

## **Qualitätssicherung und Eigenüberwachung im Straßenbau**

### **Messtechnische Voraussetzungen**

Heinz Thurner, Geodynamik AB, Stockholm, Schweden

#### **Zusammenfassung**

*Unterhalt- und Reparaturarbeiten beeinflussen in steigendem Maße die Gesamtkosten im Straßenbau und entwickeln sich außerdem immer mehr zu einer Wachstumsbremse für die Wirtschaft. Höhere Qualität - d.h. Homogenität und Langlebigkeit des Bauwerkes - kann durch flächendeckende Eigenüberwachung erreicht werden. Dazu erforderliche Hilfsmittel sind vor allem Dokumentationssysteme im Erd- und Asphaltbau, satellitengesteuerte Positionierungssysteme und selbstregelnde Baumaschinen. Moderne Elektronik hat wesentlich zur Verbesserung der messtechnischen Voraussetzungen beigetragen.*

#### **Qualitätssicherung**

Die Gesamtkosten eines Bauobjektes setzen sich aus den Kosten für Planung, Bauausführung, Betrieb und Erneuerung sowie den zugehörigen Kapitalkosten zusammen. Im Verkehrswegebau beeinflussen dabei in zunehmendem Maße die Kosten für Instandhaltung und Instandsetzung die Gesamtkosten und die mit den dazu erforderlichen Maßnahmen verbundenen Verkehrsstauungen entwickeln sich außerdem immer mehr zu einer Wirtschaftsblockierung. Diesem Trend kann nur durch verbesserte Qualität bei der Erstellung z.B. der Straße, der Eisenbahn oder des Flugplatzes Einhalt geboten werden. Höhere Qualität bedeutet vor allem Homogenität und Langlebigkeit im Erd- und Asphaltbau. Homogenität und bessere Langlebigkeit können durch flächendeckende Eigenüberwachung während der Bauausführung erreicht und dokumentiert werden.

Die durchschnittliche Lebensdauer einer Straße beträgt ungefähr 12 Jahre. Gleichzeitig ist die Gewährleistungsfrist des Bauunternehmers derzeit 2 - 5 Jahre. Es liegt daher nahe, dass die Gewährleistungsfrist über kurz oder lang verlängert werden wird. Eine zuverlässige Qualitätssicherung, bei der schon während der Bauausführung ein, jeden Quadratmeter erfassendes Qualitätssicherungssystem zum Einsatz kommt, ist die beste Voraussetzung, dass längere Gewährleistungsfristen angeboten werden können. Die Qualitätssicherung bietet nicht nur dem Bauunternehmer bei der Optimierung des Bauprozesses wesentliche Vorteile, sondern ermöglicht ihm auch, dem Auftraggeber unmittelbar, d.h. bereits während des Bauablaufes, eine flächendeckende Qualitätsdokumentation zu geben. Selbstverständlich müssen bei derartigen Systemen hohe Anforderungen an die Messtechnik gestellt werden.

#### **Eigenüberwachung**

Steigende Tagesleistungen und immer kürzere Bauzeiten erfordern ein Umdenken bei der Konzipierung der Eigenüberwachung. Konventionelle, stichprobenartige Punktkontrollen, die den Bauablauf hindern oder unterbrechen, sowie stunden- oder tagelange Wartezeiten auf das Ergebnis von Kontrollmessungen entsprechen nicht länger den Anforderungen einer modernen Baustelle. Ganz abgesehen davon, dass das am Bau praktizierte Verhältnis des Volumens der

Kontrollproben zum Volumen der ausgeführten Bauleistungen völlig unakzeptabel ist. Wenige Liter Bodenprobe oder Bohrkern auf mehrere Tausend m<sup>3</sup> verdichtetes Material ergeben ein Verhältnis in der Größenordnung von 1:1.000.000 eine Ziffer, die heute wohl kaum in einer anderen Branche zu finden ist.

Aber nicht nur die erwähnten verlängerten Gewährleistungsfristen, sondern auch privat finanzierte Objekte (Betreiberstrassen), „Public-Private-Partnership, P.P.P.“-Modelle, „Build-Own-Operate-Transfer,“(B.O.O.T.)“-Objekte und Funktionsbauverträge gehen von einer verbesserten Eigenüberwachung des Bauunternehmers aus. In allen diesen Fällen können Homogenität und lange Langlebigkeit des Bauobjektes nur dann erzielt werden, wenn der Einbau von ungebundenen und gebundenen Schichten mit Hilfe von flächendeckenden Verfahren gesteuert, optimiert und überwacht werden kann.

