Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper").

Verschleißbeurteilung für die Verdichtung mit Oszillationswalzen

J. Pistrol, D. Adam

Zusammenfassung Bei Oszillationswalzen, deren Bandagen durch die dynamische Anregung in eine rasche Vorwärts-Rückwärts-Rotation versetzt werden und die Verdichtungswirkung wesentlich über die Reibung zwischen dem Walzmantel der Oszillationsbandage und der Oberfläche der zu verdichtenden Schicht realisiert wird, stellt der Walzmantel und damit die Bandage selbst ein Verschleißteil dar. Um eine lange Lebensdauer der Oszillationsbandagen gewährleisten zu können, ist eine Beurteilung des Verschleißes sowie der Verschleißwirkung verschiedener Maschinen- und Prozessparameterkombinationen von großem Interesse.
Im vorliegenden Aufsatz wird auf Grundlage experimenteller Untersuchungen und theoretischer Überlegungen ein messtechnisch erfassbarer Schlupf-Kennwert zur Beurteilung der Kontaktbedingungen zwischen dem Walzmantel der Oszillationsbandage und dem Untergrund entwickelt.
Da zur Beurteilung der Verschleißwirkung auch die – messtechnisch praktisch nicht erfassbare – Verteilung der Relativgeschwindigkeiten und Schubspannungen erforderlich ist, wird ein validiertes numerisches Simulationsmodell genutzt, um eine Verschleißenergie als Referenzgröße der Verschleißbeanspruchung zu definieren und verschiedene Prozessparameter hinsichtlich ihrer Verschleißwirkung zu beurteilen.

Assessment of Wear for Compaction with Oscillating Rollers

Abstract The dynamic excitation of oscillating rollers causes a fast forwards-backwards-rotation of the oscillating drum. Therefore, the friction between the drum and the surface of the compacted material plays an important role for the compaction performance and makes the drum a wearing part. The assessment of both wear and impact of various machine and process parameters on the wear of the drum is crucial to ensure durable drums and rollers.
A measureable slip value based on experimental field tests and theoretical investigations for evaluating the conditions of contact between the drum and the soil is presented.
The distribution of the relative velocities and the strains in the contact area between drum and soil, which hardly can be measured, are also required for a proper wear assessment. Therefore, a validated numerical model is used to define a wear energy as a reference value of the wear stress. Furthermore, the wear energy is used to assess the impact of various process parameters on the wear of an oscillating drum.

Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Pistrol
johannes.pistrol@tuwien.ac.at
Tel. 0043 1 58801 22-127
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam
Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik
Karlsplatz 13/220–2, 1040 Wien, Österreich
dietmar.adam@tuwien.ac.at
Tel. 0043 1 58801 22-100

1 Einleitung

Durch die sinusförmige Momentenbelastung, die einer Oszillationsbandage von ihren rotierenden Unwuchtmassen aufgezwungen wird, entsteht eine rasch wechselnde Vorwärts-Rückwärts-Rotation der Bandage. Durch die Reibung zwischen dem Walzmantel der Bandage und der Oberfläche des zu verdichtenden Materials, die statische Auflast der Walze und die Oszillationsbewegung selbst werden vorwiegend dynamische Schubkräfte in den Untergrund eingeleitet, wodurch dieser vorrangig durch Schubverzerrungen verdichtet wird. Diese, wesentlich auf der Reibung zwischen den Kontaktpartnern Walze und Boden basierende Art der Verdichtung, macht den stark beanspruchten Walzmantel und in weiterer Folge die Oszillationsbandage selbst zum Verschleißteil der Walze. Neben maschinenbaulichen Aspekten, wie der Wahl des Werkstoffes des Walzmantels und der statisch und dynamisch möglichst ausgewogenen Konstruktion der Bandage spielen für den Verschleiß der Bandage zwei weitere Faktoren eine wesentliche Rolle: für den Verdichtungserfolg nicht erforderliche Walzübergänge sollen in jedem Fall vermieden und die Parameter des Verdichtungsprozesses sollen geräteschonend gewählt werden. Im Zusammenhang mit der Verschleißproblematik sind auch die Betriebszustände zu beachten, in denen eine Oszillationswalze arbeiten kann.

1.1 Betriebszustände von Oszillationswalzen

Ähnlich wie für Vibrationswalzen [1] können auch für Oszillationswalzen Betriebszustände definiert werden [2]. Zwar kommt es bei Oszillationswalzen nicht zum anregungsbedingten Abheben der Bandage vom Untergrund, allerdings können unterschiedliche Kontaktbedingungen zwischen dem Walzmantel der Bandage und der Oberfläche des zu verdichtenden Materials für die Abgrenzung verschiedener Betriebszustände genutzt werden (**Bild 1**).
Eine Einteilung der Betriebszustände von Oszillationswalzen kann in ständigen Haftkontakt („Haften") und verschiedene Formen eines periodischen Haftverlustes („Gleiten") erfolgen. Das reine Haften setzt sehr weiche Untergrundverhältnisse voraus und entspricht eher einer Modellvorstellung. Unter realen Bedingungen sind gewisse Relativverschiebungen in der angesprochenen Kontaktfläche (Gleiten) erforderlich, um überhaupt eine Fahrbewegung realisieren zu können. Die Relativverschiebungen können somit als systemimmanent bezeichnet werden. Da die Fahrbewegung der Oszillationsbewegung der Bandage überlagert ist, sind die Gleitphasen der Vorwärts- sowie Rückwärtsrotation unterschiedlich lange ausgeprägt, weshalb insbesondere die asymmetrischen Formen des Gleitens („einseitiges Gleiten" und „asymmetrisches Gleiten") praktische Relevanz besitzen (Bild 1).

1.2 Vermeidung nicht erforderlicher Walzübergänge

Wie in Abschnitt 1.1 ausgeführt, ist ein Gleiten der Oszillationsbandage auf dem Untergrund im realen Betrieb nicht zu

Interaktion Bandage-Boden	Betriebszustand	Verlauf der horizontalen Lagerbeschleunigung	Anw. d. FDVK	Fahr-geschw.	Boden-steifigkeit	Erreger-amplitude	Erreger-frequenz
ständiger Kontakt	Haften		ja	niedrig	gering (Haften)	klein (Haften)	gering (Haften)
periodischer Kontaktverlust	Einseitiges Gleiten		ja				
	Asymmetrisches Gleiten		ja		hoch (Gleiten)	groß (Gleiten)	hoch (Gleiten)
	Symmetrisches Gleiten		ja	hoch			

Bild 1. Betriebszustände einer Oszillationswalze [2].
Fig. 1. Modes of operation of an oscillatory roller [2].

vermeiden. Ein gewisser Verschleiß des Walzmantels der Oszillationsbandage tritt demnach in jedem Fall auf und muss – zumindest bis zum Erreichen der mit der gewählten Oszillationswalze maximal erreichbaren Verdichtung – in Kauf genommen werden. Inakzeptabler Verschleiß tritt allerdings auf, wenn über den Zustand der maximal erreichbaren Verdichtung hinaus noch zusätzliche Walzübergänge stattfinden, die nicht mehr zum Verdichtungserfolg beitragen, sondern die Maschine über Gebühr beanspruchen. Entscheidend ist deshalb, den Zustand der maximal erzielbaren Verdichtung zu erkennen. Eine Beurteilung der bereits erreichten Verdichtung lässt sich messtechnisch realisieren und erfolgt in idealer Weise durch ein System zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK). Ein solches wurde in [3] für Oszillationswalzen vorgestellt.
Eine Alternative wäre die Definition eines Kennwertes, der in der Lage ist, die Kontaktverhältnisse zwischen dem Walzmantel der Oszillationsbandage und der Oberfläche des zu verdichtenden Materials zu beschreiben. Ein solcher Kennwert wird in Abschnitt 3 des vorliegenden Aufsatzes präsentiert.

1.3 Wahl geeigneter Parameter des Verdichtungsprozesses

Für den Verdichtungserfolg sowie die sich einstellenden Betriebszustände und in weiterer Folge auch den Verschleiß des Walzmantels spielen die gewählten Parameter des Verdichtungsprozesses eine wesentliche Rolle. Zu diesen Parametern zählen die nur mit größerem Aufwand veränderbaren Maschinenparameter, wie die Geometrie der Bandage und die Verhältnisse der Massen und Massenträgheiten der schwingenden Bandage und der statischen Auflast aus dem Rahmengewicht der Walze sowie die leichter veränderbaren Prozessparameter, wie Fahrgeschwindigkeit, Erregerfrequenz und Amplitude der Oszillationsbewegung. Eine Variation dieser Parameter und die Untersuchung ihrer Bedeutung für die Verschleißproblematik sind in experimentellen Untersuchungen nur eingeschränkt möglich. In Abschnitt 4 des Aufsatzes wird deshalb für die Parametervariation auf ein numerisches Simulationsmodell zurückgegriffen.

2 Experimentelle Untersuchungen zur Verschleißbeurteilung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der HAMM AG und der TU Wien zur Verdichtung mit Oszillationswalzen wurden großmaßstäbliche, experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Untersuchungen, insbesondere jener Aspekte, die über den Themenbereich der Verschleißbeurteilung hinausgehen, kann in [2] nachgelesen werden.

2.1 Verdichtungsgerät – Messwalze

Als Verdichtungsgerät wurde eine HAMM Tandemwalze des Typs HD+ 90 VO eingesetzt. Dieser Walzentyp besitzt an der Front eine Vibrationsbandage und am Heck eine Oszillationsbandage und ermöglicht so eine Gegenüberstellung der beiden grundlegend verschiedenen Typen der dynamischen Anregung, wobei die Oszillationsbandage im Fokus dieses Beitrags steht.
Das Betriebsgewicht der eingesetzten Messwalze beträgt rund 9,8 t, wobei auf die schwingenden Massen der beiden Bandagen jeweils rund 1,9 t entfallen. Die Tangentialamplitude der Oszillationsbandage beträgt 1,4 mm. Neben der gerätetypischen Anregungsfrequenz von 39 Hz und der Fahrgeschwindigkeit von 4 km/h wurden Messfahrten mit einer Variation dieser Parameter durchgeführt.

2.2 Testfeld und messtechnische Instrumentierung

Für die experimentellen Hauptuntersuchungen wurde ein Testfeld mit vier parallelen Messspuren und einer Länge von jeweils 40 m auf dem hochgradig verdichteten Untergrund vorgesehen. Die Herstellung erfolgte in zwei Lagen mit einer Mächtigkeit der Schüttlagen von 40 cm und 30 cm. Als Schüttmaterial wurde ein in der Kiesgrube anstehender sandiger Kies verwendet. Auf beiden Schüttlagen wurden Messfahrten durchgeführt.

