



Jörg Böhmig

HAMBURG WASSER erprobt Aquiferspeicher

In einem in seiner Größenordnung bundesweit einmaligen Projekt erforscht HAMBURG WASSER gemeinsam mit seinen Tochterunternehmen CONSULAQUA und HAMBURG ENERGIE die Nutzung eines tief liegenden Grundwasserleiters zur Speicherung großer Wärmemengen. Im Rahmen einer versuchstechnischen Erprobung wurde eine Dublette aus einem 250 m tiefen Versuchsbrunnen und einem 230 m tiefen Hilfsbrunnen errichtet, in die in drei Phasen bis zu 85 °C heißes Wasser ein- und wieder ausgeleitet geleitet worden ist. Der Pilotversuch wurde mit einem umfangreichen Messprogramm begleitet. Vorliegende Ergebnisse bestätigen: Die Technologie könnte künftig eine wichtige Rolle bei der Wärmeversorgung der Millionenmetropole Hamburg spielen.



Das Klärwerk Hamburg befindet sich mitten im Hafen

Mehr als die Hälfte des Energiebedarfs in Deutschland wird für Bereitstellung von Wärme benötigt. Die Wärmeversorgung der Bevölkerung basiert in Deutschland nach wie vor nahezu vollständig auf der Nutzung fossiler Energieträger. Wie andere Städte steht auch die Freie und Hansestadt Hamburg (FHH) vor der Herausforderung, die Fernwärmeversorgung der Bevölkerung zugunsten einer CO₂-armen und auf regenerativen Energien basierenden Versorgung umzugestalten. Eine wichtige Rolle spielen dabei die Klimaschutzziele des Hamburger Senats, die eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 50 % bis 2030 und 80 % bis 2050 vorsehen, sowie die Zielsetzung der Bundesregierung, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen.

Gerade in urbanen Ballungsräumen stehen ganzjährig industrielle Abwärmequel-

len zur Verfügung (Müllverbrennungsanlagen, Kraftwerke, Hüttenwerke etc.). Das sich hieraus ergebende Wärmedargebot korreliert aber nicht mit dem Wärmebedarf. Um Dargebot und Bedarf miteinander zu verbinden, sind leistungsstarke saisonale Wärmespeicher erforderlich.

In einem Pilotversuch auf dem südlich der Elbe gelegenen Gelände des Klärwerks Hamburg wurde die Wärmespeicherfähigkeit eines tief liegenden, versalzten Grundwasserleiters erkundet. Wesentliche Ziele des Pilotversuchs waren neben der Erkundung der lokalen Hydrogeologie und der Ermittlung hydraulischer, hydrochemischer und thermischer Kenngrößen vor allem ein Nachweis der Anwendbarkeit und die Einschätzung der Effizienz der Speichertechnologie.

