

Erddruckmessung in einer Sandkiste nach EN 489

Earth pressure measurement in a sandbox according to EN 489

Ingo Weidlich
ingo.weidlich@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

Kurzfassung

Für die Untersuchung des Interaktionsverhaltens zwischen Rohrleitungen und Boden wurden in der Vergangenheit oft Sandkisten verwendet, in denen Rohre in ein Bettungsmaterial eingebaut wurden und in experimentellen Versuchsreihen das bodenmechanische Kontaktverhalten studiert wurde. Es wurde oft davon ausgegangen, dass es sich bei der Verwendung von Rohren mit handelsüblichen Durchmessern um eine Versuchsrandbedingung handelt, in der Maßstabeffekte weitgehend vernachlässigt werden können. Dabei kann eine Sandkiste der Eigenschaft, dass eine Leitung ein Linienbauwerk ist, kaum Rechnung tragen. Der Grund hierfür liegt vorrangig in Spannungsumlagerungen, die sich in Sandkisten aufgrund der begrenzten Abmessungen ausbilden. An der HafenCity Universität wurden Erddruckmessungen in einer Sandkiste für Normversuche nach EN489 vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erddrücke von der Position des Messpunktes und den Einbaubedingungen abhängig sind. Die Ursache hierfür wird in der Ausbildung einer Gewölbewirkung vermutet.

Abstract

In the past, sand boxes were often used to investigate the interaction behavior between pipes and soil. Pipes were installed in a bedding material and the soil mechanical contact behavior was studied in experimental test series. It was assumed that the use of pipes with commercial diameters is an experimental boundary condition in which scale effects can be largely neglected. In this context, a sandbox can hardly account for the fact that a pipeline is a line structure. The reason for this lies primarily in stress redistributions, which develop differently in sandboxes than in situ due to the limited dimensions. At HafenCity University, earth pressure measurements were carried out in a sand box for standard tests according to EN489. The results show that the earth pressures are dependent on the position and the installation conditions. The reason for this is assumed to be the formation of an arching effect.

Einleitung

Im Fernwärmeleitungsbau werden gerade Rohre als Stangenware auf die Baustelle geliefert und dort untereinander und mit ebenfalls werksseitig vorgefertigten Formteilen, wie zum Beispiel Bögen und Abzweigen, verbunden. Die Verbindungen sind daher ein wesentliches Element eines jeden Wärmenetzes. Bei allen Komponenten eines Fernwärmerohrleitungssystems müssen zunächst die Mediumrohre kraftschlüssig verbunden werden, danach wird die Ummantelung vermufft und der dabei entstehende Zwischenraum wird vor Ort nachgedämmt, damit eine durchgängige Dämmung des Rohrsystems gewährleistet ist. Es wird zwischen kraftschlüssigen Muffensystemen mit Abdichtung vor und nach der Dämmung, sowie stoffschlüssige Muffensysteme mit Abdichtung vor der Dämmung unterschieden (FW 401 T6).

Introduction

In district heating pipeline construction, straight pipes are delivered to the construction site as bar element, where they are connected to each other and to fittings that are also prefabricated at the factory, such as bends and branches. The connections are therefore an essential element of any heating network. In all components of a district heating piping system, the service pipes must first be connected together, after which the casing is installed and the resulting gap is insulated on site to ensure continuous insulation of the piping system. A distinction is made between joint systems with sealing before and after insulation, and substance-locked joint systems with sealing before insulation (FW 401 T6).

Nach der Inbetriebnahme sind die Verbindungen den Temperaturlasten und den daraus entstehenden Verformungen aus dem Betrieb ausgesetzt. Hierzu gehört die Erwärmung, die aus der Temperaturerhöhung zu erwartende radiale Aufweitung und thermisch induzierte Verschiebungen in Richtung der Rohrachse und in lateraler Richtung zur Rohrachse. Die Verbindung ist im Gesamtsystem eingebunden, sodass die Verschiebungen einer Verbindung von der Position im Netz abhängen. Hierdurch erfährt letztlich jede Verbindung eine individuelle Belastung. Für die Beschreibung des Belastungskollektivs kommt erschwerend hinzu, dass sich moderne Betriebsweisen von Wärmenetzen teilweise stark von den klassischen Betriebsweisen der Vergangenheit unterscheiden. So kann die volatile Einspeisung von erneuerbarer Wärme zu höheren Wechsellasten führen, während allgemein der Trend fallender Betriebstemperaturen zu verzeichnen ist (Weidlich 2015).

Die Verbindungen müssen alle Betriebsszenarien bei anhaltender Dichtheit und allen auftretenden Kräften sicher widerstehen. Da Fernwärmeleitungen als erdverlegte Systeme konzipiert sind, spielen die im Graben auftretenden Bettungsreaktionskräfte im Betrieb dabei eine große Rolle. Aus der Relativverschiebung infolge der thermischen Ausdehnung des Leitungsnetzes und dem umgebenden Bettungsmaterial ergeben sich Reibungskräfte in Rohrachsrichtung und in den Bogen- und Abzweigbereichen Bettungsreaktionskräfte aus der lateralen Bewegung. Die lateralen Bettungsreaktionskräfte werden an vielen Stellen durch den Einsatz von Dehnpolstern minimiert (Wolf et al. 2012). Die auftretenden Reibungskräfte sind daher im Belastungskollektiv der Verbindung vorrangig zu bewerten.

Damit ein zuverlässiger Betrieb gewährleistet werden kann, werden Verbindungstypen vor dem Einbringen in den Markt Belastungstests unterzogen. Der vorrangigen Bedeutung der Reibungskraft im Graben wird durch eine spezielle Erddruckprüfung Rechnung getragen, die nach EN 489 genormt ist (EN 489). Bei dieser Prüfung wird in einer Sandkiste mit definiertem Erdstoff das Verbindungselement in Achsrichtung mit einer zyklischen Zwangsverschiebung beaufschlagt. Der Initialspannungszustand bestimmt dabei die Größenordnung der zu erwartenden Belastung. Die Vorgaben für den Initialspannungszustand beschränken sich auf den Sandeinbau in die Kiste mit einer Mindestbettung von 300 mm bis zur Sohle des Prüflings und einer Mindestüberdeckung von 300 mm über der Sohle des Prüflings,

After commissioning operation start-up, the joints are exposed to temperature loads and the resulting deformations. This includes heating, the radial expansion and thermally induced displacements in the direction of the pipe axis and in the lateral direction to the pipe axis. The joint is integrated in the overall system, so that the displacements of a joint depend on its position in the network. As a result, each connection ultimately experiences an individual load. The description of the load spectrum is complicated by the fact that modern modes of operation of heating networks differ from the classic modes of operation of the past. For example, the volatile feed-in of renewable heat can lead to higher alternating loads, while there is a general trend of reducing operating temperatures (Weidlich, 2015).

