

# Temperaturentwicklung im und um den Erdsonden- Wärmespeicher in Crailsheim

Dr.-Ing. Janet Nußbicker-Lux, Dr.-Ing. Dan Bauer, Dr.-Ing. Harald Drück  
Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)  
Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS)  
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart  
Tel.: (0049 -711) 685 63239, Fax: (0049 -711) 685 63503  
E-Mail: nussbicker@itw.uni-stuttgart.de, Internet: www.itw.uni-stuttgart.de

## 1. Einleitung

In Crailsheim ist auf einem ehemaligen Kasernengelände die bisher größte Anlage zur solaren Nahwärmeversorgung in Deutschland realisiert worden. Die Anlage versorgt derzeit etwa 250 Wohneinheiten sowie eine Schule und Sporthalle mit Wärme. Ende des Jahres 2012 bestand die Anlage aus 7 410 m<sup>2</sup> Kollektorfläche (Apertur), einem 39 000 m<sup>3</sup> großen Erdsonden-Wärmespeicher, zwei Pufferspeichern und einer Kompressions-Wärmepumpe mit einer elektrischen Leistung von 80 kW. Die solare Nahwärmeversorgung ist auf einen solaren Deckungsanteil von 50 %, bezogen auf den Wärmebedarf für Raumheizung und Trinkwarmwasser, ausgelegt, s. [1].

In diesem Beitrag wird die Anlage unter besonderer Berücksichtigung des Erdsonden-Wärmespeichers beschrieben. Des Weiteren werden Messwerte zum Gesamtsystem und zum Erdsonden-Wärmespeicher sowie die Ergebnisse von Simulationen vorgestellt und diskutiert.

## 2. Anlagenbeschreibung

### **Gesamtanlage**

Die solare Nahwärmeversorgung ist in zwei miteinander verbundene Anlagenteile aufgeteilt, siehe Abb. 1. An den 1. Anlagenteil sind 2 492 m<sup>2</sup> Kollektorfläche angeschlossen. Des Weiteren besteht der 1. Anlagenteil aus einem 100 m<sup>3</sup> Pufferspeicher (1) und einer Heizzentrale, an die das Nahwärmenetz Hirtenwiesen II (HW II) sowie die Fernwärme, die als Nachheizung dient, angeschlossen sind. Der 2. Anlagenteil wird im Hinblick auf die Wärmespeicherung überwiegend saisonal betrieben und besteht aus 4 918 m<sup>2</sup> Kollektorfläche auf zwei Lärmschutzwällen, einem 480 m<sup>3</sup> Pufferspeicher (2), einem Erdsonden-Wärmespeicher (ESWSP) sowie einer Kompressions-Wärmepumpe (WP). Der Pufferspeicher 2 (PS2) wird benötigt,

da die maximale thermische Leistung der Kollektoren höher ist, als die maximale Beladeleistung des ESWSP. Mit dem PS 2 kann die solare Wärme kontinuierlich und unabhängig von der solaren Wärmeleistung in den ESWSP eingespeichert werden. Die WP ist hydraulisch zwischen den beiden Pufferspeichern eingebunden, da hierdurch die Effizienz der Kollektorfelder und damit der solare Nutzwärmeertrag durch die Absenkung des Temperaturniveaus im PS2 erhöht werden. Außerdem kann die Wärmepumpe dann verdampfer- und kondensatorseitig auf große hydraulische Volumina arbeiten, wodurch lange Laufzeiten in effektiven Betriebspunkten ermöglicht werden. Durch die Wärmepumpe wird die effektiv nutzbare Wärmekapazität des ESWSP gesteigert und die Wärmeverluste des ESWSP werden durch eine Absenkung der Speichertemperaturen verringert.

