

Schlussbericht

Verbundvorhaben:

Si-Drill: Entwicklung einer hochtemperaturstabilen Bohrspülung zur Verringerung der Bohrkosten für Projekte der tiefen Geothermie

Teilvorhaben:

Si-Drill: Entwicklung einer hochtemperaturstabilen Bohrspülung zur Verringerung der Bohrkosten für Projekte der tiefen Geothermie

Förderkennzeichen: 03EE4031A
Laufzeit mit Verlängerung: 01.07.2021 – 30.06.2025
Autoren: H. H. Güngör, Prof. Dr. J. Plank
Datum: März 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Professur Bauchemie
School of Natural Sciences
Department Chemie
Technische Universität München



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis	6
I. Kurze Darstellung zu	8
1. Aufgabenstellung	8
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
3.1. Projekthistorie.....	9
3.2. Ablauf des Vorhabens	9
4. Stand von Wissenschaft und Technik.....	13
4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die im Rahmen des Vorhabens genutzt wurden.....	13
4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	13
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
II. Eingehende Darstellung	14
1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	14
1.1. AP1: Praxisgerechte Erfassung der Rheologie der Si-Drill-Spülung.....	14
1.2. AP2: Auswahl von Basiskomponenten für die Si-Drill-Spülung	17
1.3. AP3: Einstellung feldgerechter Eigenschaften der Si-Drill-Spülung.....	21
1.4. AP4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der Si-Drill-Spülung	26
1.5. AP5: Entfernung von Spülrückständen aus dem Bohrloch	27
1.6. AP6: Entsorgung bzw. Wiederverwendung der Si-Drill-Spülung	30
1.7. AP7: Vorbereitung und Begleitung der Feldeinsatz	33
1.8. AP8: Kommunikation und Dokumentation	49
1.9. Zusammenfassung und Ausblick.....	50

1.10. Referenzen	53
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	57
2.1. Personalkosten	57
2.2. Materialkosten	57
2.3. Reisekosten.....	58
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	58
4. Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	59
5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	61
6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	61
Erfolgskontrollbericht.....	62

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
API	American Petroleum Institute
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
CT	Coiled tubing
DHR	Discovery Hybrid Rheometer
FLA	Fluid Loss Additiv
HBM	Hamilton Beach Mixer
IBC	Intermediate Bulk Container
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LZE	Laufzeitende
NMR	nuclear magnetic resonance
PAC	Polyanionische Cellulose
PLZ	Projektlaufzeit
PV	Plastische Viskosität (engl. plastic viscosity)
RT	Raumtemperatur
TOC	gesamter Kohlenstoffgehalt
WGK	Wassergefährdungsklasse
YP	Fließgrenze (engl. yield point)
UA	Unterauftrag
SCC-230	Toninhibitor
SWM-778	Tensid

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Zeitliche Übersicht zum geplanten und tatsächlichen Projektverlauf von Si-Drill..	12
Abb. 2	Schema der Sol-Gel-Umwandlung des Natriumsilikats unter Ausbildung eines Netzwerks aus SiO ₂ -Partikeln, woraus die Viskosität des Silica-Gels resultiert; eingeschlagener Reaktionspfad ist rot markiert.....	15
Abb. 3	Experimenteller Aufbau des 100 L Großansatzes (links) mit anschließender starker Scherung mit Ultra Turrax T65 basic (rechts) an der TUM.....	25
Abb. 4	Viskosität (cP) über Zeit (min) für „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO ₂ -Gehalt vor und nach Versetzen mit SFB-007	29
Abb. 5	Vorrichtung der Fa. Fangmann für die Kernflutversuche.....	30
Abb. 6	YSTRAL Multipurpose X50 mit Leitstrahlmischer	34
Abb. 7	Grober silt von einer Baustelle am TUM Campus in Garching.....	36
Abb. 8	Feiner silt von einer Baustelle am TUM Campus in Garching.....	36
Abb. 9	YSTRAL Multipurpose X100/200 und Hubgestell HG100 mit Leitstrahlmischer. ...	38
Abb. 10	Experimenteller Aufbau von 3 gleichzeitig laufenden, je 1 m ³ -Ansätzen von „Si-Drill“-Feldspülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt bei Fa. YSTRAL	39
Abb. 11	Bohranlage der Fa. Handke Brunnenbau, eingesetzt auf den beiden Geothermiebohrungen in Mainz-Bretzenheim	42
Abb. 12	Tragfähigkeit der unverdünnten „Si-Drill“-Spülungsproben mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt aus den Containern IBC 1 – 5	43
Abb. 13	Spülungsproben aus Bohrloch 1 mit Auswertung der rheologischen Kennwerte PV und YP	44
Abb. 14	Bohrkleinproben von der Geothermiebohrung des ersten Feldversuchs (Tiefe: 26 – 194 m).....	45
Abb. 15	Spülungsproben aus Bohrloch 2 mit Auswertung der rheologischen Kennwerte PV und YP	47
Abb. 16	Bohrkleinproben von der Geothermiebohrung des zweiten Feldversuchs (Tiefe: 4 – 100 m).....	48

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 4.0 % SiO ₂ -Gehalt bei variierten Säurezugabezeiten.....	18
Tab. 2	Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO ₂ -Gehalt bei unterschiedlichen Säurezugabezeiten.	18
Tab. 3	Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt bei unterschiedlichen Säurezugabezeiten	19
Tab. 4	Rheologie von „Si-Drill“ gemessen mit FANN Rheometer bei Raumtemperatur, vor und nach starker Scherung am Hamilton Beach Mixer.....	20
Tab. 5	Wirkung von KCl auf Rheologie von Si-Drill-Spülungen	22
Tab. 6	Toninhibierende Wirkung von KCl in „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO ₂ -Gehalt mit unterschiedlichen Zusatzmengen von Goldseal-Bentonit.....	22
Tab. 7	Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt + 2.0 % von verschiedenen K-Salzen.....	23
Tab. 8	Wirkung von NaCl auf Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO ₂ -Gehalt mit Zusatz von Goldseal Bentonit	23
Tab. 9	Wirkung von CaCl₂ auf Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO ₂ -Gehalt mit Zusatz von Goldseal Bentonit	24
Tab. 10	Filtratkontrolle von „Si-Drill“-Spülung mit 4.0 % SiO ₂ -Gehalt + 2.5 % PAC ULV + 2.0 % Rev-dust mit verschiedenen Dosierungen von Wyoming Bentonit bei 25 °C/100 psi.....	24
Tab. 11	Filtratkontrolle von „Si-Drill“-Spülung mit 4.0 % SiO ₂ -Gehalt + 2.5 % PAC ULV + 2.0 % Rev-dust + 2.0 % Gilsonit bei 25 °C/100 psi	24
Tab. 12	Eingesetzte Säuresysteme von Fa. Fangmann für die return permeability Tests.	28
Tab. 13	CT-Coupons vor und nach einer Expositionsdauer von 6 Stunden bei 150 °C mit verschiedenen Säuren	28
Tab. 14	Ergebnis der Analyse einer „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO ₂ -Gehalt von Fa. Ehgartner	32
Tab. 15	Rheologie des ersten 100 L- Ansatzes von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt bei Fa. YSTRAL	35

Tab. 16	Rheologie des zweiten 100 L- Ansatzes von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt bei Fa. YSTRAL	35
Tab. 17	Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt nach Zugabe von PAC ULV und Bentonit bei RT	37
Tab. 18	API Fluid Loss von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt + 5.0 % silt bei RT.	37
Tab. 19	API Fluid Loss und Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt + 2.0 % FLA bei RT	37
Tab. 20	Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt + 1.0 % Walnussöl	38
Tab. 21	Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt im Container IBC 1 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten	39
Tab. 22	Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt im Container IBC 2 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten	40
Tab. 23	Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt im Container IBC 3 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten	40
Tab. 24	Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt im Container IBC 4 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten	40
Tab. 25	Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO ₂ -Gehalt im Container IBC 5 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten	41
Tab. 26	Im TUM-Labor gemessene Marsh-Trichter-Auslaufzeiten für eine reine Bentonit- und für „Si-Drill“-Spülungen	42
Tab. 27	Übersicht von Veranstaltungen, an denen alle Verbundpartner während der Projektlaufzeit teilnahmen.....	49
Tab. 28	Fortgeschriebener Verwertungsplan: Erfolgsaussichten der Verwertung	60

I. Kurze Darstellung zu

1. Aufgabenstellung

Das Vorhaben sollte dazu beitragen, die geothermische Energiegewinnung durch eine signifikante Senkung der Kosten pro Bohrung attraktiver zu machen. Dazu wurde die Entwicklung einer neuartigen Bohrflüssigkeit angestrebt, welche aufgrund ihrer optimierten rheologischen Eigenschaften einen wesentlich rascheren Bohrfortschritt erlauben sollte, wodurch die Kosten pro Bohrloch erheblich gesenkt werden. Damit soll geothermische Energiegewinnung attraktiver werden.

TU München hat dabei einerseits die wissenschaftlichen Grundlagen für die Herstellung einer Silica-basierten Bohrspülung Flüssigkeit mit optimalen Eigenschaften für den Bohrprozess aus verschiedenen industriellen Silikaten, welche Fa. Wöllner bereitstellte, erarbeitet und geeignete rheologische Messgeräte identifiziert, welche das äußerst ungewöhnliche scherverdünnende Viskositätsverhalten dieser Flüssigkeit zutreffend und für potentielle Interessenten an einem Feldeinsatz überzeugend darstellen konnten.

Der Schwerpunkt des Teilprojekts der TU München liegt in der rheologischen Charakterisierung der Silica-basierten Bohrflüssigkeit (AP 1), der Auswahl und dem Austesten von Basis-komponenten für die Herstellung der Silica-Bohrflüssigkeit (AP 2), der weiteren Optimierung der Bohrflüssigkeit unter Einsatz der rheologischen Messmethoden von AP 1 im Hinblick auf Feldtauglichkeit unter allen auftretenden Bedingungen (AP 3), einer Analyse der Umwelt- und Sicherheitsaspekte des neuen Systems (AP 4) sowie der Entfernung der Si-Spülung aus dem Wirtsgestein (AP 5) und der Entsorgung/Wiederverwendung der Bohrflüssigkeit (AP 6). Zudem wirkte TUM an der Vorbereitung und Begleitung des Feldversuchs mit (AP 7).

Das vorliegende Teilprojekt liefert somit Beiträge zur Rohstoffauswahl sowie zur Herstellung und rheologischen Erfassung der scherverdünnenden Viskositätseigenschaften dieser Bohrspülung. Außerdem wurden ihre Ökologie und das Potential im Rahmen der Kreislaufwirtschaft betrachtet und eine wissenschaftlich-technische Begleitung des Feldversuchs bereitgestellt.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde bis September 2023 so bearbeitet, dass theoretisch eine Patentanmeldung möglich gewesen wäre. Bis dahin war die Kommunikation mit Dritten wie z.B. Entsorgern und Verwertern deutlich eingeschränkt, da keine Details zu der Spülung und ihrer genauen Zusammensetzung kommuniziert werden durften. Beim Projekttreffen 09/2023 in Kandel wurde entschieden, kein Patent, sondern die Marke „Si-Drill“ zu beantragen. Der Eintrag erfolgte am 16.05.2024 rechtsgültig unter der Nummer 30 2023 015 839, Inhaber sind die TUM und Wöllner GmbH.

Der geplante Feldtest erforderte die aktive Unterstützung durch eine Bohrfirma, welche geeignete Bohrprojekte vorschlug, die Zustimmung durch den Projektbetreiber und eine Einzelfallgenehmigung der unteren und oberen Wasserbehörde.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

3.1. Projekthistorie

12/2020: Einreichung des Antrags: Entwicklung einer hochtemperaturstabilen Bohrspülung zur Verringerung der Bohrkosten für Projekte der tiefen Geothermie (Akronym Si-Drill) beim Projektträger Jülich (PTJ), Geschäftsbereich Erneuerbare Energien (EEN) für das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

07/2021 – 06/2024: Projektlaufzeit des ersten Antrags

07/2024 – 06/2025: Kostenneutrale Projektverlängerung der TU München.

3.2. Ablauf des Vorhabens

Insgesamt drei Projektpartner bearbeiteten verschiedene Aufgabenstellungen:

- **BESTEC GmbH** (2021 - 2024)

Teilvorhaben: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Produktkreislaufs von der Herstellung bis zur Entsorgung oder Weiterverwertung

- **Wöllner GmbH** (2021 - 2024)

Teilvorhaben: Auswahl der Basiskomponenten und Optimierung der Spülung für den Feldeinsatz

- **Technische Universität München (TUM)** (2021 - 2025)

Teilvorhaben: Entwicklung von Komponenten einer hochtemperaturstabilen Bohrspülung zur Verringerung der Bohrkosten für Projekte der tiefen Geothermie.

Die Projektkoordination lag bei TUM. Eine Kooperationsvereinbarung zwischen den Verbundpartnern wurde kurz nach Projektbeginn abgeschlossen.

Die Ergebnisse der Arbeiten wurden sowohl in online Meetings, aber vor allem in den halbjährlich stattfindenden Projekttreffen vorgestellt, zu denen immer alle Verbundpartner und, falls nötig, auch deren Unterauftragnehmer in Person oder online anwesend waren.

Die COVID-19 Pandemie beeinträchtigte sowohl 2021 als auch 2022 den ungestörten Projektlauf und führte bei den Projektpartnern zu Verzögerungen, die sich auf die zeitliche Planung verschiedener Arbeitspakete auswirkten. Die Projektziele wurden dadurch jedoch nicht beeinträchtigt und alle geplanten Arbeitsziele und Milestones wurden innerhalb der Projektlaufzeit und/oder im darauffolgenden Jahr mit kostenneutraler Verlängerung abgeschlossen (s. **Abb. 1**).

Der Arbeitsplan der Verbundpartner gliederte sich in acht Arbeitspakete in denen jeweils die Aufgabenstellung und die Interaktionen der Verbundpartner definiert wurden. TUM war in allen Arbeitspaketen aktiv mit folgenden Aufgaben vertreten:

- Rezeptur auf Basis eines Wöllner-Silikats und Identifizierung und Anschaffung eines Rheometers, welches eine zuverlässige rheologische Charakterisierung des Silica-Gels erlaubt (AP 1)
Milestone M 1: Aussagefähige rheologische Charakterisierung der Si-Spülung (TUM).
- Auswahl geeigneter Silikat-Rohstoffe zur Herstellung eines Silica-Gels mit extrem scherverdünnender Viskosität und wissenschaftliche Beschreibung der Umwandlung des Ausgangssilikats in das vernetzte Si-Gel (AP 2)
Milestone M 2: Auswahl geeigneter Basiskomponenten zur Herstellung der Spülung (TUM/Wöllner).
- Optimierung der Zusammensetzung des Silica-Gels für den Feldeinsatz nach Prüfung der Wirksamkeit von diversen Additiven und Herstellung von Großansätzen (AP 3)

Milestone M 3: Rezeptur für optimierte feldgerechte Si-Spülung (TUM).

- In Kooperation mit den Verbundpartnern bewertete TUM die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Bohrspülung unter Berücksichtigung des gesamten Kreislaufs von der Produktion der Spülung über die Verwendung und Entsorgung bzw. deren potenzielle Weiterverwendung in anderen Industriezweigen (AP 4).

Milestone M 4: Fertigstellung des Bewertungskonzept von Silica-basierten Bohrspülungen zur Erarbeitung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (BESTEC).

- Optimierung der Gesteinspermeabilität durch Entfernung der Si-Spülung durch Laborversuche von Unterauftragnehmer Fangmann GmbH (AP 5)

Milestone M 5: Entfernung von Rückständen der Spülung aus den Poren des Trägergesteins (TUM).

- TUM untersuchte hinsichtlich der Wiederverwendung der „Si-Drill“-Spülung die Eignung und als Anmischwasser für die Bohrloch-Zementierung (Guo, Plank (2025)) als Anreger für Schlacken-/ Hochofenzement (A6)

Milestone M 6: Fertigstellung des Entsorgungskonzeptes für die Bohrspülung, die beim Feldversuch zum Einsatz kommt (BESTEC).

