

**Kalibrierungsergebnisse Porenwasserdruck**

**Gerät**

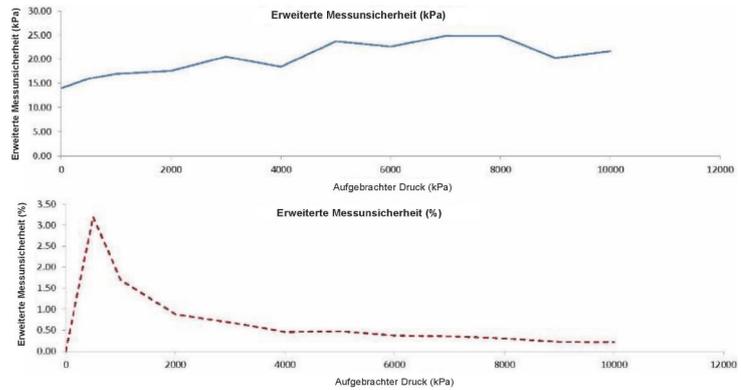
Hersteller SCJKT  
Typ COMP100-20  
Seriennummer 775241

**Sensor**

Hersteller SCJKT  
Typ Kompression  
Kalibrierbereich 0 MPa bis 10 MPa

**Referenz**

Hersteller BHM  
Typ P20  
Seriennummer 1003  
Messunsicherheit 0,000 04 P + 7,000 00



Aufgebrachter Druck	Messung 1. Serie	Messung 2. Serie	Messung 3. Serie	Messung 4. Serie
---------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

Pr kPa	X1 kPa	X2' kPa	X3 kPa	X4' kPa
0	0,61		-0,31	
500	497,77		501,92	
1 000	989,99		997,28	
2 000	1 985,61		1 991,21	
3 000	2 995,87		2 985,77	
4 000	3 988,36		3 983,56	
5 000	4 980,61		4 971,11	
6 000	5 975,19		5 986,99	
7 000	6 973,91		6 966,01	
8 000	7 977,10		7 982,50	
9 000	8 965,96		8 971,65	
10 000	9 956,35		9 964,63	
10 000		9 958,64		9 978,63
9 000		8 975,96		8 981,65
8 000		7 973,10		7 991,50
7 000		6 978,91		6 987,01
6 000		5 985,19		5 981,99
5 000		4 986,61		4 982,11
4 000		3 978,36		3 990,56
3 000		2 988,87		2 991,77
2 000		1 988,61		1 994,21
1 000		989,99		995,28
500		495,77		499,52
0		-0,73		-0,68

**Messunsicherheitsbilanz**

Referenzdruck	Standardmessunsicherheit Kalibrierdruck	Wiederholpräzision Standardmessunsicherheit	Auflösung Standardmessunsicherheit	Nullabweichung Standardmessunsicherheit	Interpolation Standardmessunsicherheit	Reversibilität Standardmessunsicherheit	Kombinierte Standardmessunsicherheit Kalibrierung	Erweiterte Messunsicherheit	Erweiterte Messunsicherheit	Messunsicherheit für Klasse der Drucksondierspitze	Erzielter Spitzenwiderstand Intervall Klasse der Drucksondierspitze
$P$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_u$	$U_u$	$W_u$	$U_{uclass}$	
kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	%	kPa	
0	7,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	7,01	14,02	0,00	0,41	1
500	7,02	2,40	0,41	0,07	2,62	1,27	7,98	15,97	3,19	3,80	1
1 000	7,04	4,24	0,41	0,13	1,86	0,58	8,46	16,92	1,69	4,69	1
2 000	7,09	3,25	0,41	0,27	3,62	1,74	8,79	17,58	0,88	5,19	1
3 000	7,13	5,85	0,41	0,40	2,29	3,76	10,24	20,48	0,68	7,34	1
4 000	7,18	2,78	0,41	0,54	0,89	4,92	9,21	18,41	0,46	5,76	1
5 000	7,22	5,51	0,41	0,67	5,77	4,93	11,87	23,73	0,47	9,41	1
6 000	7,27	6,83	0,41	0,80	2,97	4,35	11,32	22,63	0,38	8,67	1
7 000	7,31	4,58	0,41	0,94	4,72	7,54	12,44	24,87	0,36	10,06	1
8 000	7,36	3,12	0,41	1,07	8,64	3,76	12,41	24,82	0,31	9,99	1
9 000	7,40	3,30	0,41	1,21	1,09	5,79	10,10	20,21	0,22	6,88	1
10 000	7,45	4,80	0,41	1,34	3,77	4,72	10,81	21,63	0,22	7,84	1

