



LAND

OBERÖSTERREICH

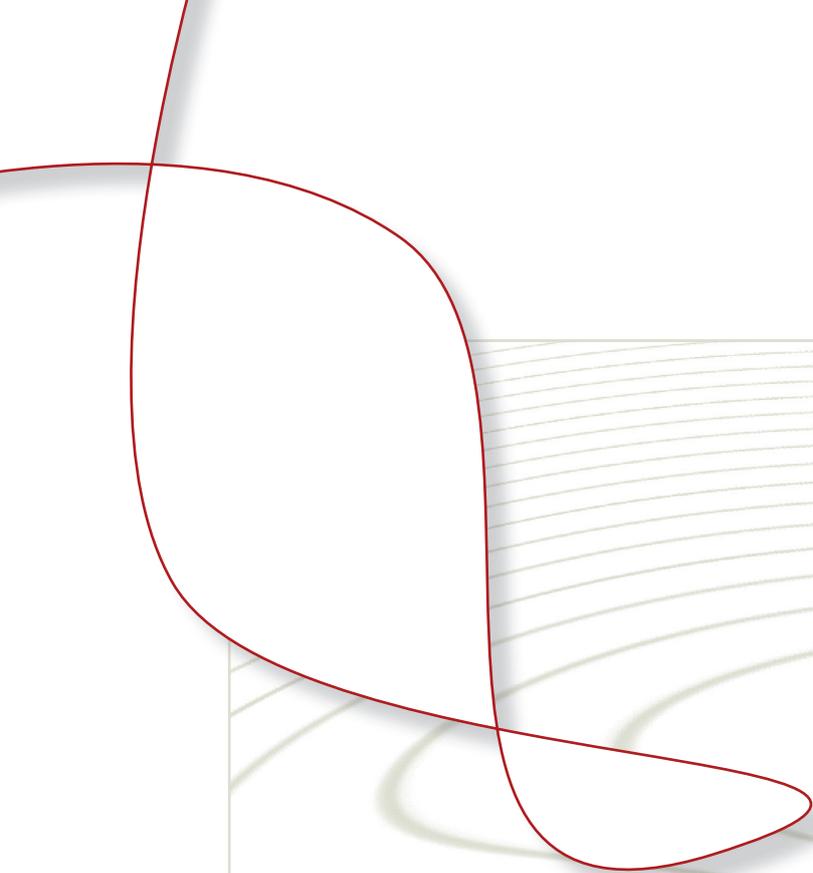
Wärmepumpen bei Einfamilienhäusern

Abschätzung thermischer Anomalien des Grundwassers

Studie



GTW



Wärmepumpen bei Einfamilienhäusern

Abschätzung thermischer Anomalien des Grundwassers

Studie



GTW



IUT

Vorwort



Landeshauptmann Dr. Josef Pühringer



Landesrat Rudi Anschober

Innovative Lösungen zur thermischen Nutzung des Grundwassers

Die thermische Nutzung des Grundwassers als Wärmequelle für Wärmepumpen zur Beheizung von Wohn- und Gewerbegebäuden nimmt stetig zu.

Eine hohe Anlagendichte, oft auch auf kleinstem Raum erfordert die Berücksichtigung bereits bestehender Anlagen und vor allem jene von Trinkwasserbrunnen.

Mit der neuen Richtlinie des ÖWAV, Regelblatt 207, wurde dafür ein neues Verfahren zur Abschätzung des thermisch veränderten Grundwasserbereiches zur Verfügung gestellt. Die Anwendung der Berechnung erfordert jedoch eine gehobene Kenntnis aller Eingangsgrößen, die in der Praxis häufig nur schwer einschätzbar sind.

Die nunmehr vorgenommene wissenschaftliche Aufarbeitung und Vereinfachung für die in der Praxis auftretenden Fälle erlaubt die komplexe Berechnung ohne Qualitätsverlust durch die Verwendung von Tabellen und grafischen Darstellungen.

Diese Studie – und vor allem die daraus abgeleitete Kurzinformation – gibt den Anlagenplanern vor Ort die Möglichkeit, den thermisch veränderten Grundwasserbereich mit relativ einfachen Mitteln rasch abzuschätzen.

Eine gut bemessene Anlage bedeutet immer den größten Nutzen bei geringstem Eingriff und damit den bestmöglichen Schutz des Grundwassers.



Dr. Josef Pühringer
Landeshauptmann



Rudi Anschober
Landesrat für Umwelt, Energie, Wasser
und Konsument/innenschutz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Literaturstudie	10
2.1	Wärmetransportvorgänge in der Geothermie.....	11
2.1.1	Konvektiver Transport	11
2.1.2	Wärmeleitung.....	12
2.1.3	Dispersiver Transport	12
2.1.4	Wärmespeicherung	12
2.1.5	Wärmetransportgeschwindigkeit	13
2.2	Temperaturverlaufsmodelle für vertikale Wärmeleitung	13
2.3	Charakterisierung der betrieblichen Parameter	16
2.4	Charakterisierung der Bodenparameter	16
2.4.1	Porosität	16
2.4.2	Horizontale und vertikale Durchlässigkeit	16
2.4.3	Wärmeleitfähigkeit und Höhen der Bodenschichten	17
2.5	Charakteristiken des Grundwassers	18
2.5.1	Dichte des Wassers	18
2.5.2	Viskosität	18
2.5.3	Relativer Auftrieb	19
3	Methodik	20
3.1	Festlegung der Modellparameter	23
4	Resultate	24
4.1	Einfluss von veränderlichen Parametern auf die Temperaturanomalien	25
4.1.1	Einfluss der Grundwassermächtigkeit auf Temperaturanomalien	25
4.1.2	Einfluss der Durchlässigkeit auf Temperaturanomalien	26
4.1.3	Einfluss des Wasserspiegelgefälles auf Temperaturanomalien	27
4.1.4	Einfluss des Dispersionswinkels auf Temperaturanomalien	27
4.1.5	Einfluss des Flurabstandes auf Temperaturanomalien	28
4.1.6	Zusammenfassung	28
4.2	Abschätzung der Länge von Temperaturanomalien mittels Diagrammen und Tabellen	28
5	Zusammenfassung	30
6	Literaturverzeichnis	32
7	Anhang	34
7.1	Anhang 1 / Bemessungsdiagramme	35
7.2	Anhang 2 / Bemessungstabellen	65

Variablen-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

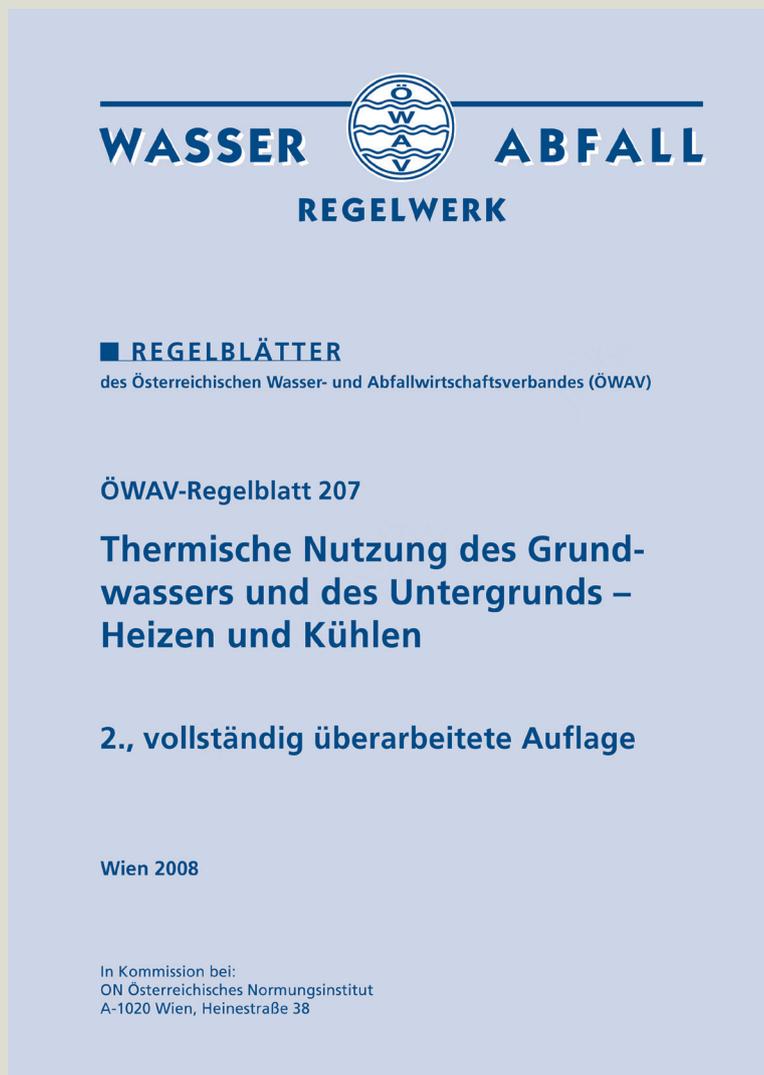
A	Querschnittsfläche (m ²)
$c_{v,GW}$	spezifische Wärmekapazität des Grundwassers (J/m ³ /k)
D	Deckschicht (m)
Df	Dispersionskoeffizient (m ² /s)
Eff	effektive Mächtigkeit
FA	Flurabstand (m)
FR	Filterrohransatz (keine Einheit)
H	Mächtigkeit (m)
k	Systemkennwert (keine Einheit; Funktion von λ_D , D, H und $c_{v,GW}$)
k_{th}	horizontale Durchlässigkeit (m/s)
n_{eff}	Porosität (keine Einheit)
P_D	dispersiver Transport (W)
P_k	konvektiver Wärmetransport (W)
P_L	Wärmeleitung (W)
P_W	Wärmespeicherung (W)
Q	Durchflussrate (m ³ /s)
QR	Rückgabemenge (m ³ /s)
s	Wegstrecke (m)
t	Zeit (s)
T	Temperatur (°C)
TE	Entnahmetemperatur (°C)
v_a	Abstandsgeschwindigkeit (m/s)
v_T	Ausbreitungsgeschwindigkeit (m/s)
V	Volumen (m ³)
VA	Vertikalabstand (m)
x, y, z	Koordinaten in X,Y und Z-Richtung (m)
X, Y, Z	Achsen in X,Y und Z-Richtung (keine Einheit)
ΔT	Temperaturspreize (K)
Δx	Horizontalabstand (m)
α	Dispersionswinkel (°)
η	dynamische Viskosität (kg/m/s)
λ	Wärmeleitfähigkeit (W/m/K)
λ_D	Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht (W/m/K)
λ_{GW}	Wärmeleitfähigkeit des Grundwassers (W/m/K)
Λ_{gesamt}	gesamte Wärmeleitfähigkeit des Bodenaufbaus (W/m/K)
ρ	Dichte (kg/m ³)

Abbildung 1: Bilanzierung über ein Kontrollvolumen V	11
Abbildung 2: Temperaturverlauf im Fluidmodell und im Feststoffmodell	14
Abbildung 3: Näherung für das Feststoffmodell zum vertikalen Temperaturverlauf.....	14
Abbildung 4: Zeitlicher Temperaturverlauf in einem Grundwasserleiter	15
Abbildung 5: Hydrogeologische Klassifikation (Sitzenfrei 2007)	17
Abbildung 6: Dichte als Funktion der Temperatur unter Normaldruck	18
Abbildung 7: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur	19
Abbildung 8: Strömungsbild – hydraulische Näherung	21
Abbildung 9: Einfluss der Grundwassermächtigkeit auf Temperaturanomalien	26
Abbildung 10: Einfluss der Durchlässigkeit auf Temperaturanomalien.....	26
Abbildung 11: Einfluss des Wasserspiegelgefälles auf Temperaturanomalien	27
Abbildung 12: Einfluss des Dispersionswinkels auf Temperaturanomalien	27
Abbildung 13: Einfluss des Flurabstandes auf Temperaturanomalien.....	28
Abbildung 14: Diagramm zur Abschätzung der Wärmefahnenlänge	29
Tabelle 1: Zusammenfassung – Einfluss der veränderlichen Parameter auf die Temperaturanomalie	28
Tabelle 2: Tabelle für Temperaturanomalie bei unterschiedlichen Mächtigkeiten	29
Tabelle 3: Bemessungstabelle für Temperaturanomalie	29

1

Einleitung

Für den Betrieb thermischer Grundwassernutzung stellt die Berechnung der Ausbreitung der Temperaturanomalien eine wesentliche Grundlage des wasserrechtlichen Genehmigungsverfahrens in Österreich dar. Hierbei geht es vor allem um den Abstand zu einer unterstrom liegenden Grundwassernutzung bzw. die Beeinträchtigung einer solchen durch die Veränderung der Grundwassertemperatur über das festgelegte Maß der Geringfügigkeit von 1 °K. Für die Bewertung wurde das Verfahren nach Ingerle (Ingerle 1988) angewendet, da dieses vom Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband mit dem Regelblatt 19 (ÖWAV-RB 207 2009) empfohlen wird. Dieses Verfahren wurde herangezogen, um ein Nachschlagewerk für die Abschätzung der Ausbreitung von Temperaturanomalien zu erstellen. Ziel der Studie ist es, mit diesem Nachschlagewerk eine einfache Anwendung des Verfahrens nach Ingerle in der Praxis zu ermöglichen.



2

Literaturstudie

In der Literaturstudie werden mögliche Schwankungsbreiten und Richtwerte für relevante Modellierungsparameter diskutiert. Dadurch lassen sich Bandbreiten für eine Analyse ableiten. Ferner wird der Einfluss der Parameter auf die Magnitude von Temperaturanomalien analysiert. Der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Parameter ist ebenso Bestandteil dieser Literaturstudie.

2.1 Wärmetransportvorgänge in der Geothermie

Aus der Bilanzierung der Wärmeenergie über ein Grundwasserkontrollvolumen ΔV lassen sich für poröse Medien die drei relevanten Transportmechanismen: konvektiver Transport, Wärmeleitung und dispersiver Transport ableiten.

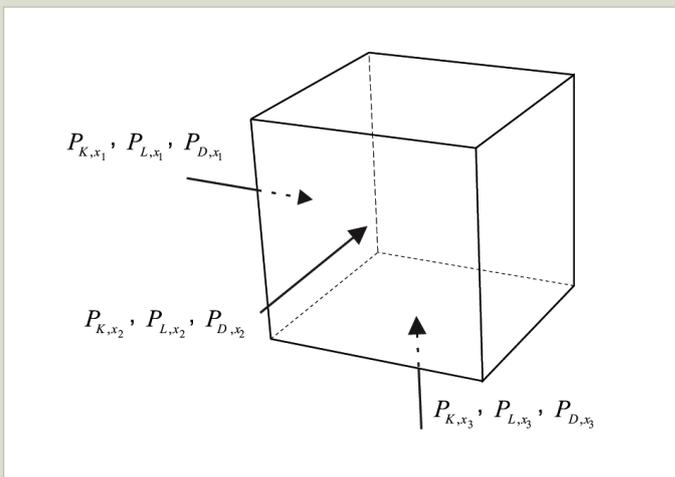


Abb. 1: Bilanzierung über ein Kontrollvolumen V

2.1.1 Konvektiver Transport

Der konvektive Wärmetransport P_k umfasst die durch die Grundwasserbewegung verursachte transportierte Wärmeenergie. Der Volumenstrom setzt sich aus der Querschnittsfläche A , der Abstandsgeschwindigkeit v_a und der effektiven Porosität n_{eff} (siehe auch 2.4.1) zusammen. Der konvektive Wärmestrom P_k ist somit die über die betrachtete Querschnittsfläche A quer zur Strömungsrichtung pro Zeiteinheit transportierte Wärmeenergie (Mehlhorn 1982) beziehungsweise Volumenstrom mal Wärmespeicherkapazität $c_{v,GW}$ mal Temperaturdifferenz ΔT :

$$P_K = c_{v,GW} \cdot n_{eff} \cdot A \cdot v_a \Delta T$$

2.1.2 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung P_L (i. e. Wärmediffusion, Konduktion) ist der Wärmefluss, der durch Temperaturunterschiede im Boden entsteht. Wärme fließt dabei immer von der höheren zur niedrigeren Temperatur. Gemäß dem Energieerhaltungssatz¹ geht dabei keine Wärme verloren. Das Maß für die Wärmeleitung ist die Wärmeleitfähigkeit λ . Der Wärmestrom P_W beschreibt die über die betrachtete Querschnittsfläche A durch Wärmeleitung transportierte Wärmemenge und ist direkt proportional zum Temperaturgradienten dT/ds :

$$P_L = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{ds}$$

2.1.3 Dispersiver Transport

Der dispersive Transport P_D ist durch die Heterogenität des mikroskopischen und makroskopischen Strömungsfeldes bestimmt bzw. ein Maß für die Schwankungen der lokalen Strömungsvektoren in Richtung und Betrag um die Darcy-Geschwindigkeit². Das heißt, dass Wasserteilchen die Bodenmatrix nicht auf geraden Bahnen durchströmen, wie es die Filtergeschwindigkeit nach Darcy beschreibt. Wegen

- unterschiedlicher Porengrößen,
- ungleichförmiger Porengeschwindigkeitsprofile
- und Umlenkung durch festes Korngerüst

werden die Teilchen mikroskopisch begründet sowohl in Längs- als auch in Querrichtung abgelenkt. Makroskopisch begründet sich der dispersive Transport in der Inhomogenität der Durchlässigkeit (z. B. Linsen). Die mitgeführte Wärme breitet sich ebenfalls aus, während die Temperaturdifferenz zur Ruhetemperatur jedoch abnimmt. Die Dispersion wird analog zum Fick'schen Gesetz für die Diffusion beschrieben und durch Parameter für longitudinale und transversale Dispersion D_f , Wärmespeicherkapazität $c_{V,GW}$, Querschnittsfläche A , effektive Porosität n_{eff} (siehe auch 2.4.1) und Temperaturgradienten dT/ds quantifiziert.

$$P_D = -D_f \cdot A \cdot n_{eff} \cdot c_{V,GW} \cdot \frac{dT}{ds}$$

2.1.4 Wärmespeicherung

Die Wärmespeicherung kann als die zusätzliche Wärmeenergie im betrachteten Kontrollvolumen $\Delta V = \Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \cdot \Delta x_3$ definiert werden. Der Wärmestrom ergibt sich als die zusätzliche Wärmeenergie bezogen auf die Zeit zu:

$$P_W = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot (P_{K,x_i} + P_{L,x_i} + P_{D,x_i}) \Delta x_i$$

¹ Der Energieerhaltungssatz sagt aus, dass die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems sich nicht mit der Zeit ändert.

² Das Darcy-Gesetz, benannt nach dem französischen Ingenieur Henry Darcy, ist eine empirisch (also durch Versuche) ermittelte Gesetzmäßigkeit der Strömungsmechanik. Das Darcy-Gesetz (auch Darcy-Gleichung genannt) besagt, dass die Wassermenge, die eine Fläche in einem porösen Medium (laminar) durchströmt, direkt proportional zum hydraulischen Gradienten ist.

2.1.5 Wärmetransportgeschwindigkeit

Die in einen Grundwasserkörper eingebrachte Wärmeenergie führt zu einer Temperaturveränderung. Da die Wärmeenergie nicht nur im Grundwasser vorhanden ist, sondern auch auf das Korngerüst übertragen wird, ist die Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit v_T geringer als die Abstandsgeschwindigkeit v_a . Als Abschätzung für gebräuchliche Grundwasserleiter kann von einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von $v_T = 0,5 \cdot v_a$ ausgegangen werden. Dies bedeutet, dass sich eine Temperaturanomalie durchschnittlich mit der halben Grundwasserabstandsgeschwindigkeit ausbreitet.

2.2 Temperaturverlaufsmodelle für vertikale Wärmeleitung

Für näherungsweise Beschreibungen der Wärmeleitungsvorgänge im Grundwasser (beispielsweise nach Ingerle [1988]) werden vereinfachte vertikale Temperaturverlaufsmodelle angewendet. Führt man den Temperaturverlauf bei einem vertikalen Profil auf eine konstante Ausgangstemperatur und stationäre Einleitbedingungen zurück, so vereinfacht sich die Beschreibung dieses Vorgangs auf die Wärmeabgabe durch die Deckschicht. Es gelten hierbei folgende Vereinfachungen:

- Temperatur zum Zeitpunkt $t = 0$ (T_0) als Jahresmittelwert der Oberflächentemperatur und Ausgangstemperaturen von Grundwasser, Korngerüst, Deckschicht und Atmosphäre.
- Der Abbau eines Temperaturgradienten durch Einleiten von Nutzwasser mit der Rückgabetemperatur erfolgt ausschließlich über die Deckschicht durch den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre. Somit muss auch von einer für den Wärmetransportvorgang endlichen Deckschicht ausgegangen werden.
- In der Fluidphase des Grundwasserleiters kommt es zu keinen Einschichtungseffekten durch temperaturbedingte Dichteunterschiede.
- Man geht von einer stationären Temperaturverteilung aus, die ausschließlich eine Funktion des Ortes ist.

In der Deckschicht herrscht somit eine stationäre Temperaturdifferenz vor, aus der ein linearer Temperaturverlauf resultiert (siehe Abbildung 2).

Da der Grundwasserleiter aus einem Feststoffanteil und den mit Wasser gefüllten Poren besteht, findet die Wärmeübertragung in beiden Phasen mit unterschiedlichen Mechanismen statt. In der Fluidphase geht man davon aus, dass durch freie Konvektion eine vollkommene Durchmischung über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters erfolgt und somit eine konstante Temperatur vorherrscht. Der Abbau des Temperaturgradienten erfolgt nur in der Deckschicht D (siehe Abbildung 2), und der Wärmestrom lässt sich analog zu 2.1.2 berechnen als:

$$P_L = -\lambda \cdot \frac{dT}{ds} \cdot A$$

Die Möglichkeit einer Durchmischung der Fluidphase ist nicht immer gegeben. Ein anisotroper Bodenaufbau mit einer verminderten Durchlässigkeit in vertikaler Richtung oder ein geschichteter Grundwasserleiter können mit dem Feststoffmodell besser dargestellt werden. Bei nur geringer Überdeckung und der Möglichkeit einer freien Konvektion bietet das Fluidmodell hingegen eine brauchbare Abbildung der natürlichen Verhältnisse.

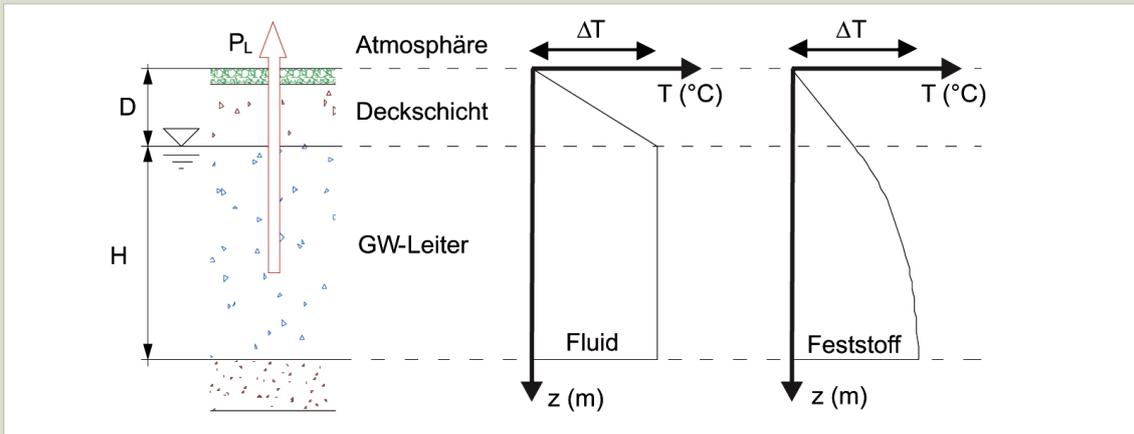


Abb. 2: Temperaturverlauf im Fluidmodell und im Feststoffmodell

Da das Feststoffmodell jedoch für häufig auftretende natürliche Randbedingungen eine bessere Abbildung des Wärmetransports ist, wird die schwierig zu behandelnde Formulierung des Wärmestroms entlang des Temperaturgradienten durch einen abschnittsweise linearen Verlauf approximiert.

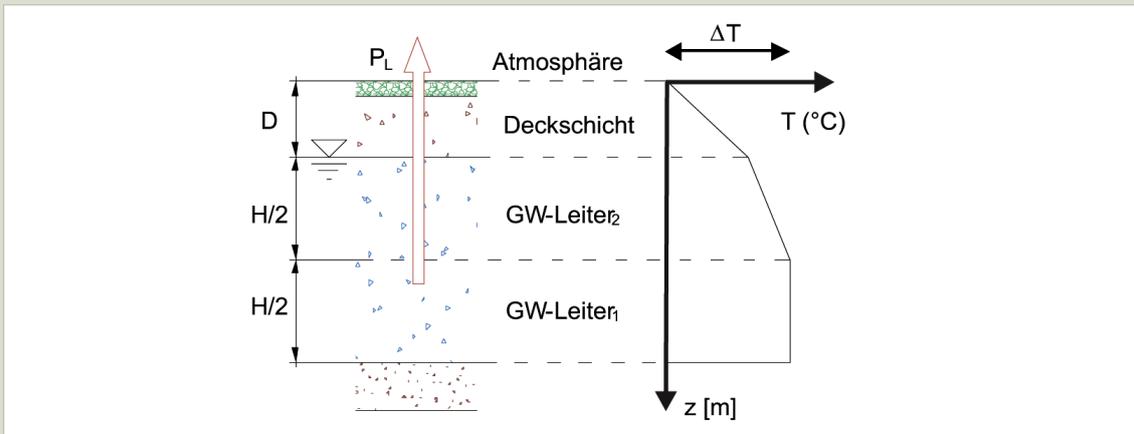


Abb. 3: Näherung für das Feststoffmodell zum vertikalen Temperaturverlauf

Der lineare Temperaturgradient erstreckt sich bis in die Mitte des Grundwasserleiters ($H/2$). Für den quasistationären Zustand kann hierbei der Wärmestrom analog zum Wärmestrom durch eine geschichtete Wand berechnet werden mit den Wärmedurchlasswiderständen (λ_D in der Deckschicht und λ_{GW} im Grundwasser) durch n Schichten und mit den Schichtdicken s_i :

$$\frac{1}{\Lambda_{gesamt}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\Lambda_i} = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} = \frac{D}{\lambda_D} + \frac{H/2}{\lambda_{GW}} = \frac{D + \frac{H}{2} \cdot \frac{\lambda_D}{\lambda_{GW}}}{\lambda_D}$$

Für die Näherung $\lambda_D : \lambda_{GW} = 1 : 2$ berechnet sich somit der Wärmestrom zu:

$$P_L = -\Lambda_{gesamt} \cdot A \cdot \Delta T = -\frac{\lambda_D}{D + \frac{H}{4}} \cdot A \cdot \Delta T$$

Mit dem Gleichsetzen von $P_W = P_L$ ergibt sich nach dem Einsetzen folgende Differentialgleichung:

$$V \cdot c_{V,GW} \frac{dT}{dt} = -\frac{\lambda_D}{D + \frac{H}{4}} \cdot A \cdot \Delta T$$

Nach Trennung der Variablen und anschließender Integration mit der Randbedingung $T(t=0) = T_1$ ergibt sich der zeitliche Temperaturverlauf in einem Grundwasserleiter als:

$$T(t) = T_1 \cdot e^{-\frac{\lambda_D \cdot t}{\left(D + \frac{H}{4}\right) \cdot H \cdot c_{V,GW}}} = T_1 \cdot e^{-kt}$$

k wird hier als von der Bodengeometrie abhängiger Systemkennwert eingeführt. Der Wärmeaustausch zwischen dem Grundwasserleiter und der Atmosphäre wird somit näherungsweise beschrieben. Zu beachten ist hierbei, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ die Zufuhr der Wärmequelle mit der Temperatur T_1 eingestellt wird:

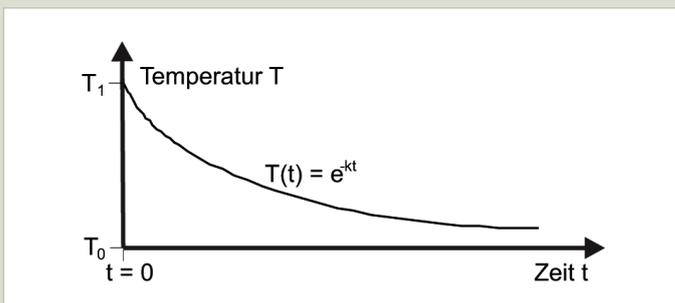


Abb. 4: Zeitlicher Temperaturverlauf in einem Grundwasserleiter

2.3 Charakterisierung der betrieblichen Parameter

Für diese Studie wird der Betrieb von Heizwasseranlagen, wie sie im Einfamilienhausbereich üblich sind, analysiert. Der Leistungsbedarf eines Objekts wird dabei zwischen 40 W/m^2 und 80 W/m^2 bzw. zwischen $6,0 \text{ kW}$ und $12,0 \text{ kW}$ angenommen. Bei einer Jahresleistungszahl von 1:5 werden dem Grundwasser demzufolge $4,8 \text{ kW}$ bis $9,6 \text{ kW}$ Leistung entzogen. Bei einer Temperaturpreize von 3 °K entspricht dies einem Wasserbedarf von ca. $0,4\text{--}1,0 \text{ l/s}$ bzw. $0,2\text{--}0,6 \text{ l/s}$ bei 5 °K Temperaturpreize. Diese Wassermengen liegen den nachfolgenden Untersuchungen zugrunde.

Der Einfluss der Entnahmemenge auf Temperaturanomalien ist wesentlich. Die relevanten Längen der Temperaturanomalien erhöhen sich bei zunehmender Rückgabemenge.

Grundwasserwärmepumpen für Heiz- und Warmwassererzeugung sind, abhängig von den klimatischen Verhältnissen, etwa $1400\text{--}2000 \text{ h}$ im Jahr in Betrieb. Zu Heizzwecken konzentriert sich dieser Betrieb auf das Winterhalbjahr. Durch einen Betrieb mit Heizpausen wird der Wärmeeintrag vermindert, wodurch sich eine geringere Erstreckung der Temperaturanomalie einstellt. Bei der Bestimmung der Temperaturanomalien ist eine dementsprechende Minderung von Spitzenwerten durch Bildung des Jahresmittelwertes nach ÖWAV-RB 207 (2009) vorzunehmen. Dies ist eine Vereinfachung, bei der hydraulische Breiten im Nahbereich unterschätzt werden.

Die Länge des Filterrohrs beeinflusst die Grundwassergeschwindigkeiten, die durch die Brunnenradialströmung hervorgerufen wird. Je länger das Filterrohr ist, desto geringer sind die indizierten Erhöhungen der Grundwasserruhefließgeschwindigkeiten. Auf die Längen der Wärmefahnen ist der Einfluss der Filterrohrlänge jedoch unbestimmt. Je nach Konfiguration kann sich die Filterrohrlänge vermindern oder auch vergrößern auf die Wärmefahnenlängen auswirken.

2.4 Charakterisierung der Bodenparameter

2.4.1 Porosität

Ein Maß für den Porenanteil ist die Porosität als Verhältnis von Porenvolumen zu Gesamtvolumen. Bei der Gesamtporosität betrachtet man sämtliche Hohlräume. Berücksichtigt man jedoch nur untereinander verbundene Hohlräume, so spricht man von der durchgängigen Porosität. Ferner werden für die effektive Porosität n_{eff} ausschließlich die am Wassertransport teilnehmenden Hohlräume berücksichtigt. Im Folgenden wird unter dem Begriff Porosität immer die effektive Porosität verstanden. Hohe Porosität bedeutet eine große durchfließbare Fläche und daher kleinere Grundwasserfließgeschwindigkeiten bzw. niedrigeres Grundwasserspiegelgefälle. Dadurch kann sich bei steigender Porosität eine geringere Länge der Temperaturanomalien ergeben.

2.4.2 Horizontale und vertikale Durchlässigkeit

Der Durchlässigkeitswert eines Bodens beschreibt den Widerstand, den ein Boden dem fließenden Wasser entgegensetzt. Man kann den Durchlässigkeitswert in einen fluidabhängigen und einen bodenspezifischen Anteil (Permeabilität) aufspalten. Die Permeabilität ist abhängig von den Bodenparametern Porosität, Korngröße und Kornverteilung (Sitzenfrei 2007).

Hohe horizontale Durchlässigkeit erhöht die Ausbreitung von Temperaturanomalien. Da der fluidabhängige Anteil der hydraulischen Leitfähigkeit von der kinematischen Zähigkeit abhängig ist, tritt hier eine Temperaturabhängigkeit auf (siehe Temperaturabhängigkeit der Viskosität).

Nach Walton (1987) kann das Verhältnis von horizontaler zur vertikaler Durchlässigkeit mit 2 für wenig anisotrope, 10 für mittel und 100 für stark anisotrope Böden angenommen werden. Die vertikale Durchlässigkeit ist meist geringer als die horizontale Durchlässigkeit. Bei sandigem Kies oder kiesigem Sand ist aber meist mit geringer Anisotropie zu rechnen. Im Gegensatz dazu herrscht bei Tonen oft hohe Anisotropie vor. Im Rahmen der Studie ist deswegen eher von einem Verhältnis von 1:2 auszugehen. Bei steigender Anisotropie verlängern sich die Wärmefahnenlängen.

2.4.3 Wärmeleitfähigkeit und Höhen der Bodenschichten

Eine sinnvolle Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens kann nur als Mittelwert über bestimmte Bodenbereiche erfolgen. Betrachtet man den Boden idealisiert als Zwei-Phasen-Gemisch, in dem einerseits die körnige Phase und andererseits ein Zwischenmedium enthalten sind, bietet sich eine Unterteilung in drei Schichten an:

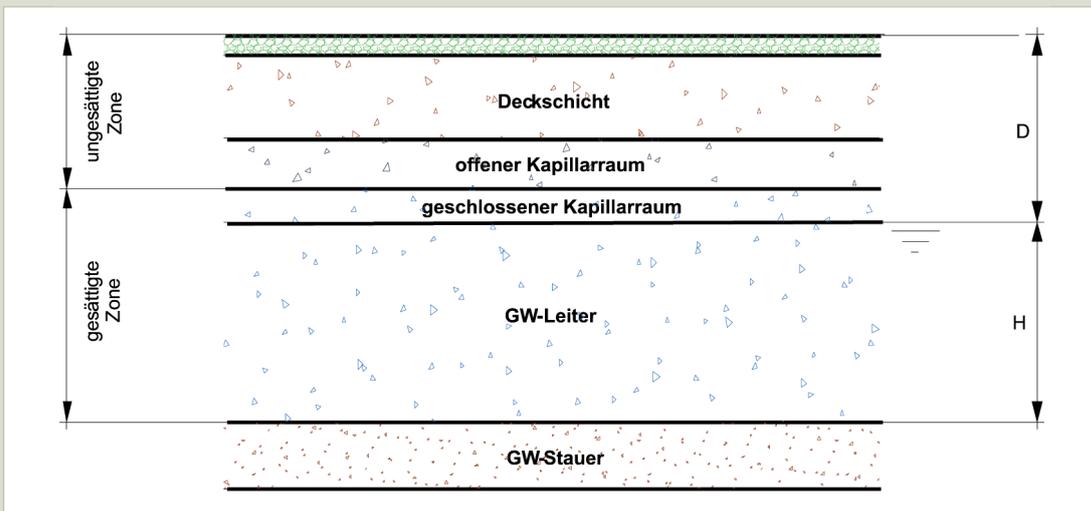


Abb. 5: Hydrogeologische Klassifikation (Sitzenfrei 2007)

- Deckschicht, als wasserungesättigter Bereich mit Luft als Zwischenmedium,
- Grundwasserleiter, als wassergesättigter Bereich mit Wasser als Zwischenmedium, und eine
- undurchlässige Schicht (Grundwasserstauer) mit niedriger Porenzahl (sedimentäres Festgestein)

Auf die Temperaturfahnen ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Grundwasserleiters vernachlässigbar. Die Wärmeleitfähigkeit der an den Grundwasserleiter angrenzenden Schichten (GW-Stauer und Deckschicht) hat hingegen einen großen signifikanten Einfluss auf den Abbau der Temperaturanomalie und somit auf die Länge der Temperaturfahnen.

Aus ÖWAV-RB 207 (2009) ergeben sich Schwankungsbreiten für die Wärmeleitfähigkeit:

- für die Deckschicht von 0,4 bis 1 W/m/K,
- für den Grundwasserleiter 0,9 bis 4 W/m/K
- und für die undurchlässige Schicht 0,3 bis 7,7 W/m/K.

Eine große Mächtigkeit der Deckschicht vergrößert nach dem Ansatz von Ingerle die Wärmefahnenlängen. Bei niedrigerer Durchlässigkeit und Dispersion im Grundwasserleiter kann sich die Temperaturanomalie aufgrund der hydraulischen Verhältnisse nicht über die gesamte Grundwassermächtigkeit ausbreiten.

2.5 Charakteristiken des Grundwassers

2.5.1 Dichte des Wassers

Die Dichte des Wassers ist als Masse pro Volumen definiert. Aus Wechselwirkungen der Wassermoleküle über die Wasserstoffbrückenbindungen miteinander resultiert die Dichteanomalie des Wassers mit dem Dichtemaximum bei $+4\text{ °C}$ bei Normaldruck (die Dichte sinkt von hier aus sowohl bei einer Erwärmung als auch bei einer Abkühlung ab). Für reines Wasser kann man die Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur mit einer parabolischen Gleichung (abgebildet in Abbildung 6) approximieren. Dies führt zu Dichteänderungen von ca. 0,025 % im Einfamilienhausbereich (zw. 5 und 10 °C). Bei dieser Studie wird die Temperaturabhängigkeit der Dichte nicht berücksichtigt.

