RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

Deponie Fort Hartmann

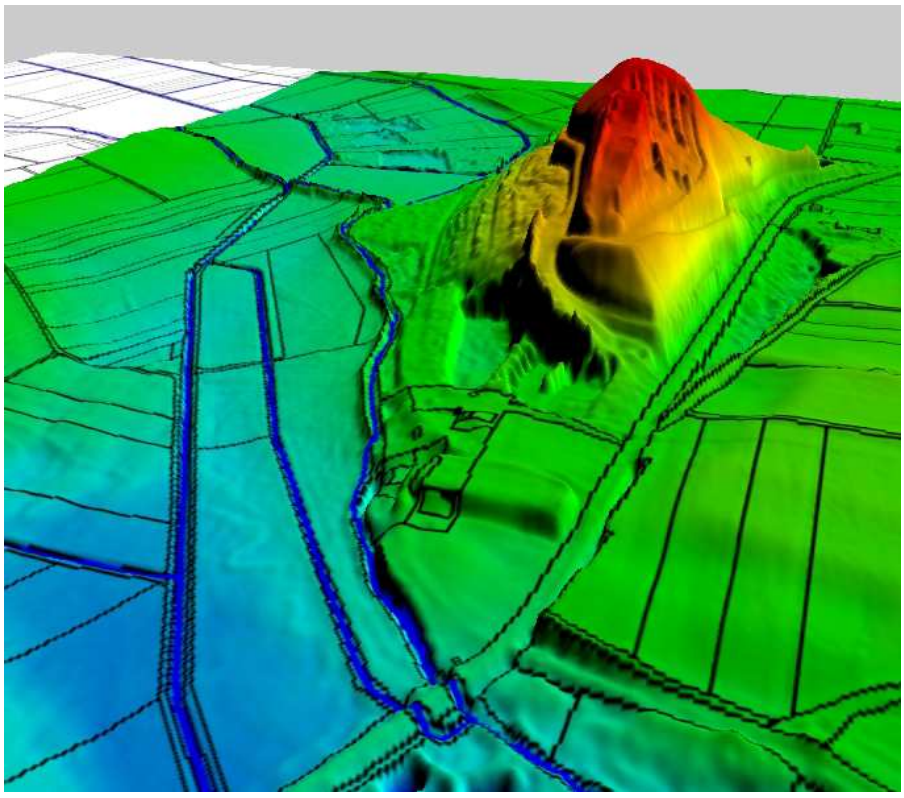
MNA-Konzept

Stufe 1: Numerisches Strömungsmodell und Planung eines Notfallszenarios für das östlich der Deponie geplante Baugebiet

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 30
85057 Ingolstadt

Projekt-Nr. 117.13.01

22. April 2013



INHALT

1 VORGANG UND VERANLASSUNG 7

2 GEOGRAFISCHE UND TOPOGRAFISCHE LAGE 8

3 BESCHREIBUNG DES AUFBAUS DER DEPONIE 9

4 GEOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHE SITUATION 10
4.1 Geologischer Überblick 10
4.2 Charakterisierung des Grundwasserleiters 10
4.3 Hydraulische Verhältnisse 14

5 NUMERISCHES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL 19
5.1 Eingesetzte Software 20
5.2 Modelleinrichtung 20
5.3 Modellparameter 21
5.4 Modellkalibrierung 21
5.5 Sensitivitätsanalyse 26
5.6 Wasserbilanz 27

6 AUSWERTUNGEN 28

7 NOTFALLSZENARIO 29

8 KONZEPTION DER STUFE 2 DES MNA-KONZEPTS 30

ANLAGENVERZEICHNIS

1	Übersichtskarte mit Lage der Deponie M 1 : 50.000
2	Kartendarstellung Modelleinrichtung
2.1	Isohypsenkarte Quartärbasis 1: 20.000
2.2	Höhe der Unterflächen der Modellzellen Layer 1 1 : 20.000
2.3	Lage der Modellränder 1 : 20.000
2.4	Modellparameter 1 : 20.000
3	Kartendarstellung Vergleich Messung und Berechnung des kalibrierten Modells
3.1	Vergleich berechnete und gemessene GW-Gleichen (stationär Kalibrierung) 1 : 20.000
3.2	Berechnete Strömungsfäden aus Deponie (stationärer Zustand) 1 : 10.000
3.3	Notfallszenario mit Förder- und Schluckbrunnen 1 : 10.000
3.4	Lage neu zu bauender GWM für Stufe 2 1 : 5.000

UNTERLAGENVERZEICHNIS

Folgende Unterlagen wurden ausgewertet und fanden in der Beurteilung der Ergebnisse Verwendung:

Allgemein zugängliche Unterlagen

[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

Gutachten und Untersuchungsergebnisse

[4] Igi Niedermeyer (1988): Deponie Fort Hartmann (Az. 87171), Bericht über die hydrogeologischen und chemischen Untersuchungen sowie Vorschläge zur Sanierung (Textteil)

[5] Igi Niedermeyer (1989): Deponie Fort Hartmann (Az. 88205), Bericht über die ergänzenden hydrogeologischen und chemischen Untersuchungen zur Erstellung einer Sanierungsplanung, Nachgang I zum Gutachten Az. 87171 vom April 1988 (Textteil)

[6] Schichtprofile der Bohrungen B1-B13, GMa- GMe, B1a, B1b

[7] IFUWA (2004): Deponie Fort Hartmann, Grundwasseruntersuchungen, Jahresbericht 2003

[8] IFUWA (2005): Deponie Fort Hartmann, Grundwasseruntersuchungen, Jahresbericht 2004

[9] Dr. Paul Radlinger (2007): Deponie Fort Hartmann, Stilllegung der Grundwassermessstelle B1-alt, vergleichende Grundwasseruntersuchungen an B1a und B1b, Textteil

[10] Isarconsult (2008): Auszug aus dem Grundwassermodell, Lastfall A01- Mittelwasserverhältnisse (Plan-Nr. 29)

[11] Auszüge aus dem Digitalen Geländemodell der Stadt Ingolstadt

[12] Auszüge aus der GW-Base-Datenbank der Ingolstädter Kommunalbetriebe E-VS (U. Arauner) mit Messstellen-Stammdaten, Grundwasserstände und Analysedaten aus den Untersuchungen der vergangenen Jahre (Zeitraum 1985 bis 05/2012), Niederschlagsdaten WTD61 Flughafen Manching, 842PWM1, 709PWM1, Oberflächenwasserstände

[13] U. Arauner (IN-KB), Skizze der Entwässerungseinrichtungen der Deponie Fort Hartmann, Stand 20.4.2011

[14] Shape-Dateien mit Flurstücken aus der digitalen Stadtgrundkarte der Stadt Ingolstadt

[15] RBK Dr.Richter Berger Kasper, Beratende Geowissenschaftler BDG, Deponie Fort Hartmann, Wertung der Grundwasseruntersuchungen im Zeitraum 1985 bis 2008 und Ableitung von weiteren Maßnahmen, 7.1.2009

[16] RBK Dr.Richter Berger Kasper, Beratende Geowissenschaftler BDG, Deponie Fort Hartmann, Konzeption von zwei neuen Grundwassermessstellen und Erweiterung des Grundwassermonitoringprogramms hinsichtlich der Überwachung von Deponien der DK0, 21.4.2010

[17] RBK Dr.Richter Berger Kasper, Beratende Geowissenschaftler BDG, Deponie Fort Hartmann, Jahresbericht Grund- und Sickerwasserüberwachung 2010, 20. April 2011

[18] RBK Dr.Richter Berger Kasper, Beratende Geowissenschaftler BDG, Deponie Fort Hartmann, Jahresbericht Grund- und Sickerwasserüberwachung 2011, 5. Juli 2012

Bewertungsgrundlagen und Regelwerke

[19] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2001): Merkblatt Nr. 3.8/1, Untersuchung und Bewertung von Altlasten, schädlichen Bodenveränderungen und Gewässerverunreinigungen – Wirkungspfad Boden-Gewässer –

[20] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2004): Merkblatt Nr. 3.8/3, Natürliche Schadstoffminderung bei Grundwasserverunreinigungen durch Altlasten und schädliche Bodenveränderungen – Natural Attenuation -

[21] LAWA (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser, Entwurf 30.9.2004

[22] LAWA/LABO (2006): Grundsätze des nachsorgenden Grundwasserschutzes bei punktuellen Schadstoffquellen

[23] LAWA/LABO (2000): Abgrenzung zwischen Bundes-Bodenschutzgesetz und Wasserrecht

[24] LAWA/LABO (2005) Abgrenzung zwischen Bundes-Bodenschutzgesetz und Wasserrecht (2. Teil)

[25] Gesetz zum Schutz des Bodens, BBodSchG, vom 17.3.1998

[26] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.7.1999

[27] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (TrinkwV 2001), 21.5.2001

1 VORGANG UND VERANLASSUNG

Die städtische Altdeponie Fort Hartmann ist seit 1985 Gegenstand altlastenspezifischer Untersuchungen. Über ein enges Grundwasser-Messstellennetz wurde eine Beeinflussung des Grundwasserchemismus im Abstrom der Deponie festgestellt. Bereits 1987 wurden erste Deponiesanierungskonzepte erarbeitet [4], die hinsichtlich der Deponiegasfassung sowie der Oberflächenabdichtung des Deponiekörpers umgesetzt wurden.

In 2009 wurden erstmalig alle bisherigen Grundwasseruntersuchungen im Umfeld der Deponie integrierend ausgewertet und hinsichtlich weiterer notwendiger Maßnahmen bewertet [15]. Dabei wurde festgestellt, dass die Altdeponie Fort Hartmann einen deponiebürtigen Einfluss auf den Grundwasserabstrom ausübt. So finden Aufsalzungen mit deponietypischen Ionen statt. Ebenfalls zeigen erhöhte Bor- und Arsenkonzentrationen im Abstrom zur Deponie die deutliche Deponiebeeinflussung des Grundwassers an.

Die bisherigen Ergebnisse der Grundwasserüberwachung lassen darauf schließen, dass insbesondere die Arsen-Verunreinigung sehr wahrscheinlich einem schadstoffmindernden Prozess unterworfen ist. In einem Besprechungstermin am 22.1.2013 wurde seitens der Fachbehörden festgestellt, dass das Prozessverständnis der Schadstoffminderung noch nicht hinreichend genau ermittelt ist und damit ein Variantenvergleich mit möglichen anderen technischen Sanierungsverfahren noch nicht durchführbar ist. Es wurde daher festgelegt, die möglichen Schadstoffabbauprozesse detailliert zu untersuchen und anschließend mittels eines Variantenvergleichs neutral zu bewerten, um die optimale Maßnahme zur Behandlung der Arsen-Kontamination festlegen zu können. Dabei soll die im Merkblatt 3.8/3 des Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft [20] genannte Vorgehensweise zur Erkundung der natürlichen Abbauprozessen angewendet werden (MNA-Konzept).

Um Planungssicherheit für das geplante Baugebiet östlich der Deponie Fort Hartmann hinsichtlich einer möglichen Arsen-Beeinflussung schnell zu erhalten soll im Vorfeld der Festlegung der geeignetsten Sanierungs- oder MNA-Maßnahme ein Notfallszenario entwickelt werden, wie das Baugebiet effektiv vor einer Arsenbelastung zu sichern ist.

Aus diesen Aufgabenstellungen ergibt sich ein siebenstufiger Arbeitsablauf:

Stufe 1: Einrichtung eines numerischen GW-Strömungsmodells und Planung eines Notfallszenarios

Stufe 2: Qualitative Abschätzung des Schadstoffminderungspotenzials (Phase I des MNA-Konzeptes nach LfU-Merkblatt 3.8/3

Stufe 3: Quantitative Bestimmung des Schadstoffminderungsprozesses (Phase II des MNA-Konzeptes nach LfU-Merkblatt 3.8/3

Stufe 4: Modellparameterermittlung und numerische Transportmodellierung (Phase III des MNA-Konzeptes nach LfU-Merkblatt 3.8/3

Stufe 5: Variantenvergleich zwischen technischen Sanierungsmethoden und MNA

Stufe 6: Maßnahmenplanung (Entwurfs-, Genehmigungs- und Ausführungsplanung)

Stufe 7: Umsetzung der Maßnahme

Auf der Grundlage unseres Angebot vom 5.2.2013 wurde wir von den Ingolstädter Kommunalbetriebe mit Schreiben vom 13.3.2013 mit der Bearbeitung des MNA-Konzeptes und der Ausarbeitung eines Notfallszenarios beauftragt.

