

Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) - Phase 3

Band 3.10E2 der Antragsunterlage: Fachgutachten

Aktualisierung und Fortschreibung des geologischen, hydrogeologischen und numerischen Modells für das Umfeld der Produktions- und Haldenstandorte des Werkes Werra; Teilgebiet 1: Hattorf/Untereizbach; Bericht zum Geologischen 3D-Modell des Produktions- und Haldenstandortes Werk Werra der K+S Minerals and Agriculture GmbH, Stand 05/2021

Vorhabenträger:

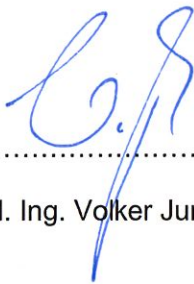
K+S Minerals and Agriculture GmbH
Werk Werra, Standort Hattorf
Hattorfer Straße
36269 Philippsthal



Verfasser:

AKVO GmbH
Torstraße 177
10115 Berlin





.....
Dipl. Ing. Volker Jungk



.....
M.Sc. Geow. Dr. Sören Wilke



.....
Dipl.-Geow. Carolin Bieck

Impressum

Fassung vom: 28.05.2021
Ansprechpartner: Dipl. Ing. Volker Jungk
Telefon: 030 - 30208900
Fax: 030 - 30873653
e-Mail: v.jungk@akvo.de
Web: www.akvo.de

Ergebnisse im Überblick:

- Im Rahmen der Planungen der Erweiterung Phase 2 der ESTA-Rückstandshalde Hattorf ist das bestehende geologische 3D-Modell fortgeschrieben und aktualisiert worden
- Im Zuge dieser Fortschreibung und Aktualisierung konnten **32 neu abgeteufte Bohrungen** in das geologische 3D-Modell übernommen werden.
- Diese neuen Bohrungen liegen mehrheitlich im unmittelbaren Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf und bedeuten einen wesentlichen neuen Erkenntniszuwachs für die Modellierung des Verlaufes der geologischen Schichten.
- **Die Kernaufnahme der neuen Bohrungen wurde von einer Expertenkommission unter Leitung von Prof. Dr. Georg Büchel von der Friedrich-Schiller-Universität Jena fachlich begleitet** und mit Vertretern des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie sowie des Thüringer Landesamtes für Umwelt, Bergbau und Naturschutz und des Regierungspräsidiums Kassel, Dezernat 31.6 abgestimmt
- Als besonders hilfreiche Methodik für die Stratifizierung der neuen Bohrungen erwies sich die Untersuchung mittels Gamma-Ray-Log. **Die Ergebnisse der Gamma-Ray-Log-Messungen sind insbesondere dort von Bedeutung, wo eine Abgrenzung von Schichten im relativ homogenen Buntsandsteinmaterial optisch kaum möglich ist.** Hier liefern die klaren und über mehrere Bohrungen hinweg reproduzierbaren Signale der Gamma-Ray-Logs ein zusätzliches, objektives Entscheidungskriterium
- Im Ergebnis der Untersuchungen an den neuen Bohrkernen wurde beschlossen, die Modellschicht **Volpriehausen-Wechselfolge (smVW)** aus dem bestehenden geologischen 3D-Modell im Zuge der hier vorgelegten Aktualisierung und Fortschreibung in **einen oberen, sandigen Teil (smVW2) und einen unteren, tonigen Teil (smVW1) zu untergliedern.**
- Der Abgleich von Gamma-Ray-Logs aus den 32 neuen Bohrungen mit jenen aus Bestandsbohrungen führte zur **Neueinstufung der Schichtenverzeichnisse von fünf Bohrungen**, die bereits im bestehenden geologischen 3D-Modell enthalten waren und im Zuge der hier vorgelegten Aktualisierung und Fortschreibung entsprechend modifiziert wurden.
- **In vier weiteren Bohrungen** wurde das bestehende Schichtenverzeichnis um einen Bohrmarker für den **smVW2 ergänzt** (Basis smVW1 entspricht dem vormaligen Basis smVW).

Ergebnisse im Überblick:

- Die genannten neuen Erkenntnisse wurden im geologischen 3D-Modell durch **regionale Nachinterpolationen der bestehenden Modellschichten sowie** durch die **Neuerstellung der Modellschicht smVW2** umgesetzt.
- Die neuen Daten liefern starke Indizien dafür, dass die im **bisherigen** geologischen 3D-Modell modellierte **Störung Nr. 17** im Norden der ESTA-Rückstandshalde Hattorf nicht in der bisher angenommenen Form existiert. Diese Störung wurde im Rahmen der Fortschreibung und Aktualisierung des geologischen 3D-Modells **gekürzt**.



AKVO GmbH · 10115 Berlin · Torstraße 177 · www.akvo.de

K+S Minerals and Agriculture GmbH

Postfach 102029

34111 Kassel

Ihr Zeichen:

Ihre Nachricht vom:

Unsere Zeichen:

P_22_2020

Unsere Nachricht vom:

Bearbeiter:

Dr. Sören Wilke

Telefon:

030 / 398 77 015

Fax:

030 / 308 736 53

E-Mail:

s.wilke@akvo.de

Datum:

28.05.2021

Projekt: Geologisches, Hydrogeologisches und Numerisches Modell für das Umfeld der Produktions- und Haldenstandorte des Werkes Werra

Teilgebiet 1: Hattorf/Untere Breitzbach

Bericht: Fortschreibung und Aktualisierung des geologischen 3D-Modells Hattorf

AKVO GmbH

Torstraße 177
10115 Berlin

Handelsregister

Amtsgericht
Berlin-Charlottenburg
HRB 117254

Geschäftsführer

Dipl.-Ing. Volker Jungk

Bankverbindung

Commerzbank Berlin (West)
IBAN: DE30 1004 0000 0107 9110 00
BIC: COBADEFFXXX

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass, Aufgabenstellung	9
2	Modellgebiet.....	10
3	Modellierung	15
3.1	Eingangsdaten.....	15
3.2	Störungsinventar	22
3.3	Durchführung	27
3.3.1	Partielle Entfernung der Störung 17	28
3.3.2	Einfügen der neuen Modellschicht smVW2.....	29
3.3.3	Anpassung aller Modellschichten an die neu hinzu gekommenen Bohrmarker	29
4	Einschätzung der erzielten Modellgüte	31
5	Kenntnisdefizite, Modellartefakte und Vorschläge zu deren Beseitigung	38
6	Bedeutung für weiterführende Bearbeitungen.....	40
7	Zusammenfassung	41
	Literaturverzeichnis	42

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Geographische Lage des Modellgebiets (umrandet durch den blauen Rahmen). Untersuchungsraum Haldenumfeld in Rot. Topographische Karte im Hintergrund vom BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2013).....	11
Abbildung 2: Histogramme der Abweichung zwischen Bohrmarkern und modellierter Modellschicht für die Schichten smTC bis smDS.....	33
Abbildung 3: Histogramme der Abweichung zwischen Bohrmarkern und modellierter Modellschicht für die Schichten smVW2 bis suC.....	34
Abbildung 4: Position der Bohrmarker mit maximaler Abweichung je Modellschicht.....	36

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Beschreibung und lithostratigraphische Einstufung der 17 Modellschichten des digitalen geologischen 3D-Modells.....	14
Tabelle 2: Übersicht der Anzahl der für die Modellierung verwendeten Bohrungen....	16
Tabelle 3: Anzahl der eingesetzten Bohrmarker.....	18
Tabelle 4: Übersicht der Quellenlage zur Mächtigkeit der Formationen vom Leine-Ton (z3T) bis zur Fulda-Formation (z7).....	21
Tabelle 5: Liste der Störungen im Untersuchungsraum und ihrer Umsetzung im geologischen 3D-Modell.....	23
Tabelle 6: Statistische Kennwerte der Abweichung zwischen Bohrmarkern und Modellschicht	31

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1.1: Lageplan
- Anlage 1.2: Detailkarten
- Anlage 2: Profilschnitte
- Anlage 3: Verzeichnis der Bohrmarker und Stützstellen
- Anlage 4: Verzeichnis der im geologischen 3D-Modell hinterlegten Objekte
- Anlage 5: Übersichtskarte Störungen
- Anlage 6.1: Isobathenplan des Hardeggen-Sandsteins (smHS)
- Anlage 6.2: Isobathenplan des Volpriehausen-Sandsteins (smVS)

Abkürzungsverzeichnis

- GK25 Geologische Karte des Modellgebietes im Verhältnis 1:25.000
- HLNUG Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
- TLUBN Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
- TLUG Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (heute: TLUBN)

1 Anlass, Aufgabenstellung

Die K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra plant am Standort Hattorf im Rahmen des Rückstandsmanagements die Erweiterung der ESTA-Rückstandshalde. Die Vorhabensbeschreibung für das Projekt wurde den Genehmigungs- und Fachbehörden vorgelegt und darauf aufbauend der inhaltliche und räumliche Untersuchungsrahmen im Scopingtermin am 21.09.2011 festgelegt. Daraufhin wurde in dem Teilprojekt T3 Geologie/Haldenumfeld in den Arbeitspaketen 3.1 Geologie, 3.2 Hydrogeologie und 3.3 Numerische Modellierung die Erstellung eines Geologischen, Hydrogeologischen und Numerischen Modells für das Umfeld der Standorte Hattorf und Unterbreizbach des Werkes Werra veranlasst und durch die Fa. Jungk Consult GmbH in den Jahren 2012-2014 durchgeführt.

Im Zuge der Erarbeitung des geologischen, hydrogeologischen und numerischen Modells für das Umfeld der Produktions- und Haldenstandorte Hattorf und Unterbreizbach war in einem ersten Schritt die Erstellung einer digitalen geologischen Karte (GK25, Maßstab 1:25.000) im osthessischen und westthüringischen Werra-Kaligebiet notwendig. Auf Grundlage dieser GK25 und der Auswertung von Bohrungen, geophysikalischen Daten, Strukturkarten und Literatur zum tektonischen Bau des Arbeitsgebietes wurde ein geologisches 3D-Modell erstellt. Dazu wurde auf Datensätze der geologischen Landesämter HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) und TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, inzwischen Teil des TLUBN) zurückgegriffen. Vom Auftraggeber wurde ein Modellgebiet (s. Anlage 1) festgelegt, das aus Flächenanteilen der topographischen Karten TK25 Blatt 5125 Friedewald, Blatt 5126 Vacha, Blatt 5225 Geisa und Blatt 5226 Stadtlengsfeld besteht. Die GK25 und das geologische 3D-Modell beinhalten einen 200 m breiten Randstreifen um das Modellgebiet, wodurch sich eine Gesamtfläche von 94,4 km² ergibt. In diesem geologischen 3D-Modell wurden Eingangsdaten mit Datum bis zum 20.01.2014 berücksichtigt.

