

**Antragsunterlagen für das wasserrechtliche  
Planfeststellungsverfahren gemäß § 68 WHG zur  
Erweiterung des Granitsteinbruchs  
Gehrenberg der RÖHRIGgranit® GmbH**

**Kapitel XIV  
Hydrogeologisches Gutachten**

**Antragsteller:**



RÖHRIGgranit® GmbH  
Werkstraße Röhrig 1  
64646 Heppenheim

**Bearbeitet von:**



Prof. Dr.-Ing. Stoll & Partner  
Ingenieurgesellschaft mbH  
Charlottenburger Allee 39  
52068 Aachen  
Dipl.-Ing. M. Buschmann  
Dr. M. Schmitz, M. Sc.

Projekt-Nr.: 1604501

August 2020

ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN  
HYDROGEOLOGIE - WASSERWIRTSCHAFT  
ALTLASTEN - ABFALLWIRTSCHAFT  
BAUGRUND - GEOTECHNIK  
ERDWÄRME - GEOTHERMIE

SOFTWAREKONZEPTE - EDV  
GIS - KARTOGRAPHIE  
GRAPHISCHE DATENVERARBEITUNG

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT - PR  
BERATUNG FÜR FIRMEN, INSTITUTIONEN  
TECHNIK, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG

**Hydrogeologische Bestandsaufnahme des Steinbruchs Gehrenberg  
und Prognose der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt -  
Antrag auf Steinbrucherweiterung nach BImSchG  
der RÖHRIGgranit® GmbH, Heppenheim**

**Auftraggeber:**                      RÖHRIGgranit® GmbH  
  **Ansprechpartner:** Herr Röhrig, Herr Koob  
  Herr Buschmann, SST Ing. GmbH

**Bearbeiter:**                         GEOBIT Ingenieur-Gesellschaft mbH  
  **Projekt-Nr.** W19012  
  Herr Himml

**Aachen, März 2020**

**Inhalt:**

1	Veranlassung	3
2	Verwendete Unterlagen	3
3	Lage des Steinbruchs "Gehrenberg"	3
4	Geologische und hydrogeologische Situation	5
5	Aspekte des Wasserhaushalts	8
5.1	Wasserhaushaltsgrößen	8
5.2	Förderraten des Steinbruchs	9
6	Quantifizierung der voraussichtlichen Auswirkungen des Planvorhabens	11
6.1	Parameterannahmen für die grundwasserhydraulischen Berechnungen	11
6.1.1	Höhenlage der ungestörten Grundwasseroberfläche im Steinbruch	11
6.1.2	Mächtigkeit des wasserwegsamem Entlastungshorizontes im Kluftaquifer	13
6.1.3	Kluftsystem	13
6.1.4	Durchlässigkeitsbeiwert, Ruhestromgefälle und natürlicher Wasserandrang	13
6.2	Grundwasserbürtiger Wasserandrang zum Steinbruchsee, stationäre Berechnung mit der DUPUIT/THIEM'schen Brunnenformel	13
6.2.1	Methodik	13
6.2.2	Grundwasserhydraulische Berechnung zum Ist-Zustand	15
6.2.3	Grundwasserhydraulische Berechnung zum bestehenden Genehmigungszustand	17
6.2.4	Grundwasserhydraulische Berechnung zum Planzustand	19
6.2.5	Grundwasserhydraulische Berechnung zum Planzustand nach Einstellung der Steinbruchsümpfung	21
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Berechnung des grundwasserbürtigen Wasserandrangs zum Steinbruchsee und der Reichweite der Absenkung	23
6.4	Prognose des voraussichtlichen Wasserandranges einschließlich Niederschlagswasser	26
7	Schlussfolgerungen	27

© Copyright 2020 - Urheberrechtshinweis

Alle Inhalte dieses Fachbeitrages, insbesondere Texte, Fotografien, Diagramme, Karten und Grafiken sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei der GEOBIT Ingenieurgesellschaft mbH. Bitte fragen Sie bei uns nach, falls Sie Inhalte dieses Fachbeitrages verwenden möchten.

Wer gegen das Urheberrecht verstößt (z.B. Bilder oder Texte unerlaubt kopiert), macht sich gem. §§ 106 ff UrhG strafbar, wird zudem kostenpflichtig abgemahnt und muss Schadensersatz leisten (§ 97 UrhG).

## 1 Veranlassung

Die Firma RÖHRIGgranit GmbH plant die Erweiterung des seit 1964 aufgefahrenen Granit-Steinbruchs "Gehrenberg" in Heppenheim-Sonderbach. Es handelt sich um eine Anlage nach BImSchG, für die eine wesentliche Änderung beantragt wird.

Nach Beendigung des Steinbruchbetriebs und der Einstellung der Sumpfung wird ein Steinbruchsee verbleiben.

Für die Entnahme von Niederschlagswasser und untergeordnet Grundwasser zum Zwecke der Steinbruchsümpfung, die teilweise Verwendung des gehobenen Wassers als innerbetriebliches Brauchwasser und die oberirdische Ableitung des nicht genutzten Wassers in ein nahegelegenes Oberflächengewässer besteht eine wasserrechtliche Erlaubnis.

Gegenstand der hier vorliegenden Stellungnahme ist eine Bestandsaufnahme zur hydrogeologischen Situation des Standortes im Ist-Zustand und eine Quantifizierung der voraussichtlichen Auswirkungen des Planvorhabens auf den Wasserhaushalt des Umfeldes. Zusätzlich erfolgt eine Quantifizierung des voraussichtlichen Verhältnisses von Niederschlagswasser zu Grundwasser als Basis für die genannte wasserrechtliche Erlaubnis.

## 2 Verwendete Unterlagen

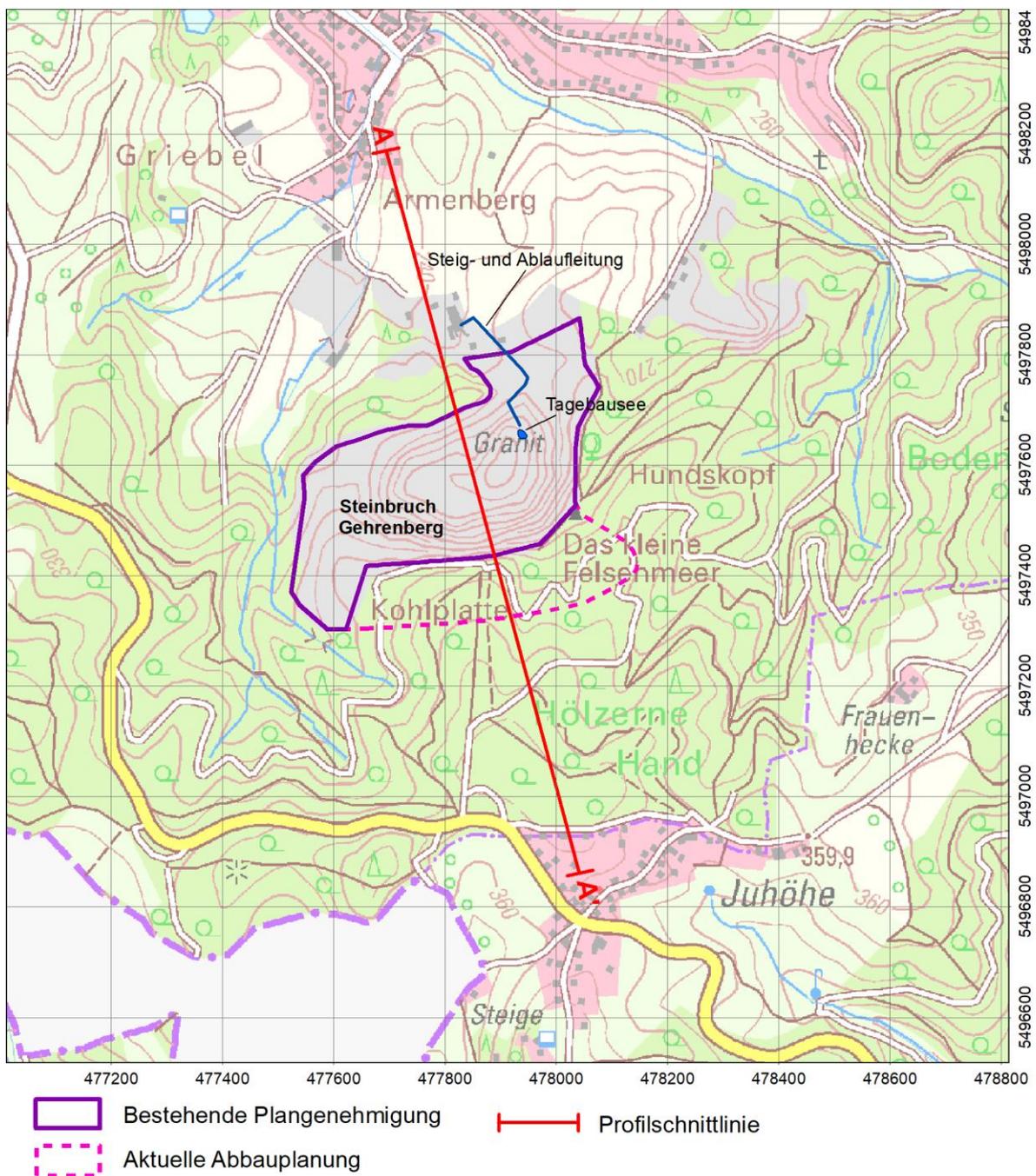
- ⇒ Pegelganglinien von Oberflächengewässern (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie)
- ⇒ Digitale Karte der mittleren Grundwasserneubildungsrate (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie)
- ⇒ Niederschlagsdaten (Deutscher Wetterdienst)
- ⇒ Hydrogeologie von Hessen – Odenwald und Sprenzlinger Horst (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Grundwasser in Hessen, Heft 2, Wiesbaden, 2017)
- ⇒ Planunterlagen zum Antragsgegenstand (SST Ingenieurgesellschaft mbH)
- ⇒ Betriebliche Aufzeichnungen zur Sumpfung (RÖHRIGgranit GmbH)

## 3 Lage des Steinbruchs "Gehrenberg"

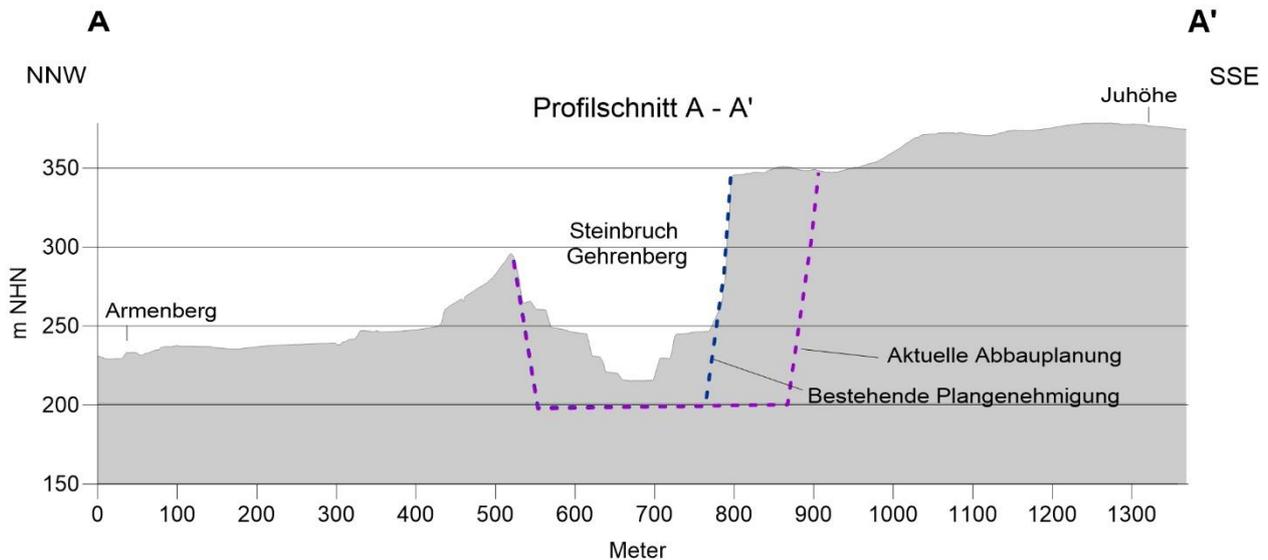
Der Steinbruch "Gehrenberg" der Fa. RÖHRIGgranit GmbH liegt 1 km südlich von Sonderbach, einem Ortsteil von Heppenheim im Landkreis Bergstraße (s. Abbildung 1). Der Steinbruch greift nach Süden in den Berghang der Kohlplatte ein. Die offene Steinbruchfläche hat eine Größe von rund 15 ha. Das morphologische Niederschlagsinzugsgebiet hat eine Größe von etwa 21 ha (0,207 km<sup>2</sup>). Die Karte in Abbildung 1 zeigt zusätzlich die Ausdehnung der derzeit gültigen Plangenehmigung sowie diejenige des aktuellen Antragsgegenstandes. Während der für die Bewertung des Wasserhaushalts des Steinbruchs betrachteten Zeit von Januar 2016 bis 2018 lag die tiefste Sohle des Steinbruchs und damit auch das Sumpfungsniveau bei etwa 214 m NHN. Erst seit etwa Oktober 2018 wurde auf zunächst kleiner Fläche die tiefste genehmigte Sohle von 198,5 m NHN aufgeschlossen.

Dem Pumpensumpf im Tiefsten des Steinbruchs strömt Niederschlagswasser und Grundwasser zu. Der

Wasserstand wird über eine mit einer Schwimmerschaltung ausgerüsteten Pumpe mit einer Schwankungsbreite des Wasserspiegels von ca. einem Meter konstant gehalten. Das Wasser wird nach Passage eines Absetzbeckens betrieblich zur Staubbindung genutzt. Überschüssiges Wasser wird in das namenlose Gewässer nordwestlich des Steinbruchs über ein Einlaufbauwerk abgeschlagen. Die mittlere Förderrate aus dem Steinbruch betrug in den Jahren 2017 und 2018 im Jahresmittel rund 124.000 m³. Die Abbildung 1 zeigt die Lage des Steinbruchsees und den Verlauf der Steig- bzw. Ablaufleitung bis zum Abschlag in das Gewässer. Die Abbildung 2 zeigt einen zweifach überhöhten morphologischen, etwa NNW-SSE verlaufenden Profilschnitt durch den Steinbruch Gehrenberg. Die Lage der Schnittlinie ist der Abbildung 1 zu entnehmen.



**Abbildung 1: Lage des Steinbruchs Gehrenberg, Landkreis Bergstraße**



**Abbildung 2: Morphologischer Profilschnitt (Grundlage: DGM1, HVBG, Befliegung SST Ing. GmbH), Schnittlinie s. Abbildung 1**

#### 4 Geologische und hydrogeologische Situation

Der Untergrund in diesem Bereich wird gebildet durch den "Weschnitz-Pluton" des Bergsträßer Odenwalds. Bei dem Weschnitz-Pluton handelt es sich um einen paläozoischen Intrusivkörper des Odenwaldkristallins, der aus Granodioriten und Dioriten besteht. Die Entstehung des Weschnitzplutons erfolgte im Verlauf der variszischen Gebirgsbildung zunächst durch Aufschmelzung tief versenkter kontinentaler Kruste im Devon und deren Neukristallisation als Plutonite mit nachfolgendem Aufstieg im Zuge der Hebung des Gebirges im Karbon.

