

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Wehr, Wolfgang Jimmy

Herausforderungen für die Spezialtiefbau-Forschung

Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105149>
Originalveröffentlichung Tagungsband "Ohde-Kolloquium 2018": <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-237547>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Wehr, Wolfgang Jimmy (2018): Herausforderungen für die Spezialtiefbau-Forschung. In: Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik (Hg.): Aktuelle Themen der Geotechnik (Ohde-Kolloquium 2018). Mitteilungen 24. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik. S. 175-186.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Herausforderungen für die Spezialtiefbau-Forschung

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Jimmy Wehr M.Sc.

Fachhochschule Erfurt, Institut für Geotechnik

Im Spezialtiefbau werden seit Jahrzehnten viele Verfahren mit Erfolg angewendet, jedoch sind noch viele Details ungeklärt. Einige Forschungsideen und Projekte, die begonnen wurden, aber noch nicht abgeschlossen sind, werden vorgestellt. Die Themenbereiche umfassen das Rütteldruckverfahren, das Rüttelstopfverfahren und das Düsenstrahlverfahren.

1 **Einleitung** Herausforderungen für die Spezialtiefbau-Forschung

In der Spezialtiefbau-Forschung sind noch viele Fragen offen. In diesem Beitrag werden einige aktuelle Forschungsprojekte an der FH Erfurt kurz vorgestellt und die Herausforderungen aufgezeigt. Schwerpunkte sind die Tiefenrüttelverfahren, wie Rütteldruck- und Rüttelstopfverdichtung, sowie das Düsenstrahlverfahren.

2 **Optimierung der Rütteldruckverdichtung**

Bei der Rütteldruckverdichtung dringt ein vibrierender Tiefenrüttler mittels Wasserspülung bis zur geplanten Tiefe in den Boden ein worauf die stufenweise Verdichtung des umgebenden Bodens folgt. Durch die Verdichtung entsteht ein Absinktrichter im oberflächennahen Bereich, der mit vorhandenem oder angefahrenem Sand verfüllt werden muss. Diese Verdichtung erfolgt bisher nicht regelbasiert und automatisch geregelt.

Schon 1955 ging Prof. Lorenz der Frage nach, wie „eine optimale Schwingungsverdichtung erreichbar ist“ und wie „Schwingungsverdichter“ z.B. für die „Rüttel-

druckverdichtung“ gebaut werden sollten, um durch eine Variation der Frequenz die „Resonanzlage“ zu erreichen, [Lor55].

Bei diesem Forschungsprojekt wird geprüft, ob eine Optimierung der Rütteldruckverdichtung durch eine Variation der Frequenz sinnvoll ist um im Boden im Resonanzfall größere Amplituden als bisher zu erreichen.

In Anlehnung an Fellin [Fel99] wurde mit einem Masse-Feder-Dämpfer System eine Nachrechnung von Baustellenversuchen durchgeführt und ergab für einen S-Tiefenrüttler der Firma Keller, dass die Resonanzerscheinungen tiefen- und lagerungsdichteabhängig sind [Weh05]. Unter einer Verdichtungsfrequenz von ca. 20Hz sind keine Resonanzen möglich, da der Boden die lockerste Lagerung nicht unterschreiten kann und über einer Verdichtungsfrequenz von ca. 30Hz sind keine Resonanzen möglich, da dieses die maximale Arbeitsfrequenz des S-Tiefenrüttlers ist.

Es wurde gezeigt, dass ein Aufrechterhalten der Resonanzfrequenz ohne eine intelligente Nachregelung bzw. Steuerung purer Zufall ist. Aus dem Grund der fehlenden Nachregelung funktioniert übrigens auch das „Müller-Resonanzverdichtungsverfahren“ nur selten.