- Wissenschaftlich-technische Vorbereitung und Begleitung eines Feldversuches (AP 7)

Milestone M 7: Identifikation von möglichen Projekten mit aktiven Bohrungen, die für einen Test der Spülung in Frage kommen und Kontaktaufnahme zu den Projektverantwortlichen (BESTEC).

- TUM nahm an allen Projekttreffen teil und bearbeitete die Arbeitspakete aktiv in Kooperation mit den jeweiligen Verbundpartnern und deren Unterauftragnehmern und stellte die Ergebnisse in Tagungen (Middle East Oilfield Chemicals 2024, Geotherm 2025, Celle Drilling 2025, DGMK Workshop „Drilling Fluids and Cements“ 2026) und in Publikationen („A Novel Silica Fluid as High-Temperature Drilling Mud for Geothermal Wells – Preparation, Properties and Performance“ von Güngör, Guo and Plank (2025) sowie „Valorization of spent drilling fluid as mixing water in cementing oil, gas and geothermal wells“ von Guo, Plank (2025)) vor. Eine weitere Publikation zum Bildungsmechanismus des 3D-Silica-Netzwerks mit dem Titel „Mechanistic Investigations on the Impact of Shear and Electrolytes on the 3D Network of Polycondensated Nano Silica Particles“ wurde im Journal „Colloids and Surfaces A“ eingereicht (AP 8).

- Milestone M 8: Dokumentation und Veröffentlichung der Ergebnisse (alle Verbundpartner).

4. Stand der Wissenschaft und Technik

4.1. Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Es waren keine bereits bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte vorhanden, die im Rahmen des Vorhabens genutzt wurden.

4.2. Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die verwendete Fachliteratur ist im 2. Abschnitt unter 1.9 im Detail aufgelistet.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die folgenden drei Verbundpartner bearbeiteten das Projekt Si-Drill von 07/2021 bis 08/2024: BESTEC GmbH, Wöllner GmbH und TUM. Die TUM führte die Projektbearbeitung bis 06/2025 fort.

Die Firmen Fangmann GmbH, Ystral GmbH und Wilhelm Reese Speditions-GmbH agierten als Unterauftragnehmer für die TUM ebenso wie die Firma Handke Brunnenbau GmbH, die dabei half geeignete Bohrvorhaben für den Feldtest der „Si-Drill“-Spülung zu identifizieren und eines Ihrer Bohrprojekte für einen Feldtest zur Verfügung stellte.

Bezüglich der Praxisgerechten Erfassung der rheologischen Eigenschaften stand TUM mit Anton Paar, Netsch sowie TA Instruments in Kontakt.

Zur Erstellung einer optimierten, feldgerechten Bohrspülung fanden Gespräche von TUM mit Newpark Drilling Fluids GmbH zur Bereitstellung von diversen Fluid Loss Additiven und Schmiermitteln (Lubricants) statt.

Bezüglich der Entsorgung bzw. Verwertung der „Si-Drill“-Spülung standen alle Verbundpartner mit den Firmen Gerach GmbH, BVU Bioverfahrenstechnik und Umweltanalytik GmbH, J.Ehgartner GmbH, Knettenbrech + Gurdulic Service GmbH & Co. KG, Jakob Becker GmbH & Co.

KG, Müller Kanaltechnik GmbH, HeidelbergMaterials AG und Stadtwerke München GmbH (SWM) in Kontakt.

Der Feldtest erfolgte in Absprache mit der unteren Wasserbehörde, dem Grün- und Umweltamt der Landeshauptstadt Mainz und der oberen Wasserbehörde, der Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd (SGD Süd) sowie mit der konstruktiven Unterstützung des Projekteigentümers, der Gemünden GmbH & Co. KG.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.1. AP1: Praxisgerechte Erfassung der Rheologie der Si-Drill-Spülung

TUM hatte im Rahmen des EU-Projekts „ThermoDrill“ bereits Arbeiten zu optimierten Bohrflüssigkeiten durchgeführt, die mehrfach publiziert wurden. Dabei wurde eine Bohrflüssigkeit auf Basis des Tonminerals Sepiolit entwickelt, welches hinsichtlich Temperaturstabilität gegenüber herkömmlichen Biopolymer-basierten Bohrflüssigkeiten einen erheblichen Fortschritt darstellte. Bei diesen Arbeiten wurden auch alternative Systeme getestet, wobei die besonderen Eigenschaften einer neuartigen Silica-Spülung in ersten Testversuchen visuell begutachtet wurden, jedoch messtechnisch nicht erfasst werden konnten. Praxisnahe Versuche im Labor der TUM unter Zugabe von Quarzpartikeln indizierten jedoch eine sehr gute Austragsfähigkeit und extrem stark scherverdünnendes Verhalten. Es erschien deshalb absolut geboten, dieses neuartige und scheinbar überlegene Spülungssystem eingehend bzgl. seiner rheologischen Kennwerte zu untersuchen und seine Herstellung und Eigenschaften für einen Feldeinsatz weiter zu entwickeln.

Die Silica-Bohrflüssigkeit wurde durch Zugabe von Salzsäure zur wässrigen Lösung eines Natriumsilikats hergestellt. Dabei bilden sich zunächst SiO_2 -Nanopartikel, welche gemäß einem Sol-Gel-Umwandlungsprozess anschließend vernetzen und dabei eine viskose Flüssigkeit ergeben (s. **Abb. 2**).

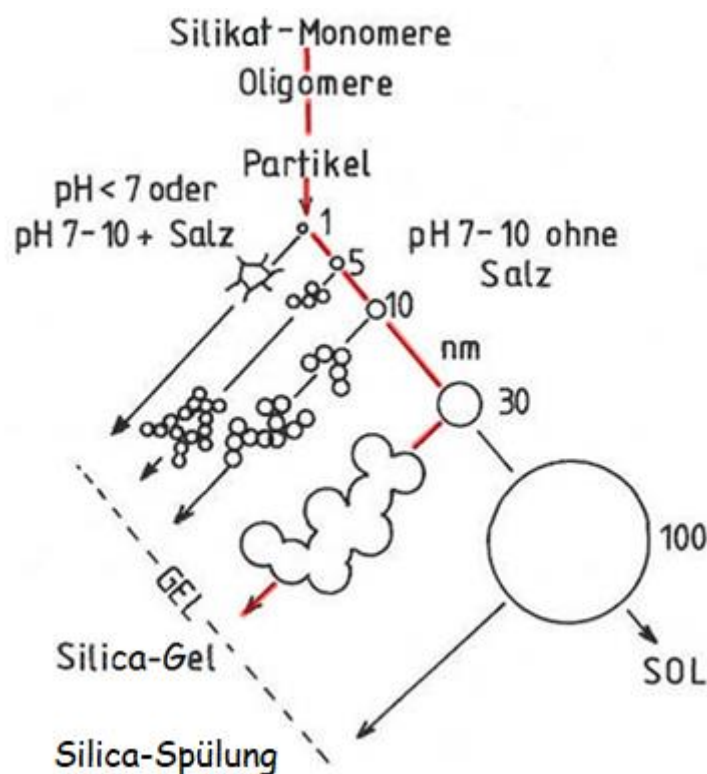


Abbildung 2: Schema der Sol-Gel-Umwandlung des Natriumsilikats unter Ausbildung eines Netzwerks aus SiO₂-Partikeln, woraus die Viskosität des Silica-Gels resultiert; eingeschlagener Reaktionspfad ist rot markiert.

Ziel zu Beginn dieses Projekts war, die Versuche zur Bildung des Silica-Gels wesentlich zu vertiefen (Einsatz verschiedener Alkalisilikate von Wöllner als Rohstoff), um so zu einer weiteren rheologischen und ökologischen Optimierung der Silica-Spülung zu gelangen.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Ausarbeitung eines Synthesewegs, bei welchem die Polykondensation der Nanosilica-Partikel nur partiell erfolgte und vor der Bildung eines durchkondensierten stichfesten Gels gestoppt wurde. Dies war essentiell, um eine praktikable Bohrflüssigkeit zu erreichen.

Im Vorfeld wurden unterschiedliche Bohrf Flüssigkeiten auf Basis von Natriumsilikat, Bentonit, Sepiolit und Welan gum hergestellt und ihre rheologischen Kennwerte (Fließgrenze, Plastische und Scheinbare Viskosität) mit Ölfeld-üblichen Rheometern (FANN/Chandler) bestimmt. Hierbei wurde die Tragfähigkeit (carrying capacity) in Ruhe und unter Belastung (leichtes Schütteln), sowie das Fließverhalten, die Homogenität, die Synäreseneigung sowie die Homogenisierbarkeit qualitativ und quantitativ beurteilt.

Die Messungen mit dem im Ölfeld üblichen und von der API-Norm vorgeschriebenen Rheometer (FANN/Chandler) hatten indiziert, dass kein verlässlicher Zusammenhang zwischen der Tragfähigkeit einer Bohrspülung und der mit dem Rheometer ermittelten Fließgrenze besteht. Eine detaillierte Untersuchung ergab jedoch, dass durchaus ein zuverlässiger Zusammenhang besteht, allerdings sind die für die Silica-Spülung ermittelten Fließgrenzen ca. 50 % niedriger als bei konventionellen Spülungen auf Basis von Bentonit oder Xanthan gum, bei vergleichbarer Tragfähigkeit. Dies ist ein wichtiges Ergebnis, denn dadurch kann der Spülungsingenieur auf der Bohrung die Eignung der Bohrflüssigkeit auch messtechnisch einigermaßen verfolgen und dokumentieren und benötigt kein extrem teures weiteres Rheometer.

Zur exakten rheologischen Charakterisierung der Spülung war die Anschaffung eines Oszillationsrheometers vorgesehen. Dazu fand ein Besuch zu Messungen bei der Fa. Anton Paar statt, außerdem stellte Fa. Netzsch ihr Gerät im TUM-Labor vor und TA Instruments führte eine umfangreiche Messreihe mit unseren Proben durch. Nach zahlreichen Videodiskussionen und Preisverhandlungen mit den Firmen wurde das Rheometer der Fa. TA Instruments/Waters bestellt. Die Einführung durch TA Instruments fand sehr ausführlich als Einführungs- und später als Vertiefungskurs statt.

Mit Hilfe dieses Rheometers ist es möglich, das Viskositätsverhalten der Si-Spülung exakter zu erfassen als mit dem ölfeld-üblichen FANN-Rheometer. So liefern z.B. die beiden Verlustmodule G' und G'' genaue Information über die Elastizität der Spülung, d.h. welcher Pumpendruck zum Anfahren der Zirkulation nötig ist und ob Bohrklein absinkt (= Tragfähigkeit der Spülung). Diese Messungen sollen anhand der vollständig konditionierten Spülung fortgesetzt werden, die weitere Entwicklung der kompletten Spülungsrezeptur unterstützen und daraus eine wissenschaftliche Publikation für eine Fachzeitschrift im Öl/Gas/Geothermie-Bereich erstellt werden (inzwischen erfolgt). Die plastische Viskosität (PV) und die Fließgrenze (YP) sind charakteristische Parameter für die Rheologie. Nach Messungen mit dem neuen DHR-20-Rheometer von TA Instruments konnten wir feststellen, dass der Trend der Werte für beide Geräte relativ ähnlich ist, obwohl die Werte mit dem neuen Rheometer insgesamt höher sind und daher die Unterschiede in den Ergebnissen deutlicher zutage treten. Diese Diskrepanz ist darauf zurückzuführen, dass das DHR-20 Rheometer die statische Fließgrenze (Beginn) erfolgt, während das FANN Viskosimeter die dynamische Fließgrenze (fortgesetztes Fließen unter Belastung) misst. Darüber hinaus berücksichtigt das DHR-20 Rheometer mehr Datenpunkte, was zu einer feineren Messauflösung führt.

1.2. AP2: Auswahl von Basiskomponenten für die Si-Drill-Spülung

Für die Erstellung der Rezeptur der „Si-Drill“-Spülung wurde die vorläufige Rezeptur und das Standard Herstellungsverfahren aus dem EU-Projekt „ThermoDrill“ als Grundlage genommen und modifiziert. Dieses Syntheseverfahren aus dem EU-Projekt beruhte darauf, zunächst das Wasserglas mit Salzsäure sauer zu stellen und anschließend mit Kalilauge teilzuneutralisieren.

Darauf basierend führte TUM zahlreiche Synthesen zur Herstellung optimierter Silica-Fluide mit unterschiedlichen Natriumsilikaten von Wöllner mit unterschiedlichem SiO_2 - und Neutralisationsgrad durch und bestimmte deren rheologische Eigenschaften bis 50 °C. Die Arbeiten erfolgten in Kooperation mit Wöllner. Daraus wurde ein detaillierter Versuchsplan erarbeitet, der wichtige Syntheseparameter systematisch abklärt, um ein gut reproduzierbares Verfahren zur Herstellung einer qualitativ hochwertigen Silica-Flüssigkeit zu erhalten. Wöllner stellte TUM mehrere gezielt ausgewählte Silikate sowie Natriumaluminat als Rohstoffe für weitere Synthesen zur Verfügung. Sie unterschieden sich bzgl. des Molmoduls (Verhältnis $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$), der Konzentration, des Kations (Na oder K) und ggfs. einer Dotierung (z.B. mit Li). Die besten Ergebnisse wurden dabei mit dem Natriumsilikat „Ligasil 39“ erzielt.

Des Weiteren sollte das Verfahren zur Umwandlung des Silikats in eine strukturviskose Flüssigkeit optimiert werden. Dazu wurden pH-Wert und Silikatkonzentration bei der Sol-Gel-Umwandlung variiert. Bei den ersten Versuchen zeigte sich, dass die Herstellmethode und die Mischreihenfolge einen großen Einfluss auf die Qualität der Spülung haben. Auch der pH-Wert am Ende der Synthese stellte sich als sehr entscheidend für die resultierende Tragfähigkeit der Spülung heraus, die durch den Aufbau eines silikatischen Netzwerks erzielt wird.

Für eine bessere Homogenisierung wurden beide Rohstoffe stark vorverdünnt. Zur Optimierung der Qualität wurden verschiedene Konzentrationen, Rührwerke und Rührzeiten getestet (s. **Tab. 1 – 3**). Es zeigte sich, dass der SiO_2 -Gehalt der „Si-Drill“-Spülung wie erwartet einen sehr großen Einfluss auf das System hat. Hohe SiO_2 -Anteile führen zu einer sehr hohen Tragfähigkeit. Jedoch steigt dadurch auch die Fließgrenze, was die Spülung im Ruhezustand wie ein nicht mehr pumpfähiges Gel erscheinen lässt. Zu niedrige SiO_2 -Gehalte reduzieren die Viskosität sowie die Tragfähigkeit und die Stabilität der Spülung.

Tabelle 1: Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 4.0 % SiO₂-Gehalt bei variierten Säurezugabezeiten.

Säurezugabezeit [h]	Messung vor / nach HBM	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
6	vor	9	10	22	32	49	78	29	20
	nach	15	16	74	78	80	87	7	73
8	vor	10	12	25	36	60	88	28	32
	nach	15	16	80	80	81	84	3	78
10	vor	6	10	20	27	43	67	24	19
	nach	16	22	75	78	80	86	6	74
12	vor	9	13	25	35	57	78	21	36
	nach	15	17	87	88	90	94	4	86
14	vor	16	15	42	55	69	109	40	29
	nach	16	24	74	76	78	84	6	72
16	vor	10	11	30	43	56	74	18	38
	nach	15	21	70	70	71	75	4	77

Tabelle 2: Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO₂-Gehalt bei unterschiedlichen Säurezugabezeiten.

