

**QUALITÄTSSICHERUNG BEI ERDWÄRMESONDEN II
MIT BETEILIGUNG AM IEA ECES ANNEX 27
- QEWS II -**

**Schlussbericht
30.11.2020**

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

Förderkennzeichen: 03ET1386A-G
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2016–31.03.2020

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Zuwendungsempfänger: ZAE Bayern (Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung e.V.)
HBC (Hochschule Biberach)
KIT (Karlsruhe Institut für Technologie)
EIFER (European Institute for Energy Research)
Solites (Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige ther-
mische Energiesysteme)
enOware GmbH
Burkhardt GmbH

Verbundkoordinatorin: Hanne Karrer, ZAE Bayern

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) mit den Förderkennzeichen 03ET1386A-G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	ZUSAMMENFASSUNG	9
2	EINFÜHRUNG	14
2.1	Thema	14
2.2	Motivation und Ziel des Vorhabens	14
2.3	Aufgabenstellung und Gliederung des Vorhabens	16
2.4	Referenzen.....	19
3	PROJEKTORGANISATION	20
3.1	Projektpartner	20
3.2	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	23
4	TEILPROJEKT 1: VERFAHREN ZUR ÜBERPRÜFUNG DER MESSEINRICHTUNGEN FÜR THERMAL-RESPONSE-TESTS	24
4.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	24
4.2	Motivation und Aufgabenstellung.....	26
4.3	Überprüfung der Langzeitstabilität eines TRT-Gerätes	27
4.3.1	Untersuchung der Einflüsse auf die ungestörte Bodentemperatur.....	28
4.3.2	Thermal-Response-Test Vergleichsmessungen an realer Erdwärmesonde	31
4.4	Entwicklung eines Prüfstandes für TRT-Geräte mit zugehörigem Prüfverfahren	38
4.4.1	Anforderungen an den Prüfstand / die E-EWS und Konzeptentwicklung	38
4.4.2	Funktionsweise des Prüfstands / der E-EWS.....	39
4.4.3	Konstruktion und Aufbau des Prüfstands / der E-EWS.....	44
4.4.4	Entwicklung des Regelungskonzeptes des Prüfstands / der E-EWS	45
4.4.5	In den Prüfstand / die E-EWS eingebundenes Simulationsmodell	64
4.4.6	Erzielte Ergebnisse an der entwickelten E-EWS.....	67
4.5	Fazit und voraussichtlicher Nutzen.....	77
4.6	Erfolge und geplante Veröffentlichungen	79
4.6.1	Bisherige Veröffentlichungen:	79
4.6.2	Geplante Veröffentlichungen:	79
4.6.3	Studentische Arbeiten:	79
4.7	Referenzen.....	80

4.8	Nomenklatur	81
5	TEILPROJEKT 2: ABDICHTUNG VON ERDWÄRMESONDEN-BOHRUNGEN MIT VERFÜLLMATERIALIEN	83
5.1	Motivation und Aufgabenstellung	83
5.2	Stand der Wissenschaft und Technik	83
5.3	Methodik	92
5.3.1	Definition von Standardtestbedingungen zur Ermittlung der Systemdurchlässigkeit	93
5.3.2	Übersicht der zu Projektbeginn bereits vorhandenen Versuchsstände	94
5.3.3	FTW-Zelle	97
5.3.4	Entwicklung einer modifizierten Triaxialzelle.....	98
5.3.5	Entwicklung des Prüfstands Systemtriaxialzelle.....	101
5.3.6	Theoretischer Einfluss einer Skalierung der Probenquerschnittsgeometrie auf den Systemdurchlässigkeitsbeiwert.	108
5.3.7	Messgenauigkeiten der Teststände.....	109
5.3.8	Prüfprogramm.....	110
5.4	Erzieltes Ergebnis	112
5.4.1	Einfluss der Probenherstellung auf die Messergebnisse	112
5.4.2	Messungen mit der FTW-Zelle.....	113
5.4.3	Langzeituntersuchung einer Systemprobe	117
5.4.4	Einfluss des Sättigungsdrucks auf die Messwerte.....	122
5.4.5	Einflüsse auf die Bildung eines Spaltes zwischen Sondenrohr und Verfüllbaustoff.....	124
5.4.6	Einfluss von Schwankungen im Sondenfluiddruck auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von Systemproben	130
5.4.7	Einfluss der Temperatur auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von Systemproben	132
5.4.8	Einfluss von FTW-Belastungen auf den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von Systemproben.....	135
5.4.9	Bewertung des Sondenrohrmaterials	140
5.4.10	Messungen mit verschiedenen Methoden	141
5.5	Fazit und voraussichtlicher Nutzen	143
5.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	145
5.6.1	Bisherige Veröffentlichungen.....	145
5.6.2	Geplante Veröffentlichungen.....	145
5.6.3	Studentische Arbeiten	145
5.7	Referenzen	146
6	TEILPROJEKT 3: IN-SITU MESSVERFAHREN ZUR QUALITÄTSÜBERWACHUNG UND -MONITORING VON ERDWÄRMESONDEN	149
6.1	Kabellose Messtechnik	149