2.2.1 Allgemeine messtechnische Instrumentierung

Sowohl der Boden als auch die Messwalze wurden messtechnisch instrumentiert. Für die Untersuchung der Verschleißproblematik sind insbesondere die in **Bild 2** dargestellten Beschleunigungsaufnehmer *OBx* und *OSx* zur Messung der horizontalen Beschleunigungen im Lager der Oszillationsbandage von Interesse.

2.2.2 Akustisches Messsystem zur Bestimmung der Kontaktlänge

Bei der Untersuchung der Interaktion zwischen einer dynamisch angeregten Bandage und dem Untergrund sind die Fläche zwischen den Kontaktpartnern und dabei insbesondere die von der Steifigkeit des Untergrundes abhängige Kontaktlänge von besonderem Interesse. Die messtechnische Erfassung dieser Kontaktlänge stellt allerdings eine große Herausforderung dar, da eine mögliche Sensorik sehr großen mechanischen Beanspruchungen in der Kontaktfläche ausgesetzt ist. Aus diesem Grund wurde ein akustisches Messsystem nach einer Idee von Kopf [4] entwickelt. Eine umfangreiche Beschreibung dieses Messsystems kann in [5] nachgelesen werden.
Das Messsystem macht sich die unterschiedlichen Eigenschaften offener und sogenannter gedackter Pfeifen zunutze. In den Viertelpunkten der Bandage wurden Löcher

durch den Walzmantel gebohrt und in diese Pfeifen installiert. Zur Luftversorgung wurden PC-Lüfter in ein Gehäuse verbaut und über gleich lange Schläuche an die Pfeifen angeschlossen. Jede Pfeife wiederum wurde mit einem Mikrophon versehen, dessen Signal von einem Aufnahmegerät gespeichert wird. In **Bild 3** ist das Prinzip des akustischen Messsystems zur Bestimmung der Kontaktlänge dargestellt.

Überrollt eine mit Luft versorgte Pfeife den Boden, wird sie von diesem weitgehend verschlossen. Damit kommt es zu einem ausgeprägten Frequenzabfall, der durch das Aufnahmegerät registriert wird. Fährt die Walze mit konstanter und bekannter Geschwindigkeit, können über den Umfang der Bandage die zurückgelegte Wegstrecke während einer Umdrehung und die dafür benötigte Zeit berechnet werden. Vergleicht man die Dauer des Frequenzabfalls durch das Verschließen der Pfeife mit der Dauer einer vollständigen Bandagenrotation, kann somit auch auf die Kontaktlänge zwischen Bandage und Untergrund geschlossen werden (Bild 3).

Die Kontaktlänge bildet sich bezüglich der Bandagenachse im Allgemeinen nicht symmetrisch aus. Um dieses Verhalten ebenfalls zu untersuchen, wird vertikal über der Bandagenachse ein Positionsrad installiert. Das Rad verschließt jene Pfeife, die dem Boden gegenüberliegt, für einen kurzen Moment. Durch Vergleich der Frequenzverläufe zweier gegenüberliegender Pfeifen im Zeitbereich kann somit die Asymmetrie der Kontaktlänge (Größe der Bugwelle vs. Größe der Heckwelle) bestimmt werden (Bild 3).

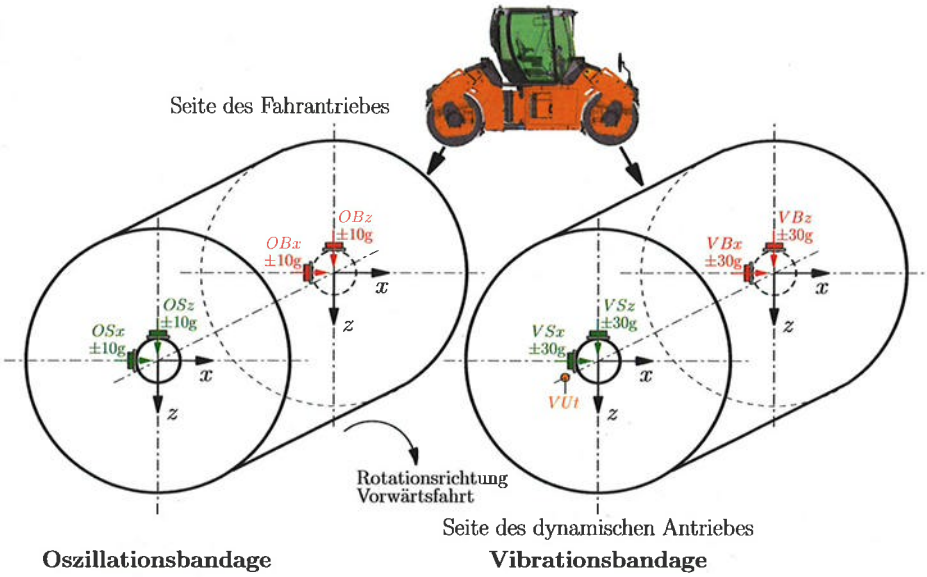

Bild 2. Messtechnische Instrumentierung der Lagerschalen der Bandagen mit einaxialen Beschleunigungsaufnehmern. Bezeichnungen, Sensitivitäten und positive Messrichtungen [2].
Fig. 2. Measurement equipment (uniaxial accelerometers) at the bearings of the drums. Nomenclature, sensitivities and positive measuring directions [2].

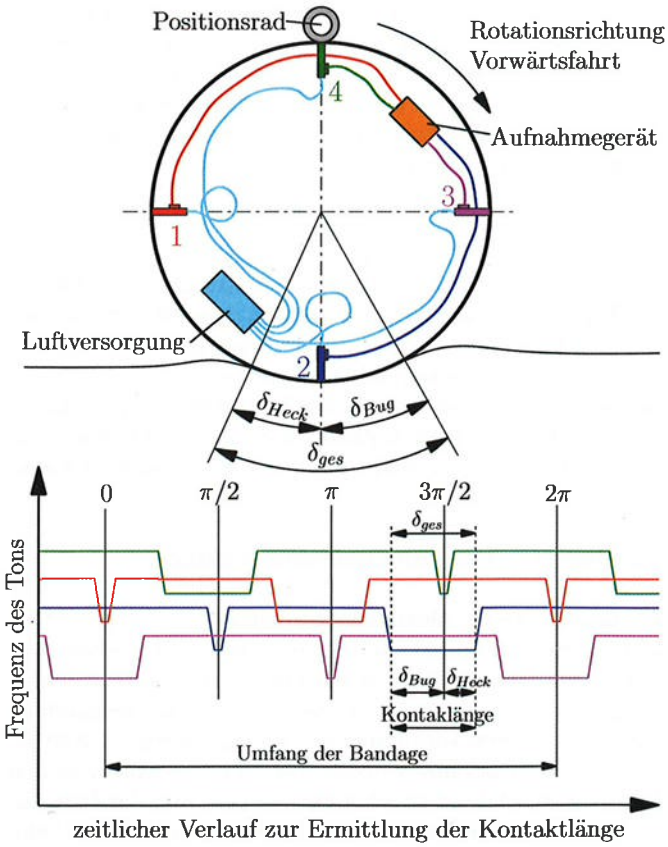

Bild 3. Prinzip des akustischen Messsystems zur Bestimmung der Kontaktlänge.
Fig. 3. Principle of the acoustic measuring system for evaluating the contact length.

2.3 Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen

Für die weiteren Ausführungen betreffend Verschleißbeurteilung sind die horizontalen Beschleunigungen im Lager der Oszillationsbandage (Bild 2) von vorrangigem Interesse. **Bild 4** zeigt einen typischen zeitlichen Verlauf der genannten Horizontalbeschleunigung im Lager (Mittelpunkt *M*) für rund vier Erregerperioden während einer Mess- und Verdichtungsfahrt.

Bestünde zwischen dem Walzmantel und der Oberfläche des zu verdichtenden Materials ständiger Haftkontakt (Betriebszustand „Haften"), würde das horizontale Beschleunigungssignal im Lager der Oszillationsbandage – zumindest theoretisch – einem reinen Sinus entsprechen.

Das in Bild 4 abgebildete Beschleunigungssignal zeigt allerdings keinen reinen Sinus, sondern ein sinusähnliches, ge-

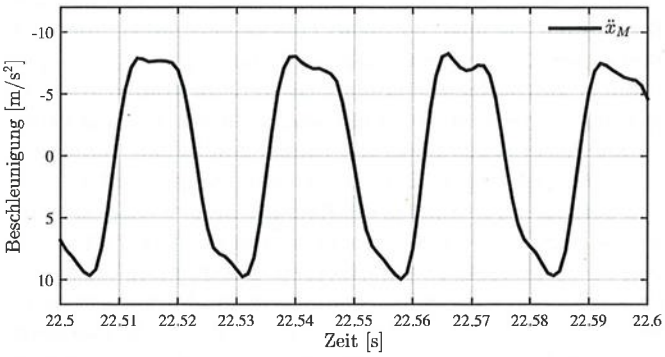

Bild 4. Typischer zeitlicher Verlauf der Horizontalbeschleunigungen im Lager der Oszillationsbandage.
Fig. 4. Characteristic time history of the horizontal accelerations in the bearing of the oscillating roller.

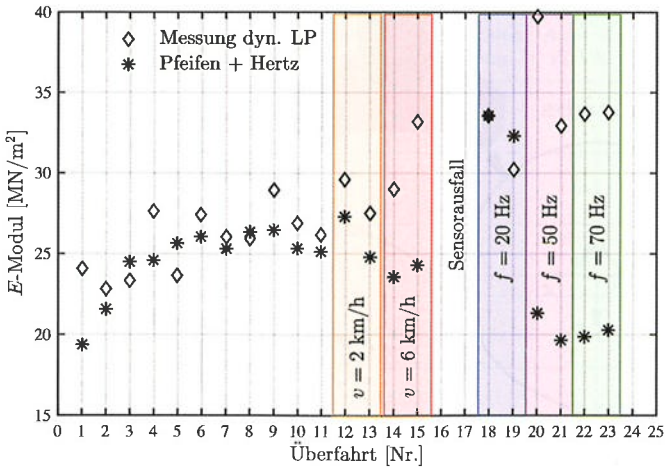

Bild 5. Vergleich der Entwicklung des E-Moduls, ermittelt aus den Ergebnissen der dynamischen Plattendruckversuche und errechnet aus den Kontaktlängen des akustischen Messsystems [2].
Fig. 5. Comparison of the evolution of Young's Modulus, calculated from the outcomes of the dynamic load plate tests and from the outcomes of the acoustic measuring device for the contact length [2].

