

Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode im Eisenbahnbau

Numerische Parameterstudien zum dynamischen Verhalten von Gleisschotter

SAMIR OMERović | CHRISTIAN KOCZWARA | HARALD DAXBERGER | BERNHARD ANTONY | FLORIAN AUER

Stetige Weiterentwicklungen im Bereich der Fahrwegtechnik und generell wachsende Anforderungen im Bahnbau werfen zahlreiche Fragen zum dynamischen Verhalten von Gleisschotter auf. Neue Simulationsmethoden erlauben erstmals einen präzisen Blick in den Gleisschotter und ermöglichen neuartige und aussagekräftige Parameterstudien.

Einleitung

Die Thematik der Vibrationsverdichtung oder – allgemeiner formuliert – der vibrationsangeregten Fluidisierung granularer Materie ist für viele Disziplinen hochinteressant. Neben Bergbauindustrie, Pharmazie, Lebensmittel- und Verpackungsindustrie gehört dazu auch der Gleisbau [1]. Vibrationsangeregte Fluidisierung des Gleisschotters, in diesem Zusammenhang manchmal auch Schotterverflüssigung genannt, ist ein omnipräsentes, vergleichsweise jedoch wenig untersuchtes Phänomen. Ein Grund dafür sind die erforderlichen aufwendigen und kostspieligen Versuche. Als Alternative oder Ergänzung zu teuren und zeitintensiven Laborversuchen kann mittels Computersimulationen der Einfluss einer großen Bandbreite von Parametern untersucht werden, ebenso wie mögliche Effekte, die üblichen Laborversuchen nicht zugänglich sind. Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) erlaubt einen virtuellen „Röntgenblick“ in das Schottergerüst und damit einen einzigartigen Einblick sowohl in das Kollektivverhalten aller Partikel als auch in die Bewegung einzelner Schotterkörner. Damit wird ein intuitiver Zugang zum Verständnis der komplexen Vorgänge im Schotter ermöglicht. Dieser Beitrag soll insbesondere die Auswirkungen von unterschiedlichen Anregungsfrequenzen sowie Anregungsamplituden auf die Verdichtung von Gleisschotter evaluieren.

Ein vertieftes Verständnis des Schotterverhaltens hat sowohl theoretische als auch praktische Bedeutung. Im Gleisbau treffen dabei situationsabhängig zwei komplett gegensätzliche Anforderungen aufeinander:

- Innerhalb des normalen Eisenbahnbetriebs will man die Übertragung von Vibrationen

in das Gleisbett möglichst minimieren. Diese Erschütterungen führen zu erhöhtem Kornabrieb und zu einer fortschreitenden Verschlechterung der Gleislage aufgrund unkontrollierter Kornumlagerung. Speziell in mangelhaft verdichteten Bereichen kommt es zu inhomogenen Setzungen, wodurch die Instandhaltungsintervalle wesentlich verkürzt werden.

- Bei den Instandhaltungsarbeiten ist es hingegen notwendig, eine kontrollierte Fluidisierung zu erreichen. Beim Stopfprozess sollen die Eindringkräfte möglichst niedrig gehalten werden, um die Belastung auf die Maschinen einzuschränken und Kornbruch zu minimieren. Zusätzlich ist eine

gesteuerte vibrationsangeregte Kornumlagerung vor allem bei der Überfahrt mit einem Dynamischen Gleisstabilisator (DGS) wünschenswert. Dabei werden möglichst abriebfrei inhomogene Verdichtungen und Hohlräume beseitigt, speziell unter den Schwellen.

Wie sich eine kontrollierte vibrationsangeregte Fluidisierung auswirken kann, zeigt Abb. 1. Hier wurde ein Schotterhaufen mit einem Schüttwinkel von ca. 45° neben den Gleisen aufgebaut. Nach dem vollständigen Passieren eines DGS sank der Haufen auf einen endgültigen (dynamischen) Schüttwinkel von ca. 18° zusammen [2].

