

(19)



(11)

**EP 3 981 919 B1**

(12)

**EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:

**09.11.2022 Patentblatt 2022/45**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):

**E01C 19/28<sup>(2006.01)</sup>**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):

**E01C 19/288**

(21) Anmeldenummer: **21194462.4**

(22) Anmeldetag: **02.09.2021**

(54) **VERFAHREN ZUM BEREITSTELLEN VON MIT DEM VERDICHTUNGSZUSTAND EINES BODENS IN ZUSAMMENHANG STEHENDER INFORMATION BEI DURCHFÜHRUNG EINES VERDICHTUNGSVORGANGS MIT EINEM BODENVERDICHTER**

METHOD FOR PROVIDING INFORMATION RELATED TO THE COMPRESSION STATE OF A SOIL WHEN PERFORMING A COMPACTION PROCESS USING A SOIL COMPRESSOR

PROCÉDÉ DE FOURNITURE DES INFORMATIONS ASSOCIÉES À L'ÉTAT DE COMPACTAGE D'UN SOL LORS DE LA MISE EN OEUVRE D'UN PROCESSUS DE COMPACTAGE AU MOYEN D'UN COMPACTEUR

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(30) Priorität: **06.10.2020 DE 102020126084**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:

**13.04.2022 Patentblatt 2022/15**

(73) Patentinhaber: **Hamm AG**

**95643 Tirschenreuth (DE)**

(72) Erfinder:

- **Kopf, Fritz**  
**Wien (AT)**
- **Pistrol, Johannes**  
**Wien (AT)**

- **Hager, Mario**  
**Zell am Pettenfirst (AT)**
- **Adam, Dietmar**  
**Brunn am Gebirge (AT)**
- **Fehr, Tobias**  
**Mitterteich (DE)**
- **Völkel, Werner**  
**Neustadt (DE)**

(74) Vertreter: **Ruttensperger Lachnit Trossin Gomoll**

**Patent- und Rechtsanwälte**  
**PartG mbB**  
**Arnulfstraße 58**  
**80335 München (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:

**EP-A1- 3 431 658 DE-A1-102015 007 369**  
**DE-T2- 69 423 048 US-A1- 2016 103 051**

**EP 3 981 919 B1**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

**Beschreibung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bereitstellen von mit dem Verdichtungsgrad eines Bodens in Zusammenhang stehender Information bei Durchführung eines Verdichtungsprozesses mit einem Bodenverdichter.

**[0002]** Bodenverdichter, welche zum Durchführen derartiger Verdichtungsprozesse, beispielsweise zum Verdichten von Schüttmaterial im Erdbau oder zum Beispiel Asphaltmaterial oder dergleichen im Straßenbau, eingesetzt werden, umfassen im Allgemeinen wenigstens eine Vibrationswalze mit einer um eine Walzendrehachse der wenigstens einen Vibrationswalze rotierenden Unwuchtanordnung. Um Information über den Bewegungszustand einer derartigen Vibrationswalze bereitstellen zu können, ist in Zuordnung zu der wenigstens einen Vibrationswalze eines derartigen Bodenverdichters eine Beschleunigungserfassungsanordnung zur Erfassung einer Vertikalbeschleunigung der Vibrationswalze im Wesentlichen orthogonal zu dem zu verdichtenden Boden und einer Horizontalbeschleunigung der Vibrationswalze im Wesentlichen parallel zu dem zu verdichtenden Boden vorgesehen.

**[0003]** Durch das Bereitstellen einer um die Walzendrehachse rotierenden Unwuchtanordnung wird bei Durchführung eines Verdichtungsprozesses der durch das Gewicht der Verdichterwalze bzw. Vibrationswalze und dem darauf lastenden Gewicht des Bodenverdichters generierten statischen Belastung des Bodens beim Überfahren desselben mit dem Bodenverdichter ein dynamischer Belastungsanteil überlagert, welcher die beim Überfahren des Bodens durch den Bodenverdichter erzeugte Verdichtung des Bodens substantiell beeinflusst. Insbesondere kann durch die Rotation einer derartigen Unwuchtanordnung eine Vibrationswalze derart betrieben werden, dass diese periodisch von dem zu verdichtenden Boden abhebt und entsprechend periodisch auf diesen aufschlägt.

**[0004]** Durch die Erfassung der Vertikalbeschleunigung, also der Beschleunigung einer derartigen Vibrationswalze im Wesentlichen orthogonal zu dem zu verdichtenden Boden, und der Horizontalbeschleunigung, also der Beschleunigung der Vibrationswalze im Wesentlichen parallel zu dem zu verdichtenden Boden, kann Information über den Bewegungszustand und über die in den Phasen, in welchen die Vibrationswalze in Kontakt mit dem zu verdichtenden Boden ist, zwischen dem Boden und der Vibrationswalze wirkende Bodenkraft bereitgestellt werden. Diese Information kann genutzt werden, um im Rahmen einer flächendeckenden dynamischen Verdichtungs-Kontrolle (FDVK) Information bereitzustellen, welche im Zusammenhang z.B. mit dem Verdichtungsgrad des zu verdichtenden Bodens steht. Auf der Grundlage dieser Informationen kann bestimmt werden, ob ein zu verdichtender Boden bereits ausreichend verdichtet ist oder ob weitere Überfahrten mit einem Bodenverdichter erforderlich sind. Weiter kann diese Information verortet und zum Zwecke der Qualitätssicherung abgespeichert bzw. dokumentiert werden.

**[0005]** Die DE 694 23 048 T2 offenbart ein Verfahren zur Kontrolle einer Verdichtungsanordnung, wobei in Abhängigkeit des während des Verdichtungsprozesses bestimmten Schermoduls neue Werte für die Schwingfrequenz und/oder Schwingungsamplitude und/oder Transportgeschwindigkeit des Verdichtungskörpers bestimmt werden.

**[0006]** Die DE 10 2015 007369 A1 offenbart ein Verfahren zur Bestimmung eines Elastizitätsmoduls eines Arbeitsmaterials während eines Verdichtungsprozesses. Das System weist einen Prozessor auf, der konfiguriert ist, um eine Steifigkeit eines Arbeitsmaterials basierend auf einer Kraft, die auf das Arbeitsmaterial aufgebracht wird, und einer Verschiebung des Arbeitsmaterials zu bestimmen. Der Prozessor ist weiter konfiguriert, um den Elastizitätsmodul des Arbeitsmaterials basierend auf einer Beziehung zwischen der Steifigkeit des Arbeitsmaterials und dem Elastizitätsmodul des Arbeitsmaterials zu bestimmen.

**[0007]** Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Bereitstellen von mit dem Verdichtungsgrad eines Bodens in Zusammenhang stehender Information bei Durchführung eines Verdichtungsprozesses mit einem Bodenverdichter bereitzustellen, mit welchem den Zustand des verdichteten Bodens repräsentierende Information mit erweitertem Informationsgehalt und höherer Präzision bereitgestellt werden kann.

**[0008]** Gemäß der vorliegenden Erfindung wird die Aufgabe gelöst durch ein Verfahren zum Bereitstellen von mit dem Verdichtungsgrad eines Bodens in Zusammenhang stehender Information bei Durchführung eines Verdichtungsprozesses mit einem Bodenverdichter, wobei der Bodenverdichter wenigstens eine Vibrationswalze mit einer um eine Walzendrehachse der wenigstens einen Vibrationswalze rotierenden Unwuchtanordnung umfasst, wobei in Zuordnung zu der wenigstens einen Vibrationswalze eine Beschleunigungserfassungsanordnung zur Erfassung einer Vertikalbeschleunigung der Vibrationswalze im Wesentlichen orthogonal zu dem zu verdichtenden Boden und einer Horizontalbeschleunigung der wenigstens einen Vibrationswalze im Wesentlichen parallel zu dem zu verdichtenden Boden vorgesehen ist.

**[0009]** Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst die Maßnahmen:

- a) Erfassen der Vertikalbeschleunigung und der Horizontalbeschleunigung der wenigstens einen Vibrationswalze bei Bewegung des Bodenverdichters über den zu verdichtenden Boden,
- b) Ermitteln eines Mess-Zusammenhangs zwischen einer Bodenkraft und einer Auslenkung der Vibrationswalze für wenigstens einen Vibrationszyklus unter Verwendung der bei der Maßnahme a) erfassten Vertikalbe-

schleunigung und Horizontalbeschleunigung,

c) Ermitteln eines Simulations-Zusammenhangs zwischen der Bodenkontaktkraft und der Auslenkung für wenigstens einen Vibrationszyklus unter Verwendung eines wenigstens einen Simulationsparameter berücksichtigenden Bodenmodells,

d) Vergleichen des bei der Maßnahme c) für wenigstens einen Vibrationszyklus ermittelten Simulations-Zusammenhangs mit dem bei der Maßnahme b) für wenigstens einen Vibrationszyklus ermittelten Mess-Zusammenhang,

e) Bestimmen, dass ein Vorgabewert des wenigstens einen in dem Bodenmodell berücksichtigten Simulationsparameters im Wesentlichen einen entsprechenden Bodenparameter des zu verdichtenden Bodens repräsentiert, wenn der bei der Maßnahme d) durchgeführte Vergleich ergibt, dass der für wenigstens einen Vibrationszyklus ermittelte Simulations-Zusammenhang im Wesentlichen dem für wenigstens einen Vibrationszyklus ermittelten Mess-Zusammenhang entspricht.

**[0010]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird die unter Berücksichtigung der erfassten Beschleunigung einer Vibrationswalze ermittelte und im Zusammenhang mit der zwischen der Vibrationswalze und dem zu verdichtenden Boden wirkenden Bodenkontaktkraft stehende Bewegung der Vibrationswalze in einem Vibrationszyklus, also beispielsweise während einer vollständigen Umdrehung der Unwuchtanordnung, verglichen mit einer Bewegung der Vibrationswalze bzw. der zwischen dieser und dem Boden wirkenden Bodenkontaktkraft im Verlaufe eines Vibrationszyklus, welche unter Berücksichtigung eines Bodenmodells und zumindest eines in dem Bodenmodell verwendeten Simulationsparameters ermittelt wird.

**[0011]** Dann, wenn zwischen dem auf dem Bodenmodell beruhenden Zusammenhang zwischen der Bodenkontaktkraft der Auslenkung, also dem Simulations-Zusammenhang, und dem auf der Erfassung der Beschleunigung beruhenden und damit den tatsächlichen Bewegungszustand der Vibrationswalze wiedergebenden Zusammenhang, also dem Mess-Zusammenhang, eine ausreichend gute Übereinstimmung erreicht ist, was beispielsweise in einem Best-Fit-Prozess bestimmt werden kann, wird angenommen, dass das Bodenmodell mit dem bzw. den darin berücksichtigten Simulationsparametern den tatsächlichen Zustand des verdichteten Bodens mit hoher Präzision repräsentiert. Dies wiederum kann als Grundlage für die plausible Annahme dienen, dass der bzw. die in dem Bodenmodell berücksichtigten Simulationsparameter hinsichtlich eines jeweiligen Parameterwertes in sehr guter Übereinstimmung ist bzw. sind mit dem bzw. den Werten des bzw. der entsprechenden Parameter des tatsächlich verdichteten Bodens.

**[0012]** Das Vorliegen einer sehr guten Übereinstimmung zwischen dem Simulations-Zusammenhang und dem Mess-Zusammenhang bestätigt somit die bei der Definition des Bodenmodells getroffene Auswahl eines jeweiligen Parameterwertes des bzw. der im Modell berücksichtigten Simulationsparameter. Ein derartiger Simulationsparameter bzw. mehrere derartige im Modell berücksichtigte Parameter können dann im Rahmen einer Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungs-Kontrolle als den Zustand des verdichteten Bodens wiedergebende Größen berücksichtigt und gespeichert bzw. in anderer Art und Weise auch im Zusammenhang mit den Orten bzw. Positionen an dem verdichteten Boden, in Zuordnung zu welchen die jeweiligen Parameterwerte bestimmt wurden, dokumentiert werden.

**[0013]** Um bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zu berücksichtigen, dass bei Durchführung eines Verdichtungs-vorgangs ein Bodenverdichter sich in einer Bewegungsrichtung voran bewegt und daher eine Wirkrichtung bzw. Arbeitsrichtung der unter der Wirkung der Unwuchtanordnung sich periodisch auf und ab bewegenden Vibrationswalze beim Eindringen in einen zu verdichtenden Boden von einer exakt vertikalen Richtung abweichen wird, wird vorgeschlagen, dass bei den Maßnahmen b) und c) die Auslenkung in einer im Wesentlichen einer Richtung der maximalen Bodenkontaktkraft entsprechenden Arbeitsrichtung der Vibrationswalze berücksichtigt wird.

