

# Effizienz von Walzenverdichtern mit unrunder Bandagegeometrie

R. E. Ocaña Atencio<sup>1</sup>, Z. Harsányi<sup>1</sup>, A. Oltmanns<sup>1</sup>, A. Knut<sup>1</sup>, R. Thiele<sup>1</sup>

<sup>1</sup> G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik, HTWK Leipzig, Leipzig, <rosa.ocana@htwk-leipzig.de>

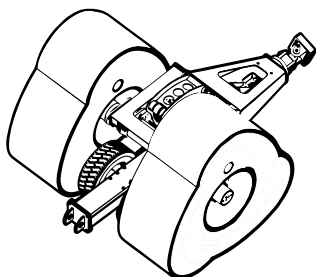
## KURZFASSUNG

In diesem Beitrag wird die Effizienz von Walzenverdichtern mit unrunder Bandagegeometrie diskutiert. Diese Technologie hat aufgrund seiner höheren Fahrgeschwindigkeit großes Potential zur Rekultivierung großflächiger Tagebauinnenkippen. Die Verdichtung erfolgt durch einen Stoßprozess, welcher durch die eingetragene Energie und den Impuls beschrieben wird. Diese Größen sind abhängig von der Geometrie der Bandage. Für eine Geometrie wird exemplarisch die Kinematik und die davon abhängigen Zustandsgrößen berechnet. Der Einfluss des Bodens auf die Kinematik der Bandage wird mit einem numerischen Modell analysiert und im Kontext der theoretischen Ergebnisse diskutiert. Es zeigt sich, dass für eine Geometrie die Zuggeschwindigkeit und die statische Masse des Verdichters maßgeblich die eingetragene Energie und den Impuls bestimmen. Mit dem Wissen um die wesentlichen Wirkgrößen ist es möglich Verdichtungsprozessen effizienter zu gestalten, z.B. durch die Wahl des entsprechenden Zuggerätes oder die Applikation zusätzlicher Masse.

*Schlagerworte:* RDC, Energie, Kinematik, Impuls, Geschwindigkeit

## 1 EINLEITUNG

Walzenverdichter mit unrunder Bandagegeometrie werden für nichtbindige Böden seit Jahren eingesetzt. Die bekanntesten Hersteller dieser Verdichtungssysteme sind Broons mit einer vierkantigen Geometrie und LANDPAC mit einer dreikantigen und einer fünfkantigen Variante.



**Abbildung 1** dreiseitige Systemvariante  
([www.gyropac.com/home](http://www.gyropac.com/home))

In der Baupraxis werden diese Systeme oft als Rolling Dynamic Compaction (RDC) bezeichnet. Aufgrund ihrer hohen Fahrgeschwindigkeit (ca. 11 km/h) und Wirktiefe (bis zu 7 m) besitzen sie großes Potential als Bodenverbesserungsmaßnahme großflächiger Tagebauinnenkippen. Alle bekannten fahrenden Systeme weisen das gleiche Grundprinzip auf. Das Verdichtungsgerät wird an ein Fahrzeug gekoppelt und über das Baufeld gerollt. Die Bandage ist als unrunderes Rad konzipiert. Durch das Weiterziehen fällt die in Bewegungsrichtung stehende Seite von einer definierten Höhe auf den Boden. Durch die unrunde Form des Verdichtungskörpers wird eine Impulsverdichtung gewährleistet, d. h. während des Fahrens schlagen die Seiten auf den Boden. Die somit erzielten hohen Energieeinträge führen zu einer

Dichteerhöhung bei einem breiten Spektrum an Wassergehalten (Nicholson 2015).

Die Hersteller des RDC-Systems beziehen meistens ihre Effizienzangaben auf die potentielle Energie, welche nur von der Masse und der geometriegebundenen Fallhöhe abhängig ist. In der Literatur ist die Ermittlung des Energieeintrags nicht genügend aufgeklärt. Manche Autoren beziehen sich nur auf die kinetische Energie, bzw., wie die Hersteller, nur auf die potentielle Energie, während andere beide Energien im Betracht ziehen (Scott et al. 2020).

