

**Versuchsserie zum  
Austrocknungsverhalten  
von Sand und thermisch stabilisierendem  
RSS Flüssigboden® TS**

**nach**

**RAL-GZ 507**

bei einer Temperierung (Oberflächentemperatur  
an der Kontaktfläche der Wärmequelle zum  
Bettungsmaterial) von 90 °C.

Projekt: Grundlagenforschung

	Ausgabe 1	Revision 1	Revision 2
Datum	12.07.2017		
Dokumentennummer	GF.17.056.2017621V0.7		
Projektnummer intern	17-056/008-17		
Projektnummer extern	zu 70019952		
Ersteller	J. Detjens, O. Stolzenburg		
Übersetzer			
Prüfer			
Unterschrift			
abgenommen durch	O. Stolzenburg		
Freigabe Unterschrift			

<b>Ansprechpartner</b>		
Forschungsinstitut für Flüssigboden GmbH (FiFB)	Jürgen Detjens	(+49) 341 244 69 11 j.detjens@fi-fb.de
	Olaf Stolzenburg	(+49) 177 959 3041 o.stolzenburg@fi-fb.de

## Inhalt

I.	Abkürzungsverzeichnis .....	I
II.	Abbildungsverzeichnis .....	II
III.	Tabellenverzeichnis .....	III
1.	Veranlassung .....	1
2.	Versuchsprinzip .....	2
3.	Versuchsabmaße .....	5
4.	Grundmaterial .....	6
4.1.	RSS Flüssigboden TS - Herstellung .....	7
5.	Zyklischer Temperaturverlauf an der Messsonde (Heiztemperatur der Wärmequelle): .....	8
6.	Temperaturverlauf (Rohroberfläche): .....	10
7.	Eigenfeuchte Ausgangsmaterial in Mörtelwanne .....	15
8.	Eigenfeuchte Überdeckung RSS Flüssigboden TS .....	16
9.	Ausbau .....	17
10.	RSS Flüssigboden TS - Prüfdaten in Anlehnung an DIN 18136 .....	20
11.	Auswertung: .....	23
11.1.	Oberflächentemperatur der Versuchsbehältnisse (Kunststoffrohre) .....	23
11.2.	Temperatur im RSS Flüssigboden TS/Sand .....	24
11.3.	Eigenfeuchte im RSS Flüssigboden TS/Sand .....	25
12.	Übersicht Versuchsdaten .....	31

## I. Abkürzungsverzeichnis

BCE	Beschleuniger auf Zementbasis
CEM I 42,5 R	Zementart nach DIN EN 187-1
EF	Eigenfeuchte
Eu	Elastizitätsmodul bei maximaler Tangentensteigung nach DIN 18136
Eu50	Elastizitätsmodul bei 50 % Druckspannung nach DIN 18136
Eu30	Elastizitätsmodul bei 30 % Druckspannung nach DIN 18136
FB	RSS Flüssigboden TS
FBC	Flüssigboden Compound (Zusatzstoff für RSS Flüssigboden)
FBC-TS	spezielles Flüssigboden Compound zur Herstellung von thermisch stabilisierendem RSS Flüssigboden auf Tonbasis
FiFB	Forschungsinstitut für Flüssigboden GmbH
ha	Anfangshöhe eines Prüfkörpers vor der Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit nach DIN 18136
mf	feuchte Masse einer Probe
mt	trockene Masse einer Probe
qu	einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136
RSS Flüssigboden	Flüssigboden mit definierten Zuschlagstoffen; nach Rezepturen des FiFB oder der Logic Logistic Engineering GmbH
RSS Flüssigboden TS	spezieller Flüssigboden zur thermischen Stabilisierung von warmgehenden Leitungen, hier GIL Rohre und Elektrokabel, mit definierten Zuschlagstoffen; nach Rezepturen des FiFB oder der Logic Logistic Engineering GmbH
RW	Name des Baustoffprüfers (Herr Raymond Wänke)
SE	enggestufter Sand nach DIN 18196
UP 25/50	Universalprüfpresse mit 25 bzw. 50 kN Kraftaufnahme, weggesteuert
$\varepsilon$	Stauchung nach DIN 18136
$\Delta h$	Höhenänderung eines Prüfkörpers vor/nach der Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit nach DIN 18136

## II. **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Skizzierter Versuchsaufbau .....	3
Abbildung 2: Fotoserie zum Versuchsaufbau .....	4
Abbildung 3: Grenzen/Übergänge Sand SE zu Flüssigboden.....	5
Abbildung 4: Ausgangsmaterial SE .....	6
Abbildung 5: Ausbreitmaß und Lagerungszylinder.....	8
Abbildung 6: Formel Eigenfeuchtebestimmung .....	8
Abbildung 7: Fotoserie zur Temperierung.....	9
Abbildung 8: Temperaturzyklus am Temperaturfühler der Heizquelle.....	9
Abbildung 9: optimierter Temperaturzyklus am Temperaturfühler der Heizquelle am 11.05.17 .....	10
Abbildung 10: optimierter Temperaturzyklus am Temperaturfühler der Heizquelle am 12.05.17 .....	10
Abbildung 11: Messprinzip Oberflächentemperatur an den Kanalrohren .....	11
Abbildung 12: 8.5.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 10,6 °C.....	12
Abbildung 13: 17.5.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 20 °C.....	12
Abbildung 14: 23.5.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 22,4 °C.....	13
Abbildung 15: 31.5.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 23,2 °C.....	13
Abbildung 16: 08.06.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 23 °C.....	14
Abbildung 17: 12.06.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 23,6 °C.....	14
Abbildung 18: Wärmebilder Versuch außen am Rohr (12.06.17) gemessen mittels Seek Compact Thermal Imaging Camera.....	15
Abbildung 19: Versuchs-Draufsicht (Eigenfeuchtebestimmung Sandüberdeckung über Flüssigboden/Sand) .....	16
Abbildung 20: Ausbau Fotodokumentation (14.06.17) .....	17
Abbildung 21: Ausbau Fotodokumentation (14.06.17) .....	18
Abbildung 22: Ausbau 14.06.17 Fotodokumentation optische Austrocknung Sand/Feuchte- zustand Flüssigboden .....	19
Abbildung 23: Weiterlaufen des Versuchs bis 19.06.17 mit verklebten Kernbohrungen.....	19
Abbildung 24: Wärmebildaufnahmen mit Fotos, 19.06.17 und Rückbau.....	20
Abbildung 25: Druckstauchungsdiagramm Probe 17-056 a. ....	22
Abbildung 26: Druckstauchungsdiagramm Probe 17-056 b. ....	22
Abbildung 27: Ausbau (14.06.17) Temperaturmesspunkte (in Kernlöchern) Messsonde 2cm im FB vor Rohrkante. ....	25
Abbildung 28: Ausbau (14.06.17) Eigenfeuchte Kernproben .....	26

---

Abbildung 29: Foto mit Aufbohrungen – trockenen Sand im Bereich der Bettung der  
Wärmequelle und optisch noch feuchten Sand je 10 cm unter und über der Bettungszone  
zeigend .....27

**III. Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Rezepturdaten des verbauten Flüssigboden .....7  
Tabelle 2: Prüfwerte Eigenfeuchteregulierung mittels Mörtelwanne .....15  
Tabelle 3: Eigenfeuchte an den oberen Rohrenden des Versuchsaufbaus .....16  
Tabelle 4: Prüfdaten des verbauten Flüssigboden (Lagerung in Ausstechzylindern bei  
Raumtemperatur) .....21  
Tabelle 5: Daten Eigenfeuchte Kernproben; Ausbau (14.06.17) .....26  
Tabelle 6: Übersicht Versuchsdaten .....31

## 1. **Veranlassung**

Mit der Entwicklung und Etablierung des Flüssigbodenverfahrens (auch RSS Flüssigbodenverfahren genannt), beginnend 1997/1998, waren und sind bei wichtigen, neuen Anwendungen umfangreiche Grundlagenforschungen verbunden. Für den Anwendungsfall des thermisch stabilisierenden RSS Flüssigbodens (RSS Flüssigboden TS) ist das Materialverhalten von RSS Flüssigboden bei verschiedenen, speziell hohen Temperaturen eines Wärmeemittenten (GIL Rohre und Erdkabel) zu klären. Thermisch stabilisierender RSS Flüssigboden TS soll insbesondere eine möglichst hohe Wärmeableitung, also einen maximierten Wärmestrom, auch als Wärmeleistung bezeichnet, gewährleisten. Das RSS Flüssigbodenverfahren ermöglicht es, trotz unterschiedlicher Eigenschaften der Ausgangsböden, durch die gezielte Beeinflussung relevanter Materialeigenschaften über die Rezeptur, die Fähigkeit der Ableitung von Wärmemengen, also die Wärmeleistung des RSS Flüssigbodens, an die Anforderungen der jeweiligen Trasse anzupassen.

Die Prüfung der zeitlichen Konstanz der Eigenschaft Feuchtegehalt bzw. Eigenfeuchte bei definierter Temperierung ist Sinn dieses Versuchs. Insbesondere soll der Versuch möglichst diejenige Einbausituation vor Ort simulieren, die den worst case Fall (90°C Oberflächentemperatur des Wärmeemittenten) für den Einsatz von GIL Rohren, Projekt „Dunford Bridge-UK“ entspricht.

RSS Flüssigboden TS ist kein Produkt im Sinne einer Herstellung aus immer gleichem Ausgangsmaterial, sondern das Ergebnis der Anwendung des Flüssigbodenverfahrens unter Verwendung der unterschiedlichsten Arten der Ausgangsböden mit seitens der Böden unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten und anderen veränderlichen Eigenschaften.

Für den durchzuführenden Versuch wird die Nachweisführung ausbleibender Austrocknung des RSS Flüssigbodens TS auf eine Zusammensetzung, also eine Rezeptur beschränkt

## 2. Versuchsprinzip

Mittels Heizquelle wird eine ca. 80 cm mächtige Schicht aus RSS Flüssigboden TS dauerhaft, über 47 Tage mit hohen Wärmemengen beaufschlagt. Die Heizquelle ist ein  $\frac{3}{4}$  Zoll verzinktes handelsübliches Stahlrohr. Das Stahlrohr wird mittels „Glas Fibre Heating Tape“ über einen „Digital Heating Controller“ auf eine Oberflächentemperatur von ca. 90 °C temperiert (Abb. 2). Die Temperaturregelung findet über einen Temperatursensor im Stahlrohr statt. Die Temperaturaufzeichnung erfolgt in festgelegten Abständen. Auf eine ergänzende Fehlerbetrachtung der verhältnismäßig geringen Temperaturschwankungen wird aus Aufwandsgründen verzichtet.

Die Heizquelle wird aktiviert, nachdem der RSS Flüssigboden TS ein Alter von 28 Tagen erreicht hat und die Anlagerungsprozesse des Zugabewassers einen dauerhaft stabilen Zustand sicher erreicht haben. Die Befüllung der Kanalrohre (OMNIPLAST Kanalrohr PVC-U DN 160) mit RSS Flüssigboden TS ist am 28.03.17 erfolgt. Als gut vergleichbarer Ausgangsboden mit ursprünglich schlechter Wasserretention dient ein handelsüblicher Sand SE (siehe Sieblinie aus Abb. 4).

Die Auswahl des Sandes erfolgte unter der Annahme, dass der Kapillardruck eines Sandes eher gering ist und wir hiermit eine Worst-Case-Betrachtung durchführen. Die eingesetzte Rezeptur hat eine für dieses Material und diese Anwendung als typisch anzusehende Zusammensetzung. Im vorliegenden Versuch wurde die Compoundsorte „FBC-TS 3“ verwendet. Um einen Einsatz unter Einbaubedingungen zu simulieren, wird der Flüssigboden in ein 2 m langes Kanalrohr verfüllt, welches senkrecht in eine mit dem gleichen Ausgangsmaterial gefüllte Mörtelwanne gesteckt wird (Abb. 1) und in dem der Aufbau der Bodenschichten samt Bettungsschicht des späteren Grabens nachgestellt werden kann.

