



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 010 532 B3 2008.04.30**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 010 532.2**
 (22) Anmeldetag: **26.02.2007**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **30.04.2008**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 9/02 (2006.01)**
E21B 49/00 (2006.01)
E02D 1/00 (2006.01)
G01C 3/00 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Technische Universität Bergakademie Freiberg,
 09599 Freiberg, DE**

(72) Erfinder:

Kudla, Wolfram, 01069 Dresden, DE

(74) Vertreter:

Hempel, H., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 01159 Dresden

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

DE 12 16 561 A
US 43 39 664 A

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Einrichtung zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz von Prüfgruben**

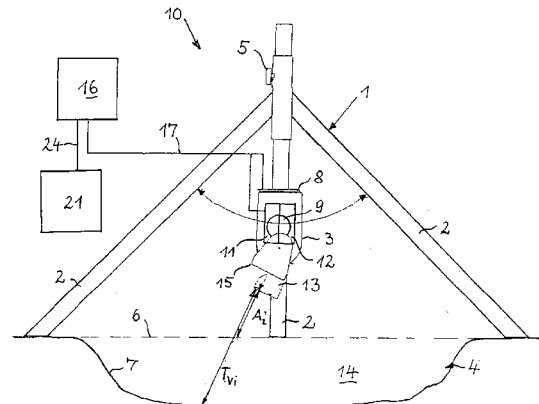
(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz (14) der Prüfgrube (4) mit folgenden Schritten:

- Aushub der Bodensubstanz (14) der Prüfgrube (4),
- Messung des Volumens (V_{PGr}) der Prüfgrube (4),
- Messungen von Masse (m_f) und Wassergehalt (w) der ausgehobenen Bodensubstanz (14) und
- Ermittlung der Dichte (ρ).

Die Aufgabe besteht darin, dass die Prüfgruben mit größerer Präzision ausgemessen werden können und damit die Dichte der Bodensubstanzen auch mit höherer Genauigkeit ermittelt werden kann.

Die Lösung weist folgende Schritte auf,

- eine Oberflächenabtastung als Nullniveauabtastung, bei der eine einmarkierte Geländeoberfläche (6, F_{Gr}) der Prüfgrube (4) abgetastet wird, und eine Messung des Abstandes (A_i) des Abtastkopfes (3) von den die Geländeoberfläche (6) rasterunterteilenden Oberflächenpixeln (F_i) ausgerichtet und somit der Geländeoberfläche (6, F_{Gr}) vor dem Aushub der Prüfgrube (4),
- eine Grubenabtastung der Wandung (7) der Prüfgrube (4) nach dem Aushub der Prüfgrube (4) und eine Messung der Tiefen (T_{vi}) des Abtastkopfes (3) von den die Wandung (7) rasterunterteilenden Wandungspixeln (V_i) aus,
- Bestimmung des Grubenvolumens (V_{PGr}) aus den gemessenen Abständen (A_i) und Tiefen (T_{vi}) und der einmarkierten Geländeoberfläche (6, F_{Gr}) nach der Gleichung $V_{PGr} = f(A_i, T_{vi}, F_{Gr})$ (I) und
- Ermittlung der Dichte (ρ) der ...



Beschreibung

derverfahren – relativ hoch sind.

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz von Prüfgruben, wobei das Verfahren folgende Schritte aufweist:

- Aushub der Bodensubstanz aus der Prüfgrube,
- Messung des Volumens der Prüfgrube,
- Messungen von Masse und Wassergehalt der ausgehobenen Bodensubstanz und
- Ermittlung der Dichte.

[0002] Die Erfindung wird für die Bestimmung der Dichte des Bodens bei der Verdichtungsüberprüfung im Erdbau und in der Geotechnik verwendet, da die Feuchtdichte oder die Trockendichte des Bodens der Quotient aus der Feuchtmasse oder Trockenmasse des Bodens und dem Prüfgrubenvolumen ist.

[0003] Eine ausreichende Verdichtung von Schüttmaterialien im Erdbau ist die grundlegende Voraussetzung für eine ausreichende Standsicherheit und eine weitgehende Setzungsfreiheit von Dämmen, die wiederum Voraussetzung für langfristig qualitativ hochwertige und gebrauchstaugliche Straßenkonstruktionen sind. Das maßgebliche Prüfmerkmal für die Bestimmung der Verdichtung im Erdbau ist der Verdichtungsgrad, der als Quotient aus der Trockendichte im Feld und der im Labor bestimmten Proctordichte definiert ist. Für die Bestimmung der Dichte im Feld sind in der Druckschrift DIN 18125 folgende Prüfverfahren beschrieben:

- a) das Ausstechzylinderverfahren,
- b) das Ballonverfahren,
- c) das Sandersatzverfahren,
- d) das Flüssigkeitersatzverfahren,
- e) das Gipsersatzverfahren,
- f) das Schürfgrubenverfahren.

[0004] Zusätzlich ist in den Technischen Prüfverfahren für Boden und Fels ein radiometrisches Verfahren mit einer Isotopeneinstichsonde zur Bestimmung der Dichte beschrieben.

[0005] Ein Problem besteht darin, dass die genannten Prüfverfahren nicht an die derzeitige Technologie angepasst worden sind.

[0006] Die Qualität zumindest eines Teils der oben genannten Verfahren sind in den beiden Druckschriften von Floss, Kudla: Qualitätsprüfungen für die Bodenverdichtung mit statistischer Grundlage, Zeitschrift Straße und Autobahn, 6/1989, S. 217, und von Kudla: Beitrag zur statistischen Qualitätskontrolle im Erdbau, Diss., Heft 16, des Lehrstuhls und Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik und Feinmechanik der TU München, 2/1990, beschrieben, in denen festgestellt wird, dass die zufälligen Messfehler bei den hauptsächlich untersuchten Verfahren-Ballonverfahren, Sandersatzverfahren und auch Ausstechzylinder-

[0007] Aus den Ergebnissen in den beiden Druckschriften lässt sich der Prüffehler für den Verdichtungsgrad berechnen. Die Vergleichsstreuung σ_R des Verdichtungsgrades ist bodenartabhängig und schwankt zwischen 0,9 % und 2,0 % des Verdichtungsgrades und ist damit sehr groß. Damit ist der berechnete Prüffehler für den Verdichtungsgrad relativ groß.

[0008] Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Durchführung der genannten Verfahren zur Ermittlung der Dichte relativ lange, ca. fünfzehn bis sechzig Minuten, dauert. Der Aufbau der Messvorrichtung und die Durchführung der Volumenmessung sind damit relativ zeitaufwändig.

[0009] Die ausgemessenen Prüfgruben sind dabei sehr klein. Bei den Ballonverfahren und Sandersatzverfahren kann zudem maximal eine Prüfgrube mit dreißig Zentimeter Durchmesser ausgemessen werden. Im Regelfall haben die Prüfgruben einen noch kleineren Durchmesser.

[0010] Die Isotopeneinstichsonde des radiometrischen Verfahrens weist den höchsten Prüffehler von allen Dichtemessverfahren auf. Das radiometrische Verfahren kommt üblicherweise nur auf Großbaustellen zum Einsatz, da bei deren Anwendung erhebliche Strahlenschutzbedingungen zu beachten sind, was als ein Problem angesehen werden kann.

[0011] Die Beschreibung der genannten Messverfahren zur Bestimmung der Trockendichte im Feld zeigen, dass sie wesentliche Probleme bei der Bestimmung der Dichte in Bezug auf

- eine ausreichende Wiederhol- und Vergleichsgenauigkeit,
- eine Durchführung in adäquater Zeit und
- ein ausreichend großes Prüfvolumen haben.

[0012] Ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Volumenbestimmung einer Prüfgrube zur Ermittlung des Raumgewichtes von Boden oder Schüttgütern unter Verwendung eines Gummiblasengerätes ist in der Druckschrift DE 1 216 561 beschrieben, bei dem die in einem Zylinder zwischen einem Kolben und einer ein stirnseitige Begrenzung des Zylinders bildende Gummiblase eingeschlossene Wassermenge in das Loch eingedrückt wird. Dabei erfolgt die Ablesung der Kolbenstellung zu Beginn und am Schluss der Messung bei gleich bleibendem hydrostatischem Druck. Die Gummiblase ist an einem Standrohr, das mit einem vorher ermittelten Volumen an Wasser gefüllt ist, befestigt. Die Gummiblase wird nun in die Prüfgrube eingelassen und mittels genau definierten Bedingungen mit Wasser aus dem Standrohr gefüllt. Entsprechend der nun noch im Standrohr vorhandenen Flüssigkeit kann auf das Volumen der Prüfgrube ge-

geschlossen werden.

