

Verdichtung von Asphalt mit Hilfe selbstregelnder Walzen

– Möglichkeiten, Grenzen und Besonderheiten –

Dr.-Ing. Ronald Utterodt

Für Asphaltschichten werden beachtliche Nutzungszeiten gefordert, weshalb es u. a. darauf ankommt, nicht nur eine anforderungsgerechte, sondern auch eine möglichst gleichmäßige Raumdichte zu erzielen. Selbstregelnde Walzen leisten dazu in zunehmendem Maße einen beachtlichen Beitrag. In der Branche hat sich die Auffassung manifestiert, daß sich dabei der Verdichtungserfolg ganz automatisch einstellt. Mit dem vorliegenden Beitrag wird der Frage nachgegangen, ob diese Annahme berechtigt oder zu relativieren ist und welche Möglichkeiten sich abzeichnen, um eine noch gleichmäßigere Raumdichte erzielen zu können.

Einführung und Problemstellung

Die ökonomischen Zukunftschancen einer Gesellschaft sind abhängig von der Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems. Die überwiegend in Asphaltbauweise angelegten Verkehrswege bilden das Rückgrat für die Wirtschaftskraft einer Industrienation. Für Asphaltschichten werden in Deutschland – wie in vielen anderen Ländern auch – beachtliche Nutzungszeiten gefordert [22]. Die öffentlichen Haushalte können mittelfristig nur über die Verbesserung der Qualität – auch der Verdichtungsqualität der Asphaltstraßen – entlastet werden, weshalb neben der Planung vor allem der Ausführung der einzelnen Asphaltschichten besondere Aufmerksamkeit zuteil werden muß. Folglich kommt es darauf an, nicht nur eine anforderungsgerechte, sondern auch eine möglichst gleichmäßige Raumdichte zu erzielen.

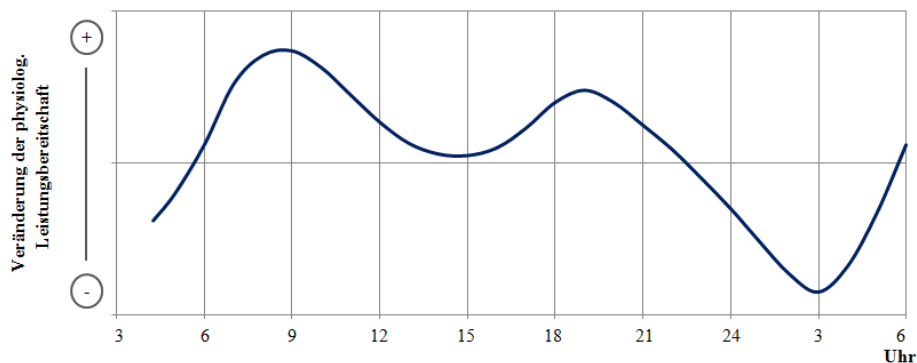


Abb. 1: Biologische Tagesrhythmik über 24 Stunden nach GRAF [11]

An die Walzenfahrer werden hohe Erwartungen gestellt: die Einhaltung eines vorgegebenen, starren Walzschemas sowie die Wahl des richtigen Verdichtungszeitpunktes. Auch wenn sich eine Verallgemeinerung der in *Abb. 1* wiedergegebenen, vagilanzbetonten Leistungskurve verbietet, so darf für Walzenfahrer gelten, daß deren Tätigkeit durchaus von einem Zustand erhöhter und dauerhafter Reaktionsbereitschaft geprägt ist. Das generelle Problem wird aber deutlich: mit der Einsatzdauer sinkt das Konzentrationsvermögen. Abgesehen von den ersten Walzübergängen können sich die Walzenfahrer bei Großprojekten ohne seitliche

Anhaltspunkte häufig nicht merken, wann sie umgesteuert haben, wo sie bereits waren und noch weniger, wie oft sie einen bestimmten Abschnitt bereits gewalzt haben.

Im Jahr 1966 von LAING [16] durchgeführte Untersuchungen zur Anzahl der Übergänge von drei Walzen bei gestaffeltem Einbau und 7,50 m Einbaubreite ohne Randeinfassung belegen ein sehr ungleichmäßiges Walzen der eingebauten Asphaltschicht:

Tab. 1: Anzahl der Walzübergänge beim Verdichten einer 7,50 m breiten Asphaltschicht nach [16]

	linke Fahrspur		rechte Fahrspur
im Querschnitt (Spurtreue)	20	4	4
	außen	mittig	außen
in Längsrichtung	13 ... 33		6 ... 21

Diese und weitere Untersuchungsergebnisse führten zu Beginn der 80er Jahre zu dem Gedanken, den ubiquitären Abweichungen von einem vorgegebenen Walzschema mit dem Einsatz selbstregelnder Walzen zu begegnen, um Kornzertrümmerungen gezielt vermeiden zu können. Auch wenn heute die Möglichkeit besteht, dem Walzenfahrer die Lage und die Anzahl der Überfahrten fortlaufend graphisch anzuzeigen, so kann nur mit dem Einsatz dieser Verdichtungstechnologie sichergestellt werden, daß zum einen die Vibration nur innerhalb des für das jeweilige Asphaltmischgut zulässigen Temperaturbereiches genutzt und zum anderen der dynamische Anteil an der Verdichtungsenergie ausschließlich dort bereitgestellt wird, wo dieser (noch) erforderlich und reduziert wird, wo er überflüssig ist. Im vorliegenden Beitrag wird ausschließlich zu aktiv selbstregelnden Tandem-Vibrationswalzen referiert; die mit dem Einsatz der Oszillationstechnik stattfindenden und mitunter als passive Regelung bezeichneten Vorgänge sind nicht Gegenstand der Betrachtung.

Mit Hilfe eines elektronischen Meß- und Regelsystems werden die veränderlichen Walzenparameter automatisch den Untergrundverhältnissen angepaßt, um zu verhindern, daß mit zunehmender Steifigkeit der Asphaltschicht die Bandage in den Sprungbetrieb geht, taumelt oder chaotische Bewegungen ausführt. Dabei bildet nach THURNER [24] die Bandage mit der zu verdichtenden Asphaltschicht und zunehmend mit dem Untergrund ein Interaktionssystem: Durch die Schwingungen der Bandage wird die Asphaltschicht ebenfalls in Schwingungen versetzt, die die Bandage wiederum in ihrem Bewegungsverhalten beeinflussen.

Herstellerbedingt wird die Erregung der Bandage nach unterschiedlichen Regelkriterien auf die zu verdichtende Asphaltschicht eingestellt. Während bei den Walzen der *Fa. Ammann* die erforderliche Verdichtungskraft sowohl über die Erregerfrequenz als auch über die Anpassung der bis auf Null reduzierbaren, nominalen Amplitude der mit einem Kreisschwinger ausgerüsteten Bandage stufenlos verändert werden kann, rüstet die *Fa. Bomag* ihre Walzen mit einem Richtschwinger aus, bei dem die Kraftrichtung variabel ist, aber die nominale Amplitude immer gleich bleibt. Bei gleichbleibender Kraftintensität beeinflusst die resultierende Kraftrichtung die Verdichtung in ihrer Tiefenwirkung, da sie sich von vertikal (maximale Wirkung) bis horizontal (geringe Wirkung) ändert. Zusätzlich kann auch eine Obergrenze für ein Steifigkeitsmodul eingestellt werden.

Es ist hinlänglich bekannt, daß Mängel an der Unterlage, Inhomogenitäten des Asphaltmischgutes, eine ungenügende Steuerung des Einbau- und Verdichtungsprozesses, der Einsatz mangelhafter Einbau- und Verdichtungstechnik sowie die häufig anzutreffenden Fehleinstellungen an den Förderaggregaten des Fertigers und den Verdichtungsaggregaten der Bohle zu einer unterschiedlichen Vorverdichtung in Längs- und Querrichtung der eingebauten Asphalttschicht führen. Dessenungeachtet besteht in der Branche die Auffassung, daß sich innerhalb der Grenzen des viskositätsabhängig zulässigen Temperaturbereiches eines Asphaltmischgutes der Verdichtungserfolg ganz automatisch einstellt.

Mit dem vorliegenden Beitrag wird zunächst der Frage nachgegangen, ob diese Annahme berechtigt oder zu relativieren ist. Basierend auf dem Arbeitsprinzip des Additions-Kreisschwingers wird unter Ausnutzung des Verdichtungsgesetzes ein theoretischer Ansatz zur Steigerung der Verdichtungsqualität entwickelt. In der Folge wird von der Wirksamkeit der maschinentechnischen Umsetzung dieses Gedankens anhand von Untersuchungsergebnissen aus praktischen Einsätzen auf Baustellen berichtet.

Arbeitsprinzip des Additions-Kreisschwingers und Einfluß der Regelungsdauer auf die Qualität der Verdichtung

Mit Hilfe der Vibration wird die innere Reibung des Asphaltmischgutes reduziert und durch das Zusammenspiel von statischem Gewicht und dynamischer Belastung die Lagerungsdichte erhöht. Maßgeblichen Einfluß auf die Verdichtungswirkung haben deshalb neben der statischen Linienlast insbesondere die schwingende Masse, die Erregerfrequenz und die Erregeramplitude.

Um den sich aus der jeweiligen Konzeption des Asphaltmischgutes und der Schichtdicke ergebenden Anforderungen an die Verdichtung gerecht werden zu können, sind Vibrationswalzen häufig so ausgelegt, daß der Walzenfahrer manuell zwischen den Kombinationen „große Amplitude/kleine Frequenz“ und „kleine Amplitude/große Frequenz“ wählen kann. Die Verstellung der Erregeramplitude wird bei einem Kreisschwinger dadurch ermöglicht, daß die beiden in den Abständen $r_{u,1}$ und $r_{u,2}$ unter dem Verstellwinkel α zur Bandagenachse angeordneten Exzentermassen $m_{u,1}$ und $m_{u,2}$ gegeneinander verdreht werden: im einfachsten Fall um 180° (s. Abb. 2). Herstellerabhängig ist es auch möglich, mit mehreren vorgegebenen Verstellwinkeln α_i zu arbeiten.

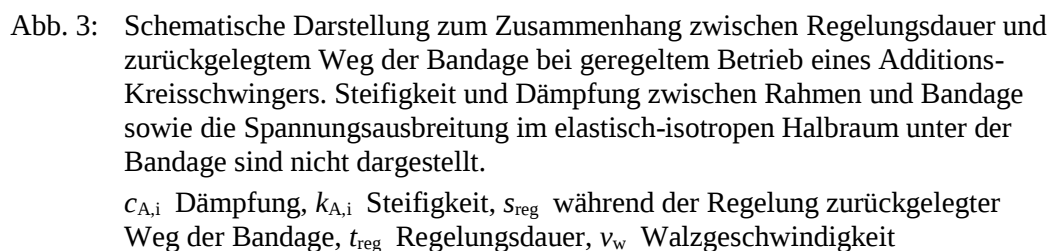
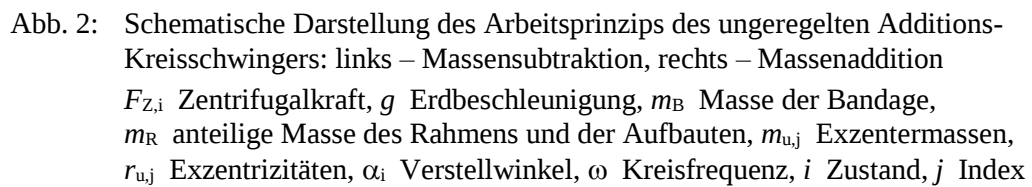
Die beiden Exzentermassen rotieren mit der Kreisfrequenz $\omega = 2 \pi f$ um die Bandagenachse und erzeugen eine Zentrifugalkraft $F_{Z,i}$, die die Bandage entlang ihres Umfanges zum Schwingen anregt:

$$F_{Z,i} = (m_{u,1} r_{u,1} + m_{u,2} r_{u,2} \cos \alpha_i) \omega^2 \quad (1)$$

mit $m_{u,1} > m_{u,2}$ und

$\alpha_i \{0^\circ; 180^\circ\}$ im unregelmäßigen sowie $\{0^\circ; 180^\circ\}$ im geregelten Betrieb.

Durch die periodischen Schwingungen werden sich räumlich ausbreitende, mechanische Wellen erzeugt.



Zur theoretischen Klärung der Frage, inwieweit selbstregelnde Walzen in der Lage sind, die Unterschiede in den Raumdichten aus der Vorverdichtung ausgleichen zu können, ist in der *Abb. 3* der Zusammenhang zwischen der Regelungsdauer und dem im gleichen Zeitraum von der Bandage zurückgelegten Weg schematisch dargestellt.

Die Walzenbandage soll einen Abschnitt der zu verdichtenden Asphaltsschicht mit der partiellen Steifigkeit $k_{A,1} < k_{A,Soll}$ erreichen. Um die Steifigkeit zu steigern, ist eine größere Verdichtungsenergie erforderlich: die Zentrifugalkraft $F_{Z,i}$ ist zu erhöhen. Dazu wird der Verstellwinkel α_i zwischen den beiden Exzentermassen $m_{u,1}$ und $m_{u,2}$ automatisch von α_1 auf α_2 verringert, wobei die anwendungsspezifisch maximal mögliche Verstellung genutzt wird.

Die von der Bandage in Abhängigkeit von ihrer Beschleunigung periodisch erzeugten Wellen, deren Intensität sich proportional zum Quadrat der Amplitude verhält, transportieren Energie in die zu verdichtende Asphaltsschicht und wirken auf jedes Volumenelement des von den Rändern der Einsenkungsmulde entlang der Schichtoberfläche begrenzten und sich mit der Weiterfahrt der Walze fortlaufend verschiebenden elastisch-isotropen Halbraumes ein. So werden auch die noch unter Druck- und Scherspannungen stehenden Volumenelemente des – in Walzrichtung gesehen – hinter der Bandagenachse liegenden Abschnittes des Halbraumes durch die Vibrationsenergie weiterhin angesprochen, wodurch das von einer selbstregelnden Walze angepaßte Leistungsangebot ortsnah wirksam werden kann. Allerdings nimmt die Leistungsdichte mit dem reziproken Quadrat des Abstandes vom Kontaktbereich der Bandage mit der Asphaltsschicht ab.

Bei hohen Walzgeschwindigkeiten v_w und/oder einer aus großen Steifigkeitsunterschieden Δk_A resultierenden längeren Regelungsdauer t_{reg} erfolgt die Antwort des Systems auf den Steifigkeitszustand $k_{A,1}$ in einem Abschnitt mit der Steifigkeit $k_{A,2}$, die zufällig mit der Steifigkeit $k_{A,1}$ übereinstimmen kann, sich aber in der Regel mehr oder weniger von dieser unterscheiden wird ($k_{A,1} \neq k_{A,2}$) und der für den Steifigkeitszustand $k_{A,1}$ erforderlichen Verdichtungsenergie nicht bedarf.

Es kommt folglich darauf an, eine Vorgehensweise zu entwickeln, damit die Antwort des Systems auf eine Abweichung von der Soll-Steifigkeit immer möglichst in unmittelbarer Nähe des betreffenden Abschnittes erfolgen kann. Dazu bieten sich verfahrens- und geräte-technische Lösungen sowie deren Kombinationen an.

Theoretischer Ansatz zur Steigerung der Verdichtungsqualität

Zunächst einmal wird aus *Abb. 3* deutlich, daß der während der Regelung zurückgelegte Weg s_{reg} der Bandage der Walzgeschwindigkeit v_w proportional ist, weshalb eine Steigerung der Walzgeschwindigkeit zu einer Verschärfung des Problems führt:

$$s_{reg} \sim v_w : \nearrow v_w \Rightarrow \nearrow s_{reg} . \quad (2)$$

Die Änderung des Verstellwinkels α verhält sich proportional zu den Steifigkeitsunterschieden Δk_A . Folglich bedingt ein größerer Steifigkeitsunterschied eine größere Änderung des

Verstellwinkels und führt über die damit verbundene längere Regelungsdauer t_{reg} zu einer größeren Wegstrecke s_{reg} :

$$\Delta\alpha \sim \Delta k_A: \nearrow \Delta k_A \Rightarrow \nearrow \Delta\alpha \Rightarrow \nearrow t_{reg} \Rightarrow \nearrow s_{reg} . \quad (3)$$

Es ist deshalb zwingend erforderlich, der Planung des Einbauprozesses besondere Sorgfalt zuteil werden zu lassen und insbesondere auf das Zusammenspiel zwischen Einbau- und Verdichtungsleistung zu achten. Die herstellerseitigen Empfehlungen bez. der Einstellung der Verdichtungsaggregate an der Einbaubohle (Stampfer, Vibration, Hochverdichtung) sind strikt zu beachten.

Die Verdichtbarkeit von Walzasphaltgemischen ist eine temperaturabhängige Eigenschaft. Dabei haben sowohl die Einbau- als auch die Verdichtungstemperatur den bedeutendsten Einfluß auf den Verdichtungserfolg [9]. Die physikalischen Zusammenhänge werden mit nachstehender Formel beschrieben [20]:

$$\rho(E_1) = \rho_\infty - (\rho_\infty - \rho_0) e^{-\frac{E_1}{C}} , \quad (4)$$

mit $\rho(E_1)$	Raumdichte in Abhängigkeit von der aufgewendeten Verdichtungsarbeit [g/cm ³],
E_1	Anzahl der Doppel-Verdichtungsschläge [42 Nm],
ρ_0	rechnerische Anfangsraumdichte [g/cm ³],
ρ_∞	rechnerisch maximal erreichbare Raumdichte [g/cm ³] und
C	Verdichtungswiderstand [42 Nm].

