

Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung
der Technischen Universität München

Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator

Bernd Wallner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. Günther Leykauf

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner,
Technische Universität Braunschweig

Die Dissertation wurde am 01.12.2003 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 26.04.2004 angenommen.

Kurzzusammenfassung

Der Gyrator ist neben dem bisher in Deutschland angewendeten Marshall-Verdichtungsgerät in der europäischen Normung als Gerät zur Herstellung von Probekörpern und zur Ermittlung der Verdichtbarkeit von Walzasphalt im Labor vorgesehen. Mit der in dieser Arbeit neu entwickelten Auswertesystematik für Gyratorversuche ist es durch die Ableitung von drei Kenngrößen aus einer sog. Masterkurve möglich, einen asphaltartenspezifischen Bezug zum nationalen Bewertungshintergrund herzustellen, die Verdichtungsleistung zu ermitteln, ab der nicht erwünschte Probekörpereigenschaften zu erwarten sind und Aussagen zur Verdichtbarkeit von Asphalt zu treffen. Es ist möglich, das Marshall-Verfahren durch das Gyratorverfahren zu ersetzen.

Abstract

In addition to the Marshall compression device used in Germany, the gyrator has been designated in European standards as a device for producing asphalt laboratory samples and determining the compactability of asphalt mixtures. In the developed technique of evaluating the gyrator procedure three values from a so called master curve are derived. With these values it is possible to establish a reference to the national evaluation strategy, to determine a maximum compression state for homogenous specimen and to determine the compactability. It is possible to replace the Marshall procedure with the gyrator.

Vorwort

An erster Stelle danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl für die Annahme der vorliegenden Arbeit und für seine wertvollen Anregungen dazu.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner für sein geschätztes Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Günther Leykauf danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei Herrn Akad. Dir. Dr.-Ing. Thomas Wörner bedanke ich mich herzlich für die stete konstruktive Gesprächsbereitschaft, die hilfreichen Ratschläge, die kritische Durchsicht der Arbeit und für das besonders kollegiale Arbeitsklima.

Auch Herr Alfred Schwingenschlögl trug durch die tatkräftige und weitsichtige praktische Unterstützung zum Gelingen meiner Arbeit bei. Danke Fred.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, hat über das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 07.181 „Beurteilung der asphalttechnologischen Kenngrößen von Gyrtorprobekörpern im Hinblick auf die Anforderungen der ZTV Asphalt-StB und der ZTVT-StB“ große Teile dieser Arbeit finanziert. Herrn Dipl.-Ing. Franz Bommert danke ich in diesem Zusammenhang für die angenehme fachliche Betreuung.

Hervorgehoben sei auch die kostenlose Bereitstellung von Bindemitteln durch die Deutsche BP und von Mineralstoffen durch das Hartsteinwerk Schicker für den Versuchsteil der Arbeit.

Meinen lieben Eltern Dank für das unerschütterliche Fundament.

Nicht nur wegen der stetigen familiären Rückendeckung hab ich Dich lieb, Reingard.

München, im Mai 2004

Bernd Wallner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Vorgehensweise.....	3
3	Grundlagen	5
3.1	Literaturüberblick.....	5
3.2	Europäische Normung.....	8
3.3	Funktionsweise des Gyrators	10
3.3.1	Allgemeines	10
3.3.2	Bewegungsablauf.....	13
3.3.3	Kräfte bei der Verdichtung	14
3.3.4	Versuchsdurchführung.....	16
3.3.5	Versuchssteuerung	17
3.3.6	Geräteeinstellungen	18
3.3.7	Aussagen zur Probekörperqualität.....	20
4	Modell einer Auswertesystematik für Gyratorversuche.....	22
4.1	Konzeption der Gyratorversuche	22
4.2	Definition von Masterkurven	23
4.3	Ableitung von Kenngrößen aus Masterkurven	24
4.3.1	Ermittlung der minimalen Verdichtungsleistung.....	24
4.3.2	Übertragung von Hohlraumgehalten	26
4.3.3	Ermittlung der maximalen Verdichtungsleistung.....	29
4.3.4	Lokalisierung des Knickpunktes.....	32
4.3.5	Absicherung der Knickpunkt-Hypothese	33
4.3.6	Ermittlung der Verdichtbarkeit.....	36
5	Untersuchungen.....	39
5.1	Untersuchungsprogramm	39
5.2	Ausgangsstoffe für das Labormischgut.....	41
5.2.1	Mineralstoffe.....	41
5.2.2	Bindemittel	42
5.3	Marshallversuche	43
5.3.1	Eignungsprüfungen.....	43
5.3.2	Übertragung von Hohlraumgehalten	47

5.3.3	Verdichtungswiderstand	49
5.4	Gyratorversuche an Labormischungen – Masterprogramm.....	52
5.4.1	Masterkurven	52
5.4.2	Minimale Verdichtungsleistung.....	54
5.4.3	Maximale Verdichtungsleistung.....	56
5.4.4	Verdichtungswiderstand	59
5.4.5	Zusammenfassung – bisheriges Vorgehen	63
5.5	Gyratorversuche an Labormischungen – Grundprogramm.....	64
5.5.1	Probekörperherstellung.....	64
5.5.2	Übertragung von Hohlraumgehalten	65
5.6	Gyratorversuche an Praxismischungen – Masterprogramm	69
5.6.1	Masterkurven	69
5.6.2	Darstellung von Grenzbereichen	70
5.6.3	Minimale Verdichtungsleistung.....	72
5.6.4	Maximale Verdichtungsleistung.....	74
5.6.5	Verdichtungswiderstand	76
5.7	Gyratorversuche an Praxismischungen – Vergleichsprogramm	80
5.7.1	Verdichtungszustand Marshallprobekörper.....	80
5.7.2	Vergleich von Hohlraumgehalten.....	84
5.7.3	Übertragung von Hohlraumgehalten	86
6	Ergebnis.....	90
6.1	Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator	90
6.2	Eignungsprüfungen an Asphalt mit dem Gyrator	91
6.3	Kontrollprüfungen an Asphalt mit dem Gyrator.....	93
7	Zusammenfassung	96
8	Literaturverzeichnis	99
9	Anlagenverzeichnis.....	106

1 Einleitung und Zielsetzung

Der Gyrator ist neben dem Marshall-Verdichtungsgerät und dem Vibrationsverdichter in der europäischen Normung als Gerät zur Herstellung von Laborprobekörpern aus Walzasphalt und zur Ermittlung der Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut vorgesehen. Die Bewertung der in Deutschland eingesetzten Walzasphalte sowohl vor als auch nach der Bauleistung wird bisher mit asphalttechnologischen Kennwerten auf Grundlage des Marshall-Verdichtungsverfahrens vorgenommen. Erfahrungen mit der Gyratorverdichtung liegen nur aus älteren Forschungsarbeiten [1]/[2]/[3] vor, in denen ein Gerät verwendet wurde, dessen Grundprinzip sich von den heutzutage eingesetzten Geräten unterscheidet. In anderen europäischen Ländern, vor allem in Frankreich und auch in Nordamerika, ist der Gyrator das Standardgerät zur Herstellung von Probekörpern im Rahmen der Asphaltkonzeption und der Qualitätssicherung im Straßenbau.

In Fachkreisen wird seit längerer Zeit ein Laborverdichtungsverfahren gesucht, das praxisadäquate Probekörper liefert. Bei der Praxisverdichtung überlagern sich mehrere Verdichtungsprinzipien. Zunächst erfolgt mit den Verdichtungsbohlen des Einbaufertigers eine vibrierend-schlagende Verdichtung des Asphaltmischgutes. Die Restverdichtung wird von Einbauwalzen entweder statisch-knetend oder statisch-vibrierend vorgenommen. Die Verdichtungsprinzipien der drei europäisch genormten Geräte zur Herstellung von Laborprobekörpern aus Asphalt unterscheiden sich grundsätzlich. Während mit dem Marshall-Verdichtungsgerät rein schlagend verdichtet wird, verdichtet der Vibrationsverdichter statisch-vibrierend und der Gyrator statisch-knetend. In Deutschland wird aufgrund von Forschungsergebnissen [4] zur Zeit davon ausgegangen, dass der Walzensegmentverdichter (statisch-knetendes Verdichtungsprinzip) die praxisnächste Verdichtung erzielt. Die damit hergestellten Probeplatten eignen sich wegen der erforderlichen Probemenge allerdings nur bedingt für die volumetrischen Betrachtungen in der Asphaltkonzeption und werden vorzugsweise für performance-orientierte Versuche wie den Spurbildungstest verwendet. Im Vergleich dazu eignen sich Probekörper, die mit dem Marshall-Verdichtungsgerät und mit dem Gyrator hergestellt werden, für volumetrische Betrachtungen. In Performance-Tests wie dem dynamischen Druck-Schwellversuch zeigen aber vor allem mit dem Gyrator hergestellte Probekörper wesentlich steifere Eigen-

schaften als praxisverdichtete Proben. Umstritten ist auch, ob bei der Gyratorverdichtung ab einer bestimmten Umdrehungszahl noch homogene Probekörper hergestellt werden können oder ob es zu Gefügeschäden kommt und damit die Basis für nachfolgende Betrachtungen an den Probekörpern fehlt.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, mit dem Gyrator basierend auf dem aktuellen Entwurf der europäischen Prüfnorm zum Einen grundlegende Erfahrungen zu sammeln, sowie Aussagen zu Geräteeinstellungen und Verdichtungsparametern zu treffen. Durch einen Vergleich mit dem bislang in Deutschland verwendeten Marshall-Verdichtungsverfahren soll zum Anderen überprüft werden, ob mit Kennwerten -ermittelt mit dem Gyrator- vergleichbare Bewertungen der in Deutschland eingesetzten Asphalte möglich sind. Abschließend soll ein Vorschlag unterbreitet werden, wie der Gyrator im Rahmen von Eignungs- und Kontrollprüfungen eingesetzt werden kann.

Dazu wird in dieser Arbeit eine Auswertesystematik für das Gyrator-Verfahren entwickelt, die anhand von umfangreichen Untersuchungen an neun im Labor hergestellten Mischgutvarianten auf Plausibilität überprüft wird und mit der anschließend an großtechnisch hergestelltem Praxismischgut ein erster Bewertungshintergrund gewonnen wird.

2 Vorgehensweise

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, wird als Grundlage für diese Arbeit zunächst die zur Verfügung stehende Literatur zum Thema Gyrator gesichtet, der aktuelle Stand der europäischen Normung bezüglich Asphaltverdichtung mit dem Gyrator dargestellt und die Funktionsweise des Gyrotors skizziert.

Danach wird eine Auswertesystematik für Gyratorversuche modelliert. Dabei werden aus Verdichtungskurven (Masterkurven) Kenngrößen zur Beurteilung von Asphaltgemischen abgeleitet.

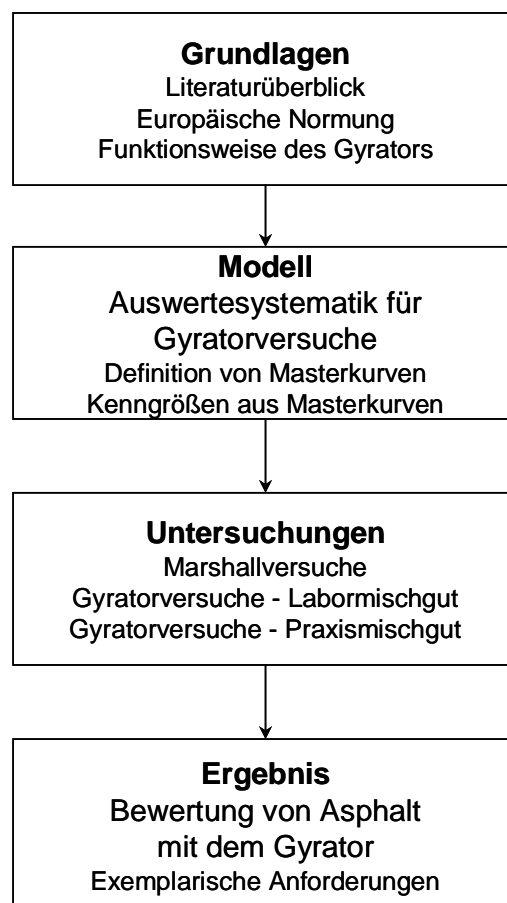


Abbildung 1: Struktur der Arbeit

Für die Untersuchungen an im Labor hergestelltem Mischgut werden neun Mischgutvarianten, welche ein breites Spektrum der in den ZTV Asphalt-StB und ZTVT-StB aufgeführten Asphaltarten und -arten abdecken, ausgewählt. Die zur Verwendung kommenden Mineralstoffe und Bindemittel werden entsprechend den Anforderungen Technischer Lieferbedingungen bzw. Normen untersucht.

In den Marshallversuchen werden für die neun Mischgutvarianten konventionelle Eignungsprüfungen durchgeführt. Zusätzlich werden Marshall-Probekörper mit 2x100 Schlägen hergestellt, mit denen Aussagen zur Verdichtbarkeit getroffen werden.

Die Gyratorversuche gliedern sich in zwei Teile, wobei im ersten Teil Untersuchungen an Labormischgut durchgeführt werden und im zweiten Teil eine Praxisanbindung mit Mischgut aus Asphalt-Kontrollprüfungen erfolgt. Die Versuche aus dem ersten Teil sollen Aufschluss über die Plausibilität der Auswertesystematik geben. Im zweiten Teil wird eine größere Anzahl von in der Praxis eingesetzten Asphalten untersucht und somit die Grundlage für einen Bewertungshintergrund geschaffen.

Abschließend wird die Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator im Rahmen von Eignungs- und Kontrollprüfungen dargestellt. Auf Basis der Ergebnisse aus den untersuchten neun Mischgutvarianten werden exemplarische Anforderungswerte für das nationale Asphaltspektrum festgelegt.

3 Grundlagen

3.1 Literaturüberblick

„Gyratory compaction“ (Gyratorverdichtung) ist schon seit den 30er Jahren bekannt und wurde in Texas entwickelt. Bei diesem Verdichtungsprozeß wird der Probekörper mit vertikalem Druck während der Gyratorbewegungen beansprucht. Die Gyratorverdichtung bewirkt eine Knetverdichtung des Probekörpers. Das Kneten des Mischgutes wird durch Gyratorbewegungen mit horizontalem Winkel bewirkt.

Das Konzept der Gyratorverdichtung wurde später im Corps of Engineers der USA und im Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) in Frankreich kontinuierlich weiterentwickelt. Nachdem in den 60er Jahren zunächst nur spezielle asphalttechnologische Fragen bearbeitet wurden, wird das Verfahren seit den 70er Jahren in Frankreich als Ersatz für die Mischgutoptimierung nach Marshall eingesetzt [5]/[6]/[7].

In dieser Zeit beschäftigte man sich auch an der Technischen Universität Darmstadt mit dem Thema Gyrator [1]/[2]/[3]. Das Gerät, das bei diesen Versuchen zum Einsatz kam, unterscheidet sich jedoch durch einen zusätzlichen Freiheitsgrad während der Verdichtung (Nachlaufwinkel) in seiner Grundkonzeption von den in der europäischen Normung beschriebenen Geräten.

In der Forschungsarbeit Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System [8], welche als ein Vorläufer des Strategic Highway Research Program (SHRP) anzusehen ist, wurden fünf verschiedene Verdichtungsgeräte überprüft, von denen man annahm, dass sie die Verhältnisse der Straßenbaupraxis am besten simulieren. Sowohl Bohrkerne aus Asphaltstraßen als auch im Labor verdichtete Probekörper wurden verschiedenen mechanischen Prüfverfahren und einer Bewertung der Orientierung der Gesteinskörner unterworfen. Die Bewertung der Prüfergebnisse ergab, dass die mit dem Texas Gyrator hergestellten Probekörper am besten, die mit dem Marshall Verdichter am schlechtesten mit den praxisbezogenen Eigenschaften der Bohr-

kerne übereinstimmten. Dazwischen lagen die Probekörper, welche mit dem rollenden Stahlrad, dem Kalifornischen- und dem Vibrations-Knetverdichter hergestellt wurden.

Seit 1991 werden nach und nach Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Program (SHRP) aus den USA veröffentlicht [10] bis [18]. Im Rahmen des SHRP Forschungsauftrages „Performance Models and Validation of Test Results“ zur Entwicklung neuer Prüfverfahren und -geräte für die Beurteilung des Gebrauchsverhaltens von Asphalt sollte auch die Frage geklärt werden, welches von drei Laborverdichtungsverfahren (Gyrator, Rollendes Rad, Knetverdichter) am besten geeignet ist, Asphaltprobekörper mit gebrauchsverhaltenorientierten Eigenschaften herzustellen. Bei der Herstellung der Laborprobekörper wurde angestrebt, den Hohlraumgehalt der zugehörigen Bohrkerne zu erreichen. Ein Vergleich und eine statistische Analyse zeigten, dass unter Voraussetzung annähernd gleicher Hohlraumgehalte, die mit dem Texas Gyrator hergestellten Probekörper am häufigsten die gleichen Eigenschaften wie die Bohrkerne aufwiesen [12]. Im Gegensatz dazu stehen die in der Einleitung (Abschnitt 1) bereits erwähnten Ergebnisse aus [4], anhand derer davon ausgegangen werden kann, dass der Walzensegmentverdichter im Vergleich zum Lamellen- und Marshall-Verdichtungsgerät sowie dem Gyrator die praxisnächste Verdichtung erzielt.

Unter dem Begriff “Superior Performing Asphalt Pavements” (SUPERPAVE), d.h. Asphaltdecken mit besserem Gebrauchsverhalten, wurde im Rahmen von SHRP ein neues und in sich geschlossenes Verfahren der Asphaltbemessung auf der Grundlage neuer Forschungsergebnisse und bewährter Erfahrung entwickelt und begründet [19]. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Bemessungsverfahrens ist die Verdichtung von Asphaltprobekörpern mit dem Gyrator [20], da hiermit nach Auffassung der nordamerikanischen Fachleute Probekörper mit praxisnahen Gebrauchseigenschaften hergestellt werden können. Die Asphaltproben werden mit einer bestimmten Gyratorumdrehungszahl, entsprechend der zu erwartenden Verkehrs- und Temperaturbelastungen verdichtet [21]/[22]. Die Auswertung der SHRP-Forschung ist in den USA noch nicht abgeschlossen. Die Ergebnisse der Validierung durch Feldversuche sowie der Absicherung und Umsetzung (Implementierung) der SUPERPAVE-Bemessung in die Praxis liegen ebenfalls noch nicht vor und werden immer noch kontrovers diskutiert.

In [23] wurden die deutschen Normen und europäischen Normentwürfe zur Ermittlung der Bezugsraumdicke und der Verdichtbarkeit von Walzasphalt vergleichend gegenübergestellt. Dabei wurden deutsche und französische Standardgemische mit dem Verdichtungsverfahren nach Marshall (in Deutschland), dem Gyrator (in Deutschland und Frankreich), und dem Vibrationsverdichter (in Großbritannien) untersucht. Die Untersuchungen ergaben, dass auf Basis der existierenden europäischen Normentwürfe mit den drei Verdichtungsverfahren keine einheitlichen Aussagen zur Ermittlung der Bezugsraumdicke bzw. zur Verdichtbarkeit von Walzasphalt getroffen werden können.

Seit 1996 beschäftigt sich der Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München mit dem Gyratorverdichtungsverfahren. Seither wurden Erfahrungen mit dem zur Verfügung stehenden Gerät gesammelt, die Rahmenbedingungen des CEN-Entwurfes zum Gyratorverfahren ausgetestet, erste Vergleiche mit dem Marshallverfahren angestellt und die zugänglichen Quellen zur Gyratorthematik in einer Literaturrecherche zusammengestellt [24] bis [27].

Bei einem vom LCPC organisierten internationalen Gyrator-Workshop Ende des Jahres 1996 in Frankreich berichteten zwei deutsche Vertreter über die nationale Gyratorforschung mit dem Darmstadt-Gyrator [28] und über aktuelle Ergebnisse aus einem Vergleich von Marshall- und Gyratorverdichtungsverfahren mit dem in München verwendeten Gyrator [29]. In insgesamt 26 Beiträgen aus 12 Ländern wurden die Verdichtbarkeit von Asphalt mit dem Gyrator, die Anwendung des Gyrators in der Asphaltkonzeption und europäische sowie amerikanische Vorschriften zur Gyratortestmethode abgehandelt. Die Gerätehersteller stellten die unterschiedlichen, auf dem Markt befindlichen Gyratortypen vor.

Aufgrund der Tatsache, dass auf dem europäischen Markt unterschiedliche Gyratortypen angeboten werden, erstellte der Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München 1997 basierend auf dem europäischen Normentwurf und den vorhandenen Erfahrungen eine Arbeitsanleitung zur Herstellung von Gyratorprobekörpern. Nach dieser Arbeitsanleitung wurden mit drei Gerätetypen Probekörper aus drei verschiedenen Mischgutvarianten mit vier verschiedenen Verdichtungszuständen hergestellt und vergleichend untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass es unabhängig vom Gerätetyp möglich

ist, bezüglich des Hohlraumgehaltes nach Tauchwägung, vergleichbare Probekörper herzustellen [30].

3.2 Europäische Normung

Seit Beginn der neunziger Jahre beschäftigt sich die WG1 des CEN TC 227 (Road Construction Materials) mit der Entwicklung von europäischen Normen für Asphalt. Zurzeit existieren ca. 50 Entwürfe für Anforderungs- und Prüfnormen in verschiedenen Normungsstadien. Diese Entwürfe sollen in den nächsten Jahren fertig gestellt werden, so dass mit einer kompletten europäischen Asphaltnorm im Jahr 2007 gerechnet wird.

In den Entwürfen Asphaltbeton [31] und Splittmastixasphalt [32] werden Anforderungen an den Hohlraumgehalt von verdichtetem Asphalt gestellt. Basis für die Ermittlung des Hohlraumgehaltes [33] ist die Bestimmung der Rohdichte [34] und der Raumdichte [35]. Die zur Bestimmung der Raumdichte notwendigen Proben können im Labor mit drei verschiedenen Verfahren hergestellt werden. Neben dem in Deutschland üblichen Marshallverfahren [36] ist auch das Gyratorverfahren [37] vorgesehen. In den beiden Anforderungsnormen sind allerdings keine eindeutigen Angaben zur Verdichtungsenergie für die Herstellung der Laborprobekörper mit dem Gyrator bzw. Marshall-Verdichtungsgerät genannt. Während für Asphaltbeton 40, 60, 80, 100 oder 120 Umdrehungen bzw. 2 x 50 oder 2 x 75 Schläge genannt sind, werden für Splittmastixasphalt alleine 200 Umdrehungen bzw. 2 x 50 Schläge gefordert.

Zur Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern sieht die EN [35] ein Ausmess- und drei Tauchwägeverfahren vor. Dabei entspricht das Ausmessverfahren (Verfahren D) weitestgehend dem bisher in DIN 1996-7 [38] beschriebenen Ausmessverfahren. Bei den drei Tauchwägeverfahren werden die zur Berechnung der Raumdichte notwendigen Probekörpervolumen durch Unterwasserwägungen berechnet. Beim Verfahren „trocken“ (Verfahren A) wird das Unterwassergewicht des Probekörpers ohne Vorbehandlung und Vorlagerung ermittelt. Das „SSD“ (Saturated Surface/Dry)-Verfahren (Verfahren B) entspricht weitestgehend

dem bisher in DIN 1996-7 beschriebenen Tauchwägev erfahren, allerdings wird vor Ermittlung der Probekörpermasse nach Wasserlagerung der Probekörper trocken gewischt. Beim Verfahren „umhüllter Probekörper“ (Verfahren C) wird der Probekörper vor der Unterwasserwägung versiegelt, um Wasserzutritt in die Hohlräume des Probekörpers zu verhindern. Das Verfahren A wird für sehr dichte Probekörper, Verfahren B für Probekörper bis ca. 4-5 Vol.-% Hohlraumgehalt, Verfahren C für Probekörper bis zu 15 Vol.-% Hohlraumgehalt und Verfahren D für Probekörper mit mehr als 15 Vol.-% Hohlraumgehalt empfohlen. Die in DIN 1996-7 angegebene Grenze zwischen Tauchwäge- (~Verfahren B) und Ausmessverfahren (~Verfahren D) liegt bei einem Hohlraumgehalt von 12 Vol.-%.

Ein weiterer Normentwurf behandelt die Bestimmung der Bezugsraumdichten [39] zur Ermittlung des Verdichtungsgrades von Ausbaustücken. Der Verdichtungsgrad einer Probe soll in Abhängigkeit von deren Raumdicke und der sog. konventionellen Bezugsraumdicke eines Gyratorprobekörpers, hergestellt mit noch nicht genau definierter Umdrehungszahl, berechnet werden. Der maximale Verdichtungsgrad einer Probe soll dagegen in Abhängigkeit von deren Raumdicke und der sog. konventionellen Maximalraumdicke eines Gyratorprobekörpers, hergestellt mit 200 Umdrehungen, berechnet werden. Die Ermittlung des Verdichtungsgrades anhand von Marshallprobekörper ist in den europäischen Normentwürfen nicht mehr vorgesehen. Laut aktuellen mündlichen Informationen aus entsprechenden Fachgremien soll dieser Normentwurf [39] allerdings gestrichen werden.

In [40] ist die Ermittlung der Verdichtbarkeit von Heißasphalt auf der Basis von drei Verdichtungsverfahren beschrieben. Die Ermittlung der Verdichtbarkeit mit dem Marshallverfahren ist dabei weitgehend identisch mit der im „Merkblatt für das Verdichten von Asphalt Teil 2“ [41] beschriebenen Vorgehensweise. Beim Einsatz des Gyratorverfahrens sollen Probekörper mit mindestens 200 Umdrehungen unter kontinuierlicher Berechnung des Hohlraumgehaltes hergestellt werden.

In [37] ist das Verfahren für die Verdichtung von zylindrischen Asphalt-Probekörpern mit einem Gyrator-Verdichter beschrieben. Diese Verdichtung soll durch die Kombination einer drehenden Schubwirkung und einer resultierenden axialen Kraft, die von einem mechanischen Kopf ausgeübt wird, erreicht werden. Das Verfahren kann verwendet werden für:

- die Herstellung von Probekörpern mit einer vorgegebenen Höhe und einer bestimmten Dichte für die nachfolgende Prüfung ihrer mechanischen Eigenschaften;
- die Ableitung einer Kurve der Raumdichte-Entwicklung in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl;
- die Ermittlung des Hohlraumgehaltes bei einer vorgegebenen Umdrehungszahl.

In der Beschreibung des Gyratorverfahrens ist die Kalibrierung eines Gyrators durch die Ermittlung des Nenn-Neigungswinkels (leere frei bewegliche Maschine) mit Hilfe von zwei Referenzmischungen, die eine unterschiedliche Verdichtbarkeit aufweisen, vorzunehmen. Dazu sind jeweils Probekörper mit drei verschiedenen Umdrehungszahlen herzustellen, deren Hohlraumgehalte, in Abhängigkeit vom Nennwinkel, innerhalb bestimmter Spannweiten liegen sollen. Die Referenzmischungen entsprechen dem französischen Asphaltpektrum. Die Versuche im Rahmen von [23] haben gezeigt, dass diese Asphalte deutlich schwerer zu verdichten sind als die in Deutschland eingesetzten Asphalte. Ein Zusammenhang zum deutschen Spektrum und dem damit verbundenen Bewertungshintergrund muss noch hergestellt werden. Diese Kalibrierung der einzelnen Gyratortypen ist aufgrund des aufwendigen Verfahrens vom jeweiligen Gyratorhersteller durchzuführen. Der Anwender kann dann den für seinen Gyratortypen attestierten Nenn-Neigungswinkel an seinem Gerät als Grundeinstellung verwenden.

3.3 Funktionsweise des Gyrators

3.3.1 Allgemeines

Abbildung 2 zeigt den in dieser Arbeit verwendeten Gyrator des Typs „Troxler Model 4140“, der sowohl die Anforderungen der europäischen Normung als auch der amerikanischen „Superpave“-Asphaltkonzeption erfüllt. Der Gyrator dient der Nachahmung der Verdichtungsverhältnisse, die auf der Straße durch Walzen und unter Verkehr herrschen. Diese bestehen aus Druckkräften durch das Eigengewicht der Fahrzeuge sowie aus horizontalen Scherkräften durch das Schieben der Walzen und das Walken der Fahrzeugreifen.

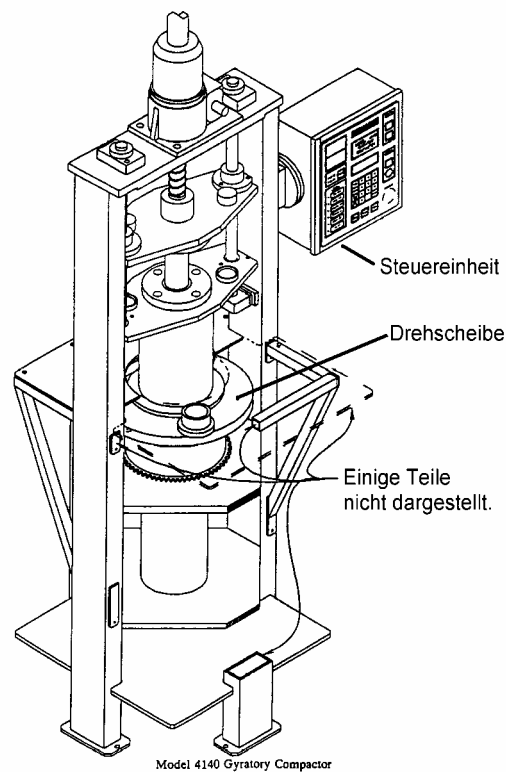


Abbildung 2: Troxler Gyrator Model 4140

Bei allen Gyratortypen wird ein zylindrischer Probekörper mit der Höhe H in seiner Rotationsachse durch einen konstanten Druck P belastet und um diese mit einer bestimmten Umdrehungszahl n gedreht, während der Probekörper gleichzeitig um den Neigungswinkel Φ ausgelenkt wird.

Abbildung 3 skizziert einen Probekörper während der Verdichtung. Die zu untersuchende Probe befindet sich in einem Stahlzylindermantel mit einem inneren Durchmesser von 100 mm (150 mm). Auf die obere Stirnfläche wirkt ein Stempel, der seinerseits den Kopf eines Kolbens einer im Geräterahmen eingebauten Presse bildet. Die untere Stirnfläche liegt auf einer Drehscheibe auf, die vertikal unbeweglich gegen den Geräterahmen abgestützt ist, deren Mittelpunkt jedoch horizontal, also exzentrisch zur Kolbenachse, auslenkbar ist und damit den Neigungswinkel Φ der Probenachse definiert. Die Probenform wird mit Hilfe

von Nockenstößeln auf der Drehscheibe ausgelenkt. Der eingestellte Neigungswinkel des Troxler-Gyrators, der aus der Auslenkung der schwenkbaren Form um die Strecke A in der Ebene der Drehscheibe als Winkel $\Phi = \arctan A/H$ entsteht, bleibt während des Verdichtungsvorganges konstant. Ein freies Kippen der Form und somit die Entstehung eines Nachlaufwinkels, wie es beim Gyrator-Verdichter der Versuchsanstalt für Straßenwesen der Technische Hochschule Darmstadt [1] bis [3] auftritt, wird durch dieses Konstruktionsprinzip verhindert.

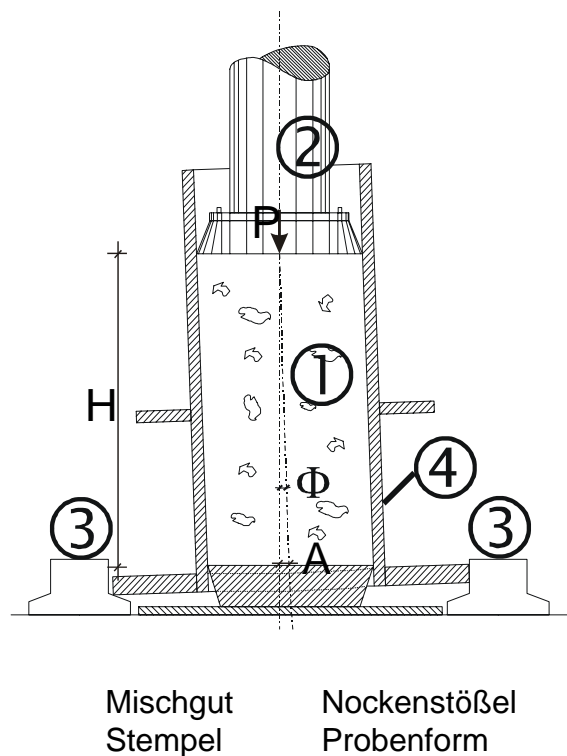


Abbildung 3: Probekörper während der Verdichtung

3.3.2 Bewegungsablauf

Unterteilt man den zylindrischen Probekörper in eine beliebige Anzahl b Kreisscheiben gleicher Stärke $h = H/b$, so tritt zwischen diesen bei konstantem Φ und h eine über die Höhe ebenfalls konstante Wegdifferenz $a = h \cdot \tan \Phi$ auf, da nicht nur die Probe durch die schwenkbare Form um den gewählten Neigungswinkel Φ ausgelenkt wird, sondern auch die äußersten Kreisscheiben, die Stirnflächen, und mit ihnen jede parallele Kreisscheibe, die durch Stempel und Drehscheibe orthogonal zur Gyrator-Hauptachse gehalten werden. Daraus entsteht an jedem Berührungspunkt zweier Kreisscheiben und zwischen allen Kreisscheiben eine konstante Schub- und Scherbeanspruchung.

Gauer [2] beschreibt die Bewegung eines beliebigen Punktes $P(x_i; y_i)$ in der Horizontalen in zwei aufeinander senkrecht stehenden Projektionen als sich überlagernde Sinusschwingungen:

$$x_i = h_i \cdot \tan \Phi \cdot \sin \omega t$$

$$y_i = h_i \cdot \tan \Phi \cdot \cos \omega t.$$

Diese Horizontalbewegung vollführt auch jeder Punkt $(x_i; y_i)$ der Form. Da diese aber im Gegensatz zum Probekörper schwenkbar ist, beschreibt jeder Punkt $(x_i; z_i)$ eine entsprechende Bewegung in der Vertikalen. Nach Gauer lässt sich folgende Schwingungsfunktion beschreiben:

$$z_i = r \cdot \tan \Phi \cdot \cos \omega t.$$

Diese Bewegung macht der entsprechende Punkt auf der Mantelfläche des Probekörpers jedoch nicht mit, so dass aus dieser Relativbewegung zwischen der Innenfläche der schwenkba-

ren Form und der Mantelfläche des Probekörpers eine über die Höhe H konstante Mantelreibung entsteht.

In der vorstehenden Betrachtung wird angenommen, dass Φ und H konstant bleiben. Tatsächlich aber verringert sich unter der gewählten Druckbelastung P die Probekörperhöhe H und mit ihr die Kreisscheibenstärke h . Deshalb besitzt der Stempel des Troxler-Gyrators einen mit Gleitlagern ausgestatteten beweglichen Stempelkopf, der bei abnehmender Probenhöhe ein Anpassen der Wirkungslinie der Druckkraft ermöglicht und damit den Neigungswinkel Φ konstant hält.

3.3.3 Kräfte bei der Verdichtung

Im folgenden werden, in Anlehnung an Untersuchungen von Gauer [2] über den Darmstadt-Gyrator und den am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München existierenden Erfahrungshintergrund, die bei der Verdichtung mit dem Troxler-Gyrator wirksamen Kräfte dargestellt. Dazu wird das System Gyrator wegen der Komplexität der dynamischen Vorgänge und viskoelastischen Reaktionen näherungsweise als statisch betrachtet.

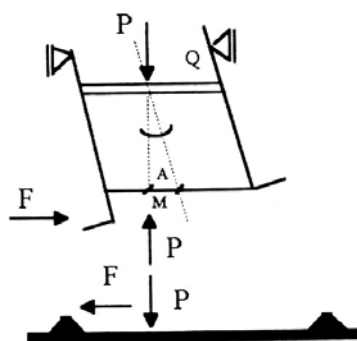


Abbildung 4: Gesamtsystem

Abbildung 4 zeigt, dass die vom Kolben erzeugte Druckkraft P über den Stempel und ein Querkraftgelenk Q in den Probekörper eingeleitet wird, von diesem über ein Momentengelenk M an die Drehscheibe weitergegeben und vom Geräterahmen aufgenommen wird. Zur Einstellung des Neigungswinkels Φ erfährt die schwenkbare Form die Auslenkung A durch eine Auslenkkraft F ; deren Gegenkraft wirkt folglich auf die Nockenstößel. Damit befindet sich das Gesamtsystem im Gleichgewicht. Das muss aber auch für die Teilsysteme „Probekörper“ und „schwenkbare Probenform“ erfüllt werden.

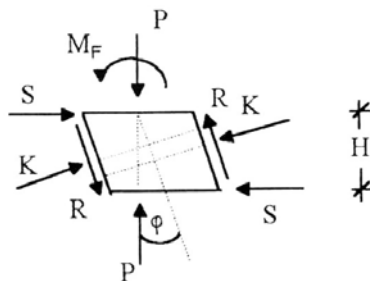


Abbildung 5: Teilsystem Probekörper

Wie aus Abbildung 5 ersichtlich, wird der Probekörper sowohl durch eine konstante vertikale als auch radiale Druckspannung, dargestellt durch deren Resultierenden P und K , als auch durch das Moment M_F , hervorgerufen durch die Auslenkkraft F , belastet. Diesem stellt sich ein inneres Moment aus dem Kräftepaar S entgegen, das als Resultierende aus den Schubspannungen gegen die Horizontalverschiebung der einzelnen Kreisscheiben gebildet wird. Da die obere Stirnfläche durch ein Gleitlager horizontal reibungsfrei gegenüber dem Krafteinleitenden Stempel gelagert ist, ergibt sich hier weder eine Resultierende aus Schubspannungen noch eine Relativverschiebung zur Gefäßwandung. Aufgrund des Kräftegleichgewichtes herrschen an der unteren Stirnfläche identische Verhältnisse. An den Mantelflächen dagegen herrschen zusätzlich zu den bereits erwähnten Druckspannungen Schubbeanspruchungen wechselnder Richtung infolge der wechselnden Neigungsrichtung der schwenkbaren Form, symbolisiert durch die Reibungskräfte R .

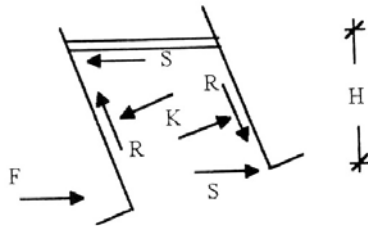


Abbildung 6: Teilsystem schwenkbare Probenform

Abbildung 6 stellt dar, dass auf die schwenkbare Probenform die über die Mantelfläche des Probekörpers übertragenen Kräfte in umgekehrter Richtung, sowie die Auslenkkraft F wirken.

3.3.4 Versuchsdurchführung

Die für die Herstellung eines Gyratorprobekörpers benötigte und nach [36] vorbereitete Menge an Asphaltmischgut, die Probekörperform und die dazugehörige Bodenplatte werden mindestens zwei Stunden im Wärmeschrank, der auf Verdichtungstemperatur $\pm 5^\circ\text{C}$ geregelt ist, vortemperiert. Das Asphaltmischgut ist dabei gegen Zufuhr von Frischluft z.B. durch eine Abdeckung zu schützen. Der im Gyrator fixierte Stempel wird mittels einer Heizplatte erwärmt, um den Temperaturgradienten zur oberen Probekörperdeckfläche zu Beginn der Verdichtung möglichst gering zu halten. Bei einer kontinuierlichen Arbeitsweise wird die Temperierung des Stempels nur vor der Herstellung des ersten Probekörpers durchgeführt.

Nach der Vorlagerung wird das Asphaltmischgut abgewogen und über einer Gasflamme unter schnellem, ständigem Umrühren exakt auf Verdichtungstemperatur temperiert.

In die temperierte Probekörperform wird als erstes ein Trennpapier gelegt, dann das Asphaltmischgut lagenweise eingefüllt und unter Stochern mit dem Spatel verteilt. Die Oberfläche des eingefüllten Asphaltmischgutes wird mit dem Spatel leicht geebnet und mit einem zweiten Trennpapier abgedeckt. Unmittelbar danach wird die gefüllte Form in den Gyrator einge-

baut und der automatische Verdichtungsvorgang gestartet. Die Arbeiten bis zum Start des Verdichtungsvorganges (Abschnitt 3.3.5) sollten nach 4 Minuten abgeschlossen sein.

Die Probekörper werden ca. 15 min nach dem Verdichten mit Hilfe einer Auspressvorrichtung ausgeformt, die Trennpapiere entfernt und auf einer ebenen Unterlage bis auf Raumtemperatur abgekühlt.

3.3.5 Versuchssteuerung

Der Gyrator kann entweder umdrehungsgesteuert oder höhengesteuert betrieben werden. Im *umdrehungsgesteuerten* Modus wird ein Probekörper solange verdichtet, bis die vorgegebene Umdrehungszahl erreicht wird. Bei dieser Art der Versuchssteuerung lassen sich große Umdrehungszahlen vorgeben und Verdichtungskurven erstellen. Unter Verdichtungskurven werden Kurven verstanden, bei denen die Höhenabnahme des Probekörpers oder die direkt davon abhängige Zunahme der Raumdichte bzw. Abnahme der Hohlraumgehalte, über die Anzahl der Umdrehungen dargestellt werden. Des Weiteren kann an Probekörpern, die mit vorgegebenen Umdrehungsanzahlen hergestellt werden, überprüft werden, ob sie Vorgaben bezüglich des Hohlraumgehaltes erfüllen.