Aufbauend auf die Grundsatzversuche der Dissertation von Nendza [Nen06], in der die Bodenverdichtung mit verschiedenen Frequenzen und Unwuchtmomenten untersucht wurde und zusätzlich einem Feldversuch mit instrumentiertem Tiefenrüttler [Nag17], soll in diesem Forschungsprojekt die Rütteldruckverdichtung mit Hilfe einer Frequenz- bzw. Auflastregelung optimiert werden. Damit werden lange Haltezeiten bei den einzelnen Verdichtungsstufen vermieden und somit die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens verbessert.

Zu diesem Zweck wurde ein Modellversuchsstand in der großen Wolfgang Storm Laborhalle aufgebaut. Dieser besteht aus zwei großen Versuchsbehältern, in die wassergesättigter Sand eingefüllt wird, der zu Beginn einem nicht tragfähigen Boden entspricht, Abb. 1.



Abbildung 1: Modellversuchsstand FH Erfurt



Abbildung 2: Modelltiefenrüttler FH Erfurt

Dieser wird mit einem Modelltiefenrüttler verdichtet, Abb. 2. Während des Versuchs werden unterschiedliche Sensoren sowohl im Boden als auch im Rüttler verschiedene Parameter aufnehmen, die auf eine Steuereinheit übertragen und ausgewertet werden. Mit diesen Daten wird dann eine automatische Regelung entwickelt, die den Boden sowohl effektiver als auch schneller verdichten kann. Somit können bei Bauvorhaben sowohl Zeit als auch Geld einspart werden.

3 Kornbruch bei Tiefenrüttelverfahren

Die Rüttelstopfverdichtung wird seit den 1950er Jahren weltweit auf Baustellen ausgeführt. Bei diesem Verfahren wird die Tragfähigkeit des Baugrundes mit lastabtragenden Säulen erhöht. Jedoch sind immer noch einige wichtige Details ungeklärt.

Die Kornzertrümmerung während des Verdichtungsprozesses wird derzeit nur ungenügend in dem hypoplastischen Stoffgesetz berücksichtigt. Deshalb ist es das Ziel eine Grundlage für die Erweiterung des hypoplastischen Stoffgesetzes zu schaffen, die eine Datensammlung von Laborergebnissen beinhaltet. Des Weiteren wird die Kornzertrümmerung von Tiefenrüttlern mit einem Laborversuch simuliert. Hierzu ist eine Probenentnahme auf einer Baustelle notwendig.

Mit der Kenntnis der Verdichtungsenergien der Tiefenrüttler ist es möglich, granuläre Materialien auf die gewünschte Kornzertrümmerung der Rüttelstopfsäule im Labor vorzubereiten. Die unterschiedlichen Tiefenrüttler werden untersucht und ein detaillierter Einfluss der Verdichtungsenergie dargestellt. Es konnte die Verdichtungsenergie einer mit dem Keller M-Rüttler hergestellten Rüttelstopfsäule mittels Proctor Prüfeinrichtung erfolgreich simuliert werden.

Für die Auswertung und Verifizierung wurden Kiesproben aus Rüttelstopfsäulen in Heilbronn entnommen. Auf dieser Baustelle wurde das Rüttelstopfverfahren angewendet, um eine Baugrundverbesserung für eine Flachgründung der Fundamente herzustellen. Das Baugerät war eine Rüttlertragraupe mit Schleusen M-Rüttler. Das Probenmaterial bzw. das Zugabematerial der Stopfsäule war ein Kalksteinschotter. Die Probenentnahme geschah unmittelbar nach dem Einbau der Rüttelstopfsäule. Die Säule wurde bis zu einer Tiefe von 1,50 m lagenweise abgetragen. Nur der Kern der Schottersäule mit ca. 70cm Durchmesser wurde entnommen. Zusätzlich ist von der Halde das Rohmaterial der Säule nämlich ein Kalksteinschotter 16/32 mm für Laboruntersuchung entnommen wurden.