Das heutige Landschaftsbild ist gekennzeichnet durch rundliche Bergkuppen (ca. 370 bis 390 m NHN, Salzkopf 391 m NHN) und zwischen diesen eingeschnittenen Tälern (Talsole bei ca. 200 m NHN in Sonderbach). Die Entstehung der heutigen Morphologie begann nach einer bereits erfolgten Einebnung des Odenwaldes zu einem großen Anteil im Tertiär durch erneute Hebung und gleichzeitiger Bildung des Oberrheintalgrabens. Diese tektonischen Prozesse gingen einher mit einer im tertiären tropischen Klima tiefgründigen hydrolytischen Verwitterung der durch die Gebirgsbildung geklüfteten plutonischen Silikatgesteine. Dabei bildet sich ein typischer scharfkantig körniger Granitgrus der Mineralkörner begleitet von der Bildung von Tonmineralen. Diese für Plutonite typische Form der Verwitterung führt an den Verschneidungskanten der Klüfte des Gebirges nahe der Erdoberfläche zu typisch rundlichen Formen der der Verwitterung ausgesetzten Felsblöcke, der so genannten "Wollsackverwitterung". In den quartären Eiszeiten verstärkten sich die Erosionsprozesse infolge häufigen Frost-/Tauwechsels und Bodenfließen über Permafrostboden. Durch Niederschläge wurden die Verwitterungsprodukte in die Täler transportiert und akkumulierten als Lockergesteine an den Talflanken in Form von Hangschuttdecken bzw. als Talfüllungen in den tieferen Lagen. Letztere können vergleichsweise große Mächtigkeiten > 10 m aufweisen. Diese Art von Sedimenten wird als "Kolluvium" bezeichnet.

Hydrogeologisch haben sich aus der erläuterten geologischen Entwicklung zwei unterschiedliche Grundwasserleiter gebildet. Zum einen handelt es sich um einen Lockergesteinsaquifer innerhalb der kolluvialen Verwitterungsprodukte an den Talflanken und in den Talfüllungen, und zum anderen um einen Klufftaquifer innerhalb des unverwitterten kristallinen Grundgebirges.

Die Verbreitung des Grundwasserleiters im Lockergestein zeichnet die Morphologie der Region nach und

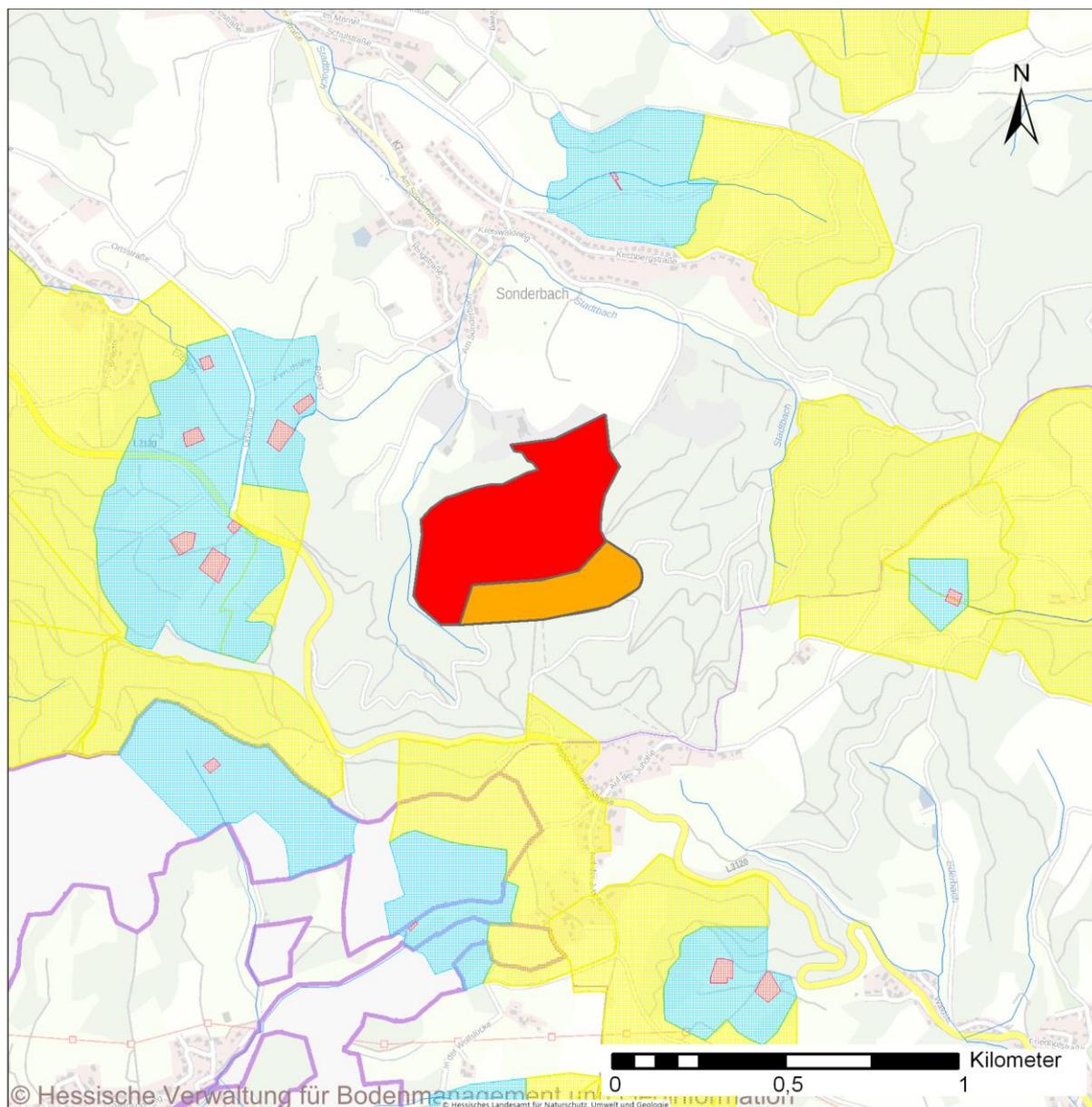
folgt dem Verlauf des Entwässerungssystems bzw. der Täler, wo er seine größten Mächtigkeiten erreicht. An den Talflanken dünnt mit zunehmender Höhe das Lockergestein aus und weist seine geringste Mächtigkeit im Bereich der Kuppen aus. Dauerhaft wassererfüllt ist dieses Aquifersystem in der Regel im Niveau der Talböden entlang der Oberflächengewässer und wird über die Grundwasserneubildung in den Tälern selbst sowie aus lateral zuströmendem Interflow-Wasser aus den seitlich anschließenden Hangschuttdecken wiederergänzt. Der kolluviale Grundwasserleiter hat im Gegensatz zum tieferen Klufftaquifer ein gutes Speichervermögen und wird im Bergsträßer Odenwald auch örtlich zur Grundwasserentnahme genutzt. Die Oberflächengewässer im Bergsträßer Odenwald stehen im engen Zusammenhang mit dem kolluvialen Grundwasserleiter. Der Trockenwetterabfluss in den Gewässern stammt zum überwiegenden Anteil aus dem Kolluvium.

Im weiteren Umfeld des Steinbruchs Gehrenberg gibt es eine Reihe von kleineren Wasserfassungen der öffentlichen Trinkwasserversorgung mit ausgewiesenen Wasserschutzgebieten, welche zur Rohwassergewinnung diesen oberflächennahen kolluvialen Grundwasserleiter nutzen. Alle Wasserschutzgebiete (s. Abbildung 3) liegen jenseits der nächstgelegenen natürlichen Vorfluter bzw. jenseits morphologischer Wasserscheiden.

Nur ein Teil der Grundwasserneubildung strömt nicht über den meist gut durchlässigen Hangschutt den kolluvialen Talaquifere zu, sondern durchsickert die Verwitterungsdecke und ergänzt den Klufftaquifer des kristallinen Grundgebirges. Der Diorit des Grundgebirges bildet ein massiges Gestein mit einer mittel- bis weitständigen Klüftung ohne Gesteinsporosität i.e.S. Der typische Kluffkörper hat eine Kantenlänge im dm- bis m-Bereich. Das Hauptkluffsystem ist etwas nördlicher als variszisch (NE-SW/NW-SE) orientiert und weist generell steiles Einfallen auf. Die Kluffweiten sind im Steinbruch als generell eng bis gelegentlich teilweise offen anzusprechen. Im Gegensatz zum Lockergesteinsaquifer der Kolluvien ist die Wasserleitfähigkeit des Klufftaquifers wie auch sein Speichervermögen als gering einzuordnen. Wasserwirtschaftlich hat der Klufftaquifer des Kristallins im Bergsträßer Odenwald aus diesem Grund generell keine Bedeutung. Zur Tiefe hin nimmt die Wasserleitfähigkeit des Klufftaquifers ab. Erfahrungsgemäß ist eine nennenswerte Wasserleitfähigkeit infolge der Entlastung des Gebirges auf einige wenige Zehner-Meter unterhalb der Geländeoberfläche beschränkt, wobei sie unter den Bergkuppen generell relativ tiefer reicht als unter den Talböden.

Kluffaquifere 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 Kluffaquifere nur mit Einschränkungen übertragbar und generell mit höherer Unsicherheit behaftet. Dennoch ist zur Frage der Reichweite der Auswirkung des Planvorhabens auf das Grundwasser eine quantitative Betrachtung erforderlich. Dies ist möglich, wenn der Betrachtungsmaßstab verkleinert wird. Für die nachfolgenden grundwasserhydraulischen Berechnungen in Abschnitt 6 wird der Klufftaquifer daher unter Annahme eines vergleichsweise großen repräsentativen Elementarvolumens (10er-Meter Skala) nach dem Kontinuumsansatz betrachtet, so dass näherungsweise die Gültigkeit des DARCY-Gesetzes mit laminarer Porenströmung angenommen wird.

Vorflut für beide Grundwasserleitersysteme sind im Standortbereich die Oberflächengewässer des Bergsträßer Odenwaldes. Die Quellen als höchste Punkte der als Liniensenken für das Grundwasser fungierenden Bäche im Umfeld des Steinbruchs Gehrenberg liegen bei etwa 340 m NHN. Die Oberflächengewässer werden vornehmlich aus dem Lockergesteinsaquifer des Kolluviums gespeist. Der Klufftaquifer hat in den mittleren bis tiefen Tallagen nur mittelbar über den Lockergesteinsaquifer Anschluss an die Vorfluter.



- Trinkwasserschutzgebiete**
- Zone I
  - Zone III bzw. IIIA
  - Bestehende Plangenehmigung
  - Zone II
  - Zone IIIB
  - Aktuelle Abbauplanung

**Abbildung 3: Wasserschutzgebiete im Umfeld des Steinbruchs Gehrenberg**

In der Veröffentlichung "Hydrogeologie von Hessen – Odenwald und Sprendlinger Horst" des HLNUG (2017) ist eine ausführliche und flächendifferenzierte Betrachtung des Wasserhaushaltes des Odenwaldes und seiner maßgeblichen Teilräume dokumentiert. Über eine Langzeitbetrachtung von Abflussganglinien regional verteilter Oberflächengewässer wurden mittlere monatliche Niedrigwasserabflussspenden nach verschiedenen Verfahren auch aus dem Bereich des Odenwaldkristallins bestimmt. Diese Werte spiegeln den regionalen grundwasserbürtigen Basisabfluss der Oberflächengewässer wider und können als Gebietswerte der Grundwasserneubildungsspende aufgefasst werden. Für den kristallinen Odenwald wurden Werte zwischen  $4,8$  und  $6,2 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ , im Mittel  $5,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  ermittelt.

Bei einer Niederschlagspende von generell deutlich über  $30 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  ist der ermittelte Wertebereich relativ niedrig. Er ist Ausdruck der hydrogeologischen Verhältnisse mit einem kolluvialen Lockergesteinsaquifer mit

guter Wasserleitfähigkeit und hohem Speichervermögen bei gleichzeitig begrenzter räumlicher Verbreitung einerseits und einem verbreitet auftretenden Kluftaquifer mit geringer Wasserleitfähigkeit und geringem Speichervermögen andererseits. Es wird in der genannten Veröffentlichung erläutert, dass der überwiegende Anteil der Grundwasserneubildung im Bereich des kolluvialen Lockergesteinsaquifers gebildet wird bzw. diesem als Interflow lateral aus den Hangschuttdecken zuströmt und nur ein kleiner Teil von etwa  $1,0 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  zur Tiefe hin den Kluftaquifer wiederergänzt.

## 5 Aspekte des Wasserhaushalts

### 5.1 Wasserhaushaltsgrößen

Die Angaben zu den nachfolgend erläuterten Größen des Wasserhaushalts beruhen im Wesentlichen auf Angaben aus der Veröffentlichung "Hydrogeologie von Hessen" des HLNUG (2017). Dort ist das Ergebnis eines flächendifferenzierten Bodenwasserbilanzmodells auf der Basis von geologischen, morphologischen und klimatischen Daten unter Berücksichtigung der Vegetation bzw. Landnutzung dokumentiert.

#### Niederschlag

Bei vorherrschenden West- bis Südwestlagen führen orographisch bedingt durch den Höhenunterschied zwischen dem Oberrheintiefland und dem Odenwald die aufgleitenden feuchten Luftmassen zu Steigungsregen. Gegenüber dem Tiefland mit etwa 700 mm Jahresniederschlag fallen auf den höchsten Erhebungen des Odenwaldes im langjährigen Mittel mehr als 1.200 mm Jahresniederschlag. Der Bereich des Steinbruchs Gehrenberg an der Westseite des Bergsträßer Odenwaldes liegt nach der genannten Auswertung des HLNUG in der Zone mit 1.001 bis 1.100 mm Jahresniederschlagssumme (1971-2000), so dass nachfolgend von einem Wert von 1.050 mm ausgegangen wird.

#### Verdunstung

Die Verdunstungsrate bzw. Evapotranspiration ist jahreszeitlich und räumlich abhängig von den Einflussfaktoren:

- Niederschlag
- Sättigungsdefizit der Luft
- Reliefenergie
- Bodenfeuchte
- Landnutzung
- Phase der Vegetationsperiode.

Auf Grundlage der genannten flächendifferenzierten Auswertung gibt das HLNUG im näheren Steinbruchbereich als reelle bzw. tatsächliche jährliche Verdunstung etwa 500 mm und im bewaldeten Umfeld von etwa 700 mm an.

#### Gesamtabfluss

Der Gesamtabfluss errechnet sich aus der Wasserhaushaltsgleichung

$$N - V = A$$

mit

- $N$  = Niederschlag
- $V$  = Verdunstung
- $A$  = Abfluss

Nach dem Wasserhaushaltsmodell des HLNUG ergibt sich im engeren Steinbruchbereich eine mittlere jährliche Gesamtabflusshöhe von etwa  $1.050 - 500 = 550$  mm und im bewaldeten Umfeld von etwa  $1.050 - 700 = 350$  mm.

