



INGENIEURGESELLSCHAFT PROF. KOBUS UND PARTNER GMBH

Wilhelmstr. 11
70182 Stuttgart
Telefon (0711) 237 19 36 00
Telefax (0711) 237 19 36 01

Thermische Nutzung von Grundwasser durch Wärmepumpen

Prinzipstudie zur Berechnung von Temperaturfeldern für kleine Anlagen mit Energieentzug kleiner 45.000 kWh/Jahr für charakteristische Situationen in Baden-Württemberg

Auftraggeber: Umweltministerium Baden-Württemberg
70182 Stuttgart

Auftragsdatum: Auftrag vom 22.05.2007

Auftragsnummer: A310

Berichtsnummer: A310-1

Bearbeitung: Dipl.-Ing. B. Keim
Dr.-Ing. U. Lang

Stuttgart, im Mai 2008

(Dipl.-Ing. B. Keim)

(Dr.-Ing. U. Lang)

ÜBERSICHT

1	AUFGABENSTELLUNG.....	3
2	EINSATZ VON GRUNDWASSERWÄRMEPUMPEN	4
2.1	Hydrogeologische Situationen.....	4
2.2	Umfang der thermischen Nutzung.....	5
3	GRUNDLAGEN DER WÄRMEAUSBREITUNG IM GRUNDWASSER	7
3.1	Vorstellung der beteiligten Mechanismen und Kennwerte.....	7
3.2	Erfahrungen aus Felduntersuchungen	12
3.2.1	Testfeld Aeffligen.....	12
3.2.2	Bekannte Beeinflussungen der Grundwassertemperatur	15
3.3	Numerische Simulationen zur Schaffung des Prozessverständnisses....	16
4	TEMPERATURFELD-BERECHNUNGEN MIT VEREINFACHENDEN ANSÄTZEN.....	26
4.1	Beschreibung der vorhandenen Programme.....	26
4.2	Vergleichsrechnungen.....	28
4.2.1	Übersicht	28
4.2.2	Parametrisierung der Dispersion in Tempfeld	28
4.2.3	Parametrisierung des Austausches mit der Atmosphäre in Tempfeld	31
4.2.4	Festlegung der Simulationsdauer in GED	32
4.2.5	Darstellung der Berechnungsergebnisse	32
4.2.6	Diskussion der Berechnungsergebnisse	40
4.3	Bewertung und Folgerungen.....	41
5	ANALYTISCHER NÄHERUNGSANSATZ FÜR INSTATIONÄRE BERECHNUNGEN.....	44
5.1	Grundlage	44
5.2	Beispielhafte Berechnungen	47



6 VERWENDETE UNTERLAGEN 63

Anhang: Ergebnisse der numerischen Simulationen

Anhang: Kurzfassung

1 Aufgabenstellung

Das Land Baden-Württemberg hat unter Federführung des Umweltministeriums einen Arbeitskreis zur Ausarbeitung eines Leitfadens eingerichtet. Mit dem Leitfaden sollen genehmigungsrechtliche Aspekte von Grundwasserwärmepumpen beschrieben werden. Der Anwendungsbereich dieses Leitfadens beschränkt sich auf kleinere Anlagen, die der Deckung des Wärmeenergiebedarfs von Einfamilienhäusern oder Doppelhäusern dienen.

Grundwasserwärmepumpen in solchen Gebäuden werden derzeit hauptsächlich für das Heizen und die Warmwasserbereitstellung eingesetzt. Bei dieser Nutzung wird üblicherweise aus einem Entnahmekunnen Grundwasser gefördert. Dem Grundwasser wird Wärmeenergie entzogen. Das abgekühlte Wasser wird anschließend über einen Infiltrationskrunnen wieder dem Grundwasserleiter zugeführt.

Vorliegende Ausarbeitung dient als eine Grundlage für die Erstellung des Leitfadens. Mit diesem Beitrag soll aufgezeigt werden, mit welchen Methoden Temperaturfelder prognostiziert werden können, die durch die Einleitung von abgekühltem Wasser in einen Grundwasserleiter entstehen. Im Leitfaden sollen die in Baden-Württemberg vorherrschenden natürlichen Verhältnisse behandelt werden. Im Arbeitskreis wurden dazu hydrogeologische Situationen definiert, die sich an typischen Anwendungen orientieren.

Für die Genehmigungspraxis stehen letztendlich zwei Fragen im Vordergrund. So ist einerseits zu klären, ob eine Anlage zu unverträglichen Veränderungen der natürlichen Grundwassertemperaturen führt. Andererseits ist zu prüfen, ob durch eine neue Anlage Konflikte mit anderen Nutzungen entstehen können. Hierfür sollen im Zuge dieser Ausarbeitung vereinfachende Berechnungsansätze diskutiert werden, die z.B. von der Wasserrechtsbehörde in einem Genehmigungsantrag verlangt werden können.

2 Einsatz von Grundwasserwärmepumpen

2.1 Hydrogeologische Situationen

Der Einsatz von Grundwasserwärmepumpen zur Deckung des Wärmeenergiebedarfs von Einfamilienhäusern oder Doppelhäusern beschränkt sich unter Berücksichtigung von technologischen und wirtschaftlichen Aspekten meist auf hydrogeologische Situationen, in denen oberflächennah vergleichsweise gut durchlässige Schichten mit entsprechender Wasserführung anzutreffen sind. Im Zuge der Diskussionen im Arbeitskreis konnten die in **Tab. 2.1** beschriebenen hydrogeologischen Situationen entwickelt werden, die den Überlegungen in dieser Ausarbeitung zu Grunde gelegt werden sollen. Es handelt sich um Kies-Grundwasserleiter.

Tab. 2.1: Zusammenstellung der zu untersuchenden hydrogeologischen Situationen

Situation	Genutzte grundwasser-erfüllte Mächtigkeit [m]	Gradient der Piezometerhöhe [-]	Durchlässigkeit [m/s]	Hohlraumanteil [%]	Flurabstand [m]	Abstandsgeschwindigkeit [m/Tag]
1	10	0,001	0,002	15	4	1,2
2	30	0,001	0,002	15	4	1,2
3	5	0,005	0,0005	15	4	1,4
4	3	0,002	0,005	15	4	5,8
5	5	0,002	0,005	15	4	5,8
6	3	0,01	0,004	15	4	23,0

Zur Berechnung der Filtergeschwindigkeit dient die Darcy-Gleichung:

$$v_f = k_f \cdot I \quad \text{(Gl. 2.1)}$$

mit:

- v_f = Filtergeschwindigkeit [$m \cdot s^{-1}$]
- I = Gradient der Piezometerhöhe, Grundwassergefälle [-]
- k_f = Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserleiters [$m \cdot s^{-1}$]

Aus der Filtergeschwindigkeit lässt sich die Abstandsgeschwindigkeit wie folgt berechnen:

$$v_a = v_f/n \quad (\text{Gl. 2.2})$$

mit:

v_a = Abstandsgeschwindigkeit [m s^{-1}]

v_f = Filtergeschwindigkeit [m s^{-1}]

n = Hohlraumanteil [-]

Unter Verwendung der Gleichungen 2.1 und 2.2 liegen die Abstandsgeschwindigkeiten bei den Situationen 1 bis 6 aus Tab. 2.1 bei umgerechnet 1 m/Tag bis hin zu über 20 m/Tag. Hieraus resultiert eine vergleichsweise schnelle Ausbreitung der induzierten Temperaturniedrigung, was als wichtige Charakterisierung der zu untersuchenden hydrogeologischen Situationen hervorzuheben ist.

2.2 Umfang der thermischen Nutzung

Der Jahresenergiebedarf von Einfamilienhäusern oder Doppelhäusern liegt in einer Größenordnung von 20.000 kWh/Jahr bis zu 60.000 kWh/Jahr. Unterstellt man eine übliche Jahresarbeitszahl von 4 für die Anlage, erhält man damit einen Energieentzug aus dem Grundwasser von überschlägig 15.000 kWh/Jahr (ca. 1,7 kW) bis zu 45.000 kWh/Jahr (ca. 5,1 kW).

Der Zusammenhang zwischen dem Umfang der Grundwassernutzung und dem Energieentzug wird beschrieben durch:

$$Q = \Delta S / (c_w \cdot \rho_w) \quad (\text{Gl. 2.3})$$

mit:

Q = Entnahme- bzw. Infiltrationsrate [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]

S = Entzug an Wärmeenergie [W]

c_w = spez. Wärmekapazität des Wassers [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
 (ca. $4.180 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

ρ_w = Dichte des Wassers [kg m^{-3}]
 (ca. 1.000 kg m^{-3})

ΔT = Temperaturniedrigung [K]

Für die oben beschriebene Nutzung werden damit über das Jahr gemittelte Pumpraten von 0,1 l/s bis 0,3 l/s errechnet, wenn man eine Temperaturenniedrigung des eingeleiteten Wassers von 4 K ansetzt.

Die mit den gängigen hydrogeologischen Formeln (Kombination aus Darcy- und Kontinuitätsgleichung gemäß Gl. 2.4) errechneten Entnahme- bzw. Infiltrationsbreiten liegen für den zu betrachtenden Umfang der thermischen Nutzung und für die in Tab. 2.1 beschriebenen hydrogeologischen Situationen nur in einer Größenordnung von wenigen Metern. Diese geringen Breiten sind ebenfalls als wichtige Charakterisierung der zu untersuchenden hydrogeologischen Situationen und thermischen Nutzungen hervorzuheben.

$$b = Q / (m \cdot v_f) \quad (\text{Gl. 2.4})$$

mit:

- b = Entnahme- bzw. Infiltrationsbreite [m]
- Q = Entnahme- bzw. Infiltrationsrate [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
- m = Genutzte grundwassererfüllte Mächtigkeit [m]
- v_f = Filtergeschwindigkeit [m s^{-1}]

Darauf hinzuweisen ist, dass Grundwasserwärmepumpen üblicherweise nicht kontinuierlich betrieben werden. Je nach Auslegung der Anlage und dem entsprechenden tatsächlichen Energiebedarf kommt es zu einem ständigen Wechsel von Betriebs- und Ruhephasen. Die in den Betriebsphasen auftretenden Entnahme- bzw. Einleitraten liegen daher über den über das Jahr gemittelten Pumpraten. Die technische Auslegung der Anlagen orientiert sich jedoch an der Spitzenabdeckung. Die mittleren Leistungen der Anlagen sind deutlich niedriger als die Spitzenleistung.

3 Grundlagen der Wärmeausbreitung im Grundwasser

3.1 Vorstellung der beteiligten Mechanismen und Kennwerte

Die Strömungsverhältnisse in einem Grundwasserleiter werden durch geologische Parameter und hydrologische Randbedingungen bestimmt. Zu den relevanten geologischen Parametern zählen die Mächtigkeit, die Durchlässigkeit, der Speicherkoeffizient und die Porosität. Aus hydrologischer Sicht werden die Strömungsverhältnisse meist durch die Grundwasserneubildung aus Niederschlag und den Austausch mit Oberflächengewässern beeinflusst, wodurch sich die Piezometerhöhenverhältnisse einstellen. Zur Quantifizierung der Strömungsverhältnisse wird in den gängigen Anwendungen meist die Darcy-Gleichung (siehe Gl. 2.1) herangezogen. Je nach Komplexität der natürlichen Verhältnisse stehen zur Berechnung der Strömungsverhältnisse vereinfachende analytische Berechnungsansätze oder numerische Methoden zur Verfügung.

Bei der Wärmeausbreitung in Grundwasserleitern sind grundsätzlich folgende Mechanismen beteiligt:

- Ausbreitung mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken und an der Sohle des Temperaturfelds
- Wärmeaustausch mit der Atmosphäre

Als Konvektion wird die Ausbreitung eines Wasserinhaltsstoffes bzw. des Wärmeinhalts mit dem durch die Abstandsgeschwindigkeit charakterisierten Geschwindigkeitsfeld bezeichnet. Bei großen Temperaturänderungen ist eine Beeinflussung des Geschwindigkeitsfeldes durch Dichteeffekte oder die Änderung der Viskosität gegeben. Bei den im Zusammenhang mit Grundwasserwärmepumpen zu diskutierenden Temperaturänderungen von 4 °C kann jedoch näherungsweise davon ausgegangen werden, dass keine nennenswerte Beeinflussung des Geschwindigkeitsfeldes durch diese Effekte stattfindet.

Die so genannte hydrodynamische Dispersion beschreibt Vermischungsvorgänge, die durch Geschwindigkeitsunterschiede in den Porenräumen des Untergrunds, durch kleinräumige Inhomogenitäten des Korngerüsts und durch makroskopische

Inhomogenitäten des Untergrunds entstehen (SÖLL 1988, RAUSCH et. al. 2005). Beim Wärmetransport ist die Dispersion nur bei größeren Filtergeschwindigkeiten relevant (Bear 1972). In Bear 1972 wird hierzu ein Kriterium unter Verwendung des Quotienten aus Konvektion zu Konduktion definiert. Bei den in **Tab. 2.1** beschriebenen Situationen und typischen Längenausdehnungen von Temperaturfahnen größer 10 m bis über 100 m ist dieses Kriterium erreicht. Die bei den typischen Situationen (gemäß **Tab. 2.1**) auftretenden Geschwindigkeiten sind folglich ausreichend groß, um von einer Relevanz der Dispersion auszugehen. Zur rechnerischen Beschreibung der Definition dient die Dispersivität. Je größer dieser Parameter, umso stärker ist die Vermischung. Unterschieden werden die Dispersivität in Längsrichtung (d.h. in Richtung der konvektive Ausbreitung), in Querrichtung (d.h. horizontal, senkrecht zur Richtung der konvektiven Ausbreitung) und in vertikaler Richtung (d.h. horizontal, senkrecht zur Richtung der konvektiven Ausbreitung). Eine Zusammenstellung von Ergebnissen aus unterschiedlichen Experimenten zeigt RAUSCH et. al. 2005. Daraus geht hervor, dass die Querdispersivität meist deutlich kleiner ist, als in Längsrichtung. Sofern für den konkreten Anwendungsfall keine vertieften Erkenntnisse vorliegen, wird üblicherweise eine um den Faktor 5 bis 10 kleinere Querdispersion angesetzt. In vertikaler Richtung ist die Dispersivität meist sehr klein. Insbesondere bei Fahnenlängen in der Größenordnung von größer 10 m bis 100 m kann davon ausgegangen werden, dass die Vermischungseffekte durch makroskopische Inhomogenitäten dominieren.

Wenn für einen Anwendungsfall keine konkreten Erkundungsergebnisse vorliegen, kann die Längsdispersivität anhand der Zusammenstellung in **Abb. 3.1** abgeschätzt werden. Hierbei ist die Dispersivität in Abhängigkeit von der Längsausdehnung des zu betrachtenden Ausbreitungsproblems zu wählen (RAUSCH et. al. 2005). Vergleichbare Auswertungen stehen von weiteren Autoren zur Verfügung (zusammengestellt in RAUSCH et. al. 2005).

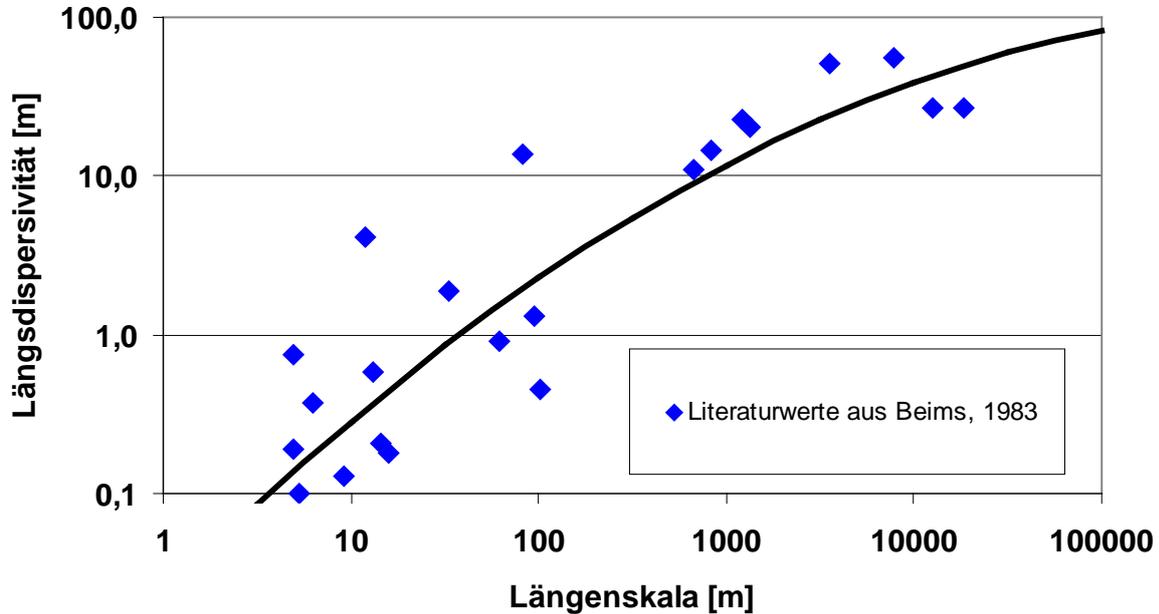


Abb. 3.1: Längsdispersivität als Funktion der Längenskala des Ausbreitungsvorgangs (aus RAUSCH et. al. 2005, redaktionell überarbeitet)

Die Wärmeausbreitung wird ferner durch die Fähigkeit des Untergrundes, Wärme zu speichern und zu leiten, beeinflusst. Eine Zusammenstellung der entsprechenden Kennwerte befindet sich beispielsweise bei SÖLL (1988). Daraus geht hervor, dass die Kennwerte für verschiedene Gesteine erheblich schwanken. **Tab. 3.1** zeigt die Bandbreite dieser Unterschiede.

Tab. 3.1: Hydrothermische Eigenschaften des Untergrundes

Kennwerte	Wasser	Gestein
Spezifische Volumenwärme [MJ K ⁻¹ m ⁻³]	4,2	1 - 2,5
Wärmeleitfähigkeit [J s ⁻¹ K ⁻¹ m ⁻¹]	0,6	0,4 - 4,1

Die spezifische Volumenwärme ist definiert als das Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte. Die Änderung des Wärmehalts eines bestimmten Stoffvolumens bei Änderung der Temperatur errechnet sich wie folgt:

$$\Delta E = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 3.1})$$

mit:

ΔE	=	Änderung des Wärmeinhalts [J]
c	=	spez. Wärmekapazität [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
ρ	=	Dichte [kg m^{-3}]
V	=	Volumen [m^3]
ΔT	=	Temperaturänderung [K]

Bei der Wärmeausbreitung im Untergrund ist zu berücksichtigen, dass sich die Temperatur des Gesteins der des fließenden Wassers angleicht. Mit **Gl. 3.1** kann z.B. errechnet werden, welcher Wärmeinhalt durch diesen Prozess im Gestein gespeichert wird. Bei einer gemeinsamen Betrachtung des Wärmeinhalts von Gestein und Grundwasser kann die Spezifische Volumenwärme des gesättigten Untergrunds über die Gewichtung der Volumenanteile von Wasser und Gestein errechnet werden.

Für die Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Untergrunds oder der ungesättigten Bodenzone werden meist so genannte effektive Parameter verwendet. Typische Werte für die Bodenzone liegen bei 1,5 bis 3 $\text{J}/(\text{s m K})$. Unter Verwendung von **Gl. 3.2** kann der Wärmeaustausch aufgrund eines Temperaturunterschiedes gemäß der in **Abb. 3.2** dargestellten Konfiguration berechnet werden.

$$F = A \cdot \lambda (T_G - T_L) / m_D \quad (\text{Gl. 3.2})$$

mit:

F	=	Wärmestrom [W]
A	=	Austauschfläche [m^2]
λ	=	Wärmeleitfähigkeit der ungesättigten Bodenzone [$\text{J s}^{-1} \text{K}^{-1} \text{m}^{-1}$]
T_G	=	Grundwassertemperatur (an der Grundwasseroberfläche) [K]
T_L	=	Lufttemperatur [K]
m_D	=	Flurabstand bzw. Mächtigkeit der ungesättigten Bodenzone [m]

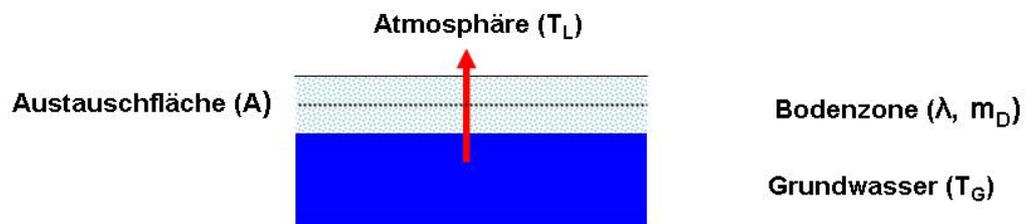


Abb. 3.2: Wärmeleitung durch Temperaturunterschied

Gl. 3.2 kann auch dazu verwendet werden, den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre quantifizieren oder bei sinngemäßer Anwendung der Formel die Wärmeleitung an den Flanken eines Temperaturfeldes abzuschätzen.

Die Relevanz der einzelnen Prozesse hängt maßgeblich von der hydrogeologischen Situation sowie von den zu betrachtenden Raum- und Zeitskalen ab. Grundsätzlich können die Ausbreitung von Wärme und der Stofftransport im Grundwasser mit vergleichbaren Methoden berechnet werden (CATHOMEN 2002). Konvektion und Dispersion sind Mechanismen, die die Ausbreitung von Stoffen (Markierungsstoffe, Schadstoffe) maßgeblich bestimmen. Der Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst, die Wärmeleitung (Konduktion) und der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre sind Mechanismen, die dazu führen können, dass sich die Ausbreitung von Wärme von der Stoffausbreitung unterscheidet.

Hinsichtlich der Relevanz der o. g. Mechanismen ist festzuhalten, dass die in **Tab. 2.1** beschriebenen Situationen zu vergleichsweise hohen Abstandsgeschwindigkeiten führen. Damit ist davon auszugehen, dass die Konvektion für die vorliegenden Untersuchungen große Relevanz besitzt. Eine Vielzahl von Markierungsversuchen in den quartären Kiesgrundwasserleitern in Baden-Württemberg hat zudem gezeigt, dass die Vermischung durch Dispersion ein wichtiger und relevanter Transportprozess ist. Zum Wärmeausgleich zwischen dem Grundwasser und dem Korngerüst ist auszuführen, dass dieser zwangsweise zu einer langsameren Ausbreitung einer Wärmefahne gegenüber der konvektiven Ausbreitung führt. Die Relevanz dieses Prozesses ist allerdings nur bei instationären Vorgängen gegeben. Bei stationären Vorgängen, ist genügend Zeit und Wärmeenergie für den Wärmeausgleich vorhanden.

3.2 Erfahrungen aus Felduntersuchungen

3.2.1 Testfeld Aefligen

Allgemein zugängliche Daten zu Wärmeausbreitungen von Grundwasserwärmepumpen sind rar. Unter Federführung des Wasser- und Energiewirtschaftsamts Bern/Schweiz wurde in den Jahren 1980 bis 1986 die Ausbreitung von infiltriertem Kaltwasser in Aefligen untersucht (siehe **Abb. 3.3**). Messergebnisse hierzu sind in KOBUS 1992 und SÖLL 1998 dokumentiert.

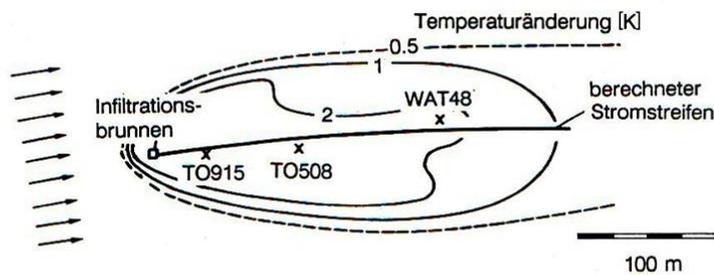


Abb. 3.3: Lageplan zu Testfeld Aefligen (aus Kobus 1992)

Der tiefengemittelte Durchlässigkeitsbeiwert wird mit $5,9 \cdot 10^{-3}$ m/s, die Mächtigkeit des Grundwasserleiters mit ca. 20 m, das Grundwassergefälle mit $2,5 \cdot 10^{-3}$ und die effektive Porosität mit 0,15 angegeben. Daraus lässt sich eine Abstandsgeschwindigkeit von 8,5 m/Tag errechnen. Der Grundwasserleiter selbst wird als heterogen beschrieben (siehe **Abb. 3.4**).

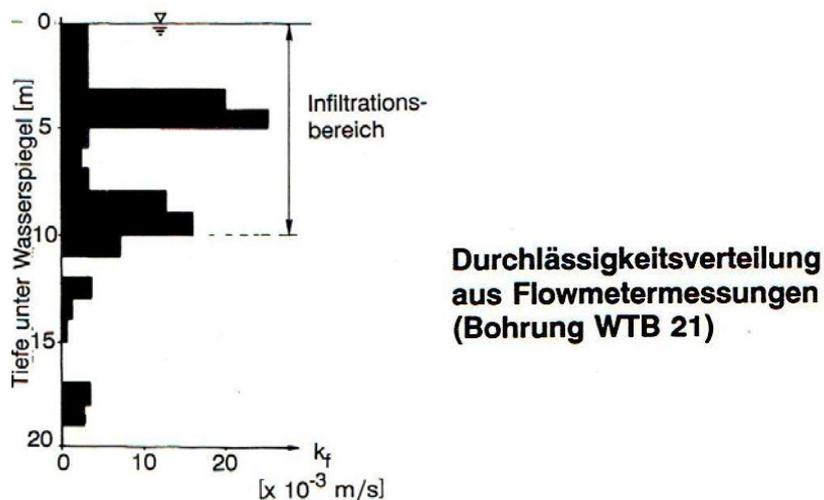


Abb. 3.4: Vertikale Durchlässigkeitsverteilung am Testfeld Aefligen (aus Kobus 1992, redaktionell überarbeitet)

Am Standort liegt eine geringmächtige Deckschicht mit 2,5 m vor. Der Verlauf der ungestörten Grundwassertemperaturen wird im Wesentlichen durch die Atmosphäre bestimmt, was zu einem saisonalen Temperaturgang führt.

Die Infiltration des Kaltwassers erfolgte in den obersten 10 m der grundwassereerfüllten Mächtigkeit. Zu Versuchsbeginn betrug die ungestörte Grundwassertemperatur ca. 10 °C. Die Temperatur des eingeleiteten Kaltwassers schwankte zwischen 2 und 7 °C (Mittelwert 3,5 °C). Im Mittel wurden 16,7 l/s infiltriert (siehe **Abb. 3.5**). Mit Ausnahme der Infiltrationsrate liegen die übrigen Parameter im Wertebereich der in Kapitel 2 beschriebenen Verhältnisse.