Der hier vorgelegte Bericht erläutert und bewertet die Ergebnisse der Arbeitsstufe 1.

2 GEOGRAFISCHE UND TOPOGRAFISCHE LAGE

Die Deponie Fort Hartmann befindet sich im Westen von Ingolstadt ca. 1,5 km westlich von Friedrichshofen und 1 km nordöstlich von Gerolfing auf einer topografischen Höhe von etwa 380 m üNN (**Anlage 1.1**). Die Deponie überragt mit etwa 20 m das umliegende Gelände.

Die nächstgelegenen Oberflächengewässer sind die Schutter, der Moos- und der Torfgraben, die nur ca. 150 – 200 m am Südwestrand der Deponie nach Südosten hin in Richtung Donau entwässern. Die Donau selbst liegt ca. 6 km südlich der Deponie.

3 BESCHREIBUNG DES AUFBAUS DER DEPONIE

Die heutige Deponiefläche befindet sich im Bereich eines Forts aus dem 19.ten Jahrhundert. Nachdem dieses nach dem 2. Weltkrieg gesprengt wurde, begann 1958 auf den Grundmauern und den Fundamentresten die Einlagerung bzw. Aufschüttung von Hausmüll. Die Hausmülleinlagerung endete im Jahr 1978. Danach diente die Deponie als Not- und Ausfalldeponie der Stadt Ingolstadt. Seit 1984 wird auf dem Gelände nur noch inerte Materialien wie Bauschutt und Erdaushub abgelagert. Die Höhe der Anschüttung ist bis 410 m über NN genehmigt.

Aufgrund ihres Alters verfügt die Deponie über keine Basisabdichtung. Im Rahmen der Altlastenuntersuchung wurden 1988 und 1989 zahlreiche Grundwassermessstellen und Gaspegel im Bereich des Müllkörpers errichtet [4] und [5]. Dabei wurde festgestellt, dass bereichsweise die Hausmüllablagerungen direkt dem Grundwasserkörper auflagern oder sogar bereichsweise in ihn hineinreichen. Aus den Daten in [4] konnten die in Anlage 1.4 dargestellten Bereiche, in denen Müll im Grundwasser oder Grundwasserschwankungsbereich nachgewiesen bzw. vermutet wurde, abgegrenzt werden. Diese Bereiche sind in [15] dokumentiert.

Zur Eindämmung des Sickerwasseranfalls wurde die Deponie mit einer Oberflächenabdichtung versehen. Diese Arbeiten wurden 1997 abgeschlossen. Aufgrund der schon stattgefundenen Ansiedlung des Kleingartengeländes konnte nicht die gesamte Deponie abgedeckt werden. So blieben neben dem Kleingartengelände auch die steilen Böschungen nach Osten hin ohne qualifizierte Abdichtung. Das aufgebrachte Abdichtungssystem im Zentralbereich entspricht den Vorgaben der TA Siedlungsabfall. Auf der Oberflächenabdichtung wird das Oberflächenwasser über Randdränagen gefasst und nach Norden in einen Muldenspeicher geleitet. Von dort aus wird dieses Regenwasser dem Vorfluter Moosgraben zugeführt. In den übrigen Bereichen wird das Oberflächenwasser in Randgräben gesammelt und abgeleitet (Westbereich), bzw. an Ort und Stelle versickert (Entlang der Ochsenmühlstraße im Ostrand der Deponie). Das Oberflächenwasser im Bereich der Kleingartensiedlung wird ebenfalls nicht gefasst sondern kann frei versickern.

4 GEOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHE SITUATION

Die Erkenntnisse der geologischen Situation im Deponiebereich stammen aus den in den Jahren 1988-1989 durchgeführten Untersuchungen, die in [4] und [5] dokumentiert sind. Insgesamt wurden damals 18 Grundwassermessstellen und 40 Gaspegel errichtet. Zu den Untersuchungen wurden zudem sechs vorhandene Gartenbrunnen und 2 Hausbrunnen mit einbezogen. Im Jahr 2007 wurde die Grundwassermessstelle B1 rückgebaut und stattdessen in unmittelbarer Nachbarschaft zwei neue Messstellen, die in unterschiedlichen Tiefen verfiltert wurden, errichtet (B1a und B1b) [9].

4.1 Geologischer Überblick

Geologisch liegt die Deponie am Südwestrand der durch das Tal der Schutter teilweise ausgeräumten mittelpleistozänen (risseiszeitlichen) Hochterrasse der Donau. Das Tal der Schutter (Alluvium der Bachtäler) ist mit holozänen also nacheiszeitlichen Aue-Ablagerungen (Moorbildungen und Schwemmsedimente) gefüllt. Die Mächtigkeit liegt im Umfeld der Deponie bei ca. 4 bis 7 m.

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].

4.2 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 2.1) zeigt eine östlich der Deponiefläche Nord-Süd 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.

Das Rinnentiefste wurde in B12 mit der Quartär-Tertiärgrenze bei 366 m NN erbohrt. Innerhalb der Rinne sind die pleistozänen Füllungen ungefähr 4 bis 5 m mächtiger ausgebildet als außerhalb der Rinne.

Im Bereich der Deponieaufstandsfläche steigt die Quartär-Tertiärgrenze weit nach oben und liegt im Süden sogar über dem Grundwasserspiegel. So wurde stellenweise Hausmüll direkt auf tertiären Ablagerungen liegend erbohrt [5]. Beispiele hierfür sind MPG 29, MPG 32, MPG 32, MPG 38 und MPG 42. Anhand des erbohrten Bodens konnte damals nicht entschieden werden, ob die tertiären Schichten tatsächlich autochthonen Ursprungs sind oder ob es sich um umgelagertes Material handelt [5].

Es spricht jedoch einiges dafür, dass die tertiäre Aufwölbung im Bereich der Deponie eine zeugenbergartige Struktur in der Hochterrasse darstellt, ähnlich dem nahe gelegenen Dachsberg. (Gerade diese Struktur könnte wegen der leichten Erhöhung gegenüber der Umgebung, zum Bau des Forts im 19.ten Jahrhundert prädestiniert gewesen sein.)

Aufgrund dieses Reliefs der Quartärbasis sind die grundwassererfüllten Mächtigkeiten sehr unterschiedlich. Innerhalb der Rinnen liegen bis zu 9 m Aquifermächtigkeit vor, wohingegen auf dem Plateau zwischen Deponie und Friedrichshofen diese bereichsweise unter einem Meter liegen kann. Im gesamten südlichen Deponiebereich befindet sich der Grundwasserspiegel im Tertiär, so dass das Quartär hier grundwasserfrei ist, bzw. gar nicht vorhanden ist.

Im Westen und Süden der Deponie 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. Die Grundwassermessstellen B8 und GMe liegen im Bereich der alluvialen Bachablagerung.

Die Tabelle 1 listet die kf-Werte auf, wie sie über Kurzpumpversuche im Anschluss an den Bau der Grundwassermessstellen ermittelt wurden. Es ist anzumerken, dass die Grundwassermessstellen nicht immer horizontbezogen ausgebaut wurden, sondern in einigen Fällen, die Filterstrecke sowohl das Quartär als auch das unterlagernde Tertiär erfasst. In diesen Messstellen lieferten die Kurzpumpversuche einen integralen kf-Wert über beide Aquiferbereiche.

Tab. 1: Über Kurzpumpversuche ermittelte kf-Werte im Anschluss an den GWM-Bau aus [5].

1.Nr.	2. Nr.	Wert	Einheit
193	B 1	0.750	10-4 m/s
194	B 2	3.800	10-4 m/s
195	B 3	0.180	10-4 m/s
196	B 4	8.700	10-4 m/s
197	B 5	1.200	10-4 m/s
198	B 6	0.410	10-4 m/s
199	B 7	1.400	10-4 m/s
200	B 8	0.720	10-4 m/s
201	B 9	8.000	10-4 m/s
202	B 10	1.600	10-4 m/s
203	B 11	7.400	10-4 m/s
204	B 12	11.000	10-4 m/s
205	B 13	11.000	10-4 m/s
210	GMa	4.900	10-4 m/s
211	GMb	2.500	10-4 m/s
212	GMc	6.800	10-4 m/s
213	GMd	15.000	10-4 m/s
214	GMe	1.100	10-4 m/s

Die Tabelle 2 differenziert zwischen den verschiedenen Ausbauarten der Grundwassermessstellen und listet den gemittelten kf-Wert für die jeweilige Messstellengruppe auf.

Die Kiese und Sande der pleistozänen Hochterrasse (Donauschotter) haben im Mittel einen kf-Wert von 7,1 x 10^{-4} m/s und damit eine 24fach höhere Durchlässigkeit als die darunter liegenden Sande des Tertiärs. Diese haben einen mittleren kf-Wert von 3 x 10^{-5} m/s. Die Lockergesteine der Talaue weisen im Mittelwert noch einen kf-Wert von 9 x 10^{-5} m/s auf und sind somit 3 mal durchlässiger als das Tertiär, jedoch 8fach geringer durchlässig als die Donauschotter.

Die Messstellen, die in beiden Aquiferbereichen (Tertiär und Donauschotter) verfiltert sind, haben einen mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von 4,5 x 10^{-4} m/s und liegen damit nur wenig unter dem mittleren kf-Wert der Donauschotter.

Tab. 2: Gemittelte kf-Werte in Abhängigkeit zur Filterlage. Die zu Grunde liegenden Einzelwerte wurden durch Kurzpumpersuche ermittelt und sind in [5] dokumentiert

Filterlage in geologischer Einheit	Repräsentative Messstellen	Mittlerer Kf-Wert m/s
Pleistozäne Hochterrasse (Donauschotter)	B4; B9, B10, B11; B12; B13; GM b, GM c	7,1 x 10^{-4}
Tertiär (Flinzsande)	B3, B6	0,3 x 10^{-4}
Hochterrasse und Tertiär	B1, B2; B5, B7, GM d, GM a	4,5 x 10^{-4}
Holozäne Bachablagerungen	B8 (Torf), GM e	0,9 x 10^{-4}

Aus der räumlichen Analyse der kf-Wert-Verteilung wird deutlich, dass zwar im Bereich der Quartärrinne die Durchlässigkeiten sehr hoch sind, jedoch innerhalb der Hochterrasse auch außerhalb der Rinne sehr durchlässige Lockersedimente anstehen (GMd, GMc) und sich daher die Rinnenstruktur in der kf-Wert-Verteilung nach Osten hin nicht durchpaust. Nach Westen hin zeigt sich allerdings der weniger durchlässige Bereich der Tertiären Gesteine, denen die Deponie weitestgehend aufliegt.

Aus den Schichtenverzeichnisse der Grundwassermessstellen in [4] und [5] wird deutlich, dass innerhalb der Flinzsande (Tertiär) in unterschiedlicher Mächtigkeit Schluff- und Tonlagen eingelagert sind. Innerhalb dieser bindigen Schichtglieder liegt die Durchlässigkeit noch weit unter dem in Tabelle 1 angegebenen Wert. In [4] wurden mittels Durchlässigkeitsversuche nach DIN 18130 für die tertiären Tone und Schluffe Werte zwischen $7x10^{-11}$ und 5 x 10^{-8} m/s ermittelt. Sandige Schluffe des Tertiärs lagen zwischen 1,3 $x10^{-8}$ und 3,5 x 10^{-7} m/s.

Eine Stockwerkstrennung können diese bindigen, wenig bis undurchlässigen Schichtglieder jedoch nicht bewirken, da sie lateral und vertikal nicht durchhalten und damit über weite Bereiche ein vertikaler Austausch des Grundwassers stattfinden kann.

Aufgrund dieser bindigen Schichtglieder kann davon ausgegangen werden, dass insgesamt die Gebirgsdurchlässigkeit des Tertiärs noch unter den aus den Messstellen ermittelten kf-Werte liegt. Das Hauptgrundwassergeschehen läuft daher in den Kiesen und Sanden der Donauschotter, insbesondere in den mächtigen Quartärrinnen ab. 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 gebildete Grundwasser fließt in die jungen holozänen Bachablagerungen der Schutter ab und tritt im Moosgraben, der in das Grundwasservorkommen einschneidet, zu tage. Damit stellt der Moosgraben die Vorflut des Grundwasservorkommen dar und trennt es hydraulisch in einen nördlichen und einen südlichen Teil. 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 influente Verhältnisse führen und Oberflächenwasser in den Grundwasserkörper abgeben. Der Moosgraben entwässert nach Südosten und mündet in die Donau.

