

# Nichtinvasive Untersuchungen zur Erkundung und Sicherung deformationsanfälliger Geozonen

B. Löwe<sup>1</sup>, H. Busse<sup>2</sup>, F. Sandig<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

<sup>2</sup> Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V.

## KURZFASSUNG

---

Der Beitrag befasst sich mit der Anwendbarkeit von zerstörungsfreien Verfahren zur Bestimmung von Bodenparametern im Zuge der Qualitätssicherung, sowie der Überwachung von risikoreichen Untergrundsituationen. Durch eine oberflächenseismische Untersuchung können künstlich hergestellte Verdichtungskontraste in Sand abgebildet werden. Dabei zeigt sich eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit Eindringwiderständen von Sondierungen. Im Anschluss wird ein Erdfallversuch zum Verständnis unterirdischer Bruchmechanismen behandelt. Dabei werden Einflussparameter aufgezeigt, welche eine Bodengewölbebildung begünstigen und somit einen Verbruch verhindern. Abschließend folgen Schlussfolgerungen bezüglich der autarken Überwachung von Erdfallphänomenen.

*Schlagerter: Oberflächenseismik; MASW, Erdfallüberwachung; Trapdoor-Versuch*

## I. SEISMISCHE NICHTINVASIVE BODENPRÜFUNG

### 1. SEISMISCHE WELLEN

Die stoßartige Anregung bei aktiven seismischen Untersuchungen erzeugt Schwingungen die sich im Korngerüst des Bodens in Form von Kompressions- (P-Wellen) und Scherwellen (S-Wellen) ausbreiten [1]. Die Wellen können als zyklisch-dynamische Beanspruchungen des Bodens verstanden werden, durch die es zu kleinsten reversiblen Verformungen im Boden kommt ([2] und [3]). Durch Interferenzen von P- und vertikal polarisierten S-Wellen an der freien Oberfläche bilden sich zusätzlich Oberflächenwellen aus - sogenannte Rayleighwellenzüge (R-Wellen). Durch eine an die Oberfläche gebundene Ausbreitungsgeometrie zeigen R-Wellen besonders große Amplituden und sind in Aufzeichnungen gut zu identifizieren [4].

Im kleinen Dehnungsbereich ( $\gamma < 10^{-4}$ ) kann für das Korngerüst von Sand linear-elastisches Stoffverhaltens vorausgesetzt werden [2].

Im Gegensatz zu P- und S-Wellen, die sich idealisiert sphärisch um den Anregungspunkt

ausbreiten, folgen R-Wellen der freien Oberfläche. Dabei dringen R-Wellen bis etwa  $1/3$  der Wellenlänge  $\lambda$  in den Untergrund ein [4].  $\lambda$  wiederum wird von Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit beeinflusst. Das Frequenzspektrum ergibt sich vor allem durch die Anregungsart. Die Geschwindigkeit an der Oberfläche dagegen aus den elastischen Eigenschaften des Untergrundes in den die Welle in Abhängigkeit von  $\lambda$  eindringt.

Da Frequenzen von R-Wellen in geschichtetem Baugrund durch die elastischen Eigenschaften verschiedener Schichten beeinflusst werden, breiten sie sich entsprechend unterschiedlich schnell aus. Das Verhalten wird als Dispersion bezeichnet und ist Kerngegenstand der nachfolgenden Untersuchungen.

### 2. VERSUCHE

Durch die Versuche wird dargestellt wie sich die Verdichtung von Sand auf Phasengeschwindigkeiten von R-Wellen auswirkt.

Der erfasste Geschwindigkeitsunterschied wird hinsichtlich der Dichteänderung interpretiert. Dazu wurden in einem Großversuchsstand zwei Verdichtungszustände in einer Sandgrube hergestellt und untersucht. Die Welle wird

durch Hammerschlag auf eine am Boden liegende Platte angeregt und an der Oberfläche mit einer Kette aus 48 Geophonen (4.5 Hz) im äquidistantem Abstand 0,25 m aufgezeichnet.

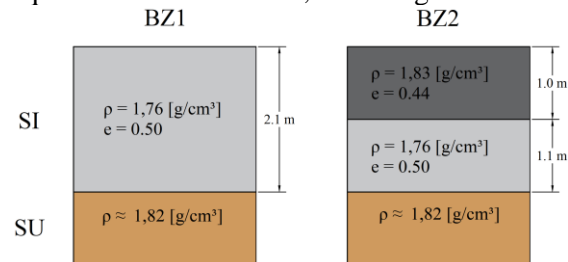


Abbildung 1: Einbauszustände BZ1 und BZ2

Mit der phase-shift-Methode kann der Weg-Zeit-Bereich der seismischen Aufzeichnung in einen Geschwindigkeits-Frequenz-Bereich transformiert werden. Die Analyse erfolgt im normalisierten Amplituden- und Phasenspektrum aus einer 2D-Fouriertransformation. Im BZ 1 wurden drei MASW Untersuchungen, und drei Sondierungen mit einem dynamischen Penetrometer durchgeführt. BZ2 wurde mit drei Sondierungen und einer MASW Untersuchung erfasst.