Die Mörtelwanne wurde halb mit dem Ausgangsmaterial gefüllt und händisch verdichtet. Auf eine Dichtebestimmung des verbauten Materials wurde beim Einbau verzichtet. Auf das händisch verdichtete Material wurden drei Kanalrohre gestellt und zur Stabilitätserhöhung an einer Wand arretiert. Danach wurden zwei der drei Rohre ca. 40 cm mit dem Ausgangsmaterial verfüllt. Dieses wurde erneut händisch verdichtet. Hierauf erfolgte die Einfüllung einer ca. 80 cm mächtigen Schicht aus RSS Flüssigboden TS.

Über den Flüssigboden wurden die Rohre 24 Stunden nach der Verfüllung mit dem RSS Flüssigboden TS bis ca. 10 cm unter Rohroberkante mit dem Ausgangsmaterial verfüllt. Auch hier

erfolgte die Verdichtung händisch, ohne Dichte- bzw. Verdichtungsprüfung. Das dritte Rohr wurde komplett mit dem Ausgangsmaterial, also ohne RSS Flüssigboden TS verfüllt.

Um eine definierte Eigenfeuchte des Umgebungsbodens zu simulieren, wurde das Ausgangsmaterial auf eine Eigenfeuchte von ca. 5% gebracht. Es ist davon auszugehen, dass unter den klimatischen Verhältnissen Mitteleuropas eine Eigenfeuchte (EF) von 5% einen Minimalwert darstellt, im vorliegenden Fall somit eine Worst-Case-Betrachtung erfolgt.

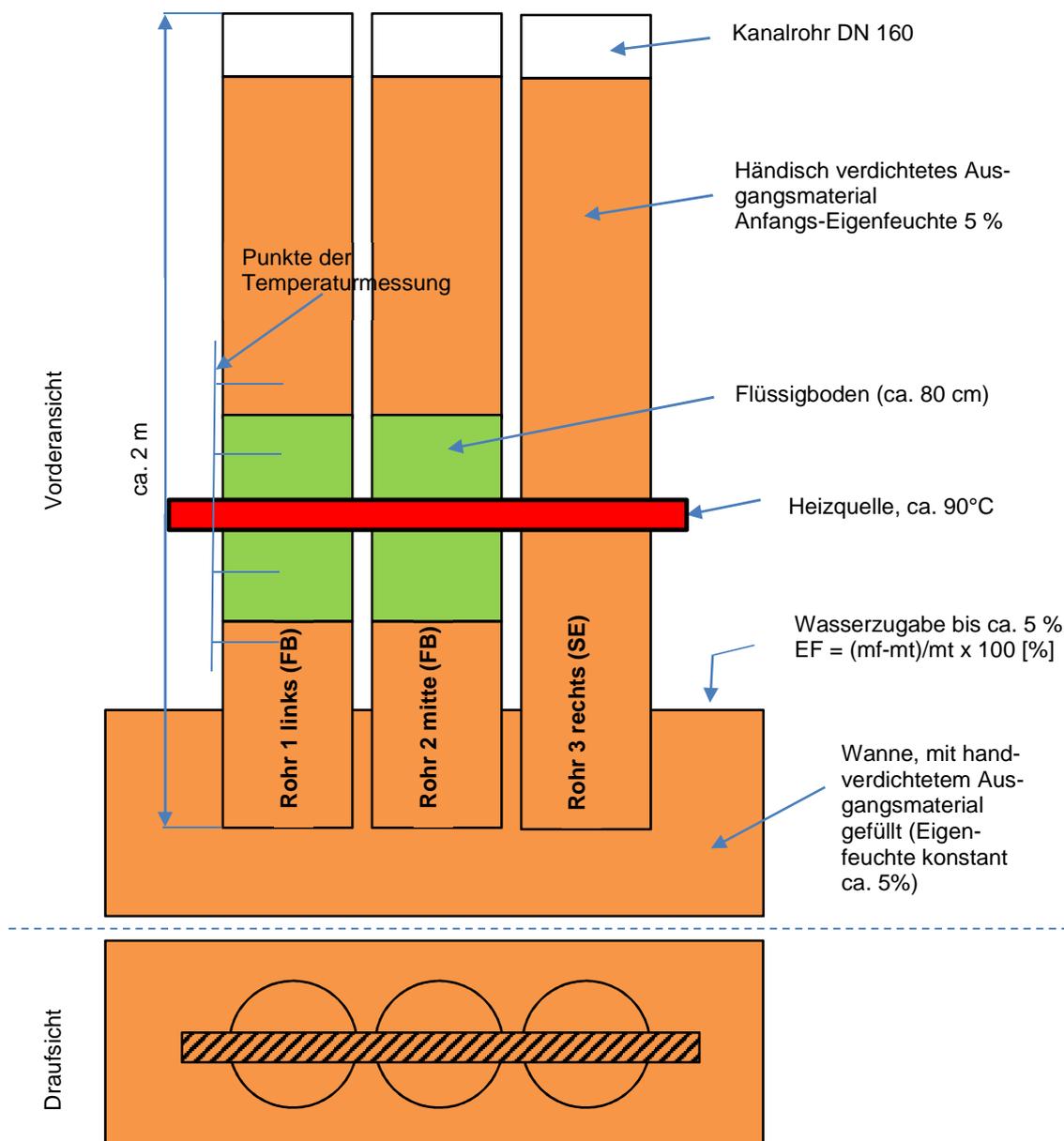


Abbildung 1: Skizzierter Versuchsaufbau

Um die Eigenfeuchte, also auch das Wasserdargebot für den RSS Flüssigboden TS und den eingebauten Sand konstant zu halten, wird die Eigenfeuchte des Ausgangsmaterials über die Mörtelwanne am Boden der Rohre reguliert.

In einem definierten Turnus wird die Eigenfeuchte des Ausgangsmaterials in der Mörtelwanne geprüft und ggf. Wasser hinzugefügt, bis die minimale Eigenfeuchte von 5% erreicht wird.



Abbildung 2: Fotoserie zum Versuchsaufbau

### 3. Versuchsabmaße

Bei der Bemessung des Versuchsaufbaus haben wir uns auf die wichtigsten Abmaße eines Rohr- bzw. Kabelgrabens beim Aufbau der Bodenschichten beschränkt. Zwecks Messung der tatsächlichen Flüssigboden-Füllhöhen wurden die Kanalrohre mittels Winkelschleifer nach Beendigung des Versuchs aufgetrennt (Abb. 3) und anschließend wieder luftdicht verschlossen.

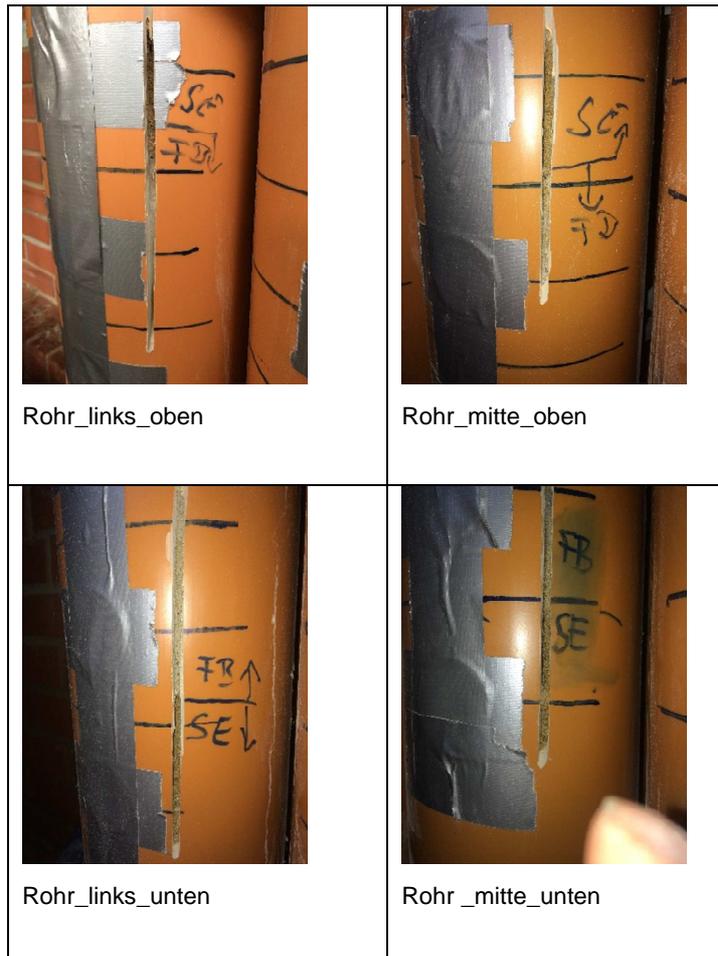


Abbildung 3: Grenzen/Übergänge Sand SE zu Flüssigboden

Sand in der Mörtelwanne:

Höhe: 20 cm

Breite x Tiefe (oben): 62cm x 36cm

Breite x Tiefe (unten): 57cm x 31cm

„Rohr 1 links (FB)“:

Mächtigkeit RSS Flüssigboden TS: 80 cm.

RSS Flüssigboden TS: Abstand Mitte Heizquelle (Nullpunkt) nach unten: 33 cm

RSS Flüssigboden TS: Abstand Mitte Heizquelle (Nullpunkt) nach oben: 47 cm

Abstand Mitte Heizquelle zur Oberfläche Sand in der Bodenwanne: 70 cm

Höhe Sand über RSS Flüssigboden TS: 70 cm

Einstecktiefe Kanalrohr im Sand der Mörtelwanne: 11 cm

„Rohr 2 mitte (FB)“:

Mächtigkeit RSS Flüssigboden TS: 81 cm.

RSS Flüssigboden TS: Abstand Mitte Heizquelle (Nullpunkt) nach unten: 35 cm

RSS Flüssigboden TS: Abstand Mitte Heizquelle (Nullpunkt) nach oben: 46 cm

Abstand Mitte Heizquelle zur Oberfläche Sand in der Bodenwanne: 70 cm

Höhe Sand über RSS Flüssigboden TS: 71 cm

Einstecktiefe Kanalrohr im Sand der Mörtelwanne: 11 cm

„Rohr 3 rechts (SE)“:

Höhe Sand über RSS Flüssigboden TS: 186 cm

Einstecktiefe Kanalrohr im Sand der Mörtelwanne: 11 cm

#### 4. Grundmaterial

Das Ausgangsmaterial für den Versuch ist ein enggestufter Quarzsand. Aus diesem Quarzsand wird durch eine definierte Zugabe von hinsichtlich seines Hydratationsverlaufes und seiner Reaktivität geeignetem Zement, RSS FBC TS und Wasser nach einem definierten Verfahren RSS Flüssigboden TS hergestellt.



Abbildung 4: Ausgangsmaterial SE

Bettungs- und Vergleichsmaterial zum RSS Flüssigboden TS ist ebenfalls dieses Grundmaterial. Die Auswahl des Sandes erfolgte unter der worst case Annahme, dass ein enggestufter

Sand sehr geringe Bindungskräfte für Wasseranlagerungen hat. Die Kapillarkräfte für das „Ansaugen des Wassers“ aus der im Versuch genutzten, mit Sand gefüllten Wanne, sollten minimal sein. Die natürliche Eigenfeuchte eines Sandes ist im Vergleich zu anderen Bodenarten eher gering.

#### 4.1. RSS Flüssigboden TS - Herstellung

Für den Versuch wurde eine nach vorliegenden Langzeiterfahrungen für das Grundmaterial als funktional geeignet anzusehende Rezeptur genutzt. Als Zielwerte des, mit der Rezeptur herzustellenden Flüssigbodens, haben wir eine Tagfähigkeit ( $EV_2$ )  $> 45 \text{ MN/m}^2$ , eine einaxiale Druckfestigkeit  $q_u = 0,1 - 0,3 \text{ N/mm}^2$  sowie eine Wärmeleitfähigkeit  $> 1,5 \text{ W/m}^*\text{K}$  vorgegeben.