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Ermittlung der Effizienz, bezogen auf Energie und Impuls, leisten.

## 2 KINEMATIC DES RDC-SYSTEMS

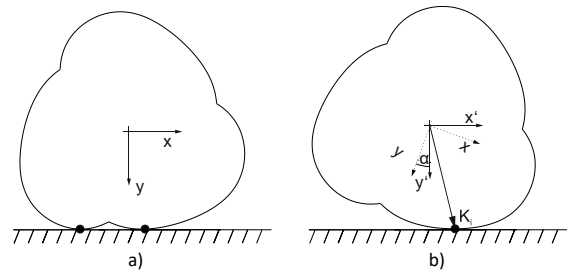
Zum besseren Verständnis dieser Technologie wurde das Bewegungsverhalten der dreiseitigen Bandagevariante der Firma LANDPAC untersucht.

Die Bewegung der Bandage, gesehen als starrer Körper, setzt sich aus Translation und Rotation zusammen. In diesem Beitrag wurden nur die Translationskomponenten der x-y-Ebene analysiert.

Für eine Umdrehung wurden die Verschiebungskomponenten der Drehachse relativ zur stabilen Ausgangslage, bei der zwei Berührungspunkte zwischen Erdoberfläche und Bandage vorliegen, ermittelt. Der Untergrund wurde als starr angenommen.

Bei einer Umdrehung hebt sich und senkt sich die Bandage mehrmals. Die Bewegung der Drehachse in x-Richtung beschreibt eine gerade Linie mit konstanter Fahrgeschwindigkeit. Die vertikale Verschiebungskomponente (Fallhöhe  $\Delta h$ ) kann abhängig von der Bandagegeometrie analytisch ermittelt werden.

Für die Betrachtung wird die Außenkontur der Bandage diskretisiert und die Koordinaten für jeden Kurvenpunkt  $r$  bestimmt. Für jede Lage kann die y-Komponente des Berührungspunktes  $K$  als maximaler Wert der Kurvenpunkte ermittelt werden. Zwei Berührungspunkte liegen nur in der stabilen Lage vor.



**Abbildung 2** stabile Lage der Bandage mit Koordinatensystem im Schwerpunkt (a) Drehung des Koordinatensystems um den Winkel  $\alpha$  zur Ermittlung von  $K$  (b)

$$K = \max\{\mathbf{r}_y\} \quad (1)$$

Um die Lage der Berührungspunkte ermitteln zu können, wurden die Kurvenpunkte iterativ über den Drehwinkel bestimmt. Dafür wurde das Koordinatensystem mit Hilfe der Drehmatrix  $D$  um den Winkel  $\alpha$  gedreht:

$$\mathbf{r}'(\alpha) = D\mathbf{r} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

Damit gilt für den Berührungspunkt der Bandage:

$$K(\alpha) = \max\{\mathbf{r}'_y(\alpha)\} \quad (3)$$

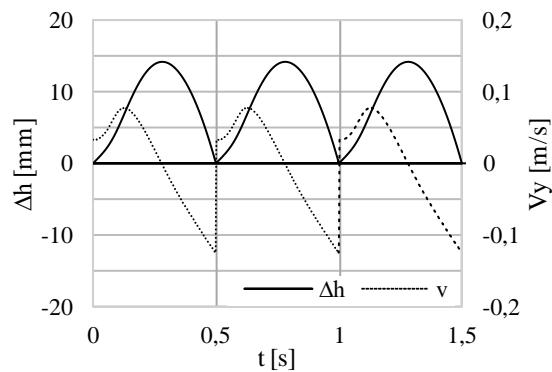
Durch die Bestimmung der Maxima lässt sich die Fallhöhe  $\Delta h$  für eine Umdrehung darstellen:

$$\Delta h(\alpha) = K(\alpha) - \min\{K\} \quad (4)$$

Ausgehend von einer konstanten Winkelgeschwindigkeit kann der Drehwinkel in Abhängigkeit von der Drehzahl und damit von der Zeit angegeben werden.