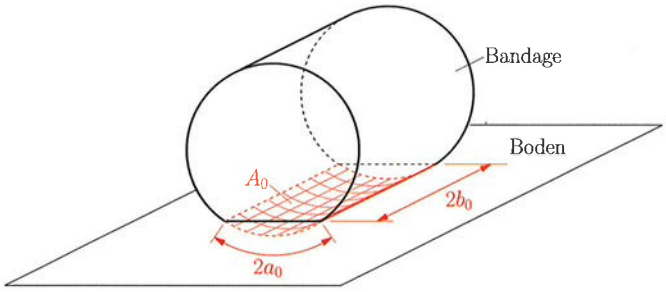

Bild 6. Geometrie der Kontaktfläche [2].
Fig. 6. Geometry of the contact area [2].

kapptes Signal. In den experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass das sinusähnliche Signal der horizontalen Beschleunigungen im Lager der Oszillationsbandage in Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit unterschiedlich stark gekappt wird. Diese Eigenschaft ist darauf zurückzuführen, dass im Falle einer Überschreitung der Haftreibung zwischen dem Walzmantel der Bandage und dem Untergrund Relativverschiebungen auftreten (Schlupf). Die Bandage gleitet dann periodisch über den Untergrund, unterbrochen durch Phasen, in denen der Untergrund in der Lage ist, den Bewegungen der Bandage zu folgen. Der Betriebszustand „Haften" kann in diesem Fall ausgeschlossen werden. In Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit und den Betriebsparametern wird die Oszillationsbandage in den Betriebszuständen „einseitiges Gleiten", „asymmetrisches Gleiten" oder „symmetrisches Gleiten" betrieben (Bild 1). Kommt es zu Relativverschiebungen in der Kontaktfläche, können die Horizontalbeschleunigungen in der Lagerschale der Bandage nicht mehr weiter zunehmen, sondern bleiben solange konstant, bis die Reibung beim Zurückschwingen der Bandage wieder ausreicht, um Relativverschiebungen zu vermeiden. Das horizontale Beschleunigungssignal im Lager der Oszillationsbandage entspricht theoretisch einem gekappten Sinus. Auf Grundlage dieser Beobachtungen und Überlegungen wird in Abschnitt 3 ein Schlupf-Kennwert zur Quantifizierung des auftretenden Bandagenschlupfes entwickelt.

2.4 Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Beispielhaft sind in **Bild 5** Ergebnisse der akustischen Messungen zur Bestimmung der Kontaktlänge zwischen Bandage und Untergrund (Abschnitt 2.2.2) dargestellt. Für jede Messfahrt wurde eine mittlere Kontaktlänge bestimmt und aus dieser, basierend auf der Theorie der Hertz'schen Pressung [6] – unter der Annahme einer im Vergleich zum Boden unendlich steifen und nicht verformbaren Bandage – ein Elastizitätsmodul E_2 des Bodens berechnet:

$$E_2 = \frac{4r\,P_0\left(1-\nu_2^2\right)}{\pi\,a_0^2\,b_0} \tag{1}$$

Der Radius r der Bandage und die Achslast P_0 sind Maschinenparameter und haben im Falle der Messwalze HAMM HD⁺ 90 VO die Größen $r = 0{,}6\,\mathrm{m}$ und $P_0 = 27{,}066\,\mathrm{kN}$. Die Parameter a_0 und b_0 beschreiben die Kontaktfläche zwischen dem Walzmantel der Oszillationsbandage und dem Untergrund, wobei $b_0 = 0{,}84\,\mathrm{m}$ der halben Bandagenbreite und a_0 der Hälfte der gemessenen Kontaktlänge entspricht (**Bild 6**). Die Querdehnzahl des Bodens wurde mit $\nu_2 = 0{,}3$ angenommen.

Die Entwicklung des E-Moduls mit zunehmender Anzahl der Überfahrten zeigt einen Verdichtungszuwachs, wie dieser auch erwartet werden kann. Allerdings wird auch die Abhängigkeit der Kontaktlänge von den gewählten Maschinenparametern, insbesondere von der Erregerfrequenz, deutlich. Bei höheren Oszillationsfrequenzen rüttelt sich die Bandage tiefer in den Boden ein, die Kontaktlänge wird größer und der daraus abgeleitete E-Modul sinkt.

Zusätzlich sind in Bild 5 auch die Messergebnisse der Vergleichsversuche mittels dynamischen Plattendruckversuchs dargestellt, die nach jeder Überfahrt durchgeführt wurden. Dazu erfolgte eine Umrechnung der dynamischen Verformungsmoduln (E_{vd}-Werte) [7] aus den dynamischen Plattendruckversuchen in E-Moduln. Für diese Umrechnung wurden zunächst gemäß RVS 08.03.04 [8] aus den E_{vd}-Werten Verformungsmoduln E_{v1} berechnet, um diese nach [9] in E-Moduln umzurechnen:

$$E = \frac{E_{v1}\,\pi\left(1-\nu_2^2\right)}{3} \tag{2}$$

Die Versuche mit der dynamischen Lastplatte bestätigen den Verdichtungszuwachs und zeigen speziell während der ersten Überfahrten eine gute Übereinstimmung mit den E-Moduln des akustischen Messsystems.

Die Kenntnis über die Größe der Kontaktfläche und -länge stellt einen wesentlichen Faktor für die Verschleißbeurteilung dar und findet in Abschnitt 4 dieses Aufsatzes eine weitere Berücksichtigung.

3 Schlupf-Kennwert für Oszillationswalzen

3.1 Grundlagen der Messdatenverarbeitung

In den Messergebnissen der experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass das sinusähnliche Beschleunigungssignal in der Lagerschale der Oszillationsbandage unter bestimmten Voraussetzungen gekappt wird. Diese Eigenschaft soll genutzt werden, um den Schlupf zwischen dem Walzmantel der Oszillationsbandage und der Oberfläche des Untergrundes zu quantifizieren. Dazu erfolgt eine Analyse des horizontalen Lagerbeschleunigungssignals ($\ddot{x}_M$) im Frequenzbereich.

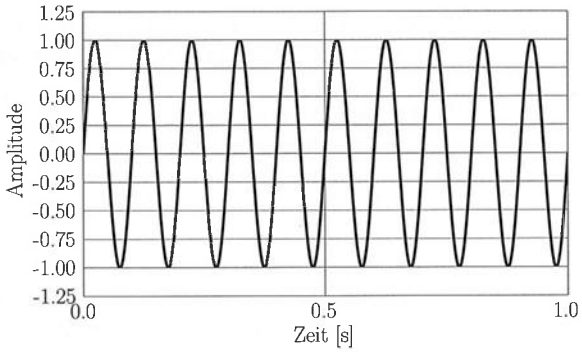

Bild 7. Signaldarstellung eines reinen Sinus (f = 10 Hz) im Zeitbereich für eine Sekunde [2].
Fig. 7. Sine-function (f = 10 Hz) in the time domain for one second [2].

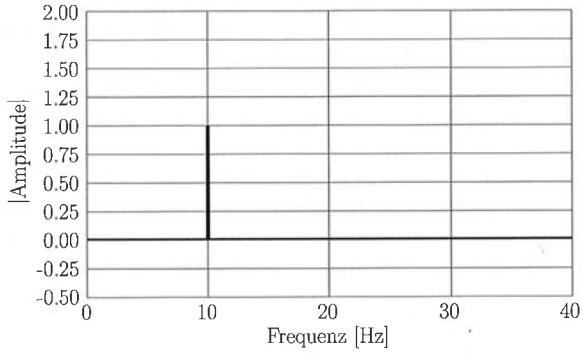

Bild 8. Signaldarstellung eines reinen Sinus (f = 10 Hz) im Frequenzbereich [2].
Fig. 8. Sine-function (f = 10 Hz) in the frequency domain [2].

Zunächst wird zum Zwecke der einfacheren Erklärung nicht von einem Messsignal, sondern von einem ideal periodischen Signal ausgegangen. Unterzieht man das Signal des reinen Sinus einer Fourier-Transformation, konzentriert sich der gesamte Inhalt des Fourier-Spektrums auf die Erregerfrequenz. In **Bild 7** ist ein Beispiel für einen reinen Sinus mit einer Frequenz von f = 10 Hz und einer Amplitude von 1,0 gegeben. In Bild 7 ist das Signal im Zeitbereich für die Dauer von einer Sekunde und in **Bild 8** im Frequenzbereich dargestellt. Unter Voraussetzung eines amplitudenberichtigten Fourier-Spektrums liefert der Maximalwert der spektralen Darstellung eine Amplitude von 1,0 bei der Frequenz von f = 10 Hz.

Wird der Sinus des genannten Beispiels symmetrisch gekappt, ergeben sich im Fourier-Spektrum zusätzliche Spitzen bei den ungeraden Vielfachen der Erregerfrequenz, also bei $3f$, $5f$, $7f$ usw. In **Bild 9** ist der Sinus des vorigen Beispiels symmetrisch gekappt dargestellt. Der Amplitudenanteil der Grundfrequenz von f = 10 Hz reduziert sich in der spektralen Darstellung von 1,0 auf 0,61 (**Bild 10**).

Die Amplituden des Fourier-Spektrums bei den ungeraden Vielfachen der Erregerfrequenz nehmen mit steigender Ordnung der Vielfachen ab, der größte Anteil entfällt auf die dreifache Erregerfrequenz ($3f$ = 30 Hz) und beträgt im vorliegenden Beispiel 0,14. Je stärker der Sinus gekappt wird, desto größer werden die Spektralanteile der ungeraden Vielfachen.

Wird die zugrunde gelegte Sinusfunktion asymmetrisch gekappt, kommen bei den geraden Vielfachen der Erregerfrequenz (also bei $2f$, $4f$, $6f$ usw.) weitere Spitzen im Fourier-Spektrum hinzu. Weiterhin sind die Spitzen bei den ungeraden Vielfachen vorhanden und im Vergleich zu jenen bei den geraden Vielfachen auch stärker ausgeprägt.

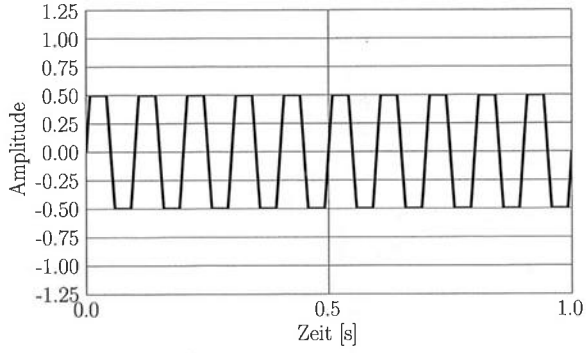

Bild 9. Signaldarstellung einer gekappten Sinusfunktion (f = 10 Hz) im Zeitbereich für eine Sekunde [2].
Fig. 9. Capped sine-function (f = 10 Hz) in the time domain for one second [2].