#### Direktabfluss und Grundwasserneubildung

Der Gesamtabfluss  $A$  ist die Summe aus oberirdischem (=Direktabfluss) und unterirdischem Abfluss (Grundwasser, Interflow):

$$A_o + A_u = A$$

mit

- $A_o$  = Direktabfluss (oberirdisch)
- $A_u$  = unterirdischer Abfluss (Grundwasser, Interflow)
- $A$  = Abfluss

Für die mittlere Grundwasserneubildungsrate  $A_u$  stellt das HLNUG einen gesonderten flächendifferenzierten Rasterdatensatz (Gitterweite = 100 m) zur Verfügung, dem für den Steinbruch eine jährliche Grundwasserneubildungsrate von 150 - 200 mm (im Mittel 175 mm), und dem bewaldeten Umfeld von 100 – 300 mm (im Mittel 200 mm) entnommen werden kann. Mit diesen Daten lässt sich der Direktabfluss  $A_o$  näherungsweise berechnen zu  $550 - 175 = 375$  mm für den Steinbruchbereich und zu  $350 - 200 = 150$  mm für das bewaldete Umfeld. Die Unterschiede lassen sich begründen durch die unterschiedliche Oberflächengestalt und Vegetationsdecke. Im Steinbruch liegt das Gestein wegen der fehlenden Vegetationsdecke offen, die Transpiration durch Pflanzen ist daher praktisch nicht vorhanden, eine Bodenspeicherung ist vernachlässigbar. Demgegenüber dürfte die direkte Evaporation im Steinbruch etwas höher ausfallen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die hier genannte Grundwasserneubildungsrate im Steinbruchbereich auch den unterirdischen Zufluss enthält (der hier als Interflow i.w.S. angesprochen wird), der in der durch die Gewinnungstätigkeit verursachten oberflächennahen Auflockerungszone des Grundgebirges dem Pumpensumpf zuströmt. Der bei Trockenwetter aus dem Grundgebirge dem Pumpensumpf zuströmende Anteil ist deutlich geringer.

In Tabelle 1 sind die Wasserhaushaltsgrößen des Standortbereichs in verschiedenen Einheiten zusammengestellt.

**Tabelle 1: Näherungsweise Wasserhaushaltsgrößen im Plangebiet (abgeleitet aus HLNUG, 2017)**

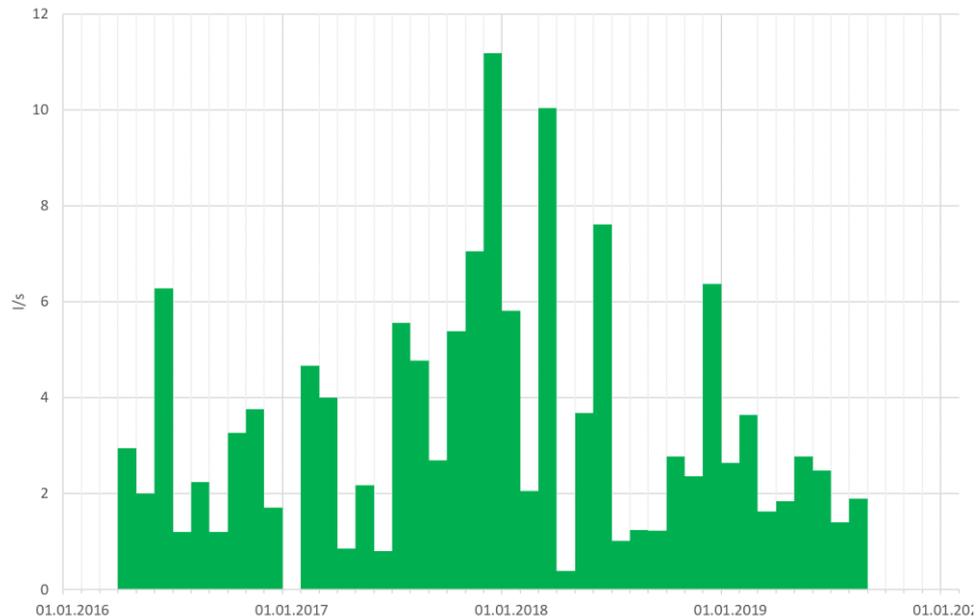
		Bereich Gehrenberg		Umfeld	
		mm/a	l·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup>	mm/a	l·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup>
Niederschlag	$N$	1050	33,3	1050	33,3
Verdunstung	$V$	500	15,8	700	22,2
Gesamtabfluss	$A$	550	17,4	350	11,1
Direktabfluss	$A_o$	375	11,9	150	4,8
Grundwasserneubildung*	$A_u$	175	5,5	200	6,3

\*einschl. Interflow, Erläuterung im Text

## 5.2 Förderraten des Steinbruchs

Die Förderraten aus dem Pumpensumpf des Steinbruchs Gehrenberg werden über monatliche Ablesungen des Betriebsstundenzählers der Pumpe erfasst. Testmessungen ergaben, dass die installierte Pumpe unter den seit November 2018 herrschenden Einbaubedingungen in einer Höhenlage von etwa 198,5 m NHN hinsichtlich Förderhöhe und Verrohrung eine Förderrate von 42,0 m³/h besitzt. Auf Grundlage dieser Testmessung wurde

für die vorherige Einbausituation in einer Höhenlage von etwa 214 m NHN auf Basis der Pumpenkennlinie, der geringeren Förderhöhe und kürzeren Rohrleitung eine Leistung von 53 m<sup>3</sup>/h abgeleitet. Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Förderung im Zeitraum vom April 2016 bis August 2019. Bei einem monatlichen Mittelwert von 3,4 l·s<sup>-1</sup> über den Datenzeitraum ist eine Schwankung der Förderung zwischen minimal 0,4 l·s<sup>-1</sup> und maximal 11,2 l·s<sup>-1</sup> anhand der Monatswerte dokumentiert. Aufgrund der monatlichen zeitlichen Auflösung der Daten ist eine Analyse des Wasserandranges bei Trockenwetter zur Abschätzung des Grundwasserneubildungsrate über den Grundwasserandrang im Einzugsgebiet nicht möglich. Auch sind keine Aussagen zur Förderung nach Starkregenereignissen möglich.



**Abbildung 4: Förderdaten des Steinbruchs Gehrenberg April 2016 – August 2019**

Abbildung 5 zeigt über den Datenzeitraum auf Basis von Monatswerten die Förderraten der Steinbruchentwässerung Gehrenberg, den Niederschlag der DWD-Station Birkenau 5 km südlich des Steinbruchs und den mittleren Abfluss am Pegel Fahrenbach an der Weschnitz etwa 5 km ostnordöstlich vom Steinbruch. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Daten als Spenden in l·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup> aufgetragen mit 0,207 km<sup>2</sup> Größe des Niederschlagsinzugsgebietes des Steinbruchs und 45,1 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsgröße des Pegels Fahrenbach (Datenquelle: HLNUG, Tageswerte in m<sup>3</sup>/s).

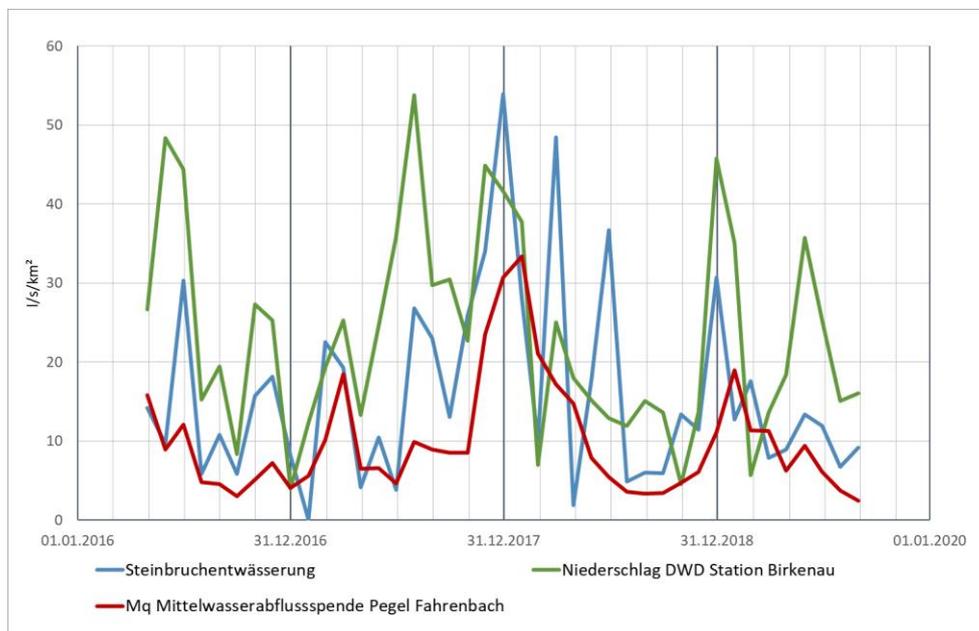
Die Korrelation zwischen Niederschlag und Wasserförderung im Steinbruch ist deutlich, wobei die Steinbruchentwässerung infolge von Verdunstungsverlusten im Datenzeitraum mit im Mittel 16 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup> generell geringer ausfällt als die Niederschlagspende mit im Mittel 23 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>. Die Steinbruchentwässerung stimmt im Datenzeitraum somit recht gut mit der auf Grundlage der Auswertung des HLNUG für den Steinbruchbereich ermittelten Gesamtabflusspende (Tabelle 1) von 17,4 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup> überein. Zu beachten ist, dass der langjährige Jahresniederschlag an der Station Birkenau mit 905 mm etwa um 15 % geringer ausfällt als der für den Standort Gehrenberg zugrunde gelegte Wert.

Deutlich geringer als die Förderung der Steinbruchentwässerung Gehrenberg ist die Abflusspende in der Weschnitz mit im Mittel 10 l·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup> im Vergleichszeitraum. Dieser Sachverhalt entspricht den Erwartungen aufgrund des im Einzugsgebiet des Pegels vorhandenen Speicherrückhalts (kolluviale Grundwasserleiter) und der verbreiteten Vegetationsdecke, welche zu einer ausgeprägteren Evapotranspiration führt als im praktisch vegetationslosen Steinbruch, wo praktisch ausschließlich reine Evaporation stattfindet. Aufgrund der

trockenen Jahre 2018 und 2019 weichen die Daten des hier ausgewerteten relativ kurzen Zeitraums von den langjährigen Gebietswerten der Tabelle 1 ab.

Herauszustellen ist, dass nach bisherigen Erkenntnissen aufgrund des relativ kleinen Einzugsgebietes des Steinbruchs, des ausgeprägten Reliefs, fehlender Transpiration durch Vegetation, unbedeutender Retentionswirkung und geringem Grundwasserandrang die Förderrate aus dem Steinbruch deutlicher durch den Verlauf der Niederschlagsereignisse selbst als durch Speicherauffüllungs- bzw. -entleerungsprozesse geprägt ist.

Aussagen zum vermutlich vergleichsweise geringeren Niedrigwasserandrang (= Grundwasserandrang) in Trockenwetterphasen sind aufgrund der groben zeitlichen Auflösung der Förderdaten aus dem Steinbruch anhand der vorliegenden Zeitreihe nicht möglich. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der vermuteten generell geringen Grundwasserneubildungsrate in das Kristallin der relative Anteil des Direktabflusses einschließlich des Interflows in der Auflockerungszone des Steinbruchs gegenüber dem Grundwasserzstrom aus dem südlichen Einzugsgebiet vergleichsweise groß ist.



**Abbildung 5: Förderrate des Steinbruchs Gehrenberg, Niederschlagspende, DWD Station Birkenau und Mittelwasser Abflussspende am Pegel Fahrenbach, Monatswerte**

## 6 Quantifizierung der voraussichtlichen Auswirkungen des Planvorhabens

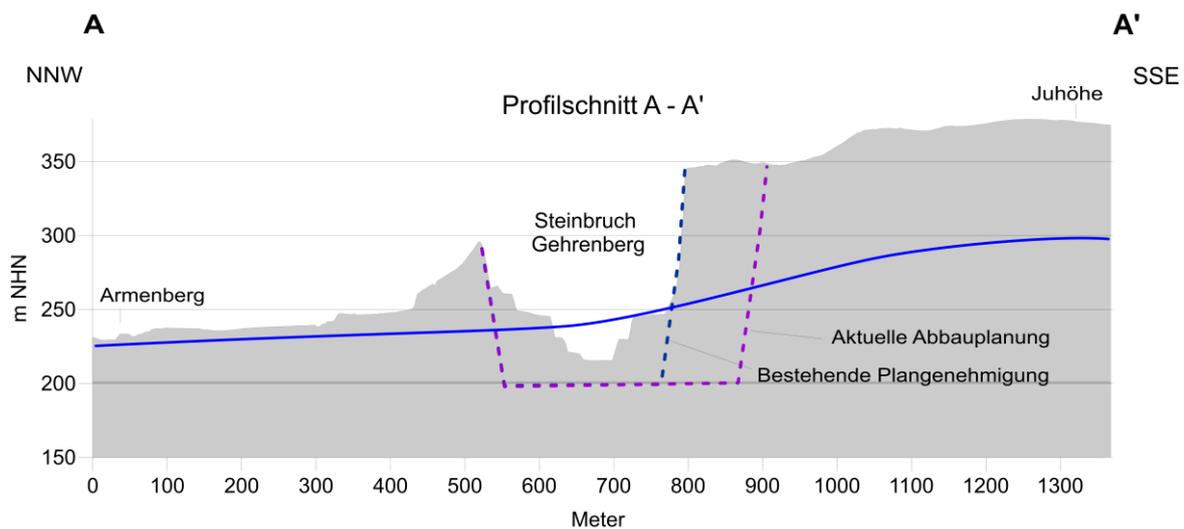
### 6.1 Parameterannahmen für die grundwasserhydraulischen Berechnungen

#### 6.1.1 Höhenlage der ungestörten Grundwasseroberfläche im Steinbruch

Wie bereits erläutert, ist eine stetige und durchgehende Grundwasseroberfläche in einem Kluffgrundwasserleiter aufgrund der natürlichen Heterogenität und Anisotropie des Gebirges i.d.R. nur mit Einschränkung gegeben. Das Kluffsystem ist zwar meist vernetzt, einzelne Klüfte können jedoch auch nur schlecht angebunden sein. Bei der Anwendung des Kontinuumsansatzes wird davon ausgegangen, dass das Kluffnetz mit seinen Wasserwegsamkeiten innerhalb des hinreichend groß angenommenen repräsentativen Elementarvolumens

statistisch so verteilt ist, dass die Annahme der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes der laminaren Strömung im geklüfteten Festgestein unter Würdigung der verbleibenden Unsicherheit gerechtfertigt ist. Dieser Ansatz erlaubt folglich auch die Annahme einer natürlichen mittleren Kluffgrundwasseroberfläche. Vor-Ort Messungen bzw. übertragbare Messergebnisse aus dem weiteren Umfeld liegen nicht vor.

Die Höhenlage der ehemaligen ungespannten (eine gering durchlässige Deckfläche ist nicht vorhanden) und ungestörten Kluffgrundwasseroberfläche aus der Zeit vor dem Auffahren des Steinbruchs muss demzufolge geschätzt werden. Es wurde näherungsweise ein Wert von 240 m NHN für den zentralen Bereich des Steinbruchs angenommen. Die Abbildung 6 veranschaulicht den vermuteten Verlauf der Grundwasseroberfläche des Kluffaquifers im Taltiefsten des Stadtbachs im Vorflutniveau bis nahe an die Geländeoberfläche, um dann gedämpft mit der Morphologie nach Süden Richtung Kohlplatte und Salzkopf allmählich anzusteigen und schließlich jenseits des Höhenzuges in Richtung der dann südlich anschließenden Vorfluter wieder abzusinken. Die Grundwasserneubildungsgebiete auf den Höhenzügen zwischen den Tälern markieren bei diesem hydrogeologischen Modell des Kluffaquifers jeweils die Hochpunkte der Grundwasseroberfläche und die linienhaften Oberflächengewässer im Kolluvium der Täler die Potentialsenken des Strömungsfeldes. Aufgrund von Erfahrungen mit anderen Kluffaquifern ist das Vorhandensein einer relativ mächtigen ungesättigten Bodenzone im Bereich der Höhenzüge wahrscheinlich.