### 3. DATEN UND BEWERTUNG

Die Sondierungen bilden die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen aus Abbildung 1 ab. Im BZ2 zeigt sich im nachverdichteten Bereich (bis -1,0 m) ein deutliches Anwachsen des Spitzendruckwiderstands von 5 MPa auf 10 MPa. Vergleicht man BZ1 mit BZ2 wird ein linearer Verlauf bei BZ1 erst ab größerer Tiefe (-0,6 m) erreicht. Die Beobachtung zeigt eine ausgeprägte nichtlineare Steifigkeitsentwicklung in diesem Bereich. Der Einfluss der Dichte auf die ermittelte Bodensteifigkeit bei großen Dehnungen scheint in diesem Bereich besonders groß zu sein. Die Dispersionskurven der phase-shift-Untersuchung zeigen im Frequenz-Geschwindigkeit-Bereich für den BZ1 graduell mit steigender Frequenz (20 – 60 Hz) abnehmende Phasengeschwindigkeiten; 220 m/s – 120 m/s (Abbildung). Im BZ2 (160 – 131 m/s) wurden im Frequenzbereich 40 – 60 Hz höhere Geschwindigkeiten gemessen als im BZ1 (148 – 126 m/s;  $R^2 = 0,702$ ) (Abbildung 3). Im stärker verdichteten Bereich im BZ2 zeigen sich in der Dispersionskurve höhere Geschwindigkeiten bis etwa 1/3 der Wellenlänge. Der Frequenzbereich 20 – 40 Hz

weist in beiden BZ annähernd identische Geschwindigkeiten auf ( $R^2 = 0,995$ ).

Mit der phase-shift-Analyse wurde die seismische Sektion aus dem Weg-Zeit-Bereich in einen Geschwindigkeit-Wellenlängen-Bereich transformiert. Wesentliche Effekte der Nachverdichtung sind aus den gemessenen Wellengeschwindigkeiten im Frequenzbereich 40 – 60 Hz ersichtlich.

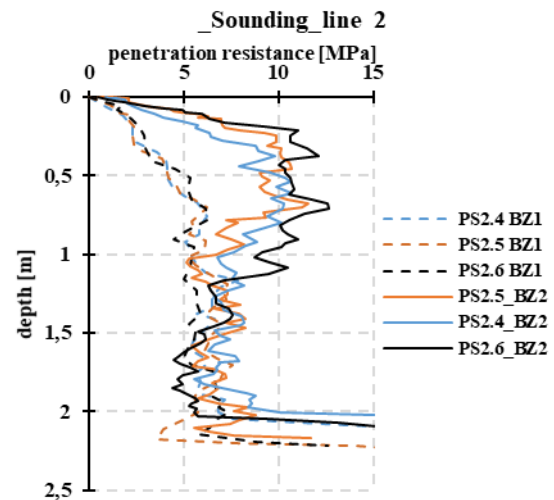


Abbildung 2: Sondierung Linie 2 BZ1 und BZ2

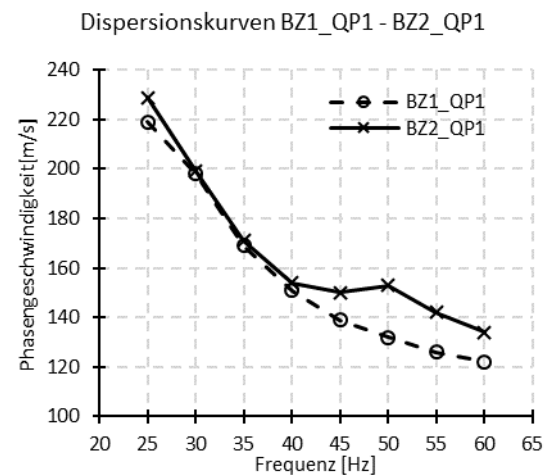


Abbildung 3: Dispersionskurve aus MASW Linie 2

Im BZ1 werden im Vergleich zu BZ2 geringere Geschwindigkeiten gemessen. Die höheren Geschwindigkeiten im BZ2 lassen auf eine höhere Schubsteifigkeit im Tiefenbereich bis -1,0 m ab GOK schließen. Dabei wird die Steifigkeit im BZ2 von einer geringfügig höheren Vertikalspannungen infolge größerer Massendichte beeinflusst. Die wesentlichen Effekte sind allerdings auf die erhöhte