Seit dem Jahr 2013 waren im Rahmen von Baugrunderkundungen, Instandsetzungen, Neuerichtungen von Grundwassermessstellen und vergleichbaren Maßnahmen umfangreiche zusätzliche Erkenntnisse über das Untersuchungsgebiet gewonnen worden, die bei der Erstellung des ursprünglichen geologischen 3D-Modells noch nicht verfügbar waren. Aufgrund der

Vielzahl und der hohen Relevanz der neu verfügbaren Daten wurde beschlossen, die o.g. Modelle zu aktualisieren und fortzuschreiben. Die Aktualisierung des geologischen 3D-Modells erfolgte in enger Rückkopplung mit der ebenfalls fortgeschriebenen GK25, um die gegenseitige Konsistenz sicher zu stellen. Besondere Berücksichtigung bei der Ausgestaltung fanden die Kommentare zum Vorgängermodell in [U1]. Diese erste Aktualisierung und Fortschreibung des geologischen 3D-Modell hatte den Datenstand 12/2017.

Im Jahr 2020 wurde im Rahmen des Antragsverfahrens zur Haldenerweiterung Phase 2 eine zweite Fortschreibung und Aktualisierung des geologischen 3D-Modells vorgenommen. Grund hierfür war, dass es seit der letzten Fortschreibung im Jahr 2017 zur Abteufung mehrerer neuer Bohrungen im Umfeld der Bestandshalde und der Haldenerweiterung gekommen ist. In der Folge hat sich zum einen lokal die Informationsdichte deutlich erhöht, zum anderen ergaben sich aus den vergleichenden Untersuchungen der erbohrten Lithologien, insbesondere im Abgleich der Gamma-Ray-Logs, neue Erkenntnisse in Bezug auf die Abgrenzung einzelner geologischer Schichten. Dies hat auch Auswirkungen auf die Interpretation der Schichtenverzeichnisse einiger Bestandsbohrungen im Umfeld der neuen Bohrungen, deren Schichtenverzeichnisse an die neuen Erkenntnisse angepasst wurden. Diesen Änderungen trägt das aktualisierte und fortgeschriebene geologische 3D-Modell Rechnung.

2 Modellgebiet

Die Grenzen des Untersuchungsgebiets des geologischen 3D-Modells sind in Abbildung 1 dargestellt und identisch mit den Grenzen der GK25 ([U2]; siehe auch Kapitel 1.1 in [U3]). Das geologische 3D-Modell unterscheidet insgesamt 17 Einheiten (siehe Tabelle 1) und reicht von der Basis der Calvörde-Formation (suC, Modellbasis) bis an die Geländeoberkante. Gegenüber dem Vorgängermodell ist die Einheit der Volpriehausen-Wechselfolge (smVW) in zwei Teilschichten (Hangendes: smVW2, Liegendes: smVW1) untergliedert worden. Lithologische Beschreibungen der jeweiligen Einheiten sind der fortgeschriebenen und aktualisierten GK25 zu entnehmen. Im Unterschied zur lithostratigraphischen Gliederung in der GK25 wurde der Muschelkalk im geologischen 3D-Modell mit Blick auf die Anforderungen der hydrogeologischen und numerischen Grundwassermodellierung nicht weiter untergliedert.

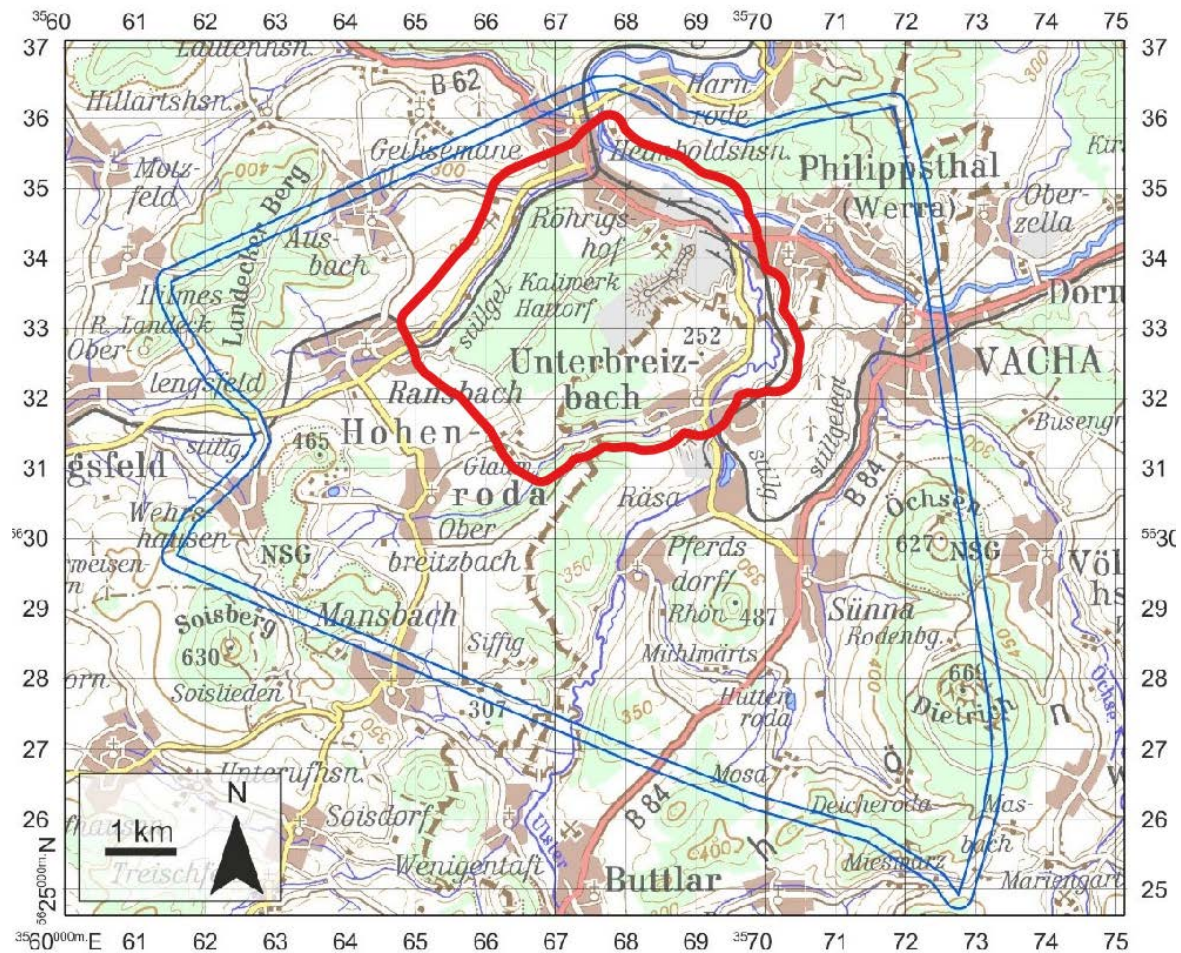


Abbildung 1: Geographische Lage des Modellgebiets (umrandet durch den blauen Rahmen). Untersuchungsraum Haldenumfeld in Rot. Topographische Karte im Hintergrund vom BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2013).

Für die Aktualisierung und Fortschreibung des Geologischen 3D-Modells waren aufgrund der Datenlage, der Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit und der geometrischen Anforderungen des Grundwasserströmungsmodells folgende geologisch vertretbare Festlegungen bzw. Annahmen notwendig:

- Die Störungen verlaufen in den betrachteten Modellschichten alle senkrecht (saiger); der Versatzvektor ist vertikal und nach oben oder unten gerichtet; Störungen mit ≥ 20 m vertikalem Versatzbetrag durchschneiden alle modellierten Festgesteins-Horizonte von der Muschelkalk-Basis bis zur Basis der Calvörde-Formation. In früheren Profilschnitten (z.B. den amtlichen GK25 Blatt 5225 Geisa, GK25 Blatt 5226 Stadtlengsfeld) verlaufen die Störungen von der Geländeoberfläche bis in die Calvörde-Formation (suC) nahezu saiger und zeigen erst ab der unteren Calvörde-Formation und im Zechstein ein Umbiegen zu flacheren Einfallswinkeln. Da in den modellierten Einheiten (bis Basis suC) keine geeigneten Daten zur Bestimmung des Einfallens von Störungen vorliegen (keine sichtbare Abhängigkeit des Störungsverlaufs von der Topographie, keine nutzbaren Reflektoren oberhalb des Plattendolomit (z3CA) in den seismischen Profilen, keine sicher nachgewiesenen Störungen im Buntsandstein in Bohrungen), ist die Modellannahme von saigeren Störungsflächen gerechtfertigt. Weiterhin wurde der Störungsversatz der Modellschichten nur an Störungen mit ≥ 20 m vertikalem Versatzbetrag modelliert, da signifikant kleinere Versatzbeträge im Bereich der Kartierungsgenauigkeiten, einem gewissen Ermessensspielraum bei der stratigraphischen Einstufung von Bohrungen und der Auflösung der verwendeten geophysikalischen Daten liegen und daher nicht realitätsnah zu modellieren sind. Eine Ausnahme bildet das Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf, wo die hohe Dichte an gut dokumentierten (Kern-)Bohrungen und die besondere Relevanz für die hydrogeologische Bearbeitung eine geologische Modellierung von Störungen mit geringeren Versatzbeträgen ≥ 5 m rechtfertigt. Störungen, deren Versatz nicht modelliert wurde, sind im geologischen 3D-Modell als ebenfalls senkrecht einfallende Flächen dargestellt.

- Die Ränder der Vulkanitkörper (Basalt, tmiB) verlaufen vertikal, d.h. die Vulkanite durchschlagen das Deckgebirge als vertikale Röhren oder Gangspalten. Nur untertägig nachgewiesene Basaltgänge von im Modellmaßstab vernachlässigbarer Breite wurden nicht als 3D-Körper modelliert.
- Die modellierten Horizonte keilen unterirdisch nicht aus. Die aus der Oberflächenkartierung ermittelten oder durch Bohrungen nachgewiesenen Maximalmächtigkeiten entsprechen den tatsächlichen Maximalmächtigkeiten auch in tieferen Horizonten.
- Unabhängig von einzelnen Bohrdaten wurde das Quartär (q) nur im Falle derjenigen Vorkommen modelliert, die in einer kartierbaren Mächtigkeit von wenigstens 2 m angetroffen wurden. Da abseits der Betriebsflächen der K+S, für die z.T. sehr detaillierte Baugrunderkundungen vorliegen, und abseits der Talauen des Werra- und Ulstertals, die Dichte an bekannten Quartärmächtigkeiten für eine detaillierte Modellierung der Quartärbasis nicht genügt, wurde dort ein sog. Range Thickness Constraint (erlaubtes Mächtigkeitsintervall, s. Kapitel 2.3) von 2 bis 4 m festgelegt.

Im Gegensatz zur Situation im Vorgängermodell war der Einsatz von Stützstellen auf Basis der mittleren Mächtigkeiten der Lithologien im Umfeld der ESTA-Rückstandshalde im Rahmen der vorgelegten Aktualisierung und Fortschreibung aufgrund der gestiegenen Dichte an verfügbaren Bohrmarkerinformationen nicht länger erforderlich. Die Modellierung der Subrosionssenke Unterbreizbach, die auf eine zweite Gruppe von Stützstellen aufbaut, wurde im Rahmen der vorgelegten Aktualisierung und Fortschreibung nicht verändert, so dass diese Stützstellen ihre Gültigkeit behalten.

Tabelle 1: Beschreibung und lithostratigraphische Einstufung der 17 Modellschichten des digitalen geologischen 3D-Modells.

