

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Vrettos, Christos; Merz, Kai

Anwendung von Elektroosmose zur Reduzierung des Herausziehwerstandes von Spundwänden: Großmaßstäbliche Modellversuche in Ton

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102379>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Vrettos, Christos; Merz, Kai (2014): Anwendung von Elektroosmose zur Reduzierung des Herausziehwerstandes von Spundwänden: Großmaßstäbliche Modellversuche in Ton. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktuelle Themen der Geotechnik. Karlsruhe: Herle, Ivo. S. 153-164.

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.



Anwendung von Elektroosmose zur Reduzierung des Herausziehwerstandes von Spundwänden: Großmaßstäbliche Modellversuche in Ton

Christos Vrettos, Kai Merz

*Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität
Kaiserslautern*

Bei kohäsiven Böden kommt es immer wieder vor, dass darin eingerammte Stahlspundwände nach einer gewissen Standzeit sich nur sehr schwer herausziehen lassen. Eine Möglichkeit zur Herabsetzung des Ziehwerstandes besteht darin, eine elektrische Spannung anzulegen und die günstigen Effekte der Elektro-Osmose auszunutzen. Im Rahmen eines internationalen Forschungsvorhabens wurde dies untersucht. Die elektro-osmotischen Parameterwerte eines typischen Tons wurden in einer osmotischen Röhre ermittelt. Kleinmaßstäbliche Modellversuche an Stahlblechen zeigten eine nennenswerte Reduzierung der erforderlichen Herausziehkraft. Die Wirkung der Elektro-Osmose wurde anschließend anhand von aufwändigen großmaßstäblichen Versuchen im Labor bestätigt. Mittels numerischer Simulation wurde eine Parameterstudie zur Ermittlung der optimalen Konfiguration bei Einsatz des Verfahrens in der Praxis durchgeführt.

1 Einleitung

Die Wiederverwendbarkeit der Spundbohlen ist ein klarer Vorteil der Spundwandbauweise. Insbesondere bei Linienbaustellen führt der mehrfache Einsatz der Bohlen zu sehr wirtschaftlichen Lösungen für die temporären Stützbauwerke. Zur Wiedergewinnung müssen die Bohlen zumeist unter Einsatz von Vibration gezogen werden. Speziell wenn die Bohlen in kohäsiven Schichten einbinden, kann das Ziehen sich als schwierig gestalten. Bei einer längeren Standzeit von Bohlen in einer bindigen Schicht kommt es zu einem „Festwachsen“ der Bohlen, so dass beim Herausziehen teilweise deutlich größere Kräfte erforderlich werden als beim Einbringen der Spunddielen. Im Extremfall muss die Spundbohle auf Dauer im Boden verbleiben.

Aus diesen Gründen ist es sinnvoll, nach Verfahren zu suchen, welche das Ziehen von Bohlen in bindigen Schichten erleichtern. Ein mögliches Verfahren stellt die Anwendung der Elektro-Osmose dar. Die Abbildung 1 zeigt die prinzipielle Wirkungsweise dieser Methode: Durch die zwischen den Elektroden (Anode) und der Spundbohle (Kathode) vorhandene elektrische Spannung findet im Erdreich eine Bewegung der im Ton angelagerten Wassermoleküle zur Spundbohle hin statt. Dort bildet das Wasser dann allmählich einen Film, der als Schmierfilm wirkt und die Mantelreibung reduziert. Bisher wurde dieses Verfahren jedoch in der Praxis noch nicht erfolgreich zur Erleichterung des Ziehvorgangs bei Spundbohlen eingesetzt.

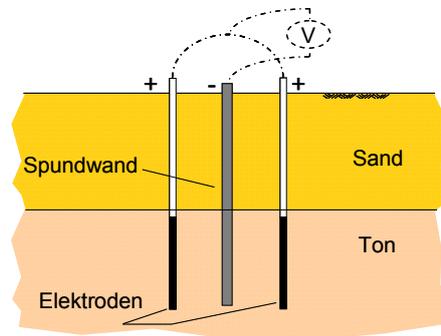


Abbildung 1: Prinzip der Elektro-Osmose.

