

RBK GmbH

Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

Kaiser-Karl-Ring 50
53119 Bonn
Tel. 0228-85098327
Fax. 0228-85099939
www.rbk-bonn.de

Baugebiet Friedrichshofen-West

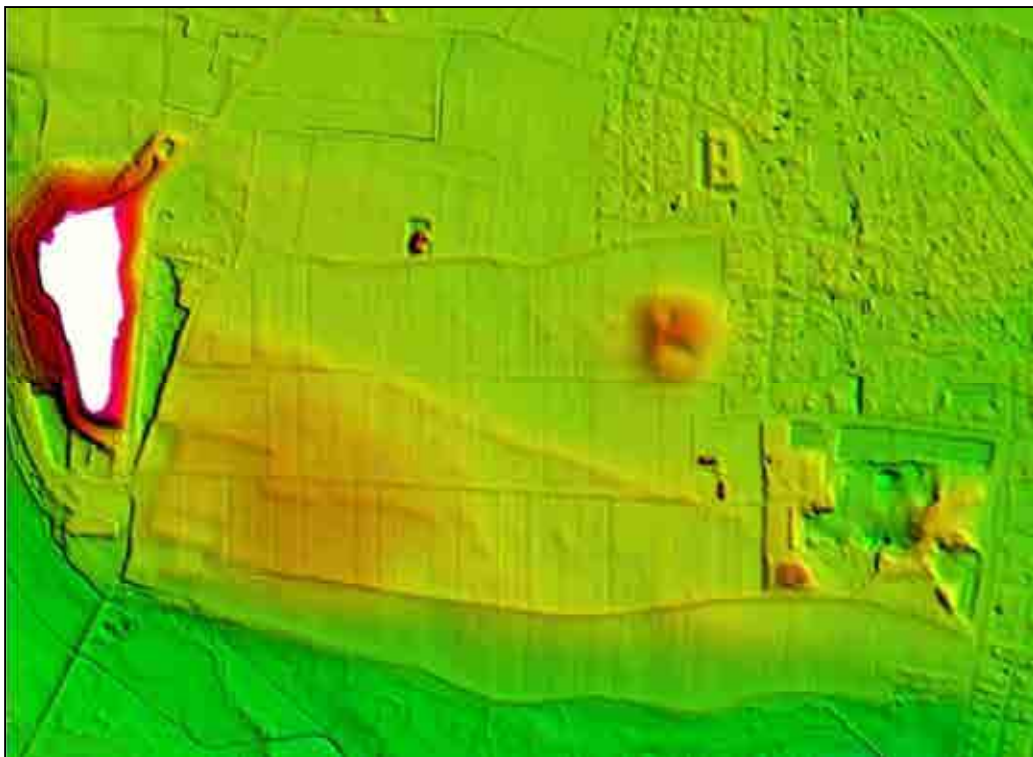
Prognose der Auswirkungen der geplanten Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände mit Hilfe eines numerischen Grundwassermodells

Erläuterungsbericht

Stadt Ingolstadt
Planungsam
85057 Ingolstadt

Projekt-Nr. 117.19.02

2. Juli 2019



INHALT

1	VORGANG UND VERANLASSUNG	5
2	VORGEHENSWEISE	5
3	GEOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHE SITUATION.....	6
3.1	Geologischer Überblick.....	6
3.2	Charakterisierung des Grundwasserleiters.....	6
3.3	Hydraulische Verhältnisse.....	8
4	NUMERISCHES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL	9
4.1	Eingesetzte Software	10
4.2	Modelleinrichtung	10
4.3	Modellparameter.....	12
4.4	Kalibrierung der Grundwasserneubildungsrate für den Zeitraum 2000 bis 2002	12
4.5	Sensitivitätsanalyse	15
4.6	Wasserbilanz.....	16
5	AUSWERTUNGEN	17
6	BEWERTUNG DER MODELLERGEBNISSE.....	19

ANLAGENVERZEICHNIS

- 1 Luftbild mit Lage des Baugebiets und der Flächennutzung, 1:7.500
- 2 Grundwassergleichenplan relatives Hochwasser April 2011, 1:10.000
- 3 Modellgebiet, Tiefenlage Schicht 1 und Modellränder, 1:15:000
- 4 Modellgebiet, Gitternetz und GW-Neubildungszonen, 1:15.000
- 5 Horizontale kf-Wert-Verteilung im Modellgebiet, 1:15.000
- 6 Kartendarstellungen der Modellauswertungen
- 6.1 Berechnete Grundwassergleichen Hochwasser 03/2001 ohne Baugebiet, 1:10.000
- 6.2 Berechnete Grundwassergleichen Hochwasser 03/2001 mit Baugebiet, 1:10.000
- 6.3 Grundwasser-Höhendifferenzen Hochwassersituation wie 03/2001, 1:10.000
- 6.4 Grundwasser-Höhendifferenzen rel. Niedrigwassersituation wie 09/2001, 1:10.000
- 6.5 Berechneter Flurabstand, Hochwasserstand wie 03/2001, 1:10.000
- 6.6 Berechneter Flurabstand, rel. Niedrigwasserstand wie 09/2001, 1:10.000

UNTERLAGENVERZEICHNIS

- [1] Geologische Karte Blatt 7234 Ingolstadt mit Erläuterungen, Bay. Geologischen Landesamt
- [2] Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planregion 10 Ingolstadt, Hydrogeologische Karte und Erläuterungen, Bay. Geologisches Landesamt
- [3] Luftbilder des Amt für Verkehrsmanagement und Geoinformation der Stadt Ingolstadt
- [4] Dr. Zerbes & Kargl GbR (2011): Baugebiet Friedrichshofen West, Baugrundgutachten zur Untersuchung und Beurteilung der Boden- und Grundwasserverhältnisse für Erschließungsplanung des Baugebiets, 7.12.2011
- [5] Dr. Zerbes & Kargl GbR (2012): Baugebiet Friedrichshofen West, Geotechnischer Ergänzungsbericht zum Baugrundgutachten Nr. 11.08.061, Untersuchung und Beurteilung der hydrogeologischen Randbedingungen für ein Versickerungskonzept, 27.3.2012
- [6] Schichtprofile der Bohrungen B1-B20, GMa- GMe, B1a, B1b
- [7] Isarconsult (2008): Auszug aus dem Grundwassermodell, Lastfall A01- Mittelwasserverhältnisse (Plan-Nr. 29), und Lastfall C03 – Starkregenereignis März 2001 (Plan-Nr. 43)
- [8] Auszüge aus dem Digitalen Geländemodell der Stadt Ingolstadt
- [9] Auszüge aus der GW-Base-Datenbank der Ingolstädter Kommunalbetriebe E-VS (U. Arauner) mit Messstellen-Stammdaten, Grundwasserständen und Analysedaten aus den Untersuchungen der vergangenen Jahre (Zeitraum 1985 bis 06/2019), Niederschlagsdaten Messstelle LfU.
- [10] Shape-Dateien mit Flurstücken aus der digitalen Stadtgrundkarte der Stadt Ingolstadt
- [11] RBK GmbH (2014): Deponie Fort Hartmann: MNA-Konzept Stufe 1 bis 4: Qualitative und Quantitative Abschätzung des Schadstoffminderungsprozesses und numerische Schadstofftransportmodellierung, 22.7.2014

1 VORGANG UND VERANLASSUNG

Die Stadt Ingolstadt plant die Ausweisung eines ca. 26 bis 30 ha umfassendes Baugebietes westlich von Friedrichshofen (Friedrichshofen-West) für die Errichtung von Wohnbebauungen (Anlage 1).

Es ist vorgesehen, das anfallende Niederschlagswasser an Ort und Stelle in den Untergrund zu versickern und nicht über einen Regenwasserkanal abzuführen. Durch die künstliche Niederschlagsversickerung wird das Wasser der natürlichen Verdunstung entzogen, so dass hierdurch die natürliche Grundwasseranreicherung (GW-Neubildung) gegenüber unbebauten Flächen mengenmäßig zunimmt, was i.d.R. zu steigenden Grundwasserständen und zu einer Verringerung des Flurabstands führt.

Das Büro RBK GmbH wurde von der Stadt Ingolstadt mit Schreiben vom 29.03.2019 beauftragt, mit Hilfe eines numerischen Grundwassermodells zu prognostizieren, wie groß der Effekt der Niederschlagsversickerung aus den geplanten versiegelten Flächen auf die Grundwasserstände im geplanten Baugebiet und die angrenzenden bestehenden Baugebieten bei Hochwasserereignissen sein wird.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden hiermit vorgelegt und erläutert.

2 VORGEHENSWEISE

Im Rahmen eines Projektes für die Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR wurde bereits 2013 für das Betrachtungsgebiet ein numerisches Grundwassermodell eingerichtet, das an verschiedenen Lastfällen kalibriert und validiert wurde.

Dieses Modell wurde für die hier vorgelegten Untersuchungen herangezogen und leicht verändert. So wurde im Bereich des Betrachtungsgebietes eine höhere räumliche Auflösung durch Verfeinerung des Modellnetzes geschaffen. Des Weiteren wurde die geologische „Inhomogenität“ des Dachsbergs in das Modell übernommen.

Die zeitliche Diskretisierung wurde ebenfalls verändert, so dass das Starkregenereignis im März 2001 modelltechnisch abgebildet werden konnte. An diesem Starkregenereignis wurde die durch die damaligen Niederschläge induzierte Grundwasserneubildung über einen Kalibrierungsprozess in einer zeitlichen Auflösung von Wochenschritten ermittelt.

Dieses März-2001-Hochwasser ist das höchste seit ca. 30 Jahren je gemessene Hochwasser und dient für die Prognose als maximaler Bemessungswasserstand.

3 GEOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHE SITUATION

3.1 Geologischer Überblick

Geologisch liegt das Baugebiet im Bereich der mittelpleistozänen (risseiszeitlichen) Hochterrasse der Donau, die unweit nördlich ausstreicht. Im Süden hat die Schutter die Hochterrasse teilweise ausgeräumt und mit nacheiszeitlichen Aue-Ablagerungen gefüllt.

Die grobklastischen Sedimente des Pleistozäns und die eher feinklastischen bis bindigen Sedimente der holozänen Talfüllungen lagern den überwiegend feinklastischen, oftmals bindigen Sedimenten des Tertiärs auf. Diese Bildungen, die i.d.R. glimmerführend sind, stehen zeitlich im Miozän und werden der Oberen Süßwassermolasse zugeordnet. Diese wiederum lagern dem verkarsteten Malmkalk auf. Insgesamt sind die Lockersedimente ca. 100 m mächtig, davon werden nur die oberen wenigen Metern (2-10 m) von den eiszeitlichen Sedimenten gebildet [1] und [2].

3.2 Charakterisierung des Grundwasserleiters

Hauptcharakteristik des Grundwasserleiters ist seine vertikale und horizontale Inhomogenität. Die quartären und tertiären Lockersedimente bilden zusammen einen Grundwasserleiter, da hydraulisch trennende Schichten an der Basis der Hochterrassensedimente nicht durchgängig vorhanden sind [4], [5], [9]. Gleichzeitig liegen die quartären Deckschichten in stark schwankenden Mächtigkeiten und unterschiedlicher Zusammensetzung vor.

