

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

VERDICHTUNG IM
ASPHALTSTRASSENBAU

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald BLAB
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Lukas EBERHARDSTEINER

E230
Institut für Verkehrswissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Militza VASSILEVA
1029215
Ovcha kupel 1/ 419-2
1632 Sofia

Wien, am Februar

KURZFASSUNG

Die vorliegende Diplomarbeit beschreibt die Grundlagen der Verdichtung im Asphaltstraßenbau. Der erste Teil stellt die theoretischen Voraussetzungen, wie auch mathematische Grundlagen vor. Außerdem werden sowohl die statische als auch dynamische Wirkfunktionen beschrieben.

Im zweite Teil werden die gängigsten Verdichtungsmethoden, sowie die zugehörigen Verdichtungsgeräte vorgestellt. Es werden die notwendigen Berechnungen bezüglich der Mechanik und der Ausführung der Verdichtung (z.B Anzahl und Art der Walzen, Walzgeschwindigkeit, Nutzleistungsfaktor u.a.), ein Überblick über die Verdichtungskontrolle (Geräte und Methodik) und die Anforderungen an das Verdichten in Österreich und Bulgarien gegeben.

Außerdem umfasst diese Arbeit einen Überblick über Verdichtungsmethoden und –kontrollen im Labor. Die prinzipiellen Konstruktionen der Laborgeräte werden beschrieben und neue Entwicklungen vorgestellt.

SUMMARY

This master thesis describes the basics of compaction in asphalt road construction. The first part will describe the theoretical precondition and mathematical basics.

In the second part, the usual methods of compaction and appropriate machines are shown. The necessary calculations regarding mechanization and applying of compacting (for example number and type of steam- roller, their speed and power output) are illustrated. Furthermore the site control of compaction (machines and methods) and the respective guidelines in Austria and Bulgaria are described.

Moreover, this thesis encompasses the compacting methods and control in the laboratory and describes the principle of construction of the laboratory instruments. Innovations in this area also are presented.

VORWORT

Hier will ich meinen Dank an Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab aussprechen, der mir die Möglichkeit gegeben hat, meine Diplomarbeit am Institut für Verkehrswissenschaften an der Technische Universität Wien zu schreiben.

Besonderer Dank an Univ. Ass. Dipl.-Ing. BSc Lukas Eberhardsteiner für seine große Geduld, Hilfe und die Bereitschaft für viele Gespräche, um meine Diplomarbeit vorzubereiten.

Bedanken möchte ich mich bei meiner Familie für Ihre Unterstützung.

INHALTSVERZEICHNIS

1 Aufgabenstellung.....	1
2 Theoretische Voraussetzungen.....	2
2.1 Der Begriff der Verdichtung.....	2
2.1.1 Der Ordnungsprozess.....	2
2.1.2 Der Verfüllungsprozess.....	2
2.1.3 Der Destrukturierungsprozess.....	3
2.1.4 Der Ausscheidungsprozess.....	3
2.1.5 Der Verschiebungsprozess.....	4
2.1.6 Der Verspannungsprozess.....	4
2.1.7 Das Drei-Zonen-Modell.....	4
2.2 Zusammenhang zwischen Bodenverdichtung und Asphaltstraßenbau.....	4
2.2.1 Statische Wirkfunktion.....	4
2.2.2 Die Wirkfunktion bei Vibrationsverdichtung.....	7
2.2.3 Vergleich der statischen und dynamischen Kräfte.....	9
2.3 Verdichtungseigenschaften von Asphalt.....	10
2.3.1 Verdichtbarkeit.....	10
2.3.2 Verdichtungs Vorgang.....	11
2.3.2.1 Verdichtungsgrad k und Verdichtungsindex K	13
2.3.2.2 Die Verdichtungsarbeit.....	14
2.3.2.3 Einfluss der Verdichtungstemperatur.....	15
2.3.3 Mischgutzusammensetzung.....	16
2.3.3.1 Einfluss auf den Verdichtungswiderstand.....	16
2.3.3.2 Einfluss auf die erforderliche Verdichtungsarbeit $E_2(k)$	18
2.3.4 Äußere Einflüsse.....	19
2.3.4.1 Untergrund.....	19
2.3.4.2 Einbaudicke.....	19
2.3.4.3 Wetter.....	20
3 Einbau, Vorverdichtung und Ausführung der Verdichtung im Feld.....	21

3.1 Einbau und Vorverdichtung	21
3.2 Verdichtungsgeräte.....	23
3.2.1 Statische Walzen	24
3.2.2 Gummiradwalzen	25
3.2.3 Vibrationswalzen.....	26
3.2.4 Kombiwalzen.....	28
3.2.5 Sonstige Verdichtungsgeräte	28
3.3 Planung der Verdichtung.....	28
3.4 Flächenleistung des Straßenfertigers.....	29
3.5 Walzverdichtung	30
3.5.1 Walzbreite und – geschwindigkeit	30
3.5.2 Anzahl der Walzübergänge	30
3.5.3 Walzflächenleistung	33
3.5.4 Walzzeiten	34
3.6 Ausführung der Verdichtung.....	34
3.6.1 Grundregeln.....	34
3.6.2 Besonderheiten	34
3.6.3 Walzschema.....	35
3.6.4 Fehler und ihre Ursachen beim Walzen	37
3.7 Kontrolle des Verdichtungsvorganges.	38
3.7.1 Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle	38
3.7.2 Isotopsonde.....	39
3.7.3 Magnetsonde	40
3.7.4 Ebenheitsmessungen	40
3.8 Anforderungen.....	41
3.8.1 Anforderungen in Österreich.....	41
3.8.2 Anforderungen in Bulgarien.....	43
4 Laborversuche	44
4.1 Probenahme.....	44

4.2 Marshall-Prüfung.....	44
4.2.1 Probekörperherstellung	44
4.2.2 Durchführung der Marshall- Prüfung.....	46
4.3 Vibrationsverdichter.....	47
4.4 Gyrator- Prüfung	48
4.5 Walzsektor- Verdichtungsgerät (WSV)	49
4.6 Vergleich der Laborverdichtungsgeräte	50
4.7 Entwicklungen- Shear Press Box Compactor.....	51
5 Zusammenfassung.....	53

1 Aufgabenstellung

Verdichtung ist ein grundlegender Arbeitsschritt im Zuge der Errichtung bzw. Instandsetzung von Asphaltstraßen. Durch Sicherstellung eines entsprechenden Verdichtungsgrades kann die jeweils notwendige Tragfähigkeit erreicht werden.

Diese Diplomarbeit behandelt mehrere Schwerpunkte. Zunächst werden die notwendigen Begriffe und mathematischen Beweise dargestellt. Gängige Verdichtungsgeräte und deren Ausführung, sowie die Kontrolle der Verdichtung werden erklärt. Weiters werden normative Anforderungen an das Verdichten in Österreich und Bulgarien verglichen und Laborprüfungen und neue Entwicklungen vorgestellt.

2 Theoretische Voraussetzungen

2.1 Der Begriff der Verdichtung

Unter Verdichtung versteht man eine Vergrößerung der Trockenrohdichte eines Schüttgutes.

Es handelt sich um einen Prozess, bei dem ein Stoffgemisch in den Zustand einer dichteren Lagerung gebracht wird. Im Asphaltstraßenbau müssen sowohl ungebundene, auch bituminös gebundene Schichten verdichtet werden, um geforderte Eigenschaften (z.B. Tragfähigkeit) zu gewährleisten.

Dabei können sechs Grundprozesse beobachtet werden:

2.1.1 Der Ordnungsprozess

Der Ordnungsprozess ist eine Veränderung der Position und der Orientierung von Partikeln des Schüttgutes unter Vergrößerung der durchschnittlichen Kontaktflächen zwischen benachbarten Partikeln. Die Vermehrung der Korn-zu-Korn-Kontakte ist die Hauptrolle dieses Prozesses. Die einzelnen Kontaktstellen werden im Zuge der Lastverteilung im Mittel weniger beansprucht und die Partikel werden auch in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Es ist wichtig, den Partikeln eine lokale Bewegungsmöglichkeit zu gewähren, die z.B. durch Vibrationen ermöglicht wird [KÖNIG, 1994], [WITT, 2009].

2.1.2 Der Verfüllungsprozess

Als Verfüllungsprozess wird das Verhalten einer beweglichen Feinkomponente des Schüttgutes in einer als unbeweglich angenommenen Grobkomponente definiert. Die parabelförmige Fuller-Verteilung gilt als günstige Annäherung an solche hypothetischen Verteilungen (siehe Abbildung 2.1.1). Um eine Immobilisierung der Feianteile durch Kapilarkräfte in Grenzen zu halten, muss die untere Korngrenze der Fuller-Verteilung ausreichend hoch liegen [KÖNIG, 1994], [WITT, 2009].

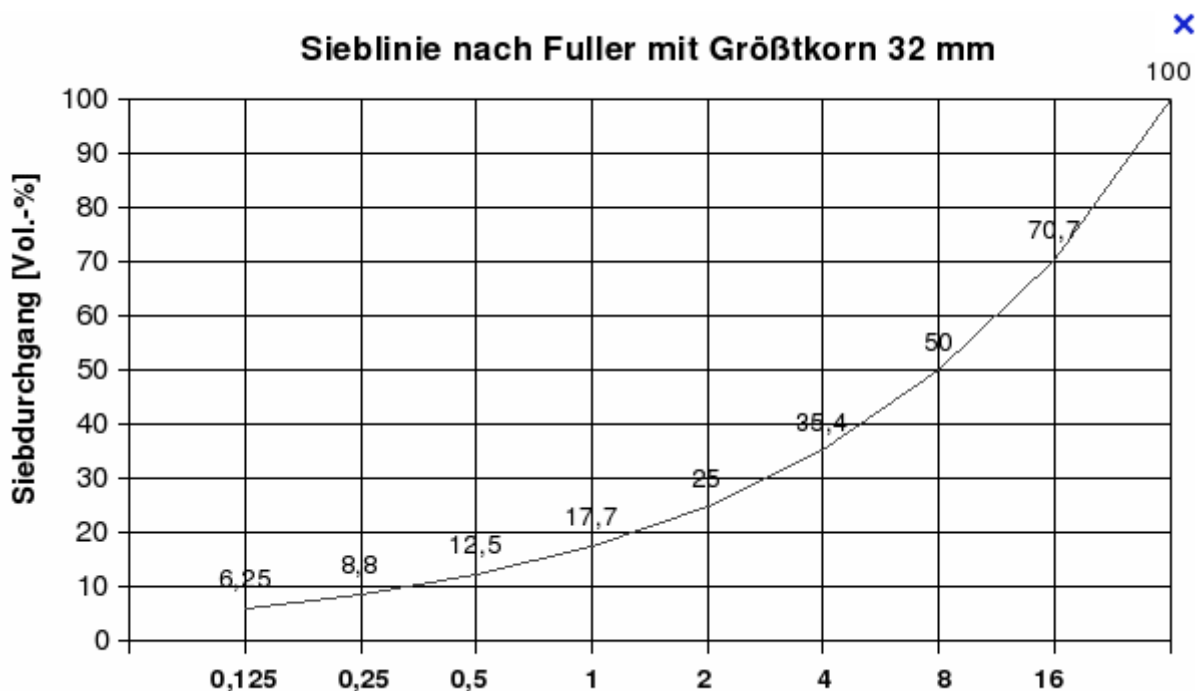


Abb.2.1.1 Sieblinie nach Fuller

[<http://www.bauversuche.de/experimente/beton/gesteinskoernung.html>]

2.1.3 Der Destrukturierungsprozess

In den meisten Schüttungen liegen bereits Kraftschlüsse zwischen benachbarten Partikeln vor. Die Aufhebung solcher Kraftschlüsse bezeichnet man als Destrukturierung. Die Intensität dieses Prozesses hängt von der Art und der Stärke der vorherrschenden Kraftschlüsse ab. Man kann weitgehende Destrukturierungen bei Laborversuchen durch Sieben erreichen. Im Destrukturierungsprozess muss ein großer Teil der benötigten Verdichtungsenergie aufgebracht werden, d.h. die Energie muss bereits während der Aufbereitung des Schüttgutes zugeführt werden [KÖNIG, 1994], [WITT, 2009].

2.1.4 Der Ausscheidungsprozess

Strömungsvorgänge von Wasser, Dämpfen oder Luft aus dem Inneren der Schüttung bezeichnet man als Ausscheidungsprozess. Eine der größten Verdichtungshemmnisse sind behinderte Ausscheidungsvorgänge. Durch den Einsatz von Schaffußwalzen kann aufgrund der Knetwirkung diese Schwierigkeiten in der Erdverdichtung gemindert werden. Bei der Verdichtung bituminöser Schichten mittels Tandemwalzen muss auf die Einhaltung einer maximaler Temperatur von 90°C geachtet werden. Unterhalb dieses Temperaturintervalles entsteht ein Ausscheiden von Dämpfen durch Druckkondensation. Ein Aufblähen ist wegen der ansteigenden Bindemittelviskosität schwierig. Die Veränderungen im Schüttgut sind auch von Entmischungsvorgängen bestimmt. Die Bodenanteile machen eigene Transportbewegungen, die Ungleichmäßigkeiten der Kornverteilung verursachen [KÖNIG, 1994], [WITT, 2009].

2.1.5 Der Verschiebungsprozess

Während der Verdichtung wird das Schüttgut an der Oberfläche horizontal verschoben. Es verändert seine Rohdichte allerdings nur unwesentlich. Eine intensive Destrukturierung tritt in der Verschiebungszone auf. Die Verschiebungsschichten sind wegen ihrer lockeren Struktur ausscheidungsfördernd. Vertikalgestellte Körner können in bituminösen Deckschichten Pakete bilden. Der Verschiebungsprozess kann diese Verbindungen zerstören und neu ordnen [KÖNIG, 1994].

2.1.6 Der Verspannungsprozess

Der Verspannungsprozess ist durch das Auftreten neuerlicher Kraftschlüsse zwischen Partikeln während des Verdichtungsvorganges bestimmt. Verspannungen können auch nach Abschluss der Verdichtung durch das Erstarren insbesondere von bituminösen Bindemitteln auftreten [KÖNIG, 1994]. [WITT, 2009].

2.1.7 Das Drei-Zonen-Modell

Destrukturierung und Verspannung sind beim Verdichten verbunden. Wenn die Verspannung der Verschiebung entgegenwirkt und die Verdichtungskräfte auf die Strukturen lenkt, wirken beide Prozesse miteinander. Wenn die Destrukturierung die Verspannung auflöst, wirken die Prozesse gegeneinander [KÖNIG, 1994].

Es gibt drei Zonen in der Schüttung. Die Verschiebungszone ist an der Oberfläche, darunter ist die Destrukturierungszone und unten liegt die Umlagerungszone mit aufwachsender neuer Verspannung. Die untere Zone wächst nach oben bei fortgesetzter Verdichtung. Die mittlere Zone dehnt sich ihrerseits noch in die oberflächennahe Verschiebungszone aus [KÖNIG, 1994].

2.2 Zusammenhang zwischen Bodenverdichtung und Asphaltstraßenbau

2.2.1 Statische Wirkfunktion

Die Arbeit einer Walze auf bituminösem Schüttgut ruft lokale Scherspannungen hervor. Diese Wirkung wird für einen einzelnen Übergang betrachtet und mit dem so genannten K-Wert beschrieben.

$$K = C \int |T| dt \quad (2.2.1)$$

[KÖNIG, 1994]

C - Konstante

T - lokale Scherspannungskomponente in einem Flächenelement

t - Zeitkoordinate für einen Walzübergang

Falls ein theoretisches Koordinatensystem in den zu verdichteten Boden eingeführt ist, ist seiner Ursprung im Mittelpunkt der Aufstandsfläche. In der Richtung $n = [\cos(n; x) ; \sin(n; x)]$ der Flächennormalen, wo n Normalenvektor ist, treten in der $x - z$ - Ebene die folgenden Spannungen auf:

$$\sigma(n)_x = n_x \sigma_x + n_z \sigma_z ; \sigma(n)_z = n_x \tau + n_z \sigma_z \quad (2.2.2)$$

[KÖNIG , 1994]

σ_x, σ_z, τ - Spannungskoodinten

Die lokale Scherspannung ist:

$$T = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cdot \sin 2(n ; x) - \tau \cos 2(n ; x) \quad (2.2.3)$$

oder

$$T = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{P}{L} \cdot \frac{d^2 \cdot z^2 \cdot x}{(d^2 + z^2 + x^2)^2 - 4 \cdot d^2 \cdot x^2} \cdot \frac{1}{x^2 + z^2} \quad (2.2.4)$$

[KÖNIG , 1994]

d - die halbe Breite der Aufstandsfläche

P - Druck

L - Arbeitsbreite

$$x^2 = u ; y = \frac{z}{d}$$

Die Wirkungsgröße K ergibt sich bei gleichförmiger Arbeitsgeschwindigkeit zu

$$K = C \frac{2}{\pi} \cdot \frac{P}{L} \cdot \frac{d^2 z^2}{v} \int_0^\infty \frac{1}{(u + z^2 + d^2)^2 - 4d^2 u} \cdot \frac{1}{u + z^2} du = C \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{P}{Lv} \cdot f(y) \quad (2.2.5)$$

Dabei ist

$$f(y) = \left[\ln \left(1 + \frac{1}{y^2} \right) + \frac{1}{2y} \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \left(\frac{y^2 - 1}{2y} \right) \right) \right] \cdot \frac{y^2}{1 + 4y^2} \quad (2.2.6)$$

[KÖNIG , 1994]

Das zu verdichtende Schüttgut kann als Flüssigkeit mit der Viskosität η dargestellt werden. Diese Flüssigkeit kann an der Bandage gegen deren Oberfläche kraftfrei gleiten. Hier spielen der hydrostatische Druck p und die Fließverschiebung w eine wichtige Rolle. Das Kräftegleichgewicht

$$\int p \cdot \cos \alpha dF = M_1 g = P \quad (2.2.7)$$

muss gelten, um die vertikale Position des Walzkörpers aufrecht zu erhalten. Hier ist α der laufende Winkel vom Mittellot des Walzkörpers bis zu der betrachteten Stelle.

Schließlich gilt:

$$K = \frac{P}{Lv} N_1(u) \quad \text{mit} \quad u = u_0 \cdot \frac{z}{R} ; \quad u_0 = 1,6419575 \sqrt{\frac{Lv\eta}{P}} \quad (2.2.8)$$

$$\overline{K}_h = \frac{P}{Lv} N_2(u) \quad \text{mit} \quad u = u_0 \cdot \frac{h}{R} ; \quad u_0 = 1,6419575 \sqrt{\frac{Lv\eta}{P}} \quad (2.2.9)$$

[KÖNIG, 1994]

\overline{K}_h - Mittelwert

P - Druck

L - Arbeitsbreite

v - Arbeitsgeschwindigkeit

η - Viskosität

R - Walzkörperradius

h - Dicke

$N_1(u)$, $N_2(u)$ - numerische Funktionen

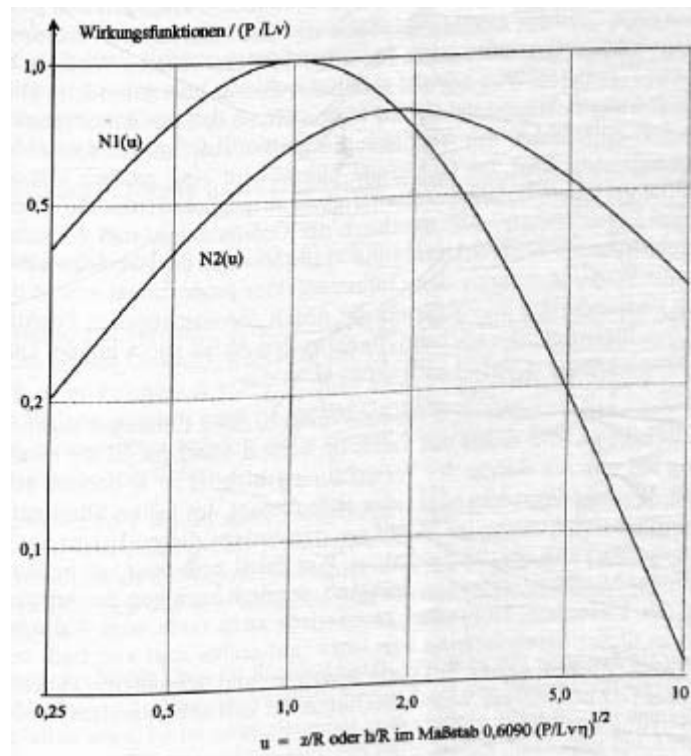


Abb. 2.2.1. Numerische Funktionen der statischen Verdichtung [KÖNIG, 1994]

Hier beschreibt $N_1(u)$ die lokale Wirkfunktion und $N_2(u)$ stellt die Wirkfunktion im Schichtmittel dar. Bei kleinen Werten von u zeigt die Kurve $N_1(u)$ einen Anstieg der numerischen Funktion mit der Tiefe und der Viskosität. Bei weiterer Steigerung der Viskosität nehmen die

Funktionswerte aber schließlich ab. Wenn nur die Viskosität unterschiedlich ist, wird der Arbeitspunkt nach rechts verschoben. [KÖNIG , 1994].

