



Zwischenbericht vom 30. Januar 2026

Grabowski

Bohrroboter für Geothermiebohrungen



Quelle: Borobotics, 2026



Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energiforschung.ch

Subventionsempfänger/innen:

Borobotics AG
CH-8406 Winterthur
www.borobotics.ch

Autor/in:

Hans-Jörg Dennig, Borobotics, hd@borobotics.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, Men.Wirz@bfe.admin.ch
Florence Bégué, Florence.Begue@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502692

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Projekt «Grabowski – Bohrroboter für Geothermiebohrungen» adressiert eine zentrale Herausforderung der Wärmewende: die wirtschaftliche, platzsparende und emissionsarme Herstellung von Bohrungen für Erdwärmesonden. Obwohl erdgekoppelte Wärmepumpen energetisch sehr effizient sind, wird ihre breite Anwendung heute durch hohe Kosten, grosse Platzanforderungen, Emissionen sowie die begrenzte Verfügbarkeit konventioneller Bohrtechnik eingeschränkt, insbesondere in urbanen Gebieten und bei Bestandsbauten.

Im vom Bundesamt für Energie geförderten Pilot- und Demonstrationsprojekt wird ein grundlegend neuer Ansatz verfolgt, bei dem ein kompakter, elektrisch betriebener Bohrroboter direkt im Bohrloch arbeitet und ohne Bohrgestänge auskommt. Ziel ist die schrittweise Entwicklung, Integration und Validierung der zentralen Systemfunktionen unter Labor- und Feldbedingungen, darunter das Dreh-Schlagwerk, der Bohrkopf, die Bewegungseinheit sowie das Wasser- und Filtersystem; perspektivisch ergänzt durch eine Extrusionseinheit zur Bohrlochabstützung.

Der Projektverlauf wich deutlich vom ursprünglichen Projekt- und Meilensteinplan ab. Technische Änderungen, insbesondere die Vergrösserung des Bohrlochdurchmessers auf 136 mm, sowie unerwartete mechanische Belastungen im Schlagmechanismus führten zu Bauteilversagen, Testunterbrüchen und erheblichen Verzögerungen. Zusätzlich stellte sich die Wasserdichtheit bei längerer Betriebsdauer als zentrales technologisches Risiko heraus, das mit der aktuellen Prototypgeneration nicht vollständig gelöst werden konnte und die erreichbare Bohrtiefe begrenzt.

Trotz dieser Herausforderungen konnten wesentliche Fortschritte erzielt werden. Das grundlegende Bohrprinzip wurde erfolgreich nachgewiesen, eine Bohrung mit 136 mm Durchmesser realisiert und die Extrusionseinheit separat im Labor unter trockenen und nassen Bedingungen getestet. Mit dem Prototyp Grabowski 2.0 wurde mittlerweile eine reale Bohrtiefe von knapp 30 m erreicht, und die Bewegungseinheit konnte in umfangreichen Feld- und Dauertests validiert werden. Diese Ergebnisse belegen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Konzepts, auch wenn Tiefen im Bereich von 200 m mit den bestehenden Prototypen derzeit nicht realistisch erreichbar sind.

Der Zwischenbericht zeigt, dass das Projekt zwar nicht planmässig verlief, die aufgetretenen Probleme jedoch zu einem deutlich vertieften technischen Verständnis und zu substanziellen Verbesserungen des Systemkonzepts geführt haben. Das weiterhin sehr hohe Marktinteresse unterstreicht das Potenzial der Technologie, langfristig einen relevanten Beitrag zur Weiterentwicklung der Geothermiebohrtechnik und zur Umsetzung der Schweizer Energie- und Klimaziele zu leisten.

Résumé

Le projet « Grabowski – Robot de forage pour sondes géothermiques » s'attaque à un défi central de la transition énergétique : la réalisation de forages pour sondes géothermiques de manière économique, peu encombrante et à faibles émissions. Bien que les pompes à chaleur géothermiques soient très efficaces sur le plan énergétique, leur utilisation à grande échelle est aujourd'hui limitée par des coûts élevés, des besoins importants en surface, des émissions ainsi que par la disponibilité restreinte des techniques de forage conventionnelles, en particulier dans les zones urbaines et dans le bâti existant.

Dans le cadre du projet pilote et de démonstration soutenu par l'Office fédéral de l'énergie, une approche fondamentalement nouvelle est poursuivie. Celle-ci repose sur un robot de forage compact, à propulsion électrique, qui opère directement à l'intérieur du forage et fonctionne sans train de tiges. L'objectif est le développement progressif, l'intégration et la validation des fonctions clés du système dans des conditions de laboratoire et de terrain. Celles-ci comprennent notamment le mécanisme de



forage rotatif-percussif, le trépan, l'unité de déplacement ainsi que le système de gestion et de filtration de l'eau, complétés à terme par une unité d'extrusion destinée au soutènement du forage.

Le déroulement du projet s'est écarté de manière significative du plan initial et du calendrier des jalons. Des modifications techniques, en particulier l'augmentation du diamètre de forage à 136 mm, ainsi que des sollicitations mécaniques inattendues dans le mécanisme de percussion ont entraîné des ruptures de composants, des interruptions de tests et des retards importants. Par ailleurs, l'étanchéité à l'eau sur de longues durées de fonctionnement s'est révélée être un risque technologique majeur qui n'a pas pu être entièrement maîtrisé avec la génération actuelle de prototypes et qui limite actuellement la profondeur de forage atteignable.

Malgré ces défis, des progrès significatifs ont été réalisés. Le principe fondamental de forage a été démontré avec succès, un forage de 136 mm de diamètre a été réalisé et l'unité d'extrusion a été testée séparément en laboratoire dans des conditions sèches et humides. Avec le prototype Grabowski 2.0, une profondeur réelle de forage de près de 30 m a désormais été atteinte, et l'unité de déplacement a été validée au moyen d'essais approfondis en conditions de terrain et en fonctionnement continu. Ces résultats démontrent la faisabilité fondamentale du concept, même si des profondeurs de l'ordre de 200 m ne sont actuellement pas réalisables de manière réaliste avec les prototypes existants.

Le rapport intermédiaire montre que, bien que le projet ne se soit pas déroulé conformément au plan initial, les difficultés rencontrées ont conduit à une compréhension technique nettement approfondie et à des améliorations substantielles du concept du système. L'intérêt du marché, qui demeure très élevé, souligne le potentiel de cette technologie à contribuer de manière significative, à long terme, au développement des techniques de forage géothermique et à la mise en œuvre des objectifs énergétiques et climatiques de la Suisse.

Summary

The project "Grabowski – Drilling robot for geothermal boreholes" addresses a key challenge of the energy transition: the cost-effective, space-efficient and low-emission construction of boreholes for geothermal probes. Although ground-coupled heat pumps are highly energy-efficient, their widespread deployment is currently limited by high costs, large space requirements, emissions, and the limited availability of conventional drilling equipment, particularly in urban areas and in existing buildings.

Within the pilot and demonstration project funded by the Swiss Federal Office of Energy, a fundamentally new approach is being pursued, in which a compact, electrically driven drilling robot operates directly inside the borehole and does not require a drill string. The objective is the step-by-step development, integration and validation of the core system functions under laboratory and field conditions. These include the rotary-percussive drilling unit, the drill bit, the locomotion unit, and the water and filtration system, with a perspective extension by an extrusion unit for borehole stabilization.

The project progress deviated significantly from the original project plan and milestone schedule. Technical changes, in particular the increase of the borehole diameter to 136 mm, as well as unexpected mechanical loads in the percussive mechanism, led to component failures, test interruptions and substantial delays. In addition, water tightness during extended operation proved to be a key technological risk that could not be fully resolved with the current prototype generation and currently limits the achievable drilling depth.

Despite these challenges, substantial progress has been achieved. The fundamental drilling principle has been successfully demonstrated, a borehole with a diameter of 136 mm has been realized, and the



extrusion unit has been tested separately in the laboratory under dry and wet conditions. With the Grabowski 2.0 prototype, a real drilling depth of nearly 30 m has now been reached, and the locomotion unit has been validated in extensive field and endurance tests. These results demonstrate the fundamental functionality of the concept, even though drilling depths in the range of 200 m are currently not realistically achievable with the existing prototypes.

The interim report shows that while the project did not progress according to the original plan, the challenges encountered led to a significantly deeper technical understanding and to substantial improvements in the system concept. The continued strong market interest underlines the potential of the technology to make a relevant long-term contribution to the further development of geothermal drilling technology and to the implementation of Switzerland's energy and climate goals.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Kontext und Motivation	9
1.2 Projektziele	12
2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion.....	14
2.1 AP1 – Optimierung Getriebeeinheit und Bohrkopf	14
2.1.1. Zielsetzung und methodisches Vorgehen	14
2.1.2. Erste Tests mit 90 mm Bohrdurchmesser (Q4/2023).....	14
2.1.3. Entscheid zur Skalierung auf 136 mm Bohrdurchmesser	15
2.1.4. Bohrkopfoptimierung.....	15
2.1.5. Neuaufbau und Stabilisierung des Schlagmechanismus (Q1/2024 – Q2/2025).....	16
2.1.6. Ergebnisse und aktueller Stand von AP1 (Q2/2025).....	17
2.2 AP2 – Integration der Bewegungseinheit	18
2.2.1. Ausgangskonzept und Anpassung des Bewegungsprinzips.....	18
2.2.2. Entwicklung und Integration der Bewegungseinheit (136-mm-Version)	18
2.2.3. Durchführung der Tests und erzielte Ergebnisse	19
2.2.4. Identifizierte Probleme und umgesetzte Verbesserungen.....	19
2.2.5. Abschluss der Aktivitäten und Einordnung von AP2	19
2.3 AP3 – Integration der Extrusions- bzw. Abstützeinheit	20
2.3.1. Zielsetzung und konzeptioneller Rahmen von AP3.....	20
2.3.2. Validierung des Funktionsprinzips mit 90-mm-Prototyp (Q4/2023 – Q2/2024).....	20
2.3.3. Skalierung und Neuentwicklung auf 136 mm (2024 – Anfang 2025).....	21
2.3.4. Entwicklung der Feedereinheit und der Abstützeinheit	21
2.3.5. Ergebnisse der bisherigen Tests und aktueller Stand	21
2.3.6. Einordnung und Abgrenzung von AP3	22
2.4 AP4 – Wassermanagement und Filtration.....	23
2.4.1. Zielsetzung und Systemgrenzen von AP4.....	23
2.4.2. Entwicklung des Spül- und Wassermanagementkonzepts	23
2.4.3. Auswahl der Filtereinheit und Aufbau des Teststands	23
2.4.4. Integration der Oberflächenperipherie und Inbetriebnahme.....	23
2.4.5. Ergebnisse und aktueller Stand von AP4	23
2.5 AP5 – Steuerung und Intelligenz.....	24



2.5.1.	Zielsetzung und Rolle von AP5 im Gesamtprojekt	24
2.5.2.	Entwicklung der Elektronik und Hardwarearchitektur	24
2.5.3.	Firmware, Software und Bedienoberfläche	24
2.5.4.	Integration und Testergebnisse	25
2.5.5.	Einordnung von AP5.....	25
2.6	AP6 – Unterstützung des Zertifizierungsprozesses	25
2.7	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse	26
2.8	Zusammenfassung der erreichte Zielstufen bzw. Stand der Zielerreichung	27
2.8.1.	Zielstufe 1: 20 m Bohrung – Validierung der Kernbohrfunktionen.....	27
2.8.2.	Zielstufe 2: 50 m Bohrung – Bewegungseinheit und Lockergestein	27
2.8.3.	Zielstufe 3: ca. 200 – Gesamtsystem & Benchmark	28
2.9	Beantwortung der Fragestellungen	28
3	Schlussfolgerungen und Ausblick	29
4	Nationale und internationale Zusammenarbeit	30
4.1	Nationale Zusammenarbeit:	30
4.2	Zusammenarbeit mit Bohrunternehmen:	30
4.3	Internationale Zusammenarbeit.....	31
5	Publikationen und andere Kommunikation	31
6	Literaturverzeichnis	31
7	Anhang	31



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
GSHP	Ground Source Heat Pump
ASHP	Air Source Heat Pump
EWS	Erdwärmesonde



1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Die Wärmezeugung durch Geothermie spielt für die erfolgreiche Wärmewende weltweit eine entscheidende Rolle. Der Umstieg von fossil betriebenen Heizsystemen auf erdgekoppelte Wärmepumpen (ground-source heat pumps = GSHP) stellt einen vernünftigen Ansatzpunkt dar, um die Treibhausgasemissionen weltweit zu senken [1], [2], [3], [4], [5]. GSHPs haben sich im Laufe der Jahre als effizient und nachhaltig erwiesen. Die Herstellung der Bohrung für die Erdwärmesonde (ESW) erfolgt dabei mittels eines Bohrgeräts, welches über ein Bohrgestänge und komprimierter Luft den Bohrkopf antreibt (Bild 1). Das Abbruchmaterial wird mit einem Wasser-Luft-Gemisch nach oben gespült und in Container gepumpt. Dieses Bohrprinzip ist weltweit etabliert, bringt allerdings zahlreiche Nachteile mit sich:

- Die Installation des Bohrgeräts zerstört die Landschaft, welche nach der Bohrung rekultiviert werden muss.
- Die Bohrung ist aufgrund des Kompressors sowie des Bohrgeräts sehr laut (ca. 120 dBA).
- Das komplette Bohrsystem benötigt sehr viel Platz (mind. 50 m²), was in urbanen Gebieten und bestehende Gebäude zu Problemen führt. Bspw. werden ca. 21 m³ Schlammcontainer benötigt.
- Das Verfahren ist sehr energieintensiv: Um eine Bohrung mit einem Standarddurchmesser von 135 mm in einer Tiefe von 200 m zu erstellen, werden ca. 700 Liter Diesel bzw. ca. 2 t CO₂ benötigt.
- Es ist nicht erlaubt, in Grundwasserschutzonen zu bohren, da das Spülwasser sowie die Hinterfüllung der EWS das Grundwasser verschmutzen würden.
- Die Marktverfügbarkeit der Bohrgeräte sowie von qualifizierten Facharbeitern ist langfristig schlecht, weshalb eine Wartezeit zur Erstellung der Bohrung von ca. 9-18 Monaten herrscht.