**[0014]** Bei einer periodischen Auf- und Ab-Bewegung einer Vibrationswalze und einem diese Bewegung begleitenden, periodischen Abheben der Vibrationswalze von dem Boden entsteht nach dem Auftreten eines Kontaktes zwischen der Vibrationswalze und dem Boden mit zunehmendem Eindringen der Vibrationswalze in den Boden eine entsprechend zunehmende Kontaktfläche. Je tiefer die Vibrationswalze in den Boden eindringt bzw. eindringen kann, desto größer ist die in axialer Richtung eines Walzenmantels der Vibrationswalze und in Umfangsrichtung ausgedehnte Kontaktfläche. Es wird daher weiter vorgeschlagen, dass die Maßnahme c) eine Maßnahme c1) umfasst zum Ermitteln einer Aufstands-Umfangslänge der Vibrationswalze im Verlaufe eines Vibrationszyklus. Die Aufstands-Umfangslänge ist eine Größe, welche im Zusammenhang mit der axialen Ausdehnung der Kontaktfläche zwischen der Vibrationswalze und dem Boden das Ausmaß, in welchem die Vibrationswalze in den Boden eindringt, beschreibt, und kann daher gemäß der vorliegenden Erfindung einen im Bodenmodell zu berücksichtigenden Simulationsparameter bilden.

**[0015]** Hierfür kann beispielsweise vorgesehen sein, dass bei der Maßnahme c1) die Aufstands-Umfangslänge auf der Grundlage der bei der Maßnahme a) ermittelten Vertikalbeschleunigung und Horizontalbeschleunigung und auf der Grundlage einer Bewegungsgeschwindigkeit bzw. Fahrgeschwindigkeit des Bodenverdichters in einer Bodenverdichter-Bewegungsrichtung ermittelt wird. Auf der Grundlage der Vertikalbeschleunigung und der Horizontalbeschleunigung

und auf der Grundlage der Bewegungsgeschwindigkeit des Bodenverdichters in seiner Bewegungsrichtung kann unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse des Bodens, in welchen die Vibrationswalze eindringt, die Aufstands-Umfangslänge berechnet werden. Die Aufstands-Umfangslänge, welche in dem erfindungsgemäß aufzustellenden Bodenmodell als einer der Simulationsparameter Berücksichtigung finden kann, ist somit eine Größe, die bei der Definition des Bodenmodells nicht beliebig ausgewählt wird, sondern aus dem tatsächlich vorliegenden und sensorisch erfassten Bewegungszustand des Bodenverdichters bzw. der Vibrationswalze rechnerisch abgeleitet wird. Grundlage dieser Berechnung können verschiedene vereinfachende Annahmen sein, wie zum Beispiel die Annahme, dass die Vibrationswalze sich parallel zum Boden bewegt, also über deren gesamte axiale Länge in gleichem Ausmaß in den Boden eindringt. In diesem Falle kann die Kontaktfläche zwischen dem Boden und der Vibrationswalze als das Produkt aus Aufstands-Umfangslänge und axialer Länge des Walzenmantels angenommen werden. Bei komplexeren, gleichwohl mathematisch berücksichtigbaren Bewegungsmodellen, wie zum Beispiel der Annahme, dass die Vibrationswalze taumelt und nicht in allen Längenbereichen gleich tief in den Boden eindringt, können für die Aufstands-Umfangslänge für verschiedene axiale Bereiche der Vibrationswalze verschiedene Werte angenommen werden. Dies kann beispielsweise unter Berücksichtigung von an beiden axialen Enden erfassten Beschleunigungswerten in Vertikalrichtung und in Horizontalrichtung erfolgen.

**[0016]** Bei der Verwendung der Aufstands-Umfangslänge als eine der Eingangsgrößen des Bodenmodells ist von besonderem Vorteil, dass die aus dem tatsächlich vorliegenden Bewegungszustand des Bodenverdichters und der Vibrationswalze mathematisch abgeleitete Aufstands-Umfangslänge diese Bewegungszustände charakterisierende Parameter, wie zum Beispiel die Bewegungsgeschwindigkeit des Bodenverdichters sowie die Drehzahl und die Drehrichtung der Unwuchtanordnung, berücksichtigt. Das Modell bzw. der unter Berücksichtigung eines derartigen Modells vorgenommene Vergleich mit aus der Beschleunigung einer Vibrationswalze abgeleiteten Größen selbst ist somit unabhängig von derartigen den Bewegungszustand charakterisierenden Größen, so dass mit dem erfindungsgemäßen Verfahren eine primäre Aussage über den Zustand des Bodens getroffen werden kann, die beispielsweise nicht bzw. kaum abhängig ist davon, mit welcher Geschwindigkeit der Bodenverdichter sich bei der Durchführung des Verdichtungsvorgangs über den zu verdichtenden Boden bewegt.

**[0017]** Bei der Maßnahme c1) kann die Aufstands-Umfangslänge mit einem in einer Bewegungsrichtung des Bodenverdichters einem Aufstandszentrum vorangehenden vorderen Umfanglängenabschnitt und einem in der Bewegungsrichtung des Bodenverdichters dem Aufstandszentrum nachlaufenden hinteren Umfanglängenabschnitt ermittelt werden. Auf der Grundlage einer Länge des vorderen Umfanglängenabschnitts und einer Länge des hinteren Umfanglängenabschnitts kann ein den Zustand des Bodens repräsentierender Asymmetrieparameter gebildet werden. Aufgrund der Bewegung eines Bodenverdichters über den zu verdichtenden Boden entsteht eine derartige Asymmetrie zwischen dem vorderen Umfanglängenabschnitt und dem hinteren Umfanglängenabschnitt. Diese Asymmetrie, also beispielsweise die Differenz zwischen den Längen der beiden Umfanglängenabschnitte oder das Verhältnis der Längen beider Umfanglängenabschnitte zueinander, hängt ab vom Zustand des Bodens, über welchen ein Bodenverdichter sich bewegt und kann somit auch als ein den Zustand des Bodens charakterisierender Parameter berücksichtigt bzw. aufgezeichnet werden. Dieser Parameter selbst bildet keine durch eine plausible Annahme zu definierende Eingangsgröße des Bodenmodells, sondern kann bei der Ermittlung der Aufstands-Umfangslänge unter Berücksichtigung der vorangehend angegebenen geometrischen Verhältnisse des Bodens und des Bewegungszustandes des Bodenverdichters bzw. der Vibrationswalze auf der Grundlage von Messwerten mathematisch ermittelt werden und stellt beispielsweise eine Größe bereit, welche in Verbindung mit einem oder mehreren als Eingangsgröße für das Modell vorzugebenden Simulationsparametern als den Zustand des Bodens charakterisierend verwendet werden kann bzw. welche auch für eine Plausibilitätsüberprüfung von für das Modell vorgegebenen Simulationsparametern genutzt werden kann.

**[0018]** Der Elastizitätsmodul eines Bodens ist eine dessen Zustand, insbesondere Verdichtungszustand, wesentlich charakterisierende physikalische Größe und kann daher gemäß einem vorteilhaften Aspekt der vorliegenden Erfindung einen Simulationsparameter des Bodenmodells bilden.

**[0019]** Beim Überfahren eines zu verdichtenden Bodens mit einem Bodenverdichter wird dieser Boden komprimiert, wobei der Boden eine der Belastung durch den Bodenverdichter und somit eine der Kompression entgegenwirkende Reaktionskraft erzeugt. In dem erfindungsgemäß aufzustellenden Bodenmodell kann daher ein wenigstens durch einen Feder-Kraftanteil und einen Dämpfer-Kraftanteil repräsentiertes Boden-Verformungsverhalten berücksichtigt werden, und die Maßnahme c) kann unter Berücksichtigung eines derartigen Verformungsverhaltens eine Maßnahme c2) umfassen zum Ermitteln des Feder-Kraftanteils, und kann eine Maßnahme c3) umfassen zum Ermitteln des Dämpfer-Kraftanteils. Es ist darauf hinzuweisen, dass in einem derartigen Bodenmodell auch andere das Verformungsverhalten beeinflussenden Größen, wie zum Beispiel die Masse des verformten Bodens, Berücksichtigung finden können.

**[0020]** Bei der Maßnahme c2) kann der Feder-Kraftanteil in Abhängigkeit von dem Boden-Elastizitätsmodul und der Aufstands-Umfangslänge ermittelt werden. Auch bei der Maßnahme c3) kann der Dämpfer-Kraftanteil in Abhängigkeit von dem Boden-Elastizitätsmodul und der Aufstands-Umfangslänge, beispielsweise auch in Abhängigkeit vom der Verformung bzw. Eindringung, ermittelt werden. Somit finden zwei das Verhalten des Bodens wesentlich beeinflussende bzw. repräsentierende Größen Eingang in das Bodenmodell.

**[0021]** Um bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zu berücksichtigen, dass ein belasteter Boden in einer Belastungsphase und einer Entlastungsphase insbesondere hinsichtlich seines Feder-Kraftanteils sich unterschiedlich verhalten kann, wird weiter vorgeschlagen, dass bei der Maßnahme c2) der Feder-Kraftanteil für einen Vibrationszyklus mit einem ersten Feder-Kraftanteilabschnitt für eine Phase mit zunehmender Eindringtiefe der Vibrationswalze in den Boden und mit einem zweiten Feder-Kraftanteilabschnitt für eine Phase mit abnehmender Eindringtiefe der Vibrationswalze ermittelt wird.

**[0022]** Insbesondere kann das unterschiedliche Kraftverhalten dadurch berücksichtigt werden, dass bei der Maßnahme c2) der zweite Feder-Kraftanteilabschnitt unter Berücksichtigung eines Entlastungssteifigkeitsfaktors derart ermittelt wird, dass bei einem Übergang von der Phase abnehmender Eindringtiefe der Vibrationswalze zu einer Außer-Kontakt-Phase der Feder-Kraftanteil und der Dämpfer-Kraftanteil einander im Wesentlichen vollständig kompensieren, wobei in der Außer-Kontakt-Phase die wenigstens eine Vibrationswalze im Wesentlichen nicht in Kontakt mit dem zu verdichtenden Boden ist. Der Entlastungssteifigkeitsfaktor kann einen den Zustand des Bodens repräsentierenden Steifigkeitsparameter bilden. Ein derartiger Entlastungssteifigkeitsfaktor kann somit bei Berücksichtigung grundsätzlich gleicher mathematischer Zusammenhänge für den Feder-Kraftanteil in den beiden Abschnitten in einfacher Art und Weise das unterschiedliche Kraftverhalten zum Ausdruck bringen, wobei die Maßgabe, dass zum Zeitpunkt des Übergangs in die Außer-Kontakt-Phase die beiden Kraftanteile einander kompensieren, eine für die Bestimmung des Entlastungssteifigkeitsfaktors wesentliche Randbedingung darstellt.

**[0023]** In dem Bodenmodell können die beiden Kraftanteile, also der Feder-Kraftanteil und der Dämpfer-Kraftanteil, als die Bodenkontaktkraft im Wesentlichen bestimmende Faktoren vorgesehen sein, so dass die Maßnahme c) eine Maßnahme c4) umfassen kann zum Ermitteln der Bodenkontaktkraft für einen Vibrationszyklus auf Grundlage des bei der Maßnahme c2) ermittelten Feder-Kraftanteils und des bei der Maßnahme c3) ermittelten Dämpfer-Kraftanteils.

**[0024]** Wird bei der Maßnahme e) erkannt, dass die Abweichung des Simulations-Zusammenhangs von dem Mess-Zusammenhang eine vorbestimmte Abweichungsschwelle nicht unterschreitet, was bedeutet, dass bei dem Vergleich zwischen den beiden Zusammenhängen eine zu große Abweichung erkannt wird, können die Maßnahmen c) bis e) unter Veränderung wenigstens eines Simulationsparameters bei Durchführung der Maßnahme c) wiederholt werden, bis die Abweichung des Simulations-Zusammenhangs von dem Mess-Zusammenhang die vorbestimmte Abweichungsschwelle unterschreitet. Es kann somit eine iterative Annäherung des aus der Simulation unter Berücksichtigung des Bodenmodells ermittelten Simulations-Zusammenhangs an den ausschließlich unter Berücksichtigung von Messdaten gewonnenen Mess-Zusammenhang vorgenommen werden, bis diese einander im Wesentlichen entsprechen.

**[0025]** Um die Übereinstimmung eines unter Berücksichtigung des Bodenmodells erhaltenen Wertes für einen Simulationsparameter mit dem für einen derartigen Wert des Simulationsparameters tatsächlich existierenden Zustand des verdichteten Bodens noch weiter zu verbessern, kann ein Korrelationsfaktor zwischen dem bei der Maßnahme e) als im Wesentlichen den entsprechenden Bodenparameter repräsentierend bestimmten Simulationsparameter und einem Messwert des Bodenparameters des verdichteten Bodens ermittelt werden. Hierzu kann beispielsweise in einem Versuch ein Boden, beispielsweise Asphaltmaterial, verdichtet werden, und nach dem Vorliegen eines aus der Simulation sich ergebenden Wertes für einen oder mehrere Simulationsparameter kann der so bearbeitete Boden unter Laborbedingungen bzw. bei in-situ Vergleichsversuchen untersucht werden, um den tatsächlich existierenden Wert eines entsprechenden Bodenparameters zu ermitteln. Aus der Abweichung zwischen dem aus der Simulation bzw. dem Bodenmodell sich ergebenden Wert und dem messtechnisch beispielsweise im Labor bestimmten Wert kann dann ein diese beiden Werte verknüpfender Korrelationsfaktor bestimmt werden. Liegt ein derartiger Korrelationsfaktor auf der Grundlage einer Untersuchung vor, kann bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zum Erhalt eines Istwertes eines Bodenparameters der bei der Maßnahme e) als im Wesentlichen den entsprechenden Bodenparameter repräsentierend bestimmte Simulationsparameter mit einem derartigen bekannten Korrelationsfaktor verknüpft werden.