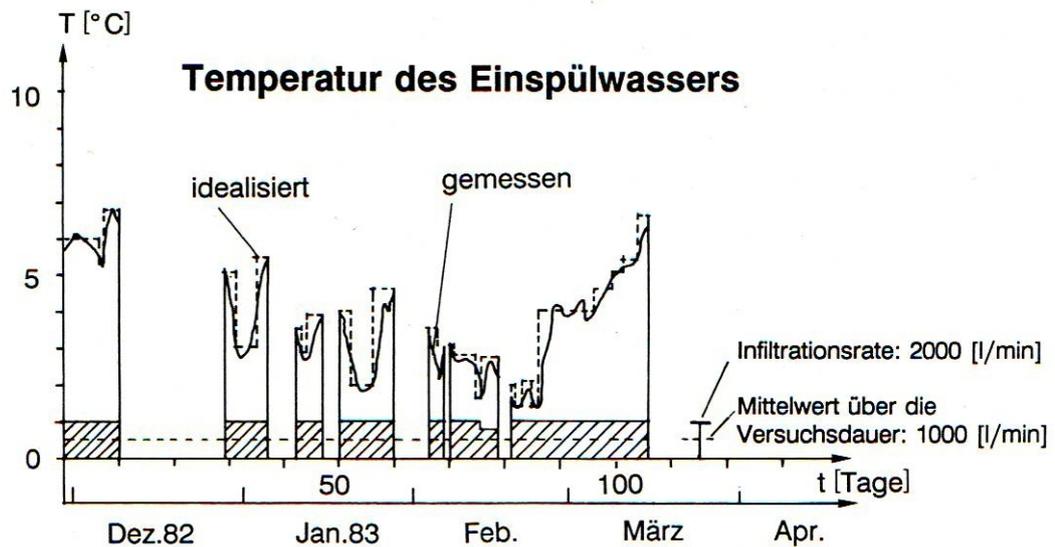


Abb. 3.5: Infiltrationsverhältnisse im Testfeld Aefligen
(aus Kobus 1992)

Die Messungen der Grundwassertemperaturen in Grundwassermessstellen mit Abständen zwischen 37 m und 200 m zeigen, dass die bevorzugte Ausbreitung in Aquiferbereichen mit erhöhten Durchlässigkeiten stattfindet. Die dort vorherrschenden erhöhten Fließgeschwindigkeiten führen zu einem Vorauseilen der Kältefront. Das Eindringen der Kältefahne in tiefere Bereiche findet nur verzögert statt. In 200 m Entfernung von der Einleitung lag die versuchsbedingte Temperaturänderung bei über 2 °C. Betriebsbedingte kurzzeitige Änderungen der Infiltrationsparameter waren in einer Entfernung von 37 m (siehe **Abb. 3.5**) nahezu spontan zu detektieren.

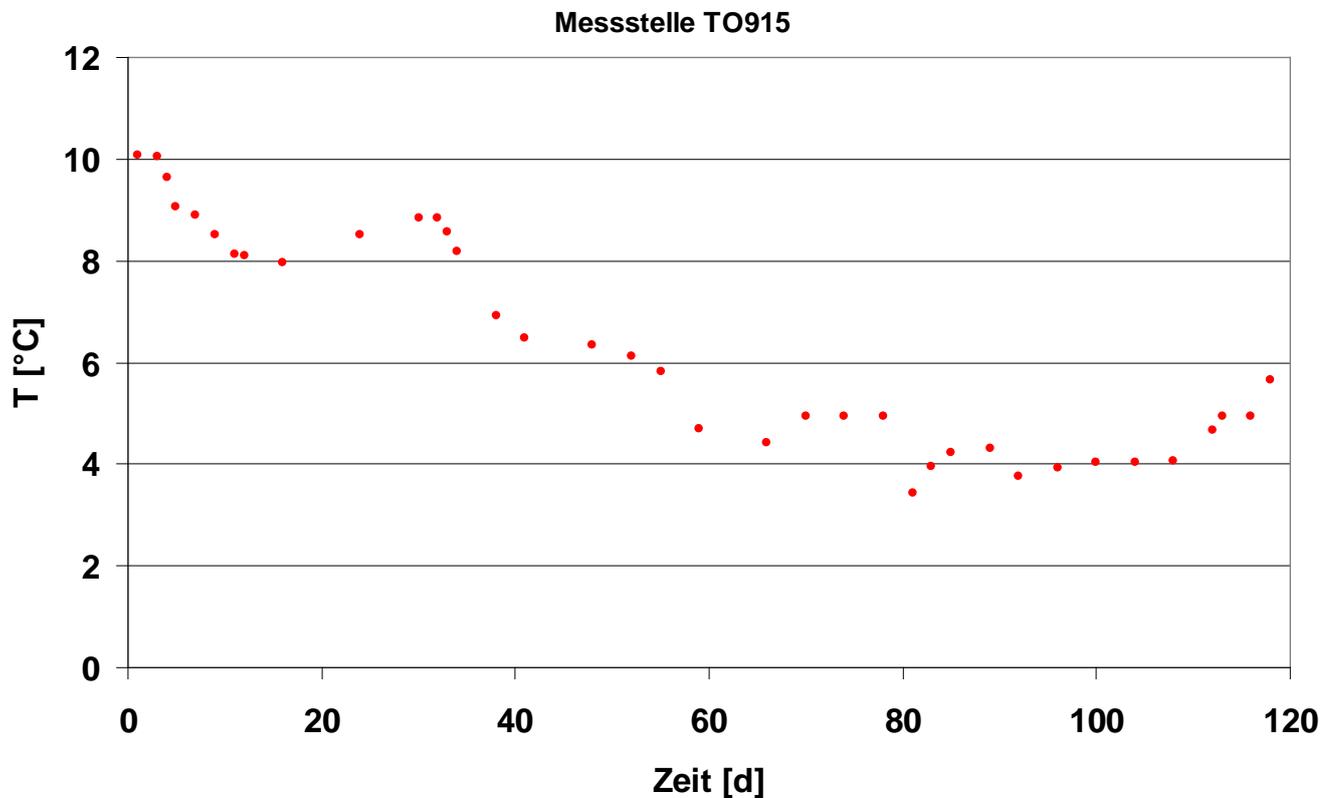


Abb. 3.5: Temperaturganglinie in 37 m Entfernung zur Einleitstelle im Testfeld Aeffligen (aus Kobus 1992, redaktionell überarbeitet)

Die Ergebnisse der Felduntersuchungen in Aeffligen zeigen, dass sich kurzzeitige betriebsbedingte Schwankungen der Infiltrationsparameter in Entfernungen von 37 m sehr stark auswirken. Dies ist eine Entfernung in der durchaus nachbarschaftliche Konflikte durch konkurrierende Nutzungen vorstellbar sind. Bei der Verwendung von vereinfachenden Ansätzen zur Prognose von Temperaturfeldern werden oftmals stationäre oder quasistationäre Betrachtungen vorgenommen, die auf einer mittleren jährlichen thermischen Nutzung des Grundwassers basieren. Um dem Anspruch an den Leitfaden gerecht zu werden, mögliche Konflikte mit anderen Nutzungen durch vereinfachende Berechnungen aufdecken zu können, muss daher zwingend hinterfragt werden, ob die Verwendung von Jahresmittelwerten eine zulässige Vereinfachung darstellt.

Für die Berechnung von Temperaturfeldern lässt sich aus diesem Versuch ferner ableiten, dass die Heterogenität des Untergrunds eine wesentliche Rolle spielt. Damit unterliegen die Prognosen von Temperaturfeldern mit homogenen

Untergrundparametern den typischen Unsicherheiten, die auch bei Stofftransportprognosen oder auch z.B. bei der Ausweisung von 50-Tage Linien für Trinkwasserschutzgebiete unter Ansatz homogener Untergrundparameter auftreten. Der Erkundungsaufwand, um diese Unsicherheit aufzulösen, ist für Grundwasserwärmepumpen für Einzel- oder Doppelhäuser nach unserer Einschätzung unverhältnismäßig hoch, da er bei fachgerechter Ausführung (z.B. Markierungsversuch, Messstellenfeld, Pumpversuche, Flowmetermessungen) in einer Größenordnung über der Gesamtinvestition der Grundwasserwärmepumpe liegen würde. Daher wird empfohlen, die Heterogenität des Untergrunds zumindest prinziphaft durch makrodispersive Betrachtungen zu berücksichtigen.

3.2.2 Bekannte Beeinflussungen der Grundwassertemperatur

Grundsätzlich zeichnet sich Grundwasser durch vergleichsweise konstante und auch in den Wintermonaten hohe Temperaturen aus. Daher ist Grundwasser grundsätzlich bestens für die Nutzung durch Wärmepumpen geeignet. Zu den natürlichen Beeinflussungen der Grundwassertemperatur zählen saisonal bedingte Temperaturschwankungen mit typischerweise verringerten Temperaturen im Winter. Dies ist insbesondere bei der Planung von Grundwasserwärmepumpen in flachen Grundwasserleitern mit geringer ungesättigter Zone zu beachten, da in diesen Fällen nicht von einer natürlichen Temperatur von dauerhaft 10-12 °C ausgegangen werden kann. Oftmals treten auch bereichsweise anthropogen beeinflusste Grundwassertemperaturen auf. Ursache für anthropogene Veränderungen der Grundwassertemperatur können bereits vorhandene thermische Nutzungen des Grundwasserleiters oder die Abwärme von größeren Städten sein. In solchen Fällen würde sich der Betrieb einer Grundwasserwärmepumpe mit einem Temperaturentzug grundsätzlich regulierend auf den Temperaturhaushalt des Grundwassers auswirken. In der Nähe von oberirdischen Gewässern, die Wasser an den umliegenden Grundwasserleiter abgeben, sind ebenfalls z. T. erhebliche Temperaturveränderungen gegeben. Insbesondere in den Wintermonaten können im Nahfeld der oberirdischen Gewässer vergleichsweise niedrige Grundwassertemperaturen auftreten, die den Betrieb von Grundwasserwärmepumpen einschränken können.

3.3 Numerische Simulationen zur Schaffung des Prozessverständnisses

Um das Prozessverständnis bei der geothermischen Nutzung von Grundwasser zu verbessern, wurden numerische Simulationen mit Hilfe eines Grundwassermodells durchgeführt. Dazu wurde das auf dem Finite-Elemente-Verfahren basierende Programm SPRING verwendet. Es wurde ein rechteckiges Prinzipmodell mit einer Längsausdehnung von 500 m und einer Querausdehnung von 100 m verwendet. Innerhalb des Modellgebiets wurde eine Grundströmung in Längsrichtung durch Festpotentiale am ober- und unterstromigen Rand angenommen. Die Längsseiten wurden als undurchlässig angesetzt. Um den Wärmetransport über den Rückgabebrunnen zu simulieren, wurde eine weitere Zuflussrandbedingung 50 m unterhalb des oberstromigen Zuflussrandes verwendet. Im Grundwasserleiter wurde eine Ausgangstemperatur von 10°C angenommen und die Zuflussrandbedingung mit einer Temperatur von 6°C belegt.

Die nachfolgend dokumentierten numerischen Berechnungen dienen dazu, die Wirkung der am Wärmetransport beteiligten Prozesse (siehe Kap. 3.1) aufzuzeigen. Da der Austausch mit der Atmosphäre insbesondere in der Hauptbetriebszeit einer Grundwasserwärmepumpe wegen der geringen winterlichen Temperaturen an der Erdoberfläche nicht stattfinden kann, wird dieser Prozess bei den numerischen Simulationen nicht betrachtet. Die Ausbreitung der Wärme mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion) ist bei den nachfolgenden Simulationen stets berücksichtigt. Folgende Prozesse werden darüber hinaus untersucht:

- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst (und damit Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst)
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds
- Wärmeleitung (Konduktion) an der Sohle des Temperaturfelds

Somit ergeben sich folgende Kombinationen:

Kombination 1 (Transport ohne Konduktion und Wärmespeicherung)

- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion

Kombination 2 (Transport mit Konduktion und Wärmespeicherung)

- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds

Kombination 3 (Transport mit Konduktion und Wärmespeicherung und anstehendem Gestein)

- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds
- Wärmeleitung (Konduktion) an der Sohle des Temperaturfelds

Die numerischen Simulationen beschränken sich auf die Situationen 1 und 5 gemäß Tab. 2.1. Durch die Verwendung eines Infiltrationsbrunnens werden die Auswirkungen der Infiltration auf das Strömungsfeld berücksichtigt.

Bezüglich der thermischen Nutzung werden zwei Betrachtungen vorgenommen. Einerseits wird eine Jahresmittelwert-Betrachtung mit einer thermischen Nutzung von 45.000 kW/Jahr durchgeführt. Dazu wird dieser Energieentzug als eine Temperaturniedrigung von 4°C gegenüber der unbeeinflussten Grundwassertemperatur mit einer Infiltrationsrate von 0,3 l/s simuliert. Trotz der Mittelwertbetrachtung müssen die Berechnungen instationär vorgenommen werden. Andererseits wird hinsichtlich der thermischen Nutzung untersucht, wie sich eine verstärkte Nutzung in den Wintermonaten auf das Temperaturfeld auswirkt. Dazu wird die Infiltrationsrate von 0,3 l/s auf 0,6 l/s verdoppelt. Die instationäre Berechnung wird nach 120 Tagen abgebrochen, um die verstärkte Nutzung während 4 Wintermonaten nachzubilden.

Für die Kombinationen 1 und 2 ist eine horizontal-ebene Betrachtung ausreichend; für die Kombination 3 ist eine dreidimensionale Betrachtung erforderlich. Um numerische Fehler zu minimieren, ist eine extrem hohe räumliche und zeitliche Auflösung (Elementlängen von 1 m, Zeitschrittlängen zwischen 0,05 und 0,2 Tage) erforderlich. Dies führt zu einem nicht zu unterschätzenden Rechenaufwand.

Die für die Wärmetransportberechnungen verwendeten Parameter sind in **Tab. 3.2** zusammengestellt.

Tab. 3.2: Wärmetransportparameter der numerischen Simulationen

Parameter	Wert
Dichte des Wassers [kg m^{-3}]	998,2
Wärmeleitfähigkeit des Wassers [$\text{J s}^{-1} \text{K}^{-1} \text{m}^{-1}$]	0,60
spez. Wärme des Wassers [$\text{MJ K}^{-1} \text{m}^{-3}$]	4,182
Wärmeleitfähigkeit des Gesteins [$\text{J s}^{-1} \text{K}^{-1} \text{m}^{-1}$]	2,00
spez. Wärme des Gesteins [$\text{MJ K}^{-1} \text{m}^{-3}$]	0,800

Um die Vergleichbarkeit zu den in den weiteren Kapiteln dokumentierten analytischen Berechnungen herstellen zu können, sind identische Dispersivitäten gewählt.

Die Ergebnisse dieser Simulationen sind im **Anhang** dokumentiert. Nachfolgend erfolgt eine Beschreibung der relevanten Auswertungen und Vergleiche.

Die Wirkung der o.g. Prozesse ist für die Situation 1 und die Jahresmittelwertbetrachtung in **Abb. 3.6** veranschaulicht. Nach einer Simulationszeit über 2000 Tage kann die dispersive Ausbreitung (Kombination 1) in **Abb. 3.6** oben als quasi-stationär angesehen werden. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Wärmespeicherung und der Konduktion über die Flanken des Temperaturfelds (**Abb. 3.6 Mitte**) oder der Konduktion über Flanken und Sohle treten nach 2000 Tagen noch keine stationären Verhältnisse ein. Daher ist ein Vergleich der Temperaturfelder, der einen direkten und generell gültigen Rückschluss auf die Wirkung der unterschiedlichen Prozesse erlauben würde, nicht sinnvoll. Es kann lediglich festgehalten werden, dass Simulationen unter Berücksichtigung der Dispersion (**Abb. 3.6 oben**) im Vergleich zu Simulationen mit zusätzlicher Berücksichtigung der Wärmespeicherung und der Konduktion an den Flanken (**Abb. 3.6 Mitte**) durchaus ähnliche Temperaturfelder ergeben. Daraus kann geschlossen werden, dass bei Jahresmittelwert-Betrachtungen mittels vereinfachenden Ansätzen, die lediglich die Dispersion berücksichtigen, vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können, wie mit komplexeren Ansätzen, die auch die Konduktion über die Flanken des Temperaturfelds berücksichtigen. Aus dem Vergleich kann jedoch nicht gefolgert werden, dass z.B. die Reichweite einzelner Isothermen bei zusätzlicher Berücksichtigung der Wärmespeicherung und der Konduktion an den Flanken immer kürzer sein muss als bei ausschließlicher Berücksichtigung der Dispersion. Dies hängt grundsätzlich von der untersuchten Situation, der Simulationsdauer und der Wahl der Isotherme (1°C , 2°C oder 3°C) ab.

Der Vergleich von **Abb. 3.6 Mitte** und **Abb. 3.6 unten** (zusätzliche Berücksichtigung der Konduktion an der Sohle) zeigt deutlichere Unterschiede. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Konduktion an der Sohle werden die Temperaturfelder merklich kleiner. Diese Tendenz ist auch gegeben, wenn man z.B. die Situation 5 betrachtet (siehe **Abb. 3.7**), da bei zusätzlicher Berücksichtigung der Konduktion an der Sohle zwangsweise ein Teil der entzogenen Wärmeenergie über die Sohle nachgeführt wird. Daraus kann geschlossen werden, dass vereinfachende Ansätze, die den Einfluss über die Sohle vernachlässigen, grundsätzlich konservative Prognosen liefern, mit denen die Auswirkungen einer Wärmepumpe überschätzt werden. Für die Jahresmittelwert-Betrachtungen in **Abb. 3.7** werden 150 Tage als Simulationszeit angesetzt, da die dispersive Ausbreitung nach dieser Zeit als quasi-stationär angesehen werden kann.

In den **Abb. 3.8 bis Abb. 3.11** wird aufgezeigt, wie sich eine verstärkte Nutzung in den Wintermonaten auf das Temperaturfeld auswirkt. Dazu wird die Infiltrationsrate von 0,3 l/s auf 0,6 l/s verdoppelt. Die instationäre Berechnung wird nach 120 Tagen abgebrochen, um die verstärkte Nutzung während 4 Wintermonaten nachzubilden. Für die Jahresmittelwert-Betrachtungen in den **Abb. 3.8 bis Abb. 3.11** werden für Situation 1 als Simulationszeit 2000 Tage und für Situation 5 als Simulationszeit 150 Tage angesetzt, da die dispersiven Ausbreitungen nach diesen Zeiten als quasi-stationär angesehen werden kann.

Die **Abb. 3.8** und **Abb. 3.9** zeigen entsprechende Vergleiche für die Situation 1. Bei Berücksichtigung von Dispersion, Konduktion über die Flanken und Wärmespeicherung (Kombination 2) zeigt sich, dass die Längsausdehnung des Temperaturfeldes bei Ansatz von Jahresmittelwerten (**Abb. 3.8 oben**) zwar weiter reicht als bei Ansatz des Winterbetriebs (**Abb. 3.8 unten**), das Temperaturfeld für den Winterbetrieb ist jedoch spürbar breiter. Entsprechendes gilt für die Situation 1 (siehe Vergleich von **Abb. 3.9 oben** mit **Abb. 3.9 unten**) auch dann, wenn zusätzlich die Konduktion über die Sohle des Temperaturfelds berücksichtigt wird (Kombination 3).

Bei Situation 5, die im Vergleich zu Situation 1 deutlich größere Abstandsgeschwindigkeiten aufweist, sind durch den Winterbetrieb sogar größere Längsausdehnungen zu erwarten als bei Ansatz von Jahresmittelwerten. Dies ist anhand der Vergleiche in **Abb. 3.10** und **Abb. 3.11** erkennbar.

Diese exemplarischen Auswertungen deuten darauf hin, dass durch die erhöhte thermische Nutzung in den Wintermonaten in Abhängigkeit von der hydrogeologischen Situation durchaus stärkere Betroffenheiten ausgelöst werden können, als bei Betrachtungen von Jahresmittelwerten.

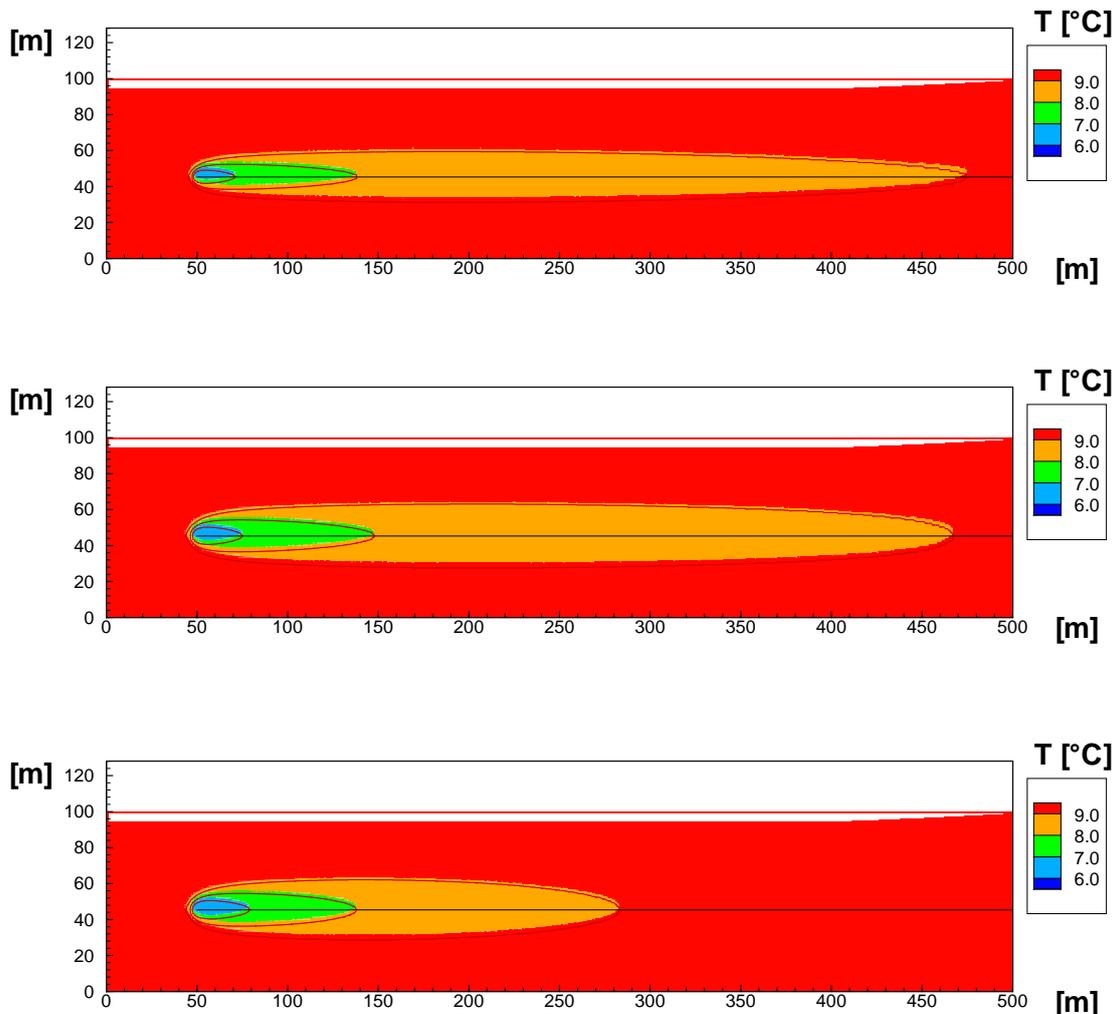


Abb. 3.6: Vergleich der Temperaturfelder für Situation 1 bei einem Energieentzug aus dem Grundwasser von überschlägig 45.000 kWh/Jahr (0,3 l/s) bei Berücksichtigung der Prozesse gemäß

Oben: Kombination 1

Mitte: Kombination 2

Unten: Kombination 3

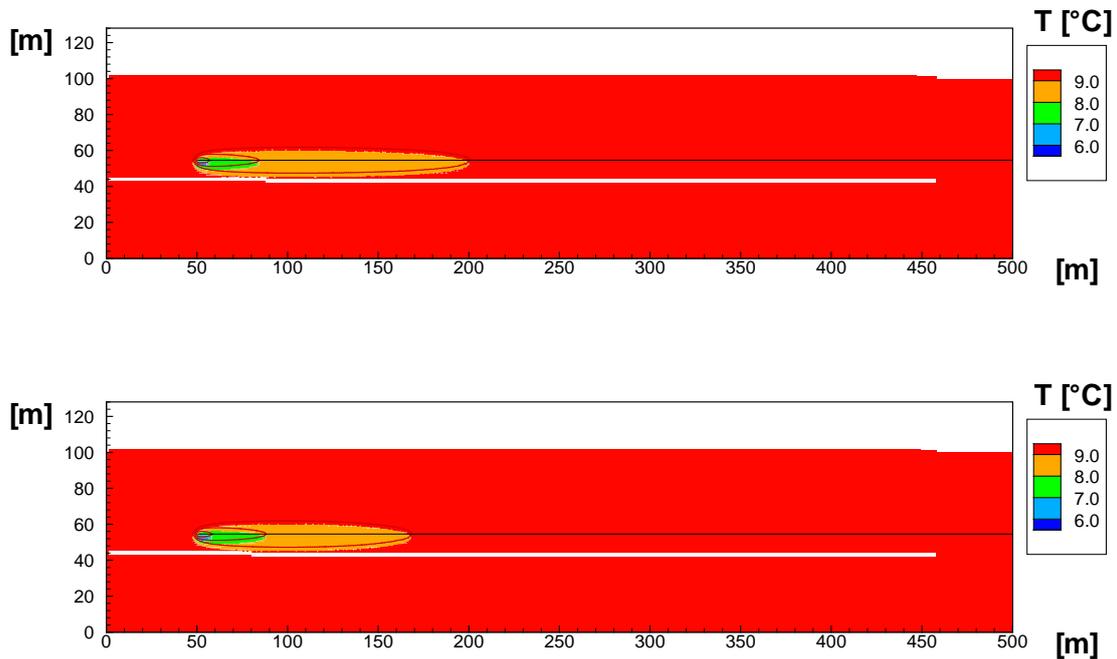


Abb. 3.7: Vergleich der Temperaturfelder für Situation 5 bei einem Energieentzug aus dem Grundwasser von überschlägig 45.000 kWh/Jahr (0,3 l/s) bei Berücksichtigung der Prozesse gemäß