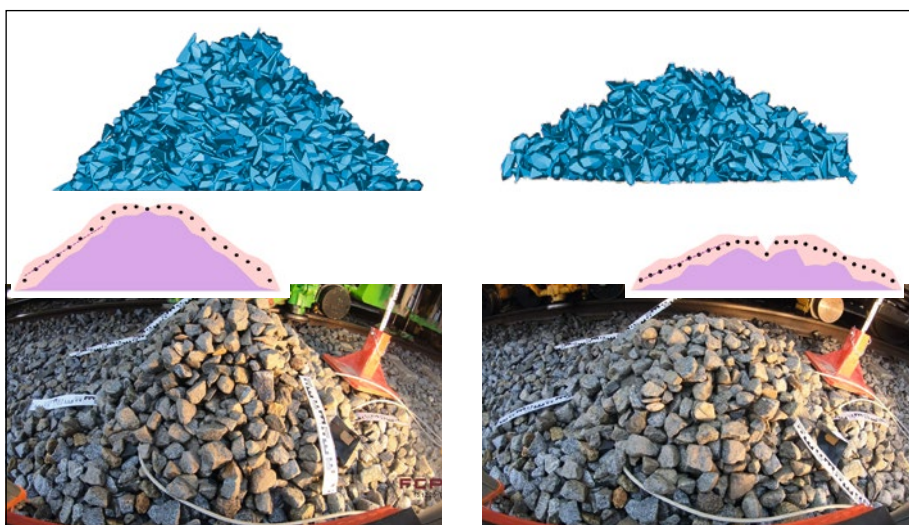


Abb. 1: Schotterhaufenversuch vor der Fluidisierung, Simulation und Feldversuch (links) bzw. nach einer Fluidisierung durch den DGS, Simulation und Feldversuch (rechts)

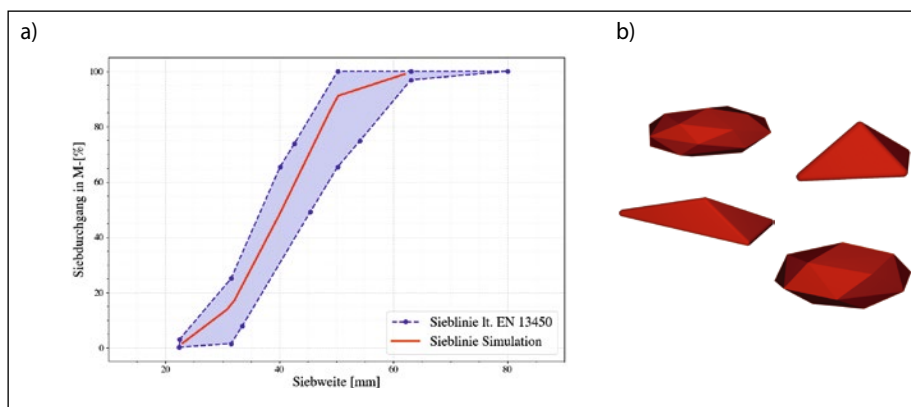


Abb. 2: a) Korngrößenverteilung für die Simulationen sowie b) die verwendeten Partikelgeometrien

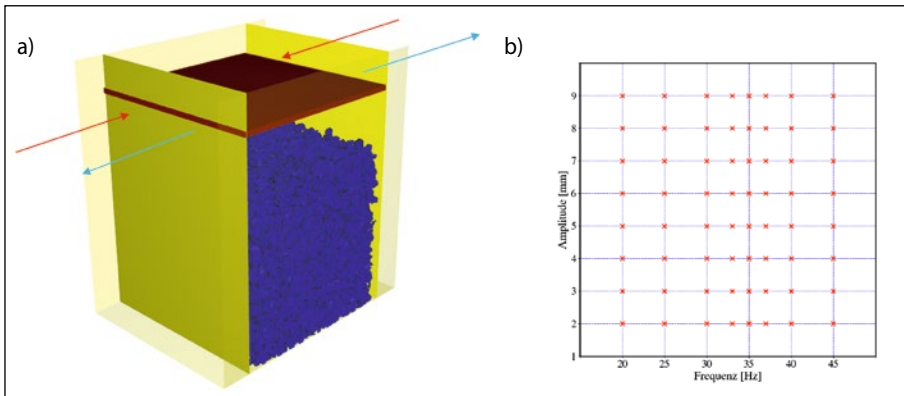


Abb. 3: a) Versuchsaufbau mit gelb dargestellten gegenüberliegenden Rüttelplatten, b) abgesuchter Parameterraum

