

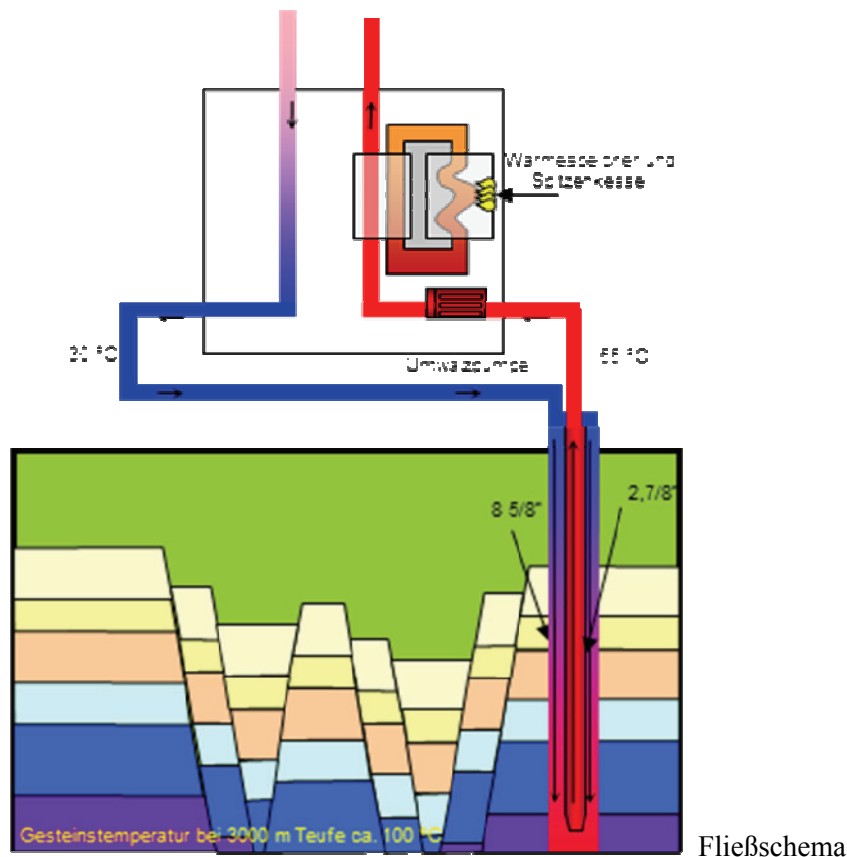
Erdwärme-Sonden - neue Entwicklungen

ANDREAS TOENIES

Daldrup & Söhne AG
Lüdinghauser Straße 42 - 46, 59387 Ascheberg
T: +49 2593 9593-0, F: +49 2593 9593-31, E: a.toenis@daldrup.eu



Anders als bei den hydro- oder petrothermalen Systemen wird bei der tiefen Erdwärmesonde das Wärmeträgerfluid mittels eines coaxialen Sondenrohrs in einem geschlossenen Kreislauf ohne unmittelbaren Kontakt zum Grundwasser bzw. zum angrenzenden Gebirge gefördert. Geochemische Prozesse, die zu einer negativen Beeinflussung des Gesamtsystems führen können, sind somit nicht vorhanden. Das Thema „Tiefe Erdwärmesonde“ bietet Vortragsstoff, der veranstaltungsfüllend sein kann. Von der geologischen Bohrspurfestlegung über die Bohrungsplanung, die Genehmigungsphase, das Erstellen der Bohrung bis hin zur Komplettierung und In-Betrieb-Setzung einschließlich der dabei vorhandenen geologischen und technischen Risiken sowie zu den bergrechtlichen Belangen gibt es eine Unmenge von interessanten, spannenden und teilweise auch verwirrenden Aspekten, über die man vortragen könnte. Ja, man wundert sich, was für Hürden man nehmen muss, wenn man eine tiefe Erdwärmesonde plant, erstellt und in Betrieb nimmt.



