

ARCADIS Deutschland · Schwieberdinger Straße 60 · 70435 Stuttgart

Vorab per Email

DB ProjektBau GmbH
Großprojekt Stuttgart 21 Wendlingen - Ulm
Räppelstraße 17
70191 Stuttgart

CC Herr Meier, Herr Enge (DB PB)

Telefon: 0711 90681-0
Fax: 0711 90681-40
E-Mail: stuttgart@arcadis.de
Internet: www.arcadis.de

Projekt: Großprojekt Stuttgart 21, PFA 1.1 bis PFA 1.6b

**7. Planänderungsantrag, Beantwortung der Stellungnahme
LGRB vom 06.10.11, Punkt B Teil Grundwasser aus Sicht
des Sachverständigen Wasserwirtschaft**

Stuttgart,
19. März 2012

Ansprechpartner:
Herr Dr. Bethge, Herr Dr.
Kunz
e.bethge@arcadis.de,
a.kunz@arcadis.de

Unser Zeichen:
DE0110.324040.0115

Sehr geehrter Herr Plenter,

mit Schreiben vom 06.10.2011 wurden vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau ergänzende Erläuterungen zur Hydrochemie des im Rahmen des Grundwassermanagement des Projekts Stuttgart 21 zur Verwendung vorgesehene Infiltrationswassers angefordert. Gemäß Ihrer Aufforderung nehmen wir im Folgenden hierzu aus Sicht des Sachverständigen für Wasserwirtschaft zusammenfassend Stellung.

In Kapitel 1 und 2 wird zunächst der Infiltrationsbereich hinsichtlich der Erstreckung und hydrochemischen Eigenschaften des Grundwasser beschrieben. In Kapitel 3 erfolgt eine Beschreibung des zur Infiltration vorgesehenen Wassers. In Kapitel 4 - 6 erfolgt die Bewertung der Auswirkungen der Infiltration auf die Infiltrationsbrunnen, den oberen Grundwasserleiter und den unteren Mineralwassergrundwasserleiter. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse aus den Kapiteln 1 – 6 zur Beantwortung der vom LGRB aufgeworfenen Fragestellungen verwendet.

Telefon-Durchwahl:
-18

Telefax-Durchwahl:
-40

Wir sind nach ISO 9001 zertifiziert.

Geschäftsführer:
Walter Verbruggen (Vorsitz)
Jürgen Boenecke
Dr. Roland Damm
Adam Mahr
Thomas-M. Vogt

Amtsgericht Darmstadt
HRB 4537

1 Infiltrationsmengen und Einflussbereiche

Die Infiltration erfolgt gemäß [U1] zur Stützung des Grundwasserspiegels und zur Minimierung des Absenktrichters der offenen Baugruben:

- Beiderseits der das Stuttgarter Tal querenden Baugruben des PFA 1.1 und Anfahrbereich PFA 1.2/1.6a mit aufbereitetem Wasser aus der Zentralen Wasseraufbereitungsanlage
- Im Bereich der offenen Baugruben S-Bahnanbindung Bereich Bahnhof Mittnachtstraße und nördlich davon der Fernbahn Bad Cannstatt vor dem Kreuzungsbereich mit der S-Bahn im PFA 1.5 mit aufbereitetem Wasser aus der Wasseraufbereitungsanlage Abstellbahnhof

Beantragt wird in [U1] eine Infiltration von bis zu 100 % des über die Gesamtbauzeit geförderten Grundwassers. Eine Regelung der Infiltrationsmenge findet über Steuerpegel statt.

Die prognostizierten Infiltrationsmengen betragen gemäß [U2] für Mittelwasserverhältnisse 6.019 Tm³ im PFA 1.1, 118 Tm³ im anschließenden Anfahrbereich des PFA 1.2/1.6a und 1.203 Tm³ im PFA 1.5, insgesamt 7.340 Tm³. Demgegenüber beträgt die prognostische Grundwasserfördermenge 6.778 Tm³ im PFA 1.1 und 1.886 Tm³ im PFA 1.5, insgesamt 8.664 Tm³.

Mit den Infiltrationsmaßnahmen erfolgt eine Kompensation der Grundwasserentnahmen im direkten Umfeld der Infiltrationsbrunnen sowie von Entnahmen in weiter entfernt liegenden Bereichen, in denen eine direkte Infiltration nicht möglich ist.

In Auswertung der Anlagen aus [U2] und [U3] (GW-Differenzenpläne im Vergleich zu dem modellierten Ausgangsspiegel bei Mittelwasser) werden dadurch folgende Bereiche durch Infiltrationswasser beeinflusst:

ARCADIS

Bereich der Talquerung PFA 1.1 incl. Anfahrbereiche PFA 1.2/1.6a

- Im Quartär ist das Grundwassergefälle zur Baugrube bis Bauschritt (BS) 9 grundsätzlich größer als die durch die Infiltrationsbrunnen erzeugte Aufspiegelung. Daher fließt nahezu das gesamte Infiltrationswasser zu den Baugruben zurück. Der Bereich mit einer Beeinflussung des oberen GW-Stockwerks durch Infiltrationswasser beschränkt sich auf eine an die Baugruben angrenzende Zone von ca. 50 bis max. 150 m.

Gemäß Modellsimulation würde bei verminderter Bauwasserhaltung im BS 10 und nach Ende der Bauwasserhaltung in den BS 11 - 12 die (ebenfalls verminderte) Infiltration zu einer Spiegelaufhöhung von 0,5 - max. 2 m führen. Dieses Infiltrationswasser fließt entsprechend der natürlichen Fließrichtung im BS 10 teilweise und in den BS 11 - 12 großteils nach Norden.

- Für den Bochinger Horizont gilt grundsätzlich das gleiche wie für das Quartär. Bis BS 3a fließt nahezu das gesamte Infiltrationswasser in Richtung der Baugruben zurück.

Gemäß Modell entstehen in BS 3b - 9 lokale Druckerhöhungen von 0,5 - 1 m, von denen ein Teilabstrom nicht durch die Bauwasserhaltung erfasst wird. Die Bauwasserhaltung wird im BS 10 -11 reduziert und im BS 12 eingestellt. In diesen Bauschritten fließt das Infiltrationswasser aufgrund einer Spiegelaufhöhung von 0,5 - max. 2 m großteils nach Norden ab.

PFA1.5, Bereich S-Bahn Bahnhof Mittnachtstraße

- Im Quartär erfolgt eine Grundwasseraufspiegelung von 0,5 - 1 m (überwiegend BS 2 – 4). Hierdurch findet ein Abstrom in östlicher Richtung statt.
- Im Bochinger Horizont erfolgt eine Druckerhöhung von 2 - max. 5 m (BS 2 – 12). Das infiltrierte Wasser fließt z.T. nach Westen in Richtung Tunnel Fernbahn Bad Cannstatt und z.T. nach Osten zum Stuttgarter Tal.

ARCADIS

PFA 1.5, Bereich Fernbahn Bad Cannstatt westlich des Kreuzungsbauwerkes Ehmmanstraße

- Im Bochinger Horizont wurde in BS 2 - 12 eine Druckerhöhung von 2 - max. 5 m modelliert. Hierdurch fließt ein Teil des infiltrierten Wassers nach Norden ab. In östlicher Richtung wird das Infiltrationswasser jedoch durch die Baugruben des Kreuzungsbereiches Ehmmanstraße wieder aufgenommen.

Fazit: Der überwiegende Teil des Infiltrationswassers (insbesondere PFA 1.1) fließt den Baugruben wieder zu. Ein geringerer Teil verbleibt im PFA 1.5 generell und im PFA 1.1 in den letzten Bauschritten im Infiltrationshorizont und fließt entsprechend der Grundwasserstromrichtung ab.

2 Beschaffenheit des Grundwassers in den Infiltrationsbereichen

Der Rohwasserchemismus stellt sich zusammenfassend wie folgt dar [U4]:

- Hohe Mineralisation (insbesondere Calcium, Magnesium, Sulfat)
- pH-Werte im neutralen bis basischen Bereich
- z.T. niedriger Sauerstoffgehalt
- z.T. signifikante Konzentrationen von Eisen, geringe Konzentrationen von Mangan

Untersuchungen zum RedOx-Potential des Grundwassers wurden während der Erkundungsprogramme nicht durchgeführt. Für das quartäre Grundwasser der Talaue kann jedoch auf Grund der häufig geringen Sauerstoffkonzentrationen davon ausgegangen werden, dass überwiegend reduzierende Verhältnisse vorliegen (s.u.).

Daten zum Rohwasserchemismus wurden auf Basis der durchgeführten Erkundungsprogramme in den Planunterlagen des Grundwassermanagements beschrieben (TEH 110 / 511). Im Folgenden werden für den PFA 1.1 und PFA 1.5 auf dieser Grundlage die wesentlichen chemischen Konzentrationen des Grundwassers zusammengestellt. Zusätzlich zu den Konzentrationsangaben aus den Planunterlagen wurden auch Daten aus der wasserwirtschaftlichen Datenbank aufge-

ARCADIS

führt, die neben früheren Untersuchungsergebnissen insbesondere Ergebnisse aus der laufenden wasserwirtschaftlichen Beweissicherung enthält.