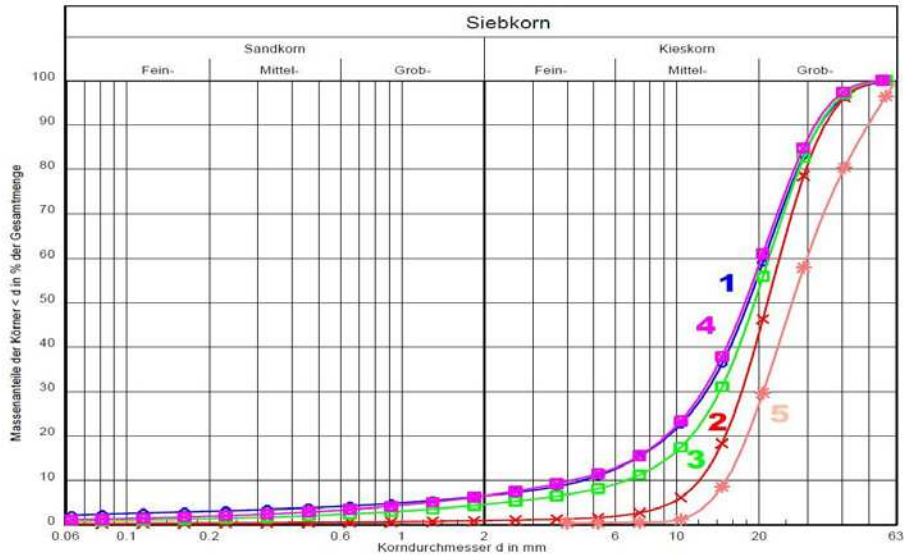


Abbildung 3: mit verschiedenen Energien verdichteter Kalksteinschotter

1. Rüttelstopfsäule Kalksteinschotter (blau)
2. Proctor Kalksteinschotter (rot)
3. modifizierter Proctor Kalksteinschotter (grün)
4. Proctor M-Rüttler Kalksteinschotter (lila)
5. Rohmaterial 16/32 Kalksteinschotter (hellbraun)

Zuerst wurde im Labor begonnen die Verdichtungsenergie des Tiefenrüttlers an den Proctorversuch anzupassen. Zunächst wurde die Sieblinie des eingebauten Kalksteinschotters der Rüttelstopfsäule bestimmt. Danach erfolgte der Vergleich der Sieblinien der Rüttelstopfsäule und des Rohmaterials. Wenn die Sieblinien die gleichen Massenanteile haben, kann von derselben Kornzertrümmerung ausgegangen werden. Die Verdichtungsenergie des M-Rüttlers konnte somit angepasst werden. In Abbildung 3 ist das Herantasten anhand der Sieblinien zu erkennen.

Die 5. Sieblinie (hellbraun) ist die Ausgangssieblinie des Rohmaterials. Diese wurde mit unterschiedlichen Proctorenergien zertrümmert. Der übliche Proctorversuch zur Bestimmung der optimalen Trockendichte und des optimalen Wassergehaltes wurde nicht durchgeführt, sondern es wurde nur die Verdichtungsenergie der Prüfeinrichtung modifiziert. Mit der üblichen Proctorenergie entstand die 2. Sieblinie (rot) und mit der modifizierten Proctorenergie die 3. Sieblinie (grün). Es ist zu erkennen, dass die 3. Sieblinie (grün) sich an die Kornzertrümmerung der 1. Sieblinie Rüttelstopfsäule (blau) annähert. Demzufolge muss der modifizierte Proctorversuch weiter angepasst werden. Die Schläge werden kontinuierlich erhöht bis die Massenprozent

zu der 1. Sieblinie (blau) der Rüttelstopfsäule passen. Dazu waren 15 Schläge mehr je Schicht nötig, wie in der 4. Sieblinie Proctor M-Rüttler (lila) dargestellt. Wie man in Abbildung 3 sieht, weisen die 1. Sieblinie Rüttelstopfsäule (blau) und die 4. Sieblinie Proctor M-Rüttler (lila) die gleichen Massenanteile auf. Somit konnte die Kornzertrümmerung eines M- Tiefenrüttlers aufgebracht werden.