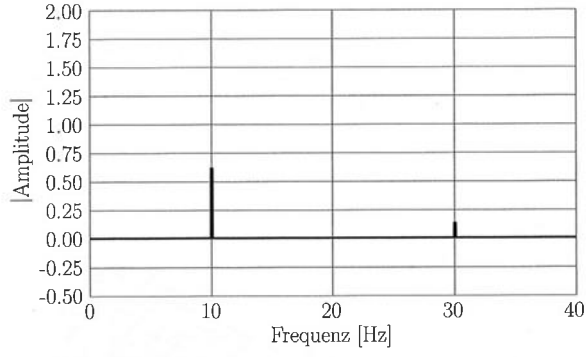

Bild 10. Signaldarstellung einer gekappten Sinusfunktion (f = 10 Hz) im Frequenzbereich [2].
Fig. 10. Capped sine-function (f = 10 Hz) in the frequency domain [2].

3.2 Übertragung auf die Oszillationsverdichtung

Wie bereits in Abschnitt 2.3 erläutert, erzeugt die Oszillationsanregung bei angehobener Bandage in der Lagerschale keinerlei Beschleunigungen in horizontaler oder vertikaler Richtung. Das dynamische Rotationszentrum fällt daher mit dem geometrischen Mittelpunkt der Bandage zusammen. Wird die oszillierende Bandage auf den Untergrund gestellt, verschiebt sich das dynamische Rotationszentrum in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften und in der Bandagenachse treten Horizontalbeschleunigungen auf. Da sich bei der Oszillationsanregung die Zentrifugalkräfte der beiden exzentrisch angeordneten Unwuchtmassen aufheben, bleiben die vorwiegend horizontalen Bodenkräfte auf die Bandage jene dynamische Einwirkung, die das Bewegungsverhalten der Bandage am meisten beeinflussen. Die Bandagenbeschleunigung ist proportional zu diesen Kräften und kann deshalb zur Bestimmung des Kraftverlaufes verwendet werden. Ist die Reibung zwischen dem Walzmantel der Bandage und dem Boden ausreichend groß und der Untergrund in der Lage, den ihm aufgezwungenen Bewegungen der Bandage zu folgen, wird die Haftreibung zwischen den beiden Kontaktpartnern nicht überschritten und in der Kontaktfläche kommt es zu keinerlei Relativverschiebungen zwischen Bandage und Untergrund. Die auftretenden Horizontalbeschleunigungen im Zentrum der Bandage zeigen dann einen sinusförmigen Verlauf und die Frequenz der Horizontalbeschleunigungen im Lager der Bandage entspricht jener der Anregung. Wird die Haftreibung zwischen dem Walzmantel der Bandage und dem Untergrund überschritten, treten Relativverschiebungen auf. Die Bandage gleitet periodisch über den Untergrund, unterbrochen durch Phasen, in denen der Untergrund den Ban-

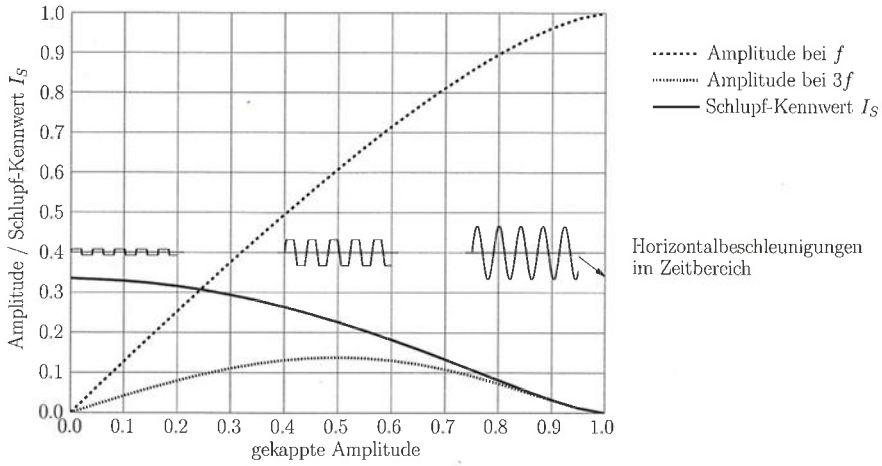

Bild 11. Entwicklung des Schlupf-Kennwertes I_S und der Amplitudenanteile bei einfacher (f) und dreifacher ($3f$) Erregerfrequenz für verschieden stark symmetrisch gekappte Sinussignale [2].
Fig. 11. Evolution of the slip-value I_S and the amplitude fractions at the excitation frequency (f) and three times the excitation frequency ($3f$) for various symmetrically capped sine-signals [2].

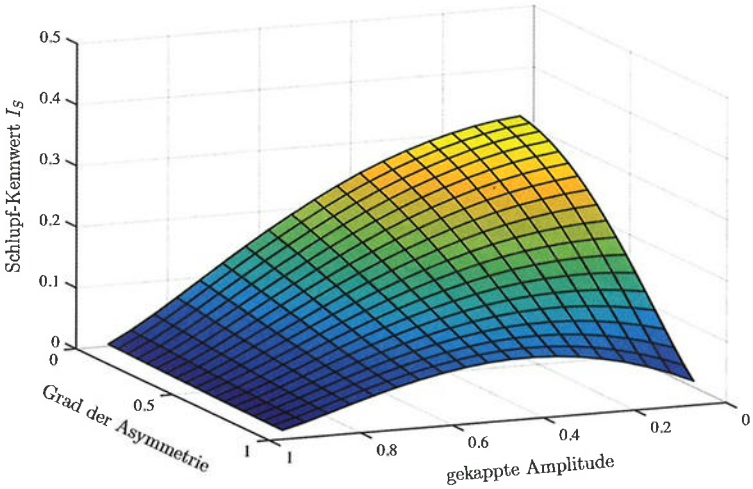

Bild 12. Entwicklung des Schlupf-Kennwertes I_S für verschieden stark und verschieden asymmetrisch gekappte Sinussignale [2].
Fig. 12. Evolution of the slip-value I_S for various symmetrically and asymmetrically capped sine-signals [2].

dagenbewegungen folgt. Kommt es zu Relativverschiebungen in der Kontaktfläche, können die Horizontalbeschleunigungen in der Bandagenachse nicht mehr weiter zunehmen, sondern bleiben konstant, bis die Reibung beim Zurückschwingen der Bandage wieder ausreicht, um Relativverschiebungen zu vermeiden. Das horizontale Beschleunigungssignal im Lager der Oszillationsbandage entspricht einem gekappten Sinus, wie in Bild 9 dargestellt. Je länger die Phasen des Gleitens in Bezug auf die Periodendauer der Anregung werden, desto größer ist der auftretende Schlupf und desto stärker gekappt ist der sinusförmige Verlauf der Horizontalbeschleunigungen in der Lagerschale der Oszillationsbandage. Durch Überlagerung der Oszillationsbewegung mit der Fahrbewegung entsteht eine Asymmetrie der Gleitphasen. Die oszillationsbedingte Vorwärtsrotation in der Setzungsmulde der Bandage wird durch die Rotation der Fahrbewegung vergrößert, die Gleitphasen während der Vorwärtsrotation werden länger. Im Gegensatz dazu wirkt die Rotation der Fahrbewegung der Rückwärtsrotation der Oszillation entgegen. Im Lager der Oszillationsbandage entsteht ein asymmetrisch gekappter Sinusverlauf der Beschleunigungen.

3.3 Signalverarbeitung und Definition des Kennwertes

Für die Berechnung des Schlupf-Kennwertes ist der zeitliche Verlauf der horizontalen Beschleunigungen in der Lagerschale der Oszillationsbandage erforderlich. Die Abtastrate des Beschleunigungssignals soll zumindest der zehnfachen Erregerfrequenz entsprechen.
Die Auswertung des Beschleunigungssignals erfolgt stückweise, wobei aufgrund der späteren Betrachtung im Frequenzbereich die Wahl eines Zeitfensters mit 2^n Messpunkten empfehlenswert ist. Für jedes Zeitfenster wird dann eine amplitudenberichtigte Fast-Fourier-Transformation (FFT) durchgeführt.
Für den Schlupf-Kennwert werden schließlich die Amplitudenanteile der Horizontalbeschleunigung $\ddot{x}_M$ im Leistungsspektrum der FFT bei einfacher (f) und dreifacher ($3f$) Erregerfrequenz gemäß

$$I_S = \frac{\ddot{x}_M(3f)}{\ddot{x}_M(f)} \tag{3}$$

verglichen.
Bild 11 zeigt die Entwicklung des Schlupf-Kennwertes für verschieden stark gekappte Sinussignale. Wird der Sinus nicht gekappt, handelt es sich also um einen reinen Sinus, beträgt die „gekappte" Amplitude ebenfalls 1,0 und für den Schlupf-Kennwert gilt $I_S = 0$ (ganz rechts auf der Abszisse von Bild 11). Je stärker das Signal gekappt wird (auf der Abszisse in Bild 11 von rechts nach links gehend), desto größer wird der Zahlenwert des Schlupf-Kennwertes.
Im Falle eines asymmetrisch gekappten Sinus entstehen zusätzliche Spitzen im Fourier-Spektrum bei den geraden Vielfachen der Erregerfrequenz (also bei $2f$, $4f$, $6f$ usw.). Trotz der Asymmetrie des gekappten Signals ist der Schlupf-Kennwert I_S weiterhin bestimmbar. Durch die Berücksichtigung der Asymmetrie entsteht eine zusätzliche Abhängigkeit des Schlupf-Kennwertes I_S, weshalb der Einfluss der Asymmetrie in **Bild 12** dreidimensional dargestellt ist. Der darin verwendete Grad der Asymmetrie gibt an, in welchem Verhältnis die gekappten Amplituden zueinanderstehen. Ein Grad der Asymmetrie von 0,5 bedeutet, dass beispielsweise die Amplitude im negativen Wertebereich nur halb so stark gekappt ist wie die Amplitude im positiven Wertebereich. Wird der Grad der Asymmetrie in Bild 12 zu Null, erhält man einen symmetrisch gekappten Sinus und damit die bekannte Entwicklung des Schlupf-Kennwertes aus Bild 11. Allgemein sagt der Grad der Asymmetrie aus, um wie viel stärker der negative Wertebereich des Signals im Vergleich zum positiven Wertebereich gekappt wird. Beim Grenzwert 1,0 wird der negative Wertebereich des Sinus vollständig gekappt.