Butterfield & Johnston [But80] berichten über Versuche an Metallpfählen, bei denen die Elektro-Osmose als Einbringhilfe beim Rammen in Tonböden eingesetzt wurde. Als Ergebnis der Untersuchungen wurde eine deutliche Reduzierung der Mantelreibung während der Versuchsdurchführungen festgestellt. Zu dem gleichen Ergebnis gelangten Alte & Berggren [Alt75] beim Herausziehen von Spundbohlen. Die Reduzierung von anhaftenden Tonmassen bei Tunnelbohrmaschinen haben Baalen et al. [Baa00] in Laborversuchen untersucht.

Im Rahmen eines internationalen Projektes wurde anhand von klein- und großmaßstäblichen Modellversuchen untersucht, ob für den Ziehvorgang von Spundbohlen ein positiver Effekt durch die Elektro-Osmose zu erwarten ist. Als Bodenmaterial wurde ein typischer Ton eingesetzt. Numerische Simulationen mit einem vereinfachten Ansatz dienen der Optimierung der Konfiguration bei späteren Anwendungen in der Praxis.

2 Transportvorgänge bei Elektro-Osmose

Ein angelegtes elektrisches Feld übt auf die hydratisierten Ionen eines oberflächen-geladenen Minerals eine gewisse Kraft aus. Der hieraus resultierende elektro-

osmotische Flüssigkeitstransport kann unter vereinfachten Annahmen mit Hilfe der Helmholtz-Smoluchowski-Gleichung beschrieben werden, Shapiro & Probst [Sha93]:

$$v_{eo} = \frac{\varepsilon \cdot \zeta \cdot E}{\eta} \quad (1)$$

Hierbei sind v_{eo} die elektro-osmotische Geschwindigkeit in m/s durch eine senkrecht zur Richtung des elektro-osmotischen Flusses gerichtete ebene Fläche, ε die Dielektrizitätskonstante, ζ das Zeta-Potenzial in V, E die elektrische Feldstärke in V/m und η die Viskosität der Porenlösung in kg/(ms).

Die Berechnung des elektro-osmotischen Durchflusses Q_{eo} erfolgt nach folgender Beziehung:

$$Q_{eo} = k_e \cdot E \cdot A \quad (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor k_e wird als elektro-osmotische Permeabilität in $\text{m}^2/(\text{Vs})$ bezeichnet und hängt von den Bodeneigenschaften ab. A ist die durchflossene Querschnittsfläche.

Im Labor kann die elektro-osmotische Permeabilität k_e durch eine Modifikation der Gleichung (2) bestimmt werden, indem die Feldstärke E durch das Verhältnis der angelegten Spannung U zum Elektrodenabstand a und Q_{eo} durch das im Versuch gemessene abgeflossene Wasservolumen V_w in der betrachteten Zeitspanne t ersetzt wird:

$$k_e = \frac{V_w \cdot a}{U \cdot A \cdot t} \quad (3)$$

3 Bodenmaterial

3.1 Bodenmechanische Kenngrößen des verwendeten Tons

Bei dem eingesetzten Ton handelt es sich um einen typischen, natürlich anstehenden Ton mittlerer Plastizität mit der Bezeichnung Pagenstecher Ton. Er weist folgende bodenmechanische Kennwerte auf: Korndichte $\rho_s = 2,72 \text{ Mg/m}^3$; Fließgrenze $w_L = 45,3\%$; Ausrollgrenze $w_P = 15,8\%$; Klassifizierung nach DIN 18196: TM; Wasseraufnahmevermögen $w_A = 54,1\%$; Korndurchmesser $d_{60}/d_{90} = 0,003/0,04 \text{ mm}$.

3.2 Ermittlung der elektro-osmotischen Eigenschaften des Tons

Diese Versuche dienen der Untersuchung und Feststellung der Bewegung des Porenwassers im Boden in einem anliegenden elektrischen Feld sowie der dabei auftretenden Reaktionen. Neben der Ermittlung der elektro-osmotischen Permeabilität k_e

wurde die Änderung des Wassergehalts w , welche durch das Anlegen eines elektrischen Feldes entsteht, erfasst. In einem weiteren Versuchstyp wurde untersucht, welche Änderungen des Porenwasserdrucks infolge des elektrischen Feldes auftreten.