The joints must safely withstand all operating scenarios with continued tightness during all forces encountered. Since district heating pipelines are designed as buried systems, the bedding reaction forces occurring in the trench during operation play a major role in this regard. The relative displacement due to the thermal expansion of the pipeline network and the surrounding bedding material results in friction forces in the pipe axis direction and in the bend and branch areas in bedding reaction forces from the lateral movement. The lateral bedding reaction forces are minimized at many locations by the use of expansion pads (Wolf et al. 2012). The frictional forces that occur must therefore be taken as a priority in the load spectrum of the joint.

To ensure reliable operation, joint types are subjected to load tests before they are introduced to the market. The primary importance of the frictional force in the trench is taken into account by a special earth pressure test, which is standardized according to EN 489 (EN 489). In this test, a cyclic forced displacement is applied to the joint test specimens in the axial direction in a sand box with defined bedding material. The initial stress state determines the magnitude of the expected load. The specifications for the initial stress condition are limited to the sand installation in the box with a minimum bedding of 300 mm up to the bottom of the test specimen and a minimum cover of 300 mm above the bottom of the test specimen, related to the straight pipe and not to the joint. In total, a compressive stress at the crown of the pipe of $(18 \pm 1) \text{ kN/m}^2$ shall be achieved by additional rigid ballast plates. The structure with the minimum dimensions of the sandbox is shown schematically in Figure 1.

bezogen auf das gerade Rohr und nicht auf die Verbindungskonstruktion. Insgesamt soll eine Druckspannung am Rohrscheitel von (18 ± 1) kN/m² durch weitere starre Auflastplatten erreicht werden.

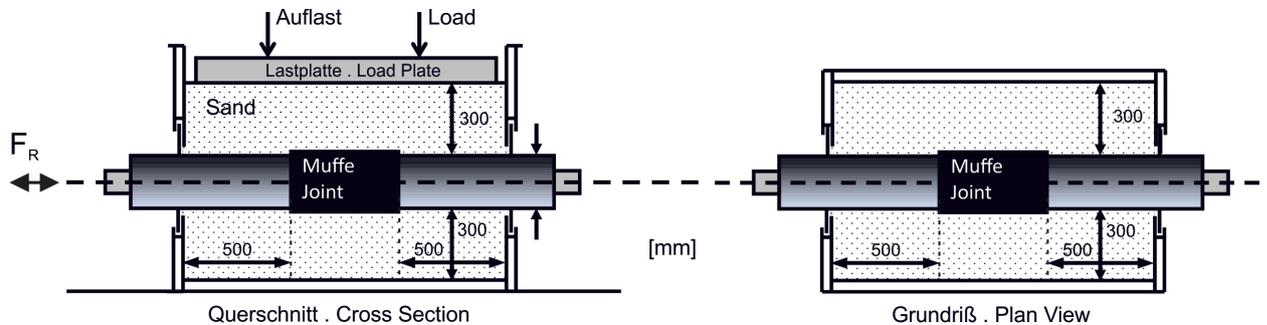


Abbildung 1: Sandkiste nach EN 489, schematisch
Fig.1: Sand box according to EN 489, schematic

Bei Sandkistenversuchen zum Rohr-Boden-Interaktionsverhalten wird meistens davon ausgegangen, dass - Maßstabeffekte weitgehend vernachlässigt werden können, wenn handelsübliche Rohre und Durchmesser verwendet werden. Dabei kann eine Sandkiste der Eigenschaft, dass eine Leitung ein Linienbauwerk ist, kaum Rechnung tragen. Der Grund hierfür liegt vorrangig in Spannungsumlagerungen die sich in Sandkisten aufgrund der begrenzten Abmessungen anders ausbilden als in situ. An der HafenCity Universität wurden Erddruckmessungen in einer Sandkiste für Normversuche nach EN489 vorgenommen, um Kenntnis über den Initialspannungszustand zu erhalten.

Methodisches Vorgehen

In der Studie wurden experimentell Erddruckmessungen in einer Sandkiste für Normversuche nach EN 489 vorgenommen. Die gewählten lichten Abmessungen des Volumens der Sandkiste betragen Länge x Breite x Höhe = 1780 x 800 x 1000 [mm³]. Die Dimensionen liegen in der Größenordnung anderer Apparaturen für diesen Versuch (Smidt 2002). Es wurden drei Erddruckgeber, Typ KDE-PA Tokyo Measuring Instruments 200kPa, in der Sandkiste installiert. Zwei auf dem Boden der Kiste und einer in der Wandung. Die Erddruckgeber wurden zum Ausschalten von Spannungsumlagerungen am Erddruckgeber infolge der Steifigkeitsunterschiede zwischen Erddruckgeber und Sand mit konisch zulaufenden Tellern eingefasst (vgl. WEIDLICH 2008). In Abbildung 2 ist die Lage der Erddruckgeber im Versuchskasten dargestellt.

In sandbox tests on pipe-soil interaction behavior, it is usually assumed that scale effects can be largely neglected if commercially available tubes and diameters are used. However, a sandbox can hardly account for the property that a pipe is a line structure. The reason for this is primarily stress redistributions, which develop differently in sandboxes than in situ due to the limited dimensions. At HafenCity University, earth pressure measurements were carried out in a sandbox for standard tests according to EN489 in order to obtain knowledge about the initial stress state.

Methodical procedure

In the study, earth pressure measurements were made experimentally in a sandbox for standard tests according to EN 489. The selected clear dimensions of the volume of the sandbox were length x width x height = 1780 x 800 x 1000 [mm³]. The dimensions are in the order of magnitude of other apparatus for this test (Smidt 2002). Three earth pressure transducers, type KDE-PA Tokyo Measuring Instruments 200kPa, were installed in the sandbox. Two on the bottom of the box and one in the wall. The earth pressure transducers were enclosed with tapered plates to eliminate stress redistribution at the earth pressure transducer due to differences in stiffness between the earth pressure transducer and the sand (cf. WEIDLICH 2008). Figure 2 shows the position of the earth pressure transducers in the test box.