Die aus den Bohrprofilen interpolierte Isohypsenkarte der Quartärbasis (Anlage 3) zeigt eine östlich der Deponie „Fort Hartmann“ verlaufende Rinne, die nördlich der Deponie eine West-Ost-Richtung einnimmt, so dass diese den östlichen und nördlichen Rand der Deponie umschließt. Die Quartärbasis vertieft sich nach Süden und Osten, so dass sich im Bereich zwischen Deponie und Friedrichshofen eine plateauartige Erhebung der Quartärbasis ergibt.

Im Osten des Baugebiets verliert sich die Hochterrasse und der aus Feinsanden und Schluffen bestehende Tertiäre Untergrund tritt an die Geländeoberfläche und bildet den sogenannten Dachsberg.

Auf einer derartigen Erhebung des Tertiären Untergrunds wurde auch das ehemalige Fort Hartmann gegründet. Auf diesem Bereich ist seit Kriegsende eine Deponie errichtet.

Aufgrund dieses Reliefs der Quartärbasis sind die grundwassererfüllten Mächtigkeiten sehr unterschiedlich. Innerhalb der Rinnen um die Deponie Fort Hartmann liegen bis zu 9 m Aquifermächtigkeit vor, wohingegen auf dem Plateau zwischen Deponie und Friedrichshofen diese bereichsweise unter einem Meter liegen kann.

Im Westen und Süden schließt sich die im Holozän durch Erosion gebildete Kante der Hochterrasse an. Sie bildet die auch morphologisch sichtbare Grenze zwischen den pleistozänen Lockergesteinen und den rinnenförmig abgelagerten jungen Talfüllungen entlang der noch heute vorhandenen Oberflächengewässer. In den jungen Talauen sind die pleistozänen Gesteine i.d.R. ausgeräumt bzw. aufbereitet und umgelagert, so dass die jungen Füllungen direkt dem Tertiär aufliegen und diese daher mit beiden Schichtgliedern (Pleistozän und Tertiär) in einem diskordanten Verbund liegen.

Aufgrund der bindigen Schichtglieder kann davon ausgegangen werden, dass insgesamt die Gebirgsdurchlässigkeit des Tertiärs mehrere 10er Potenzen unterhalb der Durchlässigkeit der Donauschotter liegt, in denen das Hauptgrundwassergeschehen abläuft. Betrachtet man die obersten 10 m des Aquifers, so werden ca. 98% des gesamten Grundwasserumsatzes im Bereich der Donauschotter und nur ca. 2% in den Flinzsanden ablaufen.

Das auf der Hochterrasse alleine aufgrund von Niederschlagsereignissen gebildete Grundwasser fließt in die jungen holozänen Bachablagerungen der Schutter ab und tritt im Moosgraben, der in das Grundwasservorkommen einschneidet, zutage. Damit stellt der Moosgraben die Vorflut des Grundwasservorkommens dar. Die Sohle der parallel verlaufenden Schutter wurde im Mittelalter um ca. 2 m erhöht, so dass diese keine Vorflutfunktion mehr ausüben kann. Da die Schutter noch Wasser führt, könnte sie bereichsweise zu influenten Verhältnissen führen und Oberflächenwasser in den Grundwasserkörper abgeben.

3.3 Hydraulische Verhältnisse

Im Anstrom fließt das Grundwasser vom Nordosten kommend in Richtung Süd-Südwesten ab. Dabei schiebt sich die Tertiäre Aufwölbung im Bereich der Deponie Fort Hartmann wie ein Keil in die Grundwasserströmung hinein und teilt diese in zwei Teilströme auf: Nördlich der Deponie fließt das Grundwasser nach Westen ab und schwenkt dann leicht nach West-Süd-West zum Moosgraben ein. Östlich der Deponie verläuft die Strömungsrichtung in südliche und südöstliche Richtung. In Anlage 2 ist ein Grundwassergleichenplan aus den Messungen vom April 2011 dokumentiert, der einen relativen Grundwasserhochstand repräsentiert. Die Interpolation eines Gleichenplans vom März 2001 (absolutes Maximum) ist aufgrund der geringen Anzahl an Messstellen nicht möglich.

Von den Grundwassermessstellen B10 (202), K3 (61) und KP18 (68) liegen seit 1986 nahezu lückenlose Grundwasserstände vor. Die Zeitreihen zeigen einen charakteristischen Jahresgang mit Frühjahrshoch- und Herbst/Winter Tiefstständen (Abbildung 1).

Insgesamt ist der maximale Schwankungsbereich in B10 (202) 2,39 m. Den bisher höchsten GW-Stand (HHW) wurde im März 2001 bei 377,61 m NN, den bisher niedrigsten Grundwasserstand (NNW) im November 1997 mit 375,22 m NN gemessen.

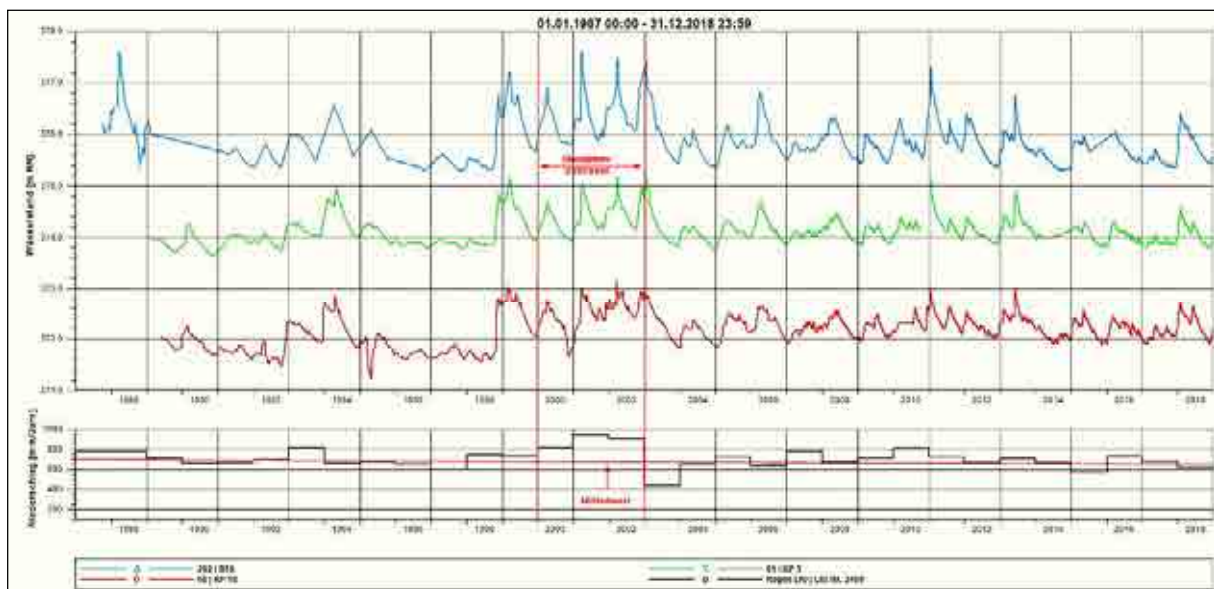


Abb. 1: Grundwasserganglinie der Messstellen B10 (202), K3 (61) und KP18 (68) und Niederschlagshöhen der letzten 32 Jahre

Die übrigen Grundwassermessstellen im Betrachtungsgebiet zeigen mit ca. 1,20 bis ca. 1,90 m geringere Schwankungsbreiten, insbesondere die, welche in den holozänen Tal-füllungen verfiltert sind.

Alle Messstellen zeigen einen Grundwassertiefstand in den Jahren 1996 bis 1998. In diesen Jahren ist die Amplitude des Jahresganges auf ca. die Hälfte bis zu einem Drittel geschrumpft. Die Gegenüberstellung der Grundwassergänge mit Niederschlagsdaten zeigt deutlich, dass die Höhe der Grundwasserstände direkt durch die Niederschlags-mengen und damit durch die Grundwasserneubildung durch Niederschlag gesteuert wird.

4 NUMERISCHES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL

Bei einem numerischen Grundwasserströmungsmodell werden mit Hilfe mathematischer Methoden die Wasserspiegelhöhen bzw. Wasserdrücke für eine endliche Anzahl von Raumpunkten bzw. Gitterkörpern innerhalb eines abgeschlossenen Systems raum- und zeitabhängig berechnet. Diese räumliche und zeitliche Zerlegung des Systems nennt man Modelldiskretisierung. Zweck eines Modells ist es, die durch Beobachtung bekannte Wirklichkeit des Systems mathematisch abzubilden und darauf aufbauend, Auswirkungen von Eingriffen in das System zu prognostizieren und vertiefendes Verständnis über die hydraulische Dynamik des Systems zu gewinnen.

Äußere Einwirkungen auf das System, quasi an den System- bzw. Modellrändern nennt man Randbedingungen. Diese werden dem System vorgegeben und begründen sich durch hydrogeologisches Verständnis für den Betrachtungsraum. Randbedingungen können aus dichten Rändern oder Ränder mit festgelegtem Wasserstand bestehen wie Fest-potenzialränder, Flusszellen oder General Head Boundaries, oder durch einen zeitlichen konstanten Zu- oder Abfluss definiert werden, wie Grundwasserneubildung und Eva-potranspiration. Randbedingungen können zeitlich variieren.

Innere Modellparameter bestimmen die Modelleigenschaften und sind die Durchlässig-keit bzw. der hydraulische Widerstand und die spezifischen Speicherkoeffizienten. Mo-dellparameter unterliegen keiner zeitlichen Variation.

Zeitlich variable Modelle sind instationär, hier wird die Veränderung des Porenspeichers bilanzmäßig in die Berechnung mit einbezogen. Zeitlich unabhängige Modelle nennt man

stationär, eine Berücksichtigung des Speichervolumens geht dabei nicht in die Berechnung ein.

Die Berechnung des Wasserstands für jede Zelle bei den gesetzten Rand- und Modellparameter erfolgt numerisch mittels Iteration. Hierfür wird ein Anfangswasserstand für jede Zelle benötigt. Für jede Zelle wird die Strömungsgleichung unter Beachtung der Massenbilanz gelöst. Dabei können nur Näherungslösungen erreicht werden, so dass die Berechnung nach Erreichen eines definierten minimalen Fehlers abgebrochen wird.

Die berechneten Ergebnisse werden mit den gemessenen Ergebnissen verglichen und die Abweichungen und die Streuung berechnet. Dieser Vorgang ist die Modellkalibrierung. Liegen die gewählten Parameter in sinnvollen Bereichen und spiegelt das berechnete Ergebnis die generelle beobachtete Situation wider, so kann das Modell als kalibriert gelten.

Eine Validierung des Modells bezieht sich auf den Test des Modells an veränderten Randbedingungen. Nur wenn das Modell auch diesen Zustand innerhalb gewisser Fehlertoleranzen wirklichkeitsnah wiedergibt, gilt es als validiert.

4.1 Eingesetzte Software

Das numerische Grundwasserströmungsmodell wurde mit dem Softwarepaket Visual Modflow 2011.1 der Fa. Schlumberger Limited, Kanada, eingerichtet. Zur numerischen Lösung wurde Modflow2000 des U.S. Geological Survey mit dem Lösungsalgorithmus des WHS (Waterloo Hydrogeological Services) eingesetzt.

4.2 Modelleinrichtung

Das Modellgebiet ist in Anlage 3 kartografisch dargestellt. Es umfasst ein Gebiet von 3400 m in Längs- und 2400 m in Querrichtung und damit eine Fläche von 8,16 km². Es ist ca. 25° nach Südost gedreht.