Es ist zu erwarten, dass Auftraggeber in absehbarer Zeit den flächendeckenden Nachweis einer derartigen Eigenüberwachung des Unternehmers als Kontrollmethode anerkennen, was wiederum wesentlich dazu beitragen wird, Kontrollkosten zu reduzieren und den Bauablauf zu beschleunigen.

Gegen die bisher verwendeten, flächendeckenden Verfahren wird manchmal eingewendet, dass es sich dabei nur um Relativmethoden handelt, konventionelle Kontrollverfahren ergäben absolute Werte. Leider vergisst man bei dieser Argumentation, dass auch die Resultate bisher praktizierter Methoden nur dann als absolut bezeichnet werden können, wenn sie strikt dem vorgegebenen Standard (Gerät, Ausführung, Auswertung) entsprechen. Damit ist auch gesagt, dass Resultate verschiedener Methoden – Ersatzverfahren, Plattendruckversuch, Isotopengerät – nicht in absoluten Termen miteinander verglichen werden können. Eigenüberwachung mit Relativmethoden ist völlig ausreichend, um Homogenität zu erzielen, so lange jeder Quadratmeter erfasst wird.

Es liegt nahe, zu erwarten, dass Auftraggeber in Zukunft eine flächendeckend dokumentierte, höhere Qualität bei der Bewertung von angebotenen Bauleistungen entsprechend berücksichtigen werden.

Im weiteren sollen die messtechnischen Voraussetzungen verschiedener Verfahren - konventioneller Punktmethode, flächendeckender Verfahren und kommender, elektronisch gesteuerter, „intelligenter“ Baumaschinen – an einigen Beispielen kurz beschrieben und verglichen werden.

### **Konventionelle Messverfahren im Straßenbau**

Die meisten konventionellen Kontrollmethoden im Straßenbau sind Punktmethode, die systematisch oder statistisch eingesetzt werden. Im Erdbau wären hier der statische Plattendruckversuch, verschiedene Ersatzmethoden, Isotopeneinstichsonden und Fallgewichte zu erwähnen. Im Asphaltbau werden hauptsächlich Bohrkern, Isotopenaufsetzsonden, PQI- und DOR-Geräte verwendet.

Diese Verfahren sind durchwegs standardisiert und ihre Resultate können daher, solange vom standardisierten Verfahren nicht abgewichen wird, als Absolutwerte angegeben und – für die jeweilige Methode - miteinander verglichen werden. So sind beispielsweise bei dem im Erdbau gebräuchlichen statischen Plattendruckversuch die Messgrößen  $E_{v1}$  und  $E_{v2}$  strikt an die normierte Geometrie der Lastplatte, an normierte Belastungs- bzw. Entlastungs-Zyklen (Laststufen,

Be-/Entlastungsdauer) sowie an eine normierte Berechnung der Tragfähigkeitsbeiwerte  $E_{v1}$  und  $E_{v2}$  gebunden.

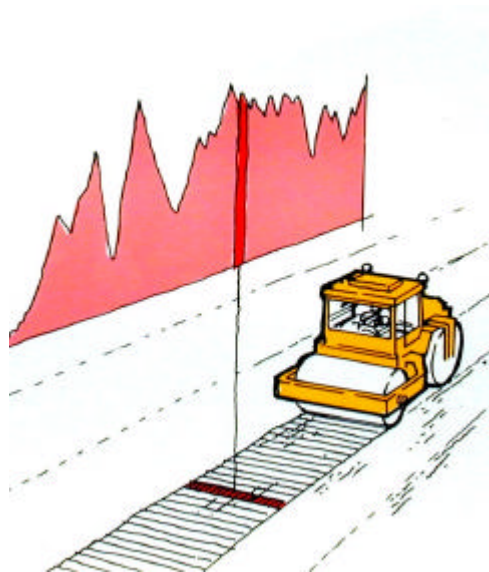
Die Tiefenwirkung der einzelnen Punktmethoden, sowohl im Erd- als auch im Asphaltbau – ist von Methode zu Methode unterschiedlich. Beim statischen Plattendruckversuch entspricht der  $E_{v2}$ -Wert einem Durchschnittswert bis zu einer Tiefe von ca.  $1.5 \times$  Plattendurchmesser. Allerdings kann man den  $E_{v2}$ -Wert einer 30 cm Platte nicht unmittelbar mit dem  $E_{v2}$ -Wert der 60 cm Platte vergleichen. Bei nicht homogenen Bodenverhältnissen wie z.B. bei unterschiedlicher Kornverteilung (Anhäufung von grobem oder feinem Material) bzw. bei einer gut verdichteten, ungebundenen Tragschicht auf weichem Erdplanum ist der gemessene  $E_{v2}$ -Wert ein Durchschnittswert, der bei naheliegenden Messpunkten starke Unterschiede aufweisen wird.