In diesem Vortrag beschäftigen wir uns aber nicht mit der Planung und Erstellung einer Bohrung sowie den damit zusammenhängenden Voraussetzungen, auch nicht mit Fündigkeitsrisiken. Die sind bei einer tiefen Erdwärmesonde, wie bereits bei den Projekten in Aachen und in Arnberg erfolgreich erstellt, nicht vorhanden. Nein, ich möchte Ihnen die Problematik der Entwicklung eines neuen, für die Anwendung in Bohrungen von mehr als 3000 m Tiefe geeigneten Förderrohres näherbringen.

Betrachtet man den Kenntnisstand in der Tiefbohr- und Fördertechnik und auch die Entwicklung in der flachen Geothermie, sollte man eigentlich annehmen, dass geeignete Sondenrohre zur Genüge am Markt verfügbar sind. Dem ist aber nicht so, wie wir bei den Projekten SuperC der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) in Aachen und Erlenbach der Stadtwerke Arnberg GmbH leider feststellen mussten. Bis zu dem Zeitpunkt unserer Entscheidung zur Entwicklung eines neuen Förderrohrsystems wurden verschiedene Werkstoffe in den Bohrungen SuperC und Arnberg-Erlenbach eingebaut. Mit dem bekannten Misserfolg in Arnberg und dem Teilerfolg im Aachener Projekt.

Sowohl die Planer des Arnberger- wie auch des Aachener Projekts gingen zunächst davon aus, dass GFK als Werkstoff die notwendigen Eigenschaften erfüllt. Auch deren Hersteller und Lieferanten bestätigten stets die hervorragenden thermischen und auch insbesondere mechanischen Eigenschaften.

Wie sich jedoch immer wieder herausstellte, traf dieses aber nur für GFK-Rohrsysteme zu, die horizontal in Rohrgräben verlegt wurden. Das bei den Bohrungen eingesetzte doppelwandige GFK-Koaxialsondenrohr war ein Prototyp, der im Vorfeld der Verwendung als Bohrungsausbau noch nie in einer vertikalen Lage über eine größere Teufe eingebaut wurde.

Unter unserer Federführung suchte die Stadtwerke Arnsberg GmbH seit der Bohrungsfertigstellung Erlenbach 2 im März 2008 nach einem für diese Art von „Tiefen Erdwärmesonden“ geeigneten Förderrohr, das die hohen Voraussetzungen erfüllt.

Im einzelnen umfasst der Katalog dieser Voraussetzungen für eine tiefe Erdwärmesonde (TEWS) folgende Faktoren:

- Hohe statische Stabilität
- Robuste Verbindungstechnik
- Dichte Verbindungen der Rohreinzelstücke
- Geringe Oberflächenrauigkeit – geringer Strömungswiderstand
- Nahezu laminare Strömungszustände im Primärkreislauf
- Optimale Wärmedurchgangskoeffizienz / Wärmedurchgangswiderstand
- Temperaturbeständigkeit (min. 100°C)
- Keine Zersetzung bzw. Korrosion der gewählten Werkstoffe / Langlebigkeit
- Leichtes Handling
- Wirtschaftliche Montage
- Absolute Wartungsfreiheit
- Umweltverträglichkeit

Die vom Projektplaner vorgesehenen und zum damaligen Zeitpunkt als „State of the Art“ angesehenen GFK-Doppelwandrohre haben den Belastungen in der 2835 m tiefen Geothermiebohrung nicht standgehalten. Auch nach durchgeführter Modifikation durch den Hersteller konnten keine Verbesserungen erzielt werden. Dieser Rohrtyp hat sich damit als gänzlich ungeeignet erwiesen.

In der Bohrung „SuperC“ der RWTH-Aachen, bei dem auch unser Unternehmen mit dem Einbau eines vergleichbaren GFK-Förderrohrs beauftragt wurde, hat man aufgrund der Erfahrungen in Arnsberg von einer Verwendung dieses Werkstoffes abgesehen und statt dessen erstmalig ein Polypropylen-Rohr (Polypropylen = teilkristalliner thermoplastischer Kunststoff) verwendet. Dieser Werkstoff hat sich zwar in energetischer Hinsicht als optimal erwiesen, seine für den Verwendungsfall ungünstigen mechanischen und hydrostatischen Eigenschaften haben jedoch einen Einbau nur bis 2000 m unter schwierigsten Bedingungen ermöglicht - zu wenig, um eine wirtschaftliche Energiegewinnung zu gewährleisten.