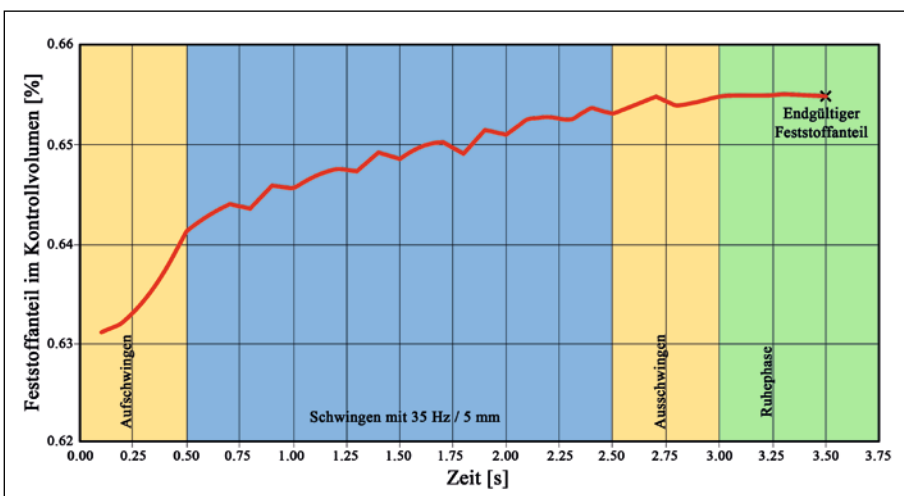


Abb. 4: Zeitlicher Ablauf und die einzelnen Phasen der Simulation

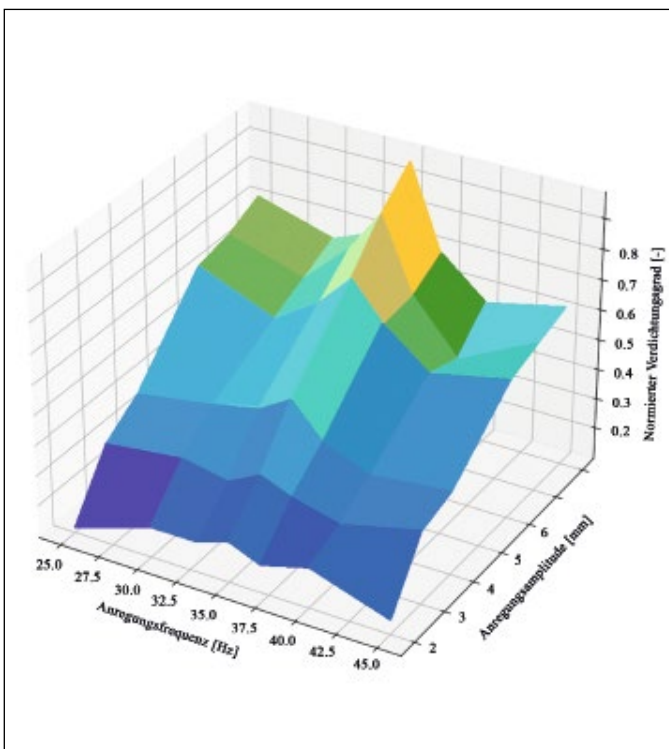


Abb. 5: Verdichtungsdiagramm als Funktion der Amplitude und der Frequenz der Rüttelplatten

mulationen (DEM) den gängigeren Methoden (z. B. Finite-Element-Methode, FEM) vorzuziehen. Der Vorteil der DEM gegenüber anderen Methoden liegt darin, dass sich die makroskopischen Systemeigenschaften durch die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Partikel wie Steifigkeit, Geometrie und Reibverhalten ergeben. Dadurch wird eine zuverlässige Extrapolation des Systemverhaltens möglich. Andere Methoden versuchen dagegen, das makroskopische Verhalten in einem Modell abzubilden (vgl. Turbulenzmodelle in der Fluidtechnik vs. direkte numerische Simulation). Dies birgt zum einen das Problem, dass solch ein makroskopisches Modell erst gefunden und verifiziert werden muss. Zum anderen basieren die makroskopischen Modelle auf Annahmen und stellen oft nur einen Teilaspekt des physikalischen Modells dar. Dies bringt die Schwierigkeit mit sich, dass eine Extrapolation der Ergebnisse über den Interessenbereich hinaus, d. h. den Bereich, für welchen Simulation und Messung abgeglichen wurde, mit größeren Unsicherheiten behaftet ist.

Die Herausforderung bei der DEM ist der hohe numerische Berechnungsaufwand, da jeder Partikelkontakt aufgelöst werden muss. Doch dieser Faktor rückt durch die rasanten Weiterentwicklungen im Bereich Hardware und Software sichtlich in den Hintergrund.