PFA 1.1

Für den Grundwasserzustrom zu den Baugruben des PFA 1.1 (inklusive der benachbarten Infiltrationsbereiche) sind auf Grundlage der Planunterlagen zum Grundwassermanagement (auf Basis der Daten 1. – 5. Erkundungsprogramm) folgende hydrochemische Konzentrationsangaben zu nennen:

- pH-Wert 6,1 ... 8
- Sauerstoff 0,5 ... 6,0 mg/l
- Hydrogenkarbonat 100 ... 600 mg/l
- Calcium 150 ... 600 mg/l
- Ammonium 0 ... 100 mg/l
- Eisen ges. 0,05 ... 2 mg/l
- Mangan 0,05 ... 0,5 mg/l
- DOC <1 ... 4,5 mg/l
- AOX <10 ... 35 µg/l
- Freie Kohlensäure 20 ... 500 mg/l

Punktuell liegen zudem Grundwasserverunreinigungen vor (insbesondere LHKW, MKW, PAK und BTEX).

Mit Hilfe der wasserwirtschaftlichen Datenbank (Daten aus dem 1. – 5. Erkundungsprogramm sowie aus der laufenden Beweissicherung) wurden schichtbezogene Werte des Sauerstoffs zusammengestellt: Quartär von 0,1 - 8,9 mg/l (Mittelwert 3,4 mg/l), Gipskeuper von 0 - 9,8 mg/l (Mittel 3,2 mg/l), Unterkeuper von 0,1 - 10 mg/l (Mittel 4,3 mg/l). Für das Quartär sind die höheren Werte für den Talrand charakteristisch, für die Talmitte Werte <2 mg/l. Für den Gips- und Unterkeuper ergibt sich keine charakteristische räumliche Verteilung, so dass hier die Mittelwerte maßgebend sind.

ARCADIS

PFA 1.5

Für das Umfeld der Baugruben und Infiltrationsbrunnen im PFA 1.5 wurde eine Datenbankabfrage (Daten 1.-5. Erkundungsprogramm sowie aus der laufenden Beweissicherung) durchgeführt. Für den abgefragten Bereich ergab sich:

- pH-Wert 6,6 ... 12,3 (BK 16/7 GM)
- Sauerstoff 0,1 ... 9,7 mg/l
- Hydrogenkarbonat 129 ... 872 mg/l
- Calcium 30 ... 440 mg/l
- Ammonium 0,01 ... 3,1 mg/l
- Eisen ges. 0,01 ... 13 mg/l (GM C1/B8(a), Einzelwert)
- Mangan 0,002 ... 1,4 mg/l
- DOC 0,5 ... 6 mg/l
- AOX 10 ... 16.000 µg/l (BK 5.5/115)
- Freie Kohlensäure 20 ... 500 mg/l

Die Zusammenstellung der schichtbezogene Spannweiten des Sauerstoffs mit Hilfe der wasserwirtschaftlichen Datenbank ergab: Quartär (nur lokal verbreitet) von 0,1 - 6,1 mg/l (Mittelwert 3,1 mg/l), Gipskeuper von 0,4 - 9 mg/l (Mittel 4,2 mg/l), Unterkeuper von 3,1 - 9,7 mg/l (Mittel 7,4 mg/l - eine Messstelle). Im Gipskeuper sind für die Trasse in der Umgebung der Trasse im Bereich des Nordbahnhofes Werte <2 mg/l charakteristisch, für den Fernbahnbereich Werte zwischen 2 und 6 mg/l.

In den angrenzenden Bereichen des Nordbahnhofes sind lokale Grundwasserverunreinigungen bekannt (insbesondere LHKW, MKW, PAK, BTEX, vereinzelt Schwermetalle). Im Bereich des Abstellbahnhofes Nord, PFA 1.5 existiert zusätzlich ein lokaler Bromacilschaden.

Fazit: Die Sauerstoffgehalte des anzutreffenden Grundwassers schwanken in einem weiten Bereich, wodurch auch die Milieuverhältnisse bereichsweise und zeitlich wechseln können. Es ist zu erwarten, dass das Grundwasser im betreffenden Abschnitt des PFA 1.1 und PFA 1.5 entsprechend der Zusammensetzung überwiegend kalkgesättigt bis kalkabscheidend und nur lokal geringfügig kalkaggressiv ist. Die lokal vorhandenen Grundwasserverunrei-

ARCADIS

nigungen werden ggf. durch die Infiltration von Sauerstoff beeinflusst (z.B. Förderung des Schadstoffabbaus).

3 Beschaffenheit des Infiltrationswassers

3.1 Bauwasserhaltung und Übergabestationen

Infolge der offenen Grundwasserhaltung in den Baugruben ist davon auszugehen, dass in den Drainageelementen und im Pumpensumpf durch Kontakt des Grundwassers mit der Atmosphäre eine Anreicherung von Sauerstoff stattfindet. Ggf. im Grundwasser gelöstes Eisen und Mangan wird so überwiegend ausfallen und voraussichtlich bereits im Bereich der Baugruben zurückgehalten.

An den Übergabestellen beginnt bereits die Grundwasseraufbereitung, in dem eine Vorreinigung des Wassers mittels eines bauseitigen Absetzbeckens durchgeführt wird. Weiterhin wird CO₂ in Abhängigkeit der Fördermenge zur Vermeidung von Inkrustationen in die Förderleitung dosiert.

3.2 Wasseraufbereitungsanlage (Funktionsweise)

In [U4], Anlage 1, sind die Verfahrensstufen der Wasseraufbereitungsanlagen skizziert. Nach einem Zulaufspeicher und einer Vorabscheidung fest/ leicht erfolgt eine Flockung/ Fällung/ Sedimentierung durch Zugabe einer 0,1 %-igen Lösung eines Flockungshilfsmittels in einem nachfolgenden Lamellenschrägklärer. Diesem ist ein Kiesfilter nachgeschaltet.

In der optionalen Oxidationsstufe wird das Wasser zusätzlich mit Natriumhypochlorid zur Oxidation anorganischer Schadstoffe (z.B. NH₄) versetzt. Durch das Angebot einer extrem hohen Oberfläche wird zudem die Bildung eines Biofilms begünstigt. Hierdurch wird der Oxidationsprozess verbessert.

Im nachgeschalteten Aktivkohlefilter werden organische Schadstoffe und in einem optionalen Anionenaustauscher bedarfsweise Schwermetalle aus dem Wasser entfernt.

ARCADIS

Die Neutralisationsanlage am Ende der Prozesskette besteht aus einem CO₂-Tank, einer Dosierlanze zur Einbringung des CO₂ in das Prozesswasser, einem Statikmischer sowie einer pH-Messsonde. Steigt der pH-Wert des Prozesswassers in den alkalischen Bereich, so wird über die pH-Messsonde eine automatische Regelarmatur angesteuert. Über die Dosierlanze wird dann das CO₂ aus dem Tank in das Wasser eingebracht und über einen Statikmischer eine gleichmäßige Verteilung des CO₂ und damit die pH-Wert-Neutralisation erzwungen.

Durch eine entsprechende pH-Steuerung wird das während der Wasserbehandlung ggf. durch einen CO₂-Austrag oder eine pH-Wert-Erhöhung gestörte Kohlensäure-Karbonat-Gleichgewicht wiederhergestellt.

Im Folgenden wird der Einfluss der Wasseraufbereitung auf die Konzentration der Parameter Eisen, Mangan und Sauerstoff sowie das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht im Infiltrationswasser dargestellt.

3.3 Einfluss der Wasseraufbereitung auf die Wasserbeschaffenheit

Eisen

In reduzierenden Wässern liegt Eisen größtenteils in echt gelöster, zweiwertiger Form vor. Zur Abscheidung dieser Konzentrationen müssen die Eisenionen oxidiert werden. Dies erfolgt in der Wasseraufbereitungsanlage durch Kontakt mit Luftsauerstoff. Durch den Oxidationsvorgang bilden sich schwerlösliche, dreiwertige Eisenverbindungen, diese werden bspw. im Filterbett des Mehrschichtfilters (Kiesfilter nach der Flockungs-Fällungsstufe) abgeschieden. Neben der Verwendung von Luftsauerstoff als Oxidationsmitteln werden die gelösten, zweiwertigen Eisenionen auch durch mikrobielle Stoffwechselforgänge im Filterbett des Mehrschichtfilters oxidiert und abgeschieden.

Bis zu Eisenkonzentrationen von maximal 6 mg/l im Zulauf der Wasseraufbereitungsanlage sind aus unserer Sicht die geplanten Verfahrensstufen der Flockungs- Fällungsstufe und der Mehrschichtfiltration für eine effektive Eisenabscheidung ausreichend. Es wird erwartet, dass die Eisenkonzentrationen im Zulauf der Wasseraufbereitungsanlagen deutlich niedriger als 6 mg/l liegen: Im Grundwasser wurden überwiegend geringere Eisenkonzentrationen gemessen (siehe

ARCADIS

Kapitel 2). Auf Grund der Mischung verschiedener Rohwässer sowie der Eisenausfällung im Bereich der offenen Wasserhaltung in den Baugruben werden die Eisengehalte im Mischwasser gegenüber den Werten im Grundwasser reduziert. Vereinzelt gemessene hohe Konzentrationen im Grundwasser werden somit nicht mehr im Zulauf der Wasseraufbereitungsanlage auftreten. Ein Austrag von Eisenverbindungen aus den Wasseraufbereitungsanlagen in das Infiltrationswasser ist daher bei bestimmungsgemäßem Betrieb der Anlage nicht zu erwarten.

