



OSTBAYERISCHE
TECHNISCHE HOCHSCHULE
REGENSBURG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

OTH REGENSBURG • POSTFACH 12 03 27 • 93025 REGENSBURG

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsbericht:

Kompakte Übertragungsleitungen für hohe Gleichspannungen

Langzeituntersuchungen an einer erdverlegten
Versuchsanlage

Direct Current Compact Transmission Line for High Voltage
Long-term Directly Buried Investigations

Forschungsprojekt-Akronym: DC CTL DBI

Förderkennzeichen: 03ET7546

Abschlussbericht zu AP 1.5 Mechanik und AP 1.7 Thermik

Auftraggeber: Siemens Energy Global GmbH & Co. KG

Bereich "Transmission"

(ursprünglich Siemens AG

Bereich „Energy Management Division“)

Freyeslebenstr. 1

91058 Erlangen

Auftragnehmer: OTH Regensburg

Labor für Geotechnik

Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart

Galgenbergstraße 30

93053 Regensburg

E-Mail: geotechnik@oth-regensburg.de

Datei DC-CTL DBI_Schlussbericht_30Aug21.docx

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Allgemeines	3
2. Projektziele	4
3. Trassenverlauf	5
4. Eingebaute Messtechnik	7
4.1. Sensorik an der DC CTL.....	7
4.2. Linienförmige Temperaturmessung.....	10
4.3. Punktförmige Messungen.....	11
5. Messergebnisse und Auswertungen	13
5.1. Bauphasen, Temperaturen, Niederschläge.....	13
5.2. Bodentemperaturen.....	16
5.3. Bodenfeuchte und Saugspannungen.....	20
5.3.1. Saugspannungen.....	20
5.3.2. Bodenfeuchte.....	25
5.3.3. Einbau, Ausbau und abschließende Betrachtung MSQ1- Süd.....	28
5.3.4. Einbau, Ausbau und abschließende Betrachtung MSQ2 - Nord.....	31
5.3.5. Einfluss der Vegetation auf die Feuchte.....	33
5.4. Wärmeleitfähigkeit.....	36
5.5. Spannungen und Kräfte.....	40
5.6. Dehnungen und Verformungen.....	42
5.6.1. Glasfaserstangen-Extensometer.....	42
5.6.2. Radiale Verformungsmessungen.....	46
5.6.3. Faseroptische Messungen der axialen Dehnungen.....	47
6. Dokumentation ZFSV-Einbau, Begleit- und Kontrollversuche	52
7. Untersuchung der thermo-hydraulischen Wechselwirkungen	56
8. Zusammenfassung	60

1. Allgemeines

Auf Basis des von der Siemens Energy Global GmbH Co. KG, kurz Siemens Energy (vormals Siemens AG), mit dem PTJ und BMWi abgestimmten, neuen technischen Konzepts wurde die DC-CTL-Versuchsanlage in Griesheim von 2018 bis Juni 2019 gebaut und bis Anfang Dezember 2020 betrieben. Das neue Konzept sah eine Trennung der Versuchsanlage in zwei Teile vor:

- A) Eine oberirdische DC CTL, die mit Hochspannung betrieben, und
- B) eine erdverlegte DC CTL, die mit Gleichstrom beheizt wird.

Die Leistungen OTH.R beziehen sich nur auf den Teil B), die erdverlegte und in ZFSV-eingegossene DC CTL (ZFSV := Zeitweise fließfähiger selbstverdichtender Verfüllbaustoff).

In diesem Zusammenhang erfolgte zwischen der Siemens Energy (vormals Siemens AG) und der OTH.R eine Vertragsanpassung zum Vertrag GP1-2595 hinsichtlich Laufzeit und Leistungen des AP 1.7 – Mechanik sowie eine Vertragserweiterung um das AP 1.5 – Thermik. Die Änderungsbestellung Nr. 3313101660 der Siemens Energy über die Leistungen in beiden Arbeitspaketen mit neuer Leistungs- und Meilensteinplanung ging am 10. Sep. 2018 ein.

Der vorliegende Abschlussbericht ist eine Zusammenfassung der erbrachten Leistungen *„Nach Endauswertung aller Messungen und Berechnungen und Zusendung des Abschlussberichts zu den Forschungsergebnissen im Arbeitspaket 1.5 und im Arbeitspaket 1.7 nach Zusendung aller Messergebnisse und Messauswertungen“*.

Um den Abschlussbericht kompakt zu halten, wurden nur die wesentlichen Erkenntnisse in den Bericht und ausgewertete Messergebnisse in den Anhang aufgenommen. Detailliertere Informationen zu den Versuchen im Labor und Technikum sowie zur Modellierung der mechanischen und thermo-hydraulischen Wechselwirkungen finden sich in folgenden öffentlich zugänglichen Quellen, wobei die beiden ersten Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts entstanden sind.

- Wolfrum, Dominik: Wechselwirkungsverhalten von thermisch beanspruchten Rohren und zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen. Hannover 2021: Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Universität, Dissertation <https://doi.org/10.15488/10904>
- Zrenner, Louis: Berechnung der thermo-hydraulischen Wechselwirkungen in Plaxis 2D anhand der Messergebnisse des DC GIL DBI Projekts, Regensburg 2021, OTH Regensburg, Masterarbeit. <https://doi.org/10.35096/othr/pub-1790>.

- Wagner, Bernd: Ein Beitrag zur axialen Bettung von Kunststoffmantelrohren der Fernwärme in zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV), Schriftenreihe der Professur für Erdbau und Spezialtiefbau (Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla) Heft 9 an der Bergakademie Freiberg 2017, Dissertation.

2. Projektziele

Ziele dieses Projektes waren im Wesentlichen:

- Im AP 1.7 – Mechanik, die messtechnische Erfassung der thermischen Ausdehnung und Kontraktion der erdverlegten Versuchsanlage (B) an einer im Graben verlegten DC CTL mit ZFSV als Bettungsmaterial. Die Rohrstrecke wurde zunächst mittels rohr-/erdstatischen Berechnungen dimensioniert und mit den tatsächlich auftretenden, gemessenen Verformungen verglichen und validiert.
- Im AP 1.5 – Thermik, die messtechnische Erfassung der Temperaturentwicklung um das im Graben verlegte, ZFSV-gebettete DC-CTL-Rohr. Neben der Temperatur wurden u. a. Bodenfeuchten und Saugspannungen im Bettungsbereich und dem umgebenden Boden sowie mittels einer Station die Einflüsse des Wetters erfasst, um Rückschlüsse von gemessenen Temperaturen auf die Wärmeleitfähigkeiten zu ermöglichen.

Im Vorgriff auf die folgenden Berichtsabschnitte kann festgestellt werden, dass nahezu alle Projektziele erreicht und zum Teil deutlich übertroffen wurden. Lediglich die eingesetzten und auf dem DC-CTL-Rohr fixierten faseroptischen Sensoren (FOS) zur Dehnungsmessungen waren nicht aus reichend robust genug. Da die gesamte Messtechnik jedoch redundant ausgelegt war, konnten dieser Verlust durch andere Sensoren kompensiert werden.

3. Trassenverlauf

Abbildung 1 gibt einen Auszug aus dem Lageplan der Gesamtversuchsanlage in Griesheim (Stand: 19. Okt. 2018) wieder.

Der Teil A der Versuchsanlage verläuft auf dem rechten Teil des Planes von oben nach unten in einer Schleife aus der dunkelgrauen Versuchshalle oben heraus und wieder hinein. Gut zu erkennen sind die Fundamente der oberirdisch verlegten DC CTL.

Der erdverlegte Teil B verläuft auf dem Lageplan horizontal von links (Süden) nach rechts (Norden) im Graben und hat eine Gesamtlänge von etwa 130 m (siehe auch Abbildung 2 Detail (3)). In der Achse des DC-CTL-Rohres und im Grabenbereich sind mehrere Schächte angeordnet, die u.a. der Aufnahme von Messtechnik dienen. Zusätzlich wird die Trasse der geraden, erdverlegten DC CTL von 2 weiteren Gräben gekreuzt, die +/- 16 m über die Trassenachse herausreichen und Messsensoren aufnehmen.

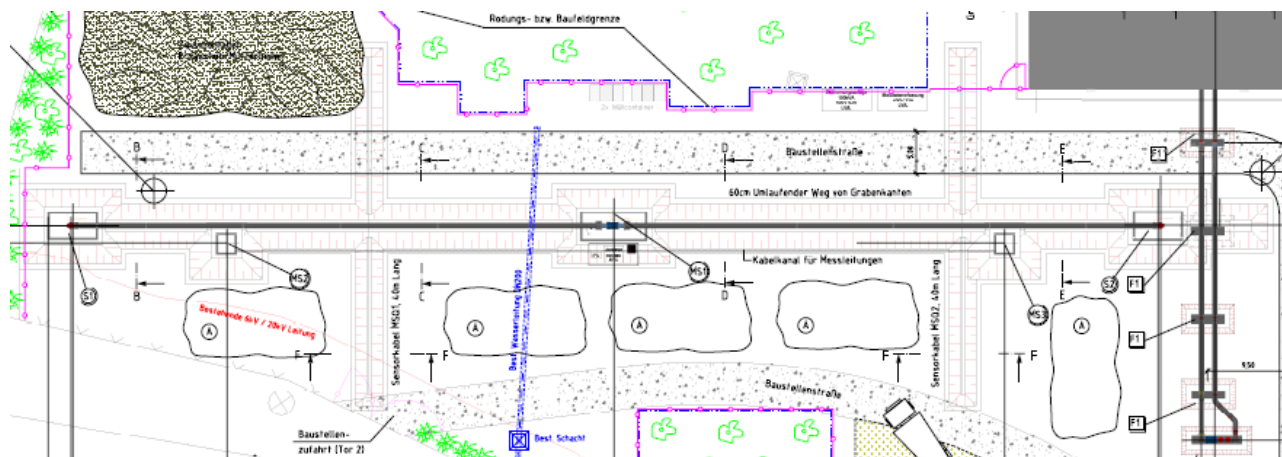


Abbildung 1: Auszug aus dem Lageplan der Gesamtversuchsanlage in Griesheim (Siemens, Stand: 19. Okt. 18)

In Mitte des erdverlegten Teils B wird im Messschacht MS1 ein mechanisch überbrückter Axialkompensator als ein natürlicher Festpunkt so ausgebildet, dass damit die bei Erwärmung des DC-CTL-Rohres entstehenden Kräfte gemessen werden können (siehe auch Abbildung 2 Detail (2)).

Die beiden Enden der DC CTL sind in axialer Richtung frei beweglich und enden in den Schächten S1 und S2 (siehe auch Abbildung 2 Detail (1)). Die seitlich der DC CTL angeordneten Schächte MS2 und MS3 sind Messschächte, in die Kabel der Messsensoren zusammengeführt werden.

All die zuvor genannten Ausbildungen und Anordnung der Schächte und Gräben erfolgte bereits im Rahmen der Detailplanung Messtechnik in Abstimmung mit Siemens Energy. In diesem Zusammenhang wurden von der OTH.R auch zahlreiche Abstimmungsgespräche zur Fachplanung Messtechnik mit den Lieferanten geführt.

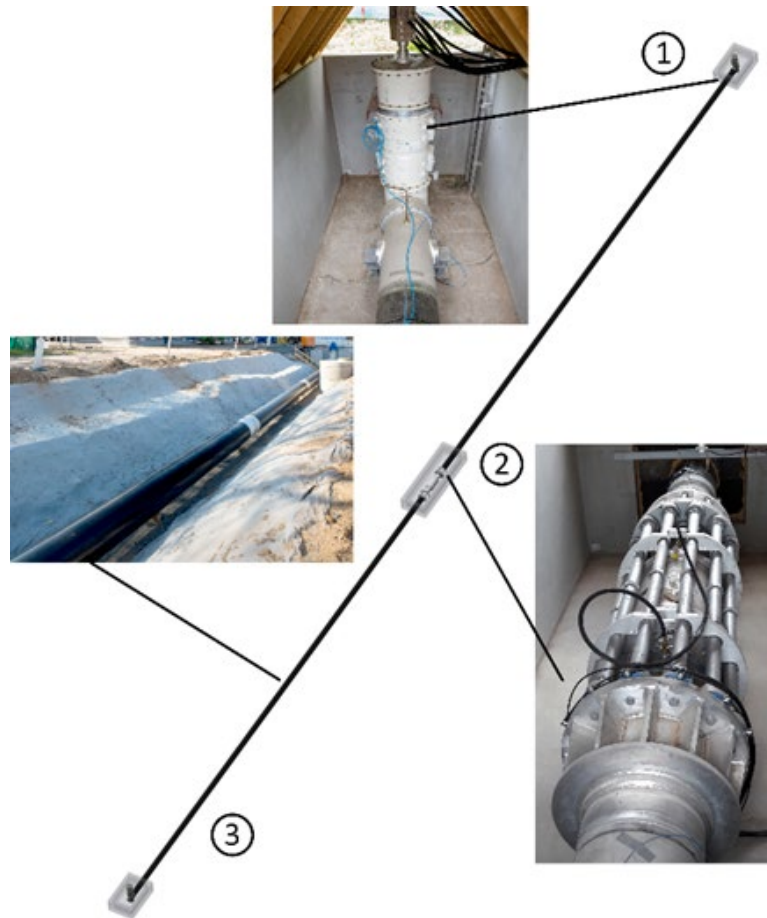


Abbildung 2: Isometrische Überblickzeichnung mit fotografischen Details des Versuchs B.
Quelle: Siemens Energy.

In Abbildung 3 der Querschnitt des DC-CTL-Verlegegrabens und dessen Maße skizziert. Aufgrund der Sohlentiefe von etwa 2,0 m unter Geländeoberfläche und dem anstehenden nichtbindigen Boden (Sand) waren nach DIN 4124 Böschungsneigungen von 45° bzw. 1:1 auszubilden. Auf der ZFSV-Verfüllung wurde etwa 75 cm des zuvor ausgehobenen Sandes als Deckschicht wieder aufgebracht. Je laufenden Meter des Verlegegrabens wurden etwa 2,9 m³ ZFSV eingebracht.

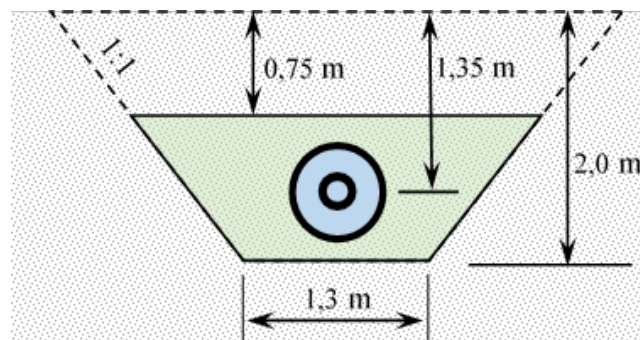


Abbildung 3: Querschnitt durch den Verlegegraben nach DIN 4124 mit Angaben zur Geometrie. Der Verfüllbereich mit ZFSV ist grün hinterlegt.

4. Eingebaute Messtechnik

Aus den Aufgabenstellungen heraus ergaben sich bei der Planung der Messtechnik drei Bereiche:

- 1) Punkt- und linienförmige Sensorik direkt am DC-CTL-Rohr zur möglichst kompletten Erfassung von Verformungen, Dehnungen, Spannungen, Kräfte.
- 2) Linienförmige Faseroptik zur Erfassung der Temperaturen im Bettungsmaterial und im Boden um die erdverlegte DC CTL.
- 3) Punktförmige Sensoren zur Erfassung der Bodenfeuchte, der Saugspannungen, des Wetters sowie unterhalb der DC CTL auch der Temperatur in den Boden hinein.

Im Folgenden werden die bisherigen Planungen, Abstimmungen und Umsetzung in Anlehnung an diese 3 Bereiche erläutert.

4.1. Sensorik an der DC CTL

Die punkt- und linienförmige Sensorik direkt an der DC CTL zur Erfassung von Verformungen, Dehnungen, Spannungen, Kräfte ist in Abbildung 4 dargestellt, deren Ausbildung, Anzahl und Anordnung sich aus einem längeren Planungs- und Abstimmungsprozess innerhalb der Projektpartner ergeben haben.

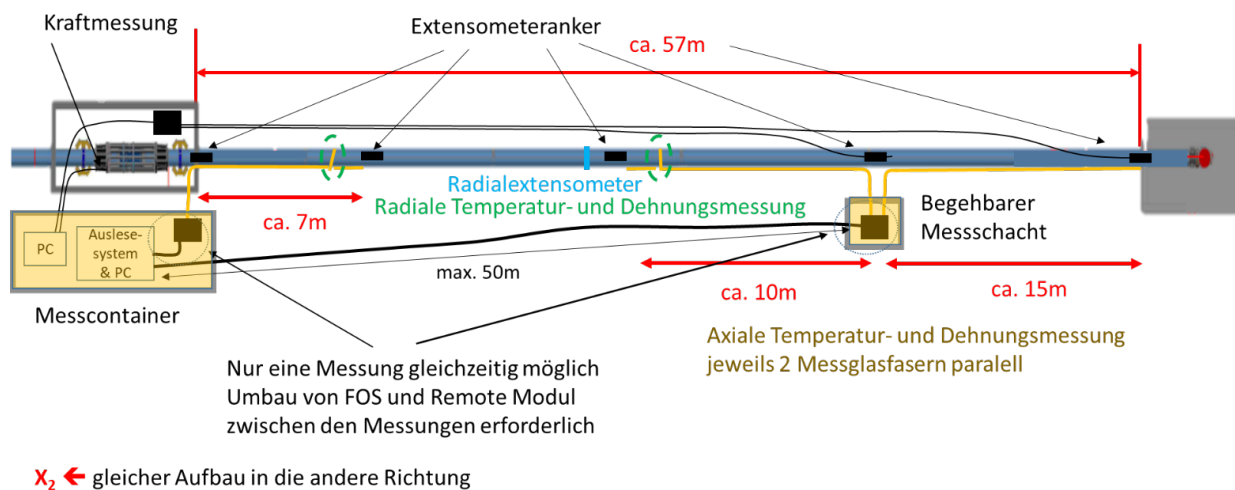


Abbildung 4: Prinzipskizze punkt- und linienförmige Sensorik direkt an der DC CTL.

Die axialen Verformungen der DC CTL aufgrund der Temperaturbelastung werden durch 2 sich ergänzende und zum Teil redundante Messtechniken erfasst.

Zunächst werden sogenannten Glasfaserstangen-Extensometer punktförmig auf den HDPE-Mantel der DC CTL aufgeklebt (Ankerpunkte). Es handelt sich dabei um ein erprobtes und robustes, mechanisches Messsystem der Fa. Glötzl Baumesstechnik an dessen Ende sich jeweils elektronische Wegaufnehmer (Messköpfe) befinden, die die Verschiebungen

der Ankerpunkte durch Abtasten der nahezu reibfrei in Hüllrohren geführten Glasfaserstangen erfassen. Die Extensometer werden beidseitig des Messschachts MS1 mit jeweils 5 Ankerpunkten ausgebildet und erfassen somit die axialen Verschiebungen mit einer Genauigkeit im 100 μm - Bereich.

Etwa 30 m des frei beweglichen Endes werden sehr genau und hochaufgelöst mittels einer faseroptischen Messung linienförmig überwacht, um die zyklischen axialen Dehnungen und Verformungen der DC CTL, da sich im W. im Endbereich abspielt, ausreichend genau zu erfassen. Die Faseroptik Luna Odisi B misst auf Abschnitten ≤ 5 mm die Dehnung, so dass bei 30 m Messlänge mindesten 6.000 Messpunkte erfasst und ausgewertet werden können. Auf diesen 30 m ergänzen sich Faseroptik und Extensometer und weisen eine gewisse Redundanz auf.

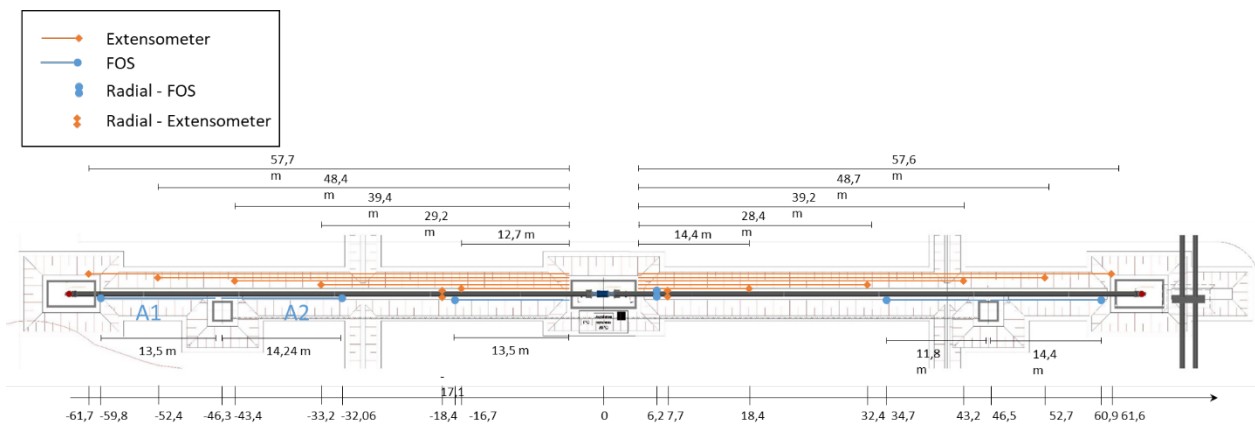


Abbildung 5: Punkt- und linienförmige Sensorik direkt am DC CTL Versuch B, Stand Juni 19.

Bei faseroptischen Dehnungsmessungen müssen beim System Luna Odisi B immer 2 Messglasfasern befestigt werden, um mechanische und temperaturbedingte Dehnungen differenzieren zu können. Dazu wird eine Temperaturmessglasfaser, die in einem Gel-gefüllten Röhrchen reibungsfrei geführt wird, mit eingebaut.

Die radialen Ausdehnungen (Umfangsänderungen) der DC CTL werden in 2 x 2 Bereichen jeweils mit einem Radialextensometer und faseroptisch erfasst.

Das dauerhafte Befestigen der faseroptischen Sensoren auf oder im HDPE-Mantel mit kontinuierlichem Verbund stellte eine spezielle Herausforderung dar. Durch Verwendung eines Spezialklebers konnten die Faser kraftformschlüssig in eine eingefräste Nut im HDPE-Mantel eingeklebt werden.

Weiterhin ist in Abbildung 4 die Kraftmessung am mechanisch überbrückten Axialdehnungskompensator skizziert. In der aus 12 Stahlstangen bestehenden Kompensatorbrücke

werden vorgespannte, ringförmige Kraftmessdosen angeordnet, mit denen die Kräfte gemessen werden können. Auch die Kraftmessdosen weisen elektronische Geber auf, die ein kontinuierliches Monitoring ermöglichen.

Aus der Detailplanung Messtechnik für Langzeitüberwachung der erdverlegten DC-CTL-Verformungen und -Spannungen bzw. Kräfte ergaben sich folgende Positionen:

- 10 axiale Glasfaserstangen-Extensometer inkl. aufzuextrudierender Befestigungssättel in Längen bis 60 m; elektronischer Messkopf mit Messgenauigkeit +/- 0,1 mm; trittgeschützte Kabel von Schacht MS1 bis in Messcontainer.
- 2 radiale Glasfaserstangen-Extensometer inkl. Befestigungssättel in Längen bis 4 m; elektronischer Messkopf mit Messgenauigkeit +/- 0,1 mm; trittgeschützte Kabel von Schacht MS1 bis in Messcontainer.
- 12 Kraftmess-Sensoren (ölhydraulisch vorgespannte, ringförmige Ankerkraftmessdosen KK500A50) für Kompensatorbrücke im Schacht MS1; max. Kraft $F_{\max} = 500 \text{ kN}$, Messgenauigkeit $0,01 \cdot F_{\max}$; trittgeschützte Kabel von Schacht MS1 bis in Messcontainer.
- Multiplexer Typ MUM-30 mit A/D-Wandler für bis zu 40 Kanäle mit BUS-Anbindung für die Messanlage MCC in Schacht MS1; trittgeschützte Kabel von Schacht MS1 bis in Messcontainer.
- Messanlage MCC/Datenlogger mit LAN- und USB-Schnittstelle; Platzierung im Messcontainer. Unterbrechungsfreie Stromversorgung 230 V erfolgt AG-seitig.

Das faseroptische Messsystem Luna Odisi B war bereits an der OTH.R vorhanden; es musste nur der Spezialkleber sowie ein zweites Remotemodul und die erforderlichen Messglasfasern beschafft werden.

- Remote Module und Kabel von Messschächten (S1, S2, MS1) zu Mess-Container
- 12 kombinierte Temperatur- und Dehnungsmessglasfasern in Gleitbereichen des DC-CTL-Rohres (Messfaserlängen bis zu 20 m; Messabschnitte 5 mm) zur Klebung direkt im PE-Mantel des DC-CTL-Gehäuses/ Alu-Außenrohr

Die zugehörigen PCs wurden von der OTH.R gestellt.

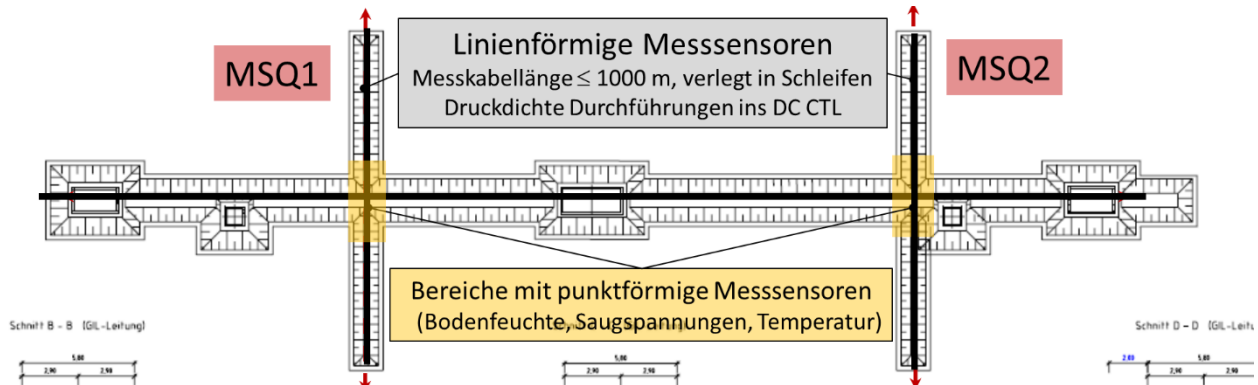


Abbildung 6: Anordnung der punkt- und linienförmigen Messsysteme in Bettung und Boden.

4.2. Linienförmige Temperaturmessung

Die linienförmige Erfassung der Temperaturen im Bettungsmaterial und im Boden um die erdverlegte DC CTL dient der Ermittlung der räumlichen Auswirkung der Temperaturerhöhungen in der DC CTL. Dazu werden ober- und unterhalb der DC CTL in Längsrichtung Messglasfaserkabel verlegt sowie auch senkrecht zur Trasse in Gräben bis zu ± 20 m von der DC-CTL-Achse entfernt wie in Abbildung 6 dargestellt. Zusätzlich sollte auf Wunsch von Siemens Energy das Messkabel über druckdichte Durchführungen auch durch den Hohlleiter der DC CTL geführt werden, um Referenztemperaturen im Inneren der DC CTL zu erfassen.

Da bei den linienförmigen Temperaturmessungen längs der DC CTL und in den Gräben senkrecht dazu, mit Ausnahme in den beiden Kreuzungsbereiche (gelbe Rechtecke in Abbildung 6), nur geringe Temperaturgradienten auftreten, konnte ein System mit einer Ortsauflösung/ Diskretisierung von minimal 0,15 m und Temperaturmessungen $\pm 1,0$ K der Fa. Osscad gewählt werden, welches nach dem Prinzip der Glasfaser Raman-Streuung mit Reichweiten bis zu 2000 m arbeitet. Einen weiteren wichtigen Punkt stellen die in der Kanalsanierung erprobten und robusten, Aramid-bewehrten Messkabel der Fa. Osscad dar, die auch direkt in der Erde und in der ZFSV-Bettung verlegt werden können.

Aus der Detailplanung Messtechnik ergaben sich für langzeitliche, linienförmige Temperaturmessung der erdverlegten DC-CTL folgende Positionen:

- Messgerät OSSCAD zur linienförmigen Temperaturmessung bis zu 1.000 m bei Messgenauigkeiten ± 1 K auf etwa 0,15 m langen Abschnitten; platziert in Mess-Container.
- Bis zu 1.000 m robustes Glasfasermesskabel für Erdverlegung zur Temperaturmessung
- PC mit Mess- und Auswertesoftware

4.3. Punktförmige Messungen

In Bereichen höherer Temperaturgradienten muss die dort räumlich zu grob auflösende, linienförmige Faseroptik mittels punktförmiger Sensoren ergänzt werden. Wie bereits in Abbildung 6 dargestellt, handelt es sich dabei um die beiden Kreuzungsbereiche (gelbe Rechtecke). In Abbildung 7 sind Querschnitte der beiden Kreuzungsbereiche dargestellt, wobei mittels gelben Dreiecks der Boden- Bettungsbereich hervorgehoben ist, in dem sich die punktförmigen Sensoren konzentrieren. In diesen als Messquerschnitt MSQ1 und MSQ2 bezeichneten Bereichen werden neben den punktförmigen Temperatursensoren auch die Bodenfeuchtesensoren und die Saugspannungsgeber (Tensiometer) installiert.

Von den Messquerschnitten ausgehend, werden die Kabel der Sensoren zu den Messschächten MS2 und MS3 geführt bzw. in Schutzrohren und Kabelkanälen verlegt und an wetterfeste Datalogger angeschlossen. Von den Dataloggern in den Messschächten führen Datenkabel zu den PC im Messcontainer.

Zur Differenzierung wetterbedingter Einwirkungen und durch das Beheizen der DC CTL hervorgerufener Einwirkungen auf Boden- und Bettung wird eine Wetterstation neben dem Messcontainer aufgebaut, die die Temperatur in unterschiedlichen Höhen, Wind, Luftfeuchte, Regen, Strahlung, etc. aufzeichnet und an die Mess-PCs überträgt.

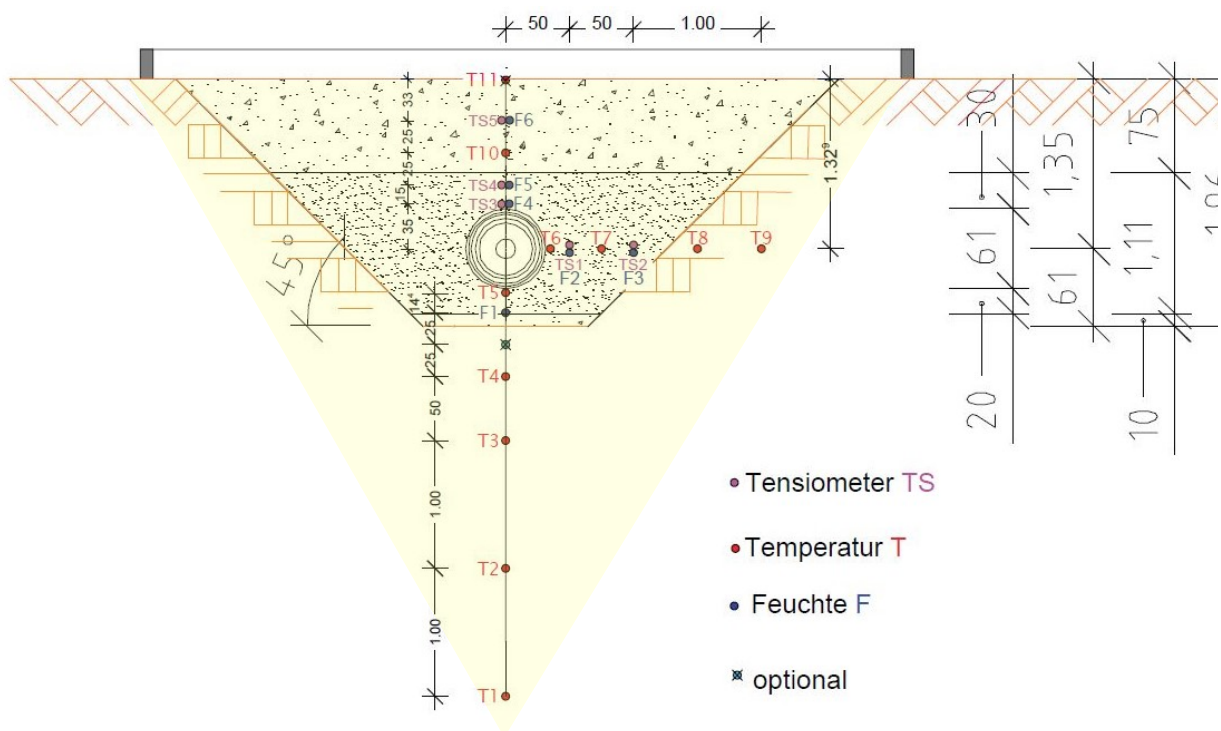


Abbildung 7: Bemaßter Messquerschnitt mit Bereich für punktförmige Sensoren.

Aus der Detailplanung Messtechnik ergaben sich für punktförmige Langzeitüberwachung im DC-CTL-Nahbereich zur Erfassung der Temperatur sowie der Saugspannungen, Bettungs-/Bodenfeuchte und des Wettergeschehens folgende Positionen.

- a) Komplette Wetterstation: 2 x Temperatur, Wind, Luftfeuchte, Regen, Strahlung, etc. / inkl. Datalogger und Kabel; Anschluss an PC in Messcontainer.
- b) 10 Saugspannungsgeber Typ UMS T4 zur Erfassung des Matrixpotentials im Boden inkl. Kabel zum Datalogger GP2 Messschacht MS1/MS3
- c) 12 Feuchtesensoren Typ ML 3 zur Erfassung des volumetrischen Wassergehalts in Bettung und Boden inkl. Kabel zum Datalogger GP2 Messschacht MS1/ MS3
- d) Temperatursensoren Typ PT100 und/ oder NTC 1,8kOhm inkl. Kabel zum Datalogger GP2 Messschacht MS1/ MS3
- e) Datalogger GP 2 mit 2 x 24 Kanälen in Messschächten mit Datenkabel zu Mess-Container

5. Messergebnisse und Auswertungen

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Daten dargestellt, ausgewertet und diskutiert. Dafür werden zunächst die Bauphasen abgebildet sowie die Entwicklung des Wetters (insbesondere Luft-Temperaturen und Niederschläge) und die gemessenen Strom-Lastzyklen bzw. Heiz-Lastzyklen in Diagrammen dargestellt. Anschließend werden die zeitliche Entwicklung der Bodentemperaturen sowie der Bodenfeuchte und der Saugspannungen im Boden erläutert und bewertet. Auf Basis dieser Informationen können zum Abschluss die DC-CTL-Verformungen und Spannungen diskutiert und bewertet werden.

5.1. Bauphasen, Temperaturen, Niederschläge

Stand: Dez.20	2019												2020											
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Messtechnik																								
Einbau	4 m																							
Mechanik Glötzl	5 w			23.	21.																			
Temp. OSSCAD	13 w			1.		19.																		
Wetter etc. UP	4 m		27.		29.	19.																		
Dehnung Luna	5 w			23.	28.																			
Messung					20.																			
ZFSV																								
Einbau	3 w				27.	17.																		
Aushärten	4 w					18.	15.																	
Bestromung	10 m																							7.
Zyklus 1	8 w							16.	15.	11.														
Zyklus 2	8 w									11.	11.	8.												
Zyklus 3	8 w										8.	11.	13.											
Zyklus 4	8 w											13.	8.	28.										
Zyklus 5	8 w																							
Dauerbetrieb	23 w																28.						2.	

Abbildung 8: Bau- und Prüfablauf Versuch B

Gemäß Abbildung 8 haben die Verfüllarbeiten mit ZFSV am 27. Mai. 19 begonnen und erstreckten sich mit einigen tageweisen Unterbrechungen über etwa 3 Wochen, bis am 17. Jun. 19 das Vergießen der DC CTL mit ZFSV abgeschlossen wurde. Die geplante Mindestaushärtedauer von 4 Wochen wurde am 15. Jun. 19 erreicht.

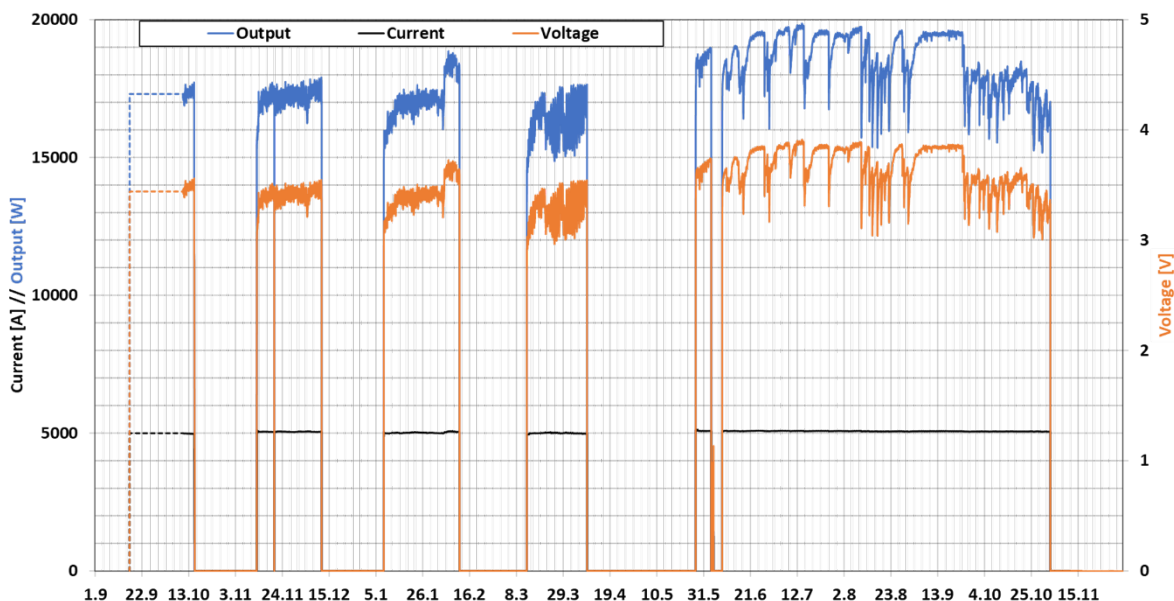


Abbildung 9: Messergebnisse Lastzyklen, Stand 07. Dez. 20.

U.a. aufgrund verschiedener bau- und messtechnischer Nacharbeiten wurde der erste Lastzyklus am 16. Sep. 19 mit der Bestromungsphase gestartet. Inzwischen sind 4 komplette Lastzyklen abgeschlossen. Ein Lastzyklus ist dabei als eine etwa 4-wöchige Bestromungsphase mit 5000 A (+/- 1%) gefolgt von einer etwa 4-wöchigen passiven Abkühlphase mit 0 A DC definiert. Die Abkühlphase des 4-ten Lastzyklus erstreckte sich über fast 8 Wochen, da ein Defekt am Osscald-Messsystem behoben werden musste. Seit dem 28. Mai 20 wurde mit Dauerbestromung über 5 Monate mit rund 5000 A DC aufgebracht, wobei aufgrund der Reproduzierbarkeit der erzeugten Verschiebungen und Temperaturen in den ersten 4 Lastzyklen von einem 5-ten Lastzyklus abgesehen werden konnte. Die Dauerbestromung wurde am 2. Nov. 20 beendet. Der Rückbau der Messtechnik erfolgte zum 8. und 9. Dezember 2020.

Die Lastzyklen sind in Abbildung 9 dargestellt, worin die schwarze Linie den gemessenen Strom von rund 5000 A DC kennzeichnet. Die eigentlichen Strom- und Spannungsmessungen konnten erst am 10. Okt. 19 installiert werden, weswegen der Zeitraum zwischen dem 16. Sep. und 10. Okt. 19 (1-te Bestromungsphase) mit einer gestrichelten Linie dargestellt wird. Deutlich erkennbar ist zudem der etwa 2-stündige Stromausfall am 20. Nov. 19 und der mehrtägige Stromausfall vom 3. Jun. bis 8. Jun. 20.

Die zusätzlich zwischen den beiden Enden der DC CTL gemessene Spannung ist durch eine orangefarbige Linie abgebildet. Die gemessenen Werte (rechte y-Achse) verlaufen im W. zwischen 3,0 und 3,6 V, wobei der raue Verlauf auf die Schwankungen der Lufttemperatur und damit auch auf die Temperatur- und Widerstandsschwankungen der offenliegenden Stromschiene zwischen Stromgenerator und den beiden DC-CTL-Enden zurückzuführen sind. Weiterhin ist in Abbildung 9 die Leistung als blaue Linie dargestellt. Diese weist dieselben Schwankungen wie der gemessene Spannungsverlauf auf, da die Leistung als Produkt aus Strom und Spannung berechnet wurde.

Die im Zeitraum 1. Jun. 19 bis 7. Dez. 20 gemessenen Lufttemperaturen erreichen Spitzenwerte über 40°C Ende Juli 2019 und -7 °C Mitte Januar 2020, wie Abbildung 10 entnommen werden kann. Im Jahr 2020 ist den Lufttemperaturen ist Mitte August 20 ein deutliches Maximum ca. 36 °C erkennbar, das jedoch hinter den 40°C Ende Juli 2019 zurückbleibt. Bis hin zum Ende November 20 sinken die Temperaturen auf im Mittel ca. 3 °C. Die Schwankungen der Temperaturen zwischen Tag und Nacht überlagern erwartungsgemäß die wetterlagen- und jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen der Luft.

Während die täglichen Lufttemperaturschwankungen keinen erkennbaren Einfluss auf die Bodentemperaturen auf Höhe des Innenleiters haben, zeigen sich jedoch zeitverzögerte

Auswirkungen der wetterlagenbedingten Lufttemperaturschwankungen, wie gut in der Hitzeperiode vom 21. bis 26. Juli 19 erkennbar. Die maximalen Bodentemperaturen werden durchaus erst 2 bis 3 Tage nach dem Abklingen der Hitzewelle in der deutlich kühleren Phase erreicht.

Die im Zeitraum 1. Jun. 19 bis 7. Dez. 20 gemessenen Bodentemperaturen erreichen Maximalwerte von etwa 21°C Ende Juli 19 und etwa 23°C Mitte August 20 sowie Minimalwerte 4,5 °C Ende Januar 20. Wie erwartet folgen die Bodentemperaturen in relativ geringer Tiefe von etwa 1,35 m unter der Geländeoberfläche (GOF) in stark gedämpfter Form mit etwas Zeitverzögerung den Lufttemperaturen. Seit April 2020 steigen die Bodentemperaturen wieder an und erreichten im Jun. 20 etwa 17 °C, um bis Ende Nov. 20 wieder auf ca. 9 °C abzusinken.

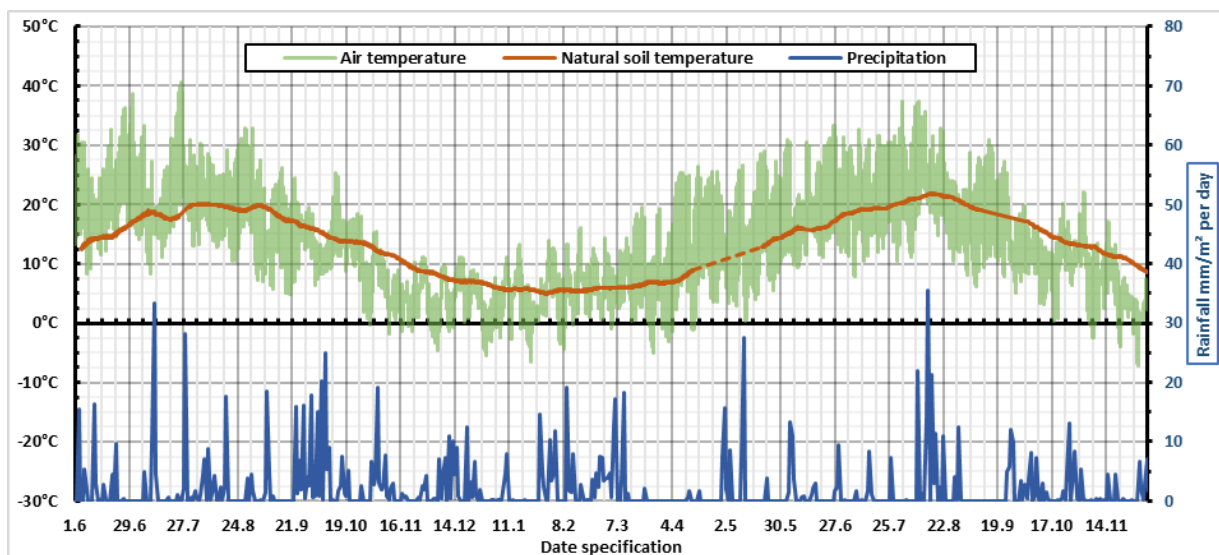


Abbildung 10: Lufttemperatur in [°C] 2,0 m über Geländeoberfläche (grüne Linie), unbeeinflusste Bodentemperatur auf Höhe des Innenleiters etwa 10 m von der DC CTL entfernt (braune Linie), Niederschläge in Millimeter [mm] je Quadratmeter [m²] Geländeoberfläche gemittelt über einen Tag (rechte y-Achse).

Auswirkungen der ebenfalls in Abbildung 10 dargestellten Niederschläge auf die Bodentemperaturen in einer Tiefe von etwa 1,35 m unter GOF als alleinige Ursache sind auch im Sommer mit Starkniederschlägen wie am 19. Aug. 19 oder 15. Aug. 20 nicht erkennbar. Vielmehr gehen Niederschläge häufig mit geringeren Lufttemperaturen einher, welche dann in Kombination die Bodentemperaturen verringern.

In Abbildung 11 wurde neben dem Verlauf der Lufttemperatur die zeitlichen Verläufe der nichtbeeinflussten Bodentemperaturen etwa 10 m von der DC CTL entfernt in Tiefen -0,35 m bis -1,65 m unter Geländeoberfläche mit dargestellt. Erwartungsgemäß zeigen die geländeoberflächennahen Bodenbereiche stärkere Ausschläge als die tieferen und liegen im Sommer deutlich über und im Winter deutlich unterhalb der Temperaturentwicklung der Lagen auf Höhe der DC CTL. Bodenfrost wurde im Winter 2019/20 nicht beobachtet.

Wichtig ist festzuhalten für die Bewertung der im Folgenden diskutierten Messergebnisse, dass die Einbettung in ZFSV bzw. das Vergießen mit ZFSV der DC CTL im W. in der ersten Junihälfte 2019 bei Lufttemperaturen zwischen 10 und 30 °C sowie bei etwa 15°C mittleren Bodentemperaturen 1,35 m unter GOF erfolgte.

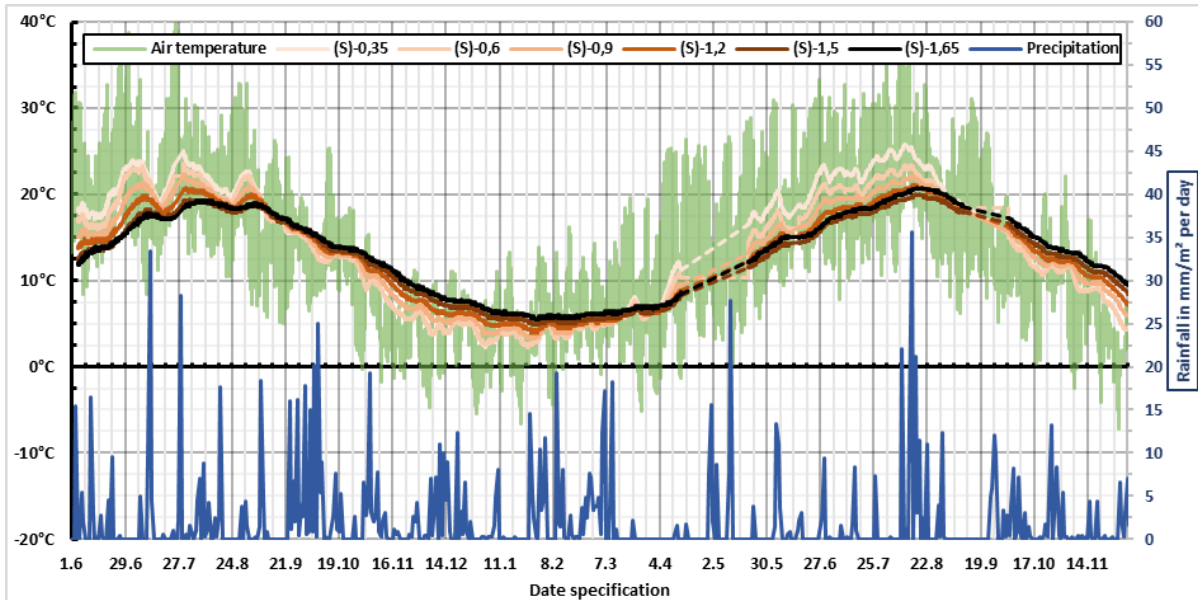


Abbildung 11: Lufttemperatur in [°C] 2,0 m über Geländeoberfläche (grüne Linie), unbeeinflusste Bodentemperaturen etwa 10 m von der DC CTL entfernt in Tiefen -0,35 m bis -1,65 m unter Geländeoberfläche. Niederschläge in Millimeter [mm] je Quadratmeter [m²] Geländeoberfläche gemittelt über 1 Tag (rechte y-Achse).

5.2. Bodentemperaturen

Die Messungen der Bodentemperaturen und -feuchten sowie der Saugspannungen erfolgen im Wesentlichen in den Messquerschnitten MSQ1 und MSQ2, deren Lage der Abbildung 6 zu entnehmen ist. Die Bezeichnungen der folgenden Diagramme beziehen sich überwiegend auf die in Abbildung 12 aufgenommenen Abkürzungen.

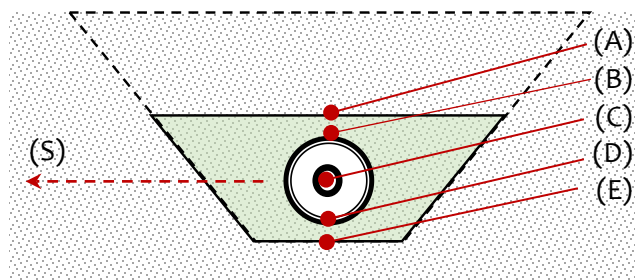


Abbildung 12: Lage und Bezeichnung der Sensoren/ Messpunkte in den Messquerschnitten. (A) Oberfläche ZFSV, (B) Oberfläche Scheitel Außenrohr DC CTL, (C) Innenleiter; (D) Oberfläche Auflager Außenrohr und (E) Grabensohle/ Unterseite ZFSV. (S) etwa 10 m entfernt auf Höhe des Innenleiters im unbeeinflussten Bereich des natürlich anstehenden Bodens.

In Abbildung 13 sind die Temperaturentwicklung in [°C] über den Zeitraum 1. Sep. 19 bis 25. Okt. 20 abgebildet. Anhand der Temperaturentwicklung des Innenleiters (C) sind in Abbildung 13 die Bestromungs- bzw. Heizphasen sehr deutlich erkennbar, wobei die Messwerte anhand des OSSCAD-Systems im Innenleiter zum einen über den gesamten Südstrang gemittelt (avg.) und zum anderen der Maximalwert (max.) abgelesen und jeweils

dargestellt wurden. Der Nordstrang unterscheidet sich nur unwesentlich vom Südstrang, weshalb aufgrund besserer Übersichtlichkeit auf eine zusätzliche Darstellung verzichtet wurde. Die einzelne Spitze am 11. Sep. 19 ist auf eine zweistufige Testbestromung vor Beginn der eigentlichen Lastzyklen, der Einbruch der Temperaturen Anfang Juni 20 auf einen mehrtägigen Ausfall der Spannungsversorgung zurückzuführen.

