



Institut für Sicherheitsforschung
und Reaktortechnik

***Validierung der Modelle zur Last-
abtragung durch Einbettung in Salzgrus
LEISA***

W. Feuser H. Vijgen E. Barnert

Forschungszentrum Jülich



Jül-3493
Januar 1998
ISSN 0944-2952

***Validierung der Modelle zur Last-
abtragung durch Einbettung in Salzgrus
LEISA***

W. Feuser H. Vijgen E. Barnert

Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 3493
ISSN 0944-2952
Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik Jül-3493

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland
☎ 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de

Im Forschungszentrum Jülich (FZJ) wird seit mehr als zehn Jahren an der Entwicklung der Bohrlochtechnologie für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen in einem Endlager im Salz gearbeitet. Das entsprechende Forschungsvorhaben wurde bis 1992 vom Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (Förderkennzeichen: KWA 5302) und von der Kommission der Europäischen Gemeinschaft (Vertrag Nr. FI2W-CT90-0006) unter dem Kurztitel „**MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern**“ gefördert. Die Ergebnisse wurden in mehreren Berichten dokumentiert.

Nach §9a Abs.3 Atomgesetz hat der Bund Anlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten. Zuständig für Errichtung und Betrieb dieser Anlagen ist das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Das Konzept für das geplante Endlager Gorleben sieht vor, wärmeentwickelnde Abfälle (hochradioaktive Abfälle und mittelradioaktive Abfälle der oberen Aktivitätskategorie) in Bohrlöchern oder Strecken einzulagern.

Vor diesem Hintergrund hat das BfS das Forschungszentrum Jülich mit der Durchführung des Vorhabens „**MAW(Q) und HTR-Brennelemente Versuchsprogramm**“ beauftragt. Ziel dieses MHV-Versuchsprogramms ist die Demonstration der Machbarkeit der Bohrlochlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen. Das Teilprogramm „Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus“ wird im Unterauftrag an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg/Sa durchgeführt. Die Ergebnisse des im Zeitraum Juli 1993 bis Dezember 1996 durchgeführten MHV-Versuchsprogramms sind in vier Berichten dokumentiert:

Jül-3492 Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus

Jül-3493 Validierung der Modelle zur Lastabtragung durch Einbettung in Salzgrus

Jül-3494 Die Löschwirkung von Salzgrus als Flammensperre

Jül-3495 Wasserstoffbildung durch Metallkorrosion

Kurzfassung

Validierung der Modelle zur Lastabtragung durch Einbettung in Salzgrus

LEISA

von W. Feuser, H. Vijgen und E. Barnert

Das derzeitige Referenzkonzept, das Semihydrostatische Einlagerungsmodell, für die Endlagerung von wärmeentwickelnden hoch- und mittelradioaktiven Abfällen in tiefen vertikalen Bohrlöchern im Salz sieht vor, jedes einzelne Gebinde vollkommen in Salzgrus einzubetten. Durch Lastabtragung durch Einbettung in Salzgrus (LEISA) werden die Stapellasten auf die eingebetteten Gebinde begrenzt. Das Forschungszentrum Jülich untersucht im Auftrag des BfS (Bundesamt für Strahlenschutz), zuständig für die Erstellung des Plans Gorleben, sowohl theoretisch als auch experimentell die Anwendbarkeit dieses Konzeptes für ein späteres Endlager (MAW(Q) und HTR-Brennelemente-Versuchsprogramm). Zwei Prüfstände mit unterschiedlichen geometrischen Dimensionen wurden zur Simulation eines Endlagerbohrlochs konstruiert, gefertigt, instrumentiert und in Betrieb genommen. Unter Variation aller maßgebenden Parameter wurden die Druckverteilungen in den Prüfständen gemessen und mit den berechneten verglichen. Nach den in diesem Versuchsprogramm durchgeführten Messungen stimmen die Prognosen des Semihydrostatischen Modells für eine jeweils in beiden Prüfständen untersuchte rauhe Bohrlochwandoberfläche sehr gut mit den Experimenten überein. Die bei einer glatten Wandoberfläche festgestellten Abweichungen zwischen Theorie und Experiment beruhen vermutlich auf einer noch zu unspezifischen Ermittlung derjenigen Salzgrusparameter, die in die Modellrechnungen einfließen. Fazit der bisherigen Untersuchungen: die Lastabtragung durch Einbettung in Salzgrus stellt ein hochwirksames Instrument zur Begrenzung der Stapellasten in vertikalen, mit Salzgrus und Abfallgebinden verfüllten Endlagerbohrlöchern dar.

Abstract

Validating the models for load diversion by embedding in crushed salt

LEISA

by W. Feuser, H. Vijgen and E. Barnert

The current reference concept, i.e. the semihydrostatic emplacement model, for the final disposal of heat-generating high- and intermediate-level waste in deep vertical boreholes in salt provides for completely embedding each individual package in crushed salt. Load diversion by embedding in crushed salt (**LEISA** = **L**astabtragung durch **E**inbettung in **S**alzgrus) will limit the stacking loads to the packages embedded. On behalf of the Federal Office for Radiation Protection (BfS - Bundesamt für Strahlenschutz), which is responsible for establishing the Gorleben planning, the Research Centre Jülich is engaged in studying theoretically as well as experimentally the applicability of this concept to a future repository (ILW(Q) und HTGR fuel element experimental programme). Two test stands with different geometrical dimensions were designed, manufactured, instrumented and put into operation for simulating a repository borehole. The pressure distributions were measured in the test stands and compared with those calculated, varying all decisive parameters. According to the measurements performed in this test programme, the predictions of the semihydrostatic model for a rough borehole wall surface examined in both test stands are in very good agreement with the experiments. The deviations between theory and experiment found for a smooth wall surface are presumably due to a still too unspecific determination of those crushed-salt parameters which are incorporated in the model calculations. The investigations carried out to date may be summarized as follows: load diversion by embedding in crushed salt is a highly efficient tool for limiting the stacking loads in vertical repository boreholes filled with crushed salt and waste packages.

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung und Zielsetzung	1
2. Die theoretische Modellierung der Druckverteilung	3
2.1. Die Randbedingungen	3
2.2. Die Kräftebilanz	3
2.3. Die Lösung	5
2.4. Die Strategie	6
2.5. Die Salzgrusparameter	8
3. Die Laborversuchsstände	10
3.1. Die technischen Anforderungen	10
3.2. Die Auslegung der Versuchsstände	10
3.2.1. Die Mantelflächen	10
3.2.2. Die Bodenplatte	15
3.3. Die Mechanik der Meßwertaufnehmer	16
3.4. Die Meßwerterfassung	19
3.5. Die Salzgrushandhabung	20
3.6. Die Dummy-Gebinde	20
4. Salzgrusexperimente LEISA I	29
4.1. Die Herstellung der Salzgrusproben	29
4.2. Die glatte CFK-Wand	29
4.2.1. Die gemessenen Druckverläufe	29
4.2.2. Die Salzgrusparameter - glatte Wand	32
4.2.3. Die berechneten Drücke	34
4.3. Die raue CFK-Wand	37
4.3.1. Die gemessenen Druckverläufe	37
4.3.2. Die Salzgrusparameter - raue Wand	38

Inhaltsverzeichnis

4.3.3. Die berechneten Drücke	39
4.4. Der Vergleich glatte - rauhe Wand	40
4.4.1. Der Vergleich der Schüttgutparameter	40
4.4.2. Der Vergleich der Drücke	42
4.4.3. Der Vergleich der Konversionstiefen	43
4.5. Der korrigierte Seitendruckbeiwert	45
4.6. Die Kontrolle der Kräftebilanz	47
4.6.1. Die Messung der Tangentialkräfte	47
4.6.2. Die experimentellen Ergebnisse	48
5. Salzgrusexperimente LEISA II	50
5.1. Die Herstellung der Salzgrusproben	50
5.2. Kurzzeitexperimente mit Salzgrus - LEISA II	50
5.2.1. Die gemessenen Druckverläufe	50
5.2.2. Die Salzgrusparameter - glatte Wand	53
5.2.3. Die berechneten Drücke	55
5.3. Langzeitexperimente mit Salzgrus - LEISA II	58
6. Experimente mit unbeheizten Dummies	64
6.1. Kurzzeitexperimente	64
6.1.1. Die Ausgangsbedingungen	64
6.1.2. Die gemessenen Vertikaldrücke in Relation zur Tiefe	64
6.1.3. Die gemessenen Vertikaldrücke in Relation zur radialen Position	66
6.1.4. Die berechneten Drücke	68
6.2. Langzeitexperimente mit unbeheizten Dummies	69
7. Langzeitexperimente mit beheizten Dummies	72
7.1. Die Randbedingungen	72
7.2. Die Vertikaldrücke in Relation zur Tiefe	72
7.3. Die Radialdrücke in Relation zur Tiefe	73

Inhaltsverzeichnis

8. Schlußfolgerungen und Ausblick	76
Literatur	79
Formelverzeichnis	80
Tabellenverzeichnis	82
Abbildungsverzeichnis	85
Anhang	89
A. Von BAF gemessene Salzgrusparameter für Probe 1	89
B. Von BAF gemessene Salzgrusparameter für Probe 2	92
C. Von BAF gemessene Salzgrusparameter für Probe B und für Probe 1 bei erhöhten Temperaturen	94
D. Konstruktionszeichnungen LEISA I	96
E. Konstruktionszeichnungen LEISA II	98

1. Problemstellung und Zielsetzung

Nach den derzeitigen Planungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) sollen in Deutschland alle Arten fester und verfestigter hoch- und mittelradioaktiver Abfälle, insbesondere aber solche mit merklicher Wärmeentwicklung, in einem Endlagerbergwerk in unterirdischen Steinsalzformationen endgelagert werden. Die Endlagerung erfolgt entweder in vertikalen Bohrlöchern oder alternativ in horizontalen Strecken.

Die Gebinde werden bei der Endlagerung nach der Bohrlochtechnik von der Sohle 800 m tief liegender Strecken in 300 - 600 m tiefe, senkrechte Bohrlöcher abgesenkt und dort abgesetzt. Nach dem Einbringen eines jeden einzelnen Gebindes erfolgt eine vollständige Umhüllung und Überdeckung des Gebindes mit Salzgrus, so daß die Gebinde nach dem endgültigen Verschluß des Bohrlochs am Ende der Betriebsphase vollständig in Salzgrus eingebettet sind. Im verfüllten Bohrloch wechseln Abschnitte von mit Salzgrus umhüllten Gebinden mit Abschnitten nur aus Salzgrus (Salzgrusschicht zwischen aufeinander folgenden Gebinden) ab.

Die vollständige Einbettung und Überdeckung der Abfallgebände soll die mit fortschreitender Einlagerung wachsenden Stapellasten auf die unteren, bereits eingelagerten Gebände begrenzen. Die mechanischen Beanspruchungen der Gebände dürfen während der Betriebsphase des Bohrlochs einen vorher definierten Wert nicht überschreiten. Bei einfacher Stapelung der Gebände im Bohrloch übereinander ist bereits nach wenigen Gebänden die Grenztragfähigkeit des untersten Behälters erreicht.

Zur Begrenzung der Stapellasten wurden verschiedene Varianten diskutiert [2]. Aus diesen Varianten hat sich die Semihydrostatische Einlagerung als derzeitiges Referenzkonzept herauskristallisiert.

Zur Berechnung der Druckverteilung im nach dem Semihydrostatischen Konzept verfüllten Bohrloch wurde ein theoretischer Modellansatz aufgestellt [3]. Er gestattet es, unter Annahme bestimmter, physikalisch sinnvoller und teilweise empirisch abgesicherter Rand- und Nebenbedingungen, die Druckkomponenten in radialer und vertikaler Richtung im gesamten Bohrloch in analytischer Form zu berechnen.

Im Rahmen des von BfS finanzierten „MAW(Q)- und HTR-BE-Versuchsprogramm“ soll das Forschungszentrum Jülich (FZJ) innerhalb der Teilaufgabe „Validierung der Modelle zur Lastabtragung“ (Vorhaben **LEISA** (Lastabtragung durch **E**inbettung in **S**alzgrus)) die vorliegenden Modellansätze zur Beschreibung der Druckverteilung in senkrechten, mit Salzgrus und Abfallgebänden verfüllten Endlagerbohrlöchern experimentell überprüfen. Weiterhin soll untersucht werden, ob sich aus der Auswertung, der Analyse der Meßdaten und durch Korrelation der experimentellen Daten mit den nach dem theoretischen Ansatz berechneten Daten Gesetzmäßigkeiten ableiten und formulieren lassen, die eine Beschreibung und Vorhersage der zu erwartenden Drücke in einem späteren Endlager erlauben.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe werden maßstabverkleinerte Laborversuchsstände

1. Problemstellung und Zielsetzung

ausgelegt, konstruiert, gefertigt, instrumentiert und in Betrieb genommen. Die Versuchsstände simulieren den unteren Teil eines Endlagerbohrlochs und sind mit empfindlichen Druck- und Temperatursensoren ausgestattet.

2. Die theoretische Modellierung der Druckverteilung

2.1. Die Randbedingungen

Das Semihydrostatische Modell geht in seinem mathematischen Ansatz davon aus, daß bei fortschreitender Verfüllung des Bohrlochs zwischen den Komponenten des Drucktensors $\tilde{\mathbf{p}}$ nur stetige Zusammenhänge bestehen.

Unstetige Gleit- und Rutschbewegungen, die in realen Schüttungen auftreten, sind nicht in diesem Modell (und auch in keinem anderen analytischen Ansatz wie etwa die Berechnung nach Janssen [7], Walker [10] und Walters [11] oder der Charakteristikenmethode [5]) enthalten. Sowohl bei der Berechnung nach Janssen als auch bei der nach Walker werden zur Lösung der aufgestellten Differentialgleichungen vereinfachende Annahmen über die Druckverteilung zugrunde gelegt. Die sich aus den Kräftebilanzen ergebenden partiellen Differentialgleichungen (hyperbolisches Differentialgleichungssystem) lassen sich zwar mit Hilfe der Charakteristikenmethode auf ein System von vier gewöhnlichen Differentialgleichungen zurückführen, diese sind aber nur numerisch lösbar.

Nur für eine stetige Füllung des Bohrlochs, bei der die Schüttungsoberfläche immer eben bleibt, dürfen stetige Zusammenhänge zwischen den axialen, radialen und tangentialen Druckkomponenten angenommen werden und nur unter diesen Annahmen lassen sich analytische Behandlungsmethoden wie das Semihydrostatische Modell verwenden.

2.2. Die Kräftebilanz

Zur Herleitung der Grundgleichungen wird im Modell die Füllung aus Salzgrus und darin eingelagerten Abfallgebinden näherungsweise als homogene Schüttung mit einer nach den Volumenanteilen des Salzgruses und der Gebinde gemittelten Dichte ρ_s betrachtet. Zur Vereinfachung wird Rotationssymmetrie angenommen.

Bei der Aufstellung der Kräftebilanz im Modell werden aus der Schüttung konzentrisch angeordnete Ringe mit infinitesimaler Höhe Δz herausgegriffen, bei denen über die Mantelseiten sowohl (Reibungs-)Kräfte in radialer als auch in azimuthaler Richtung übertragen werden können. Der Vertikaldruck p_v auf die Ringe kann sich mit der radialen und der axialen Koordinate ändern:

$$p_v = p_v(r, z). \quad (1)$$

Auf ein infinitesimal kleines Volumenelement $dr d\phi dz$ eines solchen Ringe wirken in z -Richtung folgende Kräfte (Abb. 1):

1. Vertikalkräfte:

$$F_{oben} = r dr d\phi p_v(r, z) \quad (2)$$

$$F_{unten} = r dr d\phi p_v(r, z + dz) \quad (3)$$

2. Die theoretische Modellierung der Druckverteilung

2. Tangentialkräfte:

$$F_{innen} = r d\phi dz p_t(r, z + dz/2) \quad (4)$$

$$F_{außen} = (r + dr) d\phi dz p_t(r + dr, z + dz/2) \quad (5)$$

3. Gewichtskraft:

$$F_G = r dr d\phi dz \varrho_S g. \quad (6)$$

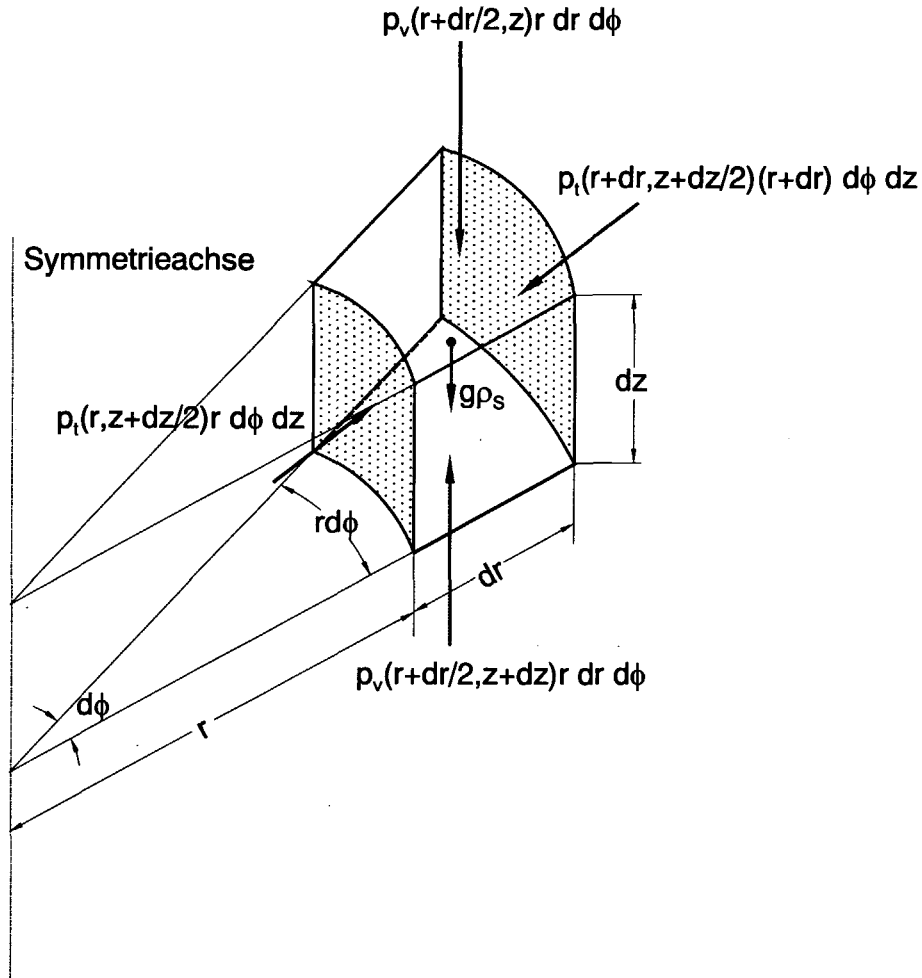


Abb. 1: Oberflächenkräfte auf ein herausgeschnittenes Volumenelement eines Ringes im Semihydrostatischen Modell

Im Gleichgewicht lautet die Kräftebilanz:

$$(F_{oben} - F_{unten}) + (F_{innen} - F_{außen}) + F_G = 0. \quad (7)$$

Durch Entwicklung der Funktionen p_v und p_t in ihre Taylorreihen und Vernachlässigung von Differentialen vierter und höherer Ordnung ergibt sich folgende Differentialgleichung:

$$r \frac{\partial p_v}{\partial z} + p_t + r \frac{\partial p_t}{\partial r} = r g \varrho_S. \quad (8)$$

2. Die theoretische Modellierung der Druckverteilung

Die beiden, noch unbekannten Funktionen p_v und p_t werden durch die phänomenologischen Relationen:

$$p_r = k p_v \quad (9)$$

$$p_t = \mu p_r = \mu k p_v \quad (10)$$

miteinander verknüpft. Sie besagen: beim Füllen eines Bohrlochs entsteht primär ein Vertikaldruck p_v . Weil das Schüttgut keine Zugfestigkeit hat, will es auseinanderfließen und muß daher von der Bohrlochwand zusammengehalten werden. Der dazu notwendige Druck p_r ist, wie einfache Experimente zeigen, dem Vertikaldruck näherungsweise proportional (Seitendruckbeiwert k).

Wäre das Schüttgut unendlich steif und inkompressibel, wären das die einzigen Lasten. Da aber elastische und plastische Verformungen sowie Verdichtungen der Schüttung auftreten, entsteht eine Abwärtsbewegung des Gutes und dadurch eine Reibung (p_t) an der Wand. Der Tangentialdruck p_t ist in einfachster Näherung dem Radialdruck p_r proportional mit dem Proportionalitätsfaktor μ . Der Reibungsbeiwert μ ist der Tangens des Winkels der Reibung: $\mu = \tan \varphi$. Mit diesen Annahmen lautet Gl. (8):

$$r \frac{\partial p_v}{\partial z} + \mu k \left[p_v + r \frac{\partial p_v}{\partial r} \right] = r g \varrho_s. \quad (11)$$

2.3. Die Lösung

Unter der Annahme bestimmter physikalisch sinnvoller Randbedingungen lautet die Lösung der Differentialgleichung (11) für die vertikale Druckkomponente p_v bei einem Bohrloch mit Radius R_B :

$$p_v = \begin{cases} \frac{\varrho_s g R_B}{2 \mu k} \left(\frac{2 \mu k}{R_B} z - \frac{(\mu k)^2}{R_B} \frac{z^2}{r} \right) & \text{für } \mu k z \leq r, \\ \frac{\varrho_s g R_B}{2 \mu k} \frac{r}{R_B} & \text{für } \mu k z \geq r. \end{cases} \quad (12)$$

Abb. 2 zeigt die Verläufe von p_v in Relation zur radialen und axialen Bohrlochkoordinate r und z für unterschiedliche Parameterwerte von μ und k . In axialer Richtung ($r = \text{const.}$) steigt der Druck zunächst unterlinear an und geht an der Stelle $\mu k z = r$ in einen konstanten Wert über. In radialer Richtung ($z = \text{const.}$) steigt der Druck für $r \leq \mu k z$ linear an. Im Bereich $r \geq \mu k z$ wird der Anstieg mit zunehmendem r kleiner. Der maximale Druck im Bohrloch:

$$p_{v,\max} = \frac{g \varrho_s R_B}{2 \mu k} \quad (13)$$

ist nach oben beschränkt und wird in endlicher Tiefe:

$$z_0 = \frac{R_B}{\mu k} \quad (14)$$

2. Die theoretische Modellierung der Druckverteilung

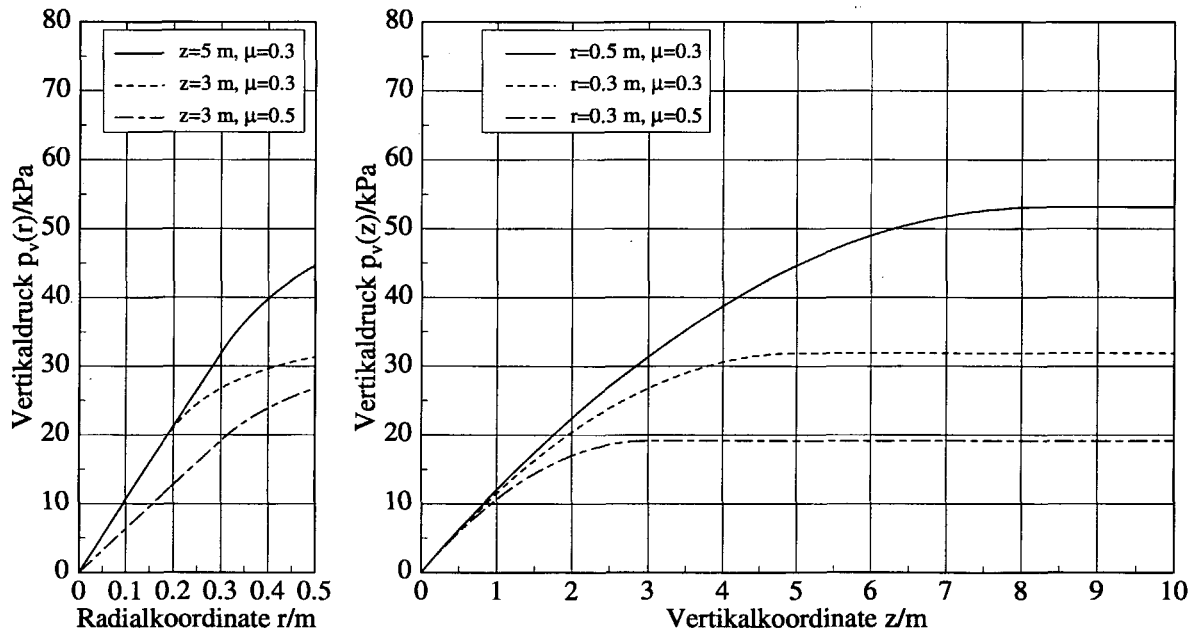


Abb. 2: Der nach dem Semihydrostatischen Modell berechnete, vertikale Druck in Relation zur Radialkoordinate r (links) und zur Vertikalkoordinate z (rechts) bei einer Schüttdichte von 1300 kg/m^3 und einem Bohrlochradius von $0,5 \text{ m}$

an der Bohrlochwand erreicht. Die Stelle z_0 wird Konversionstiefe genannt, da von hier bis zur Bohrlochsohle hin trotz weiter fortschreitender Einlagerung der Druck im Bohrloch konstant auf $p_{v,max}$ nach Gl. (13) bleibt. Damit erfahren auch eingelagerte Abfallgebinde unterhalb der Tiefe z_0 keine weiter zunehmende Beanspruchung mehr. Der Druck auf das zuunterst eingelagerte Gebinde wächst nur solange an, solange der Einlagerhorizont während der Füllung des Bohrlochs innerhalb der Konversionstiefe z_0 liegt. Unterhalb der Konversionstiefe bleibt er konstant. Diese Betrachtungsweise kann auf jedes beliebige Gebinde und damit auf jeden beliebigen Bohrlochabschnitt übertragen werden.

Das zur Berechnung der Druckverteilung entwickelte Modell beschreibt die Druckverteilung eines Bohrlochs im Füllzustand. Der Salzgrus liegt als loses Schüttgut vor. Kompaktierungen des Salzgruses, etwa durch Bohrlochkonvergenz, spielen bei den in diesem Teilvorhaben betrachteten Zeiträumen noch keine Rolle.

2.4. Die Strategie

Ziel der Experimente an den Versuchsständen ist die Formulierung eines Übertragungsgesetzes, an Hand dessen die an den verkleinerten Labormodellen gewonnenen Versuchsergebnisse auf die reale Ausführung, das spätere Endlager, übertragen werden können, ohne jetzt schon die exakten Randbedingungen und geometrischen Abmessungen dort

2. Die theoretische Modellierung der Druckverteilung

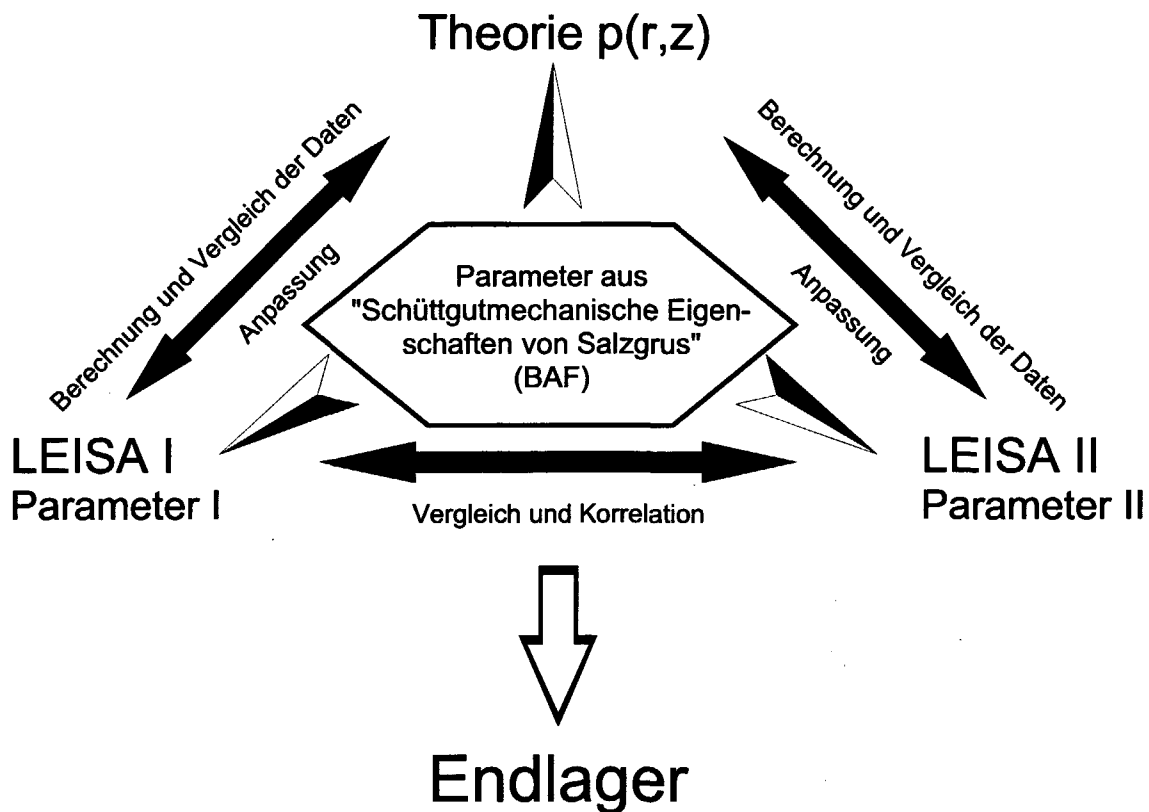


Abb. 3: Die Strategie zur Validierung des Modells

zu kennen. Dies soll einerseits durch Vergleich und Anpassung der experimentellen Daten mit den Berechnungsdaten des Modells und andererseits durch Korrelation zwischen den Meßdaten der Prüfstände untereinander geschehen (Abb. 3).

Der Sinn eines Modells ist es, einen meist komplizierten, physikalischen Sachverhalt durch Vereinfachungen und Einschränkungen mit mathematischen Formeln beschreibbar zu machen. Daher kann nicht erwartet werden, daß das Modell ein exaktes Bild der Realität entwirft. Aber das ist auch in den meisten Fällen nicht gefordert. Vielmehr soll das Modell durch Variation der Parameterwerte ein mehr oder weniger breites Spektrum möglicher Druckwerte liefern. Auf diese Weise kann auch der Frage nachgegangen werden, wie gut das Modell die Experimente noch beschreibt, wenn die Annahmen, die zu seiner Aufstellung geführt haben, nur noch teilweise oder nicht mehr erfüllt sind.

Die Parameter selbst sind aus den verschiedensten Gründen mit Unsicherheiten behaftet. Daraus erwächst zwangsläufig die Notwendigkeit, bei der experimentellen Untersuchung eines technisch-physikalischen Problemkreises im Labor ein weites Parameterspektrum in das Versuchsprogramm aufzunehmen. Damit soll sichergestellt werden, daß die in etwa zu erwartenden Bedingungen im späteren Endlager abgedeckt werden. Nur so kann eine optimale Parameterkombination für eine geringe mechanische Beanspruchung der Gebinde gefunden werden. Tab. 1 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm.

2. Die theoretische Modellierung der Druckverteilung

Tabelle 1: Übersicht über das Versuchsprogramm

Parameter	LEISA I	LEISA II
Durchmesser	0,25 m	0,6 m
Höhe	2,5 m	5 m
Wandbeschaffenheit	glatt, rauh	glatt
Salzgruskörnung	0 - 10 mm	0 - 20 mm
Fraktionen	0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	0,2; 0,6; 1,0
Dummy-Gewichte	-	127 kg; 200 kg; 216 kg
Salzgrusüberdeckungen	-	20 cm; 40 cm; 60 cm
Dummy-Temperaturen	-	25 °C, 80 °C, 120 °C, 150 °C
Langzeitexperimente	-	8 - 56 Tage
Messung d. Vertikaldrücke	p1 - p3	p1 - p9
Messung d. Radialdrücke	p4 - p7	p10 - p15
Messung d. Tangentialkräfte	x	-
Messung d. Seitendruckbeiwerte	x	x
Messung d. Schüttdichten	x	x

2.5. Die Salzgrusparameter

Die Druckverteilung bei der vollständigen Einbettung der Abfallgebinde in einer Salzgrusschüttung im Endlagerbohrloch hängt von den schüttgutmechanischen Eigenschaften des Verfüllmaterials, das sind die Schüttgutdichte, der effektive innere Reibungswinkel oder der innere Reibungswinkel und der Wandreibungswinkel, ab. In einer früheren Arbeit [4] sind bereits stichpunktartig Salzgrusproben hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften an der TU Bergakademie Freiberg (BAF) untersucht worden. Als besonders starke Einflüsse sind angesehen worden:

- die Partikelgrößenzusammensetzung, d.h. vor allem der Gehalt an Feingut und die obere Korngröße,
- die chemisch-mineralogische Zusammensetzung,
- die Salzgrustemperatur,
- das Druckniveau und
- die Wandrauhigkeit.

Diese Größen sind im Rahmen des Teilprojekts „Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus“, das als Unterauftrag von FZJ an BAF vergeben worden ist, mit Hilfe eines großen Translationsschergeräts der Bauart Jenike [4] systematisch und umfassend untersucht worden. In den Tabellen 9 - 23 (s. Anhang A - C) sind die von BAF gemessenen Salzgrusparameter wiedergegeben. Bei Probe 1 handelt es sich um Salzgrus mit

2. *Die theoretische Modellierung der Druckverteilung*

der Körnung 0 - 10 mm, bei Probe 2 um Salzgrus mit der Körnung 0 - 20 mm, beide Na2. Probe B ist Salzgrus Na3 der Körnung 0 - 20 mm.

3. Die Laborversuchsstände

3.1. Die technischen Anforderungen

Um einen Beitrag zur wirklichkeitsnahen Erfassung und Interpretation von Druckzuständen in vertikalen Endlagerbohrlöchern zu leisten, liegt der Gedanke nahe, in den Phasen der Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung ähnlichkeitsmechanische und versuchstechnische Gesichtspunkte stärker einzubeziehen. Zur experimentellen Validierung des theoretischen Modellansatzes werden daher zwei Laborversuchsstände aus CFK (Carbonfaserverstärkter Kunststoff) mit den Durchmessern $D_B = 0,25$ m (LEISA I) und $D_B = 0,6$ m (LEISA II) sowie den Höhen $z_B = 2,5$ m und $5,5$ m ausgelegt, konstruiert, gefertigt und instrumentiert.

Versuchsstand LEISA I besteht aus zwei Segmenten jeweils gleicher Höhe ($2 \times 1,25$ m, Anhang D), Versuchsstand LEISA II aus sieben Segmenten unterschiedlicher Höhe ($1 \times 1,065$ m, $2 \times 0,8$ m, $3 \times 0,825$ m, $1 \times 0,46$ m, Anhang E). Die Segmentbauweise ist aus praktischen Gründen bei der Montage und der Füllung der Versuchsstände geboten.

Der Werkstoff CFK zeichnet sich durch hohe mechanische Stabilität und geringe thermische Dehnung aus, zwei Eigenschaften, die für eine eindeutige Interpretation der Meßdaten an den Versuchsständen unabdingbar sind. Zudem besitzt CFK eine geringe Dichte. Das geringe Eigengewicht der Versuchsstände hat sich insbesondere bei der Montage und Demontage als vorteilhaft erwiesen.

In die Mantelflächen sowie in die Bodenplatten der Versuchsstände sind Öffnungen eingelassen, an die Drucksensoren zur Messung der Radial- und Vertikaldrücke montiert werden können.

3.2. Die Auslegung der Versuchsstände

3.2.1. Die Mantelflächen

Die „innere Gestaltung“ der Faserverbundwerkstoffe ermöglicht einen hinsichtlich der Beanspruchung maßgeschneiderten Werkstoff mit optimaler Materialausnutzung. Nach einer konservativen Abschätzung der maximal zu erwartenden Schüttgutdrücke und Temperaturen in den Versuchsständen sind alle Materialstärken am Prüfstand an Hand von FE-Simulationsrechnungen [12] auf radiale Verformungen von maximal $0,15$ mm hin optimiert worden.

Abb. 4 zeigt für Versuchsstand LEISA II mit 600 mm Durchmesser die Nachbildung der Segmentausgangsstruktur mit Öffnungen und Adapterflanschen für die Druckaufnehmer.

Die Berechnungen sind für folgende Randbedingungen durchgeführt worden:

3. Die Laborversuchsstände

1. FE-Modell 1:

- Geometrie:
 - Axiale Höhe des FE-Modells: 375 mm
 - Segmentwandstärke: 10 mm
 - Durchmesser der Druckaufnehmerbohrung: 180 mm
- Material:
 - Segment: INVAR-Stahl (St 1.3912), E-Modul: $2,1 \cdot 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$, Wärmeausdehnungskoeffizient: $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
 - Adapterflansch: INVAR-Stahl (St 1.3912), E-Modul: $2,1 \cdot 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

2. FE-Modell 2:

- Geometrie:
 - Axiale Höhe des FE-Modells: 375 mm
 - Segmentwandstärke: 10 mm
 - Durchmesser der Druckaufnehmerbohrung: 180 mm
 - Zur Flanschbefestigung umlaufender Versteifungsring aus CFK ($b = 25 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$)
- Material:
 - Segment: CFK, E-Modul: $1,35 \cdot 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$, $\alpha = 0$
 - Versteifungsring: CFK, E-Modul: $2,1 \cdot 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$, $\alpha = 0$
 - Adapterflansch: INVAR-Stahl, E-Modul: $2,1 \cdot 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

3. FE-Modell 3:

- Geometrie:
 - Geometrie basiert auf FE-Modell 2, aber Segmentwandstärke auf 12 mm erhöht
 - Zur Flanschbefestigung umlaufender Versteifungsring aus CFK ($b = 50 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$)
- Material:
 - Segment: CFK, E-Modul: $2,3 \cdot 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$, $\alpha = 0$
 - Versteifungsring: CFK, E-Modul: $2,3 \cdot 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$, $\alpha = 0$
 - Adapterflansch: CFK, E-Modul: $1,35 \cdot 10^5 \text{ Nmm}^{-2}$, $\alpha = 0$

Bei FE-Modell 1 aus INVAR-Stahl kommt es durch ungleichmäßige positive (nach außen) und negative (nach innen) Durchmesseränderung des Segmentquerschnitts unter

3. Die Laborversuchsstände

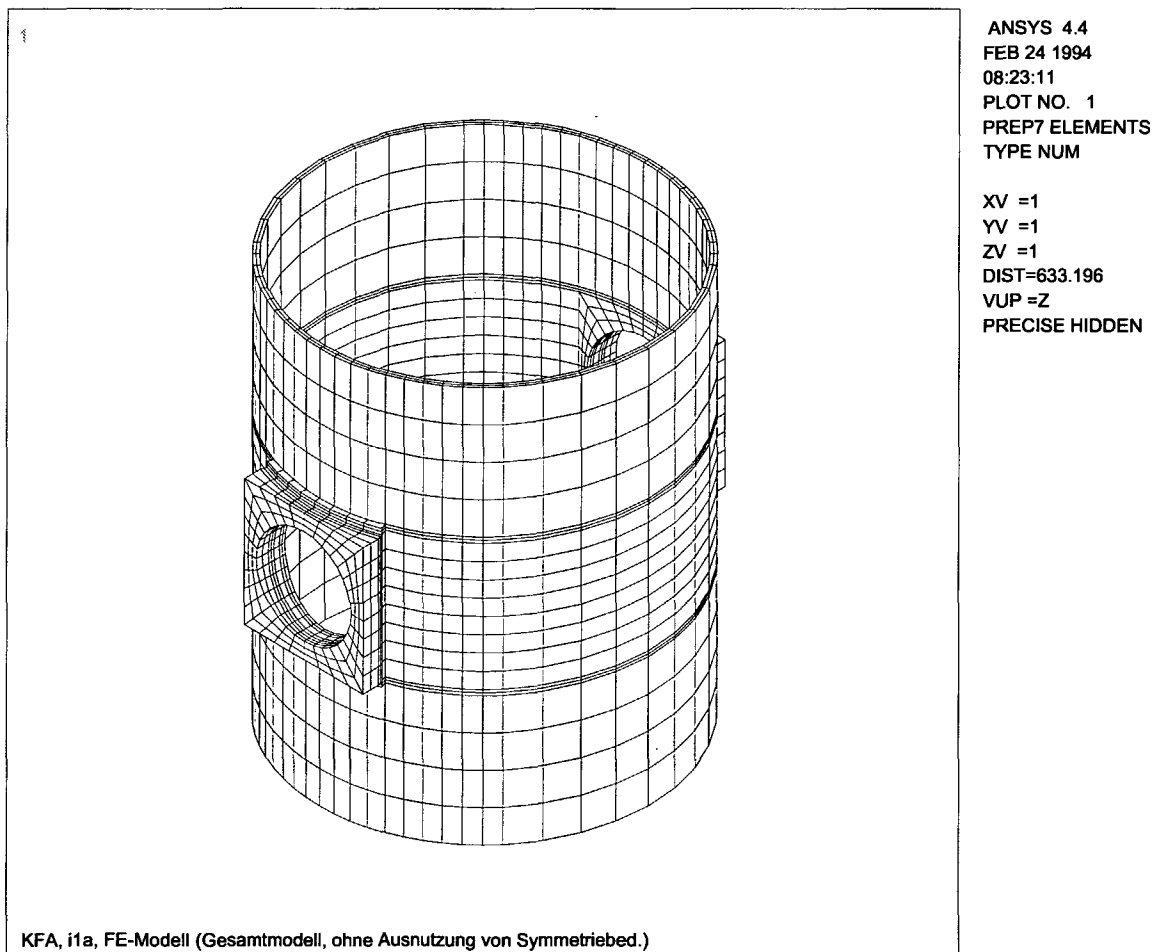


Abb. 4: Die Segmentausgangsstruktur mit Öffnungen und Adapterflanschen für die Druckaufnehmer für Versuchsstand LEISA II

Druckbelastung zu einer Ovalisierung. Ursache ist die ungleichmäßige Steifigkeit in Umfangsrichtung. Die Temperaturbeanspruchung allein führt zu einer gleichmäßigen Aufweitung des gesamten Querschnitts. Die Überlagerung beider Beanspruchungen (Druck und Temperatur) führt zu ungleichmäßiger, positiver Durchmesseränderung (Abb. 5).

Die Steifigkeit der CFK-Struktur im FE-Modell 2 mit angesetztem E-Modul erweist sich als nicht ausreichend. Das resultiert in einer Ovalisierung des Durchmessers mit zusätzlichen lokalen Effekten durch den umlaufenden Verstärkungsring. Das günstige Wärmeausdehnungsverhalten des CFK-Segments macht sich durch die Temperaturaufweitung des INVAR-Stahlflansches nicht bezahlt.