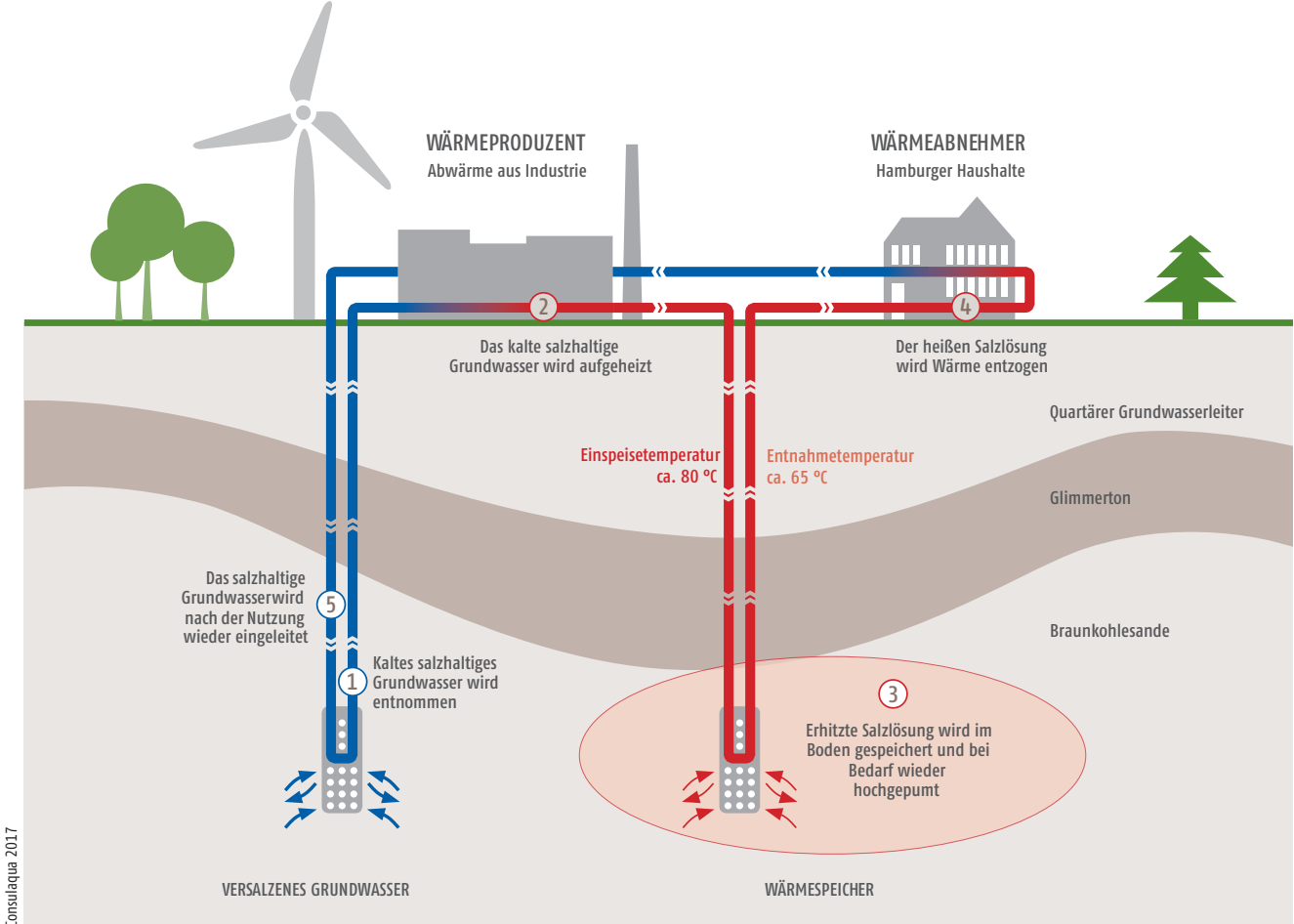
Für das im Januar 2017 begonnene Projekt bestand von Beginn an ein enger Zeit-

plan, da seitens der FHH spätestens im Herbst eine auf den Versuchsergebnissen beruhende Entscheidungsgrundlage über die Einbindung eines Speichers in ein Gesamtwärmeconcept benötigt wurde.

Konzept Aquiferspeicher

Die Funktionsweise des Aquiferspeichers ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Speicher besteht aus mindestens einer Brunnendublette und einem oberirdischen Anlagenteil mit einem Wärmetauscher zur Übertragung der Wärme in bzw. aus einem separaten Wärmekreislauf (Abb. 2 & 3).

In der Einspeicherphase wird kaltes Grundwasser aus einem Hilfsbrunnen gefördert, auf Temperaturen von 60 bis 85 °C aufgeheizt und über den Produktionsbrunnen in den gleichen Grundwasserleiter infiltriert. In der erzeugten Wärmeblase wird die Wärme im Grundwasser



Consulaqua 2017

Abb. 1 – Prinzip des Aquiferspeichers

und im Feststoffgerüst des Grundwasserleiters gespeichert. Nach der Speicherung wird das heiße Grundwasser zurückgeführt, die Wärme übermäßig entzogen und das abgekühlte Wasser wieder in den Hilfsbrunnen infiltriert. Das für die Wärmespeicherung genutzte Grundwasser wird somit in einem Kreislauf geführt. Damit bleibt der hydraulische, thermische und hydrochemische Auswirkungsbereich des Aquiferspeichers weitestgehend auf einen definierten Raum begrenzt. Der Kontakt des erwärmten Wassers mit kühlem Grundwasser in den Randbereichen des Spei-

chers führt zu einem Wärmeverlust, der auf der Basis theoretischer Berechnungen auf ca. 25 % geschätzt wurde. Die grundsätzliche Anordnung für den Pilotversuch entspricht der späteren Anordnung im großtechnischen Maßstab.

