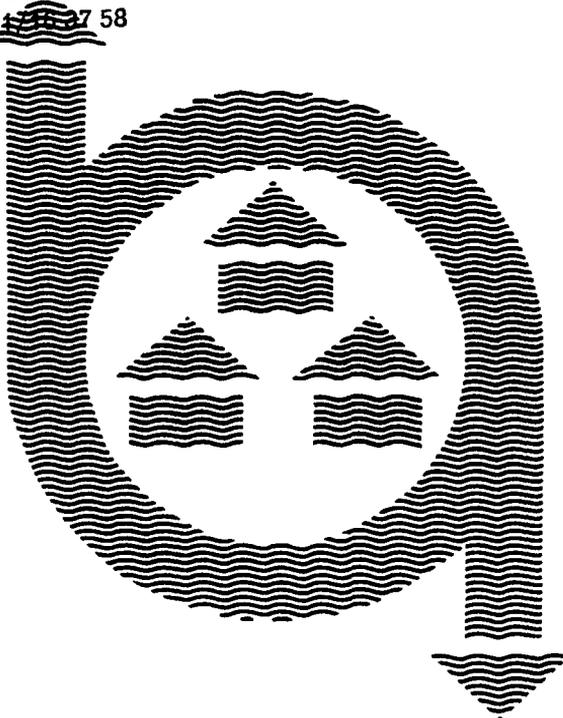


# Untersuchungen zur Kalkabscheidung aus Grundwasser von Aquiferwärmespeichern mit einem mobilen Testgerät

**INSTITUT WAR — Bibliothek —**  
Wasserversorgung, Abwassertechnik  
Abfalltechnik und Raumplanung  
Technische Universität Darmstadt  
Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt  
TEL. 0 61 51/16 36 59 + 16 27 48  
FAX 0 61 51/16 27 58

10 SBS 183



## Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung .....	10
	Abstract .....	11
<b>1</b>	<b>Einführung und Problemstellung .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Thermische Speicher im Untergrund .....</b>	<b>16</b>
2.1	Allgemeines .....	16
2.2	Oberflächennahe Geothermie .....	16
2.3	Grundlagen der Speichertechnologien .....	19
2.4	Einbindung in Energieversorgungssysteme .....	22
2.5	Historische Entwicklung und Status Quo .....	25
<b>3</b>	<b>Aquiferwärmespeicher .....</b>	<b>28</b>
3.1	Überblick .....	28
3.1.1	Systembeschreibung .....	28
3.1.2	Systemvarianten und -auslegung .....	29
3.2	Wärmeübertragung in Aquiferwärmespeichern .....	31
3.2.1	Allgemeines .....	31
3.2.2	Betriebserfahrungen .....	36
3.2.3	Erfassung mineralischer Ablagerungen .....	37
3.3	(Bio-)Geochemische Wechselwirkungen und Mechanismen .....	38
3.3.1	Belagbildung und Verstopfung .....	40
3.3.2	Carbonate .....	41
3.3.3	Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und assoziierte Systeme .....	44
3.3.4	Methoden zur Vorhersage der Belagbildung .....	50
3.4	Vermeidung von Belagbildung und Verstopfung .....	53
3.4.1	Konventionelle Methoden .....	53
3.4.2	Umweltschonende Behandlungsmethoden gegen Kalkab- lagerungen .....	55
3.5	Schlussfolgerungen .....	58
<b>4</b>	<b>Zielsetzung .....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>Entwicklung eines Scaling-Testverfahrens .....</b>	<b>60</b>
5.1	Versuchsdesign .....	60
5.2	Aufbau und Funktion des Testgeräts .....	64
5.2.1	Versuchsaufbau .....	64
5.2.2	Modul zur chemischen Konditionierung von Grundwasser .....	68
5.2.3	Regelstrategien .....	70
5.2.3.1	Aufheizen von Grundwasser .....	70
5.2.3.2	Konditionierung von Grundwasser .....	71
5.3	Probennahme und Analytik .....	72
5.3.1	Probennahme und <i>in-situ</i> -Messungen .....	72
5.3.1.1	Grundwasser .....	72
5.3.1.2	Ablagerungen im Wärmeübertrager .....	73