**Abbildung 6: Profilschnitt durch den Steinbruch Gehrenberg mit der vermuteten Höhenlage der ungestörten Grundwasseroberfläche im Kluffaquifer (Schnittlinie s. Abbildung 1)**

Diese ungesättigte Bodenzone reicht nach hier angenommenen Höhenverhältnissen unter die kolluvialen Ablagerungen aus Verwitterungsmaterial in den Tälern, so dass die Quellen der Bäche vom Grundwasser im Kluffaquifer als weitgehend unabhängig angesehen werden. Die Schwerpunkte der Steinbruchflächen im Ist-Zustand, im bestehenden Genehmigungszustand und im aktuellen Planzustand, auf denen die Berechnungen in Abschnitt 6.2 beruhen, liegen relativ eng beieinander, so dass von der jeweils gleichen Höhenlage der ungestörten Grundwasseroberfläche im Kluffaquifer ausgegangen wurde.

### 6.1.2 Mächtigkeit des wasserwegsamem Entlastungshorizontes im Klufftaquifer

Die Mächtigkeit des Entlastungshorizontes mit Kluffweiten, die eine Wasserwegsamkeit bieten, wird hier mit einheitlich 50 m unter der Höhenlage der geschätzten mittleren Grundwasseroberfläche innerhalb des Klufftaquifers angenommen.

### 6.1.3 Kluffsystem

Es wird angenommen, dass das dem variszischen Streichen gemäß ausgebildete und etwa senkrecht aufeinander stehende Kluffsystem (etwa NE-SW/NW-SE) im betrachteten repräsentativen Elementarvolumen statistisch verteilt ist und daher als näherungsweise isotrop betrachtet werden kann.

### 6.1.4 Durchlässigkeitsbeiwert, Ruhestromgefälle und natürlicher Wasserandrang

Als Wertebereich für den Durchlässigkeitsbeiwert wird von  $k_f = 1,0 \cdot 10^{-6}$  bis  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ausgegangen. Bei einem Wert von  $k_f = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ergeben sich bei einer Grundwasserneubildungsrate von  $1,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  plausible Werte für den natürlichen talwärts strömenden Wasserandrang aus dem Zustromgebiet Salzkopf/Kohlplatte (etwa 400 m Zustrombreite, 600 m Entfernung bis zur nächsten Wasserscheide) sowie das Ruhestromgefälle nach dem DARCY-Gesetz:

Grundwasserneubildungsfläche im Zustrom:  $A = B \cdot L = 600 \text{ m} \cdot 600 \text{ m} = 360.000 \text{ m}^2$

Wasserandrang:  $Q = A \cdot GWN = 360.000 \text{ m}^2 \cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2} = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

Ruhestromgefälle:  $i = \frac{Q}{k_f \cdot M \cdot B} = \frac{3,6 \cdot 10^{-4}}{1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 600} = 8,0 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{m}^{-1}$

Grundwasserstand am Hochpunkt:

$$GWH_{HP} = GWH_{Stbr} + (L_1 + L_2) \cdot i = 240 + (150 + 600) \cdot 8,0 \cdot 10^{-2} \approx 300 \text{ m NHN}$$

- $A$  = Grundwasserneubildungsfläche m<sup>2</sup>
- $B$  = Zustrombreite m
- $L_1$  = Zustromlänge zwischen Steinbruchschwerpunkt und Steinbruchrand m
- $L_2$  = Zustromlänge zwischen Steinbruchrand und Wasserscheide m
- $GWN$  = Grundwasserneubildungsrate m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>
- $i$  = Ruhestromgefälle m·m<sup>-1</sup>
- $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert m·s<sup>-1</sup>
- $M$  = wassererfüllte Mächtigkeit des Kluffgrundwasserleiters m
- $GWH_{HP}$  = Ruhe-Grundwasserstand am Hochpunkt m NHN
- $GWH_{Stbr}$  = ungestörter Ruhe-Grundwasserstand im Steinbruchschwerpunkt m NHN

## 6.2 Grundwasserbürtiger Wasserandrang zum Steinbruchsee, stationäre Berechnung mit der DUPUIT/THIEM'schen Brunnenformel

### 6.2.1 Methodik

Die Reichweite der Auswirkung der Steinbruchsümpfung auf das umgebende Grundwasser kann durch den Kontinuumsansatz näherungsweise unter Verwendung der Grundwasserneubildungsrate zweidimensional mit der Ersatzkreismethode auf Basis der DUPUIT/THIEM'schen Brunnenformel berechnet werden, wenn für die in der Formel benötigte Reichweite der Absenkung ein tragfähiger Ansatz gewählt wird.

Um einen Entnahmehrinnen herum bildet sich unabhängig vom hydraulischen Gefälle des Grundwassers unter der vereinfachenden Annahme von Homogenität und Isotropie des Grundwasserleiters ein kreisförmiger Absenkungstrichter aus. Der Betrag der Absenkung nimmt radial mit zunehmender Entfernung vom Brunnen ab und strebt am äußeren Rand des Absenkungstrichters gegen Null. Absenkungsbereich und Einzugsgebiet eines Brunnens (hier: Pumpensumpf) beschreiben unterschiedliche Sachverhalte und sind daher inhaltlich zu trennen. Es können Bereiche auch außerhalb des Einzugsgebietes eines Brunnens von dessen Absenkung betroffen sein. Unter Annahme stationär mittlerer Verhältnisse erreicht der Absenkungstrichter seine maximale Ausdehnung, wenn die Absenkung infolge der Grundwasserentnahme durch die flächenhafte Grundwasserneubildungsrate im Brunnenumfeld kompensiert wird (TODD, 1980).

Vielfach wird - wenn der Wasserandrang gesucht ist - zur Lösung der DUPUIT/THIEM'schen Brunnengleichung die empirische Formel nach SICHARDT zur Bestimmung der Reichweite - also dort, wo die Absenkung gegen Null geht - herangezogen. Dieser Ansatz ist jedoch nur unter bestimmten Bedingungen näherungsweise anwendbar und führt regelmäßig zu einer Unterschätzung der Reichweite<sup>1</sup>. Hier wird dagegen wie zuvor erläutert ein Ansatz verfolgt, bei dem die Reichweite in der DUPUIT/THIEM'schen Brunnenformel durch die der Entnahmerate entsprechende Grundwasserneubildungsfläche berechnet wird. Die Größe der kreisförmigen Fläche des Absenkungstrichters kann aus dem Verhältnis von Entnahmerate ( $L^3 T^{-1}$ ) zu Grundwasserneubildungsrate ( $L^3 T^{-1} L^{-2}$ ) errechnet werden. Die Reichweite der Absenkung ergibt sich dann als Radius dann aus der Kreisformel. Die Berechnung der Reichweite und des Wasserandranges zur Grundwasserabsenkung erfolgt iterativ.

Die DUPUIT/THIEM'sche Brunnenformel für ungespannte Grundwasserverhältnisse lautet:

$$Q = \frac{\pi \cdot k_f}{\ln R - \ln r} \cdot (H^2 - h^2)$$

mit

- $Q$  = Entnahmerate  $m^3 \cdot s^{-1}$
- $H$  = wassererfüllte Mächtigkeit im Abstand  $R$   $m$
- $h$  = wassererfüllte Mächtigkeit im Abstand  $r$   $m$
- $R$  = Reichweite der Absenkung  $m$
- $r$  = Brunnenradius (hier: Steinbruchradius)  $m$
- $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert  $m \cdot s^{-1}$

Die Berechnung der Grundwasserneubildungsfläche und der Reichweite erfolgt nach den Formeln:

$$A = \frac{Q}{GWN} \quad \text{und} \quad R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

mit

- $A$  = Grundwasserneubildungsfläche  $m^2$
- $Q$  = Entnahmerate  $m^3 \cdot s^{-1}$
- $GWN$  = Grundwasserneubildungsrate  $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
- $R$  = Reichweite der Absenkung  $m$

<sup>1</sup> SICHARDT setzte sich mit Tiefbaufragestellungen auseinander und benötigte zur Berechnung von Baugrubenwasserhaltungen eine einfache "Faustformel" zur Bestimmung der Reichweite  $R$  einer Grundwasserabsenkung, um diese in die DUPUIT-THIEM'sche Brunnengleichung einsetzen zu können. Mit dem bekannten Absenkziel war es auf diese Weise einfach möglich, den Wasserandrang zu einer Baugrube überschlägig zu berechnen. Die DUPUIT-THIEM'sche Brunnengleichung stellt eine exakte analytische Lösung der zweidimensionalen partiellen Differentialgleichung 2. Ordnung der Grundwasserströmung dar und benötigt zur Lösung u.a. die Vorgabe von Randbedingungen, so auch die Vorgabe der Reichweite der Absenkung. Mathematisch wirkt die Reichweite in dieser Formel wie eine Randbedingung 1. Ordnung, d.h. wie ein Festpotential. Die Anwendung der Formel nach SICHARDT führt daher in ausgedehnten Flachlandaquifereen in Fällen ohne Einwirkung von ernährenden Randbedingungen (Flüsse, Seen) regelmäßig zu einer Überschätzung des Wasserandranges zur Grundwasserabsenkung, so dass die darauf aufbauende Bemessung der Brunnen stets auf der sicheren Seite liegt. Aus diesem Zusammenhang wird klar, dass die Anwendung der "SICHARDT-Reichweite" vom Grundsatz her nicht geeignet ist zur Beantwortung der Frage, welche Reichweite der Absenkung sich als Folge einer Grundwasserentnahme im Grundwasserleiter einstellen wird.

### 6.2.2 Grundwasserhydraulische Berechnung zum Ist-Zustand

Der Tabelle 2 ist der Berechnungsgang zur Bestimmung der Reichweite und des Grundwasserandrangs für den Ist-Zustand nach dem zuvor erläuterten Ansatz zu entnehmen.

Unter Zugrundlegung einer Grundwasserneubildungsrate von  $1,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  bzw.  $1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$  und den in Abschnitt 6.1 genannten hydraulischen Parametern errechnet sich für den Ist-Zustand eine Reichweite von 302 m der durch die Steinbruchförderung induzierten Grundwasserabsenkung und ein grundwasserbürtiger Wasserandrang im Ist-Zustand von  $0,29 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dieses Ergebnis stimmt gut überein mit der in Abschnitt 6.1.4 vorgenommenen Abschätzung hinsichtlich Durchlässigkeitsbeiwert, Ruhestromgefälle und natürlichem Wasserandrang. Aus den getroffenen Annahmen zu den Grundwasserverhältnissen im Steinbruch lassen sich folgende weitere Angaben für den Ist-Zustand ableiten:

- Entnahmebreite  $B$

$$B = \frac{Q}{k_f \cdot i \cdot M} = \frac{2,87 \cdot 10^{-4}}{1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,08 \cdot 50} = 479 \text{ m}$$

- Unterer Kulminationspunkt  $x_o$

$$x_o = \frac{Q}{2 \cdot k_f \cdot \pi \cdot i \cdot M} = \frac{2,87 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 3,1416 \cdot 0,08 \cdot 50} = 76 \text{ m}$$

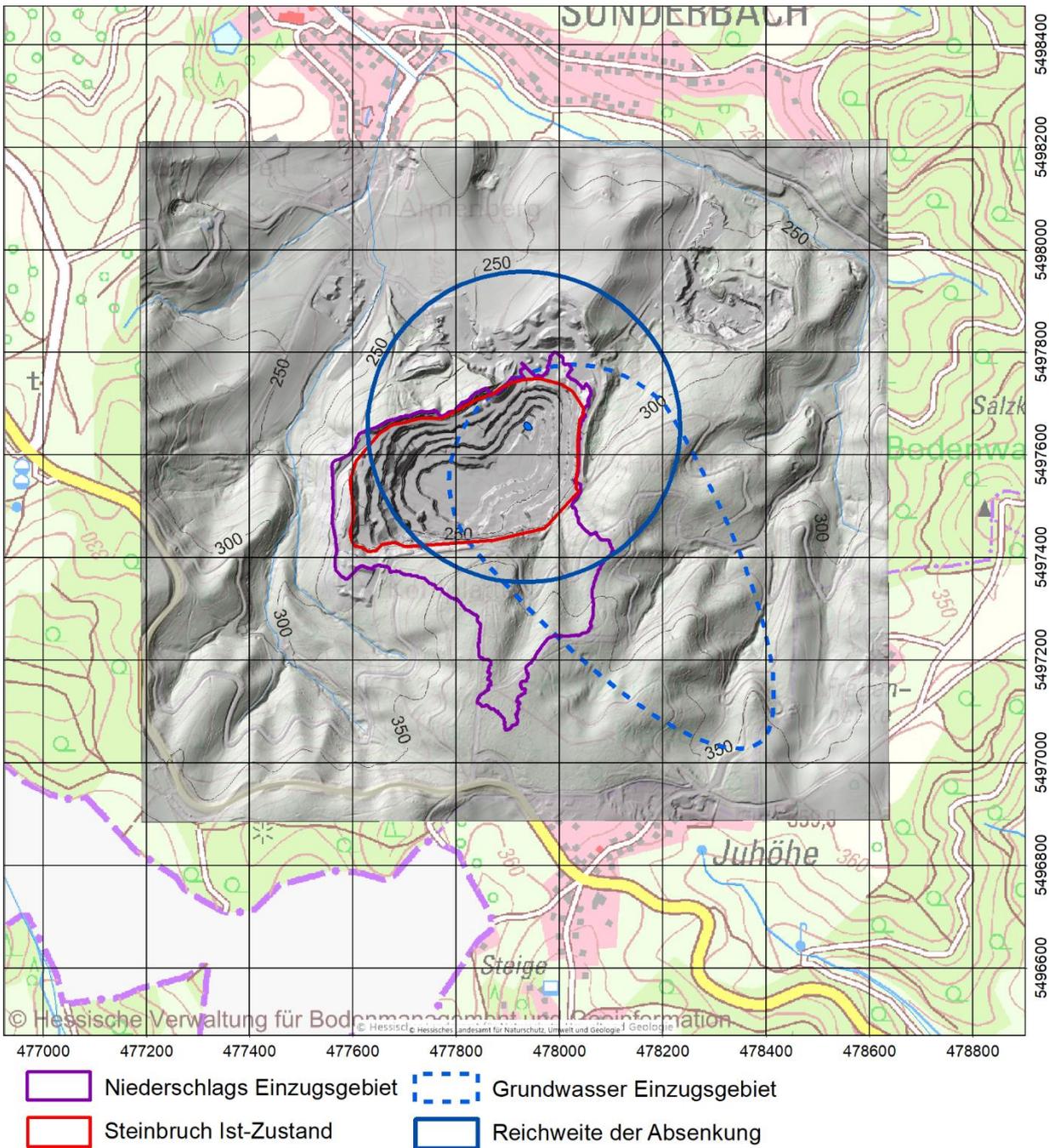
- Einzugsgebietsgröße EZG

$$EZG = \frac{Q}{GWN} = \frac{2,87 \cdot 10^{-4}}{1,0 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{1}{10^6} = 0,29 \text{ km}^2$$

Mit den gewonnenen Daten lässt sich näherungsweise das grundwasserbürtige Einzugsgebiet des Steinbruchs im Ist-Zustand ermitteln und grafisch darstellen (Abbildung 7).