**[0026]** Um die bei Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bereitgestellte Informationen über den Zustand des verdichteten Bodens noch während des Verdichtungsbetriebs berücksichtigen zu können, können die Maßnahmen a) bis e) während der Bewegung des Bodenverdichters bei Durchführung eines Verdichtungs Vorgangs wiederholt durchgeführt werden. Die Information über den Zustand des Bodens kann dann in Echtzeit in einem Regelprozess dazu genutzt werden, einen Bodenverdichter derart zu betreiben, dass für den zu verdichtenden Boden Bodenparameter erhalten werden, welche vor Durchführung des Verdichtungs Vorgangs aufgestellte Anforderungen erfüllen.

**[0027]** Insbesondere für die Zwecke der Qualitätssicherung kann bei Durchführung eines Verdichtungs Vorgangs ein Datensatz mit einer Mehrzahl von Positionen an dem zu verdichtenden Boden und dem in Zuordnung dazu jeweils bestimmten Wert des wenigstens einen bei Durchführung der Maßnahmen a) bis e) als im Wesentlichen einen Bodenparameter repräsentierend bestimmten Simulationsparameters erzeugt werden. Ein derartiger Datensatz kann dann als Grundlage für die Dokumentation eines durchgeführten Verdichtungs Vorgangs genutzt werden.

**[0028]** Die vorliegende Erfindung wird nachfolgend mit Bezug auf die beiliegenden Figuren beschrieben. Es zeigt:

Fig. 1 eine Seitenansicht eines in vereinfachter Form dargestellten Bodenverdichters;

- Fig. 2 ein Diagramm, das die im Verlaufe eines Vibrationszyklus an einer Vibrationswalze des Bodenverdichters der Fig. 1 auftretenden Beschleunigungen orthogonal zu einer Oberfläche eines zu verdichtenden Bodens und parallel zu dieser Oberfläche darstellt;
- 5 Fig. 3 ein aus dem Diagramm der Fig. 2 abgeleitetes Arbeitsdiagramm mit der über einem Schwingweg der Vibrationswalze in einer Arbeitsrichtung aufgetragenen Bodenkontaktkraft;
- Fig. 4 die Bewegung der Vibrationswalze des Bodenverdichters der Fig. 1 über mehrere Vibrationszyklen hinweg;
- 10 Fig. 5 ein physikalisches Ersatzmodell eines zu verdichtenden Bodens;
- Fig. 6 eine der Fig. 3 entsprechende Darstellung eines Simulations-Zusammenhangs zwischen der Bodenkontaktkraft und dem Schwingweg der Vibrationswalze in der Arbeitsrichtung.

15 **[0029]** In Fig. 1 ist ein Bodenverdichter allgemein mit 10 bezeichnet. Der sich in einer Bewegungsrichtung B auf einem zu verdichtenden Boden 12 bewegende Bodenverdichter 10 ist mit einem Hinterwagen 14 und einem schwenkbar daran getragenen Vorderwagen 16 aufgebaut. Am Hinterwagen 14 sind ein Antriebsaggregat und durch dieses vom Bodenverdichter 10 in der Bewegungsrichtung B bzw. entgegengesetzt zu dieser Richtung angetriebene Antriebsräder 18 vorgesehen. Ferner ist am Hinterwagen 14 ein Bedienstand 20 für eine den Bodenverdichter 10 bedienende Bedienungsperson vorgesehen. Aus dem Bedienstand heraus kann die Bedienungsperson den Bodenverdichter 10 zur Durchführung eines Verdichtungsvorgangs betreiben, wobei der Bedienungsperson an einer Anzeigeeinheit 22 für den Verdichtungsvorgang relevante Informationen angezeigt werden können.

20 **[0030]** Am Vorderwagen 16 ist als Verdichtungswerkzeug eine Verdichterwalze bzw. Vibrationswalze 24 um eine zur Zeichenebene der Fig. 1 orthogonal stehende Walzendrehachse W drehbar getragen. In den beiden axialen Endbereichen der Verdichterwalze 24 bzw. eines Mantels 26 derselben ist diese über elastische Aufhängungsanordnungen am Vorderwagen 16 derart aufgehängt, dass die Vibrationswalze 24 bezüglich des Vorderwagens 16 quer zur Walzendrehachse W ausgelenkt werden kann. Der Verdichterwalze 24 kann ein Antriebsmotor zugeordnet sein zum Antreiben derselben zur Rotation um die Walzendrehachse W.

25 **[0031]** Eine derartige Auslenkung der Vibrationswalze 24 kann durch eine im Inneren derselben angeordnete Unwuchtanordnung 28 mit wenigstens einer um die Walzendrehachse W zur Drehung antreibbaren Unwuchtmasse mit zur Walzendrehachse W exzentrischem Massenschwerpunkt hervorgerufen werden. Die Rotation der Unwuchtanordnung 28 um die Walzendrehachse W und die dabei auftretenden und auf die Vibrationswalze 24 übertragenen, orthogonal zur Walzendrehachse W wirkenden Fliehkräfte erzeugen eine periodische Auslenkung der Vibrationswalze 24 bezüglich des Vorderwagens 16. Diese Auslenkung bzw. die auf die Vibrationswalze 24 bei Rotation der Unwuchtanordnung 28 wirkenden Kräfte können durch der Vibrationswalze 24 zugeordnete Beschleunigungssensoren 30, 32 erfasst werden. Dabei kann der Beschleunigungssensor 30 zum Erfassen einer Vertikalbeschleunigung  $a_z$  ausgebildet bzw. angeordnet sein, also einer Beschleunigung, welche im Wesentlichen orthogonal zur Oberfläche des zu verdichtenden Bodens 12 gerichtet ist. Der Beschleunigungssensor 32 kann zur Erfassung einer translatorischen Horizontalbeschleunigung  $a_x$  ausgebildet bzw. angeordnet sein, also einer Beschleunigung, welche im Wesentlichen parallel zur Oberfläche des zu verdichtenden Bodens 12 gerichtet ist. Beispielsweise können die beiden Beschleunigungssensoren 30, 32 an einer Lagerschale eines die Vibrationswalze 24 in einem ihrer axialen Endbereiche bezüglich des Vorderwagens 16 drehbar lagernden Lagers vorgesehen sein. Es ist darauf hinzuweisen, dass beispielsweise auch an beiden axialen Endbereichen der Vibrationswalze 24 ein derartiges Paar aus Beschleunigungssensoren 30, 32 vorgesehen sein kann, um die auf die Vibrationswalze 24 wirkenden Beschleunigungen bzw. Kräfte in beiden axialen Endbereichen erfassen zu können.

30 **[0032]** Die Fig. 2 veranschaulicht die durch die Beschleunigungssensoren 30, 32 im Verlaufe eines Vibrationszyklus, also beispielsweise einer vollständigen Umdrehung der Unwuchtanordnung 28, auftretende Vertikalbeschleunigung  $a_z$  und Horizontalbeschleunigung  $a_x$ . Dabei zeigt das Diagramm der Fig. 2 einen Betriebszustand, bei welchem aufgrund der durch die Unwuchtanordnung 28 generierten Kräfte die Vibrationswalze 24 periodisch bei jedem Vibrationszyklus vom zu verdichtenden Boden 12 zeitweilig abhebt und darauffolgend wieder auf diesen aufschlägt und dabei in den zu verdichtenden Boden 12 eindringt.

35 **[0033]** Zum Zeitpunkt  $t_1$  hebt die Vibrationswalze 24 vom zu verdichtenden Boden 12 ab, so dass die auf die Vibrationswalze 24 wirkende Kraft im Wesentlichen bestimmt ist aus dem Produkt der Masse der Vibrationswalze 24 und der zu jedem Zeitpunkt auftretenden Beschleunigung sowie aus der Kraft aus der Vibrationserregung und aus der statischen Achslast. Zum Zeitpunkt  $t_2$  kommt die Vibrationswalze 24 wieder in Kontakt mit dem zu verdichtenden Boden 12 und dringt im Verlaufe dieser Bewegung zunehmend in den Boden 12 ein und verdichtet diesen dabei. In dieser Phase, in welcher die Vibrationswalze 24 in Kontakt mit dem Boden 12 ist, also zwischen den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_1$ , wirkt zwischen dem Boden 12 und der Vibrationswalze 24 eine Bodenkontaktkraft  $F_b$ , welche wesentlich auch bestimmt ist durch die vom Boden 12 auf die durch die Vibrationswalze 24 ausgeübte Belastung generierte Reaktion. Mit zunehmendem

Eindringen der Vibrationswalze 24 in den zu verdichtenden Boden 12 nimmt die Bodenkontaktkraft  $F_b$  zu, bis zu einem Zeitpunkt  $t_3$  die Bodenkontaktkraft  $F_b$  ihren maximalen Wert  $F_{bmax}$  erreicht. Es ist in Fig. 2 deutlich zu erkennen, dass in dem Zustand maximaler Bodenkontaktkraft  $F_{bmax}$  die Kraft nicht exakt orthogonal zum Boden 12 orientiert ist, sondern leicht nach vorne geneigt ist, was im Wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass der Bodenverdichter 10 sich während eines derartigen Vibrationszyklus in der Bewegungsrichtung B voran bewegt und daher die Vibrationswalze 24 bei ihrer Abwärtsbewegung auf den Boden 12 zu schräg nach vorne gerichtet in diesen eindringt. Die Richtung, welche im Wesentlichen der Ausrichtung der maximalen Bodenkontaktkraft  $F_b$  entspricht, wird als Arbeitsrichtung A betrachtet. Eine dazu orthogonal stehende Richtung wird als Normalenrichtung N auf die Arbeitsrichtung A betrachtet.

**[0034]** In Fig. 2 ist weiter zu erkennen, dass über einen Vibrationszyklus hinweg der die Entwicklung der Beschleunigungen darstellende Verlauf bedingt durch die auf der Vibrationswalze 24 ruhende Last des Vorderwagens 16 bzw. auch des Hinterwagens 14 um einen diesen Lastfaktor repräsentierenden, konstanten Versatz V nach unten verschoben ist, wobei auch hier der orthogonal zur Oberfläche des Bodens 12 konstant wirkende Lastanteil berücksichtigt wird.

**[0035]** Durch zweimalige Integration der im Diagramm der Fig. 2 für einen Vibrationszyklus dargestellten bzw. messtechnisch erfassten Beschleunigungen kann für jeden Vibrationszyklus ein die Auslenkung  $s_w$  der Vibrationswalze 24 in der Arbeitsrichtung A repräsentierender Schwingweg ermittelt werden. Aus dieser für jeden Zeitpunkt eines Vibrationszyklus ermittelbaren Auslenkung  $s_w$  der Vibrationswalze 24 und der gleichermaßen für jeden Zeitpunkt des Vibrationszyklus bekannten Bodenkontaktkraft  $F_b$  kann ein in Fig. 3 dargestellter Mess-Zusammenhang  $Z_M$  zwischen der Bodenkontaktkraft  $F_b$  und der Auslenkung  $s_w$  ermittelt werden. Dieser Mess-Zusammenhang  $Z_M$  stellt ein Arbeitsdiagramm dar, wobei die von der Mess-Zusammenhang  $Z_M$  repräsentierenden Kurve umschlossene Fläche die geleistete Verdichtungsarbeit repräsentiert.

**[0036]** Im Diagramm der Fig. 3 repräsentiert der Zeitpunkt  $t_1$  wieder den Zeitpunkt, zu welchem die Vibrationswalze 24 den Kontakt zum Boden 12 verliert und von diesem abhebt. Zum Zeitpunkt  $t_2$  kommt die Vibrationswalze 24 mit dem Boden 12 wieder in Kontakt. Im Verlaufe der dann erfolgenden Eindringbewegung nimmt die Bodenkontaktkraft  $F_b$  zu, bis sie zum Zeitpunkt  $t_3$  ihr Maximum  $F_{bmax}$  erreicht. Zum Zeitpunkt  $t_4$  ist der Zustand eines maximalen Eindringens in den Boden 12 erreicht und es erfolgt eine Bewegungsrichtungsumkehr, bis zum Zeitpunkt  $t_1$  die Vibrationswalze 24 wieder vom Boden 12 abhebt. Somit vollzieht die Vibrationswalze 24 in einem Vibrationszyklus eine Bewegung mit einer Amplitude  $A_s$  bezogen auf einen Mittelpunkt der Auslenkung  $s_w$  in der Arbeitsrichtung A.

**[0037]** Der in Fig. 3 dargestellte Zusammenhang kann ausgewertet werden, um Information über den Zustand des Bodens 12 zu erlangen. So kann aus der Steigung des näherungsweise linearen Verlaufs des Mess-Zusammenhangs  $Z_M$  zwischen den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_3$  beispielsweise ein näherungsweise linearer Zusammenhang mit der Steifigkeit bzw. Belastungssteifigkeit des Bodens und somit auch dem erreichten Verdichtungsgrad hergestellt werden. Wie bereits angeführt, kann aus der vom Mess-Zusammenhang  $Z_M$  umschlossenen Fläche auf die Verdichtungsarbeit und somit auch die in den Boden 12 eingebrachte Energie geschlossen werden. Derartige Auswertungen eines Mess-Zusammenhangs  $Z_M$ , wie er in Fig. 3 dargestellt ist, ermöglichen im Zusammenhang mit einer flächendeckenden dynamischen Verdichtungs-Kontrolle jedoch nur eine vergleichsweise beschränkte Bereitstellung von Information über den Zustand des Bodens, insbesondere da eine Veränderung von Prozessparametern, wie z. B. der Fahrgeschwindigkeit des Bodenverdichters 12, auch zu einer Veränderung dieses Zusammenhangs und somit zu anderen Auswertungsergebnissen führt.