Modellschicht	Stratigraphische Einheit	Mittlere Mächtigkeit aus Bohrungen, m	Lithologische Kurzbeschreibung
1	A	Relevante Mächtigkeiten nur im Bereich der Halden	Anthropogene Ablagerungen: Halden
2	Q	5	Hangschuttbildungen, Löß und fluviatile Sedimente
3	tPL	Insulares Vorkommen in der Subrosionssenke von Unterbreizbach	Wechselfolge aus orange bis rotbraunen, teilweise geröllführenden Mittelsanden und hellgrauen Ton-/Schlufflagen
4	tmiB	Gesamte Modellmächtigkeit	Basische Vulkanite, Brekzien
5	M	70	Kalk-, Dolomit-, Tonmergel- und Tonsteine
6	So	135	Schluff- und Tonsteine
7	smTC	10	Sandsteine mit Schluff- und Tonsteinlagen
8	smSS	11	Sand- und Schluffsteine, z.T. entfestigt
9	smHW	20	Wechselfolge aus Sand-, Schluff- und Tonsteinen
10	smHS	10	Sandsteine mit Schluff- und Tonsteinlagen
11	smDW	23	Wechselfolge aus Sand-, Schluff- und Tonsteinen
12	smDS	11	Sandsteine mit Schluff- und Tonsteinlagen
13	smVW2	45	Sand-, Schluff- und Tonsteine
14	smVW1	45	Sand-, Schluff- und Tonsteine
15	smVS	30	Sandsteine mit Schluff- und Tonsteinlagen
16	suB	130	Wechselfolge aus Sand-, Schluff- und Tonsteinen, im Liegenden vorwiegend Feinsandsteine
17	suC	220	Feinsandsteine, selten Sandstein-Tonstein-Wechselfolgen

3 Modellierung

3.1 Eingangsdaten

Als Grundlage für die Aktualisierung und Fortschreibung des Geologischen 3D-Modells des Untersuchungsgebiets dienten Daten aus Dokumentationen von Bohrungen und Schürfen und der im Rahmen der vorliegenden Arbeiten erstellten und fortgeschriebenen GK25. Die in der geologischen 3D-Modellierung berücksichtigten Bohrungen sowie die unter der heutigen ESTA-Rückstandshalde Hattorf gelegenen ehemaligen Schürfe wurden anhand folgender Kriterien aus einer vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Datenbank ausgewählt:

- (1) Standort innerhalb des Modellgebiets oder Tiefbohrung in weniger als 3 km Abstand zum Modellgebietsrand;
- (2) Möglichkeit der stratigraphischen Gliederung aufgrund der vorhandenen Daten ist gegeben;
- (3) Standorte von Bohrungen nicht auf Störungen gelegen (trifft zumindest im Buntsandstein für alle nach (1) und (2) selektierten Bohrungen im Modellgebiet zu). Dieses Kriterium ist notwendig, da Bohrmarker, die aus solchen Bohrungen generiert werden in ihrer Teufenlage störungsbedingt von dem lokalen Umfeld stark abweichen können und damit bei der Erzeugung der Horizonte unplausible Falten verursachen. Diese lassen sich auch bei der nachfolgenden Modellierung des Störungsversatzes nur umständlich wieder korrigieren, so dass Bohrungen auf Störungen in der Gesamtbetrachtung die Generierung eines plausiblen Modells weit mehr behindern als befördern.

Tabelle 2: Übersicht der Anzahl der für die Modellierung verwendeten Bohrungen

Bohrungen	Anzahl
Unveränderte Bestandsbohrungen	1258
Veränderte Bestandsbohrungen	29
Neue Bohrungen	32
Gesamt	<u>1319</u>

Entsprechend dieser Kriterien konnten mit der Aktualisierung und Fortschreibung des GM 1319 Bohrungen verwendet werden, ein Zuwachs von 32 Bohrungen gegenüber [U4] (siehe Tabelle 2). Deren stratigraphische Untergliederung wurde im Rahmen einer von der Universität Jena durchgeführten Kernaufnahme [U5] vorgenommen und mit dem HLNUG abgestimmt [U6], [U7] und stützt sich maßgeblich auf die Messergebnisse aus den Gamma-Ray-Logs.

Als Konsequenz aus den neuen Erkenntnissen aus der verfeinerten Methodik zur Schichtendiskriminierung mittels Gamma-Ray-Log im Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf wurden daraufhin auch die vor 2018 ausgeführten Bohrungen erneut überprüft. Im Abgleich der Gamma-Ray-Logs und unter Berücksichtigung der lithologischen Schichtenaufnahme ergab sich bei mehreren Bohrungen, die bereits in älteren Modellversionen enthalten waren, der Bedarf für eine Aktualisierung der Schichtenverzeichnisse.

Dabei wurden fünf Bohrungen grundsätzlich neu eingestuft, d.h. ihr Schichtenverzeichnis wurde auf Grundlage neuer Erkenntnisse so verändert, dass früher im Modell bereits vorhandene Marker in ihrer Teufenlage korrigiert wurden. Dies betrifft die Bohrungen GWM 3, GWM 30/2012 HA, Ink 10/2002 Hattorf, Inklinometer 11 Halde HA und INK 14/2012 HA.

Bei vier weiteren Bohrungen wurde in das Schichtenverzeichnis ein neuer Marker für die Modellschicht smVW2 eingefügt, die restlichen und bereits im bestehenden geologischen 3D-Modell [U4] abgelegten Bohrmarker dieser Bohrungen waren von diesen Änderungen jedoch nicht berührt. Dies trifft auf die Bohrungen GWM 5, GWM 29/2012 HA, GWM 45/2015 HA und GWM 57/2016 HA.

Für die Bearbeitung des geologischen 3D-Modells ergaben sich noch weitere, geringfügige Anpassungen, die nicht auf eine tatsächliche Änderung im Schichtenverzeichnis von Bohrungen zurückzuführen sind. Bei zehn Bohrungen wurden Quartär-Marker in die Modellierung aufgenommen, auf deren Einbeziehung in den Vorgängermodellen verzichtet worden war. Bei zwei Bohrungen war der Bohransatz in [U4] noch nur ungefähr (auf den ganzen Meter gerundet) bekannt, weil die Einmessung zum Redaktionsschluss noch ausstand, und dies wurde mit der hier vorgelegten Aktualisierung und Fortschreibung des geologischen 3D-Modells korrigiert. In neun Fällen lag das Schichtenverzeichnis der Bohrungen zum Redaktionsschluss von [U4] nur als Ausbauvorschlag vor. Mit der hier vorgelegten Aktualisierung und Fortschreibung des geologischen 3D-Modells wurde das offizielle Schichtenverzeichnis im Modell umgesetzt.

Naturgemäß kommt nicht allen Bohrungen die gleiche Bedeutung für die Modellierung zu. So liegt die erbohrte Maximaltiefe in 582 Bohrungen bei weniger als 5 m (Flachbohrung). Einen Überblick über die aus den Bohrungen verfügbare Informationsdichte je Schicht liefert die Tabelle 3.

Der Bereich, in dem neue Informationen aus Bohrmarkern vorlagen, beschränkt sich auf einen Radius von ca. 1300 m im Umkreis der ESTA-Rückstandshalde Hattorf (siehe Anlage 1). Dank der deutlich erhöhten Informationsdichte war es möglich, für die weitere Verfeinerung des Schichtenverlaufes bei der Interpolation auf den Einsatz der 47 Stützstellen im Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf zu verzichten, die in [U4] noch als GOCAD Control Points verwendet worden waren.

Insgesamt verteilen sich die Bohrungsinformationen sehr ungleichmäßig über das Modellgebiet, mit einer Häufung im Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf (siehe Anlage 1 und Tabelle 3). Die Werra- und Ulsterauen sind ebenfalls relativ gut erschlossen, während die Hochflächen im Süden und Westen des Modellgebietes eine geringere Dichte an Bohrungen aufweisen (vgl. auch Anlage 1 in [U3]).

Tabelle 3: Anzahl der eingesetzten Bohrmarker

Bohrmarker	Anzahl
q	625
tPL	1
tmiB	5
mu	3
so	21
smTC	21
smSS	63
smHW	55
smHS	73
smDW	55
smDS	61
smVW2	11
smVW1	23
smVS	60
suB	34
suC	87

Eine Liste der für das Geologische 3D-Modell modellierten Schichten findet sich zusammen mit einer kurzen Beschreibung der Lithologie in Tabelle 1. Die darin aufgeführten mittleren Schichtmächtigkeiten leiten sich aus den für das Modellgebiet vorliegenden Bohrdaten in Anlage 3 ab. Diese ermittelten Werte liegen für jede Schicht innerhalb der in der Region bekannten maximalen und minimalen Schichtmächtigkeiten. Von der regionalen, mittleren Schichtmächtigkeit können die lokalen, mittleren Mächtigkeiten der Schichten im geologischen 3D-Modell jedoch abweichen (siehe Tabelle 1).

Aus [U4] übernommen wurde ein Set mit 24 Stützpunkten im Bereich der Subrosionssenke von Unterbreizbach. Der Bereich ist zum einen gekennzeichnet durch eine markante Depression, die im Geologischen 3D-Modell durch die Bohrung Unterbreizbach I (Nr. 195) definiert wird, und zum anderen durch eine hohe lokale Dichte an Störungen, die durch Bohrungen z.T. nur unbefriedigend aufgeschlossen sind. Den Positionen der Stützpunkte liegen keine realen Bohransatzpunkte zu Grunde. Stattdessen sind sie vom Bearbeiter unter modellierungsstrategischen Gesichtspunkten frei gewählt worden. Im Osten der Bohrung Unterbreizbach I (Nr. 195) bilden die Stützpunkte einen Halbkreis von ungefähr 170° im Abstand von etwa 600 m um die Bohrung und definieren damit das Ende der Depression. Die restlichen Stützpunkte verteilen sich im Westen der Bohrung Unterbreizbach I (Nr. 195), ebenfalls beginnend ab einem Abstand von 600 m zur Bohrung, bis an die geoelektrischen Profile Unterbreizbach-Thüringen-Quellfassung ([U8], [U9]) und stabilisieren somit die Modellschichtmächtigkeiten zwischen den Störungen 6, 13 und 14 (siehe Tabelle 5 und Anlage 6).

Nachfolgend genannte Elemente wurden als Datengrundlage für die GOCAD-Modellierung verwendet:

- Polygone: Verbreitungsgebiet eines Grenzhorizontes zwischen zwei Einheiten gemäß Ausstrichgrenzen (abgedeckt) sowie Störungen, Modellgebietsrand, Haldengrenzen, Basaltausstriche (abgedeckt) und Quartärausstriche auf Basis der geologischen Kartierung;
- Linienobjekte: kartierte Ausstriche von Grenzhorizonten und Teufenlinien der Basis des Volpriehausen-Sandsteins aus [U10] sowie Bohrpfade der Bohrungen, kartierte Störungsausstriche, kleinere Flüsse und die Ufer größerer Flüsse (Werra, Ulster); Höhenlinien der Haldenbasis der ESTA-Rückstandshalde Hattorf;
- Punkte: Bohrmarker;
- Versätze und Bewegungssinn der Störungen;
- Mächtigkeitsabschätzungen für die Modellschichten nach verschiedenen Autoren sowie gemäß vorliegender Bohrungen und anhand kartierter Ausstriche und bekannter Aufschlüsse (siehe Tabelle 4);

- Ein DGM mit 20 m Auflösung, berechnet aus dem DGM5 (Grundlage der Arbeit von [U11]). Ein DGM mit 1 m Auflösung existiert für einen Teil des Untersuchungsgebietes und ist im geologischen 3D-Modell digital hinterlegt. Die reduzierte Auflösung genügt für die Darstellung im angestrebten Maßstab und reduziert den Rechenaufwand auf ein praktikables Maß.

