

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



TU Clausthal

**DSC**

Drilling Simulator Celle

## **Förderprogramm des BMWK zu Forschung und Entwicklung im Bereich Geothermie**

### **Schlussbericht**

Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch  
realistische Echtzeit-Simulation

(OBE)

**FKZ 03EE4005**

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Förderzeitraum: 01.05.2019 – 31.07.2023

Datum: 31.12.2023

Förderkennzeichen: 03EE4005

Titel: Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation (OBE)

Durchführung: TU Clausthal, Drilling Simulator Celle  
Zum Drilling Simulator 1  
29221 Celle

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt

Wiss. Mitarbeiter: Harits Alkatiri, M.Sc.  
Khizar Shahid, M.Sc.  
Waqar Hassan, M.Sc.  
Patrick Höhn, M.Sc.  
Lisette Hayn, Dipl.-Ing.

Beginn Förderung: 01.05.2019

Ende Förderung: 31.07.2023

# Inhaltsverzeichnis

Teil I: Kurze Darstellung .....	6
1    Aufgabenstellung .....	6
2    Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	6
3    Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
4    Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	8
5    Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
Teil II: Eingehende Darstellung.....	9
1    Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	9
1.1    Datenbeschaffung und Implementierung vorhandener Bohrungen im Simulator (TP1) 10	
1.2    Datenanalyse und Modellierung (TP 2).....	16
1.3    Entwicklung der echtzeitfähigen Simulator-Modelle (TP 3) .....	32
1.4    Simulations-Anwendung für neues Geothermieprojekt (TP 4).....	47
1.5    Zusammenfassung: Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	61
2    Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	62
2.1    Position 0812: Beschäftigte E12 – E15 .....	62
2.2    Position 0817: Beschäftigte E1 – E11 .....	62
2.3    Position 0822: Beschäftigungsentgelte .....	63
2.4    Position 0834: Mieten und Rechnerkosten.....	63
2.5    Position 0835: Vergabe von Aufträgen.....	63
2.6    Position 0846: Dienstreisen .....	64
2.7    Position 0850: Gegenstände und andere Investitionen > 800/410/400 €.....	64
3    Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	64
4    Darstellung des voraussichtlichen Nutzens & der Verwertung der Durchführung des Vorhabens .....	66
5    Darstellung des bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen.....	67
6    Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen .....	67
Anhang A: Erfolgskontrollbericht .....	70

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Volve-Feld Standort .....	11
Abbildung 2: Arbeitsablauf des Modellierungsszenarios für maschinelles Lernen.....	17
Abbildung 3: Bildschirmausgabe einer MATLAB Simulation des Temperaturmodells.....	22
Abbildung 4: Geothermisches Dual-System .....	23
Abbildung 5: Modell zur Vermeidung von Kollisionen .....	24
Abbildung 6: Normalverteilungskurve .....	24
Abbildung 7: Diagramm von 500 Versuchen für “x” an einem Vermessungspunkt.....	25
Abbildung 8: Ellipsoid of Uncertainty .....	26
Abbildung 9: Error Elliptical Cylinder.....	26
Abbildung 10: Bit Walk Tendency Simulation .....	27
Abbildung 11: ROP-Vorhersage Model – Bewertungsmatrix.....	28
Abbildung 12: ROP-Vorhersage Model – Validierungsergebnis .....	29
Abbildung 13: ROP-Vorhersage Model – Feature Importance .....	29
Abbildung 14: WOB-Vorhersage Model – Bewertungsmatrix.....	30
Abbildung 15: WOB-Vorhersage Model – Validierungsergebnisse .....	30
Abbildung 16: WOB-Vorhersage Model – Feature Importance .....	31
Abbildung 17: WOB-Vorhersage Model – Bewertungsmatrix.....	31
Abbildung 18: ECD-Vorhersage Model – Validierungsergebnisse .....	31
Abbildung 19: ECD-Vorhersage Model – Feature Importance .....	32
Abbildung 20: DrillSIM:600 - Setup.....	33
Abbildung 21: DrillSIM:600 – Drillers Chair.....	34
Abbildung 22: DrillSIM:600 – Drillers Chair.....	34
Abbildung 23: DrillSIM:600 – Neue Server .....	36
Abbildung 24: API - Workstation .....	39
Abbildung 25: API - Bildschirmausgabe während einer Simulation .....	39
Abbildung 26: DrillSIM:600 Graphics – Darstellung der parallelen Simulation von mehreren Modellen.....	42
Abbildung 27: Bildschirmfoto vom GUI-Fenster .....	43
Abbildung 28: Grafische Ergebnisse der Temperatur-Simulation.....	44
Abbildung 29: Workflow zwischen der API und DrillSIM:600 .....	45
Abbildung 30: ROP-Validierungsergebnisse.....	46
Abbildung 31: WOB Validierungsergebnisse .....	46
Abbildung 32: ECD-Validierungsergebnisse .....	47
Abbildung 33: OPC UA Sender .....	48
Abbildung 34: Bedienelement auf Monitor 1 der Teststandsteuerung zum Aktivieren des OPC UA Streams (blau hinterlegt) .....	48

Abbildung 35: Daten Flowtest.....	49
Abbildung 36: Grafische Abbildung der GeneSys Bohrung.....	51
Abbildung 37: Methodologie von Szenario Bohrungen .....	51
Abbildung 38: Instructor Station – Formation Editor.....	52
Abbildung 39: Instructor Station – Geologisches Modell .....	52
Abbildung 40: Zirkulationssystem .....	53
Abbildung 41: Bohrstrang (Bottom Hole Assembly) Konfigurator .....	53
Abbildung 42: Bohrstrang Konfigurator.....	54
Abbildung 43: Bohrloch-Planer („Wellbore Designer“) .....	54
Abbildung 44: Eingabe- und Ausgabevariablen .....	55
Abbildung 45: Vergleich der Fließrate.....	56
Abbildung 46: Vergleich des "Weight on Bit" zum Zeitpunkt der Übermittlung .....	56
Abbildung 47: Vergleich des "Weight on Bit" nach Iterationszeit .....	57
Abbildung 48: Vergleich des Drehmoments.....	57
Abbildung 49: ROP-Vergleich.....	58
Abbildung 50: Hardware Simulator am DSC.....	59
Abbildung 51: Parallele Simulation zwischen dem Hardware- und Software Simulator.....	59
Abbildung 52: Triplex Pumpe des Hardware Simulators .....	60

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Teilprojekte und Arbeitspakete .....	10
Tabelle 2: Stand der gesammelten Datensätze .....	12
Tabelle 3: Ausgewählte Daten-Eigenschaften vom ROP Vorhersage-Modell .....	18
Tabelle 4: Ausgewählte Daten-Eigenschaften vom WOB Vorhersage-Modell .....	19
Tabelle 5: Ausgewählte Daten-Eigenschaften vom ECD Vorhersage-Modell .....	20
Tabelle 6: Überblick entwickelter physikalischer Modelle.....	21
Tabelle 7: Monte Carlo Simulation in einem Vermessungspunkt .....	25
Tabelle 8: Getätigte und geplante Veröffentlichungen .....	68

# Teil I: Kurze Darstellung

## 1 Aufgabenstellung

Das Projekt ist darauf ausgerichtet, die Bohrarbeiten bei Geothermie-Tiefbohrungen mithilfe von Echtzeitsimulationen im Planungsstadium sowie auch operationsbegleitend zu optimieren. Hierdurch soll eine Kosteneinsparung bei der Bohrlocherstellung erzielt werden, weil die Planung unter realistischen Bohrbedingungen zur Verminderung von technischen Risiken und zu Zeitersparnissen führt. Die Entwicklung und Anwendung des Software-Simulators "Drill-SIM:600" in diesem Projekt haben zur Folge, dass verschiedene Bohrszenarien simuliert und potenzielle Probleme in geothermischen Bohroperationen frühzeitig erkannt werden, um präventive Maßnahmen in der Praxis ergreifen zu können.

Die Effizienz eines optimalen Bohrprozesses wird oft durch Unregelmäßigkeiten im Gestein behindert, insbesondere durch die häufig anzutreffenden Störungzonen bei Geothermie-Bohrungen. Diese Gesteinsunstetigkeiten sind entscheidende Auslöser für unerwünschte Störfaktoren, die den dynamischen Bohrvorgang beeinflussen und somit zu einem verlangsamten Bohrfortschritt führen. Zu den zentralen Projektaufgaben gehören die Weiterentwicklung bestehender physikalischer Modelle sowie die Entwicklung neuer Modelle, einschließlich solcher im Bereich des maschinellen Lernens. Diese werden in den vorhandenen Simulator "Drill-SIM:600" implementiert, um Simulationen durchzuführen, Störungen im Bohrprozess zu ermitteln und zu untersuchen sowie Handlungsempfehlungen für die praxisbezogene Umsetzung von Geothermie-Bohrungen zu erstellen. Einen weiteren wichtigen Schwerpunkt des Projekts stellt die Schaffung einer Echtzeitverbindung zwischen dem Simulator und (externen) Bohranlagen mithilfe einer OPC-UA-Schnittstelle dar.

Das endgültige Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines realitätsnahen Geothermie-Bohrsimulators, der unerwünschte Störungen während einer Bohrung, insbesondere im Geothermie-Bereich, authentisch nachbildet und frühzeitig erkennt. Durch kontinuierlichen Informationsaustausch mit relevanten Fachfirmen sollen diese Simulationen darauf abzielen, die Umsetzung eines optimierten Bohrbetriebs in die Praxis vorzubereiten.

## 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Deutsche Zentrum für Hochleistungsbohrtechnik und Automatisierung – Drilling Simulator Celle (DSC) – ist ein 2015 gegründetes Forschungszentrum der Technischen Universität Clausthal (TUC). Zu Projektbeginn war der DSC dem Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN) der TU Clausthal zugeordnet. Im Jahr 2020 erlangte der DSC den Status eines eigenständigen Forschungszentrums an der TU Clausthal. Der Projektleiter war gleichzeitig

mit der Leitung des DSC und der Bohr- und Produktionsabteilung des Institute of Subsurface Energy Systems (ITE) betraut. So konnte der DSC direkt auf die jahrzehntelange Expertise des ITE zurückgreifen. In der Anfangsphase des Projekts nutzten die wissenschaftlichen Mitarbeiter des Projekts die engen Kontakte zum ITE, um sowohl generelles als auch spezifisches Fachwissen im Bereich Bohrtechnik zu übernehmen. Über die gesamte Laufzeit des Projekts stand die Expertise langjähriger Mitarbeiter des ITE dem Projektteam unterstützend zur Verfügung.

Der Auftragnehmer im Projekt, und Hersteller des Software-Simulators, Drilling Systems Ltd. in England, erwies sich als zuverlässiger Partner für die Weiterentwicklung des "DrillSIM:600". Im Rahmen des OBE-Projekts wurde der Software-Simulator, der zuvor am DSC in einer Basisconfiguration mit Grundmodellen vorhanden war, signifikant aufgewertet. Bereits bei seiner Inbetriebnahme im Jahr 2016 wurde untersucht, welche technisch-wissenschaftlichen Upgrades möglich wären. Durch die Zusammenarbeit des DSC mit den Programmierern von Drilling Systems wurde ein tieferes Verständnis für die extern entwickelten Grundmodelle der Bohrsimulation erworben. Dies erleichterte den Mitarbeitern des OBE-Projekts am DSC die Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Modelle erheblich.

Die interne Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Drilling Simulator Celle, die sich frühzeitig mit dem Simulator befassten, ermöglichte eine schnelle Einarbeitung der OBE-Projektmitarbeiter am DSC. Zusätzlich profitierte das Projekt direkt vom wissenschaftlichen Austausch mit anderen Instituten, insbesondere dem Institute of Subsurface Engineering (ITE) der TU Clausthal, und erhielt erhebliche technische Unterstützung.

Die vorhandene Infrastruktur am DSC bot eine solide technische Grundlage für das OBE-Projekt. Modelle für die Modellierung der Formation, multilaterale Bohrungen, Bohrkleintransport, Bohrstrangbewegung (axial, lateral, torsional), Deformation des Bohrlochs und Temperaturentwicklung im Bohrloch wurden auf Basis des Upgrades des "DrillSIM:600" realisiert. Zudem wurde das umfangreiche Software-Angebot der Technischen Universität Clausthal, darunter MatLab- und LabVIEW-Lizenzen, für die Weiterentwicklung des Software-Simulators sowie für die Datenerfassung und -analyse genutzt.

### **3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Im Zuge der Antragstellung für das OBE-Projekt wurde eine grundlegende Idee für das Upgrade des Software-Simulators entwickelt. Dieses Vorhaben erforderte jedoch während der Projektbearbeitung mehrere Anpassungen am System, vor allem aufgrund von während des Projekts gewonnenen technisch-wissenschaftlichen Erkenntnissen.

Der Startpunkt war die Analyse der Anforderungen für das geplante Upgrade, inklusive Produktrecherchen und Literaturstudien zur Machbarkeit. In dieser Phase wurde schnell deutlich,

dass die geplante Erweiterung der Modelle und die Nutzung des Software-Simulators eine umfassende Anpassung des Systems erforderte. Acht Rechner mussten ausgetauscht und neu konfiguriert werden, um sie mit dem bestehenden Netzwerk und dem Simulator zu verbinden. Dieser Aufwand, in Kombination mit Reisebeschränkungen und Lieferproblemen aus dem Ausland, konnte nur mit erheblichem Zeitverzug umgesetzt werden. Die enge Zusammenarbeit mit dem Hersteller "Drilling Systems" war entscheidend, um dies zu ermöglichen.

Für das Upgrade des Software-Simulators wurden gemeinsam mit Drilling Systems Recherchen zu den geplanten neuen Modellen, wie z.B. 3D-Modellierung der Formation, multilaterale Bohrungen, Bohrkleintransport, Bohrstrangbewegung (axial, lateral, torsional) und Deformation des Bohrlochs, durchgeführt. Ein Workstation-Rechner wurde für die Entwicklung und Simulation der Modelle vor der Implementierung in den Software-Simulator beschafft. Dieser Rechner diente auch als externe Datenbank für die gesammelten Bohrdaten aus verschiedenen Quellen, um den Zugriff für Recherchen und die Entwicklung von Echtzeit-fähigen Modellen zu erleichtern.

Im Rahmen des Projekts wurden sowohl physikalische als auch Machine Learning Modelle entwickelt. Nach der Implementierung in den Software-Simulator ermöglichten sie realistischere Bohrsimulationen, als dies mit den stark vereinfachten Modellen in der Grundauführung des Simulators möglich war. Reale Bohrvorhaben wurden erfolgreich als Szenarien nachgebildet, um sicherzustellen, dass die Simulationen realitätsnah sind. Ein Teil der Ergebnisse wurde auf der Celle Drilling Konferenz 2023 präsentiert.

Der Software-Simulator "DrillSIM:600" wurde erfolgreich durch eine OPC-UA-Schnittstelle mit dem Hardware-Simulator am Drilling Simulator Celle verbunden. Diese Schnittstelle ermöglichte eine Echtzeitübertragung von Hardware- zu Software-Simulator, wobei die übertragenen Daten in Echtzeit für die Simulation genutzt wurden. Diese Technologie kann in Zukunft bei realen Bohroperationen eingesetzt werden, um durch Simulationen mögliche Problemzonen vorherzusagen und präventive Maßnahmen bei der Planung zu ergreifen. Dadurch kann eine Tiefengeothermiebohrung optimiert werden, um die Kosten zu reduzieren.

#### **4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Der Software-Simulator des DSC (DrillSIM:600) ist einzigartig, insbesondere durch die API-Workstation, die die Möglichkeit bietet, extern mit dem Simulator zu kommunizieren und dabei die Simulation in Echtzeit durchzuführen. Die Ergänzung durch das Upgrade ermöglicht die Implementierung neuer physikalischer und empirischer Modelle sowie die Aktualisierung bestehender Modelle. Dies wäre ohne eine Weiterentwicklung des gesamten Systems des Drill-



SIM:600, auf dem es läuft, nicht möglich. Das Upgrade erlaubt die Manipulation und Verwendung eines breiteren Satzes von Ein- und Ausgabe-Parametern, die zuvor sehr begrenzt waren. Neben dieser Funktion können nun auch Bohrbedingungen und Werkzeuge detaillierter eingestellt werden, beispielsweise die Formationseigenschaften mit ihrem 3D-geologischen Modell, eine komplexere 3D-Bohrlochplanung und Bohrstrangzusammenstellungen. Zusammen mit der Möglichkeit, bestimmte Hardware-Störungen im Untergrund oder an der Oberfläche sowie natürliche Bohrprobleme zu berücksichtigen, kann die Simulation das Verhalten eines tatsächlichen Bohrprozesses nachahmen. Zusätzlich zum DrillSIM:600 wurde eine OPC-UA-Schnittstelle geschaffen, um eine Echtzeitverbindung zwischen einer aktiven Bohroperation, z.B. durch den DSC-Bohrversuchsstand, und dem Software-Simulator im DSC herzustellen.

## **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Während des OBE-Projekts wurde hauptsächlich mit dem Hersteller des vorhandenen Software-Simulators (DrillSIM:600) am DSC, Drilling Systems Ltd., zusammengearbeitet. Dessen Fokus liegt darauf, fortschrittliche Simulationslösungen zu entwickeln und herzustellen. Im Verlauf dieses Projekts arbeitete das Team von Drilling Systems in Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern am DSC zusammen, um die Fähigkeiten des DrillSIM:600 signifikant zu verbessern.

In Zusammenarbeit mit den Ingenieuren von Drilling Systems konnte der Simulator genutzt werden, um verschiedene Szenarien für geothermische Bohroperationen zu erstellen. Die Ergebnisse dieser Szenario-Bohrungen wurden erfolgreich auf der Celle Drilling Conference 2023 präsentiert.

## **Teil II: Eingehende Darstellung**

### **1 Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

Der DrillSIM:600, ein Bohrsimulator am Drilling Simulator Celle (DSC), hatte ursprünglich seinen Fokus auf der Schulung von Personal in der Bedienung von Übertage-Bohrgeräten, jedoch fehlte eine realistische Darstellung des Untergrunds für Planungs- und Forschungszwecke. Upgrades waren erforderlich, um die Fähigkeiten des Simulators für geothermales Bohren zu verbessern. Die Zusammenarbeit zwischen Drilling Systems und dem DSC führte zur Entwicklung eines neuen Betriebssystems, neuer Hardware, einer aktualisierten API und realistischer Modelle. Trotz erheblicher Herausforderungen hat der aktualisierte Simulator, als Er-

gebnis umfangreicher gemeinsamer Anstrengungen, die Simulation des geothermischen Bohrens revolutioniert. Die verbesserte Software ermöglicht die Implementierung neuer physikalischer und maschineller Lernforschungsmodelle sowie detaillierte Analysen, Echtzeitdatenübertragung und Verbindung mit tatsächlichen Bohr-Anlagen. Darüber hinaus können mit der neuen Version des DrillSIM:600 realistische Bohrszenarien dargestellt und die frühzeitige Erkennung von Bohrproblemen durchgeführt werden. Dies führt in der Folge zu Empfehlungen für präventive Maßnahmen und einen kosteneffizienten geothermischen Bohrbetrieb.

Gemäß Antragstellung gliederte sich das Projekt in 4 Teilprojekte und 11 zugeordnete Arbeitspakete (Tabelle 1).

*Tabelle 1: Übersicht Teilprojekte und Arbeitspakete*

<b>TP 1</b>	<b>Datenbeschaffung und Implementierung vorhandener Bohrungen im Simulator</b>
	AP 1-1 Beschaffung von Daten verfügbarer Bohrungen
	AP 1-2 Aufbereitung und Formatierung der Daten für spätere Analyse und Eingabe in Simulator
	AP 1-3 Überführen von Daten in ausgelagerte Datenbank
<b>TP 2</b>	<b>Datenanalyse und Modellierung</b>
	AP 2-1 Ableitung empirischer Modelle aus Messdaten
	AP 2-2 Entwicklung physikalischer Modelle
	AP 2-3 Validierung und Evaluation der Modelle mittels Messdaten
<b>TP 3</b>	<b>Entwicklung der echtzeitfähigen Simulator-Modelle</b>
	AP 3-1 Ertüchtigung der API für erweiterte Anforderungen
	AP 3-2 Vereinfachung von Modellen zur Echtzeit-Fähigkeit
	AP 3-3 Implementierung und Validierung der Echtzeit-Modelle durch neu erstellte Testszenarien
<b>TP 4</b>	<b>Simulations-Anwendung für neues Geothermieprojekt</b>
	AP 4-1 Vorbohren des Bohrloches für Optimierung und Training
	AP 4- 2 Parallele Simulation während laufendem Bohrbetrieb

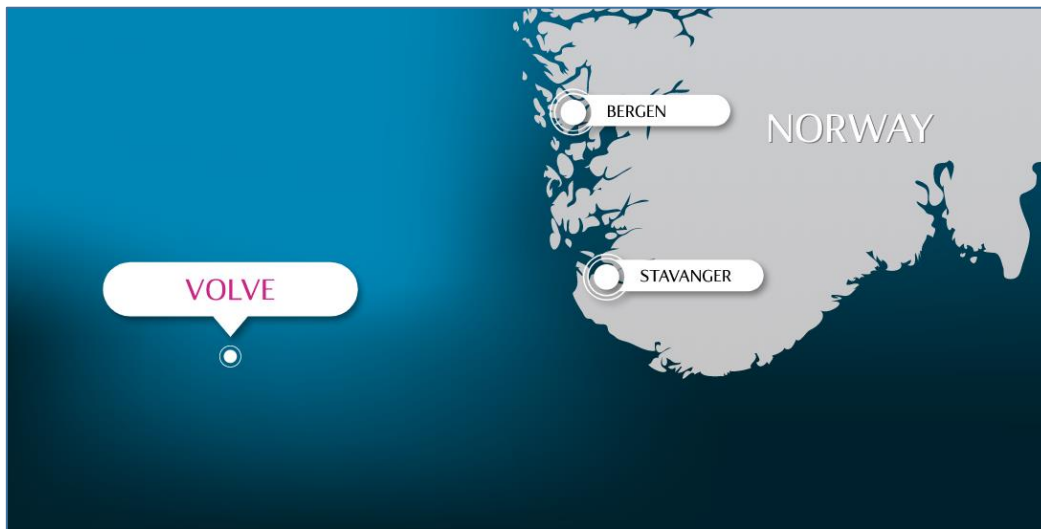
Im Folgenden werden die einzelnen Aktivitäten detailliert erläutert.

## **1.1 Datenbeschaffung und Implementierung vorhandener Bohrungen im Simulator (TP1)**

Im Vorfeld des vorliegenden Projekts wurden die Daten der GeneSys-Bohrung in Hannover-Buchholz von der BGR bereitgestellt und nach erforderlicher Aufbereitung in den Simulator eingespeist. Dies hat grundlegend gezeigt, dass das System Daten von bereits durchgeführten Bohrungen aufnehmen und verarbeiten kann.

### 1.1.1 Beschaffung von Daten verfügbarer Bohrungen

Im Rahmen dieses Projekts wurde die aktuelle Datenbasis erheblich erweitert, indem Daten weiterer Bohrungen beschafft worden sind. Darunter sind die vom Unternehmen Equinor in Norwegen bereitgestellten Bohr-Daten. Diese Daten sind von den Feldern Volve, Northern Lights, Sleipner, und Smeaheia-Feld. Der Standort von dem Volve-Feld ist in Abbildung 1 zu sehen.



*Abbildung 1: Volve-Feld Standort*

Das Volve-Feld wies zwischen Februar 2008 und September 2016 eine Ölproduktion von 63 Mbbl mit einer Erholungsrate von 54% auf und besteht aus 31 Bohrlöchern mit mehr als 4,94 TB an Daten, die in 12 verschiedene Datensätze unterteilt sind. Eine manuelle Analyse erfolgte zunächst, um die Eignung der Daten für Modellierungen zu überprüfen.

- Echtzeit Bohrdaten (tiefenbasiert und zeitbasiert)
- Geophysikalische Interpretationen
- Geowissenschaftliches Archiv
- Produktionsdaten
- Berichte
- Lagerstättenmodell (Eclipse)
- Lagerstättenmodell (RMS)
- Seismik ST10010
- Seismische VSP
- Bohrlochprotokolle
- Bohrlochprotokolle (pro Bohrloch)
- Technische Daten zum Bohrloch

Die Verarbeitung der Daten des Volve-Feldes folgt einem ähnlichen Ansatz wie bei der GeneSys-Datenverarbeitung und trägt dazu bei, die Datenbasis für Modelle zu verbessern. Nach erfolgreicher Überführung in die zentrale Datenbank des DSC wurden die Daten von GeneSys und Volve-Feld vollständig verarbeitet und auf dem zentralen Datenbankserver abgespeichert. Beide Datensätze stehen allen Arbeitsgruppen des DSC zur Verfügung, begleitet von einem bereitgestellten Tutorial für die Datenabrufung. Die fortlaufende Nutzung beider Datensätze dient auch zukünftig der weiteren Entwicklung von Machine-Learning-Modellen.

Es wurden auch andere Datensätze analysiert, wie die der Felder Hankensbüttel Süd, Burgwedel/Thönse und Staffhorst. In diesem Prozess wurde festgestellt, dass diese im Vergleich zu den GeneSys und Equinor Daten nicht detailliert genug sind, um sie für Maschinelles Lernen-Modelle zu nutzen; sie wurden daher als "Invalid/Insufficient" klassifiziert. Der Stand der gesammelten Datensätze ist der Tabelle 2 unten abgebildet.