Säurezugabezeit [h]	Rührzeit nach Säurezugabe [h]	Messung vor / nach HBM	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
			3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
6	18	vor	3	4	10	19	24	45	21	3
		nach	11	11	31	31	34	43	9	25
16	8	vor	5	6	11	23	32	50	18	14
		nach	10	11	35	36	38	42	4	34

Tabelle 3: Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt bei unterschiedlichen Säurezugabezeiten.

Säurezugabezeit [h]	Rührzeit nach Säurezugabe [h]	Messung vor / nach HBM	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
			3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
6	18	vor	3	4	10	16	21	38	17	4
		nach	7	7	20	21	23	32	9	14
16	8	vor	4	5	13	21	28	45	17	11
		nach	8	8	23	24	27	34	7	20

Es zeigte sich, dass ein SiO₂-Gehalt von 2.2 – 2.4 % in der Spülung bei einem Neutralisationsgrad von 81 % optimale Ergebnisse liefert. Bei diesem Neutralisationsgrad ist die Kondensationsreaktion bereits nahezu abgeschlossen, sodass keine deutliche Nachreaktion stattfindet und der pH-Wert der Spülung pH = 9 – 10 ist. Diese Spülungen sind stabil (keine Entmischung beim Stehen) und zeigen hervorragende Tragfähigkeit, bei gleichzeitig optimaler Verpumpbarkeit (niedrige PV). Beim Abtrennen von Feststoffen mittels Zentrifugieren verhält sich die Spülung wie konventionelle Systeme. Zu beachten ist noch der (allerdings geringe) Lufteintrag beim Anmischen. Die ausgearbeitete Rezeptur für die „Si-Drill“-Spülung, die aus Versuchen bei TUM und Wöllner hervorging, beruht auf leicht verfügbaren Basiskomponenten.

Das optimierte Herstellungsverfahren besteht aus einer 16-stündigen Säurezugabe unter ständigem Rühren und einer nachfolgenden 8-stündigen Rührzeit zur weiteren Homogenisierung. Nach Ende dieser moderaten Rührphase wird die Spülung im Hamilton Beach Mixer für 15 Minuten stark geschert (zur Simulation der Scherung am Bohrmeißel), um die endgültige Viskosität und Tragfähigkeit zu erhalten (s. **Tab. 4**). Die Daten wurden in einem ausführlichen Technischen Bericht gesammelt.

Tabelle 4: Rheologie von „Si-Drill“ gemessen mit FANN Rheometer bei Raumtemperatur, vor und nach starker Scherung am Hamilton Beach Mixer.

SiO ₂ [%]	pH- Wert	Messung vor / nach HBM	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
3.0	9.6	vor	18	14
		nach	4	34
4.0	9.5	vor	18	38
		nach	4	77
5.0	9.4	vor	32	50
		nach	6	88

Bezüglich der wissenschaftlichen Untersuchungen zur Polykondensation des Monosilikats wurden Partikelgrößen- und pH-Wert-Messungen während des Viskositätsaufbaus für unterschiedliche „Si-Drill“-Proben (2.5 %, 3.0 %, 4.0 % SiO₂) durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Hauptreaktion erst nach einer längeren Induktionsphase einsetzt und der pH-Wert dabei deutlich absinkt. Zudem wurden die Proben über 10 Tage immer wieder vermessen, um die zeitliche Entwicklung der SiO₂-Partikelgröße beim Lagern der Spülung zu ermitteln. Es wurde festgestellt, dass die SiO₂-Partikel kondensieren und während des Viskositätsaufbaus bzw. der Polykondensation auf bis zu 95 nm (in 2.5 % SiO₂ „Si-Drill“) heranwachsen. Scheren am Hamilton Beach Mixer führt dazu, dass die Partikelagglomerate wieder zerkleinert werden und die Fließgrenze abnimmt. Zudem wurden ²⁹Si-NMR-spektroskopische Messungen des Ausgangssilikats und des Endprodukts durchgeführt und die Sol-Gel-Umwandlung verfolgt. Demnach ist das Ausgangssilikat bereits ein oligomeres Silikat, das am Ende stark zwei- und dreidimensional vernetzt vorliegt.

Die Reproduktion der Basis-Spülung mit Oxalsäure als Ersatz für HCl mit verschiedenen Neutralisationsgraden wurde zusätzlich untersucht und optimiert, um einen evtl. Ersatz für die HCl zu finden. Es wurden auch darum Partikelgrößenmessungen der Spülung mit Oxalsäure durchgeführt.

Das Warenzeichen „Si-Drill“ wurde am 16. 05. 2024 mit der Registernummer 30 2023 015 839 in das Markenregister eingetragen. Die Veröffentlichung der Eintragung erfolgte am 21. 06. 2024 im Deutschen Markenregister. Eine schriftliche Regelung zwischen den Markeninhabern TUM und Wöllner erfolgte bisher nicht.

1.3. AP3: Einstellung feldgerechter Eigenschaften der Si-Drill-Spülung

Ein Ziel dieses Projektes war es, ein Spülungssystem zu entwickeln, welches über einen weiten Temperaturbereich eingesetzt werden kann und die positiven Trag-, Filtrations-, Toninhibier- und Schmiereigenschaften über einen längeren Zeitraum erhält.

So wurde in diesem AP wurde die Temperaturtoleranz geprüft und Eigenschaften wie Filtratkontrolle, Toninhibierung, Schmierfähigkeit durch Prüfung der Wirksamkeit üblicher Spülungsadditive und in der Feststoffkontrolle untersucht.

Hierzu wurden äußerst umfangreiche und experimentell sehr anspruchsvolle Versuche unter hohem Druck (bis 100 Atm.) und Temperatur (bis 220 °C) durchgeführt. Im Einzelnen waren dies:

- Spülungseigenschaften vor und nach Scherung durch den Bohrmeißel (s. **Tab. 4**)
- Ergebnis: Die Scherung verbessert die Rheologie enorm.

- Temperaturstabilität unter dynamischen (Zirkulation der Spülung) und statischen (Unterbrechung des Bohrprozesses) Bedingungen. Die Spülung zeigt gute rheologische Werte bis 170 °C, die auch durchaus akzeptabel bis 200 °C sind.
- Ergebnis: Die Spülung zeigt gute rheologische Werte bis 170 °C, die auch durchaus akzeptabel bis 200 °C sind.

- Einstellung von Filtratkontrolle im niedrigen, mittleren und hohen Temperaturbereich mit industriellen Produkten (Stärke, Polyanionische Cellulose, synthetischem sulfoniertem Polymer).
- Ergebnis: Die Filtratkontrolle kann mit den ausgewählten, unterschiedlichen Additiven in allen Temperaturbereichen verbessert werden.

- Einstellung von Toninhibierung mit K-Salzen, insbesondere KCl (s. **Tab. 5 – 7**).

Tabelle 5: Wirkung von KCl auf Rheologie von Si-Drill-Spülungen.

SiO ₂ [%]	KCl [%]	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
		4.0	-	15	21	70	70	71	75
	5.0	13	20	38	42	45	54	9	36
5.0	-	18	27	76	87	94	100	6	88
	5.0	11	20	54	55	56	60	4	52

Tabelle 6: Toninhibierende Wirkung von KCl in „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO₂-Gehalt mit unterschiedlichen Zusatzmengen von Goldseal-Bentonit.

Goldseal Bentonit [%]	KCl [%]	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
		-	-	5	6	11	16	21	32
	2.0	11	12	21	29	37	63	26	11
	4.0	13	13	23	28	34	63	29	5
4.0	-	15	17	23	33	42	69	27	16
	2.0	4	5	9	15	20	34	14	6
	4.0	3	3	7	10	14	25	11	3
8.0	-	38	56	73	78	105	175	70	35
	2.0	10	11	13	20	26	44	18	8
	4.0	3	5	10	15	22	38	16	6

Tabelle 7: Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt + 2.0 % von verschiedenen K-Salzen.

Salz	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
	3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
-	8	9	34	35	36	46	10	26
K ₂ CO ₃	5	6	13	17	23	34	11	12
K-Format	4	6	12	16	21	31	10	11
K-Sorbat	4	6	11	14	18	26	8	10

- Ergebnis: Jedoch wirkt sich die Salzzugabe negativ auf die Rheologie aus, indem sie den YP halbiert.
- Erzielung von optimalen Schmiereigenschaften mit Hilfe eines bioabbaubaren Schmiermittels der Fa. Newpark Drilling Fluids GmbH.
- Ergebnis: Durch Einsatz von Additiven werden die Anforderungen bereits bei geringer Dosierung übertroffen.
- Bestimmung der Salztoleranz mit verschiedenen Salzen wie NaCl (s. **Tab. 8**) und CaCl₂ (s. **Tab. 9**).

Tabelle 8: Wirkung von NaCl auf Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO₂-Gehalt mit Zusatz von Goldseal Bentonit.

Goldseal Bentonit [%]	NaCl [%]	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
-	-	12	13	43	43	44	50	6	38
	5.0	10	14	20	25	30	42	12	18
4.0	-	24	22	25	33	42	67	25	17
	5.0	8	12	13	17	22	33	11	11
	10.0	9	14	15	19	24	37	13	11
	15.0	9	13	15	20	25	39	14	10
	26.0	8	11	15	19	23	35	12	11

Tabelle 9: Wirkung von CaCl_2 auf **Rheologie** von „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO_2 -Gehalt mit Zusatz von Goldseal Bentonit.

Goldseal Bentonit [%]	CaCl ₂ [%]	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
-	-	12	13	43	43	44	50	6	38
	5.0	6	7	13	18	24	36	12	12
4.0	-	13	14	20	28	38	62	24	14
	5.0	12	16	21	27	32	57	25	7

- Ergebnis: Auch mit diesen Salzen wird die Rheologie, insbesondere der YP-Wert halbiert.
- Verbesserung der Filtratkontrolle durch Zusatz von Bentonit oder Gilsonite (s. **Tab. 10 – 11**).

Tabelle 10: Filtratkontrolle von „Si-Drill“-Spülung mit 4.0 % SiO_2 -Gehalt + 2.5 % PAC ULV + 2.0 % Rev-dust mit verschiedenen Dosierungen von Wyoming Bentonit bei 25 °C/100 psi.

Wyoming Bentonit [%]	API Fluid Loss [mL]
-	13.0
1.0	12.0
2.0	11.0

Tabelle 11: Filtratkontrolle von „Si-Drill“-Spülung mit 4.0 % SiO_2 -Gehalt + 2.5 % PAC ULV + 2.0 % Rev-dust + 2.0 % Gilsonit bei 25 °C/100 psi.

Zusatz	API Fluid Loss [mL]
Gilsonit Aquasol 450	11.2
Gilsonit HT 450	10.8

- Ergebnis: Je höher die Dosierung, desto besser wird die Filtratkontrolle durch die Bildung eines Filterkuchens.

Alle Versuche zur Verträglichkeit mit Spülungsadditiven wurden in einem technischen Laborbericht und Handbuch mit insgesamt 210 Seiten ausführlich dargelegt und zusammengefasst.

Die Herstellung der Basis-Spülung wurde vom 1 L-Labormaßstab auf 15 L, 30 L sowie zuletzt 100 L (s. **Abb. 3**) hochskaliert und getestet. Die Ergebnisse stimmten überwiegend mit den Ergebnissen der Versuche im Labormaßstab überein. Es war zu beobachten, dass die Rheologiewerte, vor allem die Fließgrenze, nach starkem Scheren abnehmen, aber die Tragfähigkeit der Spülung dennoch gegeben ist. Auch bereits nach Ende der Säurezugabe ist diese Eigenschaft in hohem Maße vorhanden und verbessert sich nach 8-stündigem Rühren weiter. Dieser Befund bestätigte, dass die Spülung im Feld bei der Herstellung nicht stark geschert werden muss.



Abbildung 3: Experimenteller Aufbau des 100 L Großansatzes (links) mit anschließender starker Scherung mit Ultra Turrax T65 basic (rechts) an der TUM.

Die Ergebnisse bestätigen, dass „Si-Drill“ als neuartige Bohrflüssigkeit für Bohrungen bis mindestens 200 °C, geeignet ist.

Lediglich der Einbruch der Viskosität bei KCl-Zugabe erschien ungünstig, sodass die Salztoleranz der Spülung bzgl. KCl intensiver untersucht wurde. Dafür wurde die Synthese umgekehrt, d. h. das Natriumsilikat zur Salzsäure gegeben. Es stellte sich heraus, dass die Behandlungsreihenfolge je nach Art der KCl-Zugabe die Viskosität unterschiedlich beeinflusst. Gibt man zuletzt Salz hinzu, wird die Rheologie halbiert. Findet die KCl-Zugabe hingegen vor der

starken Scherung statt, sinkt PV, während der YP steigt, was sogar zu einer weiteren Verbesserung der Spülrheologie führt.

TUM hat zudem Versuche zur Feststoffkontrolle der „Si-Drill“-Spülung im Vergleich zu einer herkömmlichen Bentonitpülung durchgeführt und festgestellt, dass beim Zentrifugieren die Trennung bei „Si-Drill“ erheblich effizienter erfolgt.

Es bestätigte sich, dass mit höherem Feststoffgehalt die Abtrennung der Spülfeststoffe bei der Zentrifugation weniger effektiv war, ähnlich wie dies bei Bentonit der Fall ist.

1.4. AP4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der Si-Drill-Spülung

TUM hat dem Verbundpartner BESTEC die dafür erforderlichen Rezepturen inkl. der Rohstoffspezifikationen übermittelt. BESTEC stellte die Ergebnisse im Abschlusstreffen am 06. 08. 2024 in Garching vor. Si-Drill wurde als ein stabiles Spülungssystem mit exzellenten Trag- und Bohlochreinigungseigenschaften bewertet, das vielversprechend für tiefe bis mitteltiefe Bohrungen erscheint. Der wesentliche Vorteil einer „Si-Drill“-Spülung liegt im höheren Bohrfortschritt, da das Bohrklein nicht mehrfach auf der Sohle zermahlen, sondern ausgetragen wird. Die Spülung verhält sich eindeutig thixotropisch, sodass sich ein Vorteil bei Unterbrechungen der Zirkulation ergibt und die Sicherheit des Bohrvorgangs erheblich verbessert wird. Das Bohrklein sinkt bei Stillstand der Zirkulation nicht ab, der Bohrstrang bleibt frei beweglich. Die Spülung lässt sich vor Ort leicht handhaben und ist leicht zu verdünnen. Damit ist eine Reduzierung der Dichte der Spülung bei Aufladung mit Bohrklein möglich. Eine detaillierte Kostenanalyse zum Einsatz der „Si-Drill“-Spülung findet sich im Abschlussbericht der Fa. BESTEC.

Zusätzliche Kalkulationen anhand der Erkenntnisse aus zwei Feldversuchen bei Bohrungen für oberflächennahe Geothermie in Mainz bestätigten mögliche Kosteneinsparungen. Weitere Untersuchungen sollten künftig an Tiefbohrungen erfolgen und Informationen zur Materialtrennung, Verträglichkeit mit Additiven und Salzzuflüssen ergeben. Dafür fehlt derzeit noch eine wasserrechtliche Genehmigung.

1.5. AP5: Entfernung von Spülungsrückständen aus dem Bohrloch

Eine Spülung, welche die Bohreffizienz deutlich steigert ist nur dann ein Gewinn, wenn die benötigten Produktkomponenten verfügbar, kostengünstig und umweltverträglich sind und Rückstände der Spülung nach Abschluss der Bohrung einfach aus dem Bohrloch entfernt werden können.