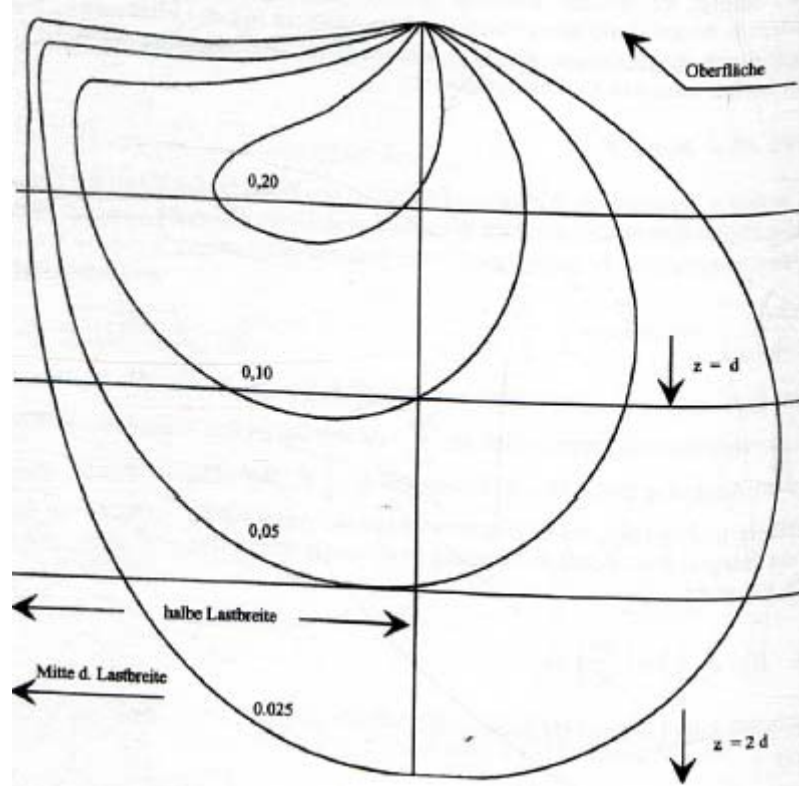


Abb. 2.2.2 Scherspannungszwiebel [KÖNIG , 1994].

Die räumliche Verteilung des Scherspannungsbetrages ist auf Abbildung 2.2.2 in Form einer Scherspannungszwiebel dargestellt. Das Mittellot der Aufstandsfläche ist die Ordinatenachse, die scherspannungsfrei ist. Hier kann nur eine Druckspannung aus Symmetriegründen vorliegen [KÖNIG , 1994].

2.2.2 Die Wirkfunktion bei Vibrationsverdichtung

Die Wirkung von dynamischen Walzen basiert auf Vibrationen, die auf den zu verdichteten Boden übertragen werden. Die innere Reibung des Bodens wird durch die Vibration aufgehoben [Fischer , 1971]. Die Bodenteilchen können in dichtere Positionen bewegt werden. Es gibt einen ständigen Austausch zwischen der Bewegungsenergie des Walzenkörpers und der des Schwingungssystems Walze / Boden. Je höher die Steifigkeit der Unterlage ist, desto effektiver ist der Leistungstransfer von der Walze in den Boden [ARBEITSGRUPPE ERD- UND GRUNDBAU, 1993].

Einige Faktoren, wie Vibrationsfrequenz, Amplitude, Erregerkraft, Erregerkreisfrequenz ω , Erregerphasenwinkel φ , müssen definiert werden. Wegen der Erregerkraft und Massenkraft bei Vibrationsverdichtung erhält die Bodenkraft einen zeitabhängigen Anteil. Die dynamische Rollbedingung in diesem Anteil ist in Gleichung 2.2.11 beschrieben.

$$\frac{|P|}{Lv\eta} = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{R} \right)^2 + \frac{\omega R}{v} \left(\frac{d}{R} \right)^2 \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{d}{R} \right) \geq 0 \quad (2.2.11)$$

[KÖNIG , 1994]

Die halbe Aufstandsbreite d ist eine Funktion der Zeit.

Mit Hilfe folgende Formeln wird die Gleichung für erzwungene Schwingungen eines gedämpften Systems bestimmt.

$$\varphi = \omega t, \quad \zeta = A \cdot \frac{s}{A_0} = \frac{1}{2} A \frac{d^2}{A_0 R}, \quad B = \sqrt{\frac{2A_0}{A \cdot R}} \cdot \frac{L\eta}{\omega M_0}, \quad C = \frac{Lv\eta}{\omega^2 R M_0} \quad (2.2.12.)$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2M_1 g \cdot R}{M_0}}; \quad v_{bez} = \frac{v}{v_0} \quad (2.2.13.)$$

[KÖNIG, 1994]

A – Vibrationsstärke

C - virtuelle Steifigkeit des Mischgutes

R - Walzenradius

M_0 - Walzenkörpermasse

$M_1 g$ - Achslastmasse

v_{bez} - bezogene Arbeitsgeschwindigkeit

v_0 - Bezugs- Arbeitsgeschwindigkeit

$$\frac{d^2 \zeta}{d\varphi^2} = 1 - A \cdot \sin(\varphi) - C\zeta - B\sqrt{\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{d\varphi} \quad (2.2.14.)$$

[KÖNIG, 1994]

Der Einschwinganteil klingt nach Maßgabe von B zeitlich ab. Wenn die verschobene Zeitkoordinate φ durch $\varphi^* + \psi$ ersetzt wird, ist die Gleichung von einer Zeitverschiebung unabhängig

Bei dem dynamischen K – Wert treten die folgende Besonderheiten auf:

- wenn der Walzkörper in das Mischgut eingedrungen ist, geht die Bodenkraft als zeitabhängige Größe in das T- Integral ein;
- die Bodenkraft ist bei Sprungbetrieb in den Sprungphasen null.

Die Wirkung wird mit einer Integration mit theoretisch unendlicher Obergrenze gerechnet. ζ wird durch den Mittelwert I / C ersetzt und die Leitfunktion geht nach einem Maximum gegen Null. Dieses Maximum hängt von v_{bez} ab. Die Leitfunktion ist schmal, wenn v_{bez} groß ist. Der Verlauf der Bodenkraft kann gerade das Maximum erreichen, wenn nur Teilintervalle der Bodenkraft in einer bestimmten Tiefe unter der Fahrspurmitte wirksam werden können [KÖNIG, 1994].

2.2.3 Vergleich der statischen und dynamischen Kräfte

Ein Vergleich der dynamischen und statischen Kräfte ist mittels eines Verhältniswerts folgender Art möglich:

$$K = \frac{2}{f_{\max}} \cdot \frac{v_{bez}^2 \cdot y_{\max}^2 \cdot u^2}{N1(u)} \int_0^{\varphi} \frac{\left| \zeta + \frac{1}{v_{bez}} \sqrt{\zeta} \frac{d\zeta}{d\varphi} \right| \zeta \varphi}{\left[(v_{bez} \varphi)^2 + \tau^2 + \zeta \right]^2 - 4\zeta (v_{bez} \varphi)^2} \cdot \frac{d\varphi}{(v_{bez} \varphi)^2 + \tau^2} \quad (2.2.15)$$

Hier sind

$$\tau^2 = y_{\max}^2 \cdot \frac{u^2}{C} \quad (2.2.16)$$

$$\text{Leitfunktion } (\varphi) = \frac{1}{\left[(v_{bez} \varphi)^2 + \tau^2 + 1/C \right]^2} \cdot \frac{1}{(v_{bez} \varphi)^2 + \tau^2} \quad (2.2.17)$$

[KÖNIG, 1994]

Abbildung 2.2.3 zeigt die grafische Darstellung der u-Werte (Kurvenparameter, die als Abszissenwerte dargestellt sind) bei einem Verhältnis zwischen dynamischen und statischen K-Werte.

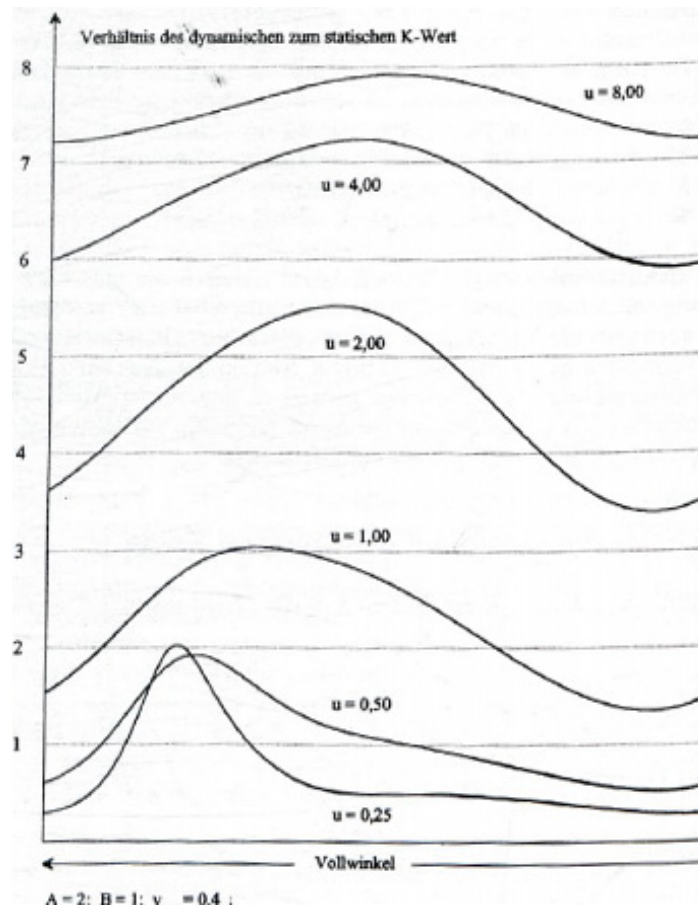


Abb. 2.2.3 Grafische Darstellung der u -Werte bei einem Verhältnis zwischen dynamischen und statischen K -Werte [KÖNIG, 1994]

Der Verhältniswert K ist größer als 1 und die Wirkfunktion der dynamischen Verdichtung ist stärker als die statische Verdichtung. [KÖNIG, 1994].

2.3 Verdichtungseigenschaften von Asphalt

2.3.1 Verdichtbarkeit

Verdichtbarkeit ist die Verminderung des Volumens eines Stoffes unter Einwirkung einer Verdichtungsarbeit bei konstanter Masse [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].

Nach [SIVAPATHAM, 2012] hängt die Verdichtbarkeit von Asphalt von folgenden Faktoren ab:

- Art des Füllers, des Sandes und des Splittes
- Kornabstufung innerhalb der feinen Gesteinskörnung
- Füllergehalt
- Kornabstufung in grober Gesteinskörnung
- Bindemittelgehalt, Viskosität des Bindemittels
- Verdichtungstemperatur
- Art und Weise der Verdichtung.

Eine gute Verdichtbarkeit wird durch folgende Bedingungen ermöglicht:

- eine günstige Kornform
- eine stetige Korngrößenverteilung
- eine optimale Bindemittelmenge, bei richtiger Verarbeitungstemperatur

[GESTRATA, 2002].

Abbildung 2.3.1 zeigt den Zusammenhang zwischen verschiedenen Einflussfaktoren. Aufgrund einer erleichterten Orientierung der Partikel (Schmierwirkung) ist bei höherem Bindemittelgehalt weniger Verdichtungsarbeit nötig, um den selben Verdichtungsgrad zu erreichen

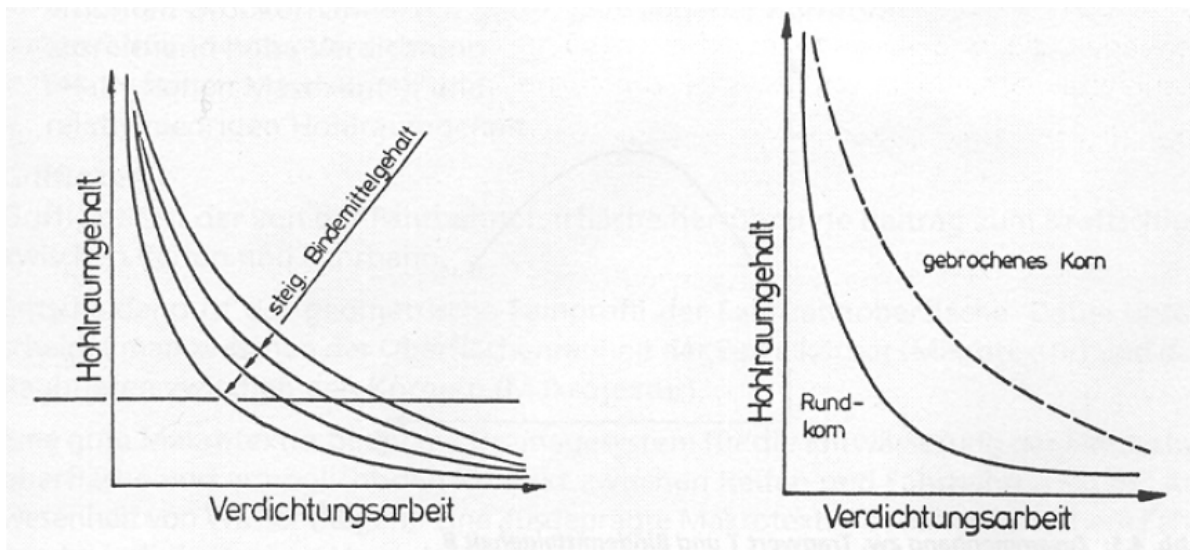


Abb. 2.3.1 Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einflussfaktoren [GESTRATA, 2002].

2.3.2 Verdichtungsvorgang

Die Beschreibung des gesamten Verdichtungsprozesses folgt einer dreiparametrischen exponentiellen Gesetzmäßigkeit der mathematischen Form

$$y = a - b \cdot e^{-\frac{s}{c}} \quad (2.3.1)$$

Diese Formel kann physikalisch interpretiert werden [ARAND, RENKEN, 1988]

$$\rho_{(s)} = \rho_{\infty} - (\rho_{\infty} - \rho_0) \cdot e^{-\frac{s}{c}} \quad (2.3.2)$$

[RENKEN, 2002]

$\rho_{(s)}$ - Raumdichte in der Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit

S - Verdichtungsarbeit

ρ_{∞} - maximal erreichbare Raumdichte

ρ_0 - Anfangsraumdichte zu Beginn des Verdichtungsprozesses ($\rho_{(s=0)}$)

C - Verdichtungswiderstand, bestimmt über die Dichteänderung

Abbildung 2.3.2 zeigt die Bedeutung der Glieder der Verdichtungsfunktion. Der Verdichtungswiderstand C zusammen mit der angewandten Verdichtungsarbeit und der Differenz $(\rho_\infty - \rho_0)$ beschreiben die Verbindung zwischen Dichte und Verdichtungsarbeit. Der Verdichtungswiderstand ist ein Maß für die erforderliche Verdichtungsarbeit, die das Mischgut auf ein nächsthöheres Dichteniveau unterhalb der theoretischen Endraum-dichte ρ_∞ verdichtet.

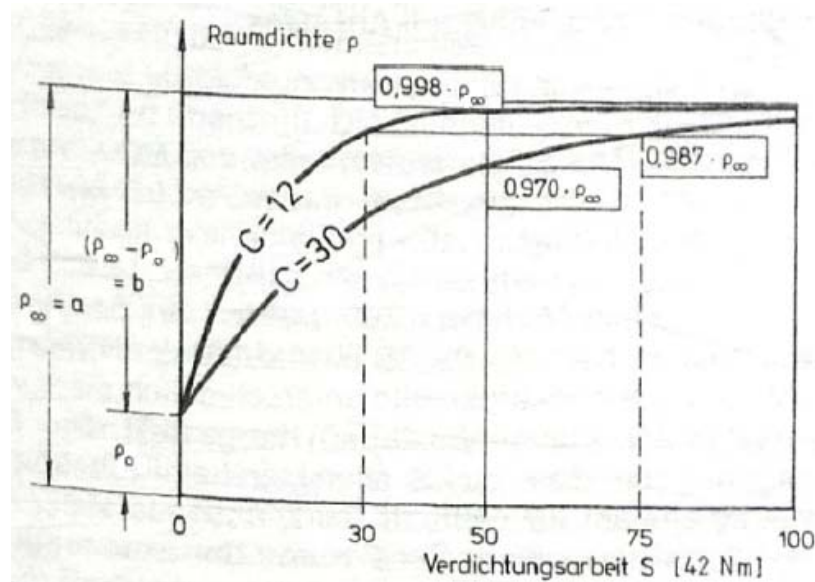


Abb. 2.3.2 Raumdichte ρ zweier Mischgutvarianten mit unterschiedlicher Verdichtbarkeit C [ARAND, RENKEN, 1988].

C kann als eine wichtige Maßzahl für die quantitative Bewertung der Verdichtbarkeit interpretiert werden. Je kleiner die Werte für C sind, desto leichter verdichtbar ist das Mischgut. Der Verdichtungswiderstand ist also von stetiger Änderung der Raumdichte während des Prozesses abhängig. Im Labor kann vereinfachend die Probekörperhöhe anstelle der Raumdichte gemessen werden.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A \cdot t} = \frac{m \cdot t^{-1}}{A} \quad [\text{g} / \text{mm}^3] \quad (2.3.3)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].

m - Masse des Probekörpers [g]

V - Volumen des Probekörpers [mm^3]

A - Grundfläche des Probekörpers [mm^2]

t - momentane Höhe des Probekörpers [mm]

Die Masse des Mischgutes und die Grundfläche des Probekörpers sind konstante Größen, aber die Höhe t bewirkt die Änderung der Dichte im Probekörper. Formel 2.3.2 kann auch nach jedem einzelnen Verdichtungsschlag angewandt werden [ARAND, RENKEN, 1988].

$$t_{(E_2)}^{-1} = t_{\infty}^{-1} - (t_{\infty}^{-1} - t_0^{-1}) \cdot e^{-\frac{E_2}{T}} \quad (2.3.4)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].

$t_{(E_2)}^{-1}$ - Probekörperhöhe in Abhängigkeit von der aufgewandten Verdichtungsarbeit

E_2 - Anzahl der Einzel-Verdichtungsschläge

t_0 - Anfangshöhe des Probekörpers zu Beginn des Verdichtungsversuches

t_{∞} - minimal erreichbare Probekörhöhe

T - Verdichtungswiderstand

2.3.2.1 Verdichtungsgrad k und Verdichtungsindex K

Das Verhältnis der Raumdichte von Bohrkernen zu der Raumdichte von Marshall-Probekörpern ist der Verdichtungsgrad k [BULL-WASSER, 2011]. Das Asphaltmischgut muss einen ausreichend hohen Verdichtungsgrad erreichen. So soll eine maximale Lagerungsdichte gewährleistet werden. k ist die zentrale Prüfgröße zur Beurteilung der Verdichtungsarbeit [RENKEN, 2002]. Die momentane Raumdichte ρ einer Asphaltprobe und die Raumdichte $\rho(E_1=50)$ von unter definierten Versuchsbedingungen mit 50 Doppel- Verdichtungsschlägen im Laboratorium (ÖNORM EN 12697-30) hergestellten Marshall- Probekörper, bilden einen Verhältniswert.

$$\text{Verdichtungsgrad } k = \frac{\rho}{\rho_{(E_1=50)}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.3.5)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].

Abbildung 2.3.3 zeigt, dass zur Erzielung eines Verdichtungsgrades $k=100\%$ die Verdichtungsarbeit von 50 Schlägen je Probekörperseite im Laboratorium entsprechen muss.