Als typisches Ausbreitmaß und technologisch relevanter Zielwert wurden 55 cm gewählt (Abb. 5). Auf eine externe, zusätzliche Prüfung der Wärmeleitfähigkeit, der Reibkräfte und der Tragfähigkeit wurde aus Kostengründen verzichtet, was jedoch jederzeit bei Bedarf nachgeholt werden kann. Als Beschleuniger wurde ein für diese Anwendung typischer Zement CEM I, 42,5 R eingesetzt.

Tabelle 1: Rezepturdaten des verbauten Flüssigboden

Grundmaterial/trocken	1535 kg/m <sup>3</sup>
RSS FBC-TS	rezepturtypisch
BCE: CEM I 42,5 R	rezepturtypisch
Gesamtwasser (inkl. Eigenfeuchte)	391 kg/m <sup>3</sup>
Ausbreitmaß	55 cm

Die Compoundsorte ist eine, für eine maximale Wärmeableitung erforderliche: FBC-TS 3. Die Herstellung des RSS Flüssigboden TS erfolgte händisch mittels Collor Mix Rührwerk. Parallel zum in den Rohren verbrachten RSS Flüssigboden TS wurde RSS Flüssigboden TS in die standardmäßig verwendeten Ausstechzylinder (Höhe 120 mm, Innendurchmesser 96 mm) mit Kunststoff-Verschlusskappen verfüllt (Abb. 5). Die Prüfkörperlagerung erfolgt wie üblich, luftdicht verschlossen, bei Zimmertemperaturen zwischen 20 und 22 °C.



Ausbreitmaß RSS Flüssigboden

Prüfkörperlagerung, Vergleichsprobe

Abbildung 5: Ausbreitmaß und Lagerungszyylinder

Nach Versuchsende wurde die Eigenfeuchte des RSS Flüssigboden TS sowohl an den „Rohrproben“ aus dem Versuchsaufbau als auch an den in den Ausstechzylindern gelagerten Prüfkörpern bestimmt. Die Werte werden verglichen und ausgewertet.

$$EF [\%] = \frac{\text{Masse feucht} - \text{Masse trocken}}{\text{Masse trocken}} \times 100\%$$

Die Trocknung des Flüssigbodens erfolgt bei 105 °C im Trockenschrank über 24 Stunden.

Abbildung 6: Formel Eigenfeuchtebestimmung

## 5. Zyklischer Temperaturverlauf an der Messsonde (Heiztemperatur der Wärmequelle):

Als Heizquellenummantelung diente ein 60 cm langes verzinktes ¾ Zoll Stahlrohr. In das Stahlrohr wurde ein 61 cm langes Glasfaser-Heizband (HT95508 Glass Fibre Heating Tape) eingeführt. Dieses wurde kontinuierlich mittels MC810B Digital Heating Controller beheizt. Der Temperatursensor wurde am Position „Rohr 1 links (FB) mittig im Stahlrohr platziert.



Anschluss der Heizquelle

Detail Anschluss der Heizquelle, noch ohne Baustahl im Zinkrohr

Temperatur Controller, noch ohne Baustahl im Zinkrohr. Aufheizung ist aus (Leuchte ist aus), trotzdem steigt die Temperatur noch an.

Abbildung 7: Fotoserie zur Temperierung

Die Zieltemperatur am Temperaturfühler betrug 90 °C. Infolge der Hysterese der Steuerung der Heizquelle wurde der Bereich des Messfühlers zu Versuchsbeginn auf bis zu 94 °C aufgeheizt und bei Abkühlung auf 77 °C erfolgte eine erneute Zuschaltung der Heizquelle. Dieser Heiz-Abkühlungszyklus wurde am 11.05.17 optimiert. s. Aufzeichnungen

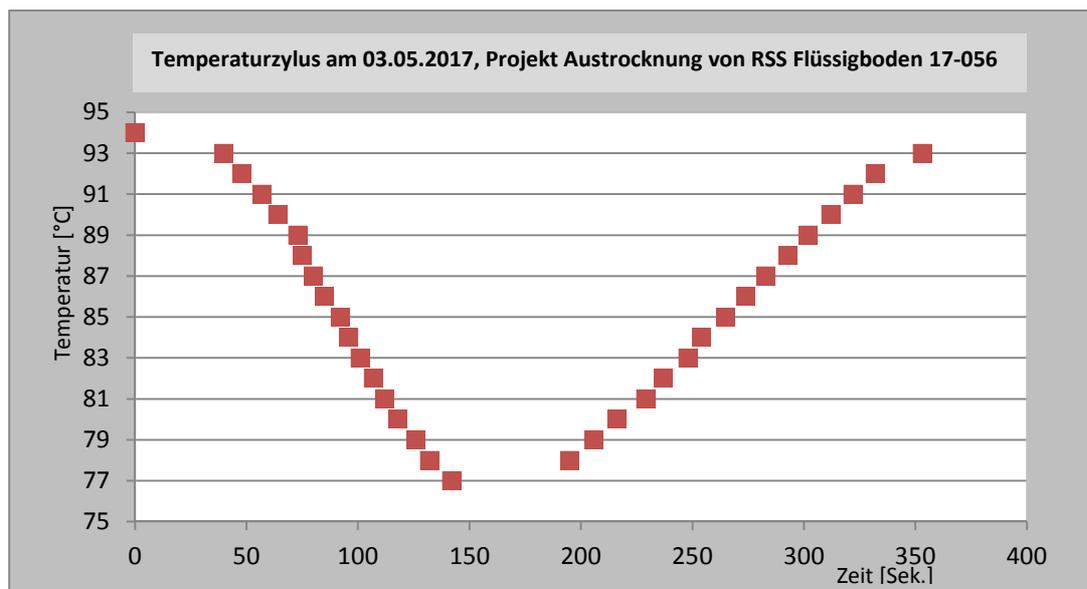


Abbildung 8: Temperaturzyklus am Temperaturfühler der Heizquelle

Der Einbau eines Baustahls in das ¾ Zoll Stahlrohr mit leichtem Anpressdruck auf das Heizband optimierte den Heizkreislauf. Die Schalthysterese am Temperaturfühler lag jetzt zwischen 83°C und 89 °C, gemessen am 11.05.17 und 12.05.17.

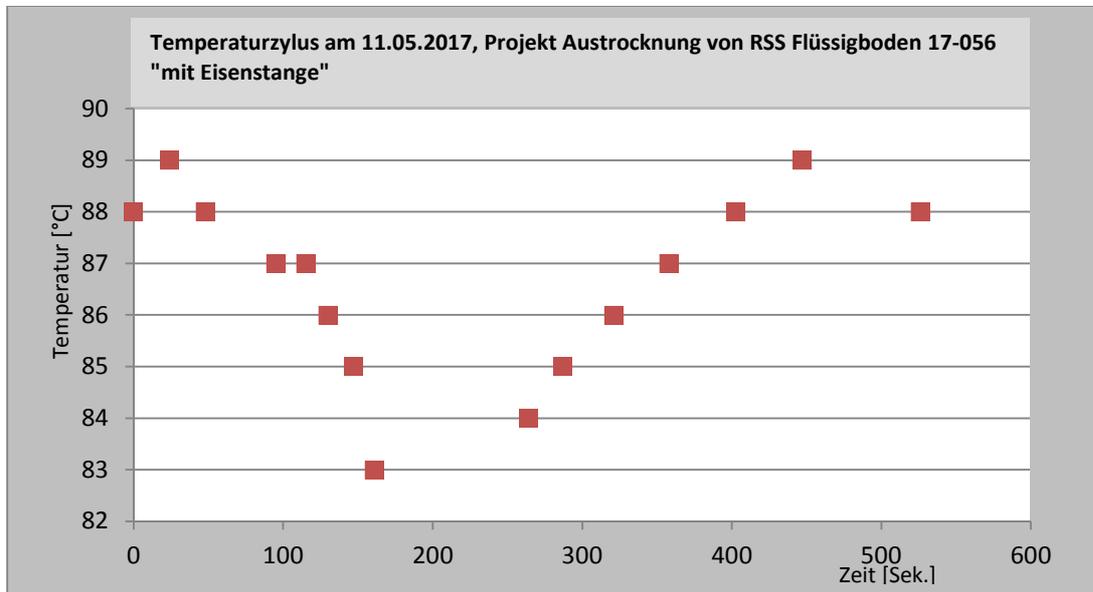


Abbildung 9: optimierter Temperaturzyklus am Temperaturfühler der Heizquelle am 11.05.17

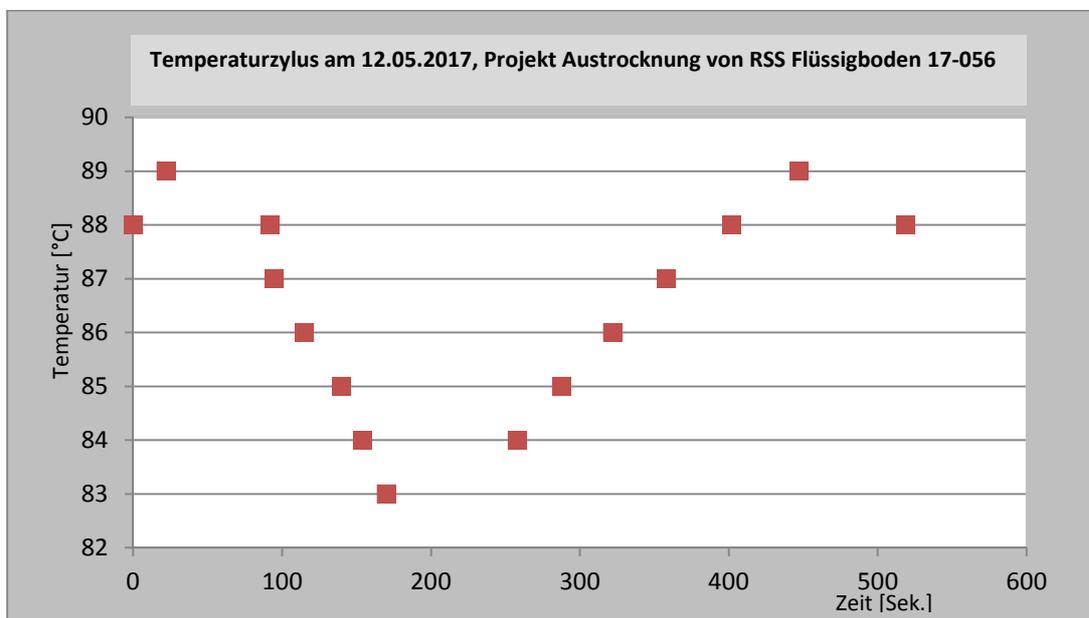


Abbildung 10: optimierter Temperaturzyklus am Temperaturfühler der Heizquelle am 12.05.17

## 6. Temperaturverlauf (Rohroberfläche):

Trotz Einflusses der niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Kanalrohres wurde mehrmals die Oberflächentemperaturmessung an einem Messfeldraster der Kanalrohre durchgeführt (Abb. 11).

Das dabei eingesetzte Messgerät war das LTM 413 Infrarot-Temperaturmessgerät. Es wurde ein Rohrabstand von 30 cm gewählt. Die Position der Heizquelle ist für das jeweilige Kanalrohr der Punkt 0. Nach unten gerichtete Messpunkte haben ein negatives Vorzeichen, nach oben gerichtete Messpunkte haben jeweils ein positives Vorzeichen.