**Tabelle 2: Berechnungsgang zur Bestimmung der Reichweite und Grundwasserandrang Ist-Zustand**

Steinbruch Gehrenberg RÖHRIGgranit als Grundwasserabsenkungsanlage		
Ist Zustand		
Schritt 1: Randbedingungen Standort für Ersatzkreismethode		
Tagebausee, Fläche, ca.		
Länge	m	10
Breite	m	10
Grundfläche	m <sup>2</sup>	100
Radius Ersatzkreis m	m	5,64
Tagebausee	m NHN	198,5
Standortdaten		
Höhenlage Gw-Stauer	m NHN	190
Gw-Stand	m NHN	240
Ruhegrundwasseroberfläche		
Wasser erfüllte Mächtigkeit H (ungespannt)	m	50
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	1,50E-07
Grundwasserneubildungsrate	m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup>	1,00E-09
Iteration 8		
Q8/GWN	m <sup>2</sup>	2,87E+05
Radius R9	m	302,5
Q9 Dupuit/Thiem ungespannt	m <sup>3</sup> /s	2,87E-04
	l/s	0,29
	m <sup>3</sup> /h	1,03



**Abbildung 7: Grundwasserbürtiges Einzugsgebiet und Auswirkungsreichweite des Steinbruchsees Gehrenberg im Ist-Zustand**

### 6.2.3 Grundwasserhydraulische Berechnung zum bestehenden Genehmigungszustand

Der Tabelle 3 ist der Berechnungsgang zur Bestimmung der Reichweite und des Grundwasserandrangs für den bestehenden Genehmigungszustand nach dem zuvor erläuterten Ansatz zu entnehmen.

Es errechnet sich analog den genannten hydraulischen Parametern für die bestehende Genehmigung eine Reichweite von rund 630 m der durch die Steinbruchförderung induzierten Grundwasserabsenkung und ein grundwasserbürtiger Wasserandrang für den bestehenden Genehmigungszustand von  $1,09 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Aus den getroffenen Annahmen zu den Grundwasserverhältnissen im Steinbruch lassen sich folgende weitere Angaben für den genehmigten Zustand ableiten:

- Entnahmebreite  $B$

$$B = \frac{Q}{k_f \cdot i \cdot M} = \frac{1,09 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,08 \cdot 50} = 1.822 \text{ m}$$

- Unterer Kulminationspunkt  $x_0$

$$x_0 = \frac{Q}{2 \cdot k_f \cdot \pi \cdot i \cdot M} = \frac{1,09 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 3,1416 \cdot 0,08 \cdot 50} = 290 \text{ m}$$

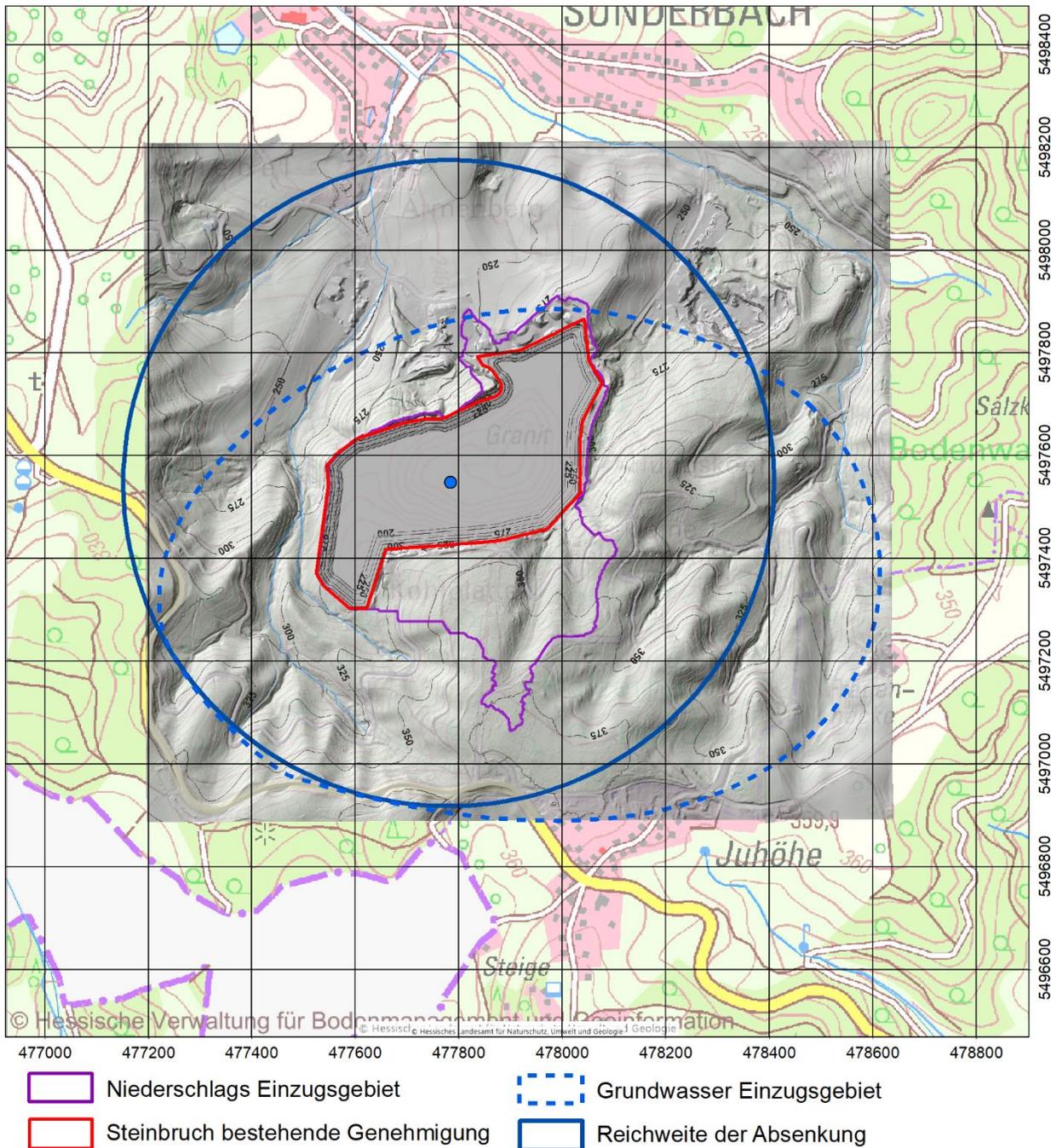
- Einzugsgebietsgröße EZG

$$EZG = \frac{Q}{GWN} = \frac{1,09 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{1}{10^6} = 1,09 \text{ km}^2$$

Mit den gewonnenen Daten lässt sich näherungsweise das grundwasserbürtige Einzugsgebiet des Steinbruchs für die bestehende Genehmigung ermitteln und grafisch darstellen (Abbildung 8). Die Entnahmebreite orientiert sich hierbei am Verlauf der unterirdischen Wasserscheiden im Klufftaquifer im Umfeld des Steinbruchs, deren Lage selbst sich kaum verändern wird.

**Tabelle 3: Berechnungsgang zur Bestimmung der Reichweite und Grundwasserandrang zum bestehenden Genehmigungs-Zustand**

Steinbruch Gehrenberg RÖHRIGgranit als Grundwasserabsenkungsanlage		
Genehmigter Zustand		
Schritt 1: Randbedingungen Standort für Ersatzkreismethode		
Tagebausee, Fläche, ca.		
Länge	m	391
Breite	m	391
Grundfläche	m <sup>2</sup>	153266
Radius Ersatzkreis m	m	220,88
Tagebausehle	m NHN	198,5
Standortdaten		
Höhenlage Gw-Stauer	m NHN	190,00
Gw-Stand	m NHN	240,00
Ruhegrundwasseroberfläche		
Wasser erfüllte Mächtigkeit H (ungespannt)	m	50
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	1,50E-07
Grundwasserneubildungsrate	m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup>	1,00E-09
Iteration 8		
Q8/GWN	m <sup>2</sup>	1,09E+06
Radius R9	m	629
Q9 Dupuit/Thiem ungespannt	m <sup>3</sup> /s	1,09E-03
	l/s	1,09
	m <sup>3</sup> /h	3,94



**Abbildung 8: Grundwasserbürtiges Einzugsgebiet und Auswirkungsreichweite des gesümpften Steinbruchs Gehrenberg zum aktuellen Genehmigungs-Zustand**

**6.2.4 Grundwasserhydraulische Berechnung zum Planzustand**

Der Tabelle 4 ist der Berechnungsgang zur Bestimmung der Reichweite und des Grundwasserandrangs für den aktuell beantragten Planzustand zu entnehmen.

Es errechnet sich analog den genannten hydraulischen Parametern für den bestehenden Planzustand eine Reichweite von rund 670 m der durch die Steinbruchförderung induzierten Grundwasserabsenkung und ein grundwasserbürtiger Wasserandrang für den bestehenden Genehmigungs-zustand von 1,2 l·s<sup>-1</sup>. Aus den getroffenen Annahmen zu den Grundwasserverhältnissen im Steinbruch lassen sich folgende weitere Angaben für den beantragten Planzustand ableiten:

- Entnahmebreite  $B$

$$B = \frac{Q}{k_f \cdot i \cdot M} = \frac{1,21 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0,08 \cdot 50} = 2.016 \text{ m}$$

- Unterer Kulminationspunkt  $x_0$

$$x_0 = \frac{Q}{2 \cdot k_f \cdot \pi \cdot i \cdot M} = \frac{1,21 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 3,1416 \cdot 0,08 \cdot 50} = 321 \text{ m}$$

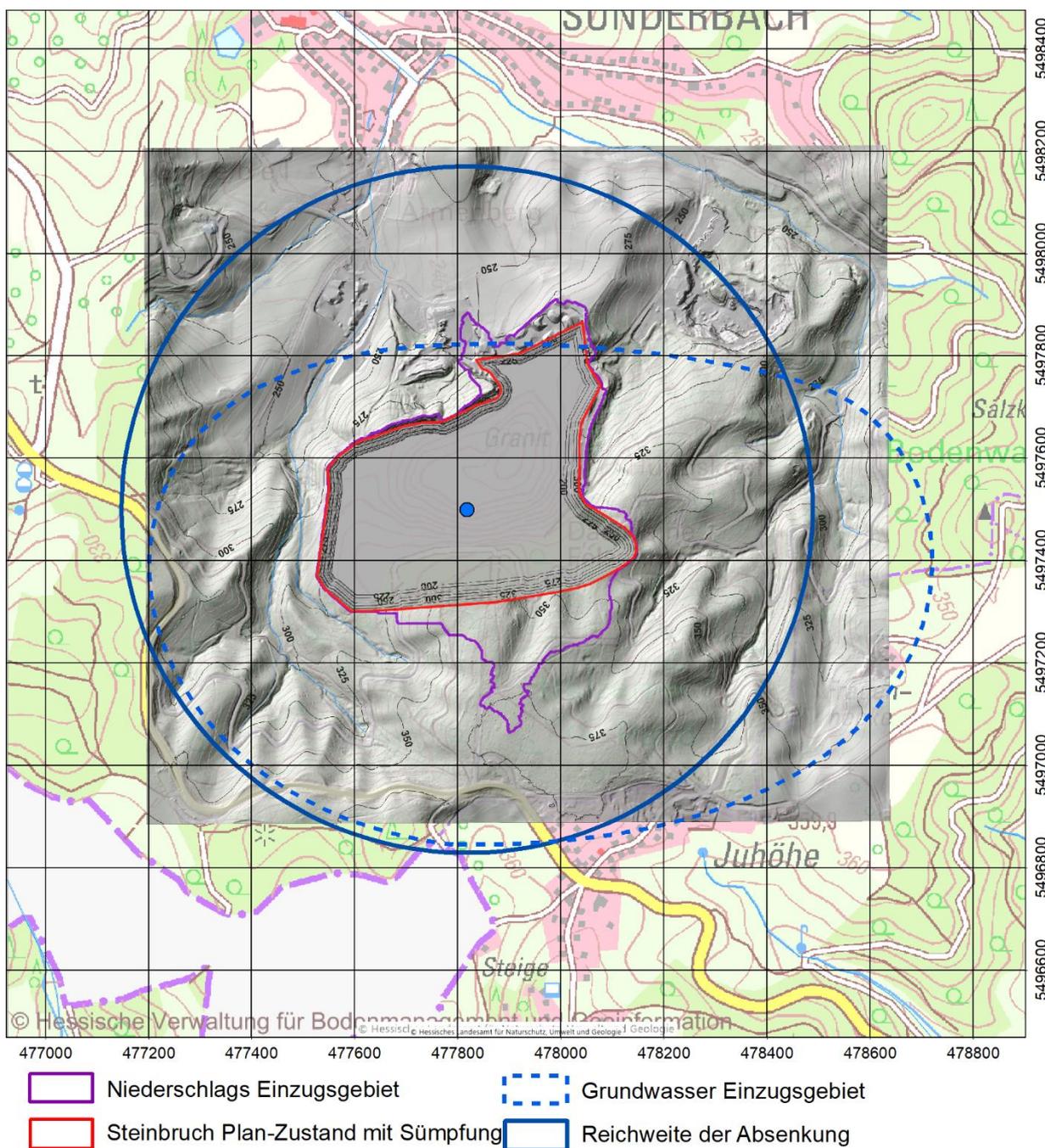
- Einzugsgebietsgröße EZG

$$EZG = \frac{Q}{GWN} = \frac{1,21 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{1}{10^6} = 1,21 \text{ km}^2$$

Mit den gewonnenen Daten lässt sich näherungsweise das grundwasserbürtige Einzugsgebiet des Steinbruchs für den Planzustand ermitteln und grafisch darstellen (Abbildung 9). Die Entnahmebreite orientiert sich hierbei am Verlauf der unterirdischen Wasserscheiden im Kluftaquifer im Umfeld des Steinbruchs, deren Lage selbst sich kaum verändern wird.

**Tabelle 4: Berechnungsgang zur Bestimmung der Reichweite und Grundwasserandrang im Plan-Zustand**

Steinbruch Gehrenberg RÖHRIGgranit als Grundwasserabsenkungsanlage Planzustand		
Schritt 1: Randbedingungen Standort für Ersatzkreismethode		
Tagebausee, Fläche, ca.		
Länge	m	462
Breite	m	462
Grundfläche	m <sup>2</sup>	213235
Radius Ersatzkreis m	m	260,53
Tagebausohle	m NHN	198,5
Standortdaten		
Höhenlage Gw-Stauer	m NHN	190,00
Gw-Stand	m NHN	240,00
Ruhegrundwasseroberfläche		
Wasser erfüllte Mächtigkeit H (ungespannt)	m	50
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	1,50E-07
Grundwasserneubildungsrate	m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup>	1,00E-09
Iteration 8		
Q8/GWN	m <sup>2</sup>	1,21E+06
Radius R9	m	671
Q9 Dupuit/Thiem ungespannt	m <sup>3</sup> /s	1,21E-03
	l/s	1,21
	m <sup>3</sup> /h	4,36



**Abbildung 9: Grundwasserbürtiges Einzugsgebiet und Auswirkungsreichweite des gesümpften Steinbruchs Gehrenberg im Planzustand**

### 6.2.5 Grundwasserhydraulische Berechnung zum Planzustand nach Einstellung der Steinbruchsümpfung

Der Wasserstand des Steinbruchsees wird in der Wiederanstiegsphase entlang seiner etwa West-Ost orientierten Querachse der Höhenlage der ehemaligen Ruhegrundwasseroberfläche in einem Niveau von etwa 240 m NHN zustreben. Der Steinbruch wird in einer Höhenlage von etwa 260 m NHN einen Ablauf erhalten, der nach den hier getroffenen Annahmen bezüglich der ursprünglichen Ruhegrundwasseroberfläche jedoch nicht aktiv werden wird.