Die in (C) erreichte Temperatur betrug etwa 68°C mit Ende der ersten Heizphase am 15. Okt. 19. In den folgenden Lastzyklen wurde dieser Wert aufgrund der jahreszeitlich bedingten, fallenden Luft- und Bodentemperaturen nicht mehr erreicht. Erst in der Heizphase Ende Mai 2020 stieg die Temperatur wieder auf ca. 68 °C. Die Durchschnittstemperatur des Innenleiters bleiben über den gesamten Beobachtungszeitraum etwa 2,5 bis 3,0 K unter den Maximaltemperaturen zurück. Mit Beginn der Dauerheizphase stiegen die Temperaturen bis zu einem Maximalwert von ca. 85 °C im August 20. Bis zum Ende Oktober fielen die Temperaturen wieder auf im Mittel 75 °C.

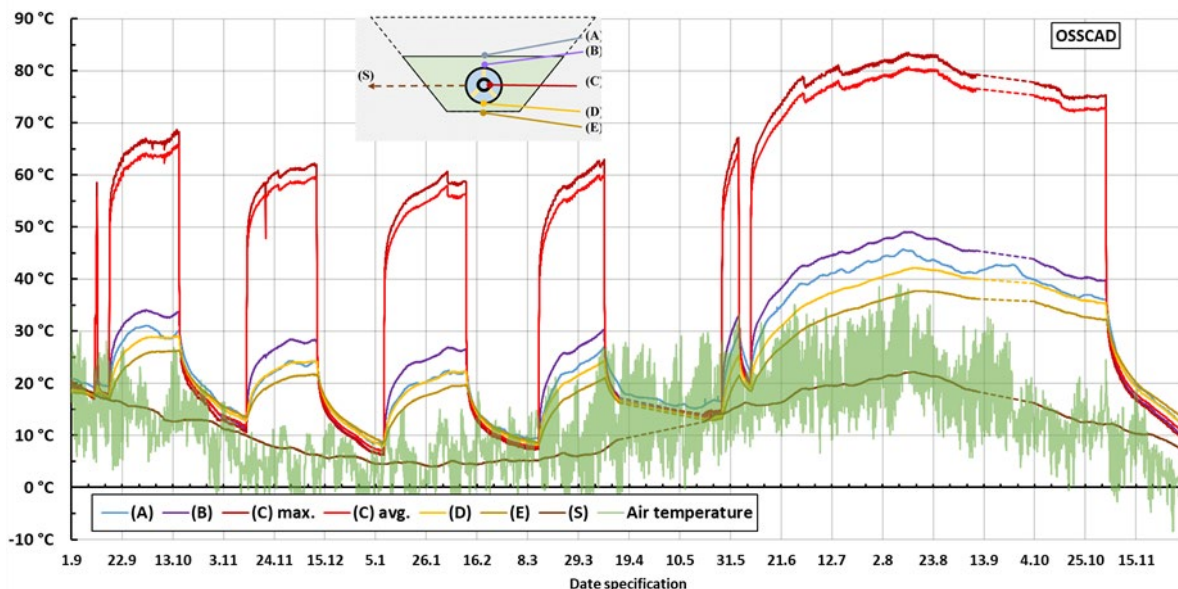


Abbildung 13: Temperaturentwicklung in [°C] über den Zeitraum 1. Sep. 19 bis 07. Dez. 20. Gestrichelte Linien zeigen Ausfälle und Wartungszeiträume des jeweiligen Messsystems an.

Die Temperaturen werden am Rohrscheitel (B) bei 12 Uhr und am Rohraufleger (D) bei 6 Uhr direkt am HDPE-Mantel des Außenrohrs mittels OSSCAD – System erfasst. Erwartungsgemäß werden in (B) etwa 3 bis 5 K höhere Temperaturen gemessen als in (D). Das Außenrohr bleibt in (B) mit max. 33 °C am Ende der ersten Heizphase am 15. Okt. 19 jedoch mit 35 K unter der max. Temperatur des Innenleiters zurück. In der Dauerheizphase ab Ende Mai 20 erreicht die Temperatur (B) ein Maximum von 48°C im Aug. 2020. Auch hier bleibt die Temperatur des Außenrohres um 35 K unter der max. Temperatur des Innenleiters.

Die Temperaturentwicklung an den Kontaktfläche ZFSV/ Sandüberdeckung, mit (A) bezeichnet, und an der Kontaktfläche ZFSV/ Sand in der Grabensohle (E), zeigt immer geringere Werte als in den Messpunkten (B) bzw. (D). Auch diese Temperaturen wurden mittels OSSCAD – System erfasst und in den Messquerschnitten ausgewertet.

Auffällig in Abbildung 13 sind während des ersten Heizzyklus die Temperatureinbrüche in den Messpunkten (A), (B) und (C), die auf den Rückgang der Lufttemperaturen, verbunden mit relativ starken Niederschlägen im Zeitraum 8. – 13. Okt. 19, zurückzuführen sind. Die tieferliegenden Messpunkte (D) und (E) werden dadurch kaum beeinflusst, was die Interpretation der Ursache unterstreicht. Vergleichbare Einbrüche, wenn auch mit weniger starken Auswirkungen auf die Temperaturen, konnten Anfang Dez. 19 und Feb. 20 sowie Sep. 20 beobachtet werden.

Der bereits in Zusammenhang mit Abbildung 9 diskutierte, etwa 2-stündige Stromausfall am 20. Nov. 19 zeichnet sich auch sehr deutlich an den Innenleiter-Temperaturen in (C) und nur geringfügig in (A) am Rohrscheitel ab. Der Temperaturrückgang des Innenleiters (C) am 26. Nov. 19 ist hingegen auf das Nachfüllen des Isoliergases (100% Stickstoff N₂) zurückzuführen. Das Nachfüllen wurde aufgrund einer kleinen Gasleckage am Austrittspunkt der inneren Mess-Glasfaser aus der DC CTL notwendig. Der ebenfalls bereits in Zusammenhang mit Abbildung 9 diskutierte sprunghafte Anstieg der gemessenen Spannung zwischen den DC-CTL-Enden geht einher mit dem Abfall der Innenleitertemperaturen. Was diesen Anstieg bzw. Abfall verursacht hat, muss noch abschließend geklärt werden. Auch der mehrtägige Stromausfall vom 3. Jun. bis 8. Jun. 20 erzeugt die erwarteten Temperaturverläufe am DC-CTL-Rohr und im Boden.

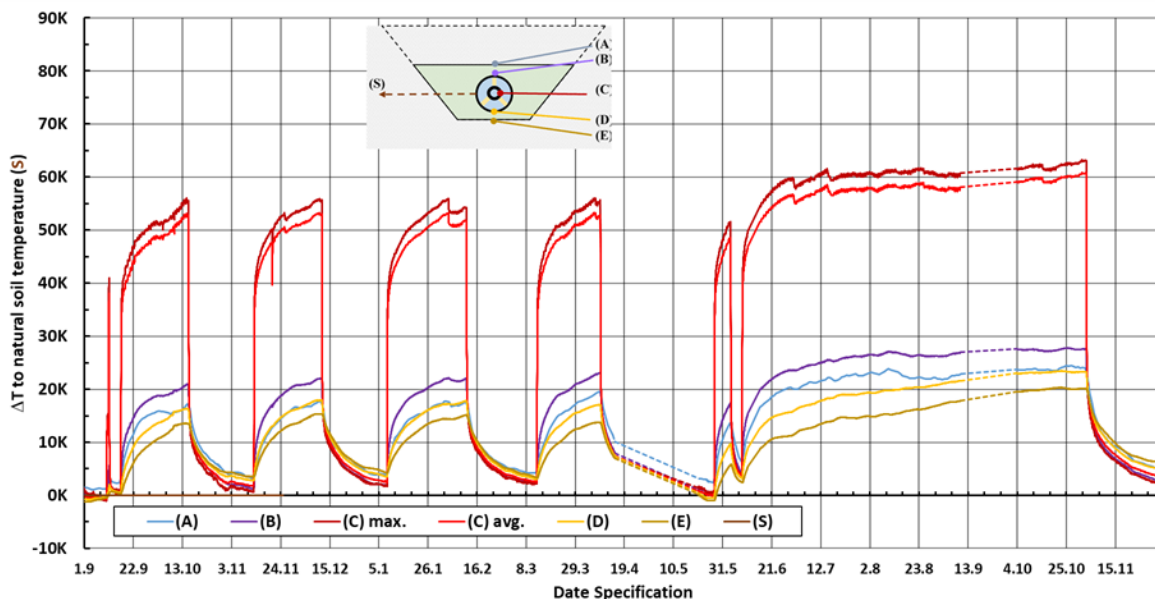


Abbildung 14: Entwicklung der Temperaturdifferenzen in [K] der Messpunkte (A) bis (E) bezogen auf (S) etwa 10 m entfernt auf Höhe des Innenleiters im unbeeinflussten Bereich des natürlich anstehenden Bodens über den Zeitraum 1. Sep. 19 bis 07. Dez. 20. Zuordnung der Messpunktbezeichnungen (A) bis (E) und (S) siehe Abbildung 12. Gestrichelte Linien zeigen Ausfälle und Wartungszeiträume des jeweiligen Messsystems an.

Das Temperaturverläufe (A) bis (E), wie auch in Abbildung 13 gut erkennbar, von den jahreszeitlichen Temperaturentwicklungen überlagert sind, wurde Abbildung 14 die Entwicklung der Temperaturen in [K] in den Messpunkten (A) bis (E) als Differenz bezogen auf (S) etwa > 10 m entfernt auf Höhe des Innenleiters im unbeeinflussten Bereich des natürlich anstehenden Bodens über den Zeitraum 1. Sep. 19 bis 7. Dez. 20 dargestellt. Durch die Differenzbildung können nun die Temperaturverläufe in den Messpunkten (A) bis (E) unabhängig von den jahreszeitlich bedingten Temperaturentwicklungen interpretiert werden.

Die Kurven in Abbildung 14 zeigen, dass weder am Ende der 4-wöchigen Heizphase noch am Ende der 4-wöchigen passiven Abkühlphase stationäre Zustände erreicht werden. Ein weiteres Heizen über den 4-wöchigen Zeitraum hinaus hat zu einem weiteren, wenn auch sehr geringen Anstieg der Temperaturen (A) bis (E) geführt.

Die Temperaturentwicklungen am Ende der 4-wöchigen Heizphasen ist nicht eindeutig zu bewerten, da es in allen Heizphasen Auswirkungen externer Einflüsse gab. Dahingegen ist am Ende der 4-wöchigen passiven Abkühlphase der DC CTL und der umgebende ZFSV etwa +0,5 bis +4,0 K wärmer als der unbeeinflusste Boden in (S), wobei die verbleibende Restwärme von Zyklus zu Zyklus ganz leicht ansteigt (Vergleich 13. Nov. 19 und 10. Mrz. 20). Die Abkühlphase beginnend am 9. Apr. 2020 hat eine Zeitdauer von rund 7 Wochen im Gegensatz zu den vorhergehenden mit 4 Wochen. Erkennbar ist, dass die Temperaturen des ZFSV in dieser Zeit leicht unter die Temperatur des umgebenden Bodens abfallen. Die dargestellte Lücke in der Abbildung 14 für die Monate April/ Mai 2020 ist auf einen Ausfall des Messsystems zurück zu führen.

Interessant ist auch, dass sich ab dem 2-ten Heizzyklus die Temperaturen der DC-CTL-Unterseite (D) an die Temperaturen der DC-CTL-Oberseite (B) angleichen. Zunächst war dies so interpretiert worden, dass erste Relativverschiebungen zwischen DC CTL und ZFSV zu einer Angleichung des Wärmeübergangs an der Kontaktfläche ZFSV/HDPE-Mantel führten. Diesen Effekt auf zeitabhängige Abbindevorgänge des Zementes oder Wassereinlagerung der Schichtmineralien (Bentonite) zurückzuführen, dürfte angesichts des langen Zeitraums zwischen ZFSV-Verguss und Beginn der Lastzyklen eher nichtzutreffend sein. Im 4-ten Lastzyklus bei der Dauerbestromung laufen die Temperaturen der DC-CTL-Unterseite (D) an die Temperaturen der DC-CTL-Oberseite (B) wieder auseinander, was nahelegt, dass diese Effekte bzw. Temperaturverläufe durch die jahreszeitliche Veränderung der Bodentemperaturen beeinflusst werden.

Zu beachten ist weiterhin, dass die Innenleitertemperaturen während der 4-wöchigen passiven Abkühlphase zumindest in der ersten Abkühlphase unter die Temperaturen des Außenrohrs fallen. Dies ist auf Abkühlung des Innenleiters über die Enden der DC CTL in den Schächten S1 und S2 und den Axialkompensator im Messschacht MS1 zurückzuführen, die dort von der Lufttemperatur beeinflusst werden. Der relativ raue Verlauf der Innenleitertemperaturen im ersten Lastzyklus, in dem sich die Tag- und Nachtschwankungen der Lufttemperaturen abbilden, bestätigt diese Interpretation. Nachdem die Giebel der Schächte S1, S2 und MS1 am 11. Nov. 19 mit Folien winddicht verschlossen wurden, reduzierte

sich die Rauigkeit deutlich, da der Luftaustausch zwischen Schachtinnern und der Umgebung dadurch behindert ist. In der 2-ten passiven Abkühlphase unterscheiden sich deswegen die Innenleitertemperaturen nur noch geringfügig von den Temperaturen des Außenrohrs.

Die Dauerbestromung Ende Mai bis Anfang Nov. 20 ist ebenfalls durch einen recht rauen Temperaturverlauf gekennzeichnet, was beim Vergleich den Strom- und Spannungsverläufen in Abbildung 9 zu interpretieren ist: Strom- und Spannungsschwankungen wirken sich direkt auf die Temperaturverläufe des Innenleiters aus. Wetterbedingte Temperatureinbrüche und Niederschläge – wie im Aug. 20 – haben Einflüsse auf die Temperaturen im Boden und Scheitelbereich der DC-CTL.

Das Ziel der Dauerbestromung war, einen näherungsweise, stationären Zustand der Temperaturentwicklungen zu erreichen, um eine maximale Temperaturbelastung der DC-CTL, der ZFSV-Bettung und des umgebenden Bodens zu ermitteln.

Es ist offensichtlich, dass ohne Aufbauen eines Regelkreises Spannungsquelle –Temperatursensoren ein „idealer“ stationärer Zustand beim Versuch (B) nicht zu erreichen und auch nicht erforderlich war, zumal ein solcher idealer Zustand bei erdverlegten Leitungen aufgrund der Überlagerung zahlreicher Einwirkungen, wie Schwankungen im Strom, jahreszeitabhängige Luft- und Grundwassertemperaturen, Niederschläge, Oberflächenbewuchs, etc. sich auch nie einstellt.

Zur Beurteilung, ob ein näherungsweise – stationärer, thermischer Zustand erreicht wurde, können die gemessenen und auf die unbeeinflusste Bodentemperatur auf Höhe der DC-CTL bezogenen Temperaturverläufe in Abbildung 14 herangezogen werden. Im Rahmen der Messgenauigkeit kann anhand der Daten in Abbildung 14 festgehalten werden, dass dieses Ziel am Innenleiter bereits nach etwa 1,5 Monaten Dauerbestromung im Jul. 20 erreicht wurde. In den Punkten (A) und (B) an der Oberfläche der ZFSV-Bettung und am Außenmantel der DC CTL kann ab Aug. 20 von einem stationären Zustand auf einem Niveau von ca. 28 K in (B) und 24 K in (A) ausgegangen werden. Die Temperaturen in den Messpunkten (D) an der DC-CTL-Unterseite und (E) an der Kontaktfläche ZFSV/ Baugrund steigen auch im Okt. 20 noch etwas an, da die von der Geländeoberfläche wirkende, jahreszeitabhängige Abkühlung im Herbst 20 noch nicht die Bereiche unterhalb der DC CTL erreicht hat. Ähnliche Temperaturentwicklungen sind auch in den 4 Belastungszyklen vom Herbst 19 bis Frühjahr 20 zu beobachten.

5.3. Bodenfeuchte und Saugspannungen

In beiden Messquerschnitten MS1 und MS2 wurden jeweils 5 Saugspannungsmessgeber, sowie 6 Feuchtesensoren in horizontaler, sowie vertikaler Richtung entlang der Rohrachsen angeordnet.

5.3.1. Saugspannungen

In der Abbildung 15 wurden Lage und Bezeichnung der Porenwasserdruck- bzw. Saugspannungsgeber (Tensiometer) in den Messquerschnitten aufgenommen. Die bemaßte Zuordnung der Messpunktbezeichnungen findet sich bereits in Abbildung 4. Alle Tensiometer

haben einen Temperaturfühler zur Kalibrierung der Messwerte eingebaut, so dass auch deren Werte dargestellt werden können.

Auf den folgenden Diagrammen ist – abweichend von den bodenmechanischen Konventionen – zu beachten, dass Saugspannungen positive und Porenwasserdrücke negative Vorzeichen haben. Da es zwei Messquerschnitte gibt, werden diese nacheinander in der Abbildung 16 (MSQ1 im Süden) und in der Abbildung 17 (MSQ2 im Norden) dargestellt und vergleichend diskutiert. Zusätzlich wurde die Temperaturentwicklung im Punkt (S) auf Höhe des Innenleiters im unbeeinflussten Bereich in die Abbildungen mit aufgenommen.

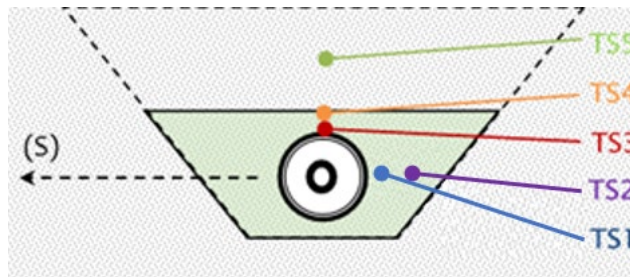


Abbildung 15: Lage und Bezeichnung der Porenwasserdruck- bzw. Saugspannungsgeber (Tensiometer) in den Messquerschnitten: TS5 etwa mittig in der Sandüberdeckung, TS4 etwas unterhalb der Oberfläche der ZFSV-Verfüllung, TS3 etwas oberhalb des Rohrscheitels in der ZFSV-Verfüllung, TS2 und TS1 auf Höhe des Innenleiters in der ZFSV-Verfüllung. (S) etwa 10 m entfernt auf Höhe des Innenleiters im unbeeinflussten Bereich des natürlich anstehenden Bodens. Vermaschte Zuordnung der Messpunktbezeichnungen siehe Abbildung 4.

In den beiden Diagrammen sind mit gestrichelten Linien der jeweilige Beginn der Heizphasen (BH) und deren Ende (EH) gekennzeichnet. So stellen die Zeiträume zwischen EH und BH die passive Abkühlphase zwischen den Lastzyklen dar. Am 02.Nov. 20 wurde die letzte Heizphase beendet. Einbau und Ausbausituation werden separat betrachtet und bewertet.

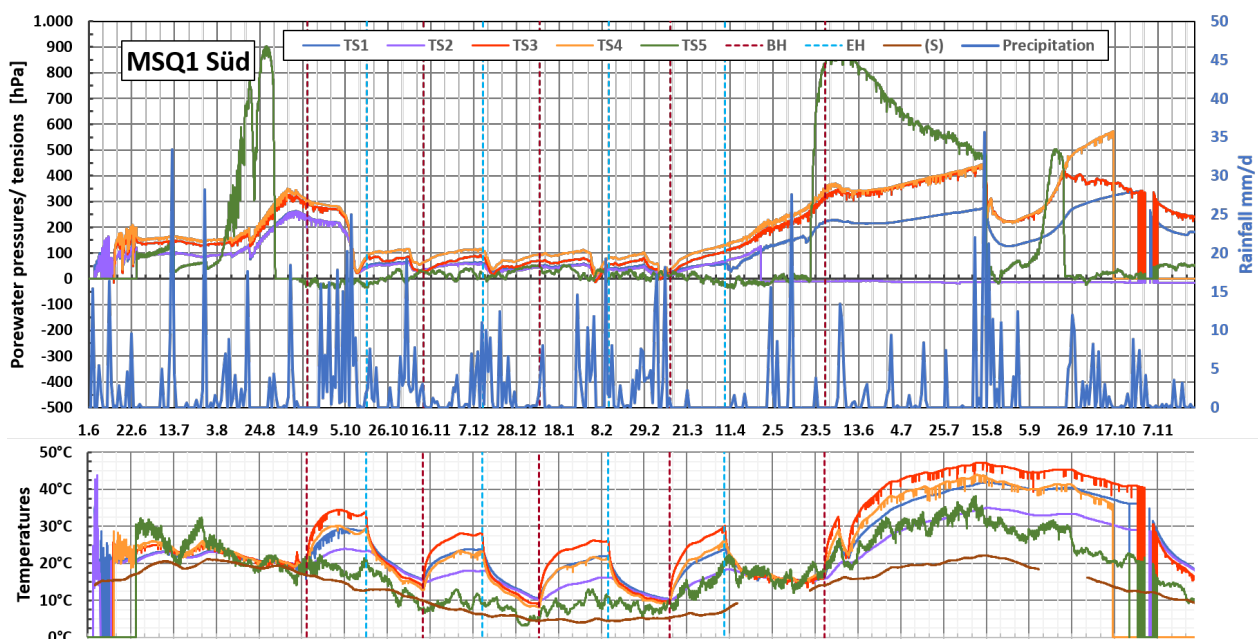


Abbildung 16: Südlicher Messquerschnitt MSQ Süd (MSQ 1). Oben - Entwicklung der Porenwasserdrücke (-) bzw. der Saugspannungen (+) im ZFSV und Sandüberdeckung über den Zeitraum 1. Jun. 19 bis 25.Nov. 20. Unten - Temperaturentwicklung Tensiometer im ZFSV und Boden. Zuordnung der Messpunktbezeichnungen siehe Abbildung 15.

Zunächst werden die Temperaturentwicklungen in den unteren Teilen der Abbildung 16 und der Abbildung 17 betrachtet. Im Juni 2019 sind in beiden MSQ recht starke Ausschläge oder ein schlagartiges Ansteigen der Temperaturen TS1 bis TS5 zuerkennen, die zumeist auf den Einbauvorgang zurückzuführen ist. So wird das höchstgelegene Tensiometer TS5 (grüne Linie) in der Sandüberdeckung in der Woche zwischen dem 21. Juni und 1. Juli 19 eingebaut. Die etwas tieferliegenden Tensiometer TS4 (orange Linie) und TS 3 (rote Linie) im ZFSV über dem Rohrscheitel wurden etwa am 12. Jun. 19 vergossen. Die Tensiometer TS1 (dunkelblaue Linie) und TS2 (violette Linie) wurden etwas früher im Zeitraum 1. – 11. Jun. 19 eingebaut, da diese etwa tiefer auf Höhe des Innenleiters liegen und somit auch früher in ZFSV eingegossen wurden.

Die etwas stärkeren Ausschläge bzw. Temperaturschwankungen der TS3 bis TS4 im Juni 19 sind auf die noch fehlende Sandüberdeckung zurückzuführen. Im Zeitraum 1. Juli bis 16. Sep. 19 mit Beginn der ersten Heizphase schwanken alle Tensiometer im ZFSV im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 25 °C, etwas wellig überprägt von den wetterlagenbedingten Temperaturschwankungen der Luft. Allein TS5 in der Sandüberdeckung weist deutlich höherer Schwankungen auf, aufgrund der größeren Luft- und Wasserdurchlässigkeit des Sandes aber auch der höheren Lage etwa 35 cm unter der GOF.

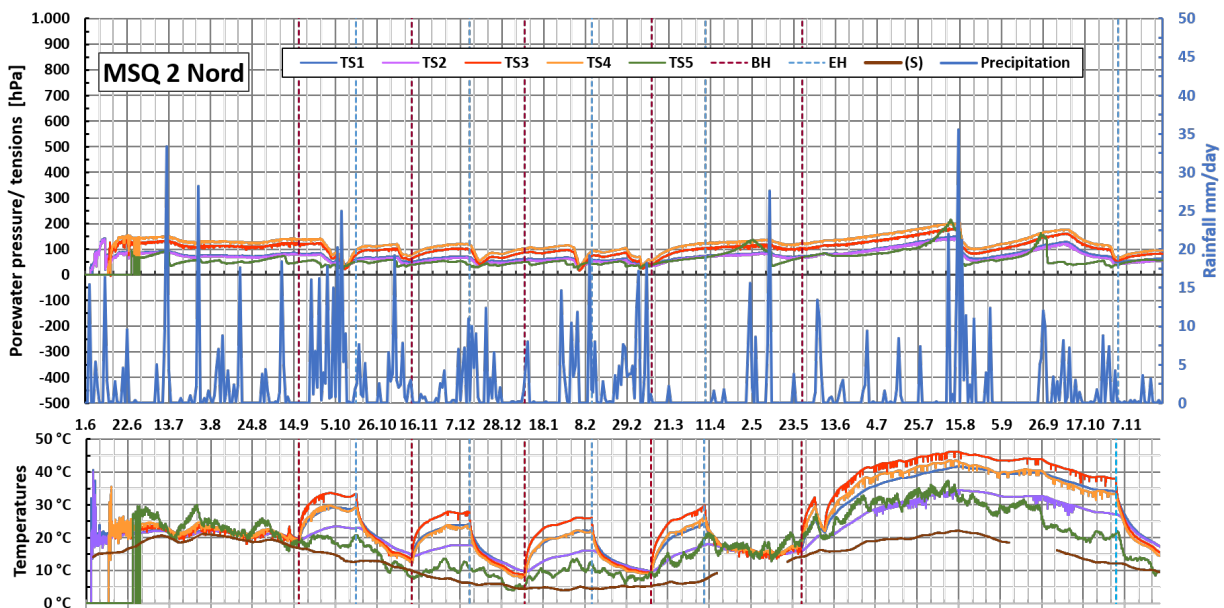


Abbildung 17: Nördlicher Messquerschnitt MSQ Nord (MSQ2). Oben - Entwicklung der Porenwasserdrücke (-) bzw. der Saugspannungen (+) im ZFSV und Sandüberdeckung über den Zeitraum 1. Jun. 19 bis 25. Nov. 20. Unten - Temperaturentwicklung Tensiometer im ZFSV und Boden. Zuordnung der Messpunktbezeichnungen siehe Abbildung 15.

Im ersten Lastzyklus werden etwas oberhalb des DC-CTL-Scheitels am TS 3 maximal 34 °C gemessen, was sehr gut mit den OSSCAD-Messungen in Abbildung 13 übereinstimmt. In beiden MSQ entsprechen die Temperaturentwicklungen der TS1 bis TS5 im Zeitraum 16. Sep. 19 bis 15. Jun. 20 recht gut den OSSCAD-Messungen in Abbildung 13. Deutlich erkennbar wird in Abbildung 16 und Abbildung 17 beim Vergleich der auf Höhe des Innen-

leiters angeordneten TS1 und TS2 der Einfluss des Abstandes auf die Temperaturentwicklung. TS1 wurde etwa 50 cm und TS2 etwa 1,0 m von DC-CTL-Mitte angeordnet. Der unterschiedliche Abstand hat eine Temperaturdifferenz von etwa 10 K zur Folge. TS1 (blau) zeigt etwa dieselben Temperaturverläufe wie TS4 (orangene Linie), das ebenfalls 50 cm – jedoch in vertikaler Richtung nach oben – von der DC-CTL-Mitte angeordnet ist. Dies deutete an, dass in 20 cm Entfernung vom HDPE-Mantel um die gesamte DC CTL herum etwa die gleichen, gegenüber den Innenleiter- und Manteltemperaturen recht geringen Temperaturen herrschen, womit die Wirksamkeit des ZFSV hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit und die Interpretationen der Abbildung 14 bestätigt werden.

Selbst nach Beginn der Dauerbestromung vom 28. Mai. 20 bis 2. Nov. 20 wird eine Maximaltemperatur vom 46°C (TS3) nicht überschritten. Die Dauerbestromung fand während der heißen Sommermonate 2020 statt. Ein Abfall der Temperaturen ab Ende September 2020 trotz der Heizphase lässt darauf schließen, dass Mitte August die maximalen Temperaturen für den Versuchsaufbau erreicht wurden. In 15 cm Abstand zum Rohr wurden 40°C mit Dauerbestromung nur marginal überschritten.

Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Saugspannungen in den oberen Teilen der Abbildung 16 und der Abbildung 17 sind auch hier der starken Ausschläge und Schwankungen im Juni 2019 in beiden MSQ zumeist auf den Einbauvorgang zurückzuführen. In ZFSV eingegossenen Tensiometer TS1 bis TS4 zeigen im Juli 19 moderate Saugspannungen von etwa 150 hPa (etwa 1500 mm Wassersäule), die über den Messzeitraum auf unter 100 hPa im Feb. 20 zurückgehen. Dieser Saugspannungsrückgang dürfte auf die jahreszeitlich bedingte Anreicherung von Niederschlagswasser im Boden und ZFSV zurückzuführen sein. Im weiteren Verlauf steigen die Saugspannungen im MSQ1 ab April 2020 wieder an und erreichen wieder das Niveau von ca. 350 hPa vom September 2019. Die Saugspannungen im ZFSV des MSQ2 bewegen sich auf einem konstanten Niveau um 125 hPa. Der volumetrische Wassergehalt des ZFV im MSQ2 weist ebenfalls von November 2019 bis ca. 25. Mai. 20 nahezu gleichbleibende Verläufe auf.

In Publikationen zu ZFSV, die jedoch mit anderen Böden, Zementen und Bentoniten hergestellt wurden, wird empirisch gezeigt, dass ZFSV ab etwa 750 hPa Saugspannungen zu Rissbildungen („Schrumpfrissen“) mit Lufteintritt neigen. Selbst der nur in MSQ1 Anfang Sep. 20 gemessene Maximalwert von ca. 580 hPa Saugspannungen ist immer noch um 170 hPa vom Grenzwert 750 hPa entfernt. Auf dieses herausstechende Ereignis wird in den folgenden Absätzen im Zusammenhang mit der Diskussion der Messwerte des TS5 in der Sandüberdeckung eingegangen.

Das höchstgelegene Tensiometer TS5 (grüne Linie) in der Sandüberdeckung unterscheidet sich deutlich im Verlauf der Messwerte von den in ZFSV eingegossenen Tensiometer TS1 bis TS4: Regenereignisse führen beim TS5 sofort zu einem Abfall der Saugspannungen, da sich der Wassergehalt durch Aufsättigung der Sandüberdeckung vergrößert. Lediglich lange und niederschlagsreiche Wetterlagen, wie im Sep. 19 und Aug. 20, haben in beiden MQS einen deutlichen Abfall der Saugspannungen im ZFSV zur Folge, wobei der langfristige

Rückgang der mittleren Saugspannungswerte durch die jahreszeitlich bedingte Anreicherung von Niederschlagswasser hervorgerufen wird. Ebenso führen längere Zeiten ohne Regenfallereignisse wie im Mrz. 20 und Apr. 20 zu einem Anstieg der Saugspannungen.

Sehr auffällig im MSQ1 (südlicher Strang) ist der Verlauf der Saugspannungen des TS5 in der Sandüberdeckung aber auch der der Tensiometer T1 bis T4 im ZFSV im Zeitraum Aug. – Sep. 19, zumal dieser Verlauf sich komplett von dem des MSQ2 (nördlicher Strang) unterscheidet. Im TS5 des MSQ1 steigen die Saugspannungen in der Sandüberdeckung auf 900 hPa an, um dann am 1. Sep. 19 auf 0 hPa einzubrechen. Etwa ab dem 13. Sep. 19 – somit 3 Tage vor Beginn des ersten Heizphase – werden geringfügige Porenwasserdrücke gemessen, die dann bis zum 16. Feb. 20 schwankend, teilweise wieder als geringe Saugspannungen < 50 hPa erfasst werden. Da sich MSQ1 und MSQ2 im Aufbau hinsichtlich Geometrie ZFSV und Sandüberdeckung nicht unterscheiden, müssen diese Unterschiede in den Saugspannungsverläufen auf andere Ursachen zurückzuführen sein.

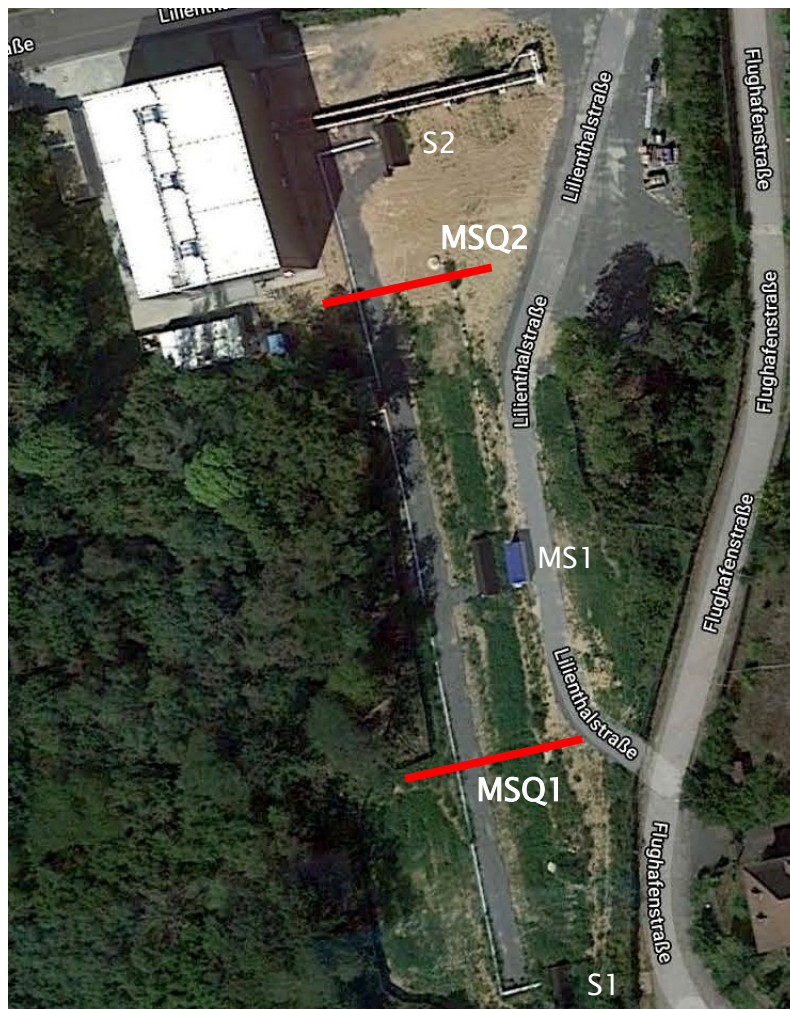


Abbildung 18: Satellitenaufnahme Sommer 2019 vom Versuchsgelände in Griesheim mit eingezeichneter Lage der Messquerschnitte MSQ1 (Süd) und MSQ2 (Nord). Weiterhin gut erkennbar sind die Endschächte S1 und S2 sowie der Messschächte MS1 und die Stromschiene.

Betrachtet man nun eine Luftaufnahme aus dem Sommer 2019 des Versuchsgeländes (Abbildung 18), erkennt man, dass der südliche MSQ1 flächendeckend mit Pflanzen überdeckt und bewachsen, jedoch im Norden der MSQ2 komplett bewuchsfrei war. So lässt sich der

Unterschied in den Saugspannungsentwicklungen auf den starken und schnellen Oberflächenbewuchs zurückführen, der pflanzenbedingte Saugspannungen hervorgerufen hat. Diese Deutung wird unterstrichen, da der bis zu 2 m hohe Spontanbewuchs auch auf MSQ1 Ende Aug. und Anfang Sep. 19 vor Beginn der ersten Heizphase gemäht wurde, womit die pflanzenbedingten Saugspannungen entfallen. Entsprechend fallen auch die Saugspannungen im ZFSV, um sich nach der langen Niederschlagsperiode im Sep. 19 mit einhergehender Aufsättigung aufgrund fehlendem oberflächennahen Bewuchs Anfang Oktober wieder auf Werte < 110 hPa vergleichbar mit MSQ2 einzufinden. Es bleibt festzuhalten, dass der intensive Spontanbewuchs anscheinend eine sehr viel stärkere Auswirkung auf die Saugspannungen hat als die Erwärmung der DC-CTL. Zu dieser Thematik finden sich noch weitere Feststellungen in Abschnitt 5.3.5 bei den Messergebnissen der Feuchtsensoren.

Beim TS5 im MSQ1 ist ab ca. 18. Mai 2020 wieder ein starker Anstieg auf ca. 850 hPa zu verzeichnen. Dieser rapide Anstieg ist darauf zurück zu führen, dass die Tensiometer neu befüllt wurden. Es ist davon auszugehen, dass sich im anstehenden Boden (TS5) so hohe Saugspannungen entwickelt hatten, dass das Tensiometer leer gesogen wurde und somit keine Werte mehr angezeigt hat. Je besser der Füllstand eines Tensiometers ist, desto schneller spricht es auf Änderungen des Porenwasserdruckes an. Ein weiterer Indikator für den starken Anstieg der Saugspannungen des TS5 ist der Abfall des volumetrischen Wassergehalts um etwa 9% im Sand ab Anfang März 2020. Da sich beim MSQ2 ein komplett anderes Bild zeigt und die Saugspannungen des TS5 im MSQ2 nur marginal ansteigen könnte dies wieder durch einen Bewuchs bedingt sein, wie bereits im September 2019. Von Mai 20 bis 15. Aug. 20 weist der Verlauf des Feuchtesensors im Sand einen minimal steigenden, jedoch nahezu geradlinigen, Verlauf auf. Dies spiegelt sich auch in den Messwerten des Tensiometers wider: Diese fallen nahezu linear ab. Die massiven Regenfallereignisse Mitte Aug. 2020 führen zu einem Einbruch aller Messwerte der Tensiometer. Dieser Einbruch ist im MSQ1 ausgeprägter als im MSQ 2. Mit Beginn der Dauerbestromung steigen die Messwerte der Tensiometer an, was im MSQ1 deutlicher erkennbar ist als im MSQ2.

5.3.2. Bodenfeuchte

In beiden Messquerschnitten MSQ1 und MSQ2 wurden auch Feuchtegeber eingebaut, die direkt den volumetrischen Wassergehalt erfassen. Deren Anordnung ist in Abbildung 19 skizziert. Um den Bezug zu den Saugspannungsmessungen herzustellen, wurden die Feuchtegeber neben den Tensiometern eingebaut und die gemessenen Entwicklungen der Wassergehalte über die Zeit wie in den zuvor diskutierten Diagrammen zur Entwicklung der Saugspannungen aufbereitet. Zusätzlich wurde die Temperaturentwicklung (S) auf Höhe des Innenleiters im unbeeinflussten Bereich mit in die Abbildungen aufgenommen.

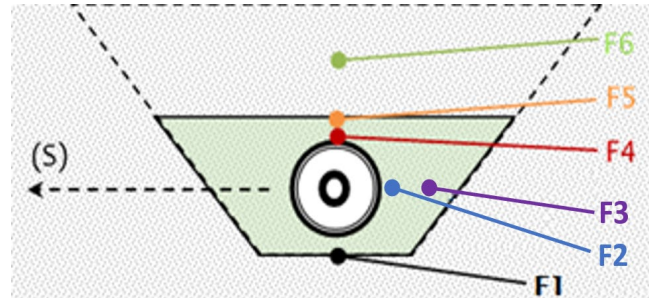


Abbildung 19: Lage und Bezeichnung der Feuchtegeber in den Messquerschnitten: F6 etwa mittig in der Sandüberdeckung, F5 etwas unterhalb der Oberfläche der ZFSV-Verfüllung, F4 etwas oberhalb des Rohrscheitels in der ZFSV - Verfüllung, F2 und F3 auf Höhe des Innenleiters in der ZFSV-Verfüllung, F1 an der Grabensohle. (S) etwa 10 m entfernt auf Höhe des Innenleiters im unbeeinflussten Bereich des natürlich anstehenden Bodens. Bemaßte Zuordnung der Messpunkte siehe Abbildung 4.

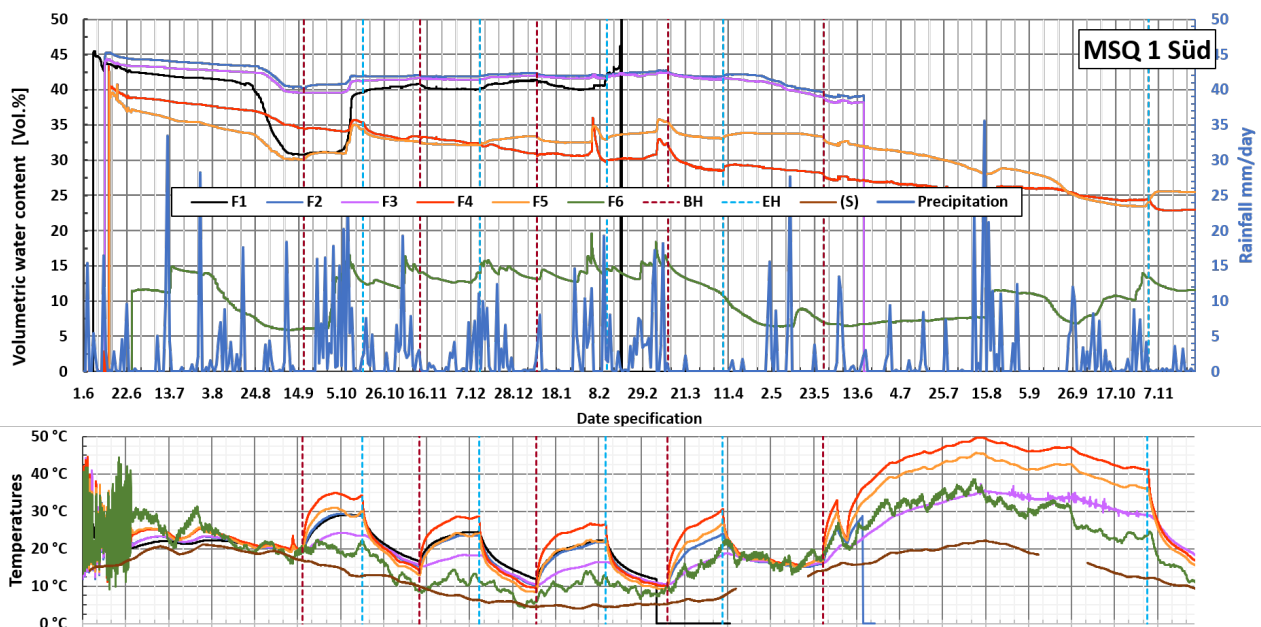


Abbildung 20: Südlicher Messquerschnitt MSQ Süd (MSQ1). Oben - Entwicklung des volumetrischen Wassergehalts in ZFSV und Sandüberdeckung über den Zeitraum 1. Jun. 19 bis 25. Nov. 20. Unten - Temperaturentwicklung Feuchtegeber im ZFSV und Boden.

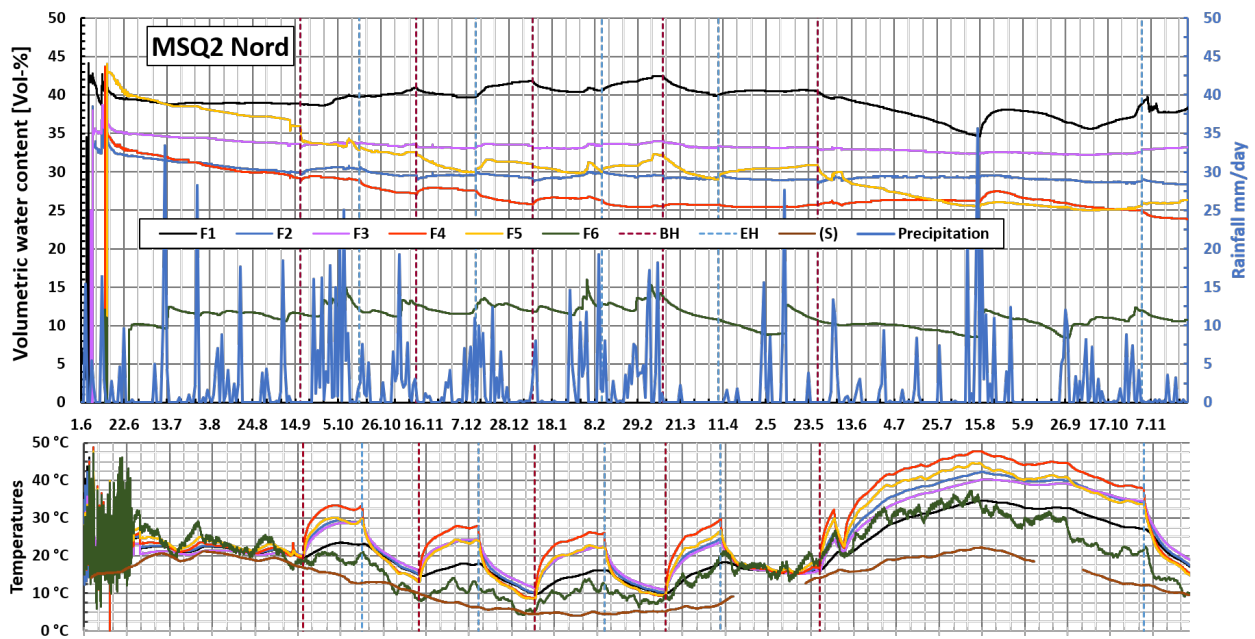


Abbildung 21: Nördlicher Messquerschnitt MSQ Nord (MSQ2). Oben - Entwicklung des volumetrischen Wassergehalts in ZFSV und Sandüberdeckung über den Zeitraum 1. Jun. 19 bis 25. Nov. 20. Unten - Temperaturentwicklung Feuchtegeber im ZFSV und Boden.

Sowohl in MSQ1 bzw. Abbildung 20 als auch MSQ2 bzw. Abbildung 21 ist – mit Ausnahme des in der Sandüberdeckung eingebauten Feuchtegebers (F6) – zu erkennen, dass unmittelbar nach Einbau in den ZFSV volumetrische Wassergehalte zwischen 35 % und 45 % gemessen werden, was in etwa auch den Wassergehalten der fließfähigen ZFSV nach Rezeptur entspricht. Über den Beobachtungszeitraum fallen die Wassergehalte im ZFSV um etwa 5% ab, um dann in etwa ab Sep. 19 konstant zu verlaufen. Diese im Allg. auf die Abbinde- und Einlagerungsvorgänge von Wasser zurückzuführenden Effekte (F1, F2 und F3), unterscheiden sich in beiden MSQ von einem etwas stärkeren Abfall der Wassergehalte im ZFSV über dem DC-CTL-Scheitel der Geber F5 und F4 mit etwa 15%. Auch die Wassergehalte der Geber F5 und F4 bleiben im MSQ2 unter Vernachlässigung der Heizphasen-bedingten Schwankungen ab Dez. 19 etwa konstant. Der Feuchtesensor F5 des MSQ1 stabilisiert sich ebenfalls ab Dez. 19, während hingegen der Feuchtesensor F4 kontinuierlich abfällt. An fast alle Feuchtegebern gehen die Heizphasen mit einer geringförmigen Veränderung der Wassergehalte ($< 3\%$) einher, die sich jedoch unmittelbar mit Beginn der passiven Abkühlphase an die Wassergehalte vor der Heizphase annähern.

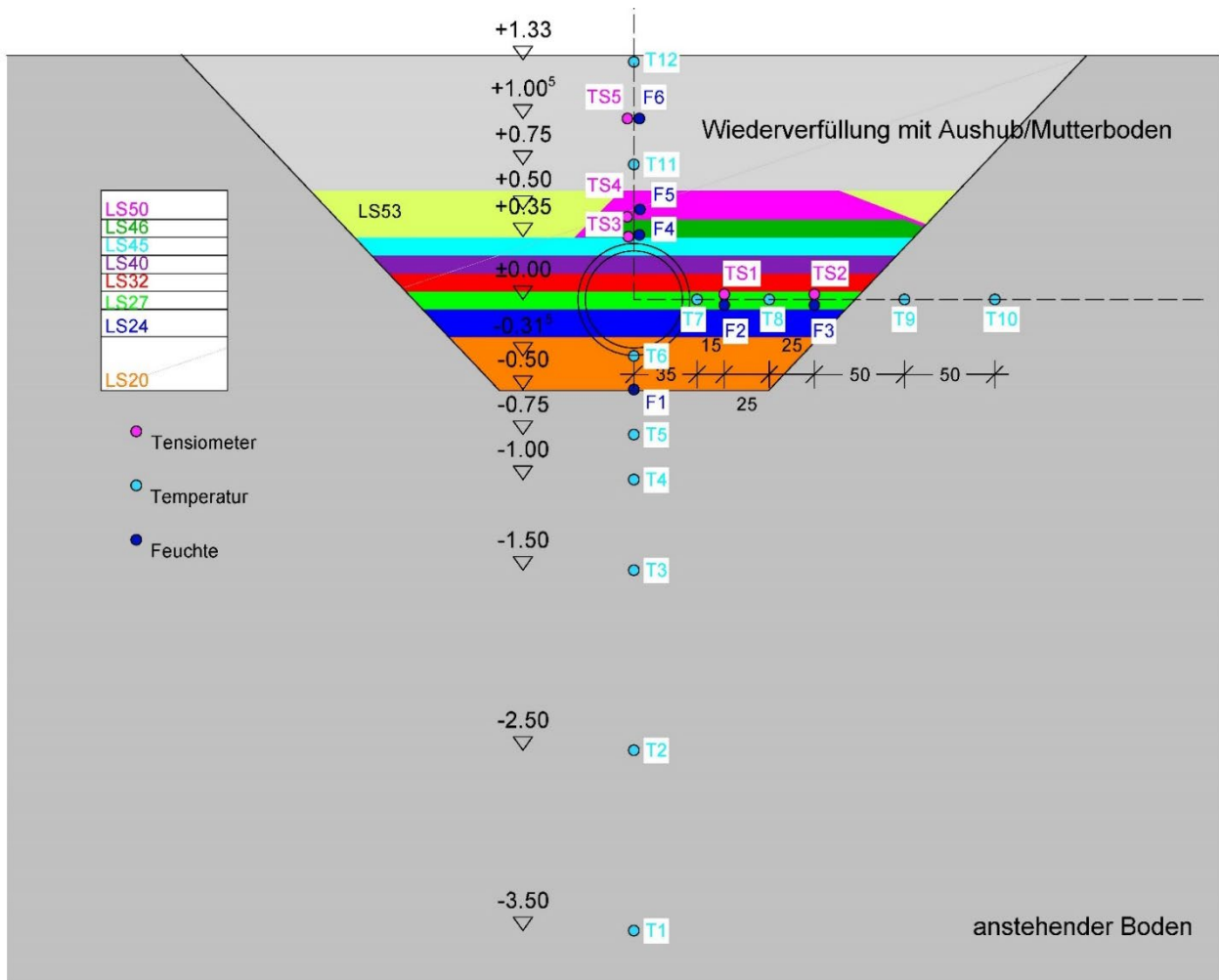
Auch bei den Feuchtemessungen stechen die unterschiedlichen Wassergehaltsentwicklungen im Zeitraum Aug. bis Sep. 19, sowie ab Mitte März 20 zwischen MSQ1 und MSQ2 ins Auge. Der in die Sandüberdeckung des MSQ1 eingebaute Feuchtegeber (F6) zeigt eine Verringerung des Wassergehalts um 10 % auf, der sich erst wieder ab dem 29. Sep. 19 während einer langandauernden Niederschlagsphase innerhalb von etwa 10 Tagen auf die Ausgangswerte normalisiert. Etwas zeitverzögert vergrößern sich auch wieder die Wassergehalte der Feuchtegeber im ZFSV auf die Ausgangswerte aufgrund der gegenüber dem Sand

viel geringeren Durchlässigkeit. Ab Dez. 19 sind die alle Verläufe des volumetrischen Wassergehaltes beim MSQ2 nahezu unverändert. Im Gegensatz hierzu sinken die gemessenen volumetrischen Wassergehalte im MSQ1 ab Mitte März 2020 beim ZFSV um ca. 4%. Der Wassergehalt des Sandes fällt um rund 9%. Dies ist auch im Vergleich mit den Saugspannungen ab Mitte März 2020 plausibel. Mit Beginn der Dauerbestromung sinken alle volumetrischen Wassergehalte des MSQ1 kontinuierlich, mit Ausnahme des im Sand verbauten Feuchtesensors F6. Die Messergebnisse des F6 werden überwiegend durch die Regenfallereignisse bestimmt. Ab dem 13. Jun. 20 ist ein Ausfall der Sensoren F2 und F3 zu verzeichnen. Die gemessenen volumetrischen Wassergehalte der Feuchtesensoren F1, F2 und F4 im MSQ2 bleiben ab Dez. 2019 nahezu konstant. Lediglich die Werte der Feuchtesensoren F3 und F5, welche an der Grenze zum anstehenden Boden verbaut sind, sinken. Auch beim MSQ 2 werden die Messergebnisse des im Sand verbauten Feuchtesensors überwiegend vom Niederschlag bestimmt.