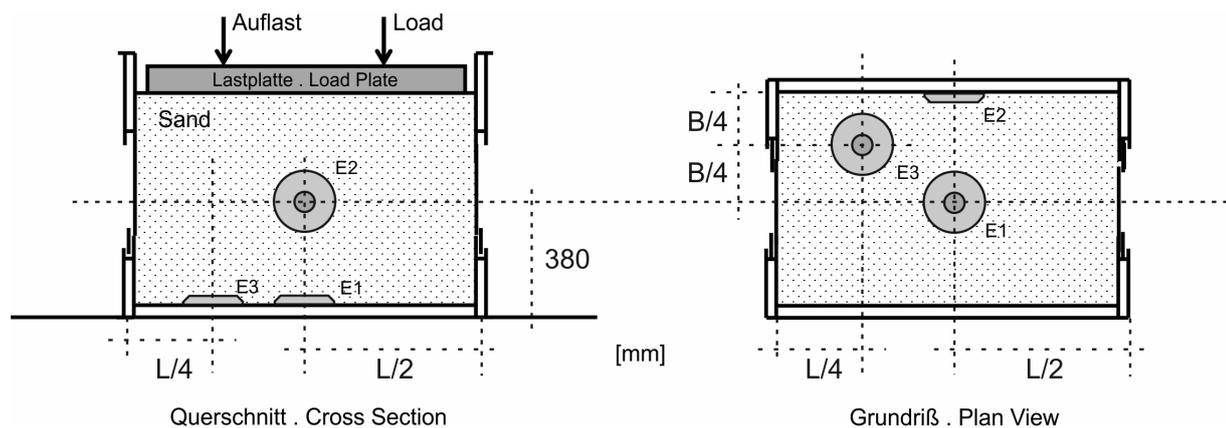


Abbildung 2: Versuchsaufbau, Lage der Erddruckgeber, schematische Darstellung
 Fig.2: Experimental setup, position of the earth pressure sensor, schematic diagram

Für die Versuche wurde ein enggestufter Sand im Körnungsband nach EN 489 gemäß den normativen Anforderungen und den Eigenschaften nach Tabelle 1 eingesetzt.

For the tests, a poor-graded sand in the grain size range according to EN 489 was used in accordance with the normative requirements and the properties given in Table 1.

Eigenschaften / Properties	Zeichen / Symbol	Wert / value
Ungleichförmigkeit Uniformity	C_u	3,4
Krümmung Curvature	C_c	1,2
Lockerste Lagerung Minimum Porosity	n_{max}	0,434
Dichteste Lagerung Maximum Porosity	n_{min}	0,332
Innerer Reibungswinkel Internal friction angle	φ'	39°
Kornrohddichte Grain density	ρ_s	2,65 g/m ³
Wassergehalt Water content	w	0,32%

Tabelle 1: Eigenschaften des Bettungsmaterials in Sandkasten nach EN489
 Table 1: Properties of the bedding material in the san box to EN 489

Der Sand wurde mit einem Einrieselverfahren eingebaut, wie es für reproduzierbare Versuchsrandbedingungen empfohlen wird (tom Wörden 2009). Die Lagerungsdichte wurde bei allen Versuchen dokumentiert und entsprach einer dichten Lagerung.

The sand was placed using a trickle-down method, as recommended for reproducible test boundary conditions (tom Wörden 2009). The relative density was documented for all tests and corresponded to dense state.

Die Wandung der Kiste wurde ebenfalls messtechnisch untersucht. Es wurde ein Verbundreibungswinkel δ von 19,4° zwischen Versuchssand und Wandoberfläche und eine Shore-D Härte der Oberfläche von 58 bestimmt.

The wall of the box was also investigated through measurement. A bond friction angle δ of 19.4° between the test sand and the wall surface and a Shore-D hardness of the surface of 58 were determined.

Abschließend wurden die Messungen den in Frage kommenden theoretischen Ansätze für die Berechnung des Erddrucks gegenübergestellt. Durch den Vergleich der Ergebnisse soll eine Vorstellung zu den Spannungumlagerungen in einer Sandkiste nach EN 489 entstehen.

Stand des Wissens

Der Erddruck im Boden ist von den darüber liegenden Lasten und von auftretenden Verschiebungen abhängig. Sofern sich der Boden in Ruhe befindet, wirkt der sogenannte Erdruchdruck. Es wird zwischen horizontalem und vertikalem Erddruck unterschieden. Aufgrund der Scherfestigkeit von Erdstoffen wird nur ein Teil der vertikalen Lasten horizontal wirksam. Die vertikalen Erddruckspannungen nehmen proportional mit der Tiefe in Abhängigkeit von der Wichte des Bodens zu. Zusätzliche Flächenlasten sind zu addieren. Für die Berechnung des horizontalen Erddrucks werden die vertikalen Erddruckspannungen mit dem Erddruckbeiwert k abgemindert. Für den horizontalen Erdruchdruck in Sanden wird in der Regel der Erdruchdruckbeiwert $k_0 = 1 - \sin \varphi'$ verwendet, wobei φ' der innere Reibungswinkel des Bodens ist (DIN 4085). Es gelten unter diesen üblichen Annahmen die Gleichungen 1 und 2.

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \gamma \cdot z + p \\ \sigma_h &= k_0 \cdot \sigma_z\end{aligned}$$

Mit

σ_z = vertikale Spannung im Boden
 σ_h = vertikale Spannung im Boden
 γ = Wichte des Bodens
 z = Tiefe unter Geländeoberfläche
 k_0 = Erdruchdruckbeiwert
 p = Oberflächenlast

In einer Sandkiste interagiert der Sandkörper zudem mit den Wänden der Kiste. Dies geschieht aufgrund der Verzahnung und dem Steifigkeitsunterschied zwischen Wandung und Bodenkörper. Durch Spannungumlagerungen können sich Gewölbe im Boden ausbilden. Finden diese Spannungumlagerungen zwischen den Grabenwänden statt, wird dies auch Siloeffekt genannt und ein Teil des Eigengewichts des Schüttguts wird über Reibung an den Grabenwänden aufgenommen. Für den zweidimensionalen Fall kann dies durch den Beiwert κ gemäß Gleichung 3 und Gleichung 4 beschrieben werden (vgl. JANSSEN 1895, TERZAGHI & JELINEK 1954, HUDER 1972).

Finally, the measurements were compared with the possible theoretical approaches for calculating the earth pressure. The comparison of the results should give an idea of the stress redistributions in a sandbox according to EN 489.

State of knowledge

The earth pressure in the soil depends on the overlying loads and on occurring displacements. If the soil does not move, the so-called earth pressure at rest acts. A distinction is made between horizontal and vertical earth pressure. Due to the shear strength of earth materials, only part of the vertical loads act horizontally. The vertical earth pressure stresses increase proportionally with depth as a function of the weight of the soil. Additional surface loads must be added. For the calculation of the horizontal earth pressure, the vertical earth pressure stresses are reduced by the earth pressure coefficient k . For horizontal earth pressure in sands, the earth pressure coefficient $k_0 = 1 - \sin \varphi'$ is usually used, where φ' is the internal friction angle of the soil (DIN 4085). Equations 1 and 2 apply under these common assumptions.