Das Modell ist als 3-Schichtmodell angelegt, für die Strömungsbetrachtung wurden jedoch Schicht 2 und 3 als inaktiv gesetzt. Insgesamt umfasst es 96 Spalten und 136 Reihen. Daraus ergeben sich 13.056 Knotenpunkte. Die Zellgrößen wurden gegenüber dem ursprünglichen Modell im östlichen Bereich halbiert, so dass nun für das Gesamtmodell eine einheitliche räumliche Diskretisierung von 25 m x 25 m vorliegt.

Als Schichtbasis wurde das Interpolationsergebnis der Quartärbasis übernommen. Die Tiefenlage der Schicht 1 ist in ebenfalls in Anlage 3 dargestellt.

Es sind folgende Randbedingungen im Modell festgelegt:

Nordrand: Undurchlässiger Rand

Westrand: Undurchlässiger Rand

Ostrand: Undurchlässiger Rand

Südrand: Östlicher Teil: Festpotentialrand

Flusszellen: Entlang des Moosgrabens. Die Wasserspiegelhöhen wurden der Datenbank des INKB entnommen und linear interpoliert. Es wurde angenommen, dass das Bachbett ca. 1 m tief ist und mit einem kf-Wert von $1E-3$ an den Aquifer angebunden ist. Insgesamt wurden von einem 5 m breiten Bach ausgegangen.

Grundwasserneubildung: Insgesamt wurden 6 Zonen mit unterschiedlicher Grundwasserneubildung festgelegt (Anlage 4).

Zone 1 (in Anlage 4 alle transparenten Zellen) normale GW-Neubildung in Donauschotter

Zone 2: verminderte GW-Neubildung im Bereich der bestehenden Bebauung Friedrichshofen

Zone 3: stark verminderte GW-Neubildung im Bereich der Deponie-Oberflächenabdichtung

Zone 4: verminderte GW-Neubildung im westlichen Deponiebereich ohne qualifizierte Abdichtung

Zone 5: normale Grundwasserneubildung in Donauschotter

Zone 6: verminderte Grundwasserneubildung durch verminderte Durchlässigkeit im Bereich des Daxbergs

Die Höhe der GW-Neubildung in den einzelnen Zonen ergeben sich für gewählte Zeitabschnitte aus den Ergebnisse der Kalibrierung (siehe unten).

4.3 Modellparameter

Insgesamt wurden fünf Zonen unterschiedlicher kf-Werte definiert:

- Zonen 1 Hochterrasse mit mittlerem kf-Wert
- Zone 2: Hochterrasse mit höherem kf-Wert
- Zone 3: Hochterrasse mit lokal geringerem kf-Wert
- Zone 3: Talaue entlang Schuttertal bzw. Moosgraben
- Zone 4: Flinzsande und Schluffe im Bereich der Deponie und des Daxbergs

Die Modellparameter (kf-Werte und spezifische Speicherkoeffizienten) sowie die GW-Neubildungshöhen wurden über eine Kalibrierung des Modells ermittelt [15]. Die Lage der Parameter- und Grundwasserneubildungszonen blieben dabei unverändert. Hierzu wurde am instationären Modell die beobachtete Grundwasserganglinie der Messstellen 202 (B10) zwischen November 2010 und Dezember 2011 modelltechnisch durch Variation der Grundwasserneubildung, der kf-Werte und des spez. Speicherkoeffizienten nachgebildet. Innerhalb dieses Zeitbereichs liegen zwei relative Maxima und Minima.

Die Höhe des maximalen Wasserstands ist eine Funktion der GW-Neubildungshöhe und des spezifischen Speicherkoeffizienten. Je höher die GW-Neubildungsrate ist, desto höher ist das Maximum, je geringer der spezifische Speicherkoeffizient und damit der Porenraum sind, desto höher fällt das Maximum aus. Die Form sowie die Länge des abfallende Asts in der Ganglinie nach einem Maximum bis zum Erreichen des Minimums ist dagegen allein eine Funktion des kf-Wertes, nicht nur des Bereichs um die GWM sondern auch der kf-Werte im Abstrom insbesondere im Bereich der Talaue, die insgesamt den Abfluss aus dem Modellgebiet regeln. Darin spiegelt sich der Abflusswiderstand des Modells (kf-Wert) des Gesteins wieder. Bei hohem Abflusswiderstand, niedrigem kf-Wert, wird dieser Kurvenast flach und das Minimum liegt höher.

4.4 Kalibrierung der Grundwasserneubildungsrate für den Zeitraum 2000 bis 2002

Anhand der Grundwasserganglinie von B10 (202) konnte die Grundwasserneubildungsrate modelltechnisch kalibriert werden. Hierzu wurden die monatlichen Niederschlagshöhen mit den Grundwasserhöhen verglichen und die Zeiträume bestimmt, in denen es zu

einer Grundwasserneubildung infolge von Niederschlagsereignissen kam. Zur Kalibrierung wurden dann die Neubildungsraten in wöchentlichen Zeitabschnitten so lange modifiziert, bis die gemessene Ganglinie von B10 mit der berechneten eine gute Übereinstimmung zeigte.

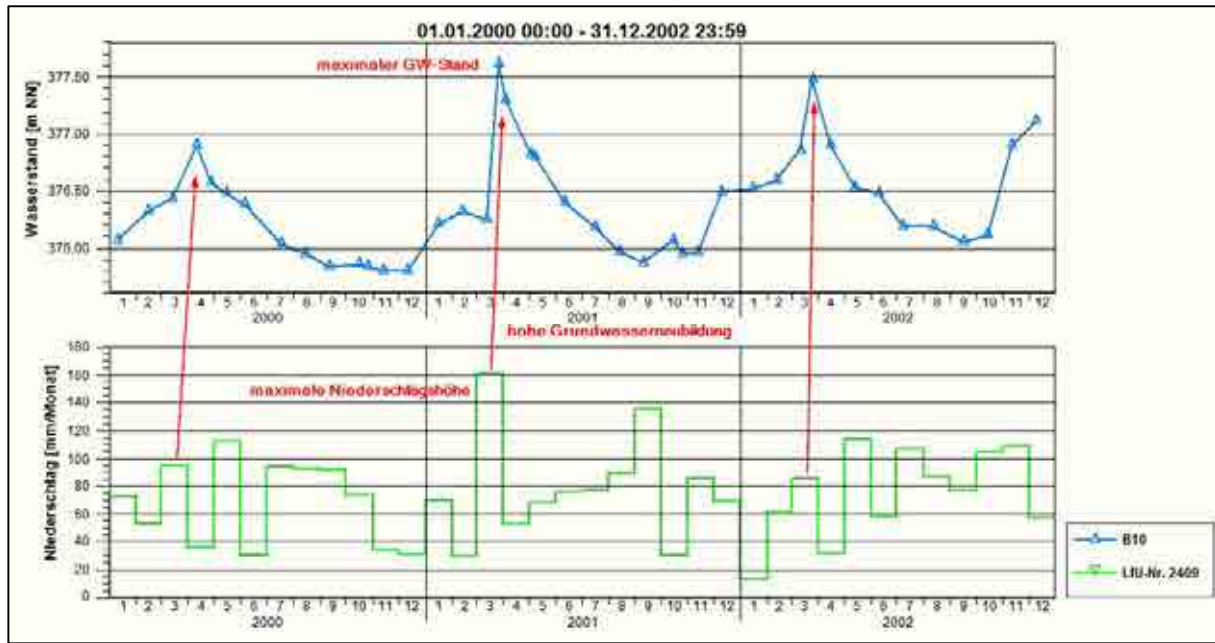


Abb. 2: Vergleich der Grundwasserganglinie in B10 mit den monatlichen Niederschlagshöhen

In Abbildung 3 ist das Kalibrierungsergebnis der Grundwasserneubildungsrate im Vergleich zu den Niederschlägen dargestellt. Ausgewiesen ist hierbei nur die GW-Neubildungsrate der Zone 1 und Zone 5 (unbebaute landwirtschaftliche Flächen über Donuaschotter und Auensedimente). Für die Zone 2 (bebaute Flächen) wurden 50%, für die unbebauten Flächen des Dachsbergs und der Kleingartensiedlung am Westrand der Deponie 18% der Grundwasserneubildung angenommen.

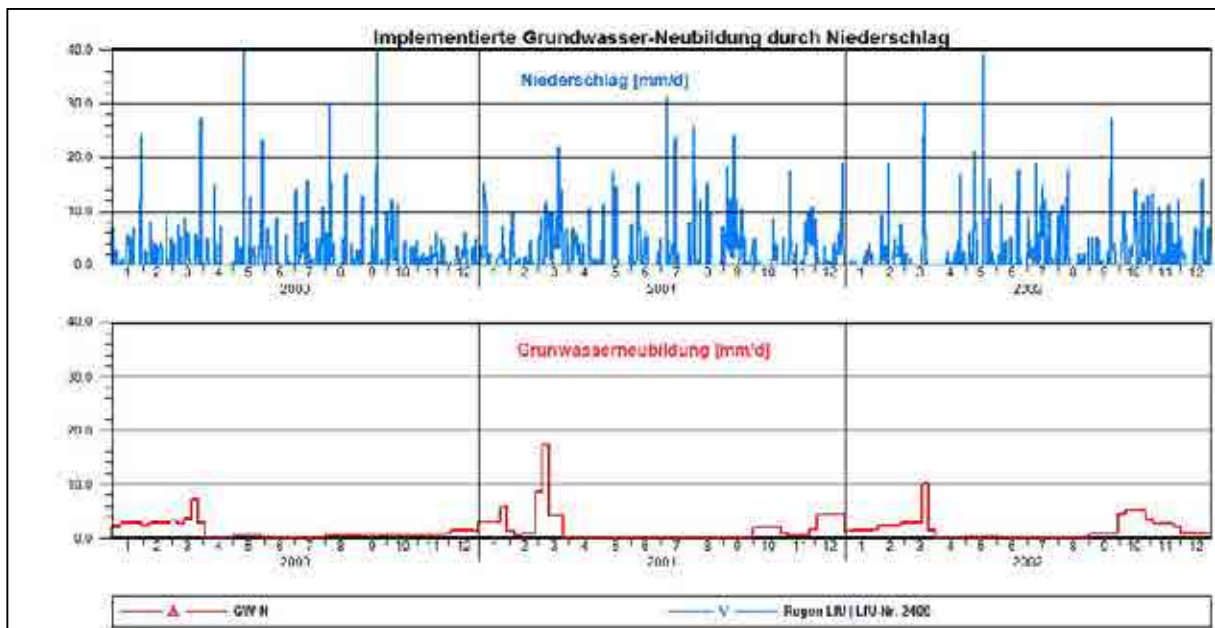


Abb. 3: Im Modell für den Zeitabschnitt 2000 bis 2002 implementierte Grundwasserneubildung in Zone 1 und Zone 5