Ausgehend von der Höhenlage der ursprünglichen Ruhegrundwasseroberfläche im Flächenschwerpunkt des Steinbruchs von 240 m NHN und dem postulierten natürlichen Ruhestromgefälle von  $i = 0,08$  m/m gemäß Abschnitt 6.1.4 ergibt sich am südlichen Ufer des Sees eine Höhenlage der ursprünglichen Ruhegrundwasseroberfläche von etwa 261 m NHN:

Ursprünglicher Ruhe-Grundwasserstand auf der Zustromseite (Südufer):

$$GWH_{Stbr-Südufer} = GWH_{Stbr} + R_{See} \cdot i = 240 + 260,5 \cdot 8,0 \cdot 10^{-2} \approx 260,8 \text{ m NHN}$$

- $GWH_{Stbr}$  = ungestörter Ruhe-Grundwasserstand im Steinbruchschwerpunkt m NHN
- $R_{See}$  = rechnerischer Seeradius bei Grundfläche 213.235 m<sup>2</sup> m
- $i$  = Ruhestromgefälle m·m<sup>-1</sup>

Folglich wird sich auf der Zustromseite des Steinbruchsees gegenüber dem ursprünglichen ungestörten Zustand dauerhaft eine Absenkung  $\Delta s$  im Grundwasser des kristallinen Grundwassers von

$$\Delta s = GWH_{Stbr-Südufer} - GWH_{Stbr} = 260,8 - 240 = 20,8 \text{ m}$$

einstellen. Gegenüber dem ungestörten Zustand bei ca. 240 m NHN entlang der Querachse des entstehenden Sees verbleibt also am Südufer eine Restabsenkung von etwa 20,8 m, für die entsprechend ein unterirdischer Wasserandrang berechnet werden kann.

Der hier angewendete Berechnungsgang zu näherungsweise Bestimmung der Reichweite der mit zunehmender Entfernung vom See abklingenden Grundwasserabsenkung ist im Detail im Anhang 1 erläutert. Der Tabelle 5 sind die dem Berechnungsgang gemäß Anhang 1 zugrunde liegenden Daten zur Bestimmung der Reichweite und des verbleibenden Grundwasserandrangs für den aktuell beantragten Planzustand nach Beendigung der Steinbruchsümpfung zu entnehmen.

Es errechnet sich auf Grundlage der hydraulischen Parameter für den aktuellen Planzustand nach Beendigung der Steinbruchsümpfung mit abgeschlossenem Wiederanstieg eine Reichweite von rund 600 m der verbleibenden Grundwasserabsenkung und ein grundwasserbürtiger Wasserandrang für den geplanten Endzustand von 0,29 l·s<sup>-1</sup>, also etwa dem Ist-Zustand entsprechend. Es errechnet sich also auch eine entsprechend ähnliche Einzugsgebietsgröße des Zustromgebietes von 0,29 km<sup>2</sup>, welches in Abbildung 9 in seiner voraussichtlichen Lage grafisch dargestellt ist.

**Tabelle 5: Berechnungsgang zur Bestimmung der Reichweite und Grundwasserandrang im Plan-Zustand nach Beendigung der Steinbruchsümpfung**

Steinbruch Gehrenberg RÖHRIGgranit		
Planzustand nach Einstellung Tagebausümpfung		
Reichweite der Seeabsenkung im Grundwasser		
Seefläche	$A_{See}$	213.235 m <sup>2</sup>
Äquivalenter Seeradius	$r_{See}$	261 m
Grundwassergefälle im ungestörten Zustand	$i$	0 m/m
Seewasserstand im Planzustand		240 m NHN
ungestörte Höhenlage der Grundwasseroberfläche		260,84 m NHN
Höhenlage der abgesenkten Grundwasseroberfläche am oberstromigen Seeufer		240,00 m NHN
Seeabsenkung		20,84 m
Grundwassererfüllte Mächtigkeit	$M$	50,00 m
Durchlässigkeitsbeiwert	$k_f$	1,50E-07 m/s
Grundwasserneubildung	$GWN$	1,00E-09 m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup>
Wasserandrang	$Q$	3,33 m <sup>3</sup> /h
"Halbbrunnen"	$Q_{1/2}$	1,66 m <sup>3</sup> /h
Reduktion mit Mittelwert $\cos(-\pi/2;+\pi/2)$	$Q_{red}$	1,06 m <sup>3</sup> /h
		0,000294 m <sup>3</sup> /s
Reichweite der Seeabsenkung	$R_{Schwerpunkt}$	604 m
Reichweite der Seeabsenkung vom Südufer	$R_{Ufer}$	343 m
Größe des unterirdischen Einzugsgebiets	$A_{GWN}$	294.388 m <sup>2</sup>
		0,294 km <sup>2</sup>

### 6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Berechnung des grundwasserbürtigen Wasserandrangs zum Steinbruchsee und der Reichweite der Absenkung

Unter der vereinfachenden Annahme des Kontinuumansatzes und folglich der Gültigkeit des DARCY Gesetzes im kristallinen Grundgebirge wurde der Grundwasserandrang zum Steinbruch Gehrenberg mit der Ersatzkreis-methode auf Grundlage der DUPUIT-THIEM'schen Brunnenformel berechnet, und die Reichweite der Grundwasserabsenkung näherungsweise berechnet. Zusätzliche Annahmen zu den natürlichen Grundwasserverhältnissen erlauben die Abschätzung weiterer Kenngrößen.

Die nachfolgende Tabelle 6 enthält eine Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse zum Grundwasserandrang zum Steinbruch Gehrenberg bezogen auf den gegenwärtigen Abbauzustand (Ist-Zustand), auf den Zustand gemäß der bestehenden Plangenehmigung, sowie auf den geplanten Erweiterungszustand. Letzterer wird noch einmal unterschieden in die Betriebsphase bei maximaler Ausdehnung mit trockener Sohle und nach Beendigung der Abbautätigkeit mit abgeschlossenem Wiederanstieg des Steinbruchsees. Die Reichweite ist jeweils bezogen auf den Abstand zum Schwerpunkt (s. Abbildung 7 -9) des jeweils betrachteten Zustands.

**Tabelle 6: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse zum Grundwasserandrang**

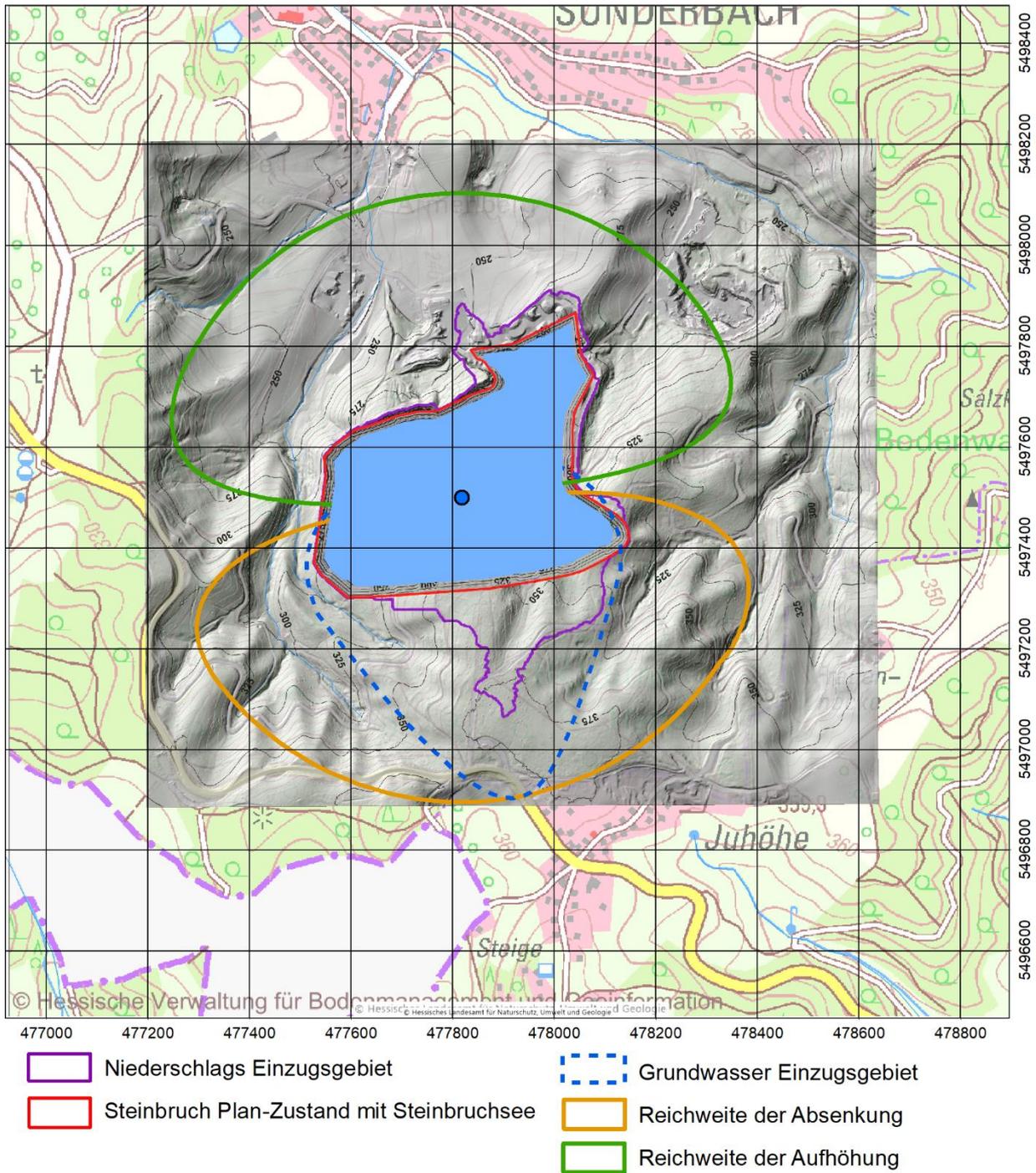
	Größe	Mittlerer Grundwasserandrang	Reichweite der Absenkung	unterirdische Einzugsgebietsgröße	Entnahmbreite	Untere Kulmination
	km <sup>2</sup>	l·s <sup>-1</sup>	m	km <sup>2</sup>	m	m
Ist- Zustand	0,101	0,29	302	0,29	479	109
Bestehende Genehmigung	0,153	1,09	629	1,09	1.822	464
Aktueller Planzustand, Abbauphase	0,213	1,21	671	1,21	2.016	525
Endzustand nach Beendigung Steinbruchsümpfung und Wiederanstieg	0,213	0,29	600	0,29	Seebreite	-

Es wird deutlich, dass die geplante Erweiterung des Steinbruchs den Erwartungen entsprechend gegenüber der bestehenden Genehmigung gemäß der rechnerischen Abschätzung eine vergleichsweise geringe Vergrößerung der Reichweite der Absenkung und des zu erwartenden Grundwasserandrangs aufweisen wird.

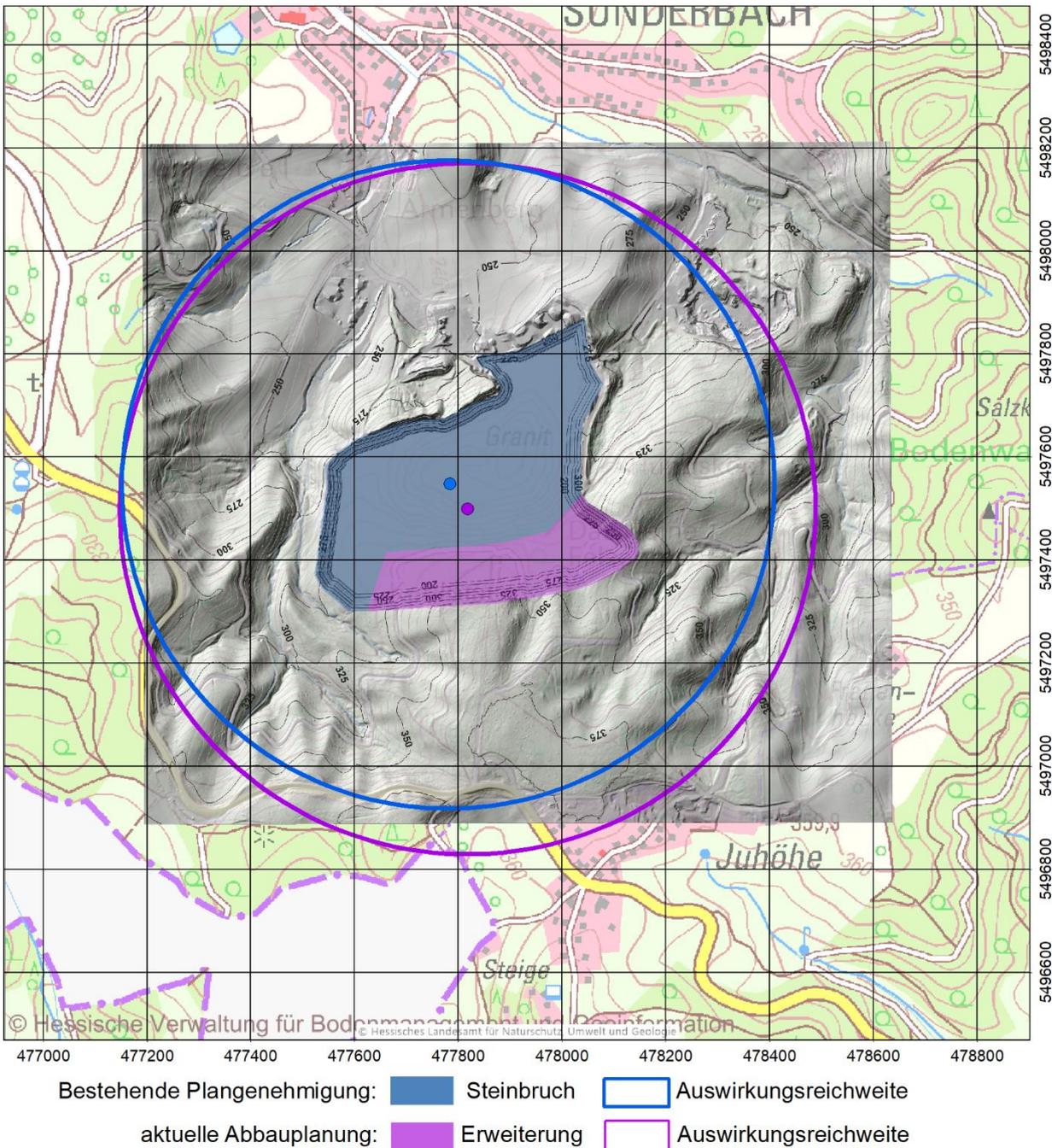
Die Abbildung 11 zeigt zum Vergleich die Auswirkungsreichweiten des aktuellen Planzustands zur bestehenden Genehmigung. Aus der Abbildung geht hervor, dass einhergehend mit einer geringen Vergrößerung der Auswirkungsreichweite von etwa 40 m mit der Verlagerung des Flächenschwerpunktes des Steinbruchs auch eine Verlagerung des Absenkbereichs von etwa 100 m in südöstliche Richtung zu erwarten ist.