6.1.1	Methodik.....	149
6.1.2	Analyse der Messunsicherheiten.....	151
6.1.3	GEOsniff-Temperaturprofilmessungen.....	152
6.1.4	Tiefenorientierter-Thermal Response Test mit dem Auto-TRT KIT.....	156
6.1.5	Zusammenfassung und Ausblick.....	160
6.2	Bestimmung und Vergleich der Einflussfaktoren der Wärmeleitfähigkeit in Labor- und Felduntersuchungen	161
6.2.1	Stand der Wissenschaft und Technik	161
6.2.2	Motivation und Aufgabenstellung.....	162
6.2.3	Modellstandort Neuweiler.....	163
6.2.4	Modellstandort Wolfersdorf: Vergleich unterschiedlicher Anordnungen des Glasfaserkabels in einer Erdwärmesonde bei einem DTRT	223
6.2.5	Modellstandort Biberach: Bestimmung der Grenzen der ETRT-Auswertung bei Grundwasserfluss.....	227
6.3	Automatischer Verfüllstandskontrollversuch	247
6.3.1	Methodik.....	247
6.3.2	Versuchsdurchführung	250
6.3.3	Zusammenfassung und Ausblick.....	260
6.4	Geophysikalische Untersuchungsmethoden – Entwicklung einer Ultraschallmesssonde	261
6.4.1	Stand der Wissenschaft und Technik	261
6.4.2	Motivation und Aufgabenstellung.....	266
6.4.3	Methodik.....	266
6.4.4	Erzieltes Ergebnis.....	282
6.4.5	Fazit und voraussichtlicher Nutzen	334
6.5	Erfolge und geplante Veröffentlichungen	338
6.5.1	Bisherige Veröffentlichungen	338
6.5.2	Geplante Veröffentlichungen	338
6.5.3	Studentische Arbeiten	338
6.6	Referenzen.....	339
7	TEILPROJEKT 4: VERFAHREN ZUR VERBESSERUNG DER BOHRLOCHVERFÜLLUNG BEI ERDWÄRMESONDEN.....	345
7.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	345
7.2	Motivation und Ziele der Untersuchungen	347
7.2.1	Druck- und Filtrationsversuche	347
7.2.2	Test einer Verdichtungseinrichtung zur Verbesserung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden	347
7.3	Druck- und Filtrationsversuche	348

7.3.1	Theoretische Vorüberlegungen.....	349
7.3.2	Vorversuche.....	359
7.3.3	Realmaßstabsversuche.....	368
7.3.4	Fazit.....	389
7.4	Verfahren zur Verbesserung der Bohrlochverfüllung bei Erdwärmesonden.....	391
7.4.1	Motivation und Stand der Technik.....	391
7.4.2	Methodik und Versuchdurchführung.....	393
7.4.3	Ergebnisse.....	399
7.4.4	Fazit.....	403
7.5	Referenzen.....	404
8	TEILPROJEKT 5: ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG KONSISTENTER AUSLEGUNGSMODELLE FÜR OBERFLÄCHENNAHE GEOTHERMISCHE ANLAGENSYSTEME (GEOSYST+).....	406
8.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	406
8.2	Motivation und Aufgabenstellung.....	408
8.3	Methodik.....	408
8.4	Erzieltes Ergebnis.....	409
8.4.1	Marktanalyse vorhandener ONG-Modelle und -Programme.....	409
8.4.2	Erdwärmesonden.....	411
8.4.3	Erdwärmekollektoren.....	440
8.5	Fazit und voraussichtlicher Nutzen.....	454
8.6	Erfolge und geplante Veröffentlichungen.....	457
8.6.1	Bisherige Veröffentlichungen.....	457
8.6.2	Geplante Veröffentlichungen:.....	457
8.6.3	Studentische Arbeiten.....	457
8.6.4	Weitere Verwertung.....	458
8.7	Referenzen.....	458
9	TEILPROJEKT 6: IEA ECES ANNEX 27.....	461
9.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	461
9.2	Motivation und Aufgabenstellung.....	462
9.3	Methodik.....	462
9.4	Erzieltes Ergebnis.....	464
9.4.1	Gesetzliche Vorgaben.....	464

9.4.2	Subtask 1 – Planungsphase	465
9.4.3	Subtask 2 – Bauphase.....	472
9.4.4	Subtask 3 – Betrieb	478
9.4.5	Subtask 4 – Probleme, Schadensereignisse, Analyse, Lösungen und Umweltverträglichkeit	480
9.4.6	Mitarbeit bei der Erstellung einer neuen Europäischen Norm (CEN: EN 17522).....	484
9.5	Fazit und voraussichtlicher Nutzen.....	489
9.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	491
9.6.1	Bisherige Veröffentlichungen:	491
9.6.2	Geplante Veröffentlichungen:	491
9.7	Referenzen.....	491
10	DANKSAGUNG	492
11	ANHANG	493
11.1	TP 1.....	493
11.2	TP 3.....	494
11.3	TP 4.....	540
11.3.1	Versuch 1: Baustoff #09 / Sand / ohne SR.....	540
11.3.2	Versuch 2: Baustoff #09 / Sand / mit SR.....	549
11.3.3	Versuch 3: Baustoff #09 / Zement / ohne SR.....	551
11.3.4	Versuch 4: Baustoff #09 / Zement / mit SR	558
11.3.5	Versuch 5: Baustoff #14 / Zement / ohne SR.....	566
11.3.6	Versuch 6: Baustoff #14 / Zement / mit SR	570
11.3.7	Versuch 7: Baustoff #14 / Sand / mit SR.....	573
11.3.8	Versuch 8: Baustoff #13 / Sand / mit SR.....	576
11.3.9	Referenzversuche	580
11.4	TP 5.....	591
11.5	Abbildungsverzeichnis	592
11.6	Tabellenverzeichnis	615