Bei FE-Modell 3 sind die Verformungen (Abb. 6) der CFK-Struktur infolge der höherwertigen Fasern, der Wandstärkenerhöhung des Segments auf 12 mm und der Verstärkung des umlaufenden Versteifungsringes im Vergleich zu FE-Modell 2 deutlich geringer. Durch die Verwendung des CFK im Flanschbereich (Aufnehmerbohrungen) kann das günstige Wärmeausdehnungsverhalten ausgenutzt werden.

3. Die Laborversuchsstände

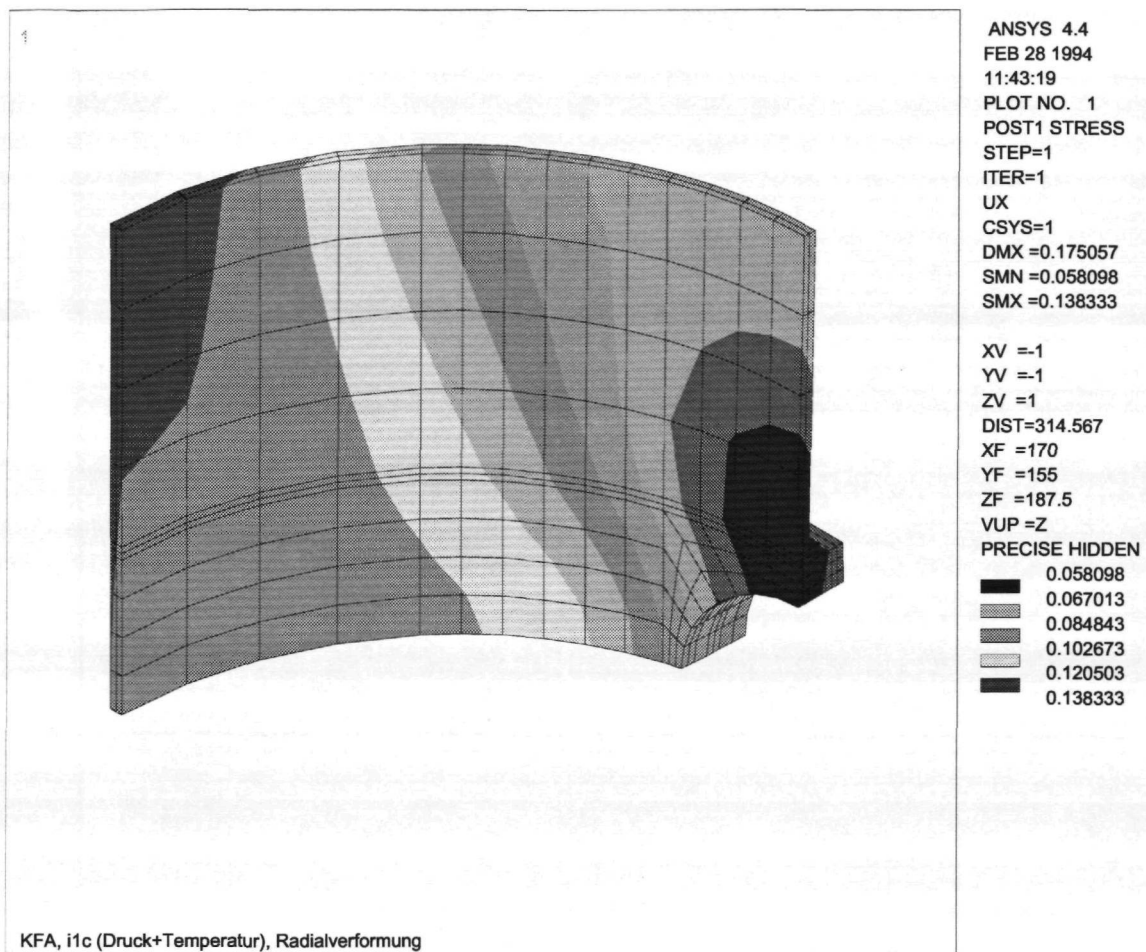


Abb. 5: Verformungen der Segmentstruktur für Modell 1 aus INVAR-Stahl unter Druck- und Temperaturbeanspruchung

Vor der Herstellung der Prüfstandsegmente sind die rechnerisch ermittelten Dehnungen durch Druck- und Temperaturbeaufschlagung auch experimentell überprüft worden. Hierzu ist ein Probekörper aus CFK mit definiertem Faseraufbau gefertigt worden. Das CFK-Probeselement besitzt folgende Spezifikationen:

- Geometrie: $d_{innen} = 602 \text{ mm}$, $d_{außen} = 612 \text{ mm}$, $s = 5 \text{ mm}$, $h = 240 \text{ mm}$
- Material: Carbonfasern FT300B-1200-50B; Matrix EP Tg 160°C, Aufbau +/-60°-Wicklungen mit Innenschicht OH 13 (schwarz) mit je einer 87°-Lage innen und außen

Zur Messung der Dehnungen des CFK-Segments in Umfangsrichtung unter Innendruck und Temperatureinfluß werden an drei um jeweils 120° versetzten Stellen auf dem Mantel

3. Die Laborversuchsstände

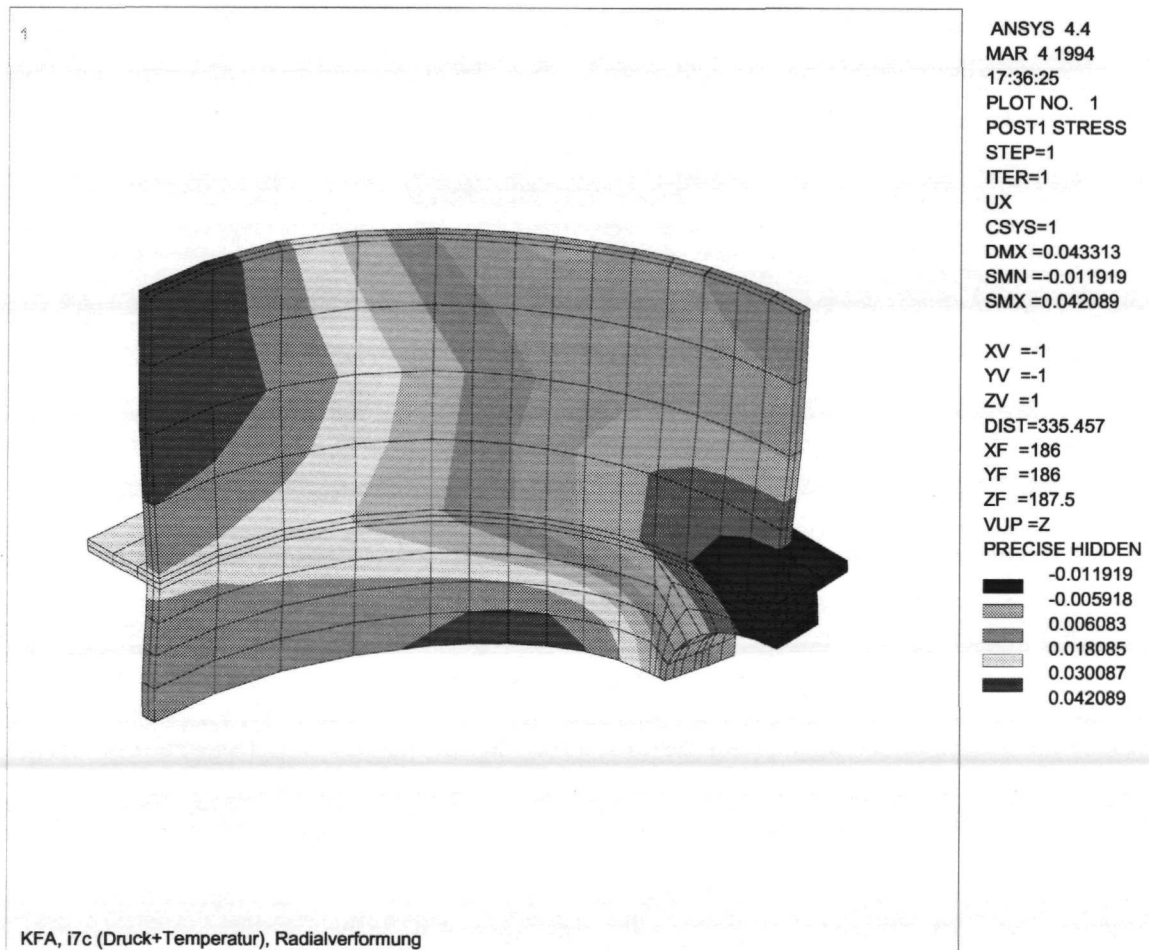


Abb. 6: Verformungen der Segmentstruktur für Modell 3 aus CFK unter Druck- und Temperaturbeanspruchung

DMS aufgeklebt. Aus den Dehnungen läßt sich die radiale Aufweitung des Segments berechnen. Die gesamte Vorrichtung befand sich in einer temperierbaren Wärmekammer.

Die Messungen haben für einen Lastfall von 150 kPa und einer Temperatur von 150 °C eine maximale Dehnung von 0,3 mm ergeben. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist zu $\alpha = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ermittelt worden.

Die tatsächlich im späteren Lastabtragsexperiment auftretenden Druckbeanspruchungen in radialer Richtung auf die Prüfstandwand liegen weit unterhalb der 150 kPa, die maximalen Wandtemperaturen bei Experimenten mit beheizten Dummies liegen bei etwa 80 °C. Auf Grund dieser beiden Umstände kann bei den Lastabtragsexperimenten von radialen Dehnungen weit unterhalb der 0,3 mm ausgegangen werden.

3. Die Laborversuchsstände

3.2.2. Die Bodenplatte

Nach unten sind die Versuchsstände LEISA I und II durch Bodenplatten aus CFK verschlossen. In die Bodenplatte von LEISA I werden zur Ermittlung der Vertikaldrücke drei Öffnungen mit Durchmessern von 80 mm eingelassen, in die von LEISA II neun Öffnungen mit Durchmessern von 150 mm. Um die auf Grund des Gewichtes der Füllung und der Temperatur hervorgerufenen Verformungen von Versuchsstand LEISA II zu minimieren, sind diese vor Anfertigung der Platten ebenfalls rechnerisch ermittelt worden. Zwei Geometrievarianten haben zur Diskussion gestanden:

1. FE-Modell 1:

- Geometrie:
 - Vertikale Lagerung der Bodenplatte außerhalb des Durchmessers 600 mm in der Mitte des ursprünglich ebenen Auflagebereichs. Ein Verkippen der quadratischen Bodenplatte (720 mm x 720 mm) wird ermöglicht (biege-weiche Lagerung).
 - Wandstärke der Bodenplatte: 15 mm
 - insgesamt vier Versteifungsriegel ($h = 100$ mm, $s = 10$ mm) bis an den Auflagebereich heranreichend
 - neun Bohrungen für Druckaufnehmer (Abb. 7)
- Material:
 - Bodenplatte: CFK (E-Modul: $6,75 \cdot 10^5$ Nmm⁻², $\alpha = 0$)
 - Versteifungsriegel: CFK (E-Modul: $1,35 \cdot 10^5$ Nmm⁻², $\alpha = 0$)

2. FE-Modell 2:

- Geometrie:
 - Geometrie basiert auf FE-Modell 1, aber im Bereich der quadratischen Auflagefläche zusätzlicher Versteifungsrahmen ($h = 100$ mm, $s = 10$ mm), an den die vier vorhandenen Versteifungsriegel angebunden sind.
 - Vertikale Lagerung an der Unterkante des zusätzlichen, umlaufenden Versteifungsrahmens (Abb. 8)
- Material:
 - Bodenplatte: CFK (E-Modul: $6,75 \cdot 10^5$ Nmm⁻², $\alpha = 0$)
 - Versteifungsriegel: CFK (E-Modul: $1,35 \cdot 10^5$ Nmm⁻², $\alpha = 0$)

Die Vertikalverformung der Bodenplatte beträgt bei FE-Modell 1 in der Mitte -0,33 mm, an den Außenkanten +0,15 mm (Abb. 9). Innerhalb des Segmentbereichs betragen die Verformungen -0,33 mm, am Rand -0,17 mm.

3. Die Laborversuchsstände

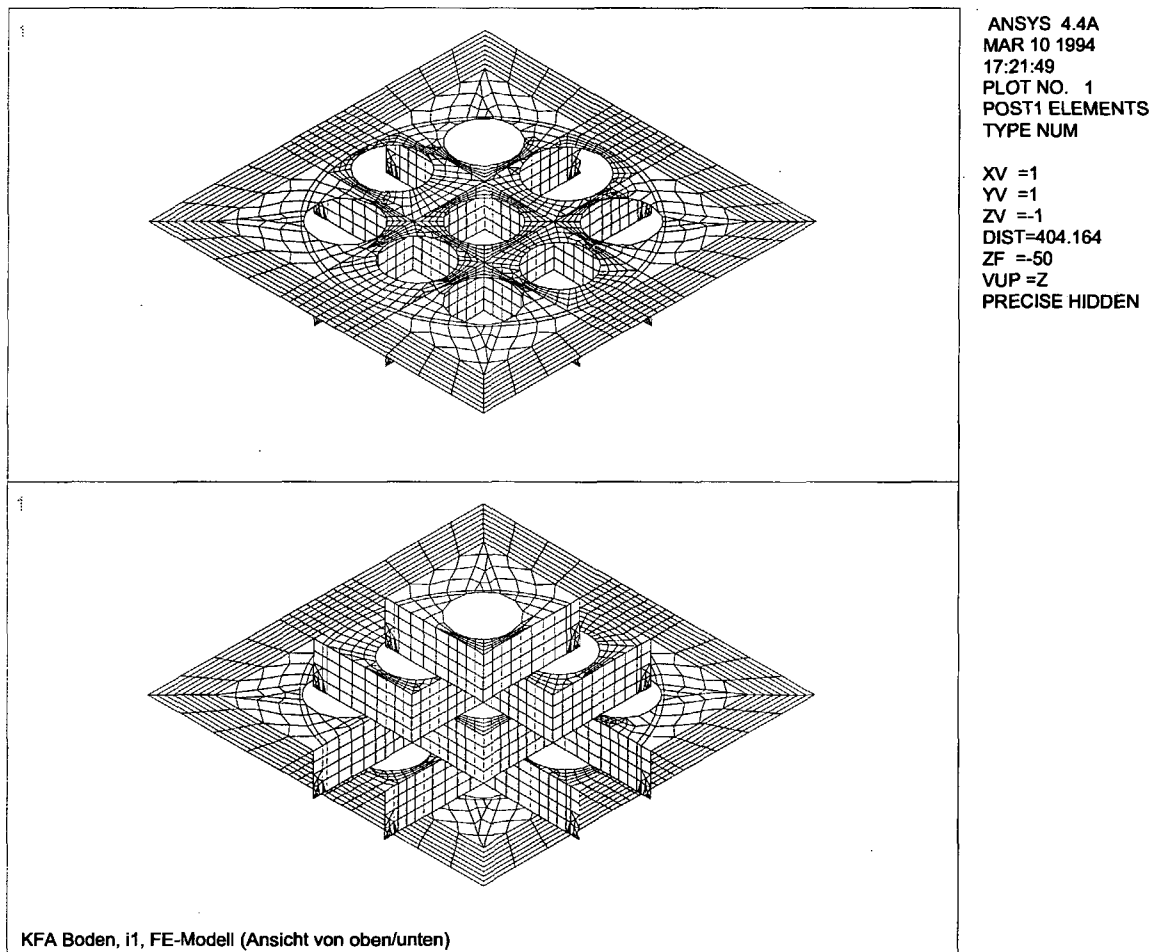


Abb. 7: CFK-Bodenplatte nach Modell 1 mit vier Verstärkungsriegeln bei biegeweicher Lagerung

Die Vertikalverformung der Bodenplatte reicht bei FE-Modell 2 von -0,2 mm in der Mitte bis zu +0,04 mm an den Außenkanten (Abb. 10). Der innerhalb der Mantelflächen liegende Bereich erfährt Verformungen von -0,2 mm (Mitte) bis -0,06 mm (Rand).

Die Berechnungen belegen die äußerst geringen Verformungen der CFK-Bodenplatte nach FE-Modell 2 unter Druck- und Temperaturbeanspruchung. Somit sind die Voraussetzungen für verlässliche Messungen der Druckverteilungen einer Salzgrusschüttung gegeben.

3.3. Die Mechanik der Meßwertaufnehmer

Die Versuchsstände LEISA I und II ruhen auf Stahlplattformen von 800 mm bzw. 1200 mm Höhe und sind in begehbare Arbeitsbühnen integriert (Abb. 11).

3. Die Laborversuchsstände

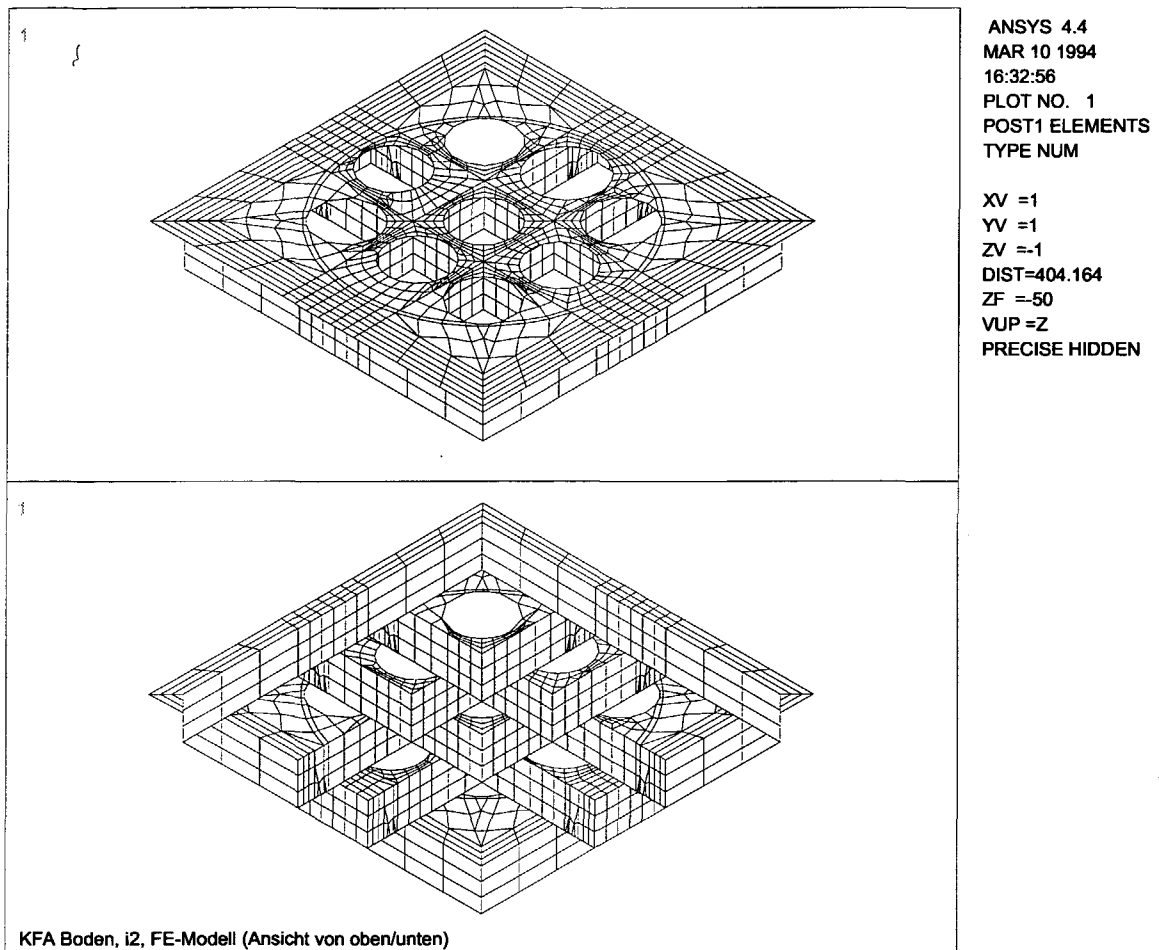


Abb. 8: CFK-Bodenplatte nach Modell 2 mit vier Verstärkungsriegeln und zusätzlichem umlaufenden Versteifungsrahmen

Die unmittelbare Messung der Druckkomponenten in axialer Richtung auf die Bodenplatte (Abb. 12 und 13) und in radialer Richtung auf die Zylinderwände (Abb. 14 - 16) übernehmen speziell gefertigte Meßwertaufnehmer (Abb. 17). Die Belastungsplatten zur Aufnahme des Schüttgutdrucks sind kreisrund, die Oberflächen der Aufnehmer im Mantel der Rohrsäulen (Radialdruckaufnehmer) der zylindrischen Innenwand angepaßt.

Die Belastungsplatte wird über eine Welle in einer Kugelhülse geführt. Ergebnisfälschende Kräfte zur Überwindung der Haftreibung der Kugelhülsen liegen nach Angaben des Herstellers unter 5 N und sind somit vernachlässigbar. Am Ende der Welle sitzt eine Rändelschraube, mit der die Belastungsplatte exakt bündig zu den Innenseiten (Boden- und Mantelflächen) der Prüfstände justiert werden kann.

Die Durchmesser der axialen Belastungsplatten betragen 60 mm (LEISA I) bzw. 128 mm (LEISA II), die der radialen 68 mm bzw. 158 mm. Die Durchmesser der Platten sind nach unten begrenzt durch die verwendete Körnung von 0 - 10 mm bzw. 0 - 20 mm der

3. Die Laborversuchsstände

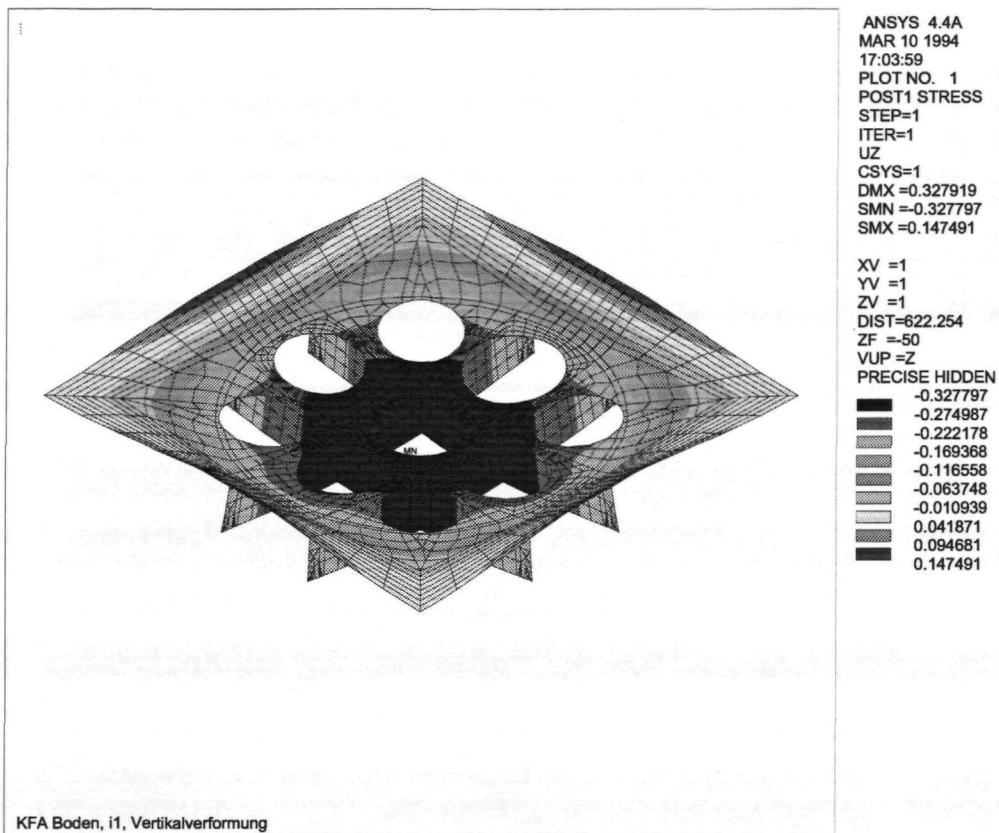


Abb. 9: Verformungen der Bodenplatte für Modell 1 (CFK) unter Druck- und Temperaturbeanspruchung

Salzgrusschüttung. Es existieren in der Schüttguttechnologie Empfehlungen (1:5 - 1:10), in welchem Verhältnis Korndurchmesser zu Aufnehmerdurchmesser höchstens stehen sollten. Den weitaus größten Anteil der Schüttung stellt die Fraktion 0 - 4 mm mit 85 Gew.-%, so daß die Empfehlung hier mit 1:15 deutlich unterschritten wird.

Der zu messende Schüttgutdruck wird über die Welle und die Rändelschraube auf einen Hebel übertragen. Dieser ist mit dem elektronischen Sensor, einer handelsüblichen Wägezelle PW2C3 (Doppelbiegebalken, HBM), fest verschraubt. Zwischen Sensor und Belastungsplatte besteht keine feste Verbindung, die Kraftübertragung erfolgt allein über Kontaktdruck. So werden unerwünschte Querkräfte von dem Sensor ferngehalten. Die Wägezelle selbst ist auf der Rückseite der Grundplatte des Meßwertaufnehmers verschraubt.

Um zu verhindern, daß Salzgruskörner in den schmalen Luftspalt zwischen Belastungsplatte und Gehäuse dringen, wird dieser mit Laborfett ausgefüllt. Messungen mit Eichgewichten haben keine Meßwertveränderungen oder Empfindlichkeitseinbußen am Sensor ergeben.

Der Meßwertaufnehmerträger wird von außen auf der zylindrischen Prüfstandoberfläche

3. Die Laborversuchsstände

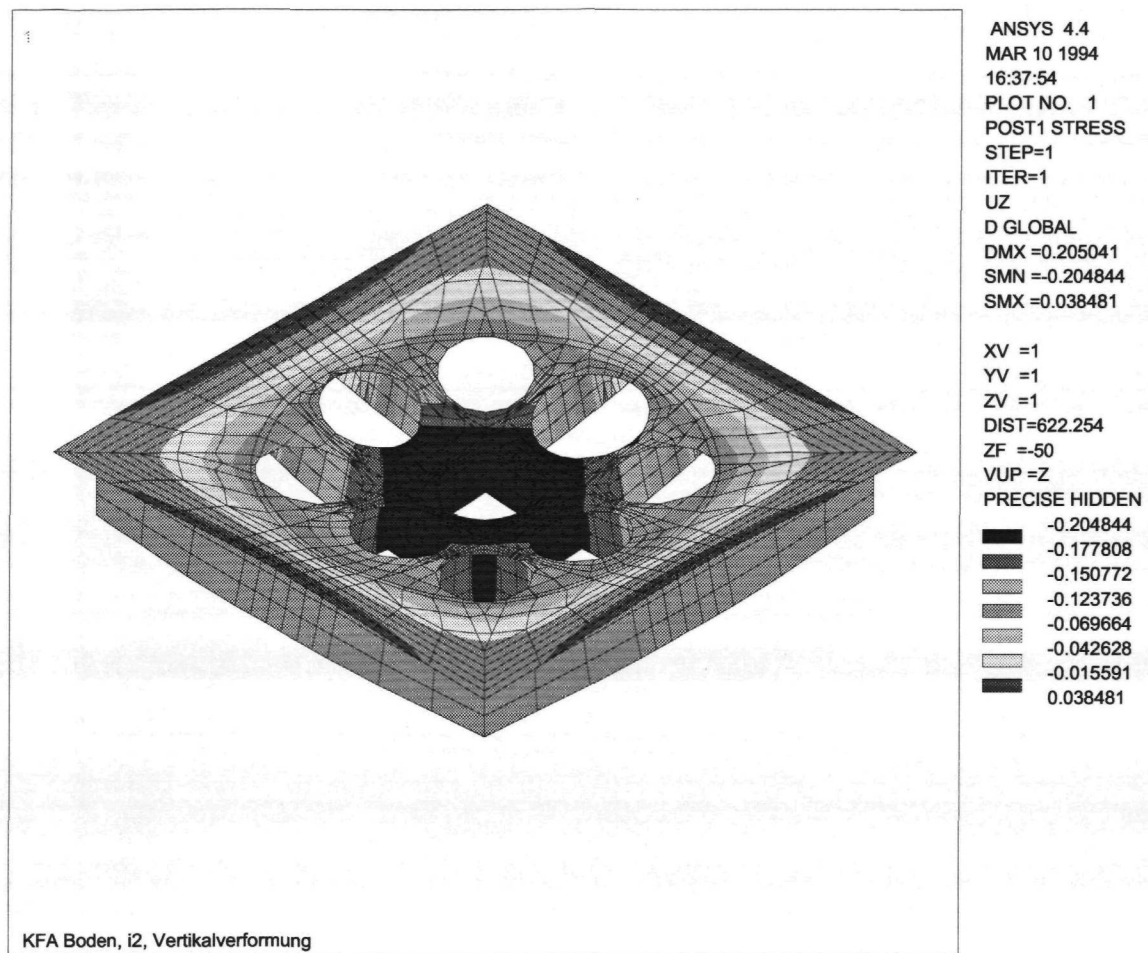


Abb. 10: Verformungen der Bodenplatte für Modell 2 (CFK) unter Druck- und Temperaturbeanspruchung

mit Schrauben befestigt. Eine Belastung der Druckplatte durch die Salzgrusschüttung bewirkt am Biegebalken ein Biegemoment. Die daraus resultierende Dehnung wird mittels DMS gemessen.

Bei Experimenten mit erhöhter Temperatur sind innerhalb der Salzgrusschüttung Widerstandsthermometer zur kontinuierlichen Registrierung der Temperatur angebracht.

3.4. Die Meßwerterfassung

Datenerfassung, -transfer, -verarbeitung und -archivierung erfolgt durch eine rechnergestützte Meßkette von HBM. Kernstück der gewählten Konfiguration ist ein Vielstellenmeßgerät UPM60. Dieses verfügt über die Standardschnittstelle IEEE 488 und RS-232-C und kann maximal mit sechs Einschüben für 60 Meßstellen bestückt werden. Ein

3. Die Laborversuchsstände

IBM-kompatibler Rechner zur Steuerung der Gerätefunktionen sowie zur Speicherung der Meßdaten komplettiert die Meßkette. Alle Meßgeräte sowie die Heiz- und Regeleinheit für die beheizbaren Dummies sind in einem staubdichten Meßschrank neben den Prüfständen untergebracht.

3.5. Die Salzgrushandhabung

Die Theorie zur Beschreibung der Druckverteilung enthält zwei zentrale Voraussetzungen: die homogene Dichte der Füllung aus Salzgrus und Gebinden sowie die auch während des Füllvorgangs stets ebene Oberfläche des Salzgruses, innerhalb dessen keine Rutschbewegungen auftreten.

Um diese Randbedingungen bei den Experimenten näherungsweise zu erfüllen, sind spezielle Füllbehälter konstruiert und gebaut worden. Dieser besteht aus zwei Teilen: einem Edelstahlzylinder, der am unteren Ende konisch zuläuft und durch einen Flansch abgeschlossen wird, sowie einem Träger, auf den Siebgeweberahmen oder Lochblenden mit unterschiedlichen Maschen- und Lochweiten eingespannt werden können. Beide Teile sind über federnde Elemente elastisch miteinander verbunden.

Druckluftgetriebene Zylindervibratoren regen den Träger zu mechanischen Schwingungen an, so daß eingefüllter Salzgrus gleichmäßig über den Querschnitt aus dem Füllbehälter herausrieselt. Die Abstimmung der Loch- und Maschenweiten auf die eingesetzten unterschiedlichen Kornfraktionen des Salzgruses ist in zahlreichen Testläufen optimiert worden.

Zur Aufbereitung des Salzgruses stehen ein Turbulenzmischer sowie eine Taumelsiebmaschine zur Verfügung.

3.6. Die Dummy-Gebinde

Zur Simulation wärmeentwickelnder Abfallgebinde sind elektrisch beheizbare Dummy-Gebinde (Abb. 18) gefertigt worden. Diese bestehen aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter kann mit Bleigranulat gefüllt werden, um so bei Experimenten den Parameter Dummy-Gewicht zu variieren. Auf der zylindrischen Mantelfläche des Innenbehälters sind Heizmanschetten angenietet. Die Stromversorgungs- und Temperaturmeßleitungen werden zur Heiz- und Regeleinheit in temperaturbeständigen Silikonleitungen nach außen geführt. Der Ringspalt zwischen Innen- und Außenbehälter wird zur Verbesserung der Wärmeübertragung mit Quarzsand aufgefüllt. Mit einem abnehmbaren Deckel wird das Dummy oben verschlossen.

3. Die Laborversuchsstände

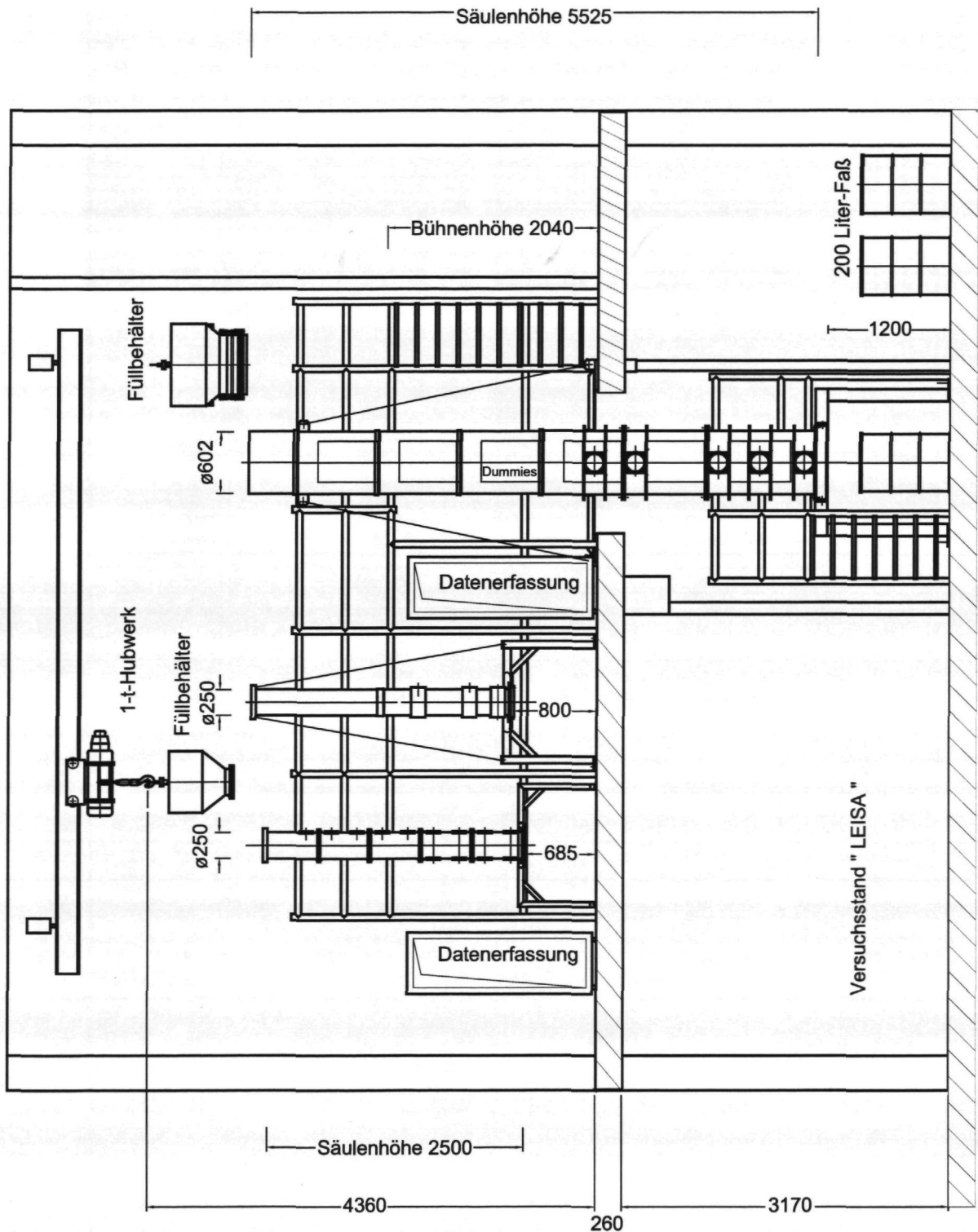


Abb. 11: Versuchshalle mit Prüfständen

3. Die Laborversuchsstände

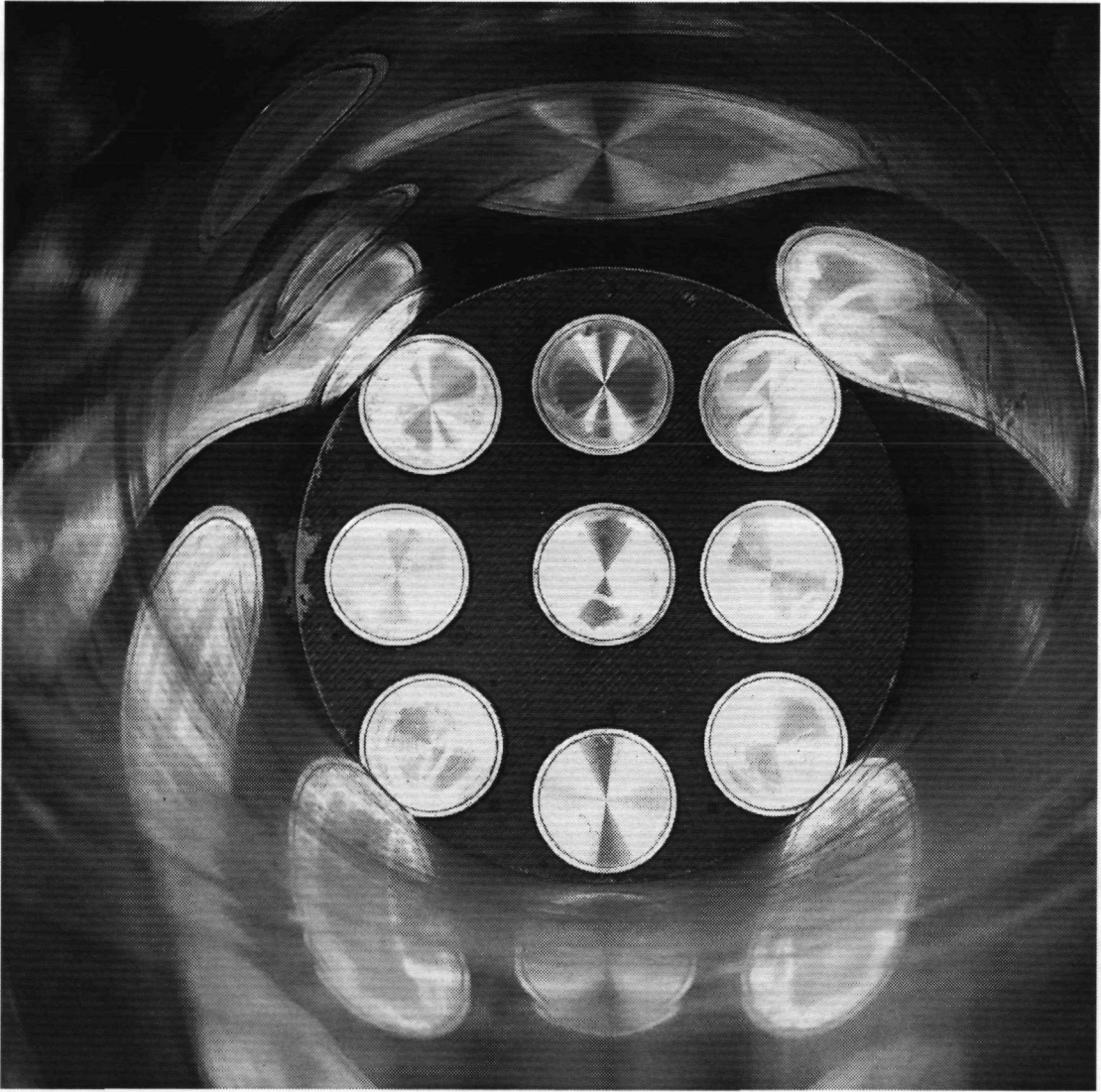


Abb. 12: Blick von oben in Prüfstand LEISA II auf die Bodenplatte mit neun Axialdruckaufnehmern

3. Die Laborversuchsstände

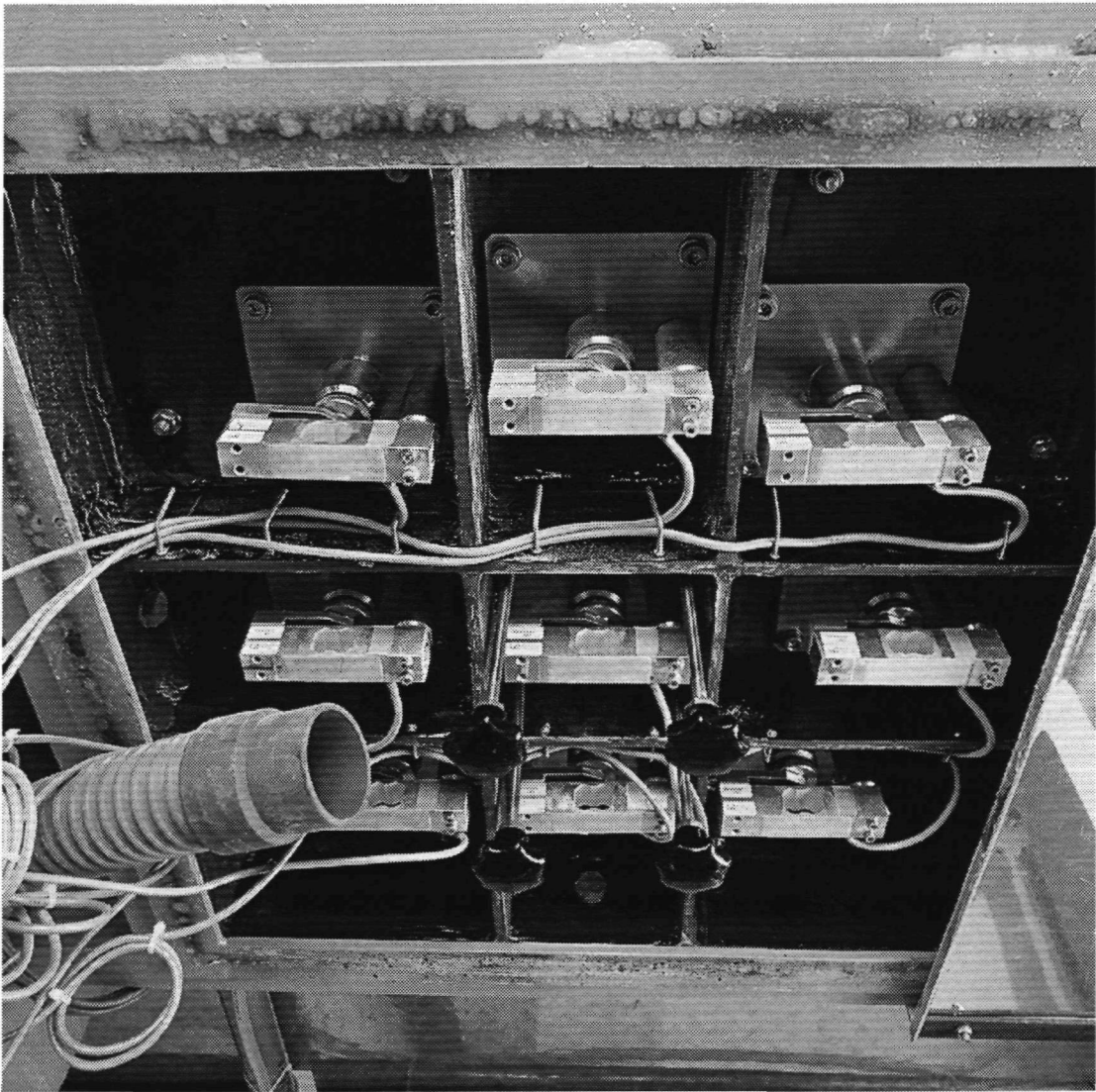


Abb. 13: Bodenplatte von LEISA II mit Axialdruckaufnehmern (Ansicht von unten)