Aus den oben genannten Gründen werden oft Luft-Wärme-Pumpen (air source heat pump = ASHP) eingesetzt, die weitaus günstiger in der Anschaffung sind. Allerdings verursacht der dafür notwendige Luft-Wärmetauscher, welcher im Aussenbereich platziert wird, Lärm und baut gross, was zu Problemen insbesondere in urbanen Gebieten führt. Zudem sind sie weniger effizient als GSHP, was bei kalten Aussentemperaturen zum Ausbleiben der Heizleistung und zu einem erhöhten Stromverbrauch führt.

Lösung für das dargestellte Problem und deren Erprobungsbedarf: Mit einem innovativen Bohrobooter namens Grabowski, welcher sich direkt im Bohrloch befindet, werden die oben genannten Nachteile eliminiert (vgl. Bild 2). Es wird kein

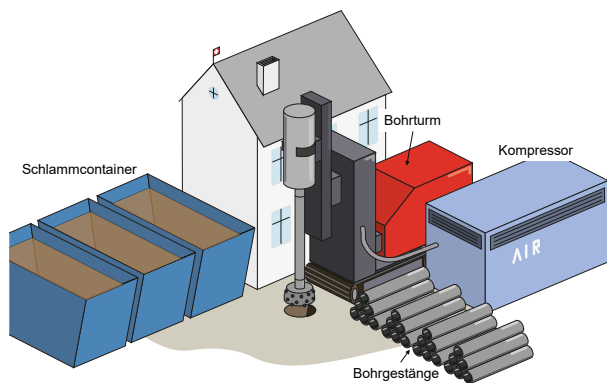


Bild 1: Konventionelle Erstellung einer Bohrung für EWS

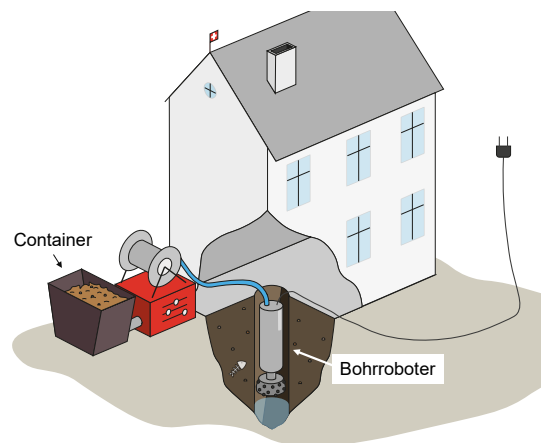


Bild 2: Neuartiges Bohrprinzip ohne Bohrgestänge



Bohrgestänge sowie grosse Gerätschaften benötigt. Insbesondere werden die Erstellungskosten durch die autonome und energieeffiziente Arbeitsweise reduziert.

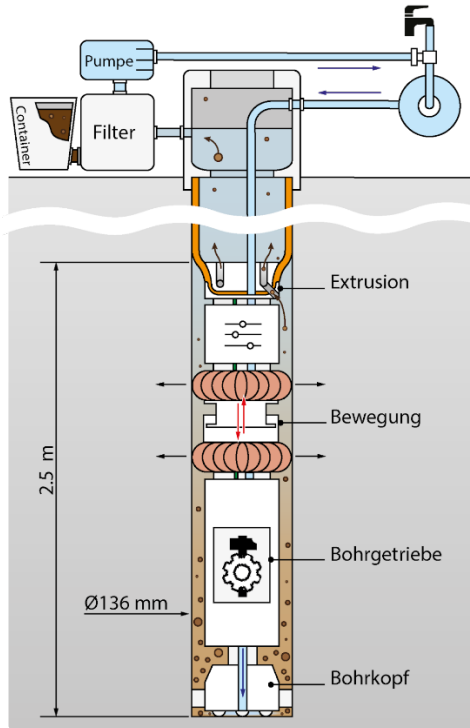


Bild 3: Funktionsweise des Bohrroboters

Der Bohrroboter ist eine mit Intelligenz ausgestattete Baumaschine, welche mit einem speziellen Bohrprinzip rein elektrisch angetrieben, Bohrungen für EWS bis zu einer Tiefe von min. 250 m bzw. max. 500 m fertigen kann. Die Innovation besteht darin, dass sich das Bohrgerät direkt in der Bohrung befindet und kein Bohrgestänge benötigt. Der Bohrroboter beinhaltet vier zentrale Hauptbaugruppen (Bild 3):

1. Ein elektrisch angetriebenes Dreh-Schlagwerk, welches einen auf diesen Durchmesser neuartigen Bohrkopf antreibt. Das Dreh-Schlagwerk inkl. Bohrkopf ist derart ausgelegt, dass es in verschiedenen Gesteinsschichten durch Variation der Dreh- und Schlagbewegung betrieben werden kann. Integrierte Vibrationssensoren detektieren, welche Gesteinsart vorherrscht, und passen Dreh- und Schlagfrequenz dementsprechend an.
2. Ein rein auf Wasser basierendes Spülsystem, welches effizient die Cuttings (=Abbruchmaterial) an die Erdoberfläche spült. Dort werden diese durch ein spezielles Filtersystem vom Wasser getrennt, wodurch das Wasser zur Spülung wiederverwendet wird. Deshalb wird nur ca. 3.5 m Schlammcontainer benötigt.
3. Ein Fortbewegungssystem mittels eines Fluidmuskels, welches durch eine alternierende Kinematik den Bohrroboter bewegt und das Drehmoment vom Bohrkopf abstützt. Der Fluidmuskel wird durch den Wasserspüldruck aktiviert.
4. Ein Abstützungssystem, welches die Bohrwand insbesondere im Lockergestein stützt. Dabei wird ein Kunststoffrohr im wassergefüllten Bohrloch extrudiert. Diese Kunststoffschicht kann auch zum Abdichten des Bohrlochs eingesetzt werden, um somit Wasserschichten zu schützen.

Durch die Integration des Bohrantriebs ins Bohrloch kann nur wenig Schlag- und Drehleistung für das Erzeugen der Cuttings aufgewendet werden. Dies führt zu einem Bohrfortschritt von 1 cm pro Minute (bezogen auf Tessiner Granit), was bei einer Tiefe von 200 m in ca. 13 Tagen Bohrdauer resultiert. Allerdings arbeitet der Bohrer autonom mit nur wenig Personalaufwand und schon ab einer geringen



Tiefe im wassergefüllten Bohrloch geräuschlos. Durch den langsamen Bohrfortschritt kann zudem eine Wasserschicht frühzeitig erkannt und der Bohrvorgang gestoppt werden.

Nach der Erstellung des Bohrlochs zieht sich der Bohrroboter wieder mithilfe der Bewegungseinheit nach oben oder er wird über ein Sicherheitsstahlseil, welches bei Verklemmung die Maschine mit grosser Kraft zurückziehen kann, nach oben gezogen. Eine Koaxialsonde oder Single-U-Rohr-Sonde wird nun herkömmlich eingeführt und herkömmlich hinterfüllt (vgl. Bild 4).

Der gesamte Energieverbrauch für eine 200 m tiefe Bohrung beträgt ca. 3000 kWh bzw. (je nach Strommix) ca. 300 kg CO₂, was ein Bruchteil der Energiekosten zum etablierten Verfahren darstellt.

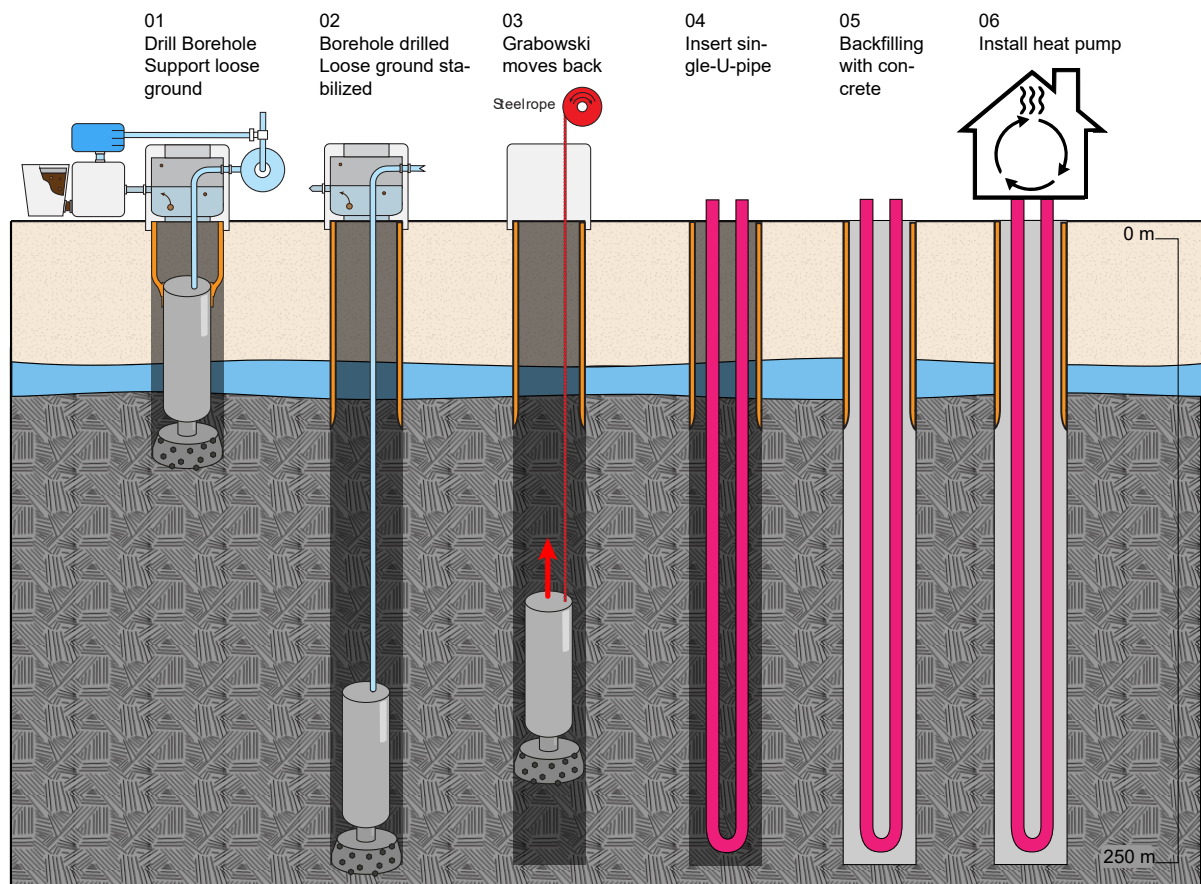


Bild 4: Prozess der Bohrerstellung sowie Sondenintegration

Vor diesem Hintergrund besteht ein klarer Innovationsbedarf im Bereich der Geothermiebohrtechnik. Gesucht sind Lösungen, die eine deutlich platzsparendere, energieeffizientere und emissionsärmere Herstellung von Bohrungen ermöglichen, gleichzeitig aber eine hohe Prozesskontrolle, Betriebssicherheit und geologische Integrität gewährleisten. Solche Lösungen müssen zudem wirtschaftlich skalierbar sein und den steigenden Bedarf an Bohrungen im Zuge der Wärmewende adressieren können.

Das Projekt «Grabowski – Bohrröbter für Geothermiebohrungen» setzt genau an dieser Stelle an. Es verfolgt einen grundlegend anderen Ansatz als konventionelle Bohrsysteme, indem die eigentliche Bohrmaschine als kompakte, elektrisch betriebene Einheit direkt im Bohrloch arbeitet und ohne Bohrgestänge auskommt. Durch diese Integration des Bohrsystems in das Bohrloch selbst eröffnen sich neue Freiheitsgrade hinsichtlich Platzbedarf, Energieverbrauch, Emissionen und Prozesskontrolle. Gleichzeitig stellt dieser Ansatz hohe Anforderungen an die technische Auslegung, die Zuverlässigkeit der einzelnen Module sowie die Systemintegration unter realen Einsatzbedingungen.