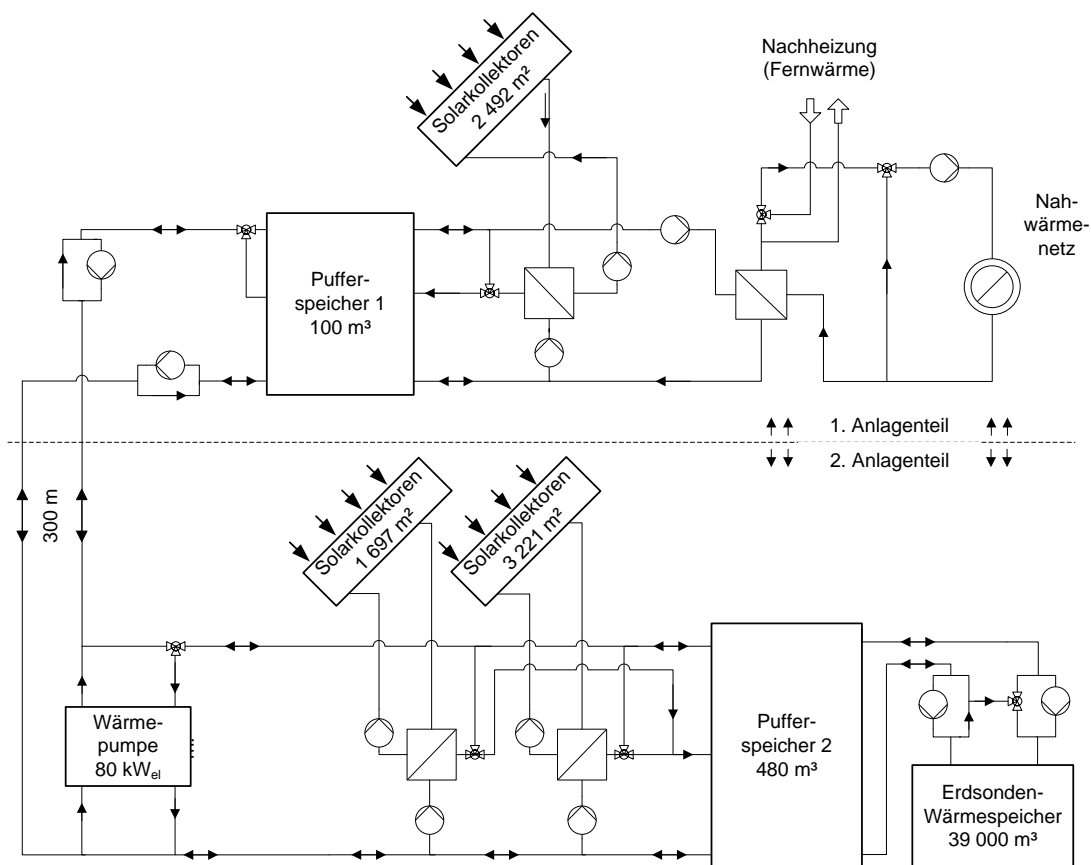


Abb.1: Schema der solaren Nahwärmeversorgung in Crailsheim

### ***Erdsonden-Wärmespeicher***

Der ESWSP wird als saisonaler Wärmespeicher genutzt, indem die solare Wärme direkt im Erdreich gespeichert wird. Das Volumen des ESWSP wird von 80 Doppel-U-Rohr-Sonden (EWS) erschlossen. Diese bestehen aus PE-Xa mit den Dimensionen (4 x 32 x 2,9) mm. Die Bohrlöcher der EWS wurden im oberen Bereich mit einem gering wärmeleitenden Material ( $\lambda = 0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) [7] verfüllt und die Länge der

EWS wurde auf 55 m begrenzt, da während der hydrogeologischen Voruntersuchungen strömendes Grundwasser (GW) sowohl einige Meter unter der GOK als auch ab einer Tiefe von ca. 60 m angetroffen wurde. Der thermisch aktive Teil der Erdwärmesonden von ca. 4 m bis 55 m Tiefe wurde mit einem Verfüllmaterial mit einer Wärmeleitfähigkeit von etwa  $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  von unten nach oben verpresst.