Im Gegensatz dazu wird im *höhengesteuerten* Modus der Probekörper solange verdichtet bis die vorgegebene Höhe und somit die direkt davon abhängige Raumdichte bzw. der Hohlraumgehalt erreicht werden. Bei dieser Art der Versuchssteuerung lassen sich Probekörper mit gezielten Hohlraumgehalten herstellen. In dieser Arbeit werden unter anderem Probekörper mit in den ZTV geforderten oberen Hohlraumgrenzen oder mit Hohlraumgehalten von Marshallprobekörpern hergestellt. Die dazu erforderlichen Umdrehungszahlen können fixiert, miteinander oder mit Anforderungswerten verglichen werden. Des Weiteren können in diesem Verdichtungsmodus Probekörper hergestellt werden, die in weiterführenden Untersuchungen, wie z. B. dem dynamischen Druck-Schwellversuch, geprüft werden.

3.3.6 Geräteeinstellungen

Für die Probekörperherstellung werden die in Tabelle 1 angegebenen Geräteeinstellungen verwendet. Vergleichend sind die Vorgaben aus den europäischen Normen [37]/[42] aufgeführt. Die Geräteparameter Verdichtungsdruck, Umlaufwinkel und die Höhenmessung werden über geräteeigene Kalibrierungsprogramme in festgelegten Abständen sowie durch externe Messungen überprüft.

<i>Parameter</i>	<i>Geräteeinstellungen</i>	<i>Vorgaben der EN</i>
<i>Umlaufwinkel</i>	<i>1°</i>	<i>0° - 2°</i>
<i>Umlaufgeschwindigkeit</i>	<i>30/min</i>	<i>< 32/min</i>
<i>Verdichtungsdruck</i>	<i>600 kPa</i>	<i>565 - 679</i>
<i>Verdichtungstemperatur</i>	<i>Bitumen: 135 °C PmB: 145 °C</i>	<i>B 50/70: 145 °C B 70/100: 140 °C</i>
<i>Probekörperdurchmesser</i>	<i>100 mm</i>	<i>100 mm, 150 mm, 160 mm</i>
<i>Probekörpermasse</i>	<i>1700 g ± 1%</i>	<i>abhängig von Probekörperhöhe und -durchmesser</i>
<i>Probekörperhöhe</i>	<i>ergibt sich aus der Probekörpermasse</i>	<i>0,66- bis 1,05-facher Probekörperdurchmesser</i>

Tabelle 1: Geräteeinstellungen mit Vorgaben der EN

In [30] wurde eine Variantenstudie mit verschiedenen Geräteeinstellungen im Rahmen der EN-Vorgaben durchgeführt. Der Umlaufwinkel wurde in dieser Studie auf 2°, die Verdich-

tungstemperatur um 10 K und der Probekörperdurchmesser auf 150 mm erhöht. Die wesentlichen Aussagen sind im Folgenden wiedergegeben:

- Die untersuchten Asphaltgemische zeigen bei einer *Erhöhung des Verdichtungswinkels von 1° auf 2°*, erwartungsgemäß einen geringeren Verdichtungswiderstand. Allerdings neigen dann auch die leichter verdichtbaren Gemische schneller zur Überverdichtung. Eine Erhöhung des Verdichtungswinkels von 1° auf 2° zieht eine Erhöhung der Schubspannungen im Probekörperinneren und somit eine stärkere Verdichtungswirkung bzw. eine stärkere Beanspruchung des Probekörpers nach sich. Dadurch werden vor allem leicht verdichtbare Asphaltgemische zum Teil überbeansprucht, differenzierte Aussagen im Rahmen der Asphaltkonzeption sind dann nicht mehr möglich. Der zeitliche Gewinn der durch niedrigere Umdrehungszahlen und somit kürzeren Verdichtungszeiten aufgrund einer stärkeren Verdichtungswirkung erzielt wird, ist in den Hintergrund zu stellen. Da die Umstellung des Verdichtungswinkels am Gerät einen deutlichen Arbeitsaufwand bedeutet, wird aufgrund mangelnder Anwendbarkeit in der Praxis, davon abgeraten, Probekörper von schwer verdichtbaren Gemischen mit einem anderen Verdichtungswinkel herzustellen als Probekörper von leicht verdichtbaren Gemischen. Es wird empfohlen, Gyratorprobekörper einheitlich mit einem Verdichtungswinkel von 1° herzustellen.
- Bei einer *Erhöhung der Verdichtungstemperatur um 10K* von 145°C auf 155°C zeigt die bindemittelreichere im Gegensatz zur bindemittelärmeren PmB-Mischgutvariante erwartungsgemäß einen geringeren Verdichtungswiderstand. Eine Erhöhung der Verdichtungstemperatur zieht eine Erniedrigung der Bindemittelviskosität nach sich und wirkt sich vor allem auf die bindemittelreicheren Gemische aus. Teilweise sind durch eine Erhöhung der Verdichtungstemperatur differenziertere Aussagen möglich. Es ist zu berücksichtigen, dass bei einer höheren Verdichtungstemperatur auch der Gradient zur Umgebungstemperatur erhöht wird und in der täglichen Laborpraxis die Einregelung und Aufrechterhaltung der Verdichtungstemperatur mehr Aufwand bedeutet. Es wird empfohlen auch die Gyratorprobekörper mit den Temperaturvorgaben der ZTV-Asphalt herzustellen.
- Die untersuchten Asphaltgemische mit einem Größtkorndurchmesser ≥ 16 mm zeigen bei einer *Erhöhung des Probekörperdurchmessers von 100 mm auf 150 mm*, erwartungsge-

mäß einen deutlich geringeren Verdichtungswiderstand. Eine Erhöhung des Probekörperdurchmessers führt bei konstanter Flächenpressung und daraus resultierend erhöhter Auflast zu einer geringeren Beeinträchtigung der Querdehnung im Probekörperinneren und entspricht somit mehr der Verdichtung auf der Straße. Bei den Gemischen mit hohem Größtkorndurchmesser sind im Rahmen der Asphaltkonzeption differenziertere Aussagen möglich als mit kleinerem Probekörperdurchmesser. Die Erhöhung des Probekörperdurchmessers führt allerdings dazu, dass bei gleich bleibendem Hohlraumgehalt für das gleiche Verhältnis von Probekörperhöhe zu Probekörperdurchmesser mehr als die dreifache Probekörpermasse notwendig wird. Der Umgang mit einer Mischgut-Einwaage von annähernd 6 kg für einen Probekörper bedeutet einen erheblich höheren Aufwand für die tägliche Laborpraxis. Allerdings bieten Gyratorprobekörper mit einem Durchmesser von 150 mm für den Einsatz in weiterführenden Versuchen, wie dem Dynamischen Stempel-eindringversuch, interessante Möglichkeiten und lassen sich im Vergleich zum Marshall-Verdichtungsverfahren einfach herstellen.

Zusammenfassend konnte in [30] festgestellt werden, dass die vorgenommenen Variationen der Geräteeinstellungen nur bedingt zu differenzierteren Aussagen über die untersuchten Asphaltgemische führen, als die in Tabelle 1 aufgeführten Geräteeinstellungen. Diese werden deshalb den Untersuchungen in dieser Arbeit zugrunde gelegt.

3.3.7 Aussagen zur Probekörperqualität

In [30] wurden Marshallprobekörper (2 x 50 bzw. 2 x 100 Schläge) und Gyratorprobekörper (400 Umdrehungen, Verdichtungswinkel 1° und 2°) extrahiert, die Korngrößenverteilung ermittelt und vergleichende Aussagen zur Qualität von Marshall- und Gyratorprobekörpern getroffen. Es zeigte sich, dass die Beanspruchung durch unterschiedliche Verdichtungsleistungen bzw. Verdichtungsarten vor allem bei den sandarmen Splittmastixasphalten, die ein ausgeprägtes Splittgerüst aufweisen, systematisch durchschlagen. Hier traten vor allem bei der Herstellung von Marshallprobekörpern mit 2 x 100 Schlägen Kornverfeinerungen auf. Die Gyratorverdichtung stellte sich als vergleichsweise schonende Verdichtungsart dar, bei der ei-

ne Erhöhung des Verdichtungswinkels allerdings auch Kornverfeinerungen nach sich ziehen kann.

Um zu überprüfen, ob die in Abschnitt 1 erwähnten Gefügeschäden bei der Gyratorverdichtung auftreten, wurden in [30] stark und gering verdichtete Gyratorprobekörper mit einem Längsschnitt entlang der senkrechten Verdichtungsachse mittig auseinandergetrennt, die Schnittflächen nass geschliffen, getrocknet und Schnittflächenbilder erstellt. Anhand der Schnittflächenbilder konnte festgestellt werden, dass in Abhängigkeit des Verdichtungszustandes zwar deutliche Unterschiede in den Schnittflächenstrukturen festzustellen sind, ein systematischer Bezug zwischen Kornausrichtung und Verdichtungszustand konnte allerdings nicht hergestellt werden. Des Weiteren konnten anhand der Schnittflächenbilder Gefügeschädigungen von Probekörpern nach 400 Umdrehungen nicht direkt nachgewiesen werden.

4 Modell einer Auswertesystematik für Gyratorversuche

4.1 Konzeption der Gyratorversuche

Den Gyratorversuchen dieser Arbeit liegt das in Abbildung 7 dargestellte Konzept zugrunde.

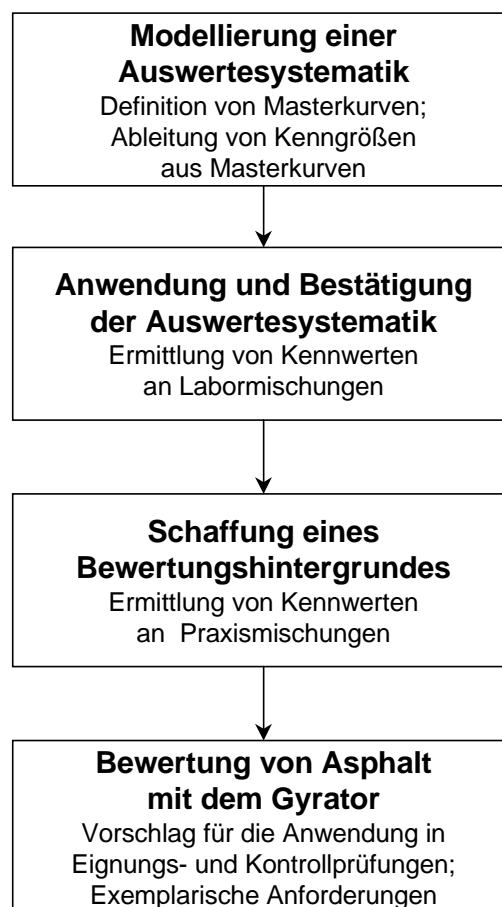


Abbildung 7: Konzeption der Gyratorversuche

Bei der Modellierung der Auswertesystematik werden die bei der Herstellung von Gyratorprobekörpern mit 400 Umdrehungen erstellten Verdichtungskurven als Masterkurven definiert und dienen als zentrales Bewertungsmedium von Asphalt. Aus den Masterkurven werden die Kenngrößen minimale, maximale und ideale Verdichtungsleistung sowie der Verdich-

tungswiderstand abgeleitet. Danach wird an Labormischgut die Auswertesystematik durch die Ermittlung von Zahlenwerten für die abgeleiteten Kenngrößen angewendet, auf Plausibilität überprüft und bestätigt. Weiter werden an Praxismischgut Wertebereiche für die abgeleiteten Kenngrößen ermittelt und somit ein erster Bewertungshintergrund geschaffen. Als Ergebnis wird die Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator im Rahmen von Eignungs- und Kontrollprüfungen dargestellt. Basierend auf den am Praxismischgut erhaltenen Kennwerten werden exemplarische Anforderungen für das nationale Asphaltspektrum festgelegt.

4.2 Definition von Masterkurven

In dieser Arbeit werden Verdichtungskurven, denen eine umdrehungsgesteuerte (vgl. Abschnitt 3.3.5) Probekörperherstellung mit 400 Umdrehungen zugrunde liegt, als Masterkurven bezeichnet. Am Gyrator wird dabei nach jeder Umdrehung n die Probekörperhöhe h gemessen und zunächst in der Steuereinheit des Gerätes gespeichert. Über die zugehörige Software mit der Bezeichnung „Gypave“ können die Daten als Textdateien ausgelesen werden. Der Text wird mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms „Excel“ in Zahlenwerte umgewandelt, die dann zur Darstellung in Diagrammen aufbereitet werden können.

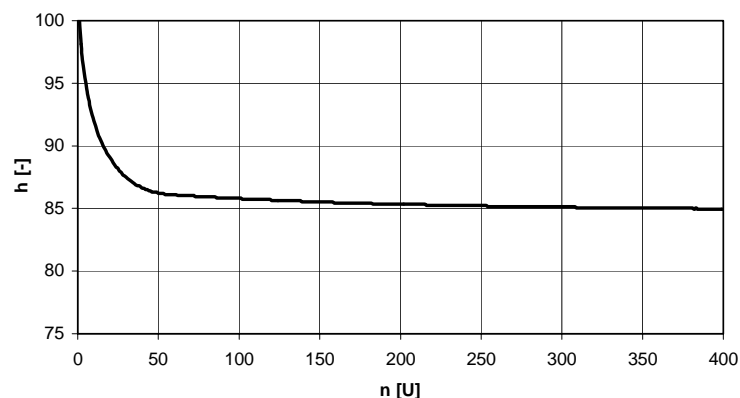


Abbildung 8: Masterkurve

In Abbildung 8 ist die Masterkurve eines Asphaltgemisches dargestellt. Die Anfangshöhe wird aufgrund der besseren Vergleichbarkeit von verschiedenen Gemischen zu 100 normiert.

Um Masterkurven interpretieren zu können ist es für verschiedene Betrachtungsweisen notwendig, den Verlauf der Raumdichtezunahme aus der Höhenabnahme bzw. den Verlauf der Hohlraumgehaltabnahme aus der Raumdichtezunahme abzuleiten. Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, können Masterkurven auch mit logarithmischer Skalierung der Abszisse dargestellt werden.

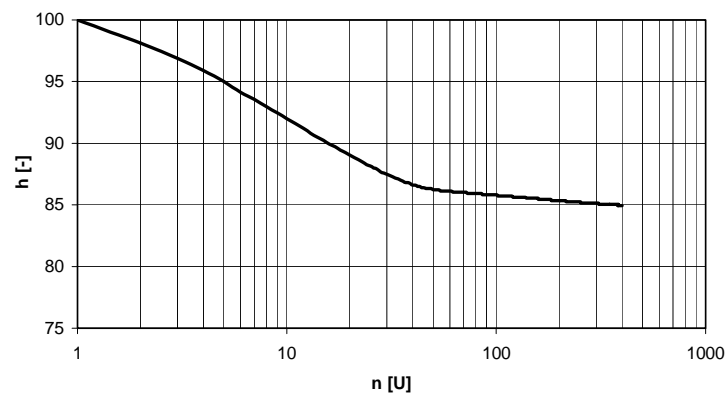


Abbildung 9: logarithmierte Masterkurve

4.3 Ableitung von Kenngrößen aus Masterkurven

4.3.1 Ermittlung der minimalen Verdichtungsleistung

In den ZTV [43]/[44] ist der Hohlraumgehalt des Marshallprobekörpers, hergestellt mit einer Verdichtungsleistung von 2x50 Schlägen, als wesentliche asphalttechnologische Kenngröße

aufgeführt und stellt eine vertragsrelevante Vorgabe für die Asphaltkonzeption (Eignungsprüfung) dar. Um einen Bezug des Gyratorverfahrens zu den ZTV und somit zum Bewertungshintergrund der nationalen Asphaltkonzeption herzustellen, kann angegeben werden, mit welcher Gyrator-Verdichtungsleistung (Umdrehungszahl n_{ZTV}) die in den ZTV genannten Hohlraumgehalt-Obergrenzen ($H_{bit,ZTV}$) erreicht werden.

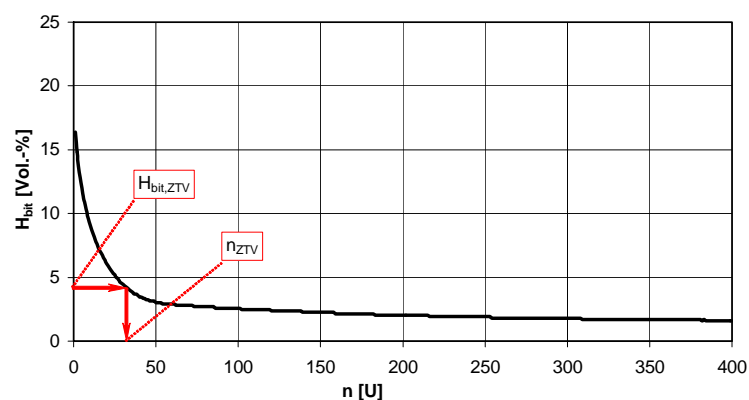


Abbildung 10: Ermittlung der Umdrehungszahl n_{ZTV}

Wie in Abbildung 10 dargestellt, kann für das jeweils zu untersuchend Asphaltgemisch die in den ZTV vorgegebene Hohlraumgehalt-Obergrenze $H_{bit,ZTV}$ in die Hohlraumgehalt-Masterkurve eingetragen und die zugehörige Umdrehungszahl n_{ZTV} ermittelt werden. Die Umdrehungszahl n_{ZTV} steht als asphaltartenabhängige *Kenngröße für die minimale Verdichtungsleistung* bei Verwendung des Gyrators zur Untersuchung von Asphaltgemischen.

Die in den ZTV angegebenen Hohlraumgehalte basieren auf mit dem Tauchwägevorgang ermittelten Raumdichtewerten [38] von Marshallprobekörpern. Die europäische Prüfnorm [37] sieht bei den Arbeiten mit dem Gyrator die Ermittlung von Raumdichtewerten mit dem Ausmessverfahren vor. Auch die Hohlraumgehalt-Masterkurven basieren auf vom Gyrator gemessenen Probekörperhöhen und daraus resultierenden Raumdichten.

Der Hohlraumgehalt nach Tauchwägung ist abhängig von der Oberflächenstruktur des Probekörpers, die sich mit zunehmender Verdichtungsleistung verändert und je nach Mischgutsorte unterschiedlich ausgeprägt ist. Ein konstanter Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalten auf Basis des Tauchwägevorgangs und Hohlraumgehalten auf Basis des Ausmessverfahrens kann somit nicht hergestellt werden. Aus diesem Grunde muss ein in Abhängigkeit der Verdichtungsleistung variabler, für jede Mischgutsorte spezifischer Zusammenhang zwischen Tauchwägung und Ausmessen ermittelt werden. Im Folgenden wird deshalb der Unterschied zwischen Tauchwäge- und Ausmessverfahren aufgezeigt und eine vom absoluten Hohlraumgehalt abhängige Beziehung zwischen beiden hergestellt.

4.3.2 Übertragung von Hohlraumgehalten

Neben der Ermittlung der Masse m_A , ist die Ermittlung des Probekörpervolumens V_A Grundlage für die Berechnung der Raumdichte ρ_A eines Asphaltprobekörpers. In der derzeit gültigen Prüfnorm für Asphalt [38] ist mit DIN 1996-07B2-P die Bestimmung der Raumdichte an Asphaltprobekörpern mit dem Tauchwägevorgang und mit DIN 1996-07F1-P die Bestimmung der Raumdichte an Asphaltprobekörpern mit dem Ausmessverfahren beschrieben. Diese Verfahren zeigen zwei Möglichkeiten das Probekörpervolumen V_A zu bestimmen. Die Ermittlung der Masse m_A eines Asphaltprobekörpers erfolgt in beiden Verfahren durch Trockenwägung. Die Unterschiede in der Volumenberechnung für einen zylindrischen Asphaltprobekörper sind in Abbildung 11 gegenübergestellt.

Beim *Ausmessverfahren* erfolgt die Volumenermittlung eines Asphaltprobekörpers $V_{A,T}$ über das größte denkbare Volumen des Probekörpers (Einhüllende). In dieser Arbeit werden für den Probekörperdurchmesser d_A die Innendurchmesser der Verdichtungsformen angesetzt. An den Marshallprobekörpern wird die Höhe h_A per Handmessung ermittelt. Für die Gyratorprobekörper werden die vom Gerät gemessenen Höhen h_A durch Handmessung überprüft und für weitere Betrachtungen übernommen.

Beim *Tauchwägevorgang* wird das Probekörpervolumen $V_{A,T}$ über den Auftrieb durch die Hohlräume des Probekörpers unter Wasser ermittelt. Dazu wird die Masse des unter Wasser

gelagerten Probekörpers $m_{A,W}$ von der Masse des Probekörpers an der Luft $m_{A,L}$ (nach Wasserlagerung und Abtropfen) subtrahiert. Die Differenz wird mit der Dichte des Wassers bei 25°C $\rho_{W,25}$ (exakter Wert: 0,997g/cm³ \Rightarrow näherungsweise: 1,000g/cm³) ins Verhältnis gesetzt. Bei dieser näherungsweisen Betrachtung treten allerdings folgende zwei Unzulänglichkeiten auf:

- ✎ Bei der Ermittlung der Masse des unter Wasser gelagerten Probekörpers füllen sich während der vorgeschriebenen Lagerungsdauer von 90 min auch zugängliche Hohlräume im Probekörperinneren mit Wasser.
- ✎ Bei der Ermittlung der Masse des Probekörpers an der Luft (nach Wasserlagerung und Abtropfen) ist nach der vorgeschriebenen Abtropfzeit von 10 s noch Wasser im und am Probekörper.

Diese beiden Unzulänglichkeiten heben sich, wie die bisherigen Erfahrungen gezeigt haben, bei Probekörpern bis zu einem Hohlraumgehalt von 12 Vol.-% weitgehend auf.

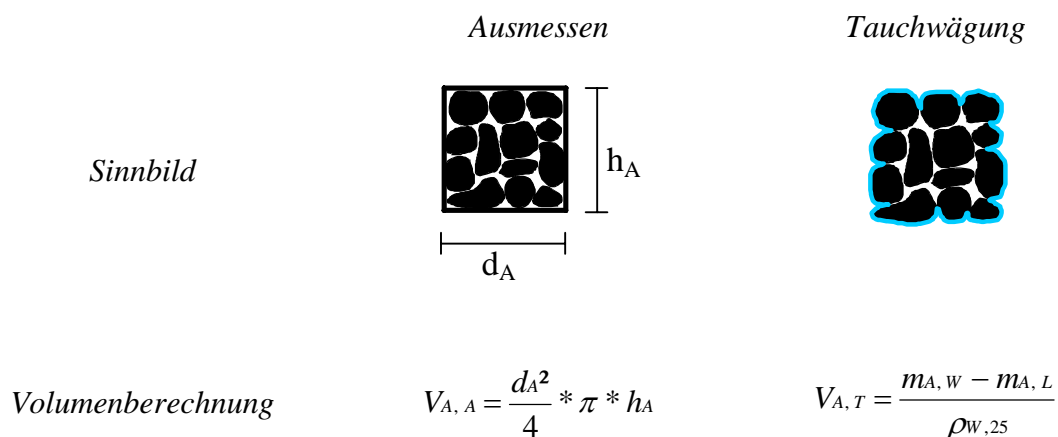


Abbildung 11: Vergleich Ausmessen und Tauchwägung

Durch die Tatsache, dass beim Ausmessverfahren systematisch das größte denkbare Volumen des Probekörpers (Einhüllende) gemessen wird, ermittelt sich gegenüber dem Tauchwägewerfahren eine signifikant geringere Raumdichte.

Um den Bewertungshintergrund der ZTV, basierend auf dem Tauchwägewerfahren an Marshallprobekörpern, direkt auf das Gyratorverfahren, basierend auf dem Ausmessverfahren, übertragen zu können (vgl. Abschnitt 4.3.1), werden in dieser Arbeit für jede untersuchte Asphaltsorte die Ergebnisse aus beiden Verfahren gegenübergestellt und einer linearen Regressionsanalyse [45] unterzogen.

Als Schätzwert für das Maß der linearen Abhängigkeit dient im Allgemeinen das Bestimmtheitsmaß R^2 . Hat es den Wert 1, besteht für die Stichprobe eine vollkommene Korrelation, das bedeutet, dass sich ein berechneter y-Wert und der entsprechende tatsächliche y-Wert nicht unterscheiden. Im anderen Extremfall, wenn das Bestimmtheitsmaß 0 ist, ist die Regressionsgerade ungeeignet, einen y-Wert vorherzusagen.

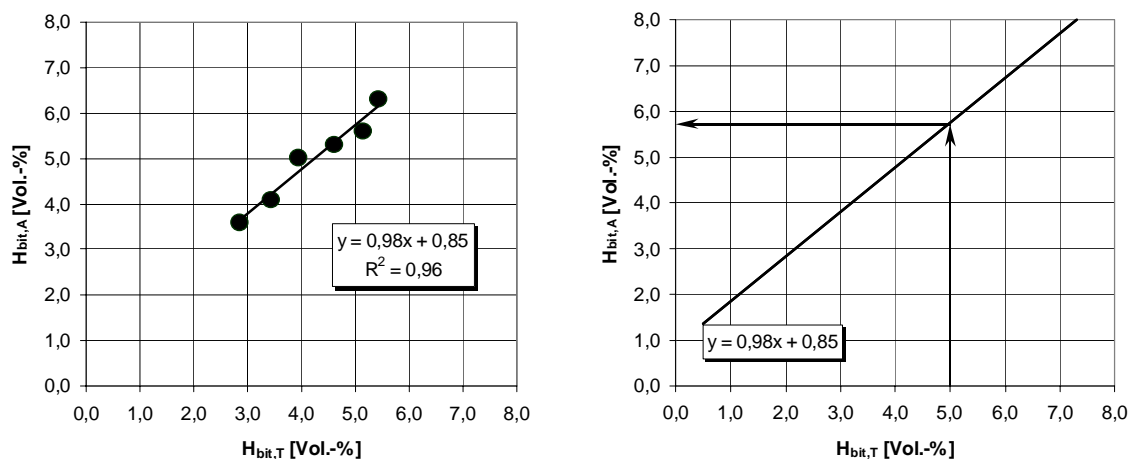


Abbildung 12: Ermittlung der Regressionsgeraden und Übertragung des Hohlraumgehaltes

In Abbildung 12 sind beispielhaft die Wertepaare von einer Stichprobe aus sechs Probekörpern eines Asphaltgemisches gegeneinander aufgetragen. Für die Regressionsgerade errechnet sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,96$. Ein über die Geradengleichung $y = 0,98x + 0,85$ berechneter Wert für $H_{\text{bit},A}$ unterscheidet sich somit nur geringfügig vom tatsächlich gemessenen Wert, es besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen $H_{\text{bit},T}$ und $H_{\text{bit},A}$. Bei diesem Gemisch entspricht ein $H_{\text{bit},T}$ von 5,0 Vol.-% (z.B. ZTV-Hohlraumobergrenze) einem $H_{\text{bit},A}$ von 5,7 Vol.-%. Dieser Wert dient gemäß Abschnitt 4.3.1 als Eingangsgröße $H_{\text{bit},ZTV}$ in die Masterkurve zur Ermittlung der Kenngröße n_{ZTV} (minimale Verdichtungsleistung).

4.3.3 Ermittlung der maximalen Verdichtungsleistung

Homogene Laborprobekörper und eine mit der Praxis vergleichbare „gesunde“ innere Struktur sind eine wichtige Voraussetzung, um anhand von volumetrischen Kennwerten im Rahmen von Eignungsprüfungen gezielte Aussagen über Asphaltgemische treffen zu können. Des Weiteren sind homogene Laborprobekörper Voraussetzung dafür, in weiterführenden dynamischen Versuchen Aussagen z.B. zur Standfestigkeit von Asphaltgemischen treffen zu können. In [6] werden bei hoher Verdichtungsleistung (großen Umdrehungszahlen), Kornzertrümmerungen und Tendenzen zur horizontalen Kornausrichtung in Gyratorprobekörpern beschrieben. Auch Beobachtungen und Erfahrungen aus Vorversuchen für diese Arbeit zeigten, dass mögliche Inhomogenitäten in Gyratorprobekörpern erst bei hoher Verdichtungsleistung („Überverdichtung“) auftreten. Im Folgenden wird deshalb der Verdichtungsprozess zunächst modellhaft beschrieben und die Ableitung einer Kenngröße für die maximale Verdichtungsleistung aus der logarithmierten Masterkurve dargestellt.

Bei der logarithmierten Darstellung von Masterkurven kann der Verdichtungsprozess gemäß Abbildung 13 in zwei Bereiche unterteilt werden. Im Bereich ① zeigt die Masterkurve nach den ersten Umdrehungen einen linearen Verlauf mit einer schnellen deutlichen Höhenabnahme. Nach dem ausgeprägten Knickpunkt (KP) mit Steigungswechsel, folgt der Bereich ② in dem die Masterkurve unter langsamer geringer Höhenabnahme nahezu waagrecht asymptotisch verläuft.

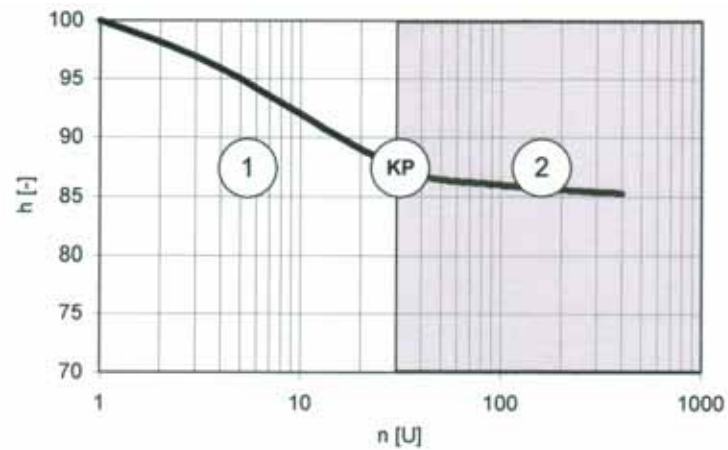


Abbildung 13: logarithmierte Masterkurve - Verdichtungsbereiche

Die Vorgänge, die während der Verdichtung im Gyratorprobekörper ablaufen, sind in Abbildung 14 sinnbildlich dargestellt.

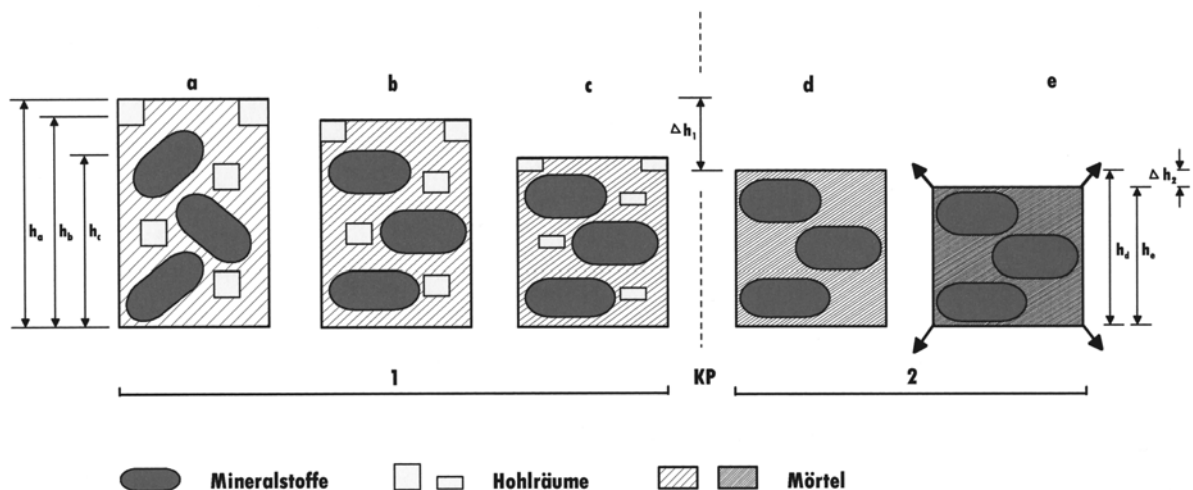


Abbildung 14: Gyratorprobekörper während der Verdichtung - Modellvorstellung

Der Bereich ① ist dabei in die Abschnitte a, b, c und der Bereich ② in die Abschnitte d, e unterteilt und durch den Knickpunkt (KP) getrennt. Die den Abschnitten ($i=a\dots e$) zugehörigen Probekörperhöhen sind mit h_i beschrieben. Die deutliche Höhenabnahme aus Bereich ① ist mit $\Delta h_{\textcircled{1}}$ und die geringe Höhenabnahme aus Bereich ② mit $\Delta h_{\textcircled{2}}$ gekennzeichnet. Die beiden Verdichtungsbereiche können wie folgt beschrieben werden:

- ① Im manuell eingefüllten Mischgut (a) richten sich die Mineralstoffe während des kneten- den Verdichtungs Vorganges in einen idealen Lagerungszustand (b) aus. Mit fortschreiten- der Verdichtungsleistung resultiert die Höhenabnahme des Probekörpers aus einer Ver- ringerung der Hohlraumgröße. Die Hohlräume füllen sich zunehmend mit Mörtel (c).
- ② Im Bereich des Knickpunktes (KP) stellt sich im Probekörper bei einem gefestigten Mi- neralstoffgerüst zunehmend ein hydrostatischer Zustand ein. Die Hohlräume füllen sich bis zum maximalen Grad mit Mörtel (d). Eine weitere Höhenabnahme kann nur noch durch Auspressen von Mörtel an die Kanten des Probekörpers oder bei Mischgutvarian- ten mit ausgeprägtem Korngerüst durch Kornzertrümmerungen erreicht werden (e). Das Auspressen von Mörtel kann durch Mörtelanreicherungen an den Rändern der bei der Verdichtung verwendeten Trennpapiere beobachtet werden (Abbildung 15).



Abbildung 15: Mörtelanreicherungen auf der Ober- und Unterseite eines Trennpapiers

Um im Rahmen der Asphaltkonzeption vergleichbare „gesunde“ Probekörper zu erhalten, sollte der Übergang von Bereich ① zu Bereich ② nicht überschritten werden. Die Umdrehungszahl bis zum Knickpunkt n_{KP} stellt somit eine asphaltartenabhängige *Kenngröße für die maximale Verdichtungsleistung* dar. In Abschnitt 4.3.4 wird die Vorgehensweise zur Lokalisierung des Knickpunktes vorgestellt, in Abschnitt 4.3.5 sind Versuchsergebnisse zur Bestätigung der dargestellten Theorie wiedergegeben.

4.3.4 Lokalisierung des Knickpunktes

Wie in Abbildung 16 dargestellt, wird in einem ersten Schritt die logarithmierte Masterkurve des untersuchten Asphaltgemisches mit einer mathematischen Funktion angepasst. Dazu wird ein Polynom 6. Grades verwendet, da die physikalische Deutung der Parameter im Rahmen dieser Überlegungen keine Rolle spielt. Mit dieser Funktion ergeben sich die besten Anpassungen ($R^2 \sim 1$). Danach werden die Parameter a bis g ermittelt und die zugehörigen Werte $y(x)$ berechnet (rot) und zusammen mit den tatsächlich gemessenen Werten (schwarz) dargestellt.

Zur Beschreibung der Krümmung von $y(x)$ wird die zweite Ableitung der polynomischen Funktion gebildet. Mit den berechneten Parametern a bis e werden die zugehörigen Werte $y''(x)$ im Bereich des Knickpunktes berechnet.

Am lokalen Maximum von $y''(x)=\max$ weist $y(x)$ die größte Krümmung auf. Der zugehörige Wert für die Kenngröße n_{KP} entspricht der maximalen Verdichtungsleistung für das untersuchte Asphaltgemisch.

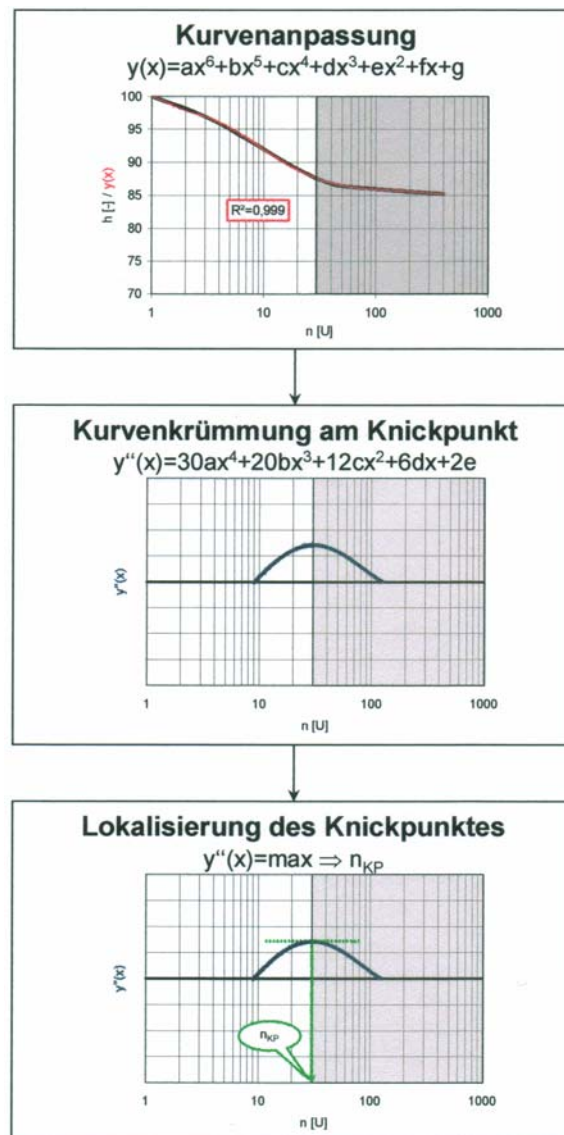


Abbildung 16: Systematik zur Lokalisierung des Knickpunktes

4.3.5 Absicherung der Knickpunkt-Hypothese

Um die in den vorangehenden beiden Abschnitten dargestellte Knickpunkt-Hypothese abzusi-
chern, werden Gyratorprobekörper mit unterschiedlichen Verdichtungsständen in dynami-
schen Druckschwellversuchen [46] untersucht. Beim dynamischen Druckschwellversuch han-

delt es sich um einen „Performance-Test“, mit dem das Verformungsverhalten von Asphalten bei hohen Gebrauchstemperaturen (50°C) unter achslastsimulierender dynamischer Belastung (10.000 Druckschwellimpulse) beschrieben werden kann. Aus dem Verhalten von Probekörpern im Dynamischen Druckschwellversuch werden Rückschlüsse auf das Verhalten der eingebauten Deckschicht gezogen.

Untersucht wird ein Asphaltbeton 0/8, der als leicht verdichtbares Asphaltgemisch mit einem Hohlraumgehalt von 1,7 Vol.-% am Marshallprobekörper nach [43] für niedrige Bauklassen (V, VI, St LLW u. Wege) geeignet ist. Erfahrungsgemäß weisen die Impulskriechkurven [46] für derartige Gemische deutliche Wendepunkte und zugehörige hohe Dehnungsraten auf.

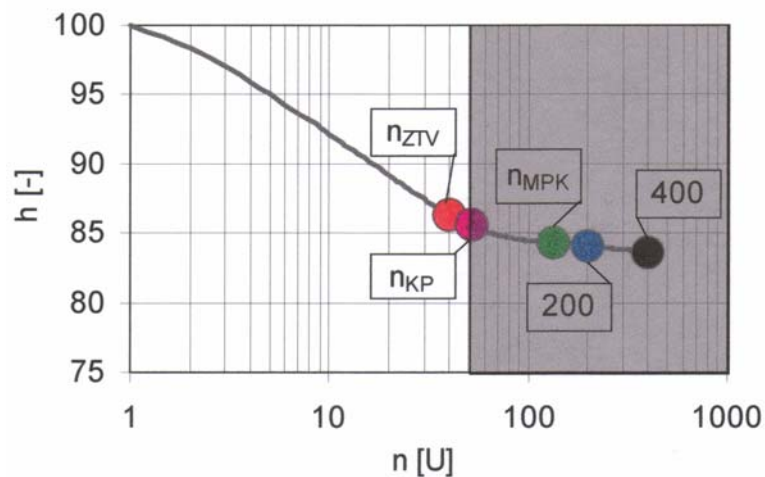


Abbildung 17: Verdichtungszustände der in den Druckschwellversuchen untersuchten Gyratorprobekörper

Vor den dynamischen Druckschwellversuchen wird die logarithmierte Masterkurve für das Asphaltgemisch erstellt und der Knickpunkt ermittelt (Abbildung 17). Für die Durchführung der dynamischen Druckschwellversuche werden Probekörper mit fünf unterschiedlichen Verdichtungsleistungen vor (n_{ZTV}), am (n_{KP}) und nach (n_{MPK} , 200, 400) dem Knickpunkt hergestellt. Schon bei der Betrachtung der Mantelflächen zeigen sich die Probekörper, hergestellt

mit Verdichtungsleistungen nach dem Knickpunkt optisch deutlich „speckiger“ als die Probekörper, hergestellt mit Verdichtungsleistungen vor dem Knickpunkt.

Die Impulskriechkurven und die zugehörigen Kurven der Dehnungsraten aus den dynamischen Druckschwellversuchen sind in Abbildung 18 zusammengestellt.