Gerade bei Silica-basierten Spülungssystemen kann dies eine Herausforderung darstellen, da die Löslichkeit von Silika (SiO_2) in klassischen Säuren wie Salzsäure oder in einfachen organischen Säuren sehr eingeschränkt ist. Da dieser Sachverhalt allen Verbundpartnern im Vorfeld bewusst war, wurde besonderen Wert daraufgelegt, dass Reste einer „Si-Drill“-Spülung einfach aus dem Gestein und aus dem Nahfeld der Bohrung in der Zielformation entfernt werden können. Der Begriff „Entfernen“ bedeutet hier ein kontrolliertes Auflösen der Spülung, die vom Bohrloch in benachbarte Formationen gespült wurde. Ungewollte neue Mineralneubildungen sollten vermieden werden. Gemeinsam mit den Verbundpartnern wurde diskutiert, welche Fragestellungen bei der Entfernung von Spülungsresten aus der Zielformation und aus der Bohrung im Hinblick auf die neu entwickelte „Si-Drill“-Spülung relevant werden könnten. Dabei traten zwei Schwerpunkte in den Vordergrund:

1. Kontrollierte Entfernung von Spülungsresten,
2. Reinigung und Freilegung von Formationsgestein, welches Spülung enthält.

Die Firma Fangmann GmbH wurde von der TUM beauftragt, verschiedene Versuche mit der „Si-Drill“-Spülung unter Verwendung ihrer anorganischen Säuren durchzuführen. Der Hauptbestandteil des von Fa. Fangmann verwendeten SSB-007-Systems ist eine starke organische Säure mit sehr niedrigem Dampfdruck. Es ist geruchlos und entwickelt keine gefährlichen flüchtigen Stoffe. Darüber hinaus weist SSB-007 eine geringe Toxizität für Wasserlebewesen auf und ist innerhalb von 28 Tagen biologisch abbaubar, wobei nur CO_2 und Sulfate entstehen. Zur Behandlung von Sandsteinformationen wird NH_4HF_2 zu einer SSB-007-basierten Rezeptur hinzugefügt, wodurch das SFB-007-System entsteht (s. **Tab. 12**).

Gemeinsam wurden verschiedene Versuchsszenarien ausgearbeitet und bestimmt, welche Reservoirgesteine für die Versuche geeignet sein könnten. Für die Durchströmungsversuche wurden ein Berea – Sandsteinkern sowie ein Bohrkern von der Geothermiebohrung EPS-1 aus Soultz-sous-Forêts (bereitgestellt von BESTEC) eingesetzt.

Im ersten Schritt wurde die Löslichkeit der Sandsteinproben gemessen. Die Löslichkeit des Kernmaterials wurde in sauren Behandlungsflüssigkeiten bestimmt und als zufriedenstellend


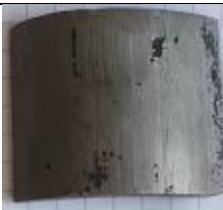

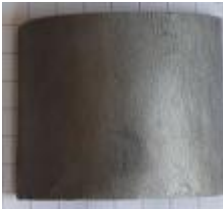
bewertet. Durch Zugabe geeigneter Korrosionsinhibitoren wurde eine optimierte Flüssigkeitsrezeptur erzielt, die für die Behandlung von Sandsteinen nach dem Eindringen von „Si-Drill“-Spülung empfehlenswert ist (s. **Tab. 12**).

Tabelle 12: Eingesetzte Säuresysteme von Fa. Fangmann für die return permeability Tests.

Säure	Fluidzusammensetzung pro m ³
SSB-007	10 % Säure + 50 kg SCC-230 + 20 L SWM-778
SFB-007	20 % Säure + 40 kg SCC-230 + 20 L SWM-778 + 50 kg NH ₄ HF ₂

Um die Verträglichkeit von Metallrohren mit den säurehaltigen Behandlungsflüssigkeiten zu bestimmen, wurden zusätzlich Korrosionstests mit geeigneten Stahl-Probekörpern durchgeführt. Die Korrosionsbeständigkeit von Stahl L-80 und CT-Stahl wurde getestet. Die Oberfläche wurde rau, aber es war kein corrosion pitting (Lochfraß) zu beobachten. Bei Korrosionstests mit L-80 wird der Schwellenwert von < 0,050 lbs/ft² bei allen Rezepturen und unter allen Bedingungen erreicht. Die Korrosionsraten sind insgesamt höher bei 150 °C als bei 80 °C. Im Fall des CT-Stahls wurde festgestellt, dass die Expositionsdauer bei 80 °C maximal 6 h und bei 150 °C maximal 4 h betragen darf, da ansonsten starke Lochfraßkorrosion auftritt (s. **Tab. 13**).

Tabelle 13: CT-Coupons vor und nach einer Expositionsdauer von 6 Stunden bei 150 °C mit verschiedenen Säuren.

Säuresystem mit	vorher	nachher
SSB-007		
SFB-007		

Schließlich wurde die Kompatibilität von „Si-Drill“ und SFB-007 durch Viskositätsmessungen untersucht. **Abbildung 4** zeigt die Viskosität (in cP) der verdünnten „Si-Drill“-Spülung mit einer

grünen Kurve. Nach Behandlung der Bohrspülung mit SFB-007 (orange Kurve) kommt es zu einem vollständigen Verlust der Flüssigkeitsviskosität. Dieser Viskositätsverlust deutet darauf hin, dass eine weitgehend vollständige Entfernung der „Si-Drill“-Spülung möglich ist.

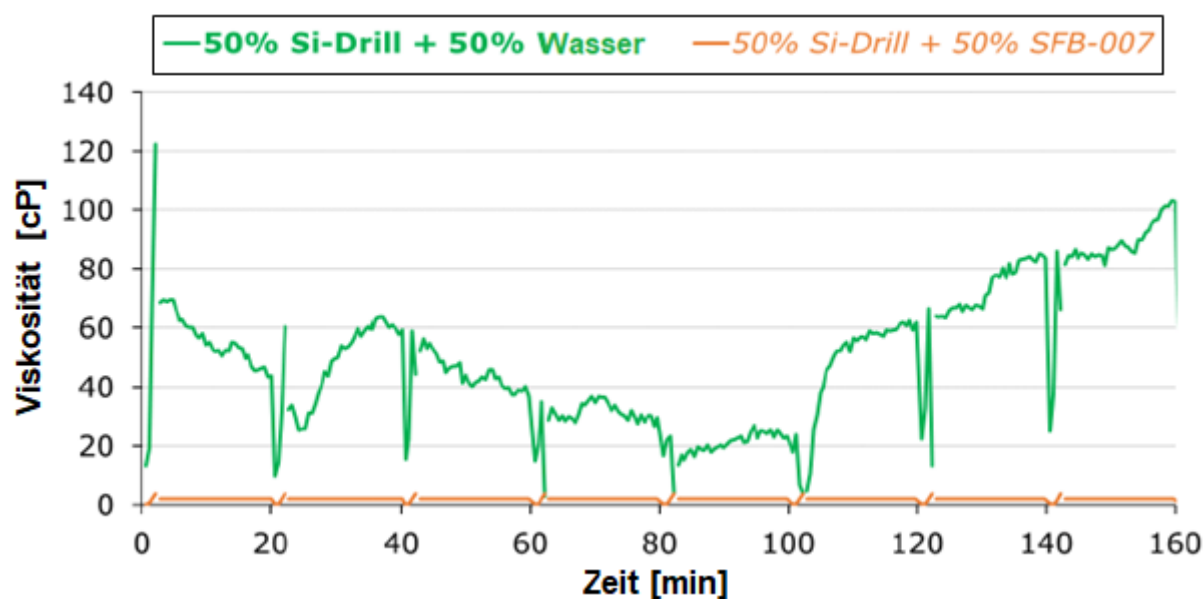


Abbildung 4: Viskosität (cP) über Zeit (min) für „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO₂-Gehalt vor und nach Versetzen mit SFB-007.

Des Weiteren wurden umfangreiche Kernflutversuchen bei 80 °C/1500 psi Einschlussdruck und ohne Gegendruck und 150°C/ 2000 psi Einschlussdruck mit einem Gegendruck von 200 psi unter Verwendung einer Kernflutungsvorrichtung (s. **Abb. 5**) durchgeführt.



Abbildung 5: Vorrichtung der Fa. Fangmann für die Kernflutversuche.

Dabei konnte die Spülung sowohl aus dem Berea-Sandstein als auch aus dem Soultz-Sandstein komplett durch die Säure entfernt werden. Die Säure SFB-007 löst primär „Si-Drill“, aber auch Silikatbestandteile aus den Poren des Sandsteins und vergrößert dessen Permeabilität. Die im Abschlusstreffen präsentierten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die „Si-Drill“-Spülung sowohl aus der Bohrung als auch aus dem Reservoir gut entfernt werden kann.

1.6. AP6: Entsorgung bzw. Wiederverwendung der Si-Drill-Spülung

Die „Si-Drill“-Spülung sollte im Rahmen dieses Forschungsprojektes von der Herstellung über die Verwendung bis zur Verwertung/Entsorgung betrachtet werden. In Deutschland dürfen

keine Abfälle erzeugt werden, die nach Europäischer und Deutscher Gesetzgebung nicht entsorgbar sind. Dies trifft auf die „Si-Drill“-Spülung nicht zu, diese ist sowohl als frisch angesetzte Spülung als auch nach Gebrauch im Rahmen der deutschen Vorschriften und Gesetze verwert- bzw. entsorgbar. Allerdings kann es durch den enthaltenen hohen Chloridgehalt im Wasser-Zentrifugat der Spülung durchaus zu hohen Entsorgungskosten kommen, insbesondere wenn eine technische Vorbehandlung notwendig wird.

Technische Optionen zur Reduzierung des Feststoffgehaltes der „Si-Drill“-Spülung wie mögliche Fällungsreaktionen, z. B. durch Zugabe von Al-Salzen, wurden mit den Verbundpartnern diskutiert. Nach Einsatz der Spülung ist diese mit Reservoirgestein beladen, auch nach der Aufbereitung mittels Rüttelsieben und Zentrifugen.

Die gebrauchte Spülung muss kostengünstig im Rahmen der aktuellen Gesetzgebung verwertet oder entsorgt werden. Das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) sieht die Entsorgung von Abfällen nur dann vor, wenn eine Wieder- oder Weiterverwendung nach der bestehenden Gesetzeslage nicht möglich ist. Eine Verwertung in anderen Industriebereichen ist also immer der Entsorgung vorzuziehen.

Die Entsorgungskosten steigen an, je höher der Salzgehalt der Spülung ist. Dies kann sowohl durch den bereits hohen Salzgehalt (NaCl) beim Herstellen der Spülung bedingt sein, aber auch durch die Kontamination mit salzhaltigen Formationswässern. Zusammen mit den Verbundpartnern evaluierte BESTEC ein mögliches Recycling bzw. die Verwertung oder Entsorgung im Wirtschaftskreislauf nach europäischen und deutschen Gesetzen und Verordnungen.

Bis zum Projekttreffen in Kandel am 06. – 07. 09. 2023 wurden Angaben zur Spülung noch als schutzwürdig hinsichtlich einer möglichen Patentanmeldung behandelt und die Rezeptur konnte mit Dritten nicht geteilt werden. Daher wurde das folgende gemeinsame „Wording“ zur Kontaktaufnahme mit Dritten ausgearbeitet:

Die Bohrspülung ist eine Produktneuentwicklung, die sich von den klassischen Spülungen wie z.B. Bentonit oder Xanthan Gum unterscheidet. Sie ist wasserbasiert und folgende Komponenten sind bei der Entsorgung/Verwertung von Interesse:

- Silicium (bis zu 14 g/kg)
- Chlorid (bis zu 8 g/kg)
- Natrium (bis zu 7 g/kg).

Der Originalsubstanz werden verschiedene Additive beigemischt:

- einfache, organischen Verbindungen wie z.B. Stärke, Cellulose oder Zitronensäure,
- Kaliumchlorid,

- eventuell synthetische Polymere,
- komplexere Verbindungen wie Biozide, Schmiermittel oder Korrosionsinhibitoren.

Der Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC) kann durch die Additive bis zu 2 Gew.% betragen.

Beim Projekttreffen der Verbundpartner am 06. – 07. 09. 2023 in Kandel wurde gemeinsam beschlossen, dass auf die Spülung kein Patent angemeldet wird. Damit konnten an Entsorger, Verwerter und Recycling-Firmen deutlich mehr Informationen weitergegeben werden als zuvor, was die Kommunikation erheblich erleichterte.

TUM hat diesbezüglich Gespräche mit Fa. Ehgartner geführt, einem Spezialisten für die Entsorgung von Bohrspülungen aus Geothermiebohrungen und mit Sitz bei München. Fa. Ehgartner erhielt eine repräsentative, voll formulierte Spülungsprobe mit allen üblichen Spülungsadditiven zur Bestimmung charakteristischer Kerngrößen für die Entsorgung wie TOC-, Chlorid-, Nitrat- und Schwermetallgehalt (**s. Tab. 14**). Des Weiteren wurden die gültigen Entsorgungsrichtlinien und Entsorgungsmöglichkeiten in Salzkavernen, Deponien und im Zementwerk diskutiert. Bei den Analysenergebnissen zur voll formulierten Spülungsprobe wurde wie erwartet ein hoher Chloridgehalt festgestellt.

Tabelle 14: Ergebnis der Analyse einer „Si-Drill“-Spülung mit 3.0 % SiO₂-Gehalt von Fa. Ehgartner.

Ion	Analytische Werte
Sulfat	150.0 mg/L
Chlorid	4.600.0 mg/L
Nitrat	< 0.5 mg/L
Fluorid	11.0 mg/L

Stichfester Bohrschlamm mit Bohrklein kann nach LAGA unter Z1.1 grundsätzlich als Verfüllmaterial bei technischen Bauten verwertet werden, solange die gesetzlich festgelegten Grenzwerte eingehalten werden. Bei der „Si-Drill“-Spülung ist aufgrund des hohen Chloridgehaltes der Grenzwert von 30 mg/L für Chlorid einzuhalten. Die AVV-Nummer für diese Art der Verwertung wäre „17 05 04 Boden und Steine mit Ausnahme denjenigen, die unter 17 05 03 fallen“ liegt.

Bei den beiden Feldversuchen nahm BESTEC Kontakt zu verschiedenen Firmen auf, um die Entsorgung der im Feldversuch verwendeten Bohrspülung sicherzustellen. Ziel war es, das

Material als stichfesten Bohrschlamm in technischen Bauten zu verwerten, im besten Fall als Z0 oder Z.1.1. Dazu sollte die Wassermenge deutlich reduziert werden, was über einfaches Absetzen des Materials erreicht werden sollte. Dies war jedoch über mehrere Wochen nicht möglich. Zuerst wurden als mögliche Ursache dafür nur die quellfähigen Tonminerale diskutiert, bis der Verbundpartner Wöllner eine Analyse von Bohrschlammproben durchführte. Dabei wurden der Wassergehalt und Feststoffgehalt vor und nach dem Zentrifugieren bestimmt. Sowohl im Zentrifugat als auch aus dem Eluat des Feststoff wurde die Chlorid-Konzentration bestimmt und daraus der Restgehalt an „Si-Drill“-Spülung berechnet. Es wurde deutlich, dass sich noch etwa 5 – 8 % „Si-Drill“-Spülung im Rückstand befanden. In Kombination mit quellfähigen Tonmineralien hält das Spülungs- Bohrschlammgemisch das Restwasser im Rückstand und verlangsamt die Entwässerung per Schwerkraft enorm.

Als Konsequenz wurde mit der TUM vereinbart, dass nicht gewartet wird, bis sich eine schnittfeste Masse bildet, sondern die Beprobung und Analyse des Bohrschlammes direkt erfolgt und basierend auf den Ergebnissen ein Entsorgungsweg gefunden wird.

Die Firma Gerach GmbH wurde von TUM sowohl mit der Stellung des Lagercontainers für die eingesetzte Feldspülung als auch mit der Ausarbeitung des Entsorgungswegs beauftragt. Die Beprobung nach PN LAGA 98 und Analytik durch BVU Bioverfahrenstechnik und Umweltanalytik GmbH ergab, dass die Entsorgung im Sinne einer Verwertung als Süßwasserschlamm in einer Anlage für Bodenbehandlung möglich ist. Der Bohrschlamm selber ist nicht als belastetes Material anzusehen, sondern dient dazu, anderes, belastetes Bodenmaterial aufzubereiten, z.B. durch die gezielte Zugabe bestimmter Mikroorganismen. Nach Abfallverzeichnisverordnung kann die Verwertung über die AVV Nr. „17 05 04 Boden und Steine mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 05 03 fallen“ erfolgen.

