

**Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekt
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi),
Projektträger Jülich GmbH (PTJ)**

Möglichkeiten der Nutzung von CO₂-Erdwärmesonden in der mitteltiefen Geothermie ?

Forschungsprojekt Nienburg

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H. Kruse, FKW GmbH, Hannover

Dipl.-Ing. D. Fennekoldt, Erdwärme Mittelweser GmbH, Nienburg

Prof. Dr. D. Michalzik, Geodienste GmbH, Garbsen

Oberflächennahe und mitteltiefe CO₂-Erdwärmerohre für Wärmepumpen höherer Leistung

**Beantragtes Vorhaben = Fortsetzungsvorhaben vom BMWi-Projekt (2007-2009)
Grundlagenerarbeitung und Weiterentwicklung des 100 m tiefen CO₂-Erdwärmerohres:**

A) Wirklichkeitsnahe Auslegungssoftware nötig.

**Größere Leistungen für größere Wohn- und kommerzielle Gebäude gefragt,
Zusammenbindung von CO₂- Erdwärmerohren zu Sondenfeldern erforderlich.**

**B) Wärmepumpen im Gebäudebestand für die Zukunft von großer energetischer
Bedeutung,**

Höhere Wärmequellentemperaturen und Leistungen erforderlich.

Für Bohrungen begrenzt verfügbare Erdoberflächen: Mitteltiefe Einzelbohrungen bis 600 m

**Deshalb Verbundprojekt mit zwei Teilprojekten A und B und jeweils kompetenten Firmen
und Forschungsstellen.**

Teilprojekt A: Oberflächennahes Erdwärmerohr

Theoretische Auslegungsprogramme

Sondenfelder für höhere Leistungen

Teilprojekt B: Mitteltiefes Erdwärmerohr

Mitteltiefe Einzelsonden für höhere Leistungen

1. Hot Spot Hannover 2008

Innovative Erdsondentechnik : Das CO₂ - Erdwärmerohr

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Horst Kruse,

Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH

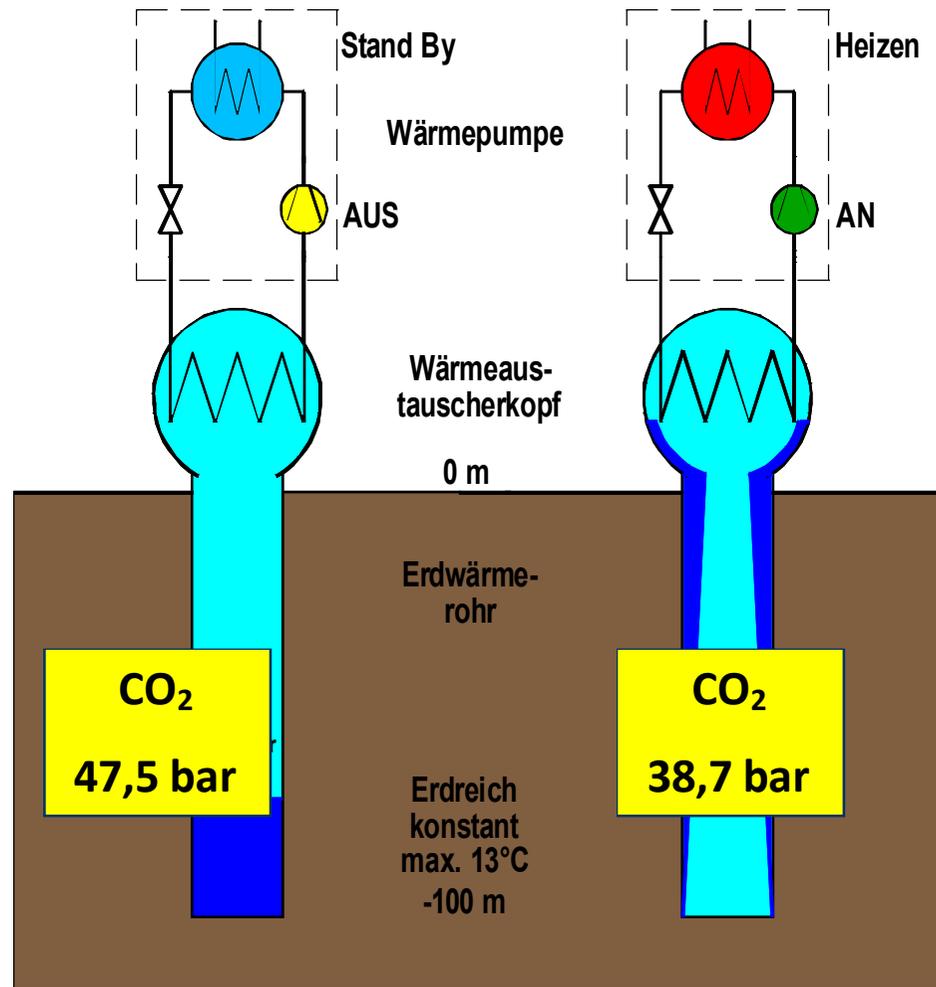
Dipl.-Ing. Meik Schubert

Brugg Rohrsysteme GmbH

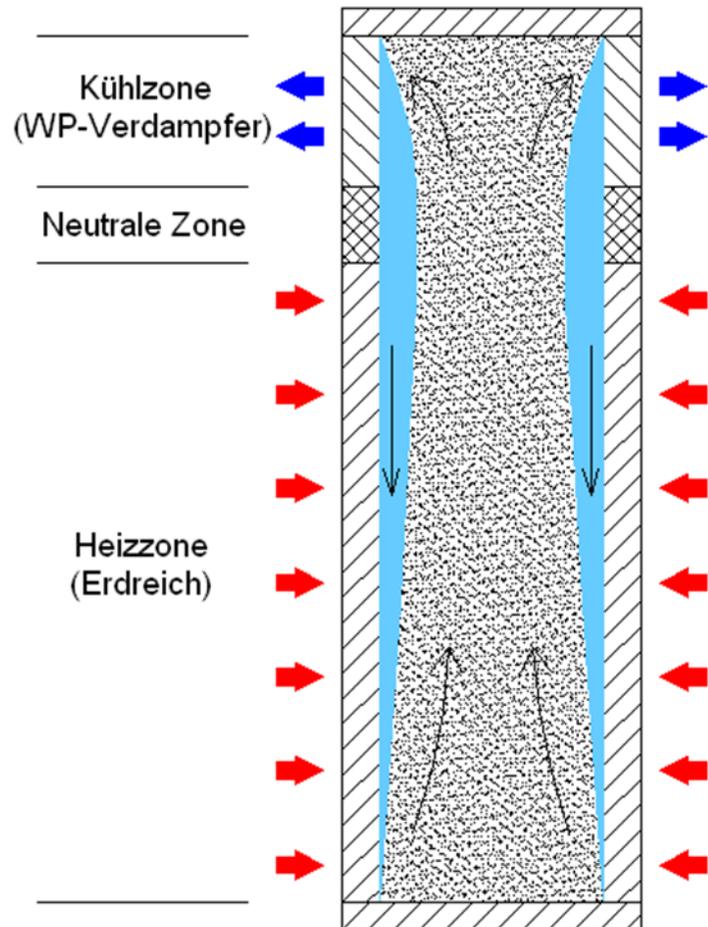
GECO₂ als Markenzeichen der Fa. Brugg für die Lizenz des FKW-CO₂-Erdwärmerohres



CO₂-EWR-Wärmepumpe im Stillstand und Normalbetrieb



BMWi -Thermosyphon - Projekt für Wärmepumpen



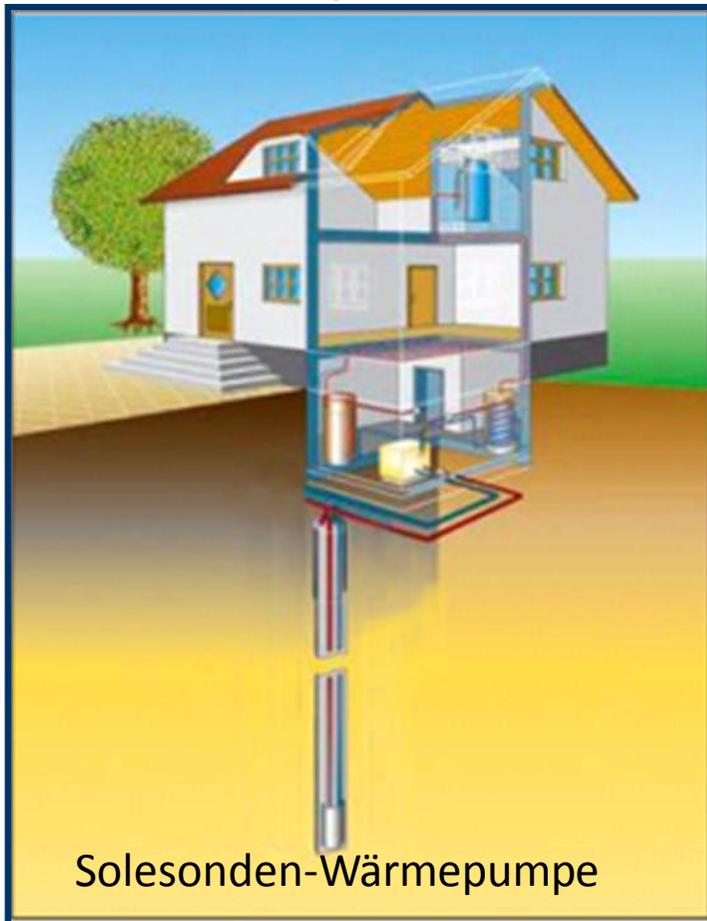
24. 12. 1998: FKW-Patentanmeldung „Erdwärmerohr“ (EWR)