Die beschriebene Entwicklung der Wassergehalte kann auf den starken und schnellen Oberflächenbewuchs in MSQ1 zurückgeführt werden, da pflanzenbedingte Saugspannungen mit Wassergehaltsreduktionen verbunden sind, falls nicht ausreichend Wasser in die betroffenen Bereiche nachströmt oder -gesaugt wird. Auch stimmen die Rückgänge der Wassergehalte mit den Vegetationsperioden überein. Etwas abweichend davon verhält sich lediglich der Feuchtegeber (F1) im MSQ1 an der Grabensohle unter der DC CTL, dessen Wassergehalte im Zeitraum Aug. bis Sep.19 am stärksten abfallen. Da an dieser Position leider kein Tensiometer verbaut wurde, können Saugspannungs- und Wassergehalts-Entwicklungen nicht verglichen werden. Nach den starken Regenfallereignissen im Sep. 2019 erreichen die Werte des F1 wieder ihr Ausgangsniveau. Ab dem 18. Feb.20 ist leider ein Ausfall des F1 zu verzeichnen. Beim Vergleich von MSQ1 bzw. Abbildung 20 und MSQ2 bzw. Abbildung 21 ist dennoch festzuhalten, dass äußere Einflüsse anscheinend eine stärkere Auswirkung auf die Wassergehalte haben als die Erwärmungsphasen der DC CTL zuvor.

5.3.3. Einbau, Ausbau und abschließende Betrachtung MSQ1- Süd

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Lage der Sensoren für beide Messquerschnitte MSQ1 und MSQ2 und die jeweilige Einbaucharge des ZFSV ersichtlich. Explizit wird der Einbauzeitpunkt Anfang Juni 2019, sowie der Ausbauzeitpunkt Dezember 2020 betrachtet. Eingefüllt wurde der ZFSV bis Rohrmitte mit einer Höhe von ca. 30 cm, anschließend in ca. 10 cm Schritten.



MSQ1_Süd

Abbildung 22: MSQ1 Süd Zuordnung Lage Sensoren zu ZFSV-Chargen.

In der Abbildung 22 ist die Lage und Höhe der einzelnen ZFSV-Chargen, sowie den darin verbauten Sensoren angegeben. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Soll-Wassergehalte w_{Soll} laut Lieferschein, die gemessenen Wassergehalte w_{VF} zum Zeitpunkt der Verfüllung, kurz vorm Ausbaupunkt w_{AB} und die mittels Ofentrocknung im Labor an entnommenen ZFSV-Proben ermittelten Wassergehalte w beim Ausbau der einzelnen Sensoren. Abbildung 23 ist eine vergrößerte Darstellung der Messergebnisse der Feuchte im MSQ1 Süd beim Einbau im Juni 19 und beim Ausbau im Herbst 20.

Die Werte aller Sensoren zum Verfüllzeitpunkt stimmen nahezu exakt mit den Wassergehalten der ZFSV-Lieferscheine überein. Lediglich der Sensor F5 weist hier eine Abweichung von rund 2,6 % auf. Die letzte Aufzeichnung der Messergebnisse erfolgte am 25. Nov. 20. Die Sensoren wurden am 9. Dez. 20 ausgebaut. Hierbei wurde an der Spitze jedes Sensors eine ZFSV-Probe genommen und die Wassergehalte im Labor mittels Ofentrocknung ermittelt.

Nr.	Sensoren	W _{soll} gemäß LS	W _{VF} gem. bei Einbau	W _{AB} gem am 25.11.20	W ZFSV-Probe	ΔW = W _{AB} - W
LS 20	F1, T6	45,65%	F1: \approx 45,5%	<i>n.a.</i>		<i>n.a.</i>
LS 24		44,83%		<i>n.a.</i>		<i>n.a.</i>
LS 27	F2, F3 TS1, TS2 T7, T8	44,28%	F2: \sim 45,5% F3: \sim 44,5%	<i>n.a.</i>	F2: 25,25% F3: 24,64%	<i>n.a.</i>
LS 32	-	44,31%				
LS 40	-	44,36%				
LS 45	-	45,03%				
LS 48	F4, TS3	44,35%	F4: \sim 43,0%	F4: \sim 23,0%	F4: 24,73%	F4: 1,73%
LS 50	F5, TS4	45,06%	F5: \sim 42,5%	F5: \sim 25,5%	F5: 20,35%	F5: 2,0%
Auf- füllung	F6, TS5 T11, T12	-	F6: \sim 12%	F6: \sim 11,5%	F6: 11,07%	F6: 0,43%

Tabelle 1: MSQ1 Süd Überblick Wassergehalte (w) bei Einbau und Ausbau. LS := Lieferschein.

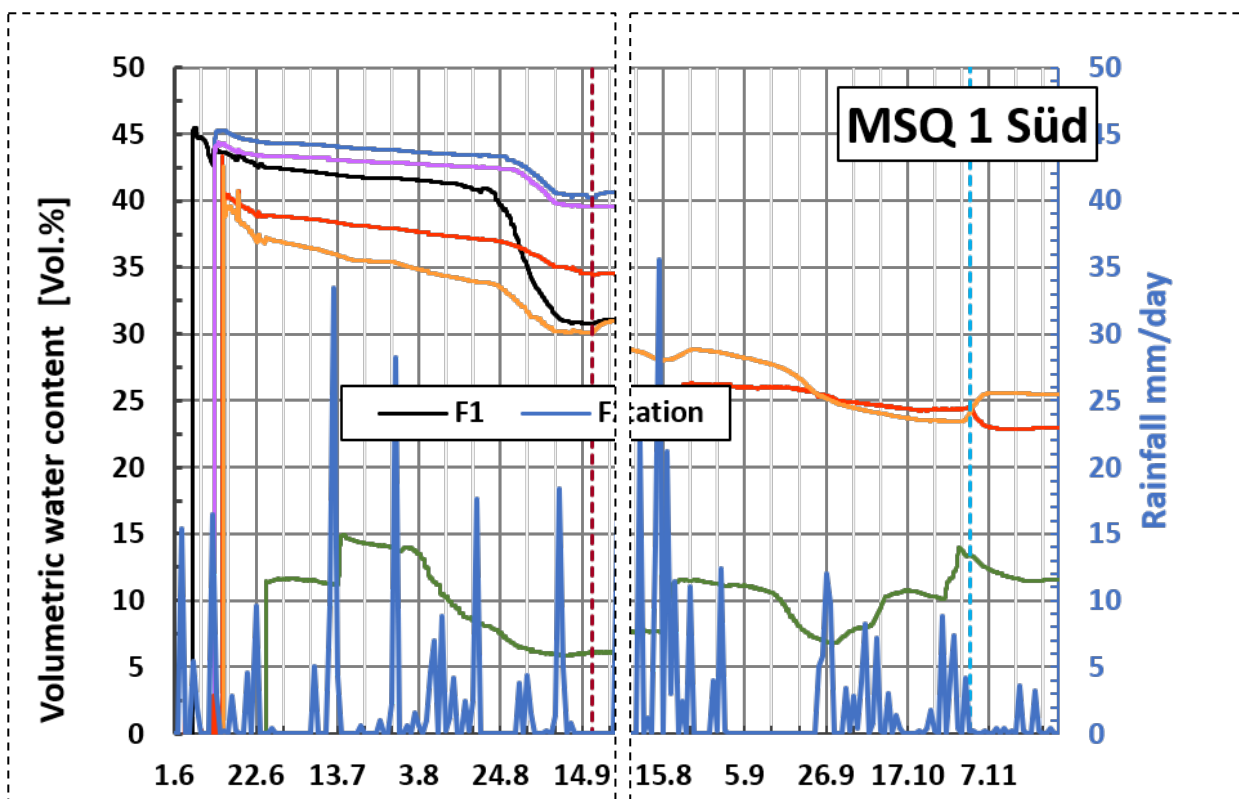


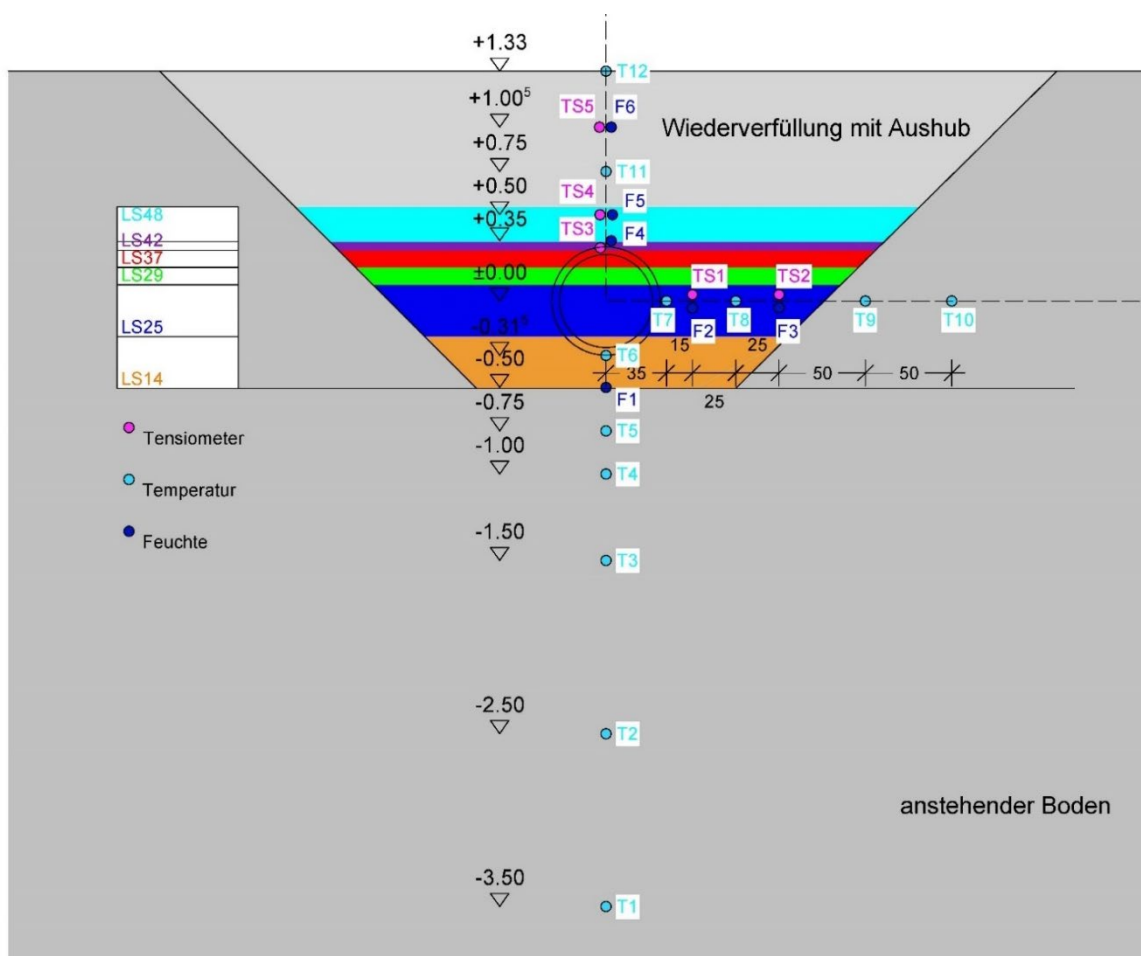
Abbildung 23: Vergrößerte Darstellung Messergebnisse Feuchte MSQ1 Süd Einbau und Ausbau

Beim Ausbau wurde festgestellt, dass die Kabel der Feuchtesensoren F2 und F3 durchtrennt wurden, weshalb hier keine Messergebnisse bis zum Schluss vorliegen. Der Sensor F1 war defekt. Beim Vergleich der gemessenen, sowie ermittelten Wassergehalte zum Ausbaupunkt zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit maximaler Differenz von 2,0%. Betrachtet man jedoch die angegebene Messgenauigkeit des Sensors, der laut Hersteller bei +/-

1,0% liegt und die Differenz von 13 Tagen zwischen beiden Messungen sind die Messergebnisse schlüssig.

5.3.4. Einbau, Ausbau und abschließende Betrachtung MSQ2 – Nord

In der Abbildung 24 ist die Lage und Höhe der einzelnen ZFSV-Chargen, sowie den darin verbauten Sensoren im MSQ2 Nord angegeben. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Sollwassergehalte w_{soil} laut Lieferschein, die gemessenen Wassergehalte w_{VF} zum Zeitpunkt der Verfüllung, kurz vorm Ausbaupunkt w_{AB} und die mittels Ofentrocknung im Labor an entnommenen ZFSV-Proben ermittelten Wassergehalte w beim Ausbau der einzelnen Sensoren. Abbildung 25 ist eine vergrößerte Darstellung der Messergebnisse der Feuchte im MSQ1 Süd beim Einbau im Juni 19 und beim Ausbau im Herbst 20.



MSQ2_Nord

Abbildung 24: MSQ2 Nord – Zuordnung Lage Sensoren zu ZFSV-Chargen.

Die Werte der Sensoren F1, F4 und F5 zum Verfüllzeitpunkt stimmen nahezu exakt mit den Wassergehalten der ZFSV-Lieferscheine überein. Lediglich die Sensoren F2 und F3 weisen hier eine Abweichung von rund 6 % auf. Die letzte Aufzeichnung der Messergebnisse erfolgte am 25.11.2020. Die Sensoren wurden am 8.12.2020 ausgebaut. Hierbei wurde an der Spitze jedes Sensors eine Bodenprobe genommen und die Wassergehalte im Labor mit-

tels Ofentrocknung ermittelt. Beim Vergleich der gemessenen, sowie ermittelten Wassergehalte zum Ausbaupunkt zeigt sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Die größten Abweichungen liegen beim Sensor F3, sowie F4. Betrachtet man jedoch die angegebene Messgenauigkeit des Sensors, der laut Hersteller bei +/-1,0 % liegt und die Differenz von 13 Tagen zwischen beiden Messungen sind die Messergebnisse absolut schlüssig.

Nr.	Sensoren	W _{soll} gemäß LS	W _{VF} gem. bei Einbau	W _{AB} gem am 25.11.20	W ZFSV-Probe	ΔW = W _{AB} - W
LS 14	F1, T6	43,23%	F1: ~ 44,0%	F1: 38,0%	n.a.	n.a.
LS 25	F2, F3 TS1, TS2 T7, T8	44,34%	F2: ~ 38,5% F3: ~ 38,0%	F2: 28,0% F3: 34,5%	n.a. F3: 29,84%	n.a. F3: 4,66%
LS 29	-	42,48%				
LS 37	-	44,31%				
LS 42	-	42,16%				
LS 48	F4, F5 TS3, TS4	44,35%	F4: ~ 43,8% F5: ~ 44,0%	F4: ~ 24,0% F5: ~ 26,0%	F4: 27,77% F5: 24,45%	F4: 3,77% F5: 1,55%
Auf- füllung	F6, TS5, T11, 12	-	F6: ~ 10,0%	F6: ~ 11,0%	F6: 9,99%	F6: 1,01%

Tabelle 2: MSQ2 Nord - Überblick Wassergehalte (w) bei Einbau und Ausbau. LS := Lieferschein.

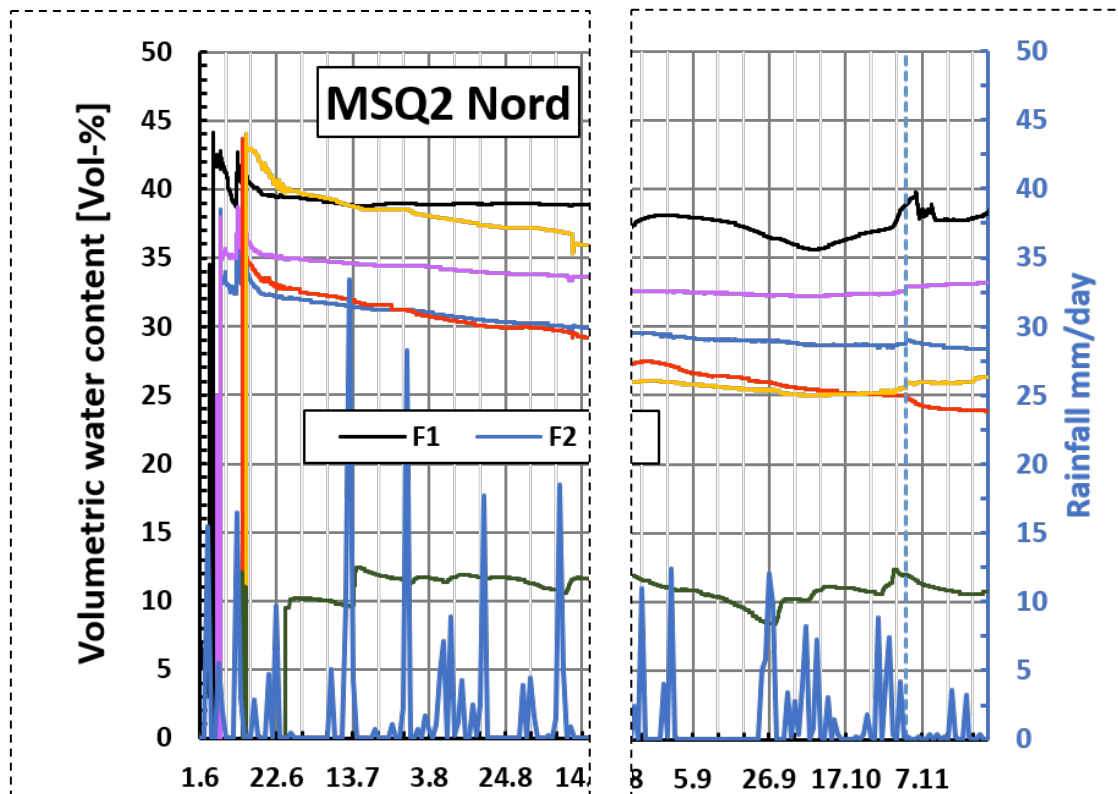


Abbildung 25: Vergrößerte Darstellung Messergebnisse Feuchte MSQ2 Nord Einbau und Ausbau

Die Abbildung 25 zeigt die gemessenen Wassergehalte zum Verfüllzeitpunkt, sowie zum Zeitpunkt der Beendigung des Versuchs in vergrößerter Darstellung. Erkennbar ist bei allen 5 Feuchtesensoren im ZFSV der Abfall der Feuchte um rund 5 % innerhalb weniger Tage

nach dem Einbau. Hierbei handelt sich um Überschusswasser, welches durch die Komponenten des ZFSV nicht gebunden werden kann und an den umliegenden Boden abgegeben wird.

Nach dem ersten Abfall der Feuchte nehmen die Messwerte der Sensoren F1, F2 und F3 nur noch geringfügig ab. Beim obersten Sensor F5 im ZFSV ist der größte Abfall der Feuchte zu verzeichnen. Während der ganzen Versuchslaufzeit erstreckt sich der Feuchteverlust von minimal 1,0 % unterhalb des Rohres bis maximal 13,5 % am obersten Sensor im ZFSV. Jedoch zeigen alle Sensoren, dass von einer Austrocknung des ZFSV auch bei einer längerfristigen Erwärmung des Bodens unter Freilandbedingungen nicht ausgegangen werden kann.

5.3.5. Einfluss der Vegetation auf die Feuchte

Die Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen den Verlauf der Feuchte- und Saugspannungsmessungen für beide Querschnitte über die gesamte Versuchslaufzeit. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Lage der Saugspannungs- und Feuchtegeber wurden deren Anordnung noch in den Prinzipskizzen der Abbildung 26 dargestellt.

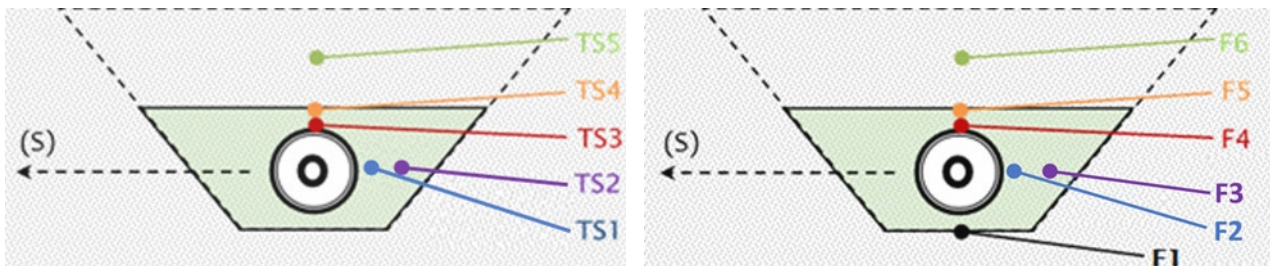


Abbildung 26: Anordnung der Saugspannungsgeber (TSx) und Feuchtegeber (Fx).

Erkennbar ist, dass sich die Messergebnisse beim Messquerschnitt MSQ2-Nord kaum verändern und lediglich von den Regenfallereignissen beeinflusst werden. Die Saugspannungen verlaufen erwartungsgemäß konträr zu den Feuchtemessungen. Jeder Anstieg des Feuchtegehaltes führt zu einem Abfall der Saugspannungen. Die Saugspannungen überschreiten zu keinem Zeitpunkt 250hPa.

Ganz anders verhält es sich hierbei beim Messquerschnitt MSQ1 Süd. Im Gegensatz zu MSQ2 Nord war beim MSQ1 Süd ein massiver Unkrautbewuchs zu verzeichnen. Auf dem Gelände wurden folgende Arbeiten im Bereich des MSQ1 Süd durchgeführt:

- C) 11.9.2019 Mäharbeiten, siehe Abbildung 29
- D) 14.05.2020 und 18.05.2020: Mäharbeiten
- E) 26.05.2020: Chemische Unkrautbekämpfung
- F) 04.08.2020: Mäharbeiten

Die oben aufgeführten Arbeiten zeigen sich in den Saugspannungsmessungen wieder. Bis zum 11.9.2019 war ein massiver Anstieg der Saugspannungen zu verzeichnen, der dann rückläufig wird, um mit den einsetzenden Regenfallereignissen einzubrechen.

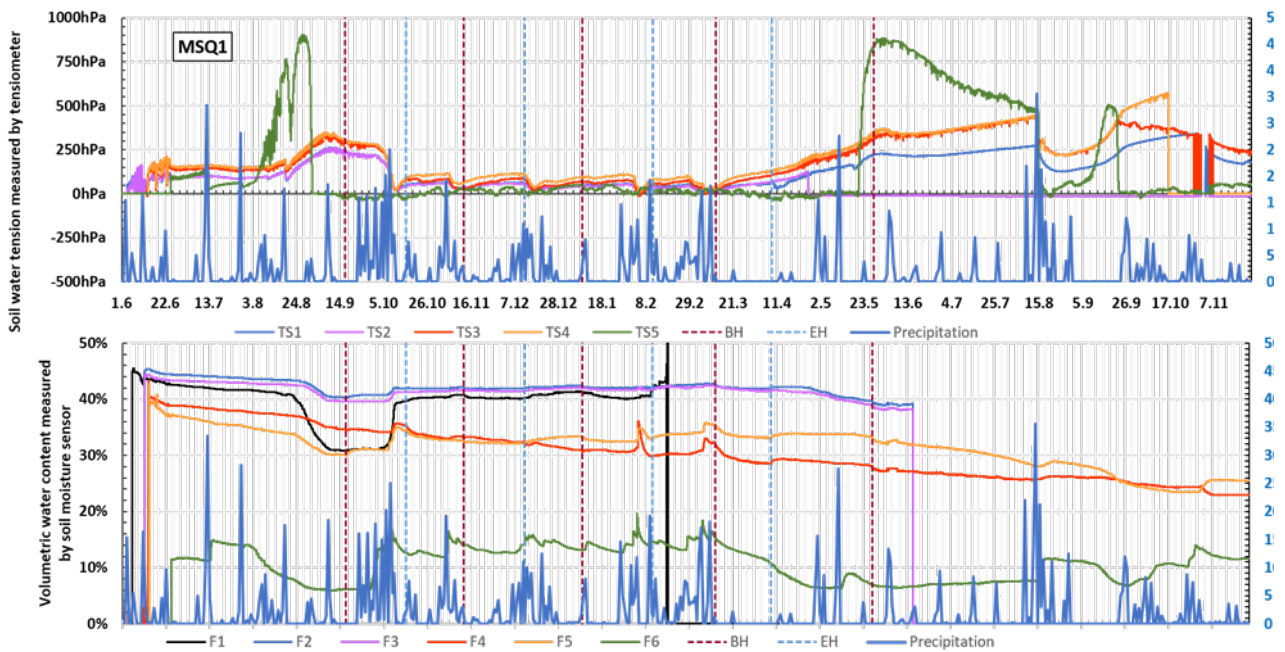


Abbildung 27: MSQ1 Süd - Feuchte und Saugspannungen

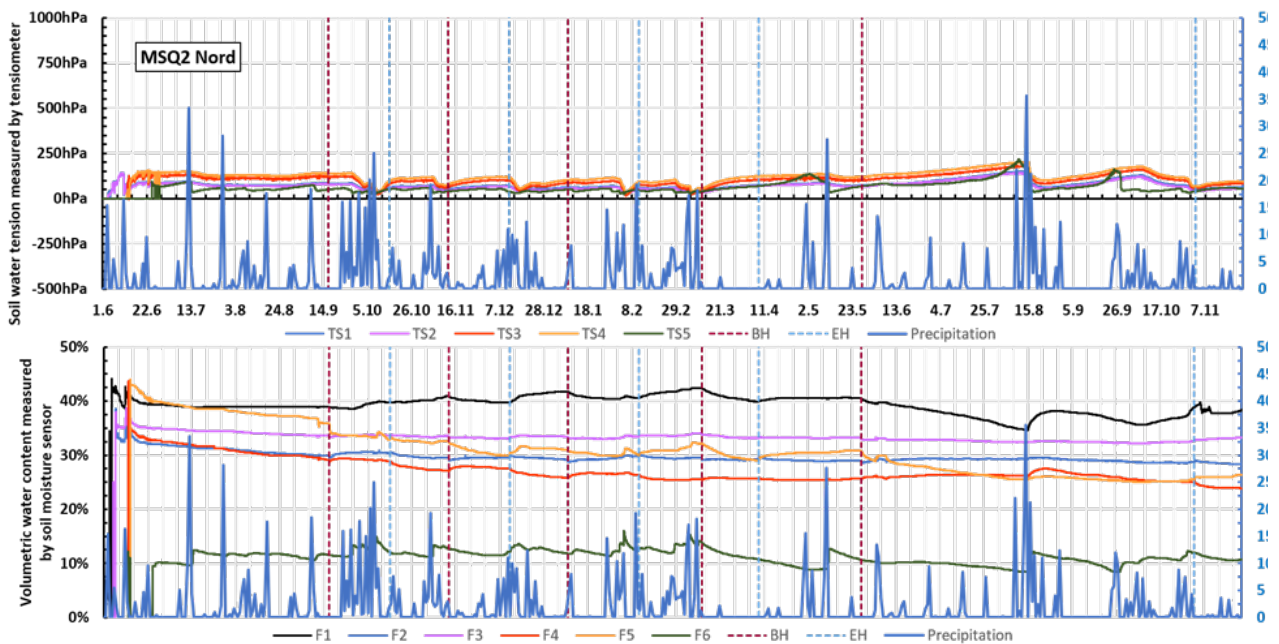


Abbildung 28: MSQ2 Nord - Feuchte und Saugspannungen

Von Oktober 2019 bis April 2020 verlaufen die Saugspannungen analog zum MSQ2 Nord. Mit Beginn der Wachstumsperiode beginnen die Saugspannungen zu stark zu steigen. Nach den Mäharbeiten Mitte Mai 2020 ist nur noch ein leichter Anstieg bei den TS3 und TS4 zu verzeichnen. Die Saugspannungen des TS5 in der Wiederverfüllung nehmen ab. In diesem Bereich ist auch der stärkste Einfluss des Wurzelwachstums zu erwarten. Die Regenfallereignisse Mitte August 2020 lassen die Saugspannungen einbrechen. Mit der anschließenden Trockenperiode steigen sie wieder an.

Beim Ausbau der Sensoren im Dezember 2020 wurde festgestellt, dass die Auffüllung oberhalb des ZFSV im MSQ2 Nord mit dem Aushubmaterial aus den unteren Bereichen der Baugrube (Sand SE) erfolgte. Der Messquerschnitt MSQ1 Süd hingegen wurde mit Oberboden wiederverfüllt, welcher ein üppiges Pflanzenwachstum ermöglichte (siehe vergleichend Abbildung 30 und Abbildung 31). Der gesamte Bereich der Wiederverfüllung im MSQ1 Süd war bis auf die Oberkante ZFSV komplett durchwurzelt. Dies erklärt im Nachgang den unterschiedlichen Verlauf der Saugspannungen. Die Wurzeln der Pflanzen entwickelten so einen starke Saugspannungen, dass sie dem Boden Wasser entzogen haben, was zum Anstieg der Saugspannungen führte. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass der Porenraum in der Wiederverfüllung beim MSQ1 Süd im Gegensatz zum MSQ2 Nord weniger homogen und feinporiger ist. Je feinporiger ein Boden ist, desto höher sind die auftretenden Saugspannungen. Hier treten zwei Wirkungen auf:

- 1) Die Pflanzen entziehen dem Boden Wasser, was am deutlichsten im Feuchteverlauf des F6 im MSQ1 Süd zu erkennen ist (Rückgang des Feuchtegehaltes Anfang August 2019 und März 2020).
- 2) Die Durchlässigkeit der Sandauffüllung/ Wiederverfüllung ist im MSQ2 Nord höher. Das Niederschlagswasser kann die Wiederverfüllung besser in Richtung ZFSV passieren.

Im MSQ1 Süd wird ein Großteil des Niederschlagswassers in der Wiederverfüllung als Haftwasser im Oberboden zurückgehalten und der Feuchtegehalt des ZFSV ist geringfügig geringer als der der Feuchtegehalt des ZFSV im MSQ2 Nord.



Abbildung 29: Beseitigung (Unkraut)-Bewuchs am 11. Sep. 2019



Abbildung 30: MSQ1 Süd – Auffüllung/ Wiederverfüllung mit durchwurzeltem Oberboden



Abbildung 31: MSQ2 Nord – Auffüllung/Wiederverfüllung mit Aushubmaterial Sand

Abschließend lässt sich festhalten, dass die auftretenden Saugspannungen wesentlich stärker von den Umgebungsbedingungen wie Bewuchs, Bodenbeschaffenheit, Niederschlagsereignissen als von den Bestromungs- bzw. Heizzyklen bestimmt werden. Deren Einflüsse auf den Feuchtegehalt durch die zuvor aufgeführten Umgebungsbedingungen sind deutlich geringer, jedoch sind auch hier Auswirkungen erkennbar.

5.4. Wärmeleitfähigkeit

Für den Versuchsaufbau wurde die Wärmeleitfähigkeit beim Einbau bzw. beim Verfüllen des Grabens als auch beim Ausbau ermittelt. Während des Verfüllvorgangs Juni 2019 wurden von bestimmten ZFSV-Chargen Proben genommen. Bei diesen wurde zu bestimmten Prüfaltern die Wärmeleitfähigkeit, sowie die Dichten und der Wassergehalt bestimmt. Beim Ausbau Dezember 2020 wurde die Wärmeleitfähigkeit auf Höhe der Sensoren vor Ort gemessen, sowie an markanten Stellen Proben mittels Ausstechzylinder entnommen, die mittels Kappen luft- und wasserdicht verschlossen, um im Labor die Wärmeleitfähigkeit, sowie die Dichten und den Wassergehalt zu ermitteln. Die Abbildung 32 zeigt die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten der Proben zu verschiedenen Prüfaltern für unterschiedliche Einbauchargen. Erkennbar ist, dass die Wärmeleitfähigkeit nicht in Zusammenhang mit dem Prüfalter steht, sofern sich weder Dichte, Temperatur, noch Wassergehalt verändern. Der Hersteller des Messgerätes gibt eine Messungenauigkeit von $\pm 10\%$ an. Somit liegen die Schwankungen der Messungen im Bereich des Messungenauigkeit des Sensors.

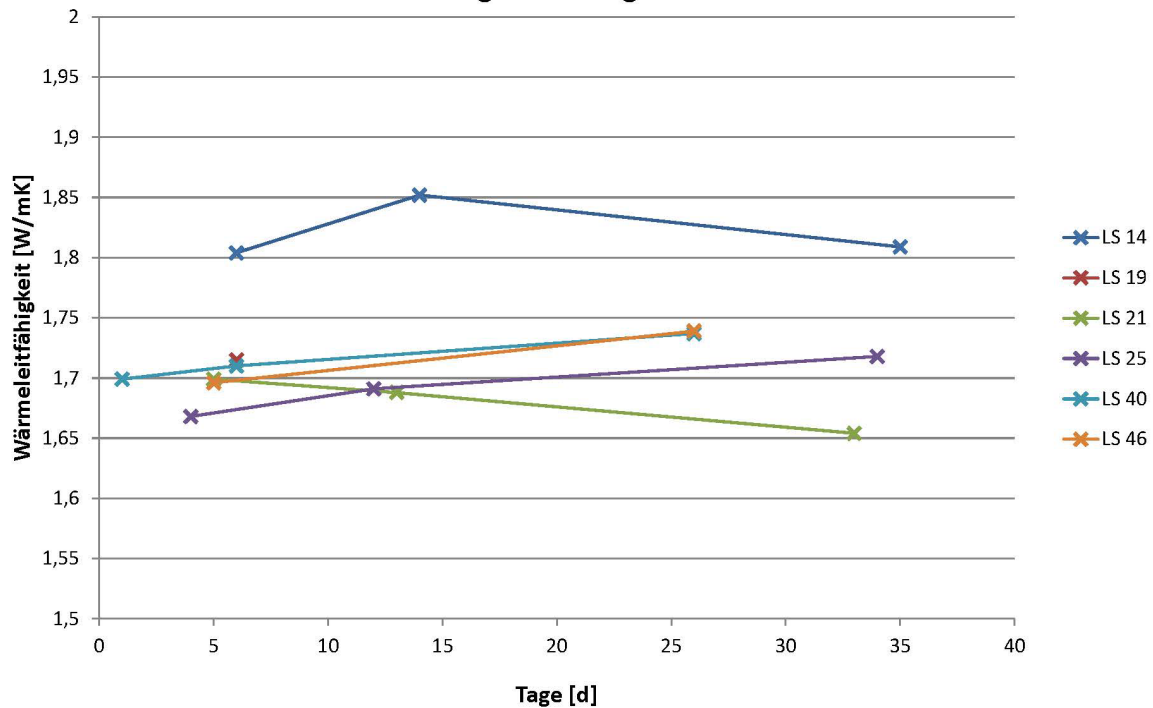


Abbildung 32: Wärmeleitfähigkeit ZFSV Einbau Juni 2019

In der Tabelle 3 sind die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten an den Sensoren aufgeführt. Zusätzlich wurde die Wärmeleitfähigkeit entlang der seitlichen Baugrube ermittelt (WLFK1 und WLFK2). Die Wärmeleitfähigkeit in der Auffüllung/ Wiederverfüllung ist geringer als die des ZFSV. Vergleichend mit den Messungen zum Einbau für den LS19, LS21 und dem LS46 hat die Wärmeleitfähigkeit um ca. 0,1–0,2 W/mK abgenommen. Jedoch haben sich auch die Wassergehalte des Bodenmaterials um ca. 10% – 15% reduziert.

Beim MSQ2 Nord ist der Unterschied zwischen den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten im ZFSV und der Wiederverfüllung/ Auffüllung (Sand) noch deutlicher. So ist die maximal gemessene Wärmeleitfähigkeit der Wiederverfüllung 1,139 W/mK, während hingegen die geringste Wärmeleitfähigkeit des ZFSV bei 1,529 W/mK beginnt. Beim Einbau wurden Wärmeleitfähigkeiten um 1,7 W/mK gemessen für die Einbaucharge mit den Sensoren TS1, TS2, F2 und F3. Beim Ausbau wurden hier Werte zwischen 1,729–1,809 W/mK ermittelt. Somit konnte trotz einer Reduktion des Wassergehaltes eine Verminderung der Wärmeleitfähigkeit nicht festgestellt werden.

MSQ1 Süd

Sensor	Wassergehalt w_{grav} [M%]	WLFK λ [W/mK]	R [Kcm/W]	Temperatur [°C]
T10	9,21	0,824	121,667	8,258
TS5	11,46	1,047	95,55	6,6
WLFK1	10,28	1,071	91,533	4,524
TS4	21,34	1,239	80,700	11,303
F5	20,35	1,301	76,940	11,480
F6	11,07	1,313	76,167	8,319
WLFK2	5,01	1,461	68,433	13,288
TS1	24,49	1,550	64,500	14,629
TS3	24,11	1,558	64,150	11,975
TS2	26,43	1,562	63,067	13,454
F3	24,64	1,586	63,067	14,030
T7	26,05	1,636	61,433	13,856
F4	24,73	1,644	60,823	12,218
F2	25,25	1,858	53,867	13,977

Tabelle 3: Übersicht gemessene Wärmeleitfähigkeiten MSQ1 Süd Ausbau 9.12.2020

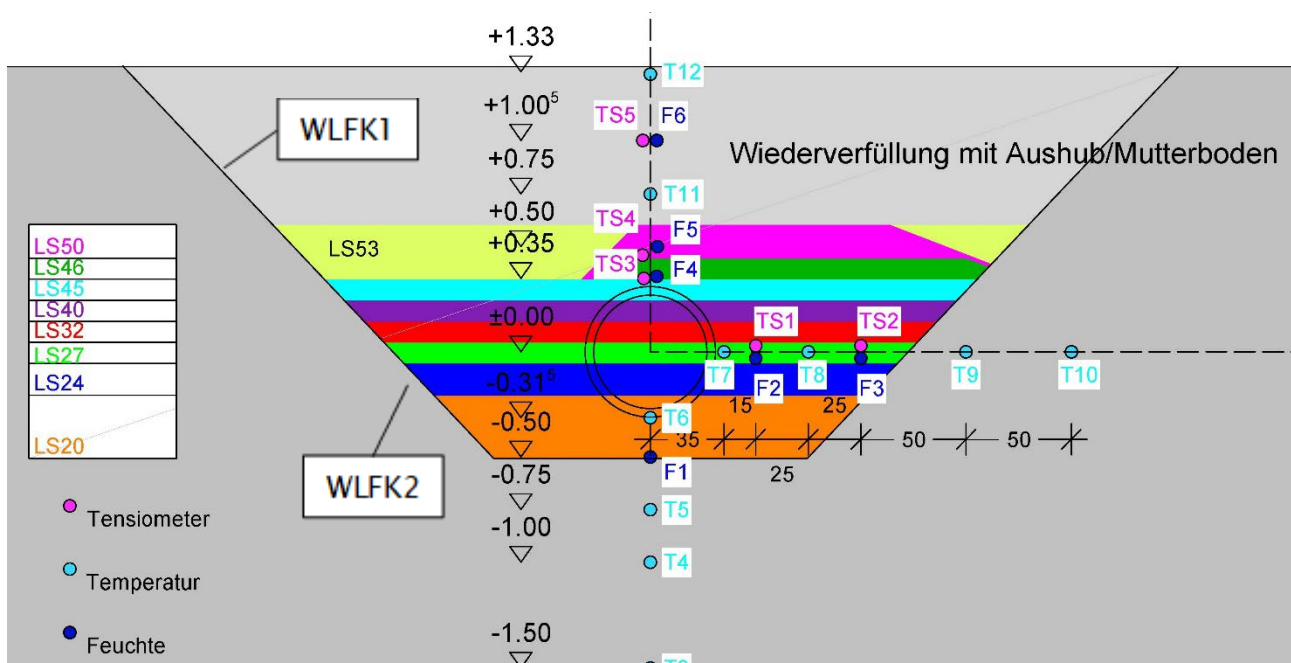


Abbildung 33: MSQ1 Süd mit eingezeichneten Sensorlagen und Verfüllchargen

MSQ2 Nord

Sensor	Wassergehalt w_{grav} [M%]	WLFK λ [W/mK]	R [Kcm/W]	Temperatur [°C]
T11	8,6	0,885	113,000	3,337
T9	6,95	0,965	103,500	12,200
F6	9,99	1,109	90,450	7,351
TS5	8,87	1,139	87,200	7,121
T10	8,08	1,242	81,000	8,689
WLFK UK ZFSV	9,87	1,466	68,300	13,266
F5	24,45	1,529	65,550	10,990
TS3	21,73	1,614	62,133	11,395
F3	29,84	1,729	57,850	12,472
F4	27,77	1,748	57,267	11,037
TS2	29,33	1,761	56,833	13,466
TS1	-	1,809	55,267	13,487
TS4	23,85	1,917	53,900	10,926

Tabelle 4: Übersicht gemessene Wärmeleitfähigkeiten MSQ2 Nord Ausbau 8.12.2020

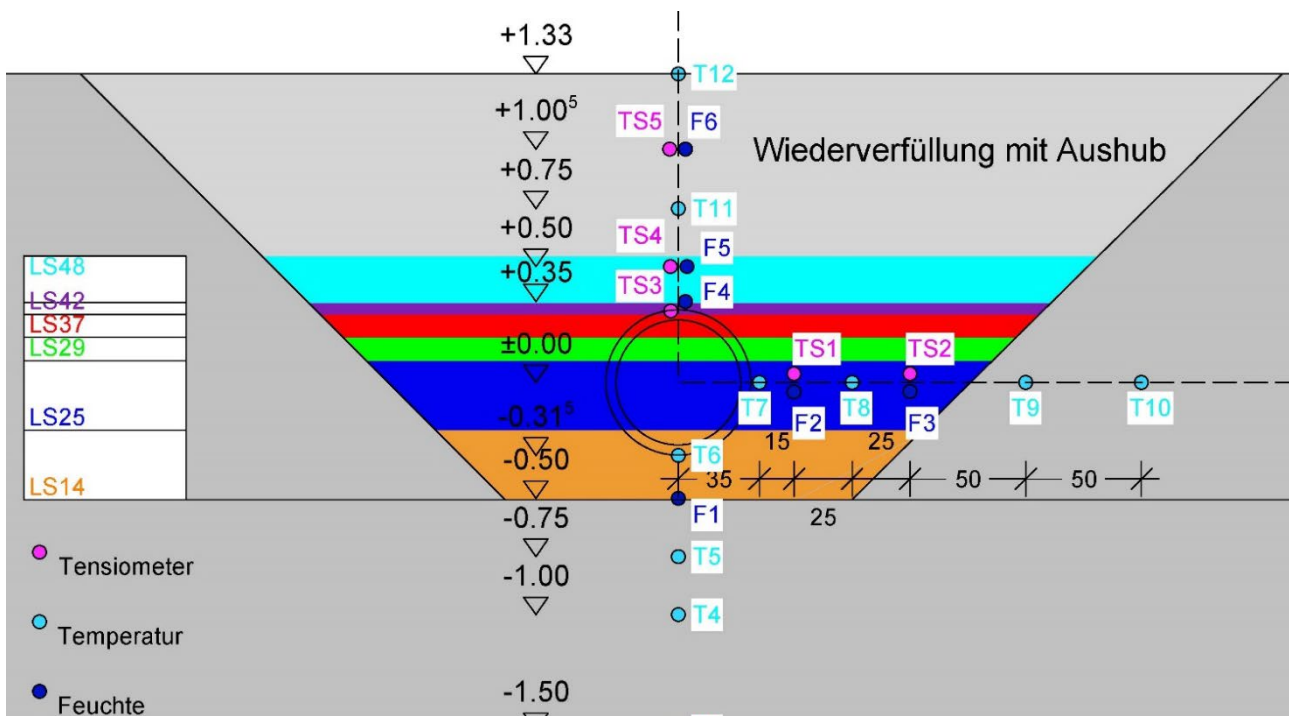


Abbildung 34: MSQ2 Nord mit eingezeichneten Sensorlagen und Verfüllchargen

5.5. Spannungen und Kräfte

Im mittleren Messschacht MS1 wurde der Axialkompensator der DC CTL mit 12 Stahlstangen axial überbrückt, um an deren Auflager mittels 12 ölhydraulischen Kraftmessgeber die Kräfte der Behinderung der temperaturbedingten Dehnungen der DC CTL messtechnisch zu erfassen. Durch Aufaddieren aller gemessenen Kräfte wurde die Gesamtkraft (total load) ermittelt und in Abbildung 35 für den Zeitraum 1. Sep. 19 bis 07. Dez. 20 dargestellt.

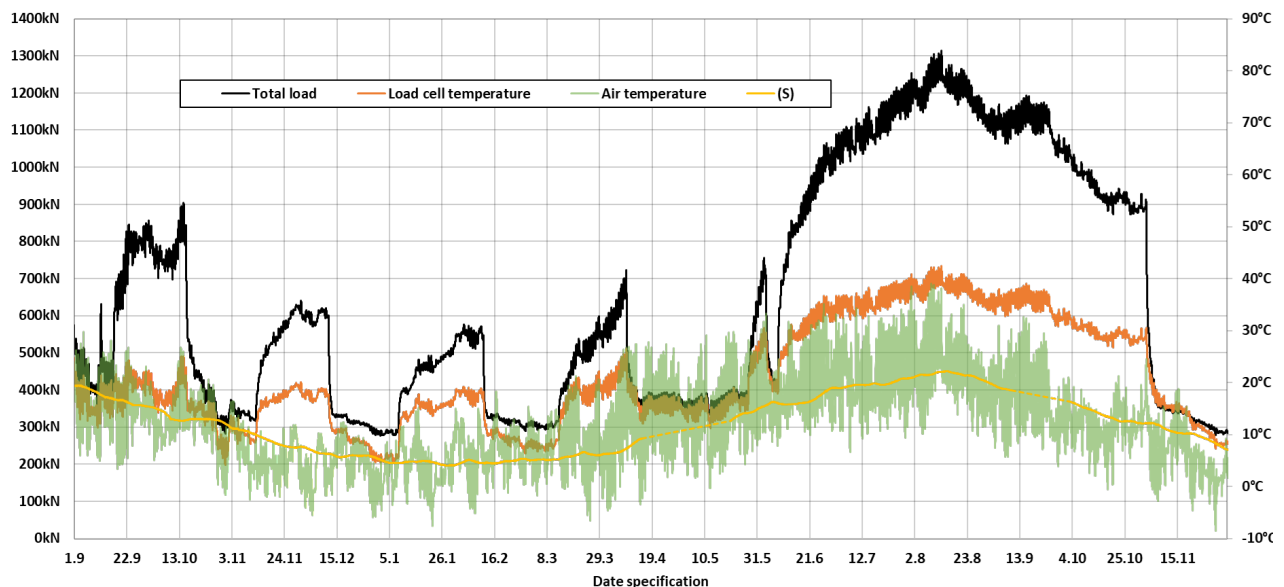


Abbildung 35: Kraft- und Temperaturmessungen im Messschacht MS1

Auch in Abbildung 35 ist der Einfluss der Lufttemperaturschwankungen auf die Kraftmessung sehr gut erkennbar: Im MS1 wird der gesamte Bereich des Axialkompensators, der mechanischen Brücke und der daran beidseitig anschließenden DC CTLs über eine Gesamtlänge von etwa 6,0 m den schwankenden Lufttemperaturen (grüne Linie) ausgesetzt. Dies führt unabhängig von den außerhalb des MS1 durch die ZFSV-Bettung behinderten Dehnungen der DC CTL zu Kraftschwankungen in Phase mit den tageszeitlichen Temperaturschwankungen, zumal Axialkompensator, mechanische Brücke und DC-CTL-Abschnitte im MS1 ohne HDPE-Ummantelung ausgeführt wurden. Dies ist sehr deutlich anhand der Verringerung der täglichen Kraftschwankungen mit dem winddichten Verschließen des Giebels am MS1 ab dem 11. Nov. 19 zu erkennen: Die Kurven der Kräfte verliert ab diesem Zeitpunkt deutlich an Rauigkeit. Im März 20 nimmt die Rauigkeit wieder deutlich zu, da sich über den Winter bereichsweise die Folie an den Schachtgiebeln gelöst hatte und Austausch mit der Luft vorhanden war. Ende Mai wurden die Giebel neu verschlossen, anscheinend ohne dauerhaften Erfolg.

Die jahreszeitlich bedingten Schwankungen wirken sich im Zeitraum 1. Sep. 19 bis 2. Nov. 20 ebenfalls deutlich auf die Kräfte aus, indem die bei der ersten Heizphase gemessenen, mittleren Spitzenwerte von etwa 800 kN in den folgenden beiden Heizphasen mit lediglich 600 und 550 kN nicht mehr erreicht werden, obwohl die Temperaturen der Kraftgeber (orangefarbene Linie) in etwa die gleichen Werte erreichen. Die geringeren Luft- und Bodentemperaturen im Herbst und Winter an der DC CTL führen zu einem Spannungs- und Kraftabfall

an der DC CTL. Lediglich in den passiven Abkühlphasen werden fast die gleichen Kräfte gemessen, wie sie in etwa bei der Vorspannung der Kraftgeber erreicht wurden. Im Juni 20 wurde wiederum das Kraftniveau im Juni des Vorjahres erreicht, da sowohl die Luft- als auch Bodentemperaturen entsprechend angestiegen sind. Mit Beginn der Dauerheizphase stiegen die gemessenen Kräfte auf ein Maximum von 1300 kN im August 20 an, um dann mit sinkenden Lufttemperaturen bis zum 2. Nov. 20 auf 900 kN abzufallen.

Unabhängig von den Bestromungs- bzw. Heizphase treten Spannungen in der DC CTL schon aufgrund der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Boden von etwa 15 °C auf, da sich die Wärmeausdehnungskoeffizienten des Aluminiumaußenrohrs deutlich von denen des ZFSV und des umgebenden Bodens deutlich unterscheiden. Die Bedeutung der Berücksichtigung der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Boden wird noch klarer, wenn man die Messergebnisse während der Bestromung dazu ins Verhältnis setzt: Es ist auch bei der Dauerbestromung nicht gelungen, am DC-CTL-Außenrohr höhere Temperaturdifferenzen als 25 K zum umgebenden Boden bzw. zu ZFSV-Bettung zu erzeugen. Auch muss der Dehnungszustand bzw. die Temperatur des DC-CTL-Außenrohrs beim Einbau bzw. Vergießen mit ZFSV erfasst werden, um dadurch bedingte Vorspannungszustände rechnerisch berücksichtigen zu können.

Für den Fall der im Allg. numerischen Berechnungen der Wechselwirkung zwischen DC CTL/ ZFSV-Bettung/ Baugrund sind grundsätzlich folgende Einwirkungen/ Lastfälle zu berücksichtigen, um möglichste genaue Ergebnisse zu erzielen.

- 1) Vorspannung/ Verspannung durch Erfassung des Temperaturverlaufs alternativ des Dehnungsverlaufs beim Vergießen der DC CTL
- 2) Spannungen und Verformungen/ Dehnungen aufgrund des Jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Boden bzw. in der Bettung.
- 3) Spannungen und Verformungen/ Dehnungen aufgrund der Bestromung.

Weiterhin folgende spezifische Einwirkungen/ Lastfälle im Versuchsaufbau B:

- 4) Kräfte der Kraftmessdosen am überbrückten Kompensator aufgrund deren Vorspannung beim Einbau im Messschacht MS1 sowie dadurch verursachte Verformungen/ Dehnungen im DC-CTL-Außenrohr.
- 5) Kräfte/ Spannungen und ggf. Dehnungen im Messschacht MS1 bzw. am überbrückten Kompensator gemäß Abbildung 31 und Abbildung 39 aufgrund Erwärmung und Einfluss der Lufttemperaturen.
- 6) Verformungen/ Dehnungen in den Messschächten MS2 und MS3 an den Endstücken der DC CTL aufgrund Erwärmung und Einfluss der Lufttemperaturen.