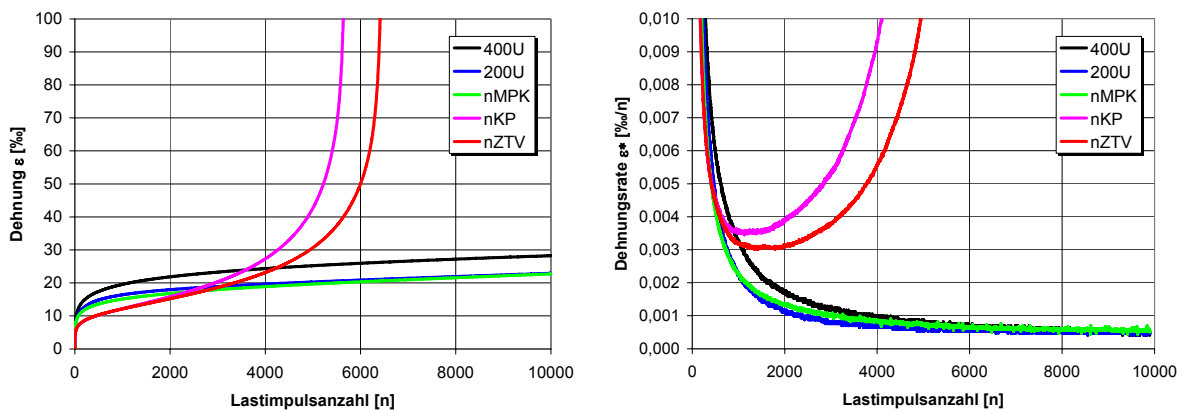


Abbildung 18: Impulskriechkurven und zugehörige Kurven der Dehnungsraten von Gyratorprobekörpern mit unterschiedlichen Verdichtungszuständen

Die Probekörper, hergestellt mit den Verdichtungsleistungen n_{ZTV} und n_{KP} zeigen in den Impulskriechkurven deutliche Wendepunkte mit zugehörigen hohen Dehnungsraten. Dieses Verhalten entspricht dem Bewertungshintergrund für leicht verdichtbare Asphaltbetone, die in Deckschichten von niedrigen Bauklassen eingesetzt werden, wo eine lange Lebensdauer erwünscht, aber nur eine geringe Standfestigkeit gefordert ist. Es resultiert aus entsprechenden Hohlraum- und Bindemittelreserven, die ausschlaggebend für große Verformungs- und Fließreserven sind (vgl. auch Abbildung 14: Bereich ①).

Im Gegensatz dazu weisen die Probekörper, welche mit Verdichtungsleistungen nach dem Knickpunkt (n_{MPK} , 200, 400) hergestellt werden, in den Impulskriechkurven keinen Wendepunkt auf und zeigen entsprechend niedrige Dehnungsraten. Dieses Verhalten ist untypisch

für leicht verdichtbare Asphaltbetone und zeigt deutlich, dass die Probekörper „überverdichtet“ wurden. Im Probekörper sind keine Hohlraumreserven mehr vorhanden, würde dieser Verdichtungszustand in der Praxis angestrebt, verringere die erwünschte lange Lebensdauer der eingebauten Schicht deutlich. Ähnlich den am Probekörper durch Überverdichtung auftretenden Mörtelauspressungen (vgl. auch Abbildung 14: Bereich ② und Abbildung 15) könnten zudem bei überverdichteten Deckschichten für das Gebrauchsverhalten unerwünschte Mörtelanreicherungen an der Oberfläche auftreten (geringe Griffigkeit).

Wie mit dieser Versuchsreihe aufgezeigt wird, eignet sich die logarithmierte Masterkurve zur Beschreibung des Materialverhaltens von Asphaltgemischen. Die Versuche zeigen, dass sich Probekörper hergestellt mit Verdichtungsleistungen vor dem Knickpunkt anders verhalten als Probekörper hergestellt mit Verdichtungsleistungen nach dem Knickpunkt. Der Knickpunkt dient somit als charakteristischer Punkt für das Materialverhalten.

4.3.6 Ermittlung der Verdichtbarkeit

Die Ermittlung einer Kenngröße für die Verdichtbarkeit von Asphaltgemischen bei der Verwendung des Marshallverfahrens wurde in einer Forschungsarbeit [47] 1980 veröffentlicht. Darauf aufbauend wurde ein Merkblatt [41] und eine Arbeitsanleitung [48] zu dieser Thematik erstellt. Die dort beschriebene Vorgehensweise wurde schließlich auch in die europäische Normung [40] übernommen. Das Prinzip besteht darin, die Marshall-Verdichtungskurven mit folgender Funktion mathematisch anzupassen:

$$1/d(S) = 1/d_{\infty} - (1/d_{\infty} - 1/d_0) * e^{-S/D}$$

$d(S)$:	Probekörperhöhe in Abhängigkeit der aufgewendeten Verdichtungsarbeit S
d_{∞} :	rechnerische Endhöhe für $S \rightarrow \infty$
d_0 :	rechnerische Anfangshöhe zu Beginn des Verdichtungsprozesses ($S=0$)
S :	Verdichtungsarbeit, Anzahl der Schläge mit dem Marshall-Verdichter
D :	Verdichtungswiderstand, bestimmt über die Dickenänderung des Probekörpers

Der aus dieser Funktion mit iterativer Regressionsrechnung ermittelte Verdichtungswiderstand D steht als Kenngröße für die Verdichtbarkeit des untersuchten Asphaltgemisches.

Dieses Prinzip kann auch auf die Masterkurven (vgl. Abschnitt 4.2) aus der Gyratorverdichtung übertragen werden. Als Verdichtungsarbeit S wird dabei die Anzahl der Umdrehungen mit dem Gyrator in die oben beschriebene Verdichtungsfunktion eingesetzt. In Analogie zum Marshallverfahren, wird der aus der iterativen Regressionsrechnung resultierende Verdichtungswiderstand D_G als *Kenngröße für die Verdichtbarkeit* des untersuchten Asphaltgemisches definiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird für die iterative Regressionsrechnung ein Programm verwendet, mit dem, unabhängig vom Verdichtungsverfahren, mit beliebig vielen Wertepaaren gerechnet werden kann. Zudem kann mit dem Rechenprogramm der Verdichtungswiderstand D_i zu jedem Verdichtungsschlag S_i bzw. zu jeder Verdichtungsumdrehung U_i ermittelt und dargestellt werden.

Die Verdichtungswiderstände D bzw. D_G liefern eine Abschätzung dafür, wie sich ein Asphaltgemisch verdichten lässt. Dabei beschreiben niedrige Werte leicht verdichtbare und hohe Werte schwer verdichtbare Mischgutvarianten.

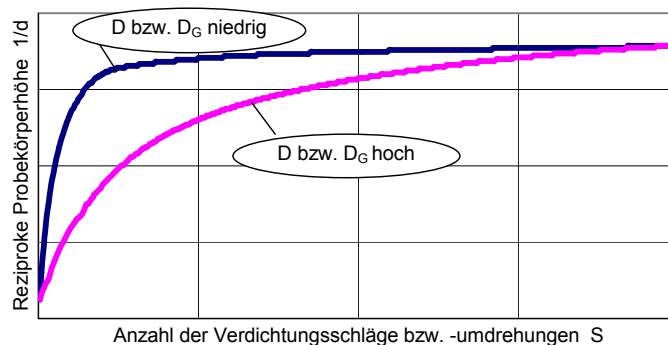


Abbildung 19: Verdichtungskurven mit Verdichtungswiderständen idealisierter Gemische

Abbildung 19 verdeutlicht die eben genannten Zusammenhänge anhand von idealisierten Gemischen. Dargestellt sind die Kehrwerte der Probekörperhöhen des Marshall- bzw. Gyrotorprobekörpers in Abhängigkeit der Anzahl der Verdichtungsschläge bzw. -umdrehungen für zwei Gemische mit unterschiedlichen Verdichtbarkeiten. Beide Gemische weisen gleiche Probekörperhöhen zu Beginn des Verdichtungsprozesses und nach Aufbringen einer unendlich großen Verdichtungsarbeit auf. Allerdings zeigt das leicht verdichtbare Gemisch eine starke Krümmung der Verdichtungskurve und einen daraus resultierenden niedrigen Verdichtungswiderstand. Das schwer verdichtbare Gemisch dagegen ist durch eine geringe Krümmung der Verdichtungskurve mit daraus folgendem hohem Verdichtungswiderstand charakterisiert.

5 Untersuchungen

5.1 Untersuchungsprogramm

In Abbildung 20 ist das Untersuchungsprogramm dieser Arbeit dargestellt.

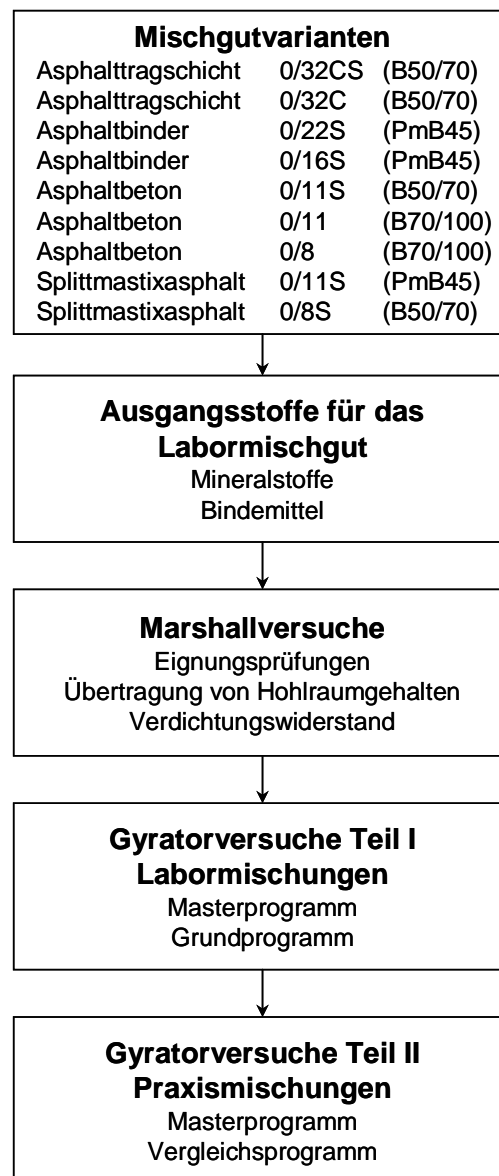


Abbildung 20: Struktur des Untersuchungsprogrammes

Für die Untersuchungen an im Labor hergestelltem Mischgut werden vier Asphaltarten in insgesamt neun Mischgutvarianten, welche ein möglichst breites Spektrum der ZTV Asphalt-StB und ZTVT-StB abdecken, ausgewählt. In den Mischgutvarianten kommen sowohl Felsgestein als auch Kies, sowie Destillationsbitumen und Polymermodifiziertes Bitumen zur Anwendung. Die verwendeten Mineralstoffe und Bindemittel werden entsprechend den Anforderungen Technischer Lieferbedingungen bzw. Normen untersucht.

In den Marshallversuchen werden für die neun Mischgutvarianten konventionelle Eignungsprüfungen durchgeführt und gemäß Abschnitt 4.3.2 ein Zusammenhang zwischen den Hohlraumgehalten nach Tauchwägung und Ausmessen an den Marshallprobekörpern hergestellt. Zusätzlich werden Marshallprobekörper mit 2x100 Schlägen hergestellt, mit denen Aussagen zur Verdichtbarkeit getroffen werden.

Die Gyratorversuche gliedern sich in zwei Teile, wobei im ersten Teil Untersuchungen an Labormischgut durchgeführt werden und im zweiten Teil eine Praxisanbindung mit Mischgut aus Asphalt-Kontrollprüfungen erfolgt.

Im ersten Teil werden im sog. „Masterprogramm“ mit Labormischgut aller neun Mischgutvarianten Gyratorprobekörper mit 400 Umdrehungen hergestellt und Zahlenwerte für die Kenngrößen gemäß Abschnitt 4.3 zur Absicherung der Auswertesystematik ermittelt. Darauf aufbauend werden im sog. „Grundprogramm“ ebenfalls für alle neun Mischgutvarianten mit ausgewählten Umdrehungszahlen Gyratorprobekörper hergestellt und gemäß Abschnitt 4.3.2 ein Zusammenhang zwischen den Hohlraumgehalten nach Tauchwägung und Ausmessen an den Gyratorprobekörpern ermittelt.

Im zweiten Teil der Gyratorversuche werden im sog. „Masterprogramm“ mit großtechnisch hergestelltem Praxismischgut aus Asphaltkontrollprüfungen der Straßenbauverwaltung entsprechend den neun ausgewählten Mischgutvarianten, Probekörper mit 400 Umdrehungen hergestellt und Wertebereiche für die Kenngrößen ermittelt und somit ein erster Bewertungshintergrund für das Gyratorverfahren geschaffen. Im sog. „Vergleichsprogramm“ werden zusätzlich zur vorgeschlagenen Auswertesystematik mit den Praxisgemischen Gyratorprobekörper mit Hohlraumgehalten der Marshallprobekörper hergestellt, die zugehörigen Umdre-

hungenzahlen fixiert, ein Vergleich zum Marshallverfahren hergestellt und der Zusammenhang zwischen den Hohlraumgehalten nach Ausmessen und Tauchwägung ermittelt.

5.2 Ausgangsstoffe für das Labormischgut

5.2.1 Mineralstoffe

<i>Mineralstoff</i>	<i>Sz_{8/12}</i> <i>[M.-%]</i>	<i>Lieferkörnung</i> <i>[mm]</i>	<i>ρ_{R,Min}</i> <i>[g/cm³]</i>
<i>Diabas</i>	<i>13,2</i>	<i>ESP 22/32</i>	<i>2,884</i>
		<i>ESP 16/22</i>	<i>2,855</i>
		<i>ESP 11/16</i>	<i>2,876</i>
		<i>ESP 8/11</i>	<i>2,902</i>
		<i>ESP 5/8</i>	<i>2,885</i>
		<i>ESP 2/5</i>	<i>2,857</i>
		<i>EBS 0/2</i>	<i>2,859</i>
<i>Kalksteinmehl</i>	<i>-</i>	<i>Füller < 0,09</i>	<i>2,703</i>
<i>Kies</i>	<i>19,2</i>	<i>2/32</i>	<i>2,716</i>
		<i>NS 0/2</i>	<i>2,724</i>

Tabelle 2: Kennwerte der verwendeten Mineralstoffe

Zur Herstellung für das Labormischgut werden für die Mischgutvariante Asphalttragschicht 0/32C Mineralstoffe aus ungebrochenem Kies ausgewählt, in allen anderen Varianten werden

Diabasedelsplitte und -edelbrechsand in Verbindung mit Kalksteinfüller verwendet. Für die Untersuchungen werden die Edelsplitte von Über- und Unterkorn befreit. Aus dem Kiessandgemisch wird der Natursand abgesiebt und der Kies in den einzelnen Fraktionen von Über- und Unterkorn befreit. Der Edelbrechsand, der Kalksteinfüller und der abgesiebte Natursand werden jeweils als Lieferkörnung verwendet. Für die Varianten der Splittmastixasphalte wird als stabilisierender Zusatz Cellulosefaser verwendet.

In Tabelle 2 ist die Rohdichte der verwendeten Mineralstoffe $\rho_{R,Min}$ und der Schlagzertrümmungswert $Sz_{8/12}$ zusammengestellt. In der Spalte Lieferkörnung sind Edelsplitte mit ESP, Edelbrechsand mit EBS und Natursand mit NS bezeichnet. Alle Mineralstoffe erfüllen die für den jeweiligen Verwendungszweck geltenden Anforderungen der TL Min-StB [49] sowie die ergänzenden Festlegungen der ZTV und unterliegen der langjährigen Güteüberwachung nach RG Min-StB [50].

5.2.2 Bindemittel

<i>Prüfgegenstand</i>	<i>50/70</i>	<i>70/100</i>	<i>PmB 45</i>
<i>Nadelpenetration [0,1 mm]</i>	58	83	52
<i>Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]</i>	52,9	48,2	62,0
<i>Brechkpunkt nach Fraaß [°C]</i>	-16	-15	-14
<i>Dichte [g/cm³]</i>	1,043	1,030	1,025

Tabelle 3: Kennwerte der verwendeten Bindemittel

Als Bindemittel werden für das Labormischgut, die in den ZTV geforderten Bitumensorten ausgewählt. Insgesamt werden zwei Destillationsbitumen (50/70, 70/100) sowie ein Polymermodifiziertes Bitumen (PmB 45) verwendet. Die wichtigsten Normkennwerte dieser Bindemittel (Nadelpenetration [52], Erweichungspunkt Ring und Kugel [53], Brechpunkt nach Fraaß [54] und Dichte [55]) sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die ausgewählten Bindemittel erfüllen in den untersuchten Punkten die Anforderungen der DIN EN 12591 [51] bzw. der TL-PmB [56].

5.3 Marshallversuche

Im Rahmen von Eignungsprüfungen werden aus allen neun Mischgutvarianten Marshallprobekörper mit 2 x 50 Schlägen hergestellt, der Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalten nach Tauchwägung und Ausmessen sowie der Verdichtungswiderstand ermittelt. In einer weiteren Serie wird der Verdichtungswiderstand aus Marshallprobekörpern, hergestellt mit 2 x 100 Schlägen, berechnet.

5.3.1 Eignungsprüfungen

Die Erstellung der Eignungsprüfungen erfolgt gemäß dem Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt [57]. Dabei werden für jede Mischgutvariante Marshallprobekörper mit 2 x 50 Schlägen mit drei unterschiedlichen Bindemittelgehalten hergestellt. Die Probekörper mit Destillationsbitumen werden bei $135 \pm 5^\circ\text{C}$, die mit Polymermodifiziertem Bitumen bei $145 \pm 5^\circ\text{C}$ verdichtet. In Abbildung 21 sind die Diagramme der Korngrößenverteilung der neun untersuchten Mischgutvarianten mit den ZTV-Sieblinienbändern dargestellt.

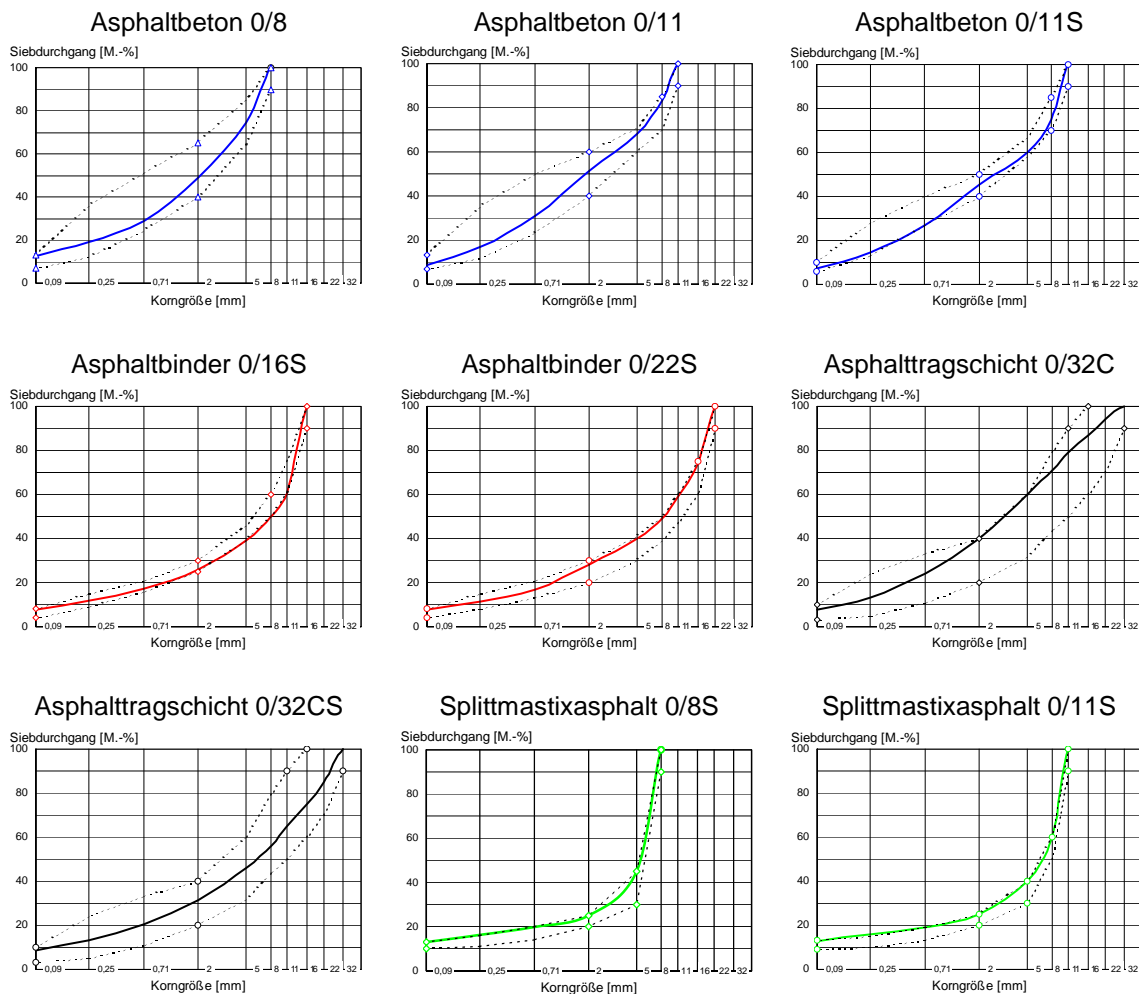


Abbildung 21: Ergebnisse der Eignungsprüfungen – Korngrößenverteilung

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Eignungsprüfungen, in Abhängigkeit des gewählten Bindemittelgehaltes B, bezüglich des Hohlraumgehaltes H_{bit} (nach Tauchwägung) zusammengestellt, sowie der fiktive Ausfüllungsgrad FA aufgeführt. Um die nachfolgenden Untersuchungen auf eine möglichst breite Basis zu stellen, wird der Bindemittelgehalt durchwegs um jeweils 0,5 M.-% variiert. Ausgangspunkt ist dabei für jede Mischgutvariante der in den entsprechenden ZTV geforderte Mindestbindemittelgehalt, der als niedrigster Wert der jeweiligen Mischgutvariante kurz mit (n) gekennzeichnet wird. Der mittlere Bindemittelgehalt der

jeweiligen Mischgutvariante wird kurz mit (m), der jeweils höchste Bindemittelgehalt mit (h) bezeichnet.

<i>Mischgut</i>	<i>B</i> [M.-%]	<i>H_{bü}</i> [Vol.-%]	<i>FA</i> [%]
	6,4 (n)	2,1	88
<i>Asphaltbeton 0/8</i>	6,9 (m)	1,7	91
	7,4 (h)	1,5	92
	6,2 (n)	4,9	75
<i>Asphaltbeton 0/11</i>	6,7 (m)	2,8	85
	7,2 (h)	2,3	88
	5,9 (n)	5,3	73
<i>Asphaltbeton 0/11S</i>	6,4 (m)	4,3	78
	6,9 (h)	3,1	84
	4,2 (n)	7,1	59
<i>Asphaltbinder 0/16S</i>	4,7 (m)	5,9	66
	5,2 (h)	4,9	72
	4,0 (n)	7,6	56
<i>Asphaltbinder 0/22S</i>	4,5 (m)	5,9	65
	5,0 (h)	4,2	74
	3,6 (n)	5,6	60
<i>Asphalttragschicht 0/32C</i>	4,1 (m)	3,6	73
	4,6 (h)	2,4	82
	3,6 (n)	8,1	51
<i>Asphalttragschicht 0/32CS</i>	4,1 (m)	6,3	61
	4,6 (h)	4,9	69
	7,0 (n)	4,5	78
<i>Splittmastixasphalt 0/8S</i>	7,5 (m)	4,0	81
	8,0 (h)	3,3	85
	6,5 (n)	3,9	80
<i>Splittmastixasphalt 0/11S</i>	7,0 (m)	3,7	82
	7,5 (h)	2,6	87

**Tabelle 4: Ergebnisse der Eignungsprüfungen
Bindemittelgehalt, Hohlraumgehalt, fiktiver Ausfüllungsgrad**

Trotz der gewählten großen Bindemittelvariation von 0,5 % erfüllen von den insgesamt 27 Gemischen ca. $\frac{2}{3}$ der Gemische die Anforderungen der ZTV an den Hohlraumgehalt H_{bit} . Ca. $\frac{3}{4}$ der Gemische liegen innerhalb des, von [58] für den fiktiven Ausfüllungsgrad der Hohlräume mit Bindemittel FA, als günstig betrachteten Bereiches zwischen 60 und 90 %. Alle ausgewählten Gemische werden deshalb als repräsentativ betrachtet und für die nachfolgenden Untersuchungen weiterverwendet.

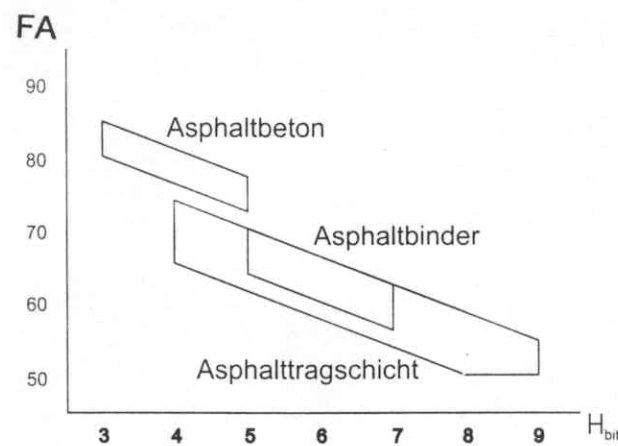


Abbildung 22: optimale Bereiche für den fiktiven Ausfüllungsgrad FA nach [59]

Im Hinblick auf Praxisrelevanz sollen die Gemische aus Gründen der Standfestigkeit und der Wirtschaftlichkeit einen möglichst niedrigen Bindemittelgehalt aufweisen, außerdem die Anforderungen der ZTV an den Hohlraumgehalt erfüllen und im Allgemeinen einen fiktiven Ausfüllungsgrad innerhalb der in Abbildung 22 aufgeführten Bereiche aufweisen. Unter diesen Gesichtspunkten kann für jede Mischgutvariante ein Gemisch als optimal herausgefiltert werden und ist in Tabelle 4 fett eingetragen, auf Interpolation zwischen den Einzelwerten wurde dabei verzichtet. Bei sechs von neun Mischgutvarianten ist das Gemisch mit dem mittleren Bindemittelgehalt (m) die für die Praxis zu empfehlende Variante. Bei den restlichen

drei Mischgutvarianten ist dies für die Gemische mit den niedrigsten Bindemittelgehalten (n) der Fall.

Die vollständigen Ergebnisse der Eignungsprüfungen sind in den Anlagen 1.1 bis 1.9 zusammengestellt.

5.3.2 Übertragung von Hohlraumgehalten

In Abbildung 23 sind für die jeweils 6 Marshallprobekörper einer Mischgutvariante die Hohlraumgehalte aus dem Ausmessverfahren $H_{\text{bit,A}}$ über den Hohlraumgehalten aus dem Tauchwägeverfahren $H_{\text{bit,T}}$ dargestellt.

In den Diagrammen sind die dazugehörigen Regressionsgeraden und -gleichungen sowie die daraus resultierenden Bestimmtheitsmaße R^2 aufgeführt (vgl. Abschnitt 4.3.2). Auf die unterschiedliche Skalierung der Achsen der Diagramme (Höchstwerte 3,5; 7,0 und 14 Vol.-%) sei hingewiesen.

Für die Marshallprobekörper der untersuchten Gemische zeigt sich eine lineare Abhängigkeit der Hohlraumgehalte nach Ausmessen von den Hohlraumgehalten nach Tauchwägung. Diese wird bei den untersuchten Asphaltbetonen, -bindern und -tragschichten sowie beim Splittmastixasphalt 0/8S mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 \geq 0,90$ deutlich. Auch beim Splittmastixasphalt 0/11S zeigt sich dieser Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,85$ noch hinreichend genau. Herauszustellen ist, dass sich die linearen Abhängigkeiten sowohl für hohlraumärmere ($H_{\text{bit,T}} < 5,0$ Vol.-%) als auch für hohlraumreichere ($H_{\text{bit,T}} > 5,0$ Vol.-%) Mischgutvarianten ergeben.

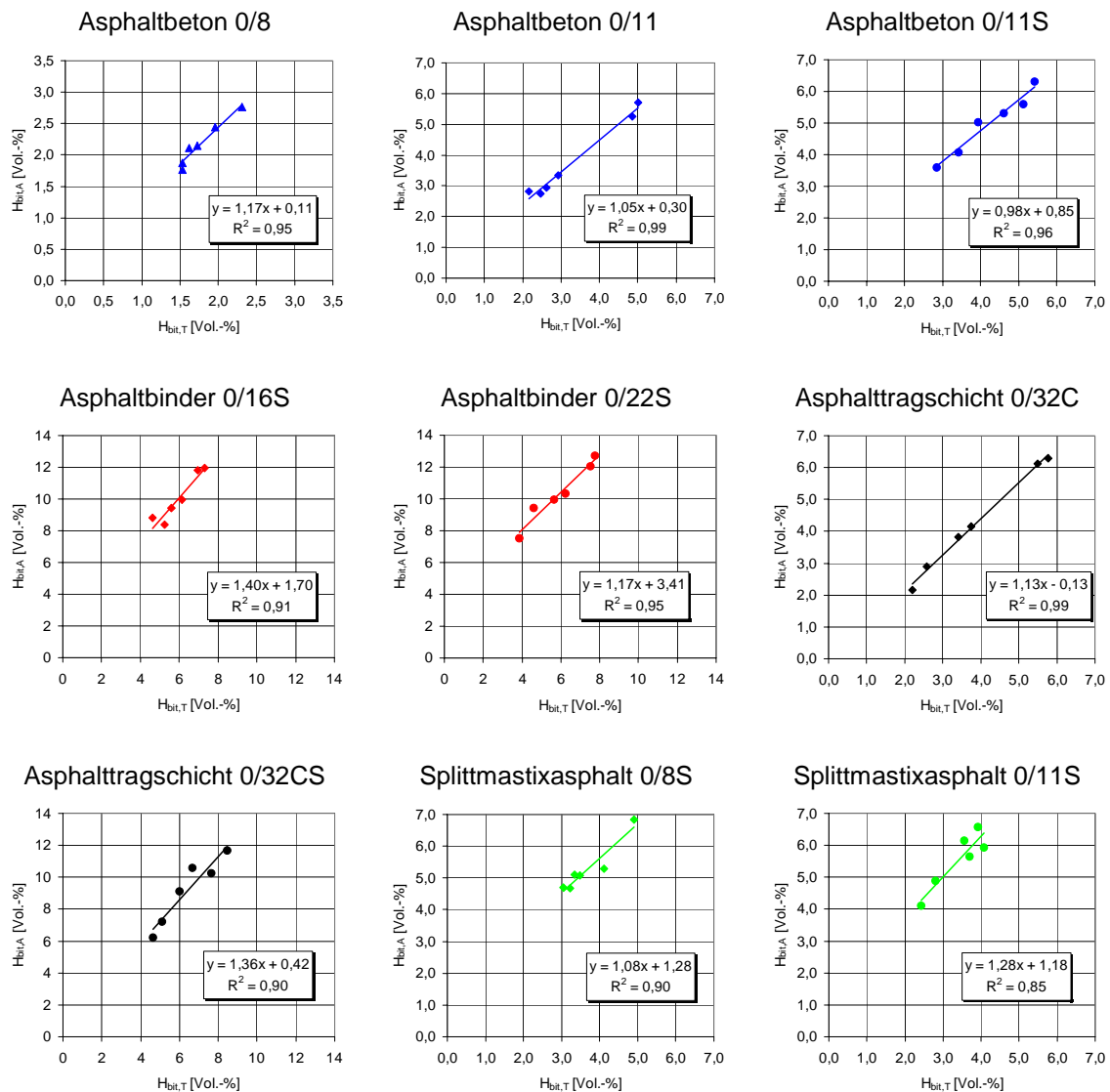


Abbildung 23: Übertragung von Hohlraumgehalten - Marshallprobekörper

Diese Zusammenhänge liegen in den Gyratorversuchen an Labormischungen (Abschnitt 5.4) der Ermittlung der minimalen Verdichtungsleistung zugrunde. Dazu wird obere Grenze der in den ZTV geforderten Hohlraumgehalte, die sich auf das Tauchwägebewertungsverfahren ($H_{bit,T,ZTV}$) bezieht, für jede Mischgutvariante in Hohlraumgehalte bezogen auf das Ausmessverfahren ($H_{bit,A,ZTV}$) umgerechnet. Die Ergebnisse der Umrechnung sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

<i>Mischgutvariante</i>	$H_{bit,T,ZTV}$ [Vol.-%]	$H_{bit,A,ZTV}$ [Vol.-%]
<i>Asphaltbeton 0/8</i>	4,0	4,8
<i>Asphaltbeton 0/11</i>	4,0	4,5
<i>Asphaltbeton 0/11S</i>	5,0	5,7
<i>Asphaltbinder 0/16S</i>	7,0	11,5
<i>Asphaltbinder 0/22S</i>	7,0	11,6
<i>Asphalttragschicht 0/32C</i>	10,0	11,2
<i>Asphalttragschicht 0/32CS</i>	10,0	14,0
<i>Splittmastixasphalt 0/8S</i>	4,0	5,6
<i>Splittmastixasphalt 0/11S</i>	4,0	6,3

Tabelle 5: Übertragung der ZTV-Obergrenzen - Marshallprobekörper

5.3.3 Verdichtungswiderstand

Sowohl bei der Herstellung der Marshallprobekörper im Rahmen der Eignungsprüfung (2x50 Schläge) als auch, wie in [60] empfohlen, bei der Herstellung von Probekörpern in zusätzlichen Serien mit 2x100 Schlägen wird die Höhenabnahme aufgezeichnet und die Verdichtbarkeit in Form von D_{2x50} - bzw. D_{2x100} -Werten gemäß Abschnitt 4.3.6 berechnet.

In Abbildung 24 ist der Verdichtungswiderstand für alle untersuchten Gemische zusammengestellt. Dabei sind die D_{2x50} - bzw. D_{2x100} -Werte der einzelnen Mischgutvarianten jeweils über die Kategorien des Bindemittelgehaltes (nB: niedrig, mB: mittel, hB: hoch) aufgetragen und in zwei Diagrammen gegenübergestellt. In den Legenden sind Abkürzungen für die Mischgutvarianten verwendet.

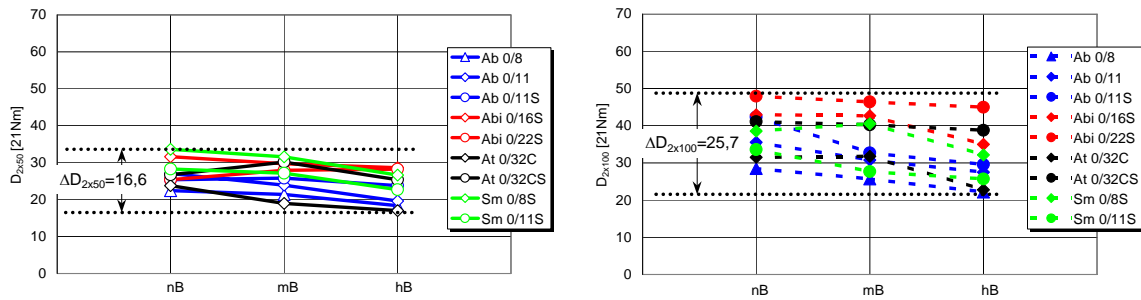


Abbildung 24: Verdichtungswiderstand D_{2x50} und D_{2x100} – Marshallprobekörper

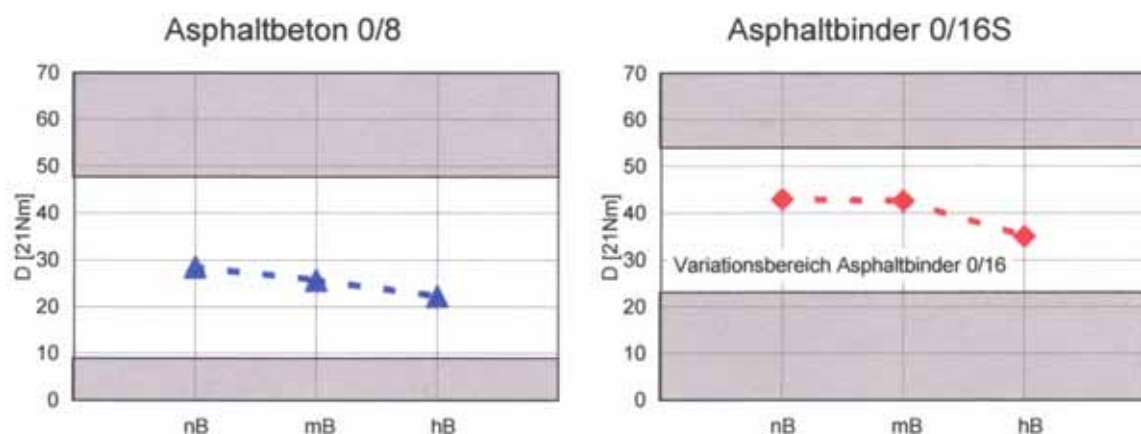
Wie aus dem linken Diagramm ersichtlich ist, streuen die Absolutwerte des Verdichtungswiderstandes D_{2x50} , über alle Gemische betrachtet, zwischen 17,0 [21 Nm] (hB Asphalttragschicht 0/32C) und 33,6 [21 Nm] (nB Splittmastixasphalt 0/8S). Im rechten Diagramm ist zu sehen, dass der Verdichtungswiderstand D_{2x100} Werte zwischen 22,2 [21 Nm] (hB Asphaltbeton 0/8) und 47,9 [21 Nm] (nB Asphaltbinder 0/22S) aufweist. Für die untersuchten Gemische ergeben sich Spannweiten $\Delta D_{2x50} = 16,6$ [21 Nm] und $\Delta D_{2x100} = 25,7$ [21 Nm]. Die Spanne ΔD_{2x100} ist somit um über 50 % breiter als die Spanne ΔD_{2x50} .

Mit den D_{2x100} -Werten lassen sich die untersuchten Mischgutvarianten hinsichtlich Verdichtbarkeit besser unterscheiden als mit den D_{2x50} -Werten. Die Empfehlung aus [60], die Verdichtbarkeit von Walzasphalt aus zusätzlich zur Eignungsprüfung mit 2x100 Schlägen hergestellten Probekörpern zu ermitteln, bedeutet zwar einen labortechnisch höheren Aufwand, kann aber durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt werden. Für den Rest dieser Arbeit wird der Verdichtungswiderstand ermittelt aus der Herstellung von Marshallprobekörpern mit 2x100 Schlägen als D-Wert bezeichnet.

Um die Praxisrelevanz der ausgewählten Mischgutvarianten beurteilen zu können, wird in Abbildung 25 der Verdichtungswiderstand für eine leicht zu verdichtende (Asphaltbeton 0/8) und eine schwer zu verdichtende Mischgutvariante (Asphaltbinder 0/16S) gesondert betrachtet und soweit möglich mit den in [60] ermittelten und in [41] dargestellten Variationsbereichen verglichen. Zu berücksichtigen ist, dass die Variationsbereiche dem Asphaltspektrum der 80er

Jahre [61] entsprechen. Standfeste splittreiche S-Mischgutvarianten, wie sie in dieser Arbeit mit untersucht werden, sind erst Ende der 90er Jahre im Zuge steigender Verkehrsbelastungen in [43] verankert worden.

Aus Abbildung 25 ist ersichtlich, dass der Verdichtungswiderstand des Asphaltbeton 0/8 mit zunehmendem Bindemittelgehalt gleichmäßig abnimmt. Die D-Werte des Asphaltbeton 0/8 liegen im unteren Teil des, durch die grauen Grenzen gekennzeichneten Variationsbereiches. Der Verdichtungswiderstand des Asphaltbinder 0/16S bewegt sich beim niedrigen und mittleren Bindemittelgehalt auf etwa gleichem Niveau und nimmt erst beim hohen Bindemittelgehalt ab. Die D-Werte liegen vergleichsweise im mittleren Teil des Variationsbereiches eines Asphaltbinder 0/16.



**Abbildung 25: Verdichtungswiderstände mit Variationsbereichen [41]
Marshallprobekörper**

Dieser Vergleich ist in Anlage 2 für alle Mischgutvarianten dargestellt. Es ist festzustellen, dass der Verdichtungswiderstand mit zunehmenden Bindemittelgehalt (nB \Rightarrow hB) mit wenigen Ausnahmen tendenziell abnimmt. Dadurch wird bestätigt, dass höhere Bindemittelgehalte die „Schmierwirkung“ des Bindemittels während der Verdichtung verstärken, die Gemische sind in der Regel leichter zu verdichten.

Zusammenfassend können die ausgewählten Gemische hinsichtlich Verdichtbarkeit als praxisrelevant bezeichnet werden.

5.4 Gyratorversuche an Labormischungen – Masterprogramm

Im Masterprogramm werden mit den 27 Gemischen der neun Mischgutvarianten je zwei Gyratorprobekörper mit einer Verdichtungsleistung von $n = 400$ Umdrehungen hergestellt. Bei der Herstellung der Probekörper erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung der Probekörperhöhen, die gemäß Abschnitt 4.2 in Masterkurven überführt und aus denen gemäß Abschnitt 4.3 Kennwerte abgeleitet werden.

In den weiteren Betrachtungen dieser Arbeit werden in den jeweiligen Abschnitten die Ergebnisse für eine leicht zu verdichtende (Asphaltbeton 0/8) und eine schwer zu verdichtende Mischgutvariante (Asphaltbinder 0/16S) exemplarisch dargestellt und diskutiert. Die Ergebnisse für alle untersuchten Mischgutvarianten sind in den Anlagen zusammengestellt und werden im jeweiligen Abschnitt zusammenfassend beschrieben.

5.4.1 Masterkurven

In den Diagrammen der Abbildung 26 (exemplarisch) und der Anlage 3 (komplett) sind die Masterkurven für die untersuchten Mischgutvarianten als gemittelte Verläufe aus jeweils zwei Einzelkurven dargestellt. In der Legende sind die Kategorien des Bindemittelgehaltes beschrieben (nB: niedrig, mB: mittel, hB: hoch).

