

Pfahlversuch Monitoring

Messung von Druck-, Zug- und Schwinddehnungen mit verteilter Faseroptik und Schwingensaitensensoren

Autor: Alessio Höttges Leitung: Prof. Dr. Carlo Rabaiotti
IBU Hochschule für Technik Rapperswil

1 Einführung

Die Passwangstrasse ist eine Verbindungsstrasse im Kanton Solothurn, welche die Gemeinde Mümliswil-Ramiswil und Erschwil verbindet. Aufgrund von Rutschbewegungen und Verschiebungen des Strassenkörpers werden im Sommer 2018 die Gesamtanierung und die Instandsetzung der Passwangstrasse und der Portale Nord-Süd des Passwangtunnels realisiert. Die Instandsetzung sieht den Bau von mehreren Lehnkonstruktionen auf Grossbohrpfählen und Mikropfählen vor. Zwei Pfähle wurden mit Faseroptischen- und Schwingensaitensensoren ausgestattet und durch einen statischen Druck- bzw. Zugversuch belastet.

2 Instrumentierung und Messtechnik

Die installierten Sensoren sind faseroptische Kabel des Typs «PCF» (Temperaturmessung) und «V9» (Dehnungsmessung) der Firma BRUGG, sowie Schwingensaitensensoren «VWSG» (Vibrating Wire and Strain Gauge) der Firma SISGEO. Die Messung der Dehnung mit den faseroptischen Kabeln erfolgte mit zwei unterschiedlichen Messverfahren «OBR» (Optical Back Reflectometer) und «BOTDA» (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer). OBR verwendet die Rayleigh-Streuung, BOTDA hingegen die Brillouin-Streuung, um die Dehnungs- und Temperaturänderungen abzuleiten [1].

Der Druckpfahl wurde mit vier V9-Kabeln (zwei Schlaufen) und zwei PCF-Kabeln (eine Schlaufe) ausgestattet, welche an den Längsseiten des Bewehrungskorb fixiert wurden (Abb. 1). Auf dem Bewehrungskorb wurden zudem paarweise zehn VWSG Sensoren in fünf unterschiedlichen Tiefen installiert (Abb. 2). Der Zugpfahl wurde nur mit Faseroptik ausgestattet.

