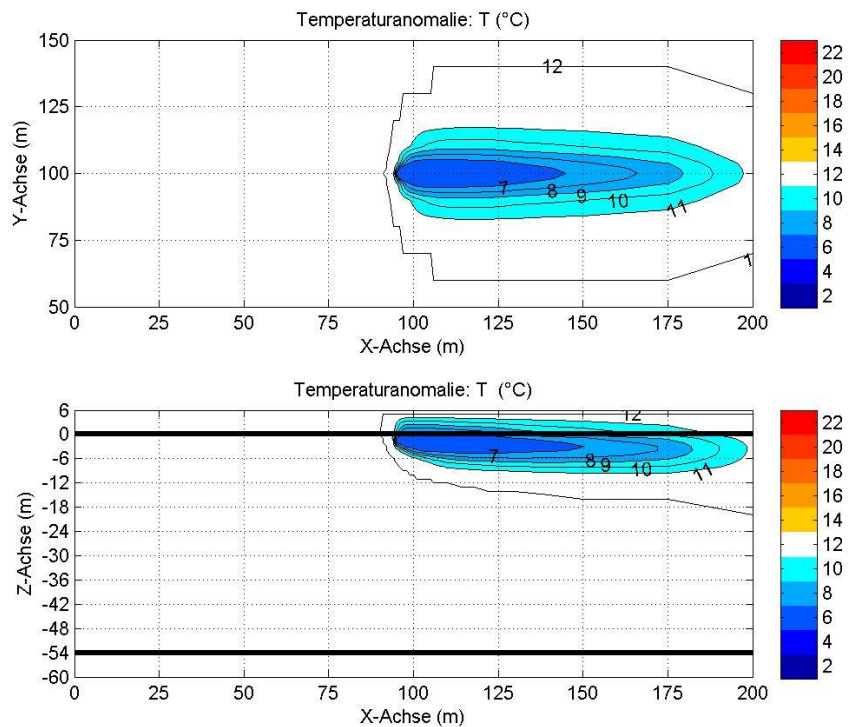


Thermischer Einfluss auf den erforderlichen Vertikalabstand für kurzschlussfreien Betrieb von Wärmepumpen



Auftraggeber:



Amt der Oö Landesregierung
Direktion:
Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung:
Grund- u. Trinkwasserwirtschaft
Kärntnerstraße 10-12
4021 Linz

Verfasser:

Dipl.-Ing. Michael Möderl
Dipl.-Ing. Robert Sitzenfrei
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Rauch
Innsbruck, am 21. Nov. 2008



ARBEITSBEREICH UMWELTECHNIK
INSTITUT FÜR INFRASTRUKTUR
baufakultät universität innsbruck

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Methoden | 4 |
| 2.1 | Hydraulischer und thermischer Kurzschluss | 4 |
| 2.2 | HST3d Modell | 5 |
| 2.3 | Modellaufbau - Referenzfall | 5 |
| 2.3.1 | Modellparameter: | 6 |
| 2.3.2 | Randbedingungen | 7 |
| 2.4 | Berechnungsfälle | 8 |
| 3 | Resultate und Diskussion | 10 |
| 3.1 | Ausführliche Analyse des Referenzfall | 10 |
| 3.1.1 | Örtliche Verteilung der Geschwindigkeiten | 10 |
| 3.1.2 | Örtliche Verteilung des Markierungsstoffes | 12 |
| 3.1.3 | Örtliche Verteilung der Temperaturanomalien | 13 |
| 3.1.4 | Bestimmung des hydraulischen und thermischen Kurzschlusses | 14 |
| 3.2 | Auswertung der Berechnungsfälle | 15 |
| 3.3 | Ableitung eines Korrekturfaktors | 19 |
| 3.3.1 | Ohne Dispersion | 19 |
| 3.3.2 | Mit Dispersion | 21 |
| 4 | Bemessungsdiagramm | 22 |
| 5 | Schlussfolgerungen | 23 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 24 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|--|----|
| Abbildung 1: | Druck-, Flux- und Temperaturrandbedingungen | 8 |
| Abbildung 2: | Longitudinale und transversale Dispersion (Gelhar et al., 1993) | 8 |
| Abbildung 3: | Stromlinien in XY, ZY und ZX-Schnittebene | 11 |
| Abbildung 4: | Örtliche Verteilung der normierten Masse des Markierungsstoffes | 12 |
| Abbildung 5: | Örtliche Verteilung der Temperaturanomalien | 13 |
| Abbildung 6: | Entnommene Masse des Markierungsstoffes und Entnahmetemperatur | 14 |
| Abbildung 7: | Maximale Entnahmemenge zur Vermeidung eines hydraulischen und thermischen Kurzschlusses. | 19 |
| Abbildung 8: | Einfluss der Wärmeströmung. | 22 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Tabelle 1: | Hydraulischer und thermischer Kurzschluss aller Berechnungsfälle | 15 |
| Tabelle 2: | Vergleich HST3d Modell mit Studie DonauConsult (ohne Dispersion) | 20 |
| Tabelle 3: | Vergleich HST3d Modell mit Studie DonauConsult (mit Dispersion) | 21 |

1 Einleitung

Die von der Abteilung Grund- und Trinkwasserwirtschaft der Oberösterreichischen Landesregierung in Auftrag gegebene Studie der DonauConsult "Erforderlicher Vertikalabstand für kurzschlussfreie Quell- /Senkenströmung" (Kirnbauer, 2008) liegt im Entwurf vor. Die Berechnung erfolgte mittels Grundwassermodellierung mit der Software pmwin 5.3. In der Studie wurden Methoden zur Abschätzung des erforderlichen Vertikalabstandes zwischen Entnahmebrunnen und Versickerungsbrunnen entwickelt, damit unabhängig von der Grundwasserströmungsrichtung ein hydraulischer Kurzschluss zwischen Versickerung und Entnahme ausgeschlossen werden kann. Die Studie beruht auf Szenarienrechnungen eines schematischen Grundwasserleiters, wobei sich die Szenarien in den Parametern Durchlässigkeit, Verhältnis der horizontalen zur Vertikalen Durchlässigkeit, Grundwasserspiegelgefälle, Entnahme- und Rückgabemenge, Entnahmetiefe und der Lage der Versickerungsstelle im Bezug zur Entnahmestelle unterscheiden. Als wesentliches Ergebnis wurden Diagramme entwickelt aus welchen sich der notwendige Vertikalabstand für kurzschlussfreien Betrieb für verschiedene Randbedingungen ablesen lässt.

Die Studie der DonauConsult berücksichtigt allerdings nicht explizit den Wärmetransport im Grundwasser. Der Wärmetransport führt aber zu einer Veränderung der Grundwasserdichte und damit zu vertikalen "Querströmungen". Bei einer Vernachlässigung des Wärmetransports kann natürlich auch die dispersive Temperaturausbreitungen bei der Ermittlung von Kurzschlussströmen nicht berücksichtigt werden.

Das gegenständliche Projekt stellt eine Ergänzung dieser Studie der DonauConsult hinsichtlich des thermischen Einflusses der Einleitung von Warm- oder Kaltwasser dar. Dazu wird ein entsprechendes Softwareprogramm verwendet, welches gekoppelt Wärmetransport und Dichteströmung berechnet, nämlich das Produkt HST3D des US Geological Service. Die Berechnungen werden entsprechend den Szenarien der Studie der DonauConsult durchgeführt.

2 Methoden

Die Studie der DonauConsult (Kirnbauer, 2008) umfasst eine große Anzahl von Berechnungsfällen und Szenarien. Der potentielle Einfluss des Wärmetransports wird im gegenständlichen Bericht an ausgewählten und relevanten Szenarien dieser Studie quantifiziert. Daraus kann ein Korrekturfaktor für den Wärmetransport abgeleitet werden, mit dem die Ergebnisse der DonauConsult Studie gegebenenfalls zu ergänzen sind.

Die DonauConsult Studie umfasst 8 wesentliche Berechnungsfälle, die sich hinsichtlich Durchlässigkeit des Bodens und der horizontalen Lage des Rückgabebrunnes sowie vertikalen Lage des Entnahmebrunnens unterscheiden. Der Einfluss des Wärmetransports auf die Situation ist natürlich temperaturabhängig. Es werden 2 Temperaturszenarien pro Grundszenario untersucht: unbeeinflusste Temperatur des Grundwassers 12° und ΔT der Einleitung -6°C für Heizung (Gefahr von Kurzschluss da kaltes Wasser absinkt) bzw. $+6^\circ$ für Kühlung (geringere Gefahr, da warmes Wasser aufsteigt). Diese Annahmen hinsichtlich Temperaturspreizung entsprechen den Vorgaben des ÖWAV Regelblattes 207: „Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds - Heizen und Kühlen“. Zusätzlich wird noch die Dispersion in 4 unterschiedlichen Ansätzen (Longitudinale Dispersion 0, 2.5, 5 und 10 m) berücksichtigt. Insgesamt ergeben sich daraus 96 Simulationen für den Einfluss des Wärmetransports.

2.1 Hydraulischer und thermischer Kurzschluss

Ein hydraulischer Kurzschluss tritt auf wenn die Stromlinien von Quell - und Senke verbunden sind. Im Falle thermischen Kurzschlusses ist dies aber nicht mehr festzustellen. Es ist also das Eintreten eines Kurzschlusses zu definieren.

Für die Quantifizierung des hydraulischen Kurzschlusses wurde ein Markierungsstoff eingeführt. Dadurch kann der Volumenanteil des am Rückgabebrunnen eingeleiteten Wassers im Entnahmebrunnen nachgewiesen werden. Da bereits für sehr geringe Dispersionswerte Kurzschlussströme auftreten, wurde ein Grenzwert von maximal 5

Vol.% der Rückgabe in der Entnahme eingeführt. D.h. ab 5 Vol% liegt ein hydraulischer Kurzschluss ein.

