

Zur Gewölbestabilität über Soilcrete-Körpern

Dipl.-Ing. Fabian Kirsch

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

Dr.-Ing. Wolfgang Sondermann

Keller Grundbau GmbH

1 Einführung

Das Soilcrete- oder auch Düsenstrahlverfahren kann unter anderem als horizontales Abdichtungssystem z.B. für Baugruben im Grundwasser eingesetzt werden. Man unterscheidet zwischen tiefliegenden und hochliegenden Sohlen, wobei bei letzteren verbleibende Auftriebskräfte beispielsweise durch Pfähle in den Baugrund abgetragen werden müssen. Das Verfahren selber ist hinlänglich bekannt und an vielen Stellen beschrieben (Bell 1993, Kirsch & Sondermann 2001). Bei der Lektüre dieser Artikel ist jedoch zu beachten, dass z.B. im Sand durch Verbesserungen im Herstellprozess mittlerweile Durchmesser von bis zu 4,0 m erzielt werden. Es ist zu erwarten, dass durch zusätzliche Neuerungen noch größere Durchmesser erreicht werden können. Hierbei sind jedoch Folgen für das System Düsenstrahlsäule zu beachten, die im Weiteren näher untersucht werden.

Bei den in den letzten beiden Jahrzehnten vermehrt ausgeführten Dichtsohlen kam es immer wieder zu Überschreitungen der zulässigen Restwassermengen, und es traten Schäden auf. Eine lückenlose Qualitätssicherung kann die Zuverlässigkeit der Sohle deutlich erhöhen, so dass teure Sanierungsmaßnahmen vermieden werden. Wird bei der Wahl des richtigen Rasters – weder zu eng noch zu weit – der anstehende Boden im Bereich der herzustellenden Sohle ohne verbleibende Zwickel und mit ausreichendem Überschnitt erodiert, kann in Teilbereichen dennoch eine zu hohe Durchlässigkeit vorhanden sein. Falls nämlich der Boden um den frisch hergestellten Düsenstrahlkörper durch den Suspensionsdruck in der Säule nicht ausreichend gestützt wird, kann es zu Bodeneinbrüchen in das frische Düsenstrahlelement und somit zu einer unkontrollierten Vermischung von Boden und Suspension kommen.

Die erforderliche Größenordnung des Stützdruckes hängt wesentlich von der Geometrie des frischen, d.h. nicht erhärteten, Düsenstrahlelementes ab, so dass die Überlagerungsspannungen durch Lastumlagerung und Gewölbebildung von den angrenzenden Bodenbereichen aufgenommen werden können. Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen dienen der Beurteilung dieser Gewölbeentwicklung und der Gewölbestabilität.

2 Simulationsberechnungen zur Gewölbeentwicklung

2.1 Untersuchte Situationen

Die Herstellung einer Soilcrete-Sohle kann in unterschiedlichen Arbeitsabläufen erfolgen. Im Allgemeinen werden jedoch zunächst sogenannte Primärreihen hergestellt. Nach ausreichender Erhärtung erfolgt die Herstellung der zwischen den Primärreihen liegenden Sekundärreihe. Bei der Herstellung der Primärreihen kann frisch-in-frisch oder intermittierend mit Primär- und Sekundärsäulen vorgegangen werden (vgl. Bild 1)

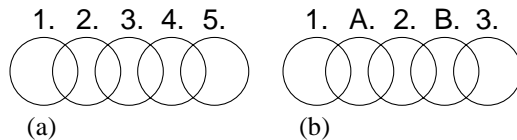


Bild 1 Herstellungsreihenfolge: Frisch in-frisch (a) und intermittierend (b)

Im Weiteren werden die Primärsäule als Einzelsäule, die Primärreihe frisch-in-frisch und die Sekundärreihe, die üblicherweise ebenfalls frisch-in-frisch hergestellt wird, untersucht. Die Sohle soll in einem homogenen und nicht geschichteten, sandigen Untergrund hergestellt werden. Das Grundwasser steht nahe der Geländeoberkante an. Die angenommenen und im weiteren konstant gehaltenen Materialparameter sind in Tabelle 1 angegeben.

Elastizitätsmodul [kN/m ²]	E = 20000·√(z) für z = 0 bis 25 m E = 60000·√(z) für z > 25 m
Querdehnzahl [-]	ν = 0,35
Wichte [kN/m ³]	γ/γ' = 19 / 10
Reibungswinkel [°]	φ' = 30°
Kohäsion [kN/m ²]	c' = 0,001
Suspensionswichte [kN/m ³]	γ = 19

Tabelle 1 Materialparameter

Zur Beurteilung der Gewölbeentwicklung werden Variationen der Geometrieparameter Säulenhöhe, Säulendurchmesser und Überdeckung vorgenommen. Bild 2 zeigt einen Querschnitt durch eine Säule mit den Abmessungen des Systems und ihren Variationsbreiten.

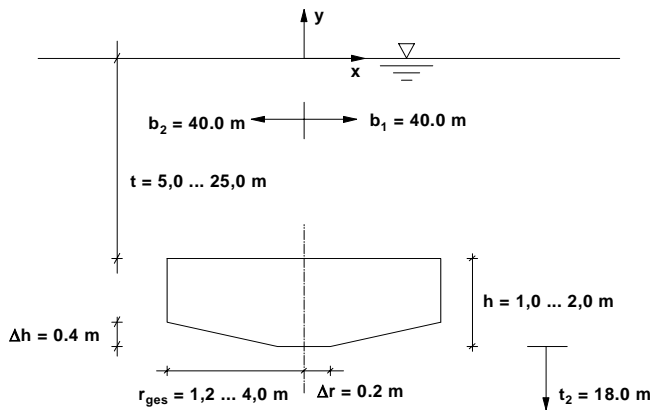


Bild 2 Querschnitt und Abmessungen

2.2 Verwendete Methode

Zur Durchführung der hier vorzustellenden numerischen Simulationsberechnungen wird die Finite Element Methode verwandt. Aufgrund der Säulen- bzw. Reihengeometrie können die Berechnungen im rotationssymmetrischen Spannungszustand bzw. im ebenen Verformungszustand durchgeführt werden. Die stoffliche Modellierung des Bodens erfolgt unter Annahme einer Fließbedingung nach Drucker-Prager mit nicht-assoziierter Fließregel. Die Diskretisierung des Kontinuums erfolgt durch Viereck-Elemente mit quadratischen Verschiebungsansätzen und zwei Knotenfreiheitsgraden. Zur Simulation des flüssigkeitserfüllten Hohlraumes wird eine Art Stützlast-Verfahren verwendet. Der Flüssigkeitsdruck im Inneren des Hohlraumes wird dabei durch Ersatzlasten simuliert, die in einer step-by-step Analyse schrittweise reduziert werden, um die Lastumlagerungen im Untergrund und die damit einhergehende Gewölbeentwicklung einzuleiten. Das Ziel ist, die Einflüsse eines sinkenden oder schwankenden Flüssigkeitsdruckes auf die Säulenstabilität zu untersuchen. In Tabelle 2 sind die Lastfälle dieser Analyse angegeben.

LF 1	Primärspannungszustand
LF 2	Hohlraum mit Innendruck zur Simulation des Primärspannungszustandes
LF 3 bis 5	Schrittweises Angleichen des Innendruckes an hydrostatischen Suspensionsdruck
LF 6 bis ...	Schrittweise Reduktion des Innendruckes bis zum Versagen

Tabelle 2 Lastfälle der step-by-step Analyse

2.3 Gewölbeentwicklung

Mit sinkendem Stützdruck im frisch hergestellten Soilcrete-Körper nehmen die Verschiebungen des umgebenden Bodens in den flüssigkeitserfüllten Hohlraum hinein zu. Da die Berechnungen einer Risikobewertung dienen sollen, ist darauf zu achten, dass tatsächlich die ungünstigsten Belastungszustände modelliert werden. Es zeigt sich, dass eine Reduktion der Stützdrücke nur im Firstbereich des Hohlraumes bei gleichzeitiger

Aufrechterhaltung des einfachen hydrostatischen Suspensionsdruckes im Ulmen- und Sohlenbereich zu größeren Verschiebungen der Firste führt als eine allseitige Stützdruckreduktion.