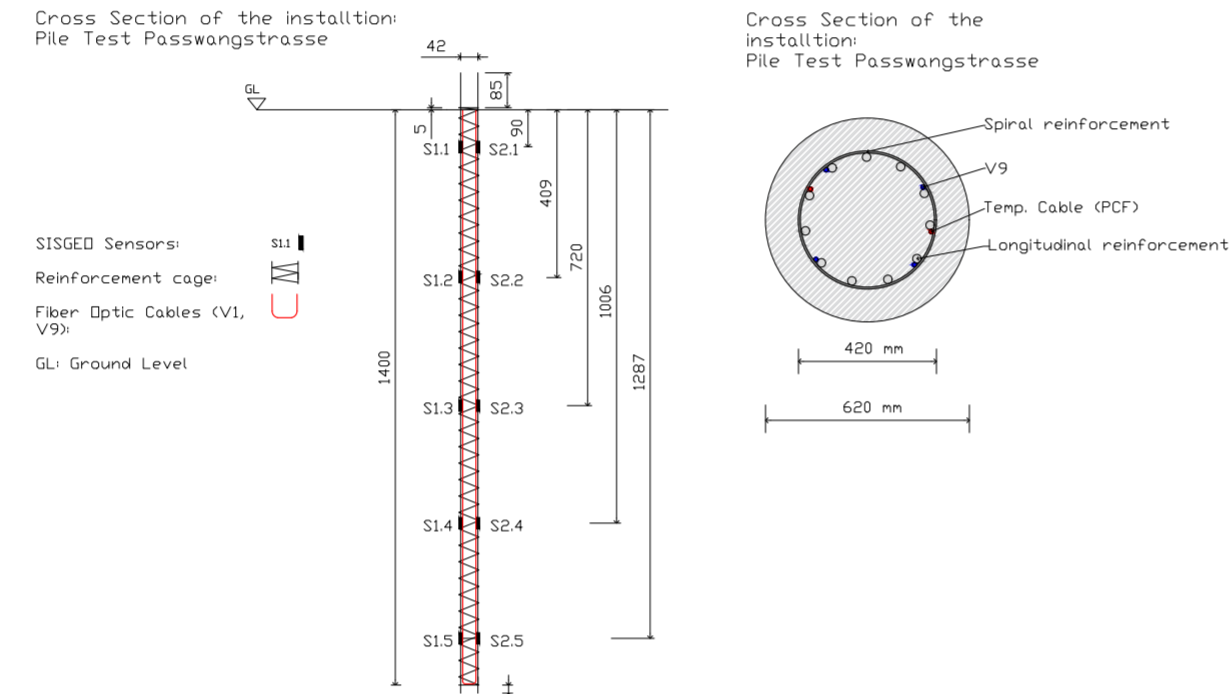


Abb. 1: Bewehrungskorb (Rot = Temperaturkabel PCF, Blau = Dehnungskabel V9)

Abb. 2: Lage der faseroptischen und VWSG Sensoren

3 Versuchsdurchführung

Der statische Pfahlversuch wurde mit einem Druckpfahl und zwei Reaktionspfählen (Durchmesser 62 cm) durchgeführt (Abb. 3). Die maximale Last betrug 2'500 kN. Die Pfähle haben eine Länge von ca. 14,5 m und stehen in einem Abstand von 2 m. Der Versuch wurde gemäss SIA 267 durchgeführt (Abb. 4) vom Fp ANKERPRÜFUNG DURRER.



Abb. 3: Sicht des Pfahlversuches im Feld

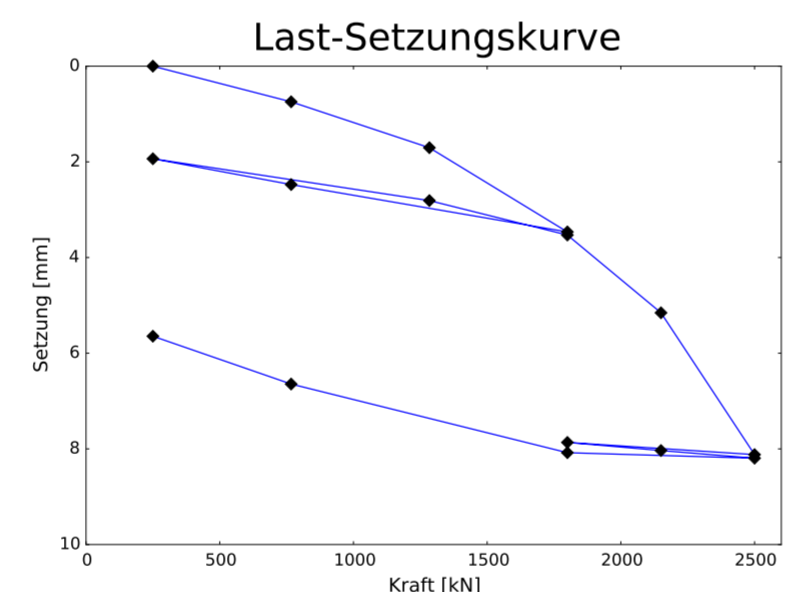


Abb. 4: Last-Setzung-Diagramm des Pfahlversuches

4 Resultate

Abb. 5 und 6 zeigen die Messung der Dehnungen während des Pfahlversuches (bei fünf Laststufen) in zwei Vertikalsegmenten (Links und Rechts) einer Schlaufe mit drei verschiedenen Messsystemen: OBR, BOTDA und VWSG. Die Resultate aus den drei Messsystemen stimmen sehr gut überein, obwohl das OBR eine feinere Auflösung hat. Aus den Resultaten ist die leicht exzentrische Belastung des Pfahles erkennbar. Abb. 7 zeigt die Entwicklung der Risse im Zugpfahl infolge zunehmender Zugbelastung ab dem Pfahlkopf. [2]