Weitere Elemente wurden in die Modelldarstellung einbezogen, um Sachverhalte an der Geländeoberfläche darzustellen, darunter Grenzen von Trinkwasserschutzzonen, Naturschutzgebieten und Landschaftsschutzgebieten, Umrisse von Subrosionssenken, die Grenze des bestehenden Haldenstandortes Hattorf und der geplanten Haldenerweiterungen sowie Gewässer.

Hinsichtlich der Lagerungsverhältnisse und gestörten Bereiche erfolgte ein Abgleich mit Altseismik-Daten der Messkampagnen Eschwege-Rotenburg [U12], Hattorf I [U13], Hattorf II [U14], Hattorf III [U15], Hattorf IV [U16] und Sünna [U17]. Diese wurden bereits bei der Erstellung der GK25 zur Bewertung von möglichen Störungen herangezogen. Da der oberste durchgängig nachgewiesene Reflektor X, der dem Plattendolomit (z3CA) entspricht, bereits unterhalb des betrachteten Modellraumes (Basis suC) liegt, konnten die Reflektoren nicht direkt in die geologische 3D-Modellierung einbezogen werden. Ein Constraint (Zwangspunkt) für die Modellierung ergibt sich daraus, dass der modellierte Horizont suC (Basis der Calvörde-Formation und Basis des Modellraumes) oberhalb des Reflektors X (Plattendolomit) liegen muss.

Tabelle 4: Übersicht der Quellenlage zur Mächtigkeit der Formationen vom Leine-Ton (z3T) bis zur Fulda-Formation (z7)

Quelle	Mächtigkeit _{MIN} , [m]	Mächtigkeit _{MAX} , [m]
Blatt 5126 Vacha [U18]	30	50
Blatt 5225 Geisa [U19]	37	50
Blatt 5226 Stadtlengsfeld [U20]	30	45

In ungestörten, nicht durch Subrosion beeinflussten und nicht verkippten Bereichen sollte die Distanz zwischen Calvörde-Formation (suC) und dem Plattendolomit (z3CA) der Mächtigkeit der Formationen vom Leine-Ton (z3T) bis zur Fulda-Formation (z7) entsprechen, die, je nach Quellenlage, mit rund 30 bis 50 m angegeben wird (siehe Tabelle 3). Dabei ist zu beachten, dass die ermittelte Teufenlage der Reflektoren unter anderem von einem korrekt gewählten Geschwindigkeitsansatz für das Deckgebirge abhängt und daher gerade in gestörten Bereichen mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist (siehe [U14] für eine Diskussion der Fehlerquellen und Modellannahmen).

Das aktualisierte geologische 3D-Modell beinhaltet zusätzliche Informationen in Form von aktuellen geoelektrischen Messergebnissen ([U21]; [U9]; [U8]; [U22]; [U23]; [U24]; [U25]). Die geoelektrischen Messungen wurden im unmittelbaren Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf im Süden und Südwesten durchgeführt.

3.2 Störungsinventar

Das aktualisierte und fortgeschriebene Störungsinventar hat sich gegenüber dem Stand in [U4] nur in einem Bereich geändert (siehe Anlage 5). Die Störungen mit der Nummer 17, die in [U4] noch im Norden der ESTA-Rückstandshalde Hattorf in einer charakteristischen Gabelform zusammen gelaufen ist (siehe Anlage 6 der [U4]), ist verkürzt worden. Beide Teilarme der Störung enden nun etwa auf Höhe der Südostflanke der ESTA-Rückstandshalde Hattorf, sind also nicht länger verbunden (siehe Anlage 5). Der Grund für diese Entscheidung war, dass in diesem Bereich nun eine deutlich höhere Dichte an tiefen Bohrinformationen aus den Schichtenverzeichnissen neu errichteter Grundwassermessstellen (GWM 66/2018 HA bis GWM 77/2018 HA sowie GWM 83/2018 HA bis GWM 85/2018 HA) verfügbar ist. Aus diesen lassen sich keine Hinweise auf das Vorhandensein lokaler Störungen ableiten, so wie sie aus dem modellierten Störungs- und Schichtenverlauf in [U4] zu erwarten gewesen wäre. Entsprechende Versätze in den Schichthöhen konnten nicht beobachtet werden. Gleichzeitig ist die Bestimmung der Schichtgrenzen in diesen neuen Bohrungen aufgrund der vorliegenden Gamma-Ray-Logs besonders präzise und methodisch konsistent (siehe [U5]; [U6]; [U7]). Folglich erklärt sich der Bedarf einer Anpassung des geologischen 3D-Modells. Eine vollständige Auflistung aller im geologischen 3D-Modell umgesetzten Störungen enthält die Tabelle 5, die, von den soeben beschriebenen Neuerungen abgesehen, weiterhin auf Anlage 4.1 in [U2] beruht.

Tabelle 5: Liste der Störungen im Untersuchungsraum und ihrer Umsetzung im geologischen 3D-Modell

Nr.	Störung/Gruppe von Störungen	Quelle	Lage der Tiefscholle ausgehend von der Störung/Gruppe von Störungen	Versatz, m (ca.)
1	Störung unter / N von Heimbolds- hausen	Kartierung LANGE (1959)	W	70
2	Störungen am Burgholz	Kartierung LANGE (1959)	W	35
3	Störungen NE Philippsthal	GK25 5126 Vacha	S	35
4	Störung am Lohberg	Aktualisierte GK25	W	47
5	Vier Störungen unter den Ulster- wiesen	BARNASCH et al. (2013)	Von links nach rechts (v.l.n.r.): W, W, E, W	(v.l.n.r.) 55, 10 25, 25
6	Störung östlich der Anhydrithalde	Bericht zur aktualisierten und fortgeschriebenen GK 25	E	20
7	Störung Kreuzgraben Ostseite	FINKENWIRTH et al. (1977)	N	16
8	Störung Kreuzgraben Westseite	FINKENWIRTH et al. (1977)	S	25
9	Störung Ochsengraben Ostseite	Bericht zur aktualisierten und fortgeschriebenen GK 25	N	12
10	Störung Kreuzgraben – Ochsengra- ben	FINKENWIRTH et al. (1977)	E	Nördlich von Nr. 9: 25; nördlich von Nr. 8: 12; südlich von Nr. 8: 40
11	Störung unter Vacha	ELLENBERG (2004)	SE	110

Nr.	Störung/Gruppe von Störungen	Quelle	Lage der Tiefscholle ausgehend von der Störung/Gruppe von Störungen	Versatz, m (ca.)
12	Störungen entlang der Öchse und der Sünna sowie an der Westseite des Öchsenbergs	ELLENBERG (2004)	Nordstörung: E; Mittelstörung: entfällt; Südstörung: E, westliche Gabel jedoch nach W	Nordstörung: 20; Südstörung: 40; Westliche. Gabel der Südstörung.: 20
13	Störung im Ulstertal am Wolfsgaben	WOITSCHACH (1977)	S	10
14	Zwei Störungen vom Rödersberg zum Kreuzgraben	FALK et al. (1961–63 u. 1976), GK25 5126 Vacha, FINKENWIRTH et al. (1977)	Westteil Nordstörung (Übergang zu Nr. 10): SW;Mittelteil Nordstörung: N;Ostteil Nordstörung: entfallen;Südstörung: S	Westteil Nordstörung: 10;Mittelteil Nordstörung: 28;Südstörung: 12
15	Störung zwischen Philippsthal und Räsa	BARNASCH et al. (2013)	nicht modelliert	
16	Störung nördlich Unterbreizbach	BARNASCH et al. (2013)	nicht modelliert	
17	Ehemalige Gabelstörung im südlichen Kreuzgraben	Kartierung FINKENWIRTH et al. (1977), Aktualisierte GK25; Bereich nördlich Kreuzgraben entfallen	E	35
18	Störung bei Schellmühle	Kartierung LANGE (1959)	W	11
19	Störung am Landecker Berg	ZEIBIG et al. (2012) und „Brüche“ nach BÜCHEL et al. (2012)	ohne Versatz modelliert	

Nr.	Störung/Gruppe von Störungen	Quelle	Lage der Tiefscholle ausgehend von der Störung/Gruppe von Störungen	Versatz, m (ca.)
20	Störungen zwischen Räsa und Ransbach	BÜCHEL et al. (2012)	nicht modelliert	
21	Störung von Sünna zum Ulstertal bei Räsa	ZEIBIG et al. (2012)	S	20
22	Störung am Südhang des Öchsenbergs	GK25 5126 Vacha	Ohne Versatz modelliert	
23	Störung im Ulstertal von Pferdsdorf nach Räsa	Bericht zur aktualisierten und fortgeschriebenen GK 25	E	40
24	Störung unter Oberbreitzbach und am Schwarzelsberg	BARNASCH et al. (2013)	Nicht modelliert	
25	Störungen im Bereich Soisberg, Grasberg und NO Mansbach	GK25 5225 Geisa	Komplexes Störungssystem, z.T. mit abgesenkter Scholle im SW, z.T. ohne Versatz modelliert	10 bis 20
26	Störung am Ulsterberg SW Pferdsdorf	Kartierung FALK et al. (1961–63 u. 1976) und zugehörige Strukturkarten nach LÜTZNER et al. (1976)	ohne Versatz modelliert	
27	Störung von Mühlwärts zum Winkelgraben, Störungen am Südhang des Ulsterbergs	Kartierung FALK et al. (1961–63 u. 1976) und zugehörige Strukturkarten bei LÜTZNER et al. (1976)	NE	15, mit Mittelteil 45

Nr.	Störung/Gruppe von Störungen	Quelle	Lage der Tiefscholle ausgehend von der Störung/Gruppe von Störungen	Versatz, m (ca.)
28	Zwei Störungen im Hobholz SW der ESTA-Rückstandshalde Hattorf	Bericht zur aktualisierten und fortgeschriebenen GK 25	Weststörung: W; Oststörung: E	5
29	Kurzer Seitenzweig der Störung 30	Bericht zur aktualisierten und fortgeschriebenen GK 25	E	5
30	Verlängerung der Störung 17 vom SW-Rand der ESTA-Rückstandshalde nach Unterbreizbach	Bericht zur aktualisierten und fortgeschriebenen GK 25	E	5
31	E-W verlaufende Störung vom Wolfsgraben bei Unterbreizbach in das südliche Haldenvorfeld	Bericht zur aktualisierten und fortgeschriebenen GK 25	N	5

3.3 Durchführung

Zur Erstellung des ursprünglichen Geologischen 3D-Modells wurde die Software GOCAD 2011.2 der Firma Paradigm verwendet. Die Bearbeitung erfolgte im Zeitraum August 2013 bis März 2014 durch Dr. Michael Buchwitz am Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg. Dieses Modell diente als Grundlage für die erste Aktualisierung und Fortschreibung. Eine erste Aktualisierung und Fortschreibung des Geologischen 3D-Modells erfolgte 2017/2018 durch die Firma Jungk Consult GmbH (heute: AKVO GmbH) (Dr. Sören Wilke) mit Hilfe der Software GOCAD 15.5 der Firma Paradigm. Auf dieser erstmalig fortgeschriebenen Version basiert die aktuell vorgelegte, zweite Aktualisierung und Fortschreibung des Geologischen 3D-Modells. Diese erfolgte 2020/2021 durch den gleichen Sachbearbeiter und unter Nutzung derselben Software.