In den Bildern 4a bis d sind die Verschiebungen des Untergrundes, die Vertikalspannungen, die Hauptspannungsrichtungen und die Bereiche plastischer Verzerrungen infolge einer Stützlastreduktion auf ca. 50% des einfachen hydrostatischen Suspensionsdruckes in der frisch-in-frisch hergestellten Primärreihe gezeigt.

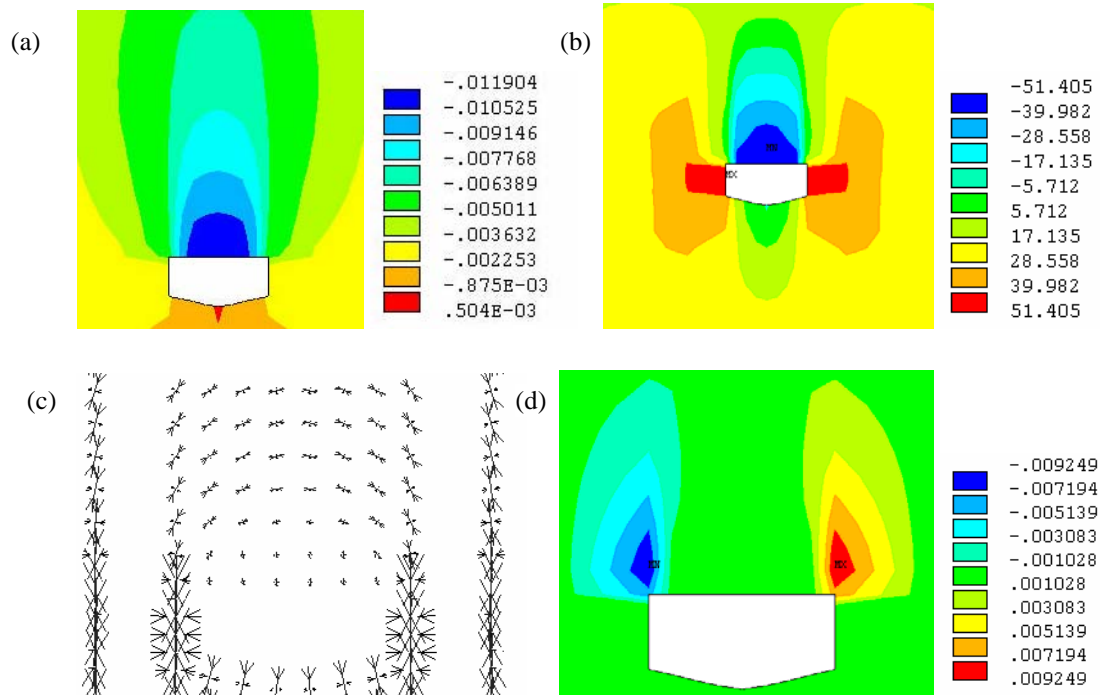


Bild 4 Gewölbeentwicklung: Vertikalverschiebungen in m (a), Vertikalspannungsänderung in kPa (b), Hauptspannungsrichtungen (c) und plastische Verzerrungen (d) bei Stützdruckreduktion

2.4 Variation der Säulenabmessungen

Zur Beurteilung des Einflusses von Geometrievariationen werden im Weiteren die Verschiebungen des Firstmittelpunktes herangezogen. Die Berechnungen erfolgen im ebenen Verzerrungszustand zur Simulation der frisch-in-frisch hergestellten Primärreihe. Bild 5 zeigt die Stützdruck-Verschiebungslinie des Firstmittelpunktes bei Variation des Säulendurchmessers. Liegt der Stützdruck oberhalb eines kritischen Wertes (vgl. Abschnitt 5) nehmen die Firstverformungen linear mit abnehmendem Stützdruck zu. Sinkt der Stützdruck unter den kritischen Wert, nehmen die Verformungen überlinear bis zum Erreichen des Bruchzustandes zu, der sich in einer Divergenz der Berechnung äußert. Die in diesen hochgradig nicht-linearen Bereichen ermittelten Verschiebungen sind abhängig von der Festsetzung des Konvergenzkriteriums und daher lediglich als Anhaltswerte zu betrachten. Zur Beurteilung der Gewölbeentwicklung soll daher im weiteren

von dem minimal erforderlichen Stützdruck als dem Stützdruck im letzten errechneten Gleichgewichtszustand gesprochen werden.

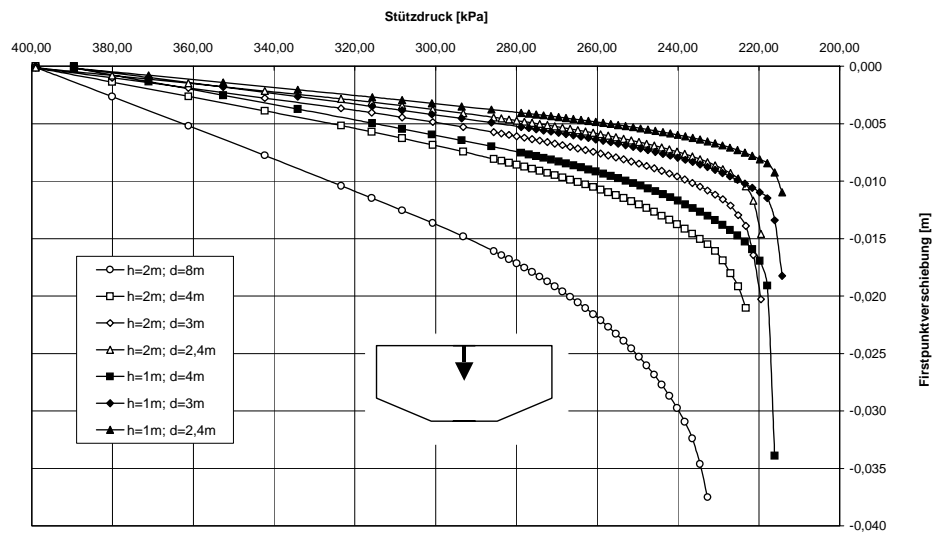


Bild 5 Stützdruck-Verschiebungslinie bei $t=20$ m, $h=1$ bzw. 2 m und $d=2,4$ bis 8,0 m

Zur Veranschaulichung der Gewölbeentwicklung sind in Bild 6 die Vertikalspannungen oberhalb des Firstmittelpunktes bei minimal erforderlichem Stützdruck angegeben. Es zeigen sich im Vergleich mit den Primärspannungen drei Zonen, die durch Minima bzw. Maxima der Spannungsverteilung getrennt werden. Zone 1 mit reduzierten aber dennoch mit zunehmender Tiefe steigenden Vertikalspannungen, Zone 2 mit stark abnehmenden Vertikalspannungen und Zone 3 mit wieder ansteigenden Vertikalspannungen, deren Wert an der Firste des Soilcrete-Körpers dem Stützdruck entspricht.

