

Erforderlicher Vertikalabstand für kurzschlussfreie Quell- /Senkenströmung

Anwendung bei Hauswärmepumpen

TECHNISCHER BERICHT

Projekt-Nr.: **41121**



DONAUCONSULT
ZOTTL & ERBER



Ziviltechnikergesellschaft m. b. H.

A-1170 Wien Klopstockgasse 34

Tel.: +43 1 480 80 10 Fax: DW 10

eMail: office@donauconsult.at

ERFORDERLICHER VERTIKALAB- STAND FÜR KURZSCHLUSSFREIE QUELL-/ SENKENSTRÖMUNG

ANWENDUNG BEI HAUSWÄRMEPUMPEN

TECHNISCHER BERICHT

Auftraggeber: **Amt der OÖ Landesregierung**
Wasserwirtschaft – Trink- und Grundwasserwirtschaft
Dipl. Ing. Christian Kneidinger
Dipl. Ing. August Neumüller

Auftragnehmer: **DonauConsult Zottl & Erber ZT-GmbH**
Dipl.-Ing. Dr. Roland Schmalfuß

Projektleitung: **Dipl. Ing. Richard Kirnbauer**

INHALT

1	EINLEITUNG	4
2	METHODIK	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Numerisches Grundwassermodell	5
2.3	Modellaufbau	6
2.4	Szenarienfestlegung	6
2.4.1	Herleitung der analytischen Zusammenhänge zur Berechnung der Abmessungen des Einzugsbereiches	7
2.4.2	Festlegung der Entnahmetiefe	12
2.5	Berechnungsfälle	13
3	ERGEBNISSE	16
3.1	Darstellung und Auswertung der Modellergebnisse	16
3.2	Vergleich von Q_{ks} bei Berechnung anhand der analytischen Formeln mit Berechnung mit numerischem Modell	19
3.3	Qualitative Beschreibung der Auswirkungen der einzelnen Parameter auf die Entnahmemenge Q_{ks} ab der ein hydraulischer Kurzschluss auftritt	21
4	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HINWEISE ZUR PRAKTISCHEN ANWENDUNG DER ERGEBNISSE	22
4.1	Ermittlung von Q_{ks} aus Diagrammen	23
4.2	Ermittlung von Q_{ks} anhand der analytischen Formeln	25
4.3	Praxisempfehlungen für Wärmepumpen von Kleinanlagen (Einfamilienhausbereich)	26
4.4	Aussagen für Grundwasserleiter mit geringerer Mächtigkeit	28
5	ZUSAMMENFASSUNG	30

1 EINLEITUNG

Bei der thermischen Nutzung von Grundwasser für Heizzwecke wird Grundwasser entnommen, über eine Wärmepumpe genutzt und abgekühlt wieder versickert. Durch die Versickerung des abgekühlten Wassers besteht die Gefahr, dass am Entnahmehrunden das schon abgekühlte versickerte Wasser wieder eingezogen wird und damit die erforderliche Temperaturdifferenz für eine effiziente Funktion der Wärmepumpe nicht mehr erreichbar ist. Ein derartiger hydraulischer Kurzschluss ist zur Sicherstellung eines dauerhaften einwandfreien Betriebes einer Wärmepumpenanlage daher in jedem Fall zu vermeiden.

Eine besondere Schwierigkeit besteht darin, dass in vielen Fällen die genaue Richtung der Grundwasserströmung nicht bekannt oder zeitlich nicht konstant ist. Eine Anlagenanordnung zur Vermeidung von nachteiligen Überschneidungen aufgrund einer ungenügend belegten lokalen Richtung der Grundwasserströmung ist daher mit relativ hohen Risiken behaftet. Dies trifft besonders auf Gebiete mit einer hohen Nutzungsdichte (z.B. Ebenseer Becken) zu.

Eine vielversprechende Lösung scheint zu sein, dass die Entnahme aus so großer Tiefe erfolgt, dass unabhängig von der Lage der Entnahmestelle und oberflächennahen Rückgabestelle eine verlässliche hydraulische Trennung anzunehmen ist. Ziel der Bearbeitung ist die Ermittlung von allgemeinen Aussagen darüber, aus welcher Tiefe eine Grundwasserentnahme für Heizzwecke erfolgen muss, um einen hydraulischen Kurzschluss zwischen Versickerung und Entnahme ausschließen zu können.

2 METHODIK

2.1 Allgemeines

Die vorliegende Untersuchung baut auf eine unveröffentlichte vorangegangene grundwasserhydraulische Parameterstudie zu Grundwasserentnahmen aus tiefliegenden Bereichen eines Grundwasserkörpers auf. Im Zuge dieser Studie wurden analytische Beziehungen zwischen der horizontalen und vertikalen Ausdehnung des Einzugsbereiches eines in großer Tiefe gelegenen Entnahmebrunnens und grundwasserhydraulischen Parametern (hydraulische Durchlässigkeit, Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Durchlässigkeit, Entnahmemenge, Grundwasserspiegelgefälle) hergeleitet. Diese Beziehungen werden im vorliegenden Bericht im Detail beschrieben (Kapitel 2.4.1) und herangezogen, um für verschiedene Parameterkombinationen die Grenzfälle für das Auftreten eines hydraulischen Kurzschlusses abzuschätzen. Eine detaillierte Berechnung der Grundwasserströmung, die sich bei Versickerungs- und Entnahmebrunnen einstellt, erfolgte exemplarisch mit einem 3-dimensionalen hydraulischen Grundwassermodell.

In der vorliegenden Untersuchung werden Einzugs- und Abströmbereiche von Entnahme- oder Versickerungsbrunnen nur auf Basis von grundwasserhydraulischen Berechnungen ermittelt. Folgende Prozesse sind nicht berücksichtigt:

- Korngerüstbedingte Dispersion
- Konvektion aufgrund von Dichteunterschieden des Grundwassers und des Rückgabewassers (kälteres Wasser sinkt nach unten).
- Wärmeleitung über den Grundwasserleiter (Gestein-Wasser) und die ungesättigte Zone (Gestein-Luft).
- Abhängigkeit der kinematischen Zähigkeit des Grundwassers und damit der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters von der Temperatur.

Sofern diese Prozesse relevant sind, sind detaillierte Untersuchungen, z.B. mit einem numerischen Modell, erforderlich.

2.2 Numerisches Grundwassermodell

Die Berechnung der 3d-Ausdehnung der Brunneneinzugs- und Abströmbereiche erfolgte mit dem sehr weit verbreiteten 3-dimensionalen Grundwassersimulationsprogramm pmwin 5.3. Dieses Programmpaket besteht aus einer graphischen Benutzeroberfläche zur Dateneingabe und Visualisierung der Ergebnisse und (unter Anderem) den Berechnungsmodulen Modflow zur Berechnung des Grundwasserströmungsfeldes und pmpath zur Berechnung und Darstellung von Grundwasserstromlinien und Fließzeiten. Die Lösung der Differentialgleichungen

erfolgt mit der Methode der finiten Differenzen auf einem 3-dimensionalen rechteckigen Rengitter. Damit ist eine Berechnung von komplexen Grundwasserströmungssituationen mit Berücksichtigung von Brunnenentnahmen und Versickerungen, Randzuflüssen, Grundwasserneubildung und Austauschvorgängen zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser möglich.

2.3 Modellaufbau

Für die Berechnungen wurde ein schematischer Grundwasserleiter mit einer Breite von 200 m, einer Länge von 300 m und einer mittleren Grundwassermächtigkeit von 58,6 m herangezogen. Die Zellgröße beträgt in allen 3 Dimensionen 2 m. Im Nahbereich der Brunnen erfolgte eine Verfeinerung der Zellgröße im Grundriss auf 0,67 x 0,67 m, die vertikale Ausdehnung der Zellen wurde mit 2 m beibehalten. Vergleichsrechnungen mit vertikal verfeinerten Zellgrößen ergaben zwar eine geringfügig andere Form des Einzugs- und Abströmbereiches im Nahbereich der Brunnen, die berechnete Entnahme- und Rückgabemenge, bei der ein hydraulischer Kurzschluss auftritt, ändert sich aber nur gering. Bei den Fällen, wo mit einem maßgeblichen Einfluss der Diskretisierung zu rechnen ist, wird darauf hingewiesen.

Die Grundwasserströmung wird durch Festpotentialränder am Zu- und Abstromrand des Modells (die schmalere Seite) mit einer Potentialdifferenz hervorgerufen. Die Längsseiten des Modellrandes sind als dichter Rand angenommen (keine „Hangwasserzutritte“ berücksichtigt). Grundwasserneubildung durch Versickerung von Niederschlag ist ebenfalls nicht berücksichtigt.

2.4 Szenarienfestlegung

Die maßgebenden Parameter, die festlegen, ob bei einer bestimmten Entnahme- bzw. Rückgabemenge ein hydraulischer Kurzschluss auftritt, sind (bei Annahme eines homogenen Grundwasserleiters):

- Durchlässigkeit in horizontaler und vertikaler Richtung
- Abstand zwischen Entnahme und Versickerungsbrunnen (in vertikaler und horizontaler Richtung)
- Grundwasserspiegelgefälle

Zunächst wurde ein Referenzfall definiert, wobei folgende Festlegungen getroffen wurden:

- Die horizontale Durchlässigkeit beträgt $4 \cdot 10^{-3}$ m/s.

- Das Verhältnis der horizontalen Durchlässigkeit zur vertikalen Durchlässigkeit beträgt 10:1.
- Die Potentialdifferenz zwischen oberem und unterem Rand beträgt 0.6 m. Das ergibt ein mittleres Grundwasserspiegelgefälle von 2 ‰.
- Zu- und Abströmung erfolgen über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters.
- Die Entnahme/Rückgabemenge beträgt 1 l/s.
- Das Filterrohr mit einer Länge von 2 m liegt 8 – 10 m unter Grundwasserspiegel. Die mittlere Entnahmetiefe unter Grundwasserspiegel beträgt daher 9 m, die Rückgabe erfolgt direkt darüber an der Grundwasseroberfläche (Annahme einer Rückgabe in den Entnahmevorschacht).
- Die Berechnung erfolgt für einen freien Grundwasserleiter.

Ausgehend von diesem Referenzfall wurden folgende Größen einzeln variiert:

- Lage der Rückgabe im Vergleich zur Entnahme: 5 m stromauf, 50 m stromauf, 5 m stromab
- Durchlässigkeit des Grundwasserleiters
- Verhältnis der horizontalen Durchlässigkeit zur vertikalen Durchlässigkeit
- Grundwasserspiegelgefälle
- Entnahmetiefe

In Zuge eines vorangegangenen Projektes wurden analytische Gleichungen zur Bestimmung der Abmessungen des Einzugsbereiches eines in großer Tiefe gelegenen Entnahmebrunnens entwickelt. Diese wurden herangezogen, um die Entnahmetiefe für verschiedene Parameterkombinationen so zu wählen, dass der Grenzfall für einen hydraulischen Kurzschluss auftritt.

2.4.1 Herleitung der analytischen Zusammenhänge zur Berechnung der Abmessungen des Einzugsbereiches

2.4.1.1 Entnahme erfolgt in großer Tiefe eines Grundwasserleiters (zentrale Entnahme)

Die folgende Herleitung gilt für eine Entnahme in großer Tiefe eines Grundwasserleiters, wobei die Mächtigkeit deutlich größer als die vertikale Ausdehnung des Zustrombereiches ist (siehe Abbildung 2).

Gegeben ist das Darcy'sche Gesetz und die Kontinuitätsgleichung:

$$v = k_{fh} \cdot I \quad \text{Gleichung 1}$$

$$Q = v \cdot A \quad \text{Gleichung 2}$$

v.....Filtergeschwindigkeit [m/s]

k_{fh}horizontale Durchlässigkeit [m/s]

I.....Grundwasserspiegelgefälle [m/m]

Q...Entnahme/Rückgabemenge [m³/s]

A....Fläche des Kontrollquerschnittes [m²]

Mit dem numerischen Modell wurden die Querschnittsabmessungen des Einzugsbereiches einer in großer Tiefe gelegenen Entnahme bei verschiedenen Verhältnissen von vertikaler zu horizontaler Durchlässigkeit (1:1, 1:3, 1:10, 1:30) ermittelt. Die übrigen Parameter (horizontale Durchlässigkeit, Grundwasserspiegelgefälle, Entnahmemenge) wurden fix gehalten. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters wurde groß im Verhältnis zur Höhe des Einzugsbereiches gewählt, um Randeinflüsse auszuschalten. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Querschnitt des Einzugsbereiches („Einzugschlauch“ im 3-dimensionalen Grundwasserleiter) in größerer Entfernung von der Entnahmestelle die Form einer Ellipse aufweist und das Verhältnis der Achsenlängen der Ellipse (Breite B_Z und Höhe H_Z des Zuströmbereiches) über folgende Beziehung vom Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Durchlässigkeit bestimmt wird (siehe Abbildung 1, zur Geometrie siehe Abbildung 2):

$$\frac{B_Z}{H_Z} = \sqrt{\frac{k_{fh}}{k_{fv}}} \quad \text{Gleichung 3}$$

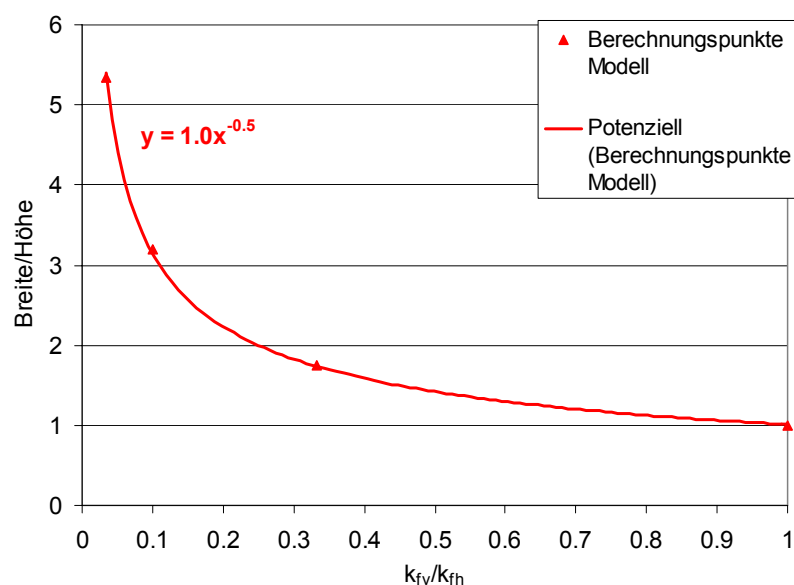


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen dem Höhen/Breitenverhältnis des Einzugsbereiches und horizontaler/vertikaler Durchlässigkeit.

Die Gleichung der Fläche einer Ellipse lautet:

$$A = \frac{B_z \cdot H_z}{4} \cdot \pi \quad \text{Gleichung 4}$$

Gleichung 1 in Gleichung 2 eingesetzt ergibt für den Zustrom Q zum Brunnen:

$$Q = k_{fh} \cdot I \cdot A \quad \text{Gleichung 5}$$

Gleichung 4 in Gleichung 5 eingesetzt ergibt:

$$Q = k_{fh} \cdot I \cdot \frac{B_z \cdot H_z}{4} \cdot \pi \quad \text{Gleichung 6}$$

Man setzt $f = k_{fv}/k_{fh}$. Auflösen von Gleichung 3 nach B_z , Einsetzen in Gleichung 6 und Auflösen nach H_z ergibt das Ergebnis Gleichung 7.

Gleichung 7 eingesetzt in Gleichung 3 und auflösen nach B_z ergibt das Ergebnis Gleichung 8.

$$H_z = \sqrt{\frac{4 \cdot Q \cdot \sqrt{f}}{k_{fh} \cdot I \cdot \pi}} \quad \text{Gleichung 7}$$

$$B_z = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{k_{fh} \cdot I \cdot \sqrt{f} \cdot \pi}} \quad \text{Gleichung 8}$$

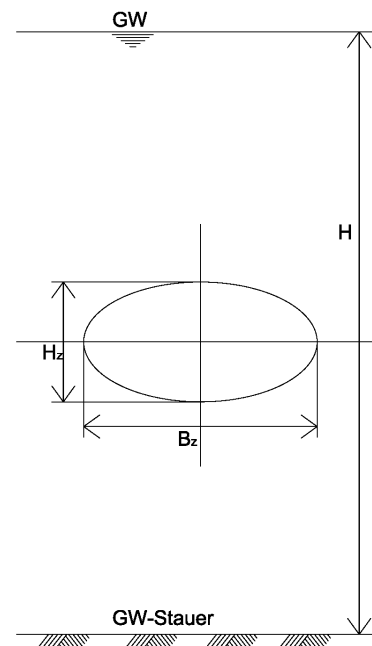


Abbildung 2: Schnitt durch den Grundwasserzuströmbereich orthogonal zur Grundwasserströmungsrichtung zur Definition der Größen in Gleichung 7 und Gleichung 8

Die Entnahme wird bei der analytischen Berechnung als punktförmig angenommen.

Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Beziehungen sind:

1. Homogener Grundwasserleiter
2. Die Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschläge ist vernachlässigbar.
3. Die Länge der Filterstrecke ist klein im Verhältnis zur Höhe H des Einzugsbereiches.
4. Die Höhe des Einzugsbereiches ist klein im Verhältnis zur Mächtigkeit des Grundwasserleiters.
5. Die Filterstrecke liegt in hinreichender Entfernung ($> H/2$) zu Grundwasserstauer und Grundwasseroberfläche.
6. Die Ränder des Grundwasserleiters liegen in hinreichender Entfernung zur Entnahme- bzw. Versickerungsstelle, dass ein Randeinfluss auszuschließen ist.

Damit lässt sich bei bekannter Durchlässigkeit in vertikaler und horizontaler Richtung und bekanntem Grundwasserspiegelgefälle für verschiedene Entnahmemengen die Höhe und Breite des Brunneneinzugsbereiches („Einzugsschlauch“) errechnen.

Gleichung 7 und Gleichung 8 gelten analog auch für Versickerungen. In diesem Fall wird die Breite und Höhe des Abstrombereiches des Schluckbrunnens bestimmt.

2.4.1.2 Die Entnahme erfolgt an der Grundwasseroberfläche oder am Grundwasserstauer (Randentnahme, analog für Versickerung)

In diesem Fall weist der Querschnitt durch den Zustromschlauch die Form einer halben Ellipse auf (siehe Abbildung 4). Die Abmessungen der halben Ellipse lassen sich aus dem Fall für zentrale Entnahme durch Anwendung der Spiegelungsmethode herleiten.

Dazu wird die Grundwasseroberfläche als dichte Berandung des Grundwasserkörpers als Spiegelungsebene angesehen. Damit ergibt sich eine Entnahmemenge von $2 \cdot Q$ (real und gespiegelt) und $H_Z = 2 H_R$.

Einsetzen in Gleichung 7 und auflösen nach H_R ergibt Gleichung 9.

Einsetzen von $2Q$ statt Q in Gleichung 8 ergibt Gleichung 10.

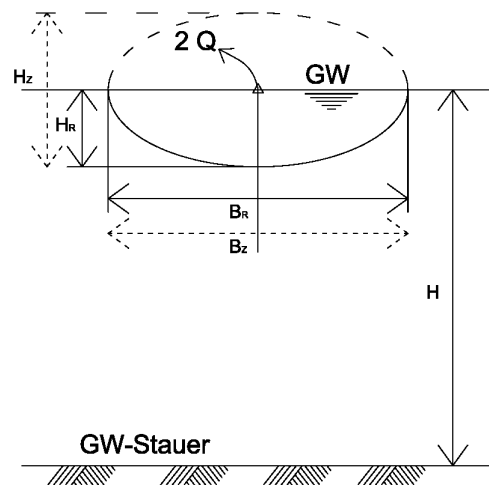


Abbildung 3: Spiegelungsmethode

$$H_R = \sqrt{\frac{2 \cdot Q \cdot \sqrt{f}}{k_{fh} \cdot I \cdot \pi}} \quad \text{Gleichung 9}$$

$$B_R = \sqrt{\frac{8 \cdot Q}{k_{fh} \cdot I \cdot \sqrt{f} \cdot \pi}} \quad \text{Gleichung 10}$$

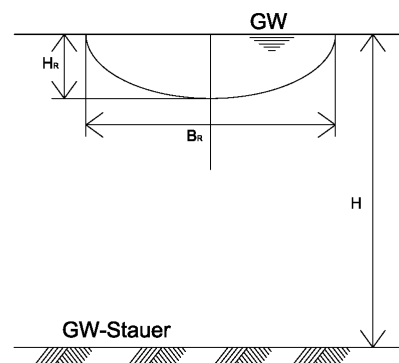


Abbildung 4: Schnitt durch den Grundwasserabstrombereich orthogonal zur Grundwasserströmungsrichtung zur Definition der Größen in Gleichung 9 und Gleichung 10

mit

$$f = \frac{k_{fv}}{k_{fh}}$$

Q Entnahmemenge

k_{fh} Horizontale Durchlässigkeit

k_{fv} Vertikale Durchlässigkeit

I Grundwasserspiegelgefälle

- f Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Durchlässigkeit. Wenn nicht bekannt, mit 0.1 anzunehmen.

Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Beziehungen sind:

1. Homogener Grundwasserleiter
2. Die Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschläge ist vernachlässigbar.
3. Die Länge der Filterstrecke ist klein im Verhältnis zur Höhe H des Einzugsbereiches.
4. Die Höhe des Einzugsbereiches ist klein im Verhältnis zur Mächtigkeit des Grundwasserleiters.
5. Die Ränder des Grundwasserleiters liegen in hinreichender Entfernung zur Entnahme- bzw. Versickerungsstelle, dass ein Randeinfluss auszuschließen ist.

2.4.2 Festlegung der Entnahmetiefe

Um für verschiedene Parameterkombinationen die Grenzfälle für das Auftreten eines hydraulischen Kurzschlusses abzuschätzen, wurden die analytischen Formeln herangezogen. Anhand der angeführten Gleichungen lässt sich ein theoretisch erforderlicher Abstand zwischen tiefer gelegener zentraler Entnahme und oberflächiger Versickerung berechnen, dass keine Überschneidung von Zu- und Abströmbereich erfolgt (siehe Abbildung 5). Es wird also angenommen, dass ein hydraulischer Kurzschluss dann auftreten kann, wenn gilt:

$$T_E \leq H_R + \frac{H_Z}{2} \quad \text{Gleichung 11}$$

wenn also die Entnahmetiefe unter Grundwasserspiegel T_E kleiner als die Höhe des Abströmbereiches der Versickerung H_R plus die halbe Höhe des Zustrombereiches zum Entnahmebrunnen H_Z ist.

Dabei wird eine gegenseitige Beeinflussung von Entnahme und Rückgabe nicht berücksichtigt und angenommen, **dass die Entnahme an einem Punkt erfolgt**, also keine räumliche Ausdehnung hat. Dieser theoretische Wert wurde als Entnahmetiefe festgelegt.