Die Verdichtungsenergie eines Proctorversuch ergibt $0,57 \text{ MNm/m}^3$ und die eines modifizierten Proctorversuches eine höhere Energie von $2,56 \text{ MNm/m}^3$. Für den Proctor M- Rüttler ergab sich eine Verdichtungsenergie von $3,24 \text{ MNm/m}^3$.

Ein weiterer Tiefenrüttler für das Rütteldruckverfahren ist der S-Rüttler, für den eine höhere Energie von $8,10 \text{ MNm/m}^3$ abgeschätzt wurde. Diese Annahme muss noch mit Feldversuchen verifiziert werden.

Tabelle 1: Kennwerte der unterschiedlichen Proctorversuche

Proctortopf B	Protor- versuch	modifi- zierter Proctortv.	Proctor M-Rüttler	Proctor S-Rüttler
Masse Fallgewicht	2,5 kg	4,5 kg	4,5 kg	4,5 kg
Durchm. Fallgewicht	50 mm	50 mm	50 mm	50 mm
Fallhöhe	305 mm	457 mm	457 mm	457 mm
Anzahl Schichten	3 -	5 -	5 -	5 -
Anzahl Schläge / Schicht	56 -	56 -	71 -	178 -
Volumen des Topfes	2208,93	2208,93	2208,93	2208,93
Verdichtungsenergie	0,569 MNm/m^3	2,557 MNm/m^3	3,242 MNm/m^3	8,106 MNm/m^3

Die einzelnen Kennwerte der unterschiedlichen Proctorversuche sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Mit diesem Ergebnis können die nächsten Proben im Labor auf dieselbe Kornzertrümmerung vorbereitet werden.

Über weiterführende Versuche an Grauwacke mit verschiedenen Sieblinien und dem Einfluß der genannten Verdichtungsenergien wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet.

4 Filterstabilität von Rüttelstopfsäulen

In diesem Abschnitt wird die hydraulische Filterstabilität von Rüttelstopfsäulen in bindigen Böden untersucht um allgemeingültige Aussagen zu erhalten, die auf die Baustelle übertragbar sind.

Da bei bisherigen Versuchen [ZBW10] nicht genau beobachtet werden konnte, wann der kritische Gradient erreicht war, wurden Modellversuche mit Prü fzellen und einer neu dafür entwickelte Filterschale mit Plexiglasscheibe durchgeführt und ausgewertet, siehe Abb. 4. Es wurden Modellversuche zur Bestimmung eines kritischen hydraulischen Gradienten bei schichtennormaler und schichtenparalleler Durchströmung entwickelt. Dafür wurden geschichtete Proben aus einem bindigen Boden und unterschiedlichen Kiesen mit einem konstanten Wasserdruck durchströmt. Der Wasserdruck wurde stufenweise in 30 min bis 1 h – Intervall erhöht, während die Durchlässigkeit in regelmäßigen Abständen gemessen wurde. Anhand der Durchlässigkeit konnte festgestellt werden, ob eine Erosion im bindigen Material aufgetreten ist und somit ein kritischer hydraulischer Gradient erreicht wurde. Danach wurden die Ergebnisse mit den theoretischen Ansätzen von Zou [ZBW10] verglichen.

Für die Schottersäule wurde mineralisches Filtermaterial mit unterschiedlichen Korndurchmessern verwendet und als bindiges Basismaterial wurde ein Sand – Ton – Schluff – Gemisch und ein mittelp lastischer Ton verwendet.