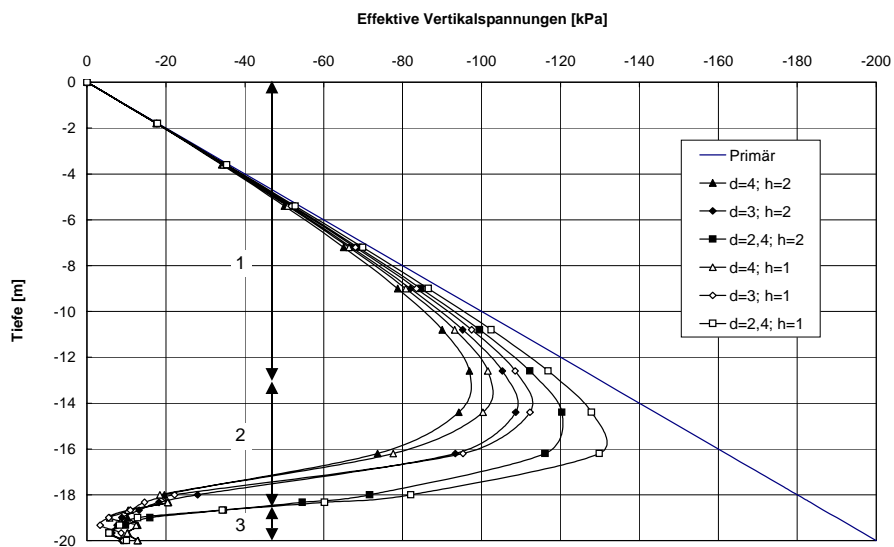


Bild 6 Vertikalspannungen oberhalb des Firstmittelpunktes

Die Zone 2 entspricht dem Bereich, in dem die Lastumlagerung um den flüssigkeitserfüllten Hohlraum herum stattfindet. Sie kann als der eigentliche Gewölbebereich identifiziert werden (vgl. Bild 7).

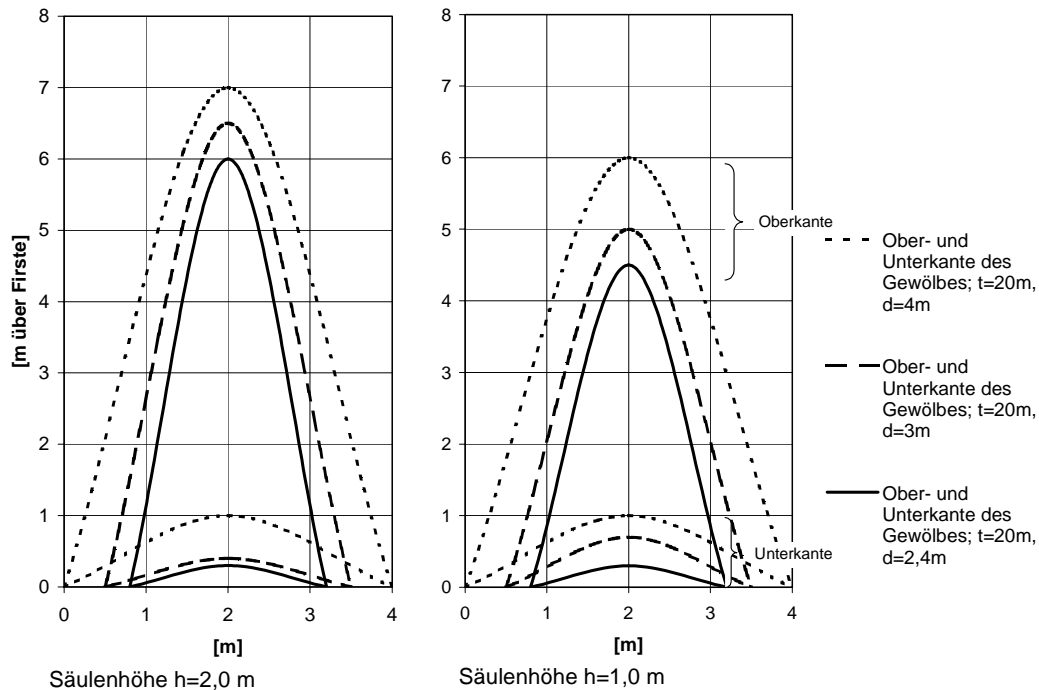


Bild 7 Gewölbebereich bei unterschiedlichen Abmessungen der Primärreihe

2.5 Variation der Überdeckung

Für die Ausbildung eines Gewölbes ist eine Mindestüberdeckung erforderlich, sonst kommt es zu einer Schlotbildung über der frisch hergestellten Säule. Je geringer die Überdeckung wird, desto stärker schlagen bei stark reduziertem Stützdruck die Verschiebungen an der Firste bis an die Geländeoberkante durch. Bild 8 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

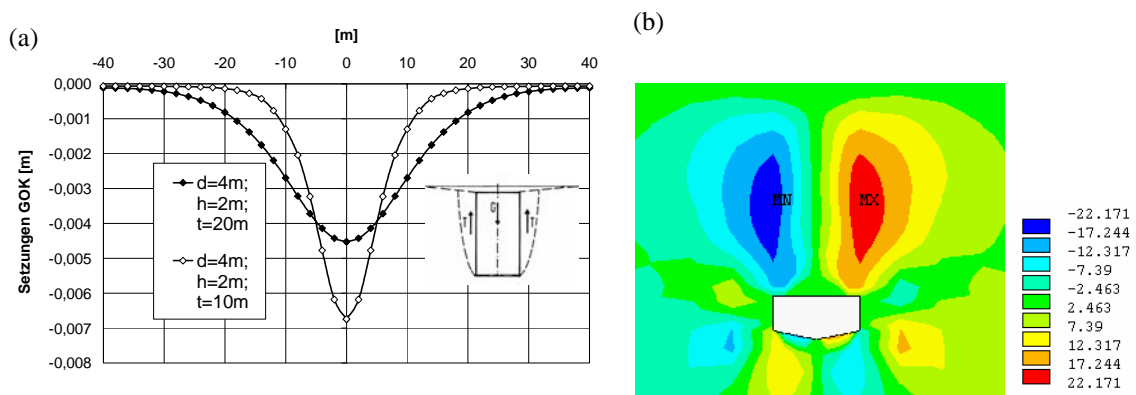


Bild 8 Verschiebungen an der Geländeoberkante bei minimal erforderlichem Stützdruck und Modellvorstellung (a), Scherspannungen in kPa im Untergrund (b)

In Bild 9 sind die Stützdruck-Verschiebungslinien für unterschiedliche Überdeckungshöhen und konstante Abmessungen der Primärreihe bzw. der Einzelsäule ($d = 4 \text{ m}$ und $h = 2 \text{ m}$) aufgetragen. Der Vergleich mit Berechnungen der Einzelsäule zur Simulation der intermittierenden Herstellung der Primärreihe zeigt, dass oberhalb von Einzelsäulen auch bei stärkerer Reduktion des Stützdruckes und geringerer Überdeckungshöhe noch ein stabiles Gleichgewicht erreicht wird.