Abbildung 11: Messprinzip Oberflächentemperatur an den Kanalrohren

Die Messergebnisse an den Messpunkten der Rohroberflächen sind nicht mit den Temperaturen im Sand oder im RSS Flüssigboden TS gleichzusetzen. Temperatureinflüsse durch die wechselnde Außentemperatur und heterogene Abkühlungseffekte durch den Bodenkontakt an einem Rohrende sind signifikant und werden im Rahmen der Dokumentationen aufgezeichnet. Die Temperaturmessungen an den Rohroberflächen wurden insbesondere durchgeführt, um Temperaturunterschiede zwischen RSS Flüssigboden TS und Sand sowie unerwartete Ereignisse zu erfassen. Zur Visualisierung der Oberflächentemperatur (Abb. 18 und 24) wurde eine Wärmebildkamera eingesetzt.

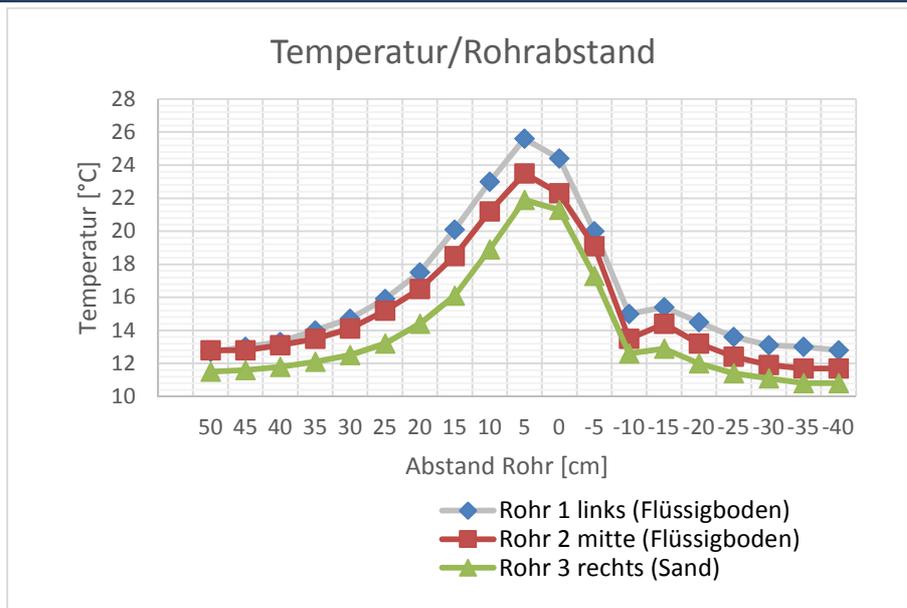


Abbildung 12: 8.5.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 10,6 °C

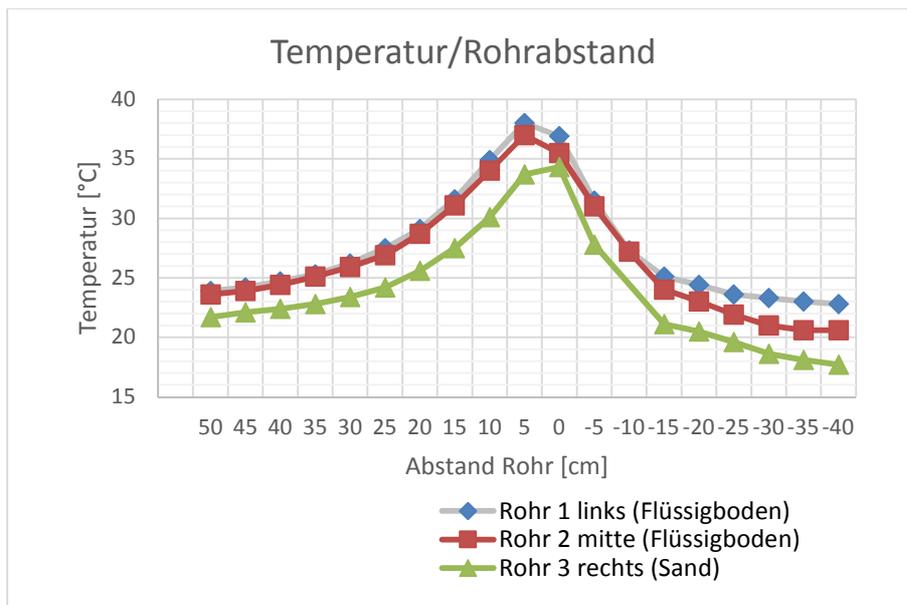


Abbildung 13: 17.5.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 20 °C

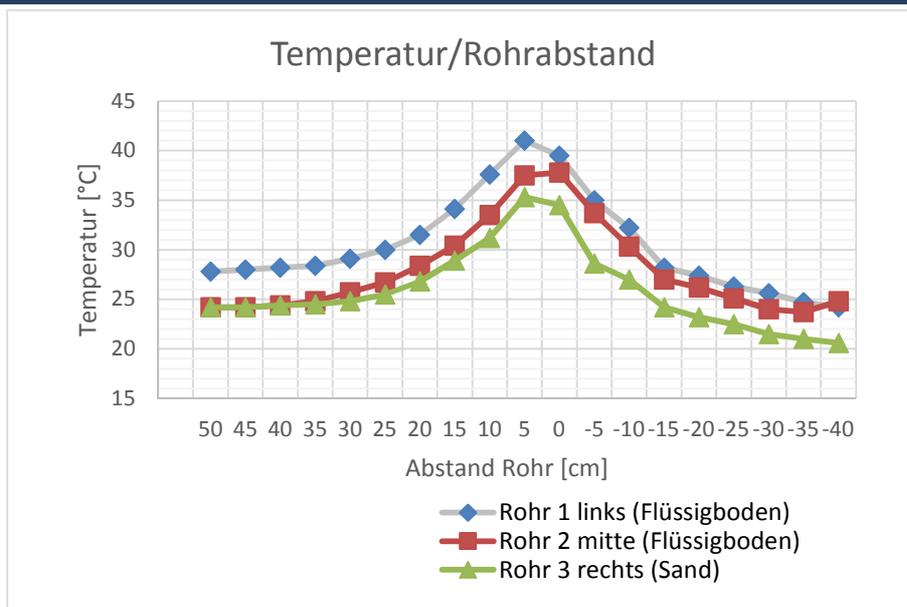


Abbildung 14: 23.5.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 22,4 °C

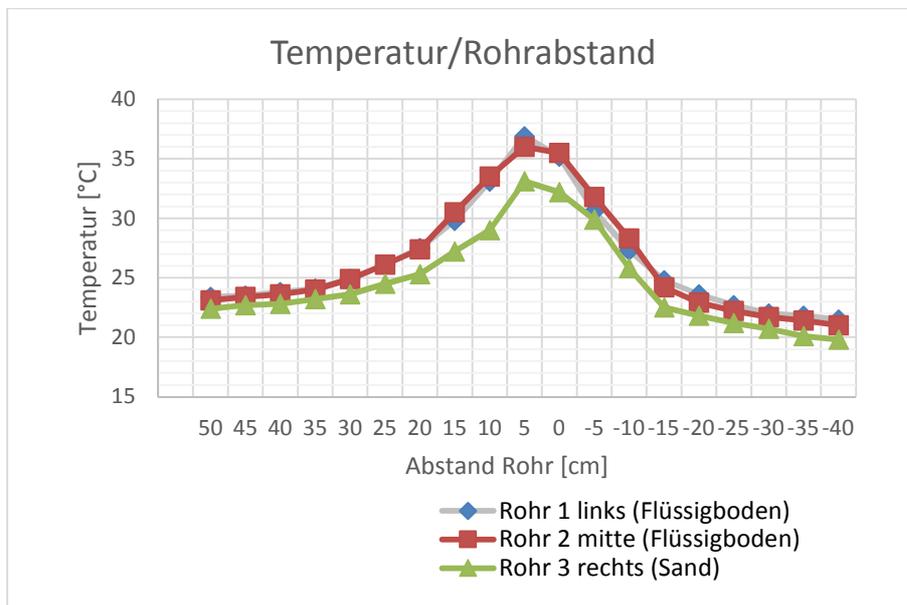


Abbildung 15: 31.5.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 23,2 °C

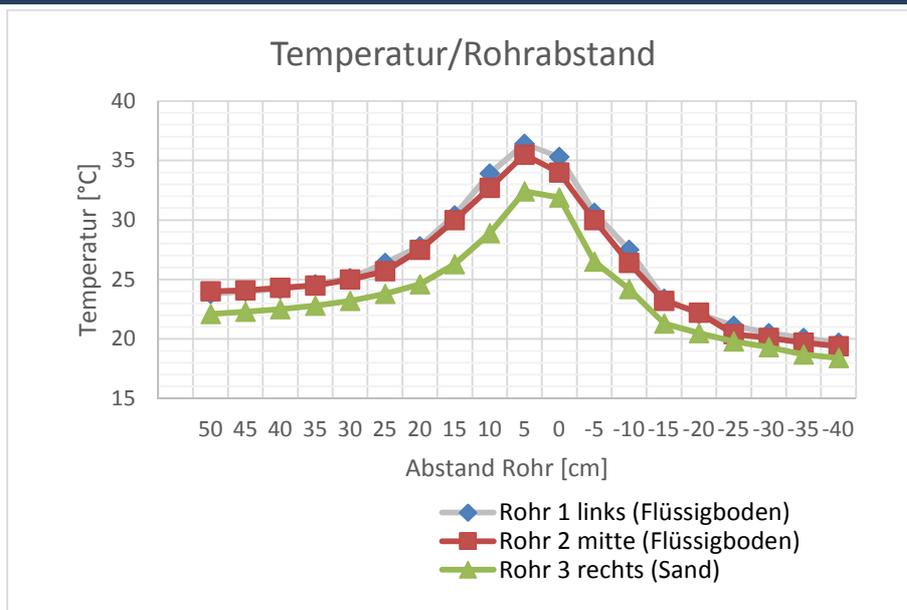


Abbildung 16: 08.06.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 23 °C

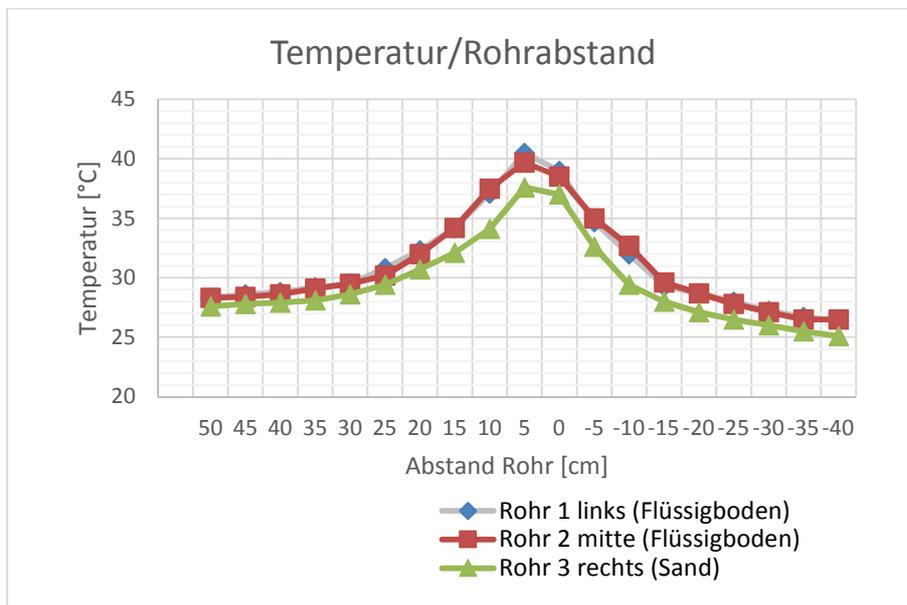


Abbildung 17: 12.06.17 Oberflächentemperatur (Rohr), Lufttemp.: 23,6 °C

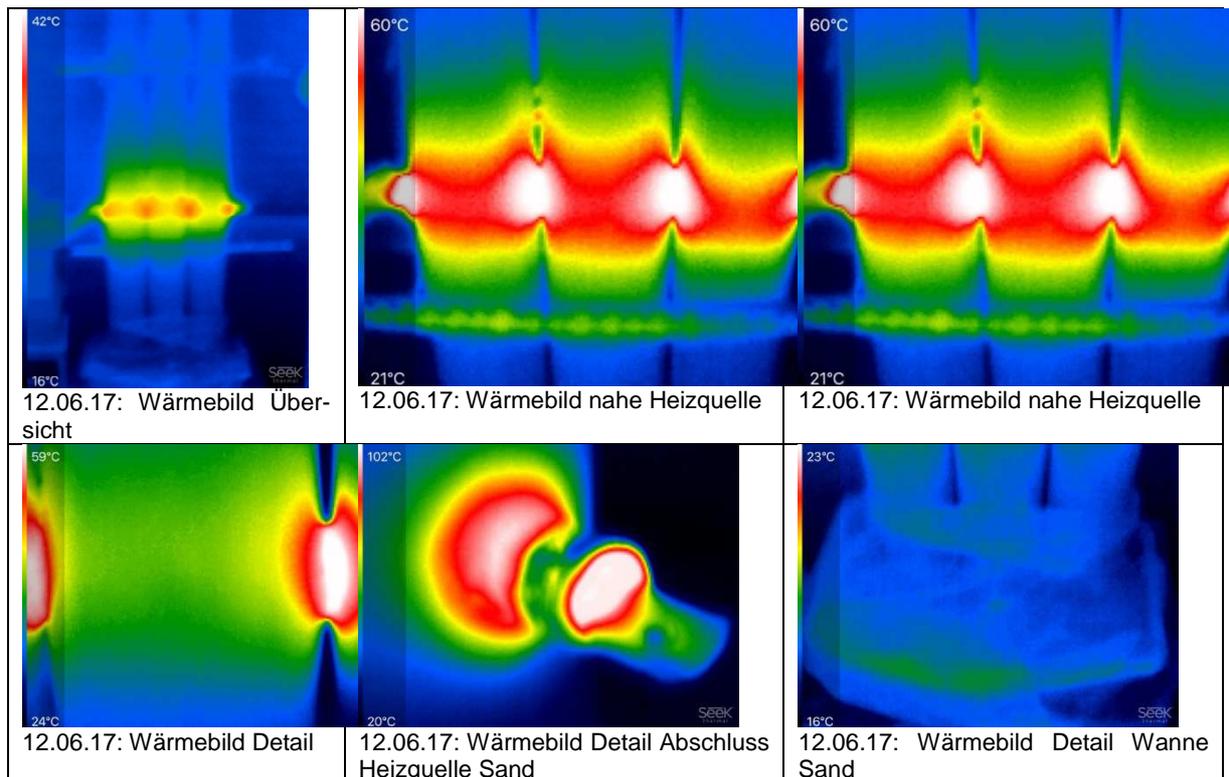


Abbildung 18: Wärmebilder Versuch außen am Rohr (12.06.17) gemessen mittels Seek Compact Thermal Imaging Camera

## 7. Eigenfeuchte Ausgangsmaterial in Mörtelwanne

Die Eigenfeuchte des gestampften Ausgangsmaterials in der Mörtelwanne unterlag leichten Schwankungen s. Tabelle 2. Es wurde darauf verzichtet, den Boden komplett zu durchmischen um eine exakt repräsentative Eigenfeuchtebestimmung durchzuführen. Stattdessen wurden oberflächennahe Proben entnommen und bei Austrocknung oberflächlich mittels Sprühflasche der Boden benetzt. Der Boden war während des Versuchs mit einer Folie abgedeckt. Aufgrund der nur oberflächennahen Eigenfeuchtebestimmung ist die händisch verdichtete Bodenstruktur weitgehend ungestört geblieben.

Tabelle 2: Prüfwerte Eigenfeuchtereulierung mittels Mörtelwanne

Datum	Eigenfeuchte [%]
3.4.17	4,5
18.4.17	6,4
28.4.17	5,7
4.5.17	6,2
12.5.17	6,1
19.5.17	5,95
26.5.17	5,0
31.5.17	6,6
8.6.17	6,3
12.6.17	6,64
20.06.17	6,72