Hydrogeologische Situation

Der Pilotversuch wurde auf einem von HAMBURG WASSER genutzten Standort im Hafengebiet in direkter Nähe zur Elbe durchgeführt. Um potenzielle Nutzungskonflikte mit der Trinkwassergewinnung zu vermeiden, wurde für den Pilotversuch

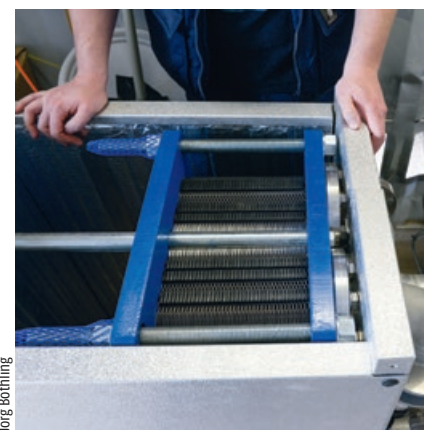
ein Standort ausgewählt, für den ein versalzene Grundwasser angenommen werden konnte.

Zielhorizont für den Pilotversuch waren die Oberen Braunkohlesande (OBKS), die am Standort auf Grundlage eines Strukturmodells für den Großraum Hamburg in Teufen zwischen 175 und 275 m erwartet wurden. Bei den OBKS (Tertiär: Miozän) handelt es sich um Mittel- bis Feinsande, die teilweise von schluff- und braunkohlehaltigen Schichten durchsetzt sind. Die OBKS werden von einer ca. 150 m mächtigen Glimmertonschicht überlagert.



Jörg Böhling

Abb. 2 – Anlagentechnik



Jörg Böhling

Abb. 3 – Der Wärmetauscher



Abb. 4 – Klärwerk im Hamburger Hafen

Abb. 5 – Das Versuchsfeld



Überdeckende Quartärschichten erreichen eine Gesamtmächtigkeit von etwa 20 m. Die Basis der OBKS wird vom Hamburger Ton gebildet. Erst im weiteren Umfeld schneiden elsterzeitliche Rinnen in die tertiären Schichten ein. Etwa 3 km nördlich befindet sich der für die Salinität der OBKS verantwortliche Salzstock Othmarschen-Langefelde.

Durchlässigkeitsbeiwerte der OBKS liegen üblicherweise zwischen 1×10^{-4} und 5×10^{-5} m/s. Bei einem von Nordwest nach Südost gerichteten natürlichen hydraulischen Gradienten von ca. 0,2 ‰ liegt die natürliche Fließgeschwindigkeit des Grundwassers bei etwa 0,3 bis 1,0 m/a.

Brunnenbau, Versuchsdurchführung und Monitoring

Nach Projektbeginn kristallisierte sich schnell der gewählte Standort auf dem Klärwerksgelände als aussichtsreich heraus (Abb. 4 & 5). Nach einer intensiven Planungsphase wurde Ende Mai 2017 mit den Arbeiten zur Erstellung des Hilfsbrunnens und des Versuchsbrunnens begonnen. Die Brunnen wurden Mitte August abgenommen, sodass der Pilotversuch planmäßig Ende August starten konnte.

Entsprechend den Erwartungen traf man den Zielhorizont in einer Teufe von

165 m an. Die OBKS sind am Standort etwa 85 m mächtig. Im oberen Abschnitt der OBKS handelt es sich überwiegend um schwach feinsandige Mittelsande, die nach unten feinkörniger werden.

Der Ausbau der Produktionsbrunnen erfolgte in DN 100 in Teufen zwischen 175 m bis 245 m mit Edelstahl-Wickeldrahtfiltern. Für den Hilfsbrunnen wurde eine vergleichbare Ausführung mit verkürzter Fil-

terstrecke gewählt. Bei der Festlegung des Ausbaus und der Ausbaumaterialien berücksichtigte man die besonderen Anforderungen während des Versuchsbetriebs, das heißt, hohe Salinität und hohe Temperaturen sowie Temperaturwechsel.