- **Innovation: Natürliches Arbeitsfluid CO₂**
nicht wassergefährdend
im Gegensatz zu den üblichen
Wasser-Glykol-Gemischen (Klasse 1)
bessere Wärmeübergangszahlen im
2-Phasengebiet
Innovation: Keine Pumpe notwendig,
selbsttätiger Prozeß
im Gegensatz zu den gebräuchlichen
Systemen mit zusätzlicher Pumpenenergie
- **Innovation: Höhere Jahresarbeitszahl**

Oberflächennahe Geothermische Heizung mit vertikalen Sonden

Am FKW gemessene Leistungszahlen im Vergleich bei B0/W35:

3,9



4,4



2. Hot Spot Hannover 2009

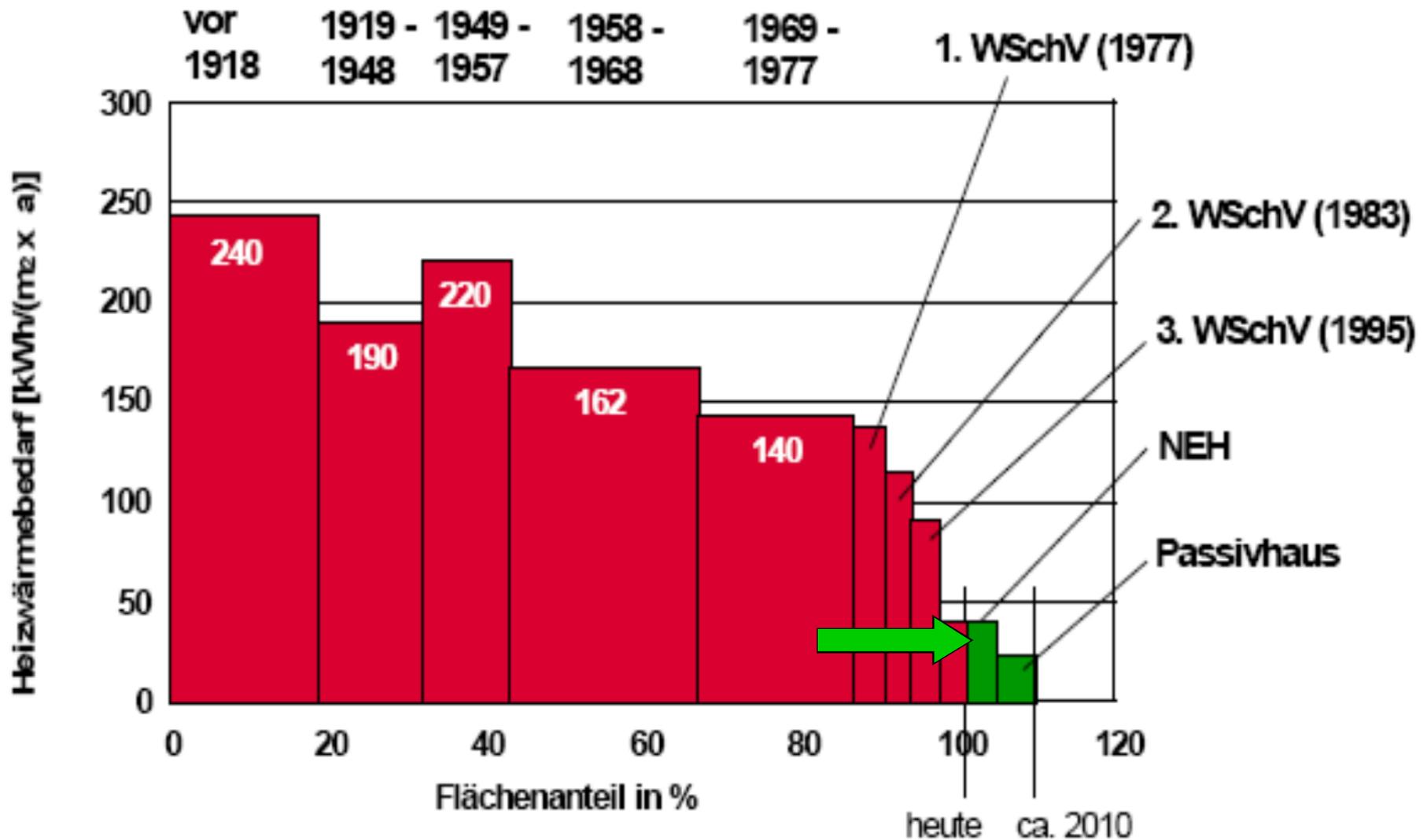
Nutzung mitteltiefer Geothermie zwischen 400 und 600 m Potential und technischer Entwicklungsbedarf

**Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Horst Kruse¹⁾,
Dipl.-Ing. Hans Rüssmann²⁾, cand.mach. Chenguang Shah³⁾**

¹⁾ Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH

^{2), 3)} vormals FKW GmbH

Heizwärmebedarf im Wohnungsbestand



Status :

Oberflächennahe Erdwärmesysteme für Neubauten mit geringerem Wärmebedarf und niedrigeren Vorlauftemperaturen Einzelsonden von 100 - 150 m .

Wegen der abnehmenden Zahl der Neubauten in Zukunft begrenzter Wärmepumpenmarkt.

Wärmepumpen für den Bestand mit höherem Wärmebedarf erfordern größere Leistungen.

Für größere Leistungen sind im Bestand Flächen für Sondenfelder nur begrenzt verfügbar.

Deshalb ergibt sich ein großes Potential für mitteltiefe Einzelsonden und eine Tendenz für größere Entzugsleistungen je Bohrloch.

Staatliche finanzielle Förderung für Heizwäme aus Bohrtiefen ab 400 m ergibt einen besonderen Marktanreiz für Geothermische Wärmepumpen im Bestand.

Entwicklung eines 300 m tiefen CO₂-Erdwärmerohres

FKW-Projekt

**des European Institute for Energy Research (EiFER),
gemeinsam mit der Universität Karlsruhe,
gefördert durch das EnBW Karlsruhe**

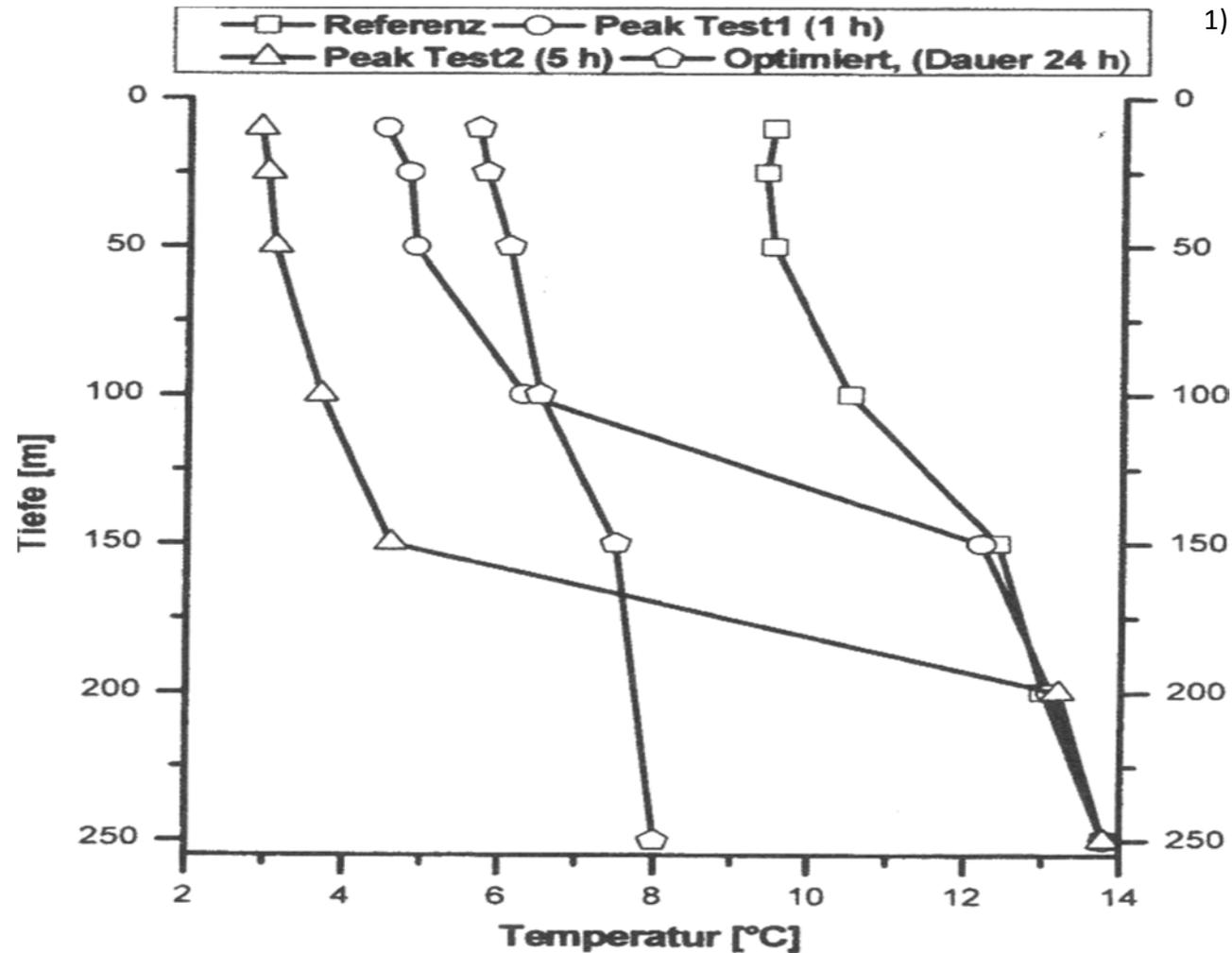
**Feldversuch Triberg/Schwarzwald
CO₂-Erdwärmerohr 250 m
Wellrohr DN 65 (ca. 80 mm lichte Weite)**