**[0038]** Die vorliegende Erfindung zielt darauf ab, unter Berücksichtigung eines derartigen Mess-Zusammenhangs  $Z_M$ , wie er für einen Vibrationszyklus in Fig. 3 dargestellt ist, eine umfassendere und präzisere Aussage über den Zustand des Bodens 12 treffen zu können. Die hierfür erfindungsgemäß vorgesehenen Maßnahmen werden im Folgenden erläutert.

**[0039]** Die Fig. 4 zeigt die Bewegung der Vibrationswalze 24 während mehrerer aufeinanderfolgender Vibrationszyklen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass derartige Vibrationszyklen im Vergleich zu der Abrollbewegung der Vibrationswalze 24 vergleichsweise kurzzeitige Ereignisse sind. Die Unwuchtanordnung 28 rotiert mit einer Drehzahl von mehreren 10 Umdrehungen pro Sekunde, während eine vollständige Umdrehung der Vibrationswalze 24 bei der Bewegung des Bodenverdichters 10 in der Bewegungsrichtung B im Allgemeinen mehrere Sekunden in Anspruch nimmt. Dies bedeutet, dass während einer vollständigen Umdrehung der Vibrationswalze 24 die Anzahl der Vibrationszyklen im Bereich von 100 oder mehr liegen kann. Dies wiederum bedeutet, dass die während jedes Vibrationszyklus auftretende Abrollbewegung bzw. Rotation der Vibrationswalze 24 vernachlässigt werden kann.

**[0040]** In Fig. 4 zeigt die Kurve K die Bewegung des Mittelpunktes der Vibrationswalze 24, also der Walzendrehachse W, im Verlaufe aufeinanderfolgender Vibrationszyklen in der Horizontalrichtung x und der Vertikalrichtung z. Diese Bewegung setzt sich im Wesentlichen zusammen aus der durch den Betrieb der Unwuchtanordnung 28 hervorgerufenen periodischen Auf-Ab- bzw. Vorwärts-Rückwärts-Bewegung der Vibrationswalze 24 und der dieser im Wesentlichen einer Orbitalbewegung der Walzendrehachse W entsprechenden Bewegung überlagerten Bewegung des Bodenverdichters 10 und damit auch der Vibrationswalze 24 in der Bewegungsrichtung B. Deutlich zu erkennen ist ein bei einer derartigen periodisch abhebenden Bewegung der Vibrationswalze 24 auftretendes Bewegungsmuster, bei welchem bei jedem zweiten Vibrationszyklus die Vibrationswalze 24 stärker vom Boden 12 abhebt als in einem jeweils dazwischen liegenden

Vibrationszyklus. Ein derartiges Bewegungsmuster wird vor allem dann auftreten, wenn eine vergleichsweise starke Verdichtung des Bodens 12 erreicht ist. Bei vergleichsweise wenig verdichtetem Boden 12 kann in jeder Periode der Bewegung der Vibrationswalze 24 diese den gleichen Bewegungsverlauf aufweisen, also im wesentlichen auch in gleichem Ausmaß vom Boden 12 abheben.

**[0041]** Der Verlauf der Kurve K kann rechnerisch bestimmt werden aus den durch die Beschleunigungssensoren 30, 32 erfassten Beschleunigungen  $a_z$  und  $a_x$  und der beispielsweise auch messtechnisch erfassten Geschwindigkeit, mit welcher der Bodenverdichter 10 sich in der Bewegungsrichtung B bewegt. Während die durch die Bewegung der Unwuchtanordnung 28 hervorgerufene Bewegung der Vibrationswalze 24 durch die zweifache Integration des aus den gemessenen Beschleunigungen sich ergebenden Verlaufs abgeleitet werden kann, kann die dieser Bewegung überlagerte Bewegung in der Bewegungsrichtung B durch Multiplizieren der bekannten bzw. erfassten Geschwindigkeit des Bodenverdichters 10 mit der Zeit ermittelt werden, so dass für jeden Zeitpunkt der durch die Kurve K repräsentierte Ort und die Bewegungsrichtung des Zentrums der Verdichterwalze 24 bekannt sind.

**[0042]** Mit der unter Berücksichtigung der Beschleunigungen  $a_z$  und  $a_x$  und der Bewegungsgeschwindigkeit des Bodenverdichters 10 in der Bewegungsrichtung B ermittelte Kurve K bzw. der durch diese repräsentierten Bewegung der Vibrationswalze 24 während der aufeinanderfolgenden Vibrationszyklen wird es möglich, unter Berücksichtigung der Geometrie des zu verdichtenden Bodens 12 für jeden Vibrationszyklus eine in Fig. 4 durch die Größe 2b repräsentierte Aufstands-Umfangslänge der Vibrationswalze 24 im Verlaufe eines jeweiligen Vibrationszyklus, also beim Eindringen und der Zurückbewegung der Vibrationswalze 24 in den Boden 10, rechnerisch zu ermitteln.

**[0043]** Die Fig. 4 zeigt anhand des im letzten dargestellten Vibrationszyklus mit Strichlinie angedeuteten Verlaufs der Oberfläche des Bodens 12, dass dieser Verlauf vor dem Auftreffen der Vibrationswalze 24 auf den Boden 12 im letzten dargestellten Vibrationszyklus im Wesentlichen definiert ist durch einen rechts erkennbaren, im Wesentlichen geradlinigen Abschnitt des noch nicht durch die Vibrationswalze 24 beaufschlagten Bodens 12, und einen kreissegmentartig gekrümmten Abschnitt, welcher sich aus dem letzten vollständigen Vibrationszyklus und der dabei auftretenden Verformung des Bodens 12 ergibt. Die Berührungslinie S dieser beiden Abschnitte der Oberfläche des Bodens 10 repräsentiert den Bereich, in welchem zum Zeitpunkt  $t_2$  die Vibrationswalze 24 im letzten dargestellten Vibrationszyklus in Kontakt mit dem Boden 12 tritt.

**[0044]** Ausgehend von einem näherungsweise linienartigen Kontakt im Bereich S über die gesamte axiale Länge der Vibrationswalze 24 bzw. des Walzenmantels 26 derselben nimmt die Aufstands-Umfangslänge 2b im Verlaufe der Eindringbewegung der Vibrationswalze 24 in den Boden 12, also im Wesentlichen zwischen dem Zeitpunkt  $t_2$  und dem Zeitpunkt  $t_4$ , zu welchem die maximale Eindringtiefe erreicht ist, zu. Das Produkt aus der Aufstands-Umfangslänge 2b und der axialen Länge 2a des Walzenmantels 26 ergibt für jeden Zeitpunkt der Eindringbewegung die Fläche, über welche die Vibrationswalze 24 mit dem zu verdichtenden Boden 12 in Kontakt ist.

**[0045]** Diese Fläche bzw. die Aufstands-Umfangslänge 2b kann aufgrund des Umstandes, dass mit der Kurve K bekannt ist, wie die Vibrationswalze 24 sich bewegt, und dass, wie die Fig. 4 dies zeigt, grundsätzlich bekannt ist bzw. angenommen werden kann, welche Geometrie der Boden 12 in demjenigen Bereich aufweist, in welchem die Vibrationswalze 24 bei einem jeweiligen Vibrationszyklus mit diesem in Kontakt tritt, mathematisch ermittelt werden. Dabei kann in einer vereinfachenden Annahme unterstellt werden, dass die Vibrationswalze 24 im Verlaufe eines Vibrationszyklus über deren axiale Länge hinweg gleichmäßig in Kontakt mit dem Boden 12 tritt und somit gleichmäßig in diesen eindringt. Weiter kann als vereinfachende Annahme unterstellt werden, dass im Verlaufe eines vollständigen Vibrationszyklus nach dem Erreichen des Zeitpunkts  $t_1$  beim Übergang von einer Entlastung zu einem Kontaktverlust im Mess-Zusammenhang  $Z_M$  der Fig. 3, der Boden 12 seine Form im Wesentlichen beibehält. Bei komplexeren Modellen kann auch messtechnisch bzw. rechnerisch berücksichtigt werden, dass die Vibrationswalze 24 taumelt, also an beiden axialen Enden nicht gleichartig in den Boden 12 eindringt, was beispielsweise dadurch erfasst werden kann, dass in Zuordnung zu beiden axialen Enden der Vibrationswalze 24 jeweilige Sensoren 30, 32 vorgesehen sind. Es kann dann auch rechnerisch berücksichtigt werden, dass über die axiale Länge der Vibrationswalze 24 hinweg diese in verschiedenem Ausmaß in den Boden 12 eindringt und somit über die Länge der Vibrationswalze 24 hinweg sich unterschiedliche Aufstands-Umfangslängen 2b ergeben.

**[0046]** Die Fig. 4 zeigt, dass die Aufstands-Umfangslänge 2b grundsätzlich aufgeteilt ist in zwei bezüglich eines Aufstandszentrums Z nicht symmetrische, also nicht gleich lange Umfangslängenabschnitte  $b_h$  und  $b_v$ . Dabei ist das Aufstandszentrum Z beispielsweise definiert durch denjenigen Bereich, in welchem beispielsweise im Zustand der maximalen Eindringung eine durch die Walzendrehachse W in der Vertikalrichtung z hindurchlaufende Linie den Boden 12 schneidet. Diese auch aus der Berechnung der Aufstands-Umfangslänge 2b sich ergebende bzw. ableitbare Asymmetrie hinsichtlich der Längen der beiden Umfangslängenabschnitte  $b_h$  und  $b_v$  gibt Aufschluss über die Schiebewirkung der Vibrationswalze 24 und hängt auch ab vom Verformungsverhalten des Bodens 12 und kann somit genutzt werden, um eine Aussage über den Zustand des Bodens 12 während der Verdichtung zu treffen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Kenntnis über diese Asymmetrie alleine aus messtechnisch erfassbaren Größen, nämlich den Beschleunigungen  $a_z$  und  $a_x$  und der Bewegungsgeschwindigkeit des Bodenverdichters in der Bewegungsrichtung B, unter Verwendung mathematischer Berechnungsmethoden bei Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse des Bodens erhalten

werden kann, ohne dass dafür irgendwelche hinsichtlich des Aufbaus des Bodens nicht bekannte Informationen berücksichtigt werden müssen.

**[0047]** Bei der erfindungsgemäßen Vorgehensweise zum Bereitstellen von Informationen über den Zustand des zu verdichtenden Bodens 12 wird für den Boden ein physikalisches Modell aufgestellt. In dem in Fig. 5 als ein Beispiel dargestellten Bodenmodell nach Kelvin-Voigt ist der Boden repräsentiert durch zwei Kraftanteile. Der Kraftanteil  $F_{b,k}$  entspricht einem Feder-Kraftanteil, welcher im Wesentlichen repräsentiert ist durch eine Federsteifigkeit  $K_{(b)}$ . Der Kraftanteil  $F_{b,c}$  entspricht einem Dämpfer-Kraftanteil, welcher im Wesentlichen repräsentiert ist durch einen Dämpfungsparameter  $C_{(b)}$ . Die zwischen dem gemäß diesem Modell sich verhaltenden Boden und der Vibrationswalze 24 wirkende Bodenkontaktkraft  $F_b$  kann somit als die Summe der beiden Kraftanteile  $F_{b,k}$  und  $F_{b,c}$  berechnet werden. Für das in Fig. 5 dargestellte Bodenmodell können beispielsweise gemäß dem Konusmodell nach Wolf für kompressible Böden die Federsteifigkeit  $K_{(b)}$  und der Dämpfungsparameter  $C_{(b)}$  mit den beiden nachfolgend angegebenen Formeln berücksichtigt werden:

$$(1) \quad K_{(b)} = \frac{G \cdot b}{1 - \nu} \cdot \left[ 3,1 \cdot \left( \frac{a}{b} \right)^{0,75} + 1,6 \right]$$

$$(2) \quad C_{(b)} = 4 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot G \cdot \frac{1 - \nu}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot a \cdot b}$$

**[0048]** In diesen Formeln entspricht die Größe  $b$  der halben Aufstands-Umfangslänge  $2b$ , deren Verlauf, wie vorangehend mit Bezug auf die Fig. 4 erläutert, für jeden Vibrationszyklus vom Zeitpunkt des Auftreffens der Vibrationswalze 24 auf den Boden 12 bis zum Erreichen des Kontaktverlustes rechnerisch ermittelt werden kann. Die Größe  $a$  entspricht der halben axialen Länge  $2a$  der Vibrationswalze 24 bzw. des Walzenmantels 26, so dass das Produkt der halben axialen Länge  $a$  der Vibrationswalze 24 mit der im Verlaufe einer Eindringbewegung sich ändernden halben Aufstands-Umfangslänge  $b$  im Wesentlichen einem Viertel der Aufstandsfläche, mit welcher zu jedem Zeitpunkt die Vibrationswalze 24 im Verlaufe eines Vibrationszyklus in Kontakt mit dem Boden 12 ist. Die Größe  $\nu$  repräsentiert die Querdehnzahl des Bodens und kann unter der Annahme, dass der in dem Modell zu berücksichtigende Boden kompressibel ist mit einem Wert zwischen 0 und etwa  $1/3$  angenommen werden. Die Größe  $\rho$  entspricht der als näherungsweise konstant angenommenen Dichte des Aufbaumaterials des Bodens.

