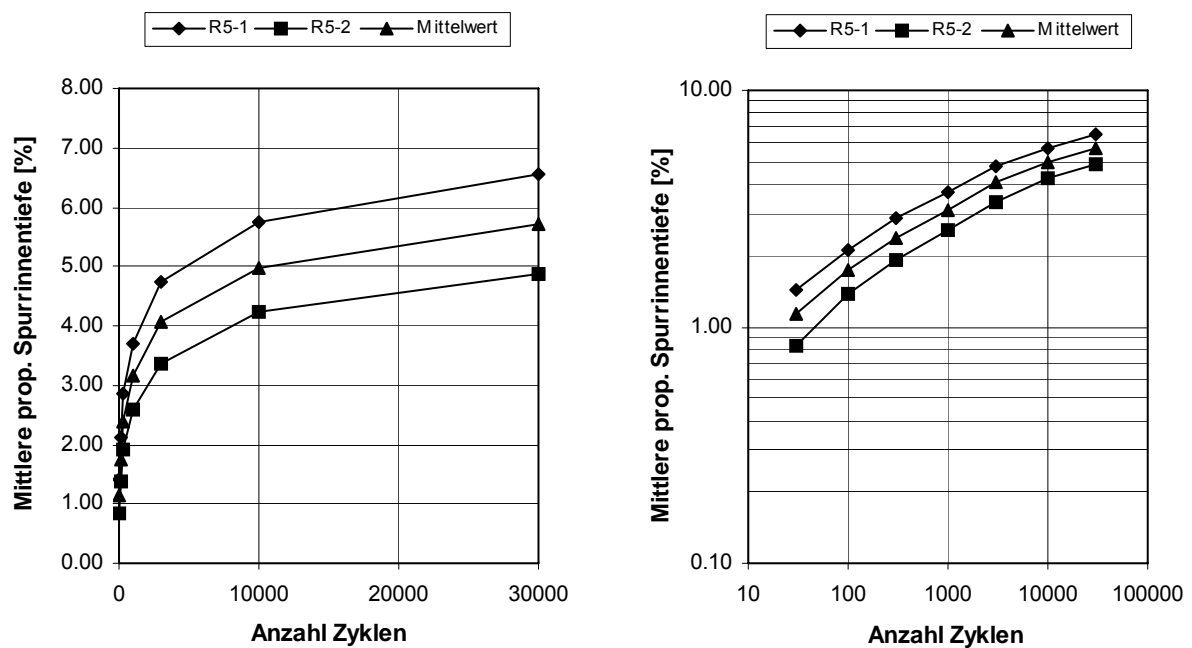


Abbildung 11.12 Belagsausschnitt aus dem ETH-Rundlauf R5, Einzelresultate.

11.5 Übrige Belagsausschnitte

11.5.1 Belagsausschnitt Arisdorf, Ari

Tabelle 11.18 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt Arisdorf

Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
Ari-1	30	0.88
	100	1.87
	300	3.59
	1'000	6.36
	3'000	13.30
Ari-2	30	0.70
	100	1.20
	300	1.82
	1'000	2.85
	3'000	5.19

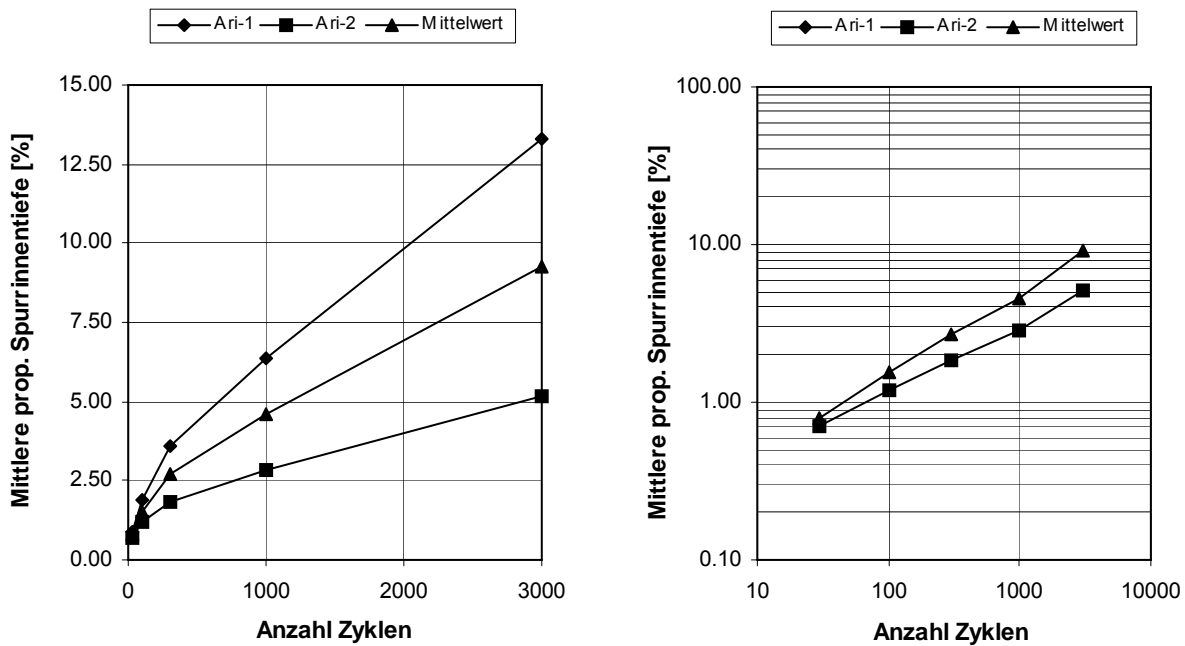


Abbildung 11.13 Belagsausschnitt Arisdorf, Einzelresultate.

11.5.2 Belagsausschnitt A3-GA

Tabelle 11.19 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt A3-GA

Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
A3-GA-1	30	3.01
	100	4.45
	300	9.78
A3-GA-2	30	3.04
	100	4.37
	300	8.88

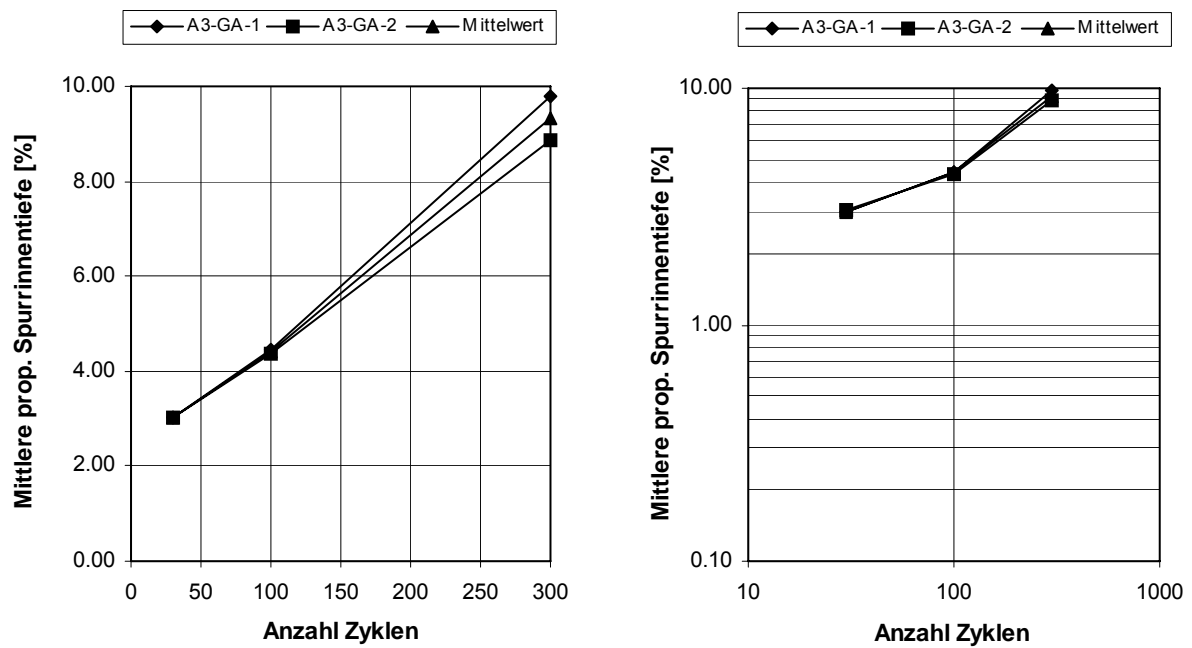


Abbildung 11.14 Belagsausschnitt A3-GA, Einzelresultate.

11.5.3 Belagsausschnitt A3-SMA, Birrfeld

Tabelle 11.20 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt A3-SMA

Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
A3-SMA-1	30	1.17
	100	2.18
	300	3.58
	1'000	6.04
	3'000	10.87
	10'000	14.12
A3-SMA-2	30	0.93
	100	1.96
	300	3.23
	1'000	5.51
	3'000	9.53
	10'000	11.51

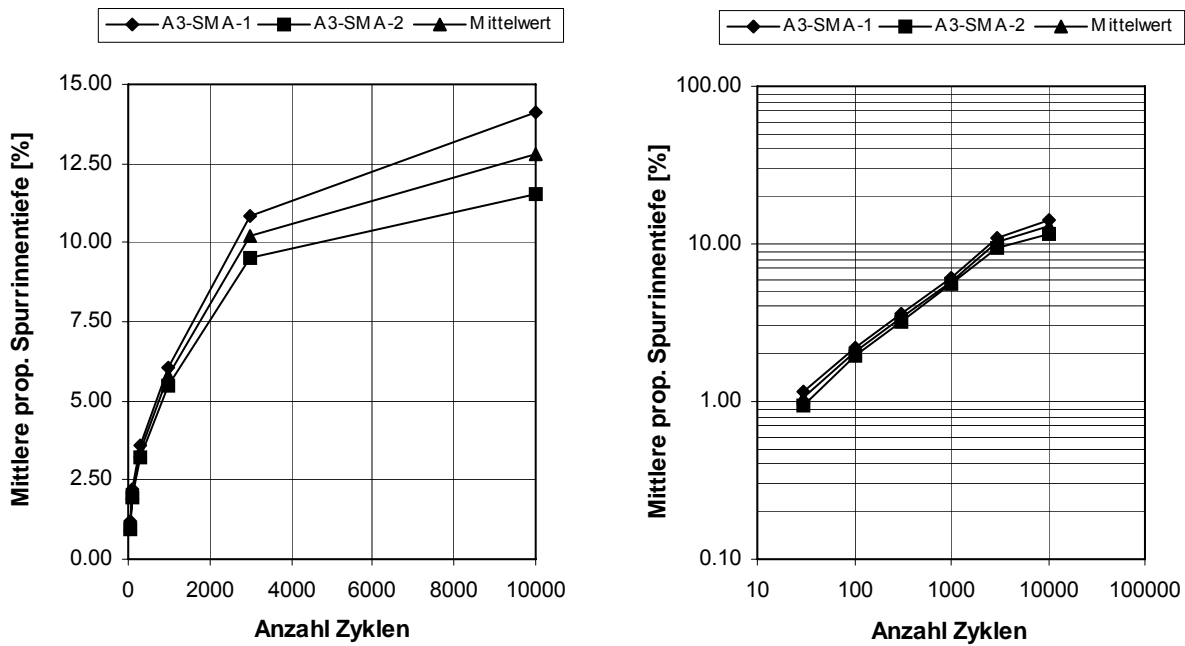


Abbildung 11.15 Belagsausschnitt A3-SMA, Einzelresultate.