Oberes Ende des Erdwärmerohres nach Einbringung in das Bohrloch



Ausstattung des 250 m EWR mit faseroptischer Temperatur-Meßtechnik

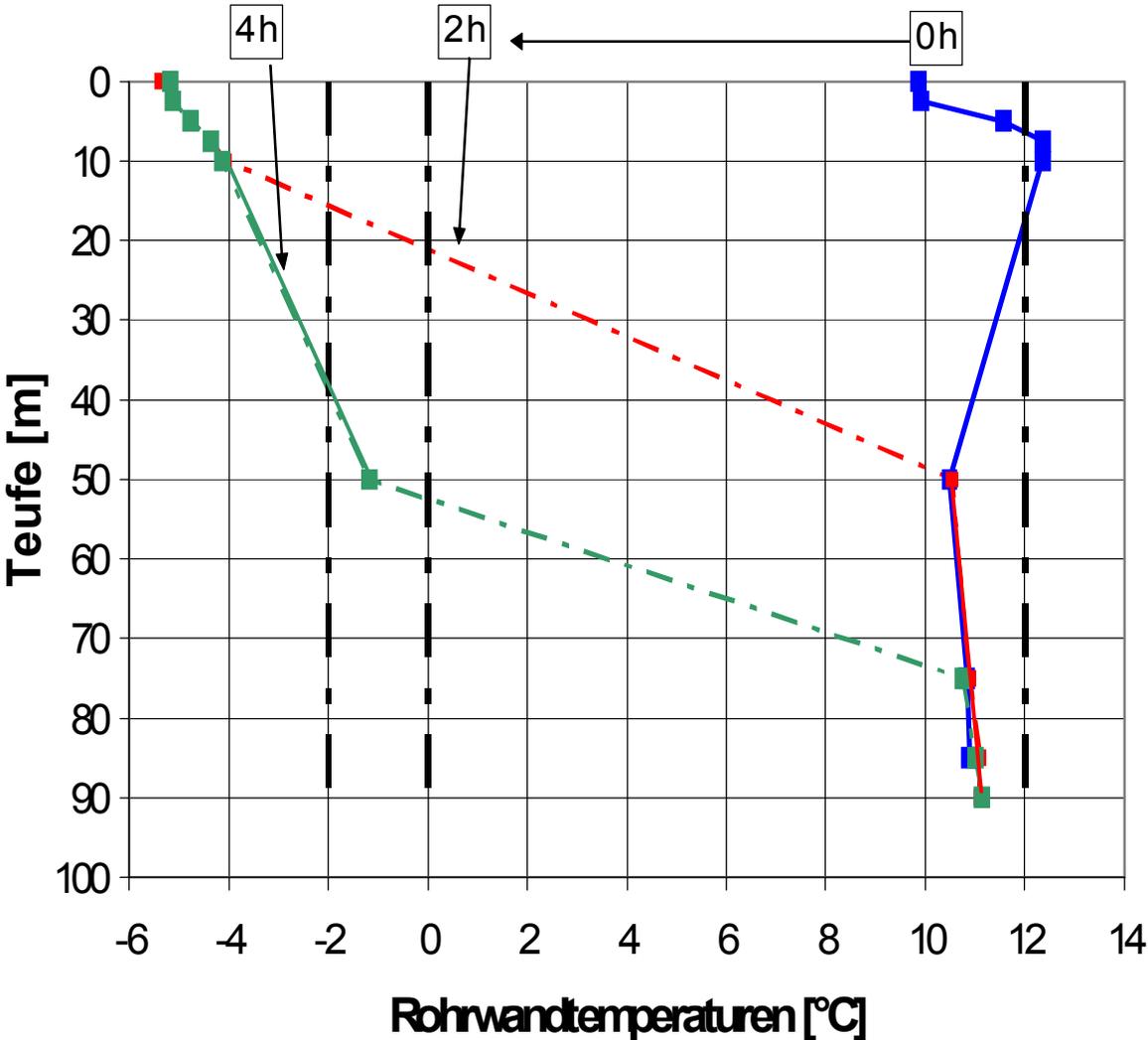
An der Rohraußenwand des 250 m Erdwärmerohres beim Anfahren gemessene Temperaturen als Anzeichen für die innere Benetzung ¹⁾



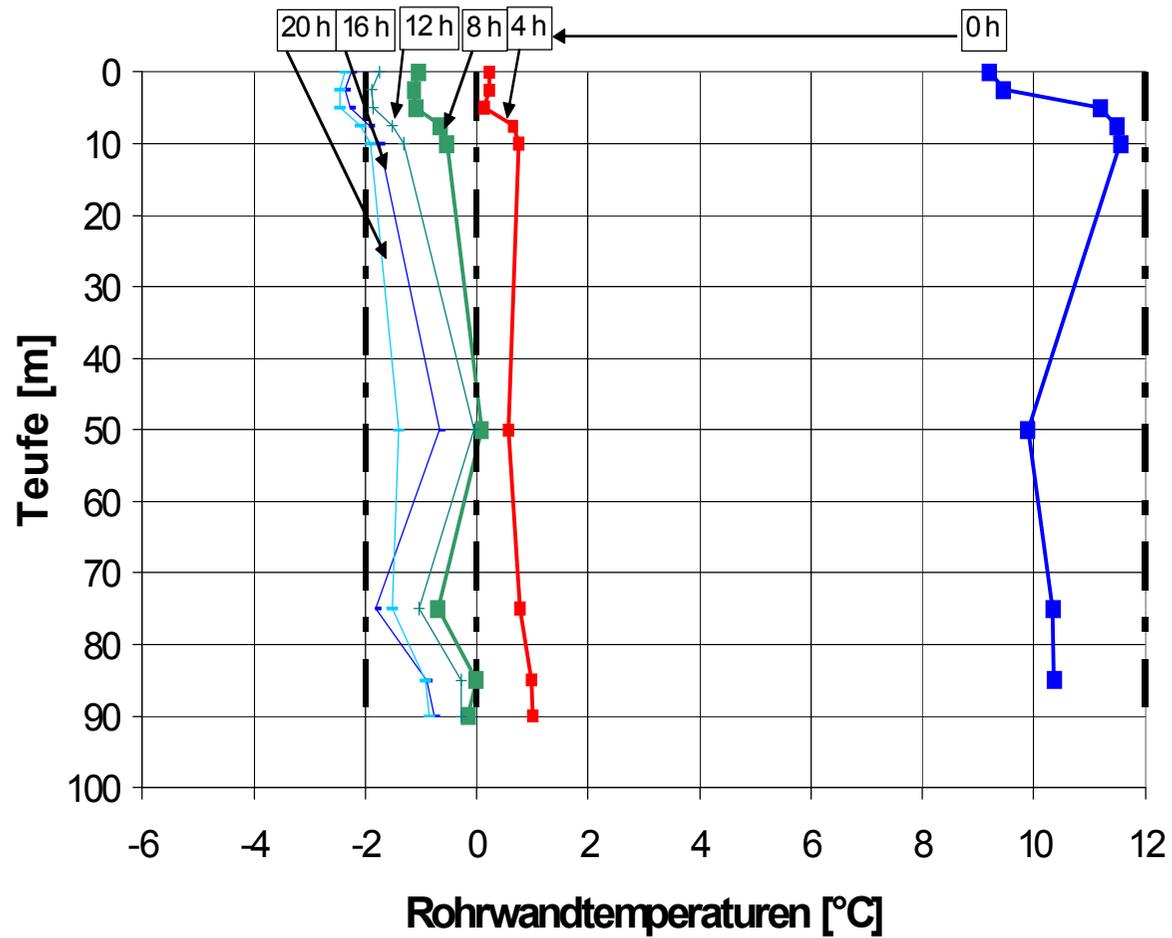
1) Zorn et al (2010)
VDI Wissensforum

Drei Anfahrversuche über 1 , 5 und 24 Stunden mit CO₂-Filmbildung bis zu Teufen von je 100 m, 150 m und 250 m

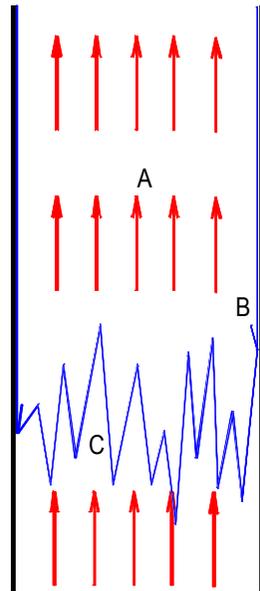
Rohraußenwandtemperaturen eines CO₂-EWR nach 2h und 4h Laufzeit einer Wärmepumpe mit Q_o = 7,5 kW im Flutbetrieb



Rohraußenwandtemperaturen eines CO₂-EWR im Normalbetrieb nach verschiedenen Laufzeiten der Wärmepumpe mit $Q_o = 5 \text{ kW}$

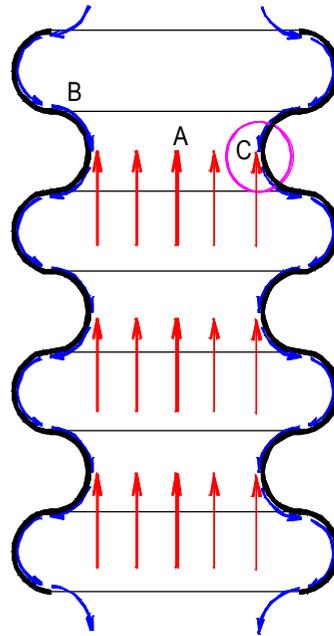


Unterschiedliche Bauformen des Erdwärmerohrs



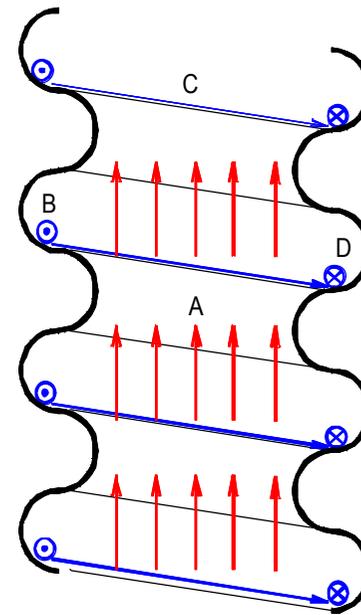
A = Dampfstrom
 B = Flüssigkeitsfilm
 C = Strahlenbildung

glattes
 Edelstahlrohr



A = Dampfstrom
 B = Flüssigkeitsfilm
 C = Filmabriß bei
 zu hoher Dampfgeschw.