Der Fokus bei der jüngsten Aktualisierung und Fortschreibung des Geologischen 3D-Modells lag auf der Anpassung bestehender Schichten an die veränderte Informationslage. Die Ausnahme stellt die neue Ausweisung der Modellschicht smVW2 dar, die im Vorläufermodell [U4] in der dortigen Modellschicht smVW enthalten war. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Reaktion auf die neuen Erkenntnisse aus [U5] und [U6] eine Unterteilung der ehemaligen Modellschicht smVW in zwei separate Modellschichten smVW1 (unterer, toniger Abschnitt) und smVW2 (oberer, sandiger Abschnitt) vorgenommen.

Insofern spielten viele der grundlegenden Arbeitsschritte der geologischen Modellierung, die bei der Neuerstellung geologischer 3D-Modelle von zentraler Bedeutung sind und die in [U26] und [U4] detailliert beschrieben werden, im Zuge der hier vorgelegten Aktualisierung und Fortschreibung nur eine untergeordnete Rolle. Im Zentrum der Bearbeitung standen im Wesentlichen die folgenden drei Arbeitsschritte:

1. Partielle Entfernung der Störung und 17 (siehe Tabelle 5)
2. Einfügen der neuen Modellschicht smVW2
3. Anpassung aller Modellschichten an die neu hinzugekommenen Bohrmarker

Das Vorgehen bei der Umsetzung dieser Arbeitsschritte ist in den Unterkapiteln 3.3.1, 3.3.2 und 3.3.3 erläutert.

3.3.1 Partielle Entfernung der Störung 17

Die Störung 17 (siehe Tabelle 5) wurde aus den in Kapitel 3.2 beschriebenen Gründen wie in Anlage 5 dargestellt aus dem Modell gelöscht. Die Löschung erfolgt im GOCAD manuell für jede betroffene Modellschicht einzeln. Der Prozess lässt sich in vier Teilschritte untergliedern.

Im ersten Schritt wurde der Versatz zwischen den verschiedenen Schichtschollen, der nach Interpretation des aktualisierten und fortgeschriebenen Modelles nicht existiert, provisorisch minimiert, um harte Übergänge in den nicht länger gestörten Bereichen zu vermeiden. Dazu wurden dabei die abgeschobenen Bereiche im Osten der ehemaligen Störung 17 mit den in GOCAD zur Verfügung stehenden Tools („Move with vector“, Abstands- und Mächtigkeitsconstraints, manuelle Modellierung) angehoben. Dies erfolgte bereits mit Blick auf die neu verfügbaren Bohrinformationen, auch wenn die formale Präzisionsanpassung an die Bohrmarker erst nach Abschluss der Störungsausheilung wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben stattfand.

Im zweiten Schritt wurden diejenigen Randbereiche der gestörten Modellschicht markiert, für die die Störung aufgehoben werden sollte. Der Befehl dazu lautet:

`SURFACE → Constraints → Constraints on Border → Set Vectorial Link`

Im dritten Schritt wurde verbliebener Versatz zwischen den geteilten Schichtgrenzen restlos behoben. Dabei wurden die Grenzknotenpunkte auf beiden Seiten der Störung zur Deckung gebracht. Der entsprechende Befehl lautet:

`SURFACE → Tools → Part → Sew Border Using FVL Constraint`

Im vierten und letzten Schritt wurde GOCAD darüber informiert, dass es in diesem Bereich auch formal keine Grenze innerhalb der Modellschicht mehr gibt (die durch die Überlagerung der ehemaligen Schnittbereiche real ja bereits behoben wurde). Der Befehl dazu lautet:

`SURFACE → Tools → Border → Uncut → one`

Der ehemals gestörte Bereich ist damit „vernäht“.

3.3.2 Einfügen der neuen Modellschicht smVW2

Die Aufsplittung der ehemaligen Modellschicht smVW in einen oberen, sandigen Teil smVW2 und einen unteren, tonigen Teil smVW1 ist eine neue Entwicklung und Bohrmarkerinformationen für die Schicht smVW2 liegen nur in denjenigen Schichtenverzeichnissen vor, die für die aktuelle Fortschreibung und Aktualisierung des geologischen 3D-Modells neu hinzugekommen waren oder nachträglich aktualisiert wurden (siehe Kapitel 3.1). Wie sich der Anlage 1 entnehmen lässt, beschränken sich detaillierte Informationen zum Schichtverlauf damit auf einen Bereich im unmittelbaren Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf.

Die Konstruktion der Modellschicht smVW2 erfolgte vor diesem Hintergrund der Ausgangsdatenlage als Derivat der Modellschicht des smVW1. Dazu wurde aus den verfügbaren Bohrungen der Mittelwert des Abstandes zwischen der smVW2 und der smVW1 ermittelt (=Mächtigkeit des smVW1, siehe Tabelle 1). Anschließend wurde eine Kopie der Modellschicht smVW1 erzeugt und um den ermittelten Abstandswert in vertikaler Richtung angehoben.

Die so erzeugte Modellschicht „smVW1+45m“ wurde dann, nicht anders als auch die restlichen Modellschichten, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben an die ihr zugeordneten Bohrmarker angepasst und weiterverarbeitet und dadurch zur Modellschicht smVW2.

3.3.3 Anpassung aller Modellschichten an die neu hinzu gekommenen Bohrmarker

Neue Bohrungen, neue Schichtenverzeichnisse (einige der letzteren mit Bezug auf bereits im Modell vorhandenen Bohrungen, vergleiche Tabelle 2) und weitere Detailänderungen (vergleiche Kapitel 3.1) wurden wie schon in [U4], [U26] aus .csv-Dateien in GOCAD eingeladen und dort als well location und well marker hinterlegt. Aus diesem so fortgeschriebenen und aktualisierten Satz von Bohrmarkern wurden modellschichtspezifische GOCAD-PointSets erzeugt.

`POINTSET → new from well markers`

Diese PointSets dienten als primäre Constraints bei der Nachinterpolation der bereits existierenden Schichten (vergleiche Kapitel 3.3.2).

`SURFACE → constraints → control points → set control points`

Als zusätzlicher Constraint wurde die Bewegung der Flächenränder in horizontaler Richtung unterbunden, um ein wahlloses Schrumpfen bzw. eine Ausdehnung der Schichtgrenzen zu verhindern.

`SURFACE → constraints → constraint on border → set on straight line → all borders`

Da der Bereich im Modell für den neue Informationen vorliegen sich weitgehend auf das Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf beschränkt (siehe Anlage 1), erfolgte die Nachinterpolation der Schichten nicht über die gesamte Schichtausdehnung, sondern innerhalb von Teilbereichen, die als GOCAD-Regions im Programm definiert wurden. Dazu wurden flächenindividuell Bereiche identifiziert und markiert, in denen die geänderte Informationslage eine Überarbeitung des Schichtenverlaufes mittels Interpolation notwendig machte.

`SURFACE → interpolation → geometry → in region`

Im Falle eines Vorliegens räumlich disparater Cluster von Neuinformationen wurden vereinzelt auch mehrere GOCAD-Regions für eine Modellschicht definiert und anschließend der Reihe nach für jede Region einzeln interpoliert, bis das Ergebnis allen Eingangsinformationen Rechnung trug.

Im Anschluss an die Interpolation wurde überprüft, ob die resultierende Modellschicht nun (teilweise) oberhalb der durch das digitale Geländemodell repräsentierten Geländeoberkante (quartärabgedeckt) zum Liegen käme. Wo dies der Fall war, wurde die Modellschicht an dem DGM abgeschnitten, die überstehenden Teile gelöscht.

`SURFACE → Tools → cut → by surfaces`

`SURFACE → Tools → Part → delete selected`

Ein solches "Erodieren" von Schichten war insbesondere dort erforderlich, wo die Korrektur der ehemaligen Störung 17 zu einer allgemeinen Anhebung des Schichtenpaketes geführt hatte (siehe Kapitel 3.3.1).

4 Einschätzung der erzielten Modellgüte

Das wesentliche Maß für die Quantifizierung der Modellgüte ist die Abweichung zwischen erbohrten Schichtkontakten, den Bohrmarkern, und den dazugehörigen modellierten Schichten einer Einheit. In den nachfolgenden Histogrammen (Abbildung 2 bis Abbildung 3) sind diese Abweichungen grafisch dargestellt. Die Tabelle 6 zeigt statistische Kennwerte der jeweiligen Abweichungsverteilung.

Tabelle 6: Statistische Kennwerte der Abweichung zwischen Bohrmarkern und Modellschicht

Modellschicht	Median	Median- Abweichung ¹⁾	Q90 ²⁾	Maximalwert
smTC	0,2	0,1	1,0	1,7
smSS	0,1	0,1	1,2	8,0
smHW	0,1	0,1	2,2	12,8
smHS	0,1	0,1	2,7	16,3
smDW	0,1	0,1	0,9	26,5
smDS	0,2	0,1	1,1	47,3
smVW2	0,2	0,1	0,4	0,7
smVW1	1,5	1,4	6,0	6,9
smVS	0,7	0,5	5,5	70,4
suB	1,7	1,4	10,8	15,3
suC	0,9	0,7	7,9	18,7

Alle Zahlenangaben in m

¹⁾ Median der absoluten Abweichung der Einzelwerte vom Median

²⁾ 90%-Quantil der Abweichungen

Gegenüber dem Vorgängermodell [U4] zeigen sich maßgebliche Änderungen vor allem im Bereich von Hardeggen- und Detfurth-Formation. In diesen für die Lokalisierung des schwebenden Grundwassers besonders sensiblen Schichten konnte die Abweichung zwischen Markern und Modellschicht noch einmal deutlich gesenkt werden. So liegt beispielsweise der Median der Abweichung für den smHW nun bei nur noch 0,1 m (siehe Tabelle 6), eine Verbesserung gegenüber [U4] um 1,4 m. Auch die Median-Abweichung hält sich in engen Grenzen und liegt in allen Modellschichten unter 1,5 m. Für die Modellschichten smTC bis smVW2, die im Fokus der hier beschriebenen jüngsten Aktualisierung und Fortschreibung des geologischen 3D-Modells stehen, liegt der Median sogar bei $\leq 0,2$ m bei einer Median-Abweichung $\leq 0,1$ m.