Es ist jedoch zu beachten, dass die räumliche Auflösung des numerischen Modells einen vertikalen Raster von 2 m vorgibt und die tatsächliche mittlere Entnahmetiefe daher von der Grundwasseroberfläche bis zur Mitte der Schicht, in der die Entnahme erfolgt, angegeben wird (siehe 3. Spalte in Tabelle 1).

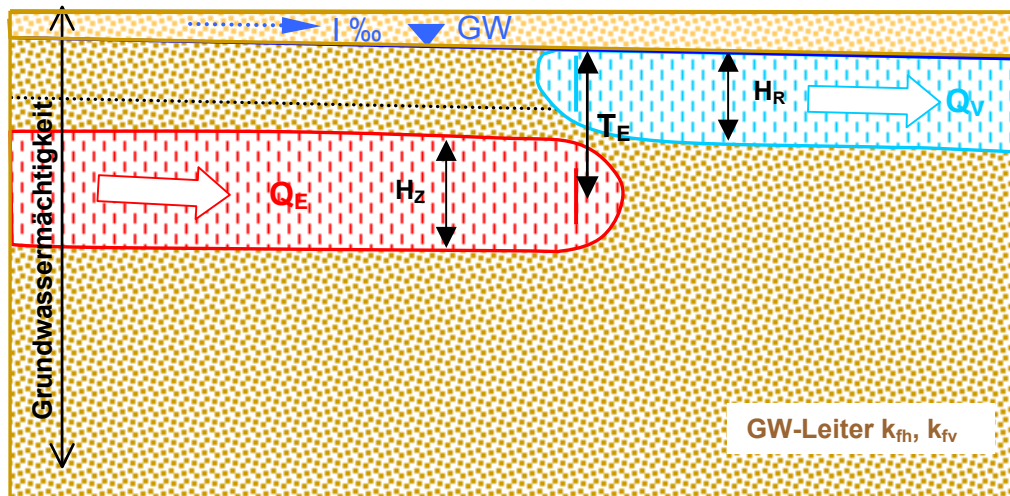


Abbildung 5: Festlegung der Entnahmetiefe, Prinzipskizze Vertikalschnitt durch den Grundwasserleiter: $T_E = H_R + H_z/2$. H_z und H_R gemäß Gleichung 7 und Gleichung 9. Rot: Einzugsbereich des Entnahmehorizonts, blau: Abströmbereich des Versickerungsbrunnen.

2.5 Berechnungsfälle

Es wurden insgesamt 40 Fälle mit verschiedenen Parameterkombinationen berechnet. Für 13 repräsentative Fälle wurden Darstellungen der Einzugs- und Abströmbereiche im Grundriss und Schnitten dargestellt. Die übrigen Fälle wurden herangezogen, um allgemeine Zusammenhänge zwischen der Entnahmemenge, die zu einem hydraulischen Kurzschluss führt und den maßgebenden grundwasserhydraulischen Parametern herzuleiten und die Anwendbarkeit der analytischen Beziehungen zu überprüfen. In Tabelle 1 sind die in Abbildungen (siehe Anhang B) dargestellten Fälle mit den Kenngrößen des Referenzfalles und den bei dem jeweiligen Fall geänderten Parameter angeführt.

Tabelle 1: Übersicht zu den Berechnungsfällen. Dunkel hinterlegte Felder entsprechen den Werten des Referenzfalles.

	Q [l/s] Entnahme = Versickerung	Tiefe Entnahme gemäß Gleichung 11 [m]	Tats. Entnahmetiefe (Berücksichtigung v. Raster) [m]	k_{fh} [m/s]	k_{fh}/k_{fv}	Grundwasserspiegelgefälle	Lage der Rückgabe im Vergleich zur Entnahme
Referenzfall	1	8,6	9,0	$4 \cdot 10^{-3}$	10	2 ‰	Direkt darüber
Fall 1	1	8,6	9,0	$4 \cdot 10^{-3}$	10	2 ‰	5 m stromauf
Fall 2	1	8,6	9,0	$4 \cdot 10^{-3}$	10	2 ‰	50 m stromauf
Fall 3	1	8,6	9,0	$4 \cdot 10^{-3}$	10	2 ‰	5 m stromab
Fall 4	1	11,6	11,0	$4 \cdot 10^{-3}$	3	2 ‰	Direkt darüber
Fall 5	1	11,6	11,0	$4 \cdot 10^{-3}$	3	2 ‰	50 m stromauf
Fall 6	1	11,6	11,0	$4 \cdot 10^{-3}$	3	2 ‰	5 m stromab
Fall 7	1	15,2	15,0	$4 \cdot 10^{-3}$	1	2 ‰	Direkt darüber
Fall 8	1	17,1	17,0	$1 \cdot 10^{-3}$	10	2 ‰	Direkt darüber
Fall 9	1	4,4	5,0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	10	2 ‰	Direkt darüber
Fall 10	1	2,4	3,0	$5 \cdot 10^{-2}$	10	2 ‰	Direkt darüber
Fall 11	0,5	6,1	7,0	$4 \cdot 10^{-3}$	10	2 ‰	Direkt darüber
Fall 12	1	12,1	13,0	$4 \cdot 10^{-3}$	10	1 ‰	Direkt darüber

Die weiteren berechneten Fälle sind:

- Mit Versickerung direkt über der Entnahme, $k_{fh}/k_{fv} = 10$, Grundwasserspiegelgefälle 2 ‰:

Entnahmetiefen 5 m, 11 m, 15 m jeweils für $k_{fh} = 1 \cdot 10^{-3}, 4 \cdot 10^{-3}, 1,5 \cdot 10^{-2}, 5 \cdot 10^{-2}$ m/s

- Mit Versickerung 50 m stromaufwärts der Entnahme, $k_{fh}/k_{fv} = 10$, Grundwasserspiegelgefälle 2 ‰:

Entnahmetiefen 5 m, 11 m, 15 m jeweils für $k_{\text{th}} = 1 \cdot 10^{-3}, 4 \cdot 10^{-3}, 1,5 \cdot 10^{-2}, 5 \cdot 10^{-2}$ m/s

Diese Kombinationen wurden sowohl für ein Gefälle von 2 ‰ als auch 1 ‰ berechnet.

3 ERGEBNISSE

3.1 Darstellung und Auswertung der Modellergebnisse

Als Ergebnis wurde der Einzugsbereich des Entnahmebrunnens und Abströmbereich des Versickerungsbrunnens durch Darstellung der in den Brunnen mündenden Stromlinien entsprechend Abbildung 6 dargestellt. In den Abbildungen außerdem enthalten sind die Kenngrößen entsprechend Tabelle 1. Die mögliche Durchflussmenge, ab der ein hydraulischer Kurzschluss auftritt (im folgenden Q_{ks} genannt), wurde mit dem numerischen Grundwassermodell durch schrittweise Erhöhung der Entnahme- und Rückgabemenge ermittelt. Die Darstellungen sind als Anhang B angefügt.

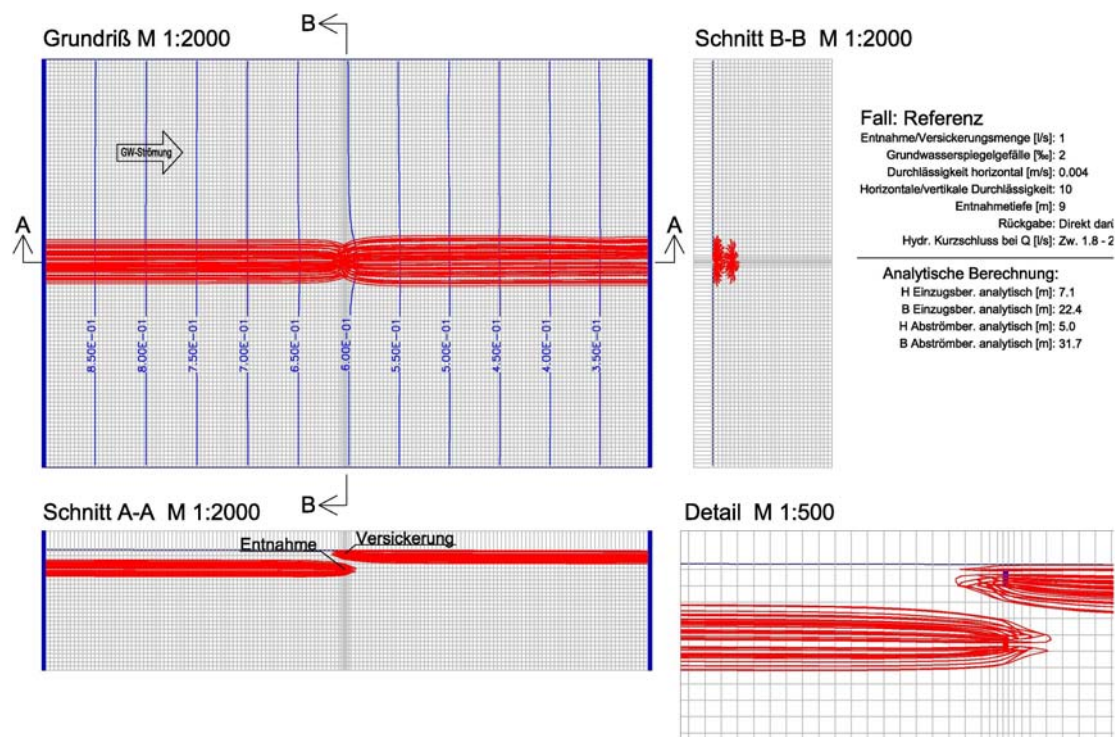


Abbildung 6: Ergebnisdarstellung für die 13 Beispielfälle (siehe Anhang B).

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse für die Beispielfälle angeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Berechnungsfälle mit Angabe, ab welcher Entnahme- und Rückgabemenge ein hydraulischer Kurzschluss auftritt. Grau hinterlegt sind die Ergebnisse der analytischen Berechnung gemäß Gleichung 7 bis Gleichung 10.

Fall	Q [l/s]	Tats. mittl. ET [m]	k _{f,h} [m/s]	k _{f,v} [1]	I [‰]	Lage der Rückgabe	A [m ²]	b/h [1]	Zentrale Entnahme		Rand- versickerung		Kurzschluss? ja/nein, bei Q=
									H _Z [m]	B _Z [m]	H _R [m]	B _R [m]	
Referenzfall	1	9	0.004	10	2	Direkt darüber	125.0	3.16	7.1	22.4	5.0	31.7	nein zw. 1.8 u. 2 l/s
Fall 1	1	9	0.004	10	2	5 m stromauf	125.0	3.16	7.1	22.4	5.0	31.7	nein zw. 1.5 u. 1.6 l/s
Fall 2	1	9	0.004	10	2	50 m stromauf	125.0	3.16	7.1	22.4	5.0	31.7	nein zw. 1.1 u. 1.2 l/s
Fall 3	1	9	0.004	10	2	5 m stromab	125.0	3.16	7.1	22.4	5.0	31.7	nein zw. 2.2 u. 2.3 l/s
Fall 4	1	11	0.004	3	2	Direkt darüber	125.0	1.73	9.6	16.6	6.8	23.5	nein zw. 1.5 u. 1.6 l/s
Fall 5	1	11	0.004	3	2	50 m stromauf	125.0	1.73	9.6	16.6	6.8	23.5	ja zw. 0.9 u. 1 l/s
Fall 6	1	11	0.004	3	2	5 m stromab	125.0	1.73	9.6	16.6	6.8	23.5	nein zw. 2.1 u. 2.2 l/s
Fall 7	1	15	0.004	1	2	Direkt darüber	125.0	1.00	12.6	12.6	8.9	17.8	nein zw. 1.7 u. 1.8 l/s
Fall 8	1	17	0.001	10	2	Direkt darüber	500.0	3.16	14.2	44.9	10.0	63.5	nein zw. 1.7 u. 1.8 l/s
Fall 9	1	5	0.015	10	2	Direkt darüber	33.3	3.16	3.7	11.6	2.6	16.4	nein zw. 1.5 u. 1.6 l/s
Fall 10	1	3	0.05	10	2	Direkt darüber	10.0	3.16	2.0	6.3	1.4	9.0	ja, direkt angrenzende Entn.
Fall 11	0.5	7	0.004	10	2	Direkt darüber	62.5	3.16	5.0	15.9	3.5	22.4	nein zw. 0.9 u. 1 l/s
Fall 12	1	61	0.004	10	1	Direkt darüber	250.0	3.16	10.0	31.7	7.1	44.9	nein zw. 1.9 u. 2 l/s

Anhand der weiteren Berechnungsfälle wurden Diagramme entwickelt, die den Zusammenhang zwischen hydraulischer Durchlässigkeit und der Entnahme- bzw. Rückgabemenge, ab der ein hydraulischer Kurzschluss auftritt, darstellen. Als konstant angenommen werden die Lage der Versickerung (direkt darüber bzw. 50 m stromauf), das Grundwasserspiegelgefälle (2 ‰) und das Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Durchlässigkeit (10). Die Tiefe der Entnahme wurde mit 5 m, 11 m und 15 m unter Grundwasserspiegel festgelegt, die Versickerung erfolgt in allen Fällen an der Grundwasseroberfläche. Die Lage der Versickerung 50 m stromauf der Entnahme wird als Repräsentation des ungünstigsten Falles angenommen, da in dieser Entfernung von der Entnahme auf jeden Fall die vollständige Höhen-Ausdehnung des Einzugsbereiches auftritt. In Abbildung 7 sind die Diagramme dargestellt.

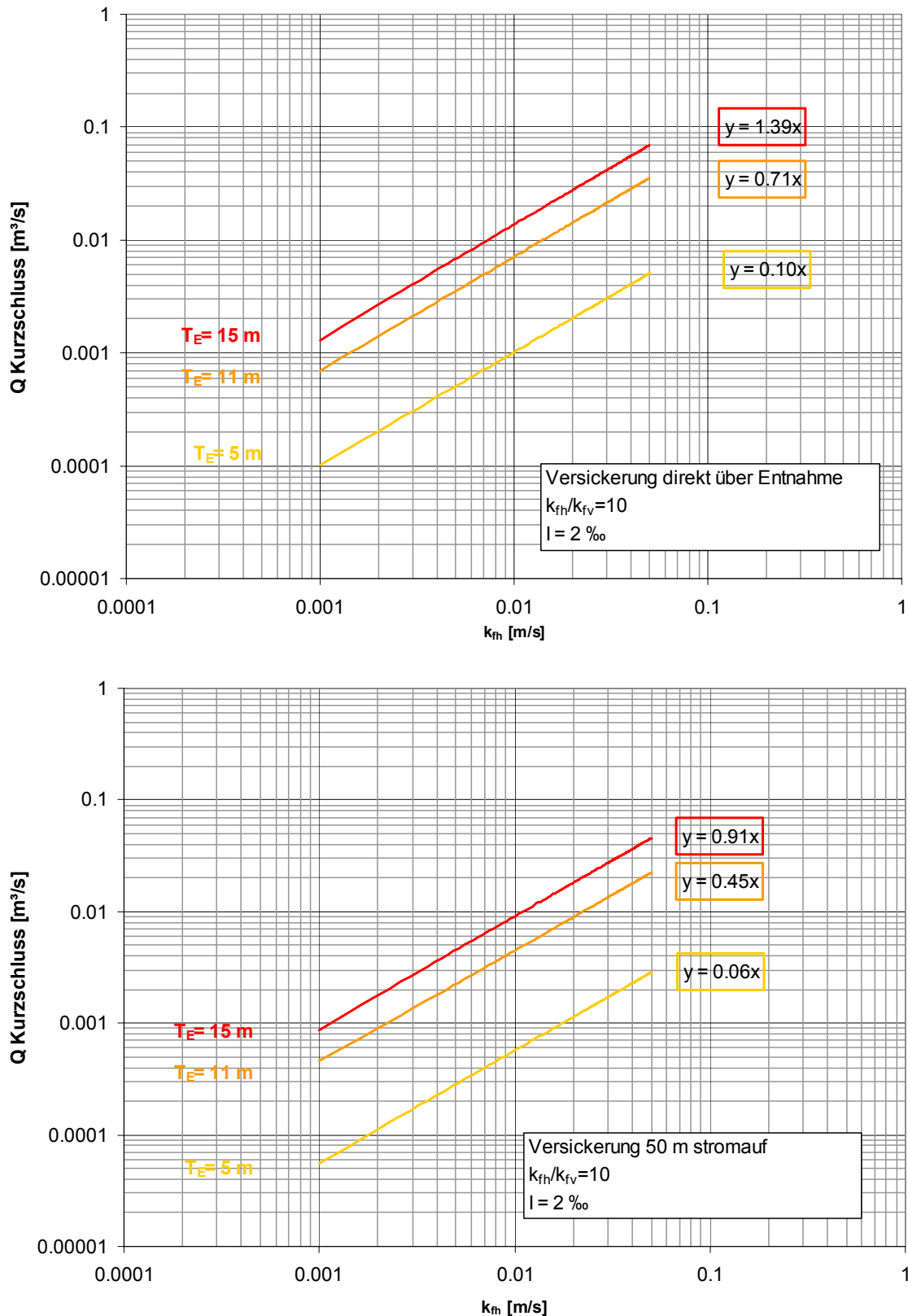


Abbildung 7: Diagramm zur Abschätzung der Entnahme- bzw. Rückgabemenge Q_{ks} , ab der ein hydraulischer Kurzschluss auftritt.

Die Diagramme in Abbildung 7 können auch für andere Grundwasserspiegelgefälle I_x angewendet werden, wenn Q_{ks} aus dem Diagramm mit dem Verhältnis I_x/I_{Diagramm} multipliziert wird.

3.2 Vergleich von Q_{ks} bei Berechnung anhand der analytischen Formeln mit Berechnung mit numerischem Modell

Die mögliche Entnahme- und Rückgabemenge für die zur Entwicklung von Abbildung 7 berechneten Fälle wurde neben der Berechnung mit dem numerischen Modell auch mit den analytischen Formeln nach Kapitel 2.4.1 ermittelt. Dabei wurde vereinfachend angenommen, dass ein hydraulischer Kurzschluss erst dann auftreten kann, wenn gilt (siehe Gleichung 11):

$$T_E \leq H_R + \frac{H_Z}{2}$$

wenn also die Entnahmetiefe unter Grundwasserspiegel T_E kleiner als die Höhe des Abström-bereiches der Versickerung H_R plus die halbe Höhe des Zustrombereiches zum Entnahme-brunnen H_Z ist.

Bei dieser Vorgangsweise wird die gegenseitige grundwasserhydraulische Beeinflussung von Versickerung und Entnahme vernachlässigt.

Tabelle 3: Vergleich Q_{ks} nach analytischer Berechnung und Berechnung mit dem numerischen 3d-Grundwassermodell. Die angeführten Fälle sind zur Unterscheidung von den in Tabelle 1 und Tabelle 2 beschriebenen Fällen mit Stern (*) bezeichnet.

Fall	I	$k_{f,h}$	$k_{f,h}/k_{f,v}$	Entnahmetiefe	Lage der Rückgabe	Q_{ks} analytisch	Q_{ks} aus numerischem Modell	$Q_{ks\ num}/Q_{ks\ analyt}$
	[1]	[m/s]	[1]	[m]		[l/s]	[l/s]	[1]
Fall 1*	0.002	0.001	10	5	Direkt darüber	0.085	0.090	1.06
Fall 2*	0.002	0.004	10	5	Direkt darüber	0.341	0.395	1.16
Fall 3*	0.002	0.015	10	5	Direkt darüber	1.278	1.550	1.21
Fall 4*	0.002	0.050	10	5	Direkt darüber	4.261	5.050	1.19
Fall 5*	0.002	0.001	10	11	Direkt darüber	0.412	0.725	1.76
Fall 6*	0.002	0.004	10	11	Direkt darüber	1.650	2.850	1.73
Fall 7*	0.002	0.015	10	11	Direkt darüber	6.187	10.550	1.71
Fall 8*	0.002	0.050	10	11	Direkt darüber	20.624	35.500	1.72
Fall 9*	0.002	0.001	10	15	Direkt darüber	0.767	1.355	1.77
Fall 10*	0.002	0.004	10	15	Direkt darüber	3.068	5.550	1.81
Fall 11*	0.002	0.015	10	15	Direkt darüber	11.505	20.500	1.78
Fall 12*	0.002	0.050	10	15	Direkt darüber	38.351	69.300	1.81
Fall 13*	0.001	0.050	10	5	Direkt darüber	2.131	2.700	1.27
Fall 14*	0.001	0.050	10	15	Direkt darüber	19.177	34.300	1.79
Fall 15*	0.002	0.001	10	5	50 m stromauf	0.085	0.057	0.66
Fall 16*	0.002	0.004	10	5	50 m stromauf	0.341	0.225	0.66
Fall 17*	0.002	0.015	10	5	50 m stromauf	1.278	0.855	0.67
Fall 18*	0.002	0.050	10	5	50 m stromauf	4.261	2.850	0.67
Fall 19*	0.002	0.001	10	11	50 m stromauf	0.412	0.445	1.08
Fall 20*	0.002	0.004	10	11	50 m stromauf	1.650	1.750	1.06
Fall 21*	0.002	0.015	10	11	50 m stromauf	6.187	6.800	1.10
Fall 22*	0.002	0.050	10	11	50 m stromauf	20.624	22.300	1.08
Fall 23*	0.002	0.001	10	15	50 m stromauf	0.767	0.905	1.18
Fall 24*	0.002	0.004	10	15	50 m stromauf	3.068	3.650	1.19
Fall 25*	0.002	0.015	10	15	50 m stromauf	11.505	13.500	1.17
Fall 26*	0.002	0.050	10	15	50 m stromauf	38.351	45.500	1.19
Fall 27*	0.001	0.050	10	15	50 m stromauf	19.177	22.500	1.17

Es zeigt sich, dass bei einer **direkt über der Entnahme** gelegenen Versickerung je nach Entnahmetiefe gemäß numerischer Berechnung bis zu 80 % mehr Wasser entnommen werden kann, als sich bei Anwendung der analytischen Formeln mit dem Kriterium gemäß Gleichung 11 ergibt. Je größer die Entnahmetiefe, desto größer ist die Differenz. Es wird vermutet, dass sich die kleineren Werte aufgrund der Diskretisierung des numerischen Modells ergeben (die Bedingung, dass die Höhe der Filterstrecke klein im Vergleich zur Höhe des Einzugsbereiches ist, ist nicht gegeben) und der theoretische Wert für den Faktor $Q_{ks, numerisch}/Q_{ks, analytisch}$ bei ca. 1,8 liegt. Der Grund für die mögliche größere Entnahmemenge liegt darin, dass sich die mit den analytischen Formeln errechnete Höhe und Breite des Einzugs- und Abströmbereiches erst in einer gewissen Entfernung von der Entnahme bzw. Versickerung einstellt und daher im Nahbereich von Versickerung und Entnahme ein Abstand zwischen Einzugsbereich und Abströmbereich vorhanden ist, der eine größere Entnahme- und Rückgabemenge zulässt.