**[0049]** Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei Verwendung anderer Modelle auch andere bzw. zusätzliche Größen, wie beispielsweise die Masse des Bodens Berücksichtigung finden können.

**[0050]** Die allgemein auch als Schubmodul bezeichnete Größe  $G$  kann unter Verwendung der folgenden Formel ermittelt werden:

$$(3) \quad G = \frac{E_{geo}}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

wobei die Größe  $E_{geo}$  den Elastizitätsmodul des Bodens wiedergibt.

**[0051]** Unter Berücksichtigung dieser Größen  $a$ ,  $b$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $E_{geo}$  können somit die Federsteifigkeit  $K_{(b)}$  und der Dämpfungsparameter  $C_{(b)}$  mit den vorangehend angegebenen Formeln (1), (2) und (3) ermittelt werden. Man erkennt, dass neben den als bekannt angenommenen bzw. rechnerisch ermittelten Größen  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $a$  und  $b$  in dem vorangehend angeführten Beispiel eines Bodenmodells als wesentliche den Zustand des Bodens charakterisierende Größe dessen Elastizitätsmodul  $E_{geo}$  bzw. der diese Größe berücksichtigende Schubmodul eingeht.

**[0052]** Unter Verwendung einer plausiblen Annahme für den Wert des Elastizitätsmoduls  $E_{geo}$  kann ein in Fig. 6 dargestellter Simulations-Zusammenhang  $Z_s$  ermittelt werden, welcher beruhend auf dem in Fig. 5 dargestellten Bodenmodell und den anhand der vorangehenden Formeln (1) bis (3) beispielhaft angenommenen Größen Federsteifigkeit  $K_{(b)}$  und Dämpfungsparameter  $C_{(b)}$  ermittelt werden.

**[0053]** Zur Ermittlung des in Fig. 6 dargestellten Simulations-Zusammenhangs  $Z_s$ , welcher unter Berücksichtigung beispielsweise des in Fig. 5 dargestellten und durch die Formeln (1) bis (3) repräsentierten Bodenmodells den Zusammenhang zwischen der Bodenkontaktkraft  $F_b$  und der Auslenkung  $s_w$  der Vibrationswalze 24 in der Arbeitsrichtung  $A$  wiedergibt, werden für einen Vibrationszyklus die Kraftanteile  $F_{b,k}$  und  $F_{b,c}$  unter Verwendung der Formeln (1) und (2) für die Federsteifigkeit  $K_{(b)}$  und den Dämpfungsparameter  $C_{(b)}$  berechnet. Im Zusammenhang mit dem Feder-Kraftanteil

$F_{b,k}$  werden dabei jeweils durch eine Strich-Punkt-Strich-Linie repräsentierte Feder-Kraftanteilsabschnitte  $F_1$  und  $F_2$  für eine Phase zwischen den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_4$  mit zunehmender Eindringtiefe und eine Phase zwischen den Zeitpunkten  $t_4$  und  $t_1$  mit abnehmender Eindringtiefe ermittelt. Damit kann berücksichtigt werden, dass ein derartiger Boden bei einer Belastung einerseits und einer Entlastung andererseits zueinander unterschiedliche Steifigkeitsverhalten aufweist, was durch das Einführen eines Entlastungssteifigkeitsfaktors für die Entlastungsphase, also die Phase abnehmender Eindringtiefe zwischen den Zeitpunkten  $t_4$  und  $t_1$ , berücksichtigt werden kann.

**[0054]** Der Feder-Kraftanteilsabschnitt  $F_1$  für die Belastungsphase, also die Phase zunehmender Eindringtiefe zwischen den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_4$ , kann durch Multiplikation der Federsteifigkeit  $K_{(b)}$  mit dem Schwingweg in Arbeitsrichtung A über diese Phase zwischen den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_4$  berechnet werden. Die Fig. 6 zeigt dabei deutlich, dass ein von einem exakt linearen Kraftverlauf abweichender Verlauf erhalten wird. In entsprechender Weise kann der Verlauf für die Phase abnehmender Eindringtiefe zwischen den Zeitpunkten  $t_4$  und  $t_1$  berechnet werden, wobei zusätzlich der bereits angesprochene Entlastungssteifigkeitsfaktor eingeht, indem das über dieses Zeitintervall zu integrierende Produkte aus Federsteifigkeit  $K_{(b)}$  und Schwinggeschwindigkeit in Arbeitsrichtung A mit dem Entlastungssteifigkeitsfaktor multipliziert wird. Als Randbedingung für den Entlastungssteifigkeitsfaktor ist dabei anzunehmen, dass zu dem Zeitpunkt, zu welchem der Kontakt zwischen der Vibrationswalze 24 und dem Boden 12 endet, also zum Zeitpunkt  $t_1$ , zum Erreichen eines Kräftegleichgewichts der Feder-Kraftanteil  $F_{b,k}$  und der Dämpfer-Kraftanteil  $F_{b,c}$  einander kompensieren.

**[0055]** Der Dämpfer-Kraftanteil  $F_{b,c}$  wird für einen jeweiligen Vibrationszyklus durch die Integration der gegebenenfalls mit einem materialabhängig auszuwählenden Dämpfungsfaktor zu multiplizierenden Produkt aus Dämpfungsparameter  $C_{(b)}$  und Schwinggeschwindigkeit in Arbeitsrichtung A erhalten und ist in Fig. 6 durch die Punkt-Linie zwischen den Zeitpunkten  $t_2$  und  $t_1$  dargestellt. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass zum Zeitpunkt  $t_4$ , also dann, wenn die Vibrationswalze 24 in maximalem Ausmaß in den Boden eingedrungen ist, der Dämpfer-Kraftanteil  $F_{b,c}$  Null ist, da in diesem Zustand der Boden 12 in Ruhe ist und somit geschwindigkeitsproportionale Kräfte zu Null werden. Zwischen den Zeitpunkten  $t_4$  und  $t_1$ , also bei einer Entlastung des Bodens 12, wirkt der Dämpfer-Kraftanteil  $F_{b,c}$  dem Feder-Kraftanteil  $F_{b,k}$  entgegen, bis zum Zeitpunkt  $t_1$  diese beiden Kraftanteile  $F_{b,k}(t_1)$  und  $F_{b,c}(t_1)$  sich gegenseitig aufheben.

**[0056]** Der in Fig. 6 dargestellte Simulations-Zusammenhang  $Z_s$ , welcher auf der Grundlage des Bodenmodells für einen Vibrationszyklus den Zusammenhang zwischen der Bodenkontaktkraft  $F_b$  und der Auslenkung  $s_w$  repräsentiert, wird durch das Addieren des Feder-Kraftanteils  $F_{b,k}$  und des Dämpfer-Kraftanteils  $F_{b,c}$  für jede Phase des Vibrationszyklus erhalten. Es ergibt sich somit ein Simulations-Zusammenhang  $Z_s$ , welcher, was ein Vergleich der Fig. 3 und 6 deutlich zeigt, qualitativ mit dem Mess-Zusammenhang  $Z_M$  vergleichbar ist.

**[0057]** Durch geeignete Auswahl der in das Bodenmodell eingehenden Größen, insbesondere des Elastizitätsmoduls  $E_{geo}$ , wird es möglich, den Simulations-Zusammenhang  $Z_s$  so zu beeinflussen bzw. zu verändern, dass dieser dem Mess-Zusammenhang im Wesentlichen entspricht. Hierzu kann sukzessive der Simulations-Zusammenhang  $Z_s$  unter Verwendung geringfügig veränderter Eingangsgrößen, insbesondere unter Veränderung des einen wesentlichen Simulationsparameter darstellenden Elastizitätsmoduls  $E_{geo}$ , ermittelt werden und beispielsweise in einem Best-Fit-Prozess mit dem Mess-Zusammenhang  $Z_M$  verglichen werden. Hierzu können beispielsweise die über die Zeitdauer mindestens eines Vibrationszyklus gemittelte Bodenkontaktkraft  $F_{b,mittel}$ , die maximale Bodenkontaktkraft  $F_{b,max}$  im Vibrationszyklus und die von der einen jeweiligen Zusammenhang  $Z_M$  bzw.  $Z_s$  darstellenden Kurve umgrenzte Fläche als Vergleichsparameter miteinander verglichen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die mittlere Bodenkontaktkraft  $F_{b,mittel}$  im Wesentlichen der über die Vibrationswalze ausgeübten statischen Last entspricht, da im Mittel der Bodenverdichter sich weder aufwärts, noch abwärts bewegt.

**[0058]** Wird für jeden dieser Vergleichsparameter eine unter einer dafür jeweils vorgegebenen Schwelle liegende Abweichung erkannt, wird festgestellt, dass diese beiden Zusammenhänge  $Z_s$  und  $Z_M$  einander im Wesentlichen entsprechen, also die Abweichung zwischen diesen eine vorbestimmte Abweichungsschwelle unterschreitet. Somit kann bestimmt werden, dass das zum Erhalt eines derartigen Simulations-Zusammenhangs verwendete Bodenmodell mit den dabei berücksichtigten Simulationsparametern den mit dem Bodenverdichter 10 verdichteten Boden mit hoher Genauigkeit wiedergibt. Es kann dann weiter bestimmt werden, dass ein oder mehrere der in dem Modell berücksichtigten Simulationsparameter, wie z. B. der Elastizitätsmodul  $E_{geo}$ , den entsprechenden Bodenparameter des Bodens 12 tatsächlich repräsentiert. In diesem Zustand kann dann ein derartiger Simulationsparameter im Rahmen einer Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungs-Kontrolle als den Zustand des Bodens repräsentierender Parameter gespeichert werden. Auch andere dabei im Bodenmodell berücksichtigte Größen, wie z. B. der Entlastungssteifigkeitsfaktor oder der Dämpfungsfaktor, können im Zusammenhang mit dem Elastizitätsmodul als den Boden beschreibende Parameter gespeichert werden, selbstverständlich im Zusammenhang mit dem Ort, an welchem während eines jeweiligen Vibrationszyklus der Bodenverdichter 10 sich befindet. Auch weitere Größen, wie z. B. die vorangehend angesprochene Asymmetrie der Aufstands-Umfangslänge  $2b$  können für die Auswertung bzw. die Beurteilung der Qualität des Bodens 12 aufgezeichnet werden.

**[0059]** Auch weitere Größen, wie z. B. die Setzung des Bodens 12, also der Höhenunterschied zwischen dem Boden 12 vor dem Kontakt mit der Vibrationswalze 24 und danach, oder die durch inkrementelle Aufsummierung der wirkenden Kraft bzw. der vorhandenen Kontaktfläche entstehende Kontaktspannung können mit der erfindungsgemäßen Vorge-

hensweise beruhend auf der vorangehend beschriebenen Berechnung der Eindringbewegung der Vibrationswalze 24 in den Boden 12 ermittelt und aufgezeichnet bzw. bei der Ermittlung des Simulation-Zusammenhangs  $Z_s$  berücksichtigt werden und beispielsweise auch als Simulationsparameter variiert werden. Aus den bei der erfindungsgemäßen Vorgehensweise ermittelten bzw. berechneten Größen kann ferner beispielsweise aus der zur Arbeitsrichtung A orthogonalen Beschleunigung der Vibrationswalze 24 in der Normalenrichtung N die Phasenlage bzw. auch die Drehdichtung der Unwuchtanordnung 28 abgeleitet werden, beispielsweise wenn diese nicht messtechnisch erfasst wird. Alternativ oder zusätzlich kann insbesondere zur Bereitstellung von Information über die Phasenlage, also die Drehpositionierung, der Unwuchtanordnung 28 dieser ein Sensor zugeordnet sein, dessen Ausgangssignal die Phasenlage und damit auch die Drehrichtung der Unwuchtanordnung 28 reflektiert. Diese Information kann beispielsweise auch einfließen in die Erstellung des in Figur 3 dargestellten Mess-Zusammenhangs  $Z_M$ .

**[0060]** Um die bei dem vorangehend beschriebenen Vergleich des Simulations-Zusammenhangs  $Z_s$  mit dem Mess-Zusammenhang  $Z_M$  als einen jeweiligen Bodenparameter repräsentierend bestimmten Simulationsparameter, wie z. B. den Elastizitätsmodul  $E_{geo}$ , in noch bessere Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Zustand eines Bodens zu bringen, kann im Feld- oder Laborversuch ein Zusammenhang zwischen einem so bestimmten Simulationsparameter und dem in einem dabei verdichteten Boden tatsächlich vorhandenen Wert des entsprechenden Bodenparameters in Form eines diese beiden Größen verknüpfenden Korrelationsfaktors bestimmt werden. Auch ein derartiger Korrelationsfaktor kann dann im Rahmen der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungs-Kontrolle dadurch Berücksichtigung finden, dass er mit dem entsprechenden Simulationsparameter verknüpft, also beispielsweise multipliziert wird, um somit einen den tatsächlichen Wert des entsprechenden Bodenparameters mit hoher Präzision wiedergebenden Parameter erzeugen zu können.