11.5.4 Belagsausschnitt Oftringen Oft A1, Offenporiger Asphalt

Tabelle 11.21 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt Oftringen A1

Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
Oft-1	30	1.07
	100	1.47
	300	1.80
	1'000	2.13
	3'000	2.56
	10'000	2.92
	30'000	3.45
Oft-2	30	0.53
	100	0.93
	300	1.23
	1'000	1.74
	3'000	2.16
	10'000	2.56
	30'000	3.76

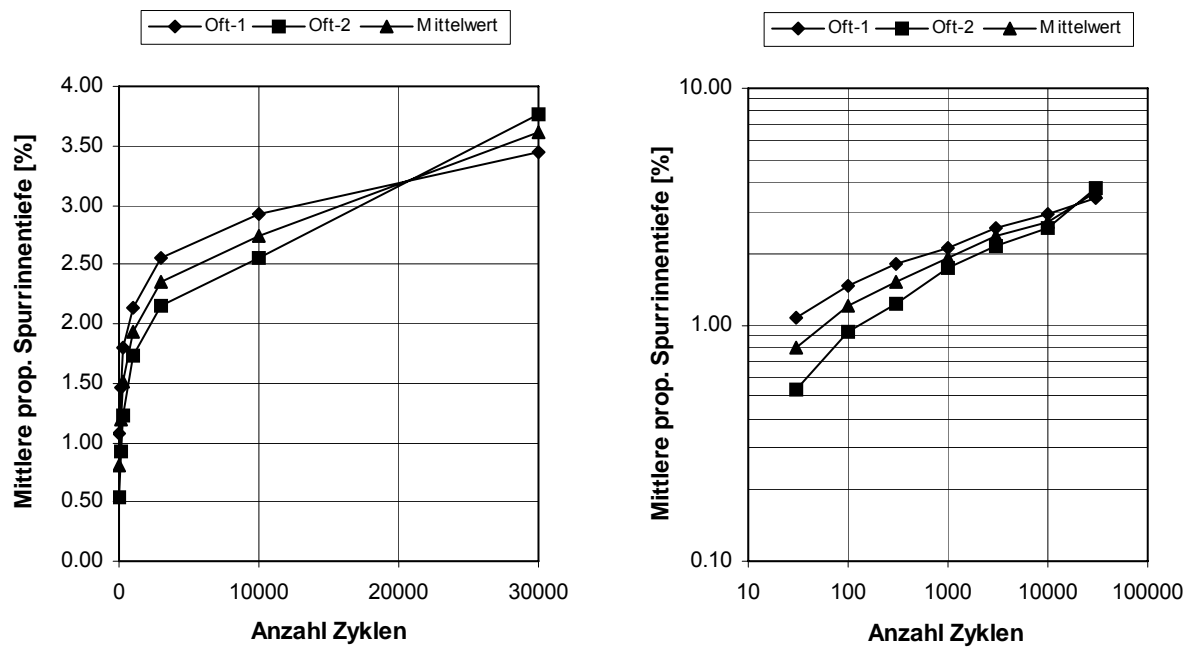


Abbildung 11.16 Belagsausschnitt Oftringen, Einzelresultate.

11.5.5 Belagsausschnitt Chiasso, Chi

Tabelle 11.22 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für Belagsausschnitt Chiasso

Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
Chi-1	30	0.85
	100	1.41
	300	2.51
	1'000	4.53
	3'000	8.99
Chi-2	30	0.74
	100	1.36
	300	2.30
	1'000	3.87
	3'000	7.98

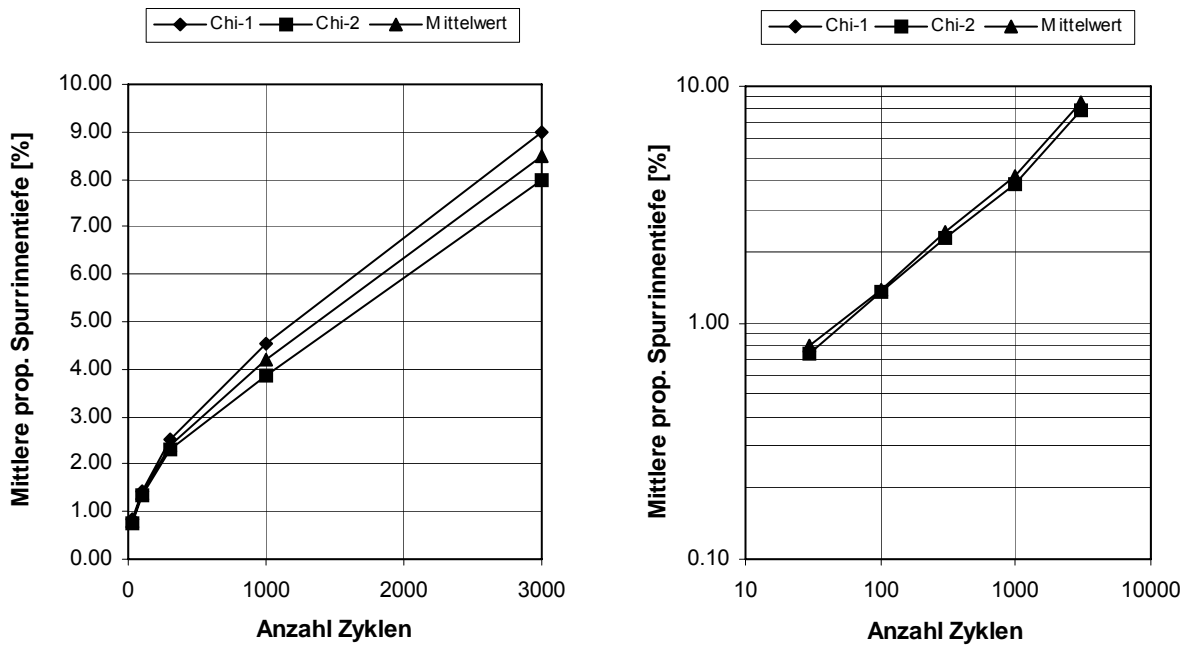


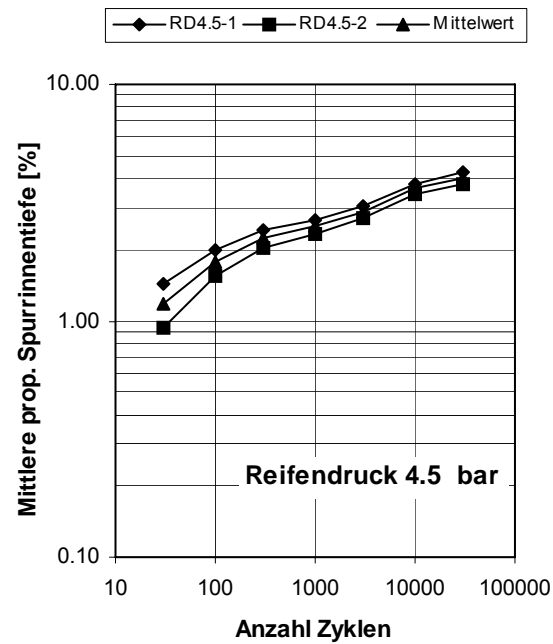
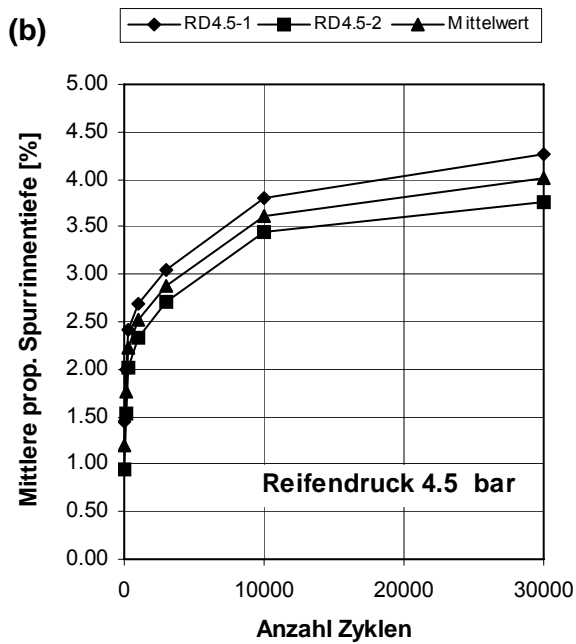
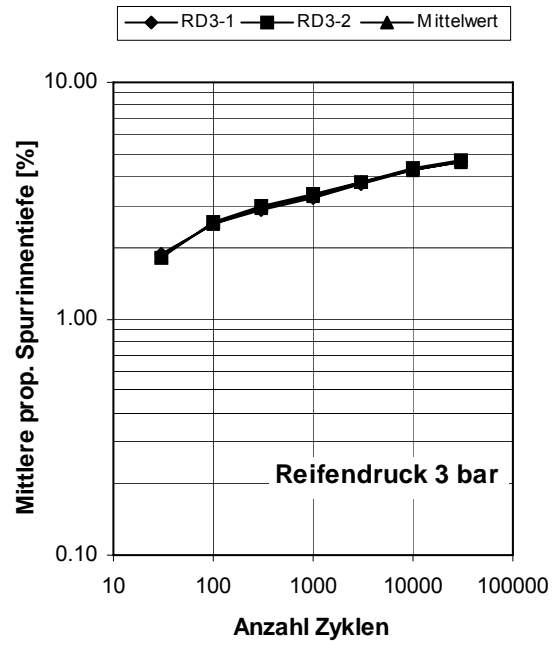
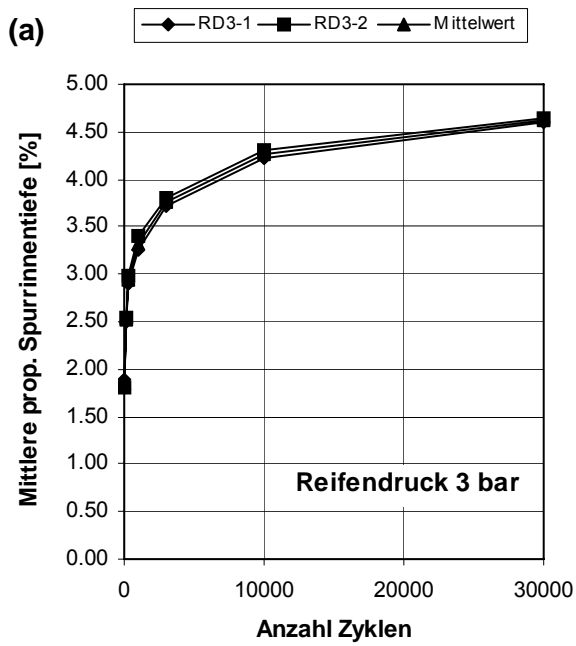
Abbildung 11.17 Belagsausschnitt Chiasso, Einzelresultate.