Bei Heranziehung von Gleichung 11 als Bedingung für die erforderliche Entnahmetiefe liegt man in diesem Fall also auf der sicheren Seite.

Etwas anders stellt sich die Situation bei einer Versickerung, die **50 m oberhalb der Entnahmestelle** liegt, dar. Und zwar tritt in der numerischen Modellrechnung bei Entnahmemengen zwischen ca. 65 –120 % der aus der analytischen Berechnung möglichen Entnahmemenge ein hydraulischer Kurzschluss auf. Auch hier ist anzunehmen, dass die kleinen Werte aufgrund der Diskretisierung auftreten und der Faktor $Q_{ks, \text{numerisch}}/Q_{ks, \text{analytisch}}$ bei 1.0 – 1.2 liegt.

3.3 Qualitative Beschreibung der Auswirkungen der einzelnen Parameter auf die Entnahmemenge Q_{ks} ab der ein hydraulischer Kurzschluss auftritt

- Die hydraulische Durchlässigkeit ist direkt proportional zur zulässigen Entnahmemenge Q_{ks} . Eine Verdoppelung der Durchlässigkeit erlaubt also eine doppelt so große Entnahmemenge. Die große Spannweite der hydraulischen Durchlässigkeit (Werte können mehrere Zehnerpotenzen variieren) unterstreicht die Bedeutung einer gesicherten Kenntnis der Durchlässigkeit.
- Das Grundwasserspiegelgefälle ist ebenfalls direkt proportional zur zulässigen Entnahmemenge Q_{ks} .
- Der Vertikalabstand zwischen Entnahme und Versickerung verhält sich quadratisch zur zulässigen Entnahmemenge Q_{ks} . Eine Verdoppelung der Entnahmetiefe ermöglicht also eine 4-fache Entnahmemenge.
- Die Wurzel des Verhältnisses k_{fv}/k_{fh} verhält sich indirekt proportional zur zulässigen Entnahmemenge Q_{ks} . Dieser Parameter ist also eher unsensibel. In der Praxis ist die vertikale Durchlässigkeit meist nicht bekannt und wird üblicherweise mit 1/10 der horizontalen Durchlässigkeit angesetzt.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HINWEISE ZUR PRAKTISCHEN ANWENDUNG DER ERGEBNISSE

Die vorliegende Untersuchung liefert Methoden, die eine Abschätzung der zulässigen Entnahme- und Rückgabemenge bei Entnahme- und Versickerungsbrunnen zu Heiz- und Kühlzwecken zulassen. Die Entnahme und Versickerung erfolgt dabei, zur Verhinderung von Überschneidungen der Zu- und Abströmbereiche, aus unterschiedlichen Tiefen eines Grundwasserleiters.

Dabei müssen folgende Voraussetzungen annähernd zutreffen, um den Annahmen der theoretischen Überlegungen zu entsprechen:

1. Die Entnahme und Versickerung erfolgt im gleichen Grundwasserhorizont.
2. Der Grundwasserleiter ist homogen.
3. Die Grundwasserneubildung durch versickernde Niederschläge ist vernachlässigbar.
4. Die Länge der Filterstrecke ist klein im Verhältnis zur Höhe des Einzugs- bzw. Abströmbereiches.
5. Die Höhe des Einzugs- bzw. Abströmbereiches ist klein im Verhältnis zur Mächtigkeit des Grundwasserleiters.
6. Die Filterstrecke des Entnahmebrunnens liegt in hinreichender Entfernung ($> H_z/2$) zu Grundwasserstauer und Grundwasseroberfläche.
7. Die Ränder des Grundwasserleiters liegen in hinreichender Entfernung zur Entnahme- bzw. Versickerungsstelle, dass ein Randeinfluss auszuschließen ist.
8. Die Prozesse der Konvektion aufgrund von Dichteunterschieden, Wärmeleitung und Änderung der hydraulischen Durchlässigkeit des Grundwasserleiters mit der Temperatur müssen vernachlässigbar sein.

Für die praktische Anwendung wird die Entnahmetiefe T_E als Abstand zwischen Grundwasserspiegel und der Oberkante des Filterrohres definiert (siehe Abbildung 8), da im ungünstigsten Fall davon ausgegangen werden muss, dass aufgrund von Inhomogenitäten des Grundwasserleiters im Bereich des Filterrohres die Entnahme überwiegend im oberen Abschnitt des Filterrohres erfolgt.

Als maßgeblicher Grundwasserspiegel ist ein niedriger Grundwasserspiegel (NGW) heranzuziehen.

Für das Filterrohr ist aus brunnenhdraulischen Gründen (Ergiebigkeit, Sandfreiheit) eine Länge von mind. 2 Metern erforderlich.

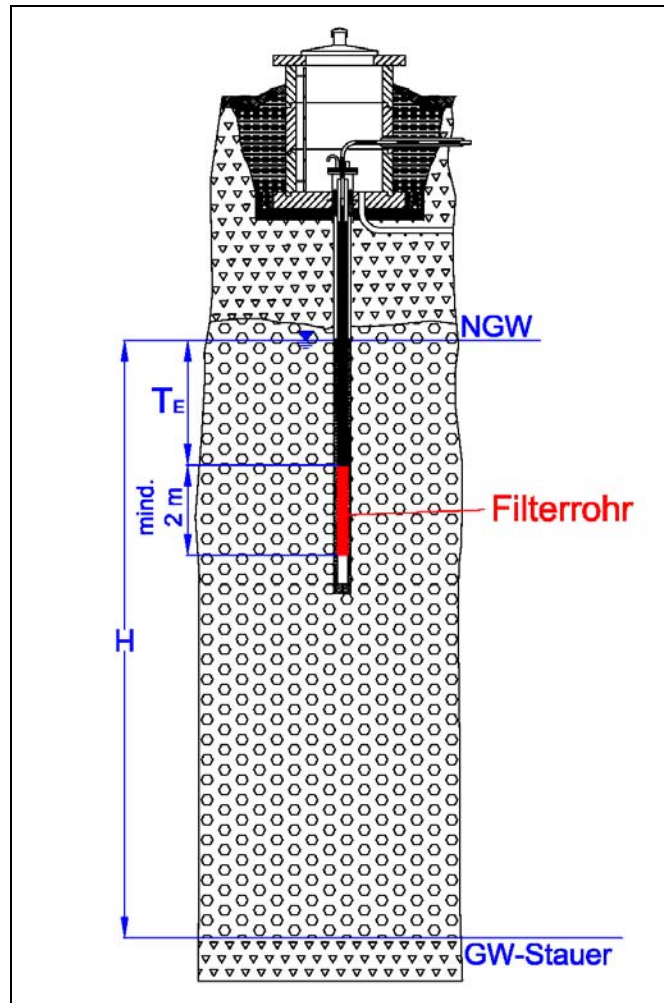


Abbildung 8: Definition der Entnahmetiefe T_E . Schemazeichnung adaptiert von „Amt der OÖ Landesregierung, OÖ Wasser“.

4.1 Ermittlung von Q_{ks} aus Diagrammen

Die Diagramme in Abbildung 7 können für folgende Situationen zur Abschätzung der maximal zulässigen Entnahme- und Rückgabemenge zur Verhinderung eines Kurzschlusses Q_{ks} herangezogen werden:

- Versickerung direkt über der Entnahme oder 50 m stromaufwärts
- Hydraulische Durchlässigkeit k_{fh} zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-2}$ m/s

- Verhältnis $k_{fh}/k_{fv} = 10$
- Entnahmetiefen (von Grundwasserspiegel bis Oberkante Filterrohr) 5m, 11m, 15m

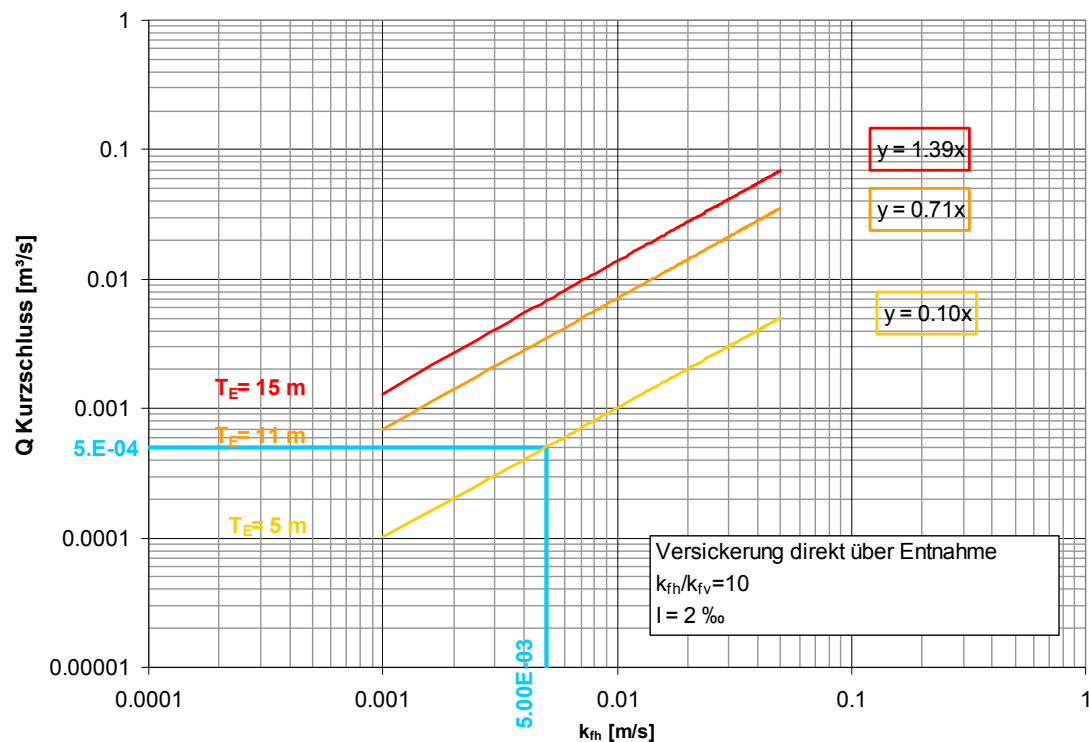
Die Diagramme in Abbildung 7 gelten für ein Grundwasserspiegelgefälle von 2 ‰. Bei davon abweichendem Gefälle I_x ist der aus dem Diagramm ermittelte Wert Q_{ks} mit dem Verhältnis $I_x/2‰$ zu multiplizieren.

Die so ermittelte zulässige Entnahmemenge Q_{ks} stellt den Grenzfall ohne Sicherheiten dar.

Beispiel:

Gegeben: $k_{fh} = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s; $I = 1$ ‰; Entnahmetiefe Oberkante Filterrohr 5 m unter niedrigstem Grundwasserspiegel, Versickerung in den Entnahmevorschacht (direkt darüber). Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Durchlässigkeit $f=0.1$. Mächtigkeit des Grundwasserleiters $H = 20$ m.

Gesucht: Zulässige Entnahmemenge, dass ein hydraulischer Kurzschluss verhindert werden kann.



Aus dem Diagramm für ein Gefälle von 2 ‰ abgelesene Wert: 0.5 l/s. Multiplikation mit dem Faktor 1/2 ergibt eine maximal zulässige Entnahmemenge zur Vermeidung eines hydraulischen Kurzschlusses von 0.25 l/s.

Jetzt ist zu überprüfen, ob die Mächtigkeit H des Grundwasserleiters ausreichend groß ist, dass die Anwendbarkeit gegeben ist. Dazu muss $H \gg T_E + H_Z/2$ gelten. H_Z gemäß Gleichung 7 ist 4.5 m daraus folgt $5 + 4.5/2 = 7.25 \ll 20$. Die Voraussetzung zur Anwendbarkeit ist also gegeben.

Da die Diagramme in Abbildung 7 nicht das gesamte Spektrum an möglichen Parameterkombinationen abdecken, wird als Alternative eine Abschätzung anhand der analytischen Formeln gemäß Kapitel 2.4.1 vorgeschlagen.

4.2 Ermittlung von Q_{ks} anhand der analytischen Formeln

Die in Kapitel 2.4.1 angeführten Gleichungen können mit der Bedingung Gleichung 11 herangezogen werden, um die zulässige Entnahmemenge zur Verhinderung eines Kurzschlusses Q_{ks} zu ermitteln. Dabei ist folgendes zu beachten:

Bei einer Versickerung direkt über der Entnahme enthält der so berechnete Wert für Q_{ks} noch Sicherheiten, da die Entnahmemenge, bei der tatsächlich ein hydraulischer Kurzschluss auftritt, bis zu 80 % größer als der berechnete Wert ist.

Bei einer Versickerung stromab der Entnahme sind ebenfalls Sicherheiten vorhanden (zunehmend mit zunehmender horizontaler Entfernung zwischen Versickerung und Entnahme).

Bei einer Versickerung stromauf der Entnahme ist keine Sicherheit vorhanden und ein hydraulischer Kurzschluss bei der so errechneten Wassermenge kann nicht ausgeschlossen werden. Daher wird in diesen Fällen eine Reduzierung der Entnahmemenge oder Vergrößerung des Vertikalabstandes zwischen Versickerung und Entnahme empfohlen.

Beispiel wie oben:

Gegeben: $k_{fh} = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s; $I = 1$ ‰; Entnahmetiefe Oberkante Filterrohr 5 m unter niedrigstem Grundwasserspiegel, Versickerung in den Entnahmevorschacht (direkt darüber). Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Durchlässigkeit $f=0.1$. Mächtigkeit des Grundwasserleiters $H = 20$ m.

Gesucht: Zulässige Entnahmemenge, dass ein hydraulischer Kurzschluss verhindert werden kann.

Die Bedingung Gleichung 11 mit Gleichung 7 und Gleichung 9 eingesetzt und aufgelöst nach Q ergibt:

$$Q \leq \frac{T_E^2 \cdot k_{fh} \cdot I \cdot \pi}{(3 + 2 \cdot \sqrt{2}) \cdot \sqrt{f}} \quad \text{Gleichung 12}$$

Einsetzen ergibt $Q \leq 0.21 \text{ l/s}$

Auch hier ist die Bedingung $H > T_E + H_Z/2$ gegeben.

Das Ergebnis der analytischen Berechnung ist kleiner als das Ergebnis aus dem Diagramm (aus den numerischen Berechnungen entwickelt), da bei der analytischen Berechnung davon ausgegangen wird, dass sich die volle Höhe des Einzugs- und Abströmbereiches schon direkt an der Entnahme- bzw. Versickerungsstelle einstellt, was nicht der Fall ist.

Ist umgekehrt die Entnahme- bzw. Rückgabemenge bekannt und ist die erforderliche minimale Entnahmetiefe T_E gesucht, dass ein hydraulischer Kurzschluss ausgeschlossen werden kann, kann Gleichung 12 nach T_E umgeformt werden:

$$T_E \geq \sqrt{\frac{Q \cdot (3 + 2 \cdot \sqrt{2}) \cdot \sqrt{f}}{k_{fh} \cdot I \cdot \pi}} \quad \text{Gleichung 13}$$

4.3 Praxisempfehlungen für Wärmepumpen von Kleinanlagen (Einfamilienhausbereich)

Für die Bemessung der erforderlichen Entnahmetiefe zur Verhinderung eines hydraulischen Kurzschlusses bei Wärmepumpen von Kleinanlagen wurden eigene Diagramme entwickelt. Diese gelten für die üblichen kleinen Entnahmemengen von unter 1 l/s.

Es wurden die Fälle einer Versickerung direkt über der Entnahme (Versickerung in den Entnahmevorschacht) oder einer Versickerung 50 m oberhalb der Entnahme bearbeitet. Das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Durchlässigkeit ist mit 1:10 angenommen. In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind die Bemessungsdiagramme für eine Entnahme- und Rückgabemenge von 1 l/s dargestellt. Im Anhang A sind zusätzliche Diagramme für eine Entnahme- und Rückgabemenge von 0.7 l/s und 0.4 l/s dargestellt.

Auf der horizontalen Achse ist das Grundwasserspiegelgefälle aufgetragen. Die Kurven gelten für die angegebenen horizontalen hydraulischen Durchlässigkeiten. Auf der vertikalen Achse kann der erforderliche Abstand zwischen Grundwasserspiegel und der Oberkante des Filterrohres abgelesen werden.

Als maßgeblicher Grundwasserstand ist ein niedriger Grundwasserspiegel (NGW) heranzuziehen.

Liegen ausreichend verlässliche hydrologische Daten vor, so sollte die Mindesttiefe aus den Diagrammen „Versickerung 50 m stromaufwärts“ abgeleitet werden, um zukünftiges Entwicklungspotential für weitere Wärmepumpenstandorte nicht zu gefährden.

Liegen keine hydrologischen Daten vor, wird eine Mindesttiefe von 8 m (Wasserspiegel bis Oberkante Filterrohr) empfohlen. Somit ist in den meisten Fällen ein ausreichender Vertikalabstand für eine Versickerung in den Entnahmevorschacht gegeben. Erst ab einem Wert von ($k_{rh} \times I$) kleiner als ca. $1 \cdot 10^{-5}$ m/s ist eine genauere Prüfung erforderlich. Gleichzeitig ist sichergestellt, dass eine Beeinträchtigung der eigenen Entnahme durch fremde Versickerungsanlagen weitgehend ausgeschlossen werden kann und dass ganzjährig mit stabilen, geeigneten Entnahmetemperaturen und damit einem verbesserten Wirkungsgrad und einer höheren Betriebssicherheit besonders in Extremjahren gerechnet werden kann. Die Erhebungen hydrologischer Bemessungsparameter können sich weitgehend auf ein Minimum beschränken.

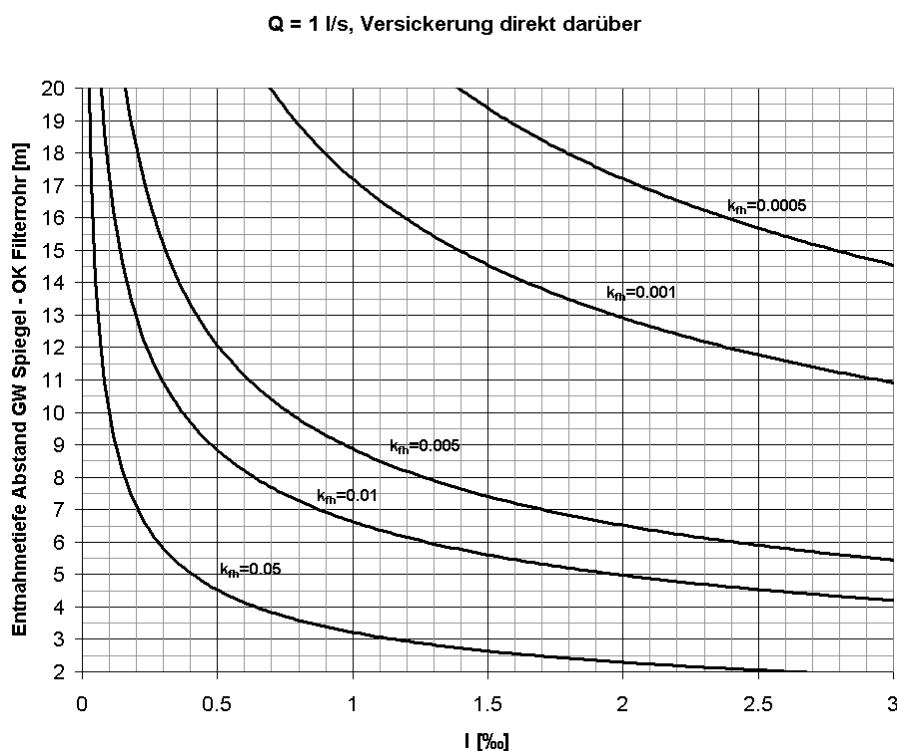


Abbildung 9: Bemessungsdiagramm für den erforderlichen Abstand zwischen Grundwasseroberfläche und Oberkante Filterrohr bei Wärmepumpen für Kleinanlagen mit einer Entnahme/Rückgabemenge von 1 l/s und Rückgabe in den Entnahmevorschacht (k_{rh} in [m/s]).

$Q = 1 \text{ l/s}$, Versickerung 50 m stromauf

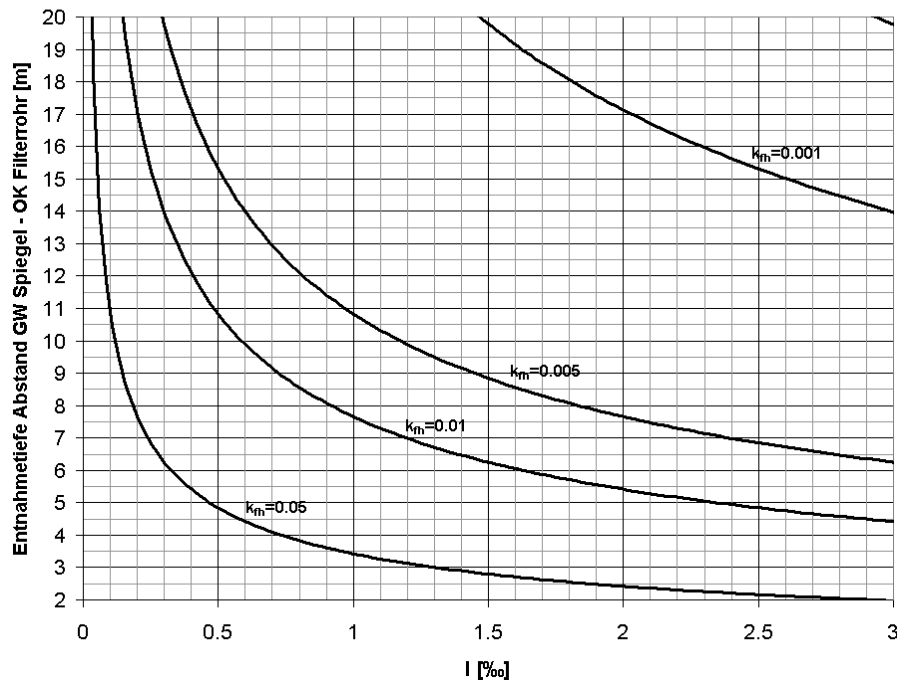


Abbildung 10: Bemessungsdiagramm für den erforderlichen Abstand zwischen Grundwasseroberfläche und Oberkante Filterrohr bei Wärmepumpen für Kleinanlagen mit einer Entnahme/Rückgabemenge von 1 l/s und Rückgabe 50 m stromauf der Entnahme (k_{fm} in [m/s]).