Der Dichtewert einer Ersatzmethode (Wasserblase, Sand, Bentonite) gilt selbstverständlich nur für das entnommene Bodenvolumen. Deshalb kann der gemessene Wert der Dichte bzw. des Verdichtungsgrades an der Oberfläche einer verdichteten Schicht relativ niedrig sein (durch Auflockerung bei vibrierender Verdichtung), wird in der Mitte der Schicht am höchsten und in den unteren Bereichen wieder niedriger sein.

Radiometrische Aufsetzsonden im Erd- und Asphaltbau haben je nach Material unterschiedliche Tiefenwirkungen, wobei tiefere Schichten anteilig immer weniger ins Gewicht fallen. Zudem beeinflussen Wassergehalt oder Bitumenanteil das Messergebnis.

### Messtechnik bei flächenhaften Verfahren im Erdbau

Seit mehreren Jahren sind Verfahren der „Flächendeckende Verdichtungskontrolle, FDVK“ im Erdbau Bestandteil der RVS in Österreich [9], der ZTVE in Deutschland [10] und der ATV-VÄG in Schweden [11]. Bei diesen Verfahren wird über walzenintegrierte Messgeräte kontinuierlich die Beschleunigung der Walzenbandage registriert und aus dem Beschleunigungssignal ein Messwert der Verdichtung ermittelt [2], [7].



**Abbildung 1. Messwert der „Flächendeckenden Verdichtungskontrolle, FDVK“.**

Man kann die Messwerte der FDVK im Prinzip mit einer Serie von dynamischen Probelastungen vergleichen. Die Bandage der Walze schlägt bei jeder Umdrehung der Unwucht einmal – das sind ungefähr alle 5 cm - gegen die Unterlage, jeder Schlag entspricht einer dynamischen Probelastung. Die errechneten Messwerte stellen den Zustand der zu verdichtenden Fläche dar (Abbildung 1). Nachdem dieser Zustand dem Walzenfahrer unmittelbar und flächendeckend angezeigt wird, weiß der Fahrer immer, wo die Verdichtung abgeschlossen ist, wo weitere Übergänge notwendig sind bzw. welche Bereiche mit der aktuellen Walze nicht ausreichend verdichtet werden können.

Derzeit sind die Messwerte der FDVK - der „CMV“-Wert und der „Omega“-Wert (des Verdichtungsmessers Terrameter) bei vibrierenden Walzen und der Oszillometerwert OMV bei oszillierenden Walzen - dimensionslose Relativwerte, die konstante Walzenparameter (Bandagendurchmesser, Linienlast, Frequenz, Amplitude, Geschwindigkeit etc.) voraussetzen und die bei Bedarf über Dichtemessungen, statische Plattendruckversuche oder Fallgewichtmessungen kalibriert werden können [1], [2], [4].

Auch ohne Kalibrierung kann die flächenhafte Darstellung des Verdichtungszustandes mit Hilfe der dimensionslosen Relativwerte nach dem FDVK-Verfahren unmittelbar zur Eigenüberwachung und zur Steuerung der Verdichtung herangezogen werden. Auf dem Bildschirm des FDVK-Gerätes sieht der Walzenfahrer immer, wo sich die Walze befindet, wo fertig verdichtet ist und wo weitere Übergänge notwendig sind. Außerdem werden Bereiche abgegrenzt, die mit der aktuellen Walze nicht verdichtet werden können.

Sobald der Walzenfahrer auf seinem Bildschirm sieht, dass die Verdichtung abgeschlossen ist, kann er direkt auf der Baustelle ein FDVK-Protokoll ausdrucken. Das Protokoll ist sein Qualitätsnachweis, der auch dazu verwendet werden kann, eventuell benötigte Punktkontrollen gezielt einzusetzen. Weist das FDVK-Protokoll Bereiche mit unzulänglich niedrigen CMV -Werten aus, kann ein bodenmechanischer Sachverständiger durch Augenschein schnell feststellen, ob die Ursache in mangelhafter Verdichtung oder in zu hohem Wassergehalt zu suchen ist und entsprechende Maßnahmen veranlassen.

### **Prüfwalze - Standardwalze - Zylindermodul**

Um das zeitaufwendige Kalibrieren von Walzen bei der Verdichtung zu vermeiden, können „Prüfwalzen“ zum Einsatz kommen. Prüfwalzen sind entweder Walzen, deren FDVK-Messwerte – wie z.B. in Österreich - über Verdichtungsversuche mit verschiedenen Materialien generell geicht wurden, oder Walzen die - wie vielerorts in Deutschland - für gewisse Baustellen kalibriert wurden. Bei Baustellen mit Prüfwalzen wird die eigentliche Verdichtungsarbeit mit beliebigen Walzen durchgeführt und das Verdichtungsresultat auf jeder Schicht mit einer Prüfwalze abgenommen und dokumentiert.

