

# Hydrogeologisches Gutachten

## zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH, Reichshof-Nespen

Auftraggeber:

**Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH**

Lüsberger Straße 2  
51580 Reichshof-Nespen

bearbeitet von:



**Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner  
Ingenieurgesellschaft mbH**

**Aachen**

Dipl.-Geol. D. Quante



**GEOBIT Ingenieur-Gesellschaft mbH**

Dipl. Geol. Markus Himml

B.Sc. Ralf Zinkel

Dipl. Geol. Marie Reiling

M.Sc. Karolina Sirel

**Aachen, Stand Februar 2023**

**INHALT:**

1	Einleitung .....	4
1.1	Veranlassung .....	4
1.2	Durchgeführte Untersuchungen.....	4
2	Örtliche Situation .....	5
2.1	Lage .....	5
2.2	Geologische und hydrogeologische Situation .....	6
2.3	Steinbruchbetrieb und Erweiterungsplanung.....	9
2.4	Schutzgüter.....	12
3	Hydrogeologische Systemanalyse .....	14
3.1	Messkonzept.....	14
3.2	Klimadaten .....	17
3.3	Seewasserstände .....	18
3.4	Grundwasserstandshöhen.....	20
3.5	Oberflächengewässer .....	22
3.5.1	Messprinzip .....	22
3.5.2	Oberflächengewässerabfluss .....	23
3.5.3	Abflussdifferenzierung .....	23
3.5.4	Direktabfluss.....	26
4	Grundwasserströmungsmodell.....	29
4.1	Methodik .....	29
4.2	Grundlagen der Grundwasserströmungsmodellierung.....	33
4.3	Modellaufbau .....	34
4.3.1	Räumliche Diskretisierung.....	34
4.3.2	Randbedingungen .....	37
4.3.2.1	Wiehltalsperre.....	37
4.3.2.2	Fließgewässer am Modellrand.....	38
4.3.2.3	Trennstromlinie Erdingen.....	38
4.3.3	Quell- und Senkenterme, sonstige besondere Modellelemente .....	38
4.3.3.1	Grundwasserneubildung.....	38
4.3.3.2	Fließgewässer innerhalb des Modellgebiets.....	40
4.3.3.3	Steinbruchseen, Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH.....	42
4.3.3.4	Steinbruchsee, Westdeutsche Grauwacken-Union .....	42
4.3.3.5	Trinkwassergewinnung .....	43
4.3.3.6	Tektonische Störung.....	43
4.4	Modellkalibrierung .....	43
4.5	Prognosesimulationen .....	49
4.5.1	Referenzsimulation.....	49

4.5.2	Prognosesimulation 1 .....	50
4.5.3	Prognosesimulation 2 .....	53
4.5.4	Brunnenanlage des Wasserleitungsvereins Odenspiel .....	56
5	Schlussfolgerungen .....	57

## Anhänge

- Anhang 1: Physikalische und mathematische Grundlagen der Grundwasserströmungsmodellierung
- Anhang 2: Abschlussbericht zur Errichtung von sechs Grundwassermessstellen im Rahmen der Erweiterung des Steinbruchs Jaeger

## Anlagen

- Anlage 1: Grundwasserhöhengleichenplan Ist-Zustand, stationäre Modellkalibrierung WWJ 2019 (80 % Grundwasserneubildungsrate)
- Anlage 2: Flurabstandsplan, stationäre Modellkalibrierung WWJ 2019 (80 % Grundwasserneubildungsrate)
- Anlage 3: Grundwasserhöhengleichenplan Ist-Zustand, stationäre Verhältnisse, mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 – 2010
- Anlage 4: Flurabstandsplan Ist-Zustand, stationäre Verhältnisse, mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 – 2010
- Anlage 5: Grundwasserhöhengleichenplan Planzustand Prognose 1, stationäre Verhältnisse, maximale Ausdehnung des Steinbruchs, mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 – 2010
- Anlage 6: Flurabstandsplan Planzustand Prognose 1, stationäre Verhältnisse, maximale Ausdehnung des Steinbruchs, mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 – 2010
- Anlage 7: Grundwasserdifferenzenplan, Planzustand Prognose 1 minus Ist-Zustand, mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 – 2010
- Anlage 8: Grundwasserhöhengleichenplan Planzustand Prognose 2, stationäre Verhältnisse, nach Flutung des Steinbruchs, mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 – 2010
- Anlage 9: Flurabstandsplan Planzustand Prognose 2, stationäre Verhältnisse, nach Flutung des Steinbruchs, mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 - 2010

## 1 Einleitung

### 1.1 Veranlassung

Die Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH, Reichshof-Nespen, plant den bestehenden Quarzit-Steinbruch Jaeger in Richtung Westen und Südwesten um ca. 14,3 ha zu erweitern. Zudem ist eine bereichsweise Vertiefung der bisher genehmigten Abbausohle auf 265 m NHN geplant.

Das Erweiterungsvorhaben liegt in der Wasserschutzzone III des Wasserschutzgebiets der Wiehltalsperre. Bereichsweise wird auch die Schutzzone IIb tangiert. In der Schutzzone III ist die oberflächennahe Gewinnung von Rohstoffen genehmigungspflichtig. Unter der Voraussetzung des § 52 Abs. 1 Satz 2 und 3 WHG bestehen jedoch beim Nachweis, dass der Schutzzweck, hier die Sicherstellung der Trinkwassergewinnung, nicht gefährdet wird, Befreiungsmöglichkeiten vom Verbotstatbestand.

Im Rahmen des Scopingverfahrens wurde daher von Seiten der Fachbehörden die Erstellung eines hydrogeologischen Fachgutachtens gefordert, in dem die möglichen hydrologischen und hydrogeologischen Auswirkungen der geplanten Erweiterung auf die im Umfeld sich befindenden Schutzgüter betrachtet werden sollen.

Im Vorfeld der Bearbeitung fand im Herbst 2017 ein Abstimmungstermin bei der verfahrensführenden Behörde (OBK) in Gummersbach statt, bei dem das Untersuchungskonzept für die Erstellung des Gutachtens vorgestellt wurde.

Das hydrogeologische Fachgutachten zur Erweiterung des Quarzit-Steinbruchs der Fa. Günter Jaeger Steinbruchbetriebe mbH, das von der GEOBIT Ingenieur Gesellschaft mbH in Kooperation mit der SST Prof. Dr. Ing. Stoll & Partner Ingenieurgesellschaft mbH erstellt wurde, ist Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen.

### 1.2 Durchgeführte Untersuchungen

Die Genehmigung für den momentanen Abbaubetrieb basiert auf dem Gutachten von Dipl.-Geol. Füllung von 1994, erstellt im Rahmen der damaligen Erweiterungsplanung. Um die Auswirkungen des aktuellen Steinbruchbetriebs sowie die der geplanten Erweiterung auf das Grundwasser und die grundwasserabhängigen Schutzgüter bestimmen zu können, wurde im Vorfeld der hydrogeologischen Systemanalyse in Abstimmung mit der verfahrensführenden Behörde ein Messkonzept erstellt und umgesetzt.

Das Messkonzept beinhaltet die Errichtung mehrerer Grundwasser- sowie Oberflächengewässermessstellen, der kontinuierlichen Datenerfassung an diesen Messstellen, die Installation einer nahe

gelegenen Wetterstation sowie die Erfassung der Sumpfungsraten im Steinbruch.

Im Zuge der hydrogeologischen Systemanalyse hat sich ergeben, dass eine Prognose der zu erwartenden Auswirkungen auf das Grundwasser durch die geplante Erweiterung des Steinbruchs auf Grundlage zunächst vorgesehener einfacher analytischer Berechnungsansätze aufgrund der Komplexität und Heterogenität der hydrogeologischen Verhältnisse mit großen Unsicherheiten behaftet und folglich bezüglich der Anforderungen an das Genehmigungsverfahren nicht zielführend gewesen wäre.

Aufgrund dieses Sachverhalts wurde auf Basis der Untersuchungsergebnisse und vorliegender Unterlagen ein numerisches Grundwasserströmungsmodell aufgebaut und auf Grundlage der gewonnenen Daten für die mittleren Verhältnisse des Wasserwirtschaftsjahres 2019 stationär kalibriert. Für die Prognosesimulationen wurden die mittleren klimatischen Verhältnisse des Referenzzeitraumes WWJ 1981 bis 2010 zugrunde gelegt.

## 2 Örtliche Situation

### 2.1 Lage

Der Steinbruch befindet sich in der Gemeinde Reichshof im Oberbergischen Kreis. Die nächstliegenden Ortschaften sind ca. 500 m nördlich Nespen und ca. 700 m südwestlich Odenspiel. Östlich an das Steinbruchgelände grenzt unmittelbar die Landesstraße L 324, deren Verlauf in etwa dem Elbach folgt, bis dieser im Tal bei Nespen in die Wiehl mündet. Die Wiehl ist der Zulauf zur Wiehltalsperre, deren oberes Ende in ca. 500 m Entfernung in nordwestlicher Richtung vom Steinbruch liegt. Die Wiehltalsperre wird zur Trinkwassergewinnung genutzt. Ca. 450 m westlich vom Steinbruch liegt der Ulberthof sowie das Quellgebiet eines namenlosen Gewässers, welches nachfolgend als Ulbertbach bezeichnet wird. Die Lage des Steinbruchgeländes ist in Abbildung 1 dargestellt.

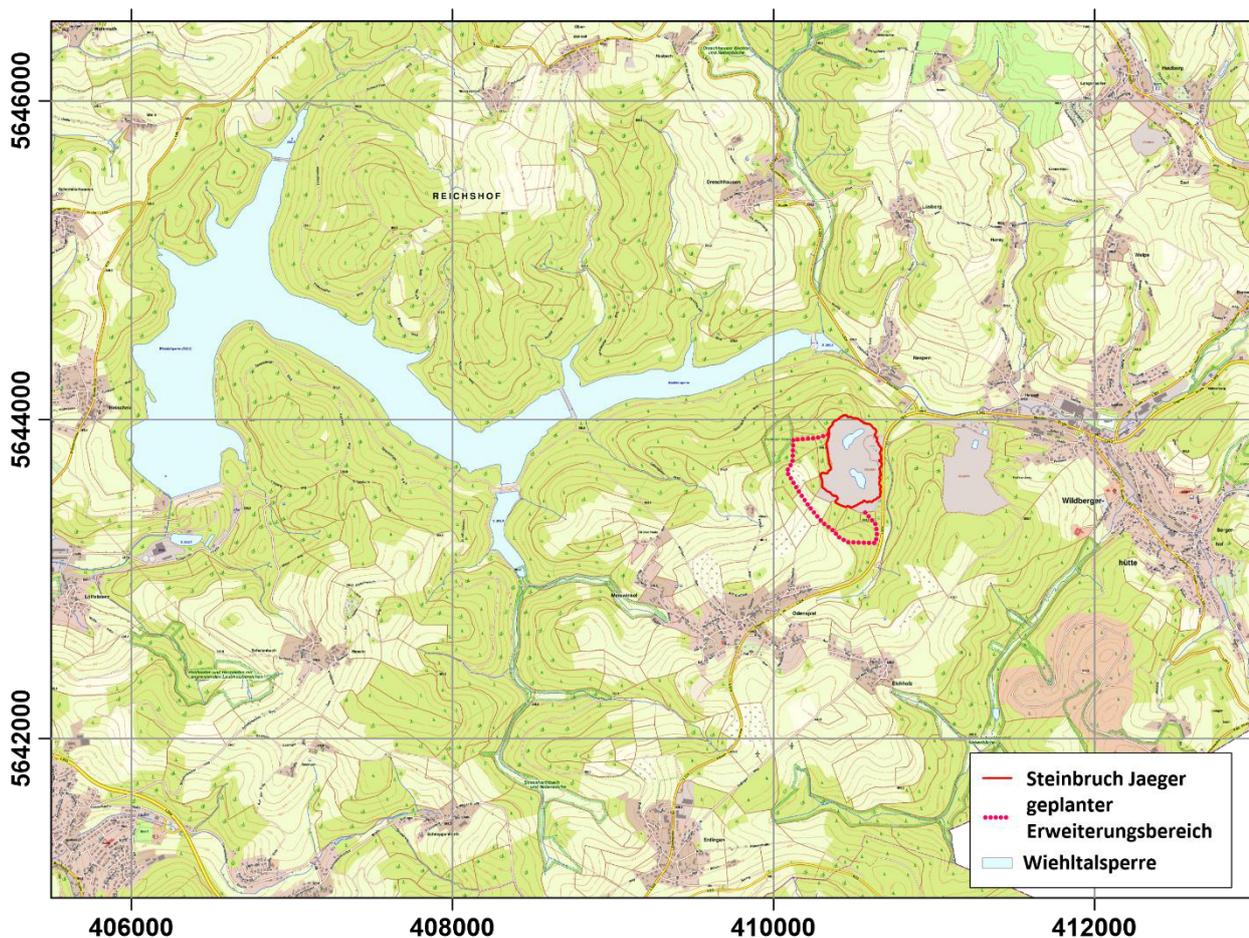


Abbildung 1: Lage des Steinbruchs (Quelle Plangrundlage: WMS DTK10 Geobasis NRW)

## 2.2 Geologische und hydrogeologische Situation

Der Oberbergische Kreis liegt naturräumlich im Südosten des Süderberglands, einem Teil des rechtsrheinischen Schiefergebirges, welches im Zuge der variszischen Orogenese gebildet wurde. In diesem Prozess wurden die zuvor im Devon abgelagerten vorwiegend klastischen Sedimente gehoben und im Laufe der Gebirgsbildung stark verfault und aufgeschoben. Dabei kam es zur Ausbildung großräumiger SW – NE streichender Sattel- und Muldenstrukturen. Nach dem Ende der Bildungsphase des variszischen Gebirges im Oberkarbon folgte eine Phase der Einebnung. Die Entstehung der heutigen Morphologie begann zu einem großen Anteil im Tertiär durch eine erneute Hebung. Dieser tektonische Prozess ging einher mit einer tiefgründigen hydrolytischen Verwitterung der durch die ursprüngliche Gebirgsbildung geklüfteten Gesteine im tertiären tropischen Klima. Während des Hebungsprozesses schnitten sich allmählich die Bäche ein. In den quartären Eiszeiten verstärkten sich die Erosionsprozesse infolge der häufigen Frost-/Tauwechsel, und über dem Permafrostboden gelangte aufgelockertes Gesteinsmaterial durch großflächiges Bodenfließen hangabwärts. Durch Niederschläge wurden die Verwitterungsprodukte weiter in die Täler transportiert und

akkumulierten als Lockergesteine an den Talflanken in Form von Hangschuttdecken bzw. als Talfüllungen in den tieferen Lagen. Das Landschaftsbild ist hier folglich durch rundliche Bergkuppen (oberhalb des Steinbruchs auf ca. 420 m NHN) und eingeschnittene Täler (der Uferbereich der Wiehltalsperre liegt bei 295 m NHN) gekennzeichnet.

In Abbildung 2 ist die Lage des Steinbruchs in einem Auszug aus der geologischen Karte von NRW (Maßstab 1:25000, Blatt 5012 Eckenhagen) dargestellt.

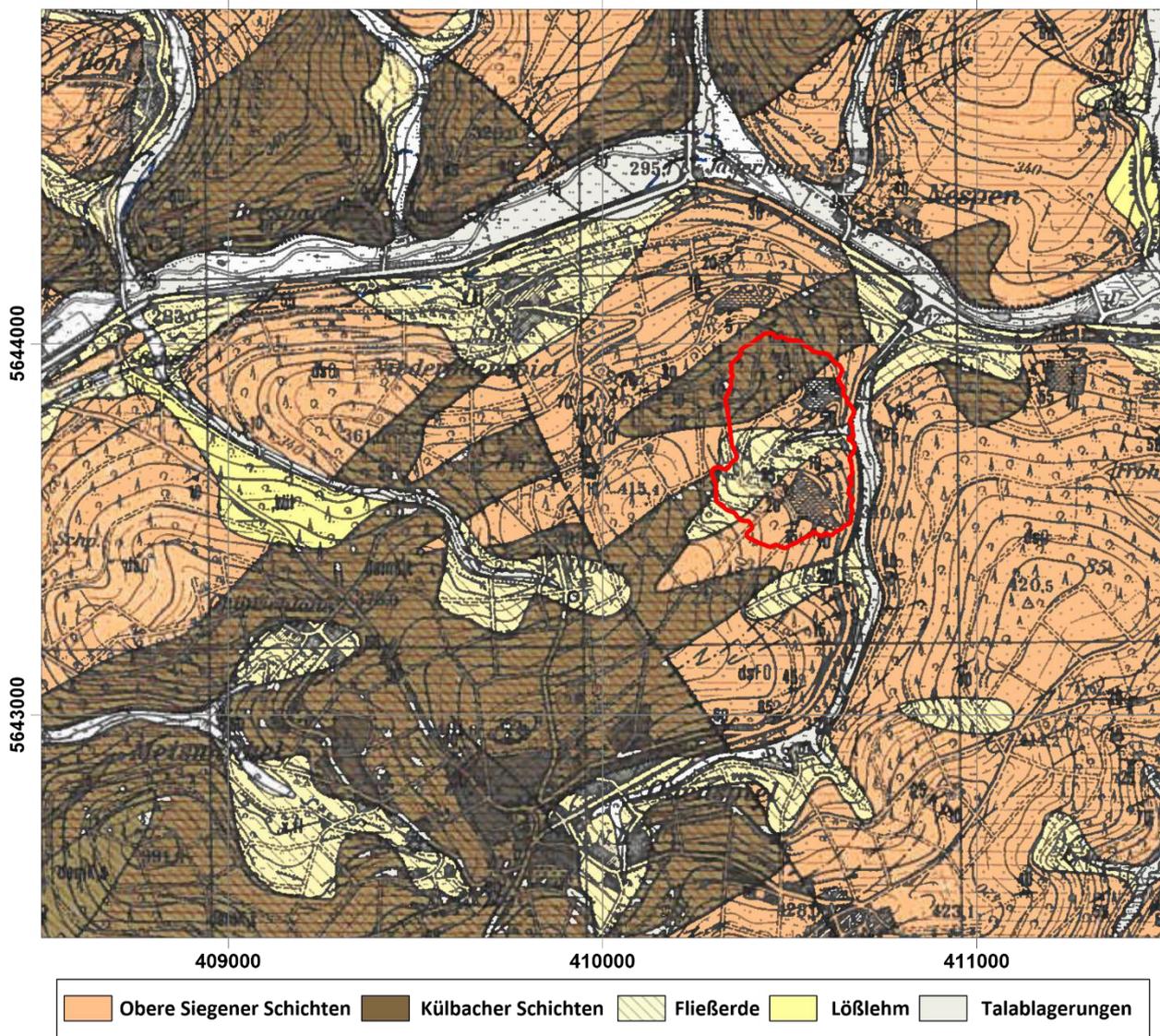


Abbildung 2: Auszug aus der geologischen Karte 1:25.000, Blatt 5012 Eckenhagen

Der Steinbruch greift in die Nordflanke einer dem Streichen des Grundgebirges folgenden und nach SW hin abtauchenden Großstruktur, dem Odenspieler Sattel, ein. Der Aufbau des Grundgebirges gliedert sich in die Schichten der oberen Siegen-Stufe und den jüngeren hangenden Schichten der

unteren Ems-Stufe, beide zeitlich dem Unterdevon zuzuordnen. Die älteste anzutreffende Formation dabei ist der Frohenberger Tonschiefer. Im tieferen Abbaubereich des Steinbruchs können dessen sandige Schiefertone in dünnen Bänken oder Linsen auftreten. Abbauziel des Steinbruchs ist die darüberliegende hier als Typuslokalität aufgeschlossene namensgebende Odenspieler Grauwacke. Diese besteht hier aus wechselnd abgelagerten fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen und sandigen Siltsteinen und weist eine Schichtmächtigkeit von ca. 80 bis 100 m auf. Beide Schichtformationen zählen zur oberen Siegen-Stufe. Auf den Höhenzügen des Sattels, insbesondere westlich einer ca. 450 m westlich des Steinbruchgeländes gelegenen und in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Störung, werden die oberen Siegener Schichten von den Külbacher Schichten der Ems-Stufe überlagert. Diese siltsteinreichen Tonschiefer-Schichten besitzen nach Angaben der geologischen Karte dort eine Mächtigkeit von bis zu 250 m.

Hydrogeologisch hat sich aus der erläuterten geologischen Entwicklung ein Kluftgrundwasserleiter gebildet, der von einer Lockergesteinsdecke bestehend aus den Verwitterungsprodukten an den Talflanken und den kolluvialen Talfüllungen überlagert wird. Die Lockergesteine sind meist nur lokal und vielfach nur temporär wasserführend und werden im Rheinischen Schiefergebirge im Allgemeinen nicht als eigenständiger Grundwasserleiter eingeordnet. Das in diesen Gesteinen auftretende unterirdische Wasser trifft bei der Sickerwasserpassage auf das Grundgebirge, dessen Klüfte in den oberen Metern vielfach verlehmt sind und daher stauende Wirkung entfalten, fließt dann zu einem relativ großen Anteil lateral ab und tritt meist nach nur relativ kurzer Verweilzeit in den Oberflächengewässern wieder zutage. Es wird daher dem Zwischenabfluss bzw. Interflow zugeordnet und nicht dem Grundwasser i.e.S. Lediglich ein vergleichsweise geringer Anteil des Sickerwassers durchströmt die Verlehmungszone vertikal und führt als Grundwasserneubildung zur Wiederergänzung des tieferen Kluftgrundwasserleiters.

Die Verbreitung der Lockergesteinsdecken zeichnet die Morphologie der Region nach und folgt dem Verlauf des Entwässerungssystems bzw. der Täler, in denen die größten Mächtigkeiten erreicht werden. An den Talflanken dünnt mit zunehmender Höhe das Lockergestein generell aus und weist im Bereich der Kuppen, soweit dort überhaupt vorhanden, meist seine geringste Mächtigkeit auf.

Die Wasserleitfähigkeit wie auch das Speichervermögen des Kluftaquifers sind generell als gering einzuordnen. Im Kluftaquifer ist erfahrungsgemäß eine nennenswerte Wasserleitfähigkeit infolge der Entlastung des Gebirges auf einige wenige Zehner-Meter unterhalb der Geländeoberfläche beschränkt, wobei die Wasserleitfähigkeit zur Tiefe hin abnimmt und unter den Bergkuppen generell relativ tiefer reicht als unter den Talböden. Im Abbaubereich des Steinbruchs ist die Durchlässigkeit an den Trennfugen des Gesteins durch Sprengungen zusätzlich erhöht.

Vorflut für den Grundwasserleiter im Standortbereich sind die Oberflächengewässer. Neben der Wiehltalsperre im Nordwesten fungieren die nördlich des Steinbruchgeländes gelegene Wiehl, der Elbach im Osten sowie der Ulbertbach im Westen als Liniensenken für das Grundwasser. Der Bereich der weidewirtschaftlich genutzten oberen Quellmulde des Ulbertbaches als oberes Ende dieser Liniensenke liegt bei etwa 395 m NHN.

### 2.3 Steinbruchbetrieb und Erweiterungsplanung

Das Betriebsgelände des Steinbruchs besteht im Wesentlichen aus zwei direkt aneinandergrenzenden Gruben. Die offene Gesamtfläche des Steinbruchs hat eine Größe von rund 0,175 km<sup>2</sup>. Die aktuelle Sohltiefe des südlichen Bereichs liegt bei ca. 260 m NHN, im nördlichen Bereich bei ca. 290 m NHN. Der stehengelassene Bereich, der die beiden Gruben trennt, erreicht eine Höhen von ca. 330 m NHN. Die Höhenlage der Abbaukante liegt bei der nördlichen Wand bei ca. 380 m NHN und bei der südlichen Wand bei ca. 398 m NHN. Der momentane Abbau erfolgt im südlichen und südwestlichen Bereich.

Der Betrieb des Steinbruchs ist mit einer aktiven Entwässerung verbunden, da der Steinbruch eine Hohlform bildet, welche keinen hydraulischen Anschluss an ein Oberflächengewässer im Freispiegelgefälle hat. Die Entnahme des in die beiden Teilbereiche des Steinbruchs eintretenden Niederschlags- und Grundwassers erfolgt über zwei Steinbruchseen, im Folgenden als See Nord und See Süd bezeichnet.

Die Entnahme aus dem See Süd dient zur Steinbruchsümpfung sowie zur Nutzung als Brauchwasser. Dafür wird über eine Druckleitung das Wasser in Richtung des Einfahrtsbereichs gefördert und fließt von dort über eine Rohrleitung entlang der L 324, um schließlich zusammen mit dem Straßenablaufwasser der L 324 in den Elbach eingeleitet zu werden.

Das Sumpfungswasser aus dem See Nord wird über eine zweite Druckleitung nördlich des Steinbruchgeländes im Bereich der Hanglehme flächenhaft versickert. Dadurch wird es dem Unterlauf des Elbach als Interflow zugeführt.

In der Erweiterungsplanung ist vorgesehen, die Abbaukante schrittweise um ca. 160 m nach Südwesten und ca. 230 m nach Nordwesten zu erweitern. Der geplante Abbau soll bis auf eine Sohltiefe von 265 m NHN erfolgen. Die finale Ausdehnung der geplanten Erweiterung ist in Abbildung 3 dargestellt.

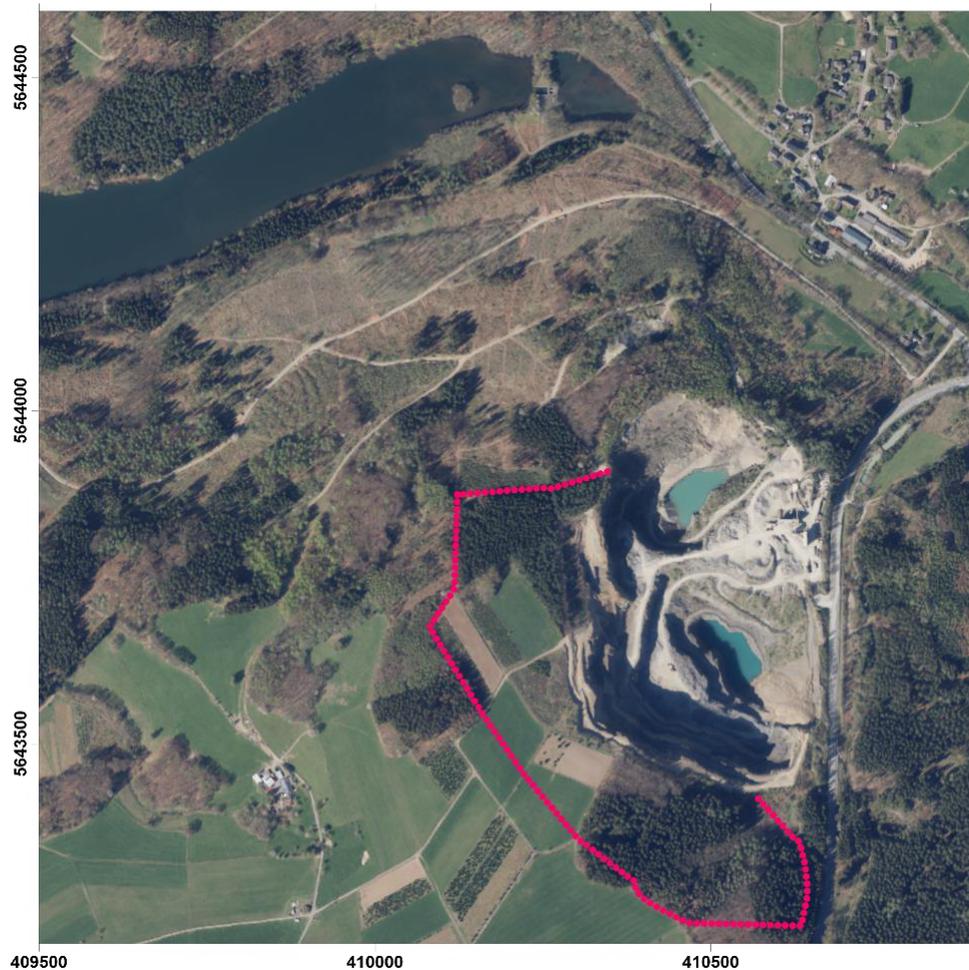


Abbildung 3: Luftbild des Steinbruchs mit geplanter Erweiterungsgrenze

Nach Beendigung des Abbaubetriebes sollen die Sumpfungsmaßnahmen eingestellt werden, so dass der Steinbruch bis zu einer Höhe von 323 m NHN geflutet wird. Dort ist dann ein Überlauf in den Elbach vorgesehen. Der resultierende See im geplanten Endzustand vereint dann sowohl den Erweiterungsbereich als auch die beiden bestehenden Gruben. Im Einfahrtsbereich des Steinbruchs bleibt eine nicht geflutete Fläche bestehen. Die einzelnen Planungsschritte sind in Abbildung 4 bis Abbildung 6 grob visualisiert.

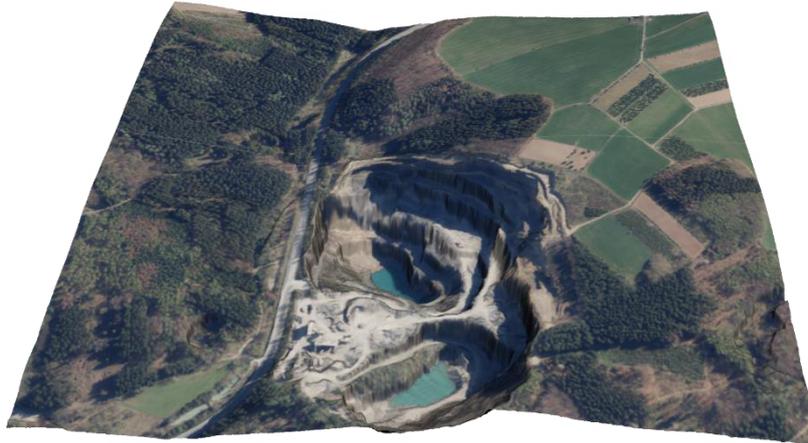


Abbildung 4: Ist-Zustand des Steinbruchs (Sicht aus Norden)

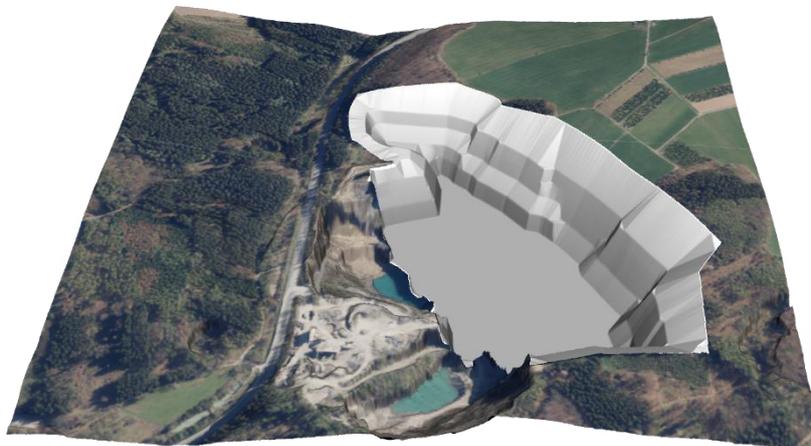


Abbildung 5: geplante Abbauerweiterung (Abbausohle auf 265 m NHN)



Abbildung 6: Endzustand nach Beendigung der Sumpfungmaßnahmen (Wasserstand bei 323 m NHN)

## 2.4 Schutzgüter

Das Steinbruchgelände und der geplante Erweiterungsbereich liegen innerhalb der durch die Wasserschutzgebietverordnung Wiehltalsperre (ausgegeben Juni 1994) ausgewiesenen Schutzzonen. Das Steinbruchbetriebsgelände in der Abbaugrenze von 1994 liegt in der Wasserschutzzone IIB (engeres Schutzgebiet) und das Gelände des seitdem fortgeschrittenen Abbaus in der Wasserschutzzone III (weiteres Schutzgebiet). Die geplante Erweiterung des Abbaubereichs liegt größtenteils innerhalb der Wasserschutzzone III und zu einem kleinen Teil in der Wasserschutzzone IIB. Im Rahmen der geplanten Erweiterung ist somit der Nachweis zu führen, dass der Schutzzweck des Wasserschutzgebietes durch die geplante oberirdische Gewinnung von Bodenschätzen nicht beeinträchtigt wird. Der Elbach und der Ulbertbach liegen als Zuflüsse zur Wiehltalsperre ebenfalls in der Wasserschutzzone IIB.

Für die Oberflächengewässer ist zu prüfen, ob bei der geplanten Erweiterung unter Annahme der derzeitigen klimatischen Rahmenbedingungen eine Beeinträchtigung der Wasserführung der Fließgewässer möglich ist bzw. ob das Quellgebiet des Ulbertbaches und das bachabwärts gelegene gesetzlich geschützte Biotop (Kennung: BT-5012-084-8) beeinträchtigt wird.

Darüber hinaus gilt es sicherzustellen, dass sich aufgrund der Einleitung von Sumpfungswasser und Niederschlagswasser aus dem Steinbruchgelände die Wasserqualität des Elbachs nicht verschlechtert.

Das Gebiet um die Talsperre ist darüber hinaus seit 2014 als Naturschutzgebiet (GM-128 Wiehltalsperre) ausgewiesen. Das zusammenhängende Waldgebiet am südlichen Uferbereich, welches im Sinne einer naturnahen Forstwirtschaft zu Laub- und Mischwäldern mit überwiegend einheimischen Baumarten entwickelt werden soll, dient dabei als Umgebungsschutz der Talsperre. Die schutzwürdigen Biotope liegen hauptsächlich nördlich des Stausees.

Ein nordwestlich des Betriebsgeländes gelegener ehemaliger Grauwacken-Steinbruch ist ebenfalls seit 2014 als Naturschutzgebiet (GM-125 Steinbruch Ulbert) ausgewiesen. Als dessen Schutzziel gilt der Erhalt des kleinräumigen Abgrabungsgewässers als Lebensraum von Reptilien und Amphibien.

Im Landschaftsplan Nr. 10 „Wiehltalsperre“ des Oberbergischen Kreises ist die Umgebung des Steinbruchs mit Ausnahme der Steinbruchfläche selbst flächendeckend als Landschaftsschutzgebiet ausgewiesen. Südlich des Steinbruchs befindet sich der geschützte Landschaftsbestandteil LB 2.4-52 („Quellbereich und Stollenmundloch“).

Der nahe unterhalb des Ulbertbach-Quellgebiets liegende Hof Ulbert verfügt über eine

wasserrechtliche Erlaubnis und betreibt einen Brunnen zur Selbstversorgung mit Trinkwasser. Dieses wird aus einem Brunnen mit 66 m Tiefe dem Grundwasser entnommen. Auch hier gilt es, eine mögliche Beeinträchtigung zu überprüfen.

Etwa 800 m ENE' des Dorfzentrums Odenspiel befindet sich eine Brunnenanlage des Wasserleitungsvereins Odenspiel zur Gewinnung von Grundwasser zur Nutzung als Trinkwasser für die Ortschaft Odenspiel. Nach vorliegenden Informationen ist diese Wassergewinnungsanlage nicht mehr in Betrieb. Nähere Informationen zur Brunnenanlage und den historischen Förderdaten liegen nicht vor.

In Abbildung 7 sind die ausgewiesenen Schutzgebiete und Trinkwasserschutzzonen im Umfeld des Steinbruchgeländes dargestellt.

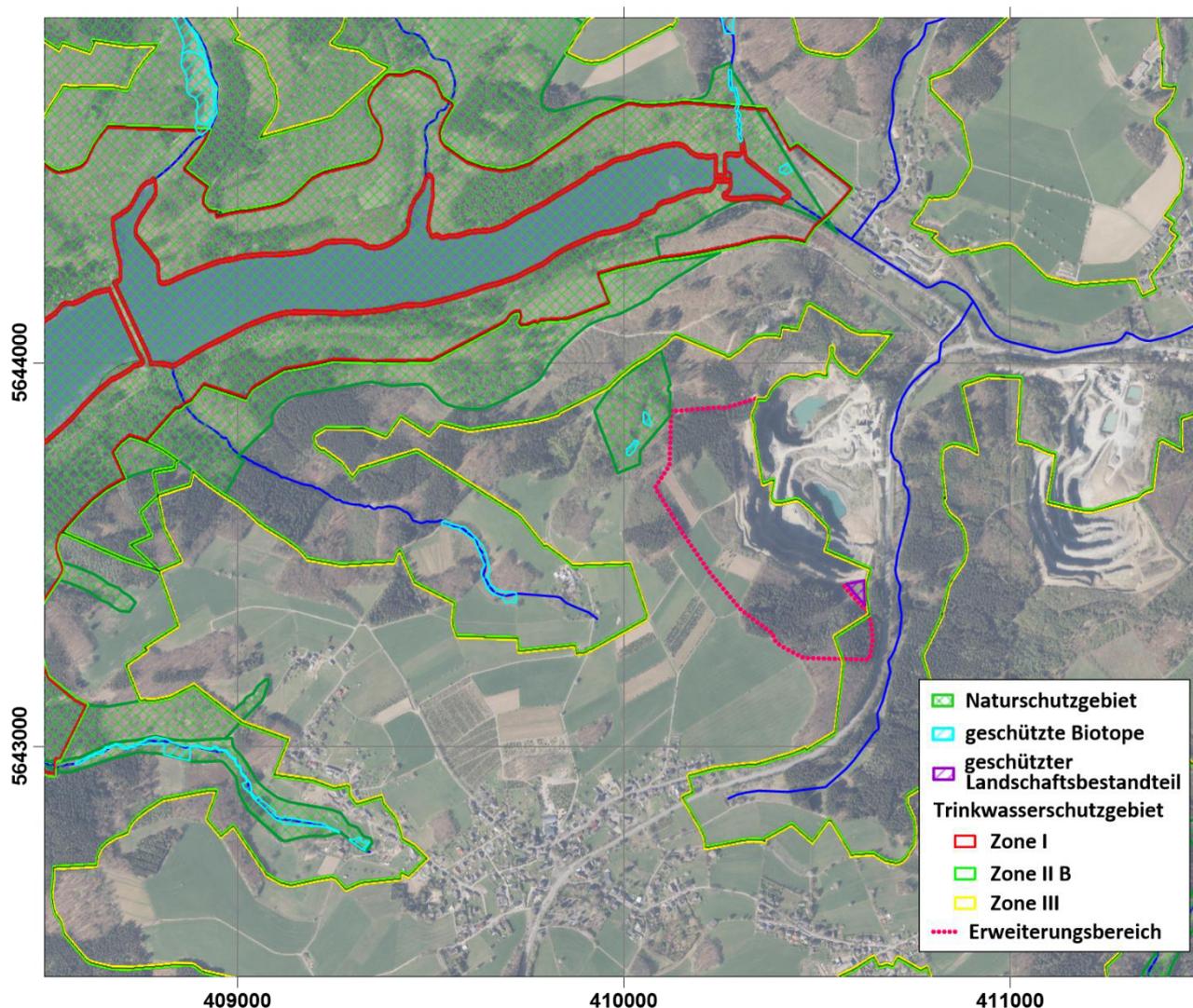


Abbildung 7: Schutzgebiete im Umfeld des Steinbruchs (Quelle: WMS-Dienst Linfos NRW, WMS Wasserschutzgebiete Land NRW)

### 3 Hydrogeologische Systemanalyse

#### 3.1 Messkonzept

Wie bereits eingangs aufgeführt, wurde für die hydrogeologische Systemanalyse ein umfangreiches Messkonzept erstellt. Als erster Schritt wurden insgesamt sechs Grundwassermessstellen u.a. in Richtung der geplanten Erweiterung abgeteuft. Drei Messstellen befinden sich in einer Linie quer zum Streichen der geologischen Schichten nördlich vom Steinbruchgelände zwischen dem Steinbruch und der Wiehltalsperre. Die anderen drei Messstellen befinden sich westlich zwischen dem Steinbruchgelände und dem Hof Ulbert. Des Weiteren wurden im See Nord und See Süd je ein Wasserstandspegel installiert. Alle Messstellen wurden mit automatisierten Loggern ausgestattet und die Erfassung der Wasserstände erfolgte in stündlicher Auflösung. Im Anhang 2 ist der Abschlussbericht zur Errichtung der Grundwassermessstellen dokumentiert, und grundlegende Angaben zu den sechs Grundwassermessstellen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Der mittlere Grundwasserstand bezieht sich auf den betrachteten Messzeitraum vom 19.12.2018 bis zum 5.5.2020.

Tabelle 1: Basisdaten der Grundwassermessstellen

GWM	Lage zum Steinbruch	Bohrteufe [m]	Höhe Datenlogger [m NHN]	Mittlerer GW-Stand [m NHN]	Mittlerer Flurabstand [m]
<b>B1-18</b>	westlich	99,5	410,61	348,79	60,79
<b>B2-18</b>	westlich	76,0	405,83	401,16	4,82
<b>B6-18</b>	westlich	50,0	410,86	389,99	21,01
<b>B3-18</b>	nördlich	90,0	381,65	304,11	78,55
<b>B4-18</b>	nördlich	73,0	366,12	325,07	41,16
<b>B5-18</b>	nördlich	50,0	338,12	305,46	32,74

Die Förderraten aus den beiden Seen wurden mittels zweier magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID) ermittelt, welche als Messrohre in dem bestehenden Leitungssystem eingebaut wurden. Die Durchflussraten wurden zunächst alle 10 Minuten, ab Anfang Juli 2019 alle halbe Stunde aufgezeichnet.

In den beiden nahegelegenen Oberflächengewässern Elbach und Ulbertbach wurden gemäß

Konzept vom Mai 2018 insgesamt drei Abflussmessstellen eingerichtet. Davon liegt eine Messstelle im Unterlauf des Ulbertbachs, eine Messstelle im Elbach oberhalb der Einleitstelle sowie eine Messstelle im Elbach unterhalb der Einleitung. Die Erfassung des Oberflächenabflusses sollte in einem zeitlich begrenzten Rahmen von ca. einem Jahr stattfinden. Um einen baulichen Eingriff in das Gewässer zu vermeiden, wurden drei batteriebetriebene Ultraschall-Messgeräte vom Typ UFO-Ex (Ultrasonic Flow Observer, Typ /S) der Firma W.A.S. Wasser-Abwasser Systemtechnik GmbH, Braunschweig, verwendet. Die Sensoren der Messgeräte konnten mit einer Metallmanschette am unteren Rand von bereits vorhandenen Rohrdurchlässen installiert werden, die Messgeräte inkl. der Batterien wurden in wenigen Metern Entfernung in witterungs-, hochwasser- und vandalismussicheren Stahlzylindern aufbewahrt. In Abbildung 8 ist dies exemplarisch für den Messstandort am Elbach oben dargestellt. Der Messstandort ‚Elbach oben‘ befindet sich unter einem unbefestigten Waldweg ca. 650 m oberhalb der Steinbruchseinfahrt. Der Messstandort ‚Elbach unten‘ befindet sich ca. 450 m unterhalb der Steinbrucheinfahrt an einem Rohrdurchlass (DN 1200) unterhalb der L 324. Der Messstandort ‚Ulbertbach‘ liegt an einem Rohrdurchlass (DN 400) in bewaldetem Gebiet ca. 100 m oberhalb der Mündung in die Wiehltalsperre. Die Messgeräte erfassten die auf die Bachbettgeometrie kalibrierte Fließgeschwindigkeit per Ultraschall (Puls-Doppler-Prinzip) und die Wasserstandshöhe per Drucksensor. Das Messintervall lag bei 2 Minuten.



Abbildung 8: Sensoren (links) und geöffneter Zylinder mit Messgerät (rechts) am Messstandort Elbach oben

In Ermangelung nahegelegener Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die auch umfängliche Klimadaten aufzeichnen, wurde ca. 200 m nordöstlich vom Steinbruchgelände eine Wetterstation installiert. Da in Mittelgebirgen der Niederschlag durch orographische Faktoren wie Höhenlage und Hangexposition beeinflusst wird, konnten so für den Standort repräsentative Niederschlagswerte ermittelt werden. Die Wetterstation hat Niederschlagsmengen sowie für die Berechnung der Evapotranspiration (ET) notwendige Klimadaten in einem einstündigen Messintervall aufgezeichnet.

Die Lage der einzelnen Messpunkte ist in Abbildung 9 dargestellt.

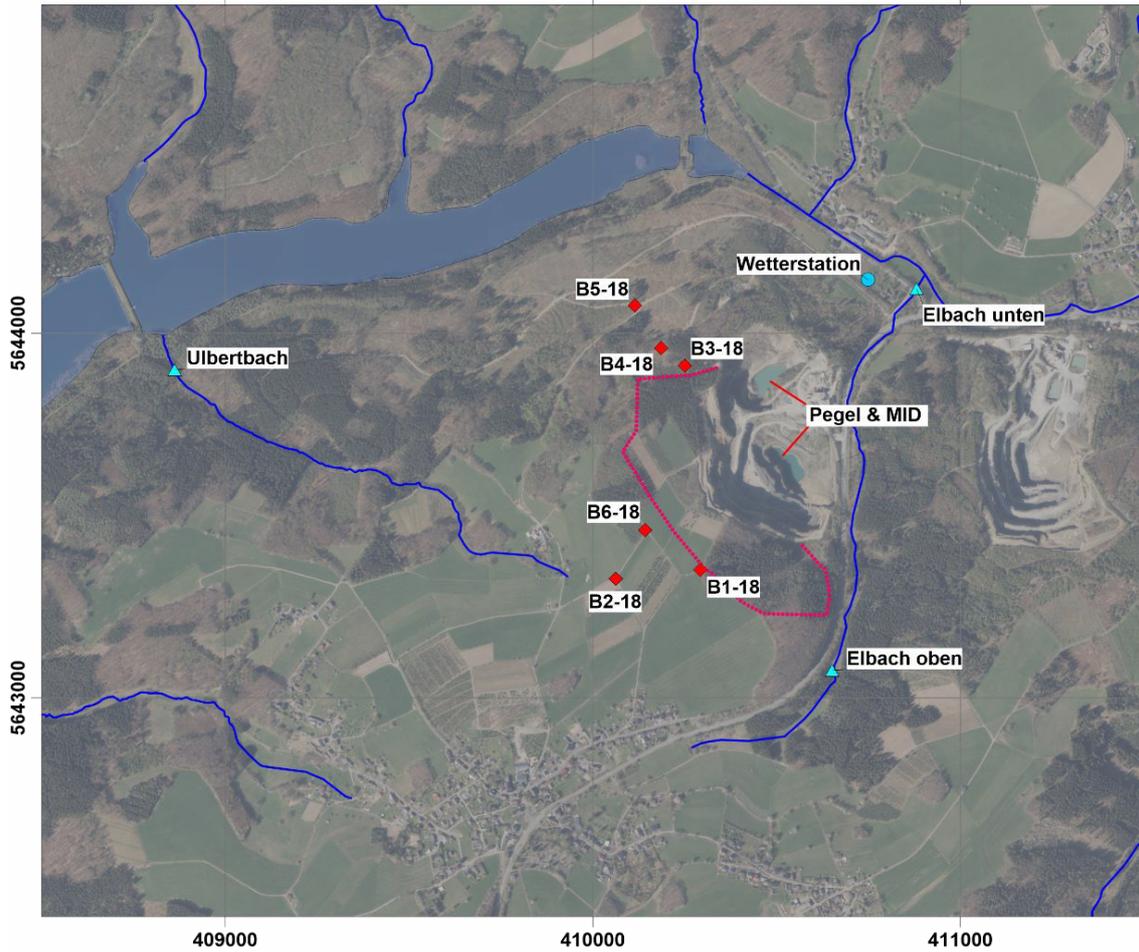


Abbildung 9: Lage der Messeinrichtungen

In Abbildung 10 sind die Messzeiträume dargestellt. Bei der hydrogeologischen Systemanalyse galt das Augenmerk hauptsächlich dem Wasserwirtschaftsjahr 2019.

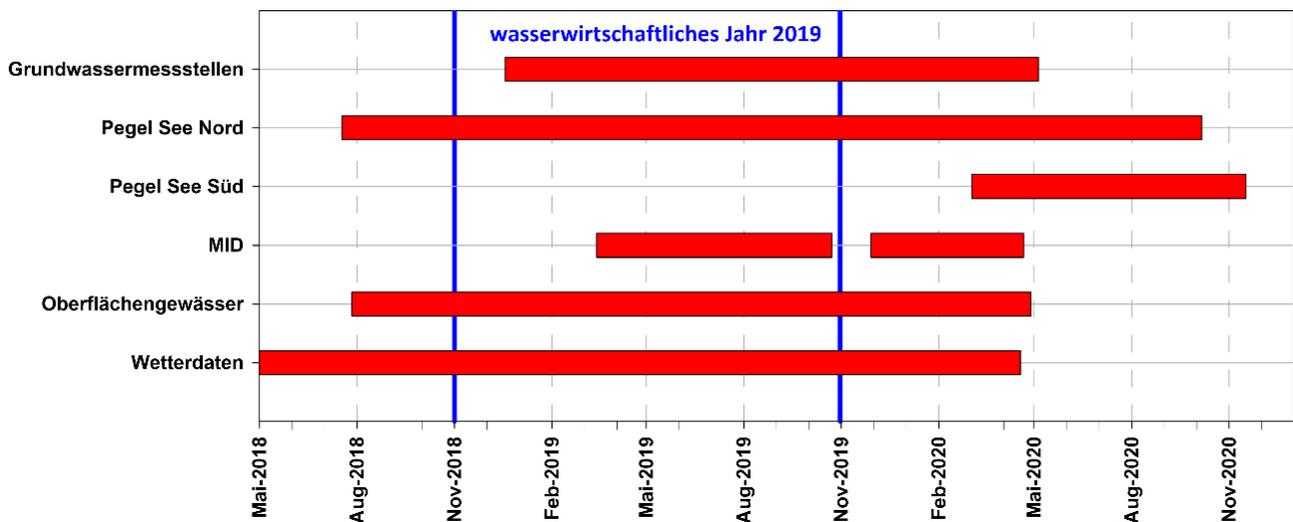


Abbildung 10: Messzeitraum

### 3.2 Klimadaten

In Abbildung 11 sind die in der lokalen Wetterstation gemessenen Tagesniederschlagshöhen dargestellt. In Abbildung 12 werden diese als Monatsniederschlagshöhen mit den Messungen der nächstgelegenen DWD-Stationen verglichen. Im zeitlichen Verlauf dieser Werte zeigt sich, dass nach dem besonders niederschlagsarmen Sommer 2018 im wasserwirtschaftlichen Jahr 2019 die Niederschlagshöhen wieder auf dem Niveau der Jahre davor liegen. Phasen mit langanhaltender Trockenheit gibt es im Untersuchungszeitraum Ende Juni bis Mitte Juli. Im Vergleich liegen die an der lokalen Wetterstation gemessenen Monatsniederschlagshöhen geringfügig unter denen der umliegenden DWD-Stationen.

Die Jahresniederschlagssumme der DWD Station Morsbach beträgt im langjährigen Mittel (1981-2010) 1.187 mm.

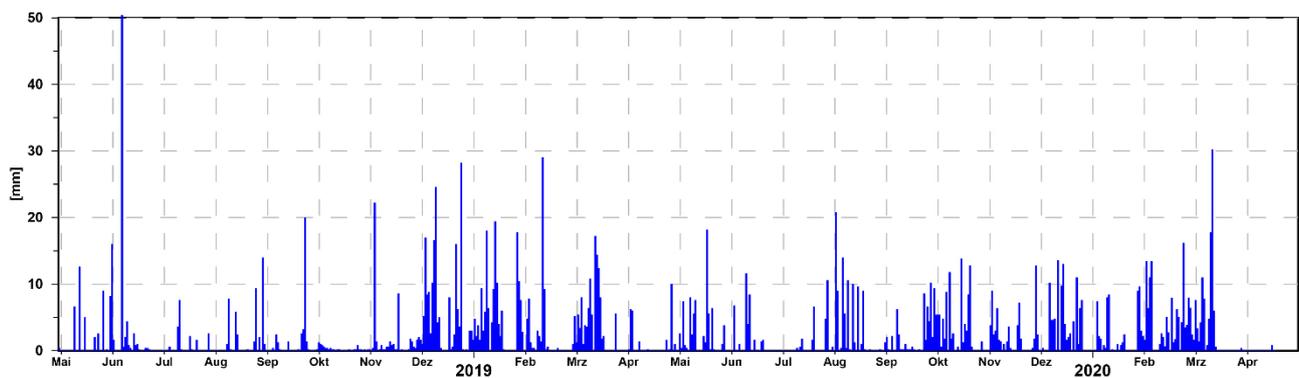


Abbildung 11: Niederschlag-Tageswertmessung der Wetterstation

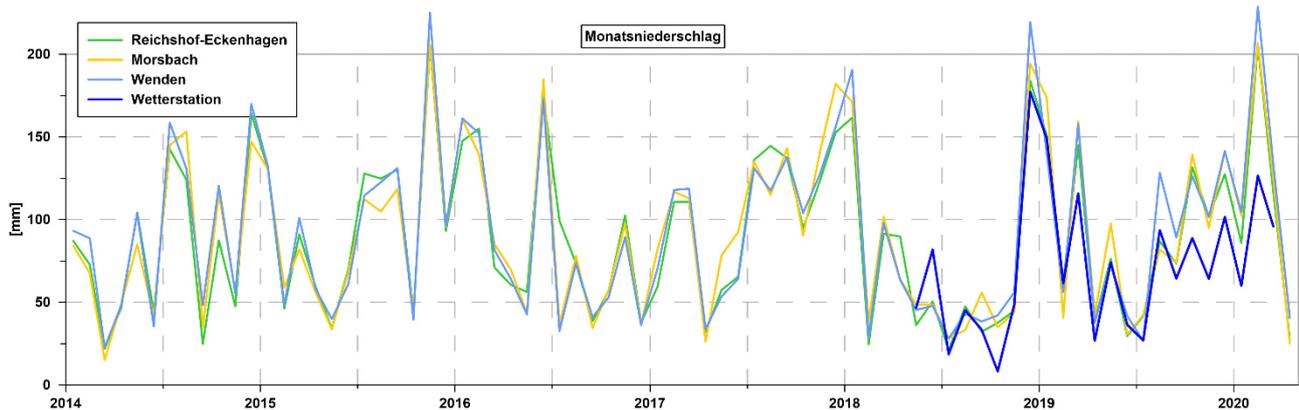


Abbildung 12: regionale Monatsniederschlagswerte

Um die klimatischen Verhältnisse des wasserwirtschaftlichen Jahres 2019 im längerfristigen Kontext einordnen zu können, wurde die Entwicklung der Grundwasserneubildungsrate seit 1981 betrachtet, da der im Auftrag des Landes NRW vom Forschungsinstitut Jülich entwickelte Datensatz der

flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate auf einem 30-jährigen Referenzzeitraum von 1981 bis 2010 basiert. Die Grundwasserneubildung wird neben klimatischen Einflüssen auch von der Reliefenergie, der Bodenfeuchte, der Landnutzung und den jahreszeitlichen Vegetationsperioden als naturräumliche Einflussfaktoren beeinflusst. In einem instationären Bodenwasserbilanzberechnungsverfahren, in welches die genannten Faktoren einfließen, wurde mit den zur Verfügung stehenden Klimadaten die jährliche Grundwasserneubildungsrate beispielhaft über Grünland mit flachem Relief für den Zeitraum von 1981 bis 2020 berechnet. In Abbildung 13 ist diese in blauer Strichfarbe dargestellt, die gestrichelte blaue Linie entspricht dem langjährigen Mittel aus dem Zeitraum von 1981 bis 2010. In roter Strichfarbe ist die prozentuale Abweichung jedes Jahreswertes zu diesem langjährigen Mittel dargestellt, gestrichelt der gleitende Mittelwert dieser Abweichung über 5 Jahre. Hier zeigt sich, dass im Wasserwirtschaftsjahr 2019 wie auch bereits in Jahren davor die Grundwasserneubildungsrate nur bei ca. 80 % des langjährigen Mittels lag.