Die Messung von k_e erfolgte mittels einer so genannten osmotischen Röhre in Anlehnung an Casagrande [Cas83], Abbildung 2. Die in diesen Versuchen ermittelten Werte der elektro-osmotischen Permeabilität liegen zwischen $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/(\text{Vs})$ bis $4,25 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{Vs})$ und somit innerhalb des für diesen Boden typischen Bereiches, Mitchell [Mit93].



Abbildung 2: Apparatur zur Messung der elektro-osmotischen Durchlässigkeit.

4 Kleinmaßstäbliche Modellversuche

Der Tonboden wurde in Versuchsbehälter kontrolliert in geringer Lagendicke bei einem Wassergehalt von 26% und einer Dichte zwischen $1,85$ und $1,96 \text{ Mg/m}^3$ eingebaut. Um Änderungen des Wassergehalts bis zum Versuchsbeginn zu vermeiden, wurde die Bodenoberfläche mit Wachs versiegelt.

Nach einer Standzeit von 6 Wochen wurden Stahlbleche mit den Abmessungen Länge/Breite/Dicke gleich $500/150/8 \text{ mm}$ ohne Einwirkung einer elektrischen Spannung statisch kontrolliert eingedrückt. Die Einbindetiefe betrug 300 mm . Anschließend ruhte das Gesamtsystem je nach Versuch für weitere 30-60 Tage (Anwachszeit).

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt



Abbildung 3: Versuchsaufbau für den Herausziehversuch mit Messung des Feuchte- und Temperaturtransports.

Zur Festlegung eines Referenzniveaus wurde zunächst das Herausziehen der Stahlbleche ohne Spannungseinwirkung untersucht. Die Abbildung 4 zeigt exemplarisch das Ergebnis eines derartigen Versuches. Vergleicht man die Kraft-Verschiebungslinie während des Eindrückens mit derjenigen während des Ziehens, so ist deutlich erkennbar, dass bei dem zweiten Vorgang eine nennenswert höhere Kraft erforderlich ist. Charakteristisch für den Ziehversuch sind der steile Kraftanstieg bis zu einem Peak-Wert und der darauf folgende stetige Abfall der Versuchskurve.

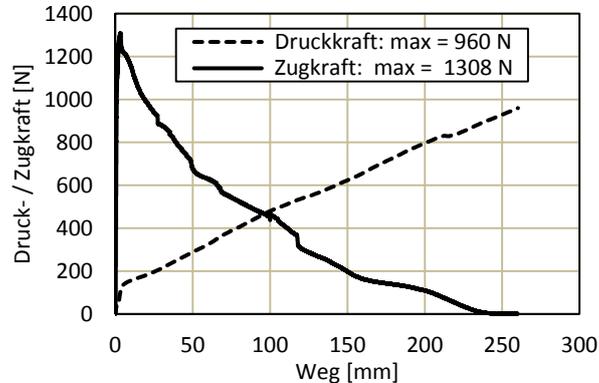


Abbildung 4: Kraft-Verschiebungslinien beim Eindringen sowie Herausziehen eines Bleches ohne elektrische Spannungseinwirkung.

In der anschließenden Versuchsreihe wurde vor dem Ziehen der Stahlbleche über zwei Kupferelektroden je nach Versuch eine elektrische Spannung von jeweils 25 V, 50 V sowie 75 V angelegt. Der Abstand zwischen dem Stahlblech und den 25 cm tief eingebetteten Elektroden betrug 12 cm. Je nach Versuchsart wurde die Spannung über eine Zeitdauer von 15 bis 90 min vor dem Ziehvorgang angelegt bzw. während des gesamten Vorganges beibehalten.

Der Feuchte- sowie Temperaturtransport innerhalb eines elektrischen Spannungsfeldes wurde durch den in Abbildung 3 dargestellten Versuchsaufbau mittels FDR-Sonden und Temperaturfühlern gemessen. Über die Ergebnisse dieser Versuche wurde in [Vre13] berichtet.