Im Versuch B konnten aufgrund von Bauabläufen und der Messtechnik die Einwirkungen/ Lastfälle 2) bis 5) vollständig, der 6) nur näherungsweise und 1) gar nicht erfasst werden.

Die gemessenen Temperaturverläufe wurden schon in den Abschnitten 5.1 und 5.2 ausführlich diskutiert, mit den gemessenen Verschiebungen und Dehnungen beschäftigen sich die nächsten beiden Abschnitte.

5.6. Dehnungen und Verformungen

5.6.1. Glasfaserstangen-Extensometer

Auf beiden DC-CTL-Strängen wurden Glasfaserstangen-Extensometer mit elektronischen Wegsensoren montiert, wie in Abbildung 36 dargestellt und in Abbildung 5 bemaßt. Damit gelingt die Messung der Relativverschiebungen zwischen Betonwand des Messschachts MS1 und Ankerpunkten auf der DC CTL, die zumindest abschnittsweise Rückschlüsse auf das axiale Verformungsverhalten des DC-CTL-Außenrohrs unter den Lastzyklen zulassen. Entscheidend hierfür ist die mechanische Entkoppelung der Glasfaserstangen mittels HDPE-Hüllrohr von der ZFSV-Bettung, was durch eine sehr glatte Kunststoffummantelung der Glasfaserstangen gelingt. Der am Ende angebrachte elektronische Wegaufnehmer weist eine Genauigkeit im 1/100-Millimeterbereich auf, jedoch lassen die restlichen Bauteile Messgenauigkeiten von $\pm 0,3$ mm erwarten.

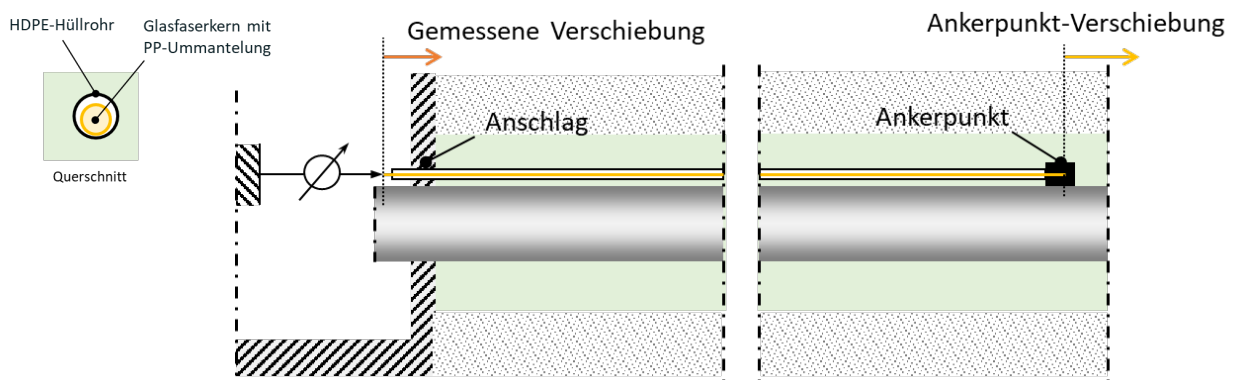


Abbildung 36: Prinzipskizze Glasfaserstangen-Extensometer.

Da die Glasfaserstangen-Extensometer mit bis zu einer Länge von fast 60 Metern eingebaut wurden, kommt es zu einer Beeinflussung der Messergebnisse infolge Temperaturwechsel, da sich die Glasfaserstangen unabhängig von den Verschiebungen des DC-CTL-Außenrohrs unter Temperaturbelastung ebenfalls ausdehnen und zusammenziehen. Nach Rücksprache mit dem Hersteller wurde unter Ansatz eines Wärmeausdehnungskoeffizienten von $\alpha_{GF} = 5,0 \cdot 10^{-6} [1/K]$ die Temperaturdehnung für jede Glasfaserstange berücksichtigt und die Verschiebungsmessungen der Extensometer zwischen Ankerpunkt und Wegaufnehmer entsprechend kompensiert. Die Temperaturdifferenzen zum jeweiligen Bezugszeitpunkt wurden aus den Messsignalen der über Feuchtesensoren (F4/ST4), die im ZFSV etwas oberhalb des DC-CTL-Außenrohrs eingegossen waren, ermittelt.

In Abbildung 37 und Abbildung 38 sind die Messergebnisse der – wie zuvor beschrieben kompensierten – Relativverschiebungen des Süd- und des Nordstrangs dargestellt, wobei als Bezugspunkt der 1. Sep. 2019 herangezogen wurde. Somit sind alle Messwerte als

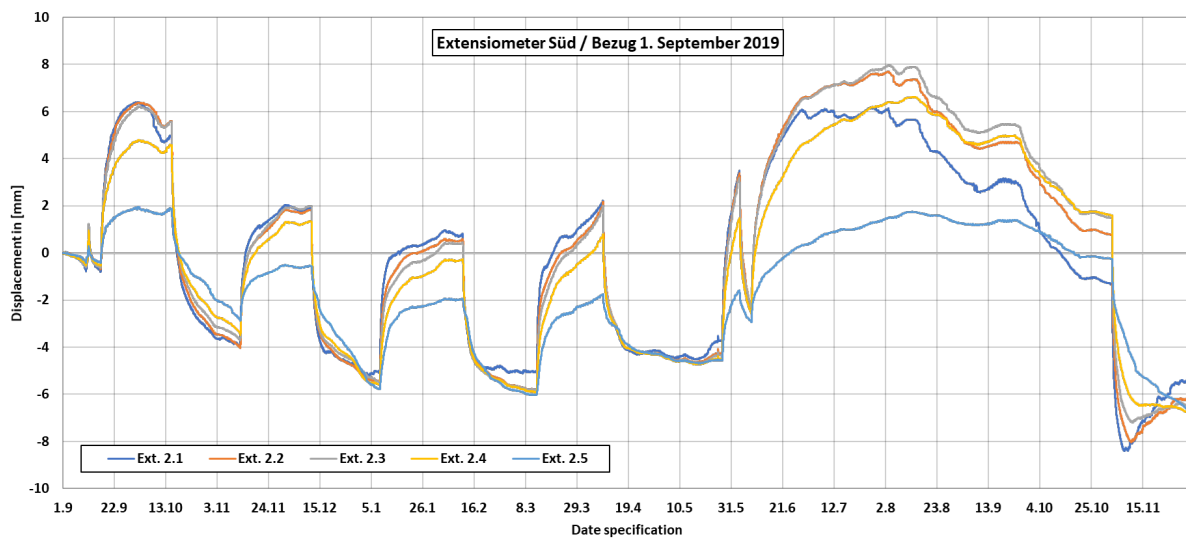


Abbildung 37: Südstrang – Relativverschiebungen zw. Betonwand Messschacht MS1 und Ankerpunkten auf dem DC-CTL-Außenrohr mit herausgerechneter Temperaturdehnung der Glasfaserstangen: Ext. 2.1: $\Delta l = 57,7$ m (Ankerpunkt bereits in S1 außerhalb ZFSV-Bettung); Ext. 2.2: $\Delta l = 48,4$ m; Ext. 2.3: $\Delta l = 39,4$ m; Ext. 2.4: $\Delta l = 29,2$ m; Ext. 2.5: $\Delta l = 13,5$ m.

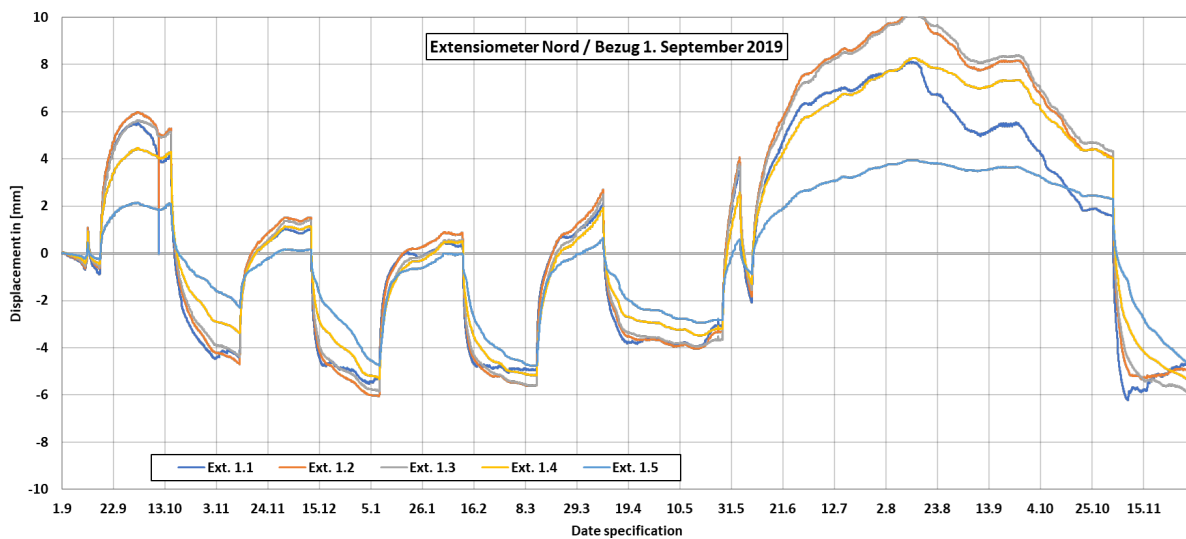


Abbildung 38: Nordstrang – Relativverschiebungen zw. Betonwand Messschacht MS1 und Ankerpunkten auf dem DC CTL mit herausgerechneter Temperaturdehnung der Glasfaserstangen: Ext. 1.1: $\Delta l = 57,6$ m (Ankerpunkt bereits in MS2 außerhalb ZFSV-Bettung); Ext. 1.2: $\Delta l = 48,7$ m; Ext. 1.3: $\Delta l = 39,2$ m; Ext. 1.4: $\Delta l = 28,4$ m; Ext. 1.5: $\Delta l = 14,4$ m.

Differenzverschiebung zum jeweiligen Messwert am der 1. Sep. 2019 aufgetragen. Dieser Bezugszeitpunkt etwa 12 Wochen vor Beginn des ersten Bestromungszyklus' wurde gewählt, da nach 2,5 Monaten von einem ausreichend ausgehärtet, relativ gleichbleibenden Zustand des ZFSV nach dem Vergießen im Jun. 19 ausgegangen werden kann. Zu beachten ist, dass mit dem gewählten Bezugszeitpunkt 1. Sep. 2019 alle zuvor aufgetretenen Verschiebungen kaum mehr interpretierbar und bewertbar sind, weshalb in den Anhängen ergänzend auch andere Bezugspunkte gewählt werden, die jedoch hier nicht behandelt werden.

Beim Vergleich der Abbildung 37 und Abbildung 38 fällt zunächst auf, dass sich die Verschiebungsverläufe Extensometer Nord und Süd sehr ähnlich Verhalten. Dies ist angesichts der baustellenbedingten Variationen der einzelnen ZFSV-Chargen und Arbeitsablaufs beim Vergießen und Auffüllen des Grabens bemerkenswert und belegt die Qualität des ZFSV.

Weiterhin ist auch in den Abbildung 37 und Abbildung 38 der deutliche Einfluss des jahreszeitbedingten Temperaturgangs des Bodens zu erkennen. Die gemessenen axialen Verschiebungen der Heizzyklen 2 bis 4 erreichen bei weitem nicht die maximalen Verschiebungen des ersten Heizzyklus', da sie in der kälteren Jahreshälfte durchgeführt wurden. Erst bei der Dauerbestromung im Sommer 2020 werden die maximalen Verschiebungen des ersten Heizzyklus wieder erreicht und übertroffen. Anschaulich beschrieben, „schwingen die Verschiebungen aufgrund der Bestromung um eine jahreszeitliche bedingte Verschiebungswelle mit der Periode 1a“.

Generell erreichen alle Relativverschiebungen in Abbildung 37 und Abbildung 38 in den ersten 4 Bestromungszyklen maximale Werte von 8 mm, wenn man die Differenz zwischen Ende passiver Abkühlung und Ende Heizphase betrachtet. Erfahrungsgemäß erfassen die längeren Extensometer die größten Verschiebungen, wobei auffällig ist, dass die Verschiebungswerte der Extensometer zwischen etwa 28 und 50 m sich nur um etwa 1 mm unterscheiden. Lediglich die beiden kurzen Extensometer mit etwa 14 m Länge weichen davon deutlicher ab und zeigen geringere Verschiebungen. Ein solches Messergebnis erlaubt den Rückschluss, dass sich die DC CTL während der ersten 4 Bestromungszyklen noch überwiegend im Haftverbund mit dem ZFSV befand und die Verschiebungen aus dem ZFSV resultieren. Dies wird auch durch das umgekehrt Extensometer-Längen-proportionale Auffächern der Verschiebungsverläufe in den Abkühlzyklen erkennbar: Die DC CTL kühlt, wie auch messtechnisch beobachten, relativ schnell von den freien Enden in MS1 und MS2 sowie insbesondere von der Mitte im MS1 bzw. vom Axialkompensator her aus. Diese Interpretation wird durch den schnellen Abfall der gemessenen Kräfte im MS1 (Abbildung 35) und den dort befestigten Wegaufnehmern (Abbildung 39) bestätigt.

Abbildung 39 zeigt den Verschiebungsverlauf beider Wegaufnehmer in MS1, welche Ende Juli 2019 eingerichtet und so fixiert wurden, dass eine Verkürzung der gemessenen Wege jeweils horizontale Verschiebung der DC CTL aus dem MS1 in den ZFSV zeigen. Der Wegaufnehmer mit der Blauen Linie und dem „+“ ist dabei auf der Nordseite und der Wegaufnehmer mit der orangenen Linie bzw. mit dem „-“ auf der Südseite des Axialkompensators angeordnet. In Abbildung 39 ist zu erkennen, dass die Wegaufnehmer vor der ersten Heizphase nahezu stillstehen. Erst in der ersten Abkühlphase im Nov. 2019 zieht sich die DC CTL bzw. der gebrückte Axialkompensator um etwa 3 mm zusammen, um in der nächsten Heizphase wiederum auf den Ausgangspunkt zurückzufallen. Erst ab der zweiten Abkühlphase entstehen bleibende Differenzverschiebungen von etwa 2 mm zwischen den beiden Wegaufnehmern unabhängig von Heiz- und Abkühlphasen. Dies spiegelt sich auch genauso in der Verschiebungsverläufen der Extensometer in Abbildung 37 wider, welche sich ab der zweiten Heizphase in Ihren Spitzenwerten zunehmend unterscheiden und in der Dauerheizphase etwa einen Unterschied von 2 mm erreichen.

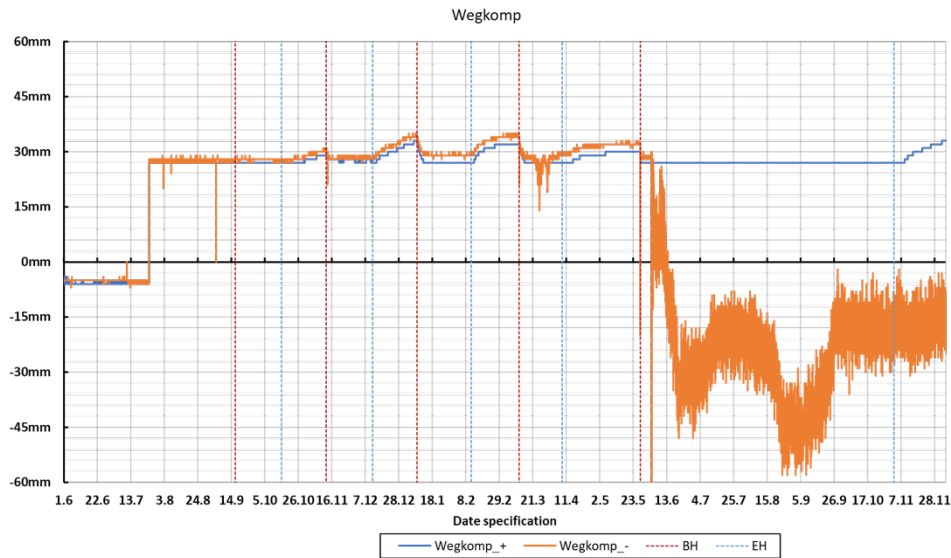


Abbildung 39: Wegaufnehmer in MS1 vor und hinter dem gebrückten Axialkompensator zur Erfassung der axialen Rohrverschiebung.

In Abbildung 39 ist an der orangenen Linie „-“ auf der Südseite des Axialkompensators bereits in der vierten Heizphase ein zunehmend rauer Verlauf des Messsignals zu erkennen, der auf einem Defekt des Wegaufnehmers hindeutet. Mit Beginn der Dauerbestromung ist das Messsignal des Wegaufnehmer nicht mehr belastbar, da ein Messwert kleiner - 5 mm die mechanische Zerstörung des Wegaufnehmers bedeutet hätte. Eine optische Nachkontrolle beim Rückbau im Dez. 21 ergab: Der äußerlich intakte Messtaster hat in etwa dieselbe Position wie der Wegaufnehmer an der Nordseite (blaue Linie +).

Weiterhin ist der stufenartige Verschiebungsverlauf interessant, der mit dem Wegaufnehmer an der Nordseite (blaue Linie +) gemessen wurde. Die im MS1 eingesetzten Wegaufnehmer waren vom gleichen Typ wie die Wegaufnehmer in den Extensometerköpfen und wurden mit dem gleichen Zeitintervall abgetastet. Letztere zeigen keine stufenartige Messsignale sondern kontinuierliche Verläufe. Es kann, ähnlich wie bei Modellversuchen im Labor beobachtet, auf ein lokales, stufenartiges Überwinden der Adhäsion an der Kontaktfläche ZFSV/HDPE-Mantel geschlossen werden, da die Verschiebungen der DC CTL unmittelbar am MS1 gemessen werden und sehr gering bleiben. Damit lässt sich jedoch erklären, dass auch die kürzesten Extensometer Ext1.5 und Ext2.5 relativ große Verformungen zeigen.

Lediglich während der Dauerbestromung (Abbildung 37, Abbildung 38) treten einhergehend mit den Maximaltemperaturen an der DC CTL von fast 50°C auch Differenzen von 10 mm auf, wobei diese - analog zur Kraftentwicklung - ab Aug. 20 wieder zurückgehen. Bei der Dauerbestromung tritt auch erstmal eine „Auffächerung“ der Verschiebungen auf: Die beiden längeren Extensometer erfahren geringere Verschiebungen als die Kürzeren (Ausnahme: Ext1.5 und Ext2.5). Solche Messungen lassen basierend auf Modellrechnungen darauf schließen, dass an den luftseitigen Enden vor den MS2 und MS3 die Adhäsion überwunden wurde und dort nun überwiegend Reibkräfte wirken, wobei der Reib-Widerstand geringer ist als die Adhäsion.

Unabhängig davon ist festzuhalten, dass die Widerstände an der Kontaktfläche HDPE/ZFSV so groß sind, dass bisher nur vernachlässigbar geringe Relativverschiebungen gemessen werden und von einem auf einem großen Bereich nach wie vor adhäsiven Verbund mit näherungsweise elastischen Verhalten zwischen HDPE-Mantel und ZFSV ausgegangen werden kann. Zum Vergleich wurde dafür in Abbildung 40 mit einer roten gestrichelten Linie die Verschiebungen von etwa 39 mm eingezeichnet, die sich an einer gänzlich unbehinderten DC CTL mit $\Delta T = 30$ K eingestellt hätten. Damit wird die Wirksamkeit der ZFSV-Bettung hinsichtlich Verschiebungsbehinderung auch nach 4 vierwöchigen Bestromungs-/Lastzyklen und einer Dauerbestromung über 5 Monate offensichtlich.

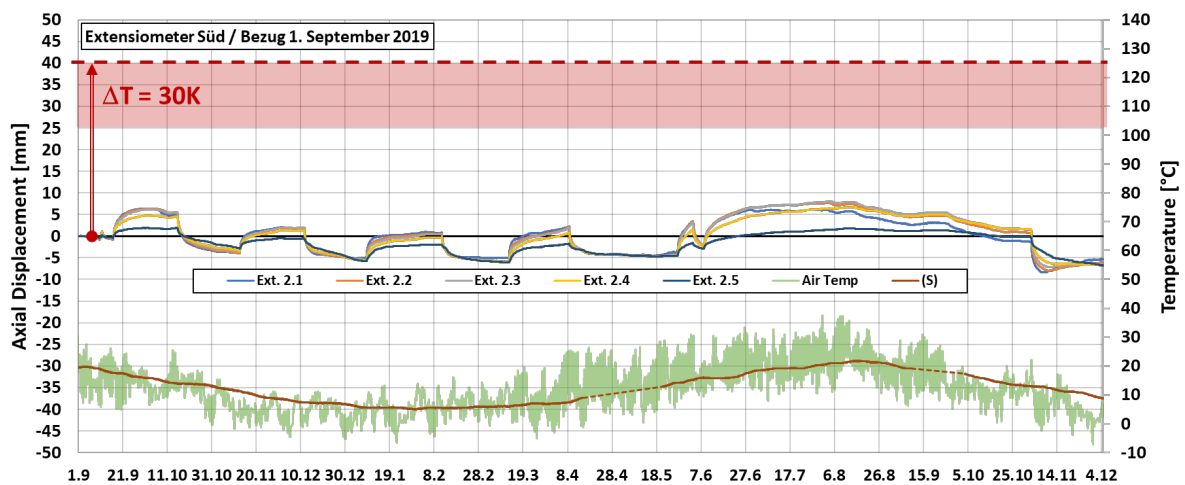


Abbildung 40: Südstrang – Relativverschiebungen zwischen Betonwand Messschacht MS1 und Ankerpunkten auf der DC CTL ergänzt mit Entwicklung der Lufttemperaturen und des unbeeinflussten Bodens (S1) 1,35 m auf Höhe des Leiters der DC CTL.

5.6.2. Radiale Verformungsmessungen

Zusätzlich wurden an beiden DC-CTL-Strängen „gürtelartige“ Extensometer mit elektronischen Wegsensoren montiert (Abbildung 5), womit die überwiegend temperaturbedingten, lokalen Umfangsänderung ΔU des DC-CTL-Außenrohrs gemessen werden können. Unter Annahme einer idealen kreisförmigen Aufweitung lässt sich durch Division mit π auf die Durchmesseränderung ΔD in radialer Richtung schließen, weshalb diese Messtechnik auch als Radial-Extensometer bezeichnet werden.

Erwartungsgemäß sind auch bei diesen Messungen die lokalen Umfangsänderung ΔU sehr gering und bleiben bei etwa 1 mm im Beobachtungszeitraum. Dies lässt sich mit geringen Temperaturhüben in den einzelnen Heizphasen erklären, die nach Abbildung 14 in den ersten 4 Lastzyklen lediglich 22 K am DC-CTL-Rohrscheitel und 18 K an der DC-CTL-Rohrsohle, somit im Mittel etwa 20 K erreichen.

Auch in der Dauerbestromung ab Ende Mai 20 werden auch nur max. 28 K am DC-CTL-Rohrscheitel und 24 K an der DC-CTL-Rohrsohle, somit im Mittel etwa 26 K, erreicht. Le-

diglich in der Abkühlphase zeigt das südliche Radialextensometer etwas größere Veränderungen bzw. eine Verringerung des Umfangs um etwa 2 mm, was jedoch lediglich einer Durchmesseränderung von 0,64 mm entspricht. Diese Informationen werden bei einer sehr genauen numerischen Berechnung erdgebetteter DC CTLs benötigt, da dadurch die Widerstände an der Kontaktfläche ZFSV/HDPE-Mantel beeinflusst werden.

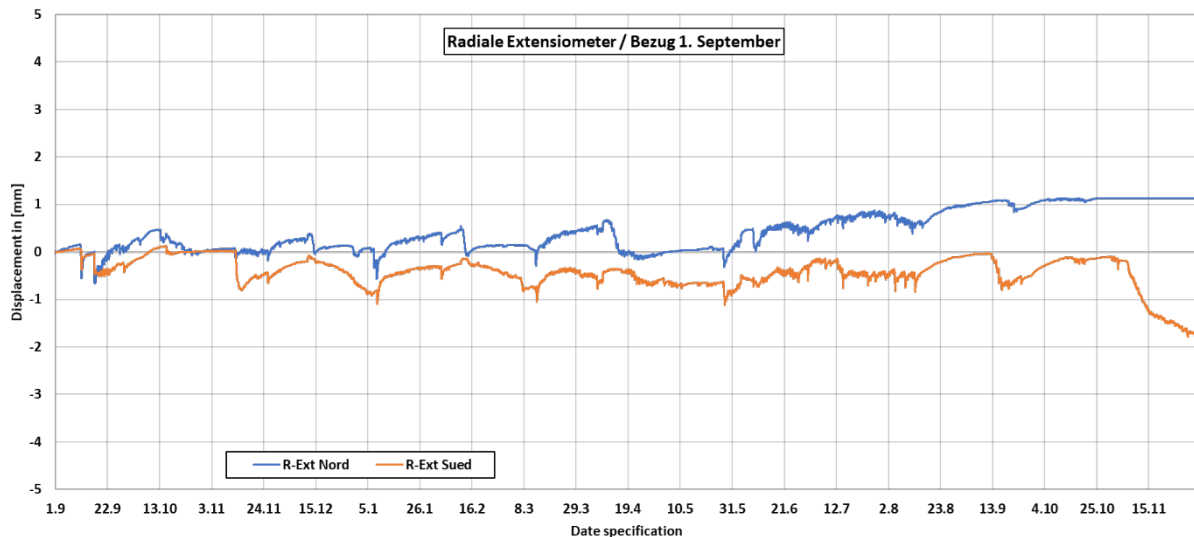


Abbildung 41: Messung der Umfangsänderung ΔU auf dem HDPE-Mantel des Außenrohrs der DC CTL mittels Radial-Extensometer.

5.6.3. Faseroptische Messungen der axialen Dehnungen

Faseroptische Messungen erfolgen im Bereich A1 und A2, wie in Abbildung 5 dargestellt. Im Bereich A1 sind Fasern mit einer Gesamtlänge von ca. 13,5 m verbaut. Im Bereich A2 ist die Gesamtlänge 14,24 m. Es wurden in beiden Bereichen sowohl Dehnungs- als auch Temperaturmessfasern eingeklebt. Bei den Dehnungsfasern wurden zwei verschiedene Fasertypen installiert. Eine Polyimid-Faser (PI-Faser) ohne metallische Schutzhülle und eine Faser mit Metallschutz, in der sich drei Messfasern befinden. Zusätzlich wurden zwei Radialmessfasern installiert.

Die Temperaturfasern sind sowohl im südlichen Teil als auch im nördlichen Teil der DC CTL ausgefallen. Im Bereich A2 können Dehnungen nur noch mit der Dehnungsfaser gemessen werden. Leider ist auch hier ein Ausfall beider Radialdehnungsfasern zu verzeichnen.

In Abbildung 42 sind die Dehnungsmessungen im Bereich A1 und in Abbildung 44 im Bereich A2 für sechs verschiedene Zeitpunkte im ersten Heiz-Lastzyklus dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich mit zunehmender Temperatur die Dehnungen erhöhen. Sämtliche Messungen starten ab einer Ortskoordinate von 2,5 m. Das Fasersegment davor ist nicht in den Leiter eingebunden und liefert somit keine verwendbaren Messdaten. Bei den Messungen im Bereich A2 ist ein unregelmäßigerer Messverlauf zu sehen, da mit Polyamid-Faser gemessen wird. Dieser Fasertyp ist durch ein größeres optisches Rauschen gekennzeichnet. Zudem kann man einen Ausfall der Messung ab einer Länge von 7,5 m am 09.11.19 erkennen. Dieser Ausfall war nur temporär.

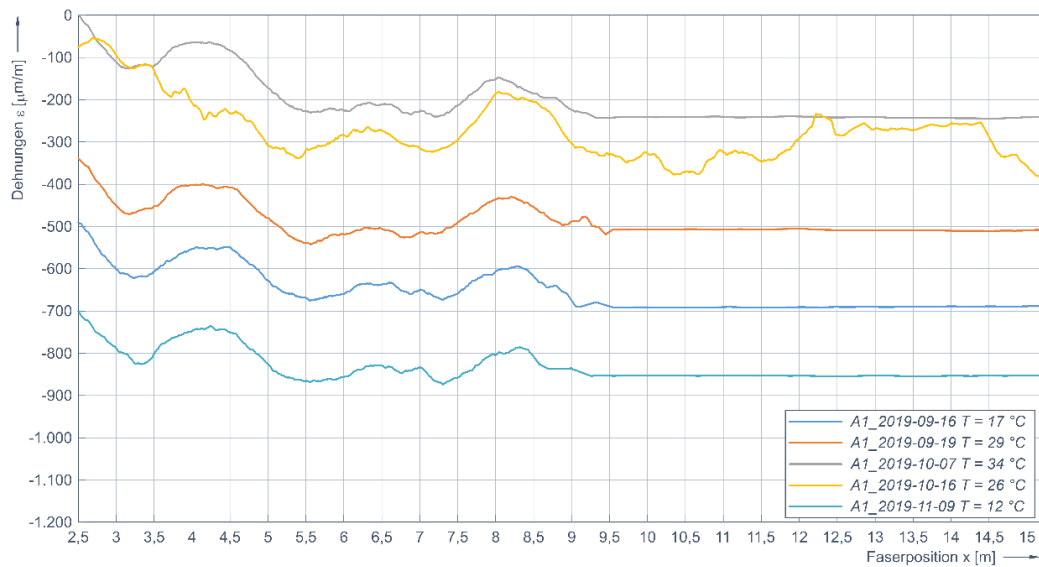


Abbildung 42: Faseroptische Messungen der axialen Dehnungen des DC-CTL-Außenrohrs mittels in den HDPE-Mantel eingeklebter Messglasfasern im Abschnitt A1 nach Abbildung 5.

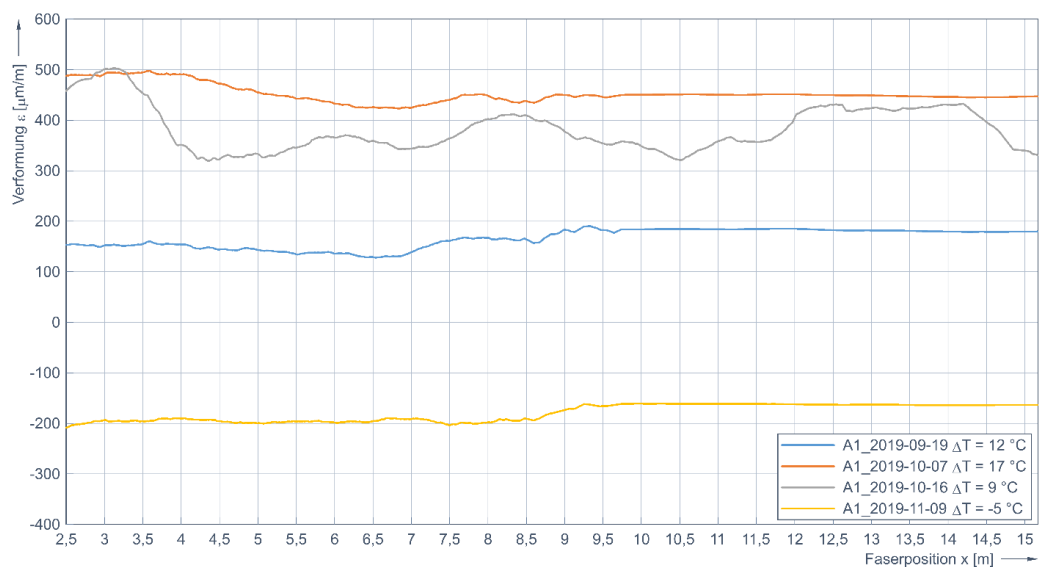


Abbildung 43: Integration der axialen Dehnungen in Abbildung 42 des DC-CTL-Außenrohrs in Abschnitt A1.

Um einen Vergleich der Messbereich A1 und A2 durchführen zu können, muss die Dehnung relativ zum Beginn des Heiz-Lastzykluses dargestellt werden, da verschiedenen Einflüsse beim Einbau der Faser und beim Verfüllen zu Unterschieden in der Ausgangsverformung führten. In Abbildung 42 sind die Dehnungen bezogen auf die Messung am 16.09.2019 bei $T = 17\text{ °C}$ dargestellt. Man kann erkennen, dass mit Zunahme der Temperatur sich eine Steigung der Dehnung und sich mit Abnahme der Temperatur eine Stauchung einstellt. Vergleicht man Abbildung 43 und Abbildung 45, kann man erkennen, dass im Mittel die Dehnungen für die unterschiedlichen Temperaturhübe gut übereinstimmen.

In Abbildung 46 und Abbildung 47 sind die Verschiebungsmessungen der Glasfasern in Abschnitt A1 und A2 dargestellt. Dabei handelt es sich um die auf integrierten Dehnungsmessungen über die Gesamtlänge der Fasern ($l_{\text{ges}} = 15,0\text{ m}$) pro Tag. Die Messungen be-

ziehen sich auf den 15.09.2019 vor Beginn des ersten Heizzyklus. Der Messzeitraum erstreckt sich vom 15.09.2019 bis zum 15.09.2020 für den Abschnitt A1 und 15.10.2020 für den Abschnitt A2. Der Abschnitt A1 konnte nur bis zum 15.09.2020 ausgewertet, da die Sensorik ab diesem Zeitpunkt keine auswertbaren Messungen mehr lieferte. Es stellen sich während den Heizzyklen maximale Verschiebungen von ca. 0,65 mm in beiden Bereichen ein. Vergleicht man die Messverläufe kann man erkennen, dass zwischen A1 und A2 eine gute Übereinstimmung vorhanden ist.

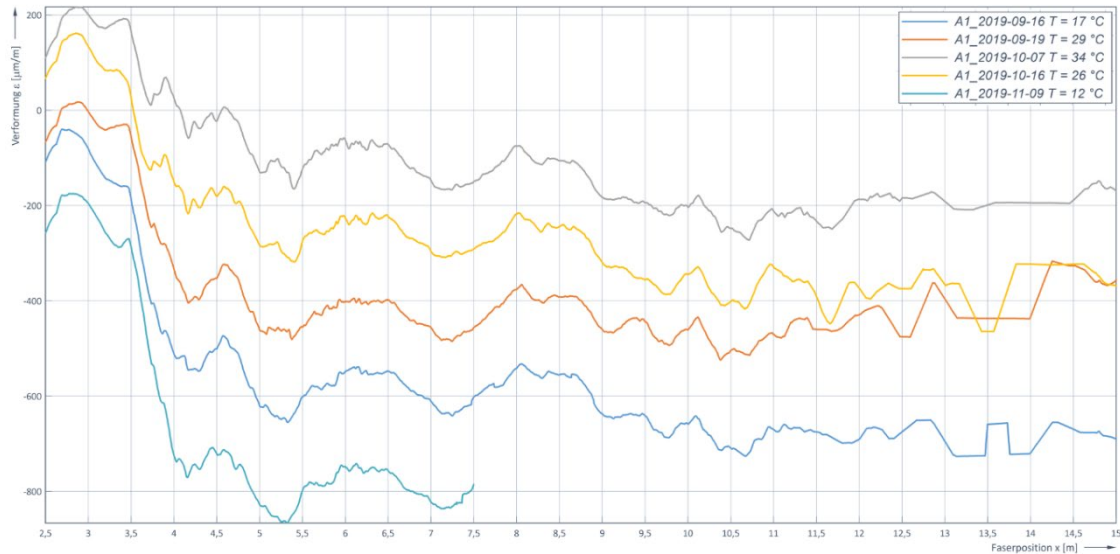


Abbildung 44: Faseroptische Messungen der axialen Dehnungen des DC-CTL-Außenrohrs mittels in den HDPE-Mantel eingeklebter Messglasfasern im Abschnitt A2 nach Abbildung 5.

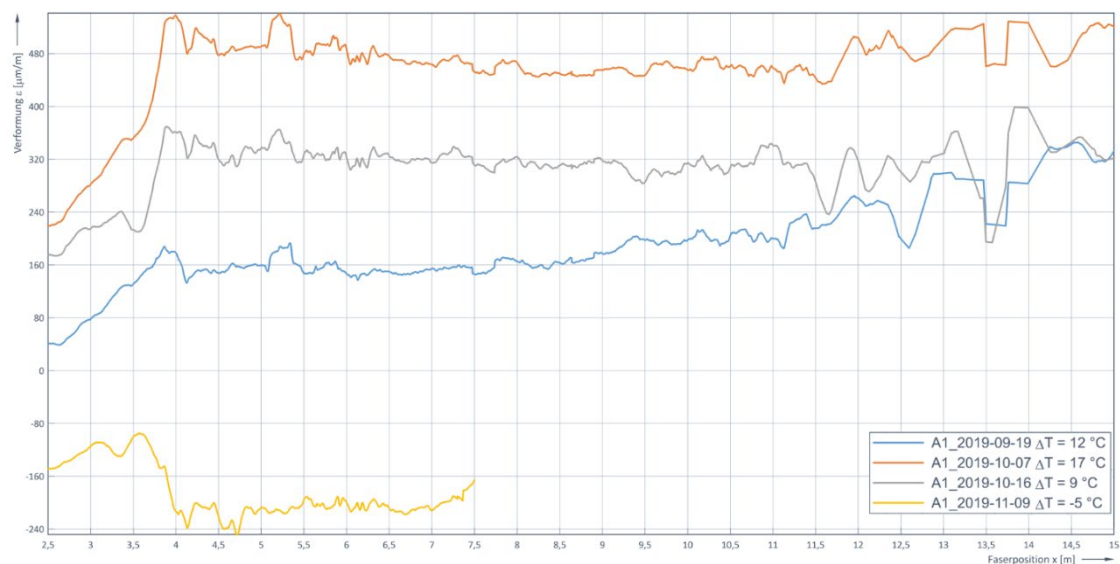


Abbildung 45: Integration der axialen Dehnungen in Abbildung 44 des DC-CTL-Außenrohrs in Abschnitt A2.

Auffälligkeiten sind im Bereich der ersten Heizphase vom 16.09.2019 bis zum 15.10.2019 zu erkennen. Bei beiden Abschnitten A1 u. A2 stellt sich nach dem Erreichen eines Maximums von ca. 0,65 mm bzw. 0,58 mm ein Abfall der Verschiebungen ein, obwohl die Temperaturmessungen weitere Erwärmung des Leiters belegen. In den darauffolgenden Zyklen ist dieses Verhalten nicht mehr zu erkennen. Aus mechanischer Sicht kann das gemessene Verhalten nicht erklärt werden. Die Messungen im ersten Heizzyklus waren jedoch bei beiden Messfasern sehr verrauscht, was eine starke Filterung der Messdaten zur Folge hatte. Somit kann der Effekt auf die Qualität der Messdaten und Ungenauigkeiten durch digitale Filterung zurückgeführt werden. Bei den anschließenden Heizzyklen waren die Messdaten wesentlich störungsfreier, was eine aussagekräftigere Auswertung der Daten ermöglichte. Bei den darauffolgenden Heizzyklen stellen sich für A1 ähnliche Verschiebungen von im Mittel 0,60 bis 0,64 mm und für A2 im Mittel von 0,58 mm bis 0,62 mm ein. Diese Ergebnisse belegen, dass es auf Grund der zyklischen Heizbelastungen zu keiner auffälligen Reduzierung der Mantelwiderstände kam, da sich sonst mit fortschreitender Zykliz größerer Verschiebungen einstellen würden.

Die Messergebnisse der Dauerheizphase konnten nur im Bereich A2 punktuell aufgezeichnet werden, da die sensible faseroptische Sensorik, wie beschrieben, bereits Ausfälle auf Grund des Dauermesseinsatzes aufwies. In Abbildung 47 kann man erkennen, dass sich ein Verschiebungsmaximum Mitte August 20 mit ca. 0,75 mm einstellt. Vergleicht man dies mit der Differenzbildung Extensometermessungen im Bereich A1 und A2, sieht man, dass die Werte im Rahmen der Messgenauigkeit gut korrelieren.

Die radiale Fasersensorik konnte nicht ausgewertet werden, da die Sensorik bereits nach dem Einbau im Zuge der Rohrverfüllung beschädigt wurde.

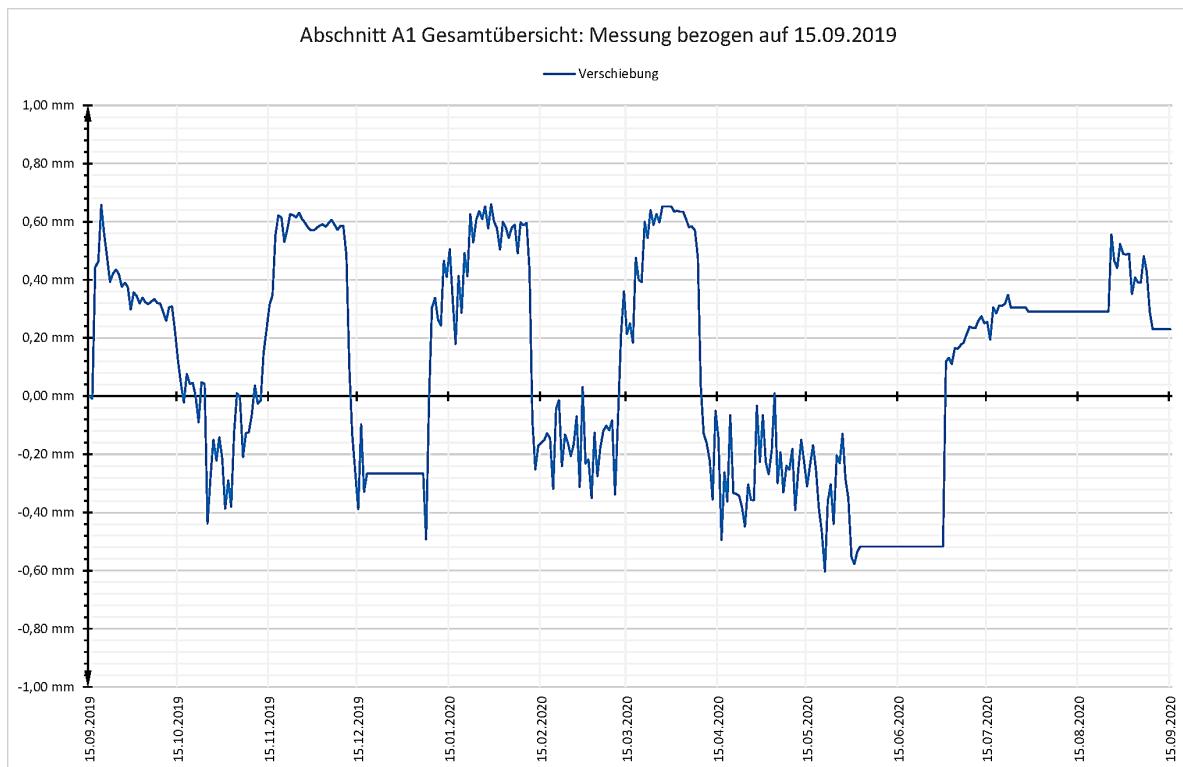


Abbildung 46: Verschiebungsmessung Abschnitt A1

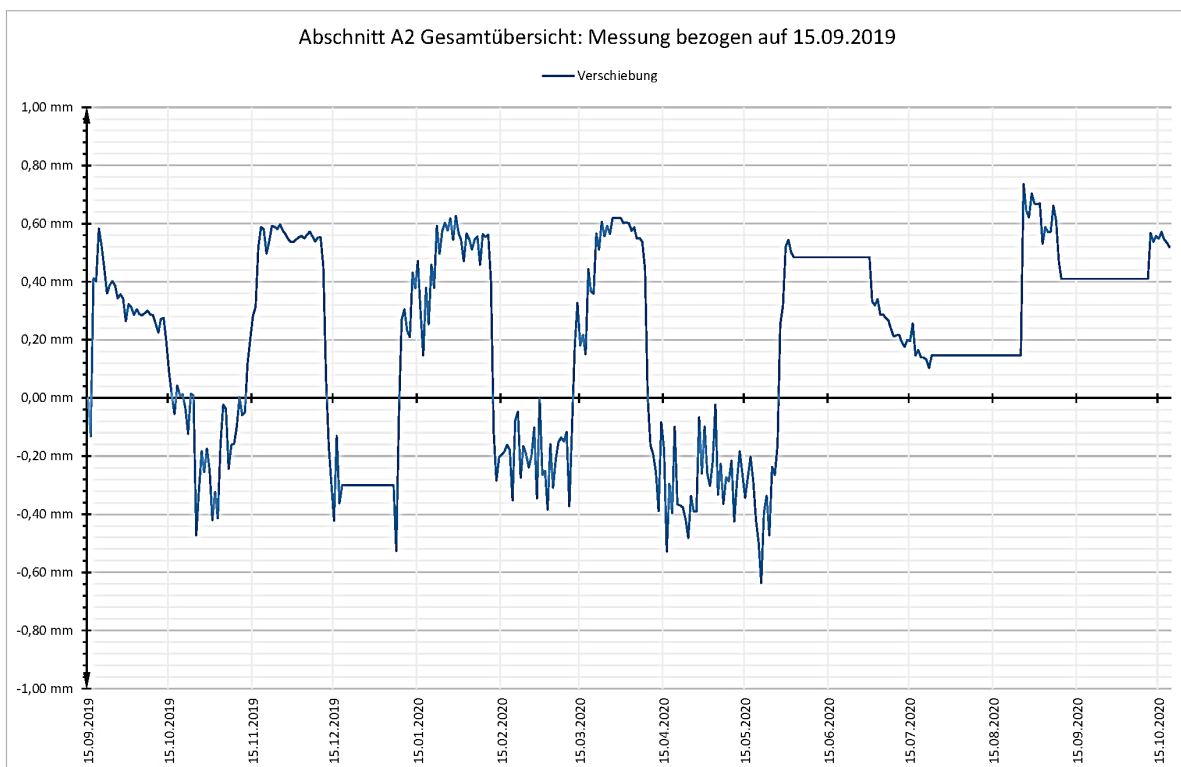


Abbildung 47: Verschiebungsmessung Abschnitt A2

6. Dokumentation ZFSV-Einbau, Begleit- und Kontrollversuche

Der Einbau des ZFSV wurde sowohl mittels Eigenüberwachung der ausführenden Firma als auch durch die OTH.R im Sinne einer Kontrollprüfung begleitet. Die von der ausführenden Firma übergebene Dokumentation der Eigenüberwachung enthält Informationen über:

- Lieferchargen: Zusammensetzung, Ausbreitmaß, z.T. Absetzmaß, Anmerkungen
- Begleitversuche: Wärmeleitfähigkeitsmessung und einaxiale Druckversuche
- Arbeitsablaufbeschreibung und Misanweisung
- Rezeptur
- Fotodokumentation

Die Inhalte der Eigenüberwachung sind nahezu vollständig und schlüssig. Lediglich bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit wurden zwei Proben geprüft, deren Herstellungsdatum bereits nach Beendigung des ZFSV-Einbaus lag und die somit nicht zuordenbar waren. Des Weiteren wäre eine Ermittlung der Dichten und der Wassergehalte bei Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit ebenso sinnvoll gewesen wie bei allen entnommenen Proben. Eine Zusammenfassung der Eigenüberwachung findet sich im Anhang.

Im Folgenden wird häufig Bezug auf die *Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau (H ZFSV) der FGSV, Köln (Ausgabe 2012)* Bezug genommen, in dem viele Untersuchungen und Versuche geregelt sind, wobei direkte Bezüge zu ZFSV-gebetteten DC CTL fehlen. Weitere Laborversuche und Untersuchungsergebnisse finden sich bei Wolfrum (2021) und Wagner (2017).

Die OTH.R hat im Zuge des ZFSV-Einbaus im Juni 2019 ebenfalls Proben zur Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit, sowie für RESIST-Durchschiebeversuche genommen, die dann im Nachgang im Labor geprüft wurden. Die Abbildung 48 zeigt die ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten bei verschiedenen Prüfaltern. Die 7-Tage-Druckfestigkeiten sind erwartungsgemäß gering, steigen aber mit dem Alter der Proben an. Keine der ermittelten einaxialen Druckfestigkeiten im Alter von 28 d hat den Wert von $0,15 \text{ N/mm}^2$ überstiegen.

Die Ergebnisse für die einaxialen Druckversuche stimmen auch mit den Ergebnissen der Eigenüberwachung überein. Lediglich die Charge LS 19 erreichte bei der Prüfung der einaxialen Druckfestigkeit Werte von $0,205 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen und $0,257 \text{ N/mm}^2$ nach 90 Tagen. Ansonsten lagen aller anderen ermittelten Druckfestigkeiten unter $0,20 \text{ N/mm}^2$. Unter Berücksichtigung der Vorgaben des H ZFSV in Abbildung 49 liegt der eingebaute ZFSV somit im Bereich der geforderten leichten Wiederaushubfähigkeit.

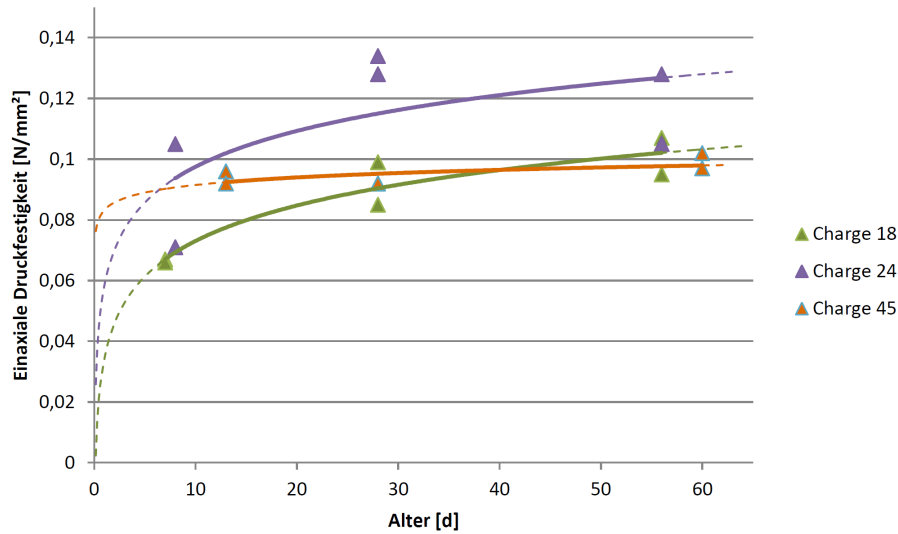


Abbildung 48: Entwicklung der einaxiale Druckfestigkeit der OTH.R-Rückstellproben.

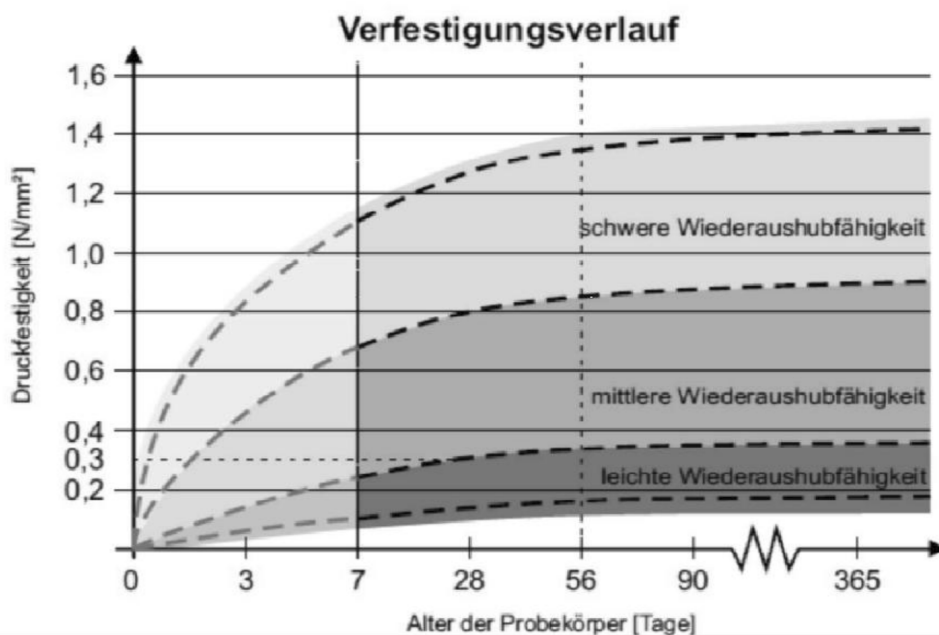


Abbildung 49: Zuordnung einaxiale Druckfestigkeit - Wiederaushubfähigkeit gemäß H ZFSV.