11.6 Einfluss des Reifendruckes

Tabelle 11.23 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung an AB11 S für verschiedene Reifendrücke

Reifendruck [bar]	Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
3.0	RD3-1	30	1.88
		100	2.50
		300	2.90
		1'000	3.25
		3'000	3.71
		10'000	4.22
		30'000	4.60
	RD3-2	30	1.80
		100	2.54
		300	2.97
		1'000	3.40
		3'000	3.80
		10'000	4.30
		30'000	4.64
4.5	RD4.5-1	30	1.44
		100	1.99
		300	2.42
		1'000	2.69
		3'000	3.05
		10'000	3.80
		30'000	4.26
	RD4.5-2	30	0.94
		100	1.53
		300	2.02
		1'000	2.34
		3'000	2.70
		10'000	3.44
		30'000	3.76

Reifendruck [bar]	Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyk- len	Proportionale Spur- rinnentiefe P_i [%]
6.0	RD6-1	30	1.61
		100	2.27
		300	2.82
		1'000	3.28
		3'000	3.83
		10'000	4.62
		30'000	5.14
	RD6-2	30	1.68
		100	2.31
		300	2.87
		1'000	3.40
		3'000	4.01
		10'000	4.75
		30'000	5.33



Fortsetzung der Abbildung siehe nächste Seite

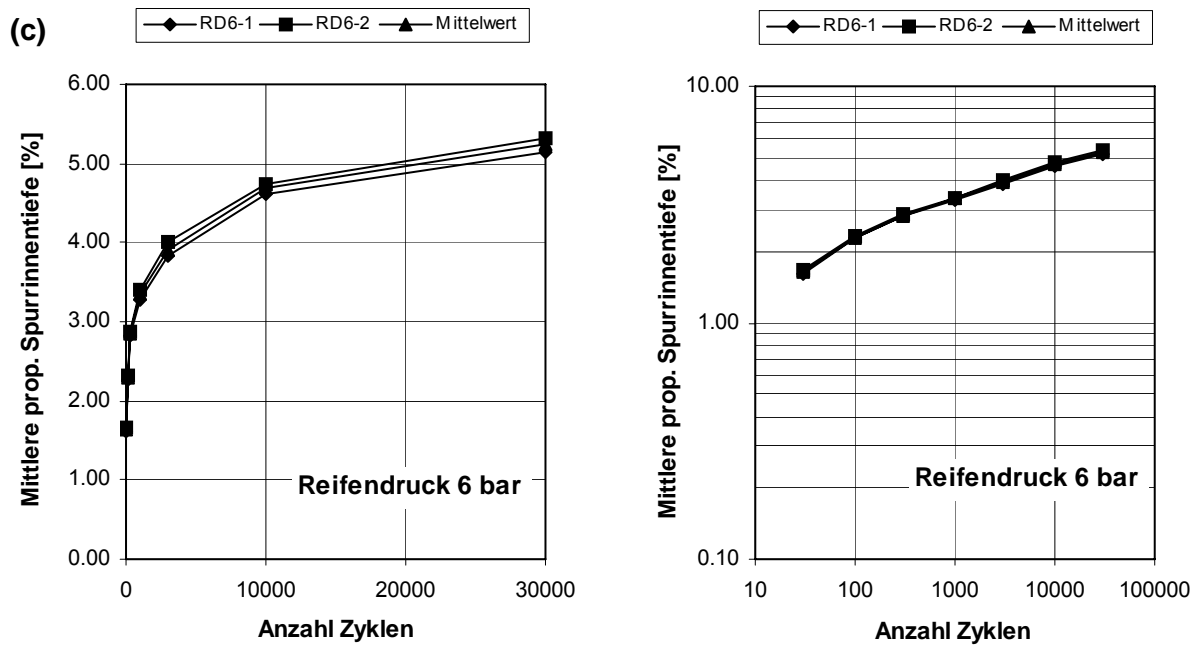


Abbildung 11.18 Einfluss des Reifendruckes, Einzelresultate: (a) – Serie RD3; (b) – Serie RD4.5; (c) – Serie RD6.

11.7 Einfluss der Randbedingungen

11.7.1 Vergleich verschiedener Halterungssysteme

Tabelle 11.24 Bezeichnung und Zuordnung der Prüfkörper

Breite (mm)	185		180	
	Klemmen	in Form belassen	Eingiessen (Epoxi)	Eingiessen (Zementmörtel)
PK1	X			
PK2		X		
PK3			X	
PK4				X

Tabelle 11.25 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für AB 11 S

Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]			
	Referenz	Klemmen	Epoxi	Zementmörtel
30	1.33	1.68	0.73	0.73
100	1.71	2.18	1.22	1.35
300	2.15	2.997	1.87	2.05
1000	2.74	4.04	2.94	3.25
3000	3.49	5.43	4.85	5.55
10000	4.21	6.72	9.32	10.31
30000	5.3	8.26	12.20	12.95
Hohlraumgehalt [%]	5.86	6.01	5.77	5.39

11.7.2 Seitliche Vermörtelung

Bezüglich der in der Form verdichteten Prüfkörper, siehe Abbildung 11.18. Die Einzelresultate der eingemörtelten Prüfkörper lauten:

Tabelle 11.26 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für AB11 S

Randbedingungen	Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinnentiefe P_i [%]
ausgeschnitten und eingegossen	RBM-1	30	1.43
		100	1.84
		300	2.31
		1'000	2.72
		3'000	3.51
		10'000	4.19
		30'000	4.87
	RBM-2	30	1.26
		100	1.69
		300	2.02
		1'000	2.43
		3'000	3.25
		10'000	3.99
		30'000	4.61