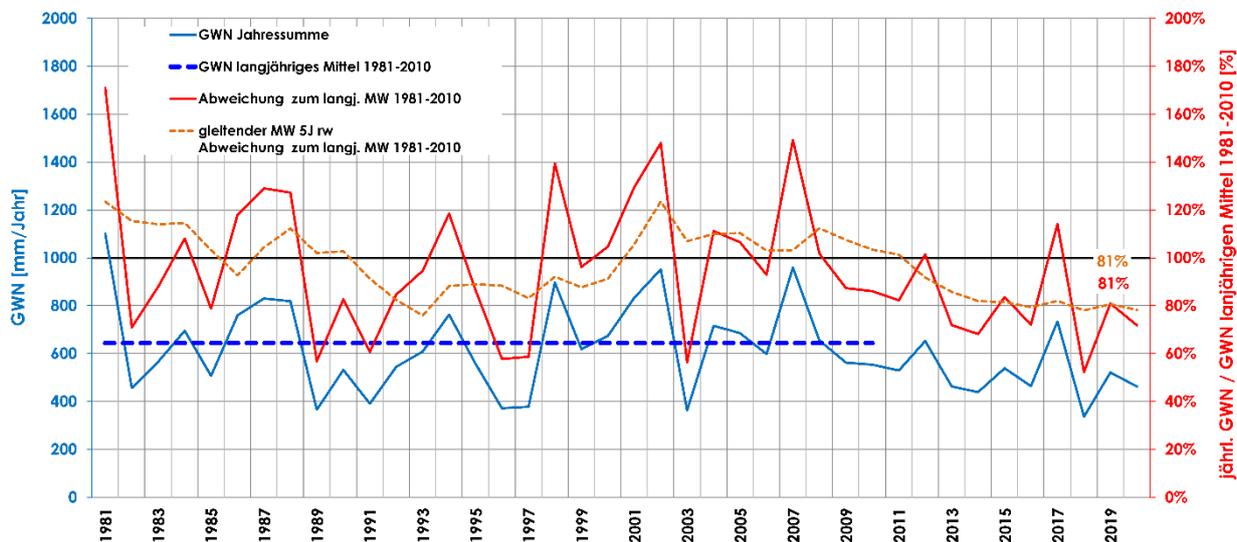


Abbildung 13: langjährige Berechnung der Grundwasserneubildungsrate über Grünland

### 3.3 Seewasserstände

Die Steinbruchseen als tiefste Punkte in den beiden Steinbruchbereichen werden als künstliche Vorfluter für das Grundwasser ständig gesümpft. Die Erfassung der Wasserstände in den beiden Steinbruchseen erfolgt über zwei Pegelmessungen. Der ursprünglich im See Süd eingebaute Pegel J-P01, der bei Niedrigwasser installiert wurde, wurde im Messzeitraum betriebsbedingt überflutet und konnte nicht ausgewertet werden. Die Messstelle wurde im Anschluss durch den Pegel J-P03 ersetzt, so dass sich der zur Verfügung stehende Messzeitraum dort stark verkürzt hat. Der im See

Nord eingebaute Pegel J-P02 konnte ausgelesen werden, wurde aber ebenfalls bei einer Wasserstandshöhe von 287,36 m NHN überflutet. Des Weiteren fielen die Messstellen bei Wasserstandshöhen unterhalb 284,08 m NHN im See Nord und 259,64 m NHN im See Süd trocken.

Die fehlenden Wasserstände im See Nord konnten unter Berücksichtigung der Förderraten und des Niederschlags extrapoliert werden. In Abbildung 14 sind neben den gemessenen und korrigierten Wasserständen die durch den MID ermittelte Förderrate aus dem See Nord und der einzugsgebietsbezogene Niederschlagszufluss (beide in m<sup>3</sup>/h) dargestellt. Der Wasserstand im See Nord steigt in Phasen ohne Förderung stetig an, nach Niederschlagsereignissen fällt dieser Anstieg steiler aus. Ein Sinken des Wasserstandes erfolgt ausschließlich während der Wasserentnahme. In Abbildung 15 sind die ermittelten Daten für den See Süd dargestellt.

Der Vergleich der Förderraten zeigt, dass die Entnahme aus dem See Süd im Mittel konstant erfolgt, während die Pumpe in dem See Nord zu Sumpfungszwecken unregelmäßig bei Bedarf betrieben wird.

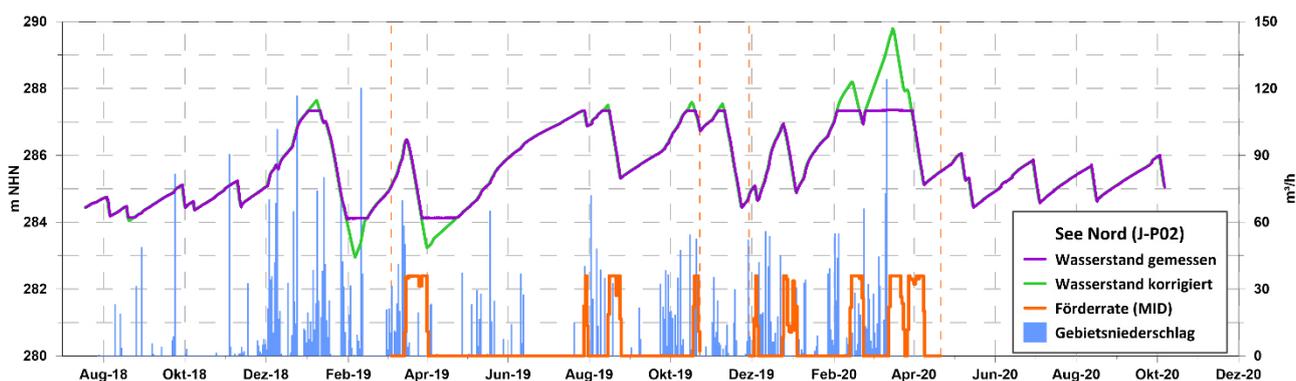


Abbildung 14: Wasserstand und Förderrate im See Nord

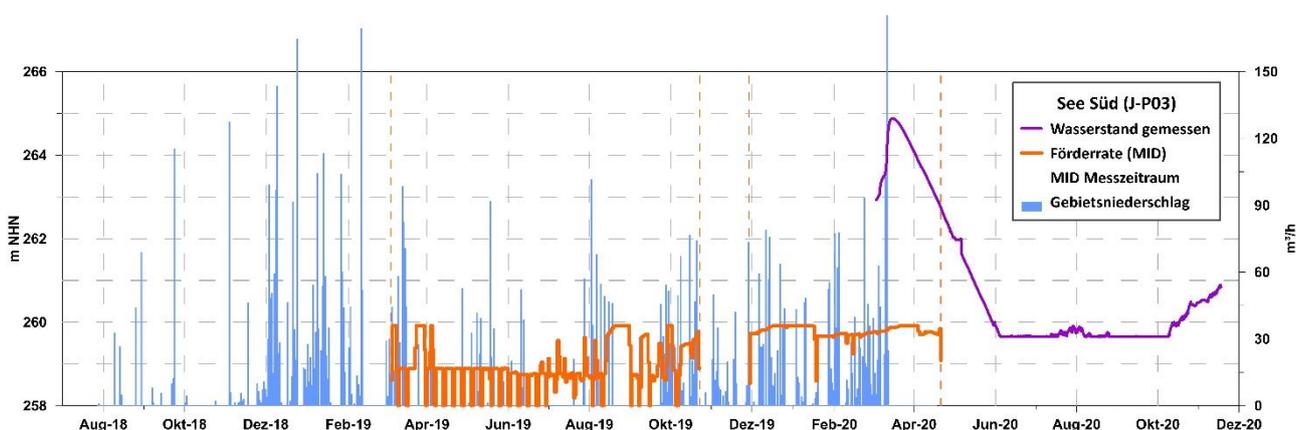


Abbildung 15: Wasserstand und Förderrate im See Süd

### 3.4 Grundwasserstandshöhen

Zur Abschätzung der Einflussreichweite der aktuellen Steinbruchtätigkeit wurden nördlich und westlich des Steinbruchgeländes jeweils eine Dreiergruppe Grundwassermessstellen installiert. In Abbildung 16 ist die Lage der Messstellen und deren mittlere Grundwasserhöhe dargestellt. Die Zeitreihen der Grundwasserstandsmessungen und der Seewasserstände sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Grundwassermessungen der nördlichen Messstellengruppe zeigen eine Wasserscheide zwischen der Wiehltalsperre und dem Steinbruch. Der mittlere Grundwasserstand von 325,1 m NHN bei der Messstelle B4-18 liegt deutlich oberhalb des Wasserstandes von 304,1 m NHN bei der südöstlichen Messstelle B3-18 sowie von 305,5 m NHN bei der nordwestlichen Messstelle B5-18. Die Situation ist in Profilschnitt A (Abbildung 18) dargestellt. Der Wasserstand im See Nord liegt nicht direkt auf der Schnittlinie und ist nur zur Orientierung in den Schnitt projiziert worden.

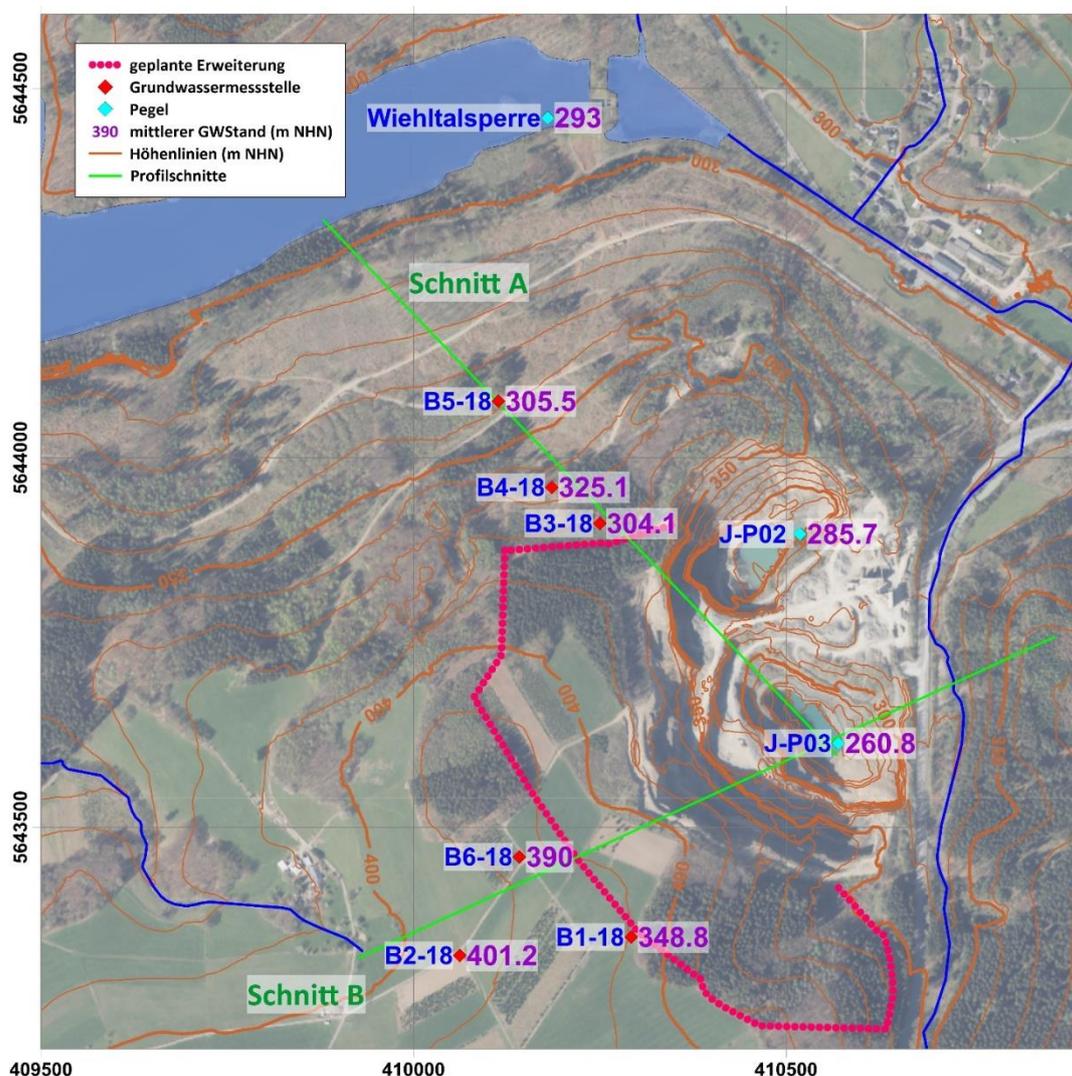


Abbildung 16: Lage der Grundwassermessstellen

Bei der westlichen Messstellengruppe liegt der höchste gemessene mittlere Grundwasserstand von 401,2 m NHN an der Messstelle B2-18. Der mittlere Grundwasserstand fällt zu den beiden in Richtung Steinbruch gelegenen Messstellen hin ab, auf 390 m NHN bei den B6-18 und auf 348,8 m NHN bei der B1-18. Der zugehörige Profilschnitt B ist in Abbildung 19 dargestellt.

Das Quellgebiet des Ulbertbaches liegt ca. 130 m westlich der Messstelle B2-18 auf einer Höhe von ca. 395 m NHN. Der Grundwasserstand in der Messstelle B2-18 liegt im Messzeitraum stets oberhalb dieser Quellaustrittshöhe, so dass davon auszugehen ist, dass der Absenkungsbereich der Steinbruchsümpfung im jetzigen Zustand die Quellmulde des Ulbertbach nicht beeinflusst.

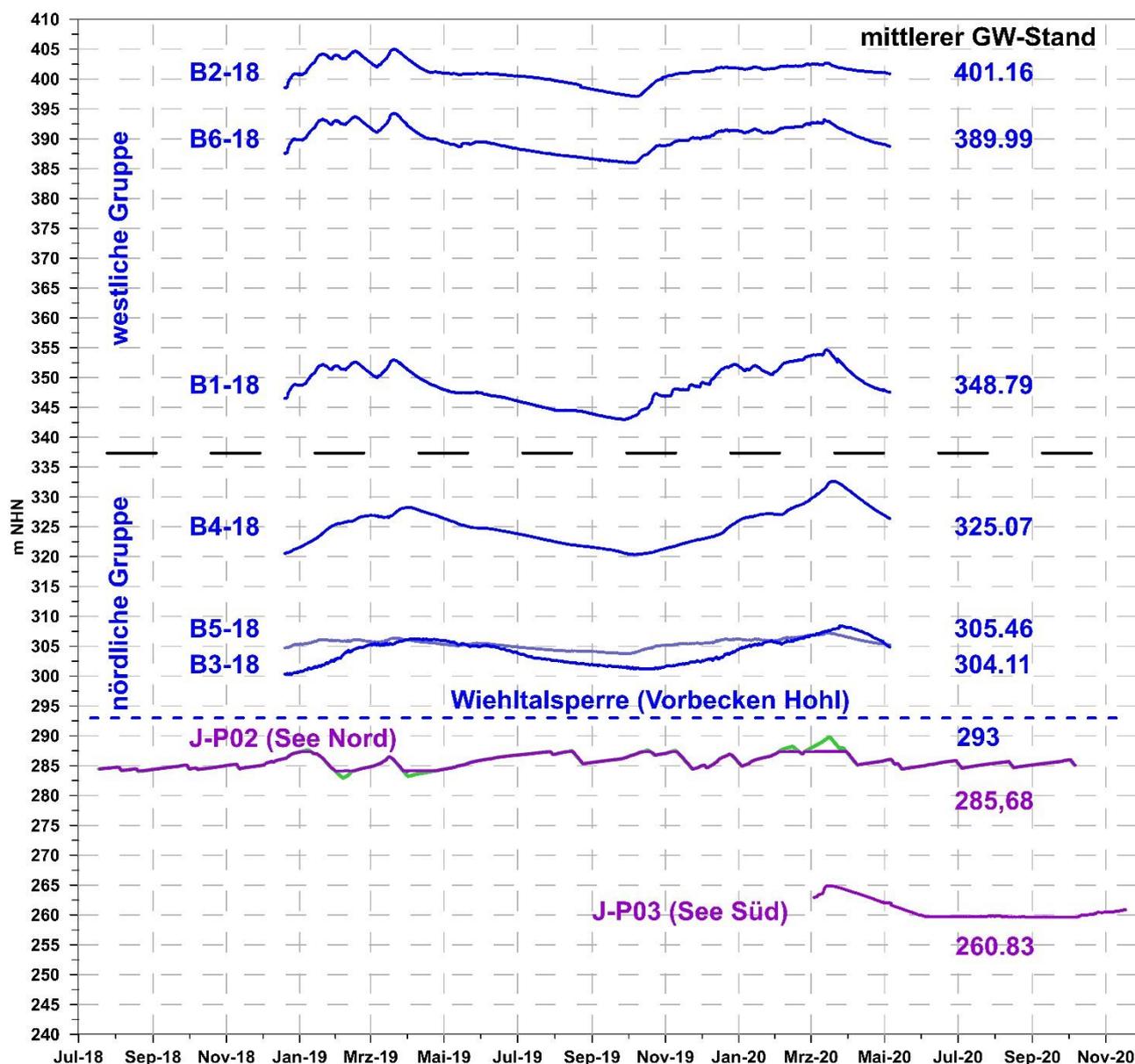


Abbildung 17: Grundwasserstandsmessungen und Seewasserstände

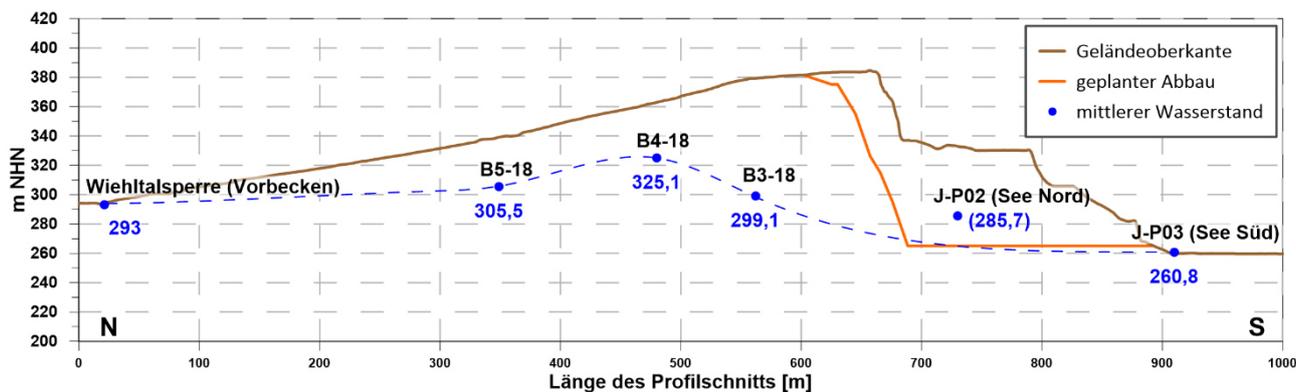


Abbildung 18: Profilschnitt A (N-S Richtung)

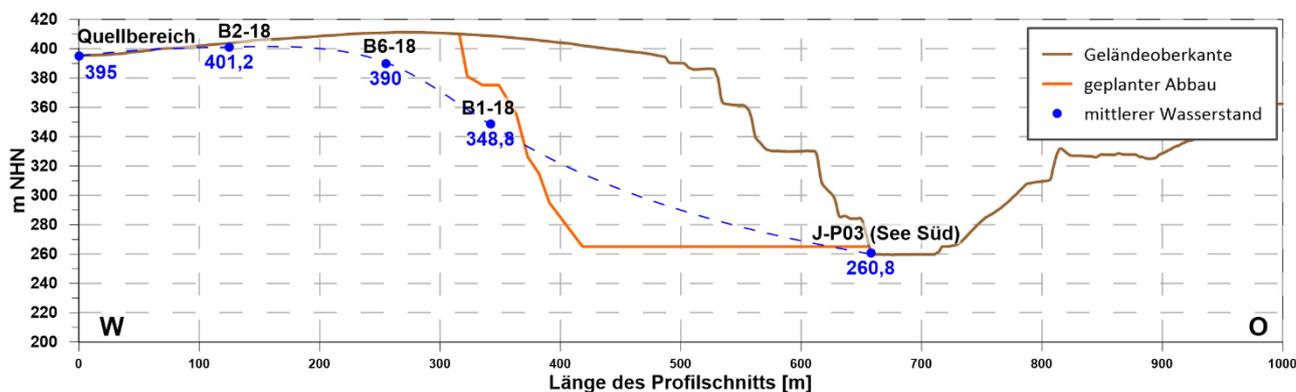


Abbildung 19: Profilschnitt B (W-O Richtung)

### 3.5 Oberflächengewässer

#### 3.5.1 Messprinzip

Bei der Abflussmessung mit dem Puls-Doppler-Prinzip wird die schallreflektierende Eigenschaft der im Wasser befindlichen Partikel ausgenutzt, und vereinfachend deren Geschwindigkeit mit der Strömungsgeschwindigkeit gleichgesetzt. Die Sonde sendet Ultraschallwellen aus und empfängt deren Reflektion. Dabei wird der Gewässerquerschnitt in ein Messraster unterteilt, und aus der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung ein Gesamtabfluss des Gewässers ermittelt. Die Messung ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, da das Messsignal durch Art und Anzahl der Partikel eine unterschiedliche Streuung erfährt bzw. auf das Vorhandensein von Partikeln angewiesen ist. Ebenso können Luftblasen im Wasser die Messung beeinflussen. Dadurch weisen die empfangenen Ultraschallsignale eine relativ hohe Streuung auf.

Die Bestimmung der durchgängigen Abflusstagesmittelwerte erfolgte mit Hilfe umfangreicher Operationen zur Signalverarbeitung. Die Erfassung der Wasserstandshöhen mittels der Drucksonde ist

messtechnisch weniger stör anfällig und lieferte stabile Messergebnisse, so dass eine Kontrolle der korrigierten Abflusswerte über die Wasserstands-Abfluss-Beziehungen der Gewässer erfolgen konnte. Ebenso wurden bei äußeren Störeinflüssen wie z.B. Anlandungen oder stehenden Wellen im Messbereich Korrekturen an den Signalen vorgenommen. Die korrigierten Werte wurden anhand der Wetterdaten, den Förderraten der Sumpfung, zeitgleichen Messwerten der anderen Standorte sowie regionalen Abflusskennwerten auf ihre Plausibilität geprüft.

### 3.5.2 Oberflächengewässerabfluss

Die resultierenden Abflussganglinien sind in Abbildung 20 dargestellt. In Tabelle 2 sind die Kennzahlen der Abflusshauptwerte für das wasserwirtschaftliche Jahr 2019 aufgelistet.

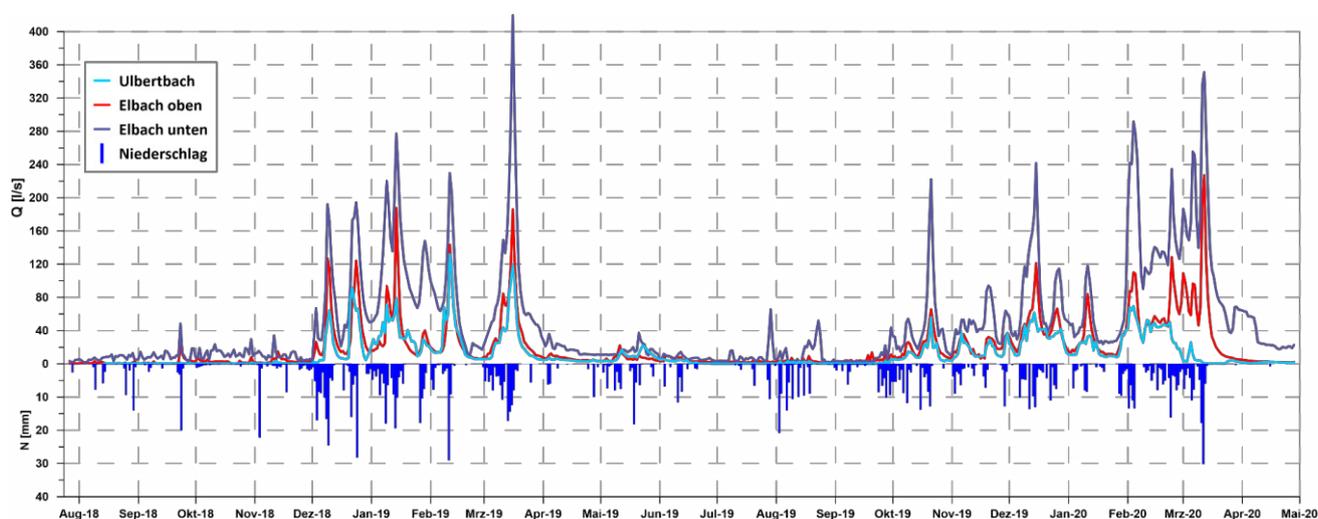


Abbildung 20: Oberflächengewässerabfluss an den Messstellen (Tagesmittelwerte)

Tabelle 2: Gewässerkundliche Kennwerte der Oberflächengewässermessstellen für das WWJ 2019

Messstelle	NQ [l/s]	MoNQ [l/s]	MQ [l/s]	MoHQ [l/s]	HQ [l/s]
Elbach oben	0,68	3,74	16,48	66,44	187,75
Elbach unten	1,08	11,56	42,13	135,51	419,76
Ulbertbach	0,13	2,71	13,79	47,48	131,97

### 3.5.3 Abflussdifferenzierung

Der Gesamtabfluss eines Gewässers setzt sich aus drei Komponenten zusammen: Erstens aus dem Oberflächenabfluss, welcher unmittelbar nach einem Niederschlagsereignis im Gewässer abfließt,

zweitens aus dem Zwischenabfluss bzw. Interflow, der oberflächennah als unterirdischer Zufluss in der ungesättigten Bodenzone mit etwas längerer Fließzeit abfließt, sowie drittens aus dem grundwasserbürtigen Abfluss bzw. Baseflow, welcher aus der Grundwasserneubildung hervorgeht und dem Gewässer aus der gesättigten Bodenzone mit der längsten Fließzeit zufließt. Dieser Anteil bestimmt im Wesentlichen den Gewässerabfluss bei längeren Trockenperioden. Der Oberflächenabfluss und der Interflow bilden zusammengefasst den Direktabfluss, der aus dem den Gewässern zufließendem Effektivniederschlag hervorgeht.

Um zwischen den Abflusskomponenten bei den drei gemessenen Abflussganglinien differenzieren zu können, wurde ein Verfahren nach WUNDT/KILLE (1970) verwendet. Dazu wurde der Abfluss in Dekaden eingeteilt. Die Dekaden-Minimum-Werte wurden aufsteigend nach Abflusswerten in ein Diagramm mit logarithmischer Ordinate aufgetragen. In diesem Diagramm liegen die einzelnen Abflusskomponenten auf einer Geraden, beginnend mit dem Baseflow. Diese Gerade kann auf die weiteren aufsteigend nach dem Abflussminimum sortierten Zeiträume extrapoliert werden. In die ursprüngliche zeitliche Reihenfolge zurücktransponiert, bildet diese Extrapolation näherungsweise den zu erwartenden Abflussanteil.

Am Messstandort ‚Elbach oben‘ ist das Verfahren hier beispielhaft dargestellt. In Abbildung 21 ist neben der Abflussganglinie mit den Tagesmittelwerten der jeweilige Minimalwert pro Dekade aufgetragen. In Abbildung 22 sind die aufsteigend sortierten Werte sowie die Extrapolation der jeweiligen Abflussanteile aufgetragen.

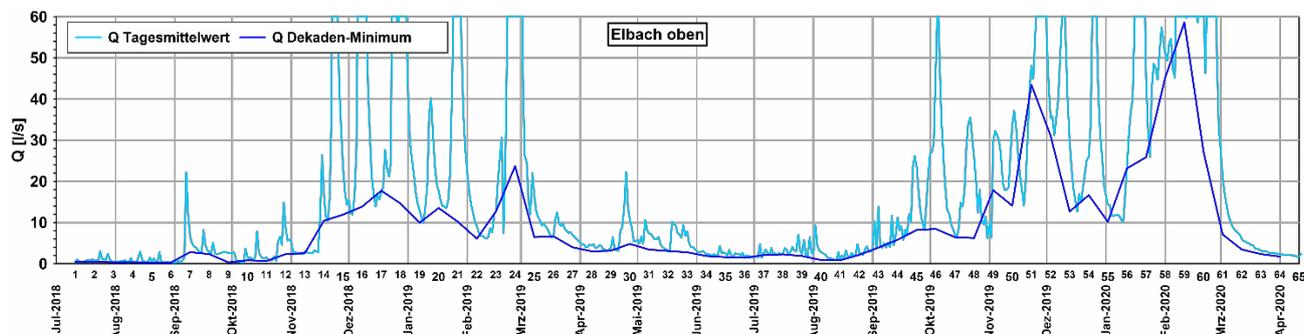


Abbildung 21: Abflussganglinie der Messstelle ‚Elbach oben‘ mit Dekaden-Minimum-Werten

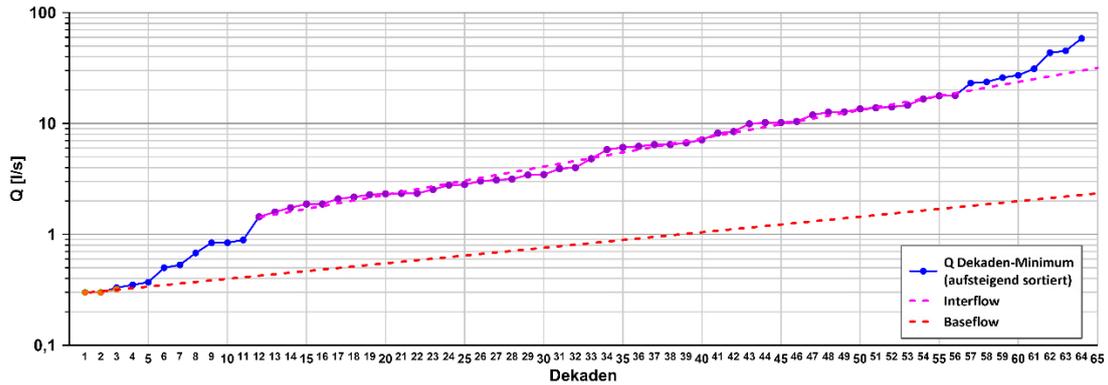


Abbildung 22: Differenzierung der Abflussanteile nach WUNDT/KILLE

In Abbildung 23 sind die Abflusskomponenten mit besonderer Berücksichtigung der niedrigen Abflüsse für die drei Messstellen dargestellt. Auffällig dabei ist der große Anteil des Interflow am Gesamtabfluss und demgegenüber der geringe Anteil des Baseflow. Der Interflow stellt den Anteil am Abflussgeschehen dar, welcher den Bächen hauptsächlich über die Lockergesteinsdecke an den Talflanken und der Talfüllung zuströmt, und bildet zusammen mit dem Oberflächenzufluss den Direktabfluss in die Gewässer. Der Baseflow kann dem Zufluss aus dem Kluftaquifer gleichgesetzt werden.

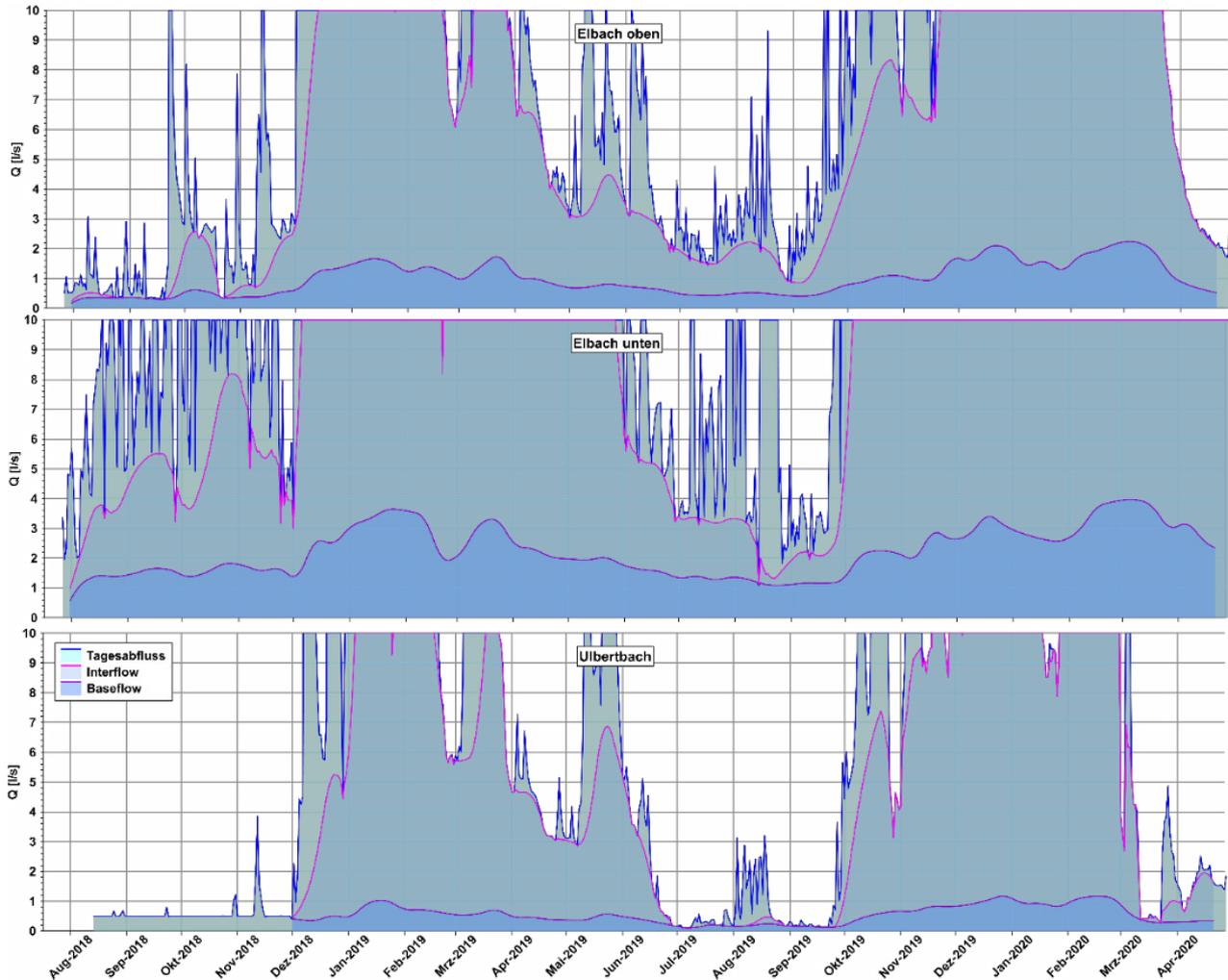


Abbildung 23: Abflusskomponenten der Oberflächengewässer

### 3.5.4 Direktabfluss

Im Zeitraum des wasserwirtschaftlichen Jahres 2019 wurde durch die lokale Wetterstation ein Gesamtniederschlag von 963 mm erfasst, das entspricht einer Niederschlagspende von  $30,52 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$ . Bilanziell teilt sich diese Niederschlagsmenge in die Verdunstung, den abflusswirksamen Gebietsniederschlag und die Grundwasserneubildung auf. Der abflusswirksame Gebietsniederschlag ist die Niederschlagsmenge, die als Direktabfluss in die Oberflächengewässer wirksam wird. Der Direktabfluss umfasst den unmittelbar abfließenden Oberflächenabfluss und den zeitlich verzögert abfließenden Zwischenabfluss bzw. Interflow aus den oberflächennahen Bodenschichten. Die morphologischen Einzugsgebiete, aus denen der abflusswirksame Gebietsniederschlag den Oberflächengewässermessstellen sowie den beiden Steinbruchseen zuströmt, sind in Abbildung 24 dargestellt. Das Abflussverhalten wird neben der Verdunstung durch gebietspezifische Faktoren hinsichtlich Geologie, Vegetation und Relief beeinflusst. Das Verhältnis des Direktabflusses zum

gesamten Gebietsniederschlag wird durch den gebietsspezifischen Abflussbeiwert ausgedrückt.

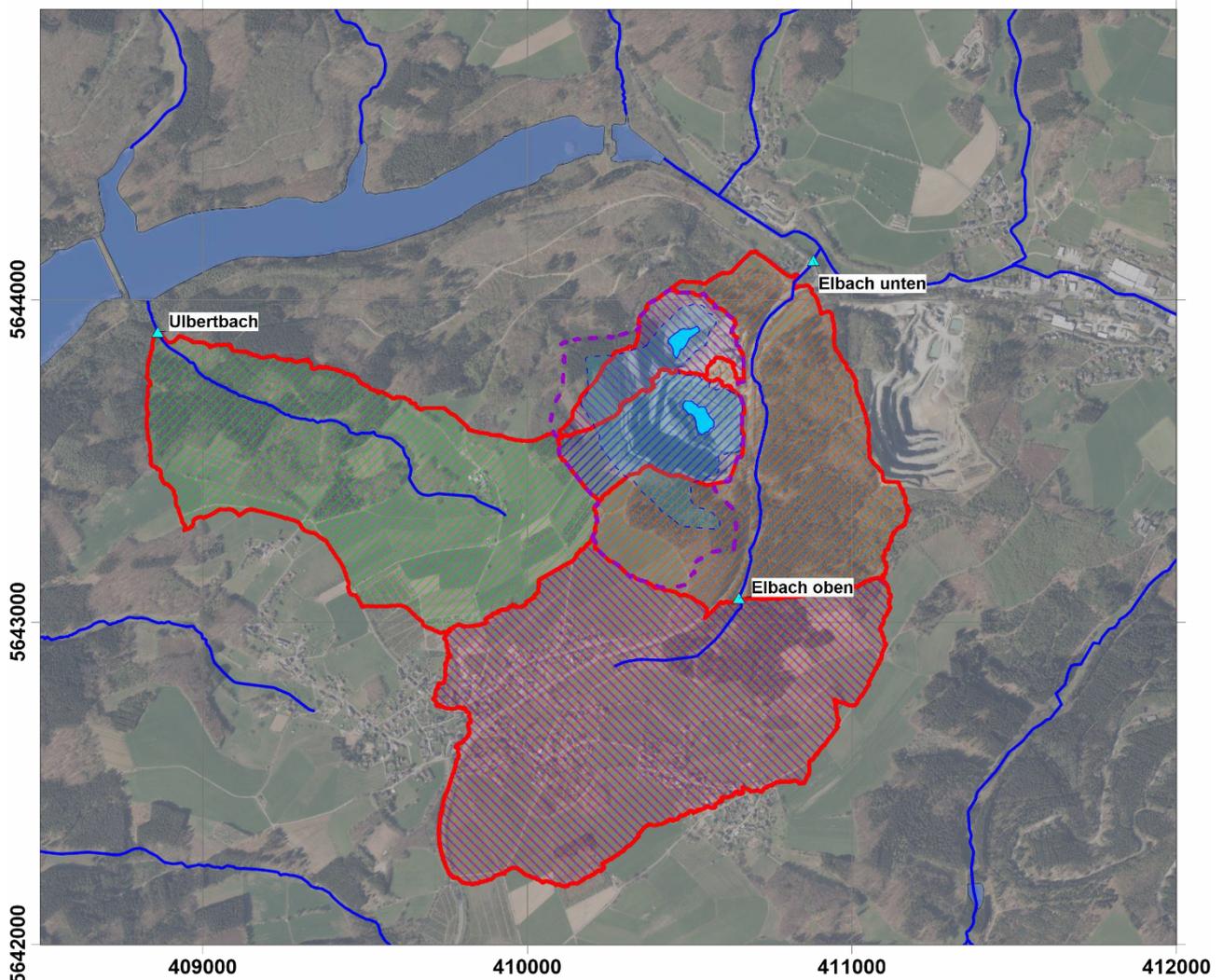


Abbildung 24: Morphologische Einzugsgebiete der Oberflächengewässermessstellen und Steinbruchseen  
(Endzustand ist gestrichelt dargestellt)

In der Tabelle 3 ist für die drei Pegel die morphologische Einzugsgebietsgröße, die mittlere Abflussspende, die mittlere Basisabflussspende und die mittlere Direktabflussspende sowie der auf den Direktabfluss bezogene Abflussbeiwert aufgelistet. In der Tabelle 4 sind die erfassten absoluten Abflüsse aufgelistet. Alle Werte beziehen sich auf das wasserwirtschaftliche Jahr 2019. Der in diesem Zeitraum an den Pegeln erfasste Direktabfluss in der vorletzten Spalte der Tabelle 4 ist, wie in Kapitel 3.2 dargelegt, analog zur Grundwasserneubildungsrate aufgrund der aktuellen klimatischen Verhältnisse in den letzten Jahren als um 20 % vermindert gegenüber dem Referenzzeitraum von 1981 bis 2010 betrachtet worden. Der auf das langjährige Referenzniveau hochgerechnete

Direktabfluss ist in der letzten Spalte der Tabelle aufgelistet.

Bei der Bewertung des Abflusses an der Messstelle ‚Elbach unten‘ müssen neben dessen morphologischem Einzugsgebiet auch die beiden Einzugsgebietsflächen der Steinbruchseen zugeordnet werden, da das aus diesen Flächen den Seen zuströmende Niederschlagswasser und Grundwasser letztendlich als Sumpfungswasser in den Elbach eingeleitet wird.

Tabelle 3: Abflussspenden in den Teileinzugsgebieten der Oberflächengewässermessstellen für das WWJ 2019

	<b>EZG [km<sup>2</sup>]</b>	<b>Mittlere Ab- flussspende [l/(s*km<sup>2</sup>)]</b>	<b>Mittlere Ba- sisabfluss- spende [l/(s*km<sup>2</sup>)]</b>	<b>Mittlere Di- rektabfluss- spende [l/(s*km<sup>2</sup>)]</b>	<b>Abflussbei- wert</b>
<b>Elbach oben</b>	0,943	17,47	0,93	16,54	0,54
<b>Elbach unten</b>	1,736	24,27	1,19	23,09	0,76
<b>Ulbert- bach</b>	0,731	18,86	0,59	18,28	0,60

Tabelle 4: Abflusswerte der Oberflächengewässermessstellen für das WWJ 2019

	<b>Mittlerer Abfluss [l/s]</b>	<b>Mittlerer Ba- sisabfluss [l/s]</b>	<b>Mittlerer Di- rektabfluss [l/s]</b>	<b>Mittlerer Direktab- fluss (100% GWN) [l/s]</b>
<b>Elbach oben</b>	16,48	0,87	15,60	19,50
<b>Elbach unten</b>	42,13	2,06	40,09	50,11
<b>Ulbertbach</b>	13,79	0,43	13,36	16,70

Das jeweilige Abflussverhalten in den Einzugsgebieten des Ulbertbach und im oberen Teil des Elbach sind nahezu identisch, während im unteren Bereich des Elbach sowohl die gesamte mittlere Abflusspende als auch der Direktabflussanteil höher ausfällt. Dies ist vermutlich morphologisch begründet, da im Unterlauf des Elbach eine höhere Reliefenergie vorliegt und in diesem Zusammenhang die Verdunstung nicht in gleichem Maß wirksam wird wie in den anderen beiden betrachteten Einzugsgebieten. Darüber hinaus erfolgen die von der Messstelle ‚Elbach unten‘ miterfassten Einleitungen aus dem Steinbruch Jaeger unabhängig vom Niederschlagsgeschehen, wodurch die Differenzierung der Abflüsse an dieser Messstelle mit einer geringen Unsicherheit behaftet ist.

Der Direktabfluss, insbesondere der Interflow, bestimmt maßgeblich das Abflussverhalten der Oberflächengewässer am Standortgebiet. Der grundwasserbürtige Basisabfluss des Kluftaquifers bildet nur einen geringen Anteil am Abflussgeschehen. Um in den nachfolgenden grundwasserhydraulischen Berechnungen den Direktabfluss als Eingangsgröße abbilden zu können, wurde den meisten Gewässersegmenten entsprechend der Größe ihrer Teileinzugsgebiete ein mittlerer Direktabfluss basierend auf dem Abflussbeiwert der Messstelle ‚Elbach oben‘ von 0,54 zugeordnet. Den Gewässersegmenten des Elbach unterhalb der Messstelle ‚Elbach oben‘ wurde ein mittlerer Direktabfluss basierend auf dem Abflussbeiwert der Messstelle ‚Elbach unten‘ von 0,75 zugeordnet. Die Abflussbeiwerte der morphologischen Einzugsgebiete der Oberflächengewässer lassen sich nicht unmittelbar auf die Einzugsgebiete der Steinbruchseen übertragen, da an deren Fläche das Steinbruchgelände selbst einen großen Anteil einnimmt. Diese Fläche unterscheidet sich grundlegend vom Rest der Einzugsgebietsfläche hinsichtlich des Reliefs und der fehlenden Vegetation und Bodenüberdeckung. Für die Einzugsgebiete der Steinbruchseen ist ein Abflussbeiwert im Bereich von 0,7 bis 0,9 realistisch.

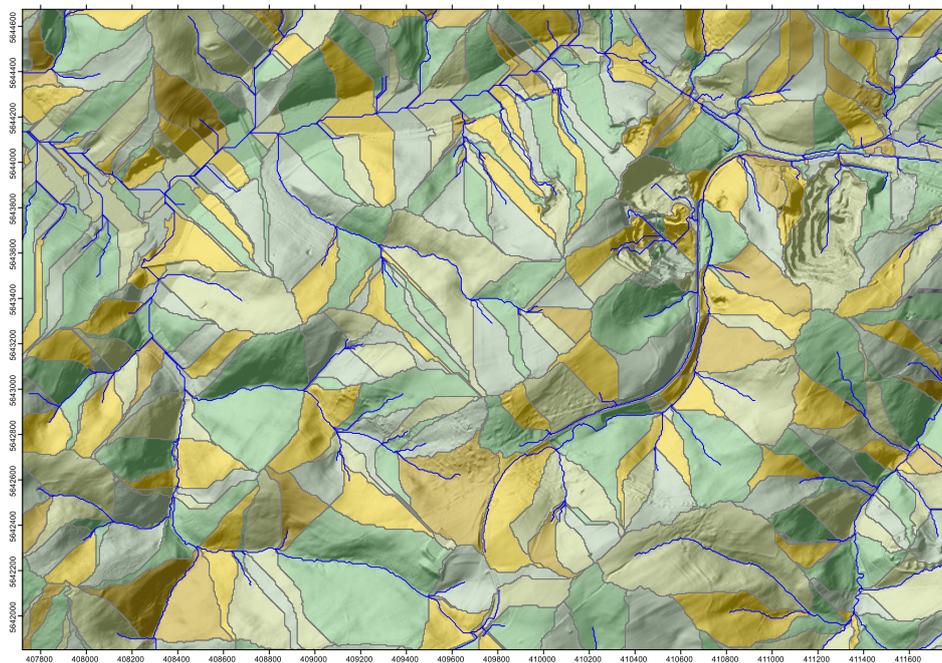
## 4 Grundwasserströmungsmodell

### 4.1 Methodik

Am Standort des Steinbruchs Jaeger wird in einen Kluftaquifer des variszischen Grundgebirges eingegriffen. Kluftaquifere sind grundsätzlich heterogen und anisotrop ausgebildet. Eine Berechnung der Grundwasserströmung, wie sie für Lockergesteinsaquifere i.d.R. mit vergleichsweise geringer Unsicherheit durchgeführt werden kann, ist auf Kluftaquifere nur mit Einschränkungen übertragbar und generell mit höherer Unsicherheit behaftet. Dennoch ist im Rahmen des Genehmigungsverfahrens zur Frage der Reichweite der Auswirkung des Planvorhabens auf das Grundwasser eine quantitative Betrachtung erforderlich. Dies ist möglich, wenn für den Kluftaquifer der Betrachtungsmaßstab gegenüber Lockergesteinsaquiferen verkleinert wird. Für die hier durchgeführte numerische

Grundwasserströmungsmodellierung wird der Kluftaquifer unter Annahme eines vergleichsweise großen repräsentativen Elementarvolumens (Meter Skala) nach dem Kontinuumsansatz betrachtet, so dass die näherungsweise Übertragbarkeit des DARCY-Gesetzes mit laminarer Porenströmung auf den Kluftaquifer gegeben ist. Das Trennflächensystem des Kluftaquifers wird dabei für das Grundwasser in der Dezimeter- bis Meterskala als gleichförmig hydraulisch vernetzt angenommen und kann durch eine Gebirgsdurchlässigkeit charakterisiert werden, die durch vorherrschend laminares Strömen gekennzeichnet ist.

Die Morphologie des Untersuchungsgebietes wurde hinsichtlich möglicherweise vorherrschender Anisotropien untersucht. Dazu wurde das digitale Geländemodell DGM1 des Landes einer Talweg-Wasserscheidenanalyse unterzogen. Als Ergebnis dieser Analyse sind in der oberen Karte in Abbildung 25 die relativ kleinskaligen Teileinzugsgebiete der Oberflächengewässer farblich abgesetzt dargestellt. Anhand der unteren Karte ist erkennbar, dass die Morphologie die tektonischen Grundrichtungen des variszischen Grundgebirges deutlich nachzeichnet. Jeweils zu etwa vergleichbaren Anteilen sind das SW-NE gerichtete variszische Streichen (gelbe Linien) der Schichtflächen und Längsklüfte, die im 90°-Winkel dazu orientierte Richtung der Querklüfte und -störungen (hellgrüne Linien) und schließlich die im 45°-Winkel zum Streichen orientierten Diagonalklüfte (dunkelgrüne Linien) anhand der kennzeichnenden morphologischen Richtungen in der Karte identifizierbar.



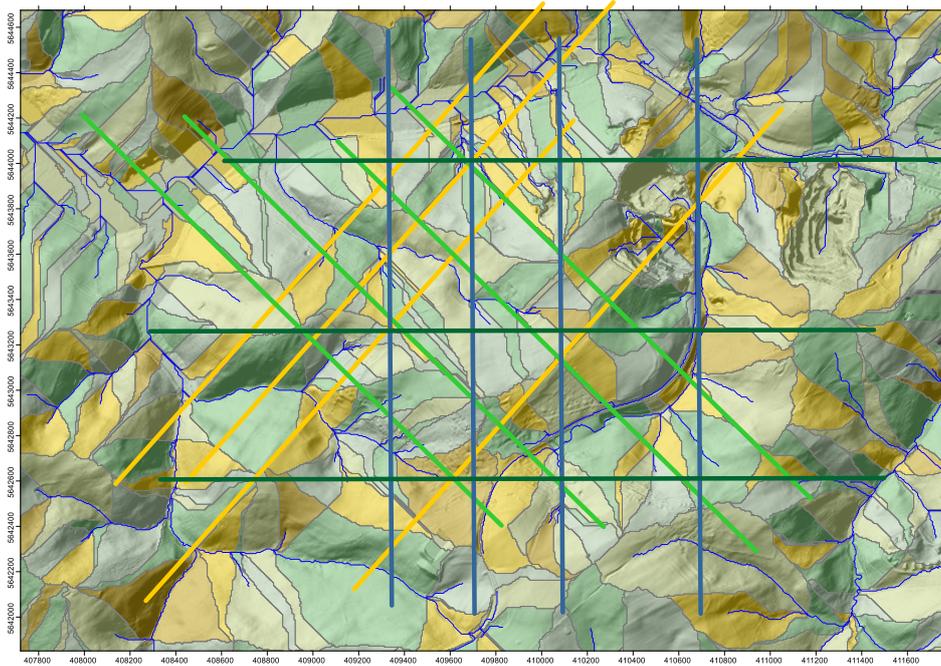


Abbildung 25: Talweg-Wasserscheidenanalyse

Aus dieser Analyse kann geschlossen werden, dass bezüglich des Entwässerungssystems und damit der Haupterosionslinien keine der tektonischen Richtungen bevorzugt ausgebildet ist, und folglich keine generelle deutliche Anisotropie vorliegt. Das vorhandene Trennflächengefüge wird für das Grundwasser auch im höherskaligen Bereich (10er bis 100er m-Skala) als weitgehend gleichförmig hydraulisch vernetzt ohne bevorzugte Richtungen interpretiert, allerdings muss lokal aufgrund der naturgemäß heterogenen Untergrundverhältnisse des variszischen Grundgebirge stets mit Unstetigkeiten bzw. Abweichungen (z.B. tektonische Störungen) von dieser idealisierten Modellvorstellung gerechnet werden, die entsprechend zu berücksichtigen sind.

Im Anschluss an den Modellaufbau erfolgt zunächst eine stationäre Kalibrierung des Modells. Auf eine instationäre Modellkalibrierung wurde aufgrund einer Reihe von Aspekten verzichtet:

- Der zur Verfügung stehende Zeitraum verfügbarer Grundwassermessungen ist mit knapp zwei Jahren relativ kurz. Für belastbare instationäre Simulationen ist erfahrungsgemäß ein mehr- bis langjähriger Zeitraum mit nach Möglichkeit deutlich unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen erforderlich.
- Es stehen im Vergleich zur Größe des Modellgebiets nur sechs Grundwassermessstellen in einem vergleichsweise eng begrenzten Raum zur Modellkalibrierung zur Verfügung.
- Aufgrund fehlender flächendeckender Vergleichsdaten hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Grundwasserstände ist die Ermittlung einer Zeitreihe der flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsrate über eine instationäre Bodenwasserbilanz mit relativ großen

Unsicherheiten behaftet.

- Angaben zum spezifischen Speicherkoeffizienten des Grundgebirges liegen nicht vor.

Die genannten Aspekte führen dazu, dass im vorliegenden Fall eine instationäre Modellkalibrierung mit höheren Parameterunsicherheiten behaftet gewesen wäre als eine stationäre Kalibrierung mit Mittelwerten des Beobachtungszeitraums wie nachfolgend erläutert.

Die stationäre Kalibrierung des Modells bezogen auf die mittleren Verhältnisse des Wasserwirtschaftsjahres 2019 erfolgt hier mit einer gegenüber dem langjährigen Mittel verringerten Grundwasserneubildungsrate. Die Grundwasserneubildungsrate wird auf der Basis eines landesweit vorliegenden flächendifferenzierten Datensatzes im Zuge der Kalibrierung als fixe Größe bei der Kalibrierung beibehalten. Variable Größe der Modellkalibrierung ist die Durchlässigkeit des Untergrundes. Im Zuge der Modellanpassung wird die Durchlässigkeit des Untergrundes zunächst global, und im weiteren Verlauf zonar unter Berücksichtigung der Geologie variiert, bis eine hinreichende Übereinstimmung mit den zur Verfügung stehenden Messungen von mittleren Grundwasserständen (= Zielgrößen) an vorhandenen Grundwassermessstellen aus dem WWJ 2019 erzielt wird. Im Zuge der Kalibrierung werden weitere Messgrößen berücksichtigt und hydrogeologische Plausibilitätsprüfungen vorgenommen.

Nach erfolgter Modellkalibrierung des Ist-Zustandes im WWJ 2019 mit verringerter Grundwasserneubildungsrate wird dieser Zustand anhand einer weiteren Simulation auf einen Zustand mit langjährig mittlerer Grundwasserneubildungsrate übertragen, um auf diese Weise einen Referenzzustand für die Prognosesimulationen des Planzustandes zu erhalten. Mit dem Modell werden dann zwei stationäre Prognosesimulationen gerechnet:

- Prognosesimulation 1: "Maximale Ausdehnung des Steinbruchs zum Ende der Abbauphase"
- Prognosesimulation 2: "Zustand nach Flutung des Steinbruchs mit Überlauf in den Elbach"

Die Ergebnisse der Simulationen werden in Form von Grundwasserhöhengleichen-, Differenzen- und Flurabstandsplänen dokumentiert. Es werden die voraussichtliche Auswirkungsreichweite der geplanten Steinbrucherweiterung erläutert und deren Auswirkung auf die im Umfeld vorhandenen Schutzgüter bewertet.