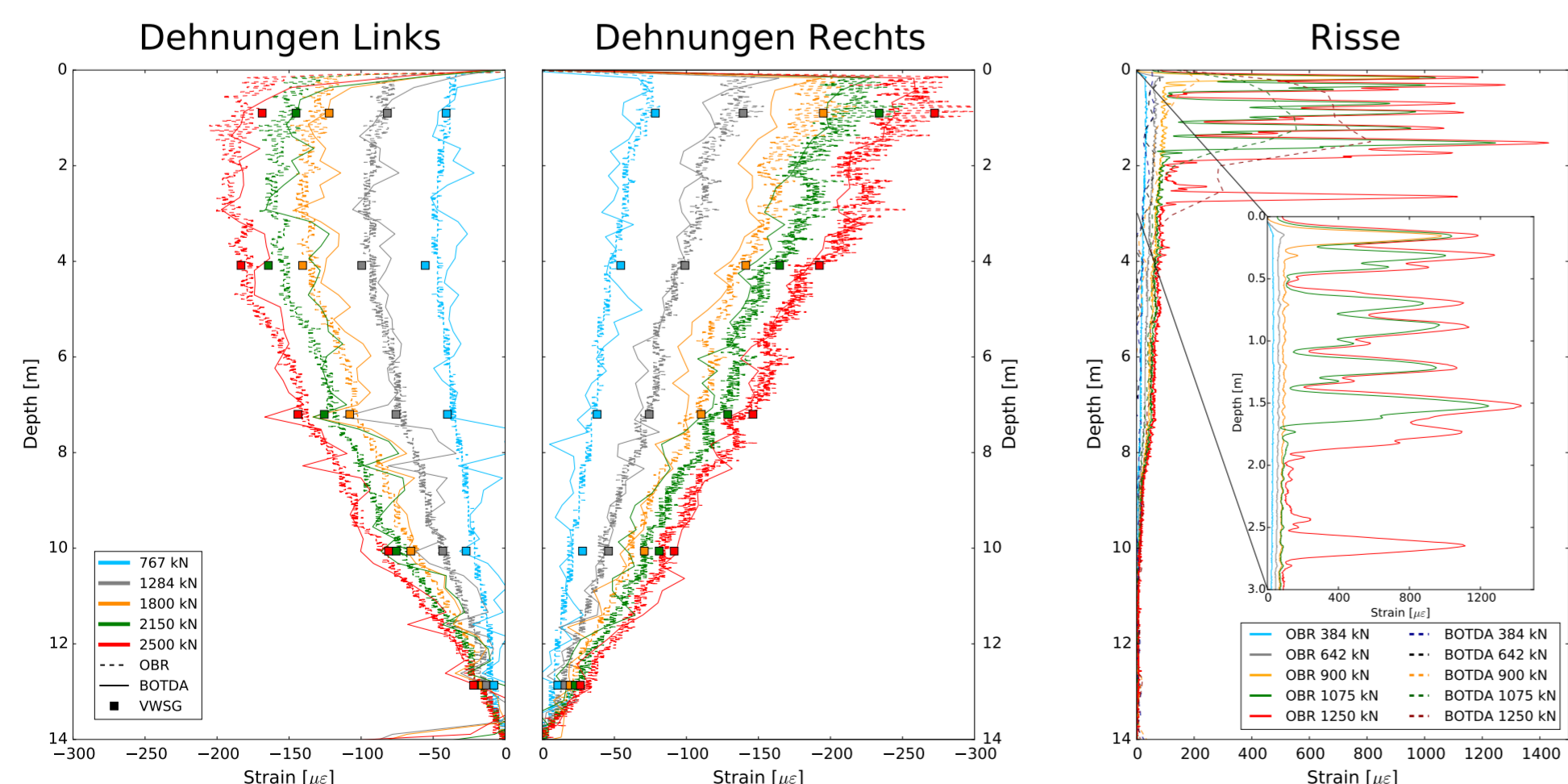


Abb. 5: Dehnungen Druckpfahl (L)

Abb. 6: Dehnungen Druckpfahl (R)