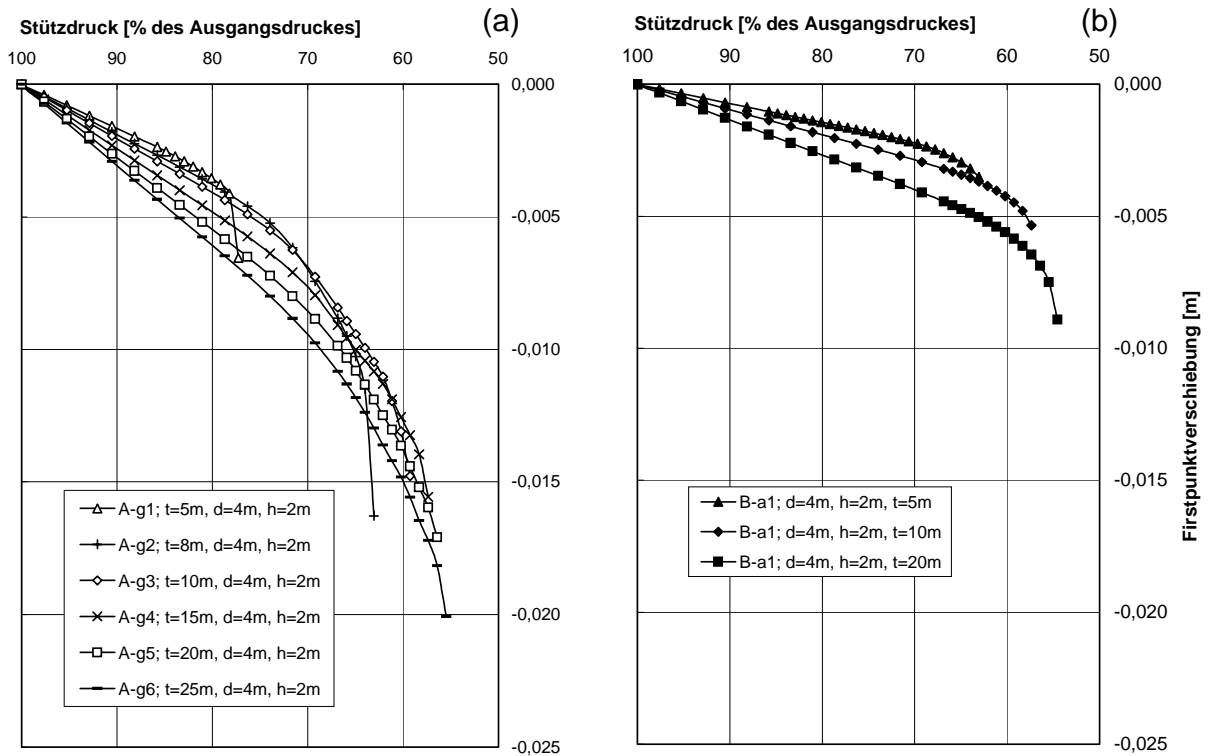


Bild 9 Stützdruck-Verschiebungslinien des Firstmittelpunktes für unterschiedliche Überdeckungshöhen: Primärreihe frisch-in-frisch (a) und Einzelsäule (b)

Dass bei der Einzelsäule geringere Stützdrücke möglich sind, folgt anschaulich aus dem Verhältnis zwischen dem Volumen unterhalb des Gewölbes und der Oberfläche des Gewölbes, das zur Scherkraftübertragung zur Verfügung steht. Unter der vereinfachenden Annahme eines halbkreis- bzw. halbkugelförmigen Gewölbes beträgt das Volumen-Oberflächen-Verhältnis $r/2$ im ebenen und $r/3$ im rotationssymmetrischen Zustand, wobei r der Säulenradius ist. Je kleiner dieses Verhältnis wird, desto größer wird die zur Scherkraftübertragung entlang der Gewöbelinie zur Verfügung stehende Oberfläche und desto geringer wird der mindestens erforderliche Stützdruck.

3 In situ Messungen

3.1 Verwendetes Gerät

Anhand der Simulationsberechnungen konnte gezeigt werden, dass sich oberhalb des frisch hergestellten Soilcrete-Körpers ein Gewölbe ausbildet. Weiterhin wurden die für die Gewölbestabilität mindestens erforderlichen Stützdrücke ermittelt. Da bisher noch keine vergleichbaren Untersuchungen veröffentlicht wurden, sollen die Berechnungen den tatsächlich vorhandenen Stützdrücken gegenübergestellt werden. Bei bisher vorgenommenen Abschätzungen der in der frischen Säule herrschenden Flüssigkeitsdrücke und deren Schwankungen ist man davon ausgegangen, dass die Untergrenze des Flüssigkeitsdruckes gleich dem hydrostatischen Druck der Rücklaufsuspension ist. Um dies zu überprüfen, wurde ein Messaufnehmer konzipiert, der in frisch hergestellte Düsenstrahlkörper eingestellt werden kann und der die im Soilcrete-Material herrschenden Drücke kontinuierlich aufzeichnet. Zur Durchführung der Messungen wurden zwei rechtwinklig zueinander angeordnete Druckkissen an einem Gestänge appliziert, welches in die Bohrung einer frisch hergestellten Soilcrete-Säule eingestellt werden kann (vgl. Bild 10).

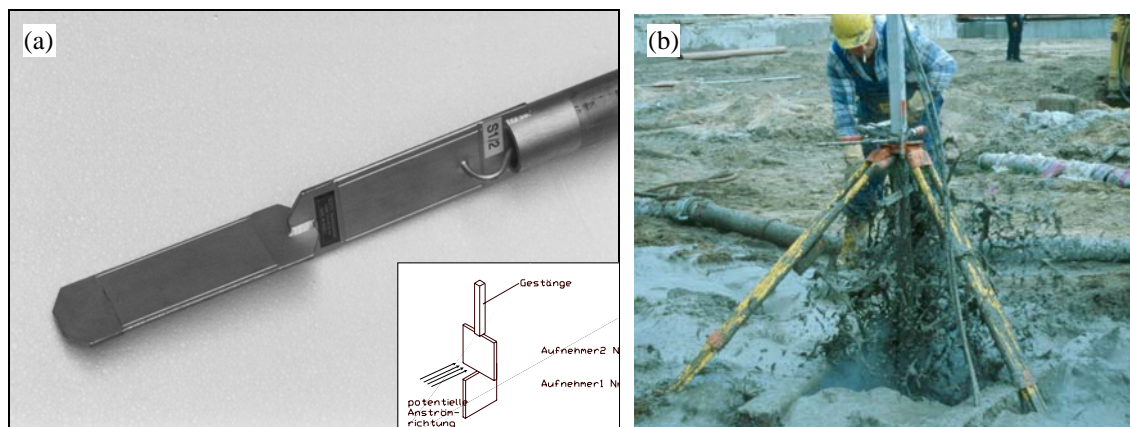


Bild 10 Druckaufnehmer an GOK (a) und im Bohrloch (b)

Zur Speisung und Messwerterfassung dient eine Einheit aus Konstantstromversorgung, einem PC und einem externen AD-Wandler. Diese Einheit zeichnet mit einer Frequenz von 10 Hz die Drücke in zwei horizontalen Koordinatenrichtungen in der frisch hergestellten Soilcrete-Scheibe während der frisch-in-frisch Herstellung benachbarter Säulen auf. Mit dieser Abtastrate ist sichergestellt, dass auch eventuell auftretende Druckschwankungen durch Anströmen von Suspension aus der Herstellung benachbarter Säulen erfasst werden.

3.2 Messergebnisse

In Bild 11 (a) ist der Verlauf der Drücke im Zentrum einer 2 m hohen Soilcrete-Scheibe mit einer Überdeckung von 9 m während der frisch-in-frisch Herstellung einer benachbarten Säule gezeigt. Anhand von zahlreichen Messungen bei mehreren Bauvorhaben zeigt sich, dass die Drücke in frisch hergestellten Soilcrete-Körpern

zeigt sich, dass die Drücke in frisch hergestellten Soilcrete-Körpern während der Herstellung benachbarter Säulen mit direkter Verbindung zur Mess-Säule unabhängig von der Tiefenlage der Sohle etwa um 0,3 bar bis 0,5 bar schwanken. Diese Druckschwankungen sind auf zyklisches Entweichen verfahrensbedingt eingebrachter Luft zurückzuführen. Bild 11 (b) zeigt die Beträge der Schwankungsbreiten bei unterschiedlichen Messungen.