Oben: Kombination 2

Unten: Kombination 3

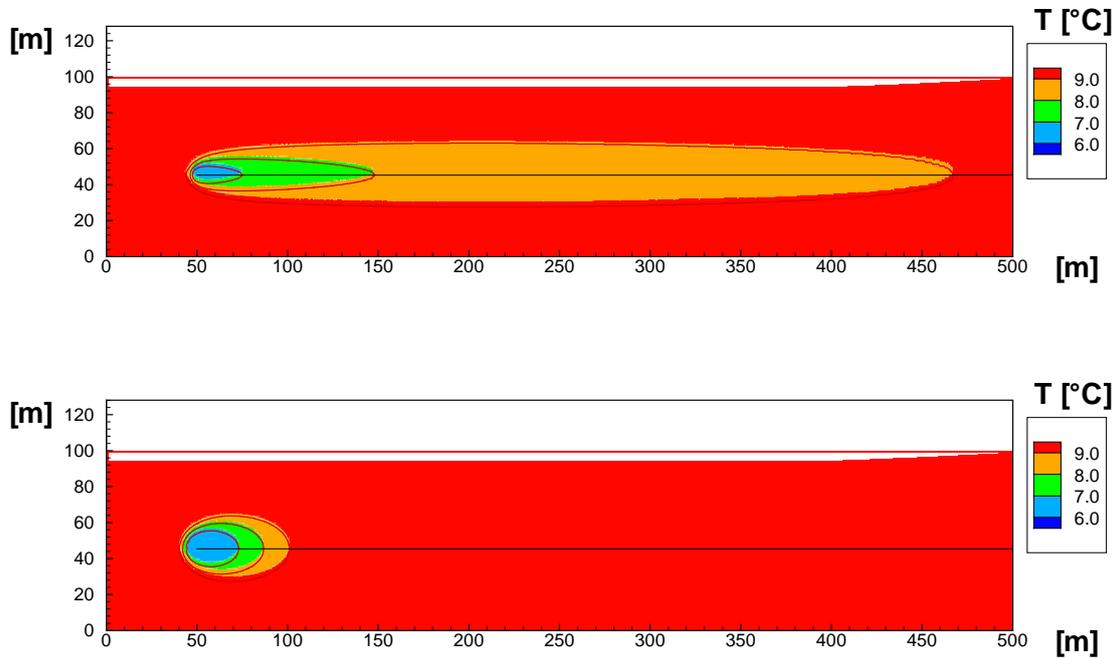


Abb. 3.8: Vergleich der Temperaturfelder für Situation 1 bei einem Energieentzug aus dem Grundwasser von überschlägig 45.000 kWh/Jahr (0,3 l/s) bei Berücksichtigung der Prozesse gemäß Kombination 2

Oben: Jahresmittelwert-Betrachtung

Unten: Winterbetrieb

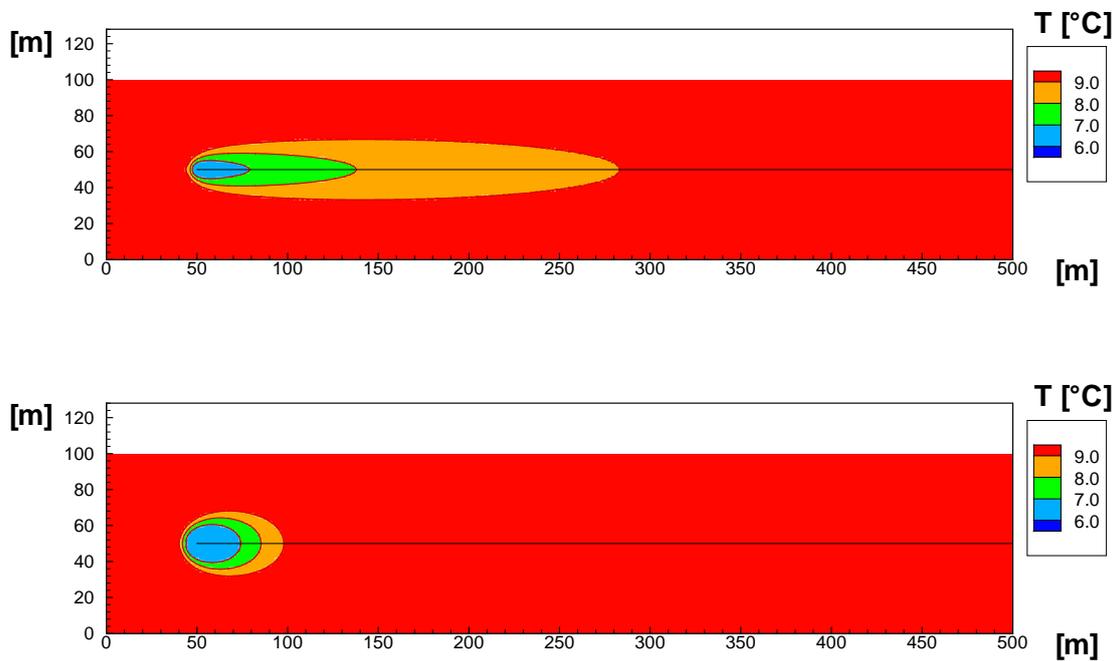


Abb. 3.9: Vergleich der Temperaturfelder für Situation 1 bei einem Energieentzug aus dem Grundwasser von überschlägig 45.000 kWh/Jahr (0,3 l/s) bei Berücksichtigung der Prozesse gemäß Kombination 3

Oben: Jahresmittelwert-Betrachtung

Unten: Winterbetrieb

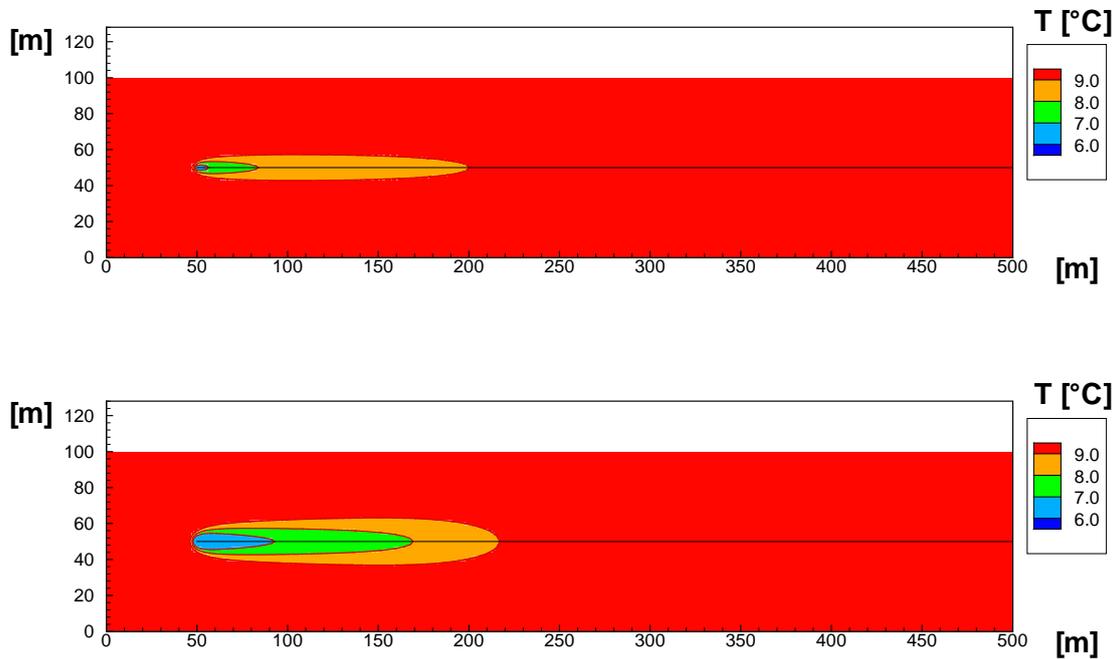


Abb. 3.10: Vergleich der Temperaturfelder für Situation 5 bei einem Energieentzug aus dem Grundwasser von überschlägig 45.000 kWh/Jahr (0,3 l/s) bei Berücksichtigung der Prozesse gemäß Kombination 2

Oben: Jahresmittelwert-Betrachtung

Unten: Winterbetrieb

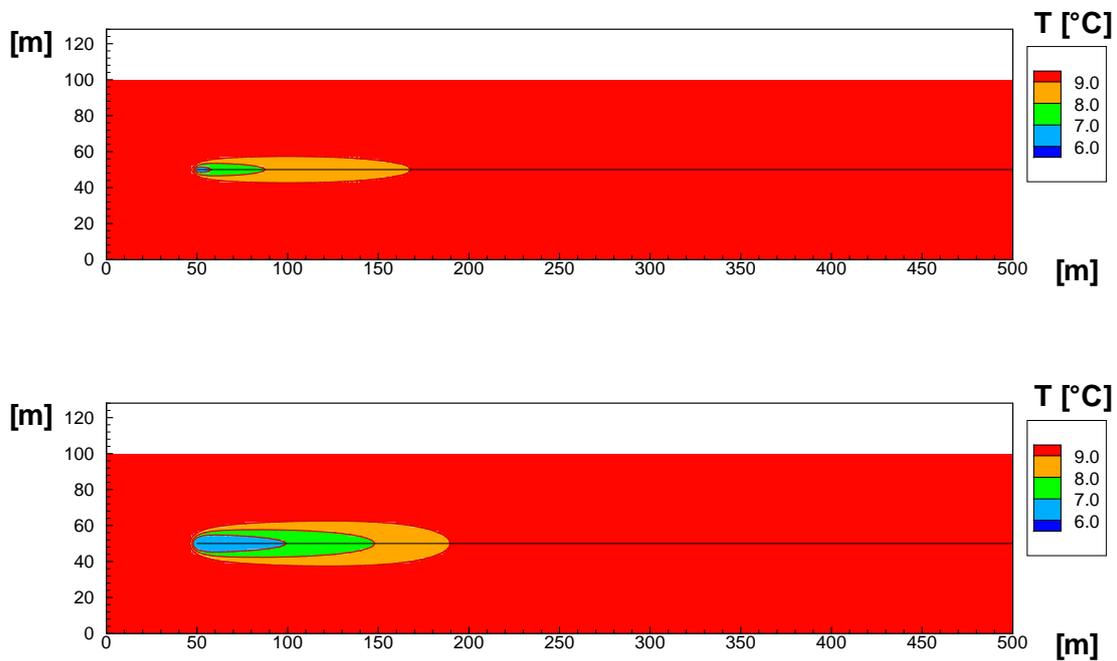


Abb. 3.11: Vergleich der Temperaturfelder für Situation 5 bei einem Energieentzug aus dem Grundwasser von überschlägig 45.000 kWh/Jahr (0,3 l/s) bei Berücksichtigung der Prozesse gemäß Kombination 3

Oben: Jahresmittelwert-Betrachtung

Unten: Winterbetrieb

4 Temperaturfeld-Berechnungen mit vereinfachenden Ansätzen

Die Simulation von Temperaturfeldern beschränkt sich auftragsgemäß auf die Anwendung zweier auf dem Markt vorhandener Programme sowie auf die in **Tab. 2.1** beschriebenen hydrogeologischen Situationen und den in **Kap. 2.2** dokumentierten Umfang der thermischen Nutzung.

4.1 Beschreibung der vorhandenen Programme

Bei den Programmen handelt es sich um:

- Tempfeld
- Groundwater Energy Designer (GED)

Tempfeld

Das Programm Tempfeld ist eine Entwicklung der Fa. GEOsens in Ebringen. Bezüglich der Berechnungsgrundlagen orientiert sich Tempfeld an den Empfehlungen des Leitfadens der LfU Baden-Württemberg (WILLIBALD 1980). Es werden zwei unterschiedliche semi-analytische Berechnungsverfahren bereitgestellt. Zu unterscheiden sind die so genannten Algorithmen „mit Vermischung“ und „ohne Vermischung“.

Der Algorithmus „mit Vermischung“ beinhaltet eine stark vereinfachende analytische Lösung der zweidimensionalen Transportgleichung mit permanenter punktförmiger Stoff- bzw. Wärmequelle. Dabei werden folgende Mechanismen berücksichtigt:

- Ausbreitung mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion

Es wird eine parallele Grundströmung vorausgesetzt. Die hydraulischen Auswirkungen der Entnahme bzw. Rückgabe des von der Wärmepumpe genutzten Grundwassers auf das Strömungsfeld werden vernachlässigt. Zur Berücksichtigung der Dispersion muss die Dispersivität eingegeben werden. In Anlehnung an WILLIBALD 1980 bietet die Programmhilfe Anhaltswerte, mit der die Dispersion über Materialparameter (Materialien: Sand, Kies und Grobkies) beschrieben wird. Die durch die Makrodispersion bedingte Skalenabhängigkeit (siehe **Kap. 3.1**) bleibt dabei unberücksichtigt.

Im Algorithmus „ohne Vermischung“ werden die Mechanismen

- Ausbreitung mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion) und
- Wärmeaustausch mit der Atmosphäre

der Temperaturfeldberechnung zu Grunde gelegt. Zunächst wird hierzu ein Strömungsfeld berechnet, das sich aus der Überlagerung einer parallelen Grundströmung mit dem Zugabebrunnen ergibt. Dadurch wird der Infiltrationsbereich abgegrenzt. Die Beeinflussung durch den Entnahmebrunnen wird dabei vernachlässigt. Innerhalb des Infiltrationsbereichs werden Linien gleicher Verweilzeit für die konvektive Ausbreitung errechnet. Für jeden Ort innerhalb des Infiltrationsbereiches wird dann der Abbau der anfänglichen Temperaturänderung von der Einleitstelle über einen zeitabhängigen Austausch mit der Atmosphäre errechnet (Gleichung 9 bzw. 10 in WILLIBALD 1980).

Groundwater Energy Designer (GED)

Beim Programm Groundwater Energy Designer (GED) handelt es sich um eine Entwicklung der Colenco Power Engineering AG aus Baden, Schweiz (POPPEI et al. 2006). Neben der reinen Temperaturfeldberechnung können mit dem Programm auch Energiebedarfsanalysen und Brunnendimensionierungen durchgeführt werden. Die Temperaturfeldberechnung erfolgt numerisch. Diese basiert auf einer Strömungsberechnung (natürliche Grundströmung unter Berücksichtigung der Absenkungen und Aufhöhungen des Grundwasserspiegels durch mehrere Entnahme- und Zugabebrunnen) und einer thermischen Berechnungen unter Berücksichtigung der Mechanismen:

- Ausbreitung mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds

Die vorliegende Programm-Version (Stand Dezember 2006) berücksichtigt hinsichtlich der numerischen Umsetzung (insbesondere räumliche Diskretisierung und Zeitabhängigkeiten) die in der Schweiz in Genehmigungsverfahren übliche Vorgehensweise. So konzentrieren sich die Berechnung und die Darstellung auf die 3 K Temperaturänderung (diese Einstellung könnte nach Auskunft der Entwickler durch eine Programmänderung angepasst werden). Es sind auch Berechnungen für andere Temperaturänderungen möglich, die aber wegen der mit dem Abstand zum Infiltrationsbrunnen gröberen räumlichen Diskretisierung unschärfer werden. Die thermische Berechnung erfolgt instationär. Das berechnete Temperaturfeld kann nach 10 oder 30 Jahren dargestellt werden. Nach diesen Zeiträumen kann für die vorliegenden Konfigurationen von quasi-stationären Verhältnissen ausgegangen werden.

4.2 Vergleichsrechnungen

4.2.1 Übersicht

Nachfolgend dokumentierter Vergleich der drei vereinfachenden Modellansätze

- Tempfeld „mit Vermischung“,
- Tempfeld „ohne Vermischung“ und
- Groundwater Energy Designer (GED)

bezieht sich auf die in **Tab. 2.1** beschriebenen 6 hydrogeologischen Situationen und zwei unterschiedliche thermische Nutzungen gemäß Kap. 2.2 (Energieentzug aus dem Grundwasser von überschlägig 15.000 kWh/Jahr und 45.000 kWh/Jahr entsprechend gemittelten Infiltrationsraten von 0,1 l/s und 0,3 l/s). Es wird einheitlich eine Temperatur des infiltrierten Wassers von 4 °C (bzw. K) unter der unbeeinflussten Grundwassertemperatur angesetzt.

4.2.2 Parametrisierung der Dispersion in Tempfeld

Die in **Kap 4.2.5** dokumentierten Berechnungen mittels Tempfeld „mit Vermischung“ sind abweichend von den Zahlenangaben zu Dispersivitäten in WILLIBALD 1980, die eine materialabhängige Definition (Materialien: Sand, Kies und Grobkies) der Dispersion beinhalten, durchgeführt worden. Entsprechend den Ausführungen in **Kap. 3.1** wurden die Dispersivitäten so gewählt, dass die Abhängigkeit von der Längenskala des Ausbreitungsvorgangs berücksichtigt wird. Der in **Abb. 3.1** dargestellte stetige Zusammenhang zwischen Längsdispersivität und Längsausdehnung wird dazu gemäß **Tab. 4.1** näherungsweise in 5 Geltungsbereiche aufgeteilt. Für die Berechnung von Temperaturfeldern steht gemäß den Diskussionen und Entwicklungen im Arbeitskreis die Länge der Fahne bis zur 1°C-Isotherme (Entfernung, in der noch eine Änderung der Temperatur gegenüber der unbeeinflussten Grundwassertemperatur von 1°C (bzw. 1K) beträgt) bei Genehmigungsfragen im Vordergrund. Daher ist es angebracht, die Länge der Fahne bis zur 1°C-Isotherme als Längenskala des zu betrachtenden Ausbreitungsvorgangs zu verwenden. Die Programmeingabe von Tempfeld benötigt als Parameter für die Dispersion ausschließlich die Quersdispersivität (Transversale Dispersivität). Diese wird gemäß den Ausführungen in Kap. 3.1 näherungsweise als 1/10 der Längsdispersivität angesetzt.

Tab. 4.1: Verwendete Dispersivitäten in Abhängigkeit von der Längsausdehnung des zu betrachtenden Ausbreitungsvorgangs

Längsausdehnung x [m]	Längsdispersivität [m]	Querdispersivität [m]
$x < 50$	1	0,1
$50 \leq x < 100$	1,8	0,18
$100 \leq x < 250$	3,4	0,34
$250 \leq x < 500$	6,2	0,62
$500 \leq x < 1000$	10	1

Die Berechnung der Längsausdehnung einer Fahne erfolgt in Tempfeld „mit Vermischung“ mit der Gl. 4.1.

$$x_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \Delta T} \left(\frac{Q \Delta T_E}{m \cdot v_f} \right)^2 \quad (\text{Gl. 4.1})$$

mit:

- x_0 = Abstand der gesuchten Isotherme vom Infiltrationsbrunnen [m]
- α_T = Querdispersivität [m]
- Q = Infiltrationsrate [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
- m = Grundwassererfüllte Mächtigkeit [m]
- v_f = Filtergeschwindigkeit [m s^{-1}]
- ΔT_E = Unterschied zwischen Einleittemperatur und unbeeinflusster Grundwassertemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- ΔT = Gesuchte Isotherme

Um sicher zu stellen, dass eine zutreffende Kombination aus Querdispersivität und Länge der Fahne bis zur 1°C -Isotherme ausgewählt wird, sind in einem ersten Schritt Berechnungen mit allen in **Tab. 4.1** dokumentierten Querdispersivitäten unter Verwendung von **Gl. 4.1** erforderlich. Die Ergebnisse für Situation 3 und bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr sind als Beispiel in **Tab. 4.2** dargestellt.

Tab. 4.2: Länge der Fahne vom Infiltrationsbrunnen bis zur 1°C-Isotherme für unterschiedliche Querdispersivitäten für Situation 3 bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr bzw. 0,1 l/s

Querdispersivität [m]	Gültige Längsausdehnung x [m] für Querdispersivität	Länge der Fahne bis zur 1°C-Isotherme [m] gemäß Gl. 4.1
0,1	$x < 50$	815
0,18	$50 \leq x < 100$	453
0,34	$100 \leq x < 250$	240
0,62	$250 \leq x < 500$	131
1	$500 \leq x < 1000$	81

In einem zweiten Schritt muss dann geprüft werden, für welche Querdispersivität die berechnete Längen der 1°C-Isotherme mit dem Geltungsbereich der Längsausdehnung übereinstimmt. Bei Übereinstimmung wird diese Kombination aus Querdispersivität und Länge der 1°C-Isotherme als zutreffend ausgewählt. Bei dem in **Tab. 4.2** gezeigten Beispiel ist dies für die Querdispersivität 0,34 m der Fall.

Da der stetige Zusammenhang zwischen Dispersivität und Längsausdehnung aus Vereinfachungsgründen nur über 5 Bereiche approximiert wird, gibt es Konfigurationen, für die keine Übereinstimmung erzielt werden kann. Eine derartige Konfiguration ist in **Tab. 4.3** dokumentiert. Aus **Tab. 4.3** wird ersichtlich, dass die berechnete Länge der Fahne bei einer Querdispersivität von 0,18 m etwas oberhalb des Gültigkeitsbereiches liegt und die berechnete Länge der Fahne bei einer Querdispersivität von 0,34 m etwas unterhalb des Gültigkeitsbereiches liegt. In diesen Fällen wird, die Dispersivität im Hinblick auf den vorgesehenen Einsatzbereich der vereinfachenden Modelle so gewählt, dass eine möglichst konservative Prognose – dies entspricht einer großen Fahnenlänge – erfolgt. Bei den nachfolgend dokumentierten Rechenläufen ist daher in vergleichbaren Fällen die kleinere Querdispersivität als zutreffende gewählt worden, da damit größere Fahnenlängen errechnet werden. Grundsätzlich wären auch andere Vorgehensweisen denkbar (z.B. Einführung weiterer Gültigkeitsbereiche oder iteratives Vorgehen mit stetigem Ansatz für den Zusammenhang von Dispersivität

und Länge der Fahne). Vor dem Hintergrund, eine praktikable Vorgehensweise für einen Leitfaden zu entwickeln, wird jedoch auf eine verfeinerte Vorgehensweise verzichtet. Eine verfeinerte Vorgehensweise könnte auch dahingehend missinterpretiert werden, dass eine richtigere Lösung erzielt wird. Dies sollte in Anbetracht der Parameterunsicherheit nicht suggeriert werden.

Tab. 4.3: Länge der Fahne vom Infiltrationsbrunnen bis zur 1°C-Isotherme für unterschiedliche Querdispersivitäten für Situation 1 bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr bzw. 0,1 l/s

Querdispersivität [m]	Gültige Längsausdehnung x [m] für Querdispersivität	Länge der Fahne bis zur 1°C-Isotherme [m] gemäß Gl. 4.1
0,1	$x < 50$	318
0,18	$50 \leq x < 100$	177
0,34	$100 \leq x < 250$	94
0,62	$250 \leq x < 500$	51
1	$500 \leq x < 1000$	32

4.2.3 Parametrisierung des Austausches mit der Atmosphäre in Tempfeld

Für die Berechnungen mit Tempfeld „ohne Vermischung“ muss die Wärmeleitfähigkeit für die ungesättigte Zone eingegeben werden. Die Programmhilfe bietet hier unter Quellenangabe VDI 4640 eine Bandbreite für unterschiedliche Materialien und unterschiedliche Wassersättigungen zwischen 0,4 und 2,4 W / (m K) an. Für die nachfolgend dargestellten Berechnungen wird einheitlich ein Erfahrungswert von 2 W / (m K) angesetzt. Grundsätzlich führen hohe Werte für die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu niedrigen Wärmeleitfähigkeiten zu kleineren Temperaturfahnen, weil hohe Werte den Wärmestrom zur Atmosphäre begünstigen. Dieser in Anbetracht der Bandbreite von 0,4 bis 2,4 W / (m K) vergleichsweise hohe Wert von 2 W / (m K) führte bei den meisten der nachfolgend dargestellten Simulationen im Vergleich zu den anderen Programmansätzen zu vergleichsweise großen Längen der Temperaturfahnen. Auf die Dokumentation von Rechenläufen mit Verkleinerung der Wärmeleitfähigkeit wird daher aus Gründen der

Übersichtlichkeit verzichtet, da diese zu noch größeren Fahnenlängen führen würden.

4.2.4 Festlegung der Simulationsdauer in GED

Die nachfolgenden Berechnungen mittels GED (instationärer Ansatz) basieren einheitlich auf einer Simulation über 30 Jahre. Durch diese Vorgehensweise kann davon ausgegangen, dass alle drei untersuchten vereinfachenden Modellansätze einheitlich stationäre bzw. quasi-stationäre Betrachtungen sind.

4.2.5 Darstellung der Berechnungsergebnisse

Bei sämtlichen Simulationen ergeben sich Fahnenbreiten (Kriterium 1°C-Isotherme), zwischen 1 m und 40 m. Die Größenordnung von 10 m überwiegt. Für die Fragestellung „Genehmigungsfähigkeit einer Anlage“ sind diese Unterschiede in erster Näherung von untergeordneter Bedeutung, da typische Flurstücksbreiten erreicht werden. Auf eine Darstellung von Fahnenbreiten wird daher bei den nachfolgenden vergleichenden Betrachtungen verzichtet. Nachfolgende Abbildungen konzentrieren sich daher auf die Länge von Temperaturänderungen für die 3°C, die 2°C und die 1°C Isotherme.