**Interpolation**

Interpolationsgleichungen  $y = a_1 x + a_0$

$a_1$	$a_0$	kPa
0,997	-1,043	

**Kalibrierungsergebnisse Porenwasserdruck**

**Gerät**

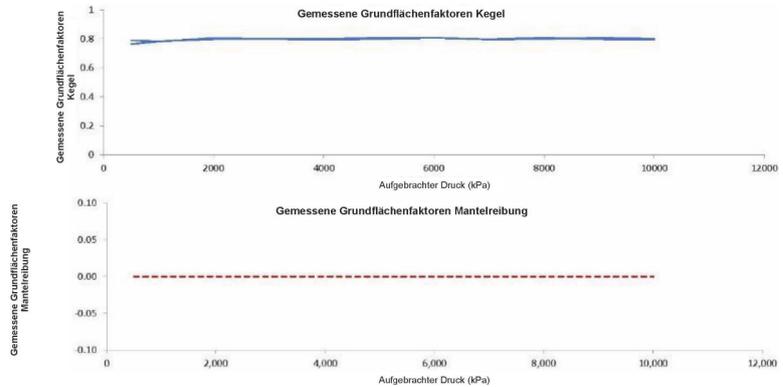
Hersteller SCJKT  
Typ COMP100-20  
Seriennummer 775241

**Sensor**

Hersteller SCJKT  
Typ PP10  
Kalibrierbereich 0 MPa bis 10 MPa

**Referenz**

Hersteller BHM  
Typ P20  
Seriennummer 1003  
Messunsicherheit 0,000 04 P + 7,000 00



<b>Grundflächenfaktor Kegel</b>	<b>0,80</b>
<b>Grundflächenfaktor Mantelreibung</b>	<b>0,00</b>

Aufgebrachter Druck	Messung 1. Serie	Messung 2. Serie	Messung 3. Serie	Messung 4. Serie	Durchschnitt
---------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	--------------

P in kPa	Gemessene Grundflächenfaktoren Kegel				Durchschnitt
0					
500	0,76		0,76		0,76
1 000	0,78		0,78		0,78
2 000	0,80		0,81		0,80
3 000	0,80		0,80		0,80
4 000	0,80		0,80		0,80
5 000	0,80		0,81		0,81
6 000	0,80		0,81		0,81
7 000	0,80		0,79		0,79
8 000	0,80		0,79		0,80
9 000	0,80		0,81		0,81
10 000	0,80		0,80		0,80
10 000		0,80		0,79	0,79
9 000		0,80		0,79	0,80
8 000		0,80		0,81	0,81
7 000		0,80		0,79	0,80
6 000		0,80		0,81	0,80
5 000		0,80		0,80	0,80
4 000		0,80		0,79	0,79
3 000		0,79		0,80	0,80
2 000		0,79		0,80	0,80
1 000		0,79		0,77	0,78
500		0,79		0,78	0,79
0					

P in kPa	Gemessene Grundflächenfaktoren Mantelreibung				Durchschnitt
0					
500	0,000		0,000		0,000
1 000	0,000		0,000		0,000
2 000	0,000		0,000		0,000
3 000	0,000		0,000		0,000
4 000	0,000		0,000		0,000
5 000	0,000		0,000		0,000
6 000	0,000		0,000		0,000
7 000	0,000		0,000		0,000
8 000	0,000		0,000		0,000
9 000	0,000		0,000		0,000
10 000	0,000		0,000		0,000
10 000		0,000		0,000	0,000
9 000		0,000		0,000	0,000
8 000		0,000		0,000	0,000
7 000		0,000		0,000	0,000
6 000		0,000		0,000	0,000
5 000		0,000		0,000	0,000
4 000		0,000		0,000	0,000
3 000		0,000		0,000	0,000
2 000		0,000		0,000	0,000
1 000		0,000		0,000	0,000
500		0,000		0,000	0,000
0					