*Tabelle 2: Stand der gesammelten Datensätze*

<b>Nr.</b>	<b>Company/Source</b>	<b>Location</b>	<b>Field</b>	<b>Status</b>
1.	BGR	Germany, Groß Buchholz	GeneSys	Processed
2.	Wintershall-Dea (TUC)	Germany, Hankensbüttel Süd	Hankensbüttel	Invalid / Insufficient
3.	BGR	Germany, Burgwedel/Thönse	Thönse	Invalid / Insufficient
4.	BGR	Germany, Staffhorst	Staffhorst	Invalid / Insufficient
5.	Equinor	Norway	Volve	Processed
6.	Equinor	Norway	Northern Lights	Processed
7.	Equinor	Norway	Sleipner	Processed
8.	Equinor	Norway	Smeaheia	Processed
9.	ICDP	Germany	KTB	Available

### **1.1.2 Aufbereitung und Formatierung der Daten für spätere Analyse und Eingabe in den Simulator**

In diesem Arbeitspaket konnten ausreichend Bohrdaten gemäß der oben aufgeführten Liste erlangt werden, um die Entwicklung von physischen und maschinellen Lernmodellen zu unterstützen. Somit wurde das Ziel dieses Arbeitspakets vollständig erreicht, nämlich die Aufbereitung und Formatierung der Daten für spätere Analyse und Eingabe in den Simulator.

Die im aktuellen Arbeitspaket erhaltenen Bohrlochdaten wurden zunächst auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüft. Anschließend war eine Konvertierung in die geeigneten Datenformate für die folgenden Arbeitsschritte erforderlich. Der Prozess der Datenvorverarbeitung erforderte die Umwandlung von den erfassten Rohdaten aus Bohrungen in ein verständliches Format und ist von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung von maschinellern Lernen

Modellen. Dieser Vorgang ist notwendig, da erfasste Daten oft unvollständig, redundant, ver-  
rauscht und inkonsistent sind. Daher mussten die Daten verschiedene Schritte durchlaufen,  
um sie in ein Format zu bringen, das für maschinelles Lernen weiterverwendet werden kann.

Der erste Schritt bestand darin, die erfassten Bohrdaten zu verarbeiten. Diese Daten waren  
nur teilweise strukturiert und wurden in mehrere Dateiformate aufgeteilt, darunter:

- Microsoft Access Database File (.mdb-Format)
- CSV-Daten (.csv-Format)
- LAS-Daten (.las-Format)
- PDF-Daten (.pdf-Format)

Die Microsoft Access Database-Datei repräsentierte eine Datenbank, in der die Daten gespei-  
chert waren. Diese Daten waren in mehrere Tabellen aufgeteilt, die miteinander durch Schlüs-  
seldaten („primary and foreign keys“) in Beziehung standen. Diese Schlüsseldaten ermöglich-  
ten es den Benutzern, die Verbindungen zwischen den Tabellen zu verstehen. Jede Tabelle  
enthielt einen Teil der Daten, der in Zeilen und Spalten angeordnet war. Diese Datenbankdatei  
enthielt 81 Datenbanktabellen, die im ersten Schritt kombiniert wurden, um alle Daten an ei-  
nem Ort zu bekommen. Verschiedene Techniken und Methodologien wurden verwendet, um  
die Daten zu extrahieren und zu aggregieren. Beim Aggregieren der Daten mussten die Be-  
ziehungen zwischen allen Tabellen berücksichtigt werden, ansonsten würden die Daten unzu-  
verlässig und mit vielen Fehlern und fehlplatzierten Informationen versehen gewesen. Ein Al-  
gorithmus wurde in der Programmiersprache Python entwickelt, um die erfolgreiche und zu-  
verlässige Aggregation der Microsoft Access Database-Datei durchzuführen. Dieser Algorith-  
mus konnte:

- Die vollständige Microsoft Access Database-Datei hochladen.
- Alle Tabellen einzeln erkennen.
- Leere Tabellen identifizieren.
- Die individuellen Beziehungen zwischen den Tabellen herausfinden.
- Die verbundenen Tabellen zusammenführen.
- Den Zusammenführungsprozess wiederholen, bis alle verbundenen Tabellen kombi-  
niert waren.

Als Ergebnis wurde ein Datensatz erstellt, der alle Bohrinformationen der Microsoft Access  
Database-Datei zusammenfasste.

Die als Teil der Bohrdaten erhaltenen CSV-Daten enthielten ebenfalls Bohrdaten. Eine ein-  
zelne CSV-Datei entsprach einer einzelnen Datentabelle. Diese Tabelle wurde mit dem resul-  
tierenden Datensatz aus der Microsoft Access Database-Datei verglichen. Die beiden Datens-  
ätze hatten einige gemeinsame Daten, aber auch unterschiedliche Daten. Beide Datensätze

wurden kombiniert, damit keine Daten dupliziert wurden und der resultierende Datensatz alle Informationen aus beiden Datensätzen enthielt. Dieser Datensatz aggregierte eine Microsoft Access Database-Datei und eine CSV-Daten-Datei.

Die LAS-Daten-Dateien, die auch als Teil der Bohrdaten vorlagen, enthielten umfangreiche Datenmengen. Es gab insgesamt 49 solcher LAS-Daten-Dateien. Diese Dateien waren aufeinander folgend und konnten unproblematisch miteinander verknüpft werden, sowohl mit den Daten aus der Microsoft Access-Datenbank als auch mit den CSV-Daten. Zusätzlich wurden wichtige Informationen aus den PDF-Dateien extrahiert und in den finalen Datensatz integriert.

Nach dem Prozess der Datenaufbereitung mussten die Daten weiterverarbeitet werden, bevor sie für maschinelles Lernen verwendet werden konnten. Das Erste, was in den Daten angesprochen werden musste, war die fehlende Information. Während der Vorverarbeitung der Daten wurde die gesamte fehlende Information mit verschiedenen Methoden und Techniken behandelt. Ein weiteres Problem in den Daten war die Wiederholung oder Duplizität. Alle doppelten Zeilen oder Spalten mussten entfernt werden, um die Informationen in den Daten genau und aufrecht zu halten. Nachdem die Daten bereinigt und die Redundanzen beseitigt waren, wurde die resultierende Datei in der Datenbank gespeichert.

Es wurde eine zusätzliche Tabelle erstellt, um alle Parameter in den Daten verfolgen zu können. Bei der Bezugnahme auf diese spezielle Tabelle konnte jeder verfügbare Parameter verfolgt werden, um zu sehen, in welchen der Rohdateien die Informationen enthalten waren und wie es sich während der gesamten Phase der Datenvorverarbeitung entwickelte.

Die vorverarbeiteten Daten wurden analysiert, um ein besseres Verständnis und Einblicke in die Parameter des Datensatzes zu erhalten. Neben der Identifizierung von Trends und Verhaltensweisen der Daten zeigte die statistische Analyse auch viele Informationen auf, die weiterhin bei der Dimensionsreduktion verwendet werden konnten.

Einige Methoden, die bei der explorativen Datenanalyse verwendet wurden, sind wie folgt:

- Outliers Detection:  
„Outliers“ sind Werte im Datensatz, die dort nicht hingehören. Es handelt sich um abnormale Beobachtungen, die nicht im normalen Bereich der Datenpunkte liegen und vor der Anwendung von Machine Learning-Modellen entfernt werden müssen. Die Methode, die auf dem vorverarbeiteten Datensatz verwendet wird, um outliers (unerwünschte Werte) zu entfernen, ist als Boxplot-Analyse bekannt. Diese Methode verwendet den Interquartil-Abstand (IQR), um Boxplot-Diagramme zu erstellen und die Datenpunkte von ihren Outliers zu trennen.
- Recursive Feature Elimination (RFE):  
Dies ist der häufigste Algorithmus zur Auswahl der Eigenschaften („feature selection algorithm“), der effektiv die relevantesten Eigenschaften aus dem Datensatz für die

Vorhersage der Zielvariable auswählt. Die „Recursive Feature Elimination“ (RFE) kann konfiguriert werden, um die Anzahl der Merkmale und den Algorithmus zu wählen, der bei der Auswahl der Eigenschaften hilft. Diese Methode wählt als Ergebnis eine Teilmenge der Gesamteigenschaften aus. Diese ausgewählten, flexibleren Eigenschaften helfen den Machine-Learning-Algorithmen, effizienter und effektiver zu sein. Für die „Recursive Feature Elimination“ des Datensatzes werden mehrere Algorithmen verwendet. Jeder dieser Algorithmen ordnet allen Parametern im Datensatz Rangfolgen zu. Die Parameter mit Rängen nahe ihrem „Feature-Importance-Score“ wurden ausgewählt, und der Rest der Parameter wurde aus dem Datensatz entfernt.

- Feature Importance:

Dies ist eine Technik, bei der jede Eigenschaft der Daten eine Punktzahl zugewiesen wird, abhängig davon, wie nützlich diese bestimmte Eigenschaft bei der Vorhersage der Zielvariablen ist. Diese Technik verbessert auch die Effizienz und Effektivität des Modells, indem sie eine Grundlage für die Auswahl von Eigenschaften und die Reduzierung der Dimensionalität bietet. Darüber hinaus bietet sie Einblicke in den Datensatz für ein besseres technisches bzw. physikalisches Verständnis.

- Correlations Check:

Korrelationen werden verwendet, um die Beziehungen zwischen verschiedenen Eigenschaften des Datensatzes zu finden und zu verstehen. Die Leistung eines Modells kann sich verschlechtern, wenn zwei oder mehr Variablen eng miteinander verbunden sind. In diesem Fall sollte nur eine dieser Variablen verwendet werden, und die anderen störenden korrelierten Variablen sollten entfernt werden. Die Korrelationen zwischen Eingabe- und Ausgabevariablen gaben auch Einblicke, welche dieser Eingabevariablen für die Modellentwicklung relevanter waren. Pearson- und Spearman-Korrelationen wurden für jede Eigenschaft des Datensatzes berechnet, um deren interne Beziehungen zueinander zu analysieren.

- Statistical Information:

Statistische Informationen bieten Einblicke in den Datensatz, die dazu verwendet werden können, die Eigenschaften der Daten besser zu verstehen. Einige übliche Informationen/Statistiken, die aus dem Datensatz berechnet werden, sind: Minimum, Maximum, Spannweite, Mittelwert, Standardabweichung, Varianz, Kurtosis und Schiefe („skewness“).

Die Ranglisten der RFE-Algorithmen, Prozentwerte der Feature-Importance-Algorithmen, Pearson- und Spearman-Korrelationswerte sowie statistische Informationen des Datensatzes wurden insgesamt für die Daten Eigenschaft, Auswahl und Dimensionalitätsreduktion analysiert. Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse von RFE, Feature Importance, Korrelationen

und statistischen Informationen bestimmte, welche Parameter für ein bestimmtes Modell hilfreicher waren.

All diese oben genannten Techniken sind Teil der explorativen Datenanalyse, die zum besseren Verständnis und Abstimmung des Datensatzes verwendet wurde. Darüber hinaus wurde die Datenqualität für die Modellentwicklung verbessert, indem die als Outliers geltenden Daten entfernt wurden. Zudem erhöhte die Auswahl der Daten-Eigenschaften („feature selection“) die Effizienz und Wirksamkeit der Modelle. Die Aufbereitung und Formatierung der Daten wurden mit den genannten Methoden erfolgreich abgeschlossen. Diese wurden für die spätere Analyse und Eingabe in den Simulator genutzt.

### **1.1.3 Überführen von Daten in ausgelagerte Datenbank**

In den abschließenden Phasen der Datenaufbereitung für die erhaltenen Bohrdaten entstand die Notwendigkeit einer zentralen Datenbank. Diese Datenbank sollte nicht nur die erfassten Daten, sondern auch die interpolierten, vorverarbeiteten und verarbeiteten Daten aufnehmen. Ihr Zweck bestand darin, als Eingabe für die verschiedenen im Projekt entwickelten Machine-Learning-Modelle zu dienen. Dementsprechend wurde eine PostgreSQL-Datenbank auf dem Server des Drilling Simulator Celle (DSC) eingerichtet. Sowohl Rohdatensätze als auch vorverarbeitete Datensätze fanden in dieser Datenbank Platz. Unabhängig vom verwendeten DSC-System könnte auf den finalisierten Datensatz über diese Datenbank zugegriffen werden. Der Zugriff auf die Daten erfordert Anmeldeinformationen wie Benutzername und Passwort. Jeder Benutzer im internen Netzwerk des DSC konnte, unabhängig vom System, auf die Datenbank zugreifen, indem er die richtige IP-Adresse des DSC-Servers sowie die Anmeldedaten bereitstellte.

Zum Abschluss des Arbeitspakets wurden die zuvor beschafften Bohrdaten erfolgreich auf einem DSC-Server gespeichert. Diese sind für alle mit Zugang zum Server verfügbar.

## **1.2 Datenanalyse und Modellierung (TP 2)**

Die Simulation von Bohrvorgängen erfordert die Simulation physikalische Phänomene durch mathematische Formulierungen. In diesem Teilprojekt liegt der Fokus auf einer Analyse von wichtigen Phänomenen im Bohrloch, die während eines Bohrvorgangs geschehen. Auf Grundlage dieser Analyse wurden sowohl empirische als auch physikalische und Maschinelles Lernen Modelle entwickelt, um echtzeitfähige Simulationsmodelle in den Software Simulator zu implementieren.



### 1.2.1 Ableitung empirischer Modelle aus Messdaten

Dieser Abschnitt des Arbeitspakets umfasste das Design und die Konstruktion von drei unterschiedlichen Machine-Learning-Modellen: dem Modell zur Vorhersage der „Rate of Penetration“ (ROP), dem Modell zur Vorhersage des „Weight on Bit“ (WOB) und dem Modell zur Vorhersage der „Equivalent Circulation Density“ (ECD). Der Konstruktionsprozess für diese Machine-Learning-Modelle umfasste die Auswahl von den Daten-Eigenschaften, den experimentellen Aufbau, das Modelltraining und die Feinabstimmung („tuning“) der Hyperparameter. Jedes Vorhersagemodell nutzte Machine-Learning-Algorithmen und -Techniken, um die Zielattribute im Zusammenhang mit dem Bohrprozess vorherzusagen.

Die vorverarbeiteten Daten dienten als Trainingsgrundlage für mehrere Machine-Learning-Algorithmen für jedes Vorhersagemodell, was die Auswahl des am besten geeigneten Algorithmus ermöglichte. Vor dem Training des Modells wurde eine bestimmte Parameterauswahl aus den vorverarbeiteten Daten getroffen, um als Eingabe für die Machine-Learning-Algorithmen zu dienen. Diese ausgewählten Parameter galten als die relevantesten und wirkungsvollsten, wodurch sie das Ziel hatten, die Leistung und Genauigkeit des Modells zu verbessern. Dies sollte zur Vermeidung von Überanpassung („overfitting“) beitragen, indem die Datenkomplexität und -redundanz reduziert wurden.

Der Arbeitsablauf des Modellierungsszenarios für maschinelles Lernen ist in Abbildung 2 dargestellt.

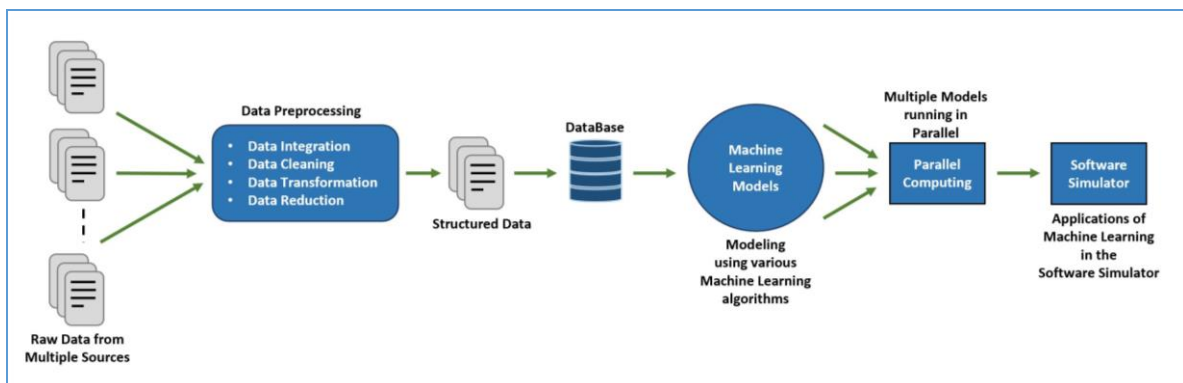


Abbildung 2: Arbeitsablauf des Modellierungsszenarios für maschinelles Lernen

In Abbildung 2 wird der gesamte Prozess der maschinellen Lernmodellierung dargestellt, bei dem Daten aus verschiedenen Quellen und Formaten integriert und für die Verwendung durch maschinelles Lernen vorbereitet wurden. Die verarbeiteten Daten wurden dann in einer zentralen Datenbank gespeichert. Mehrere maschinelle Lernalgorithmen wurden verwendet, um die Vorhersagemodelle zu trainieren, und der am besten geeignete Algorithmus wurde aufgrund der Ergebnisse der Evaluationsmatrix ausgewählt. Der finalisierte maschinelle Lernal-

gorithmus für jedes Vorhersagemodell wurde in den Software-Simulator (DrillSIM:600) implementiert. DrillSIM:600 kann je nach Bedarf ein oder mehrere Modelle gleichzeitig ausführen. Weitere Details zur Implementierung aller Modelle werden unten näher erläutert.

- Rate of Penetration (ROP) Prediction Model:

Das Vorhersagemodell für die ROP prognostizierte einen der entscheidenden Parameter des Bohrprozesses. Nach der Auswahl der relevantesten Daten-Eigenschaften aus den vorverarbeiteten Daten, die mit der Zielvariable verbunden waren, wurden vier maschinelle Lernalgorithmen eingesetzt, darunter „Decision Trees, Random Forest, Extra Trees Regressor, and XGBoost“, um Vorhersagen zu treffen, und ihre Ergebnisse wurden gründlich analysiert.

Um die Komplexität und Redundanz der Daten zu reduzieren und „Overfitting“ in den maschinellen Lernmodellen vorzubeugen, wurden die relevantesten und signifikantesten Daten-Eigenschaften in den Daten basierend auf der ROP ausgewählt. Dementsprechend wurden die Prozentsätze der ROP-Eigenschaften verwendet, um iterativ die Anzahl der Attribute zu reduzieren. Dieser Prozess umfasste das wiederholte Ausführen der maschinellen Lernalgorithmen, bis wichtige Indikatoren und die Evaluationsmatrix (wie der R2-Score, der mittlere absolute Fehler und der mittlere quadratische Fehler) einen Rückgang zeigten. Als Ergebnis wurden die folgenden Daten-Eigenschaften entsprechend ihres jeweiligen maschinellen Lernalgorithmus ausgewählt.

*Tabelle 3: Ausgewählte Daten-Eigenschaften vom ROP Vorhersage-Modell*

<u><b>Decision Trees</b></u>	<u><b>Random Forest</b></u>	<u><b>Extra Trees</b></u>	<u><b>XGBoost</b></u>
Specific Energy	Specific Energy	Rock Strength	Specific Energy
String Weight	String Weight	Mud Weight	String Weight
Mechanical Specific Energy	Mechanical Specific Energy	String Weight	Mud Weight
Bit Rotation Per Minute	Bit Rotation Per Minute	Hook Load	String Rotations Per Minute
Mud Temperature	Mud Temperature	Equiv. Circulation Density	Bit Rotation Per Minute
Weight on Bit	Weight on Bit	Specific Energy	Weight on Bit
String Rotations Per Minute	Mud Conductivity	Bit Rotation Per Minute	Mechanical Specific Energy
Mud Conductivity	String Rotations Per Minute	Mud Temperature	Torque
Hook Load	Hook Load		Stand Pipe Pressure
Flow Rate	Stand Pipe Pressure		Hook Load
	Flow Rate		Mud Temperature

Nach der Auswahl der Daten-Eigenschaften werden sowohl die Eingabe- als auch die Ausgabedaten in zwei Kategorien unterteilt: Trainings- und Testdatensätze. 90% der zufällig zusammengestellten Eingabe- und Ausgabedatensätze gelten als Trainingsdaten, und die verbleibenden 10% der Daten werden als Testdaten genutzt. Die ausgewählten Daten-Eigenschaften für die Ein- und Ausgabe werden separat den maschinellen Lernalgorithmen zugeführt, um das ML-Modell zu trainieren.

- Weight on Bit (WOB) Prediction Model:

Das „Machine Learning“ Modell zur Vorhersage des „Weight on Bit“ (WOB) prognostizierte den Weight-on-Bit-Parameter während des Bohrprozesses. Nach der Auswahl der relevantesten Daten-Eigenschaften aus den vorverarbeiteten Daten im Zusammenhang mit der Zielvariable wurden vier maschinelle Lernalgorithmen, darunter „Decision Trees, Random Forest, Extra Trees Regressor und XGBoost“, verwendet, um Vorhersagen zu treffen. Die Ergebnisse wurden anschließend gründlich analysiert. Um die Datenkomplexität und Redundanz zu bewältigen und „Overfitting“ in den maschinellen Lernmodellen zu verhindern, wurde die Auswahl der relevantesten Daten-Eigenschaften in den Daten basierend auf dem „Weight on Bit“ durchgeführt. Anschließend wurden die Prozentsätze der Daten-Eigenschaft „Wichtigkeit“ verwendet, um die Anzahl der Attribute iterativ zu reduzieren. Dieser Prozess umfasste wiederholtes Ausführen der maschinellen Lernalgorithmen, bis die wichtigsten Indikatoren und die Bewertungsmatrix (wie R<sup>2</sup>-Wert, „Mean Absolute Error und Mean Squared Error“) einen Rückgang zeigten. Die folgenden Daten-Eigenschaften wurden dementsprechend gemäß ihrem jeweiligen maschinellen Lernalgorithmus ausgewählt.

*Tabelle 4: Ausgewählte Daten-Eigenschaften vom WOB Vorhersage-Modell*

<u><b>Decision Trees</b></u>	<u><b>Random Forest</b></u>	<u><b>Extra Trees</b></u>	<u><b>XGBoost</b></u>
Mud Conductivity	Rock Strength	Rock Strength	Rock Strength
Flow Rate	Flow Rate	Mud Weight	Flow Rate
Hook Load	Equiv. Circulation Density	Mud Conductivity	Hook Load
Rock Strength	Mud Conductivity	String Weight	Mud Weight
String Weight	Hook Load	Hook Load	Torque
Torque	Torque		String Weight
	String Weight		

Nach dem Auswahlprozess der Daten-Eigenschaften wurden die Eingabe- und Ausgabedaten in zwei Kategorien unterteilt: Trainings- und Testdatensätze. 90% der zufällig zugestellten Ein- und Ausgabedatensätze wurden als Trainingsdatensätze bezeichnet, während die verbleibenden 10 % als Testdatensätze zugewiesen wurden. Die Trainingsdatensätze wurden separat den maschinellen Lernalgorithmen entsprechend ihrer ausgewählten Daten-Eigenschaften zugeführt, um das maschinelle Lernmodell zu trainieren.

- Equivalent Circulation Density (ECD) Prediction Model:

Das Modell zur Vorhersage der Äquivalenten Zirkulationsdichte (ECD) prognostizierte den Parameter der ECD im Bohrprozess. Nach der Auswahl der relevantesten Daten-Eigenschaften aus den vorverarbeiteten Daten im Zusammenhang mit der Zielvariable

wurden vier maschinelle Lernalgorithmen verwendet, darunter „Decision Trees“, „Random Forest“, „Extra Trees Regressor“ und „XGBoost“, um entsprechende Vorhersagen zu treffen. Die Ergebnisse wurden gründlich analysiert.

Um die Datenkomplexität und Redundanz zu bewältigen und ein „Overfitting“ in den maschinellen Lernmodellen zu verhindern, wurde die Auswahl der relevantesten Daten-Eigenschaften in den Daten basierend auf der äquivalenten Zirkulationsdichte getroffen. Anschließend wurden die Prozentsätze der Daten-Eigenschaften basierend auf der Wichtigkeit verwendet, um die Anzahl der Attribute iterativ zu reduzieren. Dieser Prozess beinhaltete wiederholtes Ausführen der maschinellen Lernalgorithmen, bis Schlüsselindikatoren und Bewertungsmatrix (wie R2-Score, mittlerer absoluter Fehler und mittlerer quadratischer Fehler) einen Rückgang zeigten. Als Ergebnis wurden die Daten-Eigenschaften entsprechend ihres zugehörigen maschinellen Lernalgorithmus ausgewählt.

*Tabelle 5: Ausgewählte Daten-Eigenschaften vom ECD Vorhersage-Modell*

<u><b>Decision Trees</b></u>	<u><b>Random Forest</b></u>	<u><b>Extra Trees</b></u>	<u><b>XGBoost</b></u>
Mud Weight	Mud Weight	Mud Weight	Mud Weight
Flow Rate	Stand Pipe Pressure	Stand Pipe Pressure	Flow Rate
Stand Pipe Pressure	String Weight	String Weight	String Weight
		Flow Rate	Mud Conductivity

Nach dem Auswahlprozess der Daten-Eigenschaften wurden die Eingabe- und Ausgabedaten in zwei Kategorien aufgeteilt: Trainingsdatensätze und Testdatensätze. Der Trainingsdatensatz umfasste 90% der zufällig durchmischten Ein- und Ausgabedatensätze, während die verbleibenden 10% als Testdatensatz verwendet wurden. Die Trainingsdatensätze wurden den maschinellen Lernalgorithmen separat entsprechend der Auswahl ihrer Merkmale zugeführt, um das maschinelle Lernmodell zu trainieren.

Die Implementierung sämtlicher Modelle in den vorhandenen Softwaresimulator (DrillSIM:600) wurde erfolgreich abgeschlossen, nachdem die oben genannten Modelle fertiggestellt wurden. Ein Teil der Forschungsergebnisse zur Modellierung des Bohrfortschritts wurde im Jahr 2022 auf der International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE) in Hamburg vorgestellt. Dabei kamen verschiedene Machine-Learning-Techniken wie „Support Vector Machine und Multi-Layer Perceptron Neural Networks“ zum Tragen. Zusätzlich zu diesen modernen Ansätzen wurden auch einfache empirische Modelle mit wenigen Parametern betrachtet.