Bei Asphalttragschichten soll der Verdichtungsgrad mindestens 96 % betragen. Bei Deckschichten ist ein Wert von mindestens 97 % einzuhalten [BULL-WASSER, 2011]. Bei schwer verdichtbaren Asphaltbindern kann der Verdichtungsgrad k mehr als 100 % betragen. Der Verdichtungsindex K (Verhältnis zwischen momentane Raumdichte der Probekörper und rechnerische Raumdichte) wird zur Beurteilung des Verdichtungszustandes einer Asphaltstraße verwendet. Die rechnerisch maximal erreichbare Raumdichte ρ_{∞} wird bei der Bestimmung des Verdichtungsindex K benutzt.

$$\text{Verdichtungsindex } K = \frac{\rho}{\rho_{\infty}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.3.5)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

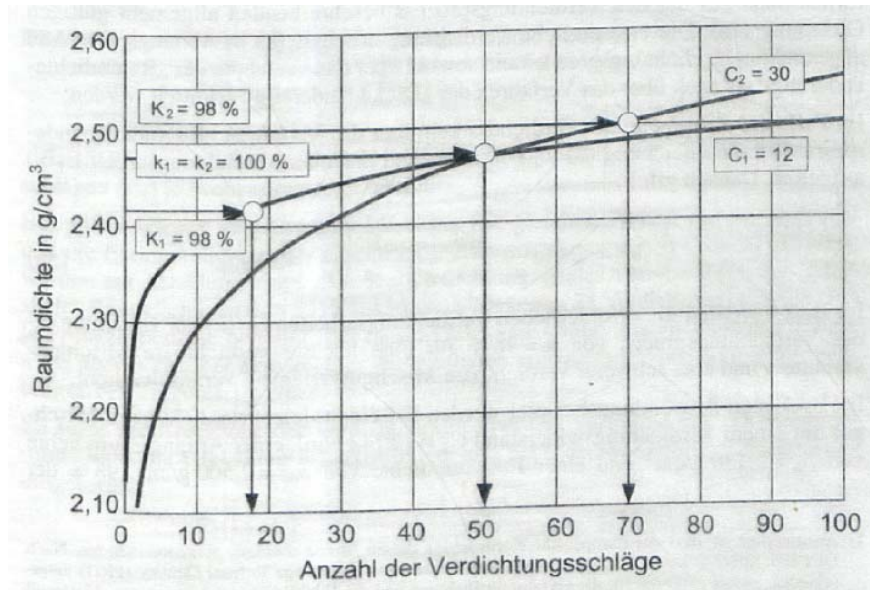


Abb. 2.3.3 Graphisches Beispiel zur Erläuterung der beiden Größen Verdichtungsgrad und Verdichtungsindex [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

2.3.2.2 Die Verdichtungsarbeit

Die Verdichtungsarbeit $E_1(K)$ ist diejenige Arbeit, die erforderlich ist, um ein Dichteniveau, charakterisiert durch den Verdichtungsindex K , zu erzielen. Als Bezugsraumdicke wird die rechnerisch maximal erreichbare Raumdicke ρ_∞ am Ende des Verdichtungsprozesses verwendet [RENKEN, 2002], [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].

Die erforderliche Verdichtungsarbeit $E_1(K)$ kann in Bezug auf die Raumdicke wie folgt definiert werden:

$$E_1(K) = C \cdot \ln \frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_\infty (1 - K)} \quad [42 \text{ Nm}] \quad (2.3.6)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].

Es ergibt sich also eine direkte funktionale Verknüpfung zwischen Verdichtungsarbeit und Verdichtungswiderstand C [RENKEN, 2002].

Bei Verwendung des Parameters *Probekörhöhe* wird die Verdichtungsarbeit $E_2(K)$ wie folgt definiert:

$$E_2(K) = T \cdot \ln \frac{t_\infty^{-1} - t_0^{-1}}{t_\infty^{-1} (1 - K)} \quad [21 \text{ Nm}] \quad (2.3.7)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].

T - Verdichtungswiderstand

2.3.2.3 Einfluss der Verdichtungstemperatur

Die erforderliche Verdichtungsarbeit kann für jede beliebige Temperatur berechnet werden. Aufgrund von Formel 2.3.4 ist Formel 2.3.8 mit $\rho(E_1=50)$ definiert als:

$$\rho_{(E_1=50)} = \rho_{\infty} - (\rho_{\infty} - \rho_0) \cdot e^{-\frac{50}{C}} = a_{\infty} - b \cdot e^{-\frac{50}{C}} \quad [g / cm^3] \quad (2.3.8)$$

Wird dieser Ausdruck logarithmiert und nach erforderliche Verdichtungsarbeit $E_1(k)$ aufgelöst, so gilt:

$$E_1(k, T_i) = C_{T_i} - \ln \frac{b_{T_i}}{a_{\infty, T_i} - k(a_{\infty, N} - b_N \cdot e^{-\frac{50}{C}})} \quad [42 \text{ Nm}] \quad (2.3.9)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

N - Index für die Regressionsparameter der Verdichtungsfunktion bei normengemäßer Verdichtungstemperatur, in der Regel $T=135^{\circ}C$

T_i - Index für die Regressionsparameter der Verdichtungsfunktion bei beliebiger Verdichtungstemperatur

Falls die Probekörper bei unterschiedlichen Verdichtungstemperaturen identische Werte für die Probekörperendhöhe voraussetzen, folgt die Rechnung mit dem Parameter *Raumdicke*. Die folgende Formel basieren auf Formel 2.3.3 und Formel 2.3.4

$$t_{(E_2=100)}^{-1} = t_{\infty}^{-1} - (t_{\infty}^{-1} - t_0^{-1}) \cdot e^{-\frac{100}{T}} \quad (2.3.10)$$

$$\rho_{(E_2=100)} = \frac{m}{A} \cdot t_{\infty}^{-1} - \frac{m}{A} (t_{\infty}^{-1} - t_0^{-1}) \cdot e^{-\frac{100}{T}} \quad [g / cm^3] \quad (2.3.11)$$

$$\rho_{(E_2=100)} = a_{\infty} - b \cdot e^{-\frac{100}{T}} \quad [g / cm^3] \quad (2.3.12)$$

$$E_2(k, T_i) = T_{T_i} - \ln \frac{b_{T_i}}{a_{\infty, T_i} - k(a_{\infty, N} - b_N \cdot e^{-\frac{100}{T_N}})} \quad [21 \text{ Nm}] \quad (2.3.13)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

Die Beziehung zwischen der erforderlichen Verdichtungsarbeit und dem Verdichtungsgrad k ist in den Liniendiagrammen in Abbildung 2.3.4 für die verschiedene Verdichtungstemperaturen dargestellt.

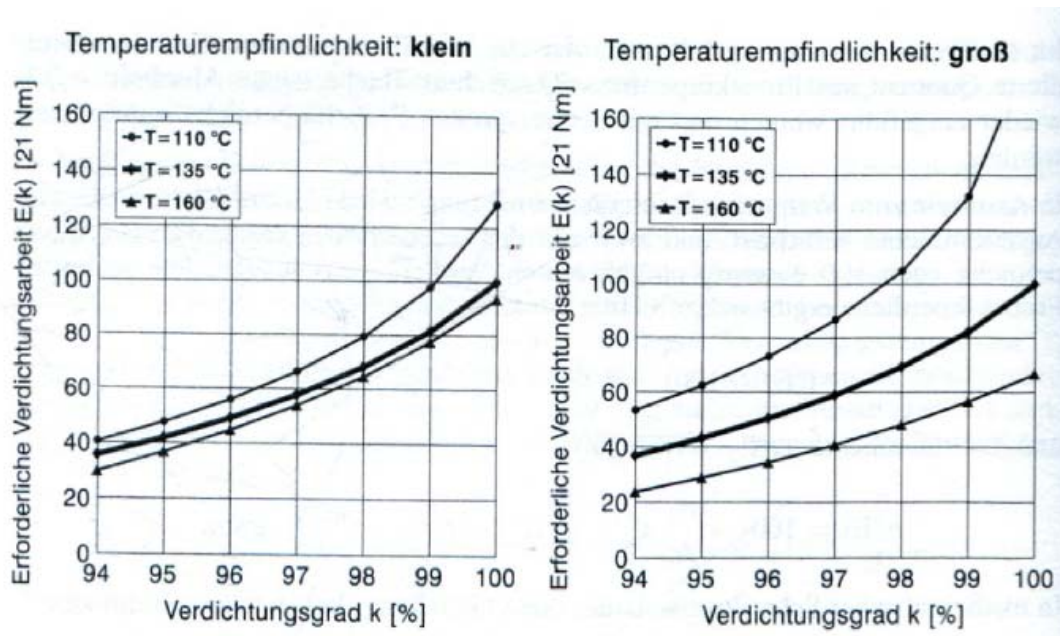


Abb. 2.3.4 Einfluss der Verdichtungstemperatur auf unterschiedlich zusammengesetzte Asphaltgemische [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

Ein Verdichtungsgrad von $k = 100\%$ ist bei einem leicht verdichtbaren Mischgut bei einer Verdichtungstemperatur von $T_i = 110^\circ\text{C}$ erreichbar, bei einem schwer verdichtbaren Mischgut kann diese Temperatur nicht erreicht werden.

2.3.3 Mischgutzusammensetzung

2.3.3.1 Einfluss auf den Verdichtungswiderstand

Die Verdichtbarkeit ist von Art und Zusammensetzung des Mischgutes abhängig. Ein Asphaltgemisch mit einem überwiegenden Grobsandanteil ist schwerer verdichtbar, mit steigendem Füllergehalt werden die Gemische leichter verdichtbar. Der Einfluss der Kornabstufung ist im Splittbereich gering, aber ein Brechsand-Splitt-Gemisch erfordert gegenüber einem Natursand-Kies-Gemisch einen wesentlich höheren Verdichtungsaufwand [RENKEN, 1980]. Gemische aus Rundkörnern lassen sich aufgrund geringer innerer Reibung leichter verdichten [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].

Abbildung 2.3.5. zeigt wie der Verdichtungswiderstand bei einem Splittgehalt über ca. 50 M-% ansteigt. Bei Splittmastixasphalt ist dieser Einfluss auf die Verdichtbarkeit stärker als bei Asphaltbetonvarianten.

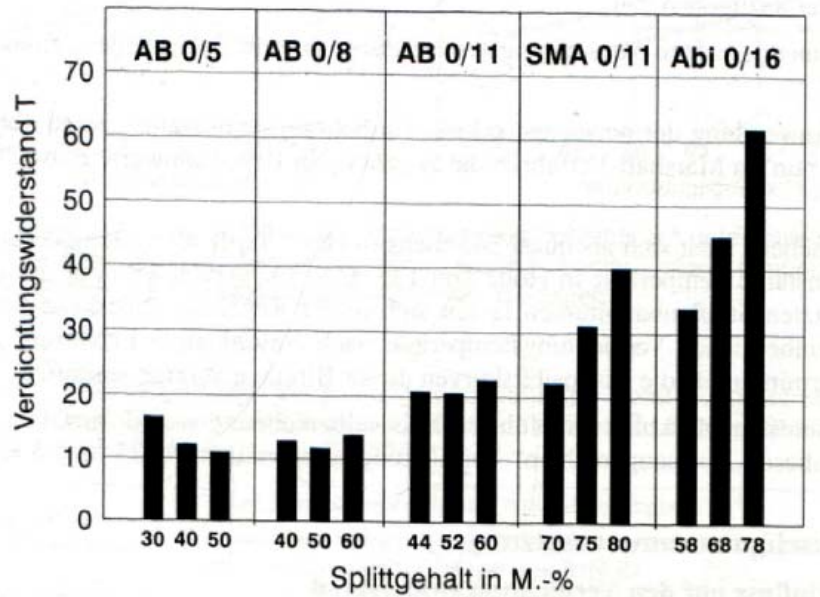


Abb. 2.3.5 Einfluss des Splittgehaltes auf den Verdichtungswiderstand T
[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

Der Verdichtungswiderstand T kann durch eine lineare Gleichung beschrieben werden:

$$T = a_0 + a_1 B + a_2 F + a_{3,1} Spl + a_{3,2} Spl^2 + a_4 d_{\max} + a_5 BS + a_6 F_a \quad [21 \text{ Nm}] \quad (2.3.14)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

T - Verdichtungswiderstand bestimmt über den Parameter *Dickenänderung* [21 Nm]

$a_0 \dots a_6$ - Koeffizienten gemäß Tabelle 2.3.1

B - Bindemittelgehalt [M-%]

F - Füllergehalt [M-%]

Spl - Splittgehalt [M-%]

d_{\max} - Größtkorndurchmesser [mm]

BS - Brechsandanteil [% , relativ]

F_a - Faserstoffgehalt [M-%]

Die Koeffizienten a_0 bis a_6 sind nach Asphaltart und Kornverteilung bestimmt und sind in Tabelle 2.3.1 gegeben.

Tabelle 2.3.1 Koeffizienten a_0 bis a_6 [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005]

Asphaltart/ -sorte	Kompositionelle Merkmalsgröße								Korrela- tions- koeffizient r
	Kon- stante	Binde- mittel B	Füller- gehalt F	Splittgehalt Spl Spl ²		Gröst- korn d _{max}	Brech- sand BS	Faser- Stoff Fa	
-	21 Nm	M-%	M-%	M-%	M-%	mm	%,rel	M-%	-
Parameter	a_0	a_1	a_2	a_{31}	a_{32}	a_4	a_5	a_6	-
Asphaltbeton 0/5 bis 0/16 S	124,6	-6,51	-2,22	-1,551	+0,016	-1,38	+0,153	n.u.	0,939
Splittmastix- asphalt 0/8 u. 0/11 S	-32,6	-4,51	-0,86	+1,787	0,0	-1,80	n.u.	-11,2	0,962
Asphaltbinder 0/16 S	122,3	-2,01	-1,09	-2,778	+0,027	-	n.u.	n.u.	0,943
n.u.= nicht untersucht									

2.3.3.2 Einfluss auf die erforderliche Verdichtungsarbeit $E_2(k)$

Die erforderliche Verdichtungsarbeit $E_2(k)$ ändert sich mit der Zusammensetzung des Asphaltmischgutes. Bei Asphaltbetonen reduziert sich die Arbeit deutlich mit zunehmendem Größtkorndurchmesser. Bei Splittmastixasphalten ist diese Reduzierung nur gering. Bei Asphaltbindern gibt es keinen Einfluss des Grobkornanteils.

Die experimentelle Ermittlung der erforderlichen Verdichtungsarbeit wird mit Hilfe des Marshall-Verfahrens für 100 Verdichtungsschläge auf eine Probekörperseite ermittelt.

$$E_2(k) = [a_0 + a_1 B + a_2 F + a_{3,1} Spl + a_{3,2} Spl^2 + a_4 d_{\max} + a_5 BS] \cdot \frac{1-k}{1-0,97} + 100 \frac{k-0,97}{1-0,97} \quad [21 \text{ Nm}] \quad (2.3.15)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

$a_0 \dots a_6$ – Koeffizienten gemäß Tabelle 2.3.2

B – Bindemittelgehalt [M-%]

F – Füllergehalt [M-%]

Spl – Splittgehalt [M-%]

d_{\max} – Größtkorndurchmesser [mm]

BS – Brechsandanteil [%, relativ]

F_a – Faserstoffgehalt [M-%]

k – Verdichtungsgrad

Tabelle 2.3.2 Koeffizienten a_0 bis a_6 [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

Asphaltart/ -sorte	Kompositionelle Merkmalsgröße							Korrela- tions- koeffizient r
	Kon- stante	Binde- mittel B	Füller- gehalt F	Splittgehalt		Gröst- korn d_{max}	Brech- sand BS	
-	21 Nm	M-%	M-%	M-%	M-%	mm	%,rel	-
Parameter	a_0	a_1	a_2	a_{31}	a_{32}	a_4	a_5	-
Asphaltbeton 0/5 bis 0/16 S	166,4	-9,46	-2,71	-1,854	+0,021	-2,07	+0,279	0,939
Splittmastix- asphalt 0/8 u. 0/11 S	19,7	-4,94	-0,76	+1,270	0,0	-1,14	n.u.	0,909
Asphaltbinder 0/16 S	22,2	-2,09	0,0	+0,764	+0,009	-	n.u.	0,912
n.u.= nicht untersucht								

2.3.4 Äußere Einflüsse

2.3.4.1 Untergrund

Der Untergrund soll tragfähig, standfest, profilgerecht und eben sein und muss beim Einbau der Asphalttragschicht die geforderte Tragfähigkeit (E_{v1} bzw. Verhältnis E_{v2} / E_{v1}) gemäß RVS aufweisen. Auf dem Unterbauplanum dürfen keine Verschmutzungen sein. Verbleibender Schmutz verhindert den Schichtverbund zwischen Asphalt und Untergrund. Das Unterbauplanum kann mit einer Kehrmachine oder Hochdruckwasserstrahl gereinigt werden [HUTSCHENREUTHER, 2010].

2.3.4.2 Einbaudicke

Abbildung 2.3.6 zeigt den Einfluss der Einbauzeit auf die Einbaudicke. Einbaudicke und Umweltbedingungen bestimmen eine maximale Zeitspanne, die für das Verdichten zur Verfügung steht. Die Zeitspanne vom Einbau bis zum Abschluss der Walzverdichtung umfasst ca. 36 Minuten bei einer Einbaudicke von 7,5 cm Asphalt. Wind kann das Abkühlen der Schichten deutlich beschleunigen. Deswegen ist es wichtig, dünne Asphaltsschichten nur bei guten Witterungsbedingungen einzubauen oder entsprechende Maßnahmen vorzusehen [HUTSCHENREUTHER, 2010].

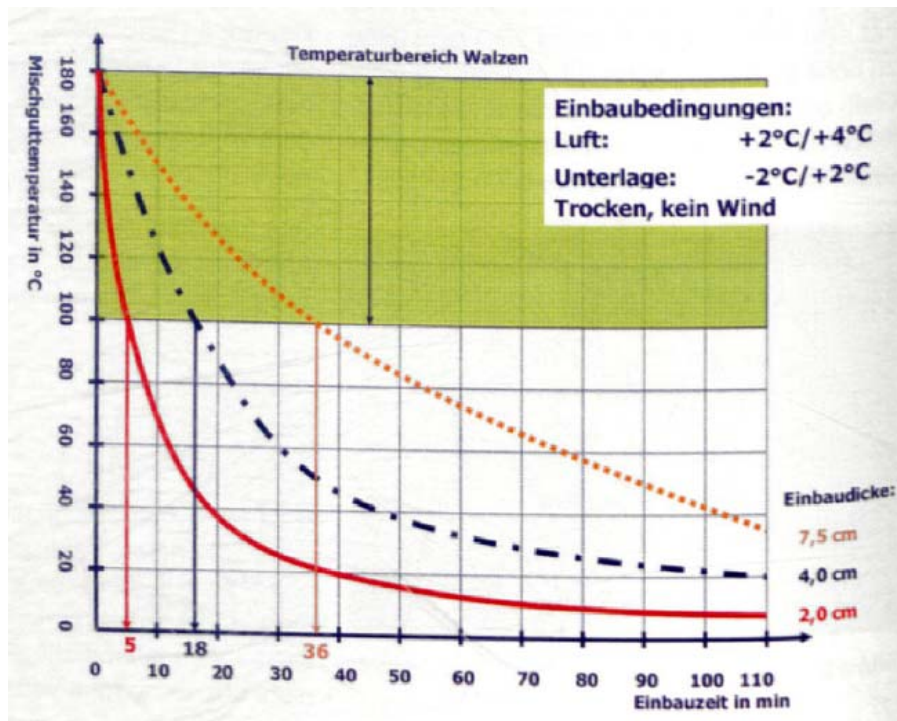


Abb. 2.3.6 Abkühlung von verschieden dicken Asphaltlagen [HUTSCHENREUTHER, 2010]

2.3.4.3 Wetter

Dicke Schichten kühlen an warmen Tagen bei hohen Einbautemperaturen langsam ab und müssen mit schweren Walzen befahren werden. Das Asphaltmischgut kühlt an kalten Tagen schnell aus. Starker Wind beschleunigt die Auskühlung. Es ist möglich, dass die mischgutspezifische Mindesttemperatur unterschritten wird. Bei Deckschichten ist eine ausreichende Verdichtung dann nicht immer erreichbar. Daher muss die Verdichtung durch höhere Vorverdichtung intensiviert werden. Außerdem soll möglichst kurz nach dem Einbau verdichtet werden [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

3 Einbau, Vorverdichtung und Ausführung der Verdichtung im Feld

Einbau und Verdichtung müssen sorgfältig geplant werden. Die Planung umfasst die Ermittlung der Reihenfolge der Abschnitte und die Auswahl der Geräte. Die Leistungen von Anlieferung, Einbau und Verdichtung hängen voneinander ab. Hier spielt die Einbaugeschwindigkeit eine wichtige Rolle. Stillstandszeiten müssen vermieden werden. Wenn die Einbautemperatur außerhalb der geforderten Grenzwerte liegt, verändern sich die Verdichtungseigenschaften des Mischguts. Mit Zunahme der Einbaugeschwindigkeit des Fertigers wird die Vorverdichtung geringer. Sehr wichtig ist auch die Einbaudicke, die entscheidenden Einfluss auf die zur Verdichtung verfügbare Zeitspanne hat. Dünne Schichten kühlen schnell aus und benötigen entsprechenden Maßnahmen [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005], [GESTRATA, 2002].