Nach Beendigung der Steinbruchentwässerung und abgeschlossener Auffüllphase des entstehenden Steinbruchsees wird sich voraussichtlich bei vergleichbarem Wasserandrang gemäß heutigem Ist-Zustand eine Reichweite der Nulllinie der Absenkung von etwa 600 m vom Schwerpunkt des Steinbruchs gerechnet bzw. von 340 m von der Steinbruchsüdgrenze in südliche Richtung einstellen.

Die hier durchgeführten Berechnungen bezüglich des Grundwassers im Kluffgrundwasserleiter des kristallinen Grundgebirge beziehen sich auf ein Grundwasservorkommen, dessen Fließgeschehen im Bereich der Höhenzüge in einem Bereich > 50 m unter Gelände und stattfindet. Angesichts der sehr geringen Ergiebigkeit des Kluffgrundwasserleiters und der Tiefe des Vorkommens kann davon ausgegangen werden, dass sich im Absenkungsbereich und insbesondere in der Ortslage Juhöhe keine Hausbrunnen befinden, die von der dort bereits weitestgehend abgeklungenen Absenkung betroffen sein könnten.



**Abbildung 10: Grundwasserbürtiges Zustrom-Einzugsgebiet und Auswirkungsreichweite des Steinbruchsees Gehrenberg im Planzustand nach Einstellung der Steinbruchsümpfung**



**Abbildung 11: Vergleich der Auswirkungsreichweiten gemäß bestehender Plangenehmigung und aktueller Planung, jeweils für den maximalen Abbaustand mit Sumpfung**

**6.4 Prognose des voraussichtlichen Wasserandranges einschließlich Niederschlagswasser**

Der voraussichtliche Gesamtwasserandrang zum Steinbruch während des Betriebsphase lässt sich gemäß Abschnitt 5.1 und Tabelle 1 anhand der vom HLNUG ermittelten Gesamtabflusspende im Bereich Gehrenberg in Höhe von  $17,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  und der Größe des geplanten Steinbruchs einschließlich seines Niederschlagsgeinzugsgebietes von  $0,283 \text{ km}^2$  mit  $155.000 \text{ m}^3/\text{a}$  bzw.  $4,9 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  abschätzen.

Nach Einstellung der Gewinnungstätigkeit und Einstellung der Steinbruchentwässerung wird sich ein Steinbruchsee bilden, dessen voraussichtliche Wasserspiegellage mit etwa 240 m NHN deutlich unterhalb der

theoretisch möglichen Überlaufhöhe von 260 m NHN liegen wird. Gleichwohl wird der Überlauf technisch vorbereitet, um auch in länger anhaltenden Zeiten ergiebiger Niederschläge ein unkontrolliertes Überlaufen des Steinbruchsees zu verhindern.

Unter der vereinfachenden Annahme, dass die reelle Verdunstung über der entstehenden offenen Wasseroberfläche etwa der potentiellen entsprechen wird, kann näherungsweise angenommen werden, dass der auf die Seefläche treffende Niederschlag im Jahresmittel über die Verdunstung weitgehend kompensiert wird. Der Gesamtabfluss aus dem angeschlossenen Niederschlageinzugsgebiet wird zu einer geringfügig höheren Wasserspiegellage des Steinbruchsees (cm-bis dm-Skala) führen, die sich jedoch lediglich im Winterhalbjahr bei geringer Verdunstung bemerkbar machen wird.

## 7 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ergeben sich aus den zuvor erläuterten hydrologischen bzw. hydrogeologischen Verhältnissen, den getroffenen Annahmen und den durchgeführten Berechnungen folgende Schlussfolgerungen:

- Die auf plausiblen Annahmen beruhende Berechnung der Höhenlage der ungestörten Kluffundwasseroberfläche lässt darauf schließen, dass die im Umfeld des Steinbruchs vorhandenen Quellen und Oberflächengewässer bei Trockenwetter aus dem Grundwasser des kolluvialen Lockergesteinsaquifers gespeist werden. Der Kluffundwasserleiter des kristallinen Grundgebirges entwässert erst in tieferen Tallagen mittelbar über das Kolluvium in die Vorfluter.
  - ⇒ Die durch die Trockenhaltung des Steinbruchs induzierte Grundwasserabsenkung im Grundgebirge hat demnach keinen Einfluss auf den Wasserhaushalt der den Steinbruch umgebenden Oberflächengewässer und Quellen.
  - ⇒ Alle im weiteren Umfeld vorhandenen Wasserfassungen der öffentlichen Trinkwasserversorgung nutzen den oberflächennahen kolluvialen Grundwasserleiter. Die ausgewiesenen Wasserschutzgebiete liegen jenseits der nächstgelegenen natürlichen Vorfluter bzw. jenseits morphologischer Wasserscheiden. Eine negative Beeinflussung der Wasserfassungen durch das Planvorhaben ist nicht zu erwarten, da sich dessen Auswirkungen auf das nahe Umfeld und den tiefen Kluffundwasserleiter des kristallinen Grundgebirges beschränken.
  - ⇒ Aufgrund der Tiefenlage des Grundwasservorkommens im Kluffundwasserleiter des kristallinen Grundgebirges und dessen geringer Ergiebigkeit ist nicht damit zu rechnen, dass dieses im Absenkungsbereich durch Hausbrunnen genutzt wird.
  - ⇒ Wenn Hausbrunnen im näheren Umfeld betrieben werden, ist davon auszugehen, dass diese das oberflächennahe kolluviale Grundwasser nutzen.
- Die Aufzeichnungen der Förderdaten der Steinbruchentwässerung der vergangenen drei Jahre korrelieren mit den Niederschlagsspenden der Station Birkenau des DWD. Aus den Trockenwettermonaten im Jahr 2018 lässt sich ein relativ geringer Grundwasserzutritt ableiten.
- Die mittlere Grundwasserneubildungsrate in das kristalline Grundgebirge wird mit  $1,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$  in Übereinstimmung mit dem HLNUG (2017) als vergleichsweise gering eingeordnet.
- Um grundwasserhydraulisch Aussagen zur Reichweite der durch die Steinbruchentwässerung induzierten Grundwasserabsenkung sowie zum Grundwasserandrang treffen zu können,

wurde der "Kontinuumsansatz" angewendet, bei dem unterstellt wird, dass der heterogene Klufftaquifer bei genügend kleinem Betrachtungsmaßstab im statistischen Mittel analog einen Lockergesteinsaquifer behandelt werden kann und folglich entsprechende Formelansätze näherungsweise angewendet werden können.

- Die Berechnungen wurden für den Ist-Zustand, den Zustand gemäß bestehender Plangenehmigung und für die aktuell beantragte Plangenehmigung - letztere unterschieden nach Betriebsphase und Endzustand - durchgeführt. Maßstab für die Bewertung sind die zusätzlichen Auswirkungen des Planzustands verglichen mit den Auswirkungen der bestehenden Genehmigung, s. Abbildung 11).
  - ⇒ Gemessen vom jeweiligen Schwerpunkt vergrößert sich die Auswirkungsreichweite gemäß Tabelle 6 radial um ca. 40 m und
  - ⇒ wandert wegen der Verlagerung des Schwerpunktes rund 100 m weiter in südöstliche Richtung.
- Nach Beendigung des Abbautätigkeit wird der See über einen längeren Zeitraum bis auf die Höhenlage der ursprünglichen Ruhegrundwasseroberfläche ansteigen, deren Höhe mit etwa 240 m NHN abgeschätzt wurde. Die Auswirkungsreichweite des Grundwassereinflusses mit abklingender Absenkung wird sich sukzessive verringern auf rund 600 m gemessen vom Seeschwerpunkt bzw. etwa 340 m vom südlichen Seeufer.
- Die voraussichtliche Gesamtförderung aus dem Steinbruch Gehrenberg gemäß aktueller Planung wird sich im Mittel von aktuell etwa  $2,9 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  auf etwa  $4,9 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  in der späten Betriebsphase erhöhen. Detailliertere und zeitlich höher aufgelöste Angaben zu den Volumenströmen des abzuleitenden Wassers können auf Grundlage der aktuell zur Verfügung stehenden Daten nicht getroffen werden.

Aachen, März 2020

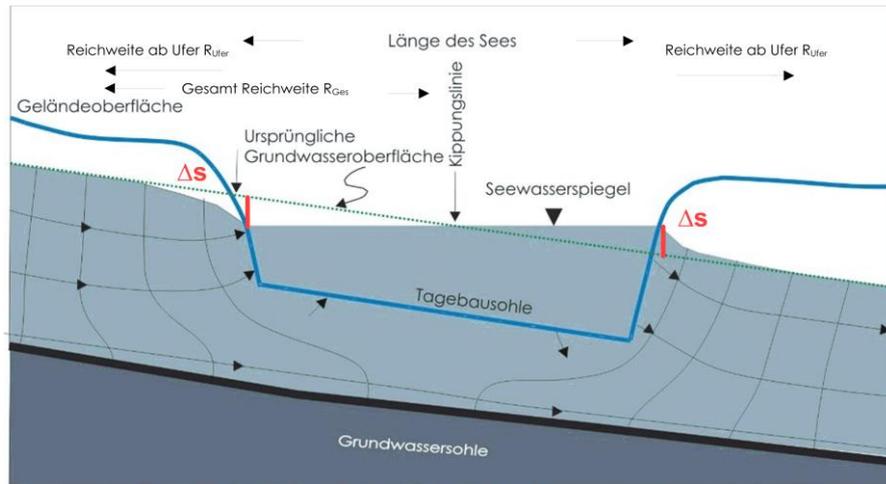
gez.

Dipl. Geol. M. Himml

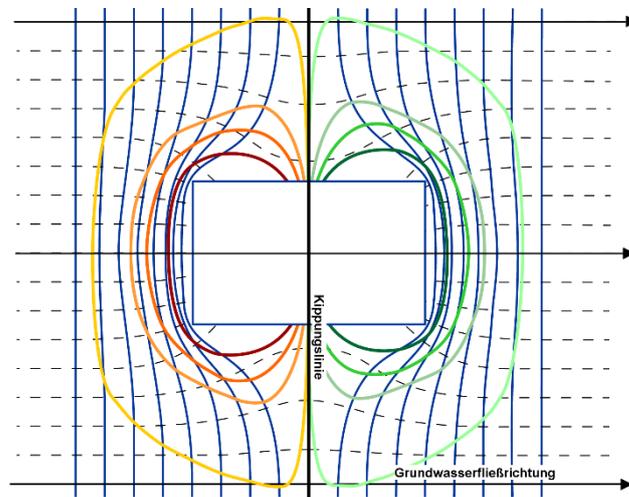
**Näherungslösung zur Bestimmung der Reichweite der oberstromigen Grundwasserabsenkung eines Grundwassersees**

**1 Problemstellung**

Mit der Offenlegung der Grundwasseroberfläche z.B. im Zuge der Anlage eines Aussandungssees ergeben sich im Umfeld charakteristische Veränderungen der lokalen Grundwasserströmung. Es entsteht eine horizontale Seewasseroberfläche, welche die mehr oder weniger stark geneigte Grundwasseroberfläche anschneidet. Dies führt auf der Anstromseite zur Absenkung und auf der Abstromseite zur Aufhöhung der Grundwasseroberfläche. Auf der Anstromseite tritt Grundwasser in den See über, auf der Abstromseite dringt Seewasser in den Grundwasserleiter ein. Der Neutralbereich zwischen diesen Zonen wird durch die sogenannte "Kippungslinie" gekennzeichnet, die bei gut durchströmten Seen etwa in der Mitte des Sees angeordnet ist. Bleiben unterhalb einer solchen Abgrabung Teile des Grundwasserleiters erhalten, wirkt sich die Anlage des Sees auch bis in größere Tiefen auf die Grundwasserhydraulik aus. Die nachfolgenden Abbildungen 1 und 2 verdeutlichen schematisch die beschriebenen Verhältnisse.



**Abbildung 1: Einfluss eines Baggersees auf die Grundwasserströmung bei partieller Entfernung des Grundwasserleiters durch eine Abgrabung**



**Abbildung 2: Einfluss eines Baggersees auf die Grundwasserströmung in der Aufsicht; Potentiallinien, Stromlinien sowie Linien gleicher Absenkung (rot bis gelb) und Linien gleicher Aufhöhung (dunkelgrün bis hellgrün) ergänzt nach WROBEL 1980**

Exakte analytische Methoden zur Berechnung der Reichweite der beschriebenen Auswirkungen auf das Grundwasser sind in der Literatur nach bisheriger Recherche nicht verfügbar. Die gewöhnlich herangezogenen Berechnungsansätze sind rein empirischer Natur und führen im Regelfall nicht zu belastbaren Ergebnissen. Sie beruhen meist auf der Anwendung und Abwandlungen der empirischen Reichweitenformel nach SICHARDT, die nur in einem sehr eng gefassten Bereich von Fragestellungen zur Anwendung kommen sollte.

Nachfolgend wird ein Ansatz erläutert, mit dem es auf einfache Weise möglich ist, unter bestimmten Vereinfachungen eine Näherungslösung für die Reichweite der Absenkung und die Austauschvolumina zwischen See und Grundwasserleiter auf Basis der Aquiferkennwerte, seiner Geometrie und der mittleren Grundwasserneubildungsrate zu berechnen.

## 2 Methodik

### 2.1 Grundlagen

- ⇒ Grundlage bildet die Berechnung der stationären Anströmung zu einem gedachten Brunnen mit sehr großem Durchmesser in Anlehnung an die Ersatzkreismethode (HERTH & ARNDTS, 1995) zur Vordimensionierung einer Baugrubenentwässerung auf Basis der DUPUIT-THIEM'schen Brunnenformel für ungespannte Verhältnisse.
- ⇒ Die Bestimmung der Reichweite der Grundwasserabsenkung erfolgt unter Annahme eines Gleichgewichtszustandes zwischen Brunnenentnahme und mittlerer Grundwasserneubildungsrate zur Wiedergängung.
- ⇒ Die Übertragung der der Berechnung der Brunnenanströmung auf einen Grundwassersee erfolgt in Form eines Analogieschlusses unter Berücksichtigung des Einflusses der Kippungslinie des Grundwassersees als Symmetrieelement und der Cosinusfunktion als regulierende Größe der radial veränderlichen Anströmungsrate und dem daraus entsprechenden resultierenden Absenkungsverlauf im Grundwasser entlang der Zustromseite des Grundwassersees.

### 2.2 Einschränkungen

- ⇒ Es gelten die gleichen Voraussetzungen wie zur Anwendung der DUPUIT-THIEM'schen Brunnenformel (KRUSEMANN, DE RIDDER, 1994)
- ⇒ Es wird von einer Form des Sees ausgegangen, die in guter Näherung durch eine Kreisfläche gleichen Flächeninhalts beschrieben werden kann. Der Berechnungsansatz gilt ausdrücklich nicht für Grundwasserseen, die signifikant von der Kreisform abweichen, insbesondere nicht für langgestreckte Seen.
- ⇒ Komplexe Geometrien, Überlagerungseffekte mehrerer Seen und heterogene hydrogeologische Verhältnisse bedürfen einer numerischen Strömungsmodellierung.