Eine Betrachtung des 90%-Quantils in Tabelle 6 macht deutlich, dass auch Ausreißer-Werte zumeist nur um wenige Meter von den Modellschichten abweichen, wobei hier ein Gefälle zwischen dem Bereich smTC bis smVW2 einerseits und smVW1 bis suC andererseits deutlich wird. Dieser Effekt lässt sich auch im Vergleich der Abbildung 2 und der Abbildung 3 erkennen. Unterschiede, wie sie durch das 90%-Quantil der Abweichungswerte kenntlich gemacht werden, entstehen im Modell oftmals in Bereichen, wo nahe beieinander liegende Bohrmarker jeweils unterschiedliche Angaben zur Höhe der jeweiligen Schicht machen, so dass bei der Modellierung, je nach Auflösung der lokalen Netzdiskretisierung, zwischen den sich widersprechenden Markern gemittelt wird, so dass hinterher beide (oder mehr) Marker um meist wenige Meter über oder unter der Modellschicht zum Liegen kommen. Solche Inkonsistenzen sind eine Folge der Herausforderungen, die die präzise Abgrenzung der optisch und lithologisch oft uniformen Schichten des Buntsandsteins in den Bohrkernen darstellt. Deutlich wird dies auch durch den Umstand, dass die Modellschicht smVW2, die ausschließlich auf Basis reproduzierbarer Gamma-Ray-Log-Features in den Schichtenverzeichnissen identifiziert wurde, von dem Auftreten solcher Abweichungen quasi nicht betroffen ist (90%-Quantil der Abweichungen = 0,4 m; siehe Tabelle 6).

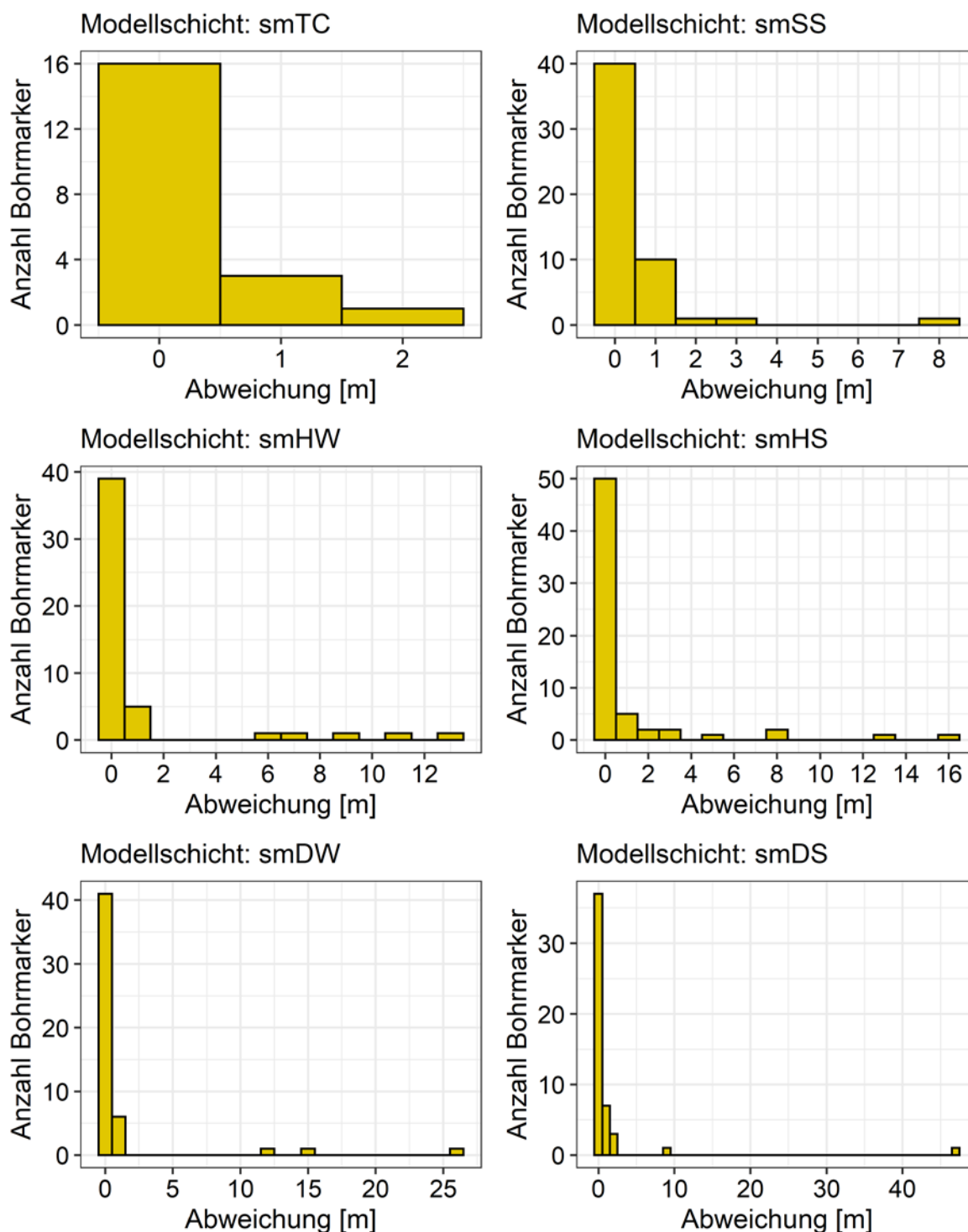


Abbildung 2: Histogramme der Abweichung zwischen Bohrmarkern und modellierter Modellschicht für die Schichten smTC bis smDS.

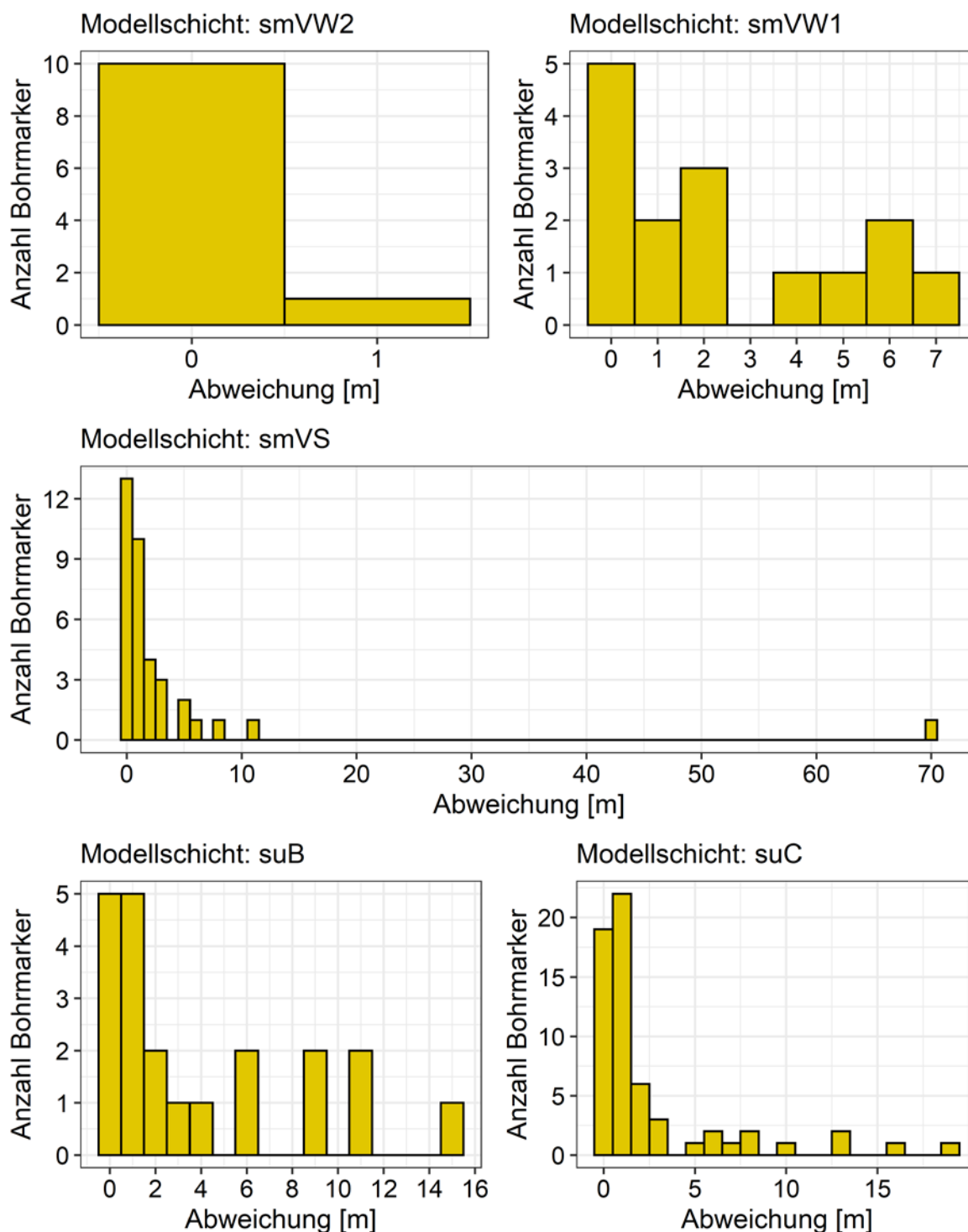


Abbildung 3: Histogramme der Abweichung zwischen Bohrmarkern und modellierter Modellschicht für die Schichten smVW2 bis suC.

Neben den bereits diskutierten, gewöhnlichen Ausreißern zeigen sich in Abbildung 2 und Abbildung 3 sowie exemplarisch in der Spalte der Maximalwerte in Tabelle 6 immer wieder auch vereinzelte Extremwerte > 10 m. Solche Werte können im Modell unter Umständen zu Stande kommen, wenn eine Bohrung sehr nahe an einer Störung oder einem kartierten Schichtausbiss in Hanglage gelegen ist. Dann treffen zwei unterschiedliche Klassen von Eingangsinformationen aufeinander (Bohrmarker versus Störungsversatz, bzw. Bohrmarker versus Kartiерergebnis) und es kann im Einzelfall sinnvoll sein, Bohrmarkerinformationen als nachrangig zu behandeln.

Die Abbildung 4 vermittelt einen Eindruck davon, wo maximale Abweichungen zwischen Bohrmarkern und modellierten Schichten auftreten. Die meisten dieser Maximalabweichungen befinden sich demnach in erheblicher Distanz (2,5 km und mehr) zur ESTA-Rückstandshalde Hattorf, außerhalb des in Anlage 5 dargestellten Untersuchungsraums. Die Ausnahme von dieser Regel bilden die Marker für smTC, smVW2 und suB, wobei die maximalen Abweichungen zwischen Bohrmarker und Modellschicht für den smTC nur 1,7 m und für den smVW2 sogar nur 0,7 m betragen und damit tatsächlich Indikatoren für eine insgesamt sehr gut gelungene Interpolation dieser Modellschichten sind.

Der Marker mit der maximalen Schichtabweichung für den suB befindet sich ca. 1 km östlich der ESTA-Rückstandshalde Hattorf und weist eine Distanz von 15,3 m zur Modellschicht auf. Der Marker stammt aus dem Schichtenverzeichnis der Bohrung Schluckbrunnen Hattorf 2 (K+S-Archiv-Nr.: 191) und liegt zwischen den beiden westlichsten Teilen der Störungsgruppe mit der Nummer 5 (siehe Anlage 5). Die Position der Bohrung Schluckbrunnen Hattorf 2 nahe der Startpunkte zweier eng beieinander liegender Störungen macht die exakte und realistische Anpassung an den Bohrmarker in diesem Bereich schwierig.