Gleichung 1// Equation 1

Gleichung 2// Equation 2

With

σ_z = vertical stress in the soil
 σ_h = vertical stress in the soil
 γ = weight of the soil
 z = depth below ground surface
 k_0 = earth pressure coefficient
 p = surface load

In a sandbox, the sand body also interacts with the walls of the box. This occurs due to the interlocking and the difference in stiffness between the walls and the floor body. Stress redistributions can cause arches to form in the floor. If these stress redistributions take place between the trench walls, this is also called the silo effect and part of the dead weight of the bulk material is absorbed by the trench walls via friction. For the two-dimensional case, this can be described by the coefficient κ according to equation 3 and equation 4 (cf. JANSSEN 1895, TERZAGHI & JELINEK 1954, HUDER 1972).

$$\sigma_z = \kappa \cdot (\gamma \cdot z + p)$$

Gleichung 3// Equation 3

$$\kappa = \frac{1 - e^{-2k_g \cdot \tan \delta \cdot z/b}}{2k_g \cdot \tan \delta \cdot z/b}$$

Gleichung 4// Equation 4

Mit
 κ = Silobeiwert
 b = Grabenbreite
 δ = Wandreibungswinkel zwischen Grabenmaterial und Wand
 k_g = Erddruckbeiwert im Graben

With
 κ = silo value
 b = trench width
 δ = angle of wall friction between trench material and wall
 k_g = earth pressure coefficient in the trench

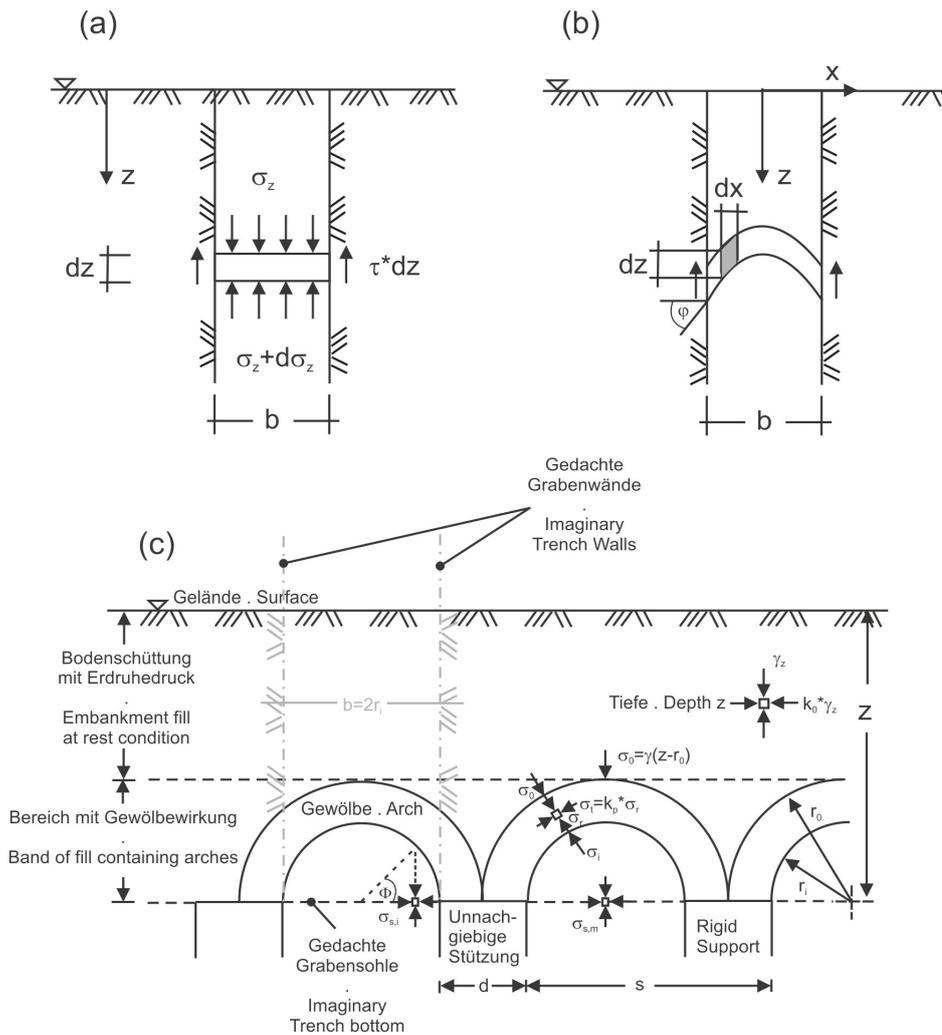


Abbildung 3: Modellvorstellungen für Gewölbewirkung
 Fig.3: Model ideas for arching

Dabei wird für die Berechnung von κ von einer ebenen Elementscheibe ausgegangen, die in Abbildung 3a) dargestellt ist. Ein Gewölbe wird hingegen von HAJNAL et al., Abbildung 3b), und HEWLETT & RANDOLPH, Abbildung 3c), angenommen (Hajnal et al. 1984, Hewlett et al. 1988). Für die Vergleichbarkeit wurden gedachte Grabenwände in Abbildung 3c) ergänzt. Die Vertikalspannung unter der Mitte des Gewölbes geben HEWLETT & RANDOLPH für den ebenen Fall gemäß Gleichung 5 an.

$$\sigma_s = \gamma \cdot (z - s/2) \cdot \left(\frac{s-d}{s}\right)^{(k_p-1)} + \frac{s-d}{2} \cdot \gamma$$

Mit

- σ_s = vertikale Spannung an der Sohle
- z = Lage der Sohle unter Geländeoberfläche
- s = Außendurchmesser des Gewölbes
- d = Breite des Auflagers
- k_p = Passiver Rankine Erddruckbeiwert
= $(1 + \sin \varphi') / (1 - \sin \varphi')$

Bildet sich das Gewölbe entsprechend aus, ist die Vertikalspannung σ_s unter dem Scheitelpunkt des Gewölbes maximal und nimmt in Richtung der Auflager ab. Ähnliche Ergebnisse berichtete EIBL et al. rd. 6 Jahre zuvor anhand von numerischen Untersuchungen von Spannungszuständen in Silos (Eibl. et al. 1982) ohne eine geometrische Idee des Gewölbes vorzugeben. Abbildung 4 zeigt einen Auszug aus den Ergebnissen. Darin wird bestätigt, dass die Vertikalspannungen zur Wand hin abnimmt sofern die Wandreibung größer Null ist. Die Vertikalspannung verläuft demnach nicht über den Siloboden konstant.

For the calculation, a planar element disk is assumed, which is shown in figure 3a). A vault, on the other hand, is assumed by HAJNAL et al., Figure 3b), and HEWLETT & RANDOLPH, Figure 3c) (Hajnal et al. 1984, Hewlett et al. 1988). Imaginary trench walls were added to Figure 3c) for comparability. The vertical stress under the center of the vault is given by HEWLETT & RANDOLPH for the plane case according to Equation 5.