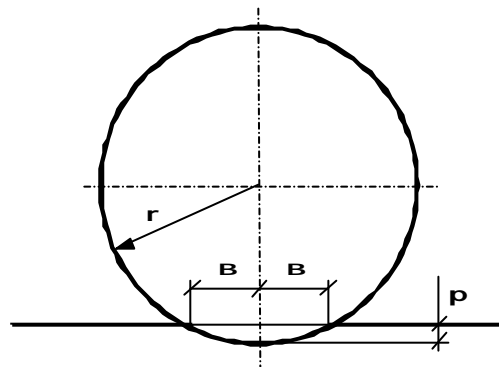
Wenn Auftraggeber in Zukunft die flächendeckende Eigenüberwachung des Bauunternehmers als Prüfmethode anerkennen, ist es von Vorteil, wenn dabei Walzen bzw. Messverfahren verwendet werden, die analog zu den konventionellen Kontrollmethoden standardisiert sind.

Um dem Messwert der FDVK eine dem  $E_{v2}$ -Wert entsprechende Dimension zuzuordnen zu können, muss eine - z.B. dem Plattendruckversuch entsprechende - standardisierte Walze verwendet und der FDVK-Messwert nach einem standardisierten Verfahren berechnet werden. Dabei sind vor allem die folgenden Einflussgrößen zu beachten:

- Die Bandage der Walze ist ein Zylinder mit einer Länge, einem Radius, einer Linienlast etc., die von Walze zu Walze verschieden sind.
- Statische Auflast und Dämpfer der Bandage variieren von Walze zu Walze.
- Be-/Entlastungsverlauf variieren (die Bandage der Walze verdichtet mit von Walze zu Walze unterschiedlicher Amplitude und Frequenz).
- Bei den meisten Walzen können Geschwindigkeit, Vibrationsamplitude und Vibrationsfrequenz stufenweise - und bei den neuesten Modellen sogar kontinuierlich - verstellt werden.

Wird der Verdichtungsablauf einer standardisierten Walze (mit bestimmter Länge, Durchmesser, Linienlast, Frequenz, Amplitude, Abrollgeschwindigkeit etc.) als eine Serie dynamischer „Probebelastungen“ definiert, entspricht jeder Schlag der Bandage im Prinzip dem Schlag einer dynamischen Lastplatte [1], [2].

Wenn ein Zylinder eine ebene Fläche belastet, wird der Zylinder immer bis zu einer gewissen Tiefe in die Bodenoberfläche eindringen und im Boden wird eine Bruchzone entstehen. Die Breite der Kontaktzone zwischen Zylinder und Boden wird ungefähr proportional zur Quadratwurzel der vertikalen Tiefe des Eindruckes sein ( $B \approx \sqrt{2rp}$ , siehe Abbildung 2) [5].



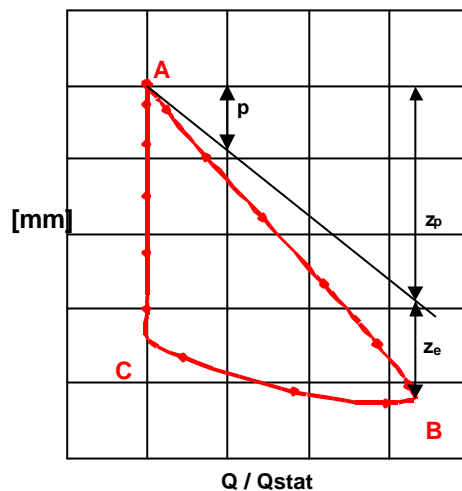
### **Abbildung 2. Zylinder auf nicht bindigem Boden.**

Analog zur Tragfähigkeitsberechnung für ein rechteckiges Streifenfundament auf nicht bindigem Boden wird angenommen, dass die Bruchlast proportional zu  $B^2$  ist.

Daraus ergibt sich, dass es für den plastischen Anteil der vertikalen Deformation einen linearen Zusammenhang gibt zwischen Kraft und Deformation. Dieser Zusammenhang konnte auch durch Versuche im Labor bestätigt werden [3].

Die elastische Deformation des Bodens unter der Zylinderbelastung hängt ab von der Dicke und den Modulen der Schicht unter der Kontaktzone. Abbildung 3 zeigt als Resultat einer Computersimulation [5] das Verhalten einer typischen, vibrierenden Walzenbandage auf nicht bindigem Boden. Der plastische Effekt ist dargestellt als die, nur durch das statische Gewicht verursachte Eindringtiefe in der Bodenoberfläche ( $p$ ).