Für den unwahrscheinlichen Fall, dass nach Passage des Mehrschichtfilters in der Wasseraufbereitungsanlage Eisenbestandteile weiterhin in echt gelöster, zweiwertiger Form vorliegen, kann durch Einsatz einer optionalen zweiten Oxidationsstufe (z.B. Zugabe von Natriumhypochlorid) eine Umwandlung in schwerlösliche dreiwertige Eisenverbindungen erfolgen, welche in den nachgeschalteten Anlagenstufen zurückgehalten werden können.

Mangan

In reduzierenden Wässern liegt Mangan größtenteils in echt gelöster, zweiwertiger Form vor. Zur Abscheidung als schwerlösliche Verbindung muss das gelöste Mangan im ersten Schritt ebenfalls oxidiert werden, dies kann durch Einfluss eines Oxidationsmittels bzw. ebenfalls durch mikrobielle Stoffwechselvorgänge stattfinden. Im zweiten Schritt müssen aus dem oxidierten Mangan schwerlösliche Verbindungen (i.d.R. Manganhydroxide) gebildet werden. Diese Hydroxidbildung ist pH-Wert abhängig. Bei den in der Wasseraufbereitungsanlage zu erwartenden pH-Werten ist allerdings mit keiner Manganhydroxidbildung zu rechnen. Eine relevante Manganabscheidung in der Wasseraufbereitungsanlage tritt daher nur in der Fällungs- Flockungsstufe (Einlagerung von Mangankonzentrationen in den gebildeten Makroflocken) und durch mikrobielle Vorgänge auf.

Die mikrobielle Manganabscheidung steht in direkter Konkurrenz mit der mikrobiellen Eisenabscheidung, wobei die Eisenabscheidung vorrangig abläuft. In Abhängigkeit der Eisenkonzentrationen im Rohwasser der Wasseraufbereitungsanlage ist es somit möglich, dass im Mehrschichtfilter größtenteils die mikrobielle Eisenabscheidung stattfindet und sich eine manganabscheidende Mikrobiologie nur in nachgeschalteten Anlagenkomponenten ausbildet.

ARCADIS

Eine nennenswerte Reduzierung der Mangangehalte durch die Wasseraufbereitung findet somit nicht statt. Auf Grund der geringen Mangangehalte im Grundwasser, den Ausfällungen im Bereich der Wasserhaltung in den Baugruben sowie der Mischung der Baugrubenwässer im Zulauf der Wasseraufbereitungsanlagen, sind die möglichen Mangankonzentrationen im Ablauf der Wasseraufbereitungsanlagen so gering, dass keine negativen Auswirkungen durch Manganausfällungen zu erwarten sind.

Sauerstoffgehalt

Durch Belüftung in der Wasserhaltung, ggf. im Plattenschrägklärer und in der optionalen Stripp- und Oxidationsstufe wird der Sauerstoffgehalt im Wasser zunächst erhöht. Durch die Oxidation organischer Schadstoffe und den Durchlauf des Aktivkohlefilters findet wieder eine gewisse Sauerstoffzehrung statt, die aber nicht beziffert werden kann. Daher ist damit zu rechnen, dass der Sauerstoffgehalt im Ablauf der Wasseraufbereitungsanlagen mindestens der Zulaufkonzentration entspricht, wahrscheinlich jedoch erhöht wird. Dabei wird die Sättigungsgrenze jedoch nicht zwingend erreicht.

Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

Für die Flockung/Fällung ist die Zugabe eines 0,1%igen Flockungshilfsmittels vorgesehen. Hierdurch wird keine wesentliche pH-Wert-Veränderung herbeigeführt, welche das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht verschieben könnte. Das Wasser bleibt damit überwiegend kalkgesättigt bis kalkübersättigt. Eine pH-Verschiebung und dadurch eventuelle zusätzliche Kalkübersättigung ist überwiegend durch den Einfluss zementhaltiger Baustoffe und durch Belüftung in den Baugruben zu erwarten. Durch die CO₂-Dosierung in den Neutralisationsanlagen an den Übergabestellen wird gewährleistet, dass in den Rohrleitungen keine Kalkausfällungen stattfinden. Eventuelle pH-Wert-Änderungen in der Anlage werden durch die nachgeschaltete Neutralisationsanlage in den vorgegebenen pH-Bereich von 6,5 - 8,5 gebracht.

3.4 Infiltrationswasser aus dem Trinkwassernetz

Sollte die Menge des in den Baugruben geförderten Wassers zur Beschickung der Infiltrationsbrunnen nicht ausreichen ist der Einsatz von Wasser aus dem Trinkwassernetz (im Bereich der

ARCADIS

Infiltrationsbrunnen Fernwasser des Zweckverbandes Bodenseewasserversorgung) vorgesehen. Hierzu wird das Trinkwasser im Reinwasserbehälter des Ablaufs der Wasseraufbereitungsanlagen mit dem aufbereiteten Baugrubenwasser gemischt und für die Beschickung der Infiltrationsbrunnen bereitgestellt. Die nur im Ausnahmefall im Zusammenhang mit Problemszenarien betriebenen Notbrunnen im Grenzdolomit des Unterkeupers werden ausschließlich mit Trinkwasser beschickt.

Vom Zweckverband Bodenseewasserversorgung wird im Korrosionsbericht 2010 ein mittlerer Sauerstoffgehalt von 16 mg/l angegeben. Damit liegt für das aufbereitete Fernwasser eine Sauerstoffübersättigung vor. Durch Verluste beim Transport ist zumindest von einem Sauerstoffmindestgehalt nahe der temperaturabhängigen Sättigungsgrenze von ca. 11 mg/l zu rechnen (für eine Temperatur von 10 ° C). Das Wasser weist zudem sehr geringe Gehalte an Eisen (0,004 mg/l) und Mangan (<0,005 mg/l) auf. Der Calcium-Gehalt liegt mit ca. 40 mg/l unter den mittleren Gehalten im Grundwasser des PFA 1.1 und 1.5. Es kann angenommen werden, dass durch die Wasseraufbereitung, das Fernwasser im Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht steht.

Die hydrochemischen Eigenschaften des gemischten Infiltrationswasser (Mischung von Trinkwasser und aufbereitetem Baugrubenwasser) liegen zwischen dem des Trinkwassers und des aufbereiteten Baugrubenwassers. Durch die Aufenthaltszeit im Reinwasserbehälter kann auch für dieses Wasser angenommen werden, dass es im Kalk-Kohlensäuregleichgewicht steht. Für die weitere Betrachtung der Mischungsvorgänge im Bereich der Infiltrationsbrunnen ist eine zusätzliche Berücksichtigung dieses gemischten Infiltrationswassers daher nicht erforderlich.

Fazit: Bei planmäßigem Anlagenbetrieb werden die Eisengehalte im Infiltrationswasser aus der Wasseraufbereitungsanlage ausreichend vermindert. Die Mangangehalte sind von vorherein so gering, dass keine negativen Auswirkungen durch Ausfällungen zu erwarten sind. Die Sauerstoffgehalte werden aufgrund der Belüftung in der Baugrube und in der Wasserreinigungsanlage erhöht. Das ggf. gestörte Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht wird wiederhergestellt.

Im Infiltrationswasser aus dem Trinkwassernetz liegen nur vernachlässigbar geringe Eisen- und Mangangehalte vor. Dieses Wasser ist im Kalk-Kohlensäuregleichgewicht. Die hydrochemischen Eigenschaften des aus Trinkwasser und aufbereitetem Baugrubenwasser

gemischten Infiltrationswassers liegen zwischen denen des Trinkwassers und Baugrubenwassers. Auch dieses Wasser ist im Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht.

4 Bewertung der Auswirkungen des Infiltrationswassers auf die Infiltrationsbrunnen

Bei planungsgemäßem Betrieb der besteht für die geplanten Wasserreinigungsanlagen nach derzeitigem Kenntnisstand auf Grund der Eisenkonzentrationen keine nennenswerte Gefahr von Ausfällungen bzw. Verockerungen der Versickerungsbrunnen. Da sich das Infiltrationswasser nach der nachgeschalteten Neutralisationsanlage im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindet, ist auch keine Versinterung der Infiltrationsbrunnen zu erwarten.

Durch die angestrebte kontinuierliche Infiltration mit konstantem Druck und die Verdrängung des möglicherweise eisenhaltigen Grundwassers durch das Infiltrationswasser sind Ausfällungen am Brunnen im angrenzenden Bereich wenig wahrscheinlich. Eine eventuelle Eisenausfällung tritt erst außerhalb des Umfelds der Brunnen im Randbereich der Infiltrationsfahne auf (siehe Kapitel 5).

Die Infiltrationsbrunnen wurden zudem mit Durchmesser und Dimensionierung des Kiesfilters großzügig ausgelegt. Es erfolgt eine kontinuierliche Überwachung der Grundwasser-/ Druckspiegel in den Steuerpegeln und der Eingaberate in die Infiltrationsbrunnen. Findet dennoch eine Verminderung der Brunnenergiebigkeit statt, wird eine Brunnenregenerierung durchgeführt. Bei Bedarf/zeitweiligem Ausfall eines Brunnens aus technischen Ursachen besteht die Möglichkeit einer anteiligen Umverteilung der Infiltration auf andere Brunnen. Bei gänzlichem Ausfall eines Brunnens ist bei Erfordernis die Errichtung von Ersatzbrunnen vorgesehen.

Der geplante Betrieb der Wasserreinigungsanlagen und die Steuerung und Überwachung der Infiltrationsbrunnen ermöglicht somit eine auf die Verhältnisse angepasste Infiltration.

