

---

## **Grundwassermodell Wasserwerk Köln-Rondorf**

### **Bewirtschaftung Brunnen während Umgestaltung des Galgenbergsees**

Auftraggeber: M&P Ingenieurgesellschaft mbH  
Herr Dr. Margane  
Widdersdorfer Str. 190, 50825 Köln

Auftragnehmer: **IBGW GmbH**  
Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH  
Nonnenstraße 9  
04229 Leipzig

Projekt Nr.: 2019/0070

Bearbeiter: Dipl.-Hydrol. D. Kriegel (IBGW)  
Dipl.-Ing. A. Thom (IBGW)  
Prof. Dr.-Ing. H. Mansel (IBGW)  
(Sachverständiger für Montanhydrologie)  
Dipl.-Geogr. S. Hagenkamp (M&P Köln)

Leipzig, 30.04.2020



Prof. Dr. Ing. H. Mansel

Geschäftsführer IBGW

## Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Veranlassung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Beschreibung des Modellgebietes .....</b>	<b>6</b>
2.1 Hydrogeologie .....	6
2.2 Hydrologische Verhältnisse .....	6
2.3 Klima .....	7
2.4 Wassernutzungen .....	8
2.5 Schutzzone II .....	8
<b>3 Grundwasserströmungsmodell Köln-Rondorf .....</b>	<b>9</b>
3.1 Horizontaler und vertikaler Modellaufbau .....	9
3.2 Zeitliche Diskretisierung .....	10
3.3 Modellrandbedingungen .....	11
3.4 Berechnung der Strombahnen .....	13
<b>4 Ermittlung der Strombahnlinien bei reduzierter Brunnenfahrweise .....</b>	<b>14</b>
4.1 Zielstellung .....	14
4.1 Abschätzung der Grundwasserfließzeit auf Basis von Messwerten .....	14
4.2 Berechnung der Bahnlinien in Abhängigkeit des Förderregimes .....	17
<b>5 Zusammenfassung .....</b>	<b>21</b>
<b>Anlagen .....</b>	<b>22</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Langjährige Mittelwerte der Referenzperioden 1981-2010 der Köln Flughafen	8
Tabelle 2 - Parameter zur analytischen Lösung der Abstandsgeschwindigkeit	16

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich: Wasserstand Pegel-Rhein und Grundwasser (GWM70405311-rheinnah und GWM76533918-rheinfern)	7
Abbildung 2:	horizontale Modelldiskretisierung	10
Abbildung 3:	Überblick Variante 1	13
Abbildung 4:	Darstellung der Abstandsgeschwindigkeit $v_a$ in (m/d) für den IST-Zustand mit einer Förderrate von 15 Mio. m <sup>3</sup> /a im Umfeld der Brunnen und der Strombahnlinien der angesetzten Partikel mit zeitlicher Staffelung: Dunkelgrün – innerhalb 50 Tage, Magenta – innerhalb 51- 80 Tage, Violet – innerhalb 81- 200 Tage, Rot – innerhalb 201 -500 Tage; Blaue Linien – Isohypsen für mittlere Grundwasserströmungsverhältnisse; Hellgrün – Schutzzone II; gelb - Transekte	15
Abbildung 5:	Darstellung der minimalen Fließzeit bis zum Erreichen der Schutzzone II in Abhängigkeit von der Förderrate	18
Abbildung 6:	Darstellung der Strombahnlinien bei unterschiedlichen Förderraten: rot) 100% sowie rosa) 15%; farbige Punkte auf den Linien stellen die Position der jeweiligen Partikel nach orange - 50 Tagen, rot - 80 Tagen, magenta - 200 Tagen, violett - 365 Tagen dar; hellgrüne Linie: Schutzzone II; bei einer Förderrate von 15% kommt es bereits zu einem Durchbruch von Partikeln durch die Brunnengalerie	20

## Literaturverzeichnis

- [1] Grundwassermodell Rondorf Nordwest - Bebauungsgebiet Rondorf Nordwest: Variantenuntersuchung zur Seeverlegung / Verfüllung, Bericht, IBGW GmbH, Leipzig, 2019.
- [2] Deutscher Wetterdienst (2020): Bereitstellung von Tageswerten hydrometeorologischer und meteorologischer Messgrößen für die Station Köln-Bonn. – Berlin
- [3] DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996

- 
- [4] GLUGLA, G. (1969): Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden. In: Albrecht-Thaer-Archiv 13, S. 371-376
  - [5] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2019): Bereitstellung der mittleren Grundwasserneubildung des Zeitraums 1971-2000. - Recklinghausen
  - [6] RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, - Offenbach a. M.

## 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Es ist geplant, den Galgenbergsee durch bauliche Eingriffe auch im Grundwasserleiter morphologisch umzugestalten. Dafür wird aus derzeitiger Sicht eine Bauzeit kleiner 90 Tage veranschlagt.

Durch den Betreiber des Wasserwerkes Köln-Rondorf wurden Bedenken geäußert, dass biologische Wasserinhaltsstoffe des Seewassers und des Seesedimentes dabei mobilisiert werden und der Wasserfassung im Abstrom zufließen könnten. Vorsorglich wird deshalb eine teilweise Reduzierung der Förderraten einzelner Brunnen oder Fassungsstränge in Erwägung gezogen.

Da durch den reduzierten Betrieb der Fassung auch ein Durchbrechen der zusätzlich vorhandenen Schadstofffront (PFT) nördlich der Fassung nicht auszuschließen wäre, ist modellgestützt eine Szenarioanalyse vorgesehen, die eine Fahrweise der Brunnenanlage simuliert, bei der dies weitgehend ausgeschlossen werden kann.

Als Grundlage soll das im Zuge der Planungen erstellte Grundwasserströmungsmodell [1] dienen. Es ist nicht vorgesehen, ein Migrationsmodell (konservativer Ansatz) für den Transport der PFT-Schadstoffe aufzubauen.

Im ersten Arbeitsschritt ist der potentiell beeinflusste räumliche Bereich der Fassungsanlage auszugrenzen. Darauf aufbauend ist die Fließzeit (Abstandsgeschwindigkeit des Wassers) von der nördlichen Seekontur in Richtung Fassung zu berechnen und die 50 d - und 80 d – Isochrone auszuweisen.

Die technische Vorgabe der möglichen Brunnenfahrweise bzw. -steuerung wird durch den Betreiber vorgegeben. Durch Reduzierung der Förderleistung der entsprechenden Brunnen oder Brunnenstränge erfolgt die Berechnung der Strombahnen mit dem Grundwasserströmungsmodell. Mittels des Strombahnverfahrens sind die Randstromlinien und die Fließzeiten zwischen Galgenbergsee (Emittent) und Fassungszone auszuweisen. In Abhängigkeit des Förderregimes erfolgt der modellgestützte Nachweis, bei welcher Förderrate ein theoretischer Durchbruch von Wasserpartikeln durch den Fassungsstrang in Richtung Norden erfolgt.

## 2 Beschreibung des Modellgebietes

Das Modellgebiet liegt südlich der Stadt Köln und westlich des Rheins. Mit einer Gesamtfläche von ca. 70 km<sup>2</sup> dient es der Erfassung und Darstellung verschiedener Gebietszustände wie die hydraulische Wirkung einer Seeverlegung bzw. Verfüllung und die Abbildung der Interaktion Fluss-Grundwasser unter verschiedenen Abflussbedingungen im Rhein. Es umfasst im Süden die Kiesgruben Meschenich und Immendorf. Die östliche Grenze bildet der Verlauf des Rheins. Im Westen entspricht die Modellgrenze dem Verlauf der Eisenbahnstrecke Köln-Brühl.

### 2.1 Hydrogeologie

Im Untersuchungsgebiet ist ein Grundwasserstockwerk aus 2 Grundwasserleiterkomplexen anzutreffen. Der Grundwasserleiterkomplex 1 (Hauptgrundwasserleiter) bildet sich aus den kiesigen Ablagerungen der Nieder- und Mittelterrassen des Rheins. Daran schließen sich im Liegenden die tertiären Lockergesteinsablagerungen aus einer Wechselfolge von Sanden, Schluffen und Tonen mit Braunkohleeinschlüssen an.

Der tertiäre fein- bis mittelsandige Grundwasserleiterkomplex 2 wird nicht flächendeckend durch das mittelmiozäne Hauptflöz hydraulisch vom oberen Grundwasserstockwerk getrennt. Hydraulische Kopplungen beider Grundwasserleiterkomplexe bestehen in den Randbereichen der Nieder- und Mittelterrassen des Rheins sowie im Bereich des Rheinverlaufs.

Die hydraulischen Durchlässigkeiten ( $k_f$ -Wert) sind mit  $10^{-3}$  bis  $10^{-2}$  m/s als sehr durchlässig einzuschätzen. Die hydraulischen Durchlässigkeiten des unteren Stockwerks sind mit  $10^{-5}$  bis  $10^{-4}$  m/s als durchlässig bis gut durchlässig zu bewerten. Das Hauptflöz wirkt als Grundwasserstauer [1].

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurden folgende Daten recherchiert und ausgewertet:

- Hydrogeologische Karte von Nordrhein-Westfalen, Profilkarte, 1:25.000 - Blätter 5107 - Brühl, 5108 - Porz am Rhein, 5007 - Köln
- Isolinien der Quartärbasis
- Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1: 1.000.000 (GK1000)
- 3D-Modell von Nordrhein-Westfalen (10-fach überhöht)
- Geologische Bohrdaten.

### 2.2 Hydrologische Verhältnisse

Gebietsprägend ist der Flusslauf des Rheins, der das Untersuchungsgebiet von Süden nach Norden durchquert. Zwischen Rhein und Grundwasserleiter besteht ein nahezu vollkommener

hydraulischer Anschluss. Hauptsächlich liegen exfiltrierende Bedingungen vor, bei denen der Grundwasserleiter in den Rhein entlastet. Kurzzeitig hohe Rheinwasserstände bedingen eine Umkehr der Fließverhältnisse. Besonders in Rheinnähe liegt eine große Schwankungsbreite in den Grundwasserständen vor.

Exemplarisch stellt Abbildung 1 die Wechselwirkung zwischen Rhein und Grundwasserleiter dar. Während im Uferbereich die Grundwasserdynamik durch die Oberflächenwasserschwankungen bestimmt wird, kommt es mit zunehmender Entfernung zum Rhein zu einer Dämpfung und Phasenverschiebung der rheininduzierten Grundwasserschwankungen [1].