## 3 Gang der Berechnung

### 3.1 Schritt 1: Ruhegrundwasseroberfläche, Seewasserstand und Betrag der Grundwasserabsenkung an der Zustromseite des Grundwassersees

Der Betrag der Grundwasserabsenkung  $\Delta s$  an der Zustromseite des Grundwassersees (s. Abbildung 1) wird grafisch oder rechnerisch ermittelt. Erforderlich ist die Kenntnis des Ruhestromgefälles  $i$  der Grundwasserströmung und des Radius  $r_{see}$  des als kreisförmig angenommenen Sees.

$$\Delta s = r_{see} \cdot i \quad \text{Gleichung 1}$$

Gleichzeitig wird der Ruhegrundwasserstand in Höhe der Kippungslinie, also am Mittelpunkt des kreisförmigen Sees, und an der Zustromseite des Grundwassersees ermittelt. Der Ruhegrundwasserstand in Höhe der Kippungslinie entspricht dem sich einstellenden Seewasserstand. Der Wert für  $\Delta s$  bildet die Grundlage für die Wasserandrangsberechnung.

### 3.2 Schritt 2: Wasserandrang nach der Ersatzkreismethode und Reichweite der Absenkung

Der grundsätzliche Berechnungsgang zur Ermittlung des Grundwasserandrangs zu einer Baugrube, wie er in HERTH & ARNDTS (1995) ausführlich beschrieben wird, wird nachfolgend als bekannt vorausgesetzt. Bezüglich der Reichweite der Grundwasserabsenkung bedarf es gegenüber der ingenieurtechnischen Herangehensweise zur Berechnung des Wasserandrangs weiterer Überlegungen, da bei diesen Methoden die Reichweite selbst nicht im Fokus steht.

Die Reichweite der Auswirkung einer Grundwasserentnahme auf das umgebende Grundwasser kann unter Verwendung der Grundwasserneubildungsrate zweidimensional mit der Ersatzkreismethode auf Basis der DUPUIT/THIEM'schen Brunnenformel berechnet werden, wenn für die in der Formel benötigte Reichweite der Absenkung ein tragfähiger Ansatz gewählt wird.

Um einen Entnahmekrann herum bildet sich unabhängig vom hydraulischen Gefälle des Grundwassers unter der vereinfachenden Annahme von Homogenität und Isotropie des Grundwasserleiters ein kreisförmiger Absenkungstrichter aus. Der Betrag der Absenkung nimmt radial mit zunehmender Entfernung vom Brunnen ab und strebt am äußeren Rand des Absenkungstrichters gegen Null. Absenkungsbereich und Einzugsgebiet eines Brunnens beschreiben unterschiedliche Sachverhalte und sind daher inhaltlich zu trennen. Es können Bereiche auch außerhalb des Einzugsgebietes eines Brunnens von dessen Absenkung betroffen sein. Unter Annahme stationär mittlerer Verhältnisse erreicht der Absenkungstrichter seine maximale Ausdehnung, wenn die Absenkung infolge der Grundwasserentnahme durch die flächenhafte Grundwasserneubildungsrate im Brunnenumfeld kompensiert wird (TODD, 1980).

Vielfach wird - wenn der Wasserandrang gesucht ist - zur Lösung der DUPUIT/THIEM'schen Brunnengleichung die empirische Formel nach SICHARDT zur Bestimmung der Reichweite herangezogen. Dieser Ansatz ist jedoch nur unter bestimmten Bedingungen näherungsweise anwendbar und führt regelmäßig zu einer Unterschätzung der Reichweite.

SICHARDT setzte sich mit Tiefbauforderungen auseinander und benötigte zur Berechnung von Baugrubenwasserhaltungen eine einfache "Faustformel" zur Bestimmung der Reichweite  $R$  einer Grundwasserabsenkung, um diese in die DUPUIT-THIEM'sche Brunnengleichung einsetzen zu können. Mit dem bekannten Absenkziel war es auf diese Weise einfach möglich, den Wasserandrang zu einer Baugrube überschlägig zu berechnen. Die DUPUIT-THIEM'sche Brunnengleichung stellt eine exakte analytische Lösung der zweidimensionalen partiellen Differentialgleichung 2. Ordnung der Grundwasserströmung dar und benötigt zur Lösung u.a. die Vorgabe von Randbedingungen, so auch die Vorgabe der Reichweite der Absenkung. Mathematisch wirkt die Reichweite in dieser Formel wie eine Randbedingung 1. Ordnung (DIRICHLET-Randbedingung), d.h. wie ein Festpotential. Die Anwendung der Formel nach SICHARDT führt daher in ausgedehnten Flachlandaquiferen in Fällen ohne Einwirkung von ernährenden Randbedingungen (Flüsse, Seen) regelmäßig zu einer Überschätzung des Wasserandranges zur Grundwasserabsenkung, so dass die darauf aufbauende Bemessung der Brunnen stets auf der sicheren Seite liegt. Aus diesem Zusammenhang wird klar, dass die Anwendung der "SICHARDT-Reichweite" vom Grundsatz her nicht geeignet ist zur Beantwortung der Frage, welche Reichweite der Absenkung sich als Folge einer Grundwasserentnahme im Grundwasserleiter einstellen wird.

Hier wird dagegen ein Ansatz verfolgt, bei dem die Reichweite in der DUPUIT/THIEM'schen Brunnenformel durch die der Entnahmerate entsprechende Grundwasserneubildungsfläche berechnet wird. Die Größe der kreisförmigen Fläche des Absenkungstrichters kann aus dem Verhältnis von Entnahmerate ( $L^3 T^{-1}$ ) zu Neubildungsrate ( $L^3 T^{-1} L^{-2}$ ) errechnet werden. Die Reichweite der Absenkung ergibt sich als Radius dann aus der Kreisformel. Die Berechnung der Reichweite und des Wasserandranges zur Grundwasserabsenkung erfolgt iterativ.

Die DUPUIT/THIEM'sche Brunnenformel für ungespannte Grundwasserverhältnisse lautet:

$$Q = \frac{\pi \cdot k_f}{\ln R - \ln r} \cdot (H^2 - h^2) \quad \text{Gleichung 2}$$

mit

- $Q$  = Entnahmerate  $m^3 \cdot s^{-1}$
- $H$  = wassererfüllte Mächtigkeit im Abstand  $R$   $m$
- $h$  = wassererfüllte Mächtigkeit im Abstand  $r$   $m$
- $R$  = Reichweite der Absenkung  $m$
- $r$  = Brunnenradius bzw. Radius des Ersatzkreises  $m$
- $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert  $m \cdot s^{-1}$

Die Berechnung der Grundwasserneubildungsfläche und der Reichweite erfolgt bei vergleichsweise kleiner Baugrube nach den Formeln:

$$A_{GWN} = \frac{Q}{GWN} m^2 \quad \text{und} \quad R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{Gleichungen 3a und 3b}$$

mit

- $A_{GWN}$  = Grundwasserneubildungsfläche  $m^2$
- $Q$  = Entnahmerate  $m^3 \cdot s^{-1}$
- $GWN$  = Grundwasserneubildungsrate  $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
- $R$  = Reichweite der Absenkung  $m$

Ein Grundwassersee kann im Vergleich zu einer im Regelfall eher kleinen Baugrube beträchtliche Größen annehmen. Der Grundwassersee steht aufgrund seiner in guter Näherung neutralen Wasserbilanz infolge vglw. großer Verdunstungsrate als Grundwasserneubildungsfläche nicht zur Verfügung. Gleichung 3b gilt daher nur für kleine Baugruben bzw. kleine See-Flächen, bei denen die Reichweite vom Mittelpunkt des Ersatzkreises abgetragen wird. Der dabei entstehende Fehler ist bezüglich der angestrebten Aussagegenauigkeit hinsichtlich der Reichweite gering.

Im Falle einer gedachten sehr großen Baugrube mit einem entsprechend großen Ersatzkreis, dessen Kreisfläche nicht zur Kompensation der Entnahme durch Grundwasserneubildung zur Verfügung steht, befindet sich die Grundwasserneubildungsfläche  $A_{GWN}$  gemäß Gleichung 3a auf einem Kreisring um den Ersatzkreis und bildet die Gesamtfläche  $A_{GES}$ . Folglich ergibt sich für die gesamte Reichweite  $R_{GES}$

$$A_{GES} = A_{GWN} + A_{SEE} m^2 \quad \text{und} \quad R_{GES} = \sqrt{\frac{A_{GES}}{\pi}} \quad \text{Gleichungen 4a und 4b}$$

Die Berechnung der Reichweite  $R_{GES}$  erfolgt iterativ nach Gleichung 2 mit einem beliebig geschätzten Startwert für die Reichweite  $R$  in der DUPUIT/THIEM'schen Brunnengleichung. Die Division des berechneten Wasserandrangs  $Q$  durch die Grundwasserneubildungsrate  $GWN$  nach Gleichung 3a und Einsetzen in die Gleichungen 4a und 4b ergibt den neuen Wert für die Reichweite in der folgenden Iteration. Die Lösung konvergiert in der Regel nach  $< 10$  Iterationen.

Werte für die mittlere Grundwasserneubildungsrate können häufig flächendifferenziert den Landeskartenwerken entnommen werden. Je nach Bodenverhältnissen, Relief, Vegetationsart und Landnutzung liegt der Wertebereich meist zwischen  $3,0$  bis  $8,0 \cdot 10^{-9} m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ .

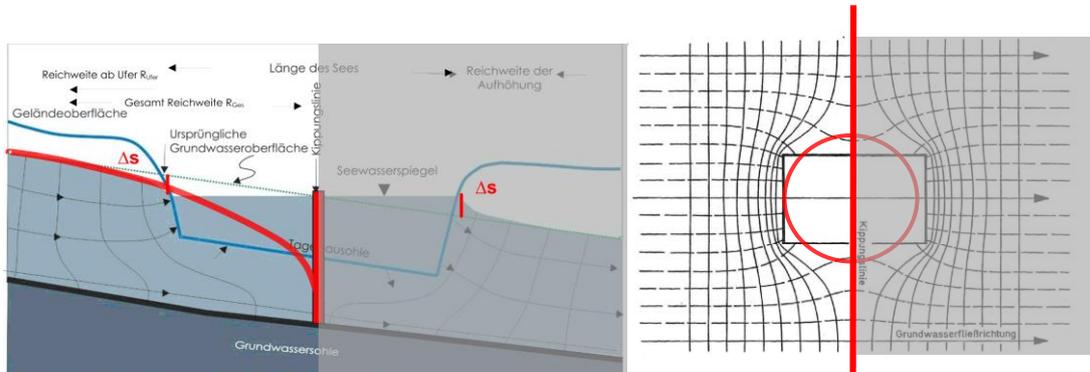
### 3.3 Schritt 3: Übertragung des Ergebnisses auf einen Grundwassersee

Anhand der Abbildungen 1 und 2 ist die auffällige Ähnlichkeit des Strömungsbildes mit der Anströmung zu einem Brunnen bzw. zu einer Baugrube zu erkennen mit der Kippungslinie als charakteristischem inversen Symmetrieelement. Auf der Zu-Strömseite gleicht das Bild der Anströmung zu einer Grundwasserabsenkungsanlage, auf der Abstromseite gleicht es einer Infiltrationsanlage. Entlang der Kippungslinie heben sich die beiden Wirkungen auf. Betrachtet man lediglich die

Zusstromseite (s. Abbildung 3) kann man einen "Halbbrunnen" auf der Kippungslinie in das Strömungsbild projizieren, welcher durch seine Entnahmerate die entsprechende Absenkung gemäß Abschnitt 3.1 am Seeufer erzeugt. Die Entnahmerate des virtuellen Halbbrunnens entspricht dann der Hälfte des in Schritt 2 berechneten Wertes  $Q$  mit der Bestimmung der Reichweite  $R_{GES}$  gemäß Gleichung 4b.

Die Reichweite der Absenkung  $R_{GES}$  entspricht entlang der zentralen Stromlinie bereits in Zustromrichtung dem gesuchten Ergebnis nach Abschnitt 1. Auf der Abstromseite ergibt sich aus Symmetriegründen die Reichweite der Grundwasseraufhöhung, die bei bestimmten Fragestellungen ebenfalls von Interesse sein kann, wie z.B. Verringerung des Flurabstands auf der Abstromseite eine Grundwassersees.

Die auf diese Weise berechnete Entnahmerate des "Halbbrunnens" entspricht jedoch noch nicht den realen Verhältnissen.



**Abbildung 3: Übertragung des Ersatzkreiskonzeptes auf einen Grundwassersee**

#### 3.4 Schritt 4: Annäherung des berechneten Wasserandrangs an reale Verhältnisse

Der Grundwasserandrang zu dem "Halbbrunnen" gemäß vorherigem Abschnitt muss größer sein als der reale Zustrom zu einem Grundwassersee auf seiner Zustromseite, da nur entlang der zentralen Stromlinie die maximale Absenkung ihre Wirkung entfaltet. Entlang des Seeufers strebt der Absenkungsbetrag aufgrund der aufhebenden Wirkung der Infiltration auf der Abstromseite bis zur Kippungslinie dem Wert 0 zu, um dann als Aufhöhungsbetrag absolut wieder zuzunehmen bis zum Erreichen des Austrittspunkts der zentralen Stromlinie auf der Abstromseite.

Die Zustromrate ist direkt proportional dem Absenkungsbetrag, die Abstromrate entsprechend dem Aufhöhungsbetrag. Der Verlauf der Seeaustauschrate entlang der Grenzfläche des Sees zum Grundwasser entspricht dem Verlauf des Cosinus des Winkels beidseitig zwischen der Zustromrichtung  $0^\circ$  ( $\cos 0 = 1$ ), quer zur Strömung  $90^\circ$  ( $\cos \pi/2 = 0$ ) und der Abstromrichtung  $180^\circ$  ( $\cos \pi = -1$ ).

Auf der Zustromseite besitzt die Cosinusfunktion im Intervall  $-90^\circ$  bis  $+90^\circ$  ( $-\pi/2$  bis  $+\pi/2$ ) den Mittelwert  $0,637$  ( $=2/\pi$ ).

Folglich ist der in den Abschnitten 3.2 bzw. 3.3 berechnete Wasserandrang zum Ersatzbrunnen bzw. Halbbrunnen mit dem Faktor  $0,637$  zu multiplizieren, um einen letztendlich realitätsnahen mittleren Grundwasserandrang entlang der Zustromseite zum Grundwassersee zu ermitteln.

## 4 Ergebnisse

Mit den Standortdaten zur Aquifergeometrie, dem repräsentativen Durchlässigkeitsbeiwert, dem Ruhestromgefälle und der mittleren Grundwasserneubildungsrate kann das stationäre Strömungsfeld eines Grundwassersees näherungsweise beschreiben werden. Mit der erläuterten Methodik können nachfolgend gelistete Kennwerte zu den Auswirkungen eines Grundwassersees auf das Grundwasser in guter Näherung berechnet werden.:

- Reichweite der Grundwasserabsenkung
- Analog aus Symmetriegründen: Reichweite der Grundwasseraufhöhung
- Grundwasserandrang auf der Zustromseite
- Seewasserinfiltration auf der Abstromseite
- Aus Wasserandrang und Grundwasserneubildungsrate: Größe des oberstromigen Einzugsgebietes
- Stützpunkte zur Konstruktion des Einzugsgebietes: Reichweite, Einzugsgebietsgröße, Schnittpunkte der Grenzen mit der Kippungslinie

Vergleiche mit numerischen Modellsimulationen bestätigen die Anwendbarkeit der Vorgehensweise.