5 Hydrochemische Prozesse durch die Infiltration im Grundwasser und Grundwasserleiter

5.1 Vorgehensweise

Durch die Vielzahl der hydrochemischen Einflussgrößen und die große Streubreite der hydrochemischen Kenngrößen des Grundwassers im Infiltrationsbereich ist die Berechnung der auftretenden hydrochemischen Mischungen nicht für jeden Einzelfall möglich. Daher wurde auf Basis der verfügbaren Daten zunächst eine qualitative Bewertung durchgeführt (Kapitel 5.2). Durch Mischungsrechnungen mit dem Programm PHREEQC wurden die Aussagen anhand repräsentativer Analysen überprüft (Kapitel 5.3).

5.2 Qualitative Bewertung

Eine Erhöhung des Sauerstoffgehaltes durch das Infiltrationswasser gegenüber dem Grundwasser findet in Bereichen mit niedrigem Sauerstoffgehalt des Grundwassers statt. Die prinzipiell hierdurch stattfindenden hydrochemischen Prozesse sind:

- Eisen- Manganausfällungen
- Bei unterschiedlichem Kohlensäure-Karbonat-Gleichgewicht des Infiltrationswassers und des Grundwassers Bildung eines kalkaggressiven Mischwassers (sogenannte Mischungskorrosivität)
- Oxidation von Ammonium und Abbau organischer Schadstoffe (bei LHKW Vinylchlorid, MKW, Naphthalin, BTEX)
- Sonstige LHKW, sonstige PAK und Schwermetalle verändern sich kaum. Es findet im Wesentlichen eine Verdrängung/Verdünnung durch das Infiltrationswasser statt.

Zur Bewertung des Einflusses auf die Infiltrationsbrunnen und den Grundwasserleiter wird im Folgenden ausschließlich die Eisen-/Manganausfällung bzw. Änderung des Kohlensäure-Karbonat Gleichgewichts betrachtet.

Das ggf. hydrochemisch veränderte Grundwasser strömt der Baugrube zu und wird der Reinigungsanlage zugeführt. In dem in Kapitel 1 beschriebenen Abstrombereichen im PFA 1.5 außer-

ARCADIS

halb der Baugrubenzuflüsse finden an der Verdrängungs-/ Austauschfront fortlaufend die o.g. hydrochemischen Prozesse statt. Durch die hierbei im Aquifer auftretenden Oxidationsprozesse findet ein Sauerstoffverbrauch statt, wodurch der Bereich mit oxidativen Einflüssen in Abstromrichtung begrenzt wird.

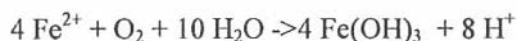
In den für die Infiltration vorgesehenen Grundwasserleitern sind überwiegend oxidische Gesteinsminerale verbreitet und sind z.T. oxidische Kluftbeläge beschrieben. Diese Minerale werden durch die Sauerstoffzufuhr nicht verändert. Oxidierbare Sulfide sind aus dem Infiltrationsbereich nicht bekannt. Daher sind durch die Sauerstoffzufuhr bis auf möglicherweise geringfügige Eisenausfällungen keine Auswirkungen auf die Mineralogie der Grundwasserleiter zu erwarten.

Eisen-/Manganausfällung

Auf Grund der niedrigen gemessenen Mangangehalte im Grundwasser sehen wir keine möglichen Auswirkungen durch eventuelle Ausfällungen von Manganmineralen.

Die Auswirkung einer Ausfällung von im Grundwasser gelösten Eisen durch die Infiltration von sauerstoffhaltigem Grundwasser auf den Porenraum des Grundwasserleiters stellt sich wie folgt dar:

Bei der Fällung von Eisen entsteht zunächst amorphes $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Gel, das sich erst allmählich in Eisenoxide umwandelt. Die Größenordnung des im Mischbereich bei einer Eisenausfällung maximal verbrauchten Sauerstoffs ergibt sich aus der stöchiometrischen Gleichung



Für die Ausfällung je mg/l Eisen werden danach je 0,15 mg/l Sauerstoff benötigt. Bei den erwarteten Sauerstoffgehalten im Infiltrationswasser ist somit theoretisch eine vollständige Ausfällung des im Grundwasser vorhandenen Eisens möglich.

Bei einer Dichte des $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -Gels von 1 g/cm^3 fallen von jeweils 1 mg/l bzw. 1 g/m^3 gelöstem Eisen pro 1 m^3 Grundwasser $1,92 \text{ cm}^3$ Eisenhydroxid (Dichte von 1 g/cm^3) aus. Von max. 13 mg/l Eisen (Einzelwert und maximal gemessene Konzentration im Grundwasser) würden somit theoretisch 25 cm^3 Eisenhydroxid ausfallen, wodurch sich eine vernachlässigbare Verringerung

ARCADIS

des Wasser-/bzw. Porenraums von nur 0,0025 % ergäbe. Durch die Umwandlung in Eisenoxid erhöht sich die Dichte der Mineralien, wodurch die Reduzierung des Porenraums wieder abnimmt.

In den Schichtbereichen zwischen Baugruben und Infiltrationsbrunnen im PFA 1.1 wird das Grundwasser größtenteils durch das Infiltrationswasser ausgetauscht. Vermischungs- und Reaktionsprozesse finden nur an der Verdrängungsfront zwischen Grund- und Infiltrationswasser statt. Im überwiegenden Einflussbereich der Infiltrationsbrunnen im Aquifer tritt somit bei der Vermischung des Grundwassers maximal je Bauschritt eine einmalige Ausfällung des im Grundwasser gelösten Eisens auf. Der Einfluss auf die Porosität des Grundwasserleiters und damit auf die Grundwasserströmung ist daher als vernachlässigbar einzustufen.

Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht

Nach der hydrochemischen Zusammensetzung ist das Grundwasser überwiegend im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bzw. kalkübersättigt und nur lokal kalkaggressiv. Das Infiltrationswasser aus der Wasseraufbereitungsanlage ist im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht und weist ähnliche Calcium-/Karbonatgehalte wie das Grundwasser auf. Durch die Mischung der Wässer (Grundwasser und Infiltrationswasser aus der Wasseraufbereitungsanlage) wird daher die Kalkübersättigung bzw. Kalkaggressivität des Grundwassers reduziert. Eine erhöhte Ausfällung/Auflösung von Kalk auf Grund der Mischung ist daher nicht zu erwarten. Die Änderung des Kalk- Kohlensäure Gleichgewichts im Mischungswasser, das bei der Mischung des Fernwasser mit dem Grundwasser entsteht, wurde im Rahmen der hydrochemischen Mischungsrechnung (Kapitel 5.3) näher untersucht.

5.3 Hydrochemische Berechnung der Kalk-, Eisen- und Manganausfällung bei Mischung von Infiltrations- und Grundwasser

Durchführung

Die hydrochemischen Auswirkungen der Zumischung von Infiltrationswasser zu Grundwasser wurden beispielhaft für das Grundwasser aus dem Quartär (Grundwasser 1: BK 11/130 GM,

ARCADIS

11.03.2010) und aus dem Bochinger Horizont (Grundwasser 2: BK 11/129 GM, 11.03.2010) mit Hilfe des Programms PHREEQC berechnet.

Zur Abschätzung der Zusammensetzung des Infiltrationswassers aus der Wasseraufbereitungsanlage (Infiltrationswasser 1) wurde zunächst die Konzentrationen im Zulaufwasser über einen Mittelwert aus den verfügbaren Grundwasseranalysen im PFA 1.1 über den Zeitraum Oktober 2009 bis Oktober 2010 abgeschätzt. Entsprechend der möglichen Variationsbreite des Sauerstoffgehalte im Infiltrationswasser 1 wurden Werte von 1 mg/l und 10 mg/l zugrunde gelegt.

Für aus der Bodenseewasserversorgung entnommenes Infiltrationswasser (Infiltrationswasser 2), wurden die Analysewerte des Jahresmittels 2010 verwendet. Hier wurde ein Sauerstoffgehalt von 11 mg/l zugrunde gelegt (siehe Kap. 3).

Vor der Mischung wurden die Infiltrationswässer (Infiltrationswasser 1 mit Sauerstoffgehalt 1 mg/l und 10 mg/l und Infiltrationswasser 2) mit PHREEQC zunächst in ein Ladungs- und Lösungs-/Fällungsgleichgewicht gebracht. Für das Infiltrationswasser 1 (aufbereitetes Mischgrundwasser) entspricht dies der Gleichgewichtseinstellung in der Wasseraufbereitungsanlage. Für das Infiltrationswasser 2 (Fernwasser) wird hierdurch im Wesentlichen der Ladungsbilanzfehler ausgeglichen.

Für die Berechnung der hydrochemischen Wechselwirkung mit dem Grundwasserleiter wurden 32 Gesteinsminerale betrachtet (siehe Anlage 2 und 4). Auf Grund ihrer thermodynamischen Eigenschaften sind unter den gegebenen hydrochemischen Milieubedingungen der Wässer ausschließlich das Calcium-Mineral Calcit, das Eisen-Mineral Hämatit und das Mangan-Mineral Pyrolusit für die weiteren Reaktionen relevant.

Ergebnisse

Vor der Durchführung der Mischungsrechnung wurden die Grundwasseranalysen hinsichtlich ihres Ladungs- und Lösungsgleichgewichts untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Analysen Ionenbilanzdefizite aufwiesen bzw. die Wässer nicht im Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht lagen. Ursache hierfür können unvollständige Analysen oder Veränderungen der Wässer während der Probenahme (z.B. Änderung des pH-Wert oder des Sauerstoffgehalts) sein. Darüber hinaus kann

ARCADIS

eine Gleichgewichtseinstellung durch kinetische Effekte oder Inhibitoren verlangsamt oder verhindert werden. Die durchgeführten Gleichgewichtsberechnungen zeigen daher die maximal möglichen hydrochemischen Veränderungen.

