



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
26.03.2003 Patentblatt 2003/13

(51) Int Cl.7: **E02D 1/02**

(21) Anmeldenummer: **02021013.4**

(22) Anmeldetag: **20.09.2002**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
IE IT LI LU MC NL PT SE SK TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder: **Wehr, Wolfgang, Dr.**
63165 Mühlheim (DE)

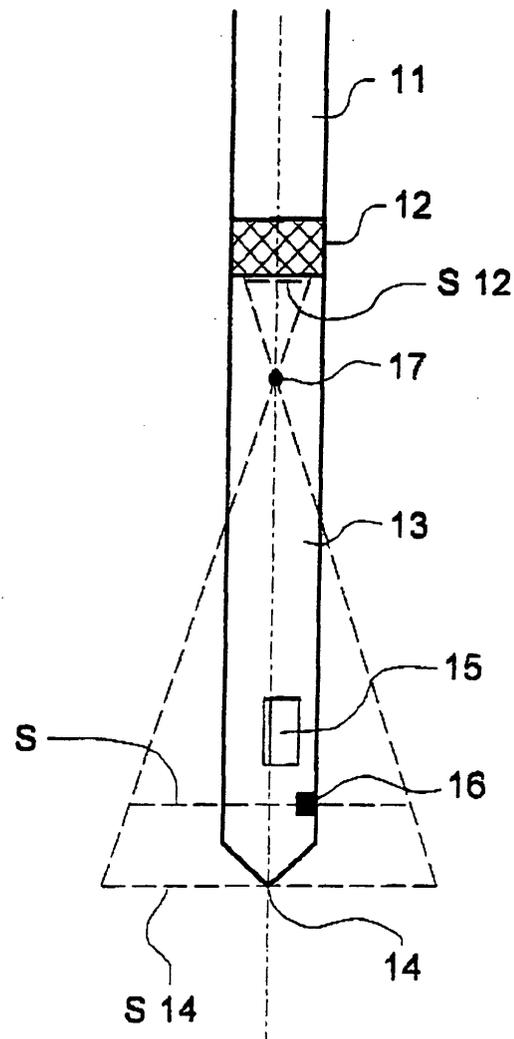
(74) Vertreter: **Neumann, Ernst Dieter, Dipl.-Ing. et al**
Harwardt Neumann Patent- und Rechtsanwälte,
Brandstrasse 10
53721 Siegburg (DE)

(30) Priorität: **20.09.2001 DE 10146342**

(71) Anmelder: **Keller Grundbau GmbH**
63067 Offenbach/Main (DE)

(54) **Verfahren zum Ermitteln der Lagerungsdichte**

(57) Verfahren zur Ermittlung der Lagerungsdichte D des Bodens während der Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung, wobei ein Tiefenrüttler mit einer um eine vertikale Achse rotierenden Unwucht (15) an einem Gestänge (11) hängend, gegebenenfalls unter Zuführung von Wasser und/oder Luft, in den Boden eingerüttelt, in einzelnen Höhenschritten gezogen und in Rüttelintervallen in einzelnen Tiefenlagen rüttelnd gehalten wird und die Lagerungsdichte D aus der Amplitude s des Rüttlers unter Berücksichtigung spannungsabhängiger Bodenkenwerte berechnet wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung der Lagerungsdichte des Bodens während der Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung unter Verwendung einer geeigneten Rechner- bzw. Prozessoreinheit. Hierbei wird ein Tiefenrüttler mit einer um eine vertikale Achse rotierenden Unwucht an einem Gestänge hängend, gegebenenfalls unter Zuführung von Wasser und/oder Luft, in den Boden eingerüttelt und in Höhenschritten meist vorgegebener Größe gezogen und in Rüttelintervallen in einzelnen Tiefenlagen rüttelnd gehalten. Der Rüttler führt hierbei taumelnde Bewegungen um einen Bewegungsnullpunkt aus, der nahe seiner elastischen Aufhängung am Gestänge liegt, während die Rüttlerspitze eine Kreisbahn mit maximaler Amplitude ausführt. Dieses Bodenverbesserungsverfahren wird in einem je nach Anforderung dichteren oder weiteren Raster über eine Gesamtfläche verteilt wiederholt ausgeführt, um eine angestrebte Tragfähigkeit des Bodens zu erreichen und/oder Verflüssigungszustände des Bodens im Fall von Erdbeben zu verhindern. Problematisch ist es hierbei, das Ergebnis der Rütteldruckverdichtung zu überprüfen. In der bisherigen Praxis wird davon ausgegangen, daß die Überwachung der Leistungsaufnahme und damit der Bodenverdichtungsleistung des Rüttlers einen hinreichenden Anhaltspunkt für das Ergebnis der Verdichtungsarbeit in den einzelnen Höhenstufen bietet. Letzte Sicherheit über die erreichte Lagerungsdichte D geben bisher hier beispielsweise Drucksondierungen. Bei unzureichendem Ergebnis muß das Bodenverbesserungsverfahren durch ergänzende Durchführungen der Rütteldruckverdichtung, die gegebenenfalls nach einem dem ersten überlagerten Raster gesetzt werden, nachgebessert werden.