Folglich blieb uns nichts anderes übrig, als weltweit nach Alternativen und Neuerungen zu suchen. Es musste für die nach wie vor als Leuchtturmprojekt anzusehende Bohrung Arnsberg-Erlenbach 2 ein Förderrohr entwickelt werden, das nachweislich den beim Einbau in eine 2835 m tiefe Bohrung auftretenden gesamtstatischen Belastungen standhalten kann und gleichzeitig ein optimales Thermoverhalten aufweist. Nun könnte man fragen, warum hat man nicht Stahlrohre verwendet? Schließlich sind bekanntermaßen Stahlrohre in der Erdöl-/Erdgasbranche, im Brunnenbau und in der tiefen hydrothermalen Geothermie als Bohrlochverrohrung und als Förderstrang seit langem erste Wahl.

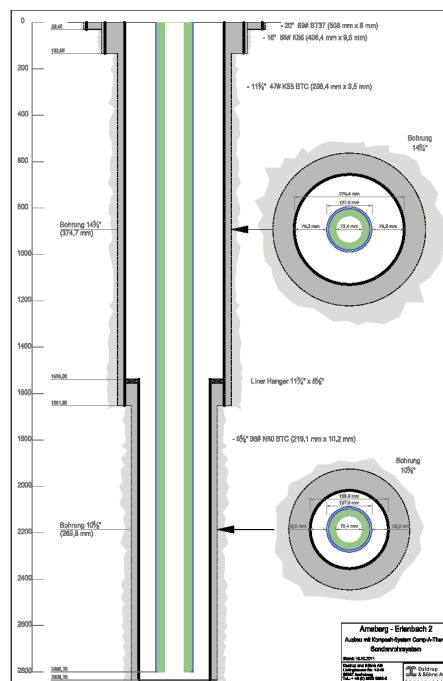
Stahlrohre haben unbestreitbar hervorragende statische Eigenschaften und sind problemlos und ohne großen Aufwand in vertikale wie abgelenkte Bohrungen einbaubar. Stahl mit seinen spezifischen Eigenschaften erfüllt aber nicht das gesamte Spektrum der hohen Anforderungen, die an eine Koaxialsonde gestellt werden. Zwar ist Stahl den Kunststoffen aufgrund der mechanischen Eigenschaften an Zug- und Kollapsfestigkeit weit überlegen, im Bezug auf den Wärmedurchgangskoeffizient aber klar unterlegen. Stahl weist je nach Legierung für den vorgesehenen Einsatzzweck negative Wärmeleitfähigkeiten in Größen von 42 W(m.k) bei niedrig legiertem (z. B. 42 CrMo4) und 15 W(m.k) bei hochlegiertem Stahl (z.B. X5CrNi18-10) auf. Um annähernd die Werte von glasfaserverstärkten Kunststoffen oder Thermoplasten zu erreichen, wären

weitere Maßnahmen zur Erhöhung des Wärmewiderstands notwendig, die den Wärmewiderstandswert erheblich verbessern. Angestrebt wird ein Wärmedurchgangskoeffizient von ca. 0,3 W(m.k).

Dieser geringe Wärmedurchgangskoeffizient ist bei Stahl nur zu erzielen, wenn eine Rohr-in-Rohr-Konstruktion nach dem Prinzip einer Thermoskanne hergestellt wird. Durch die Nutzung eines zweischaligen Systems, dessen Ringraum dauerhaft evakuiert ist, wird der Temperaturengleich der zirkulierenden Flüssigkeit (Innenraum warm und Ringraum kalt) verzögert.

Neben dem Wärmedurchgangskoeffizient spielt die Rohrrauigkeit eine große Rolle. Diese ist bei Stahlrohren größer als bei Kunststoffen. Bei Polypropylen kann sogar die an sich schon geringe Rohrrauigkeit durch Nukleierung noch weiter verbessert werden. Bei einem Stahlrohr kann ein ähnlicher Effekt durch ein „Internal Coating“ erreicht werden, so dass die an sich ungünstigen Parameter verbessert werden. Aufgrund der hohen Kosten und Unsicherheiten in Bezug auf den langfristig evakuierten Ringraum wurde auch dieses System nicht weiter verfolgt.