3. Die Laborversuchsstände



Abb. 14: Montage von LEISA II

3. Die Laborversuchsstände



Abb. 15: Verkabelung der Radial- und Axialdruckaufnehmer LEISA II

3. Die Laborversuchsstände

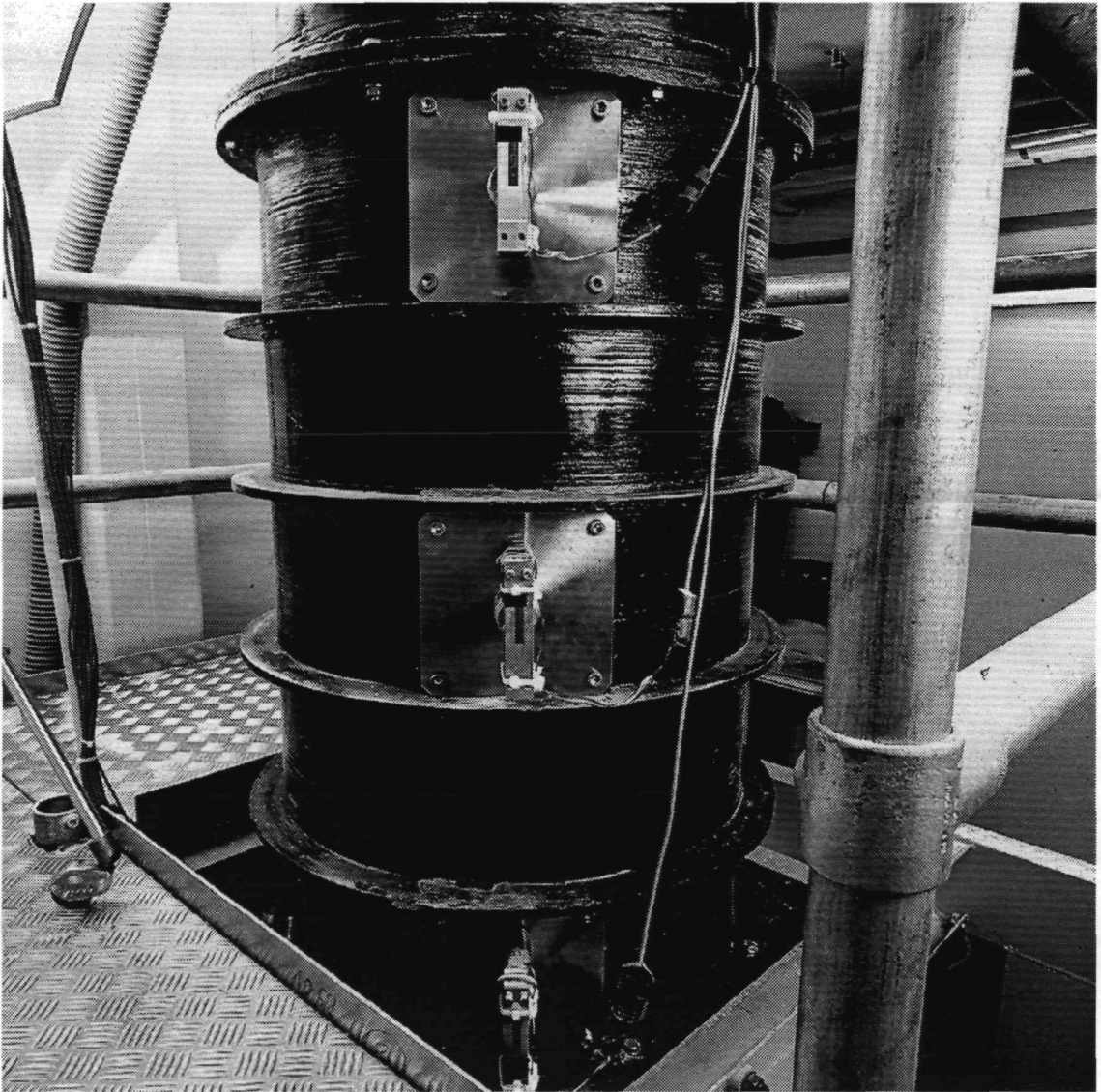


Abb. 16: Mantelflächen mit Radialdruckaufnehmern

3. Die Laborversuchsstände



Abb. 17: Radialdruckaufnehmer LEISA II (teilweise zerlegt)

3. Die Laborversuchsstände

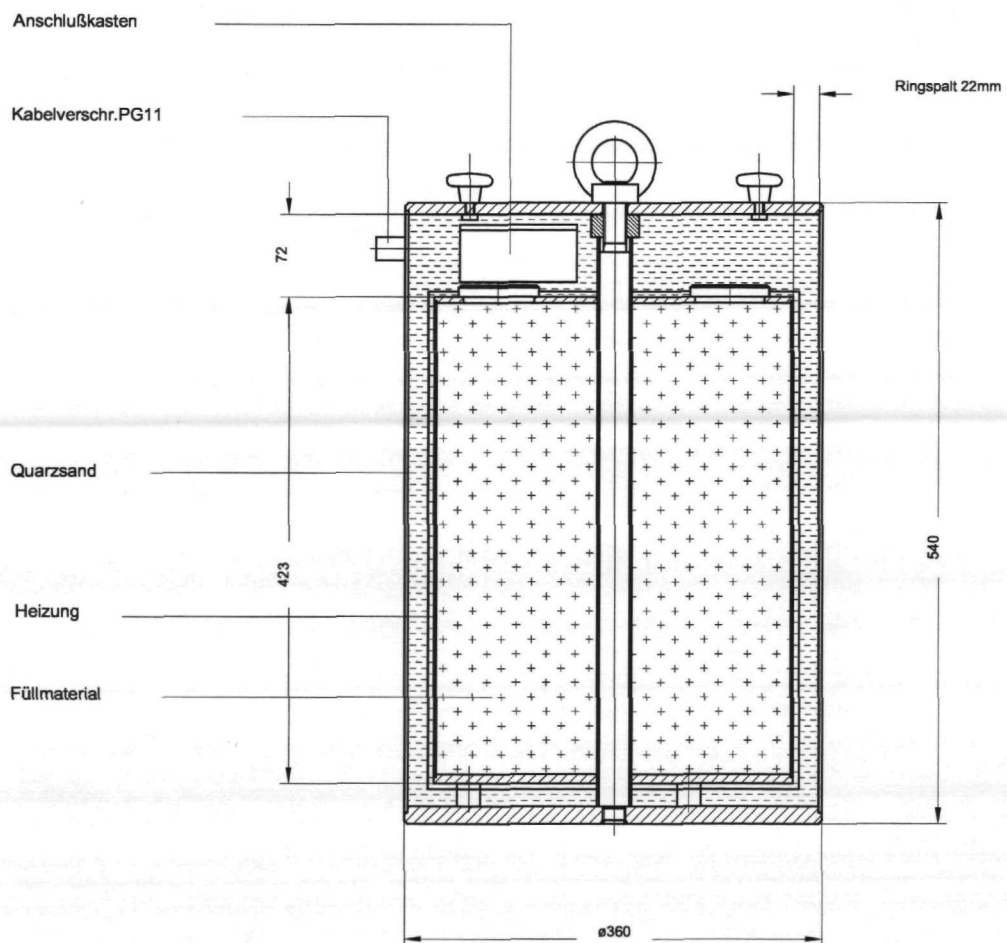


Abb. 18: Dummy-Gebinde

4. Salzgrusexperimente LEISA I

4.1. Die Herstellung der Salzgrusproben

Für die Messungen an Versuchsstand LEISA I wird Salzgrus mit der Körnung 0 - 10 mm unter Variation des Feinkornanteils X_F verwendet. Der Feinkornanteil, der hier als Anteil der Schüttung im Bereich 0 - 2 mm definiert ist, variiert zwischen 0 und 1,0 in Schrittweiten von 0,2. Die Salzgrusfeuchte X_W ist der natürliche Feuchtegehalt.

Das Versuchsgut wird hergestellt, indem von der Gesamtfraktion 0 - 10 mm der Feinkornanteil 0 - 2 mm herausgesiebt und dann anteilmäßig zur Fraktion 2 - 10 mm, je nach Vorgabe, hinzugefügt wird. Das Versuchsgut wird anschließend mit dem Turbulenzmischer homogen durchmischt und mit dem Füllbehälter in die Säule eingebracht. Durch Modifikation des Auslaufquerschnitts kann wahlweise gleichmäßig über den Querschnitt, ringförmig oder mittig eingefüllt werden. Alle Versuche finden bei Raumtemperatur statt.

4.2. Die glatte CFK-Wand

4.2.1. Die gemessenen Druckverläufe

Für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ und 1,0 werden bei gleichmäßiger Füllung die vertikalen und radialen Druckkomponenten in Relation zur Tiefe gemessen. Die aktuelle Füllhöhe bzw. die Tiefe unter der Salzgrusoberfläche während des Einfüllvorgangs kann aus dem Gewicht der Füllung im Füllbehälter bei bekannten geometrischen Dimensionen des Versuchsstandes ermittelt werden und wird simultan mit den Druckwerten aufgezeichnet. Auf Grund systematischer und zufälliger Fehler durch nicht erkennbare und nicht beeinflussbare Vorgänge beim Füllen werden für eine minimale Statistik alle Versuche je Feinkornanteil viermal wiederholt.

In den Abb. 19 - 22 sind die einzeln gemessenen Vertikaldrücke am Rand und in der Mitte der Bodenplatte in Relation zur Tiefe z für die verschiedenen Feinkornanteile aufgetragen. Nach einem relativ kurzen, steilen Anwachsen der Drücke mit der Tiefe wird der Anstieg mit wachsender Tiefe zunehmend geringer (ab etwa $z = 0,25$ m).

Für die Feinkornanteile $X_F = 0 - 0,4$ münden die Drücke nach etwa $z = 2$ m in einen nahezu zur z -Achse parallelen Verlauf, d.h. trotz weiterer Füllung des Versuchsstandes nimmt der Druck jenseits der 2 m nur noch wenig zu. Bezogen auf den Druck bei $z = 2,5$ m werden nach $z = 0,8$ m etwa 90 % des Endwertes erreicht. Für $X_F = 0,4$ liegt die 90 %-Marke bei $z = 1,1$ m.

Für alle drei Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und 0,4 übersteigen die Vertikaldrücke im Zentrum die Werte am Rand. Die Mittelwerte betragen nach $z = 2,5$ m am Rand 3,7 kPa und in der Mitte 4,2 kPa.

4. Salzgrusexperimente LEISA I

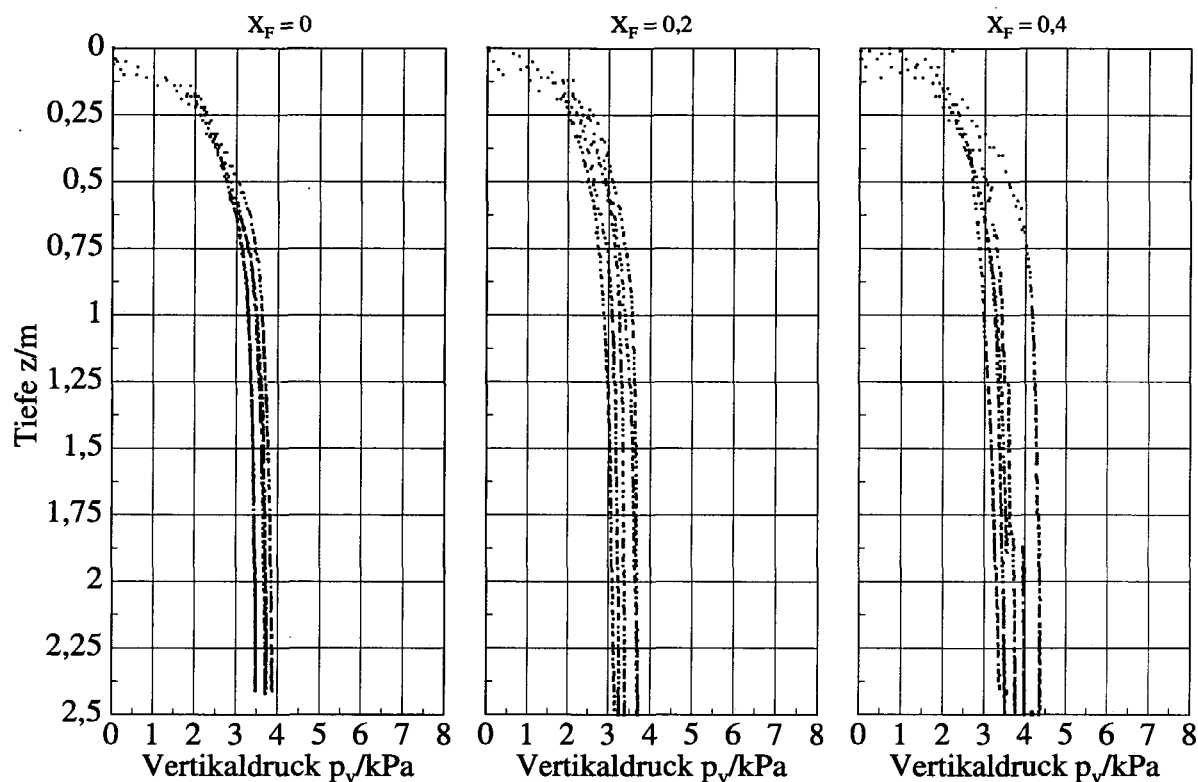


Abb. 19: Gemessene Vertikaldrücke (Rand) in LEISA I mit glatter CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und $0,4$ in Relation zur Tiefe

Für die Feinkornanteile $X_F = 0,6, 0,8$ und $1,0$ stellt sich die Situation etwas anders dar. Nach Erreichen einer gewissen Füllhöhe, die für den Feinkornanteil charakteristisch scheint, erfolgt innerhalb der Schüttung eine Setzungsbewegung, die während des Experiments auch hörbar ist. Als Folge dieser Setzung sind in den Druckverläufen kleine Stufen erkennbar bei $z = 2,4$ m für $X_F = 0,6$ ($z = 2,2 - 2,4$ m für $X_F = 0,8$, $z = 1 - 1,4$ m für $X_F = 1,0$).

Um dieses Phänomen zu klären, sind Experimente mit einem durchsichtigen Plexiglasrohr durchgeführt worden. Während der Füllung des Rohres wächst die Schüttgutoberfläche zunächst gleichmäßig nach oben. Sobald eine bestimmte Füllhöhe erreicht ist, erfolgt eine geringe Setzungsbewegung der gesamten Salzgrusfüllung um etwa 1 mm.

Der Ablauf dieser Setzungsbewegung ist folgender: während der Füllung des Rohres bilden sich innerhalb der Salzgrusschüttung fachwerkartige Strukturen, indem sich die Salzgruskörner gegenseitig in alle Richtungen sowie an der Wand abstützen. Sobald die Auflast einen gewissen Wert überschreitet, gibt die innere Struktur nach und rutscht nach unten. Die Stufen kündigen also nur das Überschreiten der Haftreibung an, d.h. den Übergang von Haft- zu Gleitreibung. Da sich aber die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten in der Regel nur wenig unterscheiden, wird das Abgleiten schnell gestoppt. Kurz nach dem Abrutschen nehmen die Drücke leicht ab und gehen in einen vertikalen

4. Salzgrussexperimente LEISA I

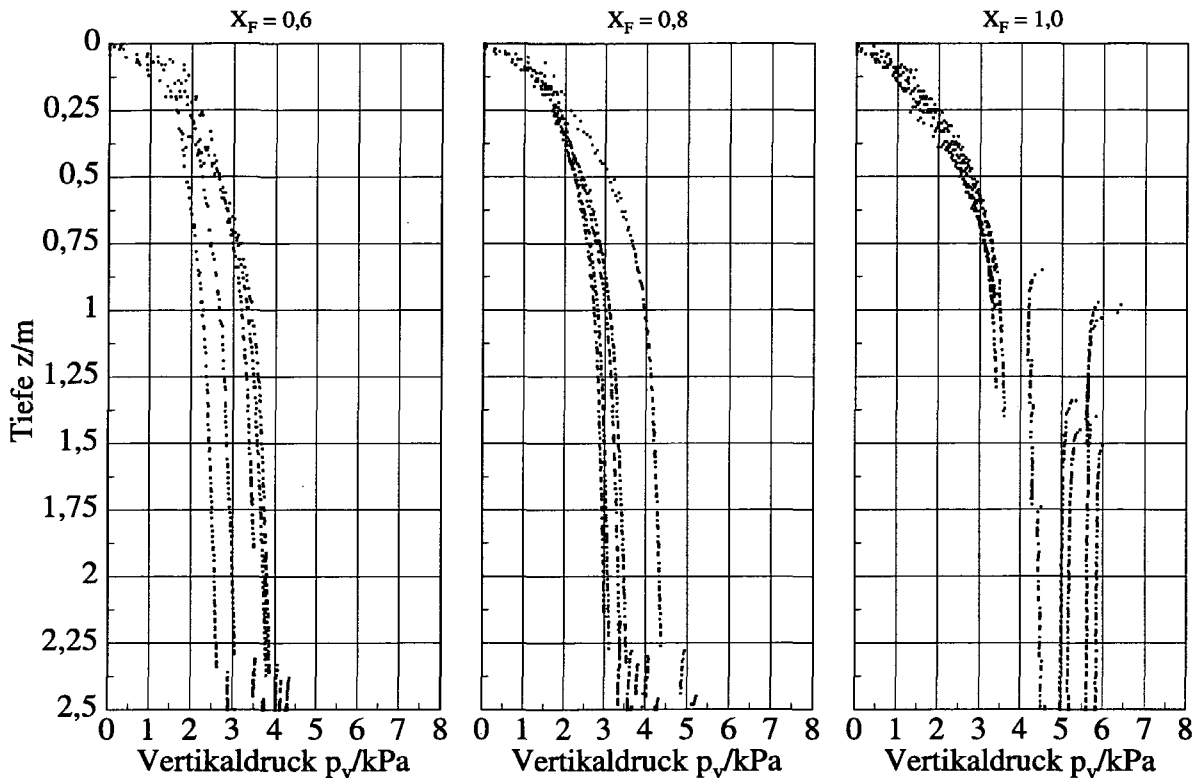


Abb. 20: Gemessene Vertikaldrücke (Rand) in LEISA I mit glatter CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0,6$, $0,8$ und $1,0$ in Relation zur Tiefe

Ast über. Bei $X_F = 1,0$ erhöhen sich zwar durch das Abrutschen die Drücke von $3,5$ kPa auf 6 kPa, sie liegen aber weit unterhalb des Wertes ohne Lastabtragung. Ein weiteres Abgleiten wird innerhalb der $2,5$ m Versuchsstandtiefe nicht mehr beobachtet.

Das kurze Abrutschen der Salzgrusschüttung an der Wand führt offenbar zu einer geringfügig höheren Dichte. Mit dieser Verdichtung in Vertikalrichtung ist auch eine Querdehnung der Schüttung und damit eine erhöhte Radialkraft auf die Wand verbunden. Die Konsequenz ist eine erhöhte Tragfähigkeit dieses Schüttungsabschnitts, die teilweise in leicht abnehmenden Vertikaldrücken nach der Setzung, insbesondere bei $X_F = 1,0$ gut zu beobachten, resultiert. Eine Relativbewegung der Salzgrusschüttung zur Wand stabilisiert die Tragwirkung auf höherem Niveau.

Damit stellt sich sofort die Frage, ob sich solche Setzungsbewegungen bei größeren Füllhöhen, d.h. größeren Auflasten, wiederholen. Eine Vergrößerung der Versuchsstandhöhe schafft hier Klarheit. Der gezielten Verdichtung eines eingefüllten Lastabschnitts, ähnlich den Verdichtungsarbeiten bei Fundamenten aus losem Schüttgut, zur Vermeidung weiterer Setzungen und zur Verbesserung der Tragfähigkeit sollte bei einer Weiterführung des Programms ebenfalls durch ausgewählte Experimente nachgegangen werden.

Die etwas größeren Drücke für die Kornfraktionen $X_F = 0,6 - 1,0$ sind nicht etwa Folgen

4. Salzgrusexperimente LEISA I

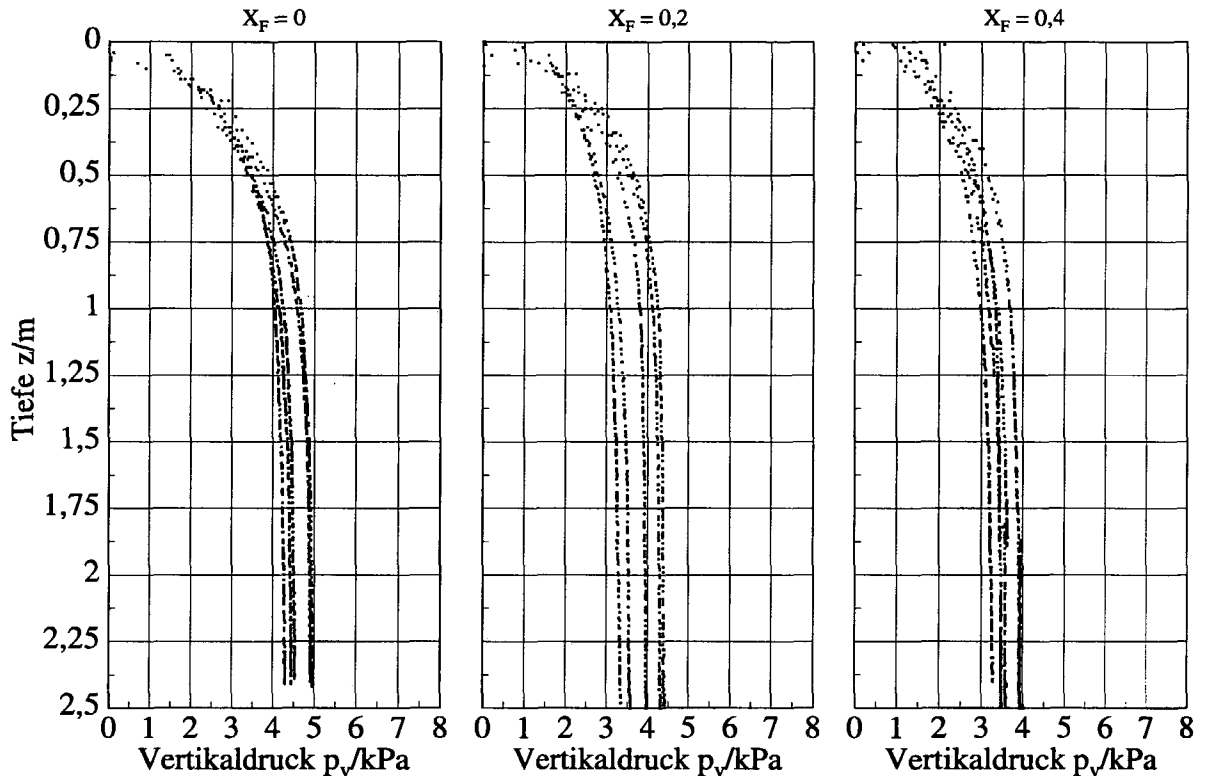


Abb. 21: Gemessene Vertikaldrücke (Zentrum) in LEISA I mit glatter CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und $0,4$ in Relation zur Tiefe

einer höheren Dichte dieser Fraktionen, sondern allein Auswirkungen der Setzungen. Verfolgt man den Kurvenverlauf dieser Fraktionen, so ergäbe sich ohne die Setzungen extrapoliert auf 2,5 m, das gleiche Druckniveau wie für die Fraktionen mit geringem Feinkornanteil. Die Schüttung mit der geringsten Dichte ($X_F = 1,0$) verursacht die höchsten Vertikaldrücke. Hier sind auch die höchsten Setzungsamplituden zu beobachten.

4.2.2. Die Salzgrusparameter - glatte Wand

Das Modell zur Beschreibung der Druckverteilung enthält geometrische und materialtypische Parameter. Die geometrischen Parameter sind mit den Dimensionen der Versuchsstände festgelegt, die materialtypischen müssen für einen Vergleich der Rechnungen mit den Experimenten ermittelt werden. Die Schüttgutdichte und das Verhältnis Radial- zu Axialdruck werden bei jedem Einzelversuch ermittelt, die inneren Reibungsbeiwerte und die Wandreibungsbeiwerte werden im Teilvorhaben „Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus“ gemessen.

In den Abb. 23 und 24 sind die materialtypischen Parameter Dichte ρ_s , Seitendruckbeiwert k , innerer Reibungsbeiwert des Salzgruses μ_i und Wandreibungsbeiwert μ_w für die glatte CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil aufgetragen. Die Fehlerbalken zeigen

4. Salzgrusexperimente LEISA I

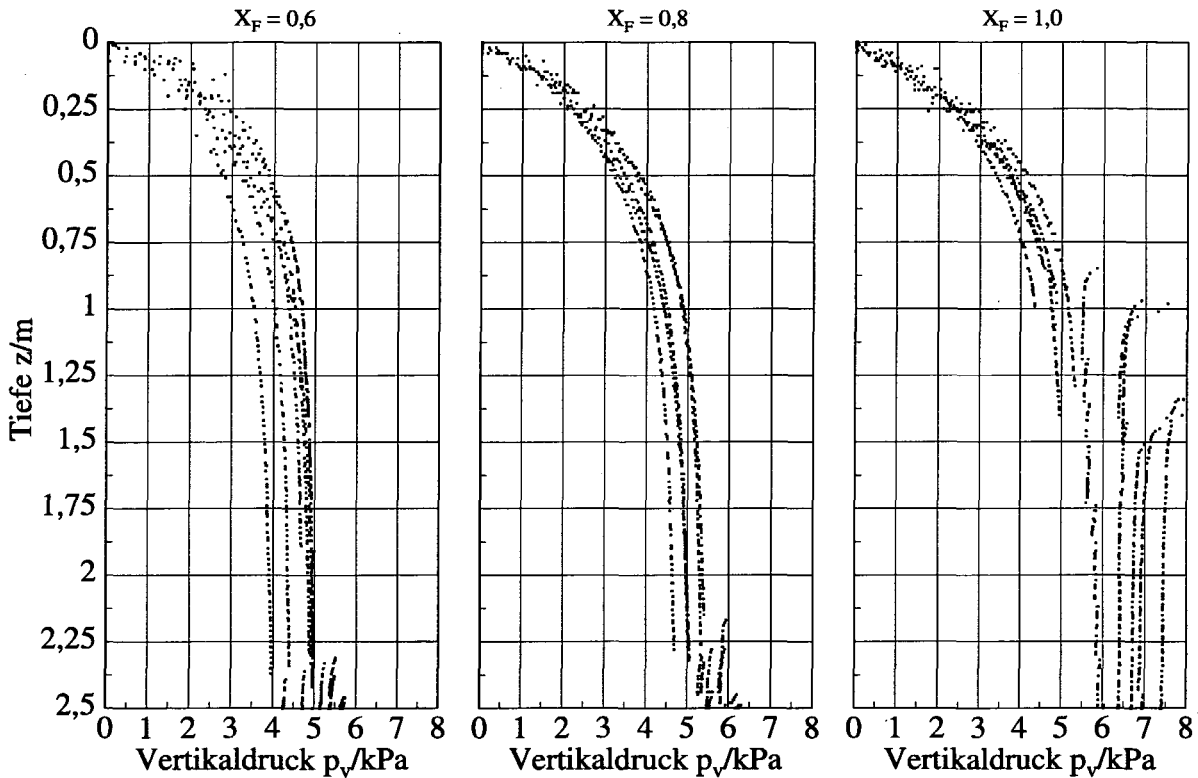


Abb. 22: Gemessene Vertikaldrücke (Zentrum) in LEISA I mit glatter CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0,6$, $0,8$ und $1,0$ in Relation zur Tiefe

die Bandbreite der maximal und minimal gemessenen Werte beim Seitendruckbeiwert.

Die Dichte besitzt ein Maximum von $\rho_S = 1500 \text{ kg/m}^3$ bei $X_F = 0,4$ und fällt nach links und rechts ab. Die kleinste Dichte von $\rho_S = 1290 \text{ kg/m}^3$ weist die Kornfraktion $X_F = 1,0$ auf. Ursache ist der Quotient Leer- zur Materialvolumen der Schüttung sowie die nahezu doppelt so große Korndichte $\rho_K = 2170 \text{ kg/m}^3$ des Salzgruses im Verhältnis zur Schüttdichte. Bei $X_F = 1,0$ fehlt der Anteil 2 - 10 mm mit den schweren Einzelkörnern, bei $X_F = 0,2$ und $0,4$ besetzen die kleineren Salzgruskörner (0 - 2 mm) die Lücken zwischen den großen Salzgrusteilchen (2 - 10 mm) und maximieren so die Dichte. Bei $X_F = 0$ ist der Raum zwischen den großen Salzgruskörnern (2 - 10 mm) frei. Die Streubreite der Dichtemeßwerte von Experiment zu Experiment ist sehr gering.

Der Seitendruckbeiwert k wird aus den Druckmeßwerten während des Experiments bestimmt, indem die Drücke der Radialaufnehmer in unmittelbarer Bodennähe durch die Drücke der Axialaufnehmer an der Wand dividiert werden.

Die Höhen der Fehlerbalken verdeutlichen, wie empfindlich k trotz äußerlich identischer Versuchsbedingungen bei den Versuchswiederholungen auf lokale Druck- und Dichteschwankungen und Setzungsbewegungen reagiert. Die relativen Unterschiede zwischen den Extremwerten betragen zum Teil mehr als 100 %. Das wird hier betont, da das ge-

4. Salzgrusexperimente LEISA I

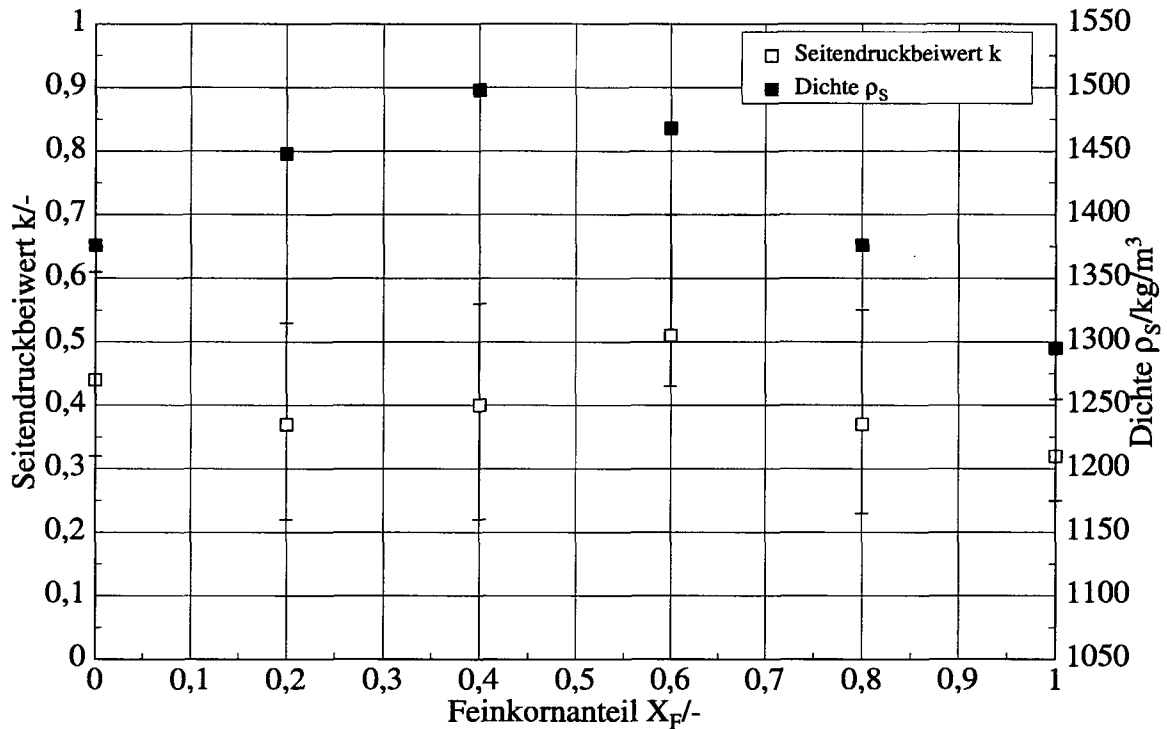


Abb. 23: Gemessene Salzgrusparameter Seitendruckbeiwert (k) und Dichte (ρ_s) für die glatte CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil X_F

gemessene k Eingangsparameter für die Berechnung der Drücke ist und dort Schwankungen in der gleichen Größenordnung bewirkt.

Die von BAF gemessenen Wandreibungsbeiwerte (Abb. 24) steigen mit wachsendem X_F nur unwesentlich an, bei den inneren Reibungsbeiwerten ist eine leichte Erhöhung im Bereich $X_F = 0,4$ im Vergleich zu den anderen Fraktionen erkennbar, korrespondiert also mit dem Maximum der Dichte in diesem Bereich.

4.2.3. Die berechneten Drücke

Zur Berechnung der Drücke werden alle relevanten Parameter, die bei den Experimenten zur Lastabtragung (Seitendruckbeiwerte und Dichten) oder von BAF (Reibungsbeiwerte) ermittelt worden sind, in die Gleichungen eingesetzt. In der Literatur wird üblicherweise zur Berechnung von Vertikaldrücken in Silos der Wandreibungsbeiwert zwischen Schüttgut und Silowand herangezogen. Dabei werden zum Teil gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und berechneten Werten beobachtet. Die Wandreibungsbeiwerte betragen bei solchen Experimenten in seltenen Fällen weniger als 0,4. Werte im Bereich 0,12, wie die Paarung glatte CFK-Wand/Salzgrus, werden nach aktuellem Kenntnisstand der Literatur [1, 6, 8] nicht realisiert.

4. Salzgrusexperimente LEISA I

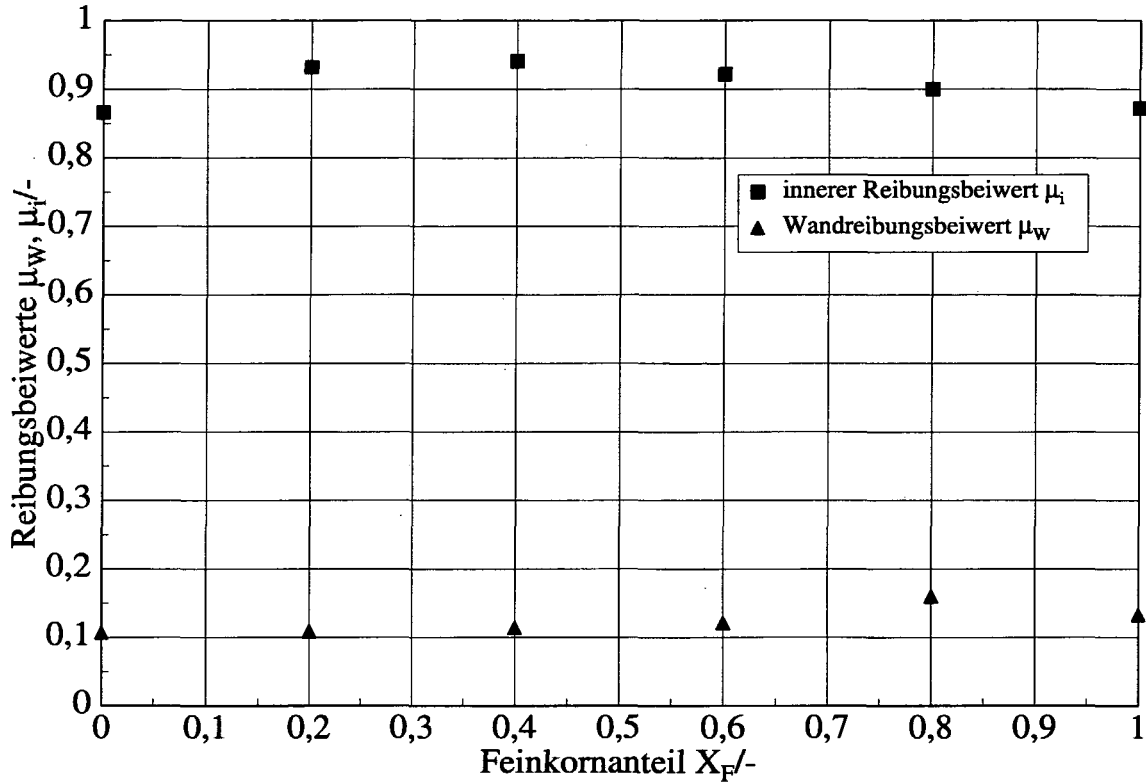


Abb. 24: Gemessene Salzgrusparameter innerer Reibungsbeiwert (μ_i) und Wandreibungsbeiwert (μ_w) für die glatte CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil X_F

Im folgenden wird die Sachlage für den Feinkornanteil $X_F = 0,8$ stellvertretend für die anderen Fraktionen verdeutlicht. Die Salzgrusparameter für $X_F = 0,8$ sind: Seitendruckbeiwert $k = 0,37$, Wandreibungsbeiwert $\mu_w = 0,1602$, Schüttdichte $\varrho_s = 1374 \text{ kg/m}^3$. Der aus fünf Einzelmessungen gemittelte maximale Druck in $z = 2,5 \text{ m}$ Tiefe an der Wand (Mittelpunkt des Axialdruckaufnehmers bei $r = 0,095 \text{ m}$) beträgt $4,9 \text{ kPa}$. Wählt man für die Berechnung des Drucks die Darstellung:

$$p_v = \varrho_s g z \left(1 - \frac{\mu_w k z}{2 r} \right), \quad (15)$$

weicht der nach dem Modell berechnete Druck p_v vom hydrostatischen Druck:

$$p_{hydro} = \varrho_s g z \quad (16)$$

um den Faktor:

$$1 - \frac{\mu_w k z}{2 r} \quad (17)$$

ab. Der hydrostatische Druck (ohne Lastabtragung) beträgt in $2,5 \text{ m}$ Tiefe $33,8 \text{ kPa}$, der nach dem Modell berechnete Gl. (13) $11,5 \text{ kPa}$, das ist das 2,3-fache des gemessenen

4. Salzgrusexperimente LEISA I

Drucks von 4,9 kPa. Die Zahlen besagen: nach dem Modell soll die Lastabtragung den hydrostatischen Druck (33,8 kPa) nach 2,5 m Tiefe auf 11,5 kPa reduzieren, tatsächlich reduziert sie die Drücke auf 4,9 kPa. Für die anderen Kornfraktionen gelten ähnliche Verhältnisse.

Über alle Kornfraktionen $X_F = 0 - 1,0$ gemittelt beträgt der hydrostatische Druck nach 2,5 m Tiefe auf der Bodenplatte 34,4 kPa und der gemittelte maximale Vertikaldruck (der Mittelwert aller aus jedem Einzelversuch maximal gemessenen Vertikaldrücke) 5,1 kPa. Das ergibt bei der glatten CFK-Wand eine Druckreduzierung in 2,5 m Salzgrustiefe um den Faktor 6,7 durch Lastabtragung.

Eine Mittelung aller gemessenen Druckkomponenten über die gesamte Bodenplatte (der Mittelwert aller gemessenen Vertikaldrücke im Zentrum und am Rand) führt auf einen mittleren Vertikaldruck von 4,4 kPa, eine Reduzierung um den Faktor 7,8.

In Tab. 2 sind die maximal gemessenen $p_{v,max}^{exp}$, die berechneten p_v und die hydrostatischen Drücke p_{hydro} in Relation zum Feinkornanteil wiedergegeben. Im Bereich um $X_F = 0,2$ werden die kleinsten Drücke (3,9 kPa) gemessen. Mit zunehmendem Feinkornanteil wachsen sie bis zum größten Wert von 6,7 kPa bei $X_F = 1,0$ an.

Tabelle 2: Maximale gemessene ($p_{v,max}^{exp}$), berechnete (p_v) und hydrostatische Drücke (p_{hydro}) für die glatte Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F

Feinkornanteil X_F	gemessener Druck $p_{v,max}^{exp}$ kPa	berechneter Druck p_v kPa	hydrostatischer Druck p_{hydro} kPa
-	kPa	kPa	kPa
0	4,6	14,2	32,4
0,2	3,9	17,3	35,5
0,4	4,1	14,4	36,8
0,6	5,1	11,2	36,0
0,8	5,8	11,5	33,8
1,0	6,7	14,0	31,8

Die Abweichungen zwischen Experiment und Rechnung sind für Fraktionen $X_F = 0 - 0,4$ wesentlich größer als für die anderen Feinkornanteile. Verursacht wird dies durch Wandreibungsbeiwerte, die bei den Fraktionen $X_F = 0 - 0,4$ um bis zu 33 % unter den Werten für die Feinkornanteile $X_F = 0,6 - 1,0$ liegen, und durch die relativ großen Schwankungen bei den Seitendruckbeiwerten (vgl. Abb. 23).

Für die glatte Oberfläche liefert die alleinige Ansetzung des Wandreibungswertes μ_W bei der Berechnung der Drücke eine sichere Abschätzung nach oben. Die an der Wand berechneten Drücke (13,8 kPa) liegen im Mittel um einen Faktor 3,4 oberhalb der an der Wand gemessenen (4,2 kPa).