**[0061]** Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die erfindungsgemäße Vorgehensweise zum Bestimmen von Parametern, welche mit hoher Genauigkeit eine Aussagekraft über den Zustand eines verdichteten Bodens haben, Anwendung finden kann bei verschiedensten zu verdichtenden Untergründen. So kann die erfindungsgemäße Vorgehensweise beispielsweise beim Verdichten von Asphalt Anwendung finden, ebenso wie beim Verdichten des unter einer Asphaltlage aufzubauenden Bodens. Grundsätzlich kann diese Vorgehensweise also Anwendung finden bei sämtlichen granulären- bzw. plastischen Bodenmaterialien, welche vermittels eines derartigen mit einer Vibrationswalze arbeitenden Bodenverdichters verdichtet werden können. Weiter ist darauf hinzuweisen, dass die erfindungsgemäße Vorgehensweise auch dazu genutzt werden kann, in Echtzeit während der Durchführung eines Bodenverdichtungsvorgangs nicht nur permanent in Zuordnung zu Verdichtungsstellen jeweilige Parameter zu ermitteln und aufzuzeichnen, sondern auch in Rückkopplung den dem Bodenverdichtungsvorgang durchführenden Bodenverdichter so zu betreiben, dass unter Berücksichtigung des ermittelten Zustands des Bodens das Verdichtungsergebnis optimiert wird. Wird also bei Durchführung eines Verdichtungsvorgangs unter Verwendung der erfindungsgemäßen Vorgehensweise erkannt, dass in bestimmten Bereichen eine ausreichende Verdichtung noch nicht erreicht ist, können derartige Bereiche durch entsprechendes Ansteuern des Bodenverdichters vermehrt oder wiederholt überfahren werden, während Bereiche, in welchen bereits ein ausreichender Verdichtungsgrad vorliegt, nicht weiter überfahren werden müssen. Es kann mithin also eine Regelung des Verdichtungsbetriebs durchgeführt werden, bei welcher der Bodenverdichter entweder automatisiert durch eine automatisierte Steuerung gezielt in bestimmte Bereiche eines zu verdichtenden Bodens bewegt wird, oder der einen Verdichter betreibenden Bedienperson Information darüber zugeführt wird, wo der Boden in welcher Art und Weise zu verdichten ist bzw. nicht mehr zu verdichten ist. Beispielsweise kann derartige Information auf der Anzeigeeinheit 22 graphisch dargestellt werden.

**[0062]** Zusammengefasst kann das erfindungsgemäße Verfahren zum Bereitstellen von mit dem Verdichtungszustand eines Bodens in Zusammenhang stehender Information bei Durchführung eines Verdichtungsvorgangs mit einem Bodenverdichter wie folgt dargestellt werden:

- a) Erfassen einer Vertikalbeschleunigung und einer Horizontalbeschleunigung einer Vibrationswalze bei Bewegung eines Bodenverdichters über einen zu verdichtenden Boden, beispielsweise vermittels eines oder mehrerer Unwuchtsensoren,
- b) Ermitteln eines Mess-Zusammenhangs zwischen einer Bodenkontaktkraft und einer Auslenkung der Vibrationswalze für einen Vibrationszyklus unter Verwendung der bei der Maßnahme a) erfassten Vertikalbeschleunigung und Horizontalbeschleunigung,
- c) Ermitteln eines Simulations-Zusammenhangs zwischen der Bodenkontaktkraft und der Auslenkung für einen Vibrationszyklus unter Verwendung eines wenigstens einen Simulationsparameter berücksichtigenden Bodenmodells,
- d) Vergleichen des Simulations-Zusammenhangs mit dem Mess-Zusammenhang,

e) Bestimmen, dass ein Vorgabewert des wenigstens einen in dem Bodenmodell berücksichtigten Simulationsparameters im Wesentlichen einen entsprechenden Bodenparameter des zu verdichtenden Bodens repräsentiert, wenn der Simulations-Zusammenhang im Wesentlichen dem Mess-Zusammenhang entspricht.

5

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Bereitstellen von mit dem Verdichtungszustand eines Bodens in Zusammenhang stehender Information bei Durchführung eines Verdichtungsvorgangs mit einem Bodenverdichter (10), wobei der Bodenverdichter (10) wenigstens eine Vibrationswalze (24) mit einer um eine Walzendrehachse (W) der wenigstens einen Vibrationswalze (24) rotierenden Unwuchtanordnung (28) umfasst, wobei in Zuordnung zu der wenigstens einen Vibrationswalze (24) eine Beschleunigungserfassungsanordnung (30, 32) zur Erfassung einer Vertikalbeschleunigung ( $a_z$ ) der Vibrationswalze (24) im Wesentlichen orthogonal zu dem zu verdichtenden Boden (12) und einer Horizontalbeschleunigung ( $a_x$ ) der wenigstens einen Vibrationswalze (24) im Wesentlichen parallel zu dem zu verdichtenden Boden (12) vorgesehen ist, umfassend die Maßnahmen:
- a) Erfassen der Vertikalbeschleunigung ( $a_z$ ) und der Horizontalbeschleunigung ( $a_x$ ) der wenigstens Vibrationswalze (24) bei Bewegung des Bodenverdichters (10) über den zu verdichtenden Boden (12),
- b) Ermitteln eines Mess-Zusammenhangs ( $Z_M$ ) zwischen einer Bodenkontaktkraft ( $F_b$ ) und einer Auslenkung ( $s_w$ ) der Vibrationswalze (24) für wenigstens einen Vibrationszyklus unter Verwendung der bei der Maßnahme a) erfassten Vertikalbeschleunigung ( $a_x$ ) und Horizontalbeschleunigung,
- c) Ermitteln eines Simulations-Zusammenhangs ( $Z_s$ ) zwischen der Bodenkontaktkraft ( $F_b$ ) und der Auslenkung ( $s_w$ ) für wenigstens einen Vibrationszyklus unter Verwendung eines wenigstens einen Simulationsparameter berücksichtigenden Bodenmodells,
- d) Vergleichen des bei der Maßnahme c) für wenigstens einen Vibrationszyklus ermittelten Simulations-Zusammenhangs ( $Z_s$ ) mit dem bei der Maßnahme b) für wenigstens einen Vibrationszyklus ermittelten Mess-Zusammenhang ( $Z_M$ ),
- e) Bestimmen, dass ein Vorgabewert des wenigstens einen in dem Bodenmodell berücksichtigten Simulationsparameters im Wesentlichen einen entsprechenden Bodenparameter des zu verdichtenden Bodens (12) repräsentiert, wenn der bei der Maßnahme d) durchgeführte Vergleich ergibt, dass der für wenigstens einen Vibrationszyklus ermittelte Simulations-Zusammenhang ( $Z_s$ ) im Wesentlichen dem für wenigstens einen Vibrationszyklus ermittelten Mess-Zusammenhang ( $Z_M$ ) entspricht.
2. Verfahren nach Anspruch 1,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** bei den Maßnahmen b) und c) die Auslenkung in einer im Wesentlichen einer Richtung der maximalen Bodenkontaktkraft ( $F_{bmax}$ ) entsprechenden Arbeitsrichtung (A) der Vibrationswalze (24) berücksichtigt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die Maßnahme c) eine Maßnahme c1) umfasst zum Ermitteln einer Aufstands-Umfangslänge (2b) der Vibrationswalze (24) im Verlaufe eines Vibrationszyklus, und dass die Aufstands-Umfangslänge (2b) einen Simulationsparameter des Bodenmodells bildet.
4. Verfahren nach Anspruch 3,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Maßnahme c1) die Aufstands-Umfangslänge (2b) auf der Grundlage der bei der Maßnahme a) ermittelten Vertikalbeschleunigung ( $a_z$ ) und Horizontalbeschleunigung ( $a_x$ ) und auf der Grundlage einer Bewegungsgeschwindigkeit des Bodenverdichters (10) in einer Bewegungsrichtung (B) des Bodenverdichters (10) ermittelt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Maßnahme c1) die Aufstands-Umfangslänge (2b) mit einem in einer Bewegungsrichtung (B) des Bodenverdichters (10) einem Aufstandszentrum vorangehenden vorderen Umfanglängenabschnitt ( $b_v$ ) und einem in der Bewegungsrichtung (B) des Bodenverdichters (10) dem Aufstandszentrum nachlaufenden hinteren Umfanglängenabschnitt ( $b_h$ ) ermittelt wird, und dass auf der Grundlage einer Länge des vorderen Umfanglängenabschnitts ( $b_v$ ) und einer Länge des hinteren Umfanglängenabschnitts ( $b_h$ ) ein den Zustand des Bodens (12) repräsentierender Asymmetrieparameter gebildet wird.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,

**dadurch gekennzeichnet, dass** ein Boden-Elastizitätsmodul ( $E_{\text{geo}}$ ) einen Simulationsparameter des Bodenmodells bildet.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** das Bodenmodell ein wenigstens durch einen Feder-Kraftanteil ( $F_{b,k}$ ) und einen Dämpfer-Kraftanteil ( $F_{b,c}$ ) repräsentiertes Boden-Verformungsverhalten berücksichtigt, und dass die Maßnahme c) eine Maßnahme c2) umfasst zum Ermitteln des Feder-Kraftanteils ( $F_{b,k}$ ) und eine Maßnahme c3) umfasst zum Ermitteln des Dämpfer-Kraftanteils ( $F_{b,c}$ ).
8. Verfahren nach Anspruch 3 und Anspruch 6 und Anspruch 7,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Maßnahme c2) der Feder-Kraftanteil ( $F_{b,k}$ ) in Abhängigkeit von dem Boden-Elastizitätsmodul ( $E_{\text{geo}}$ ) und der Aufstands-Umfangslänge (2b) ermittelt wird, oder/und dass bei der Maßnahme c3) der Dämpfer-Kraftanteil ( $F_{b,c}$ ) in Abhängigkeit von dem Boden-Elastizitätsmodul ( $E_{\text{geo}}$ ) und der Aufstands-Umfangslänge ermittelt (2b) wird.
9. Verfahren nach Anspruch 7 oder Anspruch 8,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Maßnahme c2) der Feder-Kraftanteil ( $F_{b,k}$ ) für einen Vibrationszyklus mit einem ersten Feder-Kraftanteilabschnitt ( $F_1$ ) für eine Phase mit zunehmender Eindringtiefe der Vibrationswalze (24) in den Boden und mit einem zweiten Feder-Kraftanteilabschnitt ( $F_2$ ) für eine Phase mit abnehmender Eindringtiefe der Vibrationswalze (24) ermittelt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Maßnahme c2) der zweite Feder-Kraftanteilabschnitt ( $F_2$ ) unter Berücksichtigung eines Entlastungssteifigkeitsfaktors derart ermittelt wird, dass bei einem Übergang von der Phase abnehmender Eindringtiefe der Vibrationswalze (24) zu einer Außer-Kontakt-Phase der Feder-Kraftanteil ( $F_{b,k}$ ) und der Dämpfer-Kraftanteil ( $F_{b,c}$ ) einander im Wesentlichen vollständig kompensieren, wobei in der Außer-Kontakt-Phase die wenigstens Vibrationswalze (24) im Wesentlichen nicht in Kontakt mit dem zu verdichtenden Boden (12) ist, wobei der Entlastungssteifigkeitsfaktor einen den Zustand des Bodens repräsentierenden Steifigkeitsparameter bilden kann.
11. Verfahren nach Anspruch 10,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die Maßnahme c) eine Maßnahme c4) umfasst zum Ermitteln der Bodenkontaktkraft ( $F_b$ ) für einen Vibrationszyklus auf Grundlage des bei der Maßnahme c2) ermittelten Feder-Kraftanteils ( $F_{b,k}$ ) und des bei der Maßnahme c3) ermittelten Dämpfer-Kraftanteils ( $F_{b,c}$ ).
12. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** dann, wenn bei der Maßnahme e) erkannt wird, dass die Abweichung des Simulations-Zusammenhangs ( $Z_s$ ) von dem Mess-Zusammenhang ( $Z_M$ ) eine vorbestimmte Abweichungsschwelle nicht unterschreitet, die Maßnahmen c) bis e) unter Veränderung wenigstens eines Simulationsparameters bei Durchführung der Maßnahme c) wiederholt werden, bis die Abweichung des Simulations-Zusammenhangs ( $Z_s$ ) von dem Mess-Zusammenhang ( $Z_M$ ) die vorbestimmte Abweichungsschwelle unterschreitet.
13. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** ein Korrelationsfaktor zwischen dem bei der Maßnahme e) als im Wesentlichen den entsprechenden Bodenparameter repräsentierend bestimmten Simulationsparameter und einem Messwert des Bodenparameters des verdichteten Bodens (12) ermittelt wird, oder dass zum Erhalt eines Istwertes eines Bodenparameters der bei der Maßnahme e) als im Wesentlichen den entsprechenden Bodenparameter repräsentierend bestimmte Simulationsparameter mit einem Korrelationsfaktor verknüpft wird.
14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** die Maßnahmen a) bis e) während der Bewegung des Bodenverdichters (10) bei Durchführung eines Verdichtungsvorgangs wiederholt durchgeführt werden.
15. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
**dadurch gekennzeichnet, dass** bei Durchführung eines Verdichtungsvorgangs ein Datensatz mit einer Mehrzahl von Positionen an dem zu verdichtenden Boden (12) und dem in Zuordnung dazu jeweils bestimmten Wert des wenigstens einen bei Durchführung der Maßnahmen a) bis e) als im Wesentlichen einen Bodenparameter repräsentierend bestimmten Simulationsparameters erzeugt wird.