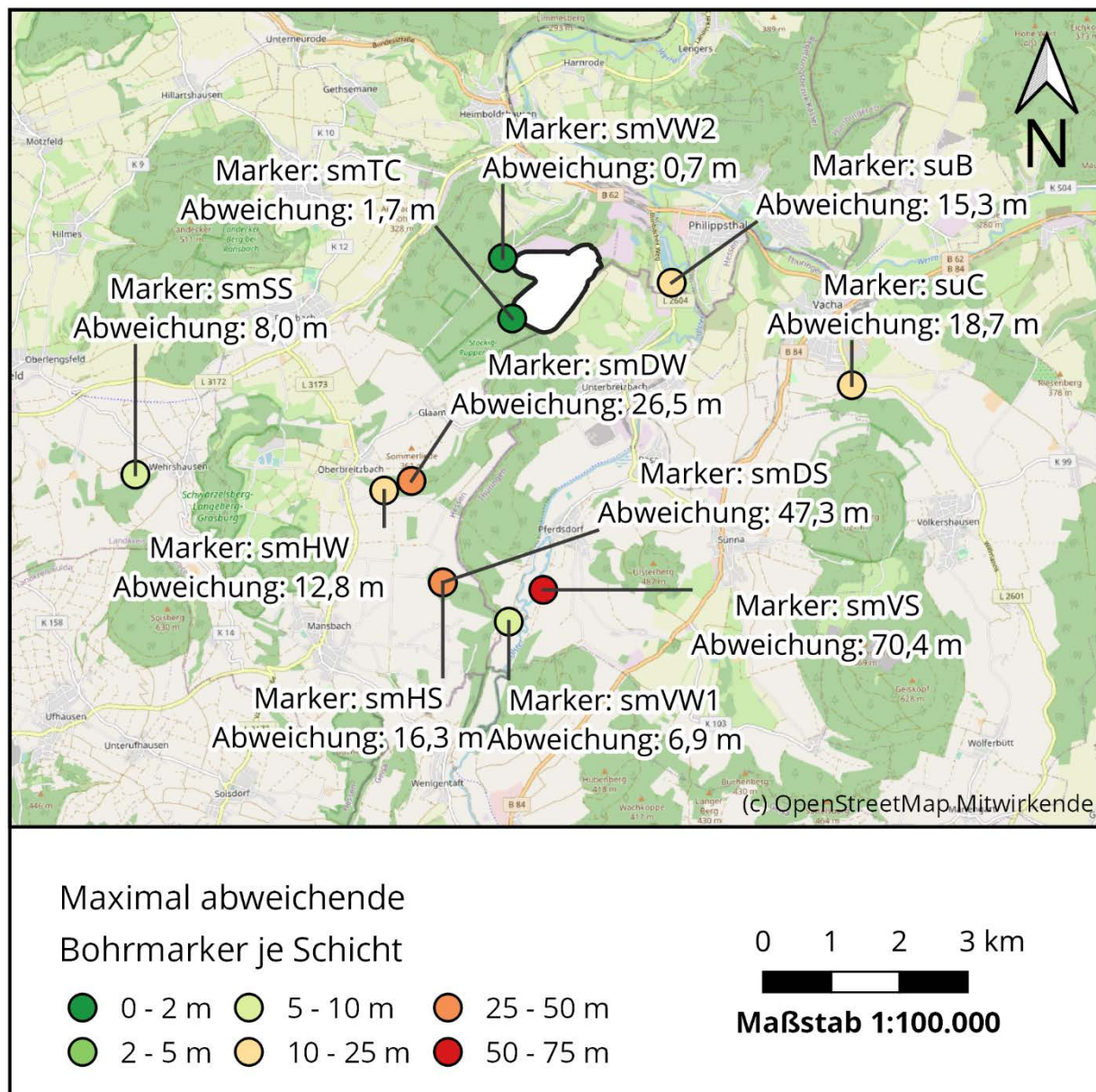


Abbildung 4: Position der Bohrmarker mit maximaler Abweichung je Modellschicht

Die größten maximalen Abweichungen zwischen einem Bohrmarker und seiner jeweiligen Modellschicht treten in erheblicher Distanz zur ESTA-Rückstandshalde Hattorf im Süden des Modellgebietes auf und damit in einem Bereich, der etwa für die Grundwasserströmungsmodellierung keine direkte Relevanz besitzt (siehe Abbildung 4, vergleiche Anlage 5). Betroffen sind vor allem die Modellschichten smDW (maximale Abweichung 26,5 m), smDS (maximale Abweichung 47,3 m) und insbesondere der smVS (70,4 m). Wie aus Abbildung 2 und Abbildung 3 abzulesen ist, stellen diese Werte in der

Tat isolierte Einzelphänomene dar, die für die Allgemeine Güte der Anpassung der Modellschichten an die Bohrmarker nicht repräsentativ sind.

Der Bohrmarker mit maximaler Schichtabweichung für den smDW stammt aus der Bohrung Hy Oberbreitzbach II/66 (K+S-Archiv-Nr.: 1370), die sich nahe eines Armes der Störung 25 (vergleiche Anlage 5) befindet. Die Abweichung entsteht in Kombination der unterschiedlichen Eingangsinformationen und als Residuum der im GOCAD auftretenden „Verschleppungs“-Modellartefakte von Schichträndern an Störungen.

Der Bohrmarker mit maximaler Schichtabweichung für den smDS stammt aus der Bohrung Hy Mansbach VB 1/66 (K+S-Archiv-Nr.: 1463), in der auch die maximale Abweichung für den smHS (16,3 m) festgestellt wurde. Das Schichtenverzeichnis der Bohrung Hy Mansbach VB 1/66 weist insgesamt 3 Bohrmarker aus. Neben den bereits genannten Markern für den smHS und den smDS noch einen für q. Die Bohrung Hy Mansbach VB 1/66 liegt weniger als 10 m von einem Arm der Störung 25 (vergleiche Anlage 5) entfernt. Möglich ist, dass diese Störung in Wirklichkeit einige Meter weiter südlich verläuft als im Modell, so dass die Bohrung Hy Mansbach VB 1/66 dort nun auf der „falschen“ Seite liegt und dies einen erheblichen Teil der Diskrepanz erklärt. Denkbar wäre auch eine suboptimale Stratifizierung des Schichtenverzeichnisses der Bohrung Hy Mansbach VB 1/66, eine These, auf die das Fehlen eines Bohrmarkers für den smDW hindeutet.

Die höchste Abweichung zwischen einem Bohrmarker und seiner Modellschicht wurde mit 70,4 m für den smVS in der Bohrung Hy Mühlwärts 2/66 (K+S-Archiv-Nr.: 1001) angetroffen. Die Bohrung verfügt ansonsten nur noch über einen Bohrmarker für q. Sie liegt nicht im unmittelbaren Umfeld einer Störung. Der Bohrmarker der Bohrung Hy Mühlwärts 2/66 für den smVS befindet sich im deutlichen Widerspruch zu den aus den Bohrungen im näheren und weiteren Umfeld (etwa jene mit den K+S-Archiv-Nr.: 210, 211, 224 & 225) abgeleiteten Informationen und wurde deshalb bei der Interpolation des Schichtenverlaufes der Modellschicht smVS als offensichtlich fehlerhaft ignoriert.

5 Kenntnisdefizite, Modellartefakte und Vorschläge zu deren Beseitigung

Trotz der hohen Dichte an Bohrungen lässt sich der Schichtenverlauf im Umfeld der Standorts Hattorf nicht überall im Detail auf Basis von Bohrmarkern modellieren. Aufgrund des teilweise komplizierten strukturellen Baus des Bereiches nordöstlich der ESTA-Rückstandshalde Hattorf, bestehend aus einem Bruchschollenmuster auf engstem Raum, beruht das geologische 3D-Modell dort in besonderem Maße auf zusätzlichen Modellannahmen (relativ konstanten Schichtmächtigkeiten, gleichbleibenden Versätzen an Störungen und saiger verlaufenden Störungen).

In den geologischen Profilschnitten (Anlage 2) sind teilweise geologisch nicht begründbare Mächtigkeitsschwankungen der Modelleinheiten zu beobachten. Dies kann verschiedene Gründe haben:

1. Es kann sich um tatsächlich beobachtete Mächtigkeitsschwankungen handeln.
2. Es kann sich um eine Konsequenz aus inkonsistenten oder inhomogenen Bohrerergebnissen handeln. Manche Horizonte sind öfter in Bohrungen dokumentiert als andere. Die stratigraphische Einstufung der modellierten Schichten kann in einzelnen Fällen abweichen.
3. Es kann sich aus den kartierten Ausbisslinien zweier Schichten ergeben, wenn der dort beschriebene Abstand zweier Schichten zueinander im Widerspruch zu Erkenntnissen aus nahegelegenen Bohrungen steht.
4. Mächtigkeitsschwankungen können beim Modellieren eines Störungsversatzes auftreten, insbesondere bei einer Kombination mit den Effekten aus den o. g. Punkten 2. und 3. So sind Schichtumbiegungen an Störungen, die sich an nur wenigen Abschnitten in den Profilschnitten erkennen lassen, keine geologisch begründbaren tektonischen Anschleppungen, sondern Artefakte der geologischen 3D-Modellierung. Diese beruhen auf der nachträglichen Anwendung von Mächtigkeitsconstraints (range thickness constraints) auf bereits mit Störungen interpolierten Flächen.

Anhand der vorliegenden Daten konnten die angesprochenen Mächtigkeitsschwankungen weitestgehend bereinigt werden.

Die Abgrenzung der verschiedenen Schichten des Buntsandsteins zueinander ist nicht trivial und Unterschiede zwischen den Lithologien in einzelnen Bohrkernen oft nur subtil ausgeprägt [U5]. In

einigen Bohrungen existieren Übergangszonen, die Charakteristika beider Schichtfolgen aufweisen. Bei der Interpretation einzelner Schichtenverzeichnisse spielen daher mitunter auch Erkenntnisse aus umliegenden Bohrungen eine Rolle. Dabei kommen neben der optischen Inspektion der Bohrkerne auch Gamma-Ray-Logs zum Einsatz [U6].

Aus der wachsenden Anzahl von neuen Informationen aus den in den letzten drei Jahren abgeteufte Bohrungen ergab sich im Vorfeld der hier vorgelegten Fortschreibung und Aktualisierung der Geologischen 3D-Modells die Notwendigkeit zur Anpassung von vier bereits im Vorgängermodell enthaltenen Schichtenverzeichnissen (siehe Kapitel 3.1). Diese Anpassungen dienten dem Zweck, Widersprüche zwischen den Einstufungen in den alten und neuen Schichtenverzeichnissen aufzulösen, wobei im Falle der Abwesenheit eindeutiger lithofazieller Unterscheidungsmerkmale als entscheidende Referenz letztlich das Verlaufsmuster der Gamma-Ray-Logs definiert wurde. Dieser Vorgang verdeutlicht, dass sich die Produktion der Bohrmarkerinformationen, auf denen der Schichtenverlauf im geologischen 3D-Modell beruht, auf fundiertes Expertenwissen stützt, das jedoch naturgemäß nicht jede Ambiguität mit letzter Sicherheit beseitigen kann.