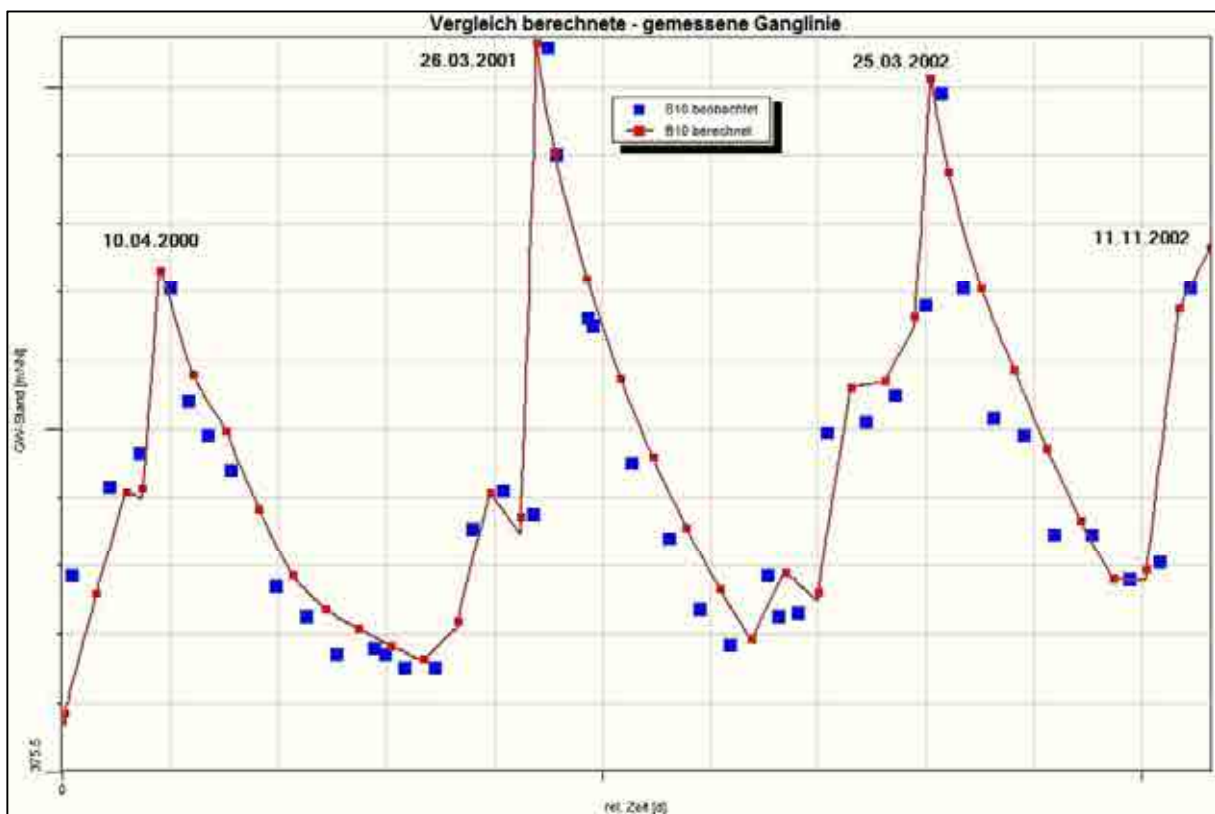


Abb. 4: Berechnete Grundwasserganglinie von B10 in Gegenüberstellung zu den Messwerten im Zeitraum 2000 bis 2002

Die Abbildung 4 zeigt für die gewählten Grundwasserneubildungsraten die sehr gute Übereinstimmung der berechneten Grundwasserhöhen mit den gemessenen in der Messstellen B10 (202). Insgesamt zeigt das damit das Grundwasserströmungsmodell mit den gewählten Parametern und Randbedingungen eine sehr gute Übereinstimmung mit den beobachteten hydraulischen Bedingungen.

Insbesondere kann bei entsprechender zeitlicher Diskretisierung mit den gewählten Parametern und Grundwasserneubildungsraten der Grundwassergang allein aus der Variation der Grundwasserneubildungsraten nachgebildet werden, was den tatsächlichen Verhältnissen ebenfalls entspricht.

Des Weiteren liegen alle gewählten Parameter und Randbedingungen in hydrogeologisch sinnvollen und für den Untergrund plausiblen Spannbreiten, so dass das Modell für den gewählten Zeitraum als hinreichend kalibriert angesehen werden kann.

4.5 Sensitivitätsanalyse

Hinsichtlich der generellen Grundwasserströmungsverhältnissen reagiert das Modell äußerst robust und ist hinsichtlich der Variation der Parameter und Grundwasserneubildungsraten nicht empfindlich. Auch hinsichtlich der kf-Wert-Verteilung innerhalb der Donauschotter reagiert das Modell nicht mit einer veränderten generellen Strömungsrichtung.

Gesteuert wird diese generelle GW-Strömung einerseits von der Vorflut Moosgraben und andererseits durch das Umströmen des Flinzsandkeils im Südbereich der Deponie.

Die Variationen der hydraulischen Parameter der Vorflut in gewissen sinnvollen Grenzen (Durchlässigkeit der Sohle, Wasserstand im Moosgraben) wiederum bewirkt ebenfalls nahezu keine Veränderung der Strömungsverhältnisse. Lediglich die Deaktivierung der Flusszellen bewirkt eine Veränderung der Fließzustände, was jedoch unrealistisch ist. Mit diesem Zustand ist eine Kalibrierung des Modells nicht möglich, was ein deutliches Indiz ist, dass dieser Zustand der Wirklichkeit nicht entsprechen kann. Somit ist die Vorflutwirksamkeit des Moosgrabens evident.

Die Höhe des Grundwasserspiegels wird von den Grundwasserneubildungsraten sowie von den Speicherkoeffizienten bestimmt. Da dies jedoch flächig das gesamte Gebiet betrifft ändert sich an der GW-Fließverhältnissen sehr wenig, wenn man die GW-Neubildung variiert.

Bei zu gering gewählten GW-Neubildungsraten fallen Zellen in Bereichen trocken, bei denen die Quartärbasis sehr hoch liegt. Dies führt zu unplausiblen Strömungsverhältnissen um diese trocken gefallenen Bereiche und kann zu numerischen Instabilitäten führen bis hin zu numerischen Divergenz.

4.6 Wasserbilanz

Das stationär kalibrierte Modell hat folgende Wasserbilanz [15]:

Ränder	Zufluss m ³ /d	Abfluss m ³ /d
Festpotenzial	0	1.900
Moosgraben	0	2.898
Grundwasserneubildung	4.792	0
Summe	4.792	4.798

Das gesamte Grundwasser im Modellgebiet wird durch GW-Neubildung gespeist. Die berechnete Tagesmenge entspricht auf das gesamte Modellgebiet bezogen im Mittel einer GW-Neubildungsrate von 214 mm im Jahr. Das langjährige Mittel der Niederschlagshöhen liegt bei 694 mm/a. Entsprechend führt im langjährigen Mittel ca. 31% des Niederschlags zur Grundwasserneubildung.

Über den gewählten 3-Jahres-Zeitraum der nassen Jahre 2000 bis 2002 zeigt das Modell folgende Wasserbilanz:

Ränder	Zufluss m ³ /d	Abfluss m ³ /d
Festpotenzial	0	3.072
Moosgraben	0	4.220
Grundwasserneubildung	8.454	0
Speicheränderung	0	1.165
Summe	8.454	8.457

Hierbei liegt die mittlere Grundwasserneubildungsrate bei 378 mm/a und somit bei etwa 42% der mittleren Niederschlagshöhe im gewählten Dreijahres-Zeitraum von 900 mm.

Der Abfluss findet zu 60% über die Vorflut und zu 40% über den Festpotenzialrand im Süden des Modellgebiets. Großräumige Grundwassergleichenpläne zeigen, dass der Moosgraben in diesem Bereich seine Vorflutwirksamkeit verliert und das Grundwasser unter ihm hindurchfließt.

Die Wasserbilanz zeigt somit ebenfalls plausible und realitätsnahe Größen.

5 AUSWERTUNGEN

Die Auswertungen der Prognoserechnung beziehen sich jeweils auf die beobachtete Grundwassersituation zwischen den Jahren 2000 und 2002, da sich in diesem Zeitabschnitt insgesamt drei relative und das absolute Maximum an Grundwasserhochständen befinden.

Zur Darstellung der Grundwasserbeeinflussung durch die geplante Niederschlagsversickerung des projektierten Baugebiets wurden die Grundwasserstände an insgesamt 5 virtuellen Kontrollpegeln berechnet. Die Lage der Kontrollpegel ist in der Anlagen 6.1ff dargestellt. Des Weiteren wurde für das Hochwasserereignis im März 2001 sowie für den relativen Niedrigwasserstand im September 2001 jeweils ein Differenzenplan erstellt, die die Grundwasserhöhenunterschiede infolge der Versickerung gegenüber dem unbebauten Zustand darstellen.

Es wurde angenommen, dass in der Fläche des Baugebiets generell 70% der Niederschläge ohne Zeitverzug zur Grundwasserneubildung beitragen. Bei extrem langanhaltenden Niederschlägen wurde darüber hinaus angenommen, dass aufgrund der Bodensättigung dann 100% des Niederschlagswassers zur Grundwasserneubildung beiträgt.

In Anlage 6.1 ist der berechnete Grundwassergleichenplan als Kalibrierergebnis für den Zustand März 2001 ohne Bebauung dargestellt. Anlage 6.2 zeigt den Gleichenplan zum gleichen Zeitpunkt bei Bebauung und Versickerung der Niederschlagswässer.

In der Anlage 6.3 ist der daraus berechnete Differenzenplan dokumentiert. Hieraus ist ersichtlich, dass bei Hochwasserständen die Niederschlagsversickerung im Baugebiet zu keiner weiteren Grundwassererhöhung führt. Bei stark gesättigten Bodenschichten nach langandauernden Niederschlagsereignissen hat der Boden seine Speicherwirkung verloren, so dass die gesamten Niederschlagsmengen zur Grundwasserneubildung führen.

Die nachfolgenden berechneten Ganglinien in den Kontrollpunkten machen diesen Sachverhalt ebenfalls deutlich.

An den Kontrollpegeln 1 bis 4 im Grenzbereich zu den bestehenden Baugebieten sowie an dem Kontrollpegel 5 innerhalb des geplanten Baugebiets zeigen sich bei Hochwasserständen keine zusätzlichen Aufhöhungen. Während des relativen Niedrigwasserstands (September 2001) liegen die Aufhöhungen am Rande des geplanten Baugebiets dagegen zwischen 5 und 20 cm. Innerhalb des Baugebiets am Kontrollpegel 5 bei ca. 40 cm.

Innerhalb der Zeitabschnitte, bei denen Grundwasserniedrigstände herrschen, findet keine natürliche Grundwasserneubildung statt. Die Versickerung von anfallenden Niederschlägen wirkt somit in diesen Zeiträumen als künstliche Grundwasseranreicherung und führt im Bereich der Versickerungseinrichtungen zu einer Grundwasseraufhöhung.