Die Rechenergebnisse sind in insgesamt 12 Diagrammen wie folgt dargestellt:

- Situation 1, Energieentzug 15.000 kWh/Jahr bzw. 0,1 l/s: Abb. 4.1 a)
- Situation 1, Energieentzug 45.000 kWh/Jahr bzw. 0,3 l/s: Abb. 4.1 b)

- Situation 2, Energieentzug 15.000 kWh/Jahr bzw. 0,1 l/s: Abb. 4.2 a)
- Situation 2, Energieentzug 45.000 kWh/Jahr bzw. 0,3 l/s: Abb. 4.2 b)

- Situation 3, Energieentzug 15.000 kWh/Jahr bzw. 0,1 l/s: Abb. 4.3 a)
- Situation 3, Energieentzug 45.000 kWh/Jahr bzw. 0,3 l/s: Abb. 4.3 b)

- Situation 4, Energieentzug 15.000 kWh/Jahr bzw. 0,1 l/s: Abb. 4.4 a)
- Situation 4, Energieentzug 45.000 kWh/Jahr bzw. 0,3 l/s: Abb. 4.4 b)

- Situation 5, Energieentzug 15.000 kWh/Jahr bzw. 0,1 l/s: Abb. 4.5 a)
- Situation 5, Energieentzug 45.000 kWh/Jahr bzw. 0,3 l/s: Abb. 4.5 b)

- Situation 6, Energieentzug 15.000 kWh/Jahr bzw. 0,1 l/s: Abb. 4.6 a)
- Situation 6, Energieentzug 45.000 kWh/Jahr bzw. 0,3 l/s: Abb. 4.6 b)

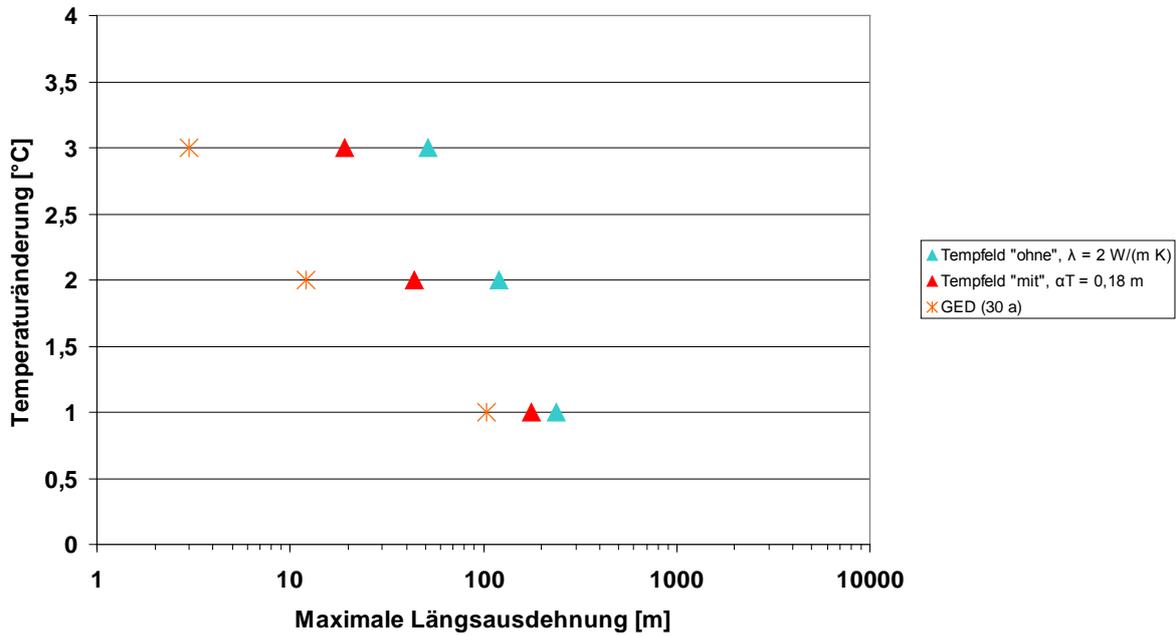


Abb. 4.1 a): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 1 bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr

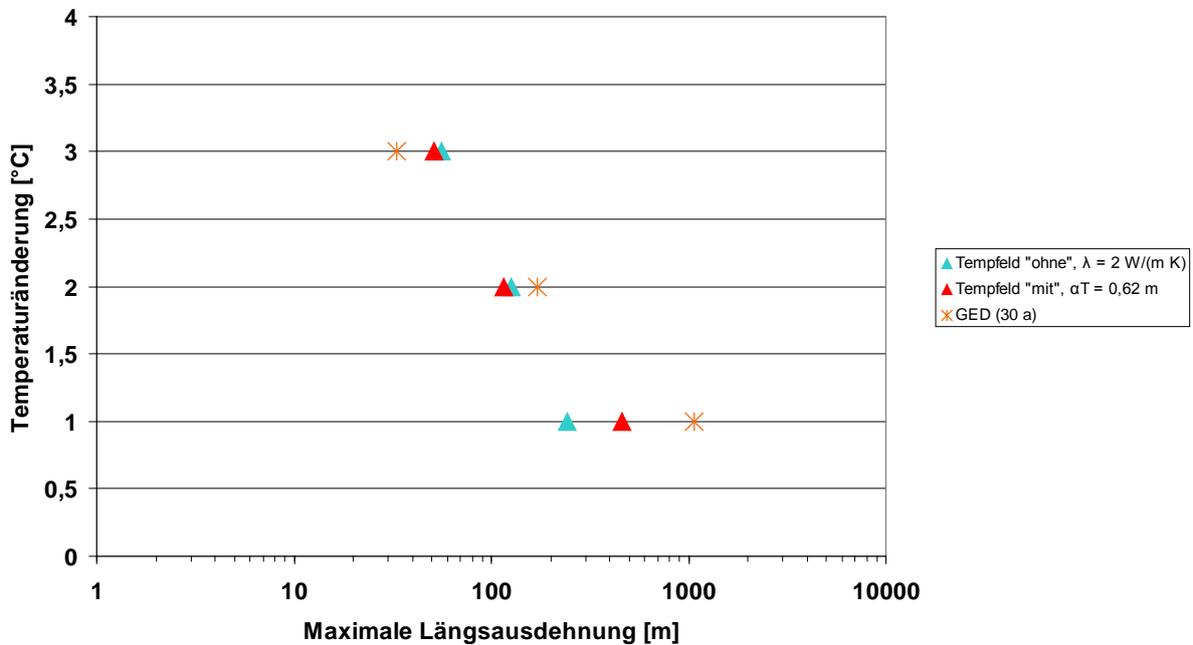


Abb. 4.1 b): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 1 bei einem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr

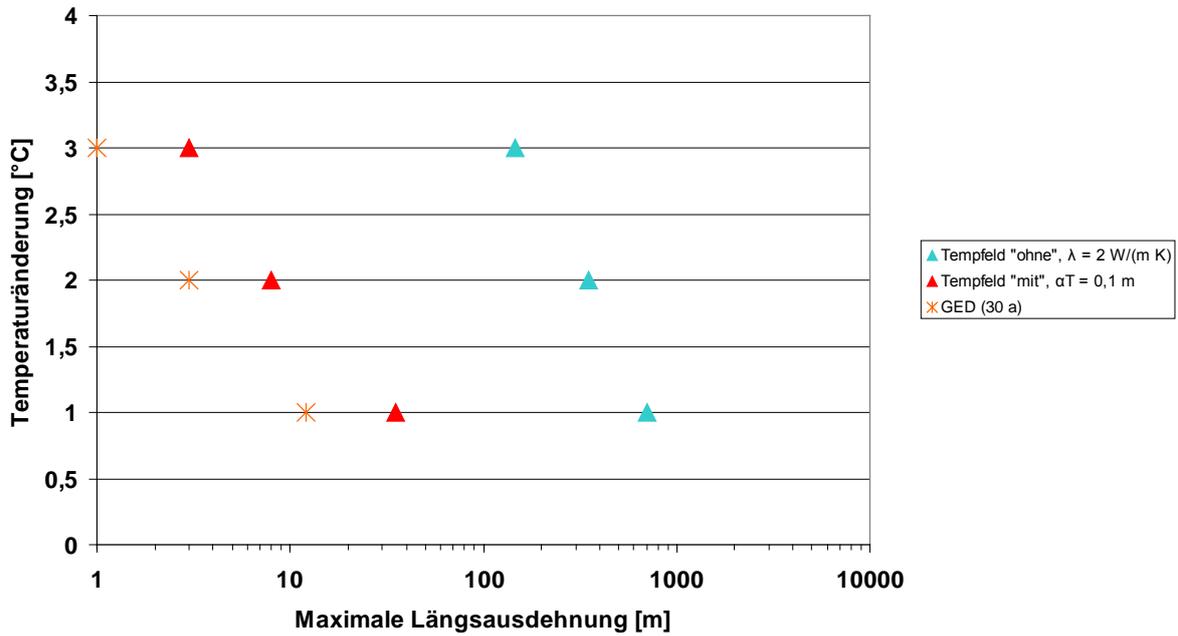


Abb. 4.2 a): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 2 bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr

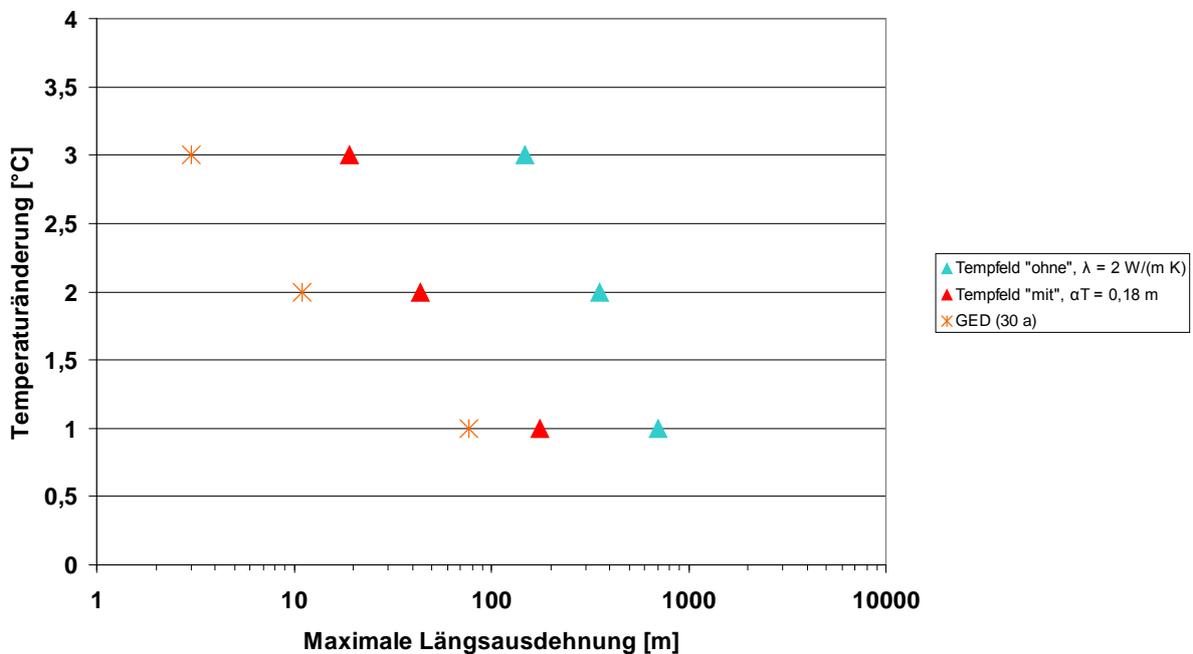


Abb. 4.2 b): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 2 bei einem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr

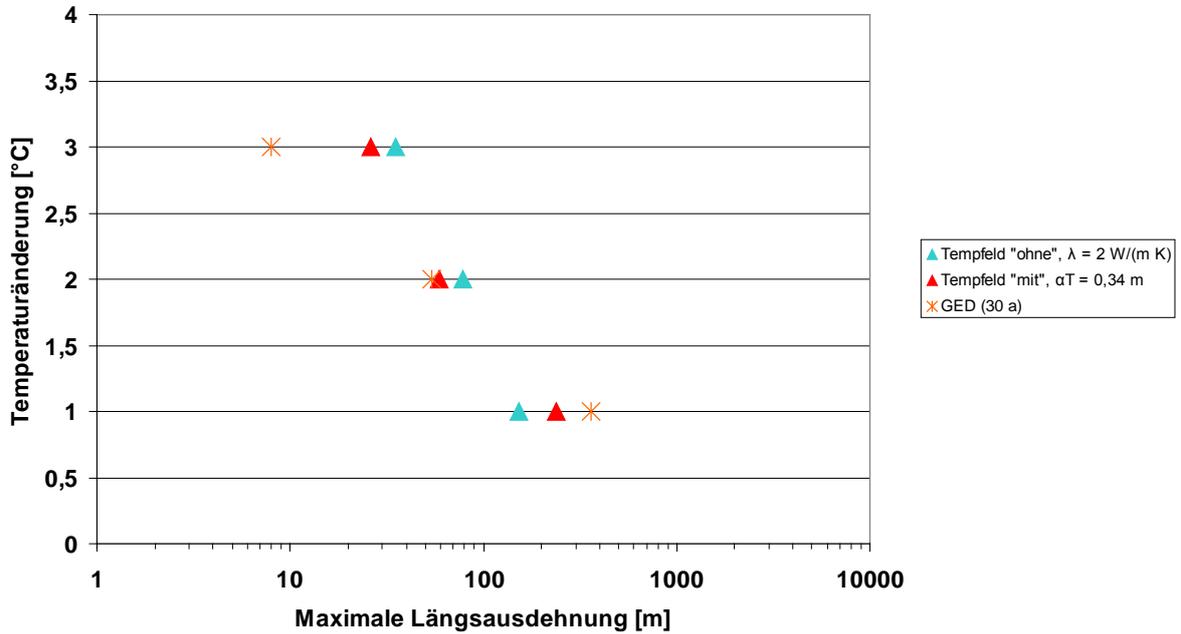


Abb. 4.3 a): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachen Ansätzen für Situation 3 bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr

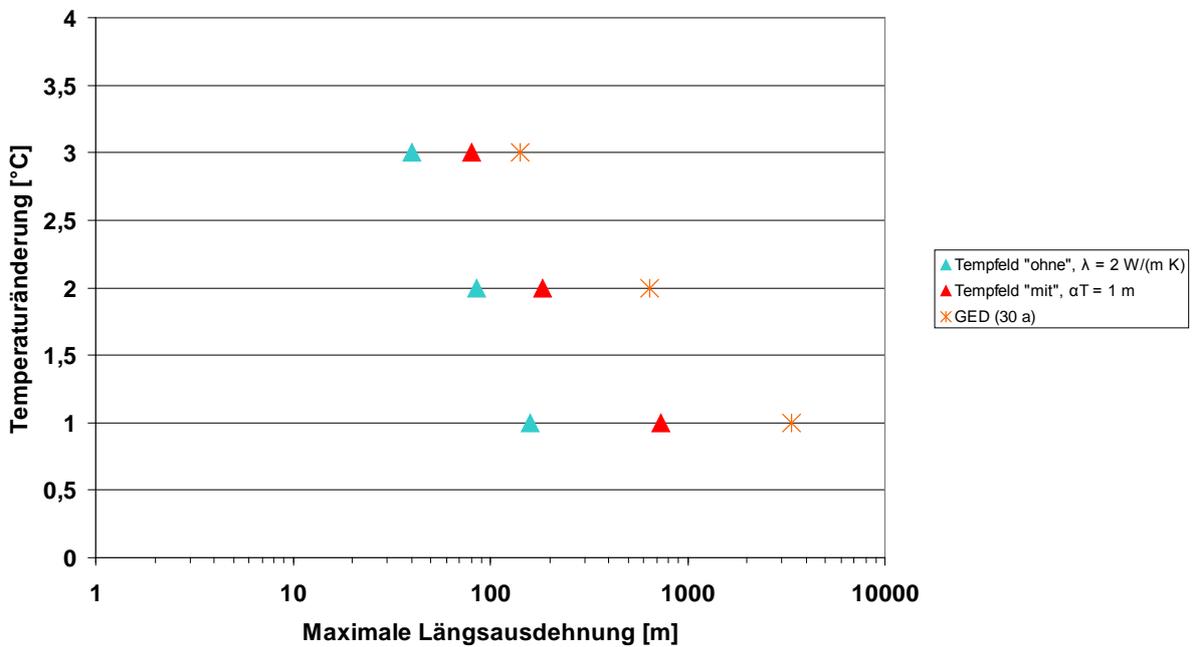


Abb. 4.3 b): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachen Ansätzen für Situation 3 bei einem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr

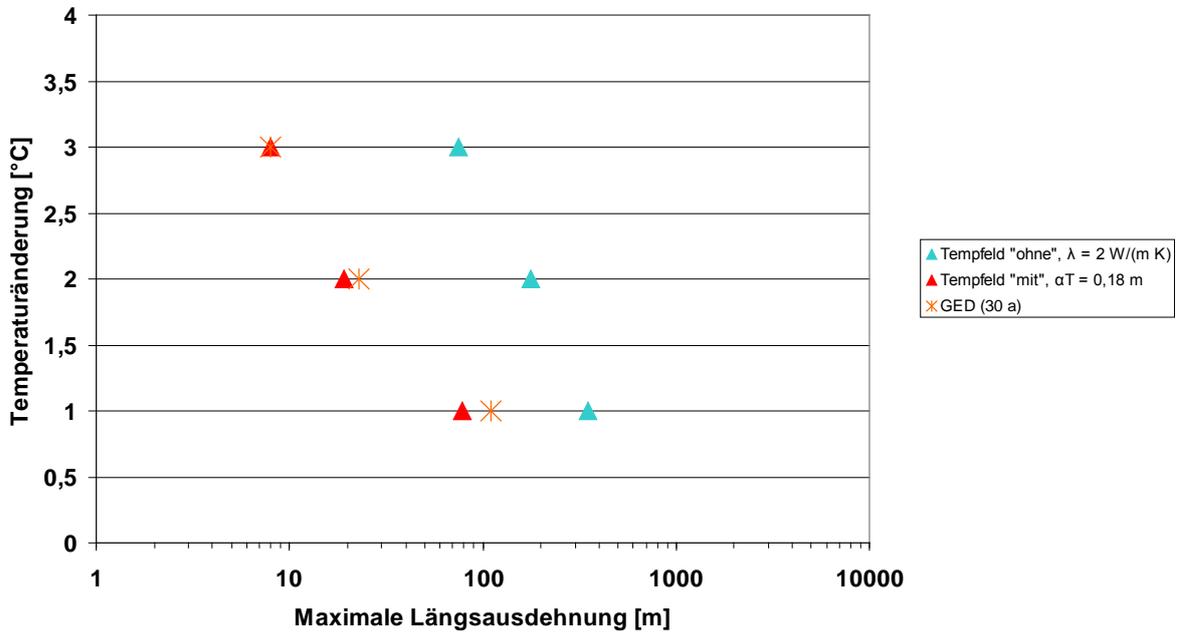


Abb. 4.4 a): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 4 bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr

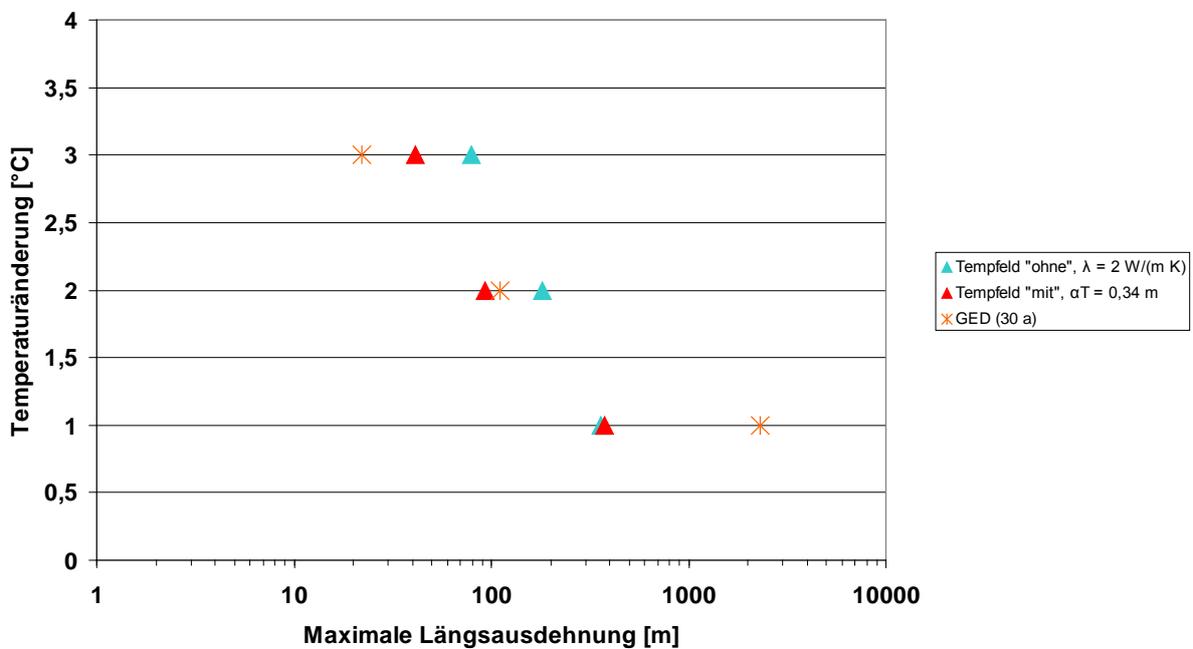


Abb. 4.4 b): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 4 bei einem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr

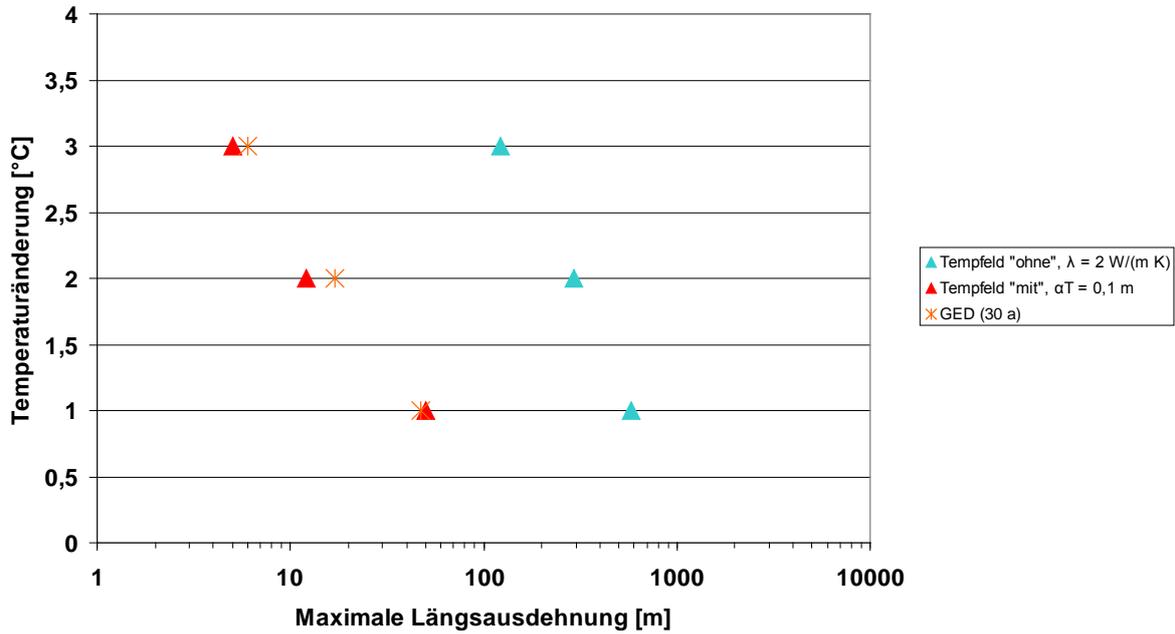


Abb. 4.5 a): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 5 bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr

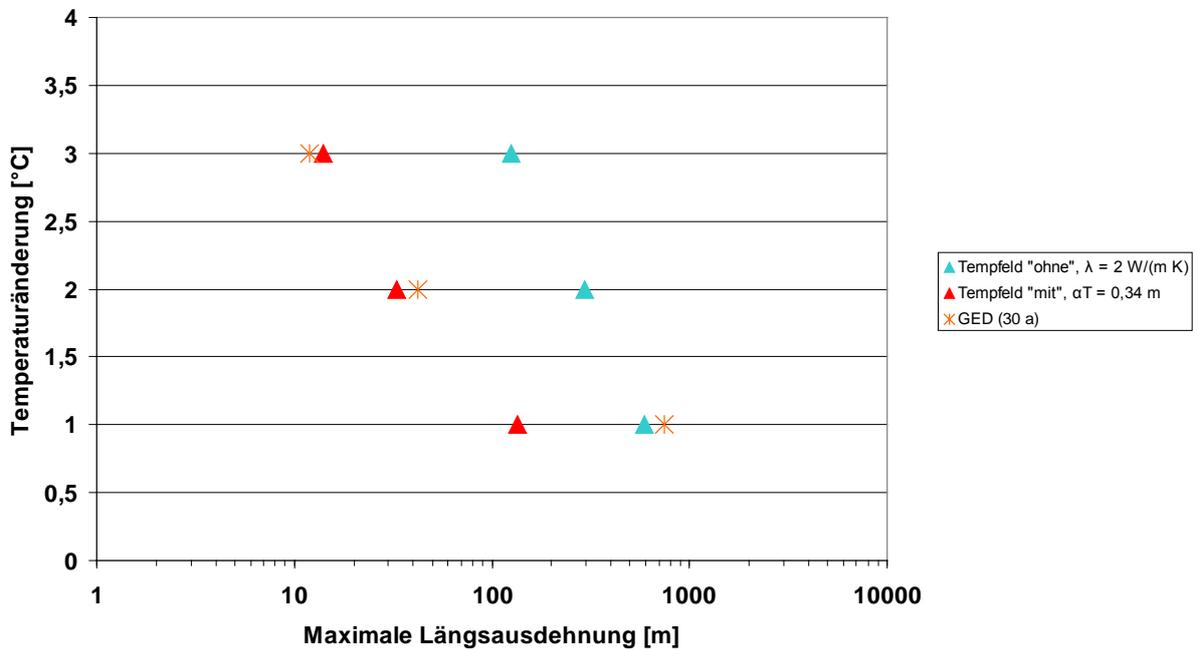


Abb. 4.5 b): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 5 bei einem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr

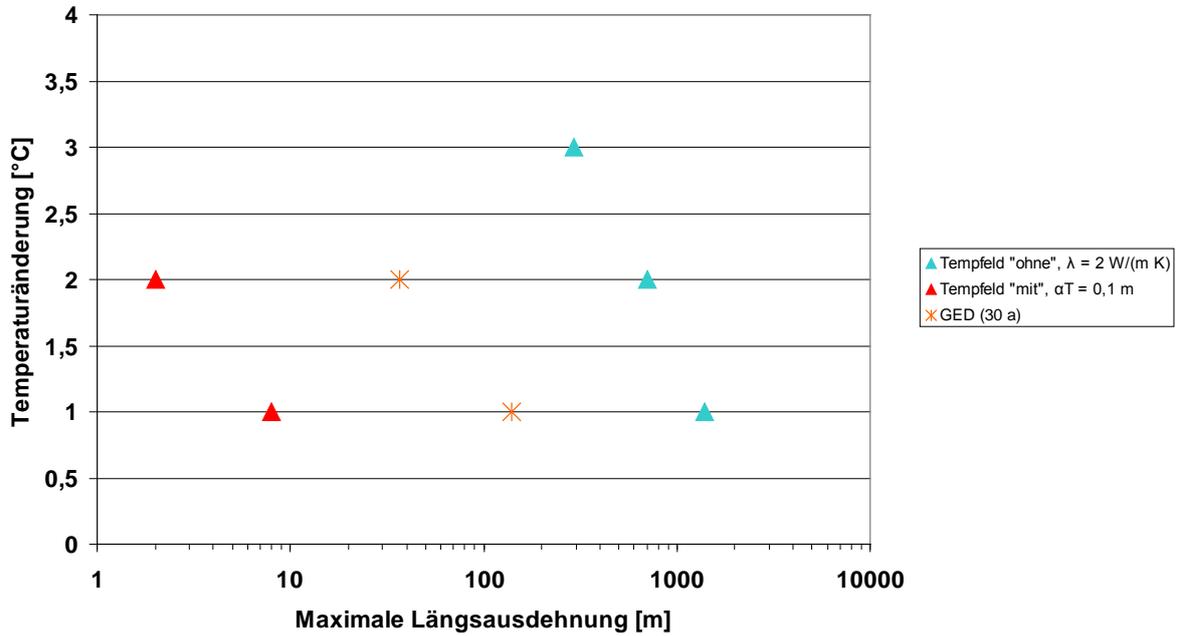


Abb. 4.6 a): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 6 bei einem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr

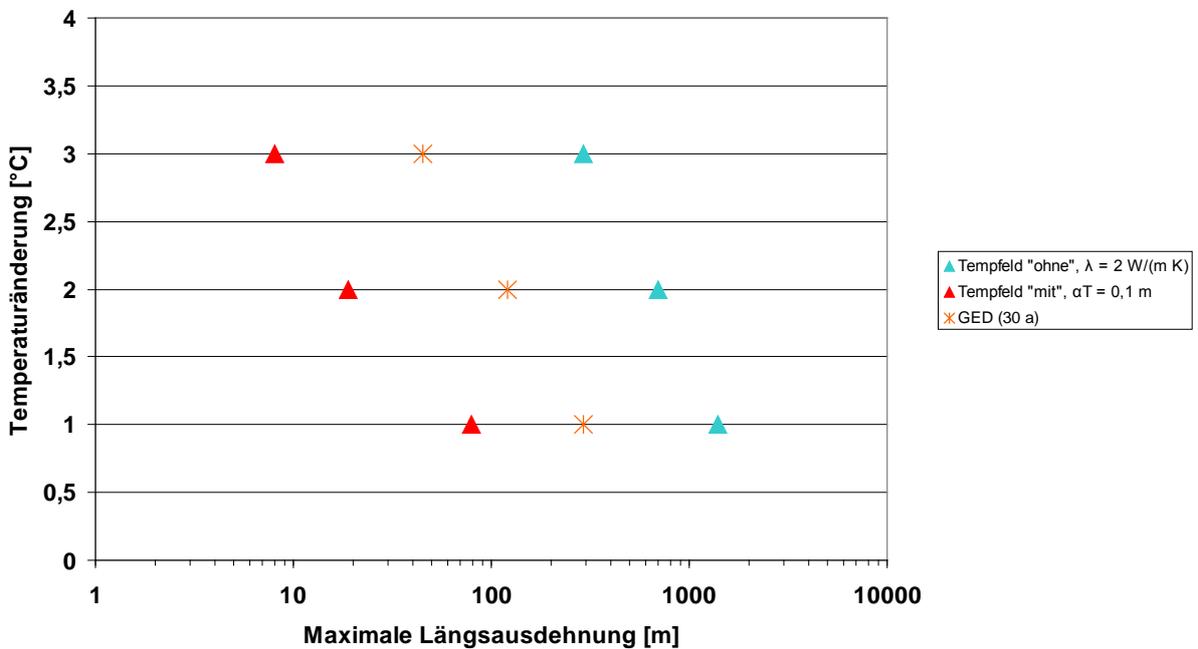


Abb. 4.6 b): Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit unterschiedlichen vereinfachten Ansätzen für Situation 6 bei einem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr

4.2.6 Diskussion der Berechnungsergebnisse

Die Vergleichsrechnungen zeigen erwartungsgemäß, dass mit den unterschiedlichen Ansätzen grundsätzlich unterschiedliche Längsausdehnungen simuliert werden. Daher kann nur die ungefähre Größenordnung als Betrachtungsmaßstab für den bewertenden Vergleich verwendet werden.