Abb. 7: Zugrisse im Zugpfahl

5 Interpretation und Diskussion

Das Schwinden des Betons im Pfahl ist in Abb. 8 dargestellt. Da die Abbindewärme die Messungen stark beeinflusst, werden die mit V9 und OBR Technologie gemessenen Dehnungen mit drei unterschiedlichen Methoden kompensiert: mit den Temperaturen aus dem PCF Kabel und aus den VWSG Sensoren, sowie mit dem Quervergleich zwischen den mit OBR und BOTDA gemessenen Dehnungen [1]. Die Kompensation der mechanisch bedingten Dehnung $\Delta\varepsilon$ infolge Temperatur ΔT erfolgte mit der Gleichung (1), wobei $\Delta\nu$ die gemessene Phasenverschiebung und C_ε bzw. C_T die linearen Konstanten des verwendeten Kabels sind [1].

$$\begin{pmatrix} \Delta\nu_{BOTDA} \\ \Delta\nu_{OBR} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\varepsilon,BOTDA} & C_{T,BOTDA} \\ C_{\varepsilon,OBR} & C_{T,OBR} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \Delta T = \frac{\Delta\nu_{BOTDA} \cdot C_{\varepsilon,OBR} - \Delta\nu_{OBR} \cdot C_{\varepsilon,BOTDA}}{C_{\varepsilon,OBR} \cdot C_{T,BOTDA} - C_{\varepsilon,BOTDA} \cdot C_{T,OBR}} \\ \Delta\varepsilon = \frac{\Delta\nu_{OBR} - C_{T,OBR} \cdot \Delta T}{C_{\varepsilon,OBR}} \end{cases} \quad (1)$$

Abb. 9 zeigt den Temperaturverlauf über die Zeit während des Abbindeprozesses für die verschiedenen Schwingensaitensensoren. Abb. 10 stellt den Temperaturverlauf in der Tiefe für verschiedenen Zeitfenster dar.