Es musste also ein System gefunden werden, das die statischen Eigenschaften von Stahl und die Isolierwirkung von Thermoplasten kombiniert. Im Herbst 2011 ist es uns gelungen, ein geeignetes Rohrsystem bis zur Einbaureife zu entwickeln. Mit dem im Sauerland ansässigen Unternehmen aquatherm GmbH aus Attendorn haben wir hierzu einen Partner gefunden, mit dem es erstmalig möglich wurde, ein Förderrohrsystem aus zwei verschiedenen Werkstoffen herzustellen. Dieses Kompositrohr besteht aus einem Stahlrohr (Außenrohr) und einem Polypropylenrohr (Innenrohr).



Koaxialsystem

Den unterschiedlichen Längenausdehnungen der Werkstoffe wurde mit speziell entwickelten Widerlagern und partiellen Lastaufnahmeelementen entgegengetreten.

Somit ist nunmehr gewährleistet, dass sowohl die statischen als auch die energetischen Anforderungen erfüllt werden. Da wir uns jedoch nicht nur auf die theoretischen Überlegungen anhand der verfügbaren Datenlage stützen wollten, wurde das Institut für Erdöl- und Erdgastechnik der Technischen Universität Clausthal (ITE) mit der Überprüfung und Begutachtung dieses Rohrsystems sowohl in theoretischer als auch in praktischer Hinsicht beauftragt. Eine umfangreiche Testreihe wurde gestartet und Berechnungen vorgenommen, deren Ergebnisse in praktischen Tests verifiziert wurden.

Für die Bohrung Erlenbach wurden die nach API schlimmsten Szenarien („Worst Cases“) ermittelt. Die hydraulische Auslegung des Gesamtsystems wurde bereits durch die Bohrlochgeometrie vorgegeben. Daher war auch die Geometrie des Komposittubingstrangs festgelegt:

Die zwei Komponenten des „Comp-A-Therm“ Koaxialförderrohrs:

Außen (Shuttle): OD: 126 mm (5“), ID: 114 mm mit 13 lb/ft aus Stahl.

Innen (Förderrohr): OD 110 mm mit 73,4 mm ID aus Polypropylen

Die Einbautiefe der Sonde wurde unter Berücksichtigung der Längenausdehnung auf zunächst 2700 m (TVD) festgelegt.

Um sicher zu stellen, das es zu keinem Versagen des Koaxialsondenrohres kommt, wurden „worst case“ Berechnungen durchgeführt. Als Rahmenbedingungen wurden dafür festgelegt:

- Eigengewicht ohne Auftrieb für die maximale Axiallastberechnung.
- Auftrieb wird nur für den unteren Abschnitt berücksichtigt.
- Keine Vorspannung, da das Komplettierungsschema keinen Packer vorsieht.
- Kein „Ballooning Effect“, da das Innere vom Tubing von seinem Äußeren nie getrennt wird.
- Keine zusätzliche Belastung durch Temperaturänderung, weil der Tubing nicht fest eingespannt ist. Nur die Tubingdehnung wurde berechnet.
- Durch die offene Bauweise besteht nie die Gefahr, dass in einer beliebigen Tiefe der Innendruck des Tubings anders sein wird als der Außendruck. Durch diese Annahme entfällt die Berechnung des Koaxialsondenrohres bzw. Tubings für Innen- oder Außendruckbelastung gemäß API.