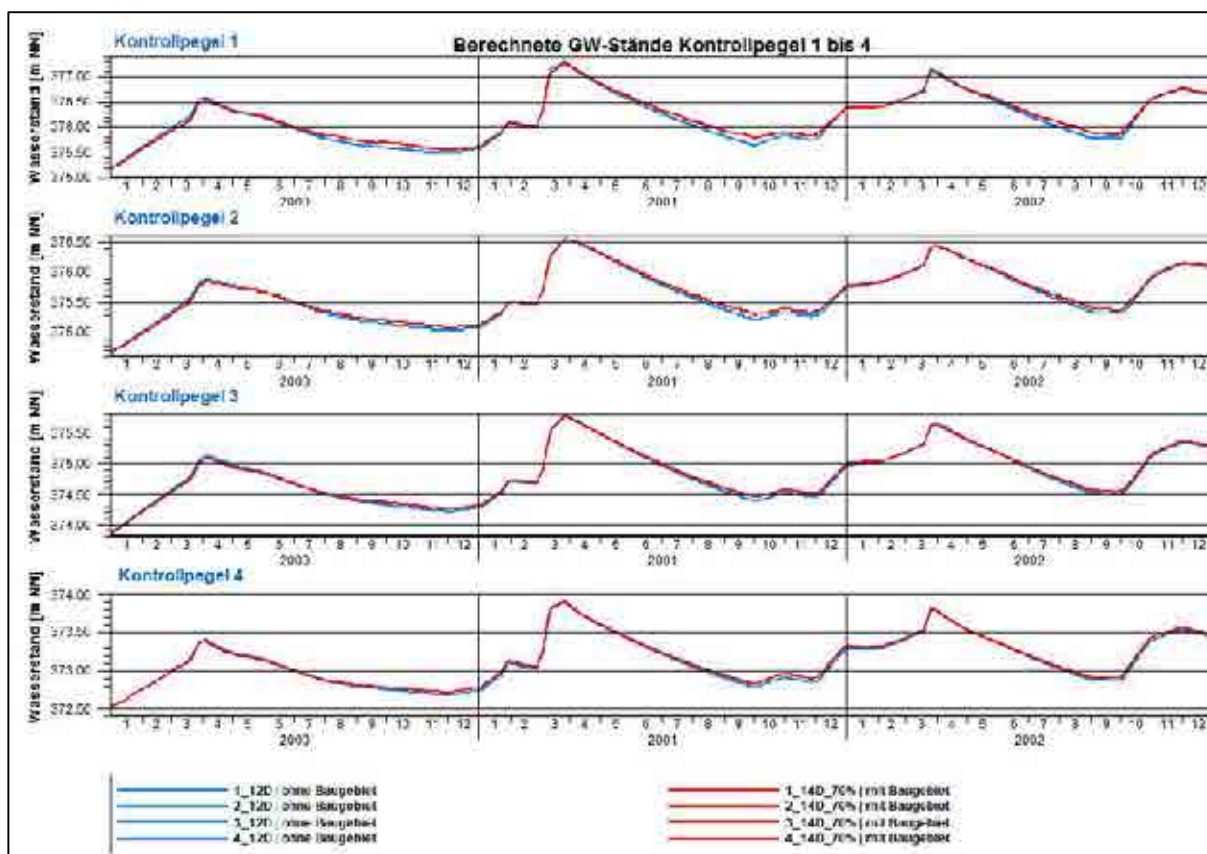


Abb. 5: Berechnete Grundwasserstände für den Zeitabschnitt 2000 bis 2002 für vier Kontrollpegel entlang des geplanten Baugebiets

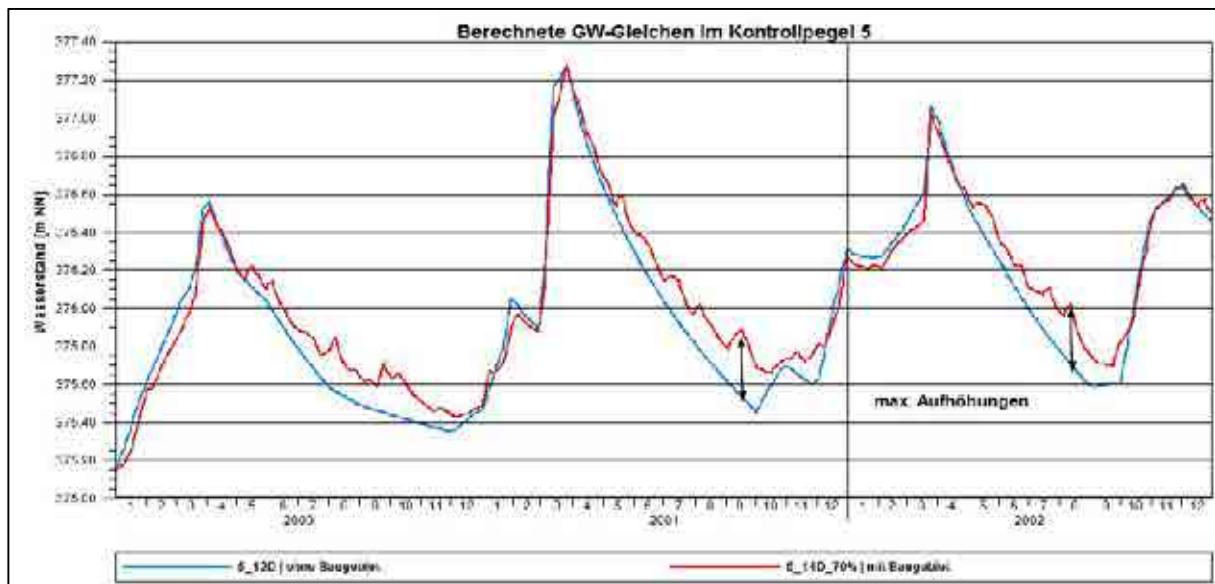


Abb. 6: Berechnete Ganglinien im Kontrollpegel 5 (innerhalb des Baugebiets). Die maximalen Aufhöhen sind im Bereich von relativen GW-Minima.

Anhand der Anlage 6.5 lassen sich die Flurabstände für ein Hochwasserereignis wie vom März 2001 abschätzen. Hieraus wird deutlich, dass insbesondere nördlich des geplanten Baugebiets am Kontrollpunkt 1 der Abstand zum Grundwasser für eine Bebauung mit Kellergeschoss kritisch wird. Allerdings kann dieser geringe Flurabstand mit der geplanten Bebauung nicht in Verbindung gebracht werden. Wie aus dem Differenzenplan hervorgeht, resultieren in diesem Bereich bei Hochwasserständen keine Grundwassererhöhungen.

Am Kontrollpunkt 1 liegt der Flurabstand bei dem relativen Minimum im September 2001, was in etwa einem mittleren langjährigen GW-Stand entspricht, bei ca. 2,40 m. Hier kann aus dem Differenzenplan entnommen werden, dass aus der geplanten Versickerung eine Grundwassererhöhung von ca. 25 cm resultiert. Demnach stünde das Grundwasser bei ca. 2,65 unter Gelände an, wenn keine Versickerung des Niederschlagswassers im geplanten Baugebiet stattfinden würde.

6 BEWERTUNG DER MODELLERGEBNISSE

Das numerische Grundwassermodell bildet im Zeitraum 2000 bis 2002 die Grundwasserdynamik sehr exakt ab. Die sehr steilen Peaks der Grundwasserganglinie von B10

sind darauf zurückzuführen, dass ab einer Höhe des Grundwassers von 1,60 unter GOK aufgrund der bindigen Deckschichten der Aquifer von einem freien zu einem gespannten Zustand übergeht und sich damit der Speicherkoeffizient deutlich verkleinert. Somit bewirkt schon relativ wenig Nachfluss durch Neubildung eine deutliche Erhöhung des Grundwasserstandes.

Die Einflüsse der Niederschlagsversickerung im geplanten Baugebiet sind umso deutlicher, je weniger GW-Neubildung stattfindet und wirken daher eher bei Mittel- und Niedrigwasserständen, insbesondere dadurch im Sommerhalbjahr. Bei einer flächenhaften Versickerung, wie sie im vorliegenden Fall berechnet wurde, muss im zentralen Bereich des Baugebiets mit einer versickerungsbedingten GW-Aufhöhung von bis zu 0,40 cm gerechnet werden. Dadurch verschieben sich die GW-Minima um diese Beträge, so dass im Sommerhalbjahr Flurabstände im Baugebiet von 4,0 bis 2,50 m zu erwarten sind. Bei Hochwasserereignissen verringern sich diese dann bis zu 1,40 m und liegen dann nur noch zwischen 1,10 und 2,60 m. Diese geringen Beträge können durch einen Verzicht auf die Niederschlagsversickerung nicht verhindert werden, da sie unabhängig von der Versickerung naturbedingt und regional auftreten.

Bonn, 2. Juli 2019

RBK GmbH

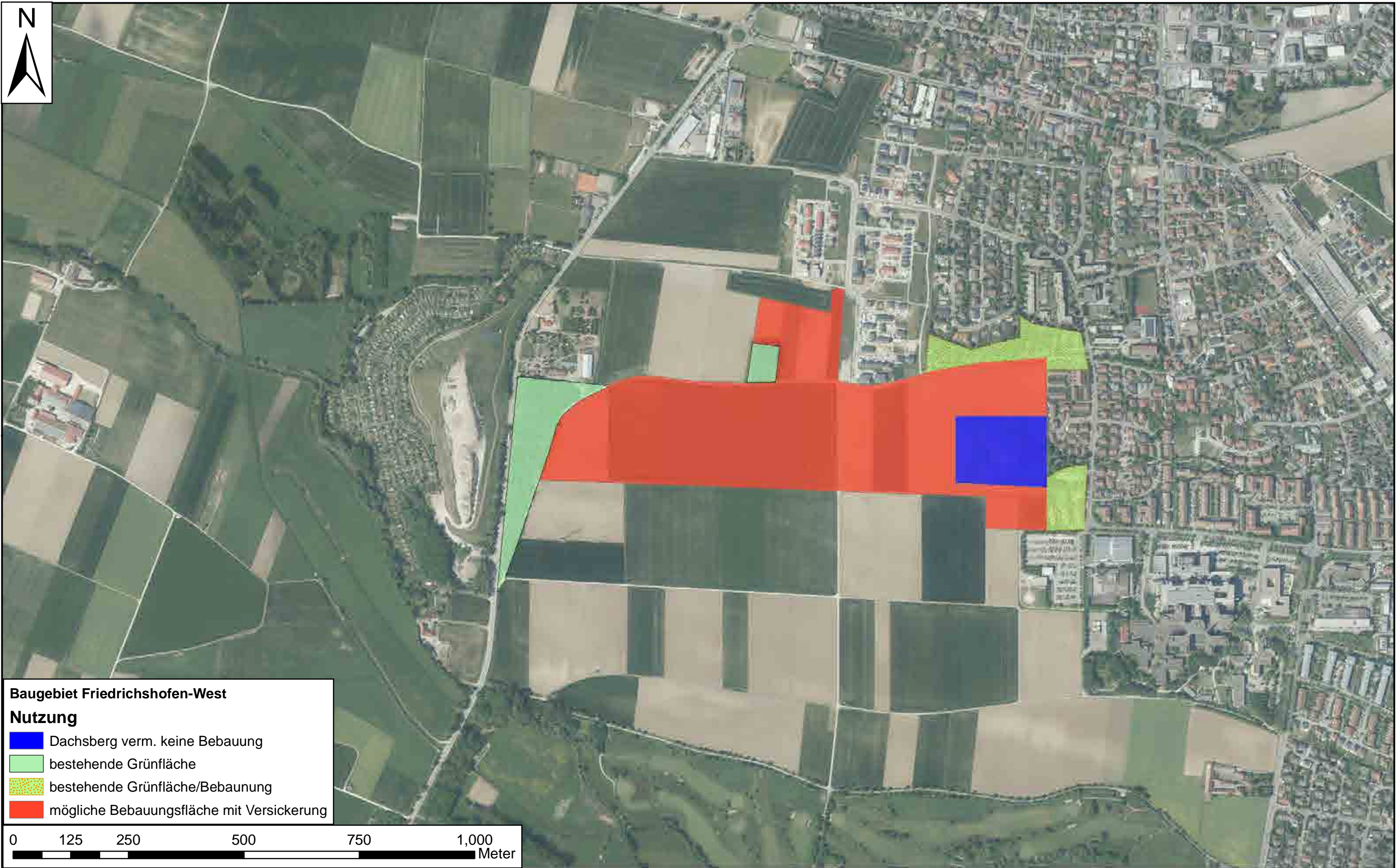
Hydrogeologische Gutachten - Grundwassermonitoring