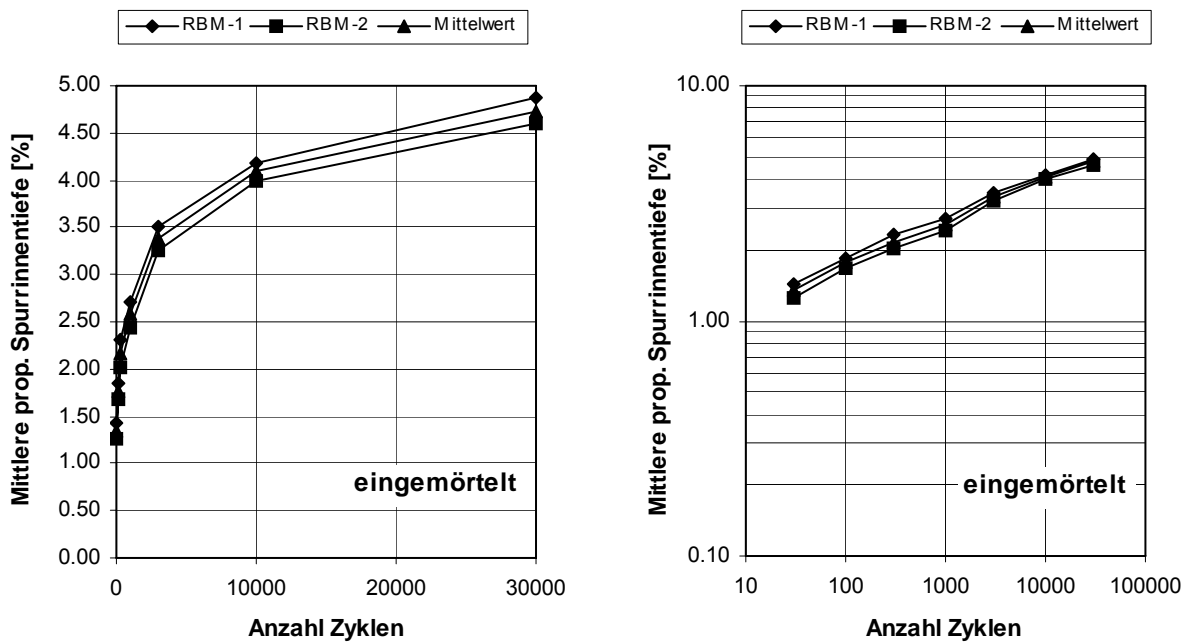


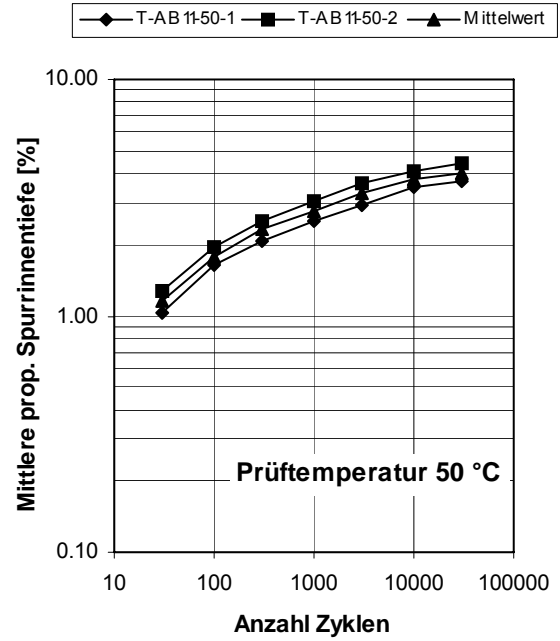
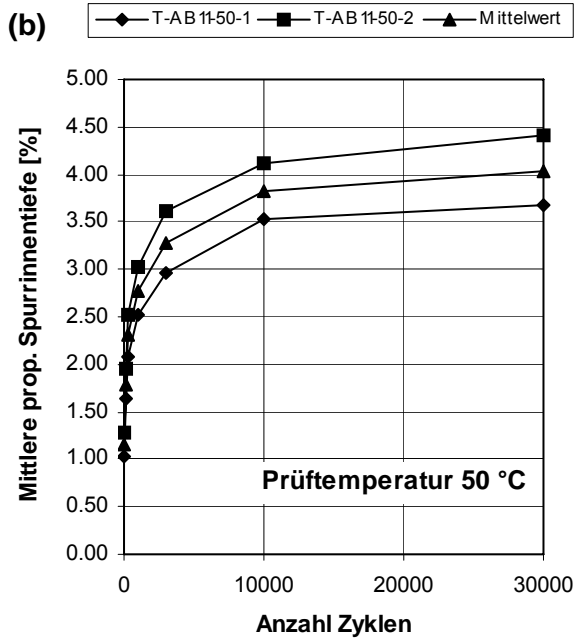
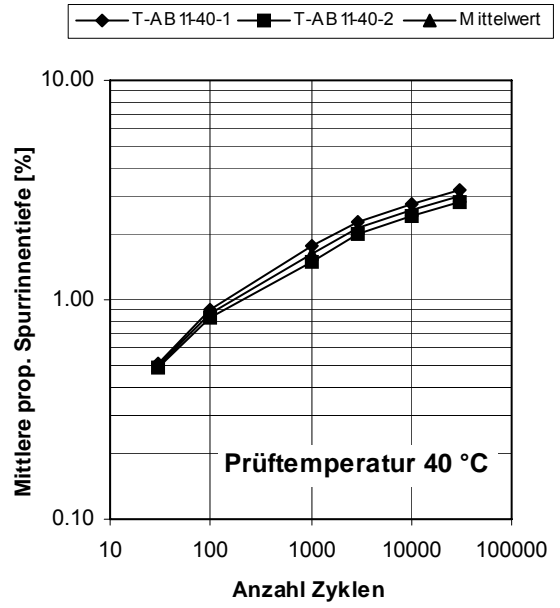
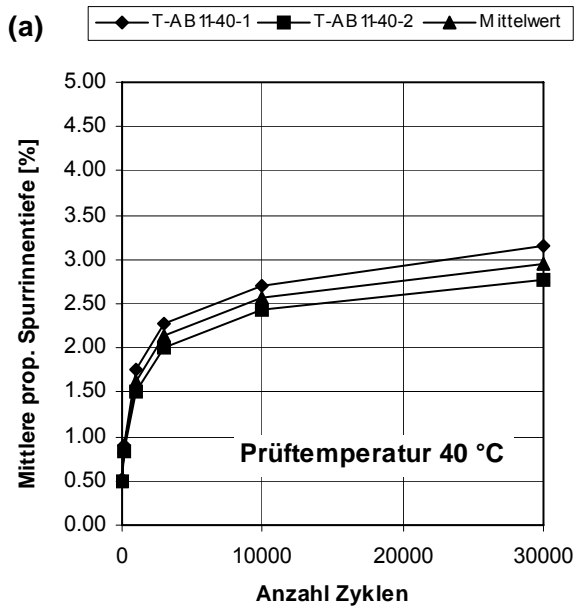
Abbildung 11.19 Einfluss der Randbedingungen: Einzelresultate für die eingemörtelten Prüfkörper

11.8 Einfluss der Prüftemperatur

Tabelle 11.27 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für verschiedene Mischgutsorten

Material	Prüftemperatur [°C]	Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinentiefe P_i [%]
Ab 11 S	40	T-AB11-40-1	30	0.51
			100	0.90
			1'000	1.75
			3'000	2.27
			10'000	2.71
			30'000	3.14
		T-AB11-40-2	30	0.49
			100	0.84
			1'000	1.50
			3'000	2.00
			10'000	2.43
			30'000	2.78
	50	T-AB11-50-1	30	1.03
			100	1.63
			300	2.09
			1'000	2.51
			3'000	2.96
			10'000	3.53
		T-AB11-50-2	30	1.29
			100	1.95
			300	2.53
			1'000	3.03
			3'000	3.61
			10'000	4.11
HMT 22 S	40	T-HMT22-40-1	30	0.13
			100	0.20
			300	0.41
			1'000	0.61
			3'000	0.61
			10'000	1.10
		T-HMT22-40-2	30	0.18
			100	0.32
			300	0.54
			1'000	0.78
			3'000	1.04
			10'000	1.52
	50	T-HMT22-50-1	30	0.54
			100	0.81
			300	0.92
			1'000	1.29
			3'000	2.00
			10'000	1.73
		T-HMT22-50-2	30	0.44
			100	0.70
			300	0.73
			1'000	1.05
			3'000	1.31
			10'000	1.40
30'000	1.53			

Material	Prüftemperatur [°C]	Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinentiefe P_i [%]
	60	T-HMT22-60-1	30	1.00
			100	1.39
			300	1.66
			1'000	1.89
			3'000	2.22
			10'000	2.57
			30'000	2.93
		T-HMT22-60-2	30	1.09
			100	1.52
			300	1.81
			1'000	2.15
			3'000	2.54
			10'000	2.95
			30'000	3.26
GA 8	40	T-GA8-40-1	30	0.27
			100	0.77
			300	1.26
			1'000	2.01
			3'000	3.29
			10'000	4.75
			30'000	6.74
		T-GA8-40-2	30	0.26
			100	0.70
			300	1.14
			1'000	1.94
			3'000	3.28
			10'000	4.92
			30'000	7.03
	50	T-GA8-50-1	30	1.30
			100	2.33
			300	3.60
			1'000	5.75
			3'000	8.50
			10'000	14.23
			T-GA8-50-2	30
100	2.43			
300	3.88			
1'000	6.31			
			3'000	9.69
			10'000	16.77



Fortsetzung der Abbildung siehe nächste Seite

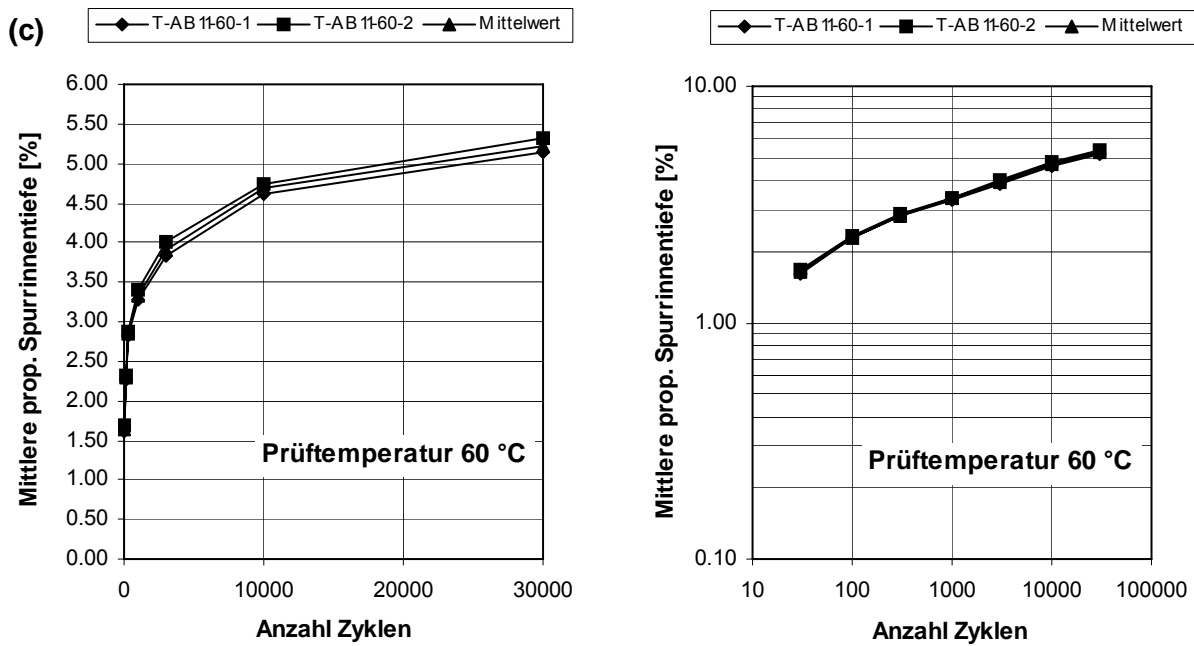
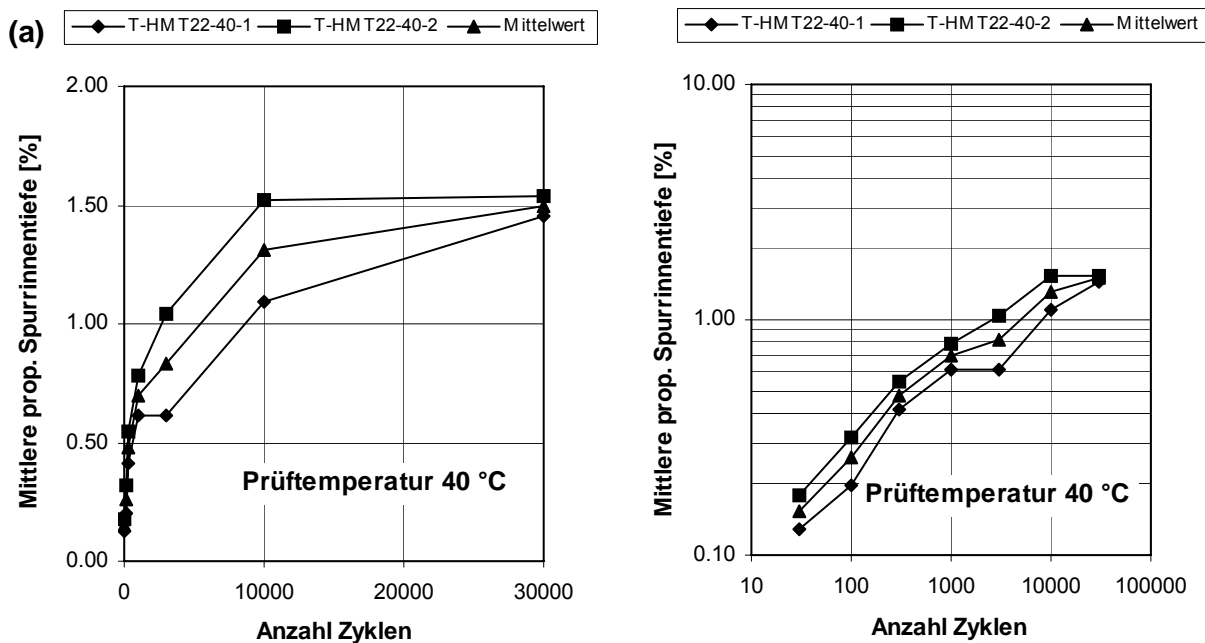


Abbildung 11.20 Einfluss der Prüftemperatur, Einzelresultate für das Mischgut AB 11 S: (a) – Serie T-AB11-40; (b) – Serie T-AB11-50; (c) – Serie T-AB11-60.