4.4 Aussagen für Grundwasserleiter mit geringerer Mächtigkeit

Die vorgestellte Methode zur Ermittlung des erforderlichen Vertikalabstandes von Entnahme- und Versickerungsbrunnen für überschneidungsfreie Grundwasserwärmepumpennutzung gilt für Grundwasserleiter, deren Mächtigkeit groß im Vergleich zur Höhe des Einzugs- bzw. Abströmbereiches ist. Ist diese Voraussetzung aufgrund der vorliegenden Parameter des Grundwasserleiters oder der Entnahme/Rückgabemenge nicht gegeben, ist auf die üblichen 2-dimensionalen Ansätze zurückzugreifen. Der erforderliche horizontale Abstand von Versickerungs- und Entnahmebrunnen in Grundwasserströmungsrichtung ist in diesem Fall mit

$$L = 0,6 \cdot \frac{Q}{k_{fh} \cdot I \cdot H} \quad \text{Gleichung 14}$$

festzulegen (siehe ÖWAV-Arbeitsbehelf Nr. 3: Wasserwirtschaftliche Gesichtspunkte für die Projektierung von Grundwasserwärmepumpenanlagen, 1986¹). Es ist:

Q.....Entnahme- bzw. Rückgabemenge

¹ In Überarbeitung

k_{fh}horizontale hydraulische Durchlässigkeit

I.....Grundwasserspiegelgefälle

H.....Mächtigkeit des Grundwasserleiters

Auch in diesem Fall sollte zur Erhöhung der Sicherheit gegen einen hydraulischen Kurzschluss eine vertikale Trennung von Zu- und Abströmbereich durch eine möglichst tief liegende Entnahme und möglichst seichte Rückgabe angestrebt werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht beschreibt Methoden zur Abschätzung des erforderlichen Vertikalabstandes zwischen Entnahmebrunnen und Versickerungsbrunnen, damit unabhängig von der Grundwasserströmungsrichtung ein hydraulischer Kurzschluss zwischen Versickerung und Entnahme ausgeschlossen werden kann.

Es wurden Szenarienrechnungen eines schematischen Grundwasserleiters mit dem 3-dimensionalen numerischen Grundwassermodell pmwin durchgeführt. Die Szenarien unterscheiden sich in den Parametern Durchlässigkeit, Verhältnis der horizontalen zur Vertikalen Durchlässigkeit, Grundwasserspiegelgefälle, Entnahme- und Rückgabemenge, Entnahmetiefe und der Lage der Versickerungsstelle im Bezug zur Entnahmestelle. Die Versickerung wurde in allen Fällen als oberflächennahe Versickerung angesetzt. Die Entnahmetiefe wurde mit maximal 20 m begrenzt. Die Rückgabemenge wird gleich der Entnahmemenge vorausgesetzt. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters wurde mit ca. 60 m festgelegt und ist so groß, dass ein mehr als vernachlässigbarer Einfluss der Grundwassersohle auf die betrachteten Strömungsvorgänge auszuschließen ist. Es wurden 13 Beispielfälle berechnet, wobei ausgehend von einem Referenzfall die Parameter einzeln variiert wurden. Für diese Fälle erfolgte eine Darstellung der Zu- und Abströmbereiche der Entnahme- und Versickerungsbrunnen in Grundrissen und Schnitten, außerdem werden Angaben zur Entnahme- und Rückgabemenge, bei deren Überschreitung ein hydraulischer Kurzschluss auftritt, gemacht.

Neben den Beispielfällen wurden weitere Fälle berechnet, die als Grundlage für die Entwicklung von Diagrammen herangezogen wurden. Die Diagramme erlauben eine Abschätzung der zulässigen Entnahmemenge, bei der noch kein hydraulischer Kurzschluss auftritt in Abhängigkeit von Entnahmetiefe, hydraulischer Durchlässigkeit, Lage der Versickerung im Bezug zur Entnahme und Grundwasserspiegelgefälle.

Ein Vergleich der numerischen Berechnungen mit Berechnungen der Entnahme- bzw. Rückgabemenge, ab der ein Kurzschluss auftritt anhand der entwickelten analytischen Formeln zeigt, dass im Fall einer Versickerung direkt über der Entnahme die Berechnung von Q_{ks} mit den analytischen Formeln sicherheiten enthält, da ein Kurzschluss erst bei Überschreiten der so berechneten Wassermenge um bis zu 80 % auftritt. Im Fall einer Versickerung 50 m flussauf der Entnahme tritt in der numerischen Berechnung ein Kurzschluss schon bei 65 – 120 % der analytisch berechneten Wassermenge auf. Daher ist bei Versickerung flussauf der Entnahme eine entsprechende Reduktion der Entnahmemenge oder Vergrößerung des Vertikalabstandes erforderlich.

ANHANG A

Bemessungsdiagramme zur Ermittlung der erforderlichen Entnahmetiefe (Abstand zw. Grundwasserspiegel und Oberkante des Filterrohres) für Kleinanlagen mit einer Entnahme- und Rückgabemenge unter 1 l/s.

Als Grundwasserspiegel soll ein niedriger Grundwasserstand (NGW) herangezogen werden.

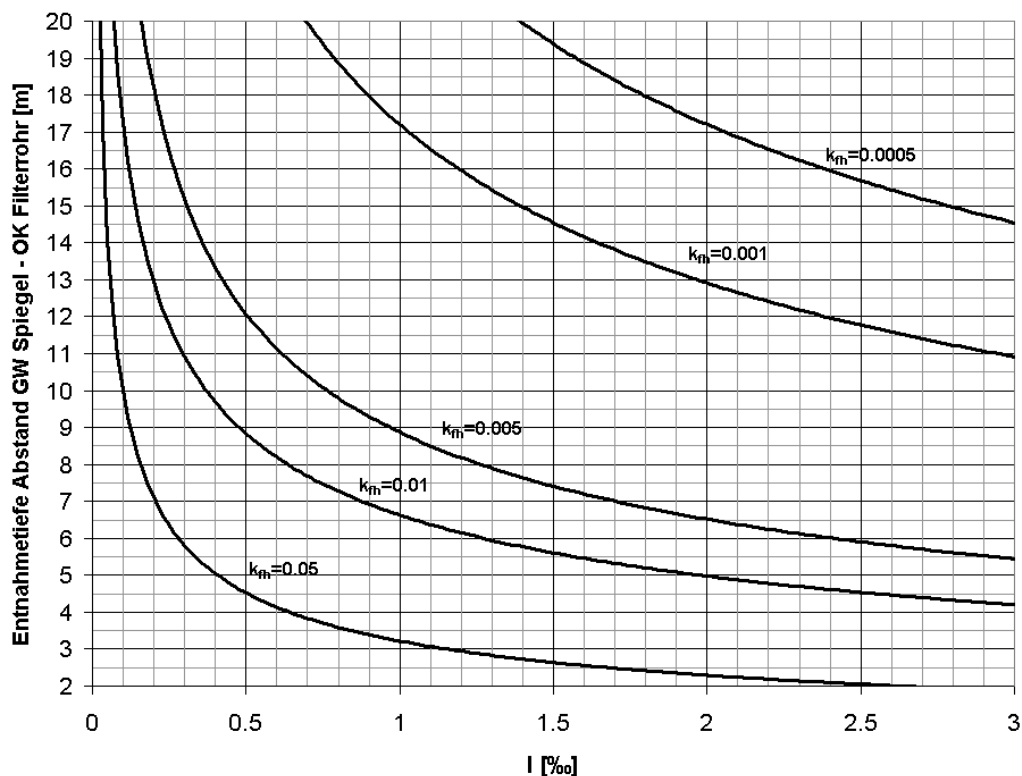
Der Abstand zwischen Grundwasserspiegel und Oberkante des Filterrohres soll auch bei günstigen Untergrund- und Grundwasserverhältnissen, die theoretisch einen kleineren Abstand zulassen, 2 Meter nicht unterschreiten.

Die Länge des Filterrohres soll 2 Meter nicht unterschreiten.

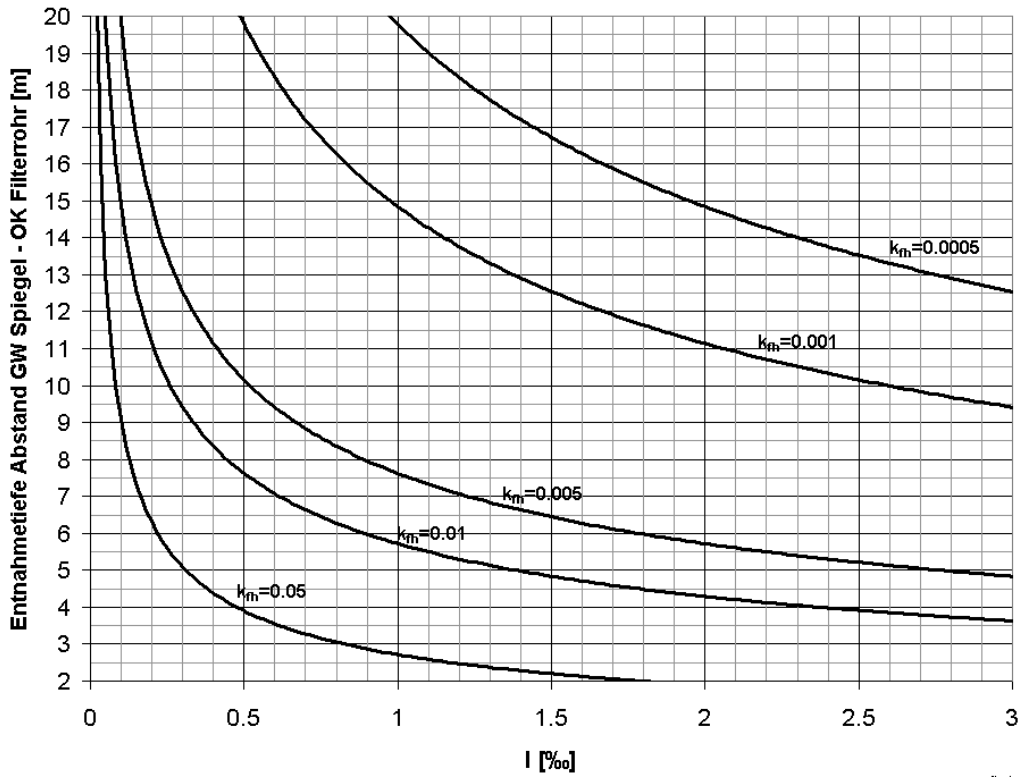
Versickerung direkt über der Entnahme (im Entnahmevorschacht)

Diagramme für Entnahmen von $Q = 1$ l/s, $Q = 0.7$ l/s und $Q = 0.4$ l/s

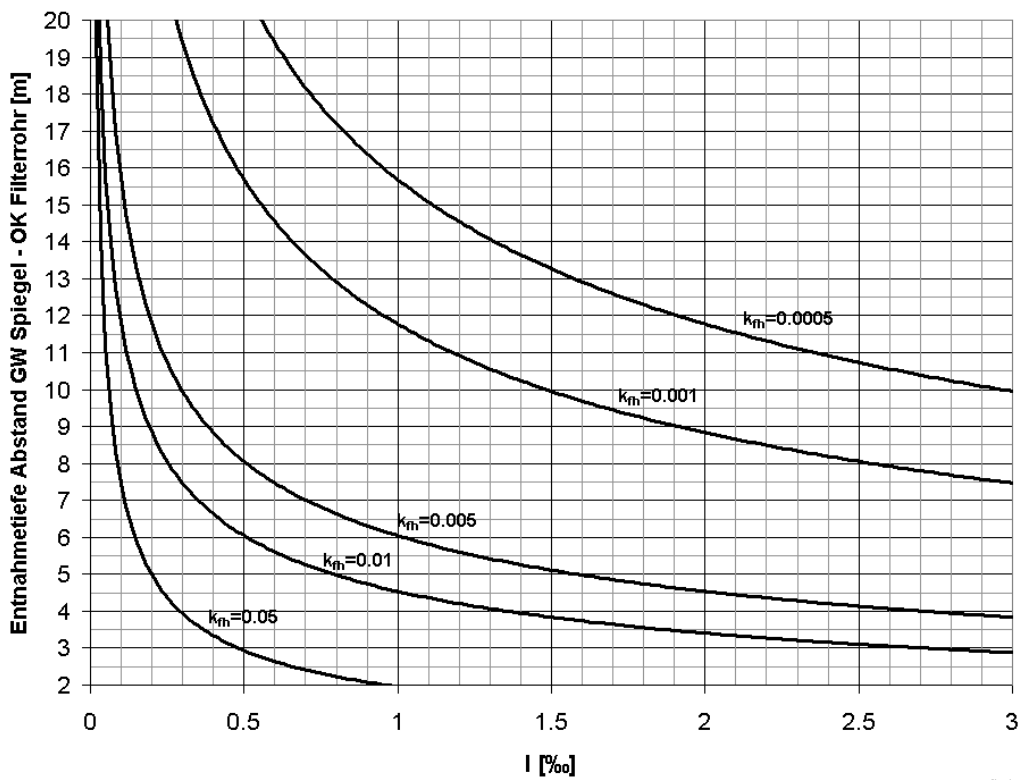
$Q = 1$ l/s, Versickerung direkt darüber



Q = 0.7 l/s, Versickerung direkt darüber



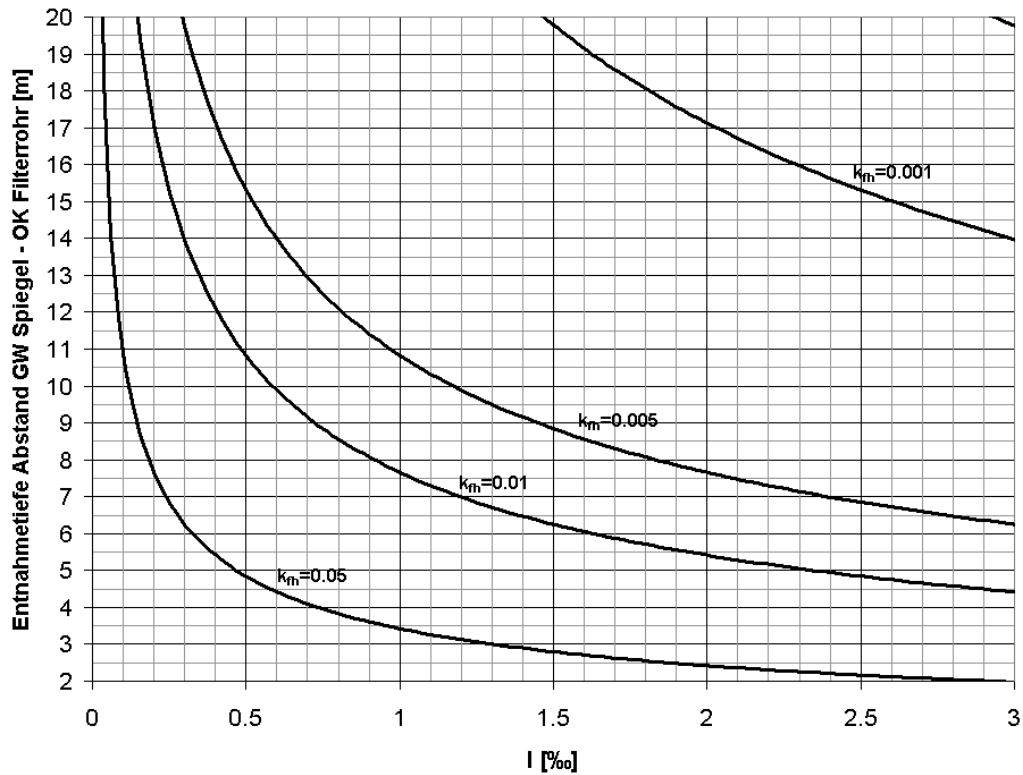
Q = 0.4 l/s, Versickerung direkt darüber



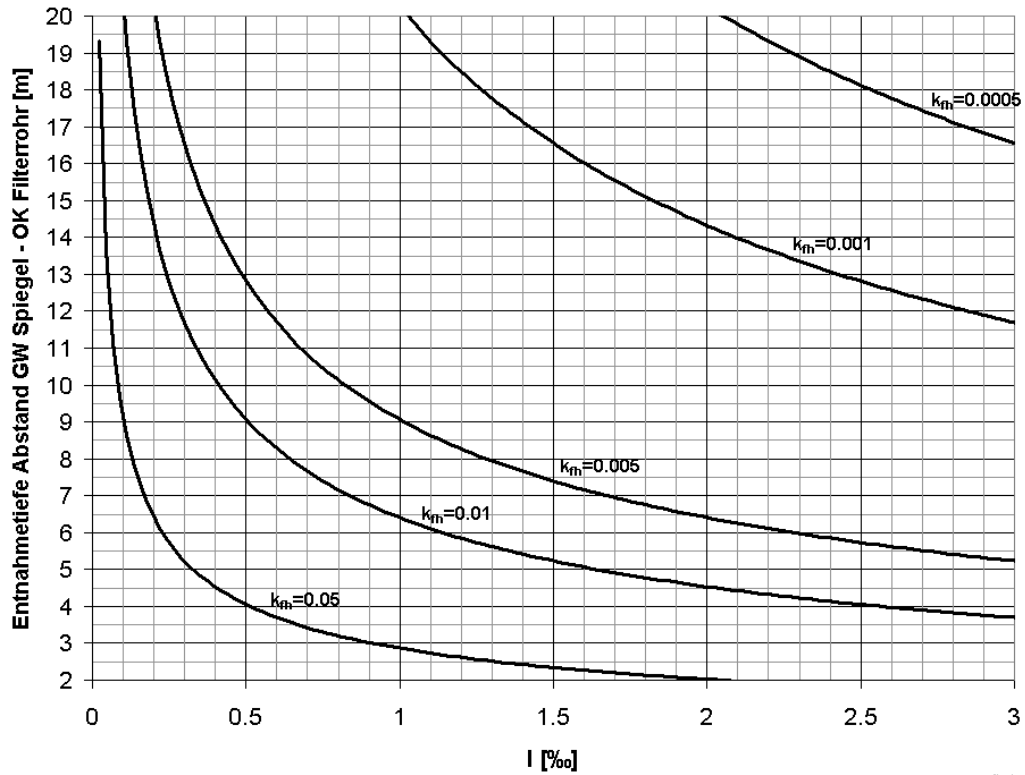
Versickerung 50 m grundwasserstromauf der Entnahme

Diagramme für Entnahmen von $Q = 1$ l/s, $Q = 0.7$ l/s und $Q = 0.4$ l/s

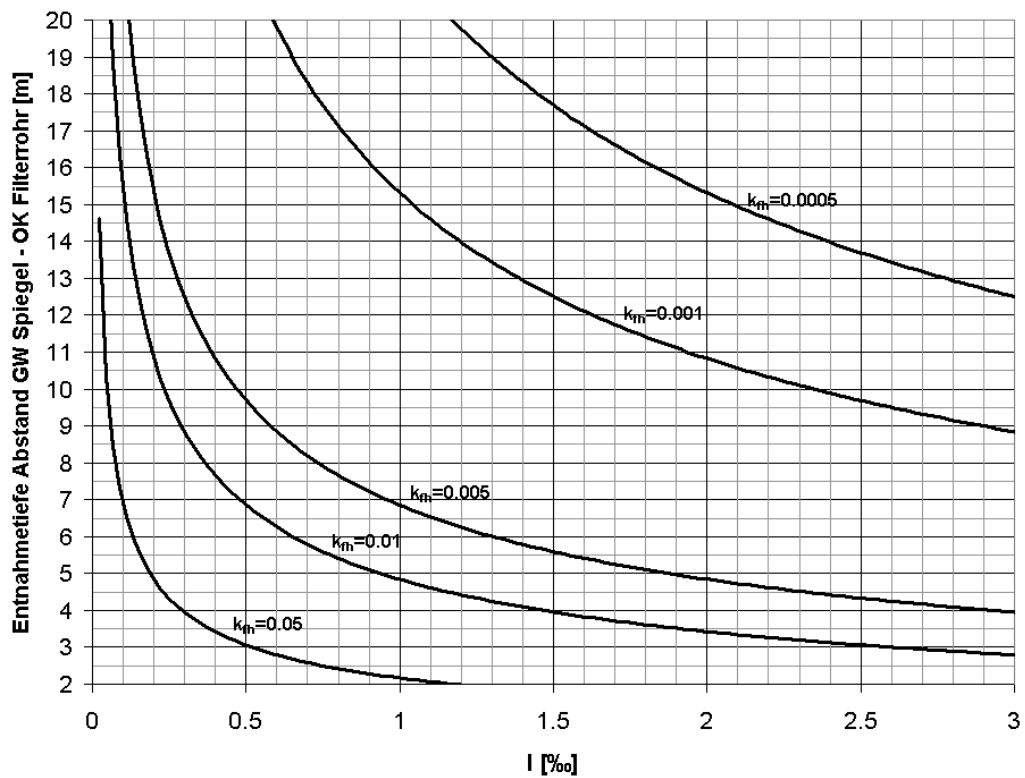
$Q = 1$ l/s, Versickerung 50 m stromauf



Q = 0.7 l/s, Versickerung 50 m stromauf



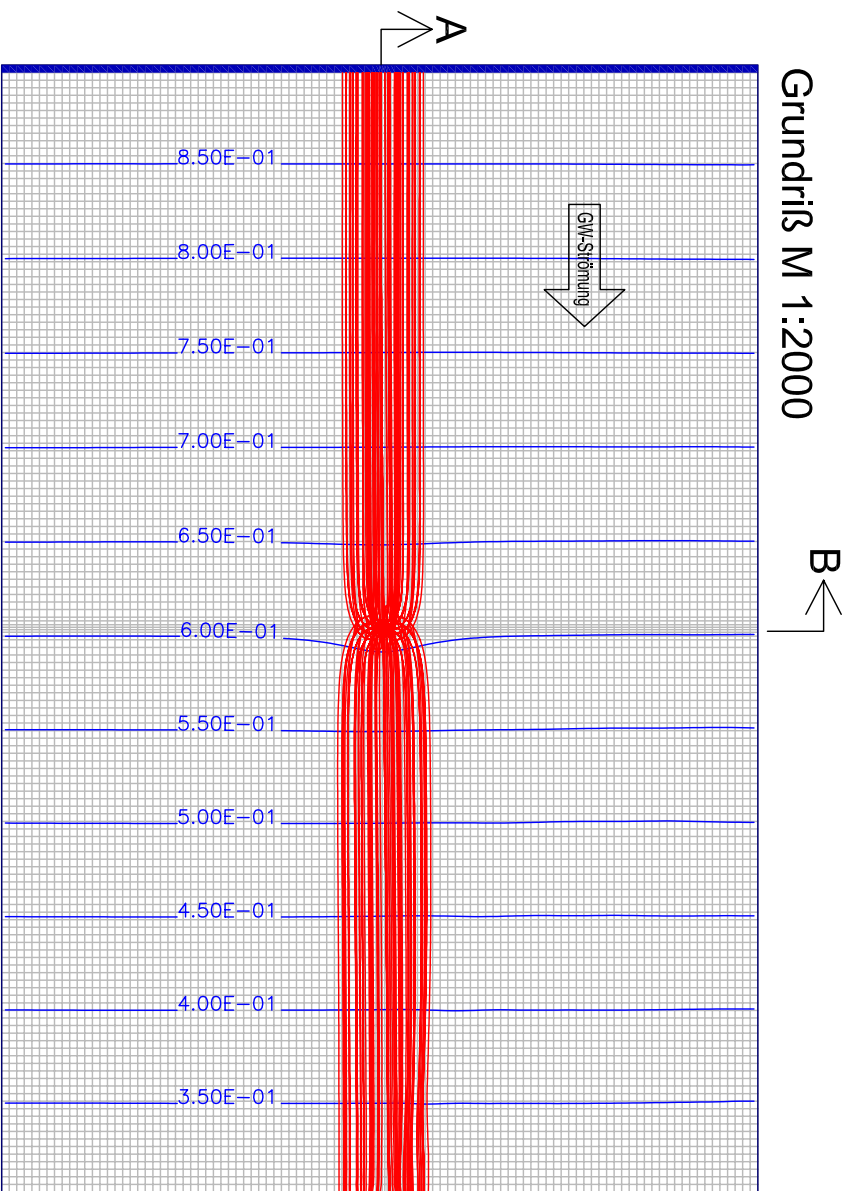
Q = 0.4 l/s, Versickerung 50 m stromauf



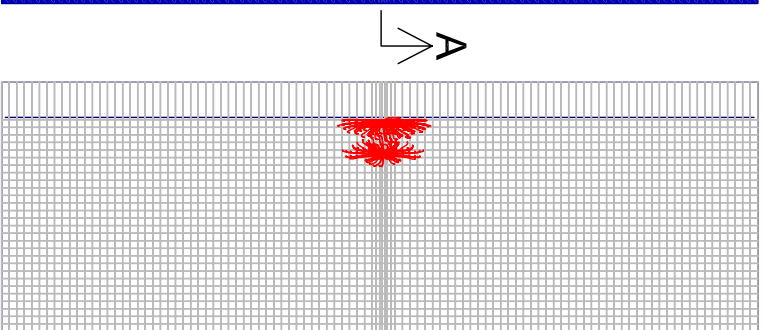
ANHANG B

Referenzfall, Fälle 1-12: Darstellung der Einzugs- und Abströmbereiche der Entnahme- und Versickerungsbrunnen. Für Fall 6 ist beispielhaft der hydraulische Kurzschluss dargestellt.