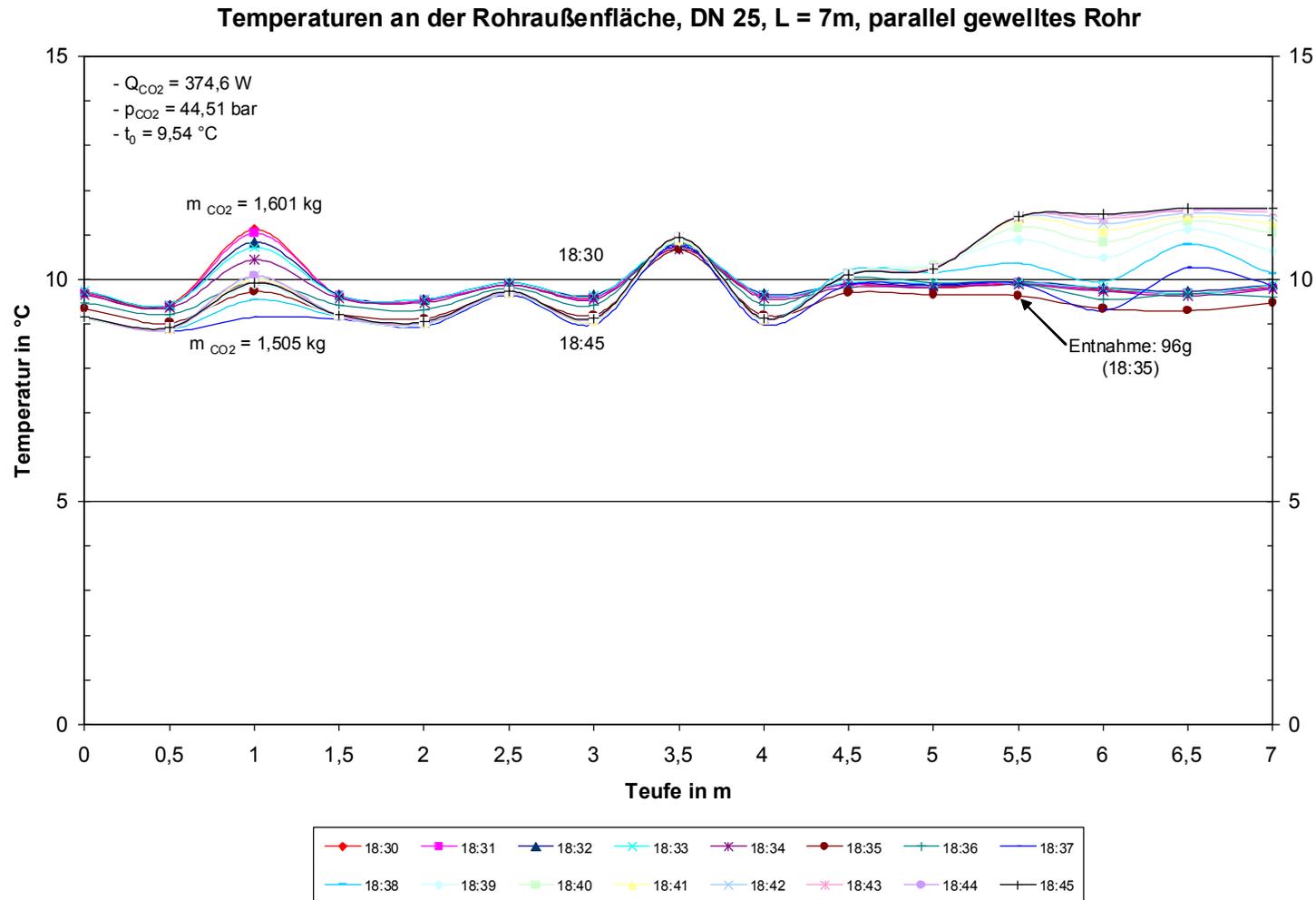
parallelgewelltes
 Edelstahlrohr



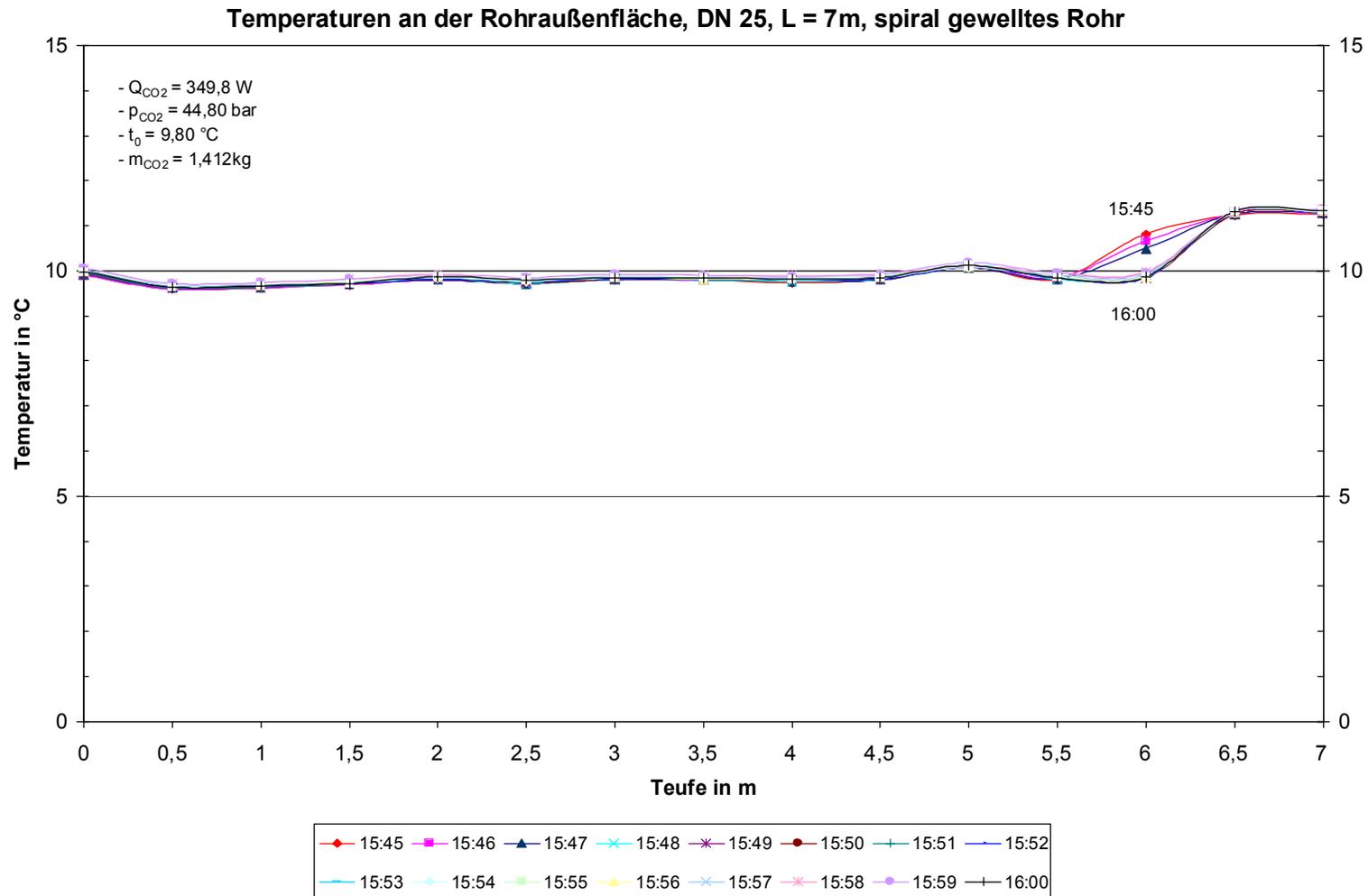
A = Dampfstrom
 B = Flüssigkeitsfilm (senkrecht aus Ebene)
 C = Flüssigkeitsfilm (senkrecht in Ebene)
 D = Flüssigkeitsfilm spiralförmig

spiralgewelltes
 Edelstahlrohr

Füllungversuch beim Parallelwellrohr L = 7 m, D = 25 mm (CO₂-Entnahme: Minderfüllung am unteren Rohrende)



Füllungsversuch beim Spiralwellrohr L = 7 m, D = 25 mm (Minderfüllung am unteren Rohrende)



Edelstahl-Spiralwellrohr als Erdwärmerohr (FKW-Patent)

Spiralgewelltes Edelstahlwellrohr:

Der **CO₂-Flüssigkeitsfilm** läuft an der Innenwand des Wellrohres spiralgig, **geschützt durch die Wendel**, hinab.

Das **Gas strömt im freien Querschnitt** ohne Behinderung des Films aufwärts.

Hierdurch wird die **maximale Wärme-Entzugsleistung aus der Erde** erreicht.