Mit Proben der Baustellenmischungen wurden Untersuchungen mittels des Regensburger Stab-Interface-Scher-Tests (kurz: RESIST) durchgeführt. In diesem Test wird der Scherwiderstand des ZFSV mit einem HDPE ummanteltem Aluminiumrohr untersucht, welches sich durch den Boden bewegt. Das Rohr simuliert die Oberfläche eines DC-CTL-Rohres, das sich durch die hohe Stromstärke, welche auf die Leitungen aufgebracht wird, ausdehnt. Da das Rohr im Labor keine Erwärmung bzw. dadurch keine Änderungen der Länge erfährt, wird die Bewegung des Rohrs durch eine äußere Kraft, hervorgerufen durch Verwendung einer Presse, hervorgerufen, welche das Rohr durch den Boden schiebt. Durch die Bewegungen des Rohrs kann als erstes die „Haftreibung“ bzw. Adhäsion gemessen werden. Ist diese

erreicht, bewegt sich das Rohr unter „Gleitreibung“, welche ebenfalls gemessen wird. Durch das Aufbringen von radialem Seitendruck, der den ZFSV zusammendrückt, kann die Veränderung der Scherwiderstände in unterschiedlichen Einbautiefen simuliert werden. Mit Zeitreihen, wie sie auch mit den einaxialen Druckversuchen durchgeführt werden, kann das Verhalten bei zunehmender Aushärtung des Zements in den Bodenmischungen untersucht werden.



Abbildung 50: RESIST-Probe bei Prüfung in der Universalpresse.

In Abbildung 51 sind die Spitzenwerte τ_{peak} der Schubspannung in [kPa] aufgetragen, welche beim ersten Durchschieben im RESIST ermittelt wurden. Sie sind die Werte, bei denen die „Haft-, in die Gleitreibung“ übergeht bzw. die Adhäsionsspitze überwunden ist. Dieser Spitzenwert kann nur mittels Geschwindigkeits-geregelter Belastung ($\leq 0,05$ mm/min) und Messwertabtastungen von ≤ 1 Sekunde ausreichend genau genug erfasst werden.

Es wurden die Mittelwerte der Ergebnisse mehrere Proben verwendet, wobei die Versuchsdurchführungen etwa einen Monat nach Probenahme erfolgten. Erwartungsgemäß zeichnet sich in Abbildung 51 ein druckabhängiges Ergebnis ab: Je größer der bei der Aushärtung aufgebrauchte Druck bzw. je tiefer die DC CTL im Baugrund liegt, desto höher der Adhäsions-bedingte Spitzenwerte τ_{peak} der Schubspannung. Im Allg. kann die Druckabhängigkeit mit einer Ausgleichsgerade angenähert werden.

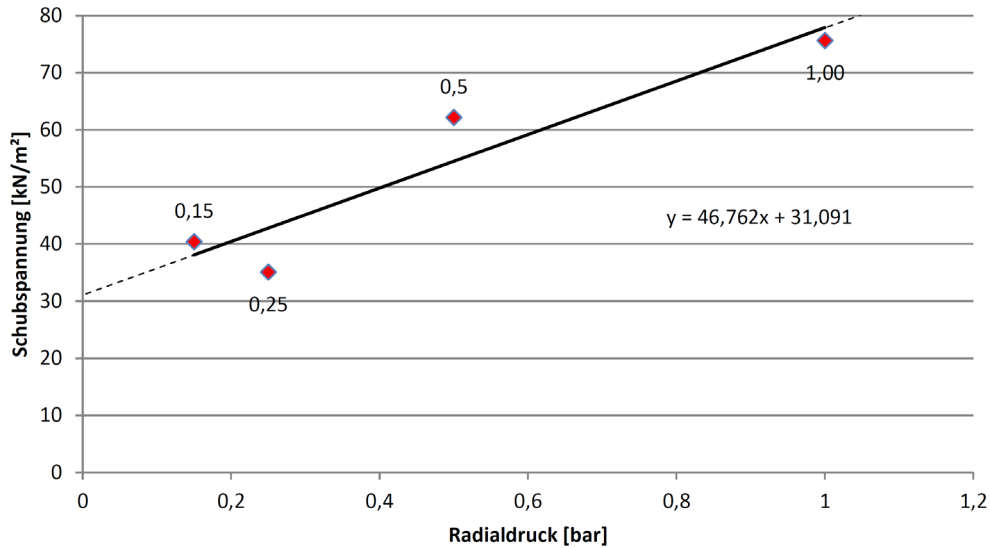


Abbildung 51: Versuchsergebnisse RESIST: Druckabhängigkeit der maximalen Durchschiebewiderstände (Adhäsion) als Schubspannung τ_{peak} [kPa].

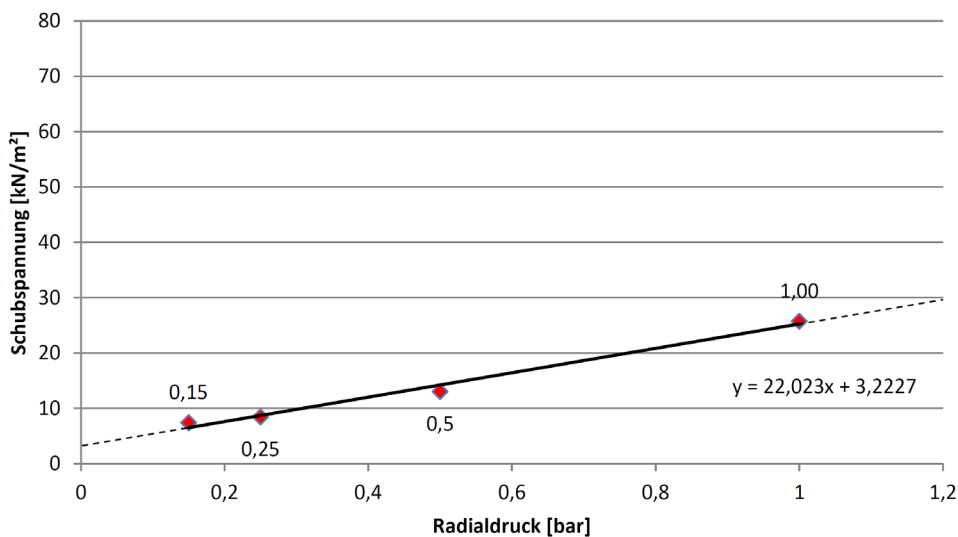


Abbildung 52: Versuchsergebnisse RESIST: Druckabhängigkeit der Rest-Durchschiebewiderstände (Reibung) als Schubspannung τ_{rest} [kPa] bei großen Verschiebungen.

Auch Abbildung 52 zeichnet sich erwartungsgemäß druckabhängiges Ergebnis der Rest-Durchschiebewiderstände („Gleitreibung“) als Schubspannung τ_{rest} [kPa] bei großen Verschiebungen (im Allg. 1,5 x Rohrdurchmesser) ab, das mit einer Ausgleichsgeraden angenähert werden kann. Theoretisch müsste die Ausgleichsgerade durch den Koordinatenursprung verlaufen, was aufgrund der möglichen Versuchsstörungen und Genauigkeiten bei solchen Versuchsreihen selten zutrifft.

Die Ergebnisse der Laborversuche lassen sich mit gleichem mittleren Druck, gleichen ZFSV-Mischungen und Kontaktoberflächen auf die Rohroberflächen im Allg. mittels der Rohrdurchmesser D vereinfacht auf die Situation in situ übertragen:

$$\tau_{\text{peak/rest}}^{\text{in situ}} = \tau_{\text{peak/rest}}^{\text{Labor}} \cdot (D^{\text{in situ}} / D^{\text{Labor}}).$$

7. Untersuchung der thermo-hydraulischen Wechselwirkungen

Aufgrund der eingebauten Messtechnik und ausgewerteten Messsignale konnten im Laufe des Projekts die hydraulischen und thermischen Transportprozesse mittels FEM näherungsweise berechnet werden. Als Programm kam hierfür Plaxis-2D zum Einsatz, welches u.a. aufgrund der Plaxis Ultimate-Module (vormals Plaxis Flow und Thermal Flow) eine sehr umfassende und realitätsnahe Berechnung ermöglicht. Die thermischen und hydraulischen Transportvorgänge sind hierbei gekoppelt und beeinflussen sich gegenseitig.

Das FEM -Paket Plaxis wurde auch aufgrund der hinterlegten bodenmechanischen Stoffgesetze gewählt, mit denen es gelingt, die mechanische Wechselwirkung zwischen DC CTL, ZFSV-Bettung und den umgebenden Böden ausreichend realitätsnah abzubilden, wie von Wolfrum (2020) gezeigt wurde. Da – wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben – es kaum zu Verlust der adhäsiven Bindung zwischen ZFSV und DC CTL kam, oder gar Spaltbildung auftraten, wurden, um allzu große Rechenzeiten (Wochen) zu vermeiden, die mechanische Wechselwirkung vernachlässigt: Es wurden keine Kräfte oder Verformungen berücksichtigt. Das grundsätzliche Vorgehen bei der Modellierung lässt sich hierbei in 3 Schritte unterteilen:

1. Ermitteln der Materialparameter:

Bei Vernachlässigung der bodenmechanischen Komponente sind lediglich Stoffparameter für den Wasser- und Wärmetransport nötig. Die hydraulischen Materialwerte wurden über die bei Versuch B eingebaute Kombination Tensiometer-Feuchtesensor, sowie Laborversuche ermittelt. Die thermischen Materialwerte hingegen wurden beim ZFSV-Verfüllen der DC CTL direkt gemessen und notiert. Die Sättigungsabhängigkeit der konduktiven Wärmeleitfähigkeit stellt einen zentralen Punkt in der Berechnung dar und wurde in unserem Modell (Programm-bedingt) als linearer Zusammenhang gewählt. Die Materialwerte der Wasserdampfdiffusion wurden auf Basis von Literaturangaben gewählt, da diese nicht mit einfachen im Labor, sondern mit nur sehr aufwändig Versuchen ermittelt werden können.

2. Ermitteln der Randbedingungen:

Aufgrund der direkt auf dem Versuchsfeld aufgestellte Wetterstation konnten alle relevanten Witterungseinflüsse wie Niederschlag, Temperatur und Sonneneinstrahlung über die Versuchsdauer aufgezeichnet werden. Diese wurden als Einwirkungen auf der Geländeoberfläche des FE-Modells aufgebracht und anschließend mit der Abwärme des Leiters (als Wärmequelle mit definierter Wärmeverlustleistung in Watt) kombiniert. Im späteren Verlauf des Modells wurde noch die Evapotranspiration als Randbedingung hinzugefügt, welche nach Penham aus den Daten der Wetterstation ermittelt wurde.

3. Aufbau des Modells:

Im letzten Schritt wurde die Geometrie und der Genauigkeitsgrad des FE-Modells festgelegt. Hierzu wurden verschiedene Abmessungen gewählt und mit analytischen Lösungen für den stationären Zustand (homogener Boden unendlich, ausgedehnt) verglichen. Um die Ergebnisse durch die Modellränder nicht zu beeinflussen, wurden die Modellgrenzen bei 10 m horizontalen Achsabstand und 16 Metern Tiefe unter Geländeoberfläche angesetzt.

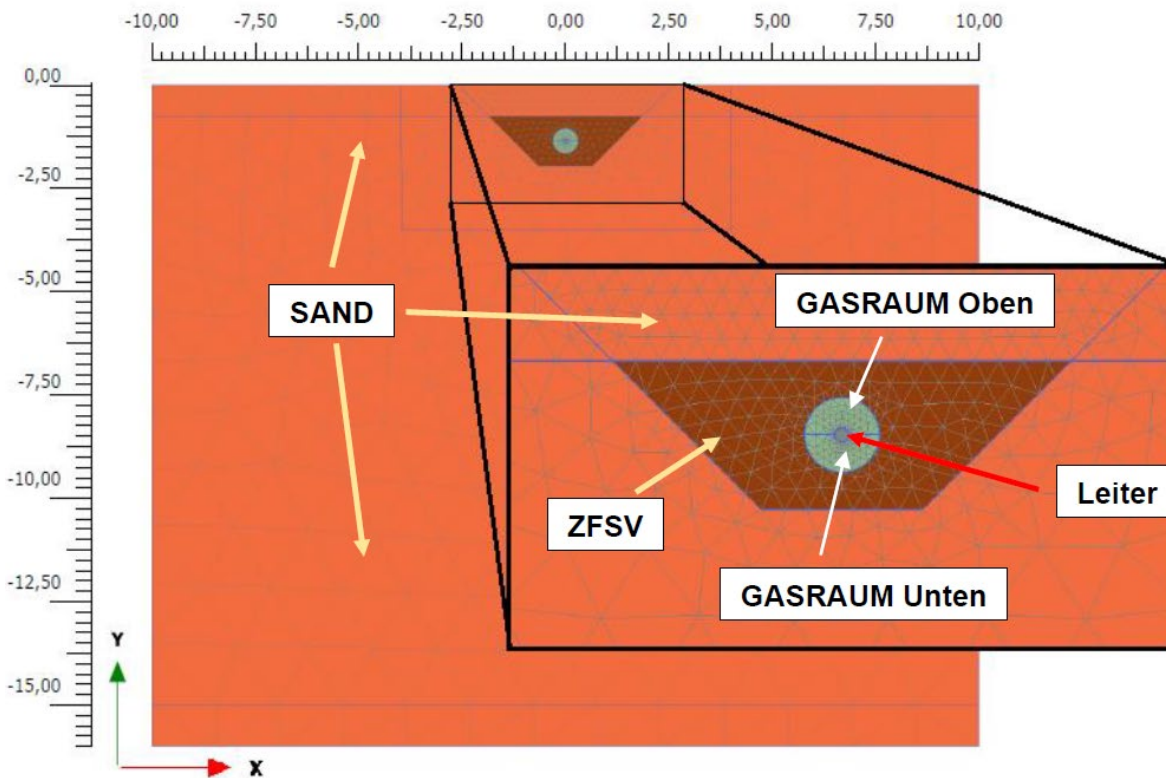


Abbildung 53: Darstellung des Modells in Plaxis 2D.

Ursprünglich war vorgesehen, nur die Außenhülle der DC CTL zu modellieren und die Wärmequelle an die Grenzfläche HDPE-Außenrohr/ZFSV zu setzen. Auf diese Weise wäre jedoch keine Berechnung der Innen-Leitertemperatur möglich gewesen, weshalb die DC CTL schlussendlich samt Leiter und Gasraum angenähert modelliert wurde. Da Plaxis 2D durch seinen Geotechnik-Fokus noch keine Wärmestrahlung und thermisch-bedingte Konvektion abbilden kann, wurden die Gasräume als Ersatzwiderstände modelliert. Die Ermittlung dieser Ersatzwärmeleitung erfolgte iterativ über Bezug auf die Messwerte der Sensorik.

Die Berechnung wird in mehrere Schritte (Stages) unterteilt. In den ersten Phasen der Berechnung wird versucht, eine möglichst zutreffende Ausgangssituation des Bodens zu erreichen (v.a. hinsichtlich seiner Anfangssättigung und Temperaturverteilung). Dies wird durch das Ansetzen der realen Witterungsverhältnisse in Form von Randbedingungen erreicht. In den folgenden Phasen ist die Unterteilung vor allem unterschiedlichen Bauphasen

(z.B. bei Rückverfüllen), der zyklischen Bestromung und der besseren Übersicht bei der Auswertung geschuldet.

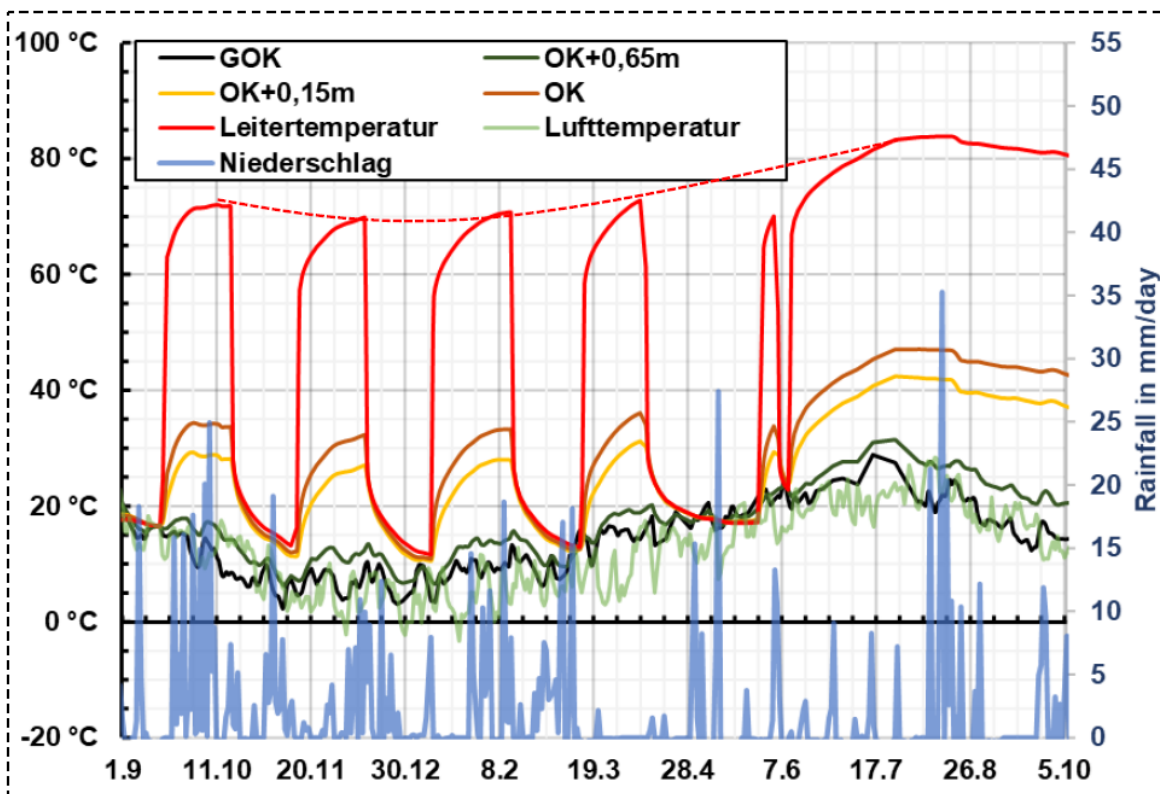
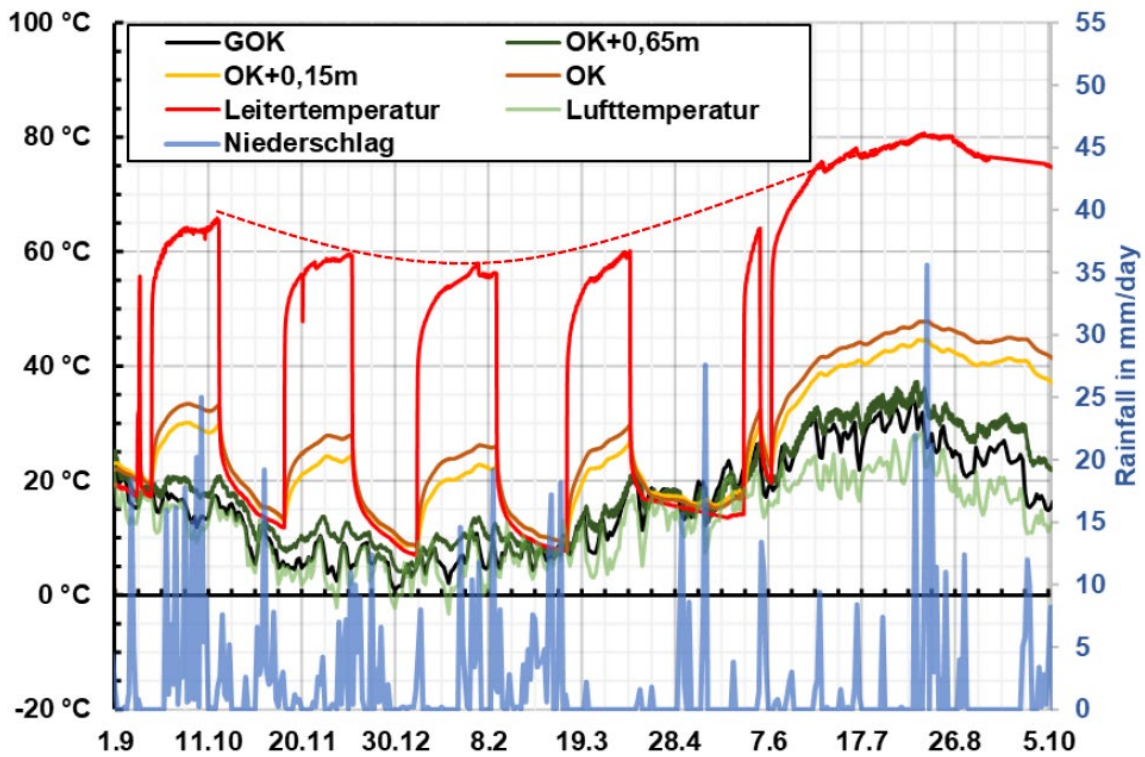


Abbildung 54: Vergleich der Bodentemperaturen oberhalb der DC CTL
oben - Messungen,
unten - Ergebnisse der FE-Modellierung.

Die Ergebnisse der Berechnung konnten anschließend mit den Messwerten der Sensorik verglichen werden. Die Werte der FEM decken sich vor allem bei der dauerhaften Bestromungsphase vom 27.05.2020 bis 02.11.2020 sehr gut mit den Messergebnissen. Im Folgenden sind die Messpunkte zwischen DC CTL und Geländeoberkante dargestellt, wobei die gestrichelt umrandete Grafik die Temperaturen der FEM zeigt. Wie deutlich zu erkennen ist, ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Sensorik. Im Oktober 2019 ist beim Verlauf des OK+0,65m sogar die Delle infolge eines witterungsbedingten Temperatursturzes erkennbar.

Die Abweichungen in den Wintermonaten sind unter anderem auf die zu hohe Abwärme infolge konstanter Verlustleistung (Temperaturkoeffizient nicht modellierbar) zurückzuführen. Zudem wird in den Wintermonaten der Wärmeverlust über die Messschächte der Versuchsanlage verstärkt ins Gewicht fallen. Aus diesen beiden Faktoren folgt der geringere jahreszeitliche Temperaturabfall im Leiter der DC CTL.

Ein weiterer Grund für Abweichungen von den Messwerten ist die angenommene lineare Beziehung zwischen Sättigung und Wärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 46), da diese bei hohen Temperaturgradienten verstärkt ins Gewicht fällt.

Deutlich zu erkennen sind die starken Einflüsse von Regenereignissen auf den Wärmetransport, wobei der konvektive Wärmestrom hier tendenziell etwas zu stark ausgeprägt scheint. Da die Permeabilität des Sandes nicht labortechnisch ermittelt wurde, erfolgte die Parameterwahl auf Basis der hinterlegten Kataloge in Plaxis.

Erwähnenswert ist, dass der Einfluss der DC CTL auf die Temperatur an der Geländeoberfläche mit abgebildet wird. Im Zeitraum der Dauerbestromung stieg die Temperatur an der Geländeoberkante deutlich über die mittlere Lufttemperatur (stellenweise sogar höher als die maximale tägliche Lufttemperatur). Dieser Temperaturanstieg über Umgebungstemperatur wird zwar durch die Globaleinstrahlung (in unserer Berechnung nicht berücksichtigt, folglich die Temperaturen an GOK niedriger) begünstigt, dennoch zeigen die Messdaten auch eine leichte Abwärme-bedingte Temperaturerhöhung der Geländeoberfläche. Durch das Definieren der „weichen“ Convection-BC mit entsprechender Wärmeübergangszahl der Umgebungsluft (im Modell mit konstanten $7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen) wird dieser Effekt in der FEM-Berechnung sichtbar.

Trotz der vorgenannten Einschränkungen lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse und der Berechnungen feststellen. Weitere Informationen zur FE-Modellierung finden sich bei Zrenner (2021): *Modellierung des gekoppelten thermischen und hydraulischen Verhaltens von ZFSV-Bettungen bei erdverlegten Höchstspannungsleitungen*. <https://opus4.kobv.de/opus4-oth-regensburg/frontdoor/index/index/docId/1790>

8. Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht ist eine Zusammenfassung der erbrachten Leistungen „Nach Endauswertung aller Messungen und Berechnungen und Zusendung des Abschlussberichts zu den Forschungsergebnissen im Arbeitspaket 1.5 und im Arbeitspaket 1.7 nach Zusendung aller Messergebnisse und Messauswertungen“.

Im Bericht sind die Messergebnisse seit Mai 2019 dargestellt und interpretiert. Dabei konzentrieren sich die Darstellungen und Bewertungen der Messergebnisse auf den Zeitraum 1.Sep.19 bis 25. Jun.20, in dem 4 Lastzyklen bestehend aus 4 vierwöchigen Heizphasen (5.000 A DC +/-1%) unterbrochen von 3 vierwöchigen passiven Abkühlungsphasen (0,0 A DC) ausgeführt und nahezu unterbrechungsfrei gemessen werden konnten. Nach einer längeren Abkühlphase von 8 Wochen nach der 4-ten Heizphase wurde vom 28. Mai 2020 bis über den Sommer 2020 insgesamt 5 Monate mit rund 5.000 A DC dauerbestromt. Die Dauerbestromung wurde am 2. Nov. abgeschaltet: Grund für die gemeinsam mit dem AG beschlossenen Abschaltung war, dass die Temperaturdifferenzen im ZFSV um die DC CTL herum nahezu konstant verliefen und einen Plateauwert erreicht hatten.

Unter Berücksichtigung aller Messergebnisse, Laborversuche und Berechnungen können die folgenden stichpunktartigen Feststellungen gemacht werden:

- A) Die Gehäuse-Temperaturen und Temperaturen im ZFSV stiegen nur moderat an und blieben unter den erwarteten Werten, wobei eine signifikante Überlagerung mit jahreszeitlich-bedingten Einflüssen beobachtet wurde. Die am Innenleiter erreichte Maximaltemperatur betrug etwa 68°C mit Ende der ersten Heizphase. In den folgenden Lastzyklen wurde dieser Wert aufgrund der jahreszeitlich bedingten, fallenden Luft- und Bodentemperaturen nicht mehr erreicht. Erst mit der Dauerbestromung ab Ende Mai 20 einhergehend mit jahreszeitlich bedingten, steigenden Luft- und Bodentemperaturen wird im Aug. 20 am Innenleiter eine Maximaltemperatur etwa 84°C gemessen, die dann - trotz Dauerbestromung - wiederum bis Ende Okt. 20 aufgrund jahreszeitlich bedingter, fallenden Luft- und Bodentemperaturen auf 75°C abfällt. *Alle gemessenen Temperaturen sind für die DC CTL aufnehmbar und verträglich.*
- B) Die Temperaturanstiege im umgebenden Boden und der ZFSV-Bettung waren relativ gering im Verhältnis zu den Anstiegen aufgrund der jahreszeitlich bedingten Sonneneinstrahlung. Die Temperaturen am DC-CTL-Rohrscheitel und an der DC-CTL-Rohrsohle direkt am HDPE-Mantel des Außenrohrs unterscheiden sich um 3 bis 5 K. Das Außenrohr bleibt am Rohrscheitel mit max. 33 °C am Ende der ersten Heizphase mit 35 K unter der max. Temperatur des Innenleiters zurück. Die max. Differenz von etwa 35 K bleibt durchgängig über alle Heizzyklen auch während der Dauerbestromung bis Ende Okt.

20 erhalten, was für eine nach wie vor kontinuierlich gute Wärmeleitfähigkeit des ZFSV spricht. Die Temperaturentwicklung an den Kontaktfläche ZFSV/ Sandüberdeckung (A) und an der Kontaktfläche ZFSV/ Sand in der Grabensohle (E), zeigen immer geringere Werte als in den Messpunkten am DC-CTL-Außenrohr. *Die hohe Wärmeleitfähigkeit des ZFSV blieb über den gesamten Versuchszeitraum erhalten.*

- C) Bis auf Auswirkungen der Vegetation und/ oder von Regenereignissen und Trockenperioden zeigten auch Wassergehalte und Saugspannungen etwa konstante Verläufe. Der volumetrische Wassergehalt des ZFSV erreichte nach einigen Monaten mit im Mittel etwa 300 Liter Wasser je 1 m³ ZFSV einen nahezu konstanten Wert. Der ZFSV ist nach 15 Monaten Versuchsdauer nicht ausgetrocknet und weist hohe Wärmeleitfähigkeitswerte auf. *Spontanbewuchs der Geländeoberfläche hat offensichtlich stärkere Auswirkungen auf die Wassergehalte und Saugspannungen in der überlagernden Sandschicht und im ZFSV als die bisherigen Erwärmungsphasen der DC-CTL.*
- D) *Die gemessenen Ausdehnungen des DC CTL Gehäuses blieben gering und werden wirkungsvoll vom ZFSV behindert.* Die axialen Ausdehnungen des DC-CTL-Gehäuses blieben im mm-Bereich, die gemessenen Kräfte unter 800 kN. Die Widerstände an der Kontaktfläche HDPE/ ZFSV sind so groß, dass bisher nur geringe Relativverschiebungen gemessen werden, was einen großen DC CTL-Bereich mit adhäsivem Verbund nahelegt.
- E) Die Versuchsergebnisse legen es bei ZFSV-Bettungen nahe, zukünftig auf „massive Festpunkte“ (Betonquader) bei Winkeln verzichten oder zumindest diese durch „Außenkompensatoren“ ersetzen zu können, wie sie z.B. bei erdverlegten Fernwärmerohren eingesetzt werden.
- F) Wetterlagen- und jahreszeitlich bedingte Temperaturschwankungen haben einen relativ großen Einfluss auf Verschiebungen/ Verformungen und Spannungen in der DC CTL, was deren Berücksichtigung bei der rechnerischen Modellierung erfordert. Auch ist die Verlege- und Vergusstemperatur der DC CTL bei der Interpretation der Messergebnisse zu berücksichtigen, da sich dadurch ein Vorspannungseffekt einstellt.
- G) Aufgrund weiterer, hier nicht direkt vorgestellter jedoch zitierter Untersuchungen und Erkenntnisse im Rahmen des FuE-Projektes, können nun auch
- *gekrümmte DC CTL-Trassenverläufe* auch mit räumlichen Biegeradien,
 - Knicke und Winkel sowie
 - nebeneinander verlegte DC CTL-Stränge berechnet werden.

H) Bodenmechanische und thermische Wechselwirkung zwischen DC CTL/ZFSV/Boden können nun auch instationär berechnet werden, falls transiente Strom/Zeit-Last-Regime und entsprechende Wetter- und Baugrunddaten vorhanden sind.

Regensburg, den 30. August 2021



Prof. Dr.-Ing. Thomas Neidhart



Maximilian Lerch, M.Eng.



Louis Zrenner, M.Eng.



Doris Wiesinger, M.Eng.

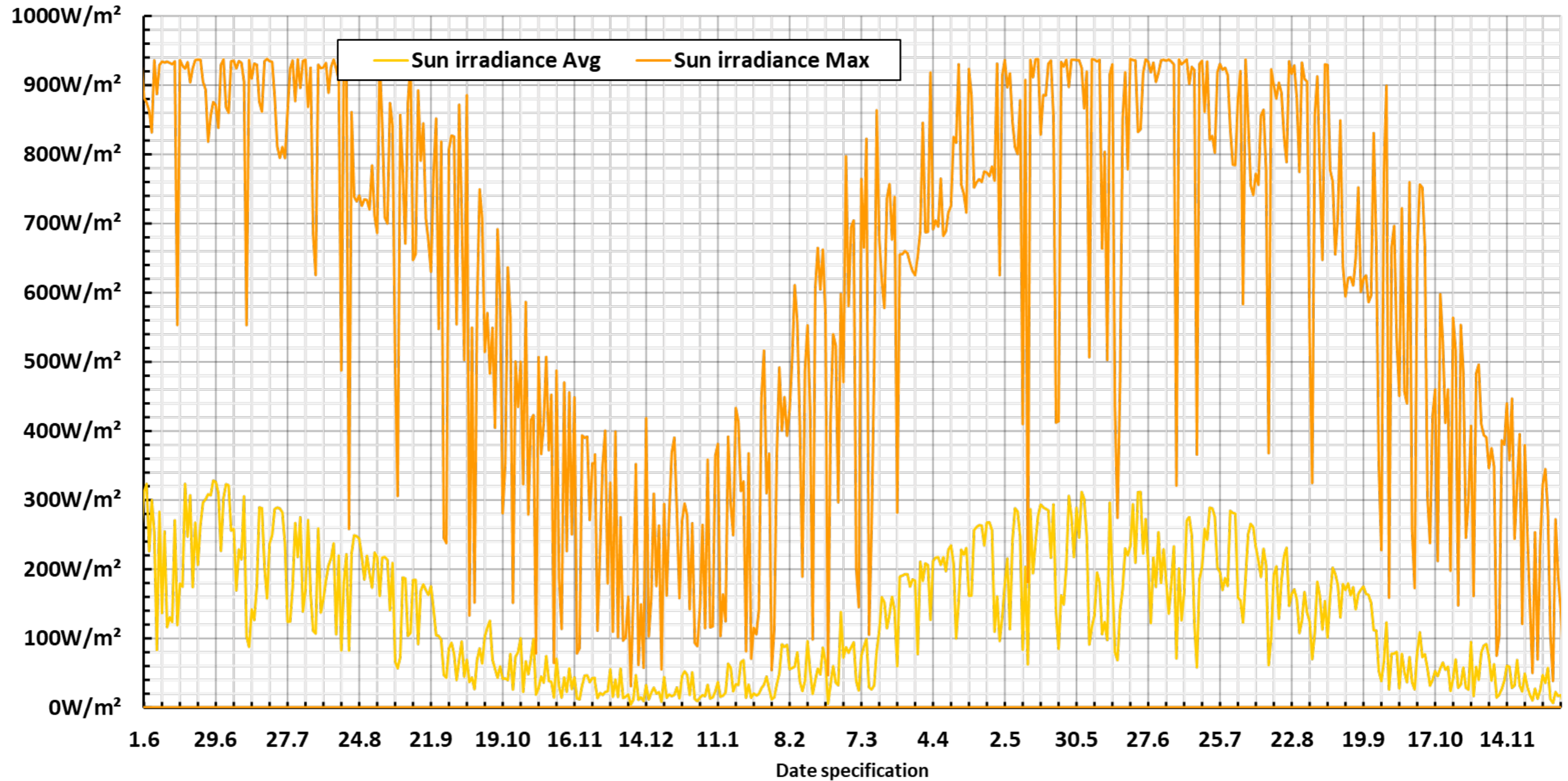
Anlagenverzeichnis

Anlage 1 – Daten der Wetterstation	3
Anlage 1.1 – Sonneneinstrahlung (Sun Irradiance).....	4
Anlage 1.2 – Windgeschwindigkeit (Windspeed).....	5
Anlage 1.3 – Lufttemperaturverlauf.....	6
Anlage 1.4 – Vergleich rel. Feuchtigkeit, Niederschläge und durchschnittlicher Lufttemperatur.....	7
Anlage 2 – Spannung, Strom, Leistung.....	8
Anlage 2.1 – Stromstärke und Spannung	9
Anlage 2.2 – Stromstärke, Spannung, Ausgangsleistung	10
Anlage 3 – Boden- und Rohrtemperatur Einzelsensorik	11
Anlage 3.1 – Lage der Temperatur- (T bzw. BT), Tensiometer- (TS) und Feuchtesensorik (F).....	12
Anlage 3.2 - Temperaturverlauf der Einzelsensoren (BT bzw. T) Messquerschnitt Süd	13
Anlage 3.3 - Temperaturverlauf der Einzelsensoren (BT bzw. T) Messquerschnitt Nord	14
Anlage 3.4 – Anlegemessfühler Temperatur am Rohrmantel (NTC) Messbereich Nord	15
Anlage 3.5 – Anlegemessfühler Temperatur am Rohrmantel (NTC) Messbereich Süd	16
Anlage 4 – Boden- und Rohrtemperaturen Faseroptik (OSSCAD).....	17
Anlage 4.1 – Bodentemperaturen je Tiefenlage mit Lufttemperatur und Niederschlag	18
Anlage 4.2 – Temperaturdifferenz der Bodentemperatur je Tiefenlage zur Bodentemperatur (S) im ungestörten Bereich.....	19
Anlage 4.3 – Erläuterung OSSCAD Gesamtmessbild	20
Anlage 4.4 – Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 1 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)	21
Anlage 4.5 – Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 2 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)	22
Anlage 4.6 – Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 3 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)	23
Anlage 4.7 – Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 4 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)	24
Anlage 4.8 – Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 5 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)	25
Anlage 4.9 – Temperaturverlauf im Messquerschnitt Nord als Surfer-Plots	26
Anlage 4.10 – Temperaturverlauf im Messquerschnitt Nord als Surfer-Plots	27
Anlage 4.11 – Temperaturverlauf im Messquerschnitt Nord als Surfer-Plots	28
Anlage 5 – Feuchtesensoren und Tensiometer inkl. der internen Temperaturverläufe	29
Anlage 5.1 – Feuchtemessverlauf inkl. interner Temperaturverlauf Messquerschnitt Süd	30
Anlage 5.2 - Saugspannungsmessverlauf inkl. interner Temperaturverlauf Messquerschnitt Süd	31
Anlage 5.3 – Feuchtemessverlauf inkl. interner Temperaturverlauf Messquerschnitt Nord	32
Anlage 5.4 - Saugspannungsmessverlauf inkl. interner Temperaturverlauf Messquerschnitt Nord.....	33
Anlage 5.5 – Gegenüberstellung Feuchte- und Saugspannungsmessverlauf Messquerschnitt Süd	34
Anlage 5.6 – Gegenüberstellung Feuchte- und Saugspannungsmessverlauf Messquerschnitt Nord	35

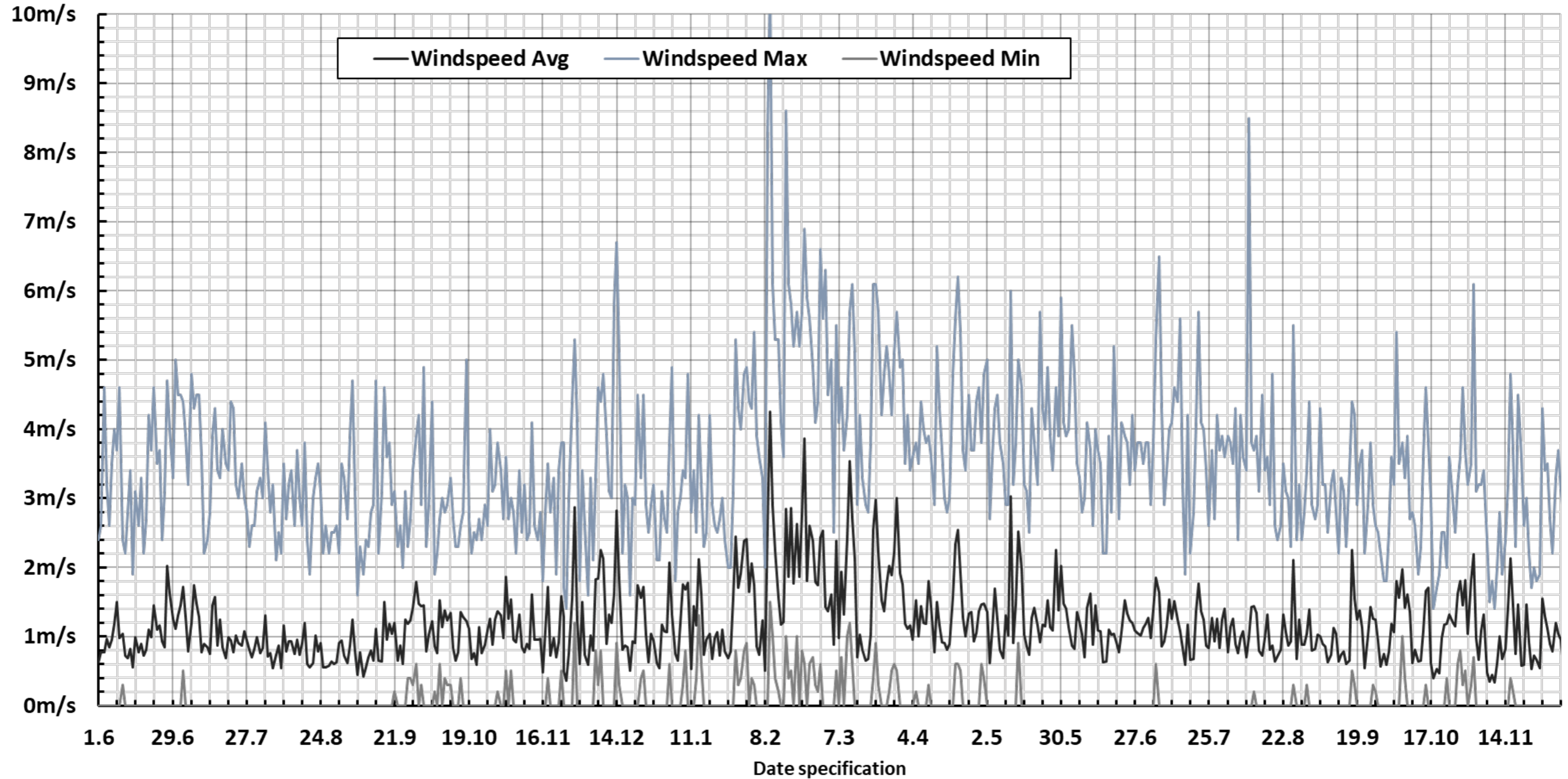
Anlage 6 – Kraftmessgeber.....	36
Anlage 6.1 – Verlauf Kraftmessung je Kraftmessdose (KMD)	37
Anlage 6.2 – Verlauf Gesamtkraft inkl. interner Temperaturverlauf, Lufttemperatur und Bodentemperatur	38
Anlage 7 – Extensometer (axial und radial) inkl. Wegaufnehmer MS 1	39
Anlage 7.1 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Nord ohne Korrektur der Temperaturdehnung	40
Anlage 7.2 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Nord mit Korrektur der Temperaturdehnung	41
Anlage 7.3 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Süd ohne Korrektur der Temperaturdehnung	42
inkl. Luft- und Bodentemperatur	42
Anlage 7.4 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Süd mit Korrektur der Temperaturdehnung	43
Anlage 7.5 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Süd mit Korrektur der Temperaturdehnung inkl. Verlauf der Gesamtkraft, Temperaturen der Kraftmessdose, (S), Lufttemperatur	44
Anlage 7.6 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Nord mit Korrektur der Temperaturdehnung inkl. Verlauf der Gesamtkraft, Temperaturen der Kraftmessdose, (S), Lufttemperatur	45
Anlage 7.7 – Radialextensometermessung	46
Anlage 7.8 – Verschiebungsmessungen Wegaufnehmer MS1 Messrichtung Süd (Wegkomp_-) und Nord (Wegkomp_+)	47
Anlage 8 – Faseroptische Messungen	48
Anlage 8.1 – Schematische Darstellung der Messstrecken A1 und A2	49
Anlage 8.2 – Faseroptische Verschiebungsmessung A1	50
Anlage 8.3 – Faseroptische Verschiebungsmessung A2	51
Anlage 9 – Dokumentation der ZFSV Mischungen	52
Anlage 9.1 – ZFSV Mischungen.....	53
Anlage 9.2 – Einaxiale Druckfestigkeit und WLFK-Messungen	57

Anlage 1 – Daten der Wetterstation

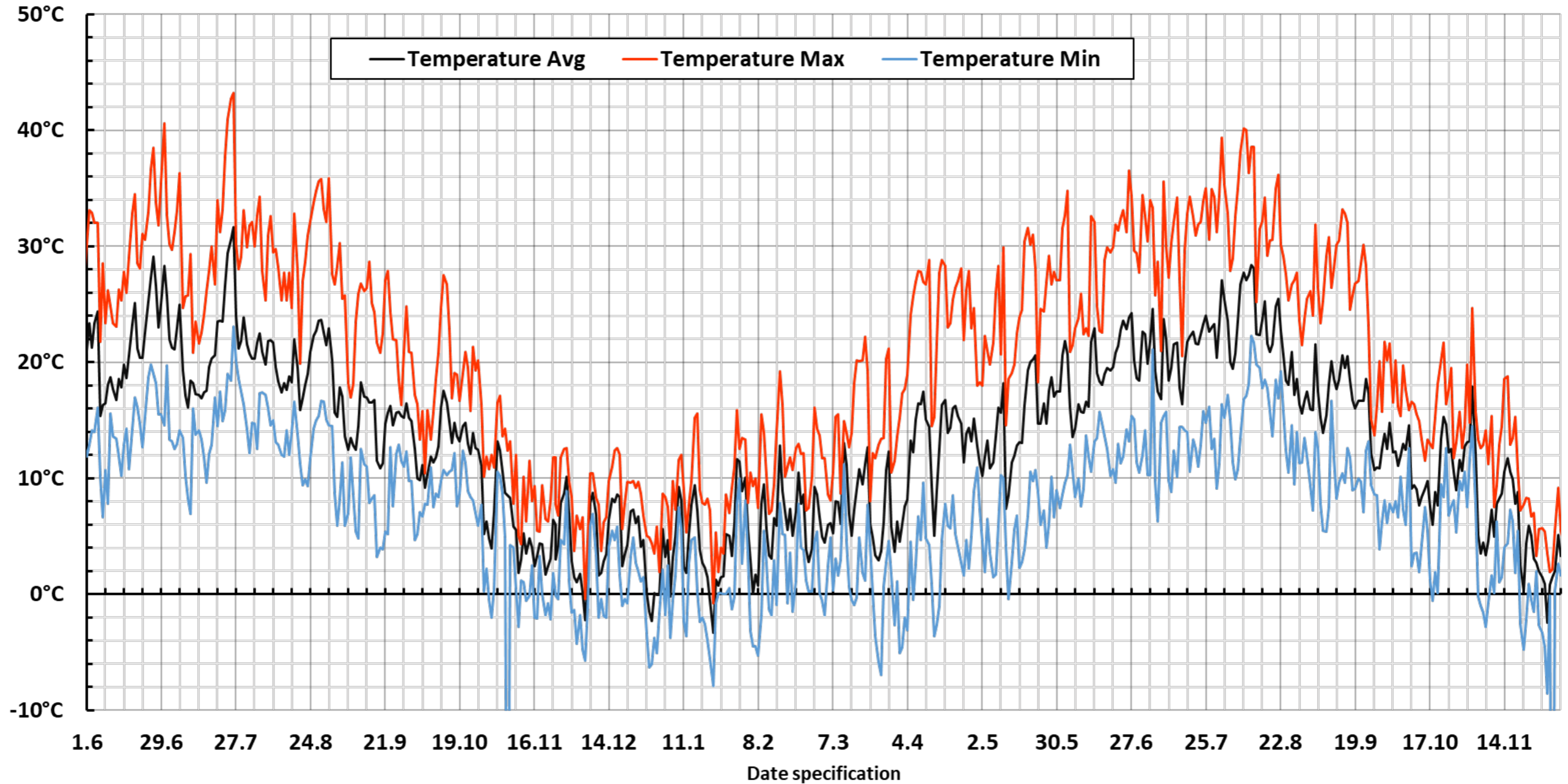
Anlage 1.1 - Sonneneinstrahlung (Sun Irradiance)



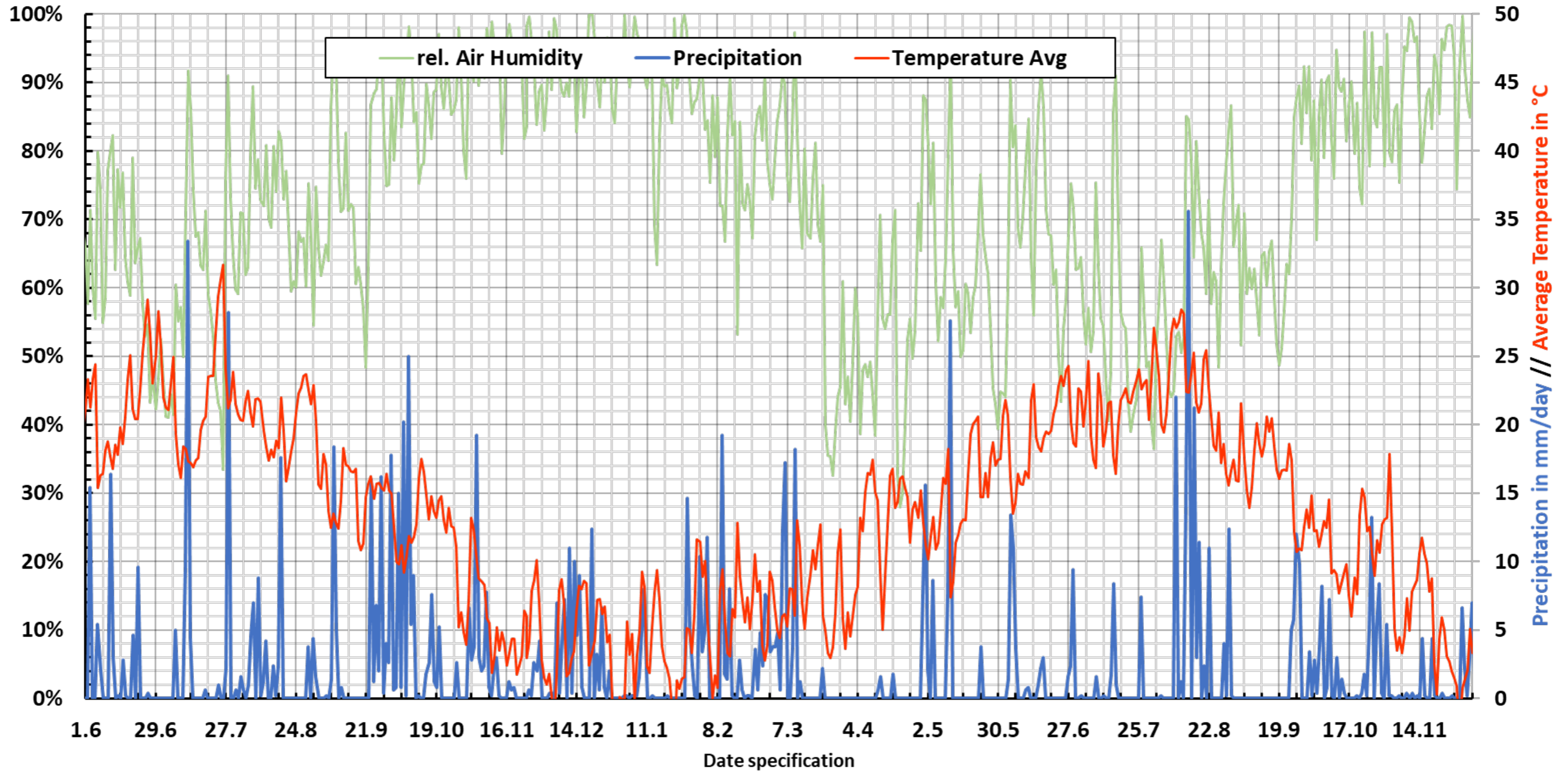
Anlage 1.2 - Windgeschwindigkeit (Windspeed)