Durch Anpassung des pH-Wertes und des Redox-Potentials sowie durch Lösung/Ausfällung wurden zunächst für die Grund- und Infiltrationswässer jeweils die sich unter Gleichgewichtsbedingungen ergebenden Konzentrationen berechnet (Anlage 2). Hierbei zeigte sich, dass unter Gleichgewichtsbedingungen in den Grundwässern Ausfällungen (Calcit, Hematit, Pyrolusit) auftreten würden (Ausfällungsmengen siehe Tabelle 1), d.h. dass das Grundwasser zur Ausfällung und Bildung dieser Minerale neigt.

Danach wurden die Infiltrationswässer jeweils mit den Grundwässern (Grundwasser 1, Grundwasser 2) im Verhältnis 1:1 und 1:10 gemischt und für die Mischwässer die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe der jeweiligen Mischwässer sowie die Ausfällung an Mineralen berechnet (Anlage 3).

In Tabelle 1 wurden die sich aus der Gleichgewichts- und Mischungsberechnung ergebenden Ausfällungsmengen zusammengestellt.

Tabelle 1: Ausfällungsmengen [kg/m^3] für die Gleichgewichts- und Mischungsberechnungen

Infiltrationswasser	Grundwasser (Gleichgewicht)	Infiltrationswasser 1				Infiltrationswasser 2	
		1 mg/l		10 mg/l		11 mg/l	
1:1		1:10	1:1	1:10	1:1	1:10	
O₂ (Infiltrationswasser)							
Mischungsverhältnis (IW:GW)							
Calcite [kg/m^3]							
Grundwasser 1	0,106	0,053	0,097	0,053	0,096	0,026	0,089

Grundwasser 2	0,110	0,057	0,101	0,057	0,101	0,045	0,098
Hematite [kg/m³]							
Grundwasser 1	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004
Grundwasser 2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pyrolusite [kg/m³]							
Grundwasser 1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Grundwasser 2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Die größten Ausfällungsmengen werden für Calcit berechnet. Nur geringfügig findet eine Ausfällung des Eisen-Mineral Hämatit statt. Für das Mangan-Mineral Pyrolusit wird keine signifikante Ausfällung berechnet.

Das relativ größte Ausfällvermögen besitzt jeweils das Grundwasser. Das Ausfällvermögen des Mischwassers aus Infiltrationswasser (Fernwasser und Wasser aus der Wasseraufbereitungsanlage) und Grundwasser verringert sich umso mehr, je höher der Infiltrationswasseranteil ist. Somit wird das natürliche Ausfällvermögen des Grundwassers durch die Zumischung von Infiltrationswasser nicht nachteilig verändert.

Durch die Mischung von Infiltrationswasser (Fernwasser und Wasser aus der Wasseraufbereitungsanlage) und Grundwasser findet auch keine Auflösung von Calcit statt. Verkarstungsvorgänge sind somit ebenfalls ausgeschlossen.

Fazit: Die Berechnungen mit PHREEQC zeigen, dass sich die ausgewählten Grundwasseranalysen nicht im hydrochemischen Gleichgewicht befinden. Wird das Gleichgewicht mit Hilfe des Programms PHREEQC berechnet, treten Ausfällung von Kalk und Eisen-/Manganmineralen auf. Dies wird im Grundwasserleiter jedoch nicht beobachtet. Die Prozesse, die zu der beobachteten Unterbindung der Gleichgewichtseinstellung im Grundwasser führen, konnten aus den verfügbaren Daten nicht abgeleitet werden und somit auch nicht mit dem Programm PHREEQC simuliert werden. Mit Hilfe der PHREEQC Berechnung war jedoch ein relativer Vergleich zwischen der potentiellen Ausfällung im Grundwasser und im Mischwasser (Grund- und Infiltrationswasser) möglich. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Ausfällungsneigung der Minerale im Mischwasser geringer ist als im zu-

grundlegenden Grundwasser. Unter der berechtigten Annahme, dass die Inhibition der Ausfällungsprozesse auch im Mischungswasser vorliegt, ist daher zu erwarten, dass keine Erhöhung der Ausfällung von Kalk, Eisen und Mangan im Grundwasser durch die Mischung mit Infiltrationswasser auftritt.

6 Hydrochemische Beeinflussung des Mineralwasseraquifers

Durch die Infiltration in den Gipskeuper (PFA 1.1, PFA 1.5) erfolgt keine hydrochemische Beeinflussung des Mineralwasseraquifers. Es wird nur die durch die Baugruben erzeugte Absenkung des Druckwasserspiegels im Unterkeuper bzw. die Druckdifferenz zwischen Mineralwasseraquifer und Unterkeuper verringert. Das infiltrierte Wasser breitet sich im Gipskeuper überwiegend horizontal aus.

Im Ausnahmefall ist zur Verhinderung des Aufsteigens von Mineralwasser durch sogenannte Notinfiltrationsbrunnen im PFA 1.1 eine Stützung des Grundwasserdrucks im Grenzdolomit des Unterkeupers (ku2GD) vorgesehen. Im PFA 1.5 findet auch planmäßig eine Infiltration in den Unterkeuper statt. Aber auch hierbei wird der Druck im Unterkeuper (ku2GD) stets niedriger gehalten als im Mineralwasseraquifer (mo). Eine Infiltration in den Mineralwasseraquifer findet daher grundsätzlich nicht statt.

7 Zusammenfassung und Bewertung

Auf Basis der in Kapitel 1- 6 dargestellten hydrochemischen Zusammenhänge werden im Folgenden die im Schreiben des LRGB vom 06.10.2011 in den Punkte 4 und 5 angeführten Fragen (im folgenden Text unterstrichen) beantwortet.

1. Hydrochemische Mischungsrechnungen zwischen den verschiedenen, reduzierten Grundwässern und dem infiltrierten Wasser

Durch die Vielzahl der hydrochemischen Einflussgrößen und die große Streubreite der hydrochemischen Kenngrößen des Grundwassers im Infiltrationsbereich ist eine hydrochemische Mischungsrechnung nicht für jeden Einzelfall der ggf. auftretenden Mischungsprozesse

se möglich. Anhand repräsentativer Grundwasseranalysen wurden daher beispielhafte Mischungsrechnungen verschiedener Grundwässer und Infiltrationswässer mit dem Programm PHREEQC durchgeführt. Die Berechnungen zeigen, dass sich die ausgewählten Grundwasseranalysen nicht im hydrochemischen Gleichgewicht befinden. Wird das Gleichgewicht mit Hilfe des Programms PHREEQC berechnet, treten Ausfällung von Kalk und Eisen-/Manganmineralen auf. Dies wird im Grundwasserleiter jedoch nicht beobachtet. Die Prozesse, die zu der beobachteten Unterbindung der Gleichgewichtseinstellung im Grundwasser führen, konnten aus den verfügbaren Daten nicht abgeleitet werden und somit auch nicht mit dem Programm PHREEQC simuliert werden. Mit Hilfe der PHREEQC Berechnung war jedoch ein relativer Vergleich zwischen der potentiellen Ausfällung im Grundwasser und im Mischwasser (Grund- und Infiltrationswasser) möglich. Als Ergebnis zeigt sich dass die Ausfällungsneigung der Minerale im Mischwasser geringer ist als im zugrundeliegenden Grundwasser.

2. Aussagen zur möglichen Aggressivität des infiltrierten Wassers und des sich nach der Infiltration bildenden Mischwassers hinsichtlich des Sättigungszustandes von Karbonatmineralen im Grundwasser

Nach den Berechnungen mit PHREEQC verringert sich das Ausfällvermögen des Mischwassers aus Infiltrationswasser (Fernwasser und Wasser aus der Wasseraufbereitungsanlage) und Grundwasser umso mehr, je höher der Infiltrationswasseranteil ist. Somit wird das natürliche Ausfällvermögen des Grundwassers durch die Zumischung von Infiltrationswasser nicht nachteilig verändert.

Durch die Mischung von Infiltrationswasser (Fernwasser und Wasser aus der Wasseraufbereitungsanlage) und Grundwasser findet auch keine Auflösung von Calcit statt. Verkarsungsvorgänge sind somit ebenfalls ausgeschlossen.

3. Aussagen zu möglichen Ausfällungsvorgängen von Eisen- und Manganmineralen, die bei einer Infiltration von sauerstoffreichen Wässern in Stockwerken mit reduzierenden Verhältnissen stattfinden können

ARCADIS

Bereits das natürliche Grundwasser neigt nach PHREEQC zur Eisen-/Manganausfällung. Die Prozesse, die zur Unterbindung der Gleichgewichtseinstellung im Grundwasser führen, sind im Einzelnen nicht bekannt und konnten mit dem Programm PHREEQC nicht simuliert werden. Die Ergebnisse der hydrochemischen Mischungsrechnung zeigen jedoch, dass die potentielle Ausfällung der Minerale im resultierenden Mischwasser geringer ist als im zugrundeliegenden Grundwasser. Unter der berechtigten Annahme, dass die Inhibition der Ausfällungsprozesse auch im Mischungswasser vorliegt, ist daher zu erwarten, dass keine Erhöhung der Ausfällung von Kalk, Eisen und Mangan im Grundwasser durch die Mischung mit Infiltrationswasser auftritt.