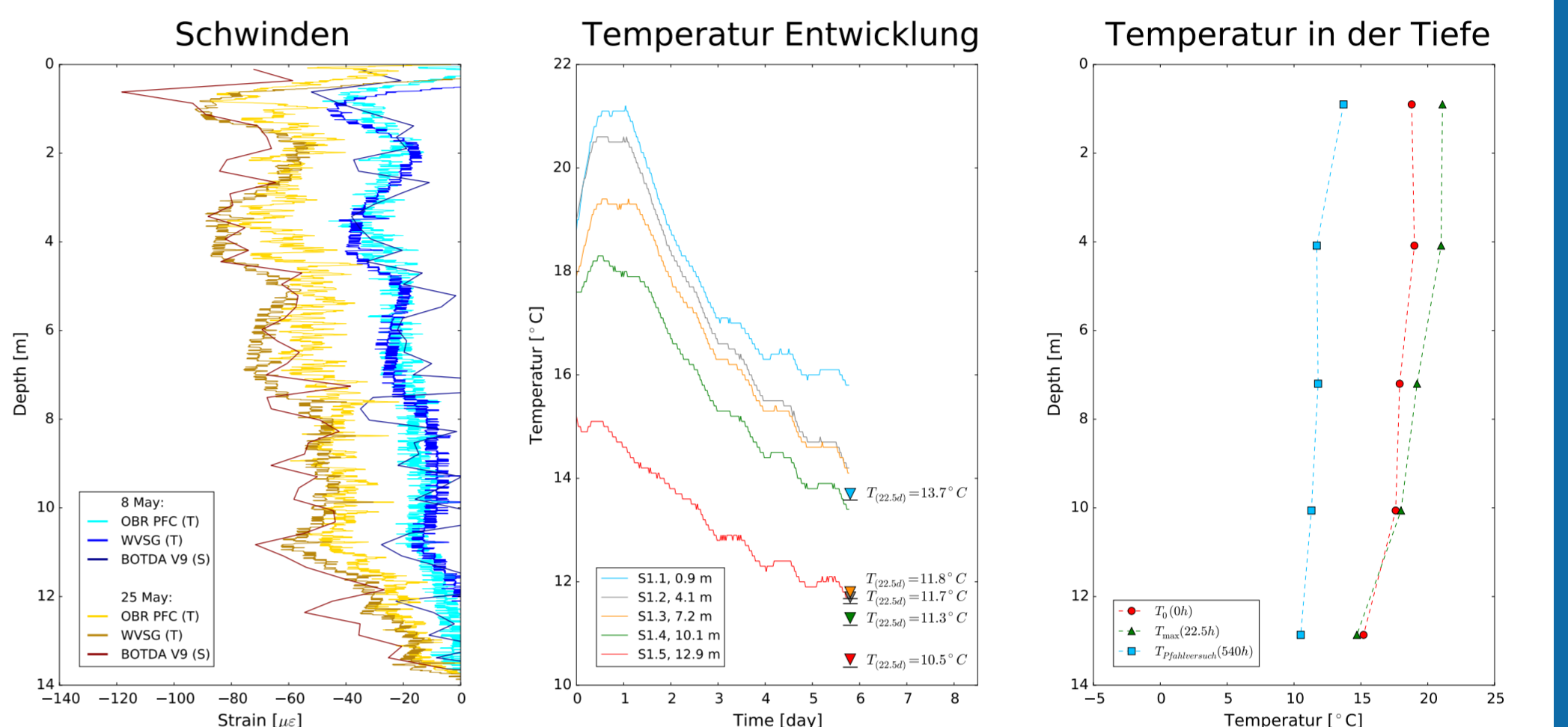


Abb. 8: Schwinddehnungen im Druckpfahl

Abb. 9: Entwicklung der Temperatur mit der Zeit

Abb. 10: Temperatur mit der Tiefe für verschiedenen Zeitfenster

Die Abb. 11 stellt ein vereinfachtes Schema der Situation während des statischen Pfahlversuches dar. Für die Berechnung der Mantelreibung (q_s) sowie des Spitzenwiderstands (q_b) nimmt man an, dass das Elastizitätsmodul (E_{Pile}) und die Fläche des Pfahles (A_{Pile}) unabhängig von der Tiefe sind [3]:

$$F(z) = E_{Pile} \cdot A_{Pile} \cdot \varepsilon(z) \iff q_s = \frac{\varepsilon(z) \cdot E_{Pile} A_{Pile}}{dz \cdot \pi D} \iff q_b = \frac{F(z=L)}{A_{Pile}} \quad (2)$$

Die aus den Dehnungen (Abb. 6) hergeleiteten Entwicklungen der Mantelreibung und der Setzungen während des Versuches sind in Abb. 12 bzw. Abb. 13 dargestellt. Während die Zunahme der Setzungen mit den Laststufen abnimmt, nimmt die Mantelreibung mit zunehmender Last zu. Der Reibungsverlauf ist stark unregelmässig, insbesondere in den oberen 10 m. Der Unterschied zwischen der gemessenen (Abb. 4) und der aus den Pfahldehnungen berechneten Setzung (Abb. 13) kann als Verschiebung der Pfahlspitze interpretiert werden.