Das Sondenfeld wurde zur hydraulischen Anbindung in vier gleiche Sektoren unterteilt und die Anbindung der EWS erfolgt in einem zentralen Schacht. Von dort aus werden jeweils zwei EWS seriell durchflossen. Zur Beladung wird zuerst eine innere EWS durchflossen und dann eine in Reihe geschaltete äußere EWS. Eine detaillierte Beschreibung des Speicheraufbaus ist [1] und [7] zu entnehmen.

### Messtechnik

Zur Anlagenregelung und für wissenschaftliche Untersuchungen wird das Temperaturprofil des ESWSP in Intervallen von 30 s gemessen. Es sind insgesamt 83 Temperatursensoren an neun Messlanzen, siehe Abb. 3, in verschiedenen Tiefen (oberhalb der Wärmedämmung bis in 80 m Tiefe) installiert. Um der erwarteten asymmetrischen Ausbreitung der Wärme infolge des Grundwasserflusses Rechnung zu tragen, wurden sieben Messlanzen in einer Reihe parallel zum Grundwasserfluss im Oberen Muschelkalk (ab 60 m Tiefe) installiert. Zusätzlich zu den Messlanzen wird die Grundwassertemperatur am Bohrpunkt C (in 50 m Tiefe) sowie an einer Messstelle ca. 100 m in Grundwasser-Abstromrichtung gemessen.

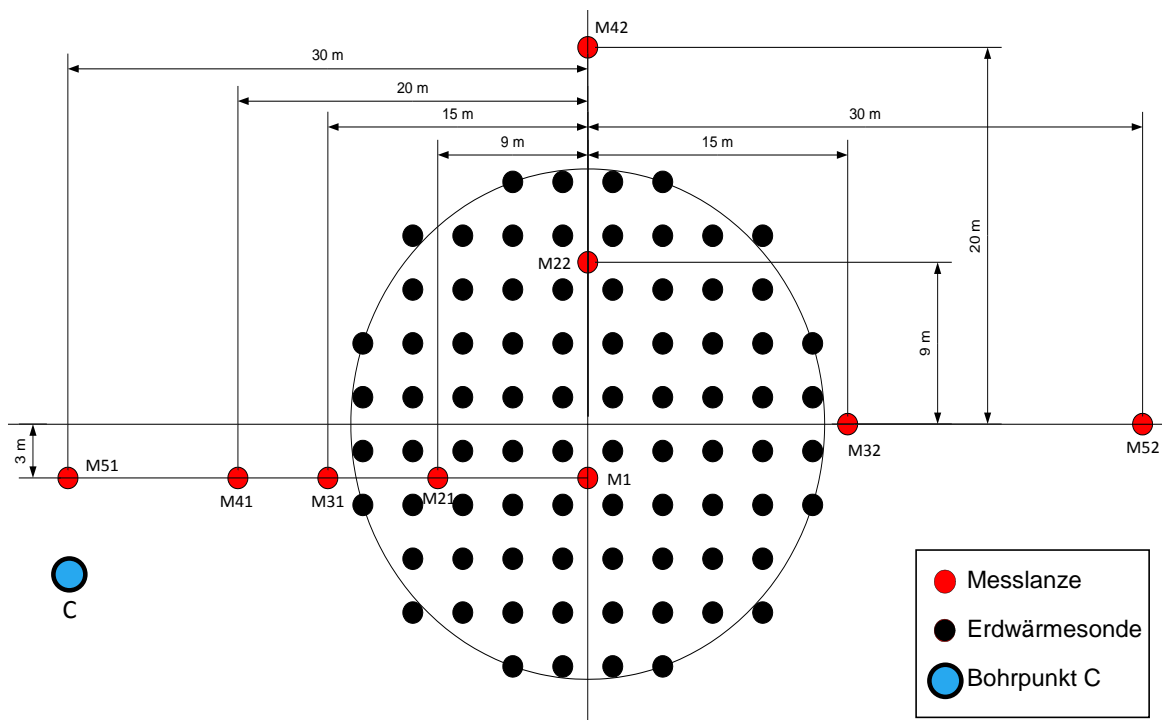


Abb. 2: Positionen der Erdwärmesonden, der neun Messlanzen sowie des Bohrpunktes C