Zur Untersuchung der Kontakterosion bei schichtennormaler Durchströmung wurden Probekörper in eine standardisierte Durchlässigkeitsprü fzelle eingebaut. Die Versuchsproben bestanden aus einem Sandauflager mit $h = 3,0$ cm um einen gleichmäßigen Wasserzustrom zur Basisschicht zu gewährleisten, siehe Abb. 4. Darauf wurden nacheinander wassergesättigtes bindiges Basismaterial mit einer Mächtigkeit von $h = 2,5$ cm und das jeweiligen Filtermaterial bis auf eine Gesamthöhe von $h = 10,5$ cm eingebaut. Insgesamt umfasste die gesamte Versuchsreihe 24 Versuche von niedrigen Auflastspannungen mit (10; 20; 30 kN/m²) bis zu größeren Auflastspannungen von (50; 100; ... 600 kN/m²).

Für die Versuchsreihe wurden die Prü fzellen an eine backpressure Anlage angeschlossen. Um möglichst vergleichbare Ergebnisse zu denen von Zou et al. [ZBW10] zu erhalten, wurde die Strömungsrichtung von unten nach oben gegen die Schwerkraft gewählt. Zum Einsatz kam entlüftetes und teilentsalztes Wasser. Das ausströmende Wasser wurde gesammelt um die Feinsteile, die trotz Filterpapier aus der Filterschale entweichen, aufzufangen.

Aus dem Verhältnis der hydraulischen Druckhöhen in den Büretten und der durchströmten Länge des Basismaterials ergaben sich die entsprechenden hydraulischen Gradienten.

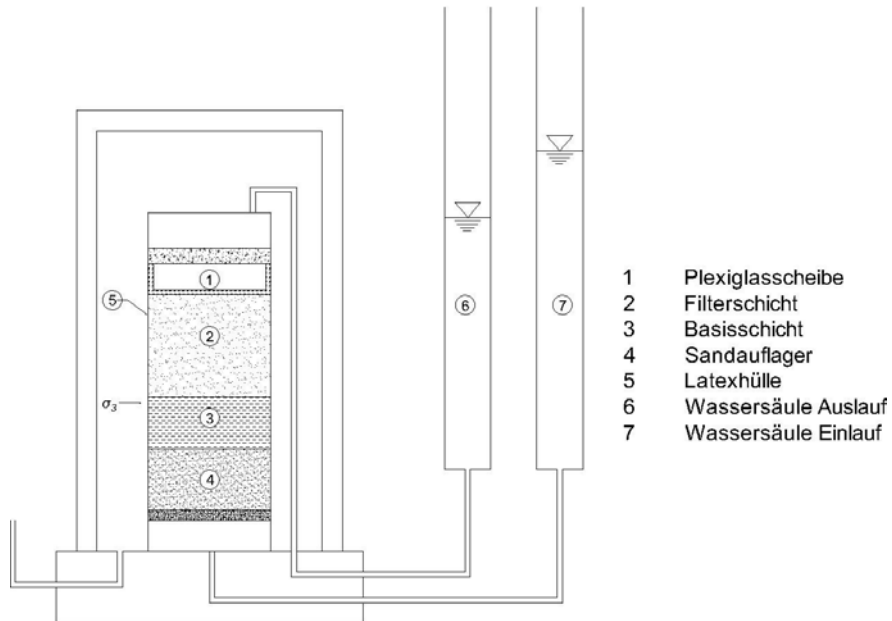


Abbildung 4: Modellversuch mit neuer Plexiglasfilterschale für schichtnormale Durchströmung

In jedem Versuchsdurchgang wurden mindestens drei hydraulische Gradienten (Laststufen) untersucht. Die Laststufe ist für eine bestimmte Zeit konstant gehalten worden oder solange bis es zur Erosion kam. In jeder Laststufe wurde in unterschiedlichen Zeitabständen die Durchlässigkeit gemessen. Die ersten Erkenntnisse dienen auch der Bestimmung der Mindesthaltezeit für das Sand-Ton-Gemisch von 30-Minuten und für den mittelplastischen Ton von 1-Stunde.