Dipl.-Geol. Michael Kasper

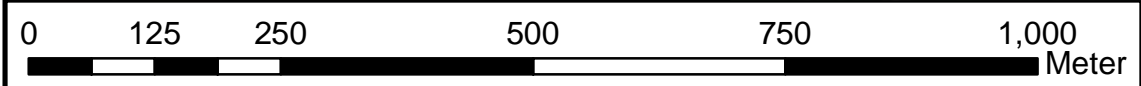
Beratender Geowissenschaftler BDG



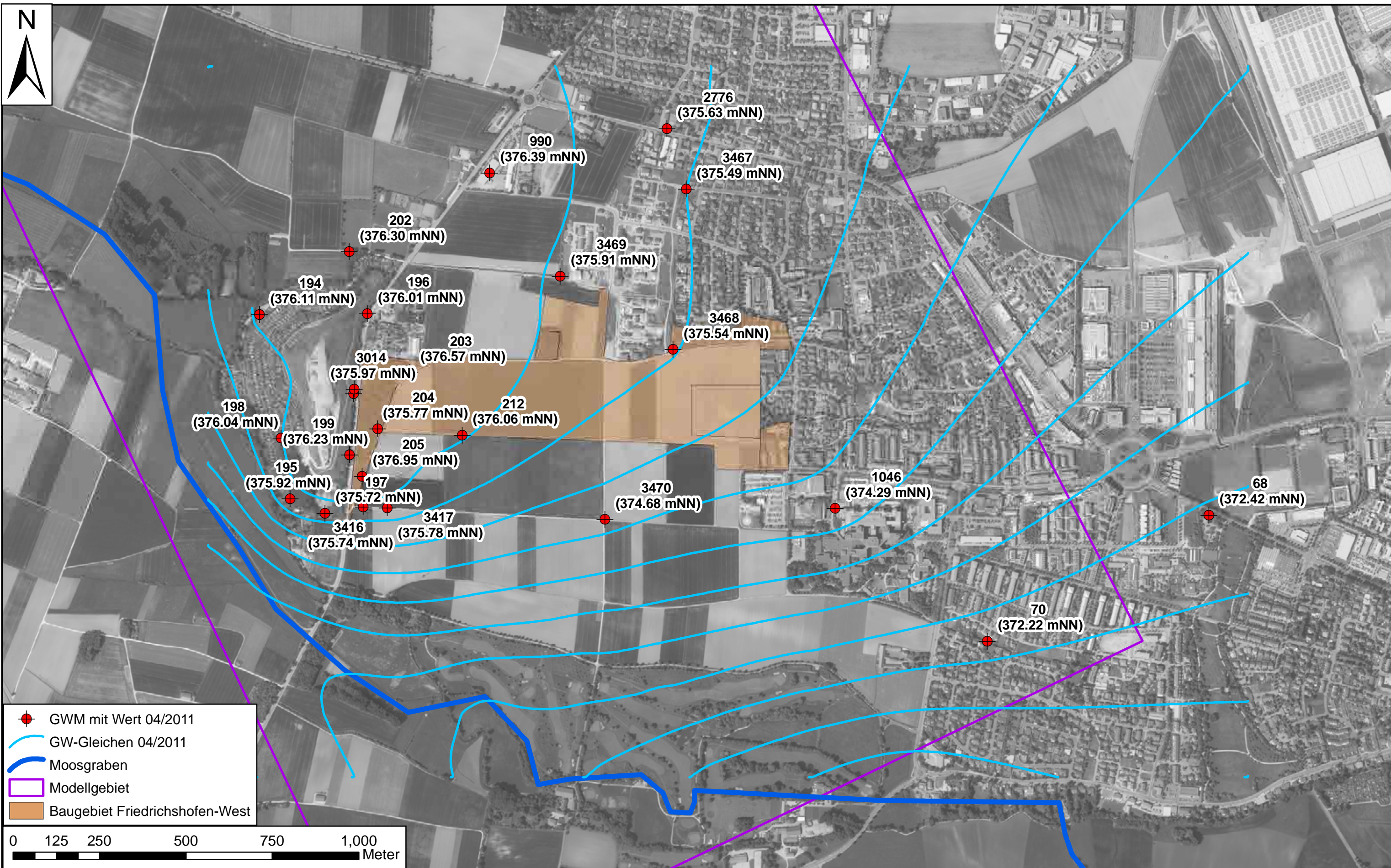


Baugebiet Friedrichshofen-West
Nutzung

- Dachsberg verm. keine Bebauung
- bestehende Grünfläche
- bestehende Grünfläche/Bebauung
- mögliche Bebauungsfläche mit Versickerung





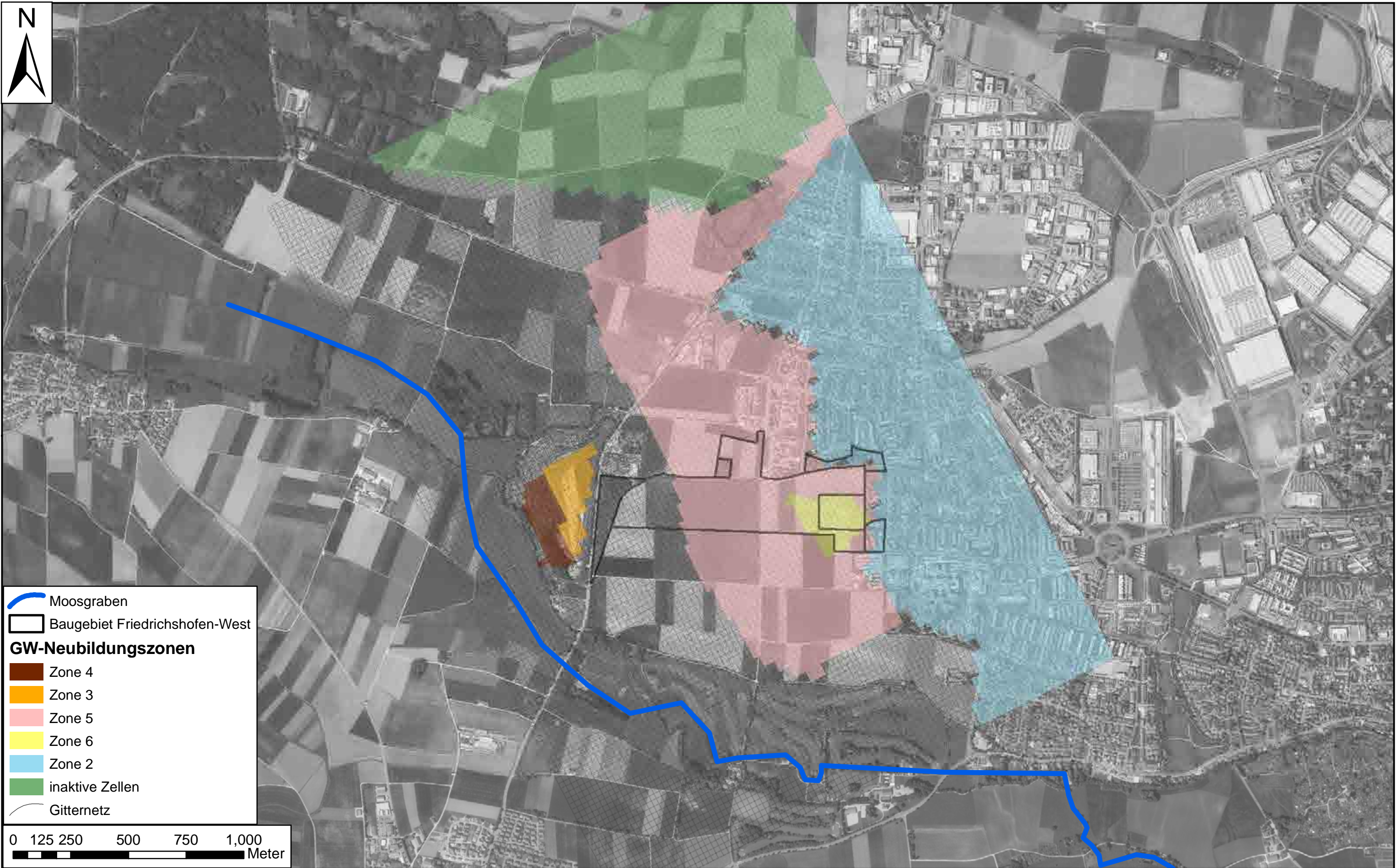
Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		Luftbild mit Lage des Baugebiets und der Flächennutzung	
		Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de	2.7.2019 Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:7,500
			Anlage: 1



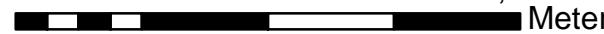
Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		Grundwassergleichenplan rel. Hochwasser April 2011	
	RBK GmbH Hydrologische Landes- Dienstleistung	Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de	2.7.2019 Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:10,000
			Anlage: 2




