

PROF. DR. HELMUT KOBUS
ORDINARIUS FÜR TECHN. HYDROMECHANIK
UND WASSERBAULICHES VERSUCHSWESEN
DIREKTOR DES INSTITUTS FÜR WASSERBAU
UNIVERSITÄT STUTTGART

PFAFFENWALDRING 61
7000 STUTTGART 80
TELEFON (0711) 685-4714

Gutachten 82/21

GUTACHTEN
ZUR BEEINFLUSSUNG DER GRUNDWASSERTEMPERATUREN
DURCH DAS WERK ETTENHEIM DER BASF

Auftraggeber: BASF Aktiengesellschaft
D-6700 Ludwigshafen

Auftragsdatum: 18. Februar 1982

Bearbeitung: Prof. Dr. Helmut Kobus
Dipl.-Ing. Thomas Söll

Stuttgart, im September 1982

INHALTSVERZEICHNIS

Verzeichnis der Bilder	Seite	3
1. PROBLEMSTELLUNG		4
1.1 Veranlassung und Fragestellung		
1.2 Untersuchungsfälle		
1.3 Verwendete Unterlagen		
2. HYDROGEOLOGIE		10
2.1 Geologische Kenndaten		
2.2 Geothermische Kenndaten		
2.3 Angaben zum Strömungsfeld		
2.4 Berechnungsfälle		
3. HAUPTABMESSUNGEN DES WÄRMEFELDES		17
3.1 Allgemeine Beschreibung		
3.2 Breitenausdehnung des Wärmefeldes		
4. FORTSCHRITTSGESCHWINDIGKEIT UND LAUFZEIT DER WÄRMFRONT		20
4.1 Strömungsgeschwindigkeit		
4.2 Geschwindigkeit der Wärmefront		
4.3 Laufzeiten		
5. WÄRMEABGABE ENTLANG DES FLIESSWEGES		23
5.1 Allgemeine Beschreibung		
5.2 Eindimensionale Berechnung		
5.3 Vertikal-ebene Berechnung		
5.4 Zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes und stationärer Endzustand		
6. AUSWIRKUNGEN FÜR DAS WASSERWERK KAISERWALD		28
6.1 Stationärer Endzustand		
6.2 Zeitliche Entwicklung		

7.	BEGLEITENDES MESSPROGRAMM	Seite 33
7.1	Allgemeines	
7.2	Ausführung der Meßstellen	
7.3	Messungen des ersten Jahres	
8.	ZUR ANORDNUNG VON SCHLUCK- UND ENTNAHMEBRUNNEN	36
8.1	Kritischer Abstand zur Vermeidung einer hydraulischen Kurzschlußströmung	
8.2	Akzeptabler Rückströmungsanteil	
8.3	Abschätzung des Rückströmungsanteils	
8.4	Auswirkungen eines hydraulischen bzw. thermischen Kurzschlusses auf das Wärmefeld	
9.	SCHLUSSFOLGERUNGEN	42
	Gutachterliche Stellungnahme	

VERZEICHNIS DER BILDER

- 1 Eingrenzung der geologischen Kenndaten des Untersuchungs-
gebiets
- 2 Schematisierter Aufbau des Grundwasserleiters (GLA)
- 3 Idealisierte Grundwasserleiter A, B, C für die Berechnung
- 4 Eingrenzung der geothermischen Kenndaten des Untersuchungs-
gebiets
- 5 Strömungsfeld des Untersuchungsgebiets (Hydrogeologische
Kartierung)
- 6 Strömungsfeld mit Kühlwassereinleitung : Verlauf der
Warmwasserfahne
- 7 Schematische Darstellung des Wärmefeldes
- 8 Mittlere Geschwindigkeiten und Laufzeiten
- 9 Prinzipskizze zum Wärmeaustausch
- 10 Ergebnisse der eindimensionalen Berechnungen
- 11 Diskretisierung des Untersuchungsgebiets im numerischen
Transportmodell
- 12 Zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes (Fallstudie A)
- 13 Zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes (Fallstudie B)
- 14 Zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes (Fallstudie C)
- 15 Eingrenzung des stationären Endzustandes des Temperatur-
feldes
- 16 Auswirkungen auf das Wasserwerk Kaiserwald
- 17 Rechenbeispiel für den Temperaturverlauf bei 15jähriger
Warmwasserinfiltration und anschließender Rückkühlung
- 18 Anordnung der zusätzlichen Wärmepegel
- 19 Prinzipskizze zum hydraulischen Kurzschluß zwischen
Schluck- und Entnahmebrunnen
- 20 Erforderlicher Abstand zwischen Schluck- und Entnahme-
brunnen und Rückströmanteile

1. PROBLEMSTELLUNG

1.1 Veranlassung und Fragestellung

Im Zusammenhang mit dem Neubau eines Spritzgußwerks der BASF in Ettenheim soll der anfallende Kühlwasserbedarf aus Grundwasser gedeckt werden. In diesem Zusammenhang wurde auf einer Besprechung am 25.1.1982 im Wasserwirtschaftsamt Offenburg die Notwendigkeit erörtert, die im Zusammenhang mit dem Neubau vorgesehenen Grundwasserentnahmen und -rückgaben im Hinblick auf die zu erwartenden Veränderungen der Grundwassertemperaturen in einem Gutachten zu beurteilen.

Ziel des Gutachtens ist es, die Entwicklung der Temperaturanomalie bei der geplanten Kühlwassereinleitung abzuschätzen und insbesondere Aussagen darüber zu liefern, ob und in welchem Maße das Wassergewinnungsgebiet Kaiserwald der Stadt Lahr hiervon betroffen wird. Hierzu sind Aussagen über die voraussichtliche Temperaturerhöhung für die Schutzzone IIIa des Wasserwerks (Jahreslinie) erforderlich. Das Gutachten enthält Abschätzungen anhand von Prinziprechnungen, die von den wenigen verfügbaren Daten über die Beschaffenheit des Grundwasserleiters ausgehen. Gleichzeitig enthält es Empfehlungen für ein begleitendes Meßprogramm zur Beobachtung der Strömungs- und Temperaturverhältnisse nach Inbetriebnahme des ersten Bauabschnitts. Diese Naturmessungen dienen dazu, eine zuverlässige Prognose über die langfristige Entwicklung der Temperaturanomalie zu erstellen. Des Weiteren werden Hinweise zur Anordnung von Schluck- und Entnahmebrunnen gegeben sowie größenordnungsmäßig die Auswirkung von hydraulischen Kurzschlußströmungen diskutiert.