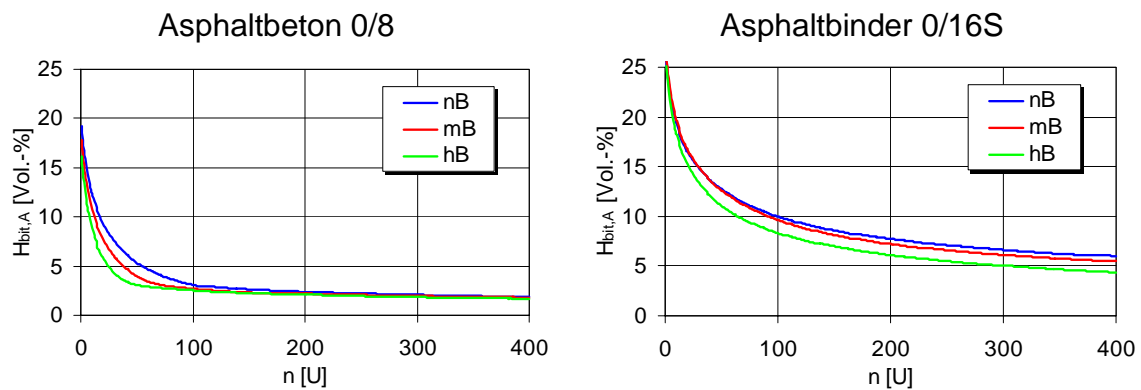


Abbildung 26: Hohlraumgehalt-Masterkurven - Labormischungen

Grundsätzlich ist aus dem Verlauf der Masterkurven festzustellen, dass die Gemische mit den hohen Bindemittelgehalten mit zunehmender Umdrehungszahl die schnellste Abnahme des Hohlraumgehaltes aufweisen. Danach folgen die Gemische mit den mittleren Bindemittelgehalten. Die Gemische mit den niedrigen Bindemittelgehalten zeigen mit zunehmender Verdichtungsleistung die langsamste Abnahme des Hohlraumgehaltes. Dieses Verhalten ist auf die „Schmierwirkung“ des Bindemittels während der Verdichtung zurückzuführen, welche erwartungsgemäß mit steigendem Bindemittelgehalt zunimmt.

Anhand der Masterkurven lassen sich die Gemische in zwei Gruppen (A und B) teilen und charakterisieren. Die Gruppe A charakterisiert leicht zu verdichtende Gemische, die ab einer bestimmten Umdrehungszahl einen nahezu waagrecht-asymptotischen Kurvenverlauf aufweisen. In diesem Bereich stellt sich ein annähernd hydrostatischer Zustand im Probekörperinneren ein. Die daraus resultierende geringe Hohlraumgehaltabnahme resultiert vorwiegend aus den in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Mörtelauspressungen.

In der Gruppe B, die schwer zu verdichtende Gemische charakterisiert, laufen auch nach hohen Umdrehungszahlen die Kurven noch nicht parallel zur waagrechten Asymptote, die Gemische weisen innerhalb einer Mischgutvariante in Abhängigkeit des Bindemittelgehaltes noch unterschiedliche Hohlraumgehalte auf. Die fortdauernde Hohlraumgehaltabnahme ist

vorwiegend auf andauernde Kornumlagerungen und auf eine damit verbundene Verkleinerung der Hohlräume oder im Extremfall auf Kornzertrümmerungen zurückzuführen.

Für die beiden in Abbildung 26 exemplarisch dargestellten Mischgutvarianten ergibt sich folgende Charakterisierung: Der Asphaltbeton 0/8 ist als leicht zu verdichtende Variante der Gruppe A zuzuordnen. Der asymptotische Kurvenverlauf stellt sich bei allen drei Bindemittelgehalten ab ca. 100 Umdrehungen ein. Die Gemische des schwer zu verdichtenden Asphaltbinder 0/16S sind ausnahmslos der Gruppe B zuzuordnen. Sie zeigen keinen waagrecht asymptotischen Verlauf.

5.4.2 Minimale Verdichtungsleistung

Mit dem in Abschnitt 5.3.2 ermittelten linearen Zusammenhang zwischen Tauchwägung und Ausmessen können aus den Masterkurven die Umdrehungszahlen ermittelt werden, mit denen die obere Grenze der in den ZTV geforderten Hohlraumgehalte erreicht werden. Diese stellen gemäß Abschnitt 4.3.1 Kennwerte für die minimale (mindestens erforderliche) Verdichtungsleistung der untersuchten Gemische dar.

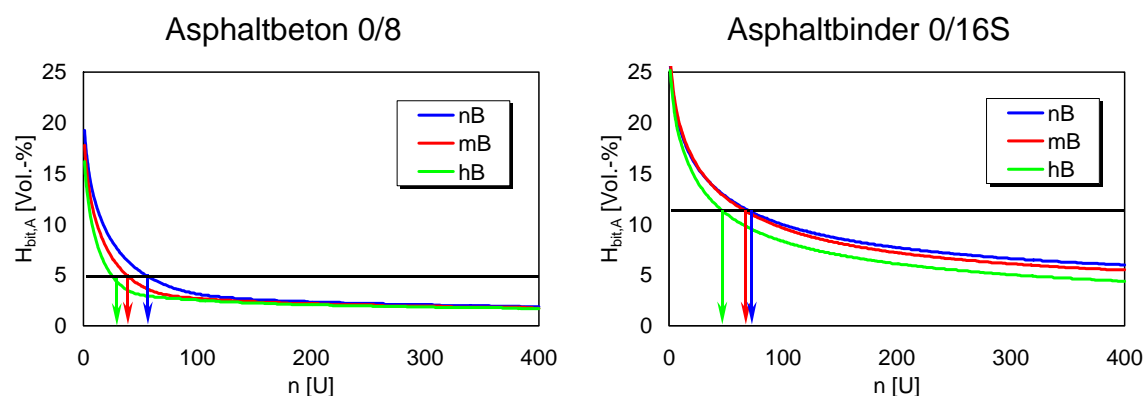


Abbildung 27: minimale Verdichtungsleistung - Labormischungen

Dazu werden die in Tabelle 5 zusammengestellten Hohlraumgehalte ($H_{\text{bit,A,ZTV}}$) in die Masterkurven eingetragen und die dazugehörigen Umdrehungszahlen (n_{ZTV}) fixiert. Diese Systematik ist in den Diagrammen der Abbildung 27 exemplarisch und in der Anlage 4 für alle Mischgutvarianten dargestellt.

In Tabelle 6 sind die Kennwerte für die minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} für alle Gemische zusammengestellt.

<i>Mischgutvariante</i>	<i>nB</i>	<i>mB</i>	<i>hB</i>
<i>Asphaltbeton 0/8</i>	59	40	27
<i>Asphaltbeton 0/11</i>	81	59	31
<i>Asphaltbeton 0/11S</i>	125	70	56
<i>Asphaltbinder 0/16S</i>	68	65	45
<i>Asphaltbinder 0/22S</i>	46	31	27
<i>Asphalttragschicht 0/32C</i>	11	3	2
<i>Asphalttragschicht 0/32CS</i>	25	18	16
<i>Splittmastixasphalt 0/8S</i>	303	171	149
<i>Splittmastixasphalt 0/11S</i>	105	80	56

Tabelle 6: minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} - Labormischungen

Es kann grundsätzlich festgehalten werden, dass mit zunehmendem Bindemittelgehalt ($nB \Rightarrow hB$) die Kennwerte für die minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} innerhalb einer Mischgutvariante abnehmen. Mit wenigen Ausnahmen liegen n_{ZTV} der untersuchten Gemische unter 100 Umdrehungen. Auffällig sind die hohen Werte für alle drei Gemische des Splittmastixasphalt 0/8S. Da auch in Asphaltkontrollprüfungen die Anforderungen der ZTV an den Hohlraumgehalt am Marshallprobekörper auffällig oft nicht eingehalten werden können, ist dies ein weite-

rer Beleg dafür, dass die Hohlraumgehalt-Obergrenze für diese Mischgutsorte im technischen Regelwerk zu niedrig angesetzt ist.

Mit der minimalen Verdichtungsleistung n_{ZTV} werden im Grundprogramm (Abschnitt 5.5) weitere Gyratorprobekörper hergestellt.

5.4.3 Maximale Verdichtungsleistung

In logarithmierten Masterkurven werden Knickpunkte (KP) sichtbar, mit denen ein verändertes Materialverhalten im Probekörper auftritt. Die Umdrehungszahlen bis zum Knickpunkt stellen gemäß Abschnitt 4.3.3 Kennwerte für die maximale Verdichtungsleistung der untersuchten Gemische dar. In Abbildung 28 sind die Diagramme mit den logarithmierten Masterkurven exemplarisch und in Anlage 5 für alle untersuchten Mischgutvarianten dargestellt.

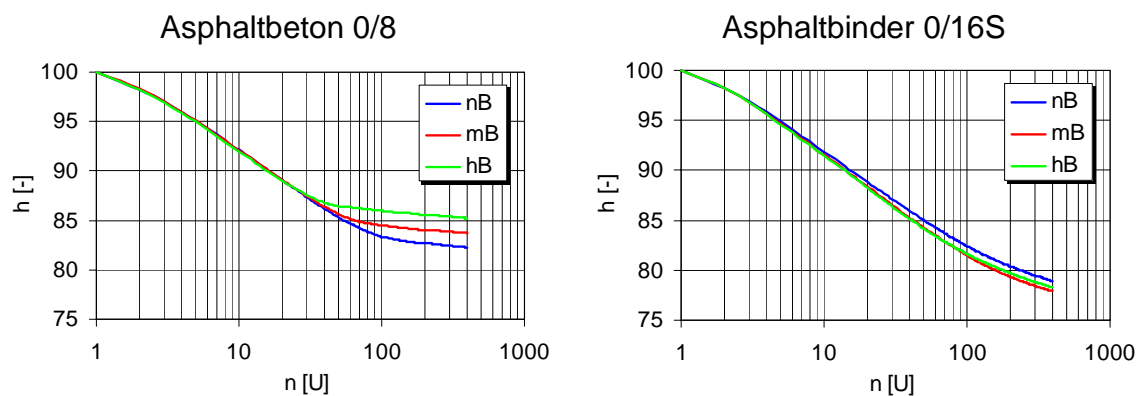


Abbildung 28: logarithmierte Masterkurven – Labormischungen

In den Diagrammen der Abbildung 28 ist zu erkennen, dass die Gemische des Asphaltbeton 0/8 einen deutlichen Knick im Kurvenverlauf aufweisen. Bei diesen Gemischen zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Lage des Knickpunktes vom Bindemittelgehalt. Dieses Verhalten

tritt, wie in Anlage 5 ersichtlich bei allen leichter zu verdichten Mischgutvarianten auf. Bei den Gemischen des Asphaltbinder 0/16S und den schwerer zu verdichtenden Mischgutvarianten ist ebenfalls ein „Abdriften“ im Kurvenverlauf zu sehen, welches allerdings nicht so deutlich ausgeprägt erscheint.

Zur Lokalisierung der Knickpunkte wird die in Abschnitt 4.3.4 beschriebene Systematik angewendet. In Abbildung 29 ist diese Systematik beispielhaft für die Gemische des Asphaltbeton 0/8 und des Asphaltbinder 0/16S dargestellt. Dabei sind in den jeweils linken Diagrammen die logarithmierten Masterkurven mit den polynomischen Funktionen und in den rechten Diagrammen die zweiten Ableitungen im Bereich der Knickpunkte dargestellt. Die Diagramme der Gemische mit dem niedrigen Bindemittelgehalt sind jeweils oben, die mit dem mittleren Bindemittelgehalt in der Mitte und die Diagramme der Gemische mit dem hohen Bindemittelgehalt unten angeordnet. Der Bereich ② der Überverdichtung (gemäß Abschnitt 4.3.3) ist jeweils grau hinterlegt. Die Diagramme aller Mischgutvarianten sind in Anlage 6 zusammengestellt.

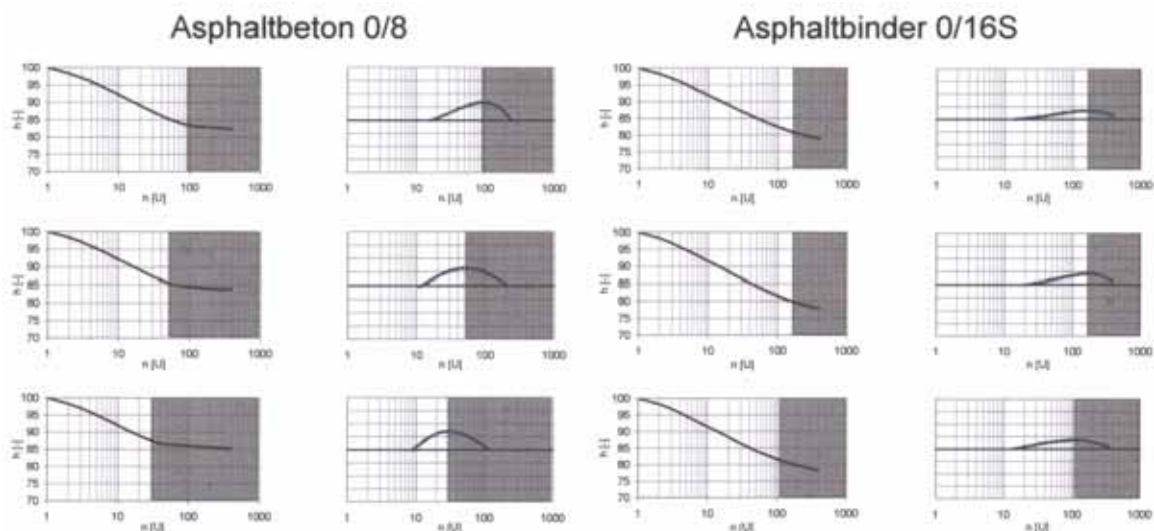


Abbildung 29: Lokalisierung der Knickpunkte - Labormischungen

In Tabelle 7 sind die mit der dargestellten Vorgehensweise abgeleiteten Kennwerte für die maximale Verdichtungsleistung n_{KP} für alle Gemische zusammengestellt. Es ist abzulesen, dass bei den leicht zu verdichtenden Mischgutvarianten (Asphaltbetone 0/8 und 0/11 sowie Asphalttragschicht 0/32C) die Umdrehungszahlen n_{KP} an denen die Knickpunkte auftreten mit zunehmenden Bindemittelgehalt ($nB \Rightarrow hB$) stetig abnehmen. Bei den restlichen Mischgutvarianten ist dies nicht durchgängig der Fall, hier liegen die Knickpunkte teilweise auf einem recht einheitlichen Niveau. Dies ist vor allem auf ein ausgeprägtes Mineralstoffgerüst dieser Varianten zurückzuführen, welches auch bei höheren Bindemittelgehalten bestimmend für die Eigenschaften der Mischgutvarianten und somit auch für die Lage des Knickpunktes bleibt. Hinzu kommt, dass aufgrund der flachen lokalen Maxima (vgl. Anlage 6) die Umdrehungszahlen bis zum Knickpunkt nur relativ „schleifend“ zu ermitteln sind.

<i>Mischgutvariante</i>	<i>nB</i>	<i>mB</i>	<i>hB</i>
<i>Asphaltbeton 0/8</i>	93	52	30
<i>Asphaltbeton 0/11</i>	135	97	38
<i>Asphaltbeton 0/11S</i>	157	208	152
<i>Asphaltbinder 0/16S</i>	166	166	108
<i>Asphaltbinder 0/22S</i>	107	153	151
<i>Asphalttragschicht 0/32C</i>	116	27	15
<i>Asphalttragschicht 0/32CS</i>	156	164	95
<i>Splittmastixasphalt 0/8S</i>	156	139	144
<i>Splittmastixasphalt 0/11S</i>	157	161	196

Tabelle 7: maximale Verdichtungsleistung n_{KP} - Labormischungen

Mit der maximalen Verdichtungsleistung n_{KP} werden im Grundprogramm (Abschnitt 5.5) weitere Gyratorprobekörper hergestellt.

5.4.4 Verdichtungswiderstand

Aus den Masterkurven wird die Verdichtbarkeit der untersuchten Gemische gemäß Abschnitt 4.3.6 in Form von D_G -Werten berechnet.

In Abbildung 30 ist der Verdichtungswiderstand für alle untersuchten Gemische zusammengestellt. Dabei sind die D_G -Werte der einzelnen Mischgutvarianten jeweils über die Kategorien des Bindemittelgehaltes (nB: niedrig , mB: mittel, hB: hoch) aufgetragen. In der Legende sind Abkürzungen für die Mischgutvarianten verwendet.

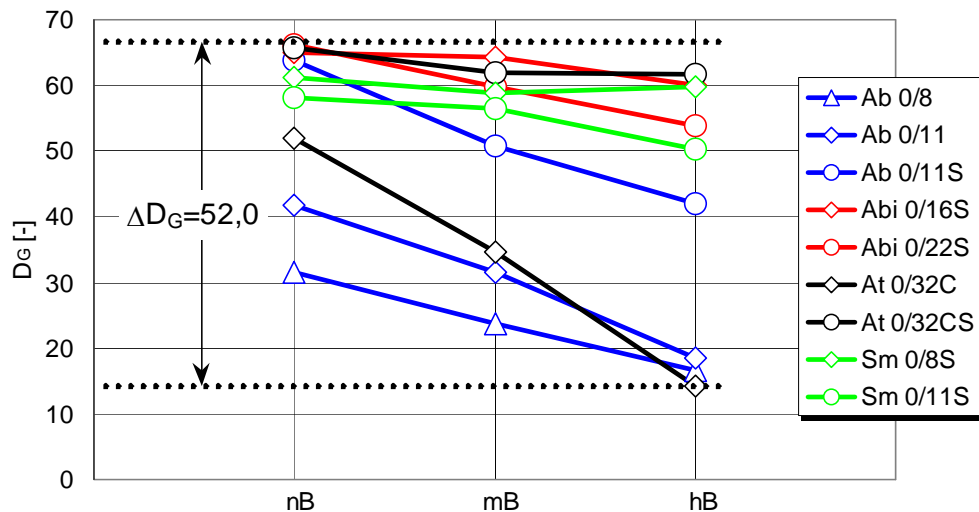


Abbildung 30: Verdichtungswiderstand D_G - Labormischungen

Es ist ersichtlich, dass die Absolutwerte des Verdichtungswiderstandes D_G , über alle Gemische betrachtet, zwischen 14,1 (hB Asphalttragschicht 0/32C) und 66,1 (nB Asphaltbinder

0/22S) streuen. Für die untersuchten Gemische ergibt sich eine Spannweite $\Delta D_G = 52,0$. Diese Spanne ist um über 100 % breiter als die Spanne $\Delta D_{2 \times 100} = 25,7$ [21 Nm] aus den Marshallversuchen. Die D_G -Werte aus den Gyratorversuchen erlauben somit eine deutlich bessere Differenzierung der Gemische als die D-Werte aus den Marshallversuchen.

Außerdem wird deutlich, dass sich die untersuchten Mischgutvarianten bezüglich der Verdichtbarkeit in zwei Gruppen teilen. Für die leicht verdichtbaren Gemische ergeben sich D_G -Werte zwischen 15 und 40. Die schwer verdichtbaren Gemische weisen Werte zwischen 40 und 65 auf. Hervorzuheben ist, dass die Gemische des Asphaltbeton 0/11 und 0/11S sowie der Asphalttragschicht 0/32C je nach Bindemittelgehalt beiden Gruppen zuzuordnen sind. Diese Bewertungen werden hinsichtlich Verarbeitbarkeit im Laborarbeitsablauf durch empirische Beobachtungen bei der Herstellung der Probekörper bestätigt.

Zur weiteren Bewertung sind in Abbildung 31 (exemplarisch) und in Anlage 7 (komplett) die Verdichtungswiderstände D_G über die Kategorien des Bindemittelgehaltes (nB: niedrig, mB: mittel, hB: hoch) je Mischgutvariante in einem Diagramm aufgetragen. Zum Vergleich sind die D-Werte aus den Marshallversuchen mit aufgeführt.

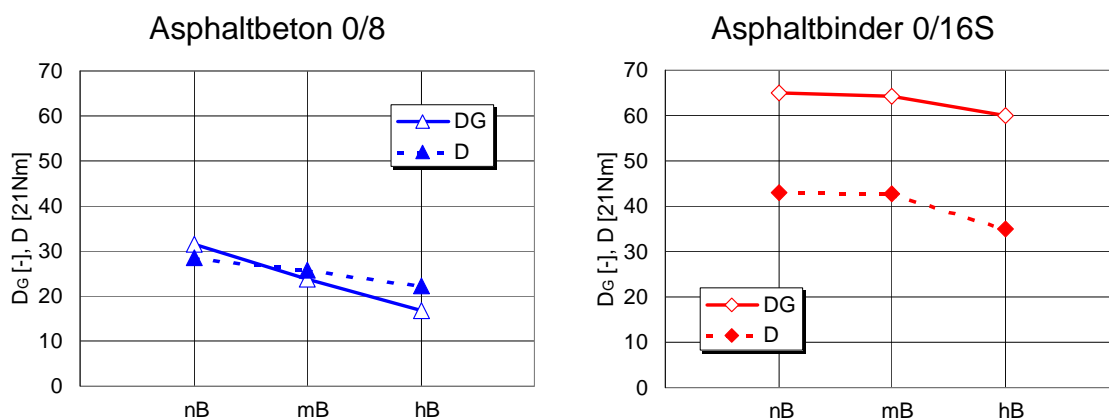


Abbildung 31: Verdichtungswiderstand - Vergleich Gyrator- und Marshallversuche

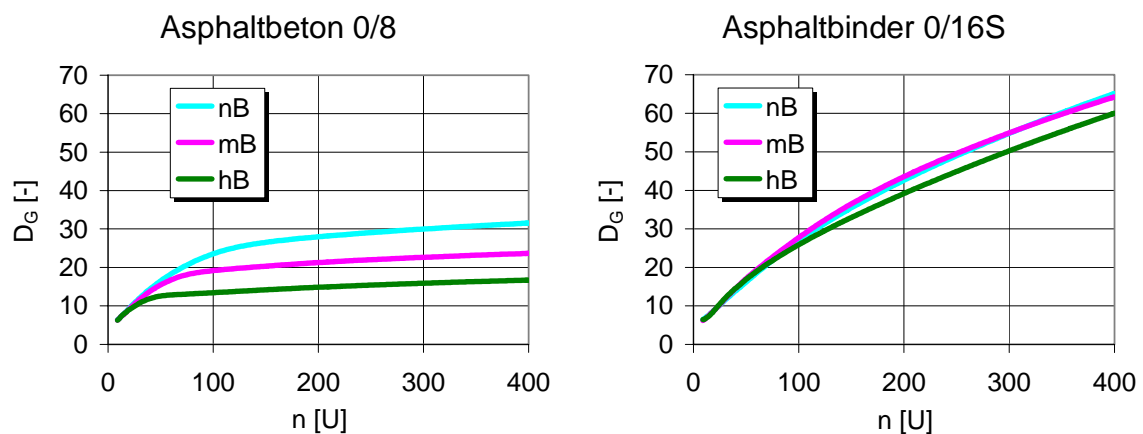
Die Verdichtungswiderstände D_G und D des Asphaltbeton 0/8 liegen beim mittleren Bindemittelgehalt auf gleichem Niveau. Beim niedrigen Bindemittelgehalt ergeben sich vergleichsweise höhere, bei den hohen Bindemittelgehalten dagegen vergleichsweise niedrigere D_G -Werte. Dieses Bild zeigt sich vor allem bei bindemittelreichen Mischgutvarianten, deren Tragverhalten durch die Steifigkeit des Mörtels bestimmt wird. Bei der knetenden Gyratorverdichtung führt dabei die „Schmierwirkung“ des Bindemittels zu einer stärkeren Abnahme des Verdichtungswiderstandes als bei der schlagenden Marshallverdichtung.

Die Verdichtungswiderstände D_G des Asphaltbinder 0/16S liegen in etwa parallel verschoben deutlich über den Verdichtungswiderständen D . Sie weisen für die niedrigen und mittleren Bindemittelgehalte jeweils das gleiche Niveau auf und nehmen erst mit den hohen Bindemittelgehalten ab. Das Tragverhalten der standfesten S-Mischgutvarianten resultiert hauptsächlich aus einem ausgeprägtem Korngerüst, in dem das Bindemittel die Wirkung des „Klebstoffes“ übernimmt und nur begrenzt als „Schmiermittel“ zur Verfügung steht. Dieses Prinzip führt bei der knetenden Gyratorverdichtung zu höheren Verdichtungswiderständen als bei der schlagenden Marshallverdichtung.

Wie in Abschnitt 4.3.6 angemerkt, können mit dem in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsprogramm die Verdichtungswiderstände in Abhängigkeit der Verdichtungsleistung ermittelt werden, d.h. jeder Verdichtungsumdrehung U_i kann ein D_{Gi} -Wert zugeordnet und dargestellt werden. In den Diagrammen der Abbildung 32 (exemplarisch) und der Anlage 8 (komplett) ist der gemittelte Verlauf des Verdichtungswiderstandes D_G mit zunehmender Verdichtungsleistung $n [U]$ für jede Mischgutvariante in Abhängigkeit der Kategorien des Bindemittelgehaltes (nB: niedrig, mB: mittel, hB: hoch) aufgetragen.

Bei den exemplarisch dargestellten Mischgutvarianten Asphaltbeton 0/8 und Asphaltbinder 0/16S steigt der D_G -Wert bis zu einer Verdichtungsleistung von 40 bzw. 120 Umdrehungen für alle Gemische unabhängig vom Bindemittelgehalt jeweils gleichmäßig an. Danach nimmt der Verdichtungswiderstand für die Gemische mit dem hohen Bindemittelgehalt in geringerem Maße zu als für die Gemische mit den mittleren und niedrigen Bindemittelgehalten. Beim Asphaltbeton 0/8 lassen sich diese ab 60 Verdichtungsumdrehungen unterscheiden. Beim As-

phaltbinder 0/16S lassen sich diese beiden Gemische auch nach einer Verdichtungsleistung von 400 Umdrehungen hinsichtlich ihrer Verdichtbarkeit noch nicht unterscheiden.



**Abbildung 32: Verdichtungswiderstand D_G – Labormischungen
Verlauf mit zunehmender Verdichtungsleistung**

Aus der Darstellung der Verdichtungswiderstände D_G über die Umdrehungszahlen ist bei den leicht zu verdichtenden bindemittelreichen Mischgutvarianten, aufgrund der oben beschriebenen „Schmierwirkung“ des Bindemittels eine sehr frühe Unterscheidung der Verdichtungswiderstände der Gemische möglich. Deshalb erfolgt auch mit zunehmenden Umdrehungszahlen eine sehr deutliche Aufspreizung der D_G -Werte. Bei den Mischgutvarianten bei denen auch nach einer Verdichtungsleistung von 400 Umdrehungen eine Differenzierung der Gemische nicht möglich ist, stellt der Verdichtungswiderstand eine vom Bindemittelgehalt und der Verdichtungsleistung unabhängige Größe dar und wird vorwiegend von der Korngrößenverteilung bzw. dem sich ausbildenden Mineralstoffgerüst bestimmt.

Zusammenfassend ist herauszustellen, dass es mit dieser Betrachtungsweise möglich ist, zu jedem Zeitpunkt der Gyratorverdichtung eine Beurteilung der Verdichtbarkeit vorzunehmen.

Im Gegensatz zum Marshallverfahren ist es nicht notwendig, Probekörper in zusätzlichen Serien herzustellen.

5.4.5 Zusammenfassung – bisheriges Vorgehen

In Abschnitt 4 wird eine Auswertesystematik zur Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator vorgestellt. Mit dieser Systematik können aus Masterkurven Kenngrößen für die minimale und maximale Verdichtungsleistung sowie den Verdichtungswiderstand ermittelt werden.

Die repräsentativ für das nationale Asphaltspektrum ausgewählten Mischgutvarianten stellen sich in den Marshallversuchen (Abschnitt 5.3) als breitbandig und praxisrelevant dar.

In Abschnitt 5.4 werden im Masterprogramm Werte für die oben beschriebenen Kenngrößen mit Labormischgut bestimmt. Dabei stellt sich die Auswertesystematik als plausibel dar. In den Gyratorversuchen lassen sich die Kennwerte n_{ZTV} , n_{KP} und D_G durchgängig ermitteln. Es zeigt sich immer wieder eine Abhängigkeit der Kennwerte von Mischgutsorte bzw. Bindemittelgehalt.

Bei bindemittelreichen, leicht zu verdichtenden Gemischen, deren Tragfähigkeit aus der Stabilität des Mörtels resultiert, wirkt das Bindemittel bei der Verdichtung als „Schmierstoff“. Bei diesen Gemischen stellt sich im Laufe der Verdichtung ein hydrostatischer Zustand im Probekörperinneren ein.

Ein anderes Verhalten zeigen standfeste, schwer zu verdichtende Gemische, deren Tragfähigkeit auf dem sich bei der Verdichtung ausbildenden Mineralstoffgerüst basiert. Bei diesen Gemischen zeigt das Bindemittel nur begrenzt „schmierende“ Wirkung bei der Verdichtung. Es steht vor allem als „Klebstoff“ zwischen den Mineralstoffen zur Verfügung.

Auf Grundlage der im Masterprogramm ermittelten Kennwerte werden im Grundprogramm Gyratorprobekörper mit verschiedenen Verdichtungsleistungen hergestellt und weitere Zusammenhänge ermittelt.

5.5 Gyratorversuche an Labormischungen – Grundprogramm

5.5.1 Probekörperherstellung

Im Grundprogramm wird analog zu Abschnitt 5.3.2 anhand einer möglichst großen Anzahl von Gyratorprobekörpern der Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalten nach Tauchwägung und Hohlraumgehalten nach Ausmessen hergestellt. Dazu werden zusätzlich zu den Probekörpern aus dem Masterprogramm je Mischgutvariante und Bindemittelgehalt zwei Gyratorprobekörper mit mindestens drei verschiedenen Verdichtungsleistungen (n_{ZTV} ; $\{n_{ZTV} + \frac{1}{2} * (n_{KP} - n_{ZTV})\}$; n_{KP}) hergestellt.

Die minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} wird für die Probekörperherstellung im Grundprogramm höhengesteuert aufgebracht. Gemäß Abschnitt 3.3.5 erfolgt im höhengesteuerten Modus die Verdichtung in Abhängigkeit des Einfüllgewichtes bis zu einer Höhe die der angestrebten ZTV-Obergrenze des Hohlraumgehaltes des Probekörpers entspricht. Dazu werden, wie in Tabelle 5 dargestellt, zunächst die Hohlraumgehalte $H_{bit,T,ZTV}$ basierend auf Tauchwägung in Hohlraumgehalte $H_{bit,A,ZTV}$ basierend auf Ausmessen umgerechnet. Mit der Rohdichte ρ_R des jeweiligen Gemisches kann dann die der ZTV-Obergrenze entsprechende Raumdichte $\rho_{A,ZTV}$ des Gemisches ermittelt werden:

$$\rho_{A,ZTV} = \rho_R - (H_{bit,A,ZTV} * \rho_R / 100).$$

Unter Berücksichtigung des Einfüllgewichtes $m_{Einfüll}$ des jeweiligen Probekörpers ergibt sich mit Hilfe der Raumdichte $\rho_{A,ZTV}$ und des Probekörperdurchmessers $d_{A,GPK}$ die der ZTV-Obergrenze entsprechende Probekörperhöhe h_{ZTV} zu:

$$h_{ZTV} = m_{Einfüll} / (\rho_{A,ZTV} * d_{A,GPK}^2 / 4 * \pi).$$

Die Verdichtungsleistungen $\{n_{ZTV} + \frac{1}{2} * (n_{KP} - n_{ZTV})\}$ und n_{KP} werden umdrehungsgesteuert aufgebracht. Im umdrehungsgesteuerten Modus erfolgt die Verdichtung unabhängig vom Einfüllgewicht bis zur vorgegebenen Umdrehungszahl.

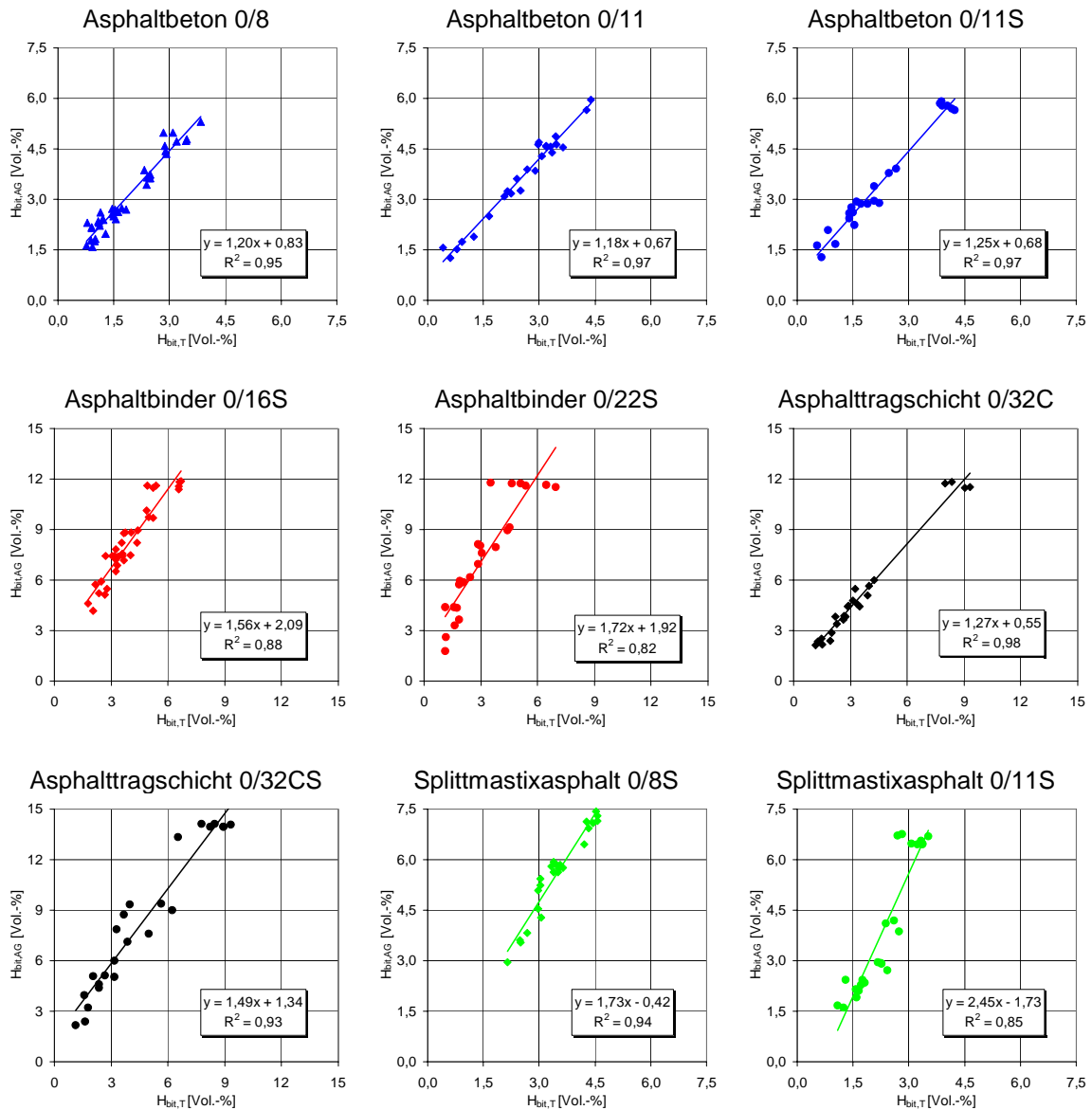
5.5.2 Übertragung von Hohlraumgehalten

Den rechnerisch ermittelten Hohlraumgehalten und Umdrehungszahlen in den bisherigen Betrachtungen des Masterprogrammes liegen die in Abschnitt 5.3.2 an Marshallprobekörpern ermittelten linearen Zusammenhänge zwischen $H_{bit,T}$ und $H_{bit,A}$ zugrunde. In diesem Abschnitt werden diese Zusammenhänge an Gyratorprobekörpern überprüft. Unter Berücksichtigung der Ausführungen in Abschnitt 4.3.2 werden deshalb die Ergebnisse der Hohlraumgehalte $H_{bit,T}$ nach Tauchwägung und der Hohlraumgehalte $H_{bit,AG}$ nach Ausmessen von jeweils mindestens 24 Gyratorprobekörpern einer Mischgutvariante des Grund- und Masterprogrammes gegenübergestellt, Regressionsgleichungen aufgestellt und Bestimmtheitsmaße R^2 berechnet. Für den Asphaltbeton 0/8 und den Asphaltbinder 0/16S werden bis zu 40 Wertepaare in die Betrachtungen mit einbezogen. Die Ergebnisse stammen aus Probekörpern, die in Vorversuchen mit verschiedenen Verdichtungszuständen unter ansonsten gleichen Randbedingungen hergestellt wurden.

In Abbildung 33 sind für jede Mischgutvariante die Hohlraumgehalte aus dem Ausmessverfahren $H_{bit,AG}$ über den Hohlraumgehalten aus dem Tauchwägeverfahren $H_{bit,T}$ in Diagrammen mit Regressionsgeraden und -gleichungen sowie daraus resultierenden Bestimmtheitsmaßen R^2 dargestellt (vgl. Abschnitt 4.3.2). Auf die unterschiedliche Skalierung der Achsen der Diagramme (Höchstwerte 7,5 und 15 Vol.-%) sei hingewiesen.

Auch für die Gyratorprobekörper der untersuchten Gemische zeigt sich eine lineare Abhängigkeit der Hohlraumgehalte nach Ausmessen von den Hohlraumgehalten nach Tauchwägung. Diese wird bei den untersuchten Asphaltbetonen und Asphalttragschichten sowie beim Splittmastixasphalt 0/8S mit Bestimmtheitsmaßen $R^2 \geq 0,93$ deutlich. Auch bei den Asphaltbindern und beim Splittmastixasphalt 0/11S zeigt sich diese Abhängigkeit mit Bestimmtheitsmaßen zwischen $0,82 \geq R^2 \geq 0,88$ noch hinreichend genau. Wie bei den Marshallprobe-

körpern treten diese Abhängigkeiten auch hier sowohl bei hohlraumärmeren ($H_{bit,T} < 5,0$ Vol.-%) als auch für hohlraumreicheren ($H_{bit,T} > 5,0$ Vol.-%) Mischgutvarianten auf.



**Abbildung 33: Übertragung von Hohlraumgehalten
Gyratorprobekörper - Labormischungen**

Die Zusammenhänge aus Abbildung 33 dienen in Abschnitt 5.7.1 als Eingangsgröße zur höhengesteuerten Herstellung von Gyratorprobekörpern mit „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“.

Um einen direkten Vergleich mit den Marshallversuchen anstellen zu können, wird die obere Grenze der in den ZTV geforderten Hohlraumgehalte, die sich auf das Tauchwägevorfahren ($H_{bit,T,ZTV}$) bezieht, für jede Mischgutvariante in Hohlraumgehalte bezogen auf das Ausmessverfahren ($H_{bit,AG,ZTV}$) umgerechnet. Die Ergebnisse der Umrechnung sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

<i>Mischgutvariante</i>	$H_{bit,T,ZTV}$ [Vol.-%]	$H_{bit,AG,ZTV}$ [Vol.-%]
<i>Asphaltbeton 0/8</i>	4,0	5,6
<i>Asphaltbeton 0/11</i>	4,0	5,4
<i>Asphaltbeton 0/11S</i>	5,0	7,0
<i>Asphaltbinder 0/16S</i>	7,0	13,0
<i>Asphaltbinder 0/22S</i>	7,0	14,0
<i>Asphalttragschicht 0/32C</i>	10,0	13,2
<i>Asphalttragschicht 0/32CS</i>	10,0	16,2
<i>Splittmastixasphalt 0/8S</i>	4,0	6,5
<i>Splittmastixasphalt 0/11S</i>	4,0	8,1

**Tabelle 8: Übertragung der ZTV-Obergrenzen
Gyratorprobekörper – Labormischungen**

Beim Vergleich der Werte $H_{bit,A,ZTV}$ aus den Marshallversuchen (Tabelle 5) mit den Werten $H_{bit,AG,ZTV}$ aus den Gyratorversuchen (Tabelle 8) ist zu sehen, dass sich bei den Gyratorprobekörpern deutlich höhere Werte für die auf das Ausmessverfahren umgerechneten ZTV-

Hohlraumgehalt-Obergrenzen ergeben als bei den Marshallprobekörpern. Ursache dafür sind die, im Vergleich zu den Marshallprobekörpern, durch die knetenden Verdichtungsbewegungen des Gyrators mit Mörtel verschlossenen Mantelflächen der Gyratorprobekörper.

In Abbildung 34 sind die Mantelflächen von Marshall- und Gyratorprobekörpern des fein strukturierten Asphaltbeton 0/8 und des grob strukturierten Asphaltbinder 0/16S vergleichend gegenübergestellt. Bei den jeweils niedrigeren Probekörpern handelt es sich um die Marshallprobekörper. Die vergleichsweise geschlossenen, „speckigen“ Mantelflächen der Gyratorprobekörper sind dabei deutlich erkennbar.



Abbildung 34: Marshall- und Gyratorprobekörper - Mantelflächenvergleich

5.6 Gyratorversuche an Praxismischungen – Masterprogramm

Im zweiten Teil der Gyratorversuche werden je Mischgutvariante bis zu 20 Gemische aus großtechnisch hergestelltem Praxismischgut untersucht. Die Hohlraumgehalte der Marshallprobekörper der ausgewählten Praxisgemische liegen unter Berücksichtigung der Toleranzen von $\pm 1,5$ Vol.-% bei den Asphaltbetonen und Splittmastixasphalten bzw. $\pm 2,0$ Vol.-% bei den Asphaltbindern und –Tragschichten innerhalb der in den ZTV geforderten Grenzen. Die Praxisgemische werden deshalb als repräsentativ für das nationale Asphaltpektrum betrachtet. Die aus den Gyratorversuchen mit diesen Praxisgemischen abgeleiteten Bereiche für die Kenngrößen dienen bis zum Vorliegen von statistisch abgesicherten Untersuchungsergebnissen als erster Bewertungshintergrund.

Im Masterprogramm wird aus den insgesamt 160 Praxisgemischen jeweils ein Probekörper mit einer Verdichtungsleistung von $n = 400$ Umdrehungen hergestellt. Bei der Herstellung der Probekörper erfolgt eine kontinuierliche Aufzeichnung der Probekörperhöhen, die gemäß Abschnitt 4.2 in Masterkurven überführt und aus denen Wertebereiche für die gemäß Abschnitt 4.3 abgeleiteten Kennwerte ermittelt werden.