Hinsichtlich der zeitlichen Frage, d.h. in welchem Zeitraum sich die ermittelte Auswirkungsreichweite künftig einstellen wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Reichweite sich jeweils sukzessive innerhalb weniger Wochen bis Monate gemäß dem geplanten etwa 30-jährigen Abbaufortschritt entwickeln wird. Diese Aussage beruht auf der Auswertung der aufgezeichneten Grundwasserstände aus dem nahen Umfeld des Steinbruchs. Demnach zeigen die

Grundwasserstandsmessungen einen deutlichen Jahrgang entsprechend dem Verlauf der Grundwasserneubildungsrate und belegen damit eine zeitnahe Reaktion auf veränderte hydraulische Verhältnisse.

Die Zeitdauer von der Einstellung des Abbaubetriebes bis hin zum vollständig gefluteten Steinbruchsees wird in der Prognose 2 durch eine instationäre Betrachtung ergänzt.

## 4.2 Grundlagen der Grundwasserströmungsmodellierung

Bezüglich der physikalischen und mathematischen Grundlagen der Grundwasserströmung und der numerischen Lösung der Differentialgleichungen der Grundwasserströmung wird auf den Anhang 1 verwiesen.

Für die numerische Lösung der Differentialgleichung der Grundwasserströmung sind die Vorgabe von Anfangsbedingungen und die Definition von Randbedingungen erforderlich. Analytische Lösungen existieren nur für eine Reihe von Strömungssituationen mit sehr einfach angeordneten Randbedingungen und ausgeprägten Generalisierungen. Mit diesen Vereinfachungen und Generalisierungen wird man den natürlichen Verhältnissen bei der Betrachtung der Grundwasserströmung in vielen Fällen wie auch am Standort Jaeger nicht gerecht, so dass man zur numerischen Lösung der Strömungsgleichung greift.

Bei der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung nach der hier angewendeten Methode der Finiten-Differenzen wird das Modellgebiet in Rechteckelemente aufgeteilt (diskretisiert) und mit den Daten zur Geometrie und Hydraulik versehen. Zur Anwendung kommt die Software MODFLOW 2005 des US-amerikanischen geologischen Dienstes USGS.

Bei der stationären Simulation der Grundwasserverhältnisse ist die Vorgabe einer gemessenen Piezometerhöhenverteilung als Anfangsbedingung nicht erforderlich. Unter Berücksichtigung der hydraulischen Randbedingungen wird die Strömungsgleichung implizit für jedes Element in Verbindung mit seinen Nachbarelementen aufgestellt. Dabei entsteht ein lineares Gleichungssystem mit  $n$  Gleichungen bei  $n$  Rechteckelementen, welches u.a. durch iterative Verfahren gelöst werden kann. Im vorliegenden Modell wird zur Lösung des Gleichungssystems ein PCG-Verfahren (präkonditionierte konjugierte Gradienten Verfahren) mit Optimierung für nichtlineare Bedingungen (ungespannte Grundwasserverhältnisse) angewendet. Die Konvergenzkriterien wurden so gewählt, dass ein Bilanzfehler von 0,5 % nicht überschritten wird.

Als Ergebnis der iterativen Berechnung erhält man die unbekannte (hier 2D) Piezometerhöhenverteilung  $h(x, y)$  unter stationären Bedingungen.

Welches Strömungsbild sich im Zuge der Simulation ergibt, hängt neben den hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters im Wesentlichen von der Wahl der Randbedingungen ab. Randbedingungen kommen nicht nur an den Modellgrenzen zur Anwendung, sie können auch innerhalb des Modellgebiets besondere Bedingungen widerspiegeln. Als Randbedingungen werden grundsätzlich unterschieden:

Randbedingung 1. Art (DIRICHLET-Typ): Festpotentialknoten, in dem die Lösung der Strömungsgleichung vorgegeben ist. Die vorgegebene Piezometerhöhe bleibt während des Zeitschritts konstant. Vorgabe: Grundwasserstand. Beispiel: Offene Wasserfläche mit konstantem Wasserspiegel und direkter hydraulischer Anbindung an den Grundwasserleiter.

Randbedingung 2. Art (NEUMANN-Typ): Konstanter Randzufluss. Das Element enthält über einen konstanten Gradienten ( $\partial h/\partial x,y$ ) senkrecht auf den Modellrand einen über den Zeitschritt konstanten Volumenstrom. Vorgabe: Volumenstrom. Beispiele: Randzufluss am Talrand, Brunnen. Sonderfall: Undurchlässiger Rand (Stromlinie) mit Randzufluss = 0.

Randbedingung 3. Art (CAUCHY-Typ): Kombination aus 1 und 2, so genannte Leakage-knoten. Sie dienen der Modellierung halbdurchlässiger Ränder. Vorgabe: Wasserstand und hydraulischer Widerstand. Beispiel: Fluss-, Bachsohle mit hydraulischem Widerstand.

Im hier aufgebauten Grundwasserströmungsmodell kommen im Wesentlichen Randbedingungen der 3. Art in unterschiedlichen Varianten zur Anwendung. Lediglich der Brunnen am Hof Ulbert ist als eine innere Randbedingung 2. Art im Modell implementiert und an der südwestlichen Grenze des Modellgebiets liegt in einem kurzen Abschnitt ein undurchlässiger Rand vor.

### 4.3 Modellaufbau

#### 4.3.1 Räumliche Diskretisierung

Die Lage des Modellgebiets mit einer Größe von ca. 8 km<sup>2</sup> ist der Abbildung 26 zu entnehmen. Das Modellgitter besteht aus 80.498 aktiven Modellelementen quadratischer Form mit einer einheitlichen Gitterweite von 10 m.

Horizontal wird das Modell im Osten von der Wiehl und im Norden von der Wiehltalsperre begrenzt. Im Westen verläuft die Grenze des Modellgebiets über das Vorbecken "Meiswinkel" der Talsperre bachaufwärts entlang des Streeshartbachs, über den einmündenden Holzsiefen bis zur morphologischen Wasserscheide. Dort quert die Grenze den Höhenzug, um dann südöstlich auf das Quellgebiet des Aubachs zu treffen und dessen Verlauf bis zur Ortschaft Wildbergerhütte zu folgen, wo sie über den Wildberger Bach wieder auf die Wiehl trifft.

Da es mangels geeigneter Datengrundlage nicht zweckmäßig ist, den Kluffgrundwasserleiter zur

Teufe hin in unterschiedliche hydraulische Einheiten zu unterteilen, wurde ein 1-Schichtmodell aufgebaut, so dass es sich hier um ein zweidimensionales 2D-Finite-Differenzenmodell handelt. Die über die wassererfüllte Mächtigkeit des Kluftaquifers variierenden Durchlässigkeitsbeiwerte werden dabei zu einer integralen mittleren Transmissivität zusammengefasst. Aufgrund der als weitgehend ungespannt angenommenen Grundwasseroberfläche ist die Transmissivität abhängig von der wassererfüllten Mächtigkeit. Die Lösung der Strömungsgleichung erfolgt iterativ.

Die Festlegung der unteren geometrischen Begrenzung des Modells ist mit Unsicherheiten behaftet, da der durch Entlastung des Gebirges entstandene Kluftohlraum zur Teufe hin allmählich seine Wasserwegsamkeit verliert und mit unscharfer Grenze schließlich im unverritzten Gebirge ein praktisch undurchlässiger Gebirgskörper vorliegt. In welcher Tiefenlage sich dieser Übergangsbereich befindet, ist für das Modellgebiet im Einzelnen nicht bekannt. Nach Erfahrungen aus dem Talsperren- und Brunnenbau reicht sie nach HEITFELD ET AL. (1980) häufig 30 – 50 m tief unter Gelände, und zwar unter Höhenrücken tiefer als in den Niederungen.

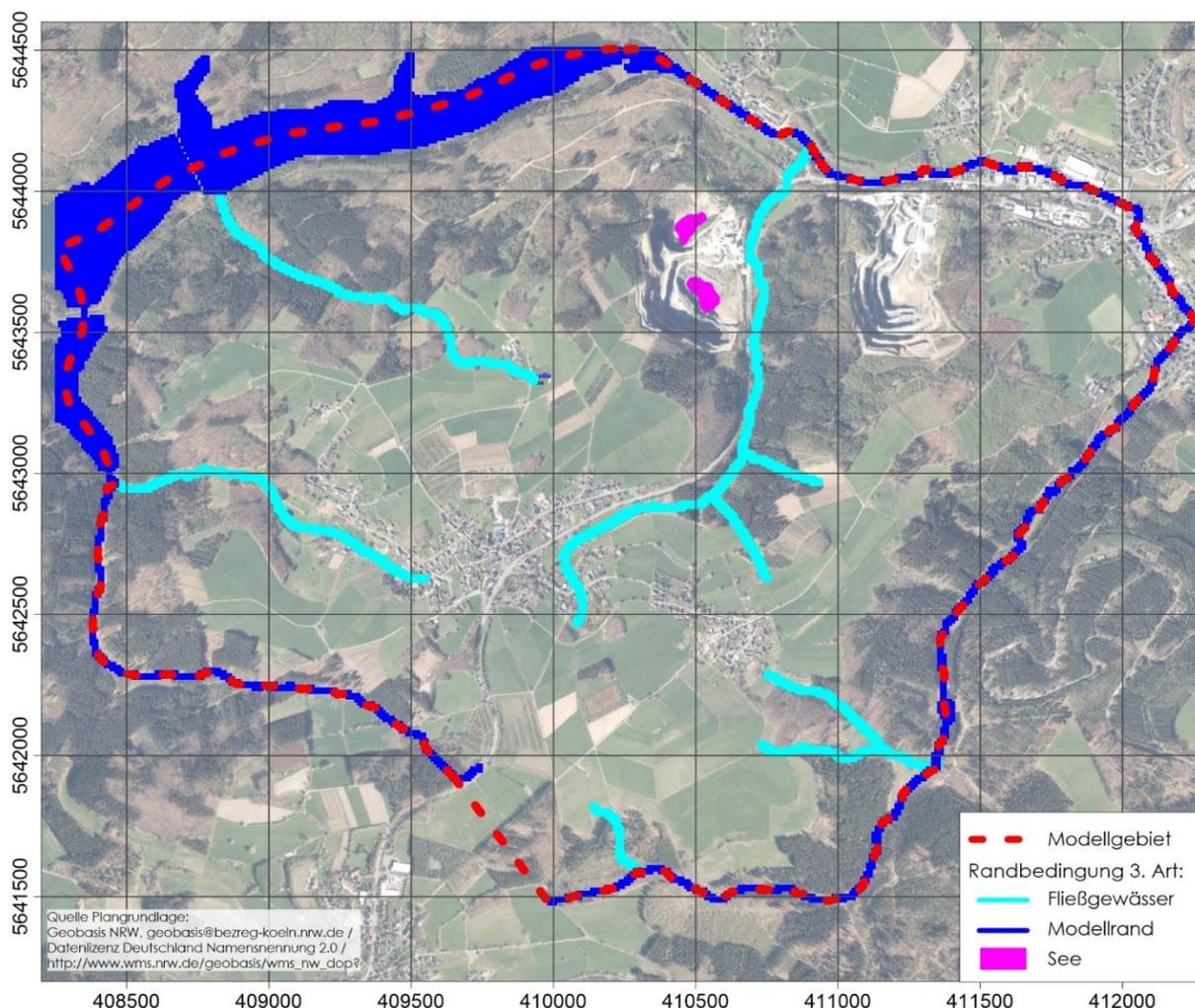


Abbildung 26: Lage und Ausdehnung des Grundwasserströmungsmodells mit

## Kennzeichnung der Randbedingungen

Um für das Modell eine Näherungslösung zu entwickeln, wurde in einem ersten Schritt das hoch aufgelöste digitale Geländemodell DGM1 des Landes NRW rechnerisch einer Glättung über eine gleitende Mittelwertbildung mit einer Schrittweite von 1.000 m unterzogen. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Bohraufschlüsse mit örtlich nachgewiesener Wasserwegsamkeit bis in 90 m Tiefe wurde von der zuvor erläuterten geglätteten Geländeoberfläche der Betrag von 105 m subtrahiert und als Basis des Modells festgelegt. Auf diese Weise beträgt die Mächtigkeit des Kluftgrundwasserleiters im Wiehltal rund 70 m und nimmt nach Westen auf Werte um 100 m zu. Im Bereich des Steinbruchs wurde aufgrund der Auflockerungswirkung der Sprengtätigkeit auf das Gebirge eine zusätzliche Vertiefung der Wasserwegsamkeit um etwa 20 m angenommen. Aufgrund der Sohlhöhen des Steinbruchs trifft dies nur für den südlichen Bereich zu.

Die Höhenlage der Geländeoberfläche und die der festgelegten Basis des Kluftaquifers sind in Abbildung 27 und Abbildung 28 in Form von Isolinenplänen zu entnehmen.

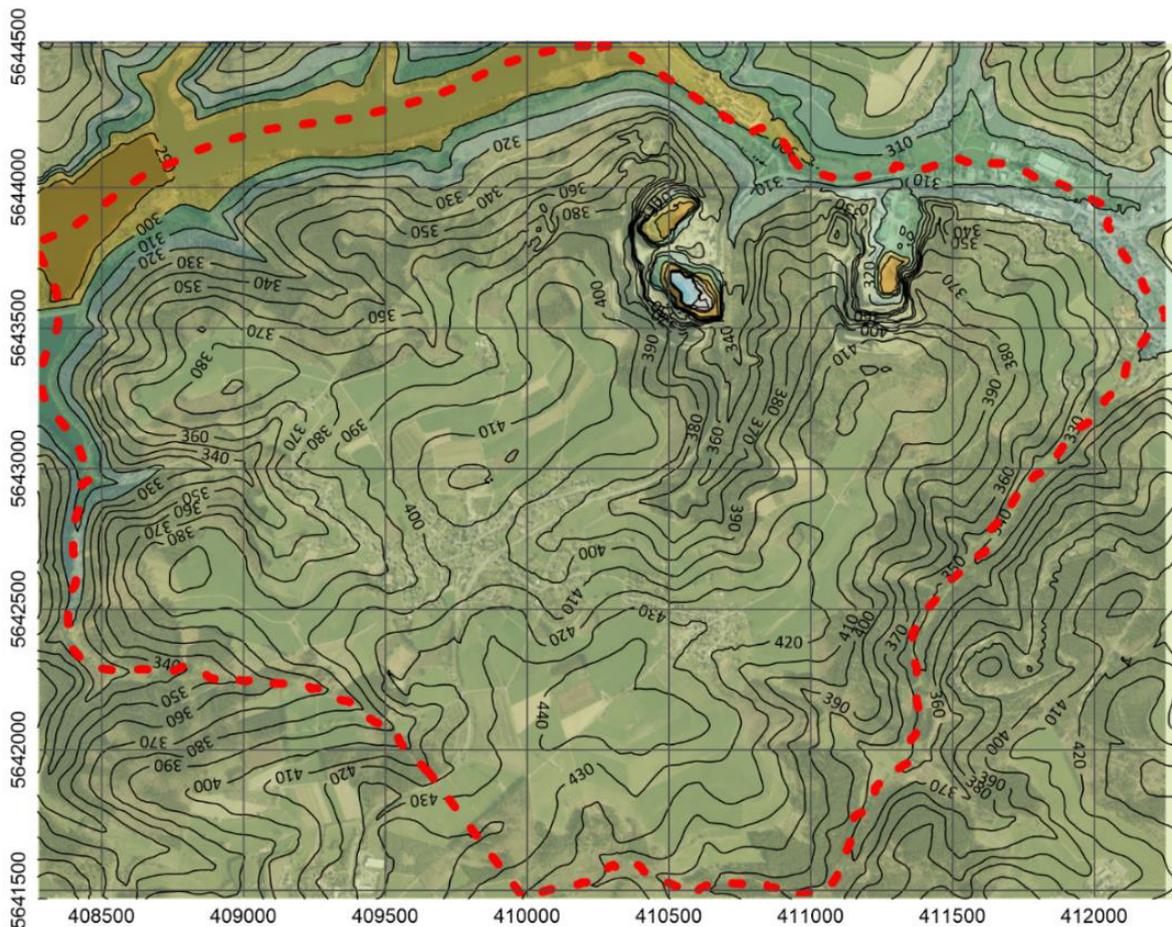


Abbildung 27: Höhenlage der Geländeoberfläche (Modellgrenze rot gestrichelt)

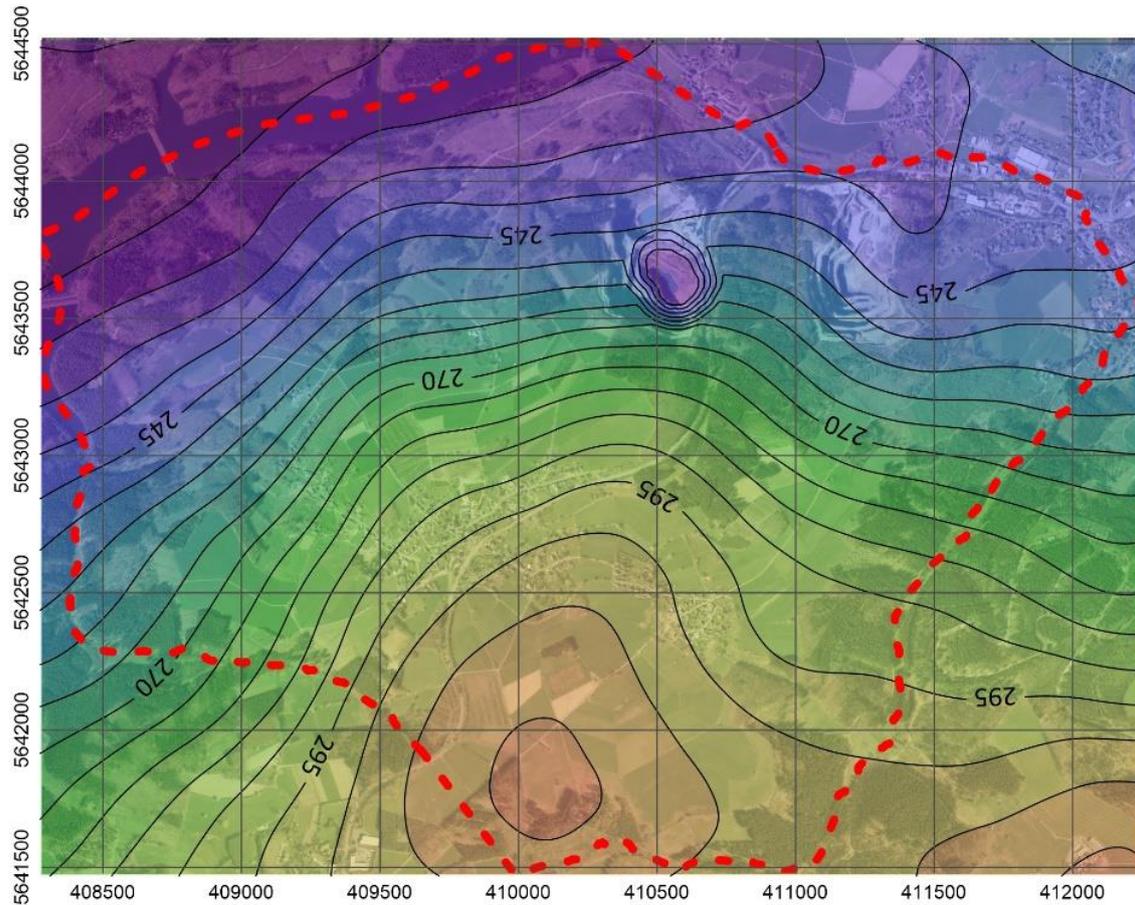


Abbildung 28: Oberfläche der Liegendbegrenzung des Kluftaquifers (Modellgrenze rot gestrichelt)

## 4.3.2 Randbedingungen

### 4.3.2.1 Wiehltalsperre

Die äußere Umrandung des Grundwasserströmungsmodells wurde überwiegend entlang von Fließgewässern bzw. entlang der Vorbecken und dem Hauptbecken der Wiehltalsperre festgelegt. Hierbei handelt es sich um hydraulisch gut begründete Modellränder, da die Gewässer die Vorflut für das Grundwasser darstellen und folglich deren Wasserstand als Randbedingung für die Grundwasserströmung herangezogen werden kann.

Die ebenen Wasseroberflächen der Talsperrenvorbecken bzw. des Hauptspeichers wurden nach Angaben des Aggerverbandes gemäß den Werten in Tabelle 5 festgelegt. Die Wasserstände in den Vorbecken schwanken im Jahresverlauf nur um wenige Zentimeter. Der Jahresgang im Hauptspeicher umfasst in Abhängigkeit vom Witterungsverlauf über ein wasserwirtschaftliches Jahr etwa 6 bis 8 m.

Tabelle 5: Wasserstände der Wiehltalsperre (m NHN) (Quelle: AGGERVERBAND)

<b>Vorsperre Hohl</b>	293,00
<b>Vorsperre Meiswinkel</b>	303,50
<b>Hauptspeicher (Mittelwert WWJ 2019)</b>	286,66

Die betreffenden Modellzellen entlang der Wiehltalsperre erhalten als Wasserstandsvorgabe die Werte der Tabelle 5. Als Randbedingung 3. Art ist die Festlegung eines hydraulischen Widerstandes (Leakagekoeffizient) erforderlich, der in diesen Zellen  $0,005 \text{ m}^2/\text{s}$  beträgt, was einem vergleichsweise geringen hydraulischen Widerstand zwischen Grundwasserleiter und Gewässer entspricht.

#### 4.3.2.2 Fließgewässer am Modellrand

Angaben zu Wasserstandsverläufen entlang der Fließgewässer des Modellrandes Streeshartbach, Holzsiepen und Aubach liegen nicht vor. Hilfsweise wurden die Höhenlagen aus den geglätteten Werten des DGM1 entlang des Talwegs der Fließgewässer abgeleitet und - zur Berücksichtigung der in der Regel schmalen Einschnitte der Gewässerbetten - um den Betrag von einheitlich  $0,5 \text{ m}$  nach unten korrigiert und als repräsentativer Wasserstand im Modell implementiert. Eine genauere Vorgabe ist angesichts des herrschenden Geländerelevs und der Entfernung der Modellränder vom Aussagegebiet nicht erforderlich.

#### 4.3.2.3 Trennstromlinie Erdingen

Die Verbindungslinie zwischen den Quellaustritten des Holzsiepens und des Aubachs zwischen den Ortschaften Odenspiel und Erdingen am Südwestrand des Modellgebiets kann als lokale grundwasserhydraulische Trennstromlinie innerhalb der Einzugsgebiete des Aubachs und des Holzsiepen aufgefasst werden. Dementsprechend wurde die Modellgrenze in diesem Abschnitt als Sonderfall der Randbedingung 2. Art mit Volumenstrom gleich Null über den Modellrand behandelt.

### 4.3.3 Quell- und Senkenterme, sonstige besondere Modellelemente

#### 4.3.3.1 Grundwasserneubildung

Die klimatischen Verhältnisse des Wasserwirtschaftsjahres 2019 wurden für die Modellkalibrierung als quasistationär eingeordnet. Gegenüber dem langjährigen Referenzzeitraum 1981 – 2010 ergibt sich gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 3.2 eine um etwa  $20 \%$  verringerte

Grundwasserneubildungsrate. Gemäß allgemeiner Empfehlung der Landesumweltverwaltung soll für stationäre Wasserhaushaltsbetrachtungen i.d.R. auf den im Auftrag des Landes durch das Forschungszentrum Jülich entwickelten Datensatz mGROWA zurückgegriffen werden. Hierbei handelt es sich um einen landesweit bereitgestellten Datensatz zur mittleren Grundwasserneubildungsrate, welcher auf Basis eines 100-m-Rasters flächendifferenziert Ergebnisse für den genannten 30-jährigen Referenzzeitraum liefert. In die Berechnung gingen ein:

- Klima
- Geologie bzw. Bodenart
- Hangneigung und Flurabstand
- Vegetation
- Flächennutzung

Der über die Server des Landes verfügbare Datensatz gemäß Abbildung 29 wurde um 20 % reduziert als grundlegender Quellterm in das Strömungsmodell implementiert.

Für die Prognosesimulationen wurde diese Reduktion rückgängig gemacht, um die langjährig mittleren Verhältnisse abzubilden.

Über das gesamte Modellgebiet gemittelt liegt die mittlere Grundwasserneubildungsrate des mGROWA-Datensatzes bei  $2,52 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ , ein vergleichsweise geringer Wert, aber typisch für das variszische Schiefergebirge. Um 20 % verringert liegt die mittlere Grundwasserneubildungsrate bei  $2,01 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ .

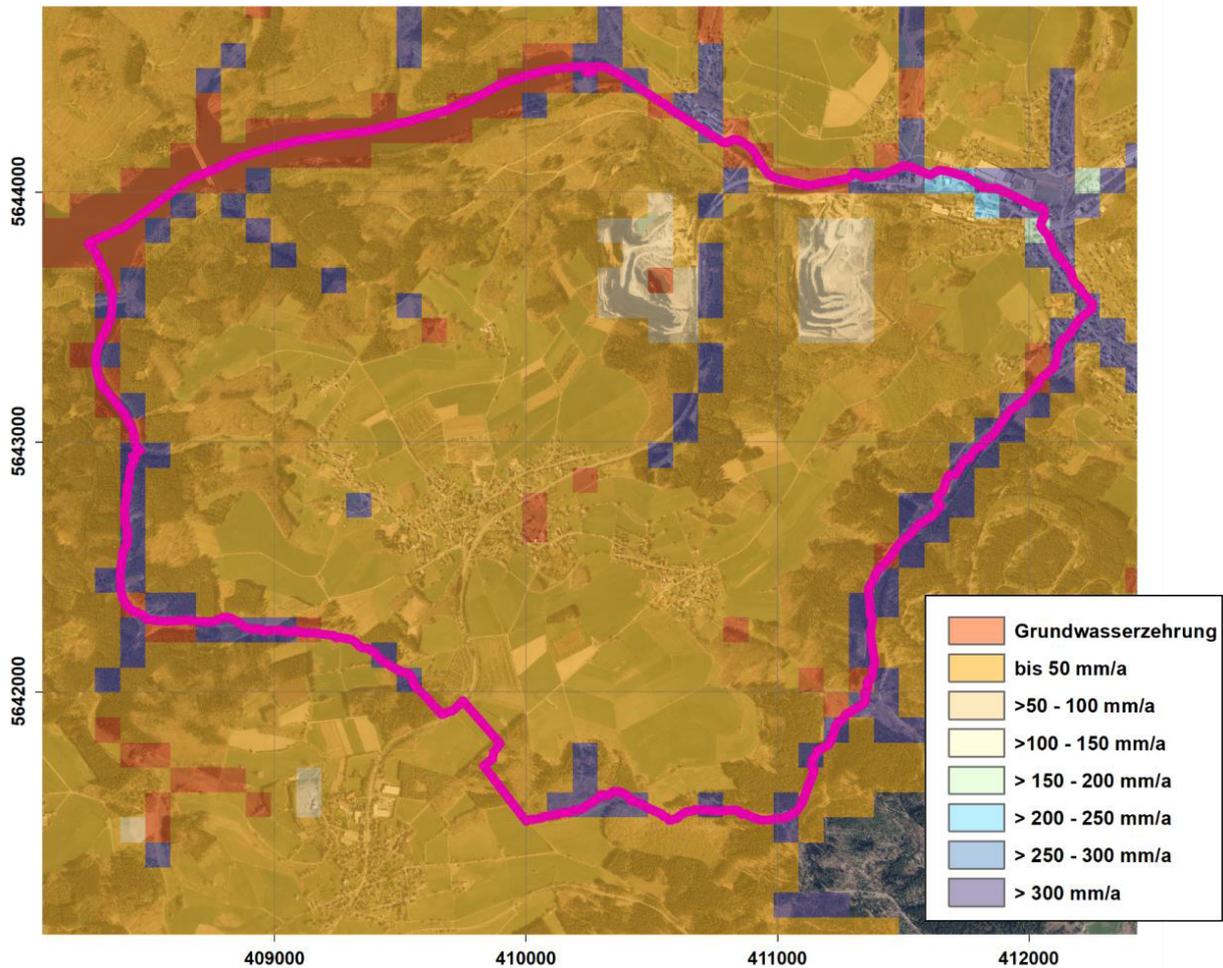


Abbildung 29: Grundwasserneubildungsrate mGROWA im Modellgebiet

Nach gegenwärtigem Informationsstand wird im Zuge der globalen Veränderungen des Klimas im Plangebiet nicht mit generell abnehmender Grundwasserneubildungsrate gegenüber dem langjährigen Referenzzeitraum gerechnet. Es werden trockenere Sommer bei tendenziell zunehmender Anzahl von Starkregentagen und höhere Winterniederschläge erwartet, was grundsätzlich günstig für die Grundwasserneubildungsrate ist, da diese vornehmlich in der Phase der Vegetationsruhe stattfindet.

#### 4.3.3.2 Fließgewässer innerhalb des Modellgebiets

Angaben zum Verlauf der Gewässersohlhöhen der Fließgewässer innerhalb des Modellgebietes (Elbach und seitliche Zuflüsse, Ulbertbach, unbenannter Zufluss des Streeshartbach bei Meiswinkel und weitere unbenannte Zuflüsse des Aubach) liegen nicht vor. Hilfsweise wurden die Höhenlagen aus den geglätteten Werten des DGM1 entlang der Fließgewässer abgeleitet und - zur Berücksichtigung der in der Regel schmalen Einschnitte der Gewässerbetten - um den Betrag von einheitlich

0,5 m nach unten korrigiert als repräsentative Sohlhöhen der Gewässer im Modell implementiert.

Die Fließgewässer spielen im Grundwasserhaushalt des Modellgebietes eine wichtige Rolle. Sie fungieren im Wesentlichen in den Tallagen als Vorflut für das Grundwasser, andererseits kann aber in Gebieten mit hohen Flurabständen auch eine Wiederergänzung des Grundwassers durch versickernden Oberflächenabfluss aus diesen Gewässern erfolgen.

### Grundlagen

Es existieren verschiedene Methoden, die Interaktion zwischen einem Oberflächengewässer und dem Grundwasserleiter zu simulieren. Bei allen Methoden handelt es sich um unterschiedliche Anwendungen der Randbedingungen der 3. Art (Leakageknoten), sei es durch Vorgabe einer Wasserspiegellage und einer Gewässersohlhöhe in einem Oberflächengewässer kombiniert mit einem hydraulischen Widerstand (wie in diesem Modell an den Modellrändern), oder sei es entsprechend einer Drainagemodellierung, die dem System ab bestimmten Grundwasserständen nur Wasser entziehen kann. Nachteilig wirkt sich bei diesen beiden Methoden aus, dass der Abfluss im Gewässer selbst quantitativ nicht in die Wasserbilanz des Gewässers bzw. des Grundwassers einbezogen werden kann. Es ist mit diesen Methoden auch nicht möglich, ein vollständig versickerndes Gewässer zu simulieren.

Die offenen Fließgewässer werden hier im Modell mit einer speziellen Anwendung der Randbedingung der 3. Art realisiert, bei der die Leakagezellen des jeweiligen Gewässers in Abstromrichtung abschnittsweise sequentiell codiert sind.

Im Zuge der Simulation prüft das Modell, ob am Gewässer das Grundwasser höher steht als der Wasserstand im Gewässer. Trifft dies zu, herrschen effluente Verhältnisse, das Fließgewässer fungiert als Vorflut, Grundwasser tritt in das Gewässer über. Ist der Grundwasserstand niedriger als der Wasserstand im Gewässer, herrschen influente Verhältnisse, das Fließgewässer gibt Wasser an das Grundwasser ab. Solche Verhältnisse herrschen im Modellgebiet am Elbach in der näheren Umgebung des gesümpften Steinbruchs.

Der Wasserstand im Gewässer wird berechnet nach dem Ansatz von MANNING/STRICKLER unter Annahme eines Trapezprofils. Der Abfluss im Gewässer wird zum einen durch Übertritt von Grundwasser ins Gewässer als Vorflutfunktion und zum anderen durch abschnittsweise Vorgabe des Direktabflusses, d.h. des Niederschlagsanteils, welcher nicht versickert und nicht verdunstet, generiert. In diesem Abflussanteil ist auch der Zwischenabfluss ("Interflow") enthalten, der dem Fließgewässer über eine oberflächennahe unterirdische Bodenpassage zeitverzögert Zutritt. Nach der DIN 4049 ist dieser unterirdische Abflussanteil nicht dem Grundwasser zuzuordnen.

Mit Hilfe des hier umgesetzten Ansatzes wird im Grundwassermodell zusätzlich somit eine vereinfachende 1-D Simulation des Oberflächengewässerabflusses (Energienliniengefälle = Sohlgefälle) umgesetzt, wobei über den Leakageterm der Randbedingung 3. Art die Interaktion mit dem Grundwasser erfolgt.

Um den Gesamtabfluss, der in Vorflutern aus der Summe aus grundwasserbürtigem Basisabfluss und Direktabfluss (Oberflächenabfluss einschl. Interflow) besteht, in den Fließgewässern im Modell realitätsnah abbilden zu können, wird als zusätzlicher Quellterm ein mittlerer Direktabfluss gemäß den Erläuterungen aus Abschnitt 3.5 den einzelnen Gewässersegmenten entsprechend der Größe ihrer Teileinzugsgebiete zugeordnet. Würde der Direktabfluss, also Oberflächenabfluss einschließlich des Interflow, nicht berücksichtigt, würde im Modell über die integrierten Fließgewässer ausschließlich grundwasserbürtiger Abfluss abströmen.

#### **4.3.3.3 Steinbruchseen, Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH**

Die beiden Steinbruchseen der Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH werden ebenfalls mit einer Variante der Randbedingung 3. Art berücksichtigt. Die Seen bilden aufgrund der aktiven Steinbruchentwässerung (mittlere Rate der Steinbruchsümpfung) lokale Senken für das Grundwasser. Den Seen strömt analog den modellierten Fließgewässern neben Grundwasser auch Oberflächenabfluss aus dem morphologischen Einzugsgebiet zu. Mittlerer Niederschlag und mittlere Verdunstung bilden weitere Bilanzgrößen. Der modellinterne Algorithmus berechnet die Seespiegelhöhe aus der volumetrischen Bilanz von Zu- und Abflüssen und der Gewässersohlhöhe, ausgehend von einer realistischen Seespiegelhöhenangabe. Aufgrund des begrenzten Messzeitraums basiert die Angabe für den See Süd auf Sichtkontrollen des Wasserstandes unter Berücksichtigung der nachfolgend erfassten Messwerte.

#### **4.3.3.4 Steinbruchsee, Westdeutsche Grauwacken-Union**

Der östlich des Elbach gelegene Steinbruch der Westdeutsche Grauwacken-Union GmbH liegt ebenfalls im Modellgebiet. Entsprechend den aus den Kartenwerken bzw. Informationssystem erkennbaren Sohlhöhen des Steinbruchs und dem Vorhandensein einer Wasserfläche im Steinbruchtiefsten ist offensichtlich, dass auch dieser Steinbruch aktiv entwässert wird und in das Grundwasser eingreift. Dieser Steinbruchsee bildet somit ebenso eine lokale Vorflut für das Grundwasser. Modelltechnisch wurde diese Potentialsenke als Festpotentialknoten (Randbedingung 1. Art) mit der Höhenlage des aus dem DGM1 abgeleiteten Seewasserspiegels abgebildet. Daten zur Steinbruchsümpfung dieses Betriebes liegen nicht vor.

#### 4.3.3.5 Trinkwassergewinnung

Nach Angaben des Gesundheitsamtes des Oberbergischen Kreises wird am Hof Ulbert mit einer Rate von 120 m<sup>3</sup>/a Grundwasser zur Trinkwasserversorgung des Bauernhofs aus einem Tiefbrunnen gewonnen. Nach vorliegenden Angaben besitzt der Brunnen eine Tiefe von 66 m. Ausbauezeichnung und Schichtenprofil liegen nicht vor. Der Brunnen wurde als innere Randbedingung 2. Art mit dem genannten Volumenstrom in das Modell implementiert.

Die nach vorliegenden Informationen ca. 800 m östlich des Dorfzentrums in der Elbachaue gelegene und heute nicht mehr in Betrieb befindliche Trinkwassergewinnungsanlage des Wasserleitungsvereins Odenspiel wurde bei der Modellkalibrierung nicht berücksichtigt.

#### 4.3.3.6 Tektonische Störung

Im Zuge der Modellkalibrierung ergab sich das Erfordernis, eine tektonische Störung mit einem Verlauf gemäß der Geologischen Karte 1 : 25.000 (s. Abbildung 2) zu berücksichtigen, welche infolge bruchhafter Verformung der Gesteine mit der Bildung von feinem Gesteinsmehl auf das Grundwasser eine stauende Wirkung entfaltet. Dies wurde modelltechnisch durch besondere Modellelemente abgebildet, die es erlauben, den Grundwasserfluss zwischen zwei benachbarten Elementen mit einem Durchflusswiderstand zu versehen analog dem Vorgehen bei einem Leakageknoten. Der Verlauf der vermuteten tektonischen Störung ist in den nachfolgend erläuterten Anlagen zu den Ergebnissen der Grundwassermodellierung eingetragen.

### 4.4 Modellkalibrierung

Im Zuge der Modellkalibrierung sind weitere Kontrollgrößen aus der Messdatenerfassung zu berücksichtigen und Plausibilitätsprüfungen bezüglich der hydrogeologischen Situation vorzunehmen:

- Verteilung der vorherrschenden Gesteine (Geologische Karte 1 : 25.000)
- Resultierende Gewässerabflüsse im Gewässernetz
- Wasserstände der Steinbruchseen
- Entnahmen aus den Steinbruchseen (Niederschlag minus Verdunstung, Direktabfluss und Grundwasser)
- Höhenlage der Quellaustrittspunkte im Modellgebiet

Das Ergebnis der Modellkalibrierung ist dem Grundwasserhöhengleichenplan in Anlage 1 mit den eingetragenen Einzugsgebieten des Steinbruchs Jaeger (0,83 km<sup>2</sup>) und des Brunnens Hof Ulbert (0,004 km<sup>2</sup>) zu entnehmen. Als ergänzende Information dient der Flurabstandsplan in Anlage 2.

Es ergibt sich insgesamt ein schlüssiges Bild mit der Ausbildung von Grundwasserscheiden entlang des Verlaufs der morphologischen Höhenzüge in Verbindung mit den eingetieften Oberflächengewässern und der dadurch erzeugten Vorflutfunktion für das Grundwasser. Im Osten bilden sich innerhalb der dort über das gesamte Profil hinweg vorliegenden Odenspieler Schichten (Transmissivität  $1 \cdot 10^{-6}$  bis  $2 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s) als markante Potentialsenken die im Modellgebiet vorhandenen Steinbrüche. Infolge Sprengauflockerung liegen die Transmissivitäten im engeren Steinbruchbereich im oberen Bereich dieses Spektrums.

Die Wasserentnahmen im Steinbruch Jaeger betragen in der Simulation der Modellkalibrierung in der Summe 7,8 l/s bzw. 245.000 m<sup>3</sup>/a (Steinbruch Jaeger Süd: 5,49 l/s, Nord: 2,27 l/s.), die aus einem grundwasserbürtigen Anteil und einem Direktabflussanteil bestehen. Der grundwasserbürtige Anteil beträgt in der Simulation 2,2 l/s bzw. 69.000 m<sup>3</sup>/a und somit knapp unter 30 % der Gesamtentnahme.

Umrahmt wird das Strömungsfeld von den Oberflächengewässern an den Rändern des Modellgebietes. Im Westen des Modellgebietes mit den jüngeren, schiefriig ausgebildeten Külbacher Schichten korrespondiert die Höhenlage der Quellzonen der in den topographischen Karten eingetragenen Fließgewässer in den meisten Fällen sehr gut mit der an den entsprechenden Einbuchtungen der Grundwasserhöhengleichen erkennbaren Vorflutfunktion der Liniensenken des Strömungsfeldes. Bei weniger tief eingeschnittenen Gewässern kann man im Oberlauf die infiltrierende Wirkung des zusätzlich berücksichtigten Direktabflusses an den gegenläufigen Einbuchtungen der Grundwasserhöhengleichen identifizieren.

Die eingeschnittenen Täler mit den Fließgewässern als Vorflut für das Kluftgrundwasser zeichnen sich durch geringe Flurabstände aus (Anlage 2). Im Bereich des Steinbruchs Jaeger trifft dies nicht zu, dort bewirkt die Steinbruchsümpfung auf Werte zwischen 260 und 270 m NHN (Modellkalibrierung: 265 m NHN) im südlichen Steinbruchsee eine Absenkung des Grundwassers im Umfeld, so dass der Elbach in einem etwa 500 m langen Abschnitt im Ist-Zustand seine Vorflutfunktion für das Grundwasser verloren hat. Dort kommt es zur Aussickerung von Oberflächenwasser in die holozäne Talfüllung bzw. in das liegende Grundgebirge. Die Wasserführung des Elbach in diesem Abschnitt resultiert aus dem Zustrom des Oberlaufs und dem Direktabfluss im betreffenden Abschnitt, wobei das unterirdische Wasser innerhalb der Talfüllung nicht als Grundwasser i.e.S. angesprochen wird, sondern dem Interflow zugeordnet wird. Das Grundwasser innerhalb des Grundgebirges liegt in diesem Abschnitt im Elbachtal ca. 20 m unter Flur. Während der Felduntersuchungen beginnend im Sommer 2018 bis Ende 2019 wurde ein Trockenfallen des Elbach in diesem Abschnitt auch während der in diesen Zeitraum zu verzeichnenden ausgeprägten Trockenperioden nicht beobachtet. Der am Unterlauf des Elbach im Modell berechnete mittlere Abfluss beträgt 37 l/s und entspricht damit gut

dem im Messzeitraum ermittelten mittleren Abfluss von 41 l/s. Am Ulbertbach ergibt sich im Modell ein mittlerer Gewässerabfluss von 13,6 l/s am Eintritt in die Wiehltalsperre.

Die Abbildung 30 zeigt ein Streudiagramm der für die im näheren Umfeld des Steinbruchs Jaeger eingerichteten Grundwassermessstellen berechneten Grundwasserstände aufgetragen gegen die gemessenen Mittelwerte des WWJ 2019. Es ist erkennbar, dass eine sehr zufriedenstellende Modellanpassung erreicht werden konnte. Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen liegen mit Ausnahme der Messstelle B4-2018 (Erläuterung s.u.) praktisch auf der Ideallinie und betragen maximal einige Dezimeter.

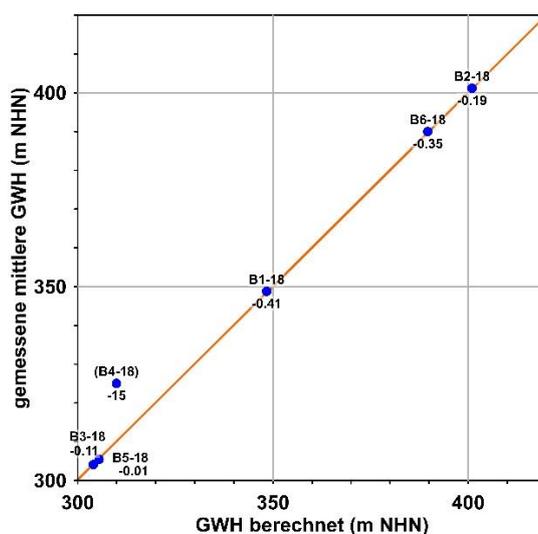


Abbildung 30: Streudiagramm gemessene/gerechnete Grundwasserstände

Das steile Grundwassergefälle zwischen dem Gebiet mit geringem Flurabstand oberhalb des Hofes Ulbert (B2-18) und den näher zum Steinbruch gelegenen Messstellen (B6-18 und B1-18), Profilschnitt B gemäß Abbildung 19, konnte nur unter besonderer Berücksichtigung der lokal speziellen geologischen Verhältnisse im Modell abgebildet werden. Die Geologische Karte 1 : 25.000 (Abbildung 2) zeigt in diesem Areal eine nicht beobachtete, jedoch vermutete Querstörung zwischen dem östlichen Bereich des Modellgebiets mit den nahe der Oberfläche anstehenden quarzitischen Silt- und Sandsteinen der Odenspieler Schichten (Unterdevon, Siegen-Stufe) und dem westlichen Bereich, der durch die hangenden, eher siltig bis tonig ausgebildeten Schiefen der Külbacher Schichten des Unterdevons (Ems-Stufe) geprägt wird, unter welche die Odenspieler Schichten nach Südwesten durch die geneigten Faltenachsen abtauchen. Tektonische Querstörungen des Grundgebirges weisen im Rheinischen Schiefergebirge häufig durch die Bildung von Gesteinsmehl eine verminderte Kluftdurchlässigkeit auf. Unterstützt wird das Vorhandensein einer wahrscheinlich tatsächlich breiteren Störungszone (>100 m Breite) mit abdichtender Wirkung durch das Auftreten von Störungsbrechen gemäß Schichtenverzeichnissen u.a. in der Bohrung B6-18. Diese im Vergleich zum

Umfeld relativ abdichtende Zone führt dazu, dass das Grundwasser auf der westlichen Hochscholle der Störung sehr hohe und gleichzeitig flurnahe Grundwasserstände aufweist, die nicht nur als Druckhöhen der tiefen Verfilterung der Messstellen aufzufassen sind, sondern auch oberflächennah über das Kluftsystem wirksam sind, und die Quellmulde des Ulbertbach unterstützend zum oberflächennahen Interflow nähren. Das Grundwasser kann in diesem Bereich leichter nach Norden und Süden abströmen als nach Osten Richtung Steinbruch Jaeger. Die geringe Absenkung durch den Brunnen am Hof Ulbert ist anhand der Grundwasserhöhengleichen nur undeutlich zu erkennen. Das Einzugsgebiet des Brunnens ist in Anlage 1 gekennzeichnet. In östliche Richtung fallen die Grundwasserstände innerhalb der Störungszone (B6-18) erst allmählich und schließlich mit Annäherung an den Steinbruch deutlich steiler (B1-18) ab.

Die anhand der Grundwasserstandsmessungen in den Messstellen B3-18, B4-18 und B5-18 entlang des hydraulischen Profilschnitts A (s. Abbildung 18) nordwestlich des Steinbruchs nachgewiesene Grundwasserscheide konnte mit dem Grundwasserströmungsmodell nachvollzogen werden. Allerdings wäre zur detailgenauen Abbildung der in der Messstelle B4-18 auffällig hohen gemessenen Grundwasserstände eine ausgeprägte Anisotropie und die Annahme lokal sehr geringer Gebirgsdurchlässigkeiten erforderlich gewesen. Anhand der dieser Grundwassermessstelle zugehörigen Ganglinie (Abbildung 17) ist zu erkennen, dass diese gegenüber den anderen Messstellen eine deutlich höhere jahreszeitlich bedingte Amplitude aufweist, was als Hinweis auf eine verminderte hydraulische Anbindung an das Umfeld gedeutet werden kann. Solche hydraulischen Eigenschaften wären zwar aufgrund des Auftretens einer Muldenstruktur mit Vorkommen von Schiefen im Muldenkern geologisch begründbar gewesen, dies hätte jedoch zur Folge gehabt, dass dieser Zone eine solche Längsausdehnung hätte zugeordnet werden müssen, dass der Steinbruch Jaeger im Nordwesten praktisch nahezu vollständig von einer hydraulischen "Barriere" umgeben gewesen wäre. Auf diese in gewisser Weise extreme Parametrisierung wurde im Zuge der Modellierung aber verzichtet, um für die nachfolgenden Prognosen im Sinne einer "Worst-Case"-Annahme für das Antragsbegehren nicht ausgeprägt günstige Verhältnisse anzunehmen. Trotz des Verzichts auf die Abbildung der in Rede stehenden schmalen und länglichen Zone ergibt sich dennoch die gemessene Grundwasserscheide, jedoch nicht in der deutlichen Ausprägung, wie sie im Feld gemessen wird. Im Streudiagramm der Abbildung 30 ist das betreffende Wertepaar der Grundwassermessstelle B4-18 daher eingeklammert.

In der Simulation der Modellkalibrierung mit um 20 % verminderter Grundwasserneubildungsrate fungiert der Ulbertbach unterhalb einer Geländehöhe von etwa 377 m NHN ca. 150 m westlich des Hofes Ulbert als Vorflut für das Kluftgrundwasser. Oberhalb entstammt die Wasserführung dem Direktabfluss mit dem prägenden Einfluss des Interflows aus der oberflächennahen

Auflockerungszone. Es ist davon auszugehen, dass in winterlichen Grundwasserneubildungsphasen mit temporär deutlich steigenden Grundwasserständen (s. Ganglinie B2-2018, Abbildung 17) die Vorflutwirkung für das Kluftgrundwasser hangaufwärts bis zu der in der topographischen Karte eingetragenen oberen Quellmulde des Ulbertbach ansteigt.

Im Messzeitraum des WWJ 2019 war festzustellen (s. Abbildung 23), dass in sehr trockenen Sommern der das Abflussverhalten kennzeichnende Interflow am Ulbertbach über einige Wochen anscheinend weitgehend zum Erliegen gekommen war, so dass der Abfluss im Gewässer in diesen relativ kurzen Phasen weitgehend vom Grundwasser gespeist wurde. Während solcher Witterungsphasen sinkt das obere Ende des als Linienquelle für das Kluftgrundwasser wirkenden Ulbertbachs einige Höhenmeter bachabwärts. Dieses jahreszeitliche Auf- und Abwandern des oberen Quellpunktes der Linienquelle ist charakteristisch für kleine Mittelgebirgsbäche.

Im Bereich unmittelbar südlich des Steinbruchs befindet sich im Elbachtal der geschützte Landschaftsbestandteil LB 2.4-52 "Quellbereich und Stollen". Hierbei handelt es sich um einen bergmännisch einige Meter in das Gebirge vorgetriebenen Stollen, der an seiner Sohle praktisch dauerhaft Vernässungen aufweist. Bei einer Höhenlage der Geländeoberfläche von etwa 358 m NHN liegt die ungespannte Grundwasseroberfläche des Kluftgrundwasserleiters in diesem Bereich aufgrund des nahegelegenen Steinbruchsees im Ist-Zustand mit großem Flurabstand etwa bei 340 m NHN. Bei den als "Quellbereich" interpretierten Vernässungen innerhalb des Stollens handelt es sich um durch die Grundwasserneubildung hervorgerufene Sickerwasseraustritte aus der ungesättigten Zone des Kluftgrundwasserleiters, welche von der Höhenlage der geschlossenen Kluftgrundwasseroberfläche unabhängig sind.

Im Bereich des Naturschutzgebietes "GM-125 Steinbruch Ulbert" nördlich des hier in Rede stehenden Steinbruch Jaeger liegt die Kluftgrundwasseroberfläche bei etwa 325 m NHN bei einer Geländehöhe von im Mittel 375 m NHN. Es handelt sich um einen aufgelassenen ehemaligen Steinbruch, der nach vorliegenden Informationen mit Abraum teilverfüllt ist. Die sich dort in Geländevertiefungen gebildeten Vernässungen sind vom Grundwasser unabhängig, es handelt sich um Staunässebildungen.

Die Wasserbilanz des Modells mit ihren einzelnen Komponenten ist der nachfolgenden Abbildung 31 zu entnehmen. Bei einer stationären Simulation sind positive und negative Bilanzposten ausgeglichen, es erfolgt keine Speicherentleerung bzw. -auffüllung. In der linken Säule ist als positiver Bilanzposten die dominierende Grundwasserneubildungsrate zu erkennen neben weniger bedeutenden Anteilen aus der Zusickerung aus Oberflächengewässern. Demgegenüber sind auf der rechten Seite die Komponenten der Grundwasserzehrung, also Brunnen bzw. Steinbruchsümpfung und die Vorflutfunktion der offenen Gewässer zu nennen.

Folgende Einzelergebnisse der Volumenströme der Modellkalibrierung sind hervorzuheben:

- Steinbruchsümpfung Jaeger:
  - See Süd: 5,5 l/s
  - See Nord: 2,3 l/s
  - Summe 7,8 l/s bzw. 245.000 m<sup>3</sup>/a
  - Grundwasserbürtiger Anteil: 27,4 %
- Mittlerer Abfluss:
  - Elbach, Wiehltal: 37 l/s
  - Ulbertbach, Mündung Vorsperre: 13,6 l/s
- Quelle Ulbertbach:
  - Grundwasserbürtiger Abflussanteil: 6,5 %

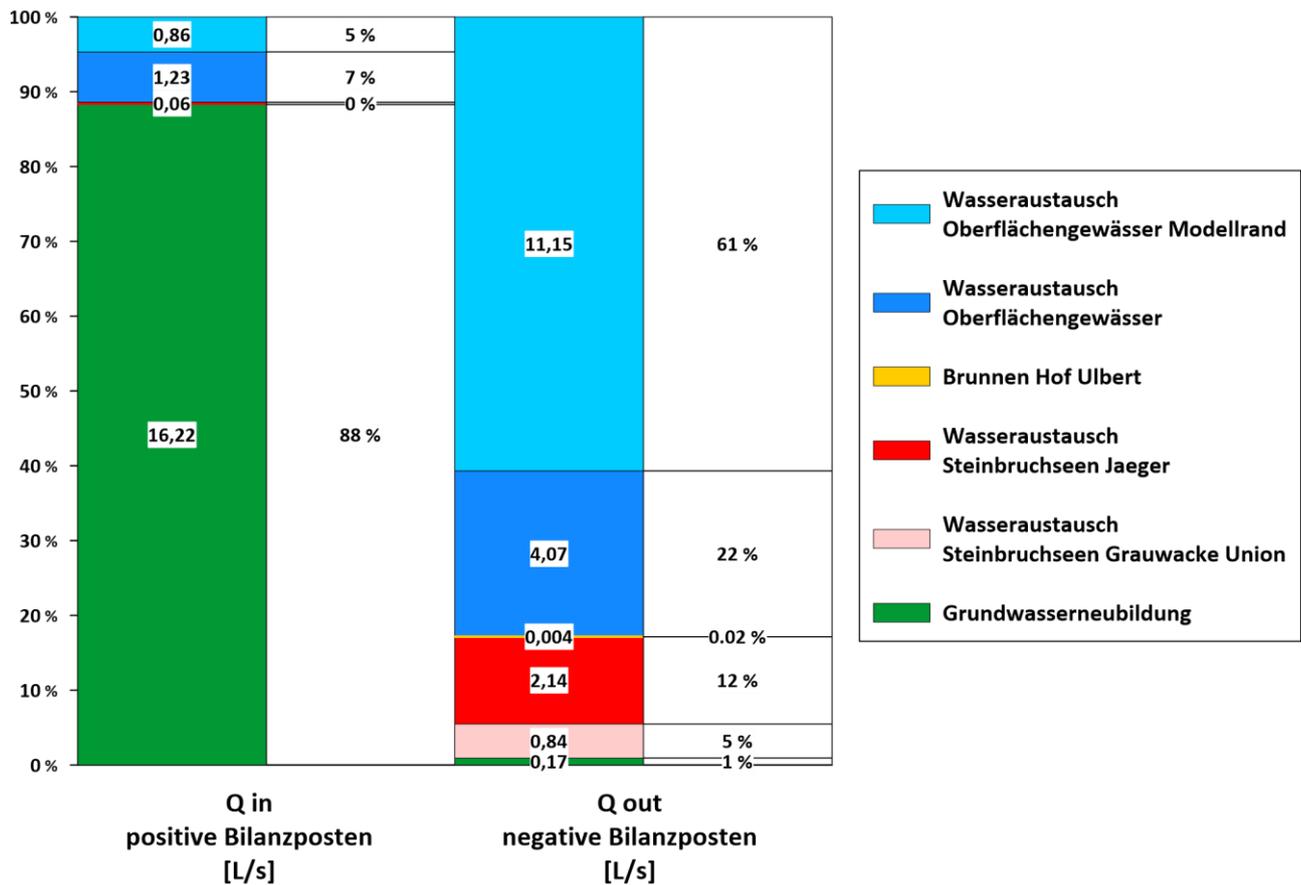


Abbildung 31: Wasserbilanz der Modellkalibrierung (Ist-Zustand)

## 4.5 Prognosesimulationen

### 4.5.1 Referenzsimulation

Um für die Prognosesimulationen einen geeigneten Vergleichszustand des Ist-Zustandes zu erzeugen wurde auf Basis der Modellkalibrierung mit um 20 % verringerter Grundwasserneubildungsrate eine weitere Simulation gerechnet, welche auf 100 % der langjährigen mittleren Grundwasserneubildungsrate nach mGROWA beruht. Die Ergebnisse dieser Simulation sind den Anlagen 3 und 4 zu entnehmen.