Anlage 1.3 - Lufttemperaturverlauf

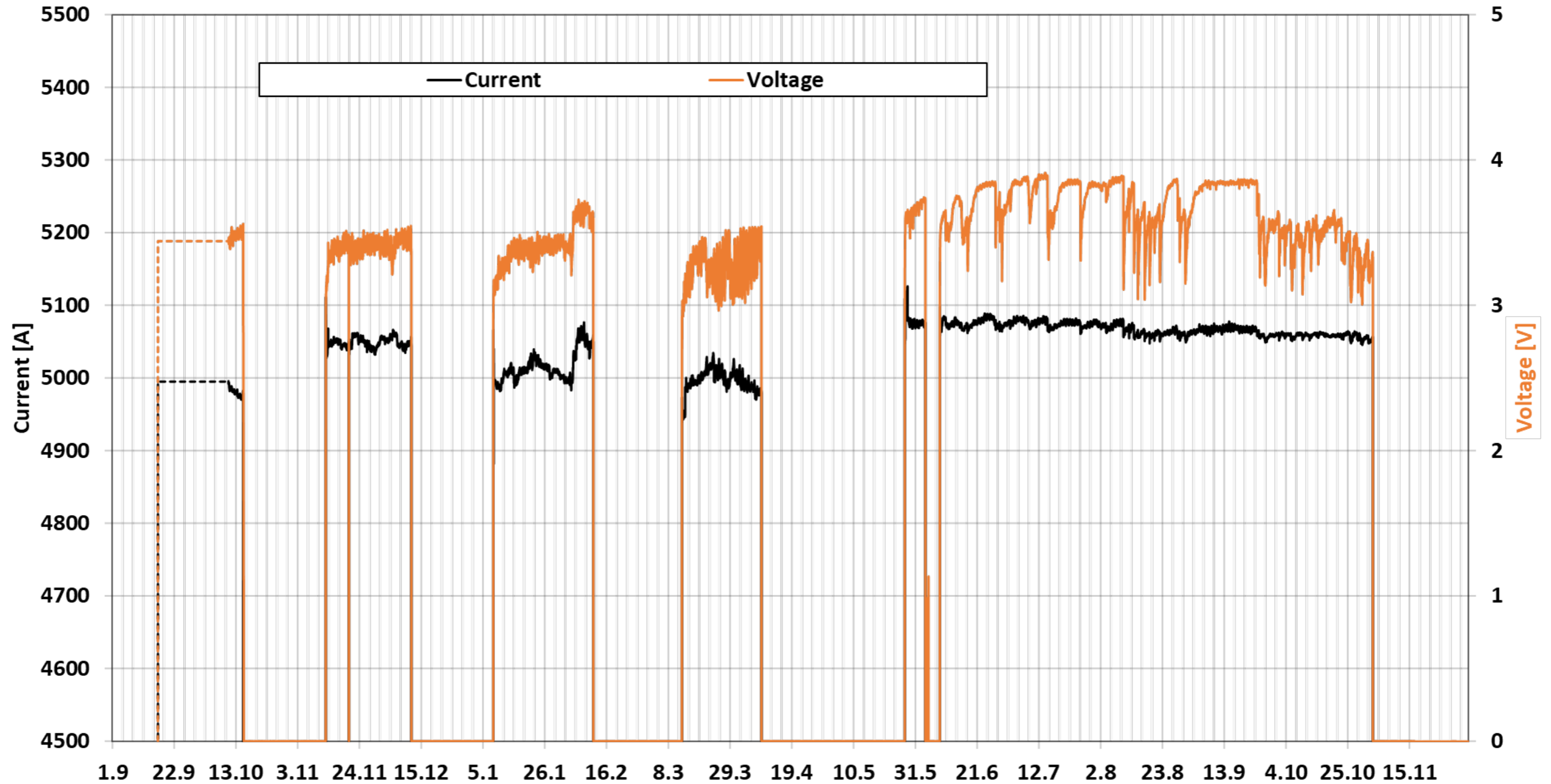


Anlage 1.4 – Vergleich rel. Feuchtigkeit, Niederschläge und durchschnittlicher Lufttemperatur

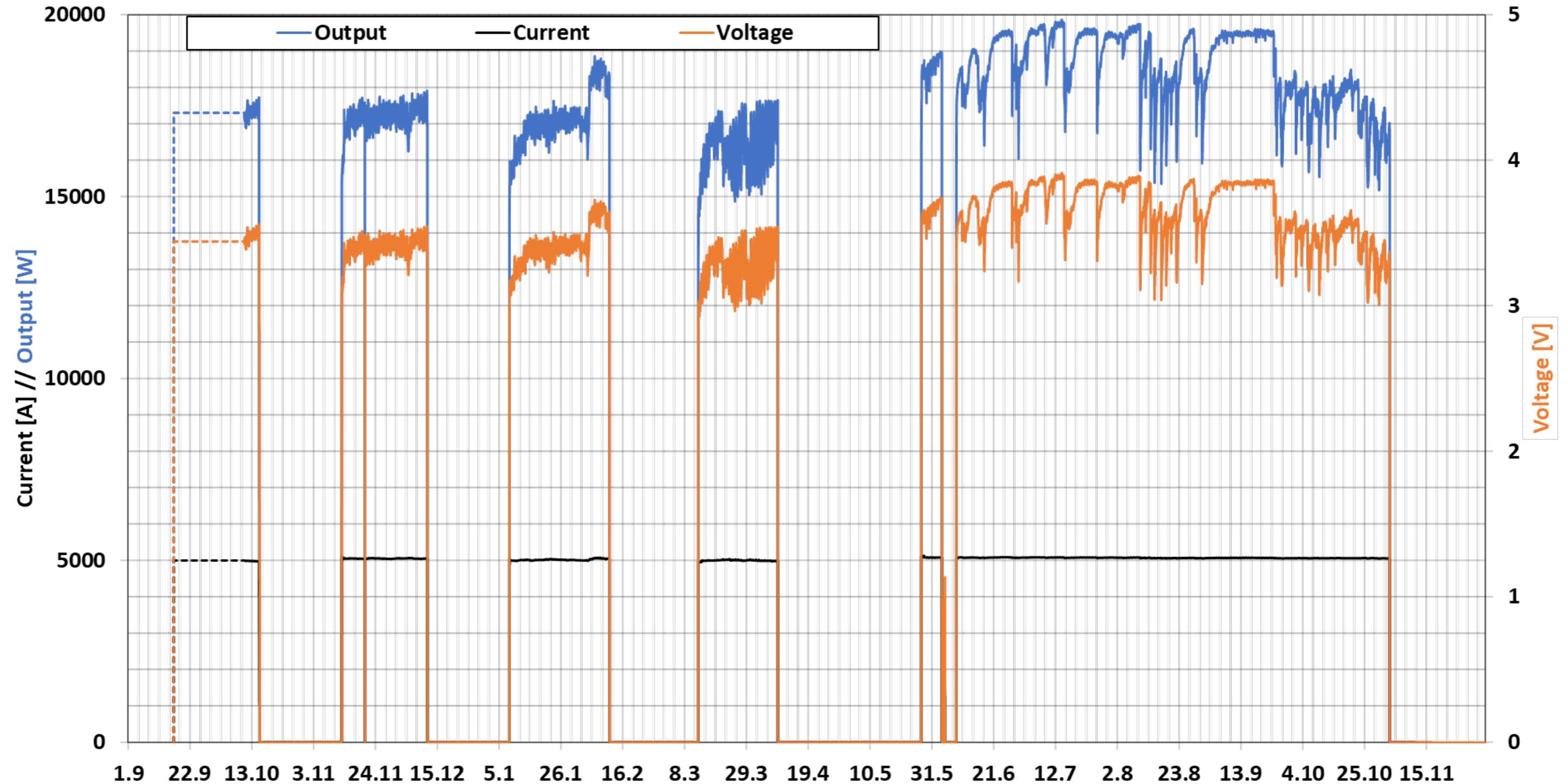


Anlage 2 – Spannung, Strom, Leistung

Anlage 2.1 - Stromstärke und Spannung

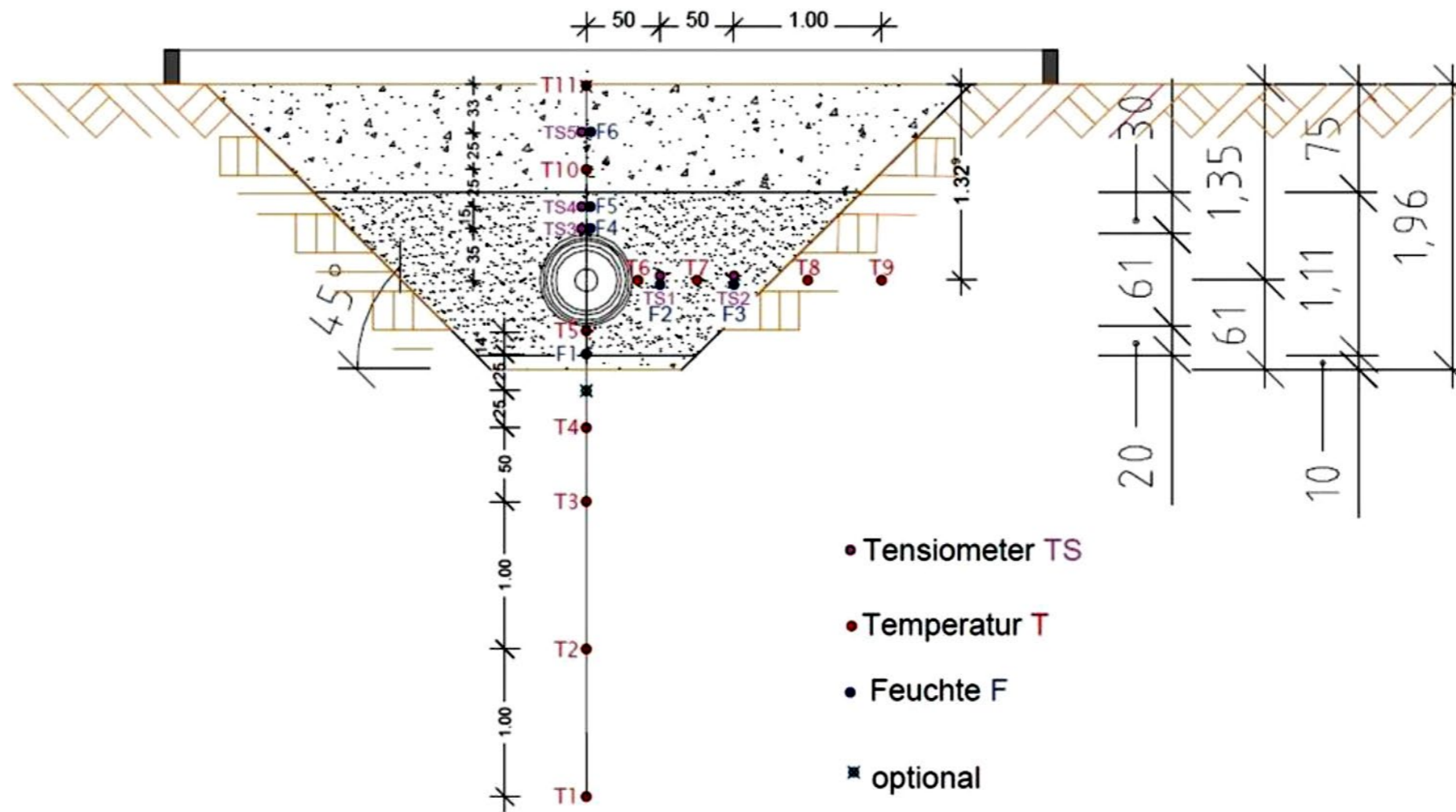


Anlage 2.2 - Stromstärke, Spannung, Ausgangsleistung

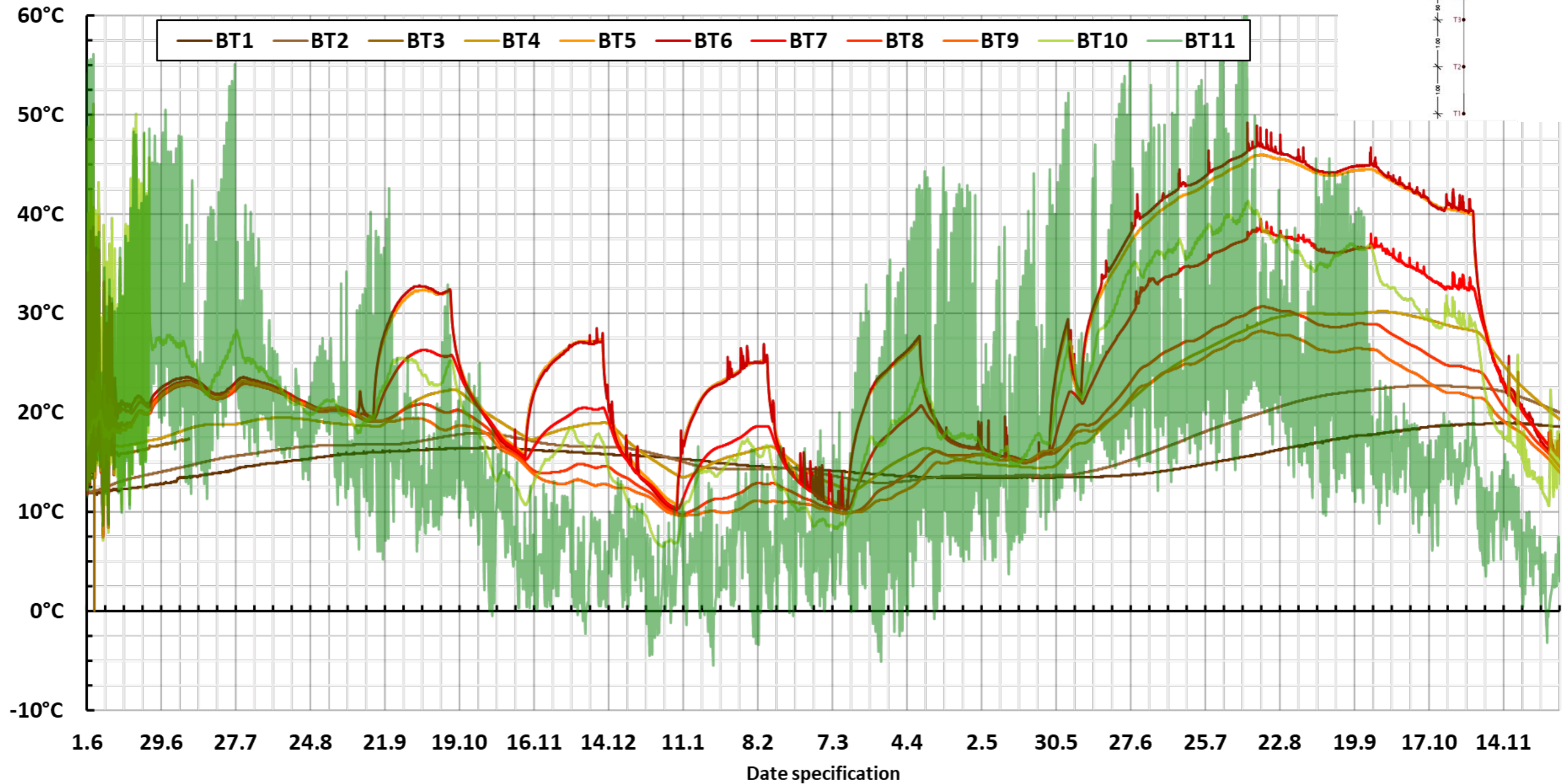


Anlage 3 – Boden- und Rohrtemperatur Einzelsensorik

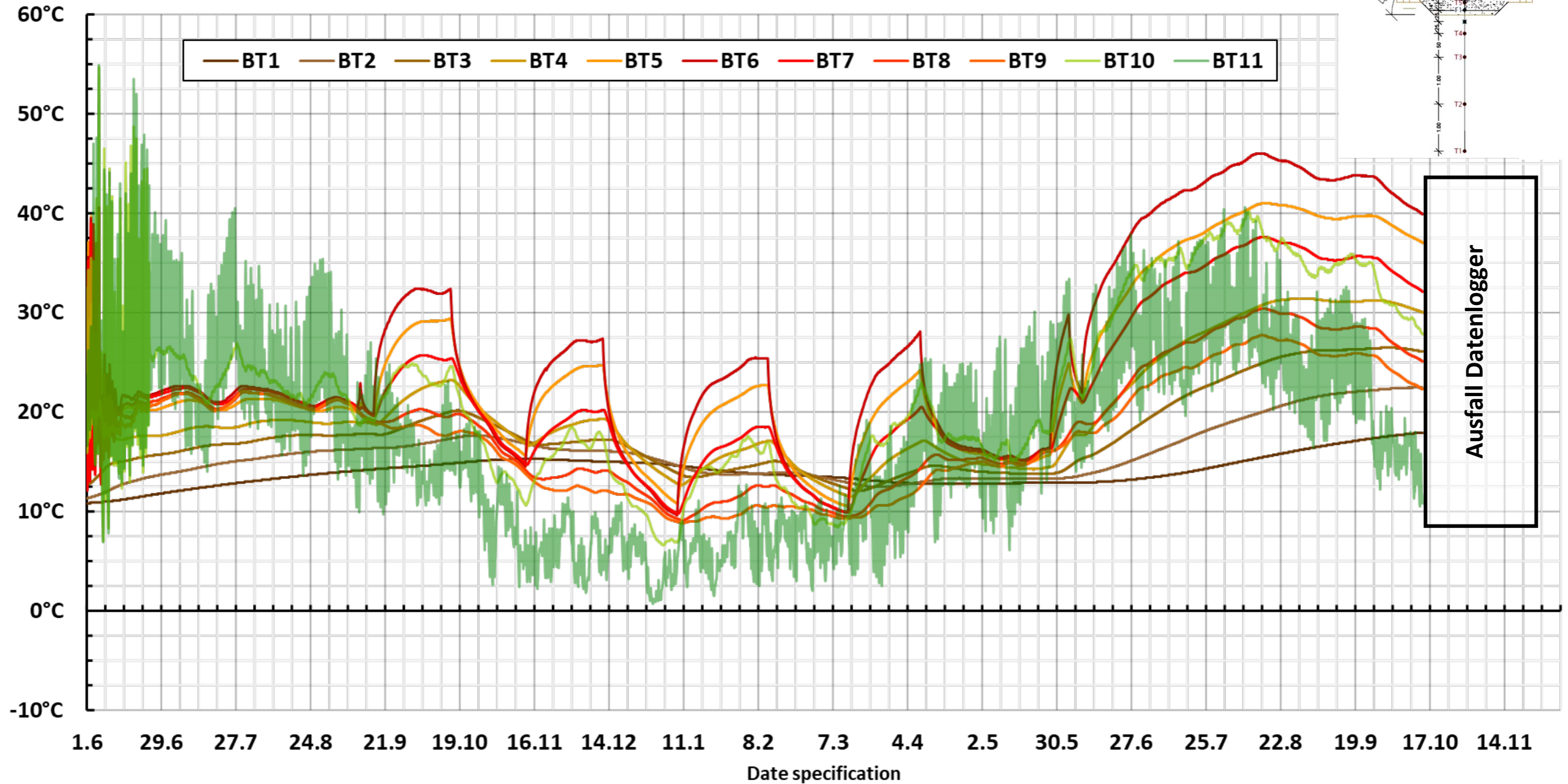
Anlage 3.1 - Lage der Temperatur- (T bzw. BT), Tensiometer- (TS) und Feuchtesensoren (F)



Anlage 3.2 - Temperaturverlauf der Einzelsensoren (BT bzw. T) Messquerschnitt Süd

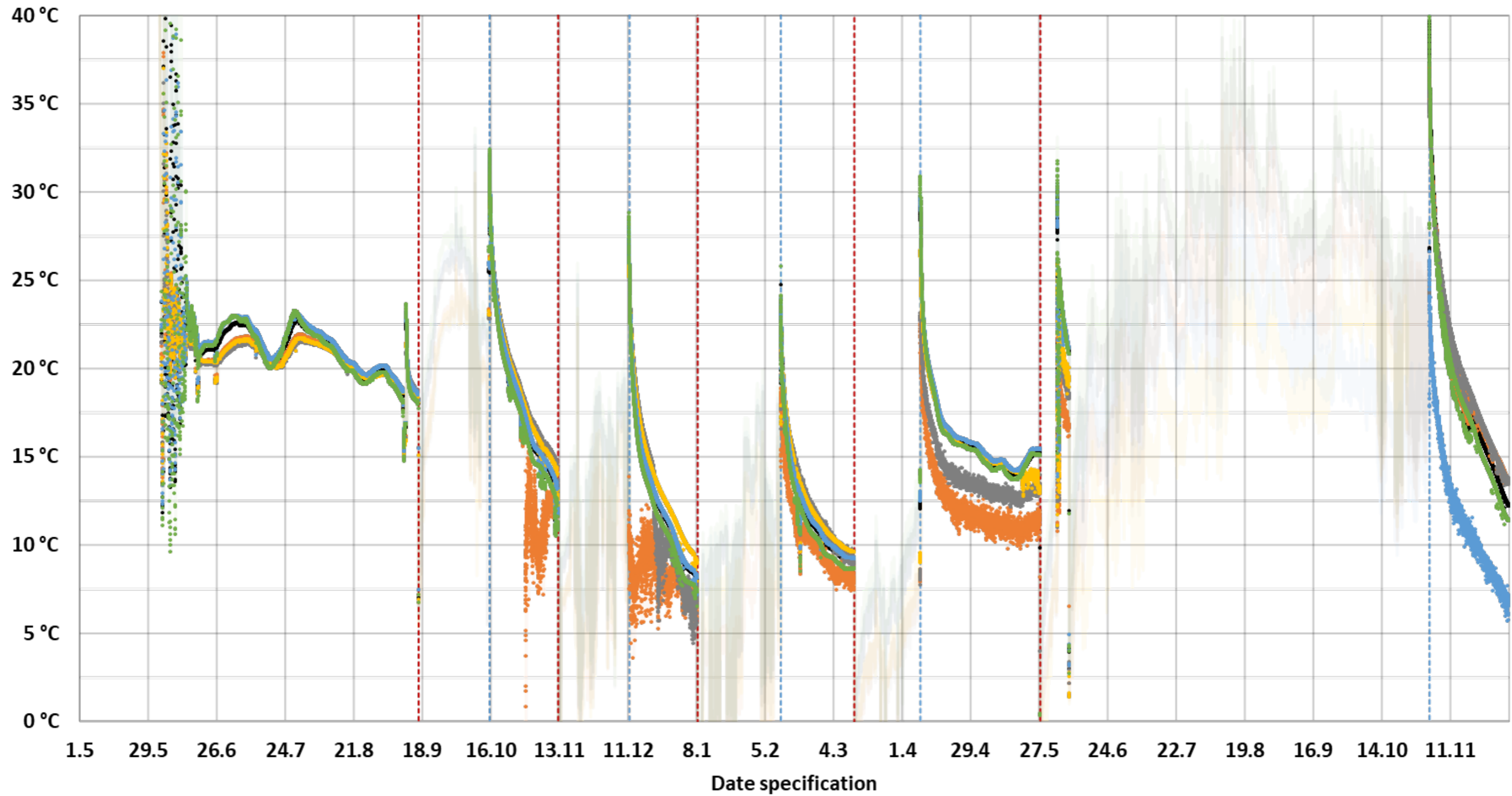


Anlage 3.3 - Temperaturverlauf der Einzelsensoren (BT bzw. T) Messquerschnitt Nord



Anlage 3.4 – Anlegemessfühler Temperatur am Rohrmantel (NTC) Messbereich Nord

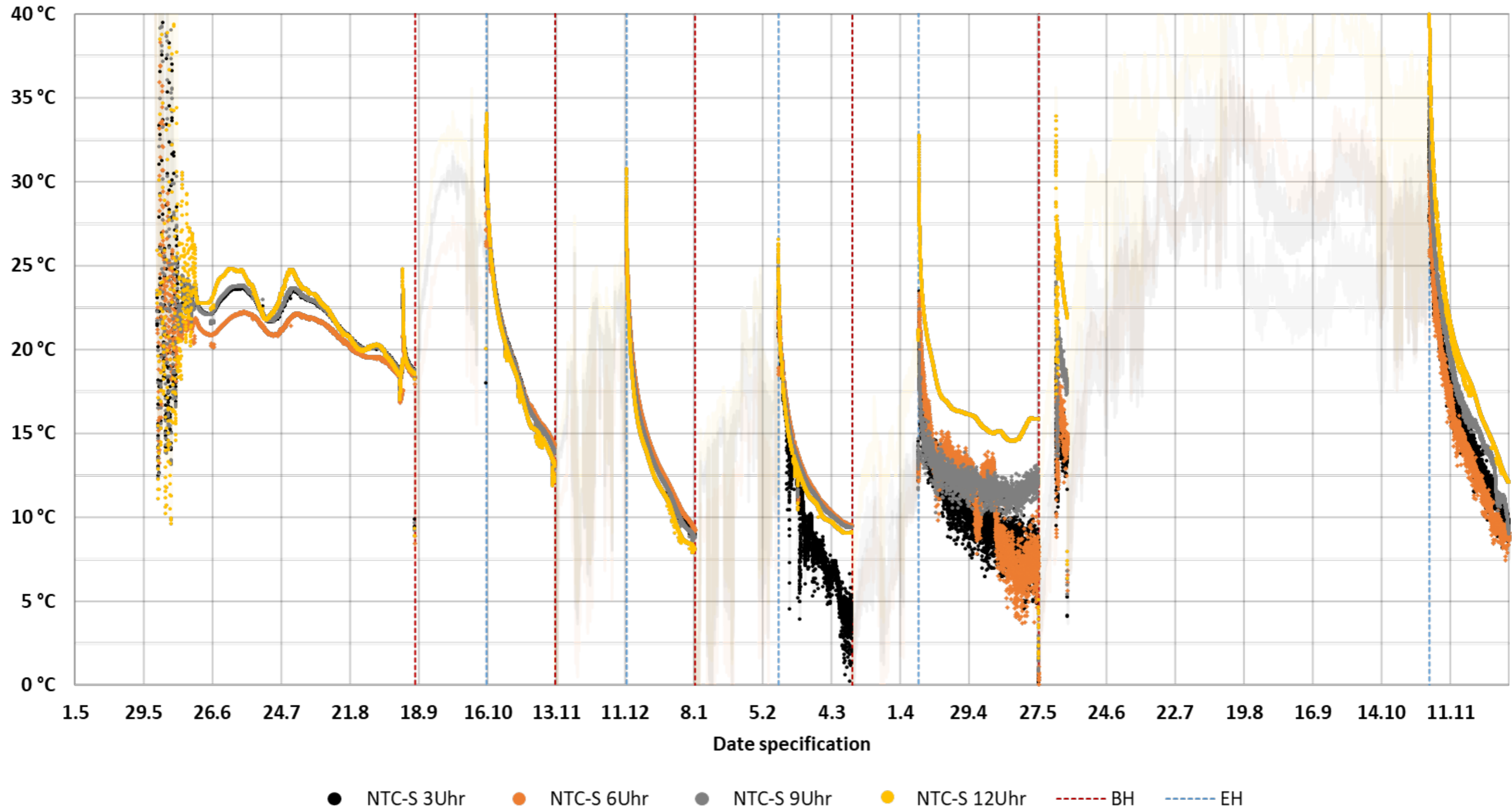
NTCs Nord



● NTC-N 2Uhr ● NTC-N 4Uhr ● NTC-N 6Uhr ● NTC-N 8Uhr ● NTC-N 10Uhr ● NTC-N 12Uhr - - - BH - - - - EH

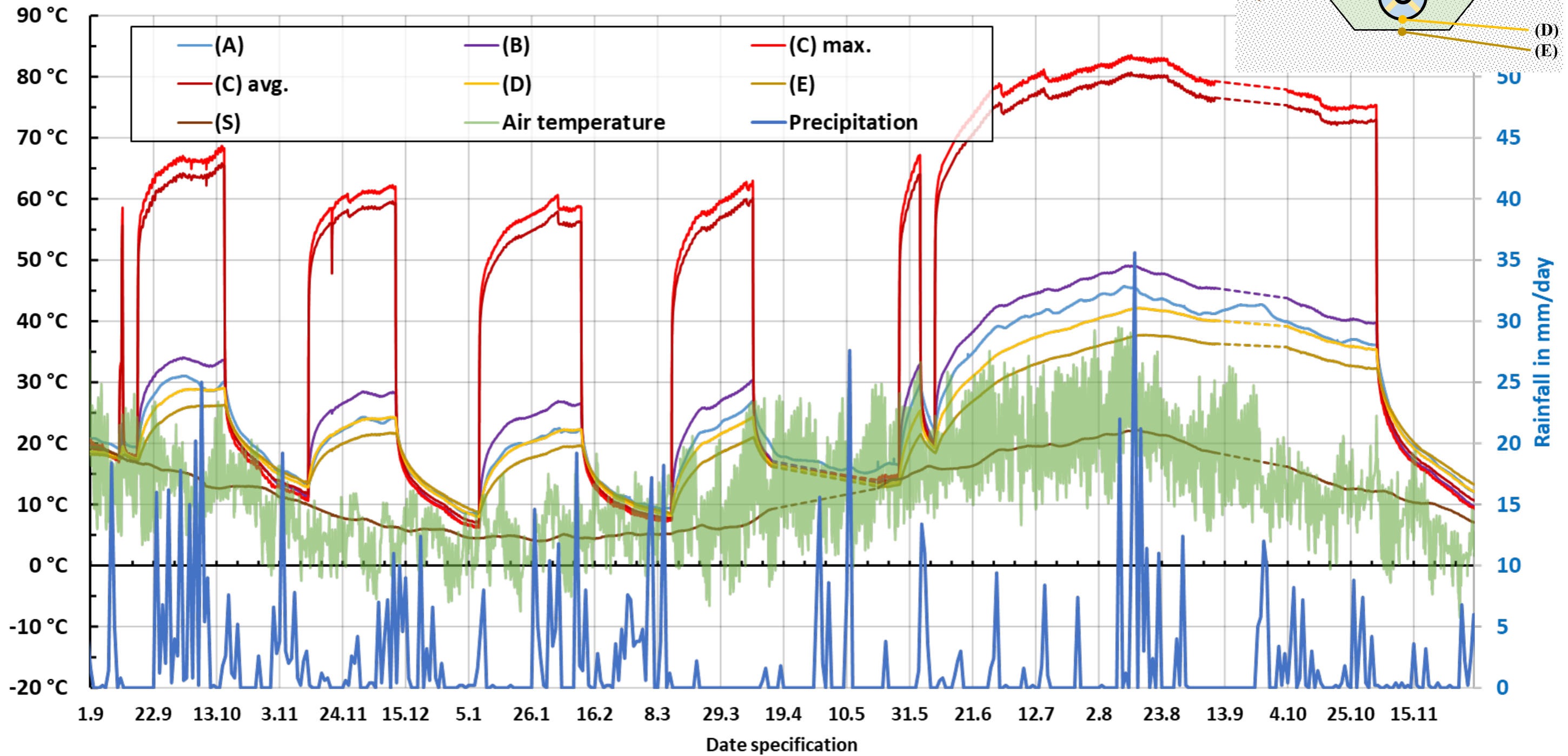
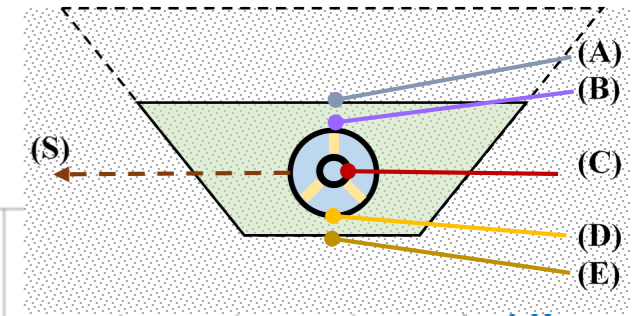
Anlage 3.5 – Anlegemessfühler Temperatur am Rohrmantel (NTC) Messbereich Süd

NTCs Sued

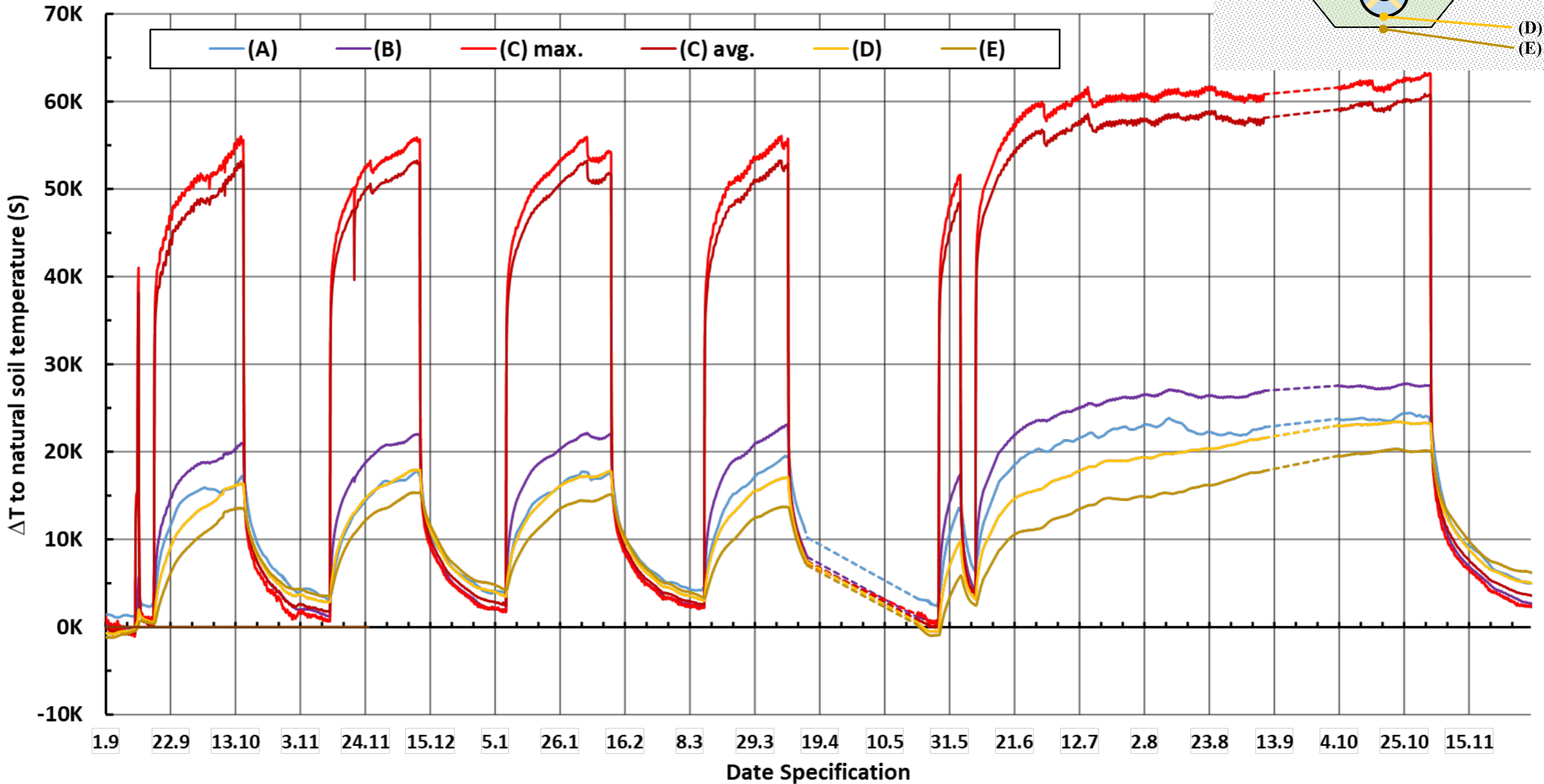


Anlage 4 – Boden- und Rohrtemperaturen Faseroptik (OSSCAD)

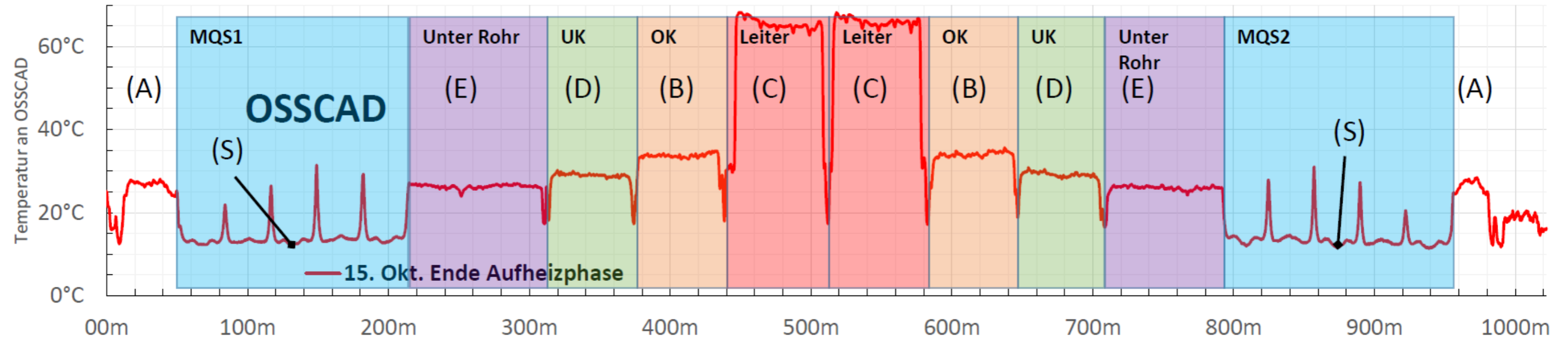
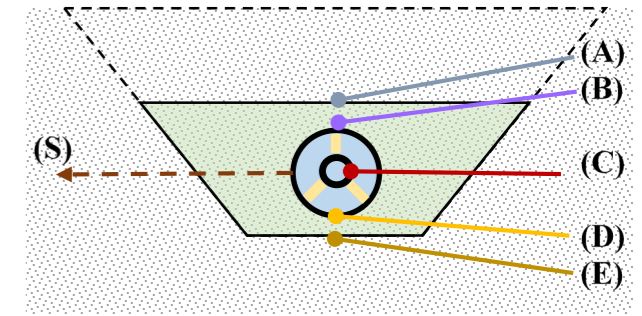
**Anlage 4.1 - Bodentemperaturen je Tiefenlage
mit Lufttemperatur und Niederschlag**



**Anlage 4.2 - Temperaturdifferenz der Bodentemperatur je Tiefenlage
zur Bodentemperatur (S) im ungestörten Bereich**

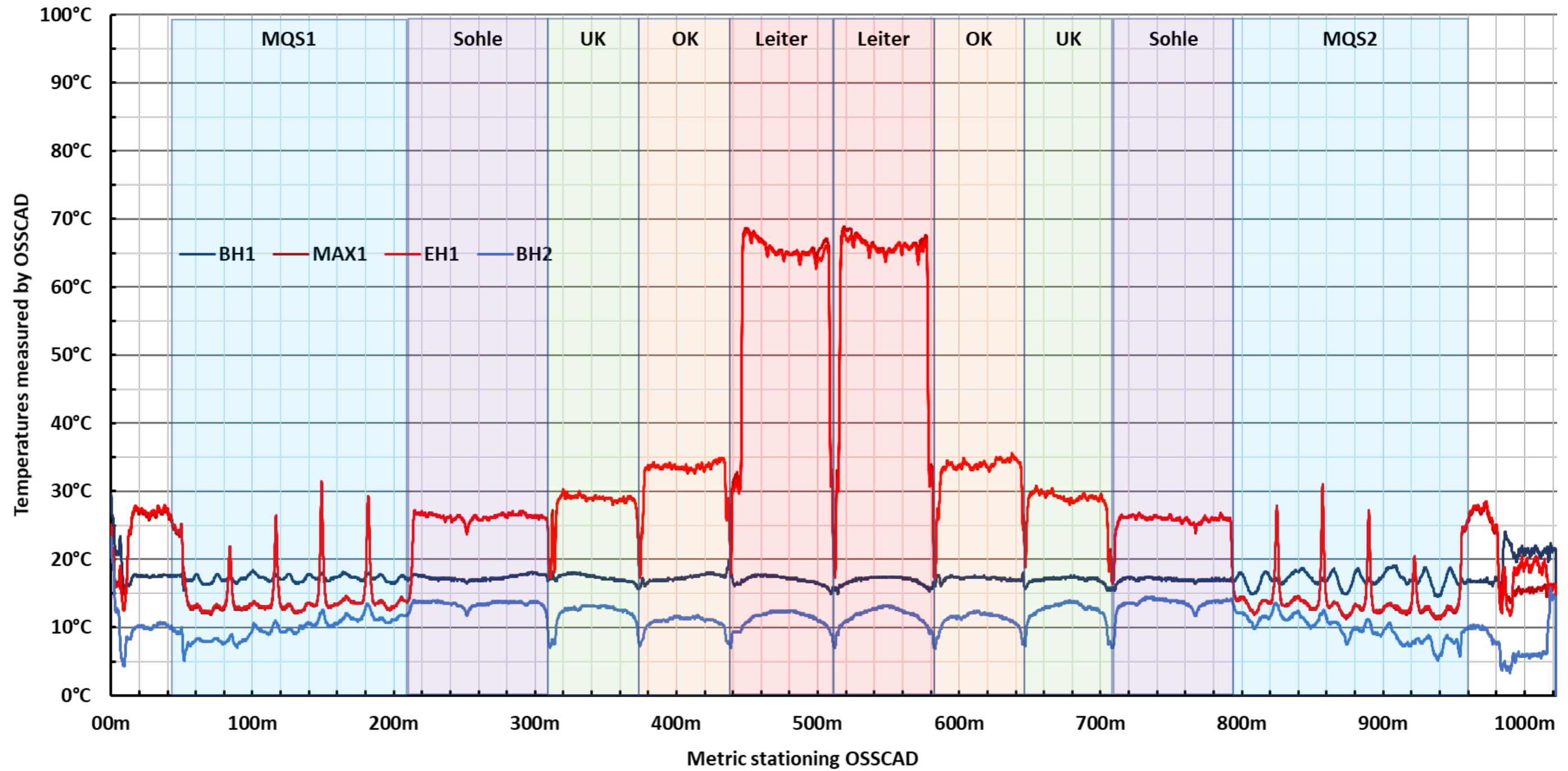


Anlage 4.3 - Erläuterung OSSCAD Gesamtmessbild

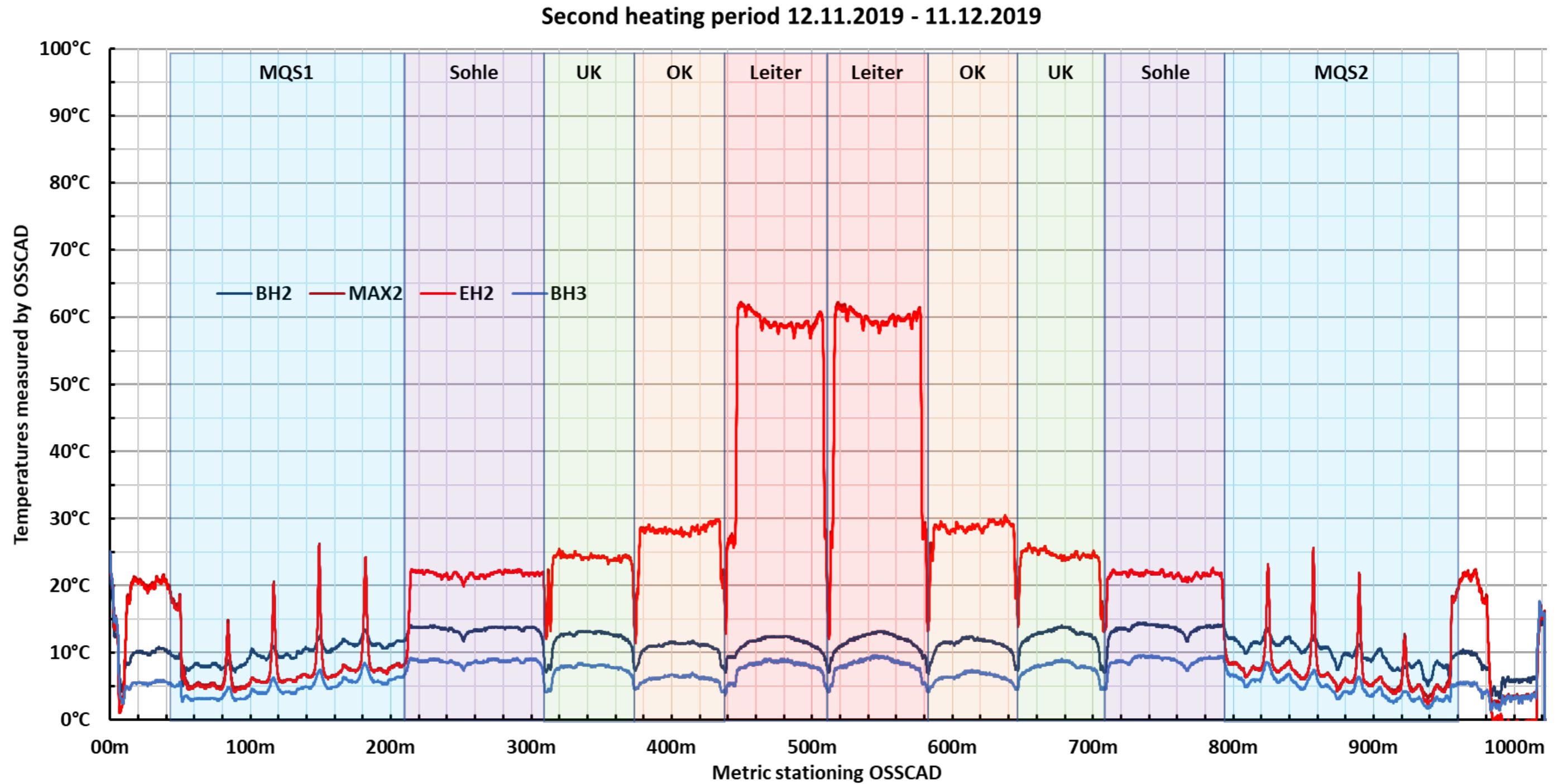


Anlage 4.4 - Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 1 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)

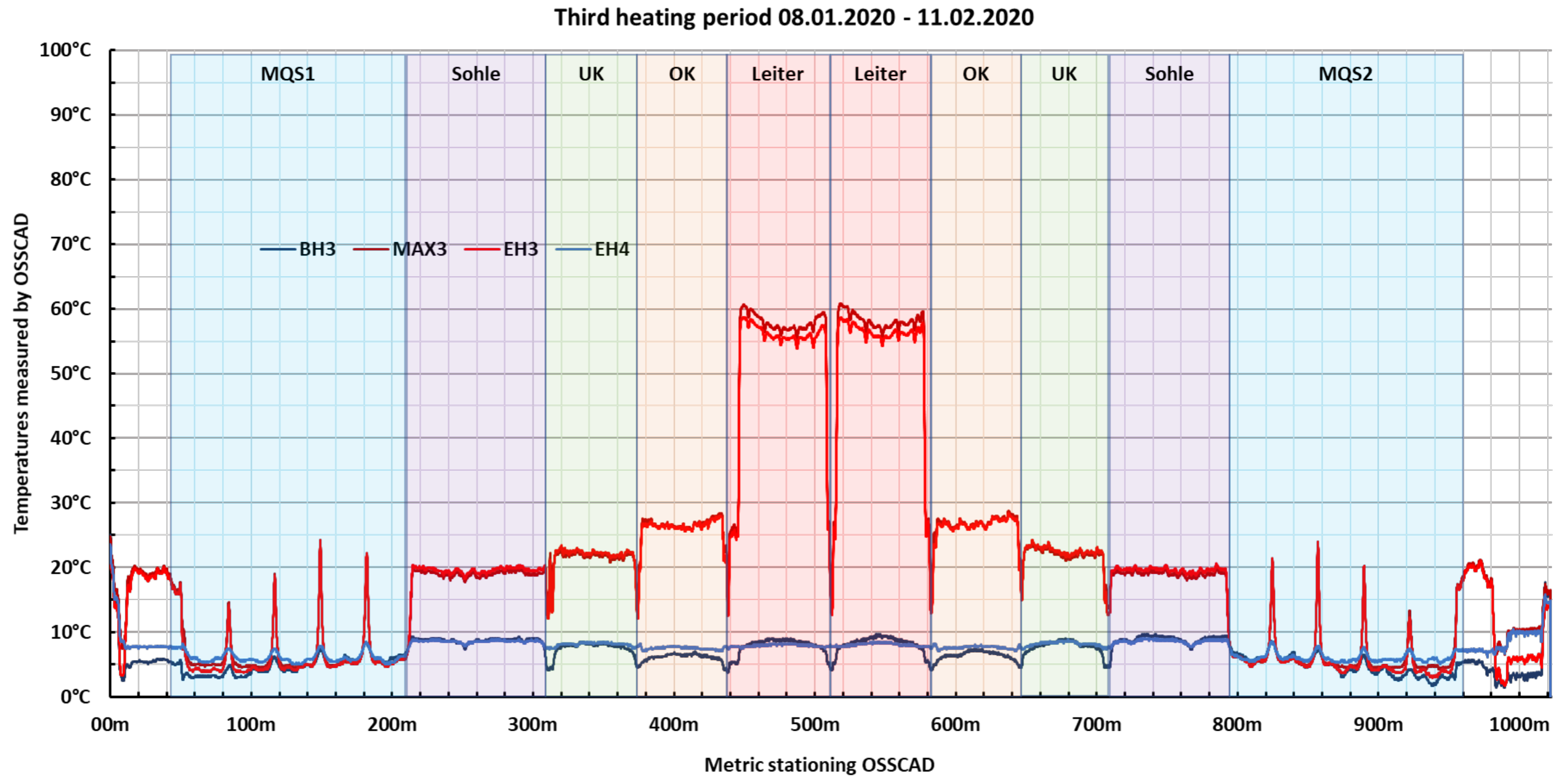
First heating period 16.09.2019 - 15.10.2019



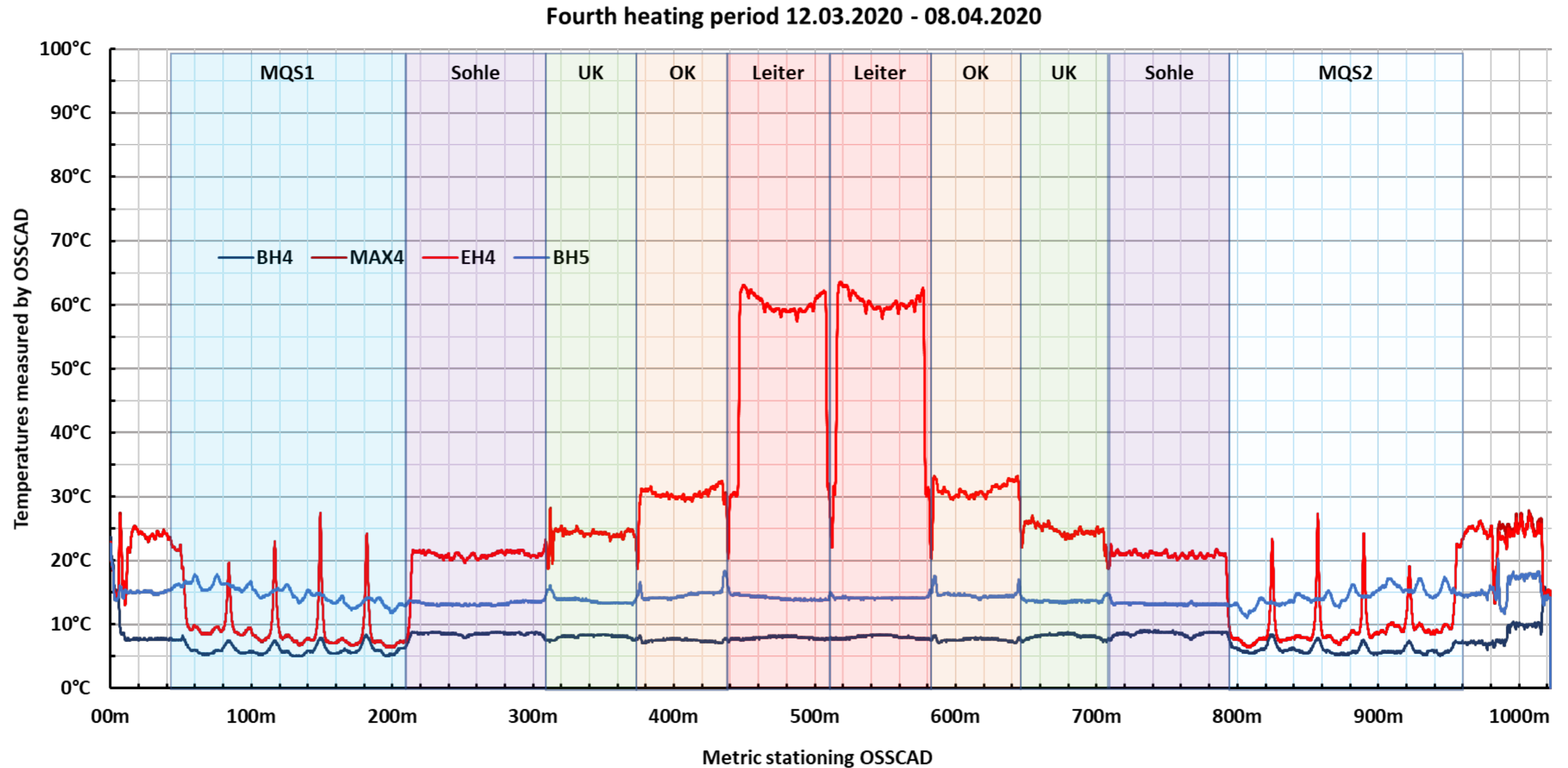
Anlage 4.5 - Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 2 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)