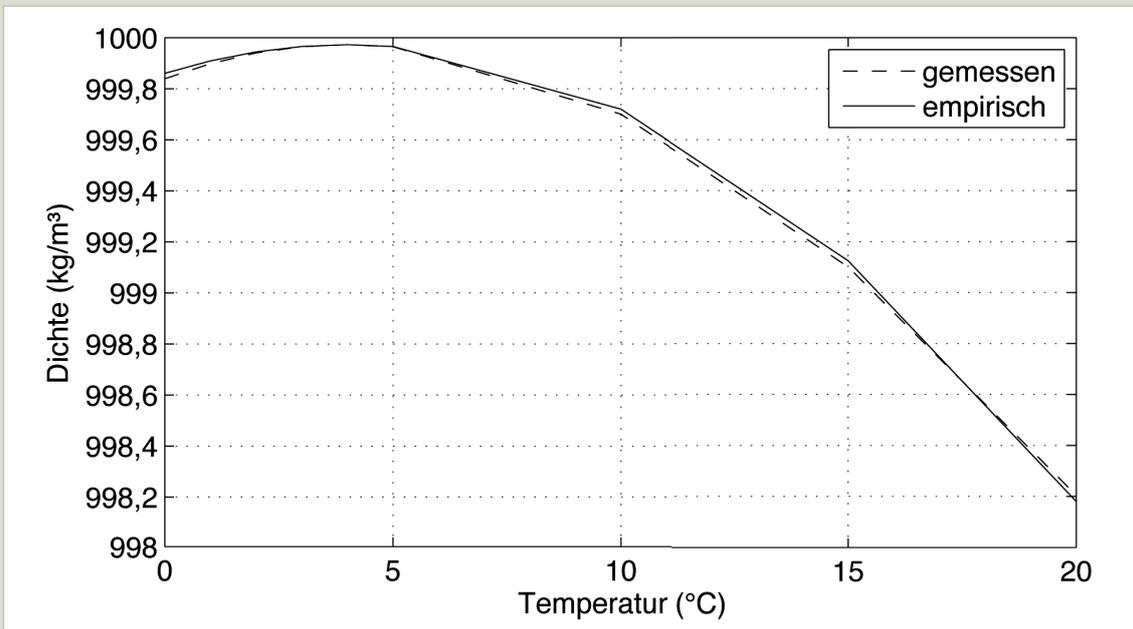


Abb. 6: Dichte als Funktion der Temperatur unter Normaldruck

2.5.2 Viskosität

18

Die Viskosität ist die Zähigkeit einer Flüssigkeit. Über Schubspannungen aufgrund von Formänderungen und infolge der somit durch innere Reibung auf benachbarte Flüssigkeitselemente übertragenen Scherkräfte entsteht ein Geschwindigkeitsgefälle. Hierbei herrscht für Newton'sche Flüssigkeiten und kleine Deformationsgeschwindigkeiten eine direkte Proportionalität zwischen Schubspannungen und dem Geschwindigkeitsgefälle. Als Proportionalitätsfaktor gilt hier die dynamische Viskosität. Die kinematische Viskosität ist auf die Dichte bezogen und errechnet sich aus der dynamischen Viskosität durch die Dichte.

Die Viskosität nimmt bei Wasser mit steigender Temperatur ab, da mit der erhöhten Temperatur ein Abbau der durch Wasserstoffbrücken bewirkten Bindungen einhergeht. Mit zunehmender thermischer Bewegung der Wassermoleküle verringert sich ebenfalls die Energie, weil bestehende Bindungen aufgelöst werden.

Somit herrscht bei höheren Temperaturen weniger innerer Reibungswiderstand, und das Wasser hat eine höhere Fließgeschwindigkeit. Näherungsweise kann die Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur nach dem Gesetz von Poiseuille (Bollrich and Preißler 1985) formuliert werden (siehe Abbildung 7). Dies führt zu Viskositätsänderungen bei geothermischen Nutzungen von bis zu 35 % und im Einfamilienhausbereich (zw. 10 u. 5 °C) 16 %. Bei dieser Studie wird die Temperaturabhängigkeit der Viskosität nicht berücksichtigt. Durch die Abhängigkeit der Durchlässigkeit von der Viskosität ergibt sich eine proportionale Änderung der Durchlässigkeit.

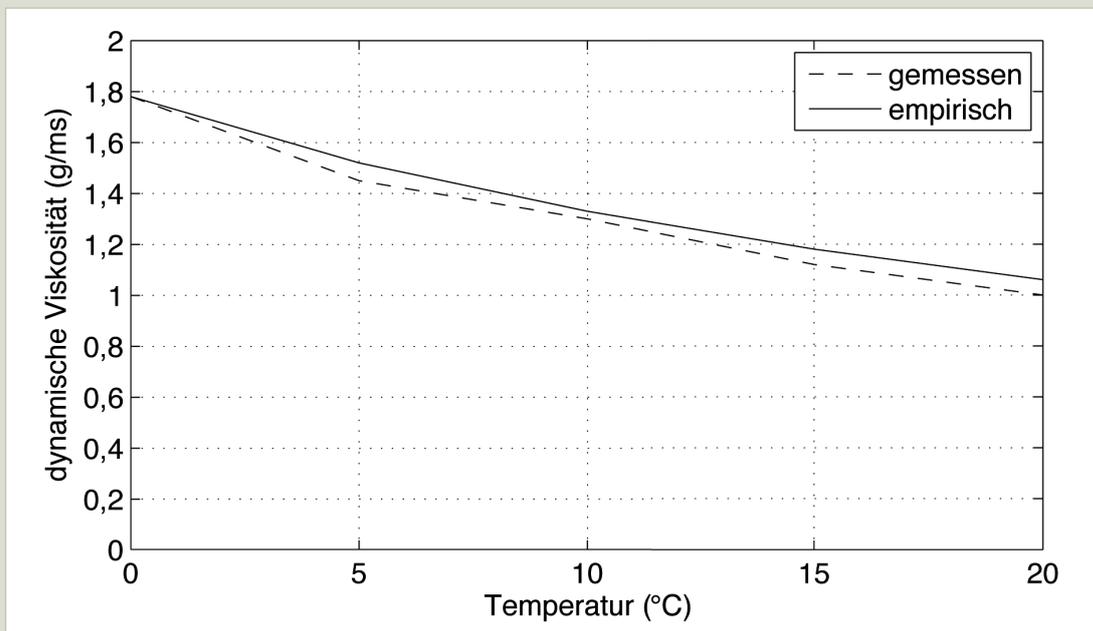
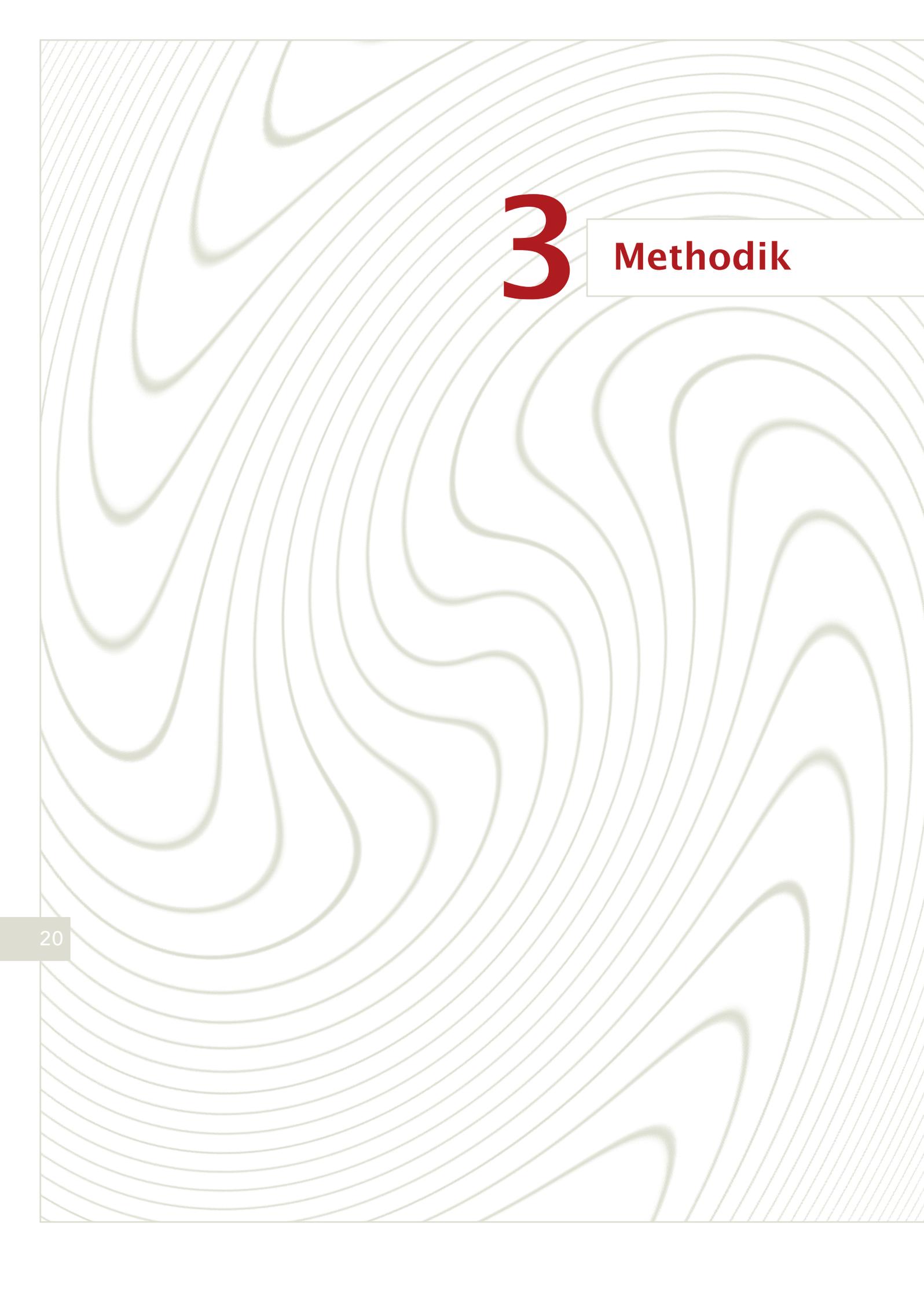


Abb. 7: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur

2.5.3 Relativer Auftrieb

Betrachtet man einen Grundwasserstrom mit bewegtem Wasserkörper, dessen Temperatur von der natürlichen abweicht, so weist dieser einen Dichteunterschied auf. In Mehlhorn (1982) wird nun der relative Auftrieb als Verhältnis zwischen Auftriebskraft und Reibungskraft definiert. Neben der horizontalen Temperaturentbreitungskomponente zufolge des Energieliniengefälles und der Wärmespeicherkapazität kommt es zusätzlich zu einer vertikalen Bewegungskomponente, verursacht durch Auftriebseffekte. Diese Auftriebskräfte sind wegen der Nichtberücksichtigung von Dichteänderungen in diese Studie nicht einbezogen.



3

Methodik

Das Ausmaß der Temperaturanomalien wird, wie in ÖWAV-RB 207 (2009) vorgeschlagen, mit der schrittweisen Berechnung nach Ingerle (Ingerle 1988) bestimmt. Dabei wird einerseits der Abbau des Temperaturgradienten aufgrund des Wärmeaustausches mit der Oberfläche und andererseits ein Temperatúrausgleichsprozess aufgrund von Mischungsvorgängen an den Rändern der Temperaturanomalie für einen stationären Zustand berücksichtigt. Bei einer aufgrund von großen Versickerungsmengen oder kleinen Grundwasserfließgeschwindigkeiten großen Einflussbreite spielen Mischungsvorgänge nur eine beschränkte Rolle. Im Falle von kleinen Versickerungsmengen und somit geringer Einflussbreite überwiegen die Mischungsvorgänge (Sitzenfrei 2007).

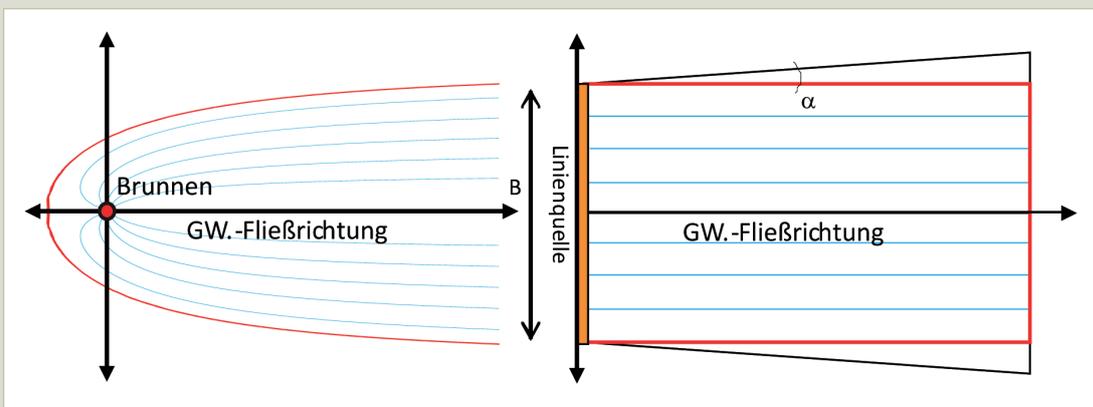


Abb. 8: Strömungsbild – hydraulische Näherung

Bei der Berechnung nach Ingerle wird das reale Strömungsbild (Abbildung 8, links) durch einen Parallelströmungskörper mit Grundwasserruhegeschwindigkeit als hydraulische Näherung abgebildet (Abbildung 8, rechts). Dabei wird der punktförmige Brunnen durch eine Linienquelle ersetzt und ein Winkel α als Näherung für Dispersion und Verschwenkung eingeführt. Ferner ist aus Abbildung 8 ersichtlich, dass im Brunnennahbereich beziehungsweise vom Brunnen aus gegen die Grundwasserfließrichtung der größte Fehler durch die Annäherung des Strömungsbildes an die Parallelströmung auftritt.

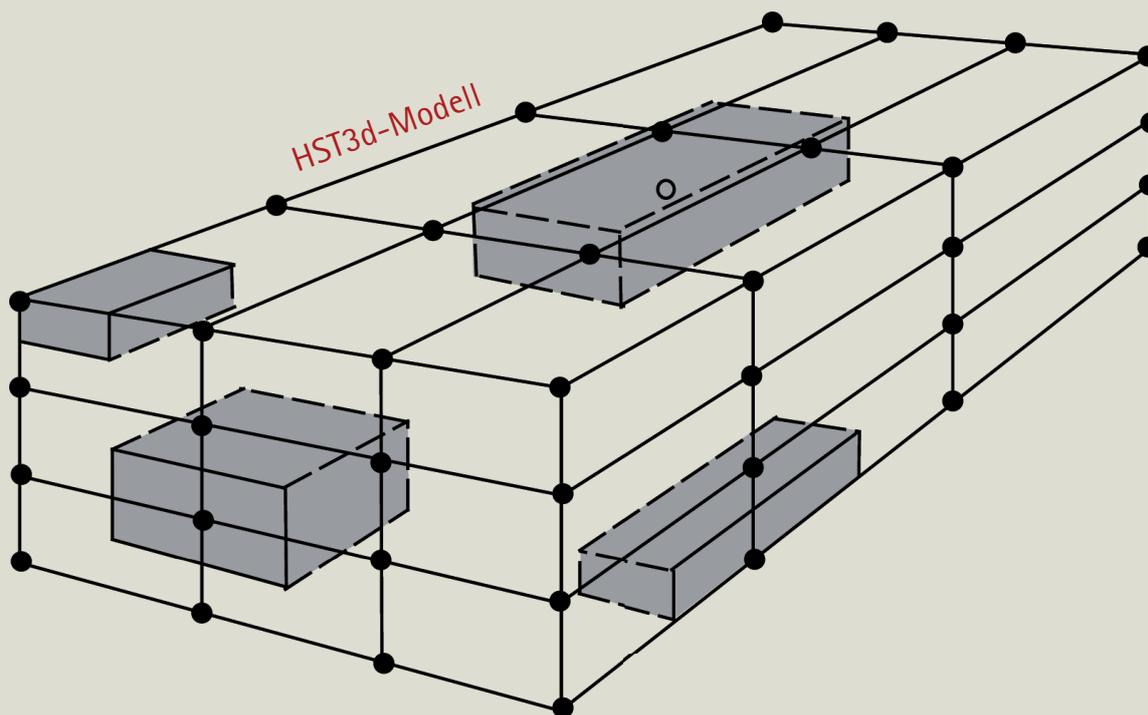
Die Berechnungsmethodik nach Ingerle geht vom Zustand des idealen vollkommenen Brunnens aus. D. h. dass der Energieeintrag über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters gleichmäßig verteilt erfolgt. Im gegenständlichen Fall wird aber durch die Versickerung ein Eintrag nur in der oberen Zone des Leiters erfolgen. Es stellt sich also die Frage nach der maßgeblichen Mächtigkeit im Sinne der Berechnung von Ingerle. Dazu können folgende Überlegungen angestellt werden:

- Filterrohrlänge (Minimalwert = 2 m)
- erforderliche Entnahmetiefe (maximaler Wert bei entsprechendem Betriebszustand, Wasserspiegelgefälle sowie horizontaler Durchlässigkeit und bei Variation des Durchlässigkeitsverhältnisses und des Horizontalabstands) addiert mit Filterrohrlänge (Maximalwert)
- Mittelwert aus erforderlicher Entnahmetiefe und Filterrohrlänge (Mittelwert)

Zur Benützung der Diagramme in der Praxis wird der Minimalwert für die Mächtigkeit (entspricht Filterrohrlänge) empfohlen. Es sei darauf aber hingewiesen, dass diese Festlegung nicht nur einen signifikanten Einfluss auf die Länge der Temperaturanomalie hat, sondern auch linear die Breite der Temperaturfahne beeinflusst.

Da der Ansatz von Ingerle keinen instationären Betrieb berücksichtigen kann, wird als Entnahme die durchschnittliche Jahreswassermenge angesetzt. Diese errechnet sich aus effektivem Förderstrom (l/s) mal Betriebsstunden (h) durch (365 Tage \cdot 24 h). Dadurch treten jedoch signifikante Ungenauigkeiten auf.

Für eine detaillierte Ermittlung der Ausbreitungen sind wegen der oben angeführten Vereinfachungen instationäre Methoden (z. B.: mit HST3d-Modell) anzuwenden.



3.1 Festlegung der Modellparameter

Für die Bestimmung der Temperaturanomalien wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Modellparameter können in konstante und fallabhängige Größen eingeteilt werden. In folgender Liste werden die konstanten Modellparameter angeführt:

- Entnahmetemperatur/Grundwasserausgangstemperatur: 10 °C
- Filterrohrlänge: 2 m
- Betriebsstunden: 2000 h (bei 8760 h/Jahr)
- Wärmekapazität – Wasser: 4182 J/kg/K (ÖWAV-RB 207 2009)
- Wärmeleitfähigkeit – Deckschicht: 0,5 W/m/K (Kapitel 2.4.3)

Für die Sensitivitätsanalyse wurden ebenso die Intervalle der fallabhängigen Parameter wie folgt festgelegt:

- Flurabstand: von 3 bis 10 m (Kapitel 2.4.3)
- Mächtigkeit: Filterrohrlänge und Vertikalabstand + 2 m und Mittelwert von Filterrohrlänge + Vertikalabstand + 2 m
- seitlicher Ausbreitungswinkel: von 5° bis 15° (ÖWAV-RB 207 2009)
- Grundwasserspiegelgefälle: von 0,25 bis 3 ‰
- Hydraulische Durchlässigkeit: von 0,05 bis 0,0005 m/s (Kapitel 2.4.2)

Für die Sensitivitätsanalyse wurden in den oben definierten Intervallen zusätzliche Stützstellen eingeführt.

Aufgrund der in Kapitel 2.3 abgeschätzten Betriebszustände, basierend auf dem Wärmebedarf von Einfamilienhäusern, wurde die Ermittlung der Temperaturanomalien für folgende Betriebszustände evaluiert:

- Betriebsstunden: 2000 h
- Entnahme und Rückgabe von 1,00 l/s – Temperaturspreize von 3 °K
- Entnahme und Rückgabe von 0,75 l/s – Temperaturspreize von 3 °K
- Entnahme und Rückgabe von 0,50 l/s – Temperaturspreize von 5 °K

Durch das Ansetzen einer mittleren Jahresmenge (Abminderung des effektiven Förderstroms um den Anteil der Jahresbetriebsstunden 2000/[365 Tage • 24 h]) ergeben sich für die obigen Spitzenwerte der drei Betriebsfälle 0,228, 0,171 und 0,114 l/s als Entnahme- bzw. Rückgabemenge.

Die Parametervariation führt schlussendlich zu insgesamt (3 Betriebszustände x 6 Durchlässigkeitsbeiwerte x 7 Grundwasserspiegelgefälle x 4 Dispersionswinkel x 3 Flurabstände x 3 Mächtigkeiten) 4536 Berechnungen.

4

Resultate

Im ersten Teil dieses Kapitels werden die Resultate der Sensitivitätsanalyse der Modellparameter des Modells nach Ingerle auf die Länge der Temperaturanomalie diskutiert. Der zweite Teil beschreibt, wie diese Resultate in Diagrammen und Tabellen strukturiert eingepflegt wurden.

4.1 Einfluss von veränderlichen Parametern auf die Temperaturanomalien

Im Folgenden wird durch statistische Auswertung aller Berechnungsfälle der Einfluss von den veränderlichen Parametern auf die Länge der Wärmefahne erhoben.

4.1.1 Einfluss der Grundwassermächtigkeit auf Temperaturanomalien

Abbildung 9 (links) zeigt die Summenverteilung gruppiert in unterschiedliche Mächtigkeitsklassen. Mit Hilfe dieses Diagramms können die Perzentilen sowie der Medianwert (50 % Perzentile) von unterschiedlichen Gruppen verglichen werden. Zum Beispiel ist der Medianwert für die Wärmefahnenlängen (Abbildung 9, links) mit einer Mittelwertbetrachtung der Mächtigkeit (Gruppe Eff.) bei 23 m. D. h. dass 50 % der Berechnungsfälle Wärmefahnen unter 23 m aufweisen.

Abbildung 9 (rechts) zeigt einen sogenannten Boxplot. Für die Erstellung dieses Diagramms werden die Berechnungsfälle mit unterschiedlichen Ansätzen für die Mächtigkeit in Gruppen eingeteilt und statistisch ausgewertet. Der rote Strich markiert den Medianwert des Vertikalabstandes. Die Box überdeckt den Bereich der 25 bis 75 % Perzentile der Wärmefahnenlänge und ist somit ein Maß für die Streuung. Die schwarzen Punkte repräsentieren Wärmefahnenlängen, die außerhalb der 25 bis 75 % Perzentile liegen.

Für die Berechnung der Länge der Wärmefahne wurden, wie oben bereits erwähnt, drei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Bei der Gruppe mit dem Ansatz Filterrohr (FR) wurde die Länge des Filterrohrs als Mächtigkeit angesetzt. Bei der Gruppe Vertikalabstand (VA) wurde der minimal erforderliche Vertikalabstand addiert mit der Filterrohrlänge als Mächtigkeit interpretiert. Bei dem Ansatz mit dem Kürzel Eff. wurde der Mittelwert aus den vorhergehenden zwei Ansätzen für die Ermittlung der Mächtigkeit gebildet. Welche Annahme besser passt, hängt von der vertikalen Durchlässigkeit und der Dispersion ab. Bei niedriger Durchlässigkeit und Dispersion kann sich die Temperaturanomalie nicht über die gesamte Grundwassermächtigkeit ausbreiten. In diesem Fall kann die Filterrohrlänge angesetzt werden. Kann sich durch Vertikalströme die Temperaturanomalie über die gesamte Grundwassermächtigkeit ausbreiten, ist der Ansatz mit dem erforderlichen Vertikalabstand maßgebend. Für die Anwendung der Ergebnisse in der Praxis wird der Ansatz mit der Filterrohrlänge empfohlen.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Ansätze sind erheblich. Bei der Gruppe Filterrohr (FR) ist sogar im Mittel mit der mehr als doppelten Länge zu rechnen. Für den Mittelwertansatz ergeben sich die geringsten Wärmefahnenlängen.

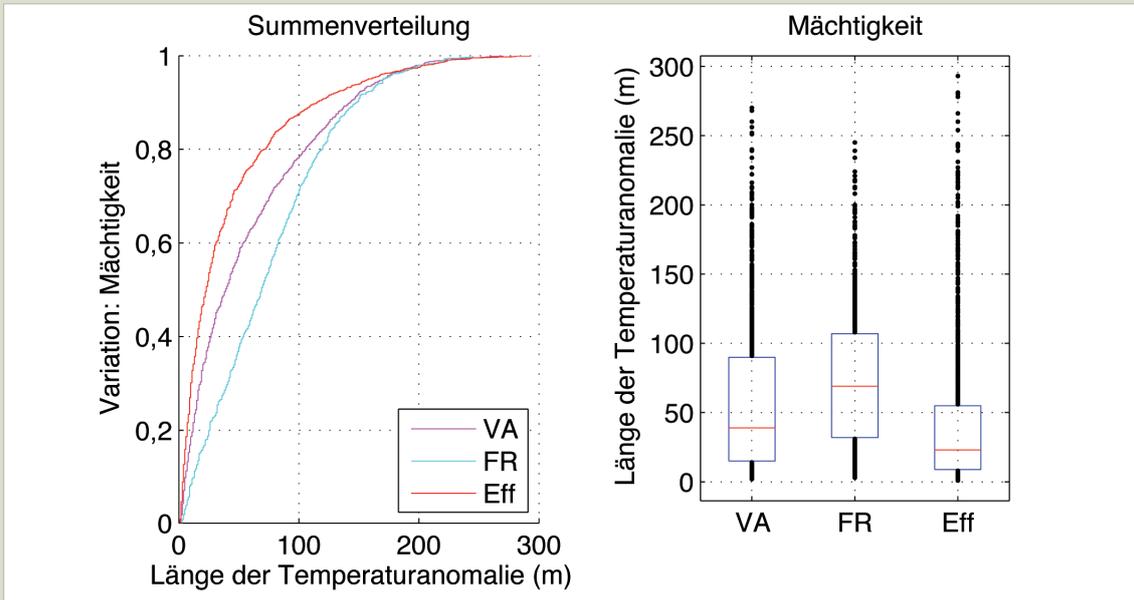


Abb. 9: Einfluss der Grundwassermächtigkeit auf Temperaturanomalien

4.1.2 Einfluss der Durchlässigkeit auf Temperaturanomalien

Abbildung 10 zeigt den Einfluss der Durchlässigkeit auf die Temperaturanomalie. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass bei hoher Durchlässigkeit mit kleinen Wärmefahnenlängen zu rechnen ist. Die Medianwerte sinken von ca. 92 m auf 5 m.

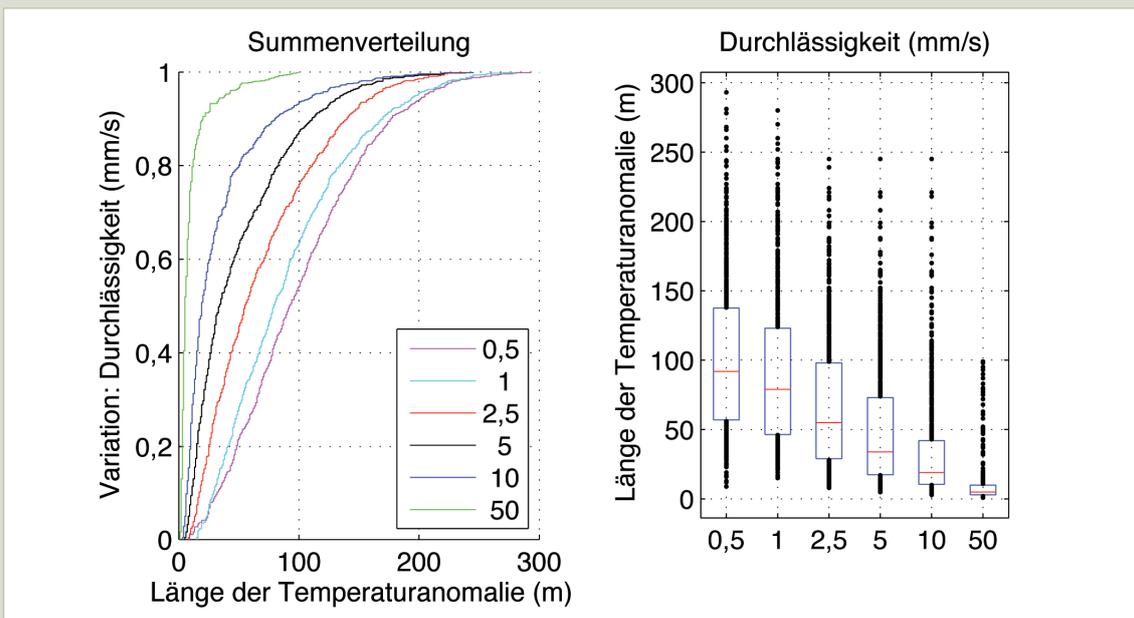


Abb. 10: Einfluss der Durchlässigkeit auf Temperaturanomalien

4.1.3 Einfluss des Wasserspiegelgefälles auf Temperaturanomalien

In Abbildung 11 wurden die Längen der Temperaturanomalien in Gruppen entsprechend dem Wasserspiegelgefälle eingeteilt. Daraus ist ersichtlich, dass bei Zunahme des Gefälles mit einer Abnahme der Temperaturanomalie zu rechnen ist.

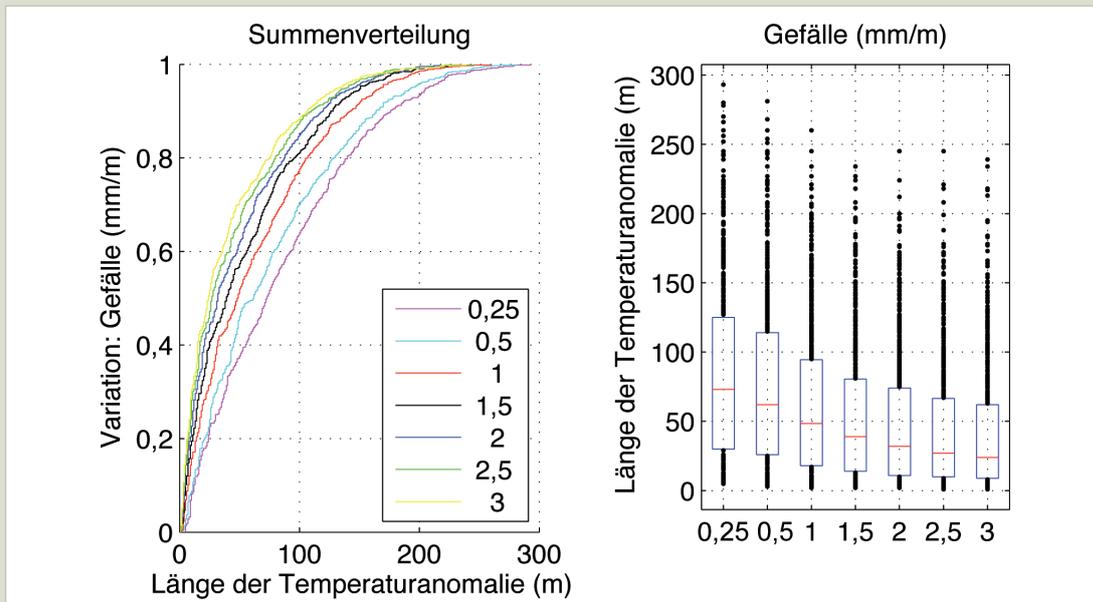


Abb. 11: Einfluss des Wasserspiegelgefälles auf Temperaturanomalien

4.1.4 Einfluss des Dispersionswinkels auf Temperaturanomalien

Der Dispersionswinkel liegt laut ÖWAV-RB 207 2009 zwischen 5 und 15°. Für die Anwendung der Ergebnisse in der Praxis wird ein Ausbreitungswinkel von 6° empfohlen. Durch Erhöhung des Dispersionswinkels können sich, wie in Abbildung 12 gezeigt, die Wärmefahnenlängen mehr als halbieren.

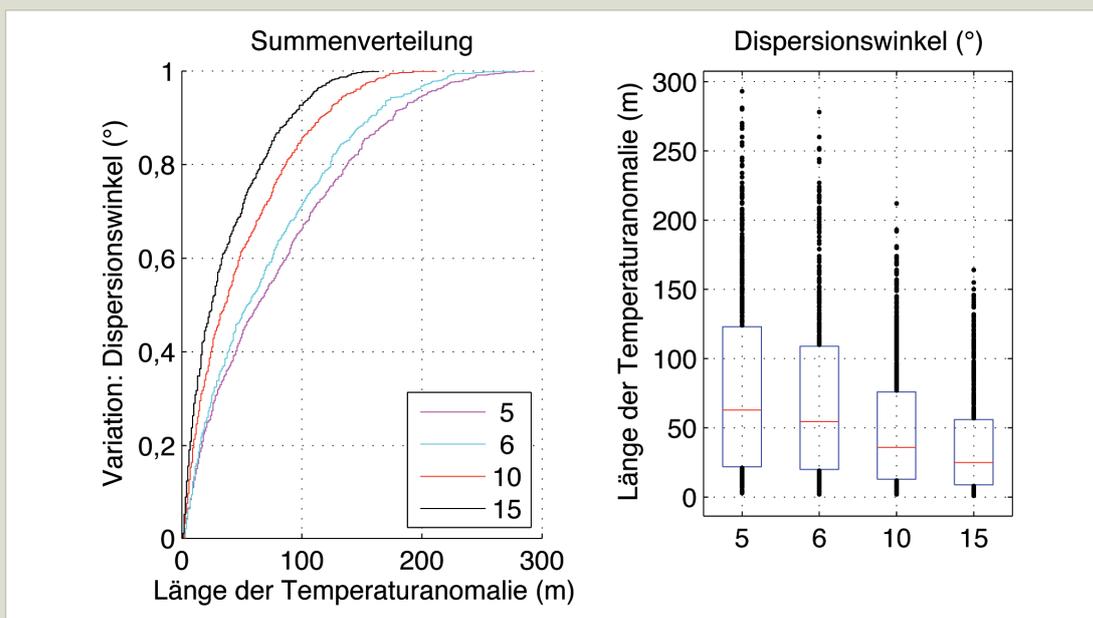


Abb. 12: Einfluss des Dispersionswinkels auf Temperaturanomalien

4.1.5 Einfluss des Flurabstandes auf Temperaturanomalien

Relativ wenig Einfluss auf die Länge der Temperaturanomalie hat der Flurabstand. Wie aus Abbildung 13 ersichtlich, vergrößert sich mit zunehmendem Flurabstand nur die Streuung, der Medianwert steigt geringfügig.

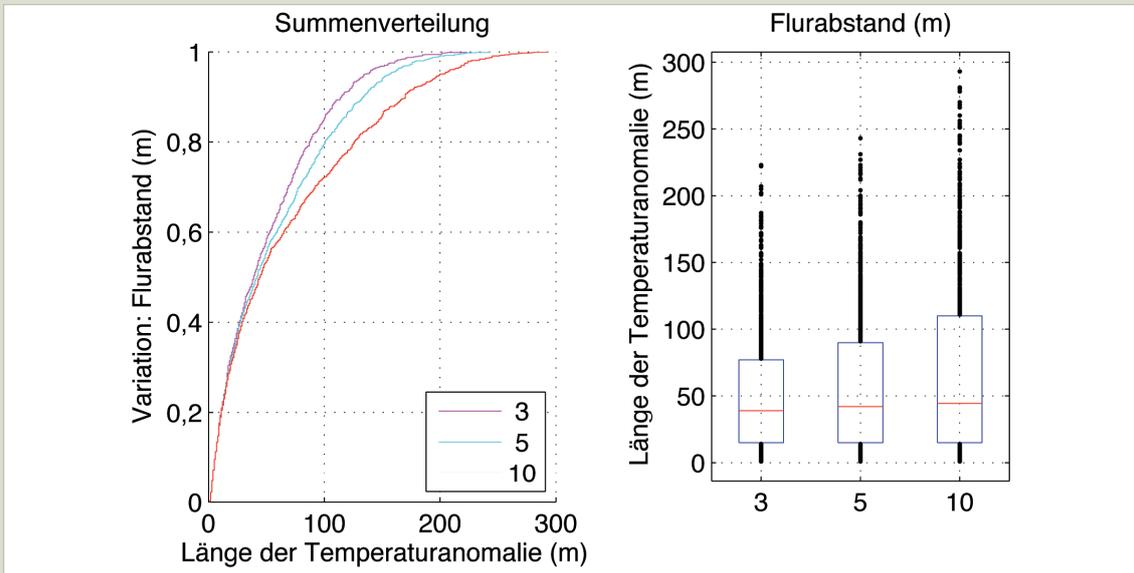


Abb. 13: Einfluss des Flurabstandes auf Temperaturanomalien

4.1.6 Zusammenfassung

In Tabelle 1 werden die Erkenntnisse der statistischen Auswertung der Länge von Temperaturanomalien in Abhängigkeit von den veränderlichen Parametern zusammengefasst. Bei zunehmender Durchlässigkeit, bei höherem Gefälle und bei starker Dispersion verkürzen sich statistisch gesehen die Wärmefahnenlängen. Setzt man für die Mächtigkeit die Länge des Filterrohrs im Gegensatz zum erforderlichen Vertikalabstand ein, erhöhen sich die Wärmefahnenlängen. Die niedrigsten Wärmefahnenlängen ergeben sich beim Mittelwertansatz.

Erhöhung	Vertikalabstand
Ansatz für Mächtigkeit	Mittelwertansatz (Eff.) < Vertikalabstand (VA) < Filterrohrlänge (FR)
Durchlässigkeit	Verkürzung (Auswirkungen variabler Mächtigkeit)
Gefälle	Verkürzung
Dispersionswinkel	Verkürzung
Flurabstand	tendenzielle Verlängerung, jedoch Auswirkungen gering

Tabelle 1: Zusammenfassung – Einfluss der veränderlichen Parameter auf die Temperaturanomalie

4.2 Abschätzung der Länge von Temperaturanomalien mittels Diagrammen und Tabellen

Für die Abschätzung der Länge der Temperaturanomalien wurden insgesamt 28 Abbildungen gezeichnet. Für die Interpretation der Diagramme ist es nötig, die Begriffe Temperaturanomalie und Wärmefahnenlänge genau zu definieren. Die Temperaturanomalie ist der gesamte Bereich, bei dem die nicht anthropogen beeinflusste Temperatur um über 1 °K gestört ist. Die Länge der Wärmefahne (hervorgehoben durch Heiz- oder Kühlbetrieb) ist der maximale Abstand, der vom Rückgabebrennenmittelpunkt bis zum Rand der Temperaturanomalie gezeichnet werden kann. Dieser Abstand liegt normalerweise in Fließrichtung.