Die Konstante C im negativen Exponenten der Exponentialfunktion kann als Maß für die Verdichtbarkeit herangezogen werden und beschreibt den Verlauf der Krümmung der Verdichtungskurve. Für die Walzverdichtung gelten prinzipiell dieselben Gesetzmäßigkeiten. Die mit einer bestimmten Verdichtungsarbeit erzielbare Dichteänderung hängt vom momentanen Dichtezustand ab.

Die Dichte einer Asphaltschicht nimmt mit jedem Walzübergang bis zu einem bestimmten Grad zu. Zu Beginn der Verdichtung ist die Dichtezunahme vergleichsweise groß, wird mit fortschreitender Verdichtung immer kleiner und strebt einem Grenzwert zu [19].

RICHTER [21] hat im Rahmen eines Laborversuches einen Asphaltbeton AB 0/11 mit einem Bindemittel B 65 unter systematischer Variation der Verdichtungsenergie (Anzahl der Schläge) und der Mischguttemperatur mit dem Marshall-Hammer verdichtet, Abb. 4. Die zuvor erläuterten physikalischen Zusammenhänge werden aus der Graphik deutlich. Insbesondere ist für den theoretischen Ansatz zur Steigerung der Verdichtungsqualität die Erkenntnis wichtig, daß bei dem 150 °C heißen Asphaltmischgut das gleiche Ergebnis ($k = 98,3 \%$) mit nur etwas mehr als einem Viertel der bei 120 °C aufgewendeten Verdichtungsarbeit erreicht werden konnte.

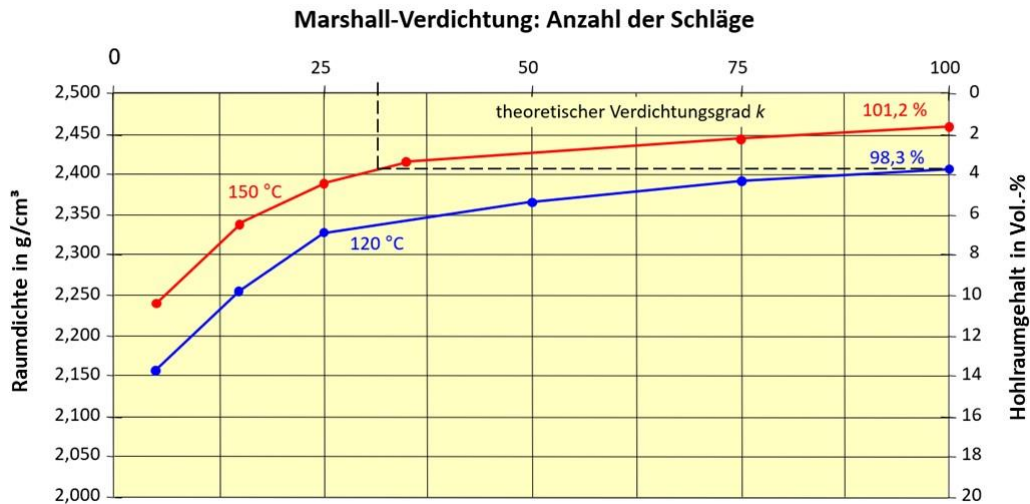


Abb. 4: Dichteverlauf an Marshall-Probekörpern aus einem Asphaltmischgut AB 0/11, B 65 in Abhängigkeit von der Anzahl der Verdichtungsschläge (Darstellung aus [21], verfasserseitig reduziert auf die Untersuchungsergebnisse mit 120 und 150 °C heißem Asphaltmischgut)

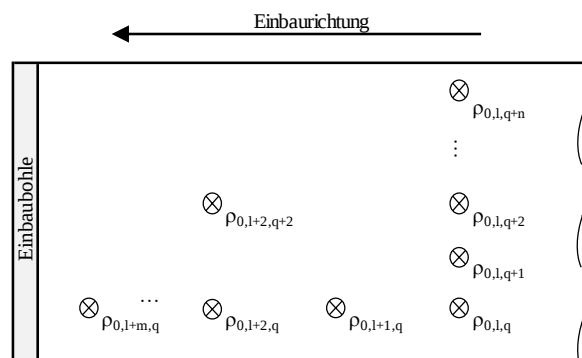
Wie bereits oben angesprochen, fällt die – hier als Raumdichte unmittelbar hinter der Bohle verstandene – Anfangsraumdichte ρ_0 an jeder Stelle m, n der eingebauten Asphaltschicht sowohl in Einbaurichtung l als auch quer q zu derselben mehr oder weniger unterschiedlich aus, so daß gem. Abb. 5 gilt:

$$\rho_{0,l,q} \neq \rho_{0,l+m,q+n} . \quad (5)$$

Für die folgenden Ausführungen soll in vereinfachter Form gelten:

$$\rho_{0,i} \neq \rho_{0,i+n} . \quad (6)$$

Abb. 5: Darstellung zur Verdeutlichung der Positionen unterschiedlicher Anfangsraumdichten ρ_0 längs l und quer q zur Einbaurichtung



Bei der Verdichtung eines Asphaltgemisches im Laboratorium wird unter der theoretischen Voraussetzung eines isothermen Verdichtungsprozesses der Verdichtungs Widerstand C als konstant angenommen. Obwohl diese Annahme für die Verdichtung im Laboratorium gerechtfertigt ist [3], muß es erlaubt sein, sie für die Verdichtung im Feld in Frage zu stellen. Die Vertikalkomponente dT/dz der resultierenden Temperaturgradienten unterliegt neben Art und Sorte des Asphaltmischgutes insbesondere den Einflüssen der Dicke der zu verdichtenden Asphaltschicht und des Wetters. Vor dem Hintergrund der Bestrebungen, die von den

Walzen angebotene und vom zu verdichtenden Asphaltmischgut konsumierte Verdichtungsenergie bewerten zu können, ist hier Forschungsbedarf angezeigt. Für die weitere Betrachtung der hier referierten Zusammenhänge soll bis zur Klärung dieser Frage an der Annahme festgehalten werden, daß sich C auch bei der Verdichtung im Feld nicht ändert.

Anhand der Liniendiagramme der Abb. 6 und der dazugehörigen Tabelle sind die rechnerisch bestimmten Verläufe der Raumdichten an zwei durch die gleiche Endraumdichte $\rho_{\infty} = 2,500 \text{ g/cm}^3$ sowie die Verdichtungswiderstände $C_1 = 12 \text{ [42 Nm]}$ (schwarze Linien) und $C_2 = 30 \text{ [42 Nm]}$ (rote Linien) charakterisierten Asphaltmischgütern in Abhängigkeit von deren Anfangsraumdichten $\rho_{0,i}$ und der Anzahl der Walzübergänge n veranschaulicht.

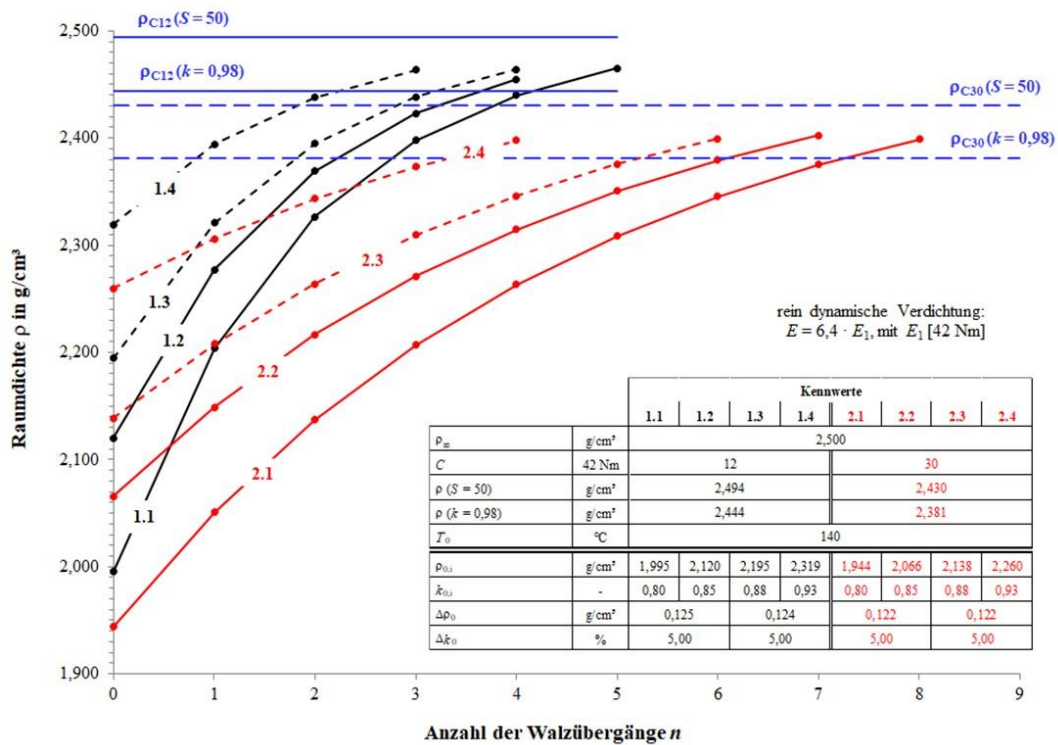


Abb. 6: Darstellung des prinzipiellen Dichteverlaufes zweier Asphaltmischgüter mit unterschiedlichen Verdichtungswiderständen C in Abhängigkeit von der Anfangsraumdichte ρ_0 und der Anzahl der Walzübergänge n mit der Verdichtungsenergie E pro Walzübergang (Materialkennwerte aus [19], Bild 4, Erläuterungen im nachfolgenden Text)

$\rho (S = 50)$ Marshall-Raumdichte, $\rho (k = 0,98)$ auf die Marshall-Raumdichte bezogenes Dichteniveau, $\rho (k \geq 0,98)$ dem geforderten Dichteniveau entsprechende Raumdichte, T_0 Anfangsverdichtungstemperatur, k_0 Anfangsverdichtungsgrad (Vorverdichtung), k Verdichtungsgrad, $n (k \geq 0,98)$ erforderliche Anzahl der Walzübergänge, um ein über den Verdichtungsgrad k definiertes Dichteniveau zu erreichen, Δ Differenz, i Zustand

Für jede der beiden Asphaltmischgutvarianten wurden Anfangsraumdichten gewählt, die einen normalen und einen höheren Bereich der Vorverdichtung durch die Einbaubohle repräsentieren (durchgängige bzw. unterbrochene Linien) und sich innerhalb dieser Bereiche um einen auf die jeweilige Marshall-Raumdichte $\rho (S = 50)$ bezogenen Grad der Vorverdich-

tung von $\Delta k_0 = 5,00 \%$ unterscheiden: Linien 1.1 und 1.2 sowie 2.1 und 2.2 mit $k_{0,i} = 0,80$ bzw. $0,85$ und Linien 1.3 und 1.4 sowie 2.3 und 2.4 mit $k_{0,i} = 0,88$ bzw. $0,93$.

Um für die fachliche Diskussion besser geeignete, gleichmäßige Kurvenverläufe erhalten zu können und die theoretischen Betrachtungen zur Ansprache der Verdichtung nicht zu komplizieren, wird sowohl in dieser Abbildung als auch in den folgenden *Abbn. 8 bis 9* die empfohlene Vorgehensweise, den ersten Walzübergang statisch¹ auszuführen, nicht abgebildet. Auch die Kombination von statischen und dynamischen² Walzübergängen soll zunächst unberücksichtigt bleiben (vgl. [15], Tab. 5). Der Einfachheit halber sei deshalb die in die beiden zu verdichtenden Asphaltmischgüter eingeleitete Verdichtungsenergie E pro Walzübergang (zwei Bandagenübergänge) konstant und soll dem 6,4fachen der Verdichtungsarbeit E_1 [42 Nm] eines Schlages je Probekörperseite im Laboratorium entsprechen. Aus der *Abb. 6* wird deutlich: Je höher die Anfangsraumdicke $\rho_{0,i}$ (Grad der Vorverdichtung) ist, desto weniger Walzübergänge $n(k)$ sind unter der Voraussetzung einer gleichbleibenden Verdichtungsenergie E erforderlich, um das Dichteniveau ρ ($k = 0,98$) der Marshall-Raumdicke zu erreichen.³

Mit der Walzverdichtung soll bei einer Temperatur $T_0 = 140 \text{ °C}$ begonnen und ein möglichst gleichmäßiger Dichtezustand auf dem jeweiligen Dichteniveau ρ ($k \geq 0,98$) erzielt werden, weshalb die Kurvenverläufe mit den Anfangsraumdichten $\rho_{0,1.1}/\rho_{0,1.2}$ und $\rho_{0,1.3}/\rho_{0,1.4}$ für das mit $C_1 = 12$ [42 Nm] leicht sowie $\rho_{0,2.1}/\rho_{0,2.2}$ und $\rho_{0,2.3}/\rho_{0,2.4}$ für das mit $C_2 = 30$ [42 Nm] schwer verdichtbare Asphaltmischgut paarweise betrachtet werden (s. *Abb. 8*), so als ob die beiden jeweils zu untersuchenden Abschnitte mit unterschiedlicher Anfangsraumdicke (Vorverdichtung) quasi in einer Walzbahn hintereinander angeordnet wären, s. *Abb. 7*.

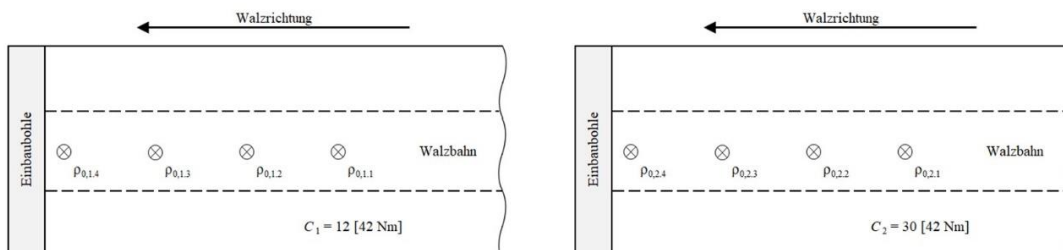


Abb. 7: Angenommene Anordnung der Meßpunkte $\rho_{0,1.1}$ bis $\rho_{0,1.4}$ und $\rho_{0,2.1}$ bis $\rho_{0,2.4}$ in jeweils einer Walzbahn eines leicht und eines schwer verdichtbar eingebauten Asphaltmischgutes mit den Verdichtungswiderständen C_1 bzw. C_2

Für die paarweisen Betrachtungen soll gelten:

$$\rho_{0,1.1} < \rho_{0,1.2} < \rho_{0,1.3} < \rho_{0,1.4} \quad (7)$$

¹ statische Verdichtung: Walzen ohne Vibration

² dynamische Verdichtung: Walzen mit Vibration

³ Es wird mit Nachdruck darauf hingewiesen, daß die im Feld in der Regel zu erbringenden 98 % Verdichtung nach Marshall eine Mindestanforderung darstellen und 100 % anzustreben sind.

und

$$\rho_{0,2.1} < \rho_{0,2.2} < \rho_{0,2.3} < \rho_{0,2.4} \quad (8)$$

In der Abb. 8 zeigen die durchgängig und gestrichelt dargestellten Linien mit den ausgefüllten Kreisen an, wie viele Walzübergänge erforderlich sind, um das jeweilige Dichteniveau ρ ($k = 0,98$) zu erreichen. Sich anschließende strichpunktierte Linien mit leeren Kreisen verdeutlichen, wie viele Walzübergänge trotz einer höheren Anfangsraumdicke zusätzlich ausgeführt werden müssen, um bei paarweiser Betrachtung (durchgängige/durchgängige und gestrichelte/gestrichelte Linien) für die korrespondierende niedrigere Anfangsraumdicke das Erreichen des geforderten Dichteniveaus gewährleisten zu können.

Die Ergebnisse der paarweisen Betrachtungen innerhalb des normalen und des höheren Bereiches der Vorverdichtung werden im unteren Teil der Tabelle wiedergegeben und sollen anhand des Vergleiches der Dichteverläufe der Linien 1.1 und 1.2 exemplarisch erläutert werden.