4.3 Hydraulische Verhältnisse

Zur Verifizierung der hydraulischen Verhältnisse wurde von der Vermessungsabteilung der Stadt Ingolstadt in 2008 die der Deponie umliegenden GWM neu nivelliert.

Da keine baulichen Veränderung an den Messstellen vorgenommen wurde, kann davon ausgegangen werden, dass sich bei den ermittelten Höhendifferenzen um frühere Messfehler handelte. Insbesondere am Südrand der Deponie gelegenen Messstellen B3 und B5 zeigen große Abweichungen gegenüber den alten Höhen. Der relative Fehler zwischen diesen beiden Messstellen beträgt 1,06 m. Die übrigen Differenzen liegen im Bereich von +- 10 cm.

Werden die neuen Messpunkthöhen auch bei den vergangenen Wasserstandsmessungen zu Grunde gelegt, so ergeben sich plausible Strömungsbilder, was mit den alten Messpunkthöhen insbesondere im Süden der Deponie aufgrund der falschen Messpunkthöhen nicht der Fall war.

Die Grundwasserhydraulik stellt sich wie folgt dar:

Im Anstrom zur Deponie fließt das Grundwasser vom Nordosten kommend in Richtung Süd-Südwesten ab. Dabei schiebt sich die tertiäre Aufwölbung im Bereich der Deponie 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, in Deponienähe auch südöstliche Richtung und folgt damit dem Verlauf der Rinne innerhalb der Hochterrasse.

Diese keilartige Aufspaltung des Grundwasserstroms führt dazu, dass im nördlichen Bereich der Deponiefläche, dort, wo die weniger durchlässigen Flinzsande noch mit geringmächtigen Donauschottern überlagert sind, ein zweigeteilten Abstrom vorhanden ist: nämlich nach Südosten und Südwesten.

Im Südbereich der Deponie, jenseits der Tertiäraufwölbung herrscht eine Süd-Süd-Ost gerichtete Grundwasserströmung.

Von der Grundwassermessstelle B10 (202) im Norden der Deponie liegen seit 1986 nahezu lückenlose Grundwasserstände vor. Die Zeitreihe zeigt eine charakteristischen Jahresgang mit Frühjahrshoch- und Herbst/Winter Tiefstständen (Abbildung 1). Insgesamt ist der maximale Schwankungsbereich 2,38 m. Den bisher höchsten GW-Stand (HHW) wurde im März 1988 bei 377,60 m NN, den bisher niedrigsten Grundwasserstand (NNW) im November 1997 mit 375,22 m NN gemessen.

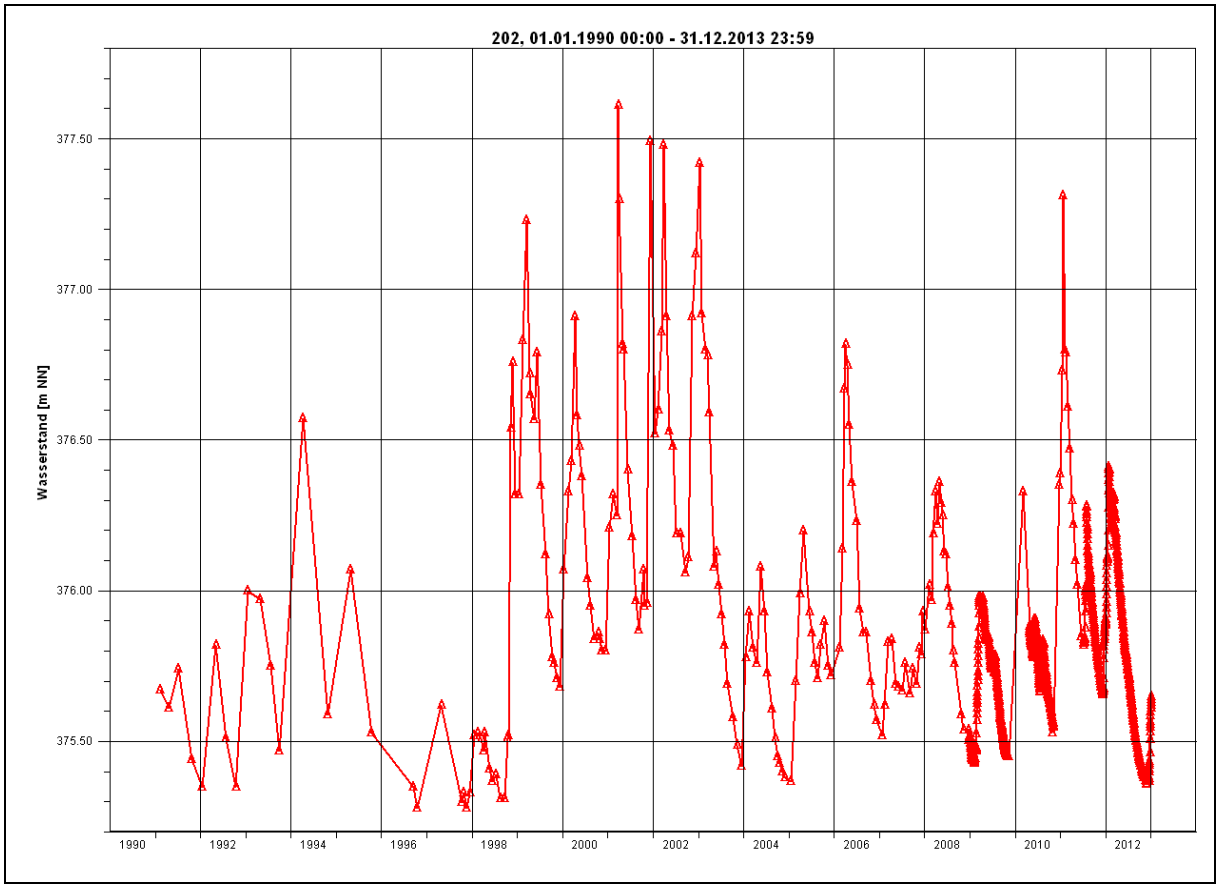


Abb. 1: Grundwasserganglinie B10 (202)

Die übrigen Grundwassermessstellen zeigen mit ca. 1,20 bis ca. 1,90 m geringere Schwankungsbreiten. Auffällig ist, dass die Grundwassermessstellen B8 (200) und GMe (214), die in der holozänen Talfüllungen verfiltert sind, signifikant geringere Grundwasserschwankungen aufzeigen (Tabelle 3).

Alle Messstellen zeigen unabhängig von ihrer Lage zur Deponie einen ausgeprägten jahreszeitlichen Gang, mit Hochwasserständen im Frühjahr und Niedrigwasserständen im Herbst. Ebenso zeigen alle Messstellen 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 Niederschlagsmengen gesteuert sind.

Tab. 3: Anzahl der Grundwassermessungen und Schwankungsbreiten der Messstellen im Untersuchungsgebiet, absteigend sortiert nach Schwankungsbreiten (Stand 2008) aus [15]

MS-Nr	Bezeichnung	Anzahl Messungen	Messbeginn	Messende	GW-Schwankung [m]
1343	**GB 1**	114	Jul. 85	Okt. 98	2,55
202	**B 10**	207	Okt. 87	Sep. 08	2,38
203	**B 11**	80	Okt. 87	Okt. 03	2,19
196	**B 4**	125	Okt. 85	Mrz. 03	2,17
197	**B 5**	116	Okt. 85	Okt. 03	2,01
205	**B 13**	80	Okt. 87	Mrz. 03	1,97
204	**B 12**	71	Okt. 87	Okt. 03	1,96
193	**B 1**	622	Jul. 85	Jun. 06	1,90
199	**B 7**	133	Okt. 85	Mrz. 03	1,87
213	**GMd**	51	Jan. 89	Okt. 03	1,85
990	**B 1**	9	Sep. 96	Mrz. 99	1,81
201	**B 9**	65	Okt. 87	Mrz. 03	1,79
212	**GMc**	35	Jan. 89	Okt. 03	1,72
1347	**GB 5**	103	Jul. 85	Okt. 94	1,68
210	**GMa**	35	Jan. 89	Okt. 03	1,68
61	**KP 3**	159	Jan. 89	Feb. 03	1,65
1344	**GB 2**	87	Jul. 85	Feb. 89	1,64
194	**B 2**	120	Aug. 85	Okt. 01	1,62
1346	**GB 4**	92	Jul. 85	Feb. 89	1,55
70	**KP 17**	145	Apr. 89	Jan. 03	1,55
211	**GMb**	36	Jan. 89	Okt. 03	1,54
1345	**GB 3**	92	Jul. 85	Feb. 89	1,52
1046	**B 16 (EZ)**	23	Jan. 93	Apr. 01	1,50
198	**B 6**	120	Okt. 85	Mrz. 03	1,40
195	**B 3**	121	Jul. 85	Mrz. 03	1,23
62	**KP 1**	535	Okt. 88	Jan. 98	1,13
1329		84	Sep. 96	Jul. 97	1,07
200	**B 8**	76	Okt. 87	Okt. 03	0,95
1328		84	Sep. 96	Jul. 97	0,94
214	**GMe**	36	Jan. 89	Okt. 03	0,90
3013	**B 1a**	16	Okt. 06	Mrz. 08	0,90
1349	**HB**	92	Jul. 85	Feb. 89	0,68
391	**B 4**	14	Mrz. 88	Mrz. 97	0,50

Mit Hilfe des Gradienten der Grundwasseroberfläche, abzulesen in den Grundwassergleichenplänen in [15] und den abgeschätzten effektiven Porenanteilen lässt sich die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwasserstroms wie folgt abschätzen (Tabelle 4):

Tab. 4: Mittlere Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers in den einzelnen geologischen Einheiten, v_a=(kf x i)/p (i=Gradient der GW-Oberfläche, p=effektiver Porenanteil)

Geologische Einheit	Gradient aus Isohypsenplan i	Kf-Wert m/s	Abgeschätze Porosiät p	Abstands-geschwindigkeit v_a
Pleistozäne Hochterrasse (Donauschotter)	0,00033 (B11 –B12) 0,0014 (B4-GMa)	$7,1 \times 10^{-4}$	0,25	29 m/a 124 m/a
Tertiär (Flinzsande)	0,00033 (B11 –B12) 0,0014 (B4-GMa)	$0,3 \times 10^{-4}$	0,20	1,5 m/a 6,6 m/a
Holozäne Bachablagerung	0,0045	$0,9 \times 10^{-4}$	0,2	63 m/a

Die Gradientenermittlung ist wegen der Rinnenstruktur im Bereich der Hochterrasse schwierig und kann für die verschiedenen Bereiche (außerhalb, innerhalb der Rinne und im Bereich der holozänen Bachablagerung) daher nur grob abgeschätzt werden. Entsprechend sind die berechneten Werte nur als Abschätzung der Größenordnung zu sehen. Innerhalb der Rinne ist der Gradient wesentlich flacher, bedingt durch die größere Mächtigkeit der Schichten und des gröberen Materials in der Rinne. Die seitlichen Zuströme zur Rinne bilden dagegen einen steileren Gradienten. Im Mittel ist jedoch entlang der Rinne von einer Abstandsgeschwindigkeit in der Größenordnung von ca. 100 m/a, in Teilbereichen auch deutlich darunter, auszugehen. In den Tertiärsanden dagegen liegt die Abstandsgeschwindigkeit wegen der erniedrigten Durchlässigkeit ca. 20fach darunter. Hier sind wenige Meter pro Jahr anzusetzen. In der holozänen Bachablagerung (Talaue der Schutter) ist von einer mittleren Abstandsgeschwindigkeit von ca. 50 bis 60 m Jahr auszugehen.

5 NUMERISCHES GRUNDWASSERSTRÖMUNGSMODELL

Bei einem numerischen Grundwasserströmungsmodell werden mit Hilfe mathematischer Methoden die Wasserspiegelhöhen bzw. Wasserdrücke für eine endliche Anzahl von Raumpunkten bzw. Gitterkörper 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 hydraulischen 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 Festpotenzialränder, Flusszellen oder General Head Boundaries, oder durch einen zeitlichen konstanten Zu- oder Abfluss definiert werden, wie Grundwasserneubildung und Evapotranspiration. Randbedingungen können zeitlich variieren.