4. Salzgrussexperimente LEISA I

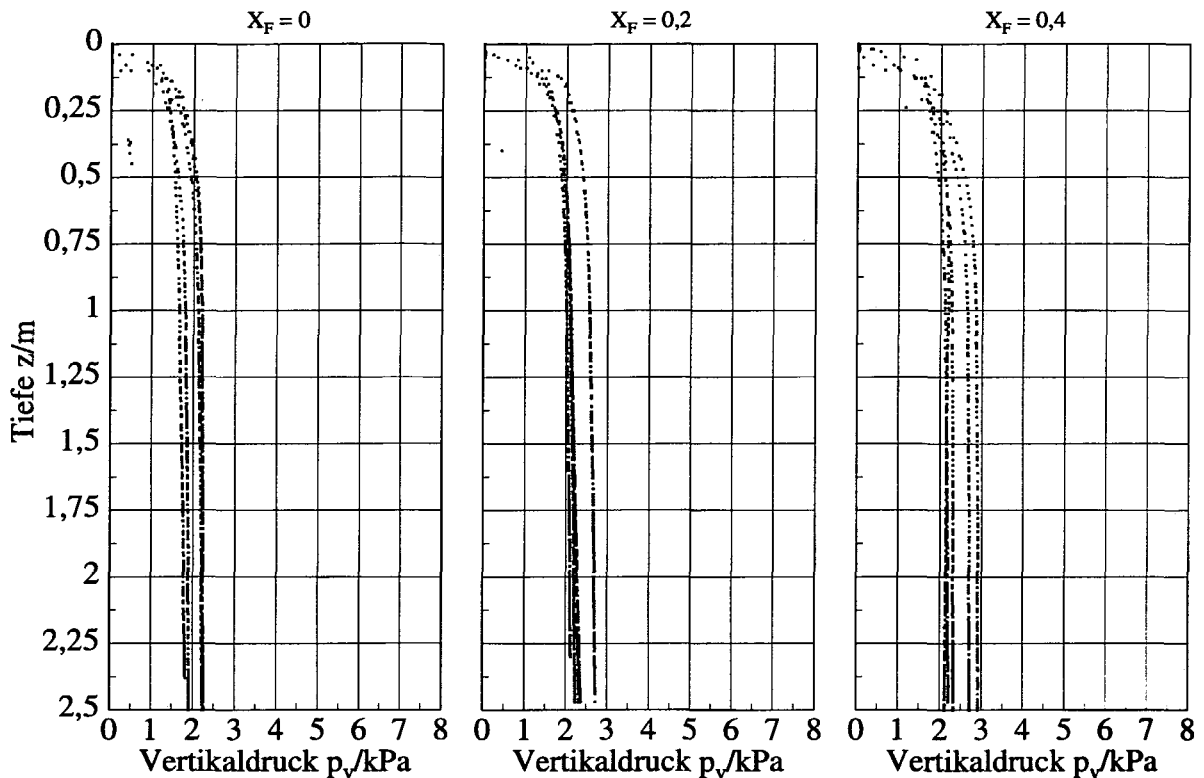


Abb. 25: Gemessene Vertikaldrücke (Rand) in LEISA I mit rauher CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und $0,4$ in Relation zur Tiefe

4.3. Die rauhe CFK-Wand

4.3.1. Die gemessenen Druckverläufe

Für die rauhe CFK-Wand werden die Druckverläufe ebenfalls für die Kornfraktionen $X_F = 0 - 1,0$ bei gleichmäßiger Füllung gemessen (Abb. 25 - 28). Im Vergleich zu den Experimenten bei glatter CFK-Wand ist das Druckniveau für alle Kornfraktionen um etwa einen Faktor 1,7 niedriger.

Für die Feinkornanteile $X_F = 0 - 0,6$ sind nach einer Tiefe von etwa 0,65 m 90 % des Druckes in 2,5 m Tiefe erreicht, für die Feinkornanteile $X_F = 0,8 - 1,0$ in einer Tiefe von 1,1 m. Bei $X_F = 1,0$ sowie bei einigen Messungen für $X_F = 0,8$ tritt die bereits für die glatte CFK-Oberfläche bekannte Setzungsbeziehung der Salzgrussäule auf und zwar interessanterweise in nahezu der gleichen Tiefe von 1 - 1,4 m ($X_F = 1,0$) bzw. 2 - 2,2 m ($X_F = 0,8$).

Das heißt: innerhalb der Salzgrussäule treten abrupte Setzungen nur für Fraktionen mit hohem Feinkornanteil ($X_F = 0,6 - 1,0$) auf. In welcher Tiefe eine Setzung stattfindet, ist nach den bisherigen Erkenntnissen unabhängig von der Wandbeschaffenheit (glatt oder rauh). Ausschlaggebend scheint hier vielmehr die innere Reibungskraft des eingefüllten

4. Salzgrusexperimente LEISA I

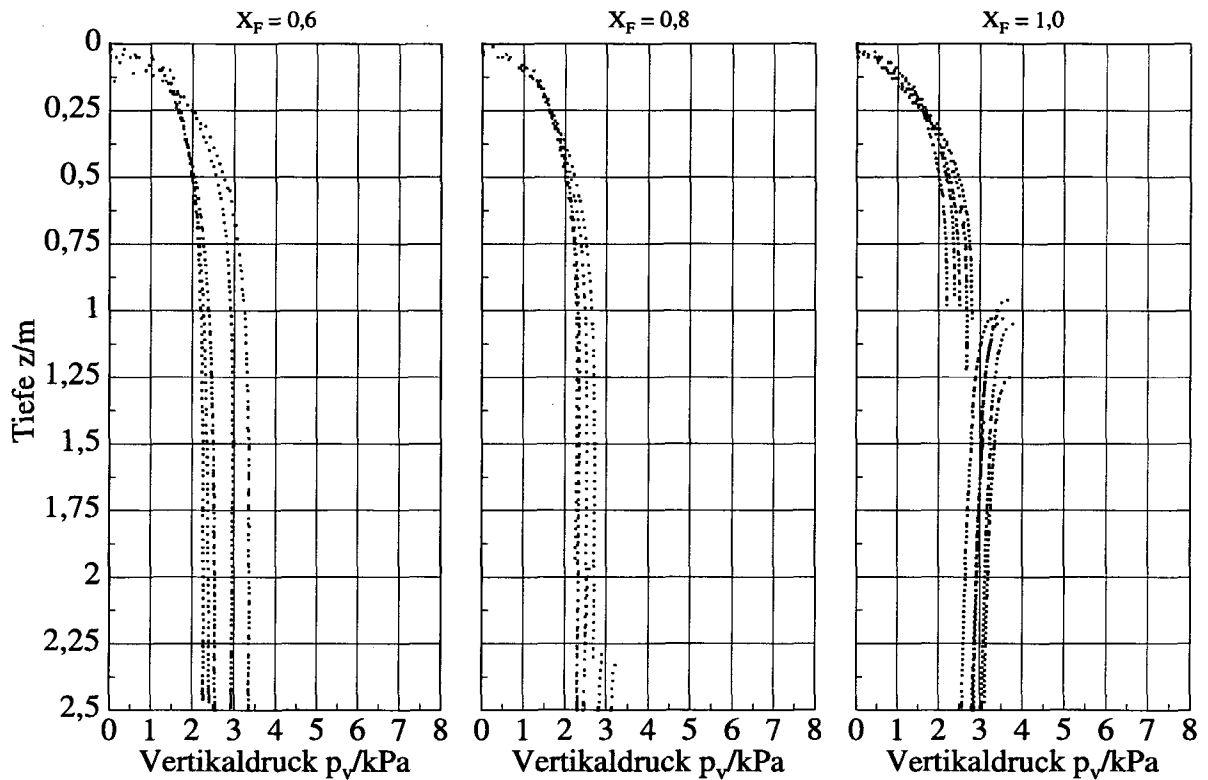


Abb. 26: Gemessene Vertikaldrücke (Rand) in LEISA I mit rauher CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0,6$, $0,8$ und $1,0$ in Relation zur Tiefe

Salzgruses im Verhältnis zum Gewicht und das Porenvolumen (Dichte) der Schüttung zu sein.

Eine Setzung findet dann statt, wenn innerhalb der Schüttung die Gewichtskraft des Schüttgutes die Reibungskraft zwischen den Schüttgutpartikeln übersteigt. Wenn das der Fall ist, bewegt sich die Schüttung von einem metastabilen Gleichgewichtszustand in den nächsten. Allein die „innere Struktur“ der Schüttung, d.h. die innere Reibung, bestimmt die Tiefe (Einfüllhöhe) innerhalb des Versuchsstandes, wo die Setzung stattfindet. Die Wandreibung wirkt sich nur auf die Höhe der Druckstufe an diesen Stellen aus. Bei der rauhen Wand sind die Stufen in allen Fällen kleiner als für die glatte Wand.

4.3.2. Die Salzgrusparameter - rauhe Wand

Der Verlauf der Dichte in Relation zum Feinkornanteil (Abb. 29) für die rauhe Oberfläche ist kongruent mit dem Verlauf für die glatte Oberfläche. Die Dichte besitzt auch hier ein Maximum (1463 kg/m^3) bei $X_F = 0,4$, die Fraktion $X_F = 1,0$ weist die kleinste Dichte (1254 kg/m^3) auf.

Die Mittelwerte der Seitendruckbeiwerte stimmen bis auf den Wert bei $X_F = 0,6$ mit

4. Salzgrusexperimente LEISA I

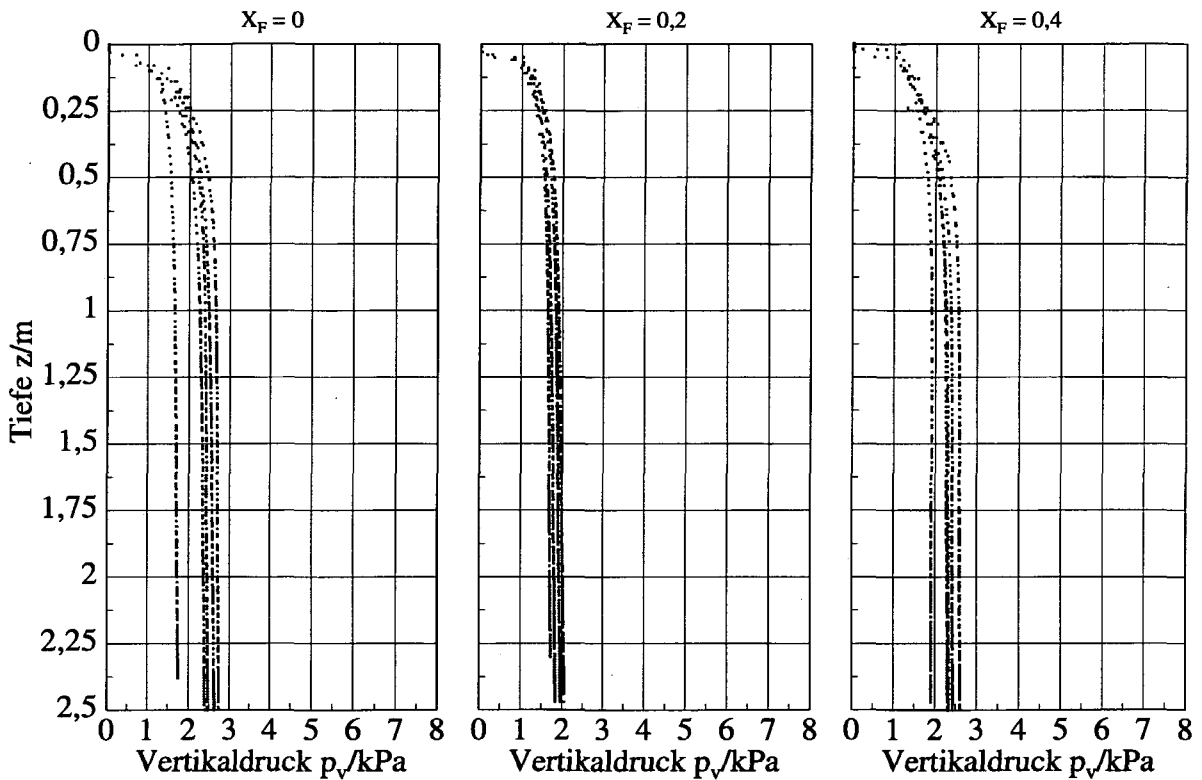


Abb. 27: Gemessene Vertikaldrücke (Zentrum) in LEISA I mit rauher CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und $0,4$ in Relation zur Tiefe

den Werten der glatten Oberfläche überein. Die gemessenen Einzelwerte streuen bei der rauhen Oberfläche weniger stark um die Mittelwerte, wie die Höhen der Fehlerbalken zeigen.

Der Verlauf der Wandreibungsbeiwerte (Abb. 30) korrespondiert ebenfalls mit den Messungen an der glatten Oberfläche, d.h. ein geringer Anstieg von μ_W mit X_F .

4.3.3. Die berechneten Drücke

Wie für die glatte Oberfläche werden zur Berechnung der Vertikaldrücke die von BAF gemessenen Parameter in die Gleichungen des Modells eingesetzt. Die alleinige Ansetzung des Wandreibungsbeiwertes liefert mit Gl. (13) die in Tab. 3 aufgeführten Maximalwerte in Relation zum Feinkornanteil X_F .

Über $X_F = 0 - 1,0$ gemittelt beträgt der Mittelwert aller aus jedem Einzelversuch gemessenen maximalen Drücke $3,1$ kPa (glatte Wand: $5,1$ kPa), eine Reduzierung gegenüber dem hydrostatischen Wert von $34,1$ kPa um den Faktor 11. Eine Mittelung der gemessenen Werte über die gesamte Bodenplatte liefert einen Wert von $2,7$ kPa (glatte Wand: $4,4$ kPa). Die an der Wand berechneten Drücke ($3,1$ kPa) überschreiten die gemessenen

4. Salzgrusexperimente LEISA I

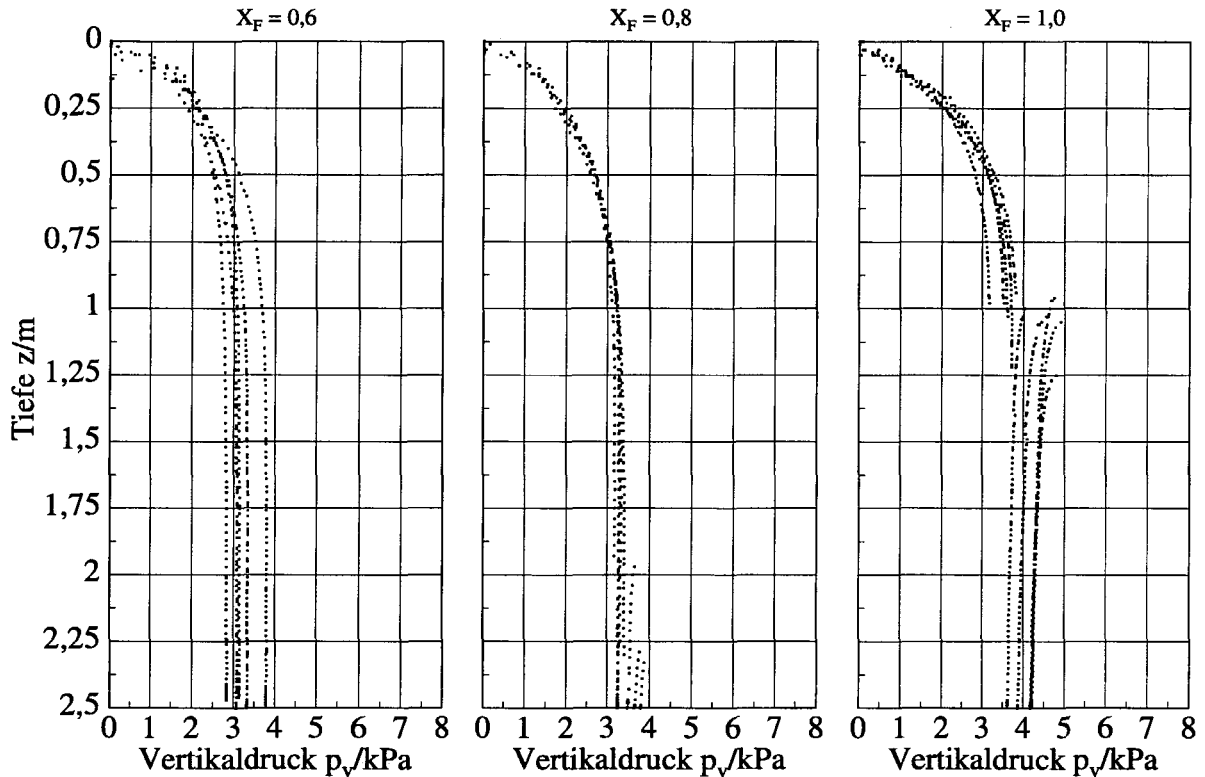


Abb. 28: Gemessene Vertikaldrücke (Zentrum) in LEISA I mit rauher CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0,6$, $0,8$ und $1,0$ in Relation zur Tiefe

Drücke (2,6 kPa) um den Faktor 1,2 (glatte Wand: 3,4).

Ebenfalls aufgeführt sind die maximal gemessenen sowie die hydrostatischen Drücke. Die experimentell ermittelten Drücke besitzen wie bei der glatten CFK-Wand ein Minimum (2,4 kPa) bei $X_F = 0,2$ und steigen mit zunehmenden Feinkornanteil kontinuierlich an. Der Maximalwert von 4 kPa wird bei $X_F = 1,0$ erreicht. Abb. 31 zeigt die berechneten und gemessenen Vertikaldrücke in Relation zur Tiefe für eine Meßreihe aus $X_F = 1,0$.

4.4. Der Vergleich glatte - rauhe Wand

4.4.1. Der Vergleich der Schüttgutparameter

Beim direkten Vergleich der mit der glatten und der rauhen CFK-Innenoberfläche an LEISA I gewonnenen Meßwerte ergeben sich eine Reihe von Gemeinsamkeiten. Die gemessenen Dichten, gemittelt über alle Feinkornanteile, weichen nur um 1 % voneinander ab, wobei in der glatten CFK-Oberfläche die höheren Dichten auftreten. Bei beiden Rauheiten besitzen die Dichten in Relation zu X_F ein Maximum bei $X_F = 0,4$ und ein Minimum bei $X_F = 1,0$.

4. Salzgrusexperimente LEISA I

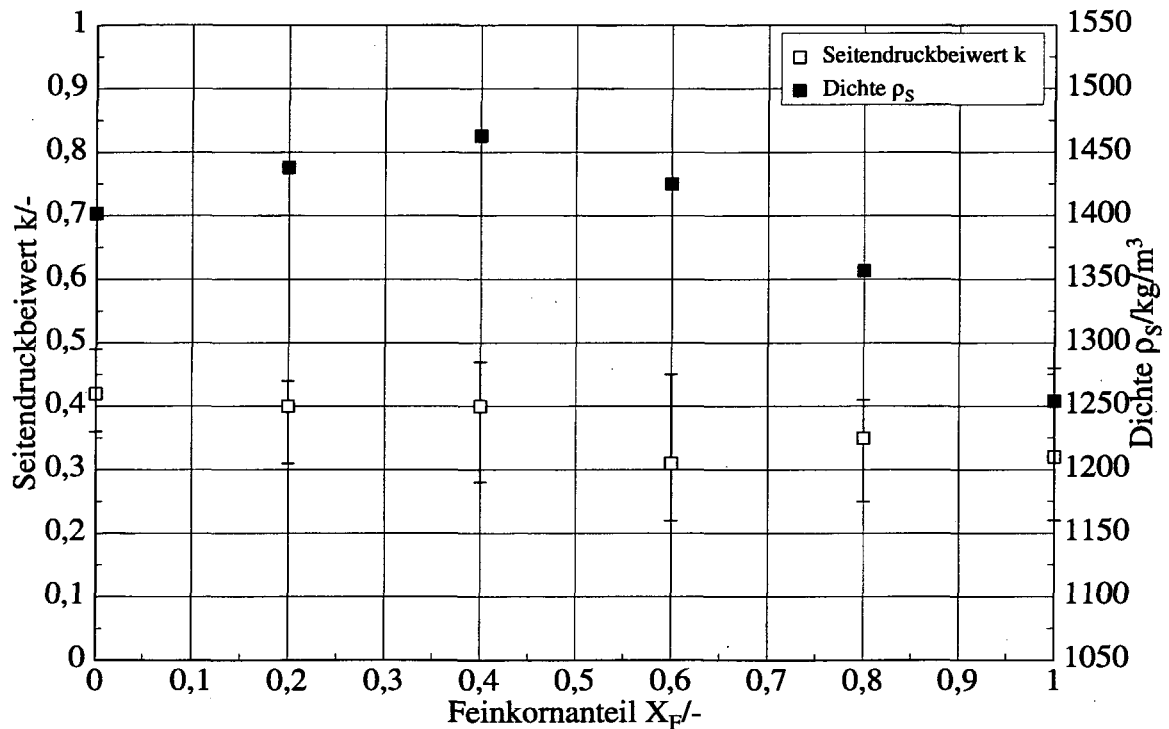


Abb. 29: Gemessene Salzgrusparameter Seitendruckbeiwert (k) und Dichte (ρ_s) für die raue CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil X_F

Die Verhältnisse Radial- zu Vertikaldruck zeigen bis auf den Wert bei $X_F = 0,6$ (glatte Wand) gute bis sehr gute Übereinstimmung. Die maximalen relativen Abweichungen betragen 8 % für $X_F = 0,2$. Der Wert $k = 0,51$ für $X_F = 0,6$ fällt sowohl innerhalb der k -Werte für die glatte Oberfläche als auch im Vergleich zum Wert $k = 0,31$ für die raue Wand aus der Reihe. Das wird noch untermauert durch frühere Messungen an der glatten CFK-Oberfläche, die sich nur dadurch von den aktuellen unterscheiden, daß die Aufnehmer durch Silikonfolien abgedeckt waren. Bei diesen früheren Messungen ist k wie bei der rauhen Oberfläche ebenfalls zu $k = 0,31$ bestimmt worden. Die Ursache für den etwas überhöhten Wert $k = 0,51$ ist im nachhinein nicht mehr feststellbar, da Wiederholungsmessungen durch die Änderung der Oberfläche nicht mehr möglich sind. Unter Berücksichtigung der früheren Messungen für $X_F = 0,6$ ergibt sich somit aus den Messungen für das Verhältnis Radial- zu Vertikaldruck k :

1. Es fällt mit zunehmendem Feinkornanteil nur unwesentlich ab.
2. Es zeigt eine geringe Abhängigkeit von der Wandbeschaffenheit. Bei gleichen Versuchsstanddimensionen und gleichen Randbedingungen stellt es im Rahmen der Meßgenauigkeit eine Materialkonstante dar.

4. Salzgrusexperimente LEISA I

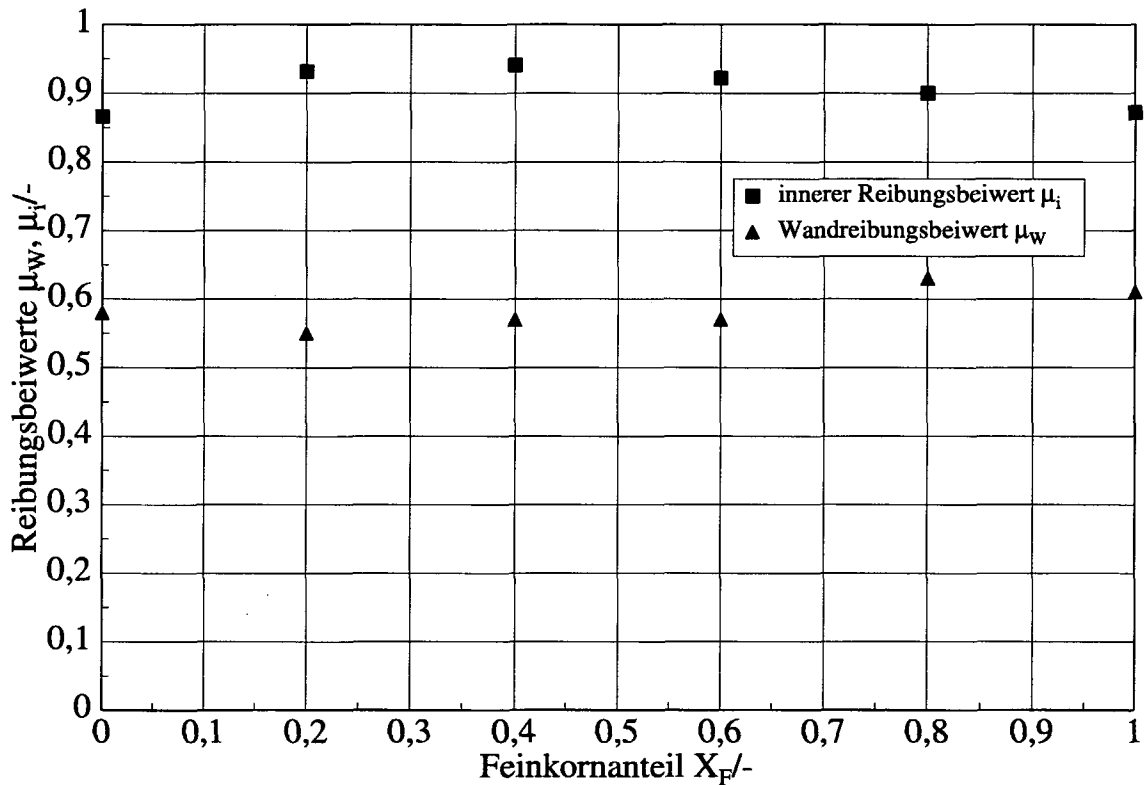


Abb. 30: Gemessene Salzgrusparameter innerer Reibungsbeiwert (μ_i) und Wandreibungsbeiwert (μ_w) für die raue CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil X_F

4.4.2. Der Vergleich der Drücke

Die Messungen belegen grundsätzlich die hohe lastabtragende Wirkung einer Salzgruschicht in vertikalen Bohrlöchern, selbst bei spiegelglatten CFK-Wänden. Wie nicht anders zu erwarten, trägt eine raue Wand stärker ab als eine glatte. Abb. 32 verdeutlicht, daß die jeweils maximal gemessenen Drücke für zwei völlig unterschiedliche Oberflächen in Relation zum Feinkornanteil nahezu parallel zueinander verlaufen.

Während bei einer glatten Oberfläche die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment weniger befriedigend ist, wird durch die Messungen mit der rauhen Wand ein überzeugender Beweis für die prinzipiell richtige Beschreibung der maximalen vertikalen Drücke in Relation zur Tiefe durch das theoretische Modell geliefert. Gründe für die Abweichungen bei der glatten Oberfläche können folgende sein:

1. Der Wandreibungsbeiwert μ_w , der in die Gleichungen eingesetzt wird, bestimmt nicht allein die Lastabtragung, sondern der innere Reibungsbeiwert μ_i muß bei den Rechnungen mit berücksichtigt werden. Das heißt, wirksam wird ein integraler

4. Salzgrusexperimente LEISA I

Tabelle 3: Maximale gemessene ($p_{v,max}^{exp}$), berechnete (p_v) und hydrostatische Drücke (p_{hydro}) für die raue Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F

Feinkornanteil X_F	gemessener Druck $p_{v,max}^{exp}$	berechneter Druck p_v	hydrostatischer Druck p_{hydro}
-	kPa	kPa	kPa
0	2,4	2,7	34,5
0,2	2,4	3,0	35,3
0,4	2,6	3,1	36,0
0,6	3,2	3,9	35,0
0,8	3,5	3,0	33,3
1,0	4,0	3,1	30,8

Reibungsbeiwert μ_{int} , der eine Funktion von μ_i und μ_W ist. Bei glatten Flächen weicht μ_{int} erheblich von μ_W ab. Sie nähern sich einander an bei bei rauheren Oberflächen.

2. Das in den Experimenten gemessene Verhältnis Radial- zu Vertikaldruck unterliegt starken Schwankungen, verursacht durch lokale Druck- und Dichteunterschiede sowie durch unvermeidliche Rutsch- und Setzungenbewegungen während der Füllung. Wie Kwade [9] zeigt, hängt der Seitendruckbeiwert bei einaxialer Verdichtung von vielen Einflußgrößen, z.B. der Einfülltechnik und dem Vertikaldruck, ab. Damit stellt sich generell die Frage, ob das in den Lastabtragsexperimenten gemessene k tatsächlich den Seitendruckbeiwert darstellt, der in die Gleichungen eingesetzt werden kann. Nach dem jetzigen Kenntnisstand muß vom wissenschaftlichen und logischen Standpunkt aus gesehen die Messung von k in einem speziellen Gerät (Lamda-Meter) mit gleicher Intensität betrieben werden wie die Messung der Reibungsbeiwerte.

Welche der beiden Ursachen letztlich zutreffen, ist im Rahmen der bisher durchgeführten Untersuchungen nicht ergründbar. Hierzu sind weitere systematische Experimente erforderlich.

4.4.3. Der Vergleich der Konversionstiefen

Neben dem Vergleich der berechneten und gemessenen Drücke kann auch der Vergleich der berechneten und gemessenen Konversionstiefen als Kriterium zur Beurteilung der Validierung des Modells herangezogen werden. Die Konversionstiefe stellt nach Gl. (14) die Tiefe dar, ab der keine Druckzunahme der Vertikaldrücke mehr mit der Bohrlochtiefe erfolgt.

Aus den Druckverläufen für die glatte CFK-Wand in LEISA I (Abb. 19 - 22) ist folgendes ersichtlich: für die Feinkornanteile $X_F = 0 - 0,4$ können die Drücke im Bereich $z = 2,25 -$

4. Salzgrusexperimente LEISA I

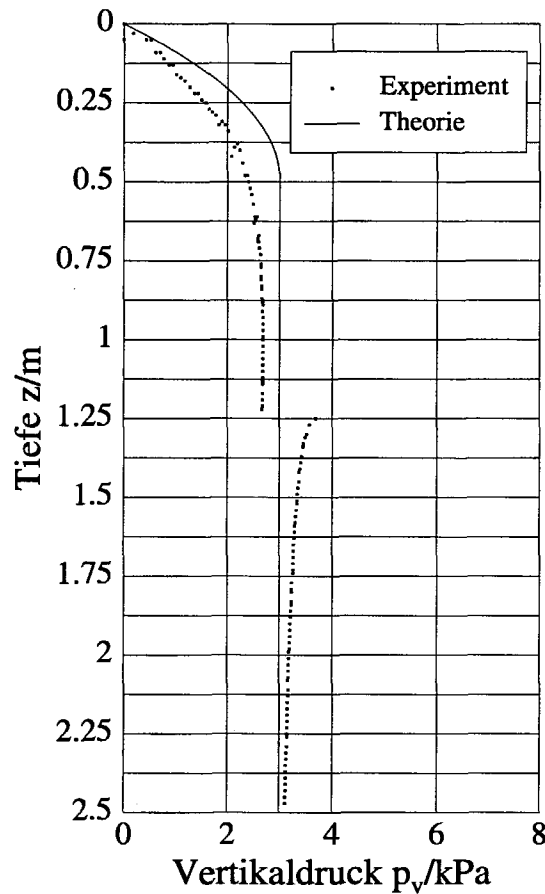


Abb. 31: Vergleich berechneter und gemessener Verlauf des Vertikaldrucks für die raue CFK-Wand in Relation zur Tiefe bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$

2,5 m näherungsweise als konstant betrachtet werden. Für $X_F = 0,6 - 0,8$ sind teilweise bei $z = 2,5$ m noch leichte Druckzunahmen ersichtlich, bei $X_F = 1,0$ erfolgt bei $z = 1,0 - 1,4$ m eine Setzung mit anschließender Druckkonstanz.

Für die raue CFK-Wand ergeben sich für alle Feinkornanteile ab einer bestimmten Tiefe horizontale Verläufe. In Abb. 33 sind die in LEISA I mit beiden Oberflächen gemessenen und berechneten Konversionstiefen in Relation zum Feinkornanteil dargestellt. Die absoluten Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Konversionstiefen betragen durchschnittlich nur 0,5 m, sowohl für die glatte als auch für die raue Wand. Diese relativ geringe Abweichung zwischen Theorie und Experiment kann als weiterer Schritt in Richtung Validierung des Modells betrachtet werden.

4. Salzgrusexperimente LEISA I

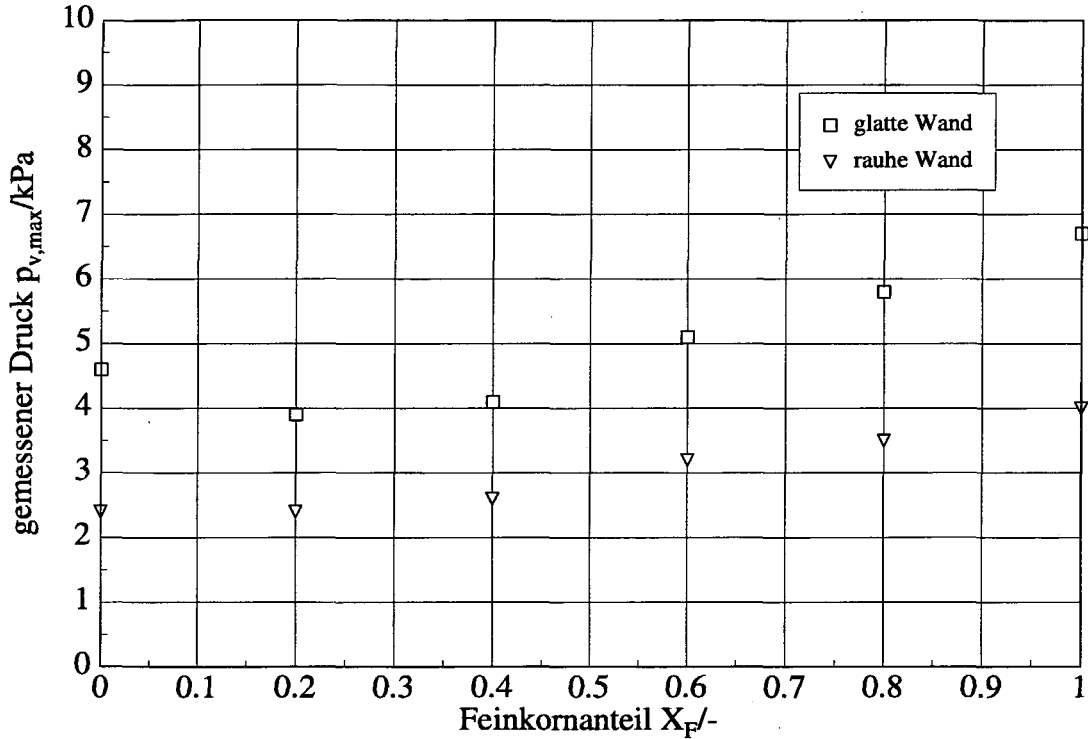


Abb. 32: Maximal gemessene Vertikaldrücke für die glatte und die raue Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F

4.5. Der korrigierte Seitendruckbeiwert

Aus den gemessenen Radial- und Vertikaldrücken p_r und p_v werden in LEISA I die Seitendruckbeiwerte errechnet. Voraussetzung für eine korrekte Berechnung von k ist, daß die Drücke in derselben Tiefe z_k gemessen werden, d.h.:

$$k = \frac{p_r(z_k)}{p_v(z_k)}, \quad (18)$$

wobei $p_v(z_k)$ der Vertikaldruck in unmittelbarer Wandnähe ist.

Konstruktionsbedingt ergibt es sich bei den Prüfständen, daß die Vertikaldrücke in größerer Tiefe $z_k + \Delta z$ gemessen werden als die Radialdrücke. Der in die bisherige Auswertung eingeflossene Seitendruckbeiwert:

$$k_{unkorr} = \frac{p_r(z_k)}{p_v(z_k + \Delta z)} \quad (19)$$

stellt den unkorrigierten Seitendruckbeiwert dar, da er zwei Drücke in unterschiedlicher Tiefe berücksichtigt. Da aufgrund der Wandreibung $p_v(z_k + \Delta z) \geq p_v(z_k)$, führt

4. Salzgrusexperimente LEISA I

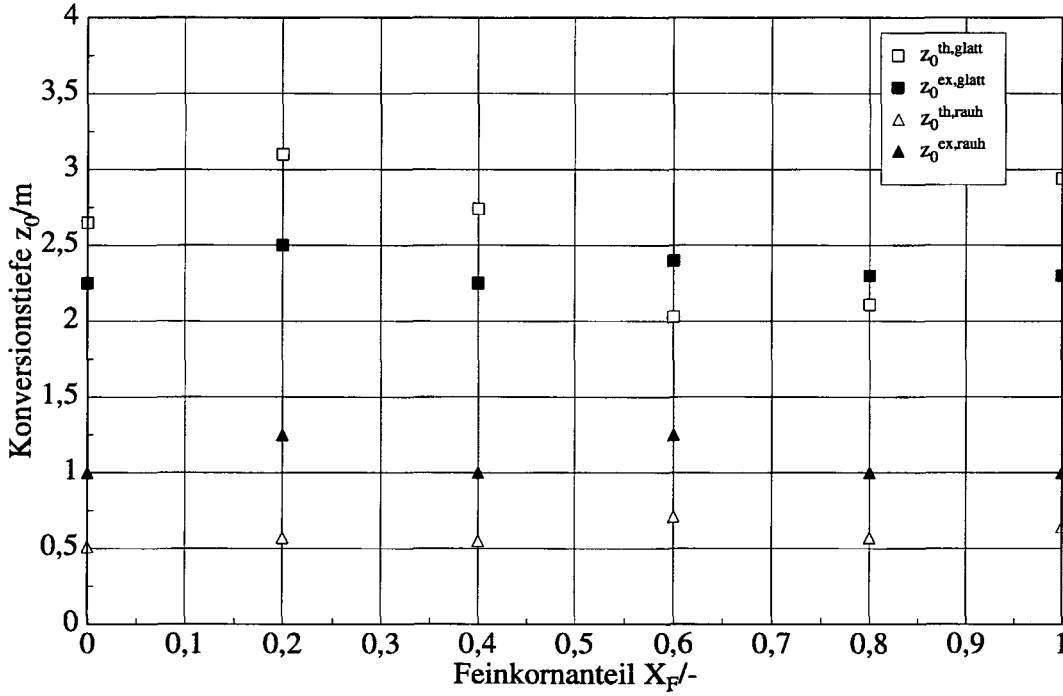


Abb. 33: Berechnete und gemessene Konversionstiefen z_0 für LEISA I mit glatter und rauher Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F

diese Berechnung auf kleinere Seitendruckbeiwerte als den wahren, bei z_k vorliegenden Seitendruckbeiwert k nach Gl. (18):

$$k_{unkorr} \leq k \quad (20)$$

und damit zu einer Überschätzung der nach dem Modell berechneten Drücke.

Um die Höhe dieses systematischen Fehlers abzuschätzen, wird für $X_F = 1,0$ bei glatter Oberfläche aus bei den $z_k + \Delta z$ gemessenen Vertikaldrücken auf die Vertikaldrücke bei z_k zurückgerechnet, um so den korrigierten Seitendruckbeiwert k_{korrr} aus gemessenen Vertikal- und Radialdrücken in derselben Tiefe z_k bestimmen zu können. Der korrigierte Seitendruckbeiwert k_{korrr} liegt näher am wahren Seitendruckbeiwert k . Unter der Voraussetzung von $\Delta z \ll z_k$ wird angenommen, daß:

$$p_v(z_k + \Delta z) \approx p_v(z_k) + p_v(\Delta z). \quad (21)$$

Dann gilt für k_{korrr} :

$$k_{korrr} = \frac{p_r(z_k)}{p_v(z_k + \Delta z) - p_v(\Delta z)} \approx \frac{p_r(z_k)}{p_v(z_k)} = k. \quad (22)$$

Die Auswertung ergibt folgendes: die Berechnung des Seitendruckbeiwertes für $X_F = 1,0$ mit der verbesserten Formel nach Gl. (22) läßt den Wert von den ursprünglichen 0,32 für

4. Salzgrusexperimente LEISA I

den unkorrigierten Wert auf 0,49 ansteigen. Dadurch reduziert sich der berechnete maximale Vertikaldruck von 14 kPa auf 9,4 kPa. Das Verhältnis berechneter zu gemessenem Vertikaldruck (6,7 kPa) verkleinert sich von 2,1 auf 1,4. Die Einführung des korrigierten Seitendruckbeiwertes führt zu einer besseren theoretischen Beschreibung der gemessenen Druckwerte durch das Modell.

Für die anderen Feinkornanteile ergeben sich qualitativ durch die Einführung des korrigierten Seitendruckbeiwertes ebenfalls bessere Übereinstimmungen zwischen Rechnung und Experiment, die Auswertung gestaltet sich hier aber aus folgendem Grund schwierig oder teilweise unmöglich: die Tiefen im Versuchsstand während des Füllvorgangs werden aus dem Gewicht im Füllbehälter und den bekannten geometrischen Dimensionen bestimmt. Gerade zu Beginn des Experiments, d.h. für kleine Füllhöhen, sind aber die berechneten Tiefen mit größeren Unsicherheiten behaftet, da der Füllbehälter durch das Anfahren der pneumatischen Rüttler und das Öffnen der Klappe zu schwingen beginnt. Das führt zu nicht exakten Gewichtsanzeigen für die ersten 10 - 15 cm Einfüllhöhe. Da nun der vertikale Abstand der Radial- und der Vertikalaufnehmer lediglich 9 cm beträgt, kann keine exakte Berechnung von $p_v(z_k)$ aus dem Meßwert $p_v(z_k + \Delta z)$ erfolgen und damit keine Berechnung des korrigierten Seitendruckbeiwertes. Da, wo im Einzelfall eine Berechnung möglich ist, wird immer ein größerer Seitendruckbeiwert und damit eine bessere Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment beobachtet. Diese qualitativen Überlegungen sind aber kein Ersatz für eine exakte Messung des Seitendruckbeiwertes in einem speziellen Meßgerät (Lambda-Meter).

4.6. Die Kontrolle der Kräftebilanz

4.6.1. Die Messung der Tangentialkräfte

In Abschnitt 4.4.2 ist als eine mögliche Ursache für die Diskrepanz zwischen Rechnung und Messung bei der glatten CFK-Oberfläche vermutet worden, daß die alleinige Ansetzung von μ_W bei der Berechnung eine zu grobe Vereinfachung darstellt. Wirksam wird vermutlich ein integraler Reibungswert $\mu_{int} = \mu_{int}(\mu_i, \mu_W)$, der eine unbekannte Funktion des inneren Reibungsbeiwertes und des Wandreibungsbeiwertes ist.