Kontaktsteifigkeit des Korngerüsts durch die höhere Dichte zurückzuführen

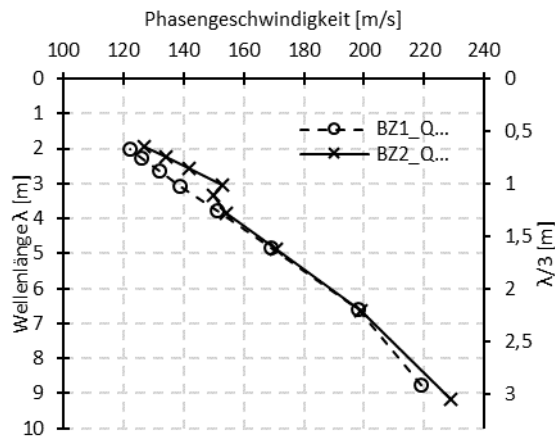


Abbildung 4: Dispersionskurve im  $\lambda$ - $V_R$  Bereich

## I. ERDFALLSICHERUNG

Der Erdfall als schlagartiger Verbruch unterirdischer Hohlräume erfordert aufgrund des schwer einschätzbaren Eintrittsrisikos die Anwendung von Sicherungskonzepten zur Schadensvermeidung. Da eine vollständige Verwahrung der Kavitäten oft nicht wirtschaftlich ist, werden im Verkehrswegebau vermehrt Erdfallüberbrückungssystemen auf Basis von hochzugfesten Geokunststoffen eingesetzt. Die EBGEO liefert dabei Vorschläge für Sicherungsmaßnahmen unter verschiedenen Umgebungs- und Untergrundgegebenheiten [5]. Dabei wird zwischen dem Prinzip der Teilsicherung und der Vollsicherung unterschieden.

Das Teilsicherungskonzept basiert auf der Annahme, dass während einer festgelegten Beanspruchungsdauer  $t_d$ , nur minimale Einsenkungen im Falle des Eintritts eines Erdfallereignisses auf der Fahrbahnoberfläche auftreten. Diese Prämisse verlangt die Ausbildung eines zeitweilig standsicheren Gewölbes innerhalb des Überbrückungskörpers. Um die Ausbildung des unterirdischen Gewölbes sicherzustellen, wird die Beobachtungsmethode angesetzt. In mehreren Großprojekten z.B. [6] wurden für diesen Zweck herkömmliche Messsysteme eingesetzt. Deren Nachteile liegen in der unflexiblen Anordnung und der manuellen Datenauslesung sowie der oft sehr kleinräumigen Überwachung. Diesem

Umstand soll mithilfe von autark messenden Sensorknoten Sorge getragen werden.

## II. VERSUCHE

Für ein Verständnis der Bruchmechanismen und der Einflussgrößen wurde ein Falltürversuch durchgeführt, wie dieser erstmals bei Terzaghi [7] Erwähnung fand. Innerhalb eines ca. 1 m x 1,50 m großen Versuchskasten mit Glasfront wurde ein plötzlicher Verbruch simuliert und mittels der PIV (Particle Image Velocimetry) – Methode aufgenommen. Diese erlaubt eine bildbasierte Analyse von kleinsten Initialbewegungen innerhalb des Bodenkörpers. Bei dem Versuch wurde der Einfluss der Überdeckung, Kohäsion und der Einbringung einer Geokunststofflage bei locker und mitteldicht gelagerten Sand untersucht. Aufgrund der Kleinmaßstäblichkeit des Versuches, erfolgte eine ergänzende Modellierung mittels Finite-Element-Methode (Abb. 5).

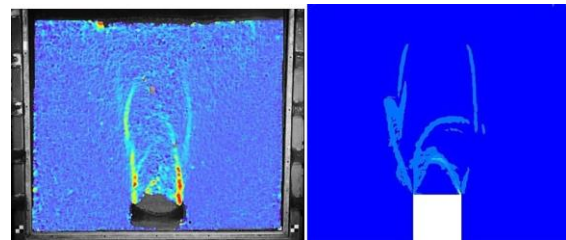


Abbildung 5: Analyse der Bruchmechanismen mittels optischer Auswertung über die PIV-Methode (links) und numerische Vergleichsbetrachtungen mittels FE-Methode (rechts)

## III. VERSUCHSERGEBNISSE

Aus den gesammelten Erfahrungen und der durchgeführten Versuchsreihe ließen sich folgende Aussagen ableiten:

1. Der Verbruch erfolgt schlagartig, wobei kohäsive und dichter gelagerte Böden unterhalb eines kritischen Verhältnisses von Hohlraumbreite zu Überdeckung ein standsicheres Gewölbe ausbilden können.
2. Ein abnehmender Verdichtungsgrad führt zu ausgeprägteren Erdfalldurchmessern an der Oberfläche.
3. Ein gesteigerter Wassergehalt im Untergrund mindert das Scherfestigkeitsverhalten und kann zu einer inneren Erosion führen, wodurch es

- zu einer Abnahme der Standsicherheit des Gewölbes kommt.
- Die FEM und PIV-basierte Auswertung ergab vergleichbare Bruchbilder. Die skalierte FEM Betrachtung ergab jedoch erhöhte Gewölbestandsicherheiten.
  - Die Einlage einer Geokunststoffbewehrung führte zu einer deutlichen Reduzierung von Gewölbehöhe und Senkungserscheinungen. Eine erhöhte Dehnsteifigkeit des Geokunststoffes reduziert den Verbruchraum und mindert, besonders bei stark dilatantem Materialverhalten, das Schadbild (Abb. 6) [8].

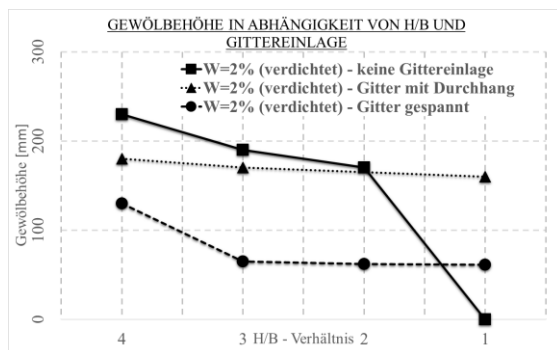


Abbildung 6: Einfluss von Verdichtung und Einlage eines Gitters (gespannt / nicht gespannt) auf die Gewölbehöhe

#### IV. EMPFEHLUNG FÜR EINE MESSTECHNISCHE ANORDNUNG

Aus den Beobachtungen werden Leitsätze für die Anwendung von Sensorikbausteinen abgeleitet:

- Das Bruchgeschehen erfolgt schlagartig und ist vorwiegend von vertikalen Deformationen dominiert. Deshalb ist der Einsatz von Sensorik, welche Deformationen erfassen kann (Beschleunigungssensorik), von primärem Interesse.
- Mithilfe dieser Sensorik kann die Durchbiegung der Bewehrung im Nachbruchzustand abgeleitet werden. Bei bekannter Dehnsteifigkeit können durch analytische Betrachtungen aus der Seilstatik und Membrantheorie z.B. [9], Zugkräfte, Gewölbehöhen und Gewölbestandsicherheiten abgeleitet werden.

- Eine zusätzliche Implementierung von Dehnungssträngen kann als Redundanzsystem verwendet werden und gleichzeitig den Nachweis einer ausreichenden Verankerungslänge erbringen.
- Aufgrund der gesteigerten Verbruchneigung durch das Vorhandensein von Wasser im Untergrund, empfiehlt sich die zusätzliche Implementierung von Porenwasserdruckgebern auf der Bewehrungsebene.
- Die Aktivierung der Tragwirkung eines Erdfallüberbrückungssystems, auf Basis einer Geogitterbewehrung, basiert auf den Versturz des Entlastungsgewölbes. Dabei ist zu prüfen, ob die Sensorik der schlagartigen Auflast (verstärkt bei verfestigten Bodenschichten) standhalten kann.

#### LITERATUR

- Everett, M.E.: Near-surface applied geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- Atkinson, J.H.: Non-linear soil stiffness in routine design. In: Géotechnique 50 (2000), Heft 5, S. 487-508.
- Bergmann, L.; Hatfield, H.: Ultrasonics and their scientific and technical applications. J. Wiley and sons, inc, New York, 1942.
- Ishihara, K.: Soil behaviour in earthquake geotechnics, Oxford engineering science series no. 46, Oxford University Press, Oxford, 1996.
- DGGT (Hg.): EBGeo - 2. Aufl., Berlin, 2010, S. 237-277.
- Alexiew, D. et al.: Erdfallüberbrückungssystem Eisenbahnknoten Gröbers - Zur Bemessung, Ausführungsplanung und Bauausführung, KGEO München, 2003, S. 235-248.
- Terzaghi, K.: Stress Distribution in dry and saturated sand above a yielding trap-door. Proc., 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass., 1936, S. 307-311.
- Villard, P.; Briançon, L.: Design of geosynthetic reinforcements for platforms subjected to localized sinkholes. In: Can. Geotech. J. 45 (2008), S. 196-209.
- von Wolffersdorff, P.A.: Sicherungsmaßnahmen gegen Erdfallgefährdung. Geotechnikseminar Weimar, 2002.