Innere Modellparameter bestimmen die Modelleigenschaften (engl. Properties) und sind die Durchlässigkeit bzw. der hydraulische Widerstand und die spezifischen Speicherkoeffizienten. Modellparameter 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 Wasserstand 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 be-

rechnete Ergebnis die generelle beobachtete Situation wider, so kann das Modell als kalibriert gelten.

Eine Validierung des Modell 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.

5.1 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.

5.2 Modelleinrichtung

Das Modellgebiet ist in Anlage 2.1 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 64 Spalten und 90 Reihen, was 5760 Zellen entspricht. Die Zellgröße liegt im Deponiebereich bei 25 x 25 m und im äußeren Bereich bei 50 x 50 m.

Als Schichtbasis wurde das Interpolationsergebnis der Quartärbasis übernommen. Die Tiefenlage der Schicht 1 ist in Anlage 2.2. dargestellt.

Die Randbedingungen sind in Anlage 2.3 kartografisch dokumentiert. Es wurden folgende Bedingungen festgelegt:

Nordrand: Undurchlässiger Rand

Westrand: Undurchlässiger Rand

Ostrand: Undurchlässiger Rand

Südrand: Östlicher Teil: Festpotentialrand

Flusszellen: Entlang des Moosgrabens. Die Wasserspiegelhöhen wurden der Datenbank des IN-KB 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 4 Zonen mit unterschiedlicher Grundwasserneubildung festgelegt.

Zone 1 (in Anlage 2.3 alle transparenten Zellen) im Mittel 300 mm/a

Zone 2: im Mittel 100 mm/a, verminderte GW-Neubildung im Bereich der Bebauung Friedrichshofen

Zone 3: Bereich der Deponie-Oberflächenabdichtung im Mittel 20 mm/a

Zone 4: Westlicher Deponiebereich ohne qualifizierte Abdichtung im Mittel 50 mm/a

Die Verteilung des GW-Neubildungszonen sowie deren Zufluss sind teilweise Ergebnisse der Kalibrierung (siehe unten).

5.3 Modellparameter

Insgesamt wurden vier Zonen unterschiedlicher kf-Werte definiert. Die Zonen orientieren sich an dem bisherigen Kenntnisstand der kf-Wert-Verteilung wie in [15] dargestellt.

Zone 1: Hochterrasse mit mittlerem kf-Wert

Zone 2: Hochterrasse mit höherem kf-Wert

Zone 3: Talaue entlang Schuttertal bzw. Moosgraben

Zone 4: Flinzsande und Schluffe im Bereich der Deponie

Die einzelnen kf-Werte sind Ergebnisse der Modellkalibrierung und werden unten erläutert. Die variieren von denen über Kurzpumpversuch ermittelten Einzelwerten der Grundwassermessstellen.

5.4 Modellkalibrierung

Die Modellparameter (kf-Werte uns spezifische Speicherkoeffizienten) sowie die GW-Neubildungshöhen wurden über eine Kalibrierung des Modells ermittelt. Die Lage der

Parameter- und Grundwasserneubildungszonen blieben dabei unverändert Hierzu wurde am instationären Modell die beobachtete Grundwasserganglinie der Messstellen 202 (B10) zwischen November 2011 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 ist, 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.

Die in Abbildung 1 dargestellte Übereinstimmung zwischen den beobachteten und berechneten Wasserständen wurden mit den nachfolgend aufgelisteten Parametern erzielt (Tabellen 5 und 6). Siehe hierzu auch die Anlage 2.4 in der die kf-Wert-Verteilung kartografisch dargestellt ist.

Tab. 5: Auflistung der kalibrierten Modellparameter und Grundwasserneubildungsraten

Zonen wie in Anlage 2.4	Zuordnung Gesteinseinheit	Kf-Wert x-Richtung	Kf-Wert y-Richtung	Kf-Wert z-Richtung	Spezifischer Speicherkoeffizient (Porenraum)
Zone 1	Donauschotter Hochterrasse	2E-3 m/s	2E-3 m/s	5E-4 m/s	0,18
Zone 2	Donauschotter erhöhte Durchlässigkeitsbereiche	5E-3 m/s	5E-3 m/s	5E-4 m/s	0,18
Zone 3	Talauen	5,1E-4 m/s	5.1E-4 m/s	5.1E-5 m/s	0,08
Zone 4	Flinzsande und Schluffe	8E-6 m/s	8E-6 m/s	1E-6 m/s	0,04

Tab. 6: Grundwasserneubildungsrate als Kalibrierungsergebnis

GW-Neubildung bis Datum in mm/a	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
01.11.10	300	150	20	50
20.01.11	1900	950	40	100
15.07.11	0	0	0	0
30.07.11	2300	1150	60	100
01.12.11	0	0	0	0
01.01.20	300	150	20	50

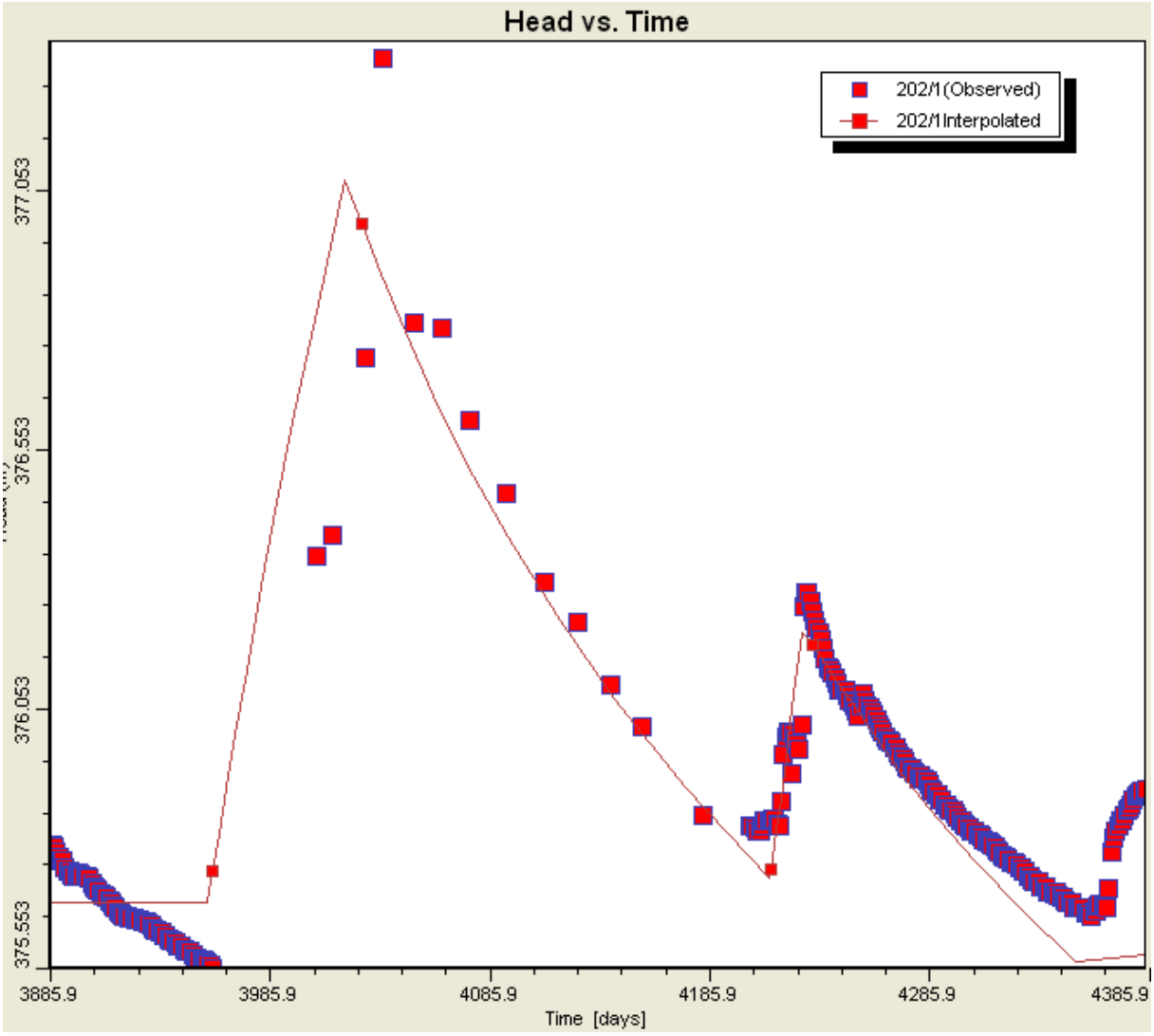


Abb. 2: Vergleich gemessene und berechnete GW-Stände an der Messstelle B10 (202) nach Kalibrierung

Die Grundwasserneubildungsraten des ersten und letzten Zeitschrittes entsprechen dabei den langjährigen Mittelwerten. Für den nicht bebauten Bereich des Modellgebiets sind dies 300 mm/a und damit etwa 1/3 des Jahresniederschlags. Dies ist bei dem relativ flachen Gelände mit landwirtschaftlicher Nutzung ein realistischer Wert. Zum Erreichen des Wasserstandsmaximums im Januar 2011 ist eine GW-Neubildungsrate von 1.900 mm/a über 80 Tage notwendig. Dies entspricht einer Jahresrate von 416 mm/a. Zusätzlich fand in 2011 in der 2. Julihälfte eine weitere GW-Neubildung mit einer Rate von 2.300 m/a über ca. 15 Tage statt, was weitere 94 mm/a zur Jahresneubildung beitrug. Insgesamt belief sich die GW-Neubildung durch Niederschlag im Bereich der unbebauten Landwirtschaftsflächen für das Kalenderjahr 2011 damit auf ca. 460 mm/a.

Auch dies ist ein realistischer Wert angesichts des festgestellten langjährigen GW-Standsmaximums am Anfang des Jahres 2011.

Diese ermittelten kf-Werte und mittleren GW-Neubildungsraten wurden im Anschluss unter stationär Bedingungen mit den Stichtagsmessungen für Januar 2013 verglichen. Nachfolgende Abbildung 2 zeigt die Korrelation von gemessenen und berechneten Werten. Insgesamt werden Wasserstände von 23 GW-Messstellen herangezogen.

Die Korrelation beträgt 98,3%, die Standardabweichung beträgt 14,5 cm (siehe Abbildung 2).

Das Histogramm der Dfferenzwerte zwischen Messung und Berechnung ist in der Abbildung 3 dargestellt. Der Mittelwert der berechneten Werte liegt ca. 1 cm unter den der beobachteten (gemessenen).

Anlage 3.1 zeigt den aus der Berechnung interpolierte Grundwassergleichenplan und stellt diesen zusammen mit dem Stichtagsplan vom Januar 2013 dar.

Die größten Abweichungen zeigen die Messstellen 3470 östlich der Deponie und 3645 in Friedrichshofen, welche 50 bis 60 cm von der Messung abweichen. Eine Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Messwerten kann für diese Messstellen auch bei großer Variation der Parameter nicht erreicht werden, ohne dass die übrigen 23 Messwerte zu sehr von den Messwerten abweichen.