1.2 Untersuchungsfälle

Der Kühlwasserbedarf für das geplante Werk ist durch folgende Werte gekennzeichnet:

	1. Bauabschnitt	2. Bauabschnitt (Endausbau)
<u>Spitzenbedarf:</u>		
Max. Volumenstrom	100 m ³ /h	410 m ³ /h
Einleitungstemperatur- differenz ΔT_e zum unge- störten Grundwasser	12 K	12 K
Max. Wärmefracht	1,4 MW	5,7 MW
<u>Jahresmittelwerte:</u>		
Jahreswasserbedarf	390.000 m ³ (davon 6 000 m ³ Berechnung)	1.900.000 m ³ (davon 25 000 m ³ Berechnung)
Einleitungstemperatur- differenz ΔT_e zum unge- störten Grundwasser	12 K	12 K
Jährliche Wärmeein- leitung	5.441 MWh	26.507 MWh
Mittlerer Volumenstrom	44,5 m ³ /h	217 m ³ /h
Mittlere Wärmefracht	0,62 MW	3,0 MW
Max. Einleitungstem- peratur T_e	25° C	25° C

Es ist im Betrieb vorgesehen, unter Einhaltung der oben genannten Maximalwerte jeweils einen möglichst kleinen Volumenstrom bei möglichst großer Temperaturerhöhung zu fahren. Dem Gutachten

werden die oben genannten jahresgemittelten Einleitungswerte zugrunde gelegt bei einer Temperaturerhöhung im Jahresmittel von 12 K.

Bezüglich der Geohydrologie des Untersuchungsgebiets baut das vorliegende Gutachten auf den entsprechenden Angaben des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg auf. Alle Angaben zum geologischen Aufbau der Deckschichten und des Grundwasserleiters sowie zu den hydrogeologischen Kenngrößen wie Porosität, Durchlässigkeit, Transmissivität, Grundwasserstände, Filtergeschwindigkeiten, Grundwasserneubildungsraten etc. und zu den geothermischen Kenngrößen (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme) entstammen der hydrogeologischen Karte für den Raum Lahr sowie den unter 1.3 aufgeführten Unterlagen des Geologischen Landesamts. Es wird davon ausgegangen, daß das Grundwasserströmungsfeld aus den Untersuchungen des Geologischen Landesamts bekannt ist.

Für eine Berechnung der Wärmeausbreitung muß der Grundwasserleiter in vereinfachter, schematisierter Form dargestellt werden. In Eingrenzung der realen Gegebenheiten wurden deshalb drei idealisierte Grundwasserleiter (A, B und C) in Abstimmung mit dem Geologischen Landesamt definiert und in dieser Form unseren Prinziprechnungen zugrunde gelegt.

Das Gutachten basiert auf der Annahme, daß die Einleitung des erwärmten Kühlwassers insgesamt in dem vorhandenen Schluckbrunnen erfolgt. Im Zuge der Ausbaustufe 2 ist der Bau eines zweiten Schluckbrunnens vorgesehen. Die Aussagen zur großräumigen Wärmeausbreitung bleiben auch für diesen Fall zutreffend, solange der zweite Schluckbrunnen in unmittelbarer Nähe des ersten Brunnens angelegt wird.

Alle in den Kapiteln 1 bis 6 angestellten Betrachtungen zur Ausbreitung des Wärmefeldes gehen davon aus, daß kein thermischer Kurzschluß zwischen Schluckbrunnen und Entnahmebrunnen stattfindet. Dies war zunächst eine ausdrückliche Vorgabe von

seiten der BASF, da es in jedem Fall für realisierbar gehalten wurde, erforderlichenfalls die Entnahmestelle genügend weit aus dem Werksgelände hinauszuverlegen, um einen thermischen Kurzschluß zu vermeiden. Da der Standort der Entnahmebrunnen aus verschiedenen Gründen jedoch nur in einem vergleichsweise begrenzten Bereich verändert werden kann, wird in Kapitel 8 auch die Frage untersucht, in welcher Größenordnung ein thermischer Kurzschluß gegebenenfalls liegen kann und welche Konsequenzen sich hieraus für das Wärmefeld insgesamt ergeben.

1.3 Verwendete Unterlagen

1.3.1 Planunterlagen der BASF

- Kühlwasserbedarfsrechnung der Ausbaustufen eins und zwei (Schreiben vom 16.12.1981/ilg, D-D46/W - C 100 Dr. Müller)
- Standortübersicht
Planmaßstäbe 1 : 200 000 und 1 : 25 000
- Lageplan der derzeitigen Bohrpunkte mit Angaben der Pegelbezugshöhen, Zeichnungsnummer Ett.-V/7, Ettenheim - video III, 21.12.1981
- Planunterlagen : Schluckbrunnen, 21.5.1982/Meier
Pumpversuchsprotokoll (30.4.1982 9.00 Uhr - 1.5.1982 9.00 Uhr), Schichtenverzeichnis (Schluckbrunnen Fa. BASF, Februar - März 1982), 2 Körnungskurven, 2 Ausbauzeichnungen über Spülbohrungen
- Liste der Pegel und Brunnen (aufgestellt: 9.2.1982; ergänzt: 19.2.1982 und 7.6.1982)

1.3.2 Planunterlagen des Wasserwirtschaftsamts Offenburg

- Anordnung der Entnahmebrunnen des Wasserwerks Kaiserwald
- Aufzeichnungen der Grundwasserganglinien
- Anordnung der Beobachtungspegel Südlicher Ortenaukreis (Wasserwirtschaftsamt Offenburg, 26.7.1982)

1.3.3 Unterlagen des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg

- Hydrogeologisches Vorgutachten zur Grundwasserentnahme und Wiedereinleitung für das geplante Spritzgußwerk Ettenheim (Schreiben vom 20.1.1982, Az.: Nr. II/2 - 1722/81)
- Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg, Oberrheingebiet Raum Lahr, Maßstab 1 : 50 000, 1980
IV. Karte der Grundwasser-Flurabstände MW 1975
- Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg, Oberrheingebiet Raum Lahr, Maßstab 1 : 50 000, 1980
VI. Karte der Transmissivitätsverteilung
- Deckschichtenkartierung des Raums Offenburg Kaiserstuhl (Schreiben vom 23.3.1982)
- Hydrogeologisches Zwischengutachten zur Grundwasserentnahme und Wiedereinleitung für das geplante Spritzgußwerk Ettenheim, Ortenaukreis (Schreiben vom 3.6.1982, Az.: II/2 - 1722/1981).

1.3.4 Schriftwechsel mit BASF, WWA, GLA

- Schreiben des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg vom 27.1.1982 (Az.: II/2 - 1722/81)
- Schreiben des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg vom 12.3.1982, Az.: W/Re
- Schreiben des Wasserwirtschaftsamts Offenburg vom 23.3.1982
- Schreiben Kobus an das Geologische Landesamt vom 23.4.1982 (Erläuterungsbericht mit 2 Tabellen zur Festlegung der maßgebenden hydrogeologischen und thermischen Parameter)
- Schreiben des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg vom 27.5.1982, Az.: W/Re
- Protokoll der Flowmetermessungen (Dr. J. Wieck) vom 4.5.1982
- Protokoll der Temperaturmessungen (Dr. J. Wieck) vom 4.5.1982
- Vorgutachten Kobus zur Beeinflussung der Grundwassertemperaturen durch den ersten Bauabschnitt des Werks Ettenheim der BASF (Schreiben an das Wasserwirtschaftsamt Offenburg vom 15.6.1982)

1.3.5. Besprechungstermine

Im Wasserwirtschaftsamt Offenburg fanden bisher drei Besprechungstermine statt:

- am 25. Januar 1982, am 19. April 1982 und am 28. Juni 1982.