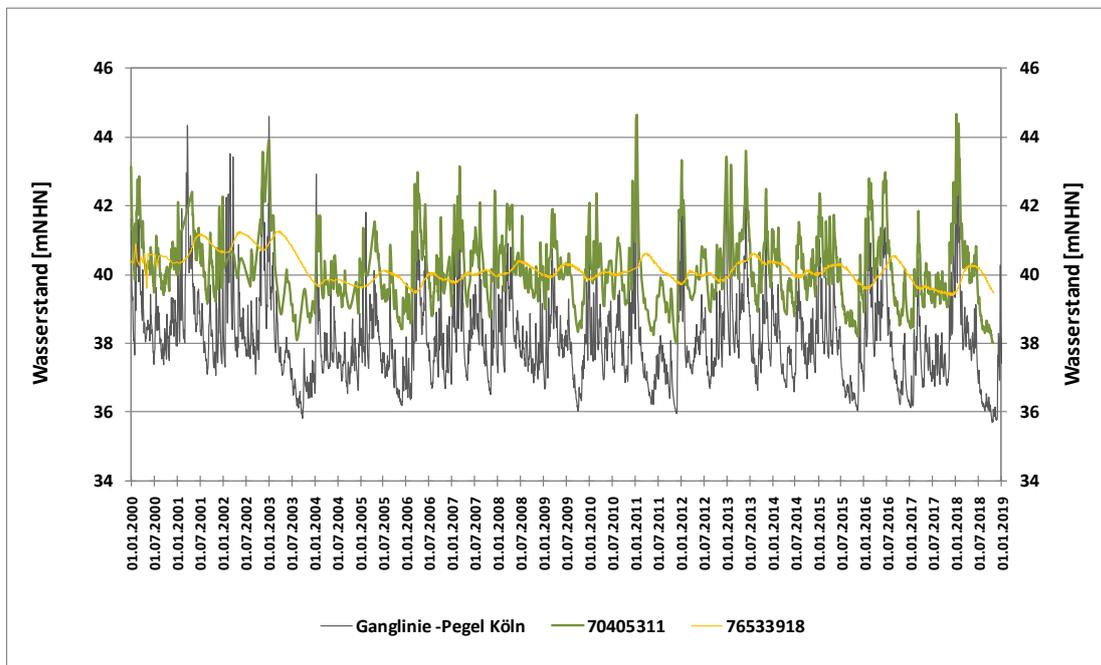


Abbildung 1: Vergleich: Wasserstand Pegel-Rhein und Grundwasser (GWM70405311-rheinnah und GWM76533918-rheinferrn)

## 2.3 Klima

Das Modellgebiet befindet sich im Übergangsbereich von einer maritim beeinflussten zu einer kontinental beeinflussten gemäßigten Klimazone. Für die klimatische Charakterisierung des Modellgebietes wurden langjährige Messreihen 1961-2019 als Tageswerte der Klimastation Flughafen Köln-Bonn des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. Mit den Parametern Lufttemperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer können aus den Messreihen klimatische Aussagen abgeleitet werden. Der DWD stellt nach der WMO-Richtlinie (World Meteorological Organisation) 30-jährige Messreihen zur Verfügung. Tabelle 1 stellt die Referenzperioden 1981-2010 dar.

**Tabelle 1: Langjährige Mittelwerte der Referenzperioden 1981-2010 der Köln Flughafen**

	<b>1981-2010</b>
<b>Lufttemperatur [°C]<sup>1</sup></b>	10,3
<b>Niederschlag [mm/a]<sup>1</sup> (<i>unkorrigiert</i>)</b>	839
<b>Sonnenscheindauer [h]<sup>1</sup></b>	1563

Die Korrektur des Niederschlages erfolgte nach dem Verfahren von Richter (1995). Die Berechnung der Grasreferenzverdunstung erfolgte auf Grundlage der Messgrößen Tagesmitteltemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit nach DVWK (2002).

## **2.4 Wassernutzungen**

Bei der Bezirksregierung Köln wurden die eingetragenen Wasserrechte für das Modellgebiet angefragt. Folgende Wasserrechte wurden berücksichtigt.

- Förderbrunnen Shell AG
- Förderbrunnen Basell Polyolefine GmbH
- Förderbrunnen Sanierungsbrunnen Immendorf

Die RheinEnergie AG stellte die Informationen zu monatlichen Entnahmemengen an den Förderbrunnen der Wasserwerke Hochkirchen und weißer Bogen im Zeitraum 2000-2019 zur Verfügung.

## **2.5 Schutzzone II**

Die Schutzzone II reicht definitionsgemäß von der Zone I bis zu einer Linie, von der aus Grundwasser noch mindestens 50 Tage bis zur Wasserefassung fließt. Diese Mindestverweildauer soll einen Abbau von mikrobiologischen Verunreinigungen und den Schutz vor sonstigen gefährlichen Beeinträchtigungen (z. B. erneute Verkeimung) gewährleisten. Die behördlich bestätigte Schutzzone II liegt nördlich der geplanten Seeverlegung entlang der Bundesautobahn BAB 4 (siehe Kapitel 4.1 Abbildung 4).

### 3 Grundwasserströmungsmodell Köln-Rondorf

#### 3.1 Horizontaler und vertikaler Modellaufbau

Der Aufbau des hydrogeologischen Strukturmodells, als Grundlage für die numerische Berechnung der Grundwasserströmung, erfolgte mit dem Programmsystem GMS (Groundwater Modeling System) von AQUAVEO™. Das Strukturmodell bildet die hydrogeologischen Verhältnisse zum aktuellen Zeitpunkt ab.

Das Modell besitzt ein **Grundraster von 50 m Kantenlänge**. Im Bereich von Rondorf wird das Raster verfeinert durch die Modellupen 1 und 2 auf Kantenlängen von 25 m bzw. 12,5 m (Abbildung 2). Die horizontale Ausdehnung des Strukturmodells folgt der Ausdehnung des Grundwasserströmungsmodells. Der vertikale Aufbau ist durch die Nutzungs- bzw. Beeinflussungskriterien definiert und beinhaltet die im Modellgebiet anzutreffenden strömungsrelevanten geologischen Einheiten.

Die **vertikale Modellstruktur** des Grundwassermodells „Rondorf Nordwest“ berücksichtigt 6 Modellgrundwasserleiter (MGWL).

Die vertikalen Gliederungsebenen werden im Folgenden mit „Modellgrundwasserleiter“ (MGWL) bezeichnet, gleichgültig ob es sich um einen Grundwasserleiter im klassischen Sinn oder einen sogenannten Grundwassergeringleiter oder -Stauer handelt. Die hydraulischen Eigenschaften des jeweiligen MGWL werden durch seine Parameter definiert. Die Aufstellung der Kopplungsmatrix im numerischen Modell PCGEOFIM® erfolgt in horizontaler Richtung entlang der Verbreitung der MGWL. Die vertikale Kopplung ergibt sich aufgrund der Bedingung, dass die Liegendhöhe eines MGWL gleich der Hangendhöhe eines (tiefer) folgenden MGWL ist.

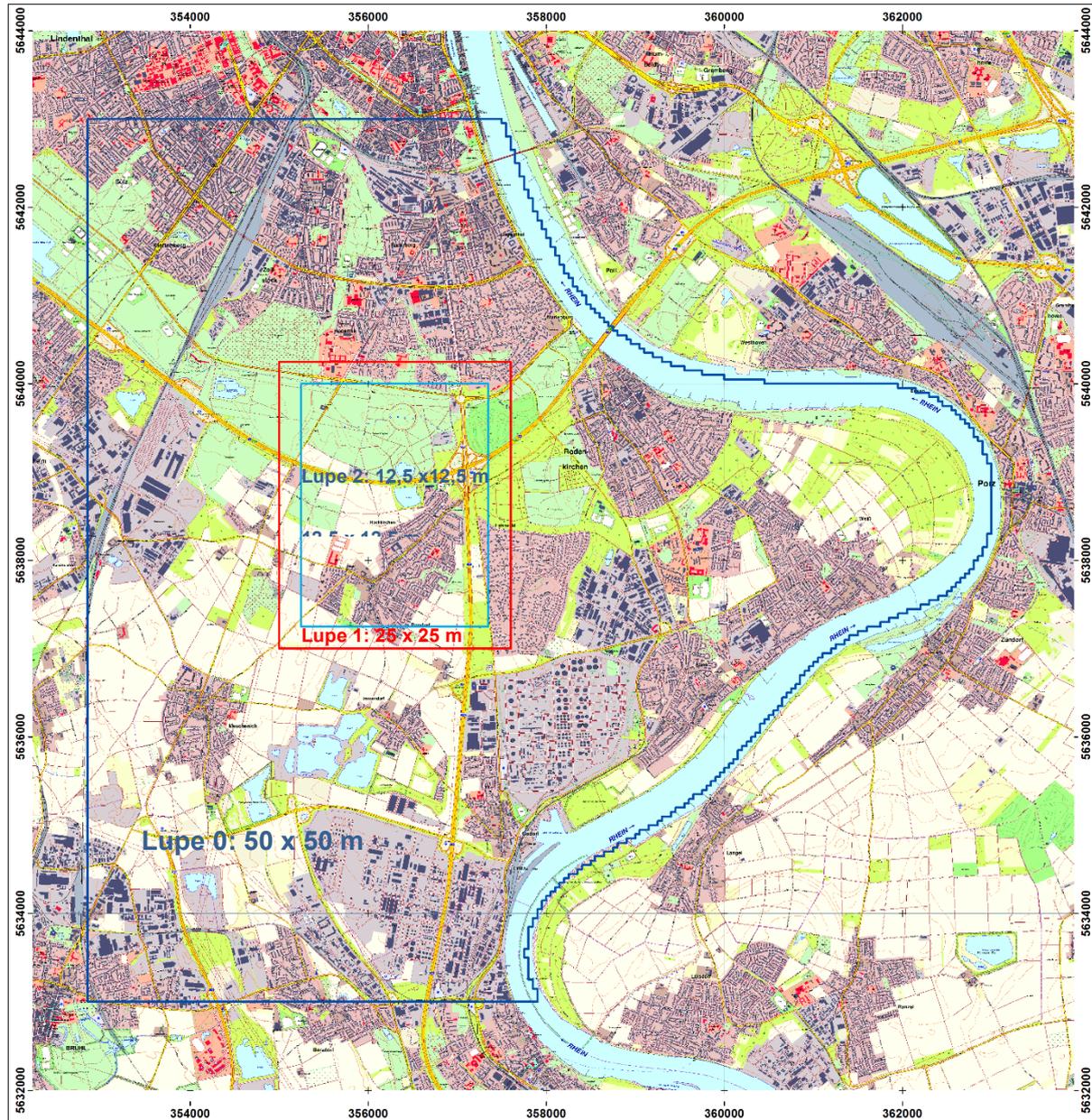


Abbildung 2: horizontale Modelldiskretisierung

### 3.2 Zeitliche Diskretisierung

Die Berechnung erfolgt instationär (zeitabhängig) für den Zeitraum 2000-2019. Anschließend erfolgt die Berechnung mittlerer Abflussverhältnisse im Untersuchungsgebiet. Hier wird der Zeitraum 2019-2025 gewählt. Die Berechnung der Strombahnen erfolgt mittlere Grundwasserströmungsverhältnisse.

### 3.3 Modellrandbedingungen

In der Regel eignen sich Wasserscheiden (Einzugsgebietsgrenzen), Fließ- oder Standgewässer. Die Festlegung der Ränder des Grundwassermodells und damit die Größe des Modellraums wurde auf Basis von Grundwassergleichenplänen erarbeitet.

Die Vorgabe einer RB 1. Art ist immer besonders sorgfältig vorzunehmen, da mit der Definition des Wasserstandes am Rand ein Zu- oder Abströmen über die Modellränder angenommen wird, wodurch der definierte Wasserstand konstant gehalten wird.

Folgende Randbedingung werden im Grundwassermodell berücksichtigt [1]:

- Äußere Ränder

An den Modellrändern können über das Grund- und Oberflächenwasser Austauschprozesse mit den angrenzenden Gebieten erfolgen. Die Wahl der Modellränder ist daher so zu definieren, dass eine Beeinflussung des Aussagebereichs durch die äußeren Ränder ausgeschlossen werden kann.

- Standgewässer

Die Seen im Untersuchungsgebiet sind künstlich geschaffene Gewässer infolge von Kiesabbau. Es wird angenommen, dass die Seen gut an den Grundwasserleiterkomplex 1 angebunden sind und die Seewasserstände mit den Grundwasserständen korrespondieren (sog. Grundwasserblänke). Da die Seen keinen Zufluss oder Abfluss besitzen, sind die Wasserstände maßgeblich durch die vorherrschenden Witterungsverhältnisse beeinflusst. Die Speisung der Seen erfolgt neben dem Grundwasserzufluss durch Niederschläge auf die direkte Seefläche und durch den oberirdischen Abfluss in die Seen infolge von Starkregenereignissen innerhalb des Einzugsgebietes. Die Zehrung erfolgt aus der Differenz des Niederschlags und der Verdunstung über der Seefläche.