Als typische Ergebnisse für die unter Anwendung von Elektro-Osmose durchgeführten Versuche sind in der Abbildung 5 die Kraft-Verschiebungs-Linien während des Eindrückens sowie des Ziehens dargestellt. Beim Ziehen wurde vorher über einen definierten Zeitraum t_{el} eine Spannung angelegt. Im konkreten Fall der Abbildung 5 war $t_{el} = 90$ min und $U = 50$ V. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Kraftspitze während des Ziehens, wie sie bei den Versuchen ohne Spannungseinwirkung beobachtet wird (vgl. Abbildung 4), nicht auftritt. Nach dem steilen Anstieg direkt zu Beginn geht der Verlauf der Zugkraft anschließend in ein horizontales Plateau über und verläuft nach etwa hälftigem Ziehweg annähernd linear auf Null aus. Im Vergleich zur benötigten Eindrückkraft ist deutlich weniger Kraft während des Herausziehens des Bleches erforderlich.

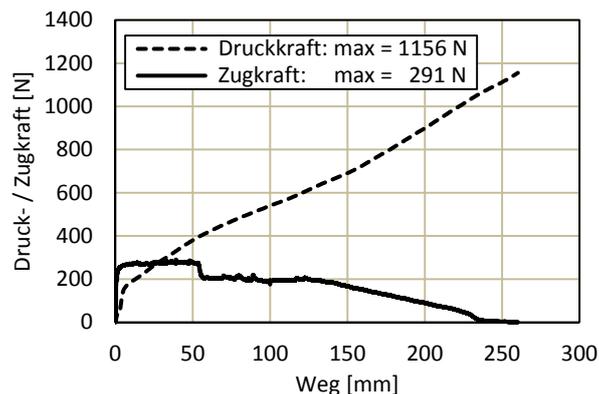


Abbildung 5: Kraft-Verschiebungs-Linien beim Eindrücken sowie Herausziehen eines Bleches: Vor dem Ziehvorgang wurde eine Spannung $U = 50$ V über einen Zeitraum von $t_{el} = 90$ min angelegt.

Die Randbedingungen der einzelnen Versuchstypen lauten wie folgt:

- Typ A: vor Herausziehen $t_{el} = 15$ min; $U = 25/50/75$ V, beim Herausziehen $U = 0$
- Typ B: vor Herausziehen $t_{el} = 90$ min; $U = 25/50/75$ V, beim Herausziehen $U = 0$
- Typ C: vor Herausziehen $t_{el} = 15$ min; $U = 25/50$ V, beim Herausziehen $U = 25/50$ V
- Typ D: $U = 25/50$ V über die gesamte Standzeit von 37 Tagen

Einen Überblick über die Ergebnisse der durchgeführten Versuche gibt Tabelle 1. Dargestellt ist dabei das Verhältnis zwischen der maximalen Zugkraft während des Ziehvorgangs und der maximalen Druckkraft am Ende des Eindrückvorgangs für verschiedene Kombinationen von elektrischer Spannung und Einwirkungsdauer. Der

Einfluss der Elektro-Osmose ist deutlich erkennbar: Während beim Referenzversuch in der Abbildung 4 ohne Anwendung der Elektro-Osmose das Verhältnis $1308/960 = 1,36$ beträgt, erreicht man bei Anwendung der Elektro-Osmose Werte von 0,7 bis 0,15.

Tabelle 1: Verhältnis zwischen Zug- und Druckkraft bei unterschiedlichen Kombination von elektrischer Spannung und zugehöriger Einwirkungsdauer.

Spannung	Versuchstyp			
	A	B	C	D
25 V	0,67	0,36	0,19	0,43
50 V	0,50	0,25	0,15	0,33
75 V	0,52	0,28	-	-

5 Großmaßstäbliche Modellversuche

Um die Anwendung des Elektro-Osmose-Verfahrens bei praxisrelevanten Spundwandbauwerken näher untersuchen zu können, wurden großmaßstäbliche Versuche im Labor des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der TU Kaiserslautern durchgeführt. Hierzu wurde eine Versuchsapparatur entworfen und gebaut, bestehend aus 3 übereinander angeordneten Beton-Schachtringen mit einem Durchmesser von 2 m und einer Gesamthöhe von 1,5 m, siehe Abbildung 6.