### 3. Messergebnisse

#### Gesamtsystem

In Tabelle 1 sind die Kenndaten der solaren Nahwärmeversorgung angegeben, siehe auch [2], [3]. Die Kollektorfläche wurde von 1 559 m<sup>2</sup> (2008) auf 7 410 m<sup>2</sup> (2011) ausgebaut und die solare Wärmelieferung konnte von 570 MWh (2008) auf 2 337 MWh (2011) gesteigert werden. Obwohl die Kollektorfläche erst im Laufe des Jahres 2011 vollständig in Betrieb genommen wurde, lag die solare Wärmelieferung nur knapp unter dem geplanten Wert von 2 699 MWh/a. Die ins Netz HW II gelieferte solare Nutzwärme betrug 1 342 MWh, da ein Teil der Kollektoren erst im Jahr 2011 installiert und in Betrieb genommen und der ESWSP noch nicht entladen wurde.

Die ins Netz HW II gelieferte Wärmemenge betrug zwischen 2 990 MWh (2008) und 4 068 MWh (2010). Damit wurde die geplante Wärmemenge von 4 100 MWh/a im Jahr 2010 fast erreicht. Im Jahr 2011 war die ins Netz gelieferte Wärmemenge mit 3 750 MWh wieder niedriger, da weniger Wärme für Bauheizungen benötigt wurde und einige Optimierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Der Nachheizbedarf (Fernwärme) betrug zwischen 3 197 MWh (2010) und 2 407 MWh (2011). Dieser Anteil wird zukünftig sinken, wenn der ESWSP entladen wird.

Die geplante Beladewärmemenge des ESWSP beträgt 1 135 MWh/a und wurde noch nicht erreicht, da die Kollektorfläche bis 2011 noch nicht vollständig in Betrieb war und der ESWSP erst ab 2012 entladen wurde (der ESWSP war zu Beginn der Beladung 2010/11/12 noch vom Vorjahr warm).

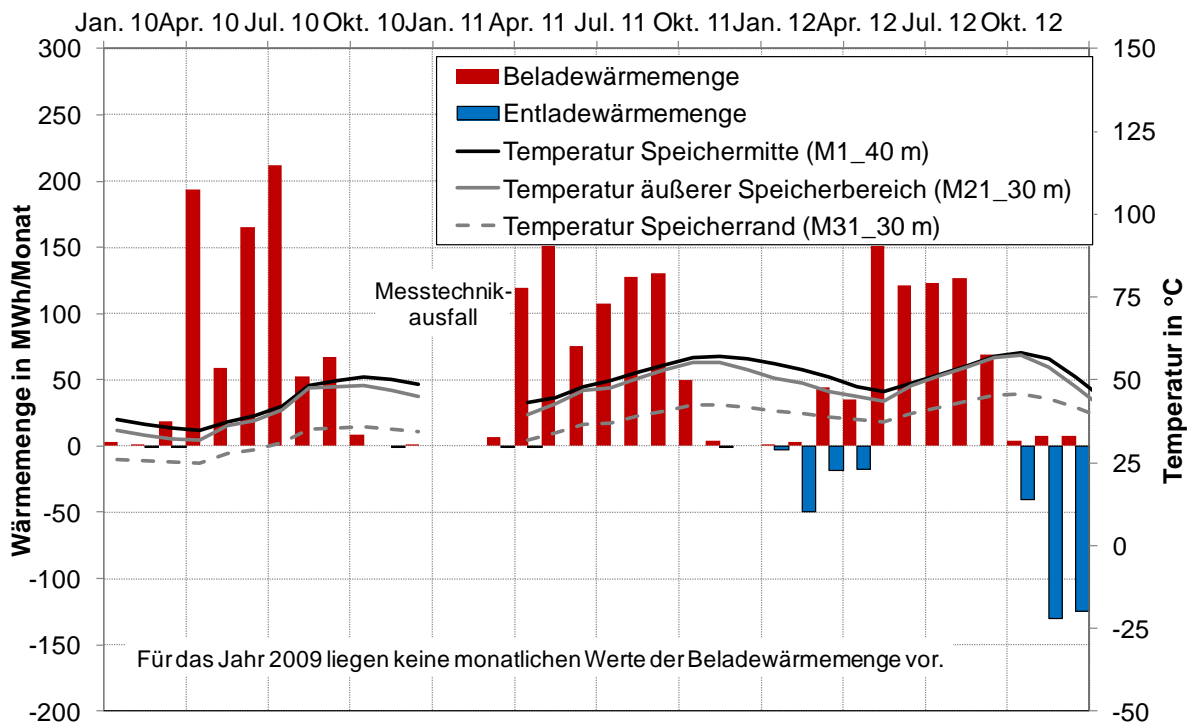
Im Jahr 2011 konnte bereits ein solarer Deckungsanteil von 35,8 % erreicht werden, obwohl die Anlage noch nicht vollständig im Betrieb war. Für 2012 wird kein Wert angegeben, da die Daten noch nicht für das gesamte Betriebsjahr vorliegen.