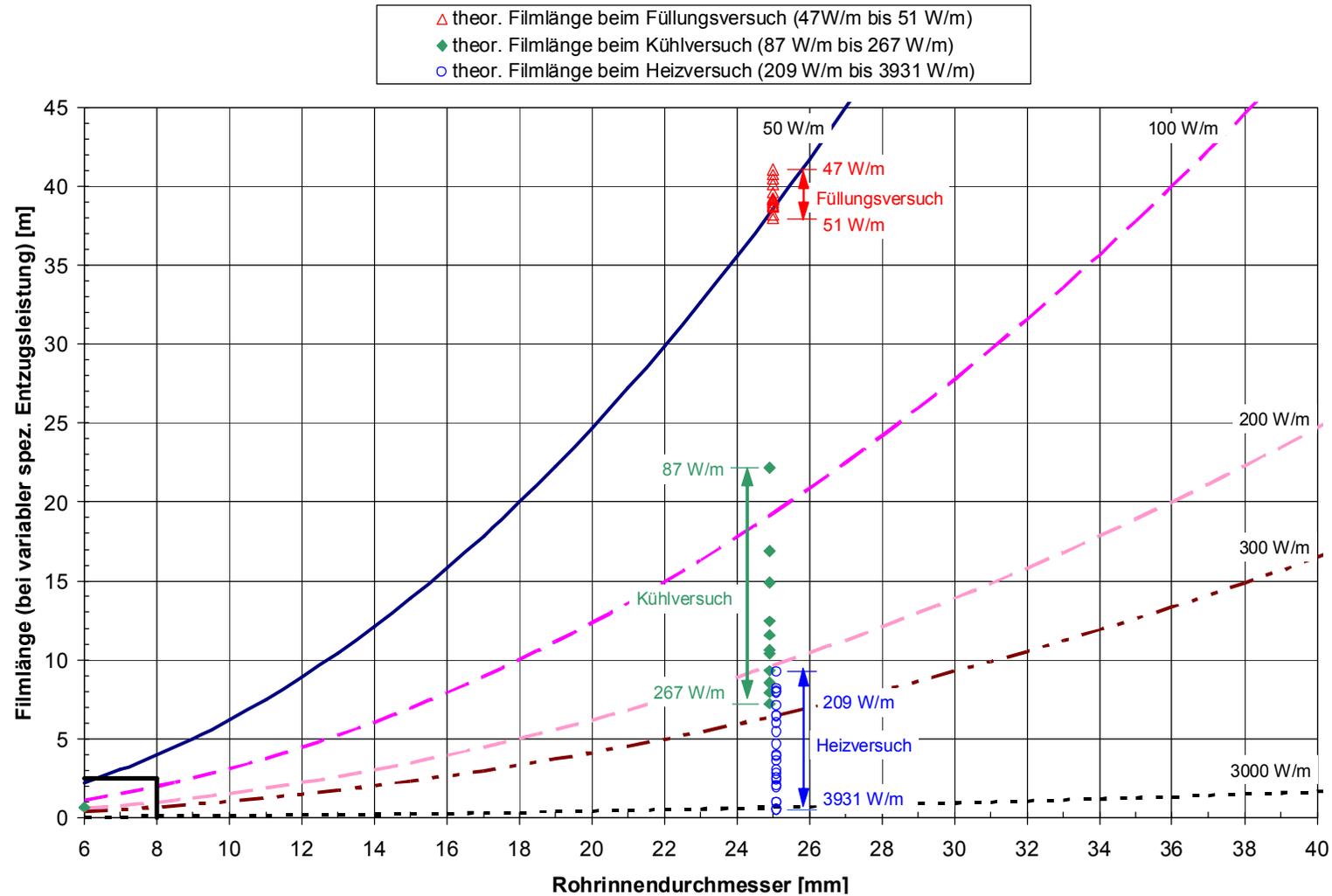
Bei Einhaltung der dem Rohr infolge von D und L abhängigen

Flutgrenze und maximalen Entzugsleistung

ergibt sich eine **optimale Zirkulation des CO₂ im Rohr** und eine

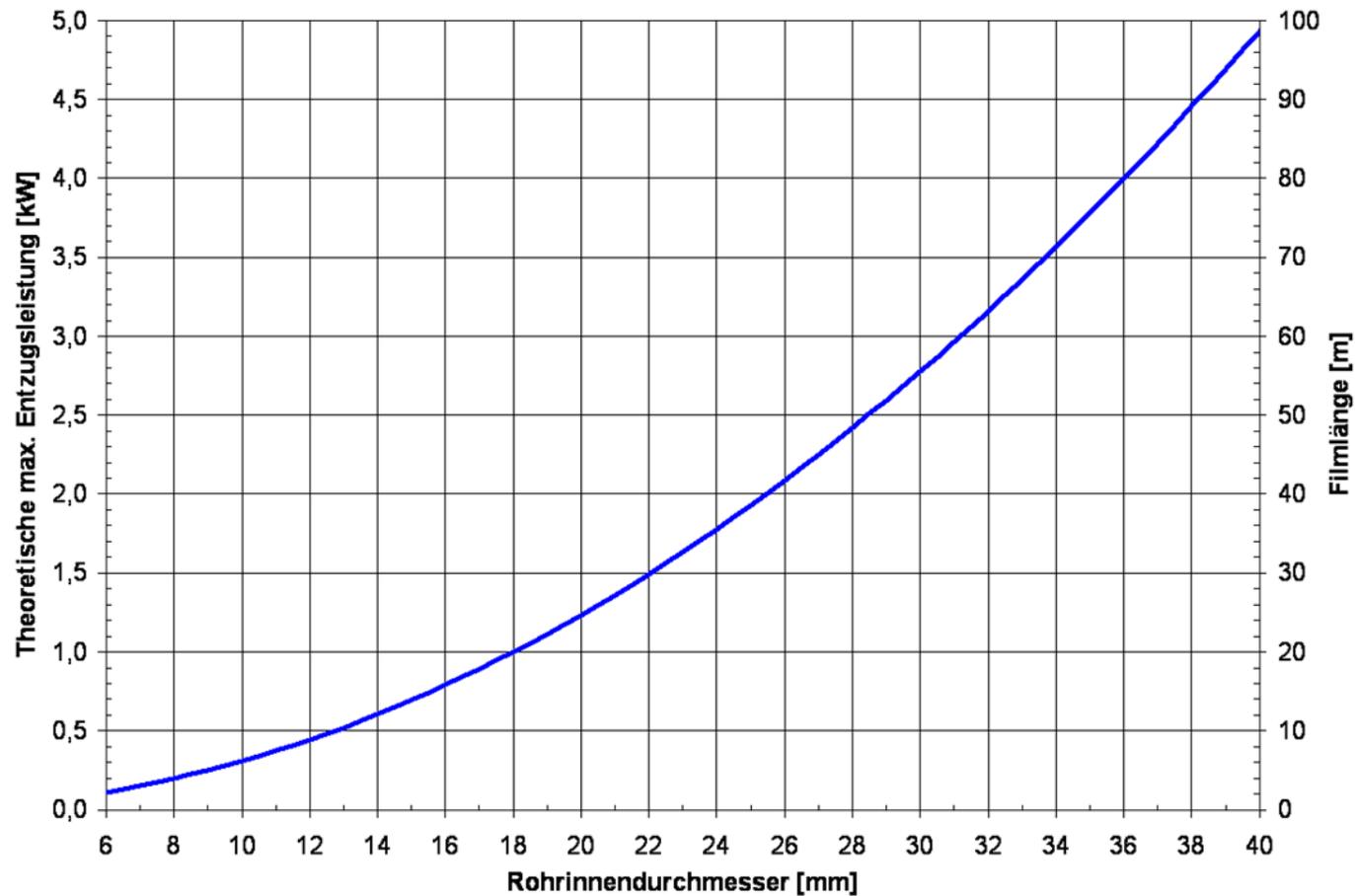
rippenförmige **Anbindung an die Verfüllmasse**

Theoretische Flutgrenze abhängig vom Rohrdurchmesser und spezifischer Wärmeleistung bei den Versuchspunkten

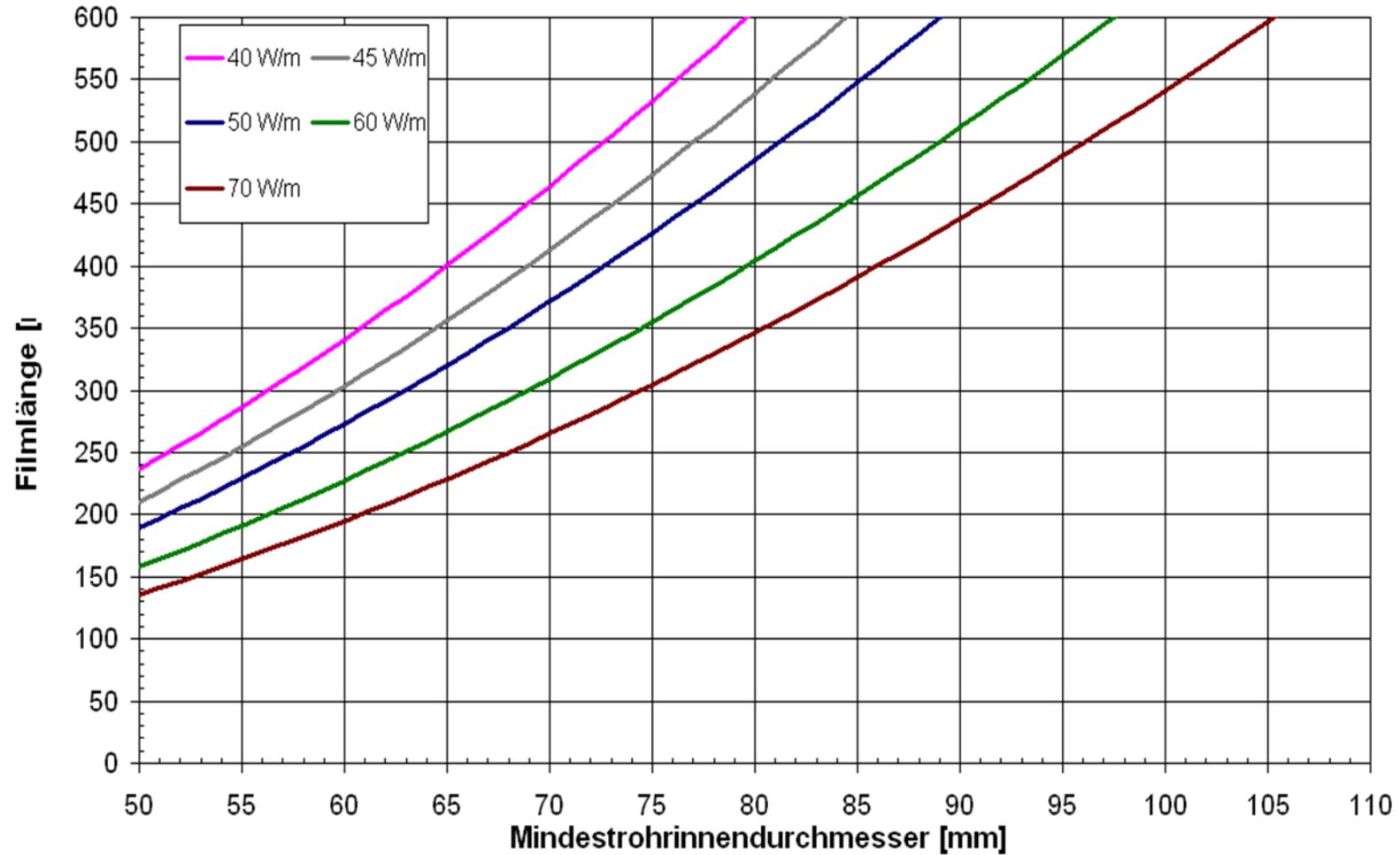


CO₂ – Erdwärmerohr

Theoretische maximale Leistung und Filmlänge an der Flutgrenze abhängig vom Rohrdurchmesser bei 50 W/m