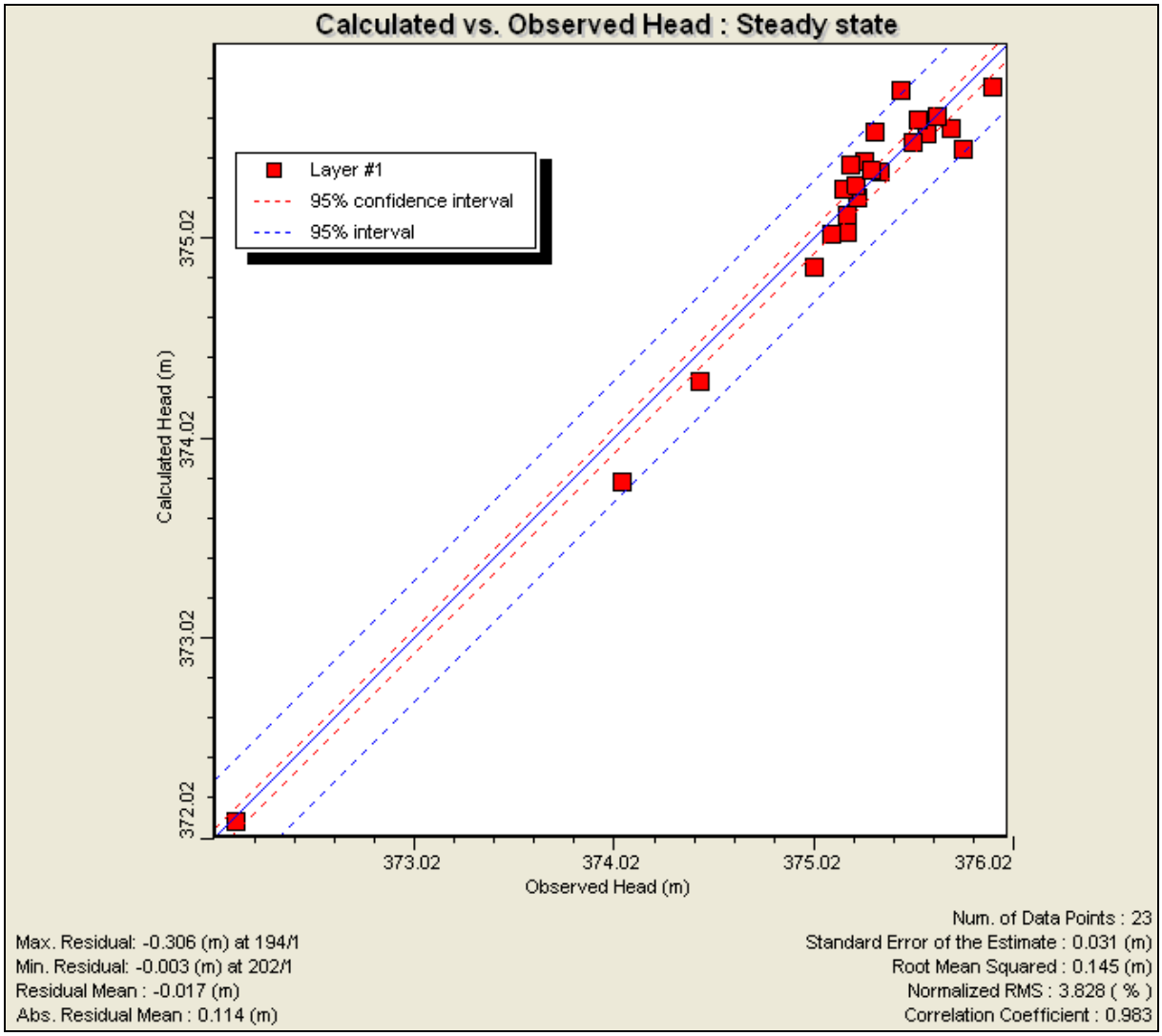


Abb. 3: Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserständen für den stationären Zustand für Januar 2013

Das Grundwasserströmungsmodell zeigt mit den gewählten Parametern und Randbedingungen eine gute Übereinstimmung mit den beobachteten hydraulischen Bedingungen und gibt das Strömungsfeld hinreichend genau wieder. Ebenfalls kann bei 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 als hinreichend kalibriert angesehen werden kann.

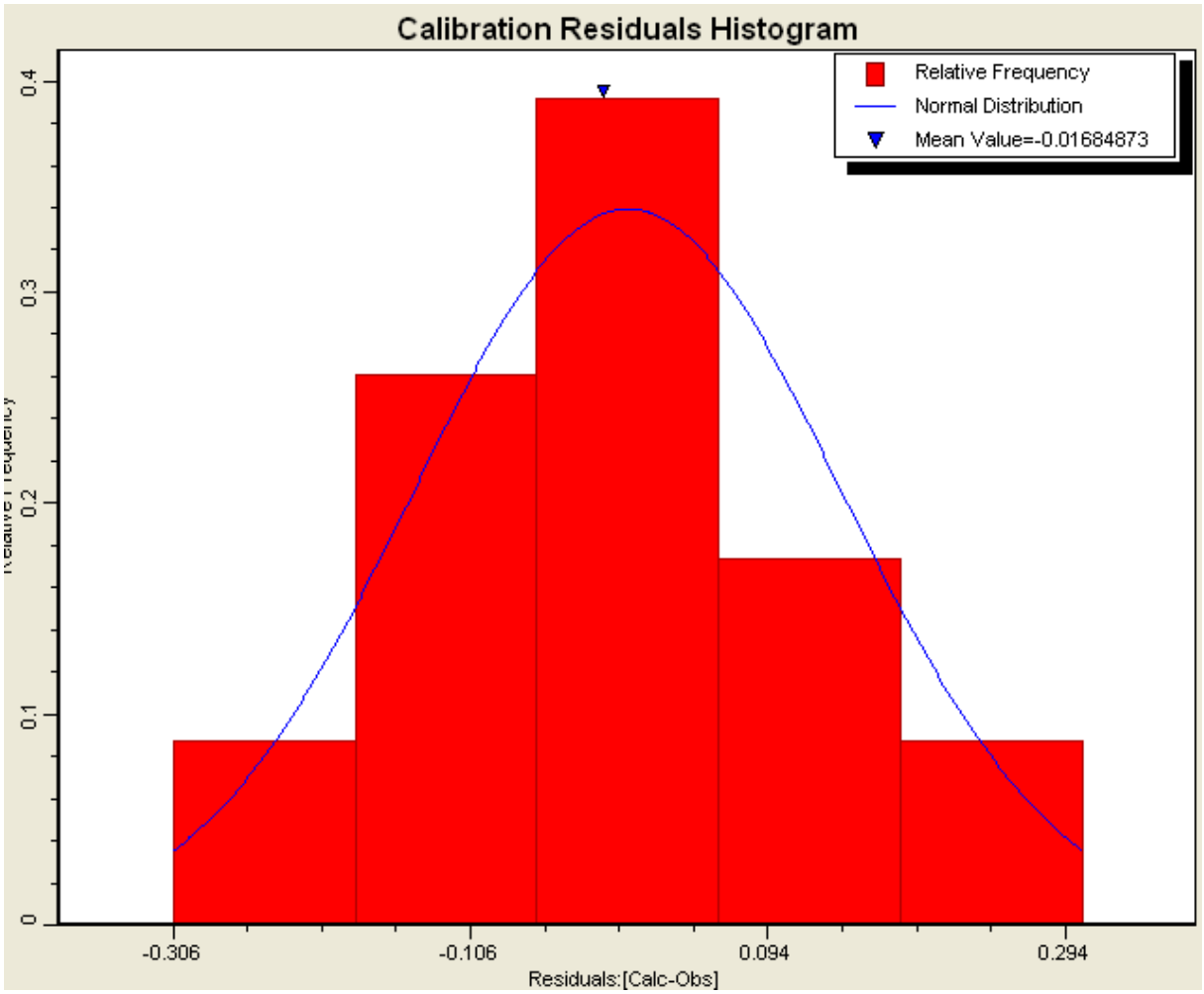


Abb. 4: Histogramm der Differenz zwischen Messwert und berechneten Wert für das kalibrierte Modell

5.5 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 anderseits 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 diese 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.

5.6 Wasserbilanz

Das kalibrierte Modell hat folgende Wasserbilanz:

Ränder	**Zufluss m³/d**	**Abfluss m³/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.

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 hiermit ebenfalls plausible und realitätsnahe Größen.

6 AUSWERTUNGEN

Mit dem kalibrierten Strömungsmodell lassen sich Stromlinien berechnen. Hierzu wird das dem Potenzialfeld aufgesetzte Programm ModPath von U.S.Geological Survey eingesetzt. Dieses Programm berechnet die Stromlinien entsprechend den berechneten hydraulischen Gradienten zwischen den einzelnen Zellen. Wahlweise können beliebig viele Ausgangs- bzw. Endpunkte der Strömungsfäden bestimmt werden.

Für die Entwicklung eines Notfallszenarios werden Ausgangspunkte von Stromlinien entlang der Deponieumrandung gesetzt. Dadurch ist gewährleistet, dass von der Deponie abströmendes Grundwasser vollständig räumlich erfasst wird.

In Anlage 3.2 ist dies so berechnete Strömungsbild dokumentiert. Es wird deutlich, dass das aus dem Deponiebereich austretende Grundwasser auf direktem Wege zur Vorflut Moosgraben strömt. Im Ostbereich der Deponie, dort wo Arsenbelastungen bekannt sind, fließt das Grundwasser entlang der Deponiegrenze innerhalb der Rinne nach Süden und fächert dann nach Übertritt in die Sedimente der Talauen auf. Zur westlichen Grenze der geplanten Bebauungsgebiete liegen zwischen dem äußersten möglichen Strömungsfaden noch ca. 100 m Abstand.

Wie im Kapitel „Sensitivitätsanalyse“ erläutert, gelingt es nicht, auch noch ein so ungünstigen Fall zu konstruieren, dass Stromfäden die Baugebiete streifen oder durchschneiden. Einziger jedoch nicht der Realität entsprechender Fall, wäre, dass die Vorflut unwirksam ist. Dann würde der östliche Abstrom der Deponie die Baugebiete durchziehen.

Da ein Stofftransport nicht nur dem hier betrachteten advektiven Transport, sondern auch Diffusions- und Dispersionsprozessen unterworfen ist, die auch senkrecht zur Strömungsrichtung wirken, könnte im ungünstigsten Fall ein geringer Stofftransport, der

seinen Ursprung im nördlichsten Deponiebereich hat, die Westgrenzen der Baugebiete erreichen.

Für dieses worst-case-Szenario wird im Folgenden eine hydraulische Abwehrmaßnahme (Notfallszenario) konzipiert.

7 NOTFALLSZENARIO

In Anlage 3.3 sind die Stromlinien für eine Notmaßnahme dargestellt, das geeignet ist eine mögliche jedoch sehr unwahrscheinliche Beeinflussung der westlichen Bereiche der geplanten Bebauungsgebiete sicher von einer deponiebürtigen Grundwasserbelastung zu schützen.

Dieses Notfallszenario sieht vor:

1. Errichtung eines Förderbrunnens ca. 100 m nördlich von B1a, östlich der Ochsenmühlstraße
2. Errichtung eines Schluckbrunnens neben B11
3. Förderung von 15 m³/h, Abreinigung des Grundwassers mittels Reinigungsanlage und Wiederversickerung des gereinigten Grundwassers in den Schluckbrunnen

Im Unterschied zur Anlage 3.2 wurden weitere Stromlinien mit Startpunkt nördlich der Deponie berechnet um eine gewisse Sicherheitszone zu erhalten und die quer zur Strömrichtung wirkenden Transportvorgänge Dispersion und Diffusion mit zu berücksichtigen. Es wird deutlich, dass durch den Förderbrunnen alle nördlich gelegenen Deponiebereiche vollständig erfasst werden und durch die Versickerung des Grundwassers bewirkt wird, dass das weiter südlich austretenden Grundwasser näher zum Deponierand gedrückt und damit den Sicherheitsabstand zu den Bebauungsgebieten vergrößert wird.

Diese Maßnahme könnte innerhalb von 3 Monaten nach Feststellung von deren Notwendigkeit umgesetzt werden. Eine Notwendigkeit könnte dann eintreten, wenn in de Messstelle GMc (212) Arsen über der Geringfügigkeitsschwelle gemessen wird.

8 KONZEPTION DER STUFE 2 DES MNA-KONZEPTS

Die Stufe 2 des MNA-Konzeptes sieht die qualitative Abschätzung des Schadstoffminderungspotentials vor. Dies entspricht der Phase I des MNA-Konzeptes nach LfU-Merkblatt 3.8/3.

Ergänzend zu den in den vergangenen Jahren bereits durchgeführten Untersuchungen und Auswertungen sind in diesem Schritt noch folgende Untersuchungen notwendig.

1. Verdichtung des GW-Messnetzes im Quartär mittels fünf weiteren Grundwassermessstellen. Dies dient einerseits zur Errichtung von Bilanzebenen für den Schadstofftransport und anderseits zur Gewinnung von Bodenproben (Aquifermaterial) an dem die Sorption und Fällreaktionen des Schadstoffs Arsen abgeschätzt werden können.
2. Bau einer GW-Messstelle im Tertiär zur Abschätzung von möglichen Tieferverlagerungen von Arsen
3. Untersuchung des Aquifermaterials auf sein Sorptionsvermögens und seiner Kationen-Austausch-Kapazität
4. Untersuchung des Aquifermaterials zur Abschätzung der Schadstoffmobilität und zum Nachweis von gefälltem Arsen am Bodenkorn
5. Vertiefende Grundwasseruntersuchungen an den Grundwassermessstellen zur Bestimmung von Redoxzonen und auf Hinweise von ablaufenden Fällreaktionen

Zur Gewinnung von Bodenmaterial im Aquifer sind beim Bohrvorgang Sonderproben mittels Liner (Schlauchkernbohrungen) zu ziehen. Die Grundwassermessstellen sind in 4““ auszubauen und an den in Anlage 3.4 dokumentierten Stellen zu errichten.