Die in Abbildung 3 dargestellte Geschwindigkeit entspricht die zeitliche Ableitung der Fallhöhe. Aufgrund der Bandagegeometrie führt die Bandagenachse drei sinusähnliche Schwingungen in einer Umdrehung aus. Die Achse steigt bis sie bei ca.  $70^\circ$  das Maximum erreicht hat, an. Anschließend sinkt sie bis zu einem Drehwinkel von  $120^\circ$ .

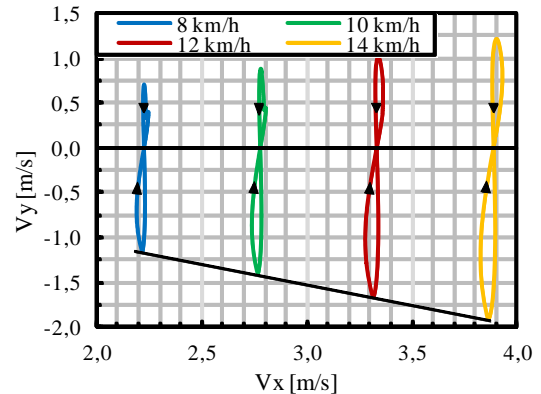
Die Walzebewegung lässt sich mit drei "Bewegungsphasen" beschreiben.



**Abbildung 3** vertikale Bewegung und vertikale Geschwindigkeit der Bandage  
Ausgehend von der stabilen Lage erfolgt als erstens ein "Heben" der Bandage. Hierfür steigt die Geschwindigkeit in positiver y-Richtung bis zu einem maximalen Wert an. Nach Erreichen des Hochpunktes wird  $v_y$  weniger, da die Bandagegeometrie die Vorwärtsbewegung begünstigt. Bei maximaler Fallhöhe kippt die Walze um,  $v_y$  erfährt eine Richtungsänderung und das "Fallen" der Bandage beginnt. Kurz vor dem "Stoß" der Walzenbandage mit dem Boden ist der maximale Betrag von  $v_y$  erreicht. Nach dem Stoß wiederholen sich die Bewegungsphasen wieder. Der Boden erfährt aufgrund der Geometrie drei Stößen pro Umdrehung.

### 3 NUMERISCHE SIMULATION

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode wurde das Bewegungsverhalten der Bandage auf sandigen Boden analysiert. Das Bodenmodell setzt sich aus einem finiten-Elementen-Netz (30 m X 10 m) und einem infiniten-Elementen-Netz als Boundary Condition zusammen. Das Bodenmaterial wurde mit dem Stoffgesetz Drucker-Prager beschrieben. Der Untergrund wurde in ebenem Dehnungszustand in ABAQUS/Explizit nachgebildet. Das Gerätmodell entspricht einer 10 t schweren Bandage, welche als Rigid Body nachgebildet wurde. Ihre Achse wird an einer starre Stange gekoppelt, die mit einer konstanten Geschwindigkeit in der x-Richtung gezogen wird. Die Bandagekinematik hängt nicht nur von der Geometrie, sondern auch von der Fahrgeschwindigkeit des Systems ab.



**Abbildung 4** Geschwindigkeitskomponenten in x- und y-Richtung bei einem Drittel der Bandagenumdrehung

Um ihren Einfluss zu erfassen, wurde eine Studie mit Hilfe von numerischen Simulationen durchgeführt. Die variierten Geschwindigkeiten betragen 8, 10, 12, 14 und 15 km/h. Während  $v_x$  annähernd konstant bleibt, ändert sich  $v_y$  in Betrag und Richtung. Dieser Effekt korreliert zu dem im Abschnitt 2 beschriebenen analytischen Verlauf der Geschwindigkeitskomponenten. Die y-Komponente zum Zeitpunkt des Stoßes nimmt mit der Fahrgeschwindigkeit linear zu. Die Zunahme kann durch folgende Gleichung in m/s beschrieben werden:

$$|v_y|_{max} = 0,4989 |v_{fahr}| \quad (5)$$

Bei 15 km/h springt die Bandage unkontrolliert, was zu extremen Belastungen an der Walze führt. Dieses Verhalten wird bei hohen Fahrgeschwindigkeiten auch in der Praxis beobachtet (Scott et al. 2020).