Neben dem beschriebenen Ansatz der Modellierung wurde auch die Methode der symbolischen Regression untersucht. Diese ermöglicht die automatisierte Ableitung neuer empirischer ROP-Modelle aus Messdaten durch einfache algebraische Formeln. Die Genauigkeit dieser Modelle ist nicht vollständig mit den Methoden des maschinellen Lernens vergleichbar, aber aufgrund der Einfachheit der Formeln konnten die Ergebnisse manuell verifiziert werden. Die

Ergebnisse wurden in einer Datei gespeichert und mithilfe der API des Software-Simulators zur Nachbildung einer Bohrung mit dem GeneSys-Datensatz verwendet.

Die Hauptzielsetzung dieses Arbeitspakets besteht darin, den automatisierten Nachbau eines Bohrlochs aus vorverarbeiteten Daten zu realisieren. Hierfür werden ausgewählte Modelle in einen Software-Simulator integriert, um bereits durchgeführte Bohrungen nachzubilden. Dieser Prozess wurde erfolgreich mithilfe der zuvor beschriebenen maschinellen Lernmodelle abgeschlossen.

### 1.2.2 Entwicklung physikalischer Modelle

In diesem Arbeitspaket werden physikalisch-analytische Modelle genutzt, um spezifische Phänomene im Bohrloch zu beschreiben. Dabei wird grundsätzlich eine Präferenz für diese Modelle gegenüber empirischen Ansätzen gegeben, da sie die Phänomene im Bohrloch auf "realistische" bzw. natürliche Weise repräsentieren können.

Physikalische Modelle spielen eine entscheidende Rolle in der Simulation des Bohrprozesses, insbesondere wenn es darum geht, realistische Szenarien im Bohrloch zu erzeugen. Durch die Anwendung von physikalischen Zusammenhängen können verschiedene Phänomene im Bohrloch modelliert werden. Die Forschungen haben sich auf die Anpassung zu dem vorhandenen Software Simulator konzentriert, insbesondere auf die Temperaturentwicklung, Bohrkleintransport, und Bohrpfadoptimierung, einschließlich von Kollisionsanalysen. Ein Überblick für die entwickelten physikalischen Modelle ist in Tabelle 6 zu sehen.

*Tabelle 6: Überblick entwickelter physikalischer Modelle*

Nr.	Models
1	Advanced Temperature Model
2	Torque and Drag
3	Weight on Bit
4	Bit Right/Left & Build/Drop Tendencies (Bit Walk)
5	Well Anti Collision Analysis
6	Cutting Transport & Drill String Dynamics Interaction

Im Projektzeitraum wurden verschiedene Modelle entwickelt und erfolgreich in den Drill-SIM:600 integriert. Als Beispiel zu nennen ist das entwickelte numerische Temperaturmodell, Dieses ermöglicht die Darstellung der Temperaturen im vertikalen Bohrloch sowohl während des Zirkulierens der Bohrspülung als auch unter Shut-In-Bedingungen. Es erlaubt zudem die transiente Simulation der Temperaturen von Bohrspülung, Bohrstrang, Casing, Zementierung und des umgebenden Gesteins. Ursprünglich wurde das Modell in der API implementiert, um

die Simulation auszuführen (Abbildung 3). Zusätzlich zur Integration in den Software-Simulator wurde über das Modell in einem Artikel mit dem Titel "Temperature modeling for wellbore circulation and shut-in with application in vertical geothermal wells" im März 2021 im Fachjournal "Journal of Petroleum Science and Engineering" berichtet.

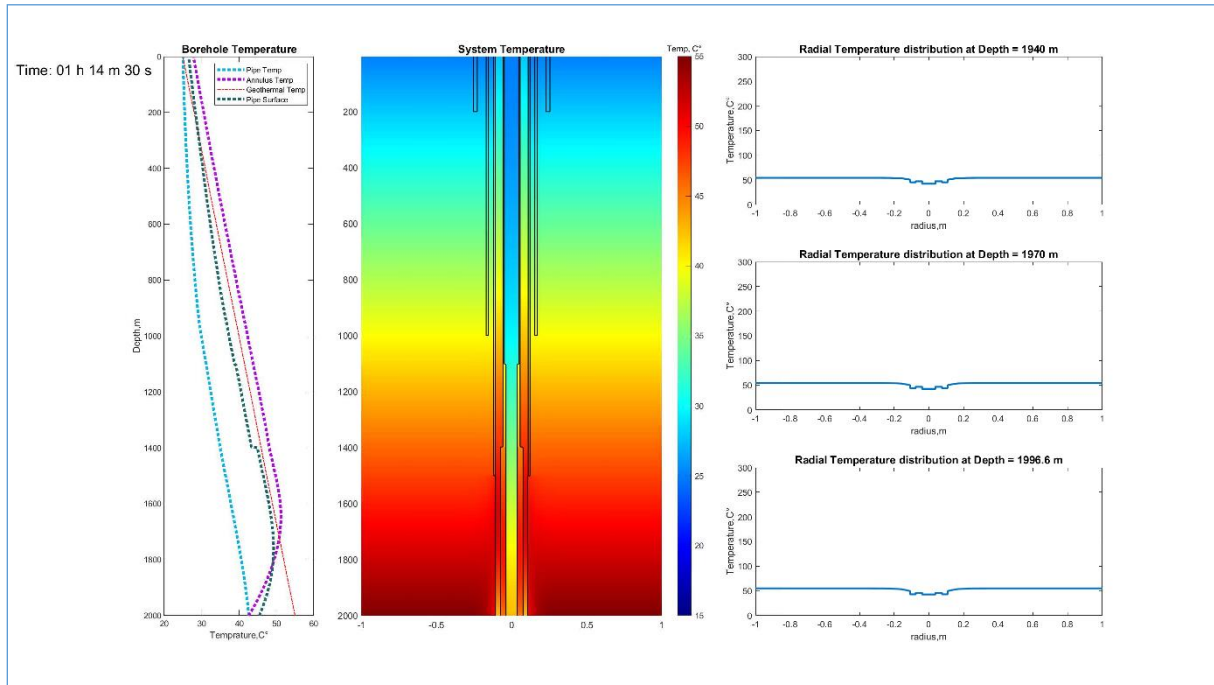
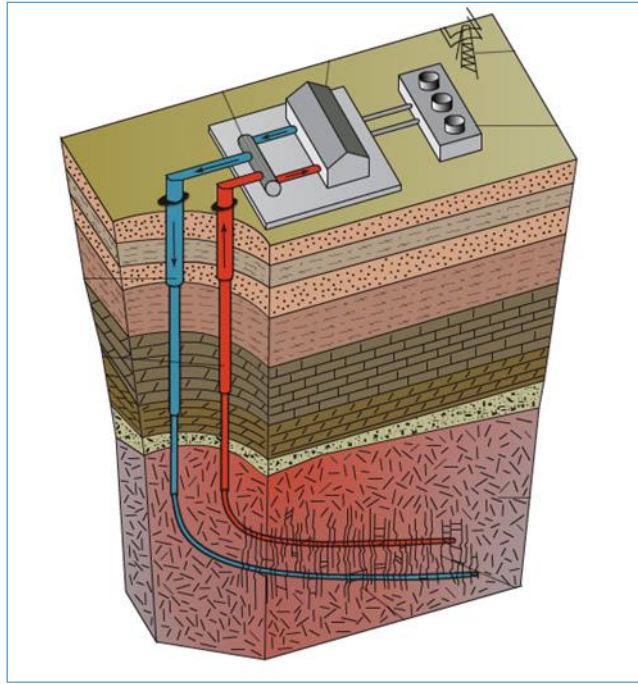


Abbildung 3: Bildschirmausgabe einer MATLAB Simulation des Temperaturmodells

Im Verlauf des Projekts wurde dieses Modell erfolgreich in den DrillSIM:600 durch den Simulator-Hersteller integriert. Diese Integration ermöglicht es nun, die Bohrlochtemperaturuntersuchung direkt über den Kern des Software-Simulators durchzuführen, anstatt dies ausschließlich durch die Application Programming Interface (API) zu simulieren. Hierdurch läuft der Prozess effizienter ab.

Zusätzlich zu dem oben genannten Modell wurde im Rahmen dieses Projekts ein Konzept für die Antikollisionsanalyse während des simulierten Bohrvorgangs erstellt und entwickelt. Dies ist notwendig, da zwei oder mehrere Geothermiebohrungen oft nah beieinanderliegen, damit die Injektions- und Förderbohrung effektiv funktionieren und optimal Wärme produzieren können. Dadurch entsteht bei der Bohrungserstellung auch die Gefahr von Kollisionen. Ein Beispiel eines dualen Systems ist unten abgebildet.



*Abbildung 4: Geothermisches Dual-System*

Aufgrund der entscheidenden Bedeutung in Geothermiebohrungen sind die Antikollisionsanalyse und die damit verbundenen erheblichen Risiken von großer Relevanz für die Vorab-Simulation. Das physikalische Modell berücksichtigt dabei die Trajektorie des Bohrlochs, die mit der mathematischen „Minimum of Curvature“ Methode berechnet wird, den Fehlerwahrscheinlichkeitsraum (Englisch: "Ellipsoid of Uncertainty", EoU) unter Berücksichtigung von Messfehlern während des Bohrvorgangs (Fehlerberechnung des Vermessungsinstruments) sowie die jeweilige Entfernung zwischen den Bohrlöchern. Weitere Modelle für das Kollisionserkennungssystem schließen Dogleg Severity, Torque & Drag sowie Bit Walk mit ein. Die Konzeption dieses Modells wird unten dargestellt.

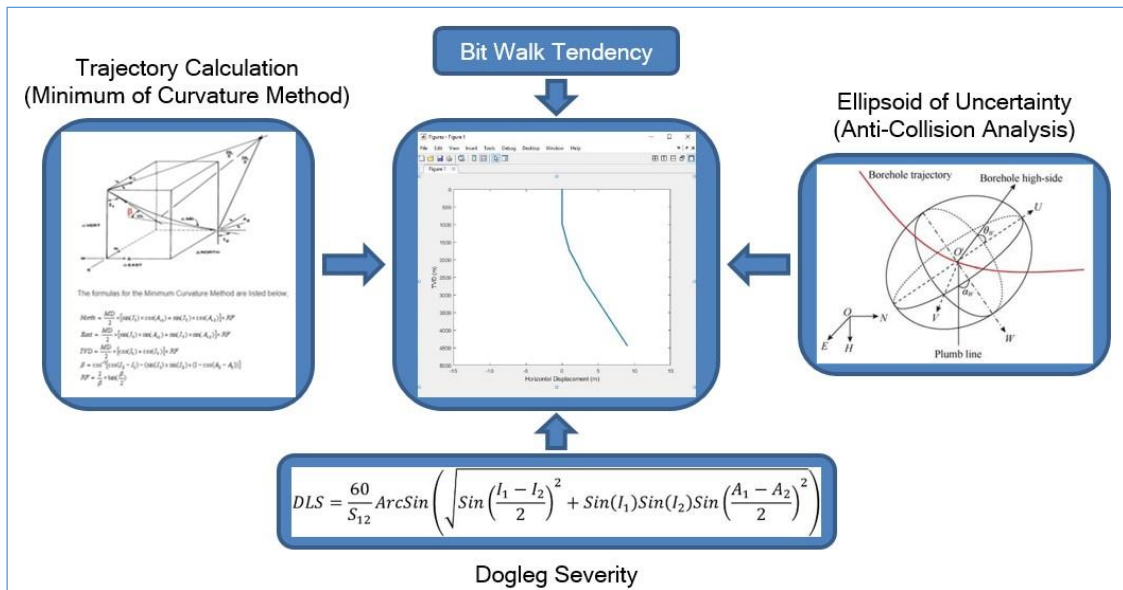


Abbildung 5: Modell zur Vermeidung von Kollisionen

Die mathematische Erschließung der Kollisionsvermeidungslösung wird mithilfe der Simulationssoftware MATLAB realisiert. Das System ermöglicht die Simulation eines Bohrvorgangs in 2D, wobei der Fortschritt des Bohrens für jeden Zeitschritt berechnet wird.

Die Analyse des Fehlerwahrscheinlichkeitsraums "Ellipse of Uncertainty" (EoU) erfolgte unter Verwendung einer Monte-Carlo-Simulation. Dabei wurden die Daten der GeneSys-Bohrung in Groß Buchholz, Niedersachsen, als Grundlage verwendet. Die Methode zur Fehlerprognose, die in der Bohrindustrie üblich ist, basierte auf der Annahme einer Normalverteilungskurve (siehe Abbildung 6) und diente als Grundlage für die Monte-Carlo-Simulation (MC).

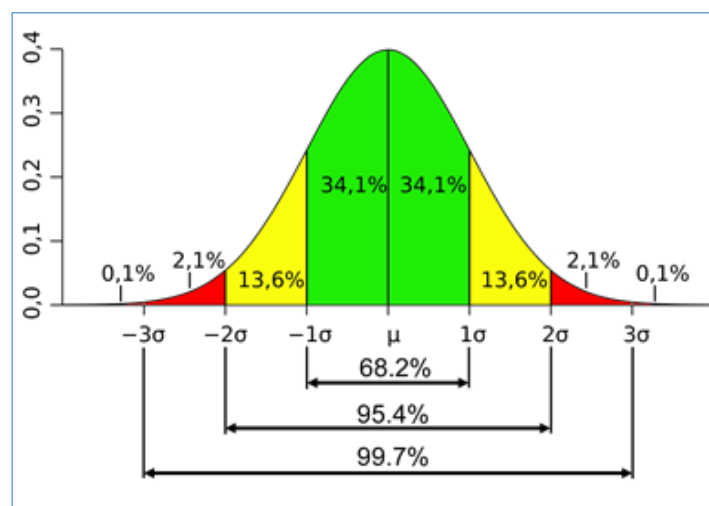


Abbildung 6: Normalverteilungskurve

Mittels der Monte-Carlo-Simulation wurde für jeden Vermessungspunkt ein Fehlerprognose-raum (Error Direction x, y, z) mit unterschiedlichen Vertrauensniveaus ( $1\sigma$ ,  $2\sigma$ ,  $3\sigma$ ) in 500 Iterationen simuliert. Ein Beispiel dieser Simulation für einen Vermessungspunkt ist in Tabelle 7 dargestellt.



Tabelle 7: Monte Carlo Simulation in einem Vermessungspunkt

Confidence Level		Error Possibility			MC Simulation
		X	Y	Z	X
		0,26	1,5	1,16	0,26
1 Sigma	0,02	0,2652	1,53	1,1832	0,246613443
		0,2548	1,47	1,1368	
2 Sigma	0,74	0,4524	2,61	2,0184	1,097671468
		0,0676	0,39	0,3016	
3 Sigma	0,97	0,5122	2,955	2,2852	0,231604511
		0,0078	0,045	0,0348	

Durch die Durchführung von 500 Versuchen für einen einzigen Vermessungspunkt wurde ein Diagramm erstellt (Abbildung 7), dass die Abbildung 6 ähnelt. Die Ergebnisse lassen sich vergleichen mit dem Diagramm einer Normalverteilung, da die Monte-Carlo-Simulation der Vermessungspunkt auf den Vertrauensniveaus der Normalverteilung durchgeführt wurde.

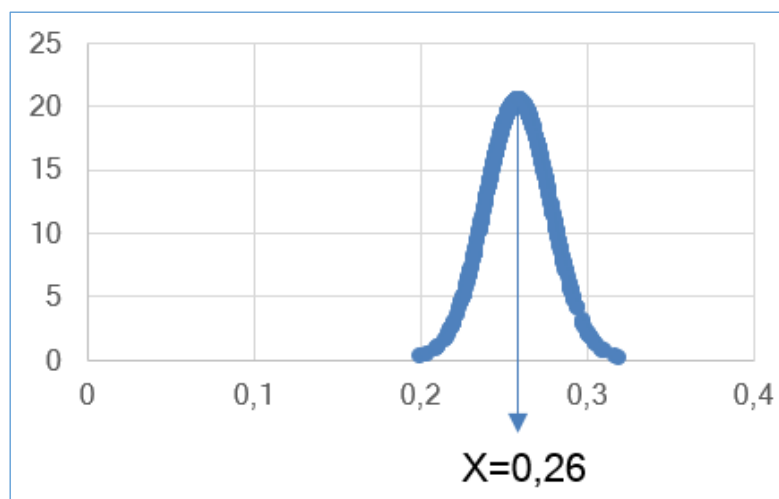


Abbildung 7: Diagramm von 500 Versuchen für "x" an einem Vermessungspunkt

Aus den Monte-Carlo-Simulationsergebnissen wurde ein Ellipsoid of Uncertainty für jede Position des Bohrlochs erstellt und implementiert, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.8.**

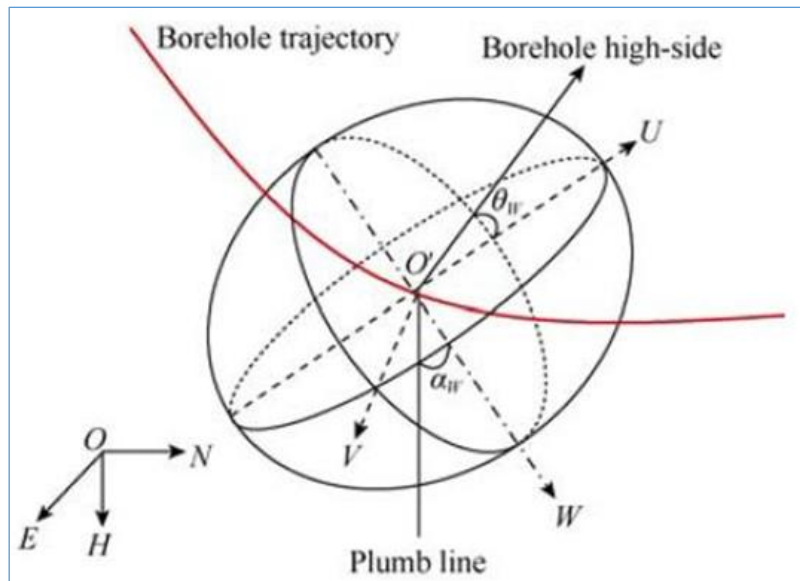


Abbildung 8: Ellipsoid of Uncertainty

Werden eine Reihe von Fehlerellipsoiden entlang der Trajektorie (Vermessungspunkte in der Mitte) projiziert und umhüllt, entsteht ein elliptischer Fehlerzylinder, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden**.9.

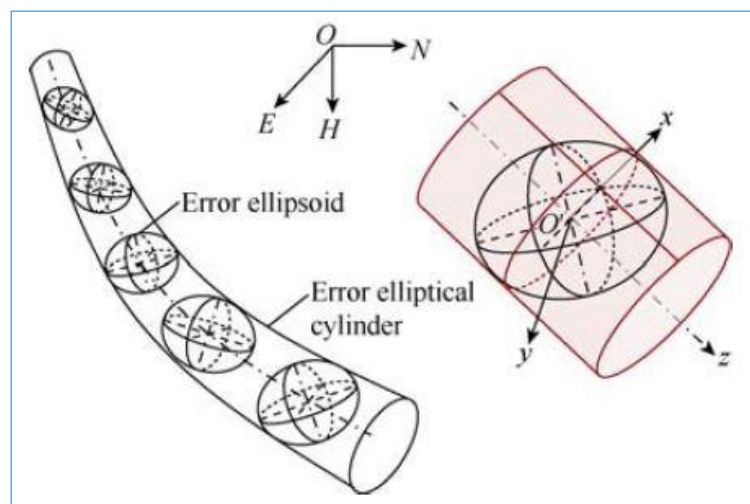


Abbildung 9: Error Elliptical Cylinder

Die genannten Methoden sind erforderlich, um die Position des Bohrlochs präziser vorherzusagen und den „Clearance Factor“ zu berechnen, der den Abstand zwischen zwei oder mehr Bohrlöchern beschreibt, um Kollisionen zu verhindern. Diese Verfahren werden implementiert

und ausführlich analysiert. Das optimale und am besten geeignete Ergebnis aus der Simulation wird schließlich im endgültigen Antikollisionsmodell integriert.

Zusätzlich wurde das neueste Modell für die Anti-Kollisions-Simulation namens "Bit Walk Tendency" verwendet. Ziel dieses Modells ist es, die natürliche Bewegung des Meißels während des Bohrvorgangs vorherzusagen und zu simulieren. Faktoren, die die Meißelbewegung beeinflussen, umfassen Meißelndruck (Weight on Bit, WOB), Rotationsgeschwindigkeit (RPM), Formationseigenschaften, Hydrodynamik der Bohrflüssigkeit, BHA-Länge und -Konfiguration, sowie das Bohrmeißeldesign. Die Schritte zur Simulation der Bit Walk Tendency umfassen:

- Konstruktion des BHA-Modells.
- Berechnung der confined compressive strength der Formation
- Berechnung der Lateralbewegung des Bohrmeißels (Lateral Motion Drill Bit Model)
- Berechnung von Neigung und Azimut des BHA unter Verwendung des BHA-Steuerungsmodells
- Iteration aller Schritte

Die Simulation erfolgt wie im Beispiel in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden**.10.

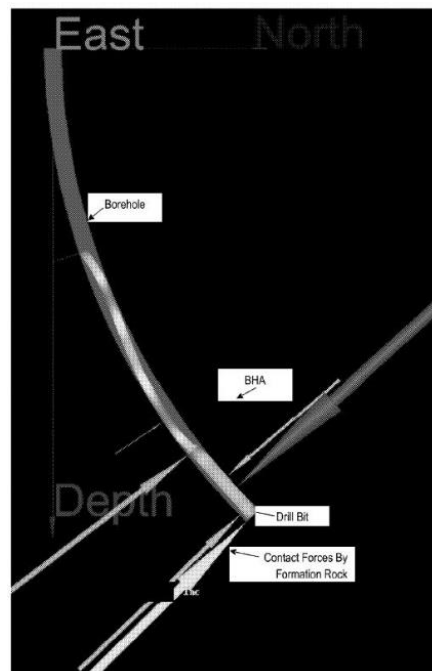


Abbildung 10: Bit Walk Tendency Simulation

Die Integration dieser Modelle ermöglicht es, die Position des Bohrloches und die Distanz zwischen zwei oder mehr Bohrlöchern zu bestimmen, um Kollisionen sicher zu verhindern. Dieses System wird automatisiert und in die API implementiert sowie in den Simulator integriert.

Während des Projekts wurden verschiedene Modelle und Konzepte entwickelt. Diese wurden teilweise erfolgreich durch den Hersteller des Simulators direkt in den DrillSIM:600 integriert. Die definierten Ziele dieses Arbeitsschrittes wurden mit den durchgeführten Arbeiten erreicht.

### 1.2.3 Validierung und Evaluation der Modelle mittels Messdaten

Nach dem Trainieren des Modells wurden alle vier maschinellen Lernalgorithmen verwendet, um Vorhersagen für den Input-Test-Datensatz zu erstellen. Diese Vorhersagen wurden anschließend mit dem Output-Test-Datensatz verglichen, um die Leistung jedes Algorithmus des maschinellen Lernens individuell zu bewerten und zu messen. Der Trainingsprozess für alle Algorithmen wurde mit 100 Iterationen durchgeführt, von denen jede bei jeder Gelegenheit mit zufällig zusammengestellten Daten lief. Die Ergebnisse jeder dieser Iterationen wurden aufgezeichnet, und ihre Durchschnittsergebnisse, einschließlich des mittleren absoluten Fehlers, des mittleren quadratischen Fehlers und der R2-Werte, wurden als Ergebnisse berechnet und analysiert. Die Resultate und Validierung aller ML-Modelle werden im Folgenden einzeln diskutiert:

- Rate of Penetration (ROP) Prediction Model:

Die Evaluierung der Bewertungsmatrix verschiedener Algorithmen des maschinellen Lernens für das ROP-Vorhersagemodell sind in der Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: ROP-Vorhersage Model – Bewertungsmatrix

Die obige Abbildung zeigt deutlich, dass der maschinelle Lernalgorithmus „Extra Trees“ die niedrigsten „Mean Absolute Error“ (MAE) und „Mean Squared Error“ (MSE) sowie den höchsten R2-Score für das ROP-Vorhersagemodell aufweist. Dies belegt, dass dieser spezielle Algorithmus am besten für die Vorhersagen des Bohrfortschritts (ROP) geeignet ist.

Die Ergebnisse der ROP-Vorhersagen im Vergleich zu den tatsächlichen ROP-Werten des Test-/Validierungsdatensatzes der erworbenen Daten bezüglich des finalisierten ML-Modells sind in der Abbildung 12 dargestellt.

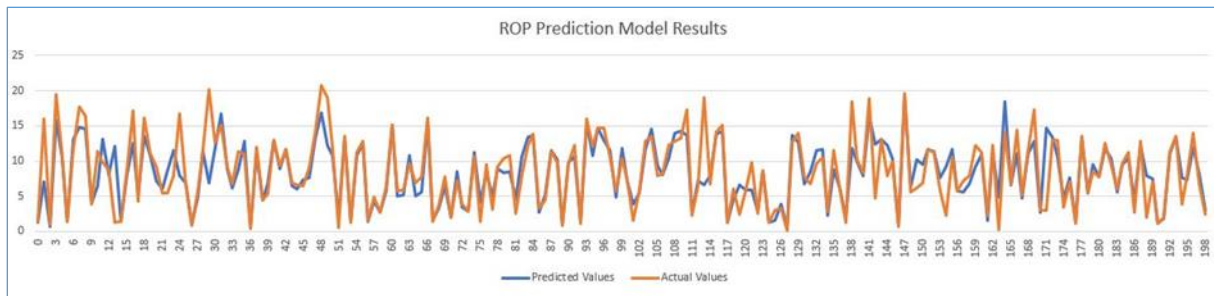


Abbildung 12: ROP-Vorhersage Model – Validierungsergebnis

In der oben dargestellten Abbildung repräsentiert die blaue Linie die vorhergesagten Werte der ROP unter Verwendung des Validierungsdatensatzes der erfassten Daten, während die orange Linie die tatsächlichen ROP-Werte des Validierungsdatensatzes darstellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die vorhergesagten Werte der ROP über das ML-Modell sehr nah an den tatsächlichen Werten liegen. Die vorhergesagten Werte folgen dem gleichen Verhalten und Muster wie die tatsächlichen Werte. Die Ergebnisse liegen sehr nah beieinander, was die Effizienz des ML-Modells belegt.