In Abbildung 14 ist nun ein Diagramm für die Abschätzung der Wärmefahnenlänge abgebildet. Auf der X-Achse ist das Wasserspiegelgefälle aufgetragen, auf der Y-Achse kann die Wärmefahnenlänge abgelesen werden. Für jede Durchlässigkeit wurde im Diagramm ein Graph eingetragen. Will man die Wärmefahnenlänge für ein Gefälle von 0,002 m/m und einen k_{fh} -Wert von 0,0025 m/s ermitteln, kann aus dem Diagramm ein Wert von ca. 115 m abgelesen werden. Dies gilt für (siehe Diagrammtitel):

- Entnahmemenge: 0,75 l/s
- Temperaturspreize: 3 °K
- Flurabstand: 5 m
- Dispersionswinkel: 6°
- Ansatz für Mächtigkeit: Filterrohransatz (FR)

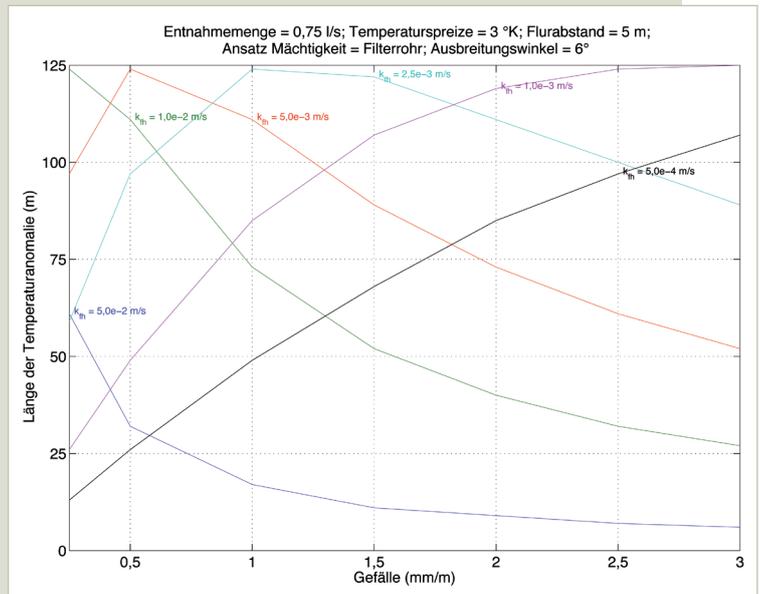


Abb. 14: Diagramm zur Abschätzung der Wärmefahnenlänge

Die 28 Diagramme unterscheiden sich eben von diesen in oben stehender Liste angeführten Parametern und sind im Anhang mitgeliefert. Für die Benützung der Diagramme in der Praxis wird der Ansatz mit der Filterrohrlänge für die Abschätzung der maßgebenden Mächtigkeit empfohlen. Ebenso soll ein Dispersionswinkel von 6° verwendet werden. Als Betriebszustand soll normalerweise von einer maximalen Rückgabemenge (nicht Jahresmittelwert) von 0,75 l/s ausgegangen werden. Ein Flurabstand von 5 m liegt im Mittel. In begründeten Ausnahmefällen kann von den Empfehlungen jedoch abgesehen werden.

Aus allen Berechnungsfällen wurden auch vier Tabellen gebildet. Die Struktur dieser Tabellen wird in Tabelle 4 dargestellt. Der Unterschied zwischen den vier Tabellen liegt im Ansatz für die Mächtigkeit. Für alle drei Ansätze (Filterrohrlänge, erforderlicher Vertikalabstand, Mittelwertansatz) wurde ein Schema zur Archivierung der Daten wie in Tabelle 2 ausgewählt.

Länge der Temperaturanomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,5 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	longitudinale Dispersion (m)				longitudinale Dispersion (m)				longitudinale Dispersion (m)			
m/m	m/s	5°	6°	10°	15°	5°	6°	10°	15°	5°	6°	10°	15°

Tabelle 2: Tabelle für Temperaturanomalie bei unterschiedlichen Mächtigkeiten

Tabelle 3 zeigt die Struktur der Tabelle, die auf Empfehlungen beruht.

Länge der Temperaturanomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,5 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Bmin	Bmax	H	L	Bmin	Bmax	H	L	Bmin	Bmax	H	L
m/m	m/s	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m

Tabelle 3: Bemessungstabelle für Temperaturanomalie

5

Zusammenfassung

Diese vorliegende Studie dient der Abschätzung der Temperaturanomalien von geothermischen Grundwassernutzungen nach ÖWAV-RB 207 (2009). Die im Rahmen der Studie entwickelten Bemessungsdiagramme eignen sich zur Abschätzung der vom Rückgabebrunnen induzierten Wärmefahnenlängen. Dadurch können auf Basis der Ergebnisse Rückschlüsse auf die wechselseitige Beeinflussung geothermischer Grundwassernutzungen gezogen werden.

Für die Entwicklung der Abschätzung von Wärmefahnenlängen wurden ca. 4500 Szenarienrechnungen mit Hilfe des Ansatzes von Ingerle durchgeführt. Die Szenarien unterscheiden sich in den Parametern „Ansatz der Ermittlung der Mächtigkeit“, „hydraulische Durchlässigkeit“, „Grundwasserspiegelgefälle“, „Dispersionswinkel“ und „Flurabstand“. Die Entnahmemächtigkeit wurde mit maximal 20 m begrenzt. Als Grundlage für die Entwicklung von Diagrammen wurden diese Parameter variiert. Diese Diagramme erlauben eine Abschätzung der Länge der Temperaturanomalie.

Mit dem vorgestellten Behelfen ist es nun möglich, Temperaturanomalien einfach abzuschätzen.

6

Literaturverzeichnis

- Bollrich, G. und Preißler, G. (1985): Technische Hydromechanik. 2. Auflage. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Ingerle, K. (1988): Beitrag zur Berechnung der Abkühlung des Grundwasserkörpers durch Wärmepumpen. Österreichische Wasserwirtschaft, 40(11/12), 280-284.
- Mehlhorn, H. (1982): Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitung. Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 50.
- ÖWAV-RB 207 (2009): Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen. Österreichischer Wasser- und Abwasserverband, Wien.
- Sitzenfrey, R. (2007): Vereinfachtes numerisches Modell zur Beschreibung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser. Arbeitsbereich Umwelttechnik, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- Walton, W. C. (1987): Groundwater Pumping Tests: Design and Analysis. 5. Ed., Lewis Publishers. Chelsea, Michigan.

7

Anhang

Anhang 1

7.1 Bemessungsdiagramme

Beschreibung

Bei der thermischen Nutzung des Grundwassers wird im Abstrom der Versickerung die Temperatur verändert. Damit sind Auswirkungen auf den Betrieb von Trinkwasserbrunnen und andere thermische Grundwassernutzungen möglich. Die Abschätzung der Ausbreitung des thermisch veränderten Grundwasserbereichs ist damit eine wesentliche Grundlage für die Anlagenplanung. Für die Bewertung nach dem vom Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband herausgegebenen Regelblatt 207 wird das Verfahren nach Ingerle empfohlen. Die Festsetzung der Parameter der Formel erfordert – speziell beim Parameter „maßgebliche Grundwassermächtigkeit“ – gehobene Fachkenntnisse.

Eine einfache Anwendung des Verfahrens nach Ingerle ermöglichen die hier beschriebenen Bemessungsdiagramme.

Anwendung

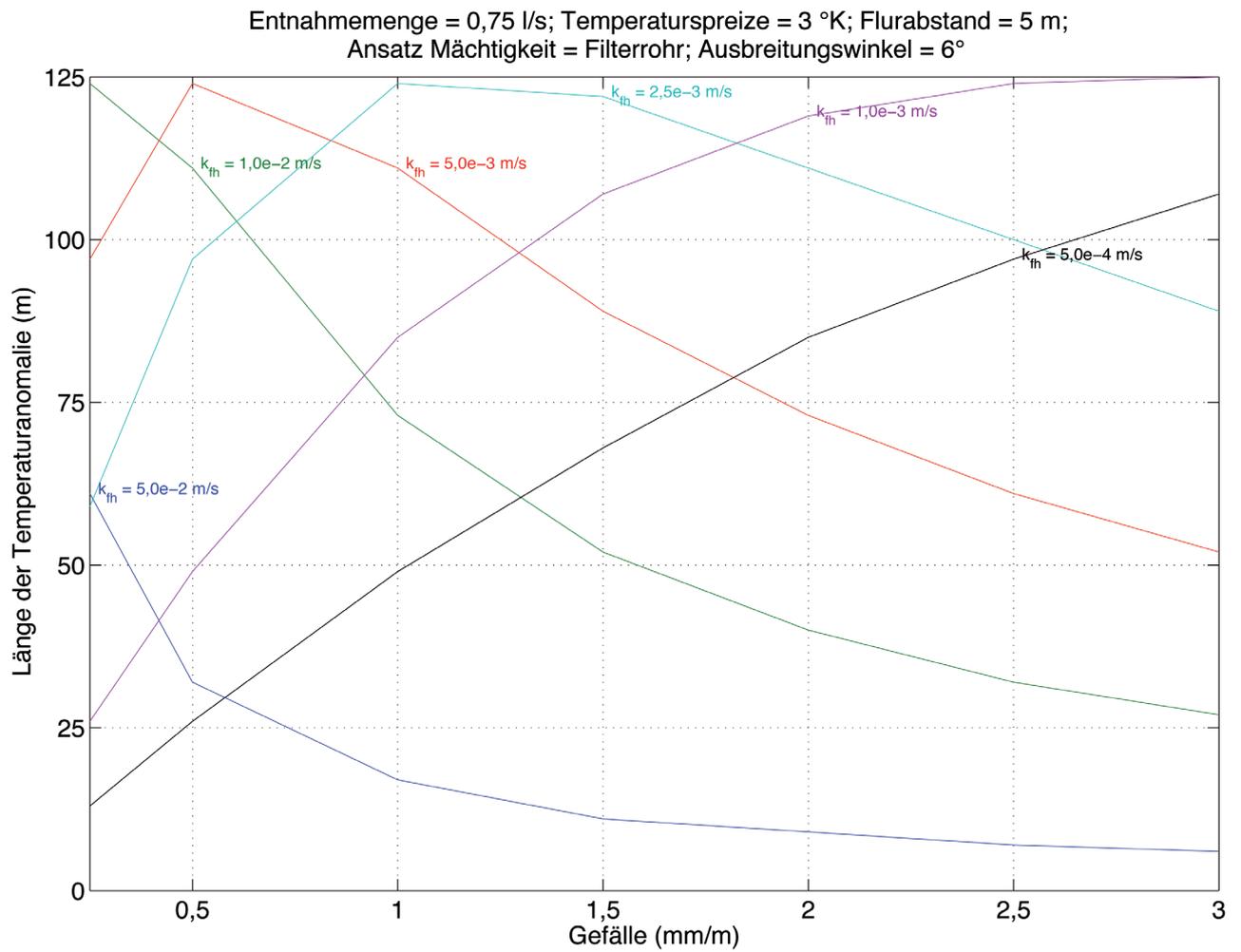
Auf der X-Achse ist das Wasserspiegelgefälle aufgetragen, auf der Y-Achse kann die Länge der Temperaturanomalie abgelesen werden. Für jede Durchlässigkeit wurde im Diagramm ein Graph eingetragen. Für die Mächtigkeit eines unvollkommenen Brunnens kann aus drei verschiedenen Ansätzen gewählt werden. Diese sind der Vertikalabstand-, der Filterrohr- und der Mittelwert-Ansatz (effektive Mächtigkeit). Will man die Länge der Temperaturanomalie für ein Gefälle von 2 mm/m und einem k_{fn} -Wert von $2,5e-3$ m/s ermitteln, erhält man für die folgenden Parameter

- Entnahmemenge: 0,75 l/s
- Temperaturspreize: 3 °K
- Flurabstand: 5 m
- Dispersionswinkel: 6°
- Ansatz für Mächtigkeit: Filterrohransatz (FR)

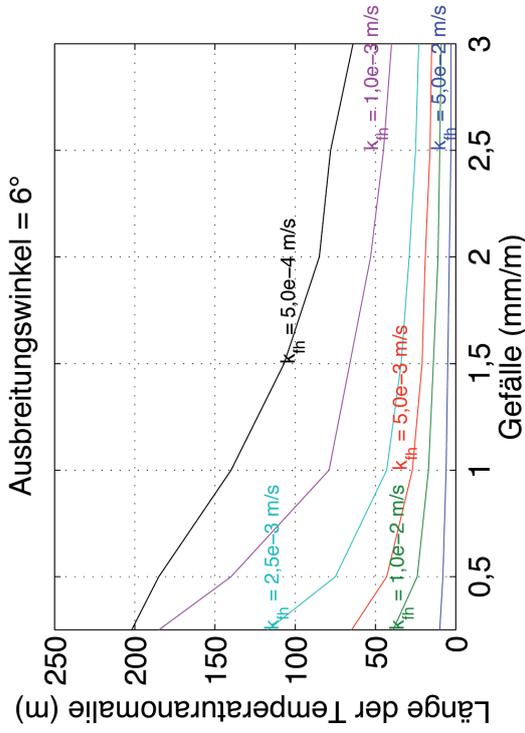
einen Wert von ca. 111 m (siehe Diagramm 1 und Diagramm 15).

Die Diagramme unterscheiden sich eben von diesen in oben stehender Liste angeführten Parametern. Für die Benützung der Diagramme in der Praxis wird der Ansatz mit der Filterrohrlänge für die Abschätzung der maßgebenden Mächtigkeit empfohlen. Ebenso soll ein Dispersionswinkel von 6° verwendet werden. Als Betriebszustand soll normalerweise von einer maximalen Entnahme bzw. Rückgabemenge (nicht Jahresmittelwert) von 0,75 l/s ausgegangen werden. Ein Flurabstand von 5 m liegt im Mittel. In begründeten Ausnahmefällen kann von den Empfehlungen jedoch abgesehen werden.

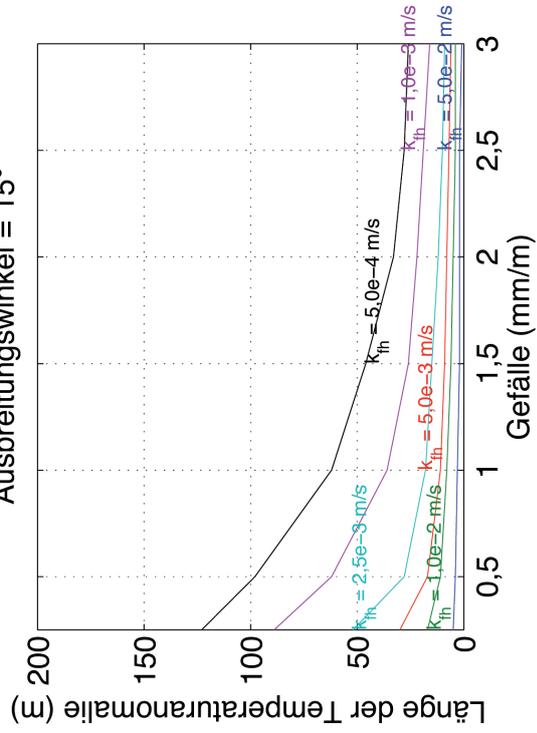
Diagramm	Entnahmemenge (l/s)	Temperaturspreize (°K)	Ausbreitungswinkel (°)	Flurabstand (m)	Ansatz Mächtigkeit (keine Einheit)
1	0,75	3	6	5	Filterrohr
2	1	3	5, 6, 10, 15	3	Vertikalabstand
3	1	3	5, 6, 10, 15	5	Vertikalabstand
4	1	3	5, 6, 10, 15	10	Vertikalabstand
5	1	3	5, 6, 10, 15	3	Filterrohr
6	1	3	5, 6, 10, 15	5	Filterrohr
7	1	3	5, 6, 10, 15	10	Filterrohr
8	1	3	5, 6, 10, 15	3	effektive Mächtigkeit
9	1	3	5, 6, 10, 15	5	effektive Mächtigkeit
10	1	3	5, 6, 10, 15	10	effektive Mächtigkeit
11	0,75	3	5, 6, 10, 15	3	Vertikalabstand
12	0,75	3	5, 6, 10, 15	5	Vertikalabstand
13	0,75	3	5, 6, 10, 15	10	Vertikalabstand
14	0,75	3	5, 6, 10, 15	3	Filterrohr
15	0,75	3	5, 6, 10, 15	5	Filterrohr
16	0,75	3	5, 6, 10, 15	10	Filterrohr
17	0,75	3	5, 6, 10, 15	3	effektive Mächtigkeit
18	0,75	3	5, 6, 10, 15	5	effektive Mächtigkeit
19	0,75	3	5, 6, 10, 15	10	effektive Mächtigkeit
20	0,5	5	5, 6, 10, 15	3	Vertikalabstand
21	0,5	5	5, 6, 10, 15	5	Vertikalabstand
22	0,5	5	5, 6, 10, 15	10	Vertikalabstand
23	0,5	5	5, 6, 10, 15	3	Filterrohr
24	0,5	5	5, 6, 10, 15	5	Filterrohr
25	0,5	5	5, 6, 10, 15	10	Filterrohr
26	0,5	5	5, 6, 10, 15	3	effektive Mächtigkeit
27	0,5	5	5, 6, 10, 15	5	effektive Mächtigkeit
28	0,5	5	5, 6, 10, 15	10	effektive Mächtigkeit



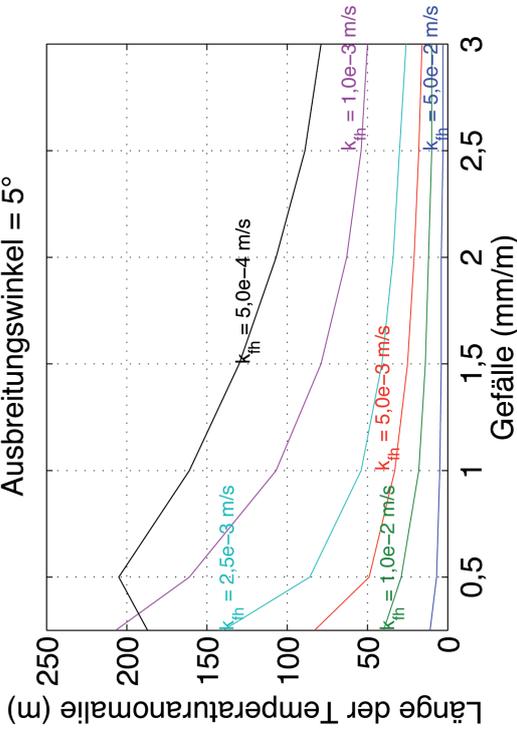
Entnahmemenge = 1 l/s; Temperaturspreize = 3 °K; Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = Vertikalabstand
Ausbreitungswinkel = 6°



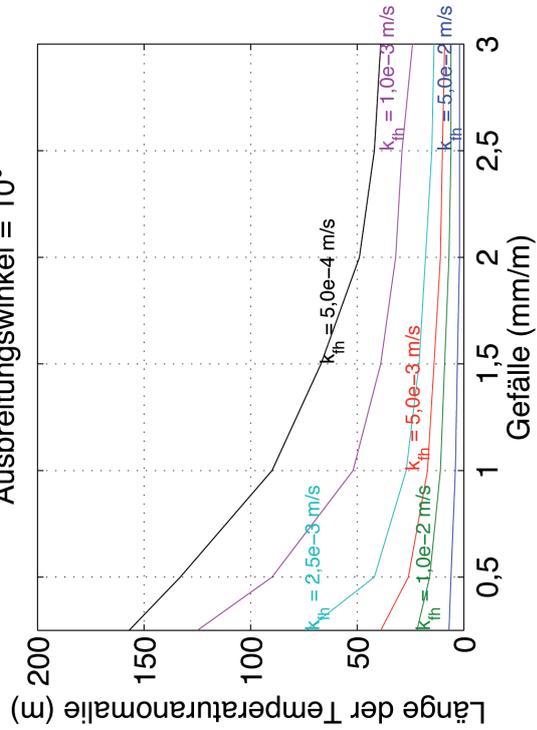
Ausbreitungswinkel = 15°

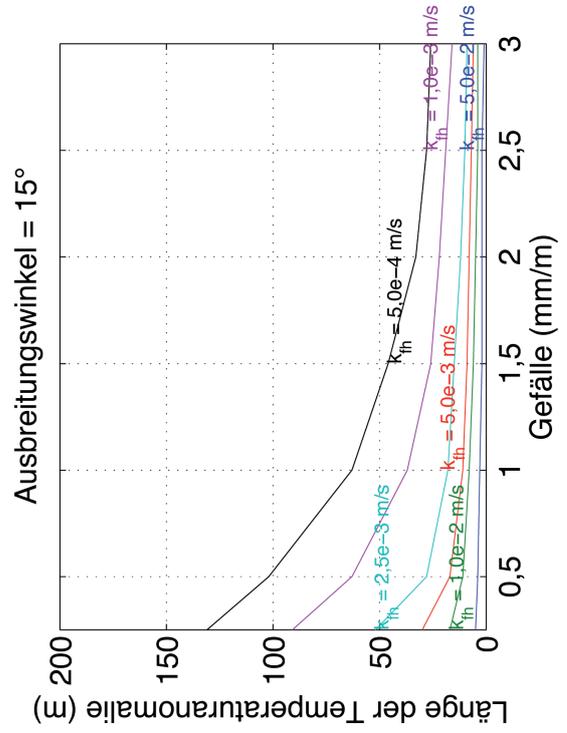
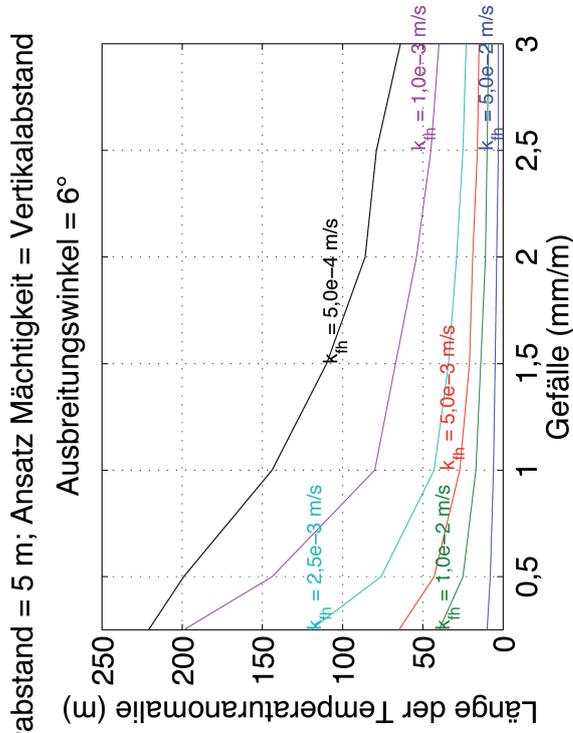
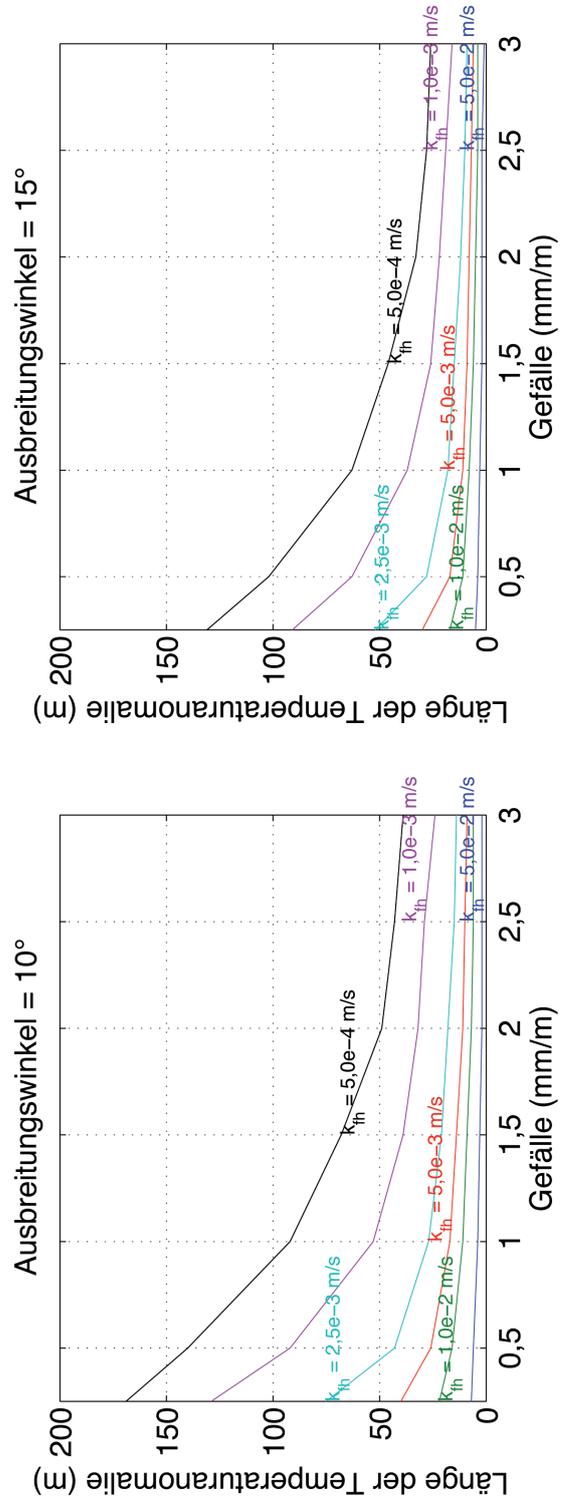
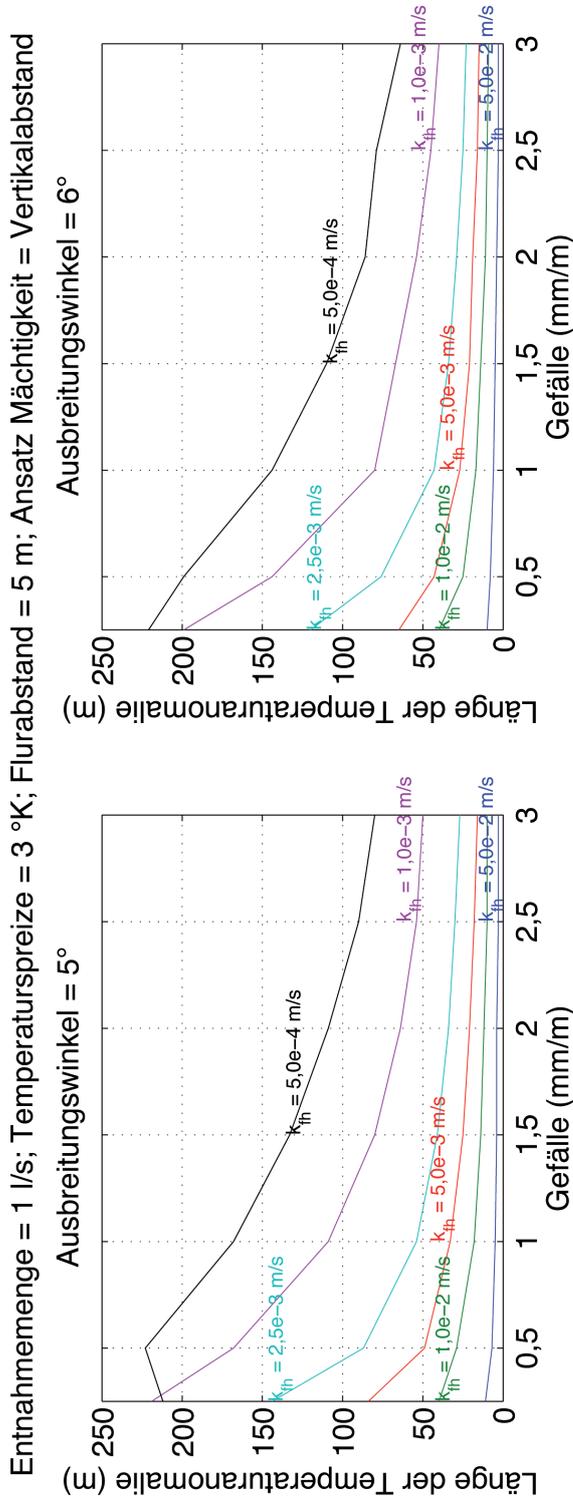


Ausbreitungswinkel = 5°

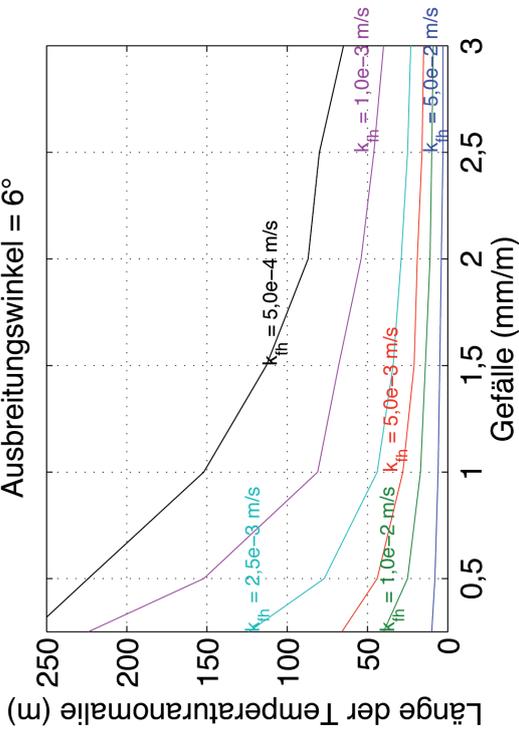
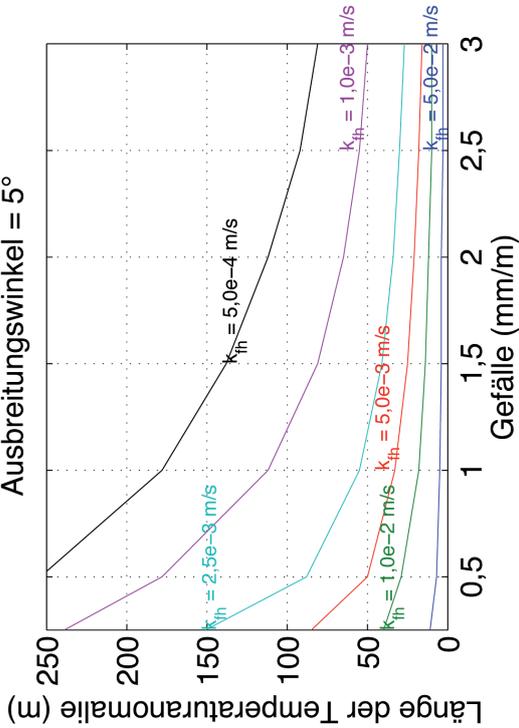


Ausbreitungswinkel = 10°

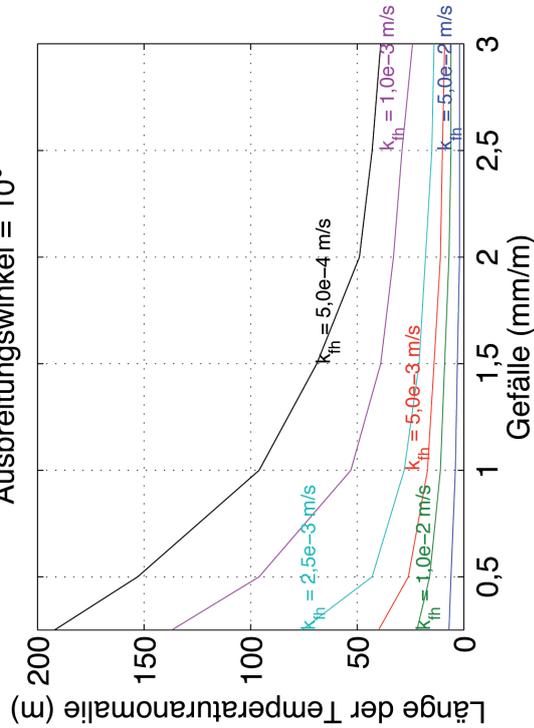




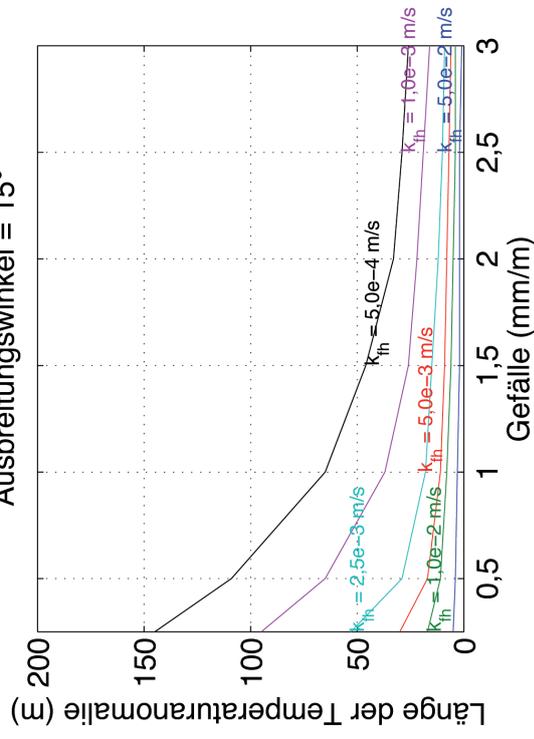
Entnahmemenge = 1 l/s; Temperaturspreiz = 3 °K; Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = Vertikalabstand
Ausbreitungswinkel = 5°

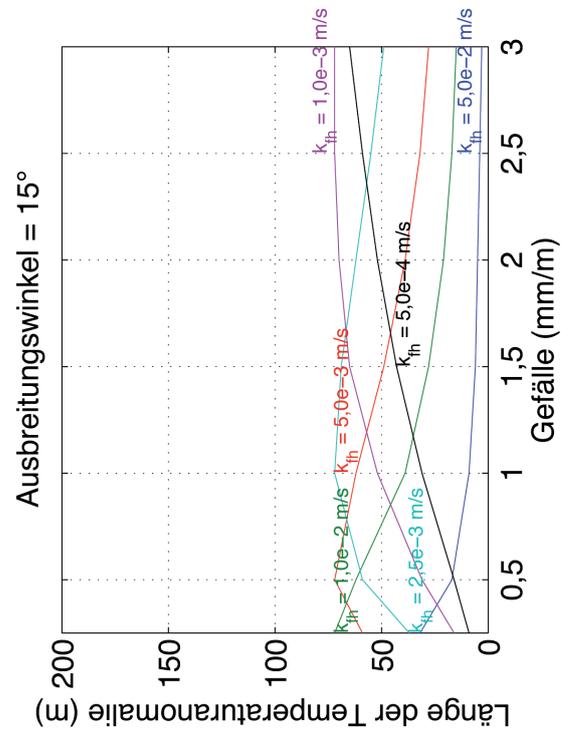
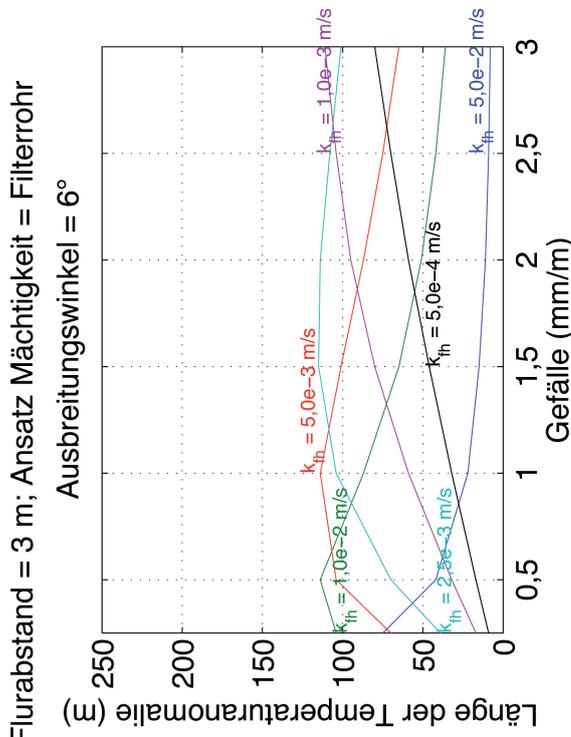
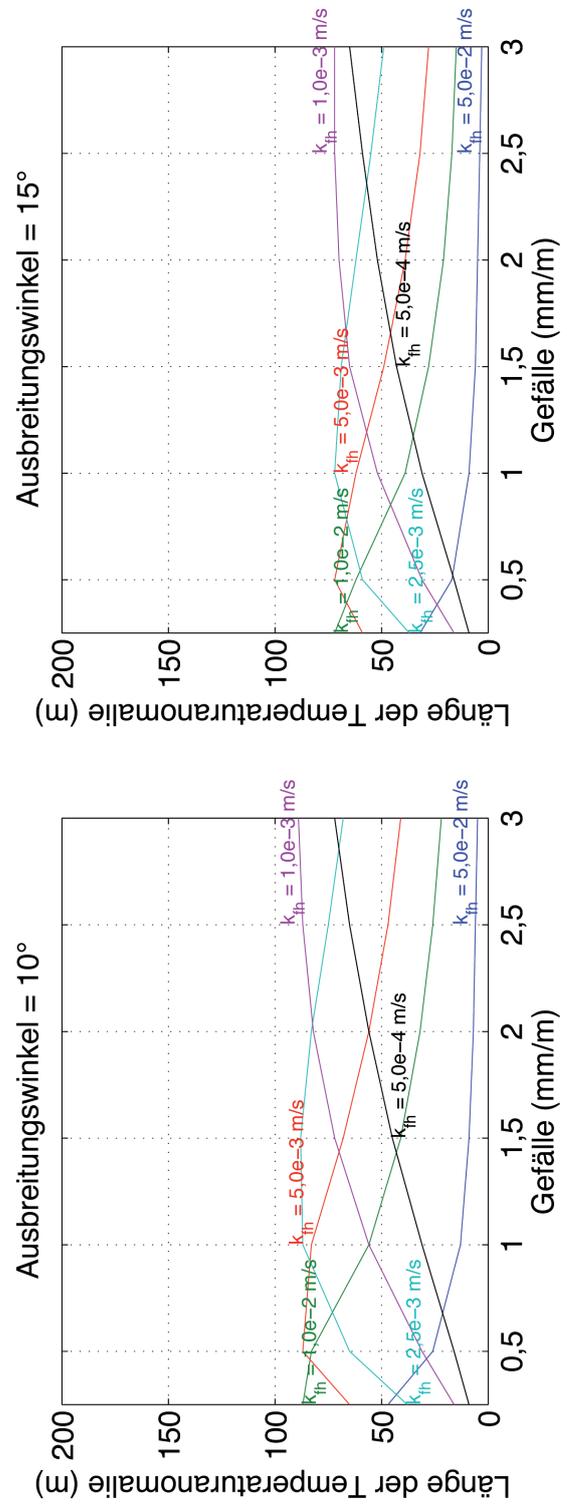
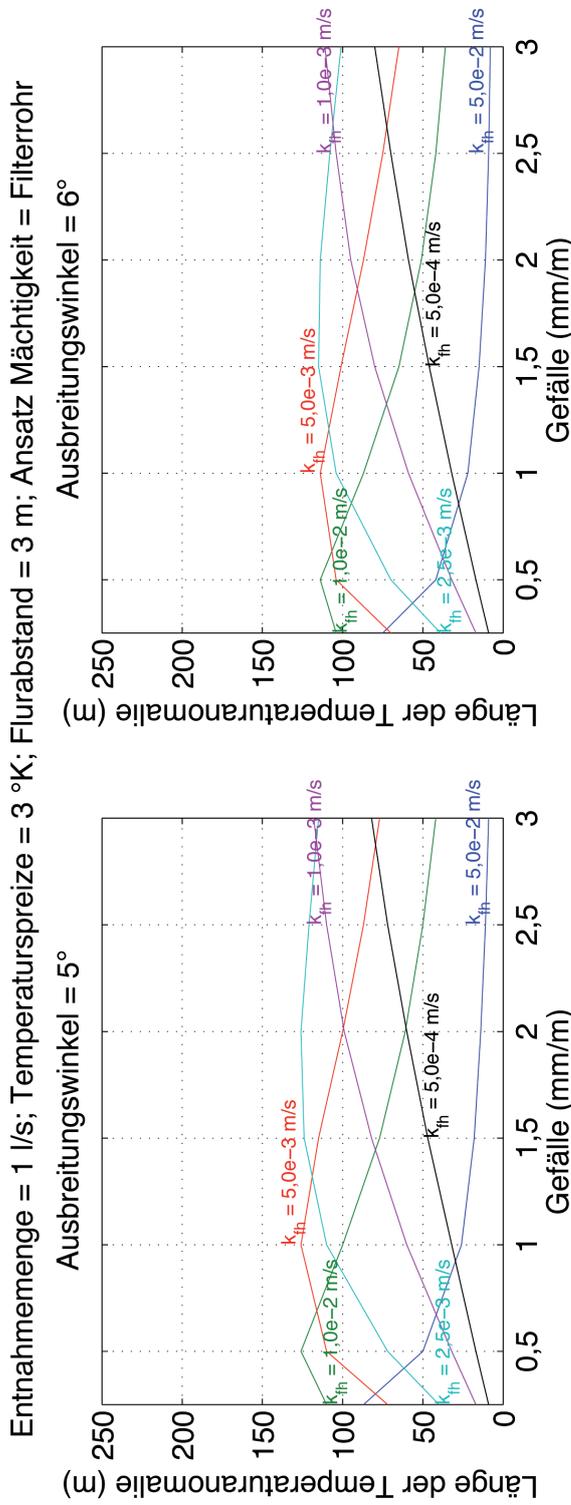