3.1 Einbau und Vorverdichtung

Der Straßenfertiger besteht aus zwei Teilen, die schematisch in Abbildung 3.1.1 dargestellt sind: der Antriebsmaschine mit Fahrwerk und dem Arbeitsteil mit der Einbaubohle. Das Fahrwerk kann als Raupen- oder Kettenfahrwerk ausgeführt werden. Die Einbaubohle wird vom Maschinenteil bewegt und liegt mit einem Anstellwinkel frei schwimmend auf dem Mischgut auf. Zugarme verbinden die Bohle mit dem Fertiger. Der Anstellwinkel hängt von der Schichtdicke, der Asphaltmischgutart und der Einbaugeschwindigkeit ab [GESTRATA, 2002], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

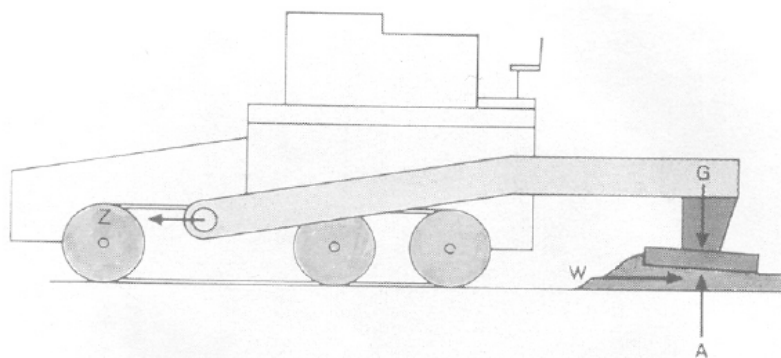


Abb. 3.1.1 Schematische Darstellung des Fertigers; Z- Zugteil, G- Gewicht der Bohle, W- Widerstand des Mischgutes, A- Anstellwinkel der Bohle. [GESTRATA, 2002]

Das Asphaltmischgut wird in einen Kübel angeliefert und durch Förderschnecken zu den Verteilschnecken transportiert. Sensoren messen die vorgegebene Menge und steuern die Vortriebsgeschwindigkeit der Schnecken. Mittels einer Stampfbohle wird das Mischgut vorverdichtet. Es gibt drei Verdichtungszone, die in Abbildung 3.1.2 angezeigt sind. Das verteilte Asphaltmischgut vor der Bohle hat einen Verdichtungsgrad von ca. 70%. Die zweite Zone befindet sich unter der Stampfbohle. Dort beträgt der Verdichtungsgrad ca. 85%. In der

letzten Zone direkt nach der Bohle steigt der Verdichtungsgrad auf 90%, bei Hochleistungsverdichtungsbohle sogar auf bis zu 96%.

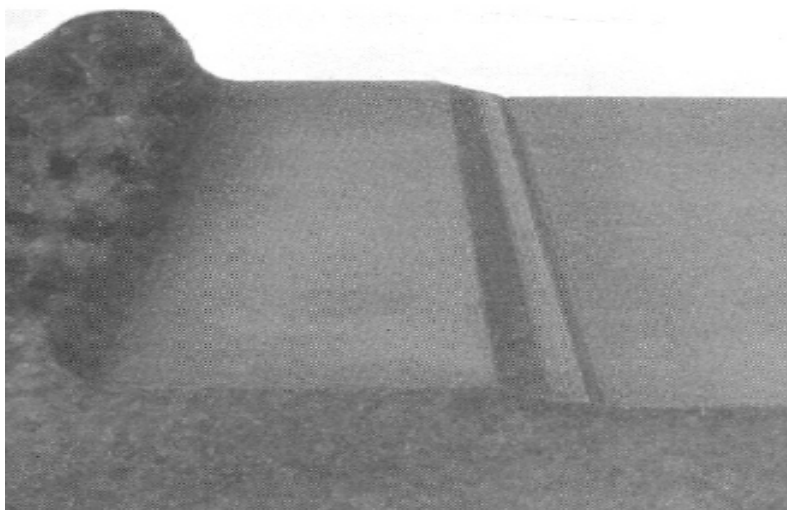
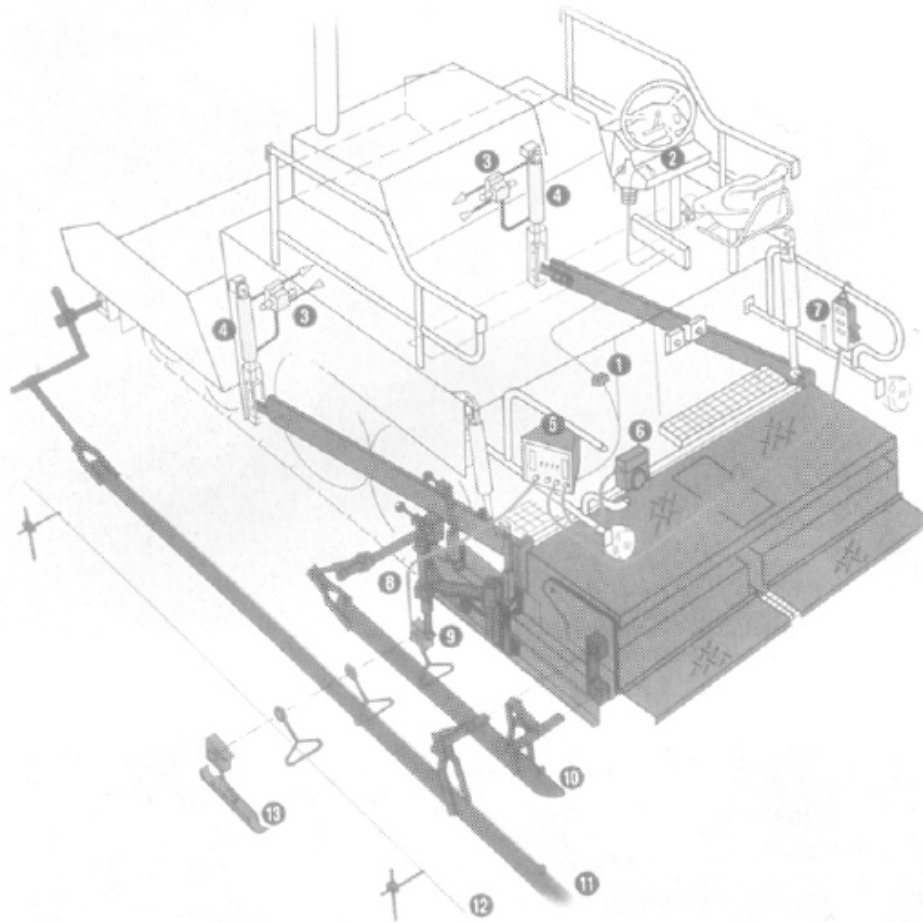


Abb. 3.1.2 Die drei Verdichtungszone [GESTRATA, 2002]

Die Einbaubreite kann mittels Vibrationsbohle oder Variobohle von 2,50 m bis 7,50 m stufenlos verstellt werden. Höhere Verdichtungsgrade sind durch Stampfer und Gleichtakt-Senkrechtvibratoren erreichbar [GESTRATA, 2002], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

Die Steuerung der Längsebenheit und der Höhenlage der Oberfläche kann durch Abtasten eines gespannten Drahtes, mit Schleppski als Referenzlinie, mit Messrad mit Impulszähler oder mit lasergestrueter Nivellierautomatik erfolgen [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010]. Mittels Nivellierautomatik wird die höchste Einbauqualität erreicht. Für direkte Abtastung von Bordsteinen wird der Schitaster benutzt (Siehe Abbildung 3.1.3, Position 13). Die indirekte Abtastung ist mittels Bügeltasters (Position 9, Abb. 3.1.3) Schleppträger (Position 10, 11, Abb. 3.1.3) und einem gespannten Draht (Position 12) möglich [GESTRATA, 2002].



Elektrik und Hydraulik des Fertigers:

- | | |
|-----------------------------------|----------------------|
| 1. Steckdose für Elektroanschluss | 2. Fahrhauptschalter |
| 3. Elektromagnetventil | 4. Nivellierzylinder |

Komponenten der Nivellierautomatik:

- | | |
|------------------------------------|---|
| 5. Regelgerät | 6. Neigungsfühler |
| 7. Neigungsfühler-Fernbedienung | 8. Höhenstellvorrichtung für Höhenfühler |
| 9. Höhenfühler mit Bügeltaster | 10. Schleppleitträger mit 2 m Nivellierrohr |
| 11. Schleppleitträger mit 7 m Rohr | 12. Nivellierdraht |
| 13. Höhenfühler mit Schitaster | |

Abb. 3.1.3 Schematische Darstellung der Nivellierautomatik [GESTRATA, 2002]

3.2 Verdichtungsgeräte

Es gibt drei Walzentypen: (i) statische Glattmantelwalze (die Verdichtung erfolgt durch die Einwirkung des Walzengewichtes), (ii) Gummiradwalze (Knetwirkung) und (iii) Vibrationswalze (Verdichtungswirkung mittels Vibration bzw. Oszillation) Heute werden zumeist

Kombinationswalzen, die die Vorteile verschiedener Walzentypen vereinen, verwendet [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [FIGGE, 1987].

3.2.1 Statische Walzen

Die Verdichtungswirkung der statischen Walzen hängt vom Vertikaldruck der Walzenräder und vom Durchmesser der Bandage ab. Der statische Walzdruck wird als Gewicht auf dem Walzenrad pro cm Walzenradbreite in kg/cm angegeben.

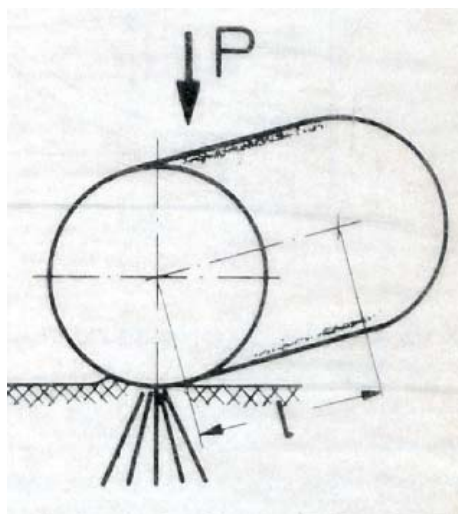


Abb. 3.2.1 Der statische Walzdruck [FISCHER,1971]

Der spezifische Flächendruck ändert sich mit dem Verdichtungsfortschritt. Mit zunehmender Verdichtung wird die Berührungsfläche kleiner und der spezifische Flächendruck größer. Größere Tiefenwirkung ist bei Erhöhung der statischen Last sichtbar. Der Durchmesser der Walzenräder spielt bei der Verdichtung ebenfalls eine wichtige Rolle. Je größer der Durchmesser ist, desto kleiner sind die vertikalen Verschiebungen. Selbstfahrende Walzen können höher belastet werden als gezogene Walzen. Die Ursache ist das Kraftspiel, das in Abbildung 3.2.2. dargestellt ist.

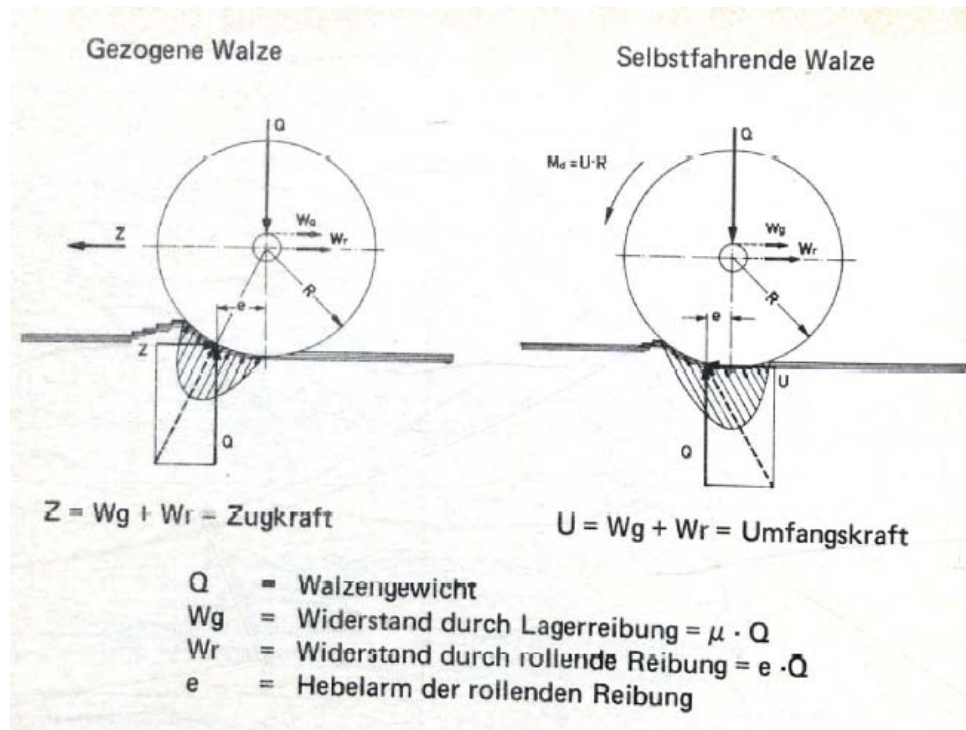


Abb. 3.2.2 Vertikale und horizontale Kräfte einer gezogenen und selbstfahrenden Walze [FISCHER,1971]

Die gezogene Bandage schiebt das Mischgut in Gestalt einer "Bugwelle" vor sich her und überrollt es. Es ist notwendig zuerst das frischgebaute Asphaltmischgut mit der angetriebenen Bandage vorzuverdichten. Die angetriebene Walze drückt auch den Boden. Der Wulst wird beim Überrollen durch die Umfangskraft U nach hinten gezogen und angedrückt [HUTSCHENREUTHER, 2010], [FISCHER, 1971].

Es gibt verschiedene Arten von statischen Walzen. Dreiradwalzen besitzen zwei große Antriebsräder und ein kleineres nicht angetriebenes Rad oder haben drei gleich große Antriebsbandagen. Das Betriebsgewicht beträgt 8-16 Tonnen und die Einsatzgebiete sind Hauptverdichtung und Nachwalzen. Tandemwalzen haben zwei angetriebene Bandagen und das Betriebsgewicht liegt zwischen 1 und 15 Tonnen. In engen Kurven oder im Randbereich können knickgelenkte Tandemwalzen verwendet werden [HUTSCHENREUTHER, 2010], [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

3.2.2 Gummiradwalzen

Das Verdichten mit Gummiradwalzen erfolgt durch Eigengewicht und Knetwirkung. Unter den Gummireifen wirken nicht nur vertikale, sondern auch horizontale Kräfte längs und quer zur Fahrrichtung. Diese Kraftwirkung führt zu einer Änderung der Kornorientierung im Mischgut. Wegen unterschiedlicher Einbaubedingungen soll der Reifendruck veränderbar sein. Mit Änderung des Reifeninnendrucks verändert sich die Reifenkontakfläche und entsprechend auch die Knetwirkung. Der Reifeninnendruck beträgt 2 bis 8 bar und muss in allen Reifen gleich sein. Um das Festkleben von Mischgut an den Gummireifen zu vermeiden, müssen diese temperiert werden. Eine Gummiradwalze hat zwischen 7 und 11 Rädern. Eine Spurüberlappung der Vorder- und Hinterräder ist üblich. Das Betriebsgewicht liegt zwischen 6 und 35 Tonnen, die Walzgeschwindigkeit zwischen 3 und 10 km/h. Gummiradwalzen werden zur Verdichtung von

Asphalttragschichten, Vorprofilierung und zum Oberflächenschluss eingesetzt [HUTSCHENREUTHER, 2010], [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [FISCHER,1971].

3.2.3 Vibrationswalzen

Die dynamische Verdichtung führt zur Verringerung der inneren Reibung der Gesteinskörnungen durch Zusammenwirken von Gewicht und Vibration. Hier kann man 3 Arten unterscheiden: (i) Vibrationsverdichtung, (ii) Oszillationsverdichtung und (iii) Verdichtung mit gerichteten Schwingungen [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

Dynamische Verdichtung mit Vibration

Der Verdichtungserfolg ist vom Gewicht der schwingenden Masse, der Frequenz und der Amplitude abhängig. Die schwingende Masse ist ein Bestandteil des Gerätes, und wird durch eine Exzentermasse angeregt. Die Verdichtungswirkung und –tiefe erhöhen sich bei Zunahme der schwingenden Masse. Die Erhöhung der Amplitude verbessert die Verdichtung, eine zu große Amplitude führt allerdings zu Auflockerungen und Kornzertrümmerungen. Für Asphaltdeck- und –binderschichten ist ein Wert von 0,4 bis 0,6 mm empfehlenswert, für Asphalttragschichten maximal 1 mm. Die Verdichtungsfrequenz soll mindestens 45 Hz (entspricht 45 Schwingungen der Bandage pro Sekunde) betragen. Geringere Frequenzen mit großen Amplituden sind für große Schichtdicken anzuwenden [HUTSCHENREUTHER, 2010], [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

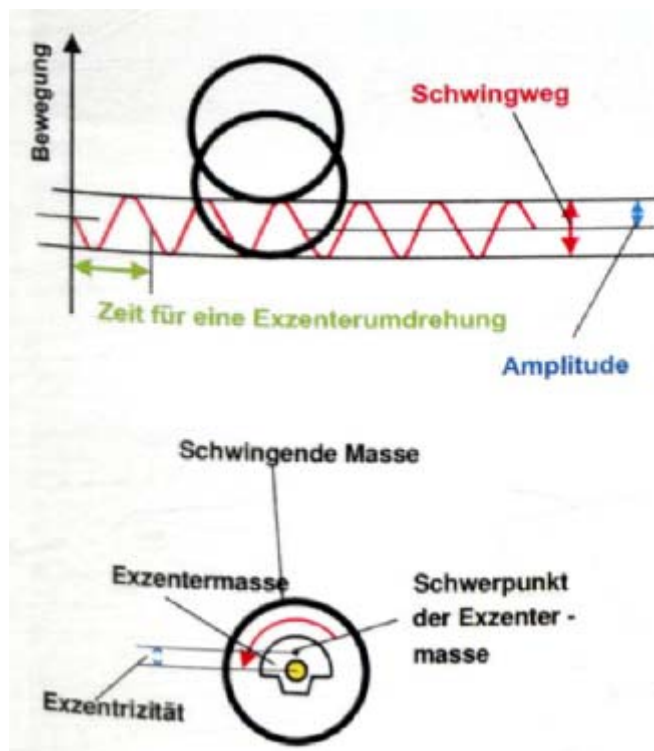


Abb. 3.2.3 Zusammenhang zwischen Amplitude und Exzentrizität [HUTSCHENREUTHER, 2010]

Dynamische Verdichtung mit Oszillation

Die Oszillationsbandage hat keine mechanische oder elektronische Regelung und die Amplitude reguliert sich durch die physikalischen Eigenschaften der Walzbandage. Das Erregersystem des Oszillators wird durch zwei um 180° phasenversetzte angeordnete Exzenterwellen und einer zentralen Antriebswelle erzielt (siehe Abbildung 3.2.4). Die Erregerwellen erzeugen ein Moment um die Mittelachse und die Bandage macht eine Drehbewegung, welche Scher- und Schubkräfte im Material hervorruft. Bei gering verdichtetem Material ist die Drehbewegung relativ hoch und der Verdichtungswiderstand ist gering. Bei zunehmender Verdichtung werden der Widerstand größer und die Amplitude kleiner [HUTSCHENREUTHER, 2010], [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [KRZEMIEN, 1995].

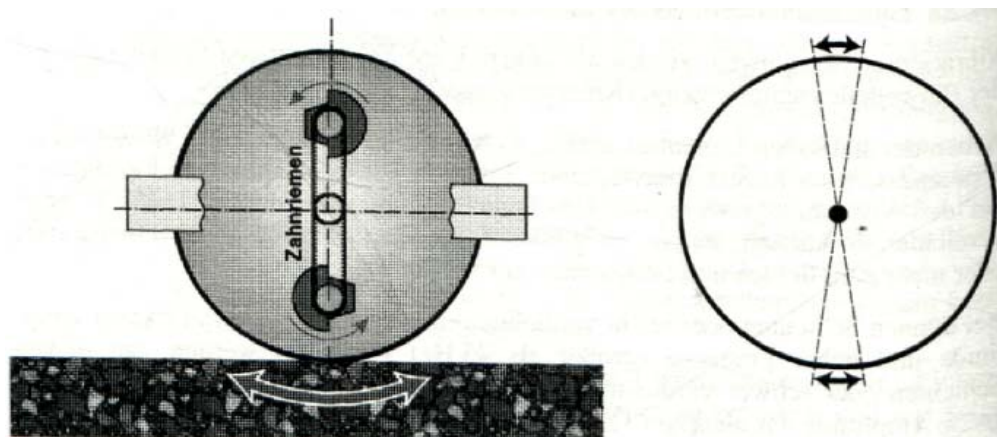


Abb. 3.2.4 Konstruktions- und Wirkprinzip des Oszillators
[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005]

Oszillationswalzen finden besonders auf Brücken Anwendung. Sie erzeugen keine schädigenden Erschütterungen und können bei niedrigeren Asphalttemperaturen verwendet werden. Üblicherweise ist das Betriebsgewicht zwischen 6 und 12 Tonnen [HUTSCHENREUTHER, 2010].