Die Bedeutung der einzelnen Daten-Eigenschaften (feature importance) des ROP-Vorhersagemodells ist in der Abbildung 13 dargestellt.

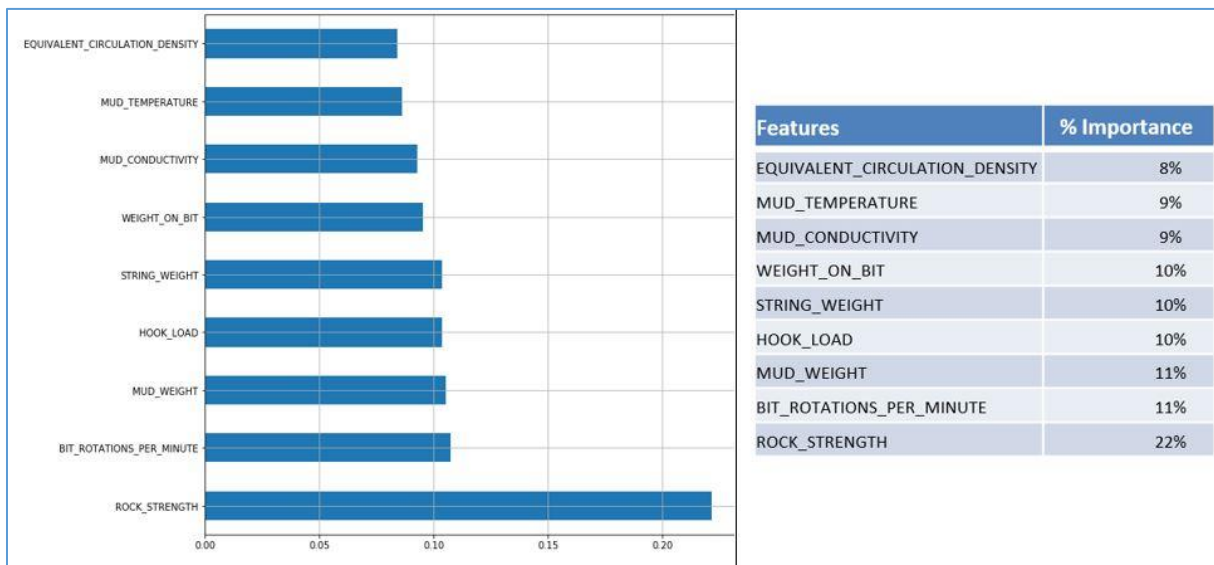


Abbildung 13: ROP-Vorhersage Model – Feature Importance

- Weight on Bit (WOB) Prediction Model:  
Die Bewertungsmatrix verschiedener Algorithmen des maschinellen Lernens für das WOB-Vorhersagemodell ist in der Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 14: WOB-Vorhersage Model – Bewertungsmatrix

Die Abbildung zeigt deutlich, dass der Machine Learning-Algorithmus „Extra Trees“ den niedrigsten „Mean Absolute Error“ (MAE) und „Mean Squared Error“ (MSE) sowie den höchsten R2-Score für das WOB-Vorhersagemodell aufweist. Dies beweist, dass dieser bestimmte Algorithmus am besten für die Vorhersagen des WOB geeignet ist.

Die Ergebnisse der WOB-Vorhersagen im Vergleich zu den tatsächlichen WOB-Werten des Trainings-/Validierungsdatensatzes der erfassten Daten im Zusammenhang mit dem finalisierten ML-Modell sind in der Abbildung 15 dargestellt.

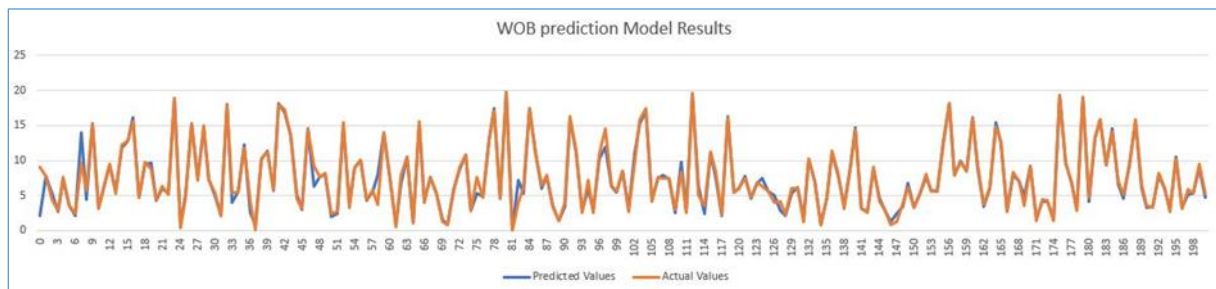


Abbildung 15: WOB-Vorhersage Model – Validierungsergebnisse

In der obigen Abbildung repräsentiert die blaue Linie die vorhergesagten WOB-Werte aus dem Validierungsdatensatz der erfassten Daten, während die orangefarbene Linie die tatsächlichen WOB-Werte des Validierungsdatensatzes darstellt. Es ist ersichtlich, dass die vorhergesagten WOB-Werte, die vom ML-Modell generiert wurden, eng mit den tatsächlichen Werten übereinstimmen und das gleiche Verhalten und Muster widerspiegeln. Die Ergebnisse zeigen eine große Nähe und unterstreichen die Effizienz des ML-Modells.

Abbildung 16 zeigt die Bedeutung der Daten-Eigenschaften (Feature Importance) im WOB-Vorhersagemodell des finalisierten ML-Modells. Ganz offensichtlich und nicht überraschend ist die Gesteinsfestigkeit hier der dominante Faktor.

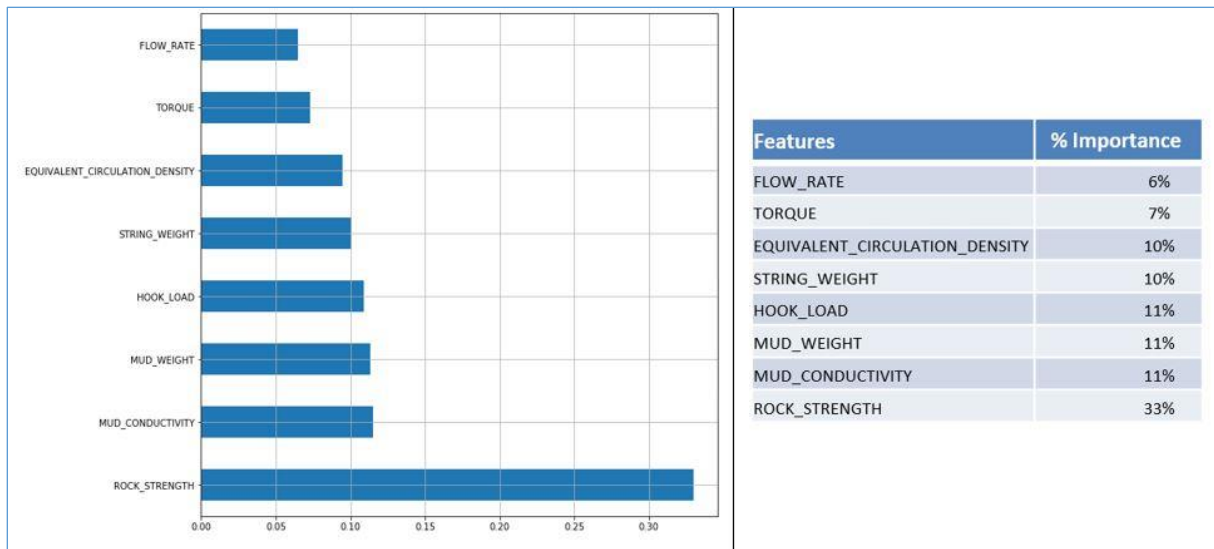


Abbildung 16: WOB-Vorhersage Model – Feature Importance

- Equivalent Circulation Density (ECD) Prediction Model:  
Die Bewertungsmatrix verschiedener Algorithmen des maschinellen Lernens für das ECD-Vorhersagemodell ist in Abbildung 17 dargestellt.

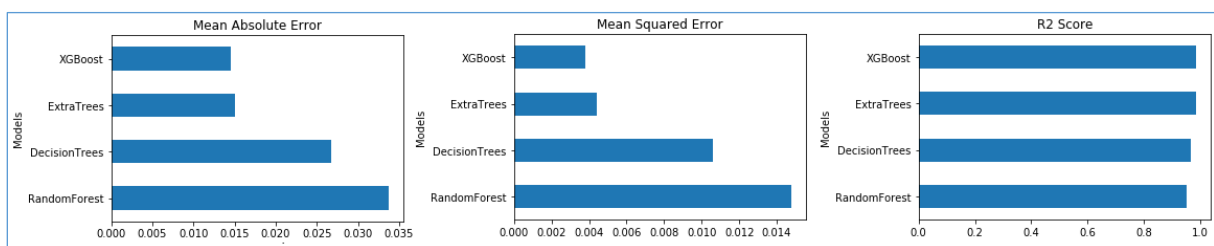


Abbildung 17: WOB-Vorhersage Model – Bewertungsmatrix

Abbildung 17 zeigt deutlich, dass der „XGBoost-Machine-Learning-Algorithmus“ die niedrigsten mittleren absoluten Fehler (MAE) und mittlere quadratische Fehler (MSE) sowie den höchsten R2-Score für das ECD-Vorhersagemodell aufweist. Dies belegt, dass dieser bestimmte Algorithmus am besten für die Vorhersagen des ECD geeignet ist. Die Ergebnisse der ECD-Vorhersagen im Vergleich zu den tatsächlichen ECD-Werten des Trainings-/Validierungsdatensatzes der erfassten Daten im Zusammenhang mit dem finalisierten ML-Modell sind in der Abbildung 18 vergleichend dargestellt.

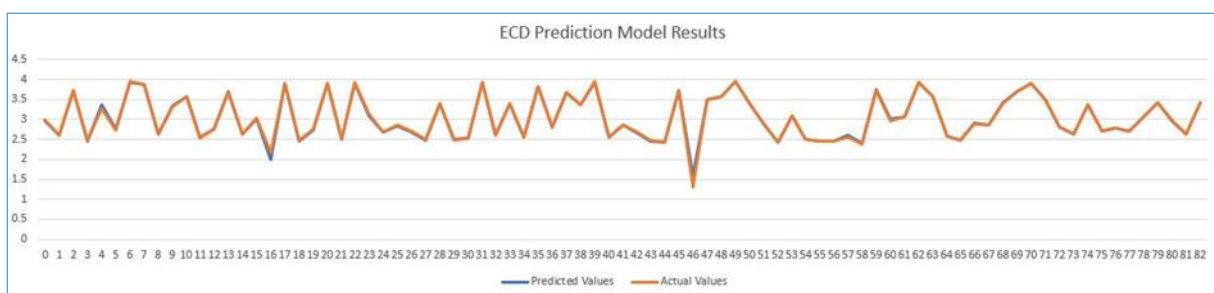


Abbildung 18: ECD-Vorhersage Model – Validierungsergebnisse

In der oben dargestellten Abbildung repräsentiert die blaue Linie die vorhergesagten ECD-Werte, die aus dem Validierungsdatensatz der erfassten Daten stammen, während die orangefarbene Linie die tatsächlichen ECD-Werte des Validierungsdatensatzes zeigt. Die sehr gute Übereinstimmung zwischen den vorhergesagten ECD-Werten, die vom ML-Modell generiert wurden, und den tatsächlichen Werten ist offensichtlich und spiegelt ein konsistentes Verhalten und Muster wider. Diese Ergebnisse zeigen einen bemerkenswerten Grad an Nähe und unterstreichen die Effizienz des ML-Modells.

Die dargestellte Grafik (Abbildung 19) verdeutlicht die Relevanz der Feature Importance im ECD-Vorhersagemodell des finalisierten ML-Modells.

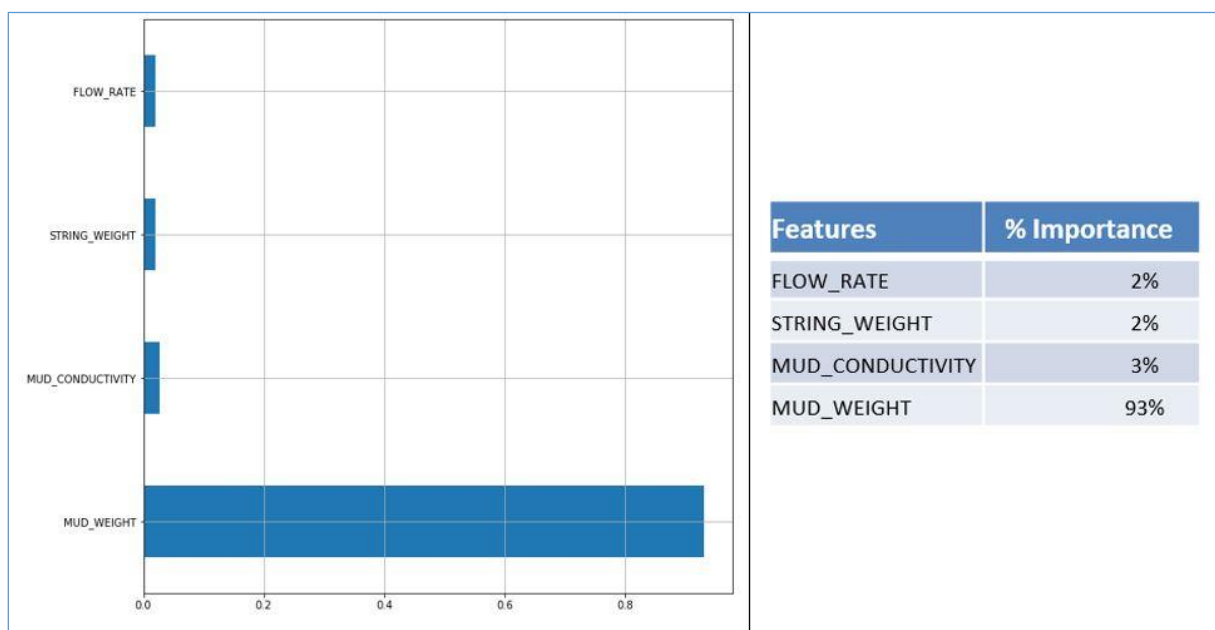


Abbildung 19: ECD-Vorhersage Model – Feature Importance

Ganz offensichtlich ist das Spülgewicht (mud weight) von ausschlaggebender Bedeutung.

Die oben genannten Ergebnisse validieren die Machine-Learning-Modelle anhand des Testdatensatzes der erworbenen Daten gemäß der Zielsetzung dieses Arbeitspakets. Diese Modelle wurden anschließend im nächsten Arbeitspaket durch die Verarbeitung im Software-Simulator weiter validiert.

### 1.3 Entwicklung der echtzeitfähigen Simulator-Modelle (TP 3)

Die vor dem Upgrade im DSC verfügbare Version des DrillSIM-600 (Abbildung 20) konnte zwar Bohroperationen in Echtzeit simulieren. Für sinnvolle Planungs- und Forschungszwecke war sie jedoch nicht nutzbar, da die Prozesse im Untergrund nicht realistisch dargestellt wurden. Diese Bestands-Konfiguration war in erster Linie für die Schulung von Personal in bohrtechni-



schen Einrichtungen konzipiert, um Handhabung und Betrieb von oberirdischen Bohrausrüstungen zu erlernen, wobei der Schwerpunkt auf einer standardisierten Bohrlochkontrolle und Sicherheit gegen „Blowouts“ lag. Dabei wurden Bedienelemente und Funktionen verwendet, die dem tatsächlichen Arbeitsplatz eines Bohrarbeiters sehr ähnlich sind.



Abbildung 20: DrillsIM:600 - Setup

Abbildung 20 zeigt die Anordnung des DrillsIM:600 am DSC, wobei der große Bildschirm, der aus einer Kombination von acht einzelnen Bildschirmen im Hintergrund besteht, welches detailliert den Bohrstandort anzeigen kann, einschließlich der Bohranlage, des „Mud pit“, des Pumpenraums sowie des „Rig floors“, der auf dem oben gezeigten Bild ebenfalls zu sehen ist. Zusätzlich gehören die beiden PC-Bildschirme auf der linken Seite zur Instruktorstation, auf der die Simulationsumgebung eingerichtet werden kann (wie in Abschnitt 1.4.2 erläutert). Die beiden Bildschirme auf der rechten Seite sind Teil der Instruktorstation, um die Bohrsimulation in Szene zu setzen und zu überwachen.

Der Arbeitsplatz oder, anders ausgedrückt, die Kontrollstation des Bohrmeisters ist unten in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt. Dieser „Drillers Chair“ ermöglicht es dem Benutzer, den gesamten Bohrsimulationsprozess ähnlich wie der Bohrmeister in einer tatsächlichen Bohranlage zu steuern. Einige der einstellbaren Variablen sind die Geschwindigkeit des Top Drive, die Pumpengeschwindigkeit, das Bewegen des Bohrgestänges, um beispielsweise das

WOB zu kontrollieren, und vieles mehr. Darüber hinaus kann die Bohrsimulation auch automatisiert werden, indem das „Field of Control“ (FOC) verwendet wird, bei dem bestimmten Bohrparameter konstant gehalten werden können.



Abbildung 21: DrillSIM:600 – Drillers Chair



Abbildung 22: DrillSIM:600 – Drillers Chair

Zur Beschreibung der Untergrundprozesse wurden stark vereinfachte Modelle verwendet, da ein hohes Maß an Detailreichtum und Präzision für das Übertagetraining nicht erforderlich waren. Zwar ermöglichten diese einfachen Modelle eine hohe Ausführungsgeschwindigkeit; die Genauigkeit und Realitätstreue der Simulationsergebnisse litten jedoch erheblich aufgrund der übermäßig simplifizierten Darstellung der Untergrundaktivitäten. Infolgedessen war eine realistische Bohrlochplanung unter Einbeziehung aller geologischen und geometrischen Parameter unmöglich. Daher war eine Erweiterung der Funktionalität des Simulators mit verbesserten Modellen erforderlich. Im Rahmen dieses Projekts wurde die Fähigkeit des Software-Simulators zur Erzeugung einer realistischeren und genaueren Untertage-Bohrumgebung geschaffen, ohne die Ausführungsgeschwindigkeit zu beeinträchtigen. Die Implementierung von Modellen bestimmter Bohrphänomene, die den Bohrprozess beeinflussen, über die API des Simulators, erlaubt eine detailliertere Analyse des Bohrprozesses auf Grundlage der entwickelten und eingebrachten Beschreibungsmodelle.

Der Hersteller der DrillsIM:600, Drilling Systems, bot ursprünglich kein Upgrade für die Unterstützung der geplanten Forschungen im Bereich der geothermischen Bohrungen an. Daher war eine Beauftragung und enge Zusammenarbeit zwischen Drilling Systems und dem Drilling Simulator Celle erforderlich, um dieses Problem zu lösen. Die umfangreiche Planung zur Schaffung eines neuen Systems für den Software-Simulator erwies sich im Verlauf der Arbeiten als deutlich komplexer als zunächst angenommen. Dazu gehörte die Entwicklung eines völlig neuen Betriebssystems, um die aktualisierte Schnittstelle für die Anwendungsprogrammierung (API) zu unterstützen, sowie die Simulationsgrafik, um die Bohrumgebung genauer zu beobachten. Hierfür mussten neue Modelle entwickelt werden, um ein noch realistischeres Bohrverhalten darzustellen. Während des Prozesses zur Verbesserung der Fähigkeiten des DrillsIM:600 wurde unerwartet festgestellt, dass die vorhandene Hardware das neue System nicht unterstützte. Infolgedessen wurden die bestehenden acht Server durch neue ersetzt (Abbildung 23), und ein weiterer Computer wurde der Instruktoren-Station hinzugefügt, um die Erstellung der Bohrumgebung zu unterstützen. Obwohl der Austausch der Hardware nicht im Auftrag an Drilling System enthalten war, konnte die neue Hardware dank der intensiven Zusammenarbeit und den guten Beziehungen zwischen Forschungsstelle und Hersteller kostenfrei von diesem bezogen werden.





*Abbildung 23: DrillSIM:600 – Neue Server*

Die Arbeiten am Upgrade des DrillSIM:600 waren so komplex, dass sie als eigenständiges Projekt kategorisiert werden könnten. Alle Mitarbeiter im OBE-Projekt investierten erheblichen Zeitaufwand und bohrtechnische Expertise, um die Entwicklung der neuen Software-Funktionalität bei Drilling Systems zu unterstützen. Während des gesamten Prozesses wurden regelmäßige Besprechungen abgehalten, und es wurden monatliche Fortschrittsberichte von beiden Seiten geteilt. Intensive Zusammenarbeit und harte Arbeit beider Teams über einen Zeitraum von vier Jahren waren die Grundlagen für den technologischen Durchbruch des DrillSIM:600 und die Entwicklung eines einzigartigen Simulators für geothermisches Bohren.

Da der technische Aufwand zur Verbesserung des Software-Simulators größer und komplexer war als ursprünglich angenommen, konnte eine Verzögerung dieses Prozesses gegenüber der früheren Planung nicht vermieden werden. Es waren eine vollständige Systemänderung sowie neue Hardware erforderlich, wie zuvor erwähnt. Abgesehen davon hat auch die COVID-19-Pandemie erheblich zur Verzögerung beigetragen, da die neue Hardware aufgrund von Lieferkettenproblemen nicht wie geplant geliefert und installiert werden konnte. Darüber hinaus trugen Reisebeschränkungen ebenfalls zur Verzögerung bei und behinderten geplante vor Ort

Besprechungen, die effektiver gewesen wären und den Modellierungs- und Grafikteil des Upgrades beschleunigt hätten.

In der Summe hat das Ergebnis des Upgrades einen deutlich höheren Wert als das an den Hersteller gezahlte Auftragsvolumen, da hier Mehrleistungen des Lieferanten sowie erhebliche Zuarbeit der internen Forschungsgruppe angefallen sind. In der fertiggestellten Version können neue Modelle implementiert, bestehende verbessert und geothermische Bohrprozesse realitätsnäher simuliert werden. Darüber hinaus wurde durch die Entwicklung der OPC-UA-Schnittstelle eine Verbindung mit dem Hardware-Simulator am DSC erstellt, die die Echtzeitdatenübertragung implementiert. Dies eröffnet die Möglichkeit, den DrillSIM:600 mit einer tatsächlichen im Betrieb befindlichen Bohranlage zu verbinden und die in Echtzeit übertragenen Bohrdaten für die Simulation im Software-Simulator zu nutzen. Die Kombination aus realistischer Simulation geothermischer Bohrungen unter Verwendung tatsächlicher Bohrdaten von laufenden Bohroperationen und der Fähigkeit des Simulators, die Simulationsgeschwindigkeit zu erhöhen, ermöglicht die frühzeitige Erkennung potenzieller Bohrprobleme. Dies führt zu gezielten präventiven Maßnahmen und hilft, geothermische Bohroperationen zu optimieren.

### **1.3.1 Ertüchtigung der API für erweiterte Anforderungen**

Die Entwicklungsumgebung oder Schnittstelle zum Kern des Software-Simulators ist das von Drilling Systems bereitgestellte Application Programming Interface (API). Dieses API definiert, welche Eingabe- und Ausgabeparameter möglich sind. Die Hauptfunktion des API besteht darin, eine externe Kommunikation mit dem DrillSIM:600 herzustellen, sodass entwickelte mathematische Modelle implementiert werden können, um bestehende Modelle zu verbessern oder zu ersetzen. Die API kann vorhandene Parameter lesen und schreiben sowie Automatisierungsalgorithmen implementieren und testen.

Die Kommunikation zwischen dem DrillSIM:600 und der API-Workstation war anfangs erheblich eingeschränkt, da es zunächst keine Zugriffsoption für bestimmte Parameter und erstellte Modelle gab, die im Rahmen des vergebenen Auftrags vom Hersteller Drilling Systems entwickelt werden mussten. Darüber hinaus waren auch bestimmte Änderungen an der Kern-Software erforderlich. Die genauen Spezifikationen der Änderungen wurden in den frühen Phasen des Projekts in Zusammenarbeit zwischen dem DSC und Drilling Systems festgelegt. Die Implementierung der während dieses Projekts erstellten Modelle war weitgehend von der Leistung und der Bereitstellung der aktualisierten Version des DrillSIM:600 abhängig. Einige der zusätzlichen Module, die erforderlich waren, um die entwickelten Modelle auszuführen, konnten nur vom Hersteller erstellt werden. Die Implementierung neuer Modelle, die entscheidend für die Erstellung eines realistischeren Bohrplanungssystems zur Durchführung komplexer Echtzeit-Geothermie-Bohrsimulationen waren, war ohne diese zusätzliche Funktionalität nicht möglich.

Die verbesserte Version der API optimierte die Kommunikation mit dem DrillSIM:600, wodurch die Simulation und Einbindung neuer Modelle sowie die Verknüpfung von zwei oder mehr Modellen möglich wurden. Diese Anwendung erzeugt präzisere und realistischere Echtzeit-Bohrsimulationsergebnisse, die dazu dienen, Bohrvorgänge und verschiedene Bohrlochphänomene genauer zu untersuchen.