Kalibrierungsergebnisse Neigung

Gerät

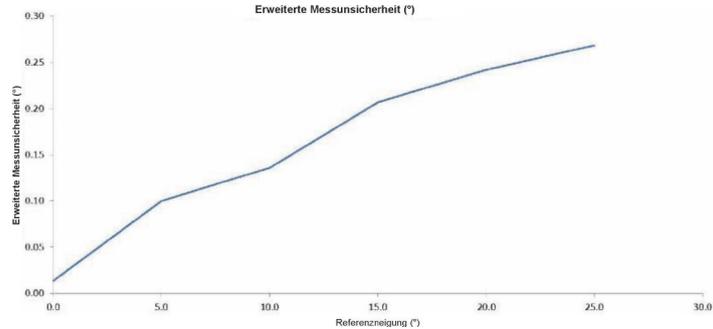
Hersteller SCJKT  
Typ COMP100-20  
Seriennummer 775241

Sensor

Hersteller SCJKT  
Typ Inc 30  
Kalibrierbereich 0° bis 25°

Referenz

Hersteller BHM  
Typ INC50  
Seriennummer 651458  
Messunsicherheit 0,004 72 I + 0,004 17



Aufgebrachte Neigung Position i0 (°) Position i90 (°)

$i_r$ (°)	$i_0$ (°)	$i_{90}$ (°)
0	0,0	0,0
5	5,1	5,2
10	10,2	10,3
15	15,2	15,4
20	20,3	20,4

Referenzneigung	Standardmessunsicherheit Referenzneigung	Vergleichpräzision Standardmessunsicherheit	Auflösung Standardmessunsicherheit	Interpolation Standardmessunsicherheit	Kombinierte Standardmessunsicherheit Inklinometer	Erweiterte Messunsicherheit
$l$ (°)	$u_1$ (°)	$u_2$ (°)	$u_3$ (°)	$u_4$ (°)	$u_{inc}$ (°)	$U_{inc}$ (°)
0,00	0,004 2	0,003 5	0,004 1	0,000 0	0,006 8	0,013 6
5,00	0,027 8	0,034 5	0,004 1	0,022 7	0,049 9	0,099 9
10,00	0,051 4	0,034 5	0,004 1	0,027 6	0,067 9	0,135 8
15,00	0,075 0	0,069 1	0,004 1	0,016 3	0,103 3	0,206 7
20,00	0,098 6	0,034 5	0,004 1	0,060 6	0,120 9	0,241 7
25,00	0,122 2	0,035 4	0,004 1	0,042 4	0,134 2	0,268 3

Interpolation

Interpolationsgleichungen  $y = a_1 x + a_0$

$a_1$	$a_0$	[°]
1,019	0,032	

## Anhang D (normativ)

### Berechnung der Sondiertiefe

Für die Prüfkategorien A, B und C ist die Tiefe von Drucksondierungen im Hinblick auf die Neigung mit folgender Gleichung zu korrigieren:

$$Z = \int_0^l C_{\text{inc}} dl \quad (\text{D.1})$$

Dabei ist

$z$  die Sondiertiefe, in m;

$l$  die Sondierlänge, in m;

$C_{\text{inc}}$  der Korrekturfaktor für den Einfluss der Neigung der Drucksondierspitze relativ zur vertikalen Achse.

Gleichungen zur Berechnung des Korrekturfaktors  $C_{\text{inc}}$  zum Einfluss der Neigung der Drucksondierspitze relativ zur vertikalen Achse auf die Sondiertiefe:

a) für ein nicht gerichtetes Inklinometer:

$$C_{\text{inc}} = \cos\alpha \quad (\text{D.2})$$

Dabei ist

$\alpha$  der gemessene Gesamtwinkel zwischen der vertikalen Achse und der Achse der Drucksondierspitze, in Grad.

b) bei einem biaxialen Inklinometer:

$$C_{\text{inc}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta_1 + \tan^2 \beta_2}} \quad (\text{D.3})$$

Dabei ist

$\beta_1$  der Winkel zwischen der vertikalen Achse und der Projektion der Achse der Drucksondierspitze auf eine vertikale Ebene, in Grad;

$\beta_2$  der Winkel zwischen der vertikalen Achse und der Projektion der Achse der Drucksondierspitze auf eine vertikale Ebene, die senkrecht zur Ebene des Winkels  $\beta_1$  steht, in Grad.