Gleichung 5 // Equation 5

With

- σ_s = vertical stress on the invert
- z = position of the invert below ground surface
- s = outer diameter of the arch
- d = width of the support
- k_p = passive Rankine earth pressure coefficient
= $(1 + \sin \varphi') / (1 - \sin \varphi')$

If the vault forms accordingly, the vertical stress σ_s is maximum below the apex of the vault and decreases in the direction of the supports. Similar results were reported by EIBL et al. about 6 years earlier based on numerical investigations of stress states in silos (Eibl. et al. 1982) without specifying a geometrical idea of the vault. Figure 4 shows an extract of the results. It confirms that the vertical stress decreases towards the wall if the wall friction is greater than zero. Thus, the vertical stress is not constant across the silo floor. A further influence on the earth pressure stresses in a sand box is due to the installation method.

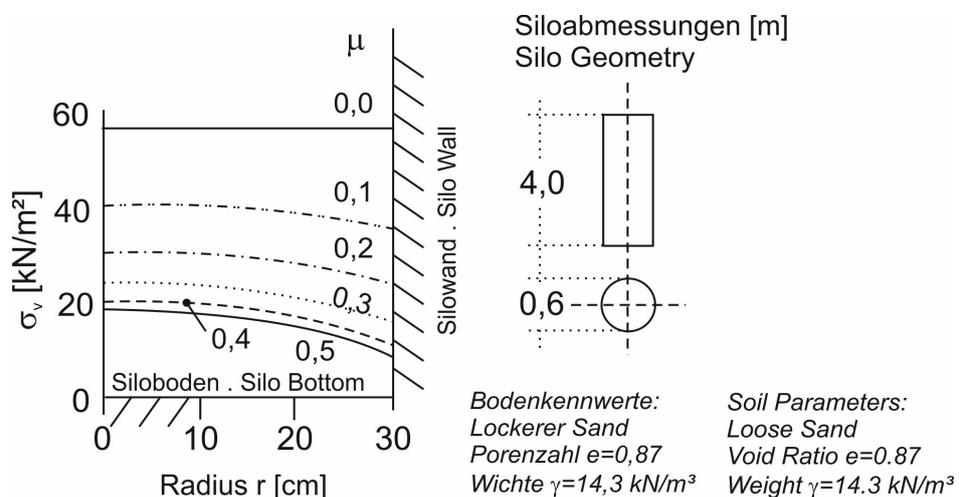


Abbildung 4, Auszug aus den Ergebnissen von EIBL et al.
Fig.4: Excerpt from the results of EIBL et al.

Ein weiterer Einfluss auf die Erddruckspannungen in einer Sandkiste ist durch das Einbauverfahren zu verzeichnen. Die händische oder maschinelle Verdichtung führt zu der Erhöhung der Lagerungsdichte, kann aber auch zu Verspannungen und damit zu erhöhten horizontalen Erddrücken führen. Dieser Verdichtungserddruck kann rechnerisch durch erhöhte Erddruckbeiwerte dargestellt werden. In der Literatur sind erhöhte Erddruckbeiwerte für den horizontalen Verdichtungserddruck in der Bandbreite von 0,7 bis 2,0 angegeben (vgl. FUCHS 1974, GRAMM 1983, NETZER 1998, DIN 4085). Durch das Einrieseln wird ein weitgehend homogener und reproduzierbarer Bodenkörper erzeugt, dessen Lagerungsdichte durch die Fallhöhe gesteuert wird. Das Verfahren verspricht eine Reduktion der durch Verdichtungsverfahren induzierten zufälligen Verspannungen.

Messungen

Es wurden insgesamt fünf Einbausituationen erstellt und die Erddrücke gemessen. In allen Versuchen wurden in vier Stufen Lastplatten aufgesetzt. In einem ersten Versuch wurde die Sandkiste nur mit Sand durch einrieseln befüllt (gemäß Abbildung 2). Es wurde eine Lagerungsdichte von $D=0,5$ erreicht. In den nachfolgenden Versuchen wurde die Sandkiste in Vorbereitung für Verschiebeversuche nach EN489 mit Sand und einem Prüfkörper befüllt (gemäß Abbildung 1). Durch die zusätzlichen Auflasten wurde jeweils die normativ geforderten 18 kN/m^2 am Rohrscheitel erreicht. Beim Einbau mit Rohr wurde die Bettung unter dem Rohr nach dem Einrieseln für die Lagesicherung des Rohres etwas nachverdichtet, wodurch sich die Lagerungsdichte auf $D=0,6$ erhöhte.

In Abbildung 5 sind die Erddruckmessungen der Erddruckgeber E1, E2 und E3 und die sich aus den Messungen ergebenden experimentellen Erddruckbeiwerte k_{exp} auf Höhe der horizontalen Erddruckmessung für alle Auflaststufen dargestellt.

Compaction by hand or machine leads to an increase in the density, but can also lead to stresses and thus to increased horizontal earth pressures. This compaction earth pressure can be represented mathematically by increased earth pressure coefficients. In the literature, increased earth pressure coefficients for the horizontal compaction earth pressure are given in the range from 0.7 to 2.0 (cf. FUCHS 1974, GRAMM 1983, NETZER 1998, DIN 4085). Pouring produces a largely homogeneous and reproducible soil body, the bedding density of which is controlled by the drop height. The method aims for a reduction of random stresses induced by compaction processes.

Measurements

A total of five test situations were created and the earth pressures measured. In all tests, load plates were placed in four stages. In the first test, the sand-box was filled only with sand by pouring (according to Figure 2). A relative density of $D=0.5$ was achieved. In the subsequent tests, the sandbox was filled with sand and a test specimen in preparation for displacement tests according to EN489 (according to Figure 1). Due to the additional superimposed loads, the normatively required 18 kN/m^2 was achieved at the pipe crown in each case. In the case of installation with pipe, the bedding under the pipe was slightly recomacted after pouring in to secure the position of the pipe, which increased the bedding density to $D=0.6$.

Figure 5 shows the earth pressure measurements of the earth pressure transducers E1, E2 and E3 and the experimental earth pressure coefficients k_{exp} resulting from the measurements for all surcharge levels.

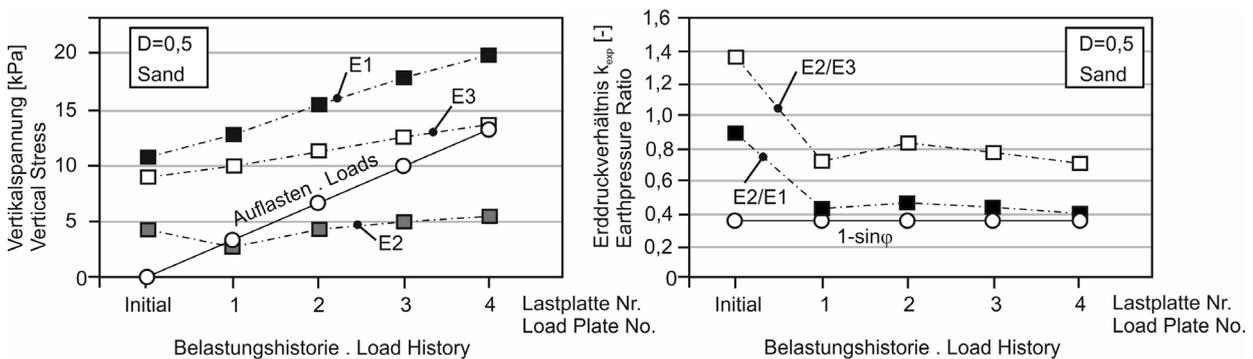


Abbildung 5, Erddruckmessungen in der Sandkiste –nur Sand
 Fig.5: Earth pressure measurements in the sandbox-only sand