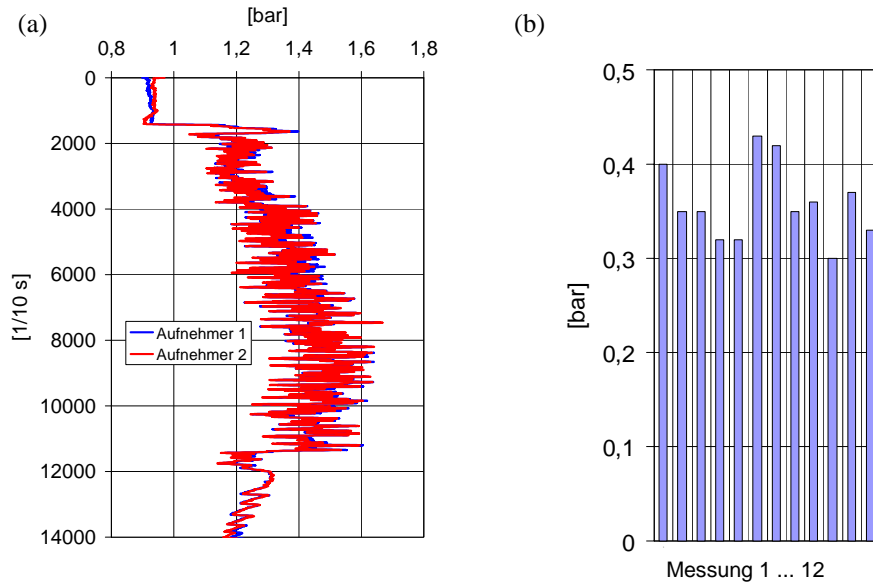


Bild 11 Spannungsverlauf während der Herstellung einer benachbarten Säule (a), Maximale Amplitude der Druckschwankungen bei der Herstellung benachbarter Säulen (b)

Die gemessenen Suspensionsdrücke liegen unter dem hydrostatischen Wert, der sich aus dem Produkt von Höhe des Suspensionsspiegels und Rücklaufwichte ergibt. Eine Ursache für dieses Phänomen ist die Zähigkeit der Suspension sowie ihre Fähigkeit Reibungskräfte entlang der Bohrlochwandung zu übertragen. Bei den durchgeführten Messungen wurden die in Bild 12 gezeigten Drücke – ausgedrückt als Vielfache f des rechnerischen hydrostatischen Druckes – aufgezeichnet. Dabei gibt es keinen Unterschied zwischen den Messwerten des Aufnehmers parallel und senkrecht zur potentiellen Anströmrichtung.

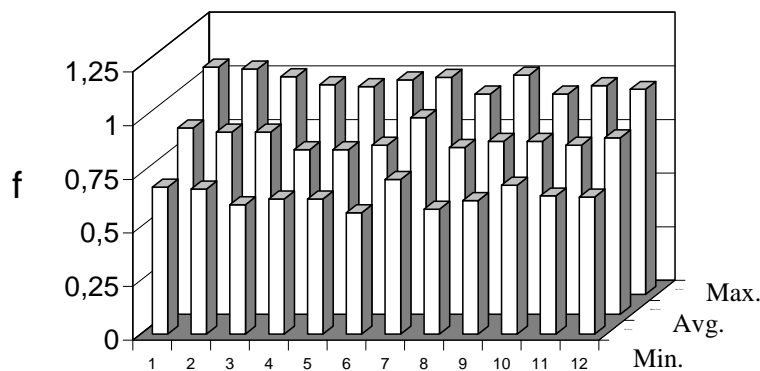


Bild 12 Spannungen in frisch hergestellten Soilcrete-Körpern

3.3 Vergleich mit der Simulation

Aus den Messungen lässt sich ein Vergleich mit den in der Simulation ermittelten minimal erforderlichen Stützdrücken ziehen. In Bild 13 sind die simulierten Stützdruck-Verformungslinien den bei unterschiedlichen Baumaßnahmen aufgezeichneten Stützdrücken gegenübergestellt. In allen Fällen handelt es sich um Primärreihen, die frisch-in-frisch hergestellt wurden.

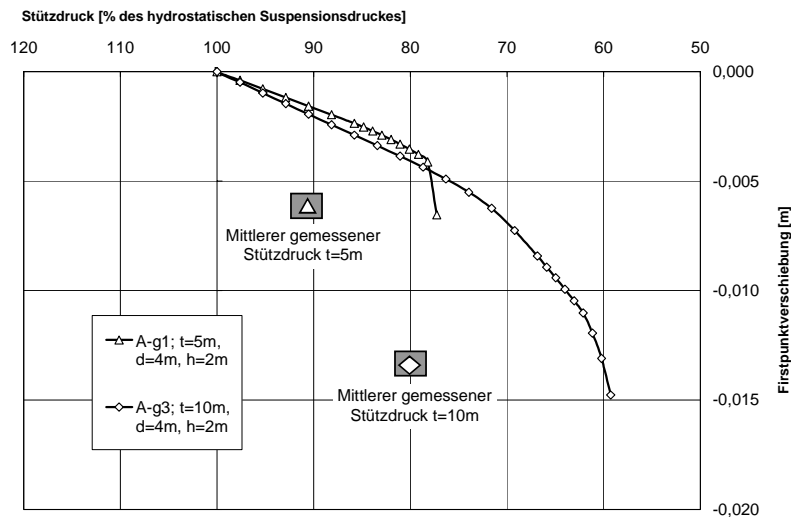


Bild 13 Vergleich Simulation – Messung

Bei Soilcrete-Körpern mit geringerer Überdeckung ist die Festigkeit des Bodens stärker ausgenutzt als bei Säulen mit höherer Überdeckung. Insbesondere bei hochliegenden Körpern ist also darauf zu achten, dass die frischen Säulen durch den Suspensionsdruck ausreichend gestützt sind.

4 Untersuchungen zur Stabilität des Gewölbes

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Gewölbeentwicklung und die tatsächlich vorhandenen Stützdrücke in frisch hergestellten Soilcrete-Körpern erläutert wurden, soll im weiteren die Stabilität des Gewölbes beurteilt werden. Dazu ist es erforderlich, den Einfluss verschiedener Parameter auf das Gewölbe und dessen Sicherheit zu untersuchen. Dies sind beispielsweise unsymmetrische Stützdruckverteilungen, planmäßige Exzentrizitäten durch Oberflächenlasten und auch die stochastische Verteilung der Scherparameter des Untergrundes. In den folgenden Kapiteln soll der Einfluss einzelner Faktoren auf die Gewölbestabilität anhand numerischer Simulationsberechnungen gezeigt werden. Die Berechnungen erfolgen für die frisch-in-frisch hergestellte Primärreihe im ebenen Verformungszustand. Die Axialsymmetrie entfällt aufgrund der planmäßigen Außermittigkeiten. Die Abmessungen werden mit einem Säulendurchmesser $d=4$ m, einer Säulenhöhe $h=2$ m und einer Überdeckung $t=10$ m konstant gehalten.

4.1 Einfluss der stochastischen Verteilung der Festigkeitsparameter

Die Scherfestigkeit rolliger Erdstoffe ist abhängig von Parametern wie Korngröße, Oberflächenrauigkeit, Kornform, Kornverteilung und Lagerungsdichte. Aufgrund der Entstehung des Bodens sind diese lokal veränderlich (Rackwitz & Peintinger 1981). Üblicherweise kann eine Normalverteilung bei entsprechender Klassierung und beidseitiger Zensierung für den Reibungswinkel von nicht-bindigen Materialien angesetzt werden. Bild 14 zeigt die in den Berechnungen angesetzte Dichtefunktion des Reibungswinkels und die für die numerische Berechnung vorgenommene Klassierung.