Die Berechnung der maximalen statischen Belastung bei einer Einbautiefe von 2700 m folgte dem Ansatz:

- Stahltubing Gewicht: 54,2 t
- PP-Innenliner Gewicht: 14,0 t
- Vorspannung 0,0 t
- Gesamt Gewichtskraft: 68,2 t

Die dadurch in dem 5” Stahltubing an der Oberfläche resultierenden Spannungen betragen $\sigma = 275,2 \text{ MPa}$

Für einen handelsüblichen Stahl mit der Güte J55 beträgt die Streckgrenze: 379 MPa. Somit ist die Spannung im Tubing und an der Oberfläche weniger als 80% seiner Streckgrenze. Wenn man die Auftriebskräfte berücksichtigt, beträgt die Spannung an der Oberfläche sogar nur 49% seiner Streckgrenze. Da dieses Rohr die Funktion des Shuttles übernimmt und nach erfolgtem Einbau keinen hohen Stressbelastungen standhalten muss, wurde der Werkstoff mit der Stahlgüte J55 als voll ausreichend festgelegt.

Um die definitive Einbautiefe der Sonde zu ermitteln musste ebenso die maximale Ausdehnung des Komposittsystems unter Berücksichtigung der Temperaturen berücksichtigt werden.

Die aus der Temperaturänderung resultierende Dehnung wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T = \alpha \cdot \frac{(T_{m,prod} - T_{m,einbau})}{2}$$

- $T_{m,einbau}$ – mittlere Einbautemperatur
- $T_{m,prod}$ – mittlere Produktionstemperatur
- α – linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient für Stahl (0–100°C: $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)

Die resultierende Dehnung für 90°C Produktionstemperatur und 15°C Injektionstemperatur beträgt 1,22 m.

Weiterhin musste die Dehnung durch das Eigengewicht der Koaxialsonde berücksichtigt werden. Dies wurde wie folgt berechnet:

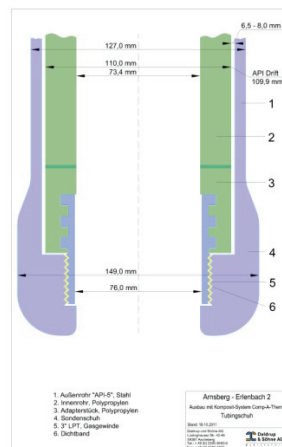
$$\Delta L_t = \frac{\rho_s \cdot g \cdot L_t^2}{2 \cdot E}$$

Die resultierende Stahlrohrdehnung durch Eigengewicht beträgt 1,456 m. Der PP-Innenliner beeinflusst nur sehr wenig die Dehnung des Gesamtsystems.

Der Effekt von Auftriebskräften ist ein weiterer Aspekt, der Berücksichtigung finden musste. Aufgrund der Bauweise des Koaxialsondenrohres entsteht bei Auftriebsverhältnissen eine zusätzliche Axialkraft. Diese Kraft wirkt dort, wo Differenzen zwischen Innen- und Außendruck in Verbindung mit entsprechenden Angriffsflächen vorhanden sind, ohne dass sich die Kräfte aufheben können. Im Falle einer Geothermiebohrung wirkt der Wasserdruck auf die freie Fläche des Tubingschuhs. Die am PP Rohr auftretende Kraft wurde wie folgt berechnet:

$$F = A_{PP} \cdot \rho \cdot g \cdot TVD = 146,7 \text{ kN}$$

Das PP-Innenrohr wurde unter einer Axialdruckkraft von mehr als 170 kN getestet und hat den Test bestanden. Allerdings konnte eine Verbindung zwischen dem PP-Innenrohr und dem Stahl tubing mittels 6 Schrauben, wie ursprünglich vorgesehen, nicht mehr als 100 kN standhalten. Aus diesem Grund wurde eine effizientere Rohrschuhkonstruktion entwickelt.