Für die Quantifizierung des thermischen Kurzschlusses wurde ähnlich vorgegangen. Als Kurzschlussgrenzwert gilt dort eine 5% Minderung der Temperaturspreizung bei der Entnahme.

Die Ermittlung der maximalen kurzschlussfreien Durchflussrate erfolgt durch Variation der Entnahmemenge und einer nachfolgenden linearen Interpolation basierend auf Stoffkonzentration und Temperatur der Entnahme.

2.2 HST3d Modell

Das HST3d Modell (Kipp Jr., 1997) entwickelt von Ken Kipp (U.S. Geological Survey) ist ein finite Differenzen-Modell das

- Grundwasserströmung (Erhaltung der Fluidmasse und Gesetz von Darcy)
- Wärmetransport (Erhaltung der Enthalpie in Fluid und Medium)
- und Stofftransport (Erhaltung der Stoffmenge inklusive Abbau und Absorption)

in 3 Dimensionen gekoppelt simuliert.

Die Interaktionen der unterschiedlichen Transportarten manifestieren sich einerseits im advektiven Transport basierend auf der Fluidgeschwindigkeit und andererseits in der Temperatur- bzw. Stoffkonzentrationsabhängigkeit von Viskosität und Dichte.

2.3 Modellaufbau - Referenzfall

Erster Schritt der Bearbeitung ist die Erstellung eines Referenzmodelles. Der Berechnungsraster wurde ähnlich wie im Modell der DonauConsult gewählt. Unterschiedlich zum dortigen Modell wurde im Brunnennahbereich eine Zellenlänge und Breite von 1 m festgelegt. Die Zellenhöhe ist bis 16 m Wassertiefe ebenso mit 1 m realisiert worden. Das Wärmetransportmodell erfordert ein Dreischichtmodell mit Deckschicht (Dicke: 6 m), grundwasserführende Schicht (Mächtigkeit: 54m) und eine

wasserundurchlässigen Bodenschicht (Dicke: 6 m). Modelltechnisch kann Wärmetransport nur im gespannten Grundwasser simuliert werden, darin begründet sich die Abweichung zu der im Modflow-Modell festgelegten freien Grundwasserspiegelannahme.

2.3.1 Modellparameter:

Bei den Modellparametern kann zwischen konstanten und fallabhängigen Größen unterschieden werden. Zusätzlich zu den übernommenen Größen aus der DonauConsult Studie wurden Parameter für Wärmetransport festgelegt, die unter Standardbedingungen auftreten. Die Kompressibilität des Wassers wurde nicht berücksichtigt. In folgender Liste werden relevante konstante Modellparameter angeführt.

- Filterrohlänge: 2 m
- Porenzahl: 0.25
- Grundwasserspiegelgefälle: 2 ‰
- Kompressibilität: 0 Pa^{-1}
- Dichte des Grundwasser: 999.5 kg/m^3 (bei 12 °C)
- Wärmeausdehnungskoeffizient des Wasser: $1.5e-4 \text{ K}^{-1}$
- Grundwassertemperatur: 12 °C
- Temperatur an der Oberfläche: 12 °C
- Wärmekapazität des Wassers: $4,182 \text{ J/m}^3/\text{K}$
- Wärmeleitfähigkeit des Wassers: 0.6 W/m/K
- Wärmekapazität des Bodens: $2.0e6 \text{ J/m}^3/\text{K}$
- Wärmeleitfähigkeit des Bodens: 1.5 W/m/K

Für den Referenzfall wurden entsprechend der DonauConsult Studie die fallabhängigen Parameter wie folgt festgelegt:

- Longitudinale und transversale Dispersion: 0 m
- Entnahmemenge: 1 l/s
- Hydraulische Durchlässigkeit: $4e-3 \text{ m/s}$

- Entnahmetiefe: 9 m
- X-Koordinatendifferenz zw. Entnahme- und Rückgabebrunnen: 0 m
- Wassertemperatur der Rückgabe: 6 °C

Zur Bestimmung von Konvektions- und Einschichtungseffekten durch Temperatur-anomalien ist der wichtigste Parameter die Wassertemperatur der Rückgabe. Entspricht diese Temperatur der Grundwassertemperatur treten Dichteströme aufgrund der örtlichen und zeitlichen Konstanz der Temperatur nicht auf. Zum Abgleich des pmwin- und des HST3d-Modells wurde darum die Rückgabetemperatur mit 12 °C eingesetzt.

2.3.2 Randbedingungen

Die Randbedingungen wurden ähnlich wie in Mahabadi, 2006 gewählt. Die angesetzten Randbedingungen (Abbildung 1) lassen sich in drei Gruppen gliedern. Druck und Flux werden zur Festlegung des Grundwasserpentials benützt. Am oberen Rand der grundwasserführenden Schicht wurde Normaldruck angesetzt. Zur Simulation der Parallelströmung wurden ein Flux-Zulauf an der linken und ein Flux-Ablauf an der rechten Modellseite mit Grundwassertemperatur als Bedingung modelliert. Letztlich wurde in der obersten und untersten Zellenebene eine Temperatur von 12°C angenommen. Eine saisonale Änderung der Oberflächentemperatur wurde nicht berücksichtigt.

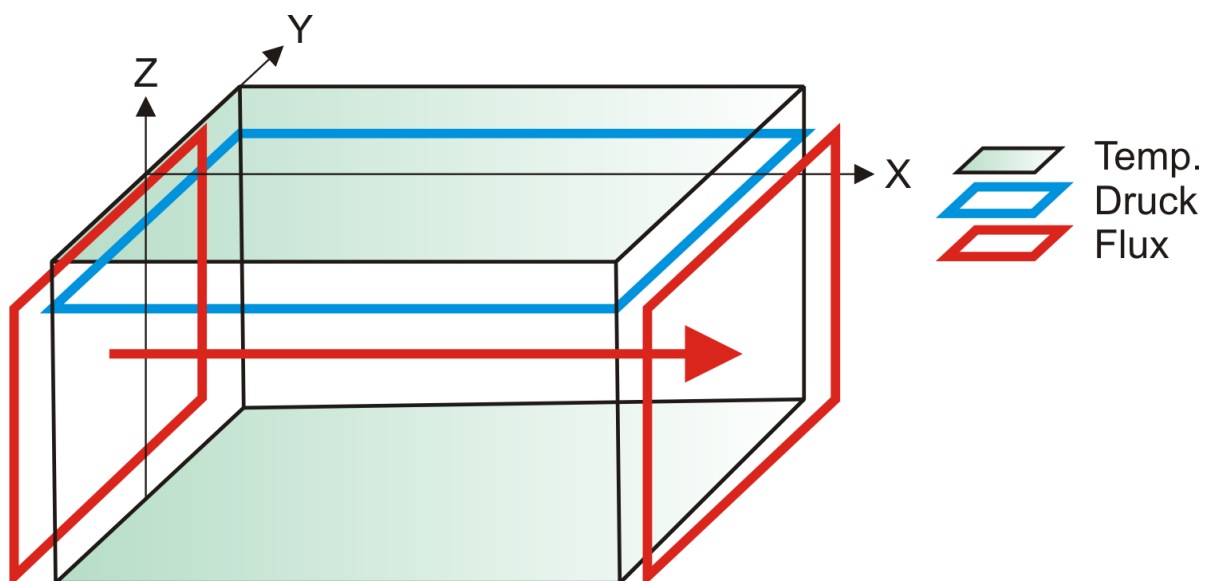


Abbildung 1: Druck-, Flux- und Temperaturrandbedingungen

2.4 Berechnungsfälle

Veränderliche Parameter sind die Positionierung des Rückgabebrunnens sowie die Entnahmetiefe des Entnahmebrunnens und die Durchlässigkeit der grundwasserführenden Schicht. Die Entnahmemenge wird in 10 Schritten stufenweise erhöht.

Zusätzlich wurde eine Rückgabetemperatur basierend auf der nach ÖWAV-RB 207, 2008 maximalen zulässigen Temperaturspreizung gewählt.

Neben dem Referenzfall ohne Dispersionseinfluss wurde Dispersion wie folgt berücksichtigt: Das Verhältnis von longitudinaler und transversaler wird als 10:1 festgelegt. Die Dispersionsparameter (longitudinal/ transversal) werden entsprechend Gelhar et al., 1993 mit den Werten 2.5/0.25 , 5/0.5 und 10/1 m festgelegt. Damit wird die Bandbreite der Literaturwerte abgedeckt.

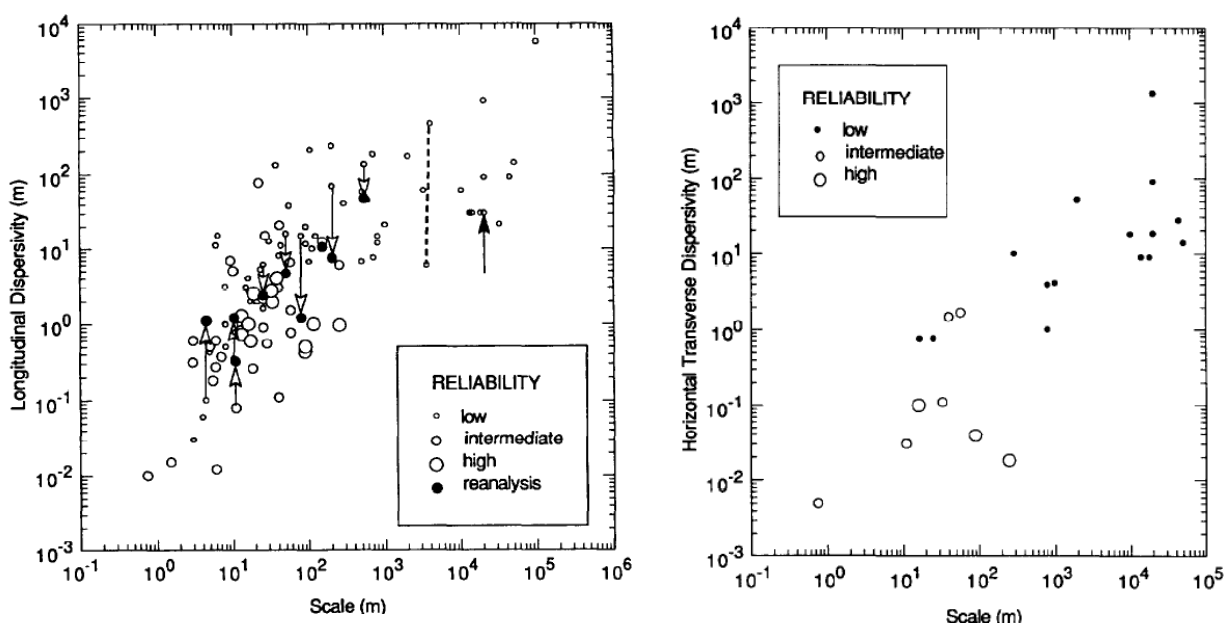


Abbildung 2: Longitudinale und transversale Dispersion (Gelhar et al., 1993)