[0002] In der DE 198 59 962 A1 wird daneben ein Verfahren beschrieben, bei dem der sogenannte Vorlaufwinkel zwischen der Phasenlage des Tiefenrüttlers und der Phasenlage seiner Unwuchtmasse als Kenngröße zur Bestimmung des Verdichtungsgrades herangezogen wird. Gerätetechnisch werden hierzu am Rüttler ein Impulsgeber zur Bestimmung einer Nulllage der Unwucht und zumindest zwei in aufeinander senkrecht stehenden vertikalen Ebenen angeordnete Beschleunigungsaufnehmer vorgesehen.

[0003] Aus der DE 199 28 692 C1 ist ein Verfahren zur online-Verdichtungskontrolle eines Tiefenrüttlers bekannt, bei dem bodendynamische Kennwerte und daraus die Lagerungsdichte des Bodens aus den Meßwerten Eindringtiefe des Rüttlers, Verkippungswinkel der Rüttlerachse, Vorlaufwinkel der Unwucht und mindestens einer horizontalen Auslenkung (Amplitude) des Rüttlers ermittelt werden. Hierbei sollen ein oder mehrere Sensoren am Rüttler die erforderlichen Meßwerte liefern, die Beschleunigungsaufnehmer und/oder Winkelaufnehmer und/oder Kompass und/oder Wegaufnehmer sein können.

[0004] Während bei der erstgenannten Schrift deut-

lich wird, daß der Vorlaufwinkel selber unmittelbar als signifikante Größe für den Verdichtungserfolg herangezogen wird, wird bei der zweitgenannten Schrift aus der genannten Anzahl von Meßwerten die Lagerungsdichte errechnet, wobei unklar bleibt, wie diese Meßwerte zur ebenfalls vorgenommenen Überwachung der Leistungsaufnahme des Rüttlers in Beziehung gesetzt werden sollen.

[0005] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, beim Rütteldruckverdichtungsverfahren der eingangs genannten Art die Lagerungsdichte online während der einzelnen Rüttelintervalle mit verringertem Meßaufwand zu kontrollieren. Die Lösung hierfür besteht darin, daß die Lagerungsdichte D aus der Amplitude s des Rüttlers unter Berücksichtigung spannungsabhängiger Bodenkennwerte mittels der Rechner- bzw. Prozessoreinheit berechnet wird. Hiermit wird die erforderliche Messung wesentlich vereinfacht, insbesondere wird von der Erfassung oder Berechnung des Vorlaufwinkels des Rüttlers (Phasenlage der Rüttlerunwucht gegenüber Phasenlage des Rüttlermantels) vollständig abgesehen. Vielmehr wird nur die Radialbeschleunigung \ddot{s} des Rüttlers zur Bestimmung der Amplitude s des Rüttlers, die Umlauffrequenz n und die Tiefenlage t des Rüttlers gemessen. Damit wird eine Rüttleramplitude s , die an geeigneter Stelle des Rüttlers zwischen der Rüttlerspitze und dem Bewegungsnullpunkt des Rüttlers erfaßt wird, im wesentlichen als einzige zu erfassende Meßgröße herangezogen, wobei vorausgesetzt wird, daß die Rüttlerdrehzahl n in jedem Fall mit entsprechender Meßtechnik am Antriebsmotor erfaßt wird. Auf diese Weise kann aus der Radialbeschleunigung \ddot{s} , die über einen einzigen am Rüttler befestigten Beschleunigungsaufnehmer gemessen werden kann, und die Rüttlerfrequenz bzw. Rüttlerdrehzahl n die Rüttleramplitude s ermittelt werden, aus der dann die Lagerungsdichte D erfindungsgemäß in der Rechner- bzw. Prozessoreinheit berechnet wird. Eine Anzahl von Gerätekennwerten und eine Anzahl von Bodenkennwerten, die aus vorhergehenden Aufschlußbohrungen zu erhalten sind, sind in die Rechner- bzw. Prozessoreinheit zunächst einzulesen.