Anlage 4.6 - Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 3 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)

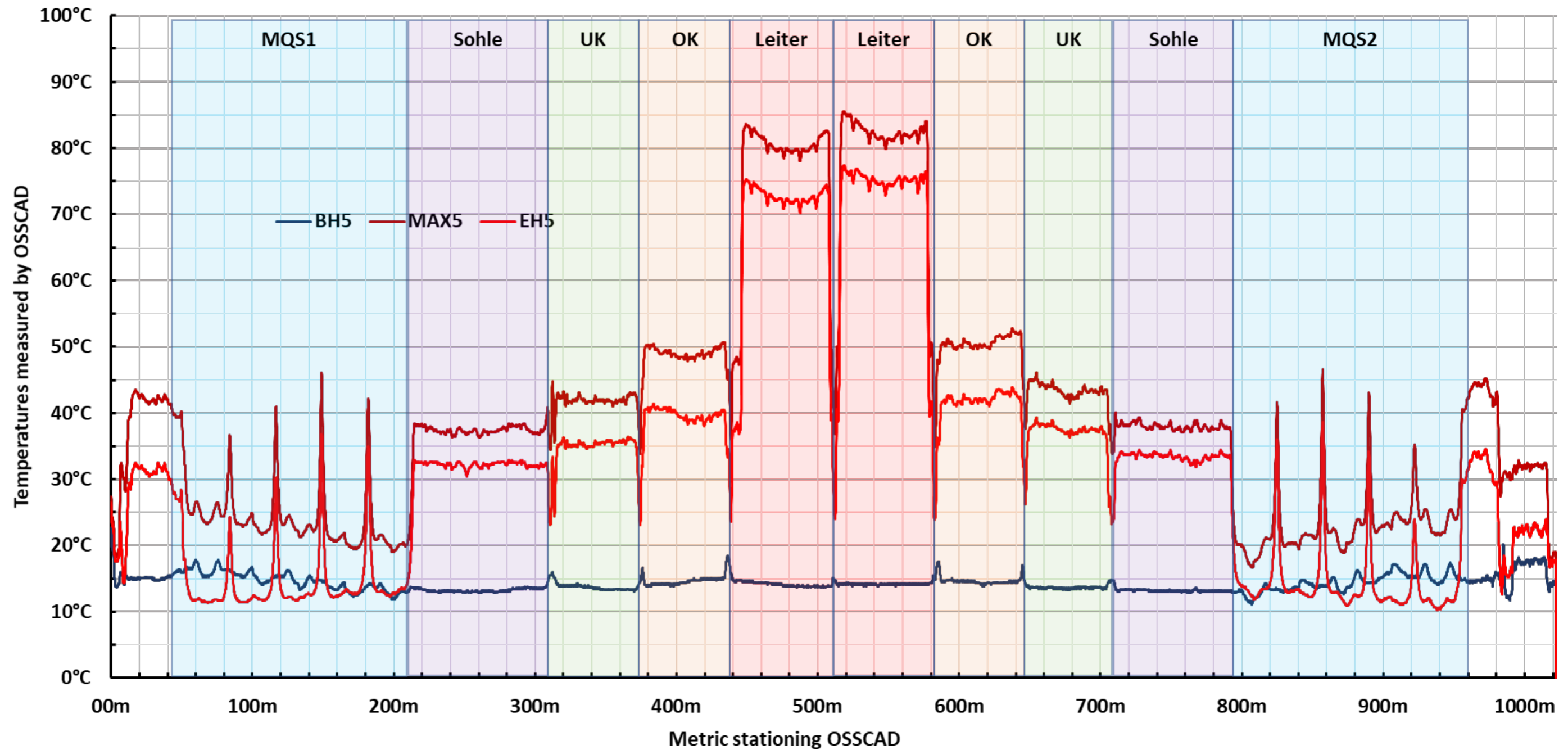


Anlage 4.7 - Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 4 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)



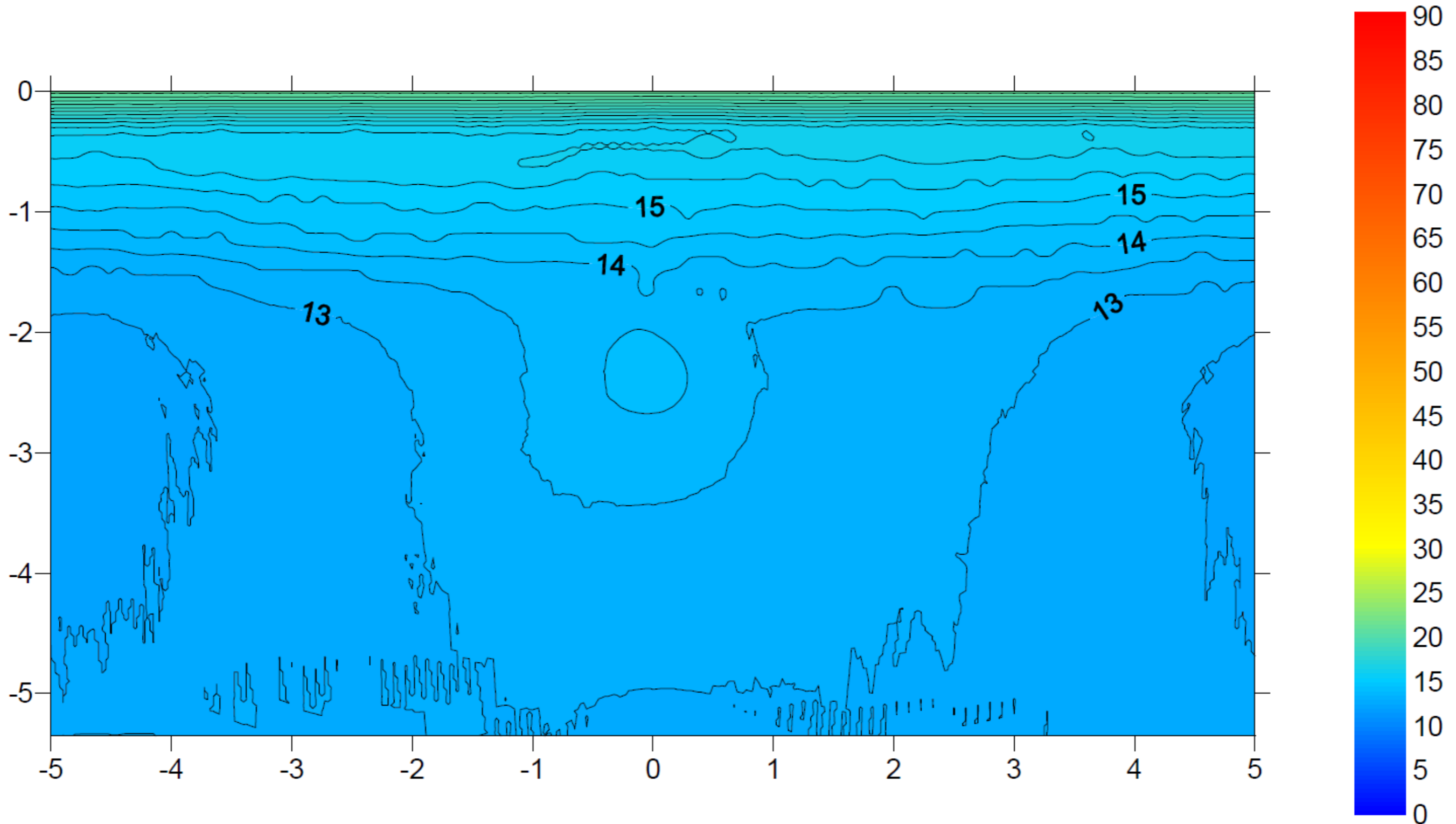
Anlage 4.8 - Gesamtverlauf Temperaturmessung Heizphase 5 mit Beginn (BH), Ende (EH) und Maximalwert (MAX)

Fifth (long-term) heating period 27.05.2020 - 02.11.2020



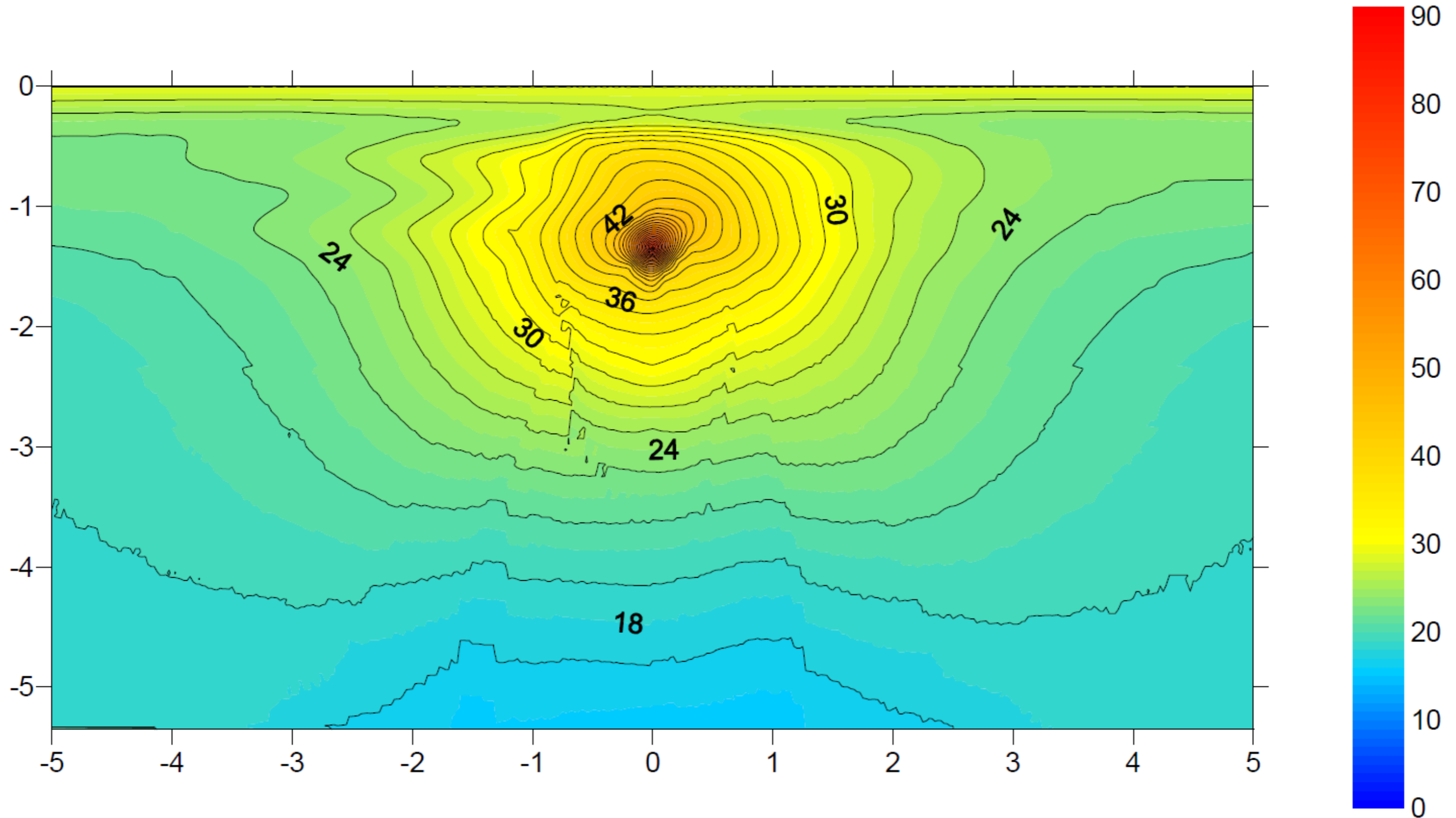
Anlage 4.9 – Temperaturverlauf im Messquerschnitt Nord als Surfer-Plots

26.05.20 12:00 Temperaturverteilung vor Dauerbestromung



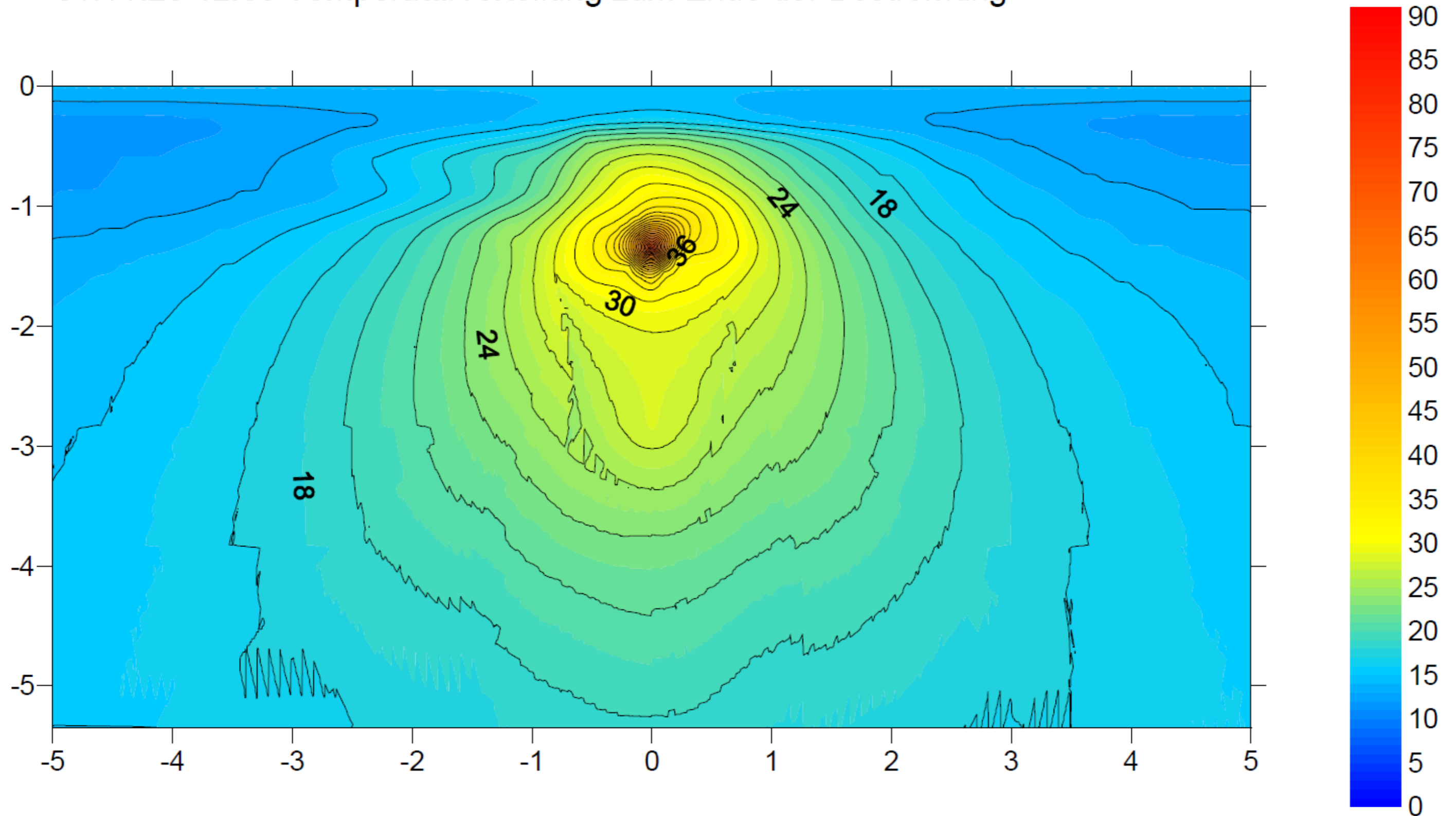
Anlage 4.10 - Temperaturverlauf im Messquerschnitt Nord als Surfer-Plots

15.08.2020 12:00 max. Temperaturen während Dauerbestromung



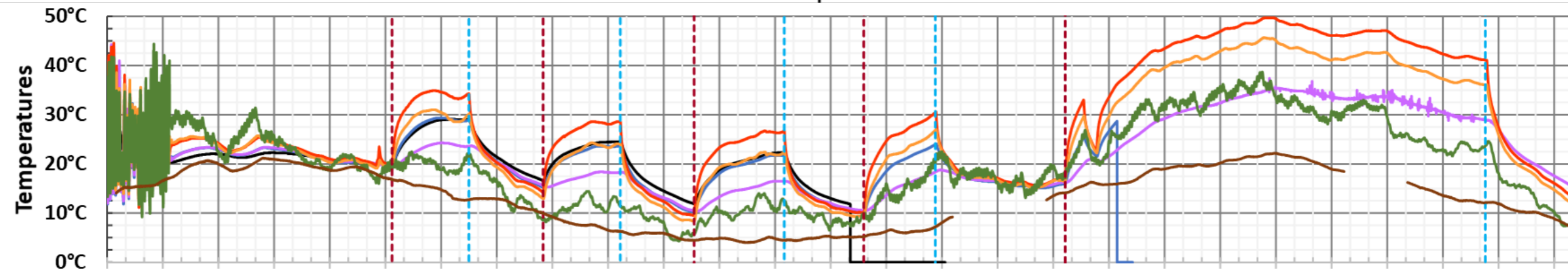
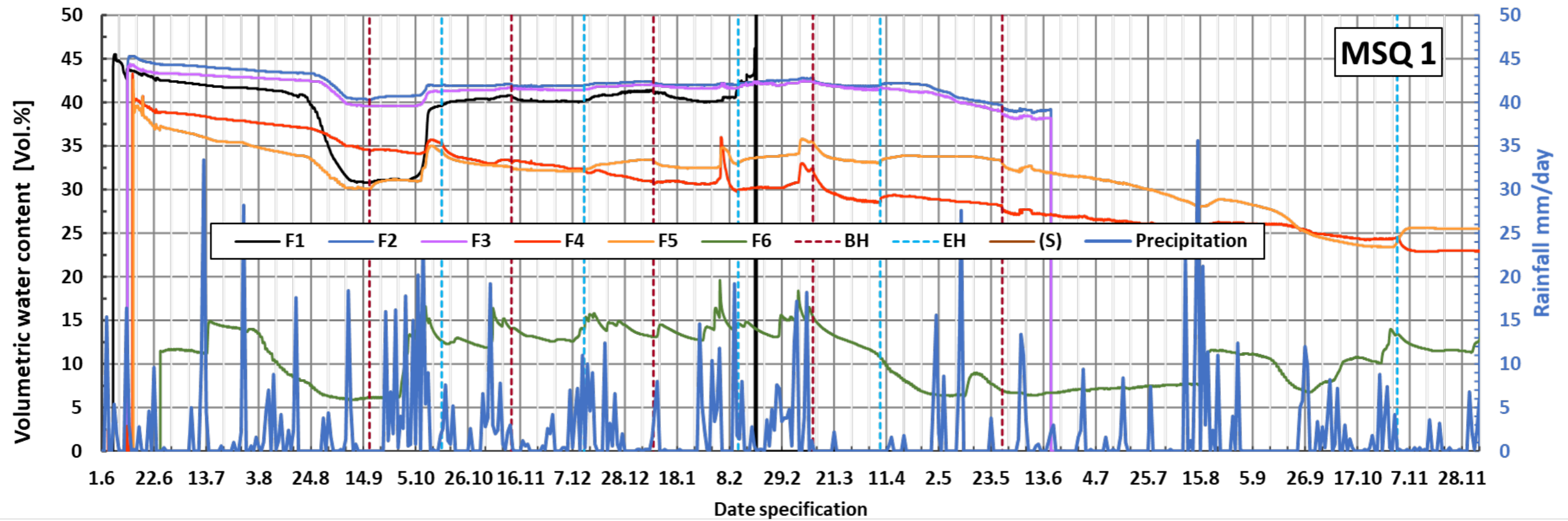
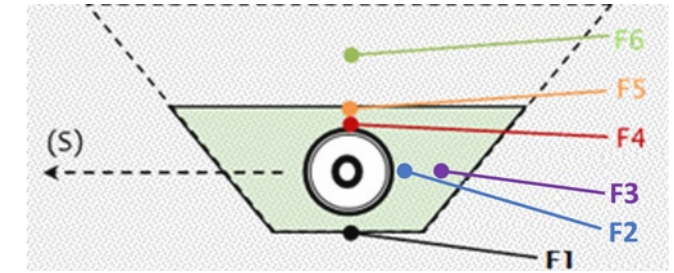
Anlage 4.11 - Temperaturverlauf im Messquerschnitt Nord als Surfer-Plots

01.11.20 12:00 Temperaturverteilung zum Ende der Bestromung

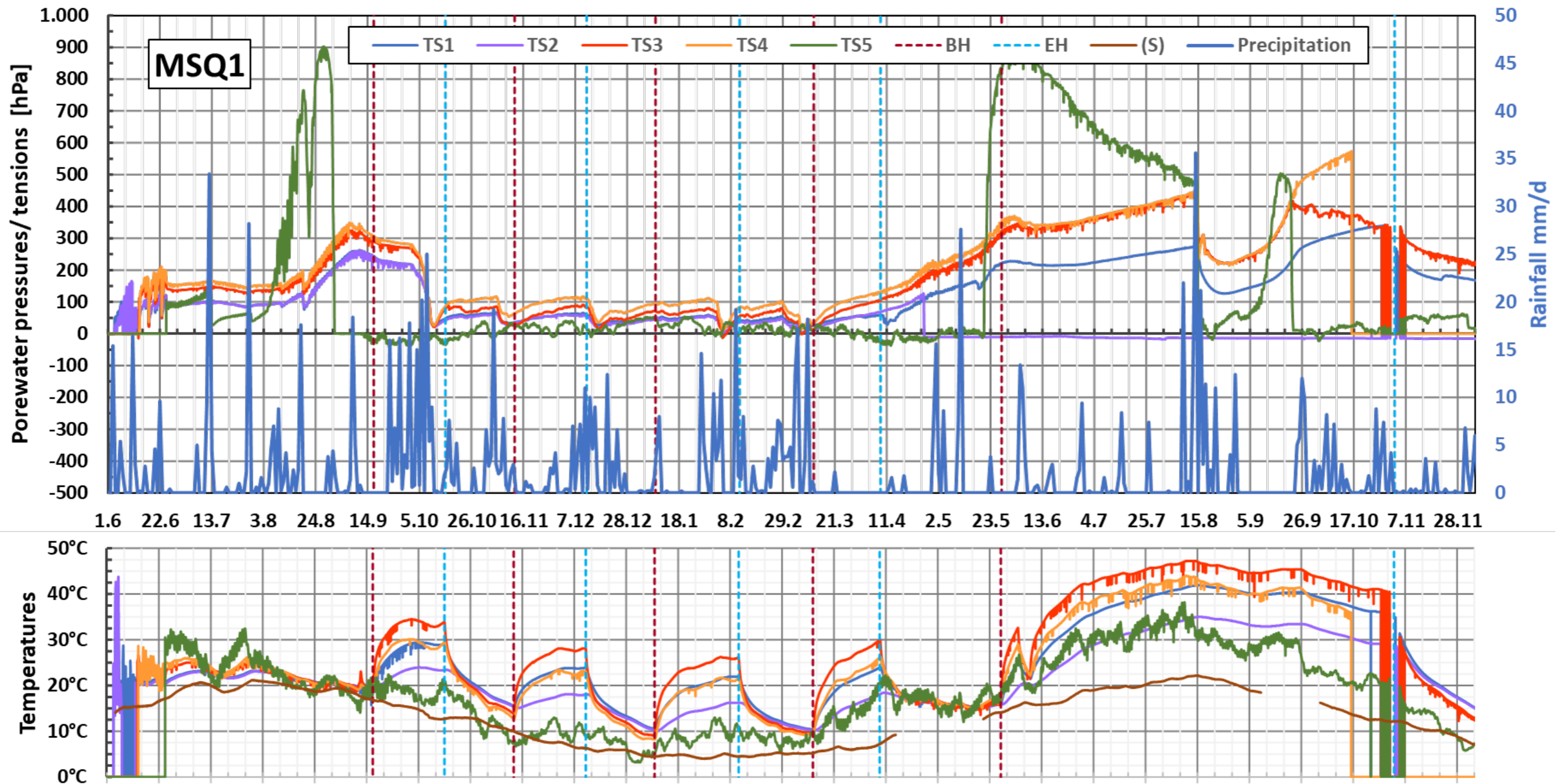
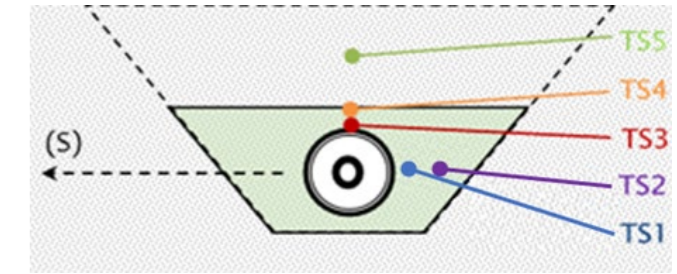


Anlage 5 – Feuchtesensoren und Tensiometer inkl. der internen Temperaturverläufe

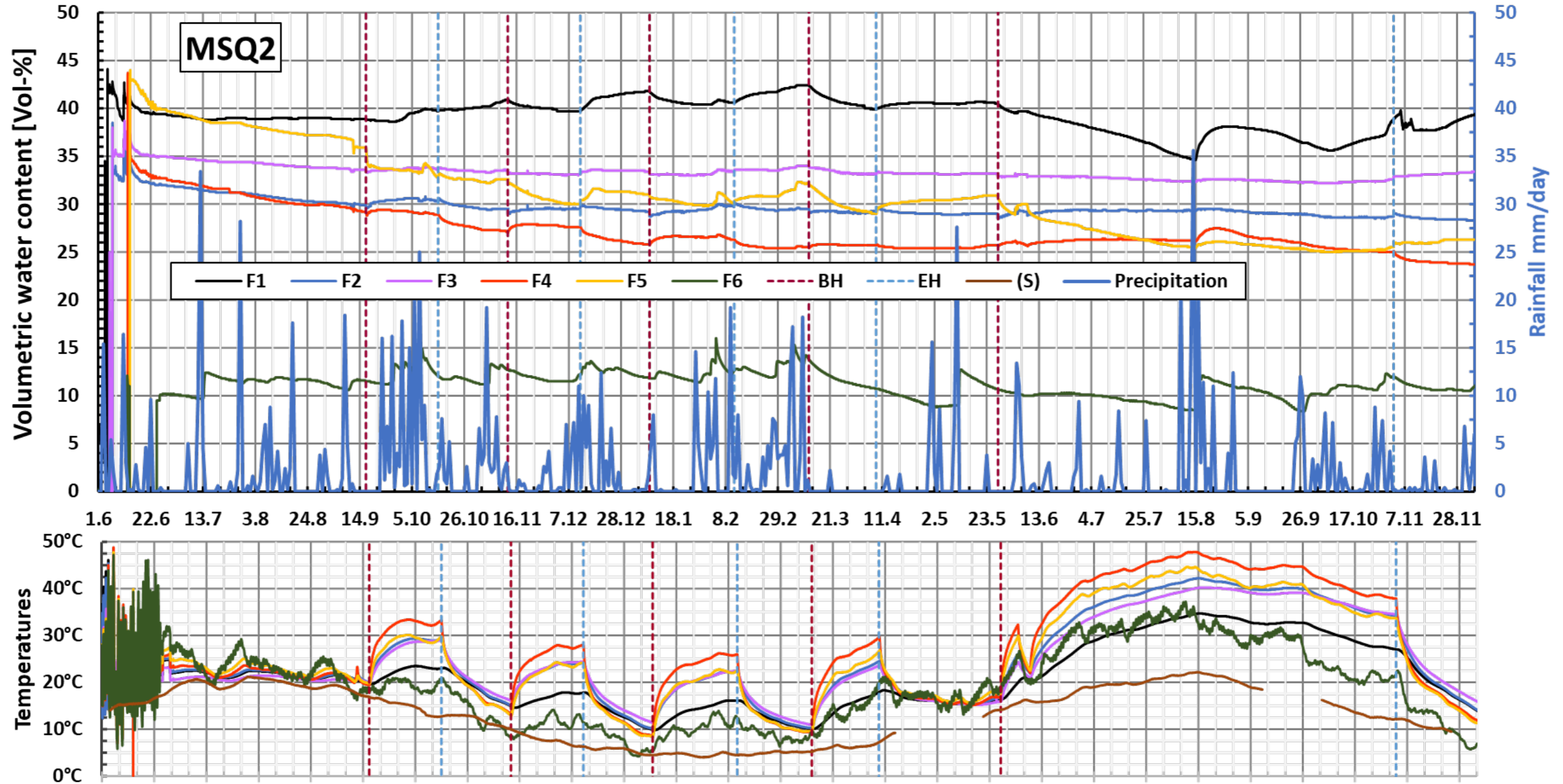
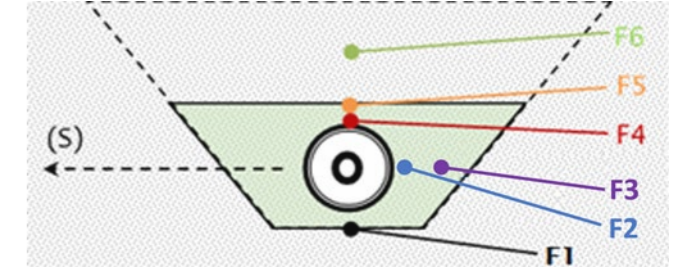
Anlage 5.1 - Feuchtemessverlauf inkl. interner Temperaturverlauf Messquerschnitt Süd



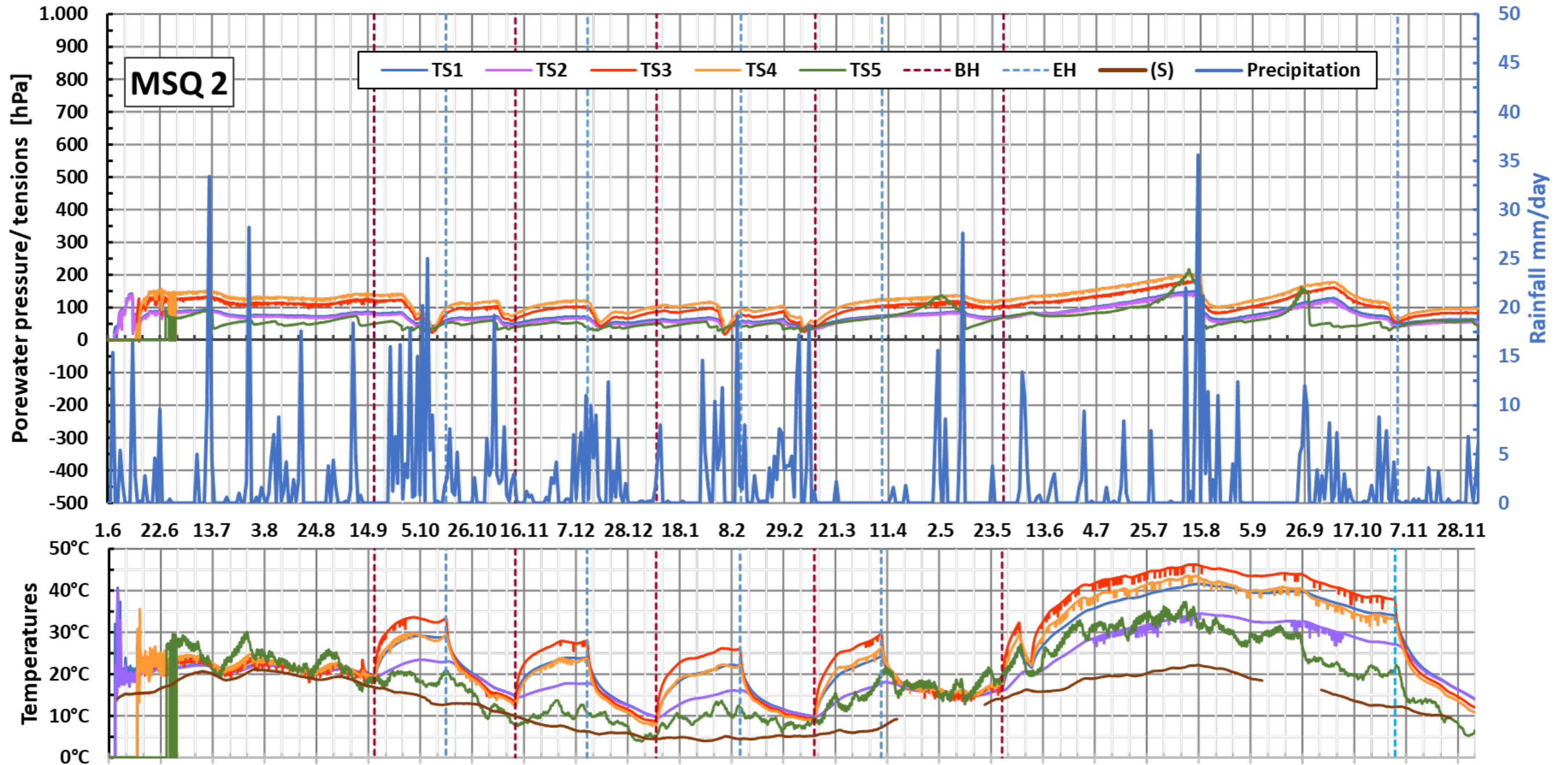
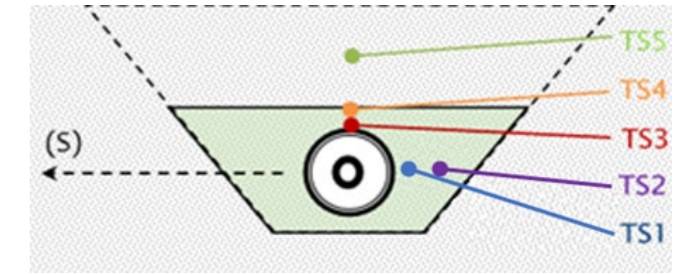
Anlage 5.2 - Saugspannungsmessverlauf inkl. interner Temperaturverlauf Messquerschnitt Süd



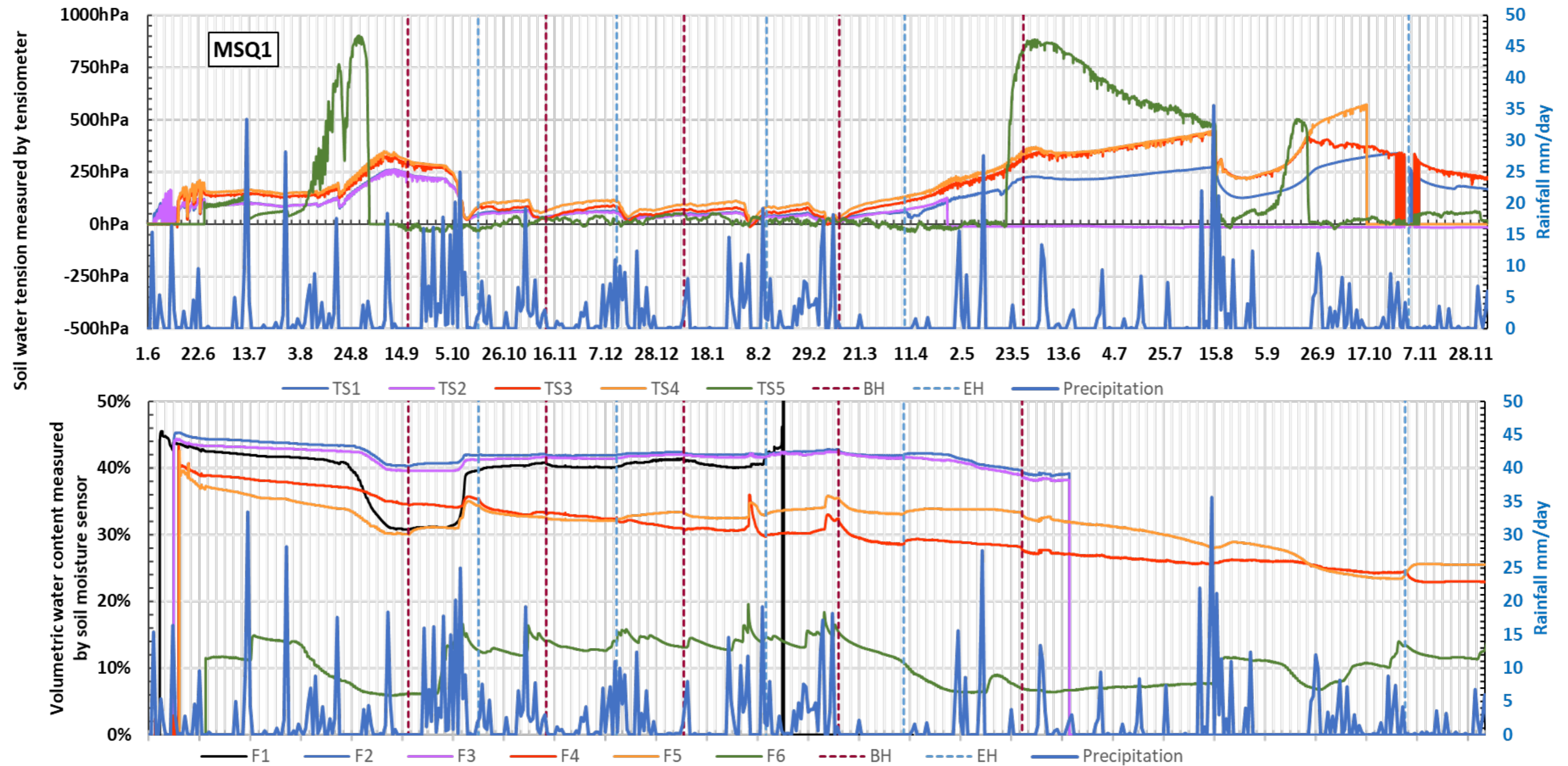
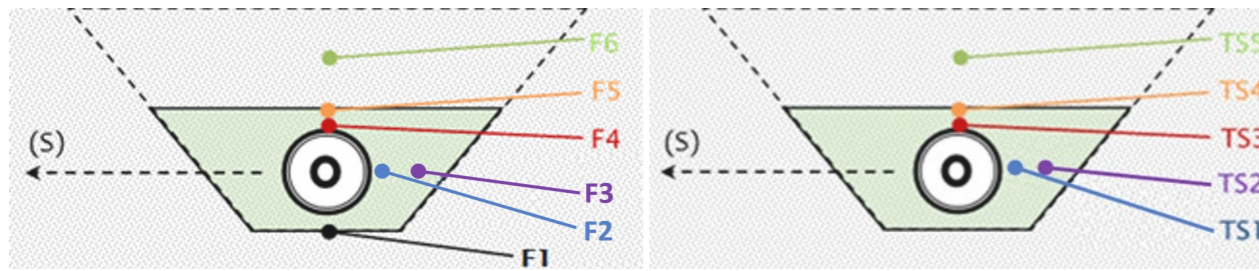
Anlage 5.3 - Feuchtemessverlauf inkl. interner Temperaturverlauf Messquerschnitt Nord



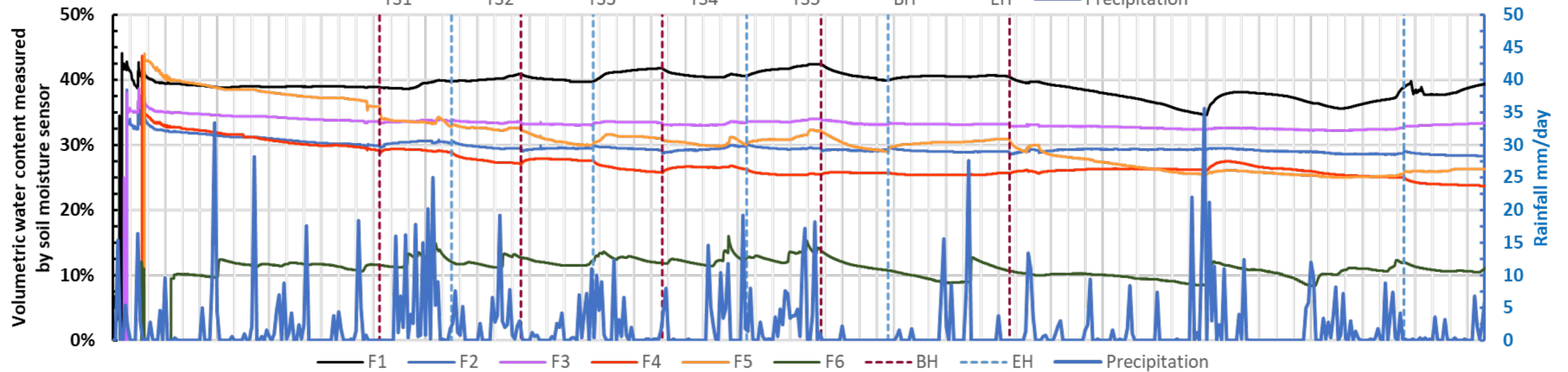
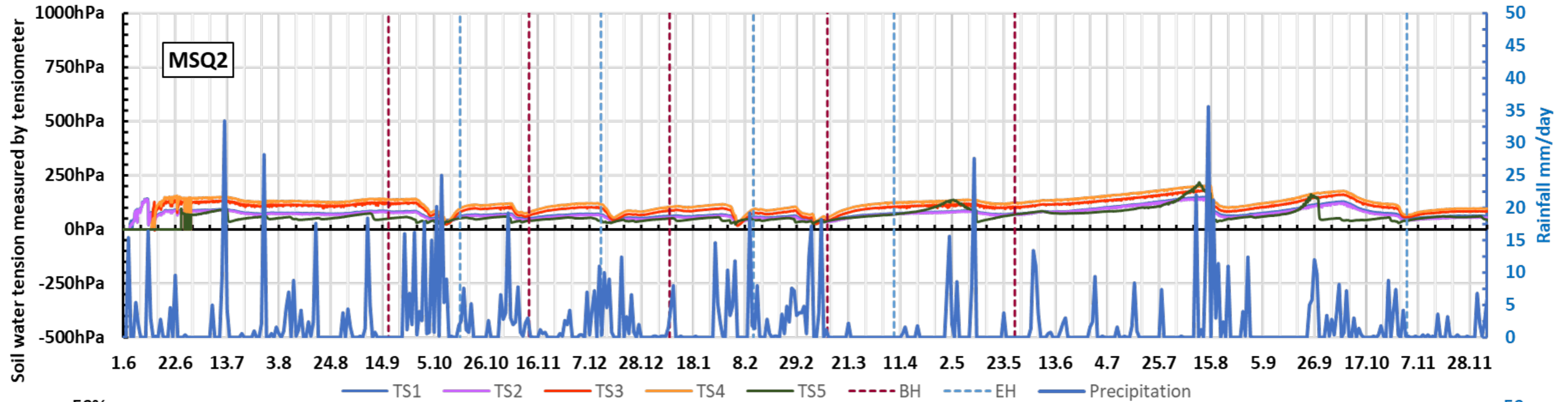
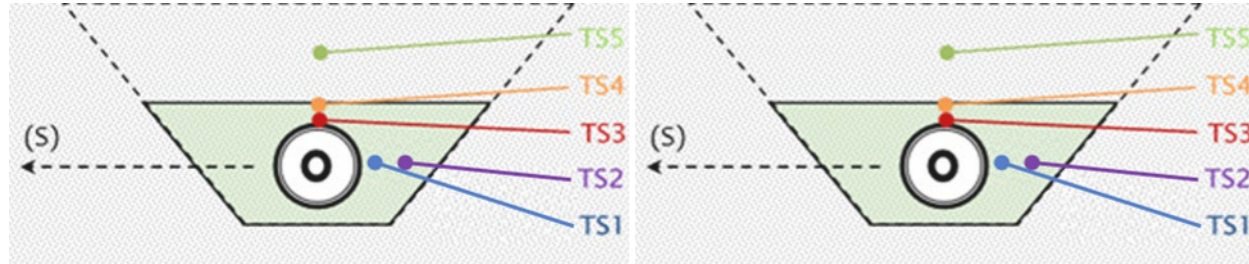
Anlage 5.4 - Saugspannungsmessverlauf inkl. interner Temperaturverlauf Messquerschnitt Nord



Anlage 5.5 - Gegenüberstellung Feuchte- und Saugspannungsmessverlauf Messquerschnitt Süd

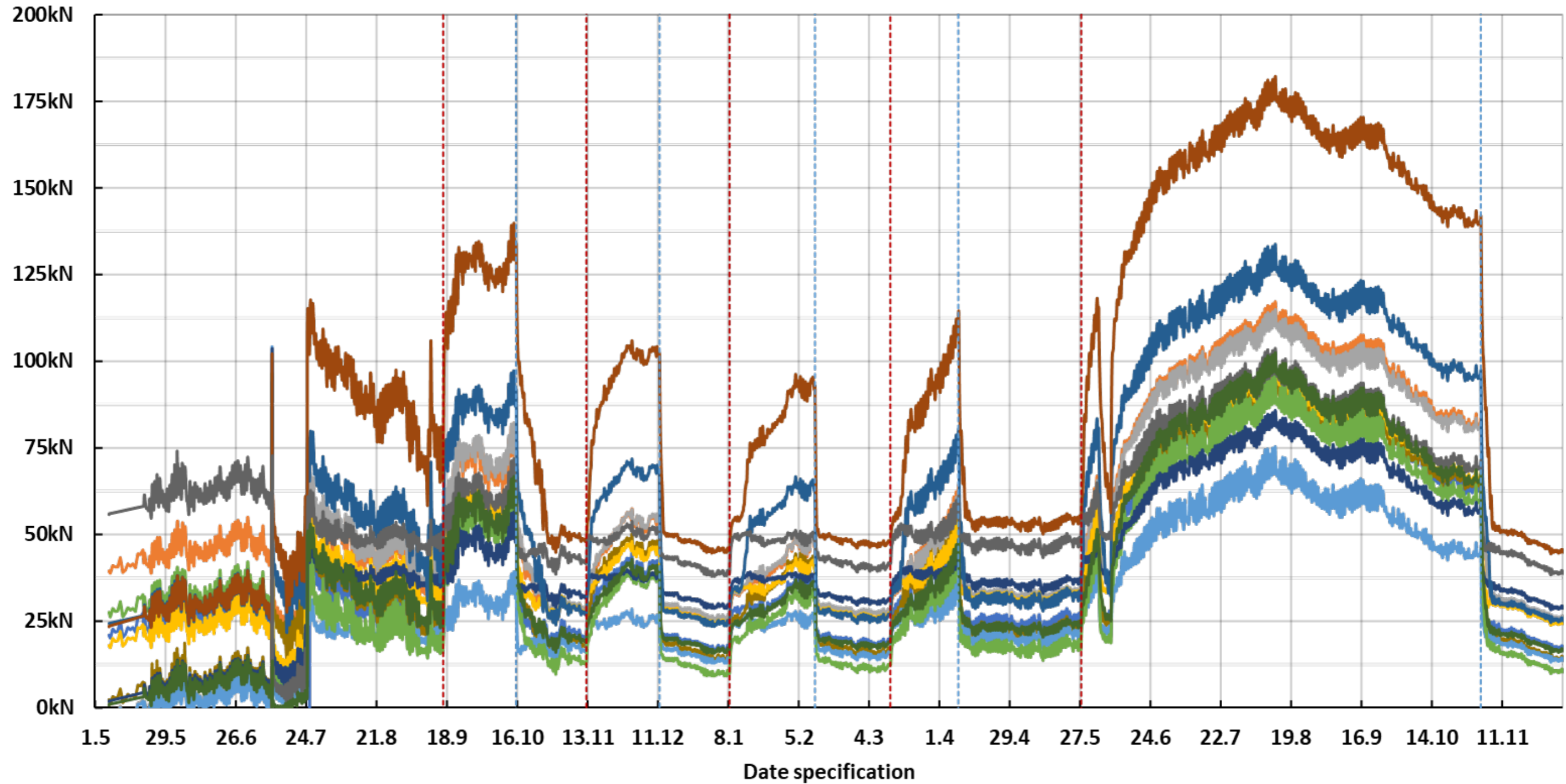


Anlage 5.6 - Gegenüberstellung Feuchte- und Saugspannungsmessverlauf Messquerschnitt Nord



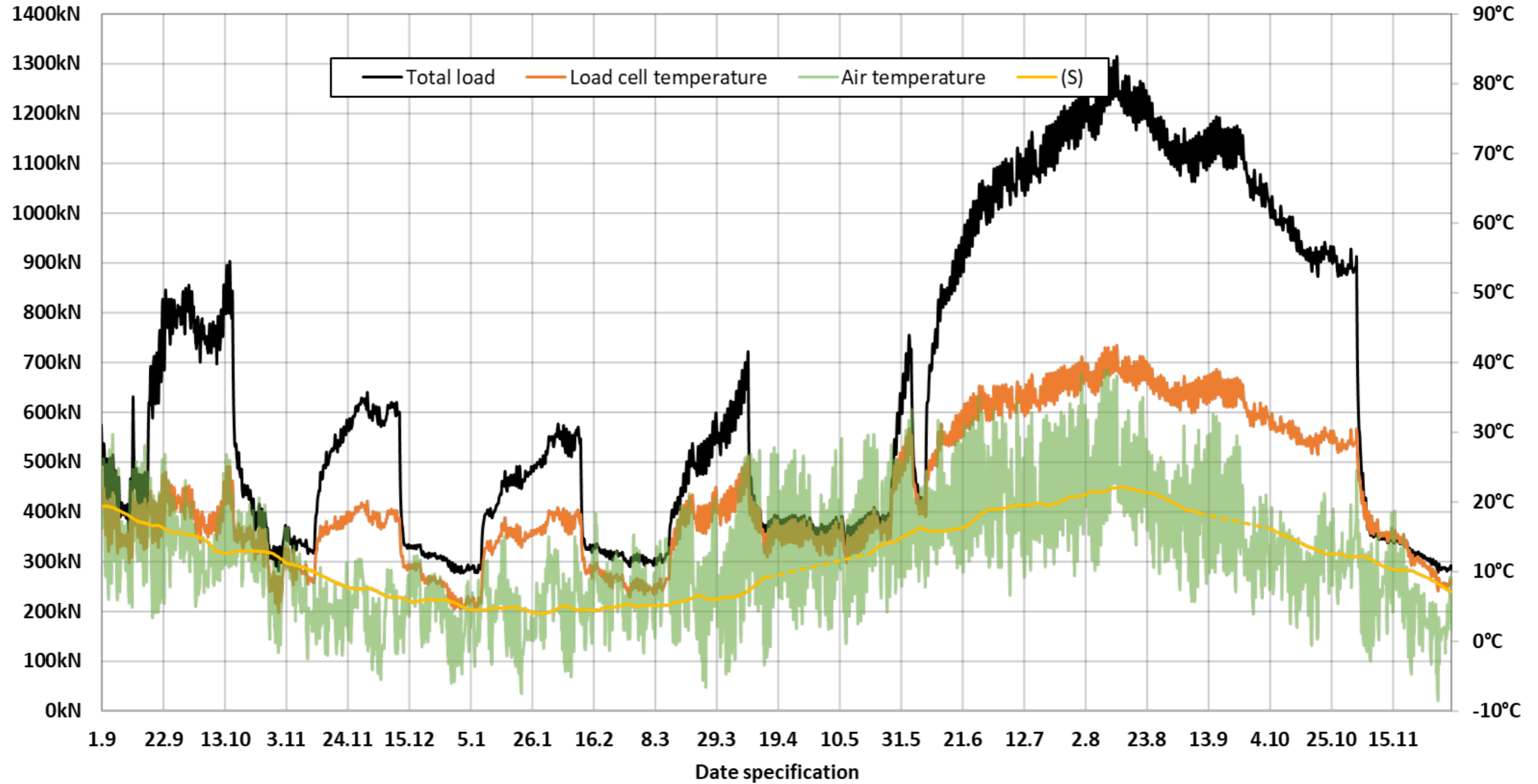
Anlage 6 – Kraftmessgeber

Anlage 6.1 - Verlauf Kraftmessung je Kraftmessdose (KMD)