Das Semihydrostatische (Ring-)Modell ist mit dieser Interpretation des Reibungsbeiwertes nicht nur vereinbar, es baut auf dieser Interpretation auf. Hierin ist der Reibungsbeiwert nicht von vorn herein als Wandreibungsbeiwert wie bei der Silo-Theorie von Janssen [7], sondern als ein über die gesamte Schüttung und über die Wände gemittelter Reibungsbeiwert aufzufassen. Dieser wirkt zwischen den einzelnen Ringen des Modells.

Um die Ursache für die Differenz zwischen Experiment und Rechnung zu ergründen, wird für einen orientierenden Versuch LEISA I mit der rauhen CFK-Wand so modifiziert, daß eine unabhängige Messung aller wirksamen Kräfte (Vertikal-, Radial-, Tangential- und Gewichtskräfte) ermöglicht wird.

4. Salzgrusexperimente LEISA I

Nach den Grundgleichungen der Mechanik muß bei allen Experimenten die Kräftebilanz stimmen. Die Summen aus gemessenen Vertikalkräften und in die Versuchsstandwand abgetragenen Tangentialkräften (Reibungskräfte) müssen zu jeden Zeitpunkt (während und nach der Füllung) die Gewichtskraft des eingefüllten Salzgruses ergeben. Zur Überprüfung der Kräftebilanz an LEISA I sind zwei Schritte notwendig:

1. Die Bodenplatte von LEISA I wird entfernt und durch einen Druckteller mit Durchmesser 250 mm ersetzt. Die gesamte Bodenplatte dient als messende Fläche.
2. Die feste Verbindung zwischen Bodenplatte und den zylindrischen Mantelflächen (Prüfstandsegmente) wird getrennt. Der gesamte Vertikalteil wird auf drei um 120° versetzte Kraftaufnehmer positioniert.

Mit dieser Anordnung ist es möglich, die von der Salzgrusfüllung in die Mantelflächen übertragenen Reibungskräfte simultan mit den Vertikal- und Radialkräften sowie dem Füllgewicht zu messen. Daraus läßt sich für geringe Schütthöhen ein integraler Reibungsbeiwert ermitteln. Die Einschränkung auf geringe Schütthöhen ist deshalb notwendig, da auch zur Berechnung der Reibungsbeiwerte ebenso wie zur Berechnung der Seitendruckbeiwerte Drücke in den selben Tiefen (die lokalen Drücke) berücksichtigt werden müssen.

4.6.2. Die experimentellen Ergebnisse

In Abb. 34 sind gemessenen Vertikal-, Tangential- und Gewichtslasten in Relation zur Tiefe für $X_F = 1,0$ aufgetragen. Wie zu erkennen, ist die Summe aus Vertikal- und Tangentiallast in jeder Tiefe z identisch mit der Gewichtslast des eingefüllten Salzgruses.

Bei bekannten geometrischen Dimensionen berechnet sich aus den gemessenen Kräften ein integraler Reibungsbeiwert $\mu_{int} \simeq 0,6$. Bei den Experimenten in Freiberg wird für $X_F = 1,0$ bei der rauhen Wand ein Wandreibungsbeiwert von $\mu_W = 0,61$ ermittelt. Damit ist gezeigt, daß für die raue CFK-Fläche die im Prüfstand gemessenen Wandreibungsbeiwerte mit den Werten aus Freiberg im Rahmen der Meßgenauigkeiten übereinstimmen. Daher ist auch hier die Abweichung zwischen den nach der Theorie berechneten und den im Experiment ermittelten Drücke gering.

Daraus läßt sich schlußfolgern: da bei den Experimenten mit der rauhen CFK-Fläche die Kräftebilanz erfüllt ist und die gemessenen Drücke somit exakt und verlässlich sind, kann davon ausgegangen werden, daß dies auch bei den Experimenten an LEISA I mit der glatten CFK-Fläche der Fall ist. Damit folgt dann zwangsläufig, daß in LEISA I mit glatter Oberfläche der integrale Reibungsbeiwert sich deutlich vom Wandreibungsbeiwert unterscheidet.

4. Salzgrusexperimente LEISA I

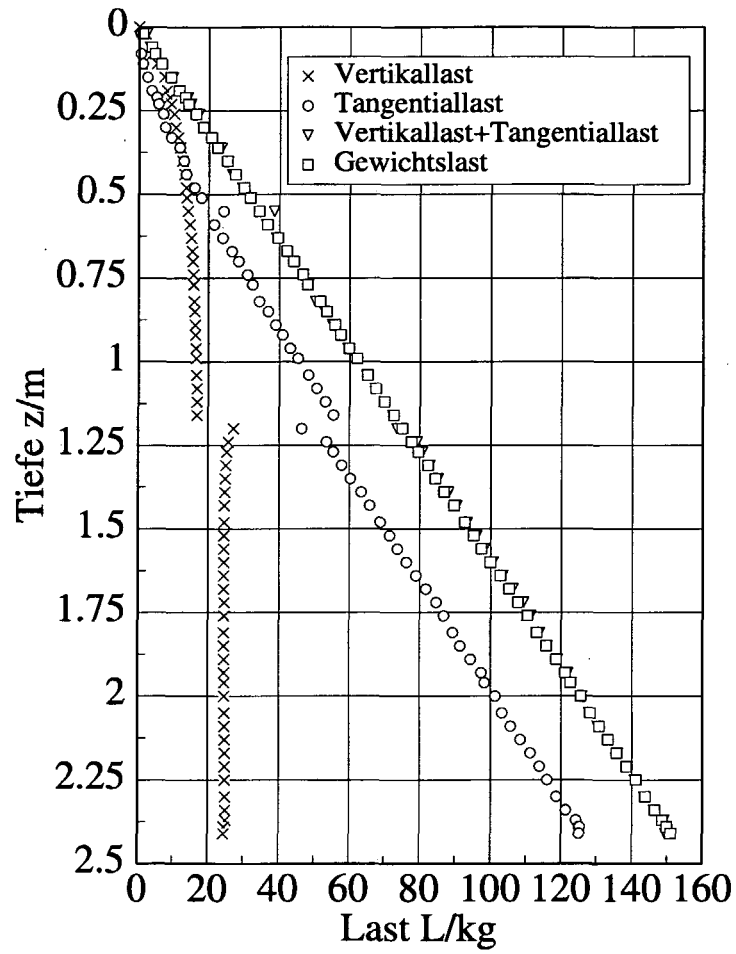


Abb. 34: In LEISA I gemessene Vertikal-, Tangential- und Gewichtslasten für die raue CFK-Wand in Relation zur Tiefe für $X_F = 1,0$

5. Salzgrusexperimente LEISA II

5.1. Die Herstellung der Salzgrusproben

Wie im Versuchsprogramm vorgesehen, werden an Versuchsstand LEISA II mit der glatten Oberfläche Versuchsreihen (Füllversuche) mit der Salzgruskörnung 0 - 20 mm für die Feinkornanteile $X_F = 0,2$, $0,6$ und $1,0$ gefahren. Das Versuchsgut wird in gleicher Weise hergestellt wie bei den Experimenten zu LEISA I und gleichmäßig über den Querschnitt der Säule eingefüllt.

Neben den Drücken werden aus jedem Experiment Schüttdichte und Seitendruckbeiwert ermittelt. Jedes Experiment wird je Feinkornanteil X_F zweimal wiederholt. Die Anordnung aller Aufnehmer und die Zuordnung der Farben für die nachfolgend beschriebenen Druckverläufe ist Abb. 35 zu entnehmen.

5.2. Kurzzeitexperimente mit Salzgrus - LEISA II

5.2.1. Die gemessenen Druckverläufe

Die Füllung des Versuchsstandes erfolgt in fünf Einzelchargen, da eine durchgehende Füllung wegen der großen Salzgrusmenge nicht möglich ist. Auf Grund der Zeitdifferenz zwischen aufeinanderfolgenden Chargen ergeben sich an den Übergängen kleinere Druckstufen (Abb. 36), hervorgerufen durch Setzungsbewegungen der Salzgrussäule von wenigen Millimetern.

Die Setzungsbewegungen sind in ihrer Auswirkung auf die Füllhöhe der Salzgrussäule zu vernachlässigen, nicht aber in ihrer Auswirkung auf die gemessenen Drücke. Hier genügen wenige zehntel Millimeter, um deutliche Druckänderungen zu verursachen. Die Druckstufen sind zeitbedingt und nicht durch abrupte Setzungsbewegungen während des Füllens hervorgerufen. „Zeitbereinigt“ ergeben sich durchgehende Kurven. Da für einen Vergleich der Experimente von LEISA I mit LEISA II dieselben Randbedingungen zugrunde gelegt werden müssen, wird im folgenden immer von den zeitbereinigten Kurven ausgegangen.

Bei Experimenten an LEISA I mit der glatten Oberfläche tritt während der Füllung innerhalb der 2,5 m Versuchsstandhöhe jeweils nur eine abrupte Setzung mit einer größeren Druckstufe auf. Hier laufen diese Setzungen während der Füllung in vielen kleinen Druckstufen ab, gut erkennbar bei $X_F = 0,2$ und $X_F = 0,6$. Auf den Zeiteffekt wird an späterer Stelle detaillierter eingegangen.

Die in LEISA II gemessenen Drücke liegen als Folge des größeren Durchmessers deutlich höher als in LEISA I. Die erreichten Enddrücke in 5 m Tiefe betragen für $X_F = 1,0$ bis zu 20,5 kPa, für $X_F = 0,6$ bis zu 16,5 kPa und für $X_F = 0,2$ bis zu 13,5 kPa. Von der Tendenz her korreliert das mit LEISA I: die Fraktionen mit höherem Feinkornanteil

5. Salzgrusexperimente LEISA II

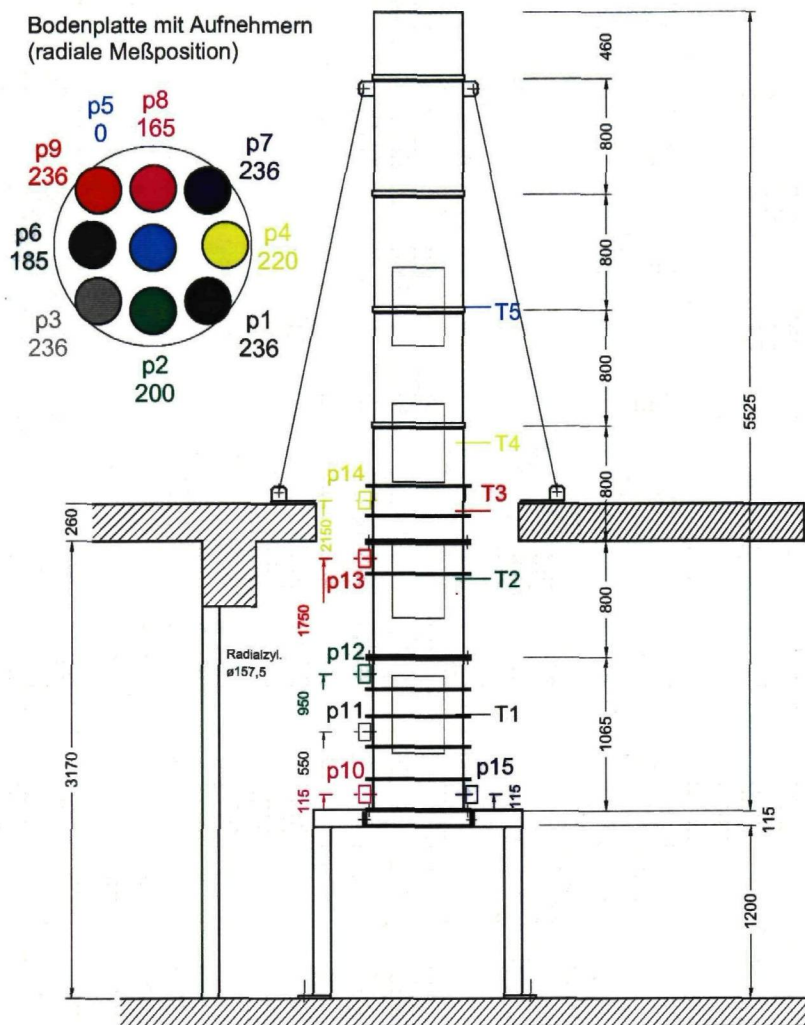


Abb. 35: Anordnung der Vertikaldruck-, Radialdruck- und Temperaturlaufnehmer in Versuchsstand LEISA II sowie Zuordnung der Farben zu den Aufnehmern

verursachen die höheren Vertikaldrücke (Abb. 37).

Vergleicht man die einzelnen Meßkurven bei gleichem Feinkornanteil untereinander, ist eine gute Reproduzierbarkeit der Experimente festzustellen. Die relative Abweichung zwischen minimal und maximal gemessenem Druck beträgt je Meßstelle maximal 32 %, im Durchschnitt 15 - 20 %, bezogen jeweils auf den höchsten Druck.

Trotz äußerlich identischer Versuchsbedingungen und nicht all zu großer Abweichungen der Einzelmeßwerte voneinander ergeben sich unterschiedliche Druckflächen über der Querschnittsfläche des Bohrlochs (Abb. 38, 39 und 40). Die Form des Druckprofils ist bereits in geringer Einfüllhöhe festgelegt. Sie ändert sich kaum noch und wandert mit steigendem Einfüllhorizont nach oben. Das bedeutet: die ersten wenigen Sekunden nach Einfüllbeginn entscheiden darüber, welches Profil sich nach 5 m Einfüllhöhe ausbildet.

5. Salzgrusexperimente LEISA II

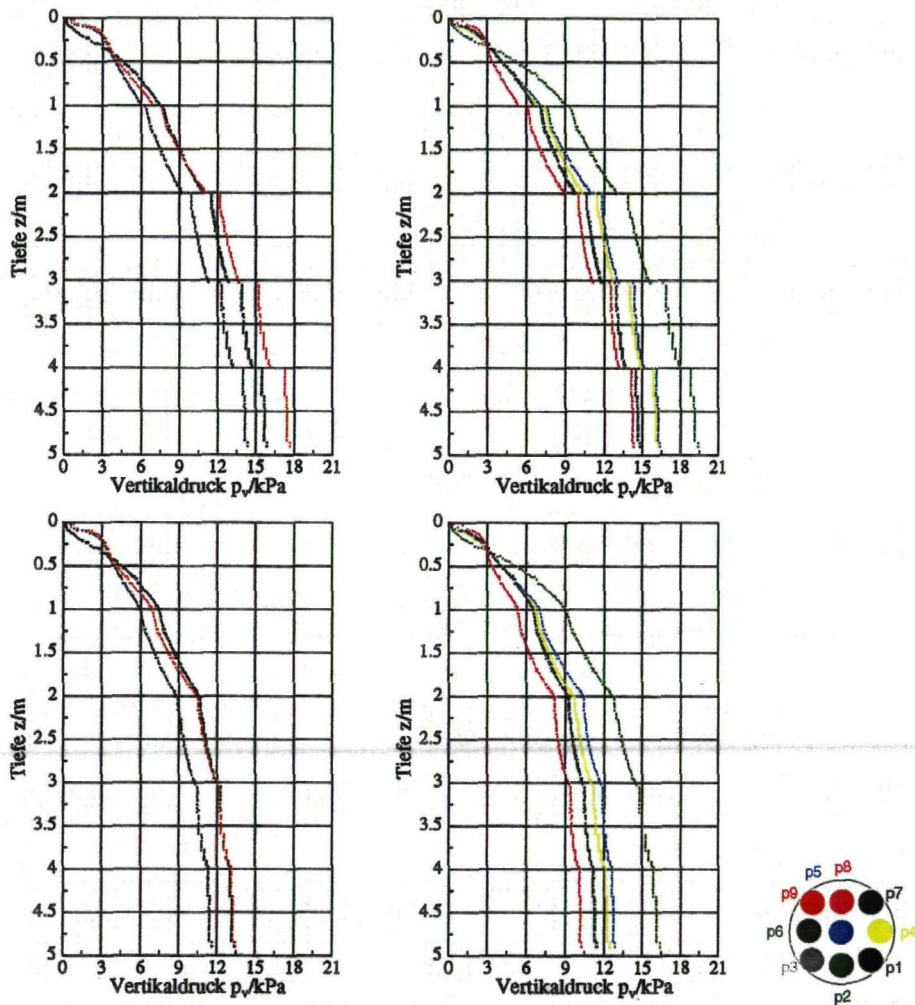


Abb. 36: Gemessene, nicht zeitbereinigte (oben) Vertikaldrücke sowie gemessene, zeitbereinigte (unten) Vertikaldrücke für LEISA II in Relation zur Tiefe für den Feinkornanteil $X_F = 0,6$

Damit wird nochmals deutlich, wie entscheidend die Druckverteilungen von der Art der Lastaufbringung bzw. dem Füllvorgang abhängen. Lokale Dichteunterschiede im Salzgrus innerhalb des Füllbehälters führen zu unterschiedlichen Auslaufprofilen beim beginnenden Ausfließen und damit zu unterschiedlichen Druckprofilen im Versuchsstand. Ist der Austrag aus dem Füllbehälter in Gang gesetzt, fließt der Salzgrus so gleichmäßig aus, daß das Druckprofil von der Form her trotz steigender Einfüllhöhe nahezu unverändert bleibt. Lediglich das Druckniveau wächst. Die Abb. 41, 42 und 43 zeigen die Isobaren.

5. Salzgrusexperimente LEISA II

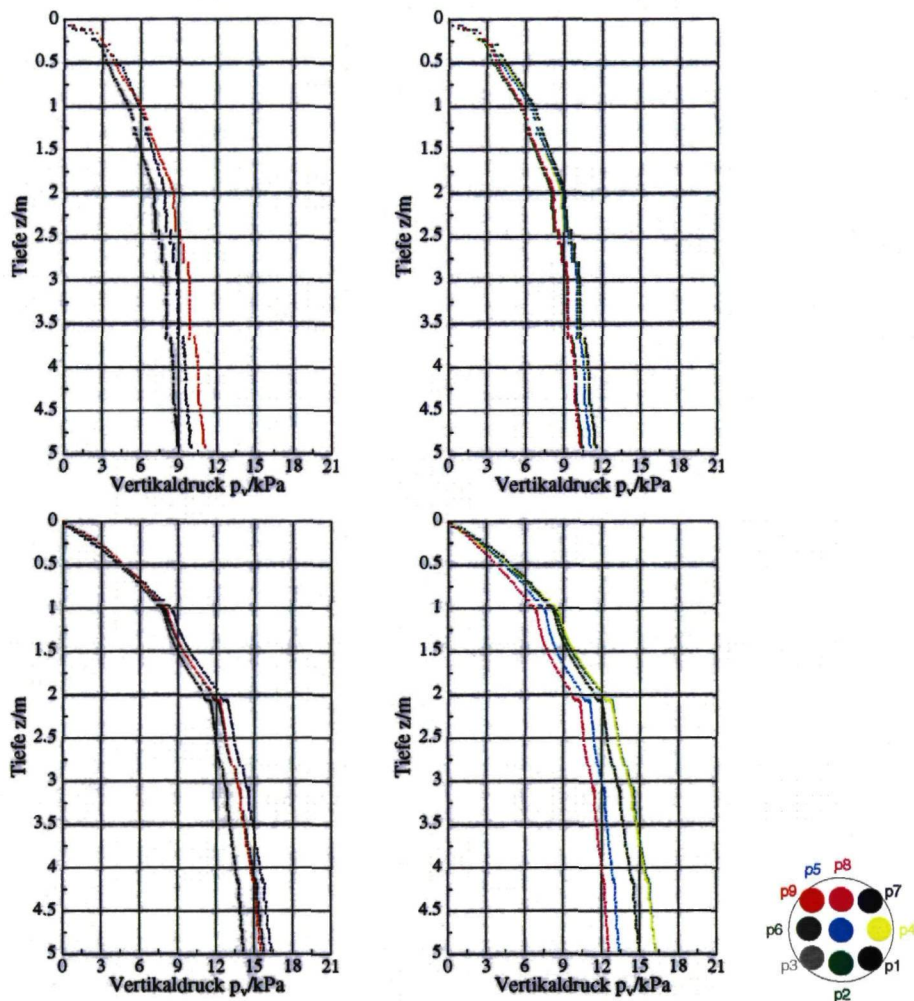


Abb. 37: Gemessene zeitbereinigte Vertikaldrücke für LEISA II in Relation zur Tiefe für die Feinkornanteile $X_F = 0,2$ (oben) und $X_F = 1,0$ (unten)

5.2.2. Die Salzgrusparameter - glatte Wand

Die in LEISA II gemessenen Dichten (Tab. 4) unterscheiden sich für die verschiedenen Feinkornanteile $X_F = 0,2, 0,6$ und $1,0$ nicht von den Werten in LEISA I. Im Bereich von $X_F = 0,6$ besitzt die Dichte ein Maximum von 1485 kg/m^3 , die kleinste Dichte von 1301 kg/m^3 weist $X_F = 1,0$ auf. Die größere Höhe bzw. die größere Salzgrusmenge in Versuchsstand LEISA II führt gegenüber zu LEISA I nicht zu einer meßbaren Kompaktierung des Salzgruses.

Die Seitendruckbeiwerte in LEISA II sind durchgängig für alle Feinkornanteile kleiner als in LEISA I und im Rahmen der Meßgenauigkeit unabhängig von X_F . Der relative Unterschied zwischen maximal und minimal gemessenem k bei gleichem X_F beträgt 36 %, im Vergleich zu den teilweise 100 % Unterschied bei LEISA I (vgl. Abb. 23). Der

5. Salzgrusexperimente LEISA II

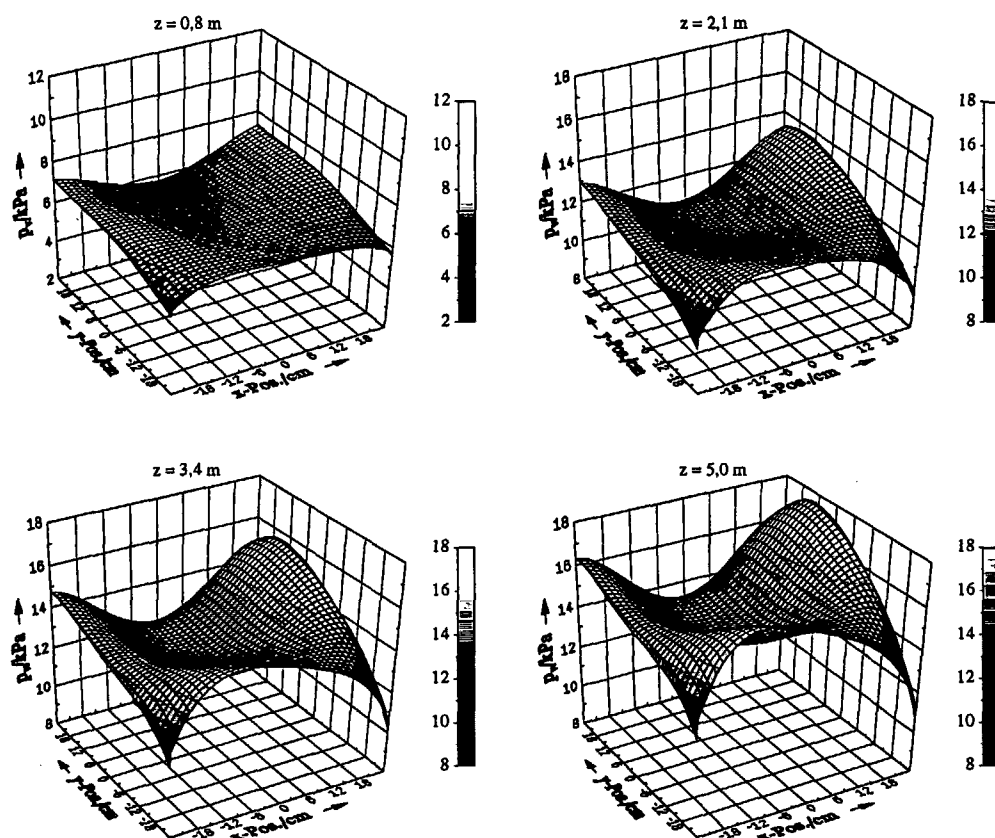


Abb. 38: Gemessene Verteilung der Vertikaldrücke über der Bodenplatte (LEISA II) für die Tiefen $z = 0,8 \text{ m}$, $z = 2,1 \text{ m}$, $z = 3,4 \text{ m}$ und $z = 5 \text{ m}$ bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Meßreihe 3)

größere Säulenquerschnitt von LEISA II sowie die größeren Flächen der Druckaufnehmer führen offenbar zu einer Vergleichmäßigung der k -Werte. Größere Flächen der Sensoren (Faktor 6) an LEISA II haben eine Mittelung der Drücke über größere Bereiche der Schüttung zur Folge, so daß lokale Schwankungen der Dichten und der Drücke weniger ins Gewicht fallen.

Die Bestimmung eines korrigierten Seitendruckbeiwertes (Abschnitt 4.5) ist bei den Experimenten an Versuchsstand LEISA II mit zu großen Unsicherheiten behaftet. Qualitativ ist aber dieselbe Tendenz wie bei LEISA I zu vermerken: der korrigierte Seitendruckbeiwert ist größer als der unkorrigierte und führt bei der Berechnung der Drücke zu einer besseren Beschreibung der gemessenen Drücke durch die Theorie.

Die gemessenen Reibungsbeiwerte μ_i und μ_W für die drei Feinkornanteile $X_F = 0,2$, $0,6$ und $1,0$ der Salzgrusfraktion $0 - 20 \text{ mm}$ weichen um maximal 8% (bei μ_i für $X_F = 0,2$) von den Werten für die entsprechenden Feinkornanteile der Salzgrusfraktion $0 - 10 \text{ mm}$ ab und können damit im Rahmen der Meßgenauigkeit mit diesen Werten als identisch

5. Salzgrusexperimente LEISA II

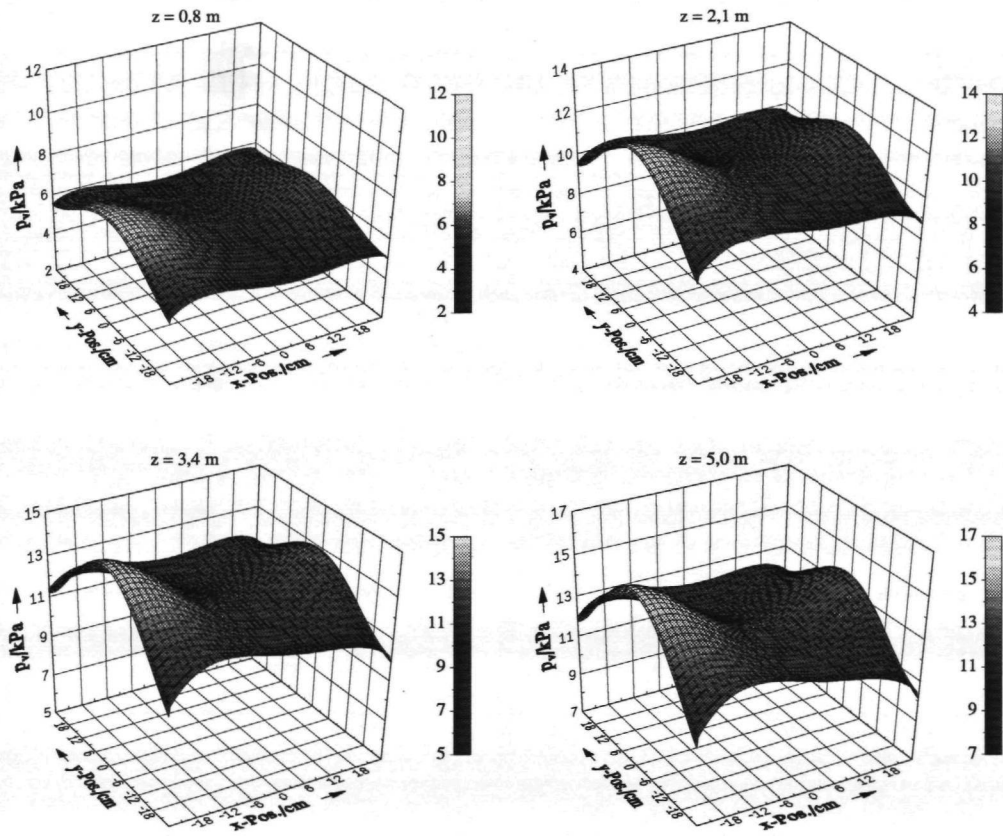


Abb. 39: Gemessene Verteilung der Vertikaldrücke über der Bodenplatte (LEISA II) für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Meßreihe 5)

angesehen werden.

5.2.3. Die berechneten Drücke

Die berechneten maximalen Drücke sind für die Fraktionen $X_F = 0,2$, $0,6$ und $1,0$ in Tab. 5 mit den gemessenen Vertikaldrücken sowie den hydrostatischen Drücken aufgeführt. Nach den Rechnungen betragen die Drücke in 5 m Tiefe in unmittelbarer Wandnähe (radiale Position $r = 0,236$ m) 46,7 kPa ($X_F = 0,2$), 43,3 kPa ($X_F = 0,6$) und 39,4 kPa ($X_F = 1,0$). In den Werten für die Drücke spiegeln sich sowohl die relativ großen Unterschiede der Wandreibungskoeffizienten von $\mu_W = 0,1334$ ($X_F = 1,0$) und $\mu_W = 0,1086$ ($X_F = 0,2$) als auch der Dichten von 1301 kg/m^3 bzw. 1450 kg/m^3 wieder.

Ohne Lastabtragung würden bei 5 m Versuchsstandhöhe und einer mittleren Dichte von 1407 kg/m^3 Drücke von näherungsweise 72 kPa ($\doteq 2075 \text{ kg}$) auftreten. Über alle Kornfraktionen $X_F = 0,2$, $0,6$ und $1,0$ gemittelt ergibt sich experimentell ein durchschnitt-

5. Salzgrusexperimente LEISA II

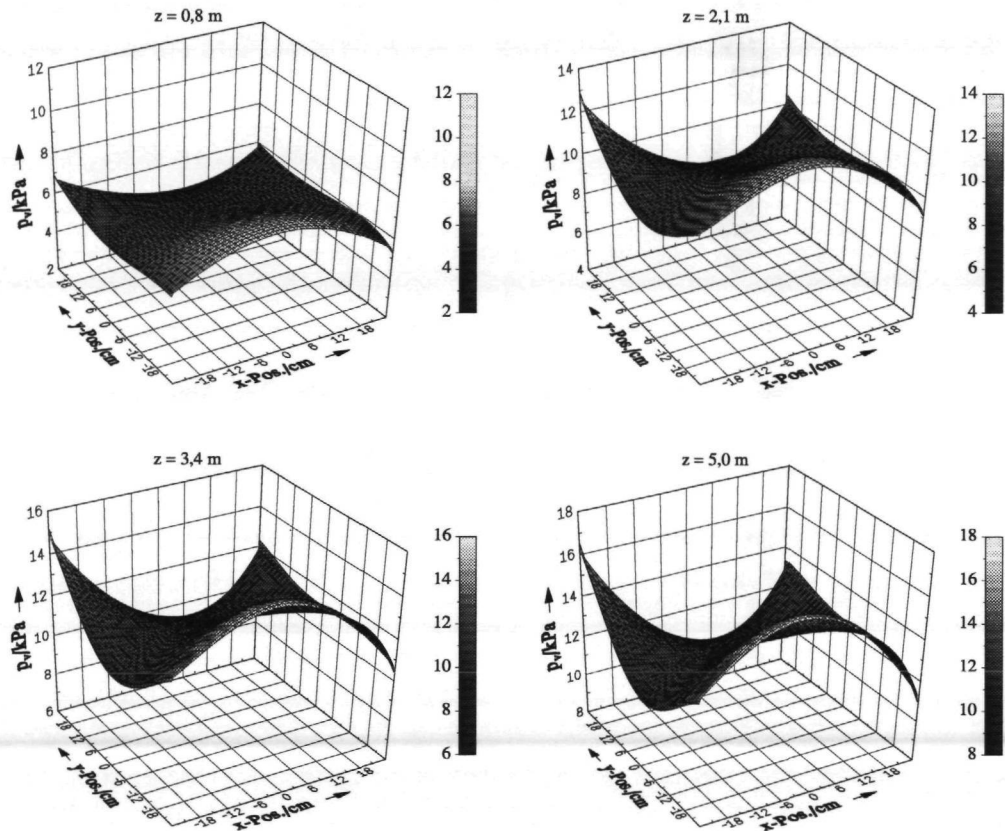


Abb. 40: Gemessene Verteilung der Vertikaldrücke über der Bodenplatte (LEISA II) für die Tiefen $z = 0,8 \text{ m}$, $z = 2,1 \text{ m}$, $z = 3,4 \text{ m}$ und $z = 5 \text{ m}$ bei einem Feinkornanteil $X_F = 0,6$ (Meßreihe 4)

licher Vertikaldruck von $12,7 \text{ kPa}$, das entspricht einer Vertikalbelastung von 366 kg . Die restlichen $59,3 \text{ kPa}$ ($\doteq 1709 \text{ kg}$) werden über Reibung in die Versuchsstandwände abgetragen. Über 5 m Salzgrusfüllhöhe werden somit die hydrostatischen Drücke um den Faktor $5,7$ von 72 kPa auf $12,7 \text{ kPa}$ ($= 17,5 \%$ des hydrostatischen Drucks) reduziert.

Bei Versuchsstand LEISA I wird eine Druckreduzierung um den Faktor 8 bei der glatten CFK-Oberfläche (s. Abschnitt 4.2.3) beobachtet. Für einen Vergleich der Druckreduzierungen bei beiden Prüfständen müssen die Drücke in derselben Tiefe berücksichtigt werden. Zwischen den in LEISA I und LEISA II gemessenen Drücken sollte bei derselben Tiefe und sonst gleichen Randbedingungen demnach ein Faktor von etwa $2,4$, dem Verhältnis der Bohrlochdurchmesser, liegen.

Die über alle Feinkornanteile und über die gesamte Bodenplatte gemittelten Vertikaldrücke in LEISA II betragen in $2,5 \text{ m}$ Tiefe $10,3 \text{ kPa}$. Bei LEISA I liegt der über alle Fraktionen gemittelte Vertikaldruck nach $2,5 \text{ m}$ Tiefe bei $4,4 \text{ kPa}$ (vgl. Abschnitt 4.2.3). Die in LEISA II ermittelten Drücke sind somit $2,34$ -mal höher als in LEISA I. Verglichen

5. Salzgrusexperimente LEISA II

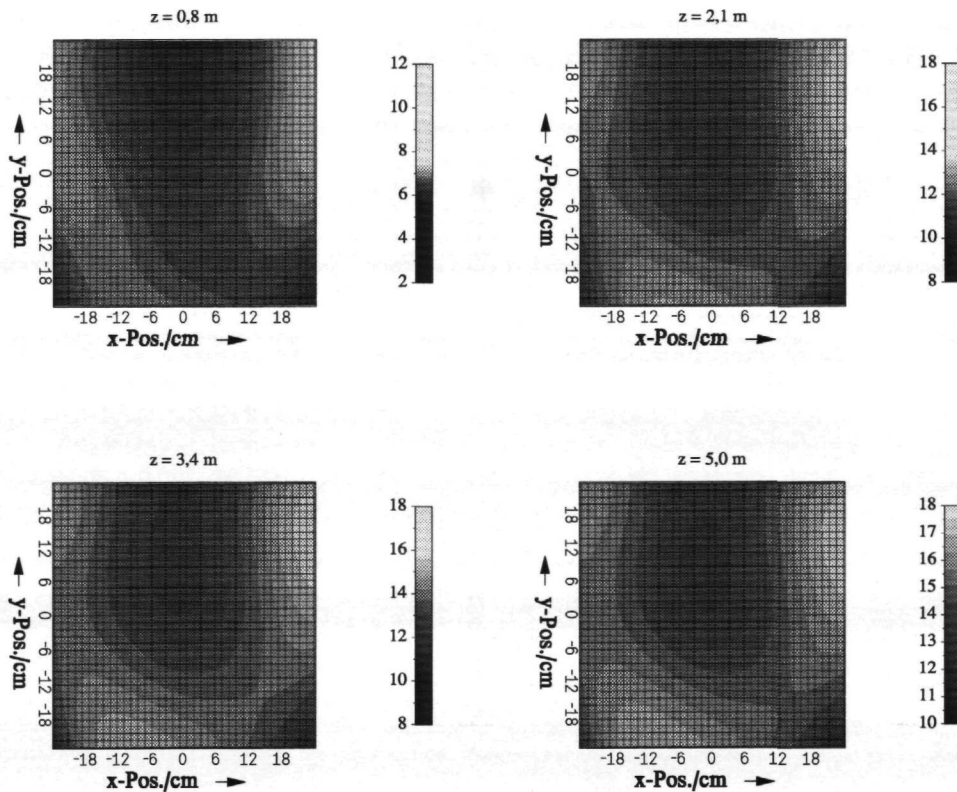


Abb. 41: Isobaren über der Bodenplatte in LEISA II für die Tiefen $z = 0,8 \text{ m}$, $z = 2,1 \text{ m}$, $z = 3,4 \text{ m}$ und $z = 5 \text{ m}$ bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Meßreihe 3)

mit dem nach der Theorie geforderten Faktor von 2,4 eine sehr gute Übereinstimmung.

Noch eine Bemerkung zur Verteilung der Drücke in Relation zur radialen Koordinate: nach der Theorie sollte der Vertikaldruck in der Mitte der Bodenplatte kleiner sein als am Rand.¹ Bei einigen Experimenten ist das so, bei anderen trotz äußerlich gleicher Versuchsbedingungen nicht. Voraussetzung bei der Aufstellung der Gleichungen ist, daß eine homogene Schüttung mit stets ebener Oberfläche (auch während der Füllung) vorliegt, innerhalb derer keine Rutschbewegungen auftreten. Diese Randbedingungen sind bei den Experimenten nicht vollständig realisiert worden, da es einen zu großen technischen Aufwand bedeutet hätte.

Für die Beurteilung der Wirksamkeit der Lastabtragung ist aber auch weniger die radiale als vielmehr die axiale Druckverteilung entscheidend. Und hier ist bei Experimenten an der kleinen CFK-Säule mit rauher Oberfläche die Beschreibung durch die Theorie hinreichend gut. Bei den glatten Oberflächen lassen sich eventuell durch eine mehr hin auf den Anwendungsfall gerichtete Bestimmung der Schüttgutparameter in einem speziellen

¹der Druck $p = 0$ bei $r = 0$ wird auf Grund der endlichen Ausdehnung der Aufnehmer nicht gemessen

5. Salzgrusexperimente LEISA II

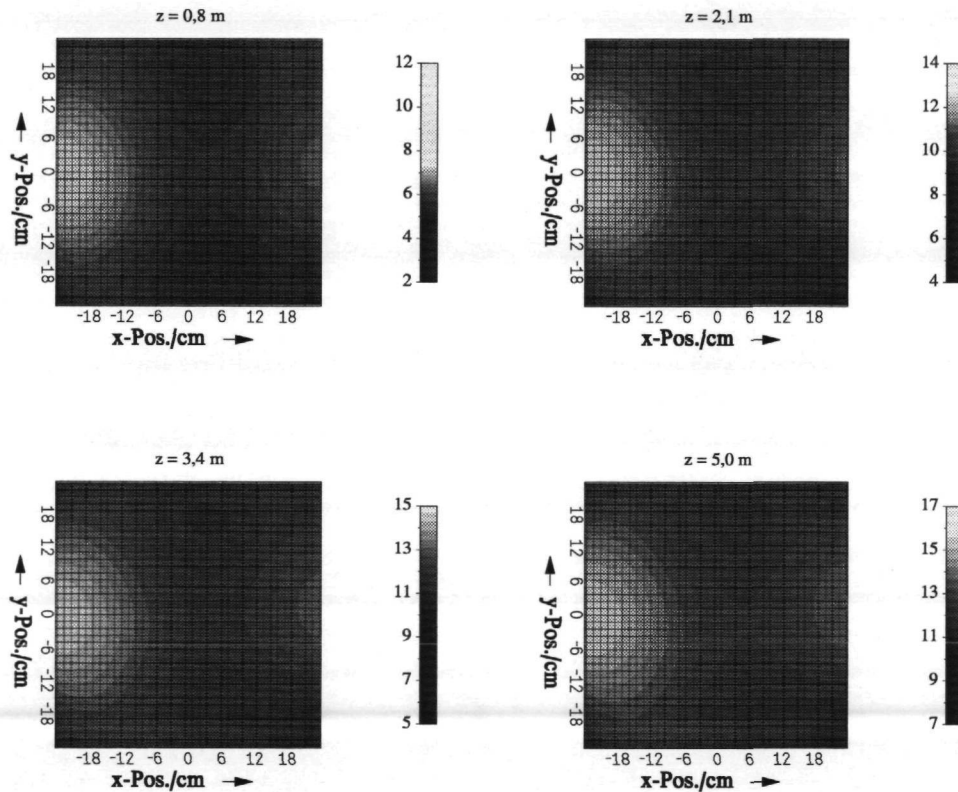


Abb. 42: Isobaren über der Bodenplatte in LEISA II für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Meßreihe 5)

Gerät (Lambda-Meter) ebenfalls höhere Übereinstimmungen erzielen.

5.3. Langzeitexperimente mit Salzgrus - LEISA II

Nach dem Einfüllen des Salzgruses in den Versuchsstand haben die Druckverteilungen (Abb. 44) noch nicht ihren Endzustand erreicht. Während die Vertikaldrücke alle zunehmen, nehmen die Radialdrücke ab oder bleiben konstant. Dabei ist die Änderung der Drücke in den ersten 0,5 - 1 Tagen am größten. Mit der Zeit wird die Anstiegsrate geringer. Der Anstieg erfolgt nicht kontinuierlich, sondern in kleinen Stufen. Zwischen zwei aufeinander folgenden Stufen nehmen die Drücke kontinuierlich ab. Zu Beginn jeder neuen Stufe liegen die Drücke wenig höher als zu Beginn der vorhergehenden Stufe, so daß sich insgesamt eine Netto-Zunahme der Vertikaldrücke einstellt. Dieser Ablauf der Druckänderungen verleiht den Druckkurven einen sägezahnartigen Verlauf in Relation zur Zeit.