Die Wasserbilanz für die Referenzsimulation ist in der nachfolgenden Abbildung 32 aufgeführt.

Insgesamt sind erwartungsgemäß etwas höhere Grundwasserstände und entsprechend geringere Flurabstände in dieser Simulation zu verzeichnen. Nachfolgend gelistete wesentliche Veränderungen sind zu nennen:

- Steinbruchsümpfung Jaeger:
  - See Süd: 6,5 l/s
  - See Nord: 3,0 l/s
  - Summe 9,5 l/s bzw. 300.000 m<sup>3</sup>/a
  - Grundwasserbürtiger Anteil: 24 %
- Mittlerer Abfluss:
  - Elbach, Wiehlal: 46 l/s
  - Ulbertbach, Mündung Vorsperre: 17 l/s
- Quelle Ulbertbach:
  - Der Ulbertbach fungiert über die gesamte Länge als Vorflut für das Grundwasser
  - Grundwasserbürtiger Abflussanteil: 7 %

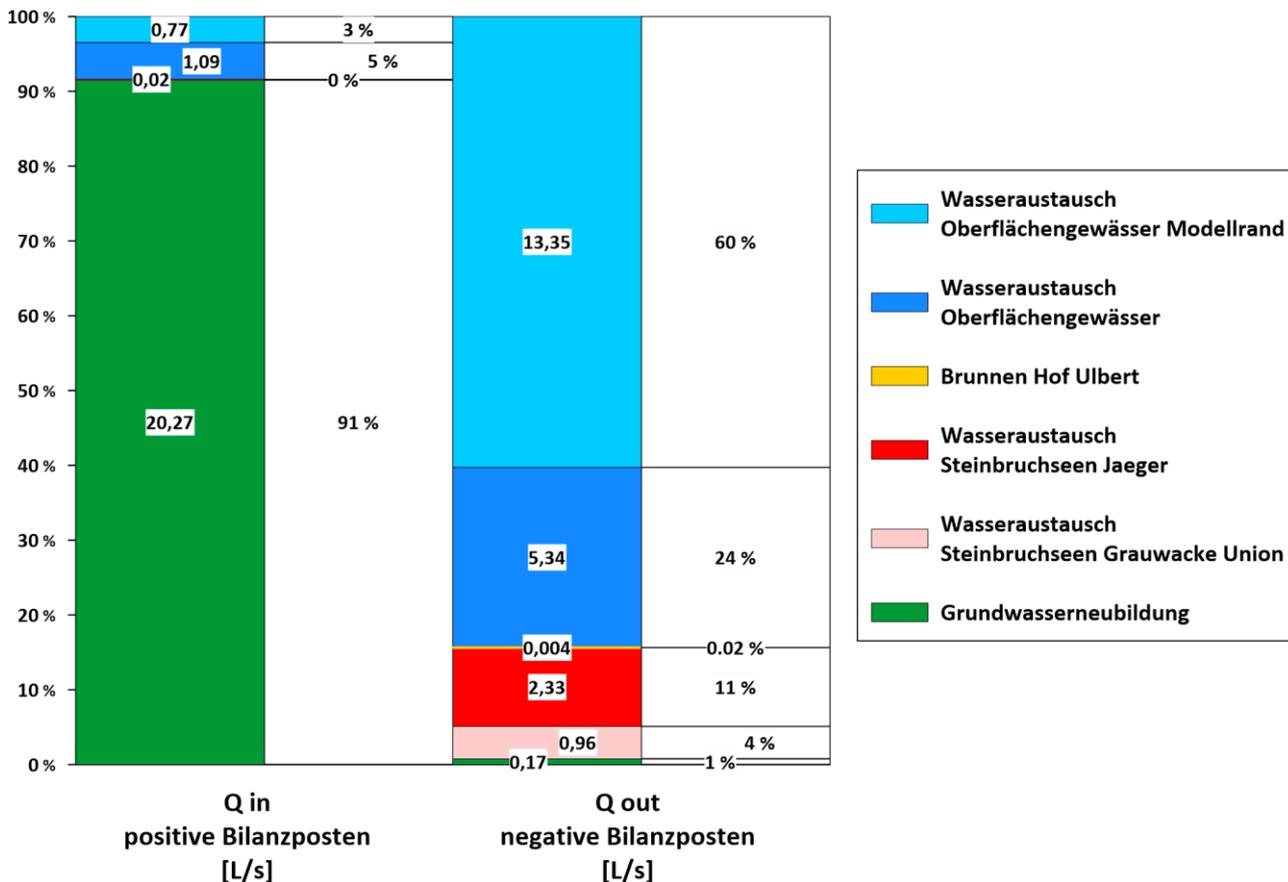


Abbildung 32: Wasserbilanz der Referenzsimulation (mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 – 2010)

### 4.5.2 Prognosesimulation 1

Mit der Prognosesimulation 1 werden die Grundwasserverhältnisse zum Zeitpunkt der maximalen Ausdehnung des Steinbruchs Jaeger berechnet. Der Simulation liegt die mittlere langjährige Grundwasserneubildungsrate zugrunde. Die Ergebnisse der Prognosesimulation 1 können den Anlagen 5 bis 7 in Form von eines Grundwasserhöhengleichenplanes, eines Flurabstandsplanes und eines Differenzenplanes entnommen werden.

Die Anlage 5 zeigt den Grundwasserhöhengleichenplan zum Ende der projektierten Abbauphase nach etwa 30 Jahren mit Eintragung des resultierenden Einzugsgebietes des Steinbruchs Jaeger, des Brunnens Ulbert und zur weiteren Orientierung das unterirdische Einzugsgebiet des Elbach oberhalb des Einflussbereichs des Steinbruchs. Zu erkennen ist der vergrößerte Steinbruch bei gleichbleibender Größe des Sumpfungsees Süd. Das an der Steinbruchsohle des beantragten Erweiterungsbereichs aufsteigende Grundwasser strömt oberflächennah an der Steinbruchsohle über das verritzte Trennflächensystem dem Steinbruchsee zu. Nach derzeit vorgesehener Abbauplanung wird der Steinbruchsee Nord trockenfallen, da der dort anfallende Abfluss dem Steinbruchtiefsten

ebenfalls über das verritzte Trennflächensystem zuströmen wird. Der Anlage 6 kann der zugehörige Flurabstandsplan entnommen werden.

Nachfolgend gelistete wesentliche Veränderungen sind zu nennen:

- Steinbruchsümpfung Jaeger:
  - See Süd: 14,6 l/s
  - See Nord: ./.
  - Summe 14,6 l/s bzw. 462.000 m<sup>3</sup>/a
  - Grundwasserbürtiger Anteil: 19,2 %
- Mittlerer Abfluss:
  - Elbach, Wiehltal: 47,5 l/s
  - Ulbertbach, Mündung Vorsperre: 17 l/s
- Quelle Ulbertbach:
  - Der Ulbertbach fungiert über die gesamte Länge als Vorflut für das Grundwasser
  - Grundwasserbürtiger Abflussanteil: 6,8 %

Anlage 7 zeigt den Differenzenplan der Grundwasserstände der Prognosesimulation 1 zur Simulation des Ist-Zustandes gemäß Modellkalibrierung mit mittlerer Grundwasserneubildungsrate (Prognose 1 minus Referenzsimulation des Ist-Zustands). Differenzenpläne eignen sich besonders, um die Auswirkungen einer Veränderung des Strömungsbildes auszuwerten, insbesondere werden Absenkungsbereiche verdeutlicht. Die größten Differenzbeträge – also prognostizierte Absenkungen - ergeben sich naturgemäß im unmittelbaren Erweiterungsbereich mit Werten lokal bis über 50 m. Große Absenkungsbeträge werden generell jedoch nur in Gebieten eintreten, in denen aktuell bereits ein großer Flurabstand herrscht. Nach außen klingen die Differenzbeträge rasch ab und werden an den Vorflutern Ulbertbach und an der Wiehltalsperre vollständig kompensiert. Im Bereich des grundwasserabhängigen Landökosystems im Taleinschnitt des Ulbertbachs beträgt die prognostizierte Absenkung weniger als 0,1 m. Grundwasserabsenkungen < 0,1 m sind nach Einordnung des Bundesamtes für Naturschutz (BfN-Skripten 534, 2019) unter Berücksichtigung der natürlichen jährlichen Schwankungsbreite der Grundwasserstände bodenkundlich nicht relevant, da sich die kapillare Aufstiegsrate im Regelfall bei Absenkungsbeträgen < 0,1 m nicht stark ändert.

Der grundwasserbürtige Abflussanteil im Ulbertbach verringert sich von 7 % im Referenzzustand auf 6,8 % im Prognosezustand, dies entspricht einer Abnahme um 3 %.

Die Angaben zur Grundwasserstandsabsenkung in der Bachau und zur Verringerung des grundwasserbürtigen Abflussanteils im Ulbertbach beruhen auf stationärer Betrachtung der

Strömungsverhältnisse. Bei der Bewertung der Auswirkung auf die Schutzgüter – in diesem Fall das grundwasserabhängige Landökosystem (gesetzl. geschütztes Biotop nach § 62 LG, Kennung BT-5012-084-8) sind die jahreszeitlichen Schwankungen zu berücksichtigen. Die dokumentierten Grundwasserstände oberhalb der Quellmulde zeigen Schwankungsbreiten im Messzeitraum um acht Meter, und der Abfluss im Ulbertbach wenige Meter oberhalb der Mündung in den Stausee weist im Messzeitraum eine große Variationsbreite zwischen 0,25 und 120 l/s aus. Aus diesen Messwerten kann abgeleitet werden, dass in der Niederung des Ulbertbachs im Ist-Zustand jahreszeitlich bedingt wechselnde hydrologische Verhältnisse mit variablem Wasserdargebot herrschen. Vor diesem Hintergrund sind die prognostizierten Veränderungen als nicht signifikant einzuordnen.

In Höhe des Steinbruchs dehnt sich die Absenkung bis jenseits des Elbach aus, oberhalb des Steinbruchs in Richtung Odenspiel klingt die zusätzliche Absenkung aus. In diesem Bereich, wo der Elbach auch im Prognosezustand seine Vorflutfunktion behalten wird, verringert sich der Grundwasserandrang zum Gewässer infolge der Absenkung geringfügig. Auf die Verhältnisse in der Talauie im Bereich des Steinbruchs hat die zusätzliche Absenkung im Klufftgrundwasserleiter keine Auswirkung. Dort befindet sich die Klufftgrundwasseroberfläche bereits im Ist-Zustand deutlich unterhalb der Talauie, so dass die nach unten gerichtete Leakageströmung keinen zusätzlichen Gradienten erfährt, es herrscht eine "freie" Aussickerung über die ungesättigte Zone des Klufftgrundwasserleiters, die unabhängig von der Höhenlage der ungespannten Grundwasseroberfläche im Kluftaquifer ist. Bilanziell ändert sich am Unterlauf des Elbach im Wiehltal praktisch nichts, da das Sumpfungswasser aus dem Steinbruch dem Elbach wieder zugeschlagen wird.

Am Oberlauf des Ulbertbach ist im Bereich des Hofes Ulbert im Mittel mit einer Absenkung von 0,5 m zu rechnen, wobei in der Niederung selbst keine kritischen Flurabstände zu erwarten sein werden. Der Hausbrunnen Ulbert wird durch die Erweiterung marginal betroffen sein, die Pumpe sehr geringfügig größere Förderhöhe überwinden müssen. Das Naturschutzgebiet GM-128 Steinbruch Ulbert nördlich des Steinbruchs besteht aus einem grundwasserunabhängigen Feuchtgebiet, welches ausschließlich durch Oberflächenwasser genährt wird. Im Prognosezustand 1 bei maximaler Auswirkungsreichweite verschlechtert sich diese Situation nicht. Entsprechendes gilt für den "Quellbereich und Stollen" im Elbachtal. Dessen Vernässung ist kein Grundwasseraustritt, es handelt sich um Sickerwasser der Grundwasserneubildung bzw. um Interflowwasser. Dessen Dargebot ändert sich im Prognosezustand nicht.

Die Wasserbilanz für die Prognosesimulation 1 ist in der nachfolgenden Abbildung 33 aufgeführt.

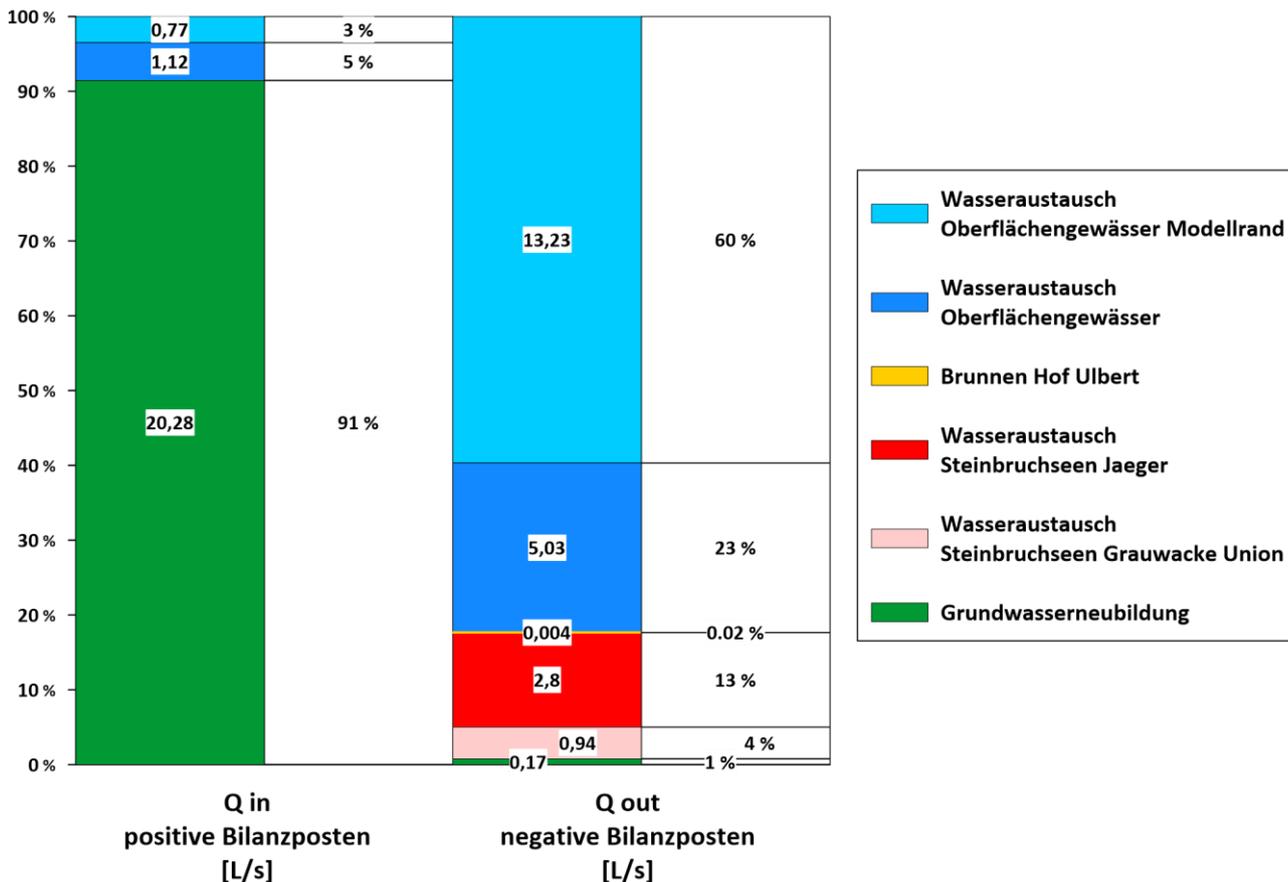


Abbildung 33: Wasserbilanz der Prognosesimulation 1

### 4.5.3 Prognosesimulation 2

Die Anlage 8 zeigt den Grundwasserhöhengleichenplan nach Einstellung der Steinbruchsümpfung und vollständiger Flutung des Steinbruchs mit einer geplanten Überlaufschwelle in den Elbach bei 323 m NHN und Anlage 9 den zugehörigen Flurabstandsplan. Es stellt sich ein Steinbruchsee mit einer Größe von ca. 19,4 ha ein. Die Südwestseite des Sees wird vom Grundwasser angeströmt, auf der Nordostseite tritt Seewasser in den Grundwasserleiter über. Die Sohlhöhe der Überlaufschwelle bei 323 m NHN mit Abschlag in den Elbach bildet die Stellgröße für die Einstellung des Seewasserspiegels. Aus den langjährigen Daten der DWD Station Morsbach wurde für den Standort als mittlere Niederschlagshöhe auf dem Steinbruchsee 1187 mm angesetzt, für die mittlere potentielle Verdunstung nach PENMAN über freien Wasserflächen wurden 567 mm/a berechnet. Nachfolgend gelistete wesentliche Veränderungen gegenüber den vorherigen Simulationen sind zu nennen:

- Überlaufschwelle Steinbruch Jaeger:
  - Summe 10,5 l/s bzw. 332.000 m<sup>3</sup>/a
  - Grundwasserbürtiger Anteil: 6,5 %

- Mittlerer Abfluss:
  - Elbach, Wiehltal: 45 l/s
  - Ulbertbach, Mündung Vorsperre: 17,1 l/s
- Quelle Ulbertbach:
  - Der Ulbertbach fungiert über die gesamte Länge als Vorflut für das Grundwasser
  - Grundwasserbürtiger Abflussanteil: 6,9 %

Die Wasserbilanz für die Prognosesimulation 2 ist in der nachfolgenden Abbildung 34 aufgeführt.

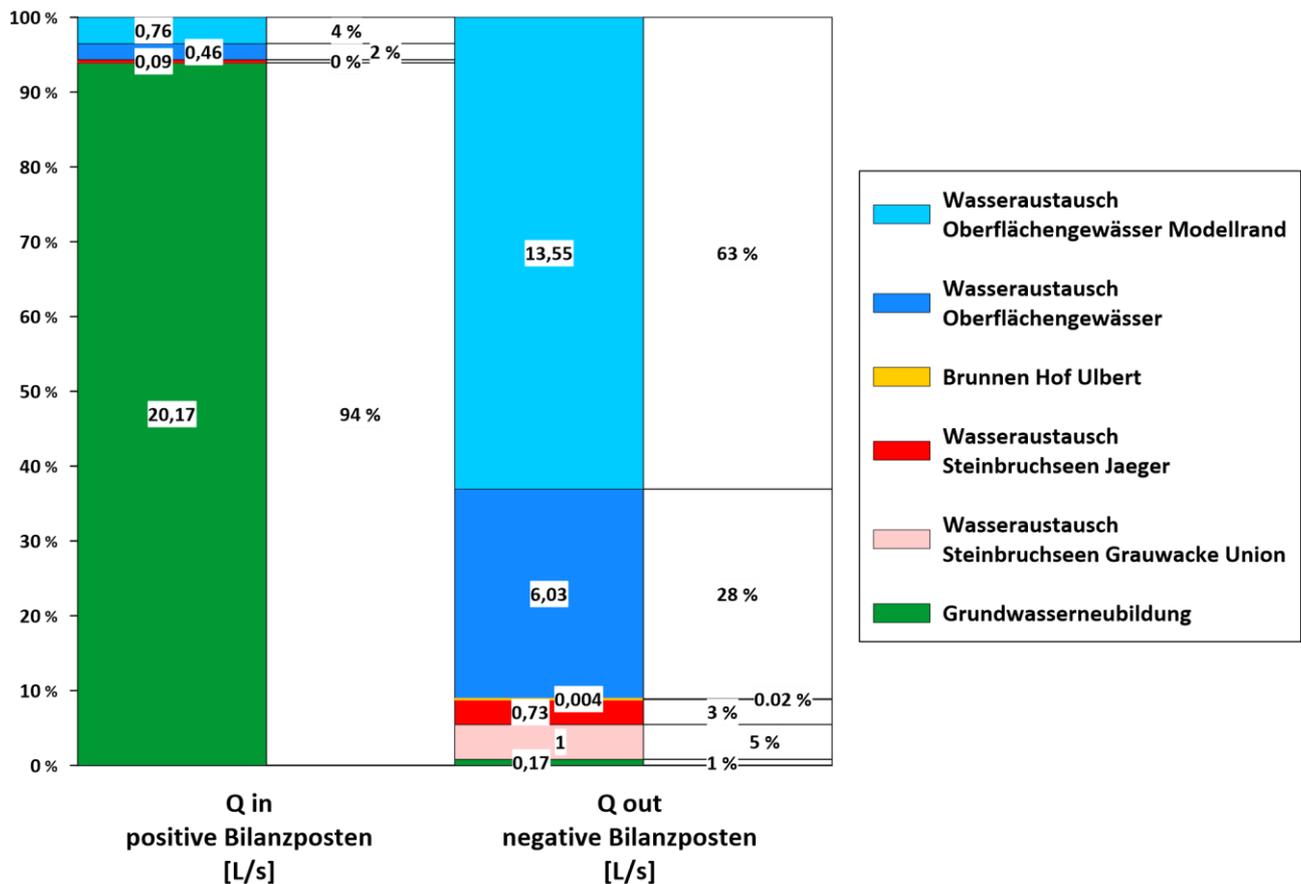


Abbildung 34: Wasserbilanz der Prognosesimulation 2

Unter Annahme eines mittleren dränbaren Kluftvolumens von 0,3 % ergibt sich nach instationärer Simulation - ausgehend vom Zustand der Prognosesimulation 1 des Endzustandes der Steinbruchsümpfung - eine voraussichtliche Flutungsdauer von ca. 20 Jahren. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass bei dem im Oberbergischen Kreis herrschenden Klima im Jahresmittel betrachtet über freien Wasserflächen der Niederschlag größer ist als die Verdunstung.

Limnologische Aspekte

Unter Berücksichtigung der Steinbruchplanung wird der See nach abgeschlossener Flutung eine mittlere Wassertiefe von 58 m und ein Wasservolumen von etwa 8,49 Mio. m<sup>3</sup> aufweisen.

Zur Ermittlung der mittleren Verweildauer bzw. der Austauschhäufigkeit des Wassers wurde eine Bilanz der ein- und ausströmenden Volumenströme aufgestellt und mit dem Wasservolumen in Beziehung gesetzt. Dazu kann auf die Ergebnisse der Modellsimulation zurückgegriffen werden (s. Tabelle 6).

Tabelle 6: Prognosesimulation 2: Stationäre Bilanz des Steinbruchsees nach abgeschlossener Flutung

Positive Bilanzposten		Negative Bilanzposten	
	l/s	l/s	
Niederschlag $N$	7,33	3,50	Verdunstung $ET_{pot}$
Oberirdischer Abfluss $A_o$	6,00	10,52	Abfluss Überlauf $A_{\ddot{u}}$
Grundwasserzustrom $GW_{IN}$	0,78	0,09	Grundwasserabstrom $GW_{OUT}$
Summe Zuflüsse	14,11	14,11	Summe Abflüsse

Die Durchflussrate  $D$  des Steinbruchsees beträgt

$$D = N + A_o + GW_{IN} = ET_{pot} + A_{\ddot{u}} + GW_{OUT} = 14,11 \text{ l/s bzw. } 0,0141 \text{ m}^3/\text{s}$$

Mit dem Wasservolumen  $V$  von 8,49 Mio. m<sup>3</sup> lässt sich die mittlere Verweildauer bzw. Austauschzeit  $t$  berechnen.

$$t = \frac{V}{D} = \frac{8,49 \cdot 10^6}{0,0141} = 449 \cdot 10^8 \text{ s bzw. } 19,1 \text{ a}$$

Es ergibt sich eine mittlere Verweildauer von etwa 19 Jahren.

Aufgrund der Tiefe des resultierenden Sees und der in Hauptwindrichtung steil aufragenden Steinbruchwände ist nicht auszuschließen, dass eine Durchmischung des Steinbruchsees in den Phasen der Frühjahrs- und Herbstzirkulation nicht in einem so wirksamen Ausmaß stattfindet, dass folglich langfristig die Entstehung eines meromiktischen Sees mit geringen Sauerstoffgehalten im Monimolimnion begünstigt wird. Um einen Wasseraustausch vorbeugend auch in den tieferen Zonen zu ermöglichen, wird angeregt, den Durchlass der Seeablaufleitung unter der L324 vollständig dicht an eine geschweißte Kunststoffrohrleitung z.B. PE-HD da 400, SDR17-PN10 anzuschließen, deren beschwertes Ende sich mit der Einlassöffnung im Bereich des Seetiefsten befindet. Die Position und Tiefenlage der Einlassöffnung kann über einen Schwimmponton im Bedarfsfall angepasst werden. Auf diese Weise wird bei steigendem Seewasserspiegel und Überlauf oberhalb der Sohlhöhe der Ablaufleitung im Steinbruchsee eine nach unten zu der in der Tiefe positionierten Einlassöffnung orientierte Strömung induziert, welche fortlaufend im Zuge von Niederschlagsereignissen

sauerstoffreiches oberflächennahes Seewasser des Epilimnions in die Tiefenzonen des Monimolimnion transportiert. In der Folge werden die Auswirkungen eines meromiktischen Sees auf die Wasserbeschaffenheit in der Tiefenzone des Sees minimiert.

In diesem Zusammenhang wird aus Sicht des Unterzeichners darauf hingewiesen, dass die Minimierung des Zutritts von Oberflächenwasser in den Steinbruchsee zur Verhinderung von Nährstoffeintrag nicht sinnvoll ist, da zum einen in der Wasserschutzgebietsverordnung konkret Handlungen untersagt sind, die zu einem signifikanten Abschwemmen von Nährstoffen (Düngemittel, Gülle) von landwirtschaftlichen Flächen in den See führen könnten, und zum anderen, da auf diese Weise die mittlere Verweildauer des Wassers im See selbst durch minimierten Wasserzutritt unerwünscht verlängert würde.

#### Entfernung der Deckschichten im Erweiterungsbereich

Durch die Entfernung der Deckschichten im Erweiterungsbereich geht deren puffernde Wirkung bezüglich des unmittelbar an der Erdoberfläche abströmenden Abflussanteil verloren, so dass theoretische eine Verringerung des Retentionsvermögens zur Verringerung von Hochwasserspitzen mit der Erweiterung einhergeht. Dies ist jedoch nicht der Fall, da die in Rede stehenden Bereiche stets innerhalb der Einzugsgebietsfläche des Steinbruchs liegen und somit der gesamte Niederschlag und Oberflächenabfluss im Erweiterungsbereich nicht den Oberflächengewässern, sondern dem Steinbruch selbst zuströmt. Das in dem 39,57 ha großen oberirdischen Einzugsgebiet des Steinbruchs Jaeger bei maximaler Ausdehnung anfallende Regenvolumen eines 72 h Bemessungsregens (Kostr-DWD 2010R) von 148,4 mm bzw. l/m<sup>2</sup> und einer Jährlichkeit von 100 a beträgt unter vereinfachenden Annahmen 58.715 m<sup>3</sup> und kann in den Tiefgängen des Steinbruchs zurückgehalten und zeitlich verzögert in den Elbach abgeschlagen werden.

#### **4.5.4 Brunnenanlage des Wasserleitungsvereins Odenspiel**

Die Brunnenanlage des Wasserleitungsvereins Odenspiel ist nicht mehr in Betrieb und wurde daher bei den hier dokumentierten Grundwasserströmungssimulationen nicht berücksichtigt. Eine durchgeführte, jedoch hier nicht dokumentierte Simulation von Szenarien unter der Annahme einer jährlichen Förderrate von 20.000 m<sup>3</sup>/a (430 EW mit 0,125 m<sup>3</sup>/d/EW) hat gezeigt, dass die Trinkwassergewinnung auch unter den Bedingungen der maximalen Steinbruchausdehnung möglich ist und keine signifikante Verlagerung des potentiellen Einzugsgebietes im Vergleich zum Ist-Zustand stattfinden wird.

## 5 Schlussfolgerungen

Anhand der durchgeführten hydrogeologischen Systemanalyse und des aufgebauten numerischen Grundwasserströmungsmodells wurde die Auswirkungsreichweite der geplanten Erweiterung des Steinbruchs der Fa. Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH berechnet. In die Modellkalibrierung gingen neben gemessenen Grundwasserständen auch gemessene Volumenströme (Wasserentnahmen, Gewässerabflüsse) wie auch ein fundierter Datensatz zur Grundwasserneubildung ein, so dass eine in mehrfacher Hinsicht abgesicherte Modellierung die Grundlage für die Bewertung der Auswirkungen bildet. Immer zu würdigen ist jedoch eine stets verbleibende Unsicherheit solcher Untergrundmodelle.

Als wesentliche zu betrachtende Schutzgüter im Umfeld des Erweiterungsvorhabens sind zu nennen:

- Trinkwassergewinnung Wiehltalsperre und zugeordnete festgesetzte Schutzzonen
- Trinkwassergewinnung Hausbrunnen Hof Ulbert
- Naturschutzgebiet GM-125 Steinbruch Ulbert
- Naturschutzgebiet GM-128 Wiehltalsperre
- Gesetzlich geschütztes Biotop (Kennung: BT-5012-084-8) in der Niederung des Ulbertbachs
- Landschaftsschutzgebiet LSG-Reichshof-Sued <2.2.1>
- Geschützter Landschaftsbestandteil LB 2.4-52 "Quellbereich und Stollen"

Bei den Strömungssimulationen hat sich ergeben, dass das Einzugsgebiet der Steinbruchsümpfung der Strömungssituation entsprechend westlich bis südwestlich des Steinbruchs liegt. Dies gilt sowohl aktuell als auch für den Prognosezustand bei maximaler Ausdehnung des Steinbruchs. Zwischen dem Steinbruch und der Wiehltalsperre wird auch künftig eine stabile Wasserscheide verbleiben, das Einzugsgebiet des Steinbruchs kann nicht in Richtung des Stausees verschwenken.

Bilanziell ergibt sich keine nennenswerte Veränderung des Wasserhaushalts, da das gehobene Wasser aus dem Steinbruch an den Elbach, das heißt seinem ursprünglichen Einzugsgebiet wieder zurückgegeben wird.

In der Schutzzone III, in der sich der größte Teil der Erweiterungsfläche befindet, ist der oberflächennahe Abbau von Rohstoffen genehmigungspflichtig, wie auch alle anderen Bodeneingriffe einschließlich Sprengungen. Ein Teilbereich der Planung tangiert jedoch die Schutzzone II, wo die genannten Tätigkeiten verboten sind, es sei denn, das Verbot würde zu einer nicht beabsichtigten Härte führen.

Aus hydrogeologischer und wasserwirtschaftlicher Sicht ist eine Beeinträchtigung der

Trinkwassergewinnung aus der Wiehltalsperre durch die geplante Erweiterung des Steinbruchs der Fa. Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH nicht erkennbar.

Unabhängig vom resultierenden Einzugsgebiet der Steinbruchsümpfung wirkt sich die mit der Erweiterung verbundene zusätzliche Grundwasserabsenkung radial in alle Richtungen aus. Letztendlich infolge der insgesamt vergleichsweise geringen Transmissivität des Grundgebirges und der nur mäßigen Grundwasserneubildungsrate klingt die Steinbruchsümpfung radial rasch ab. Die größten Absenkungsbeträge ergeben sich auf die den Steinbruch umgebenden Höhenzüge, also dort, wo bereits aktuell ein großer Flurabstand herrscht.

Dank einer speziellen tektonischen Situation ist im Bereich des Hof Ulbert und den umliegenden Schutzgütern (gesetzlich geschütztes Biotop BT-5012-084-8) nur mit geringer Absenkung zu rechnen. Die für das Grundwasser abdichtende Wirkung einer etwa NW-SE streichenden tektonischen Störung im Grundgebirge östlich des Hof Ulbert hat zur Folge, dass der Grundwasserabfluss in Richtung des Steinbruchs gegenüber der nordwestlichen und südöstlichen Richtung relativ geringer ausfällt und sich infolgedessen im Bereich westlich der Störung nur eine vergleichsweise geringere Absenkung einstellen wird, die nicht zum Trockenfallen der in den Niederungen des Ulbertbaches vorhandenen diffusen Quellen führen wird.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass der Abfluss in den oberirdischen Fließgewässern insgesamt ganz wesentlich durch den Direktabfluss geprägt ist, d.h. vom unmittelbaren Oberflächenabfluss und vom dominierenden Interflow. Der Grundwasserabfluss spielt im Wasserhaushalt des Umfeldes des Standortes insgesamt eine nur untergeordnete Rolle.

Anhand der großen Variationsbreite der Grundwasserstände und Abflüsse am Ulbertbach im Ist-Zustand ist abzuleiten, dass dieses Gewässer über ein natürlicherweise deutlich wechselndes Wasserdargebot verfügt, welches durch die prognostifizierten Einflüsse nicht signifikant beeinträchtigt wird.

Die Brunnenanlage des Wasserleitungsvereins Odenspiel ist nicht mehr in Betrieb. Sie wurde im Rahmen der Grundwasserströmungssimulationen demnach auch nicht berücksichtigt. Durchgeführte Testsimulationen im Rahmen der Bearbeitung ergaben, dass unter der Annahme einer jährlichen Förderrate von 20.000 m<sup>3</sup>/a keine negativen Auswirkungen durch die geplante Erweiterung zu besorgen sind. Die Trinkwassergewinnung wäre auf Basis der vorgenannten Annahmen auch nach Erteilung der Genehmigung ohne weiteres möglich.

Die Grundwasserverhältnisse im Naturschutzgebiet um den Stausee sind von der Absenkung nicht relevant betroffen, da dort der Flurabstand aufgrund der steilen Morphologie hangseitig sehr rasch ansteigt. Das Naturschutzgebiet in dem ehemaligen aufgelassenen Steinbruch Ulbert ist durch

Stauwasser geprägt und vom Grundwasser unabhängig.

Entlang des Steinbruchs herrscht im Elbachtal bereits aktuell bezogen auf den Grundwasserstand im Kluffgrundwasserleiter ein großer Flurabstand bedingt durch die Absenkung im Steinbruchsee Süd. Unterhalb der holozänen Talaue, deren unterirdische Wasserführung dem Interflow zuzuordnen ist, herrscht eine freie Versickerung hin zur Tiefe, die sich auch bei maximaler Ausdehnung des Steinbruchsees und zusätzlicher Absenkung nicht vergrößern kann, da die Aussickerungsrate bei freier Aussickerung unabhängig von der Höhenlage der Kluffgrundwasseroberfläche ist. Der geschützte Landschaftsbestandteil "Quellbereich und Stollen" im Elbachtal ist grundwasserunabhängig und von Sickerwasser geprägt. An dieser Situation wird sich auch im Prognosezustand nichts ändern. Im Oberlauf des Elbach bleibt seine Vorflutfunktion erhalten, lediglich der Übertritt von Grundwasser in den Elbach verringert sich geringfügig.

Der nach Beendigung der Abbautätigkeit resultierende Steinbruchsee mit ca. 20 ha Größe kann sich aufgrund der topographischen Verhältnisse im unmittelbaren Umfeld des Steinbruchs und der Seetiefe nach vollständiger Flutung zu einem schlecht durchmischten See entwickeln. Um die damit einhergehenden ggf. unerwünschten Begleiterscheinungen (z.B. Sauerstoffarmut in der Tiefe) zu vermeiden, wird angeregt, den Ablauf aus dem resultierenden Steinbruchsee so zu gestalten, dass die Einlassöffnung der Ablaufleitung sich in der Nähe der Seesohle befindet, und auf diese Weise eine Strömung im See induziert wird, welche stets sauerstoffreiches Wasser in die Tiefenbereiche des Sees transportiert.

Die Entfernung der für die Pufferung von Starkniederschlägen wichtigen Deckschichten im geplanten Erweiterungsgebiet hat für die umliegenden Oberflächengewässer keine Erhöhung des Hochwasserrisikos zur Folge, da der Niederschlag bzw. der Oberflächenabfluss vollständig direkt in den Steinbruch entwässert. Dort fungieren die aktuellen Tiefgänge bzw. die des geplanten Zustandes als Retentionsräume, um die bei Starkregen anfallenden Wasservolumina gedrosselt an den Elbach abzugeben. Dieses gilt auch für die Situation im Prognosezustand 2, welche aufgrund der geplanten Stauhöhe und der Möglichkeit eines gedrosselten Abflusses damit auch eine Retentionswirkung im Endzustand aufweist.

Die durchgeführten Berechnungen zum Wasserhaushalt beruhen auf der Annahme mittlerer Verhältnisse. Es wird daher angeregt, das im Zuge der Untersuchungen eingerichtete Monitoringsystem weitgehend aufrechtzuerhalten und fortzuführen, um jahreszeitliche Einflüsse zu dokumentieren und bewerten zu können. Insbesondere gilt dies für die Überwachung der Grundwasserstände und die aus dem Steinbruch entnommenen Sumpfungsraten. Zur Überwachung der Wasserführung des Elbach ist die Einrichtung einer fortlaufenden Wasserstandsaufzeichnung an geeigneter Stelle oberhalb der

aktuellen Einleitstelle zweckdienlich.

Gez. Dipl. Geol. M. Himml

## Physikalische und mathematische Grundlagen der Grundwasserströmungsmodellierung

In den nachfolgenden Kapiteln zu den Grundlagen der Grundwasserströmung werden physikalische Größen in neutraler Dimension bezeichnet mit

L	=	Länge
M	=	Masse
T	=	Zeit.

Wegen der erforderlichen Beschränkung auf die wesentlichen theoretischen Grundlagen wird an dieser Stelle auf vertiefende Literatur hingewiesen, in der z.T. auch numerische Lösungsmethoden behandelt werden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien an dieser Stelle genannt: Bear, J. (1979), Domenico, P.A. & Schwartz, F.W. (1998), Langguth, H.R. & Voigt, R.(2003), Appelo, C. A. J. & Postma, D. (2005), Kinzelbach, W. (1992), Rausch, R., Schäfer, W., Therrien, R., Wagner, C. (2005).

### 1. Grundwasserströmung

#### 1.1 Hubbert-Potenzial

Das Grundwasser als Teilkomponente des Wasserkreislaufs ist ständig in Bewegung. Diese wird hervorgerufen durch die Schwerkraft und die durch diese hervorgerufenen Druckkräfte. M.K. Hubbert veröffentlichte 1940 (Hubbert, 1940) eine geschlossene auf physikalischen Gesetzen beruhende Theorie zur Grundwasserbewegung.

Die gesamte mechanische Energiehöhe  $h_{ges}$  eines nicht kompressiblen Wasserteilchens konstanter Dichte lässt sich demnach mit der Gleichung von Bernoulli beschreiben. Sie ist die Summe aus Druckenergie, Lageenergie und kinetischer Energie:

$$h_{ges} = \frac{p}{\rho \cdot g} + z + \frac{v^2}{2g}$$

Gleichung A1-1

mit:	$h_{ges}$	=	Energiehöhe	L
	$p$	=	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
	$\rho$	=	Dichte des Wassers	$ML^{-3}$
	$g$	=	Erdbeschleunigung	$LT^{-2}$
	$z$	=	Ortshöhe über Bezugsniveau	L
	$v$	=	Geschwindigkeit	$LT^{-1}$

Im Grundwasser ist die Fließgeschwindigkeit so gering, dass der Term der kinetischen Energie (im Gegensatz zur Strömung in Oberflächengewässern), in den die Fließgeschwindigkeit quadratisch eingeht, ignoriert werden kann. Damit reduziert sich die gesamte Energiehöhe zum Hubbert-Potenzial bzw. zur Piezometerhöhe  $h$ .

Die Piezometerhöhe  $h$  an einem Messpunkt im Grundwasserleiter mit der Ortshöhe  $z$  ist eine der entscheidenden Größen zur Beschreibung der Grundwasserbewegung. Sie vereinigt den hydrostatischen Druck und die Lage relativ zum Bezugsniveau:

$$h = \frac{p}{\gamma} + z = \frac{p}{\rho \cdot g} + z$$

Gleichung A1-2

mit:	$h$	=	Piezometerhöhe	L
	$p$	=	Druck	$ML^{-1}T^{-2}$
	$\gamma$	=	Wichte des Wassers	$ML^{-2}T^{-2}$
	$\rho$	=	Dichte des Wassers	$ML^{-3}$
	$g$	=	Erdbeschleunigung	$LT^{-2}$
	$z$	=	Ortshöhe über Bezugsniveau	L

Unterschiede in der Piezometerhöhenverteilung sind die Auslöser einer Grundwasserbewegung, die stets bestrebt ist, einen Zustand minimaler Energiehöhe zu erreichen. Zwischen zwei Messpunkten entlang einer Fließlinie kann der Gradient (s.u.) definiert werden.

Die Grundwasserbewegung erzeugt im Untergrund ein dreidimensionales Strömungsfeld, das physikalisch und mathematisch Analogien zum Wärmefluss durch feste Körper und dem Fließen elektrischen Stroms aufweist.

Die das dreidimensionale Strömungsfeld beschreibende Bewegungsgleichung lässt sich aus dem Darcy - Gesetz und der Kontinuitätsbedingung ableiten.

**1.2 Darcy –Gesetz**

Das Darcy Gesetz besagt, dass die Durchflussrate durch eine mit wassergesättigtem Bodenmaterial gefüllte Röhre proportional ist zum Produkt aus hydraulischem Gradient und Querschnittsfläche. Die Proportionalitätskonstante ist dabei der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  mit der Dimension einer Geschwindigkeit (LT<sup>-1</sup>). Der Durchlässigkeitsbeiwert ist die Kenngröße für den hydraulischen Widerstand, den der Boden dem Durchfluss entgegensetzt. Die Analogie des Darcy-Gesetzes zum Ohm'schen Gesetz und des Durchlässigkeitsbeiwertes zum elektrischen Widerstand ist augenfällig.

Das Darcy-Gesetz kann mathematisch in unterschiedlicher Weise formuliert werden. Eine verbreitete Formulierung lautet:

$$Q = k_f \cdot i \cdot F = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot F \tag{Gleichung A1-3}$$

mit:

Q	=	Durchflussrate	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
$k_f$	=	Durchlässigkeitsbeiwert	LT <sup>-1</sup>
$k_f$	=	K in internationaler Schreibweise	LT <sup>-1</sup>
i	=	hydraulischer Gradient $\Delta h/\Delta l$	1
F	=	Durchflussquerschnitt	L <sup>2</sup>

Diese Formulierung geht unmittelbar unter Berücksichtigung von Gleichung A1-2 auf das Darcy Experiment (siehe Abbildung 1) zurück. Eine mit wassergesättigtem Bodenmaterial gefüllte Röhre mit der Querschnittsfläche F wird kontinuierlich von Wasser mit der Durchflussrate Q durchströmt. An den Enden der Röhre befinden sich im Abstand  $\Delta l$  Manometerröhrchen, in denen sich unterschiedliche Piezometerhöhen  $h_1$  und  $h_2$  einstellen. Aus der Piezometerhöhendifferenz und dem Abstand  $\Delta l$  zwischen den Piezometern errechnet sich der hydraulische Gradient zwischen zwei Punkten entlang des Fließweges:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} = \frac{\Delta h}{\Delta l} \tag{Gleichung A1-4}$$

Durch den Übergang zur infinitesimal kleinen Fließstrecke ergibt sich die differentielle Schreibweise:

$$i = \frac{dh}{dl} \tag{Gleichung A1-5}$$

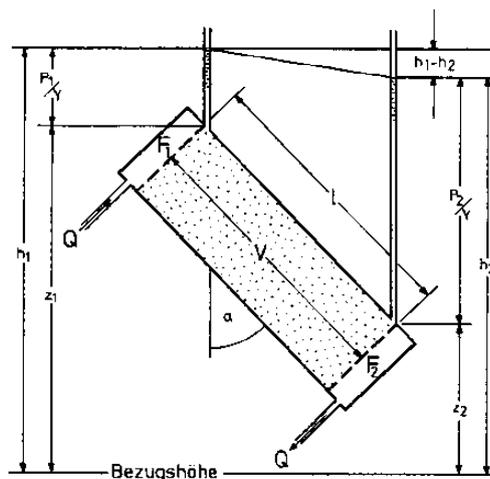


Abbildung 1: Prinzipskizze zum Darcy-Experiment (aus Langguth, H.R. & Voigt, R., 2003)

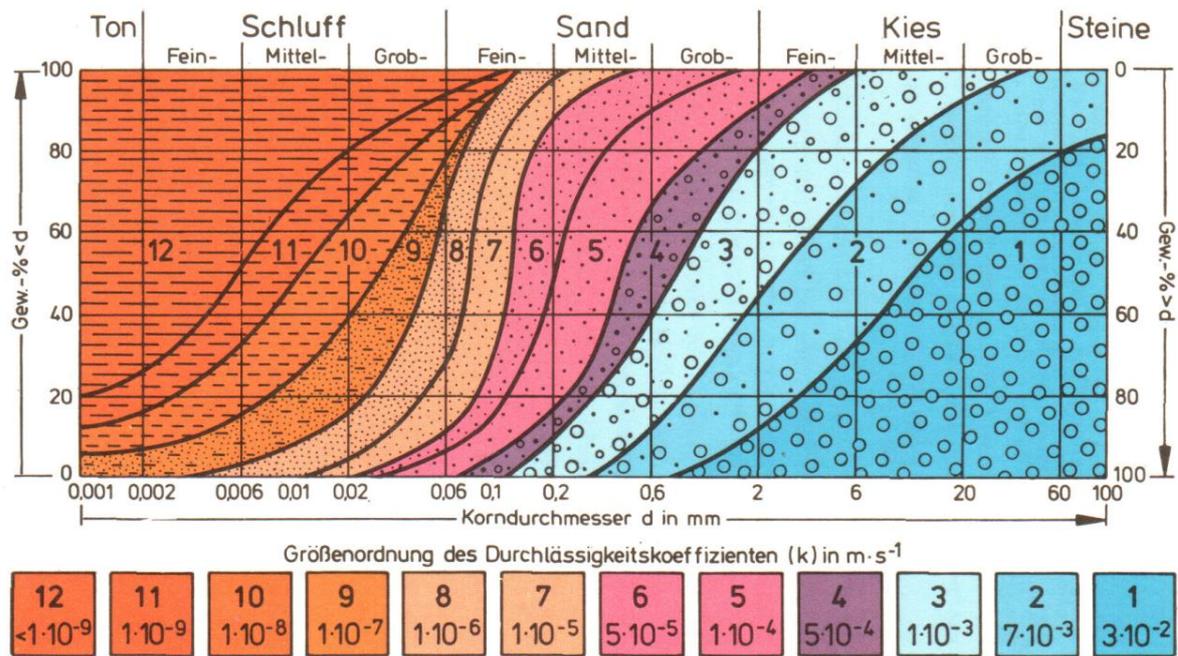


Abbildung 2: Durchlässigkeitsbeiwerte und Korngrößenklassen nach Breddin (aus Stork, W., 1980)

Die Abbildung 2 veranschaulicht die Größenordnung des Durchlässigkeitsbeiwertes in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung des Grundwasserleiters.

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist nicht nur eine Eigenschaft des Bodens, sondern auch des durchströmenden Fluids, dessen wesentliche physikalische Kenngrößen seine Viskosität und Dichte sind. Über diese Eigenschaften kann der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  in die vom Fluid unabhängige Permeabilität  $k$  als reine Bodeneigenschaft mit der Dimension  $L^2$  umgerechnet werden.

$$k = k_f \cdot \frac{\eta}{\gamma} \quad \text{Gleichung A1-6}$$

- mit:
- $k$  = spezifische Permeabilität  $L^2$
  - $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert des Fluids  $LT^{-1}$
  - $\eta$  = dynamische Viskosität des Fluids  $ML^{-1}T^{-1}$
  - $\gamma$  = Wichte des Fluids  $ML^{-2}T^{-2}$

Durch Umstellung der Gleichung A1-3 ergeben sich die Kenngrößen des spezifischen Durchflusses  $q$  bzw. der Filtergeschwindigkeit  $v$ :

$$\frac{Q}{F} = q = v = k_f \cdot \frac{dh}{dl} \quad \text{Gleichung A1-7}$$

- mit:
- $Q$  = Durchfluss  $L^3T^{-1}$
  - $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert  $LT^{-1}$
  - $dh/dl$  = hydraulischer Gradient 1
  - $F$  = Durchflussquerschnitt  $L^2$
  - $q$  = spezifischer Durchfluss  $LT^{-1}$
  - $v$  = Filtergeschwindigkeit  $LT^{-1}$

Für eine Berechnung der Grundwasserströmung ist die Filtergeschwindigkeit neben dem Gradienten die entscheidende Größe. Bei Fragestellungen des Stofftransportes müssen zusätzliche Überlegungen angestellt werden.

Die Filtergeschwindigkeit stellt keine reale Geschwindigkeit eines Wasserteilchens dar. Sie beschreibt lediglich die querschnittsbezogene Durchflussrate. Dagegen beschreibt die mittlere Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  des Grundwassers den Zeitbedarf für die Fließdauer zwischen zwei an die Erdoberfläche projizierten Punk-

ten entlang der Grundwasserfließrichtung. Sie ergibt sich durch Division der Filtergeschwindigkeit mit der durchflusswirksamen bzw. transportwirksamen effektive Porosität  $n_e$  (Dimension 1), da nur dieser Anteil eines Durchflussquerschnitts für die Wasserbewegung zur Verfügung steht:

$$v_a = \frac{v}{n_e} = \frac{k_f \frac{dh}{dl}}{n_e} \quad \text{LT-1} \quad \text{Gleichung A1-8}$$

Bei der effektiven Porosität handelt es sich um eine nicht leicht bestimmbare Größe. Die effektive Porosität ist zu unterscheiden von der speicherwirksamen Porosität. Hierbei handelt es sich um den durch Schwerkraft entwässerbaren Hohlraumanteil des Grundwasserleiters.

Effektive Porosität und Speicherwirksame Porosität können gleiche Zahlenwerte aufweisen, müssen es aber nicht. Beide Parameter beschreiben unterschiedliche Eigenschaften des Grundwasserleiters und sind formal auseinanderzuhalten.

Typische Werte für die leichter bestimmbare speicherwirksame Porosität eines Lockergesteins können der Abbildung 3 entnommen werden. Die speicherwirksame Porosität kann aus der Gesamtporosität über die Korndichte und die Rohdichte von Gesteinsproben näherungsweise abgeschätzt werden.

Die Speicherwirksame Porosität entspricht nicht der Gesamtporosität, da ein Porenanteil dem auf elektrostatischen Anziehungskräften zwischen Wasser und Feststoffmatrix beruhenden Haftwasseranteil zuzuordnen ist und daher durch die Schwerkraft alleine nicht entwässert werden kann. Die speicherwirksame Porosität kann in ungespannten Grundwasserleitern durch Pumpversuche oder durch Laborversuche an ungestörten Proben bestimmt werden. Die Begriffe nutzbare Porosität, speichernutzbare Porosität und speicherwirksame Porosität werden oft synonym verwendet, wobei die Porosität oft auch als Hohlraumvolumen bzw. Porenvolumen bezeichnet wird. Angaben zur dimensionslosen Porosität im Allgemeinen erfolgen entweder in Prozent oder in Volumenanteilen zwischen 0 und 1.

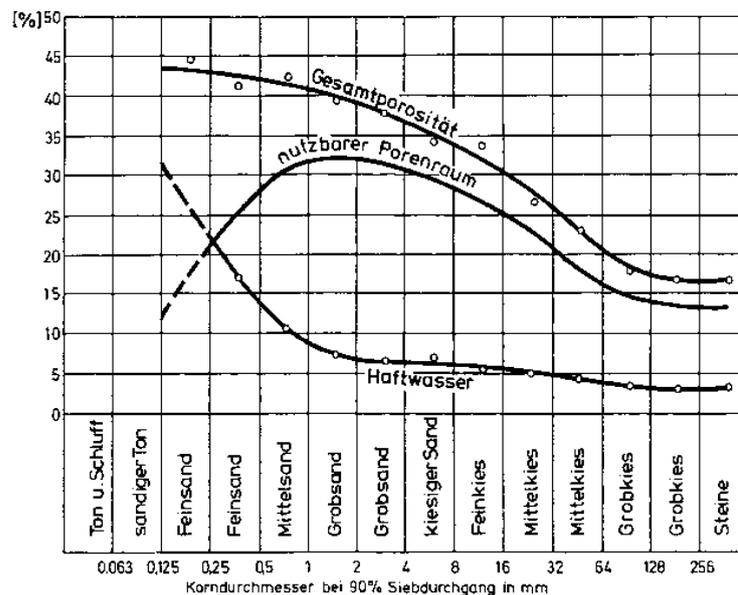


Abbildung 3: Gesamtporenraum und nutzbare Porosität (aus Langguth, H.R. & Voigt, R., 2004)

Die tatsächliche Fließgeschwindigkeit, die sogenannte Bahngeschwindigkeit des Wassers im Porenkanal, weicht in der Realität von der mittleren Abstandsgeschwindigkeit ab, da bei mikroskopischer bis makroskopischer Betrachtung Wasserteilchen unterschiedlich lange Wege zurücklegen.

Die Filtergeschwindigkeit ist eine vektorielle Größe, da sie neben einem Betrag auch eine Richtung im Strömungsfeld aufweist. In der Mathematik ist der Gradient im kartesischen Koordinatensystem  $x, y, z$  gemäß Definition stets aufwärts, d.h. in Richtung des höheren Potenzials, orientiert. Das Grundwasser fließt der

Schwerkraft folgend jedoch immer vom höheren zum niedrigeren Potenzial. Der Gradient erhält damit bei vektorieller Schreibweise des Darcy-Gesetzes ein negatives Vorzeichen.

$$\vec{v} = -kf \cdot \frac{dh}{dl} \quad \text{Gleichung A1-9}$$

mit:  $\vec{v}$  = Vektor der Filtergeschwindigkeit  $LT^{-1}$   
 $kf$  = Durchlässigkeitsbeiwert  $LT^{-1}$   
 $dh/dl$  = hydraulischer Gradient 1

Die vorstehende Formulierung des Darcy-Gesetzes bezieht sich bezüglich des Gradienten immer noch auf das eindimensionale Experiment aus Abbildung 1. Erweitert auf den dreidimensionalen Raum im kartesischen Koordinatensystem und bezogen auf ein infinitesimales Kontrollvolumen, ergeben sich folgende Schreibweisen des Darcy-Gesetzes, die ebenfalls häufig in der Literatur verwendet werden:

$$\vec{v} = -k_f \cdot \nabla h = -k_f \cdot \text{grad } h \quad \text{Gleichung A1-10}$$

mit:  $\vec{v}$  = Vektor der Filtergeschwindigkeit  $LT^{-1}$   
 $kf$  = Durchlässigkeitsbeiwert  $LT^{-1}$   
 $h$  = Piezometerhöhe L  
 $\nabla$  =  $\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$   $L^{-1}$   
 $\text{grad}$  = Gradient  $\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z$   $L^{-1}$

Im isotropen Fall handelt es sich bei dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  um eine skalare Größe, die im anisotropen Fall durch den Durchlässigkeitstensor  $K$  zu ersetzen ist.

$$\vec{v} = -K \nabla h = - \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \nabla h \quad \text{Gleichung A1-11}$$

### 1.3 Kontinuitätsbedingung

Die Abbildung 4 zeigt die Zu- und Abflüsse an einem Kontrollvolumen  $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  mit den Kantenlängen  $\Delta x, \Delta y$  und  $\Delta z$ . Die Zuflüsse über die Seiten besitzen die Größen  $q_x, q_y$  und  $q_z$ . Die Abflüsse über die gegenüberliegenden Seiten sind jeweils um einen Betrag  $\partial q_x/\partial x \cdot \Delta x, \partial q_y/\partial y \cdot \Delta y$  bzw.  $\partial q_z/\partial z \cdot \Delta z$  abweichend von den Zuflüssen. Über alle Seiten des Kontrollvolumens kann eine Massenbilanz gebildet werden.