**Tab. 1: Kenndaten der solaren Nahwärmeversorgung in Crailsheim**

		2008	2009	2010	2011	2012 (bis 30.09.)
Kollektorfläche am Jahresende	m <sup>2</sup>	1 559	5 714	5 714	7 410	7 410
Wärmelieferung der Kollektoren	MWh	570	1 735	1 785	2 337	2 500
Solare Nutzwärme in HW II	MWh	483	673	864	1 342	1 435
Wärmemenge „Gesamt ins Netz II“	MWh	2 990	3 497	4 068	3 750	2 955
Wärmelieferung durch Fernwärme	MWh	2 530	2 832	3 197	2 407	1 494
Beladewärmemenge ESWSP	MWh	-	849	779	781	687
Entladewärmemenge ESWSP	MWh	-	-	-	-	87
<b>Solarer Deckungsanteil ohne saisonale Wärmespeicherung</b>	<b>%</b>	<b>16,2</b>	<b>19,3</b>	<b>21,2</b>	<b>35,8</b>	<b>keine Angabe</b>

### Erdsonden-Wärmespeicher

In Abb. 3 sind die monatlichen Beladewärmemengen sowie die Temperaturen in der Speichermitte, im äußeren Speicherbereich sowie am Speicherrand in einer Tiefe von 40 m bzw. 30 m aufgetragen. Die Beladewärmemenge ist in den Frühjahr-/ Sommermonaten am höchsten. Sie ist abhängig von der solaren Einstrahlung, dem im ESWSP vorhandenen Temperaturniveau und dem Wärmebedarf im Nahwärmenetz. In den Jahren 2010/2011 konnte der ESWSP noch nicht entladen werden, da das Temperaturniveau im ESWSP für eine direkte Entladung nicht ausreichte und die Wärmepumpe noch nicht installiert war.



**Abb. 3: Monatliche Be-/Entladewärmemengen sowie Temperaturen im und um den ESWSP**

In Abb. 4 sind die Temperaturen im und um den ESWSP seit Betriebsbeginn aufgetragen. Ausgehend von einer ungestörten Untergrundtemperatur von ca. 12 °C wurde der ESWSP seit nunmehr vier Jahren erwärmt und hat im Oktober 2012 mit 58 °C die bisher höchste Temperatur (Speichermitte) erreicht. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen an den Messlanzen M31 und M41 schneller steigen bzw. höhere Werte erreichen als an den Messlanzen M32 bzw. M42. Dies deutet auf einen Grundwasserfluss hin, kann aber auch durch eine lokal unterschiedliche Bodenbeschaffenheit verursacht sein. Die Temperaturen an den Messlanzen (M51, M52) in 30 m Entfernung von der Speichermitte sowie am Bohrpunkt C sind bisher nur gering gestiegen und in 100 m Entfernung an der Grundwasser-Messstelle GWM1 konnte noch keine Temperaturveränderung festgestellt werden.