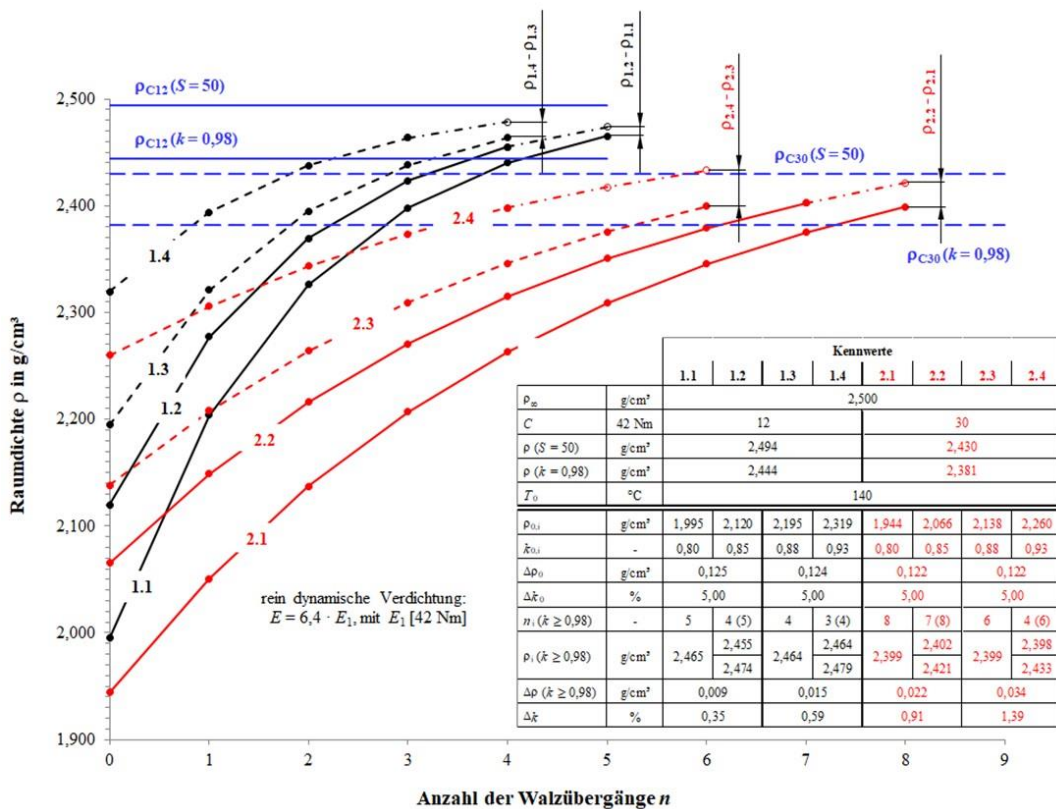


Abb. 8: Paarweise Betrachtung des prinzipiellen Dichteverlaufes zweier Asphaltmischgüter mit unterschiedlichen Verdichtungswiderständen C in Abhängigkeit von der Anfangsraumdicke ρ_0 und der Anzahl der Walzübergänge n mit der Verdichtungsenergie E pro Walzübergang (Materialkennwerte aus [19], Bild 4)

Bei einer angenommenen Anfangsraumdicke $\rho_{0,1.2} = 2,120 \text{ g/cm}^3$ des leicht verdichtbaren Asphaltmischgutes sind $n_{1.2} (k \geq 0,98) = 4$ Walzübergänge erforderlich, um mit der Dichte $\rho_{1.2} (k \geq 0,98) = 2,455 \text{ g/cm}^3$ das Dichteniveau $\rho_{C1} (k = 0,98) = 2,444 \text{ g/cm}^3$ der Marshall-Raumdicke von $2,494 \text{ g/cm}^3$ gewährleisten zu können. Auf Grund der um $0,125 \text{ g/cm}^3$

geringeren Anfangsraumdichte $\rho_{0,1.1}$ wird das geforderte Dichteniveau mit $\rho_{1.1}$ ($k \geq 0,98$) = 2,465 g/cm³ erst nach fünf Walzübergängen erreicht und überschritten. Bei paarweiser Betrachtung sind notwendigerweise in beiden Fällen fünf Walzübergänge auszuführen, was zur Folge hat, daß die Dichte $\rho_{1.2}$ von 2,455 weiter auf 2,474 g/cm³ ansteigt. Der zwischen den beiden Anfangsraumdichten bestehende Dichteunterschied von 0,125 g/cm³ ($\Delta k_0 = 5,00 \%$) wird mit fünf Walzübergängen auf $\Delta \rho$ ($k \geq 0,98$) = 0,009 g/cm³ ($\Delta k = 0,35 \%$) abgebaut.

Liegen die Anfangsraumdichten im höheren Bereich der Vorverdichtung, fallen die Unterschiede zwischen den Endraumdichten mit 0,015 g/cm³ etwas größer aus.

Stellt man die gleichen Betrachtungen für die schwer verdichtbare Asphaltmischgutvariante an, so stellen sich ähnliche Ergebnisse ein. Die Unterschiede zwischen den Endraumdichten sind mit 0,022 und 0,034 g/cm³ vergleichsweise größer.

Wenn also bei unterschiedlichem Ausgangsniveau der Raumdichten eines Asphaltmischgutes mit $\rho_{0,i} < \rho_{0,i+1}$ die eingeleitete Verdichtungsenergie E gleich bleibt und mit der Verdichtung bei der üblichen, bindemittelspezifischen Temperatur T_0 begonnen wird, dann steigt das Verdichtungs niveau von $\rho_{0,i}$ auf $\rho_i(E)$ im Vergleich zu $\rho_{0,i+1}$ auf $\rho_{i+1}(E)$ stärker an und die Unterschiede zwischen den nach einem Walzübergang erzielten Raumdichten nehmen ab: $|\Delta \rho(E)| < |\Delta \rho_0|$.

$$|\Delta \rho_0| = (\rho_{0,i+1} - \rho_{0,i}) \xrightarrow{E = \text{const}} (\uparrow \rho_{i+1}(E) - \uparrow^3 \rho_i(E)) \Rightarrow \downarrow^2 |\Delta \rho(E)|, \quad (9)$$

mit $\downarrow^2 = \downarrow\downarrow$ und $\uparrow^3 = \uparrow\uparrow\uparrow$.

Im Vergleich zur Gl. (9) führt ein hoher Verdichtungswiderstand C bei den gleichen Unterschieden zwischen den Anfangsraumdichten $\Delta \rho_0$ zu einem geringeren Abbau der Unterschiede zwischen den nach einem Walzübergang erzielten Raumdichten $\Delta \rho(E)$:

$$|\Delta \rho_{C1}(E)| < |\Delta \rho_{C2}(E)| < |\Delta \rho_0|.$$

$$|\Delta \rho_0| = (\rho_{0,i+1} - \rho_{0,i}) \xrightarrow{E = \text{const}, \uparrow C} (\uparrow \rho_{i+1}(E) - \uparrow^2 \rho_i(E)) \Rightarrow \downarrow |\Delta \rho(E)| \quad (10)$$

Je höher bei gleichen Unterschieden zwischen den Anfangsraumdichten $\Delta \rho_0$ deren Niveau (Grad der Vorverdichtung) ist, desto weniger Walzübergänge $n(k)$ sind unter der Voraussetzung einer gleichbleibenden Verdichtungsenergie E erforderlich, um das Dichteniveau ρ ($k = 0,98$) der Marshall-Raumdichte zu erreichen und um so geringer ist deshalb im Vergleich zur Gl. (9) der Abbau der Unterschiede aus den Anfangsraumdichten:

$$\begin{aligned} |\Delta \rho_0| &= (\uparrow \rho_{0,i+1} - \uparrow \rho_{0,i}) \xrightarrow{E = \text{const}, \uparrow \rho_0 \Rightarrow \downarrow n(k)} (\rho_{i+1}(k \geq 0,98) - \uparrow \rho_i(k \geq 0,98)) \\ &\Rightarrow \downarrow |\Delta \rho(k \geq 0,98)| \end{aligned} \quad (11)$$

Untersuchungsergebnisse aus einem FGSV-Forschungsvorhaben [28] belegen beim Einbau einer 8 cm dicken Asphaltbinderschicht aus einem AC 16 B S, 25/55-55 A und einer 4 cm dicken Asphaltdeckschicht aus einem SMA 11 S, 25/55-55 A Schwankungen in der Vorver-

dichtung der Asphaltbinderschicht zwischen 85,6 und 93,7 % und im Bereich der Asphalt-deckschicht zwischen 76,3 und 92,7 % nach Marshall.

Erweitert man die paarweisen Betrachtungen auf die – deutlich größere Unterschiede zwischen den Anfangsraumdichten repräsentierenden – Kombinationen 1.1/1.3, 1.1/1.4, 2.1/2.3 und 2.1/2.4 (s. Abb. 9), sind im Vergleich zu den Kombinationen 1.1/1.2 bzw. 2.1/2.2 noch mehr Walzübergänge erforderlich, um in jedem Fall das jeweils geforderte Dichte-niveau garantieren zu können. Diese zusätzlich erforderlichen Walzübergänge werden durch einen sich anschließenden punktierten Linienzug mit leeren Kreisen verdeutlicht. Auch hier wird die zunehmend ausgleichende Wirkung der Verdichtungsfunktion gem. Gl. (4) offen-sichtlich, indem größere Unterschiede zwischen den Anfangsraumdichten vergleichsweise stärker abgebaut werden. Aber dennoch nehmen die verbleibenden Unterschiede zwischen den Endraumdichten zu: $|\Delta\rho_{1.4/1.1}(k \geq 0,98)| > |\Delta\rho_{1.3/1.1}(k \geq 0,98)| > |\Delta\rho_{1.2/1.1}(k \geq 0,98)|$ bzw. $|\Delta\rho_{2.4/2.1}(k \geq 0,98)| > |\Delta\rho_{2.3/2.1}(k \geq 0,98)| > |\Delta\rho_{2.2/2.1}(k \geq 0,98)|$.

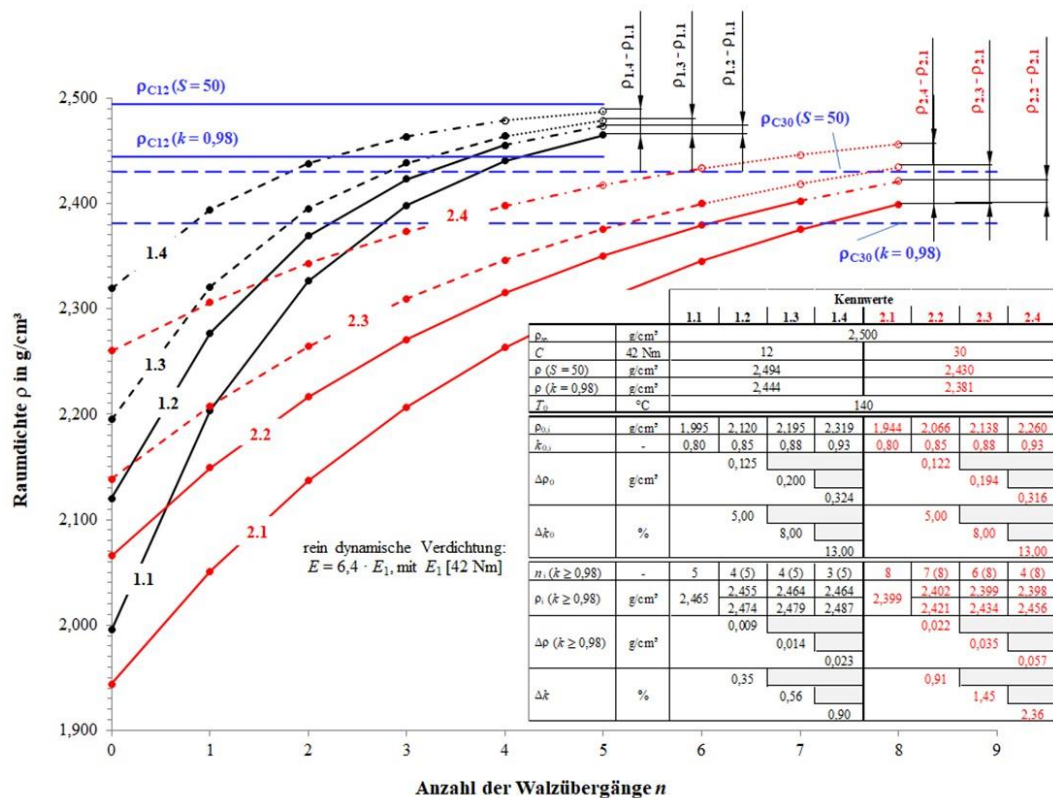


Abb. 9: Paarweise Betrachtung des prinzipiellen Dichteverlaufes zweier Asphaltmischgüter mit unterschiedlichen Verdichtungswiderständen C und größeren Unterschieden zwischen den Anfangsraumdichten ρ_0 (Materialkennwerte aus [19], Bild 4)

Ab einem bestimmten Niveau der Anfangsraumdichte können nach TAPPERT deren Ungleichmäßigkeiten nicht mehr ausgeglichen werden [23], weshalb beim Einsatz von Hochverdichtungsbohlen deren Leistungsangebot wohlüberlegt abgerufen werden sollte. Hier ist über die von ARAND U.A. [4, 5] gewonnenen Erkenntnisse hinaus Forschungsbedarf angezeigt, weil – von wenigen Ausnahmen abgesehen – mittlerweile in der Branche die Auffas-

sung vertreten wird, daß eine möglichst hohe Vorverdichtung etwas sehr Vorteilhaftes sei. Bedauerlicherweise werden dabei die Erkenntnisse von TAPPERT und ARAND U.A. sowie die morphologischen Betrachtungen von ANGST [2] als auch der Einfluß der Verdichtungsart auf die mechanischen Eigenschaften des Asphaltes [13] außer acht gelassen.

Zur Beantwortung der Frage, inwieweit selbstregelnde Walzen in der Lage sind, große Unterschiede in der Anfangsraumdicke (Vorverdichtung) auszugleichen, sei vereinbart, daß die Verdichtung in einem definierten Bereich der Kerntemperatur der zu verdichtenden Asphaltschicht ausgeführt wird und sich der variable Erregerfaktor f_{err} in Abhängigkeit von deren zunehmender Steifigkeit schrittweise verringert.

Die Steifigkeit einer Asphaltschicht nimmt während des Walzens bei anforderungsgerechter Tragfähigkeit der Unterlage sowohl mit der Verspannung des Korngerüsts als auch mit der Abnahme der Kerntemperatur zu. Wohl wissend, daß die Raumdicke einer Asphaltschicht nur bedingt mit deren Steifigkeit korreliert [25, 8], weil sowohl material- und maschinen- als auch verfahrenstechnische Einflüsse die Wechselbeziehung erheblich beeinflussen, soll im Rahmen dieser Abhandlung simplifizierend unterstellt werden, daß sich die Regelung der Walze ausschließlich an der Raumdicke der zu verdichtenden Asphaltschicht orientiert.

Wird demzufolge ein Zielwert – beispielsweise ρ ($k = 0,98$) der Marshall-Raumdicke ρ ($S = 50$) – erreicht oder überschritten, soll die Vibration automatisch auf einen unteren Grenzwert zurückgenommen werden. Solange sich das Verdichtungssystem noch im selbstregelnden Modus befindet, kann die Vibration nicht auf Null gestellt werden. Für die weiteren Betrachtungen sei außerdem vereinbart, daß die kleinstmögliche Amplitude zur Erzeugung eines Meßwertes 15 % der maximal möglichen Erregeramplitude beträgt und somit der variable Erregerfaktor f_{err} den Wert 0,15 nicht unterschreitet.

Das Zusammenspiel zwischen angebotener und konsumierter Verdichtungsenergie ist hochkomplex. Stark vereinfachend soll angenommen werden, daß für die Verdichtungswirkung lediglich die Linienlast LL mit ihren statischen und dynamischen Anteilen (LL_{stat} , LL_{dyn}) relevant sei.

Herstellerbedingt kommen Walzen mit nur einer oder zwei voneinander unabhängig selbstregelnden Bandagen (B_1 , B_2) zum Einsatz. Um die Erläuterungen nicht zu komplizieren, sollen beide Bandagen regeln: $f_{err,B1} = f_{err,B2}$. Notwendigerweise werden sich zwischen $f_{err,B1}$ und $f_{err,B2}$ Unterschiede einstellen, weil sich mit dem Konsum der von der ersten (führenden) Bandage B_1 angebotenen Verdichtungsenergie die Merkmale Steifigkeit k_A und Dämpfung c_A der Asphaltschicht verändert haben, so daß strenggenommen gilt: $k_{A,i,B1} < k_{A,i,B2}$ bzw. $c_{A,i,B1} > c_{A,i,B2}$.

Der hier eingeführte variable Erregerfaktor f_{err} wirkt über die Beeinflussung des dynamischen Anteils der Verdichtungsenergie auf den Faktor f_E der von der Walze pro Walzübergang angebotenen Energie E ein:

$$E = f_w \cdot E_1 \cdot f_E \quad (12)$$

mit

$$f_E = \frac{LL_{stat} + LL_{dyn,max} \cdot f_{err}}{LL} \quad (13)$$

und

$$LL = LL_{stat} + LL_{dyn,max} \cdot \quad (14)$$

Der Faktor f_w in Gl. (12) gilt für jeweils einen Walzübergang n , also für zwei Bandagenübergänge $B\ddot{U}_1$ und $B\ddot{U}_2$ und soll abhängig vom Verdichtungsmodus folgende Werte annehmen:

- 3,0 im statischen Betrieb,
- 7,7 im Vibrationsbetrieb einer unregelmäßigen Walze und
- 11,3 im Vibrationsbetrieb einer geregelten Walze (Maximalwert).

Die Relationen ergeben sich aus den Verhältnissen der statischen und dynamischen Linienlasten und den daraus abgeleiteten theoretischen Anteilen der statischen und dynamischen Verdichtung bei der Übertragung der für die Verdichtung des Asphaltmischgutes mit dem Verdichtungswiderstand C_2 im Laboratorium erforderlichen 34 Doppelschläge mit dem Marshall-Hammer [19] in das Feld. In [15] werden zur Verdichtung von Asphaltbeton-Mischgütern drei statische und fünf dynamische Walzübergänge empfohlen. Bezogen auf die im Laboratorium aufgewendete Verdichtungsarbeit E_1 [42 MN] leiten sich daraus theoretisch 2,13 Doppelschläge für die Bewertung eines statischen Walzüberganges und 5,52 Doppelschläge für je einen dynamischen Walzübergang ab. Um sicherstellen zu können, daß im Feld mindestens 98 % Verdichtung nach Marshall erreicht werden, sind die Werte mit dem Faktor 1,40 zu multiplizieren. Der von der Bandage im selbstregelnden Modus angebotene dynamische Anteil an der gesamten Verdichtungsenergie ist gegenüber dem Betrieb mit der großen Amplitude im manuellen Modus um einen Faktor größer, der sich beispielsweise bei den Walzenmodellen ARP 95 (*ACE^{pro}*), BW 174 AP-4F AM und CD54B AAC zwischen 1,22 und 1,83 bewegt (s. [1, 6, 7]) und hier mit einem Maximalwert von 1,46 angenommen wird.