5.6.1 Masterkurven

In den Diagrammen der Abbildung 35 sind die Scharen der Masterkurven der Praxisgemische exemplarisch und in der Anlage 9 für jede Mischgutvariante komplett zusammengestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Praxisgemische des Asphaltbeton 0/8 der in Abschnitt 5.4.1 definierten Gruppe A zuzuordnen sind. Dabei erreichen die Praxisgemische in der Regel in einem Bereich zwischen 50 bis 200 Umdrehungen einen waagrecht asymptotischen Kurvenverlauf (hydrostatischer Zustand im Probekörperinneren, Mörtelauspressungen).

Die untersuchten Praxisgemische des Asphaltbinder 0/16S sind ausnahmslos der in Abschnitt 5.4.1 definierten Gruppe B zuzuordnen. Sie zeigen keinen waagrecht asymptotischen Verlauf

(andauernde Kornumlagerungen, Verkleinerung der Hohlräume, im Extremfall Kornzertrümmerungen).

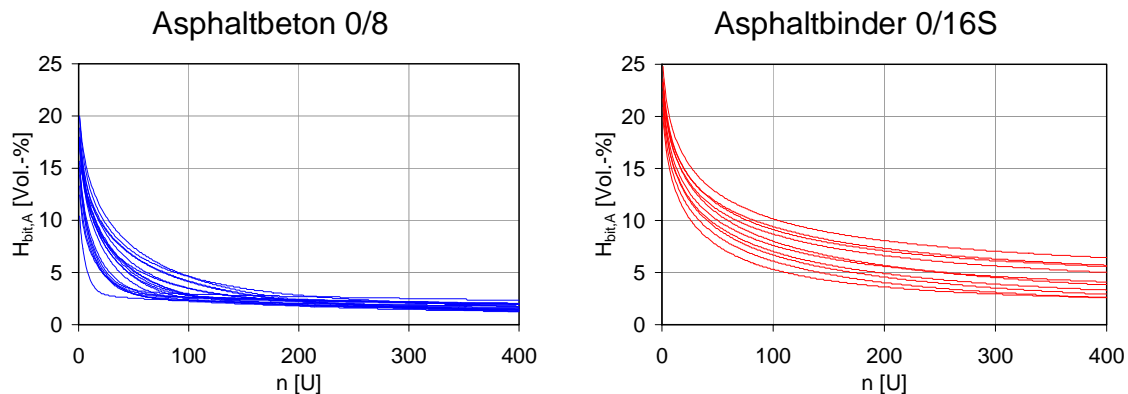


Abbildung 35: Masterkurven - Praxismischungen

Diese Zuordnung ist für alle in der Anlage 9 dargestellten Kurvenscharen möglich. Somit zeigt sich, dass die Masterkurven grundsätzlich zur charakteristischen Beschreibung von unterschiedlichen Mischgutvarianten geeignet sind. Die Gemische der Asphalttragschicht 0/32C lassen sich teilweise in Gruppe A und teilweise in Gruppe B einordnen. Das Gyratorverfahren reagiert damit auch bei Praxisgemischen empfindlich genug, um innerhalb einer Mischgutvariante die unterschiedliche Charakteristik von Gemischen (basierend auf Korngrößenverteilung und Bindemittelgehalt) herauszufiltern.

5.6.2 Darstellung von Grenzbereichen

Im Hinblick auf die Erstellung eines ersten Bewertungshintergrundes für die aus den Masterkurven abzuleitenden Kenngrößen ist es notwendig aus den Kurvenscharen der Praxisgemische Bereiche abzuleiten, anhand derer eine Eingrenzung und Bewertung einzelner Mischgutvarianten möglich wird.

Deshalb werden die in Abschnitt 5.6.1 ermittelten Hohlraumgehalt-Masterkurvenscharen für die jeweilige Mischgutvariante zunächst in eine Mittelwertkurve überführt. Dazu wird nach jeder Umdrehung der arithmetische Mittelwert der Hohlraumgehalte der untersuchten Praxisgemische \bar{x} gebildet und über die Anzahl der Umdrehungen als Mittelwertkurve dargestellt. Danach werden für jede Mischgutvariante Grenzen der typischen Bereiche für den Verlauf der Masterkurven festgelegt. Dafür wird nach jeder Umdrehung die Standardabweichung der Hohlraumgehalte der untersuchten Praxisgemische σ gebildet. Die Grenzen des typischen Bereiches ergeben sich nach jeder Umdrehung aus $\bar{x} + \sigma$ bzw. $\bar{x} - \sigma$ und werden über der Anzahl der Umdrehungen als so genannte Grenzlinien dargestellt.

In Abbildung 36 sind die Grenzlinien der typischen Bereiche der Masterkurven mit den Mittelwertkurven exemplarisch und in Anlage 10 für alle Praxismischungen komplett dargestellt. Aus diesen Grenzlinien werden in Abschnitt 5.6.3 erste Anforderungsbereiche für die minimale Verdichtungsleistung ermittelt.

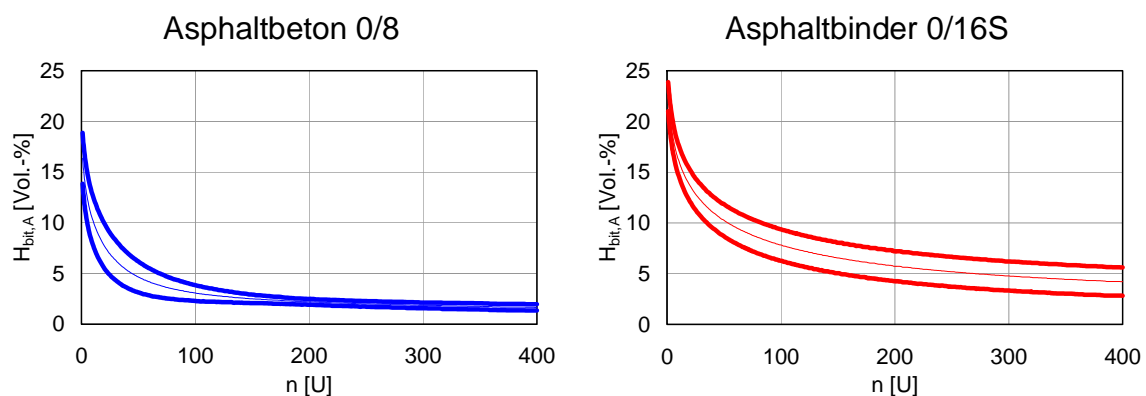


Abbildung 36: Grenzlinien mit Mittelwertkurven – Praxismischungen

Analog zu der beschriebenen Vorgehensweise werden in Abschnitt 5.6.4 normierte Höhen-Masterkurvenscharen zur Lokalisierung von Knickpunkten und zur Festlegung von ersten An-

forderungsbereichen für die maximale Verdichtungsleistung, sowie in Abschnitt 5.6.5 Kurvenscharen für den D_G -Wertverlauf zur Festlegung von ersten Anforderungsbereichen für den Verdichtungswiderstand betrachtet.

5.6.3 Minimale Verdichtungsleistung

Mit dem im Vergleichsprogramm (Abschnitt 5.7.3) ermittelten linearen Zusammenhang zwischen Tauchwägung und Ausmessen werden aus den Grenzl意思en der typischen Bereiche die Umdrehungsspannen N_{ZTV} ermittelt, in denen die obere Grenze der in den ZTV geforderten Hohlraumgehalte erreicht werden. Dazu werden die in Tabelle 12 zusammengestellten Hohlraumgehalte $H_{bit,AGP,ZTV}$ in die Diagramme der Abbildung 36 eingetragen und die dazugehörigen Umdrehungsspannen N_{ZTV} ermittelt. Diese Vorgehensweise ist in den Diagrammen der Abbildung 37 exemplarisch und in Anlage 11 für alle Praxisgemische dargestellt.

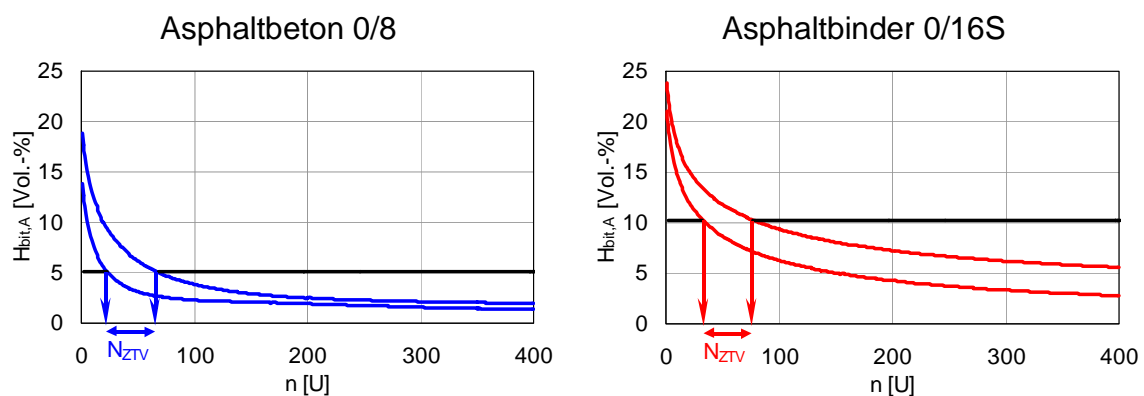


Abbildung 37: Ermittlung der Umdrehungsspannen N_{ZTV} - Prismismischungen

Die Umdrehungsspannen für die minimale Verdichtungsleistung N_{ZTV} sind in Tabelle 9 für die jeweiligen Mischgutvarianten zusammengestellt.

<i>Mischgutvariante</i>	<i>N_{ZTV}</i>	
<i>Asphaltbeton 0/8</i>	23	- 67
<i>Asphaltbeton 0/11</i>	27	- 56
<i>Asphaltbeton 0/11S</i>	21	- 58
<i>Asphaltbinder 0/16S</i>	32	- 76
<i>Asphaltbinder 0/22S</i>	24	- 134
<i>Asphalttragschicht 0/32C</i>	4	- 10
<i>Asphalttragschicht 0/32CS</i>	7	- 20
<i>Splittmastixasphalt 0/8S</i>	101	- 226
<i>Splittmastixasphalt 0/11S</i>	62	- 120

Tabelle 9: Umdrehungsspannen N_{ZTV}

Es ist abzulesen, dass die Spannen sowohl für den Asphaltbinder 0/22S, als auch für den Splittmastixasphalt 0/8S eine Größe von über 100 Umdrehungen aufweisen. Beim Splittmastixasphalt 0/11S reicht die Spanne in einen Bereich bis über 100 Umdrehungen. Aufgrund dieser Ergebnisse ist kritisch zu hinterfragen, ob die Anforderungen des Technischen Regelwerkes an den Hohlraumgehalt richtig gesetzt sind oder möglicherweise abgeändert werden müssen. Dazu sind allerdings weitere, systematische Untersuchungen an Praxisgemischen erforderlich.

Die Umdrehungsspannen N_{ZTV} stellen, bis zum Vorliegen von statistisch abgesicherten Untersuchungsergebnissen, erste *Anforderungen an die minimale Verdichtungsleistung* der ausgewählten Mischgutvarianten bei der Anwendung des Gyratorverfahrens zur Bewertung von Asphalt dar.

5.6.4 Maximale Verdichtungsleistung

Analog zu der in Abschnitt 5.6.2 beschriebenen Vorgehensweise werden Höhen-Masterkurvenscharen in Mittelwertkurven überführt und anschließend die Grenzlinien ermittelt. Die logarithmierten Grenzlinien sind in den Diagrammen der Abbildung 38 exemplarisch und in Anlage 12 für alle Praxisgemische dargestellt.

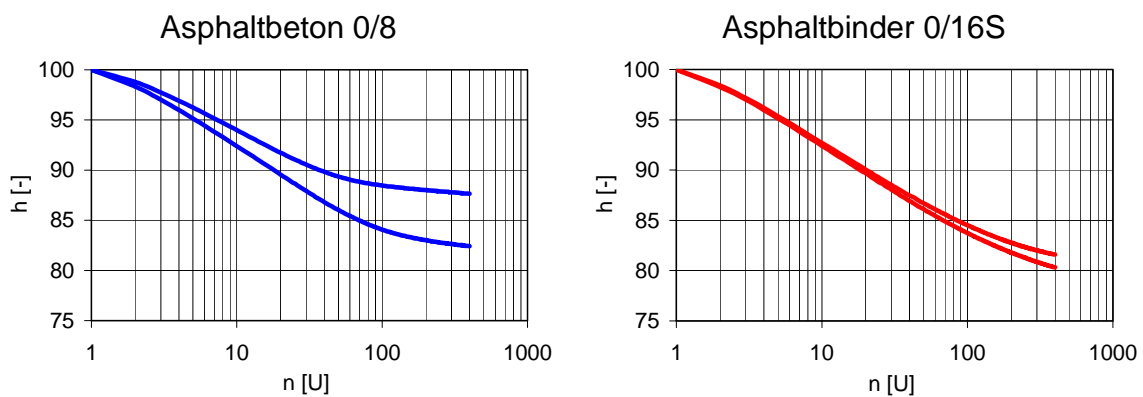


Abbildung 38: logarithmierte Grenzlinien -Praxismischungen

Aus den logarithmierten Grenzlinien werden die Umdrehungsspannen N_{KP} ermittelt, in denen die Knickpunkte der jeweiligen Praxismischungen auftreten. Diese Vorgehensweise ist in den Diagrammen der Abbildung 39 exemplarisch und in Anlage 13 für alle Praxisgemische dargestellt.

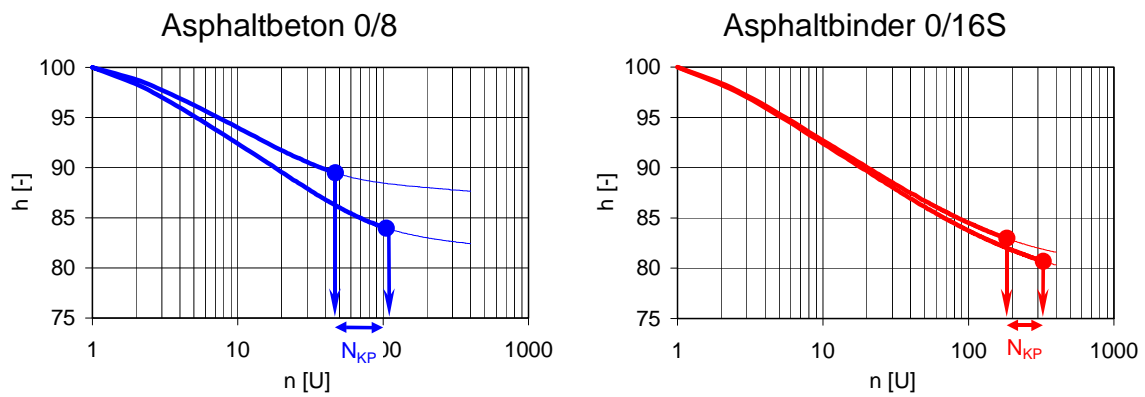


Abbildung 39: Ermittlung der Umdrehungsspannen N_{KP} - Praxismischungen

Die Umdrehungsspannen für die maximale Verdichtungsleistung N_{KP} sind in Tabelle 10 für die jeweiligen Mischgutvarianten zusammengestellt.

Mischgutvariante	N_{KP}
Asphaltbeton 0/8	47 - 105
Asphaltbeton 0/11	65 - 116
Asphaltbeton 0/11S	49 - 159
Asphaltbinder 0/16S	183 - 327
Asphaltbinder 0/22S	217 - 298
Asphalttragschicht 0/32C	91 - 164
Asphalttragschicht 0/32CS	244 - 295
Splittmastixasphalt 0/8S	162 - 194
Splittmastixasphalt 0/11S	151 - 158

Tabelle 10: Umdrehungsspannen N_{KP}

Es ist abzulesen, dass die Spannen für die leichter zu verdichtenden Gemischen unter 100 Umdrehungen beginnen und zwischen 100 und 150 Umdrehungen enden. Für die schwerer zu verdichtenden Gemische beginnen die Spannen ab 150 Umdrehungen und enden im Bereich bis über 300 Umdrehungen.

Beim Vergleich der Umdrehungsspannen N_{ZTV} aus Tabelle 9 mit den Umdrehungsspannen N_{KP} aus Tabelle 10 zeigen sich bei den Gemischen des Asphaltbeton 0/8 und 0/11S sowie des Splittmastixasphalt 0/8S Überschneidungen. Auch dieser Vergleich zeigt, dass die ZTV-Hohlraumobergrenzen kritisch zu hinterfragen und möglicherweise eine Anpassung erforderlich ist. Weitere systematische Untersuchungen an Praxisgemischen sind zunächst allerdings erforderlich.

Die Umdrehungsspannen N_{KP} stellen, bis zum Vorliegen von statistisch abgesicherten Untersuchungsergebnissen, erste *Anforderungen an die maximale Verdichtungsleistung* der ausgewählten Mischgutvarianten bei der Anwendung des Gyratorverfahrens zur Bewertung von Asphalt dar.

5.6.5 Verdichtungswiderstand

Aus den Masterkurven wird die Verdichtbarkeit der Praxisgemische gemäß Abschnitt 4.3.6 in Form von D_G -Werten berechnet.

In Abbildung 30 ist der Verdichtungswiderstand D_G nach 400 Umdrehungen für alle untersuchten Praxisgemische je Mischgutvariante in einem Diagramm aufgetragen und basierend auf Abschnitt 5.6.2 der arithmetische Mittelwert \bar{x} (durchgezogene Linie) sowie die Grenzwerte der typischen Bereiche $\bar{x} + \sigma$ bzw. $\bar{x} - \sigma$ (gestrichelte Linien) gekennzeichnet.

Die Praxisgemische der Asphaltbetone zeigen mit Mittelwerten zwischen 32 und 39 die vergleichsweise geringsten Verdichtungswiderstände. Beim Asphaltbinder 0/16S zeigen die Prismismischungen einen hohen D_G -Wert von im Mittel 65. Den vergleichsweise maximalen Mittelwert für den Verdichtungswiderstand von 71 weisen die Gemische des Asphaltbinder 0/22S

auf. Bei den Mischungen der Rundkornvariante Asphalttragschicht 0/32C tritt im Mittel ein D_G -Wert von 49 auf. Die Praxisgemische der Asphalttragschicht 0/32CS mit gebrochenen Mineralstoffen weisen dagegen mit einem Mittelwert von 66 einen vergleichsweise hohen D_G -Wert auf. Die Praxismischungen der Splittmastixasphalte zeigen mit Werten von im Mittel 63 bzw. 62 einen ebenfalls hohen Verdichtungswiderstand.

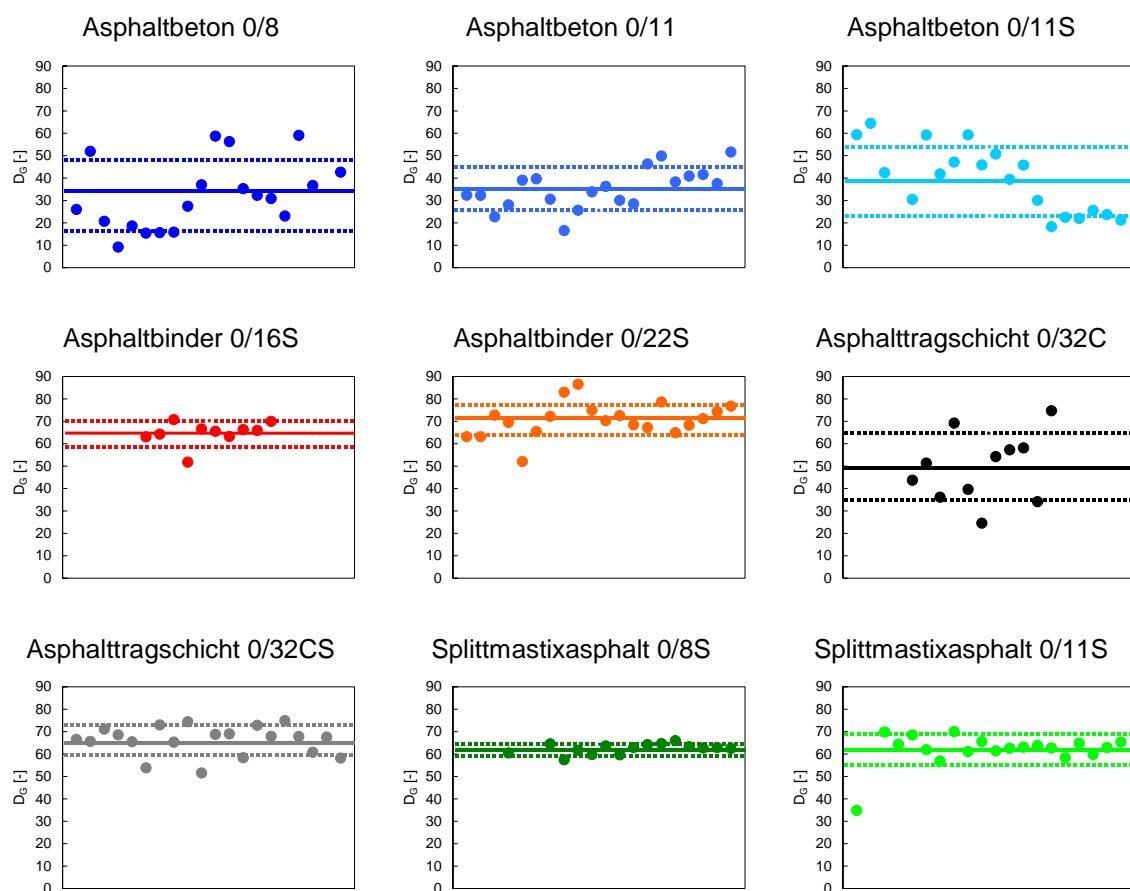


Abbildung 40: Verdichtungswiderstand D_G – Praxismischungen

Die Grenzwerte der Spannen für den Verdichtungswiderstand ΔD_G sind in Tabelle 11 für die untersuchten Praxismischungen zusammengestellt.

<i>Mischgutvariante</i>	ΔD_G
<i>Asphaltbeton 0/8</i>	17 - 48
<i>Asphaltbeton 0/11</i>	26 - 44
<i>Asphaltbeton 0/11S</i>	24 - 54
<i>Asphaltbinder 0/16S</i>	59 - 70
<i>Asphaltbinder 0/22S</i>	63 - 78
<i>Asphalttragschicht 0/32C</i>	34 - 65
<i>Asphalttragschicht 0/32CS</i>	60 - 73
<i>Splittmastixasphalt 0/8S</i>	60 - 65
<i>Splittmastixasphalt 0/11S</i>	55 - 69

Tabelle 11: Spannweiten Verdichtungswiderstand ΔD_G

Die Spannweiten ΔD_G stellen, bis zum Vorliegen von statistisch abgesicherten Untersuchungsergebnissen, erste *Anforderungen an den Verdichtungswiderstand* der ausgewählten Mischgutvarianten bei der Anwendung des Gyratorverfahrens zur Bewertung von Asphalt dar.

Wie in Abschnitt 5.6.5 an den Labormischungen aufgezeigt, können mit dem in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsprogramm auch an den Praxismischungen die Verdichtungswiderstände in Abhängigkeit der Verdichtungsleistung ermittelt werden, d.h. jeder Verdichtungs-umdrehung U_i kann ein D_{Gi} -Wert zugeordnet und dargestellt werden. Dazu wird für jedes Praxisgemisch der Verlauf des Verdichtungswiderstandes D_G berechnet. Aus den resultierenden Kurvenscharen jeder Mischgutvariante werden analog Abschnitt 5.6.2 Grenzlinien der typischen Bereiche ($\bar{x} + \sigma$ bzw. $\bar{x} - \sigma$) für den Verlauf der D_G -Werte ermittelt. Diese sind in den Diagrammen der Abbildung 41 (exemplarisch) und der Anlage 14 (komplett) dargestellt.

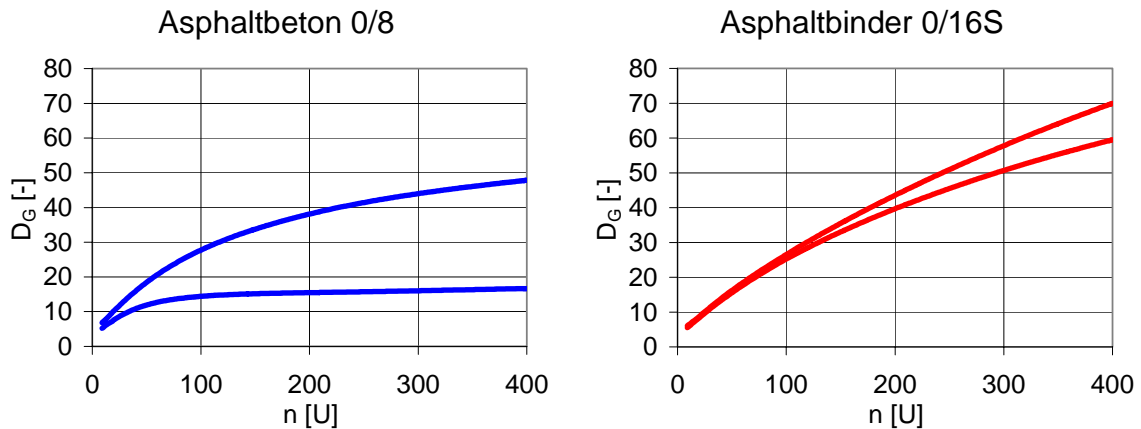


Abbildung 41: Grenzl意思 Verdichtungswiderstand D_G – Praxismischungen

Die Grenzl意思 des typischen Bereiches der D_G -Werte der Praxismische des Asphaltbeton 0/8 öffnen sich bereits ab einer niedrigen Verdichtungsleistung und mit zunehmender Verdichtungsleistung verhältnismäßig weit. Im Gegensatz dazu öffnen sich die Grenzl意思 der Praxismischungen des Asphaltbinder 0/16S wesentlich später und weisen auch nach 400 Umdrehungen eine geringe Spannweite auf.

Die Grenzl意思 des Verdichtungswiderstandes D_G stellen, in Erweiterung der Spannweiten ΔD_G bis zum Vorliegen von statistisch abgesicherten Untersuchungsergebnissen, einen ersten Bewertungshintergrund zur, von der Verdichtungsleistung unabhängigen, Bewertung der Verdichtbarkeit von Asphalt dar. Herauszustellen ist, dass es durch die Grenzl意思 des Verdichtungswiderstandes möglich ist, zu jedem Zeitpunkt der Gyratorverdichtung eine Beurteilung der Verdichtbarkeit vorzunehmen. Im Gegensatz zum Marshallverfahren ist es nicht notwendig, zur Beurteilung der Verdichtbarkeit Probekörper in zusätzlichen Serien mit exakt definierten Verdichtungsleistungen herzustellen.

5.7 Gyratorversuche an Praxismischungen – Vergleichsprogramm

Im Vergleichsprogramm werden mit den insgesamt 160 Praxisgemischen Gyratorprobekörper höhengesteuert bis zum „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“ hergestellt. Die dazu erforderlichen Umdrehungszahlen werden fixiert und dienen ergänzend zu den in Abschnitt 4.3 dargestellten Kenngrößen als Bezug zum Marshall-Verdichtungsverfahren. Der in Abschnitt 5.7.3 an den gesamten Gyratorprobekörpern der Praxisgemische (Master- und Vergleichsprogramm) ermittelte Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalten nach Tauchwägung ($H_{bit,T}$) und Hohlraumgehalten nach Ausmessen ($H_{bit,AGP}$) wird im Masterprogramm (Abschnitt 5.6.3) der Ermittlung der Umdrehungsspannen für die minimale Verdichtungsleistung N_{ZTV} zugrunde gelegt.

5.7.1 Verdichtungszustand Marshallprobekörper

Die angestrebte Höhe für den „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“ ergibt sich aus der in den Asphaltkontrollprüfungen für jedes Praxisgemisch ermittelten Rohdichte, aus dem gemittelten Hohlraumgehalt der zugehörigen Marshallprobekörper und aus dem in Abbildung 33 dargestellten Zusammenhang zwischen $H_{bit,T}$ und $H_{bit,AG}$. Zum Ansteuern des „Verdichtungszustandes Marshallprobekörper“ werden zunächst die Hohlraumgehalte der Marshallprobekörper $H_{bit,T,MPK}$ basierend auf Tauchwägung in Hohlraumgehalte $H_{bit,A,MPK}$ basierend auf Ausmessen umgerechnet. Aus der Rohdichte ρ_R des jeweiligen Praxisgemisches wird dann die entsprechende Raumdichte $\rho_{A,MPK}$ des Marshallprobekörpers ermittelt:

$$\rho_{A,MPK} = \rho_R - (H_{bit,A,MPK} * \rho_R / 100).$$

Unter Berücksichtigung des Einfüllgewichtes $m_{\text{Einfüll}}$ für den jeweiligen Probekörper ergibt sich mit der Raumdichte $\rho_{A,MPK}$ und dem Probekörperdurchmesser $d_{A,GPK}$ die dem „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“ entsprechende Gyratorprobekörperhöhe h_{MPK} zu:

$$h_{MPK} = m_{\text{Einfüll}} / (\rho_{A,MPK} * d_{A,GPK}^2 / 4 * \pi).$$

Nach dieser Vorgabe werden für jedes Praxisgemisch zwei Gyratorprobekörper hergestellt, die Hohlraumgehalte mittels Ausmessen und Tauchwägung berechnet und die benötigten Umdrehungszahlen fixiert.

Aus den Umdrehungszahlen werden je Mischgutvariante der arithmetische Mittelwert \bar{x} und die zugehörige Standardabweichung σ gebildet. Mit der Beziehung $\bar{x} + \sigma$ bzw. $\bar{x} - \sigma$ können die Umdrehungsspannen zum Erreichen des „Verdichtungszustandes Marshallprobekörper“ N_{MPK} beschrieben werden. Die Umdrehungsspannen N_{MPK} sind in Abbildung 42 für jede Mischgutvariante dargestellt.

Die Gyratorprobekörper der Praxisgemische der Asphaltbetone erreichen im Mittel zwischen 52 und 60 Umdrehungen den „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“. Die Umdrehungsbereiche N_{MPK} weisen Spannweiten zwischen 31 Umdrehungen und 49 Umdrehungen auf. Bei den Asphaltbindern werden bei der Sorte 0/16S im Mittel 29 und bei der Sorte 0/22S im Mittel 35 Umdrehungen zum Erreichen des Marshall-Verdichtungszustandes benötigt. Die Spannweiten betragen dabei 16 bzw. 33 Umdrehungen. Mit im Mittel 27 und 31 Umdrehungen erreichen Gyratorprobekörper der Praxisgemische der Asphalttragschichten 0/32C und 0/32 CS den „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“. Dabei treten vergleichsweise geringe Spannweiten von 24 und 23 Umdrehungen für die Umdrehungsbereiche N_{MPK} auf. Die Splittmastixasphalte erreichen den Marshall-Verdichtungszustand bei der Sorte 0/8S im Mittel mit 98 Umdrehungen und mit 72 Umdrehungen bei der Sorte 0/11S. Die Umdrehungsbereiche N_{MPK} weisen hier mit 66 und 65 Umdrehungen vergleichsweise große Spannweiten auf.

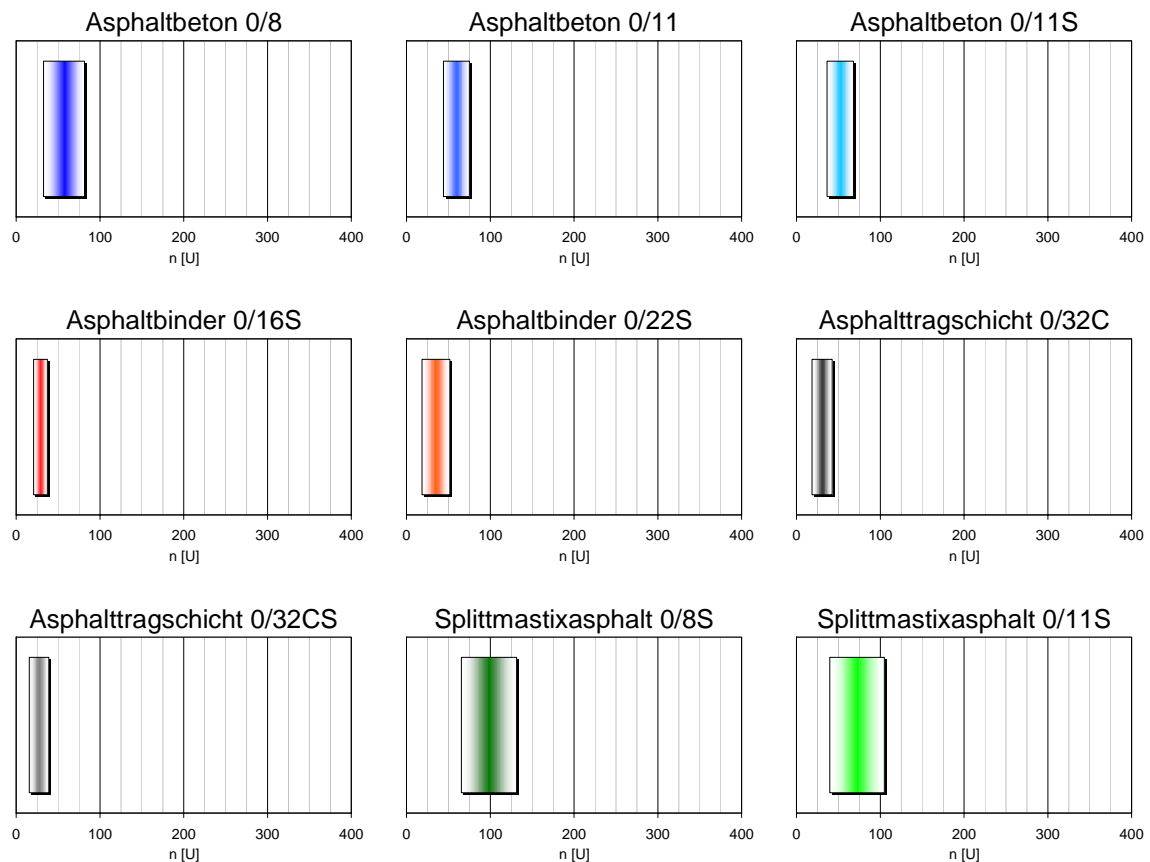


Abbildung 42: Umdrehungsspannen N_{MPK}

Zusammenfassend sind in Abbildung 43 für jede Asphaltart die mittleren Umdrehungszahlen des „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“ \bar{x}_{NMPK} dargestellt.

Aus Abbildung 43 ist festzustellen, dass über alle untersuchten Praxisgemische gesehen der Verdichtungszustand Marshallprobekörper (2x50 Schläge) im Mittel mit 52 Gyratorumdrehungen (senkrechte gepunktete Linie) erreicht wird. Als Verhältniswert ausgedrückt, hat ein Marshallschlag in etwa die 0,5-fache Verdichtungswirkung einer Gyratorumdrehung bzw. eine Gyratorumdrehung verdichtet in etwa doppelt so stark als ein Marshallschlag.

Differenzierter betrachtet, erreichen die Praxisgemische der Asphaltbinder und Asphalttragschichten den Marshall-Verdichtungszustand mit den vergleichsweise niedrigsten Umdre-

hungenzahlen von im Mittel 30. Dies entspricht im Verhältnis zu einem Marshallschlag einer 3,3-fachen Verdichtungswirkung einer Gyratorumdrehung.

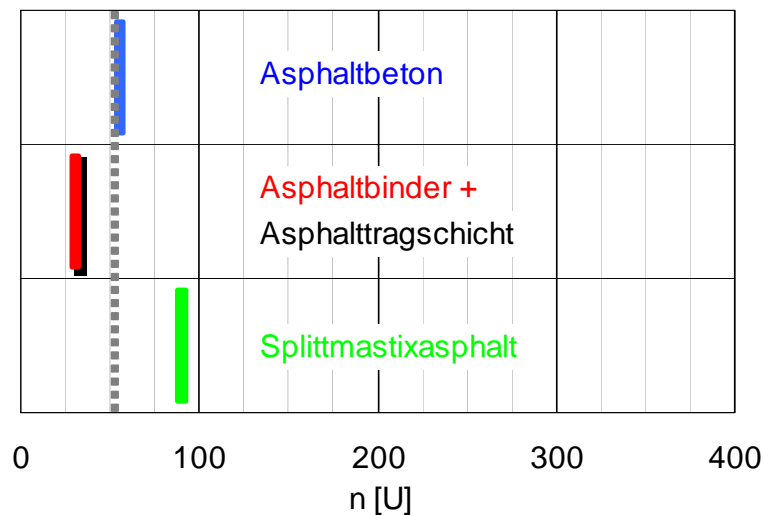


Abbildung 43: mittlere Umdrehungszahlen \bar{x}_{NMPK} bis zum „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“

Die Praxisgemische der Asphaltbetone folgen mit Umdrehungszahlen in der Größenordnung von im Mittel 56. Die Gyratorumdrehung weist somit in etwa die 1,8-fache Verdichtungswirkung eines Marshallschlages auf.

Für die Gyratorprobekörper der Splittmastixasphalte werden für den „Verdichtungszustand Marshallprobekörper“ die vergleichsweise höchsten Umdrehungszahlen von im Mittel 90 benötigt. Hier entspricht eine Umdrehung mit dem Gyrator dem 1,1-fachen Marshallschlag.

Weiter ist Abbildung 43 so zu interpretieren, dass durch die knetenden Gyratorumdrehungen Mischgutarten, die nach dem Asphaltbetonprinzip konzipiert sind, stärker verdichtet werden als Mischgutarten mit ausgeprägtem Korngerüst. Außerdem ziehen die knetenden Gyratorumdrehungen bei Mischungen mit einem größeren Größtkorndurchmesser eine stärkere Ver-

dichtungswirkung nach sich als bei Mischungen mit kleinerem Größtkorndurchmesser. Bei Splittastixasphalten, welche aufgrund der Ausfallkörnung ein deutlich ausgeprägtes Splittgerüst aufweisen, zeigt die knetende Gyratorverdichtung die vergleichsweise geringste Verdichtungswirkung.

5.7.2 Vergleich von Hohlraumgehalten

Im Folgenden wird überprüft, welche Abweichungen bei der oben dargestellten Vorgehensweise zwischen Gyratorprobekörpern und Marshallprobekörpern in den vertragsrelevanten Hohlraumgehalten nach Tauchwägung $H_{\text{bit},T}$ auftreten.

Dazu wird der Mittelwert der Hohlraumgehalte $H_{\text{bit},T,\text{GPK}}$ aus den zwei Gyratorprobekörpern, die sich um nicht mehr als $\Delta\rho_{A,T}=0,030 \text{ g/cm}^3$ (vgl. [38]) unterscheiden, gebildet. Von diesen Werten werden die jeweiligen Hohlraumgehalte $H_{\text{bit},T,\text{MPK}}$ der Marshallprobekörper abgezogen. Die daraus resultierenden Differenzen $\Delta H_{\text{bit},T,\text{GPK-MPK}}$ sind in den Diagrammen der Abbildung 44 für jede Mischgutvariante dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Gyratorprobekörper der Praxisgemische des Asphaltbeton 0/8 den Hohlraumgehalt der Marshallprobekörper mit sehr geringen Abweichungen zwischen 0,0 und 0,7 Vol.-%- $H_{\text{bit},T}$ erreichen. Des Weiteren betragen diese Abweichungen beim des Asphaltbeton 0/11 $\pm 0,4$ Vol.-%- $H_{\text{bit},T}$ und liegen beim Asphaltbeton 0/11S zwischen $-0,2$ und $0,8$ Vol.-%- $H_{\text{bit},T}$. Bei den Praxisgemischen der Asphaltbinder 0/16S weisen die Gyratorprobekörper vergleichsweise große Abweichungen zwischen $1,8$ und $3,2$ Vol.-%- $H_{\text{bit},T}$ zu den Marshallprobekörpern auf. Bei den Gyratorprobekörpern des Asphaltbinder 0/22S liegen diese Abweichungen zwischen $-0,1$ und $2,4$ Vol.-%- $H_{\text{bit},T}$. Die Gyratorprobekörper der Praxisgemische der Asphalttragschicht 0/32C weichen zwischen $-2,1$ und $0,8$ Vol.-%- $H_{\text{bit},T}$ vom Hohlraumgehalt der Marshallprobekörper ab. Diese Abweichungen betragen bei der Asphalttragschicht 0/32CS $-0,5$ bis $3,2$ Vol.-%- $H_{\text{bit},T}$. Die Gyratorprobekörper des Splittmastixasphalt 0/8S zeigen mit Werten zwischen $-0,5$ und $0,6$ Vol.-%- $H_{\text{bit},T}$ geringe Abweichungen zum Hohlraum-

gehalt der Marshallprobekörper. Bei den Gyratorprobekörpern des Splittmastixasphalt 0/11S liegen diese Abweichungen zwischen -0,4 und 1,2 Vol.-%- $H_{bit,T}$.