Da der ESWSP in den Jahren 2009 bis 2011 nicht entladen wurde, ist das Absinken der Temperaturen im Speicher und in unmittelbarer Speicherumgebung auf Wärmeverluste des ESWSP an die Umgebung zurückzuführen. Die Temperaturen sind im Ruhezustand, d. h. in Phasen ohne Be-/Entladung, um 1 bis 2 Kelvin pro Monat (Mittelwert M1, M21, M22) gesunken; damit sind die Wärmeverluste als verhältnismäßig gering einzustufen.

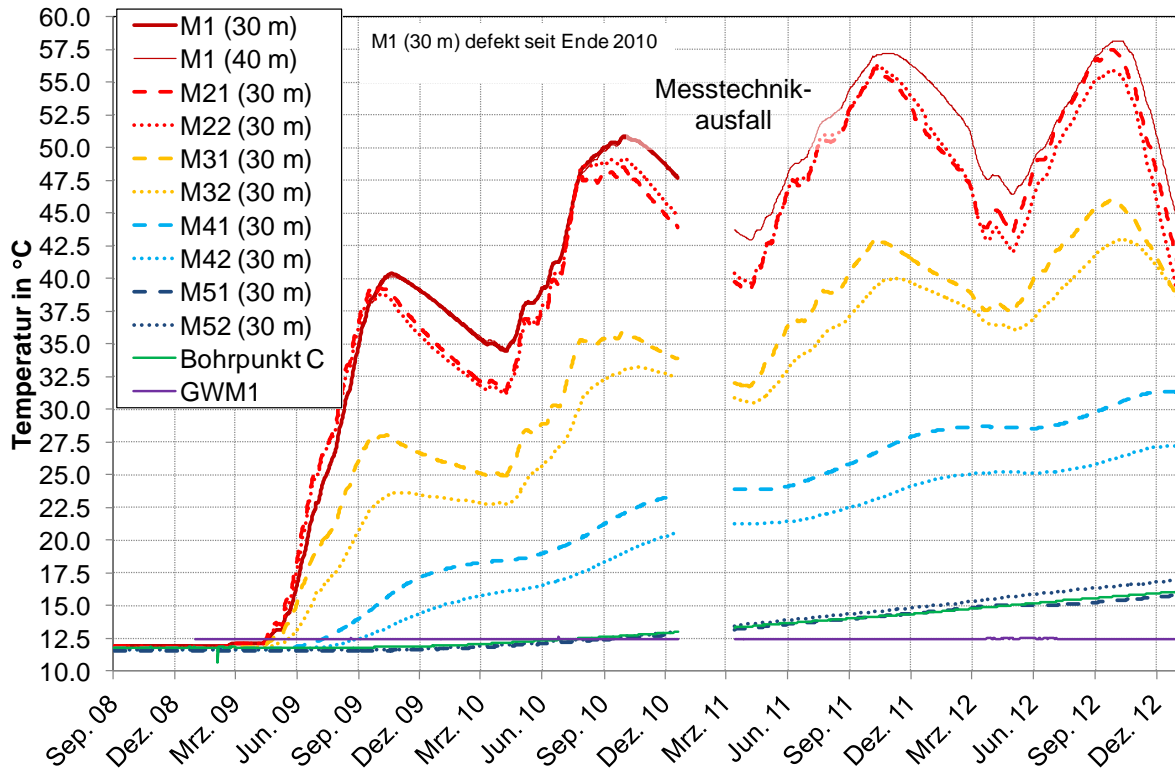


Abb. 4: Temperaturen im und um den Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim

#### 4. Simulation des Erdsonden-Wärmespeichers

Das thermische Verhalten des Erdsonden-Wärmespeichers wurde mit TRNSYS [4] und dem Superposition Borehole Model (SBM) [5], [6] nachgebildet, um darauf aufbauend Simulationen des Gesamtsystems durchführen zu können. In der Simulation des ESWSP wurden die Positionen der EWS entsprechend des realisierten Speichers festgelegt und es wurden in vertikaler Richtung fünf Schichten definiert, um die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität der verschiedenen Bodenschichten und der Wärmedämmung berücksichtigen zu können. Aufgrund von Messtechnikausfällen konnten keine gemessenen Volumenströme und Temperaturen für die Simulation verwendet werden. Stattdessen wurde auf die in den Jahren 2009 bis 2011 gemessene Wärmemenge zurückgegriffen und es wurden daraus für einen festgelegten Zeitraum konstante Beladetemperaturen

und Volumenströme abgeleitet. Am Ende der Simulation wurde das Temperaturprofil abgespeichert und kann somit als Starttemperaturprofil zur Simulation des Gesamtsystems genutzt werden.

In Abb. 5 ist das simulierte vertikale Temperaturprofil für eine Speicherhälfte dargestellt. Der Speicher wurde in der Simulation in vier symmetrische Abschnitte eingeteilt, unterschiedliche hydraulische Durchlässigkeiten oder unterschiedliche Stoffeigenschaften in horizontaler Richtung können durch das Simulationsmodell nicht berücksichtigt werden. Die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Temperaturen ist für den beabsichtigten Zweck (Starttemperaturfeld für die Gesamtsimulation) ausreichend und aufgrund der Messtechnikausfälle ist eine genauere Simulation ohnehin nicht möglich. Die Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Temperaturen betragen am Simulationsende (31.12.2011) an der Messlanze M1 ca. 1 bis 2,5 Kelvin und an den Messlanzen M31 und M32 ca. 3 bis 6 Kelvin, wobei die Abweichungen an M31 größer sind als an M32, da sich die Wärme in der Realität nicht radialsymmetrisch ausbreitet, siehe Abschnitt Messergebnisse.