Fortsetzung der Abbildung siehe nächste Seite

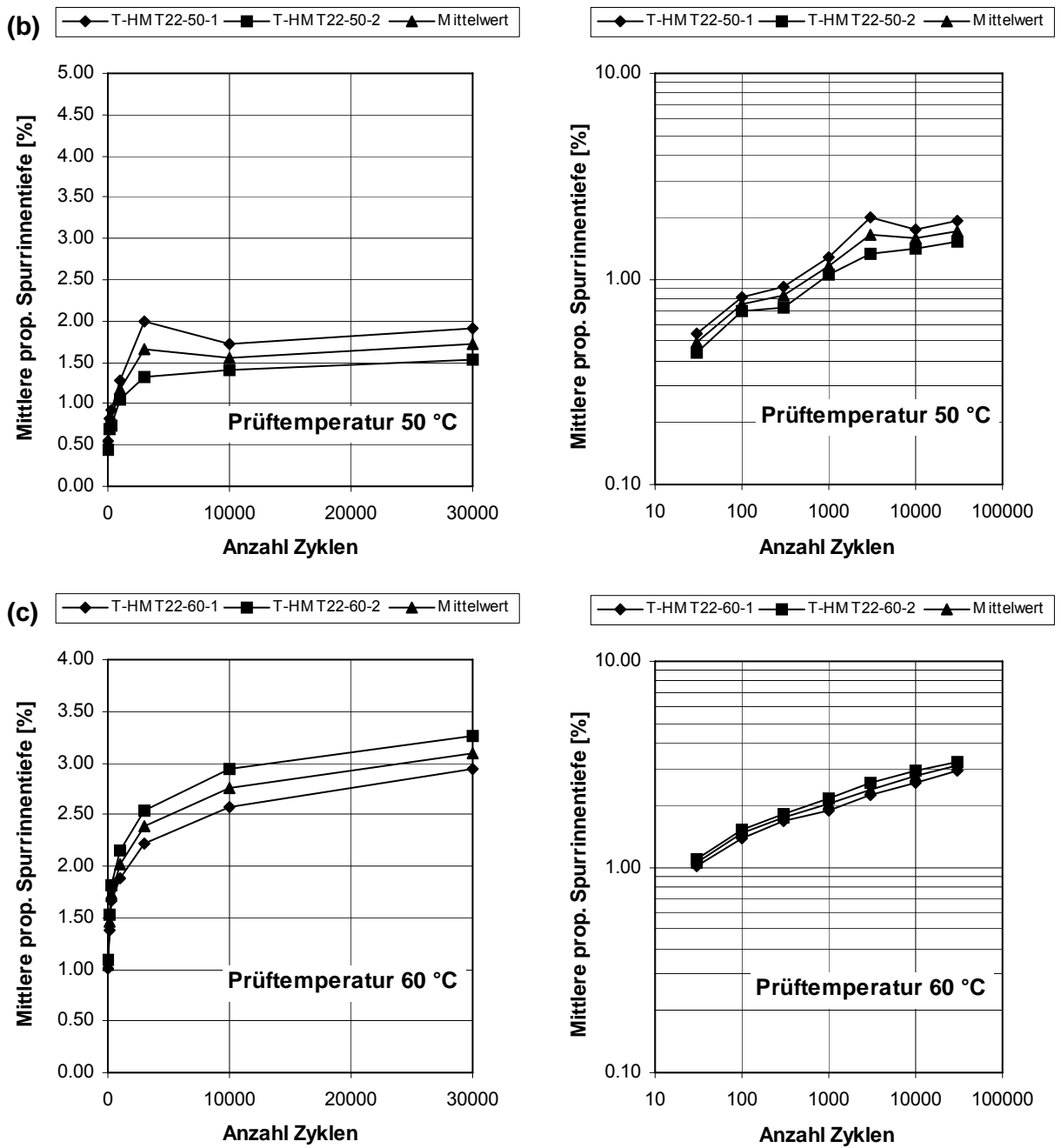


Abbildung 11.21 Einfluss der Prüftemperatur, Einzelresultate für das Mischgut HMT 22 S: (a) – Serie T-HMT22-40; (b) – Serie T-HMT22-50; (c) – Serie T-HMT22-60.

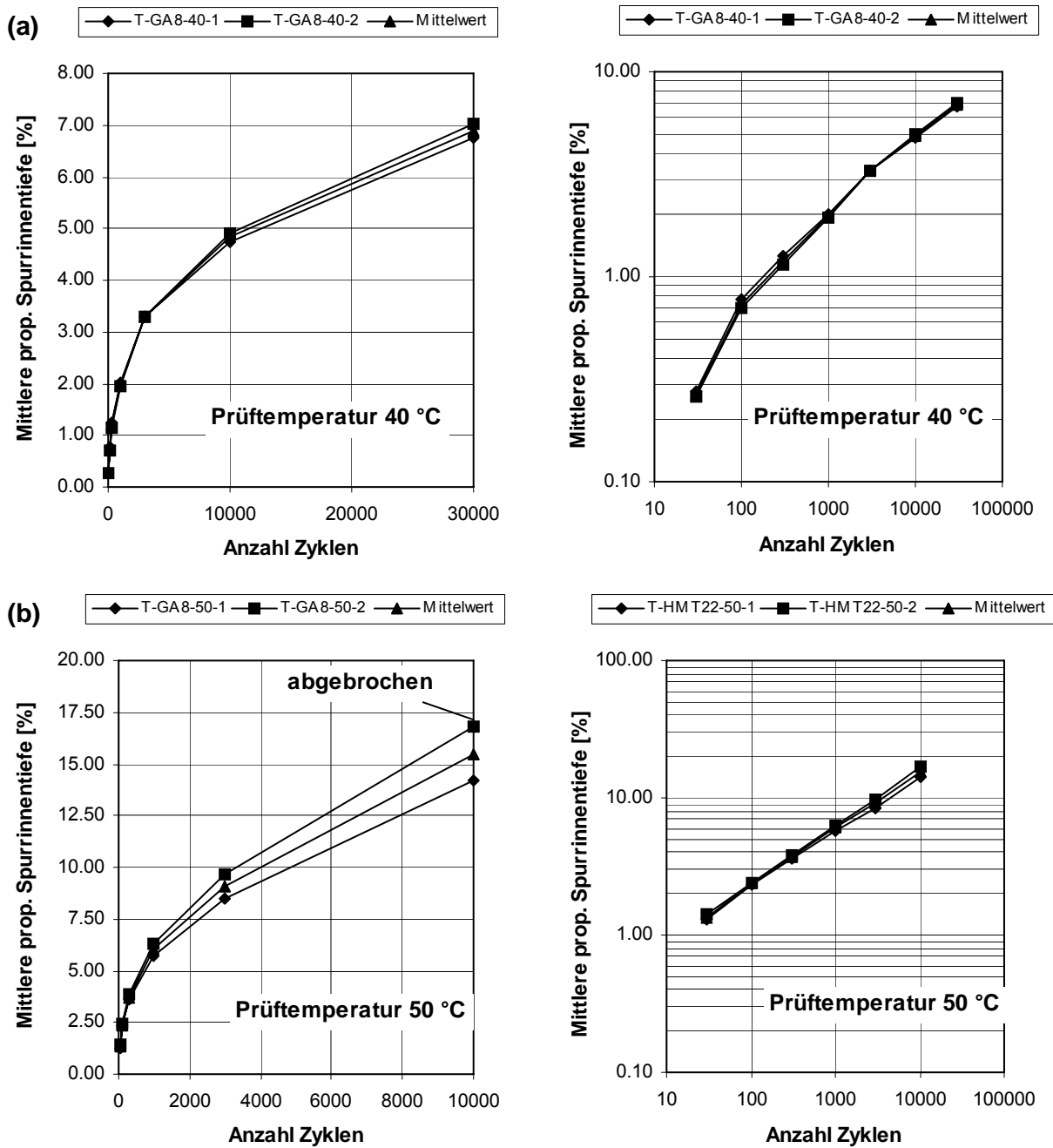


Abbildung 11.22 Einfluss der Prüftemperatur, Einzelresultate für das Mischgut GA 8: (a) – Serie T-GA8-40; (b) – Serie T-GA8-50.

11.9 Einfluss der Pausenzeit zwischen den Messungen

Tabelle 11.28 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für AB11 S

Pausenzeit zwischen den Messungen [min]	Prüfkörper- Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrin- nentiefe P_i [%]
4	Z-M-1	30	2.05
		100	2.69
		300	3.21
		1'000	3.66
		3'000	4.30
		10'000	5.14
		30'000	5.71
	Z-M-2	30	1.94
		100	2.59
		300	3.13
		1'000	3.55
		3'000	4.21
		10'000	4.93
		30'000	5.39