Die Zeitintervalle zwischen aufeinander folgenden Stufen wachsen von etwa einer Stunde

5. Salzgrusexperimente LEISA II

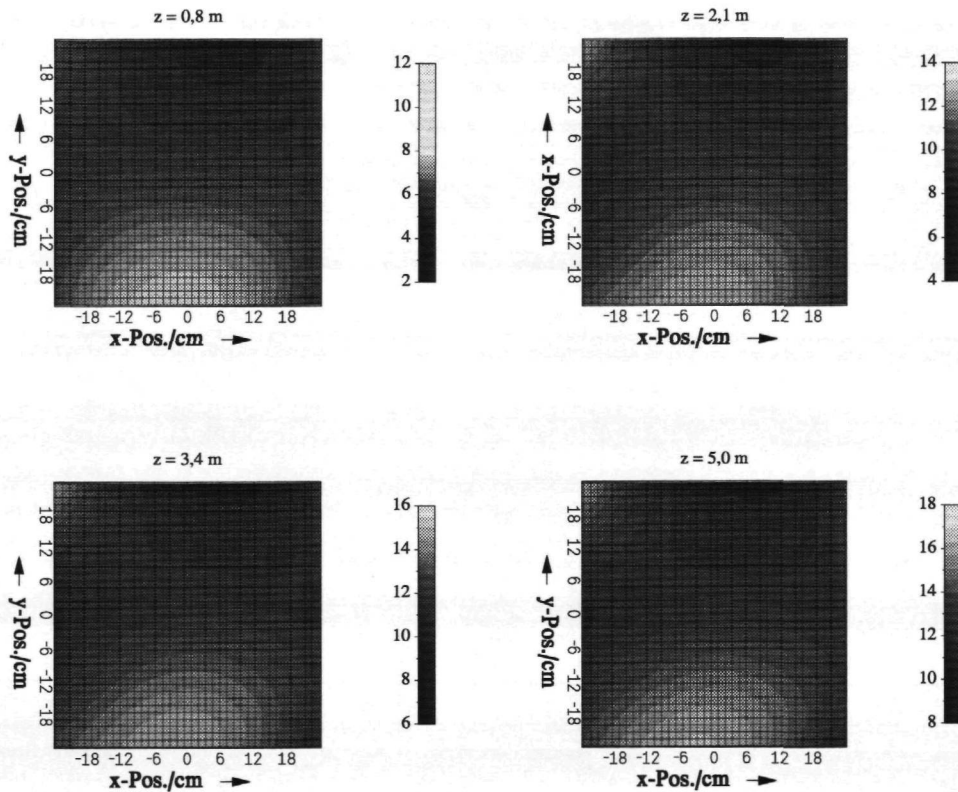


Abb. 43: Isobaren über der Bodenplatte in LEISA II für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 0,6$ (Meßreihe 4)

innerhalb des ersten Tages auf 16 Stunden nach 10 Tagen an. Nach etwa 10 Tagen ist der Netto-Anstieg gestoppt. Die Druckstufen sind nach wie vor sichtbar, jedoch liegt ab jetzt der Anfangswert mit dem Endwert einer Sägezahnstufe auf gleichem Niveau oder sogar schon tiefer. Innerhalb dieser 10 Tage sind die Drücke um 26 %, bezogen auf den Startwert bei $d = 0$, angestiegen. Die Form der Kurve deutet darauf hin, daß nach 10 - 12 Tagen ein Maximum erreicht ist und die Drücke wieder abnehmen.

Während alle gemessenen Vertikaldrücke einen ähnlichen Verlauf zeigen, ist das Bild bei den Radialdrücken etwas differenzierter. Zunächst weisen auch die Radialdrücke eine sägezahnartige Struktur auf, jedoch nehmen sie nicht zu. Während die Radialdrücke in unmittelbarer Bodennähe (p_{10} , p_{15}), abgesehen von den Druckstufen, über 15 Tage konstant bleiben, ist für die Radialdrücke in geringerer Tiefe (p_{11} - p_{14}) unter der Salzgrusoberfläche eine Abnahme zu verzeichnen. Nach 10 - 12 Tagen gehen auch die Radialdrücke in einen horizontalen Verlauf über.

Ursache für die Druckänderungen sind Setzungenbewegungen innerhalb der gesamten Salzgrusfüllung. Der Salzgrus rutscht nach dem Einfüllen unter seinem Eigengewicht

5. Salzgrusexperimente LEISA II

Tabelle 4: Gemessene Salzgrusparameter (LEISA II) Seitendruckbeiwert k , Schüttdichte ρ_S , innerer Reibungsbeiwert μ_i und Wandreibungsbeiwert μ_W für die glatte Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F

Feinkornanteil X_F	Seitendruckbeiwert k	Dichte ρ_S	inn. Reibung μ_i	Wandreibung μ_W
-	-	kg/m ³	-	-
0,2	0,25 - 0,36	1450	1,014	0,1086
0,6	0,27 - 0,35	1485	0,9228	0,121
1,0	0,21 - 0,33	1301	0,8693	0,1334

Tabelle 5: Maximale gemessene ($p_{v,max}^{exp}$), berechnete (p_v) und hydrostatische Drücke (p_{hydro}) für die glatte Oberfläche (LEISA II) in Relation zum Feinkornanteil X_F

Feinkornanteil X_F	gemessener Druck $p_{v,max}^{exp}$	berechneter Druck p_v	hydrostatischer Druck p_{hydro}
-	kPa	kPa	kPa
0,2	13,5	46,7	70,3
0,6	16,5	43,3	72,0
1,0	20,5	39,4	63,8

entlang der Wand nach unten. Hierbei bauen sich Reibungskräfte auf, die der Bewegungsrichtung entgegengesetzt sind. Es bilden sich gewölbe- oder fachwerkartige Strukturen, die sich über steigende Tangentialkräfte auf der Wand abstützen. Dies führt zu einer Entlastung am Boden und zu einer Reduktion der Vertikalkräfte. Im Kurvenverlauf sind das die abfallenden Flanken der „Sägezähne“. Übersteigen die durch die Setzungen hervorgerufenen Kräfte die Tangentialkräfte, werden diese Strukturen zerstört und die Drücke steigen abrupt an, erkennbar im Verlauf an den senkrechten Flanken der Sägezähne. Diese Vorgänge wiederholen sich und geben den Kurven den prägnanten Verlauf.

Zu Beginn, wenn diese Slip-Stick-Bewegungen sehr schnell aufeinander folgen, ist der Nettoanstieg der Drücke über der Zeit am steilsten. Wird eine Frequenz kleiner, wird auch der Anstieg flacher.

Bei den Radialdrücken tritt ein entsprechendes Verhalten mit umgekehrten Vorzeichen auf: zu Beginn bei höherer Frequenz eine steile Abnahme, mit fallender Frequenz eine geringer werdende Abnahme. Letztlich verursacht werden die Setzungen durch ein allmähliches Rutschen und Gleiten der Salzgruskörner aneinander vorbei in neue, metastabile Positionen. Es ist daher zu erwarten, daß diese Vorgänge innerhalb weniger Wochen oder Monate abgeschlossen sind und nicht zu beunruhigend hohen Drücken führen.

Eine Abschätzung der zu erwartenden Drücke nach ein bis zwei Jahren (Betriebszeit

5. Salzgrusexperimente LEISA II

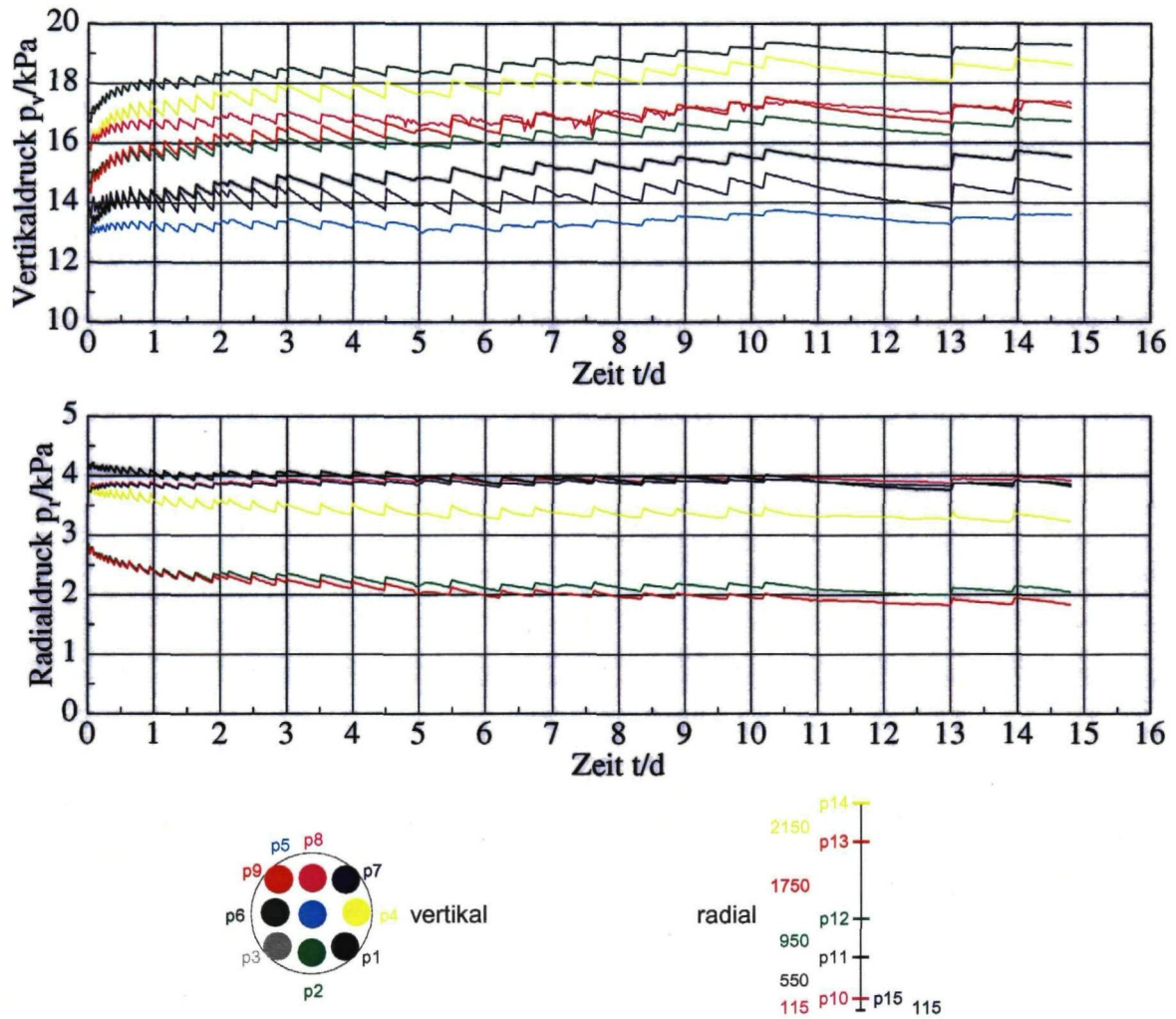


Abb. 44: Gemessene Vertikal- und Radialdrücke für LEISA II in Relation zur Zeit für Salzgrus mit einem Feinkornanteil $X_F = 0,6$

des Bohrlochs) liefern Anpassungen der Meßwerte mit einer logarithmischen oder einer exponentiellen Funktion der Form:

$$\frac{\Delta p}{p_0} = A + B (\ln(t) - 1) \quad (23)$$

$$\frac{\Delta p}{p_0} = a + b (1 - e^{-t}) \quad (24)$$

nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung. Hierbei sind Δp die Druckänderung, p_0 der Anfangsdruck nach dem Ende des Füllvorgangs, t die Zeit sowie A, B , a und b Anpassungsparameter (Abb. 45).

Einen logarithmischen Ansatz für den zeitlichen Verlauf der Kompaktierung findet man oft bei der Entwicklung von „Stoffgesetzen“ für Salzgrus. Solche Ansätze stellen em-

5. Salzgrusexperimente LEISA II.

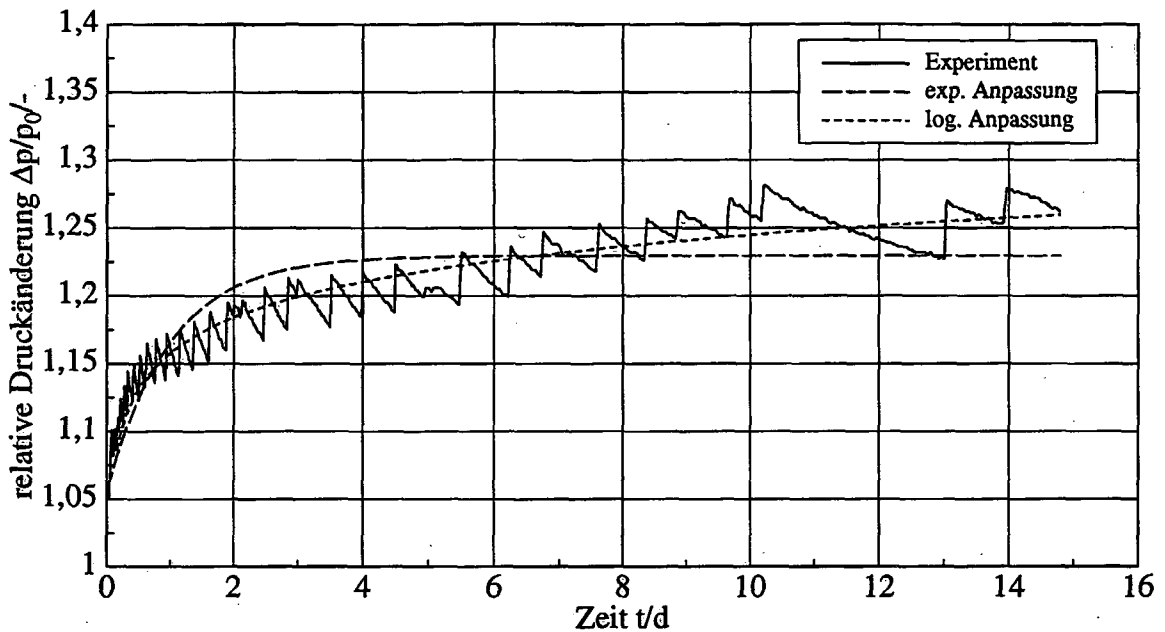


Abb. 45: Exponentielle und logarithmische Anpassung der in LEISA II gemessenen Vertikaldrücke in Relation zur Zeit für Salzgrus mit einem Feinkornanteil $X_F = 0,6$

pirische, an Laborergebnisse angepaßte Formeln dar. Sie sind der Versuch, einen experimentellen Sachverhalt durch Kurvenfits mit Parametervariationen formelmäßig zu beschreiben.

Im vorliegenden Fall werden mit den Ansätzen aus dem durch das Versuchsprogramm vorgegebenen begrenzten Experimentzeitraum von wenigen Tagen die Druckentwicklungen für den Zeitraum der Betriebsphase extrapoliert.

Der logarithmische Ansatz wächst monoton an und liefert daher eine konservative Abschätzung der Drücke. Das ist, solange nicht über wesentlich längere Zeiträume gemessen wird, sinnvoll.

Beim exponentiellen Ansatz wird davon ausgegangen, daß $\Delta p/p_0$ für lange Zeiten auf einen nach oben begrenzten Druck zuläuft.

Aus den Rechnungen resultieren $A = 1,19566$, $B = 0,03775$, $a = 1,05651$ und $b = 0,17302$. Nach der optimistischen Schätzung (exponentieller Ansatz) steigen nach ein bzw. zwei Jahren die Drücke um 23 % an. Bei der pessimistischen Abschätzung mit dem logarithmischen Ansatz wäre nach einem Jahr eine Erhöhung um 39 %, nach zwei Jahren um 41 % zu erwarten. Bei einem Anfangswert von 15 kPa bei der untersuchten reinen Salzgrusschüttung (ohne Dummies) steigen die Drücke nach zwei Jahren auf 21 kPa an, bleiben aber weit unterhalb des hydrostatischen Wertes von 72 kPa. Eine Überprüfung und Validierung dieser Prognosen ist nur mit hinreichend langen Versuchsdauern (≥ 3 Monate) möglich.

5. Salzgrusexperimente *LEISA II*

Die Werte beziehen sich auf ein Bohrloch mit 0,6 m Durchmesser in 5 m Tiefe. Ob die Betrachtungen in ähnlicher Weise auf jedes Bohrloch in beliebiger Tiefe übertragen werden können, bleibt noch zu überprüfen.

6. Experimente mit unbeheizten Dummies

6.1. Kurzzeitexperimente

6.1.1. Die Ausgangsbedingungen

Bei den Experimenten mit Dummies an LEISA II wird ausschließlich Salzgrus mit dem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ eingesetzt. Die Durchmesser der Dummies (Abb. 18) betragen $D_F = 360$ mm, die Höhen $H_F = 540$ mm. Für die Dummy-Gewichte werden zwei Werte ($G_F = 127$ kg und 200 kg je Dummy) gewählt, so daß Dummy-Dichten von $\rho_F = 2310$ kg/m³ und 3639 kg/m³ resultieren. Die Höhen der Salzgrusschichten h_S zwischen den Dummies betragen 40 cm und 60 cm.

Bei allen Experimenten werden die Dummies senkrecht stehend und mittig im Prüfstand platziert. Je Experiment werden vier Dummies eingelagert, so daß bei allen Experimenten die gleiche Menge Salzgrus von rund $G_S = 1680$ kg in den Prüfstand eingefüllt wird. Das Gesamtgewicht der Füllung beträgt demnach rund 2180 kg bei den 127 kg-Dummies und 2480 kg bei den 200 kg-Dummies.

Die Füllung des Versuchsstandes erfolgt abschnittsweise, in dem auf eine zuvor eingebrachte Salzgrusschicht das Dummy-Gebinde abgesetzt wird. Anschließend wird der verbliebene Ringspalt zwischen Dummy und Wand mit Salzgrus aufgefüllt und das Dummy mit der nächsten Salzgrusschicht vollkommen überdeckt. Abb. 35 zeigt die Position der Dummies in LEISA II für die 40 cm-Überdeckung.

6.1.2. Die gemessenen Vertikaldrücke in Relation zur Tiefe

In Abb. 46 sind die während des Füllvorgangs gemessenen Vertikal- und Radialdrücke in Relation zur Tiefe für 200 kg-Dummies und 40 cm Salzgrusüberdeckung aufgetragen. Auf die Experimente mit den 200 kg-Dummies wird im folgenden genauer eingegangen.

Während des Einbringens der ersten Salzgruslage steigen die Drücke in bereits aus den Experimenten mit reinen Salzgrusfüllungen bekannter Weise fast linear an. Die Wirkung der Lastabtragung ist auf den ersten wenigen Zentimetern Einfüllhöhe noch gering, aber bereits vorhanden und meßbar. Hydrostatisch resultiert nach 0,4 m ein Druck von 5,4 kPa auf der Bodenplatte, im Mittel werden 3,4 kPa gemessen. Die Lastabtragung bewirkt nach 0,4 m Salzgrus eine Reduzierung um den Faktor 1,6.

Beim Aufsetzen des ersten Dummies erhöht sich der Vertikaldruck in der zentralen Achse der Säule sprunghaft von 5 kPa auf 15,5 kPa, am Rand von 4 kPa auf 8 kPa. Beim anschließenden Auffüllen des Ringspalt und Überdecken des Dummies ist der aus den Füllexperimenten mit Salzgrus bekannte, leicht konvexe Anstieg der Drücke für geringe Tiefen erkennbar. Die nächste Stufe bei $z = 1,36$ m markiert das Aufsetzen des zweiten Dummies mit nachfolgender Verfüllung.

6. Experimente mit unbeheizten Dummies

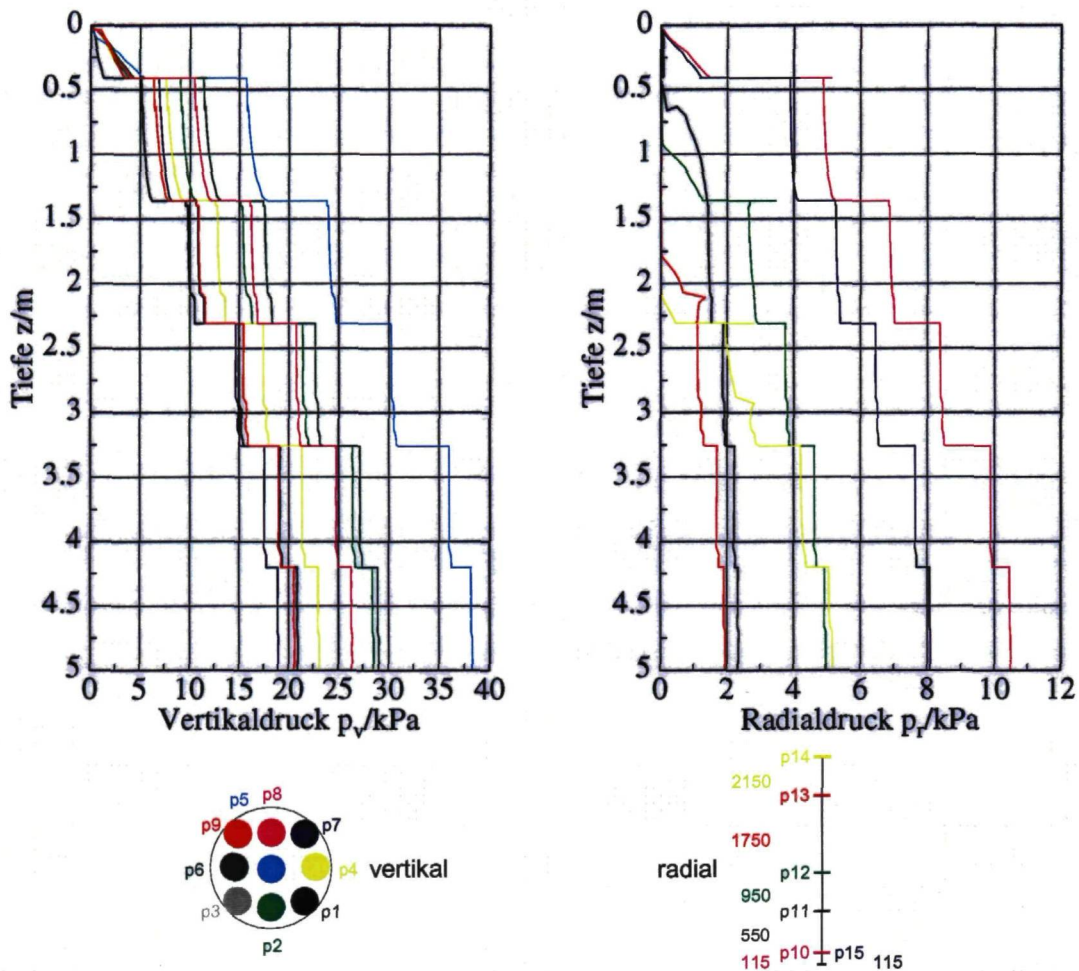


Abb. 46: Gemessene Vertikal- und Radialdrücke in Relation zur Tiefe beim Füllen des Versuchsstand LEISA II mit Salzgrus und Dummies für eine Salzgrusüberdeckung von $h_S = 40$ cm und Dummygewichten von 200 kg

In der oben beschriebenen Art wächst die Füllhöhe auf 5 m. Zentral werden dabei 38,3 kPa, in den Randbereichen, je nach radialer Position der Meßstelle, zwischen 19 kPa und 29 kPa erreicht. Im Mittel werden auf der Bodenplatte Vertikaldrücke von 23,6 kPa gemessen.

Mit jedem weiteren Dummy wird die Druckstufe beim Aufsetzen des Dummies geringer. Die Kurvenäste der anschließenden Salzgrusverfüllung werden mit jedem Füllabschnitt flacher, für den letzten Abschnitt zwischen 4,2 m und 5 m verlaufen sie nahezu horizontal. Das macht deutlich, daß die Lastabtragung mit zunehmender Tiefe bzw. Füllhöhe besser wird. Die gleiche Last (das gleiche Dummy-Gewicht), die nach 0,4 m Füllhöhe noch den zentralen Druck von 5 kPa auf 15,5 kPa hochschnellen läßt, bewirkt nach 4,2 m gerade noch eine Stufe von 36 kPa auf 38 kPa.

Ohne Lastabtragung übt ein freistehendes Dummy auf Grund seines Eigengewichtes

6. Experimente mit unbeheizten Dummies

einen Sohldruck von mindestens 19,3 kPa aus. Mindestens, wenn es günstigstenfalls auf der gesamten Bodenfläche aufsteht. Bereits geringste Verkippungen mit drastisch kleiner werdenden Aufstandsflächen lassen den Druck um Größenordnungen steigen. Eine Schicht von 0,4 m Salzgrus reduziert den Sohldruck auf etwa 10 kPa, eine 5 m-Schicht mit drei eingebetteten Dummies auf noch gerade 2 kPa, d.h. etwa einem Zehntel des Drucks von 19,3 kPa ohne Lastabtragung.

Bei einer über die Volumenanteile der Salzgrusschüttung und der Dummies gemittelten Dichte werden ohne Lastabtragung nach Tab. 6 für die 200 kg-Dummies bei einer 40 cm-Überdeckung und 5 m Füllhöhe 86 kPa erwartet.

Über die gesamte Bodenplatte gemittelt werden 25,3 kPa gemessen, d.h. rund 29 % des hydrostatischen Drucks. Bei den 127 kg-Dummies sind es rund 26 %, für die Überdeckung mit 60 cm Salzgrus bei beiden Dummy-Gewichten 27 % des hydrostatischen Wertes.

Tabelle 6: Gemessene und hydrostatische Drücke für Dummy-Experimente mit unterschiedlichen Dummy-Gewichten und unterschiedlichen Salzgrusüberdeckungen h_S

Höhe der Salzgrusschicht	$h_S = 40 \text{ cm}$		$h_S = 60 \text{ cm}$	
Dummy-Gewicht (kg)	127	200	127	200
mittlerer Druck ohne Lastabtragung (kPa)	75,6	86	75,6	86
Druck zentral ohne Lastabtragung (kPa)	88	116,1	88	116,1
Druck Ringspalt ohne Lastabtragung (kPa)	49,6	69	49,6	69
mittlerer gemessener Druck (kPa)	19,3	25,3	20,3	23,2
größter gemessener Druck (kPa)	26	38,3	24,7	25,7
gemessener Druck Ringspalt (kPa)	18,5	23,6	19,7	23,1
gemessener Druck/Druck ohne Lastabtr. (%)	26	29	27	27

Die bessere Lastabtragung für die 60 cm-Überdeckung gegenüber der 40 cm-Überdeckung für die 200-kg-Dummies bei insgesamt gleichem Füllgewicht aus Dummies und Salzgrus ist verständlich: eine 60 cm-Überdeckung trägt eine Auflast aus Dummies beim Füllen besser ab als eine 40 cm-Schicht. Mit jedem weiteren Dummy erhöht sich bei $h_S = 60 \text{ cm}$ die Salzgruszwischenschicht um weitere 20 cm im Vergleich zu $h_S = 40 \text{ cm}$.

6.1.3. Die gemessenen Vertikaldrücke in Relation zur radialen Position

Bei einer Auftragung der Vertikaldrücke über der Bodenplatte (Abb. 47) ergeben sich glockenförmige, nichtrotationssymmetrische Verteilungen, hervorgerufen durch die zentral stehenden Dummies mit ihrer zwei- bzw. dreimal so großen Dichte gegenüber Salzgrus. Bei den 127 kg-Dummies wird bei einer Erhöhung der Salzgrusüberdeckung von $h_S = 20 \text{ cm}$ auf 40 cm die Verteilung wesentlich flacher, eine nochmalige Erhöhung auf 60 cm bringt keine entscheidende Änderung mehr. Bei den Experimenten mit den 200 kg-Dummies sind dagegen bei einer Erhöhung von $h_S = 40 \text{ cm}$ auf 60 cm die Unterschiede in den Verteilungen noch deutlich vorhanden.

6. Experimente mit unbeheizten Dummies

Fazit: eine Erhöhung der Salzgruszwichenschicht reduziert nicht nur die Druckamplituden, sondern sorgt auch für eine Vergleichmäßigung der Drücke über der Bodenplatte. Mit wachsender Überdeckung der Dummies fließen die glockenförmigen Druckkurven auseinander und münden tendentiell in das Experiment ohne Dummies.

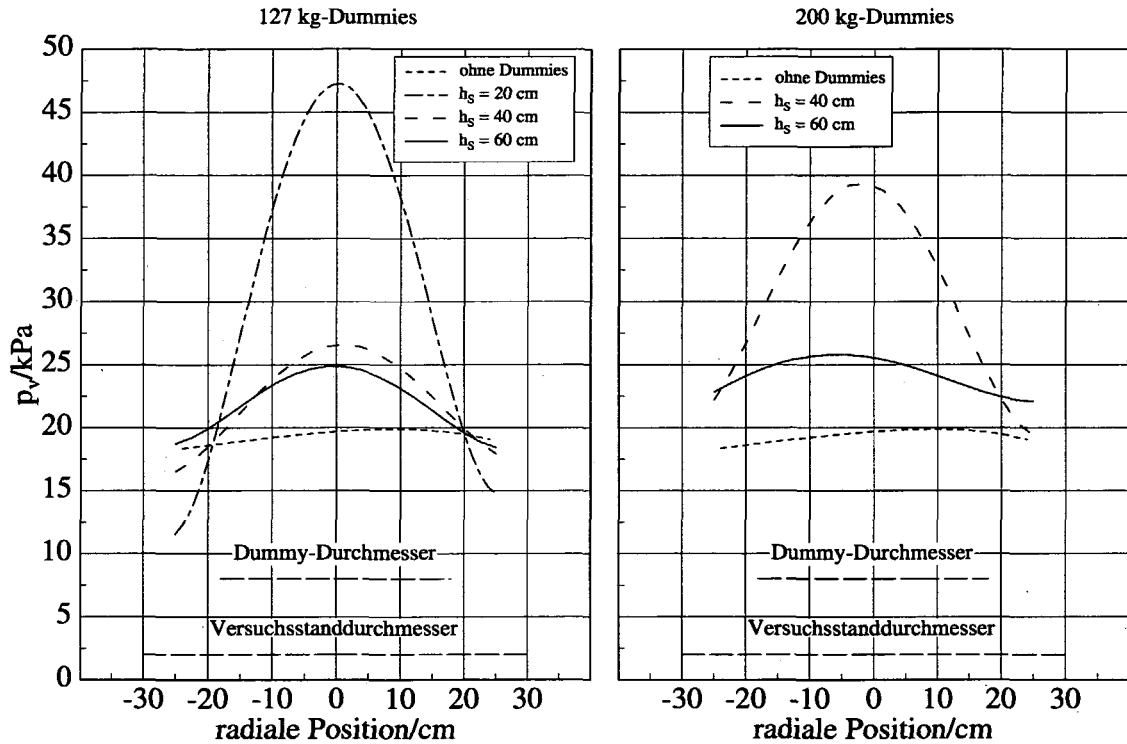


Abb. 47: Gemessene Verteilungen der Vertikaldrücke auf der Bodenplatte für Experimente mit unterschiedlichen Dummy-Gewichten und Salzgrusüberdeckungen in Versuchsstand LEISA II

Bei den Experimenten an LEISA II ohne Dummies ist eine durchschnittliche Druckreduzierung auf 17,5 % (vgl. S. 56) des hydrostatischen Drucks erreicht worden. Hier wird im Mittel eine Reduzierung auf 26 % gemessen. Die geringere Lastabtragung wird durch die Anwesenheit der Dummies verursacht, da beim Absetzen eines Dummies dessen Gewicht voll als Auflast wirkt. Beim Füllen eines entsprechenden Abschnitts mit nur Salzgrus wird dessen Gewicht ja bereits wieder über Wandreibung vermindert. Das Einbringen eines freistehenden 200 kg-Dummies verursacht höhere Drücke als das Einbringen von 200 kg Salzgrus. Die Druckverteilung hängt, wie bereits bei Experimenten mit reinen Salzgrusfüllungen festgestellt, nicht nur von der Höhe der eingeleiteten Kräfte, sondern auch von deren Richtung ab.

6. Experimente mit unbeheizten Dummies

6.1.4. Die berechneten Drücke

Eine zentrale Voraussetzung bei der Aufstellung des Semihydrostatischen Modells ist, daß eine homogene Schüttung vorliegt. Innerhalb dieser einheitlichen Schüttung treten keine lokalen Dichteunterschiede, wie etwa durch Abfallgebinde verursacht, auf. Die Einlagerung von Abfallgebinden mit einer von diesem homogenen Schüttgut abweichenden Dichte wird durch die Annahme einer mittleren Dichte, gemittelt über die jeweiligen Volumenanteile des Schüttgutes und der Gebinde, berücksichtigt.

Im folgenden wird daher bei der Berechnung der Drücke die Anwesenheit der Dummies über deren höhere Dichte im Vergleich zu Salzgrus in die Rechnungen einbezogen.

Schüttdichte des Salzgruses:	1380 kg/m ³
Dichte der 127 kg-Dummies:	2310 kg/m ³
Dichte der 200 kg-Dummies:	3639 kg/m ³
Mittlere Dichte mit 127 kg-Dummies:	1522 kg/m ³
Mittlere Dichte mit 200 kg-Dummies:	1739 kg/m ³

Die Seitendruckbeiwerte werden aus den Druckwerten nach dem Einbringen der ersten Salzgrusschicht von 0,4 m bzw. 0,6 m bestimmt. Der Wandreibungsbeiwert beträgt $\mu_W = 0,133$. Die Drücke werden nach Gl. (15) in den Tiefen berechnet, wo jeweils ein vollständiger Abschnitt aus Salzgrus und Dummy eingebracht ist. Als radiale Position wird der Rand des Dummies bei $r = 0,18$ m gewählt.

In den Tabellen 7 - 8 sind die berechneten sowie die gemessenen Vertikaldrücke für Salzgruszwischenschichten von $h_S = 40$ cm und 60 cm wiedergegeben. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment wird mit zunehmender Füllhöhe besser, da der Einfluß der zuletzt eingebrachten Dummies auf die Vertikaldrücke sinkt, wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben.

Tabelle 7: Berechnete und gemessene Vertikaldrücke für Dummy-Experimente mit Dummygewichten von 127 kg und 200 kg bei 40 cm Salzgrusüberdeckung

	$G_F = 127$ kg $k = 0,43$		$G_F = 200$ kg $k = 0,41$	
	ber. Druck kPa	gem. Druck kPa	ber. Druck kPa	gem. Druck kPa
Tiefe m				
1,36	15,9	8,7	18,4	10,4
2,31	21,8	12,5	25,6	15,1
3,26	23,5	15,5	28,2	19,8
4,2	23,5	18,0	28,2	23,7
5,05	23,5	19,3	28,2	25,3

Für die 40 cm-Überdeckung liegen in 5 m Tiefe die berechneten Vertikaldrücke im Schnitt um den Faktor 1,54 über den gemessenen, bei der 60 cm-Überdeckung um den Faktor 1,9.

6. Experimente mit unbeheizten Dummies

Tabelle 8: Berechnete und gemessene Vertikaldrücke für Dummy-Experimente mit Dummygewichten von 127 kg und 200 kg bei 60 cm Salzgrusüberdeckung

	$G_F = 127 \text{ kg}$ $k = 0,38$		$G_F = 200 \text{ kg}$ $k = 0,35$	
Tiefe m	ber. Druck kPa	gem. Druck kPa	ber. Druck kPa	gem. Druck kPa
1,75	19,7	10,4	23,1	11,3
2,88	25,6	14,0	30,8	16,4
4,05	26,5	17,9	32,9	20,4
4,98	26,5	20,3	32,9	23,3

Die Unterschiede werden hauptsächlich durch die Unsicherheiten bei der korrekten Bestimmung des Seitendruckbeiwertes herbeigeführt.

6.2. Langzeitexperimente mit unbeheizten Dummies

Entsprechend zu den Langzeitexperimenten mit reinen Salzgrusfüllungen werden für die in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Parameterwerte von Dummy-Gewichten und Salzgrusüberdeckungen die Druckverteilungen mit unbeheizten Dummies in Relation zur Zeit untersucht (Abb. 48).

Allen Langzeitexperimenten mit unbeheizten Dummies ist die bereits aus den Langzeitexperimenten mit reinen Salzgrusfüllungen bekannte, sägezahnartige Zunahme der Vertikaldrücke (Slip-Stick) in den ersten wenigen Stunden nach Füllende gemeinsam. Die Sägezahnfrequenz sinkt mit fortschreitender Versuchsdauer.

Nach etwa 0,5 Tagen erreichen die Drücke ihre Maxima, die um etwa 10 % über den Druckwerten nach Ende des Füllvorgangs liegen. Anschließend bleiben die Drücke nahezu konstant oder zeigen sogar leicht fallende Tendenz. Dieser Druckabnahme sind nach wie vor die Sägezähne überlagert. Nach einer weiteren Zeitdauer von 3 - 5 Tagen bleiben die Sägezahnstrukturen ganz aus und die Vertikaldrücke gehen innerhalb weniger Tage in einen nahezu parallelen Verlauf zur Zeitachse über.

Eine Korrelation der oben beschriebenen Abläufe von Druckzunahme, Sägezahnstrukturen, Druckabnahme oder dem Ausbleiben der Sägezahnstrukturen mit einem Versuchsparameter kann auf Grund der geringen Anzahl der Versuche (nur ein Experiment je Parametersatz) nicht festgestellt werden.

Bemerkenswert bei den Slip-Stick-Bewegungen ist die Tatsache, daß die absoluten Höhen der Druckstufen bei den Vertikaldrücken von unmittelbarer Wandnähe zur zentralen Achse hin abnehmen. Das gleiche Verhalten ist auch bei Experimenten ohne Dummies beobachtbar, aber in schwächer ausgeprägter Form.

Weniger auffällig, aber doch bei allen Experimenten nachvollziehbar ist ein schärferer

6. Experimente mit unbeheizten Dummies

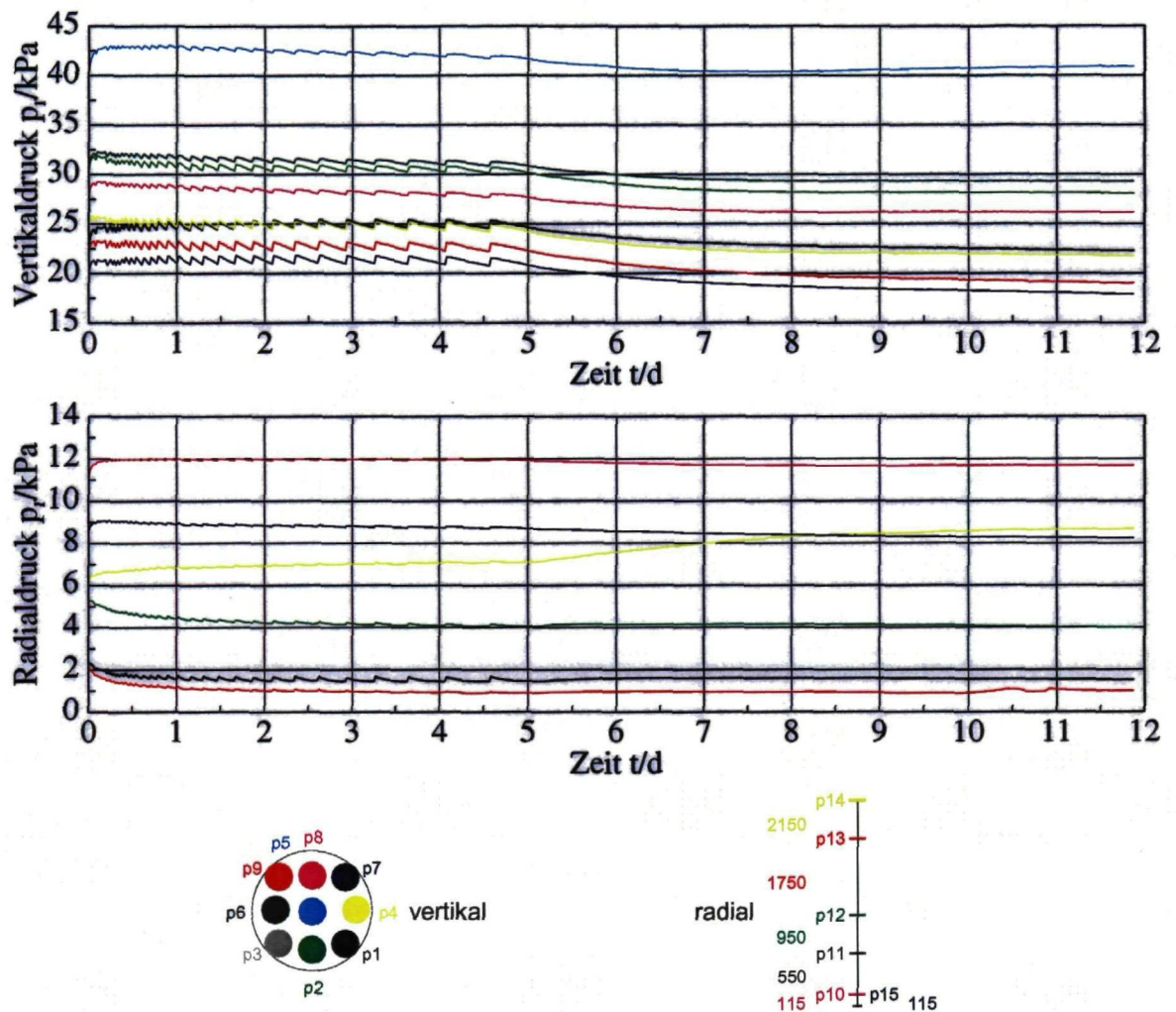


Abb. 48: Gemessene Vertikal- und Radialdrücke in Relation zur Zeit für Dummy-Gewichte von 200 kg und einer Salzgrusüberdeckung von 40 cm

Übergang zwischen aufeinander folgenden Druckstufen bei den Vertikaldrücken in unmittelbarer Wandnähe (p1, p7 und p9 nach Abb. 35) im Vergleich zu den näher zur Symmetrieachse liegenden Drücken. Die geringeren Druckstufen und die weicheren Slip-Stick-Bewegungen deuten darauf hin, daß Setzungen zwischen benachbarten Regionen innerhalb des plastisch verformbaren Salzgruses gedämpfter ablaufen als zwischen Salzgrus und einer unnachgiebigen, harten Wand aus CFK.

Die in unmittelbarer Bodennähe gemessenen Radialdrücke (p10 und p15 nach Abb. 35) folgen in ihrem Verlauf dem der Vertikaldrücke, d.h. zunächst eine leichte Zunahme mit anschließend fallender Tendenz. Die Setzungsbewegung ist nicht nur mit einer Vertikalbewegung, sondern auch mit einer, wenn auch geringen, Radialdehnung verbunden, in Folge derer sich die Radialdrücke in Bodennähe erhöhen.