Ausbreitungswinkel = 10°

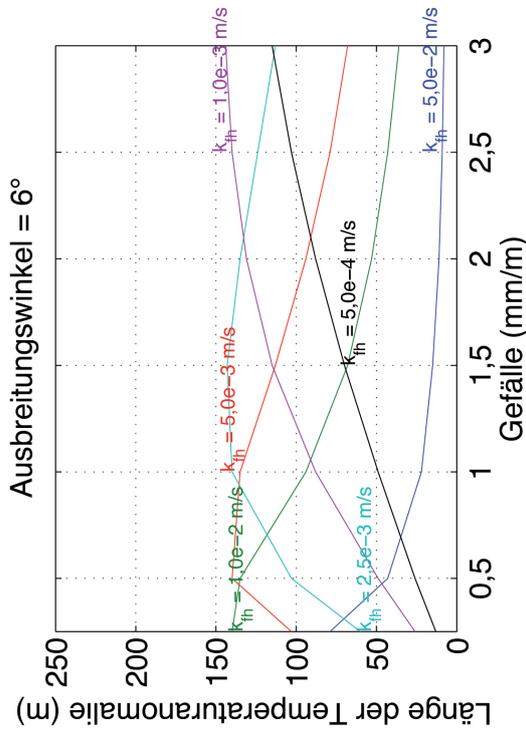
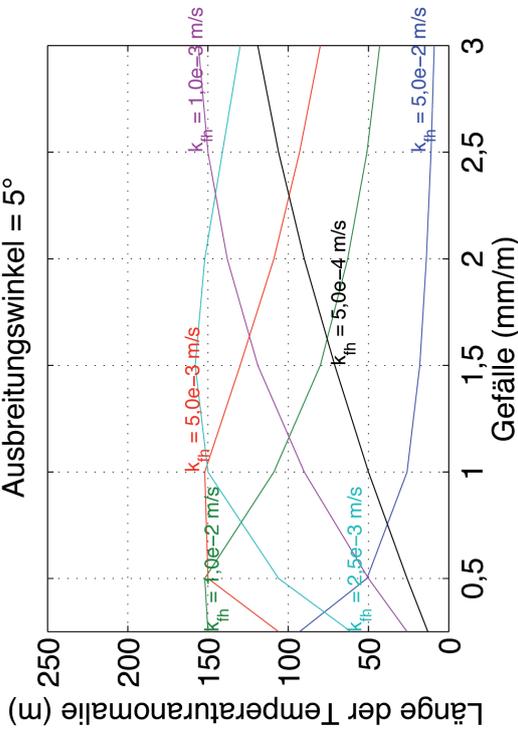


Ausbreitungswinkel = 15°

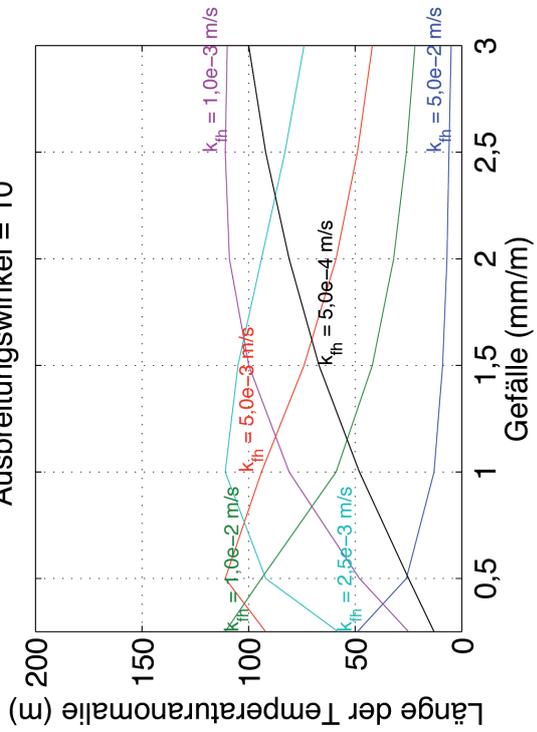




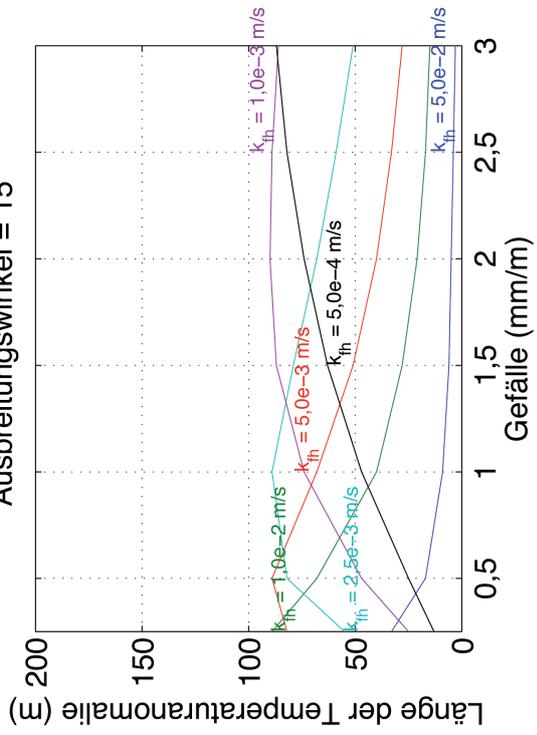
Entnahmemenge = 1 l/s; Temperaturspreize = 3 °K; Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr
Ausbreitungswinkel = 5°

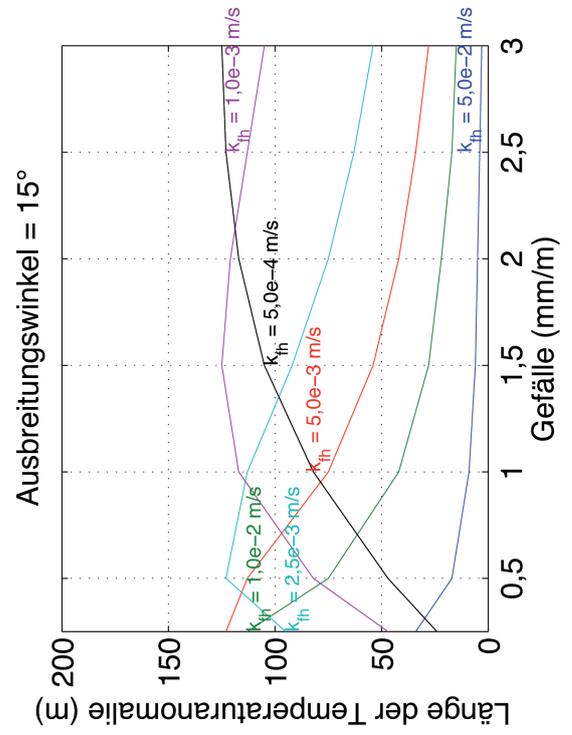
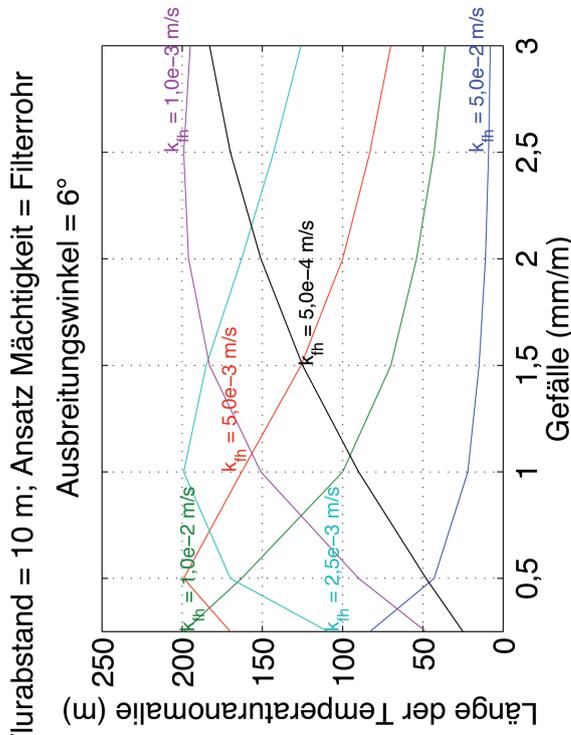
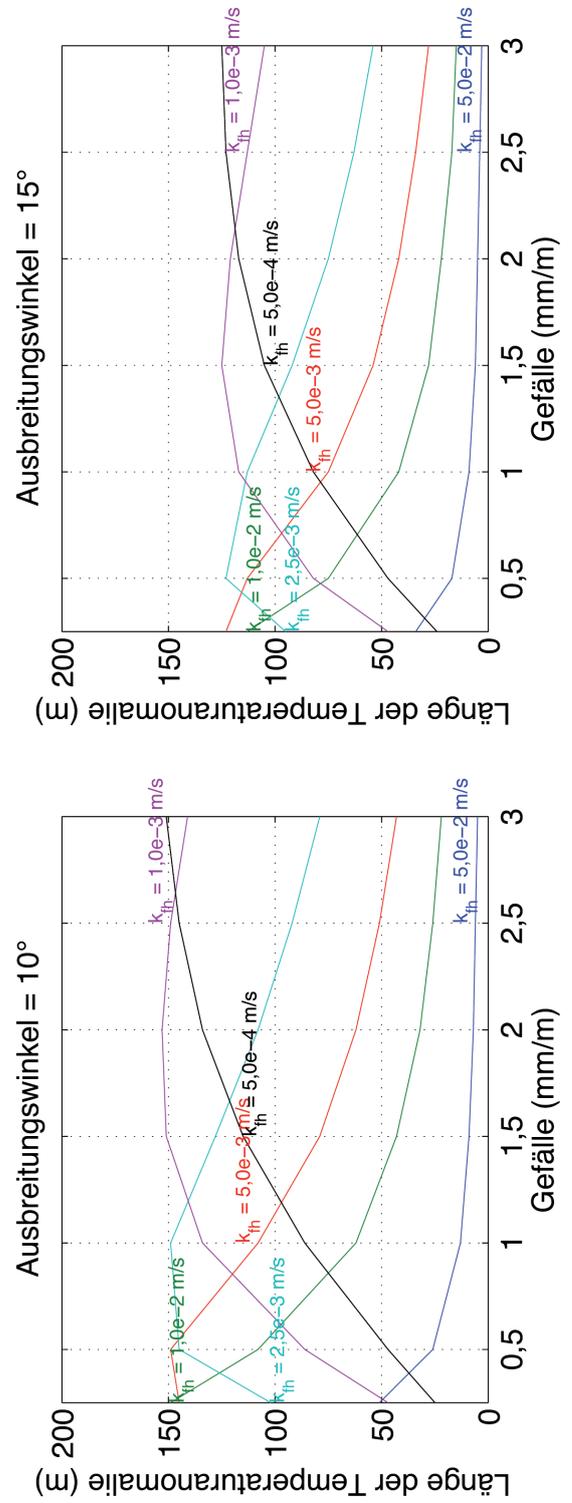
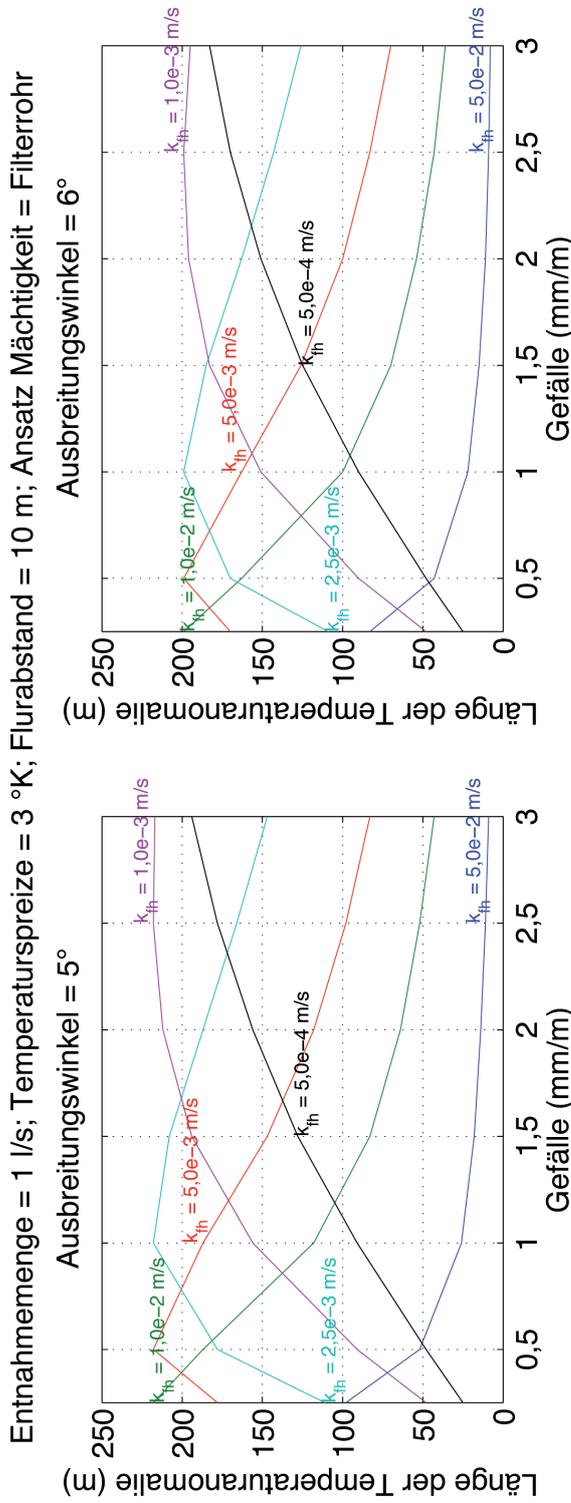


Ausbreitungswinkel = 10°



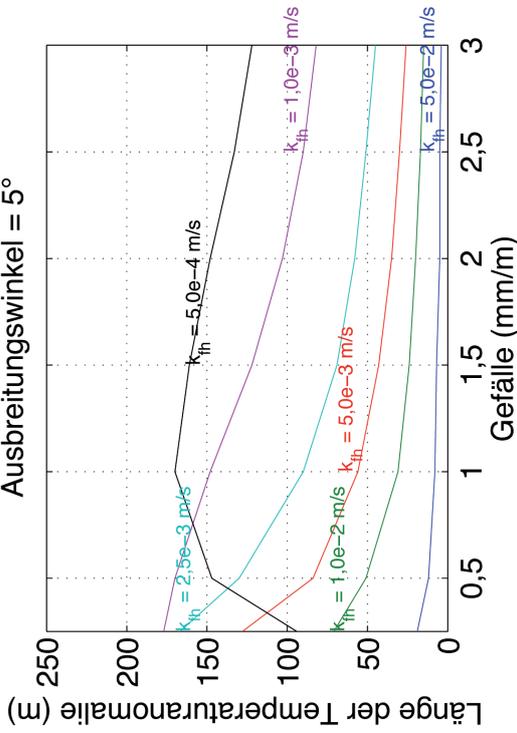
Ausbreitungswinkel = 15°



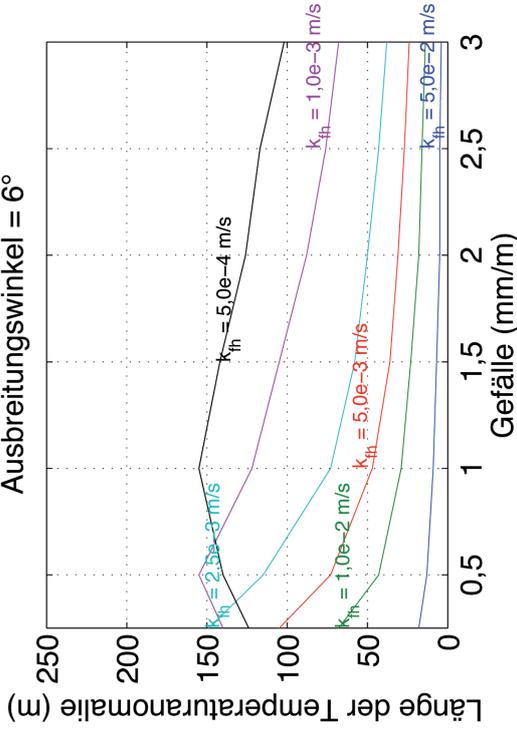


Entnahmemenge = 1 l/s; Temperaturspreize = 3 °K; Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit

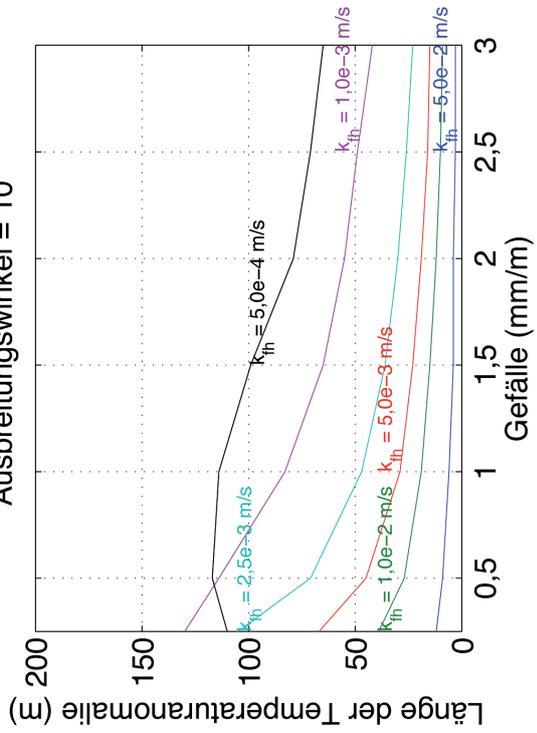
Ausbreitungswinkel = 5°



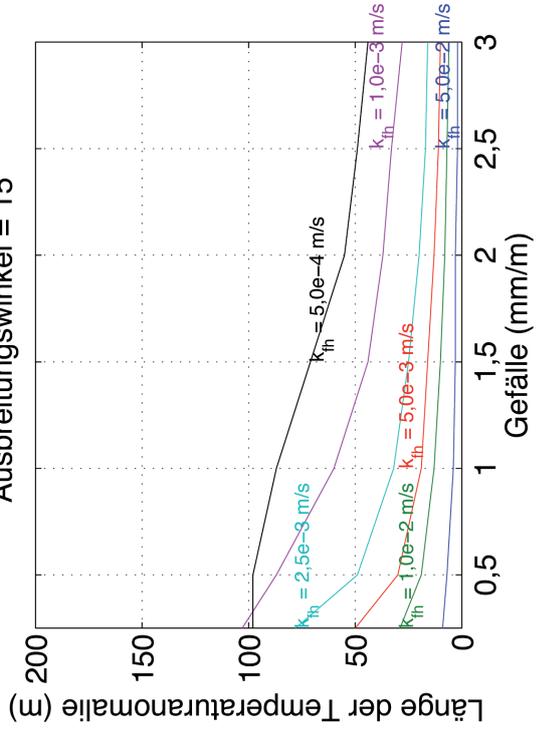
Ausbreitungswinkel = 6°



Ausbreitungswinkel = 10°

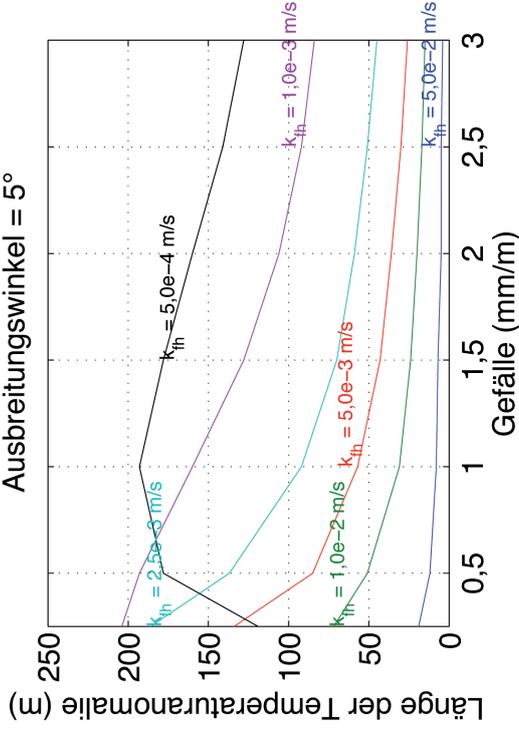


Ausbreitungswinkel = 15°

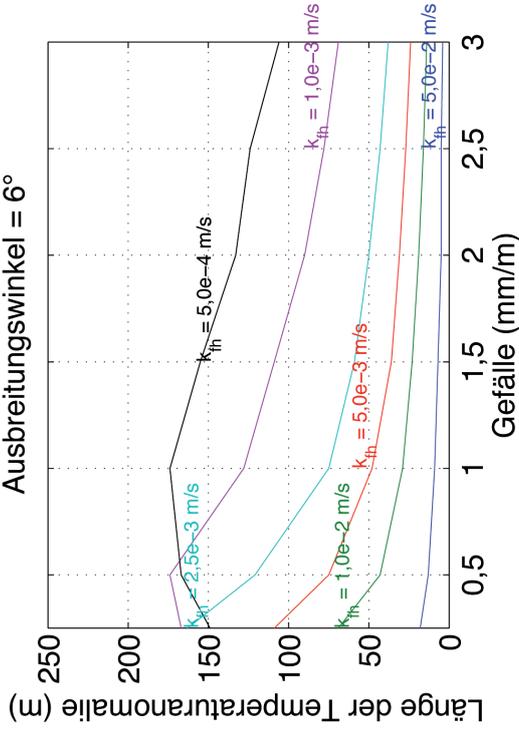


Entnahmemenge = 1 l/s; Temperaturspreize = 3 °K; Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit

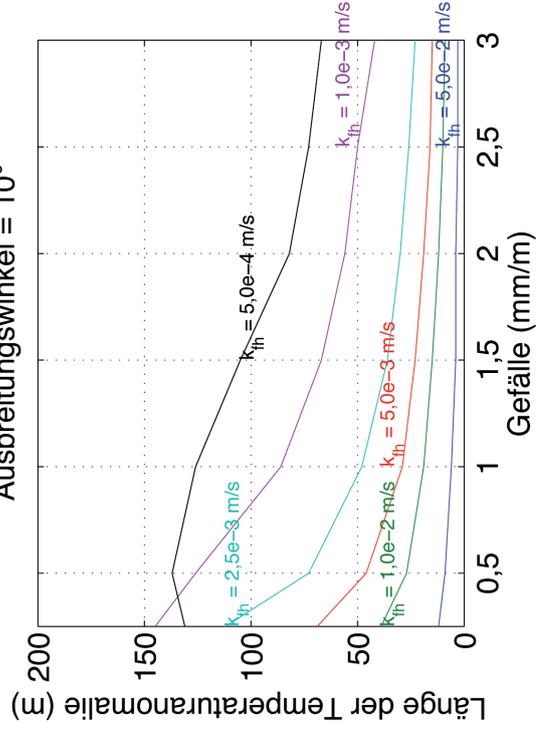
Ausbreitungswinkel = 5°



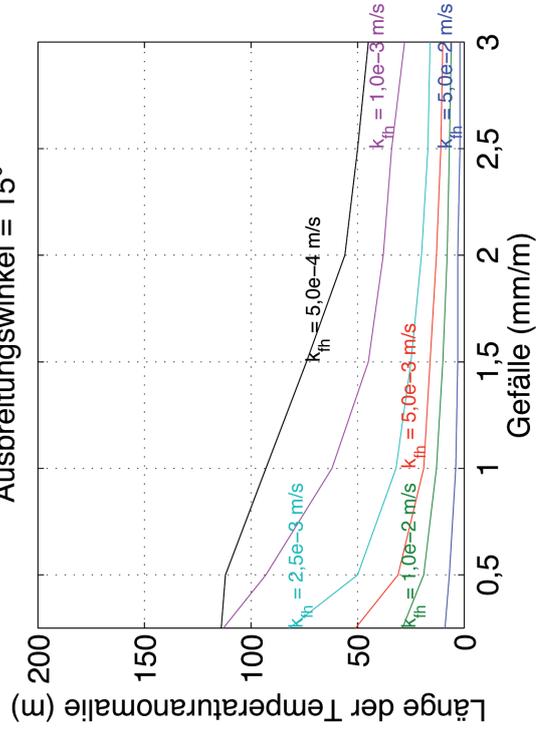
Ausbreitungswinkel = 6°



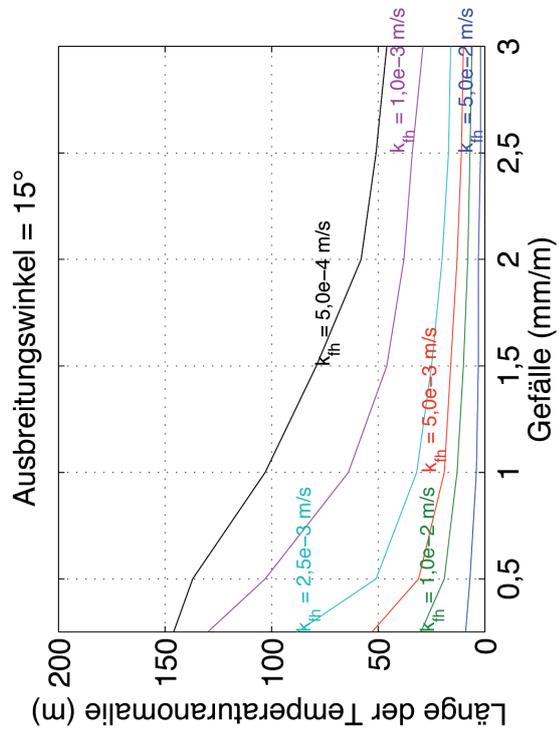
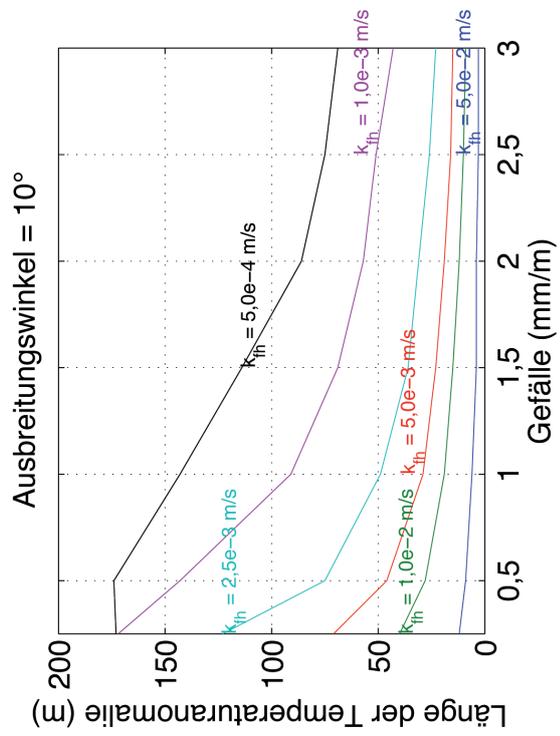
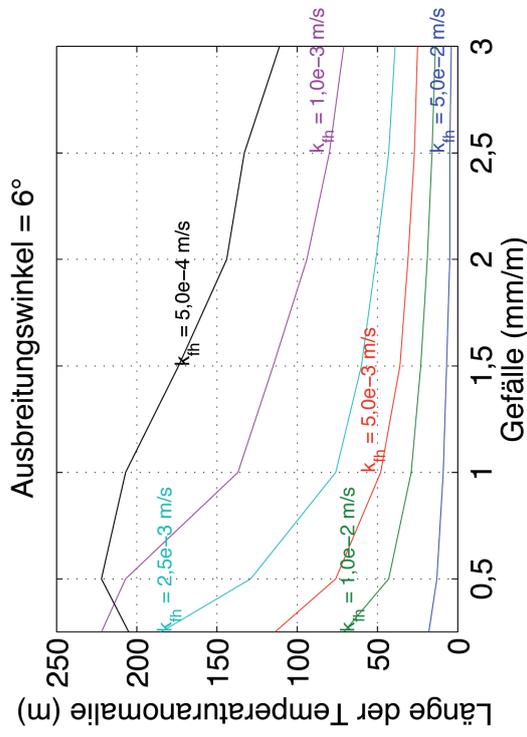
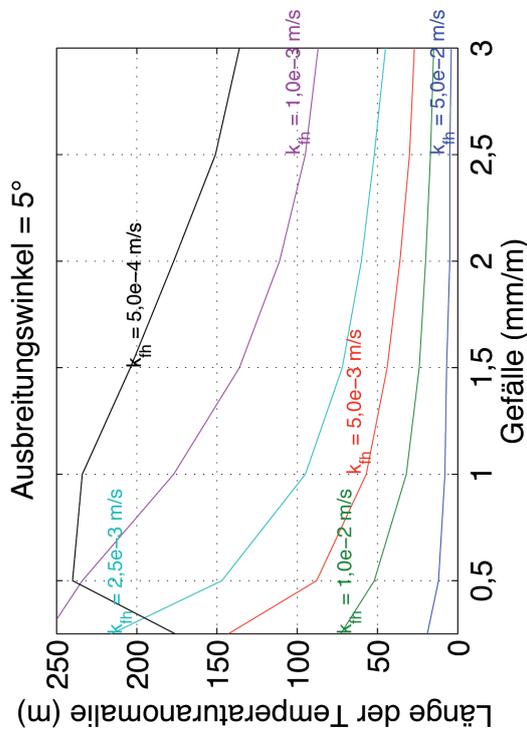
Ausbreitungswinkel = 10°

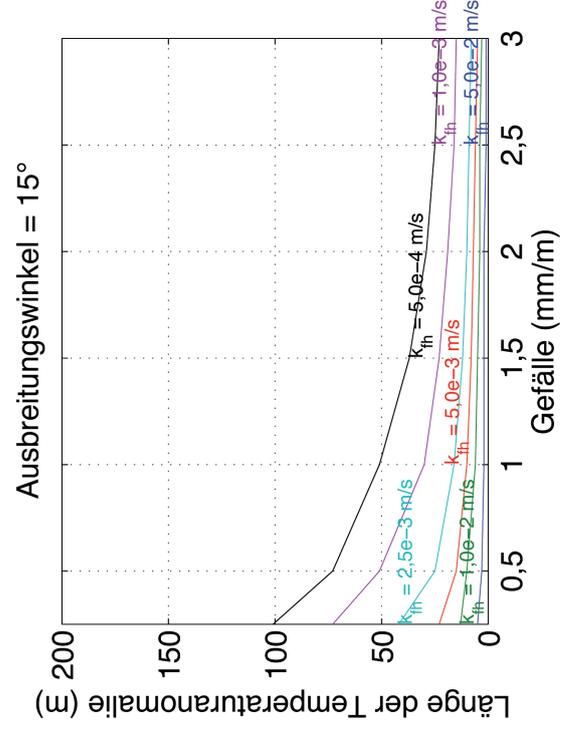
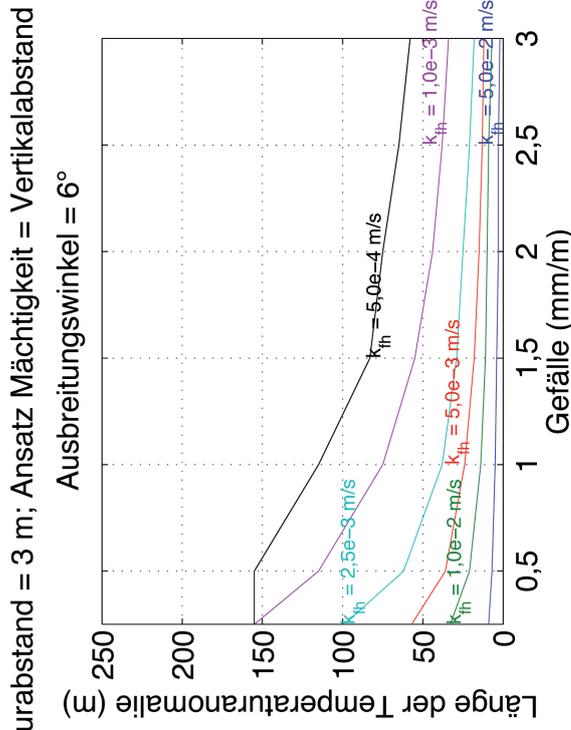
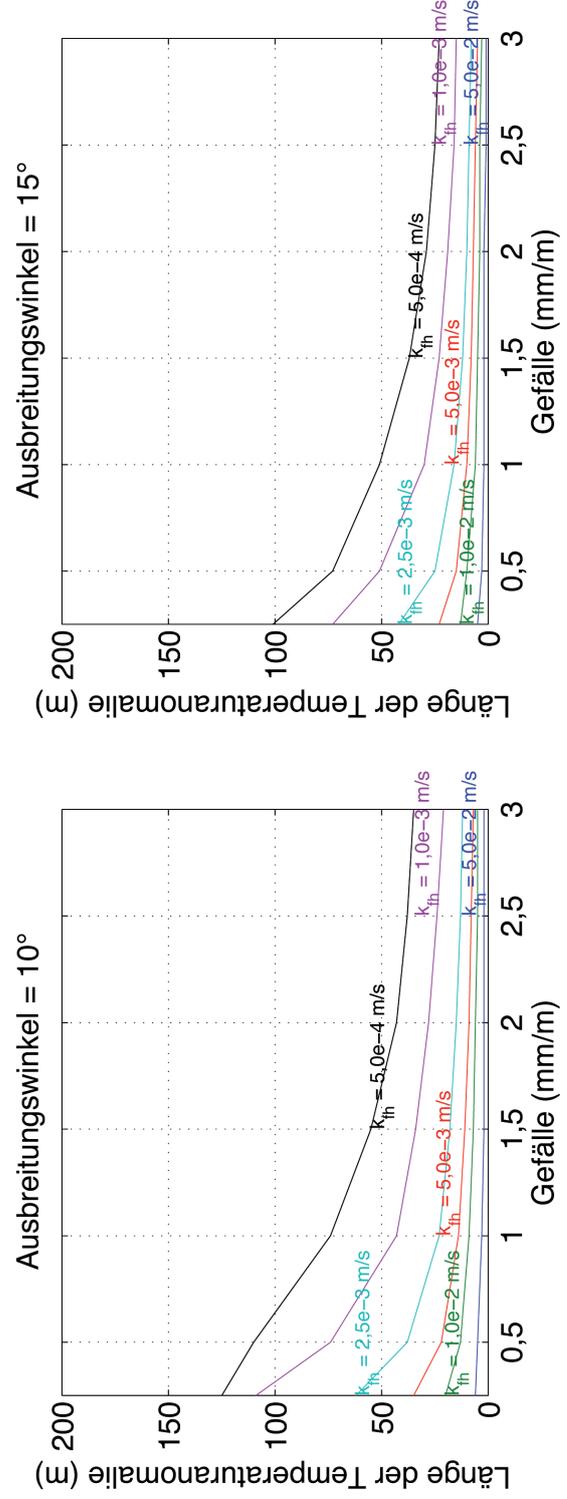
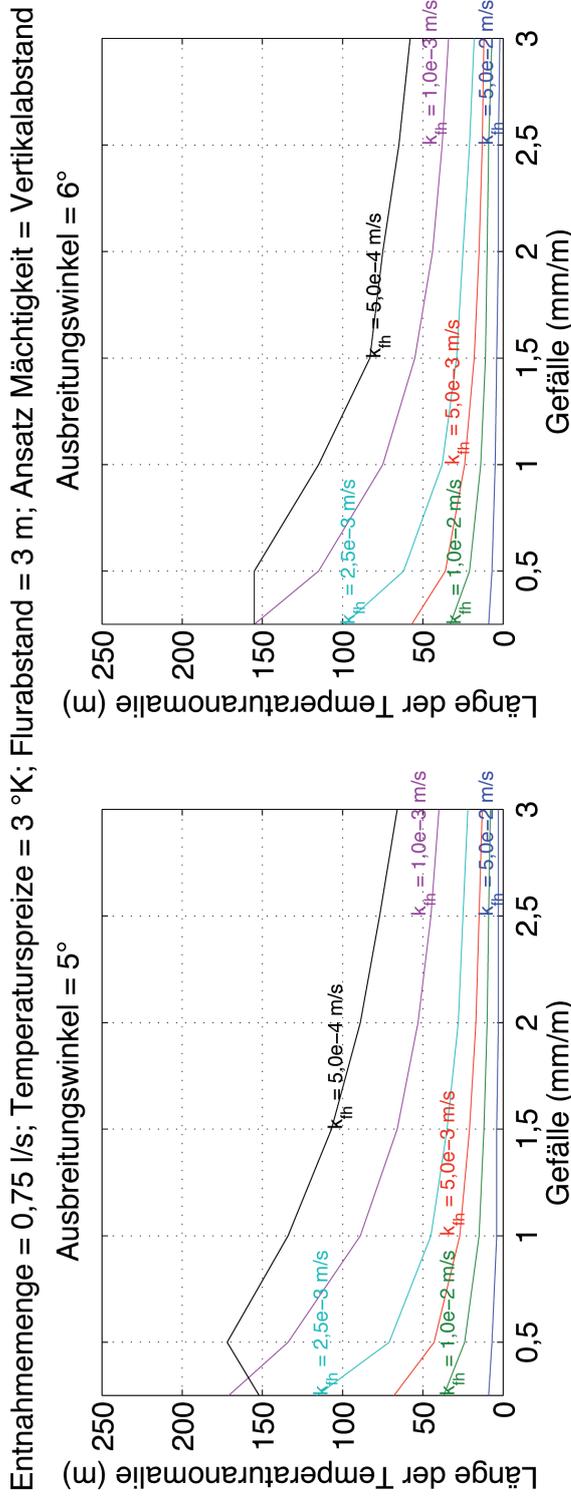