1.2 Projektziele

Die Projektziele des Pilot- und Demonstrationsprojekts «Grabowski – Bohrroboter für Geothermiebohrungen» wurden im ursprünglichen Gesuch entlang klar definierter Bohrtiefen strukturiert. Ziel war es, den neuartigen, borehole-integrierten Bohrroboter schrittweise zu entwickeln, zu testen und zu validieren, wobei mit zunehmender Tiefe sowohl der Integrationsgrad als auch die Systemanforderungen steigen sollten. Die definierten Tiefenstufen dienten dabei als technische Reifeindikatoren für einzelne Subsysteme sowie für das Gesamtsystem.

Zielstufe 1: 20 m Bohrung – Validierung der Kernbohrfunktionen

Die erste Zielstufe fokussierte auf die grundlegende Funktionsfähigkeit des Bohrsystems im Festgestein sowie auf die initiale Charakterisierung der zentralen mechanischen und fluidischen Prozesse. Im Vordergrund standen dabei folgende Ziele:

- Durchführung einer Bohrung bis 20 m Tiefe im Festgestein zur Erprobung der Getriebeeinheit unter realistischen Lastbedingungen.
- Messung und Quantifizierung des Verschleisses am Bohrkopf in unterschiedlichen Gesteinsarten mit dem Ziel, einen maximalen Verschleiss von 2 mm pro 250 m Bohrtiefe zu erreichen.
- Analyse der beim Bohrprozess entstehenden Cuttings hinsichtlich Korngrößenverteilung sowie Untersuchung des Spülvorgangs. Ziel war eine maximale Cuttinggröße von unter 10 mm.
- Nutzung der 20-m-Bohrung für erste integrierte Tests der Extrusionseinheit, insbesondere zur Beurteilung der Herstellbarkeit und Qualität des extrudierten Kunststoffrohrs.

Zielstufe 2: Äquivalente Bohrtiefe von 50 m – Validierung der Bewegungs- und Spülfunktion

Die zweite Zielstufe zielte auf die Erweiterung des Systems um die Bewegungseinheit sowie auf die Erprobung im Fest- und Lockergestein. Neben der Bohrtiefe stand insbesondere die Interaktion zwischen den einzelnen Subsystemen im Fokus. Die definierten Ziele umfassten:

- Durchführung einer Bohrung zwischen 20 und 50 m Tiefe unter Einsatz von Getriebe- und Bewegungseinheit sowohl im Festgestein als auch in Lockergesteinsschichten. Zielgrößen waren eine Bohrgeschwindigkeit von etwa 1 cm/min im Festgestein sowie grösser als 1 cm/min im Lockergestein.
- Erneute Messung des Bohrkopfverschleisses in unterschiedlichen Gesteins- und Lockergesteinsarten, insbesondere Granit, Mergel und Torf, mit Zielwerten analog zur 20-m-Bohrung.
- Integration der Extrusionseinheit für die Abstützung des Bohrlochs in Lockergesteinsschichten, inklusive Bewertung der Rohrqualität und der Prozessstabilität unter realen Bohrbedingungen.
- Test des Wasser- und Filtersystems im Fest- und Lockergestein, mit dem Ziel, eine effektive Filtration der Spülflüssigkeit zu erreichen und eine maximale verbleibende Partikelgröße von unter 1 mm sicherzustellen.

Zielstufe 3: ca. 200 m Bohrung – Gesamtsystem

Die dritte Zielstufe stellte die vollständige Systemintegration und die Demonstration der Anwendbarkeit in für Geothermie typischen Tiefen in den Mittelpunkt. Dabei sollten alle Subsysteme gemeinsam betrieben und quantitativ bewertet werden. Die Ziele umfassten:

- Integration aller Systemkomponenten in einem Gesamtsystem und Bewertung der Systemzuverlässigkeit über die gesamte Bohrtiefe hinweg, inklusive Erstellung einer Risikomatrix auf Basis realer Betriebsdaten.
- Quantitativer Vergleich des Grabowski-Systems mit konventionellen Bohrverfahren, insbesondere hinsichtlich Kosten, Personalbedarf, Energieverbrauch inklusive Infrastruktur und Beurteilung der Bohrlochqualität mittels Kamerabefahrung o. ä., Integration der Geothermiesonde, Hinterfüllung.



Daraus ergeben sich folgende Meilensteine (M):

- M1: Erreichte Bohrtiefe 20 m und Validierung Getriebe + Bohrkopf
- M2: Erreichte Bohrtiefe >20 m bzw. äquivalenten 50 m zur Validierung der Bewegungseinheit
- M3: Validierung der Extrusionseinheit im M1 erstellen Bohrloch
- M4: Erreichte Bohrtiefe 50 m
- M5: Erreichte Bohrtiefe von ungefähr 200 m

Fragestellungen des Projekts

Zur systematischen Bewertung der Technologie wurden im Gesuch folgende übergeordnete Fragestellungen definiert:

Bezogen auf Bohrtiefe und Geologie

- Welcher Platz- und Zeitbedarf ist für die Durchführung der Bohrung erforderlich?
- Welche Cuttinggrößen entstehen in Abhängigkeit von Tiefe und Geologie?
- Welche Vibrationen und Drehmomente treten während des Bohrprozesses auf?
- Welche Ressourcen werden benötigt, insbesondere hinsichtlich Energieverbrauch, Personalaufwand und Schlamm Entsorgung?

Bezogen auf die Extrusionseinheit

- Welche Qualität weist das extrudierte Kunststoffrohr hinsichtlich Durchmesser, Wandstärke, Oberflächenrauheit und Anbindung an das umgebende Erdreich auf?
- Wie hoch ist der Materialverbrauch in unterschiedlichen geologischen Schichten?
- Kann eine Wasserschicht durch das extrudierte Rohr zuverlässig abgedichtet werden, insbesondere im Hinblick auf Leckagen?
- Hat die Bohrtiefe einen signifikanten Einfluss auf den Extrusionsprozess?

Bezogen auf den Bohrprozess und die Systemzuverlässigkeit

- Welchen Einfluss haben unterschiedliche Gesteins- und Schichtformationen auf Verklemmungen des Geräts, die Wasserspülung, die notwendige Rückzugskraft sowie auf die Bohrlochqualität hinsichtlich Durchmesser, Rauigkeit und Position?
- Wie schnell kann die Filterung des Bohrschlammes vor Ort durchgeführt werden und welches Schlammvolumen fällt dabei an?
- Welche quantifizierbaren Unterschiede ergeben sich im Vergleich zu konventionellen Bohrverfahren hinsichtlich Personalaufwand, Energieverbrauch, Platzbedarf, Dauer und Kosten?
- Wie zuverlässig ist das Gesamtsystem, gemessen an der Anzahl manueller Eingriffe, Maschinenrückzüge und Defekte?
- Welcher Aufwand entsteht bei der Integration der EWS, welche Haltekraft ist für den Auftrieb während der Hinterfüllung erforderlich und wie stabil ist die Hinterfüllung über die Zeit?
- Ist das eingesetzte Messkonzept zur Erfassung von Position, Bohrtiefe, Vibrationen, Druck, Temperatur und Energieverbrauch ausreichend genau und geeignet zur Bewertung der Bohrlochqualität?



2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion

Das Projekt wurde gemäss ursprünglichem Gesuch in sechs Arbeitspakete (AP1–AP6) gegliedert (Bild 5). Die Arbeitspakete adressieren jeweils klar abgegrenzte technische und organisatorische Aspekte des Gesamtsystems. Die Testbohrungen stellen dabei keine eigenständigen Arbeitspakete, sondern die Resultate und Meilensteine der jeweiligen Arbeitspakete dar.

Mit zunehmendem Projektfortschritt steigt der Integrationsgrad der einzelnen Subsysteme sowie die angestrebte Bohrtiefe. Diese Logik erlaubt es, technische Risiken frühzeitig zu identifizieren und die Systemkomplexität schrittweise zu erhöhen.

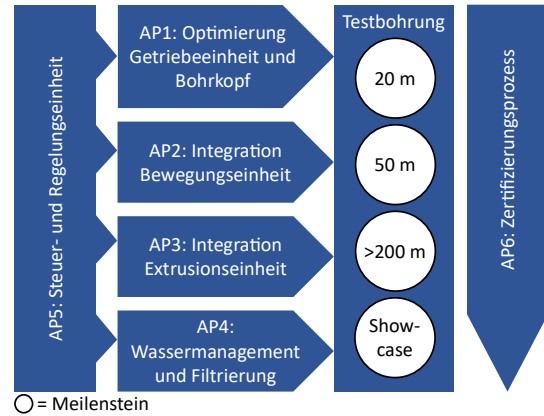


Bild 5: Ablauf Arbeitspakete

2.1 AP1 – Optimierung Getriebeeinheit und Bohrkopf

2.1.1. Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Ziel von Arbeitspaket 1 war die Auslegung, Optimierung und Erprobung der Getriebeeinheit (Bild 6) inklusive des neu entwickelten Bohrkopfs unter realistischen Bohrbedingungen im Festgestein. Das Getriebe stellt das zentrale Kraftübertragungselement zwischen Antrieb und Bohrkopf dar und ist aufgrund der hohen Schlag- und Drehmomente eines der mechanisch am stärksten belasteten Subsysteme des Bohrroboters.

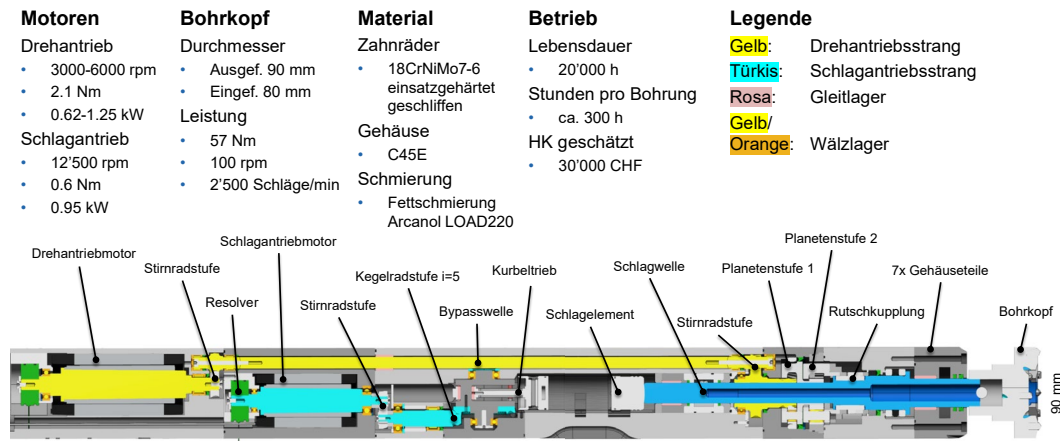


Bild 6: Aufbau Bohr-Schlagantrieb (hier noch mit 90 mm dargestellt)

Die Konstruktion der Getriebeeinheit erfolgte auf Basis detaillierter Auslegungsrechnungen sowie mittels CAD-Modellierung. Ziel war es, ausreichende Sicherheitsfaktoren für Zahnräder, Wellen, Lager und Welle-Nabe-Verbindungen zu gewährleisten und gleichzeitig eine kompakte Bauform zu realisieren, die für den borehole-integrierten Einsatz geeignet ist. Parallel dazu wurde ein neuer Bohrkopf entwickelt, bei dem Anzahl, Geometrie und Anordnung der Hartmetallstifte gezielt auf die kombinierte Schlag- und Drehbewegung abgestimmt wurden.

2.1.2. Erste Tests mit 90 mm Bohrdurchmesser (Q4/2023)

Die ersten Bohrtests im Rahmen von AP1 wurden im vierten Quartal 2023 durchgeführt (Bild 7). Zu diesem Zeitpunkt erfolgte die Entwicklung noch mit einem Bohrdurchmesser von 90 mm. Ziel dieser



frühen Tests war es, das grundlegende Bohrprinzip unter möglichst kontrollierten Bedingungen zu evaluieren und erste Messdaten zum Bohrfortschritt, zur Leistungsübertragung sowie zum Verhalten des Schlagmechanismus zu gewinnen.

Die Tests zeigten, dass mit dem damaligen System ein Bohrfortschritt von etwa 0.5 bis 2 cm pro Minute erreicht werden konnte. Der Bohrprozess funktionierte sowohl in Locker- als auch in Festgestein, wobei zum Zeitpunkt der Tests eine maximale reale Bohrtiefe von rund 4 m erzielt wurde. Die Festgesteinsbohrungen wurden im Labor in verschiedenen Gesteinsarten (roter Sandstein, Granit, Kalkstein) durchgeführt, wobei die Lockergesteinsbohrungen vorwiegend im Feld beim Stadtwerk Winterthur erfolgten. Diese Ergebnisse bestätigten grundsätzlich die Machbarkeit des Bohrprinzips, machten jedoch auch deutlich, dass die verfügbare Leistung und die Auslegung des Schlagmechanismus für grössere Tiefen und längere Betriebszeiten nicht ausreichend waren.