Theoretische max. Filmlänge an der Flutgrenze bei einer
CO₂-Verdampfungstemperatur von $t_s = 0^\circ\text{C}$
mit Variation der spez. Entzugsleistung



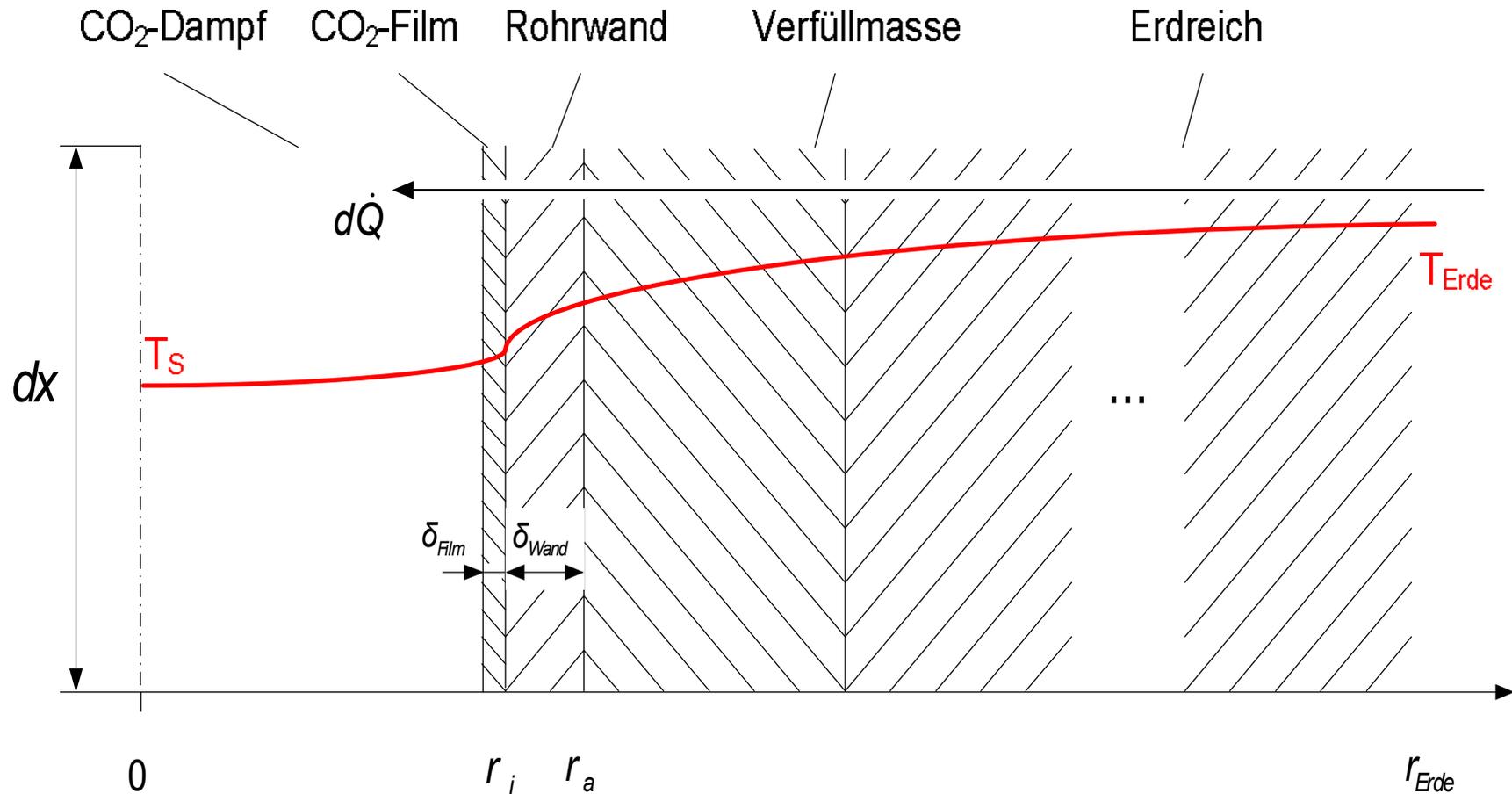
Forschungs- und Entwicklungsbedarf mitteltiefer CO₂-Erdwärmerohre

Durch die mit der Tiefe veränderlichen Temperaturen im Rohr und im umgebenden Erdreich ist es erforderlich, die daraus resultierenden Betriebszustände und sich ergebenden Entzugsleistungen möglichst genau vorausberechnen zu können.

Hierzu ist eine Zusammenführung der geothermischen Berechnungen im Erdreich und der thermodynamischen Ermittlungen der Wärmetransportvorgänge im CO₂-Wärmerohr zu gemeinsamen mathematischen Ansätzen erforderlich, um eine Modellierung seiner Betriebsweise vorzunehmen.

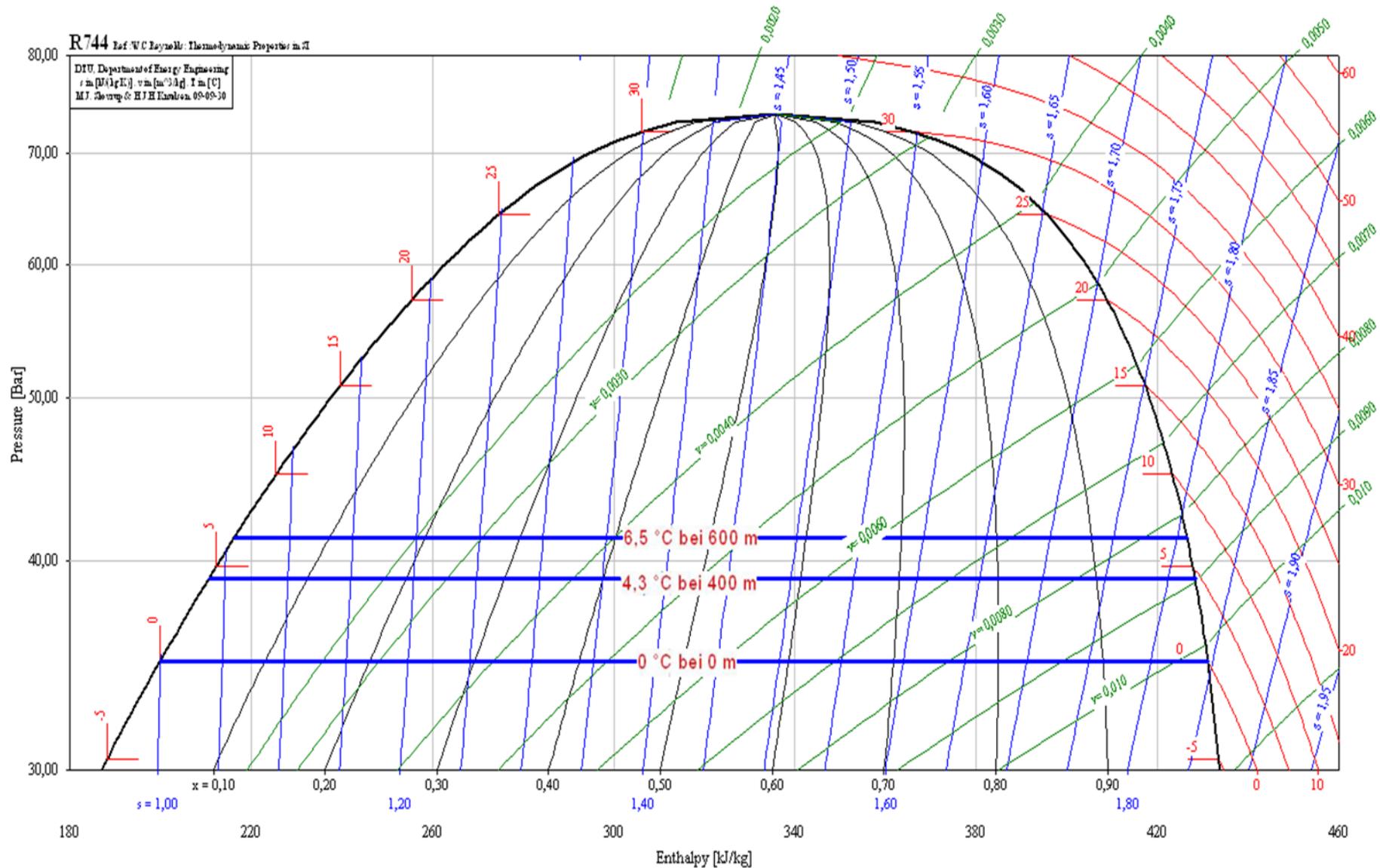
Deren Rechenergebnisse sind mit entsprechenden Meßwerten an mitteltiefen Erdwärmerohren zu korrelieren, um für die Praxis wirklichkeitsnahe Auslegungsergebnisse zu erhalten.