- Rhein

Der Rhein wird als Randbedingung Fluss abgebildet. Diese beschreibt die Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleiter und Fließgewässer. Wasserbilanzseitig wird dabei im Grundwasserströmungsmodell der Basisabfluss berücksichtigt. Der Durchfluss und somit der Flusswasserspiegel werden aus dem Grundwasser-Zu- oder Abfluss, der Gewässergeometrie, dem Gefälle sowie der Rauigkeit für jeden Zeitschritt berechnet.

- Brunnen

Alle im Modellgebiet erbauten Brunnen und Entwässerungsmaßnahmen sowie sonstige relevante Entnahmebrunnen finden im Modell Berücksichtigung. Brunnen zur Eigenwasserversorgung oder Nutzung oberflächennaher Geothermie werden aufgrund des geringen Einflusses auf die Grundwasserdynamik / Grundwasserhaushalt nicht berücksichtigt. Die modellseitigen Umsetzungen erfolgen als Randbedingung Brunnen. Folgende Brunnen oder Brunnengruppen werden im Grundwassermodell berücksichtigt:

- RheinEnergie AG - Förderraten der Brunnengalerien Hochkirchen und Weißer Bogen sowie Ausbauprofile der Einzelbrunnen
- Bezirksregierung Köln - Wasserbuchblätter und Informationen zu Entnahme-/Einleitmengen im Untersuchungsgebiet
- Basell Polyolefine GmbH - Förderraten der von Basell betriebenen Brunnen
- Shell Deutschland Oil GmbH - Förderraten der Brunnen des Shellwerkes in Godorf

- Grundwasserneubildung und klimatischer Einfluss

Entsprechend des amtlichen Referenzdatensatzes der mittels des mGROWA-Verfahrens berechneten Grundwasserneubildung (LaNUV 2019) wurden für das Modellgebiet 7 Grundwasserneubildungszonen ausgewiesen.

Die Vorgabe der Grundwasserneubildung im Grundwassermodell erfolgt flurabstandsabhängig. Für jede Grundwasserneubildungszone werden die Grundwasserneubildungswerte monatlich für flurnahe (0m) und flurferne (2m) Grundwasserstände definiert.

- Zehrung auf der Gewässeroberfläche

Die Zehrung wird aus der klimatischen Wasserbilanz für Oberflächengewässer gemäß den Vorgaben des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet.

### 3.4 Berechnung der Strombahnen

Berücksichtigt wird bei der Berechnung der Grundwasserfließzeiten (Strombahnberechnung) die verlegte Seevariante [1] (Abbildung 3). Die Seekubatur wurde vom Planungsbüro Koenzen übergeben und in das Grundwassermodell eingearbeitet. Die Startpunkte für die Strombahnen zeigt ebenfalls die folgende Abbildung.

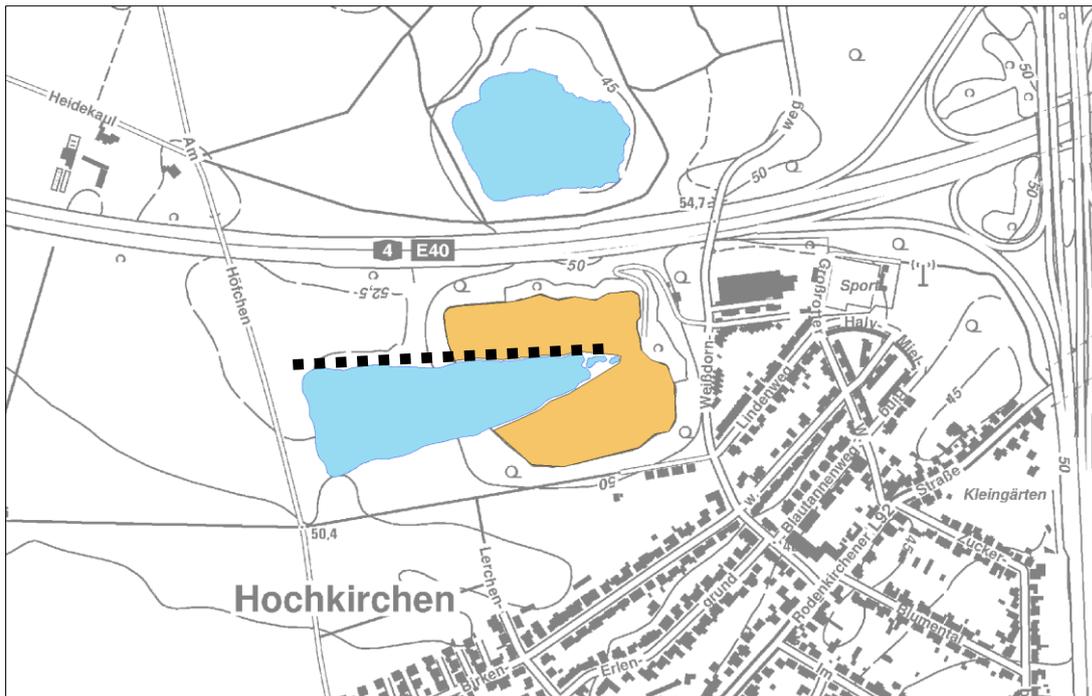


Abbildung 3: Überblick Variante 1

## 4 Ermittlung der Strombahnlinien bei reduzierter Brunnenfahrweise

### 4.1 Zielstellung

Die Strombahnlinienberechnung berücksichtigt auftragsgemäß nur den konvektiven Anteil der Stofftransportberechnung (Abbildung 3). Vermischungs- und Abbauprozesse werden hierbei nicht berücksichtigt. Dazu wurden Partikel am nördlichen Ufer des Sees angesetzt und deren Bewegung im Strömungsfeld modelliert. Basierend auf der Modellvariante 1 werden die Strombahnen unter **mittleren Grundwasserströmungsverhältnissen** berechnet.

Folgende Arbeitsschritte waren dazu notwendig:

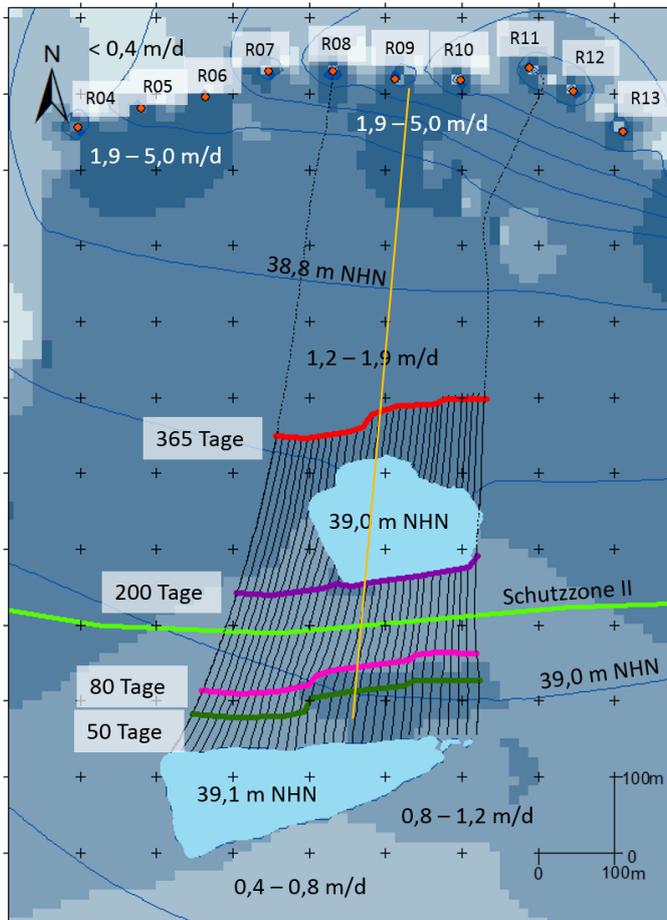
1. Partikel werden am nördlichen Ufer des geplanten Sees angesetzt und deren konvektive Bewegung im Strömungsfeld modelliert.
2. Es ist bei einer Reduzierung der Förderraten mit einem Durchbrechen der Partikel nördlich der Wasserfassung zu rechnen – daher erfolgt eine Schrittweise Reduzierung (siehe Tabelle in Abbildung 5: Darstellung der minimalen Fließzeit bis zum Erreichen der Brunnen in Abhängigkeit von der Förderrate)

Untersucht werden folgende Förderregime:

- IST-Zustand 15 Mio m<sup>3</sup>/a
- eine Reduzierung der Förderraten um 50%, 25%, 20%, 15% und 10%.

### 4.1 Abschätzung der Grundwasserfließzeit auf Basis von Messwerten

Die Hauptströmungsrichtung zwischen dem Galgenbergsee und den Brunnen ist von Süd nach Nord ausgerichtet. Dabei stellt sich ein Gradient von 39,1 m NHN zu 38,5 m NHN in zwischen See und Brunnengalerie auf ca. 900 m (0,00066) ein. Daraus ergibt sich für einen homogenen Untergrund mit einem  $k_f$ -Wert von  $1,0 \cdot 10^{-2}$  m/s eine theoretische mittlere Abstandsgeschwindigkeit von 1,9 m/d. Die vom Modell errechnete Abstandsließgeschwindigkeit liegt im Untersuchungsgebiet zwischen 0,4 m/d in Seenähe und bis zu 5 m/d in unmittelbarer Brunnennähe und beträgt im Mittel 1,4 m/d.



**Abbildung 4 - Darstellung der Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  in (m/d) für den IST-Zustand mit einer Förderrate von 15 Mio.  $m^3/a$  im Umfeld der Brunnen und der Strombahnlinien der angesetzten Partikel mit zeitlicher Staffelung: Dunkelgrün – innerhalb 50 Tage, Magenta – innerhalb 51- 80 Tage, Violet – innerhalb 81- 200 Tage, Rot – innerhalb 201 -500 Tage; Blaue Linien – Isohypsen für mittlere Grundwasserströmungsverhältnisse; Hellgrün – Schutzzone II; gelb - Transekte**

Um die modellgestützte Berechnung der Abstandsgeschwindigkeiten zu verifizieren, wurden diese basierend auf zur Verfügung stehenden Grundwassermesswerten (mittlere Grundwasserströmungsverhältnisse) entlang einer Transekte geprüft (siehe Abbildung 4, gelbe Linie).

Die Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  berechnet sich aus der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  nach Formel (1):

$$v_a = v_f/n_e \quad (1)$$

mit

$$v_f = k_f * I \quad (2)$$

wobei  $I$  den Gradienten  $grad h(x)$  als den Quotienten aus Differenz der Grundwasserdruckhöhen ( $h_1-h_2$ ) und der Fließlänge  $L$  beschreibt. Die  $v_a$  wurde für die in Tabelle 2 angesetzten  $k_f$ -Werte sowie den sich daraus ergebenden Porositäten ermittelt.

Die  $k_f$ -Werte wurden auf Basis der verfügbaren hydrogeologischen Informationen (vgl. Kap. 3.1) abgeleitet. Die Berechnung des effektiven (durchflusswirksame) Porosität erfolgt nach Hennig (Hennig, 1966).

**Tabelle 2 - Parameter zur analytischen Lösung der Abstandsgeschwindigkeit**

$k_f$ -Wert (m/s)	$n_e$ (nach Hennig)	$v_a$ (m/s)
1,00E-02	0,30	<b>1,89</b>
1,00E-03	0,25	0,23
1,00E-04	0,20	0,03

Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit über die gesamte Fließstrecke zwischen See und Brunnen beträgt bei einem angenommenem homogenen, isotropen Grundwasserkörper und einem  $k_f$ -Wert von  $1,0 \cdot 10^{-2}$  m/s etwa 1,9 m/d. Die mittlere Fließgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet wurde modellseitig mit 1,4 m/d bestimmt.