Insbesondere traten Hinweise auf eine zu geringe Leistung im Lockergestein auf. Zusätzlich erwies sich die Montage des Systems aufgrund der sehr kompakten Baugrösse als technisch anspruchsvoll, was den Zugang zu einzelnen Baugruppen und die Wartbarkeit erschwerte.



Bild 7: Eindrücke vom «20 m Test» mit der 90 mm Variante

2.1.3. Entscheid zur Skalierung auf 136 mm Bohrdurchmesser

Basierend auf den Erkenntnissen aus den ersten Tests wurde entschieden, den Bohrdurchmesser von 90 mm auf 136 mm zu vergrössern. Dieser Schritt stellte einen grundlegenden Richtungsentscheid im Projekt dar und hatte weitreichende technische und systemische Konsequenzen.

Die Vergrösserung des Bohrdurchmessers ermöglichte den Einsatz eines leistungsstärkeren Antriebs, was eine signifikante Erhöhung der Schlag- und Drehleistung erlaubte. Gleichzeitig eröffnete der grössere Durchmesser neue konstruktive Freiheitsgrade, insbesondere hinsichtlich eines kompakteren Designs des Bohrers in axialer Richtung. Zudem wurde damit die Voraussetzung geschaffen, marktübliche Doppel-U-Rohrsonden einzuführen, was für die spätere praktische Anwendung von zentraler Bedeutung ist.

Demgegenüber standen jedoch auch Nachteile. Der grössere Bohrdurchmesser führte zu einem erhöhten Platzbedarf der Oberflächenperipherie, insbesondere im Bereich des Wassermanagements, mit einer benötigten Fläche von bis zu rund 8 m². Zudem erhöhte sich der Energieverbrauch pro Bohrloch, was sich in einem CO₂-Ausstoss von etwa 288 kg pro Bohrloch widerspiegelt. Diese Aspekte wurden bewusst in Kauf genommen, da sie im Verhältnis zu den potenziellen Vorteilen für die Systemrobustheit, die Bohrleistung und die Marktfähigkeit als vertretbar eingeschätzt wurden.

2.1.4. Bohrkopfoptimierung

Unabhängig vom Entscheid zur Skalierung auf 136 mm wurde die 90-mm-Variante weiterhin gezielt eingesetzt, um den Bohrkopf zu optimieren und grundlegende Zusammenhänge zwischen Drehzahl, Schlagfrequenz und Bohrfortschritt zu untersuchen (Bild 8). Durch eine Erhöhung der Drehzahl



konnten im Lockergestein Bohrfortschritte von etwa 20 mm pro Minute erzielt werden, während im Festgestein Fortschritte von rund 5 mm pro Minute erreicht wurden.



Bild 8: Optimierung Bohrkopf 90 mm

Diese Tests lieferten wertvolle Erkenntnisse zur Auslegung der Hartmetallstifte, insbesondere hinsichtlich ihrer Geometrie und Anordnung. Die Ergebnisse flossen direkt in die Weiterentwicklung des Bohrkopfs für die 136-mm-Variante (Bild 9) ein und bildeten eine wichtige Grundlage für die Skalierung des Systems.



Bild 9: Bohrkopf, Laborbohrungen im Granit (v.l.n.r)

2.1.5. Neuaufbau und Stabilisierung des Schlagmechanismus (Q1/2024 – Q2/2025)

Mit der vollständigen Umstellung auf den Bohrdurchmesser von 136 mm wurde das Getriebe neu aufgebaut und konstruktiv überarbeitet. Ein zentraler Fokus lag dabei auf dem Schlagmechanismus, der auf einem Kurbelwellenprinzip mit Schlaggewicht basiert. Dieser Mechanismus erwies sich als eines der kritischsten Elemente des Systems.

Im Verlauf der Entwicklung kam es mehrfach zu Brüchen von Bauteilen im Schlagmechanismus (Bild 10). Diese Ausfälle traten insbesondere unter hohen Schlagenergien und bei längeren Betriebszeiten auf und führten zu wiederholten Unterbrechungen der Tests. Die Ursachen lagen in der Kombination aus hohen dynamischen Lasten, Materialermüdung und konstruktiven Randbedingungen, die in dieser Form im Vorfeld nicht vollständig vorhersehbar waren.



Bild 10: Gebrochene Kurbelwelle + Pleuelstange

Die Stabilisierung des Schlagmechanismus erforderte mehrere Iterationen in der konstruktiven Auslegung, der Materialwahl sowie der Fertigung der Komponenten. Erst im zweiten Quartal 2025 konnte ein stabiler Betrieb des Schlagmechanismus über längere Zeiträume erreicht werden. Diese Phase stellte eine wesentliche Ursache für die Verzögerungen zu Beginn des Projekts dar, führte jedoch gleichzeitig zu einem deutlich vertieften Verständnis der relevanten Belastungsmechanismen und zur Entwicklung einer wesentlich robusteren Lösung.

2.1.6. Ergebnisse und aktueller Stand von AP1 (Q2/2025)

Die Tests im Rahmen von AP1 zeigten, dass das grundlegende Funktionsprinzip des Getriebes und des Bohrkopfs valide ist und stabile Bohrfortschritte im Festgestein erzielt werden können. Gleichzeitig wurde deutlich, dass insbesondere bei längerer Betriebsdauer und höheren Schlagenergien erhebliche mechanische Belastungen auftreten. In mehreren Testläufen kam es zu Schäden an einzelnen Bauteilen des Schlagmechanismus, was eine Überarbeitung der Konstruktion erforderlich machte.

Die Analyse der Bohrköpfe nach den Tests lieferte wichtige Erkenntnisse zum Verschleissverhalten der Hartmetallstifte. Es zeigte sich, dass die ursprünglich gewählte Geometrie nicht in allen Gesteinsarten optimal war und Anpassungen hinsichtlich Form, Materialqualität und Befestigung notwendig sind. Diese Erkenntnisse flossen direkt in die Weiterentwicklung des Bohrkopfs ein.

Im weiteren Projektverlauf konnten die Arbeiten im Rahmen von AP1 erfolgreich abgeschlossen werden. Aufbauend auf der stabilisierten Auslegung des Schlagmechanismus und der neu entwickelten Getriebeeinheit wurde im zweiten Quartal 2025 die ursprünglich angestrebte Bohrtiefe von 20 m mit dem 136-mm-System erreicht. In anschliessenden Tests konnte die reale Bohrtiefe weiter gesteigert werden, sodass mittlerweile Bohrtiefen von knapp 30 m erzielt wurden. Diese Ergebnisse bestätigen, dass die im Rahmen von AP1 vorgenommenen konstruktiven Anpassungen zu einer deutlich erhöhten mechanischen Stabilität und Prozesssicherheit geführt haben.

Mit dem Erreichen dieser Bohrtiefen gelten die zentralen Aktivitäten von AP1 als abgeschlossen. Die Zeichnungserstellung und Beschaffung der Getriebekomponenten sowie deren Montage wurden vollständig umgesetzt, und die Getriebeeinheit konnte unter realistischen Bohrbedingungen erfolgreich getestet werden. Auch die vorgesehenen Tests bis 20 m Bohrtiefe wurden durchgeführt und ausgewertet. Die Optimierung des Bohrkopfs ist in Teilen abgeschlossen und wird parallel in nachfolgenden Arbeitspaketen weitergeführt, da sich hier enge Wechselwirkungen mit der Bewegungseinheit und der Extrusionseinheit ergeben.

Gleichzeitig zeigte sich im Zuge der Tests, dass mit der aktuellen Systemversion die ursprünglich angestrebten Bohrtiefen von 200 m nicht realistisch erreichbar sind. Der limitierende Faktor ist dabei insbesondere der hydrostatische Wasserdruck, der mit zunehmender Bohrtiefe aufgrund der Wassersäule im Bohrloch ansteigt sowie die Robustheit des Systems. Die derzeitige Auslegung des Systems, insbesondere im Bereich der Dichtungen und der druckbelasteten Komponenten, ist für diese Druckniveaus



noch nicht ausgelegt. Ein Betrieb in grösseren Tiefen würde daher ein erhöhtes Risiko für Leckagen und Funktionsstörungen darstellen.

Diese Erkenntnis stellt ein zentrales Ergebnis von AP1 dar und hat unmittelbare Auswirkungen auf die weitere Systementwicklung. Sie zeigt, dass für Bohrtiefen im Bereich von 200 m eine grundlegend überarbeitete Systemarchitektur erforderlich ist, insbesondere hinsichtlich Wasserdichtheit, Druckstabilität und struktureller Auslegung. Entsprechend ist vorgesehen, diese Anforderungen in einer nächsten Prototypgeneration (Version 3.0) gezielt zu adressieren. Der Aufbau und die Erprobung dieser neuen Systemversion sind ab dem dritten Quartal 2027 geplant und liegen ausserhalb des unmittelbaren Umfangs von AP1.

Im Kontext des Pilot- und Demonstrationsprojekts erfüllt AP1 damit seine vorgesehene Rolle: Die grundlegende Funktionsfähigkeit des Bohrprinzips wurde nachgewiesen, die kritischen mechanischen und hydraulischen Limitierungen der aktuellen Systemgeneration wurden identifiziert und quantifiziert, und es liegt nun eine belastbare Entscheidungsgrundlage für die nächste Entwicklungsstufe vor.

2.2 AP2 – Integration der Bewegungseinheit

2.2.1. Ausgangskonzept und Anpassung des Bewegungsprinzips

Arbeitspaket 2 hatte zum Ziel, eine Bewegungseinheit zu entwickeln und in den Bohrroboter zu integrieren, welche die axiale Fortbewegung des Systems im Bohrloch ermöglicht und gleichzeitig das beim Bohren entstehende Drehmoment zuverlässig an der Bohrlochwand abstützt. In der ursprünglichen Projektplanung war vorgesehen, sowohl die Fortbewegung als auch die Drehmomentabstützung ausschliesslich über sogenannte Fluidmuskeln in Form anisotroper Ballone zu realisieren (Bild 11).

Im Verlauf der Entwicklungsarbeiten zeigte sich jedoch, dass dieses Konzept hinsichtlich Regelbarkeit, Kraftübertragung und Zuverlässigkeit unter realistischen Bohrbedingungen nur eingeschränkt geeignet ist. Insbesondere die gleichzeitige Erzeugung von axialem Vorschub und Drehmomentabstützung über dieselben Elemente erwies sich als technisch komplex und schwer beherrschbar. Vor diesem Hintergrund wurde das Bewegungsprinzip grundlegend überarbeitet.

Das weiterentwickelte Konzept sieht vor, die Ballone ausschliesslich zur radialen Abstützung und zur Aufnahme des Drehmoments zu nutzen,

während die axiale Fortbewegung des Bohrroboters durch einen hydraulischen Zylinder erfolgt, der zwischen zwei Balloneinheiten angeordnet ist (siehe auch Bild 3). Durch diese funktionale Trennung konnte die Komplexität der einzelnen Subsysteme reduziert und die Regelbarkeit der Bewegungseinheit deutlich verbessert werden.



Bild 11: Prinzip Fluidmuskel

2.2.2. Entwicklung und Integration der Bewegungseinheit (136-mm-Version)

Die neu entwickelte Bewegungseinheit wurde vollständig auf den Bohrdurchmesser von 136 mm ausgelegt und in den Bohrroboter integriert. Ein wesentlicher Entwicklungsschritt bestand in der Auswahl und Qualifikation geeigneter Ballone, die den hohen mechanischen und hydraulischen Anforderungen im Bohrloch standhalten. Insbesondere war es erforderlich, Ballone mit metallischen Anschlussteilen zu verwenden, um eine zuverlässige Anbindung an die Struktur des Bohrroboters sowie eine dauerhafte Dichtheit zu gewährleisten.

Die Ballone werden über Ventile angesteuert, die mit Wasserdruck von bis zu 8 bar betrieben werden. Durch gezieltes Beaufschlagen der Ballone wird das System radial gegen die Bohrlochwand gedrückt, wodurch das beim Bohren entstehende Drehmoment aufgenommen werden kann. Der zwischen den Ballonen angeordnete hydraulische Zylinder erzeugt den axialen Vorschub des Systems und ermöglicht eine kontrollierte Fortbewegung im Bohrloch.