[0013] Die Probleme bestehen darin, dass das Verfahren bei einer sehr groben Prüfgrubenwandung eine große Fehlerausbildung aufweisen kann. Denn die Gummiblaste kann sich in vielen Fällen nicht direkt an der Grubenwandung anschmiegen, wobei sich zwischen der Grubenwandung und der Gummiblastenoberfläche nicht erfassbare Freiräume ausbilden können. Des Weiteren besteht auch die Gefahr des Zerplatzens der Gummiblaste.

[0014] Lasermesstechnik wird bereits in vielen Bereichen der Technik eingesetzt. Z.B. werden in der Geodäsie Lasermessungen zur Aufnahme von unzugänglichen Böschungen, insbesondere in felsigen Bereichen, eingesetzt.

[0015] Es existieren beispielsweise auch Laserabtastvorrichtungen zum Abtasten von Tunnelabläufen (Tunnelscanner zum Monitoring des Tunnelzustandes) und zum Abtasten von Spritzbetonoberflächen im Tunnelbau für die Feststellung von Spritzbetondicken.

[0016] Des Weiteren ist ein Zustandserfassungs- und -bewertungsverfahren mit einem Messsystem unter der Internetadresse www.schniering.com beschrieben, bei dem ein Laserdistanzmessgerät zur Erfassung von Fahrbahnebenenheiten, insbesondere von Längsunebenenheiten durch Mehrfachabtastung mit vier Laserdistanzsensoren und von Querunebenenheiten durch Abtastung mit bis zu neununddreißig Laserdistanzsensoren vorgesehen ist. Dabei erfolgt eine geschwindigkeitsunabhängige Messwerterfassung in Abständen von fünf Millimetern.

[0017] Ein Problem des bekannten Laserdistanzmessgerätes als Abtastvorrichtung wie auch von allen bisherigen Verfahren und Vorrichtungen besteht darin, dass sie letztlich nicht die Genauigkeit aufweisen, die die Abtastvorrichtung für das Ausmessen einer Prüfgrube mit anschließender Volumenbestimmung tauglich machen.

[0018] Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Einrichtung zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz von Prüfgruben anzugeben, die derart geeignet ausgebildet sind, dass die Prüfgruben mit größerer Präzision ausgemessen werden können und damit die Dichte der Bodensubstanzen auch mit höherer Genauigkeit ermittelt werden kann.

[0019] Die Aufgabe wird durch die Merkmale der Patentansprüche 1 und 10 gelöst. Das Verfahren zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz der Prüfgrube weist folgende Schritte auf:

- Aushub der Bodensubstanz der Prüfgrube,
- Messung des Volumens V_{PG} der Prüfgrube,

- Messungen von Masse m_f und Wassergehalt w der ausgehobenen Bodensubstanz und
- Ermittlung der Feucht- oder Trockendichte ρ , wobei gemäß des Kennzeichenteils des Patentanspruchs 1 folgende Schritte durchgeführt werden:

- eine Oberflächenabtastung als Nullniveauabtastung, bei der eine einmarkierte Geländeoberfläche F_{Gr} der Prüfgrube abgetastet wird, und eine Messung des Abstandes A_i zwischen Abtastkopf und die Geländeoberfläche rasterunterteilenden Oberflächenpixeln F_i und somit der Geländeoberfläche F_{Gr} vor dem Aushub der Prüfgrube,
- eine Grubenabtastung der Wandung der Prüfgrube nach dem Aushub der Prüfgrube und eine Messung der Tiefen T_{Vi} von der Wandung rasterunterteilenden Wandungspixeln V_i vom Abtastkopf aus,
- Bestimmung des Grubenvolumens V_{PG} aus den gemessenen Abständen A_i und Tiefen T_{Vi} und der einmarkierten Geländeoberfläche F_{Gr} nach einer Gleichung

$$V_{PG} = f(A_i, T_{Vi}, F_{Gr}) \quad (I)$$

und

- Ermittlung der Dichte ρ der Bodensubstanz aus Grubenvolumen V_{PG} , Masse m_f der Bodensubstanz und Wassergehalt w nach einer Gleichung:

$$\rho = f(V_{PG}, m_f, w) \quad (II).$$

[0020] Die Abtastung der Messflächen der Prüfgrube mittels eines Laserdistanzsensors erfolgt mit Hilfe von motorischen Antrieben, beginnend beim tiefsten Punkt in der Prüfgrube, wobei ein Laserstrahl vertikal nach unten gerichtet ist, kreisförmig die Abtastung vornimmt, wobei nach einem Drehwinkel α_H mit einer 360°-Umdrehung der Drehwinkel α_V des Abtastkopfes gegen die Vertikale vergrößert wird und eine erneute kreisförmige Abtastung beginnt.

[0021] Dabei kann ein spiralförmiger Abtastverlauf für den Laserdistanzsensor durchgeführt und die Schrittweite bei der vertikalen Neigung variiert werden.

[0022] Unter Verwendung der gemessenen Abstandswerte A_i , T_{Vi} und der zugehörigen Drehwinkelstellungen α_H , α_V berechnen die programmtechnischen Mittel des Rechners das sich unter dem Abtastkopf befindliche weitgehend kegelförmige Volumen V_{PG} der Prüfgrube.

[0023] Mittels des Laserdistanzsensors können die Distanzen A_i , T_{Vi} des Abtastkopfes von der Geländeoberfläche und von der Wandung der Prüfgrube in einem sehr engen Raster mit den Oberflächenpixeln F_i bzw. den Wandungspixeln V_i abgetastet werden, wobei die Messung mittels der Oberflächenabtastung

und der Grubenabtastung durchgeführt werden.

[0024] An der Prüfstelle, an der im Messfeld von einer Bodenschicht im Straßenbau die Dichte ermittelt wird, wird die Abstavvorrichtung über die Prüfgrube gestellt und eine Oberflächenabtastung durchgeführt, wobei mit der Abstavvorrichtung danach die Geländeoberfläche abgetastet wird.

[0025] Die Abstavvorrichtung kann die Tiefen T_{Vi} zwischen der Laserquelle des Abstavkopfes und der Grubenwandung in einem sehr engen Raster mit vorgegebenen Wandungspixeln V_i abtasten, wobei die Höhe des Abstavkopfes variabel zur Geländeoberfläche einstellbar ist.

[0026] Zur Plausibilitätskontrolle und anschaulichen Darstellung können 3D-Modelle der Prüfgrube auf einem Bildschirm des Rechners generiert werden.

[0027] Die Dichte ρ der Bodensubstanz in der Prüfgrube wird ermittelt, indem die bestimmte Masse m_f durch das in der Prüfgrube mit der Abstavvorrichtung bestimmte Grubenvolumen V_{PGr} mit

$$\rho = m_f/V_{PGr} \quad (III)$$

geteilt wird.

[0028] In der Einrichtung zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz in der Prüfbodengrube ist eine lasergestützte Abstavvorrichtung, eine Steuereinheit und ein an die Steuereinheit angeschlossener Rechner vorgesehen, wobei die Abstavvorrichtung mit der Steuereinheit über elektrische Signal- und Versorgungsleitungen verbunden ist, wobei gemäß dem Kennzeichenteil des Patentanspruchs 10 die Abstavvorrichtung aus einem Trägergestell und einem daran befestigten Abstavkopf besteht, der im Wesentlichen besteht aus

- einem motorischen Antrieb für eine horizontale Rotation und einem motorischen Antrieb für eine vertikale Rotation,
- einem Laserdistanzsensor zur Erfassung des Abstandes A_i und der Tiefen T_{Vi} und
- einem Winkelsensor zur Erfassung der vertikalen Position sowie einem Winkelsensor zur Erfassung der horizontalen Position des Laserdistanzsensors.

[0029] Das Trägergestell kann in Form eines Dreibeins ausgelegt sein.

[0030] Die Abstavvorrichtung kann für den Abstavkopfes eine Höheneinstellungseinrichtung besitzen, die zur Anpassung des maximalen Messbereiches an die Abstände A_i zur Geländeoberfläche und an die Tiefen T_{Vi} zur Grubenwandung der Prüfgrube dient.

[0031] Der Laserdistanzsensor des Abstavkopfes

kann jeweils die Distanzen A_i , T_{Vi} vom Laserdistanzsensor zu den Messflächen erfassen und nach dem Punktriangulationsprinzip arbeiten.

[0032] Zwischen dem Abstavkopf und dem Trägergestell kann eine mechanische Aufhängung vorgesehen sein, die eine Rotation des Laserdistanzsensors auf horizontaler Ebene und vertikaler Ebene zulässt.