Mit Chloridkonzentrationen von über 280 mg/l und Sulfatkonzentrationen um 400 mg/l (Tab. 1) wurde die erwartete Salinität im Grundwasser bestätigt. Auf-

Tabelle 1 – Grundwasserbeschaffenheit OBKS zu Beginn des Pilotversuchs

Parameter	Einheit	Produktionsbrunne	Hilfsbrunnen
pH-Wert		7,56	7,52
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	2.040	1.324
Temperatur	°C	13,7	13,6
Natrium	mg/l	242	50
Calcium	mg/l	157	207
Magnesium	mg/l	22	17
Eisen (gesamt)	mg/l	0,675	0,51
Mangan	mg/l	0,154	0,274
Chlorid	mg/l	288	66
Sulfat	mg/l	409	429
TOC	mg/l	6,1	3,4
DOC	mg/l	5,3	1,8

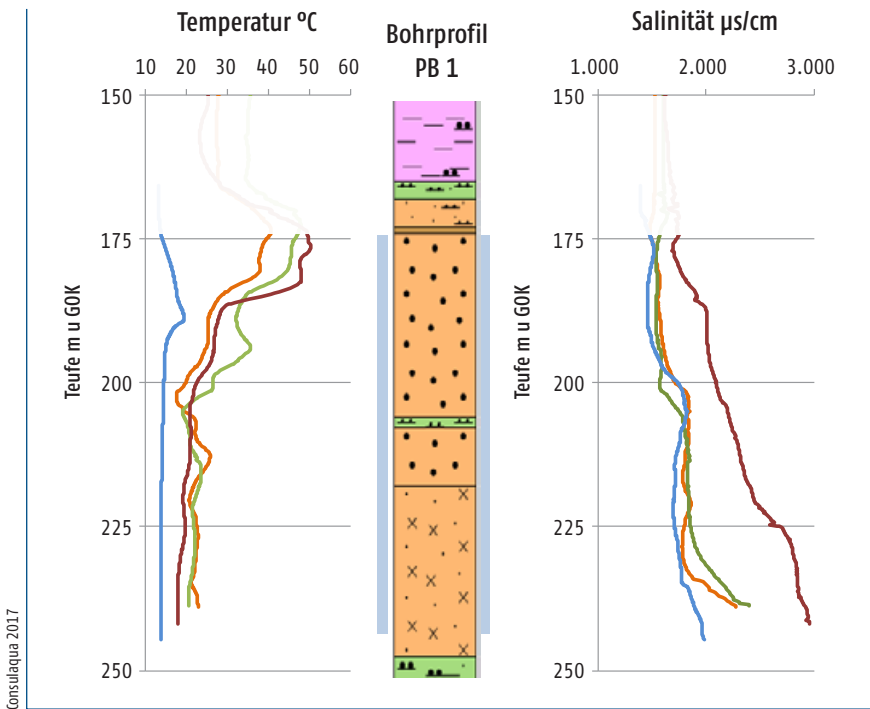


Abb. 6 – Schichtenprofil des Versuchsbrunnens sowie Temperatur- und Leitfähigkeits-Teufenprofile zur Beobachtung der pulsierenden Wärmeblase und der Änderungen in der Salinitätsverteilung

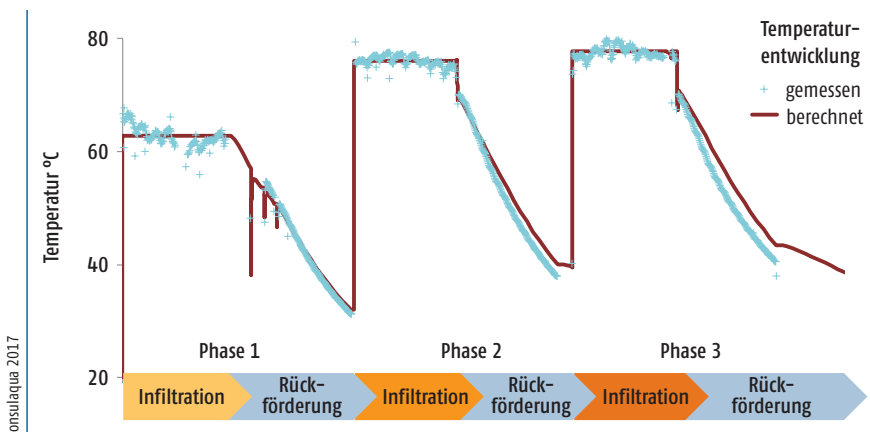


Abb. 7 – Zyklischer Test der Wärmeeinspeicherung und Ausspeicherung – gemessene und mit einem Wärmetransportmodell nachmodellerte Temperaturentwicklung am Brunnenkopf des Versuchsbrunnens