Wärmeleitung aus der Erde zum CO₂-EWR

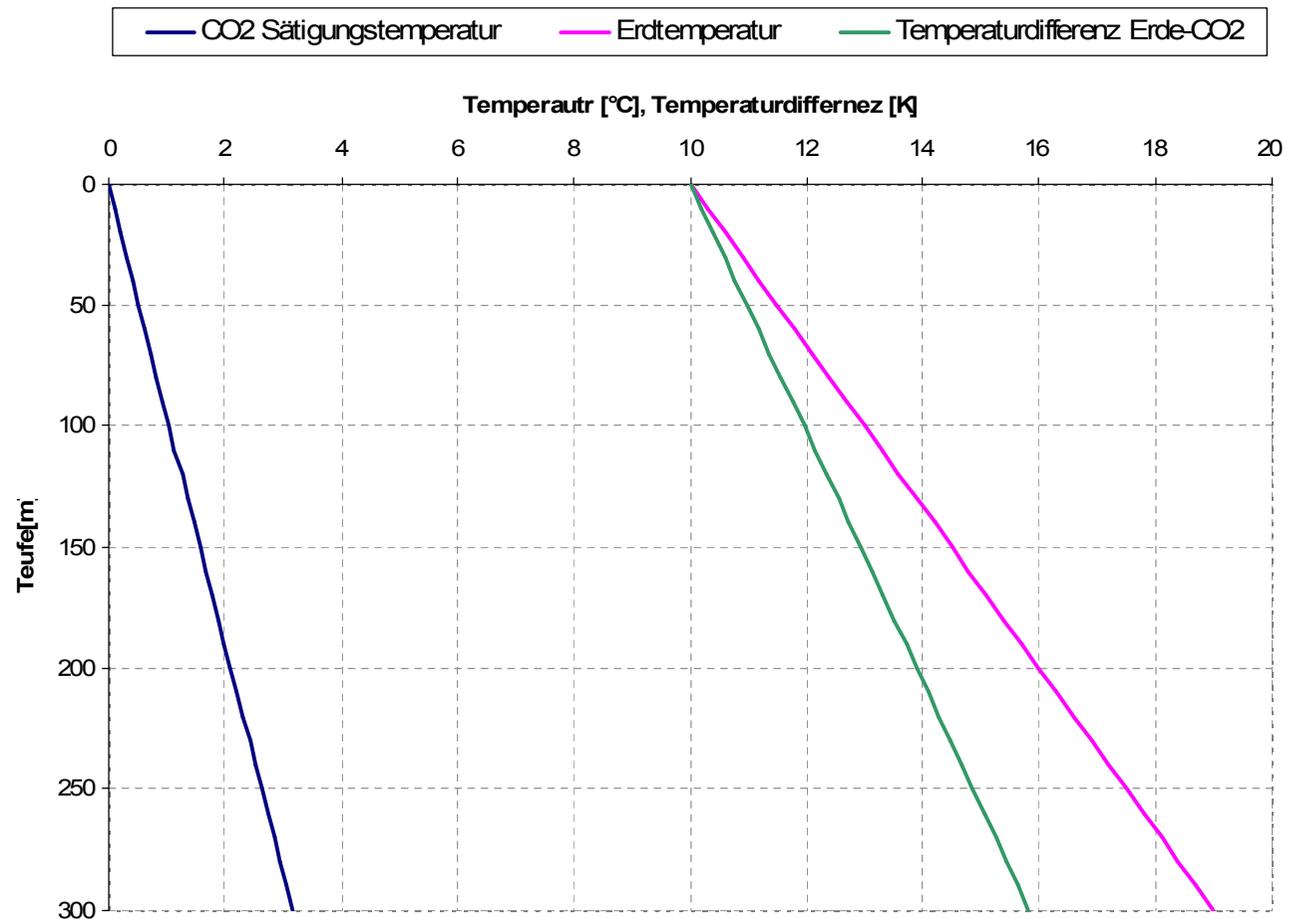
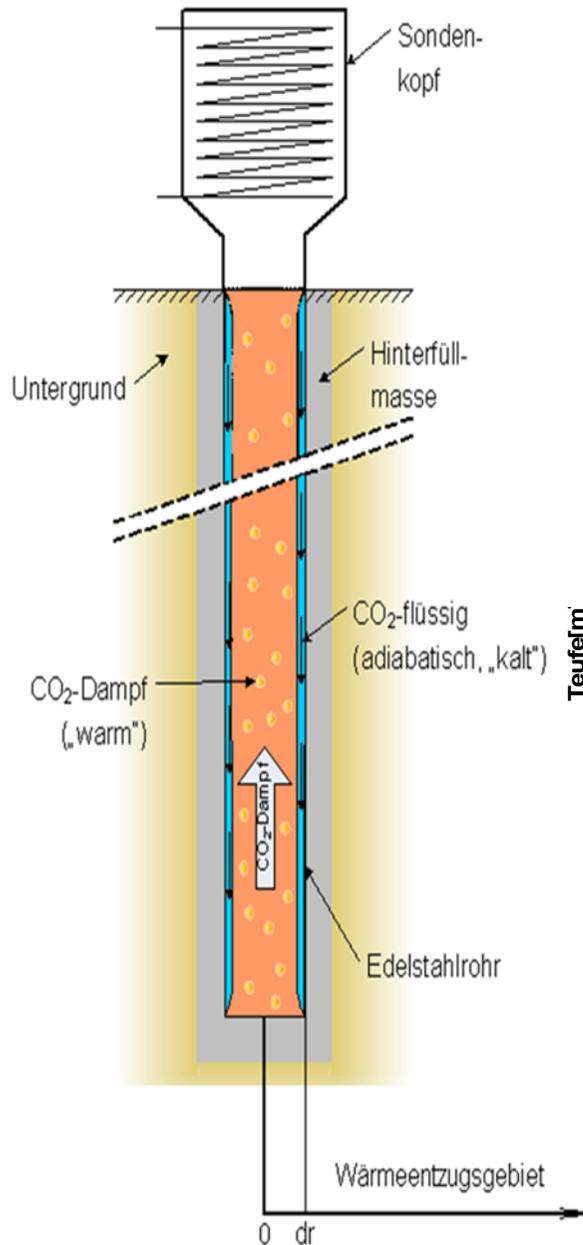


$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{mit} \quad \frac{1}{k \cdot A} = \frac{1}{\pi \cdot L} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\ln(d_{i+1}/d_i)}{\lambda_{mi}} \right)$$

CO₂ - Betriebsdrücke und -temperaturen in 0 m, 400 m und 600 m Tiefe von Erdwärmerohren



Temperaturen in CO₂-Erdwärmerohren und im Erdreich, sowie Temperaturdifferenzen Erde-CO₂



Relative Zunahme der Leistung mit der Teufe

- Wegen der Zunahme des Sättigungsdruckes mit der Teufe von ca. 1 bar je 100 m auch Zunahme der Sättigungstemperatur des CO₂ um ca. 1 K
- Wegen der Zunahme der Erdtemperatur mit der Teufe um ca. 3 K je 100 m steigt die örtliche treibende Temperaturdifferenz um $3\text{ K} - 1\text{ K} = 2\text{ K}$
- z.B. Wenn am oberen Rohrende die CO₂-Temperatur im Rohr 0°C und die Erdtemperatur 10°C beträgt, dann ist die örtliche treibende Temperaturdifferenz dort 10 K,
- z.B. bei 300 m Teufe mit einer Erdtemperatur von $10^\circ\text{C} + 3 \times 3\text{K} = 19^\circ\text{C}$ und einer CO₂-Temperatur von $0^\circ\text{C} + 3 \times 1\text{K} = 3^\circ\text{C}$ beträgt sie 16 K,
- also ist die mittlere treibende Temperaturdifferenz zwischen 0 m und 300 m bei 150 m Teufe = 13 K, also 3 K = 30% höher als oben.
- **Fazit:** Maximale Zunahme der Leistung bei einer Entzugsleistung von 50 W/m :
für ein 400 m Rohr statt 20 kW um 40% auf ca. 28 kW, und
für ein 600 m Rohr statt 30 kW um 60 % auf ca. 48 kW!

Abschätzung der Bohr-und Materialkosten von oberflächennahen 100 m-Sole- und CO₂-Sondenfeldern, sowie mitteltiefen 600 m-CO₂-Einzelsonden gleicher Entzugsleistung von 40 kW

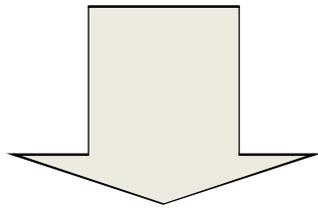
Oberflächennahe Geothermie			Mitteltiefe Geothermie			
	Ohne staatliche Förderung		Staatliche Förderung (375 €/m)	75000 €	0 €	75000 €
Sondenfeld	Doppel-U-PE-Solesonde 8 x 100 m	CO₂ – EWR Wellrohr 8 x 100 m	Einzelsonde	CO₂ – EWR Wellrohr 1 x 600 m	CO₂ – EWR Glattrohr 1 x 600 m	CO₂ – EWR Glattrohr 1 x 600m
Gesamtkosten Sondenfeld für ca. 40 kW	44640 €	53440 €	Gesamtkosten Einzelsonde für ca. 40 kW	97000 €	117000 €	42000 €

Ziele des Nienburg-Projektes:

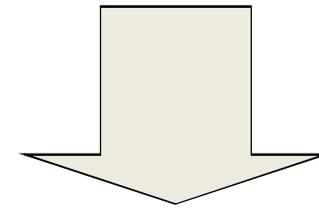
Forschung, Weiterentwicklung und Erprobung
des FKW- CO₂-Erdwärmerohres für

Anlagen größerer Leistung mit nur einem Verdampferkopf:

- Längere Erdwärmerohre 400 – 600 m mit DN 80 ($D_i = 100$ mm),
- Kürzere Erdwärmerohre in paralleler Anordnung an einem Verdampferkopf.