Eine Ortsbesichtigung fand anlässlich der Flowmeter- und Temperaturmessungen am 4.5.1982 statt.

Eine Besprechung über das Meßprogramm fand am 20.8.1982 in Freiburg im Geologischen Landesamt Baden-Württemberg statt.

Weitere Besprechungen mit der BASF fanden am 25.10.1982 in Ludwigshafen und am 26.11.1982 in Stuttgart statt.

1.3.6 Schrifttum

Lofi, W., Mehlhorn, H., Kobus, H.: Betrachtungen zum Wärmehaushalt des Untergrundes im Raum Karlsruhe", Bericht 544, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, 1977

Balke, K.D.: "Der thermische Einfluß besiedelter Gebiete auf das Grundwasser, dargestellt am Beispiel der Stadt Köln", GFW-Wasser/Abwasser, Heft 3, 1974

Kobus, H., Mehlhorn, H.: "Beeinflussung von Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen", GFW-Wasser/Abwasser, Heft 6, 1980

Spitz, H. Mehlhorn, H., Kobus, H.: "Ein Beitrag zur Bemessung der engeren Schutzzone in Porengrundwasserleitern", Wasserwirtschaft, Heft 11, 1980

Söll, T.: "Ermittlung von instationären Temperaturfeldern im Grundwasser", Diplomarbeit am Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1981

Mehlhorn, H., Spitz, K., Kobus, H.: "Kurzschlußströmung zwischen Schluck- und Entnahmebrunnen - Kritischer Abstand und Rückströmrate", Wasser und Boden, Heft 4, 1981

Mehlhorn, H.: "Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen", Dissertation am Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Februar 1982

2. HYDROGEOLOGIE

2.1 Geologische Kenndaten

Bei dem vorliegenden Aquifer handelt es sich um einen horizontal geschichteten Grundwasserleiter, dessen geologische Kenndaten in Bild 1 aufgelistet sind und dessen schematisierter Aufbau im Bereich des Werksgeländes aus Bild 2 ersichtlich ist. Aus regionalen Kenntnissen kann man annehmen, daß der geologische Aufbau des Aquifers im Untersuchungsgebiet gleichartig ist, so daß Bild 2 eine gute Näherung der wirklichen Verhältnisse darstellt. Das anstehende Bodenmaterial der einzelnen Schichten besteht vorwiegend aus Sand und Kies. Der Feinsandgehalt variiert stark, so daß mit großen Unterschieden in den Durchlässigkeiten sowie Filter- und Abstandsgeschwindigkeiten von Schicht zu Schicht gerechnet werden muß. Die Gesamttransmissivität des Grundwasserleiters T_{ges} wurde mit mindestens $0,15 \text{ m}^2/\text{s}$, maximal $0,18 \text{ m}^2/\text{s}$, veranschlagt. Diese im Werksgelände ermittelten Werte liegen vergleichsweise hoch und scheinen eine lokale Besonderheit darzustellen. Neuere Beobachtungen bestätigen die hohe Transmissivität; auch im Bereich des Wasserwerks Kaiserwald sind ähnlich hohe Werte ermittelt worden.

Die horizontalen tiefengemittelten Durchlässigkeiten betragen ($k_{fh} = 3 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$). In der durchlässigsten Teilschicht des Aquifers in etwa 33 bis 35 m Tiefe, die aus einer fast sandfreien Kieslage besteht, kann die Durchlässigkeit auf Werte von ($k_{fh} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$) ansteigen.

Flowmetermessungen im Rahmen der Voruntersuchungen zeigten, daß sowohl der Abschnitt im oberen Kieslager von 15 - 24 m als auch ein Bereich im tiefen Teil des Aquifers zwischen 33 und 45 m eine dominierende Rolle für die Ausbreitung der Wärmefahne einnimmt.

Die vertikalen Durchlässigkeiten k_{fv} sind erfahrungsgemäß wesentlich kleiner als die k_{fh} -Werte. Für den Aquifer auf dem Werksgelände konnte ein Verhältnis $k_{fv} : k_{fh}$ von 1 : 130 bestimmt werden.

Bei der Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens von Wasserinhaltsstoffen und Wärme darf jedoch weder mit mittleren Transmissivitäten noch mit mittleren Durchlässigkeiten gerechnet werden, weil diese Parameter lediglich die Bestimmung von Gesamtdurchflüssen, nicht aber von Geschwindigkeiten und Verweilzeiten erlauben. Der exakte Wärmeausbreitungsvorgang kann bei der vorliegenden Aquiferkonfiguration aus Mangel an verfügbaren Daten nicht nachvollzogen werden. Um trotzdem eine eingrenzende Prognose erstellen zu können, werden im folgenden drei aus den vorhandenen Naturdaten abgeleitete, idealisierte Grundwasserleiter vorgestellt, die die Wärmeausbreitung in ihren Extremwerten charakterisieren (siehe Bild 3). Die Problematik besteht vor allem darin, eine für das Untersuchungsgebiet charakteristische, längs- und tiefengemittelte Abstandsgeschwindigkeit zu finden, die man unter anderem als Eingabeparameter für die numerischen Rechnungen zur Wärmeausbreitung benötigt.

Fallstudie A: Tiefen- und längsgemittelte Betrachtung des gesamten Aquifers

Einer Empfehlung des Geologischen Landesamts folgend wird der Berechnung ein homogener, isotroper Grundwasserleiter zugrunde gelegt, dessen Mächtigkeit konstant 40 m beträgt und der über die gesamte Tiefe gleichmäßig mit Warmwasser beaufschlagt ist. Folgende Grunddaten wurden hierbei angesetzt:

- horizontale tiefen- und längsgemittelte Durchlässigkeit
 $k_{fh} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s};$
- effektive Porosität $n_e = 0,10;$
- längsgemitteltes Standrohrspiegelgefälle $\mathfrak{J} = 0,6 \cdot 10^{-3}$
- mittlere Wärmeleitfähigkeit des Grundwasserleiters $\lambda_G = 3,0 \frac{\mathfrak{J}}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}}$
- mittlere Wärmespeicherkapazität des Grundwasserleiters $\rho C_G = 3 \cdot 10^6 \frac{\mathfrak{J}}{\text{m}^3 \text{K}}$

Mit diesen Werten ergeben sich für die Grundströmung längsgemittelte Abstandsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von

0,18 m/Tag für die Filtergeschwindigkeit und 1,8 m/Tag für die Abstandsgeschwindigkeit.

Fallstudie B: Längsgemittelte Betrachtung des durchlässigen oberen Bereichs des Aquifers als Transportmedium

Dieser Fall enthält eine ungünstige Parameterkombination, die sich sinnvollerweise aus den Naturdaten zusammenstellen läßt (Bild 2), wobei im einzelnen folgende Annahmen getroffen wurden:

- Es liegt ein homogener, isotroper Grundwasserleiter vor, der die hydrologischen und thermischen Eigenschaften des oberen Abschnitts von 15 - 24 m des Aquifers besitzt.
- Das gesamte infiltrierte Warmwasser fließt ausschließlich in dieser durchlässigen Zwischenschicht dem Wasserwerk Kaiserwald zu.
- Es wird für die betrachtete Schicht alternativ als "ungünstig" angenommen, daß
 - a) bei einem schichtgemittelten $n_e = 0,16$ der Wert von k_{fh} maximal $6 \cdot 10^{-3}$ beträgt, oder
 - b) bei einem schichtgemittelten $k_{fh} = 4 \cdot 10^{-3}$ m/s der Mindestwert von $n_e = 0,15$ erreicht wird.