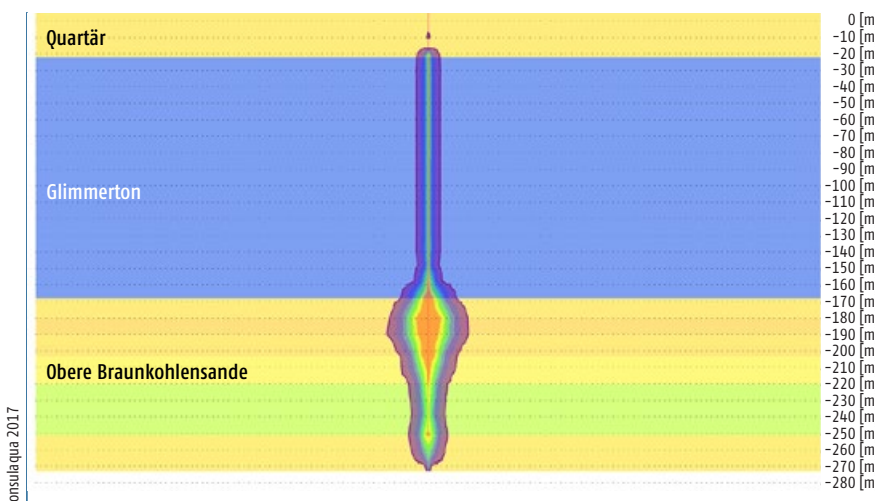


Abb. 8 – Modellberechnete Ausbreitung der Wärmeblase am Ende des dritten Infiltrationszyklus

genommene Temperatur- und Salinitätsprofile (Abb. 6) zeigen, dass die Salinität nach unten hin zunimmt.

Der Pilotversuch begann am 24. August 2017. In drei Einleitphasen wurde über jeweils acht Tage zwischen 65 und 85 °C heißes Grundwasser mit einem Volumenstrom von 15 bis 25 m³/h in den Pilotbrunnen eingeleitet. Nach kurzem Stillstand erfolgte die Rückförderung und Wiedereinleitung in den Hilfsbrunnen. Insgesamt wurden drei Infiltrations- und Förderzyklen durchlaufen, wobei die jeweiligen Zyklen in etwa gleich lang waren (Abb. 7).

Um die hydraulischen, thermischen und hydrochemischen Auswirkungen einer Wärmespeicherung zu erfassen, wurde der Pilotversuch durch ein umfangreiches Mess- und Untersuchungsprogramm begleitet.

Während der Zyklen wurden die Volumenströme, Druck (Wasserstand) und Temperatur aufgezeichnet. In Stillstandszeiten zwischen den Förder-/Infiltrationszyklen wurden Sondenmessungen durchgeführt, um die Änderung der Grundwasserbeschaffenheit in der Vertikalen zu erfassen. Die Beschaffenheitsentwicklung der geförderten Grundwässer wurde engmaschig überwacht, um Rückschlüsse zu Art- und Umfang von Minerallösungs- und Fällungsprozessen im hydraulisch-thermisch beeinflussten Untergrund, in den Brunnen und im Heizkreislauf zu erlauben (Stichwort „Scaling“ bzw. Brunnenalterung). Der Zustand bzw. die Zustandsänderung der Brunnen soll durch den Vergleich von Kamerabefahrungen vor und nach dem Pilotversuch erfasst werden. Ebenso sollen mögliche Ergiebigkeitsänderungen anhand von Pumpversuchen und Flowmeter-Messungen abgeleitet werden. Da die Temperaturen im Versuchsbrunnen für diese Untersuchungen noch zu hoch sind, stehen die nachlaufenden Untersuchungen noch aus.

Wärmetransportmodellierung

Als grundlegendes Planungsinstrument für den Pilotversuch wurde ein dreidimensionales numerisches Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell mit dem Finite-Elemente-Modell FEFLOW 7.0 von DHI-WASY aufgebaut. Ein zunächst generisches Modell wurde anhand der im Projektverlauf gewonnenen Daten sukzessiv für den Standort angepasst und anschließend anhand der hydraulischen und thermischen Daten kalibriert.

Damit steht für den Standort ein kalibriertes Grundwasserströmungs- und Wär-

metransportmodell zu Verfügung, mit dem die hydraulisch-thermischen Prozesse quantitativ abgebildet und bilanziert werden können. Abbildung 7 zeigt anhand des Vergleichs zwischen gemessenen und modellberechneten Temperaturverläufen die bisher erreichte Güte der Modellkalibrierung. Dieses Modell bildet die Grundlage für die Planung einer großtechnischen Umsetzung eines Aquiferspeichers.