Das Diagramm der Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen der vertikalen Belastung und der Deformation während eines Vibrationszyklusses. Die Zeit ist in Sechzehnteln des Zyklusses entlang der Kurve angegeben.



**Abbildung 3. Kraft/Setzungsdiagramm bei Belastung einer nicht bindigen Bodenfläche durch einen Zylinder.**

Die Belastungsphase A-B enthält sowohl die plastische als auch die elastische Deformation. Unter der maximalen Last ist der plastische Anteil  $z_p$  und der elastische Anteil  $z_e$ . Während der Entlastungsphase B-C wird nur ein Teil der elastischen Energie zur Bandage zurückgeführt, der Rest geht durch radiale (Oberflächenwellen) und visköse Verluste verloren. Von der plastischen Deformation wird nichts wiedergewonnen. Ein Teil der plastischen Deformation resultiert in der Verdichtung, aber der größte Teil wird bei der Wiederauflöckerung des Bodens innerhalb der Bruchzone nutzlos verbraucht.

Dieses Beispiel veranschaulicht deutlich die Problematik bei der Berechnung der Bodensteifigkeit, wenn nur von der Belastungsphase A-B ausgegangen wird. Eine Differenzierung zwischen plastischem und elastischem Anteil der Deformation ist möglich und sollte immer ausgenutzt werden. Dadurch erhält man einen Elastizitätsmodul  $E$  (oder  $G$ ) und zusätzlich den Parameter  $p$  der den Boden in bezug auf dessen plastische Eigenschaften charakterisiert.

Einem „Zylindermodul,  $E_c$ “ kann somit die Dimension MPa zugeordnet werden und er kann mit einer – für praktische Bedürfnisse ausreichenden – Genauigkeit mit einem standardisierten  $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$  oder  $E_{vd}$  verglichen werden, jedoch nur wenn die folgenden, wesentlichen messtechnischen Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die Parameter der Standardwalze dürfen nicht verändert werden.
2. Berechnungsverfahren müssen plastische Deformationen berücksichtigen.
3. Der Tiefenbereich der Walze muss beachtet werden.

Ad 1: Wird auch nur einer der Walzenparameter wesentlich geändert, entspricht der  $E_c$  nicht länger dem definierten Standard. Dies fällt besonders bei selbstregelnden Walzen ins Gewicht („Intelligent Compaction Machine, ICM“), da diese Walzen ihre Geschwindigkeit, Frequenz und Amplitude automatisch den jeweiligen Bodenverhältnissen unter der Bandage anpassen.

Auch in diesem Fall gibt es theoretische Zusammenhänge, die eine Berechnung des  $E_c$  bei unterschiedlichen Voraussetzungen ermöglichen und somit die Zuordnung einer absoluten Dimension erlauben. Hier muss vom jeweiligen Hersteller des Messgerätes der Nachweis erbracht werden, dass der in der Walze angezeigte bzw. in einem FDVK-Protokoll ausgewiesene Mess-

wert tatsächlich parameterunabhängig ist. Diese Parameterunabhängigkeit kann theoretisch nachgewiesen werden, sollte aber unbedingt durch Messungen an bzw. unter der Walze sowie nach vollendeter Verdichtung dokumentiert werden.

Ad 2: Bei der Verdichtung von Böden werden in erster Linie plastische Deformationen angestrebt, außerdem ist bekannt, dass sich unter jeder vibrierenden Walze - auch beim letzten Übergang - eine deutliche, plastisch deformierte Zone befindet. Diese Tatsachen müssen im Verfahren zur Berechnung eines  $E_c$  berücksichtigt werden, weshalb Berechnungsverfahren mit ideal-elastischen Annahmen unzulässig sind [5].

Ad 3: Selbstverständlich muss auch bei der Anwendung von  $E_c$  die Tiefenwirkung der Walze auf heterogenem Material bzw. Mehrschichtenfolge beachtet werden. Vorab unbekannte Anomalien im Untergrund werden immer zu einer gewissen Streubreite der Messergebnisse und der Verdichtungsergebnisse führen. Aber diese Streuungen sind auch Bestandteil aller konventionellen Verfahren, bedingt durch Einflüsse der Unterlage, des Gerätes, der Auswertungsmethode und – nicht zuletzt – durch den Faktor Mensch. Der unbestreitbare Vorteil aller flächendeckenden Messverfahren liegt in dem unmittelbaren Vorliegen des Messergebnisses sowie in der Flächendeckung und dem dadurch gegebenen Überblick, der mit keiner systematischen oder statistischen Punktmethode erreicht werden kann.