Der Fall, daß ein Anstieg von k_{fh} gekoppelt ist mit einer gleichzeitigen Abminderung von n_e wird als nicht plausibel ausgeschlossen.

Die Grundgrößen und die daraus errechneten Parameter sind längs- und (schicht-)tiefengemittelte Rechenwerte. Es ergibt sich hierbei ungünstigstenfalls für die Grundströmung eine längsgemittelte Abstandsgeschwindigkeit in der Größenordnung von 2 m/Tag.

Fallstudie C: Längsgemittelte Betrachtung des stark durchlässigen Bereichs im tiefen Teil des Aquifers als Transportmedium

Die Warmwassereinleitung ist im unteren Teil des Aquifers vorgesehen; Flowmetermessungen während der Vorversuche haben ergeben, daß auf den Bereich von 25 bis 45 m 70% des Gesamtdurchflusses entfallen. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Das gesamte infiltrierte Warmwasser fließt in dem Bereich von 33 bis 45 m dem Wasserwerk Kaiserwald zu.
- Dieser Bereich entspricht einem idealisierten Grundwasserleiter, dessen hydrogeologische Eigenschaften alternativ "ungünstig" durch folgende Annahmen eingegrenzt werden:
 - a) Bei einem schichtgemittelten $k_{fh} = 6 \cdot 10^{-3}$ wird ein schichtgemittelter Wert von $n_e = 0,13$ angesetzt.
 - b) Als Durchlässigkeit wird ein Wert $k_{fh} = 10^{-2}$ m/s in Rechnung gebracht. In Anbetracht dessen, daß dieser Wert über die gesamte Lauflänge gemittelt ist, kann er als Obergrenze für das Untersuchungsgebiet betrachtet werden. Der zugehörige Wert der effektiven Porosität wird dabei mit mindestens $n_e = 0,18$ angesetzt.
- Der Fall, daß ein Anstieg von k_{fh} gekoppelt ist mit einer gleichzeitigen Abnahme von n_e wird auch hier als nicht plausibel ausgeschlossen.

Es ergibt sich daraus ungünstigstenfalls für die Grundströmung eine längsgemittelte Abstandsgeschwindigkeit in der Größenordnung von 3 m/Tag als größter anzusetzender Rechenwert. Nach Angabe des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg liegen diese Rechenwerte sehr hoch; es wird von dort für vertretbar gehalten, die Abstandsgeschwindigkeiten im unteren Bereich denjenigen im Bereich (B) gleichzusetzen oder höchstens um 25% höher anzusetzen (also bis zu 2,5 m/Tag).

Für alle drei Fallstudien werden weiterhin folgende Annahmen getroffen:

- Weniger durchlässige Sperrschichten, die eventuell entlang des Fließweges auftreten, wirken verlangsamend; das heißt die Rechnung liegt auf der "sicheren" Seite.
- Rinnen sehr großer Durchlässigkeit, die quer zur Strömungsrichtung verlaufen, bewirken eine stärkere Querausbreitung, das heißt die Rechnung liegt auf der "sicheren" Seite.
- Die Existenz von Rinnen sehr großer Durchlässigkeit, die im Bereich der Wärmefahne über eine beträchtliche Distanz (mehrere Kilometer) in Fließrichtung verlaufen, wird ausgeschlossen.

Die vorliegenden Daten und Ansätze wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Geologischen Landesamt Baden-Württemberg zusammengestellt.

2.2 Geothermische Kenndaten

Exakte Angaben über die thermischen Eigenschaften des Aquifers sind nicht verfügbar. Es muß deshalb auf Erfahrungswerte aus der Literatur zurückgegriffen werden, die in etwa die Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet kennzeichnen. Unter Bezugnahme auf die Kartierung der Flurabstände und des Bodenmaterials im Raum Lahr wurden die in Bild 4 tabellarisch zusammengestellten geothermischen Eigenschaften aus Literaturangaben gewonnen. Die dort angegebenen Wärmeleit- und Speicherkoeffizienten wurden den weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt. Die getroffenen Annahmen wurden vom Geologischen Landesamt Baden-Württemberg überprüft und für die Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet als zutreffend bestätigt.

2.3 Angaben zum Strömungsfeld

Zum Strömungsfeld im Untersuchungsgebiet liegt vom Geologischen Landesamt lediglich die hydrogeologische Karte vor. Aus dieser sind die Grundwasserstände ersichtlich, aus denen zusammen mit den Angaben über die mittlere Durchlässigkeit ein Bild zumindest über die oberflächennahe Grundwasserströmung gewonnen werden kann. Die hydrogeologische Karte liefert Angaben zum langfristigen Mittelwert; inwiefern das Grundwasserströmungsfeld im Jahreszyklus Schwankungen und Abweichungen von diesen Mittelwerten unterworfen ist, ist hieraus nicht ersichtlich. Hingegen zeigt sich recht eindeutig, daß der BASF-Versickerungsbrunnen im Oberstrom des Wasserwerks Lahr liegt und deshalb davon auszugehen ist, daß das versicker- te Kühlwasser insgesamt dem Wasserwerk Lahr zuströmen wird. Die Grundwasserhöhengleichen im Ausgangszustand (ohne BASF) sind in Bild 5 dargestellt.

2.4 Berechnungsfälle

Die Veränderungen des Grundwasserströmungsfeldes durch die geplante Warmwasserinfiltration wurde in erster Näherung mit Hilfe eines horizontal-ebenen Grundwasserströmungsmodells numerisch berechnet. Dabei wurden die Grundwasserhöhengleichen der hydrogeologischen Kartierung als Ausgangszustand vorgegeben und diesem stationär eine Warmwasserinfiltration überlagert. Hierbei wurde zunächst davon ausgegangen, daß der Entnahmebrunnen so weit oberstrom des Schluckbrunnens angeordnet ist, daß er keinen thermischen Kurzschluß verursacht und auch die Ausbreitung der Wärmefahne nicht nennenswert verändert. Es sei vermerkt, daß die Lage des Entnahmebrunnens für diese Rechnung willkürlich an die in Bild 6 gezeigte Stelle gelegt wurde und nicht mit der tatsächlichen oder geplanten Entnahmestelle übereinstimmt; für das in Bild 6 gezeigte Ergebnis dieser groben Näherungsrechnung ist dies jedoch irrelevant. Aus Bild 6

ist eindeutig ersichtlich, daß die Warmwasserfahne gänzlich im Einzugsbereich des Wasserwerks liegt und deshalb nicht davon ausgegangen werden kann, daß erhebliche Anteile des erwärmten Wassers am Wasserwerk Kaiserwald vorbeiströmen.