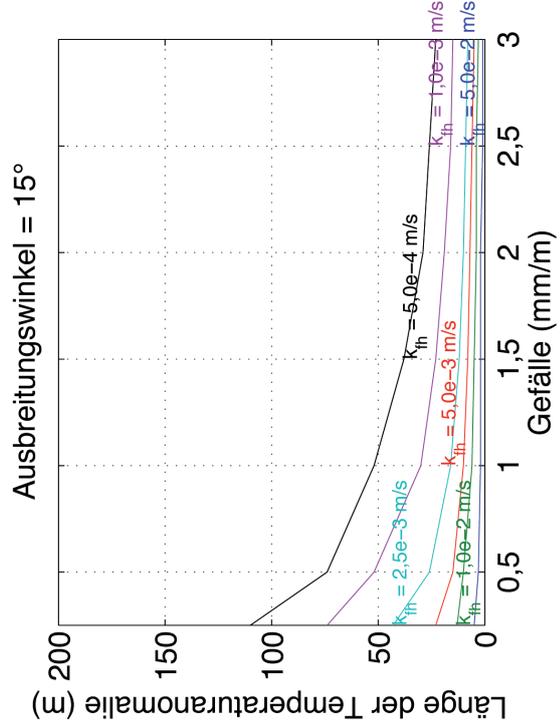
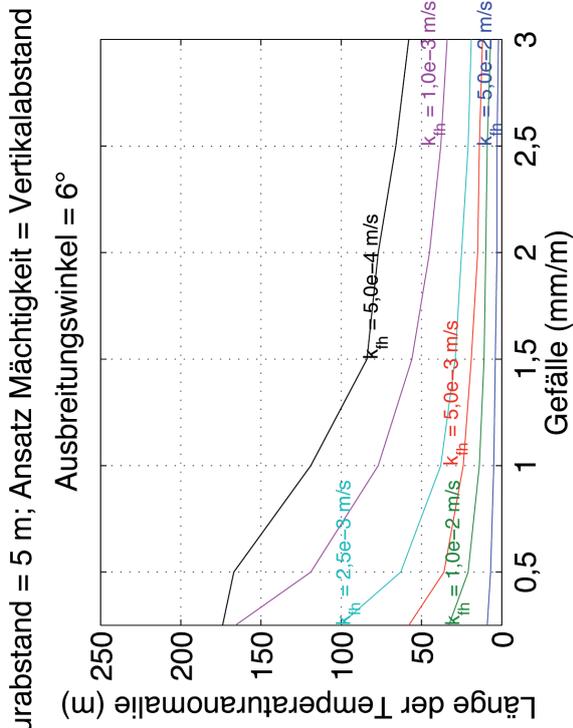
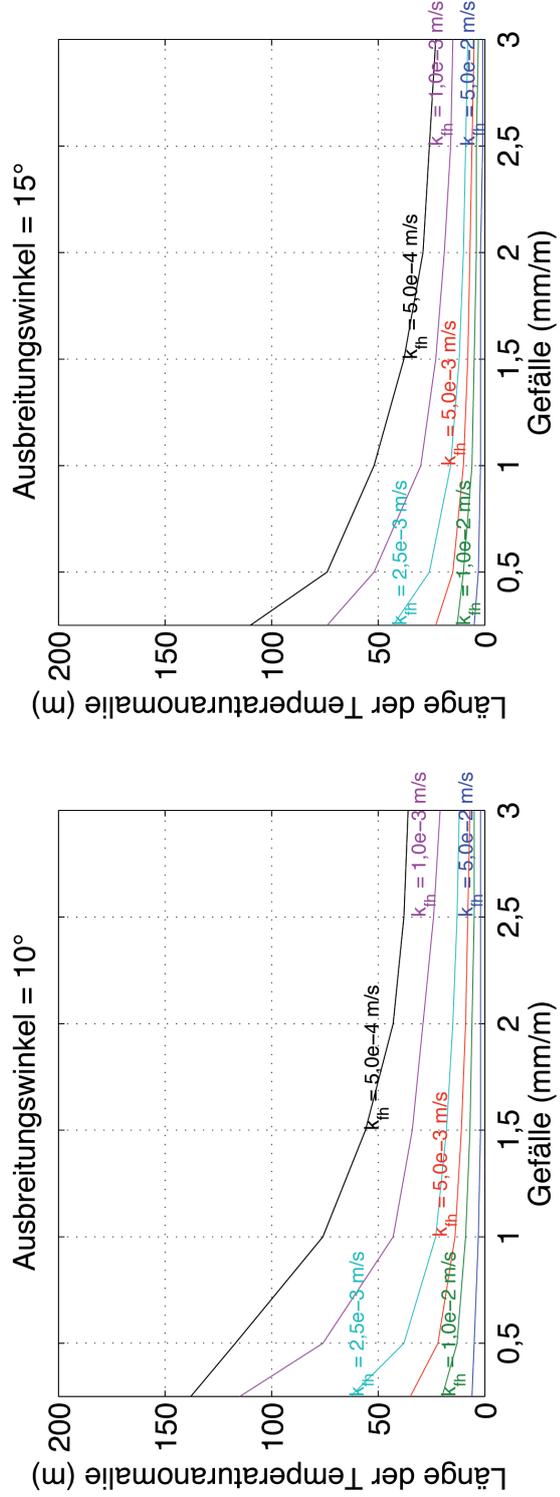
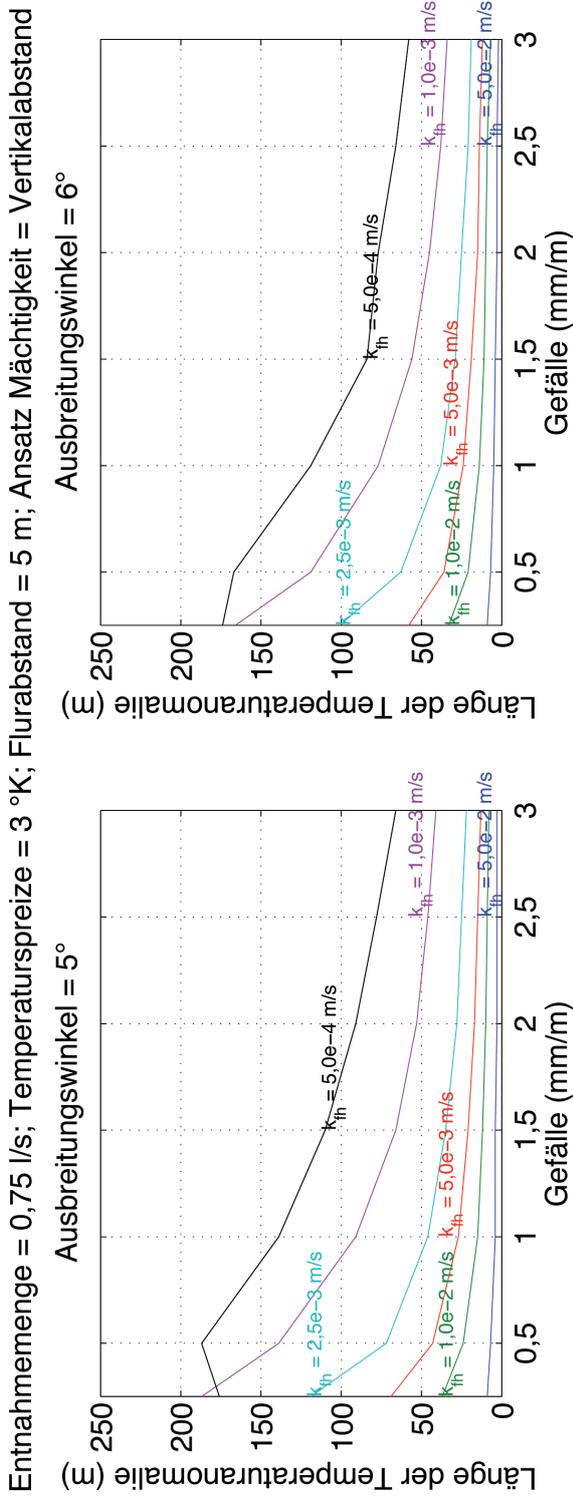
Ausbreitungswinkel = 15°



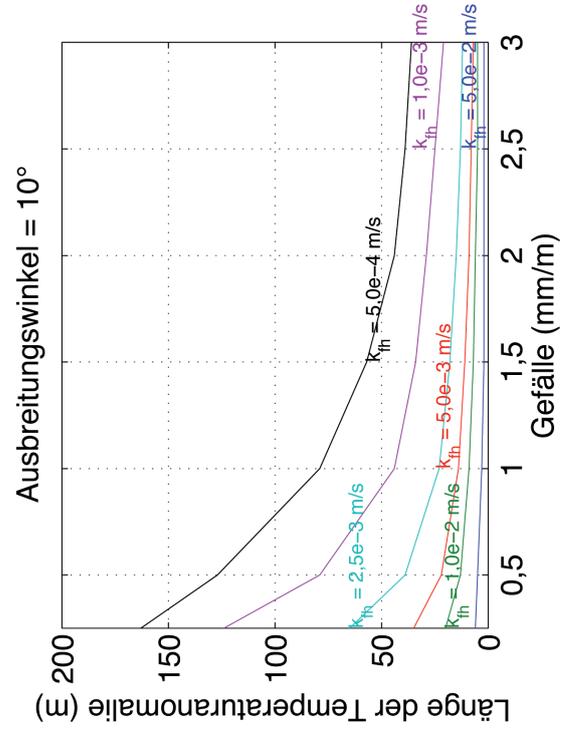
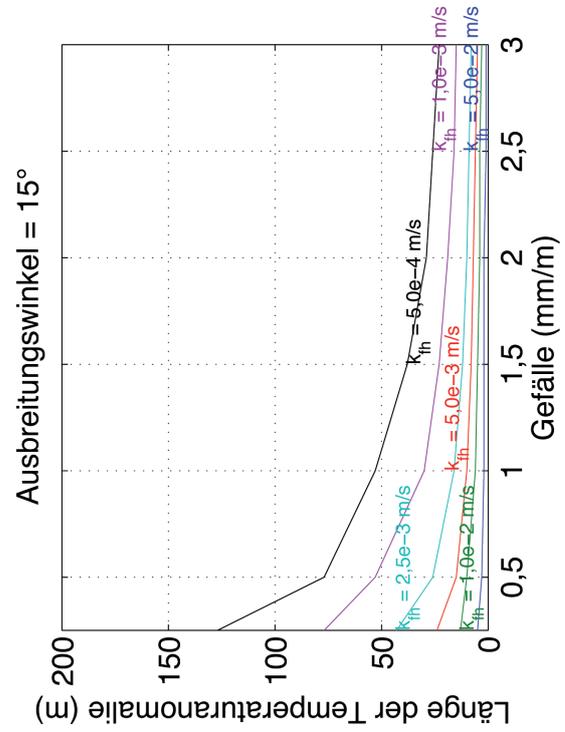
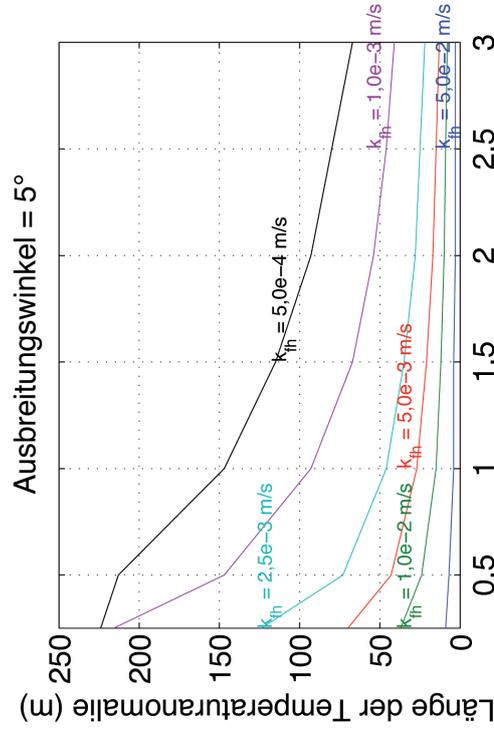
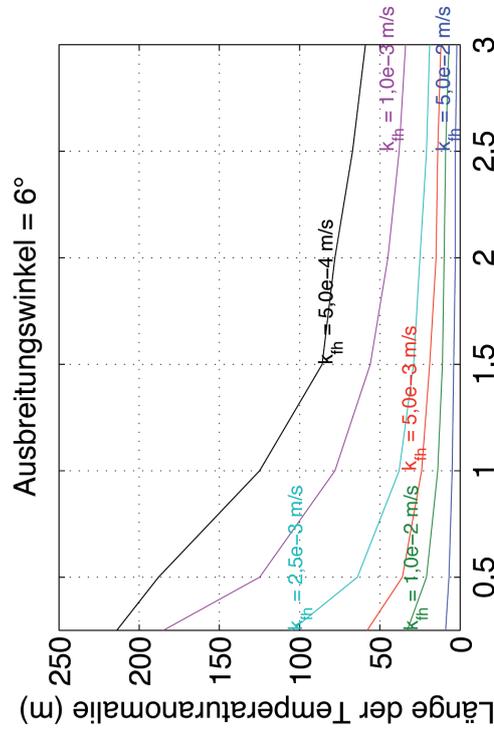
Entnahmemenge = 1 l/s; Temperaturspreize = 3 °K; Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit



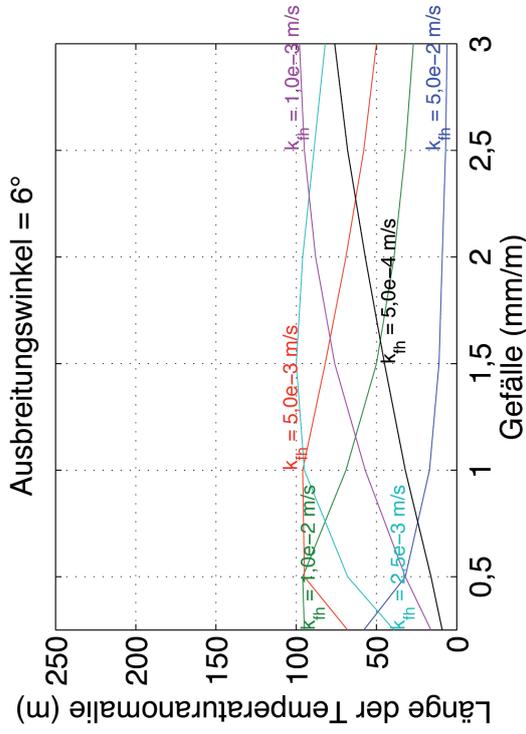
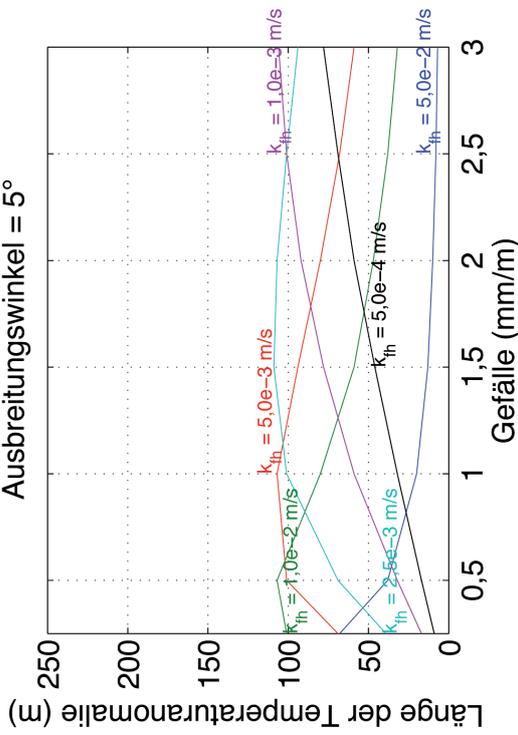




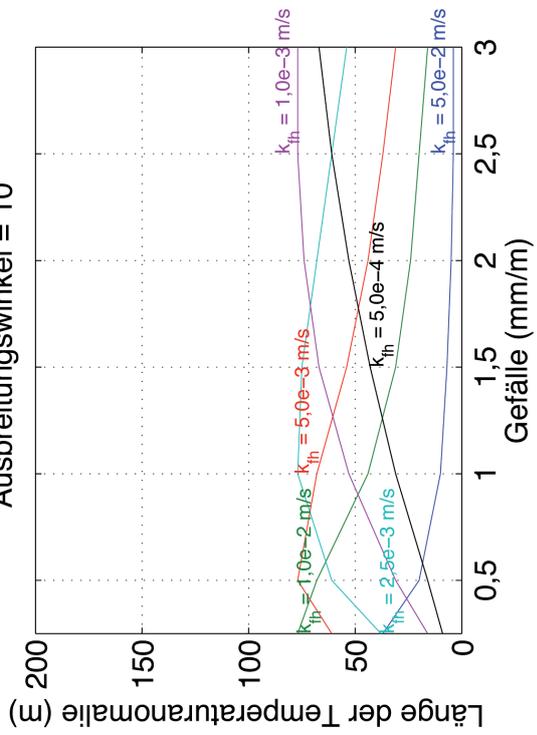
Entnahmemenge = 0,75 l/s; Temperaturpreize = 3 °K; Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = Vertikalabstand



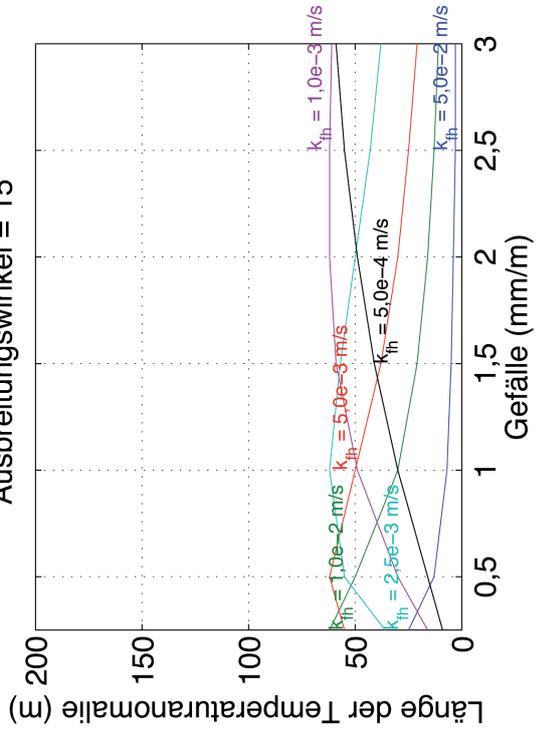
Entnahmemenge = 0,75 l/s; Temperaturspreize = 3 °K; Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr
Ausbreitungswinkel = 5°



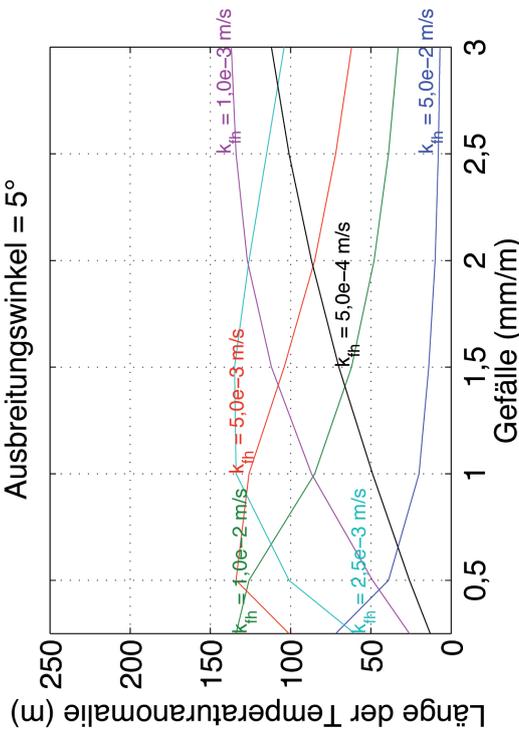
Ausbreitungswinkel = 10°



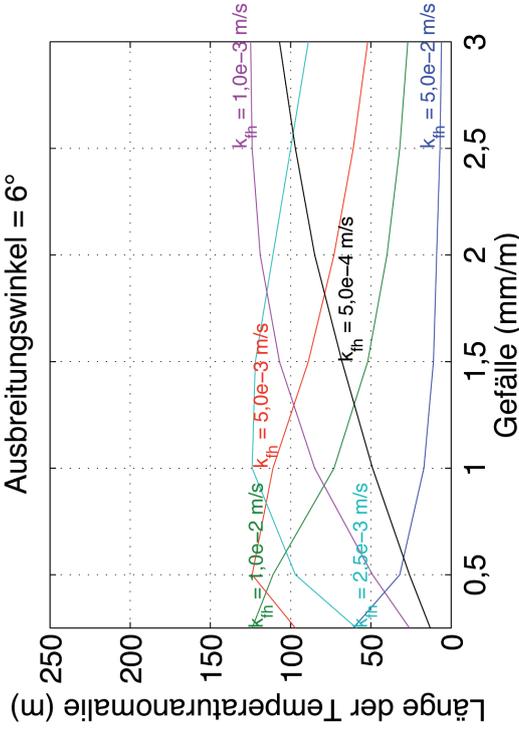
Ausbreitungswinkel = 15°



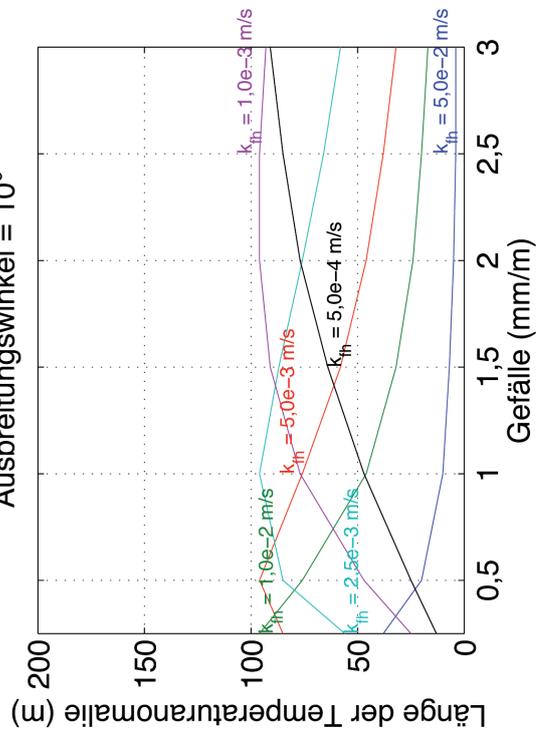
Entnahmemenge = 0,75 l/s; Temperaturspanne = 3 °K; Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr
 Ausbreitungswinkel = 5°



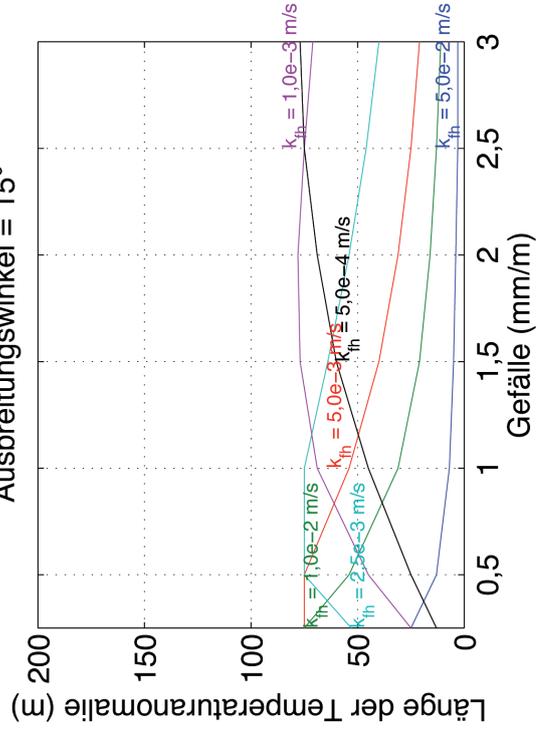
Ausbreitungswinkel = 6°



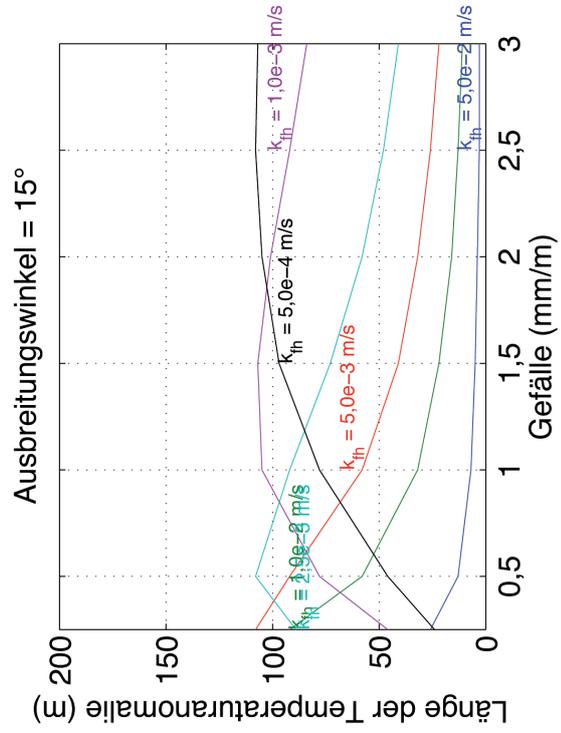
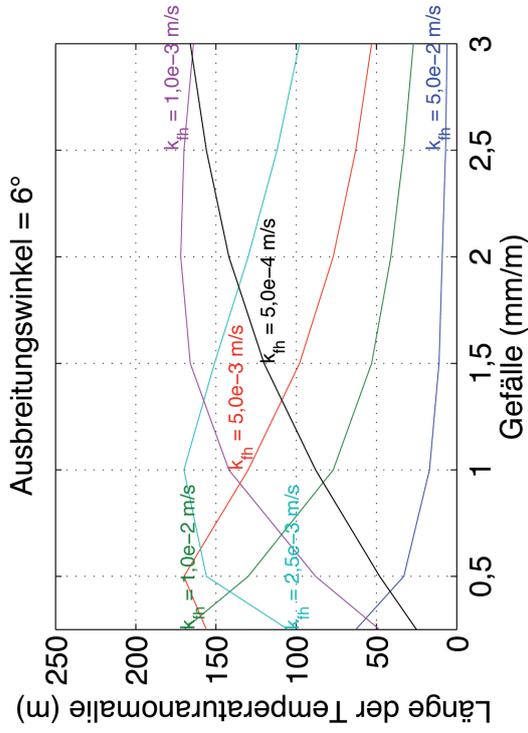
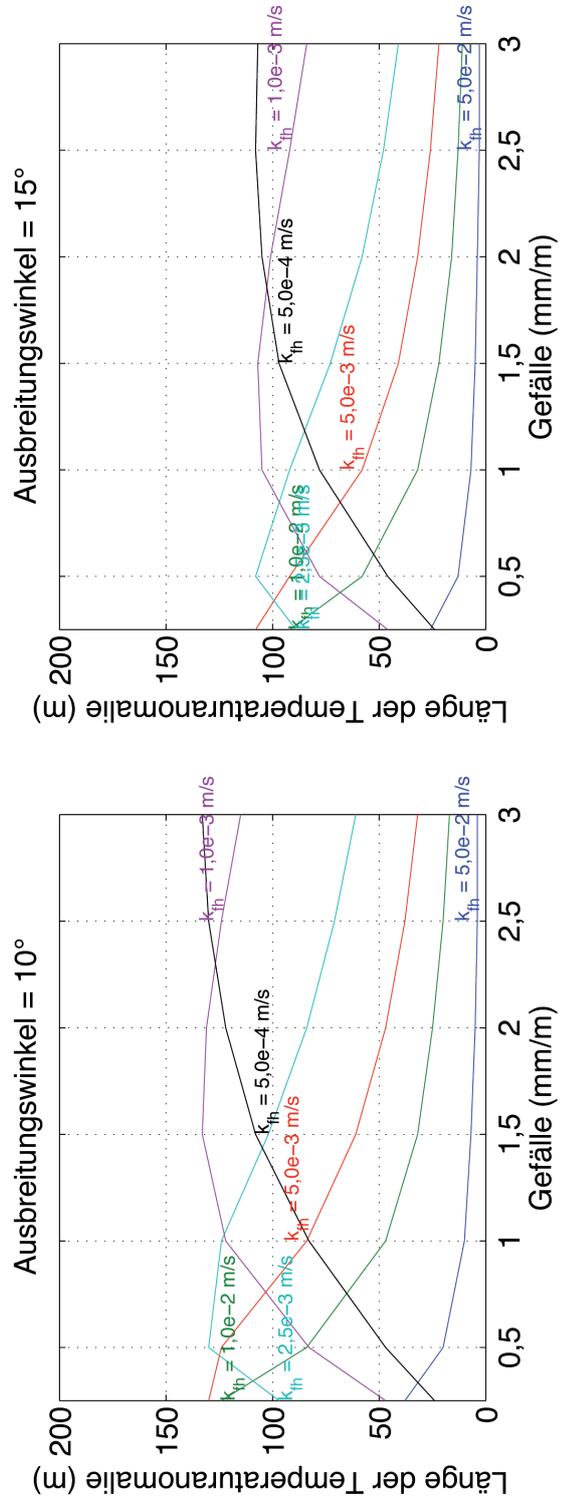
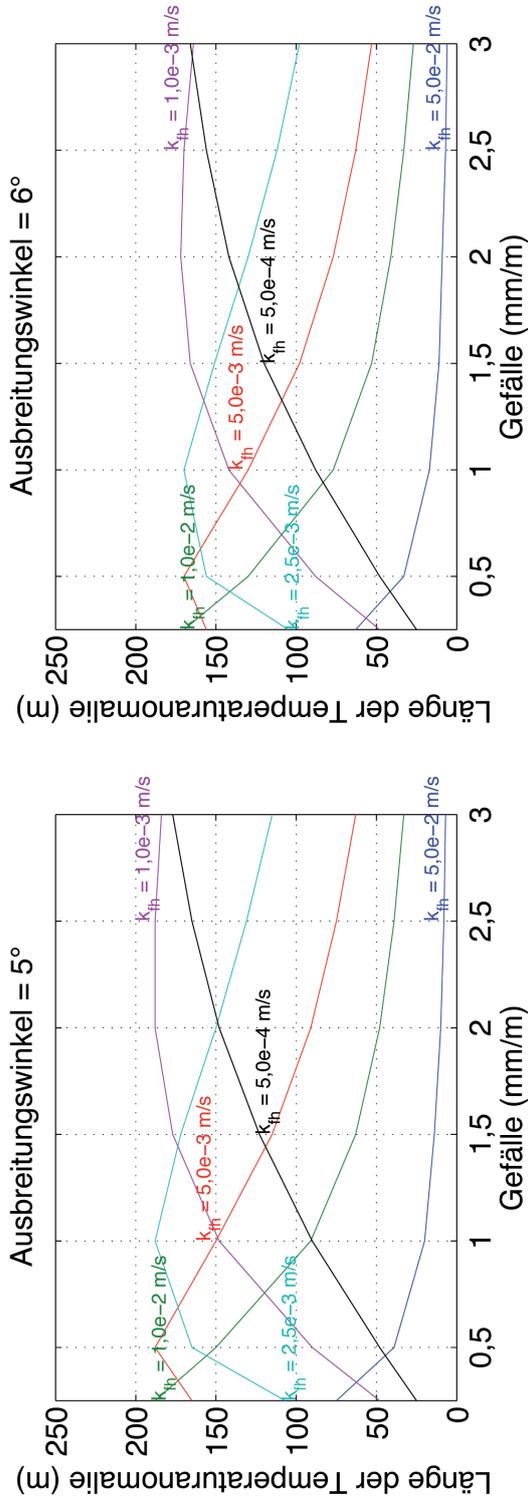
Ausbreitungswinkel = 10°



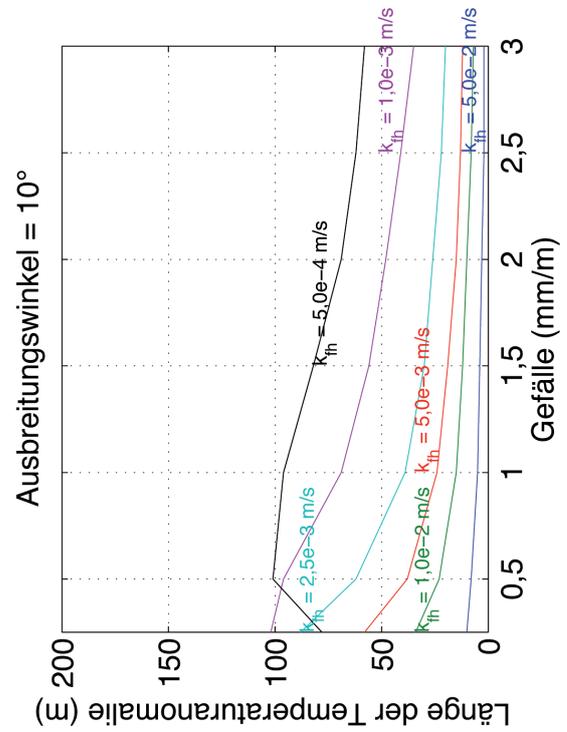
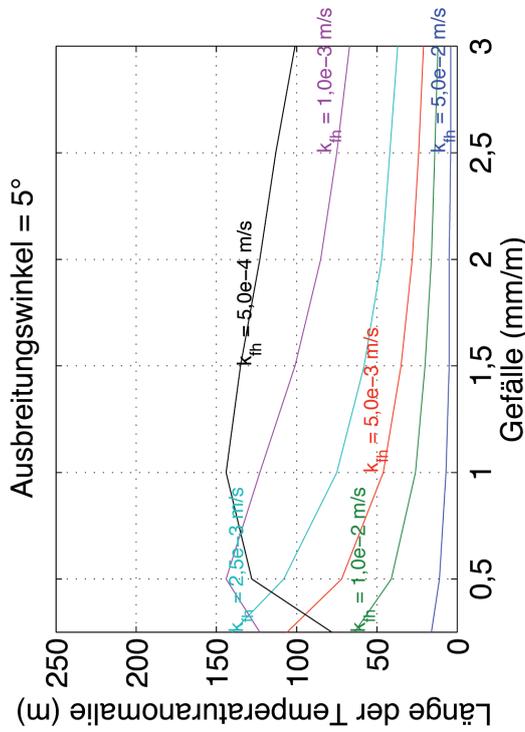
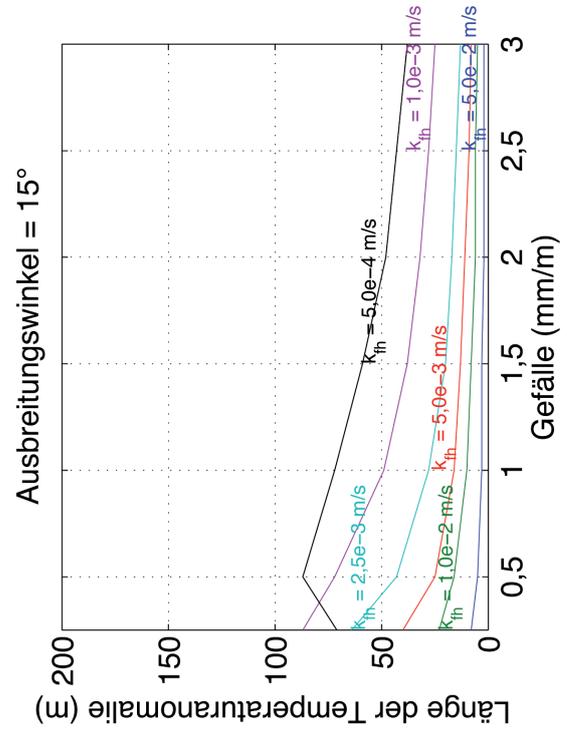
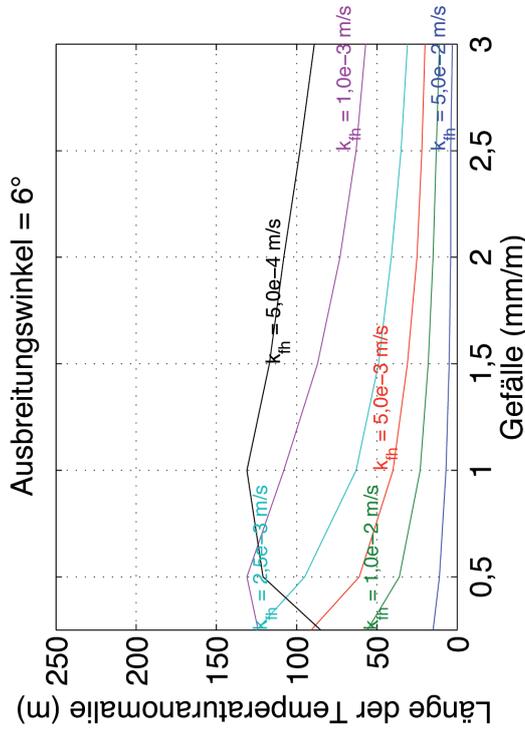
Ausbreitungswinkel = 15°