Es kann mit Blick auf Abbildung 5 festgestellt werden, dass in der Mitte der Sandkiste der Erddruck E_1 größer ist als in der Ecke der Sandkiste (E_3). Der Erddruck E_3 stieg infolge der weitem Auflasten schwächer an als in der Mitte der Sandkiste. Daher wird vermutet, dass sich auch in Sandkisten die Gewölbewirkung bogenmäßig ausbilden kann. Die Messungen bestätigen die Ergebnisse von EIBL et al. Eine weitere Einflussgröße ist die in der Länge begrenzte Dimension der Sandkiste. Das Erddruckverhältnis ist im Anfangsspannungszustand durch einen erhöhten Erddruck gekennzeichnet. Mit zunehmenden Auflasten stellt sich ein gleichmäßiges Erddruckverhältnis ein. Es scheinen die sich beim Einrieseln entstandenen Verspannungen durch die zusätzlichen Lasten überdrückt zu werden und damit keinen großen Einfluss mehr zu haben. In der Mitte der Sandkiste nähern sich die Werte dem Erdruhedruckbeiwert. In der Ecke der Sandkiste wirken sich die verminderten Spannungen durch ebenfalls erhöhte Beiwerte aus.

Abbildung 6 zeigt ein repräsentatives Ergebnis für die Einbaubedingungen mit Rohr. Hier liegen die gemessenen Erddrücke in der Mitte der Sandkiste in einer ähnlichen Größenordnung wie in der Ecke. Gleichmaßen sind, wie auch bei den Versuchen nur mit Sand, erhöhte Erddruckbeiwerte zu verzeichnen. Auch mit Zunahme der Auflast und nach Aufbringen aller Lastplatten sind erhöhte Erddruckbeiwerte über dem Erdruhedruckbeiwert gemessen worden.

Interpretation der Ergebnisse

Wenn auch durch das Einrieseln sehr homogene und reproduzierbare Einbaubedingungen hergestellt werden können, zeigt die Anwendung von Gleichung 1 und Gleichung 2 auf die Situation in der Kiste dass, die mit Gleichung 1 berechneten Spannungen um rund 13% bis 30% über den gemessenen Spannungen liegen. Daher ist folglich von einem Siloeffekt in der Sandkiste auszugehen und Gleichung 3 ist anzuwenden liegen.

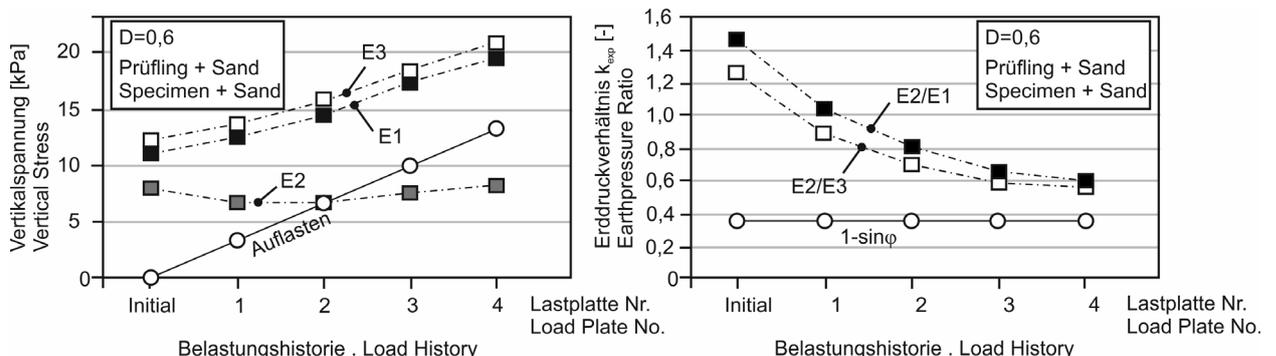


Abbildung 6, Erddruckmessungen in der Sandkiste- Prüfling und Sand
 Fig.6: Earth pressure measurements in the sand box- test specimen and sand

It can be seen from Figure 5 that in the center of the sandbox, the earth pressure E_1 is greater than in the corner of the sandbox (E_3). Earth pressure E_3 increased less than in the center of the sandbox as a result of the further loads. It is assumed that arching action can also develop in sandboxes. The measurements confirm the results of EIBL et al. Another influencing factor is the dimension of the sandbox, which is limited in length. The earth pressure ratio is characterized by an increased earth pressure in the initial stress state. With increasing loads, a uniform earth pressure ratio is established. It appears that the stresses that developed during pouring in are counteracted by the additional loads and thus no longer have a major influence. In the center of the sandbox, the values approach the earth pressure coefficient at rest. In the corner of the sandbox, the reduced stresses have the effect of likewise increased coefficients.

Figure 6 shows a representative result for the test conditions with pipe. Here, the measured earth pressures in the center of the sandbox are of a similar magnitude to those in the corner. Similarly, as in the tests with sand only, increased earth pressure coefficients are recorded. Increased earth pressure coefficients above the earth pressure coefficient were also measured with an increase in the surcharge and after application of all load plates.

Interpretation of the results

Even though very homogeneous and reproducible installation conditions can be produced by pouring, the application of equation 1 and equation 2 to the situation in the box shows that the stresses calculated with equation 1 are about 13% to 30% higher than the measured stresses. Consequently, a silo effect can be assumed in the sandbox and equation 3 must be applied.