Unter Ansatz dieser Betrachtungsweise wird deutlich, dass bei plausiblen Werten für die Dispersivität der Rechenansatz mit Dispersion (Tempfeld „mit Vermischung“) vergleichbare Werte wie der Rechenansatz mit Konduktion (GED) liefert. Nur bei extrem großen Abstandsgeschwindigkeiten (siehe z.B. Abb. 4.6 für Situation 6 mit mehr als 20 m/Tag) liefert der dispersive Ansatz wegen der sehr starken Vermischung erwartungsgemäß kleinere Ausdehnungen als der konduktive Ansatz. Vereinzelt treten bei den Berechnungen mit GED in Relation zu den dispersiven Berechnungen zwischen der 2°C-Isotherme und der 1°C-Isotherme größere Sprünge auf. Eine mögliche Erklärung dafür ist die programminterne räumliche Diskretisierung, die sich auf die Prognose der 3°C-Isotherme konzentriert und in diesem Bereich eine höhere Auflösung besitzt als im Fernfeld.

Bei den meisten Situationen liefert der Rechenansatz, der den Austausch mit der Atmosphäre berücksichtigt, trotz der vergleichsweise groß gewählten Wärmeleitfähigkeit der ungesättigten Zone merklich größere Fahnenlängen als die beiden anderen Rechenansätze. Dies ist die Folge der relativ kleinen Fahnenbreiten und der damit verbundenen kleinen Austauschfläche.

Hinsichtlich möglicher nachbarschaftlichen Betroffenheiten zeigen die Prognosen mit vereinfachenden Ansätzen auf, dass nahezu bei allen Ansätzen und Situationen Längen der 1°C-Isotherme errechnet werden, die über typische Grundstücksgrenzen hinausreichen. Metergenaue Aussagen sind mit diesen Ansätzen nicht sinnvoll.

Aus hydraulischer Sicht ist auffallend, dass in Relation zur Abstandsgeschwindigkeit und der damit innerhalb kurzer Zeiträume erzielbaren Weglängen oftmals kurze Fahnenlängen zu beobachten sind. Insbesondere bei hohen Abstandsgeschwindigkeiten stellt dies die Eignung von stationären Prognosen unter Annahme von gemittelten Jahreswerten für Genehmigungsverfahren in Frage.

4.3 Bewertung und Folgerungen

Auf Grund der Ergebnisse der in Kap. 4.2 beschriebenen Vergleichsrechnungen sowie den Ausführungen in Kap. 3.2 und 3.3 kann für die Prognose von Temperaturfeldern für die thermische Nutzung zusammengefasst werden:

Grundsätzliche Folgerungen zur Wahl der hydrogeologischen Parameter

- Eine Berechnung mit vereinfachenden Ansätzen hinsichtlich der thermischen Vorgänge setzt bereits eine vereinfachende Betrachtung und damit Idealisierung der tatsächlichen hydrogeologischen Verhältnisse voraus. So werden im Betrachtungsgebiet die hydrogeologischen Parameter als ausreichend bekannt und konstant vorausgesetzt.
- Die Annahme konstanter hydrogeologischer Parameter im Betrachtungsgebiet entspricht der fachlichen Praxis bei vielen wasserwirtschaftlichen Fragestellungen (z.B. auch bei der Berechnung von 50-Tagelinien für die Ausweisung von vielen Wasserschutzgebieten in Baden-Württemberg). Es handelt sich somit um eine in Anbetracht der in einem Genehmigungsverfahren zu prüfenden Sachverhalte gängige Vorgehensweise.
- Simulationen zur Ausdehnung von Temperaturfeldern weisen eine hohe Sensitivität hinsichtlich der verwendeten hydrogeologischen Parameter auf. Vergleichsweise kleine Änderungen eines Parameters führen zu merklichen Änderungen z.B. von Reichweiten einer Temperaturfahne. Antragsteller, mögliche Betroffene und die an einem Genehmigungsverfahren beteiligten Behörden sollten daher ausreichend darüber aufgeklärt sein, dass eine Prognose von Temperaturfahnen mit den für ein Genehmigungsverfahren üblichen Methoden und Erkenntnissen lediglich eine erste Einschätzung darstellt. Diese Einschränkung ist jedoch nicht nur bei der Prognose von Temperaturfahnen vorhanden. Derartige Einschränkungen treten bei vielen wasserwirtschaftlichen Prognosen auf. Sie können nur durch einen sehr großen Erkundungsaufwand überwunden werden.

Bemessungsfall

- Bei größeren Abstandsgeschwindigkeiten (größer 1-2 m/Tag) des Grundwasserleiters können Temperaturfahnen bei der verstärkten Nutzung einer Grundwasserwärmepumpe in der winterlichen Heizperiode weiter reichen, als bei Ansatz von Jahresmittelwerten für den Energieentzug. Unabhängig von der Abstandsgeschwindigkeit weisen die Temperaturfelder für die winterliche Heizperiode größere Breiten auf als bei Ansatz von Jahresmittelwerten.

- Dies kann dazu führen, dass eine Prognose unter Ansatz von Jahresmittelwerten die Betroffenheit einer im Umfeld der zu genehmigenden Anlage bereits vorhandenen Anlage nicht erfasst.

Anzusetzende Prozesse

- Für die Prognose von einzelnen Temperaturfahnen kleiner Anlagen ist bei den in Baden-Württemberg zu erwartenden typischen Verhältnissen davon auszugehen, dass eine vereinfachende Betrachtung, bei der nur die Prozesse Konvektion und Austausch mit der Atmosphäre angesetzt werden, unrealistisch lange Temperaturfahnen liefert. Zudem ist zu beachten, dass der Austausch mit der Atmosphäre insbesondere in der Hauptbetriebszeit einer Grundwasserwärmepumpe wegen der geringen winterlichen Temperaturen an der Erdoberfläche nicht stattfinden kann. Daher sollten Prognosen, die auf dem Austausch mit der Atmosphäre basieren, für einzelne Temperaturfahnen nicht herangezogen werden. Der Austausch mit der Atmosphäre ist allerdings bei regionalen thermischen Bewirtschaftungsfragen ein wichtiger und nicht zu vernachlässigender Prozess.
- Bei stationären Prognosen spielt der Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst keine Rolle, da die Stationarität ausreichend Zeit für diesen Austausch impliziert.
- Stationäre Prognosen (z.B. Betrachtungen unter Ansatz eines zeitlich gemittelten Jahresbetriebs), die auf einer Kombination von Konvektion und Dispersion beruhen, können als grundsätzlich geeignet angesehen werden.
- Bei instationären Prognosen (z.B. erhöhte thermische Nutzung während des Winterbetriebs) sollte darüber hinaus der die Ausbreitung verzögernde Effekt durch den Wärmeausgleich zwischen dem Grundwasser und dem Korngerüst angesetzt werden.
- Die zusätzliche Berücksichtigung der Wärmeleitung an den Flanken eines Temperaturfelds führt bei Ansätzen, die bereits eine dispersive Quervermischung berücksichtigen, zu keiner merklichen Veränderung des Temperaturfelds. Dies gilt sowohl für stationäre als auch für instationäre Berechnungen.
- Die zusätzliche Berücksichtigung der Wärmeleitung an der Sohle eines Temperaturfelds führt bei Ansätzen, die bereits eine dispersive Quervermischung und die Wärmeleitung an den Flanken berücksichtigen, zu einer merklichen Verkleinerung des Temperaturfelds. Dies gilt sowohl für stationäre als auch für instationäre Berechnungen.

Es ist explizit darauf hinzuweisen, dass eine Verallgemeinerung dieser Erkenntnisse oder Übertragung auf beliebige thermische Nutzungen des Grundwassers nicht zulässig ist. Die Erkenntnisse gelten im Wesentlichen nur für vergleichsweise gut durchlässige Grundwasserleiter mit relativ hohen Abstandsgeschwindigkeiten, deren thermische Nutzung sich durch einen geringen Energieentzug auszeichnet.

5 Analytischer Näherungsansatz für instationäre Berechnungen

In typischen Einsatzgebieten von Grundwasserwärmepumpen in Baden-Württemberg herrschen große Abstandsgeschwindigkeiten (größer 1-2 m/Tag) vor, so dass Temperaturfahnen bei der verstärkten Nutzung einer Grundwasserwärmepumpe in der winterlichen Heizperiode weiter reichen können, als bei Ansatz eines Jahresmittelwerts für den Energieentzug.

Dies kann dazu führen, dass eine Prognose unter Ansatz von Jahresmittelwerten die Betroffenheit einer im Umfeld der zu genehmigenden Anlage bereits vorhandenen Anlage nicht erfasst.

Allerdings darf auch nicht davon ausgegangen werden, dass eine stationäre Prognose unter Ansatz einer dauerhaften (gedanklich gesehen ganzjährigen) Nutzung im Umfang des Winterbetriebs zutreffend ist. Diese würde meist die Ausdehnung einer Temperaturfahne, die z.B. bei einem 4-monatigen Winterbetrieb entsteht, erheblich überschätzen.

Eine fachgerechte Berücksichtigung des Winterbetriebs kann daher in vielen Fällen nur durch eine entsprechende instationäre Prognostik erfolgen. Dies können die untersuchten Programme mit vereinfachenden Ansätzen beim derzeitigen Entwicklungsstand nicht leisten.

5.1 Grundlage

Die analytische Lösung der zweidimensionalen Transportgleichung mit permanenter punktförmiger Stoffquelle mit konstanter Stärke bildet die Grundlage für die stark vereinfachende Formulierung gemäß Gl. 4.1 (Berechnungsgrundlage für Tempfeld „mit Vermischung“). Die vollständige Formulierung lautet (KINZELBACH 1987):

$$c(x,y,t) = \frac{M}{4 \cdot n_f \cdot m \cdot v_a \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha_T \cdot \gamma}} \cdot \exp\left(\frac{x - r \cdot \gamma}{2 \cdot \alpha_L}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r - \gamma \cdot v_a \cdot t / R}{2 \sqrt{v_a \cdot \alpha_L \cdot t / R}}\right) \quad (\text{Gl. 5.1})$$

$$\text{mit: } r = \sqrt{x^2 + y^2 \frac{\alpha_L}{\alpha_T}}; \quad \gamma = \sqrt{1 + 4 \cdot \alpha_L \cdot \lambda \cdot \frac{R}{v_a}}$$

mit:

x, y	=	Längs- und Querkoordinate [m] (x in Strömungsrichtung, y senkrecht zur Strömungsrichtung)
t	=	Zeit seit Beginn der Stoffeinleitung [s]
c	=	Konzentration [g m ⁻³]
M	=	Rate des Stoffeintrags [g s ⁻¹]
n	=	Transportwirksamer Hohlraumanteil [-]
m	=	Genutzte grundwassererfüllte Mächtigkeit [m]
v _a	=	Abstandsgeschwindigkeit [m s ⁻¹]
α _L	=	Längsdispersivität [m]
α _T	=	Querdispersivität [m]
λ	=	Abbaurrate [s ⁻¹]
R	=	Retardation [-]

Bei Gl. 5.1 handelt es sich um eine gebräuchliche Näherungslösung (Annäherung der Hantush-Funktion mittels einer Laplace-Approximation) für die Prognose von Stoffausbreitungen oder für die Auswertung von Markierungsversuchen. Im Bereich $r/(2 \alpha_L) > 1$ liegt der Fehler gegenüber der exakten Lösung unter 10 %. Wenn $r/(2 \alpha_L) > 10$ reduziert sich der Fehler auf unter 1 % (KINZELBACH 1987). Die Lösung ist singular im Ursprung.

Für die Berechnung von Temperaturfahnen muss in Gl. 5.1 die Konzentration c ersetzt werden durch die gesuchte Temperaturänderung ΔT und die Rate des Eintrags M durch das Produkt $Q \cdot \Delta T_E$. Ferner kann der Abbau vernachlässigt werden, so dass sich aus Gl. 5.1 ergibt:

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{Q \Delta T_E}{4 \cdot n_f \cdot m \cdot v_a \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha_T}} \cdot \exp\left(\frac{x-r}{2 \cdot \alpha_L}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r - v_a \cdot t / R}{2 \sqrt{v_a \cdot \alpha_L \cdot t / R}}\right) \quad (\text{Gl. 5.2})$$

mit:
$$r = \sqrt{x^2 + y^2 \frac{\alpha_L}{\alpha_T}}$$

mit:

x, y	=	Längs- und Querkoordinate [m] (x in Strömungsrichtung, y senkrecht zur Strömungsrichtung)
t	=	Zeit seit Beginn der Stoffeinleitung [s]

Q	=	Infiltrationsrate [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
ΔT_E	=	Unterschied zwischen Einleittemperatur und unbeeinflusster Grundwassertemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
ΔT	=	Gesuchte Isotherme [$^{\circ}\text{C}$] (Unterschied zur unbeeinflussten Grundwassertemperatur)
n	=	Transportwirksamer Hohlraumanteil [-]
m	=	Genutzte grundwassererfüllte Mächtigkeit [m]
v_a	=	Abstandsgeschwindigkeit [m s^{-1}]
α_L	=	Längsdispersivität [m]
α_T	=	Querdispersivität [m]
R	=	Retardation [-]

Die Verwendung der Infiltrationsrate Q darf dabei jedoch nicht dahingehend interpretiert werden, dass die analytische Näherungslösung die Veränderung der Grundströmung durch die Infiltration berücksichtigen würde. Die analytische Näherungslösung geht nach wie vor von einer parallelen Grundströmung aus (wie auch das Programm Tempfeld „mit Vermischung“). Aus diesem Grund muss im Nahbereich der Infiltration von Abweichungen ausgegangen werden, die größer sind als die o. g. Fehler, die durch die mathematische Näherung entstehen.

Der Retardationsparameter R kann dazu verwendet werden, prinziphaft die verzögerte Ausbreitung einer Wärmefahne im Vergleich zu einer Schadstofffahne zu simulieren, die im Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst begründet ist. Eine entsprechende Vorgehensweise wurde von CATHOMEN 2002 für die numerische Simulation von Wärmefahnen mit dem weit verbreiteten Stofftransportmodul Mt3dms gewählt. Durch einen Koeffizientenvergleich kann aufgezeigt werden, dass für typische Hohlraumanteile von Kies-Grundwasserleitern und typische Werte der spezifischen Volumenwärme des Korngerüsts, der Retardationsfaktor R für die Berechnung Wärmeausbreitung zwischen 2 und 4 gewählt werden muss.

Bei **Gl. 5.2** handelt es sich um eine instationäre Lösung. Zur Simulation von stationären Temperaturfeldern kann die Lösung verwendet werden, die sich nach langer Zeit ergibt. Bei den 6 untersuchten Situationen gemäß **Tab. 2.1** trifft dies z.B. nach 10.000 Tagen bei Weitem zu. Dies ist darin begründet, dass der Beitrag der Funktion: erfc in Gl. 5.2 für große Werte von t den Zahlenwert 2 annimmt.

5.2 Beispielhafte Berechnungen

Die nachfolgenden **Abb. 5.1 bis 5.6** zeigen Simulationen mittels Gl. 5.2 für die in Tab. 2.1 beschriebenen hydrogeologischen Situationen und einen Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr (entsprechend einer Infiltrationsrate von 0,1 l/s bei einer Temperaturerniedrigung um 4 °C). Die **Abb. 5.7 bis 5.12** zeigen die entsprechenden Simulationsergebnisse für einen Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr bzw. 0,3 l/s. Die Dispersivität ist entsprechend den Ausführungen in Kap. 4.2 (5 skalenabhängige Geltungsbereiche) parametrisiert.

Für die jeweilige Situation werden in jeder Abbildung zwei Simulationen gegenübergestellt. Links sind die entsprechenden quasi-stationären ($t = 10.000$ Tage) Simulationen für einen Lastfall für Jahresmittelwerte dargestellt. Rechts werden entsprechende instationäre Prognosen zum Lastfall Winter gezeigt, die die Auswirkungen durch die verstärkte Nutzung während der Wintermonate repräsentieren. Hierfür sind als Berechnungsdauer 120 Tage angesetzt (entsprechend einem Winterbetrieb von 4 Monaten); der verstärkte Energieentzug wird durch eine Verdoppelung des Wärmeentzugs gegenüber dem Jahresmittelwert simuliert. Bei den instationären Prognosen zum Lastfall Winter ist der Retardationsterm $R = 3$ gewählt.

Durch die Verwendung der analytischen Näherungslösung nach **Gl. 5.2** sei auf folgende Einschränkungen zusammenfassend hingewiesen:

- Es handelt sich um eine mathematische Näherung, die dazu führt, dass erst im Bereich $r/(2 \alpha_L) > 1$ der Fehler gegenüber der exakten Lösung unter 10 % liegt. In den Abb. 5.1 bis 5.12 wird diese Grenze mit schwarzen Balken signalisiert.
- Die analytische Näherungslösung berücksichtigt keine Auswirkungen der Infiltration auf das Strömungsfeld. Die Infiltration des temperaturveränderten Grundwassers an einem Brunnen wird anhand einer punktförmigen Wärmequelle simuliert. Die Rechenergebnisse können daher im Brunnennahfeld nicht der Realität entsprechen. Wegen der Singularität können sogar Temperaturänderungen errechnet werden, die größer sind als die Temperaturänderung der Infiltration. Die Prognosen der 3°C Isotherme mittels der analytischen Näherungslösung stellen daher nur eine grobe Näherung dar.
- Eine evtl. Vorbelastung der Grundwassertemperatur durch einen vorangegangenen Sommerbetrieb wird nicht berücksichtigt. Dies erscheint

jedoch nicht gravierend, da im Sommerbetrieb wegen des kleineren Energieentzugs auch nur eine geringe Vorbelastung entsteht.

- Konduktive Prozesse und der Austausch mit der Atmosphäre werden vernachlässigt. Der Wärmeaustausch mit dem Korngerüst wird prinziphaft über die Retardation nachgebildet.