[0033] Die Freiheitsgrade können für die horizontale Ebene mit einem Drehwinkel α_H von 0° bis 360° und für die vertikale Ebene mit einem Drehwinkel α_V 0° bis 90° vorgegeben werden.

[0034] Zur besseren Lokalisierung der Prüfgrube kann wahlweise ein Ring vorab an der Prüfgrube auf die Geländeoberfläche gelegt sein.

[0035] Auf dem Ring können wahlweise Passmarken als Lokalisierungshilfen aufgebracht sein, wobei auch Passmarken direkt in die Geländeoberfläche gesteckt sein können.

[0036] Die Steuereinheit kann einen digitalen Signalprozessor sowie eine Leistungselektronik zur Ansteuerung der Motoren M_V , M_H des Abstavkopfes enthalten, wobei der digitale Signalprozessor die Kommandos des angeschlossenen Rechners verarbeitet und die echtzeitfähige Ansteuerung der Motoren M_V , M_H übernimmt sowie die Messwerte für den Abstand A_i und für die Tiefen T_{Vi} und für die Drehwinkelstellungen α_H , α_V aufgenommen, vorverarbeitet und an den Rechner übermittelt.

[0037] Der Rechner kann ein Standard-Laptop und über eine USB- oder serielle Schnittstelle und eine Leitung mit der Steuereinheit verbunden sein.

[0038] Die Verwendung der Einrichtung zur Bestimmung der Dichte des Bodens bzw. der Bodensubstanz erfolgt bei der Verdichtungsüberprüfung im Erdbau und Geotechnik mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens, wobei die Feuchtdichte und Trockendichte des Bodens als Quotient aus der Feuchtmasse und der Trockenmasse des Bodens und aus dem Volumen V_{PGr} der Prüfgrube bestimmt wird.

[0039] Die Erfindung wird anhand eines Ausführungsbeispiels mittels mehrerer Zeichnungen näher erläutert:

[0040] Es zeigen:

[0041] Fig. 1 eine schematische Darstellung der Einrichtung zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz einer Prüfgrube in Seitenansicht mit einer erfindungsgemäßen Abstavvorrichtung,

[0042] Fig. 2 eine schematische Darstellung des Trägergestells nach Fig. 1 in Draufsicht,

[0043] **Fig. 3** einen schematischen Aufbau des Abtastkopfes der Abtastvorrichtung,

[0044] **Fig. 4** eine schematische Darstellung der Freiheitsgrade des Abtastkopfes,

[0045] **Fig. 5** schematische Darstellungen von Verfahrensschritten zur Bestimmung des Prüfgrubenvolumens, wobei

Fig. 5a eine Oberflächenabtastung ohne Ring,

Fig. 5b einen Aushub der Prüfgrube ohne Ring und

Fig. 5c eine Grubenabtastung ohne Ring darstellen.

[0046] **Fig. 6** schematische Darstellungen von Verfahrensschritten zur Bestimmung des Prüfgrubenvolumens, wobei

Fig. 6a eine Oberflächenabtastung mit Ring,

Fig. 6b einen Aushub der Prüfgrube mit Ring und

Fig. 6c eine Grubenabtastung mit Ring darstellen.

[0047] **Fig. 7** ein Blockschema der versorgungs- und signaltechnischen Verbindungen zwischen Abtastkopf und zugehöriger Steuereinheit und

[0048] **Fig. 8** Darstellungsmöglichkeiten der Prüfgrube auf einem Display, wobei

Fig. 8a eine seitliche perspektivische Ansicht der Prüfgrube und

Fig. 8b eine Draufsicht auf die Prüfgrube zeigen.

[0049] Die in **Fig. 1** dargestellte Einrichtung **10** zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz in der Prüfgrube **4** enthält eine lasergestützte Abtastvorrichtung **1**. Die Abtastvorrichtung **1** besteht aus einem Trägergestell **2**, das einen Abtastkopf **3** mit einem Laser über der Oberfläche **6** der auszumessenden Prüfgrube **4** positioniert. Die Abtastvorrichtung **1** ist mit einer Steuereinheit **16** über elektrische Signal- und Versorgungsleitungen **17** verbunden.

[0050] Das Trägergestell **2** in Form eines Dreibeins, wie in **Fig. 2** gezeigt ist, ist stabil genug ausgelegt, um den Anforderungen im rauen Praxisbetrieb gerecht zu werden. Es bietet genügend Stabilität für einen verwacklungsfreien Betrieb während der Abtastvorgänge. Mittels des Trägergestells **2** kann die Höhe des Abtastkopfes **3** oberhalb der Prüfgrube **4** eingestellt werden. Eine Höheneinstellungseinrichtung **5** des Abtastkopfes **3** dient dabei zur Anpassung des maximalen Messbereiches an die vorgegebenen Tiefen T_{vi} der Grubenwandung der Prüfgrube **4**.

[0051] Der Abtastkopf **3**, wie in **Fig. 1** und **Fig. 3** gezeigt ist, besteht aus elektromotorischen Antrieben **8**, **9**, die einen Laserdistanzsensor **13** horizontal und vertikal bewegen können. Mit Hilfe der Antriebe **8**, **9** kann die Wandung **7** der Prüfgrube **4**, z.B. in Form

von versetzten Kreisen abgetastet werden. Beginnend beim tiefsten Punkt in der Prüfgrube **4**, wobei der Laserstrahl vertikal nach unten gerichtet ist, wird kreisförmig abgetastet, wobei nach einer 360°-Umdrehung der Winkel α_v des Abtastkopfes **3** gegen die Vertikale vergrößert wird und dann eine erneute kreisförmige Abtastung beginnt.

[0052] Auch andere Abtastarten sind möglich. Z.B. kann die Prüfgrube **4** in Form einer Spirale oder vertikaler Halbkreise abgetastet werden.

[0053] Der Abtastkopf **3** besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten, wie in **Fig. 3** und **Fig. 4** gezeigt ist:

1. aus einem motorischen Antrieb **8** für eine horizontale Rotation und einem motorischen Antrieb **9** für eine vertikale Rotation,
2. aus einem Laserdistanzsensor **13** zur Erfassung des Abstandes A_i und der Tiefen T_{vi} und
3. aus einem Winkelsensor **11** zur Erfassung der vertikalen Position sowie einem Winkelsensor **12** zur Erfassung der horizontalen Position des Laserdistanzsensors **13**.

[0054] Der Laserdistanzsensor **13** in den **Fig. 1** und **Fig. 3** erfasst somit jeweils die Distanzen zwischen dem Laserdistanzsensor **13** und den Messflächen **6**, **7** und arbeitet nach dem Punktriangulationsprinzip.

[0055] Eine entsprechende mechanische Aufhängung **15** lässt eine Rotation des Laserdistanzsensors **13** auf horizontaler Ebene **19** und vertikaler Ebene **20** zu. Zur Bewegung in horizontaler und in vertikaler Richtung dienen jeweils die elektromotorische Antriebe **8**, **9**. Die Freiheitsgrade betragen für die horizontale Ebene bei einem Drehwinkel α_H von 0° bis 360° und für die vertikale Ebene bei einem Drehwinkel α_v von 0° bis 90°, wie in **Fig. 4** gezeigt ist.

[0056] Zur Erfassung der Position des Laserdistanzsensors **13** im Raum dienen je ein Winkelsensor **11**, **12** für die horizontale Ebene **19** und vertikale Ebene **20**.

[0057] Die Steuereinheit **16** koordiniert den Bewegungsablauf des Abtastkopfes **3** und dient zur Erfassung der Sensordaten.

[0058] Die Steuereinheit **16** der Einrichtung **10** ist dabei mit der Abtastvorrichtung **1** verbunden. Sie übernimmt, wie in **Fig. 7** gezeigt ist, die Ansteuerung der Motoren der Antriebe **8**, **9**, das Auslesen der Messwerte des Laserdistanzsensors **13** sowie die Aufnahme der Winkelstellungen α_H , α_v des Laserdistanzsensors **13**. Im Wesentlichen beinhaltet die Steuereinheit **16** einen digitalen Signalprozessor sowie eine Leistungselektronik zur Ansteuerung der Motoren M_v und M_H des Abtastkopfes **3**. Der digitale Signalprozessor verarbeitet die Kommandos eines an-

geschlossenen Rechners **21** und übernimmt die echtzeitfähige Ansteuerung der Motoren M_V und M_H . Weiterhin werden die Messwerte für den Abstand A_i und die Tiefen T_{Vi} sowie die Winkelstellungen α_H , α_V aufgenommen, vorverarbeitet und an den Rechner **21** übermittelt.