Die Änderung des hydraulischen Gradienten z.B. im Hochwasserfall des Rheins, führt zu einer Erhöhung der Abstandsgeschwindigkeit. Am Beispiel der gewählten Transekte ergibt sich aus der analytischen Lösung eine Abstandsgeschwindigkeit von 2,53 m/d ( $k_f$ -Wert =  $1,0 \cdot 10^{-2}$  m/s).

Im Folgenden ist zu klären, inwiefern sich reduzierte Förderraten der Brunnen auf den Gradienten und die sich daraus ergebenden Fließgeschwindigkeiten auswirken.

## 4.2 Berechnung der Bahnlinien in Abhängigkeit des Förderregimes

Bei einer Förderrate von 15 Mio. m<sup>3</sup>/a verlaufen die Strombahnen zu den Brunnen 8 bis 11. Vermischungseffekte (Dispersion) in der Ausbreitung der Partikel bleiben bei diesem Berechnungsverfahren unberücksichtigt. Eine Beeinflussung der Nachbarbrunnen in Folge uneinheitlicher Ausbreitung der Partikel (Wasserinhaltsstoffe) kann nicht ausgeschlossen werden.

Mit den bei einer Förderrate im IST-Zustand von 15 Mio. m<sup>3</sup>/a errechneten Abstandfließgeschwindigkeiten ist es nicht zu erwarten, dass es bei 90 Tagen Bauzeit und vorgegebener Mindestfließ- (Aufenthalts-) zeit von 80 d zu einem Durchbruch von biologisch beeinflusstem Wasser in die Brunnengalerie infolge der bautechnischen Umgestaltung des Galgenbergsees kommen wird.

Ausgehend vom geplanten See bis zum Fassungsbereich der Brunnen ist von einer Verweildauer (Fließzeit) eines Wasserteilchens von ca. 1,5 - 2 Jahren auszugehen.

Die Ergebnisse der Reduzierung der Förderraten sind in Abbildung 5 dargestellt. Mit sinkender Förderrate nimmt die Abstandsgeschwindigkeit ab, d.h. wenn die Förderrate verringert wird, steigt die Fließzeit eines Partikels zwischen See und Brunnengalerie. Die Wasserinhaltsstoffe benötigen mehr Zeit, um bis zu den Brunnen vorzudringen. Ab einer Förderrate von unter 3 Mio. m<sup>3</sup>/a erfolgt der Durchbruch der Partikel in nördlicher Richtung.

Abbildung 6 vergleicht den Verlauf der Strombahnen bei einer Förderrate von 15 Mio. m<sup>3</sup>/a und einer reduzierten Förderrate von 3 Mio. m<sup>3</sup>/a. Dabei fällt auf, dass sich bei reduzierter Förderrate die Strombahnlinien in westliche Richtung verschieben. Die geringeren Förderraten führen zu einer Verringerung des hydraulischen Gradienten zwischen Brunnen und See. Dadurch werden Brunnen, die zuvor vermehrt Partikel gefasst haben, weniger angeströmt und andere Brunnen, die sich entlang der „natürlichen“ Fließrichtung befinden, fassen diese Wasserinhaltsstoffe.

Diesen Zusammenhang verdeutlichen Anlagen 7 bis 12. Dort wird die Ausprägung der Strombahnlinien für die unterschiedlich angesetzten Förderraten gezeigt.

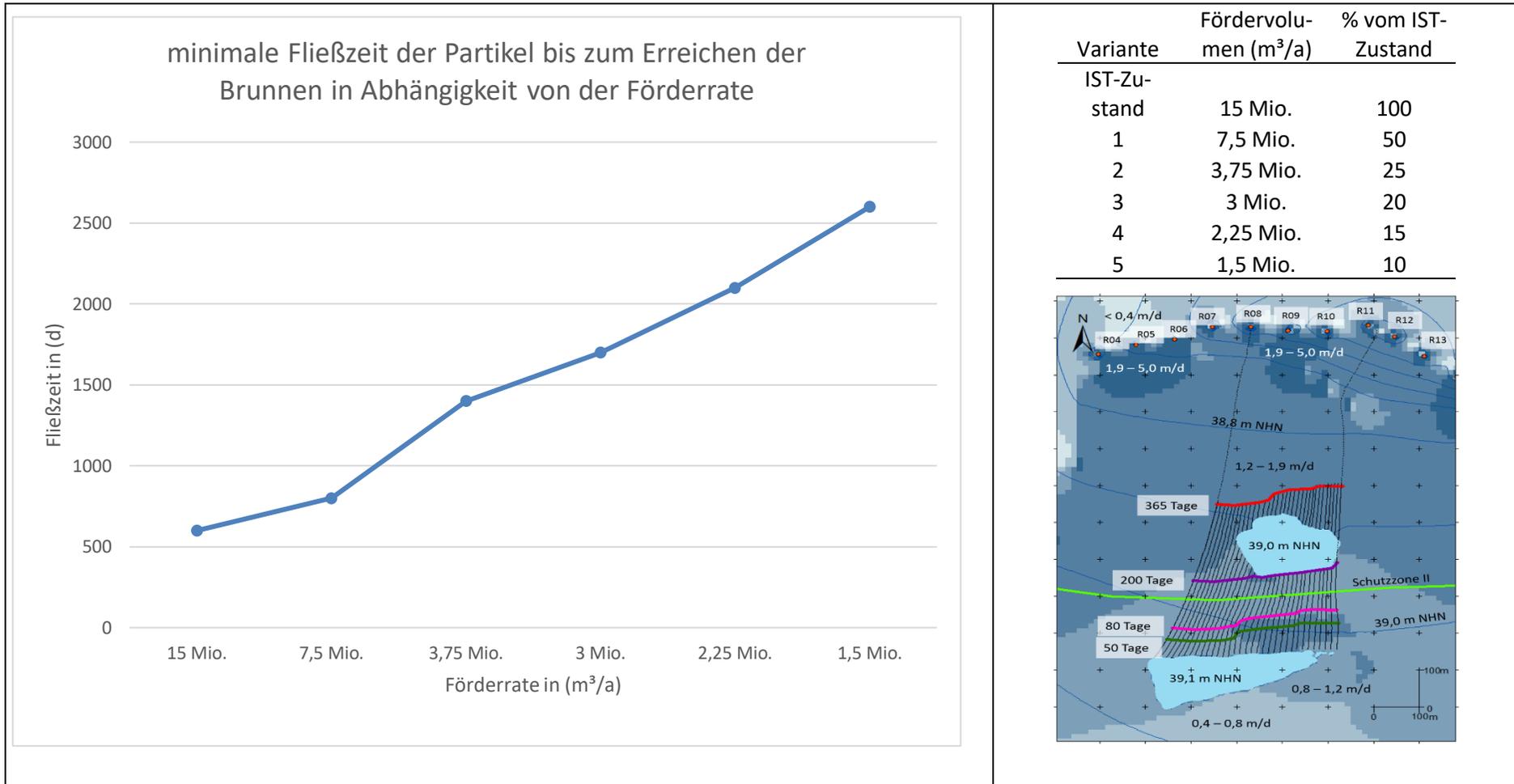


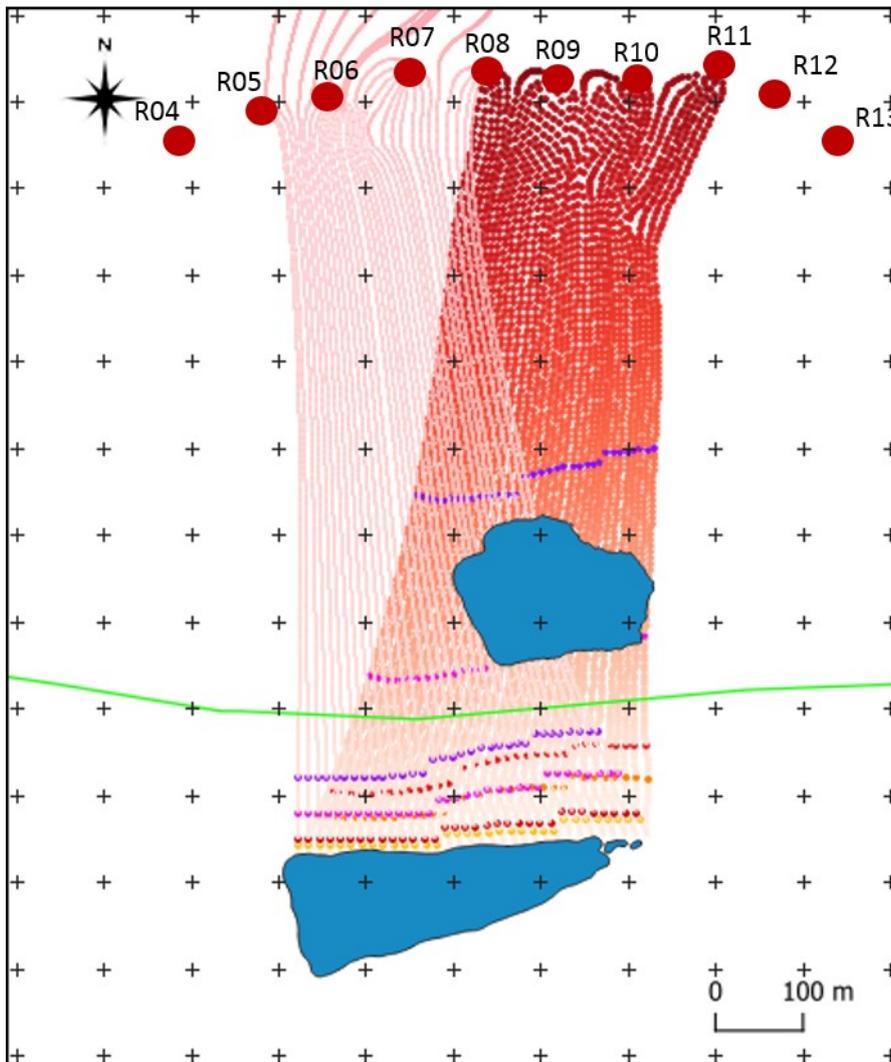
Abbildung 5: Darstellung der minimalen Fließzeit bis zum Erreichen der Brunnen in Abhängigkeit von der Förderrate

Wie in Abbildung 5: Darstellung der minimalen Fließzeit bis zum Erreichen der Brunnen in Abhängigkeit von der Förderrate zu erkennen ist, muss ab einer Reduzierung der Förderrate auf 15% (Anlage 11) vom IST-Zustand (etwa 2,25 Mio. m<sup>3</sup>/a) und weniger (Anlage 12) mit einem Durchbruch der Wasserinhaltsstoffe durch die Brunnengalerie gerechnet werden.

Folgende Aussagen lassen sich aus den Berechnungen ableiten:

- Je geringer die Förderrate, desto geringer ist der hydraulische Gradient in brunnennahen Raum (siehe Anlagen 1 bis 6),
- Je geringer der hydraulische Gradient, desto geringer ist die mittlere Abstandsgeschwindigkeit,
- Je kleiner die Abstandsgeschwindigkeit, desto größer die Fließzeiten der Wasserinhaltsstoffe in Richtung des Wasserwerks.