Modellbildung und Aufbau der Simulation

Verglichen mit anderen Schüttgutpartikeln hat der Gleisschotter einige Besonderheiten. Es handelt sich um ein polydisperses granulares Material aus gebrochenem Naturstein mit entsprechend inhomogenen Steifigkeiten sowie variierender Oberflächenbeschaffenheit. Zusätzlich ist bestens bekannt, dass auch die Schottergeometrie signifikanten Einfluss auf das Last-Verformungsverhalten des Schotterbettes hat [3, 4]. Dies alles ist relevant für das Ausmaß der Verzahnung der Einzelkörner im Korngerüst sowie die Art der Interaktion und damit das Gesamtverhalten des Materials. In den hier gezeigten Simulationen wird trockenes Granulat betrachtet, prinzipiell können aber auch Bruchvorgänge sowie verschmutzter Schotter berücksichtigt werden. Dazu müssen lediglich die Korngrößenverteilung sowie die Kontakt- und Bruchmodelle angepasst werden.

Hinsichtlich der Schotterkorngometrie wurden für die Studien mehrere unterschiedliche Gruppen von Partikeln verwendet (Abb. 2b), allesamt definiert durch die Korngrößenverteilung laut den technischen Lieferbedingungen der ÖBB BH 700 auf Basis der EN 13450. Für mehr Informationen dazu siehe auch [5]. Der Aufbau des simulierten Versuches ist in Abb. 3a sichtbar. Um das untersuchte Phänomen von störenden Effekten zu isolieren, wurde eine einfache rechteckige Geometrie mit den Abmessungen von [0,9 m x 0,9 m x 1,25 m] gewählt. Die Vibrationen werden mittels der

gegenüberliegenden beweglichen Seitenwände (Vibrationsplatten) in das Schottergerüst eingebracht. Die Vibrationsplatten bleiben während der Simulation parallel und bewegen sich aufeinander zu bzw. voneinander weg. Die Ausgangslage für alle untersuchten Testfälle ist identisch und wird erzeugt, indem die Partikel unter dem Einfluss der Schwerkraft aus einer Höhe von 1,5 m in den Behälter fallen gelassen werden. Der Einfluss von Entmischungseffekten wurde untersucht und tritt in diesem Fall nicht auf.

Anschließend werden die Vibrationsplatten mit einer Frequenz und einer dazugehörigen Amplitude beaufschlagt. Der daraus resultierende zweidimensionale Parameterraum ist in Abb. 3b dargestellt. Dabei sind die Parameter im direkten Umfeld bewährter Arbeitsparameter für Gleisbaumaschinen (35 Hz) engmaschiger aufgelöst.

Sämtliche Simulationen wurden insgesamt drei Mal durchgeführt und anschließend gemittelt. Dieses Vorgehen, d.h. mehrere Simulationen mit identischen Eingangsdaten sowie eine abschließende Mittelung der Ergebnisse, ist im stochastischen Verhalten des Löser begründet [6].

Alle Berechnungen starten mit dem in Abb. 3a dargestellten Ausgangszustand. Der genaue Ablauf ist in Abb. 4 schematisch dargestellt und gliedert sich in folgende Schritte:

1. Aufschwingen: Ausgehend vom Ruhezustand, wird die Bewegung der Vibrationsplatten innerhalb einer Rampe auf die endgültige Sollfrequenz und Sollamplitude erhöht.
2. Schwingen: Über einen Zeitraum von 2 Sekunden werden die Sollwerte (Frequenz und Amplitude) konstant gehalten, dieser Schritt ist der eigentliche Verdichtungsprozess.
3. Ausschwingen: Anschließend werden die Vibrationsplatten wieder über die gleiche Rampe in die Ruhestellung gebracht.
4. Ruhephase: Der letzte Schritt ist die Ruhephase, die man als einen numerischen Ausschwingvorgang betrachten kann.

Resultate

Der Schlüsselwert, der die Verdichtungsqualität beschreibt, ist der Feststoffanteil. Für die Auswertung wurde ein definiertes Volumen innerhalb des simulierten Bereiches herangezogen. Um den Einfluss von Randeffekten zu minimieren, wurde der direkte Kontaktbereich des Schotters mit dem Behälter, jeweils ein Streifen von 2,5 cm Breite, von der Auswertung ausgenommen. Für eine konsistente Definition einer maximalen Verdichtung wird eine obere Schranke als Referenzwert definiert. Dieser Maximalwert der erreichbaren Verdichtung wird durch einen zusätzlichen Versuch definiert. Dabei wird mittels einer Lasteinleitungsplatte (Abb. 3a) noch zusätzlich schrittweise eine Vertikallast (10 kN) aufgebracht, während die gesamte Box in Vibrationen versetzt wird. Darüber

hinaus wurden auch vertikale Vibrationen der gesamten Box getestet sowie unterschiedliche Vibrationszeiten und auch Kombinationen mit unterschiedlichen vertikalen Lasten.