[0059] Das Verfahren zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz **14** der Prüfgrube **4** weist folgende Schritte auf:

- Aushub der Bodensubstanz **14** der Prüfgrube **4**, wie in **Fig. 5b** gezeigt ist
- Messung des Volumens V_{PGr} der Prüfgrube **4**,
- Messungen von Masse m_f und Wassergehalt w der ausgehobenen Bodensubstanz und
- Ermittlung der Dichte ρ , z.B. mittels programmtechnischer Mittel eines der Steuereinheit **16** zugeordneten Rechners **21**.

[0060] Erfindungsgemäß werden dabei folgende Schritte durchgeführt:

- eine Oberflächenabtastung als Nullniveauabtastung, bei der ein Laserdistanzsensord **13** die einmarkierte Geländeoberfläche F_{Gr} **6** der Prüfgrube **4** abtastet, und eine Messung des Abstandes A_i zwischen Abtastkopf **3** und die Geländeoberfläche **6** rasterunterteilten Oberflächenpixeln F_i und somit der Geländeoberfläche F_{Gr} **6** vor dem Aushub der Prüfgrube,
- eine Grubenabtastung der Wandung **7** der Prüfgrube **4** nach dem Aushub der Prüfgrube **4** und eine Messung der Tiefen T_{Vi} von der Wandung **7** rasterunterteilenden Wandungspixeln V_i vom Abtastkopf **3** aus und
- Bestimmung des Grubenvolumens V_{PGr} aus den gemessenen Distanzen A_i und T_{Vi} und der einmarkierten Geländeoberfläche (**6**, F_{Gr}) nach einer Gleichung

$$V_{PGr} = f(A, T_{Vi}, F_{Gr}) \quad (I)$$

und

- Ermittlung der Dichte ρ der Bodensubstanz **14** aus Grubenvolumen V_{PGr} , Masse m der Bodensubstanz **14** und Wassergehalt w nach einer Gleichung:

$$\rho = f(V_{PGr}, m_f, w) \quad (II).$$

[0061] Die Steuereinheit **16** regelt die Art und Weise der Abtastung, z.B. eine kreisförmige oder spiralförmige Abtastung, und die Geschwindigkeit der elektromotorischen Antriebe **8**, **9**. Der Abtastkopf **3** rotiert z.B. auf horizontaler Ebene **19** in einem Drehwinkel α_H von 0° bis 360° und wird nach jeder horizontalen Umdrehung schrittweise in einem Drehwinkel α_V von 0° bis 90° vertikal geneigt. Somit ergibt sich z.B. eine Abtastung mit konzentrischen Kreisen für den Laserdistanzsensord **13**, der lotrecht unter dem Abtastkopf **3**, was meistens dem tiefsten Punkt/Rasterpixel der

Prüfgrube **4** entspricht, mit der Abtastung beginnt. Die Schrittweite bei der vertikalen Neigung ist variabel und kann z.B. einen Schrittwinkel von $0,5^\circ$ betragen.

[0062] Weiterhin erfasst die Steuereinheit **16** die Abstandsdaten des Laserdistanzsensors **13** zusammen mit den Positionsdaten der Winkelsensoren **11**, **12**. Zwecks weiterer Datenverarbeitung werden die Messwerte der Winkelsensoren **11**, **12** an den Rechner **21** übertragen, wie in **Fig. 7** gezeigt ist.

[0063] Die Steuereinheit **16** übernimmt des Weiteren die Kontrolle des Abtastkopfes **3** hinsichtlich des normalen Betriebs und unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Aspekte – z.B. Eigenüberwachung, Störfallerkennung, Sicherheitsabschaltung usw. -.

[0064] Der Rechner **21**, z.B. ein Standard-Laptop, ist über eine USB- oder serielle Schnittstelle und eine Leitung **24** mit der Steuereinheit **16** verbunden. Die programmtechnischen Mittel des Rechners **21** senden Kommandos zum Konfigurieren und Starten zur Ausführung einer Abtastung an die Steuereinheit **16**. Die Steuereinheit **16** sendet die vorverarbeiteten Messwerte zwecks Speicherung und Weiterverarbeitung an den Rechner **21**. Unter Verwendung der Abstandswerte A_i und Tiefen T_{Vi} und der zugehörigen Winkelstellungen α_H , α_V berechnen die programmtechnischen Mittel des Rechners **21** das sich unter dem Abtastkopf **3** befindliche weitgehend kegelförmige Volumen V_{PGr} . Aus den Messwerten der Oberflächenabtastung vor dem Aushub der Prüfgrube **4** und den Messwerten der Grubenwandungsabtastung nach dem Aushub der Prüfgrube **4** berechnen die programmtechnischen Mittel das Volumen V_{PGr} der Prüfgrube **4**.

[0065] Zur strukturierten Verwaltung der Messreihen werden diese innerhalb einer Datenbank abgelegt.

[0066] Die Erfindung wird für die Bestimmung der Dichte des Bodens bzw. der Bodensubstanz bei der Verdichtungsüberprüfung im Erdbau und Geotechnik eingesetzt, da die Feuchtdichte und Trockendichte des Bodens der Quotient aus der Feuchtmasse und der Trockenmasse des Bodens und dem Volumen V_{PGr} der Prüfgrube **4** ist.

[0067] Das Verfahren zeichnet sich gegenüber den herkömmlichen Verfahren zur Ausmessung von Prüfgruben **4** dadurch aus, dass es größere Grubenvolumen und diese mit größerer Präzision ausmessen kann.

[0068] Mittels Laserabtastung wird dabei der Abstand A_i des Abtastkopfes **3** von der Oberfläche **6** und die Tiefen T_{Vi} des Abtastkopfes **3** von der Gruben-

wandung **7** in einem sehr engen Raster mit den Oberflächenpixeln F_i bzw. den Wandungspixeln V_i aufgemessen. Aus den Distanzmessungen wird dann das Volumen V_{PG} der Prüfgrube **4** berechnet. Die Messung besteht somit aus einer Oberflächenabtastung – einer Nullniveauabtastung – und einer Grubenabtastung.

[0069] Das Messverfahren zur Bestimmung des Volumens V_{PG} der Prüfgrube **4** wird im Regelfall nicht alleine angewendet, sondern ist Teil der Ermittlung der Dichte ρ der Bodensubstanz. Nachfolgend wird deshalb der Ablauf zur Ermittlung der Dichte ρ des Bodensubstanz in Schritten erläutert, in dem die Anwendung des Messverfahrens nach den [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) erläutert wird,

1. An der Prüfstelle, an der im Messfeld einer Bodenschicht im Straßenbau die Dichte ρ gemessen wird, wird die Abtastvorrichtung **1** über die Prüfgrube **4** gestellt und eine Oberflächenabtastung – eine Nullniveauabtastung –, wie in den [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) gezeigt ist, mit der Erfassung der Abstände A_i durchgeführt. Dabei tastet die Abtastvorrichtung **1** die vorhandene Geländeoberfläche **6** ab, wie in den [Fig. 5a](#) und [Fig. 6a](#) gezeigt ist. Die Oberflächenabtastung kann über den späteren Rand der Prüfgrube **4** beispielsweise um mehr als etwa fünf Zentimeter hinausreichen. Bei der Oberflächenabtastung ist der Abtastkopf **3** der Abtastvorrichtung **1** ca. zwanzig bis sechzig Zentimeter über der Geländeoberfläche **6** angeordnet. Zur besseren Lokalisierung der Prüfgrube **4** kann wahlweise ein Ring **18**, z.B. aus Aluminium oder Stahl, mit einem Innendurchmesser von ca. zwanzig bis achtzig Zentimeter vorab an der Prüfgrube **4** auf die Geländeoberfläche **6** gelegt werden, wie in [Fig. 6a](#) gezeigt ist. Auf dem Ring **18** können wahlweise auch Passmarken **22** als Lokalisierungshilfen aufgebracht sein. Die Passmarken **22** können auch direkt in die Geländeoberfläche **6** gesteckt werden und die Abtastung erleichtern.