Anders sieht es bei den Radialdrücken (p11 - p14) aus, die im Bereich zwischen auf-

6. Experimente mit unbeheizten Dummies

einander folgenden Dummies oder im Bereich zwischen Dummy und Bohrlochwand gemessen werden. Diese zeigen von Beginn an fallende Tendenz. Bei diesen Aufnehmern ist die durch das Slip-Stick vorgegebene vertikale Bewegungsrichtung nicht durch eine im Verhältnis zum plastisch verformbaren Salzgrus unendlich harte Bodenplatte, auf die die Salzgrusfüllung gleichsam aufläuft, behindert. Wenn dieses Auflaufen fehlt, resultiert aus der Vertikalbewegung keine Radialdehnung und keine Druckerhöhung. Nach jedem einzelnen Slip-Stick ist bei diesen Aufnehmern der Enddruck geringer als der Anfangsdruck. Daraus ergibt sich innerhalb von 0 - 3 Tagen ein insgesamt fallender Verlauf für diese Radialdrücke mit nachfolgender Konstanz. Vom Verlauf her weisen die Druckkurven in Relation zur Zeit für Experimente mit reinen Salzgrusfüllungen das gleiche Bild auf wie die mit eingelagerten Dummies.

Nach 5 - 6 Tagen, wenn bei den Vertikaldrücken die Slip-Stick-Bewegungen völlig ausbleiben und die Drücke kontinuierlich abfallen bzw. in einen horizontalen Verlauf münden, setzt bei den bodenfernen Radialdrücken p_{12} - p_{14} etwas zeitversetzt ein schwacher Druckzuwachs mit anschließender Konstanz ein. Das ist im Einklang mit der Kräftebilanz: ein fallender Vertikaldruck wird durch steigenden Radialdruck aufgefangen.

7. Langzeitexperimente mit beheizten Dummies

7.1. Die Randbedingungen

Für die Experimente mit beheizten Dummies wird Salzgrus mit dem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ verwendet. Die Höhen der Salzgrusschichten zwischen den eingelagerten Dummies betragen 40 cm, die Gewichte der Dummies je 215 kg. Der Ablauf der Füllung des Versuchsstandes geht in gleicher Weise wie bei den Experimenten mit unbeheizten Dummies von statten.

Die Dummies werden vor Versuchsbeginn bereits auf eine Anfangstemperatur von $T_F = 80\text{ °C}$ vorgeheizt und mit dieser Anfangstemperatur eingelagert. Der Salzgrus hat beim Einbringen Umgebungstemperatur T_U . Abb. 49 zeigt die im Salzgrus gemessenen Temperaturen in Relation zur Zeit. Die Anordnung der Temperaturlaufnehmer ist Abb. 35 zu entnehmen.

7.2. Die Vertikaldrücke in Relation zur Tiefe

Die gemessenen Vertikaldrücke (Abb. 49, mitte) sinken kurz nach dem Füllende, je nach Meßstelle, um 20 - 30 % ab und erreichen nach etwa einem Tag ein relatives Minimum. Da der Salzgrus beim Einfüllen noch Raumtemperatur hat, steigen die Temperaturen im Salzgrus durch die Einlagerung der 80 °C heißen Dummies allmählich an. Sie erreichen nach einem Tag ein Plateau von 30 °C (Fühler T3 in der Salzgruszwichenschicht) bzw. $41 - 42\text{ °C}$ (Fühler T1, T2, T4 und T5 im Salzgrusringspalt zwischen Dummy und Wand). Die Temperaturen in den Zwischenschichten sind geringer, da die Dummy-Böden nicht beheizt werden.

Mit dem Erreichen der ersten Plateautemperatur nach einem Tag ist auch der Abfall der Vertikaldrücke gestoppt. Die Vertikaldrücke durchlaufen jeweils ein Minimum, wobei der Druck in der zentralen Achse p5 seinen kleinsten Wert als erster erreicht. Die Zeitdauer bis zum Erreichen des Minimums wächst mit dem radialen Abstand der Meßstelle von der zentralen Achse von 0,5 Tagen auf 1 Tag für die Meßstellen am Rand an. Danach beginnen die Vertikaldrücke steil anzusteigen. Nach zwei Tagen erfolgt der Anstieg mit geringerer Rate.

Nach vier Tagen bleiben alle Drücke bis auf den Druck in der zentralen Achse (p5) konstant. Die Anstiegsrate des Drucks wird nach vier Tagen wächst zur Symmetrieachse hin größer. Während für die Drücke p2 bis p9 die erreichten Plateauwerte unterhalb der Anfangswerte zum Zeitpunkt $d = 0$ liegen, wächst p5 über diesen Anfangswert hinaus an. Zudem mündet p5 nach vier Tagen nicht in einen horizontalen Verlauf, sondern steigt bis zur nächsten Temperaturerhöhung der Dummies noch geringfügig an.

Nach 9 Tagen wird die Temperatur der Dummies von 80 °C auf 120 °C erhöht. Die Temperatur im Salzgrus zwischen den Dummies erreicht 38 °C und im Ringspalt $57 - 58\text{ °C}$.

7. Langzeitexperimente mit beheizten Dummies

Infolge dieser Temperaturerhöhung weisen alle Vertikaldrücke einen „Temperaturbuckel“ auf, d.h. ein etwa einen Tag andauerndes Anwachsen und nachfolgend kontinuierliches Abfallen der Drücke.

Nach 13 Tagen, 4 Tage nach der Temperaturerhöhung, durchlaufen die Vertikaldrücke erneut ein Minimum, steigen wiederum an und münden nach 22 Tagen erneut in einen horizontalen Verlauf, für alle Drücke $p_2 - p_9$ unterhalb des Wertes als vor der Temperaturerhöhung auf 120 °C, für p_5 leicht oberhalb dieses Wertes (Abb. 49, mitte).

Bei der Temperaturerhöhung auf $T_F = 150$ °C nach 22 Tagen spielen sich die gleichen Vorgänge erneut ab: Temperaturbuckel kurz nach Temperaturerhöhung mit nachfolgendem Absinken der Vertikaldrücke mit anschließender Konstanz. Nach der dritten Temperaturerhöhung wird ein erneutes Anwachsen der Vertikaldrücke innerhalb des Versuchszeitraumes von 58 Tagen nicht mehr beobachtet.

Jede Temperaturerhöhung bewirkt einen Temperaturbuckel beim Vertikaldruck, ein Absinken der Drücke, Durchlaufen eines Minimums und nachfolgendes Anwachsen, nur die Zeitdauern zwischen den einzelnen Stationen wachsen nach jeder Temperaturerhöhung an. Der Temperaturbuckel bei $d = 0$ fehlt, da die Messung erst beginnt, wenn alle Dummies eingelagert sind.

7.3. Die Radialdrücke in Relation zur Tiefe

Die Radialdrücke (Abb. 49, unten) zwischen zwei Dummies (p_{10} , p_{12} , p_{14} und p_{15}) folgen in ihrem Verlauf den Vertikaldrücken mit Temperaturbuckel, Druckabfall und nachfolgendem Druckanstieg, schließlich Konstanz bis zur nächsten Temperaturerhöhung.

Die Radialdrücke im Ringspalt (p_{11} und p_{13}) weisen einen stufenartigen Verlauf auf, ähnlich dem der Temperatur. Nach einer Erhöhung der Temperatur steigen sie an und bleiben konstant bis zur nächsten Erhöhung. Bei der Erhöhung der Dummy-Temperatur von 80 °C auf 150 °C übersteigen die Radialdrücke p_{11} , p_{12} und p_{14} alle Vertikaldrücke bis auf Druck p_5 .

Eine Temperaturerhöhung der Dummies bewirkt kurzfristig eine Dehnung des Dummies und führt zu einer Erhöhung aller Radial- und Vertikaldrücke. Anschließend erwärmt sich auch der das Dummy umgebende Salzgrus. Dieser dehnt sich, da die Dummies nur auf den Mantelflächen, nicht aber auf den Bodenflächen beheizt werden, hauptsächlich in radialer Richtung und erhöht die Radialdrücke, insbesondere die in Dummy-Nähe im Ringspalt. Mit der Erhöhung der Drücke in radialer Richtung trägt dieser Salzgrusabschnitt im Versuchsstand besser. Damit ist eine teilweise Entlastung in vertikaler Richtung verbunden.

Nach diesen primären Vorgängen beginnt der durch die hohe Temperatur der Dummies plastisch gewordene Salzgrus äußerst langsam zu fließen. Als Folge dieser Fließsetzungsbewegung steigen die Vertikaldrücke wieder an und werden konstant.

7. Langzeitexperimente mit beheizten Dummies

Nach der letzten Temperaturerhöhung sind die Setzungsbewegungen abgeschlossen. Ein erneutes Anwachsen bleibt aus. Die Radialdrücke in Dummynähe haben sich bei der Erhöhung der Temperatur von 80 °C auf 150 °C nahezu verdoppelt und fangen die Abnahme aller gemessenen Vertikaldrücke ganz auf.

Was besonders bei den Versuchen mit erhöhter Temperatur der Dummies auffällt, ist die Tatsache, daß die Slip-Stick-Bewegungen der Experimente bei Raumtemperatur völlig fehlen. Das gleiche Phänomen wird auch bei den Experimenten zur Bestimmung der Reibungsbeiwerte von BAF beobachtet. Das spricht dafür, daß Slip-Stick eine rein innere Eigenschaft des Salzgruses ist und weniger von äußeren Eigenschaften wie der Wandbeschaffenheit abhängt. Das ist in weiterem Sinne auch ein Argument für die in Abschnitt 4.4.2 geäußerte Vermutung, daß die lastabtragende Wirkung einer Schüttung bisher zu sehr auf die äußere Eigenschaft Wandrauhigkeit zurückgeführt wird. Vermutlich sind, zumindest für das Schüttgut Salzgrus, innere Eigenschaften (innerer Reibungsbeiwert) stärker mit einzubeziehen, etwa bei der Berechnung von Vertikaldrücken in Bohrlöchern mit analytischen Modellen wie dem Janssen-Modell oder dem Semihydrostatischen Modell. Vor allem dann, wenn die Wandreibungsbeiwerte klein ($\leq 0,4$) werden.

7. Langzeitexperimente mit beheizten Dummies

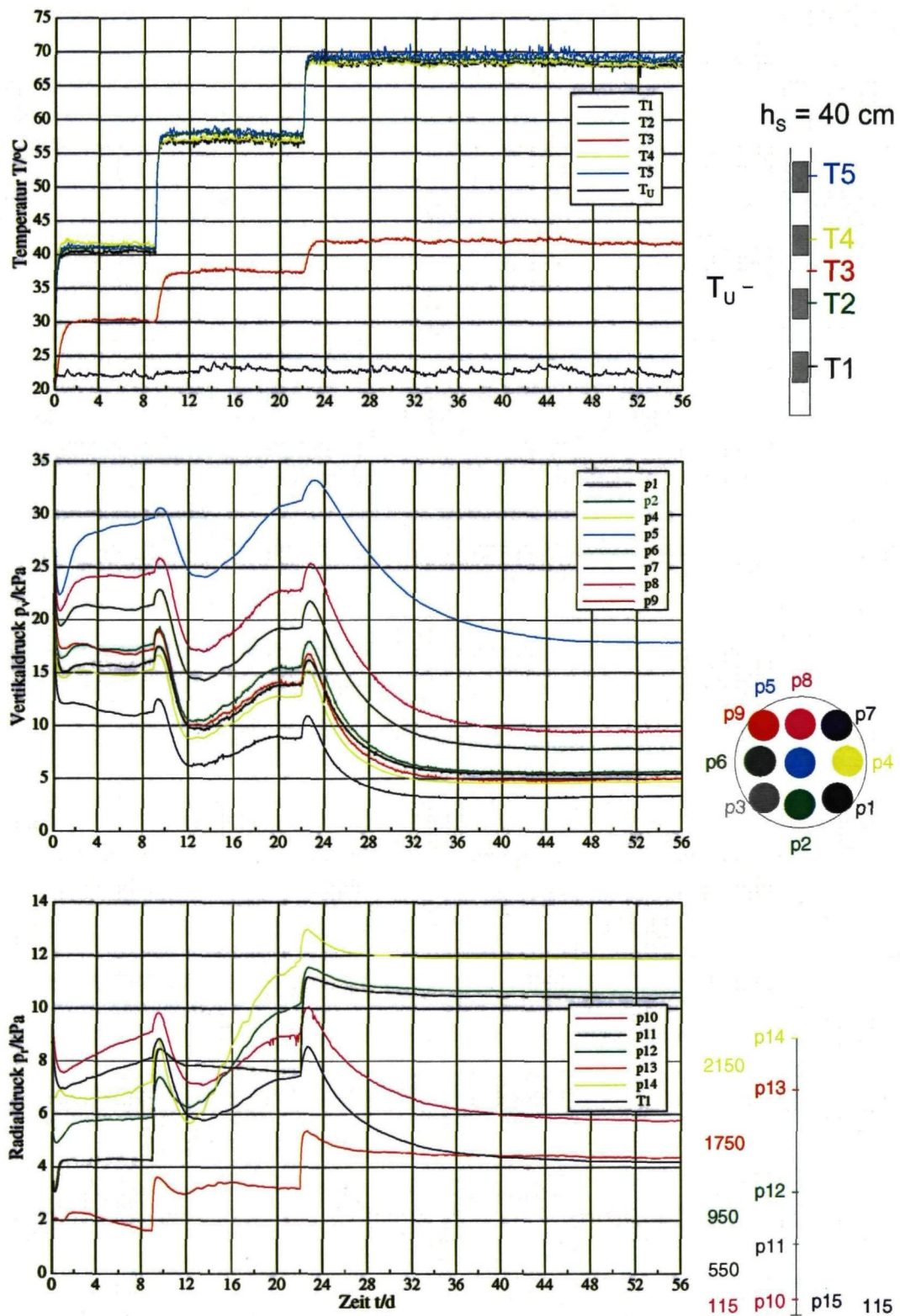


Abb. 49: Gemessene Temperaturen (oben), Vertikaldrücke (mitte) und Radialdrücke (unten) in Relation zur Zeit für Dummy-Gewichte von 215 kg und einer Salzgrusüberdeckung von 40 cm bei einem Experiment mit beheizten Dummies

8. **Schlußfolgerungen und Ausblick**

Im Teilvorhaben „Validierung der Modelle zur Lastabtragung durch Einbettung in Salzgrus“ als Teil des „MAW(Q)- und HTR-BE-Versuchsprogramms“ sollte grundsätzlich der experimentelle Nachweis für die lastabtragende Wirkung einer Salzgrusschicht in vertikalen, mit radioaktiven Abfallgebünden und losem Steinsalzgrus verfüllten Endlagerbohrlöchern erbracht werden. Zu diesen Abfällen zählen HAW-Abfälle und wärmeentwickelnde mittelfradioaktive Abfälle (MAW-Q) aus der LWR-BE-Wiederaufarbeitung sowie abgebrannte HTR-Brennelemente.

Darüberhinaus soll der theoretische Ansatz zur analytischen Beschreibung der Druckverteilungen in verfüllten Endlagerbohrlöchern - das Semihydrostatische Modell - experimentell überprüft und, falls erforderlich, erweitert werden.

Zur experimentellen Simulation eines Endlagerbohrlochs wurden zwei Versuchsstände konstruiert und gefertigt, mit denen sich die Druckverteilungen unter Variation aller maßgebenden Parameter bestimmen lassen. Parallel dazu werden im Vorhaben „Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus“ diese Salzgrusparameter experimentell ermittelt. Sie dienen als Eingangsparameter für die theoretische Modellierung und Beschreibung der Druckverteilung. Die berechneten Druckverteilungen werden anschließend mit den experimentell ermittelten Drücken verglichen.

Folgende Ergebnisse konnten nach den bisher durchgeführten Untersuchungen an beiden Prüfständen erzielt bzw. bestätigt werden.

- Die Lastabtragung funktioniert, sogar bei einer spiegelglatten Wand. Eine lastbegrenzende bzw. gegenüber hydrostatischer Lastzunahme lastvermindernde Wirkung einer lose eingebrachten Schicht aus Steinsalzgrus läßt sich bereits nach geringen Füllhöhen von 0,5 m experimentell nachweisen. Der experimentelle Nachweis der Existenz einer Konversionstiefe, unterhalb derer trotz weiter fortschreitender Einlagerung die Drücke nicht mehr zunehmen, ist gelungen. Je rauher die Oberfläche, um so schneller wird die Konversionstiefe erreicht.
- Die Wandrauigkeit spielt bei der Lastabtragung eine geringere Rolle, als es in der einschlägigen Literatur zu Siloexperimenten beschrieben ist. Darin wird die lastabtragende Wirkung nahezu ausschließlich auf den Wandreibungskoeffizienten zwischen Schüttgut und Wand reduziert. Dabei lassen sich immer dann gute Übereinstimmungen zwischen den Experimenten und den Rechnungen erzielen, wenn der innere Reibungsbeiwert des Schüttgutes und der Wandreibungsbeiwert nahe zusammen und nicht kleiner als 0,4 sind. Bei der Berechnung der Drücke nach dem Modell mit den in diesem Teilvorhaben und den von BAF gemessenen Salzgrusparametern ergeben sich bei alleiniger Ansetzung des Wandreibungsbeiwertes für die glatte Oberfläche Druckwerte, die, über alle Feinkornanteile gemittelt, um den Faktor 2,7 oberhalb der gemessenen Drücke liegen. Innerer Reibungsbeiwert und Wandreibungsbeiwert unterscheiden sich hier um den Faktor 6 - 7. Die Einführung