Abbildung 8 zeigt einen modellberechneten Profilschnitt durch die erzeugte Wärmeblase am Ende des dritten Einleitzyklus. Die leicht „birnenartige“ Form beruht (1) auf der Lithologie und vertikaler Durchlässigkeitsverteilung, (2) auf der temperaturabhängigen Viskosität des infiltrierenden Grundwassers und damit dem etablierten Temperaturfeld im Untergrund und (3) temperaturabhängigen Dichteeffekten. Die modellberechnete Form der Wärmeblase wird durch die gemessenen vertikalen Temperaturprofile (Abb. 6) bestätigt.

Mit dem kalibrierten Modell und den darin enthaltenen Parametern für das Wärmetransport- und Wärmespeicherverhalten wurde der langfristige Betrieb in einer großtechnischen Umsetzung simuliert. Erfreulicherweise zeigen diese Modellrechnungen geringere Werte für den Wärmeverlust an, als ursprünglich angenommen.

Neben hydraulisch-thermischen Prozessen wurden auch Beschaffenheitsänderungen erfasst und prozessorientiert versuchsbegleitend ausgewertet. So wurden anhand hydrochemischer Modelle die von der Temperatur und der Beschaffenheit abhängigen Mineralbildungsprozesse (Scaling) prognostiziert und Additivdosierungen zu deren Minderung festgelegt. In einem zukünftigen Arbeitsschritt sind mit diesen Modellen auch die hydrochemisch-thermischen Reaktionen und Prozesse innerhalb der erzeugten Wärmeblase zu identifizieren und zu quantifizieren. Letztlich dient dieses Prozessverständnis dazu, Aussagen zum Langzeitbetriebsverhalten eines Aquiferspeichers zu ermöglichen.

Ausblick

Die Vielzahl an erhobenen und noch zu erhebenden Daten müssen weiter ausgewertet werden. Auch sind weitere Tests mit der erstellten Brunnendublette wünschenswert. Aufgrund der positiven Ergebnisse und dem hohen Anwendungspotenzial hat HAMBURG WASSER die für den Versuch konzipierte Anlage mit Wärmetauschern, Mess-Einrichtungen etc. übernommen und kann diese für weitere Tests zur Verfügung stellen.

Bereits jetzt kann mit dem Pilotversuch die prinzipielle Machbarkeit einer saisonalen Wärmespeicherung an einem Standort im tieferen Untergrund Hamburgs belegt werden. Die Testergebnisse bestätigen das große Potenzial eines Aquiferspeichers am untersuchten Standort.

Nach ersten Berechnungen könnte eine Anlage mit drei Brunnendubletten jährlich rund 140 bis 160 Mio. Kilowattstunden Wärme speichern. Dies entspräche dem Bedarf von rund 7.000 Haushalten. Eine Erweiterung der Anlage mit zusätzlichen Brunnendubletten wäre prinzipiell möglich. Damit wäre ein Aquiferspeicher ein umso wichtigerer Baustein für eine „Hamburger Wärmewende“.

Danksagung

Besonderer Dank gilt folgenden Firmen und Institutionen. Ihrer Fachkompetenz und ihrem Engagement ist es zu verdanken, dass der Versuch innerhalb eines engen Zeitplans sach- und termingerech durchgeführt wurde und eine Vielzahl an Erkenntnissen gebracht hat: HAMBURG WASSER (Eigentümer, Analy-

tik, Verwaltung), HAMBURG ENERGIE (Projektsteuerung Gesamtprojekt), NBB NORD Bohr- und Brunnenbau GmbH (Bohrarbeiten), Bremer Pro-Aqua Wasser- & Abwasser GmbH (Heizanlage) sowie dem gesamten gemeinsamen Projektteam von HAMBURG WASSER und CONSULAQUA.

Autoren

Kai-Justin Radmann
Dr. Carsten Hansen
CONSULAQUA Hamburg
Ausschläger Elbdeich 2
20539 Hamburg
Tel.: 040 7888-89547
kai.radmann@consulaqua.de
www.consulaqua.de

Dr. Michael Beckereit
HAMBURG WASSER
Billhorner Deich 2
20539 Hamburg
www.hamburgwasser.de





Gemeinsam für mehr Wasser









STÜWA Konrad Stükerjürgen GmbH
Tel.: 05244 / 407-0
www.stuewa.de