Durch stöchiometrische Betrachtungen konnte nachgewiesen werden, dass die möglichen Eisenausfällungen im Grundwasser die Grundwasserströmung grundsätzlich nicht beeinträchtigen.

4. Bewertung der Auswirkung möglicher Lösungs- und Ausfällungsprozesse in den betroffenen Grundwasserleitern und Grundwässern

Diese Prozesse führen zu keiner messbaren Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit des Grundwasserleiters. (siehe Kap. 5). Das Grundwasser selbst besitzt ein höheres Ausfällungsvermögen als das Mischwasser.

5. Bewertung der Auswirkungen von möglichen Ausfällungsprozessen in den Infiltrationsbrunnen

Bei planungsgemäßigem Betrieb besteht für die geplanten Wasserreinigungsanlagen nach derzeitigem Kenntnisstand auf Grund der Eisenkonzentrationen und des kontinuierlichen Betriebs der Infiltrationsbrunnen keine nennenswerte Gefahr von Ausfällungen bzw. Verockerungen oder Versinterungen der Versickerungsbrunnen.

6. Wirkungspotential bei einem Sauerstoffgehalt von ca. 10 mg/l (Sauerstoffsättigung) und Infiltration von 6,8 Mio. m³ Wasser und damit 68.000 kg Sauerstoff

Die aufgeführte Menge an infiltriertem Sauerstoff relativiert sich durch den bereits im Grundwasser vorhandenen Sauerstoff und dadurch, dass die überwiegende Menge des Infiltrationswassers im PFA 1.1/Anfahrbereich PFA 1.2/1.6a zu den Baugruben zurückfließt (siehe beschriebene Einflussbereiche in Pkt. 1). Im PFA 1.5 sowie nach Reduzierung der Bauwasserhaltung im PFA 1.1 (BS 10-12) gelangen Anteile des Infiltrationswassers dauerhaft in die betroffenen Grundwasserleiter. Bereits bei den natürlichen Sauerstoff- und Eisenkonzentrationen im Grundwasser tritt unter der Annahme von Gleichgewichtsbedingungen eine Ausfällung von Kalk und Eisen-/Manganmineralen auf. Durch die Infiltration tritt im resultierenden Mischwasser keine Erhöhung der Ausfällungsneigung auf.

Der Abbau eventueller organischer Belastungen durch den Eintrag von Sauerstoff wird als positiver Nebeneffekt gesehen. Durch Verdünnung und Sauerstoffzehrung wird der Einflussbereich der erhöhten Sauerstoffgehalte im Abstrom begrenzt.

Nach Beendigung der Infiltrationsmaßnahmen ist davon auszugehen, dass sich die natürlichen hydrochemischen Verhältnisse schnell wieder einstellen werden.

7. Prüfung und Bewertung hydrochemischer Wechselwirkungen bei der ku2GD-Infiltration durch die nachgewiesenen hydraulischen Verbindungen mit dem Mineralwasserleiter Oberer Muschelkalk

Eine solche Wechselwirkung ist aus unserer Sicht nicht zu befürchten, da keine direkte oder indirekte Infiltration in den Muschelkalk erfolgt, sondern nur eine hydraulische Stützung des Wasserdrucks in den Stockwerken darüber. Dies wird durch eine Druckbegrenzung in den Infiltrationsbrunnen bzw. durch die Steuerpegel gewährleistet. Eine gewisse Strömung vom Liegenden ins Hängende bleibt bestehen. Die Infiltrationsstützung minimiert jedoch diese Strömung aus dem Mineralwasserleiter in den darüber liegenden Keuper.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

ARCADIS

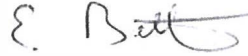
ARCADIS Deutschland GmbH

ppa.



Dr. Klaus Piroth

i.A.



Dr. Ekkehart Bethge

Verwendete Unterlagen

- [U1] ARCADIS Deutschland GmbH: Großprojekt Stuttgart 21 - Wendlingen - Ulm, Projekt Stuttgart 21, PFA 1.1, 1.5 und 1.6a, hier: Vollzug der Wassergesetze, Anzeige/Antrag gemäß Kap. 7.1.12.2 (PFA 1.1), Kap. 7.1.11.2 (PFA 1.5) bzw. Kap. 6.1.11.2 (PFA 1.6a) der jeweiligen Planfeststellungsbeschlüsse im Hinblick auf geänderte wasserrechtliche Tatbestände. Stuttgart, 12.04.2011
- [U2] ARGE WUG: Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitte 1.1, 1.2, 1.5, 1.6a und 1.6b, Prognoseberechnungen mit dem instationären Grundwasserströmungsmodell, Westheim, den 27.04.2011
- [U3] ARGE WUG: Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitte 1.1, 1.2, 1.5, 1.6a und 1.6b, Aufbau, Eichung und Validierung des instationären Grundwasserströmungsmodells, Westheim, den 03.11.2010
- [U4] ARCADIS Deutschland GmbH: Großprojekt Stuttgart 21, PFA 1.1 bis PFA 1.6b, Wasserrechtsänderungsantrag PFA 1.1, 1.2, 1.5, 1.6: Schreiben des RP Freiburg zur Infiltrationswasseraufbereitung vom 15.09.2011 (E-Mail Hr. Dr. Prestel), Stellungnahme ARCADIS vom 16.09.2011
- [U5] ARGE Wasser Umwelt Geotechnik: Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.1, Talquerung mit Hauptbahnhof, 4. Erkundungsprogramm Geologische, hydrogeologische, geotechnische und wasserwirtschaftliche Stellungnahme, Teil 3: Wasserwirtschaft, Anhang 2, Beilage 1: Baubegleitende Beweissicherung Wasser, Stuttgart, Dezember 2000

ARCADIS

- [U6] ARGE Wasser Umwelt Geotechnik: Projekt Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.5, Zuführung Feuerbach / Bad Cannstatt, S-Bahn Anbindung, 5. Erkundungsprogramm Geologische, hydrogeologische, geotechnische und wasserwirtschaftliche Stellungnahme, Teil 3: Wasservirtschaft, Westheim/ Stuttgart/ Ettlingen/ Dresden, Juli 2007
- [U7] ARCADIS Deutschland GmbH: Großprojekt Stuttgart 21, PFA 1.1 - 1.6b, Modelltechnisch gestützte Prüfung auf Ersetzbarkeit der Notbrunnen N1 und N2 zur Vermeidung des Sulfatgesteinsauslaugungsrisikos, Stuttgart, 18.08.2011

Anlagen

Anlage 1: Konzentrationen Ausgangswässer nach PHREEQC

Anlage 2: Sättigungsindizes der Ausgangswässer nach PHREEQC

Anlage 3: Konzentrationen der Mischwässer nach PHREEQC

Anlage 4: Sättigungsindizes der Mischwässer nach PHREEQC

Hydrochemische Zusammensetzung der Ausgangswässer entsprechend Analyse und im chemischen Gleichgewicht