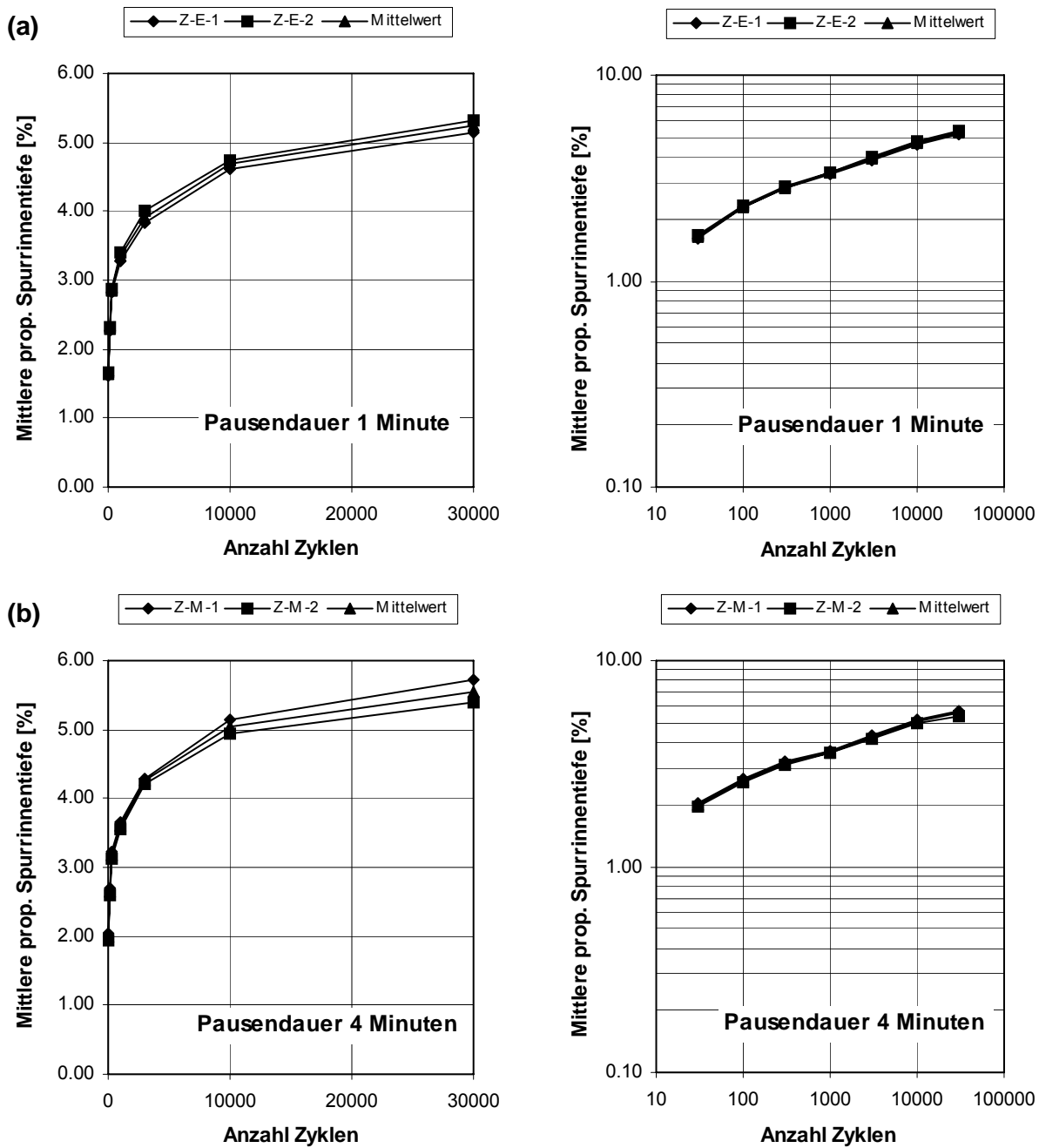


Abbildung 11.23 Einfluss der Pausendauer zwischen den Messungen, Einzelresultate: (a) – Serie Z-E; (b) – Serie Z-M

11.10 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung

Tabelle 11.29 Ergebnisse der Spurbildungsprüfung für AB11 S

Dauer der Prüfkörperlagerung	Prüfkörper-Bezeichnung	Anzahl Belastungszyklen	Proportionale Spurrinentiefe P_i [%]
6 Monate	A-6M-1	30	1.50
		100	1.73
		300	2.49
		1'000	2.86
		3'000	3.31
		10'000	3.83
		30'000	4.24
	A-6M-2	30	1.33
		100	1.63
		300	2.52
		1'000	3.04
		3'000	3.56
		10'000	4.16
		30'000	4.60

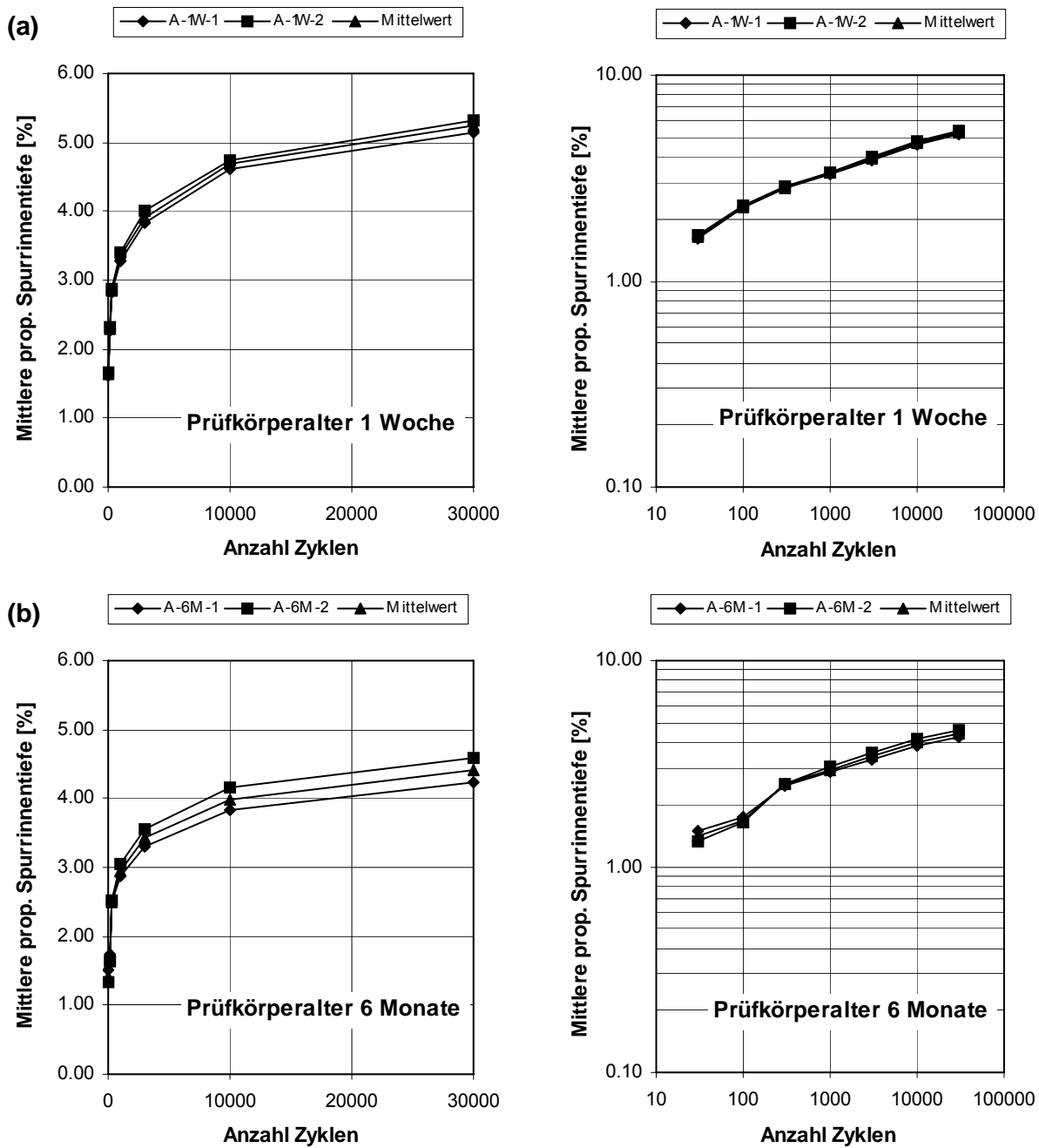


Abbildung 11.24 Einfluss der Dauer der Prüfkörperlagerung, Einzelresultate: (a) – Serie A-1W; (b) – Serie A-6M.

11.11 Einfluss der Prüfkörperdicke

Tabelle 11.30 Bezeichnung und Zuordnung der Prüfkörper innerhalb des Prüfprogramms

	Dicke (mm)	Zerschneiden in Einzelteile	
		Hohlraumgehalt und Rohdichte vor Spurbildungstest	Hohlraumgehalt und Rohdichte nach Spurbildungstest
PK 1.1	50	X	
PK 1.2	50	X	
PK 2.1	50		X
PK 2.2	50		X
PK 3.1	100	X	
PK 3.2	100	X	
PK 4.1	100		X
PK 4.2	100		X

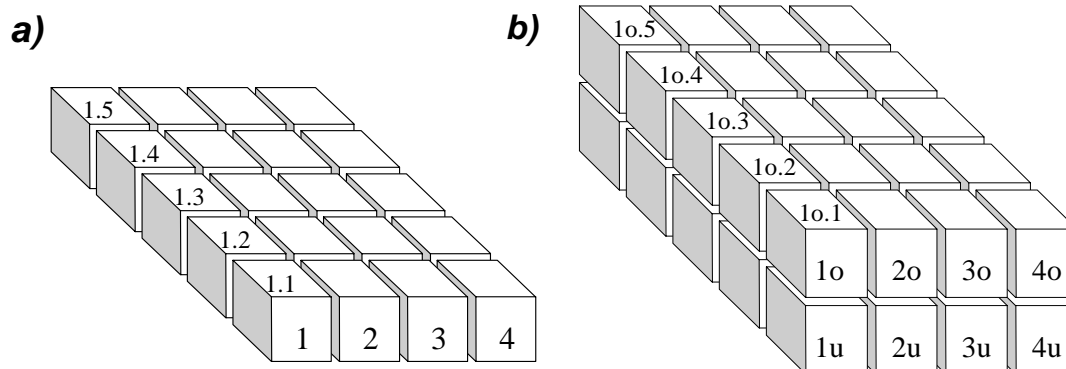


Abbildung 11.25 Bezeichnung der Prüfkörper a) mit Dicke 50 mm; b) mit Dicke 100 mm.