## 8. Eigenfeuchte Überdeckung RSS Flüssigboden TS

Die Eigenfeuchte des den RSS Flüssigboden TS überdeckenden Sandes wurde periodisch gemessen. Am 28.03.17 betrug die Eigenfeuchte 5%. Bis zum Ausbau (14.06.17) ist die Eigenfeuchte deutlich zurückgegangen s. Dokumentation. Die Probenahme zur Bestimmung der Eigenfeuchte wurde oberflächennah durchgeführt. Es wurde darauf verzichtet, eine genaue Probenahmetiefe festzulegen.



Abbildung 19: Versuchs-Draufsicht (Eigenfeuchtebestimmung Sandüberdeckung über Flüssigboden/Sand)

Tabelle 3: Eigenfeuchte an den oberen Rohrenden des Versuchsaufbaus

Datum	Eigenfeuchte Sandüberdeckung Rohr 1 links (FB) [%]	Eigenfeuchte Sandüberdeckung Rohr 2 mitte (FB) [%]	Eigenfeuchte im oberen Rohrbereich Rohr 3 rechts (SE) [%]
28.03.17	5	5	5
14.06.17	0,54	0,63	0,27

## 9. Ausbau

Am 14.06.17 wurden die Lagerungskörper zerstört und es erfolgte die Probenahme zur Bestimmung der Eigenfeuchte sowie eine Temperaturmessung direkt im Sand bzw. RSS Flüssigboden TS. Bereits während des Ausbaus konnte festgestellt werden, dass der RSS Flüssigboden TS einen für RSS Flüssigboden TS „normalen Feuchtegehalt“ aufwies. Feuchteunterschiede oder Heterogenitäten wurden nicht festgestellt.



Abbildung 20: Ausbau Fotodokumentation (14.06.17)

Beim Aufbohren des Sandes (Rohr 3 rechts SE) zeigten sich indes optisch große Unterschiede bei den Feuchtegehalten. Im Bereich der Heizquelle zeigte der Sand eine deutlich hellere Farbe (Abb. 21). Die Austrocknung war sicht- und sofort auch händisch fühlbar. In den Kernlöchern der nächsten Schicht direkt unter und direkt über der Heizquelle war keine Austrocknung erkennbar. Direkt nach der Probenahme wurden die Proben gewogen und getrocknet.



Abbildung 21: Ausbau Fotodokumentation (14.06.17)

Nach der Probenahme bzw. Messung der Eigenfeuchte wurden die Bohrungen mittels Panzertape verschlossen.

Der Versuch wurde bis zum 19.06.2017 fortgesetzt. Am 19.06.17 wurden die letzten Wärmebildaufnahmen bei vorhandenen Öffnungen durchgeführt und die Materialien optisch beurteilt. Auffällig war insbesondere das Kondenswasser an den Verklebungen der Öffnungen zum RSS Flüssigboden TS, das auf die Kondensation der Luftfeuchte an den Kältebrücken (Panzertape auf aufgebohrte Öffnungen) zurückzuführen ist.

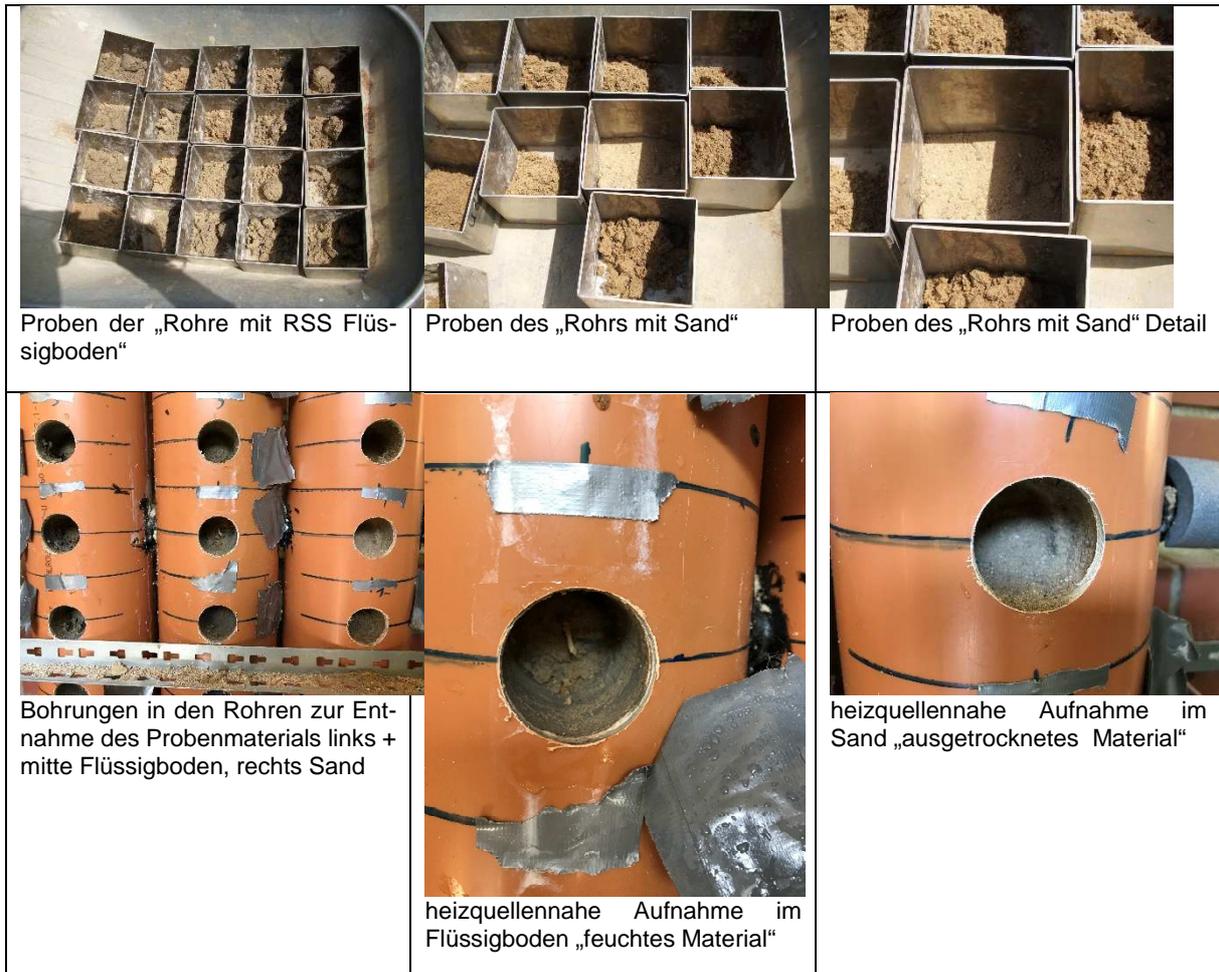


Abbildung 22: Ausbau 14.06.17 Fotodokumentation optische Austrocknung Sand/Feuchte-zu-stand Flüssigboden

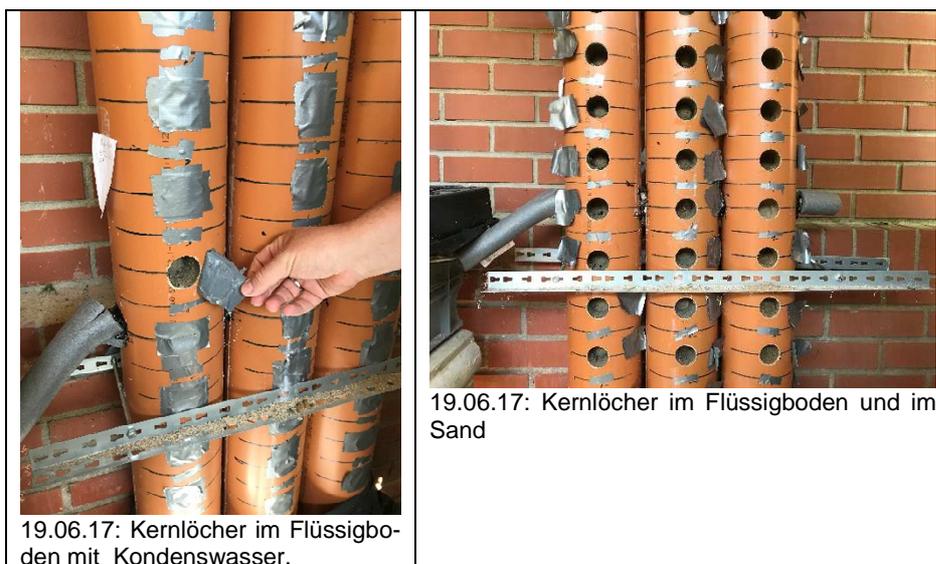


Abbildung 23: Weiterlaufen des Versuchs bis 19.06.17 mit verklebten Kernbohrungen