Parameter	Einheit	Infiltrationswasser 1 (O2: 1mg/l)	Infiltrationswasser 1 (O2: 1mg/l), Gleichgewicht	Infiltrationswasser 1 (O2: 10 mg/l)	Infiltrationswasser 1 (O2: 10 mg/l), Gleichgewicht	Infiltrationswasser 2 (Fernwasser)	Infiltrationswasser 2 (Fernwasser), Gleichgewicht	Grundwasser 1 (BK 11/130 GM, 11.03.2010)	Grundwasser 1 (BK 11/130 GM, 11.03.2010), Gleichgewicht	Grundwasser 2 (BK 11/129 GM, 11.03.2010)	Grundwasser 2 (BK 11/129 GM, 11.03.2010), Gleichgewicht
Kürzel	-	IW1_1	IW1_1_GG	IW1_10	IW1_10_GG	IW2	IW2_GG	GW1	GW1_GG	GW2	GW2_GG
T	°C	15,400	15,400	15,400	15,400	9,000	9,000	15,400	15,400	16,300	16,300
pH	-	7,010	6,910	7,010	6,910	7,990	7,540	6,900	6,900	6,870	6,960
pE	-	4,000	14,150	4,000	14,480	4,000	14,440	4,000	-2,530	4,000	13,970
Eh	mV	229,030	810,240	229,030	828,800	223,950	808,670	229,030	-144,740	229,740	802,360
Dichte	kg/L	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wasser	kg	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
TDS	mg/kg	1196,530	1135,200	1205,530	1144,200	271,610	271,600	1127,400	1016,220	1618,600	1506,930
Ionenstärke	mol/kg	0,021	0,020	0,021	0,020	0,005	0,005	0,020	0,018	0,032	0,030
Leitf 25°C	µS/cm	1329,250	1242,690	1329,250	1242,690	311,060	307,880	1253,440	1101,960	1953,420	1831,080
Alkalinität	eq/kg	0,008	0,007	0,008	0,007	0,002	0,002	0,009	0,008	0,005	0,004
GH	°dH	37,810	34,520	37,810	34,520	8,540	8,540	38,550	32,580	60,240	54,060
KH	°dH	20,870	18,750	20,870	18,750	6,710	6,390	24,080	21,910	13,240	11,420
Ladungsbilanz	eq/kg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000
Bilanzfehler	%	1,470	0,000	1,470	0,000	-1,980	0,000	5,020	0,000	4,120	0,000
Ca	mg/L	185,000	161,462	185,000	161,462	48,000	48,000	170,000	127,371	330,000	285,821
Mg	mg/L	51,700	51,700	51,700	51,700	7,900	7,900	64,000	64,000	61,000	61,000
Na	mg/L	40,000	40,000	40,000	40,000	5,200	5,200	18,000	18,000	40,000	40,000
K	mg/L	10,000	10,000	10,000	10,000	1,400	1,400	4,300	4,300	10,000	10,000
SO4	mg/L	233,000	233,000	233,000	233,000	35,000	35,000	36,000	35,893	660,000	660,000
Cl	mg/L	112,724	105,670	112,724	105,670	29,860	29,860	137,287	124,512	76,270	63,031
Cl	mg/L	82,000	82,000	82,000	82,000	6,800	6,800	130,000	130,000	100,000	100,000
Fe(2)	mg/L	0,956	0,000	0,956	0,000	0,001	0,000	2,943	0,041	0,187	0,000
Fe(3)	mg/L	0,034	0,000	0,034	0,000	0,004	0,000	0,057	0,000	0,003	0,000
Fe	mg/L	0,990	0,000	0,990	0,000	0,004	0,000	3,000	0,041	0,190	0,000
Mn	mg/L	0,442	0,000	0,442	0,000	--	--	0,220	0,220	0,025	0,000
NH4	mg/L	1,650	1,650	1,650	1,650	--	--	0,980	0,980	0,440	0,440
NO2	mg/L	0,089	0,089	0,089	0,089	--	--	0,000	0,000	0,020	0,020
NO3	mg/L	17,700	17,700	17,700	17,700	4,500	4,500	2,700	2,700	28,900	28,900
PO4_P	mg/L	0,166	0,166	0,166	0,166	--	--	0,055	0,055	0,016	0,016
B	mg/L	0,131	0,131	0,131	0,131	0,016	0,016	0,110	0,110	0,240	0,240
O2	mg/L	1,000	0,479	10,000	9,479	11,000	10,999	0,590	0,000	0,300	0,284
CH4	mg/L	--	--	--	--	--	--	0,000	0,000	--	--
Sulfide	mg/L	--	--	--	--	--	--	0,000	0,000	--	--
F	mg/L	--	--	--	--	0,090	0,090	--	--	--	--
Br	mg/L	--	--	--	--	0,002	0,002	--	--	--	--
Cu	µg/L	--	--	--	--	0,560	0,560	--	--	--	--
As	µg/L	--	--	--	--	0,700	0,700	--	--	--	--
Calcite	kg/m³	0,000	0,059	0,000	0,059	--	--	0,000	0,106	0,000	0,110
Hematite	kg/m³	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
Pyrolusite	kg/m³	0,000	0,001	0,000	0,001	--	--	0,000	0,000	0,000	0,000
Gesamtfeststoff	kg/m³	0,000	0,061	0,000	0,061	0,000	0,000	0,000	0,111	0,000	0,111

Sättigungsindizes gegenüber den Mineralen der Ausgangswässer und der Wässer im chemischen Gleichgewicht (+ kennzeichnet Übersättigung, - kennzeichnet Untersättigung)

Sättigungsindizes [-]	Infiltrationswasser 1 (O2: 1mg/l)	Infiltrationswasser 1 (O2: 1mg/l), Gleichgewicht	Infiltrationswasser 1 (O2: 10 mg/l)	Infiltrationswasser 1 (O2: 10 mg/l), Gleichgewicht	Infiltrationswasser 2 (Fernwasser)	Infiltrationswasser 2 (Fernwasser), Gleichgewicht	Grundwasser 1 (BK 11/130 GM, 11.03.2010)	Grundwasser 1 (BK 11/130 GM, 11.03.2010), Gleichgewicht	Grundwasser 2 (BK 11/129 GM, 11.03.2010)	Grundwasser 2 (BK 11/129 GM, 11.03.2010), Gleichgewicht	Grundwasser 2 (BK 11/129 GM, 11.03.2010), Gleichgewicht
	Kürzel	IW1_1	IW1_1_GG	IW1_10	IW1_10_GG	IW2	IW2_GG	GW1	GW1_GG	GW2	GW2_GG
Gypsum		-1,037	-1,076	-1,037	-1,076	-2,097	-2,094	-1,854	-1,943	-0,477	-0,519
Calcite		0,198	0	0,198	0	0,171	-0,299	0,153	0	0,037	0
Fe(OH)3(a)		1,682	-6,519	1,682	-6,519	1,423	-6,254	1,847	-6,519	0,561	-6,555
Brucite		-6,447	-6,641	-6,447	-6,641	-5,62	-6,527	-6,536	-6,528	-6,67	-6,497
Siderite		0,028	-18,169	0,028	-18,493	-2,613	-19,844	0,476	-1,396	-1,028	-18,347
Pyrochroite		-6,718	-14,354	-6,718	-15,002	—	—	-7,231	-7,214	-8,253	-14,236
Rhodochrosite(d)		-0,749	-8,329	-0,749	-8,978	—	—	-1,088	-1,107	-2,341	-8,472
Aragonite		0,047	-0,151	0,047	-0,151	0,015	-0,455	0,002	-0,151	-0,113	-0,15
Anhydrite		-1,285	-1,324	-1,285	-1,324	-2,353	-2,35	-2,102	-2,191	-0,724	-0,765
Goethite		7,22	-0,981	7,22	-0,981	6,712	-0,965	7,385	-0,981	6,133	-0,983
Hematite		16,401	0	16,401	0	15,353	0	16,732	0	14,232	0
Magnetite		16,997	-17,656	16,997	-17,98	14,539	-18,48	17,603	-0,965	13,87	-17,533
Pyrite	—	—	-248,794	—	-253,656	—	-263,708	—	0	—	-246,521
FeS(ppt)	—	—	-155,637	—	-158,553	—	-164,353	—	-6,203	—	-154,313
Mackinawite	—	—	-154,904	—	-157,82	—	-163,62	—	-5,47	—	-153,58
Pyrolusite		-12,466	0	-12,466	0	—	—	-13,199	-26,241	-14,127	0
Birnessite		-13,099	-0,633	-13,099	-0,633	—	—	-13,832	-26,875	-14,914	-0,787
Manganite		-5,848	-3,433	-5,848	-3,757	—	—	-6,471	-12,984	-7,523	-3,451
Bixbyite		-13,055	-8,225	-13,055	-8,873	—	—	-14,301	-27,326	-16,247	-8,103
Hausmannite		-16,018	-18,824	-16,018	-20,12	—	—	-17,778	-30,785	-20,666	-18,504
Greigite	—	—	-568,129	—	-578,824	—	-601,002	—	-20,468	—	-563,136
MnS(Green)	—	—	-153,214	—	-156,455	—	—	—	-13,331	—	-151,835
Dolomite		0,059	-0,278	0,059	-0,278	-0,338	-1,28	0,099	-0,083	-0,428	-0,439
Natron		-9,554	-9,695	-9,554	-9,695	-10,558	-11,031	-10,288	-10,322	-9,953	-9,927
Epsomite		-3,746	-3,726	-3,746	-3,726	-4,997	-4,995	-4,434	-4,397	-3,371	-3,351
Thenardite		-8,469	-8,452	-8,469	-8,452	-10,822	-10,821	-9,975	-9,945	-8,104	-8,083
Mirabilite		-7,058	-7,041	-7,058	-7,041	-9,074	-9,073	-8,565	-8,534	-6,74	-6,719
MnCl2·4H2O		-13,221	-20,654	-13,221	-21,302	—	—	-13,111	-13,083	-14,367	-20,517
Vivianite		-2,489	-56,894	-2,489	-57,866	—	—	-2,302	-7,747	-7,155	-58,908
Strengite		0,451	-7,575	0,45	-7,575	—	—	0,296	-8,038	-1,493	-8,729
Portlandite		-12,169	-12,422	-12,169	-12,422	-11,178	-12,084	-12,388	-12,505	-12,204	-12,093

Hydrochemische Zusammensetzung der Ausgangswässer und der Mischwässer im chemischen Gleichgewicht