5.3.1.3	Reinigungslösung des Plattenwärmeübertragers.....	74
5.3.2	Analytik .....	75
5.3.2.1	Grundwasser und Reinigungslösung .....	75
5.3.2.2	Qualitätskontrolle.....	77
5.4	Erprobung des Testgeräts .....	80
5.4.1	Reglerverhalten .....	80
5.4.2	Temperaturverhältnisse im PWT.....	83
5.4.3	Wärmeübertragung .....	85
5.4.4	Kalkbelagbildung als Funktion der Versuchsdauer.....	87
5.4.5	Kalkbelagbildung als Funktion der Temperatur.....	92
5.4.6	Reproduzierbarkeit der Kalkabscheidung .....	94
5.5	Praktische Folgerungen für den Scaling-Test.....	95
<b>6</b>	<b>Erprobung und Anwendungsbeispiele des Scaling-Tests .....</b>	<b>97</b>
6.1	Untersuchungsstandorte und Grundwässer .....	97
6.1.1	Hydrogeologische Ausgangssituation .....	97
6.1.2	Hydro(geo-)chemische Charakterisierung der Grundwässer .....	101
6.1.3	Geochemische Simulationen .....	106
6.1.3.1	Spezierung ausgewählter Inhaltsstoffe .....	106
6.1.3.2	Sättigungszustände ausgewählter Minerale .....	109
6.2	<i>On-site</i> -Untersuchungen .....	114
6.2.1	Scaling-Tests an stark mineralisierten Grundwässern.....	114
6.2.2	Standardisierung des Scaling-Tests .....	117
6.2.3	Ableitung eines Ca-Schwellenwertes .....	119
6.2.4	Scaling-Tests an carbonatischen Grundwässern .....	124
6.2.4.1	Grundwässer GW4, GW5 und GW6 .....	124
6.2.4.2	Grundwasser GW7 .....	129
6.2.5	Einfluss extremer Prozessbedingungen auf die Kalkabscheidung ...	132
6.2.5.1	Erhöhung der Ionenstärke.....	133
6.2.5.2	Erhöhung der Aufheiztemperatur .....	135
6.2.5.3	Temperaturdifferenz zwischen Primär- und Sekundärkreislauf.....	139
6.3	Konditionierung von Grundwasser mit Kohlendioxid .....	140
6.3.1	Versuchsbedingungen.....	141
6.3.2	Scaling-Tests mit kontinuierlicher CO <sub>2</sub> -Beaufschlagung .....	145
6.3.3	Scaling-Tests mit intermittierender CO <sub>2</sub> -Beaufschlagung .....	148
6.4	Weitere Mineralphasen im Versuchsaufbau .....	151
<b>7</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>157</b>
7.1	Aufbau und Betrieb des Testgeräts .....	157
7.2	Scaling-Test .....	158
7.3	Ergebnisse der Scaling-Tests .....	160
7.4	CO <sub>2</sub> -Beaufschlagung von Grundwasser.....	161
7.5	Praktische Folgerungen und Empfehlung .....	163
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>165</b>

---

<b>9</b>	<b>Summary .....</b>	<b>168</b>
<b>10</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>171</b>
<b>11</b>	<b>Verzeichnis der Bilder, Tabellen, Abkürzungen und Symbole .....</b>	<b>183</b>
11.1	Bilder .....	183
11.2	Tabellen .....	186
11.3	Abkürzungen und Symbole .....	187
<b>12</b>	<b>Anlagen .....</b>	<b>190</b>
12.1	Datenblatt Plattenwärmeübertrager .....	190
12.2	Kalibrierdaten Widerstandsthermometer.....	191
12.3	Wiederfindung Mg, Na und K.....	191
12.4	Geochemische Simulationen .....	192
12.5	Chemische Analyse modifiziertes Grundwasser.....	196
12.6	Analysedaten Scaling-Tests .....	197
	<b>Anhang</b>	
	Verzeichnis aus der Schriftenreihe "Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft" .....	202