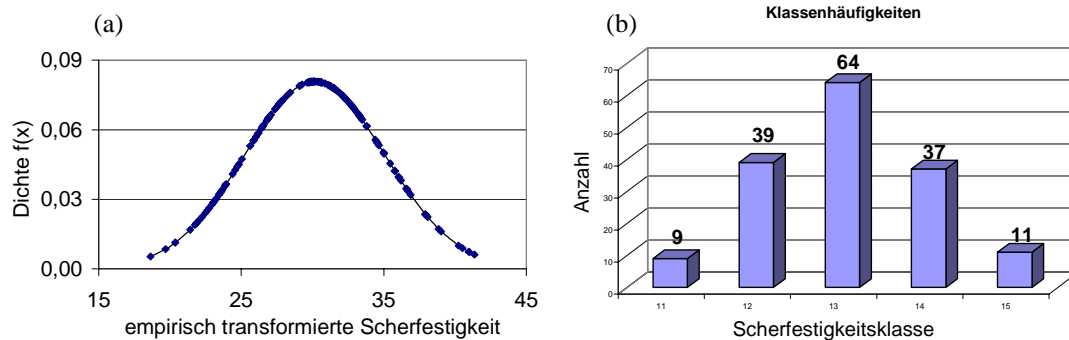


Bild 14 Dichtefunktion des Reibungswinkels (a) und Histogramm der Klassenhäufigkeiten (b)

Zur Berücksichtigung der stochastischen Verteilung der Scherfestigkeit des Bodens in der numerischen Berechnung wird auf die Technik der Monte-Carlo-Simulation zurückgegriffen. Die Elemente in relevanten Bodenbereichen des Modells werden dabei mit zufällig verteilten Scherfestigkeiten belegt. Es erfolgt die numerische Simulation der Stützdruckreduktion analog Kapitel 2. Danach erfolgt die neuerliche Bestimmung der „Rechenwerte“ der streuenden Scherparameter für jedes Bodenelement und weitere Rechendurchläufe. Bild 15 zeigt das Elementnetz mit den stochastisch verteilten Festigkeiten, sowie die Stützdruck-Verformungslinien der streuenden Belegungen bzw. der Berechnungen mit gleichmäßig verteiltem Reibungswinkel (Mittelwert MW bzw. Untergrenze UG und Obergrenze OG der Klassierung).

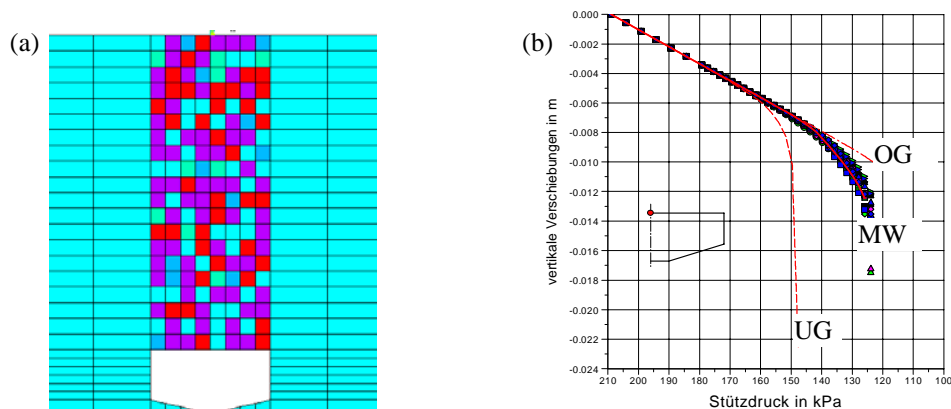


Bild 15 Elementnetz mit stochastisch verteilter Festigkeit (a) und Stützdruck-Verformungslinien (b)

Die Streubreiten der Lösungen für unterschiedliche Stützdrücke werden durch die Diagramme in Bild 16 verdeutlicht. Dort sind die Vertikalspannungen im Boden oberhalb des Firstmittelpunkts für die unterschiedlichen Ziehungen der Scherfestigkeiten angegeben, wobei die durchgezogenen Linien der Referenzbelegung mit der Obergrenze bzw. dem Mittelwert der Scherfestigkeit entsprechen. Deutlich wird die Vergrößerung der Streubreite mit zunehmender Stützdruckreduktion.

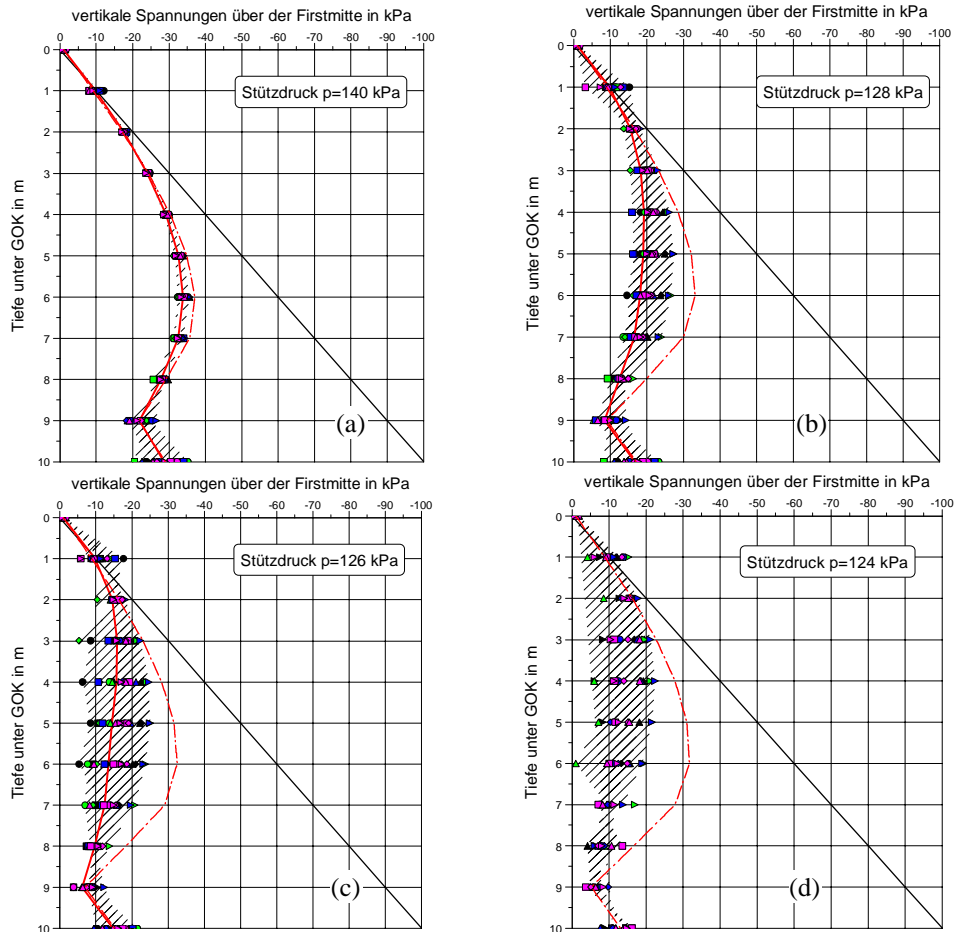


Bild 16 Vertikalspannungen bei $p_{\text{Stütz}}=140$ kPa (a) bzw. 128 kPa (b) bzw. 126 kPa (c) bzw. 124 kPa (d)

Um die Stabilität des Gewölbes zu beurteilen, wird zunächst der Wert des Stützdruckes herangezogen, für den in der numerischen Lösung gerade noch ein Gleichgewichtszustand errechnet werden konnte. Bild 17 zeigt die geringe Streuung dieser Stützdrücke in Prozent des vollen hydrostatischen Suspensionsdruckes als Ergebnis der stochastischen Berechnung.

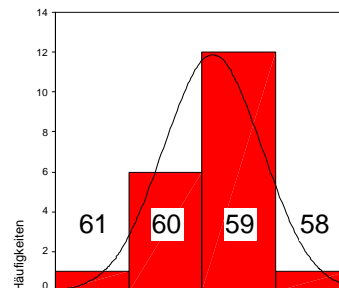


Bild 17 Verteilung der Stützdrücke in Prozent des vollen hydrostatischen Suspensionsdruckes

4.2 Einfluss planmäßiger Exzentrizitäten

Zur Beurteilung der Stabilität werden im Folgenden planmäßige Exzentrizitäten in die Berechnungen eingeführt. Dies sind einerseits außermittige Geländeauflasten, wie sie beispielsweise durch das Bohrgerät entstehen, und andererseits denkbare unsymmetrische Stützdruckverteilungen an der Firste des Soilcrete-Körpers (vgl. Bild 18).