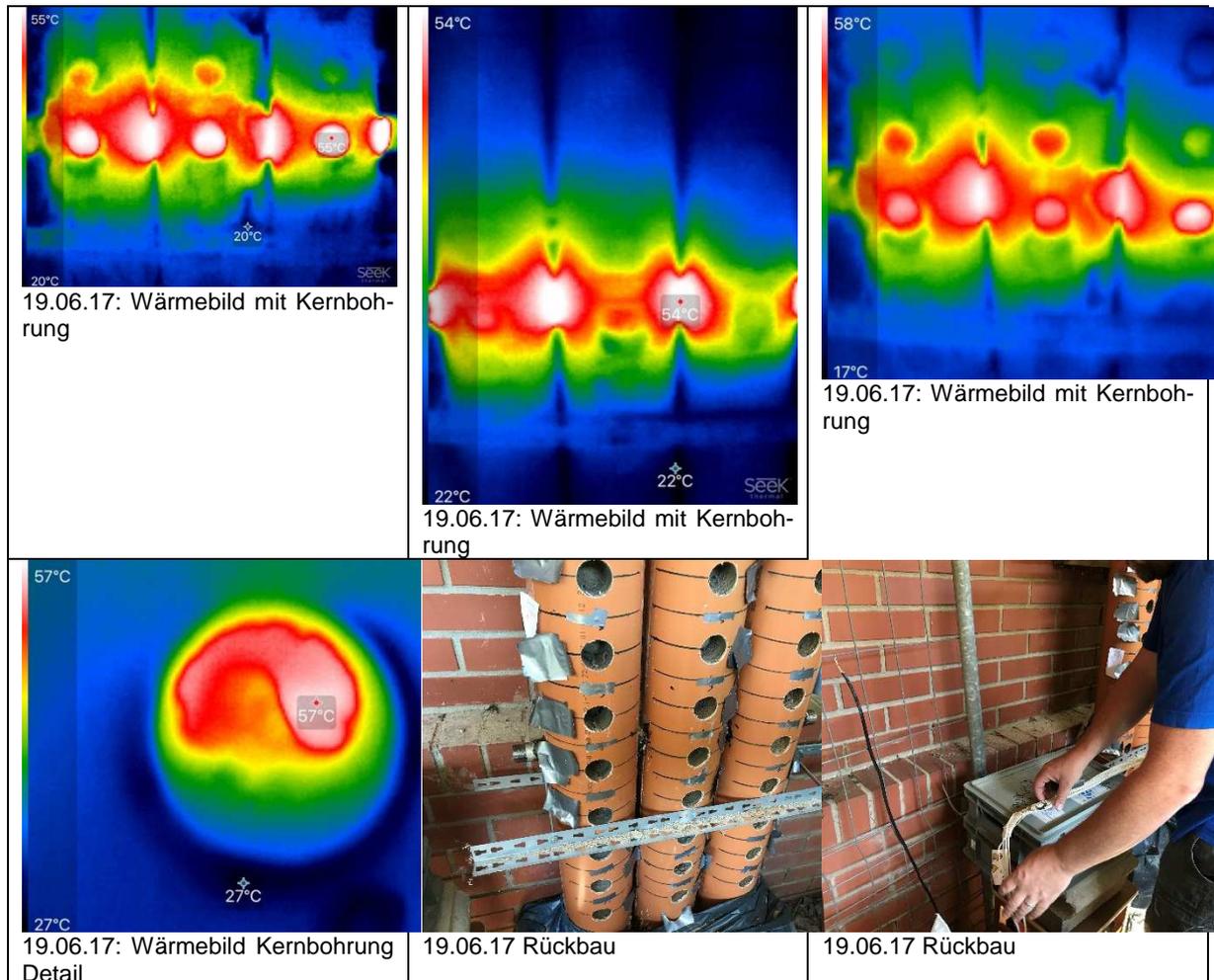


Abbildung 24: Wärmebildaufnahmen mit Fotos, 19.06.17 und Rückbau

## 10. RSS Flüssigboden TS - Prüfdaten in Anlehnung an DIN 18136

Aus der Menge des zur Verfüllung der Rohre hergestellten RSS Flüssigboden TS wurden vier Prüfkörper zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit sowie der Eigenfeuchte entnommen und bei Raumtemperatur gelagert. Die Prüfung der bodenmechanischen Parameter erfolgte in Anlehnung an DIN 18136.

### Abweichungen von DIN 18136

Abweichend von den Vorgaben der DIN Abschnitt 6.1 „Form und Maße“

*Ihre Höhe sollte das 2- bis 2,5 fache des Durchmessers bzw. der kantenlänge betragen. Abweichungen sind anzugeben und zu begründen*

werden die angegebenen Abmaße der gelieferten Proben gewählt.

Abweichend von den Vorgaben der DIN Abschnitt 9 „Angabe der Ergebnisse“

*b) Bodenart nach DIN 4022-1*

*c) Güteklasse der Probe nach DIN 4021*

Bodenart: für Flüssigboden nicht definiert  
Güteklassen: keine Entnahme, sondern eine Herstellung

In Zuge der Versuchsvorbereitung wurden die Maße (Durchmesser und Höhe) der Prüfkörper bestimmt. Die Proben wurden in eine Prüfpresse UP 25/50 (weggesteuert) eingebaut. Die Prüfung erfolgte mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit von 0,25 mm/min. Es wurden die einaxialen Druckspannungen bei der jeweiligen Prüfkraft gemessen. Die einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$  wurde als maximale Druckspannung bestimmt. Des Weiteren wurden der einaxiale E-Modul  $E_u$  als maximale Tangentensteigung der Druckstauchungskurve,  $E_{U30}$  als 30% der Bruchspannung sowie  $E_{U50}$  als 50 % der Bruchspannung bestimmt.

Nach dem Versuchsende wurden Wassergehalt und Dichte der Probenkörper bestimmt.

Tabelle 4: Prüfdaten des verbauten Flüssigboden (Lagerung in Ausstechzylindern bei Raumtemperatur))

Probe	Alter [d]	$q_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{U*1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{U50}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{U30}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Bruchstauchung [%]	Masse [g]
17-056 a	28	0,21	11,70	8,70	10,30	3,01	1680,00
17-056 b	28	0,20	14,50	12,00	12,70	2,81	1695,00
17-056 c	78	Hier nur Bestimmung der Eigenfeuchte am Tag des Versuchsende					
17-056 d	28	Geplantes Prüfdatum: 28.03.2019					

Probe	Anfangshöhe $h_a$ [mm]	Anfangs-Ø $d_a$ [mm]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Wassergehalt [%]
17-056 a	120	96	868,6	1,93	22,57
17-056 b	120	96	868,6	1,95	23,39
17-056 c			868,6	1,94	23,97
17-056 d	Geplantes Prüfdatum: 28.03.2019				

\*1  $E_U = \max d\sigma/d\varepsilon$  Modul des einaxialen Druckversuchs bei maximaler Tangentensteigung der Druck-Stauchungslinie mit  $\varepsilon = \Delta h/h_a$ .

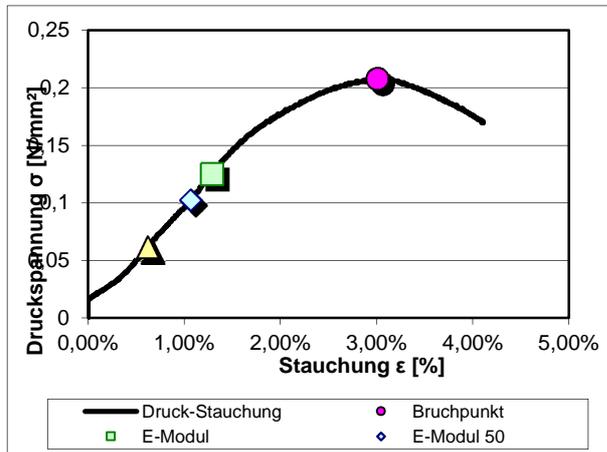


Abbildung 25: Druckstauchungsdiagramm Probe 17-056 a.

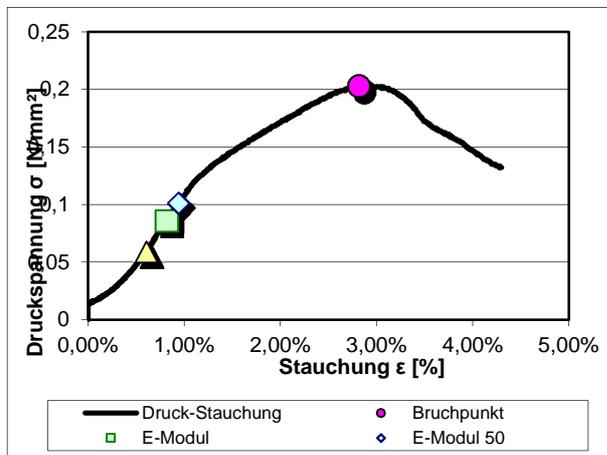


Abbildung 26: Druckstauchungsdiagramm Probe 17-056 b.

## 11. **Auswertung:**

### 11.1. **Oberflächentemperatur der Versuchsbehältnisse (Kunststoffrohre)**

Die gemessenen Oberflächentemperaturen an den Außenflächen der Rohre (Abb. 12 - 17) zeigen ihr Maximum im Bereich von ca. 3 – 5 cm oberhalb der Heizquelle (Punkt 0) und widerspiegeln damit das natürliche physikalische Verhalten von thermischen Vorgängen. Die Oberflächentemperaturen der Rohre in den mit RSS Flüssigboden TS verfüllten Bereichen liegen jeweils über den Temperaturen der Bereiche mit Sandbefüllung.

Dieser Umstand resultiert aus der besseren Wärmeableitung des RSS Flüssigboden TS gegenüber dem Sand, der schon während des Prozesses der Austrocknung eine isolierende Wirkung zu zeigen beginnt. Die Temperaturverläufe sind, bezogen auf den Nullpunkt (Heizquelle) nicht gespiegelt. Die bodennäheren Bereiche sind deutlich kühler, als die bodenfernen Bereiche.

Der Grund könnte in einer Abkühlung durch Boden- bzw. Wannenkontakt liegen, die als eine Art „Kältespeicher“ fungiert.

Auf mögliche weitere Ursachen kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht eingegangen werden. Für weitere Versuchsserien könnte es sinnvoll sein, die Wanne zur Regulierung der Eigenfeuchte am Boden zu isolieren. Die Verdunstung könnte durch Dampfsperre auf der Mörtelwanne weitgehend verhindert werden.

Doch scheint die aktuelle Versuchsanordnung gerade durch den Verdunstungseffekt und die weitgehend gleich gehaltene Bodenfeuchte, ein sehr gutes Modell der Schichten des unter einer Höchstspannungstrasse befindlichen Bodens darzustellen.

Die Wärmebilder (Abb. 18 und Abb. 24) bestätigen die höheren Temperaturen an der Oberfläche der mit RSS Flüssigboden TS verfüllten Bereiche der Rohre (Rohr 1 und Rohr 2) gegenüber dem mit Sand verfüllten Rohrbereichen und damit die bessere Wärmeableitung durch RSS Flüssigboden TS.