Grundriß M 1:2000



Schnitt B-B M 1:2000



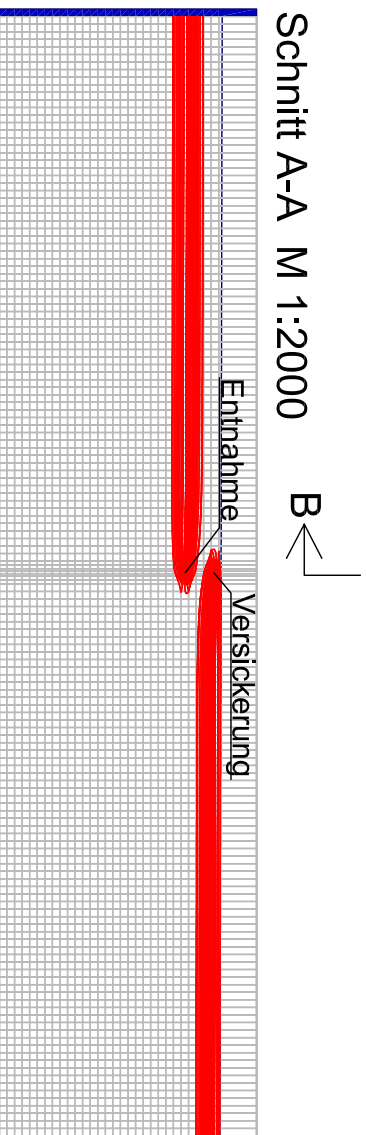
Fall: Referenz

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 9
- Rückgabe: Direkt darüber
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1.8 - 2.0

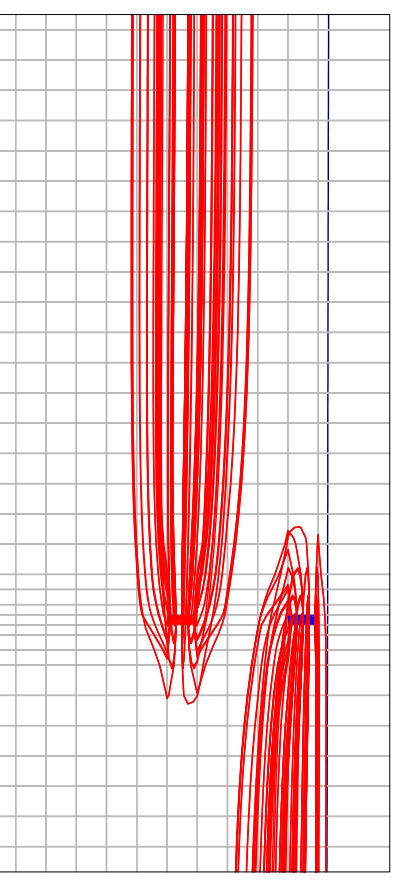
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 7.1
- B Einzugsber. analytisch [m]: 22.4
- H Abströmer. analytisch [m]: 5.0
- B Abströmer. analytisch [m]: 31.7

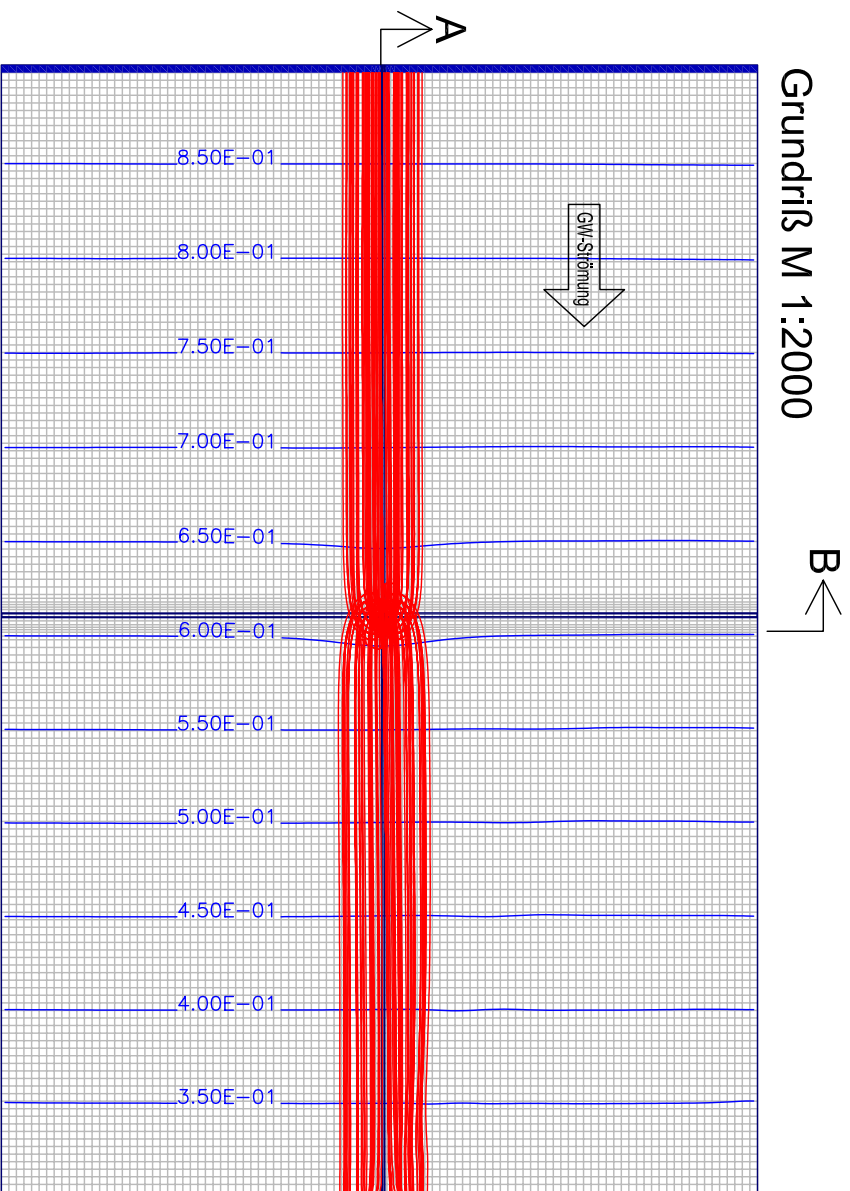
Schnitt A-A M 1:2000



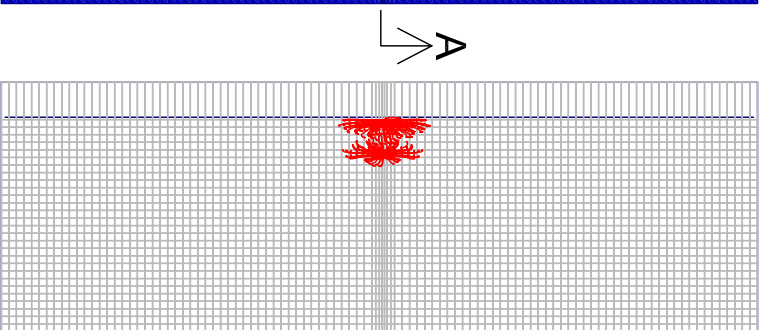
Detail M 1:500



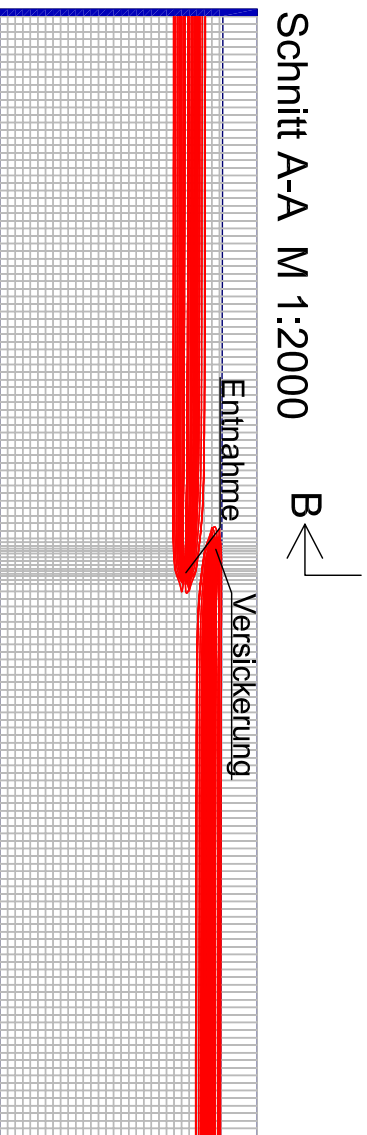
Grundriß M 1:2000



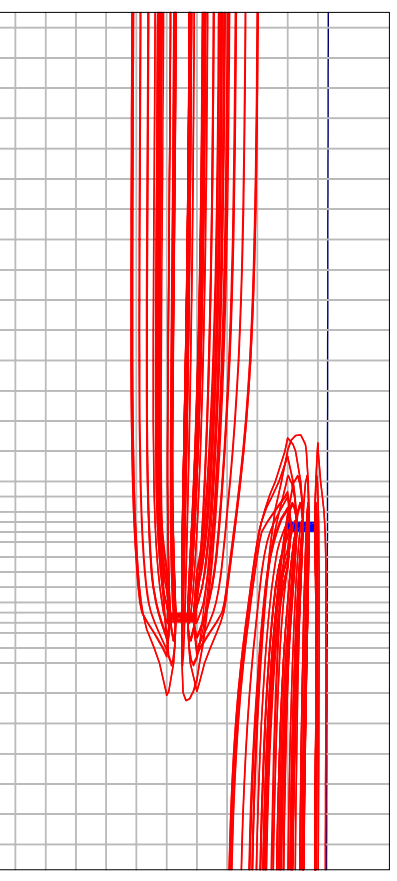
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



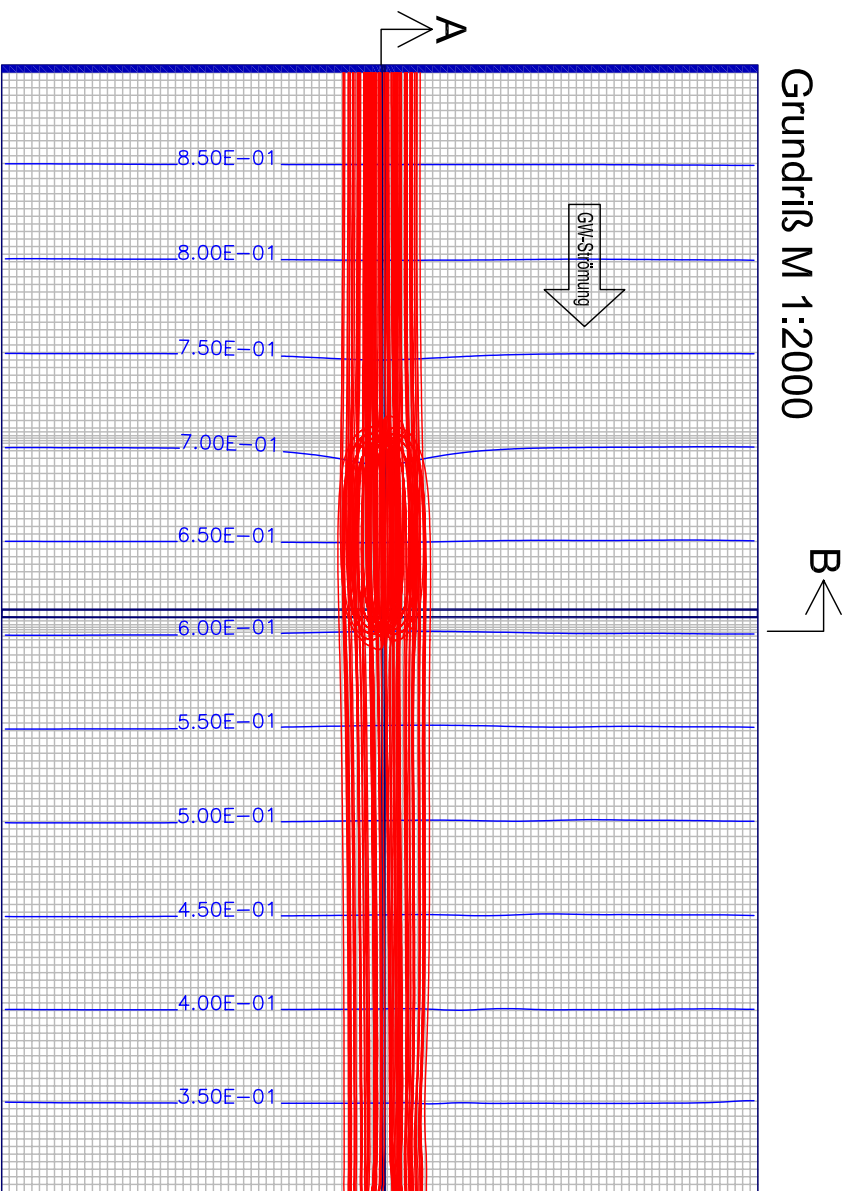
Fall: 1

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegegefälle [‰]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 9
- Rückgabe: 5 m stromauf
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1.5 - 1.6

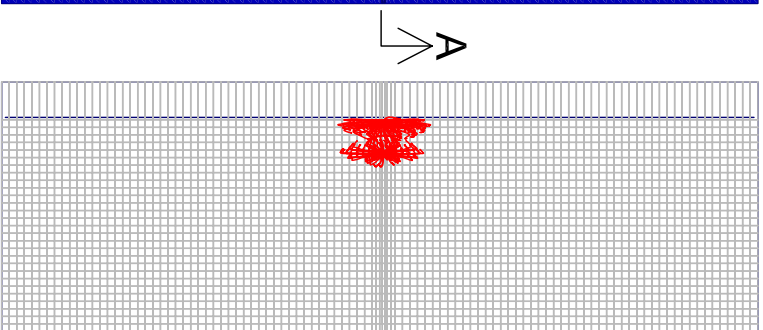
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 7.1
- B Einzugsber. analytisch [m]: 22.4
- H Abströmer. analytisch [m]: 5.0
- B Abströmer. analytisch [m]: 31.7

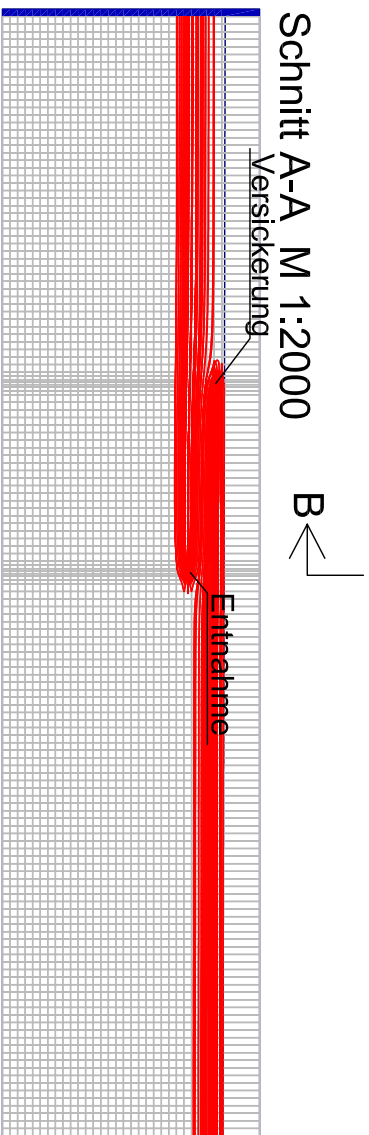
Grundriß M 1:2000



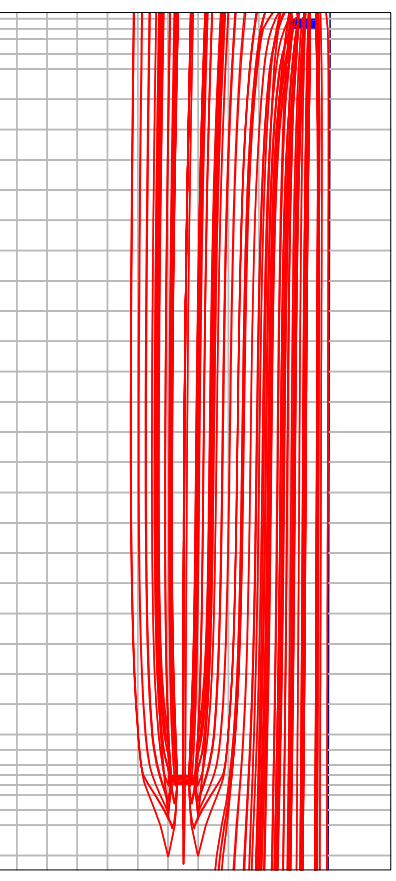
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



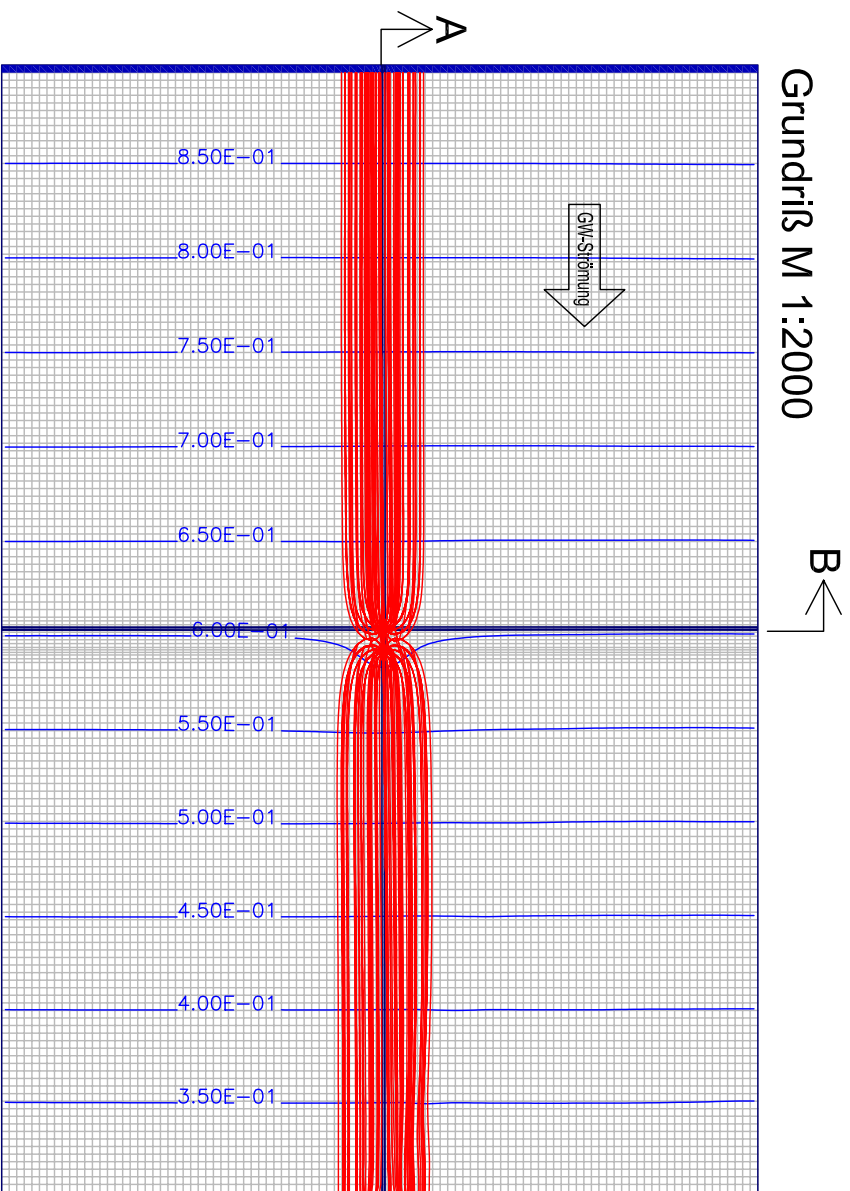
Fall: 2

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 9
- Rückgabe: 50 m stromauf
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1.1 - 1.2