Abbildung 5: Filterschale mit starker Trübung

Über die Messung der Durchlässigkeit und dem Grad der Trübung in der Filterschale konnte das Eintreten der Erosion erkannt werden. Bildete sich eine starke Trübung aus wurde der kritische hydraulische Gradient erreicht, siehe Abbildung 5. Ist in einer Laststufe kein kritischer hydraulischer Gradient erreicht worden, wurde der Zelldruck gesteigert und mit neuem hydraulischen Gradienten belastet.

Über die Versuchsergebnisse wird an anderer Stelle berichtet.

5 Abschätzung des Durchmessers von Düsenstrahlsäulen

Das Düsenstrahlverfahren ist ein seit Jahrzehnten weltweit angewendetes Verfahren um Injektionssäulen im Boden herzustellen. Der Vorgang im Boden stellt einen hochkomplexen Prozess dar, welcher mathematisch und physikalisch schwer zu erfassen ist. Bedeutende Versuche zu dieser Problematik wurden von Bernd Bergschneider [Ber02] und Jürgen Stein [Ste04] durchgeführt, die jeweils unterschiedliche Berechnungsansätze zur Ermittlung der Reichweite liefern.

Die zeitliche Entwicklung der Strahlreichweite kann für jeden Boden mit Hilfe eines Separationsansatzes beschrieben werden. Darauf baut Stein seine Berechnung der Reichweite auf. Diese Überlegung ist für die Praxis durchaus relevant, da für die Ausführung im Feld die maximale Reichweite nicht benötigt wird. Düsenstrahlsäu-

len werden in jeglichen Bodenarten erstellt, weshalb es von großem Nutzen ist, dass der Ansatz für jede Bodenart verwendet werden kann.

Bergschneider betrachtet in seiner Berechnung nur die maximale Reichweite. Dies bewerkstelligt er sehr ausführlich und liefert dadurch einen detaillierten Ansatz zur Berechnung. Den durchaus wichtigen Einfluss des Porenwasserüberdrucks berücksichtigt er jedoch nicht und umgeht dies mit einer Vereinfachung.

Beide Wissenschaftler liefern somit einen Teil der Berechnung des komplexen Vorgangs beim Düsenstrahlverfahren, vernachlässigen aber durchaus wichtige Parameter wie den Einfluss der Kohäsion oder die Auswirkung der Ziehgeschwindigkeit des Gestänges. Um für die Praxis einen Berechnungsansatz zu liefern, der mit Erfahrungswerten verglichen werden kann, müssen jedoch alle Aspekte in die Berechnung integriert werden. Es wird hier ein erster Versuch unternommen fehlende Parameter zu integrieren und einen Berechnungsansatz zu entwickeln.

Der neue Berechnungsansatz kombiniert die Formeln beider Autoren und ergänzt wichtige Parameter wie den von der Durchlässigkeit des Bodens abhängige Porenwasserüberdruck und die Kohäsion.

Zur Berechnung des Porenwasserüberdrucks wird auf die Entstehung des Überdrucks bei der Konsolidierung von Böden zurückgegriffen. Entscheidend für den Verlauf der Konsolidierung sind die Durchlässigkeit und die Steifigkeit des Bodens sowie die Drainagebedingungen. Beim Düsenstrahlverfahren wird der Ablauf der Konsolidierung in umgekehrter Reihenfolge betrachtet. Es wird also nicht der Abbau des Porenwasserüberdrucks berechnet, sondern wie lange der Aufbau des Porenwasserüberdrucks dauert und wie groß der Druck zu verschiedenen Zeiten ist.

Die Kohäsion wird über die Kohäsionskräfte entlang der von Bergschneider vorgegebenen Gleitflächen berücksichtigt, siehe Abbildung 6. Auf diese Weise kann die Reichweite nicht nur in Sanden ermittelt werden, sondern auch in bindigen Böden. Modellversuche dazu stehen noch aus.