### **Messtechnik bei flächenhaften Verfahren im Asphaltbau**

Bei der Eigenüberwachung und Kontrollprüfung von gebundenen Straßenbelägen wird zerstörungsfreien Meßmethoden eine immer größere Bedeutung zugemessen, u.a. weil die bisher durchgeführten Kernbohrungen Schadstellen in der Decke hinterlassen. Außerdem ist auch hier – aus Gründen der Effizienz und um Homogenität und Langlebigkeit erreichen zu können - ein flächendeckendes Verfahren zur optimalen Eigenüberwachung der Verdichtungsarbeit erforderlich. Allerdings sind die messtechnischen Voraussetzungen im Vergleich zum Erdbau wesentlich komplexer.

Im Erdbau können unzureichend verdichtete Bereiche im Prinzip immer nachverdichtet werden. Beim Einbau von Asphaltmischgütern ist die Verdichtungsarbeit in hohem Masse von der Temperatur des Mischgutes abhängig. Außerdem erfolgt der Einbau von Mischgut nicht in abgegrenzten Flächen, sondern in kontinuierlicher Form, was ein mobiles Positionierungssystem voraussetzt. Folgerichtig sind die Messung der Mischguttemperatur und die genaue Positionierung des Fertigers und aller Walzen wesentliche Bestandteile des Verfahrens der „Flächendeckenden Asphaltverdichtung, FDAV“ (Abbildung 4).



**Abbildung 4. Flächendeckende Asphaltverdichtung im Einsatz auf der BAB A 20.**

Die FDAV ist ein Verfahren zur flächenhaften Steuerung der Verdichtungsarbeit beim Einbau von Asphalt-Mischgut mit der Zielsetzung eine homogene Verdichtungsarbeit zu leisten. Das Resultat der Verdichtungsarbeit kann durch Flächenprotokolle nachgewiesen werden [6], [8].

Die FDAV baut auf einem elektronischen System auf („Asphalt Compaction Documentation System, ACD“), das es den Fahrern des Einbauteams – bestehend aus einem Fertiger und bis zu 6 Walzen – ermöglicht, einerseits im zulässigen Temperaturbereich zu operieren, andererseits „nützliche“ Verdichtungsarbeit leisten zu können, d.h. durch gezielte Walzenübergänge jede Überverdichtung bzw. Unterverdichtung zu vermeiden. Alle Fahrer des Einbauteams können auf den Bildschirmen des Systems, jede Sekunde erneuert, folgende Information ablesen:

- Die momentane Mischguttemperatur unmittelbar hinter der Fertigerbohle bzw. vor jeder der verdichtenden Walzen.
- Eine flächenhafte, graphische Darstellung des momentanen Standes der gemeinsam erzielten Verdichtungsarbeit.
- Die Position jeder Maschine (zur kontinuierlichen Lagebestimmung des Fertigers und der Walzen wird ein Positionierungssystem mit einer Genauigkeit von 1-2 cm verwendet).

Der Messwert der FDAV, der „Asphalt Compaction Value, ACV“-Wert, ist - wie der FDVK-Messwert im Erdbau - derzeit ebenfalls ein dimensionsloser Relativwert. Bei der Berechnung des ACV-Wertes wird die zu verdichtende Fläche in Zellen von der Größenordnung  $1 \text{ m}^2$  unterteilt und für jede Zelle ein Messwert der Verdichtungsarbeit ermittelt. Der Messwert jeder Zelle errechnet sich aus

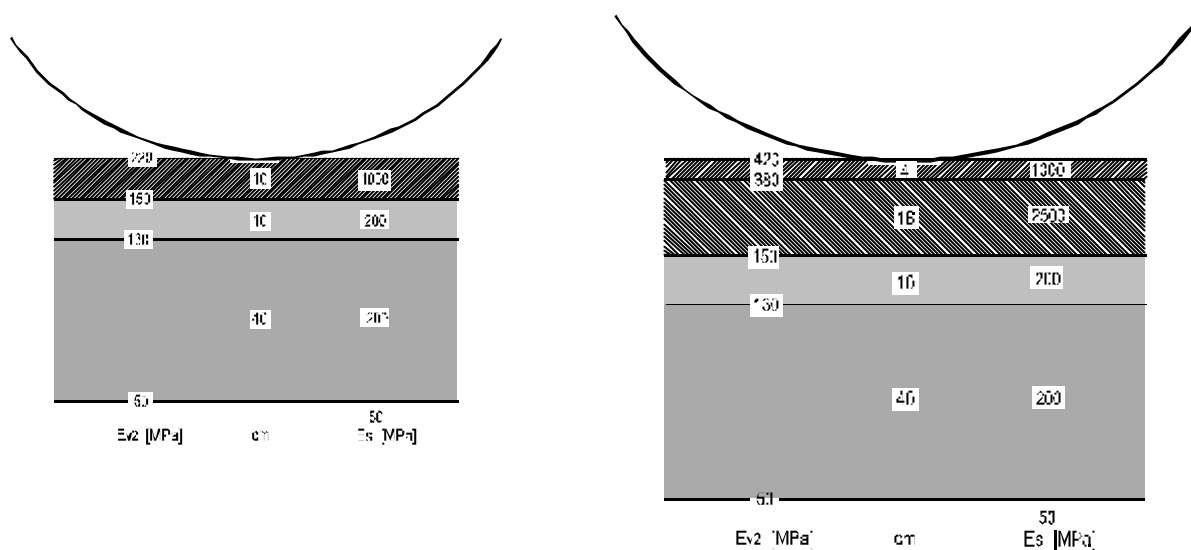
- Der Vorverdichtung hinter der Fertigerbohle.
- Dem akkumulierten Messwert aller vorangegangener Bandagenübergänge.
- Der Messwert-Zuwachsrate aus dem aktuellen Bandagenübergang.