Fallabhängige Modellparameter:

- Entnahmemenge: variiert
- Entnahmetiefe des Entnahmebrunnens: 5 m; 11 m; 15 m (3 mal)
- X-Koordinatendifferenz zw. Entnahme- und Rückgabebrunnen: 0 m; -50 m (2 mal)
- Hydraulische Durchlässigkeit: $1e-3$ m/s; $1e-2$ m/s (2 mal)
- Longitudinale und transversale Dispersion: 0/0; 2.5/0.25; 5/0.5 und 10/1 m (4mal)
- Wassertemperatur der Rückgabe: 6 °C; 18 °C (2mal)

Somit ergeben sich $2 \times 2 \times 3 \times 2 \times 4 = 96$ Fälle die simuliert und ausgewertet werden. Positive bzw. negative wirkende Temperaturanomalien und Dispersionsströmungen können durch oben getroffene Annahme analysiert werden.

3 Resultate und Diskussion

Das Kapitel „Resultate und Diskussion“ gliedert sich in drei Unterkapiteln. Erstens wird der Referenzfall ausgewertet und die hydraulischen sowie thermischen Vorgänge dargestellt. Zweitens werden alle Berechnungsfälle bezüglich Eintritt des Kurzschusses bewertet. Letztlich werden Empfehlungen für Korrekturfaktoren gegeben.

3.1 Ausführliche Analyse des Referenzfall

Der Referenzfall dient zur Darstellung der Geschwindigkeits-, Markierungsstoff- und Temperaturverteilungen im dreidimensionalen Raum. Vorab wurde der Referenzfall der DonauConsult Studie und der Ergebnisse der HST3d-Simulation durch Einleitung von Wasser mit 12°C abgeglichen.

3.1.1 Örtliche Verteilung der Geschwindigkeiten

Die Geschwindigkeitsverteilung (Abbildung 3) zeigt die Potentialströmung hervorgerufen durch ein Quellen-Senken Modell mit einer Grundwasserparallelströmung. Bei allen Berechnungsfällen und dem Referenzmodell liegt die Rückgabe im Mittel bei einer Tiefe von 1 m. Dies entspricht einer Tiefe im Modell startend bei 0 und endend bei 2 m. Im Referenzmodell liegt die Entnahme bei einer Tiefe von 9 m (im Modell 8-10m). Aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeiten in der YZ-Ebene, die hauptsächlich durch Quelle und Senke hervorgerufen werden, ist dort ein Kurzschlussstrom von Entnahme und Rückgabe bereits bei geringen Entnahmemengen ersichtlich. Aus diesem Grund wurde ein Kurzschluss - wie oben beschrieben - mit einer Grenzkonzentration eines Markierungsstoffes bzw. über die Entnahmetemperatur bestimmt.

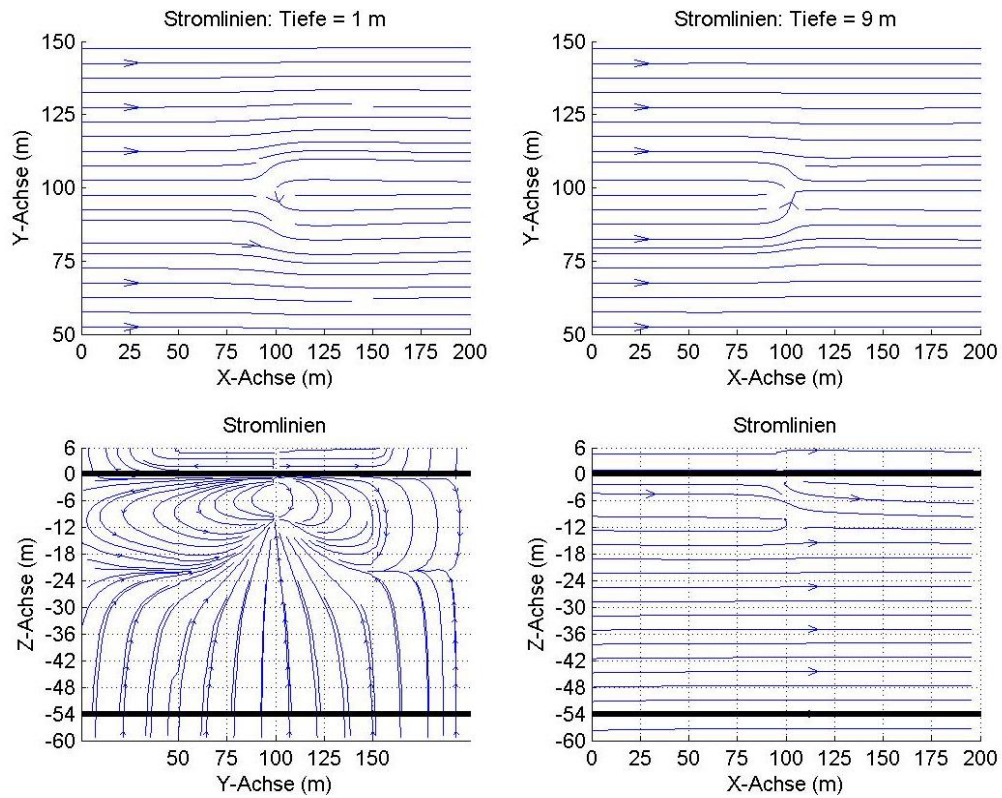


Abbildung 3: Stromlinien in XY, ZY und ZX-Schnittebene

3.1.2 Örtliche Verteilung des Markierungsstoffes

Der Markierungsstoff dient zur Feststellung eines hydraulischen Kurzschlussstroms.

Getrieben von der Quellenströmung (Rückgabe) und der Parallelströmung verteilt sich der Markierungsstoff im Raum. Durch temperaturabhängige Dichteströmungen des Fluid verbreitert sich ebenfalls die Stoffverteilung. Aus Abbildung 4 ist ebenso ersichtlich, dass mit wachsender X-Koordinate die Breite des erhöhten Stoffkonzentrationsbereichs zunimmt. In einer Tiefe von 9 m (Entnahme) sind nur noch marginale Auswirkungen des Markierungsstoffes nachweisbar.