Das Upgrade der API in Zusammenarbeit mit Drilling Systems führte zu den folgenden neuen Modulen:

#### Realistisches Bohrszenario

- Fortgeschrittene Bohrstangenkonfiguration
- Komplexes 3D-Bohrlochpfad-Design
- Fortgeschrittene geologische Einrichtung mit nicht-horizontalen Schichten
- Unterstützung für multilaterale Bohrungen

#### Zusätzliche Forschungsmodelle

- Transport von Bohrklein
- Bewegung des Bohrstranges (axial, lateral, torsional)
- Bohrlochverformung
- Entwicklung von Kicks (Zufluss, Migration, Flusscharakterisierung)
- Temperatur-Modell
- Fortgeschrittene Anpassung von Bohrspülung Eigenschaften

Die oben genannten Module ermöglichen eine Verbesserung der Fähigkeit, detailliertere Informationen oder Daten bei der Simulation des Bohrprozesses zu verwenden. Zusätzlich dazu bietet die aktualisierte API-Version auch einen breiteren Satz von Parametern zur Verwendung oder Manipulation. Dadurch wird die Genauigkeit für realistischere Simulationsergebnisse erhöht. Unten sind Bilder der API Workstation (Abbildung 24) und ein Beispiel der verwendeten API-Workstation (Abbildung 25).

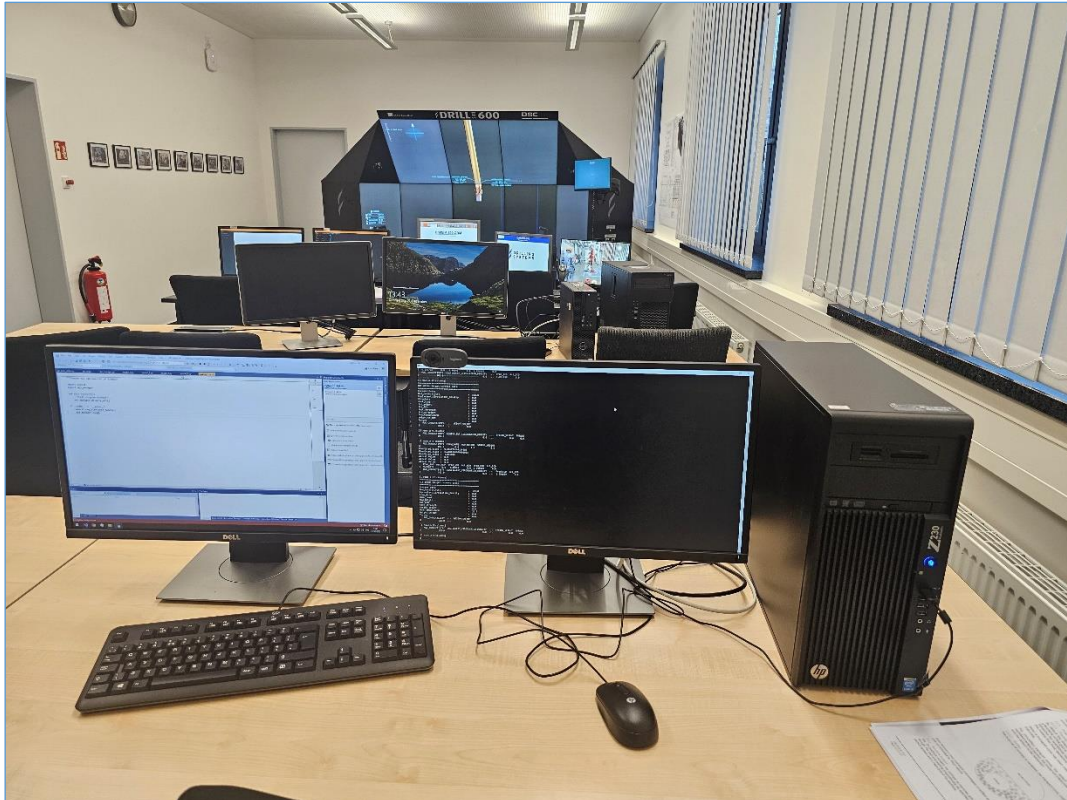


Abbildung 24: API - Workstation

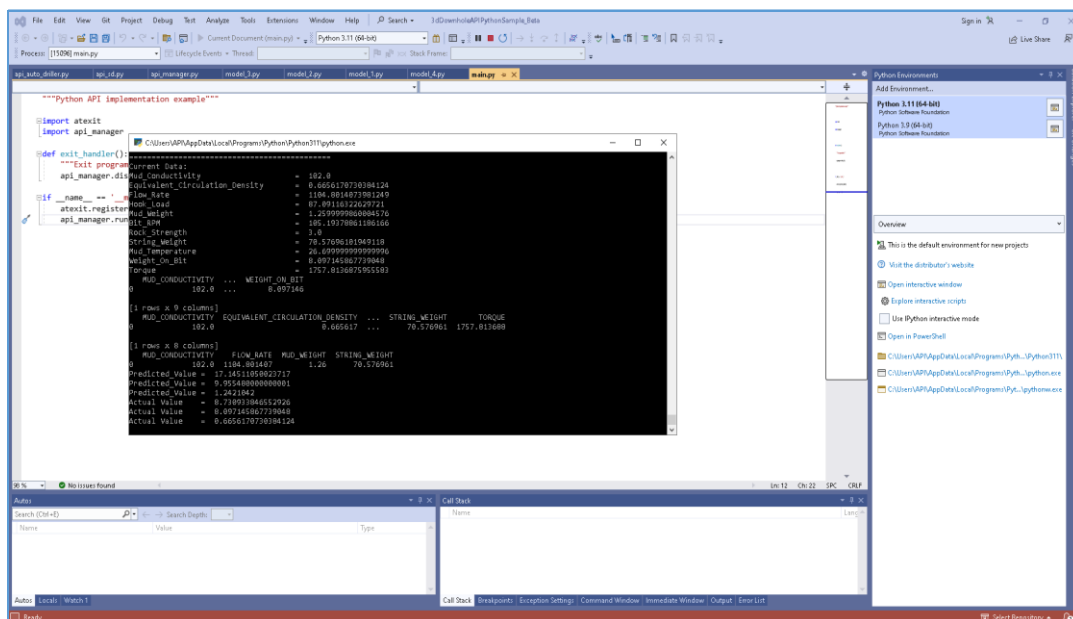


Abbildung 25: API - Bildschirmausgabe während einer Simulation

Insgesamt konnten die ursprünglich in der Projektplanung festgelegten Ziele in diesem Arbeitspaket vollständig erreicht werden. Allerdings erwiesen sich die dabei zu überwindenden technischen Hürden als wesentlich herausfordernder als vorher erkennbar war. Dies bezieht

sich vor allem auf den Umstand, dass nicht nur das API neu aufzubauen war. Vielmehr mussten grundsätzliche Eingriffe in die Hardware und Software der DrillSIM:600 vorgenommen werden. In intensiver Zusammenarbeit mit dem Auftragnehmer Drilling Systems wurde das System am DSC von einer auf das Training von Übertage-Manipulationen fokussierten Anlage auf die Fähigkeit hochentwickelt, realistische Bohrdaten als Eingangs- und Ausgangsgrößen behandeln zu können. Dies war die unabdingbare Voraussetzung für die Implementierung der in der Forschungsstelle geschaffenen Modelle, bzw. die weitere Entwicklung zu einem echten Bohr-Simulator.

### **1.3.2 Vereinfachung von Modellen zur Echtzeit-Fähigkeit**

In diesem Teil des Projekts liegt der Fokus darauf, ein oder mehrere Modelle gleichzeitig in Echtzeit auszuführen. Da einige Modelle, insbesondere maschinelle Lernmodelle, eine hohe Datenkomplexität aufweisen, konnte das für die Ausführung der Simulation verantwortliche System die Geschwindigkeit beim Echtzeitbetrieb der Modelle erwartungsgemäß nicht aufrechterhalten. Es war daher notwendig, die Modelle ausreichend zu vereinfachen, um sie im Software-Simulator gleichzeitig verwenden zu können. Daher wurden die Modelle vereinfacht, um die unnötige Komplexität zu entfernen. Abhängig davon, wie das Modell aufgebaut ist, werden verschiedene Methoden verwendet, um die Modelle zu vereinfachen, wie:

- Berücksichtigung einer datengetriebenen Beschreibung von mathematischen Funktionen, die in einfacher mathematischer Form mit wenigen Parametern beschrieben werden können.
- Berücksichtigung von Prozessen, die nur geringen oder keinen Einfluss auf die Performance des Modells haben.
- Vermeidung einer zu großen Anzahl an Zustandsvariablen
- Behebung einer effizienten Implementierung

Zusätzlich wurden folgende technische Maßnahmen ergriffen, um die Echtzeittauglichkeit der Modelle zu erreichen:

- Multithreading: Manche Aufgaben können in mehrere Teilaufgaben zerlegt werden, die parallel abgearbeitet werden. Einer dieser parallel ausgeführten Vorgänge wird dabei als Thread bezeichnet. Diese Vorgehensweise wird als Multithreading bezeichnet und dient der effizienten Auslastung aller in modernen CPUs vorhandener CPU-Kerne.
- OpenMP: Dies ist ein API für die Erstellung von portablen und skalierbaren Anwendungen. Es verwendet zum Datenaustausch das sogenannte Shared Memory.



- AMD µProf: Es handelt sich hier um ein Werkzeug des CPU-Herstellers AMD zur Messung der Performance von unter Windows und Linux laufenden Anwendungen. Es erlaubt Entwicklern, die Ausführungsgeschwindigkeit ihrer Anwendung besser zu verstehen und zeigt Wege zu deren weiterer Optimierung auf.
- GPU Computing/CUDA: Viele gut parallelisierbare Algorithmen können durch die vielen in Grafikkarten verbauten Kerne erheblich beschleunigt werden. CUDA ist dabei das bevorzugte API zur Ausführung von Berechnungen auf NVIDIA-Grafikkarten.
- AMP C++: Accelerated Massive Parallelism ist ein natives Programmiermodell, das Elemente enthält, die sowohl die C++ Programmiersprache als auch ihre Laufzeitbibliothek betreffen. AMP C++ vereinfacht das Schreiben von Programmen, die auf datenparalleler Hardware wie Grafikkarten kompiliert und ausgeführt werden können.

Verschiedene Optimierungstechniken wurden angewendet, um die Effizienz entwickelter Modelle zu verbessern. Diese Methoden umfassten das Profiling des Programms und die Nutzung von Grafikkarten. Ein Vergleich wurde zwischen einer Implementierung des „Advanced Temperature Models“ auf der CPU und einer Gegenüberstellung auf der Grafikkarte durchgeführt. Der Code wurde in C++ verfasst, um die Nutzung der CUDA-API für Grafikkarten zu ermöglichen.

Die Berechnungen auf der Grafikkarte begannen mit der Zuteilung von Grafikspeicher. Anschließend wurde dieser Speicher mit Berechnungsdaten von der CPU gefüllt, und der Kernel wurde aufgerufen, um die gewünschten Operationen auszuführen. Im letzten Schritt wurden die Ergebnisse zurück auf die CPU kopiert.

In der weiteren Entwicklung des Codes wurde die cuBLAS-API verwendet, die eine Implementierung zur Lösung linearer Gleichungen auf Basis der CUDA-Runtime ist. Diese bietet auch Hilfsfunktionen zum Schreiben und Empfangen von Daten von der Grafikkarte.



Abbildung 26: DrillSIM:600 Graphics – Darstellung der parallelen Simulation von mehreren Modellen

Das obige Bild (Abbildung 26) veranschaulicht beispielhaft die neue Funktionalität des DrillSIM:600, verschiedene Modelle gleichzeitig während einer Bohrsimulation auszuführen. Hier werden Bohrlochverformung, Bohrkleintransport, Kick und das Bohr-Modell gleichzeitig ausgeführt und sind grafisch wie oben dargestellt sichtbar.

### 1.3.3 Implementierung und Validierung der Echtzeit-Modelle durch neu erstellte Testszenarien

Nachdem die Modelle in den zuvor genannten Teilprojekten entwickelt worden waren, erfolgte ihre Implementierung an der API-Workstation des DrillSIM:600. Zur Validierung dieser Modelle wurden spezifische Testszenarien erstellt, die die typischen Anwendungsfälle der Modelle abdecken.

#### 1.3.3.1 Numerisches Modell

Das entwickelte Temperaturmodell kann die Temperaturentwicklung im Bohrloch untersuchen und analysieren. Dies wird erreicht durch Berücksichtigung verschiedener Parameter, wie die Temperatur und die Eigenschaften der zirkulierenden Flüssigkeit, die Größe und Wandstärke der Rohre im Bohrloch („Drillpipe“ und „Casing“) sowie die Temperatur der umgebenden Formation. Darüber hinaus ist auch der Wärmeaustausch zwischen der Flüssigkeit, den Rohren, und der Formation in die numerische Berechnung einbezogen.

Für das Temperaturmodell wurden die mathematischen Gleichungen und der Lösungsalgorithmus in einem Computercode mit C# als Programmiersprache erfasst. Der Code wurde auf der API-Workstation implementiert. Der Algorithmus ruft initiale Daten von der DrillSIM:600 für die Bohrerherstellung wie Bohrerlochdurchmesser, Bohrerstangenkonstruktion, Eigenschaften der Bohrspülung, Formation, und Anfangstiefe auf. Weitere wichtige Parameter, die nicht vom Simulator verfügbar sind, wie die thermischen Eigenschaften des Bohrerstrangs und der Bohrspülung, werden direkt von der API-Workstation über eine grafische Benutzeroberfläche eingestellt (Abbildung 27). Andere Variablen ändern sich im Laufe der Zeit, wie beispielsweise die Durchflussrate, die aktuelle Tiefe und die Drehzahl des Bohrermeißels.

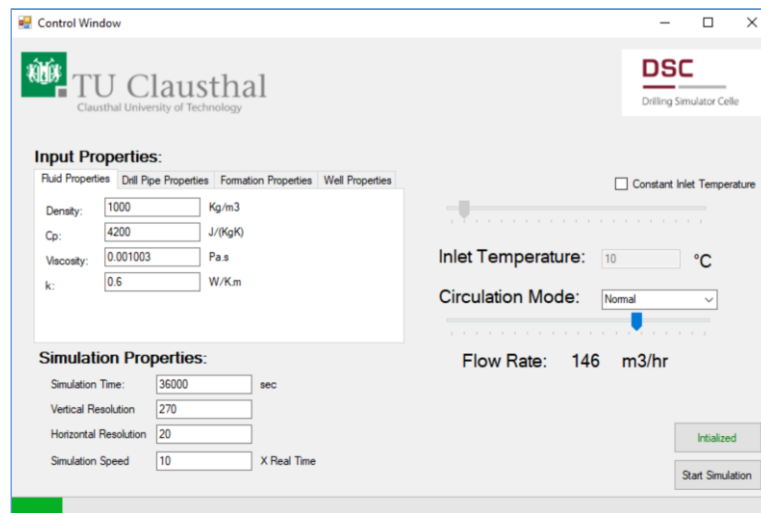


Abbildung 27: Bildschirmfoto vom GUI-Fenster

Ein zweites Fenster erscheint, sobald die Simulation initialisiert ist. Es enthält die grafischen Ergebnisse, wie in Abbildung 28 dargestellt ist. Auf der linken Seite des Fensters wird ein Diagramm mit dem vertikalen Temperaturprofil für die Flüssigkeiten im Rohr und Ringraum sowie die Oberflächentemperatur der Bohrerstange zusammen mit der initialen geothermischen Temperatur angezeigt. In der Mitte repräsentiert ein Farbkonturdiagramm die Temperaturfunktion in Abhängigkeit von der Tiefe, dem radialen Abstand vom Bohrerlochzentrum und dem zeitlichen Verlauf. Auf der rechten Seite oben befindet sich das radiale Temperaturprofil an der vom Benutzer angegebenen Tiefe. In der Mitte werden die Einlass- und Auslass temperatur als Funktion der Zeit präsentiert, und schließlich werden unten die aktuelle Gesamttiefe und die Durchflussrate angezeigt.

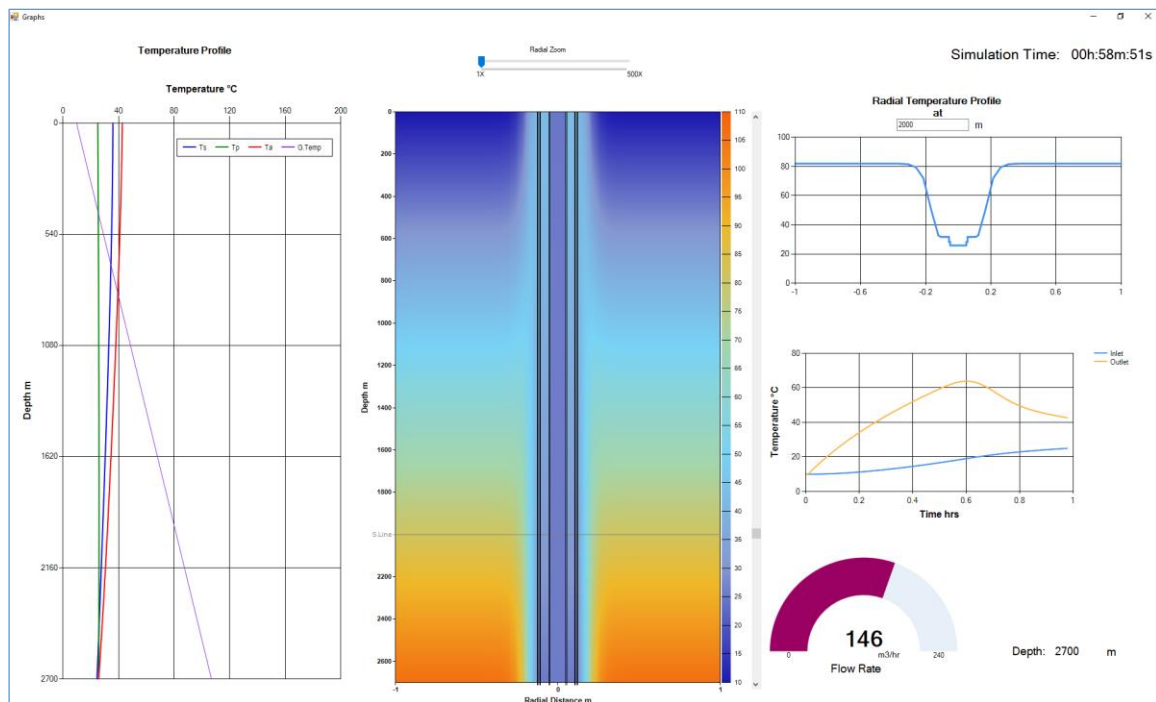


Abbildung 28: Grafische Ergebnisse der Temperatur-Simulation

Das auf der API-Workstation ausgeführte Modell berechnet die Temperatur des Bohrlochsystems in jedem Zeitschritt anhand der eingeführten bohrbetrieblichen Parameter, die vom Simulator bereitgestellt wurden. Die Temperaturentwicklung aus der Simulation wird gleichzeitig in Echtzeit an den Simulator zurückübertragen.

Ursprünglich verfügte der Simulator nicht über ein Temperaturmodul. Im Verlauf des Projekts wurde jedoch dieses Modell erfolgreich in den DrillSIM:600 integriert.

Zusätzlich zu den physikalischen Modellen wurden in diesem Teilprojekt auch verschiedene Maschinelles Lernen Modelle Implementiert. Diese werden unten näher erläutert.

### 1.3.3.2 Maschinelles Lernen Model

In diesem Abschnitt erfolgte die Implementation von Machine-Learning-Modellen in den DrillSIM:600 über das API. Die API-Workstation bietet die Python-Programmierschnittstelle, über die die maschinellen Lernmodelle in den Software-Simulator integriert wurden. Die trainierten maschinellen Lernmodelle für das ROP-, WOB-, und ECD-Vorhersagemodell wurden als „Pickle-Dateien“ gespeichert. Diese „Pickle-Dateien“ enthalten alle notwendigen Informationen über das entsprechende maschinelle Lernmodell. Die Modelldateien wurden in das API importiert. Der Algorithmus wurde so konzipiert, dass Informationen über die erforderlichen Eingaben aus dem Software-Simulator in Echtzeit in das API übertragen werden. Diese Informationen wurden dann verwendet, um Vorhersagen der Zielvariable zu treffen, und der Prozess setzte sich so fort. Für jedes der maschinellen Lernmodelle wurde ein separates Modul in dem API erstellt. Nachfolgend findet sich eine Liste der in der API-Workstation erstellten Module:

- Modul 1: ROP Vorhersage Model
- Modul 2: WOB Vorhersage Model
- Modul 3: ECD Vorhersage Model
- Modul 4: „Umbrella-Modul“ für alle 3 Modelle des maschinellen Lernens, die zusammenlaufen sollen

Solange die Simulation des Bohrprozesses im DrillSIM:600 abläuft und das API mit dem Zielmodul aktiv ist, setzt sich der Prozess der Echtzeitvorhersage der Zielvariable durch die importierten maschinellen Lernmodelle fort. Die API-Module können bei Bedarf jederzeit gestartet und gestoppt werden.

Der Arbeitsablauf zwischen der API-Workstation und dem DrillSIM:600 ist in Abbildung 29 dargestellt.

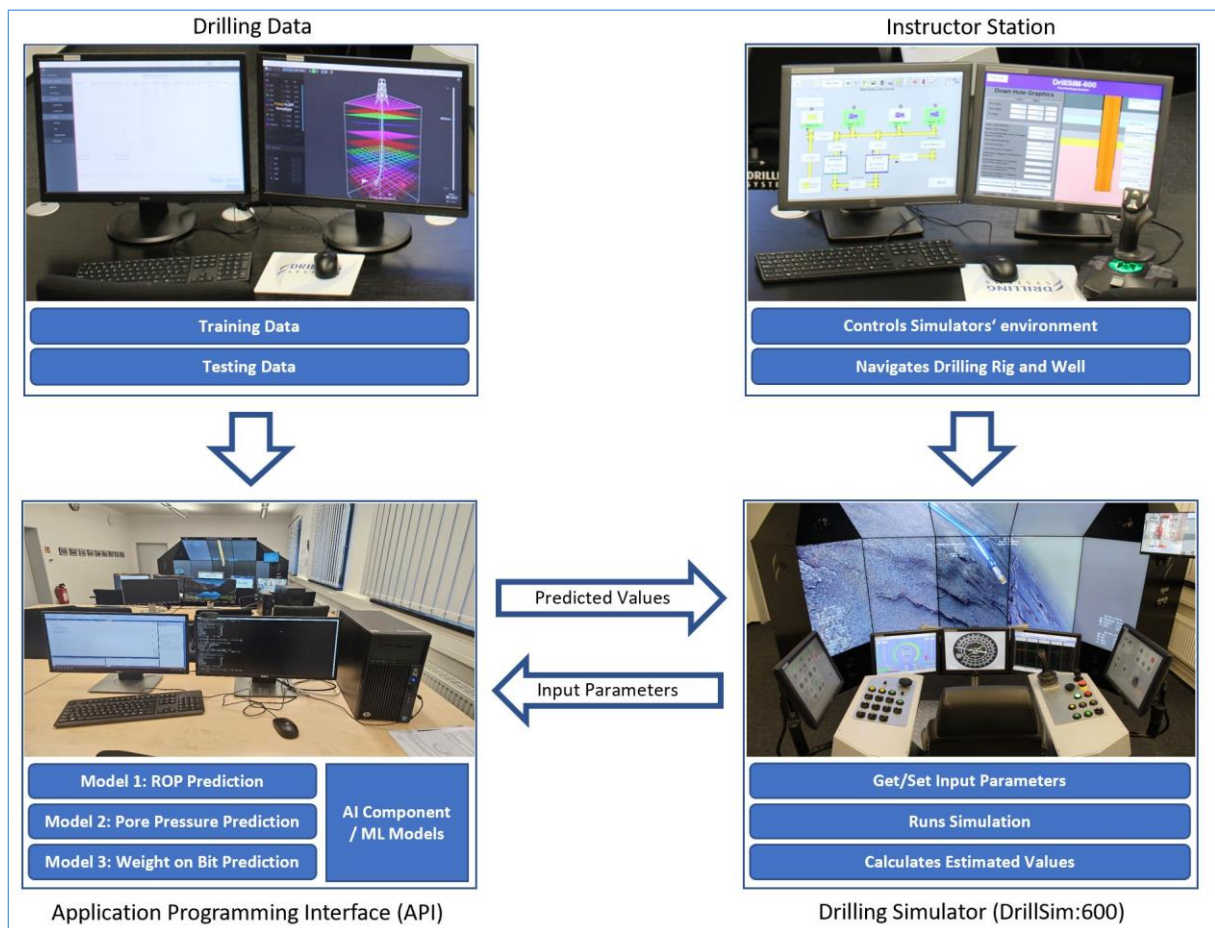


Abbildung 29: Workflow zwischen der API und DrillSIM:600

Wie im obigen Workflow ersichtlich ist, wurden die gesammelten Bohrdaten als Trainingsdaten für das Design der maschinellen Lernmodellen verwendet. Die Modelle wurden dann in die API-Workstation importiert. Die Informationen und Daten bezüglich der Eingabeparameter wurden kontinuierlich zwischen der API-Workstation und dem DrillSIM:600 übermittelt und



ausgetauscht. Die aktuellen Werte der Eingabeparameter wurden zur API-Workstation übertragen, um die Zielvariable mithilfe der maschinellen Lernmodelle zu berechnen. Die resultierenden Parameterwerte wurden dann zurück zur Drill-SIM:600 übertragen und zur laufenden Simulation benutzt. Dieser Prozess dauerte an, solange die Simulation läuft und die API-Module aktiv sind. Die Simulationsergebnisse wurden in Echtzeit als CSV-dateien gespeichert, die dann zur Analyse und Validierung der Ergebnisse verwendet wurden.