[0006] In konkreter Ausführung wird die Lagerungsdichte D als Funktion der tiefenabhängigen Horizontalspannung σ_H des Bodens und der Radialbeschleunigung \ddot{s} ermittelt ($D = f(\sigma_H, \ddot{s})$). Hierbei wird vereinfacht davon ausgegangen, daß die Horizontalspannung des Bodens in der Horizontalebene der Rüttlerarbeit im wesentlichen richtungsunabhängig gleich ist. Hierbei wird die Horizontalspannung σ_H als Produkt aus der tiefenabhängigen Vertikalspannung σ_V und dem Erddruckbeiwert K_0 berechnet ($\sigma_H = K_0 \cdot \sigma_V$). Hierbei kann wiederum gesagt werden, daß die Vertikalspannung σ_V des Bodens als Funktion von Lagerungsdichte D und Tiefenlage t ermittelt wird ($\sigma_V = f(D, t)$), so daß die Berechnung der Lagerungsdichte D mittels der Horizontalspannung durch Iteration erfolgen muß. Konkret kann die Vertikalspannung σ_V als Produkt aus Wichte γ und Tiefenlage t

ermittelt werden ($\sigma_V = \gamma t$), wobei die Wichte eine Funktion der Lagerungsdichte D ist ($\gamma = f(D)$), so daß näher erkennbar wird, wie die Berechnung der Vertikalspannung σ_V durch Iteration erfolgen muß.

[0007] Der Erddruckbeiwert K_0 , der ebenfalls in die Berechnung der Horizontalspannung eingeht, ist als exponentiale Funktion der Lagerungsdichte D zu ermitteln ($K_0 = a \cdot 10^{b \cdot D}$). Hiermit ist ein weiteres Auftreten der Lagerungsdichte D im Berechnungsansatz erkennbar, so daß auch unter diesem Gesichtspunkt das iterative Berechnen der Lagerungsdichte D erforderlich wird.

[0008] Während die Lagerungsdichte, die mit

$$D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

definiert ist, wobei e die Porenzahl des Bodens, e_{\max} die maximale Porenzahl und e_{\min} die minimale Porenzahl ist, üblicherweise auf Werte der Porenzahlen an der Bodenoberfläche bezogen ist, ist das Ergebnis der Lagerungsdichte gemäß dem vorliegenden Verfahren spannungsabhängig normiert, d.h. die Berechnung der Lagerungsdichte bezieht sich auf maximale bzw. minimale Porenzahlen in entsprechender Tiefe. Die Lagerungsdichte ist gemäß vorstehendem ein Verhältniswert. Die Porenzahl e ist hierbei eine Funktion der Wichte γ [$e = f(\gamma)$].

[0009] Wie bei bisherigen Verfahren auch dient die Ermittlung der Lagerungsdichte vorrangig zur zeitlichen Begrenzung entsprechender Rüttelintervalle, d. h. wenn ein vorgegebener Sollwert der Lagerungsdichte in der entsprechenden Tiefe erreicht ist, wird das jeweilige Rüttelintervall beendet und der Rüttler um eine vorgegebene Höhenschrittweite, insbesondere um 50 cm, nach oben gezogen. Bei gleichbleibender oder sinkender Amplitude s wird eine vorgegebene Umlauffrequenz, z. B. 30 Hz, beibehalten, da von einer zunehmenden Verdichtung des Bodens ausgegangen werden kann. Nimmt jedoch die Amplitude s zu, so deutet dies auf eine Auflockerung des Bodens oder eine Resonanzerscheinung des Rüttler-Boden-Systems infolge des Rüttelns hin. In diesem Fall ist die Umlauffrequenz zu verändern, bevorzugt zu reduzieren. Alternativ kann über eine Veränderung der Umlauffrequenz n ein Maximum der Amplitude s gesucht und beibehalten werden.

[0010] Um einen signifikanten gemittelten Kennwert der Beschleunigungsmessung und damit der Amplitudenermittlung zu erhalten, wird vorgeschlagen, daß an dem verwendeten Tiefenrüttler zur Durchführung des obengenannten Verfahrens der Beschleunigungsaufnehmer um die Hälfte der Höhenschrittweite von der unteren Rüttlerspitze entfernt angeordnet wird, insbesondere also um 25 cm bei einer Höhenschrittweite von 50 cm.