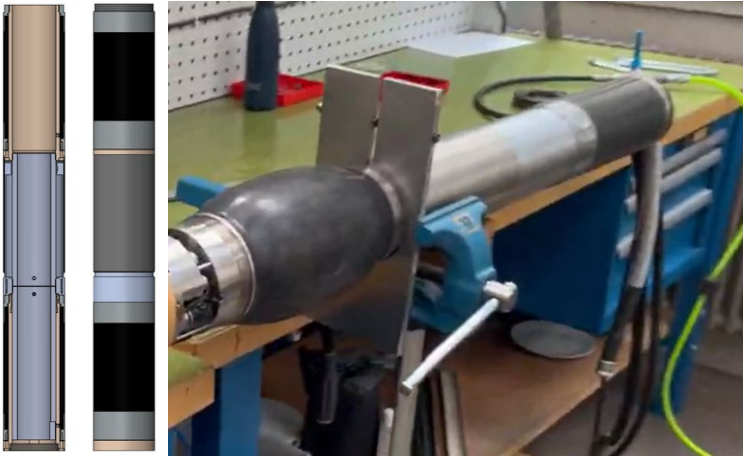


Bild 12: CAD-Prinzip (links), aufgeblasener Ballon im Labor

Parallel zur mechanischen Integration wurde die Wasser- und Spülführung in die Bewegungseinheit integriert. Dies erforderte eine enge Abstimmung zwischen Mechanik, Hydraulik und Dichtkonzept, da die Bewegungseinheit sowohl hohen Kräften als auch permanentem Wasserkontakt ausgesetzt ist. Zudem wurden im Zuge von AP2 das Getriebe und der Bohrkopf aus AP1 überarbeitet und an die neuen Last- und Integrationsbedingungen angepasst.

2.2.3. Durchführung der Tests und erzielte Ergebnisse

Die Tests der Bewegungseinheit erfolgten im integrierten System unter realen Bohrbedingungen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Bewegungseinheit zuverlässig arbeitet und eine stabile Drehmomentabstützung im Festgestein ermöglicht. Mit dem integrierten System wurden reale Bohrtiefen von knapp 30 m erreicht, ohne dass sich signifikante Änderungen durch die Bohrtiefe im Betriebsverhalten der Bewegungseinheit zeigten.

Die Analyse der Messdaten und Beobachtungen ergab, dass die auftretenden Kräfte, die hydraulischen Drücke sowie die dynamischen Beanspruchungen der Bewegungseinheit bis zu einer Tiefe von etwa 50 m als vergleichbar eingeschätzt werden können. Diese Einschätzung basiert auf der Tatsache, dass die relevanten Lasten primär durch den Bohrprozess selbst und weniger durch die absolute Tiefe bestimmt werden. Entsprechend wurde der Test der Bewegungseinheit als inhaltlich aussagekräftig für den ursprünglich vorgesehenen 50-m-Meilenstein bewertet, auch wenn diese Tiefe real noch nicht erreicht wurde.

2.2.4. Identifizierte Probleme und umgesetzte Verbesserungen

Im Rahmen der Tests traten mehrere technische Herausforderungen auf, die im Verlauf von AP2 systematisch adressiert wurden. Ein zentrales Problem betraf die Dichtheit im Bereich der Kabelverschraubungen. Hier kam es zu Wassereintritt, was das Risiko von Kurzschlüssen und Funktionsstörungen erhöhte. Ein weiteres Problemfeld betraf Verschmutzungen in den Ventilen der Ballonsteuerung. Insbesondere im dritten Quartal 2025 führten eingetragene Partikel aus dem Spülwasser zu Funktionsbeeinträchtigungen der Ventile. Zur Behebung dieses Problems wurde die Ventilarchitektur leicht überarbeitet. Die Ventile erhielten eine neue Rücklaufgeometrie, bei der das Entlastungswasser beziehungsweise der Entlastungsdruck kontrolliert zurückgeführt wird. Nach Umsetzung dieser Massnahmen konnte das Problem der Ventilverschmutzung nachhaltig behoben werden.

2.2.5. Abschluss der Aktivitäten und Einordnung von AP2

Mit Abschluss von AP2 wurden die wesentlichen geplanten Aktivitäten umgesetzt. Die Bewegungsmechanik wurde erfolgreich integriert, die Wasser- und Spülführung in die Mechanik eingebunden, geeignete Ballone inklusive Lieferanten evaluiert und qualifiziert, das Getriebe überarbeitet und die Bewegungseinheit montiert. Der ursprünglich geplante Test bis 50 m konnte in realer Tiefe noch nicht



vollständig durchgeführt werden. Die im Projektverlauf erreichten Bohrtiefen von knapp 30 m sowie die dokumentierten Betriebszustände liefern jedoch eine belastbare Grundlage zur Bewertung der Bewegungseinheit.

AP2 zeigt, dass die neu entwickelte Bewegungseinheit grundsätzlich funktionsfähig ist und eine zuverlässige Drehmomentabstützung im Bohrloch ermöglicht. Gleichzeitig wurden klare Limitierungen und Optimierungspotenziale identifiziert, insbesondere im Bereich der Dichtheit und der Hydraulikkomponenten.

2.3 AP3 – Integration der Extrusions- bzw. Abstützeinheit

2.3.1. Zielsetzung und konzeptioneller Rahmen von AP3

Arbeitspaket 3 hatte zum Ziel, eine im Bohrloch integrierte Einheit zur Abstützung und potenziellen Abdichtung des Bohrlochs zu entwickeln und zu erproben. Diese Einheit basiert auf dem Prinzip, während des Bohrprozesses ein Kunststoffrohr direkt im Bohrloch herzustellen, das insbesondere in Lockergesteinsschichten eine temporäre oder permanente Stabilisierung ermöglichen soll. Die Einheit wurde im Projektverlauf zunehmend nicht mehr ausschliesslich als Extrusionseinheit verstanden, sondern als Abstützeinheit, bestehend aus der eigentlichen Schmelz- und Extrusionseinheit sowie der vorgelagerten Feedereinheit zur Förderung des Kunststofffilaments.

AP3 stellte eines der komplexesten Arbeitspakete dar, da hier thermische, mechanische, materialtechnische und hydraulische Fragestellungen unmittelbar zusammenwirken. Entsprechend war ein iteratives Vorgehen vorgesehen, bei dem zunächst das grundlegende Funktionsprinzip im Labor validiert und anschliessend schrittweise in Richtung Integration und Feldanwendung weiterentwickelt wird.

2.3.2. Validierung des Funktionsprinzips mit 90-mm-Prototyp (Q4/2023 – Q2/2024)

Die ersten Arbeiten im Rahmen von AP3 wurden bereits im vierten Quartal 2023 mit einem Prototypen für einen Bohrdurchmesser von 90 mm begonnen (Bild 13). Mit diesem Prototyp konnten erstmals Kunststoffrohre im Labor hergestellt werden. Ziel dieser frühen Phase war es, das grundlegende Extrusionsprinzip zu validieren, insbesondere das Aufschmelzen des Polyethylen-Filaments, den kontinuierlichen Materialfluss sowie die Formgebung des extrudierten Rohrs.

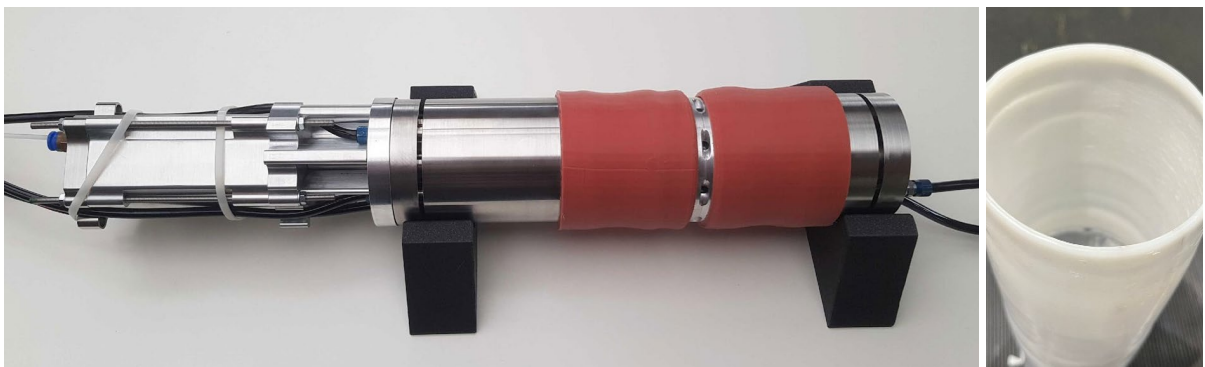


Bild 13: Prototyp 90 mm Variante Abstützeinheit (links Feedermodul, rechts Extrusionseinheit); extrudierte Rohr

Der 90-mm-Prototyp wurde bis ins zweite Quartal 2024 kontinuierlich weiterentwickelt und erweitert. In dieser Phase konnte das vollständige Funktionsprinzip der Abstützeinheit erfolgreich nachgewiesen werden. Es gelang, reproduzierbar Rohre mit definierter Wandstärke und Geometrie herzustellen, sowohl unter trockenen Bedingungen als auch bei teilweiser Beaufschlagung mit Wasser. Diese Ergebnisse bestätigten die grundsätzliche Machbarkeit des Konzepts und bildeten die Grundlage für die Skalierung auf einen grösseren Bohrdurchmesser.



2.3.3. Skalierung und Neuentwicklung auf 136 mm (2024 – Anfang 2025)

Aufbauend auf den positiven Ergebnissen mit der 90-mm-Variante wurde die Entwicklung der Abstützeinheit ab der zweiten Jahreshälfte 2024 vollständig auf einen Bohrdurchmesser von 136 mm umgestellt. Diese Skalierung stellte keinen rein geometrischen Anpassungsschritt dar, sondern erforderte eine weitgehende Neuentwicklung mehrerer Subsysteme (Bild 14).

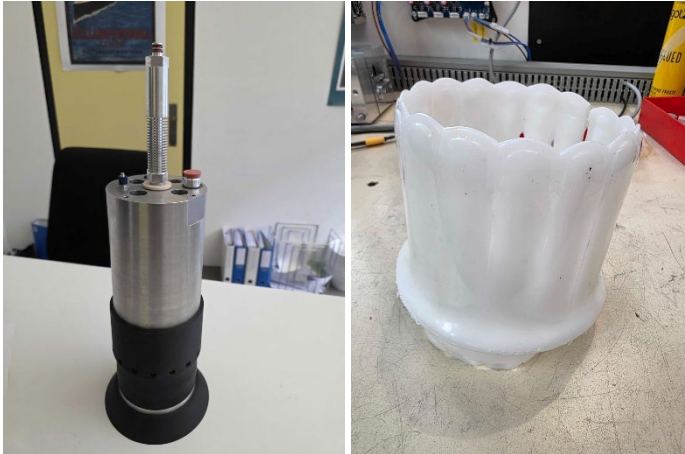


Bild 14: Prototyp 136 mm Variante Extrusionseinheit, extrudiertes Stück Durchmesser 136 mm (v.l.n.r.)

Insbesondere zeigte sich, dass der ursprünglich eingesetzte Wheel-Feeder zur Förderung des Kunststofffilaments für den grösseren Durchmesser nicht ausreichend Förderkraft bereitstellen konnte. Die Reibungskräfte im Filament sowie der erhöhte Materialdurchsatz führten dazu, dass ein neues Förderkonzept erforderlich wurde. In der Folge wurde die Feedereinheit grundlegend überarbeitet und als Riemenfeeder neu konzipiert.

Parallel dazu wurde erkannt, dass für den Betrieb im wassergefüllten Bohrloch zwingend der obere zweite Ballon erforderlich ist, der den Extrusionsbereich gezielt gegen eindringendes Wasser abdichtet und das Rohr aufweitet.

2.3.4. Entwicklung der Feedereinheit und der Abstützeinheit

Zur Entwicklung des neuen Riemenfeeders wurde zunächst ein Funktionsmuster aufgebaut, das noch nicht für den Einsatz im Bohrloch geeignet war. Dieses diente dazu, das grundsätzliche Förderprinzip, die Reibpaarung zwischen Riemen und Filament sowie die erforderlichen Antriebskräfte zu untersuchen. Nach erfolgreichen Tests dieses Funktionsmusters wurde die Feedereinheit konstruktiv auf einen Durchmesser von 136 mm ausgelegt, um sie perspektivisch in den Bohrroboter integrieren zu können.

Hierfür wurde eine spezifische Motor-Getriebe-Kombination entwickelt, die den synchronisierten Antrieb der beiden Riemen ermöglicht. Ein wesentlicher Entwicklungsaufwand bestand zudem in der Auslegung geeigneter Riemen, die eine ausreichend hohe Reibung zum zu fördernden Filament aufweisen und gleichzeitig den thermischen und mechanischen Belastungen standhalten. Diese Arbeiten führten zu mehreren Iterationen in Materialwahl und Geometrie der Riemen.

Parallel dazu wurden Arbeiten am Thermomanagement der Schmelzeinheit durchgeführt. Die thermische Isolation der auf etwa 210 °C aufgeheizten Schmelzzone gegenüber der wassergefüllten Umgebung wurde weiterentwickelt und simulationsgestützt untersucht. Die Materialentwicklung des Polyethylen-Filaments bzw. die Suche nach einem entsprechenden Hersteller konnte in dieser Phase abgeschlossen werden.