An dem **Bodenmaterial** im Aquiferbereich (Sonderproben) sind folgende chemisch-physikalischen Untersuchungen durchzuführen:

- Bestimmung der Kornsummenkurve
- Bestimmung des Glühverlustes
- Bestimmung des Karbonat-Anteils
- Bestimmung der Potenziellen und effektiven Kationen-Austausch-Kapazität

- Bestimmung der kaltoxalatlölichen und heißoxalatlöslichen bzw. dithionitlöslichen Eisenoxide
- Bestimmung von Arsen im Bodeneluat und im Feststoff mittels Königswasseraufschluss

An den **Grundwasserproben** der Messstellen (B1a, B1b, B11, B12, B13, B7, B4, B14, B15, Neu-1 bis Neu-6) sind folgende Untersuchungen durchzuführen

- Vorortparamter mit Redoxpotential, Basisparameter
- Hydrogenkarbonat
- Sulfid
- Cu, Mn(II), Fe(II)
- Arsen bei Filtrierung mit 20nm, 450 nm und ungefiltert. (Ansäuerung erst nach Filtrierung)

Dieses Konzept sollte mit der Genehmigungs- und Fachbehörde abgestimmt werden. Erst danach sollte die Umsetzung erfolgen.

Bonn, 22. April 2013

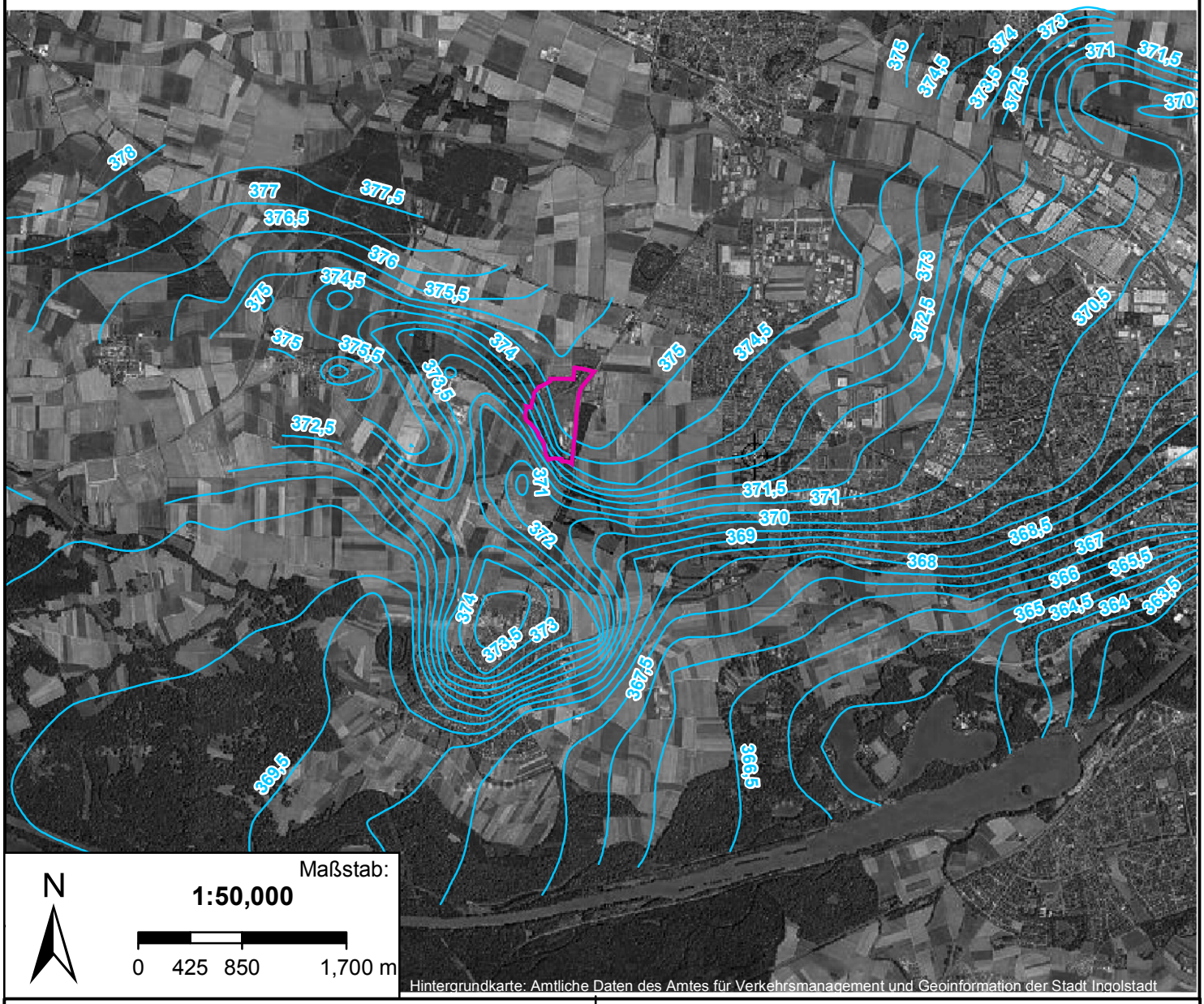
RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten - Grundwassermonitoring

Dipl.-Geol. Michael Kasper
Beratender Geowissenschaftler BDG

Legende

Deponie Fort Hartmann

GW-Höhengleichen Mittelwasser (Quelle: IN-KB)



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Übesichtskarte mit Lage der Deponie

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

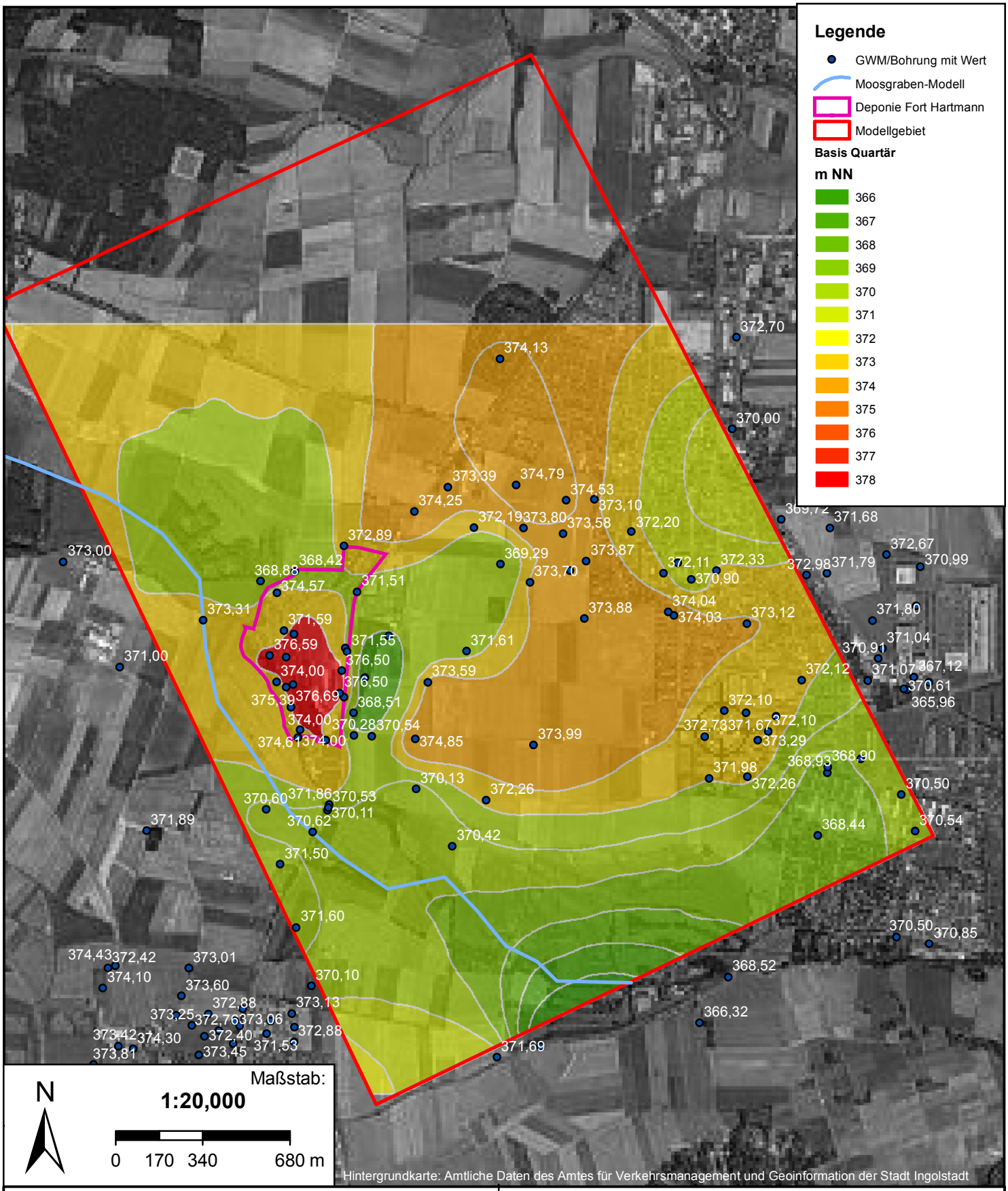
Kaiser-Karl-Ring 50
53119 Bonn
0228-85098327
www.rbk-bonn.de

22.4.2013

Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 1



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Isohypsenkarte Quartärbasis

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

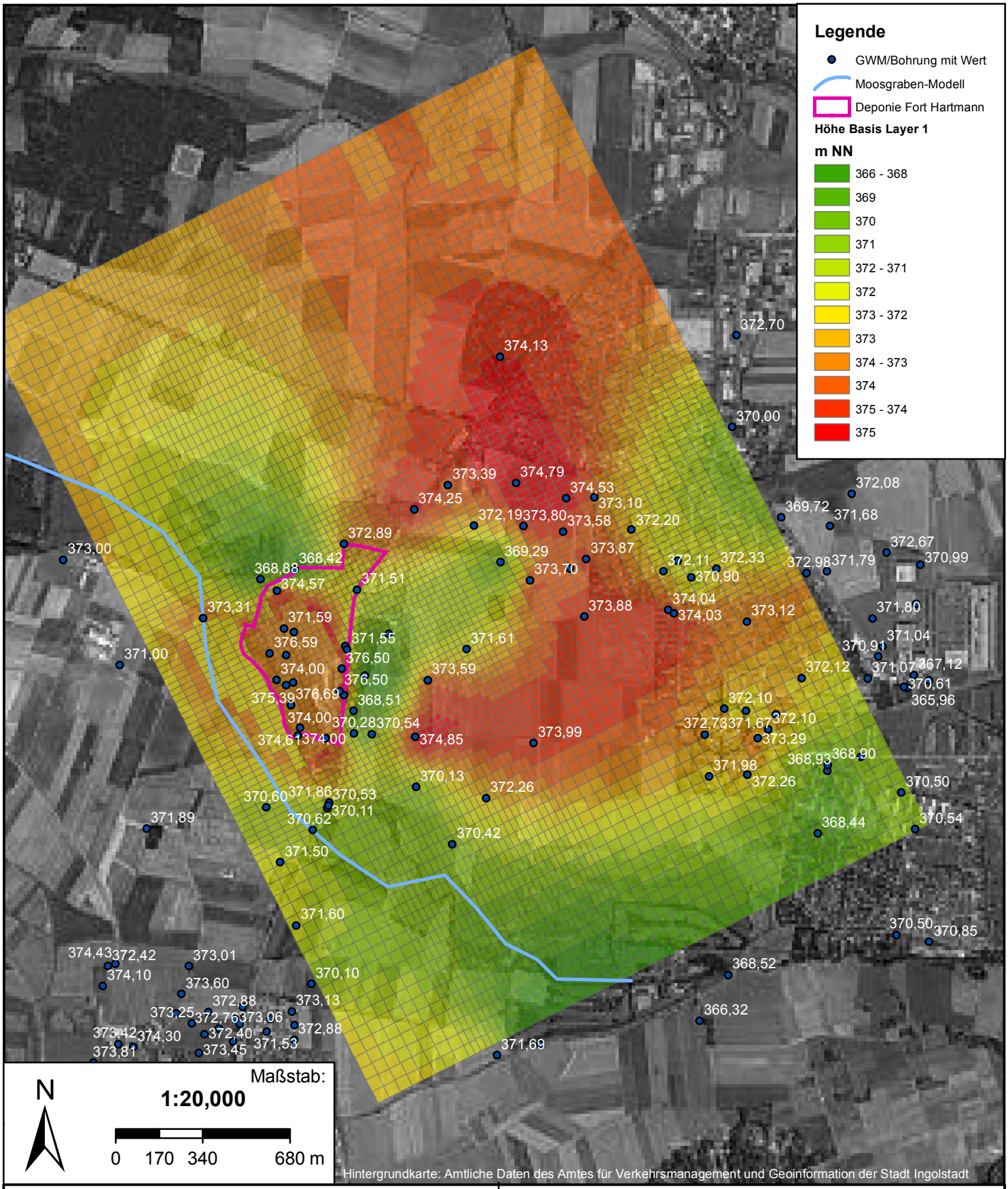
RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