3.4 Verschleiß-Indikator für Oszillationswalzen

Beim vorgestellten Schlupf-Kennwert handelt es sich um einen aus den Messdaten experimenteller Untersuchungen

abgeleiteten Kennwert zur Beschreibung der Relativverschiebungen zwischen dem Walzmantel einer Oszillationsbandage und dem Untergrund. Das Vorhandensein solcher Relativverschiebungen ist eine Grundvoraussetzung für das Auftreten von Verschleiß. Für die Quantifizierung desselben sind Informationen über die Relativverschiebungen in der Kontaktfläche allerdings nicht zwangsläufig ausreichend. Für Verschleiß ist auch eine Auflast notwendig, mit der die beiden Kontaktpartner gegeneinandergepresst werden, während es zu diesen Verschiebungen kommt. Die beiden Extremfälle von großen Verschiebungen ohne Auflast und großer Auflast ohne Verschiebungen verursachen keinen Verschleiß. Erst wenn große Verschiebungen unter hoher Auflast auftreten, ist mit Verschleiß zu rechnen.

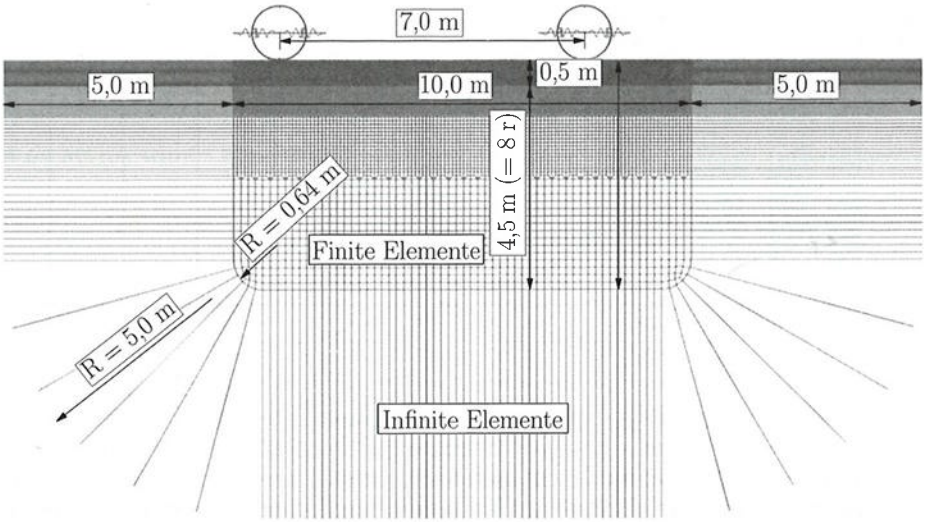

Bild 13. Modellgeometrie [2].
Fig. 13. Model geometry [2].

Im Unterschied zur Vibrationsbandage hebt die Oszillationsbandage während der Verdichtung nicht von der Unterlage ab. Allerdings wurden in der Lagerschale der Oszillationsbandage sekundäre Vertikalbeschleunigungen gemessen, die in Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit stark schwanken und bei sehr steifen Untergrundverhältnissen hohe, der Schwerkraft entgegengesetzte Werte erreichen können. Eine Auflast als Grundvoraussetzung des Bandagenverschleißes ist somit jedenfalls vorhanden, kann jedoch nicht als konstant angenommen werden.

Die Entstehung von Verschleiß ist zusätzlich stark zeitabhängig. Je höher die Geschwindigkeit, mit der die Relativverschiebungen zwischen den beiden Kontaktpartnern unter entsprechender Auflast auftreten, desto größer ist auch der verursachte Verschleiß.

Messtechnisch kann der Schlupf zwischen dem Walzmantel einer Oszillationsbandage und der Oberfläche einer zu verdichtenden Schicht mit dem vorgestellten Kennwert erfasst werden. Eine Bestimmung des Spannungsverlaufes in der Kontaktfläche über eine entsprechende Sensorik ist aus derzeitiger Sicht nicht möglich. Um Verschleiß messen zu können, müsste eine Bandage ausreichend lange mit konstanten Maschinenparametern betrieben werden, um nach hunderten Stunden beispielsweise den Materialabrieb am Walzmantel durch einen Massenvergleich bestimmen zu können.

Aus diesem Grund wurde ein numerisches Simulationsmodell entwickelt, mit dem die Wirkung einer Oszillationsbandage auf den Untergrund simuliert werden kann (Abschnitt 4). Im Computermodell sind auch die unbekannten Größen in der Kontaktfläche, wie die Spannungsverteilung, berechenbar. Wie später im genannten Kapitel gezeigt wird, kann aus den Daten der numerischen Simulation eine Verschleißenergie berechnet werden, mit der eine Beurteilung der Verschleißwirkung möglich ist. Durch den Vergleich der Verschleißenergie mit den Werten des Schlupf-Kennwertes soll die Aussagekraft des Schlupf-Kennwertes über die Verschleißwirkung geprüft werden.

4 Numerische Berechnungen zur Verschleißbeurteilung

Wie bereits in Abschnitt 3 diskutiert, ermöglicht selbst die gesicherte Kenntnis des auftretenden Schlupfes zwischen dem Walzmantel und dem Untergrund noch nicht zwingend eine Aussage über den auftretenden Verschleiß der Bandage. Komponenten und Faktoren des tribologischen Systems können den tatsächlich auftretenden Verschleiß wesentlich beeinflussen, eine Vielzahl dieser Faktoren ist allerdings nicht steuerbar. So ist beispielsweise die Abrasivität eines zu verdichtenden Materials eine Eigenschaft desselben, und selbst wenn die zu erwartende Verschleißwirkung als sehr hoch eingestuft werden muss, sind die geforderten Verdichtungsarbeiten durchzuführen. Der durch die ausgeprägte Abrasivität des Materials hervorgerufene erhöhte Verschleiß muss in Kauf genommen werden. Hingegen ist vermeidbarer Verschleiß, wie er durch eine ungünstige Kombination der Maschinenparameter oder einen zu langen Betrieb der Oszillationswalze, durch den kein Verdichtungszuwachs mehr generiert werden kann, zu minimieren. Diese beiden Faktoren, die einen vermeidbaren Verschleiß hervorrufen, können gesteuert und damit prinzipiell optimiert werden. Um dies zu ermöglichen, muss der während des Verdichtungsprozesses auftretende Verschleiß quantifiziert werden können. Der entwickelte Schlupf-Kennwert reicht dafür nicht zwingend aus, da neben Kenntnissen über den Schlupf zwischen Bandage und Untergrund weitere Informationen über den Kontaktbereich vorliegen müssen. Dazu zählt die Kontaktfläche, die in erster Näherung im Wesentlichen durch die Breite der Bandage und die steifigkeitsabhängige Kontaktlänge bestimmt ist. Die Kontaktlänge ist – mit einigem Aufwand – bestimmbar (Abschnitt 2). Wesentlich schwieriger – und aus Sicht der Autoren mit vertretbarem Aufwand nicht messtechnisch erfassbar – ist die Bestimmung der Spannungsverteilung in der Kontaktfläche zwischen Bandage und Untergrund. Es sind aber genau diese die wesentlichen Faktoren zur Beurteilung des maschinenparameterabhängigen Verschleißes. Aus diesem Grund wurde ein numerisches Modell entwickelt und mittels Finite-Elemente-Methode gelöst, um ebendiese Größen in der Kontaktfläche bestimmen zu können.

Tabelle 1. Bodenparameter des numerischen Simulationsmodells.
Table 1. Soil parameters of the numerical model.

Schicht/ Elemente	Modell	γ [kN/m³]	E [MPa]	ν [-]	d [kPa]	β [°]	R [-]	α [-]	K [-]	k_0 [-]
Verd. Schicht	*Drucker-Prager*	19	30[1]	0,3	0,2	53,08	0,2	0,01	0,778	0,455
Untergrund	linear elast.	22	250	0,3	-	-	-	-		
Infinite Elemente	linear elast.	22	250	0,3	-	-	-	-		

[1] wird im Zuge von Parameterstudien variiert

Das Hauptaugenmerk liegt dabei nicht auf der Simulation des Verdichtungsprozesses, sondern vielmehr auf der Bestimmung der im Feldversuch nicht messbaren Größen der Spannungsverteilung und Relativgeschwindigkeiten in der Kontaktfläche. Mithilfe dieser Größen wird in weiterer Folge eine Verschleißenergie E_w errechnet, die auf einer festgelegten Wegstrecke von 0,2 m durch das Gleiten der oszillierenden Bandage auf dem Untergrund umgesetzt wird. Der Bezug auf eine Wegstrecke erfolgt, um auch Oszillationsfahrten unterschiedlicher Frequenzen sowie Fahrgeschwindigkeiten objektiv miteinander vergleichen zu können. Die Verschleißenergie dient schließlich der Beurteilung der Verschleißwirkung unterschiedlicher Parameterkombinationen und stellt gleichzeitig eine Referenzgröße für die Aussagekraft des in Abschnitt 3 vorgestellten Schlupf-Kennwertes I_S dar.

4.1 Modellaufbau

Sämtliche Berechnungen wurden mit Abaqus durchgeführt. Es wird die Unabhängigkeit des Verzerrungszustandes von der Koordinatenachse in Richtung der Bandagenachse vorausgesetzt.

Es wird angenommen, dass auf ein verdichtetes Planum eine 0,5 m mächtige, locker gelagerte Schicht sandigen Kieses aufgebracht und verdichtet wird. Der zu verdichtenden Schicht wird konstitutives Verhalten nach dem elasto-plastischen Drucker-Prager/Kappen Modell zugewiesen. Der darunter befindliche, hochgradig verdichtete Untergrund ist ein elastischer, homogener und isotroper Halbraum, da aufgrund der hohen Vorverdichtung keine plastischen Verzerrungen in dieser Schicht mehr erwartet werden. Die Geometrie des Simulationsmodells ist in **Bild 13** dargestellt.

Für das Nahfeld wird ein 10 m langer und 5 m tiefer Erdkörper mit finiten Elementen diskretisiert. Um hohe Spannungsgradienten, große Verformungen und insbesondere die Kontaktformulierung zwischen Bandage und Untergrund mit hinreichender Genauigkeit abbilden zu können, ist eine sehr feine Diskretisierung, speziell in Oberflächennähe der zu verdichtenden Schicht, erforderlich. An der Oberfläche des Erdkörpers sind quadratische Elemente mit einer Seitenlänge von 2 cm angeordnet, während die Diskretisierung mit zunehmender Tiefe immer gröber wird und die Elemente an der unteren Berandung eine Seitenlänge von 16 cm aufweisen. Dabei wird die maximal zulässige Elementlänge nach Kuhlemeyer und Lysmer [10] berücksichtigt. Die Übergangsbereiche zwischen den Schichten unterschiedlicher Elementgrößen werden durch Trapezelemente mit einem minimalen Elementwinkel von 45° und einem Seitenverhältnis von 1:2 realisiert.