Kürzel Infiltrationswasser		GW1	GW1	GW1	GW1	GW2	GW2	GW2	GW2	GW1	GW1	GW2	GW2	
Kürzel Grundwasser		IW1_1_GG	IW1_1_GG	IW1_10_GG	IW1_10_GG	IW1_1_GG	IW1_1_GG	IW1_10_GG	IW1_10_GG	IW2_GG	IW2_GG	IW2_GG	IW2_GG	
Sauerstoffgehalt Infiltrationswasser		1 mg/l	1 mg/l	10 mg/l	10 mg/l	1 mg/l	1 mg/l	10 mg/l	10 mg/l	11 mg/l	11 mg/l	11 mg/l	11 mg/l	
Mischungsverhältnis		1:1	10:1	1:1	10:1	1:1	10:1	1:1	10:1	1:1	10:1	1:1	10:1	
T	°C	15,400	15,400	15,400	15,400	15,400	15,850	16,220	15,850	16,220	12,200	14,820	12,650	15,640
pH	-	6,900	6,900	6,900	6,900	6,910	6,940	6,910	6,940	7,160	6,940	7,230	7,000	7,000
pE	-	13,990	-2,500	14,410	14,190	14,080	13,990	14,360	14,140	14,450	14,230	14,350	14,150	14,150
Eh	mV	801,170	-143,420	824,810	812,480	807,670	803,570	823,530	811,740	818,100	812,900	813,600	810,760	810,760
Dichte	kg/L	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wasser	kg	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
TDS	mg/kg	1075,220	1026,850	1079,720	1027,820	1318,770	1472,630	1323,270	1473,440	671,070	955,730	899,740	1397,280	1397,280
Ionenstärke	mol/kg	0,019	0,018	0,019	0,018	0,025	0,029	0,025	0,029	0,012	0,017	0,018	0,028	0,028
Leitf_25°C	µS/cm	1170,090	1113,960	1170,080	1114,280	1540,040	1778,880	1540,040	1778,880	754,370	1043,010	1130,950	1709,260	1709,260
Alkalinität	eq/kg	0,008	0,008	0,008	0,008	0,006	0,005	0,006	0,005	0,006	0,006	0,003	0,004	0,004
GH	°dH	33,530	32,750	33,530	32,780	44,160	52,250	44,160	52,250	22,080	30,820	31,880	50,070	50,070
KH	°dH	20,300	21,610	20,300	21,610	14,940	12,050	14,940	12,050	15,680	20,900	9,490	11,110	11,110
Ladungsbilanz	eq/kg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Bilanzfehler	%	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	mg/L	144,308	130,400	144,308	130,611	222,729	274,313	222,729	274,313	98,539	123,165	171,064	265,251	265,251
Mg	mg/L	57,850	62,882	57,850	62,882	56,350	60,155	56,350	60,155	35,950	58,900	34,450	56,173	56,173
Na	mg/L	29,000	20,000	29,000	20,000	40,000	40,000	40,000	40,000	11,600	16,836	22,600	36,836	36,836
K	mg/L	7,150	4,818	7,150	4,818	10,000	10,000	10,000	10,000	2,850	4,036	5,700	9,218	9,218
SO4	mg/L	134,500	53,847	134,500	53,909	446,500	621,182	446,500	621,182	35,500	35,909	347,500	603,182	603,182
Cl	mg/L	115,058	122,778	115,058	122,841	84,077	66,846	84,077	66,846	80,438	116,809	47,690	60,330	60,330
Fe(2)	mg/L	0,000	0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe(3)	mg/L	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe	mg/L	0,000	0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	mg/L	0,000	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
NH4	mg/L	1,315	1,041	1,315	1,041	1,045	0,550	1,045	0,550	0,490	0,891	0,220	0,400	0,400
NO2	mg/L	0,044	0,008	0,044	0,008	0,054	0,026	0,054	0,026	0,000	0,000	0,010	0,018	0,018
NO3	mg/L	10,200	4,064	10,200	4,064	23,300	27,882	23,300	27,882	3,600	2,864	16,700	26,682	26,682
PO4_P	mg/L	0,111	0,065	0,111	0,065	0,091	0,030	0,091	0,030	0,028	0,050	0,008	0,015	0,015
B	mg/L	0,121	0,112	0,121	0,112	0,186	0,230	0,186	0,230	0,063	0,101	0,128	0,220	0,220
O2	mg/L	0,103	0,000	4,603	0,613	0,382	0,302	4,882	1,120	5,363	0,751	5,642	1,258	1,258
CH4	mg/L	--	0,000	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Sulfide	mg/L	--	0,000	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
F	mg/L	--	--	--	--	--	--	--	--	0,045	0,008	0,045	0,008	0,008
Br	mg/L	--	--	--	--	--	--	--	--	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
Cu	µg/L	--	--	--	--	--	--	--	--	0,280	0,051	0,280	0,051	0,051
As	µg/L	--	--	--	--	--	--	--	--	0,350	0,064	0,350	0,064	0,064
Calcite	kg/m³	0,053	0,097	0,053	0,096	0,057	0,101	0,057	0,101	0,026	0,089	0,045	0,098	0,098
Hematite	kg/m³	0,002	0,004	0,002	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,004	0,000	0,000	0,000
Pyrolusite	kg/m³	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Gesamtfeststoff:	kg/m³	0,056	0,101	0,056	0,101	0,058	0,101	0,058	0,101	0,028	0,093	0,045	0,098	0,098

Sättigungsindizes [-] der Mischwässer Im chemischen Gleichgewicht (+ kennzeichnet Übersättigung, - kennzeichnet Untersättigung)

Kürzel Infiltrationswasser	GW1	GW1	GW1	GW1	GW2	GW2	GW2	GW2	GW1	GW1	GW2	GW2	
Kürzel Grundwasser	IW1_1_GG	IW1_1_GG	IW1_10_GG	IW1_10_GG	IW1_1_GG	IW1_1_GG	IW1_10_GG	IW1_10_GG	IW2_GG	IW2_GG	IW2_GG	IW2_GG	
Sauerstoffgehalt Infiltrationswasser	1 mg/l	1 mg/l	10 mg/l	10 mg/l	1 mg/l	2 mg/l	10 mg/l	10 mg/l	11 mg/l	11 mg/l	11 mg/l	11 mg/l	
Mischungsverhältnis	1:1	10:1	1:1	10:1	1:1	10:1	1:1	10:1	1:1	10:1	1:1	10:1	
Gypsum		-1,339	-1,761	-1,339	-1,760	-0,732	-0,552	-0,732	-0,552	-1,956	-1,941	-0,858	-0,566
Calcite		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe(OH)3(a)		-6,519	-6,519	-6,519	-6,519	-6,537	-6,552	-6,537	-6,552	-6,388	-6,496	-6,407	-6,529
Brucite		-6,589	-6,539	-6,589	-6,541	-6,612	-6,525	-6,612	-6,525	-6,448	-6,526	-6,382	-6,485
Siderite		-17,957	-1,426	-18,370	-18,119	-18,233	-18,321	-18,509	-18,464	-18,880	-18,215	-19,161	-18,586
Pyrochroite		-14,019	-7,255	-14,845	-14,407	-14,302	-14,249	-14,856	-14,534	-14,897	-14,455	-14,906	-14,563
Rhodochrosite(d)		-7,950	-1,155	-8,776	-8,306	-8,379	-8,451	-8,933	-8,735	-9,228	-8,411	-9,525	-8,857
Aragonite		-0,151	-0,151	-0,151	-0,151	-0,151	-0,150	-0,151	-0,151	-0,153	-0,151	-0,153	-0,151
Anhydrite		-1,588	-2,009	-1,588	-2,008	-0,979	-0,799	-0,979	-0,799	-2,209	-2,190	-1,111	-0,813
Goethite		-0,981	-0,981	-0,981	-0,981	-0,982	-0,983	-0,982	-0,983	-0,973	-0,980	-0,974	-0,982
Hematite		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Magnetite		-17,489	-0,989	-17,902	-17,683	-17,598	-17,546	-17,875	-17,688	-18,158	-17,748	-18,129	-17,744
Pyrite		-246,721	0,000	-252,916	-250,408	-247,523	-246,692	-251,674	-248,827	-258,203	-251,758	-256,243	-249,768
FeS(pppt)		-154,349	-6,238	-158,066	-156,483	-154,913	-154,417	-157,403	-155,698	-161,105	-157,258	-160,080	-156,254
Mackinawite		-153,616	-5,505	-157,333	-155,750	-154,180	-153,684	-156,670	-154,965	-160,372	-156,525	-159,347	-155,521
Pyrolusite		0,000	-26,236	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Birnessite		-0,633	-26,869	-0,633	-0,633	-0,710	-0,773	-0,710	-0,773	-0,080	-0,534	-0,159	-0,674
Manganite		-3,266	-13,002	-3,679	-3,460	-3,446	-3,451	-3,722	-3,593	-3,428	-3,434	-3,472	-3,558
Bixbyite		-7,890	-27,362	-8,716	-8,278	-8,171	-8,117	-8,725	-8,401	-8,783	-8,329	-8,790	-8,433
Hausmannite		-18,155	-30,863	-19,807	-18,931	-18,679	-18,539	-19,785	-19,108	-20,213	-19,080	-20,187	-19,219
Grelgite		-563,480	-20,538	-577,109	-571,437	-565,375	-563,523	-574,506	-568,219	-588,734	-574,383	-584,689	-570,318
MnS(Green)		-151,759	-13,384	-155,889	-154,087	-152,466	-151,946	-155,233	-153,369	-158,940	-154,883	-157,922	-153,937
Dolomite		-0,180	-0,100	-0,180	-0,101	-0,373	-0,429	-0,373	-0,429	-0,277	-0,114	-0,522	-0,453
Natron		-9,943	-10,237	-9,943	-10,238	-9,823	-9,910	-9,823	-9,910	-10,463	-10,341	-10,080	-9,943
Epsomite		-3,892	-4,233	-3,892	-4,233	-3,487	-3,372	-3,487	-3,372	-4,531	-4,414	-3,690	-3,396
Thenardite		-8,963	-9,678	-8,963	-9,678	-8,214	-8,103	-8,214	-8,103	-10,256	-9,991	-8,752	-8,178
Mirabilite		-7,552	-8,268	-7,552	-8,267	-6,827	-6,734	-6,827	-6,734	-8,679	-8,550	-7,199	-6,779
MnCl2:4H2O		-20,075	-13,155	-20,901	-20,306	-20,549	-20,517	-21,102	-20,801	-21,684	-20,447	-22,082	-20,968
Vivianite		-56,721	-7,672	-57,960	-57,752	-57,363	-58,364	-58,194	-58,791	-60,207	-58,197	-61,547	-59,643
Strengite		-7,739	-7,965	-7,739	-7,964	-7,878	-8,441	-7,878	-8,441	-8,615	-8,113	-9,309	-8,808
Portlandite		-12,467	-12,498	-12,467	-12,499	-12,286	-12,134	-12,286	-12,134	-12,318	-12,487	-11,993	-12,085