Mit Hilfe der Abb. 10 und der korrespondierenden Tab. 2 soll nun der Einfluß der unregelmäßigen und geregelten Verdichtung auf die Gleichmäßigkeit der Endraumdicke anhand der Linien 2.1 und 2.3 aus der Abb. 6 verdeutlicht werden, die sich in den Anfangsraumdichten $\rho_{0,i}$ um 0,194 g/cm³ unterscheiden. Um die Entwicklung der Verdichtung möglichst realitätsnah darstellen zu können, ist der erste Walzübergang grundsätzlich statisch auszuführen.

Im Fall der unregelmäßigen Walze folgen fünf dynamische Walzübergänge, bevor die Verdichtung mit zwei statischen Walzübergängen abgeschlossen wird.

Die selbstregelnden Walzen setzen nach dem einleitenden statischen Walzübergang die Verdichtung mit dynamischen Walzübergängen unterschiedlicher Energie fort. Wird eine Raumdicke $\rho \geq 2,200$ g/cm³ erreicht, soll der variable Erregerfaktor f_{err} von Walzübergang zu Walzübergang fortlaufend automatisch um 8 % reduziert werden, bis der Zielwert $\rho (k = 0,98) = 2,381$ g/cm³ erreicht oder überschritten wird. Anschließend ist – der paarweisen Betrachtung der Meßwerte geschuldet – die Walze weiter vibrierend im Meßmodus zu betreiben oder die dynamische Verdichtung zu beenden.

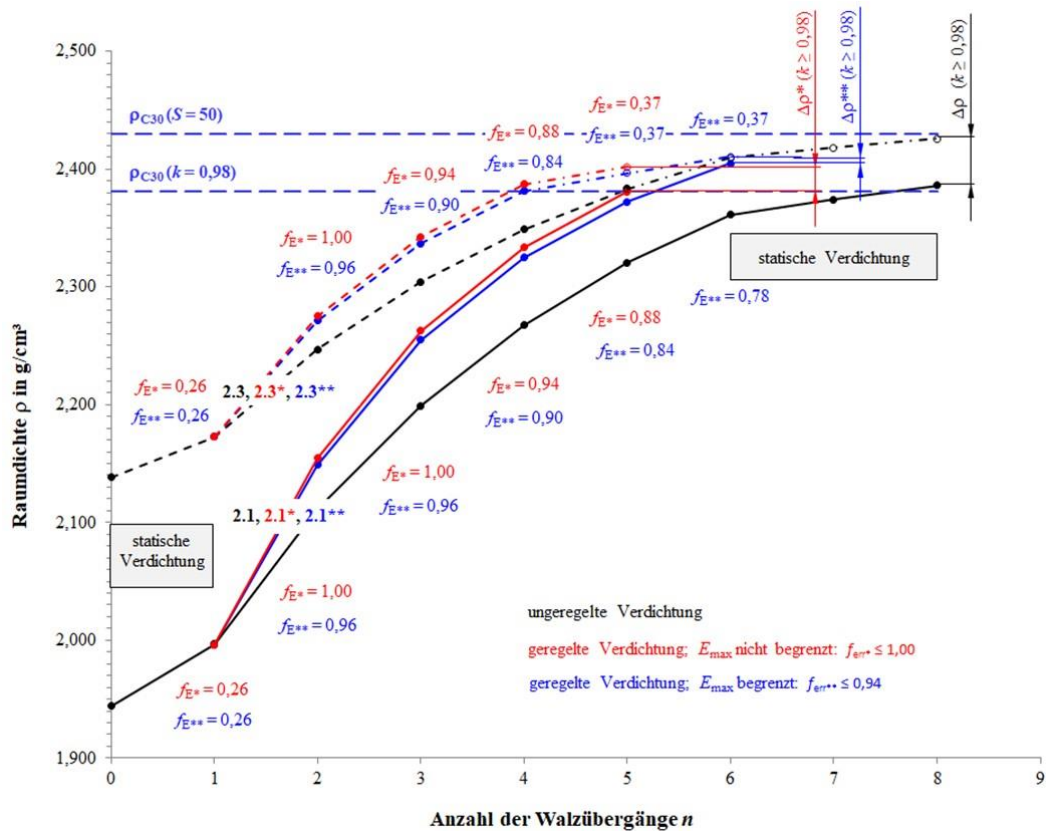


Abb. 10: Darstellung des prinzipiellen Dichteverlaufes an einem Asphaltmischgut mit einem Verdichtungswiderstand $C_2 = 30$ [42 Nm] in Abhängigkeit von der Anfangsraumdicke ρ_0 , der Anzahl der Walzübergänge n und der Verdichtungsenergie E bei unregelter und geregelter Verdichtung

Tab. 2: Kennwerte zur Abb. 10 (Materialkennwerte aus [19], Bild 4)

		Verdichtung														
		ungeregelt		geregelt												
				$E_{\max}$ nicht begrenzt		$E_{\max}$ begrenzt										
		2.1	2.3	2.1*		2.3*		2.1**		2.3**						
ρ_∞	g/cm³	2,500														
C	42 Nm	30														
ρ ($S = 50$)	g/cm³	2,430														
ρ ($\bar{\kappa} = 0,98$)	g/cm³	2,381														
T_0	°C	140														
$\rho_{0,i}$	g/cm³	1,944	2,138	1,944		2,138		1,944		2,138						
$\bar{\kappa}_{0,i}$	-	0,80	0,88	0,80		0,88		0,80		0,88						
$\Delta\rho_0$	g/cm³	0,194		0,194				0,194								
$\Delta\bar{\kappa}_0$	%	8,00		8,00				8,00								
			ρ_i		ρ_i	$f_{E^{**}}$	$f_{E^{**}}$	ρ_i	$f_{E^{**}}$	$f_{E^{**}}$	ρ_i	$f_{E^{**}}$	$f_{E^{**}}$	ρ_i		
			g/cm³		g/cm³	-	-	g/cm³	-	-	g/cm³	-	-	g/cm³		
		$n = 0$ ($\rho_{0,i}$)	1,944	2,138			1,944			2,138			1,944		2,138	
		$n = 1$ (generell statisch)	1,997	2,173	0,00	0,26	1,996	0,00	0,26	2,173	0,00	0,26	1,996	0,00	0,26	2,173
		$n = 2$	2,111	2,247	1,00	1,00	2,154	1,00	1,00	2,275	0,94	0,96	2,149	0,94	0,96	2,271
		$n = 3$	2,199	2,304	1,00	1,00	2,263	0,92	0,94	2,342	0,94	0,96	2,255	0,86	0,90	2,337
		$n = 4$	2,268	2,349	0,92	0,94	2,334	0,84	0,88	2,387	0,86	0,90	2,325	0,78	0,84	2,381
		$n = 5$	2,320	2,383	0,84	0,88	2,381	0,15	0,37	2,402	0,78	0,84	2,372	0,15	0,37	2,397
		$n = 6$	2,361	2,410							0,70	0,78	2,405	0,15	0,37	2,410
		$n = 7$ (statisch)	2,374	2,418												
		$n = 8$ (statisch)	2,386	2,426												
		n_i ($\bar{\kappa} \geq 0,98$)	-	8	5 (8)	5		4 (5)		6		4 (6)				
ρ_i ($\bar{\kappa} \geq 0,98$)	g/cm³	2,386	2,383 2,426	2,381		2,387 2,402		2,405		2,381 2,410						
$\Delta\rho$ ($\bar{\kappa} \geq 0,98$)	g/cm³	0,040		0,021				0,005								
$\Delta\bar{\kappa}$	%	1,64		0,87				0,22								

Bei einer angenommenen Anfangsraumdicke $\rho_{0,2.3} = 2,138 \text{ g/cm}^3$ des schwer verdichtbaren Asphaltmischgutes $C_2 = 30 [42 \text{ Nm}]$ sind mit einer unregelmäßigen Walze (schwarze Linien) ein statischer und vier dynamische Walzübergänge erforderlich, um mit der Dichte $\rho_{2.3} (n = 5) = 2,383 \text{ g/cm}^3$ das Dichteniveau $\rho (k = 0,98) = 2,381 \text{ g/cm}^3$ gewährleisten zu können. Auf Grund der geringeren Anfangsraumdicke $\rho_{0,2.1}$ wird das geforderte Dichteniveau erst nach einem statischen, fünf dynamischen und zwei abschließenden statischen Walzübergängen erreicht und überschritten: $\rho_{2.1} (n = 8) = 2,386 \text{ g/cm}^3$. Bei paarweiser Betrachtung sind notwendigerweise in beiden Fällen drei statische und fünf dynamische Walzübergänge auszuführen, was zur Folge hat, daß die Dichte $\rho_{2.3}$ von $2,383 \text{ g/cm}^3$ weiter auf $2,426 \text{ g/cm}^3$ ansteigt. Der zwischen den beiden Anfangsraumdichten $\rho_{0,2.1}$ und $\rho_{0,2.3}$ bestehende Dichteunterschied von $0,194 \text{ g/cm}^3$ ($\Delta k_0 = 8,00 \%$) wird mit insgesamt acht Walzübergängen auf $\Delta \rho (k \geq 0,98) = 0,040 \text{ g/cm}^3$ ($\Delta k = 1,64 \%$) abgebaut.

Beim Einsatz einer selbstregelnden Walze, deren maximale Verdichtungsenergie nicht begrenzt ist (rote Linien), sind nach einem ersten statischen Walzübergang (schwarzer Linienzug) aufgrund des höheren Leistungsangebotes nur drei dynamische Walzübergänge erforderlich, um die Anfangsraumdicke $\rho_{0,2.3*} = 2,138 \text{ g/cm}^3$ auf $\rho_{2.3*} (k \geq 0,98) = 2,387 \text{ g/cm}^3$ steigern zu können. Es wird unterstellt, daß das System nach Erreichen der Raumdicke $\rho_{2.3*} (n = 2) = 2,275 \text{ g/cm}^3$ sukzessive abregelt. Die der Asphaltsschicht von der Walze angebotene Verdichtungsenergie wird mit Hilfe des variablen Erregerfaktors $f_{\text{err}*}$ schrittweise zurückgenommen, gleichzeitig wird der Faktor f_E^* in zwei Schritten von 1,00 auf 0,88 reduziert. Nach dem Erreichen und Überschreiten des geforderten Dichteniveaus $\rho (k = 0,98)$ wird die Walze weiter im Meßmodus betrieben. Auch in diesem Fall wird auf Grund der geringeren Anfangsraumdicke $\rho_{0,2.1*}$ das geforderte Dichteniveau mit $\rho_{2.1*} (k \geq 0,98) = 2,381 \text{ g/cm}^3$ später erreicht. Bedingt durch die Zunahme der Raumdicke (und damit der Steifigkeit) wird der variable Erregerfaktor $f_{\text{err}*}$ nach dem dritten Walzübergang (dem zweiten mit Vibration) schrittweise von 1,00 auf 0,84 reduziert und der Eintrag der Verdichtungsenergie entsprechend vermindert. Da allerdings in dem Abschnitt mit der höheren Vorverdichtung (2.3*) das geforderte Dichteniveau bereits erzielt wurde, wird der zusätzlich erforderliche Walzübergang fünf im Meßmodus ($f_{\text{err}*} = 0,15$; $f_E^* = 0,37$) ausgeführt, weshalb die Steigerung der Raumdicke im Vergleich zum Abschnitt 2.1* deutlich geringer ausfällt und den Abbau des zwischen den beiden Anfangsraumdichten $\rho_{0,2.1*}$ und $\rho_{0,2.3*}$ bestehenden Dichteunterschiedes begünstigt, der mit fünf Walzübergängen von $0,194 \text{ g/cm}^3$ ($\Delta k_0 = 8,00 \%$) auf $\Delta \rho^* (k \geq 0,98) = 0,021 \text{ g/cm}^3$ ($\Delta k = 0,87 \%$) reduziert wird.

Dieses ausgezeichnete Ergebnis läßt sich allerdings nur erreichen, wenn die Anfangsraumdichten innerhalb einer Walzbahn nicht zu stark schwanken und damit keine größeren Änderungen des Verstellwinkels α mit den damit verbundenen längeren Regelzeiten fordern.

Beim Einsatz einer selbstregelnden Walze, deren maximale Verdichtungsenergie beispielsweise mit einem Erregerfaktor $f_{\text{err}**} = 0,94$ auf 96 % begrenzt ist (blaue Linien), sind im Anschluß an einen statischen Walzübergang ebenfalls nur drei dynamische Walzübergänge erforderlich, um die Anfangsraumdicke $\rho_{0,2.3**}$ von $2,138 \text{ g/cm}^3$ auf $\rho_{2.3**} (k \geq 0,98) =$

2,381 g/cm³ steigern zu können. Auch in diesem Fall regelt das System nach Erreichen der Raumdichte $\rho_{2.3**} (n = 2) = 2,271 \text{ g/cm}^3$ ab, f_{err**} ändert sich in zwei Schritten von 0,94 auf 0,78. Nach dem Erreichen und Überschreiten des geforderten Dichteniveaus $\rho (k = 0,98)$ wird die Vibration nach dem vierten Walzübergang auf den unteren Grenzwert zurückgenommen ($f_{err**} = 0,15$; $f_{E**} = 0,37$). Auf Grund der geringeren Anfangsraumdichte $\rho_{0,2.1**}$ wird in diesem Fall das geforderte Dichteniveau mit $\rho_{2.1**} (k \geq 0,98) = 2,405 \text{ g/cm}^3$ erst nach sechs Walzübergängen erreicht und überschritten. Der variable Erregerfaktor f_{err**} wird nach dem dritten Walzübergang (dem zweiten mit Vibration) in drei Schritten von 0,94 auf 0,70 reduziert und der Eintrag der Verdichtungsenergie entsprechend vermindert: f_{E**} geht von 0,96 auf 0,78 zurück. Da auch hier in dem Abschnitt mit der höheren Vorverdichtung (2.3**) das geforderte Dichteniveau wiederum bereits nach dem vierten Walzübergang (nach dem dritten mit Vibration) erzielt wurde, werden die zwei zusätzlichen Walzübergänge fünf und sechs nur im Meßmodus ausgeführt. Der zwischen den beiden Anfangsraumdichten $\rho_{0,2.1**}$ und $\rho_{0,2.3**}$ bestehende Dichteunterschied von 0,194 g/cm³ ($\Delta k_0 = 8,00 \%$) wird mit insgesamt sechs Walzübergängen fast vollständig abgebaut: $\Delta \rho^{**} (k \geq 0,98) = 0,005 \text{ g/cm}^3$ ($\Delta k = 0,22 \%$).

Obwohl im Vergleich zum vollen Leistungsangebot der selbstregelnden Walze ein zusätzlicher Walzübergang ausgeführt werden muß, ist man mit der Entscheidung, die Verdichtungsleistung nicht im vollen Umfang auszuschöpfen, qualitativ auf der sichereren Seite. Da die Änderungen des Verstellwinkels α von vornherein begrenzt werden, wirken sich die gleichen Schwankungen in den Anfangsraumdichten innerhalb einer Walzbahn geringer aus und die Antworten des Systems auf die im Zuge der Verdichtung abnehmenden Steifigkeitsunterschiede erfolgen in unmittelbarer Nähe des Meßortes.

Unter den hier gewählten Voraussetzungen (C , T_0 , $\Delta \rho_0$, $f_{err,max}$, Δf_{err}) stellt sich ein sehr vorteilhaftes Ergebnis ein, das das Potential einer derartigen Vorgehensweise aufzeigt, sich aber nicht pauschalisieren läßt, weil letztlich entscheidend ist, wann das geforderte Dichteniveau $\rho (k = 0,98)$ an den Meßpunkten erreicht und in welchem Maße die Mindestanforderung überschritten wird: $\rho (k \geq 0,98) - \rho (k = 0,98)$. Die Auswertung der praktischen Untersuchungen muß zeigen, welche Einstellung des Erregersystems der Versuchswalze sich als günstig erwiesen hat und ob die Begrenzung der Verdichtungsenergie der selbstregelnden Walze anhand begleitender Feldmessungen der Raumdichte vorgenommen werden sollte.

Nach DAINES [9] besteht zwischen der für die Walzverdichtung verfügbaren Zeit t_{verf} und der Schichtdicke d folgender Zusammenhang:

$$t_{verf} \sim d^{1,8} . \quad (15)$$

Eine Verdoppelung der Schichtdicke steigert die für das Walzen verfügbare Zeit um den Faktor 3,5. Mit dem Anspruch, eine möglichst gleichmäßige Endraumdichte zu erzielen, sollte deshalb für Schichtdicken $\geq 80 \text{ mm}$ überlegt werden, das Leistungsangebot einer selbstregelnden Walze etwas zu begrenzen und dafür gegebenenfalls einen zusätzlichen Walzübergang in Kauf zu nehmen.