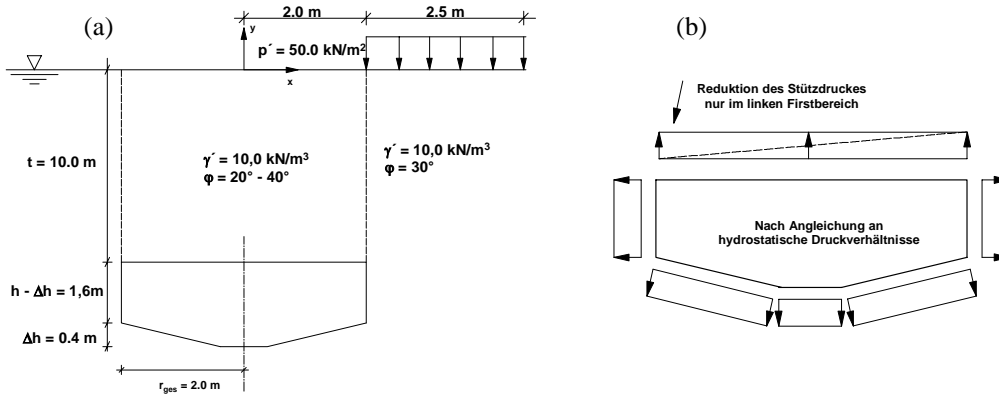


Bild 18 Planmäßige Exzentrizitäten: Außermittige Geländeauflast (a), unsymmetrischer Stützdruck (b)

Bild 19 zeigt die plastischen Schubverzerrungen kurz vor Erreichen des Versagenszustandes für die beiden Exzentrizitätstypen, während in Bild 20 die Firstpunktverschiebungen bei Stützdruckreduktion angegeben sind.

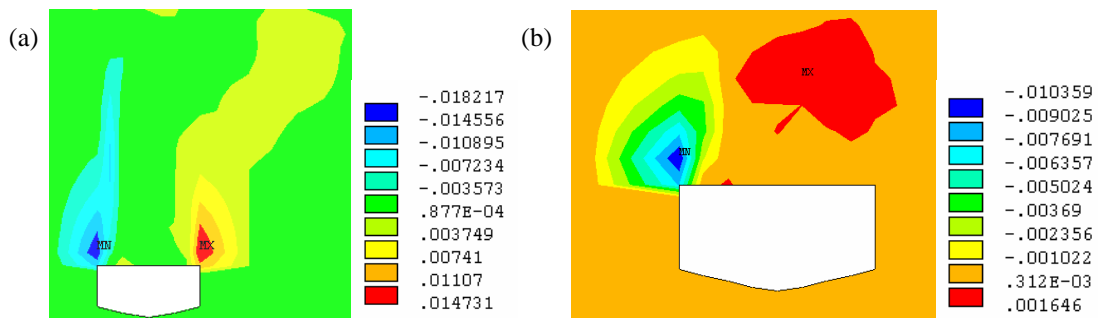


Bild 19 Plastische Schubverzerrungen: Außermittige Geländeauflast (a), unsymmetrischer Stützdruck (b)

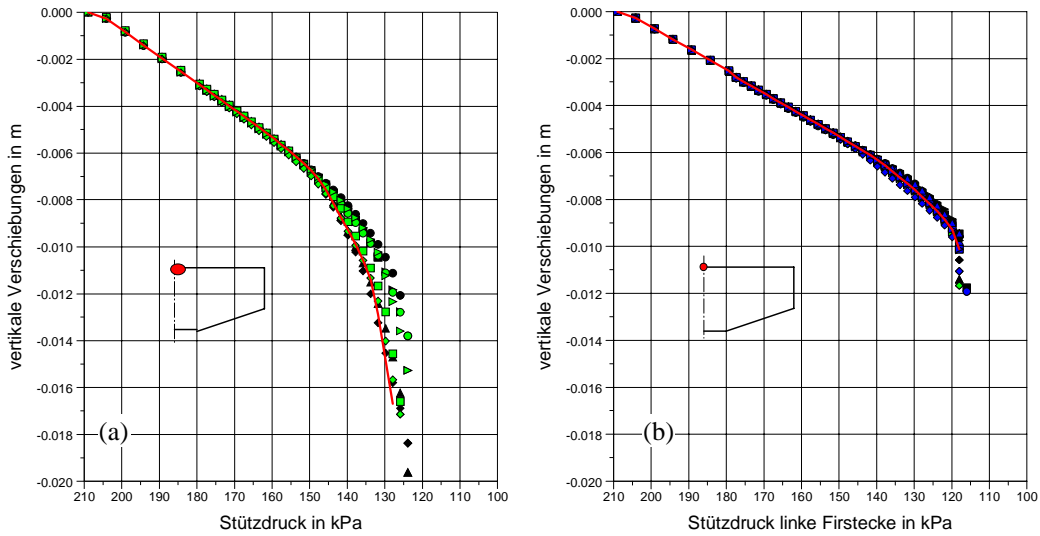


Bild 20 Stützdruck-Verschiebungslinien des Firstmittelpunktes: Außermittige Geländeauflast (a), unsymmetrischer Stützdruck (b)

In den Bildern 19 und 20 wird deutlich, dass sich die Ergebnisse nur bedingt vergleichen lassen, da einerseits die Versagensmechanismen verschieden und andererseits die resultierenden Stützdrücke aufgrund des unterschiedlichen Lastbildes anders sind. Daher werden in Bild 21 die Stützdruck-Verschiebungslinien der unterschiedlichen Exzentrizitätstypen den Ergebnissen aus Kapitel 2 anhand der Referenzbelegung der Scherfestigkeit mit dem Mittelwert gegenübergestellt.

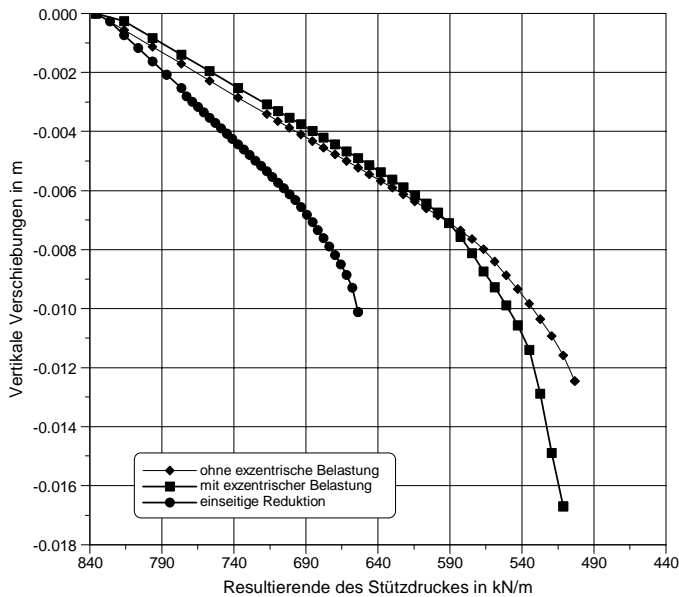


Bild 21 Vergleich der Stützkraft-Verschiebungslinien des Firstmittelpunktes

5 Definition kritischer Stützdrücke und Bemessung

Im Folgenden wird ein Vorschlag unterbreitet, wie mit den errechneten Firstpunkt-Verschiebungslinien die erforderlichen Stützdrücke abgeschätzt werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Folgerungen nur für homogenen Untergrund mit den in Tabelle 1 angegebenen Parametern Gültigkeit besitzen. Alle Stützdruck-Verformungslinien weisen einen mehr oder weniger klar zu erkennenden Übergang vom linearen in einen nicht-linearen Bereich auf (vgl. Bild 22).