2.3.5. Ergebnisse der bisherigen Tests und aktueller Stand

Erst ab dem Q1/2025 gelang es, mit der 136-mm-Version der Abstützeinheit erstmals erfolgreich Rohre zu extrudieren. Dabei zeigte sich, dass die Geometrie des Auslasses einen entscheidenden Einfluss



auf die Qualität des extrudierten Rohrs hat. Insbesondere die Oberflächenqualität, die Masshaltigkeit und die gleichmässige Wandstärke erwiesen sich als stark abhängig von der Auslassform. Diese Geometrie wird daher bis zum aktuellen Zeitpunkt weiter optimiert.

Bislang konnten mehrere etwa ca 1 m lange Rohrsegmente hergestellt werden (Bild 15). Die Tests erfolgten unter trockenen Bedingungen, teilweise unter Wassereinfluss sowie in Laborversuchen mit Lockergestein. Dafür wurde extra ein Teststand entwickelt. Diese Versuche zeigten, dass das Grundprinzip der Abstützeinheit auch unter erschwerten Randbedingungen funktioniert. Eine vollständige Integration der Abstützeinheit in den Bohrroboter war bisher jedoch nicht möglich, da insbesondere die Feedereinheit und die Ballon- und Ventiltechnik noch nicht ausreichend kompakt und robust ausgelegt waren.

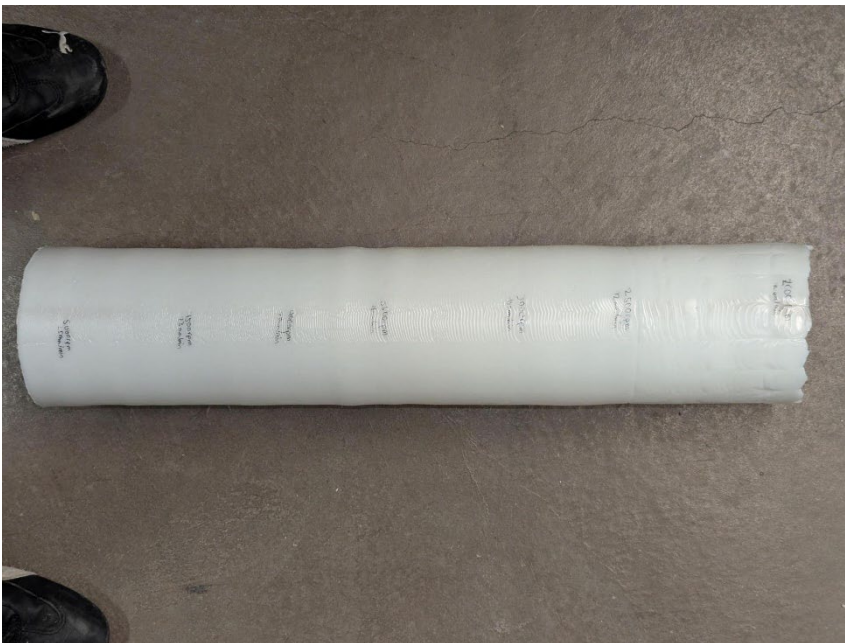


Bild 15: 80 cm langes 136 mm grosses Rohr. Grössenvergleich Schuhe links sichtbar.

Entsprechend konnten einzelne Teilaktivitäten von AP3 erfolgreich abgeschlossen werden, darunter das Thermomanagement der Schmelzeinheit sowie die Materialentwicklung des Polyethylen-Filaments. Andere Aktivitäten, insbesondere die Optimierung der Feedereinheit, die Entwicklung der Aufweit- und Abdichtballone sowie deren Ventiltechnik, sind zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen.

2.3.6. Einordnung und Abgrenzung von AP3

AP3 zeigt exemplarisch die hohe technische Komplexität der Integration zusätzlicher Funktionen in einen borehole-integrierten Bohrroboter. Während das grundlegende Funktionsprinzip der Abstützeinheit bereits frühzeitig validiert werden konnte, erwiesen sich Skalierung, Kompaktierung und Systemintegration als deutlich anspruchsvoller als ursprünglich angenommen. Die bisherigen Ergebnisse liefern jedoch eine belastbare Grundlage für die Weiterentwicklung der Abstützeinheit und deren Integration in das Gesamtsystem.

Die vollständige Integration der Abstützeinheit in den Bohrroboter ist für das zweite bis dritte Quartal 2026 vorgesehen. Damit bleibt AP3 ein zentrales, noch nicht abgeschlossenes Arbeitspaket, dessen Ergebnisse entscheidend für die weiteren Schritte des Projekts sind.



2.4 AP4 – Wassermanagement und Filtration

2.4.1. Zielsetzung und Systemgrenzen von AP4

Arbeitspaket 4 hatte zum Ziel, das gesamte Wassermanagement des Bohrrobotersystems zu entwickeln, zu integrieren und unter realistischen Betriebsbedingungen zu testen. Das Wassermanagement ist ein zentrales Subsystem des Grabowski-Bohrroboters, da es mehrere Funktionen gleichzeitig erfüllt: den Abtransport des Bohrguts aus dem Bohrloch, die Kühlung des Bohrkopfs und des Schlagmechanismus, die Versorgung der hydraulischen Aktuatoren sowie die Rückführung und Wiederverwendung des Spülwassers. Gleichzeitig bestimmt das Wassermanagement massgeblich den Platzbedarf der Oberflächenperipherie.

Im Rahmen von AP4 lag der Fokus nicht auf der weiteren Erhöhung der Bohrtiefe, sondern auf der zuverlässigen, skalierbaren und betriebssicheren Auslegung des Spül- und Filtersystems, angepasst an die Anforderungen des Bohrdurchmessers von 136 mm und die damit verbundenen Volumenströme.

2.4.2. Entwicklung des Spül- und Wassermanagementkonzepts

Die Entwicklung des Wassermanagements baute auf ersten Erfahrungen aus den frühen Bohrtests mit einem Bohrdurchmesser von 90 mm auf. Diese frühen Tests dienten dazu, grundlegende Zusammenhänge zwischen Spülmenge, Bohrfortschritt, Cuttinggrösse und Rückförderung zu verstehen. Mit der Skalierung des Systems auf einen Bohrdurchmesser von 136 mm wurde das gesamte Wassermanagement neu ausgelegt, da sich sowohl die anfallende Menge an Bohrgut als auch die erforderlichen Volumenströme signifikant erhöhten.

In einem ersten Schritt wurde eine geeignete Pumpe ausgewählt und hinsichtlich Förderleistung, Druckstabilität und Dauerbetrieb bewertet. Parallel dazu wurde das Spülkonzept weiterentwickelt, einschliesslich der Führung des Wassers vom Bohrloch über die Filtereinheit zurück zur Pumpe und erneut in den Spülkreislauf.

2.4.3. Auswahl der Filtereinheit und Aufbau des Teststands

Ein zentrales Element von AP4 war die Auswahl und Integration einer geeigneten Filtereinheit. Ziel war es, die beim Bohren anfallenden Cuttings zuverlässig aus dem Spülwasser zu entfernen, um eine Wiederverwendung des Wassers im Kreislauf zu ermöglichen. Nach Evaluation verschiedener Konzepte wurde ein Bandfiltersystem ausgewählt, das die Feststoffe kontinuierlich aus dem Wasserstrom ausscheidet. Ein Funktionsnachweis ist im Video <https://youtu.be/cg6i4ITvuml?si=va1pWYIOoMct6mx4> dargestellt.

Zur Validierung des Gesamtkonzepts wurde ein dedizierter Teststand im Labor aufgebaut. Dieser Teststand bildet die wesentlichen Komponenten des Wassermanagements ab und erlaubt es, die Spülmechanik unabhängig vom Bohrprozess zu untersuchen. Insbesondere konnten damit Volumenströme, Filterleistung, Rückführung des gereinigten Wassers sowie das Verhalten des Systems bei variierender Belastung getestet werden. Der Teststand erwies sich als sehr geeignet, um Optimierungen am System vorzunehmen, ohne die Komplexität eines vollständigen Bohrversuchs berücksichtigen zu müssen.

2.4.4. Integration der Oberflächenperipherie und Inbetriebnahme

Auf Basis der im Labor gewonnenen Erkenntnisse wurde die Oberflächenperipherie des Wassermanagements entwickelt und aufgebaut. Diese umfasst die Standkonstruktion für Pumpe und Filter, die Zuleitungen zum Bohrloch, die Rückführleitungen sowie die notwendigen Anschlüsse und Sensoren.

2.4.5. Ergebnisse und aktueller Stand von AP4

Nach Abschluss der initialen Optimierungen arbeitet das Wassermanagementsystem zuverlässig. Das System wurde erfolgreich auf die Anforderungen des 136-mm-Bohrdurchmessers skaliert und ist in der Lage, die anfallenden Volumenströme stabil zu bewältigen. Der eingesetzte Bandfilter entfernt die Cuttings zuverlässig aus dem Spülwasser, sodass dieses wieder dem Bohrprozess zugeführt werden kann.



Damit konnte ein geschlossener Wasserkreislauf realisiert werden, der den Wasserverbrauch reduziert und die Entsorgung von Bohrschlamm vereinfacht.

Die bisherigen Tests zeigen, dass das Wassermanagement die funktionalen Anforderungen des Bohrroboters erfüllt und als stabiles Subsystem betrachtet werden kann. Insbesondere im Zusammenspiel mit dem Getriebe, dem Bohrkopf und der Bewegungseinheit liefert das System reproduzierbare Ergebnisse. Damit sind die im Rahmen von AP4 vorgesehenen Entwicklungs- und Integrationsaktivitäten weitgehend abgeschlossen und bilden eine solide Grundlage für die weiteren Arbeitspakete und die geplanten Systemtests.

2.5 AP5 – Steuerung und Intelligenz

2.5.1. Zielsetzung und Rolle von AP5 im Gesamtprojekt

Arbeitspaket 5 hatte zum Ziel, die vollständige Steuerungs-, Regelungs- und Messelektronik des Bohrroboters zu entwickeln und zu integrieren. Aufgrund des hohen Integrationsgrads des Systems und der besonderen Randbedingungen im Bohrloch war von Beginn an klar, dass hierfür keine Standardlösungen eingesetzt werden können. AP5 wurde daher als vollständige Eigenentwicklung konzipiert, die sowohl die Hardware- als auch die Softwareebene umfasst.

Die Steuerung bildet das verbindende Element zwischen den mechanischen und fluidischen Subsystemen aus AP1 bis AP4. Sie ist verantwortlich für den Betrieb des Getriebes und des Schlagmechanismus, die Ansteuerung der Bewegungseinheit, die Regelung der Spülung und Filtration sowie für die Erfassung und Auswertung aller relevanten Sensordaten. AP5 lief über weite Strecken parallel zu den anderen Arbeitspaketen und wurde iterativ an den jeweiligen Entwicklungsstand angepasst.

2.5.2. Entwicklung der Elektronik und Hardwarearchitektur

Die gesamte Elektronik des Systems wurde im Rahmen von AP5 in Eigenentwicklung umgesetzt. Hierzu gehörte die Auslegung der Systemarchitektur, die Entwicklung mehrerer Leiterplatten (PCB) sowie deren Fertigung und Bestückung. Die Elektronik wurde modular aufgebaut, um einzelne Subsysteme unabhängig entwickeln, testen und bei Bedarf austauschen zu können.

Ein Schwerpunkt lag auf der Entwicklung der Steuerung für das Getriebe und den Schlagmechanismus inklusive der notwendigen Sensorik zur Erfassung von Drehzahl, Drehmoment, Temperaturen und Vibrationen. Ergänzend wurde eine Positionsdetektion implementiert, die es erlaubt, die Lage des Bohrroboters im Bohrloch zu überwachen und Schlupf zwischen Maschine und Bohrlochwand zu erkennen. Diese Funktion ist insbesondere im Zusammenspiel mit der Bewegungseinheit von zentraler Bedeutung.

Die Steuerung der Spülung und der Filtration wurde vollständig integriert, einschliesslich der Ansteuerung von Pumpen, Ventilen und der Erfassung relevanter Prozessgrössen. Die Hardware zur Steuerung der Abstützeinheit beziehungsweise der Rohrextrusion wurde konzeptionell vorbereitet und teilweise adaptiert, konnte jedoch aufgrund des noch nicht abgeschlossenen Integrationsstands von AP3 noch nicht vollständig umgesetzt werden.

2.5.3. Firmware, Software und Bedienoberfläche

Parallel zur Hardwareentwicklung wurde die Firmware für die Steuerung aller Subsysteme entwickelt. Die Firmware übernimmt die zeitkritische Ansteuerung der Aktuatoren, die Erfassung der Sensordaten sowie grundlegende Sicherheitsfunktionen. Besonderer Wert wurde auf eine robuste und fehlertolerante Auslegung gelegt, da das System unter realen Einsatzbedingungen nur eingeschränkt zugänglich ist.