In Abbildung 7 (links) wird der Berechnungsansatz der Gleichung 3 für Silowirkung mit den Messungen verglichen. Für den Erddruck in der Mitte der Sandkiste (E1) ist mit einer Abweichung von 0,6% bis 5% eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Für die gemessenen Spannungen in der Ecke der Sandkiste gilt das nur für den Fall mit Prüfling. Bei reiner Sandfüllung sind in der Ecke noch geringere Werte gemessen worden (Abbildung 5, links). Dies kann bei gekrümmten Gewölbeformen der Fall sein, da die Erdlasten

Figure 7 (left) compares the calculation approach of equation 3 for silo effect with the measurements. For the earth pressure in the centre of the sandbox (E1), a good agreement can be seen with a deviation of 0.6% to 5%. For the measured stresses in the corner of the sandbox, this only applies to the case with test specimen. With pure sand filling, even lower values were measured in the corner (Figure 5, left). This can be the case with curved vault shapes, as the earth loads are transferred via the vault into

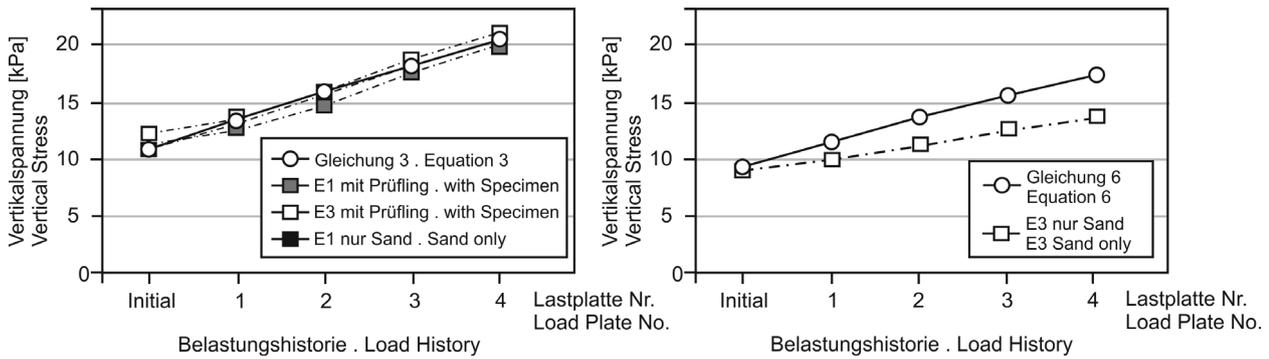


Abbildung 7, Vergleich der Berechnungsansätze mit den Messungen
 Fig.7: Comparison of the calculation approaches with the measurements.

über das Gewölbe in die Kistenwand abgeleitet werden und die Spannungen am Kistenboden von der Position unter dem Gewölbe abhängen.

the box wall and the stresses at the bottom of the box depend on the position under the vault.

Gleichung 5 liefert die Spannung am Kistenboden direkt unter dem Gewölbe. Für die übrigen Positionen unter dem Gewölbe kann dieser Wert in Abhängigkeit des Kreischnittwinkels Φ (s. Abbildung 3) abgemindert werden, wenn die Spannung in der Mitte unter dem Gewölbescheitelpunkt bekannt ist. In Abhängigkeit der Spannung unter dem Scheitelpunkt des Gewölbes $\sigma_{s,m}$ gilt dann für die übrigen Punkte unter dem Gewölbe die reduzierte Spannung $\sigma_{s,i}$ gemäß Gleichung 6.

Equation 5 provides the stress at the bottom of the box directly under the vault. For the other positions under the vault, this value can be reduced as a function of the circle section angle Φ (see Figure 3) if the stress in the center under the apex of the vault $\sigma_{s,m}$ is known. Depending on the stress under the apex of the vault, for the remaining points under the vault the reduced stress $\sigma_{s,i}$ is calculated based on equation 6.

$$\sigma_{s,\phi} = \sigma_{s,m} \cdot \sin \Phi$$

Gleichung 6// Equation 6

Im vorliegenden Fall liegt der Erddruckgeber um B/4 ausmittig, wodurch der Winkel Φ den Wert 60° annimmt. Unbekannt ist in der Sandkiste die Breite d der unnachgiebigen Stützung bzw. die Dicke des Gewölbes, weshalb hier $\sigma_{s,m} = \sigma_v$ nach Gleichung 3 gesetzt wird, welche für die Mitte der Kiste gute Werte lieferte. Nach Gleichung 6 ergibt sich dann aber nur für den Initialspannungszustand am Erddruckgeber E3 eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit der Messung (s. Abbildung 7, rechts „Initial“). Für alle folgende Zustände mit Auflast ist Gleichung 6 nicht zutreffend, da der gemessene Wert in der Ecke deutlich langsamer ansteigt, als nach Gleichung 6 zu erwarten wäre. Abbildung 7 (rechts) verdeutlicht das.

In the present case, the earth pressure transducer is off-center by B/4, so the angle Φ takes the value 60° . Unknown in the sandbox is the width d of the fixed support or the thickness of the arch, which is why $\sigma_{s,m} = \sigma_v$ is set here according to equation 3, which provided accurate values for the center of the box. According to equation 6, however, satisfactory agreement with the measurement is then obtained only for the initial stress state at the earth pressure transducer E3 (see Figure 7, "Initial" on the right). For all subsequent states with surcharge load, equation 6 is not adequate, since the measured value in the corner increases less than would be expected according to equation 6. Figure 7 (right) illustrates this.

Da Gleichung 5 und damit auch Gleichung 6 für den ebenen Spannungszustand gilt, wird darin die Gewölbewirkung in Längsrichtung der Kiste vernachlässigt. Da die gemessenen Werte unter den berechneten Werten liegen erscheint diese Vereinfachung für Sandkisten, zumindest wenn es um die Spannungen in den Ecken geht, nicht mehr haltbar. Die in Abbildung 7 links zu erkennenden Abweichungen weisen auf dreidimensionale Effekte infolge der Längenbegrenzung der Kiste hin. Da die Sandkiste länger ist als hoch, kann sich aber kein kreisförmiges Gewölbe in Längsrichtung ausbilden. Was hier genau passiert, ist noch genauer zu untersuchen. Mit den dargestellten Berechnungsverfahren lassen sich folglich die gemessenen Werte in der Kistenecke, in der Variante nur mit Sand, nicht ermitteln.

Schlussfolgerungen

Durch die vorliegende Untersuchung des Erddrucks in einer Sandkiste nach EN 489 konnte zunächst gezeigt werden, dass sich bei geostatischen Anfangszuständen Verspannungen in den Kistenecken einstellen können, welche für die Grabensituation in situ als untypisch einzuordnen sind.

Weiterhin wurde beobachtet, dass durch die normativ nach EN 489 vorgegebenen zusätzlichen Auflasten diese initialen Verspannungen überdrückt werden. Die Spannungen auf Rohrniveau und am Boden der Kiste können dann unter Berücksichtigung der Silotheorie zutreffend berechnet werden. Auch das Erddruckverhältnis stellte sich nach dem Aufbringen der zusätzlichen Lastplatten in einem realistischen Verhältnis ein. Die Sinnhaftigkeit des durch die EN 489 vorgegebene Einbauverfahren mit zusätzlichen Auflasten lässt sich daher durch die Untersuchungen bestätigen. Es führt zu einer gleichmäßigen und berechenbaren Spannungsverteilung in der Sandkiste. Dennoch sollte auf eine homogene dichte Lagerung der Bettung beim Einbau geachtet werden. Die Lagerungsdichte sollte dokumentiert werden und von lokalen Verdichtungsmaßnahmen in der Kiste sollte abgesehen werden, damit punktuelle Abweichungen vermieden werden.