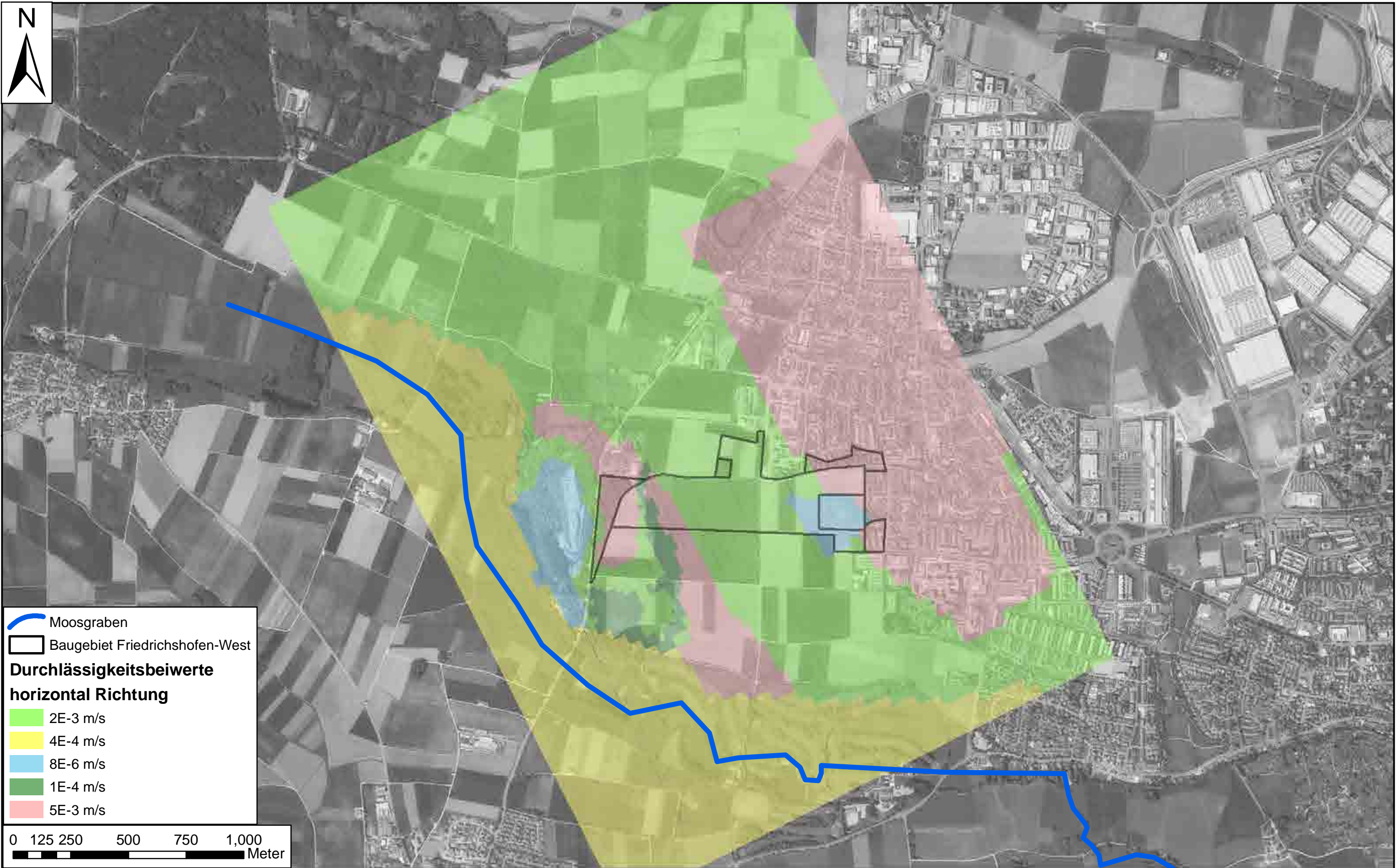
Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		Modellgebiet Tiefenlage Schicht 1 und Modellränder	
 Stadt Ingolstadt			
 RBK GmbH Hydrologische Labordienste Wasserbau-Abteilung	Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de	2.7.2019 Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:17,965	Anlage: 3










-  Moosgraben
-  Baugebiet Friedrichshofen-West
- GW-Neubildungszonen**
-  Zone 4
-  Zone 3
-  Zone 5
-  Zone 6
-  Zone 2
-  inaktive Zellen
-  Gitternetz


0 125 250 500 750 1,000
 Meter

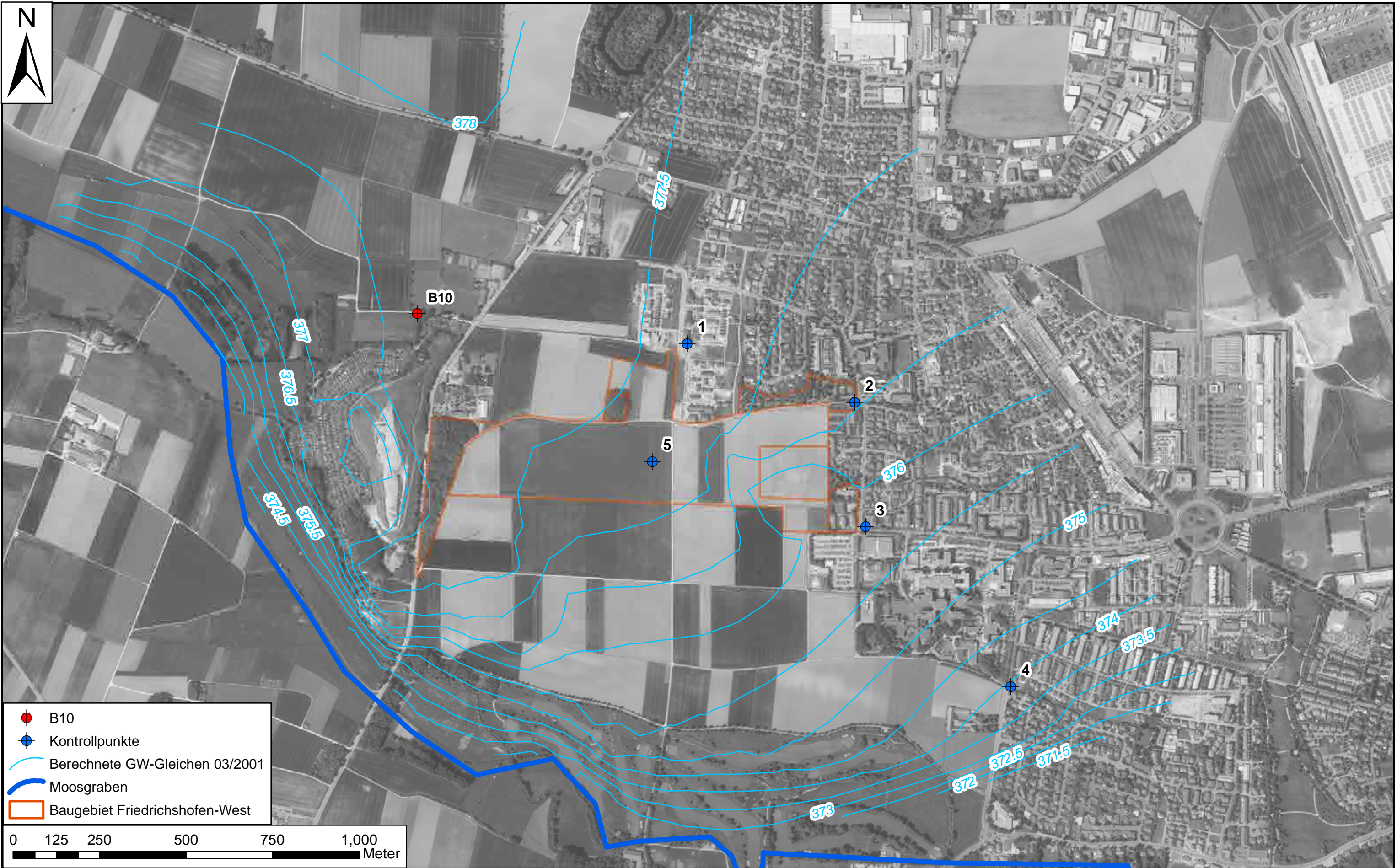
Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		Modellgebiet Gitternetz und GW-Neubildungszonen	
 Stadt Ingolstadt		Anlage: 4	
 RBK GmbH Hydrologische Labordienste Wasserbau-Abteilung	Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de	2.7.2019 Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:15,000	



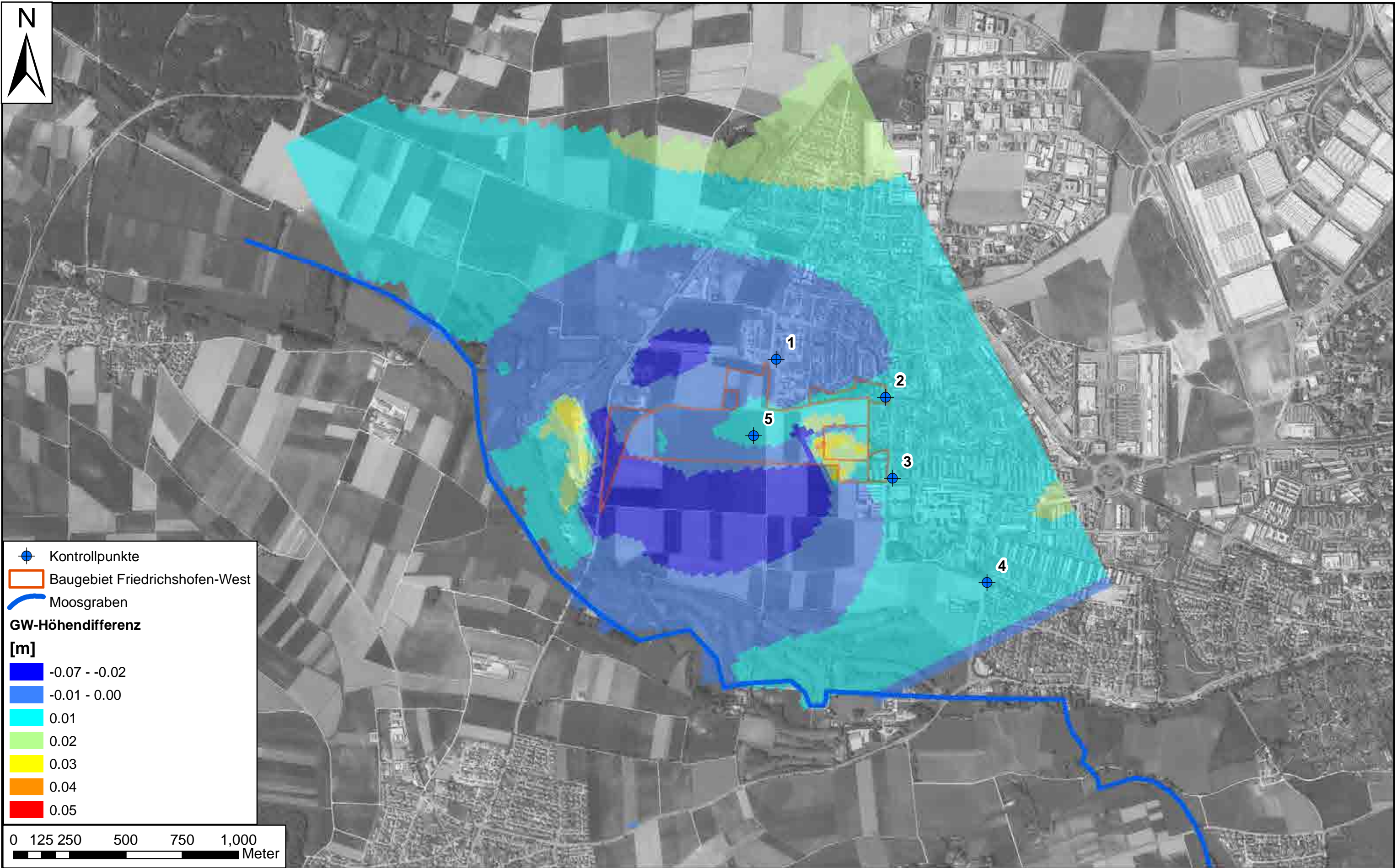
 Moosgraben
 Baugebiet Friedrichshofen-West
**Durchlässigkeitsbeiwerte
horizontal Richtung**
 2E-3 m/s
 4E-4 m/s
 8E-6 m/s
 1E-4 m/s
 5E-3 m/s

0 125 250 500 750 1,000
Meter

Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		horizontale kf-Wert-Verteilung im Modellgebiet	
 Stadt Ingolstadt			
 RBK GmbH Hydrogeologische Sachverständigen- und Beratungs-Gesellschaft	Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de	2.7.2019 Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:15,000	Anlage: 5