Auf den Bildern erkennbar sind auch Wärmebrücken durch zur Befestigung angebrachte Metallteile sowie in den unteren Bereichen der den Trassenuntergrund simulierenden Mörtelwanne. Diese spielen aber bei der Gesamtbetrachtung der sich ausbildenden Temperaturen im eingestellten Gleichgewichtszustand keine signifikante Rolle.

### 11.2. Temperatur im RSS Flüssigboden TS/Sand

Am 14.06.2017 wurden die Rohre zwecks direkter Temperaturmessung im RSS Flüssigboden TS und im Sand, sowie zur Probenahme zwecks Eigenfeuchtebestimmung mechanisch geöffnet (Abb. 20). Zur Messung der Temperatur wurden  $\varnothing$  4 mm Bohrungen in 5 cm-Abständen durchgeführt. Der Temperaturfühler wurde jeweils 2 cm tief in den Flüssigboden gesteckt. Die Messergebnisse (Abb. 27) zeigen, dass der RSS Flüssigboden TS in beiden Rohren an vergleichbaren Messpunkten nahezu identische Temperaturen aufweist.

Die Temperaturen des RSS Flüssigboden TS liegen jeweils über den Temperaturen des Sandes an den vergleichbaren Messpunkten. Dies liegt wie bei den an der Oberfläche gemessenen Temperaturen in der höheren Wärmeleitfähigkeit von RSS Flüssigboden TS gegenüber dem Sand begründet.

Die Maximaltemperaturen werden jetzt im Bereich der Heizquelle (Nullpunkt) gemessen. Anders als bei den Messungen an der Rohroberfläche ist die Temperatur-Rohrabstandskurve für RSS Flüssigboden TS eher zu spiegeln. Beim Sand ist wie bei den Oberflächentemperaturmessungen eine stärkere Abnahme der Temperaturen in Richtung Wanne zu sehen. Der Einfluss der Nähe zum Boden bzw. zur Mörtelwanne, die als Modell den Untergrund der Trasse abbildet, ist für RSS Flüssigboden TS geringer als bei Sand. Auch dies ist sehr gut aus den unterschiedlichen Eigenschaften des RSS Flüssigboden TS im Vergleich mit denen des Sandes erklärbar. Denn ein Saugverhalten mit den damit verbundenen stofflichen und energetischen Austauschprozessen entsteht für einen austrocknenden Sand, jedoch nicht oder in einem nicht relevantem Maße in den, mit RSS Flüssigboden TS verfüllten Bereichen, da diese nicht ausgetrocknet sind.

Der Temperaturübergang zwischen RSS Flüssigboden TS und Sand in den Rohren 1 und 2 erscheint nicht charakteristisch. Dieses ist vermutlich auf die bereits nur noch geringen Temperaturdifferenzen im Übergangsbereich RSS Flüssigboden TS - Sand zurückzuführen.

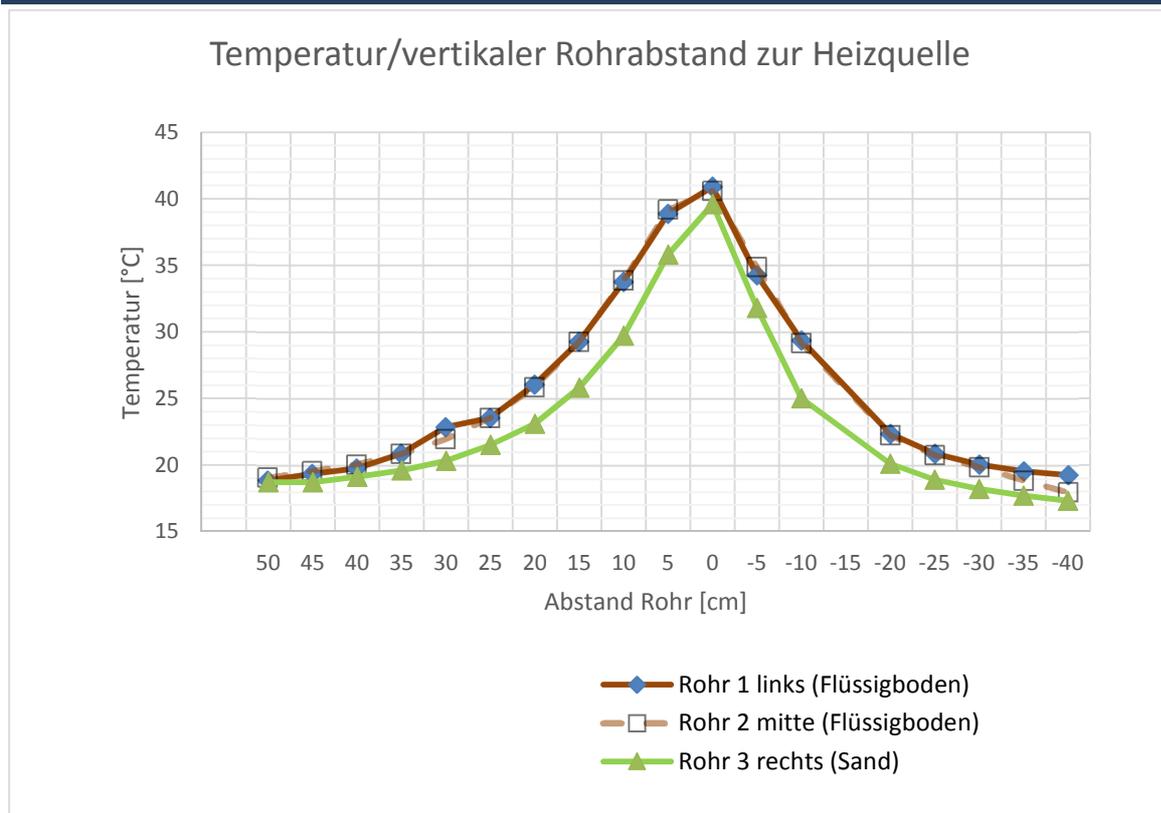


Abbildung 27: Ausbau (14.06.17) Temperaturmesspunkte (in Kernlöchern) Messsonde 2cm im FB vor Rohrkante.

Die Wärmebilder (Abb. 24) vom 19.06.17 bestätigen auch visuell die bessere Wärmeableitung von RSS Flüssigboden TS im Vergleich mit dem eingesetzten Sand. Dies ist insbesondere im Bereich der Bohrungen zur Probenahme sichtbar. Im Bereich der Bohrungen liegt die Wärmequelle weitgehend frei, so dass dort auch gleiche Temperaturen durch die Wärmebilder der Kamera angezeigt werden, während die mit RSS Flüssigboden TS und Sand noch überdeckten Bereiche deutlich unterschiedliche Temperaturen aufweisen.

### 11.3. Eigenfeuchte im RSS Flüssigboden TS/Sand

Am 14.06.2017 wurden die Rohre zwecks Probenahme zur Eigenfeuchtebestimmung mechanisch geöffnet (Abb. 20 - 22). Zur Entnahme der Proben wurden Kernlöcher  $\varnothing$  44 mm mit einer Tiefe von ca. 4 - 6 cm erbohrt. Die in den Bohrungen entnommenen Materialproben wurden direkt gewogen und an ihnen eine Feuchtebestimmung durchgeführt. Die Abstände der Kernlöcher zueinander betragen 10 cm.

Abbildung 28 zeigt die Eigenfeuchten von RSS Flüssigboden TS und die der Sandproben mit Abständen zur Heizquelle nach einer dauerhaften Temperierung auf ca. 90 °C und einer Temperierungsdauer von 47 Tagen. RSS Flüssigboden TS zeigt relativ konstante Werte der Ei-

genfeuchte. Ein Vergleich mit der bei Raumtemperatur im verschlossenen Prüfzylinder gelagerten Probe (E-17-056 c) ergibt nur eine geringfügig niedrigere Eigenfeuchte der aus den Bereichen der Rohre mit dauerhafter Temperatureinwirkung entnommenen Proben.

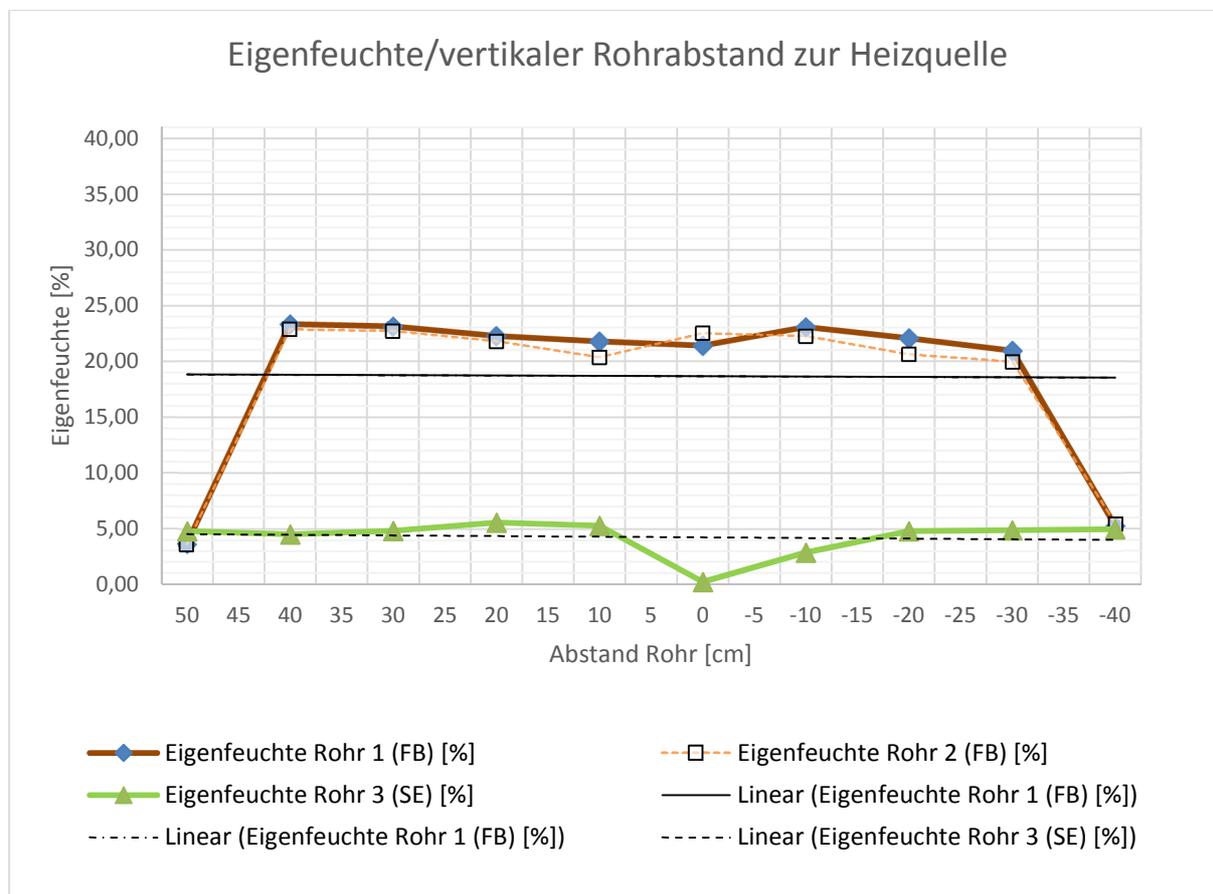


Abbildung 28: Ausbau (14.06.17) Eigenfeuchte Kernproben

Tabelle 5: Daten Eigenfeuchte Kernproben; Ausbau (14.06.17)

Abstand Rohr [cm]	Eigenfeuchte Rohr 1 (FB) [%]	Eigenfeuchte Rohr 2 (FB) [%]	Eigenfeuchte Rohr 3 (SE) [%]	Material
50	3,65	3,64	4,77	SE
40	23,33	22,87	4,48	RSS FB TS
30	23,12	22,72	4,78	RSS FB TS
20	22,25	21,80	5,54	RSS FB TS
10	21,78	20,37	5,24	RSS FB TS
0	21,40	22,53	0,20	RSS FB TS
-10	23,08	22,27	2,84	RSS FB TS
-20	22,06	20,63	4,76	RSS FB TS
-30	20,96	19,97	4,84	RSS FB TS
-40	5,48	5,48	4,94	SE

Das mit Sand befüllte Kanalrohr zeigt nach 47 Tagen Temperierung auf ca. 90 °C signifikante Austrocknungen im Bereich der Heizquelle. Oberhalb der Heizquelle reicht die Austrocknung zwischen 0 und 10 cm weit, unterhalb der Heizquelle ca. 15-20 cm weit.