[0011] Die einzige Zeichnung zeigt ein Beispiel eines zur Durchführung des Verfahrens geeigneten Tiefenrüttlers. Hierbei sind ein Gestänge 11, eine elastische

Kupplung 12 und ein Tiefenrüttler 13 gezeigt; an letzterem sind eine Unwucht 15 sowie ein Beschleunigungsaufnehmer 16 markiert. Mit 17 ist der Bewegungsnullpunkt des Rüttlers angedeutet, um den eine Taumelbewegung der Rüttlerachse erfolgt, mit geringen Amplituden s₁₂ im Bereich der elastischen Kupplung 12 und mit großen Amplituden s₁₄ im Bereich der Rüttlerspitze 14. Gemessen und im vorstehenden mit s bezeichnet ist die Amplitude im Bereich des Beschleunigungsaufnehmers 16.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung der Lagerungsdichte D des Bodens während der Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung, wobei ein Tiefenrüttler mit einer um eine vertikale Achse rotierenden Unwucht an einem Gestänge hängend, gegebenenfalls unter Zuführung von Wasser und/oder Luft, in den Boden eingerüttelt, in einzelnen Höhenschritten gezogen und in Rüttelintervallen in einzelnen Tiefenlagen rüttelnd gehalten wird und die Lagerungsdichte D aus der Amplitude s des Rüttlers unter Berücksichtigung spannungsabhängiger Bodenkennwerte berechnet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Umlauffrequenz n und die Tiefenlage t des Rüttlers gemessen werden.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, bei dem die Radialbeschleunigung \ddot{s} des Rüttlers zur Bestimmung der Amplitude s des Rüttlers unmittelbar gemessen wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, bei dem die Lagerungsdichte D als Funktion der tiefenabhängigen Horizontalspannung σ_H des Bodens und der Radialbeschleunigung \ddot{s} des Rüttlers ermittelt wird [$D = f(\sigma_H, \ddot{s})$].
5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem die Horizontalspannung σ_H als Produkt aus der tiefenabhängigen Vertikalspannung σ_V und dem Erddruckbeiwert K_0 berechnet wird [$\sigma_H = K_0 \cdot \sigma_V$].
6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem die Vertikalspannung σ_V des Bodens als Funktion von Lagerungsdichte D und Tiefenlage t ermittelt wird [$\sigma_V = f(D, t)$], so daß die Berechnung der Lagerungsdichte D durch Iteration erfolgt.
7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem die Vertikalspannung σ_V als Produkt aus Wichte γ und Tiefenlage t ermittelt wird [$\sigma_V = \gamma t$], wobei die Wichte γ eine Funktion der Lagerungsdichte D ist [$\gamma = f(D)$],

so daß die Berechnung der Vertikalspannung σ_V durch Iteration erfolgt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, bei dem der Erddruckbeiwert K_0 als exponentiale Funktion der Lagerungsdichte D ermittelt wird [$K_0 = a \cdot 10^{b \cdot D}$], so daß die Berechnung der Lagerungsdichte D durch Iteration erfolgt. 5
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei dem die Lagerungsdichte, die mit 10

$$D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad 15$$

definiert ist, wobei e die Porenzahl, e_{\max} die maximale Porenzahl und e_{\min} die minimale Porenzahl ist, mit spannungsabhängigen Werten für e_{\max} und e_{\min} berechnet wird, wobei e eine Funktion der Wichte γ ist [$e = f(\gamma)$]. 20

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem der Rüttler bei gleichbleibender oder sinkender Amplitude s mit konstanter Umlauffrequenz n angetrieben wird. 25
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, bei dem der Rüttler bei Zunahme der Amplitude s mit reduzierter Umlauffrequenz n angetrieben wird. 30
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem über eine Veränderung der Umlauffrequenz n ein Maximum der Amplitude s gesucht und eingestellt wird. 35
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, bei dem die Rüttelintervalle in Abhängigkeit vom Erreichen eines Sollwertes für die Lagerungsdichte D beendet werden. 40
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, daß** ein Beschleunigungsaufnehmer (16) um die Hälfte der Höhenschrittweite von der unteren Rüttlerspitze (14) entfernt angeordnet wird, insbesondere um 25 cm bei einer Höhenschrittweite von 50 cm. 45

50

55