Dynamische Verdichtung mit gerichteten Schwingungen

Zwei gegenläufig rotierenden Unwuchtwellen bilden Richtschwingerreger, die gerichtete Schwingung erzeugen. Die Richtung der resultierenden Kraft ist durch die Geschwindigkeit der Erregerwellen regulierbar.

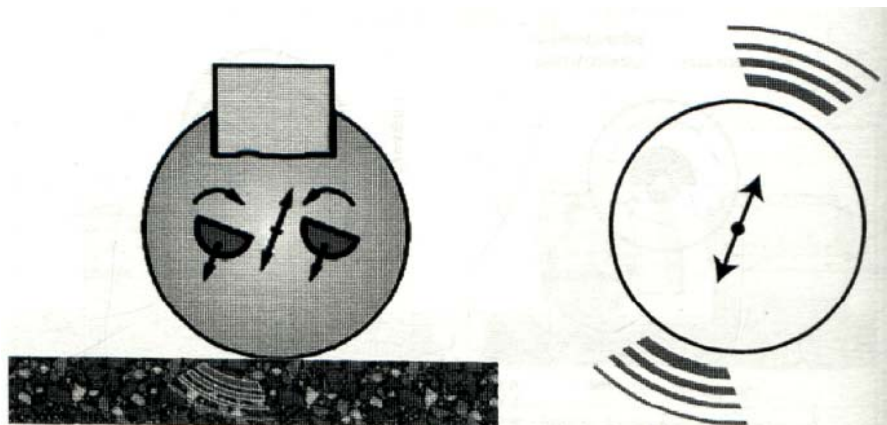


Abb. 3.2.5 Konstruktions- und Wirkprinzip der gerichteten Schwingung
[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005]

Neue Geräte arbeiten mit automatischen Vibrationsverdichtungssystemen, die auf der Analyse der Wechselwirkung zwischen der Bandage und der momentanen Steifigkeit des zu verdichtenden Materials basieren. Diese Systeme bieten eine gute Anpassung und Optimierung der Verdichtung [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

3.2.4 Kombiwalzen

Kombiwalzen bestehen aus vier profillosen Gummireifen und einer vibrationsfähigen Stahlmantelbandage. Die Verdichtung erfolgt durch das Eigengewicht, Vibration und Kneten. Diese Walze ist für vielfältige Aufgaben einsetzbar. Das Betriebsgewicht beträgt 2-18 Tonnen [HUTSCHENREUTHER, 2010], [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

3.2.5 Sonstige Verdichtungsgeräte

Stampfer, Rüttelplatten und andere Geräte sind dann verwendbar, wenn Bereiche aufgrund der Größe der Walze nicht erreichbar sind. Das Betriebsgewicht beträgt zwischen 40 und 200 kg [HUTSCHENREUTHER, 2010], [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

3.3 Planung der Verdichtung

Für eine gute Planung müssen einige Bedingungen erfüllt werden: Bauvertrag und Vertragsbedingungen, Eignungsprüfungszeugnis, Liste der Geräte und Anlagen, Personalplanung. Es ist ratsam, alle Daten für Planung und Ausführung in einer *Checkliste* zusammenzustellen. So wird die Überwachung leichter. Diese *Checkliste* muss mindestens folgenden Dateien enthalten:

- Allgemeine Angaben (Baumaßnahmen, Baukilometrierung u.a.)
- Angaben zur Baustelle (Bauloslänge und -breite, Querprofil u.a.)
- Information zum Mischgut (Mischgutart, Größtkorn, Sand- und Fülleranteil, Zusätze, Raumdichte, Hohlraumgehalt, Verdichtungswiderstand, erforderliche Verdichtungsarbeit u.a.)
- Qualitätsanforderungen (Verdichtungsgrad, Hohlraumgehalt, Quer- und Längsebenheit)
- Mischleistung (Mischanlagekapazität, Anzahl der Mischanlagen u.a.)

- Transportleistung (Transportweg, erforderliche Fahrzeuganzahl)
- Einbauleistung (Anzahl des Straßenfertigers, Einbaubreite, Einbaugeschwindigkeit, Nutzleistungsfaktor, Flächenleistung u.a.)
- Walzleistung (Walzentyp, Anzahl der Walzen, Walzflächenleistung, Nutzleistungsfaktor, Walzgeschwindigkeit u.a.)
- Abstimmung der Walzleistung auf Einbauleistung (praktische Flächenleistung und praktische Walzflächenleistung/ Walze, erforderliche Walzenanzahl)

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

3.4 Flächenleistung des Straßenfertigers

Einbaubreite, Einbaugeschwindigkeit und Nutzleistungsfaktor des Fertigers haben einen großen Einfluss auf die Leistung beim Flächeneinbau. Diese Leistung kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$F_F = B \cdot v \cdot 60 \cdot f_n \quad [m^2 / h] \quad (3.4.1)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005]

F_F - Flächenleistung des Fertigers [m^2 / h]

B - Einbaubreite [m]

v - Einbaugeschwindigkeit [m/min]

f_n - Nutzleistungsfaktor, gemäß Tabelle 3.4.1

Tabelle 3.4.1 Nutzleistungsfaktor im Zusammenhang mit der Einbaugeschwindigkeit

Einbaumengenleistung	bis 100 t/h	100 - 200 t/h	über 200 t/h
Nutzleistungsfaktor	0,8 - 0,9	0,7 - 0,8	0,6 - 0,8

Für die Praxis ist ein Nutzleistungsfaktor $f_n=0,83$ ausreichend und ergibt die folgende Vereinfachung:

$$F_F = B \cdot v \cdot 50 \quad [m^2 / h] \quad (3.4.2)$$

Die durchschnittliche Einbaugeschwindigkeit und Einbaumengenleistung sind

$$v = \frac{F_F \cdot 0,02}{B} \quad [m / min] \quad (3.4.3)$$

$$M = \frac{F_F \cdot g}{1000} \quad [t / h] \quad (3.4.4)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005]

v - Einbaugeschwindigkeit [m/min]

M - Einbaumengenleistung [t/h]

g - Einbaugewicht [kg/m^2]

Die Flächenleistung des Fertigers muss kleiner als die Summe der Flächenleistungen aller Walzen sein (siehe Kapitel 3.5.3) [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

3.5 Walzverdichtung

3.5.1 Walzbreite und – geschwindigkeit

Für die Walzverdichtung sind Walzbreite, Walzgeschwindigkeit, Anzahl der Übergänge, Walzflächenleistung und Walzzeiten von großer Bedeutung. Die Anzahl N' der parallelen Walzbreiten hängt von der Einbaubreite B ab.

$$N' = \frac{B}{b_{0,9}} \quad [-] \quad (3.5.1)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005]

b - Bandagenbreite [m]

N' ist hierbei auf die nächstgrößere ganze Zahl N aufzurundet. Die effektive Walzbreite b_{eff} ergibt sich aus

$$b_{eff} = \frac{B}{N} \quad [m] \quad (3.5.2)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005]

Die Walzgeschwindigkeit bei statischen Walzen liegt üblicherweise für die Planung zwischen 4 und 6 km/h. Bei Vibrationswalzen liegt dieser Wert zwischen 2 und 4 km/h, bei Gummiradwalzen zwischen 3 und 10 km/h. Da die Verdichtungswirkung mit größer werdender Walzgeschwindigkeit abnimmt, sind hier Unebenheiten möglich [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

3.5.2 Anzahl der Walzübergänge

Vorwalzen

Dieses Vorwalzen (oder Andrücken) muss bei niedriger Vorverdichtung durch den Fertiger, bei leicht verdichtbarem Mischgut oder bei sehr dicken Lagen über 12 cm und hohen Mischguttemperaturen angewendet werden. Es erfolgt mit Gummirad- und Kombiwalzen, die direkt hinter der Einbaubohe des Straßenfertigers fahren. Andere Walzen würden das unverdichtete Mischgut wegen der geringen Flächenpressung in dicken Lagen lediglich vor sich herschieben [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

Hauptverdichtung

Mit der Hauptverdichtung muss der Mindest-Verdichtungsgrad erreicht werden. Zur Ermittlung der erforderlichen Anzahl von Walzübergängen $n(k)$ sind 2 Verfahren möglich: rechnerisch und nomographisch. Das rechnerische Verfahren erfolgt nach Formel (3.5.3)

$$n(k) = a.T_0^b.E_2(k, T = 135)^c.m_w^d.k^e \quad [-] \quad (3.5.3)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005]

$n(k)$ – erforderliche Anzahl von Walzübergängen zum Erreichen eines bestimmten Verdichtungsgrades k [-]

$a...e$ - Koeffizienten beziehungsweise Exponenten, angegeben in Tabelle 3.5.1.

T_0 - Anfangs - Verdichtungstemperatur [$^{\circ}C$]

$E_2(k, T = 135)$ - erforderliche Verdichtungsarbeit bei $T=135^{\circ}C$ [$21Nm$] (siehe Kap. 2.3.2.2)

m_w - Masse der Walze [t]

k - Verdichtungsgrad [-]

Tabelle 3.5.1 Koeffizienten und Exponenten für Berechnung der Formel (3.5.3)
[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

Asphaltart/ -sorte	Verdichtungsgrad	Parameter					Korrelations koeffizient r
		a	b	c	d	e	
-	-						-
AB 0/11	statisch	900 ¹⁾	-1,0812	0,2800	-0,0001 ³⁾	19,00	0,879
	dynamisch	9000 ²⁾	-1,2555	0,5558	-1,4232	21,61	0,881
SMA 0/11 S	statisch	44,9	-0,6620	0,7990	-0,4809	20,59	0,957
	dynamisch	900 ¹⁾	-0,6047	0,4903	-1,7196	14,89	0,970
1) Parameter auf den oberen Wert von 900 begrenzt 2) Parameter auf den oberen Wert von 9000 begrenzt 3) Parameter auf den oberen Wert von -0,0001 begrenzt, damit er nicht positiv wird							
$n(k) = a.T_0^b.E_2(k, T = 135)^c.m_w^d.k^e \quad [-]$							

Das zweite Verfahren benutzt Nomogramme folgender Art:

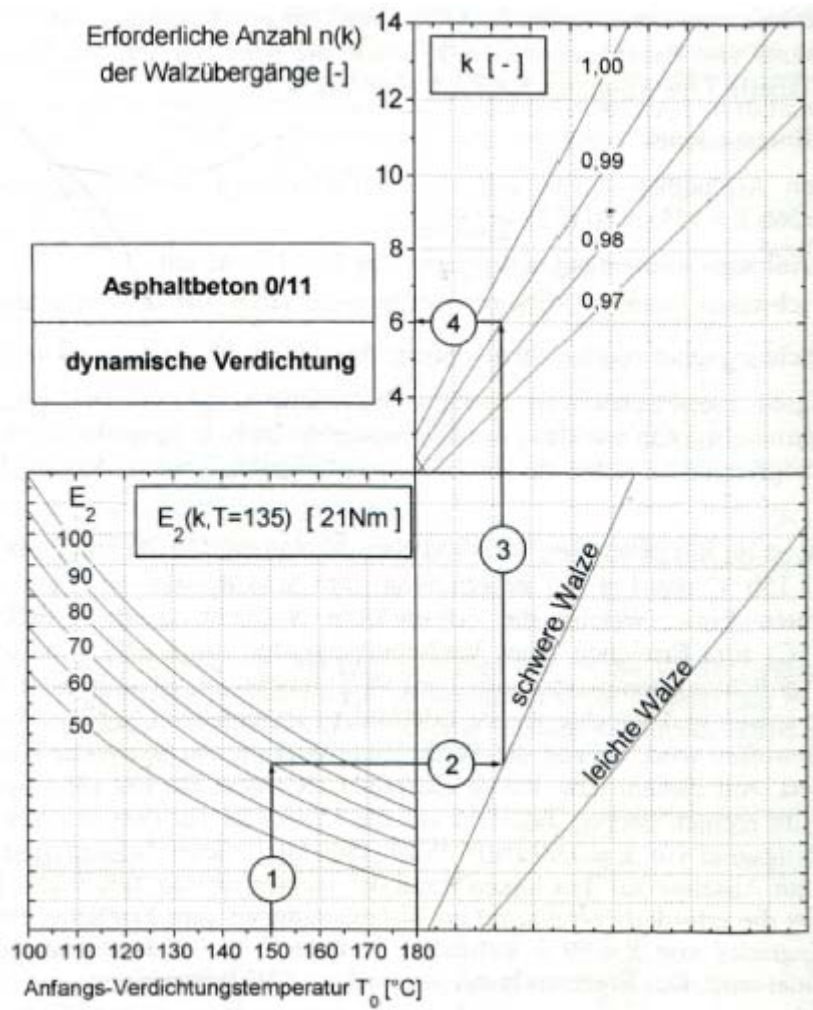


Abb. 3.5.1 Nomogramm zur Ermittlung der Anzahl der erforderlichen Walzübergängen [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

Bei bekannter Anfangstemperatur und erforderlicher Verdichtungsarbeit (Schritt 1 in Abbildung 3.5.1) wählt man die Walzenart nach dem Gewicht – schwer oder leicht (Schritt 2). Danach kann man- je nach gewünschtem Verdichtungsgrad (Schritt 3)- die erforderliche Anzahl an Walzübergängen ablesen (Schritt 4) [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].

Typische Werte liefert Tabelle 3.5.2.

Tabelle 3.5.2 Anzahl der Walzübergänge für die Hauptverdichtung
[HUTSCHENREUTHER, 2010]

Walze und Betriebsart	Anzahl n der Walzübergänge
Dreiradwalze	6 bis 8
Tandemwalze	
- Statisch	6 bis 10
- Einfach vibrierend	2 bis 8
- Doppelt vibrierend	2 bis 6
Gummiradwalze	10 bis 14
Kombiwalze	
- Statisch knetend	6 bis 12
- Vibrierend knetend	2 bis 8

Nachwalzen

Das Nachwalzen dient dem Porenschluss und der Herstellung der Querebenheit der Deckschicht und wird mit 2-4 Walzübergänge nach der Hauptverdichtung durchgeführt. Im üblichen Temperaturbereich unter 100°C dürfen nur statische oder Gummiradwalzen eingesetzt werden [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

3.5.3 Walzflächenleistung

Die Walzflächenleistung F_w kann mit folgender Formel berechnet werden.

$$F_w = \frac{b_{eff} \cdot v \cdot 50}{n} \quad [m^2 / h] \quad (3.5.4)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005]

F_w - Walzflächenleistung [m^2/h]

v - mittlere Walzgeschwindigkeit [m/min]

n - Anzahl der Walzübergänge [n]

b_{eff} - effektive Walzbreite [m]

Die Walzflächenleistung ist für Walzen beim Andrücken und der Nahtverdichtung geringer. Beim Einsatz mehrerer Walzen muss die Summe der Walzflächenleistungen größer als die Einbaufächenleistung des Fertigers sein [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

3.5.4 Walzzeiten

Die Zeiträume zwischen Asphaltmischguteinbau und Abschluss des Verdichtens sind begrenzt. Die nötigen Walzzeiten können mit folgender Formel berechnet werden:

$$t = \frac{L \cdot n \cdot N}{v} \quad [\text{min}] \quad (3.5.5)$$

[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

L - Walzbahnlänge [m]

n - Anzahl der Walzübergänge [n]

N - Anzahl der Walzbahnen

v - mittlere Walzgeschwindigkeit [m/min]

3.6 Ausführung der Verdichtung

3.6.1 Grundregeln

Die Verdichtung muss so früh wie möglich nach dem Einbau mit dem Fertiger erfolgen und die Temperatur des Asphaltmischgutes soll maximal 150°C sein. Bei Kurven beginnt man die Verdichtung stets auf der Innenseite. Eine Überlappung von üblicherweise 15 cm, mindestens jedoch 10 cm, ist vorzusehen. Das Umsetzen von Walzbahn zu Walzbahn erfolgt jeweils am Ende, wo die Asphaltenschicht schon abgekühlt ist. Umsetzen oder Kurvenfahren sind auf heißen Schichten verboten. Bei geneigtem Querprofil beginnt das Verdichten auf der tieferen Einbauseite, beim Einbau im Dachprofil muss die Krone also als Letztes behandelt werden. Das Walzen erfolgt grundsätzlich ruckfrei. Eine optimale Dosierung des Wassers zur Kühlung der Bandage ist sehr wichtig. Das Ankleben des Mischgutes muss unbedingt verhindert werden. Zu viel Wasser führt allerdings zu schnellerem Auskühlen [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010], [GESTRATA, 2002].

3.6.2 Besonderheiten

Vibrationswalzen

Vibrationsfrequenz und -amplitude sind von Mischgutart und Einbaudicke abhängig. Bei Deckschichten erfolgt das Verdichten mit hohen Frequenzen und kleinen Amplituden. Dicke Schichten über 8 cm sind in der Regel mit niedrigeren Frequenzen und höheren Amplituden zu behandeln. Bei dünnen Schichten bis 2 cm oder Deckschichten auf starrer Unterlage darf man keine Vibration benutzen, sonst sind Kernzertrümmerung, Gefügestörungen mit folgender Rissbildung oder Beeinträchtigung des Schichtenverbundes möglich. Das Verdichten mit Vibration ist bei Mischguttemperaturen unter 100°C verboten [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

Gummiradwalzen

Eine Gummiradwalze muss immer in Kombination mit einer Glattmantelwalze eingesetzt werden. Der Reifeninnendruck muss in Abhängigkeit der Mischgutart gewählt werden, bei dicken Schichten müssen die Radlasten erhöht werden. Bei kontinuierlichem Einbau werden Gummiradwalzen direkt hinter dem Fertiger ohne Wasserkühlung eingesetzt. Dieses Verfahren wird *hot and dry* genannt. Zu viele Walzübergänge sind bei hohlraumarmen Deckschichten zu

verhindern, da dadurch verursachte Mörtelanreicherung an der Oberfläche Glättebildung zur Folge haben kann. [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

Kombiwalzen

Bei Kombiwalzen sind die Radlasten niedrig und eine Erhöhung des Reifeninnendruckes ist nicht empfehlenswert, weil die Randzonen der Reifenlauffläche abheben können. Falls eine Wasserkühlung der Reifen nötig ist, wird eine Emulsion aus Trennmittel und Wasser in Verhältnis 1:50 bis 1:100 verwendet. Hier wird auch das Verfahren *hot and dry* eingesetzt und die Walze fährt mit den Reifen in Richtung des Straßenfertigers. Bei windigem Wetter sind entsprechende Maßnahmen zu berücksichtigen, wie z.B. windabweisende Schürzen oder Verwendung einer Radbeheizung [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

3.6.3 Walzschema

Für eine gleichmäßige Verdichtung ist eine gute Verteilung der Walzbahnen und – übergänge wichtig. Bei Andrücken und Hauptverdichtung fährt die Walze an der Fahrbahnkante entlang bis zum Fertiger. Die Rückfahrt erfolgt auf der gleichen Spur (siehe Abbildung 3.6.1). Die aktive Länge der Walzbahn ist zwischen 40 m und 70 m. Das Versetzen muss immer auf erkalteter Schicht erfolgen.

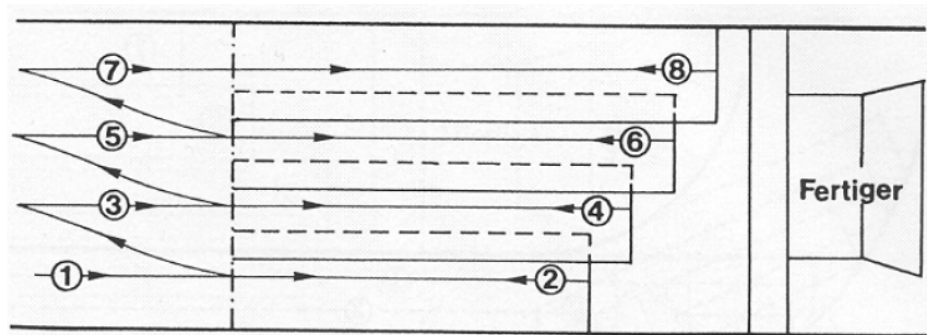


Abb. 3.6.1 Walzschema mit richtigem Umsetzen [GESTRATA, 2002]

Mit einer festen Randeinfassung ist kein seitliches Wegdrücken des Mischgutes mehr möglich. Ohne seitliche Einfassung muss man Zusatzgeräte, wie z.B. die Einbaubohle des Fertigers oder Kantenrollen, benutzen. Abbildung 3.6.2 zeigt den Anfang der Verdichtung bei Quernähten. Die Bandage läuft nur auf einer Breite von etwa 10 cm auf dem noch heißen Mischgut. Mit jedem nächsten Walzgang wird diese Spur breiter und schließlich fährt die ganze Bandage auf dem frisch eingebauten Mischgut.