Koaxialsondenschuh

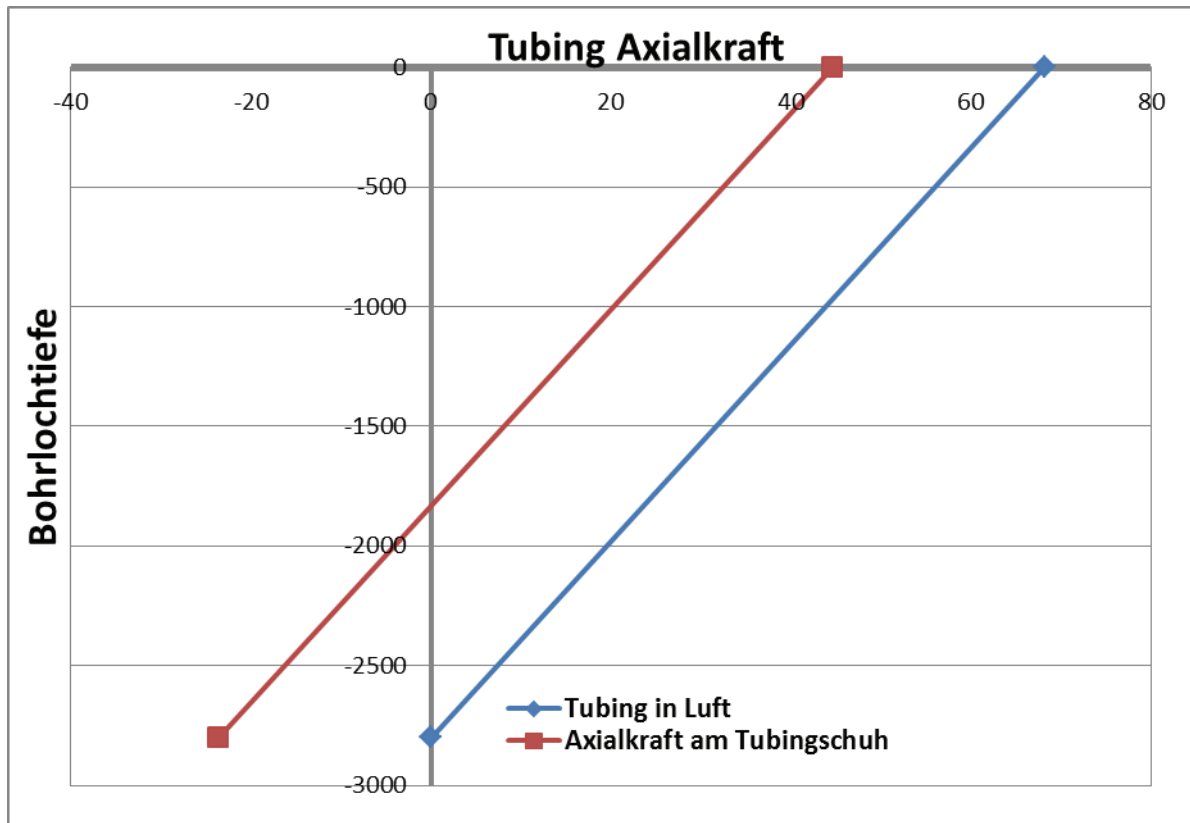
Durch die Fixierung des PP-Innenrohres im Koaxialsondenschuh entsteht eine gesamte Axiallast die wie folgt berechnet wird:

$$F = A_{schuh} \cdot \rho \cdot g \cdot TVD = 236 \text{ kN}$$

A_{schuh} wird wie folgt berechnet:

$$A_{schuh} = \frac{\pi}{4} \cdot (OD_{tubing}^2 - ID_{PPRohr}^2) = 8416 \text{ mm}^2 \text{ mit } OD_{tubing} = 126,9 \text{ mm und } ID_{PPRohr} = 73,4 \text{ mm.}$$

Diese Kraft wirkt nur, wenn der Tubing bis zur maximalen Tiefe der Bohrung (2835 m) eingebaut wird. Werden Koaxialsonden-Eigengewicht und -Axialdruckkraft am Tubingschuh aufgegeben, kann die Kraftverteilung im Rohr berechnet werden.



Kraftverteilung in den Tubing (vereinfachte Darstellung)

Durch eine erhöhte Axialkraft am Tubingschuh besteht Knickungsgefahr (Buckling), deshalb wurde ebenso eine Knickungsberechnung durchgeführt.

Das Kompositsystem wurde nach Lubinskischer und Eulerscher Methoden berechnet.

Knickung nach Euler:

$$F = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L^2} = 1,170 \text{ N}$$

Knickung nach Lubinski:

$$F = 1,94 \cdot \sqrt[3]{E \cdot I \cdot w^2} = 5381 \text{ N}$$

Weil die Kraft am Tubingschuh 236 kN beträgt, wird hier deutlich, dass sich der Tubing unter Knickungsgefahr befindet die durch den Einsatz eines Ankers an der Bohrlochsohle vermieden wird.