## Anhang E (informativ)

### Korrektur der Mantelreibung im Hinblick auf den Wasserdruck

Die korrigierte Mantelreibung kann bestimmt werden aus:

$$f_t = f_s - \frac{(u_2 \times A_{sb} - u_3 \times A_{st})}{A_s} \quad (\text{E.1})$$

Dabei ist

- $f_t$  die korrigierte Mantelreibung, in MPa;
- $f_s$  die gemessene Mantelreibung, in MPa;
- $A_s$  die Fläche der Reibungshülse, in mm<sup>2</sup>;
- $A_{sb}$  die Querschnittsfläche des unteren Teiles der Reibungshülse, in mm<sup>2</sup>;
- $A_{st}$  die Querschnittsfläche des oberen Teiles der Reibungshülse, in mm<sup>2</sup>;
- $u_2$  der Porenwasserdruck, der zwischen der Reibungshülse und dem Kegel gemessen wird, in MPa;
- $u_3$  der Porenwasserdruck, der oberhalb der Reibungshülse gemessen wird, in MPa.

Diese Korrekturen erfordern Werte für  $u_2$  und  $u_3$ , und vorzugsweise sollten beide Parameter gemessen werden, wenn diese Korrektur vorzunehmen ist.

ANMERKUNG 1  $u_3$  kann aus  $u_2$  unter Anwendung der Korrelationen im SGI-Report 42 [8] abgeschätzt werden, dabei ist  $u_3 \approx 0,7x(u_2 - u_0) + u_0 \approx 0,7xu_2$ .

Diese Korrekturen sind am wichtigsten in feinkörnigen Böden, in denen die Porenwasserdruckdifferenz während der Sondierung erheblich sein kann. Zu Auswertungs- und Klassifizierungszwecken sollten korrigierte Werte der Prüfergebnisse verwendet werden.

## Anhang F (informativ)

### Vorbereitung der Piezospitze

#### F.1 Sättigung

Bei Versuchen in gesättigten Böden wird üblicherweise entlüftetes, destilliertes Wasser benutzt. Wenn die Drucksondierung in ungesättigten Böden, trockenen Krusten und dilativen Böden (wie z. B. dichtgelagerten Sanden) ausgeführt wird, sollte der Filter mit entlüftetem Glyzerin oder einer vergleichbaren Flüssigkeit gesättigt werden, was die Beibehaltung der Sättigung während des Versuches erleichtert. Bei Verwendung von entlüftetem Wasser sollten die Filter mindestens 15 min lang gekocht werden. Der Filter sollte im Wasser abkühlen, bevor er in einem abgedichteten Behälter aufbewahrt wird. Es sollte auch eine größere Menge entlüfteten Wassers vorbereitet werden. Dieses Wasser ist bei der Montage vor der Verwendung nötig. Bei einigen Filtertypen (z. B. HDPE) könnte das Kochen unter Umständen nicht geeignet sein. Bei Verwendung von Glyzerin werden die Filter direkt in die Flüssigkeit gelegt und ungefähr 24 h mit einem Vakuum beaufschlagt. Eine größere Menge von Flüssigkeit sollte in der gleichen Art und Weise behandelt werden und in einem abgedichteten Behälter aufbewahrt werden. Die Kammer des Messwertaufnehmers wird üblicherweise mit der gleichen Flüssigkeit gesättigt wie die für den Filter. Dies kann durch direktes Einspritzen der Flüssigkeit in die Kammer oder durch Behandlung einer zerlegten Drucksondierspitze in einer Vakuumkammer erfolgen. Das Vakuum sollte solange angewandt werden, bis keine Luftblasen mehr aus der Sondierspitze steigen (ungefähr 15 min bis 30 min). Bei der endgültigen Montage von Filter und Dichtung sollte die Sondierspitze in der Sättigungsflüssigkeit eingetaucht sein. Nach der Montage sollte die Befestigung des Filters überprüft werden. Die Höhe des Filters sollte ausreichend sein, sodass der Filter nicht locker sitzt, aber klein genug, sodass sich der Filter mit den Fingerspitzen drehen lässt. Dadurch werden übermäßige Spannungen in der Nahtstelle um den Filter verhindert und gleichzeitig Einflüsse auf die Messungen reduziert. Nach Montage des Filters ist es vorteilhaft, über das Filterelement eine Gummimembran zu ziehen, die zerreißt, wenn die Sondierspitze mit dem Boden in Kontakt kommt. Alternativen sind auch möglich.