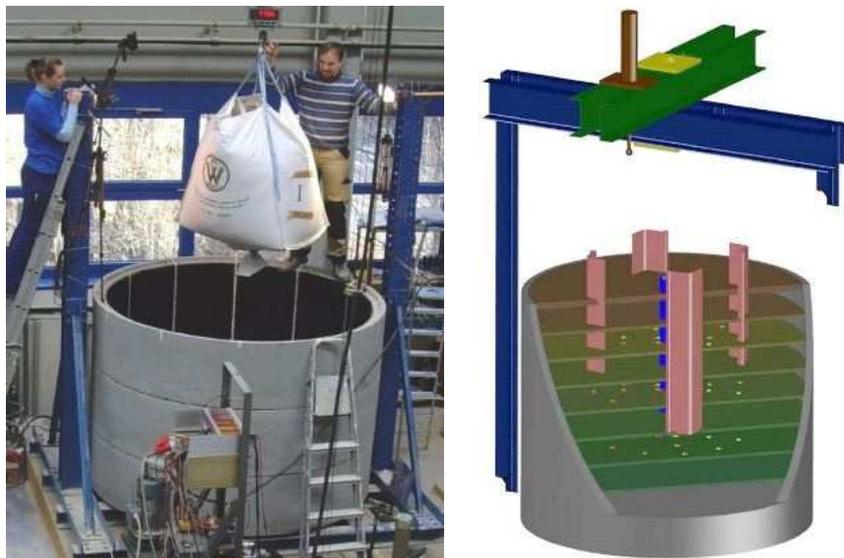


Abbildung 6: Versuchsaufbau für großmaßstäbliche Modellversuche.
Links: Einbau des Tones. Rechts: CAD-Konstruktionszeichnung.



Abbildung 7: Versuchsanordnung: In der Mitte: Anode aus Stahlrohr $d = 11,4$ cm; außen 4 Kathoden in Form von halbierten Spundwandprofilen Arcelor GU 16-400.

Der Versuchsbehälter ist innen ausgekleidet mit einer wasserdichten Kunststoffolie, damit der Ton nicht austrocknen kann. Zum Schutz vor Austrocknung an der Oberfläche ist hier eine etwa 5 cm dicke Sandschicht angeordnet, die in regelmäßigen Zeitabständen gewässert wird, siehe Abbildung 7.

Als Versuchsboden wurde Pagenstecher Ton verwendet. Der Ton wurde lagenweise mit einem Wassergehalt von etwa 18 – 20% eingebaut und mit einem Vibrationsstampfer verdichtet. Die in der Mitte angeordnete Anode in Form eines Stahlrohres mit einem Durchmesser von 11,4 cm wurde im Zuge des Toneinbaus eingebracht. Nach Einbau des Tones sind die 4 Kathoden, bestehend aus 120 cm langen, halben Spundwandprofilen Arcelor GU 16-400, mit einer Einbindetiefe von 90 cm eingedrückt worden. Der Abstand zwischen Anode und Kathode betrug etwa 50 cm.

Nach einer Anwachszeit von etwa 6 Wochen wurden die Zugversuche durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die Zugvorrichtung zum Ziehen der Spundwandprofile.

Hier wird nur über die erste Versuchsreihe berichtet. Es konnten nur an 3 der 4 Spundbohlen zuverlässige Versuchsergebnisse gewonnen und ausgewertet werden. Die Ergebnisse wurden in Form von Kraft-Verschiebungslinien aufgezeichnet, wie in Abbildung 9 dargestellt.

Der Versuch V2 wurde als Referenzversuch ohne Spannungseinwirkung durchgeführt. Hier wurde eine maximale Herausziehungskraft von etwa 52 kN erreicht.

Bei den Versuchen V3 und V4 wurde vor der Herausziehphase jeweils eine Spannung von $U = 60$ V angebracht. Dies entspricht einer elektrischen Feldstärke von 120 V/m. Der Zeitraum der Spannungseinwirkung betrug 24h bei V3 und 48h bei V4. Die maximalen Herausziehungskräfte lagen bei 43 kN (V3) bzw. 40 kN (V4).



Abbildung 8: Zugvorrichtung.

Die maximale Herausziehkraft konnte durch die Anwendung des Elektro-Osmose-Verfahrens somit um etwa 20% reduziert werden. Ein Einfluss der Zeit konnte bei den gewählten Intervallen von 24h und 48h nicht festgestellt werden. In weiteren Versuchsreihen wurde dann die Dauer der Spannungseinwirkung entsprechend reduziert. Dies ist vorteilhaft hinsichtlich einer Anwendung des Verfahrens in der Praxis.