TUM hat im Sinne einer Kreislaufwirtschaft außerdem die Wiederverwendung der Spülung als Anreger für Schlacken-/Hochofenzemente (CEM III) im Beton und als Zusatz für die Bohrloch-Zementierung von Öl-, Gas- und Geothermiebohrungen untersucht, dabei sehr positive Ergebnisse erhalten und diese publiziert (Guo, Plank (2025)). Damit könnte die Entsorgung sogar gänzlich entfallen und Ressourcen sowie Kosten gespart werden.

1.7. AP 7: Vorbereitung und Begleitung Feldeinsatz

Im Anschluss an die Laborversuche sollte die neu entwickelte Bohrspülung in einer Bohrung für tiefe Geothermie unter Praxisbedingungen (hohe Temperatur und hohe Drücke) getestet werden. TUM führte erste Gespräche mit den Münchner Stadtwerken (SWM), dem Hauptakteur bezüglich Geothermie in Deutschland, ohne technische Details preiszugeben. Es wurde

allerdings früh klar, dass ein erster Test in einer oberflächennahen Bohrung unter kontrollierbaren Bedingungen mit kleinen Spülvolumina von wenigen m³ die zielführende Herangehensweise darstellt. Zudem konnte für einen solchen Test ein Kooperationspartner gewonnen werden. Die Firma Handke Brunnenbau GmbH erklärte sich einverstanden, über geeignete Bohrprojekte zu informieren und mit den Bauherren über eine mögliche Realisierung des Feldtests zu sprechen.

Als Vorbereitung für den Feldversuch wurde Fa. YSTRAL beauftragt, 100 L-Ansätze mit ihrem Multipurpose-Aggregat X50 und dem Leitstrahlmischer als Mischkopf im Technikum der Firma anzumischen (s. **Abb. 6**).



Abbildung 6: YSTRAL Multipurpose X50 mit Leitstrahlmischer.

Im ersten Versuch konnte eine Spülung mit einigermaßen akzeptabler Tragfähigkeit erzielt werden, die jedoch einen unerwartet niedrigen pH-Wert aufwies. Nach Erhalt der Proben von Fa. Ystral stellte TUM in nachträglichen Untersuchungen fest, dass die rheologischen Eigenschaften niedriger waren im Vergleich zu den Versuchsergebnissen der TUM (s. **Tab. 15**).

Tabelle 15: Rheologie des ersten 100 L- Ansatzes von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt bei Fa. YSTRAL.

Messung vor / nach HBM	pH- Wert	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
		vor (nach 1 d)	8.0	2	3	6	11	14	26
nach (nach 1 d)	8.0	10	10	32	36	40	59	19	21
vor (nach 11 d)	8.4	1	2	5	9	12	23	11	1
nach (nach 11 d)	8.4	8	8	29	34	39	58	19	20

Zudem trat stärkeres Bluten (Wasserabsonderung) der Spülung auf. Außerdem wurde festgestellt, dass die von Fa. Wöllner an YSTRAL mitgeteilte Säurekonzentration nicht der Angabe auf dem verwendeten Gebinde entsprach, weshalb der zweite Versuch bei YSTRAL nach Rücksprache mit TUM mit einer berichtigten Säuremenge durchgeführt wurde (s. **Tab. 16**). Diese Spülung wies dann eine erheblich bessere Qualität auf und entsprach voll den Erfahrungen im TUM-Labor mit Ansätzen bis 1 L.

Tabelle 16: Rheologie des zweiten 100 L- Ansatzes von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt bei Fa. YSTRAL.

Messung vor / nach HBM	pH- Wert	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
		vor (nach 10 d)	10.4	3	3	9	14	22	34
nach (nach 10 d)	10.4	7	6	30	45	67	74	7	60

TUM führte des Weiteren umfangreiche Versuche zur Konditionierung der Spülung mit PAC ULV, Bentonit, silt (tonhaltiger Boden, s. **Abb. 7, 8**), STÜWA-FLOW PAC und Walnussöl durch (s. **Tab. 17, 18**).



Abbildung 7: Grober silt von einer Baustelle am TUM Campus in Garching.



Abbildung 8: Feiner silt von einer Baustelle am TUM Campus in Garching.

Tabelle 17: Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt nach Zugabe von PAC ULV und Bentonit bei RT.

PAC ULV [%]	Bentonit [%]	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT								API Fluid Loss [mL]
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]	
-	-	4	5	13	15	18	24	6	12	209.6
2.0	-	10	14	65	111	150	257	107	43	25.4
2.0	2.0	28	42	236	>300	>300	>300	N/A	N/A	11.0

Tabelle 18: API Fluid Loss von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt + 5.0 % silt bei RT.

silt	API Fluid Loss [mL]
-	25.4
grob	16.8
fein	17.0

Dabei wurde festgestellt, dass silt den Fluid Loss der Spülung durch Aufbau eines dichteren Filterkuchens erheblich verbessert. Außerdem war STÜWA-FLOW PAC effektiver als PAC ULV, jedoch stellte es sich als ungeeignet heraus, da PV extrem stark erhöht wird (s. **Tab. 19**).

Tabelle 19: API Fluid Loss und Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt + 2.0 % FLA bei RT.

Fluid Loss Additiv	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT								API Fluid Loss [mL]
	3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]	
PAC ULV	5	9	60	102	139	246	107	32	29.0
STÜWA-FLOW PAC	94	150	>300	>300	>300	>300	N/A	N/A	15.8

Der Zusatz von Walnussöl als Toninhibiermittel hingegen zerstört die Rheologie, aber inhibiert den Ton hervorragend (s. **Tab. 20**). Ein ähnlicher, aber geringerer Effekt wurde an Bentonitspülungen beobachtet.

Tabelle 20: Rheologie von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt + 1.0 % Walnussöl.

Walnussöl [%]	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
	3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
0.0	5	5	16	20	31	48	17	14
1.0	2	3	7	12	16	31	15	1

Nach dem erfolgreichen zweiten 100 L- Anmischversuch bei YSTRAL wurden im April 2024 insgesamt 5 m³ Spülung mit dieser Mischausrüstung hergestellt (s. **Abb. 9**).



Abbildung 9: YSTRAL Multipurpose X100/200 und Hubgestell HG100 mit Leitstrahlmischer.

Die Ansätze 1 und 2 verliefen gut. Die Ansätze 3 – 5 verliefen unregelmäßig, bedingt durch technische Störungen an den Pumpen (**Abb. 10**).



Abbildung 10: Experimenteller Aufbau von 3 gleichzeitig laufenden, je 1 m³-Ansätzen von „Si-Drill“-Feldspülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt bei Fa. YSTRAL.

Trotz dieser unvorhergesehenen technischen Störungen waren die rheologischen Eigenschaften aller Ansätze dennoch akzeptabel, jedoch im Vergleich zum Labormaßstab deutlich niedriger (s. **Tab. 21 – 25**).

Tabelle 21: Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt im Container IBC 1 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten.

Rheologie nach	pH-Wert	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
23 d	10.0	3	4	11	15	21	28	7	14
28 d	10.1	2	3	10	14	18	25	7	11
101 d	10.0	3	4	12	15	20	27	7	13

Tabelle 22: Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt im Container IBC 2 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten.

Rheologie nach	pH-Wert	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
23 days	10.0	3	4	12	15	21	28	7	14
28 days	10.0	2	4	10	14	18	26	8	10
101 days	10.0	2	4	9	12	15	22	7	8

Tabelle 23: Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt im Container IBC 3 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten.

Rheologie nach	pH-Wert	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
23 days	9.9	3	4	12	15	21	28	7	14
28 days	9.9	2	5	10	14	18	25	7	11
101 days	10.0	3	5	13	16	21	28	7	14

Tabelle 24: Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt im Container IBC 4 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten.

Rheologie nach	pH-Wert	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
22 days	9.9	4	5	15	18	25	32	7	18
27 days	9.9	3	4	11	15	20	28	8	12
100 days	10.0	2	4	11	15	20	28	8	12

Tabelle 25: Rheologie und pH-Wert von „Si-Drill“-Spülung mit 2.5 % SiO₂-Gehalt im Container IBC 5 bei verschiedenen langen Lagerungszeiten.

Rheologie nach	pH-Wert	Rheologie bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten [U/min] am Fann 35SA Rheometer bei RT							
		3	6	100	200	300	600	PV [cP]	YP [lb/100ft ²]
22 days	9.9	2	4	10	12	14	17	3	11
27 days	9.9	2	4	8	10	12	16	4	8
100 days	10.0	2	4	11	13	16	20	4	12

Die IBCs mit den „Si-Drill“-Spülungen wurden bis zum Feldversuch für ca. 3 Monate bei BESTEC in Rülzheim eingelagert und von Zeit zu Zeit anfänglich mit einer Tauchpumpe nur wenig, sodann später mit einem Doppelflügelrührer besser homogenisiert. Dies war nötig, da nach einer gewissen Zeit die Spülung entmischt und sich oben eine Wasserschicht bildet. Die Spülung ließ sich ohne Probleme homogenisieren und es konnte wiederholt eine vollständige Durchmischung erreicht werden, was auf eine gute Lagerungsfähigkeit der Spülung hinweist.

Formalien wie die Trinkwasserrechtliche Genehmigung für den Einsatz der Bohrspülung wurden im Wesentlichen durch BESTEC bei der unteren und oberen Wasserbehörde mit allen relevanten und angeforderten Informationen bearbeitet. Dafür erstellte Wöllner ein Sicherheitsdatenblatt für die „Si-Drill“-Spülung mit einer finalen Einordnung in die WGK I. BESTEC integrierte feste Abbruchkriterien in den geplanten Ablauf des Feldtests und beschrieb die Handhabung und das Abfallmanagement von Restspülung und Bohrklein. TUM übermittelte weitere Informationen zur „Si-Drill“-Spülung, insbesondere zu den verwendeten Ausgangsstoffen, der Herstellung und zur finalen Spülungschemie.

Im Juni 2024 fanden zwei Feldversuche an je 200 m tiefen Geothermiebohrungen durch Handke Brunnenbau in Mainz-Bretzenheim statt (s. **Abb. 11**). Es handelte sich dabei um oberflächennahe Geothermie für ein neu errichtetes CO₂-neutrales Gebäude der Universität Mainz und in unmittelbarer Umgebung des MEWA-Stadions, welches seine gesamte Energie über Photovoltaik- Außenwände und Geothermie beziehen soll. Vor dem Einsatz wurde der pH-Wert der 5 m³ Spülungen auf unter 10 eingestellt, da im Mainzer Untergrund quellfähige Tonminerale auftreten. Außerdem wurden die Spülungen nochmals homogenisiert.



Abbildung 11: Bohranlage der Fa. Handke Brunnenbau, eingesetzt auf den beiden Geothermiebohrungen in Mainz-Bretzenheim.

BESTEC und TUM haben während der Bohrungen den Umgang mit der Spülung, den Bohrfortschritt, die Auflast auf das Bohrgestänge, die Veränderungen der Spülung bei der Verwendung, den Bohrfortschritt und Besonderheiten dokumentiert. Bei beiden Bohrungen wurden kontinuierlich Proben genommen, pH-Wert und Marsh-Trichter-Auslaufzeiten bestimmt (sie betragen jeweils ca. 30 – 36 Sek.) und die FANN-Rheologie der Proben später im TUM-Labor gemessen (s. **Tab. 26**).

Tabelle 26: Im TUM-Labor gemessene Marsh-Trichter-Auslaufzeiten für eine reine Bentonit- und für „Si-Drill“-Spülungen.

Bohrspülung	Marsh-Trichter-Auslaufzeit	Temperatur
2.5 % SiO ₂ „Si-Drill“	41 s	26 °C
3.0 % SiO ₂ „Si-Drill“	78 s	27 °C
3.5 % SiO ₂ „Si-Drill“	124 s	26 °C
5.0 % Goldseal Bentonit	47 s	27 °C

Die erste Bohrung wurde mit der Spülung aus den IBCs 1 – 3 abgeteuft. Die Bohrspülung wurde über anlageninterne Pumpen vom Spülungscontainer angesaugt und über eine Zuleitung von oben in das Bohrgestänge gepresst. Nach dem Austritt aus dem Bohrkopf wurde die Spülung mit dem Bohrklein über den Ringraum ausgetragen und zurück in den Absetzcontainer gespült. Mit „Si-Drill“ wurde ein rascher Bohrfortschritt erzielt. Besonders auffällig war die extrem hohe Tragkraft der Spülung für Bohrklein (s. **Abb. 12**).

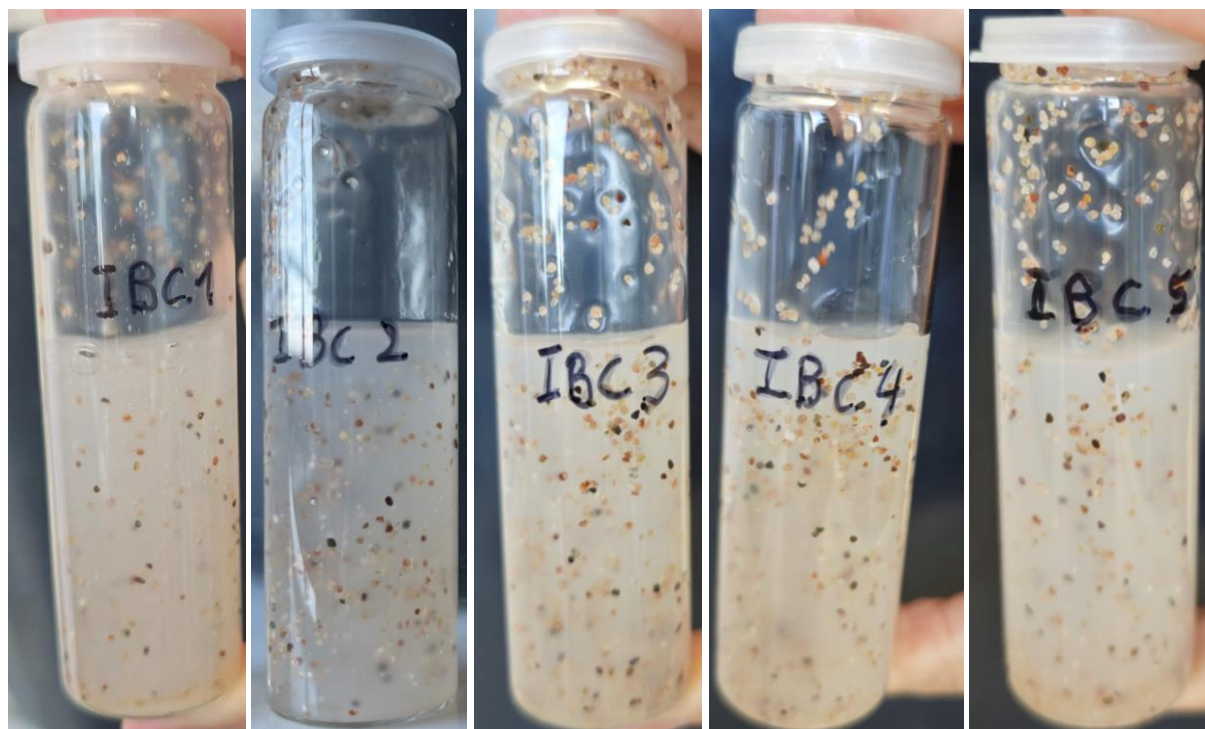


Abbildung 12: Tragfähigkeit der unverdünnten „Si-Drill“-Spülungsproben mit 2.5 % SiO_2 -Gehalt aus den Containern IBC 1 – 5.