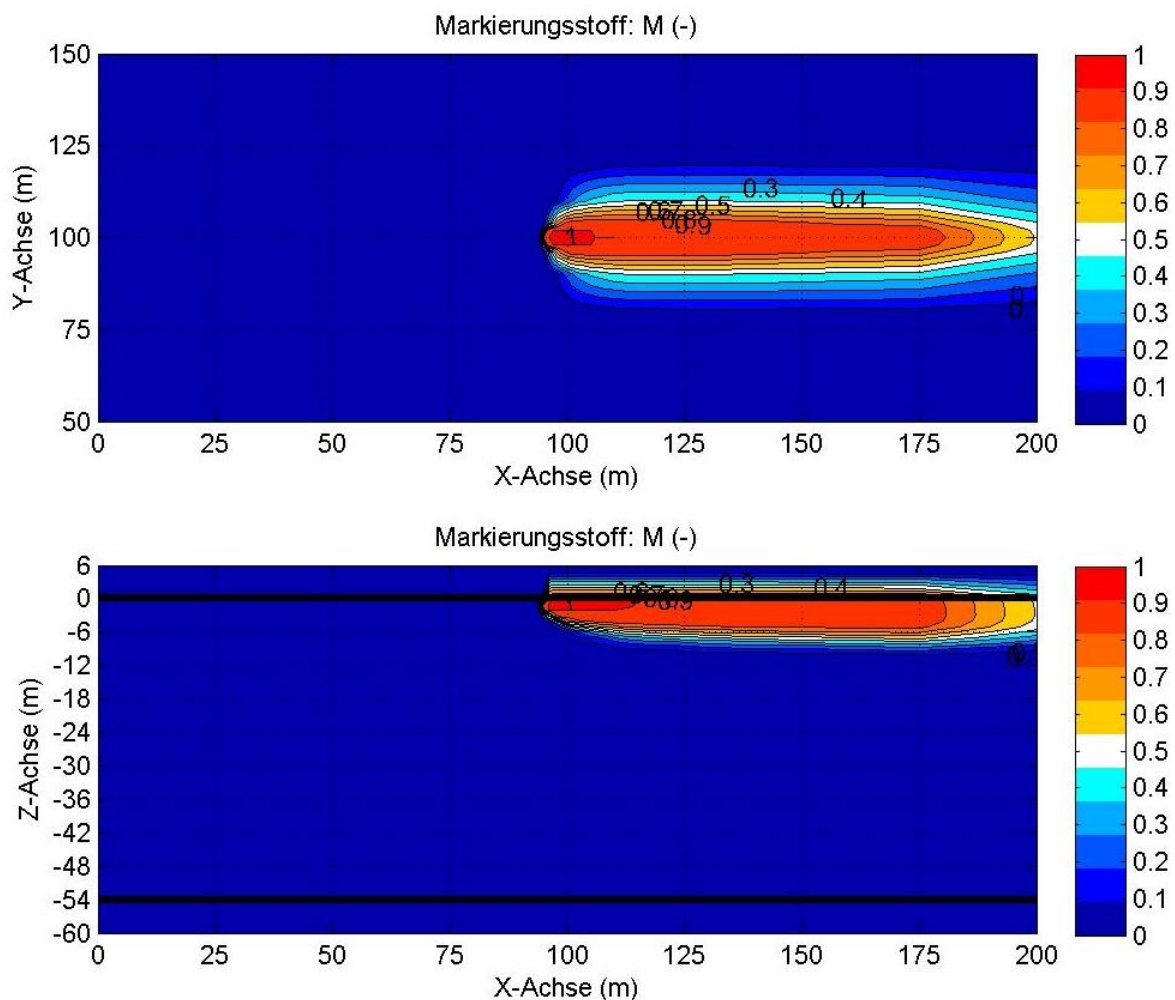


Abbildung 4: Örtliche Verteilung der normierten Masse des Markierungsstoffes

3.1.3 Örtliche Verteilung der Temperaturanomalien

Genauso wie bei der Stoffausbreitung ist auch die Temperaturentbreitung hauptsächlich von der Quellen- und Parallelströmung abhängig. Auch hier (Abbildung 5) wird der Verbreiterungseffekt mit zunehmender X-Koordinate deutlich. Durch Wärmetransporteffekte ist die Temperaturentbreitung stärker als die Stoffausbreitung. Durch kontinuierliche Abkühlungseffekte ergibt sich ein geringerer Temperaturgradient als Stoffkonzentrationsgradient in den Randbereichen. Dies ist ersichtlich anhand der Abstände der Isothermen in Abbildung 5 im Gegensatz zu den Abständen der Linien gleicher Konzentrationen in Abbildung 4. Eine geringfügige Temperaturanomalie in 9 m Tiefe ist ersichtlich.

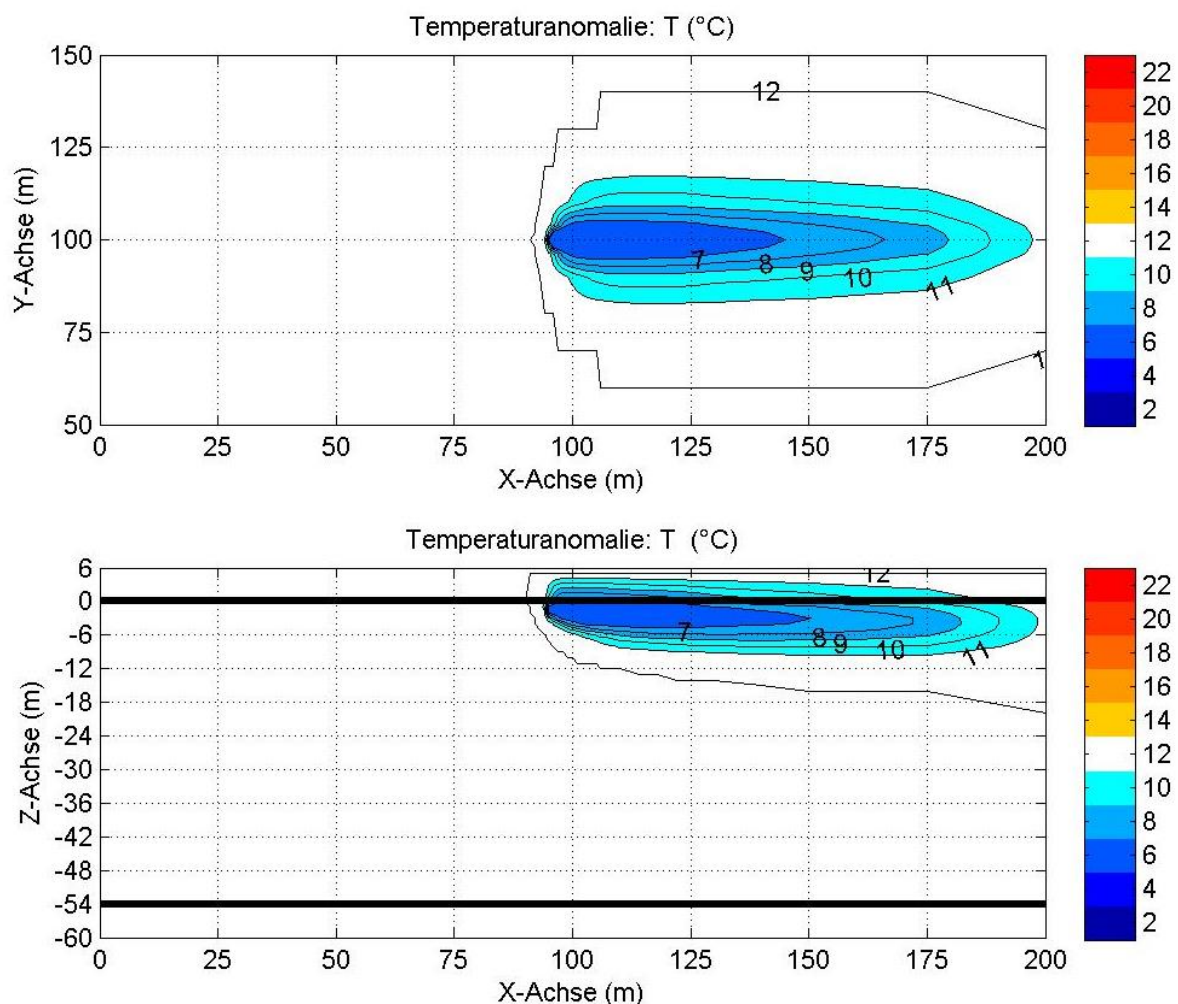


Abbildung 5: Örtliche Verteilung der Temperaturanomalien

3.1.4 Bestimmung des hydraulischen und thermischen Kurzschlusses

Wie oben beschrieben wird als hydraulischer Kurzschluss eine Markierungsstoffkonzentration über 5 % definiert (Abbildung 6 rechts). Der thermische Kurzschluss wird anhand der Temperatur der Entnahmemenge festgestellt (Abbildung 6 links). 5% TemperaturspreizungseinbuÙe wurde als thermischer Kurzschluss definiert. Bei einer Grundwassertemperatur von 12°C und Rückgabe von kaltem Wasser entspricht das 11.7 °C. Als obere Grenze ergeben sich 12.3 °C. Aus den Diagrammen kann abgelesen werden, dass bei Vernachlässigung der Dispersion bis zu 1 l/s Wasser entnommen werden kann und nur marginale Temperatur- und Konzentrationsveränderungen in der Entnahme ersichtlich sind. Wird Dispersion berücksichtigt (hier nur Fall 5/0.5 m) stellen sich auch bei geringen Durchflussraten Anomalien in der Entnahme ein. Wird Dispersion vernachlässigt kann hydraulischer und thermischer Kurzschluss ab 2.09 l/s bzw. 2.00 l/s festgestellt werden. Durch Dispersionseffekte (hier nur Fall 5/0.5 m) verringert sich die per Definition kurzschlussfreie Entnahme hydraulisch auf 1.21 l/s und thermisch auf 1.25 l/s.

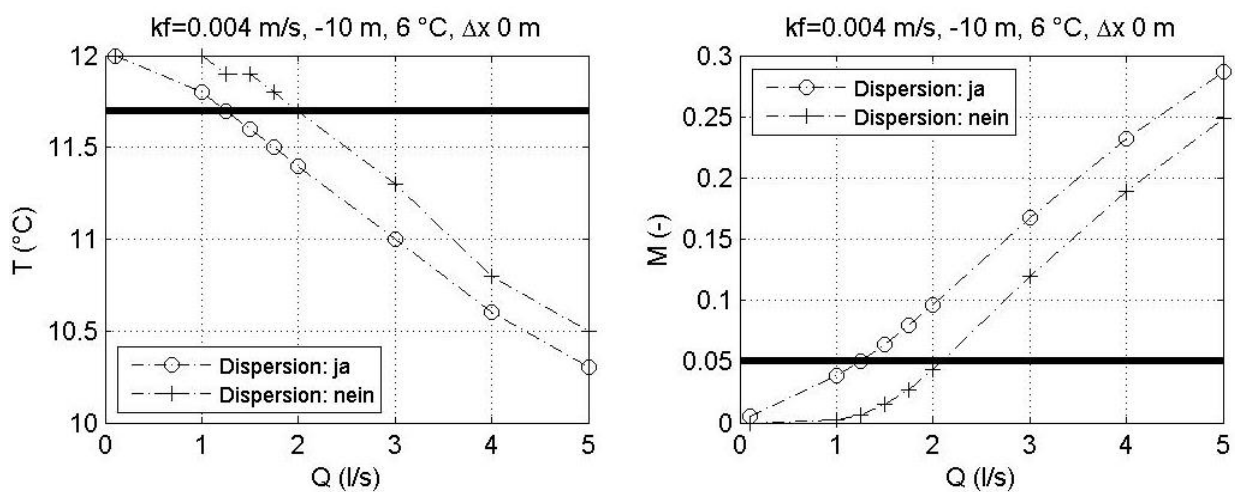


Abbildung 6: Entnommene Masse des Markierungsstoffes und Entnahmetemperatur

Im Anhang I Diagramme sind für alle Berechnungsfälle die Kurven für Stoffentnahme und Entnahmetemperatur angeführt.

3.2 Auswertung der Berechnungsfälle

In Tabelle 1 sind die berechneten maximalen kurzschlussfreien Entnahmemengen die zu nur geringen hydraulischen und thermischen Kurzschlussströme führen aufgelistet.

Bei niedriger Durchlässigkeit ist hydraulischer Kurzschluss und bei hoher Durchlässigkeit meist thermischer Kurzschluss maßgebend.