Tabelle 11.31 Mittelwerte Hohlraumgehalte AB11

	Nach Test: Mittelwerte 100mm Prüfkörper 1 und 2 obere Schicht				Vor Test: Mittelwerte 100mm Prüfkörper 3 und 4 obere Schicht			
	links	mitte l.	mitte r.	rechts	links	mitte l.	mitte r.	rechts
Abschnitt	1.1	2.1	3.1	4.1	1.1	2.1	3.1	4.1
Hohlraumgehalt	8.28	2.14	1.80	7.23	5.93	3.46	3.56	5.15
Abschnitt	1.2	2.2	3.2	4.2	1.2	2.2	3.2	4.2
Hohlraumgehalt	7.87	1.81	1.82	6.33	5.27	3.13	3.02	4.18
Abschnitt	1.3	2.3	3.3	4.3	1.3	2.3	3.3	4.3
Hohlraumgehalt	7.51	1.91	1.68	6.07	5.30	3.58	3.31	4.57
Abschnitt	1.4	2.4	3.4	4.4	1.4	2.4	3.4	4.4
Hohlraumgehalt	7.80	2.15	1.98	5.48	5.09	3.31	3.60	4.73
Abschnitt	1.5	2.5	3.5	4.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Hohlraumgehalt	7.92	2.72	2.30	7.26	6.14	3.76	3.57	5.56

	dito untere Schicht				dito untere Schicht			
	links	mitte l.	mitte r.	rechts	links	mitte l.	mitte r.	rechts
Abschnitt	5.1	6.1	7.1	8.1	5.1	6.1	7.1	8.1
Hohlraumgehalt	8.77	6.19	5.77	7.60	6.54	4.19	4.01	5.86
Abschnitt	5.2	6.2	7.2	8.2	5.2	6.2	7.2	8.2
Hohlraumgehalt	5.65	3.26	3.49	5.25	7.33	5.45	5.53	6.73
Abschnitt	5.3	6.3	7.3	8.3	5.3	6.3	7.3	8.3
Hohlraumgehalt	5.42	3.05	3.15	4.53	6.67	4.61	5.08	6.43
Abschnitt	5.4	6.4	7.4	8.4	5.4	6.4	7.4	8.4
Hohlraumgehalt	5.76	3.31	3.59	5.18	7.13	5.14	5.43	6.80
Abschnitt	5.5	6.5	7.5	8.5	5.5	6.5	7.5	8.5
Hohlraumgehalt	8.62	6.42	6.37	8.06	10.14	8.25	8.05	9.29

	Nach Test; Mittelwerte 50mm Prüfkörper 1 und 2				Vor Test; Mittelwerte 50mm Prüfkörper 3 und 4			
	links	mitte l.	mitte r.	rechts	links	mitte l.	mitte r.	rechts
Abschnitt	1.1	2.1	3.1	4.1	1.1	2.1	3.1	4.1
Hohlraumgehalt	6.80	3.02	2.58	6.52	6.54	4.19	4.01	5.86
Abschnitt	1.2	2.2	3.2	4.2	1.2	2.2	3.2	4.2
Hohlraumgehalt	6.30	2.49	2.40	5.14	6.15	4.22	3.84	5.35
Abschnitt	1.3	2.3	3.3	4.3	1.3	2.3	3.3	4.3
Hohlraumgehalt	6.76	2.64	2.74	5.33	6.33	4.61	4.37	5.39
Abschnitt	1.4	2.4	3.4	4.4	1.4	2.4	3.4	4.4
Hohlraumgehalt	6.72	2.57	2.78	5.26	5.92	4.00	4.19	5.32
Abschnitt	1.5	2.5	3.5	4.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Hohlraumgehalt	7.58	3.07	3.00	6.59	6.21	4.08	4.15	6.30

Tabelle 11.32 Einzelwert des Spurbildungstest AB 11 (Prüfkörper 2.1 und 2.2)

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i [%]	
	Prüfkörper 2.1	Prüfkörper 2.2
30	1.64	1.23
100	2.68	1.77
300	3.47	2.62
1'000	4.53	3.25
3'000	5.62	4.10
10'000	7.15	5.17
30'000	8.89	6.02
Hohlraumgehalt [%]	7.28	8.03

Tabelle 11.33 Einzelwert des Spurbildungstest AB 11 (Prüfkörper 4.1 und 4.2)

Anzahl Belastungszyklen	Mittelwert der proportionalen Spurrinnentiefe \bar{P}_i [%]	
	Prüfkörper 2.1	Prüfkörper 2.2
30	1.16	1.16
100	1.82	1.91
300	2.27	2.27
1'000	2.83	2.79
3'000	3.97	4.00
10'000	5.61	4.96
30'000	7.46	6.23
Hohlraumgehalt [%]	5.74	5.81

11.12 Temperatursausbreitung im LCPC-Verdichter

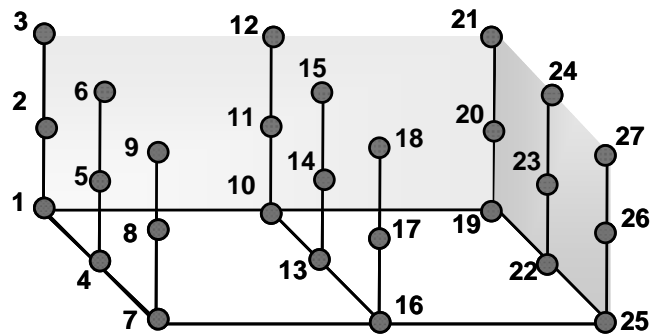


Abbildung 11.26 Messpunkte

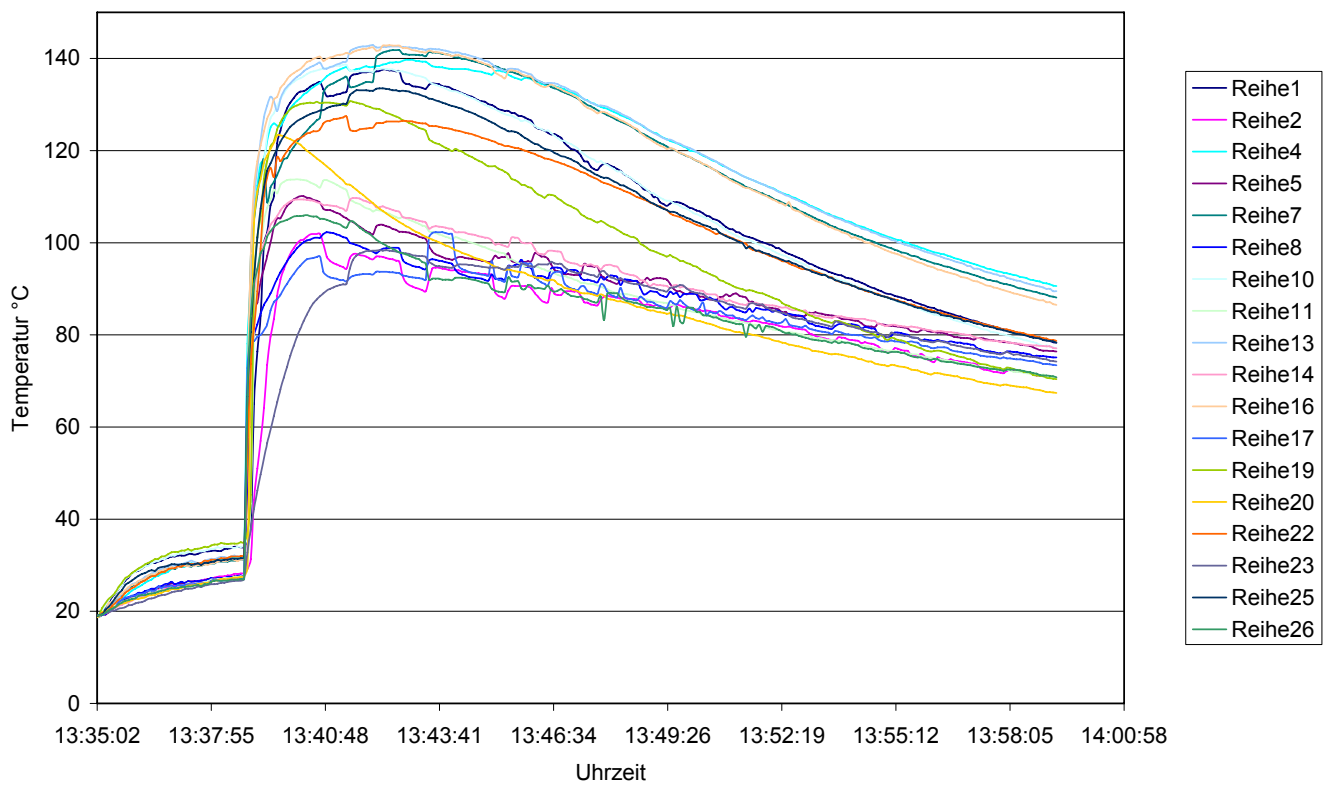


Abbildung 11.27 Abkühlungsverläufe bei Verdichtungsformen mit einer Höhe von $h=50\text{mm}$

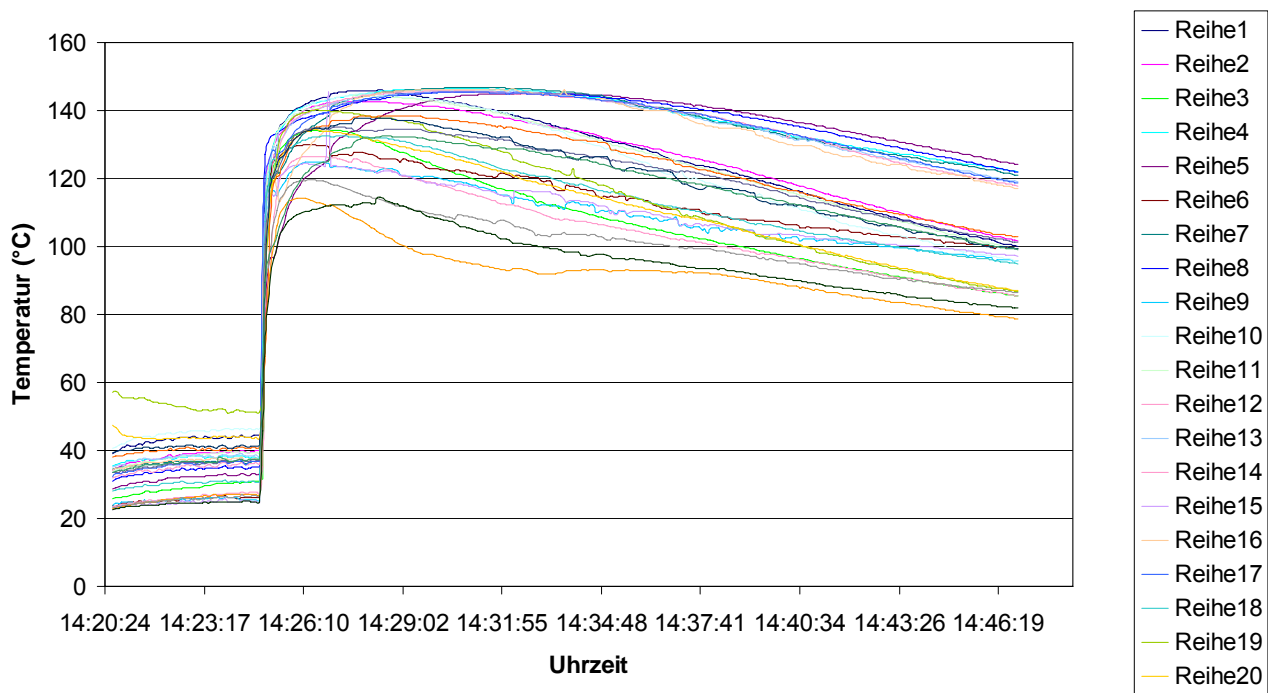


Abbildung 11.28 Abkühlungsverläufe bei Verdichtungsformen mit einer Höhe von $h=100\text{mm}$