Die „Si-Drill“-Spülung zeigte optimale Bohrlochreinigung, ihre hohe Fließgrenze führte jedoch dazu, dass das Bohrklein im Spülungstank nicht absetzte und erneut in das Bohrloch zirkuliert wurde. Um dies zu vermeiden, wurde die Spülung soweit mit Wasser verdünnt, bis ein Absetzen möglich war. Trotz der dadurch geringeren Viskosität waren keine Nachteile beim Bohrprozess zu beobachten. Nach ca. 80 m wurden sehr quellfähige und anschließend schieferige Tonschichten durchbohrt, was ohne Zusatz von Toninhibierer (Walnussöl) problemlos gelang. Ab 150 m wurden härtere Kalksteinstufen durchteuft, auch hier war rascher Bohrfortschritt zu verzeichnen. Die Bohrung dauerte ca. 2 Tage, es traten keine Spülungsverluste o. ä. auf.

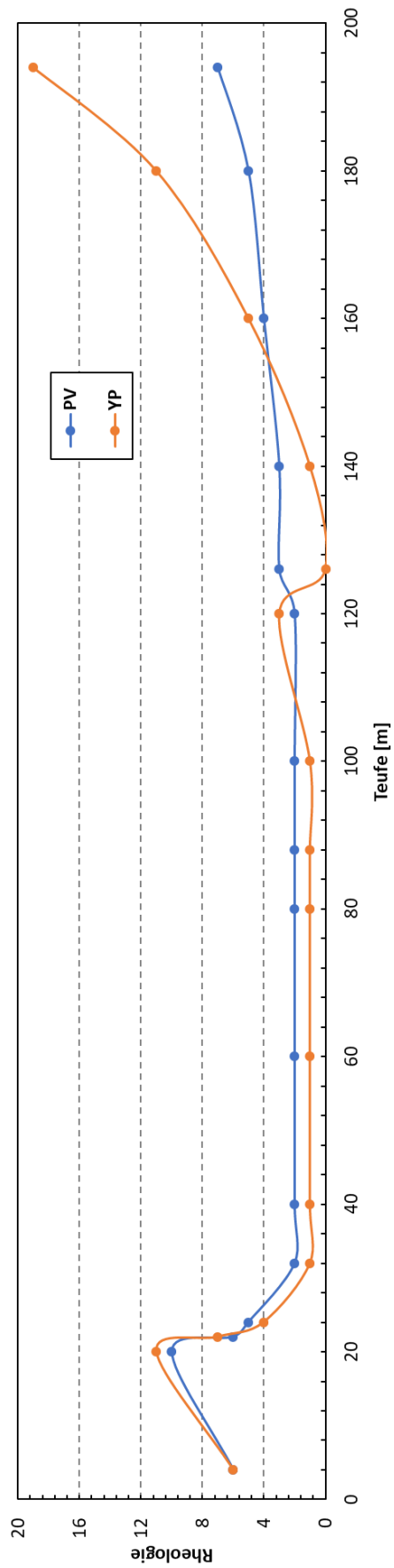
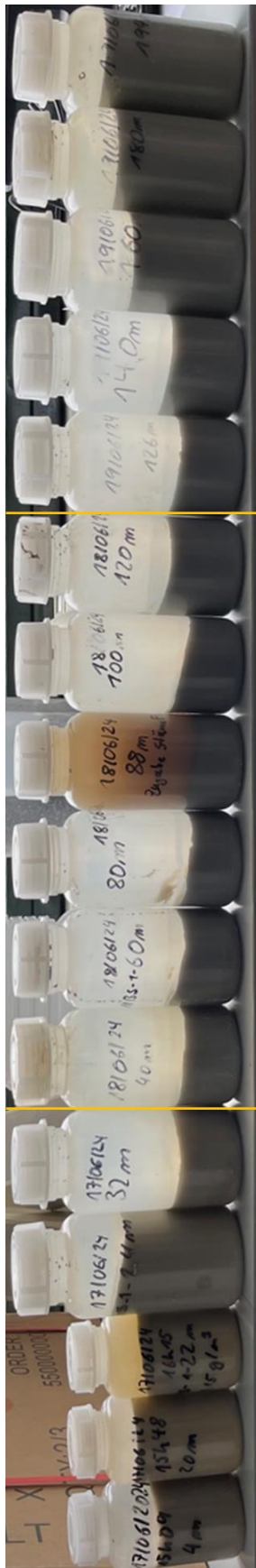


Abbildung 13: Proben aus Bohrloch 1 mit Auswertung der Rheologie.

Abbildung 13 zeigt, wie sich die Rheologie der Spülung über die verschiedenen Teufen hinweg verhielt. Zu Beginn stieg die Viskosität bis zu einer Teufe von ca. 20 m an, ab der die Spülung mit Bohrklein so beladen war, dass ein Absetzen nicht möglich war. Die Spülung musste verdünnt werden, sodass infolgedessen die Viskosität stark abnahm. Bei 120 m wurde am nächsten Tag die Spülung zirkuliert, wodurch die Fließgrenze (YP) kurzfristig erhöht war. Die nachfolgenden Proben wiesen zunehmend höhere YP-Werte auf, offenbar wegen der Anwesenheit quellender Tone. Auch bei den mit Ton beladenen Proben bildete sich nach einigen Tagen Blutwasser, und es trat Phasenseparation wie bei der reinen Ausgangsspülung ein. Zudem kann man an den Proben erkennen, dass je niedriger die Viskosität ist, desto höher ist auch die Neigung zur Wasserabsonderung („Bluten“).

Die Bohrkleinproben wurden zudem anhand ihres Aussehens bewertet. In einer Tiefe von 26 m scheint es sich um eine Mischung aus Tonstein und Kalkstein zu handeln, wobei ab einer Tiefe von 32 m quellfähige Tone den Kalkstein überwiegen. Ab einer Tiefe von 120 m überwiegt Kalkstein, aber nach 140 m sind nur noch quellfähige Tone vorhanden (s. **Abb. 14**).

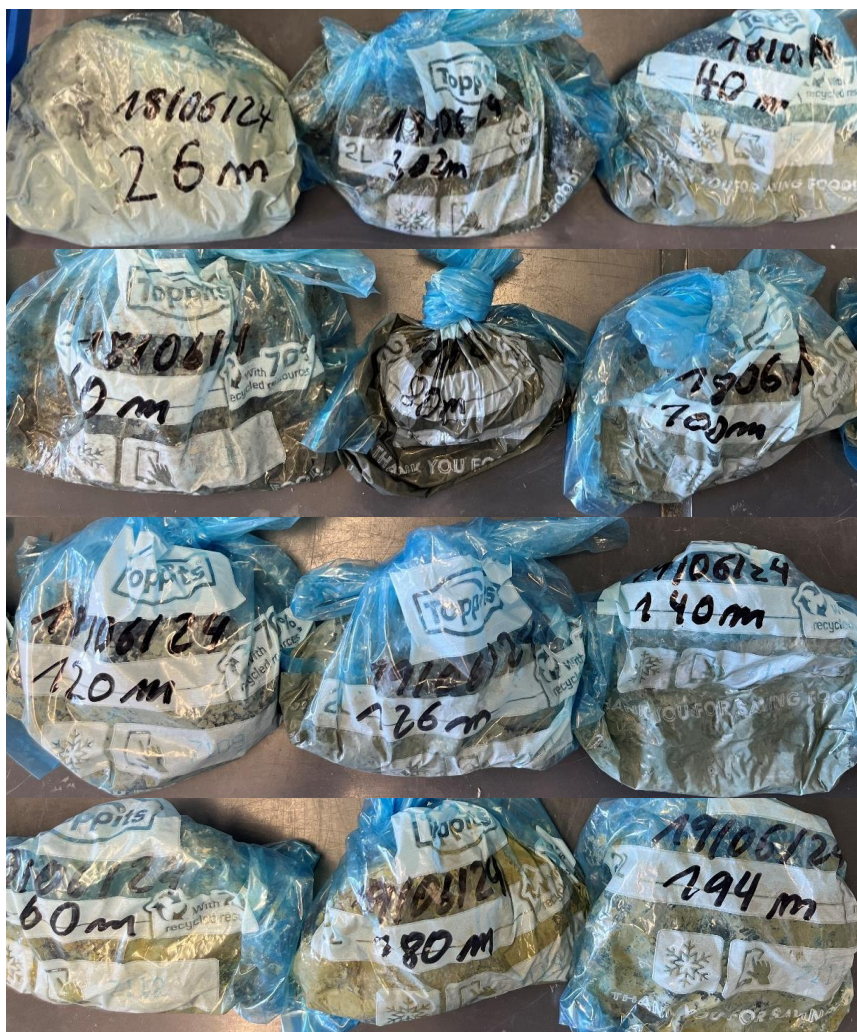


Abbildung 14: Bohrkleinproben von der Geothermiebohrung des ersten Feldversuchs (Tiefe: 26 – 194 m).

Die zweite Bohrung verlief nach dem gleichen Schema, sie war nur ca. 5 m von der ersten Bohrung entfernt platziert, weshalb mit einer reduzierten Gestängelast von ca. 200 kg gebohrt werden musste. Aufgrund der Erfahrungen aus der ersten Bohrung wurde hier von Anfang an mit einer im Verhältnis von ca. 2:1 verdünnten Spülung gearbeitet. **Abbildung 15** zeigt beim Vergleich dementsprechend zu Beginn insgesamt niedrigere Rheologiewerte. Von 0 m auf 33 m verlängern sich die Marsh-Trichter-Auslaufzeiten, was auf eine zunehmende Beladung der Spülung mit Feinstoffen schließen lässt.

Der pH-Wert sank dagegen, was eventuell an Spülungs-Gestein-Wechselwirkungen liegt. Die hohe Tragkraft der Spülung wurde durch den sinkenden pH-Wert zumindest vorort nicht beeinträchtigt. Nachdem die Spülung bei Bohrmeter 33 mit ungefähr 4 m³ Wasser weiter verdünnt wurde, sank die Auslaufzeit erwartungsgemäß wieder. Die Aufladung der Spülung ist an den entnommenen Proben gut zu erkennen, der Feststoffgehalt nahm kontinuierlich zu. Der starke Anstieg von YP ab ca. 150 m deutet auf das Vorhandensein quellender Tone hin.

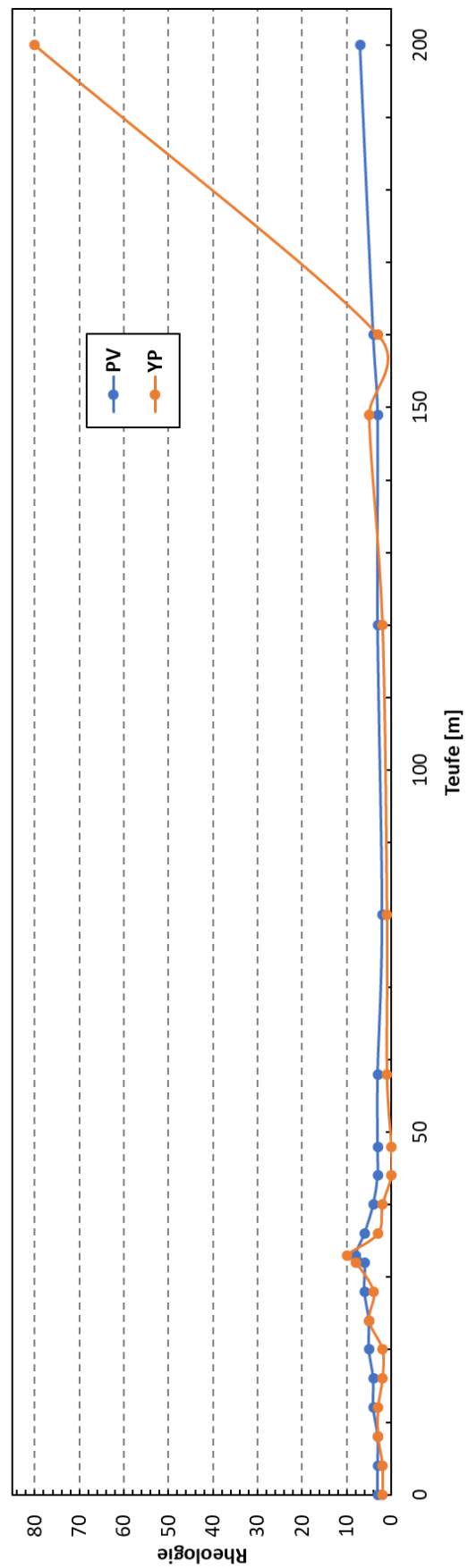


Abbildung 15: Spülungsproben aus Bohrloch 2 mit Auswertung der rheologischen Kennwerte PV und YP.

Anhand der Bohrkleinproben aus der zweiten Bohrung war zu erkennen, dass es sich bis zu einer Tiefe von 12 m um spröde Tone handelte, während diese ab einer Tiefe von 16 m mit quellfähigen Tonen vermischt waren. Ab 24 m dominierten die quellfähigen Tone, die häufig mit Kalkstein vermengt waren (s. **Abb. 16**).



Abbildung 16: Bohrkleinproben von der Geothermiebohrung des zweiten Feldversuchs (Tiefe: 4 – 100 m).

Der Feldversuch mit zwei oberflächennahen Bohrungen als erstem Schritt zeigte, dass die „Si-Drill“-Spülung eine außerordentliche Tragfähigkeit und exzellente Bohrlochreinigungseigenschaften aufweist.

Der Vergleich mit einer konventionellen Spülung auf dieser Bohrung war aus zeitlichen und organisatorischen Gründen nicht möglich.

Der Nachweis des erfolgreichen Einsatzes auf einer Tiefbohrung (> 2000 m) konnte aus Zeitgründen (u.a. Fehlen einer wasserrechtlichen Genehmigung) nicht realisiert werden.

1.8. AP8: Kommunikation und Dokumentation

Die Verbundpartner tauschten sich während des Projektes regelmäßig untereinander aus und nahmen vollständig an den halbjährlichen Projekttreffen und an Video-Konferenzen teil. Zusätzlich wurden mehrere interne Workshops veranstaltet, bei denen bestimmte Themen detailliert vorgestellt und im Hinblick auf die zu entwickelnde „Si-Drill“-Spülung diskutiert wurden (s. **Tab. 27**). Zudem besuchten Vertreter der Verbundpartner im Mai eine aktive Geothermiebohrung in Hamburg-Wilhelmshöhe und konnten sich die Spülungsbehandlung und das Spülungslabor im Detail ansehen.

Tabelle 27: Übersicht von Veranstaltungen, an denen alle Verbundpartner während der Projektlaufzeit teilnahmen.

Datum	Veranstaltung	Ort
15.12.2021	Kick-Off Meeting	Online (Covid 19 – Pandemie)
09.02.2022	Projekttreffen	Online (Covid 19 – Pandemie)
10.03.2022	Interner Workshop “Drilling Teil I - Technischer Ablauf”	Online (BESTEC)
15.03.2022	Interner Workshop „Drilling Teil II – Spülungen und Additive“	Online (BESTEC)
23.03.2022	Interner Workshop “Aufbau und Verwendung von Silikaten”	Online (Wöllner)
03.05.2022	Besuch der Geothermiebohrung	Hamburg-Wilhelmshöhe
25.-26.07.2022	Projekttreffen	TUM, Garching bei München
30.-31.01.2023	Projekttreffen	Wöllner GmbH, Ludwigshafen
06.-07.09.2023	Projekttreffen	BESTEC GmbH, Kandel
25.01.2024	Detaillierte Projektbesprechung	Online
16.04.2024	Planung Feldtest	Online
06.-07.08.2024	Abschlusstreffen	TUM, Garching bei München

Um die erzielten Arbeiten und Ergebnisse der Öffentlichkeit vorzustellen, hat die TUM mehrere Tagungsbeiträge/ -vorträge erstellt. „Si-Drill“ wurde z.B. auf der Tagung Middle East Oilfield Chemicals 2024 und auf der Geotherm Offenburg 2025 am 21. Februar 2025 wurde das Projekt auf dem Kongress Geotherm 2025 in Offenburg vorgestellt. Am 17. September 2025 wird es erneut auf der DGMK – Herbsttagung 2025 „Celle Drilling“ in Celle sowie am 18. September auf dem Treffen des DGMK-Arbeitskreises „Spülung und Zemente“ präsentiert. Des Weiteren

wurde ein Abstract darüber auf der SPE „Middle East Oilfield Conference“ vom 3. – 5. Februar 2026 in Kuwait eingereicht.