Sicherlich wird aufgrund der unbekanntenen örtlichen geologischen Gegebenheiten die tatsächliche Ausbreitung von dieser groben Näherungsrechnung abweichen, und zwar vermutlich im Sinne einer stärkeren Ausbreitung der Wärmefahne in Querrichtung. Hierzu tragen sowohl geologische Inhomogenitäten als auch zeitliche Schwankungen der Grundwasserströmungsrichtung im Jahreszyklus bei. Diese Effekte lassen sich jedoch aus Mangel an entsprechenden Daten nicht quantifizieren. Sie werden deshalb in den Berechnungen vernachlässigt; hierdurch liegt die Berechnung auf der "sicheren", das heißt ungünstigen Seite. Eine stärkere Quervermischung bedeutet, daß ein entsprechend größeres Wasservolumen von der Aufwärmung betroffen wird, wobei jedoch gleichzeitig die Temperaturerhöhung abgemindert wird.

Die Prinziprechnungen wurden für die Ausbaustufen 1 und 2 jeweils für die drei idealisierten Grundwasserleiter A, B und C durchgeführt. Hierbei wurde davon ausgegangen, daß das gesamte Kühlwasser nur in den jeweils definierten Grundwasserleiter eingespeist wird.

3. HAUPTABMESSUNGEN DES WÄRMEFELDES

3.1 Allgemeine Beschreibung

Die zeitliche Entwicklung und Ausbreitung des Wärmefeldes zufolge der Kühlwassereinleitung ist in Bild 7 in schematisierter Form dargestellt. Die Warmwassereinleitung soll im unteren Teil des Grundwasserleiters erfolgen. Andererseits wirken im unmittelbaren Einleitungsbereich Auftriebskräfte, welche ein Aufsteigen des Warmwassers und eine entsprechende Aufwärmung auch des oberen Bereichs des Grundwasserleiters bewirken. Im Laufe der Zeit breitet sich die erwärmte Zone in allen Richtungen aus, wobei in seitlicher Richtung und entgegen der Grundströmung allmählich ein asymptotischer Grenzwert erreicht wird, während in Strömungsrichtung das Wärmefeld immer weiter transportiert wird. In einiger Entfernung stromab der Einleitungsstelle erreicht das Wärmefeld eine in etwa konstant bleibende Endbreite b ("Infiltrationsbreite"), nachdem sich die Fließgeschwindigkeiten des Warmwassers denen der ungestörten Strömung angeglichen haben. Die Abmessungen des Wärmefeldes betragen ein Vielfaches der Grundwasserleitermächtigkeit von rund 40 m. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, daß das Wärmefeld die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters erfaßt und im wesentlichen eine Vermischung über die gesamte Tiefe erfolgt.

Für die großräumige, langfristige Betrachtung der Wärmeausbreitung sind in erster Linie die zeitlichen Mittelwerte von Belang. Schwankungen machen sich zwar im Nahbereich unter Umständen stark bemerkbar und führen auch zu einer verstärkten seitlichen Vermischung der Wärmefahne, sie verlieren jedoch mit zunehmender Entfernung und Zeit an Bedeutung. Kurzfristige Schwankungen (Tage, Wochen), wie sie betriebsbedingt zu erwarten sind, werden vergleichsweise rasch ausgedämpft, und selbst jahreszyklische Schwankungen sind nach 20 bis 25 Jahren Aufenthaltszeit abgeklungen. Für die Betrachtung der Wärmeausbreitung im Hinblick auf das Wasserwerk Kaiserwald werden deshalb die Jahresmittelwerte der Kühlwassereinleitung zugrunde gelegt, da diese für die Hauptabmessungen des Wärmefelds maßgeblich sind.

3.2 Breitenausdehnung des Wärmefeldes

Nach den Angaben des Geologischen Landesamts kann für die ungestörte Grundwasserströmung im Untersuchungsgebiet angenommen werden, daß die Mittelwerte sich in folgenden Größenordnungen bewegen:

	Fallstudie		
	A	B	C
Filtergeschwindigkeit [m/Tag]	0,18	0,3	0,5
Abstandsgeschwindigkeit [m/Tag]	1,8	2,0	3,0

Würde das eingeleitete Kühlwasser keine Temperaturdifferenz aufweisen, dann ergäben sich rechnerisch folgende Endbreiten für die Einleitung

Infiltrationsbreite	Fallstudie		
	A	B	C
Ausbaustufe I [m]	150	400	180
Ausbaustufe II [m]	725	1930	870

Die Endbreite des Wärmefeldes weicht von diesen Rechenwerten deshalb ab, weil im Bereich des warmen Wassers die Durchlässigkeit zufolge der veränderten Zähigkeit erhöht wird. Diese Erhöhung kann in unmittelbarem Einleitbereich bis zu 30% betragen und klingt in Fließrichtung mit zunehmendem Abstand von der Einleitungsstelle ab. Dies würde eine Verringerung der Endbreite gegenüber der oben genannten Rechenwerte bewirken. Andererseits wird am Rand des Wärmefeldes eine Quervermischung stattfinden, die durch die Temperaturdifferenzen begünstigt wird. Zuzufolge der temperaturbedingten Dichteunterschiede bilden sich im Randbereich Konvektionsrollen aus, die eine seitliche Ausbreitung begünstigen. Dies würde eine Vergrößerung der Endbreite mit sich bringen. Dieser Effekt

kann nicht hinreichend quantifiziert werden, doch läßt sich größenordnungsmäßig abschätzen, daß dies die gegenläufigen Auswirkungen der Zähigkeit- und damit Durchlässigkeitsänderung in erster Näherung aufhebt.

Darüber hinaus können auch zeitliche Schwankungen in der Richtung des Grundwasserströmungsfeldes eine zusätzliche Verbreiterung des Wärmefeldes nach sich ziehen, die ebenfalls nicht quantifizierbar ist. Es erscheint daher angemessen, den weiteren Betrachtungen die oben genannten rechnerischen Zahlenwerte für die Endbreite zugrunde zu legen unter Beachtung der Tatsache, daß aus den genannten Gründen die tatsächlichen Werte unter Umständen hiervon beträchtlich abweichen können.

4. FORTSCHRITTSGESCHWINDIGKEIT UND LAUFZEIT DER WÄRMEFRONT

4.1 Strömungsgeschwindigkeit

Die längs- und tiefengemittelten Abstandsgeschwindigkeiten für die drei untersuchten Grundwasserleitervarianten sind in Bild 8 in tabellarischer Form zusammengestellt. Wie die Tabelle zeigt, liegen die Filtergeschwindigkeiten v_f in der Größenordnung von 0,18 bis 0,5 m/Tag. Die entsprechenden Abstandsgeschwindigkeiten bewegen sich in der Größenordnung von 1,8 bis 3,0 m/Tag.

4.2 Geschwindigkeit der Wärmefront

Die Wärmefront wird sich wesentlich langsamer ausbreiten als die Grundwasserströmung. Dieses hat seinen Grund hauptsächlich darin, daß während der Wärmeausbreitung jeweils das Korngerüst mit aufgewärmt werden muß. Hinzu kommt, daß auch die Wärmeabgabe an die tiefer liegenden Schichten und an die Atmosphäre zu einer gewissen Verzögerung der Ausbreitung der Wärmefront beiträgt. Mit Hilfe der zugrunde gelegten geothermischen Eigenschaften des Grundwasserleiters lassen sich diese Verzögerungen abschätzen. Die hieraus resultierenden Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_w für die Wärmefront sind ebenfalls in Tabelle 8 enthalten. Sie liegen in der Größenordnung von 0,25 bis 0,75 m/Tag.