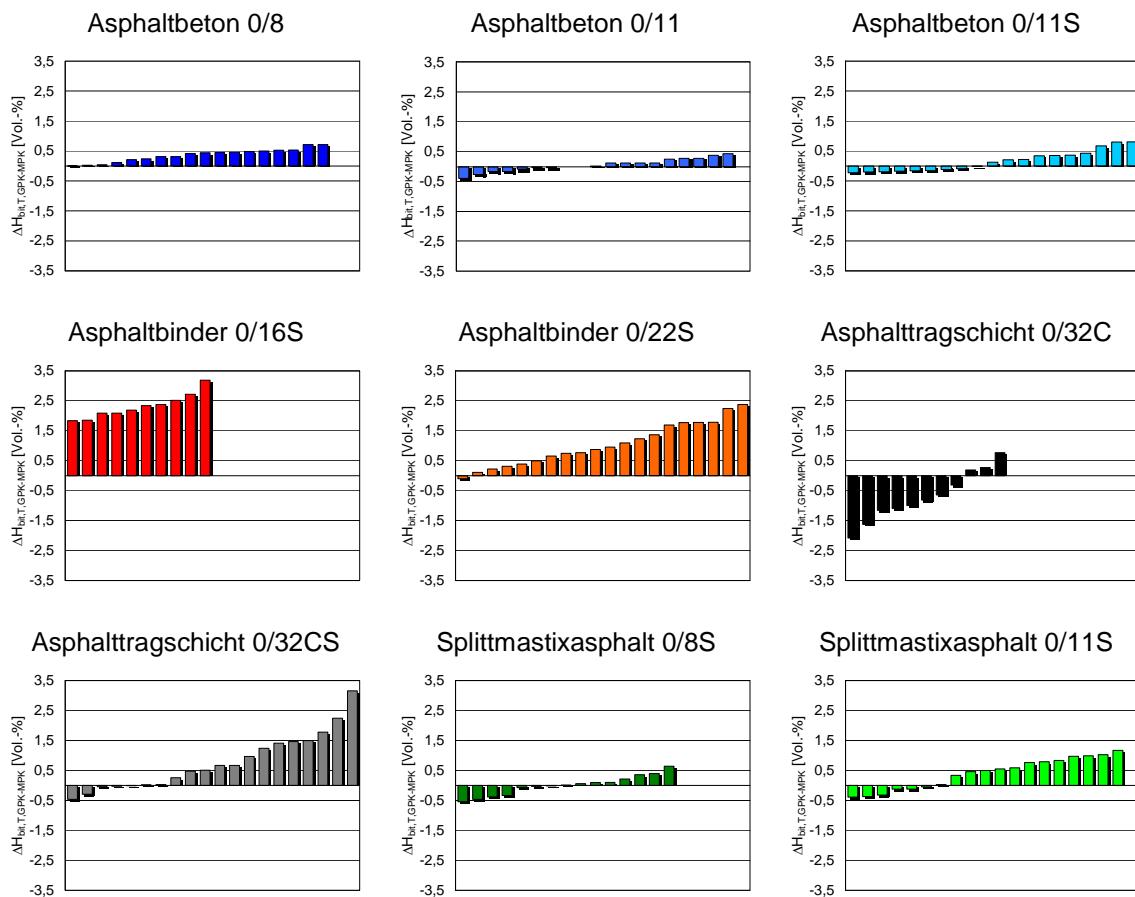


Abbildung 44: Differenzen Hohlraumgehalte Gyrator-/Marshallprobekörper

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Gyratorprobekörper der untersuchten Praxisgemische den Hohlraumgehalt der Marshallprobekörper, im Mittel mit einer Abweichung von 0,5 Vol.-%- $H_{bit,T}$ (bei $\sigma = 0,9$ Vol.-%) tatsächlich erreichen. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass bei den Asphaltbindern und Asphalttragschichten in Einzelfällen Abweichungen bis zu 3,2 Vol.-%- $H_{bit,T}$ auftreten. Aus den Ergebnissen ist zu schließen, dass die der Probekörper-

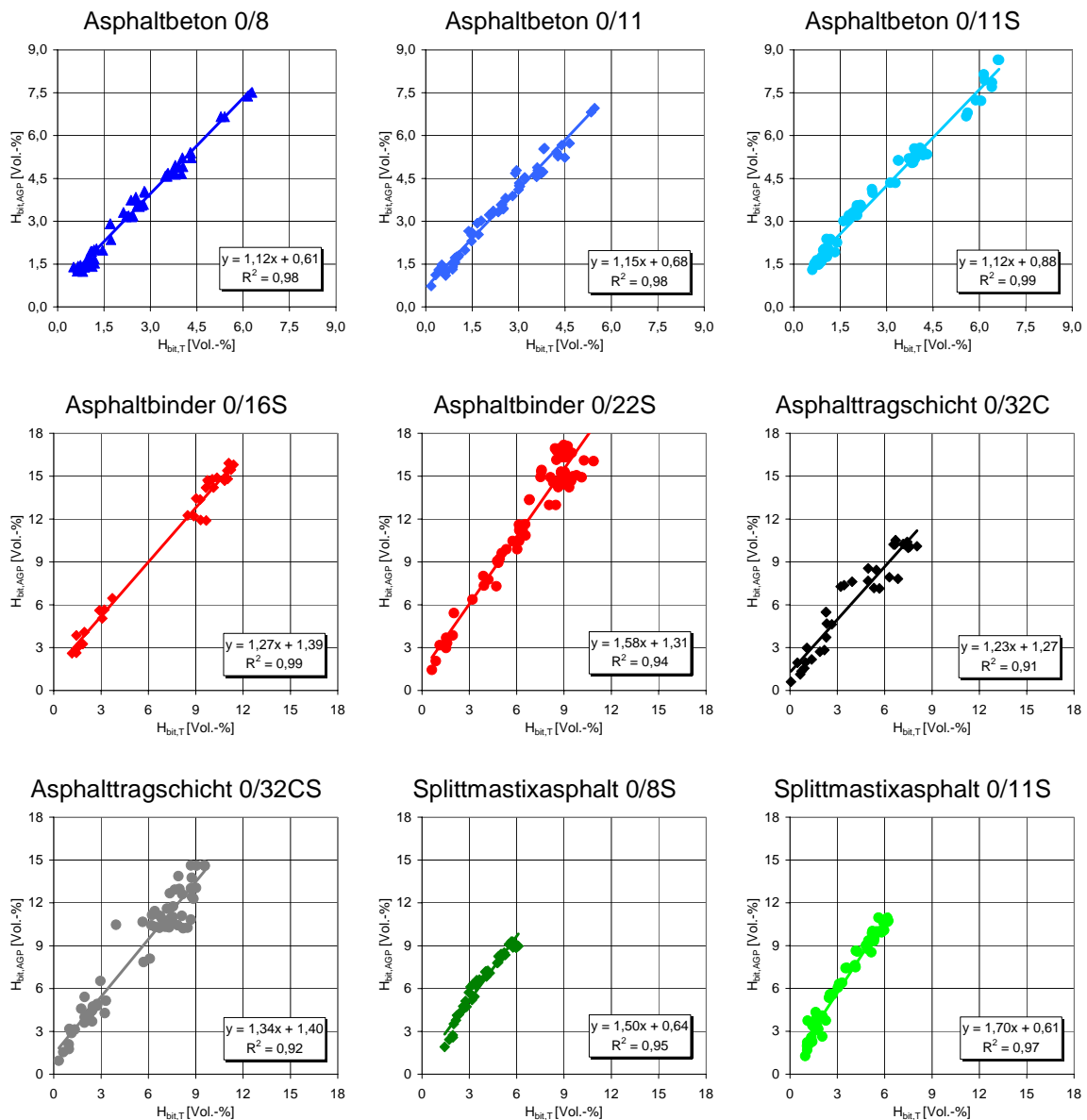
herstellung des Vergleichsprogrammes zugrunde gelegten Zusammenhänge der Labormischungen aus Abbildung 33, bei den Praxismischungen zu Gyratorprobekörpern führen, die einen systematisch höheren Hohlraumgehalt aufweisen als die Marshallprobekörper. Bei grobkörnigen und hohlraumreichen Mischgutvarianten sind die Abweichungen, aufgrund der Oberflächenrauigkeit und der damit verbundenen Toleranzen im Bestimmungsverfahren, tendenziell größer.

Weiter sind die Abweichungen darauf zurückzuführen, dass die modellierten Labormischungen in dieser Arbeit bindemittelreicher konzipiert sind als die Praxismischungen. Dies führt dazu, dass die Herstellung der Gyratorprobekörper im Vergleichsprogramm mit systematisch zu niedrigen Umdrehungszahlen beendet wird. Für die Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator wird deshalb, bis zum Vorliegen von weiteren systematischen Untersuchungen, auf den in Abschnitt 5.7.3 ermittelten Zusammenhang zwischen Ausmessen und Tauchwägung an den Gyratorprobekörpern der Praxismischungen hingewiesen.

5.7.3 Übertragung von Hohlraumgehalten

In diesem Abschnitt wird abschließend an den bis zu 60 Gyratorprobekörpern einer Mischgutvariante aus dem Vergleichs- und Masterprogramm (Abschnitte 5.6 und 5.7) der Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalten basierend auf Tauchwägung $H_{\text{bit,T}}$ und Hohlraumgehalten basierend auf Ausmessen $H_{\text{bit,AGP}}$ hergestellt.

Unter Berücksichtigung der Ausführungen in Abschnitt 4.3.2 sind in Abbildung 45 für die Gyratorprobekörper der Praxisgemische jeder Mischgutvariante die Hohlraumgehalte aus dem Ausmessverfahren $H_{\text{bit,AGP}}$ über den Hohlraumgehalten aus dem Tauchwägeverfahren $H_{\text{bit,T}}$ in Diagrammen mit Regressionsgeraden und -gleichungen sowie daraus resultierenden Bestimmtheitsmaßen R^2 dargestellt. Auf die unterschiedliche Skalierung der Achsen der Diagramme (Höchstwerte 9,0 und 18 Vol.-%) sei hingewiesen.



**Abbildung 45: Übertragung von Hohlraumgehalten
Gyratorprobekörper - Praxismischungen**

Für die Gyratorprobekörper der untersuchten Praxisgemische zeigen sich lineare Abhängigkeiten der Hohlraumgehalte nach Ausmessen von den Hohlraumgehalten nach Tauchwägung. Die lineare Abhängigkeit des Hohlraumgehaltes $H_{bit,AGP}$ vom Hohlraumgehalt $H_{bit,T}$ wird mit Bestimmtheitsmaßen $R^2 \geq 0,91$ deutlich. Die linearen Abhängigkeiten stellen bis zum Vorlie-

gen von statistisch abgesicherten Untersuchungsergebnissen, direkte Rechengrößen für die untersuchten Asphaltarten bei der Anwendung des Gyratorverfahrens zur Bewertung von Asphalt dar.

Die in den ZTV geforderten Hohlraumgehalt-Obergrenzen am Marshallprobekörper $H_{bit,T,ZTV}$, die sich auf das Tauchwägeverfahren beziehen, können für jede Mischgutvariante in Hohlraumgehalt-Obergrenzen am Gyratorprobekörper bezogen auf das Ausmessverfahren $H_{bit,AGP,ZTV}$ umgerechnet werden. Die Ergebnisse dieser Umrechnung sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

<i>Mischgutvariante</i>	$H_{bit,T,ZTV}$ [Vol.-%]	$H_{bit,AGP,ZTV}$ [Vol.-%]
<i>Asphaltbeton 0/8</i>	4,0	5,1
<i>Asphaltbeton 0/11</i>	4,0	5,3
<i>Asphaltbeton 0/11S</i>	5,0	6,5
<i>Asphaltbinder 0/16S</i>	7,0	10,3
<i>Asphaltbinder 0/22S</i>	7,0	12,4
<i>Asphalttragschicht 0/32C</i>	10,0	13,6
<i>Asphalttragschicht 0/32CS</i>	10,0	14,8
<i>Splittmastixasphalt 0/8S</i>	4,0	6,7
<i>Splittmastixasphalt 0/11S</i>	4,0	7,4

**Tabelle 12: Übertragung der ZTV-Obergrenzen
Gyratorprobekörper - Praxismischungen**

Bis zum Vorliegen von weiteren systematischen Untersuchungen dienen die Hohlraumgehalte $H_{bit,AGP,ZTV}$ als direkte Eingangsgröße zur Ermittlung der minimalen Verdichtungsleistung

n_{ZTV} bei der Anwendung des Gyratorverfahrens im Rahmen von Asphalt-Eignungs- und -
Kontrollprüfungen.

6 Ergebnis

Im Folgenden wird als Ergebnis dieser Arbeit die Verwendung des Gyrotors zur Bewertung von Asphalt in einem Schaubild beispielhaft dargestellt. Als praktische Umsetzung der Ergebnisse dieser Arbeit wird ferner der Einsatz des Gyrotors im Rahmen von Eignungs- und Kontrollprüfungen skizziert und die entsprechenden Ergänzungen des Merkblattes für Eignungsprüfungen an Asphalt [57] gemäß Anlage 15, der ZTV Asphalt [62] gemäß Anlage 16 und der ZTVT [63] gemäß Anlage 17 vorgeschlagen.

6.1 Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator

In Abbildung 46 ist die Vorgehensweise für die Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator beispielhaft zusammengestellt. Basierend auf der in Abschnitt 4 vorgestellten Auswertesystematik werden dabei aus den Masterkurven eines zu untersuchenden Asphaltgemisches Zahlenwerte für die drei wesentlichen Kenngrößen minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} , maximale Verdichtungsleistung n_{KP} und der Verdichtungsgegenstand D_G ermittelt. Mit den drei Kenngrößen wird sowohl der bisherige Bewertungshintergrund der ZTV angesprochen, als auch die Grenzen zur Herstellung „gesunder“ Laborprobekörper einbezogen und die Verdichtbarkeit des Asphaltgemisches beurteilt. In Abbildung 46 sind die Kennwerte eines zu untersuchenden Asphaltgemisches durch ein rot gekennzeichnetes Beispiel dargestellt.

Zur Bewertung des Asphaltgemisches werden die Zahlenwerte mit den zugehörigen Anforderungsbereichen N_{ZTV} , N_{KP} und ΔD_G verglichen. Diese sind in Abbildung 46 durch schwarze Grenzlinien markiert. Bis zum Vorliegen statistisch abgesicherter Untersuchungsergebnisse können die in den zugehörigen Tabellen dargestellten Ergebnisse der Gyratorversuche an Praxismischgut dieser Arbeit direkt verwendet werden.

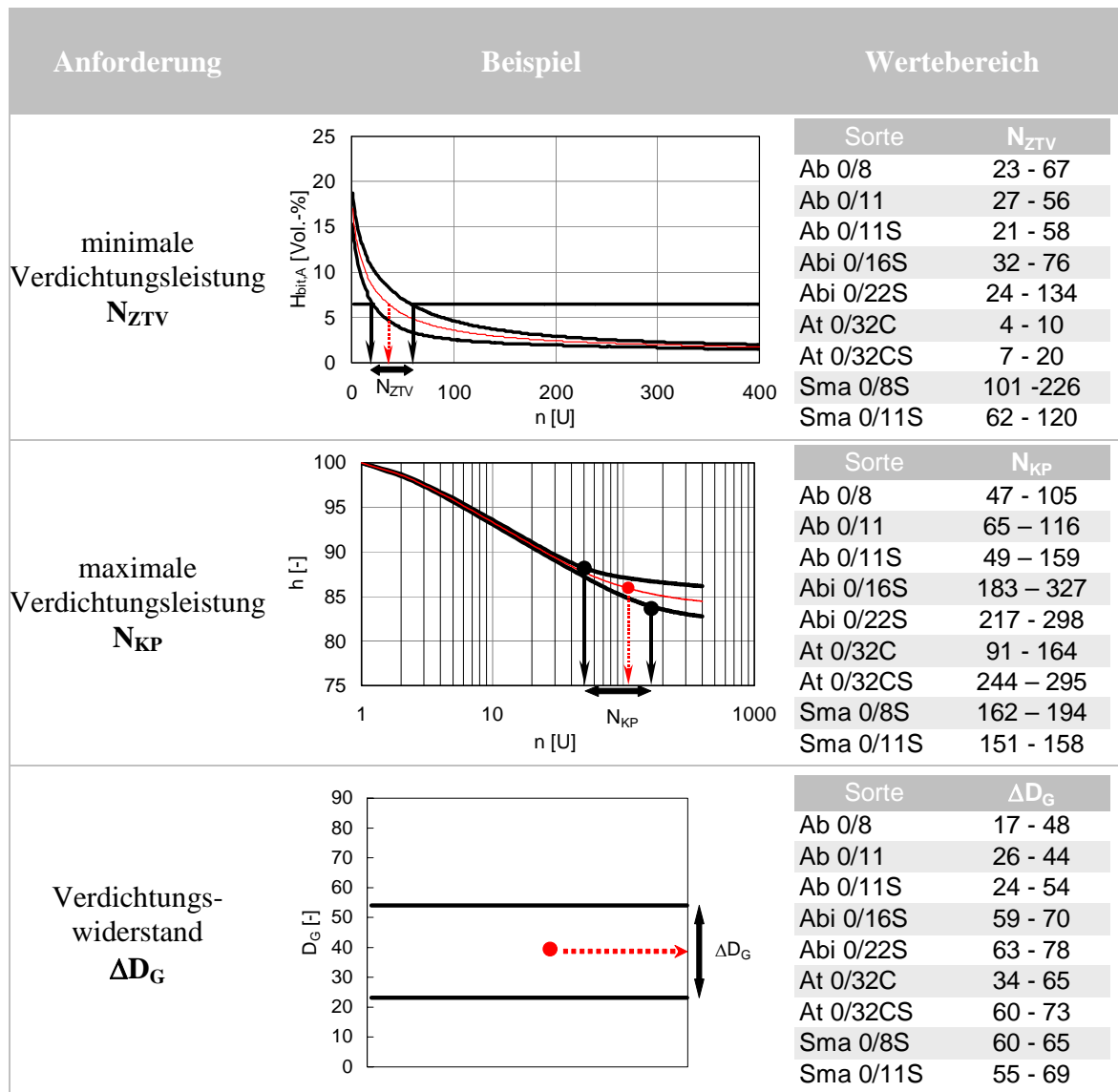


Abbildung 46: Schaubild - Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator

6.2 Eignungsprüfungen an Asphalt mit dem Gyrator

In Abbildung 47 ist die Vorgehensweise für Eignungsprüfungen an Asphalt mit dem Gyrator skizziert.

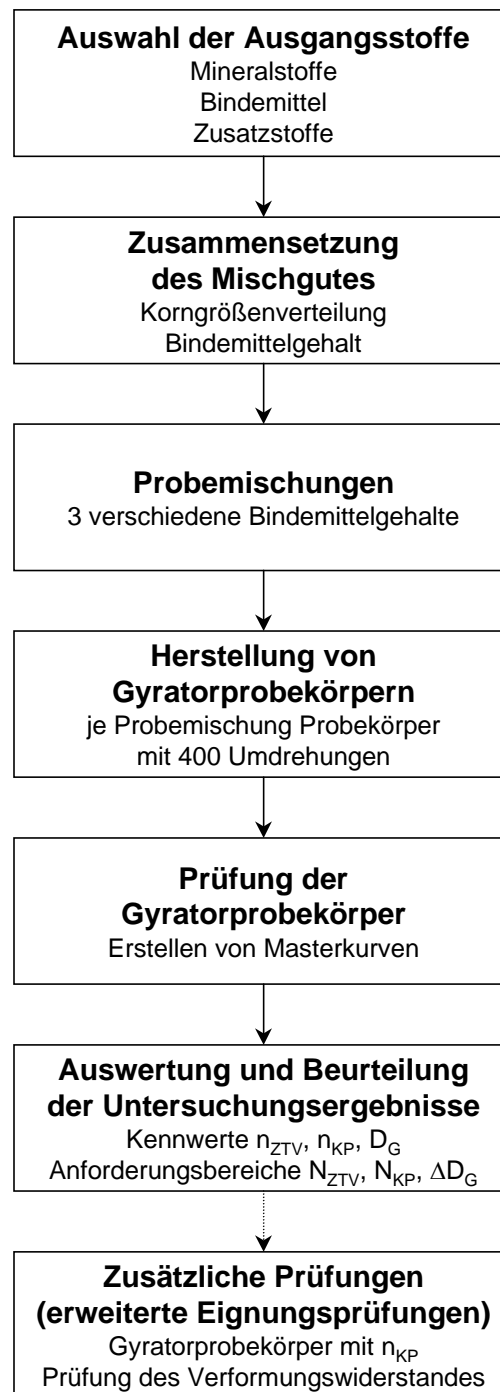


Abbildung 47: Vorgehensweise für Eignungsprüfungen an Asphalt mit dem Gyrator

Dabei sind zunächst die zum Einsatz kommenden Mineralstoffe, Bindemittel und gegebenenfalls Zusatzstoffe für den vorgesehenen Verwendungszweck auszuwählen. Danach wird das Mischgut bezüglich Korngrößenverteilung und Bindemittelgehalt gemäß den geltenden Technischen Richtlinien [62]/[63] zusammengesetzt. Auf dieser Grundlage werden Probemischungen mit drei verschiedenen Bindemittelgehalten und daraus jeweils Gyratorprobekörper mit 400 Umdrehungen hergestellt. Nach der Probekörperherstellung werden für jede Probemischung Masterkurven erstellt. Aus den Masterkurven werden die Kennwerte n_{ZTV} , n_{KP} und D_G berechnet und mit den asphaltenspezifischen Anforderungsbereichen N_{ZTV} , N_{KP} und ΔD_G , die in den Technischen Richtlinien verankert werden, verglichen und qualitativ bewertet.

Es kann zweckmäßig sein, einen Bindemittelgehalt zu wählen, der zwischen zwei untersuchten Bindemittelgehalten liegt. Die Kennwerte sind dann entsprechend zu interpolieren. Die Auswertung aller Kriterien dient als Entscheidungsgrundlage für eine Empfehlung, welche Mischgutzusammensetzung für den vorgesehenen Verwendungszweck im Sinne einer Optimierung der angestrebten Eigenschaften geeignet ist.

Sollten zusätzliche Prüfungen (erweiterte Eignungsprüfungen) erforderlich sein, können mit der Verdichtungsleistung n_{KP} Gyratorprobekörper hergestellt und im dynamischen Druckschwellversuch der Verformungswiderstand ermittelt werden. Für die in Abbildung 47 skizzierte Vorgehensweise ist das Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt [57] sinngemäß mit Ergänzungen in den in Anlage 15 aufgeführten Abschnitten anzuwenden.

6.3 Kontrollprüfungen an Asphalt mit dem Gyrator

In Abbildung 48 ist die Vorgehensweise für Kontrollprüfungen an Asphalt mit dem Gyrator skizziert.

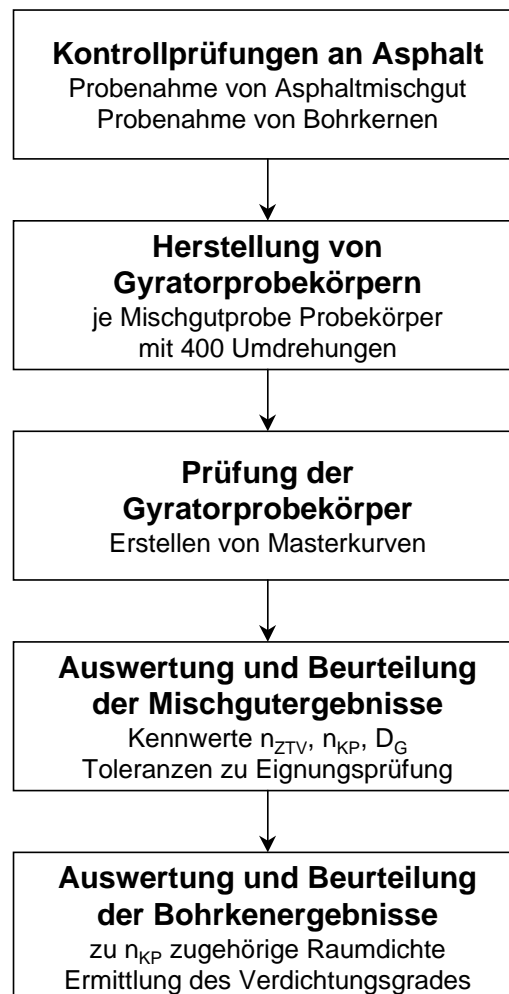


Abbildung 48: Vorgehensweise für Kontrollprüfungen an Asphalt mit dem Gyrator

Die Durchführung von Kontrollprüfungen erfolgt gemäß den geltenden Technischen Richtlinien [62], [63] unter Berücksichtigung der in Anlage 16 und Anlage 17 aufgeführten Ergänzungen unter anderem an Asphaltmischgut und an Asphaltbohrkernen der fertigen Schicht. Aus der Mischgutprobe werden Gyratorprobekörper mit 400 Umdrehungen hergestellt. Nach der Probekörperherstellung werden die Masterkurven erstellt. Aus den Masterkurven werden die Kennwerte n_{ZTV} , n_{KP} und D_G berechnet und mit den Ergebnissen der Eignungsprüfung verglichen. Die Toleranzen zur Bewertung der Ergebnisse liegen noch nicht vor und müssen in systematischen Versuchen ermittelt werden.

Mit der dem Kennwert n_{KP} zugehörigen Raumdichte kann der Verdichtungsgrad des Asphaltbohrkernes berechnet werden. Auch zur Beurteilung des Verdichtungsgrades auf Basis von Gyratorprobekörpern müssen noch systematische Untersuchungen durchgeführt werden.

7 Zusammenfassung

Der Gyrator ist neben dem Marshall-Verdichtungsgerät in der europäischen Normung als Gerät zur Herstellung von Laborprobekörpern aus Walzasphalt und zur Ermittlung der Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut vorgesehen. Die Bewertung der in Deutschland eingesetzten Walzasphalte sowohl vor als auch nach der Bauleistung wird bisher mit asphalttechnologischen Kennwerten auf Grundlage des Marshall-Verdichtungsverfahrens vorgenommen. Es war bislang nicht geklärt, ob mit dem Gyrator ermittelte Kennwerte vergleichbare Bewertungen der in Deutschland eingesetzten Asphalte ermöglichen und ob der Gyrator im Rahmen von Eignungs- und Kontrollprüfungen eingesetzt werden kann.

Mit der in dieser Arbeit neu entwickelten Auswertesystematik für Gyratorversuche ist es durch die Ableitung von drei Kenngrößen aus sogenannten Masterkurven möglich, einen asphaltsortenspezifischen Bezug zum bisherigen Bewertungshintergrund herzustellen, die Verdichtungsleistung zu ermitteln, ab der nicht erwünschte Probekörpereigenschaften zu erwarten sind und Aussagen zur Verdichtbarkeit der untersuchten Asphaltgemische zu treffen.

Als Grundlage für die Auswertesystematik werden die bei der Herstellung von Gyratorprobekörpern mit einer Verdichtungsleistung von 400 Umdrehungen aufgezeichneten Verdichtungskurven als Masterkurven definiert. Die erste aus den Masterkurven abgeleitete Kenngröße wird als minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} bezeichnet und beschreibt die Umdrehungszahl, die erforderlich ist, um die in den ZTV Asphalt bzw. ZTVT geforderte asphaltsortenspezifische Hohlraumgehalt-Obergrenze zu erreichen. Die zweite Kenngröße wird als maximale Verdichtungsleistung n_{KP} definiert und gibt die maximale Umdrehungszahl zur Herstellung von Gyratorprobekörpern an. Bei höheren Verdichtungsleistungen ist mit Fließvorgängen im Probekörperinneren und unerwünschtem Mörtelaustritt zu rechnen. Als dritte Kenngröße wird der Verdichtungswiderstand D_G aus der Masterkurve abgeleitet. Die Ermittlung des Verdichtungswiderstandes erfolgt analog zur Ermittlung der Verdichtbarkeit beim Marshall-Verfahren durch die Anpassung der Verdichtungskurve mit einer Exponentialfunktion und durch iterative Berechnung des Zahlenwertes für D_G .

Für das Versuchsprogramm dieser Arbeit wurden neun Mischgutvarianten ausgewählt, die möglichst breitbandig das nationale Asphaltenspektrum repräsentieren. In den Gyratorversuchen an den Labormischungen wurden für die insgesamt 27 untersuchten Asphaltgemische Masterkurven erstellt und Zahlenwerte für die Kenngrößen minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} , maximale Verdichtungsleistung n_{KP} und Verdichtungswiderstand D_G bestimmt. Die Kennwerte konnten durchgängig ermittelt werden und zeigten die erwarteten Abhängigkeiten von Mischgutart und -sorte sowie vom Bindemittelgehalt. Mit den Ergebnissen der Gyratorversuche an den Labormischungen stellte sich die angewandte Auswertesystematik als plausibel dar.

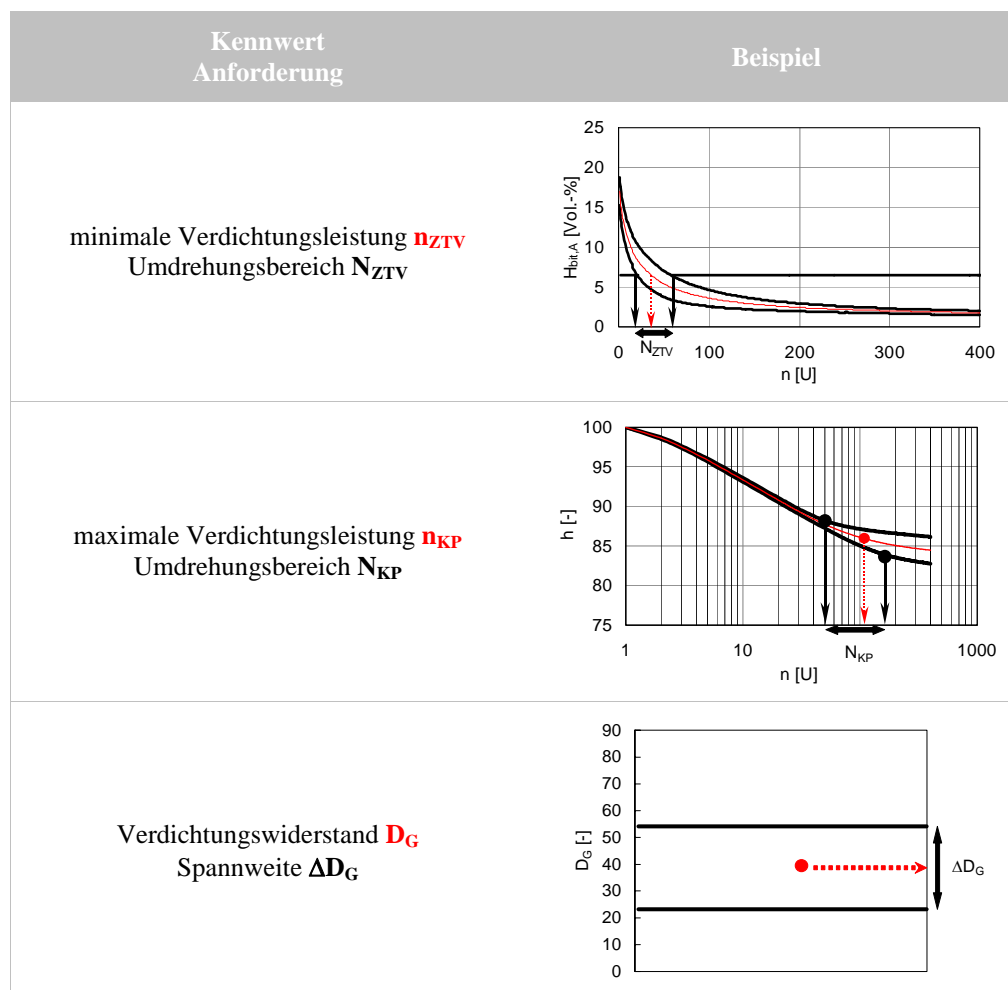


Abbildung 49: Ermittlung der Kennwerte und Vergleich mit Anforderungen

In den Gyratorversuchen an den Praxismischungen wurden für jede Mischgutvariante aus bis zu 20 großtechnisch hergestellten Praxismischungen Masterkurven erstellt. Aus den erhaltenen Kurvenscharen wurden asphaltsortenspezifische Umdrehungsbereiche N_{ZTV} und N_{KP} für die Kenngrößen der minimalen und maximalen Verdichtungsleistung sowie Spannweiten ΔD_G für den Verdichtungswiderstand bestimmt. Diese Bereiche bzw. Spannweiten dienen bis zum Vorliegen von statistisch abgesicherten Untersuchungsergebnissen als erster Bewertungshintergrund.

Abschließend konnte die Anwendung des Gyratorverfahrens zur Bewertung von Asphalt in einem Schaubild (Abbildung 49) beispielhaft dargestellt werden. Auf Basis der in den Anlagen dargestellten Ergänzungen des Merkblattes für Eignungsprüfungen, der ZTV Asphalt und der ZTVT wurde aufgezeigt, dass der Gyrator auch im Rahmen von Eignungs- und Kontrollprüfungen an Asphalt einsetzbar ist.

Als Fazit dieser Arbeit kann herausgestellt werden, dass es die neu entwickelte Auswertesystematik erlaubt, Walzasphalte mit dem Gyrator ohne „Qualitätseinbuße“ zu beurteilen. Durch die Ermittlung von drei Kenngrößen aus einer Versuchsserie ergeben sich darüber hinaus Vereinfachungen gegenüber der bisher angewandten Regelprüfung mit dem Marshall-Verfahren. Vor dem Hintergrund der in CEN diskutierten Streichung von Parallelverfahren zur Herstellung von Asphaltprobekörpern zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit auf, dass auch in Deutschland anstelle des Marshall-Verfahrens der Gyrator eingesetzt werden kann.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Paulmann, Gerhard: Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten bei schlag- und gyratorisch verdichtetem Mischgut; Dissertation TU Darmstadt 1969
- [2] Gauer, Peter K.: Eine Analyse der Verdichtungswilligkeit und des Verformungswiderstandes von bituminösem Mischgut bei Verdichtung im Gyrator; Dissertation TU Darmstadt 1970
- [3] Motz, Heribert: Die Beurteilung des Verformungswiderstandes von Asphalt auf Grund unterschiedlicher Prüfverfahren im Laboratorium; Dissertation TU Darmstadt 1984
- [4] Renken, Peter: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von mittels Walz-Sektor-Verdichtungsgerät und Lamellen-Verdichtungsgerät hergestellten Asphaltprobeplatten; Heft 821 Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, DMB Bundesdruckerei, Bonn 2000
- [5] Huber, Gerald A.: Development of the Superpave Gyratory Compactor; http://www.utexas.edu/research/superpave/articles/gyr_hist.html, The University of Texas at Austin 1996
- [6] Partl, Manfred N.; Neubauer, Oskar: Verdichtbarkeit von Walzasphalt im Gyrator; Sonderdruck aus Strasse und Verkehr Nr. 10/1997
- [7] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Prüfung von Asphalt mit dem Gyrator (CEN 227/WG1), Straßenforschung Heft 501, Wien 2000
- [8] Von-Quintus, H.L.; Hughes, C.S.; Scherocman, J.A.: NCHRP Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System; Transportation Research Board No. 1353, Washington DC 1992
- [9] Hiersche, Ernst-Ulrich: Halbzeit bei SHRP; Straße und Autobahn 7/91 (S. 402-405)

- [10] Bellin, Peter: Wird der Asphalt neu erfunden? Ursachen, Stand und Ziele der Bitumen- und Asphaltforschung im Strategic Highway Research Program (SHRP); Bitumen 2/92 (S.69-74)
- [11] Bellin, Peter: Zur Bewertung und Wahl eines Laborverfahrens für die Verdichtung von Asphaltprobekörpern mit praxisnahen Eigenschaften in den USA; Straße und Autobahn 1/94 (S. 9-13)
- [12] Bellin, Peter: Stand der Bitumen und Asphaltforschung im amerikanischen SHRP Programm; Straße und Autobahn 11/93 (S. 658-662)
- [13] Maupin, G.W. Jr.: Determination of Compactive Effort to Duplicate Pavement Voids for Corps of Engineers Gyrotory Testing Machine; Transportation Research Record 1492/1995 (S. 12-17)
- [14] Lindahl, Tord: SHRP and the European Research; European Asphalt Magazin 1/95 (S. 20-23)
- [15] Bellin, Peter: Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Program SHRP, Teil 1: Bindemittel-Spezifikationen; Bitumen 2/95 (S. 50-65)
- [16] van der Heide, Jos P.J.: Strategic Highway Research Program International conference 1995, Prague; European Asphalt Magazine 4/95 (S. 34-36)
- [17] Bellin, Peter: Ergebnisse der amerikanischen SHRP-Forschung; Straße und Autobahn 5/96 (S. 243-250)
- [18] Bellin, Peter: Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Program SHRP, Teil 2: Asphaltbemessung; Bitumen 2/97 (S. 54-65)
- [19] Asphalt Institute: SP-1 Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing; 1997 www.asphaltinstitute.org
- [20] Asphalt Institute: SP-2 Superpave Mix Design; 2001 www.asphaltinstitute.org

- [21] Asphalt Institute Research Center: Superpave Asphalt Mixture Design; National Asphalt Training Center Demonstration Project 101 (S. 63-71); Lexington, KY 1994
- [22] Mc Gennis, B.; Tam, W.; Anderson, M.: Update of Design Number of Gyration; <http://www.utexas.edu/research/superpave/articles/art-ndesign.html>, The University of Texas at Austin 1996
- [23] FE 07.170 G 95I: Internationaler Vergleich von CEN-Prüfverfahren zur Ermittlung der Verdichtbarkeit von Asphalt und Bestimmung der Bezugsraumdicke, TU Braunschweig 1997 (vorläufiger Schlußbericht)
- [24] Moll, Bernd: Herstellung und vergleichende Beurteilung von Asphaltprobekörpern mit dem Marshall-Hammer und dem Gyrator-Verdichter; TU München 1996
- [25] Löcherer, Ludwig: Erweiterung von Eignungs- und Kontrollprüfungen durch die Herstellung von Asphaltprobekörpern mit dem Gyrator-Verdichter; Diplomarbeit TU München 1997
- [26] Niedlich, Thorsten: Vergleich der Verdichtbarkeit von Asphaltprobekörpern aus der Marshall- und Gyrator-Verdichtung; Diplomarbeit TU München 1997
- [27] Schlenk, Stephan: Literaturrecherche zum Gyrator und dessen Rolle in der Asphaltkonzeption; Diplomarbeit TU München 1997
- [28] Gauer, Peter K.: Compaction of Asphalt in the Darmstadt Gyro Compactor, International Workshop on the Use of the Gyro Shear Compactor, LCPC, Nantes 1996
- [29] Wallner, Bernd: Comparison of the Compactability of Asphalt Based on the Properties of Marshall and Gyro Specimens; International Workshop on the Use of the Gyro Shear Compactor, LCPC, Nantes 1996
- [30] Wörner, Thomas; Wallner, Bernd; Schwingenschlögl, Alfred: Beurteilung der asphalttechnologischen Kenngrößen von Gyroprobekörpern im Hinblick auf die Anforder-

- rungen der ZTV Asphalt-StB und der ZTVT-StB; Heft 871 Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, DMB Bundesdruckerei, Bonn 2003
- [31] Entwurf DIN EN 13108-1: Asphalt, Anforderungen, Teil 1: Asphaltbeton; Juni 2001, Beuth Verlag Berlin
- [32] Entwurf DIN EN 13108-5: Asphalt, Anforderungen, Teil 5: Splittmastixasphalt (SMA); April 2000, Beuth Verlag Berlin
- [33] DIN EN 12697-8: Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern; Juni 2003, Beuth Verlag Berlin
- [34] DIN EN 12697-5: Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 5: Bestimmung der Rohdichte; November 2002, Beuth Verlag Berlin
- [35] DIN EN 12697-6: Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern; Juni 2003, Beuth Verlag Berlin
- [36] Entwurf DIN EN 12697-30: Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 30: Probenvorbereitung, Schlagverdichter; April 2000, Beuth Verlag Berlin
- [37] prEN 12697-31: Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 31: Herstellung von Probekörpern, Gyrator-Verdichter; Dezember 2001, CEN Brüssel
- [38] DIN 1996-7: Prüfung von Asphalt, Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad, Dezember 1992, Beuth Verlag Berlin
- [39] Entwurf DIN EN 12697-9: Asphalt, Prüfverfahren, Teil 9: Bestimmung der Bezugsraumdichte, Gyrator-Verdichter; Dezember 1997, Beuth Verlag Berlin
- [40] DIN EN 12697-10: Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 10: Verdichtbarkeit; März 2002, Beuth Verlag Berlin

- [41] Merkblatt für das Verdichten von Asphalt - Teil 2: Theorie der Verdichtung, Ausgabe 1998; FGSV Verlag, Köln
- [42] Entwurf DIN EN 12697-35: Asphalt, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 35: Labormischung, Mai 2002, Beuth Verlag Berlin
- [43] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, ZTV Asphalt – StB 94, Ausgabe 1994 mit Änderungen und Ergänzungen, Ausgabe 1998, FGSV Verlag, Köln
- [44] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, ZTVT–StB 95, Ausgabe 1995 / Fassung 1998, FGSV Verlag, Köln
- [45] Kreyszig, Erwin: statistische Methoden und ihre Anwendungen, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1965
- [46] Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau – Teil: Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme, Ausgabe 1999, FGSV Verlag, Köln
- [47] Renken, Peter: Verdichtbarkeit von Asphaltbetongemischen und ihr Einfluß auf die Standfestigkeit; Technische Universität Braunschweig, Schriftenreihe Straßenwesen, Heft 3 1980
- [48] Arbeitsanleitung für die Verdichtbarkeit von Walzasphalt mit Hilfe des Marshall-Verfahrens, Ausgabe 1987, FGSV Verlag, Köln
- [49] Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau, TL Min-StB 94, Ausgabe 1994, FGSV Verlag, Köln
- [50] Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau, RG Min-StB 93, Ausgabe 1993, FGSV Verlag, Köln
- [51] DIN EN 12591: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, Anforderungen an Straßenbaubitumen, April 2000, Beuth Verlag Berlin