Unterschiedliche Ergebnisse bei unterschiedlichen Einleittemperaturen zeigen die Auswirkung von Dichteströmungen. Werte für hydraulischen und thermischen Kurzschluss verhalten sich bezüglich Dichteströmungen ähnlich. Der Quotient der tolerierbaren Entnahmemengen bei Einleittemperatur 6°C und 18°C ($Q_{KS}(T=6)/Q_{KS}(T=18)$) liegt im Mittel bei 0.90 (-).

Die Auswirkung von Dispersionsströmungen ist signifikant. Wird die Dispersion (D) berücksichtigt stellen sich vor allem beim hydraulischen Kurzschluss niedrigere Werte ein. Im Mittel liegt der Dispersionseffekt für hydraulischen Kurzschluss bei:

- $Q_{KS}(D=2.5/0.25)/Q_{KS}(0/0) = 0.57$ (-)
- $Q_{KS}(D=5/0.5) / Q_{KS}(0/0) = 0.47$ (-)
- $Q_{KS}(D=10/1) / Q_{KS}(0/0) = 0.43$ (-)

Beim thermischen Kurzschluss ergeben sich im Mittel folgende Faktor:

- $Q_{KS}(D=2.5/0.25)/Q_{KS}(0/0) = 0.72$ (-)
- $Q_{KS}(D=5/0.5) / Q_{KS}(0/0) = 0.67$ (-)
- $Q_{KS}(D=10/1) / Q_{KS}(0/0) = 0.64$ (-)

Tabelle 1: Hydraulischer und thermischer Kurzschluss aller Berechnungsfälle

| Fälle | k_f | Tiefe | ΔX | Temp. | Long. Disp.* | Hyd. Q_{KS} | Therm. Q_{KS} |
|-------|-------|-------|------------|-------|--------------|---------------|-----------------|
| (-) | (m/s) | (m) | (m) | (°C) | (binär) | (l/s) | (l/s) |

| | | | | | | | |
|----|-------|-----|-----|----|-----|-------|-------|
| 1 | 0.001 | -6 | 0 | 6 | 0 | 0.110 | 0.080 |
| 2 | 0.001 | -6 | 0 | 6 | 2.5 | 0.064 | 0.060 |
| 3 | 0.001 | -6 | 0 | 6 | 5 | 0.044 | 0.050 |
| 4 | 0.001 | -6 | 0 | 6 | 10 | 0.037 | 0.050 |
| 5 | 0.001 | -6 | 0 | 18 | 0 | 0.122 | 0.100 |
| 6 | 0.001 | -6 | 0 | 18 | 2.5 | 0.069 | 0.060 |
| 7 | 0.001 | -6 | 0 | 18 | 5 | 0.045 | 0.050 |
| 8 | 0.001 | -6 | 0 | 18 | 10 | 0.037 | 0.050 |
| 9 | 0.001 | -6 | -50 | 6 | 0 | 0.046 | 0.100 |
| 10 | 0.001 | -6 | -50 | 6 | 2.5 | 0.020 | 0.100 |
| 11 | 0.001 | -6 | -50 | 6 | 5 | 0.027 | 0.138 |
| 12 | 0.001 | -6 | -50 | 6 | 10 | 0.045 | 0.175 |
| 13 | 0.001 | -6 | -50 | 18 | 0 | 0.069 | 0.100 |
| 14 | 0.001 | -6 | -50 | 18 | 2.5 | 0.020 | 0.100 |
| 15 | 0.001 | -6 | -50 | 18 | 5 | 0.028 | 0.130 |
| 16 | 0.001 | -6 | -50 | 18 | 10 | 0.045 | 0.175 |
| 17 | 0.001 | -12 | 0 | 6 | 0 | 0.805 | 0.800 |
| 18 | 0.001 | -12 | 0 | 6 | 2.5 | 0.669 | 0.701 |
| 19 | 0.001 | -12 | 0 | 6 | 5 | 0.535 | 0.601 |
| 20 | 0.001 | -12 | 0 | 6 | 10 | 0.348 | 0.402 |
| 21 | 0.001 | -12 | 0 | 18 | 0 | 0.866 | 0.799 |
| 22 | 0.001 | -12 | 0 | 18 | 2.5 | 0.708 | 0.699 |
| 23 | 0.001 | -12 | 0 | 18 | 5 | 0.562 | 0.598 |
| 24 | 0.001 | -12 | 0 | 18 | 10 | 0.356 | 0.499 |
| 25 | 0.001 | -12 | -50 | 6 | 0 | 0.441 | 0.501 |
| 26 | 0.001 | -12 | -50 | 6 | 2.5 | 0.145 | 0.401 |
| 27 | 0.001 | -12 | -50 | 6 | 5 | 0.120 | 0.303 |
| 28 | 0.001 | -12 | -50 | 6 | 10 | 0.123 | 0.303 |
| 29 | 0.001 | -12 | -50 | 18 | 0 | 0.521 | 0.598 |
| 30 | 0.001 | -12 | -50 | 18 | 2.5 | 0.162 | 0.399 |
| 31 | 0.001 | -12 | -50 | 18 | 5 | 0.128 | 0.399 |
| 32 | 0.001 | -12 | -50 | 18 | 10 | 0.127 | 0.302 |
| 33 | 0.001 | -16 | 0 | 6 | 0 | 1.610 | 1.750 |
| 34 | 0.001 | -16 | 0 | 6 | 2.5 | 1.427 | 1.501 |
| 35 | 0.001 | -16 | 0 | 6 | 5 | 1.243 | 1.376 |
| 36 | 0.001 | -16 | 0 | 6 | 10 | 0.913 | 1.251 |
| 37 | 0.001 | -16 | 0 | 18 | 0 | 1.733 | 1.749 |
| 38 | 0.001 | -16 | 0 | 18 | 2.5 | 1.513 | 1.499 |
| 39 | 0.001 | -16 | 0 | 18 | 5 | 1.297 | 1.499 |
| 40 | 0.001 | -16 | 0 | 18 | 10 | 0.941 | 1.248 |
| 41 | 0.001 | -16 | -50 | 6 | 0 | 0.990 | 1.251 |
| 42 | 0.001 | -16 | -50 | 6 | 2.5 | 0.485 | 1.001 |
| 43 | 0.001 | -16 | -50 | 6 | 5 | 0.291 | 0.801 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-----|-----|----|-----|--------|--------|
| 44 | 0.001 | -16 | -50 | 6 | 10 | 0.222 | 0.602 |
| 45 | 0.001 | -16 | -50 | 18 | 0 | 1.119 | 1.498 |
| 46 | 0.001 | -16 | -50 | 18 | 2.5 | 0.546 | 0.998 |
| 47 | 0.001 | -16 | -50 | 18 | 5 | 0.316 | 0.799 |
| 48 | 0.001 | -16 | -50 | 18 | 10 | 0.232 | 0.598 |
| 49 | 0.01 | -6 | 0 | 6 | 0 | 1.103 | 1.001 |
| 50 | 0.01 | -6 | 0 | 6 | 2.5 | 0.640 | 0.626 |
| 51 | 0.01 | -6 | 0 | 6 | 5 | 0.430 | 0.501 |
| 52 | 0.01 | -6 | 0 | 6 | 10 | 0.360 | 0.401 |
| 53 | 0.01 | -6 | 0 | 18 | 0 | 1.242 | 1.249 |
| 54 | 0.01 | -6 | 0 | 18 | 2.5 | 0.692 | 0.748 |
| 55 | 0.01 | -6 | 0 | 18 | 5 | 0.446 | 0.499 |
| 56 | 0.01 | -6 | 0 | 18 | 10 | 0.365 | 0.399 |
| 57 | 0.01 | -6 | -50 | 6 | 0 | 0.254 | 0.200 |
| 58 | 0.01 | -6 | -50 | 6 | 2.5 | 0.165 | 0.200 |
| 59 | 0.01 | -6 | -50 | 6 | 5 | 0.234 | 0.301 |
| 60 | 0.01 | -6 | -50 | 6 | 10 | 0.386 | 0.401 |
| 61 | 0.01 | -6 | -50 | 18 | 0 | 0.789 | 0.499 |
| 62 | 0.01 | -6 | -50 | 18 | 2.5 | 0.171 | 0.199 |
| 63 | 0.01 | -6 | -50 | 18 | 5 | 0.237 | 0.299 |
| 64 | 0.01 | -6 | -50 | 18 | 10 | 0.390 | 0.499 |
| 65 | 0.01 | -12 | 0 | 6 | 0 | 8.020 | 8.338 |
| 66 | 0.01 | -12 | 0 | 6 | 2.5 | 6.628 | 6.672 |
| 67 | 0.01 | -12 | 0 | 6 | 5 | 5.287 | 5.009 |
| 68 | 0.01 | -12 | 0 | 6 | 10 | 3.054 | 3.759 |
| 69 | 0.01 | -12 | 0 | 18 | 0 | 8.593 | 8.329 |
| 70 | 0.01 | -12 | 0 | 18 | 2.5 | 7.000 | 7.492 |
| 71 | 0.01 | -12 | 0 | 18 | 5 | 5.471 | 5.828 |
| 72 | 0.01 | -12 | 0 | 18 | 10 | 3.142 | 3.741 |
| 73 | 0.01 | -12 | -50 | 6 | 0 | 3.598 | 3.504 |
| 74 | 0.01 | -12 | -50 | 6 | 2.5 | 0.999 | 1.003 |
| 75 | 0.01 | -12 | -50 | 6 | 5 | 0.742 | 0.755 |
| 76 | 0.01 | -12 | -50 | 6 | 10 | 0.777 | 0.755 |
| 77 | 0.01 | -12 | -50 | 18 | 0 | 5.300 | 4.988 |
| 78 | 0.01 | -12 | -50 | 18 | 2.5 | 1.254 | 1.496 |
| 79 | 0.01 | -12 | -50 | 18 | 5 | 0.805 | 0.750 |
| 80 | 0.01 | -12 | -50 | 18 | 10 | 0.804 | 0.997 |
| 81 | 0.01 | -16 | 0 | 6 | 0 | 15.892 | 16.253 |
| 82 | 0.01 | -16 | 0 | 6 | 2.5 | 14.082 | 13.754 |
| 83 | 0.01 | -16 | 0 | 6 | 5 | 12.075 | 12.505 |
| 84 | 0.01 | -16 | 0 | 6 | 10 | 8.251 | 7.515 |
| 85 | 0.01 | -16 | 0 | 18 | 0 | 16.949 | 16.662 |
| 86 | 0.01 | -16 | 0 | 18 | 2.5 | 14.849 | 14.992 |