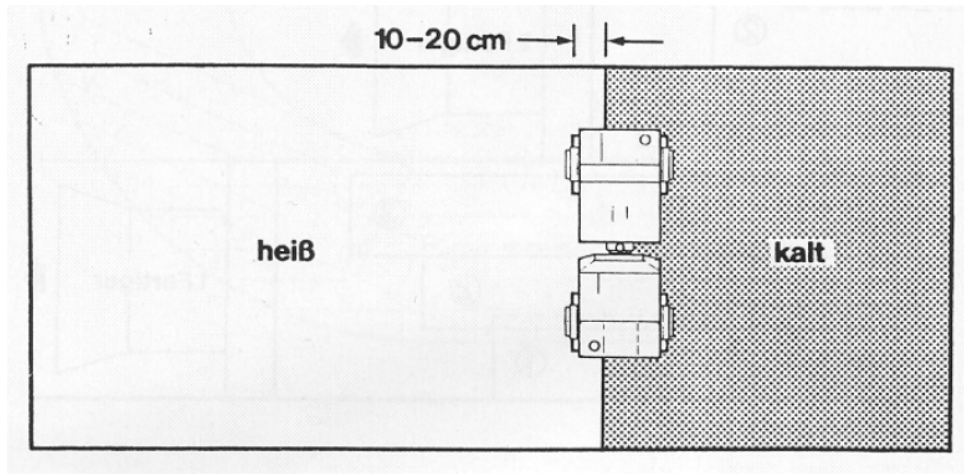


Abb. 3.6.2 Verdichten einer Quernaht [GESTRATA, 2002]

Bei Längsnähten *heiß an kalt* beginnt der erste Walzübergang nur 10-15 cm auf der frisch eingebauten Bahn (Schritt 1 in Abb. 3.6.3), die nächste Walzspur beginnt auf dem anderen, unverdichteten Rand, die weitere Verdichtung erfolgt vom Rand her zur Mitte hin (siehe Schritt 2 und 3 in Abbildung 3.6.3).

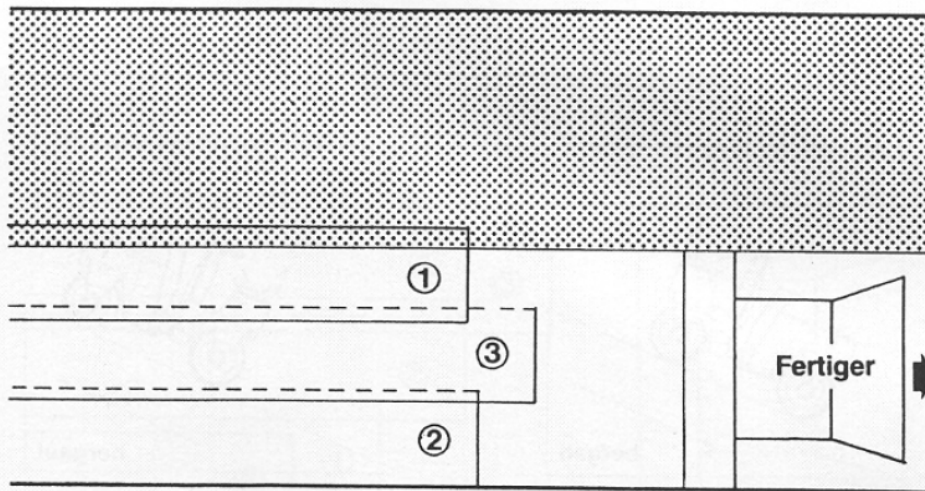


Abb. 3.6.3 Walzschema bei einer Längsnaht *heiß an kalt* [GESTRATA, 2002]

Längsnähte *heiß an heiß* treten beim Einbau mit zwei Fertigern auf. Abbildung 3.6.4 stellt das prinzipielle Schema der Verdichtung dar. Das Walzen beginnt an den Außenkanten und fährt nach innen bis zur Längsnaht fort.

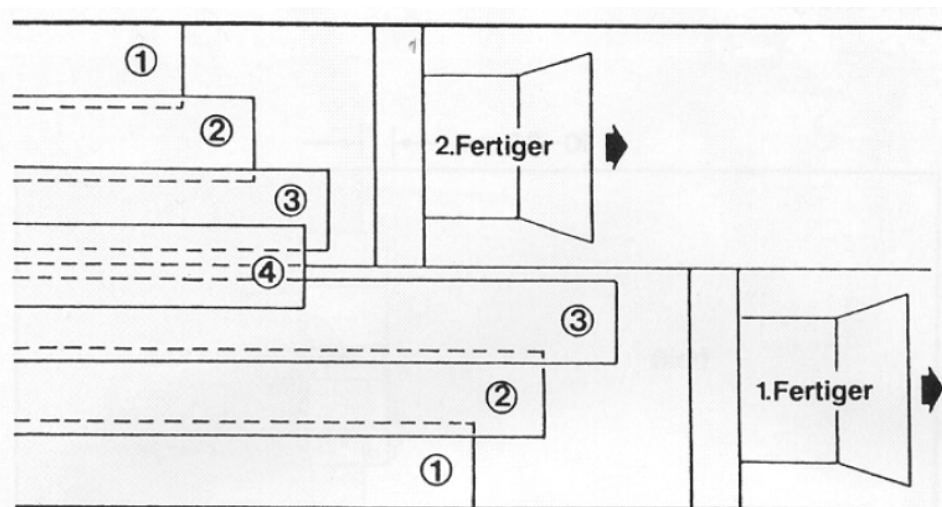


Abb. 3.6.4 Walzschema bei einer Längsnaht *heiß an heiß* [GESTRATA, 2002]

Das Kurvenverdichten fängt immer an der Innenseite an. Bei kleineren Kurvenradien ist es ratsam, die Kurve anzuschneiden und tangential zu versetzen. Es soll möglichst lange geradeaus gefahren werden (siehe Abbildung 3.6.5) [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [HUTSCHENREUTHER, 2010].

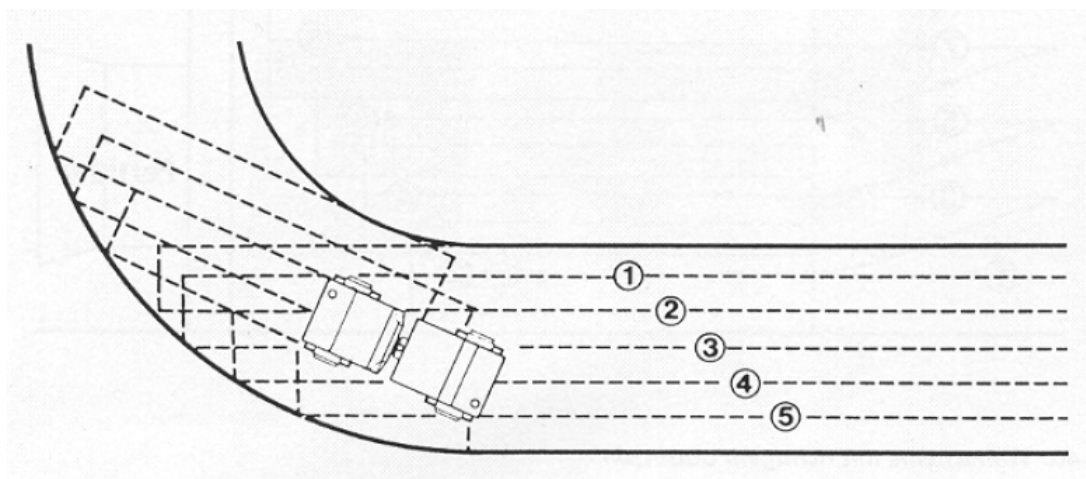


Abb. 3.6.5 Verdichtung in Kurvenbereich [GESTRATA, 2002]

3.6.4 Fehler und ihre Ursachen beim Walzen

Walzrisse, Querrisse

Querrisse sind durch Verschiebung einer Bugwelle aus eingebautem Mischgut auf der Unterlage möglich. Zu lange Wartezeiten bevor Walzenbeginn oder Wettereinflüsse sind ebenfalls mögliche Ursachen. In noch heißem Mischgut können diese Risse mit Gummiradwalzen behoben werden. Querrisse in Asphalttragschichten können durch Überbauen mit heißem Mischgut geschlossen werden, falls sie bis zu 1 cm tief sind. In Deckschichten werden sie mit Bitumenemulsion abgedichtet und mit einem zusätzlichen Walzgang verfestigt [HUTSCHENREUTHER, 2010].

Längsrisse

Diese Risse entstehen in Folge einer fehlerhafter Unterlage, zu hohem oder zu niedrigem Bindemittelgehalt, zu hoher Mischguttemperatur oder ungünstiger Mischgutzusammensetzung. Andere mögliche Ursachen sind häufiges Hin- und Herfahren in einer Spur oder Einsatz von zu schweren Walzen, die zu Abscheren des Mischgutes führen [HUTSCHENREUTHER, 2010].

Verschiebungen des Mischgutes vor der Walzenbandage

Falls die Oberfläche ausgekühlt und erhärtet ist, bricht die Walze diese Schicht und schiebt sie über die noch heiße Kernzone [HUTSCHENREUTHER, 2010].

Verdichten mit Vibration

Die Temperatur des Mischgutes ist sehr wichtig für den ersten Walzgang der Vibrationswalze. Bei zu hohen Temperaturen sind häufig Aufwölbungen neben oder Querrisse hinter der Bandage, starkes Schieben des Mischgutes vor der Walze oder Ankleben an der Bandage erkennbar [HUTSCHENREUTHER, 2010].

3.7 Kontrolle des Verdichtungsvorganges.

Der Anfang der Kontrolle ist beim Mischguteinbau. Die Temperaturspannen für die Mischguttemperatur, die in den Richtlinien angegeben sind, müssen eingehalten werden. Verschiedene Geräte sind für die Messung anzuwenden, wie z.B. Einstichthermometer oder Infrarotthermometer der Walzen oder des Straßenfertigers. Das momentane Verdichtungsverhalten des Asphaltes ist mit der Reaktion der Oberfläche auf den Walzeinsatz erkennbar. Bei zu geringer Vorverdichtung oder zu heißem Mischgut schiebt die Walze das Mischgut oder sinkt darin ein. Walzrisse sind auch ein Merkmal für Verdichtungsprobleme. Bindemittelanreicherung an der Oberfläche zeigt ein Aufsteigen des Mörtels. Gegenmaßnahmen sind Walzeinsatz bei niedrigen Temperaturen oder weniger Walzübergänge. Falls Walzspuren in Querrichtung entstehen, lassen sich diese durch Einsatz einer Walze mit hoher Linienlast beseitigen.

Der Verdichtungsgrad kann durch Bohrkernen aus der fertigen Schicht überprüft werden. Zur Messung des relativen Verdichtungserfolges während des Walzvorganges sind zerstörungsfreie Methoden anwendbar, mit welchen die Zunahme der Dichte des Asphaltmischgutes kontrolliert werden kann [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005], [GESTRATA, 2002].

3.7.1 Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle

Die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle *FDVK* ist eine Methode zur zerstörungsfreien Kontrolle während der Verdichtung. An der Bandage der Walze ist ein Beschleunigungsaufnehmer (siehe Abb. 3.7.1) befestigt, der die Wechselwirkung zwischen Asphalt und Walzenbandage während des Verdichtungsvorganges beurteilt. Dabei wird das Trag- und Verformungsverhalten der Straße analysiert und auf ein spezielles Display übertragen. Außerdem informiert dieses Display über die Walzgeschwindigkeit, die aktuelle Asphalttemperatur und die Amplitude der dynamischen Verdichtung [HUTSCHENREUTHER, 2010], [BRÄU, HARTMANN, 2004], [www.bauwesen.tuwien.ac.at].

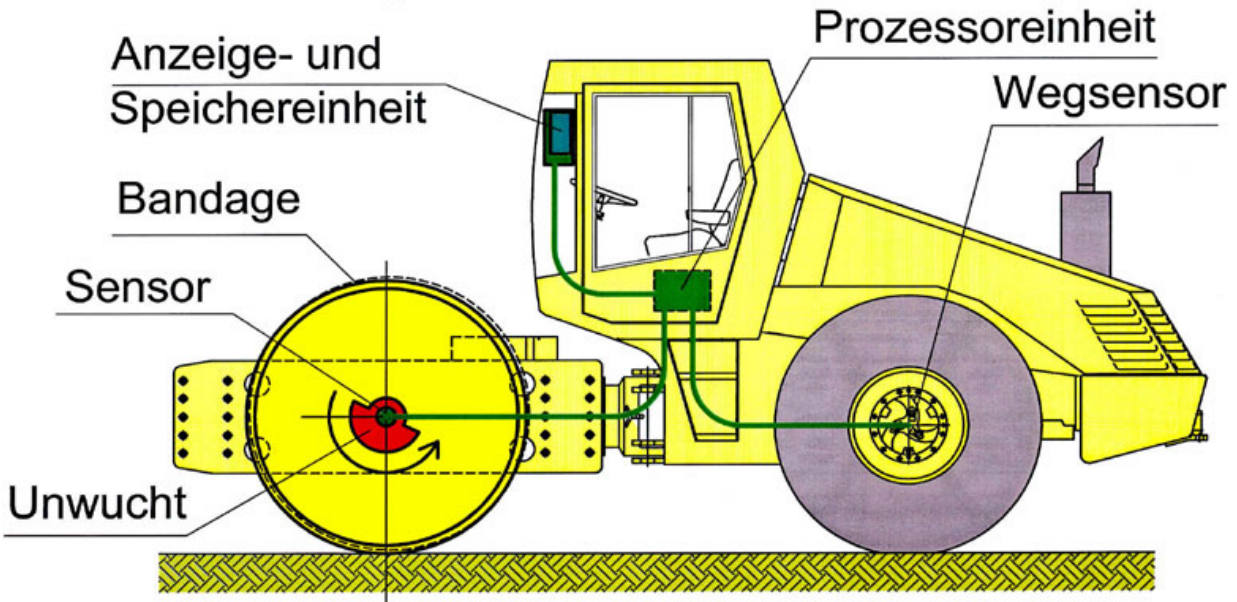


Abb. 3.7.1 Prinzip der FDVK [www.bauwesen.tuwien.ac.at]

3.7.2 Isotopensonde

Im Feld ist eine zerstörungsfreie Prüfung der Dichte, Asphaltstärke und Verdichtungsgrad durch radiometrische Verfahren erlaubt. Hier werden Sonden mit radioaktiven Isotopen benutzt. Die Intensität radioaktiver Strahlung wird in Beziehung zur Stoffdichte gesetzt. Abbildung 3.7.2 zeigt die Wirkung der Sonde schematisch. Der Strahler streut Photonen in die Schicht. Die Intensität der rückgestreuten Gammaquanten wird mittels Strahlungsdetektoren gemessen. Die Gamma-Strahlung hängt von der Weglänge, der Dichte und dem Massenabsorptionskoeffizient μ ab. Zur Dichtemessung werden Aufsatzsonden mit dem Isotop Cäsium $Cs\ 137$ eingesetzt. Die Schwächung erfolgt durch Streuung und Absorption. Je dichter die Materie ist, desto mehr Strahlungsquanten werden weggestreut. Pro Messstelle werden zwei Messungen durchgeführt.

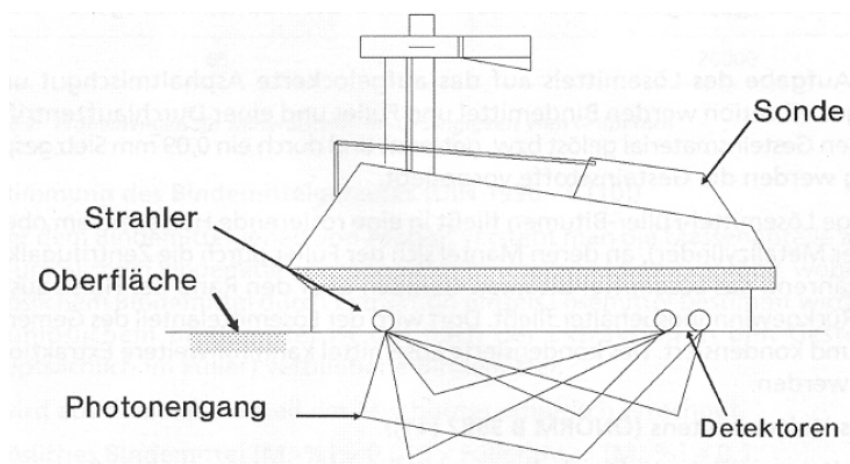


Abb. 3.7.2 Systemskizze einer Isotopensonde [GESTRATA, 2002]

Isotopensonden sind nicht nur auf kalten, sondern auch auf heißen Schichten anwendbar. Man benutzt sie zur Bestimmung der Vorverdichtungsleistung von Einbaubohlen, der Gleichmäßigkeit der Verdichtung oder der Abhängigkeit der Dichte von der Anzahl der Walzübergänge [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2001].

3.7.3 Magnetsonde

Das Prinzip der elektrischen Wirbelstromdämpfung wird bei der Magnetsonde, die in Abbildung 3.7.3 dargestellt ist, zur Bestimmung der Schichtdicke verwendet. Aluminiumfolien oder -bleche sind als Gegenpol definiert und werden vor dem Mischguteinbau unverschiebbar eingelegt. Die Sonde erzeugt ein elektromagnetisches Feld im Messteil und die abstandsabhängige Schwächung wird zur Anzeige gebracht, wodurch auf die Schichtdicke rückgeschlossen werden kann [GESTRATA, 2002], [KRZEMIEN, 1995], [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2001].

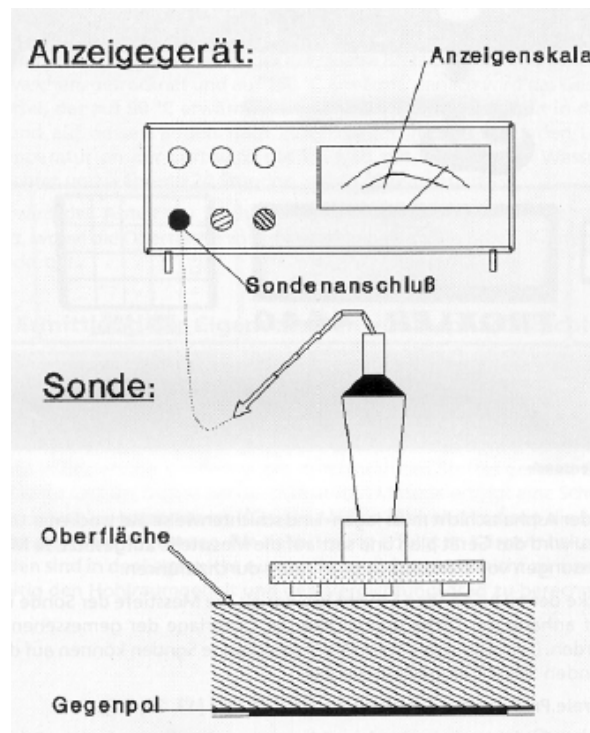


Abb. 3.7.3 Systemskizze einer Magnetsonde [GESTRATA, 2002]

3.7.4 Ebenheitsmessungen

Fehler bei der Verdichtung können Unebenheiten verursachen. Zur Messung der Ebenheit werden 4m- Messlatte (Abbildung 3.7.4) und Planograf (Abbildung 3.7.5) verwendet. Die Latte wird auf die Straße gelegt und die maximalen Abstände zwischen Messlattenunterkante und der Asphaltoberfläche mittels Messkeil gemessen.