Bei der Berechnung der jeweiligen Messwertzuwachsrate sind die Mischguttemperatur, die Anzahl der vorangegangenen Bandagenübergänge, sowie alle wichtigen Maschinenparameter der einzelnen Walzen einzuwichten.

### Verformungsmodul – Steifemodul - Integralmodul

Die Voraussetzungen, von der Walze aus einen Modul der zu verdichtenden Asphalttschicht zu messen, sind komplex. Nicht nur aufgrund des viskoelastischen und temperaturabhängigen Zustandes in der, bzw. des elastoplastischen Zustandes unter der zu verdichtenden Asphalttschicht, sondern auch wegen der beträchtlichen Unterschiede der aktuellen Verformungsmodule  $E_v$  bzw. Steifemodule  $E_s$  in der zu verdichtenden Schicht bzw. in der Schichtfolge darunter.



**Abbildung 5. Verformungs- und Steifemodule beim Verdichten unterschiedlicher Schichtfolgen.**

Abbildung 5a illustriert die Verdichtung einer 10 cm dicken, gebundenen Tragschicht auf ungebundenem Oberbau, bestehend aus einer 10 cm dicken Tragschicht und einer 40 cm dicken Frostschutzschicht. Links in der Prinzipskizze sind die  $E_{v2}$ -Werte und rechts die  $E_s$ -Werte der einzelnen Schichten im Endzustand der Verdichtung der Asphalttschicht angegeben. Das maßstabgerechte Segment der Walzenbandage lässt die Tiefenwirkung der Bandage ahnen.

Messtechnisch ausschlaggebend ist hier die Steifigkeit der Asphalttschicht. Betrachtet man eine gewisse Zelle der Asphalttschicht, so dämpft das heiÙe, unverdichtete Mischgut zu Beginn der Verdichtung die Vibration der Bandage so stark, dass die gesamte Verdichtungsenergie der vibrierenden Walzenbandage zur Verformung des Mischgutes benötigt wird. Je weiter die Verdichtung fortschreitet, desto steifer wird die Asphalttschicht und mit zunehmender Steifigkeit der Asphalttschicht nimmt der Einfluss der ungebundenen Oberbauschichten immer mehr zu. Am Ende der Verdichtung kann die Asphalttschicht im Prinzip als eine dünne Membran betrachtet werden, durch die der größte Teil der Verdichtungsenergie in tiefer gelegene, weichere Schichten übertragen wird.

Abbildung 5b illustriert die Verdichtung einer 4 cm dicken Deckschicht auf der abgefrästen Oberfläche einer 16 cm dicken Asphalttschicht, die wiederum auf 10 cm ungebundener Tragschicht und 40 cm Frostschutzschicht aufliegt. In diesem Fall wird die Verdichtungsarbeit der Walzenbandage bereits beim ersten Übergang durch die steife Unterlage (= alte Asphalttschicht) beeinflusst. Auch wenn die „Membrane“ hier dicker ist, wird der ungebundene Oberbau das Messergebnis beeinflussen.

Mit diesem Beispiel soll die Problematik der Messtechnik veranschaulicht werden:

1. Ein von der Walzenbandage aus gemessener Steifigkeitswert ist ein Integralwert, der sehr stark von plastischen Deformationen abhängig ist und durch tiefer gelegene Schichten beeinflusst wird.
2. Bereits nach der ersten Überfahrt nimmt der Anteil der zu verdichtenden Asphalttschicht am Integralwert schnell ab.
3. Die Steifigkeit der viskoelastischen Asphalttschicht hängt sehr stark von der Temperatur des Mischgutes ab.
4. Sowohl die zu verdichtende Asphalttschicht, als auch deren Unterlage sind mehr oder weniger heterogen (= die Steifigkeit variiert).