Die Begrenzung der Verdichtungsleistung ist mit einem weiteren Vorteil verbunden. THURNER hat in [24] den Einfluß des Untergrundes bei der Verdichtung einer Asphalttragschicht auf einem ungebundenen Oberbau beschrieben. Meßtechnisch ausschlaggebend ist zunächst allein die Steifigkeit der Asphalttragschicht. Zu Beginn der Verdichtung wird die Vibration stark gedämpft, die gesamte Energie wird zur Verformung des Asphaltmischgutes benötigt. In dem Maße, wie die Asphalttragschicht zunehmend steifer wird, nimmt der Einfluß der ungebundenen Oberbauschichten zu, und am Ende wirkt die Asphalttragschicht wie eine dünne Membran. Der größte Teil der Verdichtungsenergie wird nun in tieferliegende, weichere Schichten übertragen. Neben der Abnahme der Temperatur der zu verdichtenden Asphaltschicht war das in der Vergangenheit einer der Gründe, warum sich die Korrelation zwischen der Raumdichte und den mit einer Walze ermittelten Meßwerten mit zunehmender Anzahl der Walzübergänge verschlechterte. Auf diese Erkenntnis haben die Hersteller selbstregelnder Walzen reagiert und ihre Systeme entsprechend weiterentwickelt, um die vom Verdichtungsgerät an die unterschiedlichsten Asphaltarten und -sorten abzugebende Leistung durch eine gezielte und sensiblere Regelung des dynamischen Anteils an der Verdichtungsenergie besser anpassen zu können. Mit der Möglichkeit, das Leistungsangebot einer selbstregelnden Walze noch gezielter begrenzen zu können, kann der Einfluß der tieferliegenden Schichten auf den Regelungsprozeß weiter abgemindert werden, so daß sich eine noch gleichmäßigere Verdichtung einstellt.

Im Vergleich zur Gl. (9) führt bei einem Asphaltmischgut mit einem hohen Verdichtungs-widerstand C und den gleichen Unterschieden zwischen den Anfangsraumdichten $\Delta\rho_0$ ein größerer Energieeintrag E zu geringeren Unterschieden zwischen den nach einem Walzübergang erzielten Raumdichten $\Delta\rho(E)$, weil die Ansprache der Verdichtung stärker ist:

$$|\Delta\rho_0| = (\rho_{0,i+1} - \rho_{0,i}) \xrightarrow{\uparrow C, \uparrow E} (\uparrow \rho_{i+1}(E) - \uparrow \rho_i(E)) \Rightarrow \downarrow^3 |\Delta\rho(E)| \quad (16)$$

Bei den gleichen Unterschieden zwischen den Anfangsraumdichten $\Delta\rho_0$ führt der Eintrag einer höheren Verdichtungsenergie E und deren fortlaufende Reduzierung nach dem Erreichen einer vorgegebenen Raumdichte im Vergleich zur unregelmäßigen Verdichtung zu geringeren Unterschieden zwischen den Endraumdichten: $|\Delta\rho^*(k \geq 0,98)| < |\Delta\rho(k \geq 0,98)|$.

$$|\Delta\rho_0| \xrightarrow{\uparrow C, \uparrow E, E \neq const} \downarrow |\Delta\rho^*(k \geq 0,98)| \quad (17)$$

Verglichen mit Gl. (17) führt die Begrenzung der maximal angebotenen Verdichtungsenergie E ($f_{err,max} < 1$) bei denselben Unterschieden zwischen den Anfangsraumdichten $\Delta\rho_0$ unter Inkaufnahme eines gegebenenfalls zusätzlich erforderlichen Walzüberganges zu einer weiteren Verminderung der Unterschiede zwischen den Endraumdichten:

$$|\Delta\rho^{**}(k \geq 0,98)| < |\Delta\rho^*(k \geq 0,98)|.$$

$$|\Delta\rho_0| \xrightarrow{\uparrow C, \uparrow E, E \neq const, f_{err,max} < 1, \uparrow n(k \geq 0,98)} \downarrow^2 |\Delta\rho^{**}(k \geq 0,98)| \quad (18)$$

Wie bereits mit Gl. (2) verdeutlicht, führen höhere Walzgeschwindigkeiten dazu, daß die Antwort des Regelsystems auf eine Abweichung von der Soll-Steifigkeit u. U. nicht in der unmittelbaren Nähe des betreffenden Abschnittes gegeben werden kann. Je besser die Teilprozesse Mischgutlogistik, Einbau und Verdichtung aufeinander abgestimmt sind, desto gleichmäßiger wird sich der Einbau des Asphaltmischgutes gestalten. Es darf erwartet werden, daß sowohl eine angemessene Walzgeschwindigkeit als auch das über die Begrenzung des Verstellwinkels α bewußt verminderte Leistungsangebot einer selbstregelnden Walze zu einer Abnahme der Schwankungen der Raumdichte um ihren Mittelwert und damit zu einer Steigerung der Verdichtungsqualität beitragen können.

Maschinentechnische Umsetzung des theoretischen Ansatzes

Im Zuge der Entwicklung des Meß- und Regelsystems *Auto Adjustable Compaction* (AAC) wurden von der Fa. *Caterpillar* die o. g. Erkenntnisse auf dessen Wirkungsweise mit der Möglichkeit übertragen, die Empfindlichkeit des Systems den gegebenen Bedingungen noch feiner anpassen zu können.

Das Regelprinzip basiert auf der Verwendung von Beschleunigungsaufnehmern zur Ermittlung der Bandagendynamik und deren Einfluß auf die Kontaktkraft zwischen Bandage und zu verdichtender Asphaltsschicht. Die Analyse der Bandagenbeschleunigung erfolgt im Zeitbereich. Die fortlaufend berechnete Kontaktkraft wird mit einem Zielwert verglichen. Ausgehend von der neutralen Stellung „0“, kann der Walzenfahrer eine mehr oder weniger aggressivere Arbeitseinstellung (+5 ... 0 ... -5) wählen. Beim Überschreiten definierter Grenzen wird die stufenlos verstellbare Amplitude des Kreisschwingers mit Hilfe sehr geringer und schneller Änderungen des Verstellwinkels α zwischen den beiden Unwuchtmassen $m_{u,1}$ und $m_{u,2}$ (vgl. Abb. 3) automatisch geändert, was einen fortlaufend dosierten Eintrag der für die jeweilige Asphaltsschicht möglichen Verdichtungsenergie garantiert. In den Verdichtungsmodi „-1“ bis „-5“ wird früher zurückgeregelt. Für dünnere Asphaltsschichten ist die effektive Amplitude von Anfang an begrenzt.

Caterpillar rüstet beide – unabhängig voneinander arbeitenden – Bandagen seiner selbstregelnden Tandem-Vibrationswalzen mit dem AAC-System aus.

Auf Grund seiner Erfahrung kann der Walzenfahrer auch feste Amplituden vorgeben. Dafür hat er die Möglichkeit, im manuellen Betriebsmodus zwischen einer 2stufigen Frequenz und einer daran gekoppelten 3- bzw. 6stufigen Amplitude zu wählen.

Da mit der Möglichkeit, über den vom Walzenfahrer wählbaren Verdichtungsmodus der zu verdichtenden Asphaltsschicht nicht von Anfang an die volle Energie anbieten zu müssen, die Bandbreite der Amplitudenverstellung reduziert wird, sollten dementsprechend kurze Regelwege und damit Regelungsdauern anfallen. Die Antwort des Systems auf einen festgestellten Steifigkeitsunterschied würde damit in dessen unmittelbarer Nähe gegeben werden können und somit den Ausgleich der Verdichtungsunterschiede verstärken. An den Stellen mit geringerer Steifigkeit würde infolgedessen der Eintrag der Verdichtungsenergie dosiert gesteigert und an Stellen mit hoher Steifigkeit etwas zurückgenommen werden.

Systematische Untersuchungen zur Wirksamkeit des AAC-Systems

In der Bundesrepublik Deutschland wurden im Zeitraum von Oktober 2015 bis Oktober 2016 unter meßtechnischer Begleitung Untersuchungen zum Regelungsverhalten des AAC-Systems beim Einbau von Asphalttrag- und -binderschichten auf drei Bundesautobahnen, zwei Kreisstraßen und einer Industriefläche durchgeführt, um zu eruieren, ob sich bei der Verdichtung der Asphaltmischgüter qualitative Unterschiede zwischen der konventionellen und geregelten Verdichtungsmethode beim Einsatz einer Tandem-Vibrationswalze vom Typ CD54B AAC zeigen. Parallel dazu wurde die im geregelten Modus erzielte Qualität der Verdichtung mit den Ergebnissen einer selbstregelnder Tandem-Vibrationswalze eines namhaften Wettbewerbers (*Referenzwalze*) verglichen.

Auf Untersuchungen an Asphaltdeckschichten wurde wegen des erforderlichen frühen Abstreuens und der damit verbundenen möglichen Beeinflussung der Meßwerte verzichtet.

Tab. 3: Kenndaten ausgewählter, anonymisierter und nach ihrer zeitlichen Reihenfolge geordneter Baustellen

Baustelle	Verkehrsweg	Asphaltschicht	Asphaltmischgut	Marshall-Raumdicke g/cm ³	Einbaubreite m	Einbaudicke mm
Bst. 1	BAB ¹⁾	ATS	AC 32 T S, 50/70	2,347 ⁴⁾	12,60	180
Bst. 2	BAB ¹⁾	ABS ³⁾	AC 16 B S, 25/55-55 A	2,546 ⁵⁾	10,20	60
Bst. 3	K ²⁾	ABS	AC 16 B S, 25/55-55 A	2,400 ⁶⁾	5,80	60
Bst. 4	IF ¹⁾	ATS	AC 32 T S, 30/45	2,399 ⁷⁾	4,40	140

BAB Bundesautobahn, IF Industriefläche, K Kreisstraße

ABS Asphaltbinderschicht, ATS Asphalttragschicht

¹⁾ einseitiges Querprofil 2,5 %, ²⁾ Dachprofil 2,5 %, ³⁾ Ausgleichsschicht, ⁴⁾ lt. Laborant,

⁵⁾ lt. Asphaltmischwerk, ⁶⁾ angenommene Raumdicke, ⁷⁾ lt. Einbaumeister

In der Tab. 3 werden Kenndaten ausgewählter Baustellen wiedergegeben. Die Einbauprozesse wurden mit Ausnahme der *Baustelle 4* nicht beeinflusst, um die Untersuchungen unter typischen Einbaubedingungen durchführen zu können. Da auf besagter Baustelle kein Beschicker zum Einsatz kam, wurde der Fertigerfahrer angewiesen, den Materialkübel nicht leerzufahren, um die Temperaturverluste in der Materialförderstrecke des Fertigers geringhalten zu können.

Im Vergleich zu Untersuchungen unter Laborbedingungen mit einem festen Walzschema und der Möglichkeit der systematischen Variation einzelner Parameter gestalten sich Untersuchungen unter regulären Einbaubedingungen wesentlich schwieriger.

Auf der ersten Baustelle wurden Prüffelder mit bis zu 18 farblich markierten Meßpunkten über mehrere Walzbahnen hinweg angelegt, siehe Abb. 11. Die beiden äußeren Walzbahnen wurden in die Untersuchung nicht einbezogen. Zur Gewährleistung homogener Asphaltmischguttemperaturen wurden die Meßpunkte in die mittleren Bereiche zwischen zwei Lkw-Wechseln plaziert und darüber hinaus so gewählt, daß der Einfluß der Oberflächenstruktur auf das jeweilige Meßergebnis möglichst gering und gleichmäßig ausfiel. Während der Messungen wurde auf die Einhaltung des Walzschemas geachtet. Die durch den Ausfall einer

Asphaltmischanlage verursachten Störungen in der Anlieferung des Asphaltmischgutes behinderten aufgrund der daraus resultierenden Einbauunterbrechungen die Auswahl geeigneter Untersuchungsabschnitte. Wegen häufiger Abweichungen vom Walzschema standen für die Auswertung nur jeweils drei Meßpunkte von den Walzbahnen zur Verfügung, in denen die Vorgehensweise bei der Verdichtung vergleichbar war. Deshalb wurde entschieden, für die folgenden Untersuchungen die Anordnung der Meßpunkte zu ändern. Die Lage eines Prüffeldes und Anordnung seiner Meßpunkte kann den *Abbn. 12* und *13* entnommen werden.



Abb. 11: Walzbahnen 2 bis 7 mit 18 Einzelmeßstellen im Prüffeld 2 der *Baustelle 1*

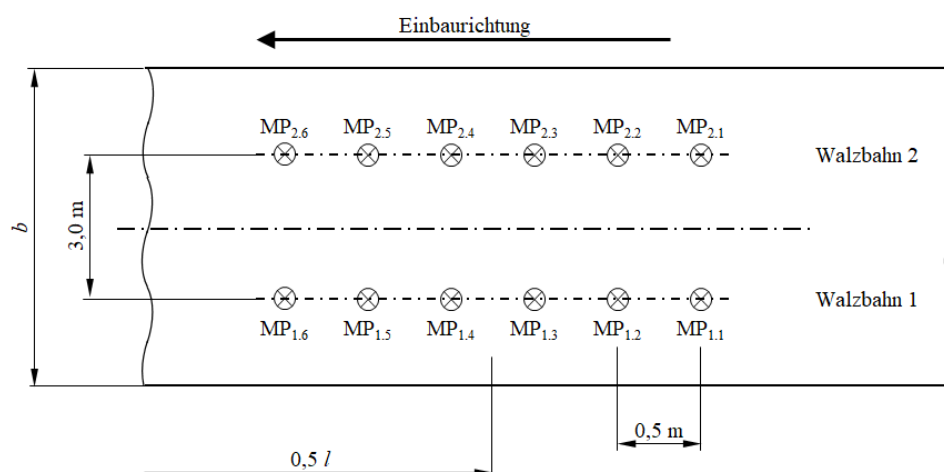


Abb. 12: Schematische Darstellung zur Lage eines Prüffeldes und Anordnung seiner Meßpunkte auf den *Baustellen 2* bis *4*

b Einbaubreite, l Einbaustrecke zwischen zwei Beschickungsvorgängen, MP Meßpunkt

Abb. 13: Meßpunkte im Prüffeld 4 zur Kontrolle der Verdichtung des Asphaltbinders AC 16 B S, 25/55-55 A auf der Baustelle 3



Dazu wurden pro Prüffeld in Einbaurichtung im Abstand von 1,50 m links und rechts der Fertigerachse jeweils sechs einzelne Meßpunkte mit einem Abstand von 0,50 m in überlappungsfreien Bereichen angeordnet und ebenfalls farblich markiert.

Um sicherzustellen, daß mit der Vibrationsverdichtung nicht verspätet begonnen und der Verdichtungsfortschritt sowie die Gleichmäßigkeit der Verdichtung durch die damit bedingte Abnahme der Temperatur in der Asphaltschicht beeinflußt wurden, wurde folgendermaßen vorgegangen:

Wie bereits auf der Baustelle 1 ab dem zweiten Tag der Untersuchung praktiziert, wurde vor Beginn der Messungen und nicht zeitiger als 30 min nach Einbaubeginn der Einbauprozess hinsichtlich seiner Gleichmäßigkeit beobachtet. Von besonderem Interesse waren dabei die Temperaturverteilung an der Oberfläche der Asphaltschicht unmittelbar hinter der Einbau- bohle sowie die zeitliche Abfolge des Walzens und die Länge der Walzbahnen.

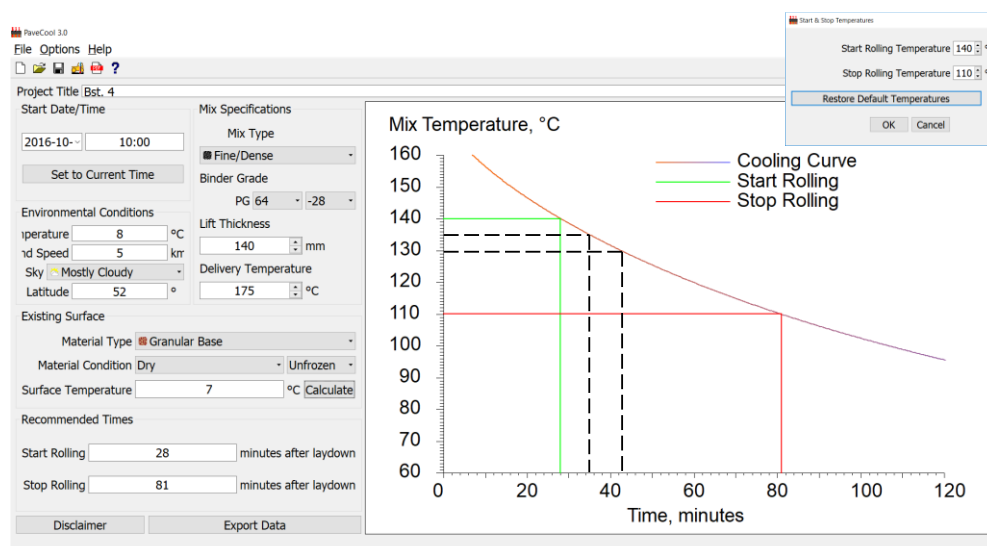


Abb. 14: Zeitliche Abschätzung des Temperaturrückganges von 135 auf 130 °C beim Einbau der 14 cm dicken Asphalttragschicht AC 32 T S, 30/45 auf der Baustelle 4 mit Hilfe des Programmes PaveCool 3.0 [18]

Unter Verwendung des vom *Minnesota Department of Transportation* zur freien Benutzung bereitgestellten Programmes *PaveCool* [18] wurde unter Berücksichtigung des Wetters, der Art und der Temperatur des Asphaltmischgutes bei dessen Übergabe an den Fertiger, der Temperatur der Unterlage und der Schichtdicke der theoretische Temperaturverlust in der eingebauten Asphaltschicht über der Zeit ermittelt und anhand der ausgewiesenen Temperaturkurve abgeschätzt, wieviel Zeit zwischen einem Temperaturabfall von 135 auf 130 °C vergeht. In der *Abb. 14* wird das beispielhaft für die *Baustelle 4* mit der aktuellen Version *PaveCool 3.0* wiedergegeben.