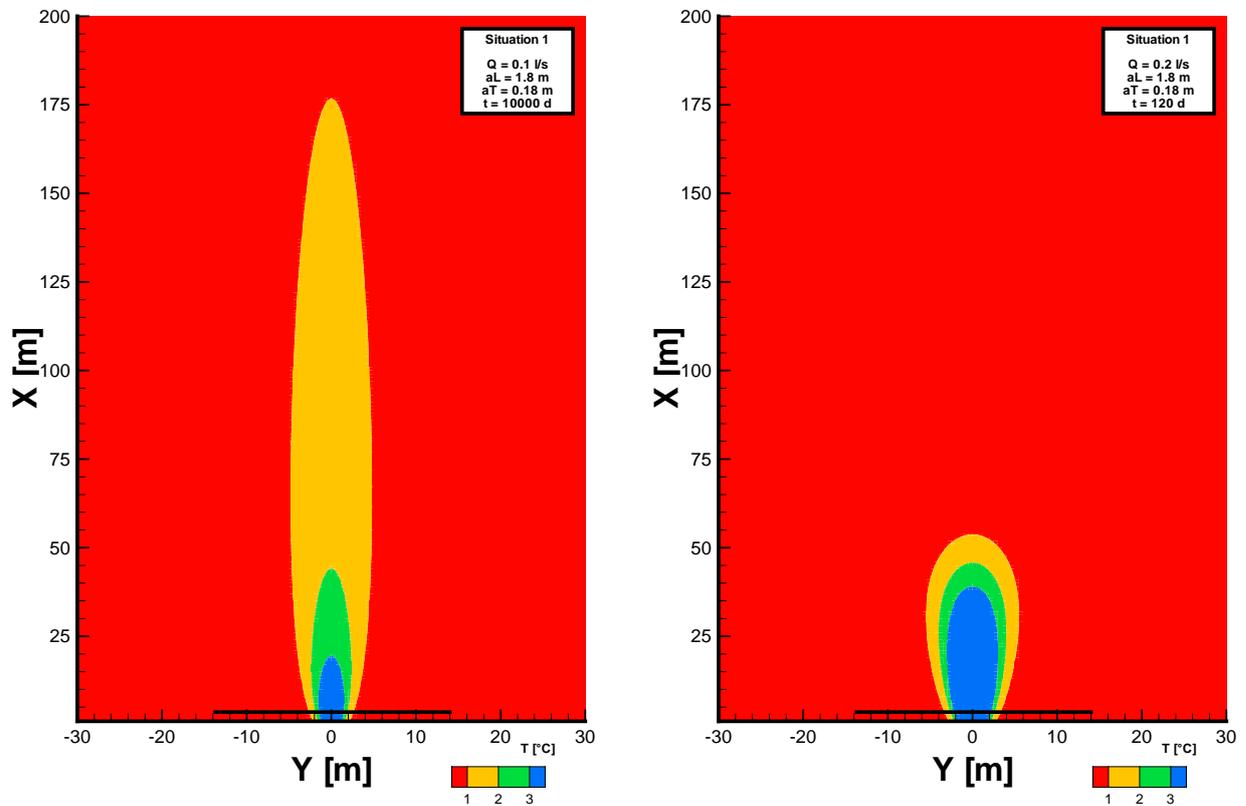


Abb. 5.1: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 1

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

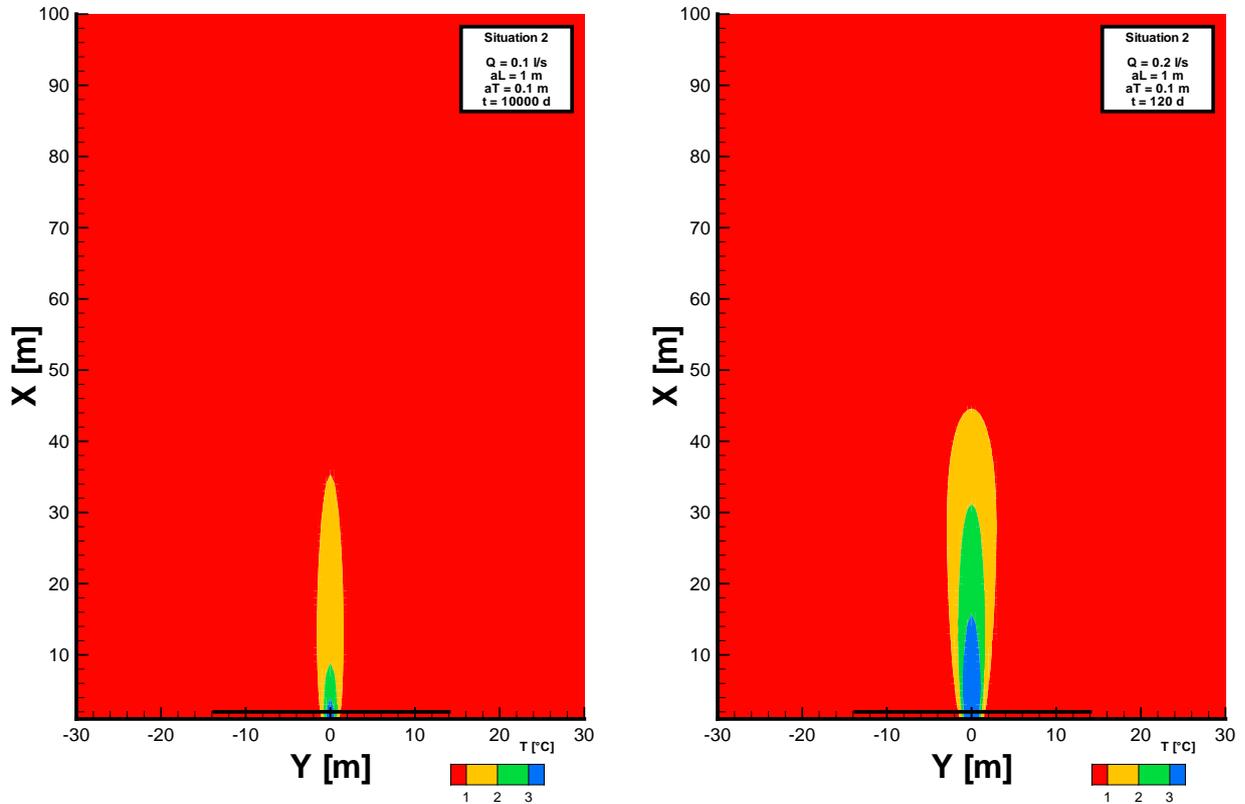


Abb. 5.2: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 2

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

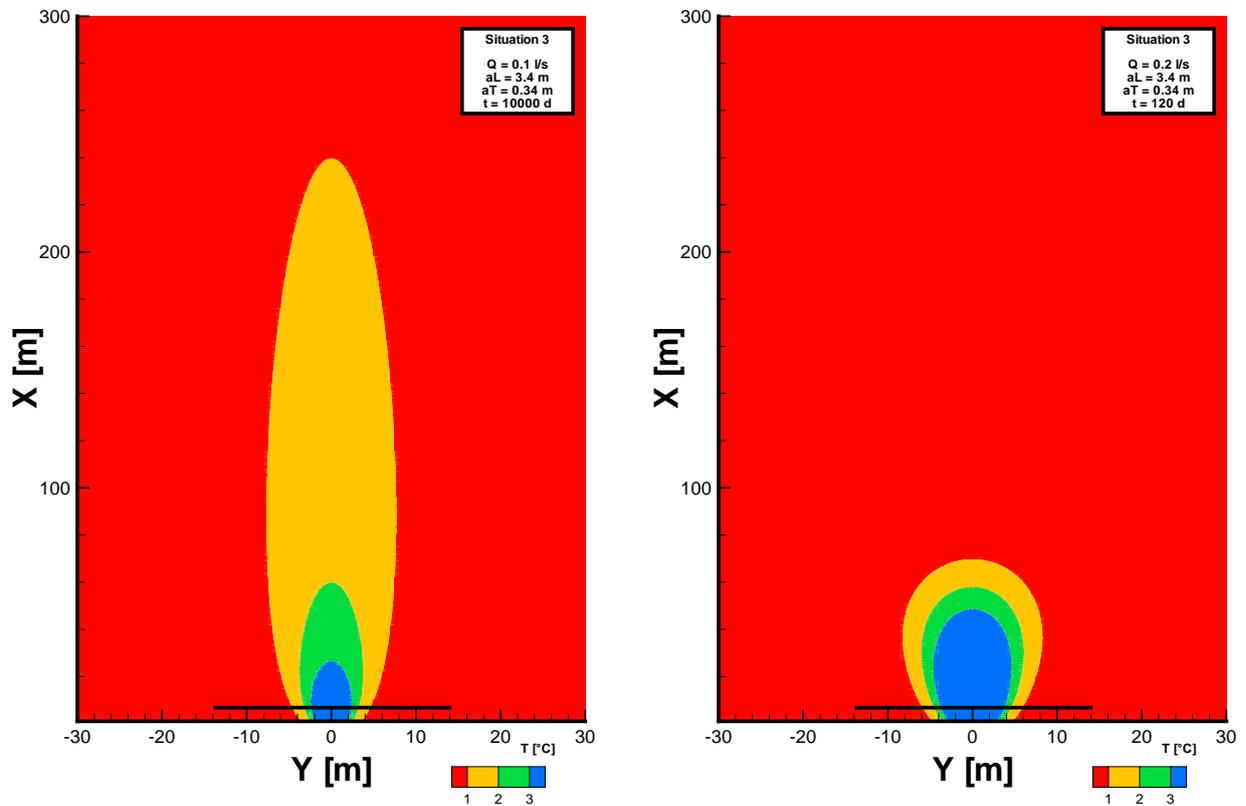


Abb. 5.3: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 3

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

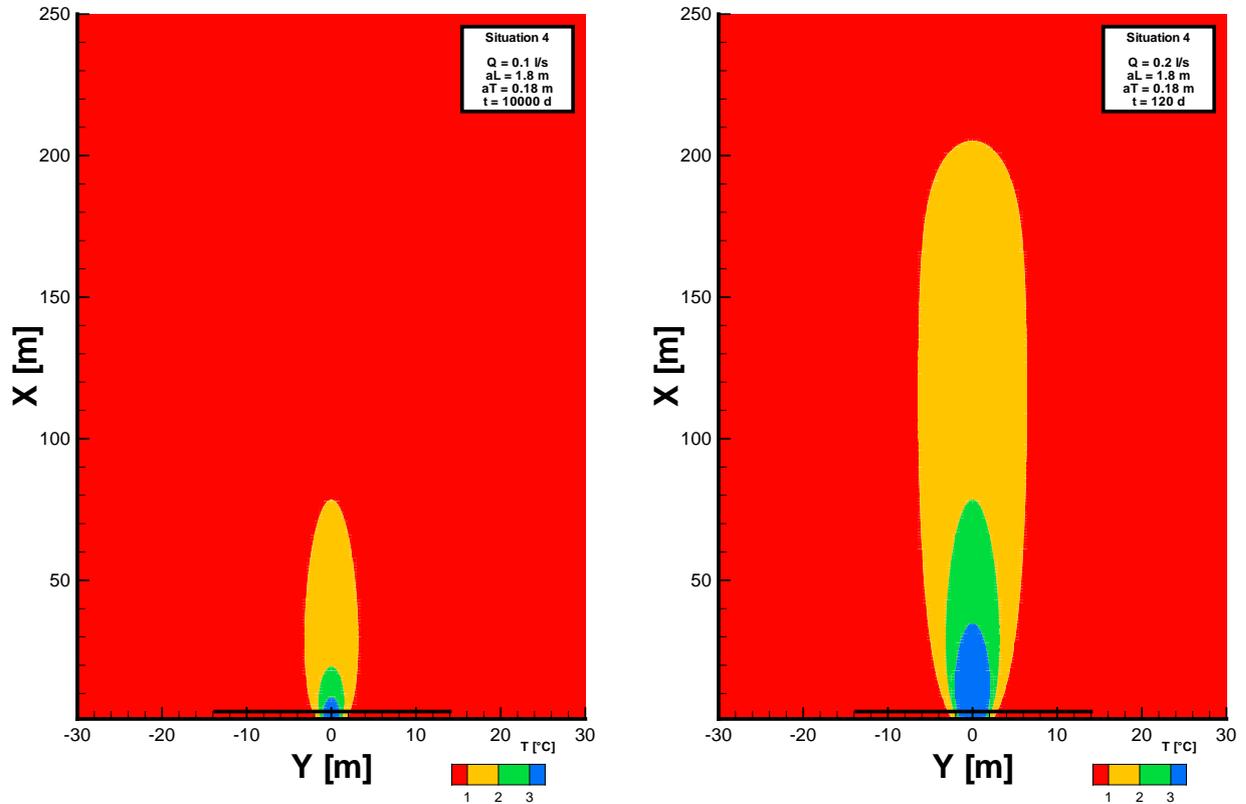


Abb. 5.4: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 4

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

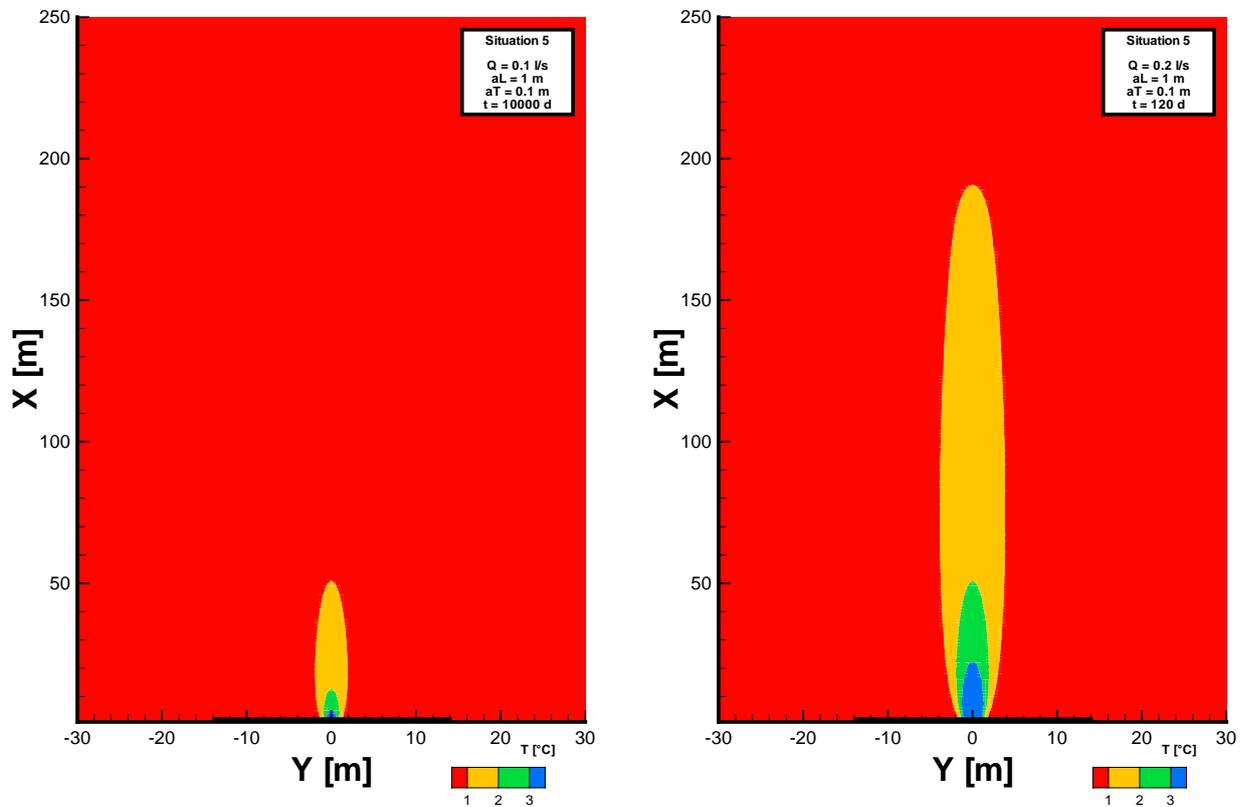


Abb. 5.5: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 5

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

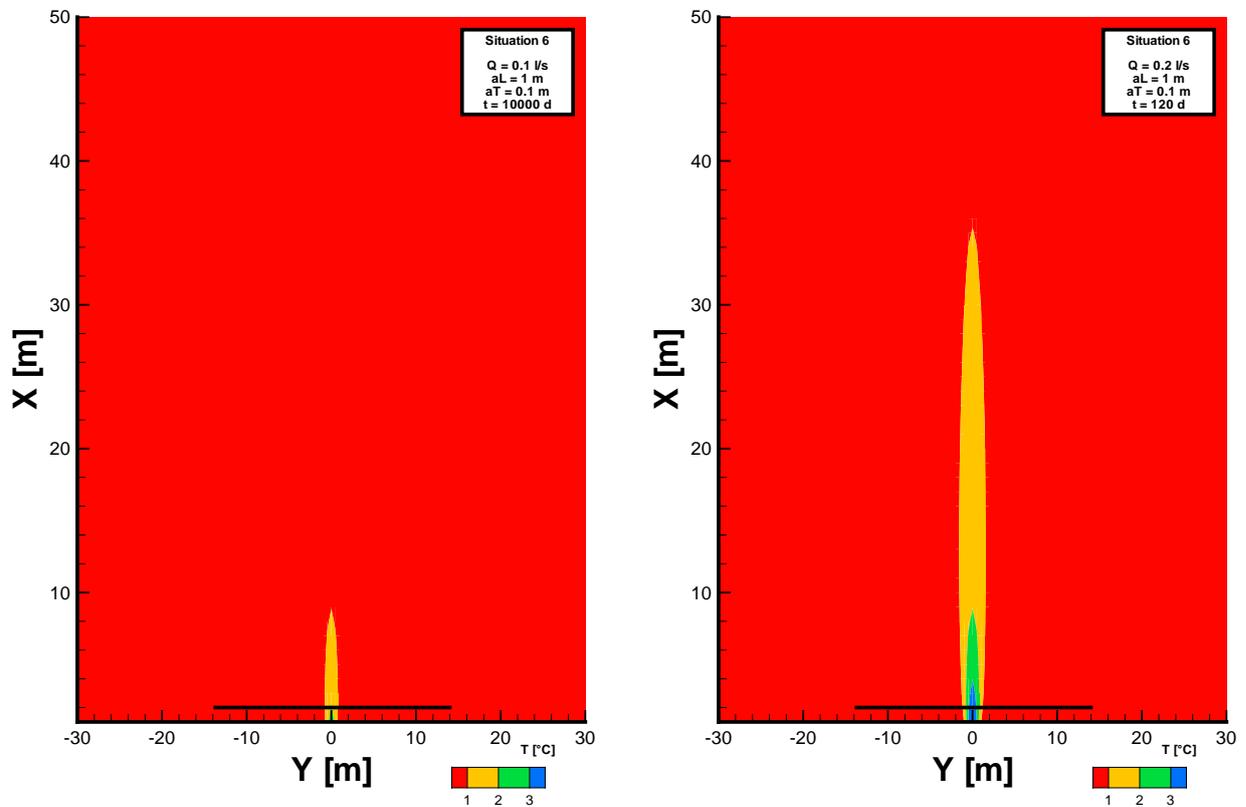


Abb. 5.6: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 6

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 15.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