## Claims

1. A method for providing information related to the compaction state of a soil when carrying out a compaction process with a soil compactor (10), wherein the soil compactor (10) comprises at least one vibratory roller (24) with an imbalance arrangement (28) rotating about a roller rotation axis (W) of the at least one vibratory roller (24), wherein in association with the at least one vibratory roller (24) an acceleration detection arrangement (30, 32) is provided for detecting a vertical acceleration ( $a_z$ ) of the vibratory roller (24) substantially orthogonal to the soil (12) to be compacted and a horizontal acceleration ( $a_x$ ) of the at least one vibratory roller (24) substantially parallel to the soil (12) to be compacted, comprising the operations:
- a) detecting the vertical acceleration ( $a_z$ ) and the horizontal acceleration ( $a_x$ ) of the at least one vibratory roller (24) when the soil compactor (10) moves over the soil (12) to be compacted,
  - b) determining a measurement relationship ( $Z_M$ ) between a ground contact force ( $F_b$ ) and a deflection ( $s_w$ ) of the vibratory roller (24) for at least one vibration cycle using the vertical acceleration ( $a_x$ ) and horizontal acceleration detected in operation a),
  - c) determining a simulation relationship ( $Z_s$ ) between the ground contact force ( $F_b$ ) and the deflection ( $s_w$ ) for at least one vibration cycle using a ground model taking into account at least one simulation parameter,
  - d) comparing the simulation relationship ( $Z_s$ ) determined in operation c) for at least one vibration cycle with the measurement relationship ( $Z_M$ ) determined in operation b) for at least one vibration cycle,
  - e) determining that a default value of the at least one simulation parameter taken into account in the ground model substantially represents a corresponding soil parameter of the soil (12) to be compacted, if the comparison carried out at operation d) shows that the simulation relationship ( $Z_s$ ) determined for at least one vibration cycle substantially corresponds to the measurement relationship ( $Z_M$ ) determined for at least one vibration cycle.
2. The method according to claim 1,  
**characterised in that** the operations b) and c) take into account the deflection in a working direction (A) of the vibratory roller (24) substantially corresponding to a direction of the maximum ground contact force ( $F_{bmax}$ ).
3. The method according to claim 1 or 2,  
**characterised in that** operation c) comprises an operation c1) for determining a contact perimeter length (2b) of the vibratory roller (24) in the course of a vibration cycle, and that the contact perimeter length (2b) forms a simulation parameter of the ground model.
4. The method according to claim 3,  
**characterised in that** in operation c1) the contact perimeter length (2b) is determined on the basis of the vertical acceleration ( $a_z$ ) and horizontal acceleration ( $a_x$ ) determined in operation a) and based on a movement speed of the soil compactor (10) in a moving direction (B) of the soil compactor (10).
5. The method according to claim 3 or 4,  
**characterised in that** in operation c1) the contact perimeter length (2b) is determined with a front perimeter length section ( $b_v$ ) preceding a contact centre in a moving direction (B) of the soil compactor (10) and a rear perimeter length section ( $b_h$ ) trailing the contact centre in the movement direction (B) of the soil compactor (10), and **in that** an asymmetry parameter representing the condition of the soil (12) is formed on the basis of a length of the front perimeter length section ( $b_v$ ) and a length of the rear perimeter length section ( $b_h$ ).
6. The method according to any one of the preceding claims,  
**characterised in that** a soil elasticity modulus ( $E_{geo}$ ) forms a simulation parameter of the ground model.
7. The method according to any one of the preceding claims,  
**characterised in that** the ground model takes into account a ground deformation behaviour represented at least by a spring force component ( $F_{b,k}$ ) and a damper force component ( $F_{b,c}$ ), and **in that** the operation c) comprises an operation c2) for determining the spring force component ( $F_{b,k}$ ) and an operation c3) for determining the damper force component ( $F_{b,c}$ ).
8. The method according to claim 3 and claim 6 and claim 7,  
**characterised in that** in operation c2) the spring force component ( $F_{b,k}$ ) is determined as a function of the soil elasticity modulus ( $E_{geo}$ ) and the contact perimeter length (2b), or/and **in that** in operation c3) the damper force component ( $F_{b,c}$ ) is determined as a function of the soil elasticity modulus ( $E_{geo}$ ) and the contact perimeter length (2b).

9. The method according to claim 7 or claim 8,  
**characterised in that**, in operation c2), the spring force component ( $F_{b,k}$ ) is determined for a vibration cycle with a first spring force component portion ( $F_1$ ) for a phase with increasing penetration depth of the vibratory roller (24) into the ground and with a second spring force component portion ( $F_2$ ) for a phase with decreasing penetration depth of the vibratory roller (24).
10. The method according to claim 9,  
**characterised in that** in operation c2) the second spring force portion ( $F_2$ ) is determined taking into account a relief stiffness factor in such a way that in a transition from the phase of decreasing penetration depth of the vibratory roller (24) to an out-of-contact phase the spring force component ( $F_{b,k}$ ) and the damper force component ( $F_{b,c}$ ) compensate each other substantially completely, wherein in the out-of-contact phase the at least vibratory roller (24) is substantially not in contact with the soil (12) to be compacted, wherein the relief stiffness factor can form a stiffness parameter representing the condition of the soil.
11. The method according to claim 10,  
**characterised in that** operation c) comprises an operation c4) for determining the ground contact force ( $F_b$ ) for a vibration cycle based on the spring force component ( $F_{b,k}$ ) determined in operation c2) and the damper force component ( $F_{b,c}$ ) determined in operation c3).
12. The method according to one of the preceding claims,  
**characterised in that**, if it is detected during operation e) that the deviation of the simulation relationship ( $Z_s$ ) from the measurement relationship ( $Z_M$ ) does not fall below a predetermined deviation threshold, operations c) to e) are repeated while changing at least one simulation parameter when operation c) is carried out, until the deviation of the simulation relationship ( $Z_s$ ) from the measurement relationship ( $Z_M$ ) falls below the predetermined deviation threshold.
13. The method according to one of the preceding claims,  
**characterised in that** a correlation factor is determined between the simulation parameter determined in operation e) as substantially representing the corresponding soil parameter and a measured value of the soil parameter of the compacted soil (12), or **in that**, in order to obtain an actual value of a soil parameter, the simulation parameter determined in operation e) as substantially representing the corresponding soil parameter is linked to a correlation factor.
14. The method according to any one of the preceding claims,  
**characterised in that** operations a) to e) are repeatedly carried out during the movement of the soil compactor (10) when carrying out a compaction operation.
15. The method according to any one of the preceding claims,  
**characterised in that**, during a compaction process, a data set is generated with a plurality of positions on the soil (12) to be compacted and the value, determined in association therewith, of the at least one simulation parameter determined to be substantially representative of a soil parameter when carrying out operations a) to e).

## Revendications

1. Un procédé pour fournir des informations en rapport avec l'état de compactage d'un sol lors de l'exécution d'un processus de compactage avec un compacteur de sol (10), le compacteur de sol (10) comprenant au moins un rouleau vibrant (24) avec un dispositif de balourd (28) tournant autour d'un axe de rotation de rouleau (W) dudit au moins un rouleau vibrant (24), dans lequel un dispositif de détection d'accélération (30, 32) est prévu en association avec ledit au moins un rouleau vibrant (24) pour détecter une accélération verticale ( $a_z$ ) dudit rouleau vibrant (24) sensiblement orthogonale au sol (12) à compacter et une accélération horizontale ( $a_x$ ) dudit au moins un rouleau vibrant (24) sensiblement parallèle au sol (12) à compacter, comprenant les mesures :
- a) détecter l'accélération verticale ( $a_z$ ) et l'accélération horizontale ( $a_x$ ) dudit au moins un rouleau vibrant (24) lors du déplacement du compacteur de sol (10) au-dessus du sol (12) à compacter,
- b) déterminer une relation de mesure ( $Z_M$ ) entre une force de contact avec le sol ( $F_b$ ) et une déviation ( $s_w$ ) du rouleau vibrant (24) pour au moins un cycle de vibration en utilisant l'accélération verticale ( $a_z$ ) et l'accélération horizontale du sol détectées lors de la mesure a),

## EP 3 981 919 B1

c) déterminer une relation de simulation ( $Z_S$ ) entre la force de contact au sol ( $F_b$ ) et la déviation ( $s_w$ ) pour au moins un cycle de vibration en utilisant un modèle de sol tenant compte d'au moins un paramètre de simulation, d) comparer la relation de simulation ( $Z_S$ ) déterminée lors de la mesure c) pour au moins un cycle de vibration avec la relation de mesure ( $Z_M$ ) déterminée lors de la mesure b) pour au moins un cycle de vibration, e) déterminer qu'une valeur de consigne dudit au moins un paramètre de simulation pris en compte dans le modèle de sol représente essentiellement un paramètre de sol correspondant du sol (12) à compacter, si la comparaison effectuée lors de l'action d) montre que la relation de simulation ( $Z_S$ ) déterminée pour au moins un cycle de vibration correspond essentiellement à la relation de mesure ( $Z_M$ ) déterminée pour au moins un cycle de vibration.

2. Le procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que**, pour les mesures b) et c), on tient compte de la déviation dans une direction de travail (A) du rouleau vibrant (24) correspondant sensiblement à une direction de la force maximale de contact avec le sol ( $F_{bmax}$ ).
3. Le procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** la mesure c) comprend une mesure c1) pour déterminer une longueur circonférentielle de contact (2b) du rouleau vibrant (24) au cours d'un cycle de vibration, et **en ce que** la longueur circonférentielle de contact (2b) constitue un paramètre de simulation du modèle de sol.
4. Le procédé selon la revendication 3, **caractérisé en ce que**, dans la mesure c1), la longueur circonférentielle de contact (2b) est déterminée sur la base de l'accélération verticale ( $a_z$ ) et de l'accélération horizontale ( $a_x$ ) déterminées dans la mesure a) et sur la base d'une vitesse de déplacement du compacteur de sol (10) dans une direction de déplacement (B) du compacteur de sol (10).
5. Le procédé selon la revendication 3 ou 4, **caractérisé en ce que**, dans la mesure c1), la longueur circonférentielle de contact (2b) est déterminée avec une section de longueur circonférentielle avant ( $b_v$ ) précédant un centre de contact dans une direction de déplacement (B) du compacteur de sol (10) et une section de longueur circonférentielle arrière ( $b_h$ ) suivant le centre de contact dans la direction de déplacement (B) du compacteur de sol (10), et **en ce que** un paramètre d'asymétrie représentatif de l'état du sol (12) est formé sur la base d'une longueur de la section de longueur circonférentielle avant ( $b_v$ ) et d'une longueur de la section de longueur circonférentielle arrière ( $b_h$ ).
6. Le procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** un module d'élasticité du sol ( $E_{geo}$ ) constitue un paramètre de simulation du modèle de sol.
7. Le procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le modèle de sol prend en compte un comportement de déformation du sol représenté au moins par une composante de force élastique ( $F_{b,k}$ ) et une composante de force d'amortissement ( $F_{b,c}$ ), et **en ce que** la mesure c) comprend une mesure c2) pour déterminer la composante de force élastique ( $F_{b,k}$ ) et une mesure c3) pour déterminer la composante de force d'amortissement ( $F_{b,c}$ ).
8. Le procédé selon la revendication 3 et la revendication 6 et la revendication 7, **caractérisé en ce que**, lors de la mesure c2), la composante de force élastique ( $F_{b,k}$ ) est déterminée en fonction du module d'élasticité du sol ( $E_{geo}$ ) et de la longueur circonférentielle de contact (2b), ou/et **en ce que**, lors de la mesure c3), la composante de force d'amortissement ( $F_{b,c}$ ) est déterminée (2b) en fonction du module d'élasticité du sol ( $E_{geo}$ ) et de la longueur circonférentielle de contact.
9. Le procédé selon la revendication 7 ou la revendication 8, **caractérisé en ce que**, dans la mesure c2), la composante de force élastique ( $F_{b,k}$ ) est déterminée pour un cycle de vibration avec une première section de composante de force élastique ( $F_1$ ) pour une phase avec une profondeur de pénétration croissante du rouleau vibrant (24) dans le sol et avec une deuxième section de composante de force élastique ( $F_2$ ) pour une phase avec une profondeur de pénétration décroissante du rouleau vibrant (24).
10. Le procédé selon la revendication 9, **caractérisé en ce que**, dans la mesure c2), la deuxième section de force élastique ( $F_2$ ) est déterminée en tenant compte d'un facteur de rigidité de décharge de telle sorte que, lors d'une transition de la phase de profondeur de

pénétration décroissante du rouleau vibrant (24) à une phase hors contact, la composante de force élastique ( $F_{b,k}$ ) et la composante de force d'amortissement ( $F_M$ ) se compensent sensiblement complètement l'une l'autre, dans la phase hors contact, le rouleau vibrant (24) au moins n'est sensiblement pas en contact avec le sol (12) à compacter, le facteur de rigidité de décharge pouvant constituer un paramètre de rigidité représentatif de l'état du sol.