Verkompliziert wird diese Situation durch das reichhaltige Auftreten von Störungen im Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf. Die erneute Anpassung des Störungsmusters in der hier vorgelegten jüngsten Fortschreibung und Aktualisierung des geologischen 3D-Modells, mit der partiellen Löschung der Störung 17, zeigt, dass sich unter Einsatz erheblicher Mittel zur fortgesetzten Aufschlussverdichtung das Verständnis für die Geologie in diesem Bereich dynamisch weiterentwickeln lässt. Änderungen im modellierten Störungsversatz sind mit den verfügbaren Schichtenverzeichnissen der Bohrungen in Einklang zu bringen und haben daher Auswirkungen auf die Modellgeologie insgesamt, die über ihr unmittelbares Umfeld hinaus reichen.

6 Bedeutung für weiterführende Bearbeitungen

Das aktualisierte Geologische 3D-Modell dient als Grundlage folgender Bearbeitungen:

- Fortschreibung und Aktualisierung der geologischen Karte GK25
- Fortschreibung und Aktualisierung des hydrogeologischen Strukturmodells
- Erstellung des numerischen Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodells

In der ersten Bearbeitungsstufe stellt das geologische 3D-Modell die dreidimensionale Situation der geologischen Verhältnisse bereit. Bei der Erstellung des numerischen Grundwasserströmungsmodells muss das vorliegende geologische 3D-Modell wie folgt weiterbearbeitet werden:

- Definition von Mindestmächtigkeiten, da im Grundwasserströmungsmodell die Schichten durchgehend ausgehalten werden müssen und anschließende Korrektur der entstandenen nicht zutreffenden Verbreitungsgebiete durch Zuweisung von Durchlässigkeitsbeiwerten hangender oder liegender Schichten.
- Ausgleich von sehr kleinräumigen Störungsversätzen durch Vergleichmäßigung von Schichtlagen und ebenfalls anschließender Korrektur durch Anpassung der Durchlässigkeitsbeiwerte.
- Berücksichtigung aller bekannten Störungen (unabhängig vom Versatzbetrag) im Berechnungsnetz zur Abbildung zusätzlicher hydraulischer Eigenschaften.
- Abgleich des modellierten Verlaufes der geologischen Schichten mit den im Gelände bestimmten hydraulischen Parametern (bspw. aus Packertests).

7 Zusammenfassung

Das bestehende Geologische 3D-Modell [U4] wurde auf Basis von 32 neu abgeteufte Bohrungen, unter der Berücksichtigung der Aktualisierung der Schichtenverzeichnissen von neun bereits im Modell integrierten Bohrungen (in vier Fällen nur Einfügen des smVW2-Markers), Verbesserungen in der Umsetzung des bestehenden Schichtenverzeichnisses von 20 Bestandsbohrungen sowie durch Änderungen im Verlauf der Störung Nr. 17 aktualisiert und fortgeschrieben. Mit der smVW2 wurde dabei eine neue Modellschicht zwischen smVW und smDS geschaffen und in das Modell integriert.

Im Modell enthalten sind nunmehr somit 17 Modellschichten, deren Interpolation sich wesentlich auf 1198 Schichtkontakte („Bohrmarker“) stützt, die aus den Schichtenverzeichnissen von 1319 berücksichtigten Bohrungen abgeleitet wurden. Als weitere wichtige Informationen sind ein digitales Geländemodell der Geländeoberkante DGM20, aus geologischen Karten übernommene Schichtbisse und im Bereich der Subrosionssenke Unterbreizbach 24 virtuelle Stützmarker in die Modellierung eingegangen.

Im Rahmen dieser Bearbeitung gelang eine nachvollziehbare und logische 3D-Interpretation der geologischen Verhältnisse, die eine ausreichende Grundlage für die nachfolgende Bearbeitung des hydrogeologischen Strukturmodells sowie des numerischen Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodells darstellt.

Literaturverzeichnis

- [U1] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2017): „Erweiterung der Rückstandshalde des Werkes Werra, Standort Hattorf – Bergrechtliches Planfest-stellungsver-fahren; Prüfung des überarbeiteten Antrags; Geologische Grundlagen“. 14-Juni-2017.
- [U2] Jungk Consult GmbH (2018): „Geologisches, Hydrogeologisches und Numerisches Modell für das Umfeld der Produktions- und Haldenstandorte des Werkes Werra Teilgebiet 1: Hattorf/Unterbreizbach. Erläuterung zur aktualisierten geologischen Karte 1 : 25.000 (GK25) des Produkti-ons- und Haldenstandortes Werk Werra der K+S Kali GmbH“, 2018.
- [U3] A. Brosig und F. Scholze (2014): „Geologisches, Hydrogeologisches und Numerisches Modell für das Umfeld der Produktions- und Haldenstandorte des Werkes Werra Teilgebiet 1: Hattorf/Unterbreizbach. Kartierungsbericht zur digitalen geologischen Karte 1 : 25.000 des Produktions- und Haldenstandortes Werk Werra der K+S KALI GmbH“, 2014.
- [U4] Jungk Consult GmbH (2018): „Aktualisierung und Fortschreibung des geologischen, hydrogeo-logischen und numerischen Modells für das Umfeld der Produktions- und Haldenstandorte des Werkes Werra - Teilgebiet 1: Hattorf/Unterbreizbach - Bericht: Geologisches 3D-Modell des Produktions- und Haldenstandortes Werk Werra der K+S KALI GmbH, Stand 12/2017“, Jan. 2018.
- [U5] G. Büchel, R. Graupp, und T. Voigt (2020): „Kernaufnahme, Fazies-Interpretation und lithofazielle Korrelation am Werk Werra, Standort Hattorf, K+S Minerals and Agriculture GmbH“, Jena, 2020.
- [U6] K+S Minerals and Agriculture GmbH (2020): „Korrelation und stratigraphische Einstufung von Kernbohrungen nördlich, nordwestlich und westlich der Haldenerweiterungsfläche (Phase 1) der ESTA-Rückstandshalde Hattorf, Standort Hattorf, K+S Minerals and Agriculture GmbH“, Apr. 2020.
- [U7] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2020): „Stratigraphische Einstu-fung der Kernbohrungen RM-HA mit Erläuterungen“, Juni 2020.
- [U8] T. Hohlfeld und U. Serfling (2017): „Geophysikalische Untersuchungen bei Unterbreizbach (Thü-ringen) Ergänzende Messungen im Bereich Quelle 6“, März 2017.
- [U9] U. Serfling und T. Hohlfeld (2016): „Geophysikalische Untersuchungen bei Unterbreizbach“, Sep. 2016.
- [U10] J. Ellenberg (2004): „Strukturkarte. – [In:] THÜRINGER LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLO-GIE (unveröffent-licht): Beilage, Geologische Karte von Thüringen 1:250000, Blatt 5126 Vacha.“, 2004.
- [U11] G. Büchel, T. Burghardt, M. Lonschinski, H. Lützner, und D. Pudlo (2012): „Plausibilitätsanalyse und Neukartierung von Störungen im Modellgebiet Werra“, 2012.
- [U12] F. Holländer und R. Köhler (1955): „Bericht über reflexionsseismische Untersuchungen im Kon-zessionsgebiet Eschwege-Rotenburg ausgeführt für die Wintershall-Aktiengesellschaft Celle und die Deutsche Vacuum Oel Aktiengesell-schaft Celle Hannover von der Prakla Gesellschaft für praktische Lagerstättenforschung GmbH Hannover“, 1955.

- [U13] E. Kreitz, W. Müntefering, und L. Ruprecht (1956): „Bericht über reflexionsseismische Messungen im Schürfgebiet Fischbach der Vereinigten Kaliwerke Salzdetfurth AG, Werk Hattorf, ausgeführt für die Salzdetfurth AG von der Prakla Gesellschaft für praktische Lagerstättenforschung GmbH Hannover.“, 1956.
- [U14] H. Ceyn und E. Wierczyko (1962): „Bericht Hattorf II über reflexionsseismische Untersuchungen im Schürfgebiet Fischbach der Vereinten Kaliwerke Salzdetfurth A.G. Werk Hattorf ausgeführt für die Vereinten Kaliwerke Salzdetfurth A.G. Hannover von der Prakla Gesellschaft für praktische Lagerstättenforschung GmbH Hannover.“, 1962.
- [U15] D. Gottlieb und E. Wierczyko (1962): „Bericht Hattorf III über reflexionsseismische Ergänzungsmessungen im Schürfgebiet Fischbach der Vereinten Kaliwerke Salzdetfurth A.G. Werk Hattorf ausgeführt für die Vereinten Kaliwerke Salzdetfurth A.G. Hannover von der Prakla Gesellschaft für praktische Lagerstättenforschung GmbH Hannover.“, 1962.
- [U16] E. Wierczyko (1965): „Bericht Hattorf IV über reflexionsseismische Messungen im Schürfgebiet Fischbach der Vereinigten Kaliwerke Salzdetfurth AG Werk Hattorf ausgeführt für die Vereinigten Kaliwerke Salzdetfurth AG Hannover von der Prakla Gesellschaft für praktische Lagerstättenforschung GmbH Hannover.“, 1965.
- [U17] E. Woitschach (1977): „Ergebnisbericht Sünna 1.2. – VEB Geophysik Leipzig“, 1977.
- [U18] H. Lützner, J. Ellenberg, F. Falk, und E. Grumbt (2000): „5126 Vacha. – [In:] THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR GEOLOGIE (Hrsg.): Geologische Karte von Thüringen 1:25000, 3. neu bearbeitete Auflage, Weimar“, 2000.
- [U19] M. Laemlen (1975): „Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt Nr. 5225 Geisa. – Hessisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.), 2., neu bearbeitete Auflage, Wiesbaden“, 1975.
- [U20] H. Lützner, J. Ellenberg, F. Falk, und E. Grumbt „5226 Stadtlengsfeld. – [In:] THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR GEOLOGIE (Hrsg.): Geologische Karte von Thüringen 1:25000, 3. neu bearbeitete Auflage, Weimar“.
- [U21] U. Serfling und T. Hohlfeld (2016): „Goelektrische Messungen im südlichen Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf - zwischen GWM 9 und GWM 53/2015 HA“, Sep. 2016.
- [U22] U. Serfling und T. Hohlfeld (2017): „Goelektrische Untersuchungen im Süden und Südwesten der Halde Hattorf Teil 1: Breizbachtal“, Juli 2017.
- [U23] U. Serfling und T. Hohlfeld (2017): „Goelektrische Untersuchungen im Süden und Südwesten der Halde Hattorf Teil 2: Süd, geophysikalisches Gutachten, Leipzig“, Aug. 2017.
- [U24] U. Serfling und T. Hohlfeld (2017): „Goelektrische Untersuchungen im Süden und Südwesten der Halde Hattorf Teil 3: Halde Süd-west“, Aug. 2017.
- [U25] U. Serfling, H. Steinel, und T. Hohlfeld (2017): „Ergänzende Goelektrische Messungen im südlichen Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf - zwischen GWM 9 und GWM 53/2015 HA, geophysikalisches Gutachten“, Feb. 2017.

- [U26] A. Brosig, M. Buchwitz, und F. Scholze (2014): „Geologisches, Hydrogeologisches und Numerisches Modell für das Umfeld der Produktions- und Haldenstandorte des Werkes Werra Teilgebiet 1: Hattorf/Unterebreizbach. Bericht zum Geologischen 3D-Modell der K+S KALI GmbH“, Freiberg, 2014.