Forschungsantrag: Wöltjen GmbH Nienburg
mit Geodienste GmbH Garbsen
FKW GmbH Hannover

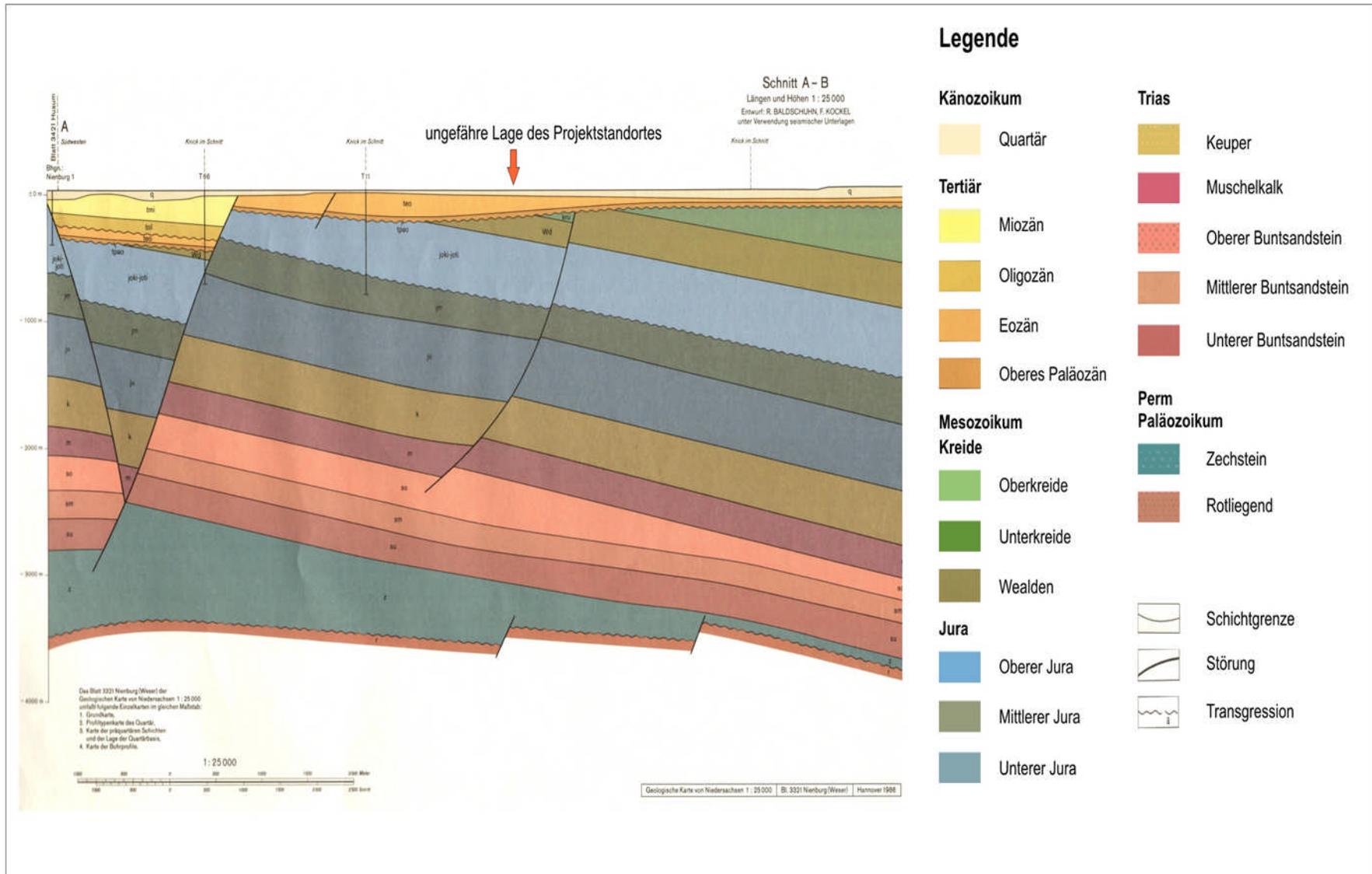


Forschungsantrag: FKW GmbH Hannover
mit IfT HSU Hamburg
IfV TUHH H-Harburg
IEK FH Hannover
Stiebel-Eltron Holzminden
Viessmann Allendorf

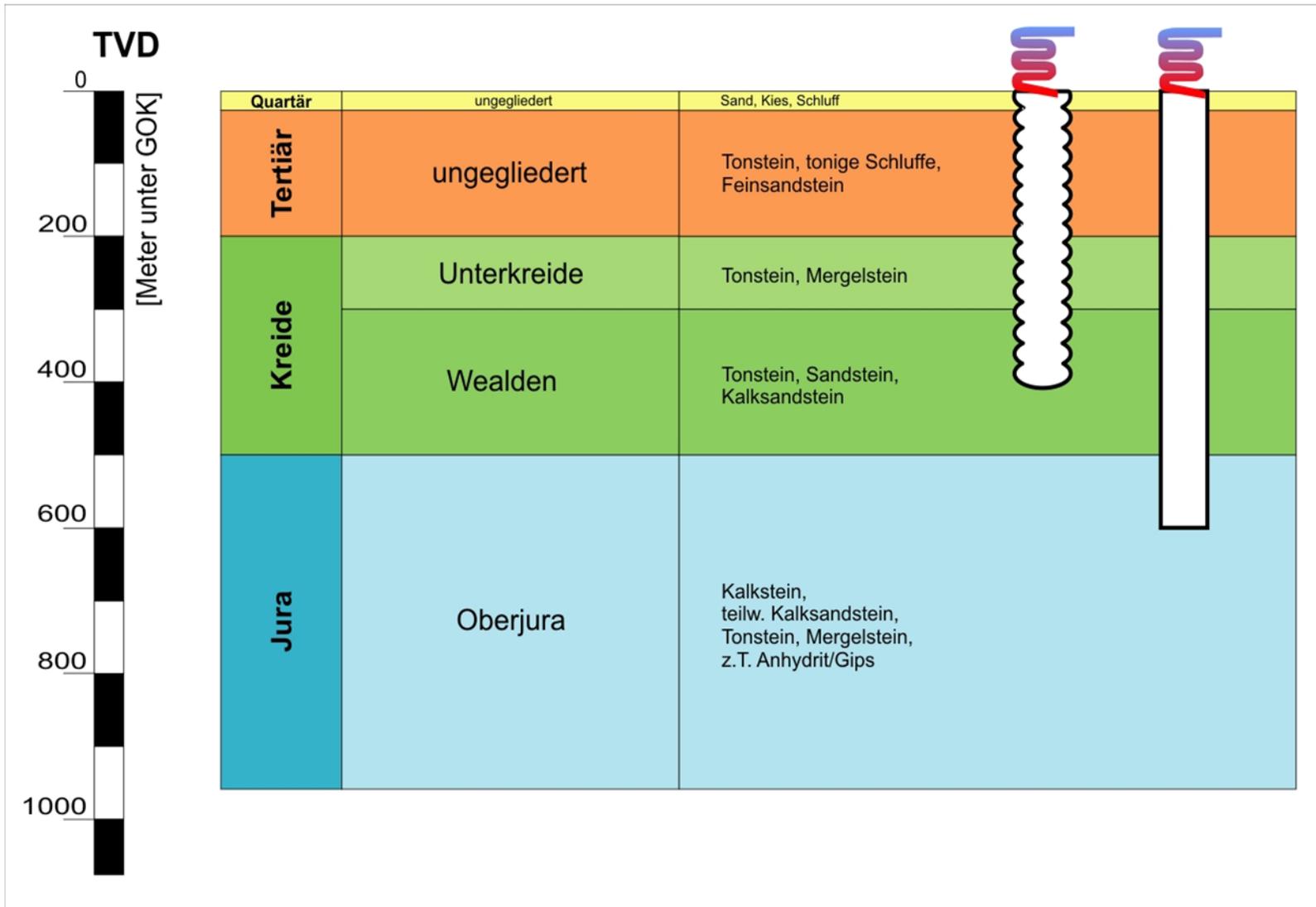
Projekt Nienburg

- Im Projekt Nienburg sind der Ausbau einer 400 m tiefen Bohrung und einer 600 m tiefen Bohrung mit je einem mitteltiefen Erdwärmerohr als Demonstrationsvorhaben vorgesehen, wobei das erstere mit dem bereits erprobtem Wellrohr und das zweite mit Glattrohr ausgeführt wird, um die Unterschiede im Verhalten zu untersuchen.
- An der Pilotanlage sollen Material, Einbautechnik und Leistungsfähigkeit der mitteltiefen CO₂-Sonde mit einem ausführlichen Meßprogramm getestet werden, um über Langzeitmodellierungen die Funktionalität des Systems nachweisen zu können.
- Das mitteltiefe Erdwärmerohr kann besonders dort eingesetzt werden, wo höhere Heizleistungen benötigt werden oder wo durch eingeschränktes Flächenangebot oberflächennahe Sondenfelder nicht erstellt werden können.
- Die prognostizierte Leistung einer mitteltiefen Sonde sollte ausreichen, um ein Mehrfamilienhaus oder ein kleines Bürogebäude zu beheizen.
- Die auf dem Prinzip des Thermosiphon-Wärmerohres basierenden Erdwärmesonden mit CO₂ als Transportfluid kommen ohne äußere Energiezufuhr für den Transportvorgang aus.
- Der Wegfall der Pumpen, die bei den herkömmlichen Solesonden zum Umpumpen des Wärmetransportfluides erforderlich sind, senkt den Energiebedarf und erhöht die Effizienz der Erdwärmeanlage.

Projekt Nienburg



Projekt Nienburg



Wir danken Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.