Es wurde zur zur Wiederverwertung von „Si-Drill“ auch eine Publikation erstellt (Guo, Plank (2025)). Weitere Publikationen (insbesondere zum Bildungsmechanismus des partiellen 3D-Netzwerkes der SiO₂-Nanopartikel bei der Synthese) sind in der Einreichungsphase.

1.9. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Projektes war es, ein Spülungssystem zu entwickeln, das über einen weiten Temperaturbereich eingesetzt werden kann und die positiven Trag- und Schmiereigenschaften über einen längeren Zeitraum erhält. Der Verschleiß von Bohrausrüstung ist insbesondere bei abgelenkten Bohrungen enorm und eine Spülung mit exzellenten Schmiereigenschaften schonen die Gerätschaften (Bohrstrang und Meißel) auch in sehr harten Gesteinsformationen. Gleichzeitig muss die Spülung das Bohrloch auch in instabilen Formationen stabilisieren und offen halten. Dadurch können die mit der Bohrung verbundenen Kosten erheblich gesenkt werden. Zudem sollte die Spülung einfach nach dem Bohren der Zielformation bzw. Lagerstätte entfernt werden können. Die neu entwickelte „Si-Drill“-Spülung hat durch ihre im Labor und Feldtest nachgewiesene hohe Tragfähigkeit ein hohes Potential, Bohrkosten zu senken. Dadurch kann die soziale Akzeptanz in der Bevölkerung für Projekte der tiefen Geothermie erhöht werden, da die hohen Bohrkosten einen der großen Kritikpunkte darstellen.

Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft wurde die mögliche Verwertung der Spülungsrückstände, beispielsweise in der Zementindustrie evaluiert. Allerdings scheint aufgrund des hohen Chlorigehalts eine Verwertung von Gemischen aus „Si-Drill“-Spülung und Bohrklein in technischen Bauten und Anlagen der Bodenverbesserung geeigneter. Die Umweltrisiken, die durch die verschiedenen Teilkomponenten entstehen können, wurden erfasst und als sehr niedrig eingestuft, da es sich bei den Komponenten nach der Herstellung der Spülung um einfache anorganische Verbindungen (Siliciumdioxid) handelt.

Im Juni 2024 konnte die „Si-Drill“-Spülung an zwei oberflächennahen Geothermiebohrungen in Mainz-Bretzenheim innerhalb von sieben Arbeitstagen getestet werden. Nach Lagerung des angefallenen Bohrschlammes mit Restspülung bei BESTEC wurde das Gemisch nach fachgerechter Beprobung in einer Anlage für Bodenbehandlung verwertet. Der Bohrschlamm selbst ist nicht als belastetes Material anzusehen, sondern dient dazu, anderes belastetes Bodenmaterial aufzubereiten, z.B. durch die gezielte Zugabe bestimmter Mikroorganismen. Nach Abfallverzeichnisverordnung kann die Verwertung über die AVV Nr. „17 05 04 Boden und Steine mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 05 03 fallen“ erfolgen.

Im Rahmen der Laborversuche und des anschließenden Feldtests ergaben sich eine Reihe von aufschlussreichen Beobachtungen, welche die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der „Si-Drill“-Spülung betreffen.

Positiv vermerkt werden konnten folgende Eigenschaften:

- Die Trageigenschaft der Spülung war im Labor und beim Feldversuch hervorragend!
- Damit sind die Bohrlochreinigungseigenschaften der Spülung (d.h. der Austrag des Bohrkleins) ebenfalls als sehr gut zu bezeichnen. Dies gewährleistet einen verbesserten Bohrfortschritt, da das Bohrklein nicht mehrfach auf der Sohle zermahlen wird.
- Die Spülung verhält sich eindeutig thixotropisch, d.h. die Sicherheit des Bohrvorgangs bei Unterbrechung der Zirkulation wird erheblich verbessert. Das Bohrklein sinkt bei Stillstand der Zirkulation nicht ab, der Bohrstrang bleibt frei beweglich.
- Die Spülung lässt sich vor Ort leicht handhaben und ist leicht zu verdünnen. Damit ist eine Reduzierung der Dichte der Spülung bei Aufladung mit Bohrklein gut möglich.
- Die Spülung ist lagerungsstabil und lässt sich leicht wieder aufrühren.
- Im Labor konnte die Temperaturstabilität der Spülung mit akzeptabler Rheologie bis auf ca. 200° C nachgewiesen werden.
- Der reibungsmindernde Effekt der Spülung konnte im Feldtest in der Flachbohrung bestätigt werden.

Als noch kritisch angesehen werden folgende Punkte, die in einem Folgeprojekt untersucht werden sollten:

- Die Herstellung der Spülung im industriellen Maßstab ($> 100 \text{ m}^3$) wurde noch nicht getestet, die größte Ansatzmenge war bisher 1 m^3 . Für den Einsatz in der tiefen Geothermie werden mehrere hundert Kubikmeter Spülung benötigt. Insbesondere der Energieeintrag durch die Scherung, sowie die Homogenisierung variiert bei größeren Volumina.
- Der aktuelle Herstellprozess dauert ca. 24 Stunden. Eine Beschleunigung des Prozesses konnte noch nicht abschließend untersucht werden, erste Ergebnisse bestätigten, dass Zugabezeiten von z.B. 6 Stunden möglich sind.
- Das Ansetzen der Spülung bei Flach- und oberflächennahen Bohrungen ist aufgrund des häufig dort fehlenden Mischvorrichtungen schwierig. Dort ist es daher empfehlenswert, die Spülung im angemischten Zustand auf die Bohrlokation anzuliefern.

- Ein Ersatz der Salzsäure bei der Herstellung der Spülung durch die leichter handzuhabende Oxalsäure wäre sehr vorteilhaft, auch zur Senkung der Entsorgungskosten, die stark vom Chloridgehalt abhängen.
- Die Änderung des Herstellprozesses der Spülung durch Zugabe von Natriumsilikat zur Säure anstelle des bisherigen umgekehrten Verfahrens, liefert nach neuesten Erkenntnissen noch bessere Spülungsqualität.
- Durch die sehr gute Tragfähigkeit der Spülung kommt es zu einer raschen Aufladung mit Bohrklein, sodass die Dichte der Spülung steigt. Das Verhalten der Spülung in einer feldüblichen Anlage zur Feststoffkontrolle ist bisher nicht ausgeprüft, u.a. wie sich Bohrklein und vor allem extrem feine Partikel durch Rüttelsiebe, Desander, Desilter, Zentrifugen wieder aus der Spülung entfernen lassen.
- Der Absetzvorgang des Bohrkleins aus dem Feldversuch konnte während der Zwischenlagerung bei BESTEC wochenlang eingehend beobachtet werden. Die Spülung trennt sich nur extrem langsam bzw. gar nicht vom Bohrklein.
- In den Tanks der Bohranlage sollten zudem geeignete Rührwerke vorhanden sein, um eine völlige Durchmischung und Scherung zu gewährleisten.
- Es liegen bisher keine Erfahrungen vor, wie die Spülungviskosität vor Ort nach Verdünnung bei Bedarf wieder erhöht werden kann; Laborversuche zeigten, dass ein Zusatz von hochviskoser zu einer niedrigviskosen Spülung möglich ist.
- Beim Zentrifugieren der Spülung im Labor trennt sich Wasser ab. Es wäre interessant zu untersuchen, ob das Wasser auf der Bohrung wieder als Anmachwasser verwendet werden kann, mit dem Ziel, die ursprüngliche Viskosität wiederherzustellen.
- Eine allgemeine wasserrechtliche Genehmigung liegt noch nicht vor; bisher konnte für den Feldversuch nur eine Ausnahmegenehmigung erwirkt werden.
- Die Spülung wurde unter WGK1 eingestuft. Es sollte geprüft werden, ob eine Einstufung ohne WGK möglich ist! Dies würde die Entsorgung von Spülung und Bohrklein erheblich vereinfachen.
- Die Verträglichkeit der „Si-Drill“-Spülung mit Salzzuflüssen wurde bisher nicht untersucht. Dies wäre sehr wichtig für den Einsatz der Spülung z.B. im Oberrheingraben oder in Norddeutschland (Zechsteinsalz).
- Bei dem Feldversuch erwies sich das Fluid Loss Polymer, das Fa. Handke vorschlug, als nicht geeignet. Die Verträglichkeit der Spülung mit diversen Additiven verschiedener Hersteller sollte stets vorab überprüft werden.
- Optimierung des Zugabezeitpunkts von KCl für die Toninhibierung beim Durchteufen unterschiedlicher Gesteinsschichten.
- Es fehlt noch eine Untersuchung zur Langzeitstabilität der Spülung im Bohrbetrieb z.B. über mehrere Monate.

1.10. Referenzen

Alderman, N.J., Gavignet, A., Guillot, D., Maitland, G.C., High temperature-high pressure rheology of water based muds, in: p.S. 180355 (Ed.) 63rd SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston (TX), 1988.

Al-Hameedi Abo Taleb T., Alkinani Husam H., W. Albazzaz Hussien, Shari Dunn-Norman Shari and. Alkhamis Mohammed M (2020): Insights into the applications of waste materials in the oil and gas industry: state of the art review, availability, cost analysis, and classification, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* (<https://doi.org/10.1007/s13202-020-00865-w>).

Al-Malki, M., Mahmoud, A.A., Elkatatny, S., Performance of the hole cleaning factor in predicting the hole cleaning conditions in vertical and deviated Wells: real case studies, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48 (2023) 17119-17127.

API American Petroleum Institute Recommended Practice 10B, Washington, DC, 2009.

API American Petroleum Institute Recommended Practice 13B; Washington, DC, 2010.

Baumgärtner, J., Hettkamp, T., Teza, D., Baria, R., and Michelet, S. (2004) Building of a Hot Dry Rock Scientific Power Plant at Soultz-sous-Forêts, *Proceedings Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 28, 2004.

Becker, T. E., Azar, J. J., & Okrajni, S. S., Correlations of Mud Rheological Properties With Cuttings-Transport Performance in Directional Drilling, *SPE-19535-PA*, 6 (1991) 16-24. 10.2118/19535-PA.

Błaż, S., Zima, G., Jasiński, B., Kremieniewski, M., Increasing the Thermal Resistance of Water-Based Mud for Drilling Geothermal Wells, *Energies*, 17 (2024) 4537.

Bleler, R., Selecting a drilling fluid, *Journal of Petroleum Technology*, 42 (1990) 832-834.

Caenn, R., Darley, H.C.H., Gray, G.R., Clay mineralogy and the colloid chemistry of drilling fluids, *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*, Elsevier, 2011, 137-177.

Chemwotei, S.C., *Geothermal Drilling Fluids*, Geothermal Training Programme, 2011.

Chesser, B.G., Perricone, C., Bettge, G.W., Drilling fluid systems with improved fluid loss properties, United States patent, US7439209B2, 2002.

Daugan, S., Talini, L., Herzhaft, B., Allain C., Aggregation of particles settling in shear-thinning fluids, *The European Physical Journal E*, 7 (2002).

Daugan, S., Talini, L., Herzhaft, B., Peysson, Y., Allain C., Sedimentation of Suspensions in Shear-Thinning Fluids, *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, 59 (1) (2004) 71-80.

Degering, D., Köhler, M. and Friedrich, H.-J. (2010) Schlussbericht: Verbundvorhaben: Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen - Teilprojekt Mobilisierung und Ablagerungsprozesse natürlicher Radionuklide, FKZ 0329937C. VKTA.

Echt, T., Plank, J., An improved test protocol for high temperature carrying capacity of drilling fluids exemplified on a sepiolite mud, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 70 (2019) 102964. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102964>.

Echt, T., Stoxreiter, T., Plank, J., Impact of the drilling fluid system on the effectiveness of a high pressure jetting assisted rotary drilling system, *Heliyon*, 6 (2020) e04179. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04179>.

Eggeling, L., Herr, K., Goldberg, V., Siefert, D., Köhler, J., Kölbl, T. and Reith, S. (2018) Anlagenmonitoring als Schlüsseltechnologie für den erfolgreichen Betrieb von Geothermiekraftwerken in Deutschland: Schlussbericht zum Verbundprojekt ANEMONA, EnBW, Karlsruhe.

Finger, J., Blankenship, D., Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 2010.

Gautam, S., Guria, C., Rajak, V.K., A state of the art review on the performance of high-pressure and high-temperature drilling fluids: towards understanding the structure-property relationship of drilling fluid additives, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 213 (2022) 110318.

Gray, H.C.H., Darley, G.R., Composition and properties of oil well drilling fluids, sixth ed., Gulf Publishing Co., Houston (USA), 1980.

Guo, Z.; Plank, J., Valorization of spent drilling fluid as mixing water in cementing oil, gas and geothermal wells, *Materials Reports: Solidwaste and Ecomaterials*, 1 (2025) 9520014. <https://doi.org/10.26599/MRSE.2025.9520014>.

<https://www.tainstruments.com/produkte/rheology/discovery-hybrid-rheometers/?lang=de>

<https://www.woellner.de/de/produkte.html>

<https://ystral.com/maschinen/>

Iler, R.K., *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry*, Wiley VCH, Weinheim, 1998.

Ismail, A.R., Alias, A.H., Sulaiman, W.R.W., Jaafar, M.Z., Ismail, I., *Drilling Fluid Waste Management in Drilling for Oil and Gas Wells*, *Chemical Engineering Transactions*, 56 (2017) 1351-1356.

Kalkan, A.W., Ahmed, E., *Drilling Fluids; Types, Formation Choice and Environmental Impact*, *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*, 8 (2019).

Mansell, J., Haughs, J., *High Shear Rheology and its Direct Impact on the Rate of Penetration*, *OIL GAS-EUROPEAN MAGAZINE*, 44 (2018) OG24-OG26.

Mezger, T.G., *Angewandte Rheologie*, Hannover, Germany, 2014.

Michael, E.B., Erez, N.A., Ian, D.M., *Drilling Fluid Considerations in Design of Engineered Horizontal Directional Drilling Installations*, *International Journal of Geomechanics*, 5 (2005) 339-349. 10.1061/(ASCE)1532-3641(2005)5:4(339).

Mohamed, A., Salehi, S., Ahmed, R., *Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: A review*, *Geothermics*, 93 (2021) 102066.

Njobuenwu, D.O., Wobo, C.A., *Effect of drilled solids on drilling rate and performance*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 55 (2007) 271-276.

Okoro Emeka Emmanuel, Dosunmu Adeweke (2018): *Data on cost analysis of drilling mud displacement during drilling operation*, Elsevier, *Data in Brief* 19, p. 535 – 541.

Pauwels, H., Fouillac, H. and Fouillac, A.-M. (1993) *Chemistry and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben: Origin of compounds and water-rock interactions*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51, 2737-2749.

Plank, J.P., Hamberger, J.V., *Field experience with a novel calcium-tolerant fluid loss additive for drilling muds*, *European Petroleum Conference*, London, United Kingdom, 1988, 150-154.

Robinson, L. Morgan, M., *Effect of hole cleaning on drilling rate performance*, *AADE Drilling Fluid Conference*, Houston, TX, USA, 2004, pp. 6-7.

Sanjuan, B., Millot, R., Innocent, C., Dezayes, C., Scheiber, J. and Brach, M. (2016) *Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation*. *Chemical Geology* 428, 27-47.

Sawdon, C.A., Wellbore fluid, International patent, WO2009047480A1, 2008.