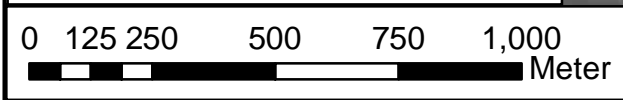
Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		Berechnete GW-Gleichen Hochwasser 03/2001 (ohne Baugebiet)	
 Stadt Ingolstadt			
 RBK GmbH Hydrogeologische Geotechnik Ingenieurbüro		Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de	
		2.7.2019 Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:10,000	Anlage: 6.1



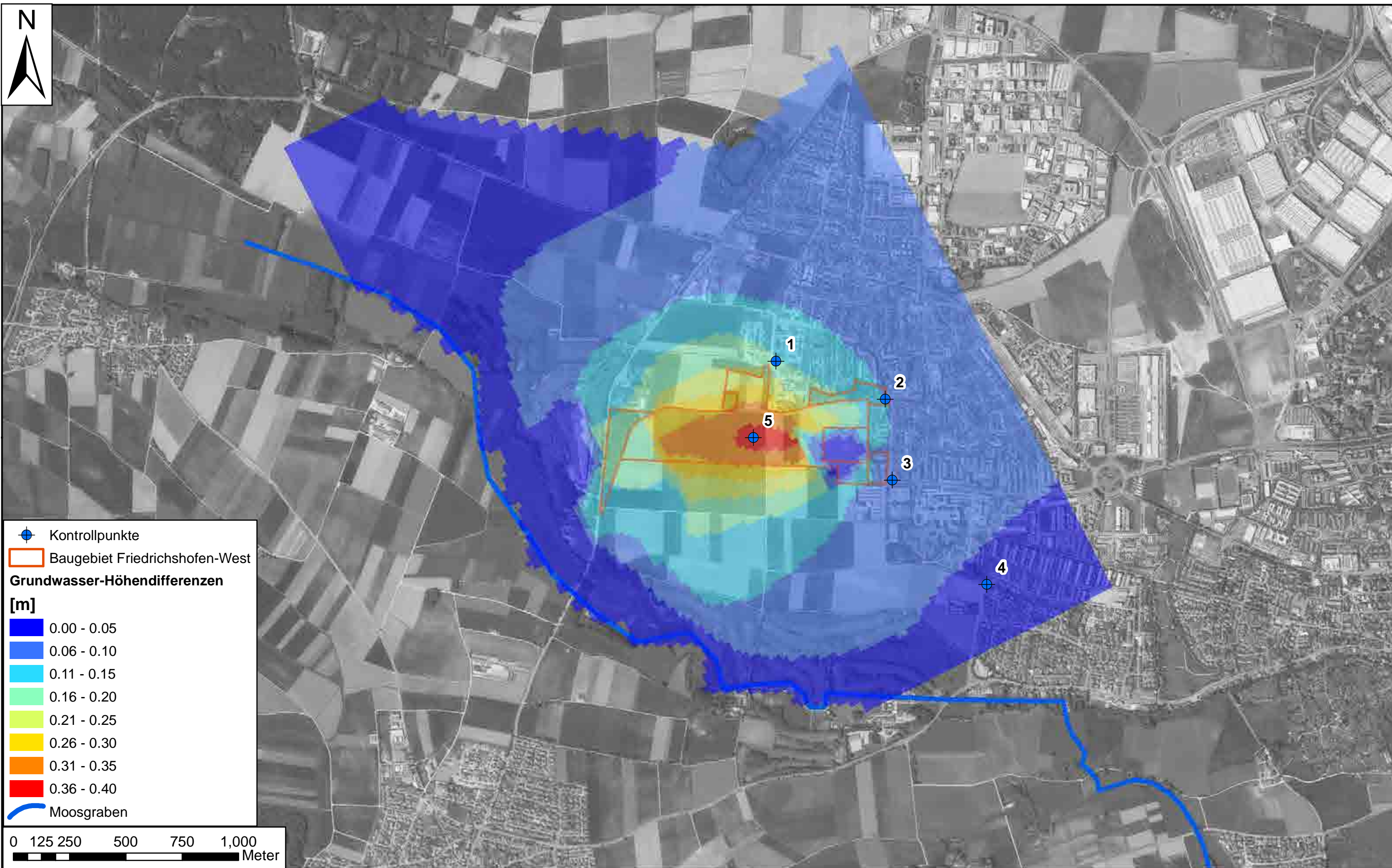
⊕ Kontrollpunkte
▭ Baugebiet Friedrichshofen-West
— Moosgraben

**GW-Höhendifferenz
[m]**

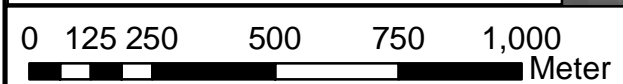
Dark Blue	-0.07 - -0.02
Blue	-0.01 - 0.00
Cyan	0.01
Light Green	0.02
Yellow	0.03
Orange	0.04
Red	0.05



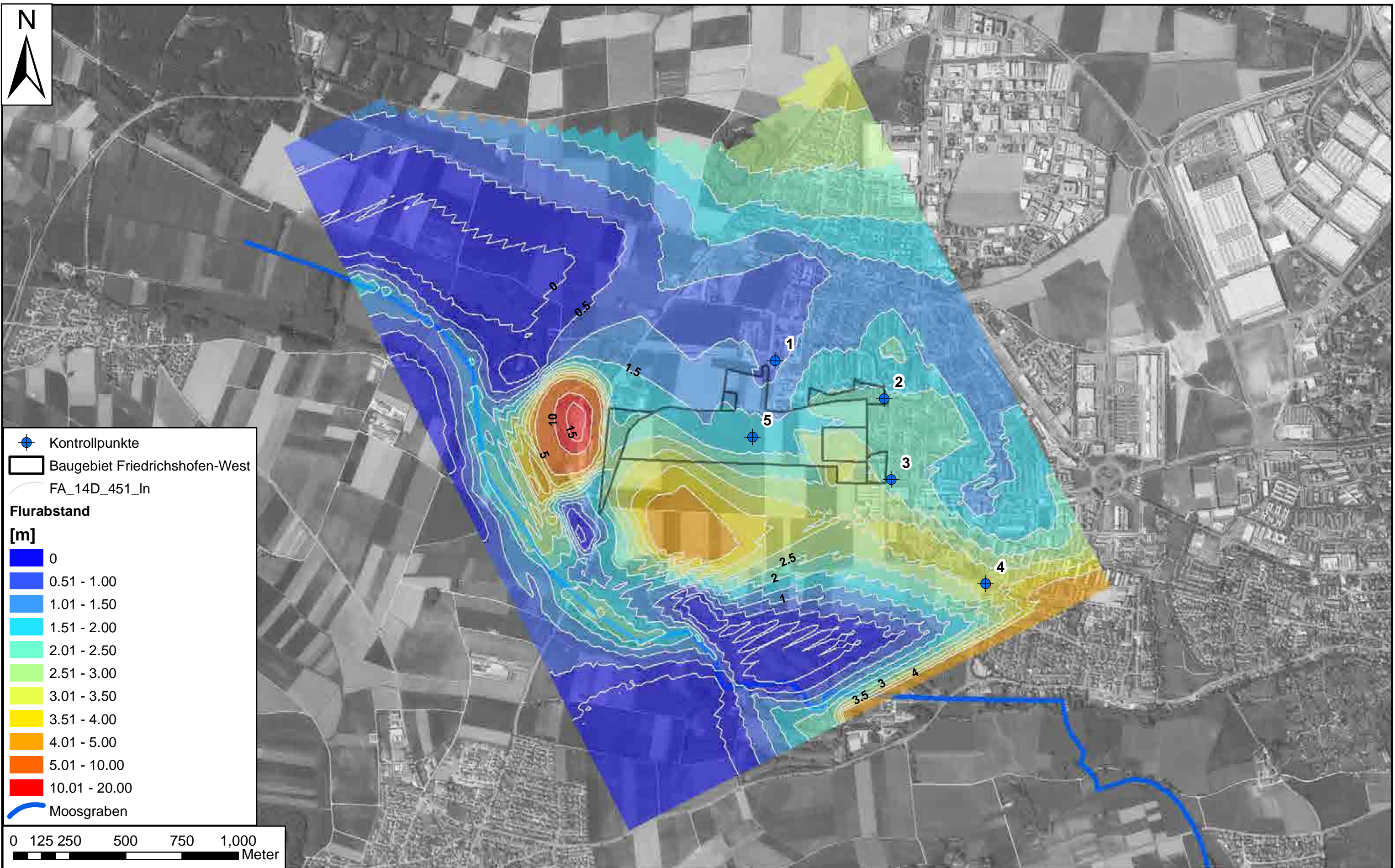
Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		Grundwasser-Höhendifferenzen Hochwassersituation wie 03/2001	
		Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de	2.7.2019 Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:15,353
			Anlage: 6.3


















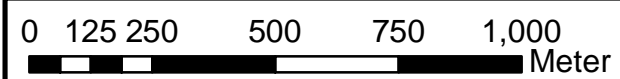
⊕ Kontrollpunkte
 Baugebiet Friedrichshofen-West
Grundwasser-Höhendifferenzen
[m]
 0.00 - 0.05
 0.06 - 0.10
 0.11 - 0.15
 0.16 - 0.20
 0.21 - 0.25
 0.26 - 0.30
 0.31 - 0.35
 0.36 - 0.40
~ Moosgraben



<p style="text-align: center;"> Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände </p> <p style="text-align: center;"> Stadt Ingolstadt </p>	<p> Grundwasser-Höhendifferenzen rel. Niedrigwassersituation wie 09/2001 </p>
<p> RBK GmbH <small>Hydrogeologische Ingenieure Bodenmechanik - Grundbau</small> </p>	<p> <small>Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de</small> </p>
	<p> 2.7.2019 <small>Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:15,353</small> </p>
	<p>Anlage: 6.4</p>



-  Kontrollpunkte
-  Baugebiet Friedrichshofen-West
-  FA_14D_451_In
- Flurabstand**
- [m]**
-  0
-  0.51 - 1.00
-  1.01 - 1.50
-  1.51 - 2.00
-  2.01 - 2.50
-  2.51 - 3.00
-  3.01 - 3.50
-  3.51 - 4.00
-  4.01 - 5.00
-  5.01 - 10.00
-  10.01 - 20.00
-  Moosgraben



Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		Berechneter Flurabstand Hochwasserstand wie 03/2001	
			
		Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327 www.rbk-bonn.de	2.7.2019 Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:15,353
			Anlage: 6.5



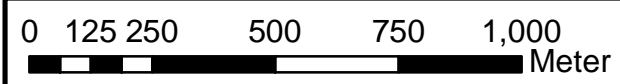
⊕ Kontrollpunkte

Flurabstand
[m]

- 0
- 0.51 - 1.00
- 1.01 - 1.50
- 1.51 - 2.00
- 2.01 - 2.50
- 2.51 - 3.00
- 3.01 - 3.50
- 3.51 - 4.00
- 4.01 - 5.00
- 5.01 - 10.00
- 10.01 - 20.00

▭ Baugebiet Friedrichshofen-West

▬ Moosgraben



Baugebiet Friedrichshofen-West Auswirkungen der Niederschlagsversickerung auf die Grundwasserstände		Berechneter Flurabstand rel. Niedrigwasserstand wie 09/2001	
	RBK GmbH Hydrogeologische Labordienstleistungen www.rbk-bonn.de	Kaiser-Karl-Ring 50 53119 Bonn 0228-85098327	2.7.2019
			Projekt-Nr. 117.19.02 Maßstab: 1:15,353
			Anlage: 6.6