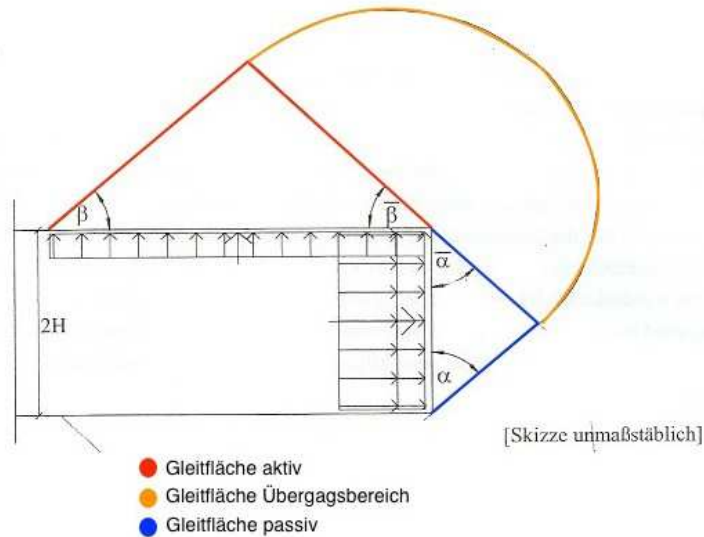


Abbildung 6: Berücksichtigung der Kohäsion

6 Zusammenfassung

Im Spezialtiefbau werden seit Jahrzehnten viele Verfahren mit Erfolg angewendet, jedoch sind noch viele Details ungeklärt. Einige Forschungsideen und Projekte, die begonnen wurden, aber noch nicht abgeschlossen sind, werden vorgestellt.

Beim Rütteldruckverfahren ist nicht geklärt, welche Bewegungen der Rüttler im Boden genau macht und wie man den Verdichtungsprozess beschleunigen kann. Dazu wird an einer Optimierung mit Frequenzregelung gearbeitet.

Beim Rüttelstopfverfahren ist nicht klar, wie sich die bodenmechanischen Säulenparameter in Abhängigkeit von der Rüttlerenergie durch Kornbruch verändern. Hierzu wird eine Vorgehensweise im Labor vorgeschlagen und mit Baustellenversuchen verglichen. Ebenso ist es bisher beim Thema Filterstabilität von Rüttelstopfsäulen nicht gelungen, den rechnerisch ermittelten kritischen Gradienten mit Versuchen genau nachzuweisen. Zu diesem Zweck wird eine Modifikation der Versuchseinrichtung vorgeschlagen.

Am Ende wird auf die Abschätzung der Reichweite des Düsenstrahlverfahrens eingegangen, wobei vorhandene Ansätze kombiniert und mit neuen Parametern ergänzt werden.

Literatur

- [Ber02] BERGSCHNEIDER, Bernd. *Zur Reichweite beim Düsenstrahlverfahren im Sand*. Dissertation. Universität Wuppertal, 2002
- [Fel99] FELLIN, Wolfgang. *Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem*. Dissertation. Universität Innsbruck, 1999
- [Lor55] LORENZ, Hans. Über die Vorgänge im rolligen Baugrund bei Schwingungsverdichtung“, TU Berlin., S.12-16, 1955
- [Nag17] NAGY, Peter Investigation of soil-machine interaction during deep vibro compaction, In: 6th *International young geotechnical engineers' conference, Seoul*, 2017
- [Nen06] NENDZA, Matthias: *Untersuchungen zur dynamischen Bodenverdichtung bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens*, TU Braunschweig, Diss,
- [Ste04] STEIN, Jürgen. *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Düsenstrahlverfahren*. (J. Grabe, Hrsg.) Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2004
- [Weh05] WEHR, Wolfgang Jimmy: Variation der Frequenz von Tiefenrüttlern zur Optimierung der Rütteldruckverdichtung. In: *Hans-Lorenz Symposium, TU Berlin*, 2005
- [ZBW10] ZOU Yazhou, BOLEY Conrad, WEHR Wolfgang: On stress state dependent contact erosion during the constructing of stone columns, In: *International conference on scour and erosion, San Francisco*, 241-250, 2010