Infinite Elemente [11] werden an der Berandung zwischen dem diskretisierten Nahfeld und dem Fernfeld angeordnet, um Energie zu absorbieren und Reflexionen an den Rändern zwischen Nahfeld und Fernfeld zu vermeiden.

Die Bodenparameter und Parameter des Verfestigungsgesetzes an der Kappe des Drucker-Prager Modells sowie die viskosen Dämpfungsparameter des Simulationsmodells sind in **Tabelle 1**, **Tabelle 2** und **Tabelle 3** zusammengefasst. In Tabelle 1 entspricht γ der Dichte, E dem Elastizitätsmodul und ν der Querdehnzahl des Bodens. Die Angaben zur Kohäsion d und dem Winkel der inneren Reibung β beziehen sich auf die p-q Ebene. Der Materialparameter R definiert das Verhältnis der Halbmesser der elliptischen Versagensfläche der Kappe und somit die Ausrundung der Kappe, während die Form der Übergangsfläche zwischen Kegel und Kappe über den Parameter α festgelegt wird. Der Parameter K ermöglicht die Anpassung der kegelförmigen Versagensfläche an unterschiedliche Maximalspannungen in Zug- und Druckrichtung und somit eine Approximation der Versagensfläche nach Mohr-Coulomb in der deviatorischen Spannungsebene. Der Erdruhedruck findet über den Parameter k_0 Berücksichtigung. C_c und C_s sind in Tabelle 2 der Kompressionsbeiwert und der Schwellbeiwert aus dem Diagramm des Ödometerversuchs, welches die Porenzahl e_0 in Abhängigkeit der mittleren effektiven Spannung darstellt. p_0 ist der Spannungszustand vor Belastungsbeginn und entspricht damit dem geostatischen Spannungszustand. In Tabelle 3 sind ausgehend vom Lehr'schen Dämpfungsmaß ζ der massenproportionale Wert η_1 und der steifigkeitsproportionale Wert η_2 der Dämpfung angegeben. Diese wurden unter Berücksichtigung der ersten Eigenkreisfrequenz (ω_1) und der höchsten Eigenkreisfrequenz (ω_n) mit einem signifikanten Beitrag zur Systemantwort des modellierten Erdkörpers ermittelt.

Tabelle 2. Bodenparameter des Verfestigungsgesetzes an der Kappe des Drucker-Prager Modells.
Table. 2. Soil parameters of the hardening law for the cap of the Drucker-Prager model.

Schicht/ Elemente	C_c [-]	C_s [-]	e_0 [-]	p_0 [kN/m²]
Verdichtete Schicht	0,005	0,0001	0,6	7

Tabelle 3. Viskose Dämpfungsparameter des numerischen Simulationsmodells.
Table 3. Viscous damping parameters of the numerical model.

Schicht/ Elemente	Modell	ζ [%]	ω_1 [rad/s]	ω_n [rad/s]	η_1 [kPa]	η_2 [°]
Verdichtete Schicht[1]	*anisotrop*	20	6,86	48,68	N/A	$8{,}703 \cdot 10^{-4}$
Verdichtete Schicht	isotrop	2 000	6,86	48,68	N/A	$8{,}703 \cdot 10^{-2}$
Untergrund	isotrop	20	6,86	48,68	70,06	$8{,}703 \cdot 10^{-4}$

[1] die ersten 6 cm unterhalb der GOK

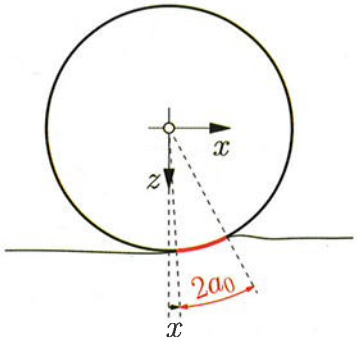

Bild 14. Prinzipdarstellung der Kontaktlänge $2a_0$ zwischen der Bandage und dem Boden [2].
Fig. 14. Scheme of the contact length $2a_0$ between the drum and the soil [2].

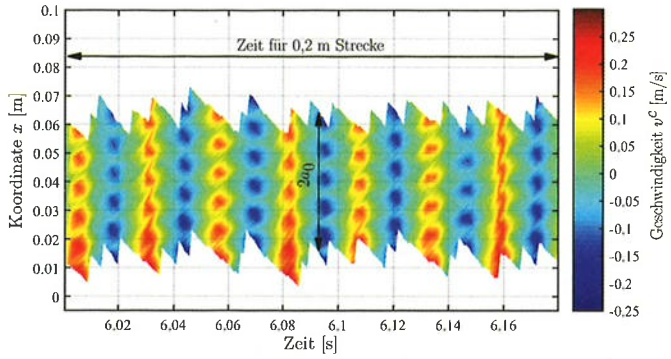

Bild 15. Auswertung der Geschwindigkeit v^c für einen E-Modul E = 30 MN/m² des Bodens [2].
Fig. 15. Evaluation of the velocity v^c for Young's Modulus E = 30 MN/m² of the soil [2].

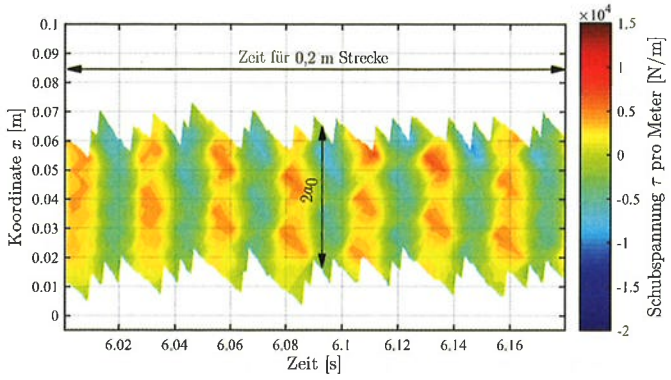

Bild 16. Auswertung der Schubspannungen τ für einen E-Modul E = 30 MN/m² des Bodens [2].
Fig. 16. Evaluation of the shear stresses τ for Young's Modulus E = 30 MN/m² of the soil [2].

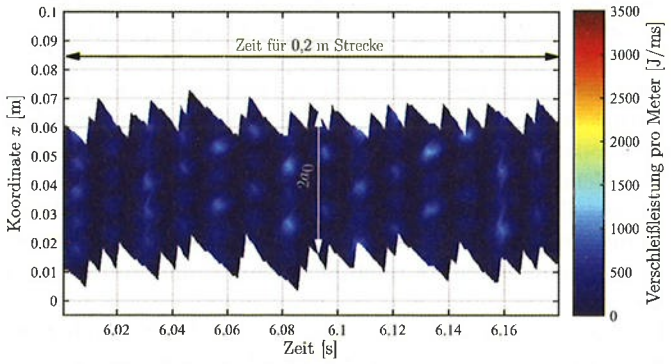

Bild 17. Auswertung der Verschleißenergie E_w für einen E-Modul E = 30 MN/m² des Bodens [2].
Fig. 17. Evaluation of the wear energy E_w for Young's Modulus E = 30 MN/m² of the soil [2].

Eine detaillierte Modellbeschreibung inklusive Modellierung der Oszillationsbandage kann in [2] nachgelesen werden.

4.2 Ergebnisse der Simulationsberechnungen in Bezug auf die Verschleißwirkung

4.2.1 Datengrundlage der Auswertung

Im Fokus der Auswertung der numerischen Simulationsberechnungen stehen jene Größen in der Kontaktfläche zwischen Oszillationsbandage und Untergrund, die im Zuge der experimentellen Untersuchungen nicht bestimmbar waren. Diese Größen sind allerdings auch nicht ohne weiteres in Abaqus darstellbar. Es erfolgt deshalb eine Verarbeitung der Simulationsergebnisse mit dem Softwarepaket Matlab. Dabei werden zunächst für jedes Zeitinkrement – es wird eine Aufzeichnungsrate von 1 000 Hz wie in den experimentellen Untersuchungen gewählt – jene Knoten am Umfang der Oszillationsbandage gesucht, die sich mit dem Bodenkörper in Kontakt befinden. Durch die Oszillationsbewegung und insbesondere die Fahrbewegung sind in jedem Zeitinkrement andere Knoten im Kontakt. Über geometrische Beziehungen wird dann die Lage dieser Knoten in Bezug auf den Referenzknoten in der Achse der Bandage bestimmt, um die Kontaktlänge zwischen Bandage und Untergrund darstellen zu können. Positive Werte der Kontaktlänge bedeuten dabei, dass der betrachtete Knoten in der Kontaktlänge in Richtung der positiven x-Achse vor dem Referenzknoten in der Achse der Bandage liegt (**Bild 14**).
Für jeden im Kontakt befindlichen Knoten i der Bandage und jedes Zeitinkrement j wird die Geschwindigkeit v^c berechnet:

$$v_{ij}^c = \frac{x_{ij} - x_{ij-1}}{t_j - t_{j-1}} \tag{4}$$

Ebenso wird für jeden Knoten i und jedes Zeitinkrement j die Schubspannung τ_{ij} aus den Ergebnissen der numerischen Simulationsberechnung ausgelesen.