**Die Reduzierung der Förderraten führt zu einer Verschiebung der berechneten 50-, 80-, 200- sowie die 365-Tageslinie in südliche Richtung. Die Verweildauer der Wasserinhaltsstoffe im Grundwasserkörper erhöht sich somit in Richtung des Wasserwerks zunehmend.**



**Abbildung 6:** Darstellung der Strombahnlinien bei unterschiedlichen Förderraten: rot) 100% sowie rosa) 15%; farbige Punkte auf den Linien stellen die Position der jeweiligen Partikel nach orange - 50 Tagen, rot - 80 Tagen, magenta - 200 Tagen, violett - 365 Tagen dar; hellgrüne Linie: Schutzzone II; bei einer Förderrate von 15% kommt es bereits zu einem Durchbruch von Partikeln durch die Brunnengalerie

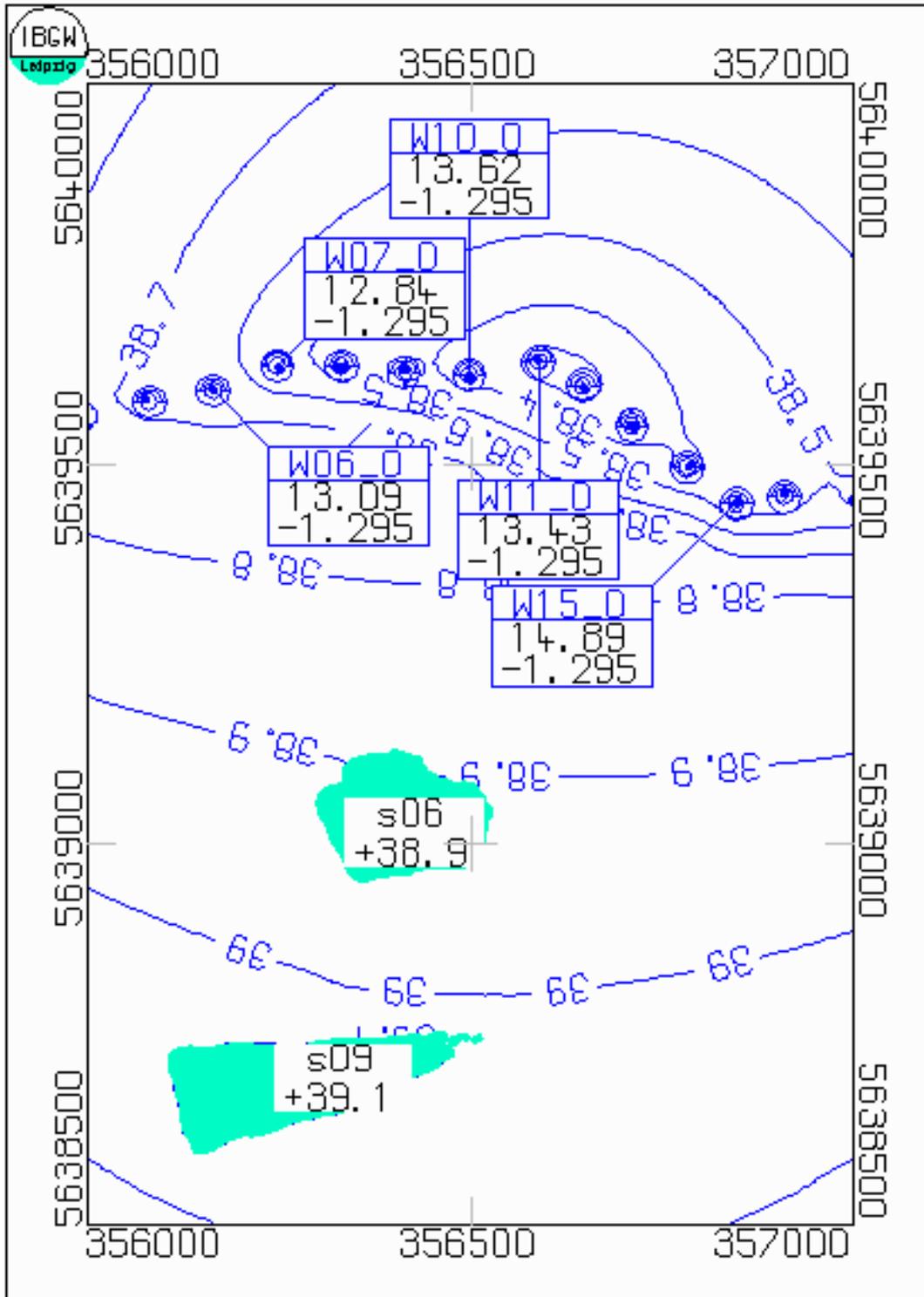
## 5 Zusammenfassung

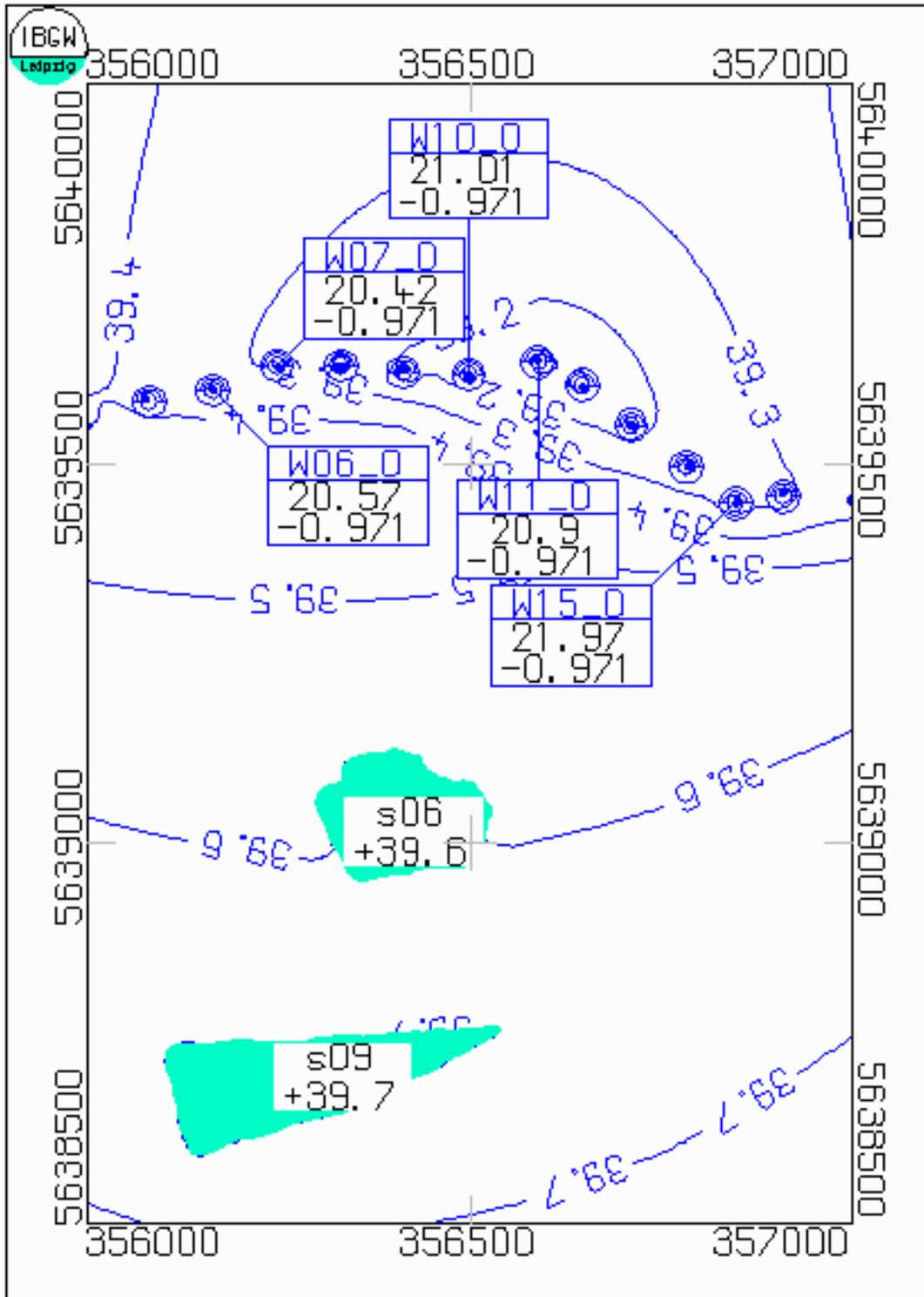
Zunächst wurden die Fließzeiten und Strombahnlinien etwaiger Wasserinhaltsstoffe zwischen dem Galgenbergsee und den Brunnen des Wasserwerkes Köln-Rondorf für den Mittel- und Hochwasserfall ermittelt. Dabei ist festzuhalten, dass bei einer modellseitig wie analytisch errechneten mittleren Abstandsgeschwindigkeit von 1,9 m/d zwischen See und Brunnen Wasserinhaltsstoffe etwa 1,5 – 2 Jahre benötigen, um bis zu den Brunnen vorzudringen. Mit einer momentanen Förderrate im IST-Zustand von 15 Mio. m<sup>3</sup>/a errechneten Abstandfließgeschwindigkeiten ist es nicht zu erwarten, dass es bei veranschlagten 90 Tagen Bauzeit und vorgegebener Mindestfließ- (Aufenthalts-)zeit von 80 d zu einem Durchbruch von biologisch beeinflusstem Wasser in die Brunnengalerie infolge der bautechnischen Umgestaltung des Galgenbergsees kommen wird.

In einem zweiten Arbeitsschritt war zu ermitteln, um wieviel die Förderrate der Brunnen des Wasserwerkes Köln-Rondorf reduziert werden kann, ohne dass sich im Grundwasser befindliche PFT durch die Brunnengalerie hindurch in den Abstrom des Wasserwerkes gelangen. Dazu wurden modellseitig Förderraten von 50%, 20%, 15% und 10% vom IST-Zustand angesetzt und die sich ergebenden Fließzeiten, Abstandsgeschwindigkeiten sowie Strombahnlinien ermittelt. Es zeigt sich, dass bei sinkenden Förderraten die sich einstellenden Gradienten zwischen See und Brunnen abschwächen, sodass mittlere, aber vor allem brunnennahe Abstandsgeschwindigkeiten abnehmen und die Brunnen ihre „Sogwirkung“ verlieren, so dass sich eine

- Verlagerung der Strombahnlinien in westliche Richtung bei sinkenden Förderraten sowie ein
- Hindurchbrechen von Wasserinhaltsstoffen durch die Brunnengalerie bei Förderraten unter 3 Mio. m<sup>3</sup>/a (entspricht 20% vom IST) ergeben.