### 4 ENERGETISCHE BETRACHTUNG DES SYSTEMS

Die gesamte Energie des Systems setzt sich aus potentieller und kinetischer Energie zusammen. Die maximale Verdichtungswirkung wird durch das Schlagen der Geräteseite auf den Boden verursacht (Scott et al. 2020). Bei dem Stoß beträgt die Fallhöhe 0 m. Zu diesem Zeitpunkt ist die potentielle Energie Null. Somit ergibt sich die gesamte Energie wie folgt:

$$E_{ges} = E_{kin} = E_{tra} + E_{rot} \quad (6)$$

Die kinetische Energie ergibt sich aus der Translations- und der Rotationsbewegung der Bandage. Mit  $E_{tra}$ :

$$E_{tra} = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2) \quad (7)$$

Das Schlagen der Geräteseite auf den Boden, der Zeitpunkt wenn die maximale kinetische Energie des Systems erreicht ist, kann mit Hilfe des Impulses  $p$  beschrieben werden. Da die vertikale Komponente  $p_y$  den größten Einfluss auf die Verdichtung hat, wird nur sie für die weitere Betrachtung einbezogen.

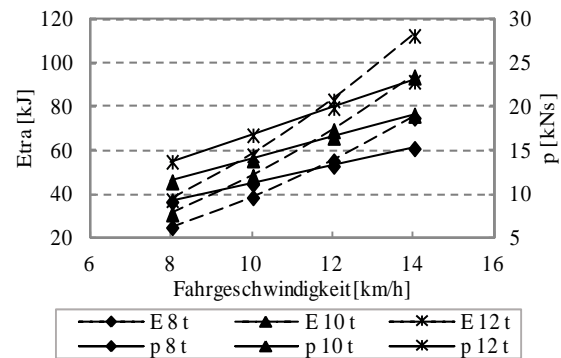
$$p_y = mv_y \quad (8)$$

Die Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang zwischen Masse (8, 10 und 12 t) und Fahrgeschwindigkeit als maßgebende Größen für die Energie (unterbrochene Linie) und den Impuls (durchgezogene Linie) des Systems.

Wie zu erwarten ist, hat die Geschwindigkeit den größten Einfluss auf die kinetische Energie. Bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von 14 km/h, steigt die Energie bei einer Massenerhöhung von 4 t um 30 % an. Im Vergleich dazu beträgt die Energieerhöhung ca. 70 % bei einer Fahrgeschwindigkeitszunahme von 6 km/h einer 12 t schweren Walze. Unter gleichen Randbedingungen begünstigt die Massensteigerung bzw. der Geschwindigkeitsanstieg eine Impulserhöhung von 35 bzw. 39 %.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Durch die Analyse der Kinematik des RDC-Systems lässt sich die Funktionsweise besser verstehen und die Effizienz genau ermitteln. Die Vorgehensweise der Hersteller zur Effizienzermittlung scheint nicht korrekt zu sein. Eine Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit und ihren Einfluss auf die Verdichtungswirkung wird dabei vernachlässigt.



**Abbildung 5** Energie und Impuls des dreikantigen Systems für unterschiedliche Massen und Fahrgeschwindigkeiten

Die numerischen Simulationen haben aufgezeigt, dass ab einer gewissen Fahrgeschwindigkeit die Walzenbandage zu springen anfängt. Dieses Verhalten setzt eine obere Grenze für die Effizienz dieser Systeme und müsste genauer untersucht werden.

In diesem Beitrag wurden nur die Translationskomponenten der Bandagebewegung berücksichtigt. Die Rotationskomponenten müssen noch einbezogen werden, um die kinetische Energie genau zu ermitteln. Ein Zusammenhang zwischen Energie bzw. Impuls und Wirktiefe wird Bestandteil zukünftiger Arbeiten sein.

## LITERATUR

- Nicholson, P. G. (2015): *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-408076-8.
- Scott, B. T., Jaksa, M. B. und Mitchell, P. W. (2020). Influence of towing speed on effectiveness of rolling dynamic compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* Vol. 12 Nr. 1: 126-134. ISSN: 1674-7755.