Anschließend wurde in den geplanten Meßbereichen gem. *Abb. 12* unmittelbar hinter der Einbaubohle an mehreren Stellen die Temperatur an der Oberfläche der Asphaltschicht mit Hilfe einer Infrarot-Pistole bestimmt. Die Prüffelder wurden so positioniert, daß in Anlehnung an den Marshall-Versuch eine Temperaturspanne von 10 °C nicht überschritten wurde. Aus den von den Walzenfahrern abgefragten Walzgeschwindigkeiten und der mit Hilfe der Leitpflocke abgeschätzten bzw. auf der *Baustelle 4* gemessenen Walzbahnlängen wurde der zu erwartende zeitliche Abstand für einen Walzübergang zwischen zwei unmittelbar nebeneinanderliegenden Walzbahnen $t_{WÜ}$ berechnet. Je nachdem, ob mit Dachprofil oder einseitiger Querneigung eingebaut und über die Reihenfolge der Walzbahnen ein Widerlager aufgebaut wurde, ergab sich der direkte oder indirekte Abstand N der untersuchten Walzbahnen zueinander und daraus weiter folgend der kalkulierte walzübergangsbezogene, zeitliche Abstand t_N . Unter der Prämisse, daß die unmittelbar hinter der Einbaubohle festgestellten Temperaturunterschiede zwischen den Meßpunkten zeitbedingt um nicht mehr als 5 °C zunehmen, wurde unter Berücksichtigung der mit dem Programm *PaveCool* kalkulierten Abkühlzeit zwischen 135 und 130 °C der für die spezifischen Einbaubedingungen tolerierbare zeitliche Abstand t_{tol} zwischen den Walzbahnen gem. *Abb. 12* festgelegt (s. *Tab. 4*).

Tab. 4: Tolerierter zeitlicher Abstand zwischen den Walzbahnen gem. *Abb. 12*

Baustelle	Anordnung der Walzen (<i>CD54B AAC, Referenzwalze</i>)	t_{verf} min	$t_{WÜ}$ min	N	t_N min	t_T min	t_{tol} min
Bst. 1	parallel, voneinander unabhängig ¹⁾	37 ²⁾	2	1	2	14	10 ³⁾
Bst. 2	parallel	15	1	2	2	2,5	2,5
Bst. 3	parallel, voneinander unabhängig ¹⁾	13	1,5			2	2
Bst. 4	einzelnen pro Prüffeld ¹⁾	53	2	1	2	8	8

N Anzahl der zwischen den untersuchten Walzbahnen direkt oder indirekt liegenden übrigen Walzbahnen, t_N kalkulierter zeitlicher Abstand pro Walzübergang zwischen den untersuchten Walzbahnen, t_T kalkulierte Abkühlzeit von 135 auf 130 °C, t_{tol} tolerierter zeitlicher Abstand pro Walzübergang zwischen den untersuchten Walzbahnen, t_{verf} verfügbare Walzzeit, $t_{WÜ}$ zeitlicher Abstand pro Walzübergang zwischen zwei nebeneinanderliegenden Walzbahnen

¹⁾ Beginn der Verdichtung mit annähernd gleichen Zeitabständen nach dem Einbau

²⁾ nach dem Einsatz der Gummiradwalze verbliebene Zeit

³⁾ organisatorisch vorgenommene zeitliche Begrenzung

Auf jeder Baustelle wurde den Walzenfahrern der Ablauf der Untersuchung ausführlich erläutert und verfassenseitig darauf hingewirkt, daß die verfügbaren Zeitfenster möglichst ein-

gehalten wurden. Wurde fallweise dennoch etwas zu spät gewalzt, aber die maximal zulässige Temperaturspanne nicht überschritten, wurde der Meßpunkt gewertet, andernfalls verworfen. Die in den *Tabn. 6 bis 13* aufgeführten Meßwerte entstammen Meßpunkten, die diesen Anforderungen genügten.

Da auf der *Baustelle 1* in der Regel mit einer Gummiradwalze vorgearbeitet wurde, haben die beiden in die Untersuchung eingebundenen Walzen annähernd zeitgleich mit der weiteren Verdichtung der ihnen zugeordneten Abschnitte begonnen.

Der Einsatz der Walzen sowie die Wahl des Verdichtungsmodus unterlagen der Zustimmung der Einbauteams. Damit waren bedauerlicherweise sowohl der systematischen Variation der Verdichtungsenergie als auch der zweifachen Wiederholung der Versuche sowie der Randomisierung zum Erreichen einer höheren statistischen Sicherheit Grenzen gesetzt. Lediglich auf den *Baustellen 2 und 3* war eine wahllose Anordnung der Walzen möglich.

Unmittelbar hinter der Einbaubohle und in der Regel nach jedem zweiten Walzübergang mit Vibration erfolgte die Ermittlung der Raumdichten in Form fortlaufender Einzelmessungen mit einer Sonde des Typs *PQI 380 (Fa. TransTech)*. Unter einem Walzübergang wird hier das Fahren der Walze zum Fertiger hin oder vom Fertiger zurück verstanden.

Bei den in den *Tabn. 6 bis 13* aufgeführten Raumdichten handelt es sich nicht um die endgültig erreichten Werte, weil – mit Ausnahme der *Baustelle 1* – zum einen die Sonde nicht an Bohrkernen oder einem kalibrierten Meßgerät eingemessen werden konnte und es sich daher um Relativwerte handelt und zum anderen die sich an die Verdichtung mit der *CD54B AAC* und der *Referenzwalze* anschließenden Verdichtungsvorgänge mit weiteren Walzen nicht weiterverfolgt wurden.

Auf der *Baustelle 1* war ein Vergleich der mit der *PQI 380* gewonnenen Meßergebnisse mit den Werten einer an Bohrkernen kalibrierten Dünnschichtsonde des Modells *4640-B (Fa. Troxler)* möglich. Die Meßtiefe betrug jeweils 10 cm. In der *Tab. 5* werden die Ergebnisse wiedergegeben und belegen eine sehr gute Übereinstimmung.

Tab. 5: Vergleich der beim Einbau einer Asphalttragschicht *AC 32 T S, 50/70* auf der *Baustelle 1* an denselben Stellen mit zwei unterschiedlichen Meßsystemen ermittelten Raumdichten

	Troxler-Dünnschichtsonde 4640-B $\bar{x} \pm s$	TransTech PQI 380 $\bar{x} \pm s$
$\rho \text{ kg/m}^3$	2318,0/2279,0/2305,0	2318,0/2276,7/2311,5
$\rho \text{ kg/m}^3$	$2.300,7 \pm 19,9$	$2.302,1 \pm 22,2$
$k \text{ \%}$	$98,0 \pm 0,8$	$98,1 \pm 0,9$

Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden auszugsweise repräsentative Ergebnisse aus einem Untersuchungsbericht zur Wirksamkeit des AAC-Systems [27] wiedergegeben.

Die Einzelwerte wurden jeweils als Teil einer Grundgesamtheit aufgefaßt und die Stichproben als nicht miteinander verbunden betrachtet, da die Untersuchungsobjekte (Meßpunkte in verschiedenen Walzbahnen) nicht gleich sind, was sowohl auf die Inhomogenität des Asphaltmischgutes selbst als auch auf die unterschiedliche Vorverdichtung einer Variobohle über die Einbaubreite zurückzuführen ist.

Die arithmetischen Mittelwerte und deren Varianzen von Prüffeldern mit einer Anzahl von bis zu sechs Einzelmeßstellen wurden auf dem Wahrscheinlichkeitsniveau von 95 % ($\alpha = 0,05$) mit Hilfe statistischer Untersuchungsmethoden [17] miteinander verglichen.

Die Meßwerte eines Prüffeldes wurden zunächst auf technische Ausreißer überprüft. Ein als technischer Ausreißer identifizierter Meßwert wurde grundsätzlich aus der Meßreihe eliminiert.

Die sich anschließende Prüfung auf Normalverteilung erfolgte mit Hilfe des *Shapiro-Wilk*- und des *David-Schnelltestes*. Beim *Shapiro-Wilk-Test* handelt es sich um eine sehr effektive Methode für kleine Stichproben.

Auf eine Datentransformation wurde verzichtet.

Die Prüfung auf statistische Ausreißer aller Meßwerte eines technologischen Abschnittes eines Prüffeldes wurde bei Vorliegen einer Normalverteilung mit den Testverfahren nach *Davies/Gather* [10] mit Hilfe des *Hampel-Identifizierers* [12] sowie anhand des Testes nach *Nalimov* durchgeführt, für den die Daten ohne den ausreißerverdächtigen Meßwert zumindest annähernd normalverteilt sein sollten.

Ob es sich tatsächlich um einen statistischen Ausreißer handelt, wurde in jedem Fall mit Hilfe des *t-Testes* für die jeweils größte Abweichung geprüft. Wenn der berechnete *t-Wert* bei einem einseitigen Test die Signifikanzschranke aus der *Student-Verteilung* überschritt, wurde der verdächtige Wert eliminiert.

Bei einer Abweichung von der Normalverteilung war die Anwendung des Testverfahrens nach *Davies/Gather* nicht möglich. Bei nur drei vorliegenden Einzelwerten wurde auf die Durchführung von Ausreißertestverfahren verzichtet.

Da bei den geringen Datenmengen nicht mit Sicherheit auf das Vorliegen einer Normalverteilung geschlossen werden kann, wurden zum jeweiligen Vergleich zweier unabhängiger Stichproben sowohl parametrische als auch nichtparametrische Testverfahren angewendet. Zur Prüfung auf Varianzgleichheit (Homogenität) wurden der annähernd Normalverteilung voraussetzende *F-Test* und der durch Abweichungen von der Normalverteilung nicht wesentlich beeinflusste, parameterfreie *Pfanzagl-Test* eingesetzt.

Zur Prüfung auf Signifikanz (Vergleich der Mittelwerte) wurden einseitige Tests zwischen den betreffenden Grundgesamtheiten innerhalb einer Walzbahn und zweiseitige Tests zwischen der statistischen Masse zweier Walzbahnen mit Hilfe des *Lord*-, *Weir*-, *U*- und *Median-Testes* durchgeführt. Der für kleine Stichproben geeignete und gleiche Varianzen sowie Stichprobenumfänge n voraussetzende *Lord-Test* ist innerhalb $5 \leq n \leq 20$ genauso effektiv wie der *t-Test*. Das ebenfalls für kleine Stichproben anwendbare und annähernd

Normalverteilung voraussetzende *Weir-Test-Verfahren* ist auch für ungleiche Varianzen geeignet. Die Effizienz des parameterfreien *U-Testes* liegt im Vergleich zum *t-Test* bei 95 %. Da der *U-Test* für beide Grundgesamtheiten die gleiche Verteilungsform fordert, wurde der parameterfreie *G-Homogenitätstest* vorgeschaltet. Je größer die Unterschiede in der Verteilungsform sind, desto unzuverlässiger werden hierfür die Signifikanzschranken. Deshalb sollte bei starken Unterschieden in der Verteilungsform zur Kontrolle der Befunde aus dem *U-Test* zusätzlich der parameterfreie *Median-Test* durchgeführt werden.

Signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Grundgesamtheiten werden innerhalb einer Walzbahn mit einfachen und zwischen zwei Walzbahnen mit doppelten Unterstreichungen der Raumdichten bzw. Verdichtungsgrade einschließlich deren Standardabweichungen kenntlich gemacht.

Die Untersuchungen auf der *Baustelle 1* wurden unter dem Eindruck der ersten zwei Arbeitsstunden so angelegt, daß möglichst viele Meßwerte (2 x 9) systematisch in der Fläche hätten gewonnen werden können. Da die Walzenfahrer in der Folge vom festgelegten Walzschema abwichen, konnten letztlich nur jeweils zwei Walzbahnen pro Prüffeld für die Untersuchungen herangezogen werden. Aufgrund des damit deutlich verminderten Stichprobenumfanges von drei Meßpunkten pro Walzbahn war die Auswahl der statistischen Tests begrenzt. Auch die Wertung, ob die festgestellten Unterschiede signifikant sind oder nicht, wurde durch die geringe Anzahl an Meßwerten erschwert.

Aufgrund dieser Randbedingungen dürfen die aus dem Einbau auf der *Baustelle 1* abgeleiteten Ergebnisse lediglich als Trend gewertet werden.

Die in den folgenden Tabellen zur Arbeitseinstellung der Referenzwalze verwendeten Symbole bedeuten:

- + die für die Verdichtung der jeweiligen Asphaltsschicht vom Walzenhersteller empfohlene Einstellung der selbstregelnden Bandage,
- Bandage nicht aktiv,
- u Bandage aktiv, aber ungeregelt.

Vom Einbau der 18 cm dicken **Asphalttragschicht** auf der *Baustelle 1* liegen nur aus den Prüffeldern 3 bis 5 statistisch verwertbare Ergebnisse vor. Die auf dieser Baustelle durchgeführte zweistufige Verdichtung mit Hilfe einer *Gummiradwalze (GRW)* läßt unter den gegebenen Bedingungen keinen Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der Verdichtung erkennen (s. Tab. 6). Gleichzeitig wird aus dem internen Vergleich zum Einsatz der *CD54B AAC* im Automatikbetrieb und im manuellen Betriebsmodus deutlich, daß nur im geregelten Betrieb eine effektive Verminderung der Streuung der Raumdichten bei der Verdichtung der 18 cm dicken Asphalttragschicht erreicht werden konnte.

Tab. 6: Entwicklung der Verdichtung in den Walzbahnen 3 und 4 der Prüffelder 3 und 4 beim Einbau einer 18 cm dicken Asphalttragschicht AC 32 T S, 50/70 auf der Baustelle 1

Walze		CD54B AAC	
Betriebsart		ungeregelt	geregelt
aktive Bandagen		beide	
Verdichtungsmodus		0,75 mm/0,75 mm	0 / 0
Prüffeld / Walzbahn		3 / 3	4 / 4
Vorverdichtung	kg/m³	2182,6 / 2134,2 / 2101,5	2108,3 / 2175,8 / 2065,3
	kg/m³	<u>2139,4</u> ± 40,8	<u>2116,5</u> ± 55,7
	%	91,2 ± 1,7	90,2 ± 2,4
		2 WÜ mit GRW	2 WÜ mit GRW
2. WÜ mit Vib.	kg/m³	2248,4 / 2282,3 / 2212,8	2244,6 / 2232,2 / 2173,3
	kg/m³	2247,8 ± 34,8	2216,7 ± 38,1
	%	95,8 ± 1,5	94,4 ± 1,6
		2 WÜ mit GRW	2 WÜ mit GRW
3. WÜ mit Vib.	kg/m³	2285,4 / 2319,4 / 2240,0	
	kg/m³	<u>2281,6</u> ± 39,8	
	%	97,2 ± 1,7	
4. WÜ mit Vib.	kg/m³		2275,2 / 2260,3 / 2217,8
	kg/m³		<u>2251,1</u> ± 29,8
	%		95,9 ± 1,3

Zur Beantwortung der Frage, ob sich das Ausrüsten der zweiten Bandage mit einem zusätzlichen AAC-System vorteilhaft auf die Steigerung der Verdichtungsqualität auswirkt, wurde in den Prüffeldern 6 und 7 die zweite Bandage nur ungeregelt betrieben. Bedauerlicherweise leiden die Ergebnisse der beiden Prüffelder sehr stark unter den praktizierten Walzschemata, weshalb Vergleiche mit dem sich dafür anbietenden Prüffeld 4 nicht möglich sind. Bemerkenswert ist allerdings, daß in den Walzbahnen der beiden Prüffelder die Streuungen der Raumdichten abgenommen haben. Offensichtlich reagierten beide Systeme auf die sich mit der Abkühlung einstellende fiktive Steifigkeit der Asphaltschicht mit kurzen Verstellwegen und -zeiten. Dadurch wurde der Eintrag der Verdichtungsenergie vergleichmäßigt, auch wenn dieser nicht mehr genügte, um den geforderten Verdichtungsgrad erreichen zu können.

Die Ergebnisse der Prüffelder 4 und 5 dokumentieren die Vorteile des AAC-Systems bei der Verdichtung von Asphaltschichten, die den Einsatz großer Amplituden fordern.

Mit der Möglichkeit, die Empfindlichkeit des Regelsystems den gegebenen Bedingungen anpassen zu können, konnten die Standardabweichungen der Raumdichten bzw. der zugehörigen Verdichtungsgrade deutlich reduziert werden:

- von ± 55,7 kg/m³ nach dem Einbau fortlaufend auf ± 28,0 kg/m³ nach dem sechsten Walzübergang mit Vibration in der Walzbahn 4 des Prüffeldes 4 (s. Tab. 7) und
- von ± 26,6 kg/m³ nach dem Einbau auf ± 12,1 kg/m³ nach dem siebten Walzübergang mit Vibration in der Walzbahn 3 des Prüffeldes 5 (s. Tab. 8).