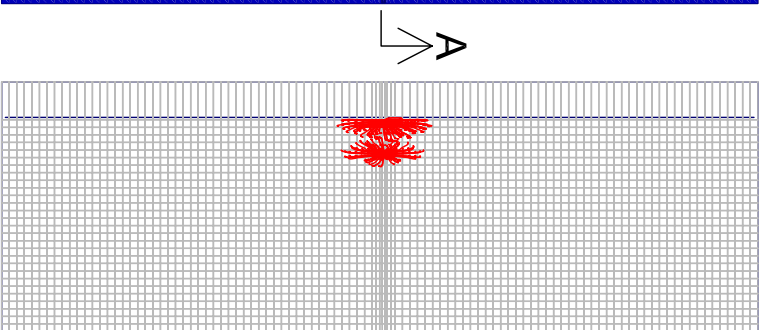
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 7.1
- B Einzugsber. analytisch [m]: 22.4
- H Abströmer. analytisch [m]: 5.0
- B Abströmer. analytisch [m]: 31.7

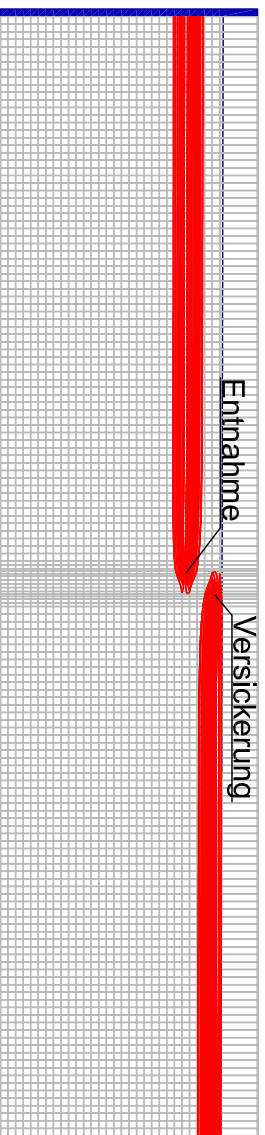
Grundriß M 1:2000



Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



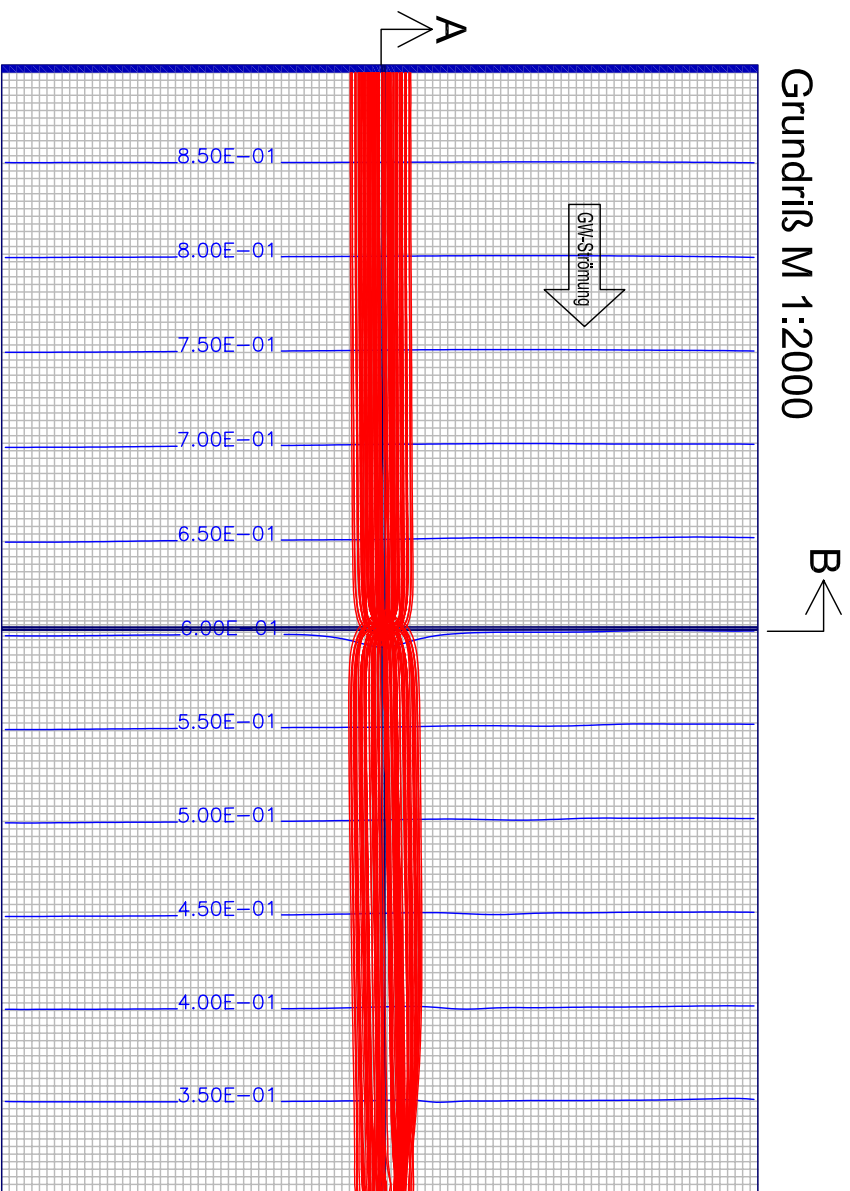
Fall: 3

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 9
- Rückgabe: 5 m stromab
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1.8 - 2.0

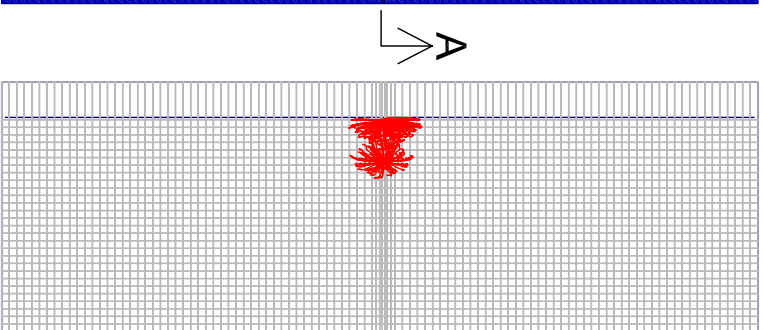
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 7.1
- B Einzugsber. analytisch [m]: 22.4
- H Abströmer. analytisch [m]: 5.0
- B Abströmer. analytisch [m]: 31.7

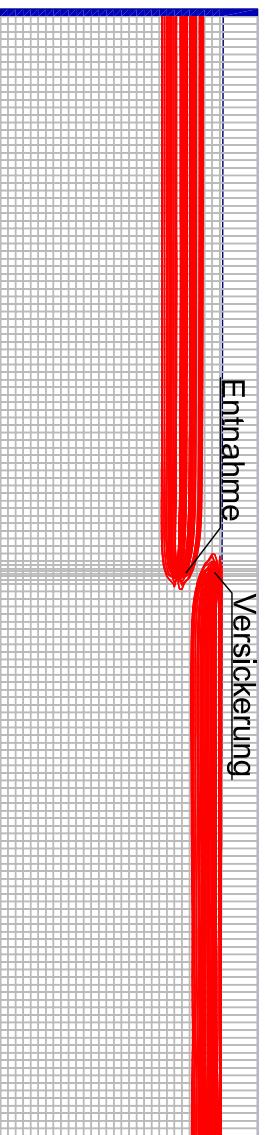
Grundriß M 1:2000



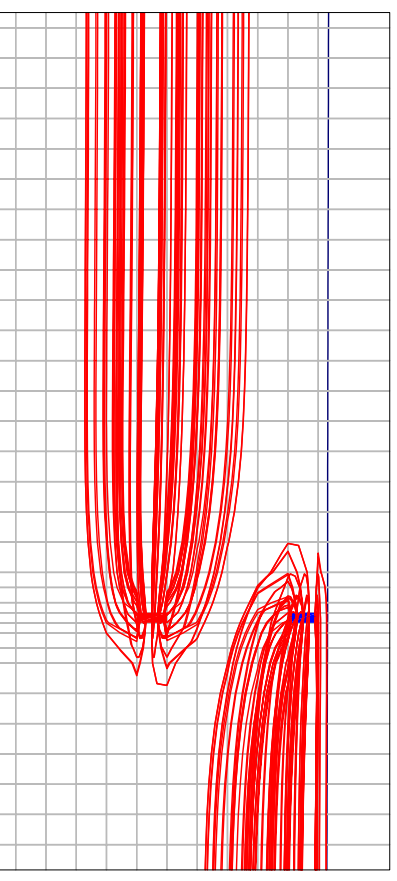
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



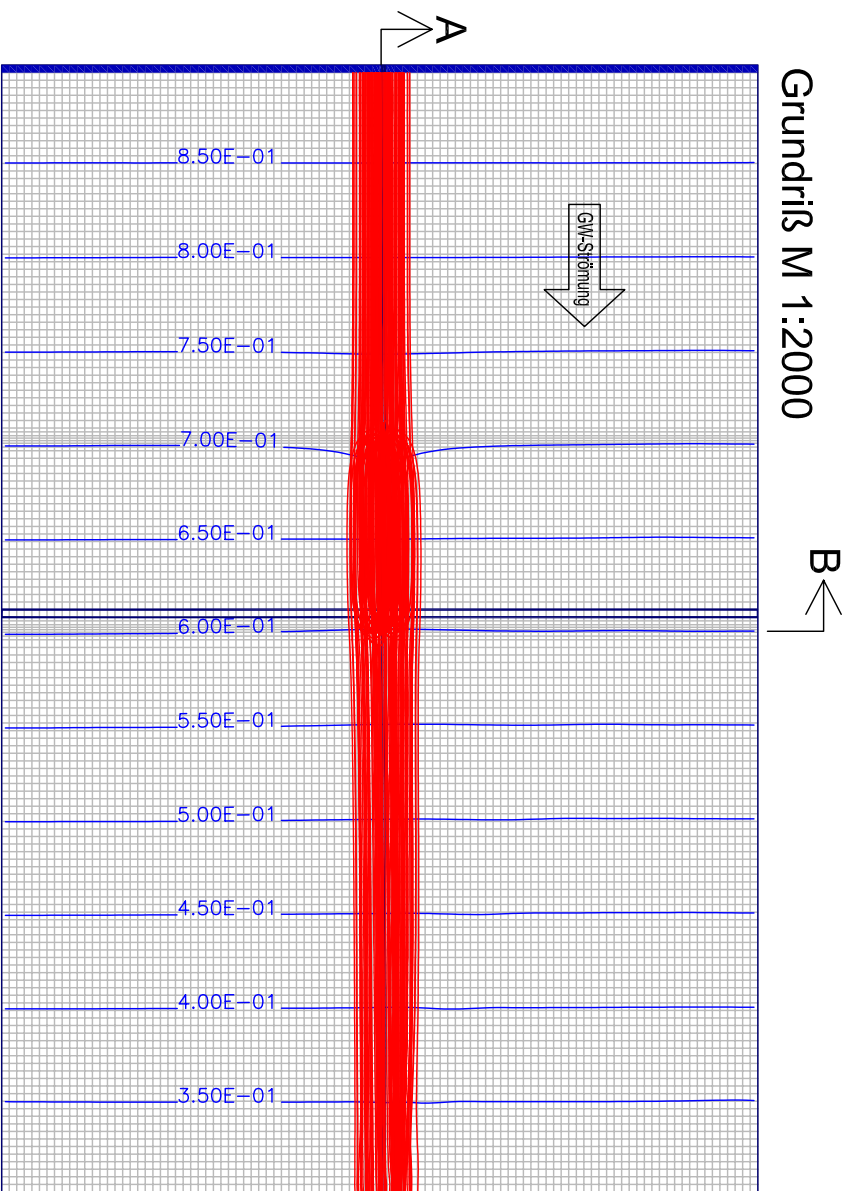
Fall: 4

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 3
- Entnahmetiefe [m]: 9
- Rückgabe: Direkt darüber
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1.8 - 2.0

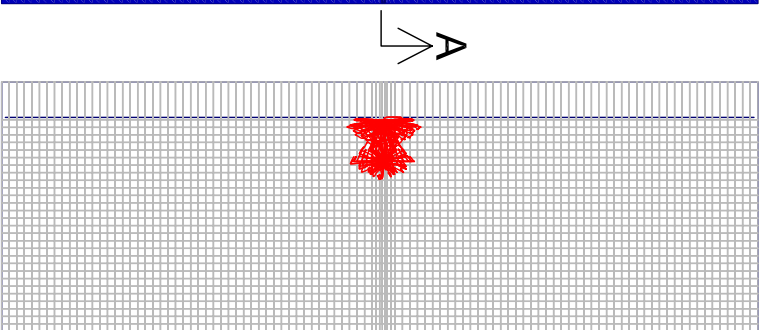
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 9.6
- B Einzugsber. analytisch [m]: 16.6
- H Abströmer. analytisch [m]: 6.8
- B Abströmer. analytisch [m]: 23.5

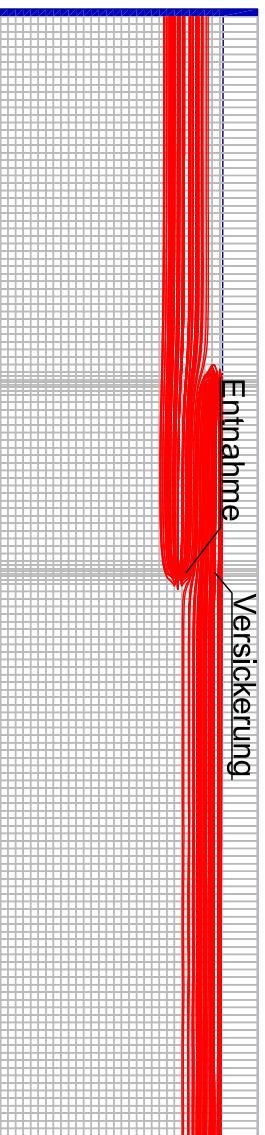
Grundriß M 1:2000



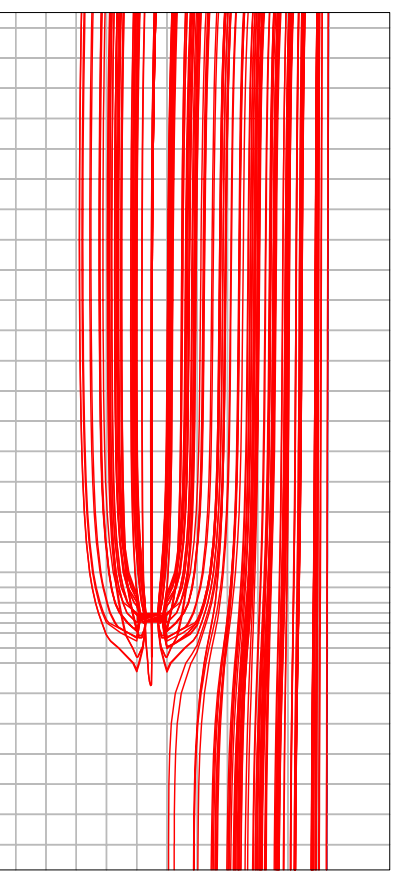
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



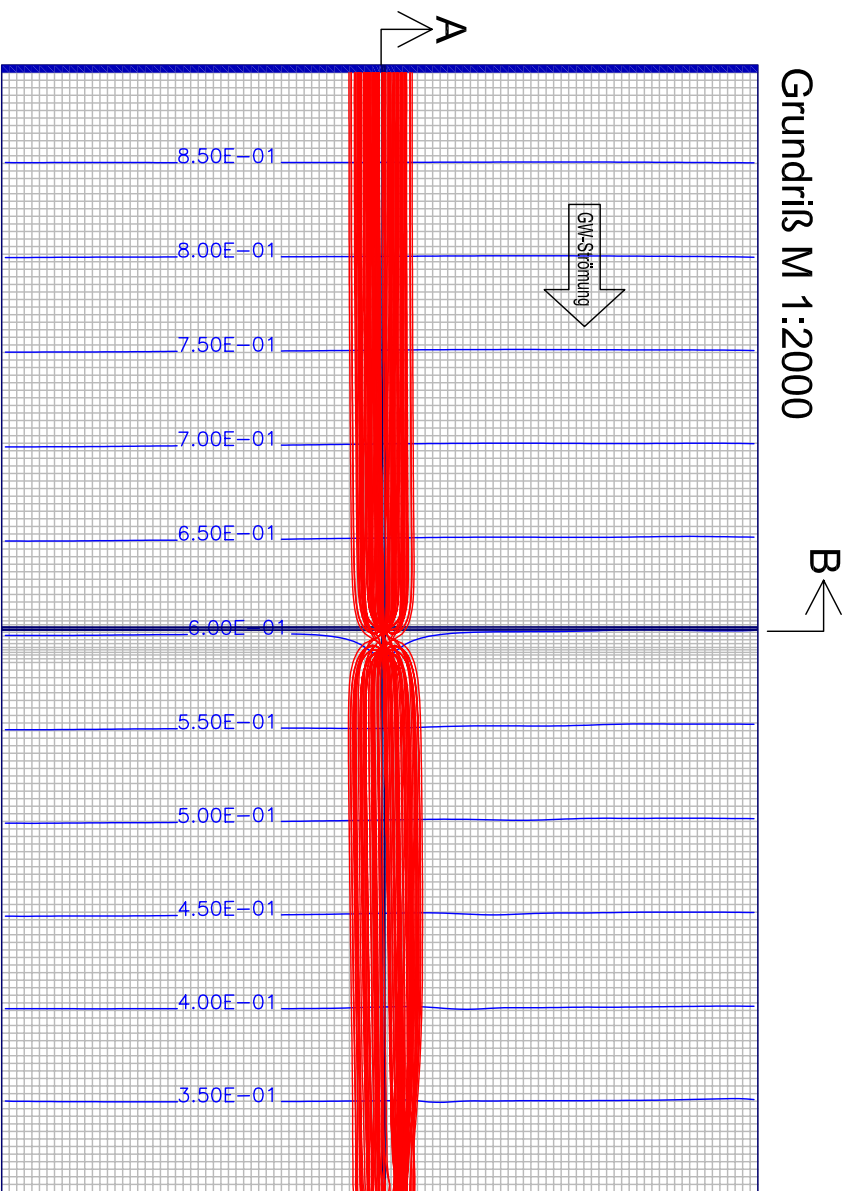
Fall: 5

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 3
- Entnahmetiefe [m]: 11
- Rückgabe: 50 m stromauf
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 0.9 - 1.0

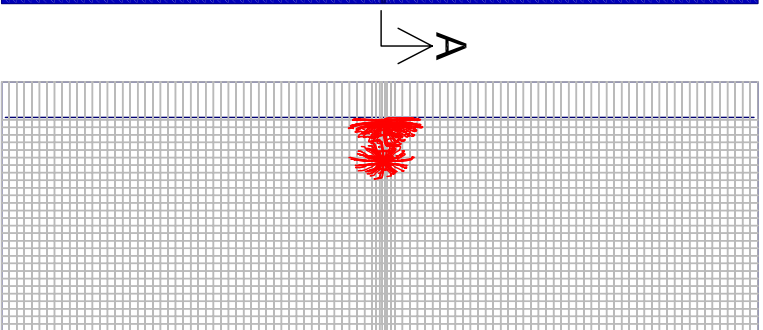
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 9.6
- B Einzugsber. analytisch [m]: 16.6
- H Abströmer. analytisch [m]: 6.8
- B Abströmer. analytisch [m]: 23.5

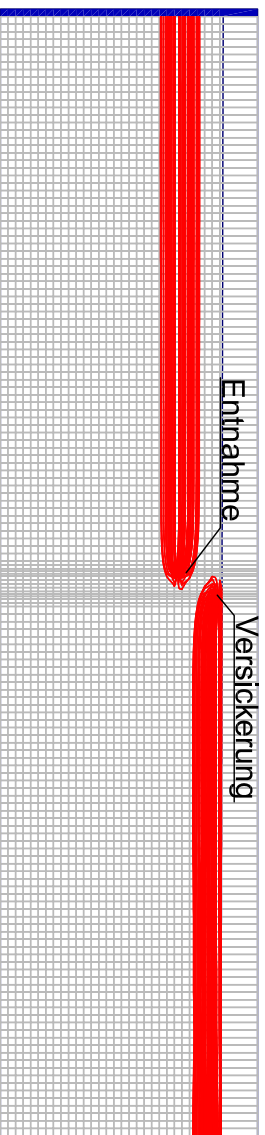
Grundriß M 1:2000



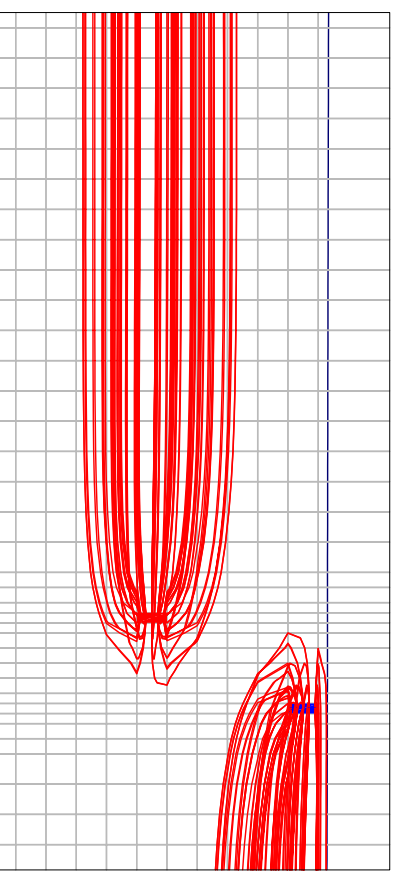
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