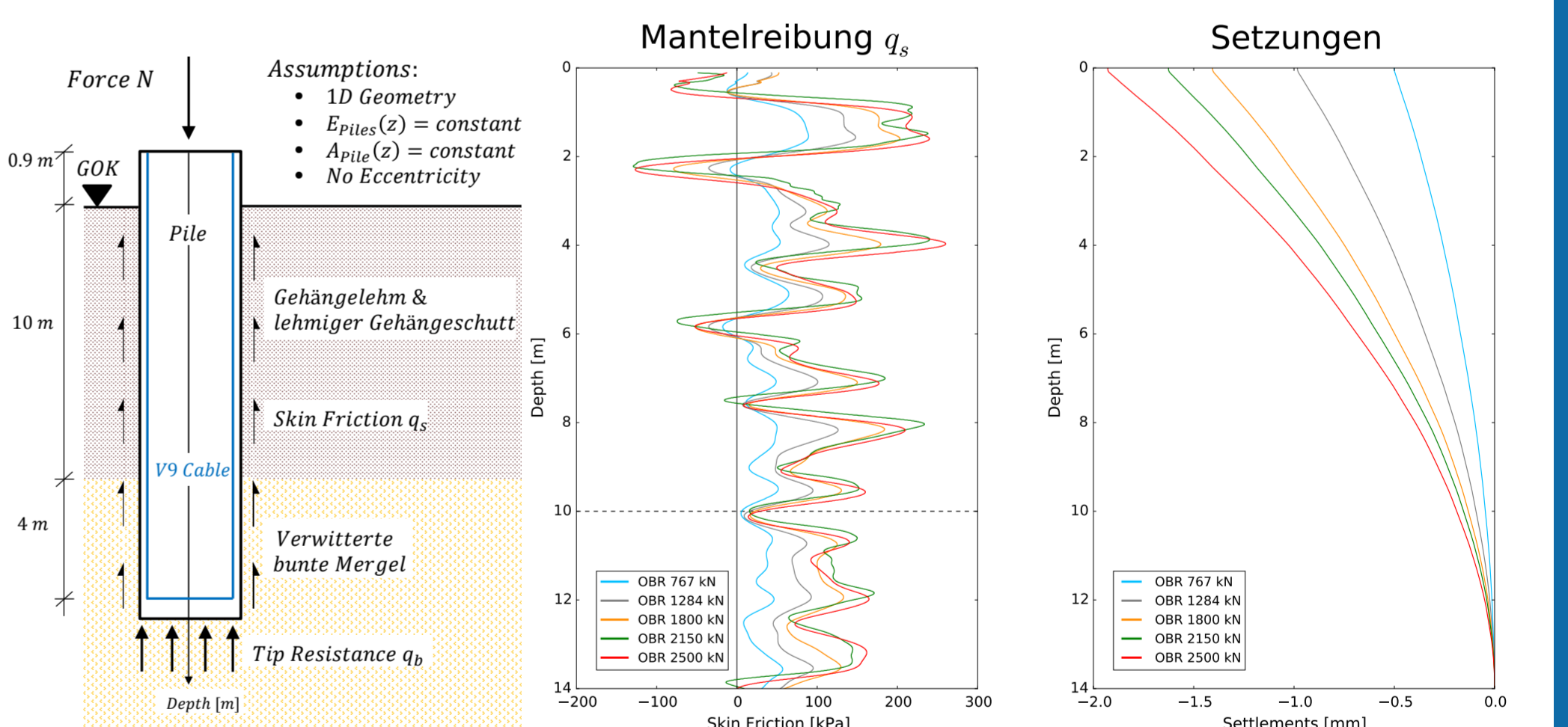


Abb. 11: Schema beim statischen Pfahlversuch

Abb. 12: Entwicklung der Mantelreibung des Druckpfahles

Abb. 13: Entwicklung der Setzungen des Druckpfahles

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die faseroptischen Messverfahren OBR und BOTDA sowie die VWSG Messungen der Druckdehnungen im Pfahl während des Versuches korrelieren punktweise nahezu perfekt miteinander. Die Faseroptik, insbesondere mit der Technologie OBR, ermöglicht es, eine verteilte, hoch aufgelöste und genaue Messung der Schwinddehnungen, der Zugrisse und der Schubabtragung im Pfahl genau zu erfassen. Auf dieser Basis können der nichtlineare Pfahlbeton und die Bodeneigenschaften in einem nächsten Schritt quantitativ rückgerechnet werden.

7 Referenzen

[1] Dominik Hauswirth. A Study of the Novel Approaches to Soil Displacement Monitoring Using Distributed Fiber Optic Strain Sensing. PhD thesis, ETH Zurich, 2015.
[2] Carlo Rabaiotti and Cornelia Malecki. No access in situ testing of barrette foundations for a high retaining wall in molasse rock. *Geotechnique*, 17:144, 2018.
[3] Silvia Bersan, Otello Bergamo, Luca Palmieri, Luca Schenato, and Paolo Simonini. Distributed strain measurements in a cfa pile using high spatial resolution fibre optic sensors. *Engineering Structures*, 160:554-565, 2018.