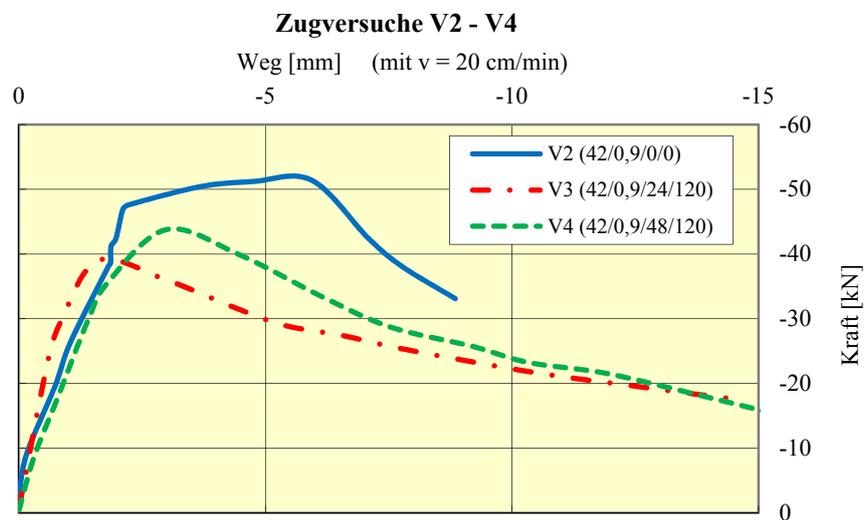


Abbildung 9: Ergebnisse der Zugversuche V2, V3 und V4.

6 Numerische Simulation

Zur Erfassung der elektro-osmotischen Fließvorgänge im Untergrund zwischen einer Spundwand, die als Kathode dient und einer Anode z. B. in Form eines in den Untergrund einzubringenden Stahlrohres wurden numerische Simulationen durchgeführt. Das eingesetzte numerische Verfahren berücksichtigt lediglich den Feuchte-transport im Boden infolge eines Stromflusses ohne die Interaktion zwischen Spundbohle und Boden an der Kontaktfläche zu erfassen. Es wurde von der Firma Elsyca in einem Programmcode implementiert. Mit Hilfe dieses Programmes wurde eine Parameterstudie zur Optimierung der Konfiguration durchgeführt. Abbildung 10 zeigt den typischen Aufbau des Systems Anode (Stahlrohr) – Kathode (Spundwand).

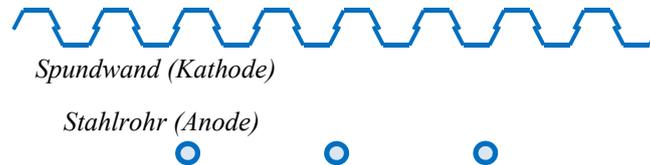


Abbildung 10: Konfiguration Anode (Stahlrohr) – Kathode (Spundwand) für die numerische Parameterstudie in [Vre13].

In der Parameterstudie wurden folgende Parameter variiert:

- Einbindetiefe Spundwand (Kathode) = 10 m
- Abstand Kathode – Anode = 2, 4, 6 m
- Einbindetiefe Anode = 6, 10, 12 m
- Anzahl der Anoden = 1 bzw. 3
- Abstand zwischen einzelnen Anoden = 4 bzw. 8 m
- Elektrische Feldstärke = 60 bzw. 120 V/m.

Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Stromdichte J [A/m^2] an einer Spundwand bestehend aus Spundbohlen Arcelor PU18. Die Breite der Wand wurde so gewählt, dass an den Seitenrändern die Elektro-Osmose keinen nennenswerten Einfluss hatte. Das Ergebnis der Abbildung 11 zeigt folgende Konfiguration: 3 Anoden mit einem Abstand untereinander von jeweils 4 m und einer Entfernung zur Wand von 2 m; Einbindetiefe der Anode 6m; aufgebrauchte Spannung 240V entsprechend einer Feldstärke von 120 V/m.