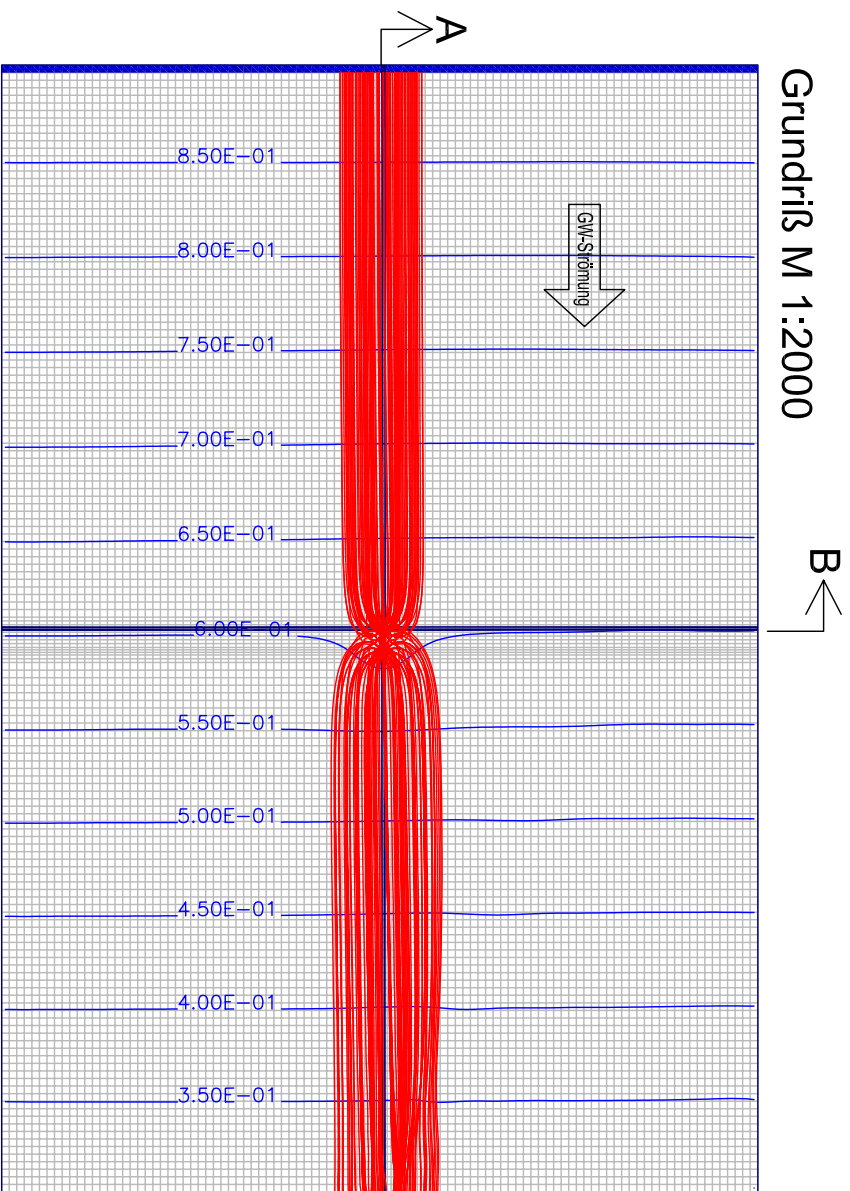
Fall: 6

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 3
- Entnahmetiefe [m]: 9
- Rückgabe: 5 m stromab
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 2.1 - 2.2

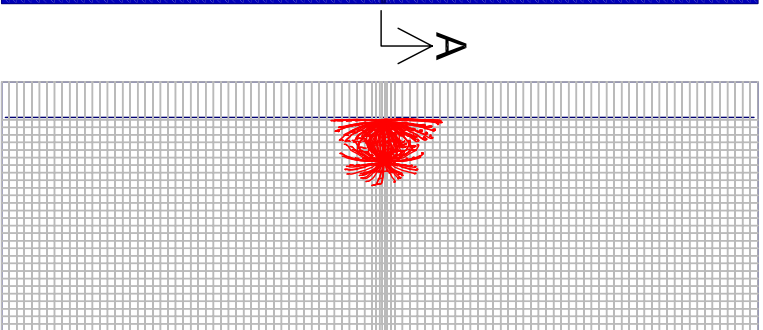
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 9.6
- B Einzugsber. analytisch [m]: 16.6
- H Abströmer. analytisch [m]: 6.8
- B Abströmer. analytisch [m]: 23.5

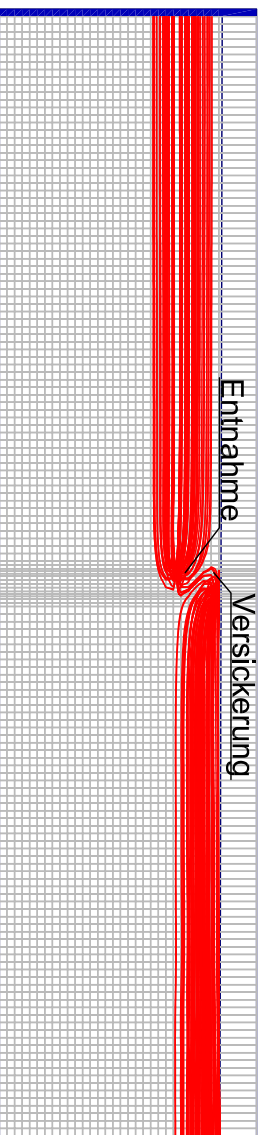
Grundriß M 1:2000



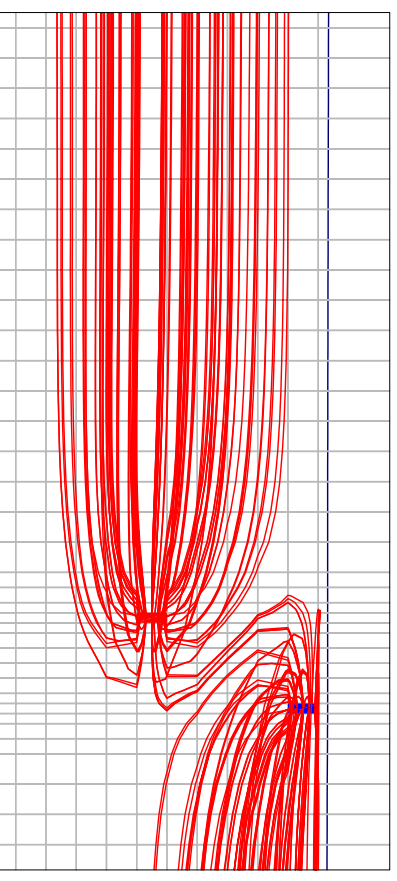
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



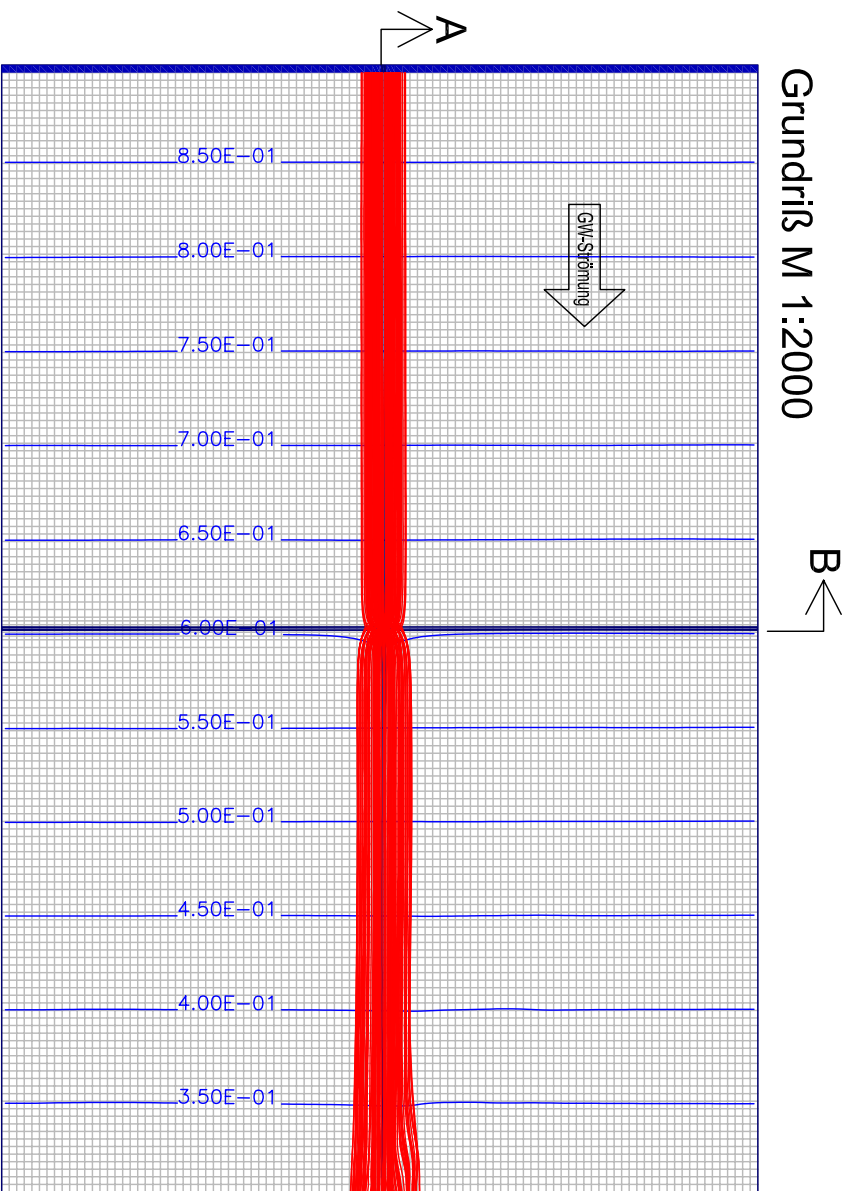
Fall: 6, Kurzschluss

Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 2.2
Grundwasserspiegelgefälle [‰]: 2
Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 3
Entnahmetiefe [m]: 11
Rückgabe: 5 m stromab
Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 2.1 - 2.2

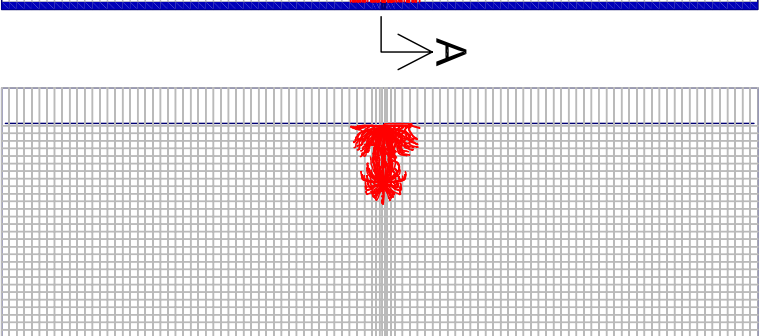
Analytische Berechnung:

H Einzugsber. analytisch [m]: 9.6
B Einzugsber. analytisch [m]: 16.6
H Abströmer. analytisch [m]: 6.8
B Abströmer. analytisch [m]: 23.5

Grundriß M 1:2000



Schnitt B-B M 1:2000



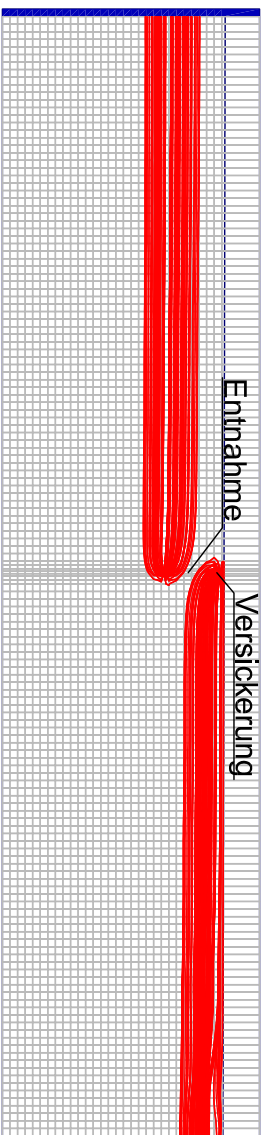
Fall: 7

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 1
- Entnahmetiefe [m]: 15
- Rückgabe: Direkt darüber
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1.7 - 1.8

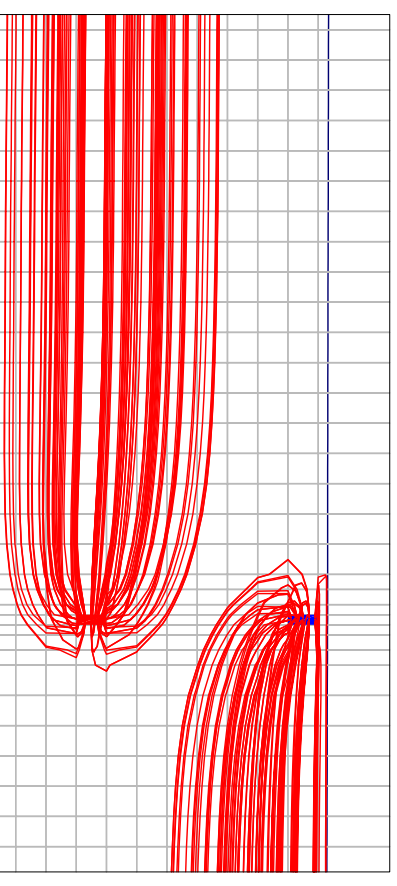
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 12.6
- B Einzugsber. analytisch [m]: 12.6
- H Abströmer. analytisch [m]: 8.9
- B Abströmer. analytisch [m]: 17.8

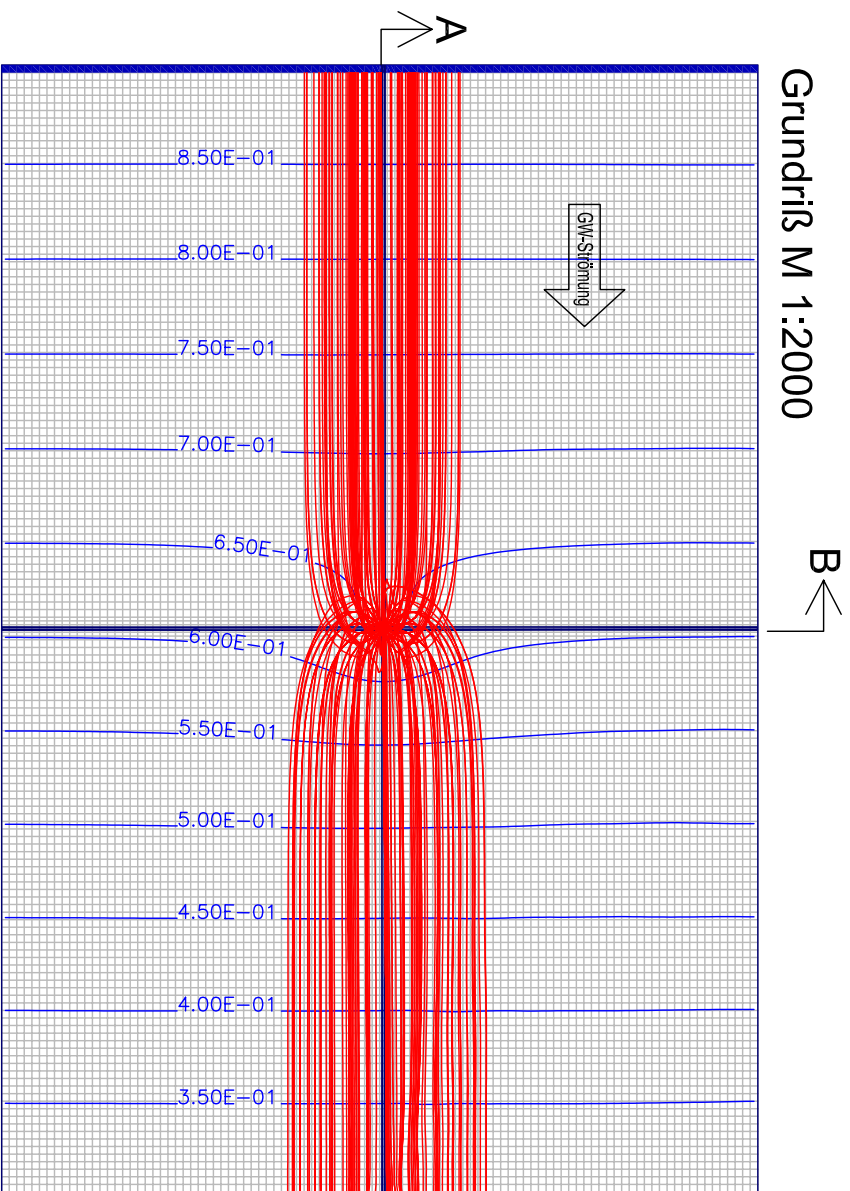
Schnitt A-A M 1:2000



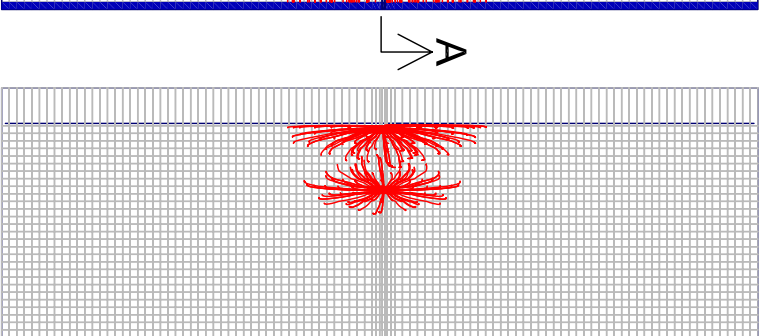
Detail M 1:500



Grundriß M 1:2000



Schnitt B-B M 1:2000



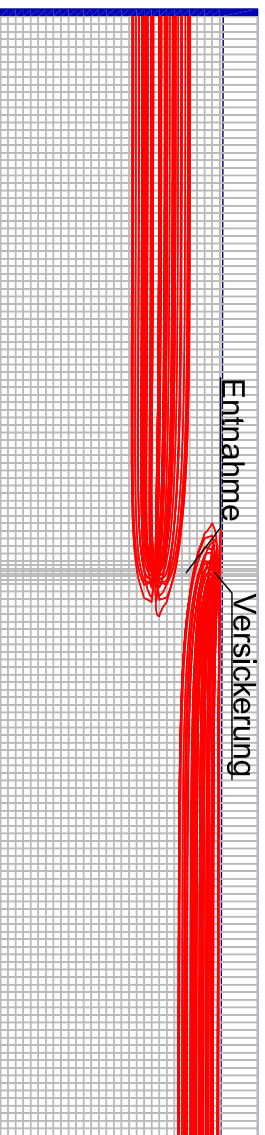
Fall: 8

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.001
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 17
- Rückgabe: Direkt darüber
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1.7 - 1.8

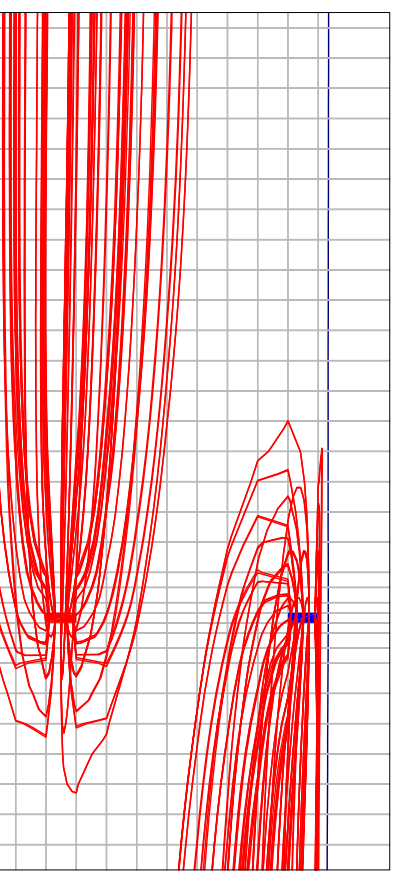
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 14.2
- B Einzugsber. analytisch [m]: 44.9
- H Abströmer. analytisch [m]: 10
- B Abströmer. analytisch [m]: 63.5

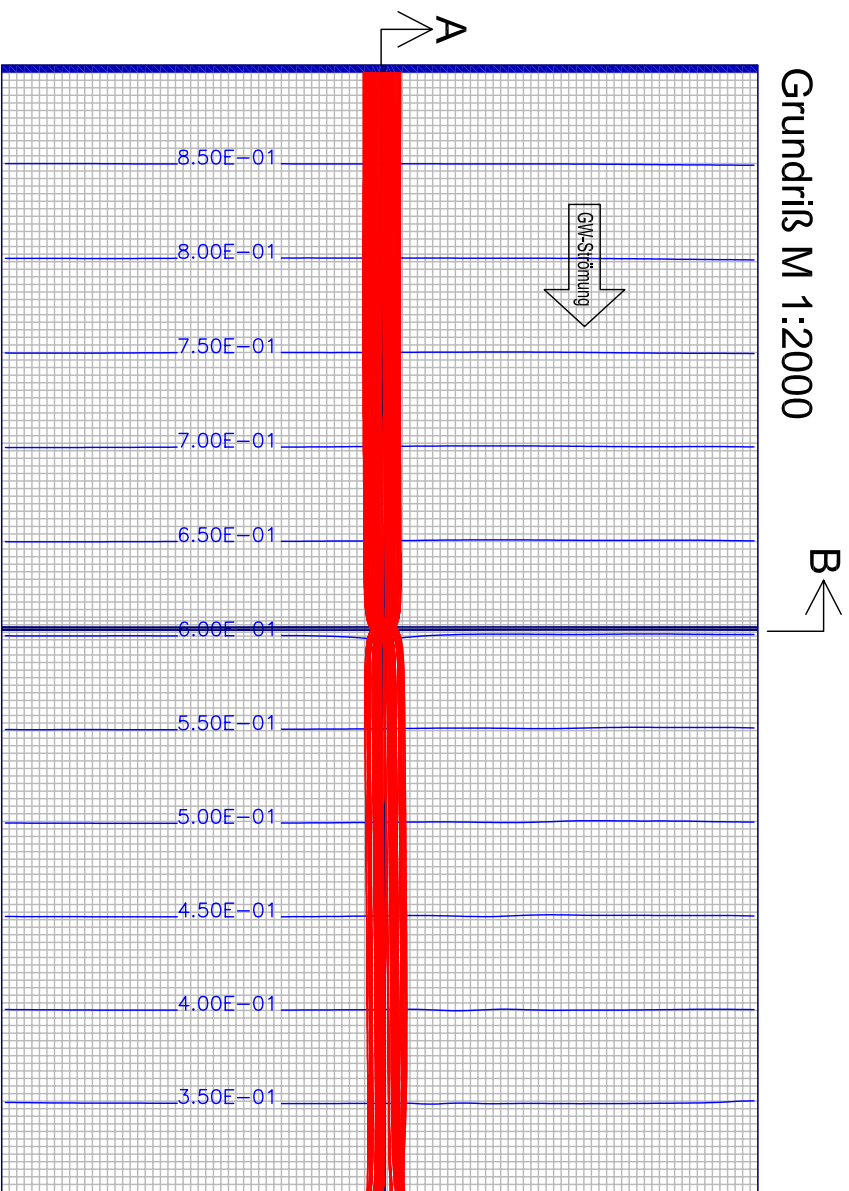
Schnitt A-A M 1:2000



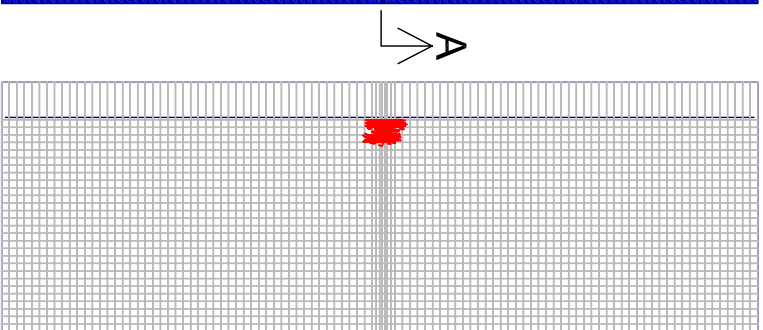
Detail M 1:500



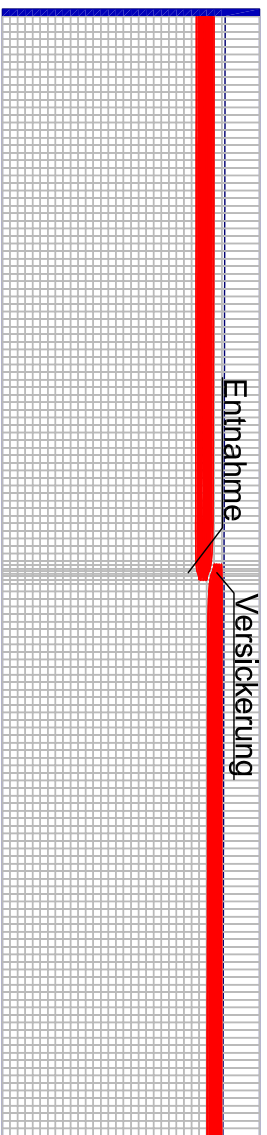
Grundriß M 1:2000



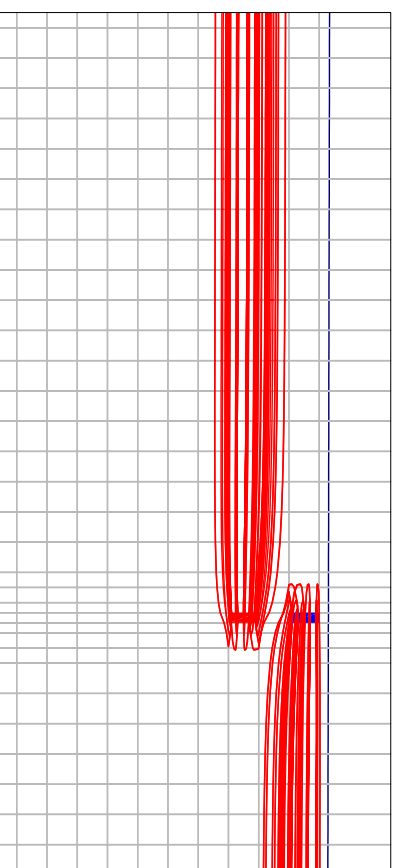
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