4.3 Laufzeiten

Aus den Überlegungen zu den typischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten ergibt sich eine Abschätzung der zu erwartenden Laufzeiten für das Grundwasser einerseits und die Wärmefront andererseits zwischen der Zugabestelle und dem Wasserwerk Lahr. Die in Tabelle 8 angegebenen Geschwindigkeiten gelten jeweils für das großräumige Strömungsfeld in ausreichender Entfernung von der Zugabestelle, wo das Strömungsgeschehen durch das vorhandene natürliche Grundwasserspiegelgefälle geprägt wird. Im Nahbereich des Schluck-

brunnens treten selbstverständlich höhere örtliche Geschwindigkeiten auf, die eine raschere Anfangsausbreitung mit sich bringen. Für die großräumige Betrachtung können diese Nahfeldeffekte jedoch vernachlässigt werden. Diese Näherung zeigt Abweichungen von der exakten Laufzeit, die für die Ausbaustufe 1 bei einem Monat und für die Stufe 2 bei mehreren Monaten liegen, was angesichts der extrem großen Gesamtlaufzeiten nicht von Bedeutung ist. Man erhält somit eine Abschätzung für die zu erwartenden Laufzeiten zwischen Schluckbrunnen und Wasserwerk, wenn man auch an den Wasserwerksbrunnen die örtlichen Beschleunigungen im Nahbereich der Brunnen vernachlässigt. Die zu erwartenden Laufzeiten sind ebenfalls in Bild 8 tabellarisch zusammengestellt. Die Entfernung zwischen BASF und Wasserwerk Lahr beträgt in der Luftlinie rund 6 km. Als Weglänge entlang der verbindenden Stromlinie zwischen BASF und Wasserwerk, die für die Laufzeiten maßgeblich ist (siehe Bild 6) wird eine Entfernung von 6,5 km angesetzt. Man sieht aus der Tabelle 8, daß für die Laufzeit eines Wasserteilchens vom BASF-Werksgelände zum Wasserwerk Lahr mindestens fünf Jahre anzusetzen sind, während für die Laufzeit der Wärmefront die Größenordnung von einigen Dekaden erreicht wird.

Die ursprüngliche Frage lautet, welche Temperaturveränderungen am Rand der Schutzzone IIIa (das heißt Jahreslinie) des Wasserwerks zu erwarten sind. Die exakte Lage dieser Schutzzone ist für Lahr noch nicht festgelegt, dürfte jedoch voraussichtlich in der Größenordnung von 500 bis 1000 m von der Entnahmestelle liegen. Aus diesem Grund werden die Laufzeiten einerseits bis zum Wasserwerk, andererseits bis zu einem geodätischen Punkt ermittelt, dessen Entfernung zum Wasserwerk 1000 m beträgt: Damit ist für alle Fallstudien der geometrische Betrachtungsort fixiert und ermöglicht direkte Vergleiche.

Bei der Berechnung der Laufzeiten der Wärme ist zu berücksichtigen, daß mit zunehmender Grundwassertemperatur die Durchlässigkeit k_f erhöht wird. Eine Temperaturänderung von 10°C auf

20°C bewirkt eine Erhöhung der Durchlässigkeit von ca. 30%. Mit zunehmender Lauflänge und zunehmender Abkühlung wird dieser beschleunigende Effekt allmählich abnehmen und schließlich verschwinden. Über die gesamte Lauflänge gemittelt wird deshalb als plausible Rechenannahme eine k_f -Erhöhung um 15% angesetzt.

5. WÄRMEABGABE ENTLANG DES FLIESSWEGES

5.1 Allgemeine Beschreibung

Das eingeleitete Warmwasser erfährt entlang seines Fließweges im Laufe der Zeit eine allmähliche Abkühlung durch Wärmeaustausch mit seiner Umgebung. In Bild 9 sind die entsprechenden Wärmeflüsse in schematisierter Form dargestellt.

Der weitaus wichtigste Anteil der Wärmeabgabe erfolgt durch Wärmeaustausch mit der Atmosphäre. Bei den relativ geringmächtigen Deckschichten im Untersuchungsgebiet sind relativ hohe Temperaturgradienten zur Bodenoberfläche zu erwarten und damit verbunden eine rasche Wärmeabgabe der oberflächennahen Grundwasserschichten. Dies führt voraussichtlich zur Ausbildung eines vertikalen Temperaturprofils im Grundwasserleiter in der Art, daß die Temperatur des Grundwassers von der Grundwasser-oberfläche zu den tieferen Schichten hin zunimmt. Wie ausgeprägt ein solches Temperaturprofil auftreten wird, hängt sehr stark davon ab, wie groß die Quervermischung im Grundwasserleiter zufolge Querdispersion sein wird. Die Querdispersion wird einerseits durch die geringen vertikalen Durchlässigkeitswerte (etwa 1% der horizontalen Durchlässigkeitswerte) und andererseits durch die ausgeprägte geologische Schichtung des Grundwasserleiters vermutlich stark behindert, so daß das Auftreten eines vertikalen Temperaturgradienten im Grundwasserleiter wahrscheinlich ist. In diesem Fall wird nach Abkühlung der oberflächennahen Schichten die Wärmeabgabe an die Atmosphäre vermindert, und zwar proportional zur Abminderung des Temperaturgradienten zur Atmosphäre hin. In Ermangelung entsprechender Meßdaten zu den geothermischen Eigenschaften kann der maßgebliche Wärmeaustausch mit der Atmosphäre durch Rechnung nur größenordnungsmäßig eingeschränkt werden. Eine Quantifizierung dieses Wärmeaustauschs wird nach Vorliegen entsprechender Naturmeßdaten nach Inbetriebnahme des ersten Bauabschnittes möglich sein, und zwar umso zuverlässiger, je länger die Warmwasserfahne beobachtet wird. Der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre ist

letztlich auch maßgeblich für die Ausdehnung der Temperatur-anomalie im stationären Endzustand. Die Ausdehnung der Temperatur-anomalie kann aus den genannten Gründen im jetzigen Zustand nur grob eingegrenzt werden.

Des weiteren findet ein Wärmeaustausch durch Wärmeleitung mit den tieferliegenden Gesteinsschichten statt. Nach entsprechend langen Betriebszeiten wird sich allmählich ein stationärer Endzustand einstellen, bei dem die aus der Warmwasserschicht an die tieferliegenden Gesteinsschichten abgegebene Wärme pro Zeiteinheit großräumig im Untergrund ausgeglichen und seitlich abgegeben wird.

Ferner findet auch an den seitlichen Rändern der Warmwasserfahne ein Wärmeaustausch statt, der sich zum Teil durch die Ausbildung von Konvektionsrollen in den Randbereichen bemerkbar macht und hierdurch zu einer zusätzlichen Quervermischung und Verbreiterung der Warmwasserfahne beiträgt.