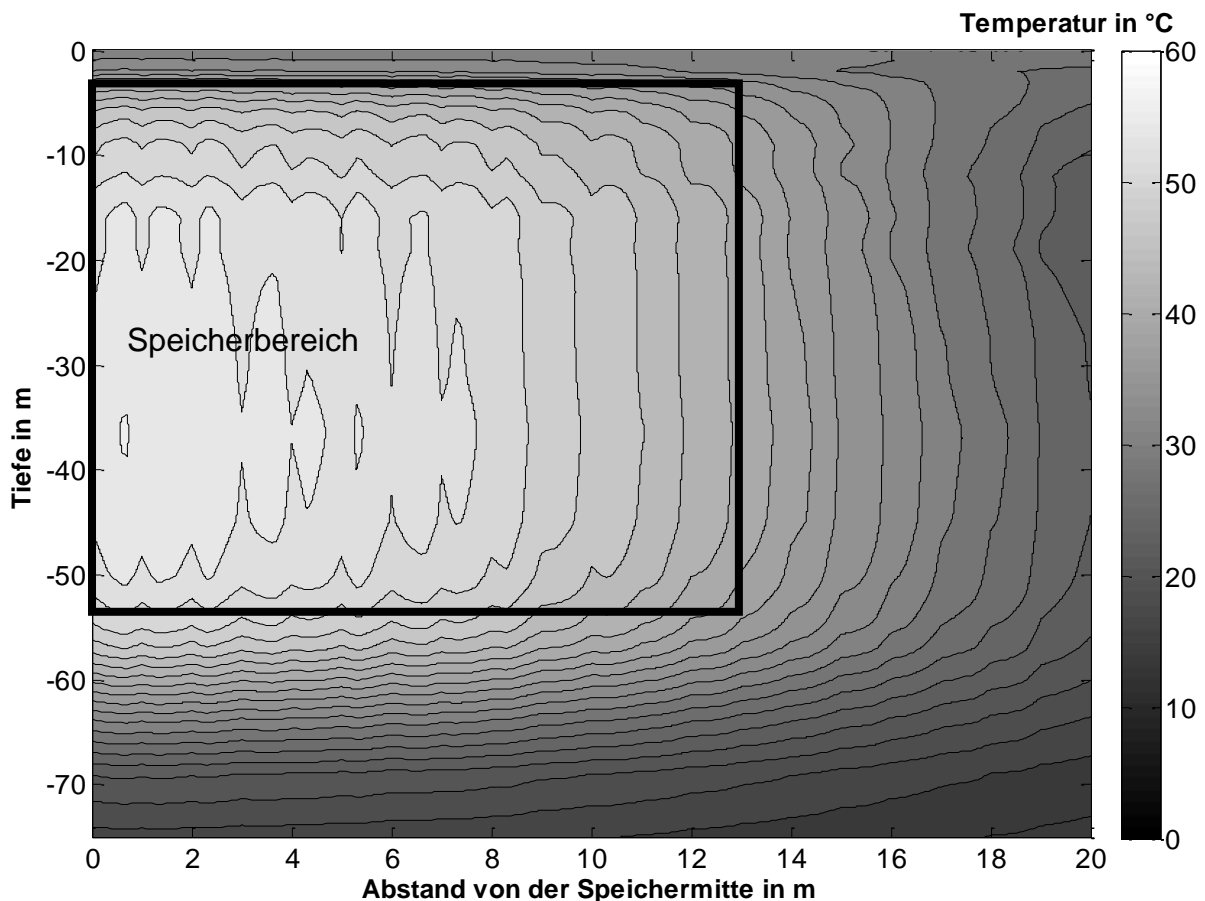


Abb. 5: Simuliertes vertikales Temperaturprofil im ESWSP (Speicherhälfte) Ende 2011

## 5. Zusammenfassung

Der im Jahr 2008 errichtete ESWSP wurde in den ersten vier Betriebsjahren auf eine Maximaltemperatur von 58 °C (Oktober 2012) erwärmt. Im Frühjahr 2012 konnte der ESWSP nach der Inbetriebnahme der Wärmepumpe erstmals entladen werden, allerdings war die Entladewärmemenge im Herbst / Winter 2012 aufgrund der milden Temperaturen relativ gering. Im Jahr 2011 wurde noch ohne die Nutzung saisonal gespeicherter Solarwärme ein solarer Deckungsanteil von 35,8 % erreicht. Es ist zu erwarten, dass nach der Inbetriebnahme der Wärmepumpe im Frühjahr 2012 der geplante solare Deckungsanteil von 50 % erreicht wird.

## 6. Literatur

- [1] Bauer, D.; Heidemann, W.; Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Ochs, F.; Panthalookaran, V.; Raab, S.: Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher, Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607J (Juni 2005 bis Juli 2008), Stuttgart, 2009.
- [2] Bauer, D.; Drück, H.; Heidemann, W.; Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Ochs, F.: Solarthermie2000plus: Wissenschaftlich technische Begleitung des Förderprogramms Solarthermie2000plus zu solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicherung, Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0329607P (August 2008 bis September 2012), Stuttgart, 2013.
- [3] Nußbicker-Lux, J.; Drück, H.: Solare Nahwärmeversorgung in Crailsheim mit 7500 m<sup>2</sup> Kollektorfläche, OTTI – 22. Symposium Thermische Solarenergie Kloster Banz, 09.-11.05.2012.
- [4] Klein, S. A.; et al: A Transient System Simulation Program (TRNSYS), Version 17, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin – Madison, 2009.
- [5] Eskilson, P.: Superposition Borehole Model, Manual for Computer Code, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Schweden, 1986.
- [6] Holst, S.: Type 146 TRNSBM – Modified Version for separate ground layers, TRANSSOLAR, 1997.
- [7] Riegger, M.: Saisonaler Erdsonden-Wärmespeicher in Crailsheim, bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, 09/2008.

*Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 0329607P aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.*