Tab. 7: Entwicklung der Verdichtung in den Walzbahnen 4 und 7 des Prüffeldes 4 beim Einbau einer 18 cm dicken Asphalttragschicht AC 32 T S, 50/70 auf der *Bau-stelle 1*

Walze	CD54B AAC		Referenzwalze
Betriebsart	geregelt		
aktive Bandagen	beide		beide, davon eine geregelt
Verdichtungsmodus	0 / 0		+ / u
Prüffeld / Walzbahn	4 / 4		4 / 7
Vorverdichtung	kg/m³	2108,3 / 2175,8 / 2065,3	2197,1 / 2190,4 / 2063,0
	kg/m³	<u>2116,5</u> ± 55,7	<u>2150,2</u> ± 75,6
	%	90,2 ± 2,4	91,6 ± 3,2
		2 WÜ mit GRW	2 WÜ mit GRW
1. WÜ mit Vib.	kg/m³	2244,6 / 2232,2 / 2173,3	2281,9 / 2280,0 / 2123,0
	kg/m³		2228,3 ± 91,2
	%		94,9 ± 3,9
2. WÜ mit Vib.	kg/m³	2244,6 / 2232,2 / 2173,3	2234,9 / 2208,4 / 2178,9
	kg/m³		2207,4 ± 28,0
	%		94,1 ± 1,2
		2 WÜ mit GRW	
4. WÜ mit Vib.	kg/m³	2275,2 / 2260,3 / 2217,8	2350,4 / 2322,6 / 2219,7
	kg/m³	2251,1 ± 29,8	2297,6 ± 68,9
	%	95,9 ± 1,3	97,9 ± 2,9
6. WÜ mit Vib.	kg/m³	2319,2 / 2305,9 / 2265,5	2354,8 / 2314,0 / 2221,5
	kg/m³	<u>2296,9</u> ± 28,0	<u>2296,8</u> ± 68,3
	%	97,9 ± 1,2	97,9 ± 2,9

Tab. 8: Entwicklung der Verdichtung in den Walzbahnen 3 und 7 des Prüffeldes 5 beim Einbau einer 18 cm dicken Asphalttragschicht AC 32 T S, 50/70 auf der *Bau-stelle 1*

Walze	CD54B AAC		Referenzwalze
Betriebsart	geregelt		
aktive Bandagen	beide		beide, davon eine geregelt
Verdichtungsmodus	0 / 0		+ / u
Prüffeld / Walzbahn	5 / 3		5 / 7
Vorverdichtung	kg/m³	2127,9 / 2086,9 / 2136,8	2233,0 / 2177,1 / 2045,7
	kg/m³	<u>2117,2</u> ± 26,6	2151,9 ± 96,2
	%	90,2 ± 1,1	91,7 ± 4,1
1. WÜ mit Vib.	kg/m³	2238,3 / 2198,9 / 2180,5	
	kg/m³	2205,9 ± 29,5	
	%	94,0 ± 1,3	
3. WÜ mit Vib.	kg/m³	2280,1 / 2253,7 / 2254,2	2313,5 / 2339,9 / 2218,5
	kg/m³	2262,7 ± 15,1	2290,6 ± 63,9
	%	96,4 ± 0,6	97,6 ± 2,7
5. WÜ mit Vib.	kg/m³	2246,4 / 2274,8 / 2244,4	2300,6 / 2309,6 / 2194,7
	kg/m³	2255,2 ± 17,0	2268,3 ± 63,9
	%	96,1 ± 0,7	96,6 ± 2,7
7. WÜ mit Vib.	kg/m³	2291,6 / 2290,3 / 2270,1	2311,9 / 2329,9 / 2200,4
	kg/m³	<u>2284,0</u> ± 12,1	2280,7 ± 70,2
	%	97,3 ± <u>0,5</u>	97,2 ± <u>3,0</u>

In den Walzbahnen 7 der Prüffelder 4 und 5 gelang es nicht, die Standardabweichungen im selben Umfang zu vermindern:

- von $\pm 75,6 \text{ kg/m}^3$ nach dem Einbau auf $\pm 68,3 \text{ kg/m}^3$ nach dem sechsten Walzübergang mit Vibration im Prüffeld 4 (s. *Tab. 7*) und
- von $\pm 96,2 \text{ kg/m}^3$ nach dem Einbau auf $\pm 70,2 \text{ kg/m}^3$ nach dem siebten Walzübergang mit Vibration im Prüffeld 5 (s. *Tab. 8*).

In den beiden Abschnitten der Baustelle 4, in denen die *CD54B AAC* zur Verdichtung der 14 cm dicken Asphalttragschicht eingesetzt wurde, gelang im Vergleich zur Referenzwalze eine Steigerung der Verdichtungsqualität sowohl hinsichtlich des Verdichtungszuwachses als auch der Gleichmäßigkeit der Verdichtung (s. *Tab. 9*).

Tab. 9: Entwicklung der Verdichtung beim Einbau einer 14 cm dicken Asphalttragschicht AC 32 T S, 30/45 auf der *Baustelle 4*

Walze		CD54B AAC	Referenzwalze
Betriebsart		geregelt	
aktive Bandagen		beide	beide, davon eine geregelt
Verdichtungsmodus		+2 / +2	+ / u
Prüffeld / Walzbahn		2 / 2	1 / 2
Vorverdichtung	kg/m ³	2289,7 / 2183,4 / 2285,5	2235,6 / 2177,2 / 2256,1
	kg/m ³	2235,8 / 2169,8 / 2184,4	2337,2 / 2211,5 / 2160,4
	kg/m ³	<u>2224,8</u> $\pm 53,6$	<u>2229,7</u> $\pm 63,5$
	%	92,7 $\pm 2,2$	92,9 $\pm 2,7$
3 stat. WÜ + 4 WÜ mit Vib.	kg/m ³		2418,1 / 2247,7 / 2288,2
	kg/m ³		2387,5 / 2292,7 / 2415,8
	kg/m ³		<u>2341,6</u> $\pm 74,3$
	%		97,6 $\pm 3,1$
2 stat. WÜ + 5 WÜ mit Vib.	kg/m ³	2421,3 / 2371,7 / 2422,9	
	kg/m ³	2378,9 / 2350,5 / 2337,8	
	kg/m ³	<u>2380,5</u> $\pm 35,4$	
	%	99,2 $\pm 1,5$	

Die Walzen arbeiteten mit beiden Bandagen im großen Amplitudenspektrum. Bei annähernd gleicher Qualität der Vorverdichtung nahm mit dem Einsatz der *CD54B AAC* bei geregelterm Betrieb im Verdichtungsmodus „+2“ nach zwei statischen und fünf dynamischen Walzübergängen die Standardabweichung von $\pm 53,6$ auf $\pm 35,4 \text{ kg/m}^3$ ab. Im Einsatzbereich der *Referenzwalze* fiel die Steigerung der Raumdichte bei einem dynamischen Walzübergang weniger, aber dafür einem statischen Walzübergang mehr, geringer aus. Die Standardabweichung konnte nicht verbessert werden.

Nach dem Walzen der auf der *Baustelle 2* eingebauten 6 cm dicken **Asphaltbinderschicht** (Ausgleichsschicht) aus einem AC 16 B S, 25/55-55 A zeigt sich beim Einsatz der *CD54B AAC* im geregelten Betrieb mit zwei Bandagen im Verdichtungsmodus „0“ und kleinem Amplitudenspektrum ein qualitativer Vorteil hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Verdichtung gegenüber dem manuellen Betrieb mit zwei aktiven Bandagen und einer konstanten Amplitude von 0,45 mm (s. *Tab. 10*). Die signifikante Verminderung der Standardabweichung nach sechs Walzübergängen mit Vibration im ungeregelten Betrieb von $\pm 33,1$ auf $\pm 12,6 \text{ kg/m}^3$ verdeutlicht, daß die auf Basis eines Kreisschwingers arbeitende Walze beim Verdichten dünner Asphaltbinderschichten auch im manuellen Modus hervorragend homo-

genisiert. Dennoch konnte die Standardabweichung im geregelten Betrieb bei einem durchgängig stärkeren Zuwachs der Raumdichte in allen Verdichtungsstufen kontinuierlich und signifikant von $\pm 77,6$ auf $\pm 7,6$ kg/m³ reduziert werden.

Tab. 10: Entwicklung der Verdichtung in den Walzbahnen 2 und 1 der Prüffelder 7 und 3 beim Einbau einer 6 cm dicken Asphaltbinderschicht AC 16 B S, 25/55-55 A auf der Baustelle 2

Walze		CD54B AAC	
Betriebsart		ungeregelt	geregelt
aktive Bandagen		beide	
Verdichtungsmodus		0,45 mm/0,45 mm	0 / 0
Prüffeld / Walzbahn		7 / 2	3 / 1
Vorverdichtung	kg/m ³	2390,2 / 2348,3 / 2313,6	2325,4 / 2129,4 / 2315,0
	kg/m ³	2295,1 / 2339,2 / 2353,2	2320,9 / 2286,2 / 2330,1
	kg/m ³	<u>2339,9</u> $\pm$ <u>33,1</u>	<u>2284,5</u> $\pm$ <u>77,6</u>
	%	91,9 $\pm$ <u>1,3</u>	89,7 $\pm$ <u>3,1</u>
2. WÜ mit Vib.	kg/m ³	2545,5 / 2522,2 / 2503,1	2492,8 / 2507,3 / 2484,5
	kg/m ³	2519,0 / 2519,2 / 2543,3	2518,0 / 2468,6 / 2493,8
	kg/m ³	2525,4 $\pm$ 16,2	2494,2 $\pm$ 17,3
	%	99,2 $\pm$ 0,6	98,0 $\pm$ 0,7
4. WÜ mit Vib.	kg/m ³	2583,3 / 2566,6 / 2556,1	2543,9 / 2544,9 / 2529,8
	kg/m ³	2576,8 / 2560,3 / 2567,8	2529,3 / 2507,9 / 2532,6
	kg/m ³	2568,5 $\pm$ 10,1	2531,4 $\pm$ 13,4
	%	100,9 $\pm$ 0,4	99,4 $\pm$ 0,5
6. WÜ mit Vib.	kg/m ³	2590,9 / 2609,6 / 2583,5	2556,5 / 2566,6 / 2555,4
	kg/m ³	2593,0 / 2592,9 / 2616,7	2543,9 / 2549,9 / 2555,7
	kg/m ³	<u>2597,8</u> $\pm$ <u>12,6</u>	<u>2554,7</u> $\pm$ <u>7,6</u>
	%	<u>102,0</u> $\pm$ 0,5	<u>100,3</u> $\pm$ 0,3

Tab. 11: Entwicklung der Verdichtung im Prüffeld 4 beim Einbau einer 6 cm dicken Asphaltbinderschicht AC 16 B S, 25/55-55 A auf der Baustelle 2

Walze		CD54B AAC	Referenzwalze
Betriebsart		geregelt	
aktive Bandagen		eine	
Verdichtungsmodus		0 / —	+ / —
Prüffeld / Walzbahn		4 / 2	4 / 1
Vorverdichtung	kg/m ³	2326,9 / 2288,4 / 2298,4	2300,2 / 2323,6 / 2335,8
	kg/m ³	2298,3 / 2290,3 / 2326,9	2335,9 / 2343,0 / 2348,2
	kg/m ³	<u>2304,9</u> $\pm$ 17,6	<u>2331,1</u> $\pm$ 17,3
	%	90,5 $\pm$ 0,7	91,6 $\pm$ 0,7
2. WÜ mit Vib.	kg/m ³	2470,0 / 2453,4 / 2476,2	2486,2 / 2511,4 / 2509,7
	kg/m ³	2482,7 / 2478,1 / 2493,8	2498,0 / 2486,7 / 2512,9
	kg/m ³	2475,7 $\pm$ 13,5	2500,5 $\pm$ 12,1
	%	97,2 $\pm$ 0,5	98,2 $\pm$ 0,5
4. WÜ mit Vib.	kg/m ³	2545,1 / 2514,3 / 2530,4	
	kg/m ³	2522,8 / 2490,6 / 2522,5	
	kg/m ³	<u>2521,0</u> $\pm$ 18,1	
	%	<u>99,0</u> $\pm$ 0,7	
4 dynam. WÜ + 1 stat. WÜ	kg/m ³		2533,0 / 2556,1 / 2554,8
	kg/m ³		2543,6 / 2545,3 / 2544,3
	kg/m ³		<u>2546,2</u> $\pm$ 8,5
	%		<u>100,0</u> $\pm$ 0,3

Im geregelten Ein-Bandagen-Betrieb erzielten beide Versuchswalzen einen vergleichbaren Verdichtungszuwachs (s. Tab. 11). Die CD54B AAC wurde im Verdichtungsmodus „0“ betrieben. Der Referenzwalze gelang es, die ohnehin geringen Streuungen aus der Vorverdichtung von $\pm 17,3$ auf $\pm 8,5$ kg/m³ zu vermindern. Obwohl die in den beiden Walzbahnen des Prüffeldes 4 in der Vorverdichtung festgestellten Unterschiede zwischen den arithmetischen Mittelwerten der Raumdichten nicht abgebaut werden konnten, führte die Reduzierung der Standardabweichung in der Walzbahn 1 zu signifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten der beiden Grundgesamtheiten nach dem vierten Walzübergang mit Vibration.

Im geregelten Betrieb mit einer aktiven Bandage sind die mit der Referenzwalze nach dem vierten dynamischen Walzübergang in der Walzbahn 1 des Prüffeldes 7 erzielten Mittelwerte der Raumdichten im Vergleich zu denen, die mit der im geregelten Zwei-Bandagen-Betrieb im Verdichtungsmodus „0“ arbeitenden CD54B AAC in der Walzbahn 1 des Prüffeldes 3 erreicht wurden, trotz einer um 0,6 % geringeren Vorverdichtung signifikant höher (s. Tab. 12). Mit beiden Walzen gelang es, die großen Streuungen aus der Vorverdichtung deutlich zu vermindern. Vermutlich war das Leistungsangebot der CD54B AAC im gewählten Verdichtungsmodus geringer als das der Referenzwalze. Dafür spricht, daß mit zwei weiteren dynamischen Walzübergängen die Verdichtung von 99,4 auf 100,3 % Marshall gesteigert und die Standardabweichung weiter auf $\pm 7,6$ kg/m³ reduziert werden konnte. Mit einer etwas aggressiveren Einstellung des Regelsystems hätte sich vermutlich eine stärkere Ansprache der Verdichtung bei einer gleichzeitig gedämpften Reduzierung der Streuung der Raumdichten um ihre arithmetischen Mittelwerte eingestellt.

Tab. 12: Entwicklung der Verdichtung in den Walzbahnen 1 der Prüffelder 3 und 7 beim Einbau einer 6 cm dicken Asphaltbinderschicht AC 16 B S, 25/55-55 A auf der Baustelle 2

Walze		CD54B AAC	Referenzwalze
Betriebsart		geregelt	
aktive Bandagen		beide	eine
Verdichtungsmodus		0 / 0	+ / —
Prüffeld / Walzbahn		3 / 1	7 / 1
Vorverdichtung	kg/m ³	2325,4 / 2129,4 / 2315,0	2213,5 / 2282,9 / 2183,3
	kg/m ³	2320,9 / 2286,2 / 2330,1	2286,5 / 2302,6 / 2348,3
	kg/m ³	<u>2284,5</u> $\pm$ 77,6	<u>2269,5</u> $\pm$ 60,6
	%	89,7 $\pm$ 3,1	89,1 $\pm$ 2,4
2. WÜ mit Vib.	kg/m ³	2492,8 / 2507,3 / 2484,5	2494,0 / 2524,4 / 2517,4
	kg/m ³	2518,0 / 2468,6 / 2493,8	2516,9 / 2521,5 / 2516,9
	kg/m ³	2494,2 $\pm$ 17,3	2515,2 $\pm$ 10,8
	%	98,0 $\pm$ 0,7	98,8 $\pm$ 0,4
4. WÜ mit Vib.	kg/m ³	2543,9 / 2544,9 / 2529,8	2536,5 / 2570,9 / 2544,7
	kg/m ³	2529,3 / 2507,9 / 2532,6	2568,9 / 2559,5 / 2589,9
	kg/m ³	<u>2531,4</u> $\pm$ 13,4	<u>2561,7</u> $\pm$ 19,3
	%	<u>99,4</u> $\pm$ 0,5	<u>100,6</u> $\pm$ 0,8
6. WÜ mit Vib.	kg/m ³	2556,5 / 2566,6 / 2555,4	
	kg/m ³	2543,9 / 2549,9 / 2555,7	
	kg/m ³	2554,7 $\pm$ 7,6	
	%	100,3 $\pm$ 0,3	

Tab. 13: Entwicklung der Verdichtung im Prüffeld 4 beim Einbau einer 6 cm dicken Asphaltbinderschicht AC 16 B S, 25/55-55 A auf der *Baustelle 3*

Walze	CD54B AAC		Referenzwalze
Betriebsart	geregelt		
aktive Bandagen	eine		
Verdichtungsmodus	+1 / —		+ / —
Prüffeld / Walzbahn	4 / 1		4 / 2

Vorverdichtung	kg/m³	2163,0 / 2128,3 / 2081,6	2154,4 / 2153,2 / 2160,6
	kg/m³	2093,1 / 2102,9 / 2099,9	2152,5 / 2132,1 / 2160,3
	kg/m³	<u>2111,5</u> ± <u>29,6</u>	<u>2152,2</u> ± 10,5
	%	<u>88,0</u> ± <u>1,2</u>	<u>89,7</u> ± <u>0,4</u>

2 stat. WÜ + 4 WÜ mit Vib.	kg/m³	2315,9 / 2336,8 / 2326,1	
	kg/m³	2333,1 / 2330,5 / 2332,1	
	kg/m³	<u>2329,1</u> ± <u>7,3</u>	
	%	97,0 ± 0,3	

1 stat. WÜ + 6 WÜ mit Vib.	kg/m³		2322,4 / 2310,2 / 2315,2
	kg/m³		2273,0 / 2305,0 / 2314,3
	kg/m³		<u>2306,7</u> ± 17,5
	%		96,1 ± 0,7

Mit jeweils einer aktiven, geregelten Bandage sind nach der Verdichtung der 6 cm dicken Asphaltbinderschicht aus einem AC 16 B S, 25/55-55 A mit den beiden Versuchswalzen auf der *Baustelle 3* keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianzen der beiden Grundgesamtheiten mehr feststellbar. Der CD54B AAC gelang es trotz deutlich schlechterer Ausgangsbedingungen, mit zwei dynamischen Walzübergängen weniger einen um 2,6 % Marshall stärkeren Verdichtungszuwachs bei gleichzeitig signifikanter Verminderung der Standardabweichung von ± 29,6 auf ± 7,3 kg/m³ zu erzielen (s. Tab. 13).