4.2.2 Exemplarische Auswertung zur Beurteilung der Verschleißwirkung

Da später die Ergebnisse von Simulationsberechnungen mit unterschiedlichen Maschinenparametern (z. B. Variation der Oszillationsfrequenz f) verglichen werden, ist die Auswertung für eine festgelegte Anzahl an Oszillationsperioden oder für eine festgelegte Zeitspanne nicht zweckmäßig. Der Bezug erfolgt deshalb auf die willkürlich festgelegte Wegstrecke von 0,2 m, für die unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit ein entsprechendes Zeitfenster der Auswertung berechnet wird. Für die Standardfahrgeschwindigkeit von 4 km/h sind das beispielsweise $\Delta t = 0{,}18$ s. Das Zeitfenster beginnt dabei stets $t = 6$ s nach dem Beginn der dynamischen Analyse und damit 5 s nach dem Beginn der Fahrbewegung, um den bereits eingeschwungenen Zustand der Fahrbewegung zu betrachten.
In **Bild 15**, **Bild 16** und **Bild 17** ist die Auswertung der Kontaktbedingungen für eine Simulation mit den Standardparametern der Oszillationsverdichtung (Frequenz $f = 39$ Hz, Fahrgeschwindigkeit $v = 4$ km/h) dargestellt. Die Bodenparameter entsprechen dabei den Angaben in Tabelle 1 mit ei-

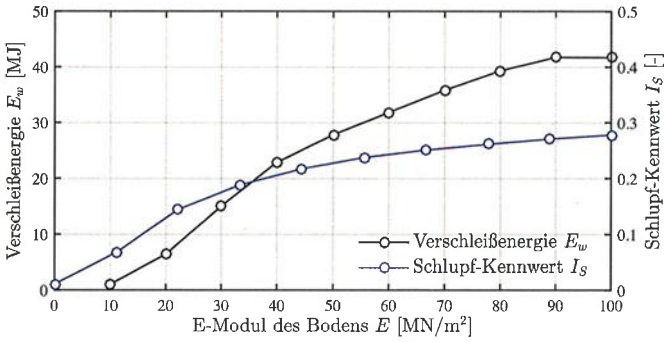

Bild 18. Entwicklung der Verschleißenergie E_w und des Schlupf-Kennwertes I_S in Abhängigkeit vom E-Modul des Bodens E [2].
Fig. 18. Evolution of the wear energy E_w and the slip-value I_S as a function of Young's Modulus E of the soil [2].

nem Elastizitätsmodul E = 30 MN/m² der zu verdichtenden Schicht. In Bild 15 bis Bild 17 ist auf der Ordinate die Koordinate x aufgetragen, aus der entlang der Abszisse der Verlauf der Kontaktlänge $2a_0$ verfolgt werden kann. Sie beträgt im gegenständlichen Fall $2a_0 \approx 5$ cm (Bild 14).
Die Knoten im Kontakt mit dem Boden sind in Bild 15 in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v^c eingefärbt. In der Zeit Δt, in der die Strecke von 0,2 m zurückgelegt wird, werden bei einer Frequenz f = 39 Hz sieben Oszillationsperioden ausgeführt. Diese sind im zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeiten v^c eindeutig durch das abwechselnd positive und negative Vorzeichen dieser Geschwindigkeiten erkennbar. Die Geschwindigkeiten liegen zwischen $v^c = -0{,}165$ m/s und $v^c = 0{,}280$ m/s. Die Asymmetrie des Wertebereichs ist eine Folge der Überlagerung von Oszillations- und Fahrbewegung der Bandage. Die farbliche Darstellung der Kontaktlänge im Verlauf der Zeit in Bild 16 repräsentiert die Größe der auftretenden Schubspannungen τ in der Kontaktfläche. Die Angabe der Schubspannung τ erfolgt in N/m, da bereits die Bandagenbreite von $2b_0$ = 1,68 m berücksichtigt ist. Abhängig von der Wirkrichtung des Oszillationsmomentes wechseln die Schubspannungen das Vorzeichen und die einzelnen Oszillationsperioden sind wie in den Geschwindigkeiten des Bildes 15 erkennbar. Aufgrund der Vorzeichendefinition treten im Falle positiver Geschwindigkeiten v^c auch positive Schubspannungen τ auf.
Die Multiplikation von Geschwindigkeit v^c_i und Schubspannung τ_i eines Knotens i führt auf die Verschleißleistung pro Meter und ist in Bild 17 dargestellt. Bereiche hoher Geschwindigkeiten und Schubspannungen führen erwartungsgemäß auch zu höheren Beträgen der Verschleißleistung. Die tatsächliche Verschleißenergie E_w [MJ] für die gesamte Kontaktfläche und die Dauer, die benötigt wird, um 0,2 m Fahrstrecke zurückzulegen, wird nach Gleichung (5) berechnet, indem die Verschleißleistung pro Meter über die Kontaktlänge $2a_0$ und die Dauer Δt integriert wird.

$$E_w = \int_{2a_0} \int_{\Delta t} |\tau| \left| v^c \right| \mathrm{d}t\, \mathrm{d}x \qquad (5)$$

Eine ähnliche Vorgehensweise wurde bereits von Forstmann [12] für die Lebensdauerprognose von Kugelgewindetrieben im Einsatz an Kunststoffspritzgießmaschinen gewählt.
Für den betrachteten Fall der Simulation einer Oszillationsverdichtungsfahrt mit den Standardparametern der Oszillation (Oszillationsfrequenz f = 39 Hz, Fahrgeschwindigkeit v = 4 km/h) und einem E-Modul des Bodens E = 30 MN/m² beträgt die Verschleißenergie E_w = 15,06 MJ.

4.3 Beurteilung der Verschleißwirkung – Verifikation des Schlupf-Kennwertes

Die Auswertung der Verschleißenergie E_w einer einzelnen Simulationsberechnung hat nur beschränkte Aussagekraft. Wertvoll sind vergleichende Untersuchungen mehrerer Berechnungen mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften oder Oszillationsparametern.

4.3.1 Einfluss des E-Moduls des Bodens auf die Verschleißbeurteilung

Bild 18 zeigt die Entwicklung der Verschleißenergie E_w und des Schlupf-Kennwertes I_S für die durchgeführte Variation des Elastizitätsmoduls der zu verdichtenden Schicht von E = 10 MN/m² bis E = 100 MN/m².
Während sich für den Elastizitätsmodul E = 10 MN/m² der zu verdichtenden Schicht eine sehr geringe Verschleißenergie E_w = 1,05 MJ ergibt, ist der Boden bereits bei einer geringfügigen Steigerung des E-Moduls nicht mehr in der Lage, den Bewegungen der Oszillationsbandage vollständig zu folgen. In der Kontaktfläche treten Relativverschiebungen und Schubspannungen auf, die eine Steigerung der Verschleißenergie E_w zur Folge haben. Diese Steigerung ist bis zu E = 40 MN/m² am deutlichsten ausgeprägt. Bei höheren E-Moduln flacht die steifigkeitsbedingte Zunahme der Verschleißenergie ab und nähert sich asymptotisch einem Grenzwert, der für die simulierten Parameter der Oszillationsanregung (f = 39 Hz, v = 4 km/h) und Reibungseigenschaften μ = 0,5 bei einem E-Modul des Bodens E = 90 MN/m² de facto erreicht wird. Im Falle derart hoher Werte ist der Boden überhaupt nicht mehr in der Lage, den Bewegungen der oszillierenden Bandage zu folgen. Der Anteil der Gleitphasen jeder Oszillationsperiode wird maximal und Haftphasen existieren nur mehr theoretisch an den Umkehrpunkten der Bandagenbewegung. Ab dem identifizierten Grenzwert des E-Moduls erscheint der Untergrund aus Sicht der Kontaktmechanik starr.
Ziel der numerischen Simulationsberechnungen ist neben der Beurteilung der Verschleißwirkung insbesondere das Schaffen einer Referenzgröße zur Beurteilung der Aussagekraft des in Abschnitt 3 vorgestellten Schlupf-Kennwertes I_S. Während die Größe des Schlupf-Kennwertes im Experiment bestimmt und aufgezeichnet werden kann, ist die Bestimmung der umgesetzten Verschleißenergie E_w auf die numerischen Simulationsberechnungen beschränkt. Umgekehrt ist allerdings der Schlupf-Kennwert I_S sehr wohl mittels numerischer Simulationen bestimmbar und sein Verlauf in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul des Bodens ebenfalls in Bild 18 dargestellt.
Die Größe des Schlupf-Kennwertes I_S ist begrenzt (Bild 11). Darüber hinaus unterscheiden sich die Wertebereiche des dimensionslosen Schlupf-Kennwertes I_S und der Verschleißenergie E_w deutlich.
Die Verläufe der Verschleißenergie E_w und des Schlupf-Kennwertes I_S mit zunehmendem E-Modul des Bodens zeigen einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf. Für E-Moduln der zu verdichtenden Schicht E < 35 MN/m² überschätzt der Schlupf-Kennwert I_S die Verschleißwirkung geringfügig,

während die Verschleißwirkung für höhere Elastitzitätsmoduln geringfügig unterschätzt wird.
Für die durchgeführten Simulationsberechnungen mit den Standardparametern der Oszillationsverdichtung einer HAMM HD+ 90 VO Tandemwalze zeigt sich eine hohe Aussagekraft des Schlupf-Kennwertes I_S über die Verschleißwirkung, die im Zuge des Verdichtungsprozesses in der Kontaktfläche umgesetzt wird.

4.3.2 Einfluss der Oszillationsfrequenz auf die Verschleißbeurteilung

In **Bild 19** sind die Entwicklungen der Verschleißenergie E_w und des Schlupf-Kennwertes I_S mit steigender Oszillationsfrequenz f dargestellt. Dabei zeigt sich eine deutliche Reduktion der umgesetzten Verschleißenergie mit zunehmender Oszillationsfrequenz. Dieser Sachverhalt entspricht nicht zwingend der Erwartungshaltung, dass bei einer größeren Anzahl von Belastungszyklen eine entsprechend größere Verschleißwirkung die Folge ist. Tatsächlich ist der relative zeitliche Anteil der Gleitphasen während einer Oszillationsperiode für Oszillationsfrequenzen bis $f = 40$ Hz vergleichsweise konstant. Dies bedeutet aber auch, dass im Falle einer längeren Dauer einer Oszillationsperiode, also bei niedrigen Oszillationsfrequenzen, die absolute Dauer der Gleitphasen deutlich länger ist als im Falle hoher Oszillationsfrequenzen. Daraus ist zudem ableitbar, dass durch den weniger häufigen Wechsel der Bewegungsrichtung im Falle einer Oszillationsfrequenz $f = 20$ Hz die Summe der Dauer aller Gleitphasen während des Zurücklegens der Wegstrecke von 0,2 m größer ist als bei der Betrachtung höherer Oszillationsfrequenzen. Aus diesem Grund sinkt die Verschleißwirkung auf den Walzmantel der Bandage auch mit zunehmender Oszillationsfrequenz f.
Die Verläufe der Verschleißenergie E_w und des Schlupf-Kennwertes I_S ähneln einander für ausreichend hohe Frequenzen. Besteht zwischen den Gleitphasen einer Oszillationsperiode, also am Umkehrpunkt der Bewegung, nahezu kein Haftkontakt mehr zwischen dem Walzmantel der Bandage und der Oberfläche des Bodens, verschwindet allmählich das gekappte Sinussignal in den horizontalen Lagerbeschleunigungen, welches Basis der Ermittlung des Schlupf-Kennwertes I_S ist (Abschnitt 3), wodurch auch I_S geringere Werte annimmt.
Bei der sehr niedrigen Oszillationsfrequenz $f = 20$ Hz ist der zu verdichtende Boden in der Lage, den Bewegungen der Bandage noch weitgehend zu folgen. Es tritt weniger Schlupf zwischen dem Walzmantel und der Oberfläche des Bodens auf und geringere I_S-Werte werden erreicht. Dass der geringe dabei auftretende Schlupf allerdings eine erhebliche Verschleißwirkung generiert, zeigt die berechnete Verschleißenergie E_w.
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Schlupf-Kennwert I_S für übliche ($f = 30 - 40$ Hz) und hohe Oszillationsfrequenzen eine realistische Beurteilung der Verschleißwirkung zulässt. Für sehr niedrige Oszillationsfrequenzen, die in der Praxis aufgrund der schwierigeren dynamischen Entkoppelung von schwingender Bandage und dem Rahmen der Walze nicht zur Anwendung kommen, wird die Verschleißwirkung durch den Schlupf-Kennwert I_S stark unterschätzt.