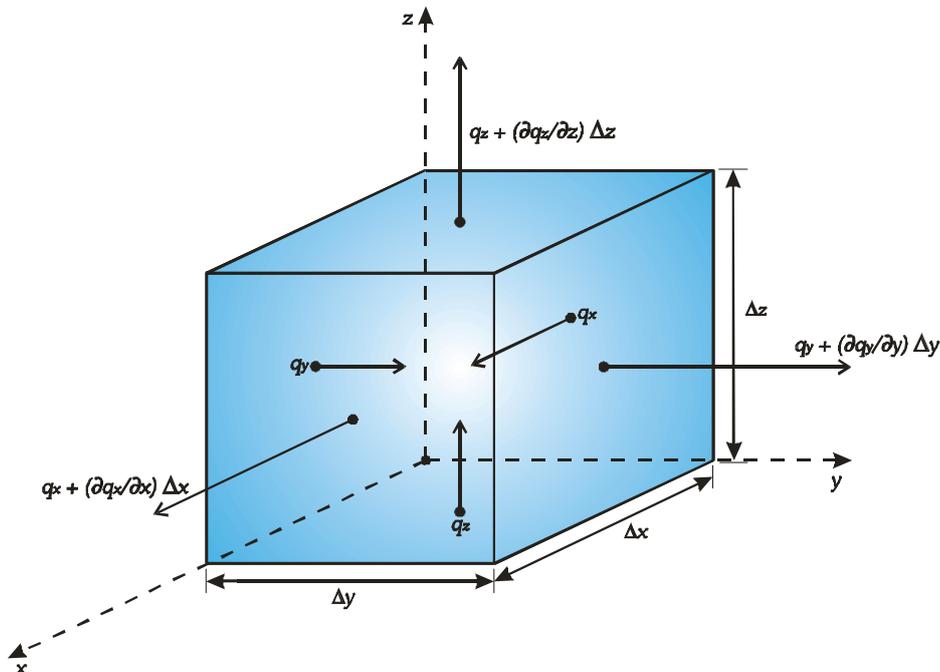


Abbildung 4: Zu- und Abflüsse an einem Kontrollvolumen (nach Wang, H.F. & Anderson, M. P. 1982)

Die Kontinuitätsbedingung besagt, dass bei der Strömung von Wasser konstanter Dichte durch ein Kontrollvolumen die Summe der Zu- und Abflüsse gleich der Summe des im Kontrollvolumen gespeicherten Wasservolumens plus der Zu- und Abflüsse externer Quellen und Senken ist. Vereinfachend sagt die Kontinuitätsbedingung, dass kein Wasser verloren geht: Was hineinfließt, muss auch wieder hinausfließen, oder es wird zwischengespeichert und später wieder abgegeben.

In einem stationären dreidimensionalen quellen- und senkenfreien Strömungsfeld bedeutet die Kontinuitätsbedingung, dass sich in einem infinitesimalen Kontrollvolumen die flächenspezifischen Flüsse  $q$  über die Seiten zu Null addieren. Dies kann durch folgende Differentialgleichung ausgedrückt werden:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

Gleichung A1-12

Besitzt das stationäre Strömungsfeld eine Quelle  $R$  - wie z.B. die Grundwasserneubildung - ergibt sich:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = R$$

Gleichung A1-13

da in diesem Fall der Volumenstrom über die Seiten des Kontrollelements gleich dem Volumenstrom aus der Quelle sein muss.

Für den allgemeinen instationären Fall muss noch ein weiterer Term hinzugefügt werden, der das im Zeitintervall  $\Delta t$  im Kontrollvolumen zusätzlich eingespeicherte bzw. aus dem Speichervorrat freigegebene Wasservolumen berücksichtigt. Der Term enthält daher den spezifischen Speicherkoeffizienten  $S_{sp}$ , den neben dem Durchlässigkeitsbeiwert zweiten wichtigen Kennwert eines Grundwasserleiters.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = R - S_{sp} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Gleichung A1-14

### 1.4 Bewegungsgleichung des Grundwassers

Kombiniert man nun diese Kontinuitätsbedingung mit dem Darcy-Gesetz

$$q = \vec{v} = -K \cdot \frac{dh}{dl}$$

Gleichung A1-15

erhält man schließlich die allgemeine Bewegungsgleichung der gesättigten Strömung des Grundwassers in drei Dimensionen:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = R - S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Gleichung A1-16

bzw. ausmultipliziert:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} K_{xx} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} K_{yy} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} K_{zz} = S \frac{\partial h}{\partial t} - R$$

Gleichung A1-17

Häufig kann die Vertikalkomponente der Grundwasserströmung vernachlässigt werden. Dies gilt z.B., wenn die Mächtigkeit eines Grundwasserleiters gering ist im Vergleich zu seiner horizontalen Erstreckung und ein Aufbau aus mehreren Schichten nicht vorliegt. Auf diese Weise kann das Strömungsproblem auf zwei Dimensionen reduziert werden. In diesem Fall muss anstelle der z-Komponente noch die wassererfüllte Mächtigkeit  $m$  berücksichtigt werden. Für den Fall isotropen gespannten Grundwassers gilt:

$$T = k_f \cdot m$$

Gleichung A1-18

mit:

T	=	Transmissivität	$L^2 T^{-1}$
kf	=	Durchlässigkeitsbeiwert	$L T^{-1}$
m	=	Mächtigkeit	L

Für die Strömungsgleichung ergibt sich dann im zweidimensionalen isotropen gespannten Fall:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{1}{T} \left( S \frac{\partial h}{\partial t} - R \right) \quad \text{Gleichung A1-19}$$

Im Fall des Grundwasserleiters mit freier Oberfläche ist die Transmissivität keine Konstante mehr, sondern hängt von der Piezometerhöhe ab.

$$m = h - b \quad \text{Gleichung A1-20}$$

mit:

m	=	Mächtigkeit	L
h	=	Piezometerhöhe	L
b	=	Höhenlage Aquiferbasis	L

Für die Strömungsgleichung ergibt sich somit im zweidimensionalen isotropen Grundwasserleiter mit freier Oberfläche:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{1}{(h - b) k_f} \left( n_0 \frac{\partial h}{\partial t} - R \right) \quad \text{Gleichung A1-21}$$

Bei der Bewegungsgleichung der Grundwasserströmung handelt es sich um eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung.

Zu beachten ist, dass im Fall der freien Grundwasseroberfläche der Speicherkoeffizient S durch das nutzbare Porenvolumen n0 zu ersetzen ist. Während im gespannten Fall der Grundwasserleiter stets wassergesättigt ist, und somit die Speicherung lediglich auf die Elastizität des Korngerüstes und die extrem geringe Kompressibilität des Wassers zurückzuführen ist, ist die Speicherung beim Grundwasserleiter mit freier Oberfläche mit einer Auffüllung bzw. Entleerung des Porenvolumens verbunden.

Gespannte und ungespannte (= freie) Grundwasserleiter unterscheiden sich bezüglich ihres Speicherkoeffizienten daher sehr deutlich. Während bei einem ungespannten Aquifer der Speicherkoeffizient der oben erläuterten speicherwirksamen Porosität entspricht, ist er bei gespannten Aquiferen um Größenordnungen kleiner. Wird die freie Grundwasseroberfläche abgesenkt, so gibt der Boden entsprechend seinem Hohlraumanteil Wasser frei. Wird dagegen bei einem gespannten Grundwasserleiter der Druckspiegel gesenkt, so stammt dabei frei werdendes Wasser lediglich aus einer geringen Elastizität des Korngerüstes und der extrem geringen Kompressibilität des Wassers. In einen gespannten Grundwasserleiter, dessen Hohlraumvolumen ja bereits gefüllt ist, passt nur noch extrem wenig zusätzliches Wasser hinein. Der dimensionslose Speicherkoeffizient kann pro Meter wassererfüllter Mächtigkeit angegeben werden als spezifischer Speicherkoeffizient mit der Dimension 1/L und besitzt eine Größenordnung von etwa 1-10 · 10<sup>-6</sup> m<sup>-1</sup> für wenig elastische Aquifere. Schwach konsolidierte gespannte Aquifere können auch noch deutlich höhere Werte (Wertebereich ca. 5-500 · 10<sup>-6</sup> m<sup>-1</sup>) aufweisen, die aber immer noch um Größenordnungen kleiner sind als das speicherwirksame entwässerbare Porenvolumen bei ungespannten Aquiferen. Daten zum Speicherkoeffizienten liefern Pumpversuche.

### 1.5 Randbedingungen

Zur Lösung von Differentialgleichungen ist stets die Formulierung von Randbedingungen erforderlich. Diese definieren das Verhalten der Strömung an den Rändern des betrachteten Strömungsfeldes. Es werden drei verschiedene Typen von Randbedingungen unterschieden:

Randbedingung 1. Art (DIRICHLET-Typ)

Randbedingung 2. Art (NEUMANN-Typ)

Randbedingung 3. Art (CAUCHY-Typ)

Für die Bewegungsgleichung der Grundwasserströmung existieren nur für sehr einfach gelagerte Randbedingungen analytische Lösungen wie z.B. zur Berechnung der Grabenanströmung oder zur Berechnung der Absenkung in der Umgebung eines Brunnens. Allgemeine analytische Lösungen partieller Differentialgleichungen 2. Ordnung sind Gegenstand der mathematischen Forschung. Zur Lösung des Strömungsproblems greift man daher auf numerische Methoden zurück. Näheres dazu folgt im Kapitel 2.0.

## 2. Numerische Lösung der Strömungs- und Transportgleichung

### 2.1 Einführung

In Kapitel 1.0 wurde erläutert, dass die Grundwasserströmung durch eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung beschrieben werden kann. Für diese Differentialgleichung wurden bisher nur für sehr stark vereinfachende Annahmen analytische Lösungen entwickelt. Um beliebige Geometrien von Grundwasserleitern, Vorflutern, Brunnen und auch den Einfluss von Heterogenitäten berechnen zu können, bedient man sich daher besser numerischer Verfahren.

Bei den numerischen Verfahren wird die räumlich kontinuierliche Lösung der partiellen Differentialgleichung der Grundwasserströmung - die Piezometerhöhenverteilung - durch eine nach unterschiedlichen Verfahren bestimmte Lösung an einer endlichen Anzahl von Gitterpunkten angenähert.

Als Lösungsmethoden haben sich das Finite Differenzen Verfahren ("FD") und die Methode der Finiten Elemente ("FE") durchgesetzt. Eine geringere Verbreitung hat die Methode der Finiten Volumen gefunden. Daher wird auf diese Methode nachfolgend nicht weiter eingegangen.

Dem FD- und FE-Verfahren ist gemeinsam, dass das zu betrachtende Gebiet in eine endliche Zahl von Teilflächen diskretisiert, d.h. aufgegliedert wird. Auffälligster Unterschied zwischen den beiden Methoden ist die Art der Diskretisierung. Während beim FD-Verfahren der Modellraum im Grundriss betrachtet in rechteckige, oft quadratische Zellen aufgeteilt wird, kann das FE-Modellnetz aus einem unregelmäßigen Netz von Elementen praktisch beliebiger Form (Dreiecke, Vierecke u.a., auch in gemischter Form) bestehen. Bei dreidimensionaler Betrachtung handelt es sich beim FD-Verfahren um würfel- oder quaderförmige Zellen, bei der FE-Methode um vielfältige Formen wie z.B. Tetraeder, Prismen, Dreiecks- oder Viereckspyramiden und andere.

Das FD-Verfahren liefert als Ergebnis eine mittlere Piezometerhöhe der einzelnen Modellzelle, wohingegen das FE-Verfahren die Piezometerhöhe an den Eckpunkten der Elemente berechnet. Zum Beispiel würde die Piezometerhöhenverteilung einer freien Grundwasseroberfläche nach dem FD-Verfahren eine treppenförmige Gestalt annehmen. Das Ergebnis des FE-Verfahrens kann z.B. bei der Verwendung von Dreieckselementen mit einer aus vielen einzelnen Ebenen (den Elementen) aufgespannten facettierten Oberfläche beschrieben werden.

Beide Verfahren nähern die exakte Lösung der Differentialgleichung auf unterschiedliche Art und Weise an. Bei bekannter Parameterverteilung und vergleichbarer Diskretisierung sind die Ergebnisse beider Methoden gleichwertig (Dvgw, 2004). Die Genauigkeit der Ergebnisse beider numerischer Lösungsverfahren ist letztlich nur eine Frage der Feinheit der Diskretisierung.

Oft wird die Frage in den Raum gestellt, welche Lösungsmethode zu bevorzugen ist. Eine definitive Antwort auf diese Frage gibt es nicht. Beide Lösungsmethoden haben eine weite Verbreitung gefunden und keiner Methode ist es bisher gelungen, die andere zu verdrängen.

Ein Vorteil der FE-Methode ist ihre größere Flexibilität beim Aufbau des Modellgitters. Da die Elemente in Form und Größe variabel sein können, kann das Modellgitter sehr gut an die natürlichen Verhältnisse angepasst werden. Bereiche von besonderem Interesse bzw. Bereiche mit höherer Erkundungsdichte können praktisch beliebig verdichtet werden, während Bereiche mit geringerer Informationsdichte weitständiger diskretisiert werden können. Das FD-Modellgitter ist dagegen normalerweise rechtwinklig aufgebaut und von daher nicht so flexibel wie das FE-Modellgitter. Aufgrund des FD-Prinzips von maximal vier (2D) bzw. sechs Nachbarzellen im 3D-Modell sind Verdichtungen des Modellgitters zwar möglich, diese ziehen sich dann aber durch das ganze Modell hindurch (siehe Abbildung 5). Die Hauptachsen eines möglichen Anisotropietensors sind beim FD-Netz stets parallel den Gitterachsen orientiert. Ändert sich im Feld die Richtung eines solchen Tensors, kann dies im klassischen FD-Netz nicht abgebildet werden. Manche FD-Modelle können die genannten Nachteile durch die Anwendung curvilinearere Gitter in gewissem Maß kompensieren.

Generell kann man sagen, dass eine Hervorhebung der Nachteile des FD-Verfahrens gegenüber dem FE-Verfahren vielfach eher historisch begründet ist und aus einer Zeit stammt, in der mit Speicher- und Rechenzeit noch besonders sparsam umgegangen werden musste. Mit der heutigen Rechnergeneration können relativ problemlos Modelle mit mehreren Hunderttausend bis Millionen Zellen bzw. Knoten verarbeitet werden (siehe Abbildung 6), so dass sehr feine räumliche Diskretisierungen auch mit dem FD-Verfahren realisiert werden können.

Bei Zellabständen von wenigen Zehnermetern bis hinunter in den Meterbereich kann das FD-Verfahren meist allen Erfordernissen der Praxis gerecht werden. Die Entscheidung für die eine oder andere Methode ist eine Frage des Einzelfalls und nicht ausschließlich von fachlichen Erfordernissen geprägt.

Eine ausführliche mathematische Herleitung der FD- und FE-Methode ist nicht Ziel dieser Arbeitshilfe und würde auch deren Rahmen sprengen. Zur Theorie numerischer Modelle gibt es eine Reihe sehr guter Lehrbücher. Insbesondere zur Anwendung numerischer Verfahren im Themenfeld Grundwasser sei auf die Arbeiten von Kinzelbach (1986), Kinzelbach & Rausch (1995), Istok (1989) und Wang & Anderson (1982) hingewiesen. In den folgenden Kapiteln werden nur die Grundzüge der Verfahrensweisen skizziert.

**2.2 Finite Differenzen Verfahren**

Beim FD-Verfahren wird die kontinuierliche Lösung der Differentialgleichung durch die Bildung von Differenzenquotienten angenähert.

Dazu wird das Modellgebiet räumlich in eine endliche Anzahl von rechteckigen Zellen bzw. Blöcken diskretisiert. Man unterscheidet flächenzentrierte und knotenzentrierte Modellgitter. Bei den flächenzentrierten Diskretisierungsverfahren liegen die Berechnungspunkte im Mittelpunkt der durch das Modellgitter bestimmten Zellen oder Blöcke. Beim knotenzentrierten Verfahren liegen die Berechnungspunkte dagegen auf den Kreuzungspunkten des Gitters. Die zugehörigen Zellen ergeben sich dann aus den Mittelsenkrechten der Verbindungslinien zwischen den Knoten. Beide Verfahren sind mathematisch identisch. Weit verbreitete Anwendung haben die flächenzentrierten Gitter gefunden.

Die FD-Methode lässt sich anhand der Wasserbilanz einer 2-D Modellzelle für den gespannten Aquifer erläutern. Gesucht ist die unbekannte Piezometerhöhenverteilung an n Modellzellen am Ende eines bestimmten Zeitintervalls.

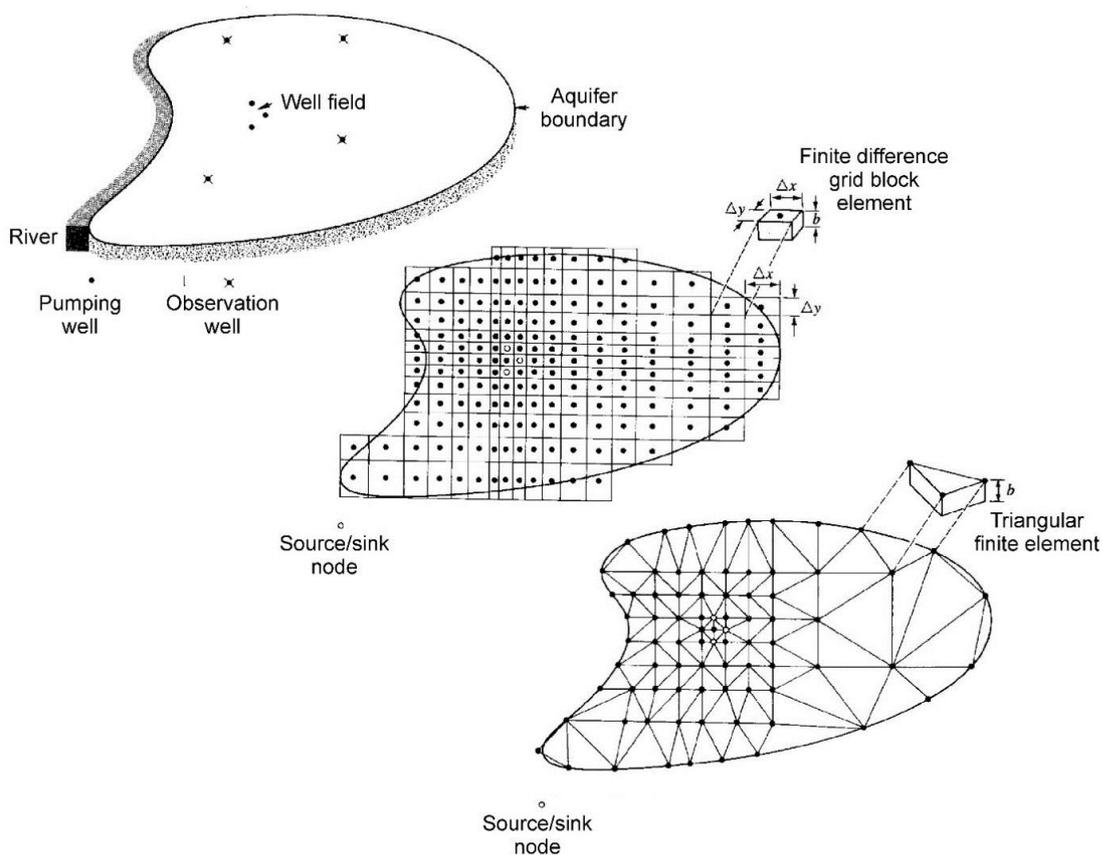
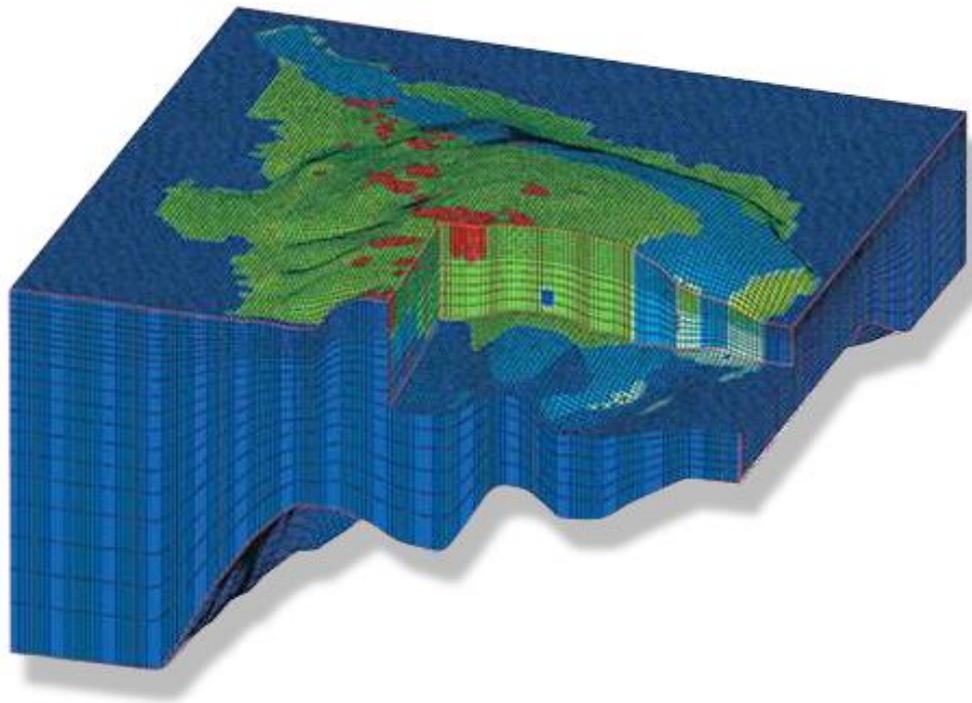
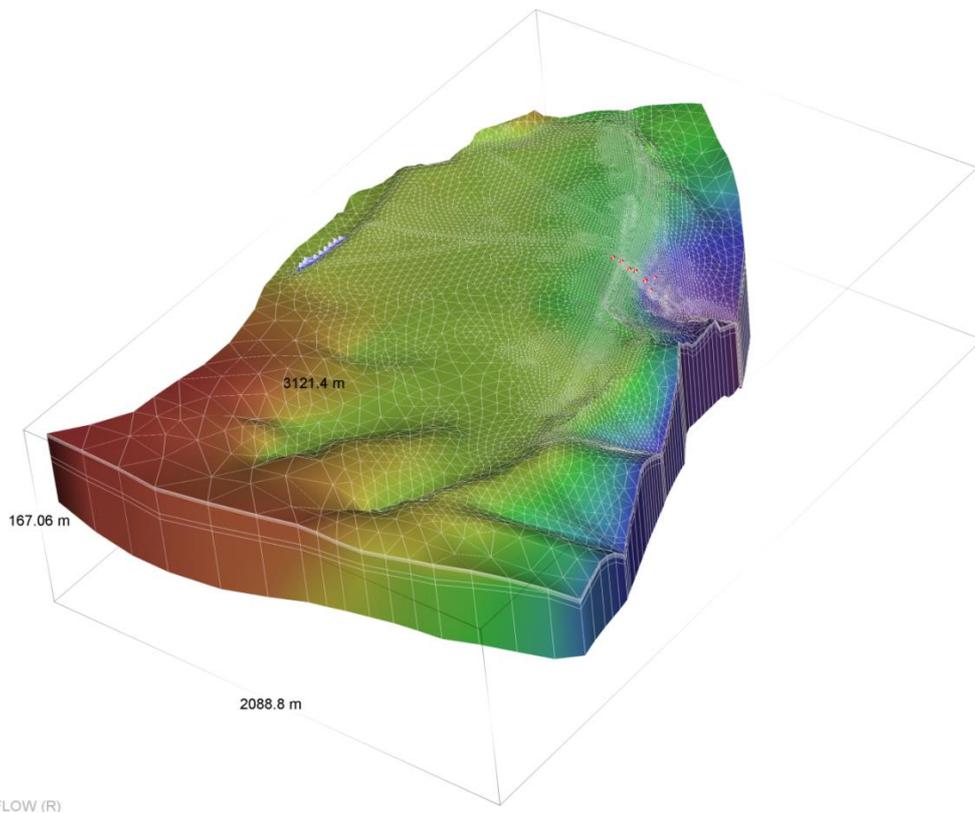


Abbildung 5: Diskretisierungsprinzipien: Modellgebiet (links), Finite Differenzen Gitter (mitte), Finite Elemente Gitter (rechts) (verändert nach Wang, H.F. & Anderson, M. P. 1982)



Quelle: HydroGeoLogic Inc.



Quelle: DHI-WASY GmbH

Abbildung 6: Komplexe 3D Modellgitter: Finite Differenzen (oben), Finite Elemente (unten)

Eine Modellzelle des FD-Verfahrens besitzt im 2D-Fall vier benachbarte Zellen, über die ein Wasseraustausch erfolgen kann. Zusätzlich kann über die Dachfläche ein Quell- bzw. Senkenterm berücksichtigt werden. Aus Gründen der Kontinuität ist in einem Zeitintervall die Summe der Wasserflüsse über die Seiten und Dachfläche einer Modellzelle gleich dem Volumen des Wassers, das in diesem Zeitintervall in der Modellzelle gespeichert oder aus dem Speichervorrat abgegeben wurde. Im stationären Fall ist die Summe der Wasserflüsse gleich Null.

Die Wasserflüsse über die Seiten der Modellzelle können mit Hilfe des Darcy-Gesetzes über den Gradienten und die Transmissivität zwischen benachbarten Zellen zu einem noch festzulegenden Zeitpunkt während des Zeitintervalls angenähert werden. Ersetzt man in der Kontinuitätsgleichung die Wasserflüsse durch die äquivalenten Terme des Darcy-Gesetzes, erhält man nach einigen algebraischen Umformungen die Knotengleichung für die betrachtete Modellzelle, in der als Unbekannte beim impliziten Lösungsschema nur noch die Piezometerhöhen der betrachteten Zelle und seiner vier Nachbarn zum Ende des Zeitintervalls enthalten sind.

In einem FD-Modell können die einzelnen Modellzellen abweichende hydraulische Eigenschaften besitzen. Haben benachbarte Zellen eine unterschiedliche Transmissivität, so muss zwischen diesen Modellzellen eine geeignete mittlere Transmissivität bestimmt werden. Dazu wird in der Regel das entsprechend der Zelldimensionen gewichtete harmonische Mittel der beiden Transmissivitäten verwendet.

Wird die zuvor beschriebene Knotengleichung für  $n$  Modellzellen aufgestellt, erhält man im Fall des gespannten Grundwasserleiters ein lineares Gleichungssystem bestehend aus  $n$  Gleichungen mit  $n$  unbekanntem Piezometerhöhen. Auf der linken Seite der einzelnen Gleichungen stehen die unbekanntem Piezometerhöhen der jeweils fünf beteiligten Modellzellen mit ihren Koeffizienten, die die einzelnen Zellabstände und hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Zellen berücksichtigen. Die rechte Seite der Gleichung besteht aus einem Quell- bzw. Senkenterm sowie dem im Zeitschritt gespeicherten/entleerten Wasservolumen.

Ein solches Gleichungssystem kann mit verschiedenen Verfahren entweder direkt oder iterativ gelöst werden.

Die Übertragung des FD-Verfahrens auf andere Aquifertypen (Mehrschichtaquifere, freie Grundwasseroberfläche u.a.) ist möglich.

Im 3D Fall besitzt jede Modellzelle sechs Nachbarzellen. Die Berechnung des vertikalen Wasseraustauschs erfolgt in diesem Fall analog über die vertikale Durchlässigkeit der einzelnen Modellzellen und den aus der Zellgeometrie abgeleiteten harmonischen Mittelwerten der Transmissivität.

Bei Aquiferen mit freier Grundwasseroberfläche ist die Transmissivität keine konstante Größe, sondern hängt unmittelbar von der Piezometerhöhe ab. Dadurch wird das entstehende Gleichungssystem nichtlinear und kann ausschließlich mit iterativen Verfahren gelöst werden.

### 2.3 Finite Elemente Verfahren

Die mathematische Herleitung der FE-Methode ist gegenüber der des FD-Verfahrens deutlich komplizierter. Das FE-Verfahren kann nach der weit verbreiteten Galerkin Methode (Methode der gewichteten Residuen) kurz umrissen wie folgt erläutert werden.

Das Modellgebiet wird in eine endliche Anzahl unregelmäßig gefomter Elemente diskretisiert. Die Eckpunkte der Elemente bilden die Modellknoten, für die die Piezometerhöhen berechnet werden. Innerhalb der Elemente sind die hydraulischen Eigenschaften konstant. Von Element zu Element können sie dagegen unterschiedlich sein.

Gesucht ist wieder die unbekanntem Piezometerhöhenverteilung an  $n$  Modellknoten am Ende eines bestimmten Zeitintervalls. Im Gegensatz zur FD-Methode ist die Piezometerhöhe nicht nur an den Modellknoten, sondern auch innerhalb der Elemente definiert. Im einfachen Fall ist die unbekanntem Piezometerhöhe an einem beliebigen Punkt z.B. innerhalb eines Dreieckelementes durch eine lineare Interpolation zwischen den Modellknoten definiert. Diese Interpolationsfunktion spielt beim Galerkin Verfahren eine entscheidende Rolle.

Beim Verfahren der gewichteten Residuen nach Galerkin wird für die zu lösende Differentialgleichung zunächst eine Näherungslösung definiert bestehend aus Werten für die Piezometerhöhe an den Modellknoten und einer zugehörigen Ansatz- bzw. Gewichtungsfunktion. Wird diese Näherungslösung in die Differentialgleichung eingesetzt, ist diese nicht mehr exakt erfüllt. Es verbleibt ein Residuum. Das Residuum ist ein Maß für die Ungenauigkeit der Näherungslösung.

Ziel des Galerkin Verfahrens ist es, an  $n$  Modellknoten die Summe der gewichteten Residuen Null werden zu lassen. Dazu werden die Produkte aus Residuen und zugehöriger Gewichtungsfunktion integriert und Null gesetzt. Beim Galerkin Verfahren werden für diese Gewichtung die bereits erwähnten Interpolationsfunktionen herangezogen. Wird in das Integral anstelle des Residuums die Näherungslösung für die Differentialgleichung eingesetzt, so entsteht nach partieller Integration und Einsetzen der Interpolationsfunktion beim gespannten Grundwasserleiter ein System von  $n$  linearen Gleichungen mit  $n$  unbekanntem Piezometerhöhen.

Das Gleichungssystem kann in Matrixform überführt werden. Die Gleichung enthält dann eine Spaltenmatrix der Piezometerhöhen zum Ende des Zeitintervalls. In die quadratische Koeffizientenmatrix der Piezometerhöhen geht neben der Geometrie der einzelnen Elemente auch deren hydraulische Leitfähigkeit ein. Sie wird daher als "globale Durchlässigkeitsmatrix" bezeichnet. Eine weitere Spaltenmatrix enthält die zeitlichen Ableitungen der Piezometerhöhen, und deren ebenfalls quadratische Koeffizientenmatrix berücksichtigt die Speicherung in den einzelnen Elementen. Auf der rechten Seite der Gleichung befinden sich zwei Spaltenmatrizen der Randzuflüsse und sonstiger Quellen bzw. Senken.

Ganz ähnlich wie beim FD-Verfahren sind die Koeffizientenmatrizen des FE-Verfahrens nur sehr dünn besetzt, da nur die Eigenschaften der an einen Modellknoten angrenzenden Elemente ("Patch") zu dessen Piezometerhöhe beitragen. Die Koeffizienten der nicht zum Patch des Modellknotens gehörenden Elemente sind jeweils gleich Null.

Das Gleichungssystem kann mit verschiedenen Verfahren entweder direkt oder iterativ gelöst werden.

Die Anwendung des FE-Verfahrens ist bei allen denkbaren Aquifertypen möglich.

## 2.4 Lösung der Gleichungssysteme und zeitliche Diskretisierung

Der Simulationszeitraum eines instationären Modells wird sowohl beim FD- als auch beim FE-Verfahren in einzelne Phasen zeitlich aufgeteilt, d.h. zeitlich diskretisiert. Innerhalb der einzelnen Phasen bleiben die System bestimmenden Randbedingungen konstant. Von Phase zu Phase können sich die Randbedingungen dagegen ändern. Jede Phase kann in weitere Zeitintervalle unterteilt werden, um eine höhere zeitliche Auflösung zu erhalten. Das erste Zeitintervall einer instationären Simulation bedarf der Definition einer Anfangsbedingung. Jeweils das Ergebnis des vorangegangenen Zeitintervalls bildet die Anfangsbedingung des folgenden Intervalls.

Die Vorgehensweisen zur Berechnung des instationären Flusses sind beim FD- und FE-Verfahren sehr ähnlich und werden daher an dieser Stelle gemeinsam erläutert. In beiden Verfahren werden hinsichtlich des zeitlichen Aspekts Differenzenverfahren eingesetzt.

Bei der Beschreibung des FD- und FE-Verfahrens wurde in beiden Fällen ein Zeitintervall genannt, zu dessen Ende jeweils die unbekanntem Piezometerhöhen an den Modellknoten bzw. den Modellzellen berechnet werden.

Ausgehend von einer stets zu definierenden Anfangsbedingung zu Beginn des Zeitintervalls ist das Ziel, eine neue Piezometerhöhenverteilung am Ende des Zeitintervalls  $t + \Delta t$  zu berechnen. Hierzu muss festgelegt werden, zu welchem Zeitpunkt innerhalb des Zeitintervalls die Piezometerhöhengradienten angenähert werden sollen. Man unterscheidet hierbei explizite und implizite Verfahren.

Beim expliziten Lösungsschema wird dieser Zeitpunkt  $t'$  innerhalb des Zeitintervalls  $t + \Delta t$  mit den bekannten Piezometerhöhen zum Zeitpunkt  $t$ , d.h. zu Beginn des Zeitintervalls, festgelegt. Man benutzt also die Ergebnisse des vorangegangenen Zeitschritts. Auf diese Weise können die gesuchten unbekanntem Piezometerhöhen "explizit" für jede Zelle bzw. Knoten berechnet werden ohne die neuen Werte der Nachbarknoten berücksichtigen zu müssen. Der Nachteil dieses einfachen Verfahrens liegt in der erforderlichen sehr kleinen Zeitschrittweite, da sonst die Lösung instabil wird. Es müssen beim expliziten Verfahren strenge Stabilitätskriterien eingehalten werden. Bei langen Simulationszeiträumen ergeben sich neben erheblichen Rechenzeiten zudem häufig nicht zu vernachlässigende Rundungsfehler. In der Praxis finden explizite Lösungsverfahren nur selten Anwendung.

Bei impliziten Verfahren wird für den Zeitpunkt  $t'$  ein beliebiger Zeitpunkt innerhalb des Zeitintervalls  $t + \Delta t$  herangezogen. In diesem Fall sind die unbekanntem Piezometerhöhen "implizit" in den zuvor beschriebenen Gleichungssystemen enthalten. Wird der Zeitpunkt zum Ende des Zeitintervalls verwendet, spricht man vom "vollständig impliziten" Schema. Wird das Verfahren mit dem Zeitpunkt zur Hälfte des Zeitintervalls angewandt, entspricht dies dem Crank-Nicholson-Schema.

Die Anwendung impliziter Schemata führt zu Gleichungssystemen, die mit direkten und iterativen Verfahren gelöst werden können.

Direkte Gleichungslöser (z.B. Gauss-Jordan-Verfahren) lösen das Gleichungssystem in einem Schritt. Nachteil der direkten Verfahren ist der sehr große Speicherbedarf. Üblicherweise werden heute iterative Gleichungslöser (Iadi-, Gauss-Seidel-, Pcg-, Multi-Grid-Verfahren u.a.) verwendet, die nach unterschiedlichen Verfahrensweisen arbeiten.

Gemeinsam ist allen iterativen Verfahren, dass sie mit "gerateten" Anfangswerten arbeiten, das Ergebnis wieder einsetzen und sich auf diese Weise dem tatsächlichen Ergebnis annähern. Je besser die geratene Lösung ist, desto schneller wird das Berechnungsergebnis erzielt.

Um zu entscheiden, wann ein Berechnungsergebnis hinreichend "richtig" ist, müssen bei den iterativen Verfahren sogenannte "Konvergenzkriterien" definiert werden. Diese werden während der Berechnung als Abbruchkriterium eingesetzt. Wenn die Änderung des Ergebnisses zwischen zwei Iterationen das Konvergenzkriterium unterschreitet, wird die Iteration abgebrochen und zum nächsten Zeitschritt übergegangen. Je nach Verfahren sind die Kriterien zur Prüfung der Konvergenz unterschiedlich definiert. Es können keine absoluten Regeln zur Festlegung der Größe der Konvergenzkriterien angegeben werden. Sie sind vom Einzelfall abhängig und sollten begründet werden. Zu schwache Konvergenzkriterien führen zu einem verfrühten Abbruch der Iteration und einem falschen Ergebnis. Zu strenge Kriterien verlängern die Rechenzeit unnötig ohne zu einer qualitativen Verbesserung des Ergebnisses zu führen. Im ungünstigen Fall kommt es zur Oszillation der Ergebnisse und es wird keine Konvergenz erreicht.

Die beste Methode zur Optimierung der Konvergenzkriterien ist die Kontrolle des Ergebnisses über die Wasserbilanz des Gesamtmodells: Das Verhältnis zwischen den Summen aller Zu- und Abflüsse sollte möglichst nahe an Eins liegen. Der Unterschied (d.h. der Fehler) sollte in der Regel Bruchteile eines Prozentes der Wasserflüsse nicht überschreiten. Im Zweifel eignet sich ein Vergleich von Ergebnissen mit unterschiedlichen Konvergenzkriterien zu deren Beurteilung. Die Wahl fallbezogener Konvergenzkriterien ist ein wichtiger Schritt zur wirtschaftlichen Optimierung von Simulationen.

## 2.5 Anfangsbedingungen

Für numerische Lösungen der Grundwasserströmung ist grundsätzlich die Definition von Anfangsbedingungen erforderlich. Die Anfangsbedingung beschreibt den Zustand des Systems zu Beginn des Zeitintervalls  $t + \Delta t$  am Beginn der Simulation. Als Anfangsbedingungen können für instationäre Simulationen gemessene Piezometerhöhenverteilungen herangezogen werden.

Können diese z.B. aufgrund des vorhandenen Messstellennetzes nur mit geringer Güte entwickelt werden, bedarf das Modell bei instationären Simulationen einer Anpassungsphase an die Randbedingungen des Systems. Es muss daher beachtet werden, dass in der Anfangsphase instationäre Modelle nur in Ausnahmefällen Messergebnisse gut nachvollziehen können.

Für stationäre Berechnungen sind Anfangsbedingungen vom Grundsatz her eigentlich nicht erforderlich, da die Lösung mit dem Erreichen der Stationarität ausschließlich von den Randbedingungen gesteuert und damit unabhängig von den Anfangsbedingungen wird. Stationäre Simulationen können nur über iterative Verfahren erfolgen. Iterative Verfahren benötigen jedoch einen geratenen Startwert. Insofern kann die Anfangsbedingung bei stationären Simulationen eine willkürlich festgelegte sein. Je näher sie der stationären Lösung entspricht, desto kürzer ist jedoch die Rechenzeit bis zur Konvergenz.

## 2.6 Randbedingungen der Grundwasserströmung

Für die Lösung partieller Differentialgleichungen 2. Ordnung mit numerischen Verfahren ist neben den Anfangsbedingungen auch die Definition von Randbedingungen erforderlich, mit denen das Strömungsverhalten an den Rändern aber ggf. auch innerhalb des Modells vorgegeben wird. Die Randbedingungen sind die prägenden Bestandteile eines Modells und müssen sorgfältig erarbeitet werden.

Es sind als mögliche Randbedingungen zu nennen:

- Randbedingung 1. Art (DIRICHLET-Typ): Festpotenzial, d.h. vorgegebene Piezometerhöhe.
- Randbedingung 2. Art (NEUMANN-Typ): konstanter Gradient senkrecht zum Rand, entspricht konstantem Randzufluss.
- Randbedingung 3. Art (CAUCHY-Typ): Linearkombination aus 1. und 2. Art, Leakage-Randbedingung, Festpotenzial mit hydraulischem Widerstand.

Randbedingungen werden in numerischen Modellen nach der FE- bzw. FD-Methode prinzipiell ähnlich behandelt. Bei Festpotenzialen ist die Knoten- oder Zellgleichung unabhängig vom Geschehen an den Nachbarknoten explizit ohne weitere Berechnung gelöst. Randzuflüsse sind in den Gleichungssystemen der FE- bzw. FD-Methode jeweils auf der rechten Seite der Gleichungen enthalten. Erhält die betreffende Modellzelle bzw. das betreffende Element des Patches keinen Randzufluss, ist der entsprechende Term der Gleichung gleich Null. Flüsse über Leakgeknoten werden analog den Randzuflüssen behandelt.

Die mathematische Behandlung der Festpotenziale zeigt die Gefahr bei deren Anwendung. Die Festpotenzialhöhe bleibt bei der Simulation konstant unabhängig von den Bedingungen an den Nachbarknoten. Wird in einem Nachbarknoten stark abgesenkt, z.B. durch eine Grundwasserentnahme, ändert sich die Piezometerhöhe am Festpotenzialknoten nicht. Auf diese Weise kann im Modell beliebig viel Wasser erzeugt werden. Festpotenziale als Randdefinition sollten daher in der Regel tatsächlich auch nur da angewendet werden, wo der Untergrund entsprechend "unendlich" viel Wasser zu Verfügung stellen kann. In allen anderen Fällen ist bei der Anwendung von Festpotenzialen große Vorsicht geboten.

Unterschiede zwischen der FE- bzw. FD-Methode bestehen bezüglich der Behandlung von Quellen und Senken. Während bei der FD-Methode alle Arten von Quellen und Senken (Grundwasserneubildung, Randzuflüsse, Brunnen etc.) gleich behandelt werden, kann bei der FE-Methode zwischen flächenhaften (z.B. Grundwasserneubildung), linienhaften (z.B. Fließgewässer) und punktförmigen Quellen und Senken (z.B. Brunnen) unterschieden werden.

Bei vergleichsweise grober Diskretisierung ist die FE-Methode diesbezüglich der FD-Methode im Vorteil. Bei feiner Diskretisierung wird dieser Vorteil wieder überdeckt von den in der Regel mangelnden Kenntnissen der geometrischen und hydraulischen Eigenschaften im Detail, so dass beide Verfahren dann wieder gleichwertig sind.

# **Errichtung von sechs Grundwasser- messstellen im Rahmen der Erweiterung des Steinbruchs Jaeger, Reichshof-Nespen**

## **Abschlussbericht**

**Auftraggeber:**

**Günter Jaeger  
Steinbruchbetriebe GmbH**

Lüsberger Straße 2  
51580 Reichshof-Nespen

**bearbeitet von:**



Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner  
Ingenieurgesellschaft mbH, Aachen  
Dr.-Ing. F. Schwarzkopp  
Dipl.-Geol. D. Quante  
Dipl.-Geol. A. Quante

Projekt-Nr.: 1921806

Stand: Juli 2019

---

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<b>1 Vorbemerkungen</b>	<b>3</b>
<b>2 Untersuchungsgebiet</b>	<b>4</b>
<b>3 Geologisch/hydrogeologischer Überblick</b>	<b>5</b>
<b>4 Bohr- und Ausbauarbeiten</b>	<b>6</b>
<b>5 Errichtung der Grundwassermessstellen</b>	<b>7</b>
5.1 Vorbemerkungen	7
5.2 Grundwassermessstellen Richtung Wiehltalsperre	8
5.2.1 Grundwassermessstelle B3-18	8
5.2.2 Grundwassermessstelle B4-18	10
5.2.3 Grundwassermessstelle B5-18	11
5.3 Grundwassermessstellen zur Beweissicherung Hof Ulbert	13
5.3.1 Grundwassermessstelle B1-18	13
5.3.2 Grundwassermessstelle B2-18	15
5.3.3 Grundwassermessstelle B6-18 (Zusatzmessstelle)	16
<b>6 Grundwasserstandsmessungen /-monitoring</b>	<b>18</b>
<b>7 Anlagen</b>	<b>20</b>

## 1 Vorbemerkungen

Die Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH betreibt einen Grauwackensteinbruch am Rande der Ortslage Reichshof-Nespen, in der Nähe der Wiehltalsperre. Es ist derzeit geplant, die Steinbruchfläche Richtung Westen und Südwesten um ca. 10 ha zu erweitern (siehe Anlage 1).

Im Zuge der Erstellung der hydrogeologischen Systemanalyse für das hydrogeologische Fachgutachten war das Abteufen von insgesamt sechs Bohrungen mit Bohrteufen zwischen 52 m und 99 m mit anschließendem Ausbau zu Grundwassermessstellen vorgesehen. Zur Errichtung von Grundwassermessstellen wurde bei der zuständigen Behörde eine wasserrechtliche Erlaubnis gem. §§ 8 ff. WHG beantragt, die mit Schreiben vom 30.06.2018 erteilt wurde.

Von den sechs Bohrungen wurden drei Bohrungen zur Überprüfung der Lage der Wasserscheide in Richtung Wiehltalsperre erstellt. Die Bohrungen wurden etwa entlang einer Linie quer zum Streichen der geologischen Schichten abgeteuft. Drei weitere Grundwassermessstellen westlich der geplanten Erweiterung dienten der Beweissicherung bezogen auf den Hof Ulbert und die dortige Wassergewinnung über einen Brunnen.

Im Anschluss an die Fertigstellung der Grundwassermessstellen ist geplant, diese mit automatischen Datenerfassungsgeräten zu bestücken (2“ Datenlogger, stündliche Messung von Wasserstand und Temperatur). Die Datenerfassung wird über einen Zeitraum eines Jahres erfolgen.

Folgende Bearbeitungsschritte wurden zwischenzeitlich in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber umgesetzt:

- Recherche zur Regionalgeologie/Hydrogeologie, Auswertung vorhandener Unterlagen, Kartenwerke und Bohrungen im Umfeld
- Ortstermin zur Abstimmung der Bohransatzpunkte und der erforderlichen Logistik
- Erstellung eines Leistungsverzeichnisses, inklusive Vorbemerkungen für Bohrunternehmer, Festlegung der Bohransatzpunkte, Durchführung einer beschränkten Ausschreibung, Unterbreitung eines Vergabevorschlags
- Fachbauleitung während der Bohrarbeiten, geologische Kernansprache sowie Erstellung eines Schichtenprofils je Bohrung, inkl. Fotodokumentation, Durchführung von Pumpversuchen zur Festlegung des Ausbaues der Messstellen
- Prüfung des Aufmaßes und der Rechnungsstellung des Bohrunternehmers

- Einmessen der Bohransatzpunkte im Gelände in Lage und Höhe, Zulegen der Ergebnisse in das UTM-System
- Einbau von automatischen Messgeräten zur Erfassung der Grundwasserstände in den sechs Grundwassermessstellen
- Auswertung und Darstellung der Bohrergebnisse, Erstellung eines Erkundungsberichts.

Im vorliegenden Bericht sind die erforderlichen Arbeiten zur Abteufung der Bohrungen und zum Ausbau zu 3“ Grundwassermessstellen dokumentiert. Darüber hinaus ist eine Kurzdarstellung der ermittelten Grundwasserdaten aufgeführt. Die Auswertung der Grundwasserstandmessungen über den Messzeitraum eines Jahres wird in einem separaten Bericht dokumentiert.

Der Abschlussbericht zur Errichtung von sechs Grundwassermessstellen im Rahmen der Erweiterung des Steinbruchs Jaeger, Reichshof-Nespen, wird hiermit vorgelegt.

## **2 Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet befindet sich ca. 10 km nordöstlich der Stadt Waldbröl in der Gemeinde Reichshof im Oberbergischen Kreis. Der Grauwackensteinbruch der Firma Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH grenzt unmittelbar östlich an die L 324. Die nächstgelegenen Dörfer sind Nespen, Odenspiel und Wildbergerhütte. Die Siedlung Nespen liegt ca. 500 m nördlich des Steinbruchs (siehe Anlage 1).

Die Bohrpunkte liegen westlich bzw. nördlich der geplanten Erweiterung auf unverritztem Gelände (siehe Anlage 2). Die Zufahrtswege zu den Bohrpunkten sind über öffentliche Wirtschaftswege bzw. über die Fahrwege innerhalb des Steinbruchgeländes zu erreichen.

Von den sechs Bohrungen wurden drei Bohrungen zur Überprüfung der Lage der Wasserscheide in Richtung Wiehltalsperre erstellt. Die Bohrungen wurden entlang eines nordwest-südost verlaufenden Profils in Richtung Wiehltalsperre auf unterschiedlichen Niveaus abgeteuft. Die Bohrungen zur Beweissicherung bezogen auf den Hof Ulbert und die dortige Wassergewinnung wurden östlich des Hofes Ulbert abgeteuft. Aufgrund der Ergebnisse an der Bohrung B2-18 in unmittelbarer Nähe zum Brunnen Ulbert wurde weitere Bohrung (B6-18) zwischen den Bohrungen B1-18 und B2-18 niedergebracht.

### 3 Geologisch/hydrogeologischer Überblick

Das Untersuchungsgebiet gehört naturräumlich zum Oberwiehl-Bergland, einer Untereinheit des Berglandes der oberen Agger und Wiehl. Für die Landschaft charakteristisch sind Kuppen und Höhenrücken zwischen 400 m und 430 m NHN sowie steile Nebentäler. Das Gebiet ist auf der geologischen Karte Blatt 5012 Eckenhagen im Maßstab 1:25.000 (Krefeld, 1972) dargestellt und gehört regionalgeologisch zu den nordwestlichen Ausläufern der Gerlinger Sattelgruppe. Es liegt auf dem Nordflügel des sogenannten Odenspieler Sattels, der aus unterdevonischen Gesteinsserien aufgebaut wird und spezialgefaltet ist. Die Mulden und Sättel besitzen Spannweiten zwischen ca. 50 m und 100 m. Die Odenspieler Grauwacke hat einen Quarzgehalt von rund 60 % und ist sehr abrasiv.

Das Untersuchungsgebiet wird vom Grundsatz her durch folgenden Schichtaufbau charakterisiert:

- Quartäre Deckschichten: Steiniger Hanglehm (Hangschutt)  
Mächtigkeit: ca. 0 m - 2 m
- Odenspieler Grauwacke (Oberere Siegener Schichten des Unterdevons):  
Bestehend aus einer deutlich geschichteten Wechselfolge aus hellgrauen bis braunen fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen und dunkelgrauen sandigen Siltsteinen. Eingeschaltet sind Tonsteine und tonige Siltsteine unterschiedlicher Mächtigkeit.  
Mächtigkeit der Abfolge: ca. 80 m -100 m
- Frohenberger Tonschiefer (Oberere Siegener Schichten des Unterdevons):  
Im unteren Teil der Odenspieler Grauwacke können die Schichten aus siltigen Tonschiefern mit dünnen Sandsteinbänken bestehen.

Das Grundwasser zirkuliert im Bereich des Untersuchungsgebiets vor allem auf Trennfugen (Klüfte, Schichtflächen), die besonders gut in den Sandsteinen und sandigen Siltsteinen der Odenspieler Grauwacke ausgeprägt sind. Im Vorfeld der Bohrarbeiten wurde gemäß den Angaben in den vorliegenden Gutachten (u.a. FÜLLING, 1994) von einer Höhenlage der Grundwasseroberfläche von ca. 310 m NHN - 320 m NHN nordwestlich des Steinbruchs Richtung Wiehltalsperre ausgegangen.

Nach Maßgabe der Höhenlage der Quelle am Hof Ulbert wurde davon ausgegangen, dass die Grundwasseroberfläche nach Süden deutlich ansteigt, so dass zwischen Steinbruch und Hof Ulbert ebenfalls von einer Wasserscheide auszugehen ist.

#### **4 Bohr- und Ausbaurbeiten**

Ziel der Bearbeitung war es, in beiden vorgenannten Bereichen - Lage der Wasserscheide in Richtung Wiehltalsperre bzw. Beweissicherung Hof Ulbert - die Höhenlage der Grundwasseroberfläche des Kluftgrundwasserleiters der Odenspieler Grauwacke sicher zu ermitteln und eine Erfassung der Grundwasserstandsdaten über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr durchzuführen.

Die Bohransatzpunkte wurden dabei so gewählt, dass auch im Zuge eines späteren Abbaus in der Erweiterungsfläche eine Überwachung der Grundwasserverhältnisse in den einzelnen Messstellen möglich ist, diese dem Abbau also nicht zum Opfer fallen. Die Zuwegung zu den Bohrpunkten erfolgte über die südlich gelegene Ortschaft Odenspiel. Die Tiefe der Bohrungen wurde dahingehend ausgelegt, dass eine ausreichend lange Filterstrecke in der Odenspieler Grauwacke gegeben ist.

Die Bohrungen wurden nach Abschluss des Vergabeverfahrens von der Fa. BOG Bohr- und Umwelttechnik GmbH durchgeführt. Das Bohrprogramm wurde mit der Bohrung B1-18 auf einer Höhe von ca. 410 m NHN begonnen und mit der Bohrung B6-18 südwestlich des Tagebaues auf einer Höhe von ca. 411 m NHN abgeschlossen.

Für die Ausführung der Arbeiten wurde ein Kettenbohrgerät eingesetzt, das in der Örtlichkeit ausreichend flexibel umsetzbar war. Als Bohrverfahren wurde das Seilkernbohrverfahren mit einem Bohrdurchmesser von 146 mm und einem Kerndurchmesser von 102 mm ausgewählt. Für den Verwitterungshorizont der Odenspieler Grauwacke wurde ein Standrohr als Hilfsverrohrung verwendet. Der Einbau einer zusätzlichen Hilfsverrohrung war aufgrund der Standfestigkeit des Gebirges nicht erforderlich.

Ursprünglich war vorgesehen, die Bohrungen im Hammerbohrverfahren mit Luftspülung im Durchmesser 178 mm auszuführen. Im Zuge der Erstellung der ersten Bohrung wurde jedoch schnell deutlich, dass in dieser heterogenen Gesteinsformation mit diesem Verfahren kein ausreichender Bohrfortschritt erzielt werden konnte, so dass nach Abstimmung mit dem Bohrunternehmen auf Seilkernbohrverfahren umgestellt wurde. Mit diesem Verfahren konnte anschließend ein ausreichender Bohrfortschritt erzielt werden.

Nach Fertigstellung der Bohrungen wurden die Bohrungen jeweils zu 3“ Grundwassermessstellen ausgebaut. Der Ausbau erfolgte in PVC-normalwandig, einschließlich Ringraumverfüllung mit Filterkies und Gegenfilter. Die Messstellen wurden als Überflur- bzw. als Unterflurmessstellen ausgebaut. Die Unterflurmessstellen wurden mit einer tagwassergeschützten Straßenkappe versehen. Die Überflurmessstellen wurden mit einem Stahlstülprohr nebst Betonsockel und Anfahrerschutz versehen. Zur Herstellung des hydraulischen Anschlusses zum umgebenden Gebirge und zum Zwecke der Entsandung wurden die Messstellen klargepumpt.