Interpretation der Untersuchungsergebnisse und Schlußfolgerungen

Aus dem internen Vergleich zum Einsatz der CD54B AAC im Automatikbetrieb und im manuellen Betriebsmodus wird deutlich, daß nur im geregelten Betrieb eine effektive Verminderung der Streuung der Raumdichten bei der Verdichtung der 18 cm dicken Asphalttragschicht erreicht werden konnte (s. Tab. 6). Damit wird der in Gl. (17) beschriebene Zusammenhang für die Verdichtung von Asphaltschichten, die den Einsatz der großen Amplitude bzw. des großen Amplitudenspektrums fordern, bestätigt. Für die Verdichtung der 6 cm dicken Asphaltbinderschicht auf der *Baustelle 3* gilt das vermutlich nicht (s. Tab. 10).

Die Feststellung von TAPPERT [23], daß ab einem bestimmten Niveau der Anfangsraumdichte deren Ungleichmäßigkeiten nicht mehr ausgeglichen werden können, bezieht sich auf den Einsatz unregelter Walzen. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen aber, daß bei hohen Vorverdichtungsgraden auch selbstregelnde Walzen u. U. nicht mehr in der Lage sind, die vorhandenen Verdichtungsunterschiede auszugleichen (s. Tabn. 7 bis 9).

Es hat sich bestätigt, daß bei nicht ausreichender Temperatur partieller Abschnitte der zu verdichtenden Asphaltschicht die Systeme aufgrund der zunehmenden fiktiven Steifigkeit

abregeln. Damit ist indirekt bewiesen, daß selbstregelnde Walzen nach dem Erreichen einer vorgegebenen Steifigkeit die Verdichtungsenergie reduzieren und dadurch eine Überverdichtung vermieden werden kann. Die Verdichtung ist innerhalb des zulässigen Temperaturbereiches des Asphaltmischgutes durchzuführen.

Da mit der Möglichkeit, über die vom Walzenfahrer wählbare Arbeitseinstellung des Regelsystems (Verdichtungsmodus) der zu verdichtenden Asphaltsschicht nicht von Anfang an die volle Energie anbieten zu müssen, die Bandbreite der Amplitudenverstellung reduziert wird, waren dementsprechend kurze Regelwege und damit Regelungsauern zu erwarten, so daß die Antwort des Systems auf eine Abweichung von der Soll-Steifigkeit möglichst in unmittelbarer Nähe des betreffenden Abschnittes gegeben und somit der Ausgleich der Unterschiede in den Raumdichten verstärkt werden würde.

Bei der Verdichtung von Asphaltsschichten, die den Einsatz großer Amplituden fordern, zeigt die Datenanalyse Vorteile einer derartigen Regelung auf: Die Qualität der Verdichtung konnte sowohl bezüglich des Verdichtungszuwachses als auch ihrer Gleichmäßigkeit gesteigert werden. Damit erfährt der in Gl. (18) dargestellte Zusammenhang eine Bestätigung, indem die Begrenzung der von einer selbstregelnden Walze maximal angebotenen Verdichtungsenergie unter Inkaufnahme eines gegebenenfalls zusätzlich erforderlichen Walzüberganges zu einer weiteren Verminderung der Unterschiede zwischen den Endraumdichten führt.

Bei der Verdichtung der 6 cm dicken Asphaltbinderschichten sind die mit den beiden Walzen erzielten Verdichtungsergebnisse als vergleichbar anzusehen (s. Tabn. 11 bis 13), weil beide Maschinen mit dem kleinen (begrenzten) Amplitudenspektrum arbeiteten und es in der Regel gelang, die überwiegend geringen Streuungen der Raumdichten aus der Vorverdichtung weiter zu vermindern. Nach Beendigung der Verdichtung mit den beiden in die Untersuchung eingebundenen Walzen pendelten sich die Streuungen der Meßwerte auf einem vergleichbaren Niveau ein.

Trotz der vielversprechenden Untersuchungsergebnisse darf der Einsatz selbstregelnder Walzen nicht losgelöst vom Einbauprozeß gesehen werden, und es bedarf eines hohen Ausbildungsstandes der Walzenfahrer, um die technischen Möglichkeiten ausschöpfen zu können. Die Einbauqualität sollte so gleichmäßig wie möglich sein. Es ist folglich zwingend erforderlich, der Planung des Bauprozesses besondere Sorgfalt zuteil werden zu lassen und insbesondere auf das Zusammenspiel zwischen Einbau- und Verdichtungsleistung zu achten. Dreh- und Angelpunkt hierbei ist die Walzverdichtung, weshalb in der Reihenfolge der technologischen Teilschritte *Transport – Übergabe – Einbau – Verdichtung rückwärts* gedacht werden muß! Insbesondere ist dem weitverbreiteten Verhalten der Fertigerfahrer, auf einen diskontinuierlichen Materialzulauf zur Baustelle mit wechselnden Einbaugeschwindigkeiten zu reagieren, mit Nachdruck Einhalt zu gebieten, weil das unweigerlich zur Störung des Walzschemas führt und Änderungen der Walzgeschwindigkeit nach sich zieht. Und wie bereits oben angesprochen, führen höhere Walzgeschwindigkeiten dazu, daß die Antwort des Regelsystems auf eine Abweichung von der Soll-Steifigkeit u. U. nicht mehr in der unmittelbaren Nähe des betreffenden Abschnittes gegeben werden kann.

Es ist davon auszugehen, daß sowohl eine angemessene Walzgeschwindigkeit als auch das über die Begrenzung des Verstellwinkels α bewußt verminderte Leistungsangebot zu einer Abnahme der Schwankungen der Raumdichte um ihren Mittelwert und damit zu einer weiteren Steigerung der Verdichtungsqualität beitragen werden.

Obwohl die Variationsmöglichkeiten bez. der Einstellung der Empfindlichkeit des AAC-Systems bauablaufbedingt stark limitiert und die Bedingungen sehr unterschiedlich waren (Asphaltemischgutsorten, Schichtdicken, Walzschemata), konnten mit der überwiegend in der neutralen Stellung „0“ betriebenen CD54B AAC sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Zurückkommend auf die in den Erläuterungen zur Abb. 10 gegebenen Hinweise zu einer gegebenenfalls erforderlichen Optimierung kann deshalb empfohlen werden, das Regelsystem zu Beginn der Verdichtung im Verdichtungsmodus „0“ zu betreiben, die Gleichmäßigkeit der Verdichtung zu prüfen und – sofern erforderlich – eine Optimierung vorzunehmen.

Zur Verdichtung von Asphaltdeckschichten aus *Offenporigem Asphalt (OPA)* und *Dünnen Schichten im Heißeinbau auf Versiegelung (DSH-V)* können selbstregelnde Walzen nur im statischen Verdichtungsmodus betrieben werden.

Aus der Sicht des Verfassers ergibt sich eine weitere Anwendungsgrenze aus der Relation der Einbaubreite zur Bandagenbreite. Bei der Verdichtung einer 20 cm dicken Frostschutzschicht FS 0/16 aus Basaltgestein war ab einer 50 %igen Walzbahnüberlappung ein Einfluß der bereits mit zwei dynamischen Walzübergängen bearbeiteten parallelen Walzbahn auf den Verdichtungskennwert zu erkennen [26]. Obwohl dieses Untersuchungsergebnis keinesfalls pauschal auf die Verdichtung von Asphaltschichten mit Hilfe selbstregelnder Walzen übertragen werden darf, sollte im Einzelfall der Einfluß eines 30 % überschreitenden Überlappungsmaßes durch Vergleichsfahrten mit und ohne Überlappung abgeklärt werden.

In der Praxis ist man bestrebt, die Effizienz der Verdichtung zu steigern und die Anzahl der Walzübergänge zu reduzieren, indem in die zu verdichtende Asphaltschicht von Beginn an eine möglichst hohe, konsumierbare Verdichtungsenergie eingeleitet wird.

Nach HUSCHEK [14] hat sich die überwiegend empirische Wissenschaft Straßenbau aus einer Vielzahl von praktischen Erfahrungen auf den verschiedenen Gebieten wie Materialtechnologie, Baumaschinentechnik, Fahrzeugtechnik oder beispielsweise der menschlichen Zuverlässigkeit entwickelt. „*Aber es liegt gerade im Wesen der Empirie, daß man sich immer wieder grundsätzlich zu fragen hat, ob sich denn das bisher Bewährte auch künftig unter anderen, härteren Bedingungen bewähren wird oder ob es ratsam erscheint, neue Konzepte in Erwägung zu ziehen.*“

Bedingt durch weiterhin steigende Verkehrs- und Klimabeanspruchungen stellt sich diese Frage gleichermaßen für die strukturelle Dimensionierung sowie für die Material- und Oberflächeneigenschaften mit dem Schwerpunkt, den Eintrag unebenheitsbedingter, dynamischer Zusatzlasten in die Fahrbahnen zu vermeiden. Dazu bedarf es noch homogenerer Verdichtungsergebnisse, weshalb zu überlegen wäre, zur Verdichtung von Asphaltschichten mit entsprechender Wärmekapazität ($d \geq 80$ mm) das Leistungsangebot einer selbstregelnden Walze etwas zu begrenzen und dafür u. U. einen zusätzlichen Walzübergang in Kauf zu nehmen.

Basierend auf der feingestuften Empfindlichkeit des *AAC-Regelsystems* besteht auch für Asphaltbinder- und -deckschichten die Möglichkeit, unter meßtechnischer Begleitung zu Beginn der Walzverdichtung eine Optimierung hinsichtlich des Zuwachses und der Gleichmäßigkeit der Verdichtung durchzuführen.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Feld sind strenggenommen nur für die vorgefundenen Einbau- und Verdichtungsbedingungen gültig und beziehen sich auf den Einsatz selbstregelnder Tandem-Vibrationswalzen.

Da die Durchführung der praktischen Untersuchungen den Einflüssen der Einbauprozesse unterlag, war eine zweifache Wiederholung der Versuche sowie eine vollständige Randomisierung zum Erreichen einer höheren statistischen Sicherheit nicht möglich, weshalb die Ergebnisse als Tendenz zu werten sind, obwohl sich bei der Verdichtung der Asphalttragschichten eine fundamentale, systematische Abnahme der Schwankungen der Raumdichten um ihre arithmetischen Mittelwerte zeigt.

Vom Verfasser werden weiterführende Untersuchungen unter Laborbedingungen empfohlen, um mögliche Besonderheiten verschiedener Asphaltmischgüter beim Einsatz selbstregelnder Tandem-Vibrationswalzen herausfinden und zugleich statistisch noch stärker belastbares Datenmaterial gewinnen zu können.

Nachweis der Quellen

- [1] AMMANN: https://1n000s1caj2j2lxh39vxh8l5-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/arp_95_stv_pivot-steer_tandem_roller_sell_sheet_mss-1297-01-en_190306.pdf; 26.05.2019, 13:04
- [2] ANGST, CH.: Morphologische Beurteilung verdichteter bituminöser Mischungen. Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ISETH, Mitteilung Nr. 51, Forschungsauftrag des EDI Nr. 24/78, Schlußbericht, 1982, Diss., 111 S.
- [3] ARAND, W.: Gedanken zum Verdichtungsgrad. Die Asphaltstraße, (4) 1983, 156 - 164
- [4] ARAND, W., MILBRADT, H.-R., STEINHOFF, G.: Untersuchung der Wirksamkeit von Hochverdichtungsbohlen durch Feldmessungen auf laufenden Baustellen. TU Braunschweig, Abschlußbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 7190, Braunschweig 1989
- [5] ARAND, W.: Zur Wirksamkeit von Hochverdichtungsbohlen. Straße und Autobahn, 41 (1990) 1, 14 - 22
- [6] BOMAG: https://www.bomag.com/dam/BOMAG/Other/Data_Sheets/Datasheet_BW154AP-4iAM_BW174AP-4FAM_PRD87054010_SA03.pdf; 26.05.2019, 12:35
- [7] CATERPILLAR: https://www.cat.com/de_DE/products/new/equipment/compactors/tandem-vibratory-rollers/1000030921.html; 26.05.2019, 14:09
- [8] CHANG, G. ET AL.: A Study on Intelligent Compaction and In-Place Asphalt Density. Final Report. The Transtec Group, Inc., Austin, December 2014. Federal Highway Administration Office of Pavement Technology, HIPT-10, Washington, DC, FHWA-HIF-14-017, pp. 309
- [9] DAINES, M. E.: Cooling of bituminous layers and time available for their compaction. 3rd Eurobitume symposium 1985, The Hague, 13 Sept. 1985, Volume 1, summaries and papers, pp. 236 - 242
- [10] DAVIES, L., GATHER, U.: The Identification of Multiple Outliers. Journal of American Statistical Association, 88 (1993), 782 - 792

- [11] GRAF, O.: Arbeitsablauf und Arbeitsrhythmus. In: LEHMANN, G. [Hrsg.]: Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin, Bd. 1: Arbeitsphysiologie. Urban & Schwarzenberg, Berlin, 1961, S. 789 - 824
- [12] HAMPEL, F. R.: The breakdown points of the mean combined with some rejection rules. *Technometrics*, 27 (1985), 95 - 107
- [13] HUSCHEK, S., ANGST, CH.: Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-Gemischen. Teil 2: Einfluß der Verdichtungsart auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltprüfkörpern. Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilung Nr. 44, Zürich, September 1980, S. 30 - 45
- [14] HUSCHEK, S.: Der „funktionale Schichtaufbau“, Gedanken zu einem neuen Konzept für Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt. *Bitumen* (1988) 2, 50 - 52
- [15] H VAE: Leitfaden zur Herstellung von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt – Hinweise zur Sicherstellung einer anforderungsgerechten Ebenheit. Ausg. 2019, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen, FGSV Verlag, Köln, FGSV 735, 86 S.
- [16] LAING, J.: Verdichtung von Asphaltbetondecken. *Bitumen, Teere, Asphalte, Pech*, 11 (1966) 1, 23
- [17] LOZÁN, J. L., KAUSCH, H.: Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler. 4. überarbeitete und ergänzte Auflage, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, 2007, ISBN 978-3-9809668-3-2, 303 S.
- [18] MINDOT: PaveCool 3.0. Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN, 2015
- [19] M VA: Merkblatt für das Verdichten von Asphalt. Ausg. 2005, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen, FGSV Verlag, Köln, FGSV 730, 76 S.
- [20] RENKEN, P.: Verdichtbarkeit von Asphaltbetongemischen und ihr Einfluß auf die Standfestigkeit. Schriftenreihe „Straßenwesen“ des Lehrstuhls für Straßenwesen und Erdbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 3, Braunschweig 1980, Diss., 161 S.
- [21] RICHTER, E., DIETRICH, W.: Kompaktasphalt – eine Bauweise der Zukunft. *Bitumen* (1997) 3, 98 - 101
- [22] RPE-STRA 01: Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen. Ausg. 2001. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln, FGSV 988
- [23] TAPPERT, A.: Verdichtung bituminöser Schichten – Erfahrungen mit Hochverdichtungsbohlen. *Teerbau-Veröffentlichungen* (1985) 31, 43 - 50
- [24] THURNER, H. F.: Flächendeckende Verdichtungskontrolle von Schwarzdecken. In *Technik und Technologie des Straßenbaus*, 3. Internationales Symposium im Rahmen der bauma 98, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1998, S. 129 - 133
- [25] UTTERODT, R.: Untersuchungen zur Korrelation zwischen Bandagenbeschleunigung und Verdichtungsgrad bei der Verdichtung einer 6 cm dicken Binderschicht aus Abi 0/11, PmB 45A. 31.10.2002, auszugsweise veröffentlicht
- [26] UTTERODT, R.: Compaction of a frost protection layer with a self-regulating tandem vibration roller. Caterpillar, interner Bericht, 17.06.2014, unveröffentlicht
- [27] UTTERODT, R.: Systematische Untersuchungen zur Wirksamkeit des AAC-Systems – Verdichtung von Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten mit Hilfe selbstregelnder Tandem-Vibrationswalzen auf Baustellen in der Bundesrepublik Deutschland im Zeitraum Oktober 2015 bis Oktober 2016. Interner Bericht für Caterpillar, Inc., 21.07.2018, 100 S., unveröffentlicht
- [28] ZANDER, U., BUCH, M., BIRBAUM, J.: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle (FDVK) von Asphalt. Abschlußbericht zum FGSV-Forschungsvorhaben FE 89.0288/2013, Universität Siegen, ifs Institut für Straßenwesen, Siegen, 2014, 83 S.