Die Anteile zufolge seitlicher und nach unten gerichteter Wärmeabgabe dürften jedoch wesentlich geringer sein als der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre. Dieser ist dominierend und für die Beurteilung des zu erwartenden Temperaturfeldes maßgeblich.

Zur Eingrenzung der zu erwartenden Wärmeabgabe an die Atmosphäre wurden in Ermangelung geeigneter Naturdaten drei rechnerische vertikale Temperaturgradienten der Rechnung zugrunde gelegt (Bild 9):

- a) Völlige Quervermischung: gleichmäßige Temperatur über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters. Linearer Temperaturgradient von der Grundwasseroberfläche zur Bodenoberfläche. Dies ist zweifelsfrei die günstigste Annahme, die zur größten Wärmeabgabe an die Atmosphäre führt und deshalb die Untergrenze der zu erwartenden Ausdehnung der Temperatur-anomalie liefert (eindimensionale Rechnung, analytische Lösung).

- b) Annahme, daß die untere Hälfte des Grundwasserleiters eine konstante Temperatur aufweist und von der halben Mächtigkeit des Grundwasserleiters bis zur Bodenoberfläche ein linearer Temperaturgradient auftritt. Dies dürfte den ungünstigsten Fall darstellen, der die geringste Wärmeabgabe an die Atmosphäre liefert und somit zur größten Ausdehnung der Temperaturanomalie führt (eindimensionale Rechnung, analytische Lösung).
- c) Teilweise Quervermischung ohne Schichtungseffekte nach Maßgabe der aus der Literatur verfügbaren Angaben zur Querdispersion (vertikal-ebene numerische Berechnung).

Mit Hilfe dieser Annahmen läßt sich die zu erwartende Wärmeabgabe an die Atmosphäre und die Ausdehnung des Temperaturfeldes in etwa eingrenzen.

5.2 Eindimensionale Berechnung

Der stationäre Endzustand für die beiden Grenzfälle (a) und (b) kann mit Hilfe eines eindimensionalen Berechnungsansatzes erfaßt werden. Die Grundlagen dieser eindimensionalen Näherungsrechnung sind in dem Aufsatz Kobus und Mehlhorn "Beeinflussung von Grundwassertemperaturen durch Wärmepumpen" in GWF, Heft 6, 1980, enthalten. Die Ergebnisse dieser eindimensionalen Berechnungen für die verschiedenen Untersuchungsfälle sind in Bild 10 zusammenfassend dargestellt.

Dort sind zum einen die Zahlenwerte für die Reichweite der Temperaturanomalie angegeben. Diese Reichweite ist definiert als jene Entfernung vom Einleitungsort, in der die örtliche Temperaturdifferenz ΔT bis auf 5% des Wertes ΔT_E an der Einleitungsstelle reduziert ist.

Des weiteren sind auch die Entfernungen bis zu dem Ort angegeben, an dem bei einer Einleitungsdifferenz von $\Delta T_E = 12$ K die örtliche Temperaturdifferenz noch $\Delta T = 1$ K beträgt (Ein-Grad-Linie).

5.3 Vertikal-ebene Berechnung

Zur realistischeren Erfassung der maßgeblichen vertikalen Wärmeströme und Temperaturgradienten wurde ein vertikal-ebenes numerisches Wärmetransportmodell eingesetzt. In diesem numerischen Modell wird die Deckschicht, der Grundwasserleiter und das Liegende in eine Anzahl von Knotenreihen diskretisiert, die in horizontaler Strömungsrichtung ebenfalls diskrete Abstands- bzw. Zeitschritte aufweisen. Die Diskretisierung des Untersuchungsgebiets im numerischen Transportmodell ist in Bild 11 dargestellt. Die Ergebnisse der numerischen Rechnungen hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung und des stationären Endzustands des Temperaturfelds für die drei idealisierten Grundwasserleiter A, B und C sind in den Bildern 12 bis 14 dargestellt. Alle Angaben in diesen Diagrammen beziehen sich auf die jeweilige örtliche Temperaturerhöhung ΔT über die natürliche, ungestörte Temperatur hinaus. Den Rechenläufen wurde eine konstant bleibende Einleitung mit dem jeweils gegebenen Durchsatz und einer Temperaturerhöhung am Einleitungsort von $\Delta T = 12 \text{ K}$ im Jahresmittel zugrunde gelegt.

5.4 Zeitliche Entwicklung des Temperaturfelds und stationärer Endzustand

Wie die oben genannten Rechenergebnisse zeigen, ist mit Laufzeiten der Wärme front von der Einleitungsstelle bis zum Wasserkwerk Lahr in der Größenordnung von mehreren Dekaden zu rechnen. Die zeitliche Entwicklung ist im einzelnen aus den Bildern 12, 13 und 14 ersichtlich.

Für den zu erwartenden stationären Endzustand nach sehr langen Betriebszeiten wurde eine Eingrenzungsrechnung durchgeführt. Dieser wurden einerseits die ungünstigsten Parameterkombinationen zugrundegelegt, wie sie auch für die Rechnungen unter 5.3 (Bild 12 bis 14) verwendet wurden, und andererseits Annahmen auf der günstigen Seite hinsichtlich der geothermischen Eigen-

schaften des Untersuchungsgebiets getroffen. Hieraus ergibt sich eine ungünstigste, obere Eingrenzung und eine günstigste, untere Eingrenzung für die Ausdehnung der Temperaturanomalie im stationären Endzustand, das heißt nach sehr langen Betriebszeiten. Der in Bild 15 schraffiert dargestellte Bereich gibt an, in welchen Grenzen nach heutiger Kenntnis der Situation der Bereich der Temperaturerhöhungen zufolge der geplanten Kühlwassereinleitungen zu erwarten ist. Hierbei spiegeln die Unterschiede zwischen den Kurvenscharen A, B und C die Unsicherheit und mögliche Bandbreite der geologischen und hydrologischen Basisdaten wider, wie dies bei der Festlegung der idealisierten, eingrenzenden Fallstudien A, B und C beschrieben wurde (Kapitel 2). Die Bandbreite der jeweiligen Schraffur charakterisiert die mögliche Bandbreite zufolge unzureichender Kenntnis der jeweiligen geothermischen Kennwerte.

Es wird hieraus deutlich, daß im günstigen Falle die Temperaturanomalie abgeklungen sein wird, bevor die Jahresgrenze bzw. 1000 m-Linie des Wasserwerks Kaiserwald erreicht wird, so daß keinerlei Beeinträchtigung des Wasserwerks zu befürchten wäre. Andererseits könnte im ungünstigen Fall im Bereich der Schutzzone IIIa bzw. im Wasserwerk selbst noch eine durchaus nennenswerte Temperaturerhöhung auftreten.