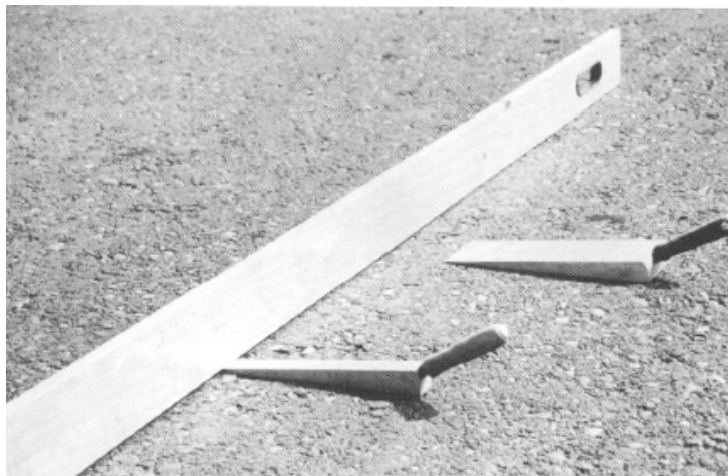


Abb. 3.7.4 Ebenheitsmessung mit der 4m-Messlatte [GESTRATA, 2002]

Der Planograf ist ein Messwagen, der 4 Meter lang und mit einer Anzeige- und Schreibeinrichtung ausgestattet ist. Es gibt 10 Laufräder an einem Rohrrahmen, der eine Bezugsgerade für die überrollte Unebenheit bildet. Das Messrad in der Gerätemitte ist mit der Anzeige- und Schreibeinrichtung verbunden und registriert die Unebenheiten im Maßstab 1:1 [GESTRATA, 2002]

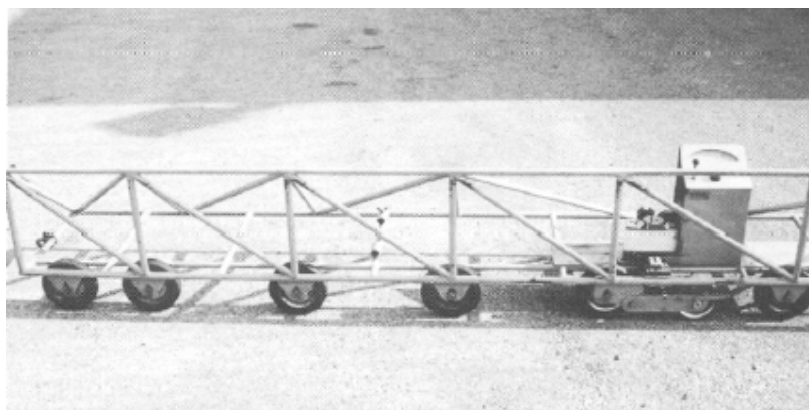


Abb. 3.7.5 Ebenheitsmessung mit Planograf [GESTRATA, 2002]

3.8 Anforderungen

Für eine gute Verdichtung der bituminösen Schichten muss eine gute Verdichtung des Untergrundes verfügbar sein. Diese Bodenverdichtung ist üblicherweise mit Hilfe der *Flächendeckenden Verdichtungskontrolle FDVK* geprüft und soll die entsprechenden Anforderungen erfüllen.

3.8.1 Anforderungen in Österreich

Für Straßenbaukonstruktionen stehen Anforderungen an fertigen Schichten zur Verfügung. Die Verdichtung von Asphalten kann nach ÖNORM EN 12697-10: 2000 06 01 berechnet werden. Sie wird durch das Verhältnis zwischen Dichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsarbeit ermittelt,

welche mit den Verdichtungsverfahren Marshall- Prüfung, Gyrator- Verdichtung und Vibrationsverdichtung überprüft werden.

Die Anforderungen an fertige Schichten, die mit dem Verdichten verbunden sind, sind in den nächsten Tabellen gegeben.

Tabelle 3.8.1 Anforderungen an Tragschichten und Tragdeckschichten [RVS 08.016.01].

Kennwerte	Prüfung gemäß	Sollwert	Qualitätsabzug	Keine Übernahme
Solldicke (SD) [cm]		Gem. Ausschreibung		
Mindestdicke	ÖNORM EN 12697-36	\geq SD -10% , max. \geq SD -1,0 cm	<SD -10% bis -25%, max. <SD- 1cm bis - 2,5cm ¹⁾	<SD -25% , max. <SD - 2,5 cm ²⁾
Ebenheit [mm/ 4m]	RVS 11.06.62	\leq 6	7 bis 18 ³⁾	>18 ⁴⁾
Verdichtungsgrad [%]	ÖNORM EN 12697-8	\geq 98 ⁵⁾	97 bis 94 ⁶⁾	<94 ⁷⁾
1) Für ländlichen Straßen gilt <SD -10% bis -30%, max. <SD- 1cm bis - 3,0 cm 2) Für ländlichen Straßen gilt <SD -30%, max. <SD - 3,0 cm 3) Für Tragdeckschicht, AC deck A5 und A6 gilt 7 bis 15 4) Für Tragdeckschicht, AC deck A5 und A6 gilt >15 5) Für ländlichen Straßen gilt \geq 96 6) Für ländlichen Straßen gilt 95 bis 92 7) Für ländlichen Straßen gilt < 92				

Tabelle 3.8.2 Anforderungen an Deckschichten [RVS 08.016.01].

Kennwerte	Prüfung gemäß	Sollwert	Qualitätsabzug	Keine Übernahme
Solldicke (SD) [cm]		Gem. Ausschreibung		
Mindestdicke	ÖNORM EN 12697-36	\geq SD -15%	<SD -15% bis -40% ¹⁾	<SD -40% ²⁾
Ebenheit [mm/ 4m]	RVS 11.06.62	\leq 4	5 bis 12	>12
Verdichtungsgrad [%]	ÖNORM EN 12697-8	\geq 98 ³⁾	97 bis 94 ⁴⁾	<94 ⁵⁾
1) Für ländlichen Straßen gilt <SD -15% bis -50% 2) Für ländlichen Straßen gilt <SD -50% 3) Für ländlichen Straßen gilt \geq 96 4) Für ländlichen Straßen gilt 95 bis 92 5) Für ländlichen Straßen gilt < 92				

3.8.2 Anforderungen in Bulgarien

Tabelle 3.8.3 Anforderungen an Tragschichten und Tragdeckschichten

Kennwerte	Prüfnorm	Tragschichten und Tragdeckschichten
Solldicke (SD) [cm]		Gem. Ausschreibung
Minstdicke	Technische Spezifikation	Solldicke -10% , max. - 15 mm
Ebenheit [mm/ 4m]	Methodik für Ebenheitsmessung	≤ 10
Ebenheit [mm/ 3m]	EN 13036-7	≤ 9
Verdichtungsgrad [%]	БДC EN 12697-6	≥ 97

Tabelle 3.8.4 Anforderungen an Deckschichten

Kennwerte	Prüfnorm	AB	SMA	DA
Solldicke (SD) [cm]		Gem. Ausschreibung		
Minstdicke	Technische Spezifikation	Solldicke -10% , max. - 6 mm		
Ebenheit [mm/ 4m]	Methodik für Ebenheitsmessung	≤ 6		
Ebenheit [mm/ 3m]	EN 13036-7	≤ 5		
Verdichtungsgrad [%]	БДC EN 12697-6	≥ 98	≥ 97	≥ 97

Die Ebenheit der Straßenschichten ist in Bulgarien nach EN 13036- 7 mittels 3m- Latte zu prüfen. Um einen Vergleich mit anderen Ländern zu ermöglichen, steht auch ein Wert für die 4m- Latte zur Verfügung und zulässige Werte sind nach der *Methodik für Ebenheitsmessung* [TECHNISCHE SPEZIFIKATION, 2009] zu ermitteln. Die Gegenüberstellung mit den Anforderungen in Österreich zeigt, dass in Bulgarien die Anforderungen an die Ebenheit nicht so streng sind, aber bei der Dicke sind die erlaubten Abweichungen geringer. Der minimale Verdichtungsgrad ist in beiden Ländern fast ohne Unterschied.

4 Laborversuche

4.1 Probenahme

Wie schon in Kapitel 2.3.2.1. erklärt, ist der Verdichtungsgrad das Verhältnis der Raumdichte von Bohrkernen zu der Raumdichte von Marshall-Probekörpern.

$$\text{Verdichtungsgrad } k = \frac{\rho}{\rho_{(E_1=50)}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (2.3.5.)$$

In Teil 27 der Technischen Prüfvorschriften für Asphalt, die auf der ÖNORM EN 12697-27 basieren, sind verschiedene Begriffe für Proben definiert:

- Einzelprobe: man erhält diese Probe durch einmalige Entnahme. Sie darf als Durchschnittsprobe gewertet werden, falls die Schicht homogen ist.
- Sammelprobe: sie besteht durch Vereinen von Einzelproben der gleichen Schicht. Sie wird als Durchschnittsprobe definiert, wenn die Einzelproben nach einem Plan entnommen werden.
- Teilprobe: sie entsteht aus verschiedenen Proben (Einzel-, Sammel- oder Durchschnittsproben), die auf mehrere gleichartige Teile getrennt sind.
- Laboratoriumsprobe: die Probe ist im Laboratorium hergestellt und dient für Laboruntersuchungen.
- Messprobe: Ermittlung eines Einzelwertes für eine Prüfung.

Bei Einzelprobenahme sind mindestens zwei und bei Durchschnittsproben mindestens fünf Bohrkern zu entnehmen. Der Durchmesser des Bohrkernes muss 100 mm zum Messen der Schichtdicke und 150 mm zur Bestimmung der Raumdichte betragen. Der Abstand zwischen Entnahmestelle und Fahrbahnrand muss mindestens 50 cm betragen. Bei Temperaturen über 18°C dürfen Bohrkern nur entnommen werden, wenn ausreichende Wasserkühlung zur Verfügung steht. [BULL-WASSER, 2011].

4.2 Marshall-Prüfung

4.2.1 Probekörperherstellung

Die Probekörper werden nach EN 12697- 30 hergestellt. Das Marshall- Verdichtungsgerät kann mit Stahlamboss oder Holzsockel ausgeführt sein. Abbildung 4.2.1. stellt das Gerät mit Stahlamboss schematisch dar.

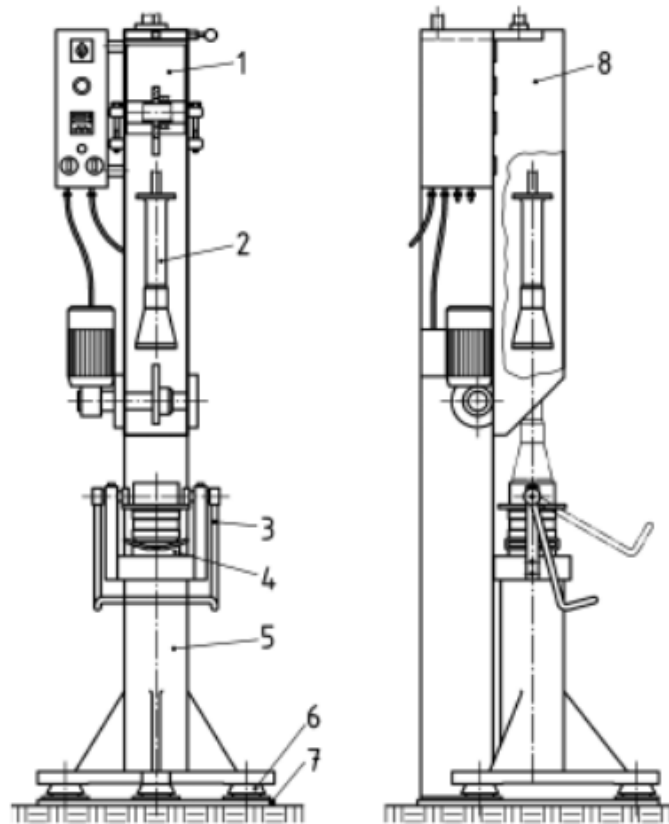


Abb. 4.2.1 Schema des Marshall-Verdichtungsgeräts [EN 12697- 30]

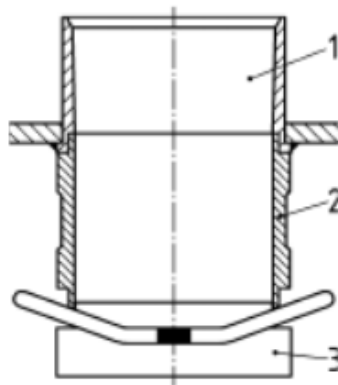


Abb. 4.2.2 Schema der Verdichtungsform [EN 12697- 30]

Das Mischgut muss die erforderliche Verdichtungstemperatur in einer Wärmekammer erreichen. Vor der Herstellung des ersten Probekörpers wird der Fallhammer erwärmt. Falls die Zeitspanne zwischen dem Herstellen zweier Probekörpern mehr als 10 Minuten beträgt, ist eine neue Erwärmung des Gerätes notwendig. Eine Scheibe aus nicht saugfähigem Papier wird auf den Boden der Verdichtungsform gelegt. Das Mischgut wird gleichmäßig in der Form verteilt und wird mit einer Filterscheibe bedeckt. Der Probekörper wird 4 Minuten lang verdichtet und nach

dem Aufsetzen des Fallhammers wird die festgelegte Anzahl von Schlägen (üblicherweise 50 Schläge, innerhalb 55 s bis 60 s) durchgeführt. Das Aufsatzstück wird entfernt, der Formzylinder wird umgedreht und der Körper wird wieder mit dieselber Schlaganzahl verdichtet. Der Probekörper wird nach dem Verdichten an der Luft auf 40°C abgekühlt und danach aus der Form entnommen [EN 12697- 30].

4.2.2 Durchführung der Marshall- Prüfung

Die Marshall- Prüfung wird nach EN 12697- 34 durchgeführt. Im Prüfbericht werden die Marshall- Stabilität, der Fließwert, der Marshall- Quotient und die Raumdichte des Probekörpers angegeben. Die Raumdichte wird nach EN 12697- 6 bestimmt. Zuerst ist die Masse des trockenen Probekörpers m mittels Waage zu bestimmen. Die Dichte des Wassers ist durch folgende Formel zu ermitteln

$$\rho_w = 100025205 + \left(\frac{7,59 \cdot t - 5,32 \cdot t^2}{10^6} \right) \quad [Mg / m^3] \quad (4.2.1.)$$

[EN 12697- 6]

t - Temperatur des Wassers

Der Probekörper ist im Wasserbad einzutauchen und das Gewicht m_2 ist zu messen. Die Raumdichte erhält man nach Formel 4.2.2

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \rho_w \quad [Mg / m^3] \quad (4.2.2)$$

[EN 12697- 6]

Für die Marshall- Prüfung sind die Prüfkörper 4 Stunden nach dem Entformen zu benutzen. Sie sind in einem Wasserbad, das mindestens 150 mm tief ist, eine Wasserpumpe enthält und eine Temperatur von 60°C hält, zu lagern. Die Zeitdauer ist zwischen 40 und 60 Minuten. Der Prüfkopf der Druckprüfmaschine ist auch im Wasserbad für 30 min oder im Wärmeschrank zu erwärmen. Nach der Aufwärmung ist der Kopf in die Druckprüfmaschine einzusetzen (siehe Abbildung 4.2.3). Ein Probekörper ist im Prüfkopf einzusetzen. Nach dem Versuch ist der abgedrückte Probekörper zu entfernen und das Kraft- Verformungs- Diagramm auszuwerten [EN 12697- 34].



Abb. 4.2.3 Marshall- Gerät

4.3 Vibrationsverdichter

Der Vibrationsverdichter dient zur Herstellung von Asphaltprobekörpern im Labor. Er besteht aus Schaft, Verdichtungsfuß mit Durchmesser 146 mm oder 102 mm, Form mit Innendurchmesser 152,5 mm und Länge 170 mm, Grundplatte und Einschnappklinke (siehe Abbildung 4.3.1)

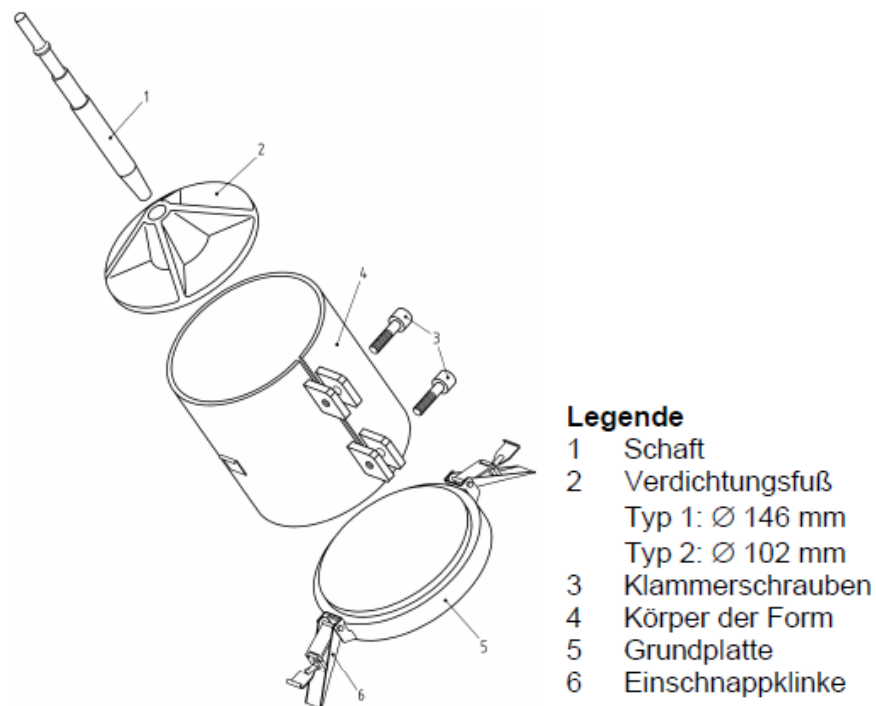


Abb. 4.3.1 Schema der Vibrationsverdichter [EN 12697- 32]

Das Mischgut wird nach EN 12697- 30 vorbereitet (siehe Kapitel 4.2.1), in die Form des Vibrationsverdichters eingefüllt und mit einer Papierscheibe bedeckt. Im Voraus wird der Verdichtungsfuß erhitzt, der Hammer wird mit dem Schaft festgehalten. Die Verdichtungszeit beträgt 2 Minuten. Die Grundplatte wird umgedreht und die Verdichtung wird wiederholt. Die Papierscheiben werden entfernt und der Probekörper wird nach 2-stündige Auskühlung herausgenommen. Die Raumdichte ist nach EN 12697- 6 zu ermitteln (siehe Kapitel 4.2.2) [EN 12697- 32].

4.4 Gyrator- Prüfung

Der Gyrator ist in Nordamerika und Frankreich ein Standardgerät zur Herstellung der Probekörper aus Asphalt im Labor und auch zur Bestimmung der Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut. Die Prüfung ist in der europäischen Normung EN 12697- 31 geregelt [WÖRNER, 2003].

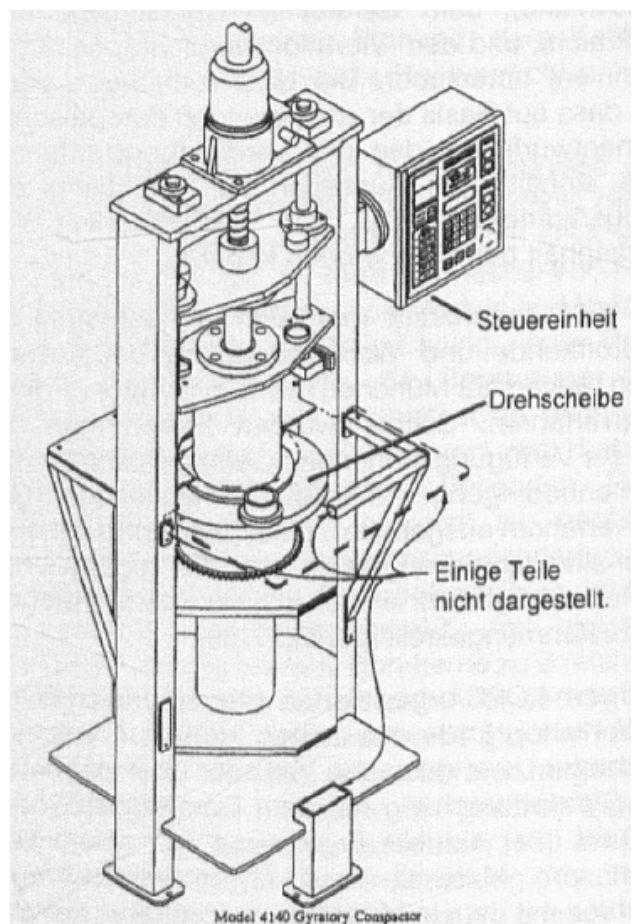


Abb. 4.4.1 Schema des Gyrator- Gerätes [WÖRNER, 2003]

Abbildung 4.4.1. stellt das Gyrator- Gerät dar, das Arbeitsprinzip ist in Abbildung 4.4.2 gezeigt. Der Probekörper (Position 1 in Abb.4.4.2) wird in einem Stahlzylindermantel (Position 4 in Abb. 4.4.2) mit einem Innendurchmesser von 100 mm eingestellt. Der Stempel (Position 2 in Abb.4.4.2) bildet den Kopf eines Kolbens einer Presse, die im Gerätenrahmen eingebaut ist.