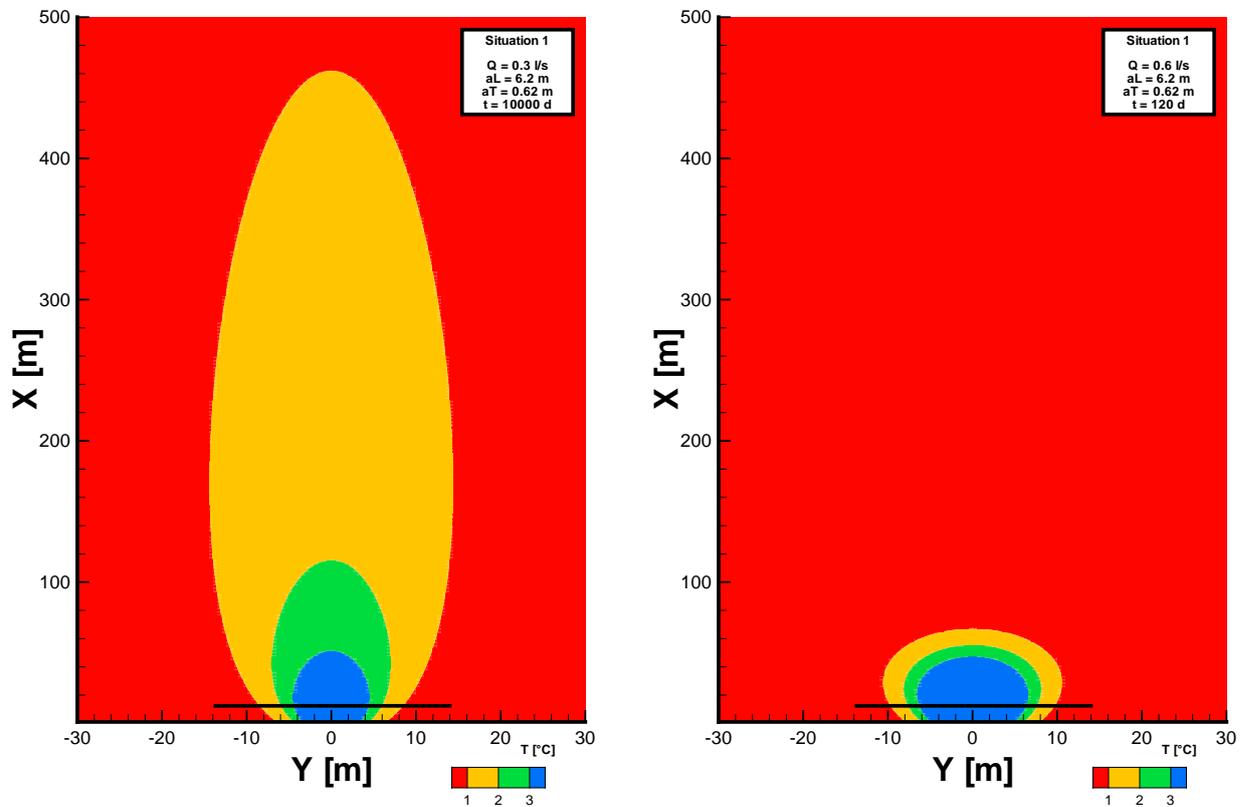


Abb. 5.7: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 1

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

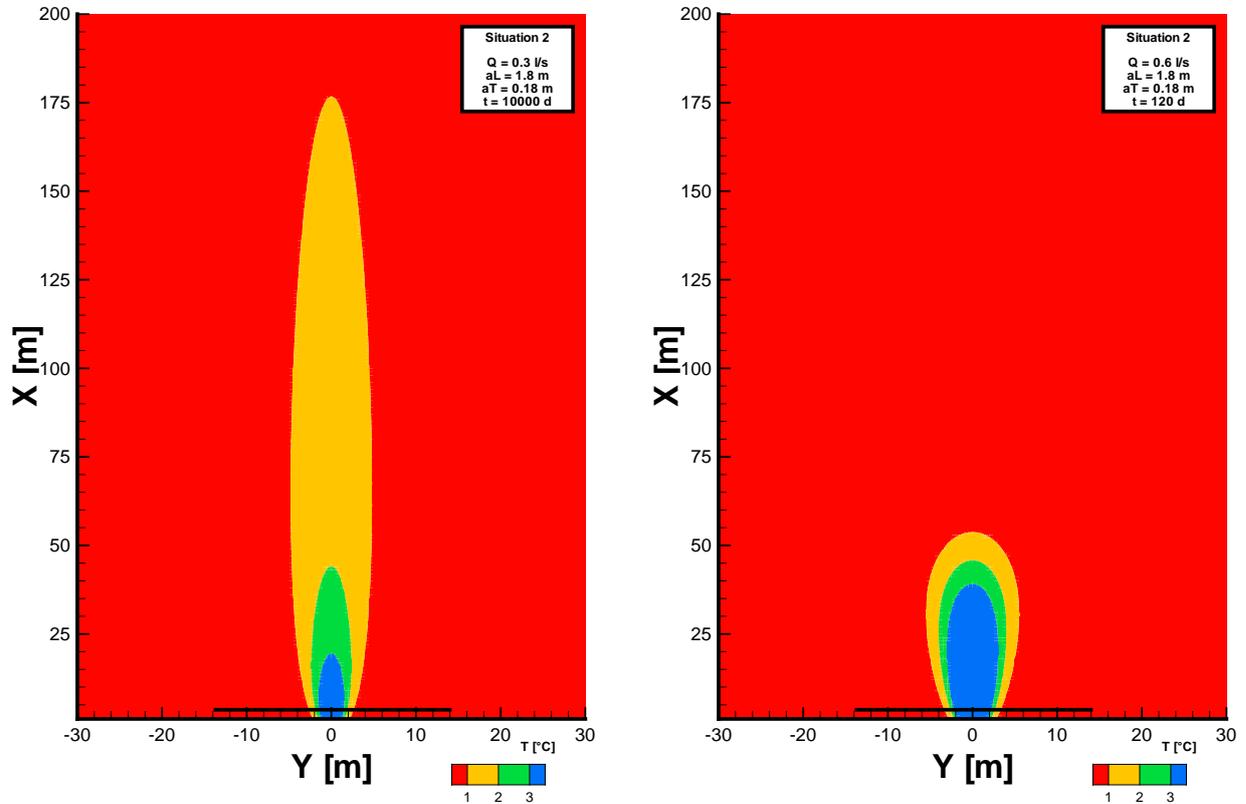


Abb. 5.8: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 2

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

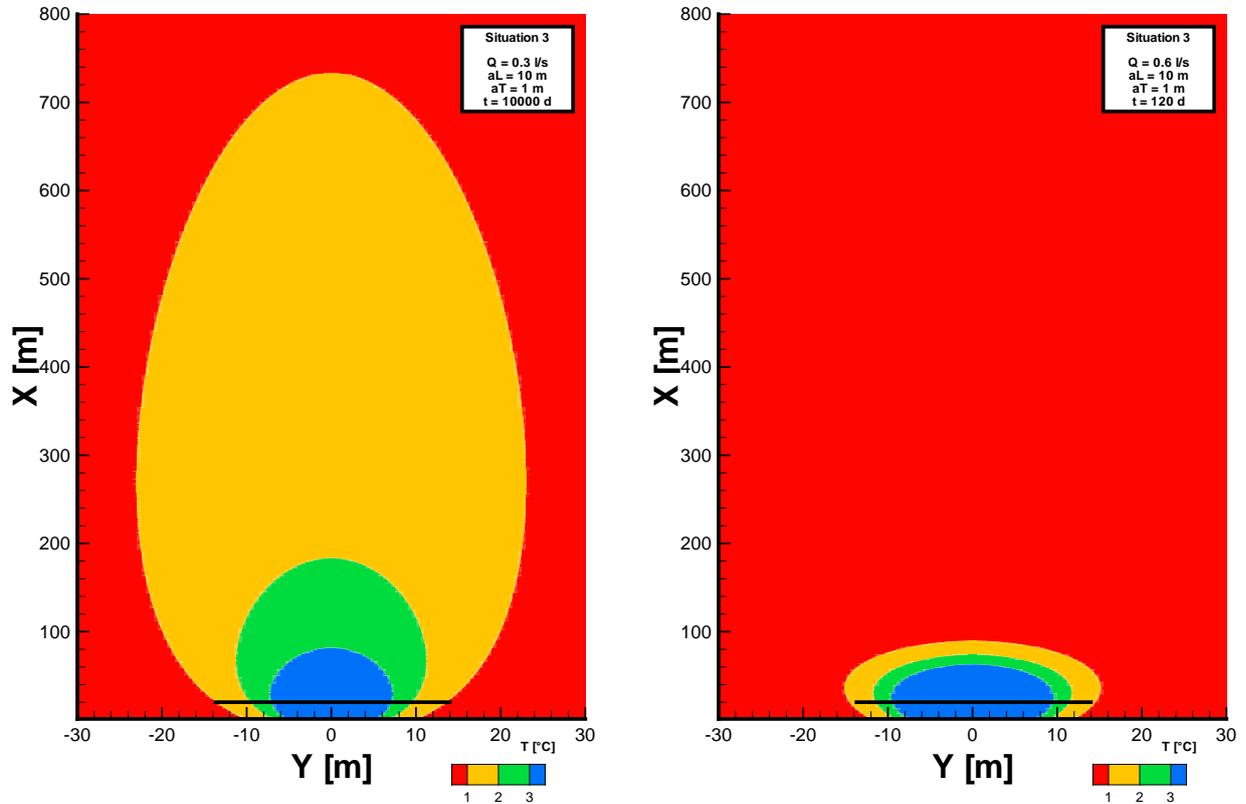


Abb. 5.9: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 3

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

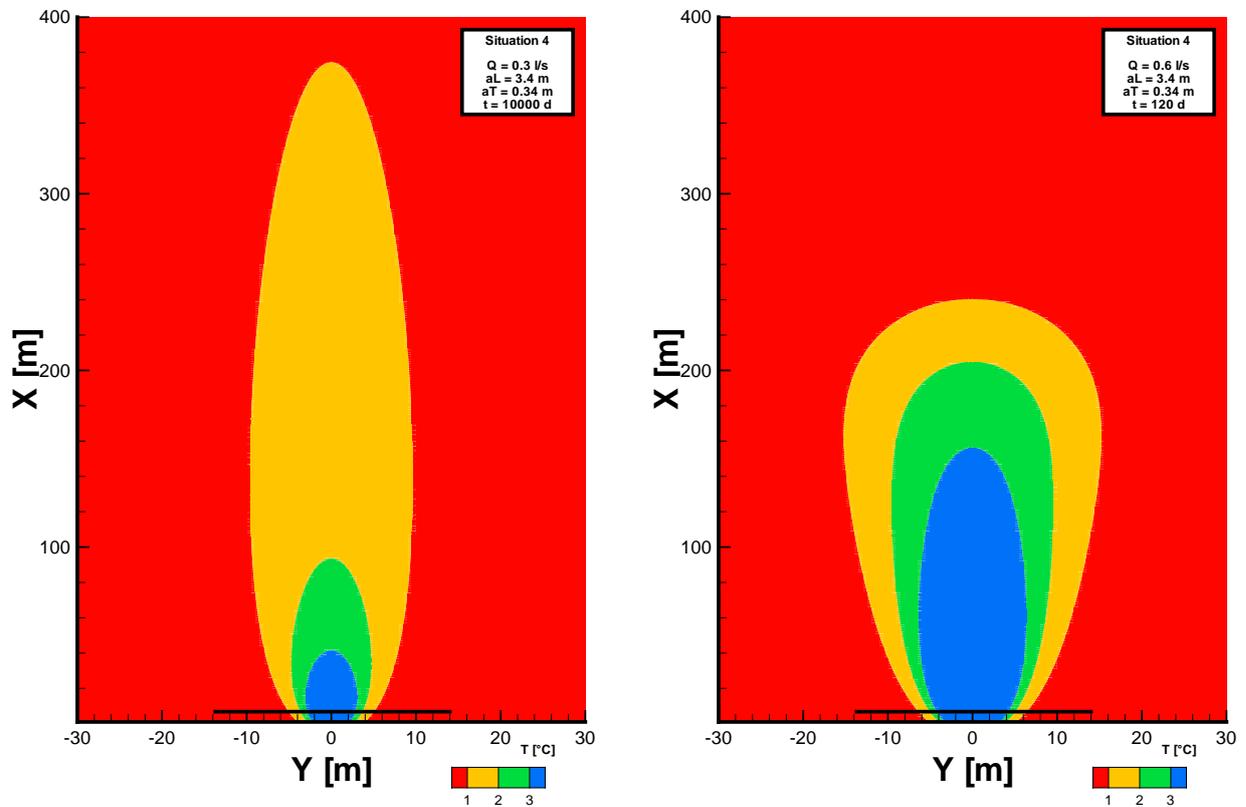


Abb. 5.10: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 4

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

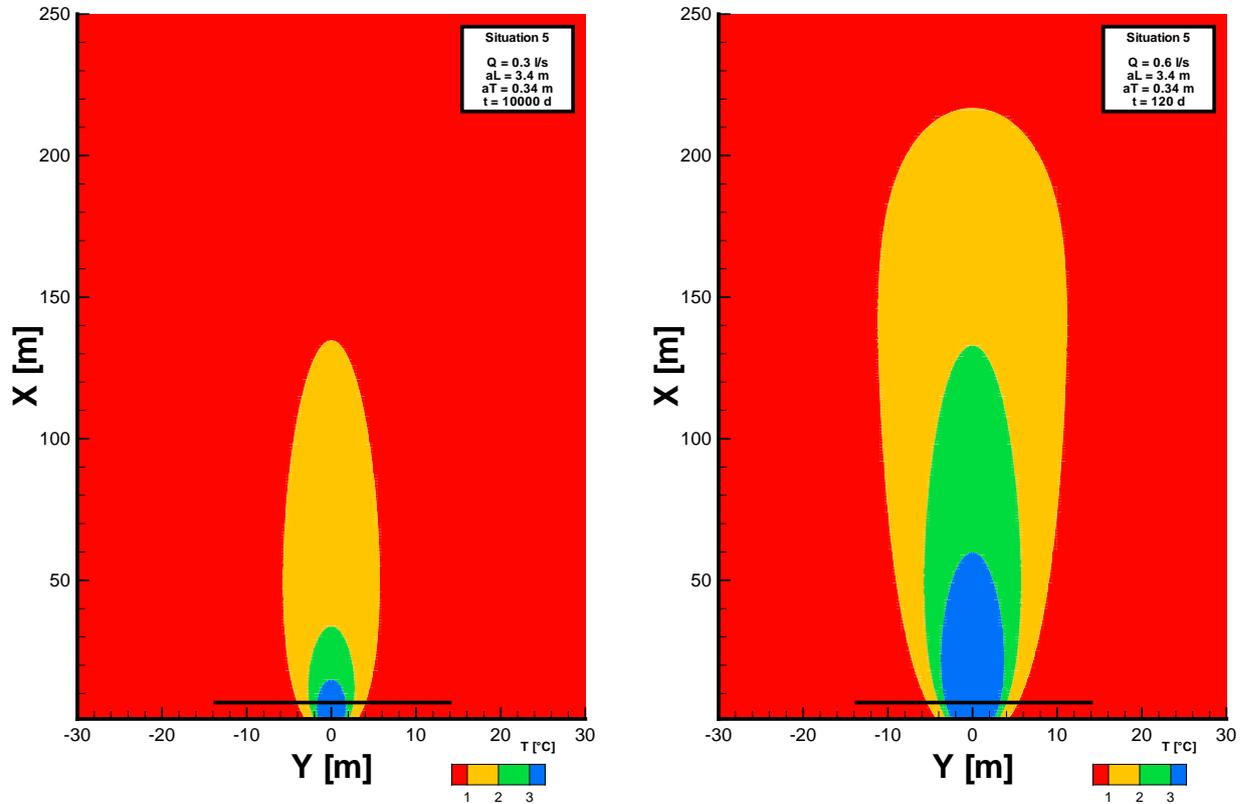


Abb. 5.11: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 5

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

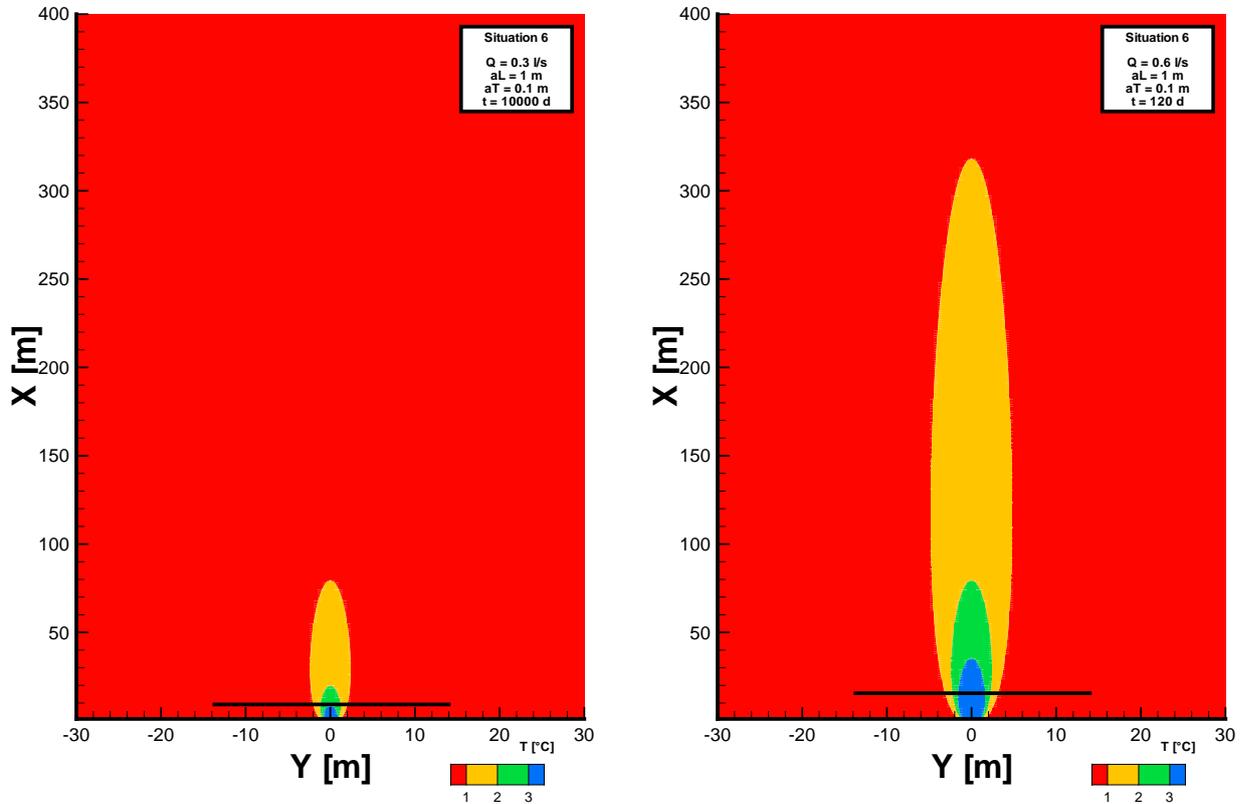


Abb. 5.12: Ergebnis der Temperaturfeldberechnungen mit einer analytischen Näherungslösung für Situation 6

Links: Lastfall Jahresmittelwert

(Stationäre Betrachtung mit mittlerem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr)

Rechts: Lastfall Winter

(Instationäre Betrachtung nach 120 Tagen bei verdoppeltem Energieentzug)

Dargestellt ist der Temperaturunterschied zur unbeeinflussten Ausgangstemperatur.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass für den Lastfall Winter in Abhängigkeit von der hydrogeologischen Situation und dem Umfang der thermischen Nutzung sehr unterschiedliche Abweichungen gegenüber dem quasi-stationären Fall (Jahresmittelwert) resultieren. Eindeutig erkennbar ist, dass sich bei großen Abstandsgeschwindigkeiten (Situationen 4, 5 und 6) stets größere Ausdehnungen der Temperaturfahnen für den Lastfall Winterbetrieb ergeben. Einen allgemein gültigen Zahlenwert für eine „Grenz-Abstandsgeschwindigkeit“, bei der damit zu rechnen ist, dass sich im Lastfall Winterbetrieb größere Ausdehnungen als bei Betrachtung von Jahresmittelwerten ergeben, gibt es allerdings nicht. Dies hängt vom Einzelfall ab; die Grenz-Abstandsgeschwindigkeit könnte aber für den Einzelfall mit den vorgestellten Formeln errechnet werden.

Tendenziell kann anhand der **Abb. 5.1 bis 5.12** festgestellt werden, dass wenn sich bei Betrachtung von Jahresmittelwerten vergleichsweise kurze Ausdehnungen einer beliebigen Isotherme ergeben (Größenordnung 100 m), im Winterbetrieb mit größeren Ausdehnungen zu rechnen ist.

Da die 1°C-Isothermen stets die größten Ausdehnungen aufweisen, gibt es in den Abb. 5.1 bis 5.12 für die 1°C-Isotherme die wenigsten Fälle, bei denen im Winterbetrieb größere Ausdehnungen entstehen. Für die 2°C-Isotherme oder die 3°C-Isotherme gibt es mehr Fälle mit größeren Ausdehnungen beim Winterbetrieb.

Im Extremfall der Situation 6 (Abstandsgeschwindigkeit größer 20 m/d) stellen sich im Winterbetrieb um den Faktor 4 größere Ausdehnungen der Isothermen gegenüber der Jahresmittelwert-Betrachtung ein. Der Faktor 4 stellt in Anbetracht der Annahmen für den Winterbetrieb (doppelter Wärmeentzug gegenüber dem Jahresmittelwert) zugleich den theoretischen Maximalwert (siehe Gl. 4.1 oder Gl. 5.2) für die Überschreitung dar.

Tab. 5.1 zeigt den Vergleich der analytischen Näherungslösung mit den Ergebnissen der numerischen Berechnungen gemäß **Kap. 3.3** für die Situationen 1 und 5 bei einem Energieentzug von 45.000 kWh/Jahr. Als Ergebnis der numerischen Berechnungen wird Kombination 3 herangezogen. Diese Berechnungen beinhalten keine Vereinfachungen (mit Ausnahme des Austausches über die Atmosphäre) und kann daher als realitätsnah betrachtet werden. Es werden folgende Prozesse berücksichtigt:

- Ausbreitung mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst

- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds
- Wärmeleitung (Konduktion) an der Sohle des Temperaturfelds

Aus **Tab. 5.1** geht hervor, dass mit der analytischen Näherungslösung für die relevanten hydrogeologischen Situationen und für den zu betrachtenden Umfang der thermischen Nutzung vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können.

Tab. 5.1: Vergleich der Ergebnisse zur Längsausdehnung unterschiedlicher Isothermen gemäß der analytischen Näherungslösung und der numerischen Simulationen für Situation 1 und 5

Fall	Lösung	Längsausdehnung der Isothermen [m]		
		3°C	2°C	1°C
Situation 1, Jahresmittelwert- Betrachtung	Analytische Näherungslösung (quasi-stationär)	51	115	461
	Numerische Lösung (2000 Tage)	29	88	232
Situation 1, Winterbetrieb	Analytische Näherungslösung (120 Tage)	47	55	67
	Numerische Lösung (120 Tage)	24	35	47
Situation 5, Jahresmittelwert- Betrachtung	Analytische Näherungslösung (quasi-stationär)	14	33	134
	Numerische Lösung (150 Tage)	8	37	117
Situation 5, Winterbetrieb	Analytische Näherungslösung (120 Tage)	59	132	216
	Numerische Lösung (120 Tage)	50	98	139

6 Verwendete Unterlagen

BEAR, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media.-764S; New York (American Elsevier)

CATHOMEN, N. (2002): Auswirkungen von Wärmepumpenanlagen auf die Grundwassertemperatur am Beispiel der Gemeinde Altach im Vorarlberger Rheintal; Diplomarbeit ETH Zürich im Wintersemester 2001/2002, Betreuung Prof. Fritz Stauffer und Prof. Wolfgang Kinzelbach; Zürich

Kinzelbach, W. (1987): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser; Schriftenreihe gwf Wasser Abwasser, Band 21; München-Wien (R. Oldenbourg Verlag)

KOBUS, H. [Hrsg.] (1992): Schadstoffe im Grundwasser / DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Band 1. Wärme- und Schadstofftransport im Grundwasser. Weinheim (VCH Verlagsgesellschaft mbH)

POPPEI, J., MAYER, G., SCHWARZ, R. (2006): Groundwater Energy Designer (GED), Modellgrundlagen und Verifikation; Colenco Power Engineering AG, Baden

RAUSCH, R., SCHÄFER, W., THERRIEN, R., WAGNER, C. (2005): Solute Transport Modelling, An Introduction to Models and Solution Strategies; Berlin –Stuttgart (Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung)

SÖLL, T. (1988): Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser; Stuttgart (Eigenverlag des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart)

WILLIBALD (1980): Temperaturfelder im Grundwasser als Folge von Einleitungen erwärmten oder abgekühlten Wassers und deren Berechnung mit Hilfe analytischer Ansätze; Heft der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Karlsruhe

Anhang: Ergebnisse der numerischen Simulationen

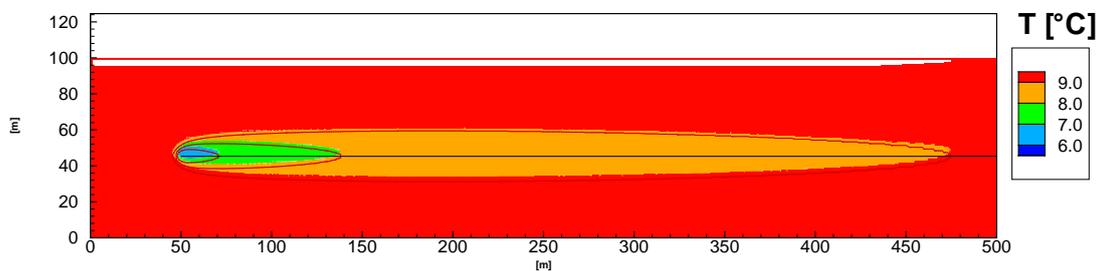
Situation 1, Jahresmittelwertbetrachtung ($Q = 0,3 \text{ l/s}$)

Kombination 1

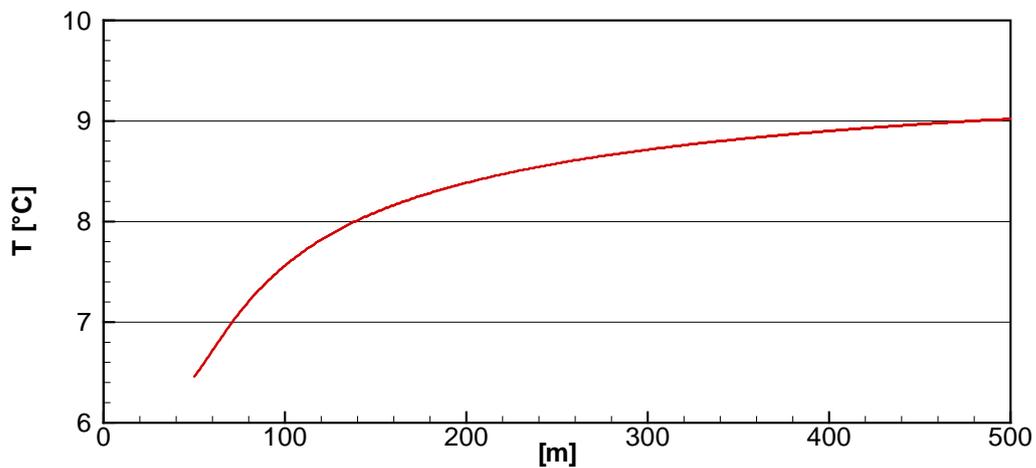
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion

$T = 2000$ Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



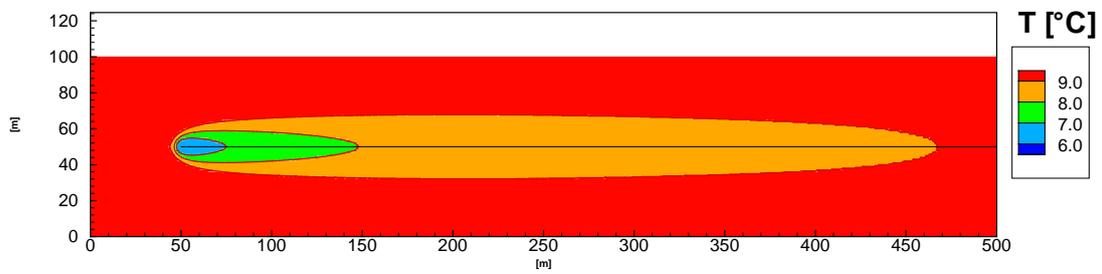
Situation 1, Jahresmittelwertbetrachtung ($Q = 0,3 \text{ l/s}$)

Kombination 2

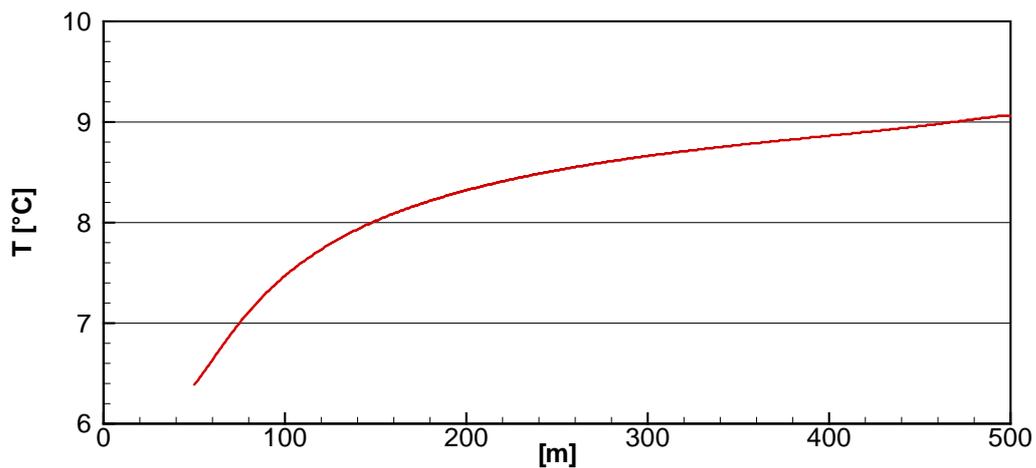
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds

$T = 2000$ Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



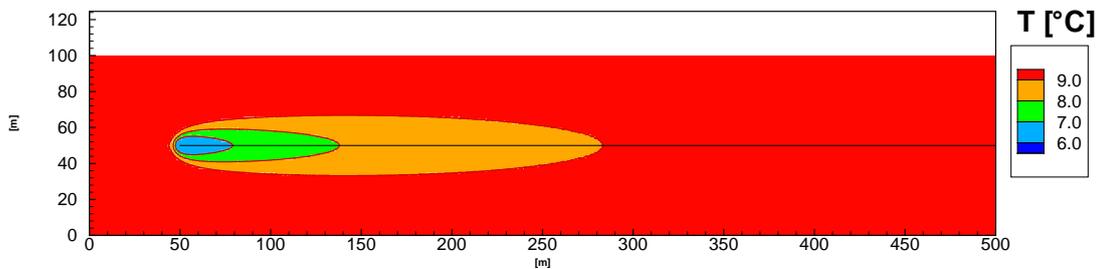
Situation 1, Jahresmittelwertbetrachtung ($Q = 0,3 \text{ l/s}$)

Kombination 3

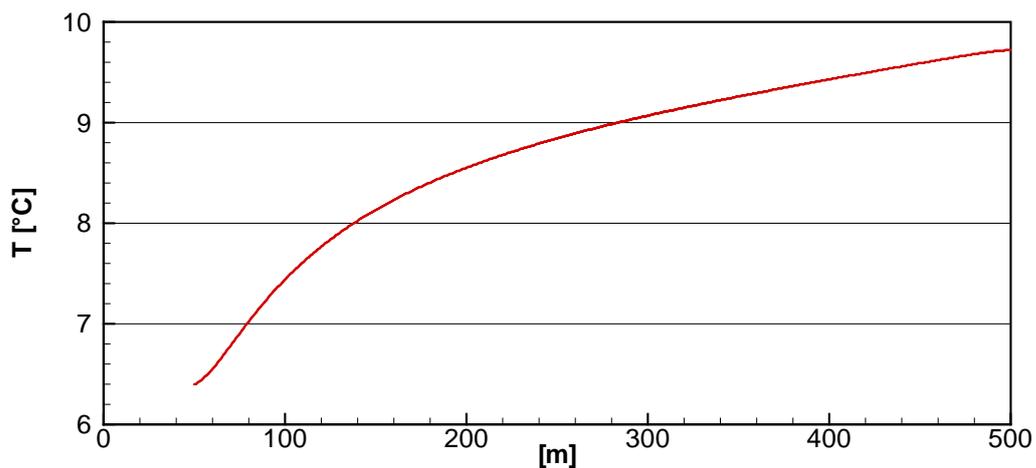
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds
- Wärmeleitung (Konduktion) an der Sohle des Temperaturfelds

T = 2000 Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



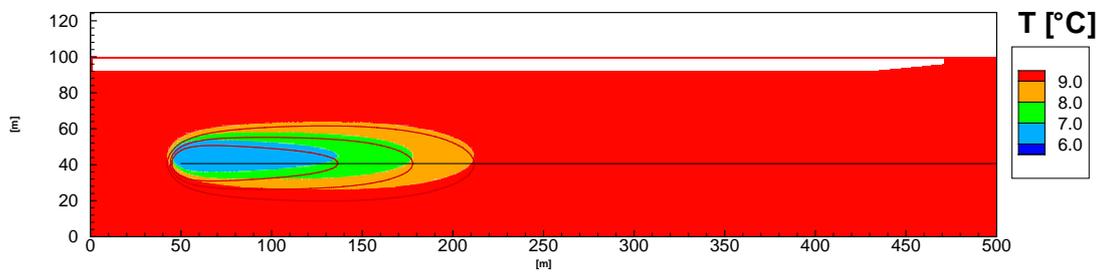
Situation 1, Winterbetrieb (Q = 0,6 l/s)

Kombination 1

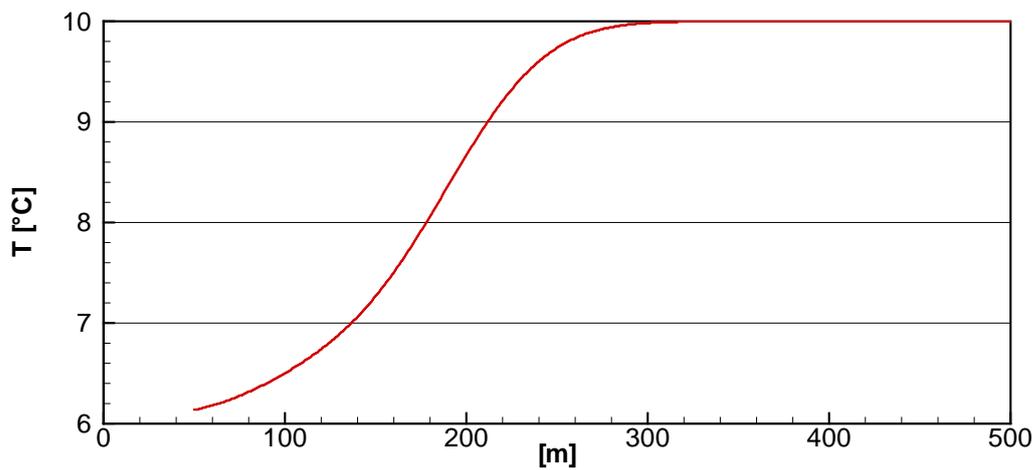
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion

T = 120 Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



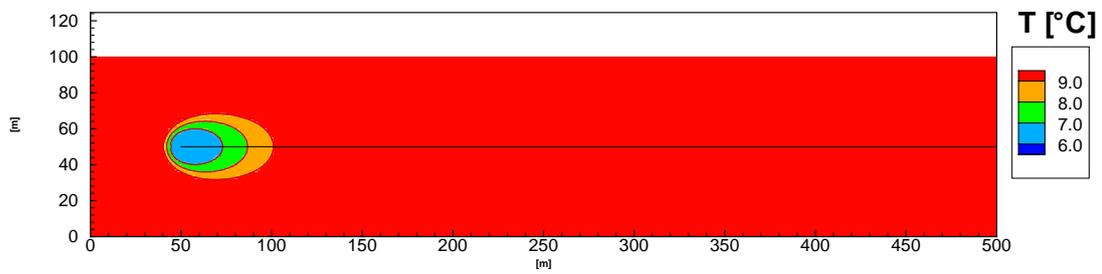
Situation 1, Winterbetrieb ($Q = 0,6 \text{ l/s}$)

Kombination 2

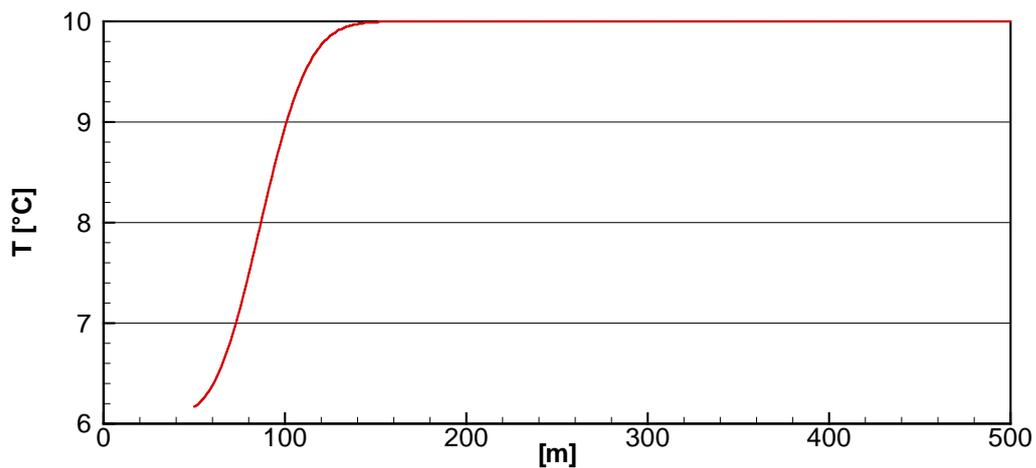
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds

T = 120 Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



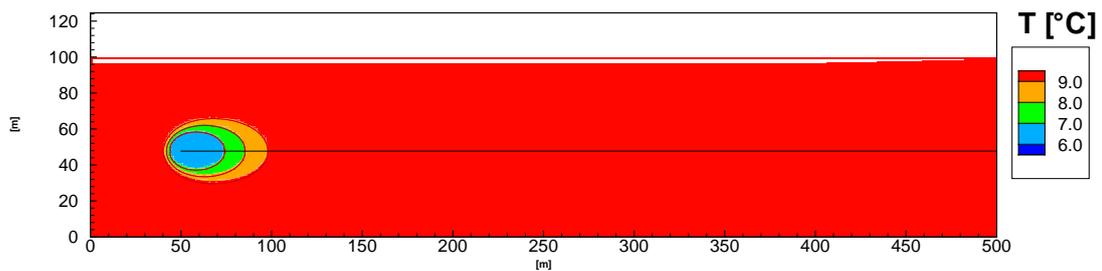
Situation 1, Winterbetrieb ($Q = 0,6 \text{ l/s}$)

Kombination 3

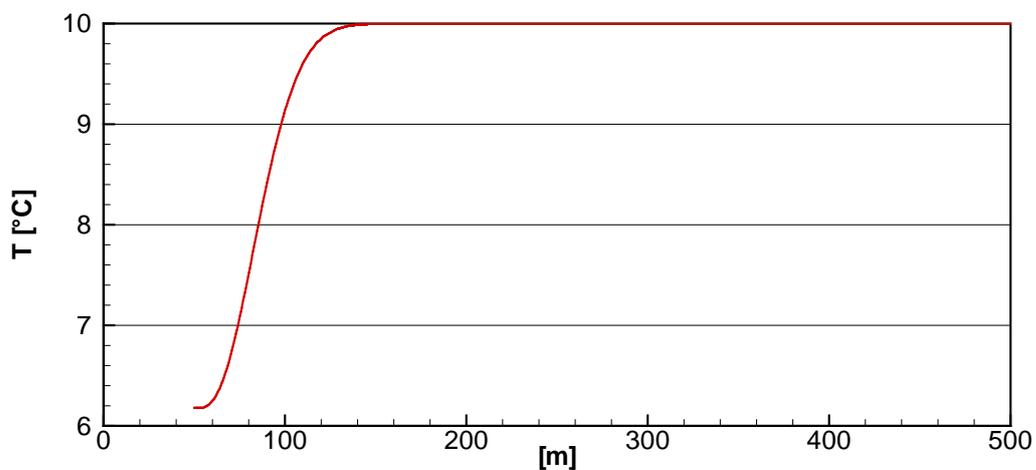
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds
- Wärmeleitung (Konduktion) an der Sohle des Temperaturfelds