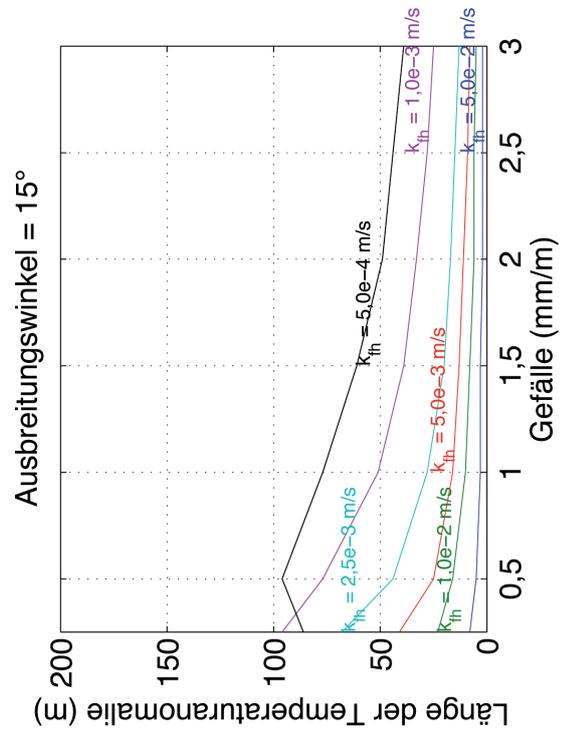
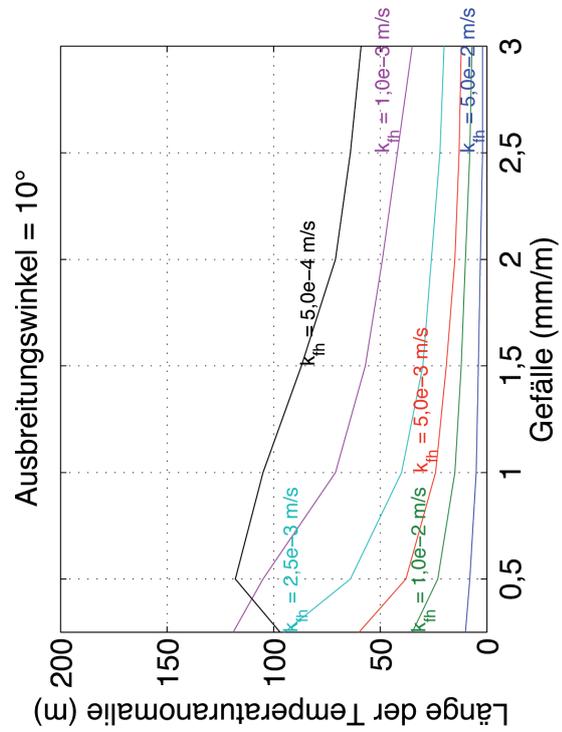
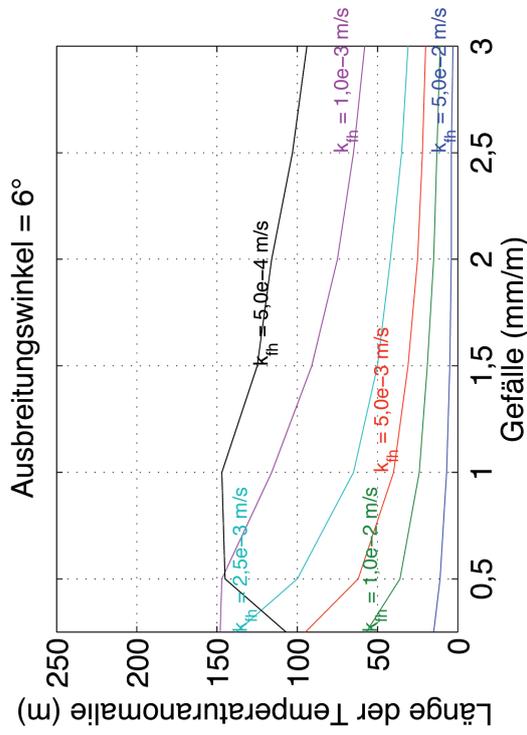
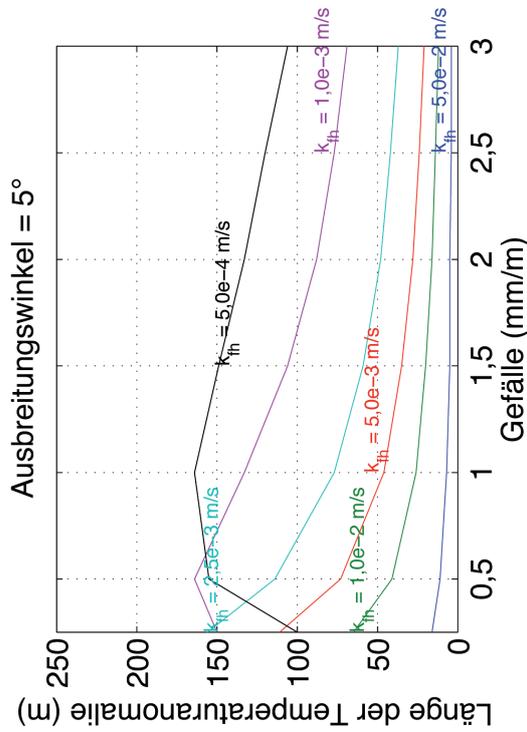
Entnahmemenge = 0,75 l/s; Temperaturspreize = 3 °K; Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr



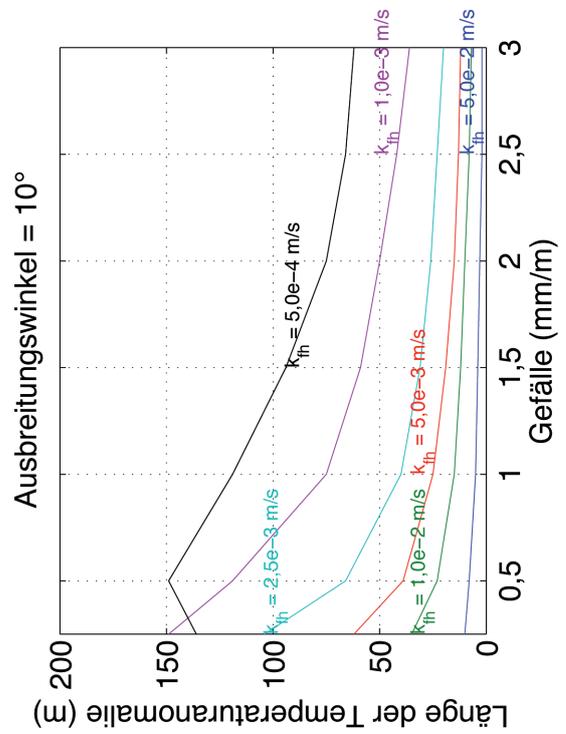
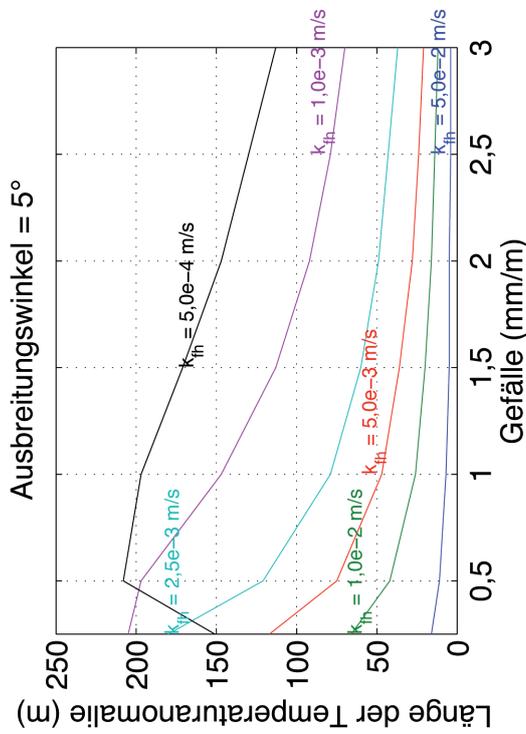
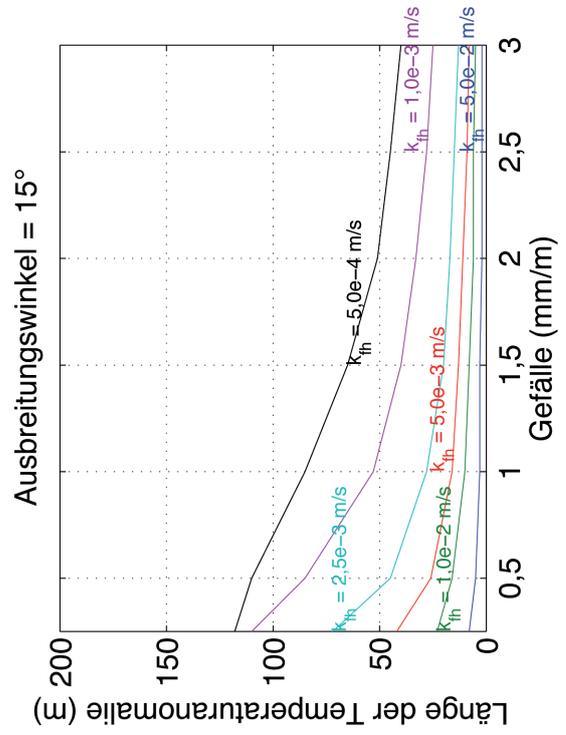
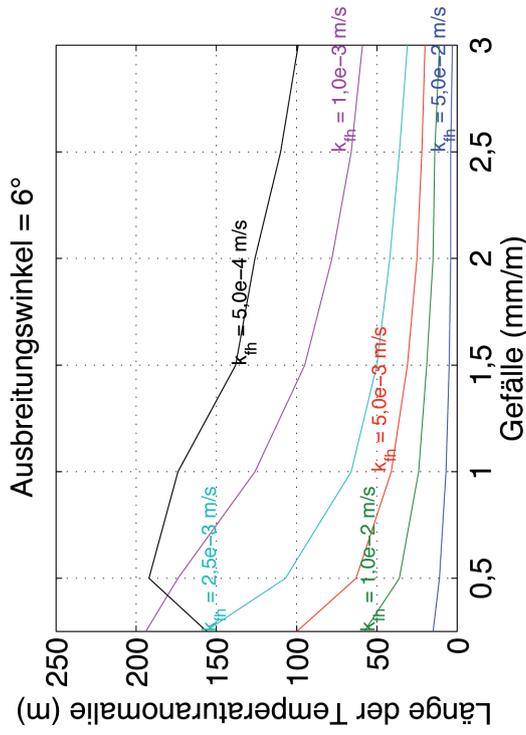
Entnahmemenge = 0,75 l/s; Temperaturspreize = 3 °K; Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit

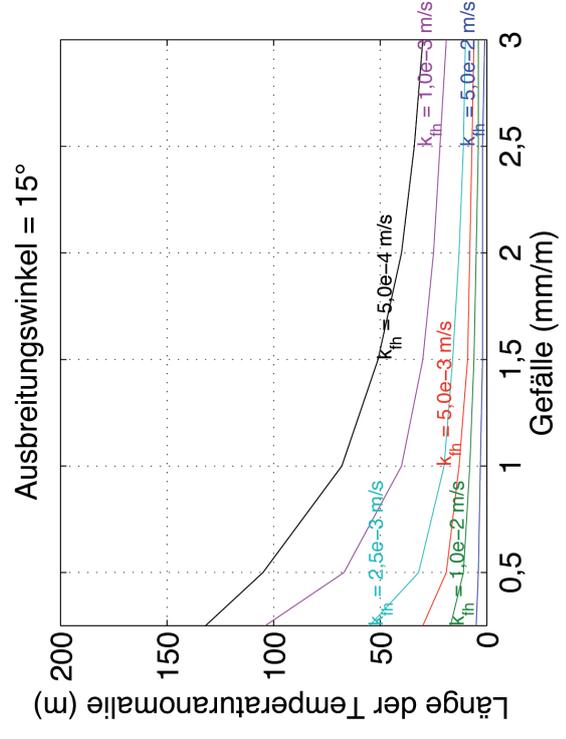
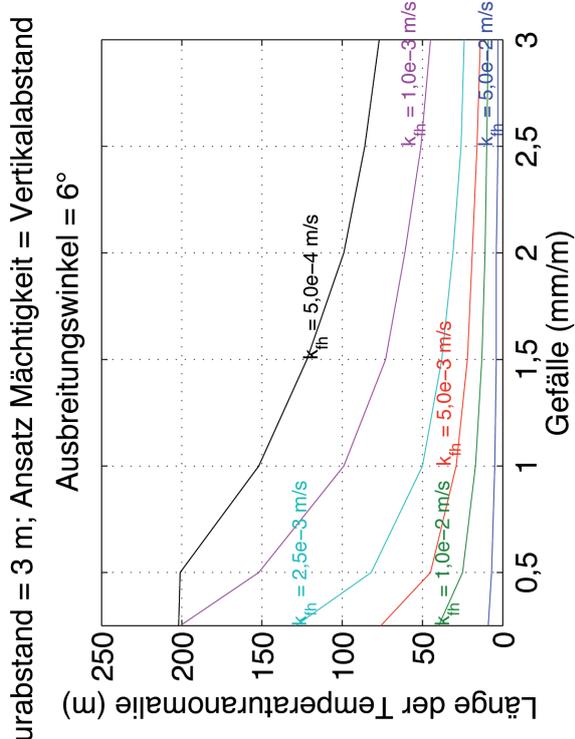
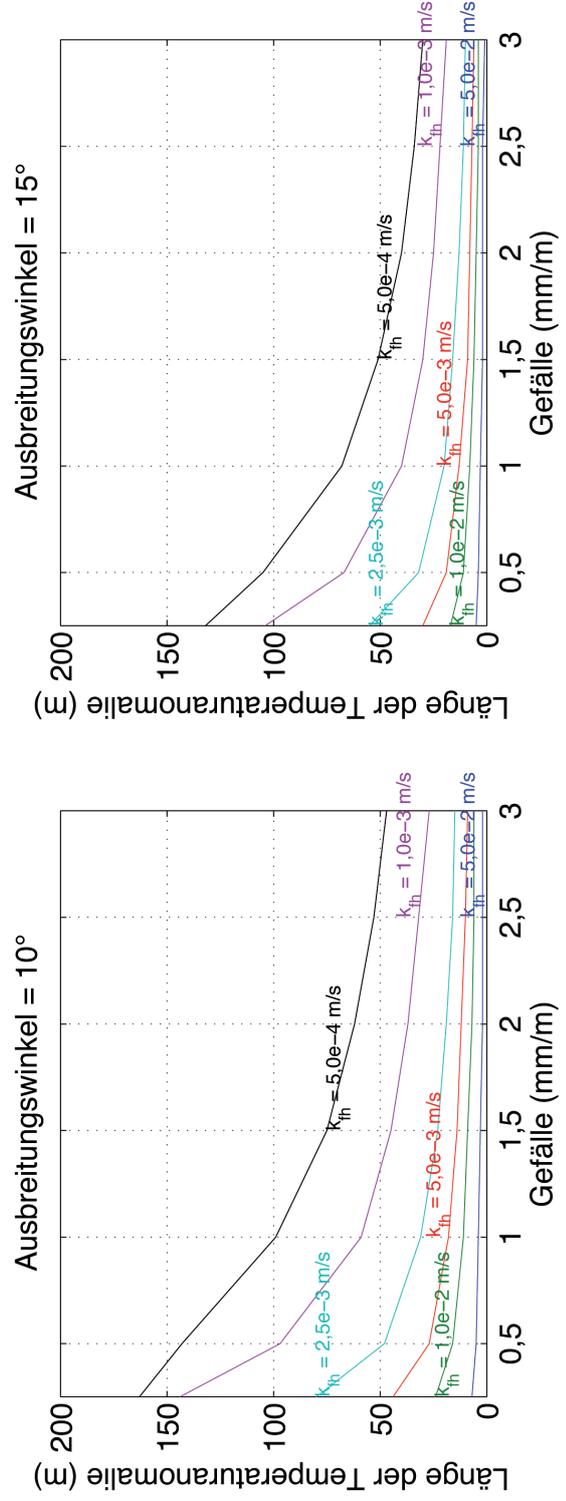
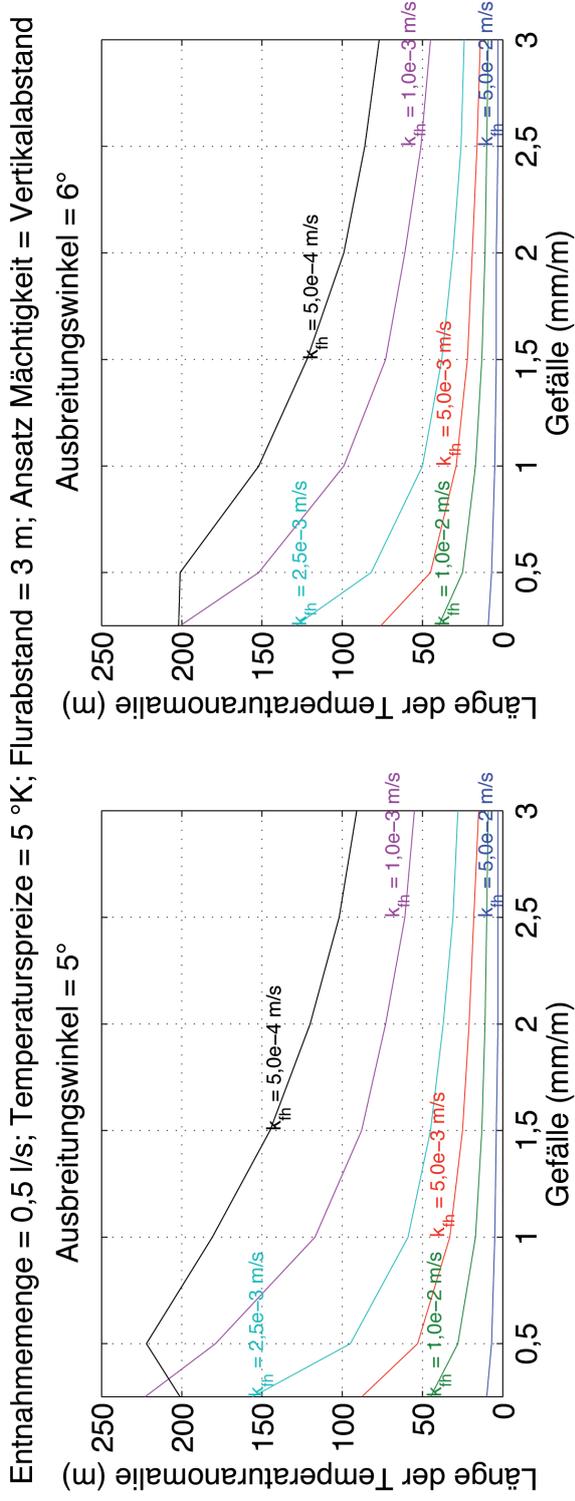


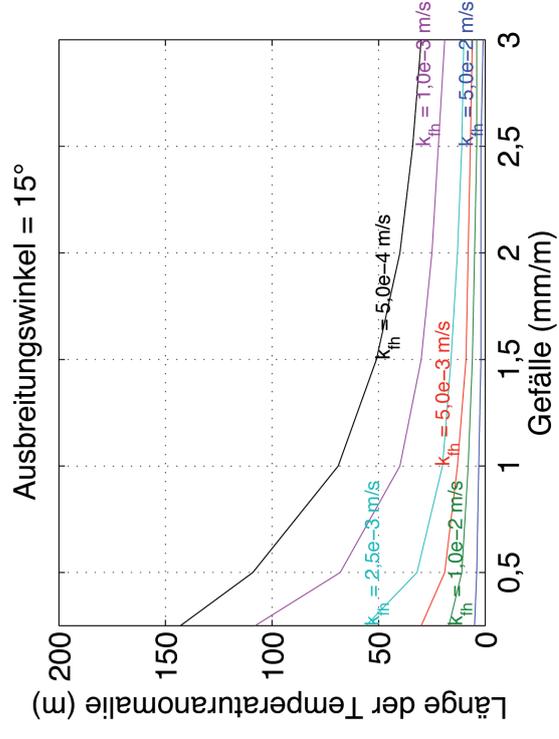
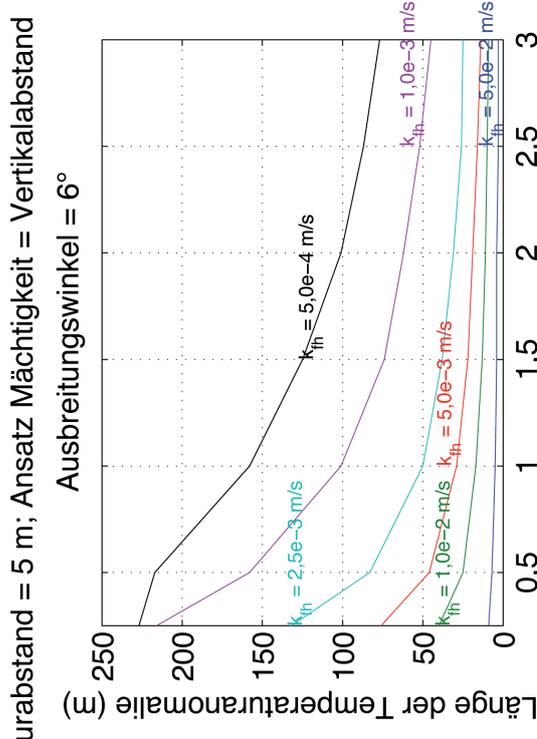
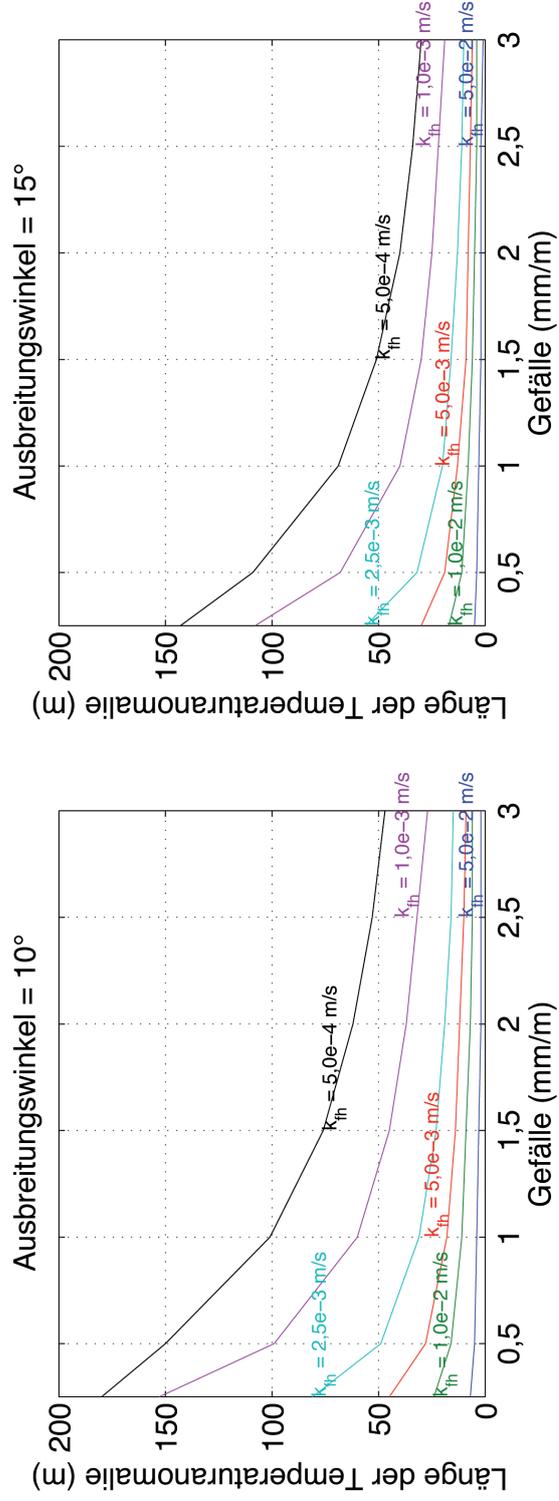
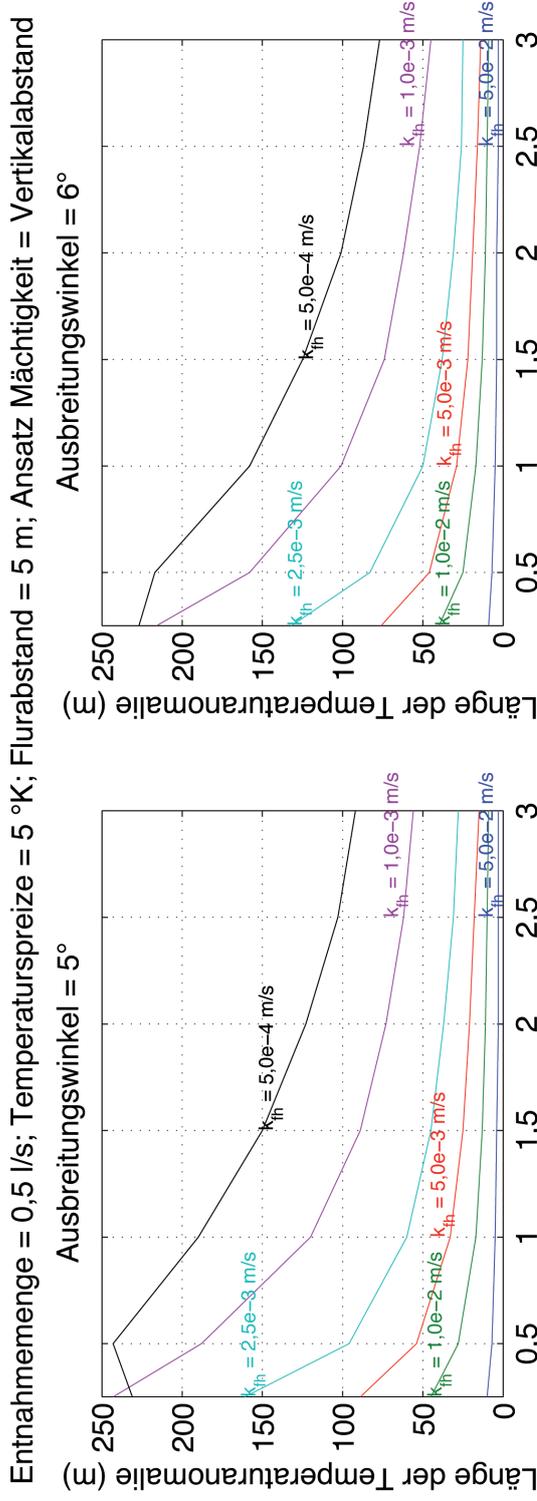
Entnahmemenge = 0,75 l/s; Temperaturpreize = 3 °K; Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit

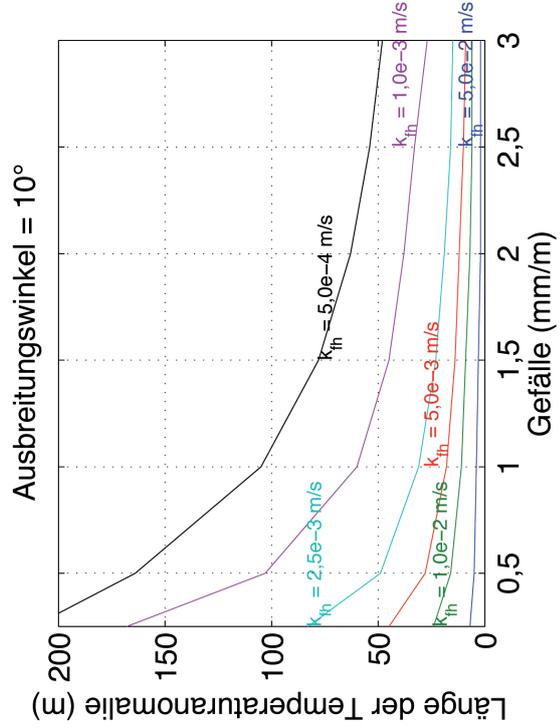
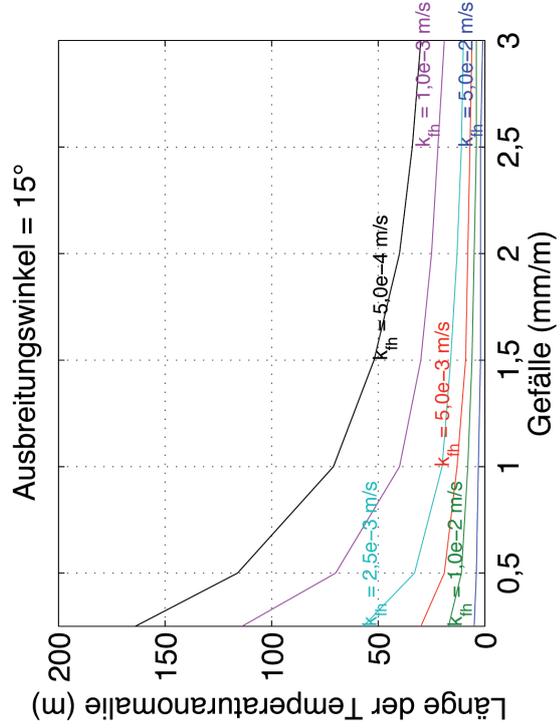
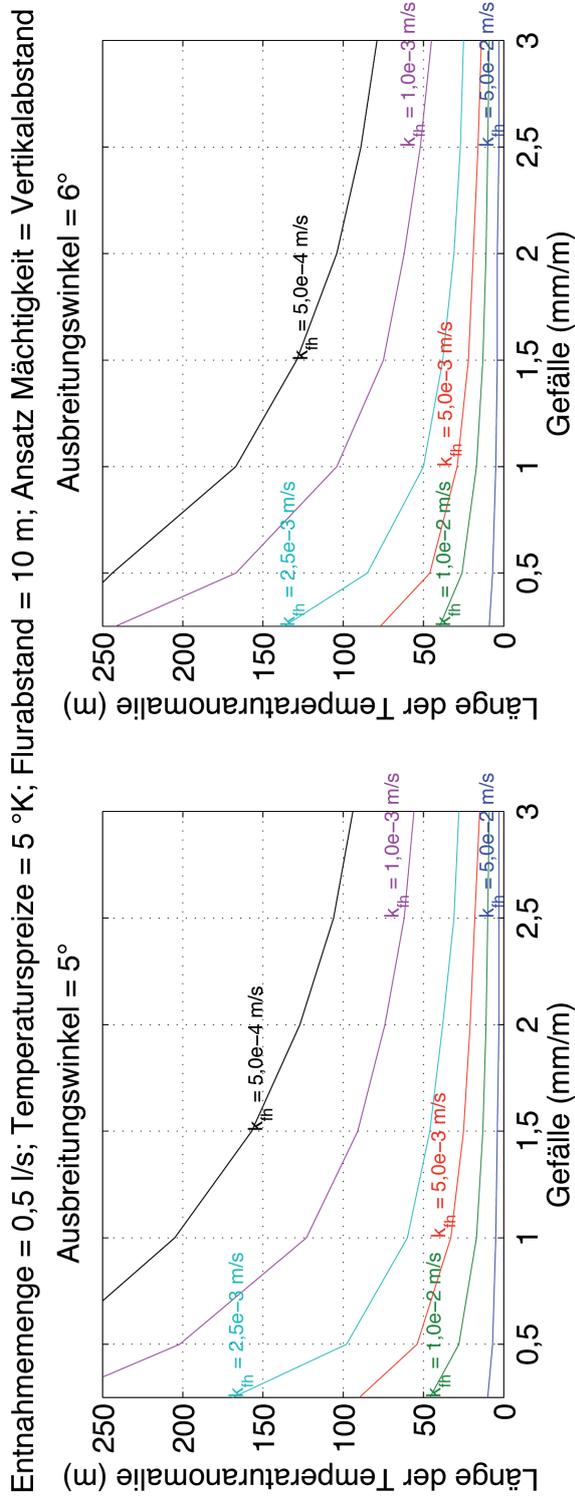


Entnahmemenge = 0,75 l/s; Temperaturpreise = 3 °K; Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit

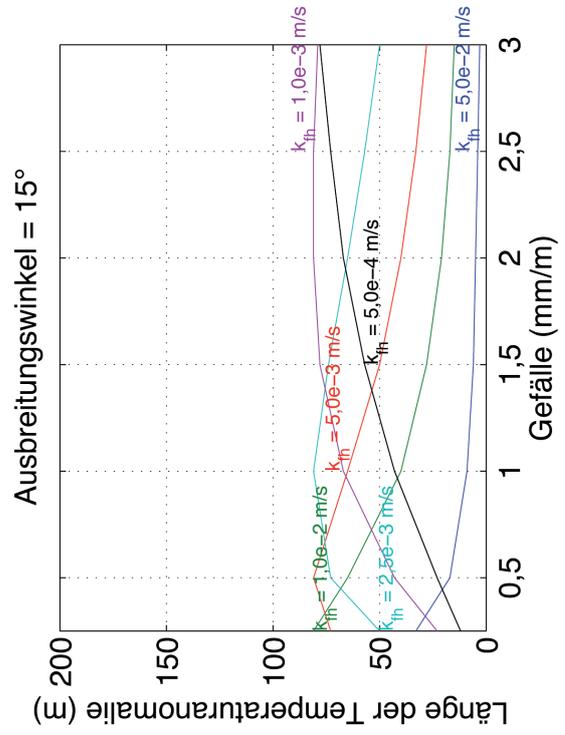
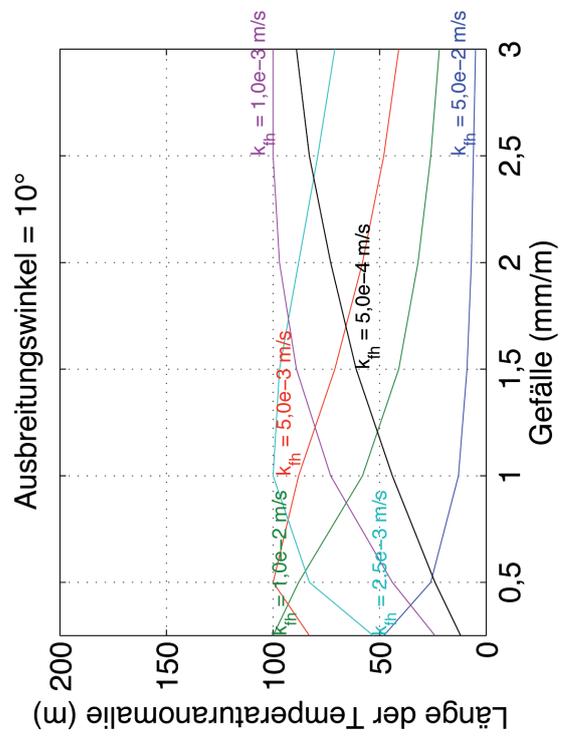
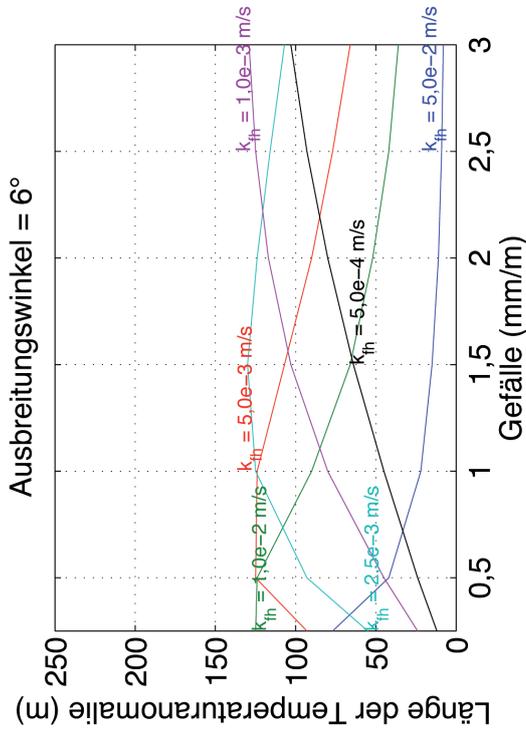
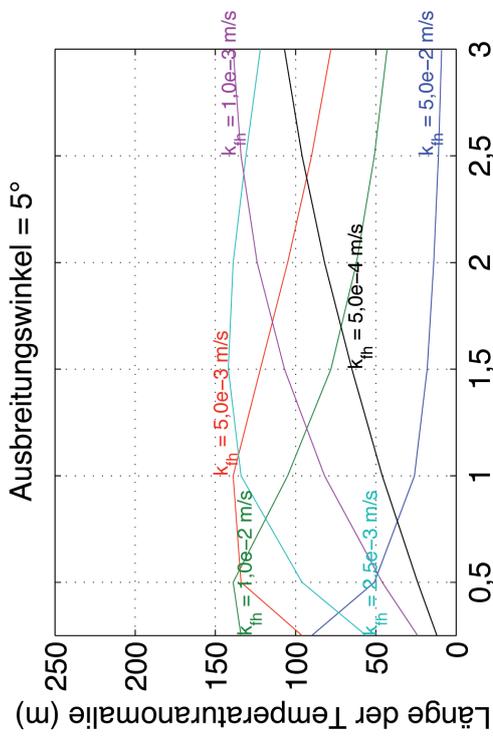