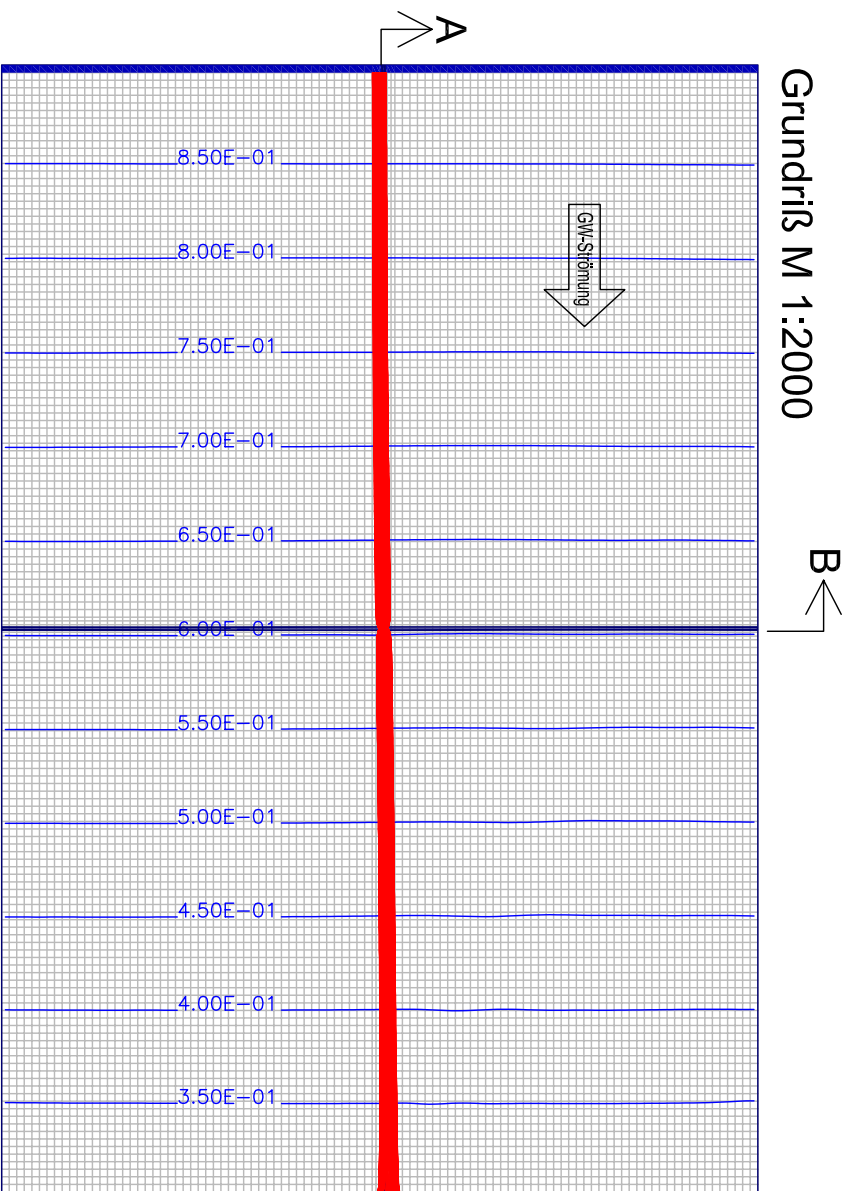
Fall: 9

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0,015
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 5
- Rückgabe: Direkt darüber
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1,5 - 1,6

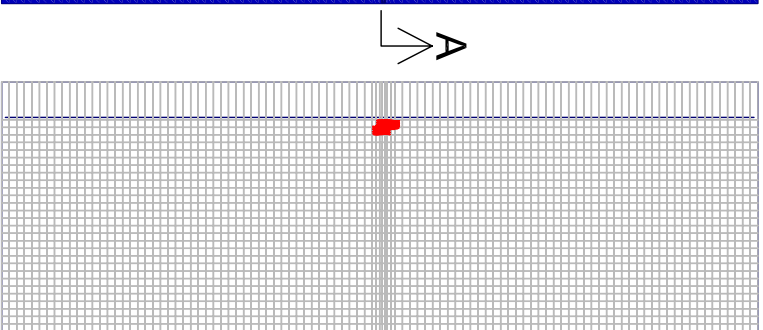
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 3,7
- B Einzugsber. analytisch [m]: 11,6
- H Abströmer. analytisch [m]: 2,6
- B Abströmer. analytisch [m]: 16,4

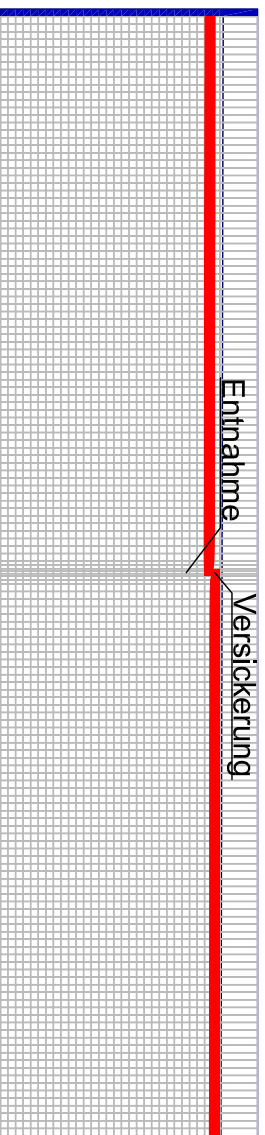
Grundriß M 1:2000



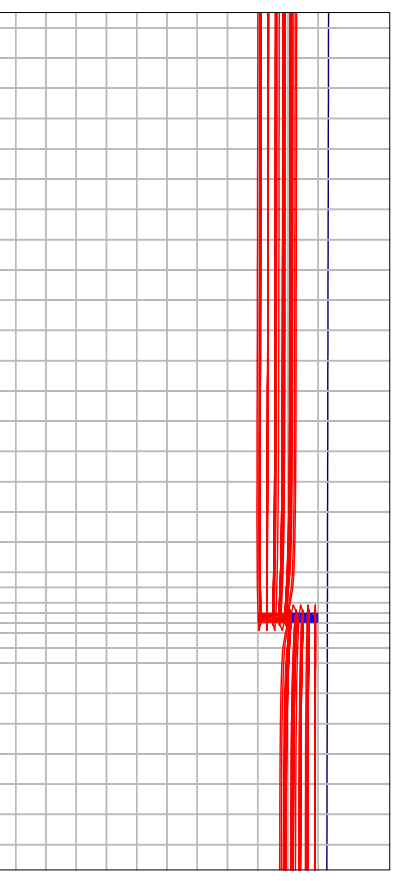
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



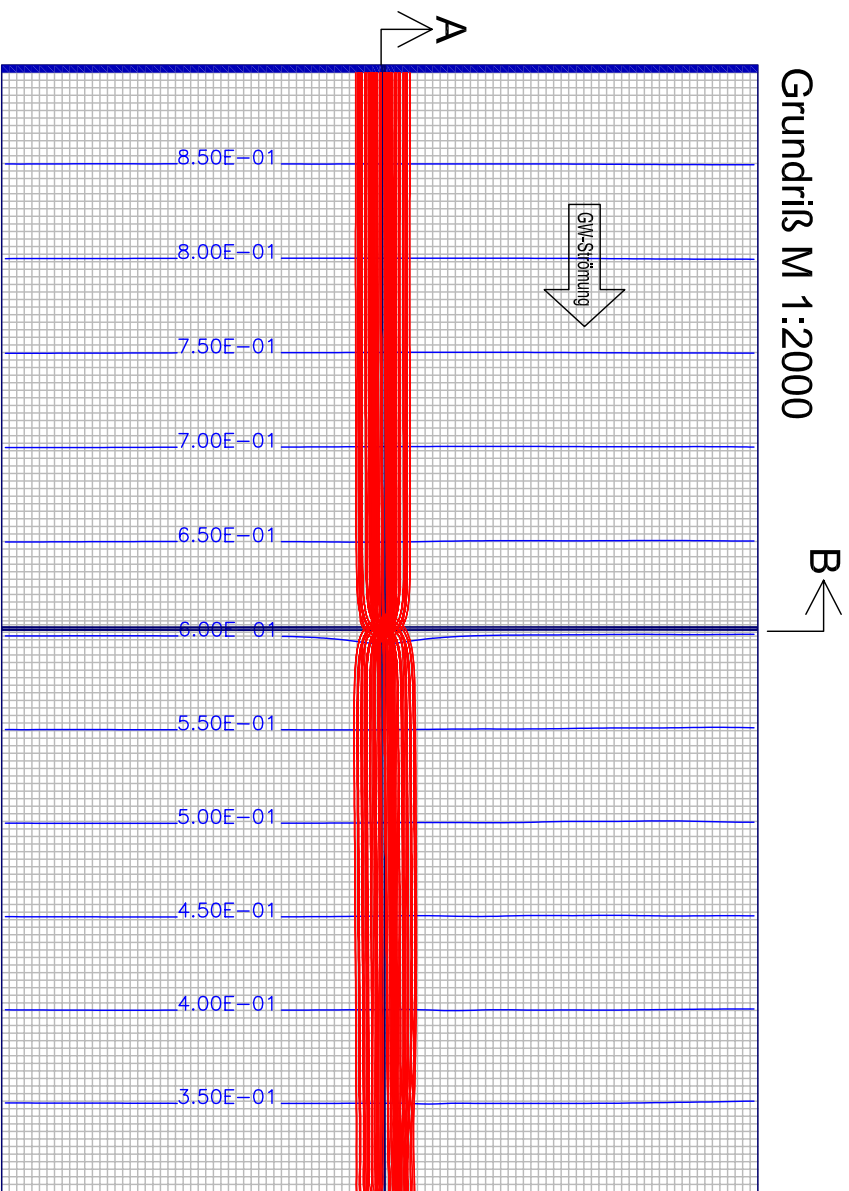
Fall: 10

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.05
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 3
- Rückgabe: Direkt darüber
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: < 1

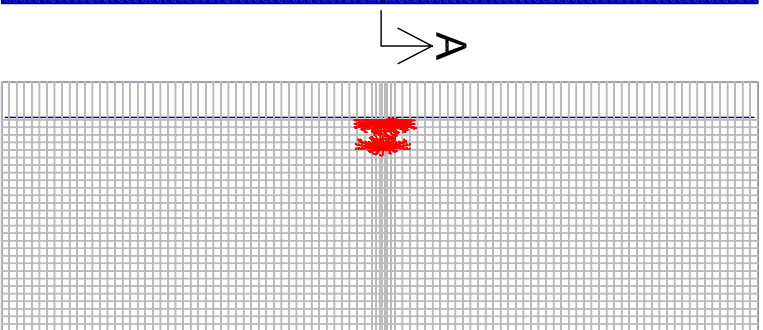
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 2
- B Einzugsber. analytisch [m]: 6.3
- H Abströmer. analytisch [m]: 1.4
- B Abströmer. analytisch [m]: 9.0

Grundriß M 1:2000



Schnitt B-B M 1:2000



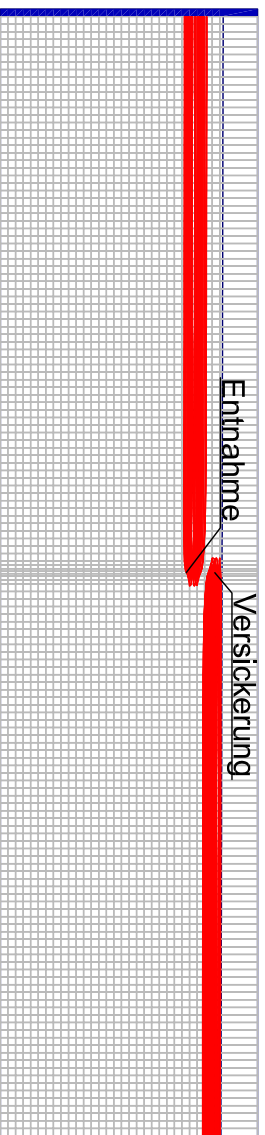
Fall: 11

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 0.5
- Grundwasserspiegelgefälle [‰]: 2
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 7
- Rückgabe: Direkt darüber
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 0.9 - 1.0

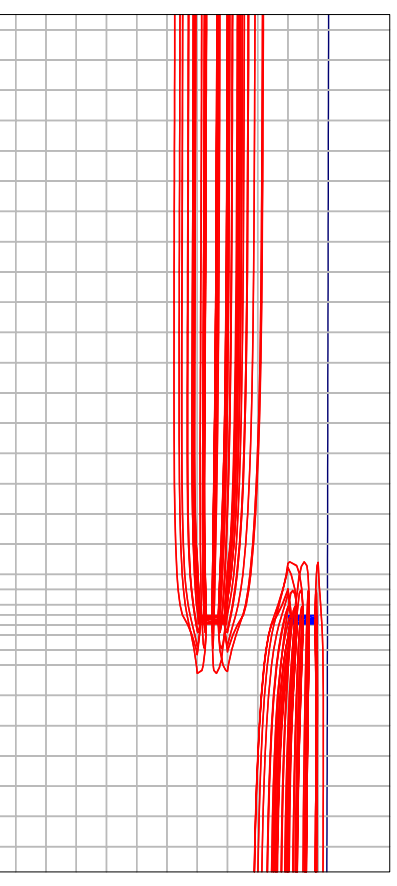
Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 5.0
- B Einzugsber. analytisch [m]: 15.9
- H Abströmer. analytisch [m]: 3.5
- B Abströmer. analytisch [m]: 22.4

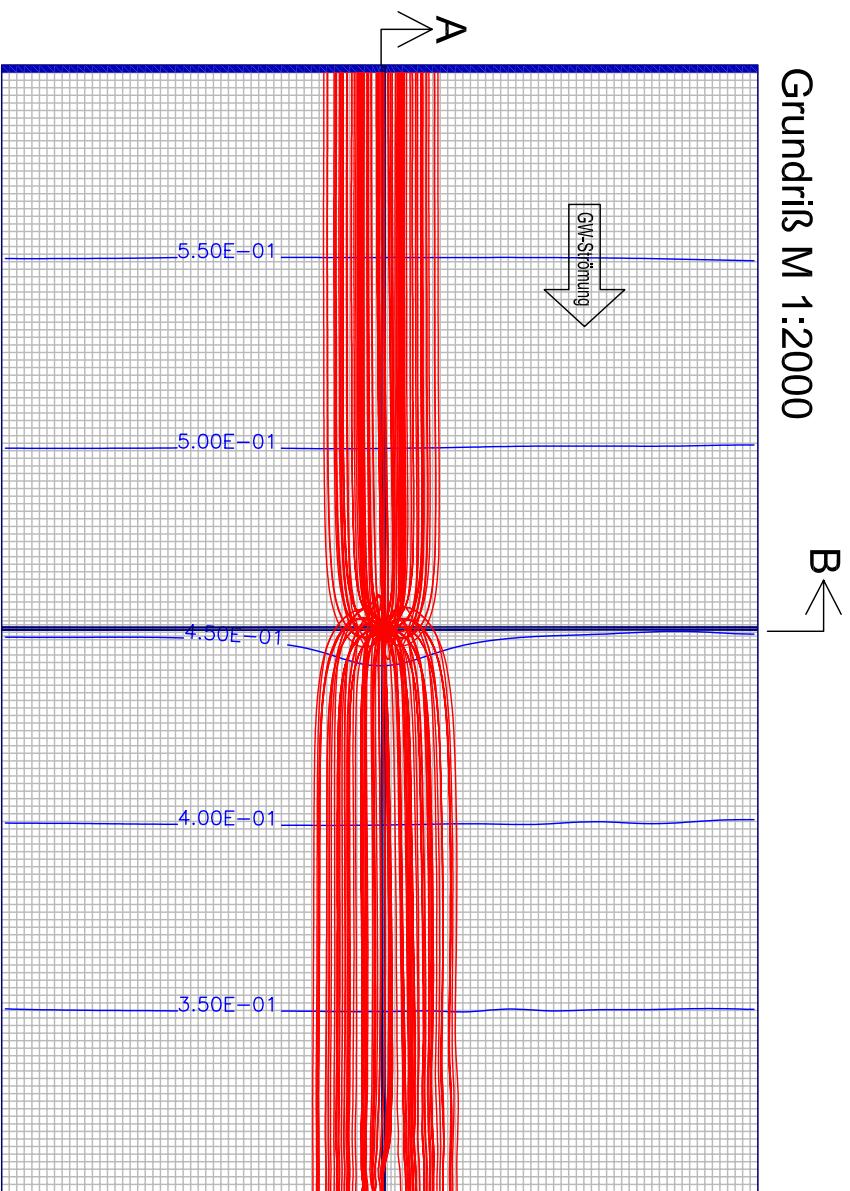
Schnitt A-A M 1:2000



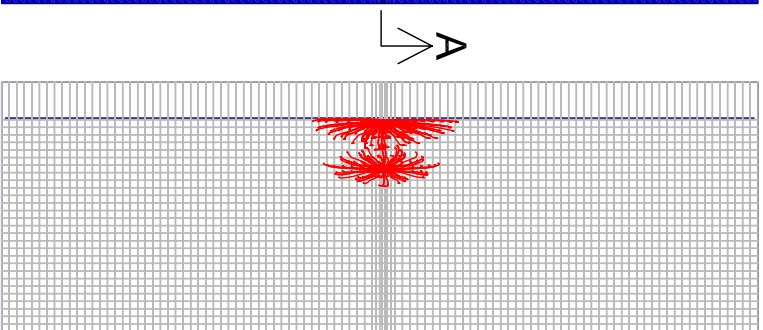
Detail M 1:500



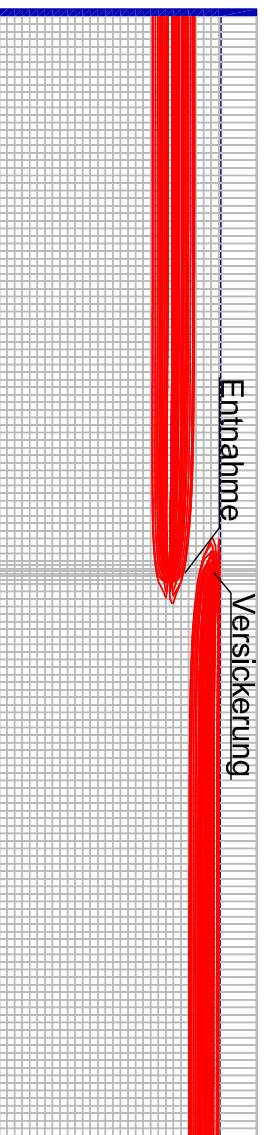
Grundriß M 1:2000



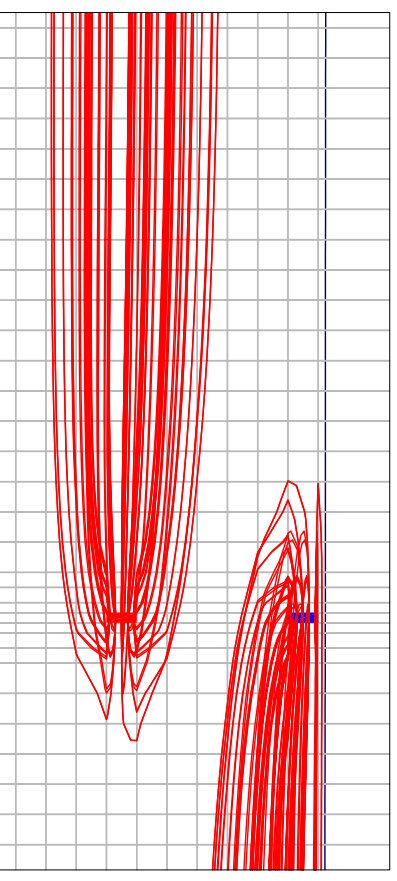
Schnitt B-B M 1:2000



Schnitt A-A M 1:2000



Detail M 1:500



Fall: 12

- Entnahme/Versickerungsmenge [l/s]: 1
- Grundwasserspiegelgefälle [%o]: 1
- Durchlässigkeit horizontal [m/s]: 0.004
- Horizontale/vertikale Durchlässigkeit: 10
- Entnahmetiefe [m]: 13
- Rückgabe: Direkt darüber
- Hydr. Kurzschluss bei Q [l/s]: Zw. 1.9 - 2.0

Analytische Berechnung:

- H Einzugsber. analytisch [m]: 10.0
- B Einzugsber. analytisch [m]: 31.7
- H Abströmer. analytisch [m]: 7.1
- B Abströmer. analytisch [m]: 44.9