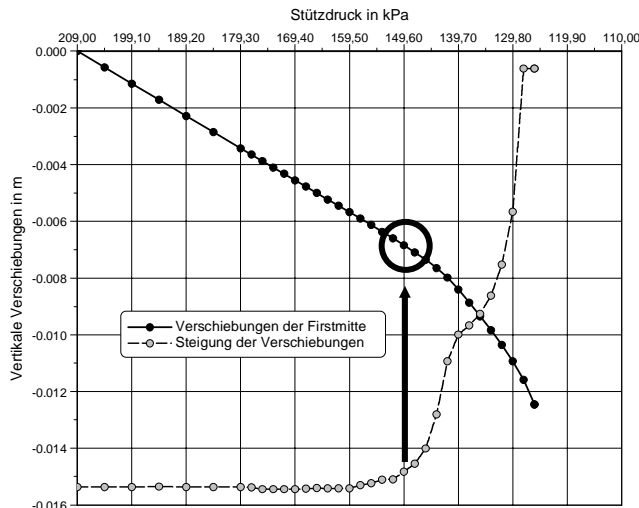


Bild 22 Steigung der Stützdruck-Verschiebungslinie

Die Berechnungen mit stochastischer Verteilung der Scherfestigkeiten haben gezeigt, dass die Streuung der Ergebnisse bis zu diesem Übergangsbereich sehr klein ist, während sie danach erheblich zunimmt (vgl. Bild 15 (b)). Aus diesem Grund sollen die für den Übergangsbereich ermittelten Stützdrücke zur Definition eines kritischen Stützdruckes herangezogen werden. Dabei bleiben die Berechnungen mit planmäßigen Exzentrizitäten unberücksichtigt. Einerseits ergeben die Berechnungen mit außermittiger Geländeauflast bis zum oben definierten Übergangsbereich die gleichen kritischen Stützdrücke (vgl. Bild 21) und andererseits unterscheidet sich der Versagensmechanismus bei einseitiger Stützdruckreduktion deutlich von den übrigen, so dass ein Vergleich zunächst nicht sinnvoll erscheint (vgl. Bild 19).

In Bild 23 sind die kritischen Stützdrücke p für die frisch-in-frisch hergestellte Primärreihe und die Einzelsäule in Abhängigkeit von der Überdeckung t und dem Säulendurchmesser d gezeigt. Die kritischen Stützdrücke p sind dabei in Anteilen des vollen hydrostatischen Suspensionsdruckes p_{hyd} angegeben.

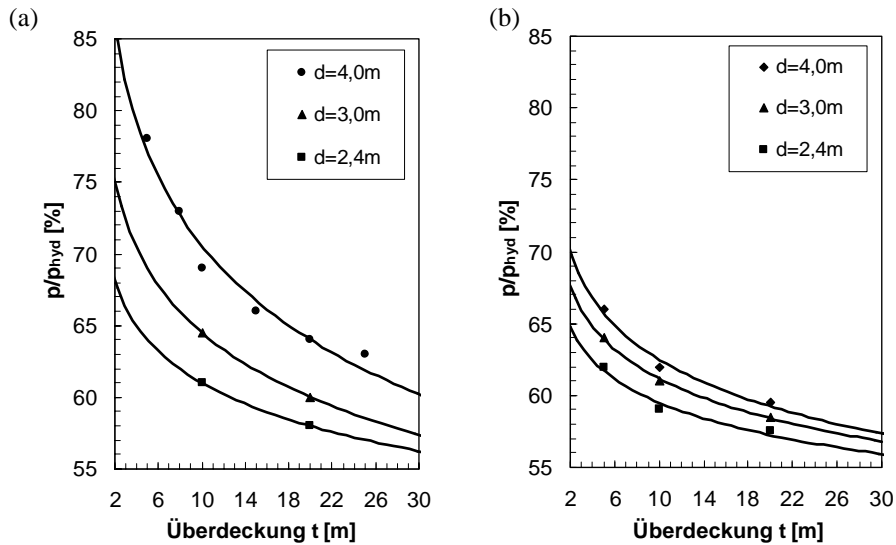


Bild 23 Kritische Stützdrücke p für die frisch-in-frisch hergestellte Primärreihe (a) und die Einzelsäule (b)

6 Zusammenfassung

Die Berechnungen zur Gewölbeentwicklung und Stabilität haben gezeigt, dass die Sicherheit des Bodengewölbes oberhalb des frischen Soilcrete - Körpers stark von der Überdeckungshöhe abhängig ist. Bei nicht ausreichend kontrollierter Herstellung steigt mit zunehmendem Durchmesser und geringerer Überdeckung das Risiko, dass aufgrund der nicht ausreichenden Stützung Boden in die frisch hergestellte und noch nicht ausreichend erhärtete Säule fällt. Damit würde die Homogenität und die Dichtigkeit des Soilcrete-Körpers beeinträchtigt. Folgt man den oben gemachten Vorschlägen, ist anhand der in Bild 23 gegebenen Diagramme die Ermittlung von Anhaltswerten für die kritischen Stützdrücke in frisch-in-frisch hergestellten Primärreihen und in Einzelsäulen möglich. Dabei ist in jedem Falle zu prüfen, ob die im Text angegebenen Voraussetzungen eingehalten werden.

Ein Beispiel aus der Baustellenmessung ist in Bild 24 angegeben. Es wurden Säulen mit Durchmessern von 3,5 m frisch-in-frisch in sandigem Untergrund hergestellt. Die Überdeckung betrug ca. 6 m. Die Rücklaufwichte wurde mit $\gamma_{Rücklauf} = 19 \text{ kN/m}^3$ ermittelt. Somit sind die Diagramme in Bild 23 anwendbar. Der hydrostatische Suspensionsdruck ergibt sich zu 114 kPa. Wie in Bild 24 gezeigt, lässt sich damit der kritische Stützdruck zu $p = 0,72 \cdot 114 = 82 \text{ kPa}$ ablesen. Die Messungen ergaben Stützdrücke von im Mittel 90 kPa. Die Säulen waren stabil.

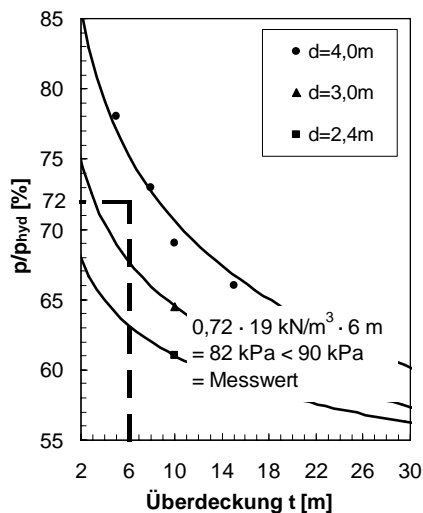


Bild 24 Anwendungsbeispiel

Geplante weitere Berechnungen und zusätzliche in situ Messungen werden die Aussagequalität der Diagramme verbessern helfen. Im einzelnen sind Berechnungen für unterschiedliche Suspensionswichten und verschiedene Baugrundverhältnisse vorgesehen. Dennoch ist festzuhalten, dass die Diagramme nur Anhaltswerte liefern können. Insbesondere in Grenzbereichen sind weitere Überlegungen erforderlich, um im Verbund mit einer herstellungsbegleitenden Qualitätssicherung eine erfolgreiche Baumaßnahme zu ermöglichen.

Literatur

Bell, A.L. (1993)

Jet Grouting. In Moseley, M.P. (Hrsg.): Ground Improvement. Blackie A&P, Glasgow, 1993

Kirsch, K. & Sondermann, W. (2001)

Baugrundverbesserung. In Smoltczyk, U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch Teil 2. Ernst & Sohn, Berlin, 2001

Rackwitz, R. & Peintinger, B. (1981)

Ein wirklichkeitsnahes stochastisches Bodenmodell mit unsicheren Parametern und Anwendung auf die Stabilitätsuntersuchung von Böschungen. Bauingenieur 56. Springer, Berlin, 1981