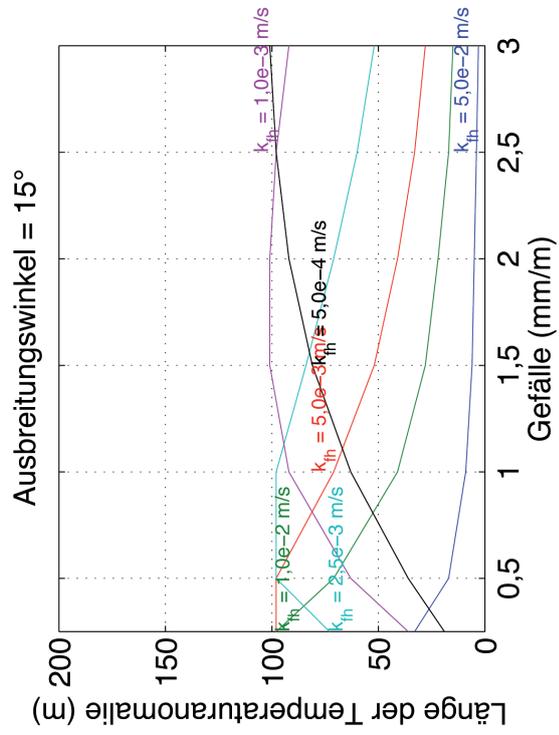
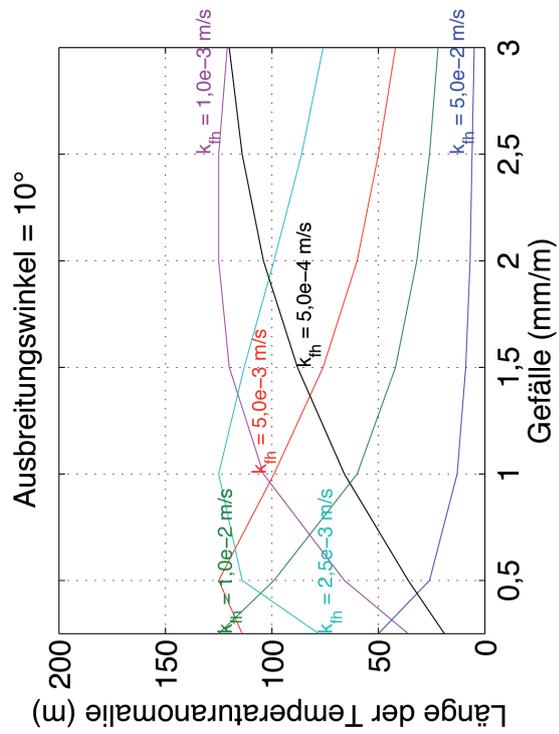
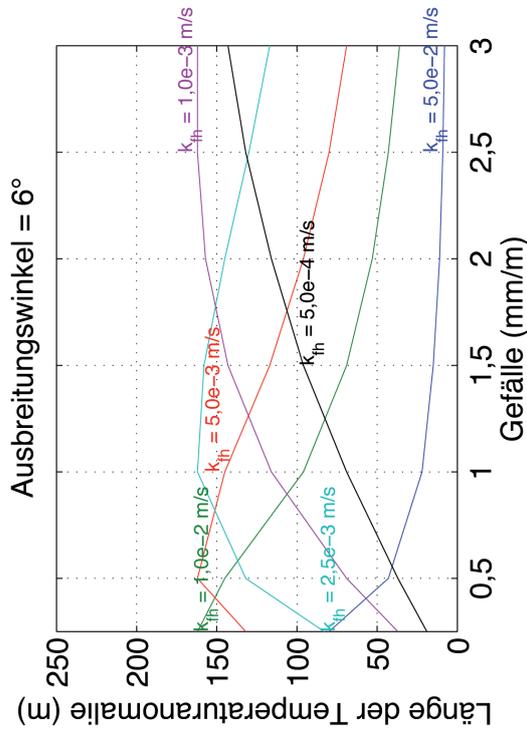
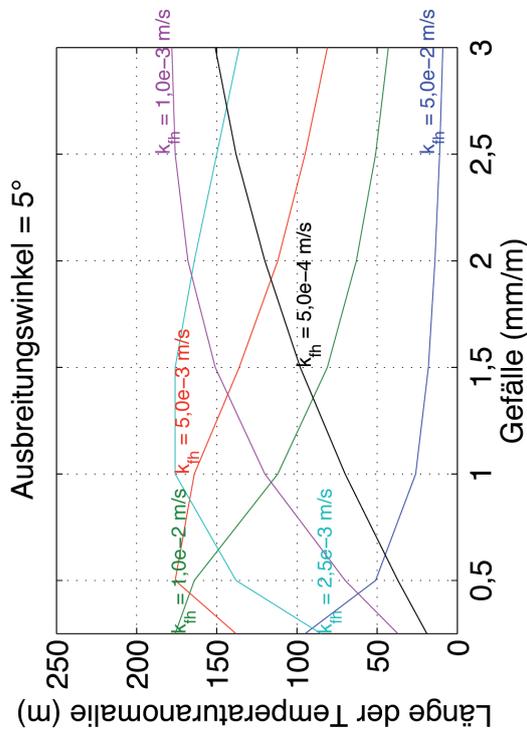


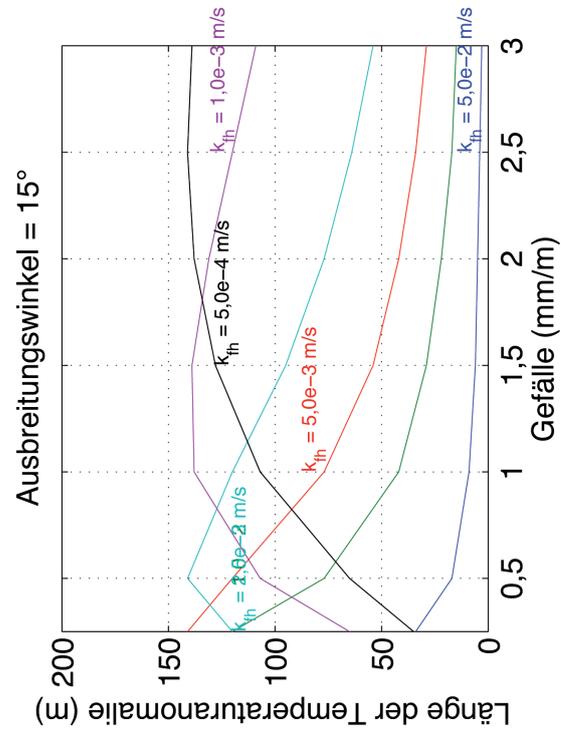
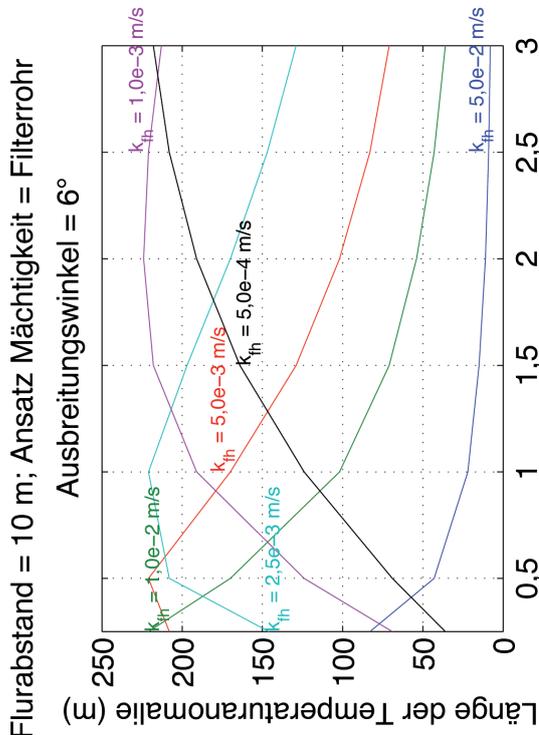
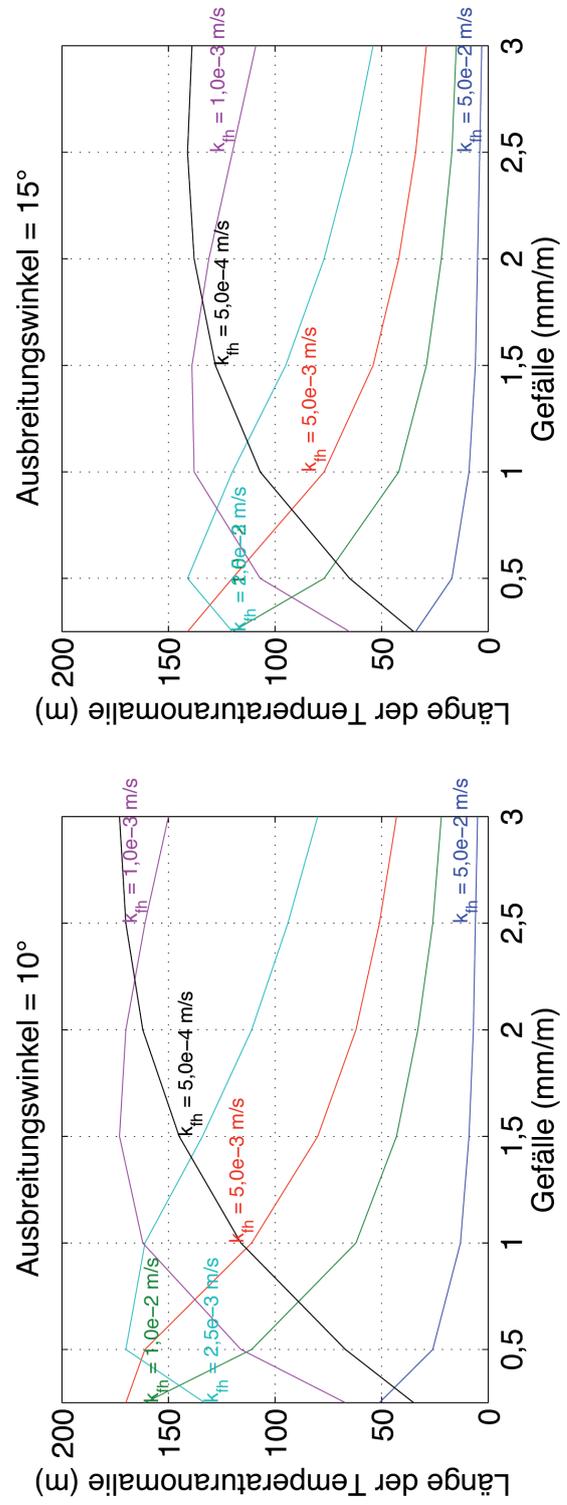
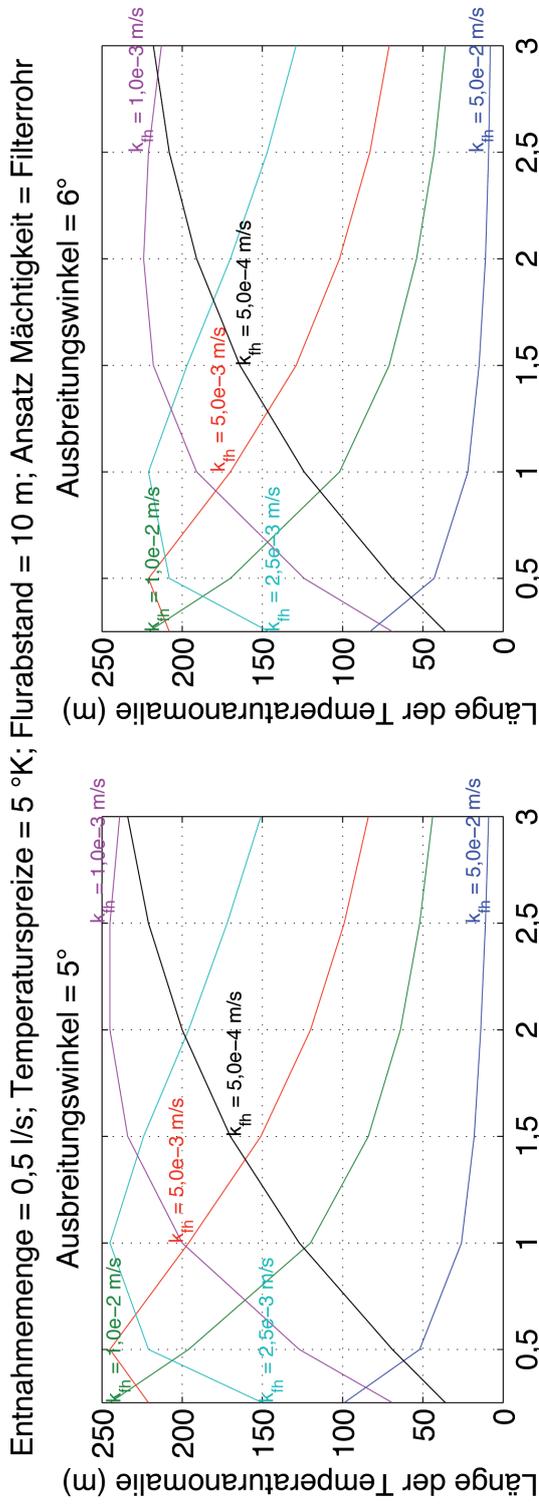


Entnahmemenge = 0,5 l/s; Temperaturspreize = 5 °K; Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr

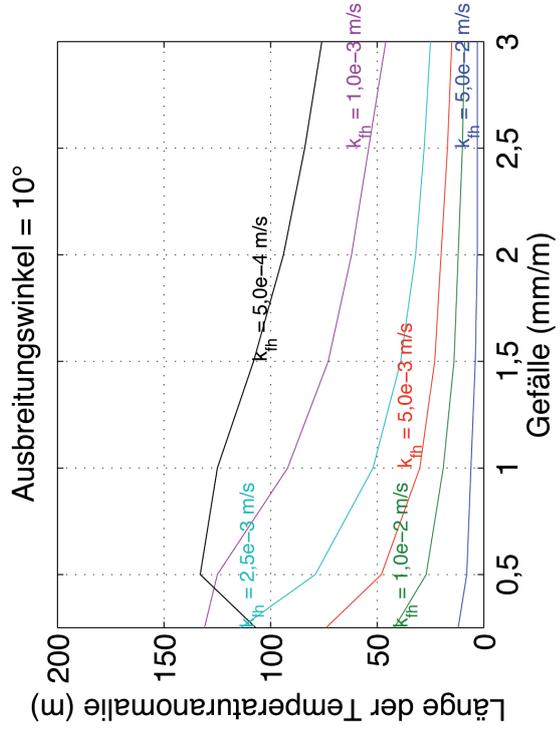
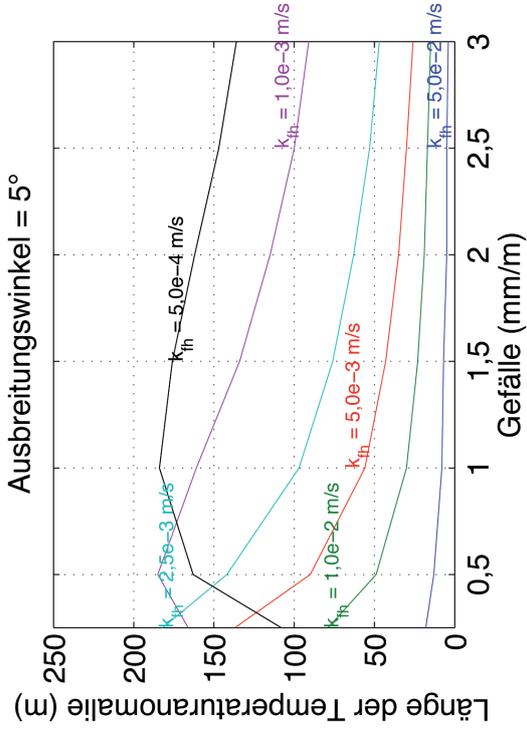
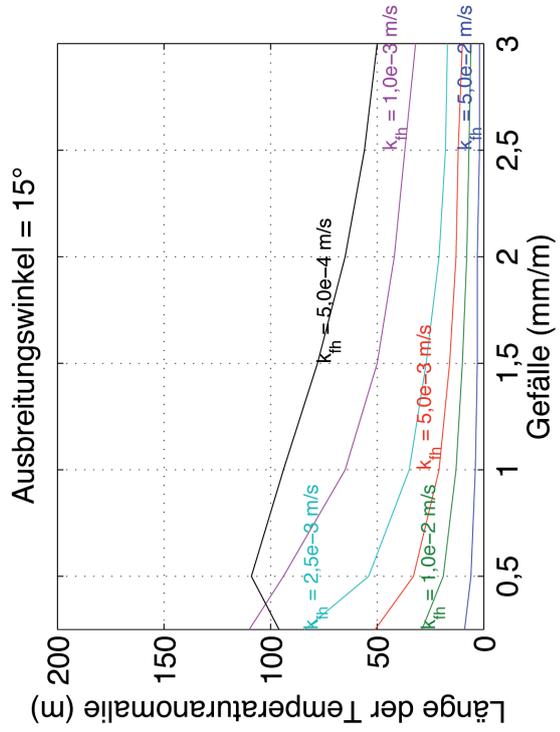
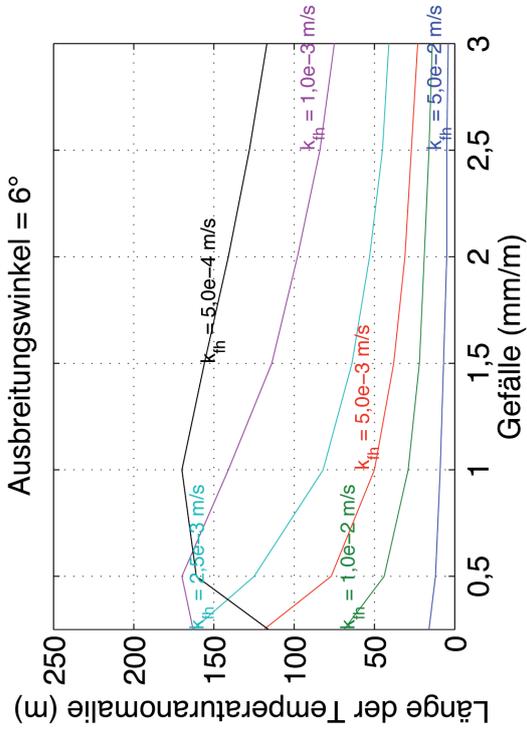


Entnahmemenge = 0,5 l/s; Temperaturspreize = 5 °K; Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr

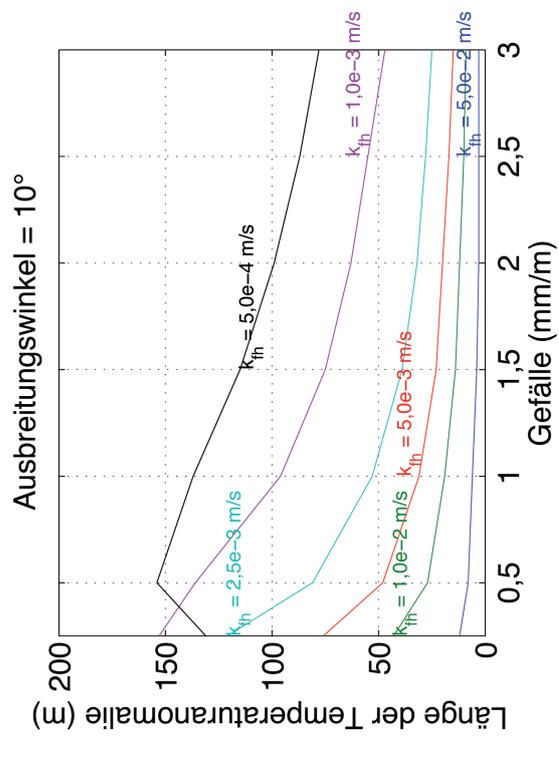
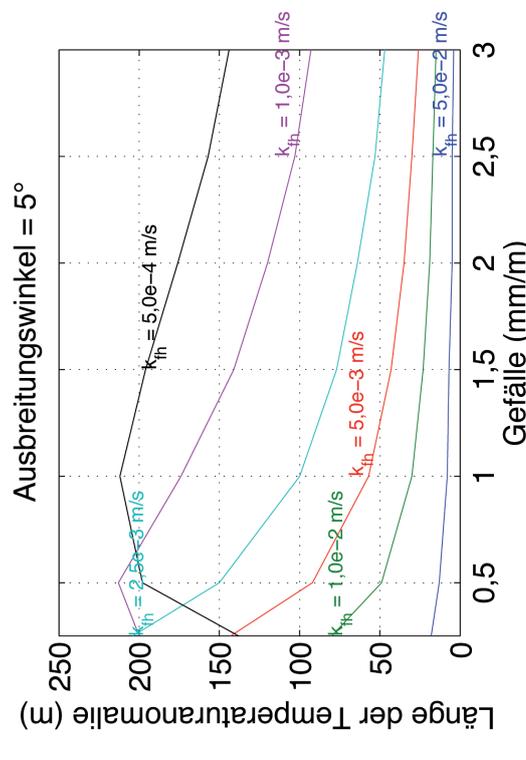
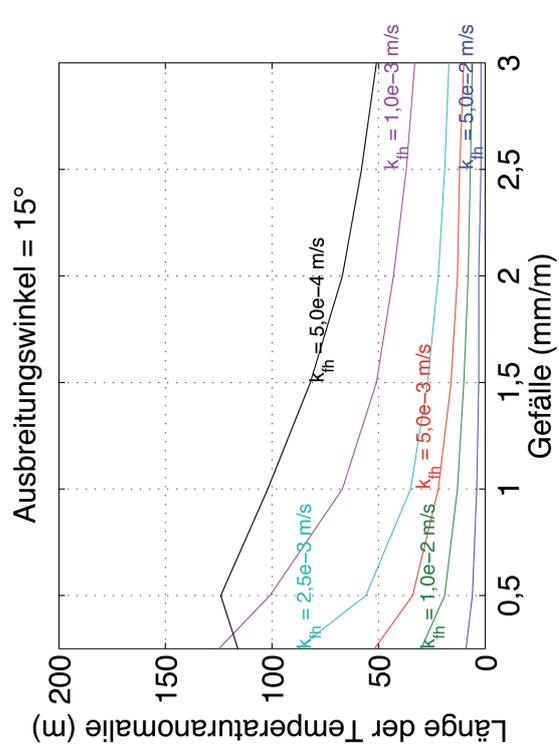
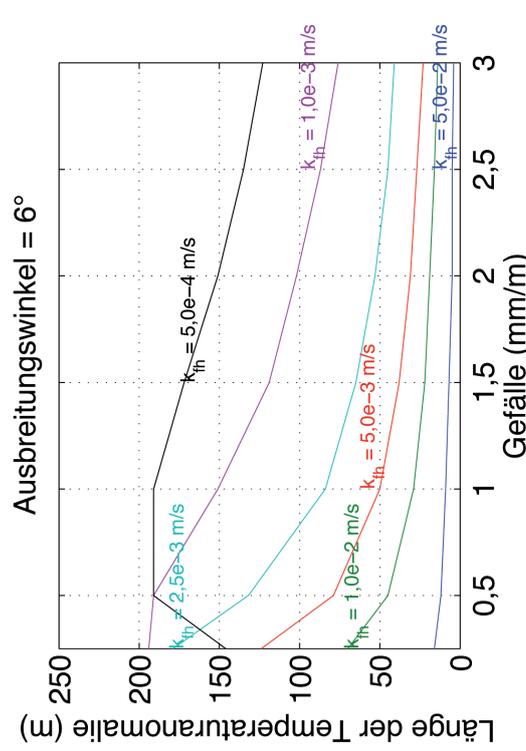




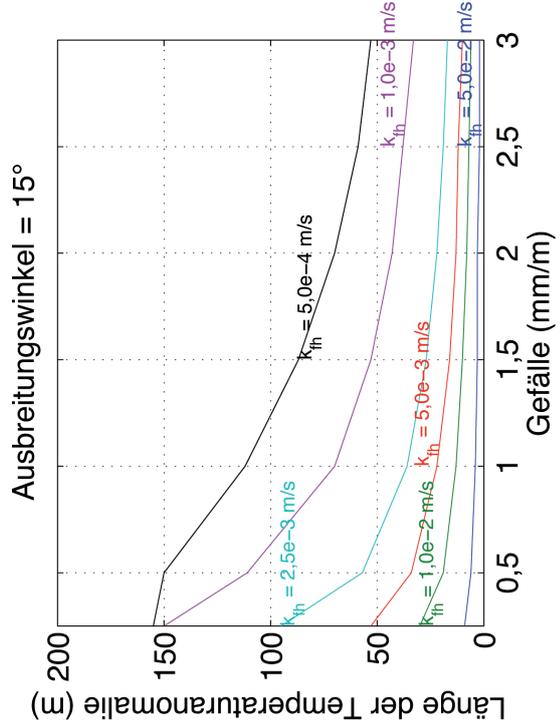
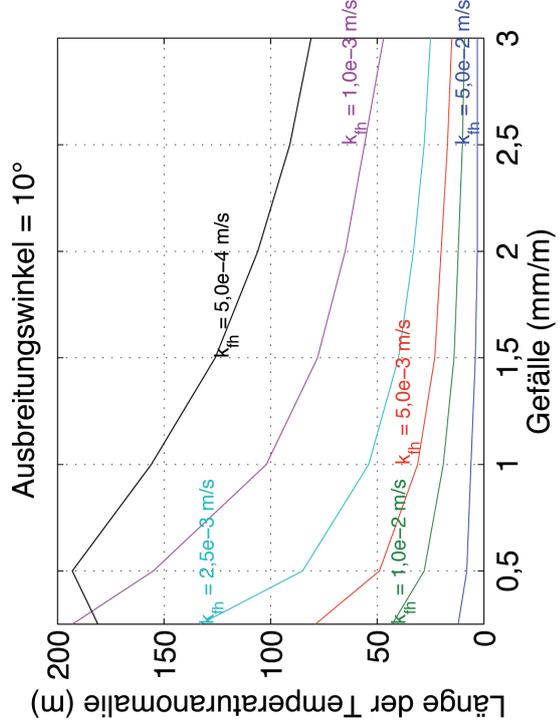
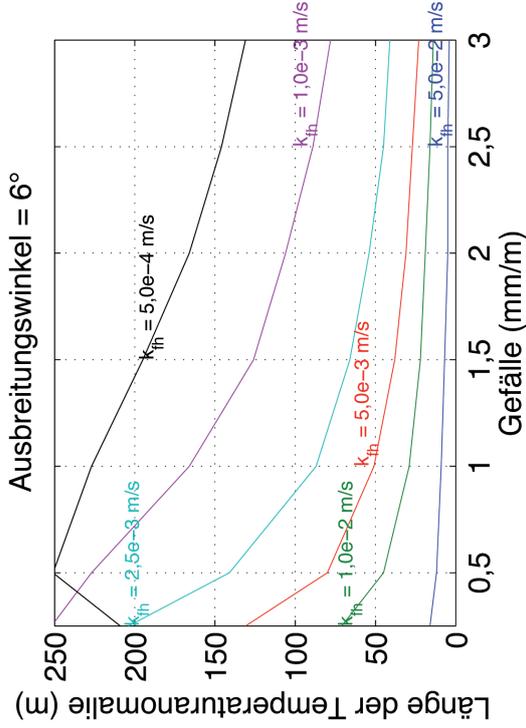
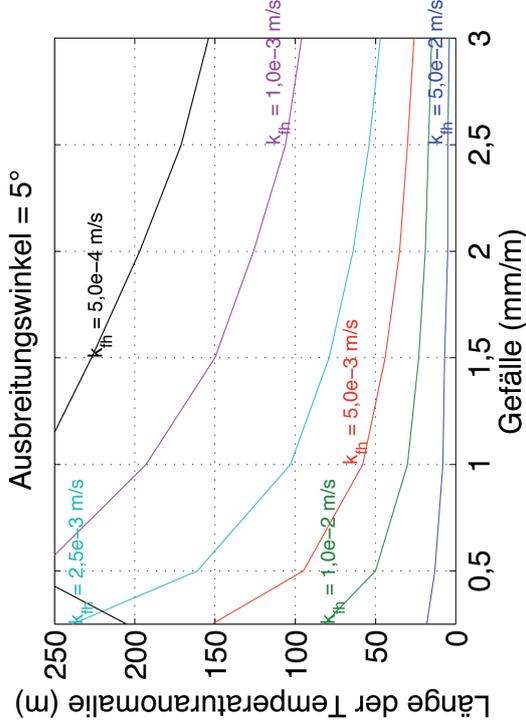
Entnahmemenge = 0,5 l/s; Temperaturspreize = 5 °K; Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit



Entnahmemenge = 0,5 l/s; Temperaturpreize = 5 °K; Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit



Entnahmemenge = 0,5 l/s; Temperaturspreize = 5 °K; Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit



Anhang 2

7.2 Bemessungstabellen

Beschreibung

Bei der thermischen Nutzung des Grundwassers wird im Abstrom der Versickerung die Temperatur verändert. Damit sind Auswirkungen auf den Betrieb von Trinkwasserbrunnen und andere thermische Grundwassernutzungen möglich. Die Abschätzung der Ausbreitung des thermisch veränderten Grundwasserbereichs ist damit eine wesentliche Grundlage für die Anlagenplanung. Für die Bewertung nach dem vom Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband herausgegebenen Regelblatt 207 wird das Verfahren nach Ingerle empfohlen. Die Festsetzung der Parameter der Formel erfordert – speziell beim Parameter maßgebliche Grundwassermächtigkeit – gehobene Fachkenntnisse.

Eine einfache Anwendung des Verfahrens nach Ingerle ermöglichen die hier beschriebenen Bemessungstabellen.

Anwendung

In der ersten Spalte sind unterschiedliche Wasserspiegelgefälle aufgetragen, in der zweiten Spalte unterschiedliche Werte der horizontalen Durchlässigkeit. In der dritten Zeile kann bei den Tabellen 4 bis 12 der Ausbreitungswinkel ausgewählt werden. Für die Mächtigkeit eines unvollkommenen Brunnens kann aus drei verschiedenen Ansätzen gewählt werden. Diese sind der Vertikalabstand-, der Filterrohr- und der Mittelwert-Ansatz (effektive Mächtigkeit). Im Kernbereich sind in den Tabellen 1 bis 3 wahlweise die minimale Breite der Temperaturanomalie (B_{\min}), die maximale Breite der Temperaturanomalie (B_{\max}), die gewählte Grundwassermächtigkeit (H) und die Länge der Temperaturanomalie (Länge) ablesbar. In den Tabellen 4 bis 12 ist nur die Länge der Temperaturanomalie ablesbar. Will man die Länge der Temperaturanomalie für ein Gefälle von 2 mm/m und einem k_{th} -Wert von $2,5e-3$ m/s ermitteln, erhält man für die folgenden Parameter

- Entnahmemenge: 0,75 l/s
- Temperaturspreize: 3 °K
- Flurabstand: 5 m
- Dispersionswinkel: 6°
- Ansatz für Mächtigkeit: Filterrohransatz (FR)

einen Wert von ca. 111 m (siehe Tabelle 2 und Tabelle 8).

Für die Benützung der Tabellen in der Praxis wird der Ansatz mit der Filterrohrlänge für die Abschätzung der maßgebenden Mächtigkeit empfohlen. Ebenso soll ein Dispersionswinkel von 6° verwendet werden. Als Betriebszustand soll normalerweise von einer maximalen Entnahme bzw. Rückgabemenge (nicht Jahresmittelwert) von 0,75 l/s ausgegangen werden. Ein Flurabstand von 5 m liegt im Mittel. In begründeten Ausnahmefällen kann von den Empfehlungen jedoch abgesehen werden.

Tabelle	Entnahmemenge (l/s)	Spreize (°K)	Ausbreitungswinkel (°)	Flurabstand (m)	Ansatz Mächtigkeit (keine Einheit)
1	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	6	3	Filterrohr
2	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	6	5	Filterrohr
3	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	6	10	Filterrohr
4	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	3	Vertikalabstand
5	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	5	Vertikalabstand
6	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	10	Vertikalabstand
7	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	3	Filterrohr
8	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	2	Filterrohr
9	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	10	Filterrohr
10	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	3	effektive Mächtigkeit
11	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	5	effektive Mächtigkeit
12	1; 0,75; 0,5	3; 3; 5	5, 6, 10, 15	10	effektive Mächtigkeit

Tabelle 1: Ausbreitungswinkel = 6°; Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{th}	Bmin	Bmax	H	Länge	Bmin	Bmax	H	Länge	Bmin	Bmax	H	Länge
mm/m	m/s	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0,25	5,0e-2	9	25	2	75	7	19	2	58	5	21	2	77
0,25	1,0e-2	46	68	2	104	34	54	2	95	23	49	2	125
0,25	5,0e-3	91	106	2	70	68	83	2	68	46	65	2	93
0,25	2,5e-3	183	191	2	39	137	145	2	39	91	103	2	55
0,25	1,0e-3	457	460	2	17	342	346	2	16	228	233	2	24
0,25	5,0e-4	913	915	2	9	685	687	2	9	457	459	2	12
0,5	5,0e-2	5	13	2	42	3	10	2	32	2	11	2	42
0,5	1,0e-2	23	47	2	114	17	37	2	96	11	37	2	124
0,5	5,0e-3	46	68	2	104	34	54	2	95	23	49	2	125
0,5	2,5e-3	91	106	2	70	68	83	2	68	46	65	2	93
0,5	1,0e-3	228	235	2	32	171	178	2	32	114	124	2	45
0,5	5,0e-4	457	460	2	17	342	346	2	16	228	233	2	24
1	5,0e-2	2	7	2	22	2	5	2	17	1	6	2	22
1	1,0e-2	11	30	2	87	9	23	2	69	6	25	2	90
1	5,0e-3	23	47	2	114	17	37	2	96	11	37	2	124
1	2,5e-3	46	68	2	104	34	54	2	95	23	49	2	125
1	1,0e-3	114	127	2	59	86	98	2	57	57	74	2	80
1	5,0e-4	228	235	2	32	171	178	2	32	114	124	2	45
1,5	5,0e-2	2	5	2	15	1	3	2	11	1	4	2	15
1,5	1,0e-2	8	21	2	65	6	16	2	50	4	18	2	66
1,5	5,0e-3	15	36	2	101	11	29	2	82	8	30	2	107
1,5	2,5e-3	30	55	2	115	23	44	2	100	15	43	2	130
1,5	1,0e-3	76	93	2	80	57	73	2	76	38	60	2	103
1,5	5,0e-4	152	162	2	46	114	124	2	45	76	90	2	64
2	5,0e-2	1	3	2	11	1	3	2	9	1	3	2	11
2	1,0e-2	6	16	2	51	4	12	2	39	3	14	2	52
2	5,0e-3	11	30	2	87	9	23	2	69	6	25	2	90
2	2,5e-3	23	47	2	114	17	37	2	96	11	37	2	124
2	1,0e-3	57	77	2	95	43	61	2	88	29	53	2	117
2	5,0e-4	114	127	2	59	86	98	2	57	57	74	2	80
2,5	5,0e-2	1	3	2	9	1	2	2	7	0	2	2	9
2,5	1,0e-2	5	13	2	42	3	10	2	32	2	11	2	42
2,5	5,0e-3	9	25	2	75	7	19	2	58	5	21	2	77
2,5	2,5e-3	18	41	2	108	14	32	2	89	9	34	2	116
2,5	1,0e-3	46	68	2	104	34	54	2	95	23	49	2	125
2,5	5,0e-4	91	106	2	70	68	83	2	68	46	65	2	93
3	5,0e-2	1	2	2	8	1	2	2	6	0	2	2	8
3	1,0e-2	4	11	2	36	3	9	2	27	2	9	2	36
3	5,0e-3	8	21	2	65	6	16	2	50	4	18	2	66
3	2,5e-3	15	36	2	101	11	29	2	82	8	30	2	107
3	1,0e-3	38	61	2	111	29	49	2	98	19	46	2	129
3	5,0e-4	76	93	2	80	57	73	2	76	38	60	2	103

Legende:

- Bmin (m) minimale Breite der Temperaturanomalie
- Bmax (m) maximale Breite der Temperaturanomalie
- H (m) Grundwassermächtigkeit
- Länge (m) Länge der Temperaturanomalie

Tabelle 2: Ausbreitungswinkel = 6°; Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Bmin	Bmax	H	Länge	Bmin	Bmax	H	Länge	Bmin	Bmax	H	Länge
mm/m	m/s	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0,25	5,0e-2	9	26	2	79	7	20	2	61	5	21	2	80
0,25	1,0e-2	46	75	2	140	34	60	2	124	23	57	2	162
0,25	5,0e-3	91	113	2	103	68	89	2	97	46	73	2	132
0,25	2,5e-3	183	195	2	60	137	149	2	59	91	109	2	83
0,25	1,0e-3	457	462	2	26	342	348	2	26	228	236	2	37
0,25	5,0e-4	913	916	2	13	685	688	2	13	457	461	2	19
0,5	5,0e-2	5	14	2	43	3	10	2	32	2	11	2	43
0,5	1,0e-2	23	51	2	135	17	40	2	111	11	42	2	145
0,5	5,0e-3	46	75	2	140	34	60	2	124	23	57	2	162
0,5	2,5e-3	91	113	2	103	68	89	2	97	46	73	2	132
0,5	1,0e-3	228	239	2	49	171	182	2	49	114	129	2	69
0,5	5,0e-4	457	462	2	26	342	348	2	26	228	236	2	37
1	5,0e-2	2	7	2	22	2	5	2	17	1	6	2	22
1	1,0e-2	11	31	2	94	9	24	2	73	6	26	2	96
1	5,0e-3	23	51	2	135	17	40	2	111	11	42	2	145
1	2,5e-3	46	75	2	140	34	60	2	124	23	57	2	162
1	1,0e-3	114	133	2	88	86	103	2	85	57	81	2	116
1	5,0e-4	228	239	2	49	171	182	2	49	114	129	2	69
1,5	5,0e-2	2	5	2	15	1	3	2	11	1	4	2	15
1,5	1,0e-2	8	22	2	68	6	17	2	52	4	18	2	69
1,5	5,0e-3	15	39	2	113	11	30	2	89	8	32	2	117
1,5	2,5e-3	30	61	2	143	23	48	2	122	15	48	2	158
1,5	1,0e-3	76	100	2	115	57	80	2	107	38	68	2	143
1,5	5,0e-4	152	167	2	70	114	128	2	68	76	96	2	96
2	5,0e-2	1	3	2	11	1	3	2	9	1	3	2	11
2	1,0e-2	6	17	2	53	4	13	2	40	3	14	2	53
2	5,0e-3	11	31	2	94	9	24	2	73	6	26	2	96
2	2,5e-3	23	51	2	135	17	40	2	111	11	42	2	145
2	1,0e-3	57	85	2	131	43	68	2	119	29	62	2	157
2	5,0e-4	114	133	2	88	86	103	2	85	57	81	2	116
2,5	5,0e-2	1	3	2	9	1	2	2	7	0	2	2	9
2,5	1,0e-2	5	14	2	43	3	10	2	32	2	11	2	43
2,5	5,0e-3	9	26	2	79	7	20	2	61	5	21	2	80
2,5	2,5e-3	18	44	2	124	14	35	2	100	9	36	2	130
2,5	1,0e-3	46	75	2	140	34	60	2	124	23	57	2	162
2,5	5,0e-4	91	113	2	103	68	89	2	97	46	73	2	132
3	5,0e-2	1	2	2	8	1	2	2	6	0	2	2	8
3	1,0e-2	4	11	2	36	3	9	2	27	2	9	2	36
3	5,0e-3	8	22	2	68	6	17	2	52	4	18	2	69
3	2,5e-3	15	39	2	113	11	30	2	89	8	32	2	117
3	1,0e-3	38	68	2	144	29	55	2	125	19	53	2	162
3	5,0e-4	76	100	2	115	57	80	2	107	38	68	2	143