- [52] DIN EN 1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, Bestimmung der Nadelpenetration, Dezember 1999, Beuth Verlag Berlin
- [53] DIN EN 1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, Bestimmung des Erweichungspunktes, Ring- und Kugel-Verfahren, Dezember 1999, Beuth Verlag Berlin
- [54] DIN EN 12593: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß, April 2000, Beuth Verlag Berlin
- [55] DIN EN ISO 3838: Rohöl und flüssige oder feste Mineralölerzeugnisse, Bestimmung der Dichte oder der relativen Dichte, Verfahren mittels Pyknometer mit Kapillarstopfen und Bikapillar-Pyknometer mit Skale, Dezember 1995, Beuth Verlag Berlin
- [56] Technische Lieferbedingungen für Polymermodifizierte Bitumen in Asphaltsschichten im Heißeinbau, Teil 1: Gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen, TL-PmB Teil 1, Ausgabe 1991, FGSV Verlag, Köln
- [57] Merkblatt für Eignungsprüfungen an Asphalt, Ausgabe 1998; FGSV Verlag, Köln
- [58] Gestrata: Asphalt Handbuch, Austrotop Vervielfältiger Prikyl, Wien 1991
- [59] Hutschenreuther, Jürgen; Wörner, Thomas: Asphalt im Strassenbau, Verlag für das Bauwesen, Berlin 1998
- [60] Arand, W.; Renken, P.: Grundlegende Untersuchungen über den Einfluß der Zusammensetzung auf die Verdichtbarkeit von Walzasphalten mittels Variation kompositiveller Merkmale zur Schaffung quantitativer Bewertungsmaßstäbe, Schlußbericht zum Forschungsauftrag 8267 der AIF, Braunschweig 1992
- [61] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau bituminöser Fahrbahndecken ZTVbit-StB 84, Ausgabe 1984, FGSV Verlag, Köln
- [62] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, ZTV Asphalt – StB 01, Ausgabe 2001, FGSV Verlag, Köln

- [63] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, ZTV T-StB 95, Ausgabe 1995 / Fassung 2002, FGSV Verlag, Köln

9 Anlagenverzeichnis

Anlage	1.1 bis 1.9	Eignungsprüfungen
Anlage	2	Verdichtungswiderstände – Marshallprobekörper
Anlage	3	Masterkurven – Labormischungen
Anlage	4	minimale Verdichtungsleistung – Labormischungen
Anlage	5	logarithmierte Masterkurven – Labormischungen
Anlage	6	Lokalisierung der Knickpunkte – Labormischungen
Anlage	7	Verdichtungswiderstand – Labormischungen Vergleich Gyrator- und Marshallversuche
Anlage	8	Verdichtungswiderstand D_G – Labormischungen Verlauf mit zunehmender Verdichtungsleistung
Anlage	9	Masterkurven – Praxismischungen
Anlage	10	Grenzlينien mit Mittelwertkurven – Praxismischungen
Anlage	11	Ermittlung der Umdrehungsspannen N_{ZTV} – Praxismischungen
Anlage	12	logarithmierte Grenzlينien – Praxismischungen
Anlage	13	Ermittlung der Umdrehungsspannen N_{KP} – Praxismischungen
Anlage	14	Grenzlينien Verdichtungswiderstand D_G – Praxismischungen
Anlage	15.1 bis 15.2	Ergänzungen des Merkblattes für Eignungsprüfungen an Asphalt
Anlage	16.1 bis 16.2	Ergänzungen der ZTV Asphalt – StB
Anlage	17.1 bis 17.2	Ergänzungen der ZTVT – StB

Eignungsprüfung Asphaltbeton 0/8

Dosiervorschlag

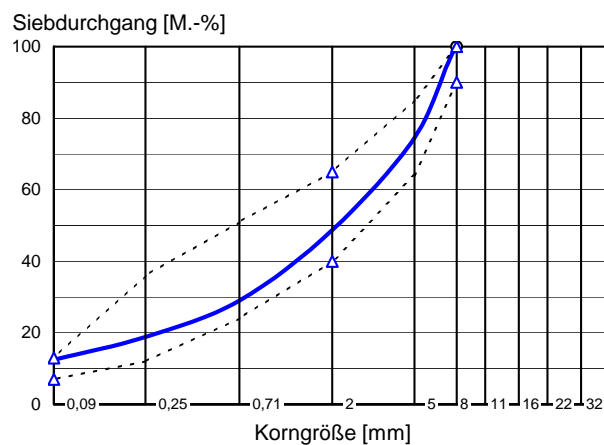
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Diabas ESP	5/8	25,5
Diabas ESP	2/5	22,5
Diabas EBS	0/2	46,0
KSM	<0,09	6,0

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	5/8	2/5	0/2	<0,09					
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	--	--	--	--	--	--	--	--	--
8 - 11	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5 - 8	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--
2 - 5	--	100,0	7,2	--	--	--	--	--	--
0,71 - 2	--	--	42,8	--	--	--	--	--	--
0,25 - 0,71	--	--	22,0	0,7	--	--	--	--	--
0,09 - 0,25	--	--	12,6	9,8	--	--	--	--	--
< 0,09	--	--	15,4	89,5	--	--	--	--	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand	Summe	Anteile
	[M.-%]	[M.-%]	
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 51,3
22 - 32	0,0	100,0	
16 - 22	0,0	100,0	
11 - 16	0,0	100,0	
8 - 11	0,0	100,0	
5 - 8	25,5	100,0	
2 - 5	25,8	74,5	Sand 36,2
0,71 - 2	19,7	48,7	
0,25 - 0,71	10,2	29,0	
0,09 - 0,25	6,4	18,8	
< 0,09	12,5	12,5	Füller 12,5



Ergebnisse der Eignungsprüfung

		Mischung A	Mischung B	Mischung C
B-Sorte		B80	B80	B80
B	[M.-%]	6,4	6,9	7,4
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,855	2,855	2,855
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,564	2,544	2,524
ρ_A	[g/cm ³]	2,510	2,502	2,486
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	2,1	1,7	1,5
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	2,6	2,1	1,8
B_V	[Vol.-%]	15,6	16,8	17,9
M_V	[Vol.-%]	82,3	81,6	80,6
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	17,7	18,4	19,4
FA	[%]	87,9	90,9	92,1

Anforderung ZTV
Asphalt - StB 94 (98)

B80; (B65)
6,4 - 7,7

1,0 - 3,0 ; 2,0 - 4,0

Eignungsprüfung Asphaltbeton 0/11

Dosiervorschlag

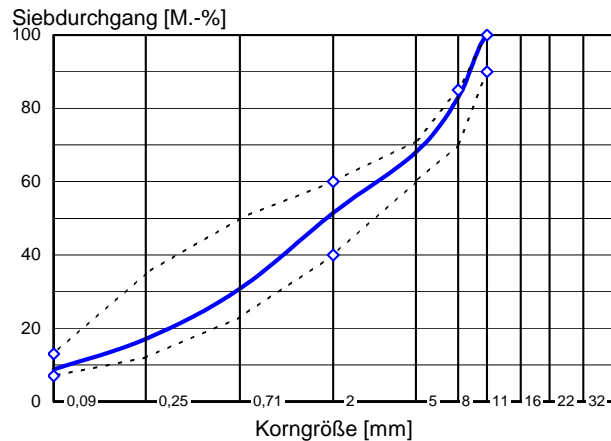
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Diabas ESP	8/11	17,0
Diabas ESP	5/8	15,0
Diabas ESP	2/5	15,0
Diabas EBS	0/2	50,0
KSM	<0,09	3,0

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	8/11	5/8	2/5	0/2	<0,09				
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	--	--	--	--	--	--	--	--	--
8 - 11	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--
5 - 8	--	100,0	--	0,0	--	--	--	--	--
2 - 5	--	--	100,0	3,1	--	--	--	--	--
0,71 - 2	--	--	--	41,4	--	--	--	--	--
0,25 - 0,71	--	--	--	27,4	0,7	--	--	--	--
0,09 - 0,25	--	--	--	16,0	9,8	--	--	--	--
< 0,09	--	--	--	12,1	89,5	--	--	--	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand	Summe	Anteile [M.-%]
	[M.-%]	[M.-%]	
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 48,6
22 - 32	0,0	100,0	
16 - 22	0,0	100,0	
11 - 16	0,0	100,0	
8 - 11	17,0	100,0	
5 - 8	15,0	83,0	
2 - 5	16,6	68,0	Sand 42,7
0,71 - 2	20,7	51,4	
0,25 - 0,71	13,7	30,7	
0,09 - 0,25	8,3	17,0	
< 0,09	8,7	8,7	Füller 8,7



Ergebnisse der Eignungsprüfung

		Mischung A	Mischung B	Mischung C
B-Sorte		B80	B80	B80
B	[M.-%]	6,2	6,7	7,2
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,865	2,865	2,865
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,580	2,559	2,539
ρ_A	[g/cm ³]	2,453	2,488	2,480
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	4,9	2,8	2,3
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	5,5	3,1	2,8
B_V	[Vol.-%]	14,8	16,2	17,3
M_V	[Vol.-%]	80,3	81,0	80,3
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	19,7	19,0	19,7
FA	[%]	75,0	85,4	88,2

Anforderung ZTV
Asphalt - StB 94 (98)

B80; (B65)
6,2 - 7,5

1,0 - 3,0 ; 2,0 - 4,0

Eignungsprüfung Asphaltbeton 0/11 S

Dosiervorschlag

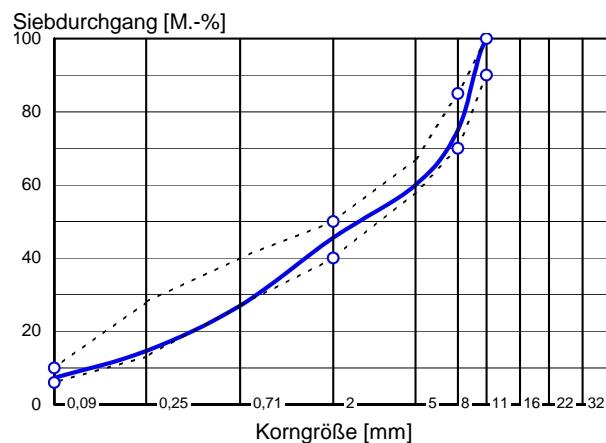
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Diabas ESP	8/11	25,0
Diabas ESP	5/8	15,0
Diabas ESP	2/5	13,0
Diabas EBS	0/2	45,0
KSM	<0,09	2,0

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	8/11	5/8	2/5	0/2	<0,09				
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	--	--	--	--	--	--	--	--	--
8 - 11	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--
5 - 8	--	100,0	--	0,0	--	--	--	--	--
2 - 5	--	--	100,0	3,1	--	--	--	--	--
0,71 - 2	--	--	--	41,4	--	--	--	--	--
0,25 - 0,71	--	--	--	27,4	0,7	--	--	--	--
0,09 - 0,25	--	--	--	16,0	9,8	--	--	--	--
< 0,09	--	--	--	12,1	89,5	--	--	--	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand	Summe	Anteile [M.-%]
	[M.-%]	[M.-%]	
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 54,4
22 - 32	0,0	100,0	
16 - 22	0,0	100,0	
11 - 16	0,0	100,0	
8 - 11	25,0	100,0	
5 - 8	15,0	75,0	
2 - 5	14,4	60,0	
0,71 - 2	18,6	45,6	Sand 38,3
0,25 - 0,71	12,3	27,0	
0,09 - 0,25	7,4	14,6	
< 0,09	7,2	7,2	Füller 7,2



Ergebnisse der Eignungsprüfung

		Mischung A	Mischung B	Mischung C
B-Sorte		B65	B65	B65
B	[M.-%]	5,9	6,4	6,9
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,870	2,870	2,870
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,601	2,581	2,560
ρ_A	[g/cm ³]	2,464	2,470	2,480
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	5,3	4,3	3,1
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	5,9	5,2	3,8
B_V	[Vol.-%]	13,9	15,2	16,4
M_V	[Vol.-%]	80,8	80,6	80,5
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	19,2	19,4	19,5
FA	[%]	72,6	78,0	84,0

Anforderung ZTV
Asphalt - StB 94 (98)

B65; (B80)
5,9 - 7,2

3,0 - 5,0

Eignungsprüfung Asphaltbinder 0/16 S

Dosiervorschlag

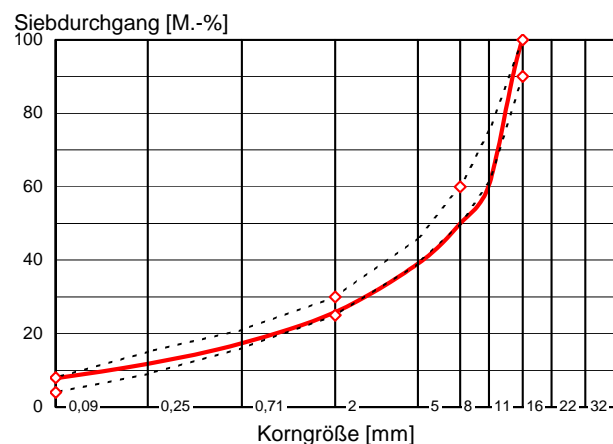
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Diabas ESP	11/16	39,5
Diabas ESP	8/11	10,5
Diabas ESP	5/8	11,0
Diabas ESP	2/5	12,5
Diabas EBS	0/2	20,5
KSM	<0,09	6,0

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	11/16	8/11	5/8	2/5	0/2	<0,09			
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--
8 - 11	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--
5 - 8	--	--	100,0	--	0,0	--	--	--	--
2 - 5	--	--	--	100,0	3,1	--	--	--	--
0,71 - 2	--	--	--	--	41,4	--	--	--	--
0,25 - 0,71	--	--	--	--	27,4	0,7	--	--	--
0,09 - 0,25	--	--	--	--	16,0	9,8	--	--	--
< 0,09	--	--	--	--	12,1	89,5	--	--	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand	Summe	Anteile [M.-%]
	[M.-%]	[M.-%]	
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 74,1
22 - 32	0,0	100,0	
16 - 22	0,0	100,0	
11 - 16	39,5	100,0	
8 - 11	10,5	60,5	
5 - 8	11,0	50,0	
2 - 5	13,1	39,0	
0,71 - 2	8,5	25,9	Sand 18,0
0,25 - 0,71	5,7	17,4	
0,09 - 0,25	3,9	11,7	
< 0,09	7,9	7,9	Füller 7,9



Ergebnisse der Eignungsprüfung

B-Sorte		Mischung A	Mischung B	Mischung C
PmB45		PmB45	PmB45	PmB45
B	[M.-%]	4,2	4,7	5,2
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,863	2,863	2,863
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,662	2,640	2,619
ρ_A	[g/cm ³]	2,472	2,486	2,489
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	7,1	5,9	4,9
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	11,9	9,7	8,6
B_V	[Vol.-%]	10,1	11,4	12,6
M_V	[Vol.-%]	82,7	82,7	82,4
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	17,3	17,3	17,6
FA	[%]	58,7	66,0	71,9

Anforderung ZTV
Asphalt - StB 94 (98)
(B65): B45; PmB45
4,2 - 5,5

4,0 - 7,0

Eignungsprüfung Asphaltbinder 0/22 S

Dosiervorschlag

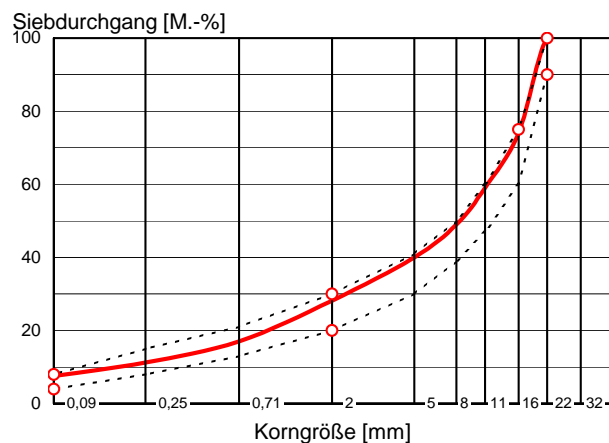
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Diabas ESP	16/22	26,0
Diabas ESP	11/16	15,0
Diabas ESP	8/11	10,0
Diabas ESP	5/8	9,0
Diabas ESP	2/5	10,0
Diabas EBS	0/2	26,0
KSM	<0,09	4,0

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	16/22	11/16	8/11	5/8	2/5	0/2	<0,09		
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--
8 - 11	--	--	100,0	--	--	--	--	--	--
5 - 8	--	--	--	100,0	--	0,0	--	--	--
2 - 5	--	--	--	--	100,0	7,2	--	--	--
0,71 - 2	--	--	--	--	--	42,8	--	--	--
0,25 - 0,71	--	--	--	--	--	22,0	0,7	--	--
0,09 - 0,25	--	--	--	--	--	12,6	9,8	--	--
< 0,09	--	--	--	--	--	15,4	89,5	--	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand	Summe	Anteile [M.-%]
	[M.-%]	[M.-%]	
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 71,9
22 - 32	0,0	100,0	
16 - 22	26,0	100,0	
11 - 16	15,0	74,0	
8 - 11	10,0	59,0	
5 - 8	9,0	49,0	
2 - 5	11,9	40,0	
0,71 - 2	11,1	28,1	Sand 20,5
0,25 - 0,71	5,8	17,0	
0,09 - 0,25	3,7	11,3	
< 0,09	7,6	7,6	Füller 7,6



Ergebnisse der Eignungsprüfung

B-Sorte		Mischung A	Mischung B	Mischung C
		PmB45	PmB45	PmB45
B	[M.-%]	4,0	4,5	5,0
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,860	2,860	2,860
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,669	2,647	2,625
ρ_A	[g/cm ³]	2,465	2,490	2,514
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	7,6	5,9	4,2
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	12,4	10,1	8,5
B_V	[Vol.-%]	9,6	10,9	12,3
M_V	[Vol.-%]	82,7	83,1	83,5
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	17,3	16,9	16,5
FA	[%]	55,7	64,8	74,4

Anforderung ZTV
Asphalt - StB 94 (98)
(B65); B45; PmB45
4,0 - 5,0

5,0 - 7,0

Eignungsprüfung Asphalttragschicht 0/32 C

Dosiervorschlag

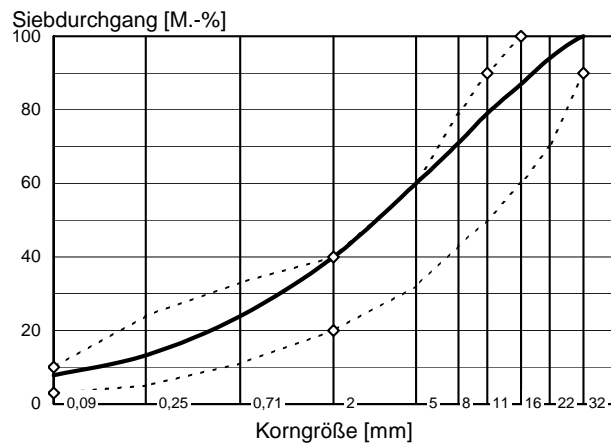
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Kies	22/32	6
Kies	16/22	7
Kies	11/16	8,0
Kies	8/11	8,0
Kies	5/8	11
Kies	2/5	20
Kiessand	0/2	40

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	22/32	16/22	11/16	8/11	5/8	2/5	0/2		
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	--	--	100,0	--	--	--	--	--	--
8 - 11	--	--	--	100,0	--	--	--	--	--
5 - 8	--	--	--	--	100,0	--	--	--	--
2 - 5	--	--	--	--	--	100,0	--	--	--
0,71 - 2	--	--	--	--	--	--	40,2	--	--
0,25 - 0,71	--	--	--	--	--	--	26,8	--	--
0,09 - 0,25	--	--	--	--	--	--	13,5	--	--
< 0,09	--	--	--	--	--	--	19,5	--	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand	Summe	Anteile
	[M.-%]	[M.-%]	
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 60,0
22 - 32	6,0	100,0	
16 - 22	7,0	94,0	
11 - 16	8,0	87,0	
8 - 11	8,0	79,0	
5 - 8	11,0	71,0	
2 - 5	20,0	60,0	
0,71 - 2	16,1	40,0	Sand 32,2
0,25 - 0,71	10,7	23,9	
0,09 - 0,25	5,4	13,2	
< 0,09	7,8	7,8	Füller 7,8



Ergebnisse der Eignungsprüfung

		Mischung A	Mischung B	Mischung C
B-Sorte		B65	B65	B65
B	[M.-%]	3,6	4,1	4,6
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,719	2,719	2,719
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,571	2,551	2,532
ρ_A	[g/cm ³]	2,426	2,460	2,472
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	5,6	3,6	2,4
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	6,2	4,0	2,5
B_V	[Vol.-%]	8,4	9,7	10,9
M_V	[Vol.-%]	86,0	86,7	86,7
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	14,0	13,3	13,3
FA	[%]	59,8	72,9	82,0

Anforderung
ZTVT - StB 95 (98)

B80; B65
>= 3,6

4,0 - 10,0

Eignungsprüfung Asphalttragschicht 0/32 CS

Dosiervorschlag

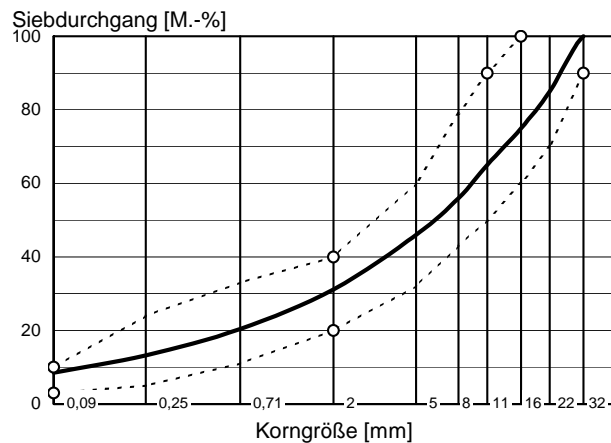
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Diabas ESP	22/32	15,0
Diabas ESP	16/22	10,0
Diabas ESP	11/16	10,0
Diabas ESP	8/11	9,0
Diabas ESP	5/8	10,0
Diabas ESP	2/5	14,0
Diabas EBS	0/2	26,0
KSM	<0,09	6,0

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	22/32	16/22	11/16	8/11	5/8	2/5	0/2	<0,09	
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	--	100,0	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	--	--	100,0	--	--	--	--	--	--
8 - 11	--	--	--	100,0	--	--	--	--	--
5 - 8	--	--	--	--	100,0	--	0,0	--	--
2 - 5	--	--	--	--	--	100,0	3,1	--	--
0,71 - 2	--	--	--	--	--	--	41,4	--	--
0,25 - 0,71	--	--	--	--	--	--	27,4	0,7	--
0,09 - 0,25	--	--	--	--	--	--	16,0	9,8	--
< 0,09	--	--	--	--	--	--	12,1	89,5	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand	Summe	Anteile
	[M.-%]	[M.-%]	
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 68,8
22 - 32	15,0	100,0	
16 - 22	10,0	85,0	
11 - 16	10,0	75,0	
8 - 11	9,0	65,0	
5 - 8	10,0	56,0	
2 - 5	14,8	46,0	
0,71 - 2	10,8	31,2	Sand 22,7
0,25 - 0,71	7,2	20,4	
0,09 - 0,25	4,7	13,3	
< 0,09	8,5	8,5	Füller 8,5



Ergebnisse der Eignungsprüfung

		Mischung A	Mischung B	Mischung C
B-Sorte		B65	B65	B65
B	[M.-%]	3,6	4,1	4,6
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,860	2,860	2,860
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,691	2,670	2,648
ρ_A	[g/cm ³]	2,475	2,500	2,519
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	8,1	6,3	4,9
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	11,0	9,8	6,7
B_V	[Vol.-%]	8,5	9,8	11,1
M_V	[Vol.-%]	83,4	83,8	84,0
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	16,6	16,2	16,0
FA	[%]	51,5	60,8	69,5

Anforderung
ZTVT - StB 95 (98)

B80; B65
>= 3,6

5,0 - 10,0

Eignungsprüfung Splittmastixasphalt 0/8 S

Dosiervorschlag

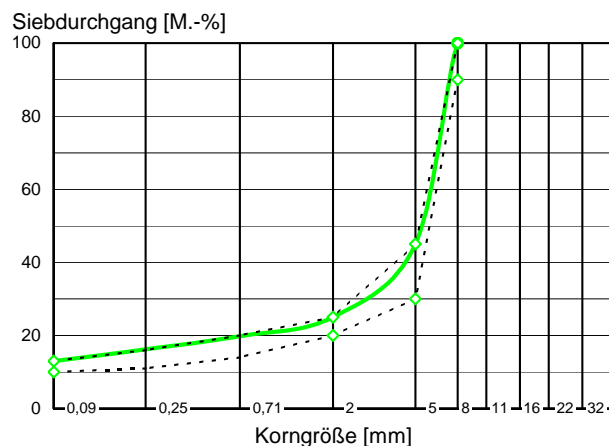
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Diabas ESP	5/8	55,0
Diabas ESP	2/5	19,6
Diabas EBS	0/2	12,6
KSM	< 0,09	12,5
stab. Zusatz	< 0,09	0,3

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	5/8	2/5	0/2	< 0,09	< 0,09				
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	--	--	--	--	--	--	--	--	--
8 - 11	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5 - 8	100,0	--	0,0	--	--	--	--	--	--
2 - 5	--	100,0	3,1	--	--	--	--	--	--
0,71 - 2	--	--	41,4	--	--	--	--	--	--
0,25 - 0,71	--	--	27,4	0,7	--	--	--	--	--
0,09 - 0,25	--	--	16,0	9,8	--	--	--	--	--
< 0,09	--	--	12,1	89,5	100,0	--	--	--	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand	Summe	Anteile [M.-%]
	[M.-%]	[M.-%]	
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 75,0
22 - 32	0,0	100,0	
16 - 22	0,0	100,0	
11 - 16	0,0	100,0	
8 - 11	0,0	100,0	
5 - 8	55,0	100,0	
2 - 5	20,0	45,0	Sand 12,0
0,71 - 2	5,2	25,0	
0,25 - 0,71	3,5	19,8	
0,09 - 0,25	3,2	16,3	
< 0,09	13,0	13,0	Füller 13,0



Ergebnisse der Eignungsprüfung

		Mischung A	Mischung B	Mischung C
B-Sorte		B65	B65	B65
B	[M.-%]	7,0	7,5	8,0
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,844	2,844	2,844
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,538	2,518	2,499
ρ_A	[g/cm ³]	2,423	2,436	2,418
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	4,5	3,3	3,3
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	6,1	4,9	4,9
B_V	[Vol.-%]	16,3	17,5	18,5
M_V	[Vol.-%]	79,2	79,2	78,2
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	20,8	20,8	21,8
FA	[%]	78,3	84,2	85,0

Anforderung ZTV
Asphalt - StB 94 (98)

B65; (PmB45)

$\geq 7,0$

3,0 - 4,0

Eignungsprüfung Splittmastixasphalt 0/11 S

Dosiervorschlag

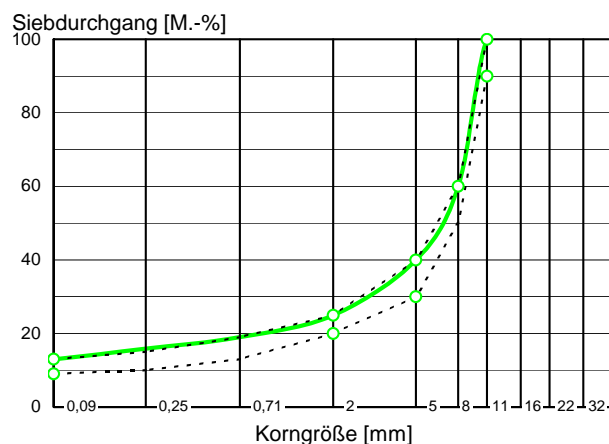
Mineralstoff	Körnung	Anteil [M.-%]
Diabas ESP	8/11	40,0
Diabas ESP	5/8	20,0
Diabas ESP	2/5	14,0
Diabas EBS	0/2	14,0
KSM	<0,09	11,7
stab. Zusatz	<0,09	0,3

Siebanalyse der Lieferkörnungen

Körnung	Siebrückstand [M.-%]								
	8/11	5/8	2/5	0/2	<0,09	<0,09			
32 - 45	--	--	--	--	--	--	--	--	--
22 - 32	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16 - 22	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11 - 16	--	--	--	--	--	--	--	--	--
8 - 11	100,0	--	--	--	--	--	--	--	--
5 - 8	--	100,0	--	0,0	--	--	--	--	--
2 - 5	--	--	100,0	7,2	--	--	--	--	--
0,71 - 2	--	--	--	42,8	--	--	--	--	--
0,25 - 0,71	--	--	--	22,0	0,7	--	--	--	--
0,09 - 0,25	--	--	--	12,6	9,8	--	--	--	--
< 0,09	--	--	--	15,4	89,5	100,0	--	--	--
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0

Sieblinie des Mineralstoffgemisches

Körnung	Rückstand [M.-%]	Summe [M.-%]	Anteile [M.-%]
32 - 45	0,0	100,0	Splitt 75,0
22 - 32	0,0	100,0	
16 - 22	0,0	100,0	
11 - 16	0,0	100,0	
8 - 11	40,0	100,0	
5 - 8	20,0	60,0	
2 - 5	15,0	40,0	Sand 12,1
0,71 - 2	6,0	25,0	
0,25 - 0,71	3,2	19,0	
0,09 - 0,25	2,9	15,8	
< 0,09	12,9	12,9	Füller 12,9



Ergebnisse der Eignungsprüfung

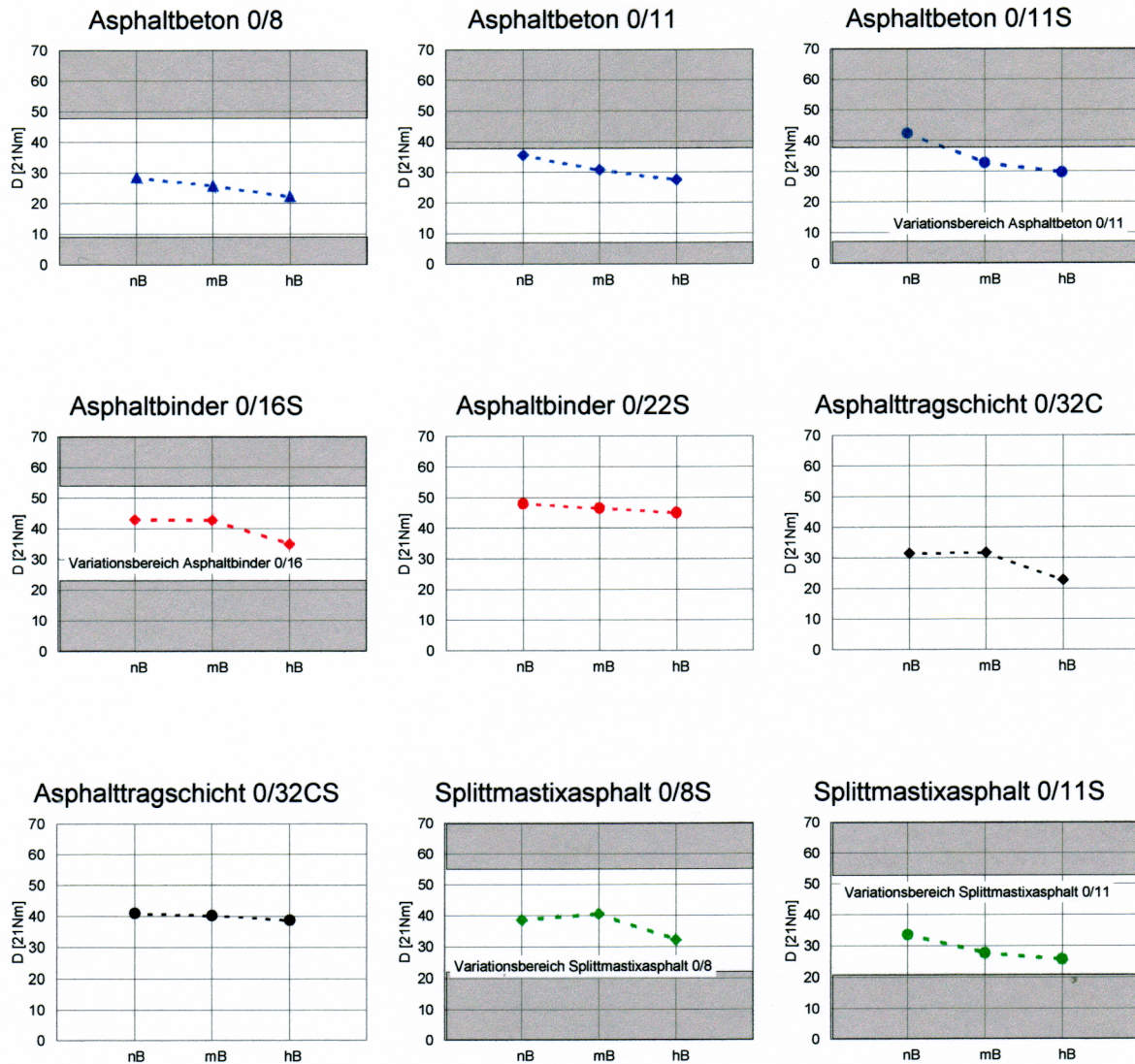
		Mischung A	Mischung B	Mischung C
B-Sorte		PmB 45	PmB45	PmB45
B	[M.-%]	6,5	7,0	7,5
$\rho_{R,M}$	[g/cm ³]	2,854	2,854	2,854
$\rho_{R,bit}$	[g/cm ³]	2,557	2,537	2,517
ρ_A	[g/cm ³]	2,458	2,442	2,451
$H_{bit,T}$	[Vol.-%]	3,9	3,7	2,6
$H_{bit,A}$	[Vol.-%]	5,8	6,4	4,5
B_V	[Vol.-%]	15,6	16,7	17,9
M_V	[Vol.-%]	80,5	79,6	79,4
$H_{M,bit}$	[Vol.-%]	19,5	20,4	20,6
FA	[%]	80,1	81,7	87,3

Anforderung ZTV
Asphalt - StB 94 (98)

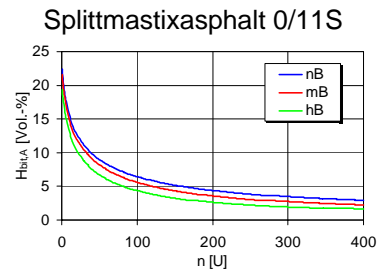
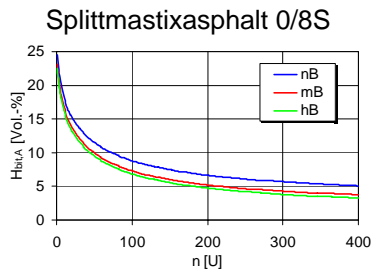
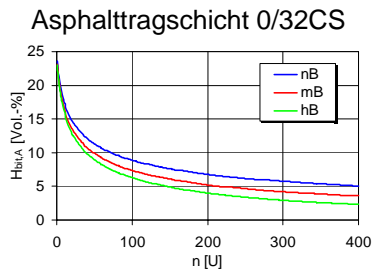
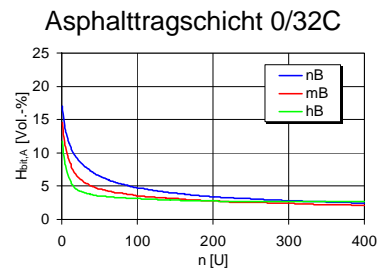
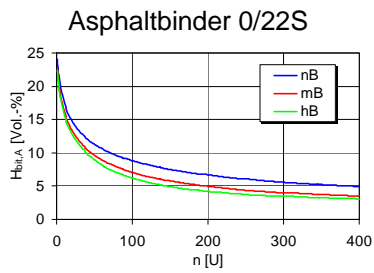
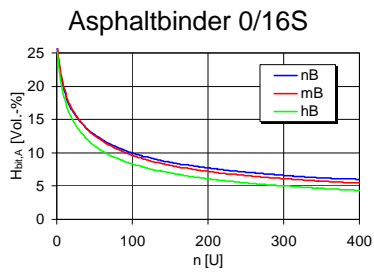
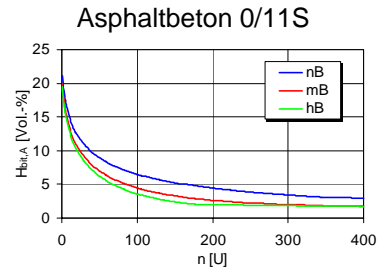
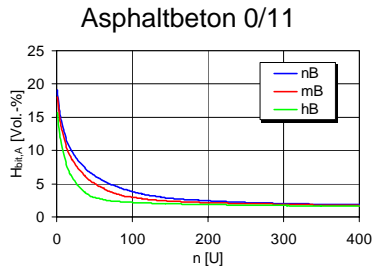
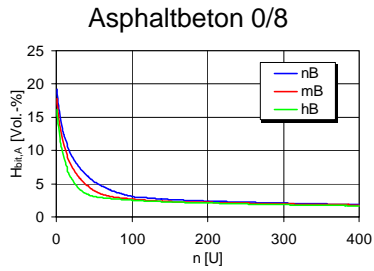
B65; (PmB45)
>= 6,5

3,0 - 4,0

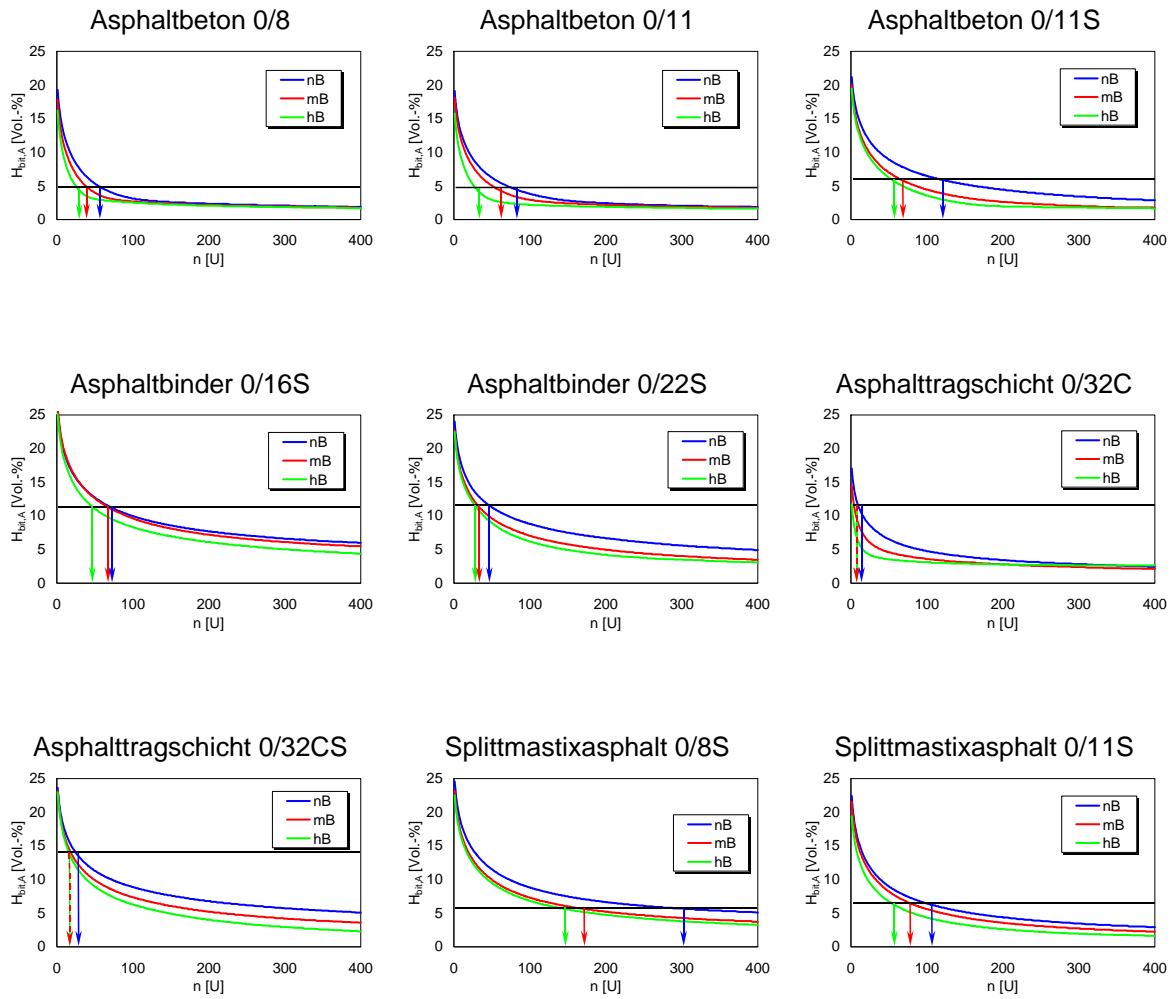
Verdichtungswiderstände – Marshallprobekörper