Bedenkt man dazu noch, dass eine Asphalttschicht normalerweise mit ca. 10 Übergängen fertig verdichtet wird und dass in diesem Zeitraum die Mischguttemperatur von ca. 170° auf 70° absinkt und der Steifemodul von ca. 20 MPa auf ca. 2.000 MPa ansteigt, dann erkennt man, wie hoch die Anforderungen an Messtechnik und Auswerteverfahren sein müssen, um Aussagen treffen zu können, die eine praxisgerechte Steuerung und Dokumentation der Verdichtungsarbeit ermöglichen.

Aus diesen Gründen wird bei der FDAV derzeit noch bewusst darauf verzichtet, die Steifigkeit der Asphalttschicht in den ACV-Wert einfließen zu lassen und nur die Mischguttemperatur gemessen.

### **„Intelligente“ Verdichtungsmaschinen**

Die erste Prototypen einer „Intelligent Compaction Machine, ICM“ wurde bereits bei der Bauma 1992 ausgestellt. Inzwischen sind andere Prototypen zur Verdichtung von Böden eingesetzt worden, aber offensichtlich fehlt noch der Markt für derartige Produkte. Es ist jedoch zu erwarten, dass selbstregelnde Verdichtungsmaschinen als logische Folge der FDVK und der FDAV in nicht allzu weiter Zukunft zum Einsatz kommen werden. Dazu müssen die messtechnischen Voraussetzungen verbessert und in praktisch anwendbare Produkte umgesetzt werden. U.a. sind die Zusammenhänge zwischen Verdichtungs Vorgang in-situ und im Labor zu studieren und bei Bedarf durch neue Verfahren zu ergänzen.

Wenn Messverfahren für die Regelung der Verdichtungsmaschinen genutzt werden, die nicht den Anforderungen der FDVK und der FDAV genügen, ist das Verdichtungsergebnis in Frage zu stellen. Daher ist die Thematik der Verdichtungsmessung zur Qualitätskontrolle und die Messtechnik zur Maschinenregelung in engem Zusammenhang zu sehen.

## Literaturhinweise

- [1] **Adam, Dietmar**: „Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen“, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien, Wien, 1996.
- [2] **Gruber, Norbert, Obermayer, Josef und Floss, Rudolf**: Beschleunigungsmessung an vibrierenden Walzen zum Nachweis der Bodenverdichtung. Symposium Messtechnik im Erd- und Grundbau, München 1983. DGEG, Essen 1983, pp.71-77.
- [3] **Kargl, G**: „Modellversuche zur Ermittlung des Last-Deformationsverhaltens geschichteter Modellböden unter ebenen und zylindrisch gekrümmten Belastungsflächen und vergleichende Computerberechnungen“, Diplomarbeit, Institut für Grund- und Bodenmechanik, Technische Universität Wien, Wien 1995.
- [4] **Obermayer, Josef**: Untersuchung über dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten, Abschlussberichte zu den Forschungsaufträgen FE 5.068G80E und 5.707G83E des Bundesministers für Verkehr. Prüfamf für Grundbau der TU München, 1990, 2 Bände, P. 712.
- [5] **Sandström, Åke**: Numerical simulation of a vibratory roller on cohesionless soil. Geodynamik Report, Stockholm 1994, P. 22.
- [6] **Thurner, Heinz**: Flächendeckende Verdichtungskontrolle von Schwarzdecken. 3. Internationales Symposium „Technik und Technologie des Straßenbaus“, BAUMA 98, München 1998.
- [7] **Thurner, Heinz and Sandström, Åke**: Continuous Compaction Control, CCC. Compaction of Soils and Granular Materials. Modelling and Properties of Compacted materials. Paris, 2000, pp. 237-245.
- [8] **Utterodt, Ronald**: Flächendeckende Verdichtungskontrolle im Asphaltstraßenbau. Erfahrungen mit dem ACD-System. Fachzeitschrift ASPHALT Heft 8/99, 1999, pp. 41-46.
- [9] Kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis. Technische Vertragsbedingungen **RVS 8S.02.6**. Verbindlicherklärung. Erdarbeiten. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Zl. 800.041/43-VI/A/1/99, Wien 1999, P. 13.
- [10] Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, **TP BF-StB**, Teil E 2. Flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung. FGSV Verlag GmbH, Köln 1994. P. 20.
- [11] Bärighet, packningsgrad och utförande av packning. **ATB VÄG**, Kapitel E.5, Borlänge, 2001, pp. 23-43.