In Abbildung 30 (unten) findet man die vergleichende grafische Darstellung von vorhergesagten Werten auf Basis der maschinellen Lernalgorithmen und tatsächlichen Werten aus den physikalischen Modellen, die bereits im DrillSIM:600 implementiert sind. Obwohl die maschinellen Lernmodelle ursprünglich mit den erworbenen GeneSys-Bohrdaten trainiert und getestet wurden, erfolgte die Validierung anhand der Simulationsdaten des DrillSIM:600.

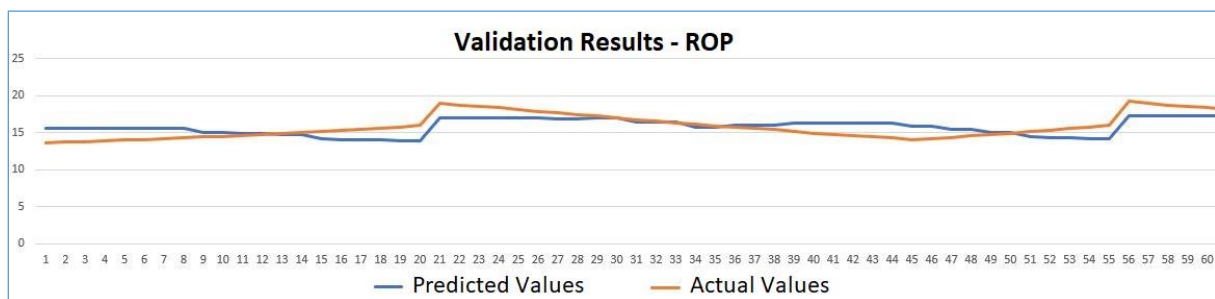


Abbildung 30: ROP-Validierungsergebnisse

Abbildung 30 zeigt einen Vergleich zwischen dem maschinellen Lernen vorhergesagten Werten von ROP (blaue Linie) und den tatsächlichen Werten von ROP aus dem Simulator (orangefarbene Linie). Wie ersichtlich, verlaufen beide Linien eng beieinander. Dies zeigt, dass die maschinellen Lernmodelle funktionieren und dem gleichen Trend und Verhalten wie die physikalischen Modelle des Simulators folgen.

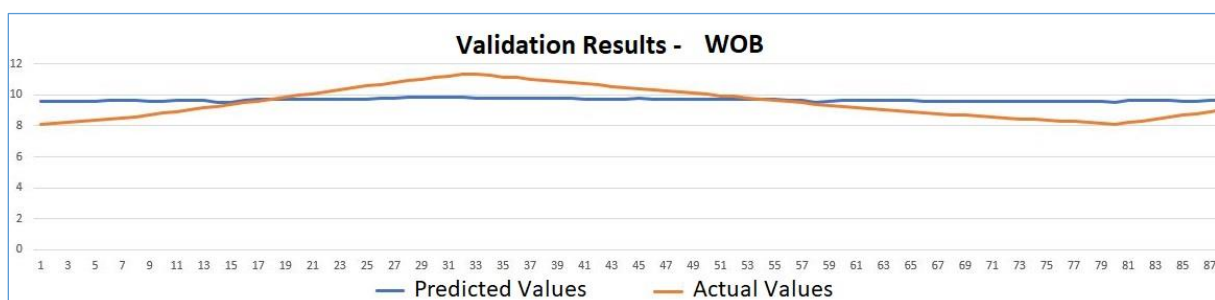


Abbildung 31: WOB Validierungsergebnisse

Für den Fall des Bohrdrucks (WOB) zeigt die Darstellung in Abbildung 31 einen Vergleich zwischen den maschinell vorhergesagten Werten (blaue Linie) und den tatsächlichen Werten aus dem Simulator (orangefarbene Linie). Es ist anhand der eng beieinander verlaufenden Linien zu erkennen, dass die maschinellen Lernmodelle effektiv sind und einen sehr ähnlichen Trend und das gleiche Verhalten wie die physikalischen Modelle des Simulators erfassen.

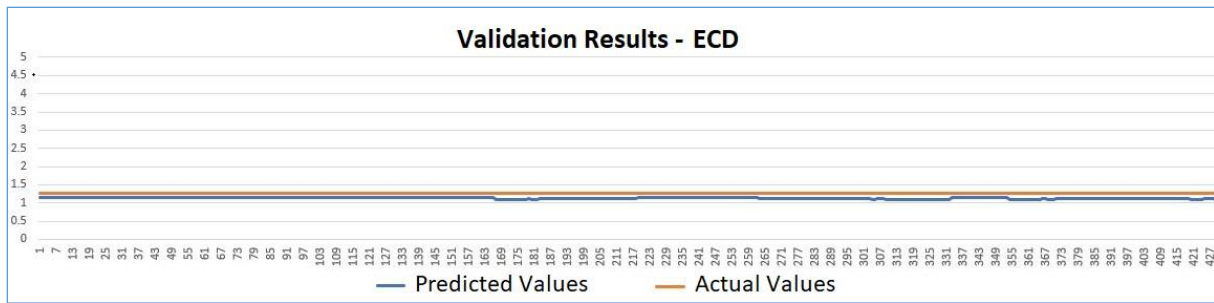


Abbildung 32: ECD-Validierungsergebnisse

Abbildung 32 vergleicht die ML-vorhergesagten ECD-Werte (blaue Linie) mit den tatsächlichen ECD-Werten aus dem Simulator (orangefarbene Linie). Die enge Übereinstimmung dieser Linien ist ein deutlicher Hinweis auf die Effektivität der maschinellen Lernmodelle, da sie genau die gleichen Trends und Verhaltensweisen wie die physikalischen Modelle im Simulator erfassen.

Die oben erwähnten maschinellen Lernmodelle, die im Rahmen dieses Projekts entwickelt wurden, wurden erfolgreich in Drill-SIM:600 implementiert und arbeiten mit hoher Effizienz. Die Modelle des maschinellen Lernens bieten Vorteile gegenüber physikalischen Modellen, da sie sich durch die Erfassung komplexer Muster, die Anpassung an sich ändernde Bedingungen und den Umgang mit nichtlinearen Beziehungen auszeichnen. ML-Modelle liefern datengesteuerte Erkenntnisse, automatisieren die Merkmalsextraktion und lassen sich gut auf neue Szenarien verallgemeinern. Physikalische Modelle mögen zwar einfacher sein, doch ML-Modelle ergänzen sie, indem sie Genauigkeit bieten, ohne sich auf explizite Modellgleichungen zu stützen, und indem sie mit Unsicherheiten in den Daten umgehen. Die Wahl zwischen physikalischen und ML-Modellen hängt von den spezifischen Aufgabenanforderungen und Datenmerkmalen ab.

## 1.4 Simulations-Anwendung für neues Geothermieprojekt (TP 4)

### 1.4.1 Entwicklung und experimentelle Erprobung der OPC-UA-Schnittstelle

Im Rahmen des Projekts sollte es dem Simulator ermöglicht werden, eine Echtzeitkommunikation zu einer Bohranlage aufzubauen. Um diese Schnittstelle nicht nur zu simulieren, sondern auch zu testen, wurde der Bohrtteststand des DSC so aufgerüstet, dass er exemplarisch als Bohranlage über ein Netzwerk mit dem DrillSim:600 kommunizieren kann. Der Teststand ist dabei vorerst als Sender der Nachrichten ausgelegt, der DrillSim:600 ist dementsprechend der Empfänger der Nachrichten. Analog zu dieser exemplarischen Umsetzung kann auch der Datentransfer in umgekehrter Richtung vom DrillSim:600 zur Bohranlage umgesetzt werden.

Die Kommunikation der beiden Teilnehmer DrillSim:600 und Bohranlage erfolgt über ein standardisiertes Protokoll, das den neuesten Kommunikationsspezifikationen der Bohrindustrie

entspricht: OPC Unified Architecture (OPC UA). Es handelt sich hierbei um eine Weiterentwicklung des OPC-Standards der OPC-Foundation. Die Schnittstelle ist als Client-Server Kommunikation ausgelegt, wobei die Bohranlage, in diesem Fall der DSC-Teststand, den Server darstellt und der DrillSIM:600 als Client im Netzwerk eingeschrieben ist. Der Server stellt zyklisch Daten des Teststandes zur Verfügung, welche der Client per Request abfragen kann.

Der Server ist auf dem Leitstandrechner des DSC-Teststandes in LabVIEW implementiert. Abbildung 33 zeigt den Hauptteil der OPC UA Kommunikation. Zuerst wird der Server initialisiert, die verschiedenen Variablen (Fließrate, Drehzahl, Drehmoment, etc.) werden strukturiert angelegt, dann wird der Server gestartet. Es erfolgt das zyklische Schreiben der Variablen. Wenn der Stream beendet wird, z.B., weil der Teststand abgeschaltet wird, erfolgt der Shut-down Prozess, in dem der Server die belegten Netzwerkressourcen wieder freigibt.

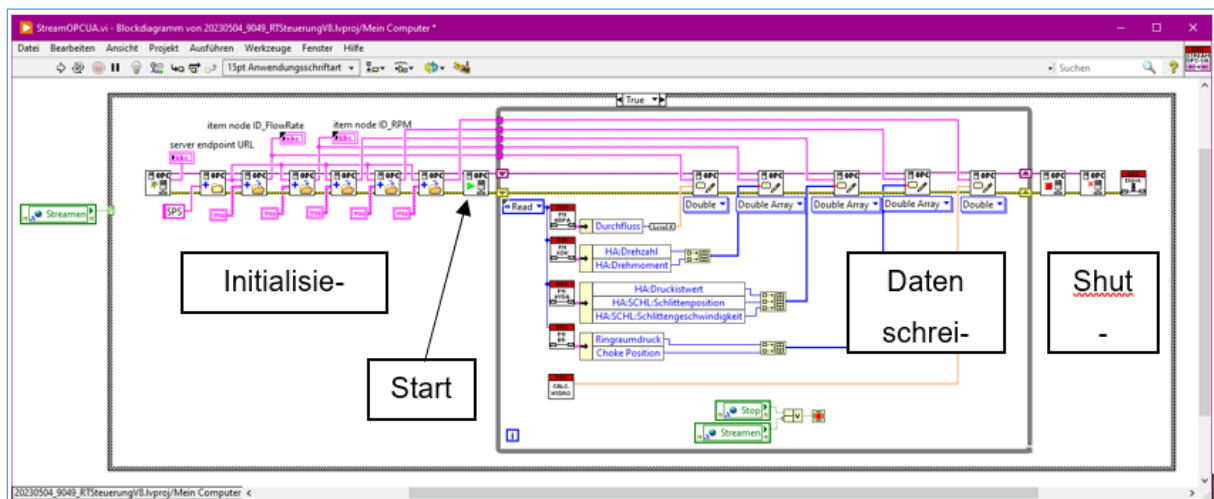


Abbildung 33: OPC UA Sender

Um den Datenstream zu starten, wurde auf dem User Interface des Teststandes ein Bedienelement hinzugefügt, siehe 34.

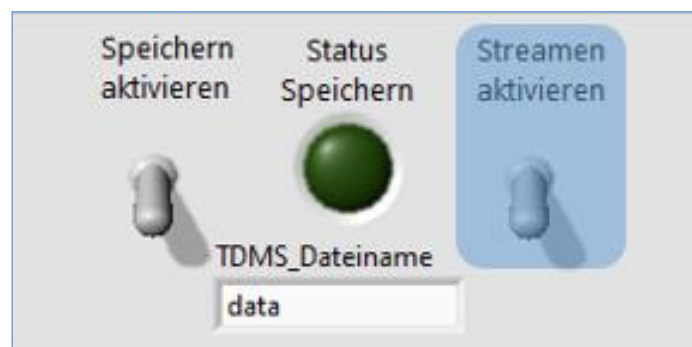


Abbildung 34: Bedienelement auf Monitor 1 der Teststandsteuerung zum Aktivieren des OPC UA Streams (blau hinterlegt)

Die Daten, die vom Server bereitgestellt werden, werden vom DrillSIM:600 abgefragt. Dies erfolgt über einen Python-Code, der auf der API-Workstation des Simulators ausgeführt wird.



Die Umsetzung ähnelt dem Programm auf Serverseite. Der Client wird initialisiert, verbindet sich mit dem Server und fragt dann zyklisch die Daten ab. Sobald das Programm beendet wird, wird auch hier der Client aus dem Netzwerk abgemeldet.

Um diese Datenübertragung zu testen, wurde ein Flowtest am Teststand durchgeführt, in dem Wasser durch den Teststand zirkuliert wurde. Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse des Flowtests. In blau sind die Daten des Teststandes, in orange die übertragenen Daten am DrillSim:600 dargestellt. Erkennbar ist ein Offset in der Zeitebene, sowie ein Unterschied in der Amplitude.

Der zeitliche Versatz ist ein erwartetes Ergebnis des Tests. Er beträgt derzeit noch ca. 30 Sekunden und stellt die Latenz dar, aufgrund der Übertragung im Netzwerk sowie durch die Verarbeitungszeit auf der API-Workstation entsteht. Weiterhin ist der DrillSIM:600 nicht hart getaktet, sodass der Zeitstempel nicht uniform ist (Datenrate fluktuiert zwischen 0,5 und 1 Hz).

Die Unterschiede der Amplitude sind zurückzuführen auf Einheitenumrechnungen (von Strom zu Fließrate) sowie damit einhergehende Ungenauigkeiten der Fließkomma-Zahlendarstellungen auf den verschiedenen Systemen.

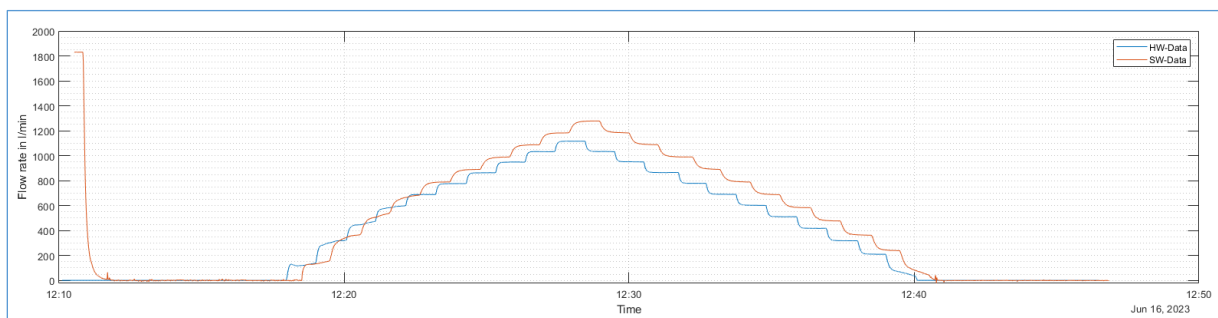


Abbildung 35: Daten Flowtest

Abschließen sei gesagt, dass die Datenübertragung funktionsfähig ist, allerdings weitere Untersuchungen im Bereich der Zahlenformatierung notwendig sind. Sofern die Daten in ausreichend langsamer Geschwindigkeit übertragen werden sollen, spielt die Fluktuation des zeitlichen Ablaufes auf der API-Workstation keine Rolle. Sollten hier deterministisch getaktete Datenströme erwartet werden, z.B. für die Nutzung in Modellen oder - in umgekehrter Richtung – zur dynamischen Steuerung von Bohranlagen, so ist das Timing im DrillSIM:600 verschärft zu überwachen und zu untersuchen.

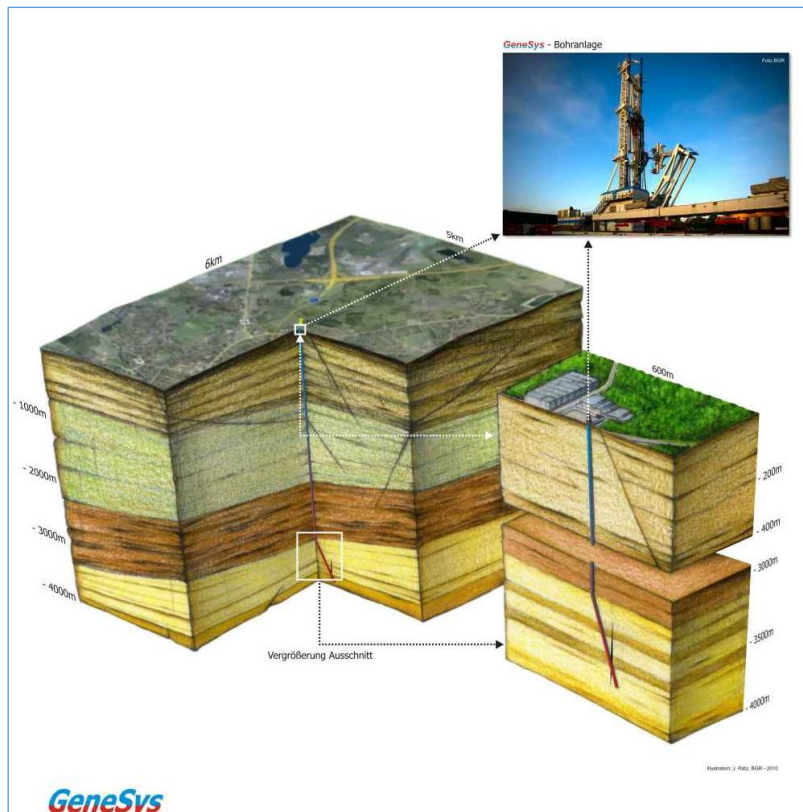
Für die Durchführung der parallelen Simulation während einer laufenden Bohroperation war dieses zusätzliche Arbeitspaket erforderlich. Das Ziel dieses Arbeitspakets wurde weitgehend erreicht, indem eine OPC-UA-Verbindung zwischen dem Hardware- und Software-Simulator hergestellt wurde und so ein erfolgreicher und funktionaler Echtzeit-Datentransfer ermöglicht wurde.

#### **1.4.2 Vorbohren des Bohrloches für Optimierung und Training**

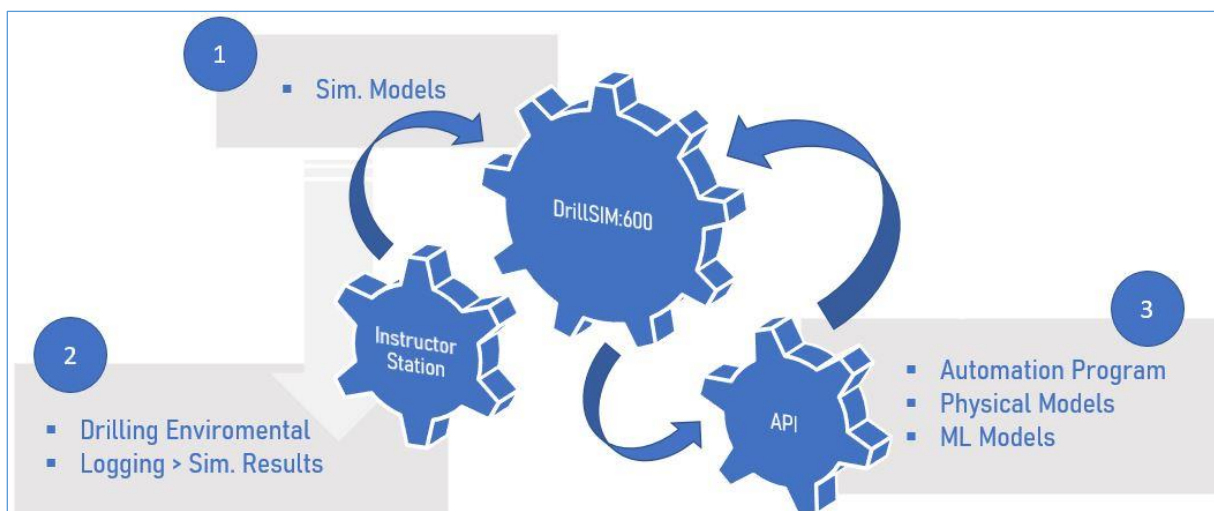
In diesem Abschnitt des Projekts wurden Bohrsimulationen durchgeführt, und es wurde eine Echtzeit-Datenübertragung über die OPC-UA-Schnittstelle zwischen dem vorhandenen Hardware-Simulator am DSC und dem DrillSIM:600 für die Durchführung der Simulationen ermöglicht. Der Software-Simulator (DrillSIM:600) am Drilling Simulator Celle, entwickelt und hergestellt von Drilling Systems, UK, bildet eine authentische Bohrumgebung in Echtzeit ab, einschließlich einer Landbohranlage und ihrer Oberflächen- sowie unterirdischen Werkzeuge. Der Simulator kombiniert 3D-Oberflächen- und Bohrlochgrafiken mit realistischen Geräuschen der Bohranlage, um dem Benutzer eine praxisnahe Lernerfahrung zu bieten.

Um parallele Simulationen während eines laufenden Bohrbetriebs zu ermöglichen, ist es entscheidend, verschiedene Bohrsimulationen (Szenarien) zu erstellen und zu testen. Dies geschieht indem Formationsbedingungen wie Formationsschichten, Formationseigenschaften usw. entworfen und Bohrparameter wie Bohranlage, Bohrstrang, BHA, Trajektorie usw. eingestellt werden. Es besteht auch die Möglichkeit, potenzielle Bohrprobleme einzubeziehen, wie zum Beispiel Verluste, Kick, Bohrstrangvibration. Die Kombination all dieser Faktoren ergibt einen komplexen Bohrvorgang, der in Echtzeit oder mit beschleunigter Simulation simuliert werden kann.

In diesem Kontext wurde ein Bohrszenario erstellt, um realistische Bohrumgebungen zu schaffen und komplexe Bohrprozesse in Echtzeit zu simulieren und durchzuführen. Konkret wurde eine bereits abgeteuft Tiefengeothermie-Bohrung nachmodelliert. Dabei wurden Daten von der Genesys-Bohrung (siehe Abbildung 36) verwendet, da diese Daten vollständig und detailliert vorliegen. Die Geothermiebohrung wurde im Jahr 2009 durchgeführt, mit dem Ziel, die Formation des Mittleren Buntsandsteins in einer Tiefe von 3.901 Metern zu erreichen. Die simulierte Sektion in diesem Beispiel erstreckt sich auf den Teufenabschnitt von 1542 bis 1562 Metern.

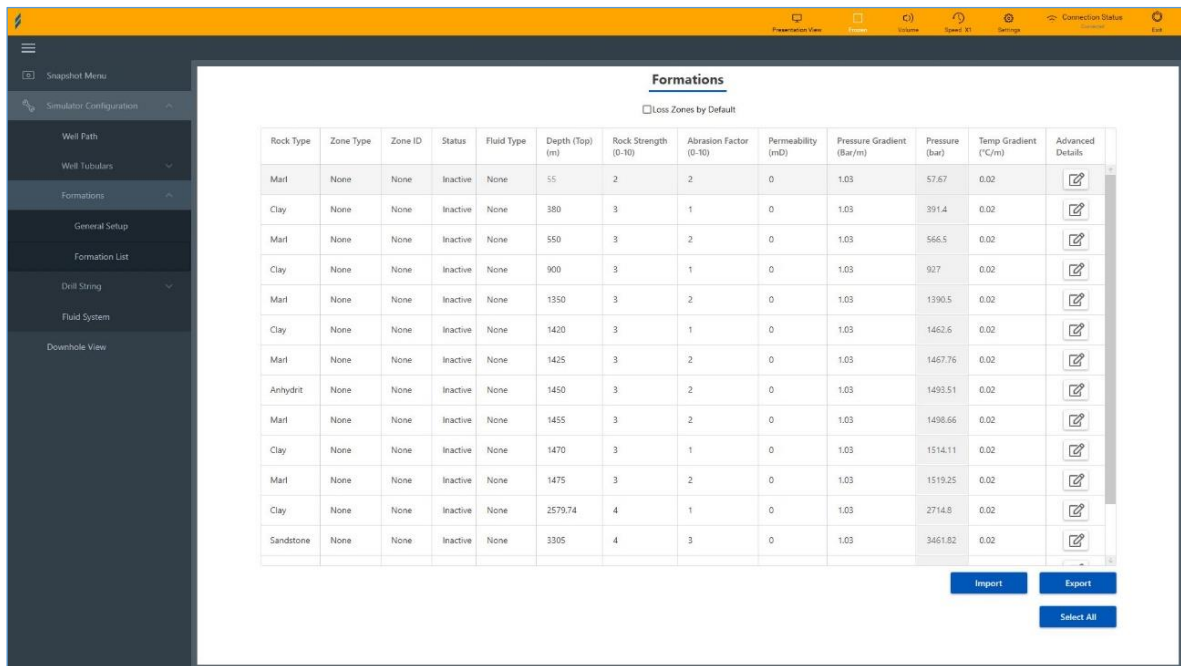


Um die Simulation realistisch zu gestalten, wurden die mit der Bohrung zusammenhängenden Daten in den Simulator bzw. die „Instructor-Station“ eingegeben. Dies wird weiter unten ausführlicher und detaillierter erklärt. Die Methodologie des Szenario-Simulationsprozesses ist unten dargestellt.



Zunächst wurden die Simulationsparameter in der „Instructor-Station“ eingegeben. Hierzu gehören Informationen zur Formation, zum Zirkulationssystem, zur Bohrstrangkfiguration und zum Bohrlochdesign.

Die Eigenschaften jeder Formationsschicht wurden im Formation Editor" eingetragen (siehe Abbildung 38), und das Ergebnis ist als 3D-geologisches Modell in Abbildung 39 zu sehen.



The screenshot shows the 'Formations' tab in the Formation Editor. A table lists 14 geological formations with their properties. The table has columns for Rock Type, Zone Type, Zone ID, Status, Fluid Type, Depth (Top) (m), Rock Strength (0-10), Abrasion Factor (0-10), Permeability (mD), Pressure Gradient (Bar/m), Pressure (bar), Temp Gradient (°C/m), and Advanced Details. The formations are listed in descending order of depth.