| | | | | | | | |
|----|------|-----|-----|----|-----|--------|--------|
| 87 | 0.01 | -16 | 0 | 18 | 5 | 12.578 | 12.490 |
| 88 | 0.01 | -16 | 0 | 18 | 10 | 8.473 | 7.485 |
| 89 | 0.01 | -16 | -50 | 6 | 0 | 8.567 | 8.338 |
| 90 | 0.01 | -16 | -50 | 6 | 2.5 | 3.723 | 3.759 |
| 91 | 0.01 | -16 | -50 | 6 | 5 | 2.009 | 1.756 |
| 92 | 0.01 | -16 | -50 | 6 | 10 | 1.449 | 1.504 |
| 93 | 0.01 | -16 | -50 | 18 | 0 | 10.939 | 10.829 |
| 94 | 0.01 | -16 | -50 | 18 | 2.5 | 4.686 | 4.986 |
| 95 | 0.01 | -16 | -50 | 18 | 5 | 2.314 | 2.494 |
| 96 | 0.01 | -16 | -50 | 18 | 10 | 1.538 | 1.744 |

*Transversale Dispersion=Longitudinale Dispersion/10;

Die in der DonauConsult Studie angeführten Diagramme (Abbildung 7 in Studie DonauConsult) wurden auf Basis des HST3d-Modells neu gezeichnet und sind hier in Abbildung 7 dargestellt. Bei der Ausarbeitung wurden Dichteströmungen (hier nur Fall 5/0.5 m) berücksichtigt. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wurde für die Ermittlung der Kurzschlussmenge hydraulischer und thermischer Kurzschluss berücksichtigt. In den Diagrammen werden zwischen der geometrischen Lage des Versickerungsbrunnens unterschieden und Dispersionseffekte berücksichtigt bzw. vernachlässigt. Abzulesen ist die maximale Entnahmemenge in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens und der Tiefe des Entnahmebrunnens, ohne dass hydraulische und thermische Kurzschlussströme (nach Definition < 5 Vol% bzw. 5% ΔT) auftreten.

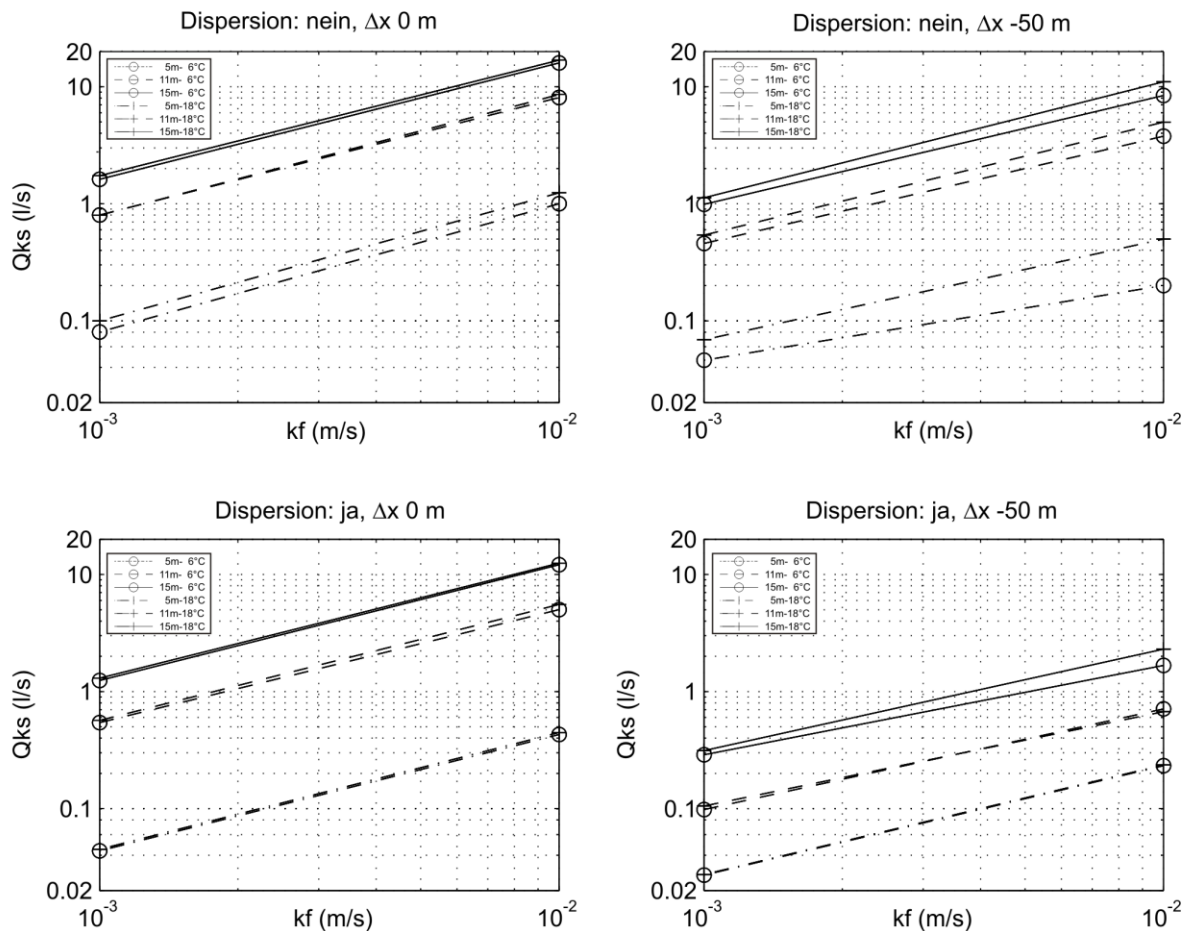


Abbildung 7: Maximale Entnahmemenge zur Vermeidung eines hydraulischen und thermischen Kurzschlusses.

3.3 Ableitung eines Korrekturfaktors

Die Ableitung eines Korrekturfaktors der Ergebnisse des DonauConsult Studie ist schwierig. Da bei unterschiedlichen Systemkonfigurationen unterschiedliche Berechnungsfälle für die Ermittlung der minimalen kurzschlussfreien Entnahmemenge maßgebend sind und auch hydraulischer oder thermischer Kurzschluss maßgebend wirken, verändern sich Korrekturfaktoren unregelmäßig.

3.3.1 Ohne Dispersion

In Anbetracht der vorliegenden Resultate für eine Rückgabe direkt über der Entnahme bei Vernachlässigung von Dispersion (Tabelle 2 oben) ergeben sich durch das 95% Effizienzkriterium bei der Kurzschlussdefinition sogar eine höhere tolerierbaren Förderrate als in der DonauConsult Studie (Größenordnung ca. 10%). Bei Tempera-

turanomalien durch Versickerung von Wasser mit niedrigerer Temperatur ist aber der Einfluss der Dichteströmungen ersichtlich. Insgesamt ist aber der Einfluss der Dichteströmung ohne Dispersion gering.

Bei Einleitung 50 m stromaufwärts (Tabelle 2 unten) wirkt sich die Temperaturanomalie stark aus. Zur Verdeutlichung wurde der Konfigurationsfall 29-32 mit einer Simulation basierend auf einer Wassereinleittemperatur von 12°C verglichen. Erhält man bei 12°C Einleittemperatur und einer Entnahmemenge von 0.2 l/s eine Markierungsstoffkonzentration von nur 0.6 Vol.%, erhöht sich der Prozentsatz bei 6°C Einleittemperatur auf 3.2 Vol.% und die Entnahmetemperatur sinkt auf die kritische Temperatur von 11.7°C. Korrekturfaktoren für Einleitung 50 m stromaufwärts sind daher auch bei Vernachlässigung der Dispersion empfehlenswert.

Tabelle 2: Vergleich HST3d Modell mit Studie DonauConsult (ohne Dispersion)

| Fälle | k_f | Tiefe | ΔX | min Q_{ks}^* | Q_{ks}^{**} | f |
|--------------|-------------------------|--------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------|
| | (m/s) | (m) | (m) | (l/s) | (l/s) | (-) |
| 1-4 | 0.001 | 5.000 | 0.000 | 0.08 | 0.10 | 0.80 |
| 9-12 | 0.001 | 11.000 | 0.000 | 0.80 | 0.71 | 1.13 |
| 17-20 | 0.001 | 15.000 | 0.000 | 1.61 | 1.39 | 1.16 |
| 25-28 | 0.010 | 5.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 33-36 | 0.010 | 11.000 | 0.000 | 8.02 | 7.10 | 1.13 |
| 41-44 | 0.010 | 15.000 | 0.000 | 15.89 | 13.90 | 1.14 |
| 5-8 | 0.001 | 5.000 | -50.000 | 0.05 | 0.06 | 0.77 |
| 13-16 | 0.001 | 11.000 | -50.000 | 0.44 | 0.45 | 0.98 |
| 21-24 | 0.001 | 15.000 | -50.000 | 0.99 | 0.91 | 1.09 |
| 29-32 | 0.010 | 5.000 | -50.000 | 0.20 | 0.60 | 0.33 |
| 37-40 | 0.010 | 11.000 | -50.000 | 3.50 | 4.50 | 0.78 |
| 45-48 | 0.010 | 15.000 | -50.000 | 8.34 | 9.10 | 0.92 |

* ... HST3d Modell

** ... DonauConsult

3.3.2 Mit Dispersion

Dispersionseffekte reduzierten die maximale Entnahmemenge für kurzschlussfreien Betrieb signifikant. Da Werte für longitudinaler und transversaler Dispersion in der Realität starken Schwankungen unterworfen sind ist eine generelle Quantifizierung eines Korrekturfaktors schwierig. Nimmt man eine longitudinale Dispersion von 5 m und einer transversalen Dispersion von 0.5 m an ergeben sich die in Tabelle 3 aufgelisteten Korrekturfaktoren f (-).