Legende:

- Bmin (m) minimale Breite der Temperaturanomalie
- Bmax (m) maximale Breite der Temperaturanomalie
- H (m) Grundwassermächtigkeit
- Länge (m) Länge der Temperaturanomalie

Tabelle 3: Ausbreitungswinkel = 6°; Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{th}	Bmin	Bmax	H	Länge	Bmin	Bmax	H	Länge	Bmin	Bmax	H	Länge
mm/m	m/s	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0,25	5,0e-2	9	27	2	83	7	20	2	63	5	22	2	83
0,25	1,0e-2	46	87	2	199	34	70	2	170	23	69	2	221
0,25	5,0e-3	91	127	2	170	68	101	2	156	46	89	2	208
0,25	2,5e-3	183	206	2	109	137	159	2	105	91	122	2	146
0,25	1,0e-3	457	467	2	48	342	353	2	48	228	243	2	69
0,25	5,0e-4	913	918	2	25	685	690	2	25	457	464	2	36
0,5	5,0e-2	5	14	2	43	3	10	2	33	2	11	2	43
0,5	1,0e-2	23	57	2	163	17	44	2	130	11	47	2	170
0,5	5,0e-3	46	87	2	199	34	70	2	170	23	69	2	221
0,5	2,5e-3	91	127	2	170	68	101	2	156	46	89	2	208
0,5	1,0e-3	228	247	2	90	171	190	2	88	114	140	2	124
0,5	5,0e-4	457	467	2	48	342	353	2	48	228	243	2	69
1	5,0e-2	2	7	2	22	2	5	2	17	1	6	2	22
1	1,0e-2	11	32	2	100	9	25	2	77	6	27	2	102
1	5,0e-3	23	57	2	163	17	44	2	130	11	47	2	170
1	2,5e-3	46	87	2	199	34	70	2	170	23	69	2	221
1	1,0e-3	114	146	2	151	86	115	2	142	57	97	2	191
1	5,0e-4	228	247	2	90	171	190	2	88	114	140	2	124
1,5	5,0e-2	2	5	2	15	1	3	2	11	1	4	2	15
1,5	1,0e-2	8	22	2	70	6	17	2	53	4	19	2	71
1,5	5,0e-3	15	42	2	126	11	32	2	98	8	35	2	129
1,5	2,5e-3	30	69	2	185	23	55	2	151	15	57	2	197
1,5	1,0e-3	76	115	2	183	57	92	2	166	38	84	2	218
1,5	5,0e-4	152	178	2	125	114	139	2	120	76	111	2	164
2	5,0e-2	1	3	2	11	1	3	2	9	1	3	2	11
2	1,0e-2	6	17	2	54	4	13	2	41	3	14	2	54
2	5,0e-3	11	32	2	100	9	25	2	77	6	27	2	102
2	2,5e-3	23	57	2	163	17	44	2	130	11	47	2	170
2	1,0e-3	57	98	2	196	43	79	2	172	29	76	2	224
2	5,0e-4	114	146	2	151	86	115	2	142	57	97	2	191
2,5	5,0e-2	1	3	2	9	1	2	2	7	0	2	2	9
2,5	1,0e-2	5	14	2	43	3	10	2	33	2	11	2	43
2,5	5,0e-3	9	27	2	83	7	20	2	63	5	22	2	83
2,5	2,5e-3	18	48	2	143	14	37	2	112	9	40	2	147
2,5	1,0e-3	46	87	2	199	34	70	2	170	23	69	2	221
2,5	5,0e-4	91	127	2	170	68	101	2	156	46	89	2	208
3	5,0e-2	1	2	2	8	1	2	2	6	0	2	2	8
3	1,0e-2	4	11	2	36	3	9	2	27	2	9	2	36
3	5,0e-3	8	22	2	70	6	17	2	53	4	19	2	71
3	2,5e-3	15	42	2	126	11	32	2	98	8	35	2	129
3	1,0e-3	38	79	2	195	29	63	2	164	19	64	2	213
3	5,0e-4	76	115	2	183	57	92	2	166	38	84	2	218

Legende:

- Bmin (m) minimale Breite der Temperaturanomalie
- Bmax (m) maximale Breite der Temperaturanomalie
- H (m) Grundwassermächtigkeit
- Länge (m) Länge der Temperaturanomalie

Tabelle 4: Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = Vertikalabstand

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	11	10	7	5	9	9	6	5	10	9	7	5
0,25	1,0e-2	40	39	22	17	37	33	20	13	45	40	24	17
0,25	5,0e-3	83	65	39	30	68	57	35	23	88	76	44	30
0,25	2,5e-3	140	117	74	52	116	99	62	42	156	129	80	55
0,25	1,0e-3	207	185	125	89	171	155	109	73	223	201	144	104
0,25	5,0e-4	187	202	157	123	152	155	125	101	201	202	163	132
0,5	5,0e-2	7	8	6	4	7	7	5	3	7	7	5	4
0,5	1,0e-2	29	24	16	11	24	21	13	10	28	25	16	11
0,5	5,0e-3	49	43	26	17	43	36	22	15	53	45	27	19
0,5	2,5e-3	86	75	42	28	71	62	38	25	95	82	48	32
0,5	1,0e-3	161	140	90	62	134	115	74	51	179	152	97	67
0,5	5,0e-4	205	185	133	98	172	155	110	73	222	201	143	105
1	5,0e-2	5	6	4	3	4	5	3	2	5	5	4	3
1	1,0e-2	18	17	11	8	15	14	9	6	17	17	11	8
1	5,0e-3	33	27	17	11	27	24	14	10	33	29	18	13
1	2,5e-3	54	43	27	18	45	38	23	16	59	50	31	20
1	1,0e-3	107	79	52	36	89	75	43	30	117	99	59	40
1	5,0e-4	161	140	90	62	134	115	74	51	181	152	99	68
1,5	5,0e-2	4	5	3	2	4	4	2	2	4	4	3	2
1,5	1,0e-2	14	14	9	6	12	11	7	5	13	13	9	6
1,5	5,0e-3	25	21	14	9	21	18	11	8	25	22	14	9
1,5	2,5e-3	41	34	21	15	35	29	18	12	45	38	23	16
1,5	1,0e-3	79	66	39	26	66	55	34	23	88	73	45	30
1,5	5,0e-4	130	107	67	46	107	83	55	37	145	122	75	51
2	5,0e-2	4	4	2	2	3	3	2	2	3	4	2	2
2	1,0e-2	12	11	7	5	10	10	6	4	11	11	7	5
2	5,0e-3	21	19	11	8	17	15	9	7	21	19	12	8
2	2,5e-3	34	29	18	12	28	25	15	10	37	31	19	13
2	1,0e-3	63	53	32	22	53	44	28	19	73	61	37	25
2	5,0e-4	107	85	49	33	89	75	43	29	120	99	62	40
2,5	5,0e-2	3	3	2	2	3	3	2	1	3	3	2	2
2,5	1,0e-2	10	10	6	4	9	9	5	4	10	10	6	4
2,5	5,0e-3	18	16	10	7	15	13	8	6	18	16	10	7
2,5	2,5e-3	30	25	15	10	25	21	13	9	31	26	16	11
2,5	1,0e-3	54	45	29	19	45	38	24	16	61	51	32	22
2,5	5,0e-4	89	78	42	28	77	65	38	25	102	86	53	34
3	5,0e-2	3	3	2	1	3	2	2	1	3	3	2	1
3	1,0e-2	10	9	6	4	8	7	5	3	9	9	6	4
3	5,0e-3	16	15	9	6	13	12	7	5	15	14	9	6
3	2,5e-3	26	23	14	9	22	18	12	8	28	24	15	10
3	1,0e-3	50	40	24	16	40	34	21	15	55	45	27	19
3	5,0e-4	79	64	39	26	66	58	35	23	91	77	47	30

Tabelle 5: Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = Vertikalabstand

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	11	10	7	5	9	9	6	5	10	9	7	5
0,25	1,0e-2	40	40	22	17	37	33	20	13	45	40	24	17
0,25	5,0e-3	84	65	40	30	69	58	35	23	89	76	45	30
0,25	2,5e-3	144	120	75	52	119	101	63	43	161	132	81	56
0,25	1,0e-3	219	199	129	91	187	166	115	74	243	216	153	108
0,25	5,0e-4	212	221	169	131	176	174	138	110	231	227	180	143
0,5	5,0e-2	7	8	6	4	7	7	5	3	7	7	5	4
0,5	1,0e-2	29	25	16	11	24	21	13	10	28	25	16	11
0,5	5,0e-3	49	43	26	17	43	36	22	15	54	46	28	19
0,5	2,5e-3	87	76	43	28	72	63	38	26	96	83	49	32
0,5	1,0e-3	168	144	92	63	139	119	76	52	188	158	99	68
0,5	5,0e-4	223	199	140	102	187	167	117	74	243	217	150	109
1	5,0e-2	5	6	4	3	4	5	3	2	5	5	4	3
1	1,0e-2	18	17	11	8	15	14	9	6	17	17	11	8
1	5,0e-3	33	27	17	11	27	24	14	10	33	29	18	13
1	2,5e-3	54	43	27	18	46	38	23	16	60	50	31	20
1	1,0e-3	109	80	53	37	91	77	43	30	120	101	60	40
1	5,0e-4	168	144	92	63	139	119	76	52	190	158	101	69
1,5	5,0e-2	4	5	3	2	4	4	2	2	4	4	3	2
1,5	1,0e-2	14	14	9	6	12	11	7	5	13	13	9	6
1,5	5,0e-3	25	21	14	9	21	19	11	8	25	22	14	9
1,5	2,5e-3	41	34	21	15	35	29	18	12	45	38	23	16
1,5	1,0e-3	80	67	39	26	66	56	34	23	89	74	45	30
1,5	5,0e-4	133	110	68	46	110	84	56	38	150	125	76	51
2	5,0e-2	4	4	2	2	3	3	2	2	3	4	2	2
2	1,0e-2	12	11	7	5	10	10	6	4	11	11	7	5
2	5,0e-3	21	19	11	8	17	15	9	7	21	19	12	8
2	2,5e-3	34	29	18	12	28	25	15	10	37	31	19	13
2	1,0e-3	64	54	32	22	53	45	29	19	73	62	37	25
2	5,0e-4	109	86	49	33	91	77	43	29	123	101	62	40
2,5	5,0e-2	3	3	2	2	3	3	2	1	3	3	2	2
2,5	1,0e-2	10	10	6	4	9	9	5	4	10	10	6	4
2,5	5,0e-3	18	16	10	7	15	14	8	6	18	16	10	7
2,5	2,5e-3	30	25	15	10	25	21	13	9	31	26	16	11
2,5	1,0e-3	54	45	29	19	46	38	24	16	62	52	32	22
2,5	5,0e-4	90	79	43	28	78	66	38	26	103	87	53	34
3	5,0e-2	3	3	2	1	3	2	2	1	3	3	2	1
3	1,0e-2	10	9	6	4	8	7	5	3	9	9	6	4
3	5,0e-3	16	15	9	6	13	12	7	5	15	14	9	6
3	2,5e-3	27	23	14	9	22	19	12	8	28	25	15	10
3	1,0e-3	50	40	24	16	41	34	21	15	56	45	27	19
3	5,0e-4	80	64	39	26	66	58	36	23	92	77	47	30

Tabelle 6: Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = Vertikalabstand

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	11	10	7	5	9	9	6	5	10	9	7	5
0,25	1,0e-2	40	40	22	17	37	33	20	13	46	40	24	17
0,25	5,0e-3	85	66	40	30	70	58	35	24	90	77	45	30
0,25	2,5e-3	151	124	76	53	124	105	65	43	169	137	83	57
0,25	1,0e-3	239	224	137	95	216	185	124	77	280	242	168	114
0,25	5,0e-4	266	260	192	145	224	214	163	127	293	278	212	164
0,5	5,0e-2	7	8	6	4	7	7	5	3	7	7	5	4
0,5	1,0e-2	29	25	16	11	24	21	13	10	28	26	16	11
0,5	5,0e-3	50	44	26	17	43	36	22	15	54	46	28	19
0,5	2,5e-3	88	77	43	29	73	64	39	26	98	85	49	33
0,5	1,0e-3	178	152	96	65	147	125	79	53	202	167	103	70
0,5	5,0e-4	254	224	153	109	213	188	127	77	281	244	164	116
1	5,0e-2	5	6	4	3	4	5	3	2	5	5	4	3
1	1,0e-2	18	17	11	8	15	14	9	6	17	17	11	8
1	5,0e-3	33	28	17	11	27	24	14	10	33	29	18	13
1	2,5e-3	55	44	28	18	46	38	23	16	60	50	31	20
1	1,0e-3	112	81	53	37	93	78	44	30	123	104	60	40
1	5,0e-4	178	152	96	65	147	125	79	53	205	167	105	71
1,5	5,0e-2	4	5	3	2	4	4	2	2	4	4	3	2
1,5	1,0e-2	14	14	9	6	12	11	7	5	13	13	9	6
1,5	5,0e-3	25	21	14	9	21	19	11	8	25	22	14	9
1,5	2,5e-3	41	34	21	15	35	29	18	12	46	38	23	16
1,5	1,0e-3	81	68	39	26	67	56	34	23	91	75	45	30
1,5	5,0e-4	138	113	69	46	115	86	57	38	157	129	78	52
2	5,0e-2	4	4	2	2	3	3	2	2	3	4	2	2
2	1,0e-2	12	11	7	5	10	10	6	4	11	11	7	5
2	5,0e-3	21	19	11	8	17	15	9	7	21	19	12	8
2	2,5e-3	34	29	18	12	28	25	15	10	38	31	19	13
2	1,0e-3	65	54	33	22	54	45	29	19	74	62	38	25
2	5,0e-4	112	87	49	33	93	78	44	29	127	104	63	40
2,5	5,0e-2	3	3	2	2	3	3	2	1	3	3	2	2
2,5	1,0e-2	10	10	6	4	9	9	5	4	10	10	6	4
2,5	5,0e-3	18	16	10	7	15	14	8	6	18	16	10	7
2,5	2,5e-3	30	25	15	10	25	21	13	9	31	27	16	11
2,5	1,0e-3	55	46	29	19	46	38	25	16	62	52	33	22
2,5	5,0e-4	92	80	43	29	80	67	39	26	106	89	54	34
3	5,0e-2	3	3	2	1	3	2	2	1	3	3	2	1
3	1,0e-2	10	9	6	4	8	7	5	3	9	9	6	4
3	5,0e-3	16	15	9	6	13	12	7	5	15	14	9	6
3	2,5e-3	27	23	14	9	22	19	12	8	28	25	15	10
3	1,0e-3	50	40	24	16	41	34	21	15	56	45	27	19
3	5,0e-4	81	65	39	26	67	59	36	23	94	79	48	30

Tabelle 7: Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	87	75	47	32	68	58	37	25	90	77	48	33
0,25	1,0e-2	110	104	87	72	101	95	77	62	134	125	100	81
0,25	5,0e-3	72	70	65	59	69	68	61	55	96	93	83	73
0,25	2,5e-3	40	39	38	37	39	39	38	36	56	55	53	50
0,25	1,0e-3	17	17	16	16	17	16	16	16	24	24	24	23
0,25	5,0e-4	9	9	9	9	9	9	9	9	12	12	12	12
0,5	5,0e-2	50	42	26	17	38	32	20	13	51	42	26	17
0,5	1,0e-2	126	114	83	62	107	96	68	50	139	124	88	65
0,5	5,0e-3	110	104	87	72	101	95	77	62	134	125	100	81
0,5	2,5e-3	72	70	65	59	69	68	61	55	96	93	83	73
0,5	1,0e-3	32	32	31	31	32	32	31	30	46	45	44	43
0,5	5,0e-4	17	17	16	16	17	16	16	16	24	24	24	23
1	5,0e-2	26	22	13	9	20	17	10	7	26	22	13	9
1	1,0e-2	100	87	56	39	80	69	44	30	105	90	58	40
1	5,0e-3	126	114	83	62	107	96	68	50	139	124	88	65
1	2,5e-3	110	104	87	72	101	95	77	62	134	125	100	81
1	1,0e-3	60	59	56	52	59	57	53	49	82	80	73	67
1	5,0e-4	32	32	31	31	32	32	31	30	46	45	44	43
1,5	5,0e-2	18	15	9	6	13	11	7	5	18	15	9	6
1,5	1,0e-2	77	65	41	28	59	50	31	21	78	66	41	28
1,5	5,0e-3	115	101	68	49	94	82	54	38	122	107	71	50
1,5	2,5e-3	124	115	88	69	109	100	75	57	142	130	97	74
1,5	1,0e-3	82	80	72	65	78	76	67	59	107	103	89	78
1,5	5,0e-4	47	46	45	43	46	45	43	41	65	64	61	57
2	5,0e-2	14	11	7	5	10	9	5	4	14	11	7	5
2	1,0e-2	61	51	32	21	47	39	24	16	62	52	32	21
2	5,0e-3	100	87	56	39	80	69	44	30	105	90	58	40
2	2,5e-3	126	114	83	62	107	96	68	50	139	124	88	65
2	1,0e-3	99	95	82	70	92	88	74	62	124	117	97	81
2	5,0e-4	60	59	56	52	59	57	53	49	82	80	73	67
2,5	5,0e-2	11	9	6	4	8	7	4	3	11	9	6	4
2,5	1,0e-2	50	42	26	17	38	32	20	13	51	42	26	17
2,5	5,0e-3	87	75	47	32	68	58	37	25	90	77	48	33
2,5	2,5e-3	121	108	75	55	101	89	61	43	131	116	79	57
2,5	1,0e-3	110	104	87	72	101	95	77	62	134	125	100	81
2,5	5,0e-4	72	70	65	59	69	68	61	55	96	93	83	73
3	5,0e-2	9	8	5	3	7	6	4	3	9	8	5	3
3	1,0e-2	42	36	22	15	32	27	16	11	43	36	22	15
3	5,0e-3	77	65	41	28	59	50	31	21	78	66	41	28
3	2,5e-3	115	101	68	49	94	82	54	38	122	107	71	50
3	1,0e-3	118	111	89	72	106	98	77	61	139	129	100	79
3	5,0e-4	82	80	72	65	78	76	67	59	107	103	89	78

Tabelle 8: Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	93	79	49	33	72	61	38	25	95	80	50	33
0,25	1,0e-2	150	140	111	89	134	124	96	75	176	162	125	98
0,25	5,0e-3	106	103	92	82	101	97	85	75	138	132	114	98
0,25	2,5e-3	61	60	58	55	60	59	56	53	85	83	78	73
0,25	1,0e-3	26	26	25	25	26	26	25	25	37	37	36	36
0,25	5,0e-4	13	13	13	13	13	13	13	13	19	19	19	19
0,5	5,0e-2	51	43	26	17	39	32	20	13	51	43	26	17
0,5	1,0e-2	152	135	94	68	126	111	76	54	164	145	99	71
0,5	5,0e-3	150	140	111	89	134	124	96	75	176	162	125	98
0,5	2,5e-3	106	103	92	82	101	97	85	75	138	132	114	98
0,5	1,0e-3	50	49	48	47	49	49	47	45	70	69	66	63
0,5	5,0e-4	26	26	25	25	26	26	25	25	37	37	36	36
1	5,0e-2	26	22	13	9	20	17	10	7	26	22	13	9
1	1,0e-2	109	94	59	40	85	73	46	31	112	96	60	41
1	5,0e-3	152	135	94	68	126	111	76	54	164	145	99	71
1	2,5e-3	150	140	111	89	134	124	96	75	176	162	125	98
1	1,0e-3	90	88	81	74	87	85	77	69	120	116	104	92
1	5,0e-4	50	49	48	47	49	49	47	45	70	69	66	63
1,5	5,0e-2	18	15	9	6	14	11	7	5	18	15	9	6
1,5	1,0e-2	80	68	42	28	62	52	32	21	81	69	42	28
1,5	5,0e-3	130	113	74	51	104	89	58	40	136	117	76	52
1,5	2,5e-3	158	143	105	79	135	122	87	64	176	158	113	84
1,5	1,0e-3	119	115	100	87	112	107	91	77	151	143	120	101
1,5	5,0e-4	71	70	67	63	70	68	64	60	98	96	88	81
2	5,0e-2	14	11	7	5	10	9	5	4	14	11	7	5
2	1,0e-2	63	53	32	21	48	40	24	16	63	53	32	22
2	5,0e-3	109	94	59	40	85	73	46	31	112	96	60	41
2	2,5e-3	152	135	94	68	126	111	76	54	164	145	99	71
2	1,0e-3	138	131	109	90	127	119	96	78	168	157	125	101
2	5,0e-4	90	88	81	74	87	85	77	69	120	116	104	92
2,5	5,0e-2	11	9	6	4	8	7	4	3	11	9	6	4
2,5	1,0e-2	51	43	26	17	39	32	20	13	51	43	26	17
2,5	5,0e-3	93	79	49	33	72	61	38	25	95	80	50	33
2,5	2,5e-3	141	124	83	59	115	100	66	46	150	130	86	60
2,5	1,0e-3	150	140	111	89	134	124	96	75	176	162	125	98
2,5	5,0e-4	106	103	92	82	101	97	85	75	138	132	114	98
3	5,0e-2	9	8	5	3	7	6	4	3	9	8	5	3
3	1,0e-2	43	36	22	15	33	27	17	11	43	36	22	15
3	5,0e-3	80	68	42	28	62	52	32	21	81	69	42	28
3	2,5e-3	130	113	74	51	104	89	58	40	136	117	76	52
3	1,0e-3	156	144	110	86	137	125	93	71	178	162	121	92
3	5,0e-4	119	115	100	87	112	107	91	77	151	143	120	101

Tabelle 9: Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = Filterrohr

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	98	83	51	34	75	63	38	26	99	83	51	34
0,25	1,0e-2	218	199	149	113	188	170	124	92	245	221	161	120
0,25	5,0e-3	178	170	145	123	165	156	130	108	221	208	170	141
0,25	2,5e-3	111	109	102	95	107	105	97	89	150	146	133	120
0,25	1,0e-3	48	48	47	47	48	48	47	46	69	69	67	65
0,25	5,0e-4	25	25	25	24	25	25	24	24	36	36	35	35
0,5	5,0e-2	52	43	26	17	39	33	20	13	52	43	26	17
0,5	1,0e-2	187	163	108	75	150	130	84	58	196	170	111	77
0,5	5,0e-3	218	199	149	113	188	170	124	92	245	221	161	120
0,5	2,5e-3	178	170	145	123	165	156	130	108	221	208	170	141
0,5	1,0e-3	91	90	86	82	90	88	83	78	127	124	116	107
0,5	5,0e-4	48	48	47	47	48	48	47	46	69	69	67	65
1	5,0e-2	26	22	13	9	20	17	10	7	26	22	13	9
1	1,0e-2	118	100	62	42	91	77	47	32	120	102	62	42
1	5,0e-3	187	163	108	75	150	130	84	58	196	170	111	77
1	2,5e-3	218	199	149	113	188	170	124	92	245	221	161	120
1	1,0e-3	156	151	134	117	148	142	122	105	200	191	162	138
1	5,0e-4	91	90	86	82	90	88	83	78	127	124	116	107
1,5	5,0e-2	18	15	9	6	14	11	7	5	18	15	9	6
1,5	1,0e-2	83	70	43	28	63	53	32	22	84	71	43	29
1,5	5,0e-3	147	126	79	54	115	98	61	41	151	129	80	54
1,5	2,5e-3	208	185	128	92	172	151	102	73	224	197	134	95
1,5	1,0e-3	194	183	151	125	177	166	133	107	234	218	173	139
1,5	5,0e-4	128	125	115	105	123	120	108	97	170	164	145	128
2	5,0e-2	14	11	7	5	10	9	5	4	14	11	7	5
2	1,0e-2	64	54	32	22	48	41	25	16	64	54	33	22
2	5,0e-3	118	100	62	42	91	77	47	32	120	102	62	42
2	2,5e-3	187	163	108	75	150	130	84	58	196	170	111	77
2	1,0e-3	212	196	153	121	188	172	131	101	245	224	170	131
2	5,0e-4	156	151	134	117	148	142	122	105	200	191	162	138
2,5	5,0e-2	11	9	6	4	8	7	4	3	11	9	6	4
2,5	1,0e-2	52	43	26	17	39	33	20	13	52	43	26	17
2,5	5,0e-3	98	83	51	34	75	63	38	26	99	83	51	34
2,5	2,5e-3	166	143	92	63	131	112	71	48	172	147	94	64
2,5	1,0e-3	218	199	149	113	188	170	124	92	245	221	161	120
2,5	5,0e-4	178	170	145	123	165	156	130	108	221	208	170	141
3	5,0e-2	9	8	5	3	7	6	4	3	9	8	5	3
3	1,0e-2	43	36	22	15	33	27	17	11	44	36	22	15
3	5,0e-3	83	70	43	28	63	53	32	22	84	71	43	29
3	2,5e-3	147	126	79	54	115	98	61	41	151	129	80	54
3	1,0e-3	217	195	141	105	184	164	115	84	239	213	150	109
3	5,0e-4	194	183	151	125	177	166	133	107	234	218	173	139

Tabelle 10: Flurabstand = 3 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	19	18	12	9	16	15	10	8	18	16	12	9
0,25	1,0e-2	71	68	39	29	64	56	34	23	79	69	42	29
0,25	5,0e-3	128	105	67	50	106	91	58	40	137	119	74	51
0,25	2,5e-3	167	149	105	78	140	125	88	64	182	163	114	84
0,25	1,0e-3	177	140	130	103	123	124	102	87	166	163	131	110
0,25	5,0e-4	94	124	110	98	78	85	78	71	108	116	107	96
0,5	5,0e-2	12	13	9	7	11	11	8	5	13	12	8	6
0,5	1,0e-2	51	43	27	19	41	36	23	16	49	44	27	19
0,5	5,0e-3	84	73	45	30	72	61	38	25	90	77	48	33
0,5	2,5e-3	130	115	71	49	108	95	62	43	142	125	79	54
0,5	1,0e-3	170	155	114	87	144	131	96	72	185	170	125	94
0,5	5,0e-4	147	140	117	98	128	121	101	87	163	161	133	109
1	5,0e-2	8	9	6	4	7	7	5	3	8	9	6	4
1	1,0e-2	31	29	19	13	26	23	15	10	30	29	19	13
1	5,0e-3	56	47	29	19	46	40	24	16	56	50	30	21
1	2,5e-3	90	73	47	32	75	63	39	28	97	82	52	35
1	1,0e-3	148	122	83	60	123	108	69	49	161	141	92	65
1	5,0e-4	170	155	114	87	144	131	96	72	184	170	125	94
1,5	5,0e-2	7	7	4	3	5	5	4	3	7	7	4	3
1,5	1,0e-2	24	23	15	10	20	18	12	8	23	22	14	10
1,5	5,0e-3	43	36	23	16	35	31	19	13	43	38	23	16
1,5	2,5e-3	69	58	36	25	58	49	30	20	76	64	39	27
1,5	1,0e-3	122	105	65	44	101	87	56	38	134	114	73	50
1,5	5,0e-4	161	142	99	71	135	117	82	59	176	156	108	78
2	5,0e-2	5	5	4	3	5	4	3	2	5	5	3	3
2	1,0e-2	20	18	12	8	16	15	10	6	19	19	12	8
2	5,0e-3	35	31	19	13	28	25	15	11	35	31	20	13
2	2,5e-3	58	50	30	20	47	41	26	17	63	53	32	21
2	1,0e-3	103	88	55	37	85	73	48	32	115	98	62	42
2	5,0e-4	148	126	79	55	123	108	69	48	162	141	94	65
2,5	5,0e-2	5	5	3	2	4	4	2	2	5	5	3	2
2,5	1,0e-2	17	16	10	7	14	13	8	6	17	16	10	7
2,5	5,0e-3	30	27	16	11	24	22	13	9	30	27	17	12
2,5	2,5e-3	51	43	26	17	42	35	22	15	53	45	28	18
2,5	1,0e-3	90	76	49	33	75	63	41	28	100	84	54	37
2,5	5,0e-4	133	117	71	49	113	98	62	43	147	128	84	56
3	5,0e-2	4	4	3	2	4	3	2	2	4	4	3	2
3	1,0e-2	15	14	9	6	12	11	7	5	15	14	9	6
3	5,0e-3	26	24	15	10	21	20	12	8	26	23	15	10
3	2,5e-3	45	38	23	16	37	31	20	13	47	41	25	17
3	1,0e-3	82	68	42	28	67	57	35	25	91	75	46	32
3	5,0e-4	122	102	65	44	101	89	58	38	136	117	76	50

Tabelle 11: Flurabstand = 5 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	19	18	12	9	16	15	10	8	18	16	12	9
0,25	1,0e-2	72	69	39	29	65	57	35	23	80	70	43	30
0,25	5,0e-3	134	109	69	51	111	95	60	41	143	124	76	52
0,25	2,5e-3	186	163	112	82	156	138	95	68	204	179	121	88
0,25	1,0e-3	204	167	145	113	150	148	119	96	200	194	153	125
0,25	5,0e-4	119	149	131	114	100	107	97	86	138	146	131	116
0,5	5,0e-2	12	13	9	7	11	11	8	5	13	12	8	6
0,5	1,0e-2	51	43	27	19	41	36	23	16	49	45	27	19
0,5	5,0e-3	85	75	46	31	73	62	38	25	92	79	48	34
0,5	2,5e-3	137	121	73	50	114	100	64	44	150	132	81	56
0,5	1,0e-3	193	174	126	93	164	147	105	77	213	191	136	101
0,5	5,0e-4	178	167	137	112	155	145	118	96	198	191	154	124
1	5,0e-2	8	9	6	4	7	7	5	3	8	9	6	4
1	1,0e-2	31	29	19	13	26	24	15	10	30	29	19	13
1	5,0e-3	57	48	29	19	46	40	24	16	57	50	31	22
1	2,5e-3	92	75	48	32	77	65	40	28	100	84	53	35
1	1,0e-3	160	128	86	62	133	116	71	51	174	151	96	67
1	5,0e-4	193	174	126	93	164	147	105	77	212	191	137	102
1,5	5,0e-2	7	7	4	3	5	5	4	3	7	7	4	3
1,5	1,0e-2	24	23	15	10	20	19	12	8	23	22	14	10
1,5	5,0e-3	43	36	23	16	35	31	19	13	43	38	23	16
1,5	2,5e-3	70	59	36	25	59	50	30	20	77	65	39	27
1,5	1,0e-3	128	109	67	45	106	91	57	39	141	119	75	51
1,5	5,0e-4	178	155	105	74	149	125	87	61	196	172	115	82
2	5,0e-2	5	5	4	3	5	4	3	2	5	5	3	3
2	1,0e-2	20	19	12	8	16	15	10	6	19	19	12	8
2	5,0e-3	36	31	19	13	28	25	15	11	35	31	20	13
2	2,5e-3	59	50	30	20	48	42	26	17	64	53	32	22
2	1,0e-3	106	90	56	38	88	75	49	33	120	102	63	43
2	5,0e-4	160	133	82	56	133	116	71	49	176	151	99	67
2,5	5,0e-2	5	5	3	2	4	4	2	2	5	5	3	2
2,5	1,0e-2	17	16	10	7	14	13	8	6	17	16	10	7
2,5	5,0e-3	30	27	16	11	24	22	13	9	30	27	17	12
2,5	2,5e-3	51	43	26	17	42	35	22	15	53	45	28	19
2,5	1,0e-3	92	78	50	34	77	65	42	28	103	87	55	37
2,5	5,0e-4	141	124	73	50	120	103	64	44	157	135	87	58
3	5,0e-2	4	4	3	2	4	3	2	2	4	4	3	2
3	1,0e-2	15	14	9	6	12	11	7	5	15	14	9	6
3	5,0e-3	26	24	15	10	21	20	12	8	26	23	15	10
3	2,5e-3	45	38	23	16	37	31	20	13	47	41	25	17
3	1,0e-3	84	69	42	28	69	58	35	25	93	76	47	33
3	5,0e-4	128	106	67	45	106	94	59	39	144	123	78	51

Tabelle 12: Flurabstand = 10 m; Ansatz Mächtigkeit = effektive Mächtigkeit

Länge der Temperatur-anomalie (m)		Entnahmemenge = 1,00 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,75 l/s Temperaturspreize = 3 °K				Entnahmemenge = 0,50 l/s Temperaturspreize = 5 °K			
Gefälle	k_{fh}	Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel				Ausbreitungswinkel			
mm/m	m/s	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C	5°	6°	10°	15 °C
0,25	5,0e-2	19	18	12	9	16	15	10	8	18	16	12	9
0,25	1,0e-2	73	71	40	30	66	58	35	23	82	71	43	30
0,25	5,0e-3	143	114	71	53	117	100	62	42	152	131	79	53
0,25	2,5e-3	216	185	123	88	180	157	104	72	239	204	133	95
0,25	1,0e-3	256	222	172	130	205	194	149	110	270	252	193	150
0,25	5,0e-4	176	205	173	146	151	156	136	118	205	209	181	155
0,5	5,0e-2	12	13	9	7	11	11	8	5	13	12	8	6
0,5	1,0e-2	52	43	28	19	42	36	23	16	50	45	28	19
0,5	5,0e-3	88	76	46	31	75	63	39	26	95	80	49	34
0,5	2,5e-3	147	129	75	51	121	107	66	45	161	141	85	57
0,5	1,0e-3	234	207	143	103	197	174	119	85	260	227	155	111
0,5	5,0e-4	240	222	174	137	208	192	149	110	268	251	193	150
1	5,0e-2	8	9	6	4	7	7	5	3	8	9	6	4
1	1,0e-2	32	29	19	13	26	24	15	10	30	29	19	13
1	5,0e-3	57	48	29	19	47	41	25	16	58	51	31	22
1	2,5e-3	95	76	49	32	79	66	40	28	103	87	54	36
1	1,0e-3	177	137	91	64	147	126	75	53	193	166	102	70
1	5,0e-4	234	207	143	103	197	174	119	85	260	227	156	112
1,5	5,0e-2	7	7	4	3	5	5	4	3	7	7	4	3
1,5	1,0e-2	24	23	15	10	20	19	12	8	23	22	14	10
1,5	5,0e-3	44	36	23	16	36	31	19	13	44	38	23	16
1,5	2,5e-3	72	60	36	25	60	50	31	20	79	66	40	27
1,5	1,0e-3	136	115	69	46	113	95	59	40	150	126	78	53
1,5	5,0e-4	204	174	114	79	171	138	94	65	227	195	126	87
2	5,0e-2	5	5	4	3	5	4	3	2	5	5	3	3
2	1,0e-2	20	19	12	8	16	15	10	6	19	19	12	8
2	5,0e-3	36	31	19	13	28	25	15	11	35	31	20	13
2	2,5e-3	60	51	31	20	49	42	26	17	64	54	33	22
2	1,0e-3	111	94	57	38	92	78	50	33	126	106	65	43
2	5,0e-4	177	144	86	58	147	126	75	51	197	166	106	70
2,5	5,0e-2	5	5	3	2	4	4	2	2	5	5	3	2
2,5	1,0e-2	17	16	10	7	14	14	8	6	17	16	10	7
2,5	5,0e-3	30	27	16	11	24	22	13	9	30	27	17	12
2,5	2,5e-3	52	43	26	17	43	36	23	15	54	45	28	19
2,5	1,0e-3	95	80	51	34	79	66	42	28	106	89	56	38
2,5	5,0e-4	151	133	75	51	130	110	66	45	171	146	91	59
3	5,0e-2	4	4	3	2	4	3	2	2	4	4	3	2
3	1,0e-2	15	14	9	6	12	11	7	5	15	14	9	6
3	5,0e-3	27	25	15	10	21	20	12	8	26	23	15	10
3	2,5e-3	45	39	23	16	37	31	20	13	47	41	25	17
3	1,0e-3	87	71	43	29	70	59	36	25	96	78	47	33
3	5,0e-4	136	111	69	46	113	99	62	40	154	131	81	53

Impressum

Medieninhaber: Land Oberösterreich

Herausgeber:

Amt der Oö. Landesregierung
Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung Grund- und Trinkwasserwirtschaft
Kärntnerstraße 12 / 4021 Linz
Tel.: (+43 732) 7720-12478
Fax: (+43 732) 7720-212662
E-Mail: gtw.post@ooe.gv.at

Projektleiter:

Dipl.-Ing. August Neumüller, GTW

Autoren:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Möderl
Dipl.-Ing. Robert Sitzenfrei
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Rauch
Universität Innsbruck

Redaktion: Waltraud Dinges
GTW – Öffentlichkeitsarbeit

Grafik:

Lunart Werbeagentur, Linz (090031)

Druck:

Colour & Point, Linz

Download:

www.land-oberoesterreich.gv.at
Themen > Publikationen

1. Auflage, April 2010

DVR: 0069264

Copyright:

Grund- und Trinkwasserwirtschaft (GTW)



GTW