Anhang E

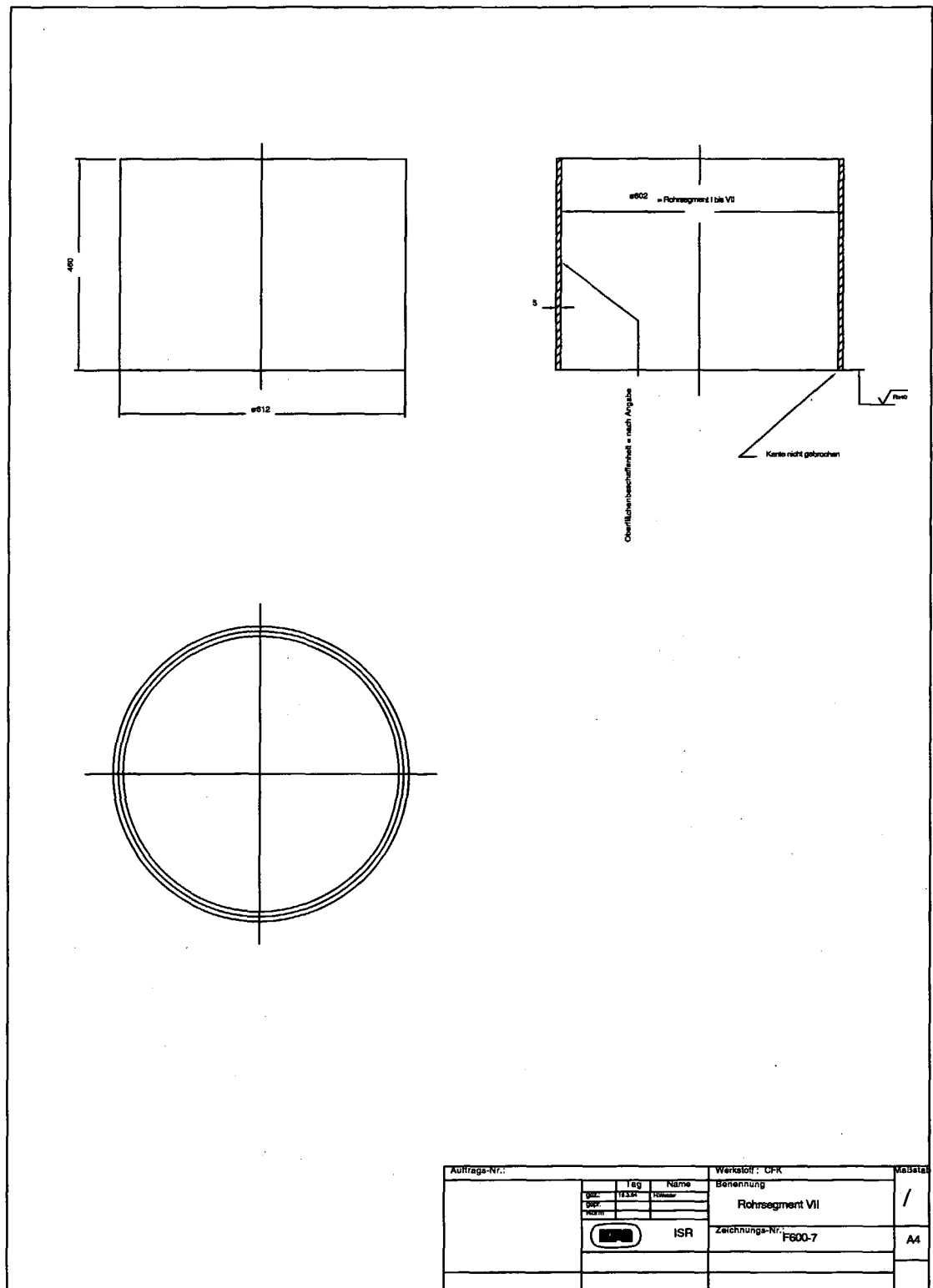


Abb. 60: Rohrsegment 7 von LEISA II

Anhang E

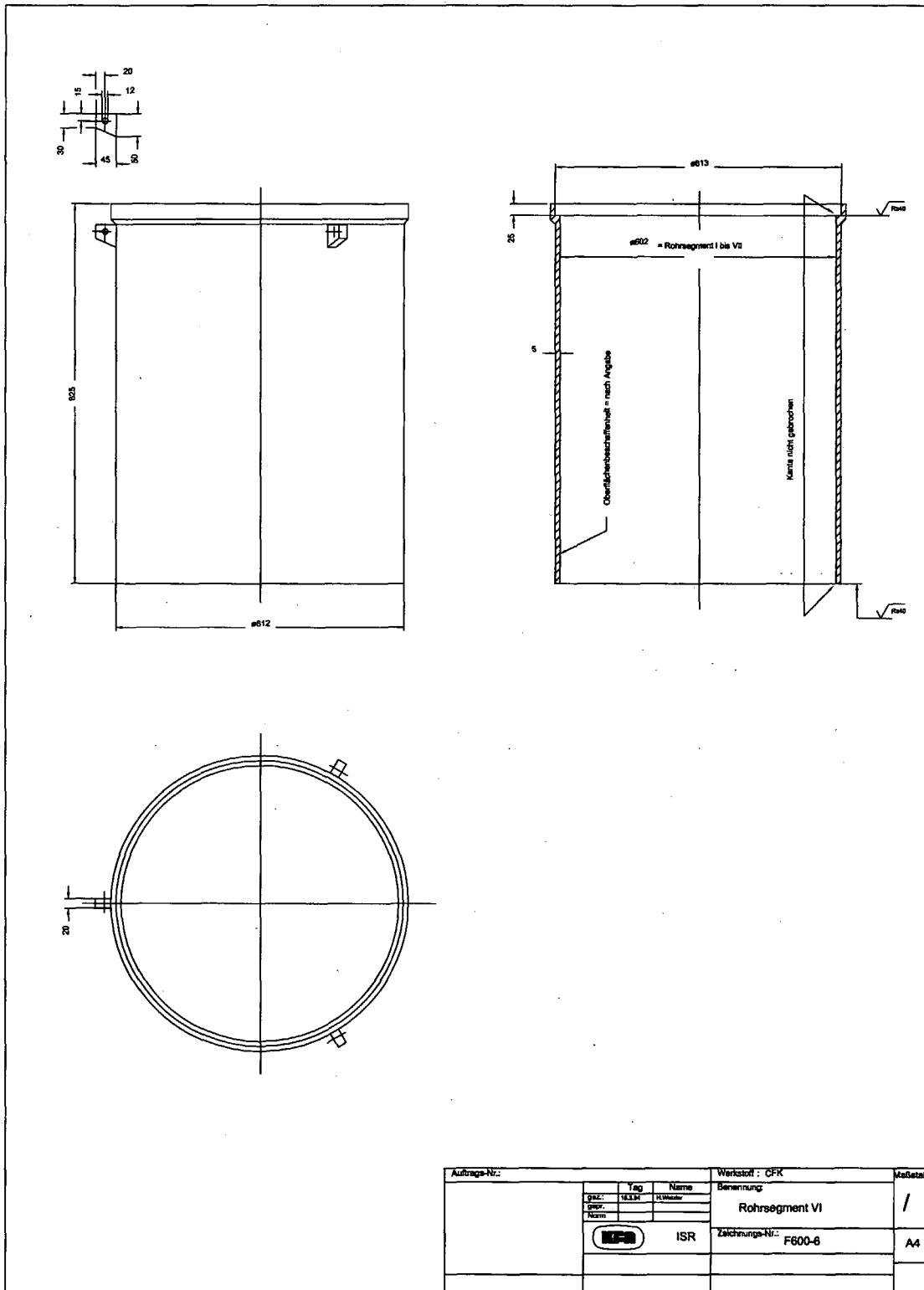


Abb. 59: Rohrsegment 6 von LEISA II

Anhang E

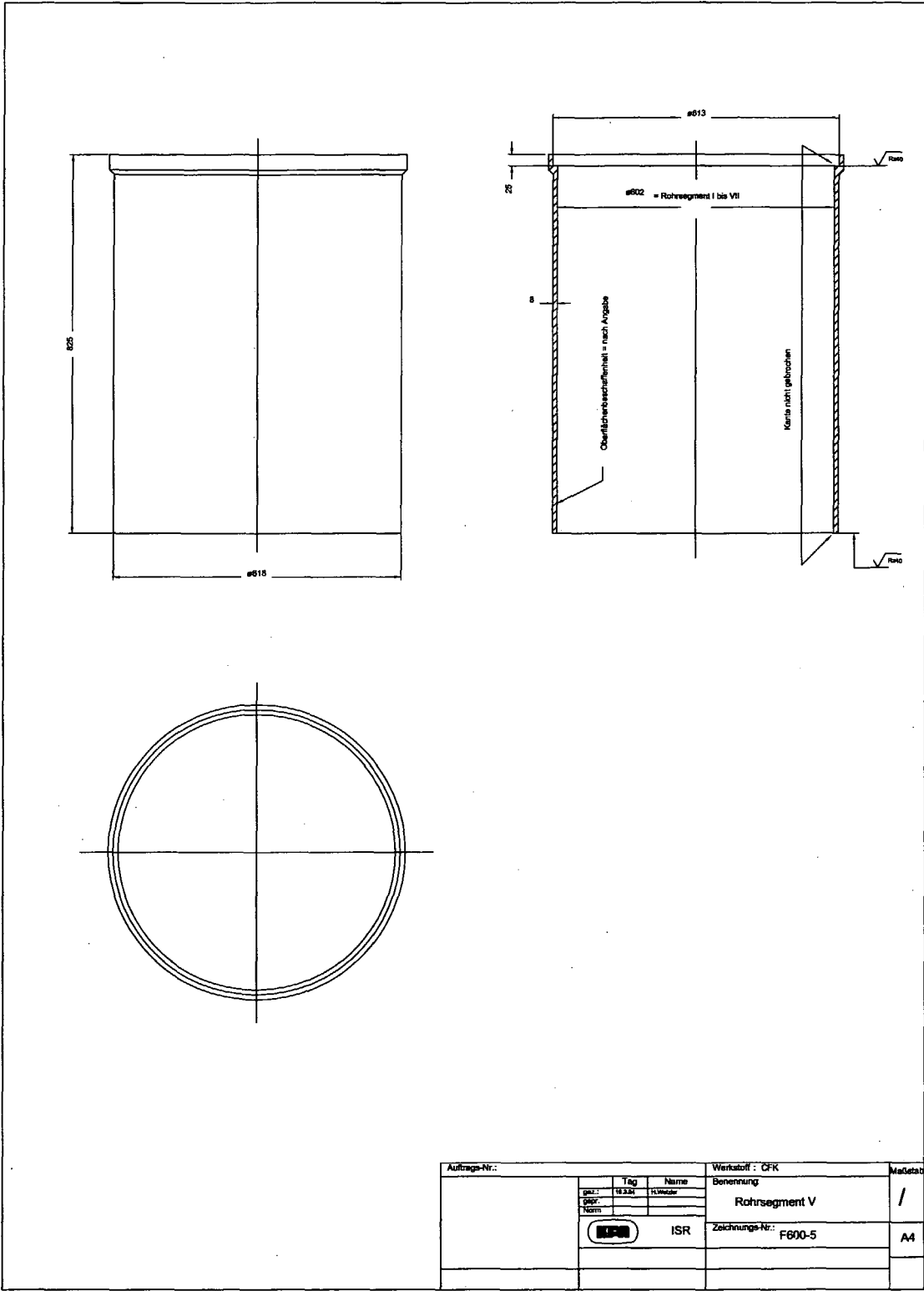


Abb. 58: Rohrsegment 5 von LEISA II

Anhang E

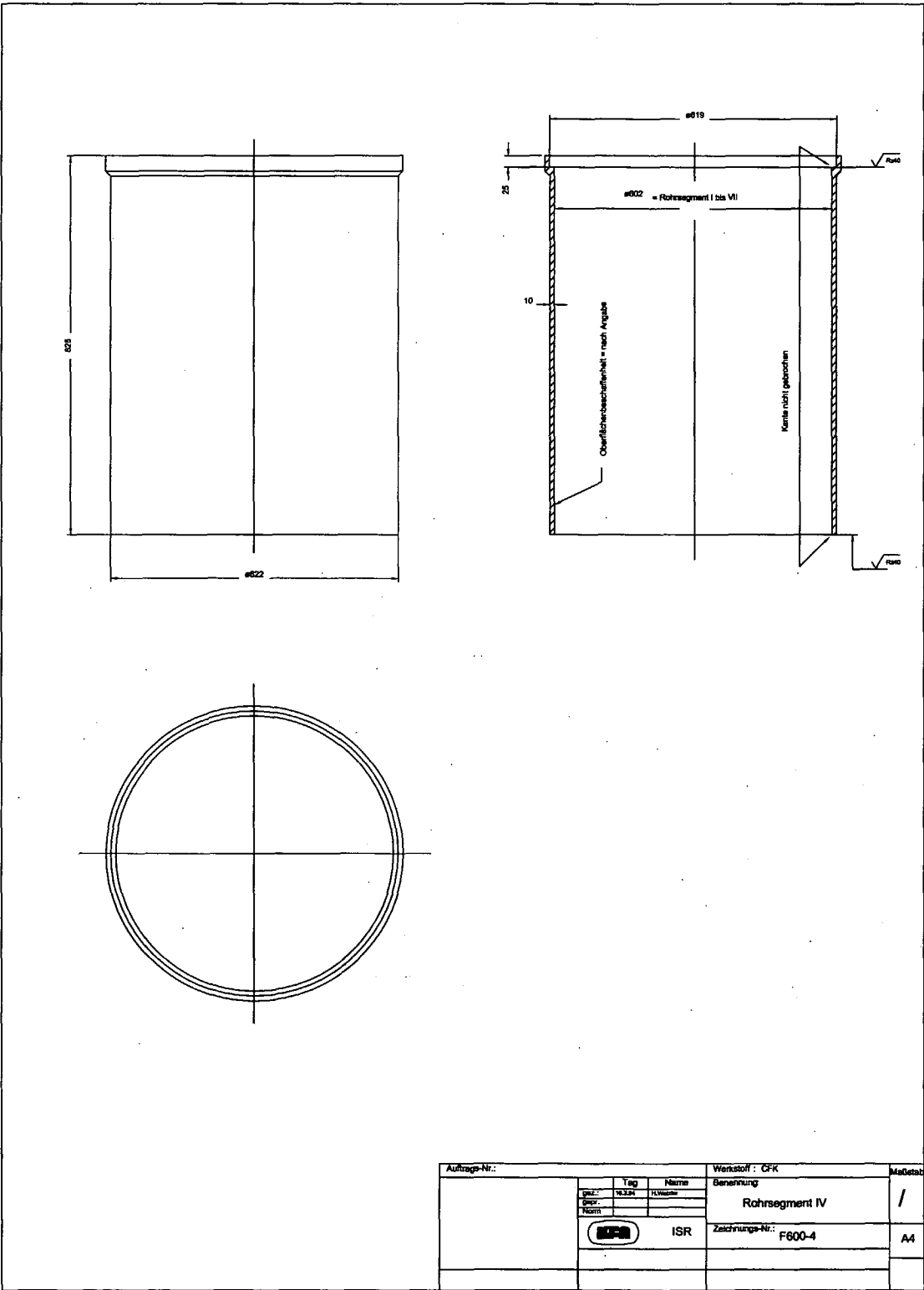


Abb. 57: Rohrsegment 4 von LEISA II

Anhang E

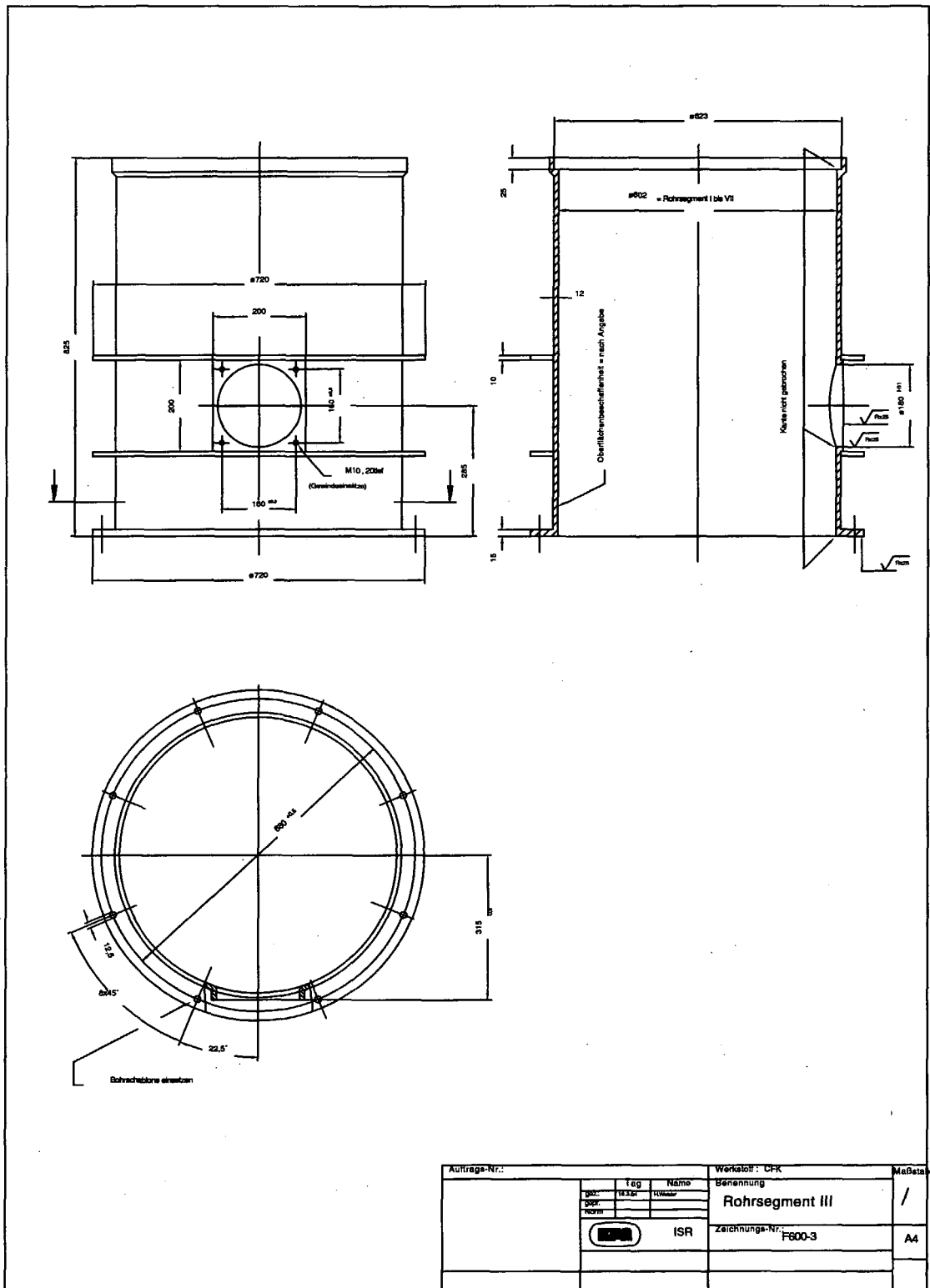


Abb. 56: Rohrsegment 3 von LEISA II

Anhang E

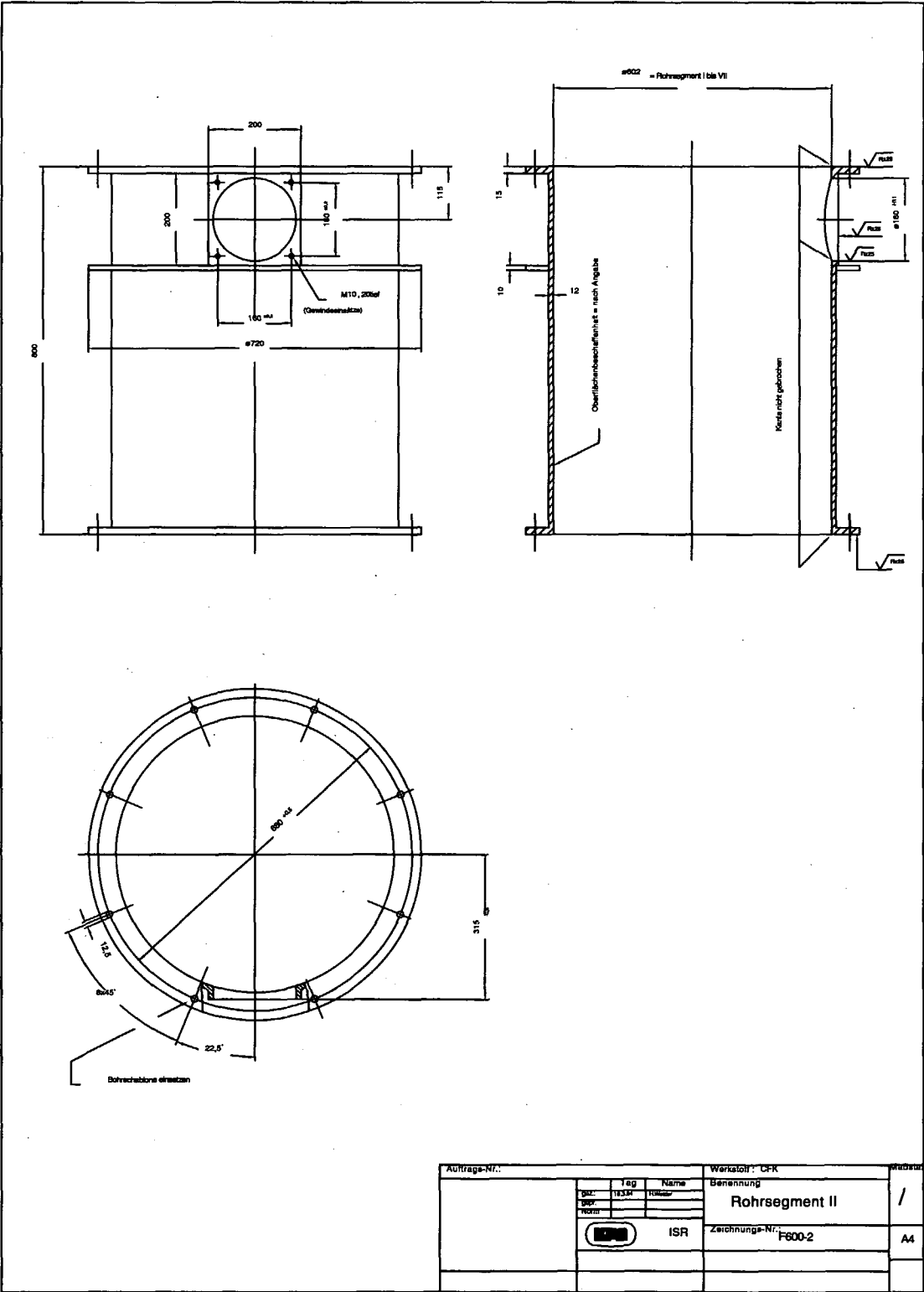


Abb. 55: Rohrsegment 2 von LEISA II

Anhang E

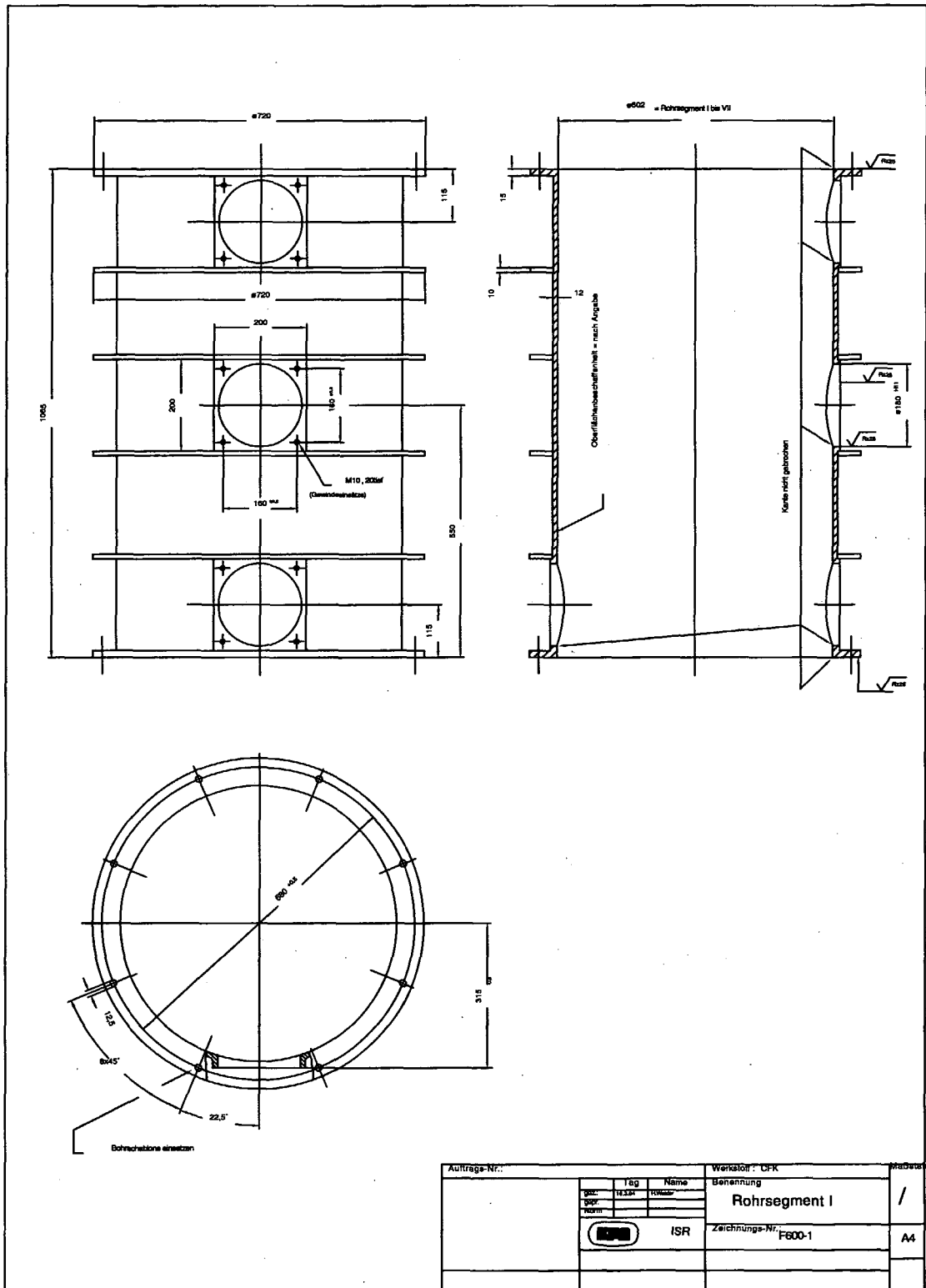


Abb. 54: Rohrsegment 1 von LEISA II

Anhang E

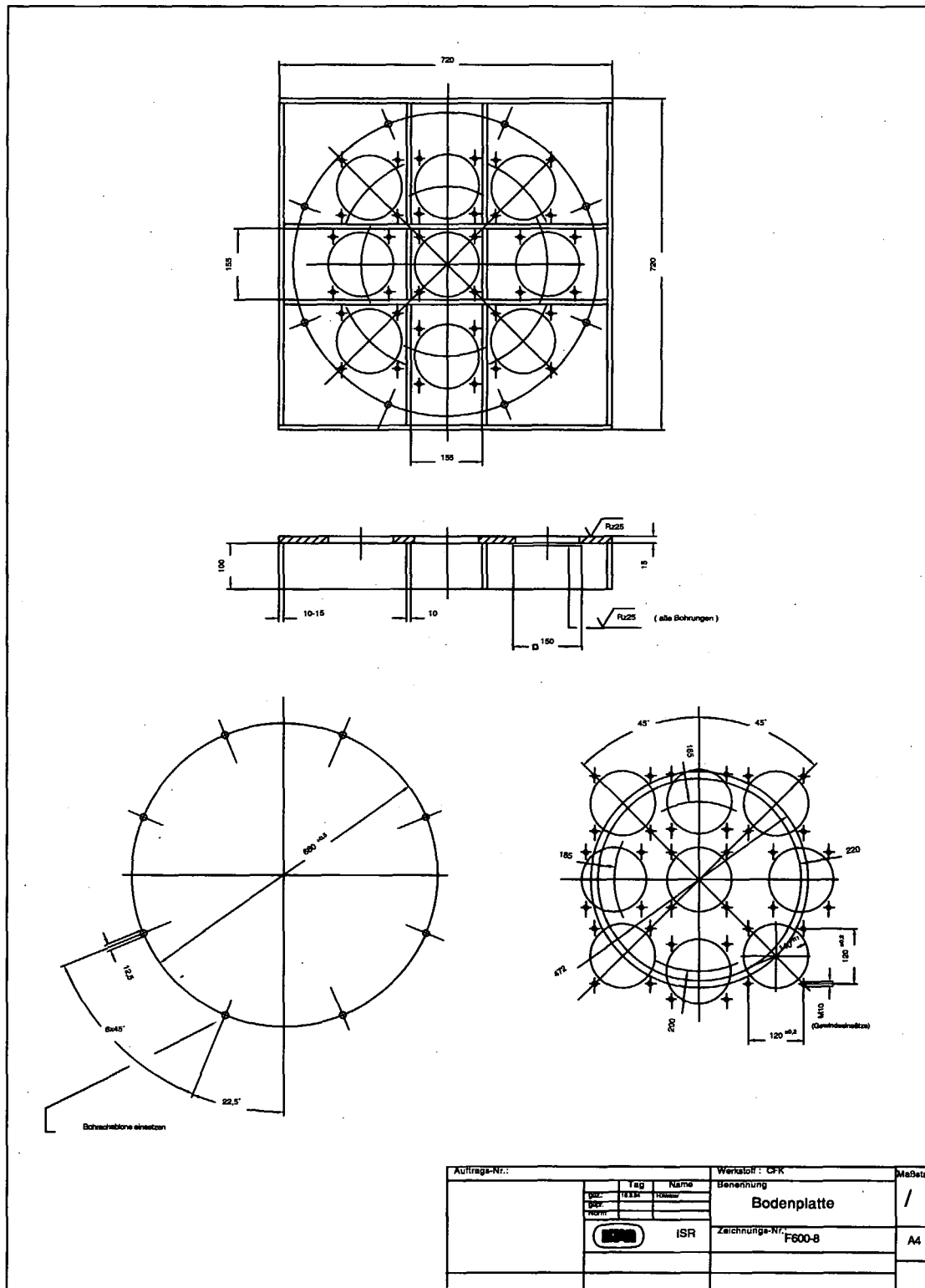


Abb. 53: Bodenplatte LEISA II

E. Konstruktionszeichnungen LEISA II

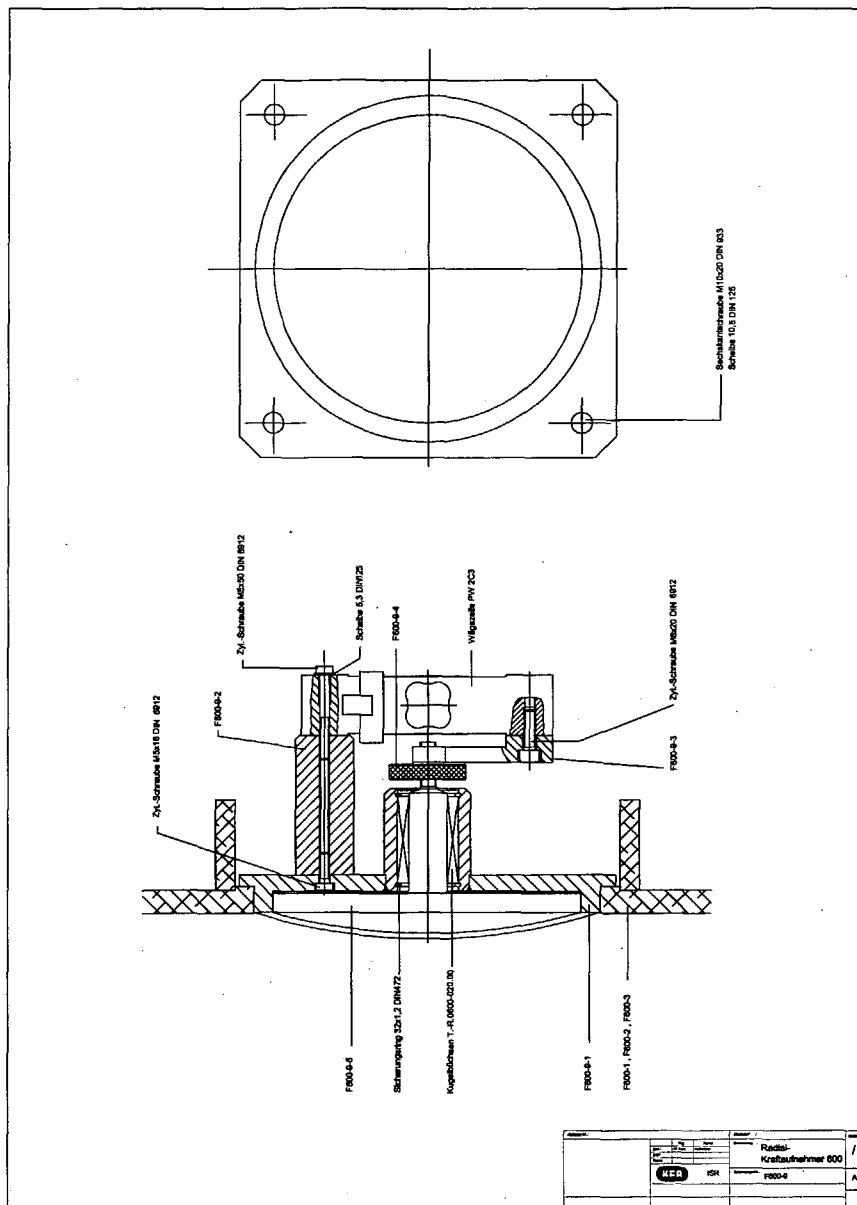


Abb. 52: Radialdruckaufnehmer LEISA II

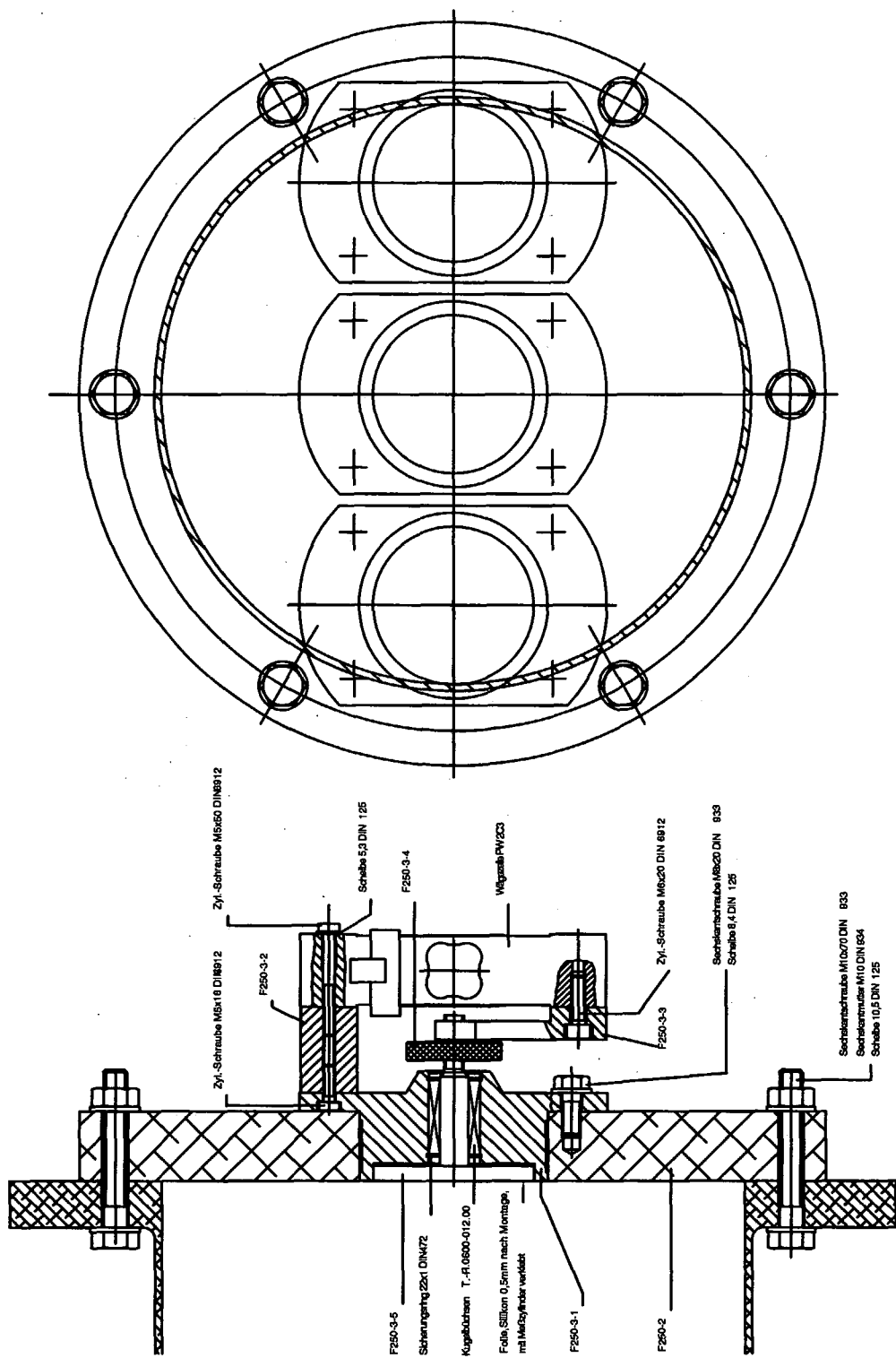


Abb. 51: Bodenplatte LEISA I mit Axialdruckaufnehmer

Anhang C

Tabelle 25: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e , einaxiale Druckfestigkeit σ_c und Wandreibungswinkel φ_W (CFK glatt und rau) für unterschiedliche Feinkornanteile X_F bei der Salzgrustemperatur $T_S = 100\text{ °C}$

Fließort	X_F	ρ_S	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c	φ_W (rau)	φ_W (glatt)
-	-	kg/m ³	°	kPa	°	kPa	°	°
2	1,0	1310	39,7	37,1	40,2	0,85	27,9	15,6
3	1,0	1310	39,7	73,4	41,2	4,65		
2	0,51	1324	40,6	36,2	40,8	0,35	27,2	15,9
3	0,51	1352	40,6	72,9	40,8	0,78		
2	0,2	1296	41,6	41,0	42,4	1,44	27,6	14,9
3	0,2	1239	41,6	80,4	42,4	2,78		
2	0,0	1169	43,4	43,0	43,4	0,00	28,0	14,8
3	0,0	1127	43,4	74,8	43,5	0,54		

Tabelle 26: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e , einaxiale Druckfestigkeit σ_c und Wandreibungswinkel φ_W (CFK glatt und rau) für unterschiedliche Feinkornanteile X_F bei der Salzgrustemperatur $T_S = 150\text{ °C}$

Fließort	X_F	ρ_S	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c	φ_W (rau)	φ_W (glatt)
-	-	kg/m ³	°	kPa	°	kPa	°	°
2	1,0	1268	40,4	38,2	40,8	0,64	26,9	20,2
3	1,0	1296	40,4	64,7	40,8	1,24		
2	0,51	1296	40,6	37,7	40,9	0,39	26,8	18,6
3	0,51	1310	40,6	75,8	40,9	0,79		
2	0,2	1239	41,6	38,4	41,7	0,17	26,9	18,6
3	0,2	1268	41,6	80,2	41,8	0,86		
2	0,0	1127	42,0	42,7	42,0	0,08	27,5	18,3
3	0,0	1141	42,0	79,5	42,3	1,23		

C. Von BAF gemessene Salzgrusparameter für Probe B und für Probe 1 bei erhöhten Temperaturen

Tabelle 23: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_s , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für Probe B

Fließort	ρ_s	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1380	0,029	42,8	11,96	43,0	0,135
2	1373	0,423	40,9	41,63	41,9	1,850
3	1380	0,874	42,4	75,50	43,6	3,963
4	1394	2,510	41,5	108,11	43,8	11,157

Tabelle 24: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_s , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e , einaxiale Druckfestigkeit σ_c und Wandreibungswinkel φ_w (CFK glatt und rau) für unterschiedliche Feinkornanteile X_F bei der Salzgrustemperatur $T_s = 60\text{ °C}$

Fließort	X_F	ρ_s	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c	φ_w (rau)	φ_w (glatt)
-	-	kg/m ³	°	kPa	°	kPa	°	°
2	1,0	1289	37,9	31,9	39,4	2,05	28,1	15,3
3	1,0	1310	37,9	71,9	38,9	2,88		
2	0,51	1310	40,5	36,8	40,5	0,00	27,0	14,8
3	0,51	1310	40,5	64,9	40,7	0,84		
2	0,2	1296	40,5	36,3	40,8	0,56	27,0	15,0
3	0,2	1296	40,5	77,6	40,9	1,54		
2	0,0	1169	42,6	43,6	42,6	0,00	27,8	12,9
3	0,0	1169	42,6	72,3	42,6	0,00		

Anhang B

Tabelle 20: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ϱ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,6$ (Probe 2)

Fließort	ϱ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1451	0,18	42,7	11,5	44,3	0,85
2	1458	0,61	44,3	46,5	45,6	2,92
3	1479	1,29	45,1	83,6	46,7	6,23

Tabelle 21: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ϱ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Probe 2)

Fließort	ϱ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1239	0,16	41,0	10,0	42,6	0,70
2	1246	0,91	41,3	40,0	43,5	4,01
3	1268	1,40	41,3	64,7	43,4	6,17
4	1282	3,92	41,3	119,8	44,5	17,30

Tabelle 22: Von BAF gemessene Wandreibungswinkel φ_W für CFK (glatt) und CFK (rauh) für verschiedene Feinkornanteile X_F (Probe 2)

Fließort	Feinkornanteil	CFK (glatt)	CFK (rauh)
-	-	°	°
1	0	6,0	28,4
1	0,2	5,9	27,5
1	0,4	6,2	29,4
1	0,51	6,5	27,3
1	0,6	7,1	29,1
1	1,0	7,6	31,2

B. Von BAF gemessene Salzgrusparameter für Probe 2

Tabelle 17: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0$ (Probe 2)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1169	0,07	44,6	11,3	45,2	0,34
2	1107	0,10	44,1	39,9	44,4	0,48
3	1211	0,31	44,2	76,7	44,6	1,46

Tabelle 18: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,2$ (Probe 2)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1324	0,09	45,4	12,2	46,1	0,43
2	1352	0,57	45,3	43,9	46,6	2,79
3	1373	1,58	45,0	79,3	47,1	7,64

Tabelle 19: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,4$ (Probe 2)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1394	0,15	44,1	12,0	45,4	0,72
2	1423	1,04	44,6	43,9	47,0	4,97
3	1408	2,25	44,9	79,0	47,8	10,83

Anhang A

Tabelle 16: Von BAF gemessene Wandreibungswinkel φ_W für CFK (glatt), CFK (rauh) und V4A-Stahl für verschiedene Feinkornanteile X_F (Probe 1)

Fließort	Feinkornanteil	CFK (glatt)	CFK (rauh)	V4A-Stahl
-	-	°	°	°
1	0	6,1	30,0	23,4
1	0,2	6,2	29,0	23,3
1	0,4	6,5	29,5	24,3
1	0,51	5,8	28,2	23,4
1	0,6	6,9	29,8	24,4
1	0,8	9,1	32,2	25,8
1	1,0	7,6	31,3	26,1

Anhang A

Tabelle 12: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,56$ (Probe 1)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1352	0,13	41,0	10,8	42,1	0,57
2	1366	0,45	41,2	38,5	42,3	1,97
3	1380	1,02	40,7	74,1	42,0	4,43
4	1423	1,41	41,0	121,8	42,1	6,17

Tabelle 13: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,6$ (Probe 1)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1423	0,05	41,5	11,2	41,9	0,22
2	1430	0,53	43,8	40,7	45,1	2,49
3	1437	0,87	44,1	76,2	45,2	4,09

Tabelle 14: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,8$ (Probe 1)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1317	0,14	41,6	11,4	42,7	0,61
2	1324	1,13	41,7	37,8	44,7	5,05
3	1380	2,14	43,2	78,2	45,9	9,87

Tabelle 15: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Probe 1)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1239	0,17	40,9	10,0	42,6	0,74
2	1246	0,91	41,3	40,0	43,5	4,01
3	1268	1,40	41,3	64,7	43,4	6,17
4	1282	3,92	41,3	119,8	44,5	17,30

Anhang

A. Von BAF gemessene Salzgrusparameter für Probe 1

Tabelle 9: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0$ (Probe 1)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1141	0,04	40,8	10,6	41,1	0,16
2	1169	0,08	41,0	36,7	41,2	0,36
3	1176	0,00	40,7	65,1	40,7	0,01

Tabelle 10: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,2$ (Probe 1)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1268	0,00	43,1	10,3	43,2	0,00
2	1282	0,26	42,9	39,0	43,5	1,19
3	1296	0,27	43,0	76,1	43,3	1,27

Tabelle 11: Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,4$ (Probe 1)

Fließort	ρ_S	τ_c	φ_i	σ_1	φ_e	σ_c
-	kg/m ³	kPa	°	kPa	°	kPa
1	1359	0,00	42,8	10,3	42,8	0,00
2	1366	0,37	43,7	37,5	44,7	1,75
3	1394	0,61	43,8	72,4	44,6	2,85

Abbildungsverzeichnis

49.	Gemessene Temperaturen (oben), Vertikaldrücke (mitte) und Radialdrücke (unten) in Relation zur Zeit für Dummy-Gewichte von 215 kg und einer Salzgrusüberdeckung von 40 cm bei einem Experiment mit beheizten Dummies	75
50.	Versuchsstand LEISA I	96
51.	Bodenplatte LEISA I mit Axialdruckaufnehmer	97
52.	Radialdruckaufnehmer LEISA II	98
53.	Bodenplatte LEISA II	99
54.	Rohrsegment 1 von LEISA II	100
55.	Rohrsegment 2 von LEISA II	101
56.	Rohrsegment 3 von LEISA II	102
57.	Rohrsegment 4 von LEISA II	103
58.	Rohrsegment 5 von LEISA II	104
59.	Rohrsegment 6 von LEISA II	105
60.	Rohrsegment 7 von LEISA II	106

Abbildungsverzeichnis

36.	Gemessene, nicht zeitbereinigte (oben) Vertikaldrücke sowie gemessene, zeitbereinigte (unten) Vertikaldrücke für LEISA II in Relation zur Tiefe für den Feinkornanteil $X_F = 0,6$	52
37.	Gemessene zeitbereinigte Vertikaldrücke für LEISA II in Relation zur Tiefe für die Feinkornanteile $X_F = 0,2$ (oben) und $X_F = 1,0$ (unten)	53
38.	Gemessene Verteilung der Vertikaldrücke über der Bodenplatte (LEISA II) für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Meßreihe 3)	54
39.	Gemessene Verteilung der Vertikaldrücke über der Bodenplatte (LEISA II) für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Meßreihe 5)	55
40.	Gemessene Verteilung der Vertikaldrücke über der Bodenplatte (LEISA II) für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 0,6$ (Meßreihe 4)	56
41.	Isobaren über der Bodenplatte in LEISA II für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Meßreihe 3)	57
42.	Isobaren über der Bodenplatte in LEISA II für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Meßreihe 5)	58
43.	Isobaren über der Bodenplatte in LEISA II für die Tiefen $z = 0,8$ m, $z = 2,1$ m, $z = 3,4$ m und $z = 5$ m bei einem Feinkornanteil $X_F = 0,6$ (Meßreihe 4)	59
44.	Gemessene Vertikal- und Radialdrücke für LEISA II in Relation zur Zeit für Salzgrus mit einem Feinkornanteil $X_F = 0,6$	61
45.	Exponentielle und logarithmische Anpassung der in LEISA II gemessenen Vertikaldrücke in Relation zur Zeit für Salzgrus mit einem Feinkornanteil $X_F = 0,6$	62
46.	Gemessene Vertikal- und Radialdrücke in Relation zur Tiefe beim Füllen des Versuchsstand LEISA II mit Salzgrus und Dummies für eine Salzgrusüberdeckung von $h_S = 40$ cm und Dummygewichten von 200 kg	65
47.	Gemessene Verteilungen der Vertikaldrücke auf der Bodenplatte für Experimente mit unterschiedlichen Dummy-Gewichten und Salzgrusüberdeckungen in Versuchsstand LEISA II	67
48.	Gemessene Vertikal- und Radialdrücke in Relation zur Zeit für Dummy-Gewichte von 200 kg und einer Salzgrusüberdeckung von 40 cm	70

Abbildungsverzeichnis

20.	Gemessene Vertikaldrücke (Rand) in LEISA I mit glatter CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0,6, 0,8$ und $1,0$ in Relation zur Tiefe	31
21.	Gemessene Vertikaldrücke (Zentrum) in LEISA I mit glatter CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und $0,4$ in Relation zur Tiefe	32
22.	Gemessene Vertikaldrücke (Zentrum) in LEISA I mit glatter CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0,6, 0,8$ und $1,0$ in Relation zur Tiefe	33
23.	Gemessene Salzgrusparameter Seitendruckbeiwert (k) und Dichte (ρ_s) für die glatte CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil X_F	34
24.	Gemessene Salzgrusparameter innerer Reibungsbeiwert (μ_i) und Wandreibungsbeiwert (μ_w) für die glatte CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil X_F	35
25.	Gemessene Vertikaldrücke (Rand) in LEISA I mit rauher CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und $0,4$ in Relation zur Tiefe	37
26.	Gemessene Vertikaldrücke (Rand) in LEISA I mit rauher CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0,6, 0,8$ und $1,0$ in Relation zur Tiefe	38
27.	Gemessene Vertikaldrücke (Zentrum) in LEISA I mit rauher CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und $0,4$ in Relation zur Tiefe	39
28.	Gemessene Vertikaldrücke (Zentrum) in LEISA I mit rauher CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0,6, 0,8$ und $1,0$ in Relation zur Tiefe	40
29.	Gemessene Salzgrusparameter Seitendruckbeiwert (k) und Dichte (ρ_s) für die rauhe CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil X_F	41
30.	Gemessene Salzgrusparameter innerer Reibungsbeiwert (μ_i) und Wandreibungsbeiwert (μ_w) für die rauhe CFK-Wand in Relation zum Feinkornanteil X_F	42
31.	Vergleich berechneter und gemessener Verlauf des Vertikaldrucks für die rauhe CFK-Wand in Relation zur Tiefe bei einem Feinkornanteil $X_F = 1,0$	44
32.	Maximal gemessene Vertikaldrücke für die glatte und die rauhe Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F	45
33.	Berechnete und gemessene Konversionstiefen z_0 für LEISA I mit glatter und rauher Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F	46
34.	In LEISA I gemessene Vertikal-, Tangential- und Gewichtslasten für die rauhe CFK-Wand in Relation zur Tiefe für $X_F = 1,0$	49
35.	Anordnung der Vertikaldruck-, Radialdruck- und Temperaturaufnehmer in Versuchsstand LEISA II sowie Zuordnung der Farben zu den Aufnehmern	51

Abbildungsverzeichnis

1. Oberflächenkräfte auf ein herausgeschnittenes Volumenelement eines Ringes im Semihydrostatischen Modell	4
2. Der nach dem Semihydrostatischen Modell berechnete, vertikale Druck in Relation zur Radialkoordinate r (links) und zur Vertikalkoordinate z (rechts) bei einer Schüttdichte von 1300 kg/m^3 und einem Bohrlochradius von $0,5 \text{ m}$	6
3. Die Strategie zur Validierung des Modells	7
4. Die Segmentausgangsstruktur mit Öffnungen und Adapterflanschen für die Druckaufnehmer für Versuchsstand LEISA II	12
5. Verformungen der Segmentstruktur für Modell 1 aus INVAR-Stahl unter Druck- und Temperaturbeanspruchung	13
6. Verformungen der Segmentstruktur für Modell 3 aus CFK unter Druck- und Temperaturbeanspruchung	14
7. CFK-Bodenplatte nach Modell 1 mit vier Verstärkungsriegeln bei biege-weicher Lagerung	16
8. CFK-Bodenplatte nach Modell 2 mit vier Verstärkungsriegeln und zusätz-lichem umlaufenden Versteifungsrahmen	17
9. Verformungen der Bodenplatte für Modell 1 (CFK) unter Druck- und Temperaturbeanspruchung	18
10. Verformungen der Bodenplatte für Modell 2 (CFK) unter Druck- und Temperaturbeanspruchung	19
11. Versuchshalle mit Prüfständen	21
12. Blick von oben in Prüfstand LEISA II auf die Bodenplatte mit neun Axialdruckaufnehmern	22
13. Bodenplatte von LEISA II mit Axialdruckaufnehmern (Ansicht von unten)	23
14. Montage von LEISA II	24
15. Verkabelung der Radial- und Axialdruckaufnehmer LEISA II	25
16. Mantelflächen mit Radialdruckaufnehmern	26
17. Radialdruckaufnehmer LEISA II (teilweise zerlegt)	27
18. Dummy-Gebinde	28
19. Gemessene Vertikaldrücke (Rand) in LEISA I mit glatter CFK-Wand für die Feinkornanteile $X_F = 0, 0,2$ und $0,4$ in Relation zur Tiefe	30

Tabellenverzeichnis

23.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ϱ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für Probe B	94
24.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ϱ_S , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e , einaxiale Druckfestigkeit σ_c und Wandreibungswinkel φ_W (CFK glatt und rau) für unterschiedliche Feinkornanteile X_F bei der Salzgrustemperatur $T_S = 60\text{ °C}$	94
25.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ϱ_S , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e , einaxiale Druckfestigkeit σ_c und Wandreibungswinkel φ_W (CFK glatt und rau) für unterschiedliche Feinkornanteile X_F bei der Salzgrustemperatur $T_S = 100\text{ °C}$	95
26.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ϱ_S , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e , einaxiale Druckfestigkeit σ_c und Wandreibungswinkel φ_W (CFK glatt und rau) für unterschiedliche Feinkornanteile X_F bei der Salzgrustemperatur $T_S = 150\text{ °C}$	95

Tabellenverzeichnis

13.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,6$ (Probe 1)	90
14.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,8$ (Probe 1)	90
15.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Probe 1)	90
16.	Von BAF gemessene Wandreibungswinkel φ_W für CFK (glatt), CFK (rauh) und V4A-Stahl für verschiedene Feinkornanteile X_F (Probe 1)	91
17.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0$ (Probe 2)	92
18.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,2$ (Probe 2)	92
19.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,4$ (Probe 2)	92
20.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,6$ (Probe 2)	93
21.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 1,0$ (Probe 2)	93
22.	Von BAF gemessene Wandreibungswinkel φ_W für CFK (glatt) und CFK (rauh) für verschiedene Feinkornanteile X_F (Probe 2)	93

Tabellenverzeichnis

1.	Übersicht über das Versuchsprogramm	8
2.	Maximale gemessene ($p_{v,max}^{exp}$), berechnete (p_v) und hydrostatische Drücke (p_{hydro}) für die glatte Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F . . .	36
3.	Maximale gemessene ($p_{v,max}^{exp}$), berechnete (p_v) und hydrostatische Drücke (p_{hydro}) für die raue Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F . . .	43
4.	Gemessene Salzgrusparameter (LEISA II) Seitendruckbeiwert k , Schüttdichte ρ_S , innerer Reibungsbeiwert μ_i und Wandreibungsbeiwert μ_W für die glatte Oberfläche in Relation zum Feinkornanteil X_F	60
5.	Maximale gemessene ($p_{v,max}^{exp}$), berechnete (p_v) und hydrostatische Drücke (p_{hydro}) für die glatte Oberfläche (LEISA II) in Relation zum Feinkornanteil X_F	60
6.	Gemessene und hydrostatische Drücke für Dummy-Experimente mit unterschiedlichen Dummy-Gewichten und unterschiedlichen Salzgrusüberdeckungen h_S	66
7.	Berechnete und gemessene Vertikaldrücke für Dummy-Experimente mit Dummygewichten von 127 kg und 200 kg bei 40 cm Salzgrusüberdeckung	68
8.	Berechnete und gemessene Vertikaldrücke für Dummy-Experimente mit Dummygewichten von 127 kg und 200 kg bei 60 cm Salzgrusüberdeckung	69
9.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0$ (Probe 1)	89
10.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,2$ (Probe 1)	89
11.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,4$ (Probe 1)	89
12.	Von BAF gemessene Salzgrusparameter Schüttdichte ρ_S , Kohäsion τ_c , innerer Reibungswinkel φ_i , Verfestigungshauptspannung σ_1 , effektiver innerer Reibungswinkel φ_e und einaxiale Druckfestigkeit σ_c für den Feinkornanteil $X_F = 0,56$ (Probe 1)	90

Materialtypische Parameter

Variable	Dimension	Bedeutung
k	-	Seitendruckbeiwert
k_{korrr}	-	korrigierter Seitendruckbeiwert
k_{unkorr}	-	unkorrigierter Seitendruckbeiwert
α	K^{-1}	Wärmeausdehnungskoeffizient
μ	-	Reibungsbeiwert
μ_e	-	effektiver innerer Reibungsbeiwert
μ_i	-	innerer Reibungsbeiwert
μ_{int}	-	integraler Reibungsbeiwert
μ_W	-	Wandreibungsbeiwert
φ_e	$^\circ$	effektiver innerer Reibungswinkel
φ_i	$^\circ$	innerer Reibungswinkel
φ_W	$^\circ$	Wandreibungswinkel
ϱ_F	kg/m^3	Gebindedichte
ϱ_K	kg/m^3	Salzgruskorndichte
ϱ_S	kg/m^3	Schüttdichte
σ_c	kPa	einaxiale Druckfestigkeit
τ_c	kPa	Kohäsion

Formelverzeichnis

Geometrische Parameter

Variable	Dimension	Bedeutung
$d_{\text{au\ss en}}$	m	Au\ss endurchmesser des Versuchsstandes
d_{innen}	m	Innendurchmesser des Versuchsstandes
D_B	m	Bohrlochdurchmesser
D_F	m	Gebindedurchmesser
h_S	m	Sch\uttth\o he des Salzgrus
H_F	m	Gebindeh\o he
r	m	radiale Bohrlochkoordinate
R_B	m	Bohrlochradius
z	m	axiale Bohrlochkoordinate
z_0	m	Konversionstiefe
z_B	m	Bohrlochtiefe
z_k	m	Bestimmungstiefe f\ur k

Äu\ss ere Parameter

Variable	Dimension	Bedeutung
G_F	kg	Gebindegewicht
G_S	kg	Salzgrusgewicht
p_{hydro}	kPa	hydrostatischer Druck
p_r	kPa	radiale Druckkomponente
p_t	kPa	Wandreibungsdruck
p_v	kPa	axiale Druckkomponente
$p_{v,\text{max}}$	kPa	max. axiale Druckkomponente
$p_{v,\text{max}}^{\text{exp}}$	kPa	max. gem. axiale Druckkomponente
t	d	Zeit
T_F	°C	Gebindetemperatur
T_S	°C	Salzgrustemperatur
T_U	°C	Umgebungstemperatur
X_F	-	Feinkornanteil des Salzgrus ($\leq 2\text{mm}$)
X_W	-	Feuchteanteil des Salzgrus
σ_1	kPa	Verfestigungshauptspannung

Literatur

- [1] ATEWOLUGUN A. O., RISKOWSKI G. L.: *Experimental determination of Janssen's stress ratio by four methods for soybeans under static conditions*; Transactions of the ASAE, 34(1991) Nr. 5, 2193.
- [2] BARNERT E., BRÜCHER H., KROTH K.: *Einlagerungs- und Bohrlochverschlußtechnik - Abschlußbericht für die Projektphase 1.10.89 - 31.12.92 des Forschungsvorhabens MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern (Projekt MHV), Berichte des Forschungszentrums Jülich, Jül-2883, (1994).*
- [3] FEUSER W.: *Messung mechanischer Eigenschaften von Salzgrus und Überlegungen zur semihydrostatischen Einlagerung von Abfallgebinden in tiefen Bohrlöchern*; Berichte des Forschungszentrums Jülich, Jül-2782, (1993).
- [4] HÖHNE D., SCHÜNEMANN U., REUTER U.,WEBER K.: *Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus*; Forschungszentrum Jülich, Projekt MHV, Bericht ICT-TB-7/92 (1992).
- [5] HORNE R. M., NEDDERMAN R. M.: *Analysis of the stress distribution in two-dimensional bins by the method of characteristics*; Powder Technol., 14(1976) 93.
- [6] HUA Y. L., FENG Y. T.: *Wall pressure analysis of two-dimensional shallow bins with top piles*; Powder Technol., 86(1996) 257.
- [7] JANSSEN H. A.: *Versuche über Getreidedruck in Silozellen*; Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure Vol. 39(1895) 1045.
- [8] JARRET N. D., BROWN C. J., MOORE D. B.: *Pressure measurements in a rectangular silo*; Geotechnique 45(1995) Nr. 1, 95.
- [9] KWADE A., SCHULZE D., SCHWEDES J.: *Determination of the stress ratio in uniaxial compression tests*; Powder Handling & Processing, 6(1994) Nr. 1, 61 und 6(1994) Nr. 2, 199.
- [10] WALKER D. M.: *An approximate theory for pressures and arching in hoppers*; Chem. Engng. Sci., 21(1966) 975.
- [11] WALTERS J. K.: *A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers*; Chem. Engng. Sci., 28(1973) 779.
- [12] WERNER E. A.: *Finite-Elemente-Berechnung zur Validierung der Lastabtragung - Teil 1 u. 2, interner Bericht.*

8. *Schlußfolgerungen und Ausblick*

Gebinde und des Salzgruses gemittelten Dichte werden nach der Theorie Drücke errechnet, die um etwa den Faktor 1,5 oberhalb der gemessenen liegen.

- Die Einlagerung von beheizten Dummies in eine Salzgrusschüttung führt zu einer dynamischen Wechselwirkung zwischen Temperatur, mechanischer Dehnung und Setzung sowie Vertikal- und Radialdrücken in Relation zu Zeit. Durch Erhöhung der Dummy-Temperatur auf über 150 °C können die Radialdrücke im Bohrloch die Vertikaldrücke übersteigen.

Mit der Vorlage dieses Berichtes werden die systematischen Untersuchungen der Druckverteilungen innerhalb verfüllter Bohrlöcher vorläufig abgeschlossen. Ausgehend von der theoretischen Modellierung werden Konstruktion, Bau und Betrieb von geeigneten Versuchsständen beschrieben, mit denen sich die bisher nur im Modell nachgewiesene hohe Wirksamkeit der Lastabtragung durch Einbettung in Salzgrus auch experimentell belegen läßt. Die eingesetzte Meßtechnik und die eingeschlagene Strategie zur Validierung haben sich durchweg bewährt. Die parallel zu diesem Vorhaben durchgeführten Bestimmung aller maßgebenden Salzgrusparameter liefert alle wichtigen Daten zur Berechnung der Druckverteilungen.

Zur Aufstellung eines allgemein gültigen Übertragungsgesetzes bestehen noch Defizite in einer systematischen Untersuchung des Seitendruckbeiwertes und des integralen Reibungsbeiwertes in einem Lambda-Meter unter Variation der Wandrauhigkeit, der Normaldrücke usw.

Signifikante Verbesserungen der Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment bei der glatten Oberfläche lassen sich nur herbeiführen, wenn die experimentelle Bestimmung des Seitendruckbeiwertes im Lambda-Meter mit der simultanen Messung des integralen Reibungsbeiwertes für unterschiedliche Rauigkeiten erfolgt.

Weiterhin besteht Klärungsbedarf zur Frage, welche Druckverteilungen sich mit einem zwischen der glatten und der rauhen Oberfläche gelegenen Wandreibungsbeiwert ergeben und wie gut die Beschreibung durch das Modell ist. Die Auswahl des von BAF untersuchten Salzblocks mit künstlich aufgerauhter Oberfläche erfolgte willkürlich und stellt keinen repräsentativen Ausschnitt einer realen Bohrlochwand dar.

Ebenso ist zu untersuchen, wie die gemessenen Druckverteilungen bei einem mehr technischen Ablauf der Füllung aussehen (hartes Aufsetzen der Gebinde, exzentrisches Aufsetzen im Bohrloch etc.).

Zusätzliche Einflüsse wie Erschütterungen durch Erdbeben und der Zutritt von Laugen ins verfüllte Bohrloch sollen neben den oben erwähnten Problem- und Fragestellungen im Nachfolgeprogramm teils experimentell, teils theoretisch behandelt werden.

8. *Schlußfolgerungen und Ausblick*

eines integralen Reibungsbeiwertes, der sowohl innere als auch Wandeigenschaften berücksichtigt und eine Funktion beider Reibungsbeiwerte ist, schafft hier eventuell eine Annäherung von Rechnung und Experiment. Ein solcher integraler Reibungsbeiwert läßt sich im Prinzip in einem Gerät, ähnlich dem Lambda-Meter, experimentell bestimmen. Liegen, wie bei den Experimenten mit der rauhen CFK-Oberfläche an LEISA I, beide Beiwerte nahe zusammen, ist die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment sehr gut. Sie unterscheiden sich nur noch um 3 %.

- Alle durchgeführten Experimente zeigen, daß Salzgrusfraktionen mit höherem Feinkornanteil höhere Vertikaldrücke verursachen. Mit fallendem Feinkornanteil sinken auch die gemessenen Drücke, unabhängig von der Wandbeschaffenheit (CFK glatt oder rauh) und dem Versuchsstandradius (LEISA I oder II). Die glatte CFK-Oberfläche führt, über alle Feinkornanteile gemittelt, an LEISA I zu im Schnitt 1,7-mal größeren Drücken als eine rauhe Oberfläche. Die jeweils mit der glatten Oberfläche in LEISA I und II gemessenen Druckverteilungen unterscheiden sich im Verhältnis der Versuchsstanddurchmesser. In gleicher Tiefe werden bei LEISA II 2,4-mal größere Drücke gemessen als bei LEISA I. Das ist in genauer Übereinstimmung mit der theoretischen Modellierung, wonach der Vertikaldruck proportional mit dem Bohrlochradius wächst. Der entsprechende Nachweis für die rauhe Oberfläche in LEISA II steht noch aus.
- Die Unsicherheiten bei der korrekten Bestimmung der Seitendruckbeiwerte haben großen Einfluß bei der Berechnung der vertikalen Drücke, insbesondere bei der glatten Oberfläche. Hier weisen die gemessenen k -Werte höhere Schwankungen um die Mittelwerte auf als bei der rauhen Oberfläche. Für Reibungsbeiwerte im Bereich 0,6 kann die Theorie zur Berechnung der Drücke als Funktion der Tiefe z als validiert angesehen werden, da sich berechnete und gemessene Drücke über alle Feinkornanteile gemittelt nur um den Faktor 1,2 unterscheiden. Die Reibungsbeiwerte einer realen Bohrlochwand dürften schätzungsweise im Bereich 0,25 - 0,6, je nach Oberflächenbeschaffenheit, liegen.
- Nach dem Ende des Einfüllvorgangs bleiben die Drücke in Versuchsstand nicht konstant, sondern nehmen durch Setzungsbewegungen der Salzgrussäule zu und münden innerhalb weniger Tage bis Wochen in einen horizontalen Verlauf. Pessimistische Extrapolationsrechnungen ergeben auf Grund dieser Setzungen Druckerhöhungen um das 1,4-fache des Anfangsdrucks nach Füllende innerhalb von zwei Jahren.
- Durch die Einlagerung schwerer Dummies in Versuchsstand LEISA II mit der glatten CFK-Fläche werden zu keinem Zeitpunkt des Füllvorgangs hydrostatische Druckverhältnisse erreicht. Selbst vier 200 kg schwere Dummies, die jeweils durch eine 40 cm hohe Salzschrift getrennt sind, lassen in 5 m Tiefe den Druck nicht über einen mittleren Wert von 25 kPa ansteigen. Mit einer über die Volumenanteile der