In der Kistenecke liefern die hier vorgestellten und untersuchten Berechnungsverfahren bei der Befüllung nur mit Sand keine befriedigende Übereinstimmung mit der durchgeführten Messung. Es wird empfohlen, für das bessere Verständnis der Spannungszustände in Versuchskisten nach EN 489 hier umfangreichere Messungen vorzunehmen und auch numerische Verfahren anzuwenden (s. EIBL et al. 1982). Auf diese Weise kann die Grundlage geschaffen werden, aus den Verschiebekräften einer Erddruckprüfung nach EN 489 verlässlich auf die statisch relevanten

Since equation 5 and thus also equation 6 apply to the plane stress state, the arch action in the longitudinal direction of the box is neglected in this equation. Since the measured values are lower than the calculated values, this simplification appears not to be valid for sandboxes, at least in the corners length limitation of the box. However, since the sandbox is longer than high, a circular vault cannot form in the longitudinal direction. What exactly happens here needs to be investigated in more detail. Consequently, the measured values in the corner of the box, in the variant with sand only, cannot be determined with the calculation methods presented.

Conclusion

The present investigation of the earth pressure in a sandbox in accordance with EN 489 firstly demonstrated that, in the case of initial geostatic conditions, stresses can occur in the corners of the box which are to be interpreted as atypical for the trench situation in situ.

Furthermore, it was observed that these initial soil constraints are suppressed by the additional surcharges specified in the standard EN 489. The stresses at the pipe level and at the bottom of the box can then be calculated correctly, taking into account the silo theory. The earth pressure ratio also turned out to be realistic after the additional load plates had been applied. The usefulness of the installation method with additional superimposed loads specified by EN 489 can therefore be confirmed by the investigations. It leads to a uniform and calculable stress distribution in the sandbox. Nevertheless, care should be taken to ensure homogeneous, dense bedding of the bedding during installation. The bedding density of the material should be documented and local compaction measures in the box should be refrained from in order to avoid punctual deviations.

In the box corner, the calculation methods presented and investigated here do not provide satisfactory agreement with the measurement performed when filling with sand only. It is therefore recommended that, for a better understanding of the stress conditions in test boxes according to EN 489, more extensive measurements should be carried out here and numerical methods should also be applied (see EIBL et al. 1982). In this way, the basis can be created for reliably concluding the statically relevant stress states and

Spannungszustände und Verschiebewiderstände an den Rohrverbindungen rückzuschließen.

Danksagung

Die dem Artikel zu Grunde liegenden Messungen wurden an der HafenCity Universität selbstfinanziert für die wissenschaftliche Begleitung von Aufgaben im Projekt „Qualitätsprüfung an Mantelrohrverbindungen für Fernwärmeleitungen nach EN489“ durchgeführt. Mein Dank gilt Violeta Madan und Marcus Illguth für die engagierte Durchführung und Bereitstellung der Messungen und Daten, sowie Herrn Dr.-Ing. Andretzky vom AGFW e.V., Auftraggeber des genannten Projektes, für die freundliche Unterstützung und Zusage zur Nutzung der Synergieeffekte.

displacement resistances at the pipe joints from the displacement forces of an earth pressure test in accordance with EN 489.

Acknowledgement

The measurements on which this article is based were carried out at HafenCity University on a self-financed basis for the scientific support of tasks in the project “Quality testing of casing pipe joints for district heating pipes according to EN489”. My thanks go to Violeta Madan and Marcus Illguth for their dedicated performance and provision of the measurements and data, as well as to Dr.-Ing. Andretzky of AGFW e.V., the client of the aforementioned project, for his kind support and promise to use the synergy effects.

Literatur / Literature

(FW 401 T6) AGFW FW 401 (2007) "Teil 6, Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Bauteile; Rohrverbindungen" – AGFW Verlag, Frankfurt am Main

(Weidlich, 2015) Weidlich I., (2015) "Near future testing requirements for joints in modern district heating networks", International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies - CONECT 2015, Science direct, Energy Procedia, ISSN 18766102, Elsevier Ltd., London

(Wolf et al. 2012) Wolf I., Nielsen H.-J., Weidlich I., (2012) „Dehnpolster – KMR Systembauteil mit großer Wirkung“, Euroheat & Power, 41. Jhg., Heft 3

(EN 489) EN 489-1:2020-03 (2020) "Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung für Fernwärmenetze nach EN 13941-1"; Deutsche Fassung EN 489-1:2019, Beuth-Verlag, Berlin

(Smidt, 2002) Smidt H.D., (2002) „Intercomparison of sandboxes used for testing joints for district heating pipes“, NORDTEST Report TR 495, 2002-03, Nordtest Finland, ISSN: 0283-7234

(Weidlich, 2008) Weidlich, I. (2008) „Untersuchung zur Reibung an zyklisch axial verschobenen erdverlegten Rohren“. Promotionsschrift 64, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energie-wasserbau, Leibniz Universität Hannover.

(tom Würden, 2010) tom Würden, F. (2010) „Untersuchung zum räumlichen aktiven Erddruck auf starre vertikale Bauteile im nichtbindigen Boden“. Promotionsschrift 68, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Leibniz Universität Hannover.

(DIN 4085) DIN 4085:2017-08, (2017) „Baugrund - Berechnung des Erddrucks“, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag Berlin

(Janssen, 1895) Janssen, H. A. (1895) „Versuche über Getreidedruck in Silozellen“. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Seiten 1045–1049

(Terzaghi et al., 1954) Terzaghi, K. und Jelinek R. (1954) Theoretische Bodenmechanik. Springer Verlag Berlin (Huder 1972) Huder J., (1972) "Stability of Bentonite slurry trenches with some experiences in swiss practice", 5th European Conf. SMFE, S.517-522, Madrid

(Hajnal et al., 1984) Hajnal I., Marton J., Regele Z., (1984) "Construction of Diaphragm Walls", John Wiley&Sons, ISBN 0-471-10002-1, 339 S.

(Hewlett et al., 1988) Hewlett, W. und M. Randolph (1988) "Analysis of piled embankments", Ground Engineering, 21:12–17

(Eibl. et al., 1982) Eibl J., Landahl H., Häußler U., Gladen W. (1982) „Zur Frage des Silodrucks“, Beton- und Stahlbetonbau, 4-1982, pp. 104-110

(Netzer, 1998) Netzer, W. (1998) "Pipe deflection in extreme situations - A check for the Austrian calculation standard ÖNORM B5012". 3R International, 37(2-3):124–129, 1998.

(Gramm, 1983) Gramm, G. (1983) „Statik und Festigkeit des Kunststoffmantelrohrs“. 3R international, 22(7/8):355–357, 1983.

(Fuchs, 1974) Fuchs, E. (1974) „Ruhedruck rolliger Erdstoffe“. Schriftenreihe der Bauforschung 53, Institut für Ingenieur- und Tiefbau, Bauakademie der DDR, 1974.