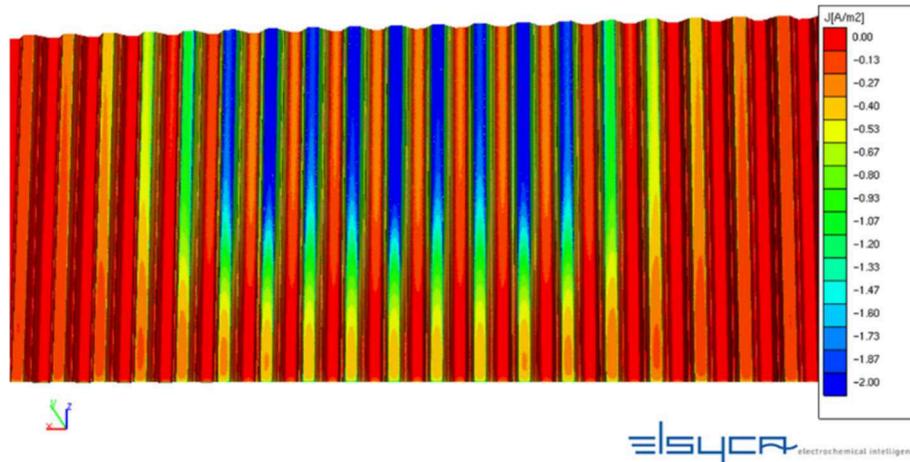


Abbildung 11: Numerische Simulation: Verteilung der Stromdichte J [A/m²].

Die numerischen Ergebnisse der Parameterstudie bildeten die Grundlage zur Aufstellung eines empirischen Bemessungsverfahrens zur Wahl der optimalen Konfiguration für die Anwendung in der Baupraxis. Das Verfahren wird in [Vre13] aufgestellt und mit Beispielen erläutert.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorgestellten Studie wurde untersucht, inwieweit die Anwendung von Elektro-Osmose eine Kraftreduzierung beim Herausziehen von Stahlspundbohlen mit sich bringt. Neben der Ermittlung von elektro-osmotischen Parameterwerten des verwendeten Tons in einer osmotischen Röhre wurden kleinmaßstäbliche Modellversuche im Labor durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine nennenswerte Reduzierung der erforderlichen Herausziehkraft. Die Wirkung der Elektro-Osmose wurde anschließend anhand von großmaßstäblichen Versuchen im Labor bestätigt. Mittels numerischer Simulation wurde eine Parameterstudie zur Ermittlung der optimalen Konfiguration bei Einsatz des Verfahrens in der Praxis durchgeführt. Die nächsten Schritte sehen eine in-situ-Versuchsreihe vor. Hierbei sind Sicherheitsaspekte im Zusammenhang mit dem elektrischen Stromfluss in den Bauteilen und dem Boden zu berücksichtigen.

Literatur

- [Alt75] ALTE, B.; BERGGREN, B.: *Elektroosmotisk smörjning av spont*. Stockholm, 1975.
- [Baa00] BAALEN, L. van; u. a.: *Applicability of electro-osmosis to reduce clay adherence in a TBM*. Int. Conf. on Geotechnical & Geological Engineering. Melbourne, 2000
- [But80] BUTTERFIELD, R.; JOHNSTON, I.W.: The influence of electro-osmosis on metallic piles in clay, *Géotechnique*, 30(1980), 1, S. 17-38
- [Cas83] CASAGRANDE, L.: Stabilization of soils by means of electro-osmosis. State-of-the art, *Journal of Boston Society of Civil Engineers* 69(1983), 2, S. 255-302
- [Mat08] MATHAY, G.: *Einfluss der Elektro-Osmose auf den Ziehvorgang bei Stahlspundbohlen*. Diplomarbeit am Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau, TU Kaiserslautern, 2008
- [Mit93] MITCHEL, J.K.: *Fundamentals of Soil Behaviour*, J. Wiley, New York, 1993
- [Sha83] SHAPIRO, A.P.; PROBSTEIN, R.F.: Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis, *Environmental Science & Technology*, 27(1983), 2, S. 283-291
- [Vre13] VRETTOS, C.; MERZ, K.; BECKER, A.; HIGGINS, K.; NELISSEN, G.; BOURDOUXHE, M.-P.; DA SILVA ARÊDE, L.; WALSH, M.; POOLE, A.: *Industrial Application of Electro-osmosis to Reduce Environmental Impact of Steel Sheet Piles via Reuse (INAREIS)*, Final Report, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, TG Steel 8, RFSR-CT-2009-00026, 2013