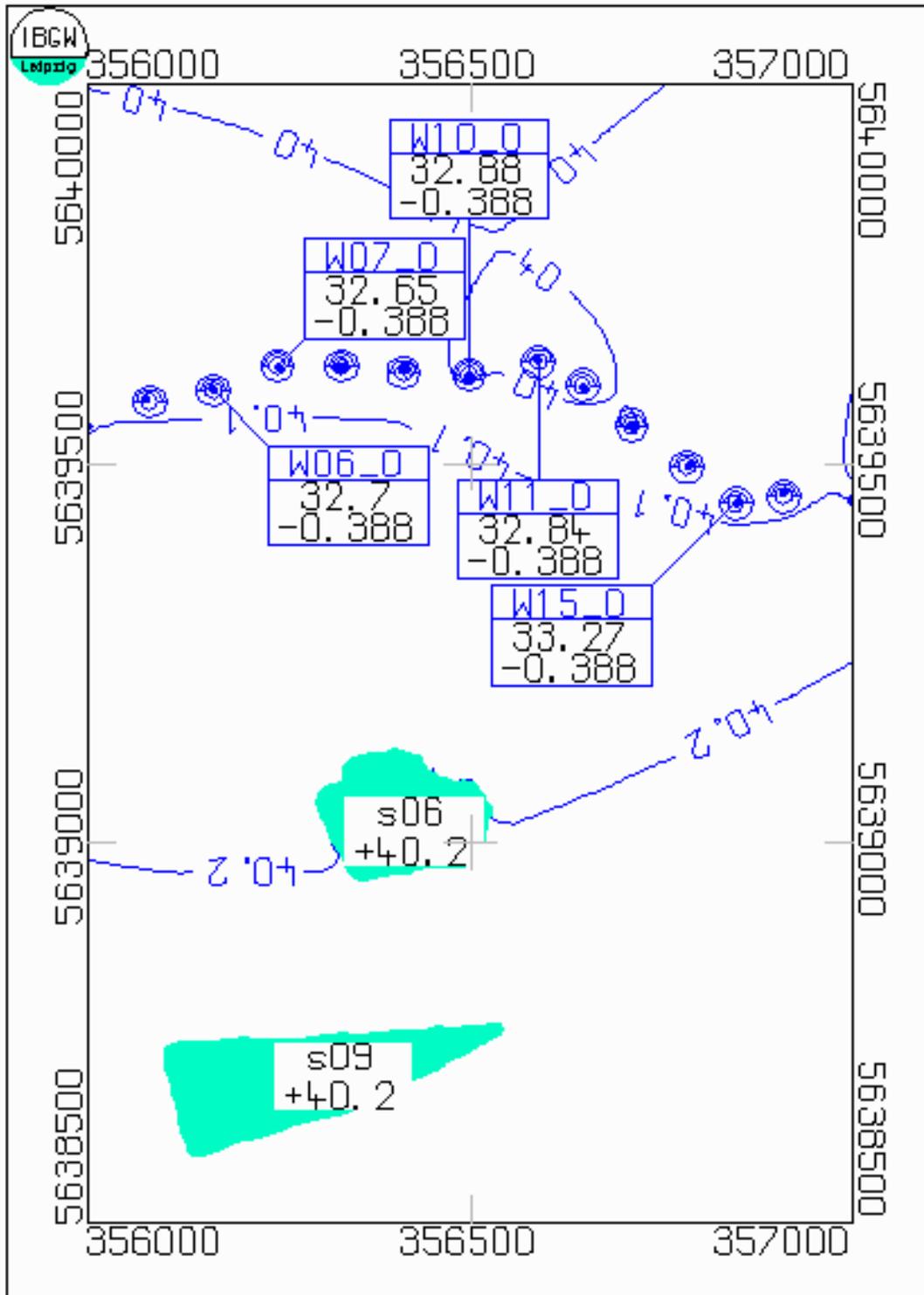
## Anlagen



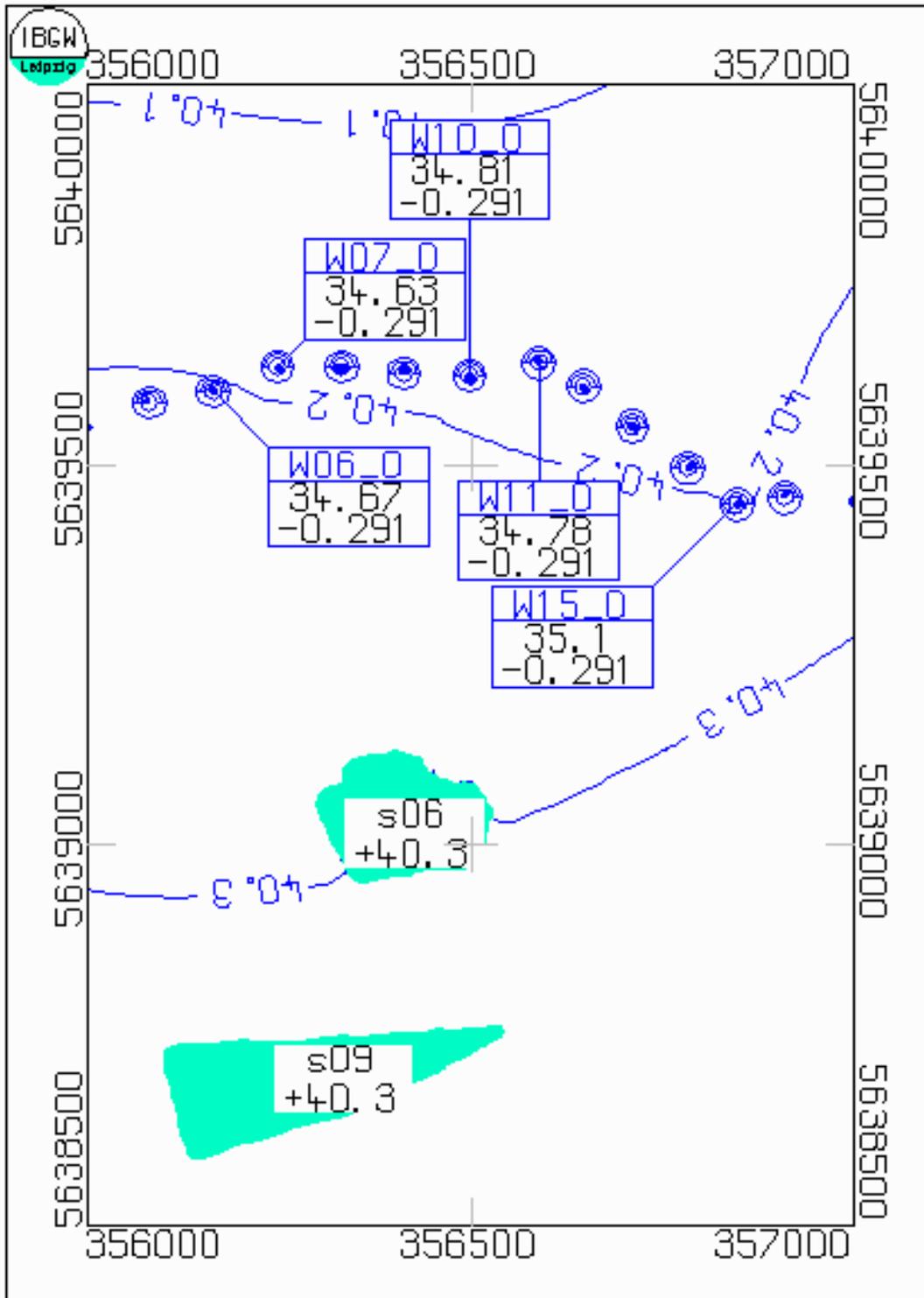


Anlage 2: GW-Stände bei 50% Förderrate

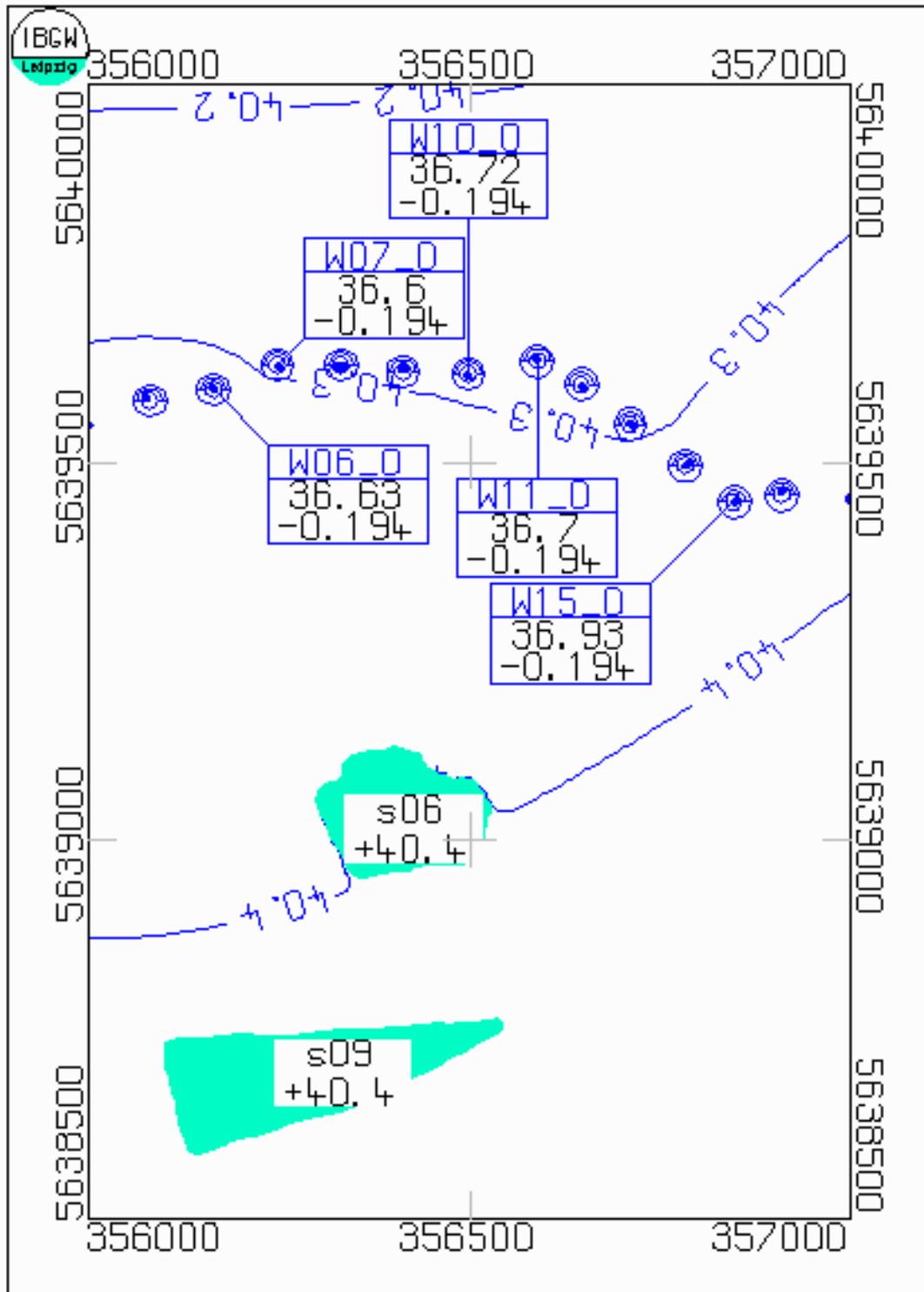




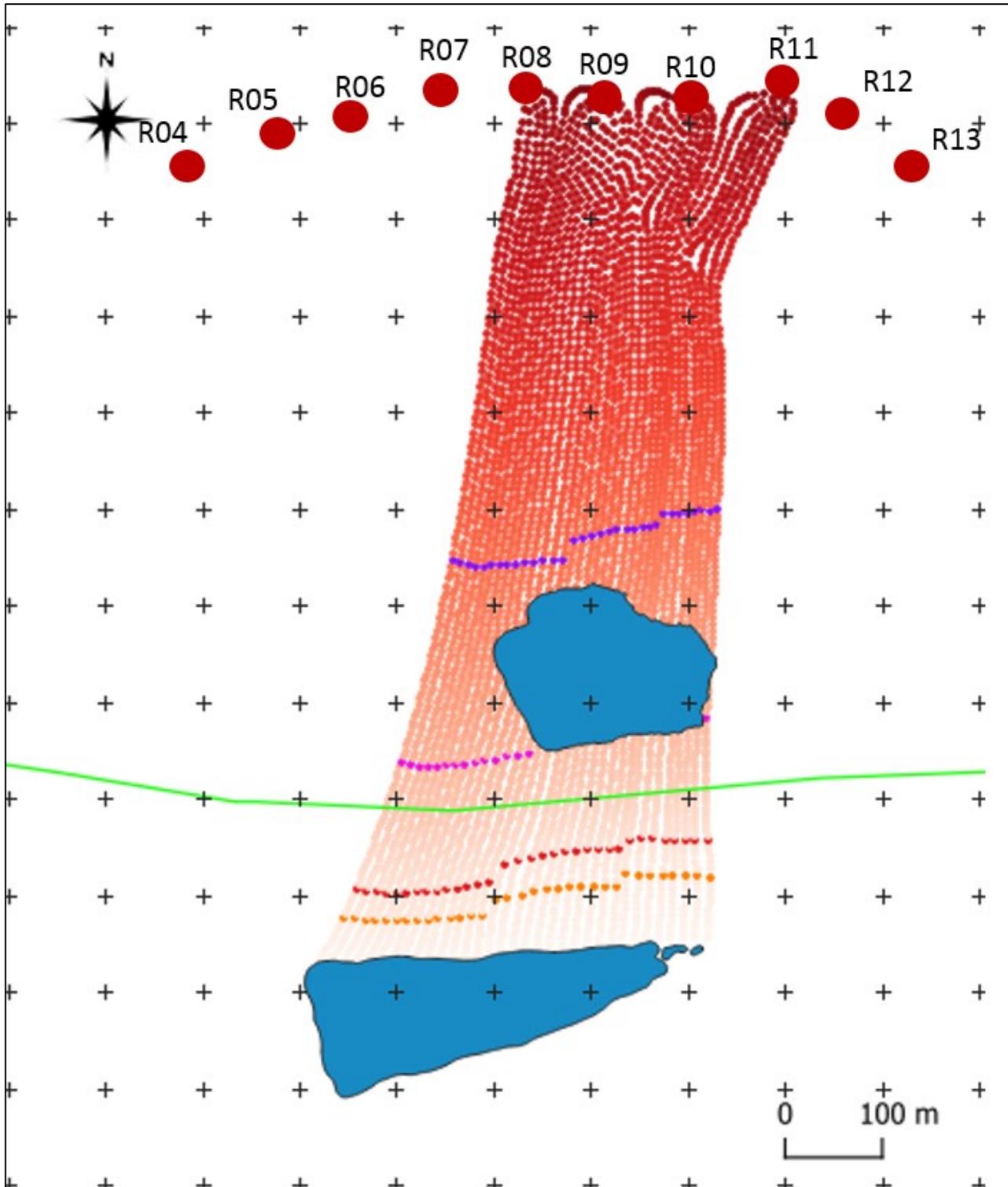
Anlage 4: GW-Stände bei 20% Förderrate



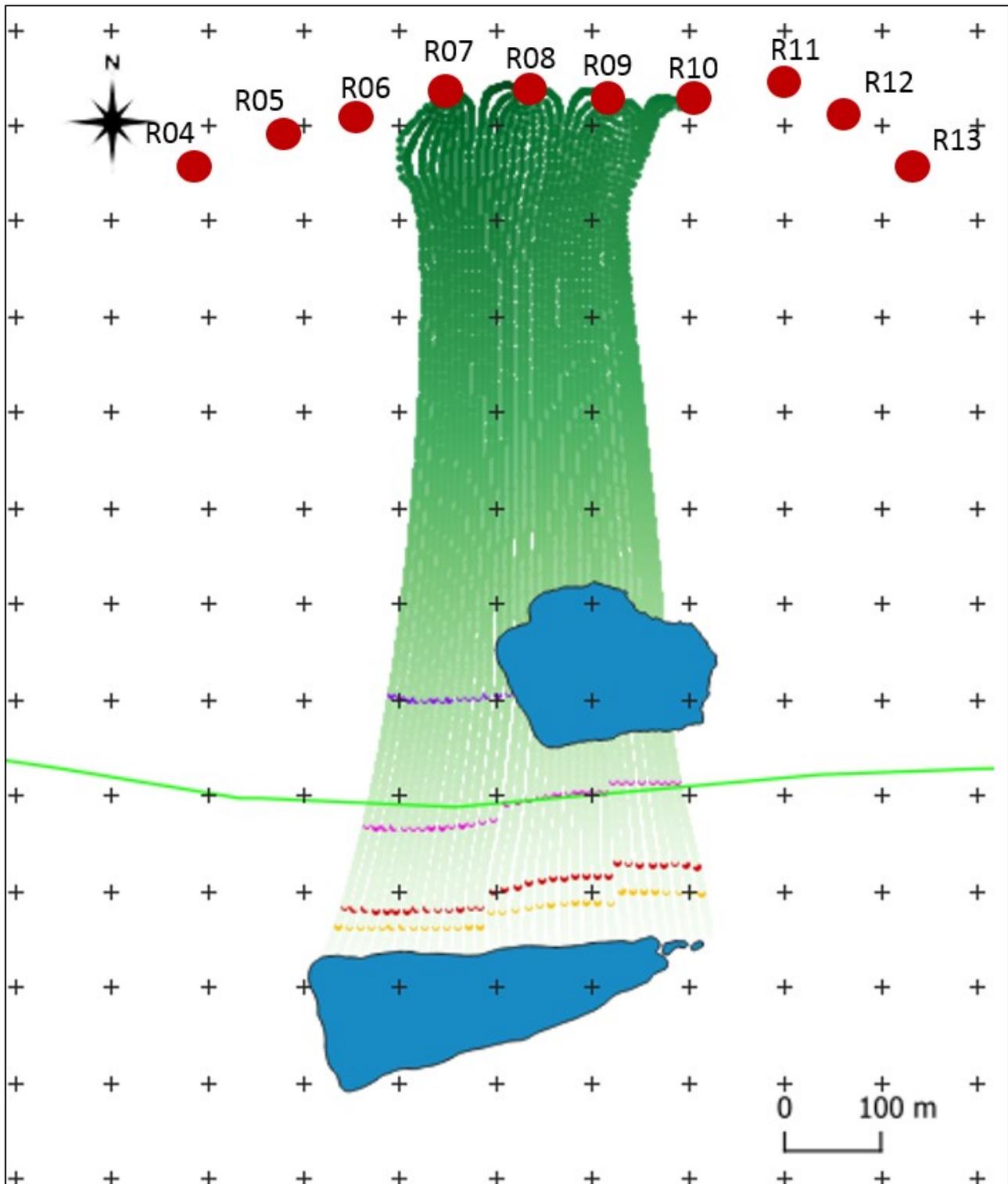
Anlage 5: GW-Stände bei 15% Förderrate



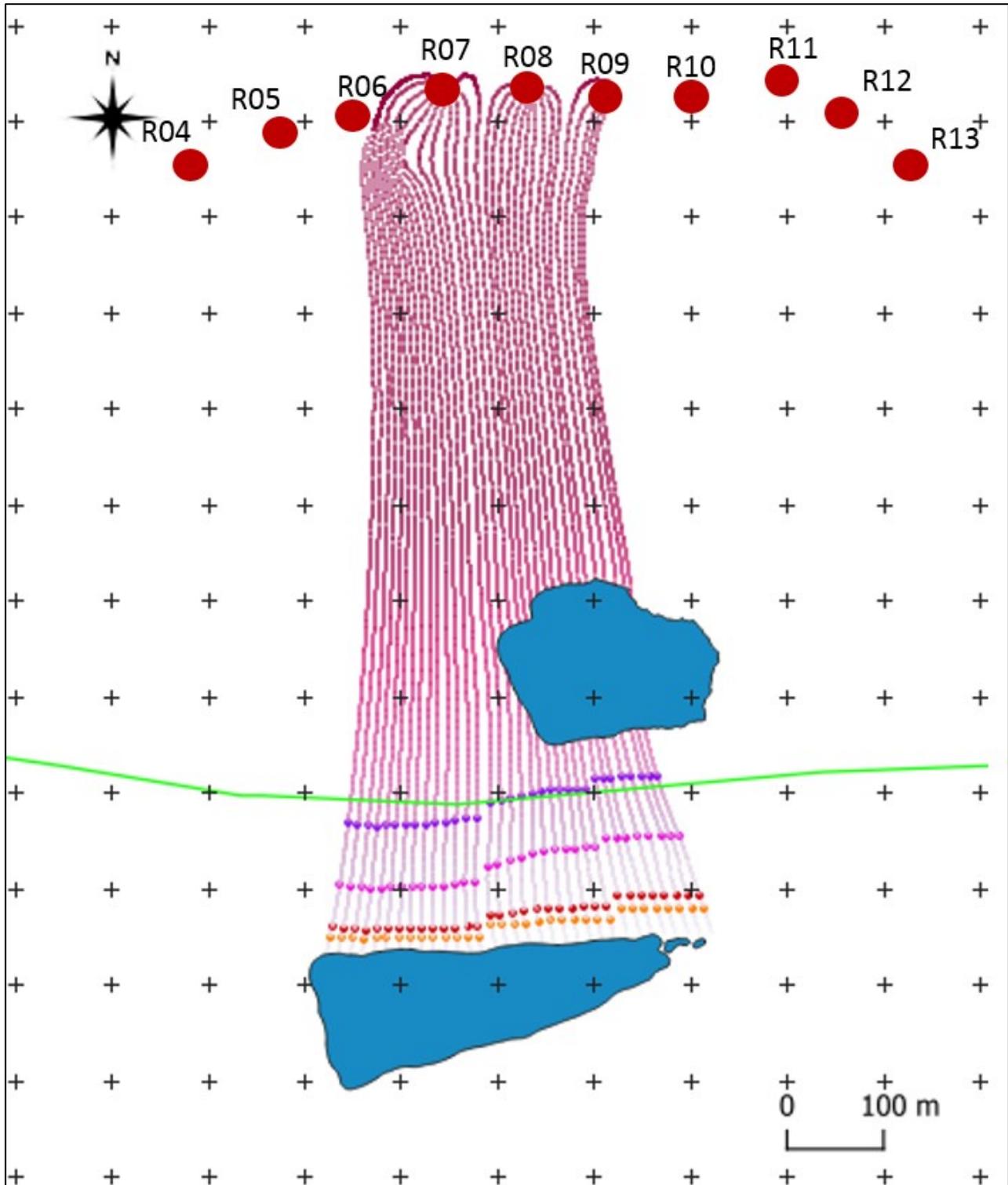
Anlage 6: GW-Stände bei 10% Förderrate



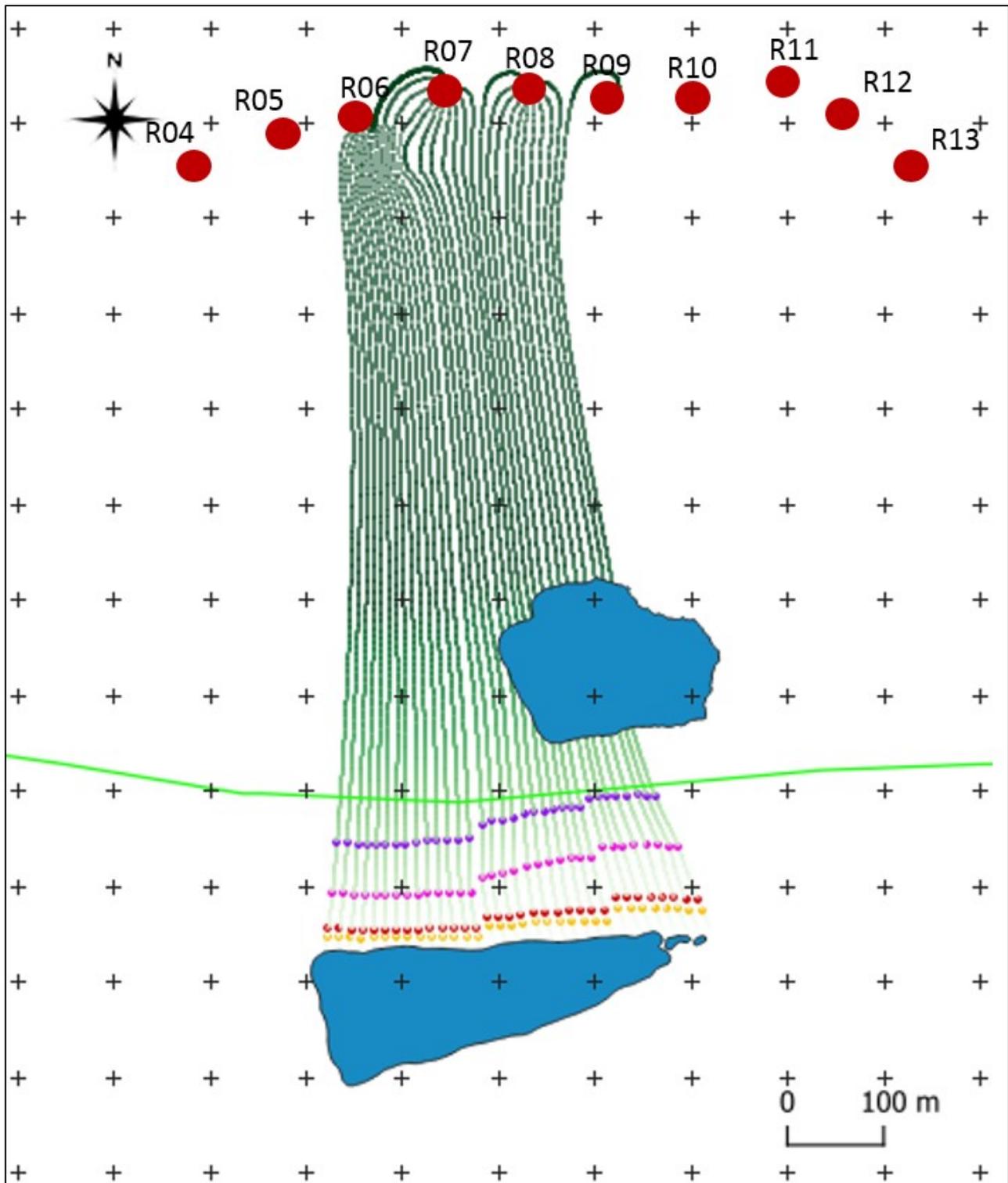
Anlage 7: Darstellung der Strombahnlinien bei einer Förderrate von 15 Mio. m<sup>3</sup>/a (100%); farbige Punkte auf den Linien stellen die Position der jeweiligen Partikel nach orange - 50 Tagen, rot - 80 Tagen, magenta - 200 Tagen, violett - 365 Tagen dar; hellgrüne Linie - Schutzzone II