Stoxreiter, T., Portwood, G., Gerbaud, L., Seibel, O., Essl, S., Plank, J., Hofstätter, H., Full-scale experimental investigation of the performance of a jet-assisted rotary drilling system in crystalline rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 115 (2019) 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.01.011>.

Werner, B., Myrseth, V., Saasen A., Viscoelastic properties of drilling fluids and their influence on cuttings transport, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156 (2017) 845-851.

Zilch, H.E., Otto, M.J., Pye, D.S., Evolution of geothermal drilling fluid in the Imperial Valley, The Western Regional Meeting, Long Beach, California, USA, 1991.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.1. Personalkosten

An dem Forschungsvorhaben nahmen mehrere Mitarbeiter des Arbeitskreises von Prof. Plank teil. Das Projekt war Hauptbestandteil der Promotionsarbeit von Frau Hicran Güngör. Außerdem haben zu bestimmten Messungen und Untersuchungen folgende Mitarbeiter beigetragen: Yuexin Zhang, Yi Zhang (alle Masteranden), Zumrud Ahmadova, Lisa Winkler, Hsien-Keng Chan, Jiaxin Chen, Xinyue Wang, Guo Zichen (alle Doktoranden), Dr. Oyewole Salami Taye (Postdoc) and Dr. Lei Lei (Habilitation). Guo Zichen wurde aus anderen Projektmitteln finanziert.

Das Personal der TUM wurde zur Bearbeitung aller Arbeitspakete eingesetzt. TUM befasste sich mit der Ermittlung einer geeigneten rheologischen Messmethode, um die ungewöhnlichen Viskositätseigenschaften der Silica-Bohrflüssigkeit erfassen zu können, mit der Herstellung, Optimierung und Bestimmung der rheologischen Kenngrößen der Si-Drill-Spülung unter Einbeziehung gängiger Bohrspülungsadditive im Hinblick auf Feldtauglichkeit unter allen auftretenden Bedingungen, mit der Generierung von Daten zur Erstellung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Berücksichtigung der Temperaturstabilität und der Umwelteigenschaften der Si-Drill-Spülung, mit der Wiederherstellung der Gesteinspermeabilität durch Entfernung der Si-Drill-Spülung aus dem Wirtsgestein für eine verbesserte Geothermie-Ausbeute, sowie der Recyclerbarkeit/ Verwertbarkeit der Bohrflüssigkeit. Bei dem Feldeinsatz war TUM in der Akquisition und Vorbereitung der Bohrung sowie während des Einsatzes technisch begleitend tätig und beteiligte sich über die gesamte Projektlaufzeit an dem regen Informationsaustausch der Verbundpartner.

2.2. Materialkosten

Im Rahmen von AP1 wurde das DHR-20 Rheometer von TA Instruments angeschafft. Aufgrund der Abnutzung der eingesetzten Messinstrumente zur Erfassung der Spülungseigenschaften, die in den Laboratorien der TUM zur Verfügung standen, wurden bei Bedarf entsprechende Ersatzteile sowie Verbrauchsmittel für die Durchführung der Spülungsuntersuchungen besorgt.

2.3. Reisekosten

Die Reisekosten der TUM setzten sich aus verschiedenen Dienstreisen zusammen:

- Projekttreffen mit den Verbundpartnern,
- Besuch der Geothermiebohrung in Hamburg-Wilhelmshöhe,
- Rheologische Untersuchungen bei Anton-Paar in Stuttgart zur Auswahl eines geeigneten Rheometers,
- Konferenz GeoTherm 2025 in Offenburg,
- Feldversuch in Mainz-Bretzenheim.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ziel des hier beschriebenen Vorhabens war es, eine optimierte Bohrspülung auf Silica-Basis zu entwickeln, was vollständig erreicht wurde. Die neu entwickelte „Si-Drill“-Spülung zeigt ein großes Potential, durch Verkürzung der Bohrdauer und -komplettierung und durch Verminderung von Materialverschleiß die Gesamtbohrkosten zu senken, sowie die Bohrlochstabilität und Feststoffkontrolle zu verbessern und eine einfache Entsorgung zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass die Spülung nach dem Bohrprozess leicht aus der Bohrung und dem angrenzenden Reservoir mittels chemischer Verfahren entfernt werden kann. Die Silica-basierte Spülung hervorragende Eigenschaften wie beispielsweise eine hohe thermische Stabilität sowie Scherstabilität und Toleranz gegenüber KCl bei angepasster Zugabereihenfolge. Sie besitzt eine sehr hohe Austragfähigkeit, was in dem Forschungsprojekt voll bestätigt werden konnte. Das wiederum bewirkt eine Erhöhung des Bohrfortschritts aufgrund verbesserter Entfernung des Bohrkleins aus dem Bohrloch und einer damit verbundenen Kostensenkung.

4. Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Verwertung der Forschungsergebnisse konzentriert sich im Wesentlichen auf drei Gebiete:

1) Verbesserung des Bohrfortschritts

Aufgrund des ausgezeichneten Tragvermögens der neu entwickelten „Si-Drill“-Spülung kann das Bohrklein schnell und effizient vom Bohrmeißel abtransportiert werden, was den Bohrfortschritt erheblich beschleunigt und zu deutlich weniger Verschleiß des Bohrwerkzeuges führt. Zudem hat die „Si-Drill“-Spülung das Potential, im Fall eines Stromausfalls oder technischen Defekts der Spülpumpen das Bohrklein für längere Zeit in der Spülung suspendiert zu halten. Dies verhindert, dass der Bohrkopf mit bereits erzeugtem Bohrklein verstopft wird, was im schlimmsten Fall beim Wiederaufahren zum Abreißen des Bohrmeißels führen kann.

2) Reduzierung der Bohrkosten

Hohe Bohrkosten kommen unter anderem durch geringen Bohrfortschritt und Materialverschleiß zustande. Wie bereits unter Punkt 1 beschrieben, ist zu erwarten, dass der Bohrfortschritt im Vergleich zu herkömmlichen Spülungssystemen deutlich verbessert ist. Der schnelle und effiziente Abtransport von Bohrklein vom Bohrmeißel sorgt zudem für einen verminderten Verschleiß von Bohrmeißel und Bohrgestänge, was zu einer weiteren Kostenersparnis führt.

3) Einfache Verwertung der „Si-Drill“-Spülung mit Bohrschlamm und Bohrklein

Für die Entsorgung von „Si-Drill“-Spülung, die mit Bohrklein oder Bohrschlamm kontaminiert ist, gibt es, abhängig vom Chloridgehalt, verschiedene Verwertungsmöglichkeiten in Deutschland, deren Kosten maximal im mittleren zweistelligen Bereich pro Tonne liegen. Am günstigsten ist die Verwertung als Anmachwasser bei der Zementierung von Tiefbohrungen. Damit ist eine fachgerechte Verwertung der „Si-Drill“-Spülung gewährleistet und überschreitet nicht den Kostenrahmen konventioneller Bohrspülungen bei der Verwertung.

Tabelle 28: Fortgeschriebener Verwertungsplan: Erfolgsaussichten der Verwertung.

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Finanzierung von wissenschaftlichen Mitarbeitern in der TUM durch teilweise Drittmittelfinanzierung	während PLZ: 1-4 Jahre
2	Schaffung von Wissen zur Kompetenzerhaltung und Ausbau der bereits vorhandenen Kompetenzen der Mitarbeiter der TUM	während PLZ: 1-4 Jahre
3	Steigerung der wissenschaftlichen und technischen Konkurrenzfähigkeit der TUM	während PLZ: 1-4 Jahre nach LZE: 4-10 Jahre
4	Wissenstransfer zu Forschungsgruppen und Industriepartnern durch Veröffentlichung der Projektergebnisse; Schaffung und Kooperation zur Verbreitung von Wissen	während PLZ: 1-4 Jahre nach LZE: 4-6 Jahre
5	Verbesserung der sozialen Akzeptanz der tiefen Geothermie und damit auch der Akzeptanz von Firmen wie BESTEC und Wöllner durch Verringerung der Bohrkosten	während PLZ: 1-4 Jahre nach LZE: 4-10 Jahre
6	Beteiligung von TUM an möglichen Folgeprojekten	nach LZE: 4 Jahre
7	Nutzen für andere Koordinatoren von Bohrprojekten durch Übertragungsmöglichkeiten der Projektergebnisse	nach LZE: 4-10 Jahre
8	Beteiligung der TUM an möglichen Folgeaufträgen bei denen die Bohrspülung zum Einsatz kommt	während PLZ: 1-4 Jahre nach LZE: 4-10 Jahre
9	Verbesserung der Wettbewerbssituation durch Kompetenzsteigerung	nach LZE
10	Schaffung von Arbeitsplätzen durch Produktionserweiterung	nach LZE
11	Wissenstransfer zu Forschungsgruppen durch Veröffentlichung der Projektergebnisse	während + nach LZE
12	Vereinfachter Zugang zu Informationen	während + nach LZE
13	Verbesserte Zusammenarbeit mit Firmen und Forschungsstellen	während + nach LZE

5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Solche Fortschritte sind nicht bekannt.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Zu Projektbeginn von „Si-Drill“ wurde durch die Verbundpartner TUM und Wöllner geprüft, ob Rezeptur und Herstellung der „Si-Drill“-Spülung patentwürdig sind. Beide Verbundpartner einigten sich beim Projekttreffen in Kandel (06. - 07. 09. 2023), „Si-Drill“ als Warenzeichen einzutragen, aber kein Patent anzumelden. Bis zu diesem Termin konnte über „Si-Drill“ nur sehr wenig offenbart werden, weshalb TUM und BESTEC keine Tagungsbeiträge zu dem Projekt eingereicht haben. Die TUM hat ab dem September 2023 mehrere Abstracts eingereicht, wie z.B. für die Tagung Geotherm Offenburg 2025, Celle Drilling 2025 und auch für den DGMK Workshop „Drilling Fluids and Cements“ 2026. Das Projekt wurde am 21.02.2025 auf dem Kongress der Geotherm 2025 in Offenburg vorgestellt. Des Weiteren wurde ein Paper mit dem Titel „A Novel Silica Fluid as High-Temperature Drilling Mud for Geothermal Wells – Preparation, Properties and Performance“ wurde im August 2025 beim Journal Geoenery Science and Engineering eingereicht (Autoren: Gungör, Guo, Plank) und es liegt eine Publikation zur Wiederverwertung von „Si-Drill“ mit dem Titel „Valorization of spent drilling fluid as mixing water in cementing oil, gas and geothermal wells“ im Journal Materials Reports: Solidwaste and Eco-materials vor (Autoren: Guo, Plank). Eine weitere Publikation zum Bildungsmechanismus des 3D-Silica-Netzwerks mit dem Titel „Mechanistic Investigations on the Impact of Shear and Electrolytes on the 3D Network of Polycondensated Nano Silica Particles“ wurde im Journal „Colloids and Surfaces A“ eingereicht.

Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen Zielen

Der Antrag zu dem Si-Drill Projekt wurde auf Grundlage der Bekanntmachung Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ vom 1. Oktober 2018 im Abschnitt 3.8. „Geothermie“ gestellt. Diese Bekanntmachung nennt unter anderem folgende wichtige Aspekte:

- Weiterentwicklung der Technologie,
- Werkzeuge und Verfahren mit dem Ziel, die Bohr- und Komplettierungskosten zu reduzieren,
- Forschung zur stofflichen Nutzung und Verwertung geförderter geothermischer Fluide und Rückstände.

Die hier genannten Punkte dienen der Weiterentwicklung einer kostengünstigen Gewinnung und Nutzung von Wärme und Strom aus tiefen geothermischen Reservoiren.

Ziel des Projektes hier war es, eine optimierte Bohrspülung zu entwickeln, welche die Gesamtbohrkosten durch verbesserte Temperaturstabilität, Verminderung von Materialverschleiß, Verkürzung von Bohrdauer und Komplettierung senkt und zudem durch ihre Tragfähigkeitseigenschaften die Sicherheit des Bohrprozesses signifikant erhöht. Die erhöhte Temperaturstabilität der „Si-Drill“-Spülung und ihre herausragenden Trageigenschaften wurden im Projekt nachgewiesen. Darüber hinaus sollte die Spülung nach dem Bohrprozess leicht aus der Bohrung und dem angrenzenden Reservoir zu entfernen sein, was ebenfalls bestätigt wurde.

Zusätzlich wurde eine mögliche Wiederverwendung der Spülungsrückstände, beispielsweise in der Zementindustrie untersucht. Die Verwertung von Gemischen aus „Si-Drill“-Spülung und Bohrklein in technischen Bauten und der Anlagen der Bodenverbesserung scheint allerdings noch attraktiver zu sein. Die Umweltrisiken, die durch die verschiedenen Teilkomponenten entstehen können, wurden erfasst und als sehr niedrig eingestuft, da es sich bei den Teilkomponenten nach der Herstellung der Spülung um einfache, anorganische Verbindungen handelt.

2. Wissenschaftlich-Technisches Ergebnis des Vorhabens

Wie geplant, wurde während der Projektlaufzeit eine neue Bohrspülung, basierend auf Silica-Partikeln entwickelt und erfolgreich im Fel eingesetzt. Die Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte im Rahmen von Publikationen über TUM.

Die Teilergebnisse sind in Kapitel II, Punkt 1 im Detail dargestellt und zusammengefasst.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

Siehe Kapitel II, Punkt 4 im Abschlussbericht.

(1) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte:

„Si-Drill“ wurde durch die Verbundpartner TUM und Wöllner als Marke eingetragen.

(2) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende:

Die neu entwickelte „Si-Drill“-Spülung hat durch ihre hohe Tragfähigkeit ein hohes Potential, Bohrkosten zu senken. Zudem kann sie dadurch die soziale Akzeptanz in der Bevölkerung bei Projekten der tiefen Geothermie erhöhen, da die hohen Bohrkosten einen der großen Kritikpunkte darstellen.

(3) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

Die TUM plant mehrere Publikationen, so dass die Ergebnisse des Projektes, auch der sehr wichtige Feldtest, der Öffentlichkeit und einem breiten Fachpublikum zugänglich sind.

(4) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Die Verbundpartner stellen auch nach Ende der Projektlaufzeit bei potentiellen Kunden die neu entwickelte „Si-Drill“-Spülung vor und werben für einen weiteren Feldtest in einer Bohrung der tiefen Geothermie, um das volle Potential der Spülung zu demonstrieren. Zudem diskutieren die Verbundpartner die Optionen für ein Folgeprojekt.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Wie bereits in Kapitel II, Punkt 6 beschrieben, wird TUM die Projektergebnisse im Rahmen von Publikationen oder Kongressteilnahmen veröffentlichen und so anderen Nutzern zur Verfügung stellen.

6. Die Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Die Kostenplanung wurde eingehalten. Nur bei Material und Reisekosten gab es geringfügige Änderungen, die auf die Projektbearbeitung angepasst wurden. Zum Beispiel wurde die Bohrspülung an einer oberflächennahen Bohrung getestet und nicht an einer Bohrung der tiefen Geothermie, was sowohl die Beprobung als auch die Sicherheitsmaßnahmen vor Ort erleichterte. Die Reiskosten wurden nicht voll ausgeschöpft, da Projekttreffen und Reisen während der aktiven Zeit der Covid-19-Pandemie nicht realisiert werden konnten. Stattdessen ist der Bedarf an Personalkosten höher ausgefallen, da die relevanten Untersuchungen, besonders zur Optimierung der Spülung für den Feldversuch, zeitlich und auch technisch sehr umfangreich waren.

Die Zeitplanung wurde bis auf geringfügige Verschiebungen eingehalten, diese sind in Kapitel I, Punkt 3.2 dokumentiert.

Die ursprüngliche Projektlaufzeit vom 01.07.2021 bis 30.06.2024 wurde für TUM um ein Jahr kostenneutral bis zum 30.06.2025 verlängert, um den Feldversuch, alternative Säuren als Ersatz für HCl, die KCl-Toleranz der Spülung beim Durchteufen von Tonschichten näher zu untersuchen und Publikationen bzw. Vorträge erstellen zu können.