22.4.2013
Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 2.1



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Höhe der Unterflächen der Modellzellen Layer 1

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

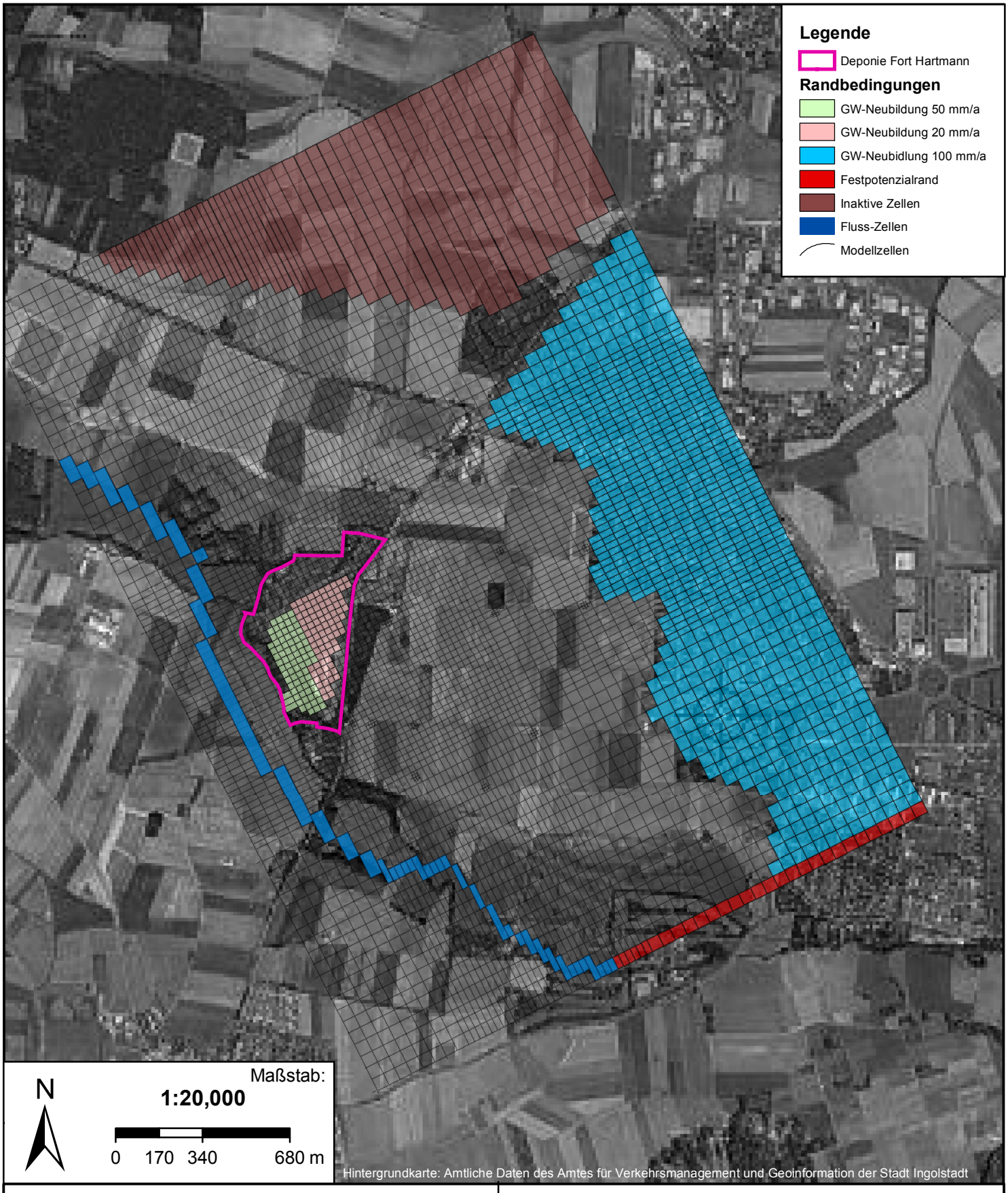
RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

22.4.2013
Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 2.2



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

Lage der Modellränder

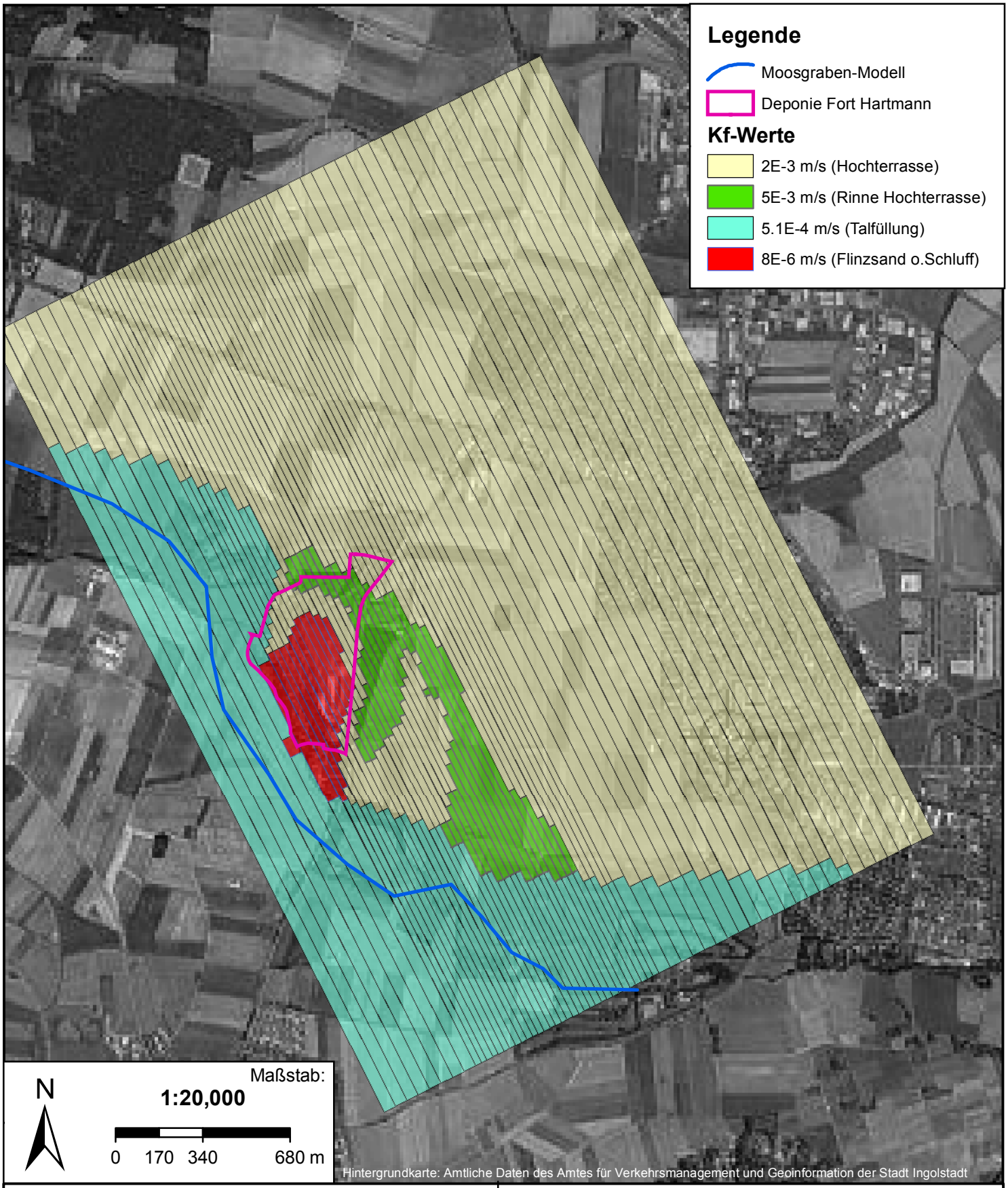
RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

22.4.2013
Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 2.3



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

Modellparameter

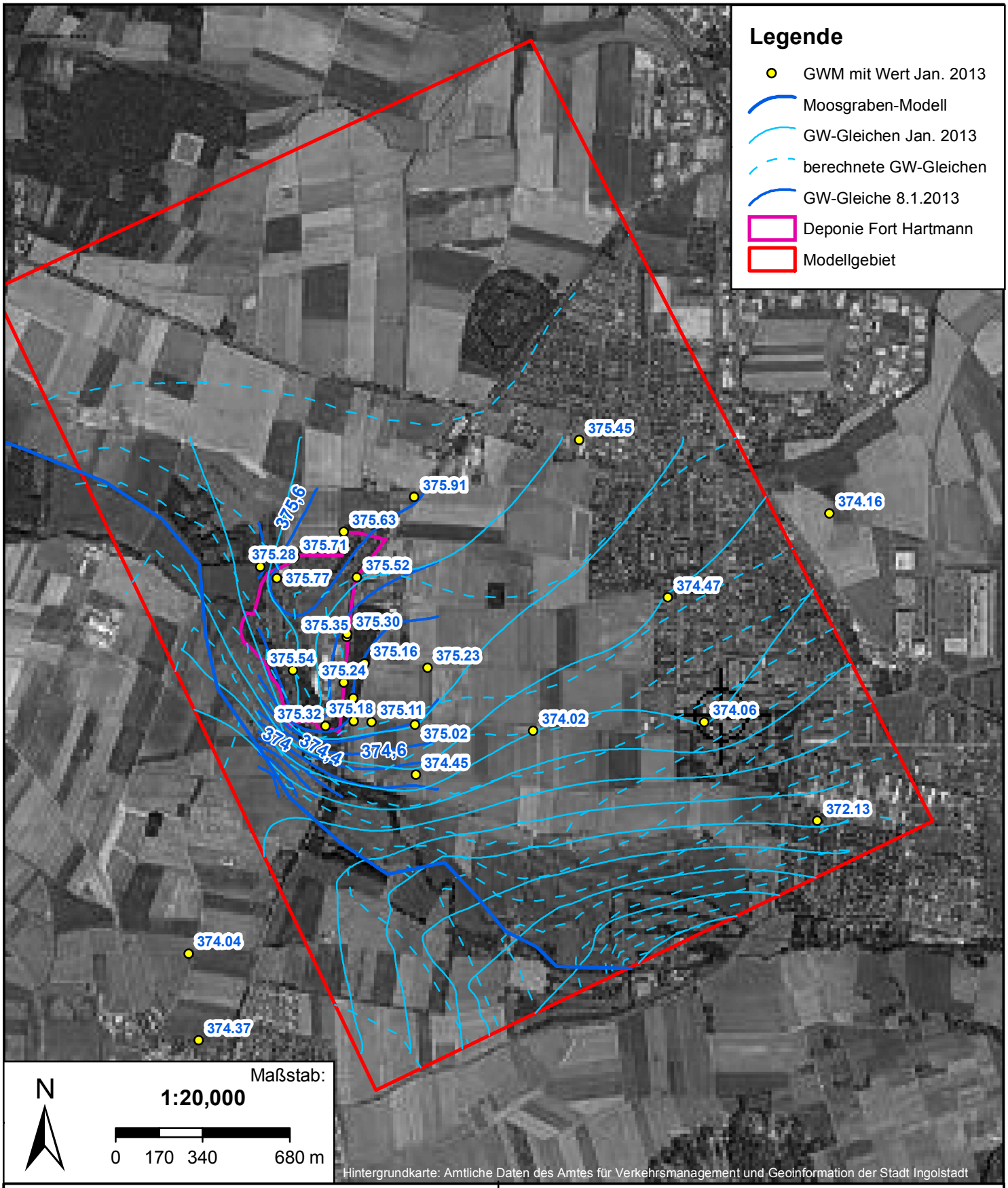
RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