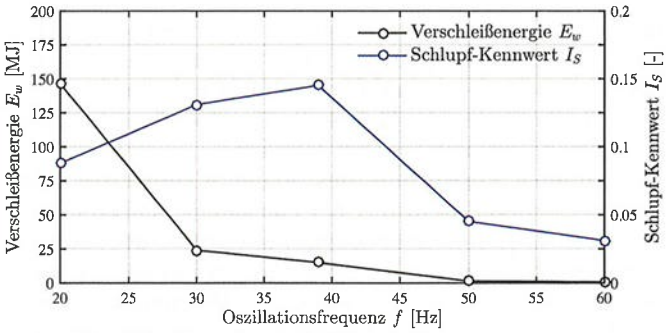

Bild 19. Entwicklung der Verschleißenergie E_w und des Schlupf-Kennwertes I_S in Abhängigkeit von der Oszillationsfrequenz f [2].
Fig. 19. Evolution of the wear energy E_w and the slip-value I_S as a function of the oscillation frequency f [2].

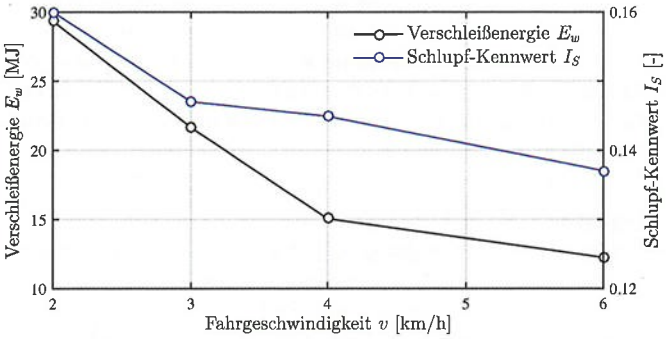

Bild 20. Entwicklung der Verschleißenergie E_w und des Schlupf-Kennwertes I_S in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v [2].
Fig. 20. Evolution of the wear energy E_w and the slip-value I_S as a function of the roller speed v [2].

4.3.3 Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Verschleißbeurteilung

Wie **Bild 20** verdeutlicht, sinken die Werteniveaus der Verschleißenergie E_w und des Schlupf-Kennwertes I_S mit steigender Fahrgeschwindigkeit v.
Durch die Variation der Fahrgeschwindigkeit v wird auch der Bezug der Verschleißenergie E_w auf eine Fahrstrecke von 0,2 m deutlich. Für ebendiese Strecke wird bei einer Halbierung der Fahrgeschwindigkeit auf $v = 2$ km/h die doppelte Zeit benötigt, das betrachtete Zeitfenster der Auswertung beträgt dann $\Delta t = 0{,}36$ s und der Walzmantel der Bandage wird doppelt solange beansprucht.
Der Schlupf-Kennwert I_S ist prinzipiell in der Lage, die Abnahme der Verschleißwirkung mit steigender Fahrgeschwindigkeit v abzubilden, die Größe der Beeinflussung wird allerdings geringfügig unterschätzt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Aufsatz wurde auf Grundlage experimenteller Untersuchungen und theoretischer Überlegungen ein Schlupf-Kennwert zur Beurteilung der Kontaktbedingungen zwischen dem Walzmantel einer Oszillationsbandage und der Oberfläche eines zu verdichtenden Materials vorgestellt. Die Aussagekraft des Schlupf-Kennwertes hinsichtlich Verschleißwirkung auf den Walzmantel der Bandage war jedoch zunächst unbekannt. Aus diesem Grund wurde ein Finite-Elemente-Modell zur numerischen Simulation der Verschleißwirkung einer Oszillationsverdichtung entwickelt. Aus der Analyse der Größe der Kontaktfläche zwischen dem Walzmantel der Bandage und dem Untergrund

und der Auswertung der Verteilungen von Schubspannungen und Relativgeschwindigkeiten in ebendieser Kontaktfläche wurde die auf eine konstante Fahrstrecke bezogene Verschleißenergie als Referenzgröße der Verschleißwirkung einer Verdichtungsfahrt definiert.

Die parallele Auswertung des Schlupf-Kennwertes zeigt, dass der Schlupf-Kennwert bei konstanter Fahrgeschwindigkeit und Oszillationsfrequenz sehr gut in der Lage ist, den steifigkeitsabhängigen relativen Verschleiß des Walzmantels einer Oszillationsbandage zu beurteilen. Mit steigender Bodensteifigkeit erhöht sich auch die Verschleißwirkung auf den Walzmantel der Bandage.

Im Zuge der Untersuchung der Abhängigkeit der Verschleißwirkung von der Oszillationsfrequenz wurde erkannt, dass Oszillationsfrequenzen $f \geq 30\,\mathrm{Hz}$ eine tendenziell geringere Beanspruchung des Walzmantels der Bandage bedeuten. Dieses Verhalten wird auch vom Schlupf-Kennwert erfasst. Festgestellt wurde außerdem, dass der Schlupf-Kennwert die Verschleißwirkung sehr geringer Oszillationsfrequenzen $f \approx 20\,\mathrm{Hz}$ deutlich unterschätzt. Praktisch hat dieser Sachverhalt nur untergeordnete Bedeutung, da mit derart niedrigen Oszillationsfrequenzen auch eine geringere Verdichtungswirkung erzielt wird. Ein Vergleich der berechneten Verschleißenergie mit den Werten des Schlupf-Kennwertes zeigt, dass niedrige Fahrgeschwindigkeiten eine besonders hohe Verschleißwirkung besitzen, der Schlupf-Kennwert allerdings nicht in der Lage ist, den geschwindigkeitsabhängigen Verschleiß des Walzmantels abzubilden.

Hinsichtlich der relativen Verschleißwirkung besitzt der vorgestellte Schlupf-Kennwert, mit einer Einschränkung für sehr niedrige Oszillationsfrequenzen, eine hohe Aussagekraft. Sollen quantitative Aussagen über die Verschleißwirkung, insbesondere im Falle einer Variation unterschiedlicher Maschinenparameter, getroffen werden, reicht der Schlupf-Kennwert nicht aus, sondern es müssen die Verteilungen der Schubspannungen und Geschwindigkeiten in der Kontaktfläche zwischen dem Walzmantel der Bandage und dem Untergrund ebenfalls Berücksichtigung finden.

Literatur

[1] *Adam, D.*: Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen. Wien, TU Wien, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Dissertation, 1996.

[2] *Pistrol, J.*: Verdichtung mit Oszillationswalzen. Bewegungsverhalten, walzenintegrierte Verdichtungskontrolle und Verschleißbeurteilung. Wien, TU Wien, Institut für Geotechnik, Dissertation, 2016.

[3] *Pistrol, J.; Adam, D.*: Dynamische Verdichtung und walzenintegrierte Verdichtungskontrolle mit Oszillationswalzen. *In*: Bauingenieur 91 (2016), Heft 9, S. 337–349.

[4] *Kopf, F.; Villwock, S.; Völkel, W.*: Vorrichtung und Verfahren zur Ermittlung einer einen Kontaktzustand einer Verdichterwalze mit zu verdichtendem Untergrund repräsentierenden Aufstandsgröße. Patent: Deutschland, 2014.

[5] *Stöberl, L.*: Auswertung und Interpretation akustischer Messungen zur Ermittlung der Kontaktlänge und Schiebewirkung von Erdbauwalzen. Wien, TU Wien, Institut für Geotechnik, Diplomarbeit, 2015.

[6] *Hertz, H.*: Über die Berührung fester elastischer Körper. Gesammelte Werke, Band 1, Leipzig, 1895.

[7] *Adam, C.; Adam, D.; Kopf, F.; Paulmichl, I.*: Computational validation of static and dynamic load testing. *In*: Acta Geotechnica, Vol. 4.1 (2009), pp. 35–55.

[8] RVS 08.03.04: Technische Vertragsbedingungen. Vor-, Abbruch- und Erdarbeiten. Verdichtungsnachweis mittels Dynamischen Lastplattenversuches, 2008.

[9] *Goodman, R. E.*: Introduction to Rock Mechanics. John Wiley and Sons, New York, 1980.

[10] *Kuhlemeyer, R.; Lysmer, J.*: Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *In*: Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 99.SM5 (1973), pp. 421–427.

[11] *Lysmer, J.; Kuhlemeyer, R.*: Finite dynamic model for infinite media. *In*: Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 95.DM4 (1969), pp. 859–877.

[12] *Forstmann, J.*: Kugelgewindetriebe im Einsatz an Kunststoffspritzgießmaschinen – Lebensdauerprognose und Optimierung. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2010.

Buchempfehlung

Heisel, J. P.
Planungsatlas
Praxishandbuch Bauentwurf
4., Auflage 2016. 588 Seiten, Fotos, Gebunden.
Beuth Verlag GmbH
ISBN 978–3–410–25285–6
64,- Euro, auch als E-Book erhältlich

Der Planungsatlas enthält die wesentlichen Grundlagen für den Entwurf und die Planung von Hochbauten. Alle wichtigen Gebäudetypen mit ihren grundlegenden Merkmalen und Strukturen werden schnell erfassbar und übersichtlich dargestellt. Neben vielen erläuternden Grafiken zeigen zahlreiche Grundrisse, Schnitte und Fotos beispielhafte Lösungen.

Neu in der 4. Auflage sind:

- durchgehende Aktualisierung in Text und Grafiken,
- neue Bautypen, neue Themenfelder,
- neues Kapitel zu Bauten für die Kultur (Museen, Theater, Kinos, Konzerthäuser, Sakralbauten) + des Gesundheitswesens (Arztpraxen, Pflegeheime),
- über 50 neue, aktuelle Projektbeispiele mit Fotos,
- über 100 neue Grafiken.

Berücksichtigt werden die neuesten Regelwerke.

www.beuth.de