T = 120 Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



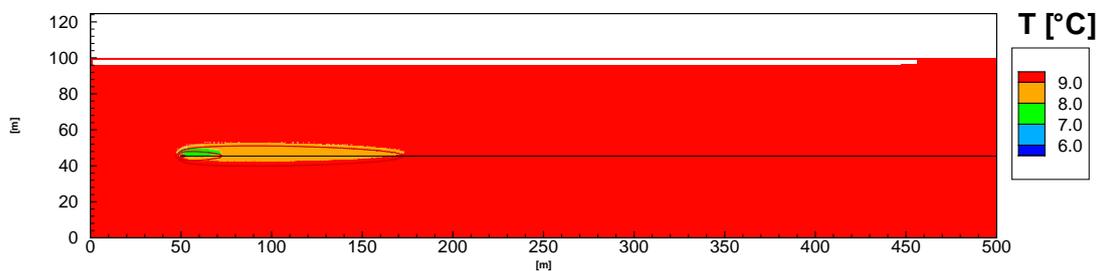
Situation 5, Jahresmittelwertbetrachtung ($Q = 0,3 \text{ l/s}$)

Kombination 1

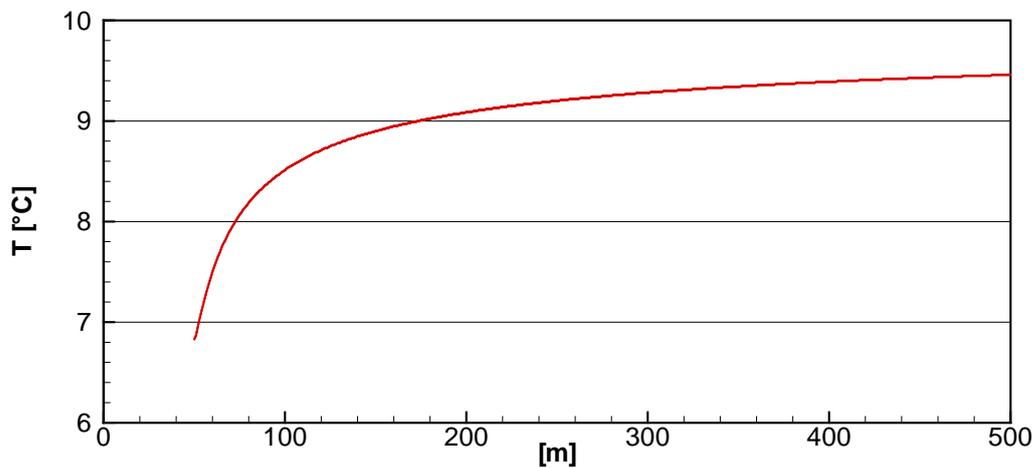
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion

T = 150 Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



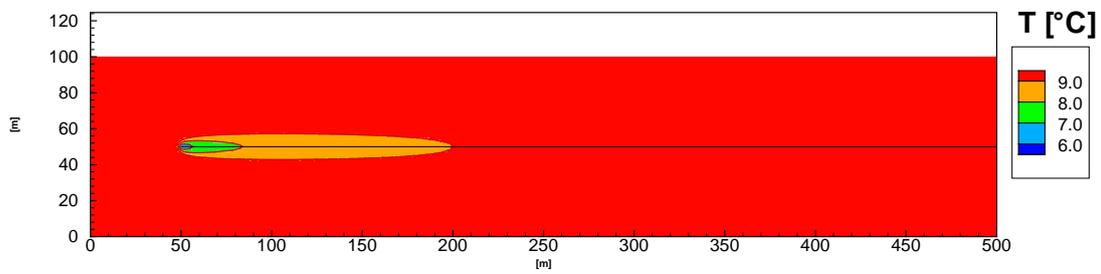
Situation 5, Jahresmittelwertbetrachtung ($Q = 0,3 \text{ l/s}$)

Kombination 2

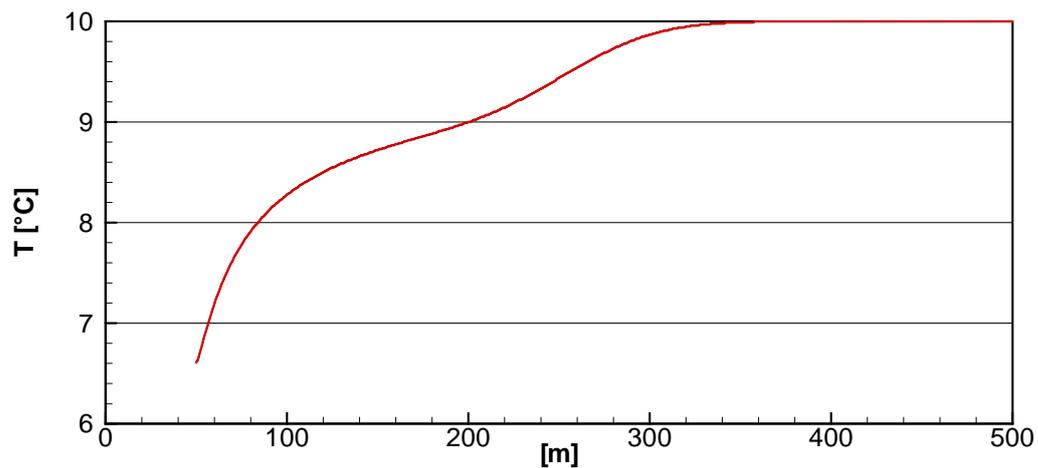
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds

$T = 150$ Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



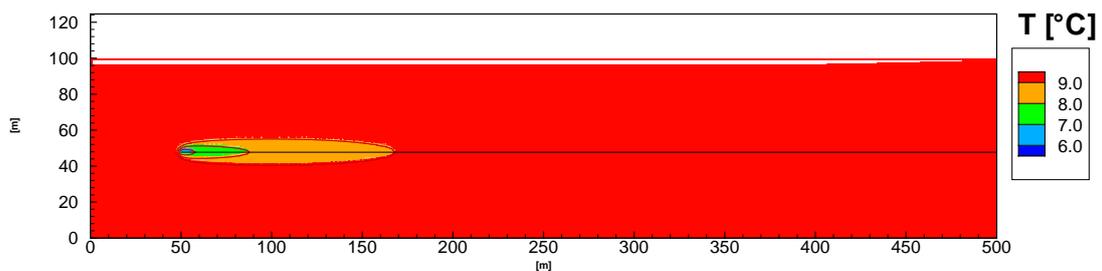
Situation 5, Jahresmittelwertbetrachtung ($Q = 0,3 \text{ l/s}$)

Kombination 3

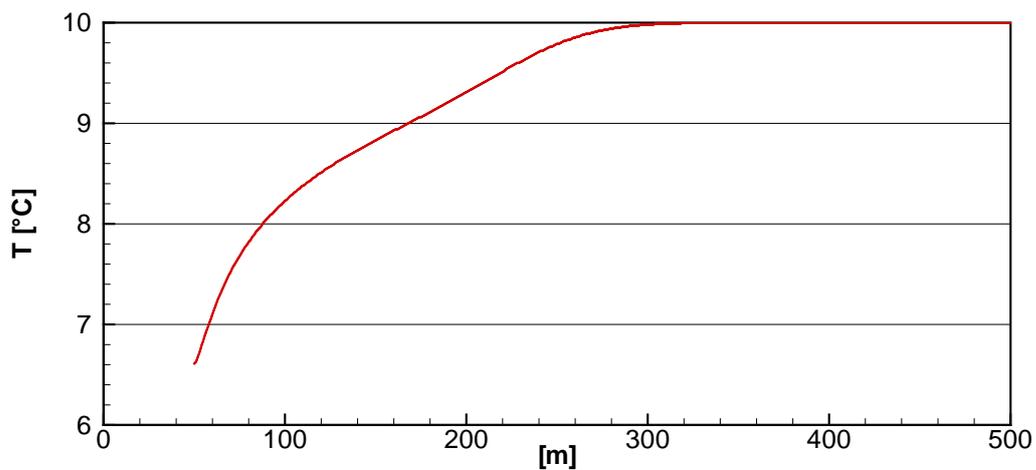
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds
- Wärmeleitung (Konduktion) an der Sohle des Temperaturfelds

T = 150 Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



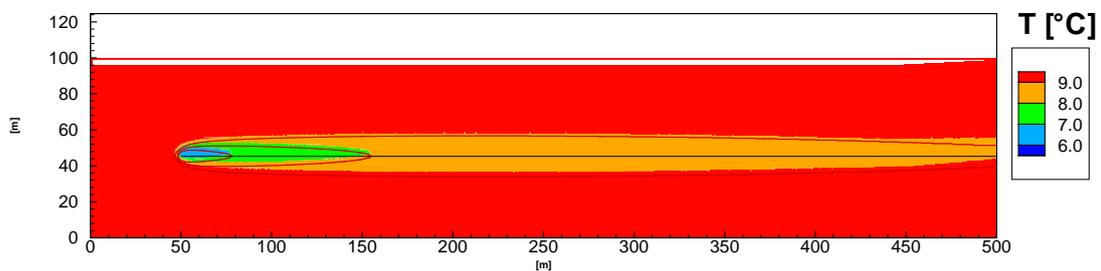
Situation 5, Winterbetrieb ($Q = 0,6 \text{ l/s}$)

Kombination 1

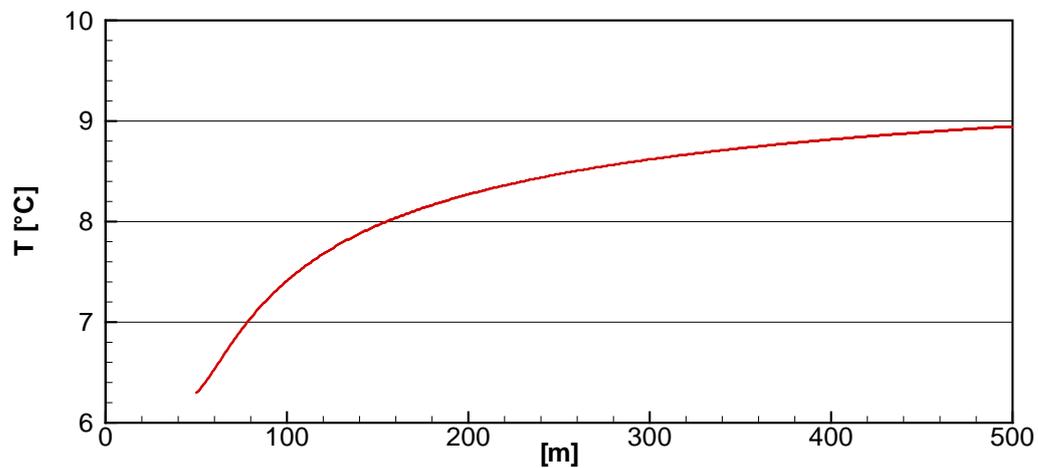
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion

$T = 120$ Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



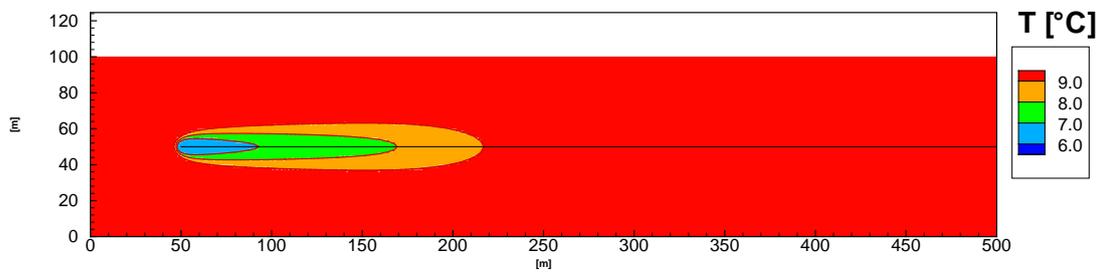
Situation 5, Winterbetrieb ($Q = 0,6 \text{ l/s}$)

Kombination 2

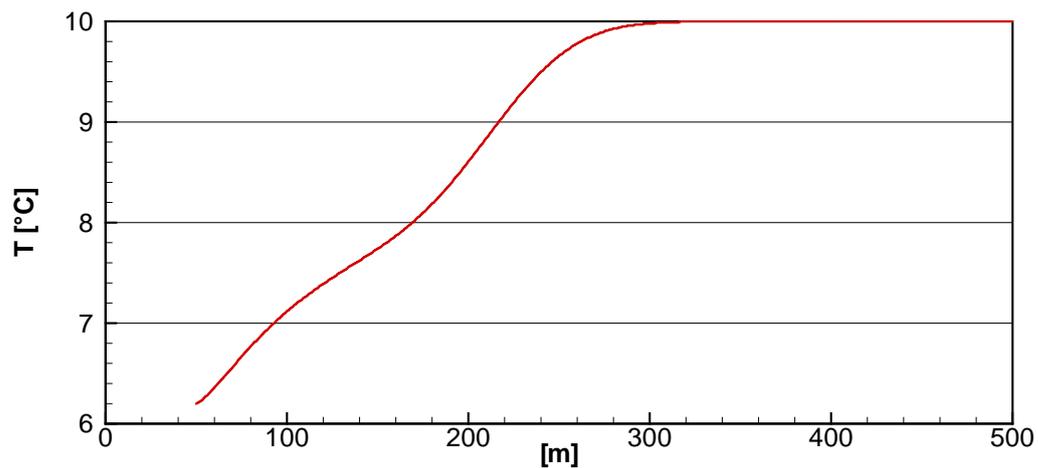
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds

$T = 120$ Tage

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



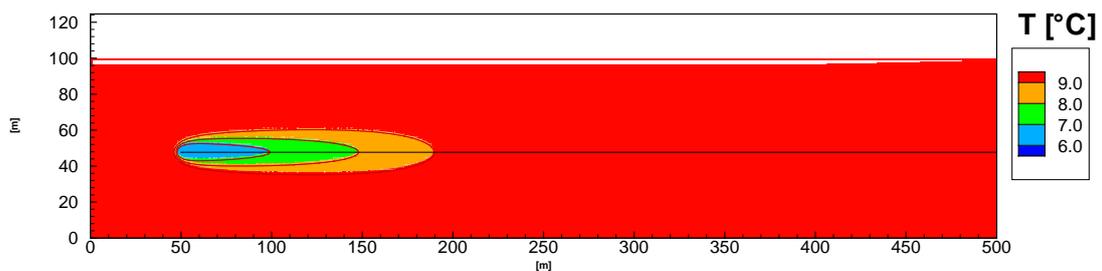
Situation 5, Winterbetrieb ($Q = 0,6 \text{ l/s}$)

Kombination 3

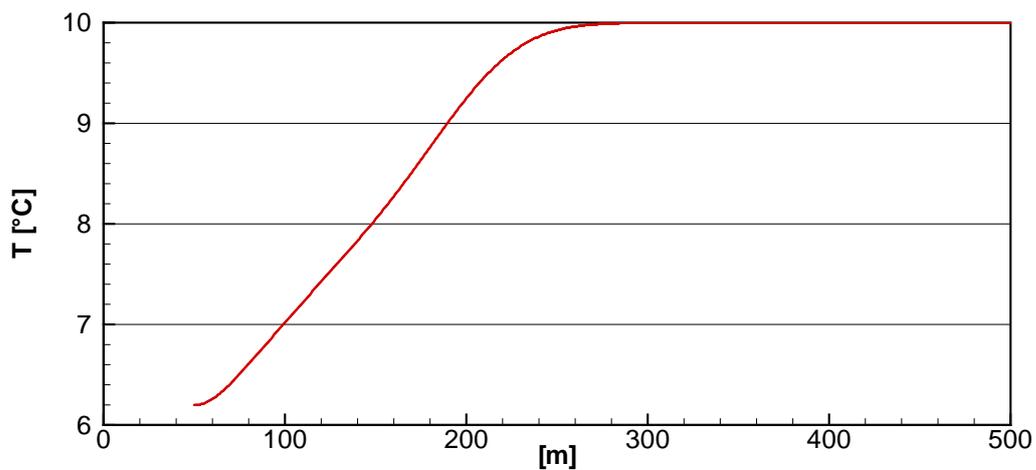
- Ausbreitung der mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmespeicherung im Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken des Temperaturfelds
- Wärmeleitung (Konduktion) an der Sohle des Temperaturfelds

$T = 120 \text{ Tage}$

Darstellung der Temperaturfahne



Darstellung des Temperaturprofils in der Achse der Fahne



Anhang: Kurzfassung

Thermische Nutzung von Grundwasser durch Wärmepumpen

Prinzipstudie zur Berechnung von Temperaturfeldern für kleine Anlagen mit Energieentzug kleiner 45.000 kWh/Jahr für charakteristische Situationen in Baden-Württemberg

Das Land Baden-Württemberg hat unter Federführung des Umweltministeriums einen Arbeitskreis zur Ausarbeitung eines Leitfadens eingerichtet, mit dem genehmigungsrechtliche Aspekte von Grundwasserwärmepumpen beschrieben werden sollen. Der Anwendungsbereich dieses Leitfadens beschränkt sich auf kleinere Anlagen, die der Deckung des Wärmeenergiebedarfs von Einfamilien- oder Doppelhäusern dienen. Grundwasserwärmepumpen für diese Gebäude werden derzeit hauptsächlich für das Heizen und die Warmwasserbereitstellung eingesetzt. Der Energieentzug aus dem Grundwasser beträgt dabei überschlägig 15.000 kWh/Jahr (ca. 1,7 kW) bis zu 45.000 kWh/Jahr (ca. 5,1 kW). Bei dieser Nutzung wird Grundwasser aus einem Entnahmebrunnen gefördert. Dem Grundwasser wird Wärmeenergie entzogen. Anschließend wird das abgekühlte Wasser über einen Infiltrationsbrunnen wieder dem Grundwasserleiter zugeführt.

Durch die Einleitung des abgekühlten Wassers und die anschließende Ausbreitung entstehen Fahnen, in denen die Grundwassertemperatur gegenüber dem unbeeinflussten Zustand erniedrigt ist. Für die Genehmigung von derartigen Grundwasserwärmepumpen stehen zwei Fragen im Vordergrund. So ist einerseits zu klären, ob eine Anlage zu unverträglichen Veränderungen der natürlichen Grundwassertemperaturen führt. Andererseits ist zu prüfen, ob durch eine neue Anlage Konflikte mit anderen Nutzungen entstehen können. Ziel vorliegender Ausarbeitung ist die Diskussion und Bewertung vereinfachender Berechnungsansätze zur Prognose von Temperaturfeldern, die z.B. von der Wasserrechtsbehörde in einem Genehmigungsantrag verlangt werden können.

Der Einsatz von Grundwasserwärmepumpen zur Deckung des Wärmeenergiebedarfs von Einfamilien- oder Doppelhäusern beschränkt sich unter Berücksichtigung von technologischen und wirtschaftlichen Aspekten meist auf hydrogeologische Situationen, in denen oberflächennah vergleichsweise gut durchlässige Kies-Grundwasserleiter mit entsprechender Wasserführung anzutreffen sind. Im Arbeitskreis wurden dazu 6 hydrogeologische Situationen definiert, die sich an typischen Anwendungen in Baden-Württemberg orientieren und den

Überlegungen in dieser Ausarbeitung zu Grunde gelegt werden sollen. Die Abstandsgeschwindigkeiten bei den Situationen liegen bei 1 m/Tag bis hin zu über 20 m/Tag. Hieraus resultiert eine vergleichsweise schnelle Ausbreitung der induzierten Temperaturerniedrigung, was als wichtige Charakterisierung der zu untersuchenden hydrogeologischen Situationen hervorzuheben ist. Ebenso ist von Bedeutung, dass die Infiltrationsbreiten wegen des vergleichsweise geringen Umfangs der thermischen Nutzung nur in einer Größenordnung von wenigen Metern liegen.

Bei der Wärmeausbreitung in Grundwasserleitern sind folgende Mechanismen beteiligt:

- Ausbreitung mit der Abstandsgeschwindigkeit (Konvektion)
- Vermischung durch Dispersion
- Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst
- Wärmeleitung (Konduktion) an den Flanken und an der Sohle des Temperaturfelds
- Wärmeaustausch mit der Atmosphäre

Als Konvektion wird die Ausbreitung eines Wasserinhaltsstoffes bzw. des Wärmeinhalts mit dem durch die Abstandsgeschwindigkeit charakterisierten Geschwindigkeitsfeld bezeichnet. Die so genannte hydrodynamische Dispersion beschreibt Vermischungsvorgänge, die durch Geschwindigkeitsunterschiede in den Porenräumen des Untergrunds, durch kleinräumige Inhomogenitäten des Korngerüsts und durch makroskopische Inhomogenitäten des Untergrunds entstehen. Die Wärmeausbreitung wird ferner durch die Fähigkeit des Untergrundes, Wärme zu speichern und zu leiten, beeinflusst. Dabei ist zu bedenken, dass sich die Temperatur des Korngerüsts der des fließenden Wassers angleicht.

Die Relevanz der einzelnen Prozesse hängt maßgeblich von der hydrogeologischen Situation sowie von den zu betrachtenden Raum- und Zeitskalen ab. Grundsätzlich können die Ausbreitung von Wärme und der Stofftransport im Grundwasser mit vergleichbaren Methoden berechnet werden. Konvektion und Dispersion sind Mechanismen, die die Ausbreitung von Stoffen (Markierungsstoffe, Schadstoffe) maßgeblich bestimmen. Der Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst, die Wärmeleitung (Konduktion) und der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre sind Mechanismen, die dazu führen können, dass sich die Ausbreitung von Wärme von der Stoffausbreitung unterscheidet. Zum Wärmeausgleich zwischen dem Grundwasser und dem Korngerüst ist auszuführen, dass dieser bei instationären Vorgängen zwangsweise zu einer langsameren Ausbreitung einer Wärmefahne gegenüber der konvektiven Ausbreitung führt.

Bei Simulationen von Temperaturfeldern ist grundsätzlich zu beachten:

- Eine Berechnung mit vereinfachenden Ansätzen hinsichtlich der thermischen Vorgänge setzt bereits eine vereinfachende Betrachtung und damit Idealisierung der tatsächlichen hydrogeologischen Verhältnisse voraus.
- Simulationen zur Ausdehnung von Temperaturfeldern weisen eine hohe Sensitivität hinsichtlich der verwendeten hydrogeologischen Parameter auf. Vergleichsweise kleine Änderungen eines Parameters führen zu merklichen Änderungen z.B. von Reichweiten einer Temperaturfahne.

Die durchgeführten Untersuchungen haben hinsichtlich der zu berücksichtigenden Prozesse aufgezeigt:

- Für die Prognose von einzelnen Temperaturfahnen kleiner Anlagen ist bei den in Baden-Württemberg zu erwartenden typischen Verhältnissen davon auszugehen, dass eine vereinfachende Betrachtung, bei der nur die Prozesse Konvektion und Austausch mit der Atmosphäre angesetzt werden, unrealistisch lange Temperaturfahnen liefert. Prognosen, die auf dem Austausch mit der Atmosphäre basieren, sollten für einzelne Temperaturfahnen nicht herangezogen werden. Der Austausch mit der Atmosphäre ist allerdings bei regionalen thermischen Bewirtschaftungsfragen ein wichtiger und nicht zu vernachlässigender Prozess.
- Prognosen, die auf einer Kombination von Konvektion und Dispersion beruhen, können als grundsätzlich geeignet angesehen werden.
- Die zusätzliche Berücksichtigung der Wärmeleitung an den Flanken eines Temperaturfelds führt bei Ansätzen, die bereits eine dispersive Quervermischung berücksichtigen, zu keiner merklichen Veränderung des Temperaturfelds.
- Die zusätzliche Berücksichtigung der Wärmeleitung an der Sohle Temperaturfelds führt bei Ansätzen, die bereits eine dispersive Quervermischung und die Wärmeleitung an den Flanken berücksichtigen, zu einer merklichen Verkleinerung des Temperaturfelds.

Die Erkenntnisse gelten im Wesentlichen nur für vergleichsweise gut durchlässige Grundwasserleiter mit relativ hohen Abstandsgeschwindigkeiten, deren thermische Nutzung sich durch einen geringen Energieentzug auszeichnet. Daher ist eine Verallgemeinerung dieser Erkenntnisse nicht zulässig.

Ein Vergleich von Jahresmittelbetrachtungen mit Betrachtungen nach einer verstärkten thermischen Nutzung während der Winterperiode führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Bei größeren Abstandsgeschwindigkeiten (größer 1-2 m/Tag) des Grundwasserleiters können Temperaturfahnen bei der verstärkten Nutzung einer Grundwasserwärmepumpe in der winterlichen Heizperiode weiter reichen, als bei Ansatz von Jahresmittelwerten für den Energieentzug.
- Unabhängig von der Abstandsgeschwindigkeit weisen die Temperaturfelder für die winterliche Heizperiode größere Breiten auf als bei Ansatz von Jahresmittelwerten.

Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Prognose unter Ansatz von Jahresmittelwerten die Betroffenheit einer im Umfeld der zu genehmigenden Anlage bereits vorhandenen Anlage nicht erfasst.

Eine fachgerechte Berücksichtigung des Winterbetriebs kann daher in vielen Fällen nur durch eine entsprechende instationäre Prognostik erfolgen. Dies können die untersuchten Programme mit vereinfachenden Ansätzen beim derzeitigen Entwicklungsstand nicht leisten.

Daher wird vorgeschlagen, die analytische Lösung der zweidimensionalen Transportgleichung mit permanenter punktförmiger Stoffquelle mit konstanter Stärke für vereinfachende Temperaturfeldberechnungen heranzuziehen. Dieser Ansatz erlaubt instationäre und (quasi-)stationäre Berechnungen. Die verzögerte Ausbreitung einer Wärmefahne im Vergleich zu einer Schadstofffahne, die im Wärmeausgleich zwischen Grundwasser und Korngerüst begründet ist, kann durch den Retardationsparameter R simuliert werden.

Die analytische Näherungslösung geht von einer parallelen Grundströmung aus und berücksichtigt keine Veränderung der Grundströmung durch die Infiltration. Aus diesem Grund ist die Lösung im Nahbereich der Infiltration nicht zutreffend. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der analytischen Näherungslösung mit numerischen Berechnungen ergab hinsichtlich der Längsausdehnung von Temperaturfahnen vergleichbare Ergebnisse.