Ergänzend zur Firmware wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) entwickelt, die den Betrieb des Systems visualisiert und die Überwachung zentraler Prozessparameter ermöglicht. Über die GUI können Betriebszustände eingesehen, Sollwerte angepasst und relevante Messdaten in strukturierter Form dargestellt werden. Die Benutzeroberfläche dient primär als Entwicklungs- und Testwerkzeug und bildet die Grundlage für weiterführende Automatisierungs- und Fernsteuerungskonzepte.



2.5.4. Integration und Testergebnisse

Die entwickelte Elektronik, Firmware und Software wurden schrittweise in das Gesamtsystem integriert und in Kombination mit den mechanischen und hydraulischen Subsystemen getestet. Die Tests zeigten, dass die Eigenentwicklung der Steuerung erfolgreich umgesetzt werden konnte. Das System arbeitet stabil und zuverlässig und erlaubt einen reproduzierbaren Betrieb der angebundenen Subsysteme.

Die Steuerung des Getriebes inklusive Sensorik, die Positionsdetektion sowie die Steuerung der Spülung und Filtration konnten vollständig implementiert und validiert werden. Die Software für die Hardwaresteuerung erwies sich als robust gegenüber Störungen und erlaubte eine klare Trennung zwischen Mess-, Steuer- und Bedienfunktionen. Die Steuerung der Abstützeinheit beziehungsweise der Rohrextrusion ist konzeptionell vorbereitet, jedoch noch nicht vollständig integriert, da hierfür die Ergebnisse aus AP3 abzuwarten sind.

2.5.5. Einordnung von AP5

AP5 zeigt, dass die Entscheidung zur vollständigen Eigenentwicklung der Steuerungs- und Elektronikarchitektur technisch sinnvoll war. Die entwickelte Hardware- und Softwareplattform bildet eine stabile Grundlage für den weiteren Ausbau des Systems und kann flexibel an zukünftige Anforderungen angepasst werden. Gleichzeitig erlaubt sie eine enge Verzahnung von Messkonzept, Erfolgskontrolle und Systembetrieb.

Damit stellt AP5 ein tragendes Querschnittsarbeitspaket dar, das die bisherigen Ergebnisse der Arbeitspakete AP1 bis AP4 zusammenführt und die Voraussetzung für weitergehende Integrations- und Demonstrationsschritte schafft.

2.6 AP6 – Unterstützung des Zertifizierungsprozesses

Arbeitspaket 6 hatte zum Ziel, den regulatorischen Rahmen für den Einsatz der neuartigen Grabowski-Bohrmethode frühzeitig zu adressieren und den Dialog mit den zuständigen Behörden und relevanten Akteuren zu etablieren. Im Verlauf des Pilot- und Demonstrationsprojekts konnte ein sehr konstruktiver und kontinuierlicher Austausch mit dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) in Zürich aufgebaut werden. Dieser Austausch ermöglichte es, die technologische Entwicklung eng mit regulatorischen Fragestellungen abzustimmen und frühzeitig potenzielle Genehmigungs- und Sicherheitsaspekte zu diskutieren. Ergänzend wurden Kontakte zu weiteren kantonalen Behörden, unter anderem in den Kantonen Thurgau und Aargau, sowie zu zuständigen Stellen in Deutschland aufgenommen.

Parallel dazu fanden Gespräche mit etablierten Bohrunternehmen (Barmetter, Heim Bohrtechnik, Broder AG, Baugrund Süd, Bohrmaus, e-therm, u.v.m.) statt, die über langjährige Erfahrung im Bereich konventioneller Geothermiebohrungen verfügen. In diesen Gesprächen wird das Risiko, dass das Grabowski-System grundsätzlich nicht zugelassen oder akzeptiert wird, als gering eingeschätzt. Die zentrale offene Fragestellung betrifft nicht die Bohrqualität oder die geologische Integrität, sondern den vorgesehenen personenlosen beziehungsweise stark automatisierten Betrieb.

Der wesentliche Nachweis, der im weiteren Projektverlauf zu erbringen ist, betrifft die sichere Durchführung des Bohrprozesses ohne permanente Anwesenheit von Personal direkt an der Maschine. Hier soll das Bohrloch mit Hilfe der Bewegungseinheit sicher verschlossen werden im Fall von eintritt von gespanntem Wasser oder Gas. Dazu braucht es eine Überwachung durch Sensoren, welche in der Version 3.0 umgesetzt werden sollen.

Zusätzlich ist vorgesehen, dass der Betrieb jederzeit fernüberwacht wird und im Sicherheitsfall ein manueller Eingriff möglich ist. Der autonome oder personenlose Betrieb ist damit nicht als unbeaufsichtigter Betrieb zu verstehen, sondern als automatisierter Prozess mit klar definierten Sicherheitsmechanismen und Eingriffsmöglichkeiten. Die Ausgestaltung und der formale Nachweis dieses Sicherheitskonzepts sind Gegenstand laufender Abklärungen mit Behörden und Industriepartnern und werden als lösbare, wenn auch zentrale Herausforderung im weiteren Projektverlauf eingeschätzt.



2.7 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Die im Rahmen des Pilot- und Demonstrationsprojekts erzielten Ergebnisse zeigen insgesamt, dass der gewählte Ansatz eines borehole-integrierten, elektrisch betriebenen Bohrroboters technisch grundsätzlich realisierbar ist, gleichzeitig jedoch mit einer hohen Systemkomplexität und entsprechendem Entwicklungsrisiko verbunden ist. Die Diskussion der Resultate über alle Arbeitspakete hinweg verdeutlicht, dass insbesondere die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen einen wesentlich grösseren Einfluss auf den Projektverlauf hatten als ursprünglich angenommen.

Ein zentrales Ergebnis des Projekts ist der Nachweis der Funktionsfähigkeit der grundlegenden Bohrmechanik. Sowohl das Dreh-Schlagwerk als auch der Bohrkopf konnten in unterschiedlichen Gesteinsarten erfolgreich eingesetzt werden. Die schrittweise Skalierung vom 90-mm- auf den 136-mm-Bohrdurchmesser erwies sich als technisch notwendig, um eine ausreichende Leistungsreserve, eine robustere mechanische Auslegung sowie die Kompatibilität mit marktüblichen Erdwärmesonden zu erreichen. Gleichzeitig führte diese Skalierung zu deutlich höheren mechanischen Belastungen und machte umfangreiche konstruktive Anpassungen erforderlich, insbesondere im Bereich des Schlagmechanismus. Die daraus resultierenden Verzögerungen sind als direkte Folge der hohen dynamischen Beanspruchungen und der notwendigen iterativen Optimierung zu verstehen.

Die Integration der Bewegungseinheit stellte einen weiteren wesentlichen Entwicklungsschritt dar. Die Abkehr vom ursprünglichen Fluidmuskel-Konzept hin zu einer Kombination aus hydraulischem Vorschubzylinder und ballonbasierter Drehmomentabstützung erwies sich als entscheidend für die Stabilität und Regelbarkeit des Systems. Die erzielten Bohrtiefen von über 20 m, respektive knapp 30 m im Dezember 2026 im integrierten System, sowie die dokumentierten Betriebszustände zeigen, dass die Bewegungseinheit zuverlässig arbeitet und die auftretenden Lasten beherrschbar sind. Gleichzeitig wurden klare technische Grenzen identifiziert, insbesondere im Bereich der Dichtheit und Zuverlässigkeit, die für grössere Tiefen adressiert werden müssen.

Ein besonders komplexer Teil des Projekts betrifft die Entwicklung der Abstützeinheit auf Basis einer im Bohrloch integrierten Rohrextrusion. Die Ergebnisse zeigen, dass das grundlegende Prinzip der Extrusion eines Kunststoffrohrs unter Bohrlochbedingungen funktioniert und im Labor erfolgreich validiert werden konnte. Die Skalierung auf den grösseren Bohrdurchmesser sowie die notwendige Kompaktierung für die Integration in den Bohrroboter erwiesen sich jedoch als deutlich anspruchsvoller als ursprünglich angenommen. Insbesondere die Entwicklung einer leistungsfähigen und zuverlässigen Feedereinheit sowie die Abdichtung gegen eindringendes Wasser stellen zentrale Herausforderungen dar. Dass bisher nur Teilintegration und Laborversuche möglich waren, ist Ausdruck dieser hohen technischen Komplexität und nicht eines fehlenden Funktionsnachweises.

Das Wassermanagement und die Filtration konnten hingegen in einem vergleichsweise frühen Stadium stabilisiert werden. Nach anfänglichen Optimierungen arbeitet das System zuverlässig und ist auf die Anforderungen des 136-mm-Bohrdurchmessers skaliert. Die Auswahl eines Bandfiltersystems zur kontinuierlichen Abscheidung der Cuttings und zur Wiederverwendung des Spülwassers stellt einen wichtigen Beitrag zur Reduktion des Wasserverbrauchs und zur Vereinfachung der Logistik dar. Das Wassermanagement kann damit als tragfähiges Subsystem betrachtet werden, das den weiteren Integrationschritten nicht limitierend entgegensteht.

Die vollständige Eigenentwicklung der Steuerungs-, Regelungs- und Messelektronik erwies sich als strategisch sinnvoll. Die entwickelte Hardware- und Softwareplattform ermöglicht einen stabilen Betrieb der bestehenden Subsysteme und bietet gleichzeitig die notwendige Flexibilität für weitere Entwicklungsstufen. Die enge Kopplung von Sensorik, Aktuatorik und Benutzeroberfläche erlaubt eine detaillierte Analyse des Systemverhaltens und bildet die Grundlage für eine weitergehende Automatisierung und Sicherheitsüberwachung.

Über alle Arbeitspakete hinweg zeigt sich, dass die erreichbare Bohrtiefe nicht durch ein einzelnes technisches Element limitiert ist, sondern durch das Zusammenspiel von mechanischer Belastbarkeit, hydraulischem Druck, Dichtheit und Systemintegration. Insbesondere der hydrostatische Wasserdruck im Bohrloch stellt mit zunehmender Tiefe eine relevante Randbedingung dar, die in der aktuellen



Systemgeneration noch nicht vollständig adressiert ist. Diese Erkenntnis ist als zentrales Ergebnis des Projekts zu werten, da sie klare Anforderungen an die nächste Entwicklungsstufe definiert. Allerdings ist zu betonen, dass die Performance der Module bisher nicht durch die Bohrtiefe beeinflusst wurde, was auch die Berechnungen zeigen. Dazu gehören vor allem die Bohr- und Bewegungsgeschwindigkeit sowie die Spülung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Projekt trotz deutlicher Abweichungen vom ursprünglichen Zeitplan wesentliche technologische Fortschritte erzielt hat. Die im Rahmen des P+D-Projekts gewonnenen Erkenntnisse liefern ein konsistentes Bild der Leistungsfähigkeit, der Grenzen und der Entwicklungsbedarfe des Grabowski-Systems.

2.8 Zusammenfassung der erreichte Zielstufen bzw. Stand der Zielerreichung

2.8.1. Zielstufe 1: 20 m Bohrung – Validierung der Kernbohrfunktionen

- **20-m-Bohrung im Festgestein:**
 - ✓ Erreicht; reale Bohrtiefen von >20 m (bis ~30 m) erzielt, Getriebe und Bohrkopf unter realistischen Lasten erfolgreich betrieben.
- **Getriebe (Verzahnung, Lager, Sicherheitsfaktoren):**
 - ✓ Grundsätzlich validiert; mehrere Iterationen erforderlich, Schlagmechanismus seit Q2/2025 stabil.
- **Bohrkopfverschleiss:**
 - ⦿ Qualitativ bewertet; Verschleissmechanismen verstanden, Zielwerte über 200 m Tiefe noch nicht experimentell bestätigt.
- **Cuttinggrößen und Spülvorgang:**
 - ✓ Grundsätzlich verstanden; Cuttinggrößen abhängig von Drehzahl/Schlagfrequenz, aber alle unterhalb 0.5 mm, meist 0.1 mm; Ziel erreicht, Feinkornfilterung in AP4 ausgewählt.
- **Erste Tests Extrusionseinheit bei 20 m:**
 - ⦿ Prinzipiell möglich; Funktionsprinzip im Labor validiert, Integration im Bohrloch noch ausstehend.

2.8.2. Zielstufe 2: 50 m Bohrung – Bewegungseinheit und Lockergestein

- **Bohrung bis 50 m mit Bewegungseinheit:**
 - ⦿ Reale Tiefe ~ knapp 30 m erreicht; Belastungen und Betriebszustände bis ~50 m als vergleichbar bewertet (BFE akzeptiert).
- **Bohrgeschwindigkeit:**
 - ✓ Größenordnung erreicht; 1 cm/min-Bereich im Fest- und Lockergestein nachgewiesen.
- **Bohrkopfverschleiss in verschiedenen Gesteinen:**
 - ⦿ Qualitativ untersucht; systematische Langzeitergebnisse stehen noch aus.
- **Integration Extrusionseinheit in Lockergestein:**
 - ✗ Noch nicht erreicht; Integration in Gesamtsystem für Q2/Q3 2026 vorgesehen.
- **Wasser- und Filtersystem:**
 - ✓ Erfolgreich integriert; zuverlässige Filtration mittels Bandfilter, geschlossener Wasserkreislauf.