Rock Type	Zone Type	Zone ID	Status	Fluid Type	Depth (Top) (m)	Rock Strength (0-10)	Abrasion Factor (0-10)	Permeability (mD)	Pressure Gradient (Bar/m)	Pressure (bar)	Temp Gradient (°C/m)	Advanced Details
Marl	None	None	Inactive	None	55	2	2	0	1.03	57.67	0.02	[Edit]
Clay	None	None	Inactive	None	380	3	1	0	1.03	391.4	0.02	[Edit]
Marl	None	None	Inactive	None	550	3	2	0	1.03	566.5	0.02	[Edit]
Clay	None	None	Inactive	None	900	3	1	0	1.03	927	0.02	[Edit]
Marl	None	None	Inactive	None	1350	3	2	0	1.03	1390.5	0.02	[Edit]
Clay	None	None	Inactive	None	1420	3	1	0	1.03	1462.6	0.02	[Edit]
Marl	None	None	Inactive	None	1425	3	2	0	1.03	1467.76	0.02	[Edit]
Anhydrit	None	None	Inactive	None	1450	3	2	0	1.03	1493.51	0.02	[Edit]
Marl	None	None	Inactive	None	1455	3	2	0	1.03	1496.66	0.02	[Edit]
Clay	None	None	Inactive	None	1470	3	1	0	1.03	1514.11	0.02	[Edit]
Marl	None	None	Inactive	None	1475	3	2	0	1.03	1519.25	0.02	[Edit]
Clay	None	None	Inactive	None	2579.74	4	1	0	1.03	2714.8	0.02	[Edit]
Sandstone	None	None	Inactive	None	3305	4	3	0	1.03	3461.82	0.02	[Edit]

Buttons at the bottom right: Import, Export, Select All.

Abbildung 38: Instructor Station – Formation Editor

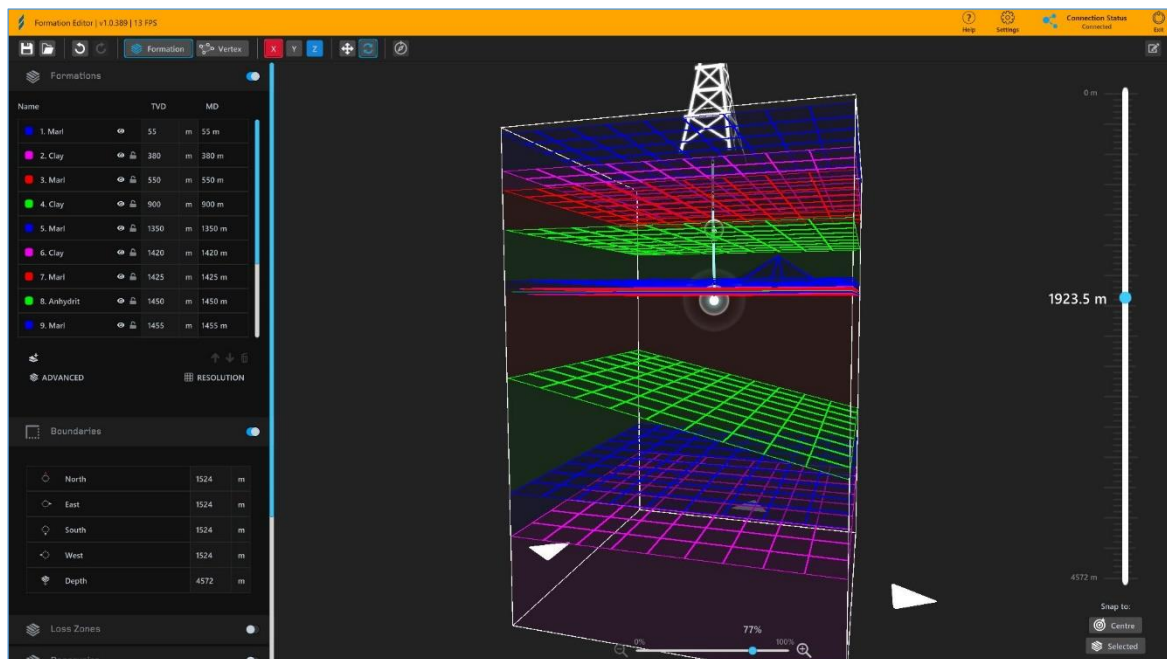


Abbildung 39: Instructor Station – Geologisches Modell

Im zweiten Schritt wird das Zirkulationssystem erstellt. Dies beinhaltet die Eigenschaften der Flüssigkeit, wie den Flüssigkeitstyp, das Modell, die Dichte und die Viskosität. Diese Schritte sind in Abbildung 40 dargestellt.

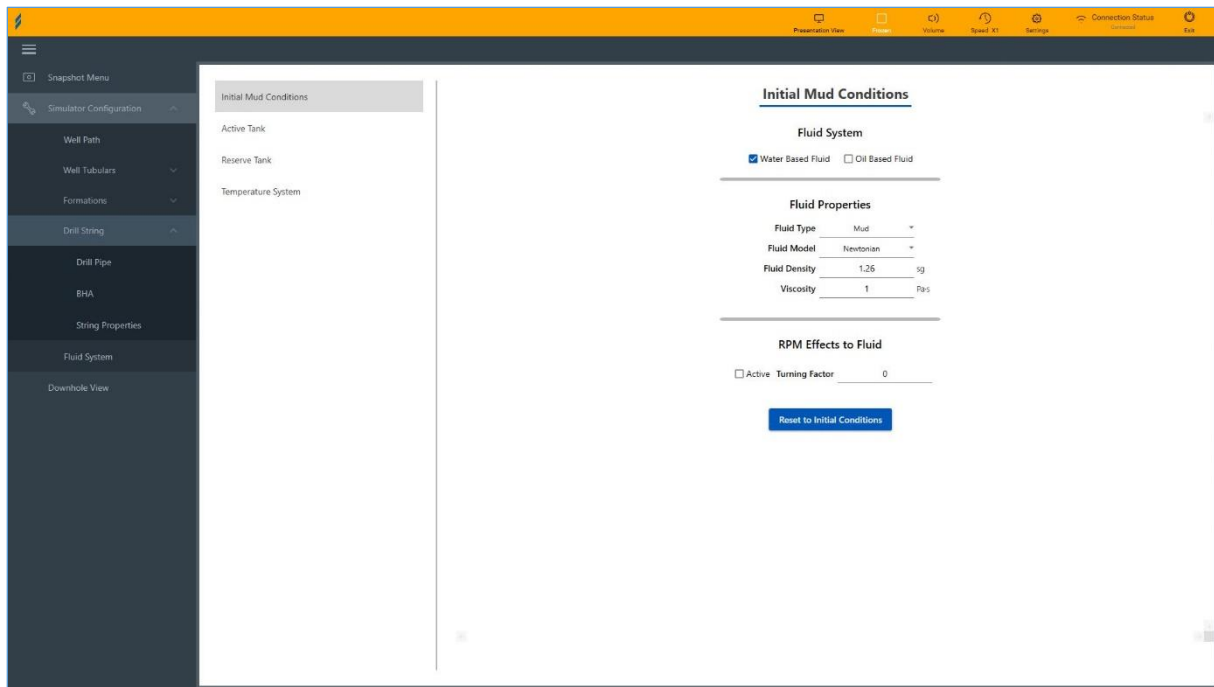


Abbildung 40: Zirkulationssystem

Als dritter Schritt wurde die Bohrstrangkongfiguration (siehe Abbildung 41) erstellt, wobei auch auf die tatsächliche Konfiguration des Bohrstrangs in der GeneSys-Bohrung zurückgegriffen wurde. Zusätzlich wurden die Anzahl und Länge der Bohrstränge in einem separaten Fenster angegeben (siehe Abbildung 42). Diese Eingaben wurden ebenfalls mit Informationen zu den Eigenschaften der Bohrstränge versehen.

Component	Length (m)	Single Length (m)	Quantity	OD (mm)	ID (mm)	Weight (kg/m)	Tot. Weight (kg)	Yield Press. (bar)	Tensile Str. (kg)	Collapse Press. (bar)	Joint Length (cm)	Joint OD (mm)	Joint ID (mm)	Config	Move	Delete Row
HW Drill Pipe	186.4	9.32	20	127	76.2	31.82	5931.48	9999.99	999999	9999.99	0	0	0			X
Cross Over	1.09	1.09	1	209.5	73.66	0	0	0	0	0	0	0	0			X
Drill Collar	9.4	9.4	1	209.5	73.66	118.57	1114.59	9999.99	999999	9999.99	0	0	0			X
Hydraulic Jar	7	7	1	203.2	73.66	0	0	0	0	0	0	0	0			X
Drill Collar	65.17	9.31	7	209.5	73.66	118.57	7727.46	9999.99	999999	9999.99	0	0	0			X
Float Sub	1.98	1.98	1	203.2	76.2	0	0	0	0	0	0	0	0			X
Stabiliser	2.19	2.19	1	300	73.66	0	0	0	0	0	0	0	0			X
Float Sub	1.58	1.58	1	209.5	132.1	0	0	0	0	0	0	0	0			X
MWD	8.9	8.9	1	209.5	10	0	0	0	0	0	0	0	0			X
Stabiliser	1.41	1.41	1	300	73.6	0	0	0	0	0	0	0	0			X
PD Motor	10	10	1	203.2	10	0	0	0	0	0	0	0	0			X
DrillBit PDC	0.37	0.37	1	311	10	0	0	0	0	0	0	0	0			X
Total BHA Length				295.49	m	Total Drill String Length				1532.46	m					
Total BHA Weight				14773.53	kg	Total Drill String Weight				74123.31	kg					

Abbildung 41: Bohrstrang (Bottom Hole Assembly) Konfigurator

Component	Length (m)	Single Length (m)	Quantity	OD (mm)	ID (mm)	Weight (kg/m)	Total Weight (kg)	Yield Pressure (bar)	Tensile Strength (kg)	Collapse Pressure (bar)	Joint Length (cm)	Joint OD (mm)	Joint ID (mm)	Move
Drill Pipe	1236.97	9.44	131	139.7	125	47.86	59349.78	9999.99	999999	9999.99	0	0	0	
Total Drill Pipe Length	1236.97	m			Total Drill String Length	1532.46	m							
Total Drill Pipe Weight	59349.78	kg			Total Drill String Weight	74123.31	kg							

Abbildung 42: Bohrstrang Konfigurator

Im vierten Schritt wurde die Trajektorie des Bohrlochs mithilfe des Wellbore Designers erstellt, wie in Abbildung 43 dargestellt. Dies umfasst die tatsächliche gemessene Tiefe (MD), Neigung und Azimut an einem bestimmten "Messpunkt". Alle anderen Variablen wie Dogleg, Turn Rate, und Build Rate, sowie die vertikale Tiefe und horizontale Länge werden automatisch durch den Bohrlochplaner berechnet. Außerdem besteht die Möglichkeit, ein bestimmtes Bohrziel einzugeben, sodass die Bohrsimulation automatisch darauf ausgerichtet wird.

Measure Depth (m)	Inclination (°)	Azimuth (°)	Vertical Depth (m)	Northing (m)	Easting (m)	V-Section (m)	Dogleg (°/30m)	Turn Rate (°/30m)	Build Rate (°/30m)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	55	0	0	0.94	0.38	271.04	0.38
345	0.37	262.01	345	-0.13	-0.93	0.18	4.38	-60.45	4.35
365	0.66	257.98	365	-0.16	-1.1	0.16	5.7	-10.2	-5.7
385	0.28	257.3	385	-0.2	-1.26	0.02	3.69	-726.5	-1.33
388.6	0.26	248.58	388.6	-0.2	-1.28	0.02	3.5	-726.5	-1.33
392.2	0.25	239.86	392.2	-0.21	-1.29	0.02	3.32	-726.5	-1.33
395.8	0.23	231.15	395.8	-0.22	-1.31	0.01	3.13	-726.5	-1.33
399.4	0.22	222.43	399.4	-0.23	-1.32	0.01	2.95	-726.5	-1.33
403	0.2	213.71	403	-0.24	-1.33	0.02	3.19	510.16	2.53
407.75	0.24	221.79	407.75	-0.25	-1.34	0.02	3.42	510.16	2.53
412.5	0.28	229.86	412.5	-0.27	-1.35	0.02	3.67	510.16	2.53
417.25	0.32	237.94	417.25	-0.28	-1.37	0.03	3.94	510.16	2.53
422	0.36	246.02	422	-0.29	-1.4	0.16	3.79	137.05	3.63
441	0.59	254.7	441	-0.34	-1.55	0.19	1.12	-80.37	-0.79
460	0.54	249.61	459.99	-0.4	-1.72	0.2	2.28	122.53	1.89

Abbildung 43: Bohrloch-Planer („Wellbore Designer“)

Nachdem die Bohrumgebung eingerichtet wurde, erfolgte die Simulation unter Verwendung realistischer Bohrbetriebsparameter der GeneSys-Bohrung. Dies geschah automatisiert über die API-Workstation. In diesem Szenario wurden die Daten von WOB (Gewicht auf Bit), RPM (Umdrehungen pro Minute), Drehmoment, Fließrate, und Flüssigkeitsdichte durch den entwickelten Automatisierungscode in Echtzeit bei jedem neu abgeteufte Meter aktualisiert und an den DrillSIM:600 für die Simulation übermittelt und über das Aufzeichnungssystem an der „Instructor Station“ protokolliert. Die Eingabe- und Ausgabevariablen sind unten aufgeführt, wie in Abbildung 44 zu sehen ist.

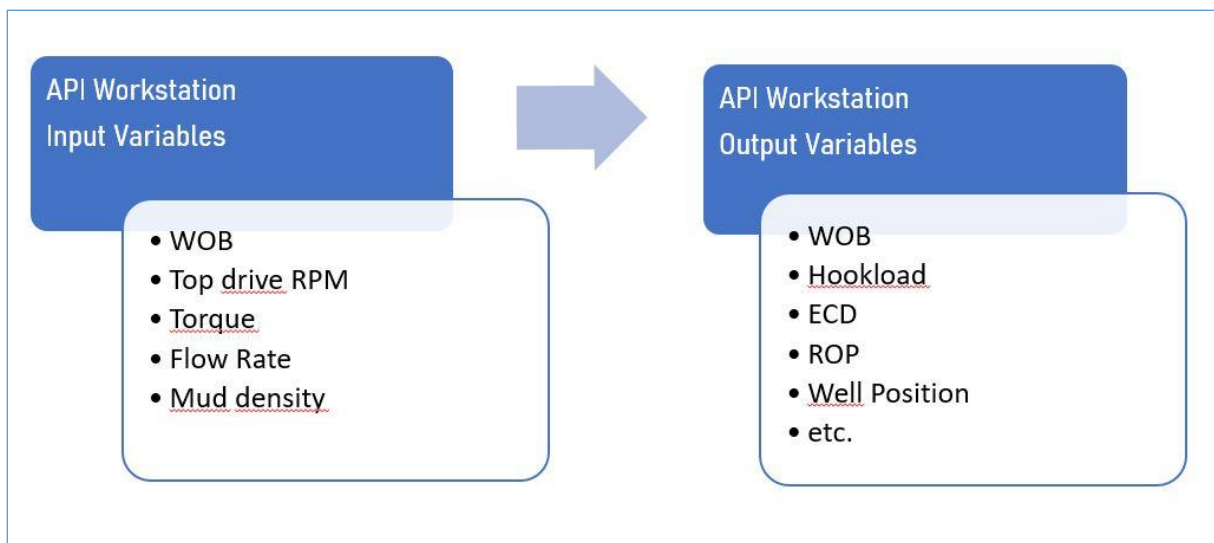


Abbildung 44: Eingabe- und Ausgabevariablen

Durch die realistische Darstellung der Bohrumgebung und die Verwendung der tatsächlichen Bohrparameter konnte eine Simulation erstellt werden, die der Realität nahekommt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Grafiken dargestellt. Die orangefarbene Linie repräsentiert die Simulationsdaten, während die blaue Linie die tatsächlichen Betriebsdaten darstellt. Die Punkte zeigen an, wo die Parameter als Eingabe eingegeben und als Ausgabe aufgezeichnet werden. Abbildung 45 zeigt den Vergleich zwischen der eingegebenen Fließrate in der Simulation (orange Linie) und der tatsächlichen Bohroperation (blaue Linie). Hier ist zu sehen, dass die eingegebenen Fließraten nahezu genau den Werten wie bei der Bohroperation entsprechen.



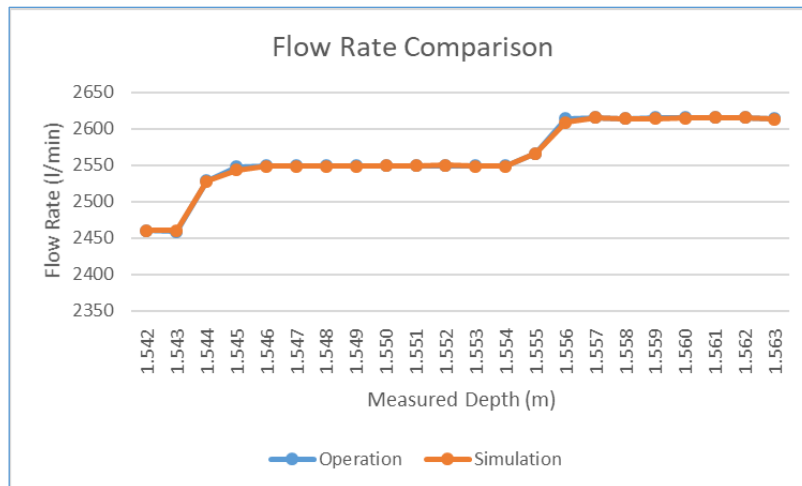


Abbildung 45: Vergleich der Fließrate

Bezüglich des Parameters "Weight on Bit" konnte der Simulator die Eingabe nicht unmittelbar übernehmen, sondern benötigte eine gewisse Iterationszeit, um den eingegebenen Wert zu erreichen. Abbildung 46 veranschaulicht den direkten Vergleich des "Weight on Bit" genau zum Zeitpunkt der Übermittlung, während Abbildung 47 den Vergleich mit einer Verzögerung von einigen Sekunden zeigt, bis der Simulator den eingegebenen Wert erreicht.

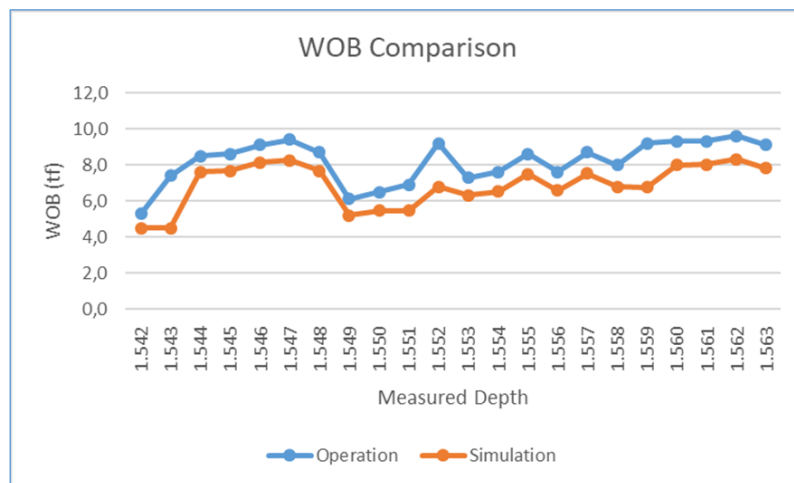


Abbildung 46: Vergleich des "Weight on Bit" zum Zeitpunkt der Übermittlung



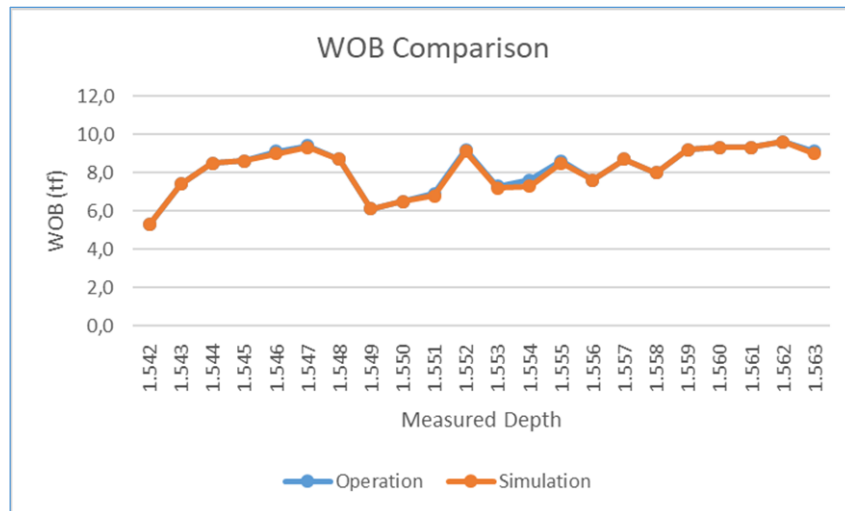


Abbildung 47: Vergleich des "Weight on Bit" nach Iterationszeit

Für den Drehmomentwert konnte der Simulator nach einiger Zeit den implementierten Drehmomentwert erreichen. Ähnlich wie bei der Implementierung des WOB-Werts ist hier eine gewisse Iterationszeit erforderlich, wie unten dargestellt (Abbildung 48).

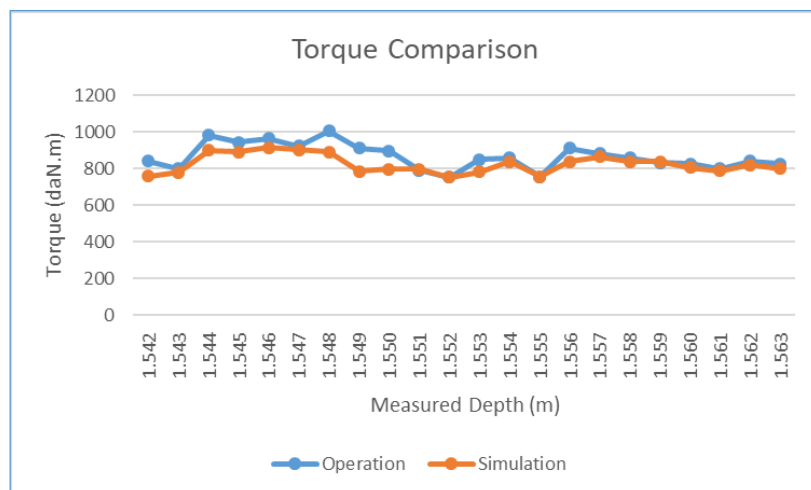


Abbildung 48: Vergleich des Drehmoments

Die Grafik unten zeigt den Vergleich zwischen der Simulations- und operational-ROP (Rate of Penetration). In diesem Fall führte die Simulation jedoch nicht wie erhofft zu den gewünschten Ergebnissen. Es gibt verschiedene Gründe für dieses Ergebnis, wie zum Beispiel, dass in dieser Simulation eine homogene Formation eingestellt wurde, kein Bohrer-verschleiß berücksichtigt wurde und der abrupte Übergang der Bohrparameter bei der Eingabetiefe.

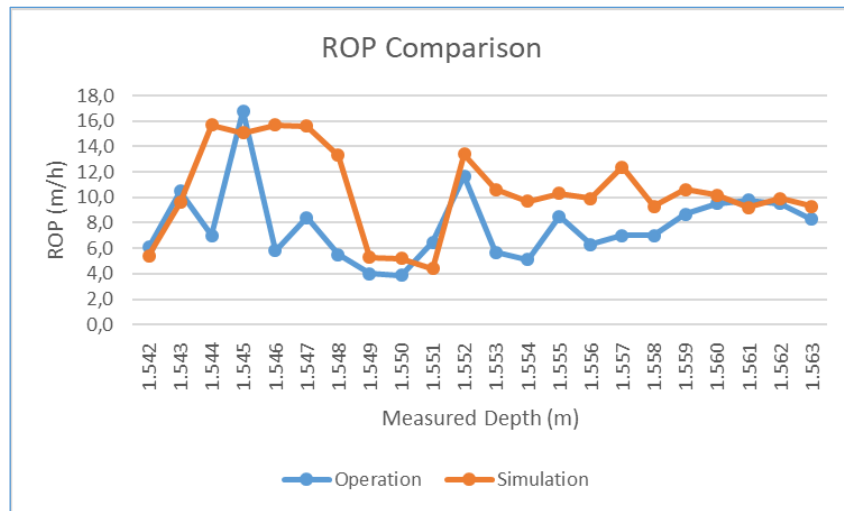


Abbildung 49: ROP-Vergleich

Zusammenfassend wurde das Ziel dieses Arbeitspakets erfolgreich erreicht, in dem die Nachbildung eines Bohrlochs und das erfolgreiche Bohren eines Abschnitts, kombiniert mit der Entwicklung eines automatisierten Programms, das Bohrparameter aus der ursprünglichen Operation nutzt, zu Szenario-Bohrsimulationsergebnissen, die die beobachteten Trends und Muster des tatsächlichen Bohrvorgangs widerspiegeln.

Diese Leistung unterstreicht die Wirksamkeit der Simulation bei der Nachbildung realer Bohrszenarien und liefert wertvolle Einblicke in das Verhalten verschiedener Parameter während des Bohrbetriebs. Die Möglichkeit, Bohrergebnisse durch Simulation zu beobachten, zu analysieren und zu optimieren, trägt zu verbessertem Verständnis und Entscheidungsfindung in Bohrlochbohrprozessen bei.

Die Verwendung erstreckt sich auch auf das Vorbohren oder erneute Bohren eines kompletten Bohrlochs oder seiner kritischen Abschnitte. Dies geschieht, um den Prozess zu analysieren und spezielle Bohr- und Bohrlochphänomene zu verstehen oder zu untersuchen. Durch eine detaillierte Erfassung und Analyse der Daten aus der Simulation ist es möglich, die Bohrleistung zu verbessern, insbesondere bei tiefen Geothermiebohrungen, wo die Kosten hoch sind und ein langer Return on Investment erwartet wird, indem die Betriebs- oder Bohrlochparameter angepasst werden.