Die Bohrkern wurden im Anschluss geologisch aufgenommen und fototechnisch dokumentiert. Die Kerne wurden arbeitstäglich in ein Kernlager am Standort transportiert. Dort erfolgten die weitere geologische Ansprache sowie die Fotodokumentation.

Nach Fertigstellung wurden die Bohrungen in Lage und Höhe entsprechend eingemessen. In der Tabelle 1 sind die Koordinaten und Bohransatzhöhen aufgelistet. In den Anlagen 2 und 3 sind die Ansatzpunkte lagemäßig und im Gelände dargestellt.

**Tabelle 1:** Bohrprogramm 2018/19 – Zielvorgaben, Koordinaten, Bohrtiefen

Bohrung	Zielvorgaben	Ost-Wert	Nord-Wert	Bohrteufe	Ansatzhöhe GOK in m NHN
B1-18	Beweissicherung Brunnen Hof Ulbert	410297	5643359	99,50 m	409,58 m
B2-18	Beweissicherung Brunnen Hof Ulbert	410065	5643335	76,00 m	405,97 m
B3-18	Ermittlung Lage Wasserscheide	410247	5643908	90,00 m	382,66 m
B4-18	Ermittlung Lage Wasserscheide	410196	5643960	73,00 m	366,22 m
B5-18	Ermittlung Lage Wasserscheide	410124	5644073	50,00 m	338,21 m
B6-18	Beweissicherung Brunnen Hof Ulbert	410313	5643898	50,00 m	410,99 m

## 5 Errichtung der Grundwassermessstellen

### 5.1 Vorbemerkungen

Im Zuge der Erstellung der Bohrungen für die Errichtung der Grundwassermessstellen wurde aufgrund des geringen Bohrfortschrittes das Bohrverfahren kurzfristig vom geplanten Hammerbohrverfahren mit Luftspülung auf ein Seilkernbohrverfahren mit Was-

serspülung umgestellt. Das Seilkernbohrverfahren hat in dem vorgefundenen Baugrund den Vorteil, dass sich durch das eingesetzte Doppelkernrohr stets eine Verrohrung im Bohrloch befindet. Dies führt dazu, dass das Bohrloch stabil gehalten werden kann. Der Nachteil des Verfahrens liegt in der eingesetzten Wasserspülung, die eine tiefenscharfe Zuordnung zu potenziellen Grundwasserzutritten deutlich erschwert. Diese Zuordnung war aber entscheidend für die Festlegung der Bohrtiefe und des Filterausbaues.

Zur Festlegung des Ausbaues der Bohrung wurden daher Wiederanstiegsmessungen im offenen Bohrloch durchgeführt. Hierzu wurde das im Bohrloch befindliche Wasser mittels Kompressor - soweit technisch möglich - ausgeblasen und dann der Wiederanstieg über einen Zeitraum von rund 20 Stunden gemessen. Anhand der dabei ermittelten Ergebnisse wurde festgelegt, ob die Bohrung eingestellt und zur Grundwassermessstelle ausgebaut wird oder ob die Bohrung noch weiter vertieft werden muss. Die Ergebnisse der Versuche sind im nachfolgenden Kap. 5.3 bohrungsweise dokumentiert.

In der Anlage 3 sind die Bohrprofile und die Ausbauzeichnungen der Grundwassermessstellen dokumentiert. In der Anlage 4 ist eine Fotodokumentation der Bohrkerns und in Anlage 5 eine Fotodokumentation der Abschlussbegebung an der Grundwassermessstellen hinterlegt.

## **5.2 Grundwassermessstellen Richtung Wiehltalsperre**

### **5.2.1 Grundwassermessstelle B3-18**

Die Bohrung für die Grundwassermessstelle **B3-18**, die am nordwestlichen Tagbau- rand gelegen ist, wurde bis 90,00 m u. GOK mit einem Bohrdurchmesser von 146 mm abgeteuft.

#### Schichtansprache:

In der Bohrung B3-18 konnten bohrtechnisch bedingt bis 6,00 m u. GOK keine Bohrkerns gezogen werden. Von 6,00 m u. GOK bis 7,80 m u. GOK folgt ein hellbrauner verwitterter Fein- bis Mittelsandstein. Danach wird bis 37,00 m u. GOK eine Wechsel- folge aus Sandsteinen und Siltsteinen angetroffen. Der Fein- bis Mittelsandstein wird von 7,80 m bis 8,60 m u. GOK, von 9,50 m bis 12,30 m u. GOK sowie von 15,30 m bis

21,00 m u. GOK von einem Siltstein abgelöst wird, der im oberen und unteren Paket tonig ausgebildet ist. Bis 37,00 m u. GOK ist der Feinsandstein siltig ausgeprägt mit vereinzelt tonigen Zwischenlagen im cm-Bereich. Es folgt bis 39,30 m u. GOK ein Tonstein, abgelöst von einem tonigen Siltstein bis 53,50 m u. GOK. Die Bohrung durchteuft bis 75,10 m u. GOK einen sehr harten Feinsandstein, der von einer dünnen Tonsteinlage von 68,50 m bis 68,80 m u. GOK unterbrochen wird. Im Liegenden folgt Tonstein bis 76,30 m u. GOK sowie siltiger, brekziös verwachsener Feinsandstein bis 77,40 m u. GOK. Die Bohrung schließt mit einer Wechselfolge aus Siltsteinen mit eingeschalteten Tonsteinen bis zur Endteufe von 90,00 m u. GOK.

#### Pumpversuch im offenen Bohrloch:

Der Pumpversuch an der Bohrung B3-18 fand am 11.07.2018 statt. Der Wiederanstieg wurde nach Ausblasen des Bohrlochs mittels Kompressor von 11.00 Uhr bis 20.00 Uhr gemessen. Am 12.07.2018 wurde um 08.00 Uhr eine Kontrollmessung durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die Ergebnisse des Pumpversuches dargestellt. Anhand der Darstellung wird ersichtlich, dass es sich aufgrund des sehr typischen Kurvenverlaufs im Rahmen des Wiederanstieges um zulaufendes Grundwasser im Bohrloch handelt. Der Wasserspiegel hat sich nach ca. 4 Stunden auf ein Niveau von ca. 72,50 m u. GOK m eingependelt und diesen bis zum nächsten Tag quasi gehalten. Die Bohrarbeiten wurden bei 90,00 m u GOK eingestellt und die Bohrung zur Grundwassermessstelle ausgebaut.

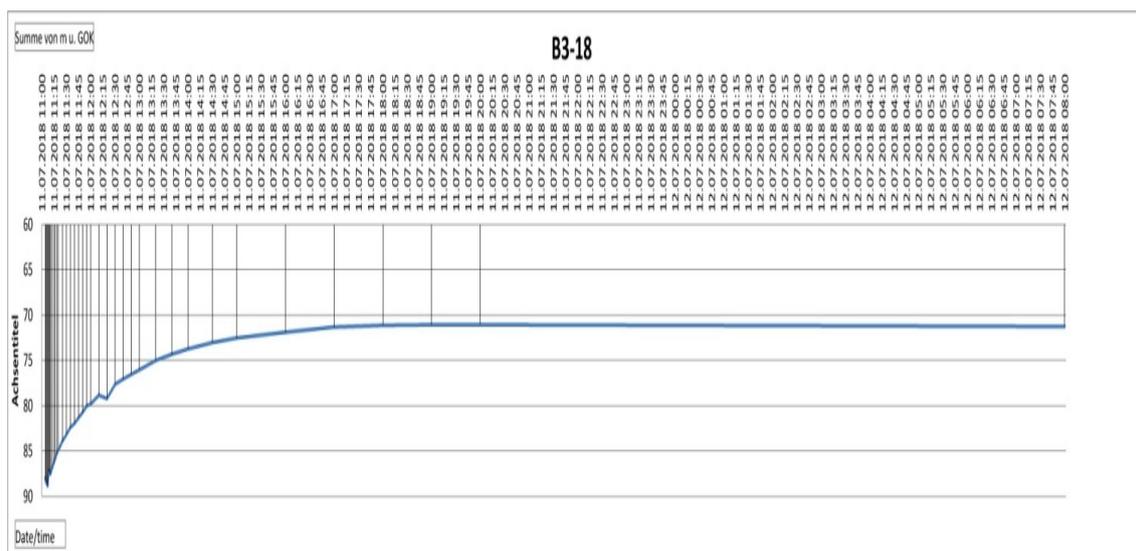


Abbildung 1: Auswertung Pumpversuch an Bohrung B3-18

#### Ausbau zur Grundwassermessstelle:

Die Bohrung wurde mit einem PVC-Filterrohr DN 80 (sw 1,0 mm) von 78,00 m u. GOK bis 90,00 m u. GOK ausgestattet.

Die Vollrohrstecke wurde aus PVC-DN 80 bis 0,00 m u. GOK ausgeführt. Die Kies-schüttung in der Körnung 2,00-3,15 mm wurde von 90,00 m u. GOK bis 73,00 m u GOK eingebracht. Darüber folgt bis 71,00 m u. GOK ein Gegenfilter in der Körnung 0,75 bis 1,25 mm. Die Tonsperre wurde anschließend bis 0,50 m u. GOK eingebracht. Die Grundwassermessstelle wurde als Überflurmessstelle fertiggestellt.

#### **5.2.2 Grundwassermessstelle B4-18**

Die Bohrung für die **Grundwassermessstelle B4-18** nordwestlich der Bohrung B3-18 gelegen, wurde bis 73,00 m u. GOK mit einem Bohrdurchmesser von 146 mm abgeteuft.

#### Schichtansprache:

Die Bohrung B4-18 weist im oberen Teil neben feinsandigem schluffigem Mutterboden bis 0,30 m u. GOK und schluffig steinigem Hanglehm bis 4,00 m u. GOK einen Siltstein bis 9,50 m u. GOK auf, der teilweise brekziös mit Tonstein/Sandstein verwachsen ist,. Es folgt bis zur Endteufe von 73,00 m u. GOK eine Wechsellagerung aus Feinsandstein und siltigem Tonstein, wobei das Feinsandsteinvorkommen von 24,10 m bis 45,90 m vereinzelt Quarzfällungen auf den Klufflächen aufweist. Im unteren Bereich der Bohrung hat der Feinsandstein selten Tonsteineinlagerungen, jedoch Quarz auf den Klufflächen und ist teilweise brekziös mit Siltstein verwachsen.

#### Pumpversuch im offenen Bohrloch:

Der Pumpversuch an der Bohrung B4-18 fand am 01.08.2018 statt. Der Wiederanstieg wurde nach Ausblasen des Bohrlochs von 12.00 Uhr bis 20.00 Uhr gemessen. Am 02.08.2018 wurde um 07.30 Uhr eine Kontrollmessung durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 2 sind die Ergebnisse des Pumpversuches dargestellt.

Analog zu den Ergebnissen an der Bohrung B4-18 wird ersichtlich, dass es sich aufgrund des sehr typischen Kurvenverlaufs im Rahmen des Wiederanstieges um zulau-

fendes Grundwasser im Bohrloch handelt. Der Wasserspiegel hat sich nach bereits ca. ca. 3 Stunden auf ein Niveau von ca. 37,00 m u. GOK m eingependelt und diesen bis zum nächsten Tag quasi gehalten.

Die Bohrarbeiten wurden bei 73,00 m u GOK eingestellt und die Bohrung zur Grundwassermessstelle ausgebaut.

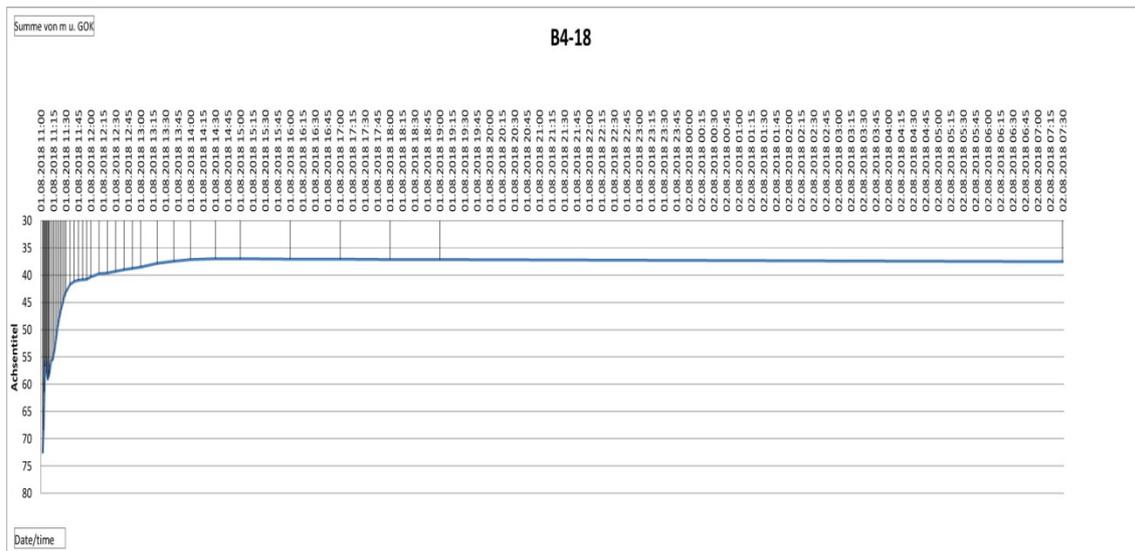


Abbildung 2: Auswertung Pumpversuch an Bohrung B4-18

#### Ausbau zur Grundwassermessstelle:

Die Bohrung wurde mit einem PVC-Filterrohr DN 80 (sw 1,0 mm) von 53,00 m u. GOK bis 73,00 m u. GOK ausgestattet. Die Vollrohrstecke wurde aus PVC-DN 80 bis 0,00 m u. GOK ausgeführt. Die Kiesschüttung in der Körnung 2,00-3,15 mm wurde von 73,00 m bis 51,00 m u. GOK eingebracht. Darüber folgt bis 49,00 m u. GOK ein Gegenfilter in der Körnung 0,75 bis 1,25 mm. Die Tonsperre wurde anschließend bis 0,50 m u. GOK eingebracht. Die Grundwassermessstelle wurde als Unterflurmessstelle fertiggestellt.

### 5.2.3 Grundwassermessstelle B5-18

Die Bohrung für die **Grundwassermessstelle B5-18**, nordwestlich der Bohrung B4-18 gelegen, wurde bis 50,00 m u. GOK mit einem Bohrdurchmesser von 146 mm abgeteuft.

### Schichtansprache:

Die Bohrung B5-18 beginnt ebenso mit feinsandigem tonigem schluffigem Mutterboden bis 0,50 m u. GOK und schluffigem steinigem Hanglehm bis 4,00 m u. GOK. Es folgt eine Wechsellagerung aus Feinsandstein teils mit tonig, siltigen Einschaltungen, teils brekziös und oft mit Quarzfällungen im Wechsel mit Siltstein und Tonstein. Bis 14,00 m u. GOK liegt siltig toniger Feinsandstein vor, teilweise brekziös und stark verwittert. Er wird abgelöst von Siltstein mit vereinzelt Einschaltungen von Tonstein und Feinsandstein, teilweise brekziös verwachsen und mit Quarzfällungen bis 22,10 m u. GOK. Danach durchteuft die Bohrung bis 23,90 m u. GOK brekziös verwachsenen Feinsandstein mit Quarzfällungen und bis 31,00 m u. GOK Siltstein mit tonigen Einschaltungen. Neben Sandstein, Siltstein und Tonstein bis 32,00 m u. GOK wird bis 35,70 m u. GOK siltiger Tonstein erbohrt. Bis zur Endteufe wechseln sich Feinsandstein und Siltstein ab, gefolgt von Tonstein von 49,50 m bis 50,00 m u. GOK.

### Pumpversuch im offenen Bohrloch:

Der Pumpversuch an der Bohrung B5-18 fand am 15.08.2018 statt. Der Wiederanstieg wurde nach Ausblasen des Bohrlochs von 10.00 Uhr bis 19.00 Uhr gemessen. Am 16.08.2018 wurde um 07.30 Uhr eine Kontrollmessung durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 3 sind die Ergebnisse des Pumpversuches dargestellt.

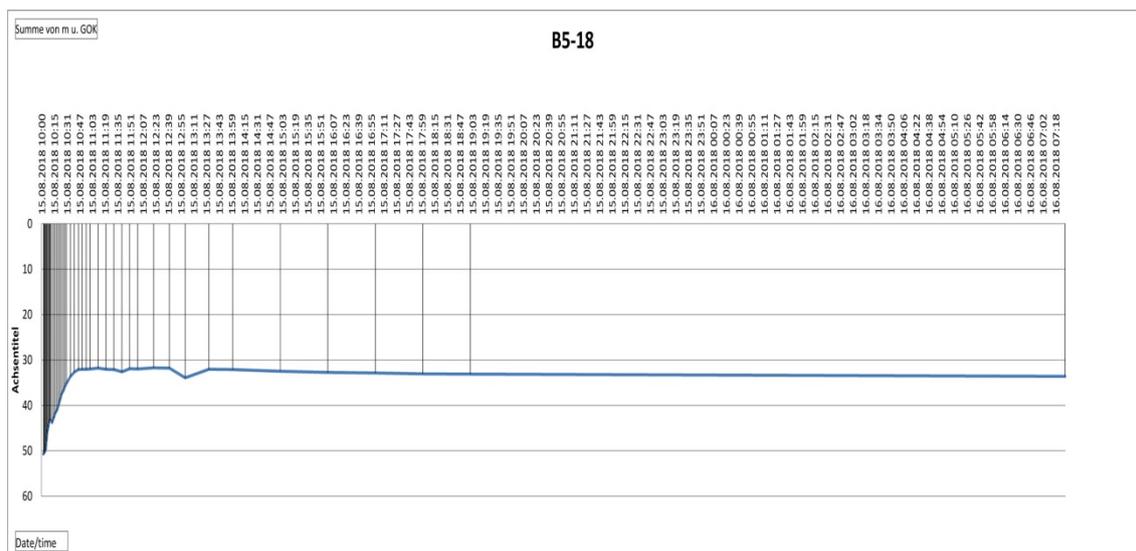


Abbildung 3: Auswertung Pumpversuch an Bohrung B5-18

Der Pumpversuchsverlauf in Abbildung 3 an der Bohrung B5-18 ist ebenfalls vergleichbar mit den vorhergehenden Versuchen, wenngleich nach einer Stunde ein kurzzeitiges Absinken des Wasserspiegels um rd. einen Meter zu verzeichnen war. Nach Abschluss des Versuches konnte jedoch davon ausgegangen werden, dass es sich um zulaufendes Grundwasser im Bohrloch handelt. Der Wasserspiegel pendelte sich nach ca. 6 Stunden auf ein Niveau von ca. 33,00 u. GOK m ein und hielt diesen Wasserstand quasi bis zum nächsten Tag.

Die Bohrarbeiten wurden bei 50,00 m u. GOK eingestellt und die Bohrung zur Grundwassermessstelle ausgebaut.

#### Ausbau zur Grundwassermessstelle:

Die Bohrung wurde mit einem PVC-Filterrohr DN 80 (sw 1,0 mm) von 35,00 m u. GOK bis 50,00 m u. GOK ausgestattet. Die Vollrohrstecke wurde aus PVC-DN 80 bis 0,00 m u. GOK ausgeführt.

Die Kiesschüttung in der Körnung 2,0-3,15 mm wurde von 50,00 m u. GOK bis 33,00 m u. GOK eingebracht. Darüber folgt bis 31,00 m u. GOK ein Gegenfilter in der Körnung 0,75 bis 1,25 mm. Die Tonsperre wurde anschließend bis 0,50 m u. GOK eingebracht. Die Grundwassermessstelle wurde als Überflurmessstelle fertiggestellt.

### **5.3 Grundwassermessstellen zur Beweissicherung Hof Ulbert**

#### **5.3.1 Grundwassermessstelle B1-18**

Die Bohrung für die **Grundwassermessstelle B1-18**, südlich des Tagebaues gelegen, wurde im Seilkernbohrverfahren bis 99,50 m u. GOK mit einem Bohrdurchmesser von 146 mm abgeteuft.

#### Schichtansprache:

In der Bohrung wurde bis 0,30 m u. GOK zunächst feinsandig, schluffiger Mutterboden, gefolgt von steinigem Hanglehm bis 2,50 m u. GOK erbohrt. Darunter liegt bis 5,80 m u. GOK ein Siltstein mit tonigen Zwischenlagen und sekundären Quarzitäfüllungen auf den Schichtgrenzen. Im Anschluss daran wurde ein Feinsandstein erbohrt, der sich bis 8,00 m u. GOK hinzieht und von einem Siltstein, der teilweise brekziös mit Sand- und Tonsteinen verwachsen ist, abgelöst wird. Dieser ist bis 11,90 m u. GOK zu verfolgen.

Er geht in einen Feinsandstein mit vereinzelt tonigen Zwischenlagen über, der bis 21,00 m u. GOK vorliegt. Nach einer dünnen Schicht bis 21,70 m u. GOK aus brekziösem Siltstein, der mit Tonstein verwachsen ist, wechselt die Abfolge zu Tonstein, vereinzelt mit Sandsteinlagen bis 36,00 m u. GOK. Es folgt bis 39,10 m u. GOK ein Tonstein, brekziös mit Siltsteinen verwachsen. In dessen Liegendem befindet sich ein Siltstein mit vereinzelt tonigen Zwischenlagen, der sich bis 72,00 m u. GOK hinzieht. Die Bohrung schließt mit Feinsandstein mit sehr vereinzelt tonigen Lagen und teilweise Quarzfüllungen auf den Schichtflächen bei 99,50 m u. GOK.

#### Pumpversuch im offenen Bohrloch:

Der Pumpversuch an der Bohrung B1-18 fand am 04.09.2018 statt. Der Wiederanstieg wurde nach Ausblasen des Bohrlochs von 12.00 Uhr bis 20.00 Uhr gemessen. Am 05.09.2019 wurde um 07.10 Uhr eine Kontrollmessung durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 4 sind die Ergebnisse des Pumpversuches dargestellt.

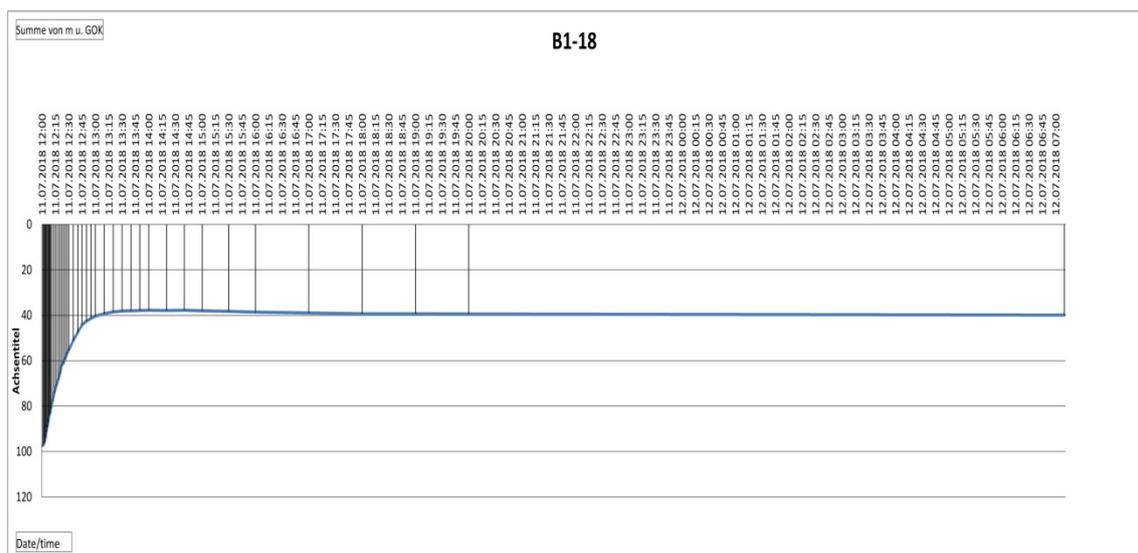


Abbildung 4: Auswertung Pumpversuch an Bohrung B1-18

Die Abbildung 4 zeigt im Rahmen des Wiederanstieges analog zu den vorherigen Bohrungen den sehr typischen Kurvenverlauf. Der Wasserspiegel hat sich nach ca. 2 Stunden auf ein Niveau von ca. 38,00 m u. GOK m eingependelt und diesen bis zum nächsten Tag quasi gehalten. Die Bohrarbeiten wurden bei 99,50 m u GOK eingestellt und die Bohrung zur Grundwassermessstelle ausgebaut.

#### Ausbau zur Grundwassermessstelle:

Die Bohrung B1-18 wurde und mit einem PVC-Filterrohr DN 80 (sw 1,0 mm) von 79,50 m bis 99,50 m u. GOK ausgebaut. Die Vollrohrstecke wurde aus PVC-DN 80 bis 1,00 m über GOK ausgeführt. Die Kiesschüttung in der Körnung 2,0-3,15 mm wurde von 99,50 m bis 75,00 m u. GOK eingebracht. Darüber folgt bis 73,00 m u. GOK ein Gegenfilter in der Körnung 0,75 bis 1,25 mm. Die Tonsperre wurde bis 0,50 m u. GOK eingebracht. Die Grundwassermessstelle wurde als Überflurmessstelle fertiggestellt.

#### **5.3.2 Grundwassermessstelle B2-18**

Die Bohrung für die Grundwassermessstelle **B2-18** in Richtung Hof Ulbert gelegen, wurde ebenfalls im Seilkernbohrverfahren bis 76,00 m u. GOK mit einem Bohrdurchmesser von 146 mm abgeteuft.

#### Schichtansprache:

Die Bohrung beginnt mit schluffig feinsandigem Mutterboden bis 0,40 m u. GOK und steinigem Hanglemm bis 4,80 m u. GOK. Ein schluffiger stark verwachsener Tonstein schließt sich an bis 7,40 m u. GOK. Es folgen bis 18,70 m u. GOK ein Feinsandstein mit tonigen und siltigen Zwischenlagen und bis 26,40 m u. GOK Tonstein. Danach wird bis 29,00 m u. GOK Siltstein erbohrt, gefolgt von Tonstein mit siltigen Zwischenlagen bis 39,30 m u. GOK. Bis 46,60 m u. GOK schließt sich Siltstein an, ab 40,60 m u. GOK vereinzelt mit Sandsteinzwischenlagen. Im Liegenden folgen Tonsteine bis 47,00 m u. GOK sowie Feinsandsteine mit tonigen Zwischenlagen bis 51,30 m u. GOK. Bis 60,80 u. GOK gehen diese in einen Tonstein mit Einschaltungen von Feinsandstein über. Im unteren Bereich der Bohrung findet sich zumeist Feinsandstein, von einer Lage aus Siltstein von 68,40 m bis 69,40 m u. GOK unterbrochen. Das Sandsteinpaket im oberen Teil enthält Tonsteinzwischenlagen, das im unteren Paket Tonschieferlagen.

#### Pumpversuch im offenen Bohrloch:

Der Pumpversuch an der Bohrung B2-18 fand am 24.09.2018 statt. Der Wiederanstieg wurde nach Ausblasen des Bohrlochs von 16.00 Uhr bis 22.00 Uhr gemessen. Am 25.09.2018 wurde um 07.30 Uhr eine Kontrollmessung durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 5 sind die Ergebnisse des Pumpversuches dargestellt.

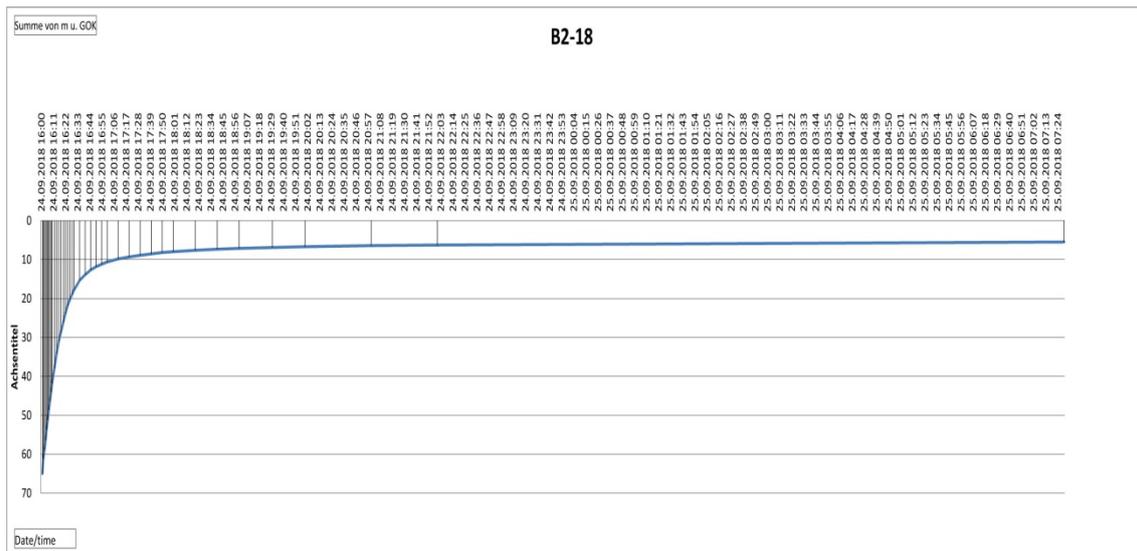


Abbildung 5: Auswertung Pumpversuch an Bohrung B2-18

Die Abbildung 5 zeigt im Rahmen des Wiederanstieges analog zu den vorherigen Bohrungen den sehr typischen Kurvenverlaufs. Der Wasserspiegel hat sich nach ca. 2 Stunden auf ein Niveau von ca. 38,00 m u. GOK m eingependelt und diesen bis zum nächsten Tag quasi gehalten. Die Bohrarbeiten wurden bei 99,50 m u. GOK eingestellt und die Bohrung zur Grundwassermessstelle ausgebaut.

#### Ausbau zur Grundwassermessstelle:

Die Bohrung wurde mit einem PVC-Filterrohr DN 80 (sw 1,0 mm) von 56,00 m u. GOK bis 76,00 m u. GOK ausgestattet. Die Vollrohrstecke wurde aus PVC-DN 80 bis 0,00 m u. GOK ausgeführt.

Die Kiesschüttung in der Körnung 2,0-3,15 mm wurde von 76,50 m u. GOK bis 54,00 m u GOK eingebracht. Darüber folgt bis 52,00 m u. GOK ein Gegenfilter in der Körnung 0,75 bis 1,25 mm. Die Tonsperre wurde anschließend bis 0,50 m u. GOK eingebracht. Die Grundwassermessstelle wurde als Unterflurmessstelle fertiggestellt.

### 5.3.3 Grundwassermessstelle B6-18 (Zusatzmessstelle)

Aufgrund der sehr hohen Wasserstände in der Grundwassermessstelle B2-18 wurde eine Zusatzmessstelle erforderlich. Diese wurde lagemäßig zwischen den Bohrungen

B1-18 und B2-18 errichtet. Die Grundwassermessstelle **B6-18** wurde anschließend bis 61,00 m u. GOK mit einem Bohrdurchmesser von 146 mm abgeteuft.

#### Schichtansprache:

In der Bohrung **B6-18** tritt neben schluffigem feinsandigem Mutterboden bis 0,40 m u. GOK und steinigem schluffigem Hanglehm bis 5,10 m u. GOK eine Wechsellagerung aus Feinsandstein, Tonstein und Siltstein auf. Bis 17,80 m u. GOK wird siltiger stark verwitterter Feinsandstein erbohrt, der von siltigem Tonstein bis 25,00 m u. GOK abgelöst wird. Es folgt Feinsandstein bis 26,20 m u. GOK. Bis 39,60 m u. GOK liegt Siltstein mit Einschaltungen von Tonstein vor. Im Liegenden durchteuft die Bohrung bis 47,90 m u. GOK Tonstein, der brekziös mit Siltstein verwachsen ist. Bis zur Endteufe folgen sekundär verwitterter Feinsandstein, untergeordnet mit Tonsteineinlagerungen im dm-Bereich vereinzelt brekziös, mit Quarzadern und Siltstein mit tonigen Einschaltungen.

#### Pumpversuch im offenen Bohrloch:

Der Pumpversuch an der Bohrung B6-18 fand am 16.10.2018 statt. Der Wiederanstieg wurde nach Ausblasen des Bohrlochs von 10.00 Uhr bis 20.00 Uhr gemessen. Am 17.09.2018 wurde um 08.00 Uhr eine Kontrollmessung durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 6 sind die Ergebnisse des Pumpversuches dargestellt.

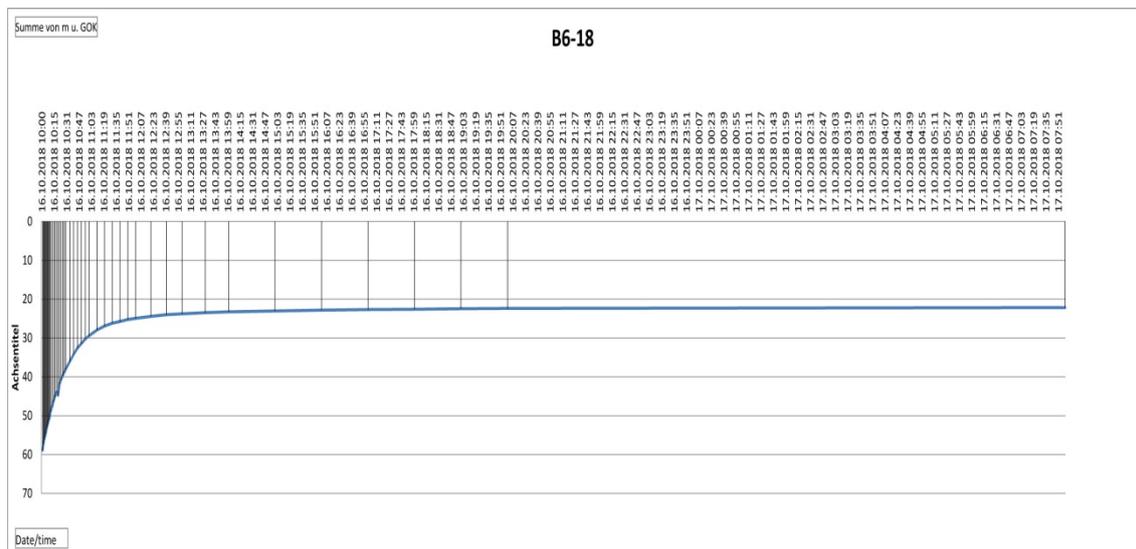


Abbildung 6: Auswertung Pumpversuch an Bohrung B6-18

Die Ergebnisse des Pumpversuches lieferten vergleichbare Daten zum Wiederanstieg, so dass die Bohrung nach Abschluss der Arbeiten zur Grundwassermessstelle ausgebaut wurde. Der Grundwasserspiegel pendelte sich nach ca. 4 h auf 23,00 m u. GOK ein. Im Zuge der Kontrollmessung lag der Wasserspiegel auf einem Niveau von rd. 22,00 m u. GOK.

#### Ausbau zur Grundwassermessstelle:

Die Bohrung wurde mit einem PVC-Filterrohr DN 80 (sw 1,0 mm) von 40,00 m u. GOK bis 60,00 m u. GOK ausgestattet. Die Vollrohrstecke wurde aus PVC-DN 80 bis 0,20 m u. GOK ausgeführt. Die Kiesschüttung in der Körnung 2,0-3,15 mm wurde von 60,00 m bis 38,00 m u. GOK eingebracht. Darüber folgt bis 36,00 m u. GOK ein Gegenfilter in der Körnung 0,75 bis 1,25 mm. Die Tonsperre wurde anschließend bis 0,50 m u. GOK eingebracht. Die Grundwassermessstelle wurde als Unterflurmessstelle fertiggestellt.

## 6 Grundwasserstandsmessungen /–monitoring

Die Überwachung der neu errichteten Grundwassermessstellen im Bereich des Grauwackensteinbruchs der Fa. Jaeger erfolgt durch den Einsatz von automatischen Datenerfassungsgeräten (Datenloggern). Bei den Datenloggern handelt es sich um den Datensammler vom Typ 575 II kompakt der Fa. Hydrotechnik, der für das Messen von Wasserstand und Temperatur in Grundwassermessstellen geeignet sind. In der nachfolgenden Abbildung 7 ist das Messgerät dargestellt. Die Messung erfolgt stündlich. Die Daten werden monatlich ausgelesen.

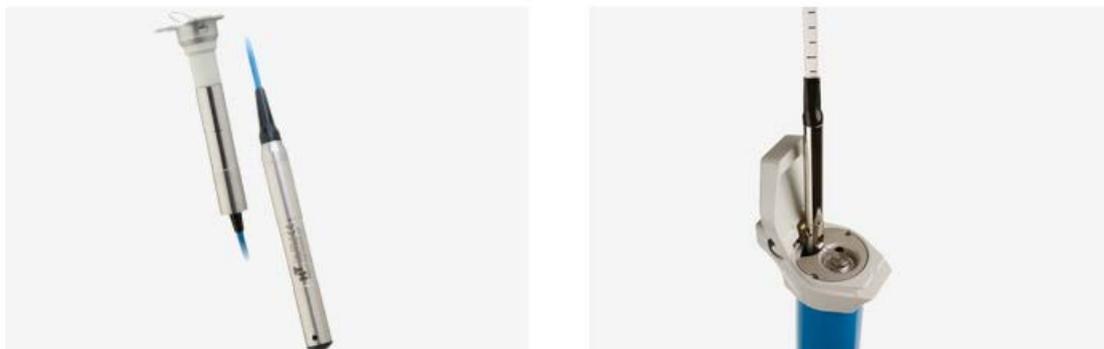


Abbildung 7: Datenlogger vom Typ 575 II, Messung von Wasserstand und Temperatur

Die Datenlogger wurden nach Abschluss der Bohrarbeiten am 20.12.2018 in die Messstellen eingebaut. Im Zuge des Einbaues wurden die Wasserstände an den Grundwassermessstellen ermittelt. In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Grundwasserstandsmessungen im Zuge des Einbaues der Datenlogger dokumentiert.

Tabelle 2: Ergebnisse der Grundwasserstandsmessungen vom 20.12.2018

<b>Bohrung</b>	<b>Zielvorgaben</b>	<b>Bohrteufe</b>	<b>Höhe DL in NHN</b>	<b>GW Messung in m NHN</b>
B1-18	Beweissicherung Brunnen Hof Ulbert	99,50 m	410,61 m NHN	345,00
B2-18	Beweissicherung Brunnen Hof Ulbert	76,00 m	405,83 m NHN	402,00
<b>B3-18</b>	<b>Ermittlung Lage Wasserscheide</b>	<b>90,00 m</b>	<b>381,65 m NHN</b>	<b>300,32</b>
<b>B4-18</b>	<b>Ermittlung Lage Wasserscheide</b>	<b>73,00 m</b>	<b>366,12 m NHN</b>	<b>320,60</b>
<b>B5-18</b>	<b>Ermittlung Lage Wasserscheide</b>	<b>50,00 m</b>	<b>338,12 m NHN</b>	<b>304,03</b>
B6-18	Beweissicherung Brunnen Hof Ulbert	50,00 m	410,86 m NHN	388,00

Im Hinblick auf die Überprüfung der **Lage der Wasserscheide in Richtung Wiehltalsperre** kann anhand der Daten in Tabelle 2 festgehalten werden, dass die Wasserstände an den Messstellen B3-18 bis B5-18, die etwa entlang einer Linie quer zum Streichen der geologischen Schichten abgeteuft wurden, auf eine Wasserscheide in Richtung Wiehltalsperre hindeuten.

Die Wasserstände in der mittleren Bohrung B4-18 liegen bezogen auf m NHN ca. 15-20 m höher als die Wasserstände an den beiden äußeren Messstellen des Profils.

## **7 Anlagen**

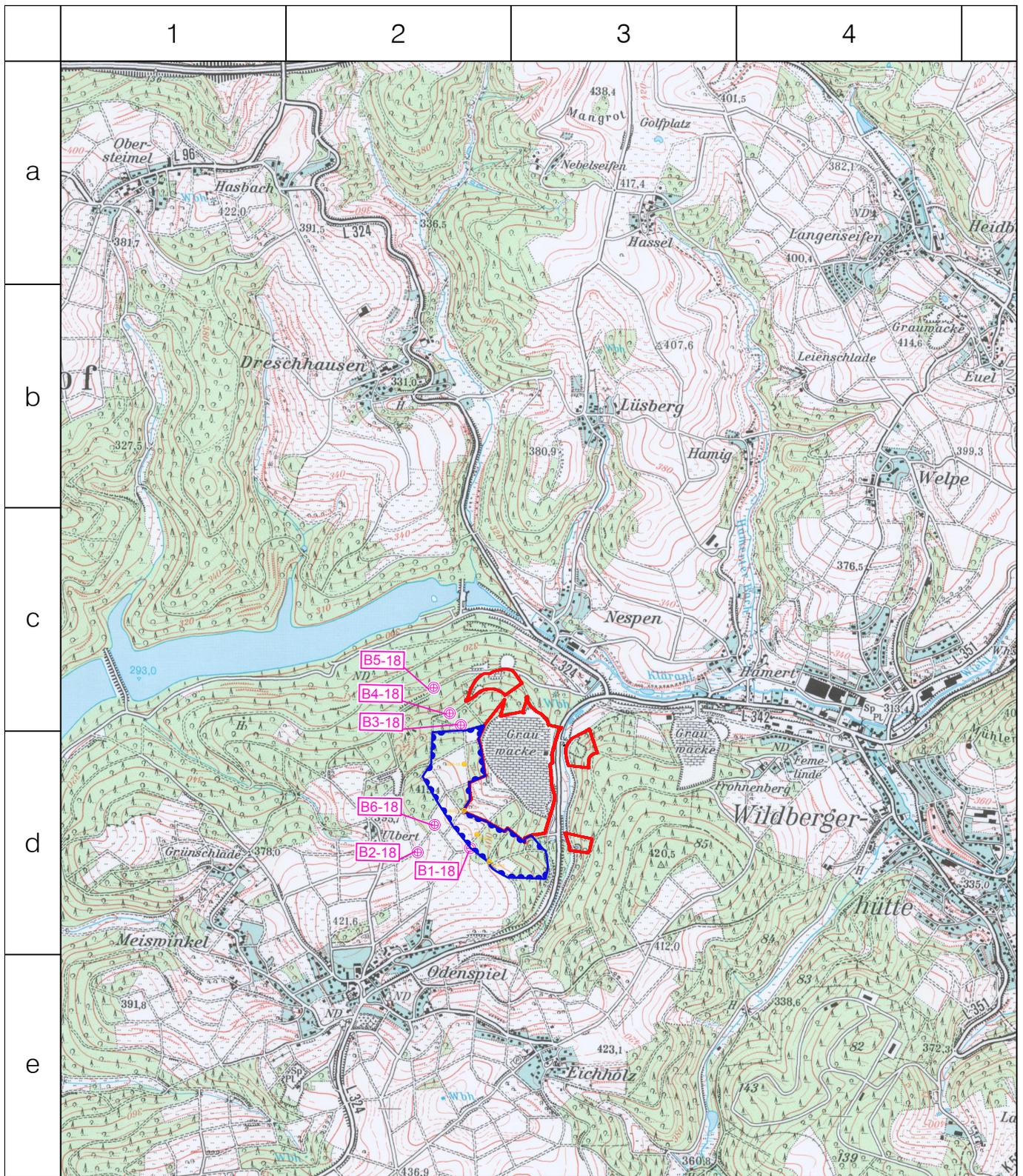
*Anlage 1: Übersichtskarte im Maßstab 1: 25.000*

*Anlage 2: Bohransatzpunkte im Maßstab 1: 5.000*

*Anlage 3: Bohrprofile und Ausbauzeichnungen der Grundwassermessstellen B1-18 bis B6-18 im Maßstab 1:250 bis 1:500*

*Anlage 4: Fotodokumentation der Bohrkerne*

*Anlage 5: Fotodokumentation Abschlussbegehung - Grundwassermessstellen*



- heutiger Tagebaubereich
- geplante Erweiterung 2018
- B1-18 Grundwassermessstellen 2018



Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner  
Ingenieurgesellschaft mbH

52068 Aachen, Charlottenburger Allee 39  
Tel.: +49 241 / 16000-0  
Fax: +49 241 / 16000-16  
Web: www.sst-consult.de  
eMail: info@sst-consult.de

Datum: 29.07.2019  
Index: 01  
Projektnr.: 1723608  
Maßstab: 1:25.000

Datei-Code : Jaeger\_reichshof\_201802  
Layout : Topo Übersicht

gez.:  
Karakus, C.  
+49 241 / 16000-17  
gepr.:  
Dipl.-Geol. D. Quante  
+49 241 / 16000-12

Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH  
Grauwackesteinbruch Jaeger in Reichshof  
Bohrprogramm 2018  
Steinbruch Jaeger/Reichshof-Nespen

## Übersichtskarte

Anlage 1

### Legende

#### Böschungen

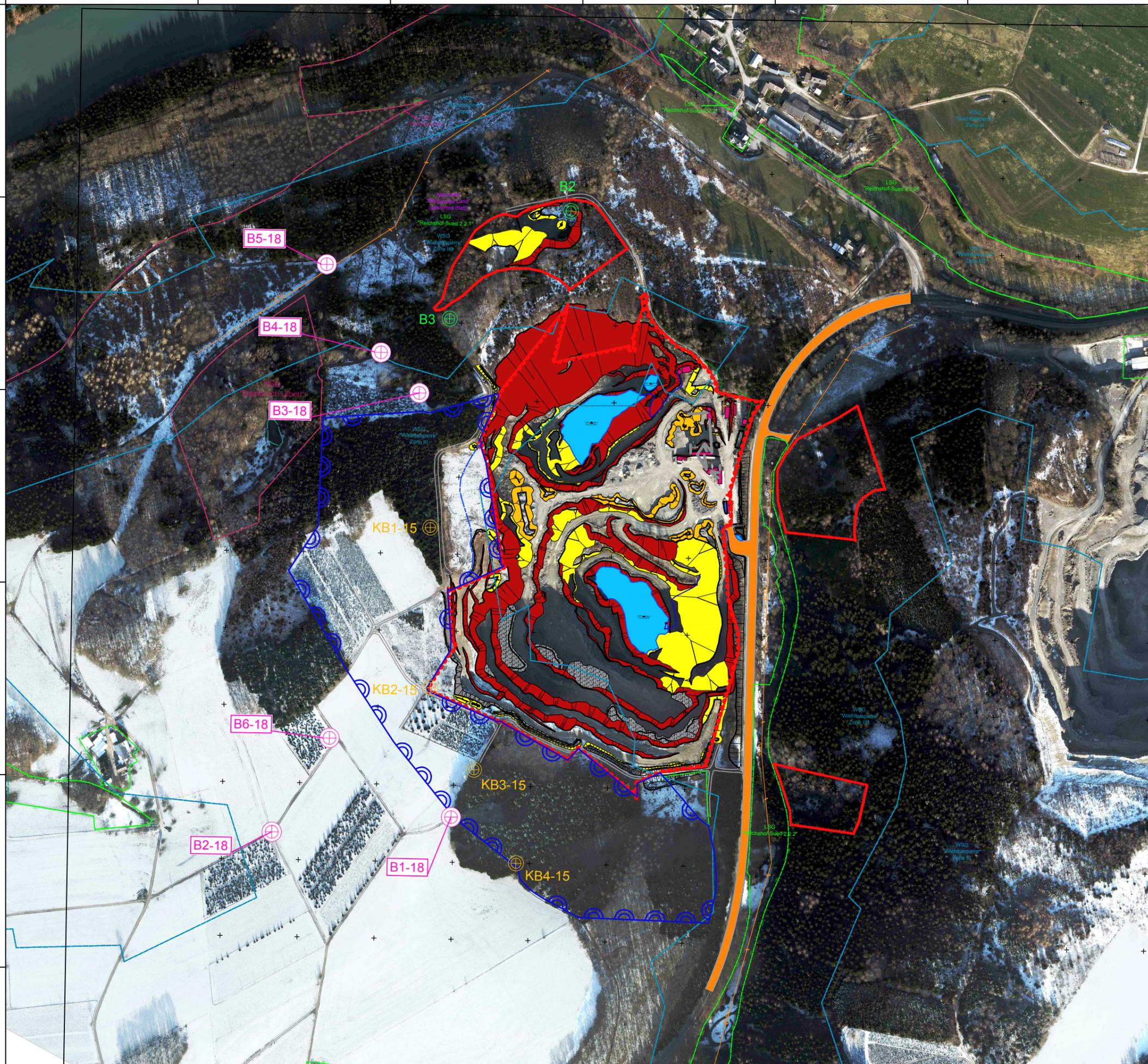
-  Gewinnungsböschung
-  Abraumböschung
-  Haldenböschung
-  sonstige Böschung
-  gesprengtes Haufwerk

#### Kataster

-  Gemeindegrenze
-  Gemarkungsgrenze
-  Flurgrenze
-  Flurstücksgrenze
-  Nutzungsgrenze

#### Betrieb

-  heutiger Tagebaubereich
-  geplante Erweiterung
-  B2 Bohrungen 1993
-  KB1-15 Erkundungsbohrungen 2015
-  B2-18 Grundwassermessstellen 2019



Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner  
Ingenieurgesellschaft mbH