2.8.3. Zielstufe 3: ca. 200 – Gesamtsystem & Benchmark

- **Vollständige Systemintegration:**
✗ Noch nicht erreicht; aktuelle Systemgeneration nicht für hydrostatische Drücke >50 m ausgelegt.
- **Systemzuverlässigkeit / Risikomatrix:**
⦿ Teilweise erarbeitet; kritische Limitierungen (Dichtheit, Druck) klar identifiziert.
- **Benchmark vs. konventionelle Bohrung:**
✗ Noch offen; erst sinnvoll nach Erreichen von ≥50 m bzw. ~200 m → geplant spät Q2/2027

2.9 Beantwortung der Fragestellungen

Bohrtiefe und Geologie

- **Platz- und Zeitbedarf:**
✓ Deutlich reduzierter Platzbedarf (derzeit ca. 12 m², kann aber weiter reduziert werden) gegenüber konventionellen Anlagen; Zeitbedarf aktuell noch höher.
- **Cuttinggrößen:**
✓ Abhängig von Parametern; steuerbar über Drehzahl, Schlagfrequenz und Spülung; zw. 0.1 und 0.5 mm Grösse
- **Schlagenenergien und Drehmomente:**
✓ Erfasst und ausgewertet; kritische Lastkollektive identifiziert; Drehmoment im Lockergestein ca. 100 Nm; Schlagenergie ca. 5-9 J
- **Ressourcenverbrauch (Energie, Personal, Schlamm):**
⦿ Energieverbrauch höher als erwartet (136 mm); Leistungsverbrauch eher bei 5 kWh anstatt bei 7 kWh wie ursprünglich angenommen; Personal- und Schlammaufwand perspektivisch geringer.

Extrusions- / Abstützeinheit

- **Rohrqualität:**
⦿ Im Labor reproduzierbar; Auslassgeometrie noch in Optimierung. Rohrqualität innen sehr gut mit +/- 1 mm Toleranz. Sehr dichtes Rohr produziert.
- **Materialverbrauch:**
⦿ Größenordnung bekannt; noch keine feldrelevanten Langzeitergebnisse.
- **Abdichtung gegen Wasser:**
⦿ Zweiter Abdichtballon als notwendig identifiziert; noch nicht vollständig validiert.
- **Einfluss der Tiefe:**
✗ Noch nicht untersuchbar; Integration fehlt.

Bohrprozess & Systemzuverlässigkeit

- **Verklemmen, Rückzug:**
✓ Verhalten bekannt; Bewegungseinheit stabilisiert Prozess deutlich.; Bisher nur Verklemmen durch Kabelführung
- **Bohrlochqualität:**
⦿ Bisher nur optische Prüfung der Bohrwand im Labor
- **Filterung & Schlammvolumen:**
✓ Filterung vor Ort zuverlässig; Schlammhandling praktikabel.
- **Vergleich mit konventioneller Bohrung:**
✗ Noch offen; Benchmark erst nach ≥50 m sinnvoll.



- **Systemzuverlässigkeit:**
Grundfunktionen zuverlässig; Schwachstellen (Dichtheit, Ventile) identifiziert und teilweise behoben.
- **Integration der Sonde & Hinterfüllung:**
✗ Noch nicht getestet.
- **Messkonzept:**
 - Messsystem ausreichend genau und geeignet; kontinuierliche Datenerfassung etabliert → Auswertung der Daten und Analyse muss noch erfolgen

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Pilot- und Demonstrationsprojekt «Grabowski – Bohrroboter für Geothermiebohrungen» hat im bisherigen Projektverlauf wesentliche technische Erkenntnisse geliefert und die grundsätzliche Machbarkeit eines borehole-integrierten, elektrisch betriebenen Bohrroboters aufgezeigt. Gleichzeitig hat das Projekt in transparenter Weise die technologischen Grenzen und Entwicklungsrisiken offengelegt, die mit einem derart neuartigen Ansatz verbunden sind. Damit erfüllt das Projekt in besonderem Masse den Anspruch eines P+D-Vorhabens, nicht nur Erfolge zu demonstrieren, sondern auch belastbare Entscheidungsgrundlagen für die weitere Entwicklung zu schaffen.

Auf Basis der erzielten Ergebnisse und der im Projekt durchgeführten Risikoanalyse wurden die Meilensteine M1 und M2 durch die Subventionsgeberin anerkannt. Insbesondere wurden die erreichten technischen Fortschritte in der Entwicklung des Getriebes, des Bohrkopfs sowie der Bewegungseinheit, die schrittweise Integration der funktionalen Module und die Resultate aus Dauer- und Feldtests als relevante Nachweise für den Projektfortschritt gewertet. Der Go/No-Go-Entscheid für M1 und M2 fiel positiv aus, unter der expliziten Feststellung, dass das Erreichen der ursprünglich geforderten Bohrtiefen für M2 primär eine Frage des Zeitpunkts und nicht der grundsätzlichen Machbarkeit darstellt.

Gleichzeitig wurde festgehalten, dass die Bohrtiefe weiterhin ein zentrales Kriterium zur Bewertung des Anwendungspotenzials dieser neuartigen Technologie bleibt. Während für M2 auf die physische Erreichung einer spezifischen Tiefe verzichtet wurde, besteht Einigkeit darüber, dass für die weiteren Projektphasen reale Bohrtiefen von zunächst rund 50 m und in einem späteren Schritt von ungefähr 200 m nachzuweisen sind. Diese Tiefen gelten als entscheidend, um sowohl die technische Robustheit als auch die praktische Einsetzbarkeit des Systems für geothermische Anwendungen belastbar beurteilen zu können. Sollte sich zeigen, dass diese Tiefen mit vertretbarem Aufwand nicht erreichbar sind, wären alternative Anwendungsfelder der Technologie in Betracht zu ziehen.

Vor diesem Hintergrund wurde einvernehmlich eine Anpassung der Meilensteinlogik und des Zahlungsplans vereinbart, ohne den bestehenden Fördervertrag formal zu ändern. Die weiteren Fördertranchen sind an klar definierte, tiefenbasierte Meilensteine gekoppelt, namentlich den Nachweis einer realen Bohrtiefe von 50 m sowie den späteren Nachweis von Bohrtiefen im Bereich von rund 200 m. Diese Anpassung trägt sowohl den technischen Realitäten als auch den Anforderungen an eine verantwortungsvolle Mittelverwendung Rechnung und schafft zugleich Planungssicherheit für die nächsten Projektphasen.

Aus technischer Sicht zeigt der bisherige Projektverlauf, dass die aktuelle Systemgeneration in ihrer Leistungsfähigkeit primär durch Aspekte der Dichtheit, der Druckbelastbarkeit und der Systemintegration limitiert ist. Insbesondere der mit zunehmender Bohrtiefe steigende hydrostatische Wasserdruck stellt eine zentrale Randbedingung dar, die in der nächsten Entwicklungsstufe gezielt adressiert werden muss. Die identifizierten Schwachstellen sind klar benannt und technisch nachvollziehbar; sie bilden die Grundlage für eine weiterentwickelte Systemarchitektur, die auf grössere Tiefen ausgelegt ist.

Der Ausblick des Projekts ist daher durch einen klaren Fokus auf die schrittweise Erhöhung der real erreichten Bohrtiefen geprägt. Kurz- bis mittelfristig steht der Nachweis einer Bohrtiefe von rund 50 m im Vordergrund, gekoppelt mit einer weiter verbesserten Integration der Bewegungseinheit, der



Abstützeinheit und des Wassermanagements. In einem weiterführenden Schritt soll das System in Richtung Bohrtiefen von etwa 200 m weiterentwickelt werden, um die Eignung des Grabowski-Systems für den vorgesehenen geothermischen Anwendungsfall abschliessend beurteilen zu können.

Parallel dazu wird der regulatorische Dialog fortgeführt. Der im Rahmen des Projekts etablierte enge und konstruktive Austausch mit den zuständigen Behörden bildet eine wichtige Voraussetzung dafür, die neue Bohrmethode schrittweise in den regulatorischen Rahmen zu integrieren. Die zentrale offene Fragestellung betrifft dabei weniger die Bohrqualität als vielmehr den sicheren, teil- oder vollautomatisierten Betrieb. Die bisherigen Abklärungen zeigen jedoch, dass die identifizierten Risiken grundsätzlich beherrschbar sind, sofern geeignete Überwachungs- und Sicherheitskonzepte umgesetzt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Projekt trotz erheblicher technischer Herausforderungen und zeitlicher Abweichungen vom ursprünglichen Plan wesentliche Fortschritte erzielt hat. Die Bestätigung der Meilensteine M1 und M2, der positive Go/No-Go-Entscheid sowie die gemeinsam abgestimmte Weiterführung des Projekts unterstreichen das Vertrauen in das technologische Potenzial des Grabowski-Systems. Der weitere Projektverlauf wird entscheidend davon geprägt sein, die identifizierten technischen Grenzen systematisch zu überwinden und die angestrebten Bohrtiefen unter realen Bedingungen nachzuweisen.

4 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit verschiedenen nationalen und internationalen Akteuren aus Industrie, Forschung und öffentlicher Verwaltung durchgeführt. Diese Zusammenarbeit unterstützt sowohl die technische Entwicklung als auch die regulatorische Einbettung der neuen Bohrmethode.

4.1 Nationale Zusammenarbeit:

- Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kanton Zürich: Enge und kontinuierliche Zusammenarbeit im Rahmen des P+D-Projekts, insbesondere zu regulatorischen Fragestellungen, Bewilligungspraxis und sicherheitsrelevanten Aspekten der neuen Bohrmethode.
- Kantonale Fachstellen Thurgau und Aargau: Erste Gespräche und fachlicher Austausch zur Übertragbarkeit der Methode auf andere kantonale Rahmenbedingungen. Der Kontakt entstand durch eine Investition durch die EKT.
- Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften: Forschungspartner und institutionelle Basis von Borobotics als Spin-off; Unterstützung in den Bereichen Mechanik, Thermomanagement, Simulation, Systemintegration und Messkonzept.

4.2 Zusammenarbeit mit Bohrunternehmen:

Auf nationaler Ebene arbeitet das Projekt mit mehreren etablierten Schweizer Bohrunternehmen zusammen, die ihre praktische Erfahrung aus der Geothermiebohrpraxis in die Entwicklung und Bewertung des Grabowski-Systems einbringen. Zu den zentralen Industriepartnern zählen **Barmettler AG**, **Heim Bohrtechnik**, **Broder AG** sowie **E-therm**.

Der Austausch mit diesen Unternehmen umfasst insbesondere Fragen zur technischen Machbarkeit, zur Handhabung des Systems, zu geologischen Randbedingungen sowie zur Einordnung der neuen Bohrmethode im Vergleich zu konventionellen Verfahren. Die Rückmeldungen aus der Praxis fliessen laufend in die Weiterentwicklung des Systems ein.



4.3 Internationale Zusammenarbeit

Auf internationaler Ebene wurden bereits **mehr als zehn Letters of Intent (LoI)** mit weiteren Bohrunternehmen abgeschlossen. Diese Absichtserklärungen dienen dazu, das Interesse am Grabowski-System zu formalisieren und die Grundlage für spätere Pilotanwendungen und Markteintritte zu schaffen.

Zu den international wichtigsten Partnern zählen unter anderem **Bohrmaus**, **E-Krämer Energietechnik** sowie **BauGrund Süd**, eines der grössten Bohrunternehmen im Bereich der Geothermie in Deutschland.

Der internationale Austausch fokussiert sich auf die Übertragbarkeit der Technologie auf unterschiedliche regulatorische Rahmenbedingungen, geologische Situationen und Marktanforderungen. Gleichzeitig liefern diese Kontakte eine wichtige Einschätzung zur Akzeptanz und zum Zertifizierungsrisiko der neuen Bohrmethode ausserhalb der Schweiz.

5 Publikationen und andere Kommunikation

N.A.

6 Literaturverzeichnis

- [1] M. Sabel und J. Schreinermacher, „Roadmap Wärmepumpe - Der Weg zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors“, Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., Berlin, Apr. 2021. Zugegriffen: 22. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/Sonstige/2021-04-29_BWP_Roadmap_final.pdf
- [2] „Übersicht – Geothermie Schweiz“. Zugegriffen: 22. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://geothermie-schweiz.ch/geothermie/geothermie-uebersicht/>
- [3] M. Bauer, W. Freeden, H. Jacobi, und T. Neu, Hrsg., *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. doi: 10.1007/978-3-662-50307-2.
- [4] D. V. Breisig, „Der Wechsel zur Wärmepumpe als Treiber neuer Geschäftsmodelle“, gehalten auf der Berliner Energietage, 29. April 2021.
- [5] S. Thomas, D. Schwürer, F. Vondung, und O. Wagner, „Heizen ohne Öl und Gas bis 2035 – ein Sofortprogramm für erneuerbare Wärme und effiziente Gebäude. Im Auftrag von Greenpeace e.V.“, 2022.

7 Anhang

N.A.