Tabelle 3: Vergleich HST3d Modell mit Studie DonauConsult (mit Dispersion)

| Fälle | k_f (m/s) | Tiefe (m) | ΔX (m) | min Q_{ks}^* (l/s) | Q_{ks}^{**} (l/s) | f (-) |
|-------|----------------|--------------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------|
| 1-4 | 0.001 | 5.000 | 0.000 | 0.04 | 0.10 | 0.44 |
| 9-12 | 0.001 | 11.000 | 0.000 | 0.54 | 0.71 | 0.75 |
| 17-20 | 0.001 | 15.000 | 0.000 | 1.24 | 1.39 | 0.89 |
| 25-28 | 0.010 | 5.000 | 0.000 | 0.43 | 1.00 | 0.43 |
| 33-36 | 0.010 | 11.000 | 0.000 | 5.01 | 7.10 | 0.71 |
| 41-44 | 0.010 | 15.000 | 0.000 | 12.08 | 13.90 | 0.87 |
| 5-8 | 0.001 | 5.000 | -50.000 | 0.03 | 0.06 | 0.46 |
| 13-16 | 0.001 | 11.000 | -50.000 | 0.12 | 0.45 | 0.27 |
| 21-24 | 0.001 | 15.000 | -50.000 | 0.29 | 0.91 | 0.32 |
| 29-32 | 0.010 | 5.000 | -50.000 | 0.20 | 0.60 | 0.33 |
| 37-40 | 0.010 | 11.000 | -50.000 | 0.74 | 4.50 | 0.16 |
| 45-48 | 0.010 | 15.000 | -50.000 | 1.76 | 9.10 | 0.19 |

* ... HST3d Modell

** ... DonauConsult

Bei einer Rückgabe direkt oberhalb des Entnahmebrunnens ist mit einer Reduktion der möglichen Entnahmemengen auf ca. 75% der Werte der Studie DonauConsult zu rechnen – mit Maximalwerten von unter 50%.

Bei einer Rückgabe 50m stromaufwärts sinken die Mengen auf nur mehr 30% der in der Studie DonauConsult ermittelten Werte – mit Maximalwerten von unter 20%.

Bei höheren Dispersionswerten ist der Einfluss des Wärmetransports noch ausgeprägter und die Werte sinken entsprechend weiter ab.

4 Bemessungsdiagramm

Analog zur Studie DonauConsult werden im folgenden Diagramm der Zusammenhang zwischen hydraulischer Durchlässigkeit und der Entnahme- bzw. Rückgabemenge, ab der ein hydraulischer Kurzschluss auftritt, dargestellt. Als konstant angenommen werden die Lage der Versickerung (direkt darüber bzw. 50 m stromauf), das Grundwasserspiegelgefälle (2 ‰) das Verhältnis der horizontalen zur vertikalen Durchlässigkeit (10:1) das Verhältnis von longitudinaler zu transversaler Dispersion (10:1) sowie die Temperatur des Grundwassers mit 12°C. 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.

Der Einfluss der Wärmeströmung wird mittels 2 verschiedenen Rückgabetemperaturer dargestellt 6°C bzw. 18°C, sowie die Dispersion in 4 verschiedenen Fällen (0/0), (2.5/0.25), (5/0.5) und (10/1) – jeweils in m.

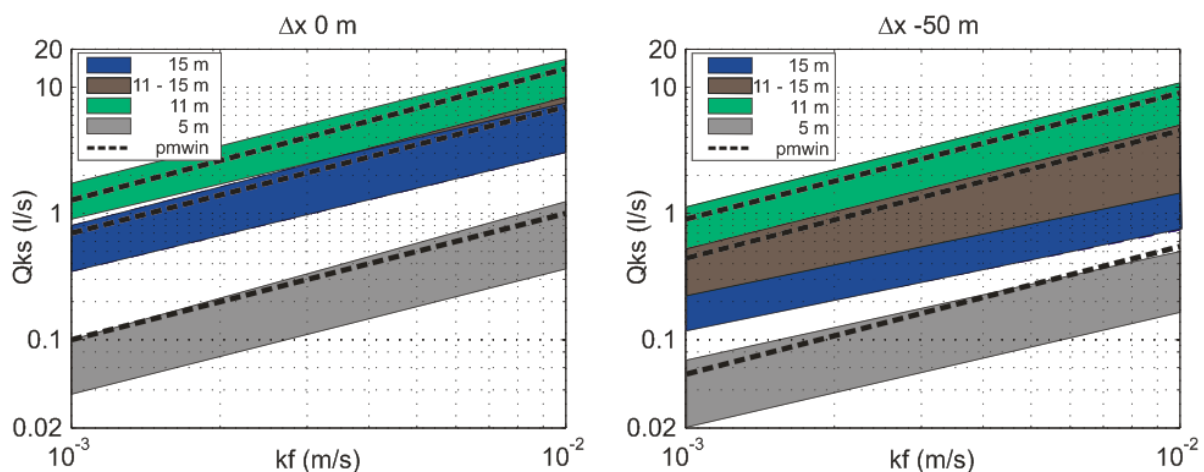


Abbildung 8: Einfluss der Wärmeströmung.

5 Schlussfolgerungen

Auf Basis der Ergebnisse des HST3d Modells lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

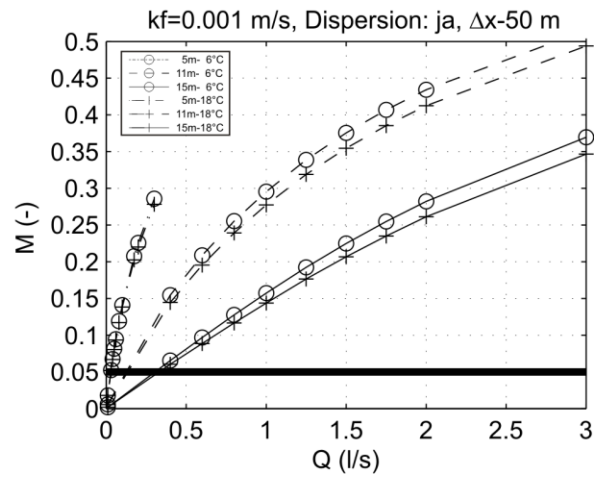
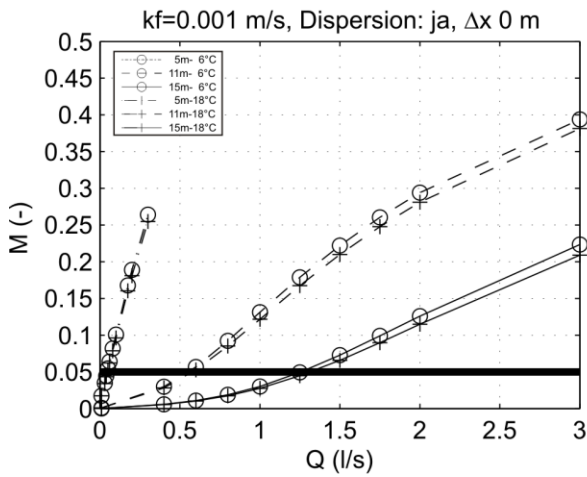
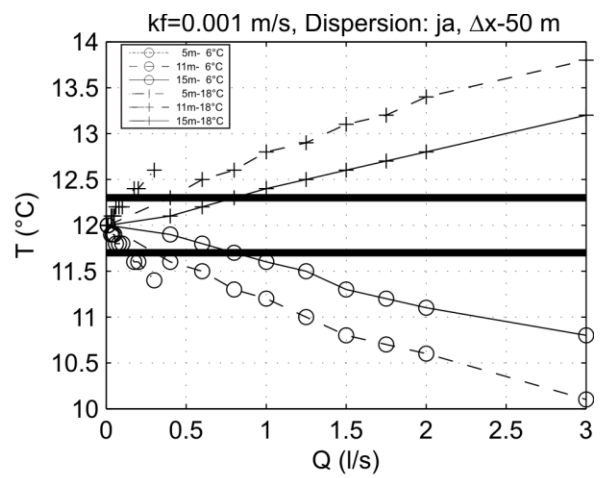
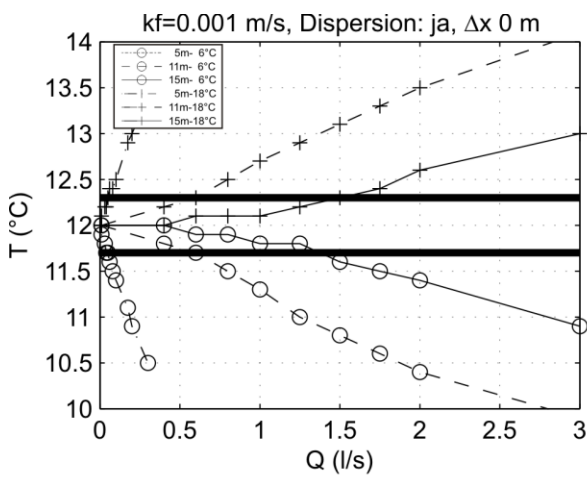
- Für die Darstellung des Einflusses von Wärmetransport ist eine Definition des hydraulischen und thermischen Kurzschlusses notwendig. Im gegenständlichen Fall wird als Kurzschluss angenommen wenn entweder 5 Vol% der Quellströmung in der Senke einlangen oder die ursprüngliche Temperaturspreizung um 5% verändert wird.
- Der Einfluss von Dichteströmungen ohne Dispersion auf Kurzschlussströme ist gering. Ist allerdings die Rückgabe 50 m stromauf angeordnet, so treten auch hier nachweisbare Effekte auf. Im Vergleich zu den Werten aus der Studie DonauConsult können hier nur ca. 80% der Wassermengen kurzschlussfrei entnommen werden.
- Dispersionsströmungen verändern die Werte für thermischen und hydraulischen Kurzschluss signifikant. Die effektiven Beeinflussungen hängen natürlich stark von der effektiven Größe der Dispersion ab. Für die mittlere Größe der Dispersion (5/0.5 m) ergibt sich bei einer Rückgabe direkt oberhalb des Entnahmebrunnens eine Reduktion der möglichen Entnahmemengen auf ca. 75% der Werte der Studie DonauConsult – mit Maximalwerten von unter 50%. Bei einer Rückgabe 50m stromaufwärts sinken die Mengen auf nur mehr 30% der in der Studie DonauConsult ermittelten Werte – mit Maximalwerten von unter 20%. Mit steigender Dispersion steigt auch die Gefahr des thermischen Kurzschlusses weiter.