Da sich die Werkstoffe Stahl und Polypropylen unterschiedlich ausdehnen, und es dadurch zu einem Kollabieren des PP-Innenrohres kommen kann, wurde besonderer Wert auf die maximale Einzellänge vom PP-Innenrohr „ohne“ Widerlager gelegt.

Die Auftriebkraft durch Dehnung wurde wie folgt berechnet:

$$F_{\text{auftrieb}} = A_{PP} \cdot \rho_{\text{wasser}} \cdot g \cdot L$$

Das Eigengewicht des Rohrs wird hier nicht berücksichtigt. Die Auftriebkraft darf nicht die experimentell ermittelten Werte überschreiten. Laut ITE Bericht 1161 wurde für das reine Polypropylen Rohr ein maximaler Wert von 100 kN gemessen. Allerdings bleibt das PP nur bis zu

einer Kraft von 60 kN im elastischen Bereich. Mit diesem Wert und einem Sicherheitskoeffizient von 2 kann man die maximale Länge eines freistehenden PP-Rohrs im Kompositsystem berechnen:

$$L_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_{PP} \cdot \rho_{\text{wasser}} \cdot g}$$

- F_{\max} ist die experimentell ermittelte Zugkraft (60 kN).
- A_{PP} ist die Rohrquerschnitt in mm^2
- ρ_{wasser} ist die Wasserdichte = 1000 kg/m^3

Unter diesen Voraussetzungen beträgt die einsetzbare Einzelstranglänge L_{\max} 1145 m.

Ein zweiter Begrenzungsfaktor ist die maximale Zugkraft, die während der Einbauphase eintreten könnte, wenn das PP-Rohr am Haken hängt. Hiermit wird die maximal zugelassene Länge wie folgt berechnet:

$$L_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_{PP} \cdot \rho_{PP} \cdot g}$$

ρ_{PP} ist die PP-Rohrdichte (940 kg/m^3)

Unter diesen Voraussetzungen beträgt die nicht zu überschreitende Einzelstranglänge L_{\max} 1195 m.

Ein dritter Begrenzungsfaktor ist die maximale Zugkraft, die während der Einbauphase eintreten könnte, wenn das Gewicht des Stahlrohrs berücksichtigt wird. Hiermit wird die maximal zugelassene Länge wie folgt berechnet:

$$L_{\max} = \frac{F_{\max}}{(\text{WeightTubing} + A_{PP} \cdot \rho_{PP}) \cdot g}$$

WeightTubing ist das lineare Mass des Tubings in kg/m

Unter diesen Voraussetzungen beträgt die nicht zu überschreitende Einzelstranglänge L_{\max} 246 m.

Da der „worst case“ berücksichtigt wurde, ist die maximale PP-Einzelstranglänge „ohne Widerlagerkonstruktion“ auf 250 m festgelegt worden. Ein kürzerer PP-Einzelstrang führt folglich zu einer größeren Anzahl von Spezialverbindern, wobei dadurch die Möglichkeit besteht, das während des Einbauvorganges das Gewicht vom äußeren Stahl tubing auf das Polypropylen übertragen wird. Folglich war es notwendig beim Einbau des Koaxialförderrohres zwischen dem PP-Innenrohr und der Hebevorrichtung (Autokran) eine Lastmessvorrichtung einzubauen. So konnte während des Einbauvorgangs die Hakenlast des PP-Innenrohres kontrolliert werden.

Für die 2800 m tiefe Arnsberger Geothermiebohrung wurde auf Grund der Teste und Berechnungen ein Widerlageraufbau (Worst Case) in 11 Abschnitten zu je 250 m Länge vorgenommen:

- Abschnitt 1: 0 bis 300 m
- Abschnitt 2 bis 11: je 250 m

Als kritischster Abschnitt ist der untere Bereich ermittelt worden, da dort Axialdruckkräfte von bis zu 140 kN auftreten können.