+49 241 / 16000-0

info@sst-consult.de

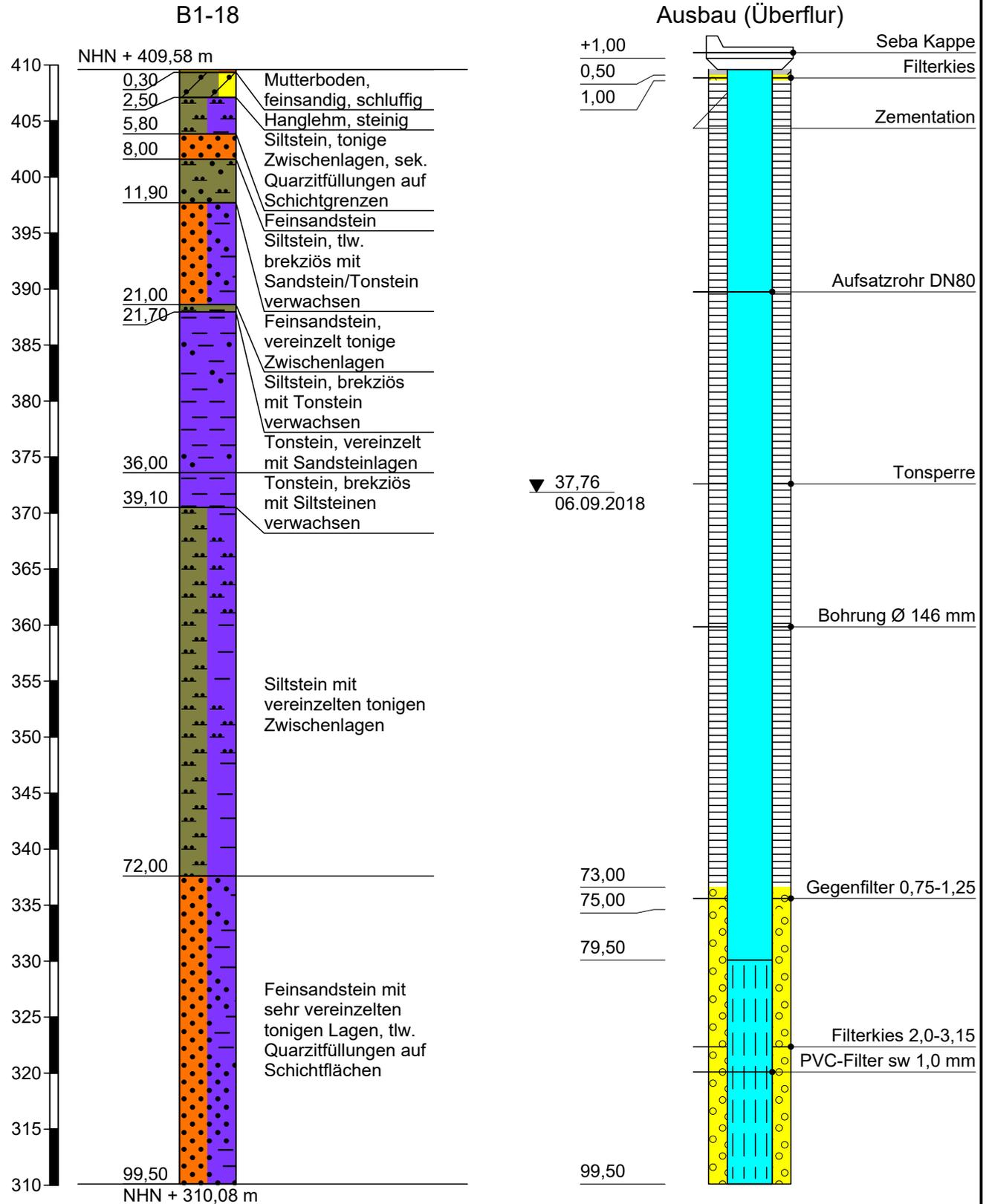
Datum : 29.07.2019  
Maßstab : 1:5.000  
Projektnr. : 1723608

gez. : S. Loyen  
gepr. : Dipl.-Geol. D. Quante

Steinbruchbetrieb Günter Jaeger GmbH  
Lüsberger Str. 2  
51580 Reichshof

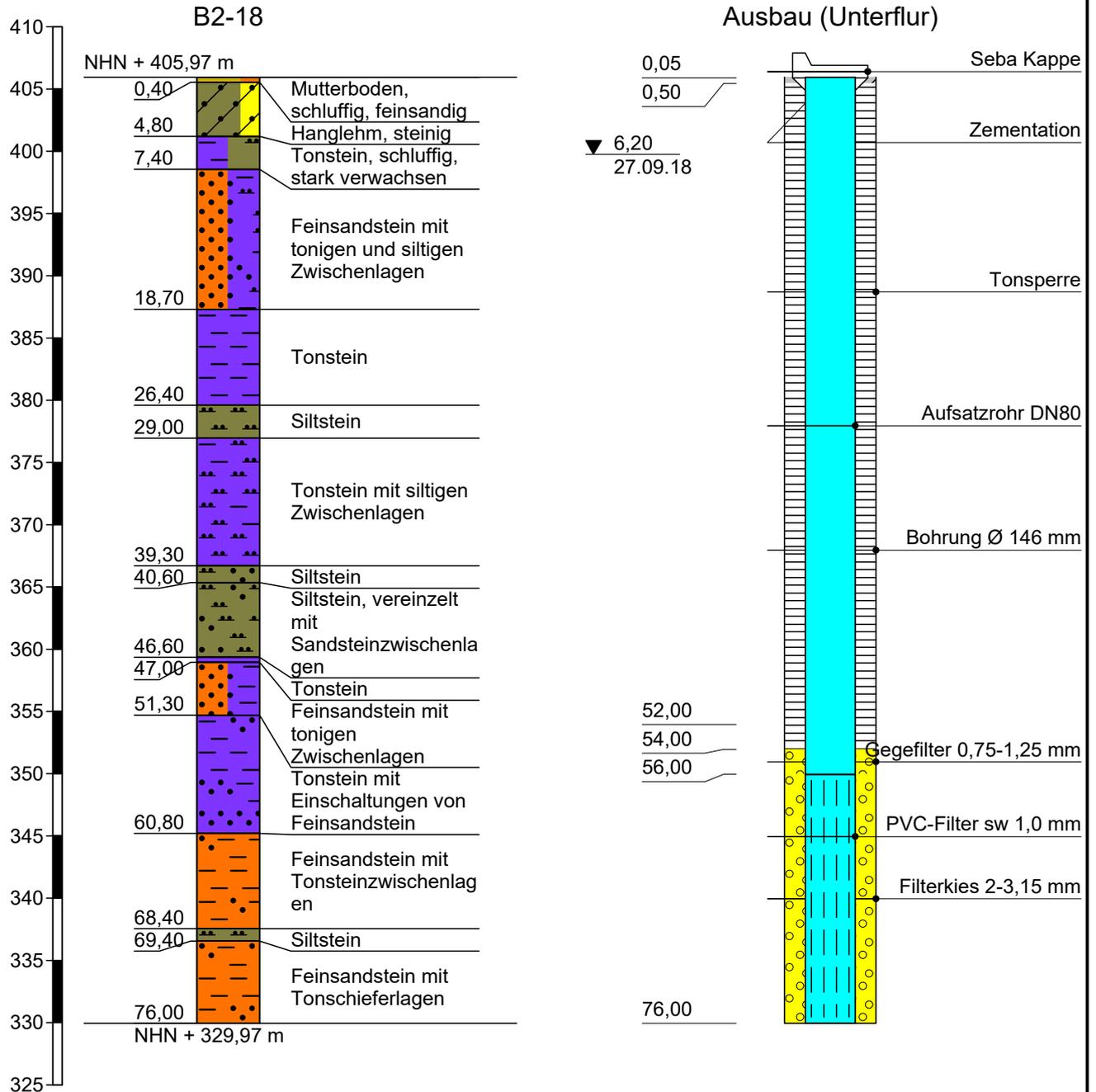
Lageplan Grundwassermessstellen 2018

### Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023



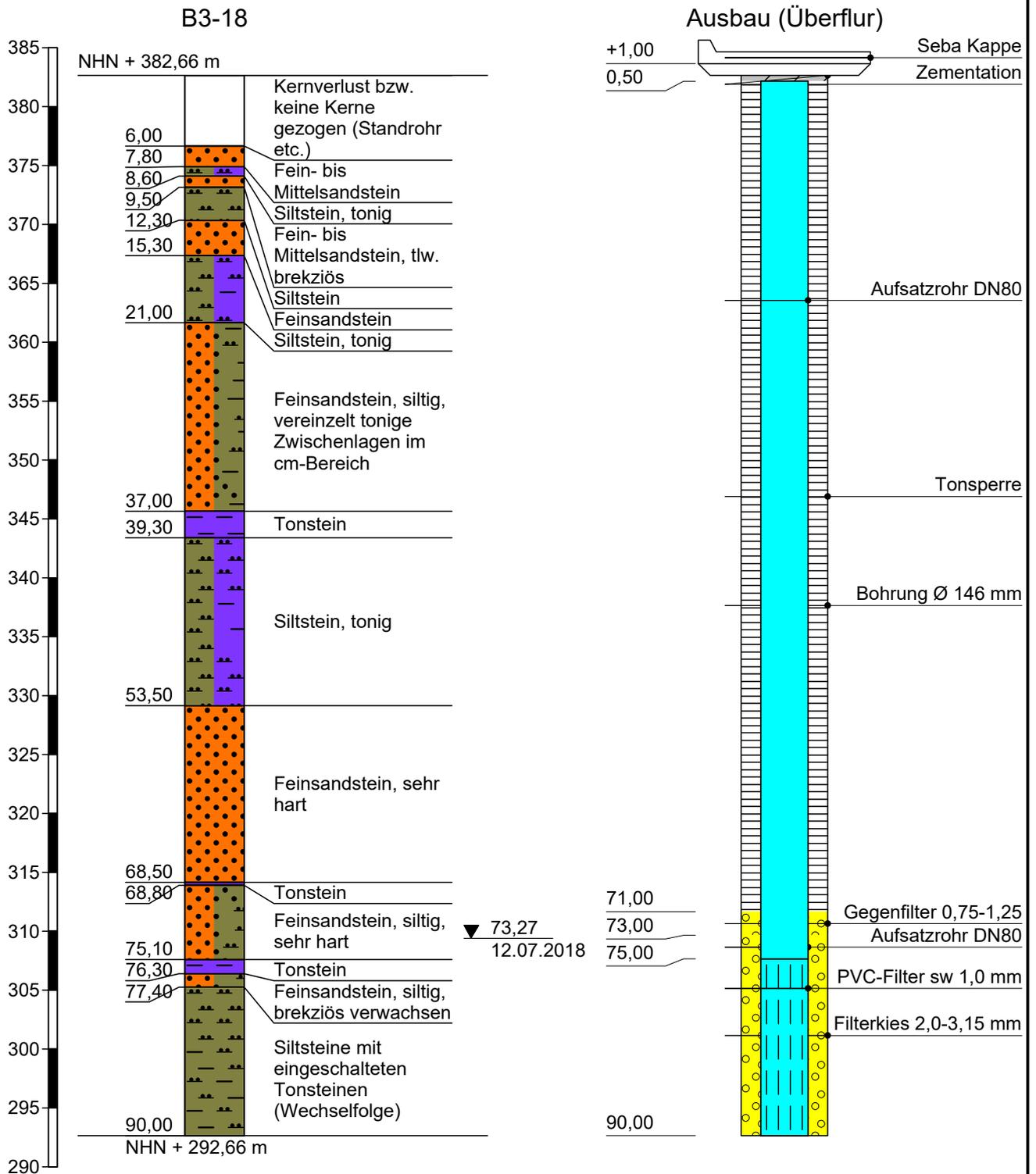
Höhenmaßstab 1:500

### Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023



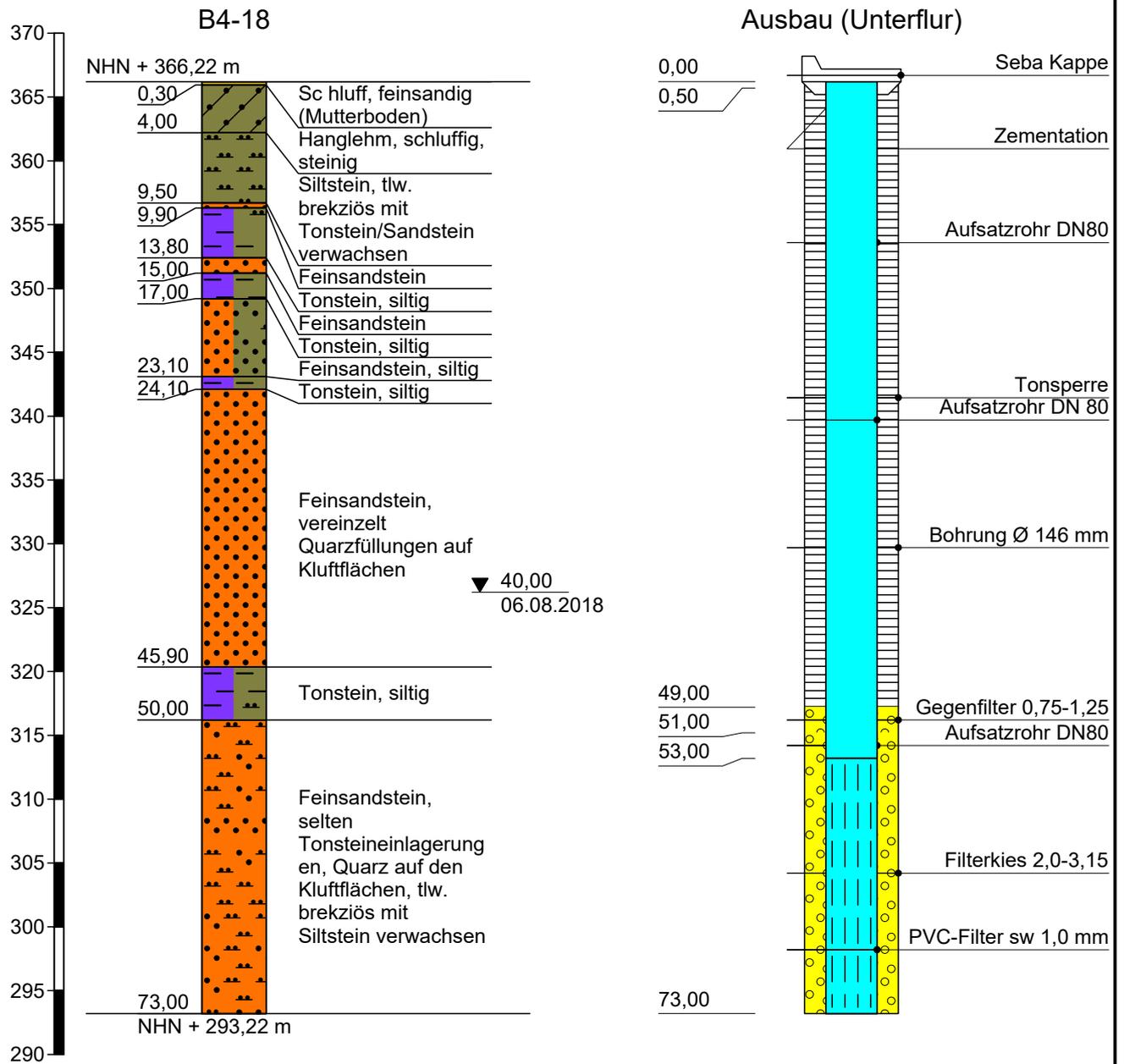
Höhenmaßstab 1:500

### Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023



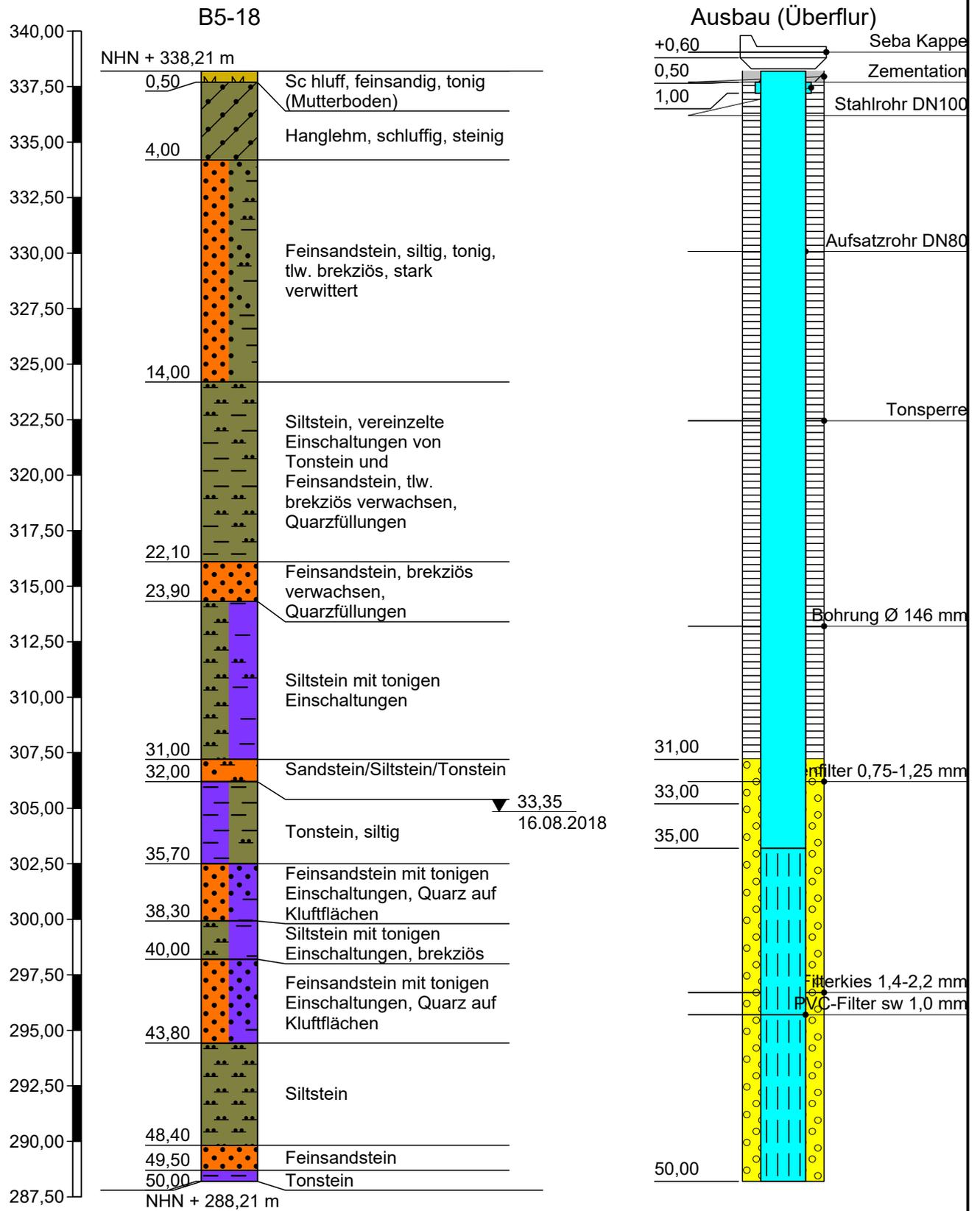
Höhenmaßstab 1:500

### Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023



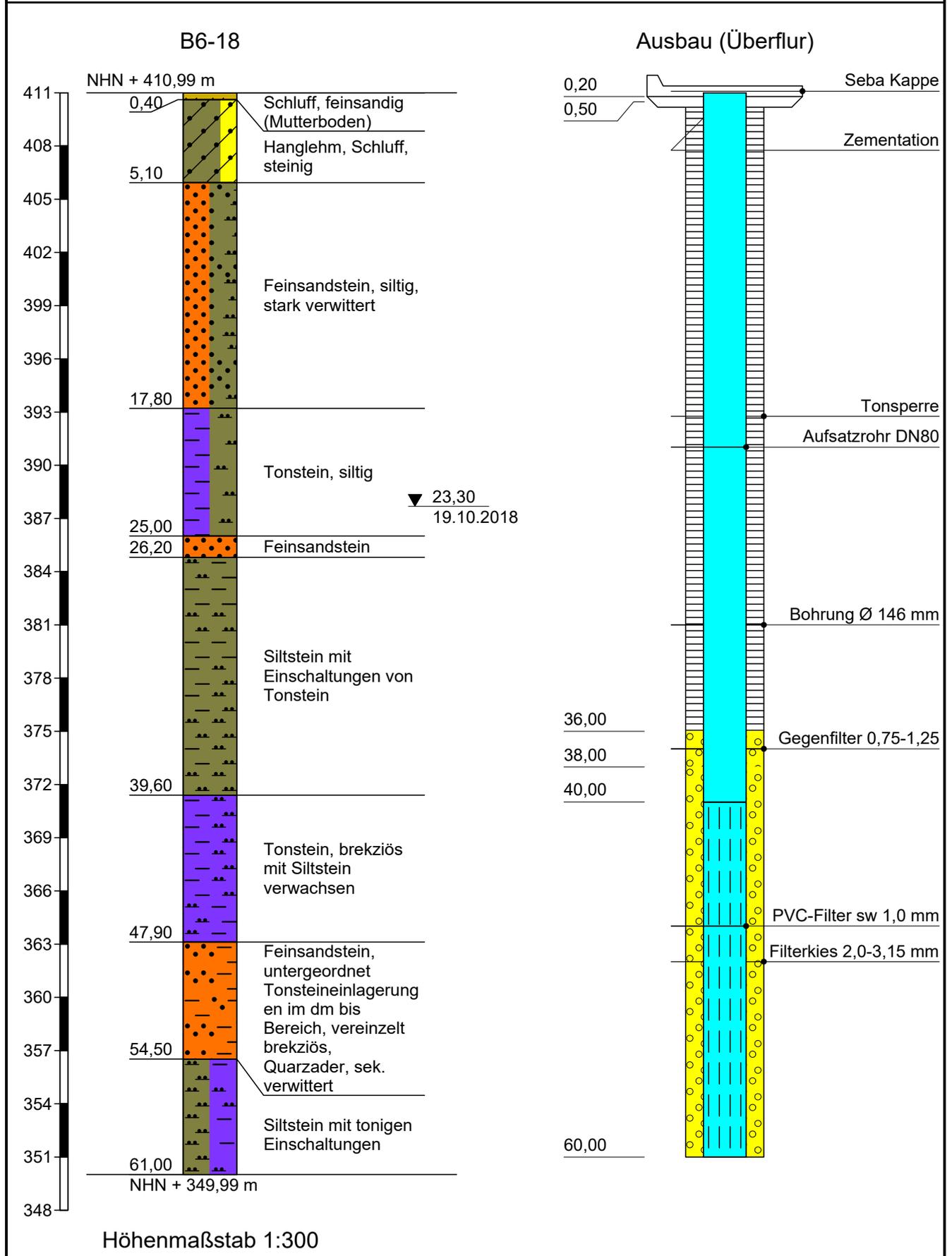
Höhenmaßstab 1:500

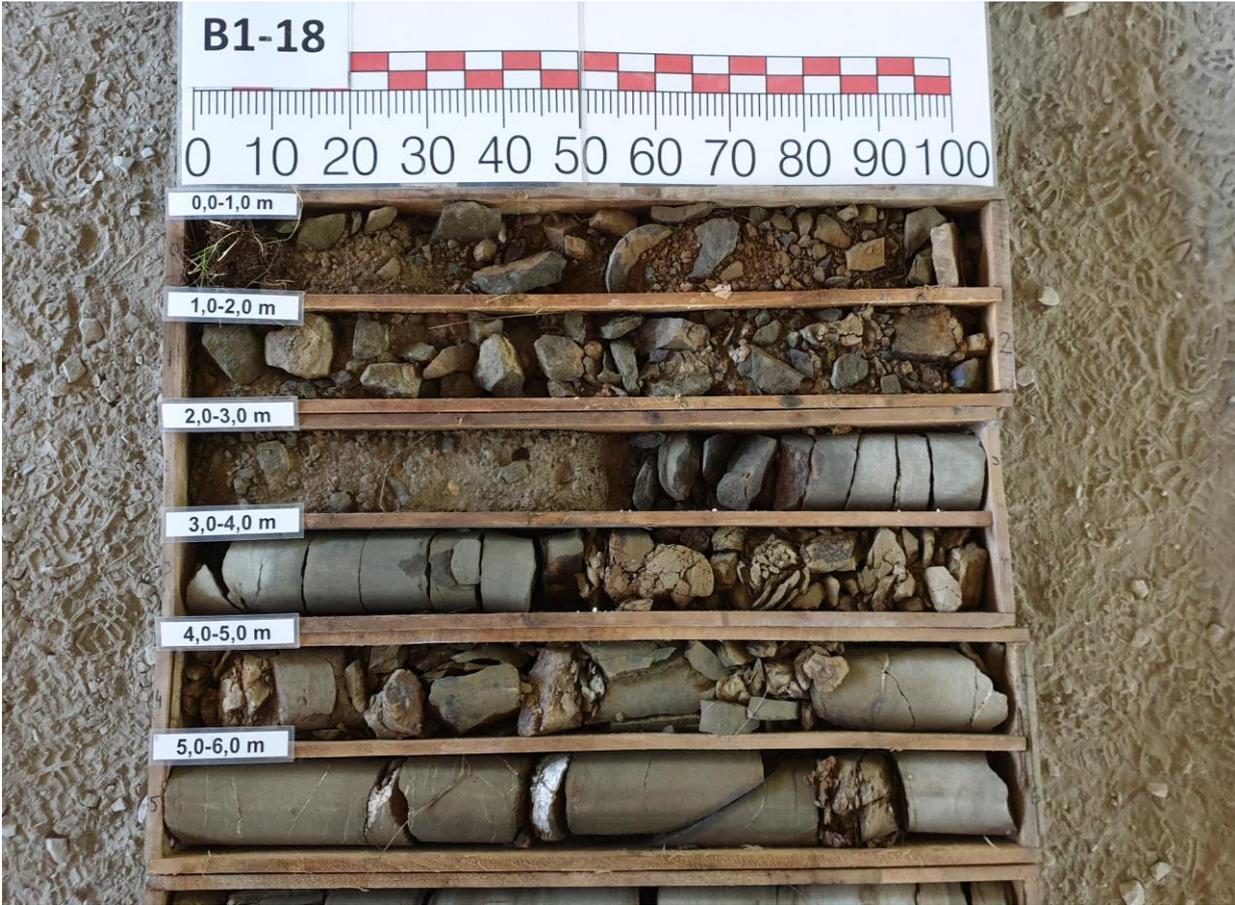
### Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023

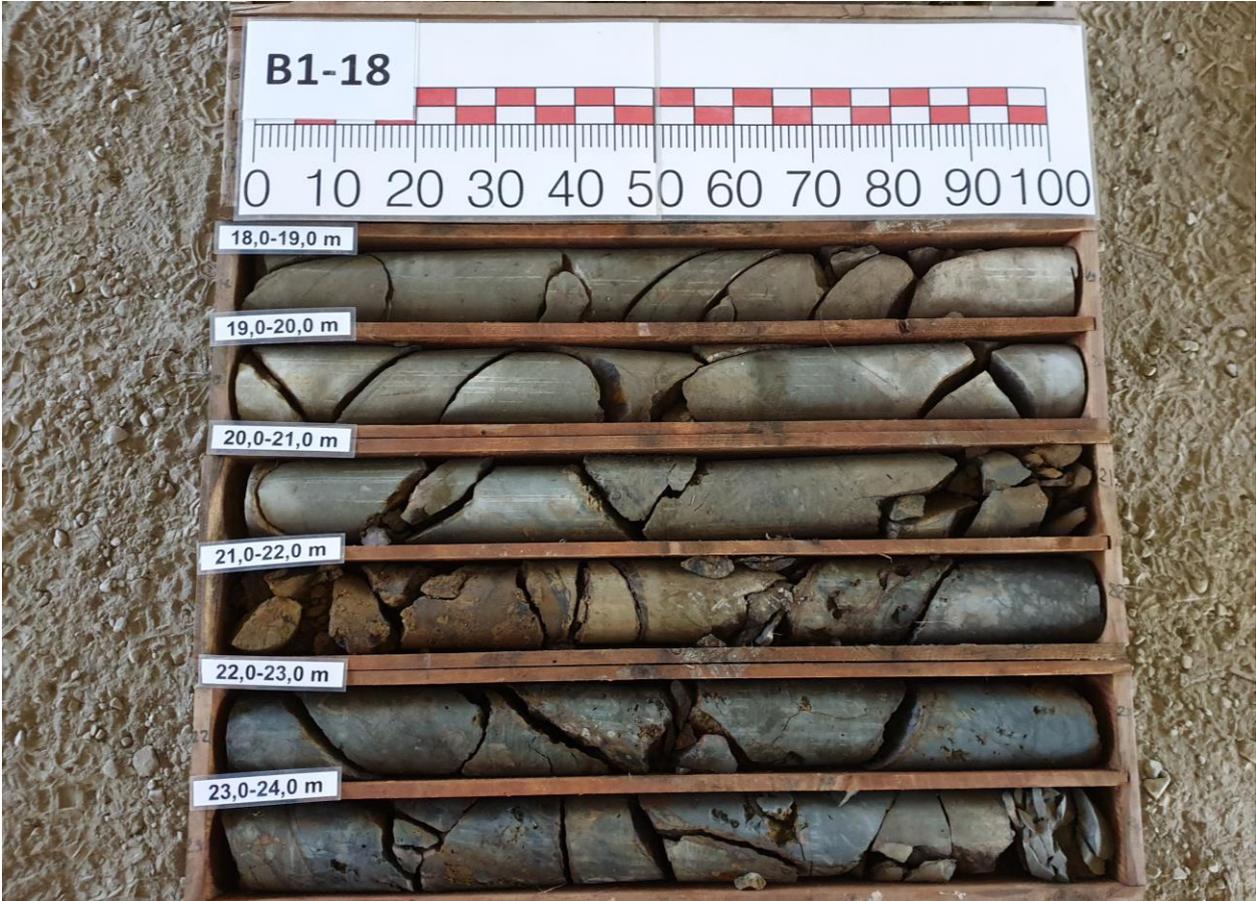
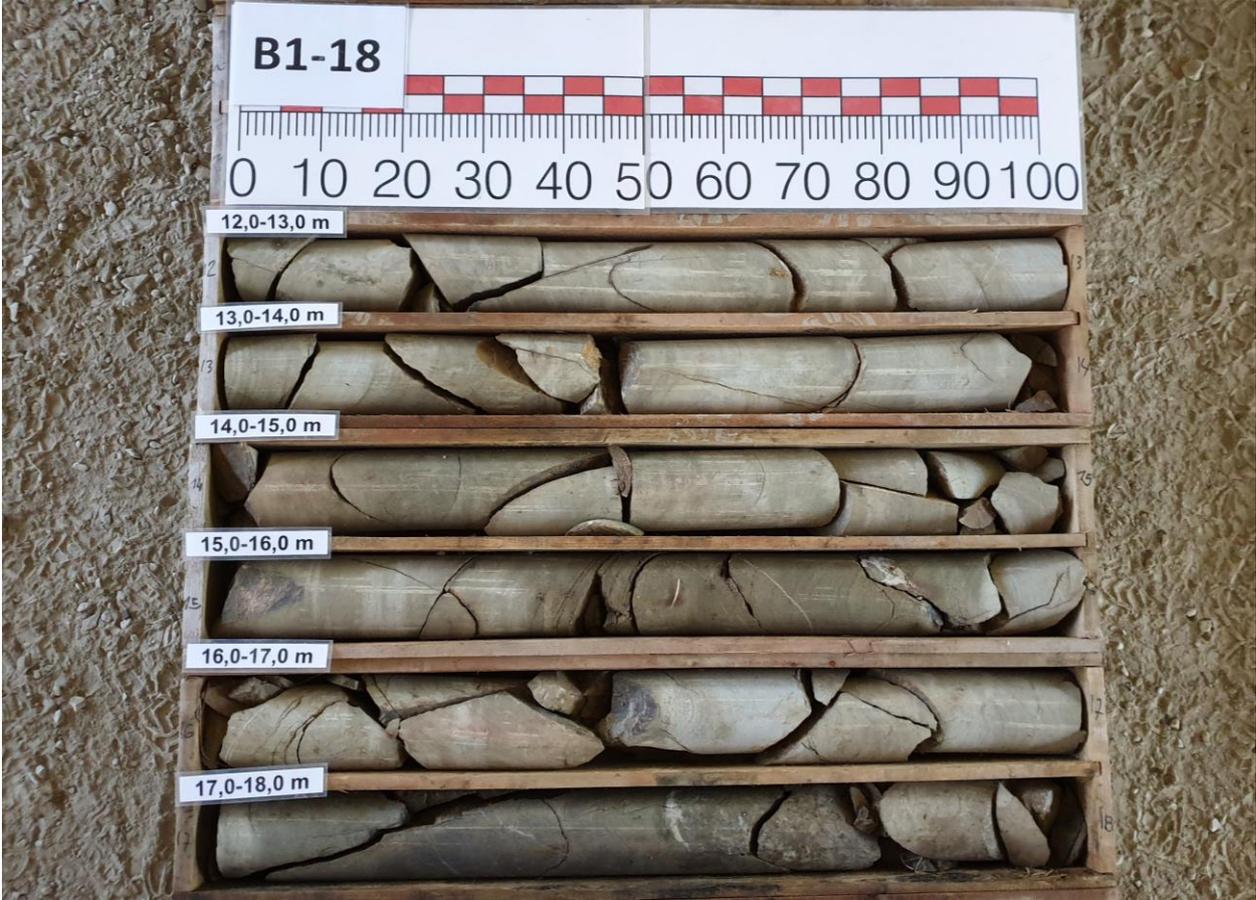


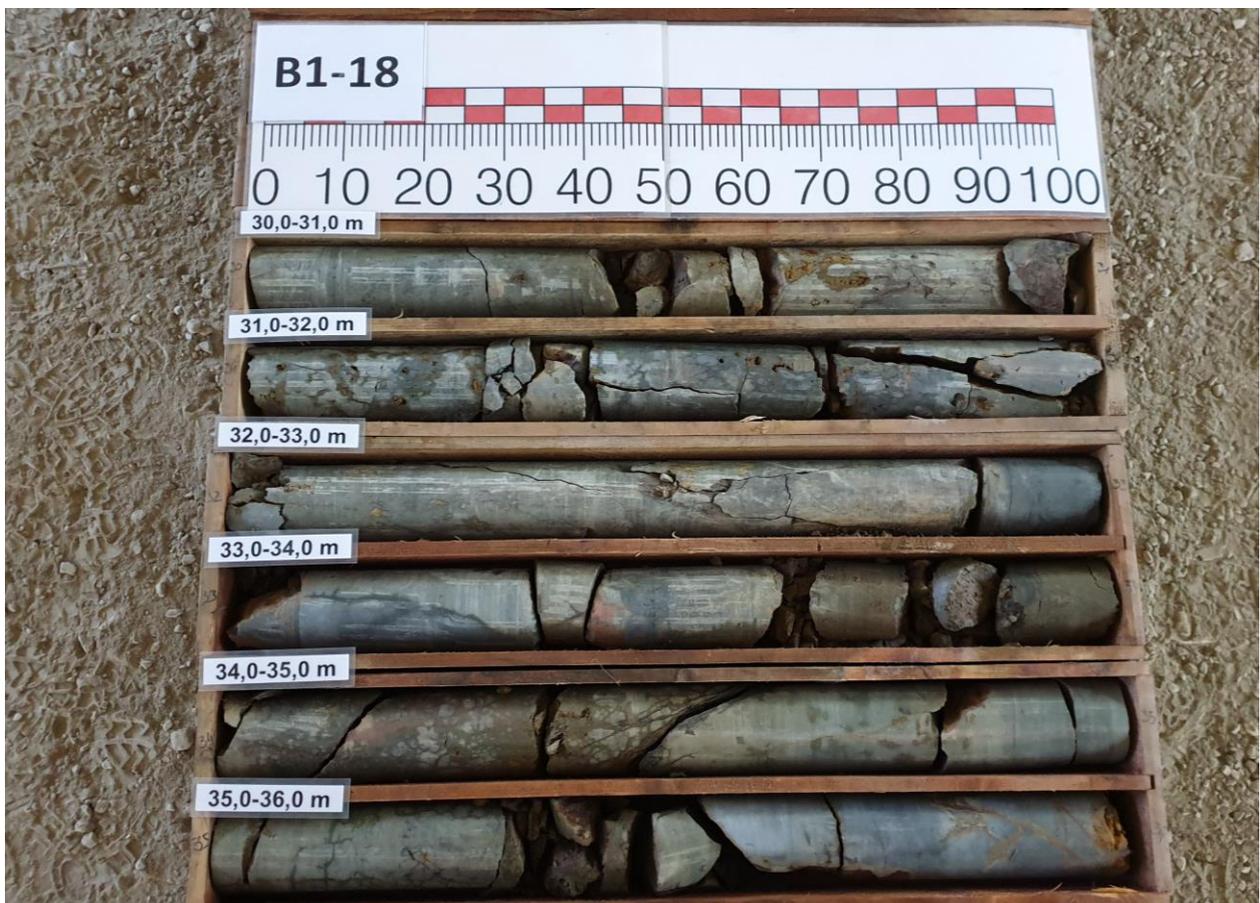
Höhenmaßstab 1:250

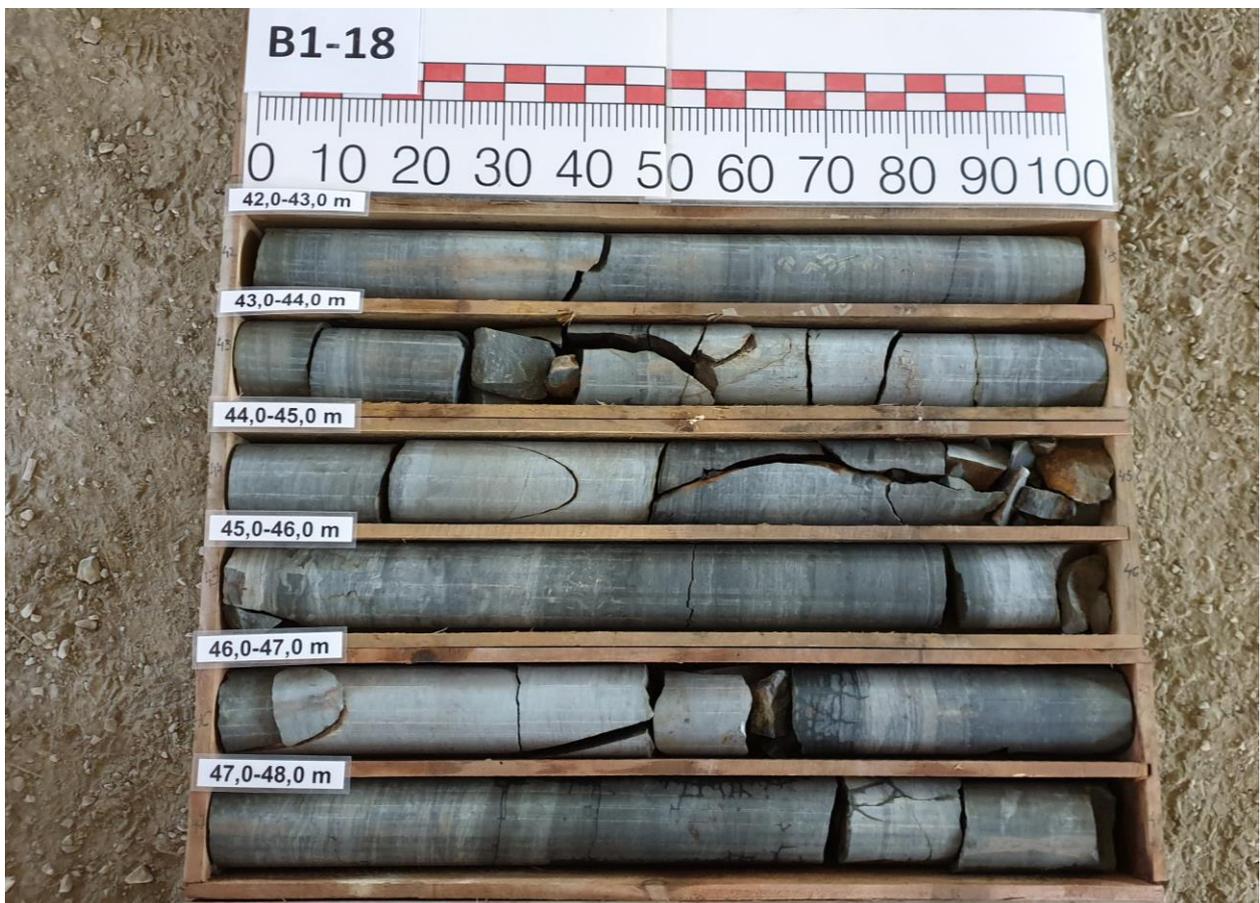
### Zeichnerische Darstellung von Bohrprofilen nach DIN 4023