#### 1.4.3 Parallele Simulation während laufendem Bohrbetrieb

Ursprünglich war die Absicht, eine Kommunikation zwischen einem laufenden geothermischen Bohrvorgang und dem Software-Simulator durch direkte Datenübertragung von einer Bohranlage zu etablieren. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Suche nach einem für dieses Vorhaben geeigneten Projektpartner und der aufwändigeren Arbeit an vorangegangenen Arbeitspaketen wurde jedoch beschlossen, stattdessen den Hardware-Simulator (Abbildung 50) des DSC als Bohranlage zu verwenden.



Abbildung 50: Hardware Simulator am DSC

In diesem Zusammenhang wurden Bohrsimulationen unter Verwendung von Echtzeitdaten aus einem laufenden Bohrvorgang durchgeführt, die über den vorhandenen Hardware-Simulator am DSC (Drilling Systems Center) gewonnen wurden. Die Datenübertragung wurde durch die OPC-UA-Schnittstelle ermöglicht, die mit den am Hardware-Simulator installierten Sensoren verbunden war. Anschließend wurden diese Daten an das API des DrillSIM:600 übertragen, was die Durchführung von Echtzeit-Bohrsimulationen ermöglichte, die den tatsächlichen Bohrvorgang widerspiegeln. Abbildung 51 zeigt den Workflow eines parallelen Simulationsprozesses zwischen Hardware Simulator und Software Simulator.

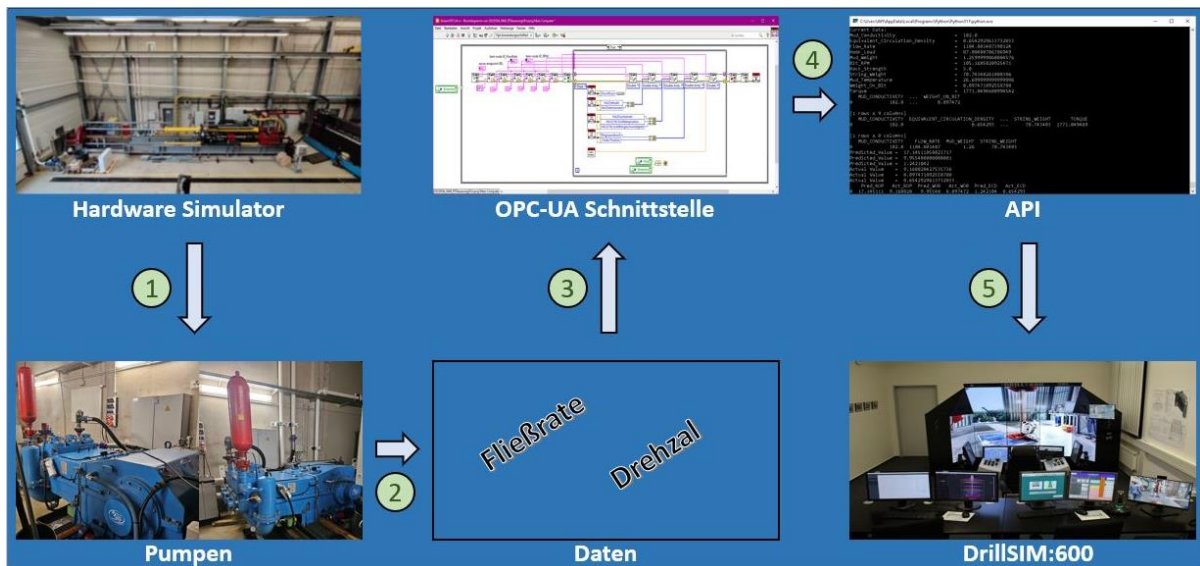


Abbildung 51: Parallele Simulation zwischen dem Hardware- und Software Simulator

Dies wurde erreicht, indem die Pumpen (Abbildung 52) des Hardware-Simulators gestartet und das Fluidumlaufsystem aktiviert wurde. Die Echtzeit-Fließraten wurden basierend auf der

Drehzahl der Pumpen erfasst und anschließend an die API übertragen, um als Eingabe für die Ausführung von Simulationen auf dem DrillSIM:600 zu dienen.



*Abbildung 52: Triplex Pumpe des Hardware Simulators*

Die Ergebnisse dieses Verfahrens wurden zuvor bereits im Arbeitspaket 1.4.1 erläutert. Analog zu dem oben genannten Prozess kann dieselbe Methodik unter Verwendung anderer aufgezeichneter Parameterinformationen wie dem WOB und der RPM des Bohrstrangs verwendet werden.

Die Anwendung dieses Ansatzes beinhaltet die Fähigkeit, eine authentische Bohrumgebung zu schaffen, kombiniert mit Echtzeit-Datenübertragung und der Nutzung des Software-Simulators (parallele Simulation während eines aktiven Bohrvorgangs). Dadurch, dass die Simulation in der DrillSIM:600 bis zum Zwanzigfachen der Echtzeit beschleunigt werden kann, ist mit diesem proaktiven Ansatz das Vorwegnehmen potenzieller Bohrprobleme im realen Bohrprozess möglich. Dies erleichtert die Umsetzung präventiver Maßnahmen für einen optimierten Bohrvorgang. Letztendlich führt dies zu einer Reduzierung der mit geothermischen Bohroperationen verbundenen Kosten.



Somit wurde das Ziel erreicht, eine parallele Simulation eines Bohrprozesses durchzuführen, indem Daten aus einer tatsächlichen Bohrung, am Beispiel des Hardware-Simulators, verwendet wurden. Die Beschaffung von Echtzeitdaten aus einer laufenden Bohroperation stellte im Rahmen der verbleibenden Projektlaufzeit eine Herausforderung dar. Daher wurde entschieden, Daten vom direkt zugänglichen Hardware-Simulator am DSC zu verwenden. Diese Daten wurden nahtlos in Echtzeit übertragen und für die Simulation am DrillSim:600 eingesetzt.

## **1.5 Zusammenfassung: Wissenschaftlich-technische Ergebnisse**

Die Nutzung von geothermischer Energie kann einen bedeutenden, zuverlässigen und kontinuierlichen Beitrag zur Umstellung der Energieerzeugung auf erneuerbare Quellen leisten. Im Gegensatz zu Bohrungen im Bereich von Öl und Gas sind die Erfahrungen der Geothermiebranche noch begrenzt, was potenziell zu erhöhten Kosten führen kann. Das Projekt zielt darauf ab, die Effizienz von geothermischen Bohrungen durch die Entwicklung eines fortschrittlichen Simulators zu verbessern, der auf dem vorhandenen DrillSIM:600-Trainingssimulator des englischen Herstellers Drilling Systems basiert und Planungen mit erheblich verbesserter Realitätsnähe ermöglicht. Die neue Version des Simulators erforderte eine umfassende Überarbeitung der Hard- und Software. Zur Hardware gehören u.a. acht Server, acht Großbildschirmen zur Visualisierung des Bohrverlaufs, ein „Cyber Chair“ und eine API (Application Programming Interface) Workstation. Der neue Simulator ermöglicht die Echtzeitplanung kritischer Bohrungen oder Bohrungsabschnitte und dient auch als digitaler Zwilling für den Bohrprozess. Die wesentliche Aufgabe im Projekt bestand in der Schaffung und Implementierung neuer Modelle, die den Bohrprozess realistisch abbilden. Im Projektverlauf wurden dazu sowohl physikalische als auch empirische Modelle entwickelt, letztere auf Basis von Verfahren des maschinellen Lernens und künstlicher Intelligenz. Bevor diese Modelle, wie beispielsweise der Bohrfortschritt, in die DrillSIM:600 implementiert werden konnten, war eine erhebliche Aufwertung des Bestands-Simulators erforderlich.

Die Entwicklung und Verbesserung des DrillSIM:600 wird als wichtiger Baustein angesehen, um geothermische Energiegewinnung zukünftig wirtschaftlich tragfähiger zu machen. Die Fähigkeit, reale Bohrdaten zu verwenden, erhöht die Genauigkeit der Simulation und ermöglicht eine schnellere Identifikation von Bohrerausforderungen. Die Integration einer OPC-UA-Schnittstelle, die in der Bohrindustrie häufig im Feld eingesetzt wird, ermöglicht den Echtzeitdatentransfer mit operativen Bohranlagen, was zu einer realistischeren Simulation von geothermischen Bohrprozessen führt. Der Simulator findet auch Anwendung in der Vorbohrphase, indem er anspruchsvolle Szenarien simuliert und verschiedene Werkzeuge, Bohrstrangkfigurationen und Bohrparameter im Voraus testet. Dies trägt zur Verbesserung der Bohrlochqualität und des Bohrfortschritts bei. Durch detaillierte Simulationen verschiedener Bohrszenarien ermöglicht der Simulator die frühzeitige Erkennung potenzieller Probleme

während eines Bohrvorgangs und die Anwendung präventiver Maßnahmen. Dies ist von großer Bedeutung, da geothermische Energie aufgrund historisch hoher Bohrkosten oft als unwirtschaftlich galt.

Durch die simulierten Szenarien entsteht eine umfassende Datenbank, die als Grundlage für Handlungsempfehlungen für die Branche dient. Dies ist besonders wichtig im geothermischen Bohrbereich, wo nur eine begrenzte Anzahl von Bohrungen in einem Gebiet durchgeführt wird. Die Erkenntnisse aus den Simulationen können das Risiko reduzieren und die Wirtschaftlichkeit bei zukünftigen geothermischen Bohrprojekten verbessern, was langfristige Vorteile für die Branche bietet um die nachhaltige Energieentwicklung zu unterstützen.

## 2 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nach dem Verwendungsnachweis wurde das Projekt mit einem Kassenbestand von - 4.710,56 € abgeschlossen. Im Anschluss werden die zentralen Positionen näher erläutert.

### 2.1 Position 0812: Beschäftigte E12 – E15

Insgesamt waren fünf wissenschaftliche Mitarbeiter an dem Projekt beteiligt, wobei zwei Mitarbeiter dauerhaft im Rahmen des Projekts beschäftigt waren. Die Anzahl der Personalmonate wurde nach der erfolgreichen Bewilligung der kostenneutralen Verlängerung (Änderungsbescheid vom 21.09.2022) von ursprünglich 120 auf 147 Monate erhöht.

Position Gesamtfiananzierungsplan	Urspr. bereitgestellte Mittel Gesamtfinanzierungsplan	Nach Verlängerung und Umwidmungen	Ausgaben
0812	708.607,00 €	823.275,14 €	804.619,68 €

### 2.2 Position 0817: Beschäftigte E1 – E11

Während des Projekts wurden zeitweise verschiedene Techniker beauftragt, um das Hardware-Upgrade des Software-Simulators zu unterstützen. Allerdings konnte dieser Prozess in einem kürzeren Zeitraum abgeschlossen werden. Daher wurde die ursprünglich benötigte Anzahl an Personalmonaten von 19 auf 11 Monate reduziert, was zu Einsparungen führte. Die überschüssigen Mittel für diese Position wurden in die Position 0812 umgeleitet.

Position Gesamtfiananzierungsplan	Urspr. bereitgestellte Mittel Gesamtfinanzierungsplan	Nach Verlängerung und Umwidmungen	Ausgaben

0817	90.490,00 €	53.548,02 €	53.545,44 €
------	-------------	-------------	-------------

### 2.3 Position 0822: Beschäftigungsentgelte

Die Kosten für wissenschaftliche Hilfskräfte in diesem Projekt waren niedriger als ursprünglich vorgesehen, daher wurden die übrigen Mittel auf die Position 0812 verschoben.

Position Gesamtfinanzierungsplan	Urspr. bereitgestellte Mittel Gesamtfinanzierungsplan	Nach Verlängerung und Umwidmungen	Ausgaben
0822	51.031,00 €	11.056,97 €	11.104,47 €

### 2.4 Position 0834: Mieten und Rechnerkosten

Für die Einrichtung der Kommunikation und des Datenaustauschs zwischen dem Software- und Hardware-Simulator war die Implementierung einer OPC-UA-Schnittstelle erforderlich. Die Ausgaben in dieser Position resultierten aus den damit verbundenen Lizenzkosten. Des weiteren wurden die geplanten Ausgaben für eine Bohrplanungssoftware namens "Landmark Compass" nicht getätigt, da die Kosten dafür die bewilligten Mittel für diese Position im Projekt deutlich überschritten hätten und die technische Aufgabe anderweitig gelöst werden konnte. Auch hier wurden die verbleibenden Mittel für die Personalausgaben umverteilt.

Position Gesamtfinanzierungsplan	Urspr. bereitgestellte Mittel Gesamtfinanzierungsplan	Nach Verlängerung und Umwidmungen	Ausgaben
0834	8.750,00 €	3.858,82 €	868,82 €

### 2.5 Position 0835: Vergabe von Aufträgen

Die finanziellen Mittel dieser Position wurden hauptsächlich für die Finanzierung des Upgrades des Software-Simulators (DrillSIM:600) verwendet. Nach der Projektfreigabe wurden eine Vereinbarung bzw. ein Vertrag mit dem Hersteller des Simulators, "Drilling Systems Ltd.", abgeschlossen. Die Kosten beliefen sich auf etwa 340.500,00 Euro, was weniger ist als ursprünglich geplant. Die verbleibenden Kosten wurden auf die Position 0812 übertragen.

Position Gesamtfi- nanzierungsplan	Urspr. bereitgestellte Mittel Gesamtfinan- zierungsplan	Nach Verlängerung und Umwidmungen	Ausgaben
0835	340.760,00 €	340.515,00 €	340.515,00 €

## 2.6 Position 0846: Dienstreisen

Die Mittel für Position 0846 konnten weitgehend genutzt werden. Die Einsparungen resultierten hauptsächlich daraus, dass aufgrund der Corona-Pandemie keine Präsenztermine stattfanden, wie zum Beispiel die geplanten Reisen nach Bournemouth, England, zum Hersteller des Software-Simulators. Zudem haben sich die Reisen der Projektmitarbeiter hauptsächlich auf nationale anstelle internationaler Konferenzen konzentriert.

Position Gesamtfi- nanzierungsplan	Urspr. bereitgestellte Mittel Gesamtfinan- zierungsplan	Nach Verlängerung und Umwidmungen	Ausgaben
0846	13.549,00 €	10.879,00 €	5.339,19 €

## 2.7 Position 0850: Gegenstände und andere Investitionen > 800/410/400 €

Für diese Position resultierten die Ausgaben hauptsächlich für die Beschaffung einer Workstation. Dieser hat in diesem Projekt als Simulationsrechner für Echtzeit-Modelle und als Datenbank für die große Zahl von Bohrdaten gedient. Auch hier wurden die restlichen Mittel in die Position 0812 umgeleitet.

Position Gesamtfi- nanzierungsplan	Urspr. bereitgestellte Mittel Gesamtfinan- zierungsplan	Nach Verlängerung und Umwidmungen	Ausgaben
0850	42.324,00 €	19.372,00 €	19.372,00 €

## 3 Darstellung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Geothermische Energie spielt eine entscheidende Rolle im aktuellen politischen und energiepolitischen Umfeld in Deutschland und Europa. Während Nationen darauf abzielen, zu nachhaltigeren und umweltfreundlicheren Energiequellen überzugehen, hat geothermische Energie



an Bedeutung gewonnen. Ihre Wichtigkeit liegt in ihrem Potenzial, eine konstante und zuverlässige Quelle für Wärme und Grundlaststrom bereitzustellen, was den Herausforderungen intermittierender erneuerbarer Energiequellen wie Wind- und Solarenergie entgegenwirkt. In Deutschland besteht eine bemerkenswerte politische Verpflichtung zur Unterstützung des Übergangs zur Nutzung von thermischer Energie, bekannt als "Wärmewende". Diese Politik zielt darauf ab, den Wärmesektor auf erneuerbare Energiequellen umzustellen, einschließlich geothermischer Energie, als wesentlichen Bestandteil der Gesamtstrategie für den Energiewandel.

Geothermische Bohrsimulation spielt eine entscheidende Rolle bei der Reduzierung von Betriebsrisiken und -kosten in Zusammenhang mit geothermischen Projekten. Der DrillSIM:600 am DSC, mit seinen fortschrittlichen Fähigkeiten, dient als entscheidendes Instrument zur detaillierten Simulation verschiedener Bohrszenarien. Die Fähigkeit, Bohrprozesse zu simulieren und zu analysieren, trägt zur frühzeitigen Erkennung potenzieller Probleme bei, ermöglicht die Anwendung präventiver Maßnahmen und verbessert somit die Wirtschaftlichkeit und den Gesamterfolg von geothermischen Bohroperationen. Um jedoch genauere und realistischere Simulationen zu erreichen, ist es entscheidend, fehlende geothermische Bohrphänomene im Untergrund im DrillSIM:600 anzugehen. Die Entwicklung von physischen und maschinellen Lernmodellen wird dringend benötigt, um diese Lücken zu schließen und die Fähigkeit des Simulators zur Nachbildung realer Bohrbedingungen zu verbessern.

Im Kontext des OBE-Projekts wurden die Entwicklung und Verbesserung des DrillSIM:600 als notwendig und angemessen erachtet. Dieses Projekt spiegelt die entscheidende Bedeutung von geothermischer Energie wider, insbesondere in der aktuellen geopolitischen Situation, in der nachhaltige und regional bezogene Energie Priorität hat. Trotz ihres vielversprechenden Potenzials wurde geothermische Energie historisch weitgehend als unwirtschaftlich betrachtet, nicht zuletzt aufgrund hoher Bohrkosten. Daher sollte ein Hauptziel die Reduzierung der Bohrausgaben sein, um geothermische Energie wirtschaftlich tragfähiger zu machen und ihre weitere Integration in den erneuerbaren Energiemix zu ermöglichen.

Zusammenfassend betrachtet ist der neue DrillSIM:600 am DSC ein einzigartiges und entscheidendes Element für die Fortschritte in der geothermischen Bohrforschung. Seine Rolle bei der Simulation verschiedener Bohrszenarien und sein Beitrag zum Verständnis geothermischer Prozesse unterstreichen seine Bedeutung im breiteren Kontext der nachhaltigen Energieentwicklung in Deutschland und Europa.

## **4 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens & der Verwertung der Durchführung des Vorhabens**

Die erweiterten Funktionen des DrillSIM:600 ermöglichen nun die Integration neuer Modelle, Verbesserungen bestehender Modelle und eine realistischere Simulation von geothermischen Bohrprozessen. Ein bedeutender Fortschritt ist dabei auch die Entwicklung der OPC-UA-Schnittstelle, die eine Verbindung mit Bohranlagen für den Echtzeitdatentransfer herstellen kann, was im Projekt am Beispiel des Hardware-Simulators erprobt wurde. Dieser Durchbruch ermöglicht es dem DrillSIM:600, sich mit operativen Bohranlagen zu verbinden und dabei Echtzeit-Bohrdaten für Simulationen zu nutzen. Die Integration realer Bohrdaten in den Software-Simulator bietet eine einzigartige Möglichkeit, geothermische Bohrungen mit erhöhter Genauigkeit zu simulieren. Die Fähigkeit des Simulators, die Simulationsgeschwindigkeit gegenüber der Echtzeit zu beschleunigen, erleichtert die frühzeitige Erkennung möglicher Bohrherausforderungen bzw. Probleme. Diese frühzeitige Identifikation ermöglicht die Umsetzung gezielter Präventivmaßnahmen und Optimierungsstrategien in laufenden geothermischen Bohroperationen.

Der DrillSIM:600 findet auch Anwendung in der Vorbohrphase („pre-drilling“) bei anspruchsvollen Szenarien. Er repliziert Probleme, die in echten Bohrlöchern auftreten, wie harte Formationen, Bohrlochverformungen, „Pipe sticking“, „Kick“ und mehr, im Software-Simulator. Durch Simulationen können verschiedene Werkzeuge, Bohrstrangkfigurationen und Bohrparameter im Voraus getestet werden, um eine optimale Bohrlochqualität zu gewährleisten und den Bohrfortschritt in einer realen Geothermie Bohrung zu verbessern.

Darüber hinaus kann durch das Bohren und Messen dieser simulierten Szenarien eine umfassende Datenbank erstellt werden. Diese Datenbank dient als Grundlage für ableitbare Handlungsempfehlungen für die Branche. Der potenzielle Einfluss ist besonders signifikant beim geothermischen Bohren, wo in der Regel nur eine begrenzte Anzahl von Bohrungen in einem Gebiet gebohrt wird. Die aus diesen Simulationen gewonnenen Erkenntnisse können das Risiko erheblich reduzieren und die Wirtschaftlichkeit bei zukünftigen geothermischen Bohrprojekten verbessern, was langfristige Vorteile für die Branche bietet.

Die Weiterführung der Arbeiten an dem Simulationssystem sollen die bisher gefundenen Lösungen in eine Form bringen, die eine tatsächliche Einbindung in die Planung (Vorab-Bohren) geothermischer Projekte ermöglicht. Im zweiten Schritt wird dann auch die Funktion als digitaler Zwilling im Rahmen laufender Projekte zur Erstellung von Geothermiebohrungen erprobt.

## **5 Darstellung des bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen**

Während der gesamten Dauer des Projekts gab es keine andere Software-Simulation, die in der Lage war, Echtzeit-Bohrsimulationen unter Verwendung detaillierter Informationen in einer realistischen Umgebung durchzuführen, so wie es beim vorhandenen Simulator des DSC der Fall ist. Obwohl ein etwas ähnlicher Simulator namens "OpenLab" am Norwegian Research Centre (NORCE) verfügbar ist, stützt er sich auf vordefinierte Vorlagen und basiert nur auf zwei Computermodellen für den Fluidströmung im Bohrloch und die Mechanik des Bohrstrangs. Obwohl "OpenLab" 3D-Visualisierungen für verschiedene Szenarien ermöglicht, handelt es sich um eine Software, die auf einem einzelnen PC läuft.

Im Gegensatz dazu zeichnet sich der DrillSIM:600 als vollständiger Softwaresimulator aus, der eine realistische Bohrplatzumgebung rechnet und visualisiert. Er umfasst einen tatsächlichen Bohrmaschinenführerstuhl, der mit einer Hardware-Steuerungseinheit für den Bohrantrieb ausgestattet ist. Dieser umfassende Simulator ist für den Einsatz in der akademischen Welt und von Ingenieuren konzipiert und dient verschiedenen Zwecken wie Bildung, Tests, Training, Simulationen und Forschung. Ein herausragendes Merkmal des signifikant aufgewerteten DrillSIM:600 ist seine Fähigkeit zur Implementierung neuer und verbesserter Modelle, was dazu beiträgt, damit durchgeführte geothermische Bohrsimulationen der Realität näher zu bringen. Die Integration der OPC-UA-Schnittstelle ermöglicht den Echtzeitdatentransfer und die Verbindung mit operativen Bohranlagen. Dies erlaubt Simulationen unter Verwendung von Echtzeit-Bohrdaten, erleichtert die frühzeitige Erkennung potenzieller Probleme und ermöglicht die Umsetzung gezielter präventiver Maßnahmen. Insgesamt dienen diese Fortschritte zur Verbesserung der Kosteneffizienz von geothermischen Bohrprozessen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zwar verschiedene Einrichtungen zur Untersuchung des Bohrprozesses existieren, der DSC Software Simulator mit seiner realistischen Einrichtung und ganzheitlichen Herangehensweise als einzigartige Entität in der Welt steht. Insbesondere im Bereich der geothermischen Bohrsimulation und Forschung kann kein anderer bekannter Simulator vergleichbare Ergebnisse liefern wie die hier entwickelte Version des DSC "DrillSIM:600" mit seinem einzigartigen Systemansatz zur realistischen Bohrsimulation.

## **6 Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen**

Unten ist eine Liste (Tabelle 8) mit gehaltenen Vorträgen und Präsentationen und Veröffentlichungen im Verlauf des OBE-Projektes. Außerdem ist die Veröffentlichung zweier Dissertationen mit den Inhalten von diesem Projekt kurzfristig geplant.

*Tabelle 8: Getätigte und geplante Veröffentlichungen*

Datum	Art	Ort	Titel
2019	Messestand	Celle Drilling, Celle	Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation (OBE)
2021	Präsentation	Geo Energy, GDMB, Celle	Drilling Simulator Celle
2021	Veröffentlichung	Journal of Petroleum Science and Engineering	Temperature modeling for wellbore circulation and shut-in with application in vertical geothermal wells
2022	Messestand	GeoTHERM, Offenburg	Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation (OBE)
2022	Veröffentlichung	Journal of Petroleum Science and Engineering	Framework for Automated Generation of real-time Rate of Penetration Models
2023	Messestand	Celle Drilling, Celle	Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch realistische Echtzeit-Simulation (OBE)
2023	Präsentation	Celle Drilling, Celle	Realistic automated scenario drilling using a real-time drilling simulator
2023	Masterarbeit	Drilling Simulator Celle	Application of Machine Learning for the Prediction of Equivalent Circulation Density (ECD) in Drilling Operations
2024	Veröffentlichung (geplant)	Journal	Application of Machine Learning for the Prediction of Equivalent Circulation Density (ECD) in Drilling Operations

2024	Messestand (geplant)	GeoTHERM, Of- fenburg	Optimierung der Bohroperationen für Geothermieprojekte durch re- alistische Echtzeit-Simulation (OBE)
2024	Präsentation (geplant)	GeoTHERM, Of- fenburg	Realistic automated scenario drill- ing through implementation and validation of physical and machi- ne learning models using a real- time drilling simulator
2024	Veröffentlichung (geplant)	Journal of Petro- leum Science and Engineering	Realistic automated scenario drill- ing through implementation and validation of physical and machi- ne learning models using a real- time drilling simulator
2024	Veröffentlichung (geplant)	Dissertation	Automated Trajectory Optimiza- tion with Real-Time Software Simulation Application
2024	Veröffentlichung (geplant)	Dissertation	Applications of Machine Learning in the Planning of Drilling Opera- tions Optimization

## **Anhang A: Erfolgskontrollbericht**