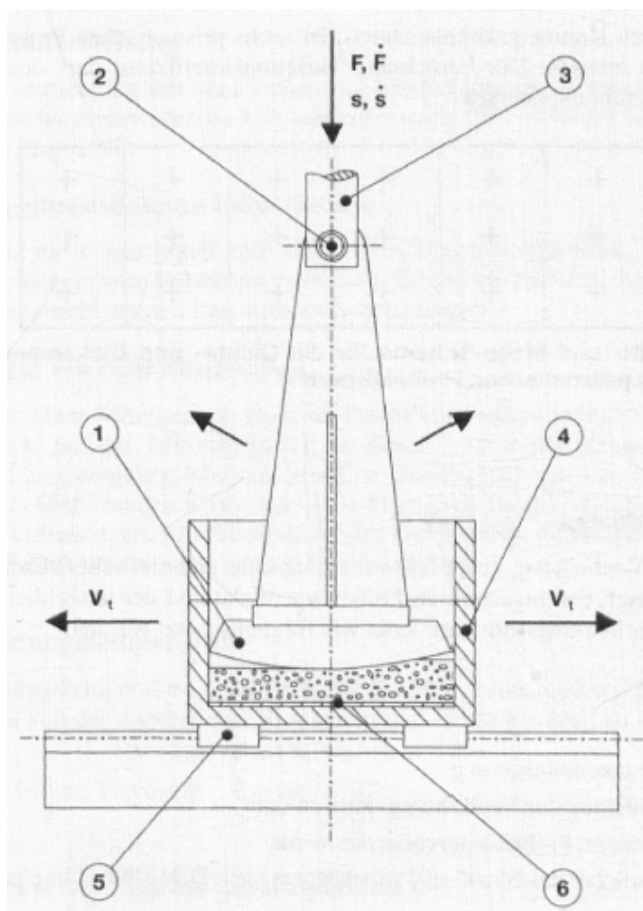


Abb. 4.5.1 Schema des Walzsegment- Verdichtungsgerät
[ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2003].

Mit Beginn des Versuches fährt das Segment nach unten. Die Verdichtung fängt mit dem Erreichen einer Druckkraft von 1 kN an. Nach dem Ende der Verdichtung ist das Papier zu entfernen, den Formkasten auf den Hubwagen zu ziehen und die Platte auskühlen zu lassen. Danach ist die Asphaltplatte zu entformen und die Plattendicke ist an 6 Stellen zu messen. Die Raumdichte und der Verdichtungsgrad sind festzustellen [EN 12697- 33].

Beim Gerät mit einem oder zwei Rädern mit Luftbereifung sind die Probenformen mit Abmessungen 500 x 180 mm, Höhe 100 mm oder 600 x 400 mm, Höhe 150 mm und die Radlast beträgt 1 kN bis 10 kN. Am Anfang und Ende der Verdichtung bleibt die Höhe der Radachse konstant, um eine ebenen Oberfläche der Probeplatte zu erhalten. In der Hauptphase ist die Last auf die Platte unveränderbar. Die Verdichtung ist über den gesamten Probekörper gleichmäßig [EN 12697- 33].

4.6 Vergleich der Laborverdichtungsgeräte

Alle Geräte haben ihre Vor- und Nachteile. Der Vergleich zwischen den verschiedenen Prüfungen ist mit Hilfe einiger Parameter möglich. Beim Schlagverdichter gemäß EN 12697-30 sind Entmischung und spezifische Kornorientierung in Abhängigkeit der Anzahl der Schläge möglich. Daher ist die Steifigkeit der Probekörper höher als jene von Bohrkernen und die

Probekörperabmessungen sind nicht für Gebrauchsverhaltens orientierte (GVO) Prüfungen geeignet.

Die Probekörperabmessungen des Gyratorprobekörpers sind für GVO Prüfungen geeignet und hier ist eine bessere Vergleichbarkeit mit der Feldverdichtung aufgrund der Knetwirkung gegeben. Die Nachteile sind eine mögliche inhomogene Hohlraumverteilung im Probekörper (infolge Lufteinschlüsse an der Unterseite der Probe) und Entmischung des Mischguts an den Rändern der Verdichtungsform.

Beste Vergleichbarkeit mit Feldverdichtung hat das Walzsektor-Verdichtungsgerät, da Verdichtungslast und -dauer bestmöglich gesteuert werden können. Der Nachteil dieses Gerätes ist die höhere Ermüdungsfestigkeit des Probekörpers im Vergleich zur Gyratorverdichtung.

4.7 Entwicklungen- Shear Press Box Compactor

In den letzten Jahren gibt es Entwicklungen neuer Technologien zum Prüfen von Asphalteigenschaften. Im Jahre 2009 wurde an der TU Delft der Shear Press Box Compactor vorgestellt.



Abb. 4.7.1 Shear Press Box Compactor [TU DELFT]

Er dient zur Herstellung von Asphaltprobeplatten mit Abmessungen 450 x 150 mm und Höhe zwischen 140 mm bis 180 mm. Die Vertikalkraft kann bis 130 kN erreichen und der Scherwinkel ist zwischen 1° bis 4°. Durch Scheren und Drücken kann die Verdichtung mittels Walzen simuliert werden.

PReSBOX COMPACTOR IN PROFILE

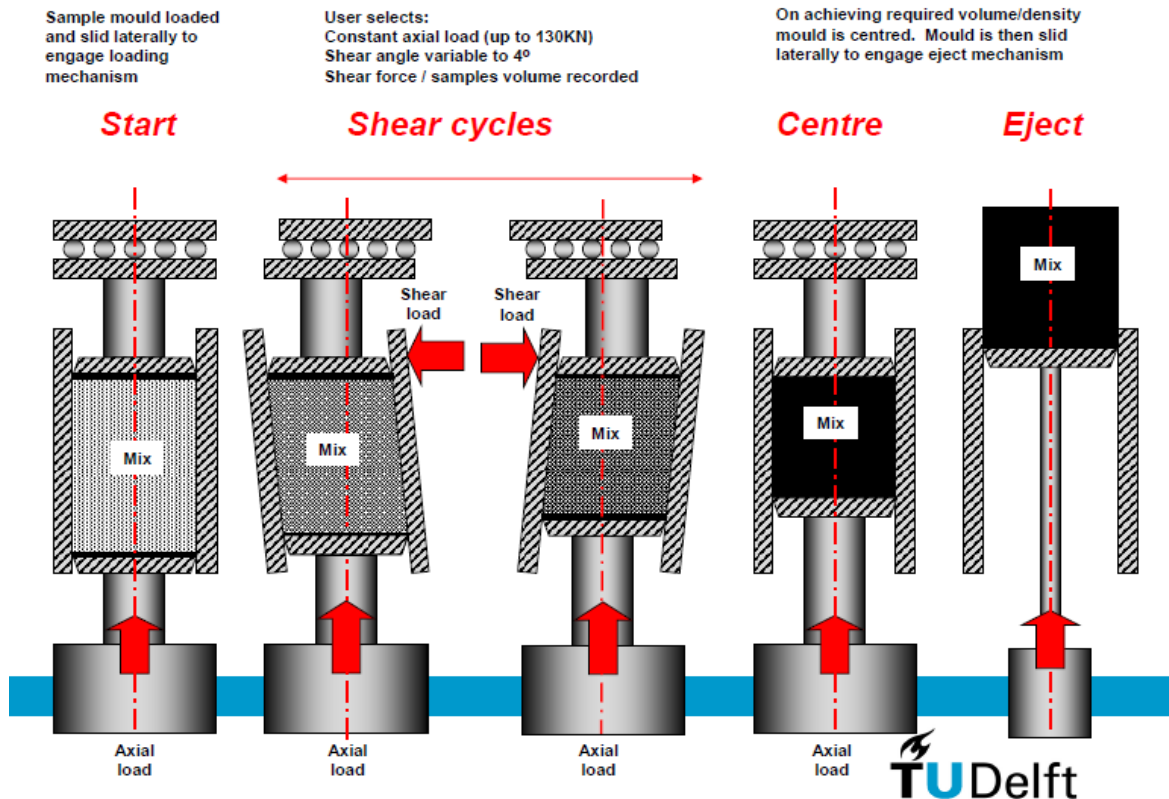


Abb. 4.7.2 Schema der Arbeit des Shear Press Box Compactor [TU DELFT]

Aus der fertigen Platte erhält man 4 rechteckige Prüfkörper mit Abmessungen 450×50×50 oder 3 zylindrische Prüfkörper mit Durchmesser 100 mm und Höhe 150 mm [TU DELFT].

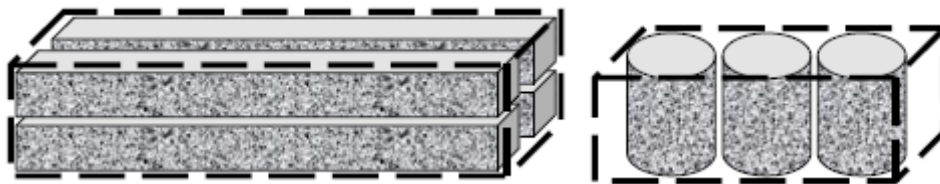


Abb. 4.7.3 Schema der möglichen Prüfkörper [TU DELFT]

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Vorgang der Verdichtung beim Einbau bzw. der Instandsetzung von Asphaltstraßen untersucht. Verdichtung ist die Verminderung des Volumens eines Stoffes unter Einwirkung einer Verdichtungsarbeit bei konstanter Masse.

Im ersten Teil werden theoretischen Grundlagen erläutert und Prozesse während des Verdichtungsvorgangs beschrieben. Zur Beschreibung der Verdichtungseigenschaften von Asphalt werden Begriffe, wie Verdichtungsgrad k , Verdichtungsindex K und Verdichtungsarbeit E definiert und statische, sowie dynamische Wirkfunktionen beschrieben.

Weiters wird die Ausführung im Feld detailliert behandelt und übliche Geräte und deren Wirkungsweise beschrieben. Dabei werden drei typische Walzentypen unterschieden: (i) statische Glattmantelwalzen (Verdichtung durch Einwirkung des Eigengewichts der Walze), (ii) Gummiradwalzen (Knetwirkung), und (iii) Vibrationswalzen (Verdichtung durch Vibration bzw. Oszillation der Bandage). Um eine sinnvolle Planung für eine erfolgreiche Verdichtung zu ermöglichen, sind Formeln zur Bestimmung der Ausführungsparameter Flächenleistung, Einbauzeit, Nutzleistungsfaktor und Anzahl der Geräte angegeben und Grundregeln für die Ausführung zusammengefasst. Außerdem werden gängige Methoden zur Verdichtungskontrolle beschrieben. In einem Vergleich der Anforderungen an die Verdichtung bituminöser Schichten in Österreich und Bulgarien sind die Unterschiede der Normenwerke herausgearbeitet.

Um in Laborversuchen an Asphaltprobekörpern realistische Bedingungen zu simulieren, sind Verdichtungsmethoden mit möglichst ähnlicher Wirkung wie im Feld notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit sind die gängigsten Verfahren beschrieben und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt. Außerdem wird auf Neuentwicklungen in diesem Bereich eingegangen.

Diese Arbeit soll den Stand der Technik der Verdichtung im Asphaltstraßenbau im Feld und im Labor zusammenfassen und einen Überblick über übliche Geräte und Grundregeln für die Ausführung geben.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1.1 Sieblinie nach Fuller [http://www.bauversuche.de/experimente/beton/gesteinskoernung.html] 3	3
Abb. 2.2.1 Numerische Funktionen der statischen Verdichtung [KÖNIG, 1994].....	6
Abb. 2.2.2 Scherspannungszwiebel [KÖNIG , 1994].....	7
Abb. 2.2.3 Grafische Darstellung der u- Werte bei einen Verhältnis zwischen dynamischen und statischen K- Werte [KÖNIG, 1994]	10
Abb. 2.3.1 Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einflussfaktoren [GESTRATA, 2002].....	11
Abb. 2.3.2 Raumdichte ρ zweier Mischgutvarianten mit unterschiedlicher Verdichtbarkeit c [ARAND, RENKEN, 1988].	12
Abb. 2.3.3 Graphisches Beispiel zur Erläuterung der beiden Größen Verdichtungsgrad und Verdichtungsindex [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].....	14
Abb. 2.3.4 Einfluss der Verdichtungstemperatur auf unterschiedlich zusammengesetzte Asphaltgemische [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].....	16
Abb. 2.3.5 Einfluss des Splittgehaltes auf den Verdichtungswiderstand T [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRABEN, 2005].....	17
Abb. 2.3.6 Abkühlung von verschieden dicken Asphaltlagen [HUTSCHENREUTHER, 2010].....	20
Abb. 3.1.1 Schematische Darstellung des Fertigers; Z- Zugteil, G- Gewicht der Bohle, W- Widerstand des Mischgutes, A- Anstellwinkel der Bohle. [GESTRATA, 2002].....	21
Abb. 3.1.2 Die drei Verdichtungszone [GESTRATA, 2002]	22
Abb. 3.1.3 Schematische Darstellung der Nivellierautomatik [GESTRATA, 2002]	23
Abb. 3.2.1 Der statische Walzdruck [FISCHER,1971]	24
Abb. 3.2.2 Vertikale und horizontale Kräfte einer gezogenen und selbstfahrenden Walze [FISCHER,1971]	25
Abb. 3.2.3 Zusammenhang zwischen Amplitude und Exzentrizität [HUTSCHENREUTHER, 2010].....	26
Abb. 3.2.4 Konstruktions- und Wirkprinzip des Oszillators [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].....	27
Abb. 3.2.5 Konstruktions- und Wirkprinzip der gerichteten Schwingung [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].....	2831

Abb. 3.5.1 Nomogramm zur Ermittlung der Anzahl der erforderlichen Walzübergängen [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].	32
Abb. 3.6.1 Walzschema mit richtigem Umsetzen [GESTRATA, 2002]	35
Abb. 3.6.2 Verdichten einer Quernaht [GESTRATA, 2002].	36
Abb. 3.6.3 Walzschema bei einer Längsnaht <i>heiß an kalt</i> [GESTRATA, 2002].	36
Abb. 3.6.4 Walzschema bei einer Längsnaht <i>heiß an heiß</i> [GESTRATA, 2002].	37
Abb. 3.6.5 Verdichtung in Kurvenbereich [GESTRATA, 2002]	37
Abb. 3.7.1 Prinzip der FDVK [www.bauwesen.tuwien.ac.at]	39
Abb. 3.7.2 Systemskizze einer Isotopensonde [GESTRATA, 2002]	39
Abb. 3.7.3 Systemskizze einer Magnetsonde [GESTRATA, 2002].	40
Abb. 3.7.4 Ebenheitsmessung mit der 4m-Messlatte [GESTRATA, 2002]	41
Abb. 3.7.5 Ebenheitsmessung mit Planograf [GESTRATA, 2002].	41
Abb. 4.2.1 Schema des Marshall-Verdichtungsgeräts [EN 12697- 30]	45
Abb. 4.2.2 Schema der Verdichtungsform [EN 12697- 30]	45
Abb. 4.2.3 Marshall- Gerät	47
Abb. 4.3.1 Schema der Vibrationsverdichter [EN 12697- 32].	47
Abb. 4.4.1 Schema des Gyrator- Gerätes [WÖRNER, 2003].	48
Abb. 4.4.2 Schema der Arbeit des Gyrators [WÖRNER, 2003].	49
Abb. 4.5.1 Schema des Walzsegment- Verdichtungsgerät [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2003].	50
Abb. 4.7.1 Shear Press Box Compactor [TU DELFT]	51
Abb. 4.7.2 Schema der Arbeit des Shear Press Box Compactor [TU DELFT]	52
Abb. 4.7.3 Schema der möglichen Prüfkörper[TU DELFT]	52

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.3.1 Koeffizienten a_0 bis a_6 [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].....	18
Tabelle 2.3.2 Koeffizienten a_0 bis a_6 [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].....	19
Tabelle 3.4.1 Nutzleistungsfaktor im Zusammenhang mit der Einbaugeswindigkeit	29
Tabelle 3.5.1 Koeffizienten und Exponenten für Berechnung der Formel (3.5.3) [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005].....	31
Tabelle 3.5.2 Anzahl der Walzübergänge für die Hauptverdichtung [HUTSCHENREUTHER, 2010]	33
Tabelle 3.8.1 Anforderungen an Tragschichten und Tragdeckschichten [RVS 08.016.01].	42
Tabelle 3.8.2 Anforderungen an Deckschichten [RVS 08.016.01].	42
Tabelle 3.8.3 Anforderungen an Tragschichten und Tragdeckschichten	43
Tabelle 3.8.4 Anforderungen an Deckschichten.....	43

LITERATURVERZEICHNIS

- [ARAND, RENKEN, 1988] ARAND W., RENKEN P. : Einfluss der Mischdauer und der Verdichtungstemperatur auf die Verdichtbarkeit von Walzasphaltgemischen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Technische Universität Braunschweig, Heft 523, 1988
- [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2001] ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN: Arbeitsleitung für den Einsatz radiometrischer Geräte für zerstörungsfreie Dichtemessungen auf Asphaltsschichten; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2001
- [ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN, 2005] ARBEITSGRUPPE ASPHALTSTRASSEN: Merkblatt für das Verdichten von Asphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 2005
- [ARBEITSGRUPPE ERD- UND GRUNDBAU, 1993] ARBEITSGRUPPE ERD- UND GRUNDBAU : Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau ; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, Ausgabe 1993
- [BRÄU, HARTMANN, 2004] BRÄU, HARTMANN,: Flächendeckende Prüfung der Verdichtung (FDVK)- baupraktische Umsetzung und verfahrensbezogene Verdichtungsanforderungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 897, Bonn, 2004
- [BULL-WASSER, 2011] BULL-WASSER R., SCHMIDT H., WEßELBORG H., ZTV/TL Asphalt StB Handbuch und Kommentar; Kirschbaum Verlag Bonn, 3. Auflage, 2011
- [EN 12697- 6] ÖNORM EN 12697-6 (2007): Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern
- [EN 12697- 30] ÖNORM EN 12697-30 (2007): Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Teil 30: Probenvorbereitung- Marshall-Verdichtungsgerät

-
- [EN 12697- 31] ÖNORM EN 12697-31 (2007): Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Teil 31: Herstellung von Probekörpern mit dem Gyrator-Verdichter
- [EN 12697- 32] ÖNORM EN 12697-32 (2007): Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Teil 32: Laborverdichtung von Asphalt mit einem Vibrationsverdichter
- [EN 12697- 33] ÖNORM EN 12697-33 (2007): Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Teil 33: Probestckvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgert
- [EN 12697- 34] ÖNORM EN 12697-34 (2007): Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt- Teil 34: Marshall-Prüfung
- [FIGGE, 1987] FIGGE H.: Verdichtungs- und Belastungsverhalten bituminöser Gemische; Aachen, 1987
- [FISCHER,1971] FISCHER F.: Die Verdichtung im Erdbau und bituminösen Straßenbau; Clark international marketing s.a., 1971
- [GESTRATA, 2002] GESTRATA: Asphalt Handbuch; Wien, 3. Auflage- September 2002
- [HUTSCHENREUTHER, 2010] HUTSCHENREUTHER J., THOMAS W. : Asphalt im Straßenbau; Kirschbaum Verlag Bonn, 2. Auflage, 2010
- [KÖNIG, 1994] KÖNIG F. : Verdichtung im Erd- und Straßenbau; Bauverlag GMBH, Wiesbaden und Berlin, 1994
- [KRZEMIEN, 1995] KRZEMIEN R.: Oszillierende Verdichtung und flächendeckende Kontrolle von Asphalt-schichten; Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straenforschung, Heft 445, Wien, 1995
- [LABOR DES INSTITUTS FÜR STRAßENBAU UND STRAßENERHALTUNG] LABOR DES INSTITUTS FÜR STRAßENBAU UND STRAßENERHALTUNG; Technische Universität Wien

-
- [RENKEN, 1980] RENKEN P. : Verdichtungswilligkeit von Asphaltgemischen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Technische Universität Braunschweig, Heft 296, 1980
- [RENKEN, 2002] RENKEN P. : Verdichtung von Walzasphalt im Laboratorium und im Felde; Strassenwesen, Technische Universität Braunschweig, Heft 11, 2002
- [SIVAPATHAM, 2012] SIVAPATHAM P. : Einfluss des Verdichtungsgrades auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltstraßen – Gebrauchsverhaltensorientierte Vergütungsmethode; Fachzentrum Verkehr, Bergische Universität Wuppertal, Heft 11, März 2012
- [TECHNISCHE SPEZIFIKATION, 2009] ТЕХНИЧЕСКА СПЕЦИФИКАЦИЯ; Национална агенция „Пътна инфраструктура“, София, 2009
- [TU DELFT] TECHNISCHE UNIVERSITÄT DELFT, 2009
- [WITT, 2009] WITT K.: Grundbau- Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren; Berlin, 2009
- [WÖRNER, 2003] WÖRNER T.: Beurteilung der asphalttechnologichen Kenngrößen von Gyratorprobekörpern im Hinblick auf die Anforderungen der ZTV Asphalt-StB und der ZTVT-stB; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 871, Bonn, 2003