22.4.2013
Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 2.4



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Vergleich berechnete und gemessene GW-Gleichen

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

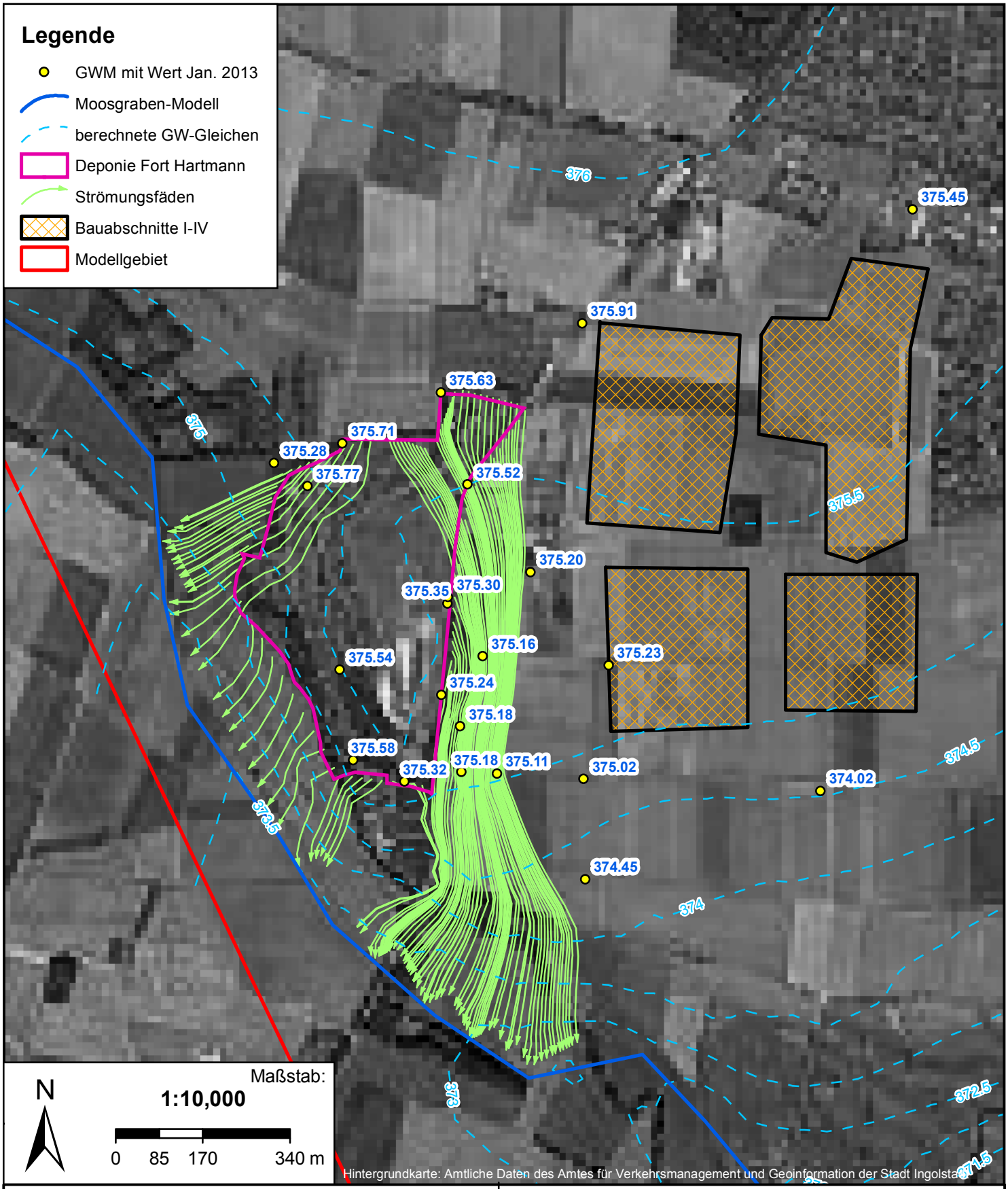
RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

22.4.2013
Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 3.1



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Berechnete Strömungsfäden aus der Deponie

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

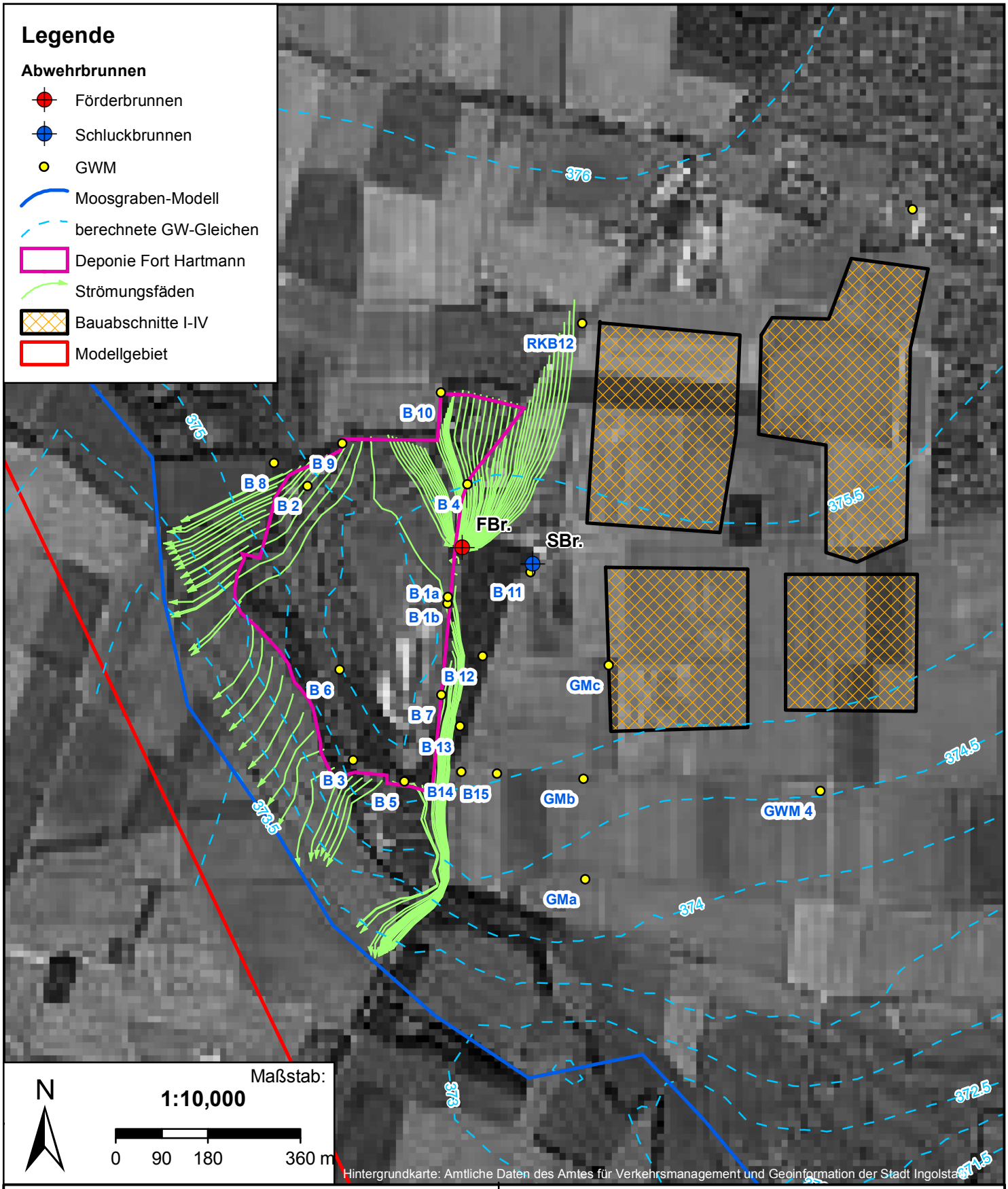
RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

22.4.2013
Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 3.2



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Notfallszenario mit Förder- und Schluckbrunnen

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

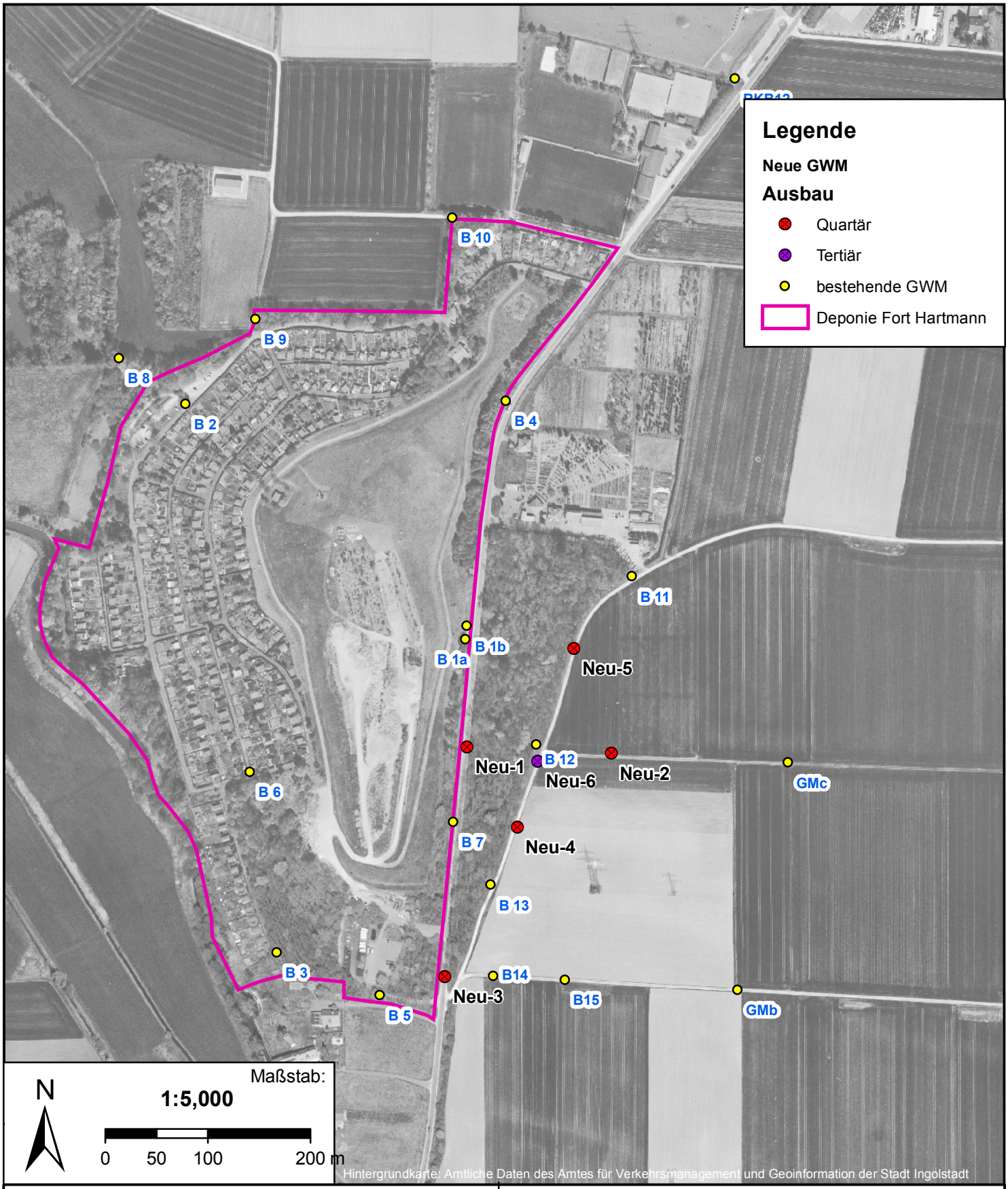
RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

22.4.2013
Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 3.3



Deponie Fort Hartmann:
MNA-Konzept Stufe 1

Lage neu zu bauender GWM für Stufe 2

Ingolstädter Kommunalbetriebe AöR
Hindemithstr. 32 85057 Ingolstadt

RBK GmbH
Hydrogeologische Gutachten
Grundwasser-Monitoring

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

22.4.2013
Projekt-Nr. 117.13.01

\177.13.01 Fort Hartmann MNA\Bericht\Stufe 1\Anlagen

Anlage: 3.4