2. Eine Prüfgrube **4**, die zwischen null und fünfzig Zentimeter tief sein kann, wird in Anlehnung an die Vorgaben der DIN 18125 ausgehoben und die entnommene Bodensubstanz in einen Behälter **23** gefüllt ([Fig. 5b](#) und [Fig. 6b](#)). Innerhalb des Ringes **18**, sofern der Ring **18** verwendet wird, wird der Boden bis zu einer Tiefe von etwa $0,5d$ bis $1,3d$, wobei d der Prüfgrubendurchmesser an der Oberfläche **6** der Prüfgrube **4** ist, ausgehoben. Die Wandung **7** der Prüfgrube **4** wird zur Vermeidung von Abtastschatten bei aus der Wandung **7** herausstehenden Steinen mit einem Böschungswinkel γ von nicht mehr als etwa 70° gegen die Horizontale geneigt ausgebildet. Größere Bodenkörner, die in vorzugsweise horizontaler Richtung zu weit in die Prüfgrube **4** hineinragen und Abtastschatten hervorrufen, werden beseitigt. An den Wandungen **7** haftender loser Boden wird auch zu der bereits im Behälter **23** befindlichen Bodensub-

stanz gegeben. Sofern ein Ring **18** auf die Oberfläche **6** gelegt wird, darf der Aushub der Prüfgrube **4** nicht bis unter den Ring **18** erfolgen. Der Aushub erfolgt – wie es bei den Dichtemessverfahren im Erdbau üblich ist – mit kleineren handlichen Gerätschaften.

3. Die Masse m_f der Bodensubstanz und deren Wassergehalt w werden wie bisher nach DIN 18125 gemäß dem Stand der Technik bestimmt.

4. Die Abtastvorrichtung **1** wird über die Prüfgrube **4** gestellt und die Wandung **7** der Prüfgrube **4** abgetastet, wie in [Fig. 1](#) bzw. [Fig. 5c](#) und [Fig. 6c](#) gezeigt ist. Die Abtastvorrichtung **1** tastet dabei die Grubenwandung **7** in einem sehr engen Raster, dessen Wandungspixel V_i etwa ca. 1 mm^2 groß sind, ab und misst die Tiefen T_{Vi} zwischen der Laserquelle des Abtastkopfes **3** und der Grubenwandung **7**. Bei der Abtastung der Grubenwandung **7** braucht sich der Abtastkopf **3** nicht unbedingt genau an der gleichen Stelle zu befinden wie vorher bei der Oberflächenabtastung. Die Höhe des Abtastkopfes **3** zur Oberfläche **6** kann variabel eingestellt werden. Der Abtastkopf **3** kann sich so hoch über der Prüfgrube **4** befinden, dass der Bereich um die Prüfgrube **4**, der Grubenrand, noch abgetastet werden kann.

5. Aus den Distanzmessungen mit A_i und T_{Vi} und der Geländeoberfläche FG wird mittels programmtechnischer Mittel im Rechner **21** das Volumen V_{PG} der Prüfgrube **4** ermittelt.

6. Zur Plausibilitätskontrolle und anschaulichen Darstellung wird zusätzlich ein 3D-Modell der Prüfgrube **4** generiert. Die programmtechnischen Mittel des Rechners **21** generieren dabei Darstellungen der abgetasteten Oberfläche **6** und der Wandung **7** als 2,5-D-Form sowie Höhenlinien und farblichen Höhendarstellungen, um eine visuelle Kontrollmöglichkeit zu schaffen, inwieweit der Abtastungsvorgang die Realität hinreichend genau genug erfasst hat, wie in den [Fig. 8](#), [Fig. 8a](#) und [Fig. 8b](#) auf dem Bildschirm des zugehörigen Rechners **21** gezeigt ist.

[0070] Die Dichte ρ in der Prüfgrube **4** wird ermittelt, indem die bestimmte Masse m_f durch das mit der Abtastvorrichtung **1** bestimmte Grubenvolumen V_{PG} der Prüfgrube **4** gemäß Gleichung

$$\rho = m_f/V_{PG} \quad (\text{III})$$

geteilt wird.

[0071] Dabei weist das Messverfahren folgende Vorteile auf:

1. Das Volumen V_{PG} der Prüfgrube **4** wird grundsätzlich schneller bestimmt als beim Sand-, Gips- oder Flüssigkeitersatzverfahren,
2. Die Wiederholpräzision des erfindungsgemäßen Messverfahrens ist höher als bei allen herkömmlichen Verfahren,

3. Das erfindungsgemäße Messverfahren ist für jede Bodensubstanz **14** und auch bei gebrochenen Materialien anwendbar.

4. Mit dem erfindungsgemäßen Messverfahren ist auch das Ausmessen von wesentlich größeren Prüfgruben **4** mit einem Durchmesser bis zu ca. sechzig Zentimeter und Tiefen T_{Vi} bis zu ca. fünfzig Zentimeter möglich.

Bezugszeichenliste

1	Abtastvorrichtung
2	Trägergestell
3	Abtastkopf
4	Prüfgrube
5	Höheneinstellungseinrichtung
6	Geländeoberfläche
7	Wandung
8	vertikaler elektromotorischer Antrieb
9	horizontaler elektromotorischer Antrieb
10	Einrichtung
11	vertikaler Winkelsensor
12	horizontaler Winkelsensor
13	Laserdistanzsensor
14	Bodensubstanz
15	Aufhängung
16	Steuereinheit
17	Signal- und Verbindungsleitungen
18	Ring
19	Horizontale Ebene
20	Vertikale Ebene
21	Rechner
22	Passmarken
22'	Passmarken
23	Behälter
24	Leitung
V_{PGr}	Grubenvolumen
F_{Gr}	Geländeoberfläche
m_f	Masse
ρ	Dichte
w	Wassergehalt
A_i	Abstand
T_{Vi}	Tiefe
F_i	Oberflächenpixel
V_i	Wandungspixel
d	Grubendurchmesser
γ	Böschungswinkel
α_H	horizontaler Drehwinkel
α_V	vertikaler Drehwinkel
M_V	vertikaler Motor
M_H	horizontaler Motor
W_V	Winkelsensor
W_H	Winkelsensor

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz **(14)** einer Prüfgrube **(4)** mit folgenden Schritten:

- Aushub der Bodensubstanz **(14)** der Prüfgrube **(4)**,
- Messung des Volumens (V_{PGr}) der Prüfgrube **(4)**,
- Messungen von Masse (m_f) und Wassergehalt (w) der ausgehobenen Bodensubstanz **(14)** und
- Ermittlung der Feucht- oder Trockendichte (ρ), durch folgende Schritte gekennzeichnet,
- eine Oberflächenabtastung als Nullniveauabtastung, bei der eine einmarkierte Geländeoberfläche **(6, F_{Gr})** der Prüfgrube **(4)** abgetastet wird, und eine Messung des Abstandes (A_i) zwischen Abtastkopf **(3)** und die Geländeoberfläche **(6)** rasterunterteilenden Oberflächenpixeln (F_i) und somit der Geländeoberfläche **(6, F_{Gr})** vor dem Aushub der Prüfgrube **(4)**,
- eine Grubenabtastung der Wandung **(7)** der Prüfgrube **(4)** nach dem Aushub der Prüfgrube **(4)** und eine Messung der Tiefen (T_{Vi}) von die Wandung **(7)** rasterunterteilenden Wandungspixeln (V_i) vom Abtastkopf **(3)** aus,
- Bestimmung des Grubenvolumens (V_{PGr}) aus den gemessenen Abständen (A_i) und Tiefen (T_{Vi}) und der einmarkierten Geländeoberfläche **(6, F_{Gr})** nach einer Gleichung

$$V_{PGr} = f(A_i, T_{Vi}, F_{Gr}) \quad (I)$$

und

- Ermittlung der Dichte (ρ) der Bodensubstanz **(14)** aus Grubenvolumen (V_{PGr}), Masse (m_f) der Bodensubstanz **(14)** und Wassergehalt (w) nach einer Gleichung:

$$\rho = f(V_{PGr}, m_f, w) \quad (II).$$

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Abtastung der Prüfgrube **(4)** mit einem Laserdistanzsensor **(13)** und mit Hilfe von ihm bewegbaren Antrieben **(8, 9)**, beginnend beim tiefsten Punkt in der Prüfgrube **(4)**, wobei ein Laserstrahl vertikal nach unten gerichtet ist, kreisförmig durchgeführt wird, wobei nach einem horizontalen Drehwinkel (α_H) mit einer 360°-Umdrehung der vertikale Drehwinkel (α_V) des Abtastkopfes **(3)** gegen die Vertikale vergrößert wird und eine erneute kreisförmige Abtastung beginnt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass ein spiralförmiger Abtastverlauf für den Laserdistanzsensor **(13)** durchgeführt und die Schrittweite bei der vertikalen Neigung kontinuierlich variiert wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass unter Verwendung der gemessenen Abstandswerte (A_i, T_{Vi}) und der zugehörigen Drehwinkelstellungen (α_H, α_V) die programmtechnischen Mittel des Rechners **(21)** das sich unter dem Abtastkopf **(3)** befindliche weitgehend kegelförmige Volumen (V_{PGr}) der Prüfgrube **(4)** berechnen.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass mittels der lasergestützten Abtastung die Distanzen (A_i , T_{vi}) des Abtastkopfes (3) von der Oberfläche (6) und von der Wandung (7) der Prüfgrube (4) in einem sehr engen Raster mit den Oberflächenpixeln (F_i) bzw. den Wandungspixeln (V_i) abgetastet werden, wobei die Messungen mittels der Oberflächenabtastung und der Grubenabtastung durchgeführt werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass an der Prüfzelle, an der im Messfeld von einer Bodenschicht im Straßenbau die Dichte ermittelt wird, die Abtastvorrichtung (1) über die Prüfgrube (4) gestellt und eine Oberflächenabtastung durchgeführt wird, wobei die Abtastvorrichtung (1) die Geländeoberfläche (6) abtastet.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Abtastvorrichtung (1) die Tiefen (T_{vi}) zwischen der Laserquelle des Abtastkopfes (3) und der Grubenwandung (7) in einem sehr engen Raster mit den vorgegebenen Wandungspixeln (V_i) abtastet, wobei die Höhe des Abtastkopfes (3) variabel zur Geländeoberfläche (6) einstellbar ist.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass zur Plausibilitätskontrolle und anschaulichen Darstellung 3D-Modelle der Prüfgrube (4) auf einem Bildschirm des Rechners (21) generiert werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Dichte (ρ) der Bodensubstanz (14) in der Prüfgrube (4) ermittelt wird, indem die bestimmte Masse (m_r) durch das in der Prüfgrube (4) mit der Abtastvorrichtung (1) bestimmte Grubenvolumen (V_{pGr}) mit

$$\rho = m_r/V_{pGr} \quad (\text{III})$$

geteilt wird.

10. Einrichtung zur Ermittlung der Dichte der Bodensubstanz (14) in einer Prüfgrube (4) mit einer lasergestützten Abtastvorrichtung (1), einer Steuereinheit (16) und einem an die Steuereinheit (16) angeschlossenen Rechner (21), wobei die Abtastvorrichtung (1) mit der Steuereinheit (16) über elektrische Signal- und Versorgungsleitungen (17) verbunden ist,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Abtastvorrichtung (1) aus einem Trägergestell (2) und einem Abtastkopf (3) besteht, der im Wesentlichen besteht aus

– einem motorischen Antrieb (8) für eine horizontale Rotation und einem motorischen Antrieb (9) für eine vertikale Rotation,

– einem Laserdistanzsensor (13) zur Erfassung des Abstandes (A_i) zu einer festgelegten Geländeoberfläche (6) und der Tiefen (T_{vi}) zur Wandung der Prüfgrube (4) und

– einem Winkelsensor (11) zur Erfassung der vertikalen Position sowie einem Winkelsensor (12) zur Erfassung der horizontalen Position des Laserdistanzsensors (13).

11. Einrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Trägergestell (2) in Form eines Dreibeins ausgelegt ist.

12. Einrichtung nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Abtastvorrichtung (1) für den Abtastkopf (3) an dem Trägergestell (2) eine Höheneinstellungseinrichtung (5) besitzt, die zur Anpassung des maximalen Messbereiches an die Abstände (A_i) zur Geländeoberfläche (6) und an die Tiefen (T_{vi}) zur Grubenwandung (7) der Prüfgrube (4) dient.

13. Einrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserdistanzsensor (13) jeweils die Distanzen (A_i , T_{vi}) vom Laserdistanzsensor (13) zu den Messflächen (6, 7) erfasst und nach dem Punktriangulationsprinzip arbeitet.

14. Einrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen Abtastkopf (3) und Trägergestell (2) eine mechanische Aufhängung (15) vorgesehen ist, die eine Rotation des Laserdistanzsensors (13) auf horizontaler Ebene (19) und vertikaler Ebene (20) zulässt.

15. Einrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Freiheitsgrade für die horizontale Ebene (19) mit einem Drehwinkel (α_H) von 0° bis 360° und für die vertikale Ebene (20) mit einem Drehwinkel (α_V) 0° bis 90° vorgegeben sind.

16. Einrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass zur besseren Lokalisierung der Prüfgrube (4) wahlweise ein Ring (18) vorab an der Prüfgrube (4) auf die Geländeoberfläche (6) gelegt ist.

17. Einrichtung nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass auf dem Ring (18) wahlweise Passmarken (22) als Lokalisierungshilfen aufgebracht sind, wobei auch Passmarken (22') direkt in die Geländeoberfläche (6) gesteckt sind.

18. Einrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuereinheit (16) einen digitalen Signalprozessor sowie eine Leistungselektronik zur Ansteuerung der Motoren (M_V , M_H) des Abtastkopfes (3) enthält, wobei der digitale Signalprozessor die Kommandos des angeschlosse-

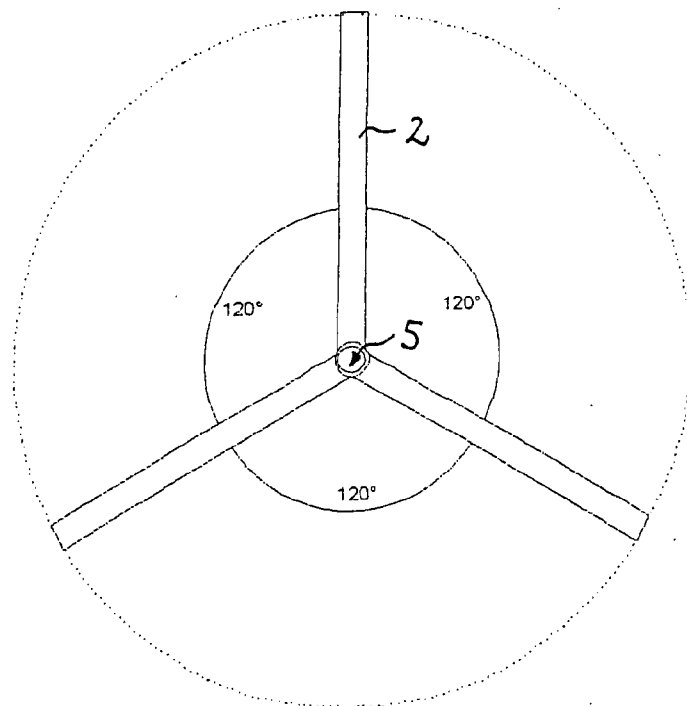
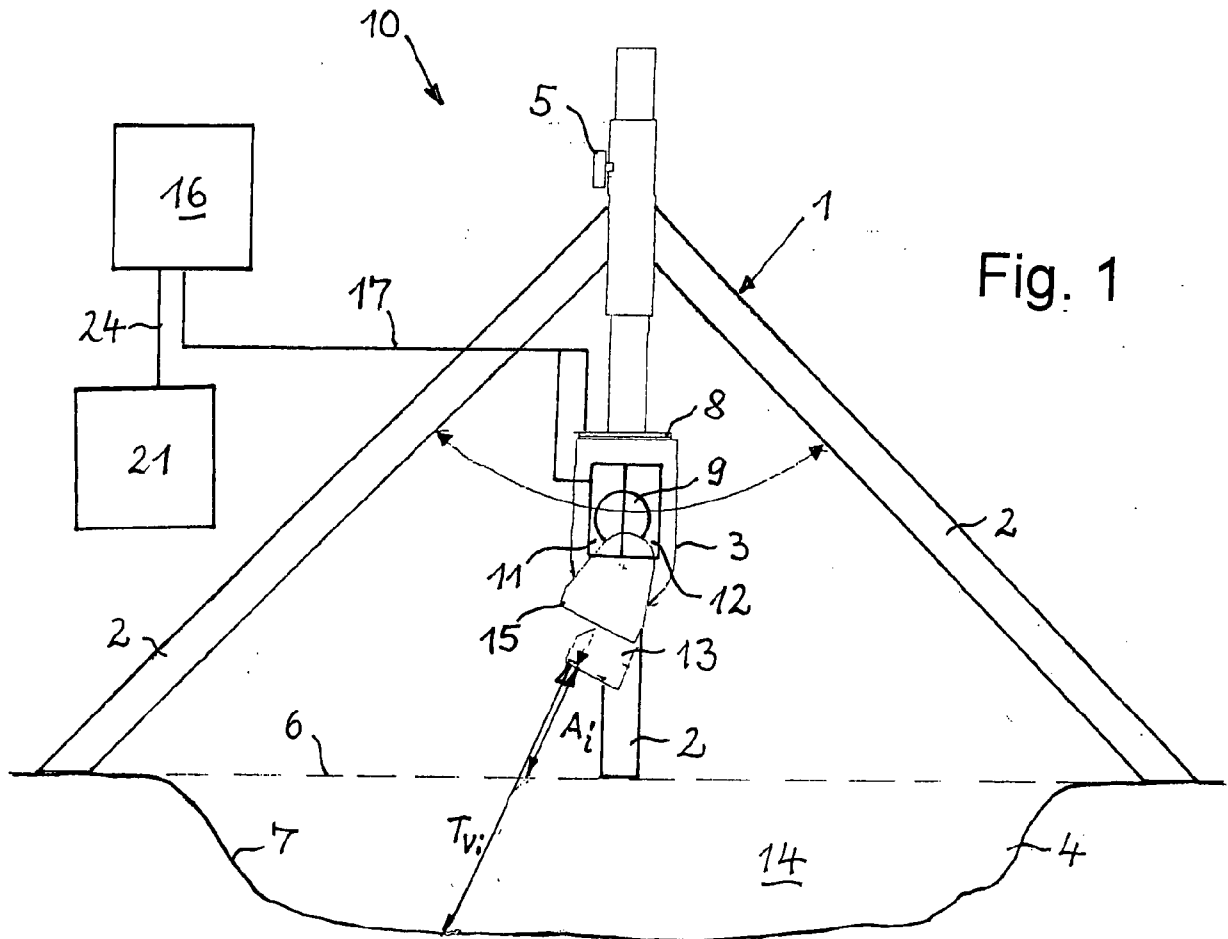
nen Rechners (21) verarbeitet und die echtzeitfähige Ansteuerung der Motoren (M_V , M_H) übernimmt sowie die Messwerte für den Abstand (A_i) und für die Tiefen (T_{Vi}) sowie für die Drehwinkelstellungen (α_H , α_V) aufgenommen, vorverarbeitet und an den Rechner (21) übermittelt.

19. Einrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der Rechner (21) ein Standard-Laptop und über eine USB- oder serielle Schnittstelle und eine Leitung (24) mit der Steuereinheit (16) verbunden ist.

20. Verwendung der Einrichtung (10) zur Ermittlung der Dichte (ρ) der Bodensubstanz (14) nach Anspruch 10 bei der Verdichtungsüberprüfung im Erdbau und Geotechnik unter Einsatz des Verfahrens nach Anspruch 1, wobei die Feuchtdichte und Trockendichte des Bodens als Quotient aus der Feuchtmasse und der Trockenmasse des Bodens und aus dem Volumen (V_{PGr}) der Prüfgrube (4) bestimmbar ist.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



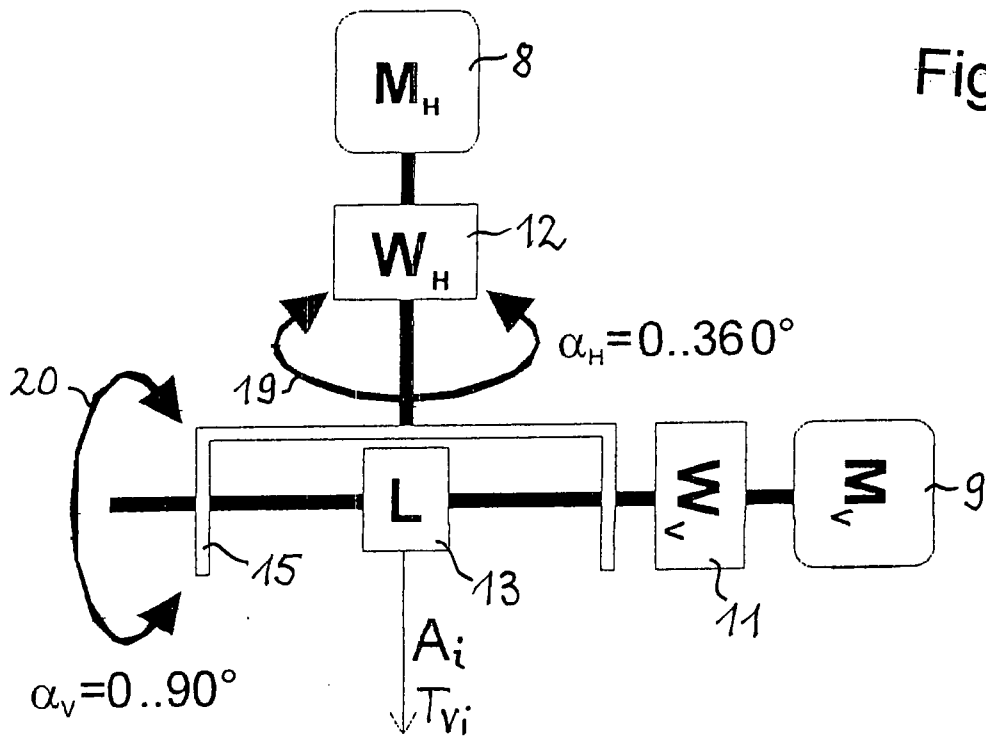


Fig. 3

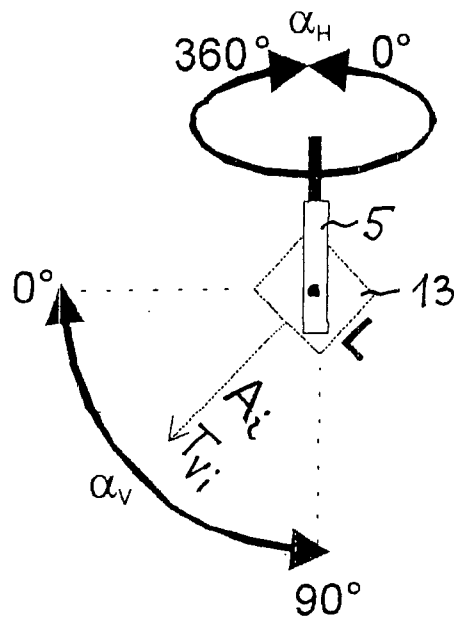


Fig. 4

Fig. 5

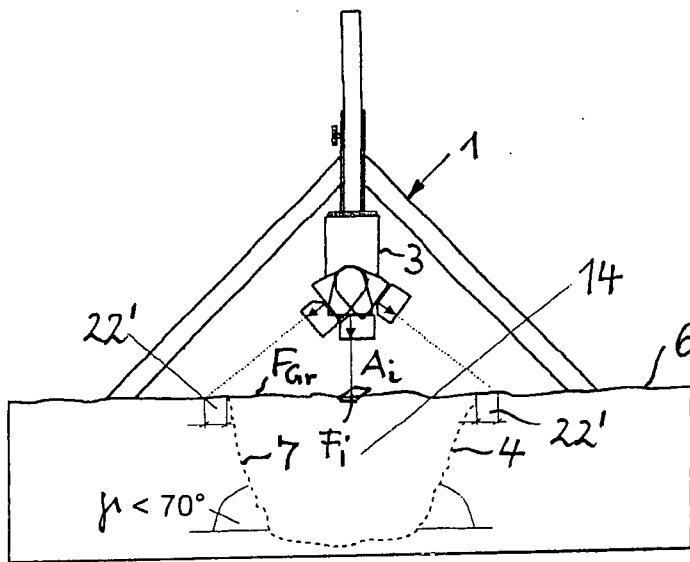


Fig. 5a

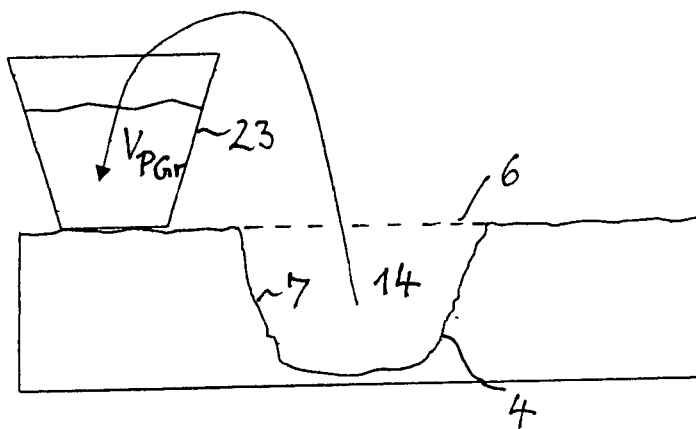


Fig. 5b

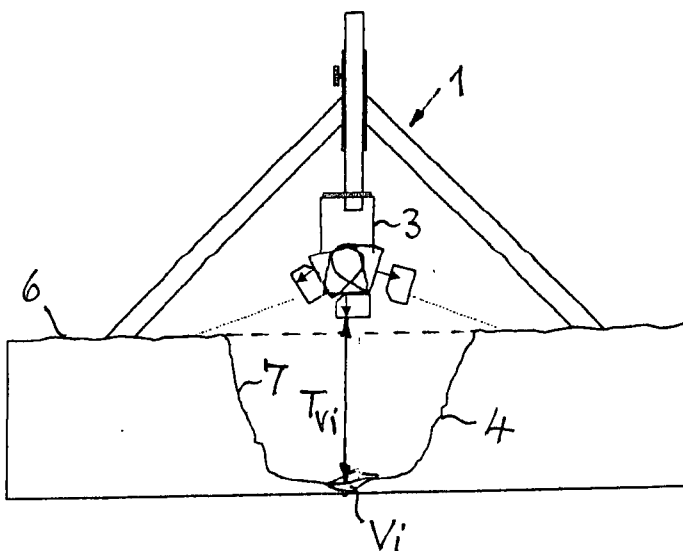


Fig. 5c

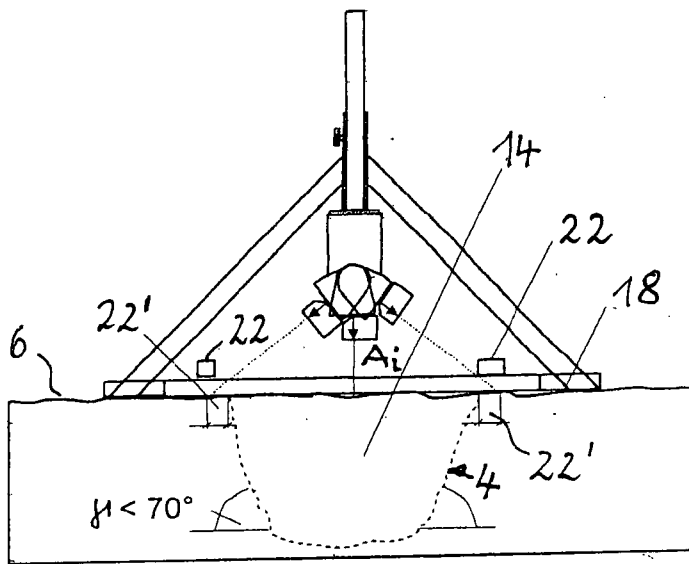


Fig. 6

Fig. 6a

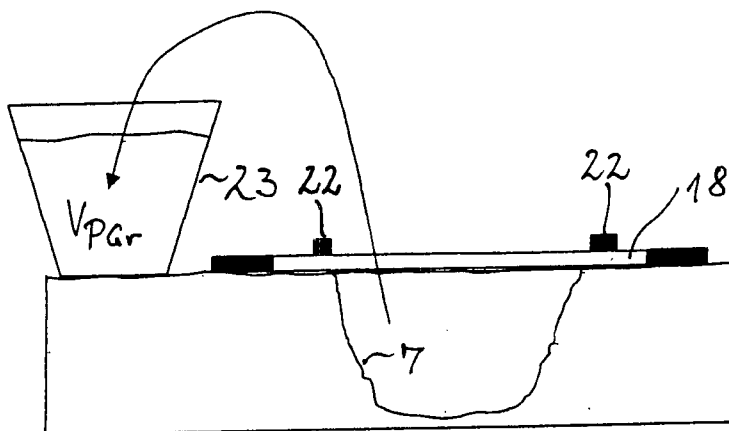


Fig. 6b

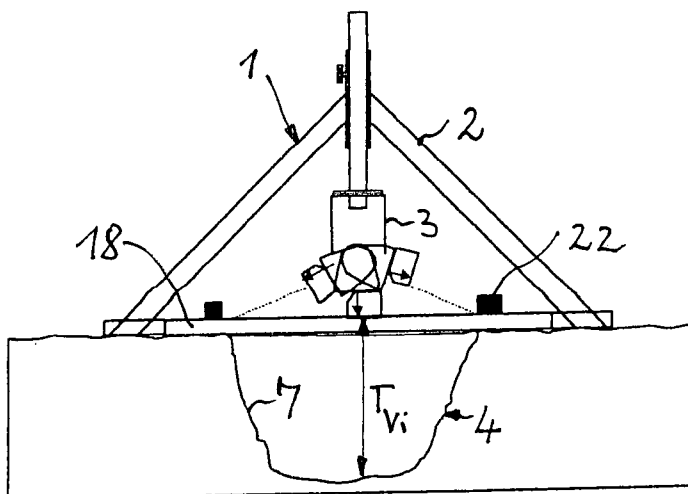


Fig. 6c

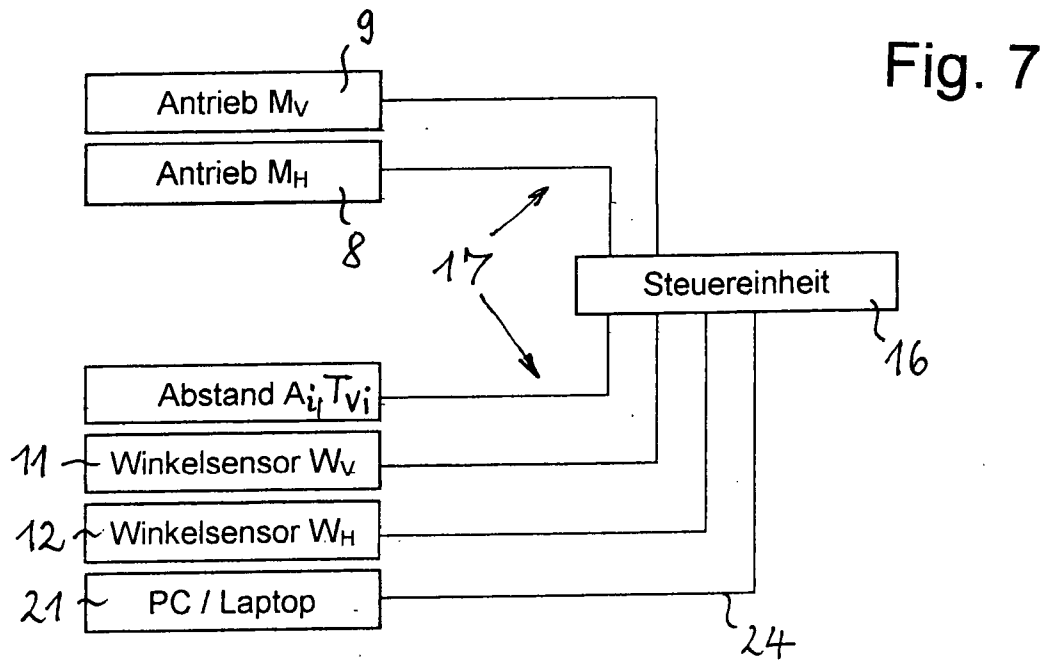


Fig. 8

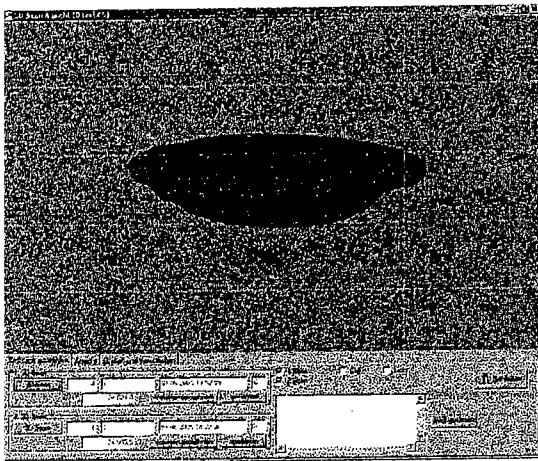


Fig. 8a

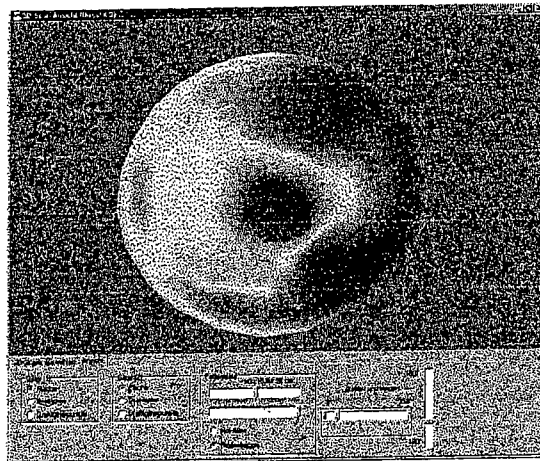


Fig. 8b