ANMERKUNG Während der Sättigung und der Montage der Gummimembran werden auf die Drucksondierspitze kleine Drücke abgegeben, sodass die Sensoren von Null abweichende Werte anzeigen können.

#### F.2 Schlitzfilter

In diesem System wird der Porenwasserdruck durch ein offenes System mit einem 0,3-mm-Schlitz unmittelbar hinter dem kegelförmigen Teil gemessen. Aus diesem Grund wird das poröse Filterelement zwischen dem Boden und der Druckkammer überflüssig. Der Schlitz steht über mehrere Kanäle mit der Druckkammer in Verbindung. Entlüftetes Wasser, Frostschutzflüssigkeit oder eine andere Flüssigkeit kann zur Sättigung der Druckkammer verwendet werden, während die Kanäle mit Gelatine oder einer vergleichbaren Flüssigkeit gesättigt werden.

Die Verwendung eines Schlitzfilters kann die für die Vorbereitung der Drucksondierspitze benötigte Zeit verkürzen. Außerdem behält dieses Porenwasserdrucksystem seine Sättigung besser bei, wenn ungesättigte Bodenzonen passiert werden. Ein Drucksensor, der konventionellen Piezospitzen mit porösen Filtern ähnelt, zeichnet die Veränderungen des Druckes im gesättigten System auf. Die Anforderungen an eine ausreichende Sättigung sind die gleichen, wie bei anderen Drucksondierspitzen, sodass eine ausreichende Reaktion des Porenwasserdruckes bei der Sondierung erhalten wird.

## **Anhang G** (informativ)

### **Reibungsminderungstechniken**

#### **G.1 Allgemeines**

Die Reibung entlang der Sondierstangen kann vermindert werden, um die Eindringfähigkeit eines Sondiergeräts zu erhöhen. Typischerweise wird eine örtliche und symmetrische Vergrößerung des Durchmessers der Sondierstangen zur Verringerung der Reibung entlang der Sondierstangen eingesetzt.

Die Injektion von Wasser oder biologisch abbaubaren Bohrspülungen an separaten Punkten entlang der Sondierstangen wird als effektive Reibungsminderungsmethode in bestimmten Bodenprofilen betrachtet. Der Höchstdruck und die Menge des hinzugegebenen Schmierstoffs kann aufgezeichnet werden, da hierdurch unter Umständen zusätzliche Informationen hinsichtlich des Bodenverhaltens gewonnen werden könnten.

## Literaturhinweise

- [1] ISO 14688-2, *Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of soil — Part 2: Principles for a classification*
- [2] ISO 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*
- [3] ISO 22475-1, *Geotechnical investigation and testing — Sampling by drilling and excavation methods and groundwater measurements — Part 1: Technical execution*
- [4] ISO 22476-12, *Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 12: Mechanical cone penetration test (CPTM)*
- [5] ISO 19901-8, *Petroleum and natural gas industries — Specific requirements for offshore structures — Part 8: Marine soil investigations*
- [6] EN 1997-1, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 1: Allgemeine Regeln*
- [7] EN 1997-2, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik — Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds*
- [8] WECC DOC. 19-1990, *Guidelines for the expression of the uncertainty of measurement in calibrations*
- [9] DEJONG J. T., R. A. Jaeger, R. W. Boulanger, M. F. Randolph, et al. Variable penetration rate cone testing for characterization of intermediate soils. in R.Q. COUTINHO and P.W. MAYNE eds. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2013, p. 25-42.
- [10] T. LUNNE, P.K. ROBERTSON and J.J.M. POWELL, *Cone penetration testing in geotechnical practice*, Blackie Academic/Routledge Publishing, New York, 1997
- [11] SGI REPORT 42, R. Larsson and M. Mulabdic, *Piezococone tests in clay*, 1991
- [12] Post M.L., Nebbeling H. *Uncertainties in Cone Penetration Testing*, Proc. International Symposium on Cone Penetration Testing CPT'95, Sweden, 1995