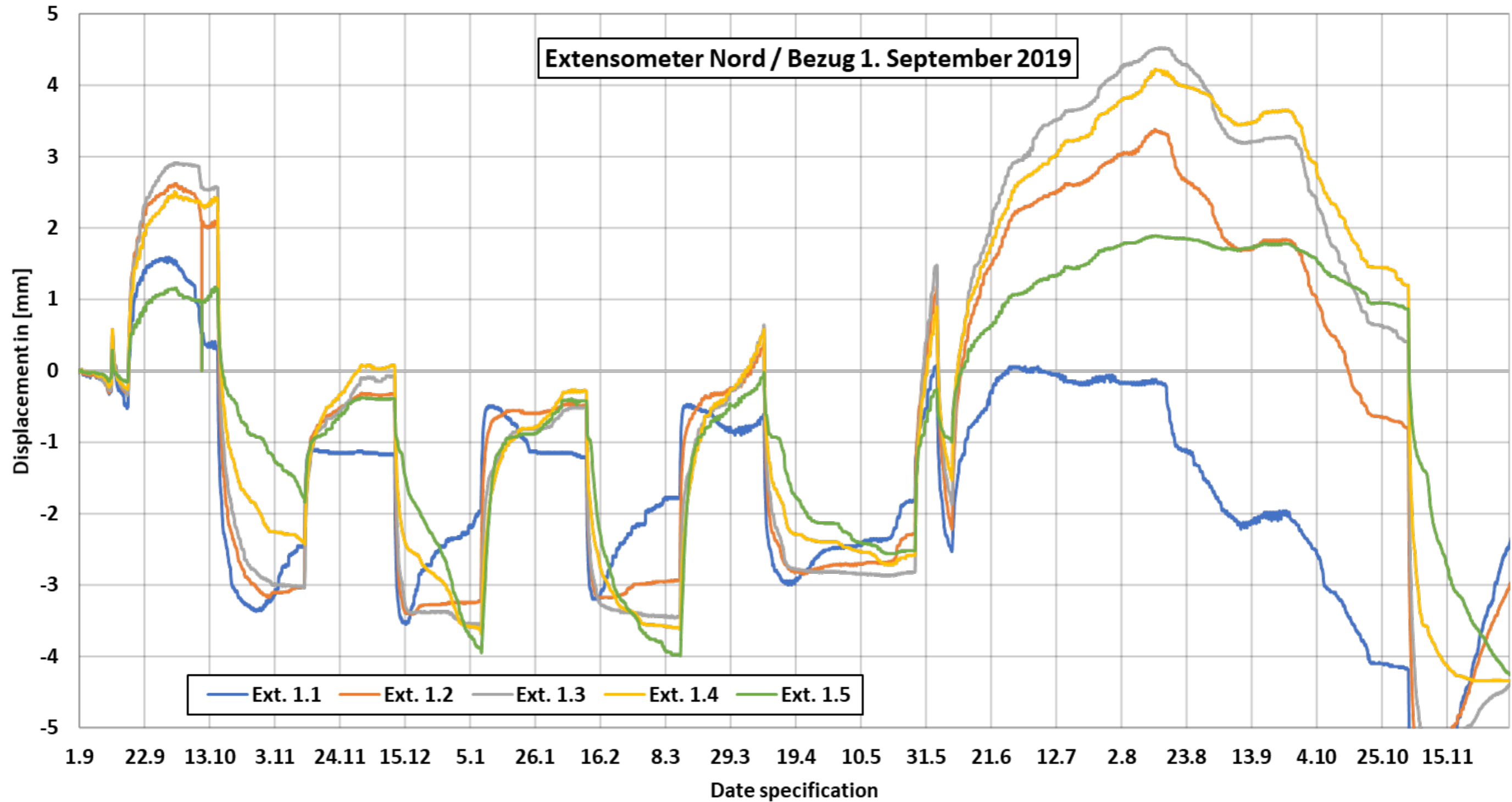
Anlage 6.2 - Verlauf Gesamtkraft inkl. interner Temperaturverlauf, Lufttemperatur und Bodentemperatur

Total load and load cell temperature

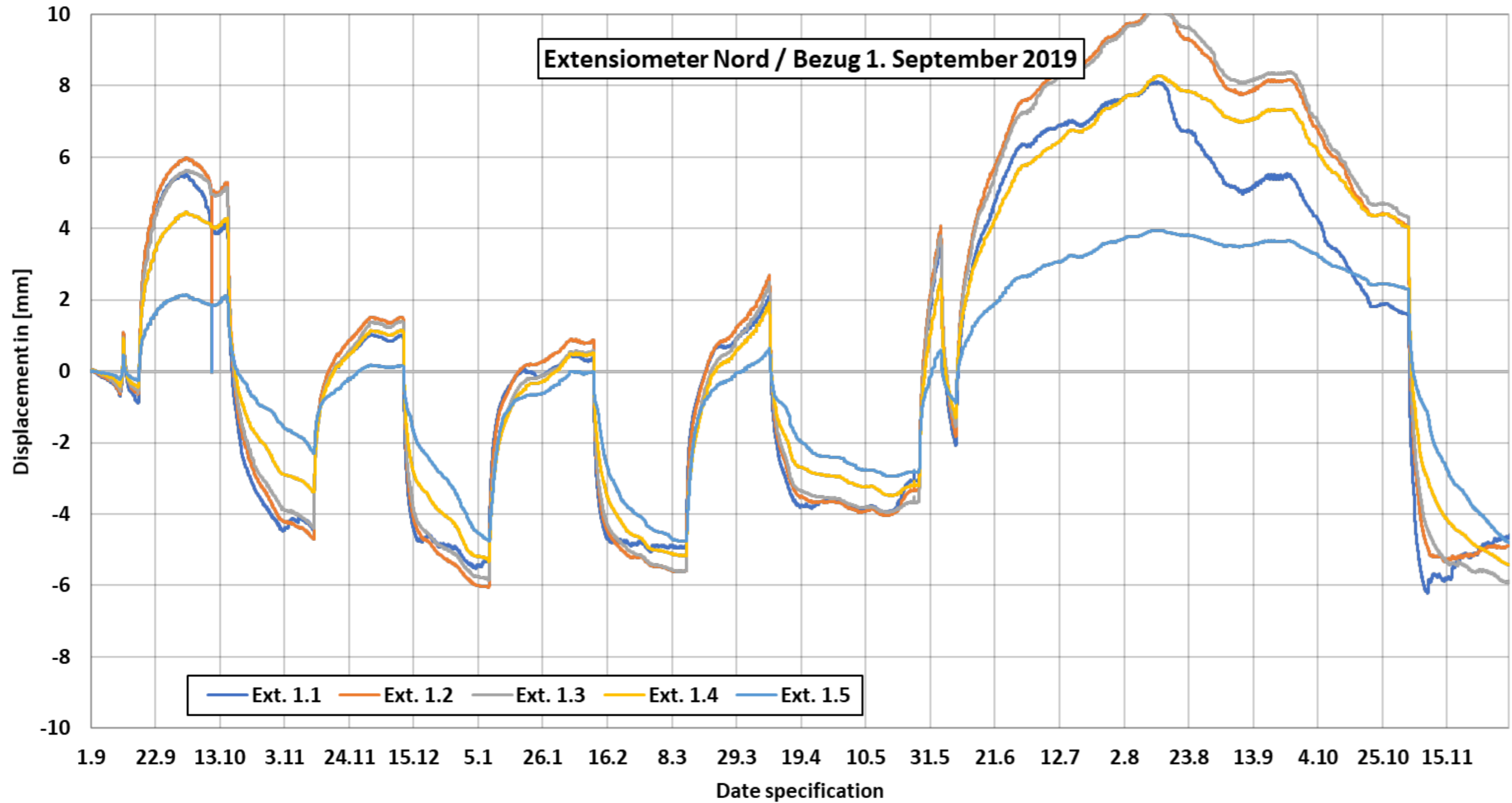


Anlage 7 – Extensometer (axial und radial) inkl. Wegaufnehmer MS 1

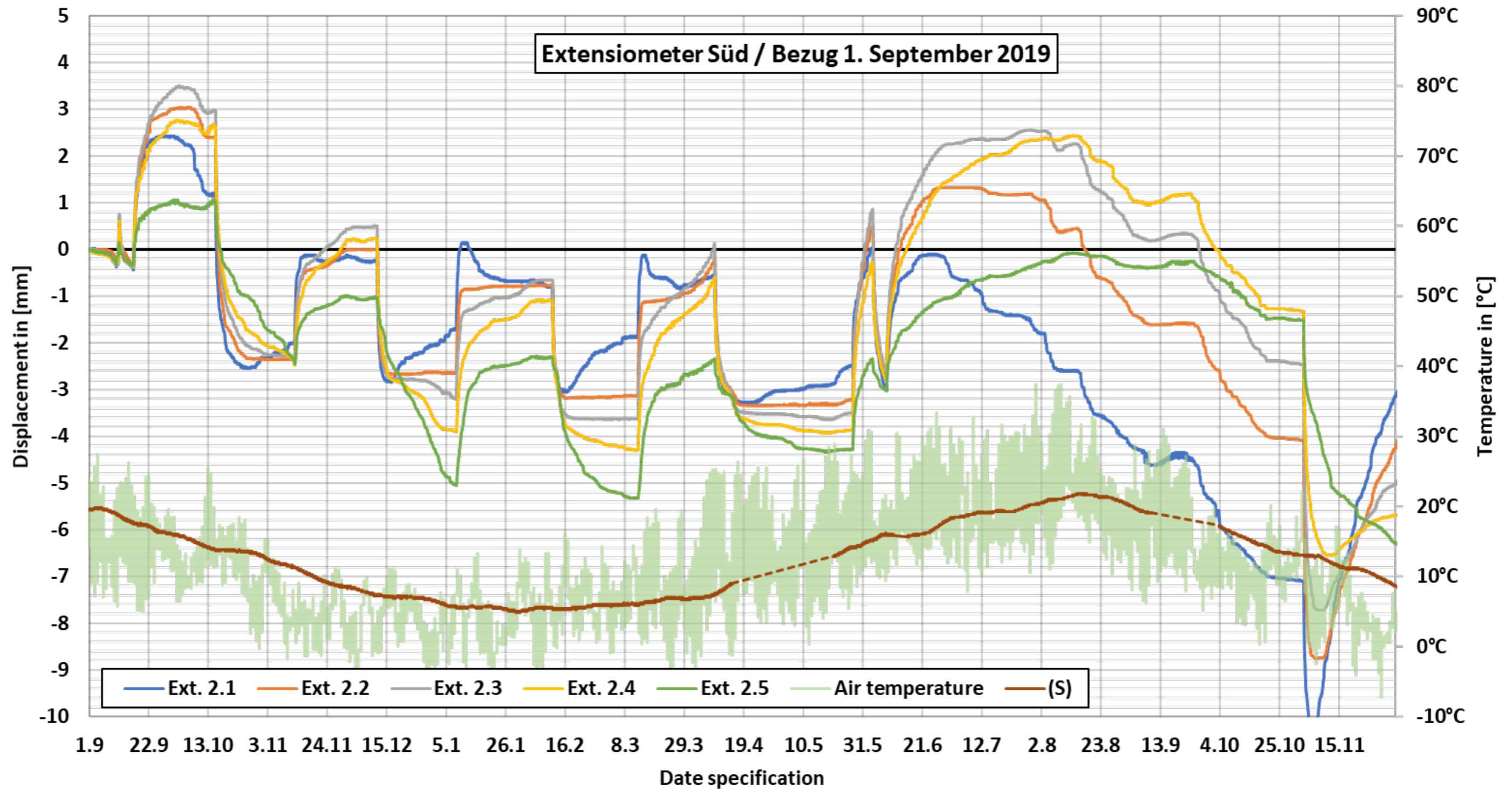
Anlage 7.1 - Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Nord ohne Korrektur der Temperaturdehnung



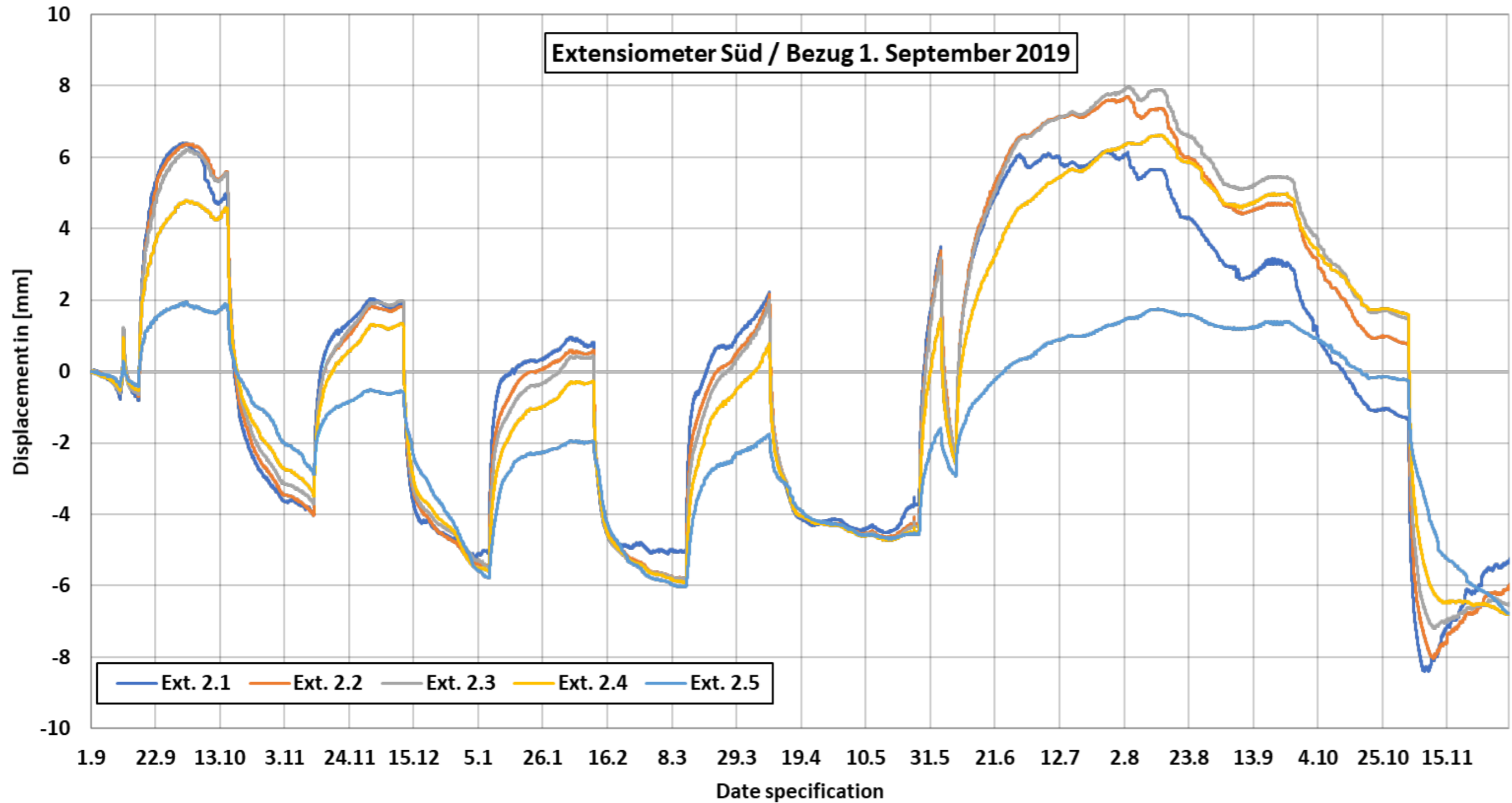
Anlage 7.2 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Nord mit Korrektur der Temperaturdehnung



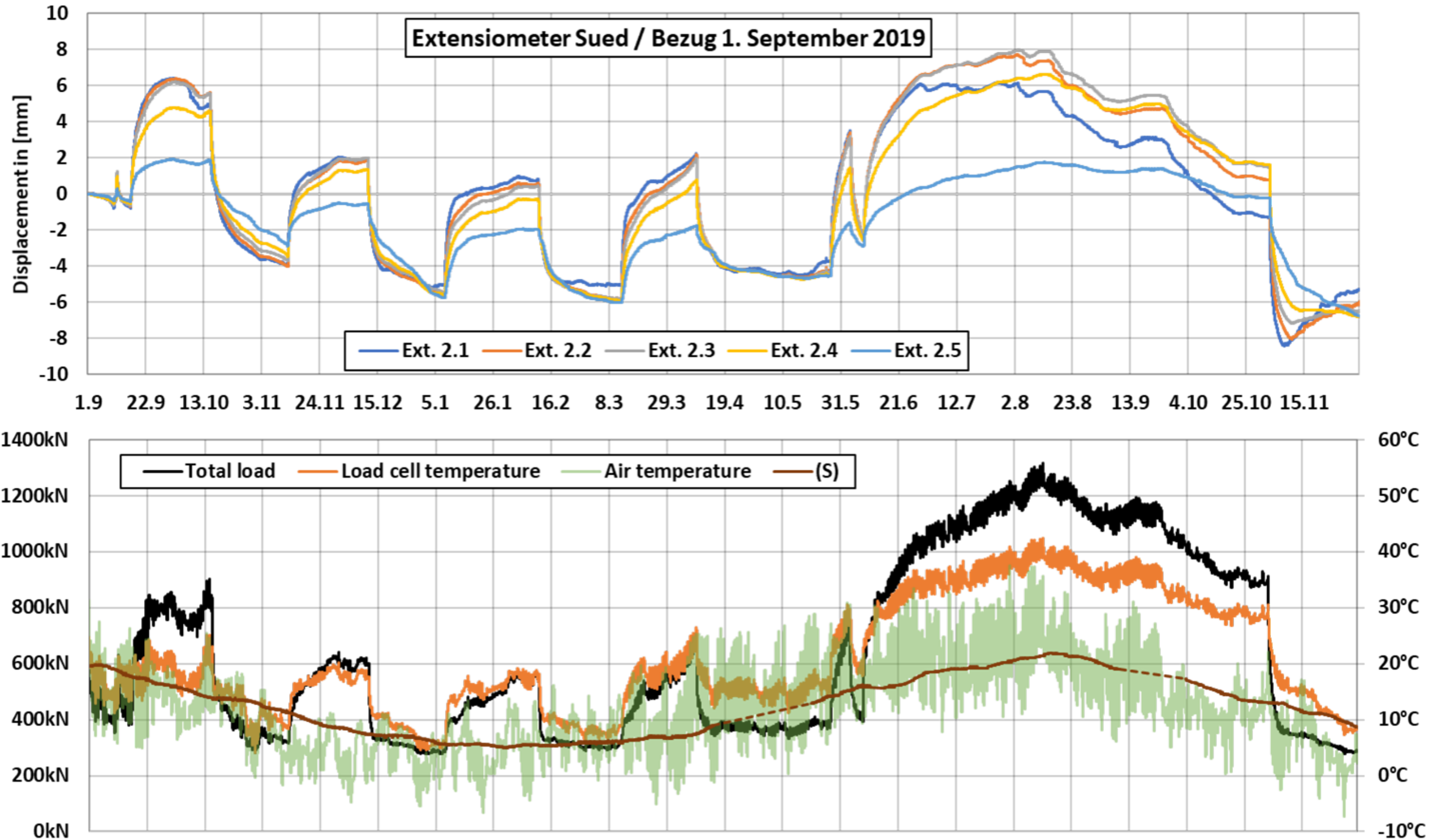
**Anlage 7.3 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Süd ohne Korrektur der Temperaturdehnung
inkl. Luft- und Bodentemperatur**



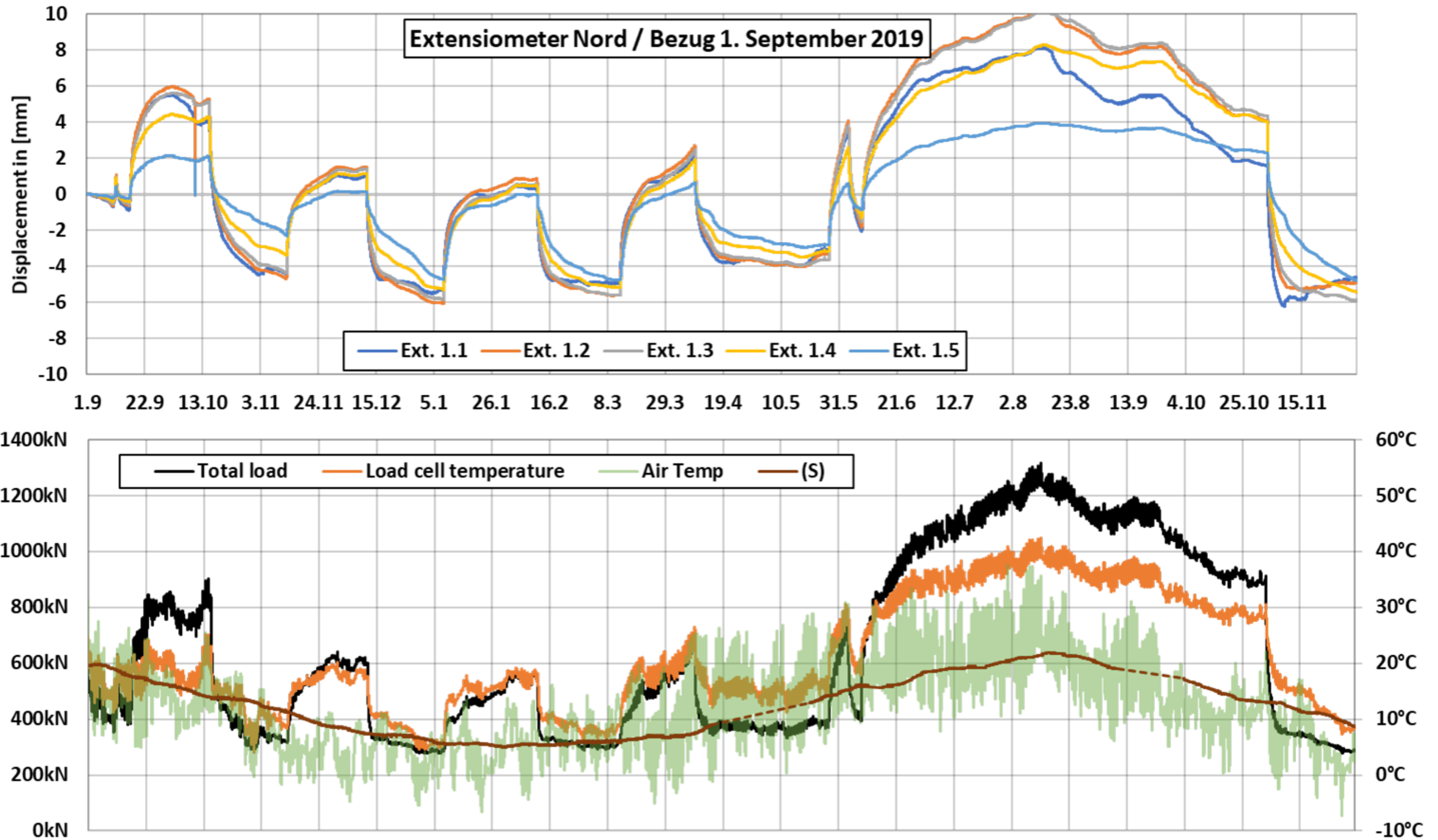
Anlage 7.4 - Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Süd mit Korrektur der Temperaturdehnung



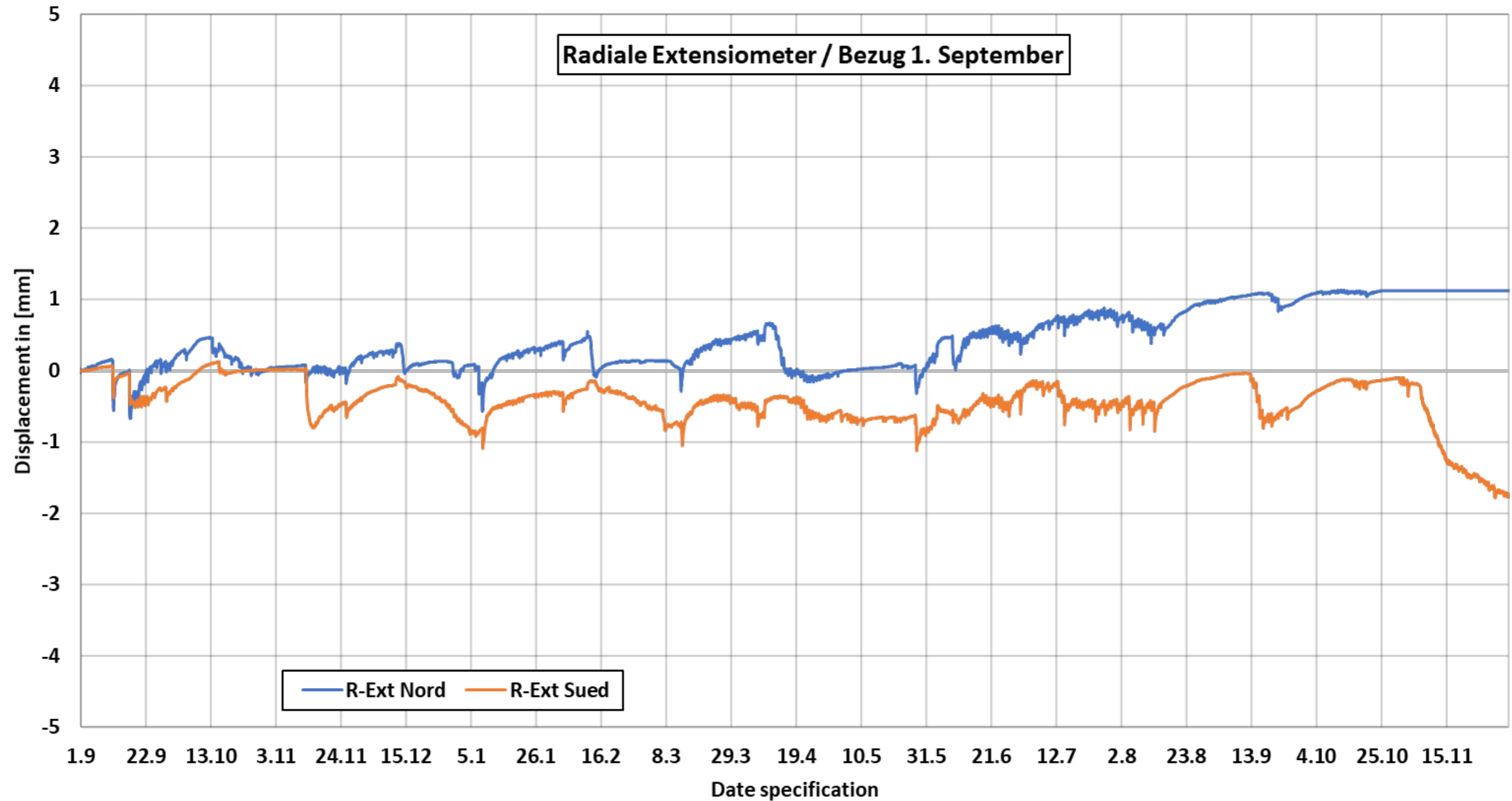
**Anlage 7.5 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Süd mit Korrektur der Temperaturdehnung
inkl. Verlauf der Gesamtkraft, Temperaturen der Kraftmessdose, (S), Lufttemperatur**



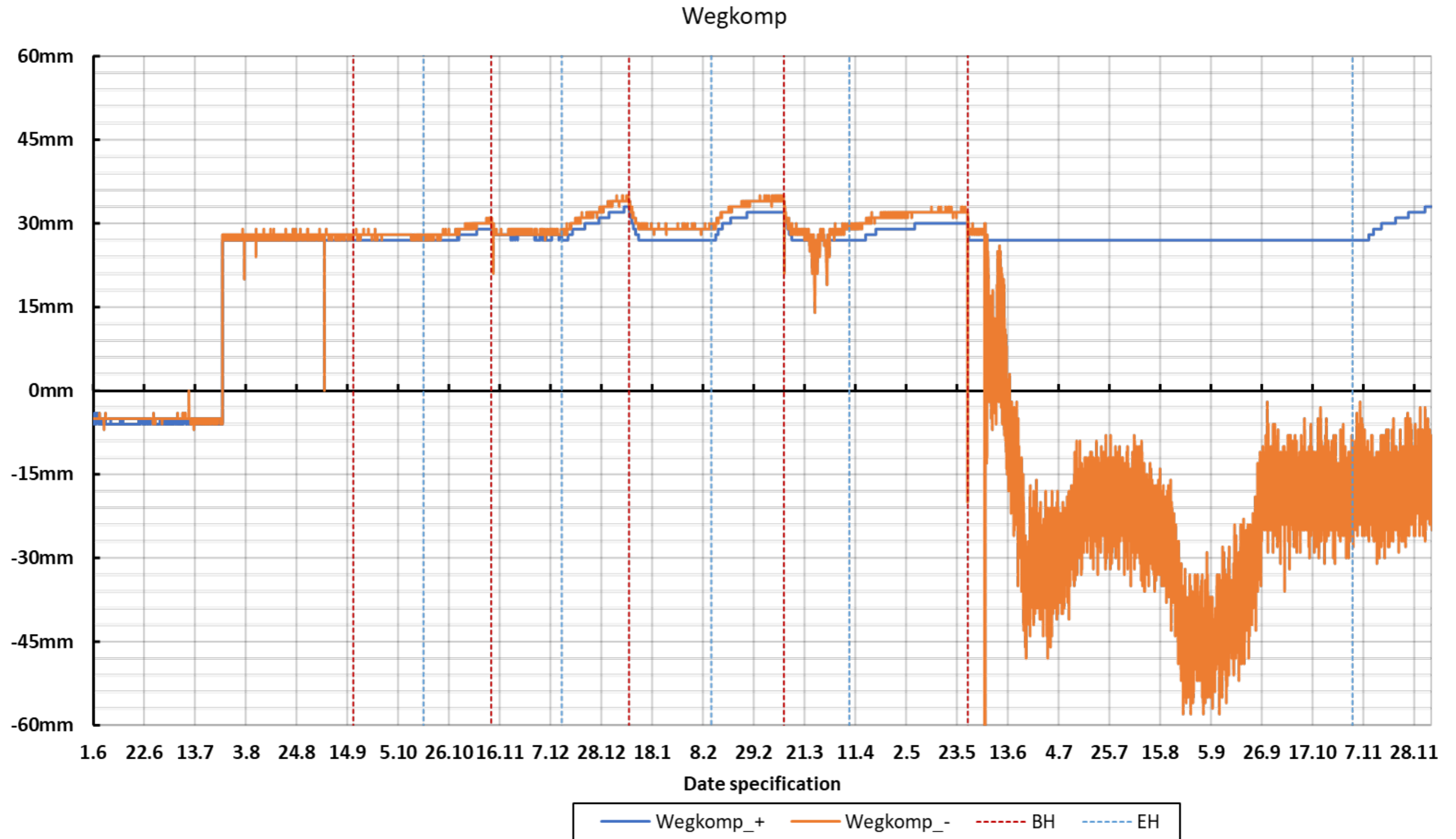
Anlage 7.6 – Verschiebungsmessung Extensometer Messrichtung Nord mit Korrektur der Temperaturdehnung inkl. Verlauf der Gesamtkraft, Temperaturen der Kraftmessdose, (S), Lufttemperatur



Anlage 7.7 – Radialextensometermessung

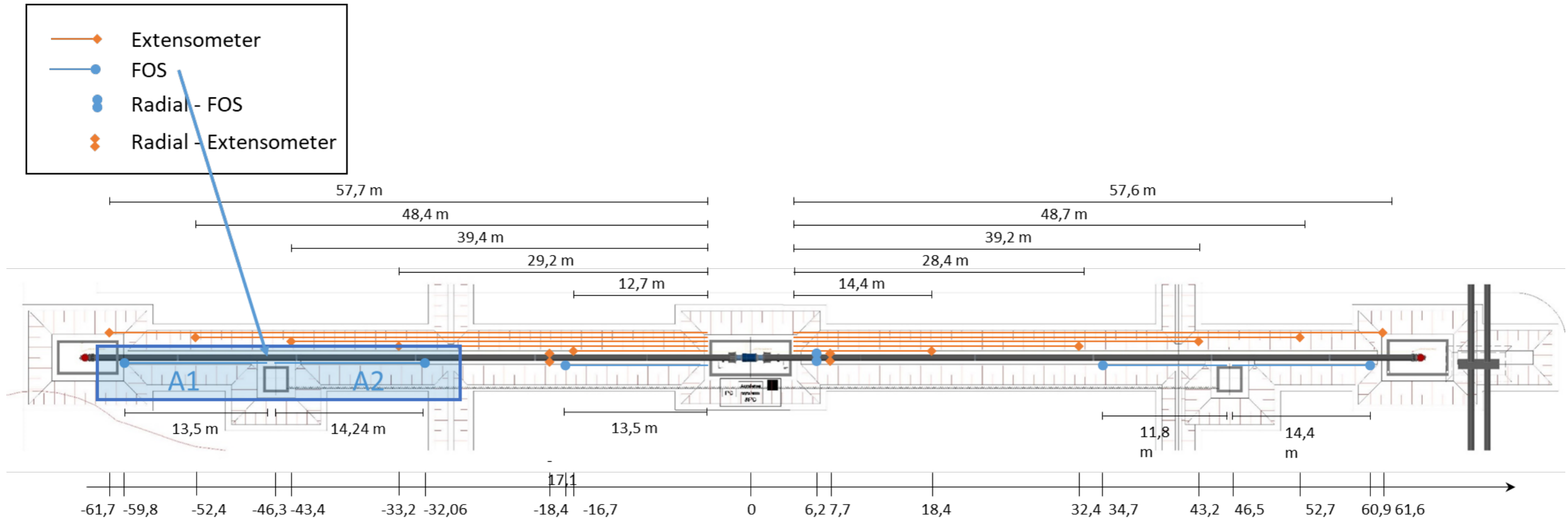


Anlage 7.8 – Verschiebungsmessungen Wegaufnehmer MS1 Messrichtung Süd (Wegkomp_-) und Nord (Wegkomp_+)



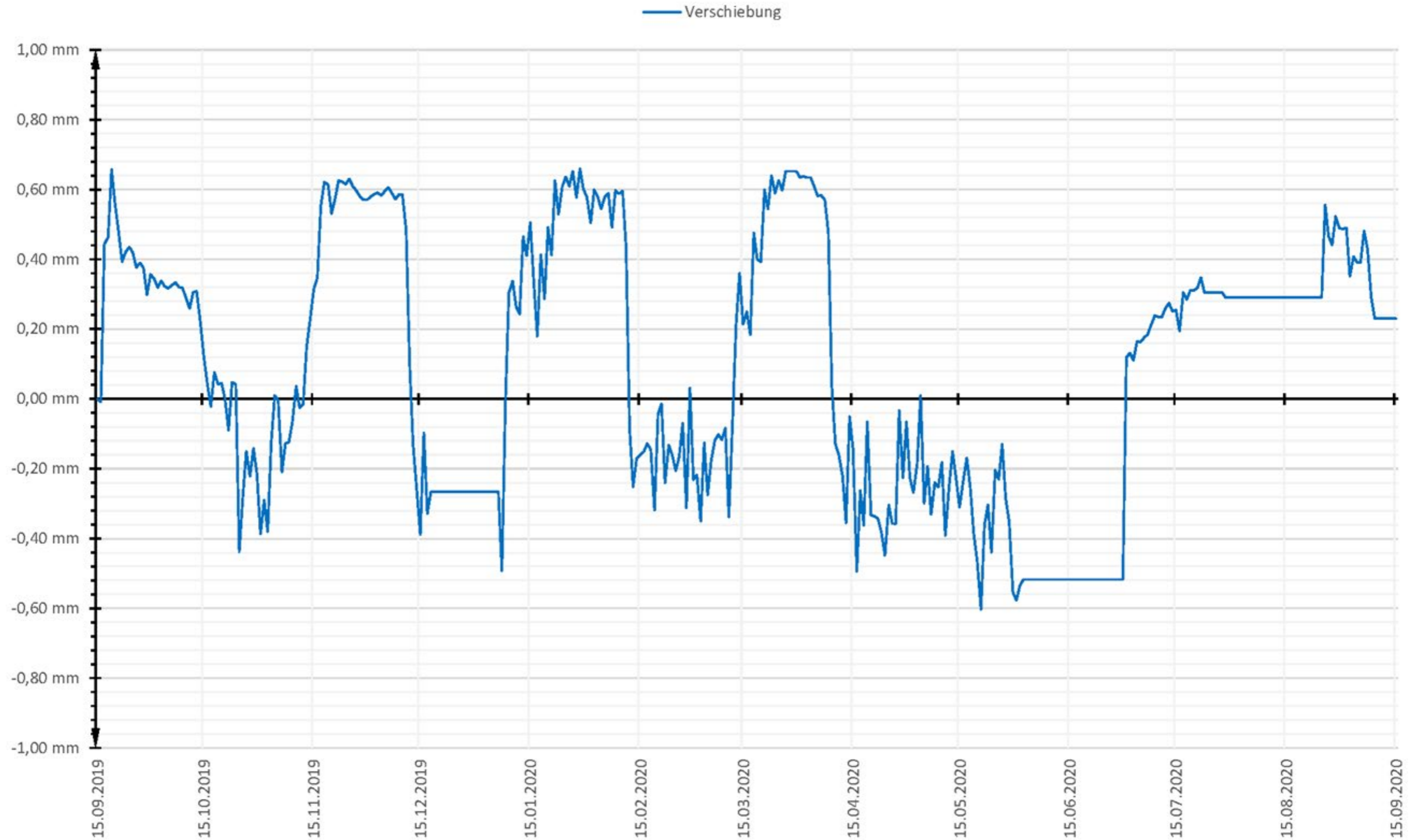
Anlage 8 – Faseroptische Messungen

Anlage 8.1 - Schematische Darstellung der Messstrecken A1 und A2



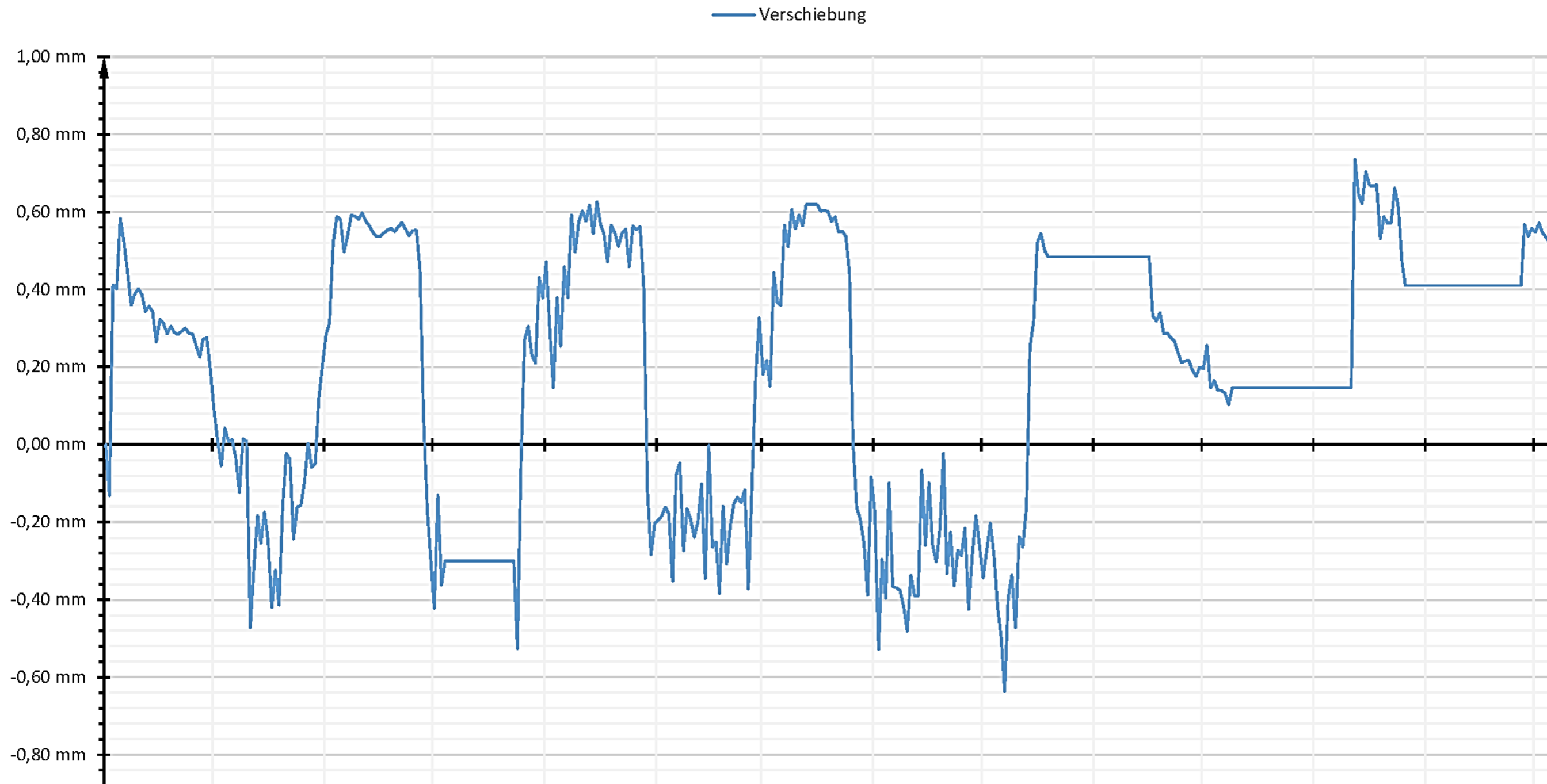
Anlage 8.2 – Faseroptische Verschiebungsmessung A1

Abschnitt A1 Gesamtübersicht: Messung bezogen auf 15.09.2019



Anlage 8.3 – Faseroptische Verschiebungsmessung A2

Abschnitt A2 Gesamtübersicht: Messung bezogen auf 15.09.2019



Anlage 9 – Dokumentation der ZFSV Mischungen

Anlage 9.1 - ZFSV Mischungen



Lieferschein	Datum	m ³	Boden feucht [kg]	*Boden gemischt lt Lieferscheine [%]	*Boden gemessen [%]	Boden trocken [kg]	Geoflu [kg]	CEM [kg]	Wasser [l]	Rechnerischer Wassergehalt	Ausbreitmaß [cm]	Absetzmaß [%]	Kommentar
LS 12	04.06.2019	5,00	6561,00	7,00	7,00		239,70	185,70	2383,30	43,55%	64,00		
LS 13	04.06.2019	8,00	10500,70	7,00	7,00		383,80	296,70	3812,00	43,53%	66,00	0,30	
LS 14	04.06.2019	8,04	10600,40	7,00	7,00		383,70	296,40	3814,00	43,23%	65,50		
LS 15	04.06.2019	8,00	10492,30	7,00	7,00		383,30	295,30	3814,50	43,59%	66,00		
LS 16	05.06.2019	8,00	10481,70	7,00	7,00		383,50	297,00	3814,70	43,62%	58,00		
LS 17	05.06.2019	8,19	10989,40	7,00	7,00		383,40	296,30	3814,30	42,05%	63,00		
LS 18	05.06.2019	8,00	10489,10	7,00	7,04		383,80	296,40	3815,20	43,60%	63,50		Rezept V1M1 d. h. Ursprungsrezeptur wurde um 4 kg Compound je m ³ erhöht
LS 19	05.06.2019	8,00	10481,20	7,00	6,90		383,40	296,40	3814,70	43,62%	62,50		
LS 20	05.06.2019	8,00	10482,90	8,40	8,40		383,60	296,80	3813,60	45,65%	62,50		
LS 21	05.06.2019	8,00	10482,10	8,20	8,20		383,90	296,70	3813,50	45,36%	62,00		Fremdmessung
LS 22	06.06.2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Entsorgt
LS 23	06.06.2019	8,00	10493,20	7,50	7,50		383,80	296,70	3814,00	44,30%	62,00	0,20	Der Mischung wurden nachträglich 150-200 kg Sand hinzugefügt, da zu flüssig
LS 24	06.06.2019	8,10	10742,40	8,40	8,40		383,60	296,80	3814,40	44,83%	58,00		

LS 25	06.06.2019	8,00	10485,10	7,50	7,50	383,60	296,70	3815,40	44,34%	60,00	0,10	
LS 26	06.06.2019	8,07	10668,80	7,50	7,50	383,70	296,60	3814,20	43,74%	62,00		
LS 27	11.06.2019	8,00	10496,20	7,50	7,50	383,40	296,60	3813,20	44,28%	56,00		
LS 28	11.06.2019	8,11	10775,10	7,50	7,50	383,70	296,70	3815,10	43,42%	58,00	0,10	
LS 29	11.06.2019	8,23	11087,40	7,50	7,50	383,50	296,30	3813,60	42,48%	56,00		
LS 30	11.06.2019	8,16	10914,00	7,50	7,60	384,20	296,40	3814,60	42,99%	57,50		
LS 31	11.06.2019	8,00	10485,90	7,50	7,50	383,40	296,40	3813,40	44,32%	57,50		
LS 32	11.06.2019	8,00	10487,20	7,50	7,50	383,80	296,20	3813,50	44,31%	61,00		
LS 33	11.06.2019	8,00	10482,20	7,50	7,50	383,80	296,80	3813,20	44,32%	61,00		
LS 34	12.06.2019	8,00	10486,20	7,00	7,00	383,40	298,00	3814,00	43,59%	58,50		
LS 37	12.06.2019	8,00	10491,90	7,50	7,50	383,70	296,60	3814,90	44,31%	58,00	0,25	Aktennotiz: 12.06.2019
LS 38	12.06.2019	8,00	10480,40	7,50	7,50	383,60	296,70	3813,00	44,33%	57,00		
LS 39	12.06.2019	8,00	10490,10	8,00	8,00	383,80	297,00	3813,20	45,03%	59,00		
LS 40	12.06.2019	8,00	10486,30	7,50	8,50			383,50 296,50 3815,50	44,34%	58,00		
LS 41	12.06.2019	8,00	10488,00	7,00	7,00			383,70 296,80 3813,20	43,58%	57,50		
LS 42	12.06.2019	8,00	10494,50	6,00	6,00			383,30 296,40 3815,70	42,16%	61,00		
LS 43	12.06.2019	8,00	10492,70	7,00	7,00			383,70 296,70 3815,50	43,59%	60,00		
LS 44	13.06.2019	8,00	10488,20	7,50	7,50			383,90 297,10 3813,60	44,31%	60,50		
LS 45	13.06.2019	8,01	10497,60	8,00	8,00			383,30 296,70 3815,80	45,03%	58,00		
LS 46	13.06.2019	8,00	10492,60	8,00	8,00			384,10 296,10 3813,40	45,03%	59,50		
LS 47	13.06.2019	8,00	10489,10	7,50	7,50			383,50 295,50 3814,70	44,32%	60,00		
LS 48	13.06.2019	8,00	10482,00	7,50	6,50			384,00 295,50 3815,10	44,35%	61,00		Aktennotiz: 13.06.2019 Gefahren mit 7,5% Wasser
LS 49	13.06.2019	8,00	10482,10	8,00	7,00			384,10 295,00 3814,60	45,08%	60,00		Aktennotiz: 13.06.2019 Gefahren mit 8% Wasser
LS 50	13.06.2019	8,00	10489,90	8,00	7,00			383,70 295,70 3815,20	45,06%	60,50		Aktennotiz: 13.06.2019 Gefahren mit 8% Wasser
LS 51	13.06.2019	8,00	10488,10	8,00	7,00			384,00 295,20 3812,00	45,03%	60,00		Aktennotiz: 13.06.2019 Gefahren mit 8% Wasser
LS 52	17.06.2019	8,00	10483,40	8,00				383,80 296,60 3814,70	45,07%	60,50		
LS 53	17.06.2019	8,45	11698,90	8,00				383,60 296,20 3812,90	41,50%	58,00		
LS 54	17.06.2019	8,00	10483,40	7,00				383,40 296,60 3813,80	43,60%			
LS 55	17.06.2019	8,00	10484,20	7,50				384,10 296,70 3814,30	44,33%	60,00		

Anlage 9.2 – Einaxiale Druckfestigkeit und WLFK-Messungen

Lieferschein Datum	Wärmeleitfähigkeit Einbau/ Labormessungen [W/mK]					Wärmeleitfähigkeit Ausbau/ Feldmessung [W/mK]			
	Prüfalter: [d]	WLFK [W/mK]	gravimetrischer Wassergehalt w [%]	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	Feuchtdichte ρ_f [g/cm ³]	Prüfdatum [d]	WLFK [W/mK]	gravimetrischer Wassergehalt w [%]	
LS 12	04.06.2019								
LS 13	04.06.2019								
LS 14	04.06.2019	6	1,804	33,86%	1,56	2,02			
		14	1,852	33,86%	1,56	2,02			
		35	1,809	33,54%	1,56	2,01			
LS 15	04.06.2019								
LS 16	05.06.2019								
LS 17	05.06.2019								
LS 18	05.06.2019								
LS 19	05.06.2019	6	1,715	nicht ermittelt	nicht ermittelt	2,03			
LS 20	05.06.2019								
LS 21	05.06.2019	5	1,699	33,77%	1,54	2,06			
		13	1,688	33,77%	1,54	2,06			
		33	1,654	32,92%	1,54	2,06			
LS 22	06.06.2019								
LS 23	06.06.2019								
LS 24	06.06.2019								
LS 25	06.06.2019	4	1,668	33,06%	1,56	2,08	08.12.2020	1,729	29,84
		12	1,691	33,06%	1,56	2,08			
		34	1,718	29,49%	1,56	2,02			
LS 26	06.06.2019								
LS 27	11.06.2019						09.12.2020	1,586	24,64
LS 28	11.06.2019								
LS 29	11.06.2019								
LS 30	11.06.2019								
LS 31	11.06.2019								
LS 32	11.06.2019								
LS 33	11.06.2019								
LS 34	12.06.2019								
LS 37	12.06.2019								
LS 38	12.06.2019								
LS 39	12.06.2019								

LS 40	12.06.2019	1	1,699	36,29%	1,49	1,99			
		6	1,710	36,29%	1,49	1,99			
		26	1,737	36,04%	1,49	1,99			
LS 41	12.06.2019								
LS 42	12.06.2019						08.12.2020	1,748	27,77
							08.12.2020	1,614	21,73
LS 43	12.06.2019								
LS 44	13.06.2019								
LS 45	13.06.2019								
LS 46	13.06.2019	5	1,696	33,74%	1,53	2,04	09.12.2020	1,644	24,73
		26	1,739	33,74%	1,53	2,04	09.12.2021	1,558	24,11
LS 47	13.06.2019								
LS 48	13.06.2019						08.12.2020	1,529	24,45
							08.12.2020	1,917	23,85
LS 49	13.06.2019								
LS 50	13.06.2019						09.12.2021	1,301	20,35
LS 51	13.06.2019								
LS 52	17.06.2019								
LS 53	17.06.2019								
LS 54	17.06.2019								
LS 55	17.06.2019								