Ausbau: 19.06.2017, Sand im Bereich 0 – trocken und in den Bereichen -1 und +1 feucht

Abbildung 29: Foto mit Aufbohrungen – trockenen Sand im Bereich der Bettung der Wärmequelle und optisch noch feuchten Sand je 10 cm unter und über der Bettungszone zeigend

Damit wird erkennbar, dass insbesondere die kritischen Bereiche der Kontaktflächen zwischen Heizquelle und Sand für die Wärmeübertragung problematisch sind, da sich dort zuerst die

Folgen der Austrocknung zeigen und die Wärmeableitung behindern. Eine Austrocknung in Verbindung mit der Wirkung der, bei Austrocknung im Sand verschwindenden Kapillarkohäsion, führt zur Bildung eines Ringspaltes zwischen Wärmequelle und Sand und damit zu einem verschlechterten Wärmetransport auf Grund des, sich im Bereich jedes Ringspaltes ausbildenden zusätzlichen Wärmeübergangswiderstandes. Die Folgen des Einsatzes von Sand als Bettungsmaterial sind dann messbar und z.B. sich einstellende, höhere Temperaturen der, die Wärme abgebenden Einbauten (z.B. GIL-Rohre oder Kabel) im Vergleich zum RSS Flüssigboden TS.

Die hier vorgestellten Ergebnisse der Auswertung des Versuches bestätigen über den Temperaturverlauf die Ergebnisse der Messungen der Amprion im Verlauf des Versuchsprojektes „Osterrath“. Mittels der gemessenen Eigenfeuchte erklären sie zusätzlich den Grund für die dort und hier gemessenen unterschiedlichen Temperaturen in den verschiedenen Bettungsmaterialien, wie sie sich bei Bettung von Wärmequellen in Form von GIL Rohren oder Kabeln in thermisch stabilisierendem RSS Flüssigboden TS und in Sand einstellen.

Daraus folgt für die praktische Auslegung von Höchstspannungstrassen die Notwendigkeit, neben der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  zwingend auch die Wärmeübergangswiderstände zwischen der Oberfläche der Wärmequelle bzw. der Oberfläche der GIL Rohre oder der Oberfläche der Kabel und deren Veränderbarkeit mit Hilfe der gezielt einstellbaren Eigenschaften des RSS Flüssigboden TS, zur Beurteilung der tatsächlich sicher nutzbaren Wärmeableitung, hinzuzuziehen.

Hinter der Möglichkeit, die Wärmeübergangswiderstände gezielt zu minimieren und damit die Wärmeableitung wirksam zu verbessern, steht der Zusammenhang der Wärmeübertragung mit dem Anpressdruck des Bettungsmaterials gegenüber der Oberfläche der Wärmequelle. Dies beschreibt der sogenannte Kontaktkoeffizient  $K_k$  in  $[W/m^2K]$ . Er zeigt, dass ein höherer Anpressdruck des Bettungsmaterials zu einer besseren Wärmeableitung führt. Exakt dieser Anpressdruck kann, zusammen mit der Wärmeleitfähigkeit, bei Einsatz von RSS Flüssigboden TS in bestimmten Toleranzbereichen über die Rezeptur des Flüssigbodens gezielt verändert werden. Der Nachweis unterschiedlicher Anpressdrücke erfolgt mittels zusätzlicher Prüfungen, wie auch die Nachweisführung unterschiedliche eingestellter Wärmeleitfähigkeiten des RSS Flüssigbodens TS. Diese Nachweise waren nicht Inhalt dieses Versuches, da sie schon zu den Standardnachweisen für die Fachplanung von Höchstspannungstrassen in RSS Flüssig-

sigboden TS gehören. Doch kann ein ergänzender Versuch sowohl die Prüfung unterschiedlicher Anpressdrücke als auch die Prüfung verschiedener Böden mit über die Rezeptur veränderten Wärmeleitfähigkeiten beinhalten.

Dies ist ein guter Nachweis, der zeigt, dass über die Veränderbarkeit von 2 Faktoren einer Gleichung, die auf 3 Faktoren beruht (Wärmestrom bzw. auch Wärmeleistung  $Q/t = \lambda \times A \times (T_1 - T_2)/d$ ), die Möglichkeit für die Planung von Höchstspannungstrassen zur Verfügung steht, **auch bei Böden, mit von Natur aus schlechter Wärmeleitfähigkeit, eine ausreichend gute Wärmeableitung** für den sicheren Betrieb von Höchstspannungstrassen, **garantieren zu können**.

Der RSS Flüssigboden TS hat sich auch in den Kontaktbereichen zu Sand (Kontaktbereich 1+2 zwischen + 40 und + 50 cm; Kontaktbereich 3+4 zwischen - 30 und - 40 cm) als sehr widerstandsfähig gegen Austrocknung erwiesen. Ein weiterer Versuch zur detaillierten Betrachtung des Übergangsbereiches Flüssigboden-Sand erscheint sinnvoll, da sich auch hieraus Potentiale zur Kostenreduzierung bei der Ausbildung eines Regelaufbaus von Gräben für Höchstspannungstrassen ergeben können.

Der Bereich um die Heizquelle unterliegt, wie die dokumentierten Messdaten zeigen, trotz der hohen Temperatur der Heizquelle von 90°C an deren Kontaktflächen zum RSS Flüssigboden TS, keiner messbaren Austrocknung.

Diese Ergebnisse bestätigen auch die Ergebnisse der bisherigen F&E Projekte des Herrn Prof. Rogler von der HTW Dresden, die unseres eigenen Hauses in Zusammenarbeit mit Fa. Siemens und Herrn Prof. Steffens von der HS Regensburg, und die aus der Praxis bekannten Ergebnisse des Versuchsprojektes der Amprion in Osterath und anderer bereits realisierter Projekte.

Neu ist bei der Durchführung dieses Versuches, dass erstmals mit einer Temperatur der Heizquelle von 90°C gearbeitet wurde und diese dauerhaft über 47 Tage aufrecht erhaltenen Temperatur der Temperatur der Kontaktflächen zwischen der Wärmequelle und dem Bettungsmaterial entspricht. In der baulichen Umsetzung ist es das GIL Rohr oder das jeweilige Kabel, die die Wärmeemittenten darstellen und an ihren Oberflächen eine Temperatur von 90 °C aufweisen würden.

Ebenfalls neu ist, dass der eingesetzte Versuchsaufbau erstmals auch die Simulation der realen Bodenschichten in ihrer Art und Stärke ermöglicht hat und zusätzlich zu den Messergebnissen auch eine Feuchtebestimmung an Materialproben des Bettungsmaterials erfolgte, die den verschiedenen Schichten und damit den Einbauhöhen des Grabenaufbaus entnommen wurden.

Der Vergleich der gemessenen Bodenfeuchten mit extern gelagerten und bei der Herstellung des RSS Flüssigbodens TS dem hergestellten Flüssigboden entnommenen Referenzproben war ebenfalls ein zusätzliches Element des Versuches, das die Belastbarkeit der gemessenen Ergebnisse bestätigte und das in Form einer Plausibilitätsprüfung die nötige Sicherheit bei der Anwendung der Versuchsergebnisse in der Praxis verleiht.

**Zusammenfassend hat dieser Versuch gezeigt, dass:**

- RSS Flüssigboden TS als Bettungsmaterial unter Einbaubedingungen nicht austrocknet und als Bettungsmaterial einen sicheren Betrieb von Höchstspannungstrassen ermöglicht und dabei Potentiale zur Kostenreduzierung aufweist
- diese Aussage auch für Extremtemperaturen gilt, wenn z.B. (90°C) an den Kontaktflächen zur Wärmequelle herrschen würden
- damit große Sicherheiten gegen Überlast oder der Einsatz geringerer Kabelquerschnitte oder anderer Materialien zulässig wird.
- damit auch andere, platzsparendere Gestaltungen der bisher üblichen Regelquerschnitte der Trassen möglich werden.
- damit aber auch Böden mit schlechter Wärmeleitfähigkeit als mittels des Flüssigbodenverfahrens verbessertes Bettungsmaterial genutzt werden können
- diese Vorteile für andere platzsparendere und diplomatischere Lösungen in Abstimmung mit den Landbesitzern und –nutzern verwendet werden können und damit z.B. der nötige Flächenverbrauch deutlich sinkt
- im Gegensatz zu den Ergebnissen bei RSS Flüssigboden TS, der vergleichsweise eingesetzte Sand als Bettungsmaterial das bekannte Austrocknungsverhalten zeigt
- eine Reihe weiterer Potentiale zur Kostenminimierung im Einsatz von RSS Flüssigboden TS liegen, die im Rahmen eines vorgelagerten und parallel zur Bodenerkundung beginnenden Planungsprozesses genutzt werden können.

## 12. Übersicht Versuchsdaten

Tabelle 6: Übersicht Versuchsdaten

Labornummer Grundmaterial	Bodengruppe Grundmaterial	Rezepturdaten						
		Boden trocken [kg/m <sup>3</sup> ]	B-CE [kg/m <sup>3</sup> ]	B-CE-Sorte	FBC [kg/m <sup>3</sup> ]	FBC-Sorte	Gesamtwasser [kg/m <sup>3</sup> ]	Ausbreitmaß [cm]
17-056	SE	1535	rezepturtypisch	CEM I, 42,5 R	rezepturtypisch	TS	391	55

Labornummer Vergleichs-sand	Bodengruppe Vergleichssand	Zielgrößen RSS Flüssigboden						
		Austrocknung bei Temperierung	Wärme-leitfähig-keit	Temperatur Heizquelle	qu (28 d)	EV2-Wert	Mantel-rei-bung	Ausbreitmaß [cm]
17-056	SE	minimal	maximal	90°C	<sup>*3</sup> 0,1-0,3 N/mm <sup>2</sup> )	>45 MN/m <sup>2</sup>	maximal	55

FB Einbau	Beginn 90°C Tem-perierung	FB Ausbau	Temperatur Heiz-quelle	Mittlere Eigenfeuchte Mörtelwanne (SE)	Mittlere qu nach 28 d
28.03.17	28.04.2017	14.06.2017	<sup>*2</sup> ca. 83-89°C	<sup>*1</sup> ca. 6 %	0,21 N/mm <sup>2</sup>

Mittlerer Wassergehalt FB „Rohr 1 FB links“ temperiert auf 90 °C 14.06.17	Mittlerer Wassergehalt FB „Rohr 2 FB mitte“, temperiert auf 90 °C 14.06.17	Mittlerer Wassergehalt FB Lagerung bei ca. 20 °C 14.06.17
22,24 %	21,65 %	23,97 %

<sup>\*1</sup> Eigenfeuchtebestimmung nur im oberen Bereich der Mörtelwanne. Es ist davon auszugehen, dass die durchschnittliche Bodenfeuchte innerhalb der Mörtelwanne geringer ist.

<sup>\*2</sup> Bis 11.05.17 Temperaturschwankungen 77°C -94°C, ab 11.5.17 Temperaturschwankungen ca. 83°C-89°C

<sup>\*3</sup> bodentypischer Wert