6 Literaturverzeichnis

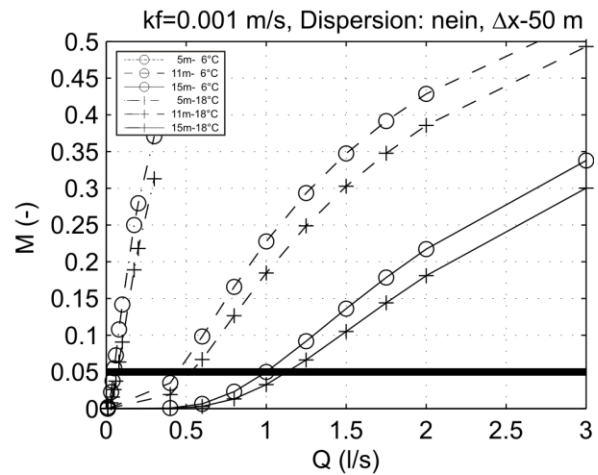
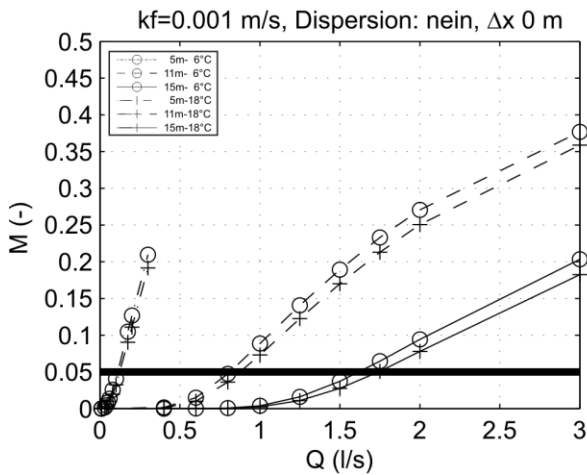
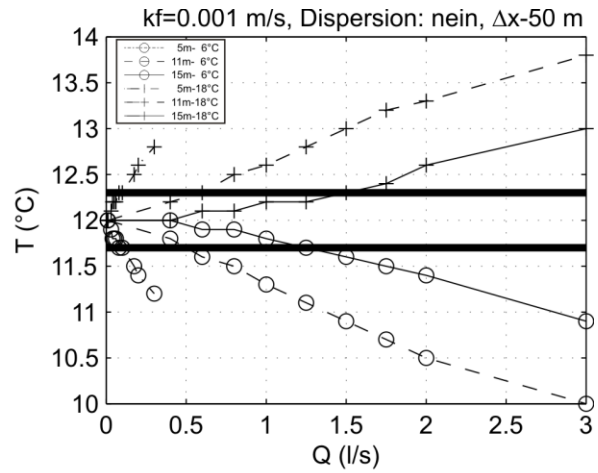
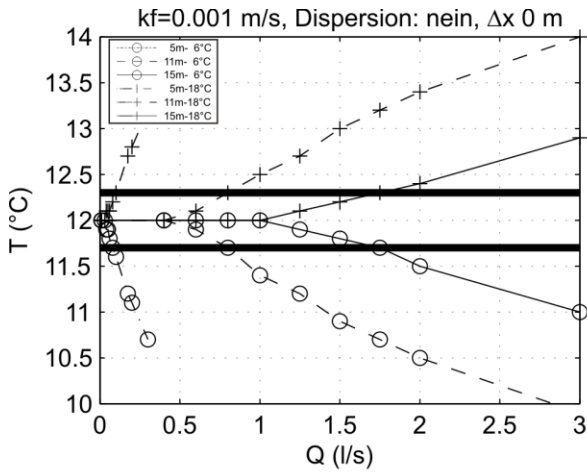
- Gelhar, L.W.; Welty, C. and Rehfeldt, K.R. (1993): A CRITICAL-REVIEW OF DATA ON FIELD-SCALE DISPERSION IN AQUIFERS - REPLY. In: Water Resources Research, Vol. 29(6), p. 1867-1869.
- Kipp Jr., K.L. (1997): Guide to the revised heat and solute transport simulator: HST3D version 2; Water Resources Investigations Report 97-4157. U.S. Geological Survey.
- Kirnbauer, R. (2008): Erforderlicher Vertikalabstand für kurzschlussfreie Quell-/Senkenströmung - Anwendung bei Hauswärmepumpen. DonauConsult Zottl & Erber ZT-GmbH.
- Mahabadi, O.K. (2006): Geothermal Simulation for the City of Berlin. Brandenburg University of Technology, Master Thesis.
- ÖWAV-RB 207 (2008): Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen.

I Diagramme

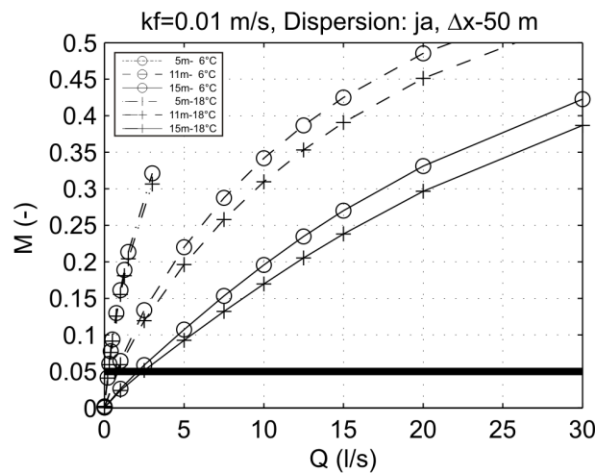
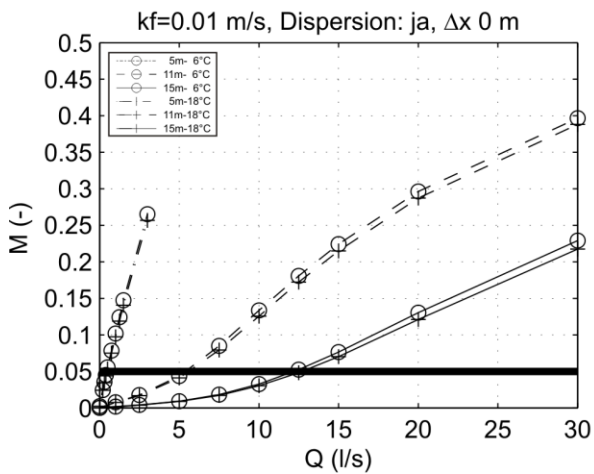
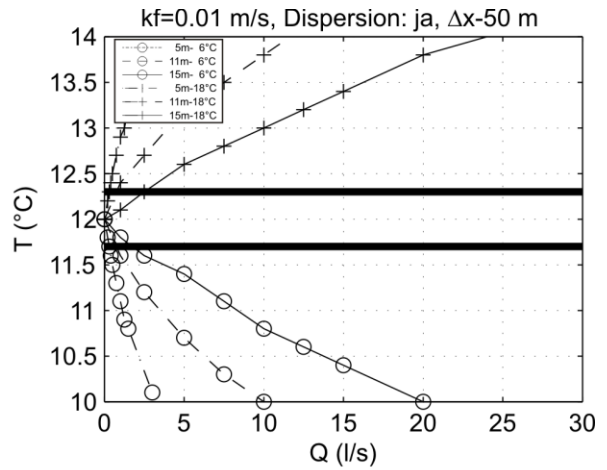
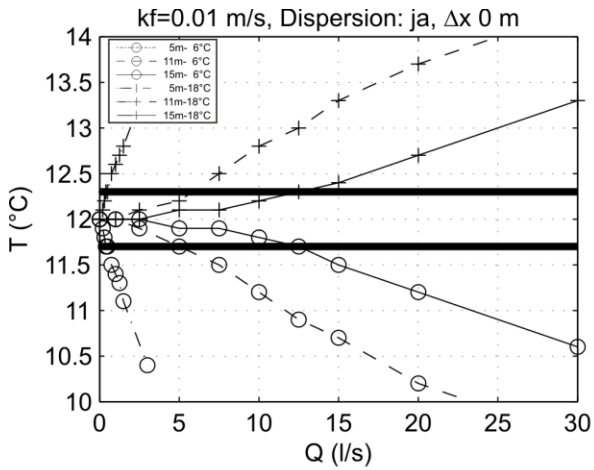
I.1 $k_f=0.001$ m/s; Dispersion: ja;



I.2 $k_f=0.001$ m/s; Dispersion: nein;



I.3 $k_f=0.001$ m/s; Dispersion: ja;



I.4 $k_f=0.01$ m/s; Dispersion: nein;