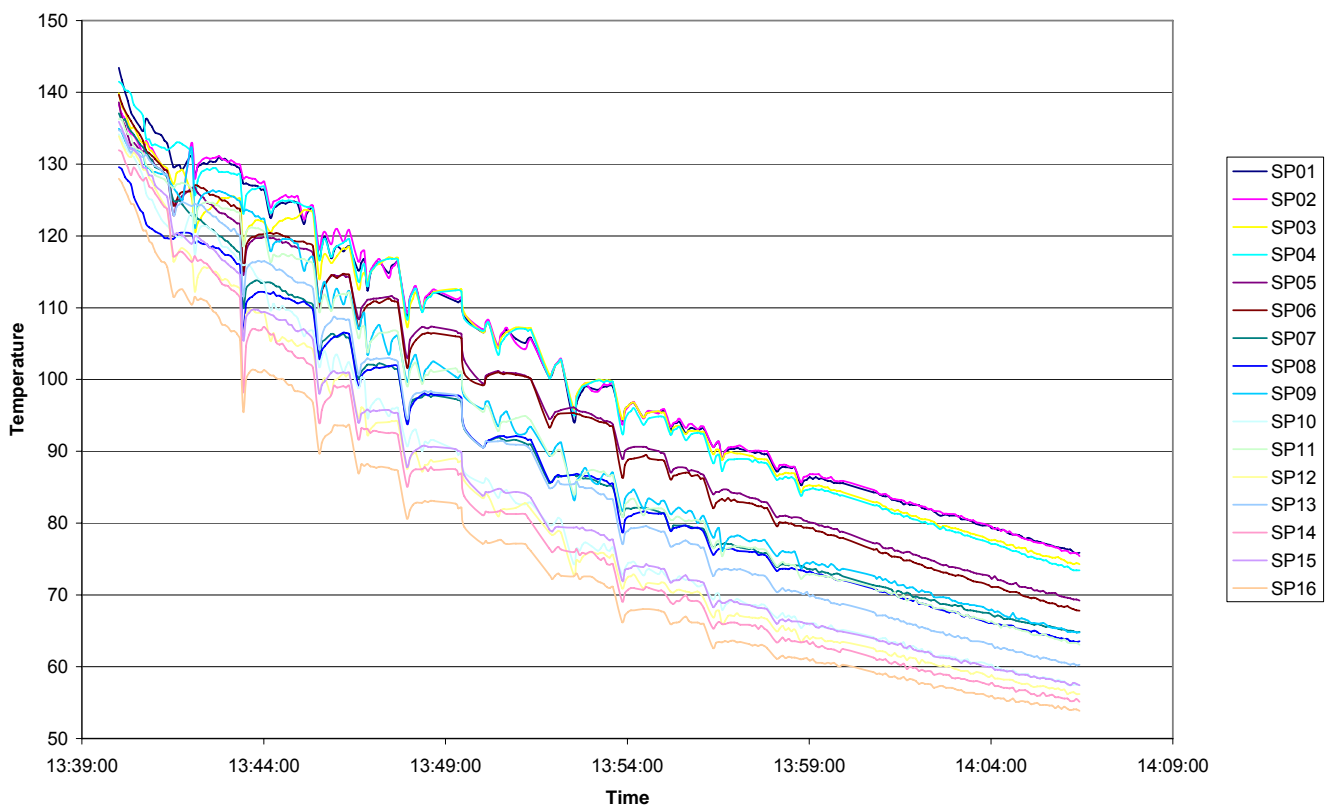


Abbildung 11.29 Resultate der Thermografiemessungen (Abkühlung an der Oberfläche), $h=50\text{mm}$

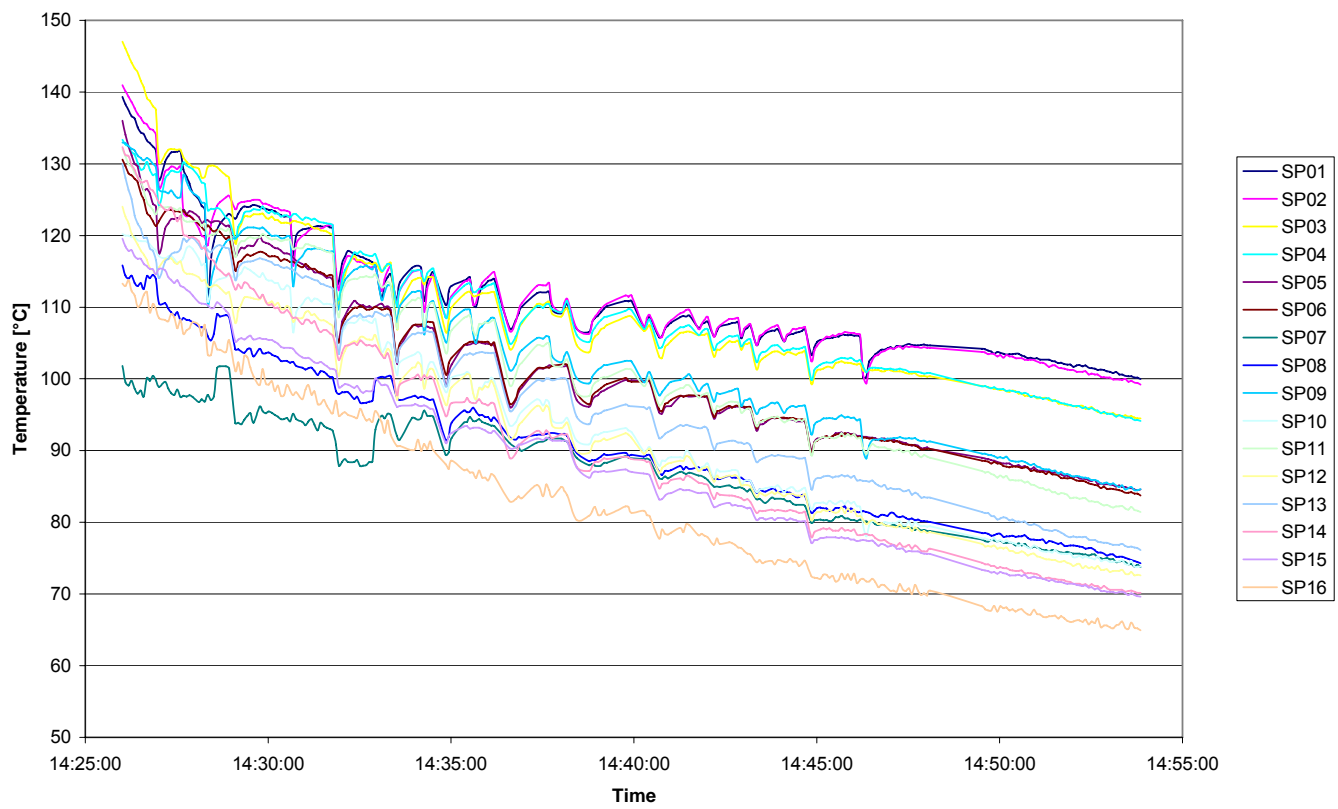
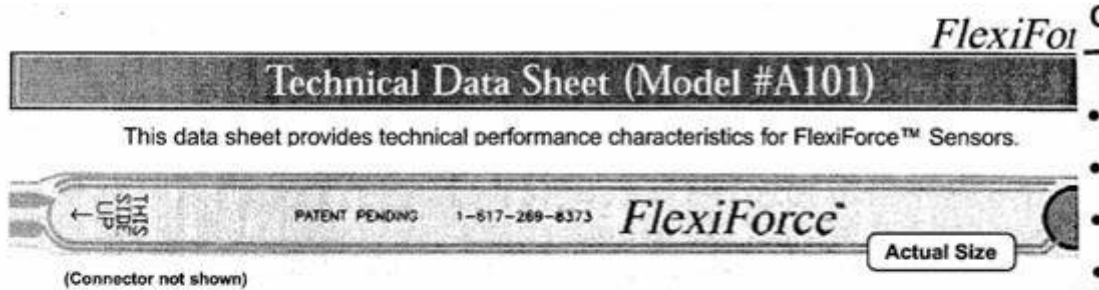


Abbildung 11.30 Resultate der Thermografiemessungen (Abkühlung an der Oberfläche), $h=100\text{mm}$

11.13 Spannungsverteilung unter dem Rad des LCPC-Spurbildungstesters

11.13.1 Technische Beschreibung der Druck-Kraftsensorfolie

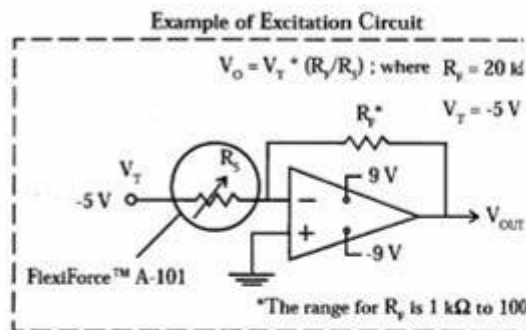
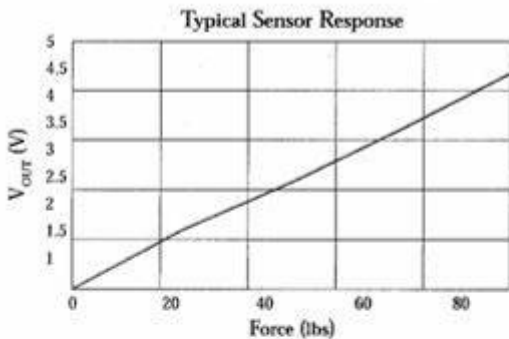


Physical Properties

Thickness	0.005" (0.127 mm)
Length	8.125" (205 mm) End of connector to tip of sensor.
Width	0.625" (16 mm)
Active sensing area	0.375" (10 mm) Diameter
Connector	3 pin Berg Clincher™ Connector - Part # 66226-003 (Mates with Part # 65801-003)

Standard Force Ranges Available (Custom ranges quoted upon request)

1 lb.	(4.4 N)	500 lb.	(2200 N)
25 lb.	(110 N)	1000 lb.	(4400 N)
100 lb.	(440 N)		



Typical Performance

Linearity (Error)	< ±5%	Evaluation Conditions
Repeatability	< ±2.5% of Full Scale	Line drawn from 0 to 50% load
Hysteresis	< 4.5 % of Full Scale	Conditioned Sensor, 80% of Full Force Applied
Drift	< 3% / logarithmic time	Conditioned Sensor, 80% of Full Force Applied
Rise Time	< 20 μsec	Constant Load (25 lb.)
Operating Temperature	15°F - 160°F (-8°C - 71°C)*	Impact load - recorded on Oscilloscope

* Force reading change per degree of temperature change = ±0.2% / °F (0.36%/°C)