Zusätzlich ist die Definition einer unteren Schranke notwendig. Diese kann vergleichsweise einfach bestimmt werden: durch die lockerste Kornlagerung, also die Ausgangssituation dieser Simulation. Diese zwei Schranken definieren den „normierten Verdichtungsgrad“. Abb. 5 zeigt den normierten Verdichtungsgrad als Funktion der gewählten Parameter, wobei einige klare Trends erkennbar sind. Zunächst sieht man, dass für die Verdichtungsqualität die Amplitude der relevanten Parameter ist. Dies impliziert, dass bei einer zu geringen Amplitude keine wesentliche Verdichtung erreicht wird. Bei einer höheren Amplitude ist die Kombination von Frequenz und Amplitude ausschlaggebend. Vor allem für maximale Auslenkungen der Vibrationsplatten von > 4 mm stellen 35 Hz den optimalen zweiten Betriebsparameter dar. Obwohl diese Simulationen die tatsächlichen Arbeitsschritte nicht direkt darstellen, sind die Ergebnisse auf Prozesse wie Gleisstopfen oder Stabilisieren übertragbar.

Besonders hervorzuheben ist die Übereinstimmung der simulierten optimalen Frequenz mit Arbeitsparametern aus der Praxis. Die Ergebnisse stehen auch im guten Einklang mit bekannten Laborergebnissen (z. B. [7]).

Zusammenfassung und Ausblick

Numerische Simulationen sind in vielen Branchen mittlerweile ein wesentlicher Bestandteil des gesamten Produktlebenszyklus. Angetrieben von den Entwicklungen in Hardware und Software, sind solche Werkzeuge nun auch im Gleisbau einsetzbar. Dieser Beitrag zeigt, dass selbst komplexe Aufgaben wie das dynamische Verhalten von Gleisschotter mittlerweile in ausreichender Genauigkeit mit numerischen Experimenten abgebildet werden können. Dabei ist sowohl die qualitative als auch die quantitative Übereinstimmung mit Laborergebnissen und Erfahrungen hervorzuheben.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Simulationen zeigen nur einen Bruchteil des potenziellen Einsatzgebietes moderner numerischer Methoden. Ergänzend dazu werden noch umfangreiche theoretische Untersuchungen zu mikromechanischen und rheologischen Zusammenhängen durchgeführt. Vor allem die Kraftübertragung und Kraftverteilung im Korngerüst unter unterschiedlichen Bedingungen sowie die Struktur und Orientierung der Schotterkörner sollen in Zukunft detaillierter betrachtet werden. ■

QUELLEN

- [1] Golovanovskiy, V. A.; Arsenyev, V. A.; Blekhan, I. I.; Vasilkov, V. B.; Azbel, Y. I.; Yakimova, K. S. (14. September 2011): Vibration-induced phenomena in bulk granular materials. *International Journal of Mineral Processing*, S. 79-85
- [2] Auer, F.; Antony, B.; Kopf, F.; Koczwar, C.: Präzise Gleislage durch innovative Stopfmaschinen, Teil 2: Dynamische Verdichtungskontrolle und dynamische Gleisstabilisation, EI – DER EISENBÄHNINGENIEUR 03/2021

[3] Suhr, B.; Klaus, S.: Simple particle shapes for DEM simulations of railway ballast: influence of shape descriptors on packing behaviour. *Granular Matter* 03/2020

[4] Boler, H.; Qian, Y.; Tutumluer, E. (1. Januar 2014): Influence of Size and Shape Properties of Railroad Ballast on Aggregate Packing: Statistical Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, S. 94-104

[5] Kuttelwascher, C.; Zuzic, C.: Oberbauschotter – Kompendium für Österreich, EIK – Eisenbahn Ingenieur Kalender 2013

[6] Omerović, S.; Philipp, T.; Auer, F.: Die Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode im Eisenbahnbau: Inverse Parameterbestimmung, *Eisenbahntechnische Rundschau* 06/2019

[4] Fischer, J. (1983): Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter, Graz



Dipl.-Ing. Dr. techn. Samir Omerović
Simulationsingenieur
Abt. Research und Simulation
samir.omerovic@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Daxberger
Leiter
Abt. Research und Simulation
harald.daxberger@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwar
christian.koczwar@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Bernhard Antony
Leiter
Technologiezentrum Purkersdorf
bernhard.antony@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. techn. Florian Auer
Leiter Technologie und Innovation
florian.auer@plassertheurer.com

Alle Autoren:
Plasser & Theurer, AT-Wien