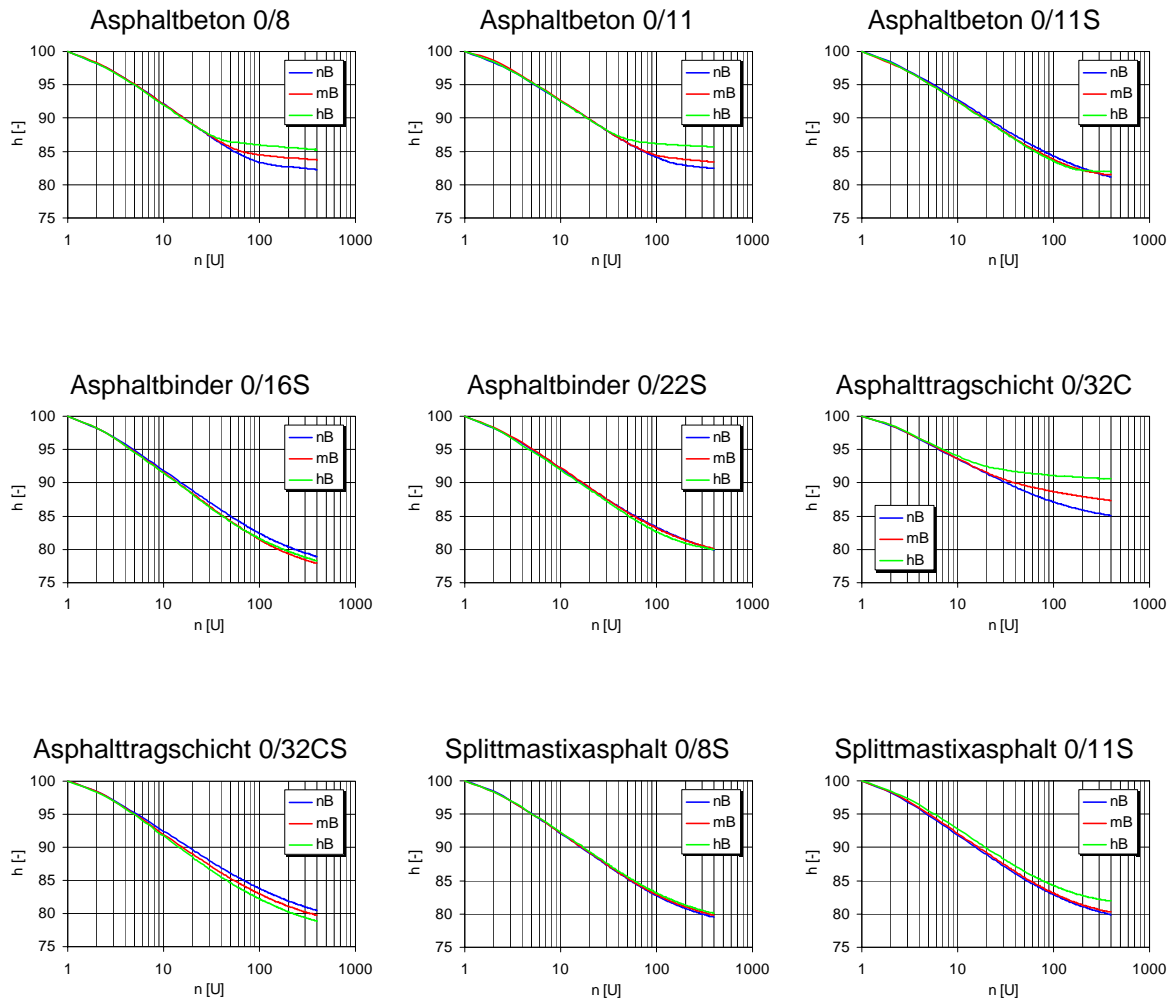
Masterkurven – Labormischungen



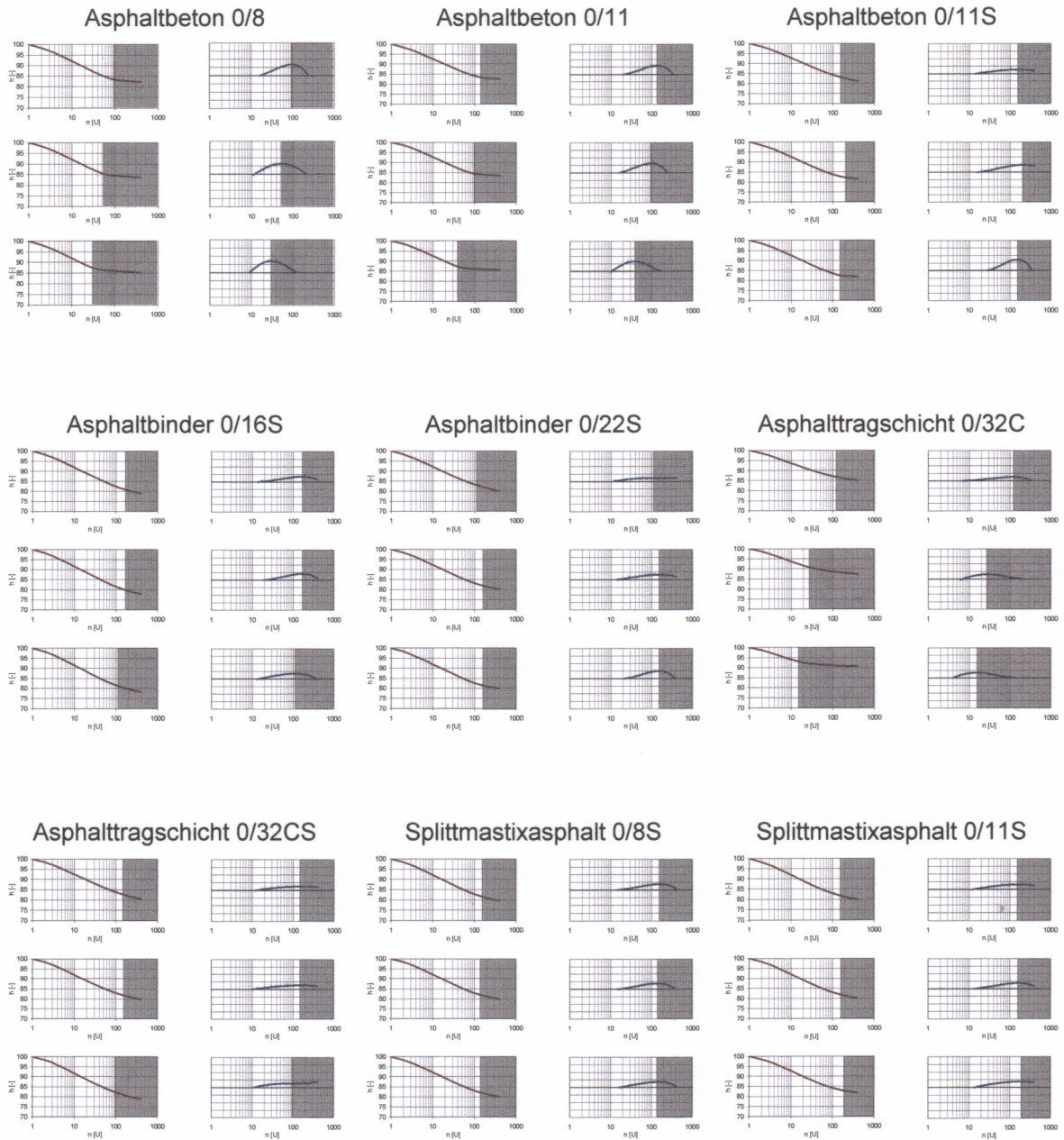
minimale Verdichtungsleistung – Labormischungen



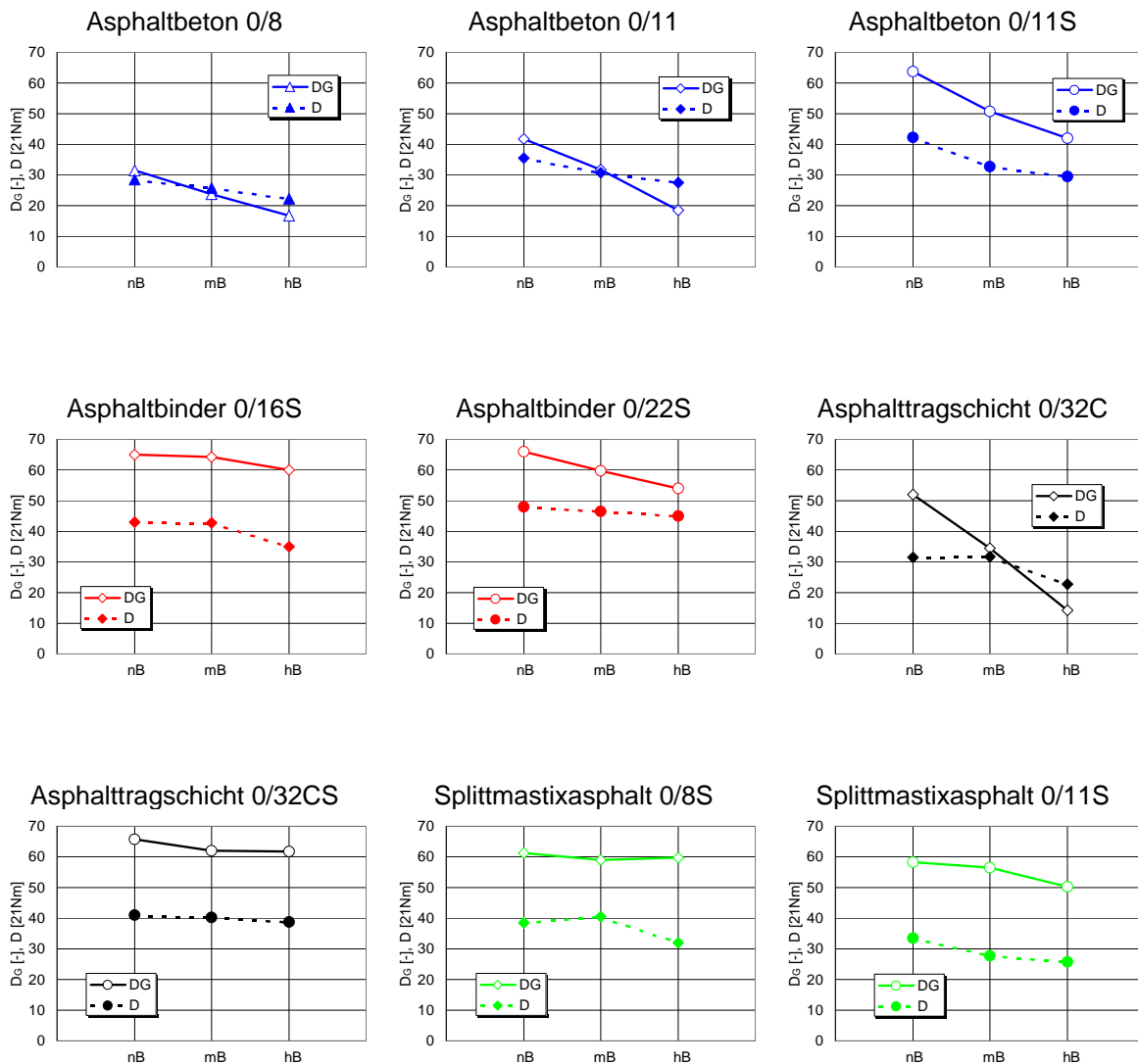
Logarithmierte Masterkurven – Labormischungen



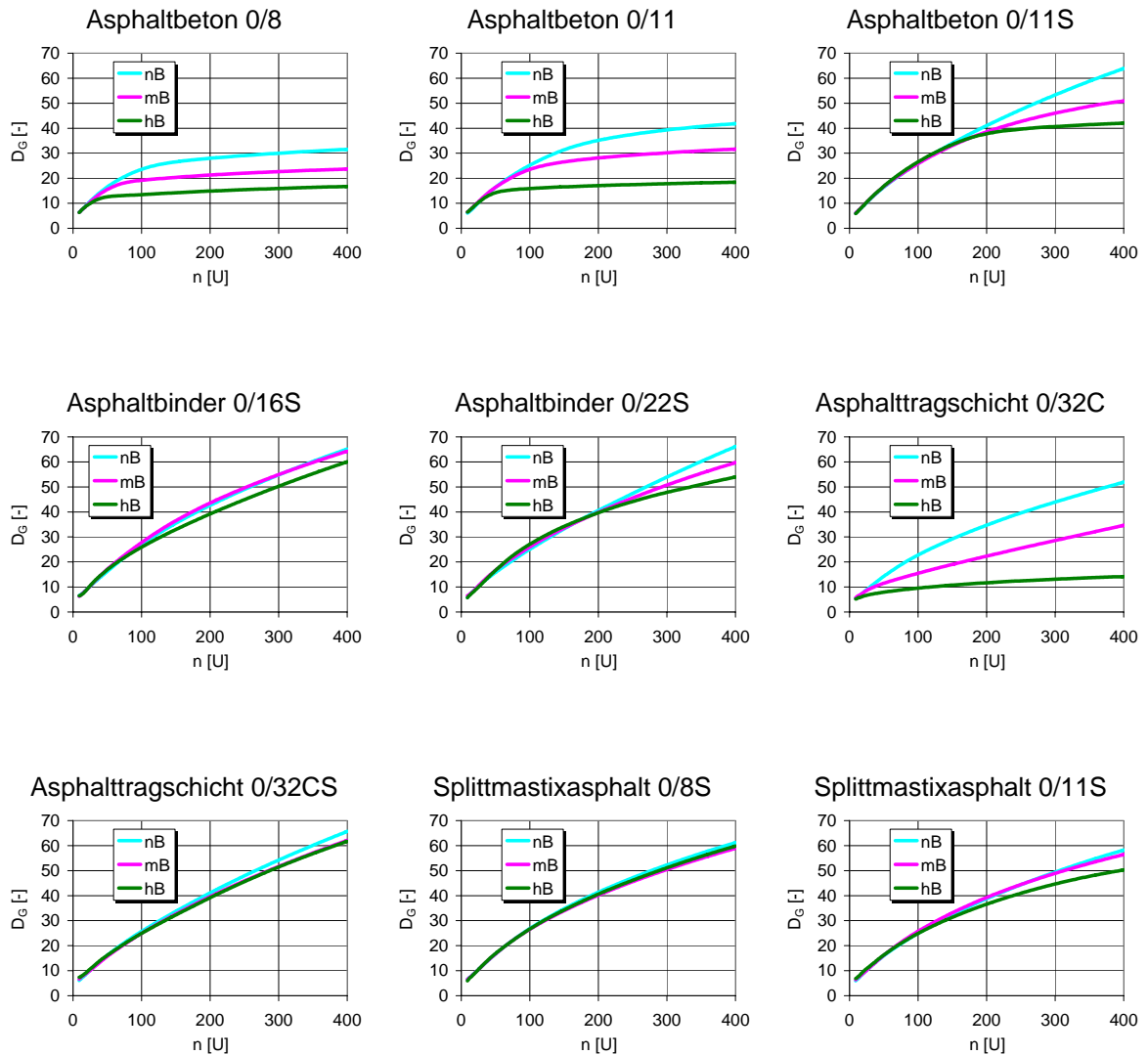
Lokalisierung der Knickpunkte – Labormischungen



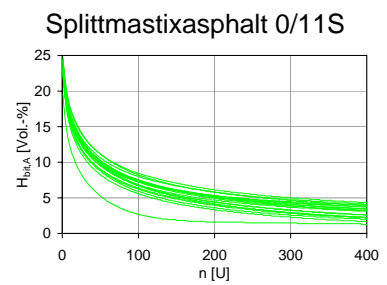
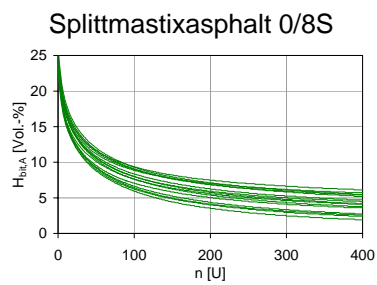
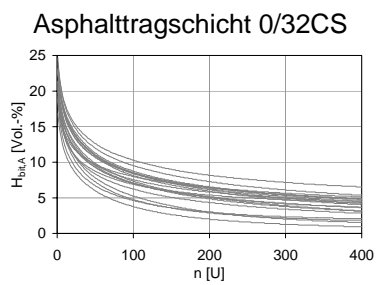
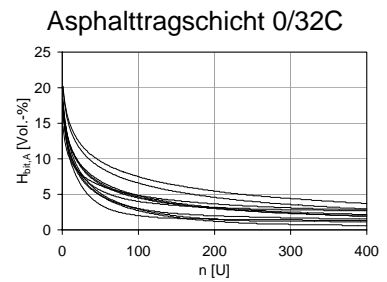
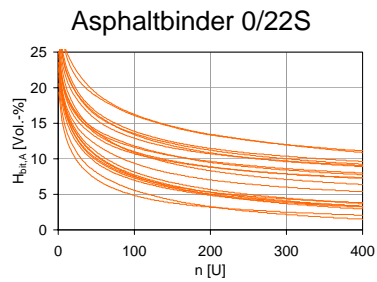
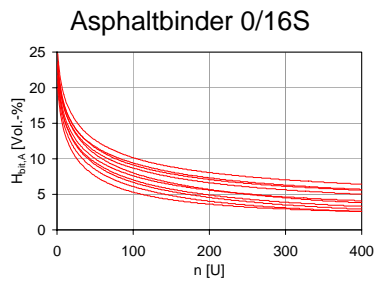
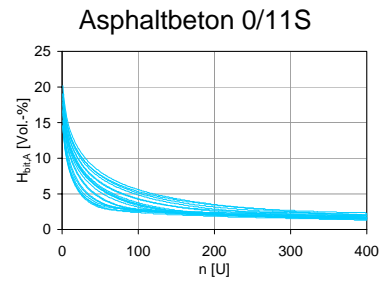
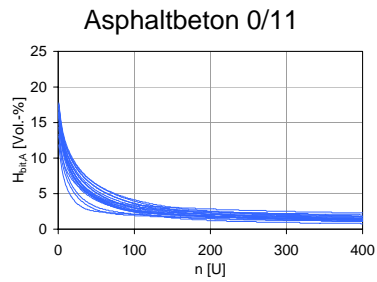
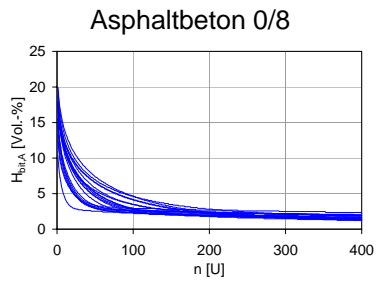
Verdichtungswiderstand – Labormischungen Vergleich Gyrator- und Marshallversuche



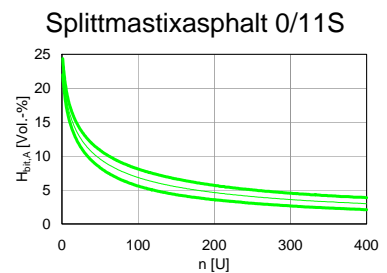
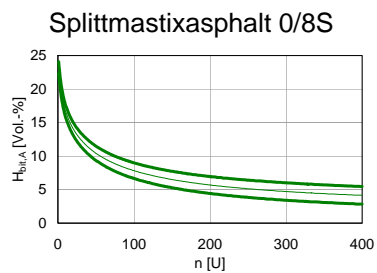
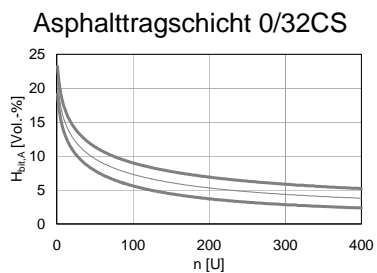
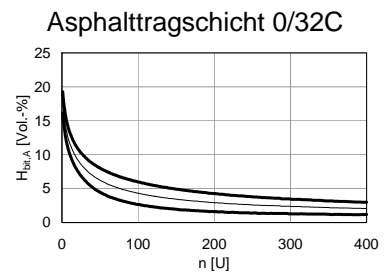
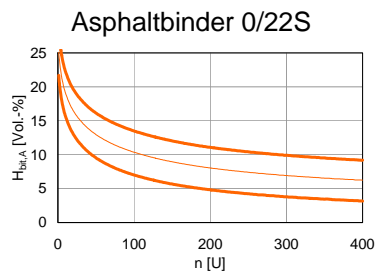
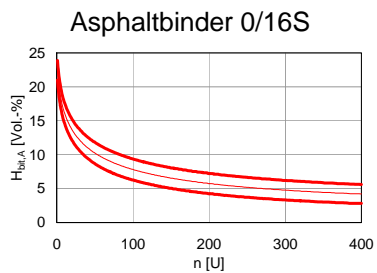
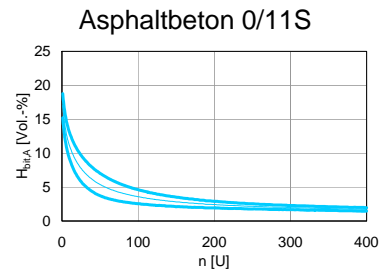
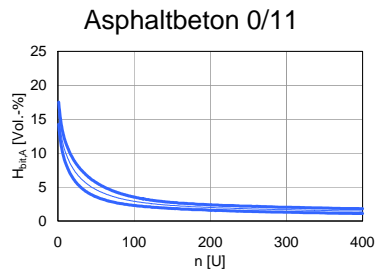
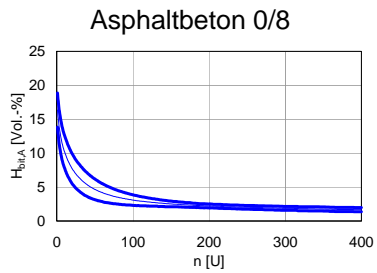
Verdichtungswiderstand D_G – Labormischungen Verlauf mit zunehmender Verdichtungsleistung



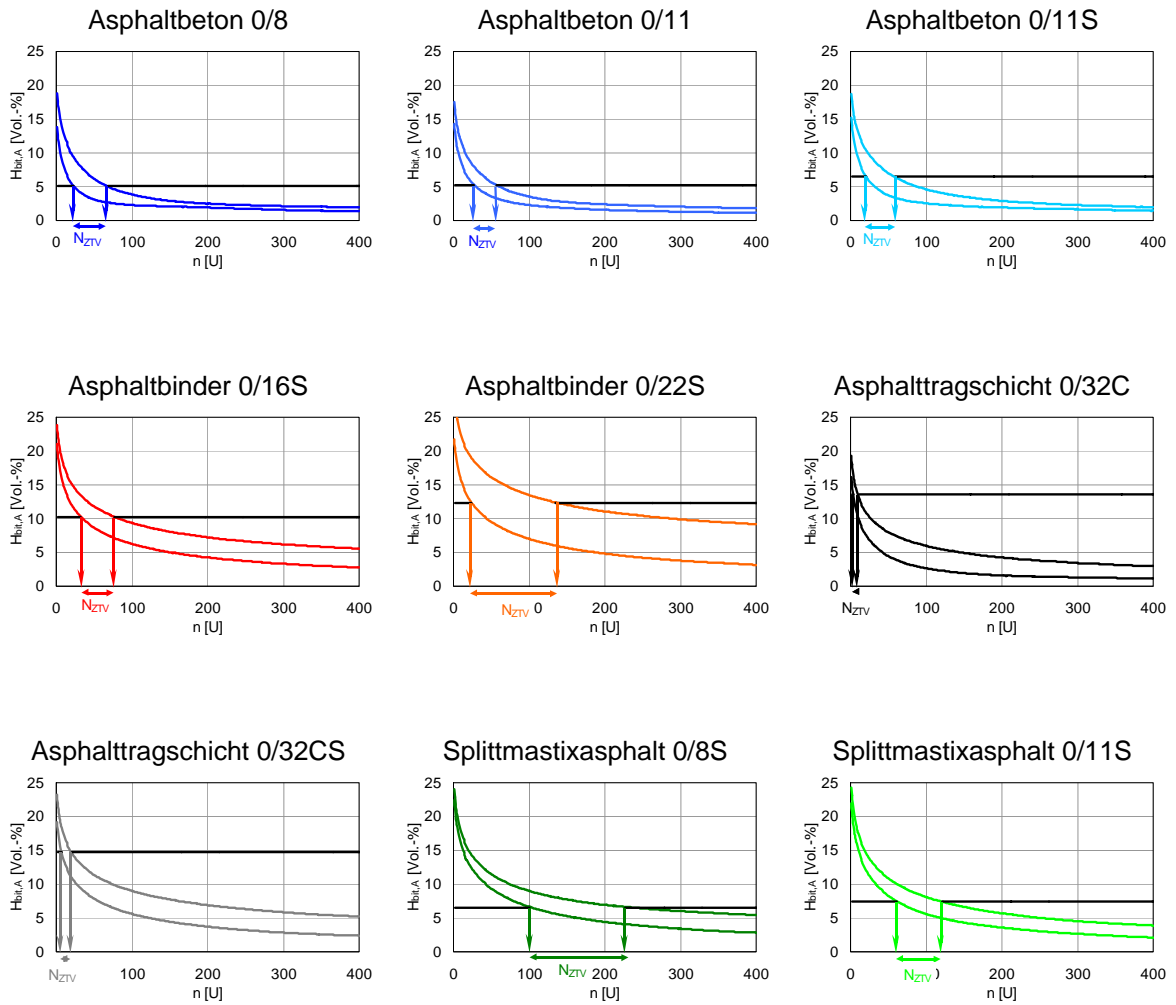
Masterkurven – Praxismischungen



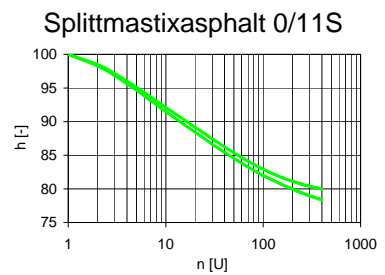
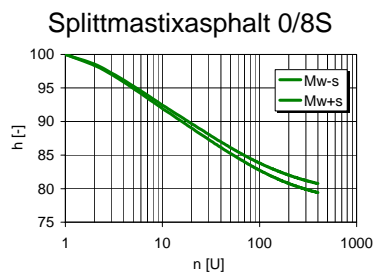
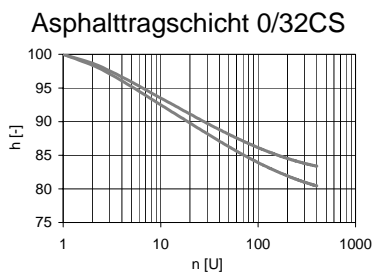
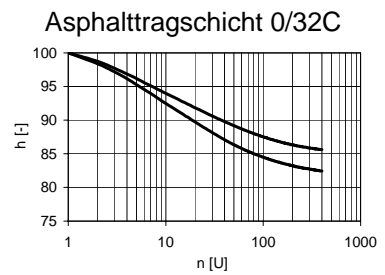
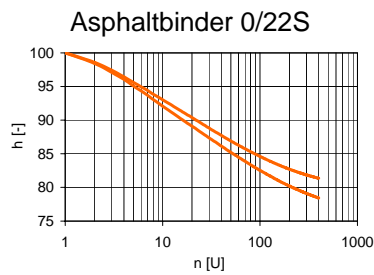
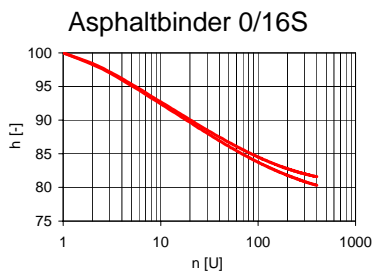
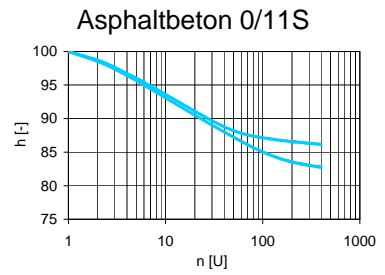
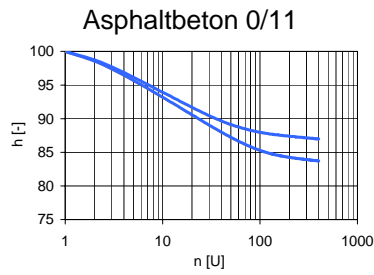
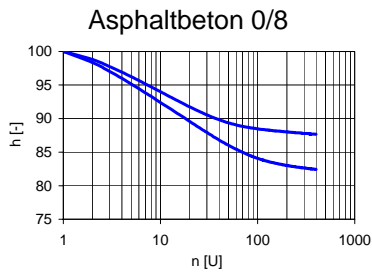
Grenzlinien mit Mittelwertkurven – Praxismischungen



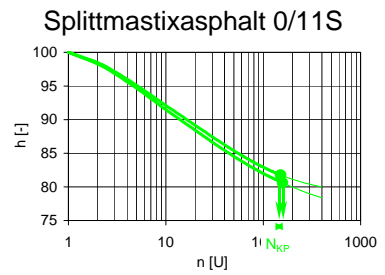
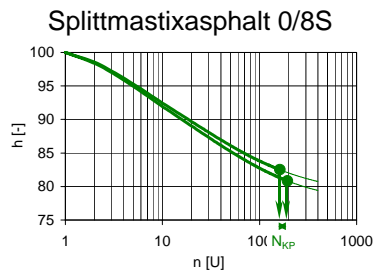
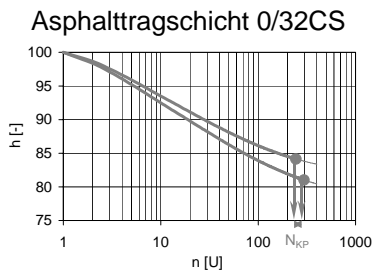
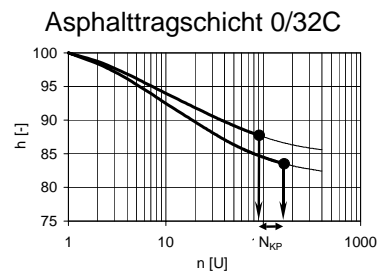
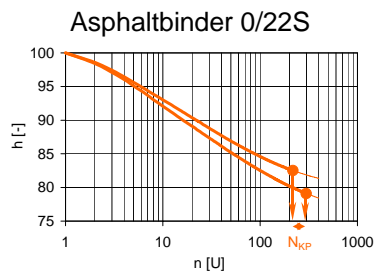
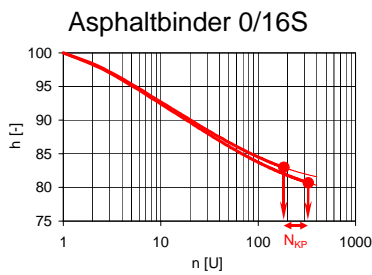
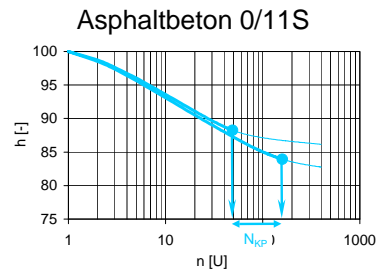
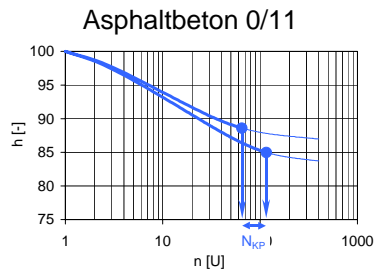
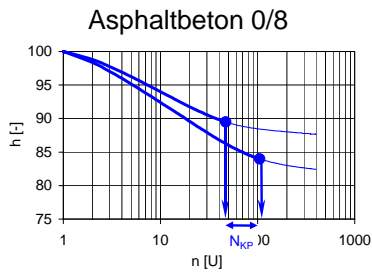
Ermittlung der Umdrehungsspannen N_{ZTV} Praxismischungen



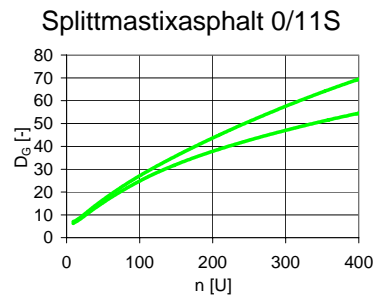
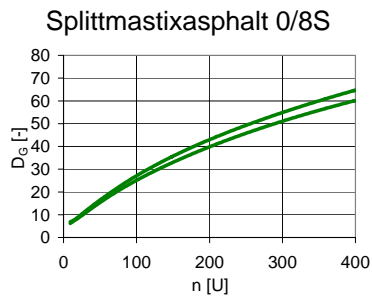
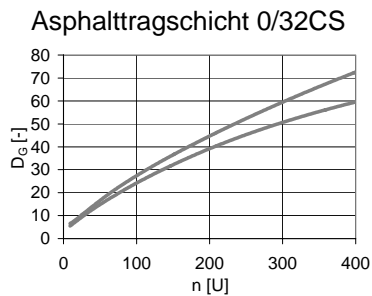
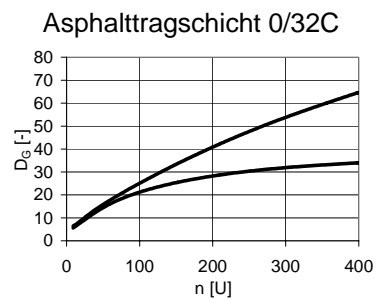
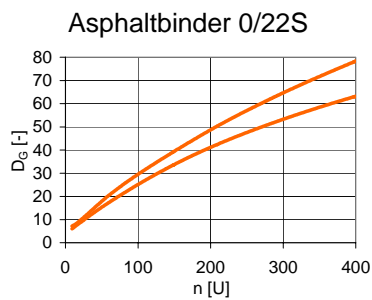
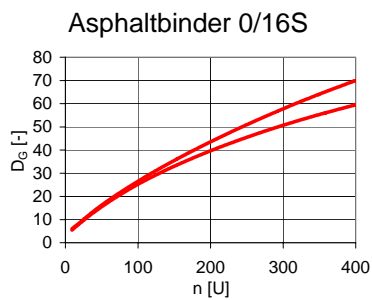
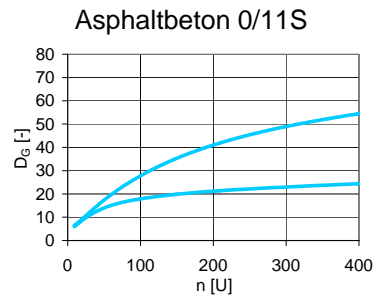
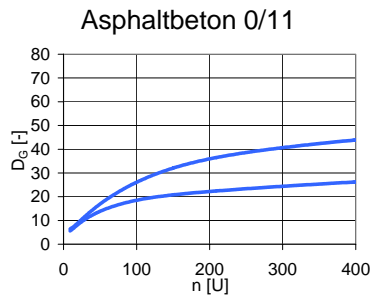
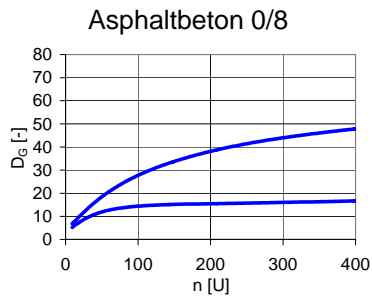
logarithmierte Grenzlinien - Praxismischungen



Ermittlung der Umdrehungsspannen N_{KP} Praxismischungen



Grenzl意思 Verdichtungswiderstand D_G Praxismischungen



Ergänzungen des Merkblattes für Eignungsprüfungen an Asphalt

➤ 4.2.7 Herstellung von Probekörpern

Bei den Mischgutgruppen A und B werden aus den Probemischungen Gyrator-Probekörper mit 400 Umdrehungen hergestellt.

➤ 4.2.9 Prüfung der Probekörper

Bei der Herstellung der Gyrator-Probekörper ist die Höhenabnahme aufzuzeichnen und zusammen mit den Umdrehungszahlen in einer logarithmierten Höhenmasterkurve, einer Hohlraumgehaltmasterkurve und einer Raumdichtemasterkurve darzustellen.

➤ 4.2.10 Auswertung und Beurteilung der Untersuchungsergebnisse

Für jede Mischgutvariante werden aus den Masterkurven die Kennwerte n_{ZTV} für die minimale Verdichtungsleistung, n_{KP} für die maximale Verdichtungsleistung und der Verdichtungswiderstand D_G bestimmt. Die Ergebnisse werden mit den entsprechenden Anforderungsbereichen N_{ZTV} , N_{KP} und ΔD_G , die in den Technischen Regelwerken fixiert sind, verglichen.

➤ 5. Zusätzliche Prüfungen (erweiterte Eignungsprüfung)

Bei der Verwendung des Gyrotors für Eignungsprüfungen an Asphalt wird die Verdichtbarkeit als Standardkennwert ermittelt und beurteilt.

Die Prüfung des Verformungswiderstandes erfolgt an Gyratorprobekörpern, welche umdrehungsgesteuert mit der maximalen Verdichtungsleistung n_{KP} hergestellt werden.

➤ 7.3 Ergebnisse der Eignungsprüfung

- Masterkurven
- minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV}
- maximale Verdichtungsleistung n_{KP}
- Verdichtungswiderstand D_G

➤ *7.4 Vorschlag für die Zusammensetzung*

- Bei einem interpolierten Wert für den Bindemittelgehalt: Die zwischen zwei untersuchten Gemischen mit unterschiedlichen Bindemittelgehalten zu erwartenden Kennwerte des Baustoffgemisches und der Gyratorprobekörper:
 - minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} , maximale Verdichtungsleistung n_{KP} und Verdichtungswiderstand D_G

➤ *Anlage 1*

Die Tabelle der Anlage 1 ist sinngemäß, wie in den oben aufgeführten Abschnitten zu ergänzen.

Ergänzungen der ZTV Asphalt - StB

➤ *1.4.3.3 Grenzwerte und Toleranzen*

Angaben zu Grenzwerten und Toleranzen für die Kennwerte n_{ZTV} , n_{KP} und D_G können erst nach Vorliegen statistisch abgesicherter Untersuchungsergebnisse ergänzt werden.

➤ *1.6.2 Eignungsprüfungen*

- Herstellung von Probegemischen und Probekörpern:

Bei der Verwendung des Gyrators gelten die Angaben dieses Abschnittes entsprechend.

- Bestimmung der minimalen Verdichtungsleistung n_{ZTV} , der maximalen Verdichtungsleistung n_{KP} und des Verdichtungswiderstandes D_G

➤ *Tabelle 1.9*

2.8 minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} , maximale Verdichtungsleistung n_{KP} und Verdichtungswiderstand D_G

3.1.1 Verdichtungsgrad mit zu n_{KP} zugehöriger Raumdichte als Bezugsgröße

➤ *Tabelle 2.1: Asphaltbinder*

Asphaltbinder		0/22 S (PmB 45)	0/16 S (PmB 45)	0/16	0/11
3. Mischgut					
Gyrator-Probekörper					
Verdichtungstemperatur	°C	135 ± 5 (bei PmB 145 ± 5)			
minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV}	U	24 - 134	32 - 76	*	*
maximale Verdichtungsleistung n_{KP}	U	217 - 298	183 - 327	*	*
Verdichtungswiderstand D_G	-	63 - 78	59 - 70	*	*
4. Schicht					
Verdichtungsgrad bezogen auf $\rho_{n_{KP}}$	%	*	*	*	*

* es liegen noch keine Erfahrungen vor

➤ *Tabelle 3.1: Asphalteton (Heißeinbau)*

Asphaltbeton		0/16 S	0/11 S (50/70)	0/11 (70/100)	0/8 (70/100)	0/5
3. Mischgut						
Gyrator-Probekörper						
Verdichtungstemperatur	°C	135 ± 5				
minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV}	U	*	21 - 58	27 - 56	23 - 67	*
maximale Verdichtungsleistung n_{KP}	U	*	49 - 159	65 - 116	47 - 105	*
Verdichtungswiderstand D_G	-	*	24 - 54	26 - 44	17 - 48	*
4. Schicht						
Verdichtungsgrad bezogen auf $\rho_{n_{KP}}$	%	*	*	*	*	*

* es liegen noch keine Erfahrungen vor

➤ *Tabelle 4.1: Splittmastixasphalt*

Splittmastixasphalt		0/11 S (PmB 45)	0/8 S (50/70)	0/8	0/5
3. Mischgut					
Gyrator-Probekörper					
Verdichtungstemperatur	°C	135 ± 5 (bei PmB 145 ± 5)			
minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV}	U	62 - 120	101 - 226	*	*
maximale Verdichtungsleistung n_{KP}	U	151 - 158	162 - 194	*	*
Verdichtungswiderstand D_G	-	55 - 69	60 - 65	*	*
4. Schicht					
Verdichtungsgrad bezogen auf $\rho_{n_{KP}}$	%	*	*	*	*

* es liegen noch keine Erfahrungen vor

Ergänzungen der ZTVT - StB

➤ *Tabelle 4.2 Anforderungen an Mineralstoffgemische und Mischgutarten*

Mischgutart	Körnung	minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV}	maximale Verdichtungsleistung n_{KP}	Verdichtungswiderstand D_G
-	mm	U	U	-
(1)	(2)	(10)	(11)	(12)
AO	0/2 bis 0/32	*	*	*
A	0/2 bis 0/32	*	*	*
B	0/22; 0/32 0/16	*	*	*
C	0/22; 0/32 0/16	4 - 10	91 - 164	34 - 65
CS	0/22; 0/32 0/16	7 - 20	244 - 295	60 - 73

* es liegen noch keine Erfahrungen vor

➤ *4.4.3.2 Zusammensetzung des Mischgutes*

Für Asphalttragschichten unter Betondecken ist die Mischgutzusammensetzung so zu wählen, dass die minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} der Gyratorprobekörper höchstens bei einer noch zu definierenden Umdrehungszahl erreicht wird.

Für Asphalttragschichten unter Pflasterdecken oder Plattenbelägen ist die Mischgutzusammensetzung so zu wählen, dass die minimale Verdichtungsleistung n_{ZTV} der Gyratorprobekörper an der unteren Grenze der in Spalte (10) der Tabelle 4.2 angegebenen Spannweiten liegt.

➤ *4.5.3.3 Hohlraumgehalt*

Hier sind bei der Verwendung des Gyratorverfahrens entsprechende Angaben zu Toleranzen für die Kennwerte n_{ZTV} , n_{KP} und D_G anzugeben. Diese können erst nach Vorliegen statistisch abgesicherter Untersuchungsergebnisse ergänzt werden.

➤ *4.5.3.5 Verdichtungsgrad*

Hier sind bei der Verwendung des Gyratorverfahrens Anforderungen für den Verdichtungsgrad mit zu n_{KP} zugehöriger Raumdichte als Bezugsgröße anzugeben. Diese können erst nach Vorliegen statistisch abgesicherter Untersuchungsergebnisse ergänzt werden.

➤ *4.6.2 Eignungsprüfungen*

- Herstellung von Probegemischen und Probekörpern:

Bei der Verwendung des Gyrators gelten die Angaben dieses Abschnittes entsprechend.

- Bestimmung der minimalen Verdichtungsleistung n_{ZTV} , der maximalen Verdichtungsleistung n_{KP} und des Verdichtungswiderstandes D_G

➤ *4.6.4 Kontrollprüfungen*

Je angefangene 6000 m² sind folgende Untersuchungen durchzuführen:

- Bestimmung der minimalen Verdichtungsleistung n_{ZTV} , der maximalen Verdichtungsleistung n_{KP} und des Verdichtungswiderstandes D_G an Gyratorprobekörpern.