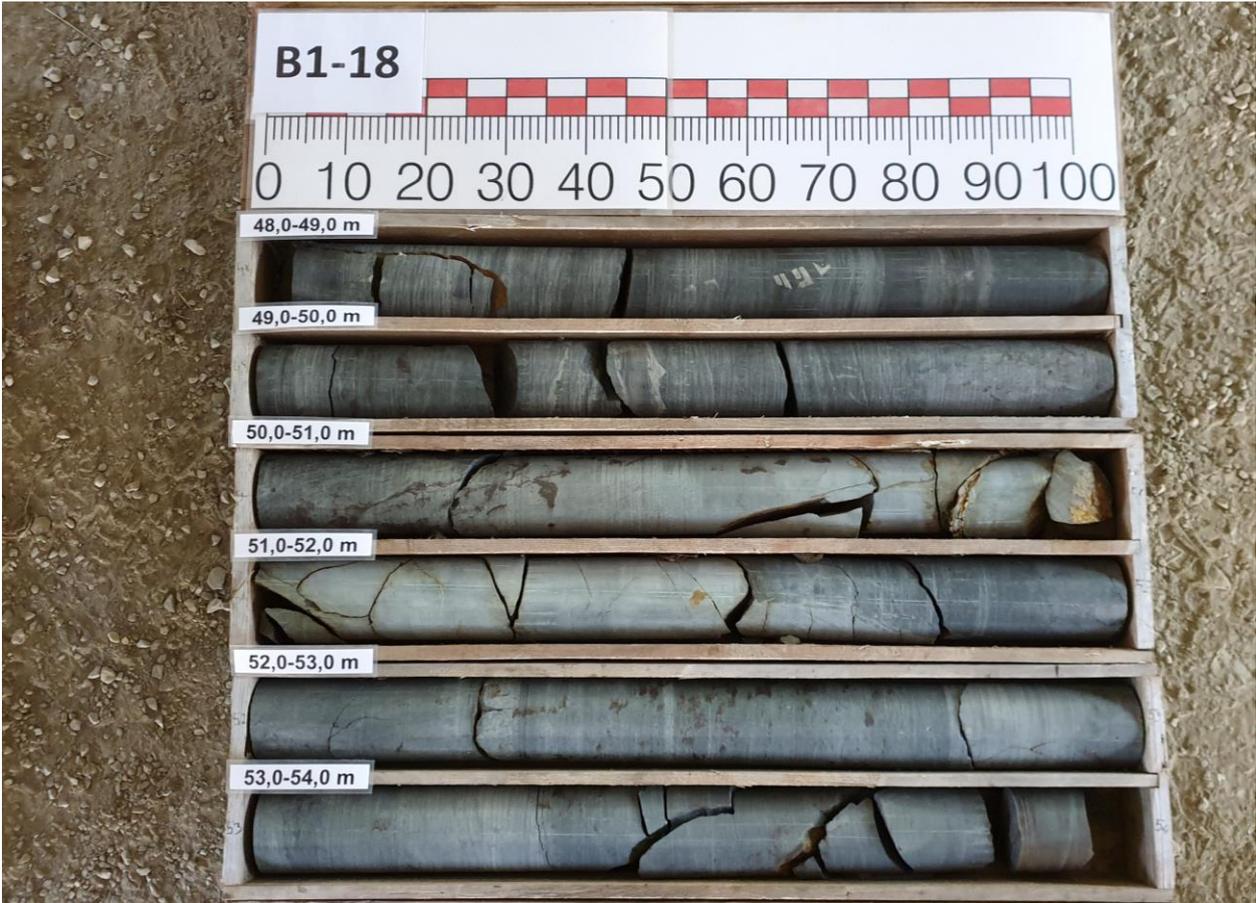


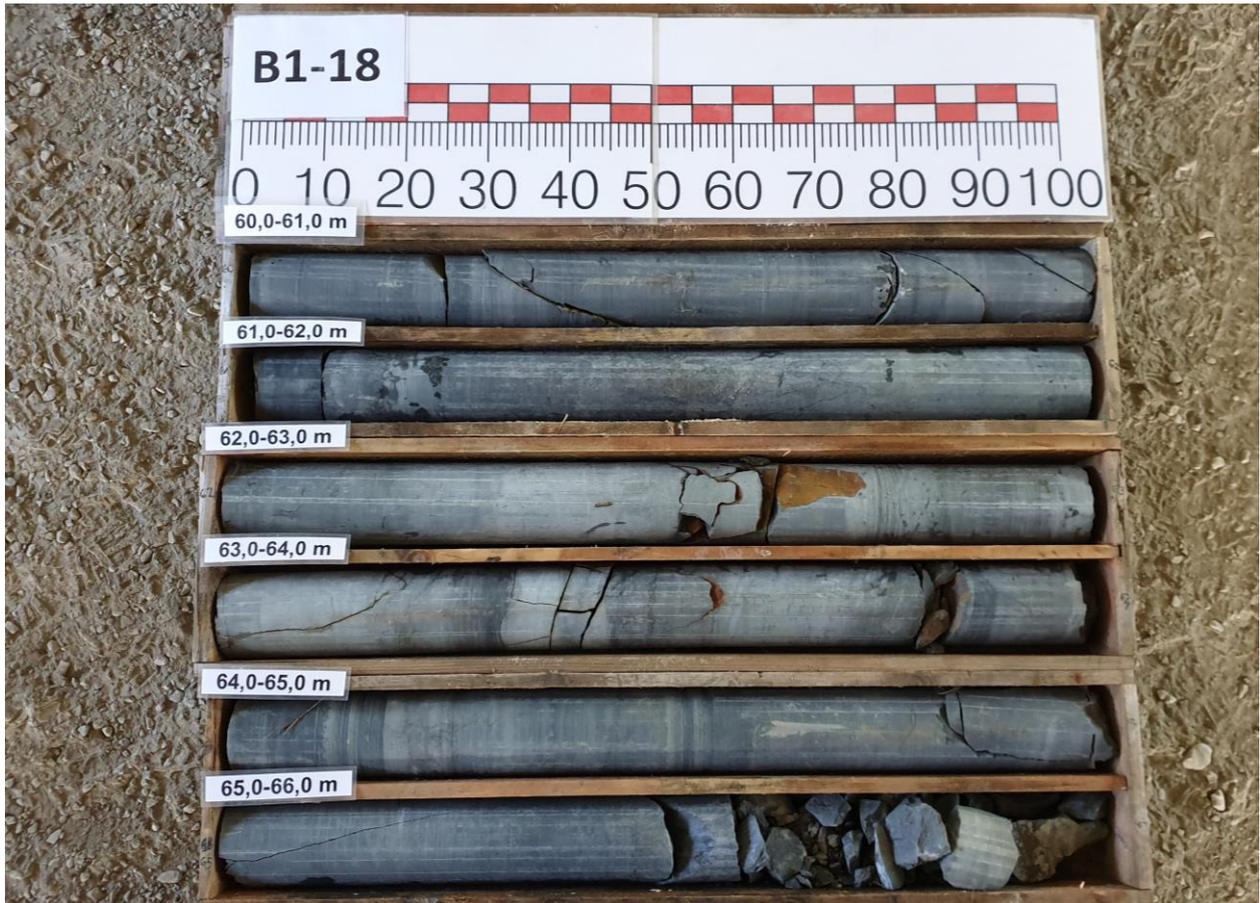


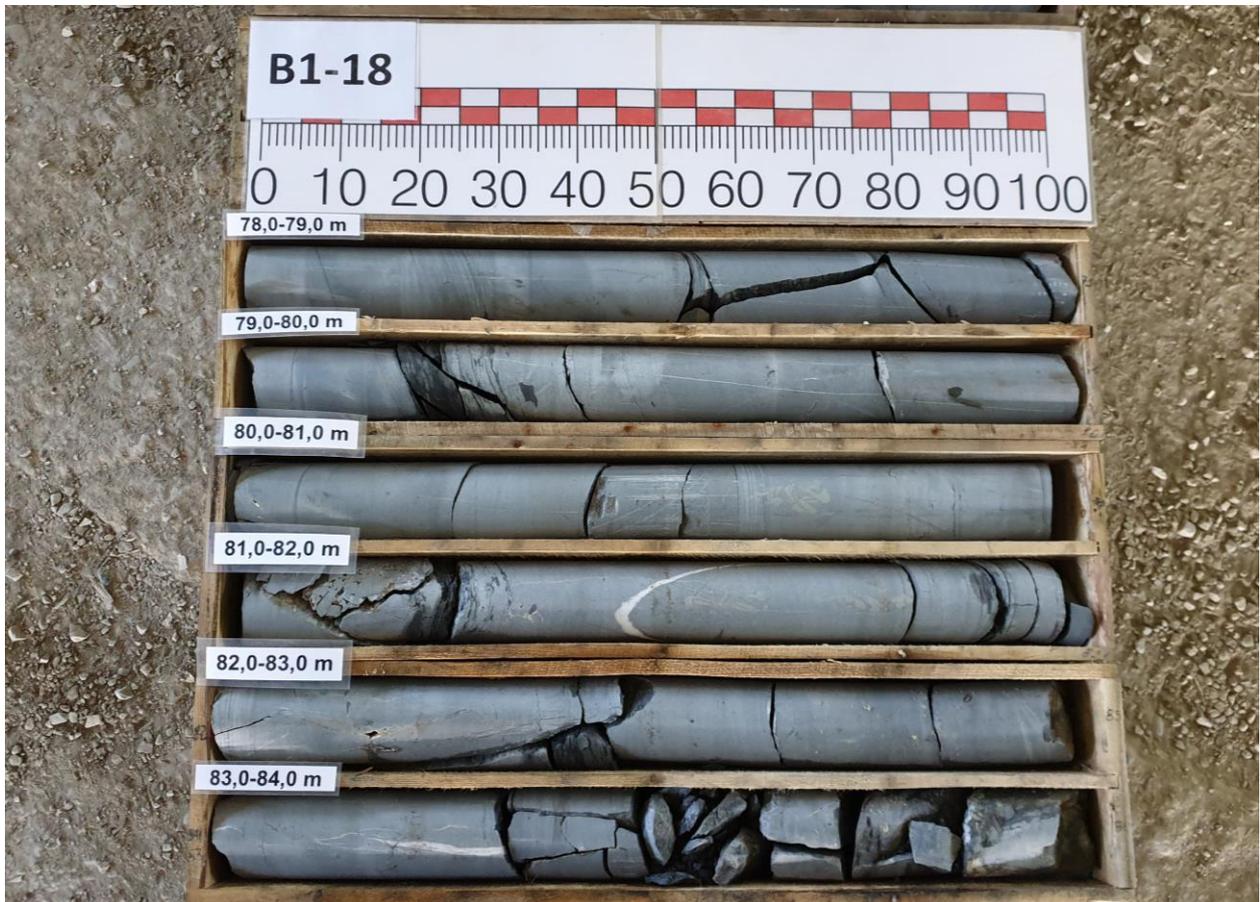






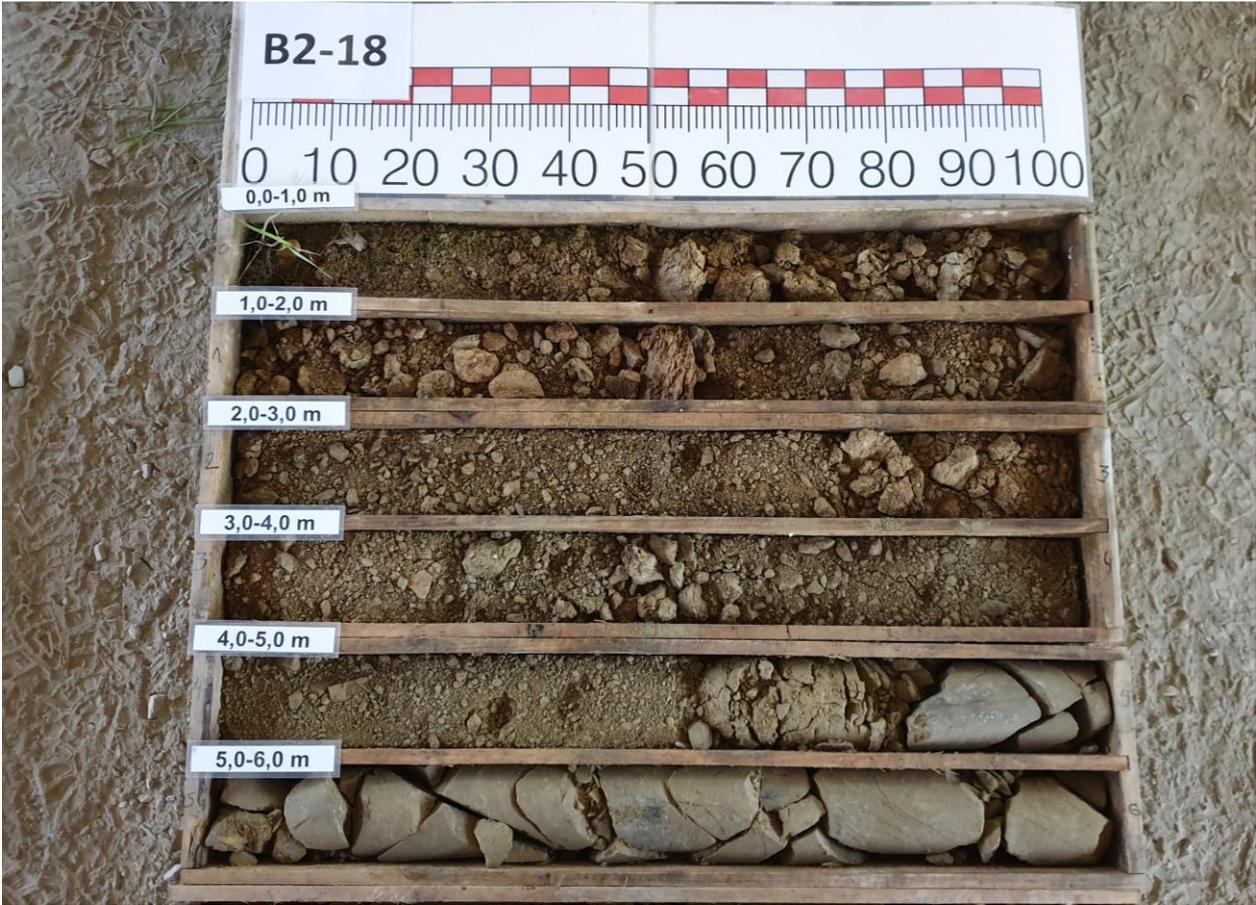


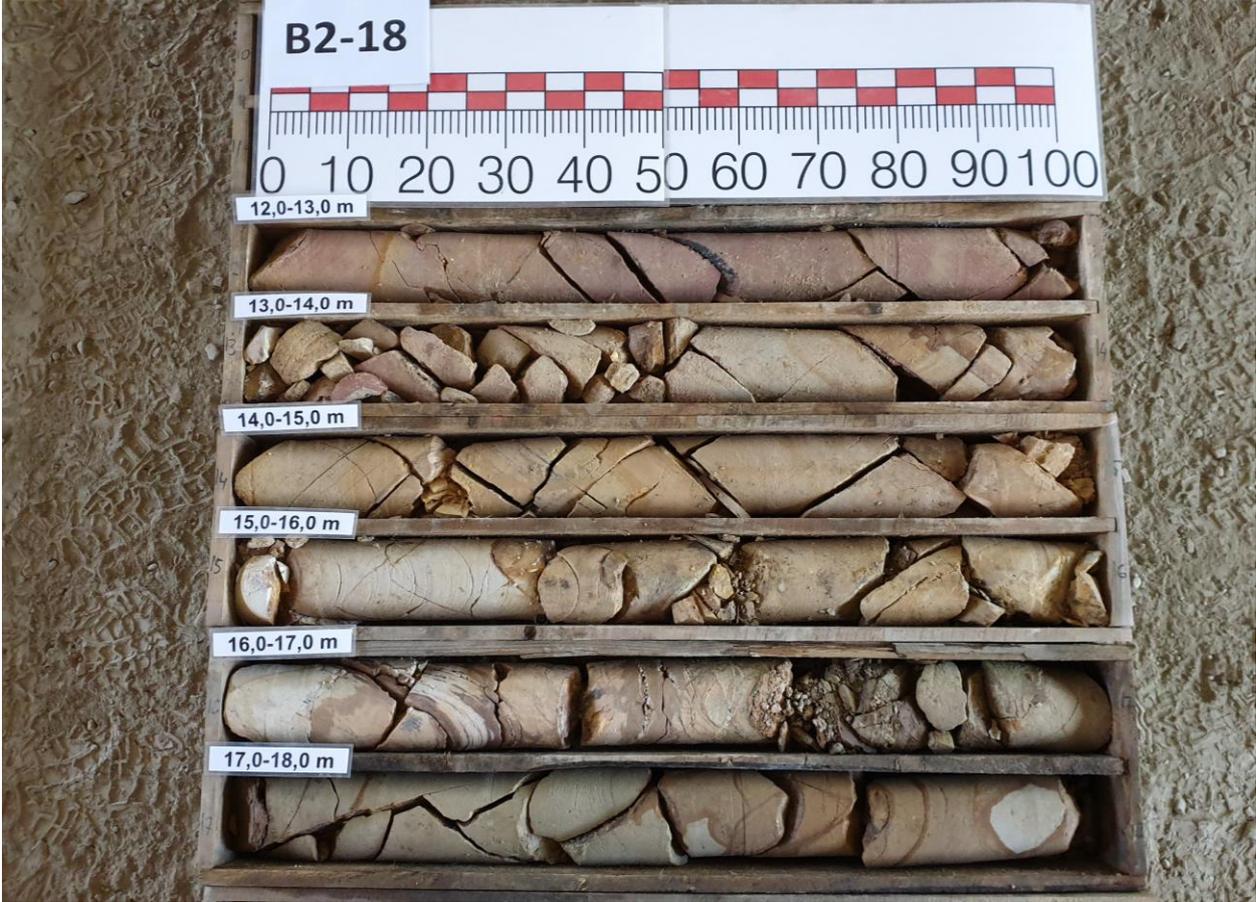


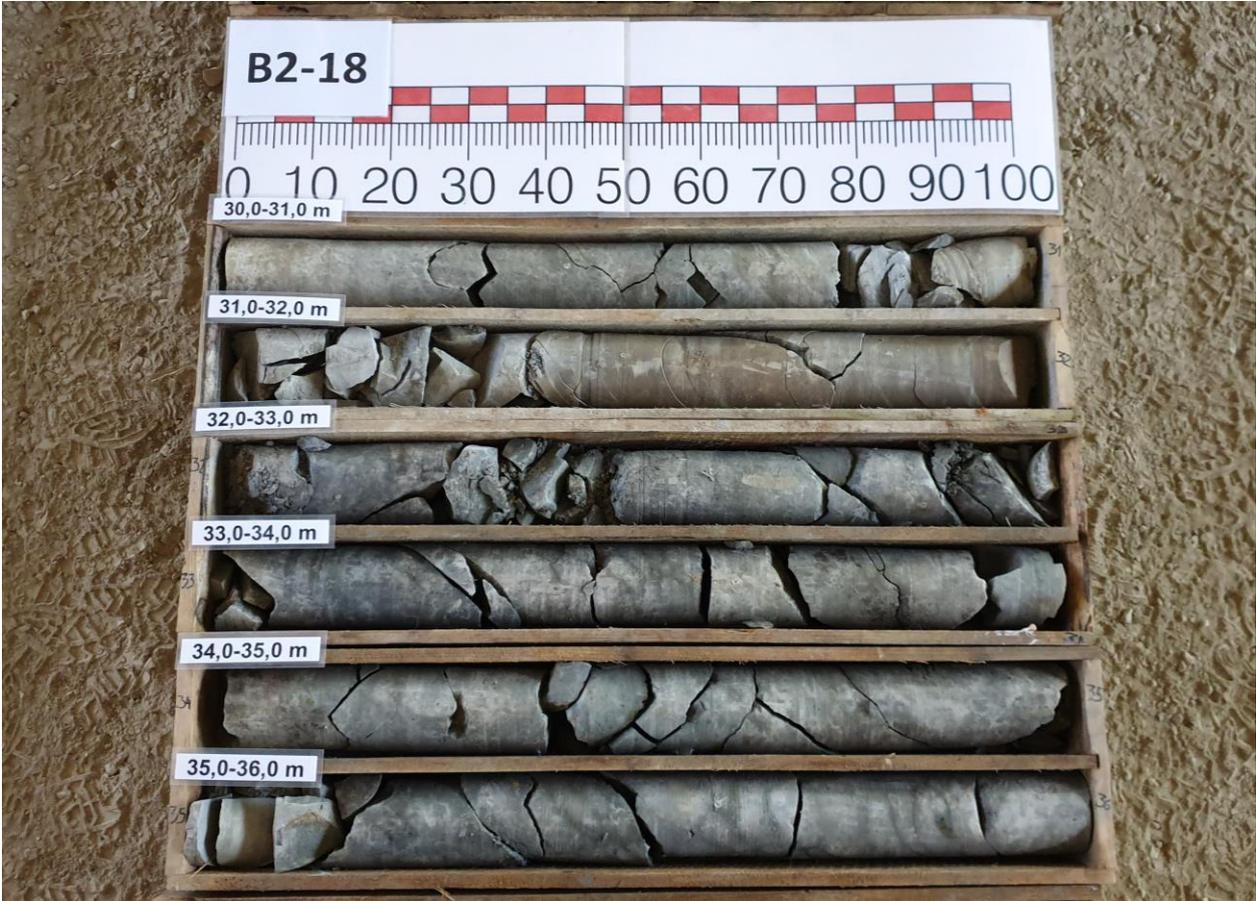






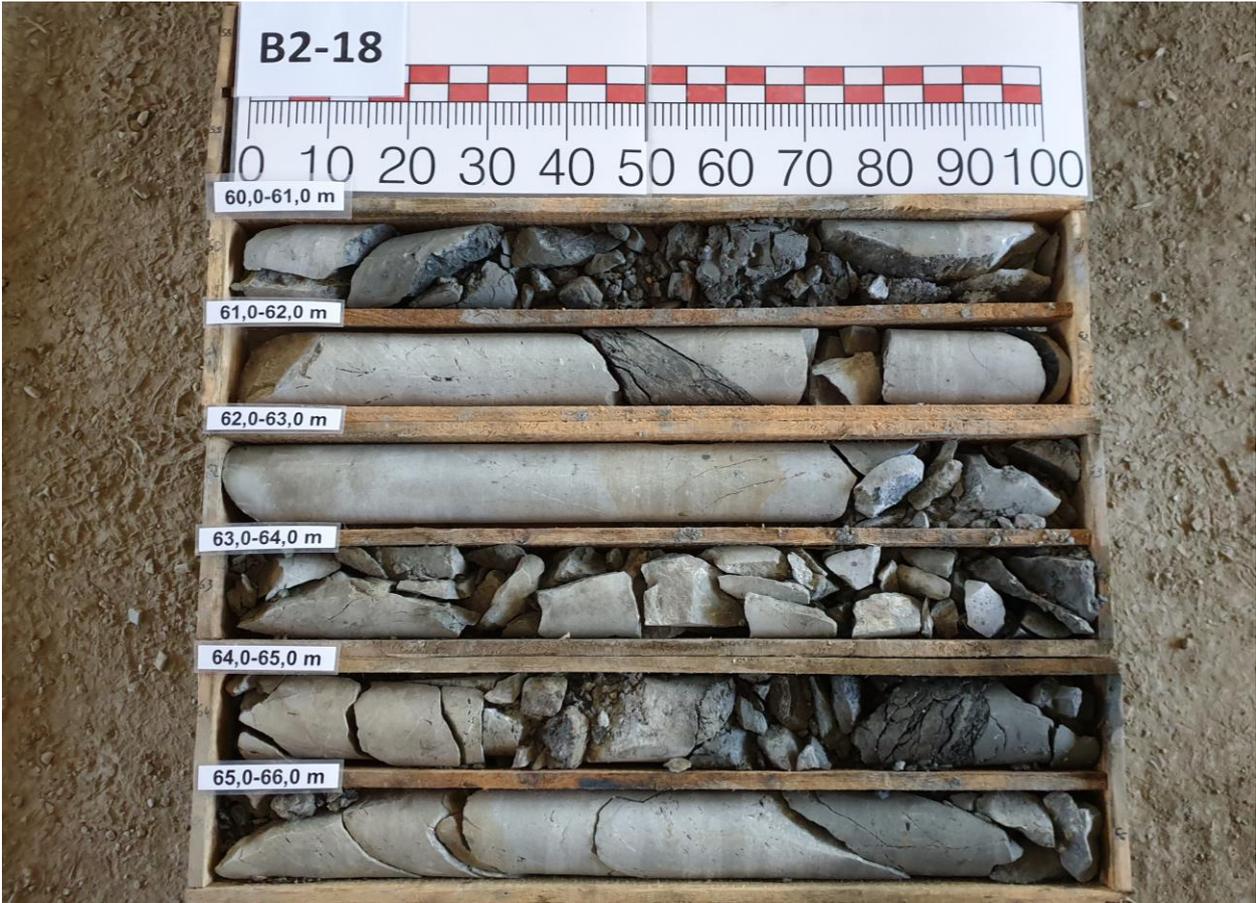








































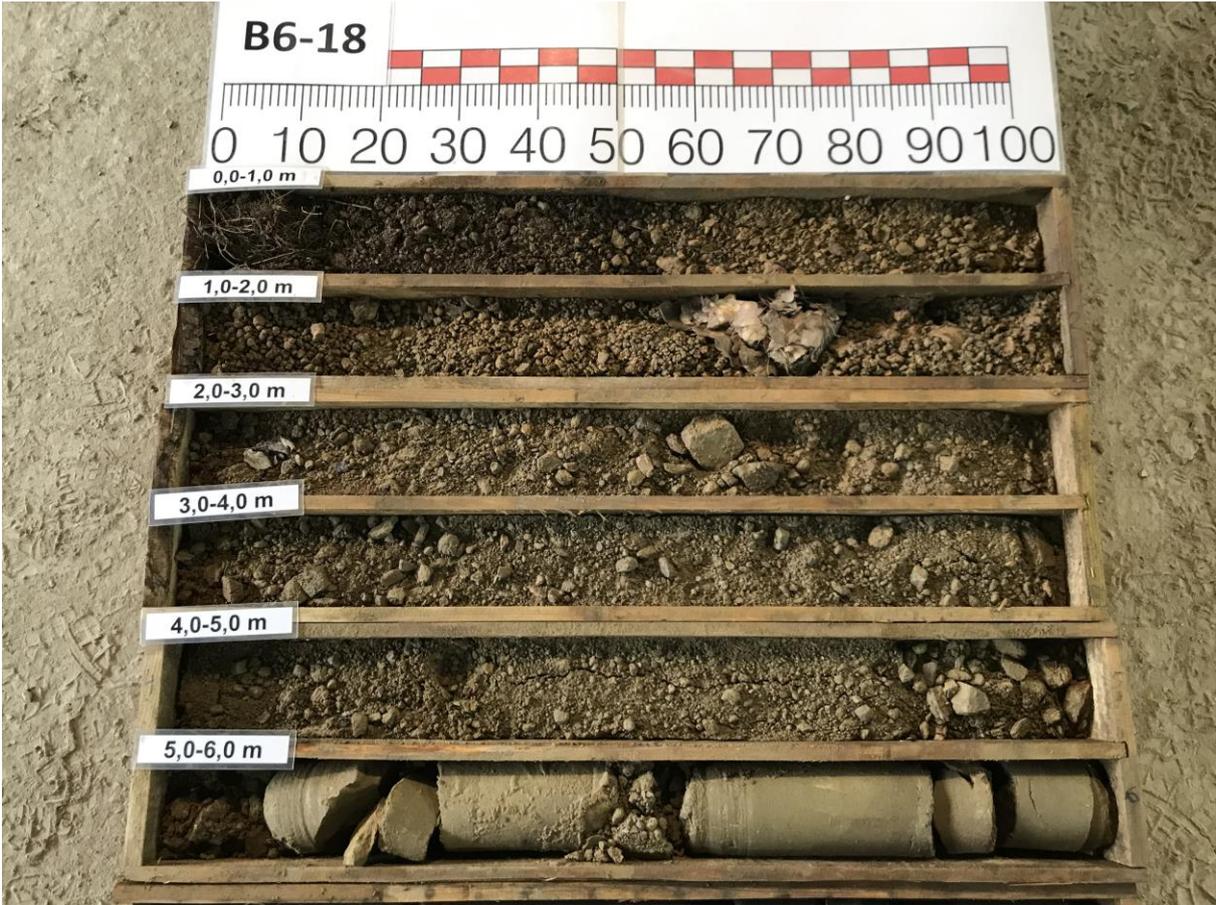






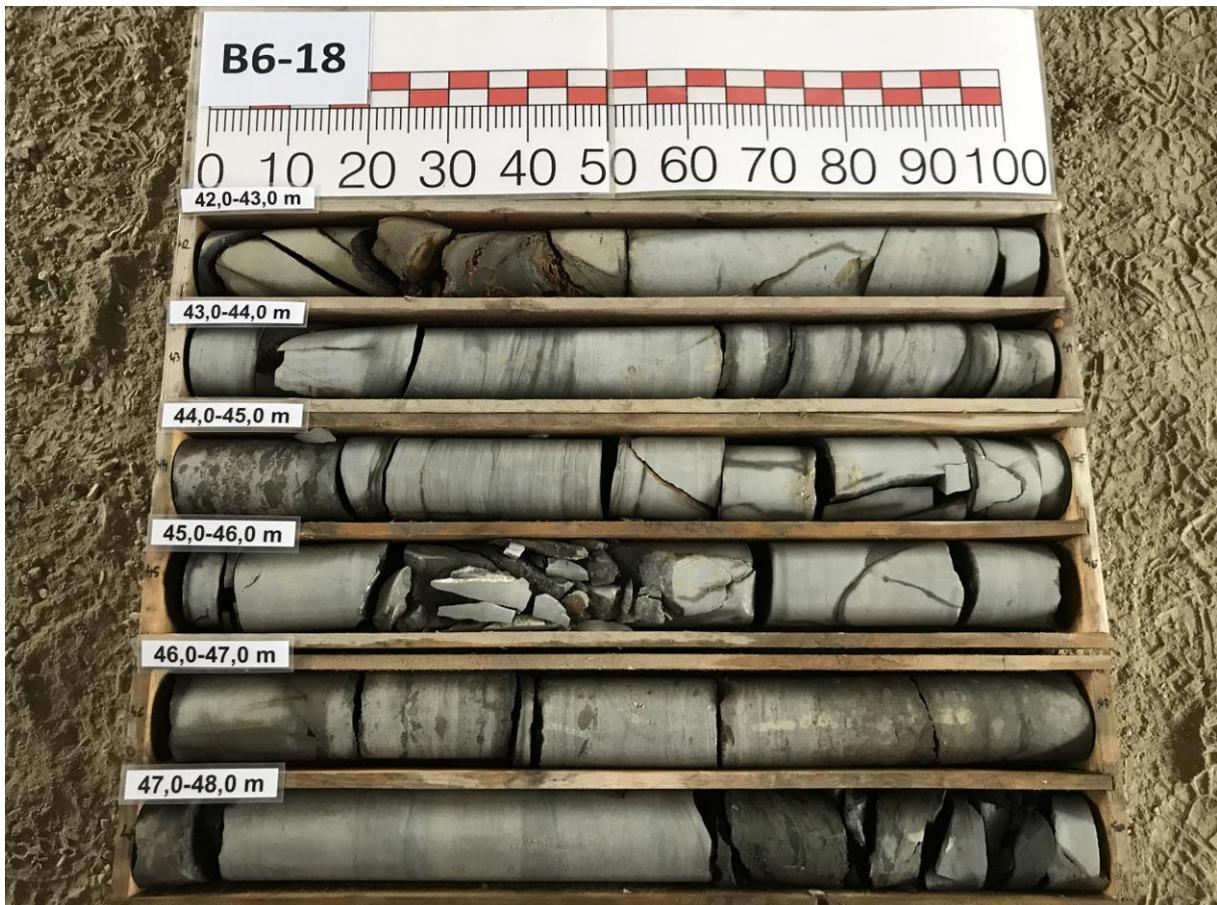














Bohrpunkt B1-18



Bohrpunkt B2-18



Bohrpunkt B3-18



Bohrpunkt B4-18

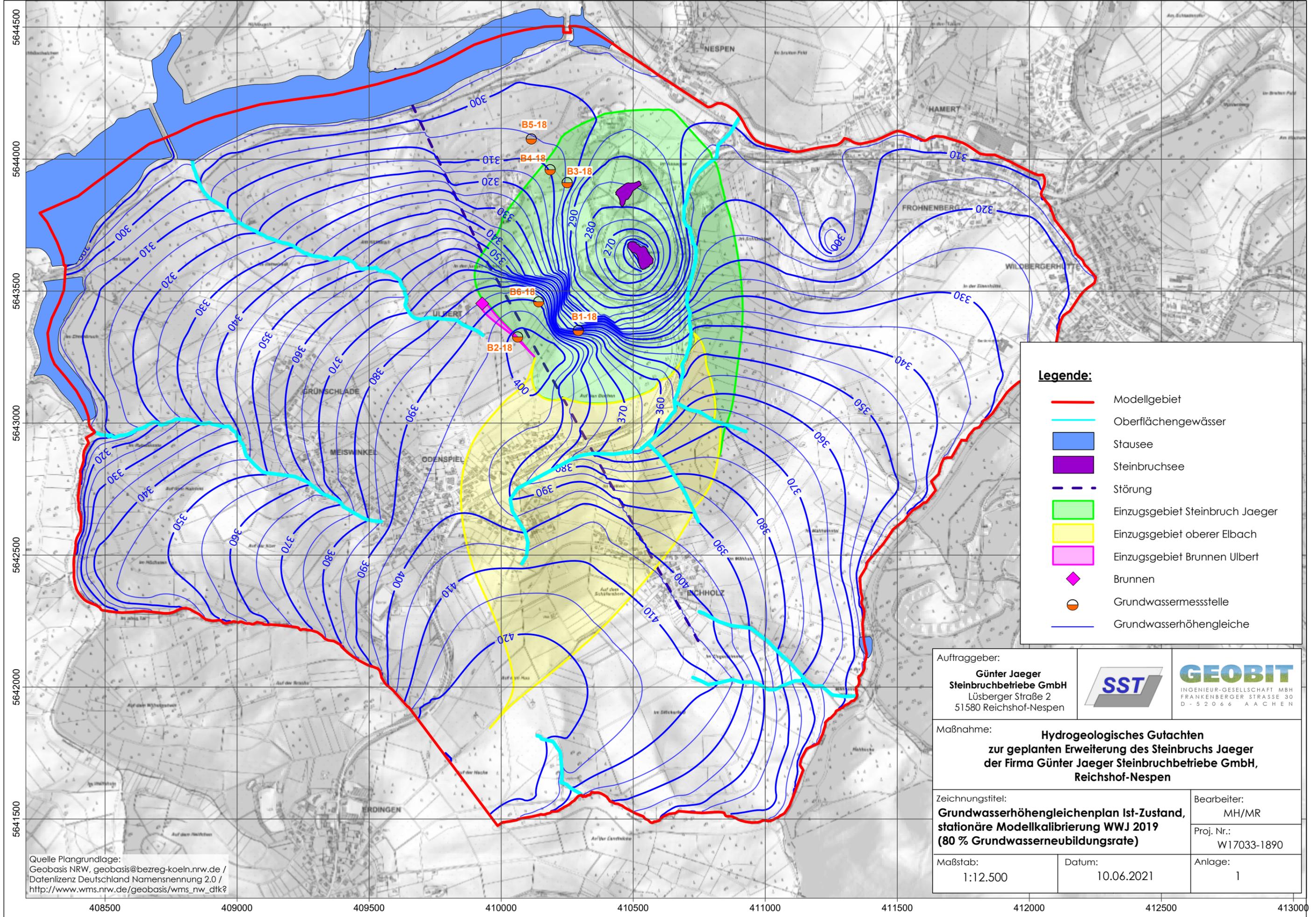


Bohrpunkt B5-18



Bohrpunkt B6-18





**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee
- Steinbruchsee
- - - Störung
- Einzugsgebiet Steinbruch Jaeger
- Einzugsgebiet oberer Elbach
- Einzugsgebiet Brunnen Ulbert
- ◆ Brunnen
- Grundwassermessstelle
- Grundwasserhöhengleiche

Auftraggeber:  
**Günter Jaeger  
 Steinbruchbetriebe GmbH**  
 Lüsberger Straße 2  
 51580 Reichshof-Nespen



Maßnahme: **Hydrogeologisches Gutachten  
 zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger  
 der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH,  
 Reichshof-Nespen**

Zeichnungstitel:  
**Grundwasserhöhengleichenplan Ist-Zustand,  
 stationäre Modellkalibrierung WWJ 2019  
 (80 % Grundwasserneubildungsrate)**

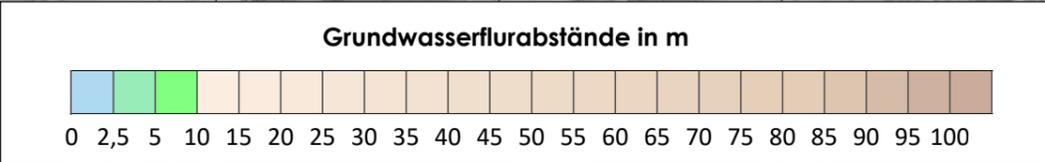
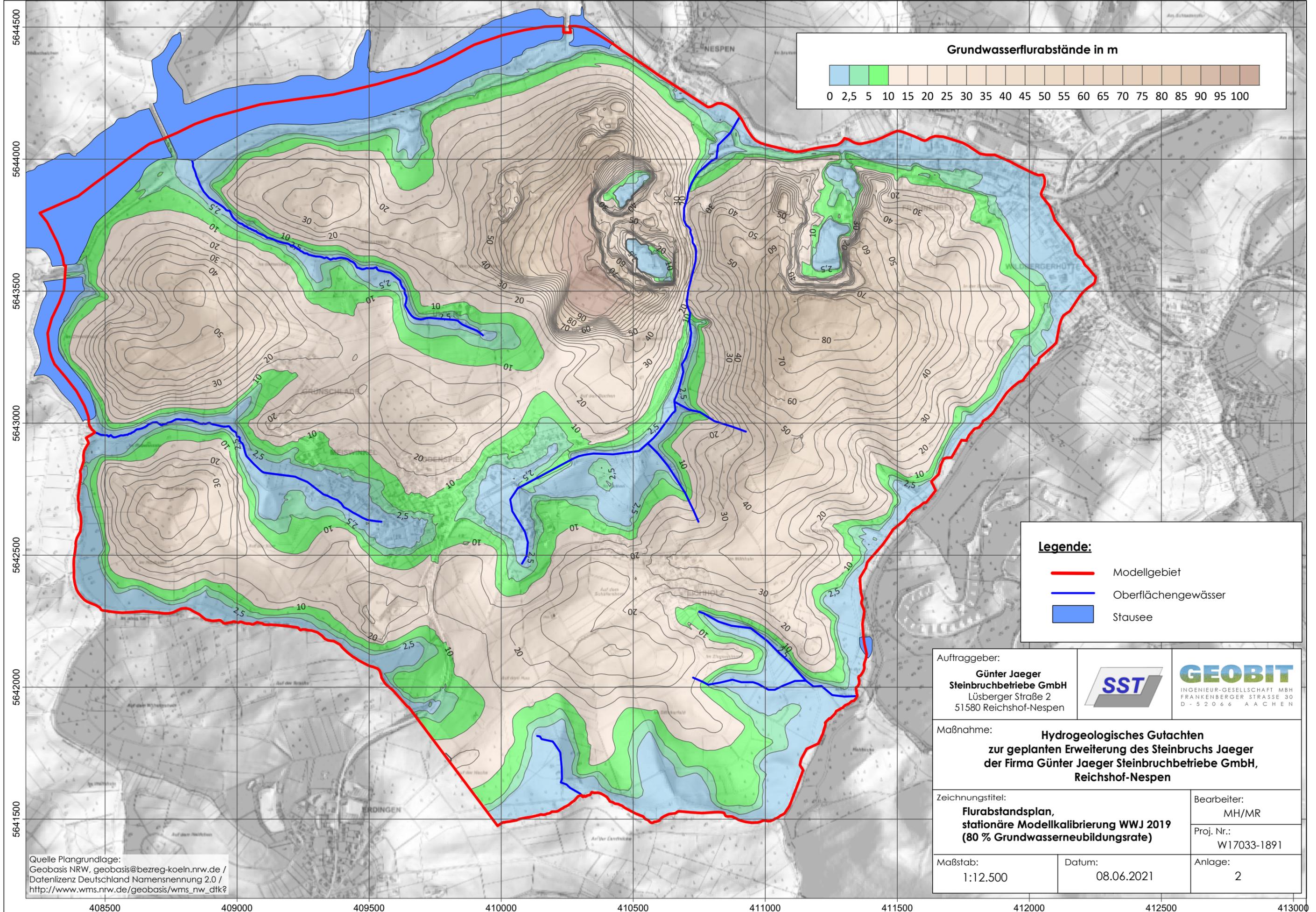
Bearbeiter:  
 MH/MR  
 Proj. Nr.:  
 W17033-1890

Maßstab:  
 1:12.500

Datum:  
 10.06.2021

Anlage:  
 1

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)



**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee

Auftraggeber:  
**Günter Jaeger  
 Steinbruchbetriebe GmbH**  
 Lüsberger Straße 2  
 51580 Reichshof-Nespen



Maßnahme: **Hydrogeologisches Gutachten  
 zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger  
 der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH,  
 Reichshof-Nespen**

Zeichnungstitel:  
**Flurabstandsplan,  
 stationäre Modellkalibrierung WWJ 2019  
 (80 % Grundwasserneubildungsrate)**

Bearbeiter:  
 MH/MR  
 Proj. Nr.:  
 W17033-1891

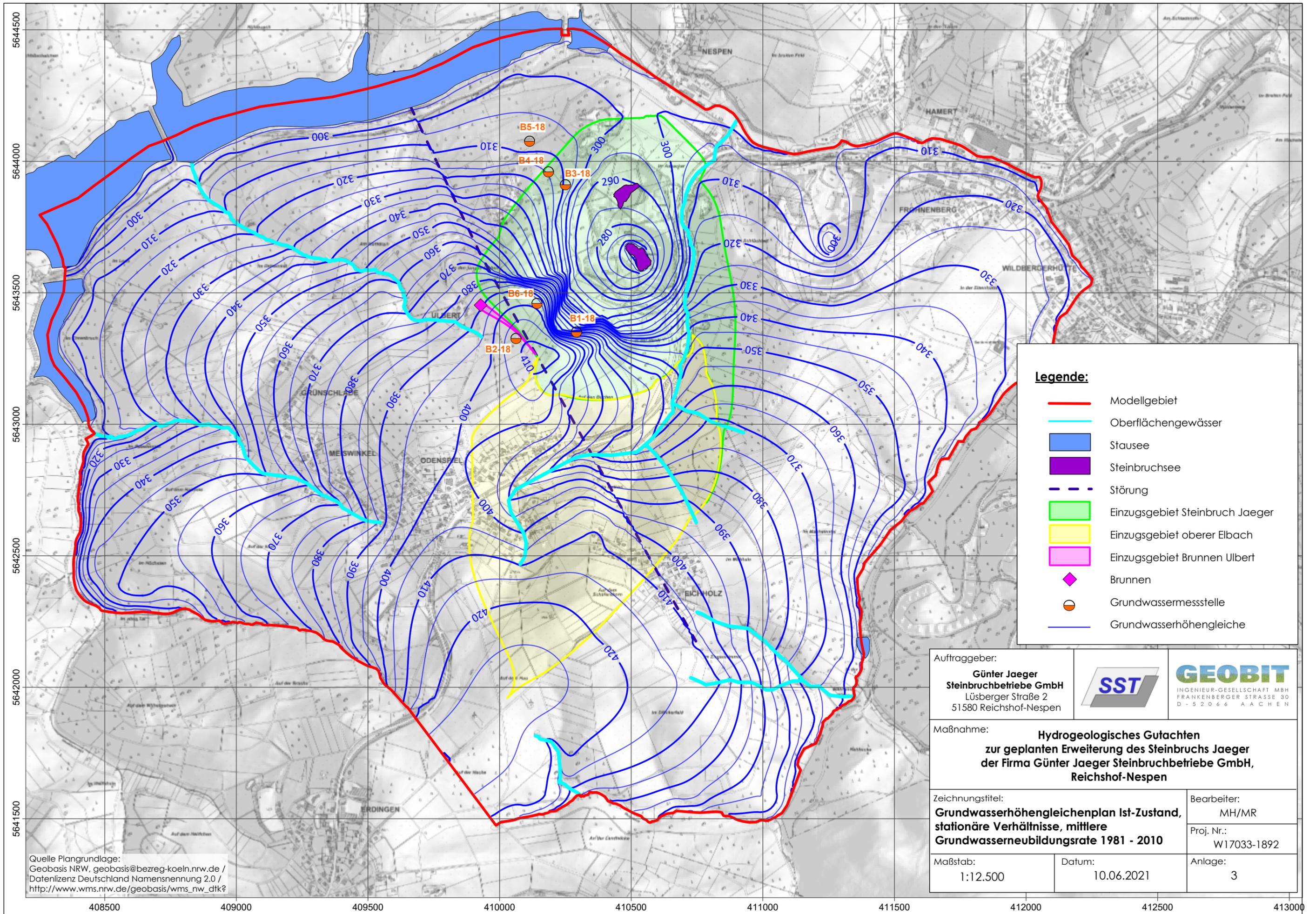
Maßstab:  
 1:12.500

Datum:  
 08.06.2021

Anlage:  
 2

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
 http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\_nw\_dtk?

408500      409000      409500      410000      410500      411000      411500      412000      412500      413000



**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee
- Steinbruchsee
- - - Störung
- Einzugsgebiet Steinbruch Jaeger
- Einzugsgebiet oberer Elbach
- Einzugsgebiet Brunnen Ulbert
- ◆ Brunnen
- Grundwassermessstelle
- Grundwasserhöhengleiche

Auftraggeber:  
**Günter Jaeger  
 Steinbruchbetriebe GmbH**  
 Lüsberger Straße 2  
 51580 Reichshof-Nespen



Maßnahme: **Hydrogeologisches Gutachten  
 zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger  
 der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH,  
 Reichshof-Nespen**

Zeichnungstitel:  
**Grundwasserhöhengleichenplan Ist-Zustand,  
 stationäre Verhältnisse, mittlere  
 Grundwasserneubildungsrate 1981 - 2010**

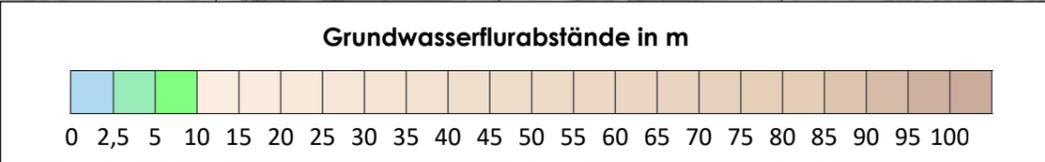
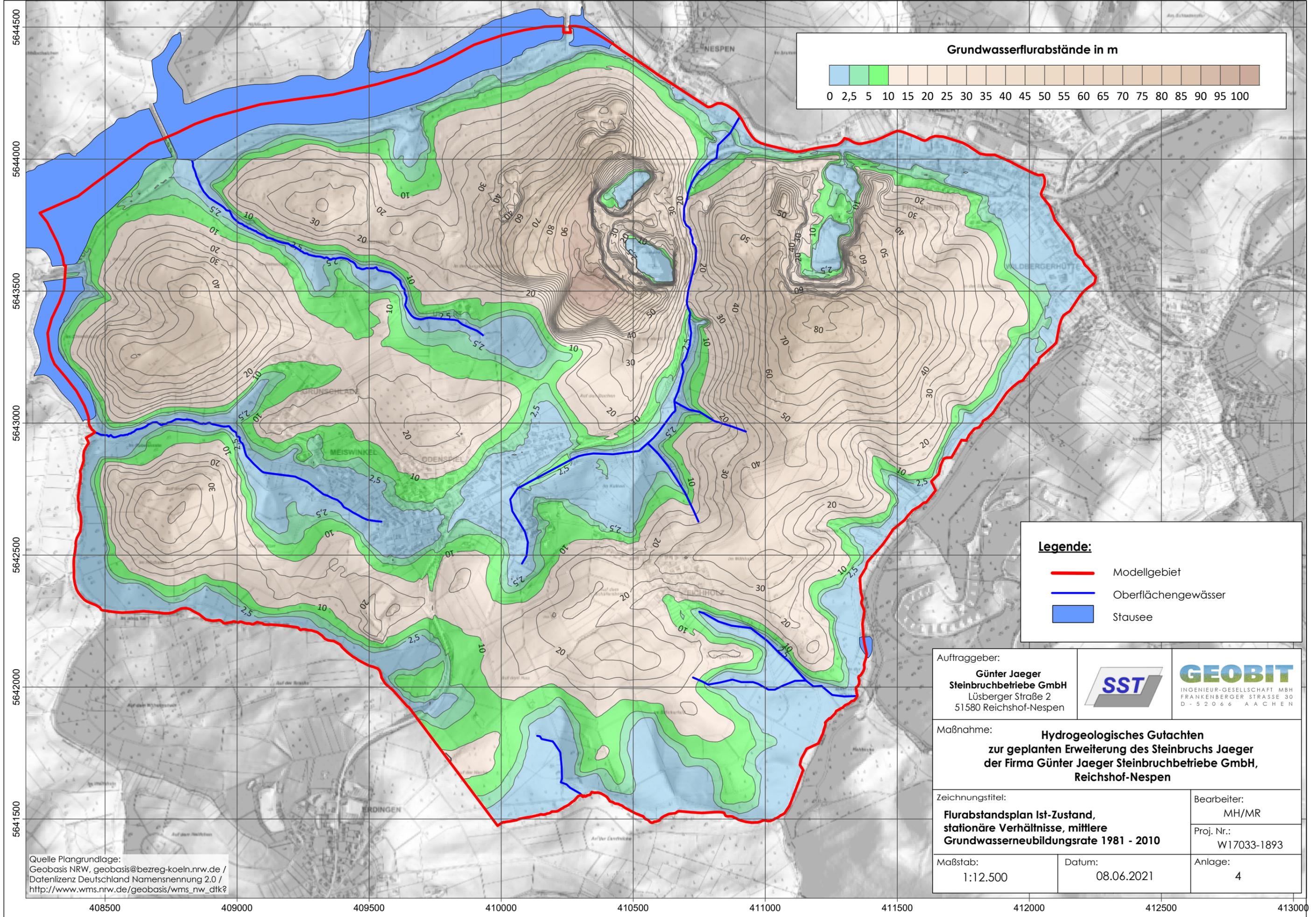
Bearbeiter:  
 MH/MR  
 Proj. Nr.:  
 W17033-1892

Maßstab:  
 1:12.500

Datum:  
 10.06.2021

Anlage:  
 3

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
 http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\_nw\_dtk?



**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee

Auftraggeber:  
**Günter Jaeger  
 Steinbruchbetriebe GmbH**  
 Lüsberger Straße 2  
 51580 Reichshof-Nespen



Maßnahme: **Hydrogeologisches Gutachten  
 zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger  
 der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH,  
 Reichshof-Nespen**

Zeichnungstitel:  
**Flurabstandsplan Ist-Zustand,  
 stationäre Verhältnisse, mittlere  
 Grundwasserneubildungsrate 1981 - 2010**

Bearbeiter:  
 MH/MR  
 Proj. Nr.:  
 W17033-1893

Maßstab:  
 1:12.500

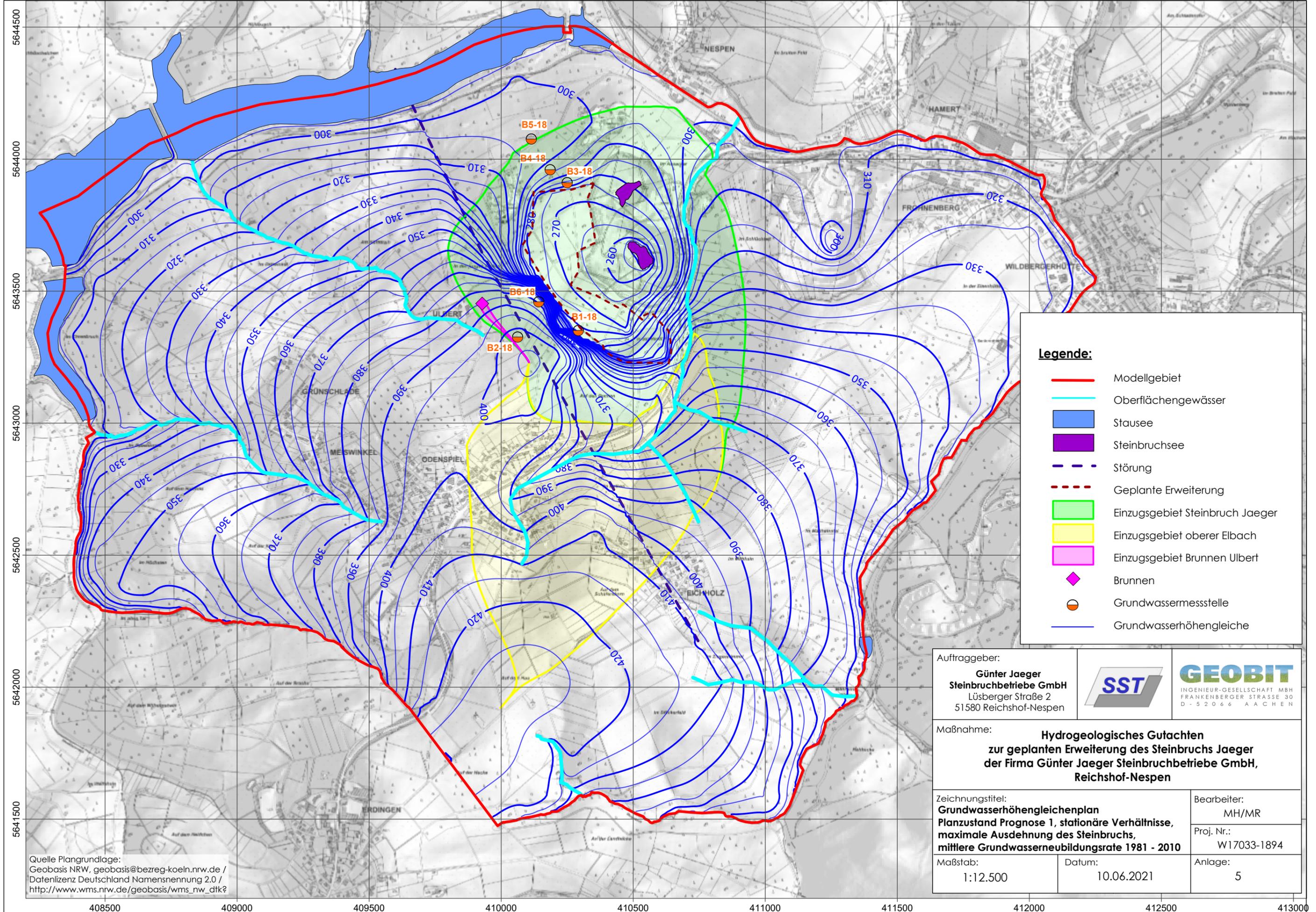
Datum:  
 08.06.2021

Anlage:  
 4

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)

408500 409000 409500 410000 410500 411000 411500 412000 412500 413000

5644500  
5644000  
5643500  
5643000  
5642500  
5642000  
5641500



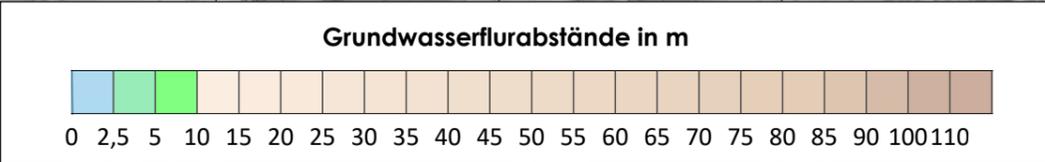
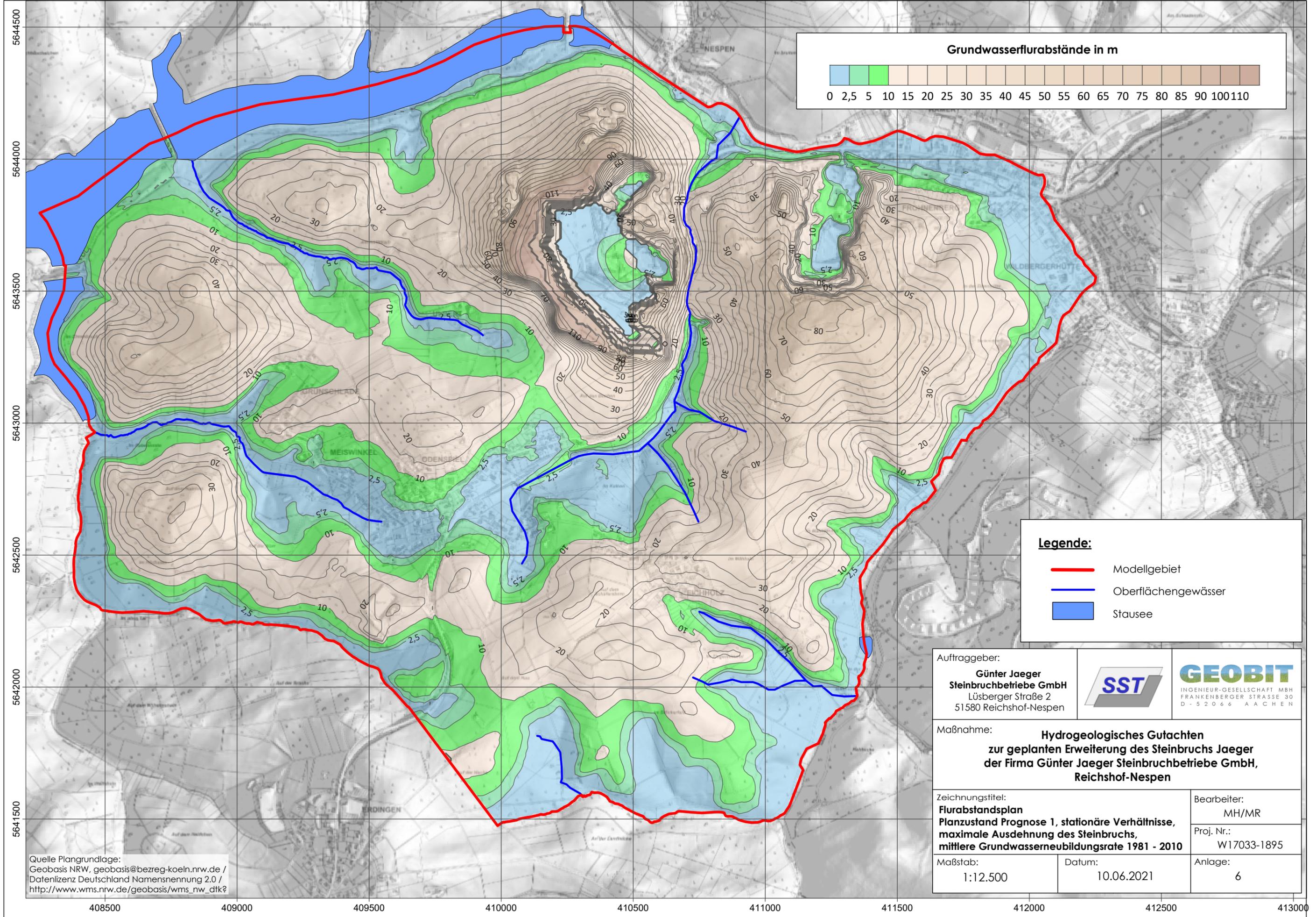
**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee
- Steinbruchsee
- - - Störung
- - - Geplante Erweiterung
- Einzugsgebiet Steinbruch Jaeger
- Einzugsgebiet oberer Elbach
- Einzugsgebiet Brunnen Ulbert
- ◆ Brunnen
- Grundwassermessstelle
- Grundwasserhöhengleiche

Auftraggeber: <b>Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH</b> Lüsberger Straße 2 51580 Reichshof-Nespen			
<b>Maßnahme:</b> <b>Hydrogeologisches Gutachten zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH, Reichshof-Nespen</b>			
Zeichnungstitel: <b>Grundwasserhöhengleichenplan Planzustand Prognose 1, stationäre Verhältnisse, maximale Ausdehnung des Steinbruchs, mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 - 2010</b>		Bearbeiter: MH/MR	
Maßstab: 1:12.500		Datum: 10.06.2021	
		Proj. Nr.: W17033-1894	
		Anlage: 5	

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
 http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\_nw\_dtk?

408500      409000      409500      410000      410500      411000      411500      412000      412500      413000



**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee

Auftraggeber:  
**Günter Jaeger  
 Steinbruchbetriebe GmbH**  
 Lüsberger Straße 2  
 51580 Reichshof-Nespen



Maßnahme: **Hydrogeologisches Gutachten  
 zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger  
 der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH,  
 Reichshof-Nespen**

Zeichnungstitel:  
**Flurabstandsplan  
 Planzustand Prognose 1, stationäre Verhältnisse,  
 maximale Ausdehnung des Steinbruchs,  
 mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 - 2010**

Bearbeiter:  
 MH/MR  
 Proj. Nr.:  
 W17033-1895

Maßstab:  
 1:12.500

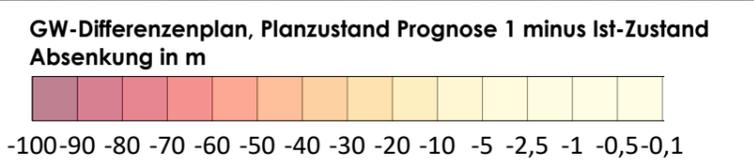
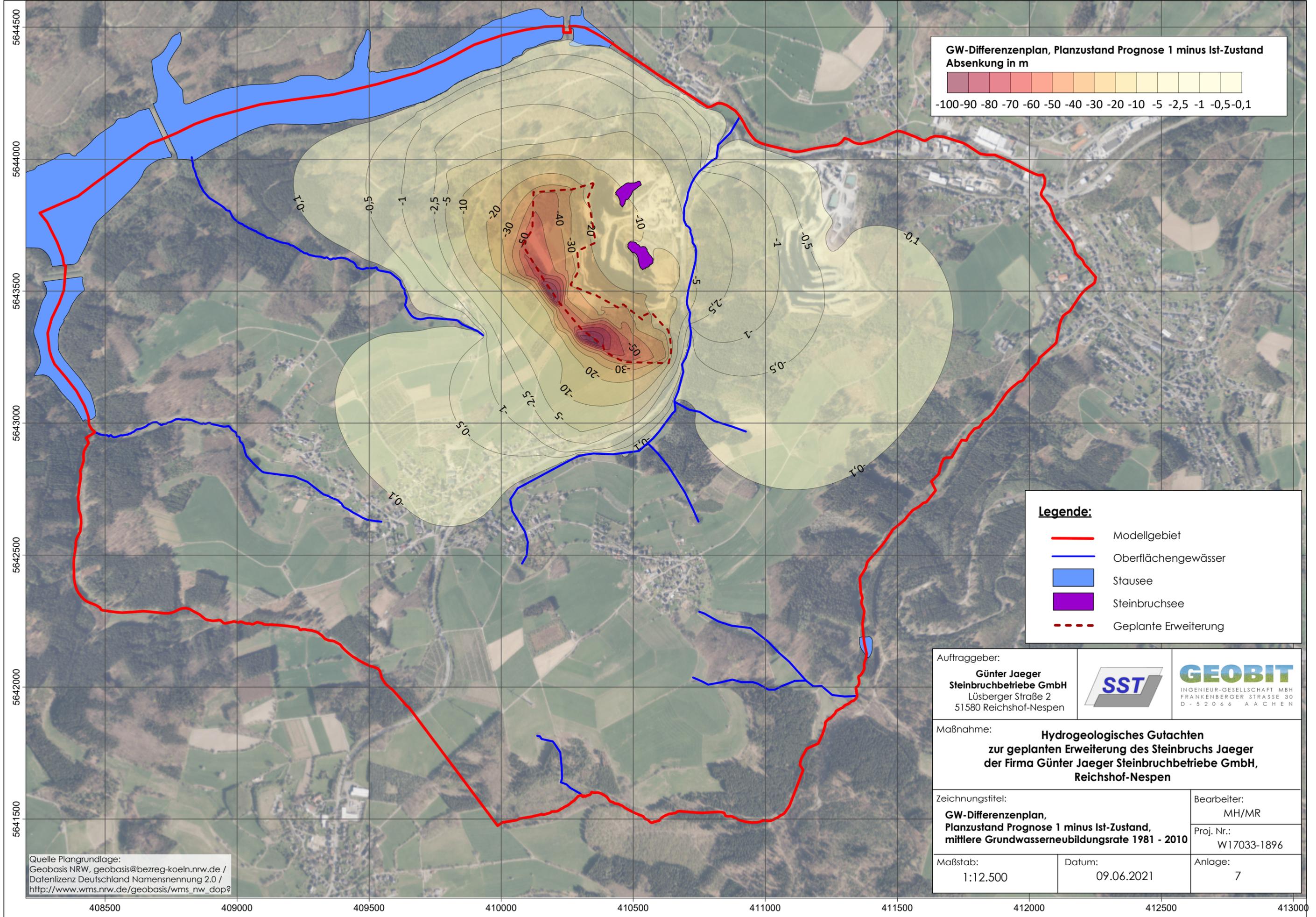
Datum:  
 10.06.2021

Anlage:  
 6

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
 http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\_nw\_dtk?

408500      409000      409500      410000      410500      411000      411500      412000      412500      413000

5644500  
5644000  
5643500  
5643000  
5642500  
5642000  
5641500



**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee
- Steinbruchsee
- - - Geplante Erweiterung

Auftraggeber:  
**Günter Jaeger  
 Steinbruchbetriebe GmbH**  
 Lüsberger Straße 2  
 51580 Reichshof-Nespen



Maßnahme: **Hydrogeologisches Gutachten  
 zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger  
 der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH,  
 Reichshof-Nespen**

Zeichnungstitel:  
**GW-Differenzenplan,  
 Planzustand Prognose 1 minus Ist-Zustand,  
 mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 - 2010**

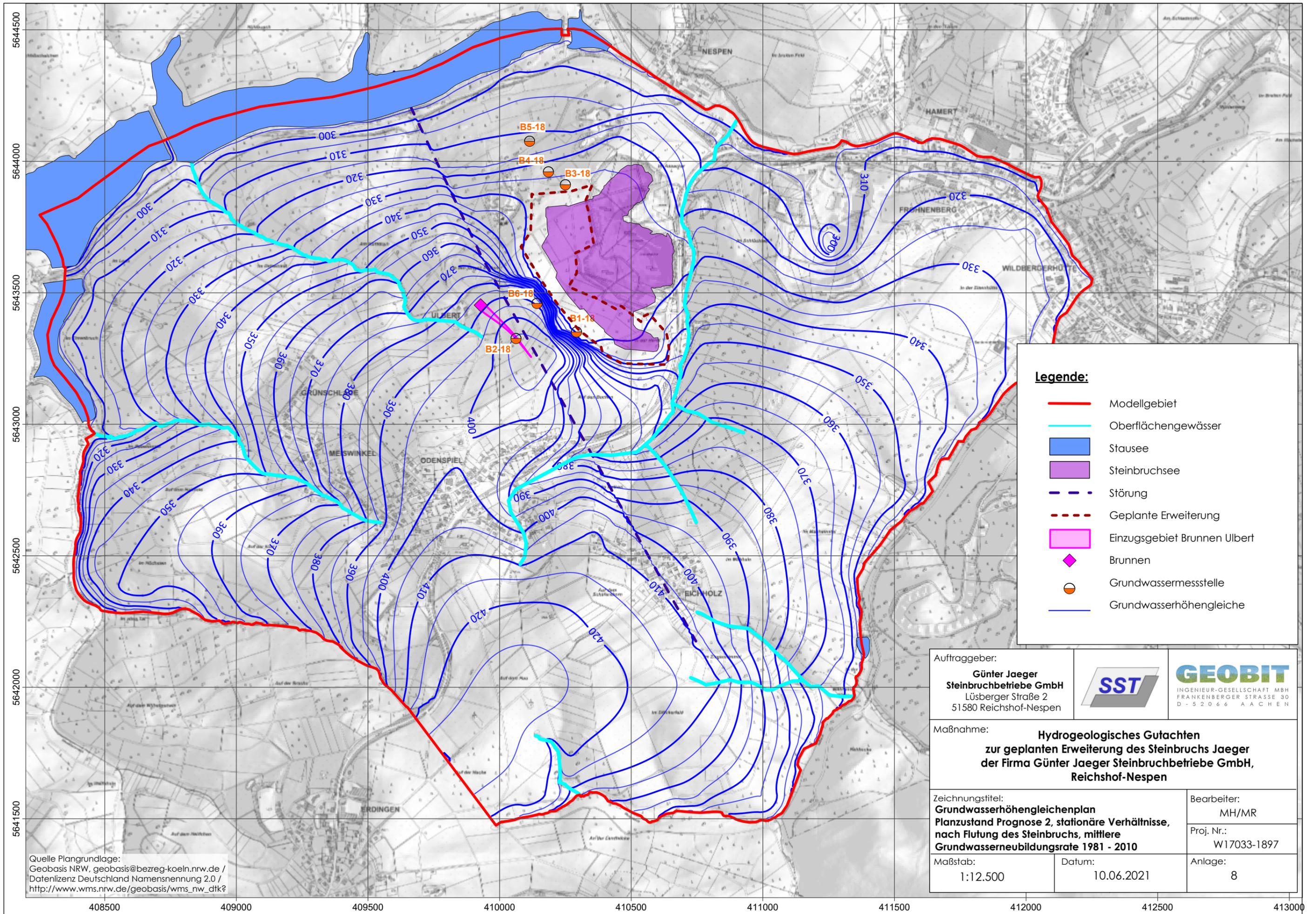
Bearbeiter:  
 MH/MR  
 Proj. Nr.:  
 W17033-1896

Maßstab:  
 1:12.500

Datum:  
 09.06.2021

Anlage:  
 7

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dop?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dop?)



**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee
- Steinbruchsee
- - - Störung
- - - Geplante Erweiterung
- Einzugsgebiet Brunnen Ulbert
- ◆ Brunnen
- Grundwassermessstelle
- Grundwasserhöhengleiche

Auftraggeber:  
**Günter Jaeger  
 Steinbruchbetriebe GmbH**  
 Lüsberger Straße 2  
 51580 Reichshof-Nespen



Maßnahme: **Hydrogeologisches Gutachten  
 zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger  
 der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH,  
 Reichshof-Nespen**

Zeichnungstitel:  
**Grundwasserhöhengleichenplan  
 Planzustand Prognose 2, stationäre Verhältnisse,  
 nach Flutung des Steinbruchs, mittlere  
 Grundwasserneubildungsrate 1981 - 2010**

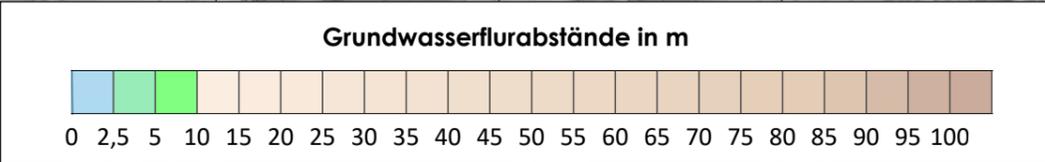
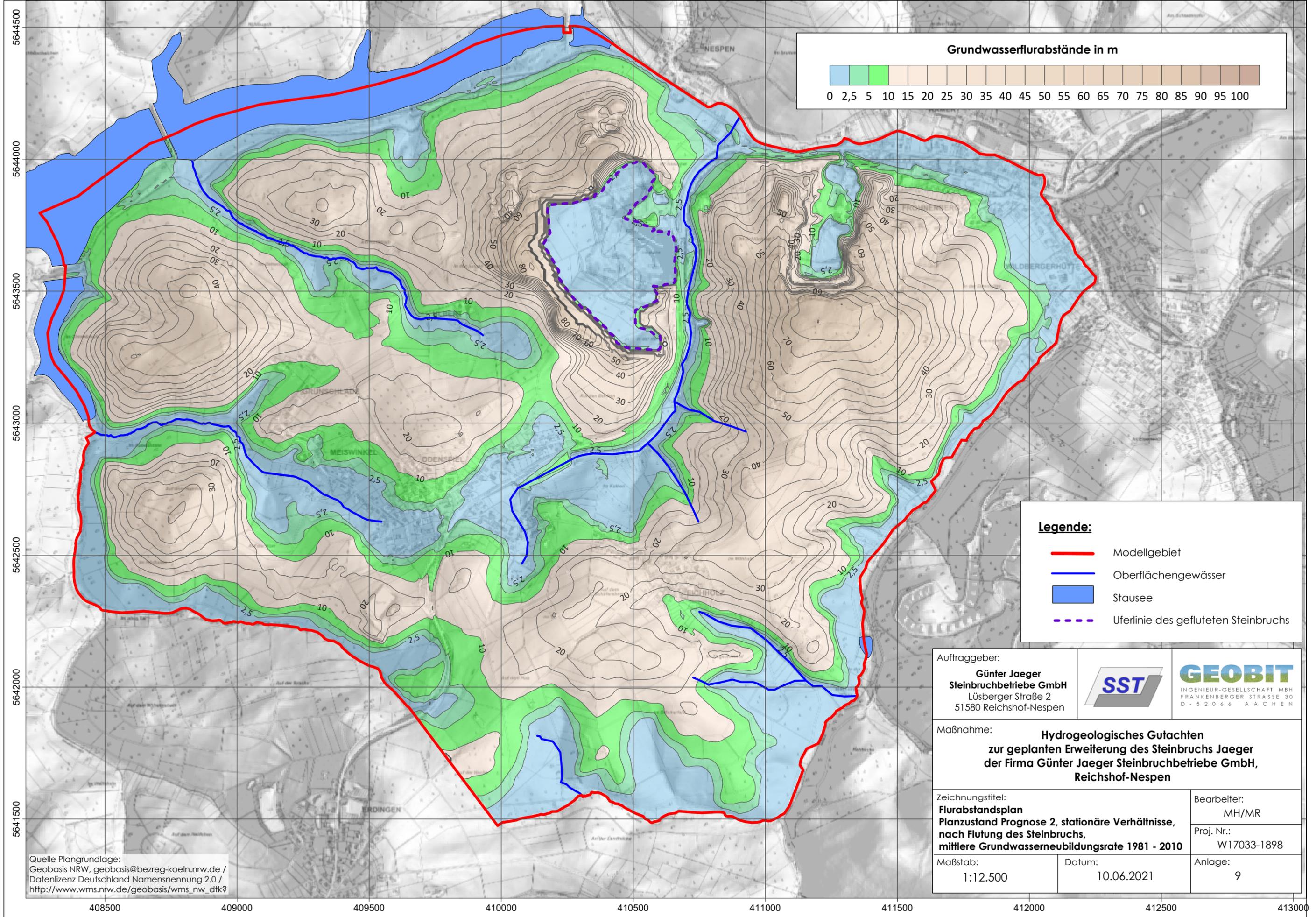
Bearbeiter:  
 MH/MR  
 Proj. Nr.:  
 W17033-1897

Maßstab:  
 1:12.500

Datum:  
 10.06.2021

Anlage:  
 8

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
[http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\\_nw\\_dtk?](http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk?)



**Legende:**

- Modellgebiet
- Oberflächengewässer
- Stausee
- Uferlinie des gefluteten Steinbruchs

Auftraggeber:  
**Günter Jaeger  
 Steinbruchbetriebe GmbH**  
 Lüsberger Straße 2  
 51580 Reichshof-Nespen



Maßnahme: **Hydrogeologisches Gutachten  
 zur geplanten Erweiterung des Steinbruchs Jaeger  
 der Firma Günter Jaeger Steinbruchbetriebe GmbH,  
 Reichshof-Nespen**

Zeichnungstitel:  
**Flurabstandsplan  
 Planzustand Prognose 2, stationäre Verhältnisse,  
 nach Flutung des Steinbruchs,  
 mittlere Grundwasserneubildungsrate 1981 - 2010**

Bearbeiter:  
 MH/MR  
 Proj. Nr.:  
 W17033-1898

Maßstab:  
 1:12.500

Datum:  
 10.06.2021

Anlage:  
 9

Quelle Plangrundlage:  
 Geobasis NRW, geobasis@bezreg-koeln.nrw.de /  
 Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0 /  
 http://www.wms.nrw.de/geobasis/wms\_nw\_dtk?

408500 409000 409500 410000 410500 411000 411500 412000 412500 413000

5644500  
5644000  
5643500  
5643000  
5642500  
5642000  
5641500