Eine Berechnung des Koaxialsonden-Kompositsystems in Bezug auf Innen- (Burst) und Aussendruck (Collapse) wurde nicht durchgeführt da sich die Sonde zu jeder Zeit in einem geschlossenen flüssigkeitsgefüllten Raum befindet.

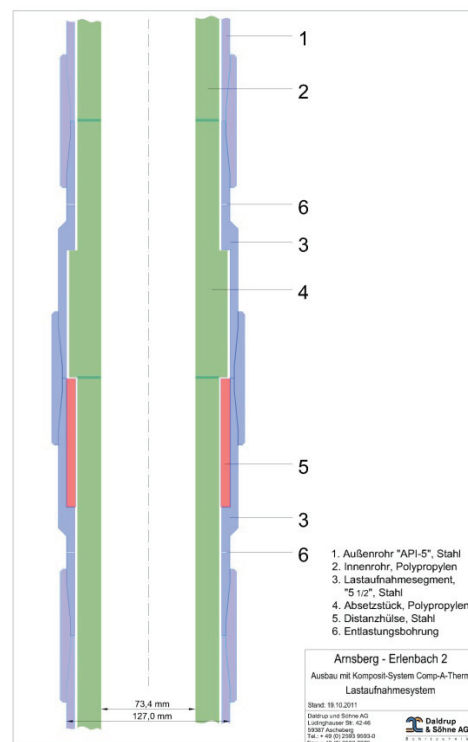
Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt war die Befestigung zwischen PP-Rohr und Tubing. Ziel dieser Überlegungen war die Konstruktion einer sicheren, dichten Befestigung des PP-Rohrs in dem Stahl tubing mit den Vorgaben, dass

- nach der maximal erlaubten PP Rohrlänge das PP-Rohr im Tubing axial fixiert wird.
- der Druck im unteren Bereich nicht auf das PP-Rohr übertragen wird (siehe Tubingschuh).

Als optimales Verbindungskonzept ergab sich ein duales Mehrelementsystem.

Die Kombination aus Muffeneinzelkomponenten bei dem Stahl tubing gestattet es, Außen- und Innenrohr in Segmentlängen von ca. 9 m getrennt voneinander in das Bohrloch einzubauen und sicher zu verbinden. Im Gegensatz zu den Schraubverbindungen der Stahlrohre haben die PP-Rohre eine kraftschlüssige Schweißverbindung. Das System aus negativer Schulter durch aufgesetzte Muffe im Stahlkörper und positiver Schulter durch Verdickung des PP-Körpers stellt einen sicheren Lastabtrag der Gewichtskräfte des mechanisch labilen Innenrohrs auf das mechanisch stabile Aussenrohr dar.

Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau einer Axialbefestigung (Zwischenfixierung) des PP-Innenrohrs. Diese Konstruktion funktioniert in beide Bewegungsrichtungen.



Lastaufnahmesystem

Die TU Clausthal verfügt über diverse Autoklaven (Druckkammern), die es ermöglichen, die Druck und Temperaturverhältnisse in einer Geothermiebohrung realitätsnah zu simulieren. Mit dem Rohrsystem wurden hier ausgiebige Stresstests durchgeführt. Sämtliche Ergebnisse dieser Stresstests haben den Erwartungen an die Eigenschaften des Rohrsystems entsprochen.

Dieses neu entwickelte Förderrohr für Geothermiesonden wurde am 20. Oktober 2011 dem Aufsichtsrat der Stadtwerke Arnsberg vorgestellt, der daraufhin den Beschluss zum Einbau in die Bohrung fasste. Der Einbau selbst erfolgte ohne Probleme, was auch als Bestätigung für die Richtigkeit der vorgeschalteten Entwicklungsüberlegungen und Berechnungen gewertet werden muss. Im Januar 2012 wurde die tiefe Erdwärmesonde in den Testbetrieb genommen.

Nach wie vor hat das Projekt Arnsberg Leuchtturmcharakter und ist für die tiefe Sonden-Geothermie wegweisend. Von den Erkenntnissen, die während der vergangenen 3 Jahre in Arnsberg gewonnen wurden, werden andere Projekte profitieren. Und das nicht nur in Deutschland.