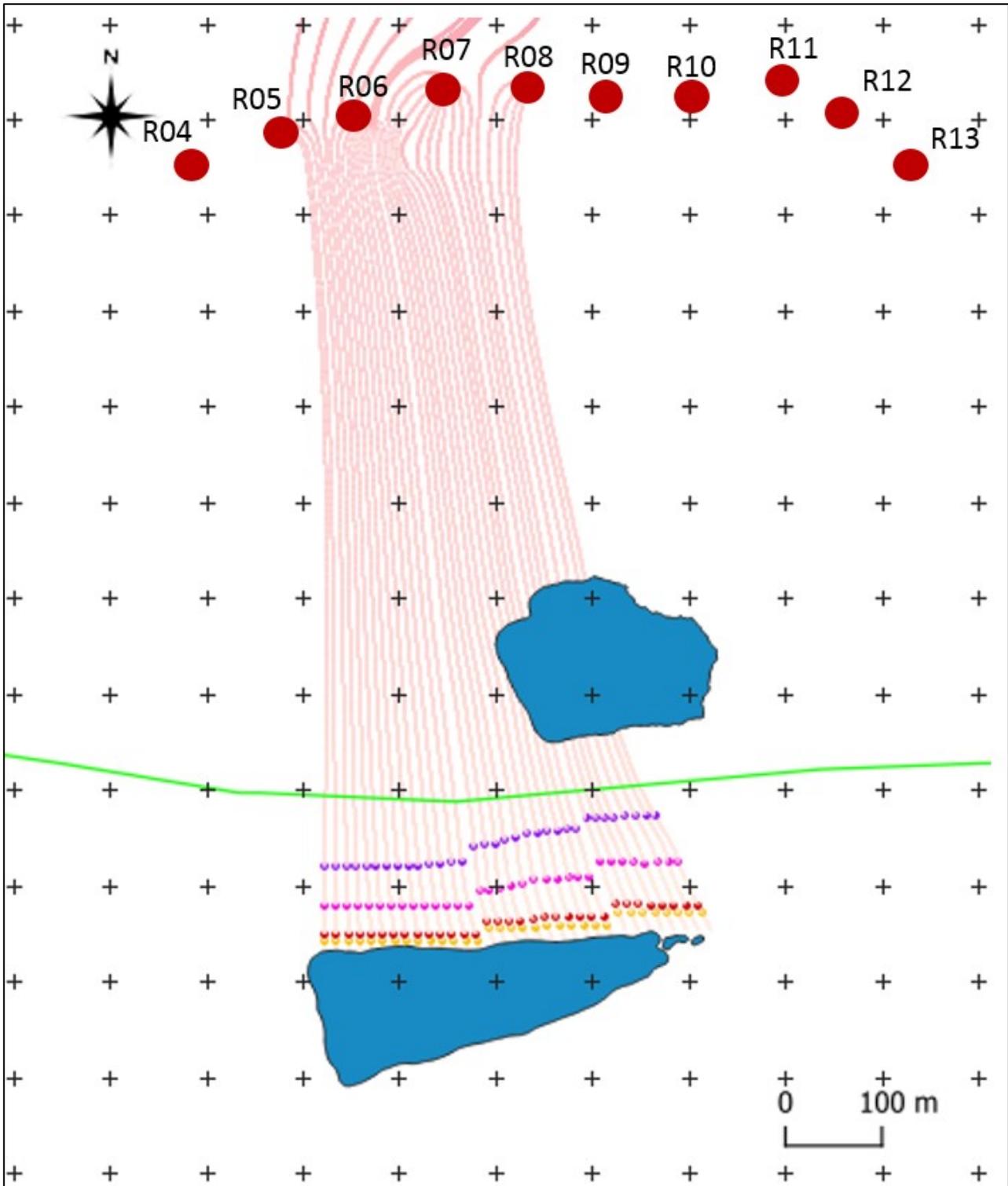
Anlage 8: Darstellung der Strombahnlinien bei einer Förderrate von 50%; farbige Punkte auf den Linien stellen die Position der jeweiligen Partikel nach orange - 50 Tagen, rot - 80 Tagen, magenta - 200 Tagen, violett - 365 Tagen dar, hellgrüne Linie - Schutzzone II



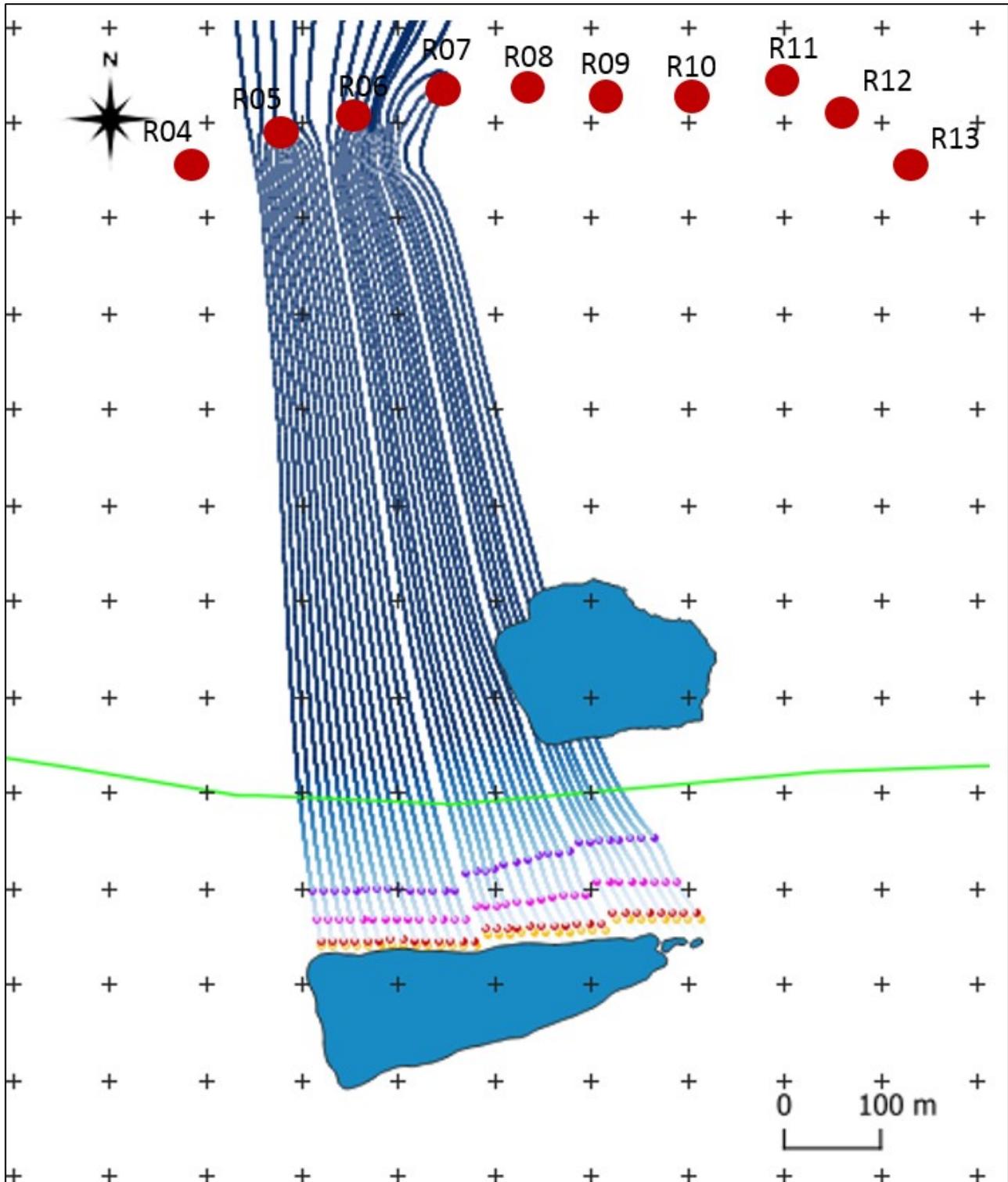
Anlage 9: Darstellung der Strombahnlinien bei einer Förderrate von 25%; farbige Punkte auf den Linien stellen die Position der jeweiligen Partikel nach orange - 50 Tagen, rot - 80 Tagen, magenta - 200 Tagen, violett - 365 Tagen dar, hellgrüne Linie - Schutzzone II



Anlage 10: Darstellung der Strombahnlinien bei einer Förderrate von 20%; farbige Punkte auf den Linien stellen die Position der jeweiligen Partikel nach orange - 50 Tagen, rot - 80 Tagen, magenta - 200 Tagen, violett - 365 Tagen dar, hellgrüne Linie - Schutzzone II



Anlage 11: Darstellung der Strombahnlinien bei einer Förderrate von 15%; farbige Punkte auf den Linien stellen die Position der jeweiligen Partikel nach orange - 50 Tagen, rot - 80 Tagen, magenta - 200 Tagen, violett - 365 Tagen dar, hellgrüne Linie - Schutzzone II



Anlage 12: Darstellung der Strombahnlinien bei einer Förderrate von 10%; farbige Punkte auf den Linien stellen die Position der jeweiligen Partikel nach orange - 50 Tagen, rot - 80 Tagen, magenta - 200 Tagen, violett - 365 Tagen dar, hellgrüne Linie - Schutzzone II