5

11. Le procédé selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** la mesure c) comprend une mesure c4) pour déterminer la force de contact avec le sol ( $F_b$ ) pour un cycle de vibration sur la base du pourcentage de force élastique ( $F_{b,k}$ ) déterminé lors de la mesure c2) et du pourcentage de force d'amortissement ( $F_{b,c}$ ) déterminé lors de la mesure c3).

10

12. Le procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** si, lors de la mesure e), il est reconnu que l'écart de la relation de simulation ( $Z_s$ ) par rapport à la relation de mesure ( $Z_M$ ) ne passe pas en dessous d'un seuil d'écart prédéterminé, les mesures c) à e) sont répétées en modifiant au moins un paramètre de simulation lors de l'exécution de la mesure c) jusqu'à ce que l'écart de la relation de simulation ( $Z_s$ ) par rapport à la relation de mesure ( $Z_M$ ) passe en dessous du seuil d'écart prédéterminé.

15

13. Le procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'**un facteur de corrélation est déterminé entre le paramètre de simulation déterminé lors de la mesure e) comme représentant essentiellement le paramètre de sol correspondant et une valeur de mesure du paramètre de sol du sol compacté (12), ou **en ce que**, pour obtenir une valeur réelle d'un paramètre de sol, le paramètre de simulation déterminé lors de la mesure e) comme représentant essentiellement le paramètre de sol correspondant est associé à un facteur de corrélation.

20

14. Le procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les mesures a) à e) sont exécutées de manière répétée pendant le déplacement du compacteur de sol (10) lors de l'exécution d'une opération de compactage.

25

15. Le procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que**, lors de l'exécution d'une opération de compactage, un jeu de données est généré avec une pluralité de positions sur le sol à compacter (12) et la valeur, déterminée en association avec celles-ci, dudit au moins un paramètre de simulation déterminé lors de l'exécution des mesures a) à e) comme représentant essentiellement un paramètre de sol.

30

35

40

45

50

55

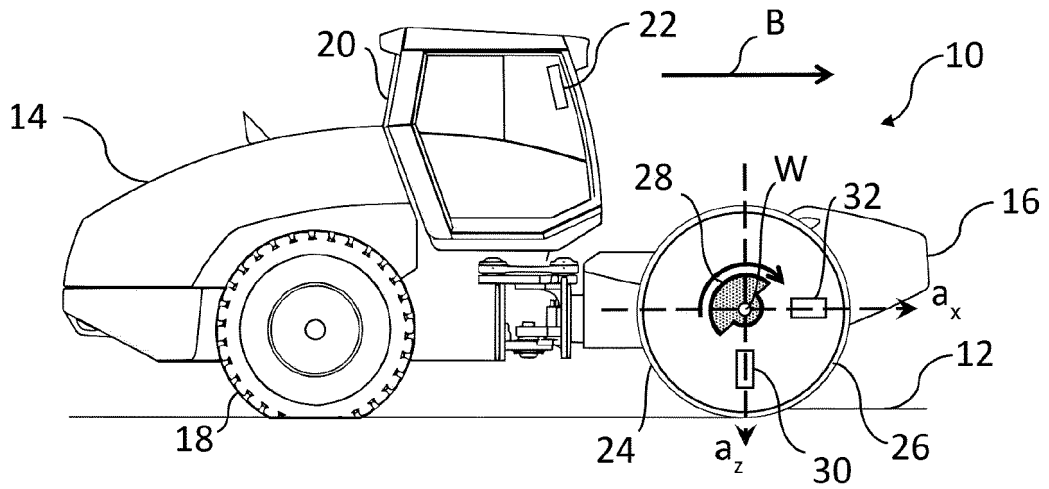


Fig. 1

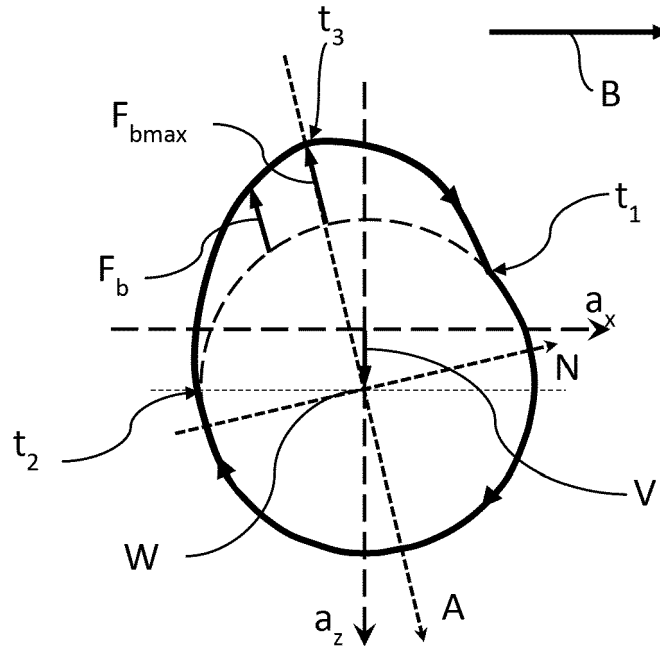


Fig. 2

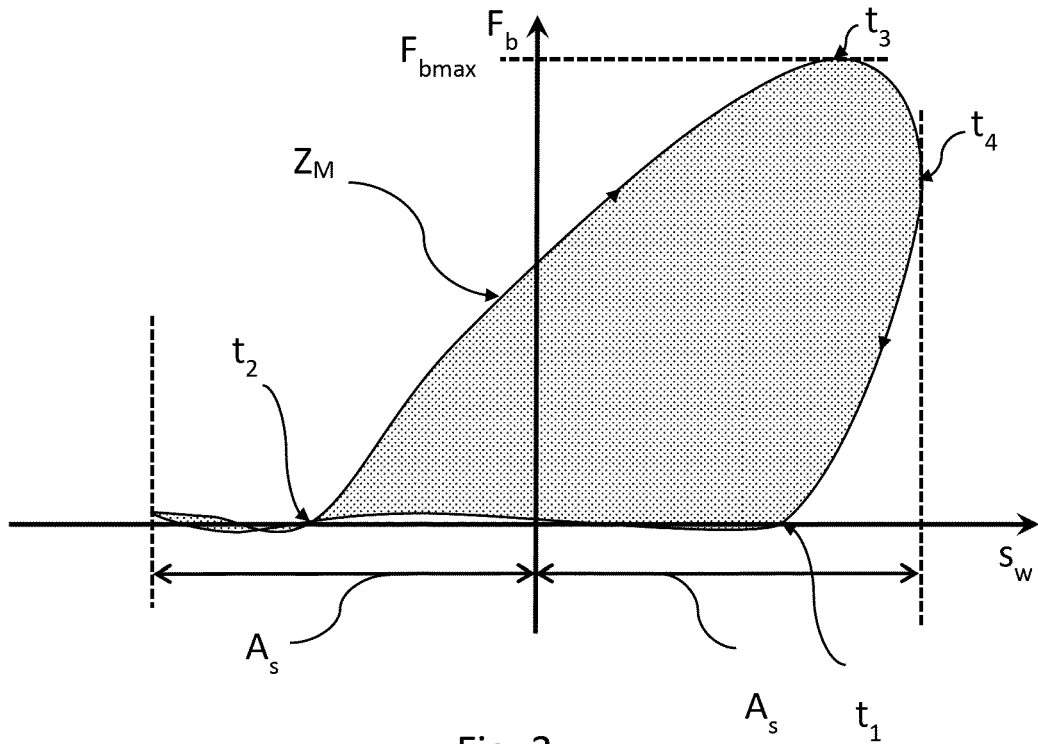


Fig. 3

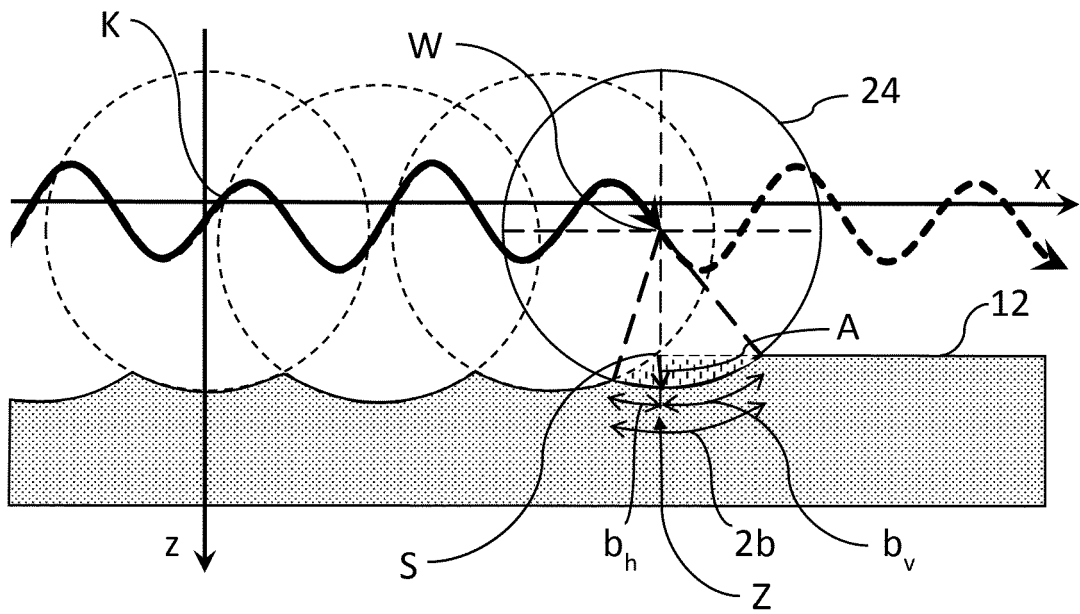


Fig. 4

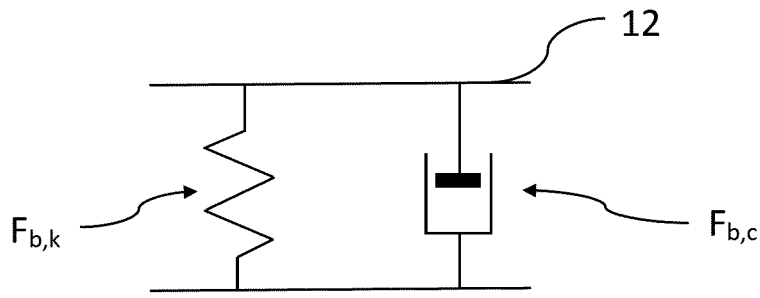


Fig. 5

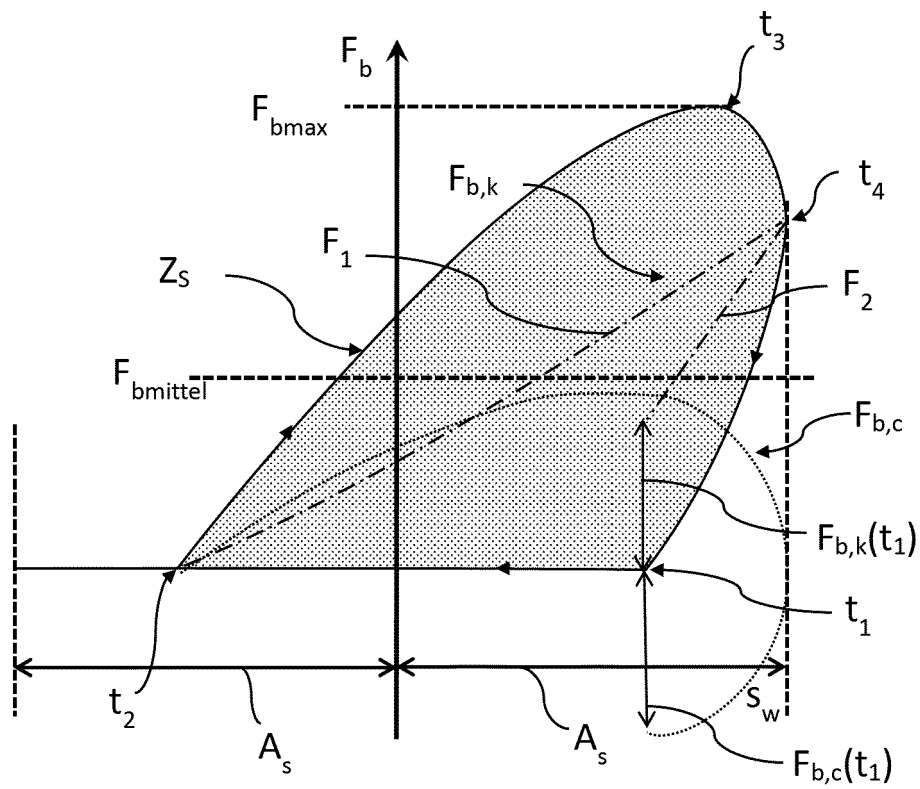


Fig. 6

**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- DE 69423048 T2 [0005]
- DE 102015007369 A1 [0006]