6. AUSWIRKUNGEN FÜR DAS WASSERWERK KAISERWALD

6.1 Stationärer Endzustand

Wie Bild 15 zeigt, wird die Temperaturerhöhung des aus der Kühlwassereinleitung stammenden Grundwassers im stationären Endzustand im Wasserwerk Kaiserwald günstigenfalls unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Entsprechend ungünstige Rechenannahmen (schnelle Ausbreitung im tiefen Grundwasserleiter) liefern Temperaturerhöhungen von 2 bis 3 K. Die entsprechenden Rechenwerte für die drei Fallstudien A, B oder C sind in Bild 16 tabelliert. Wie der obere Teil der Tabelle zeigt, sind die Resttemperaturdifferenzen des aus der Kühlwassereinleitung stammenden Grundwassers unabhängig vom Kühlwasservolumenstrom und gelten deshalb für beide Ausbaustufen bis zu den jeweiligen Spitzenwerten. Ohne Meßdaten über die tatsächliche Wärmeausbreitung läßt sich eine bessere Abschätzung innerhalb dieser Grenze nicht treffen; die große Bandbreite ist auf die sehr spärliche Kenntnis der hydrogeologischen Verhältnisse im einzelnen und auf das völlige Fehlen von Daten zur Wärmeabgabe an die Atmosphäre zurückzuführen. Es läßt sich aus diesen Gründen nicht ausschließen, daß die Temperaturerhöhung des Grundwassers am Wasserwerk den Wert von 1 K erreicht oder übersteigt.

Die genehmigte Grundwasserentnahme des Wasserwerks Kaiserwald beträgt derzeit 120 l/s und im weiteren Ausbau insgesamt 200 l/s. Zur Abschätzung der Auswirkungen wird davon ausgegangen, daß das gesamte von der Kühlwassereinleitung der BASF betroffene Grundwasser dem Wasserwerk Kaiserwald zuströmt und dort entnommen wird. Dies ist die ungünstigste Annahme auf der sicheren Seite. Für große Entnahmen des Wasserwerks dürfte sie realistisch und zutreffend sein (siehe Bild 6). Bei kleinen Wasserwerksentnahmen nimmt jedoch die Wahrscheinlichkeit zu, daß die Warmwasserfahne nicht voll dem Wasserwerk zuströmt, sondern ganz oder teilweise außerhalb vorbeiströmt. Im Fall sehr kleiner Entnahmen (zum Beispiel Wasserwerksentnahme = Kühlwassereinleitung) ist es sehr

unwahrscheinlich, daß die natürlichen Strömungsverhältnisse dazu führen, daß die Kühlwassereinleitung direkt und vollständig auf das Wasserwerk trifft. Trotzdem wurde auch dieser Grenzfall rechnerisch mit einbezogen.

In Bild 16 ist für die jeweiligen Jahresmittelwerte der Kühlwassereinleitung aufgelistet, welchen Anteil an der Gesamtförderung des Wasserwerks das erwärmte Kühlwasser ausmacht. Unter den oben genannten Voraussetzungen ergeben sich für die einzelnen Ausbaustufen und jeweils verschiedenen Entnahmeraten des Wasserwerks die dort tabellierten Prozentzahlen. Da die jeweils restlichen Anteile der Grundwasserentnahme im Wasserwerk in ihrer Temperatur unbeeinflusst sind, ergeben sich rechnerisch aufgrund der Vermischung deutlich niedrigere Temperaturerhöhungen in der Wasserwerksentnahme selbst, wie dies aus den Zahlenwerten in Bild 16 hervorgeht. Im günstigen Fall bleibt die Temperaturerhöhung unterhalb der Nachweisgrenze. Die meisten dieser rechnerischen Temperaturerhöhungswerte (außer Fallstudie C) liegen in einer Größenordnung, die vergleichbar oder kleiner ist als die Bandbreite der Schwankungen der natürlichen Grundwassertemperaturen im Jahreszyklus.

6.2 Zeitliche Entwicklung

Die Einleitung von Wärme in den Untergrund ist - im Gegensatz zur Einleitung von Wasserinhaltsstoffen - ein reversibler Prozeß, der durch Abschalten der Einleitung wieder rückgängig gemacht werden kann. Es bietet sich daher an, die vorgesehene Wärmeeinleitung vorzunehmen und durch geeignete Messungen die zeitliche Entwicklung der Temperaturanomalie zu verfolgen. Anhand der Meßdaten kann eine im Laufe der Zeit immer zuverlässiger werdende Prognoserechnung über die weitere Entwicklung angestellt werden.

Um die raum-zeitliche Entwicklung des Wärmefeldes in einem solchen Fall deutlich zu machen, wurde eine Prinziprechnung durchgeführt, der die Einleitung von Kühlwasser über einen Zeitraum von 15 Jahren zugrunde gelegt wurde. Die Entwicklung des Temperaturfeldes und das Abebben der Temperaturwelle nach Abschalten sind in Bild 17 dargestellt, wobei dieser Rechnung die oben genannten "plausibel ungünstigen" Bodenkennwerte zugrunde gelegt wurden.

7. BEGLEITENDES MESSPROGRAMM

7.1 Allgemeines

Für die Erstellung einer zuverlässigen Prognose ist es erforderlich, durch ein begleitendes Meßprogramm die Ausbreitung der Temperaturanomalie in den ersten Betriebsjahren zu verfolgen. Hierzu ist erforderlich, daß

- a) die Entnahme- und Wiedereinleitungsmengen pro Zeiteinheit erfaßt werden;
- b) die Temperaturen im Entnahme- und Schluckbrunnen erfaßt werden;
- c) die vorhandenen Beobachtungspegel innerhalb des Werksgebietes sowie ein vorhandener Bezugspegel außerhalb (als Bezugswert für die "ungestörte" Grundwassertemperatur) beobachtet werden;
- d) im ersten Jahr fünf zusätzliche Temperaturpegel über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters (45 m) im Bereich der Einleitung gemäß Bild 18 installiert und beobachtet werden; und
- e) die Beobachtungen im zweiten und dritten Jahr fortgeführt und erforderlichenfalls durch zusätzliche Temperaturmeßpegel ergänzt werden, deren Anzahl, Tiefe und Anordnung nach Ablauf des ersten Beobachtungsjahres festgelegt werden soll.

Die Naturmessungen sollen Aufschluß geben über

- (1) Richtung der Wärmefahne,
- (2) Fortschrittsgeschwindigkeit der Wärmefront,
- (3) Breitenausdehnung der Wärmefahne,
- (4) Höhenlage der Wärmefahne und Vertikalvermischung,
- (5) Wärmeabgabe an die Atmosphäre (Abkühlung).

In Anbetracht der zu erwartenden Breitenausdehnung der Wärmefahne soll der Meßpunktstand quer zur Strömungsrichtung die Größenordnung von 100 m nicht überschreiten. Die zeitliche Abfolge der Messungen hat sich an der Ausbreitung des Wärmefeldes zu orientieren, wie dies in Abschnitt 7.3 dargestellt ist. Dies erfordert eine laufende begleitende Auswertung.

7.2 Ausführung der Meßstellen

Als Temperaturpegel sind 1 1/2" Stahlrohre vorzusehen, die unten geschlossen sind und mit Wasser gefüllt werden. Diese Pegel sind bis 45 m Tiefe auszuführen. Bei der Herstellung ist insbesondere durch sorgfältiges Einbringen einer geeigneten Sandschüttung (Vorschlag des Geologischen Landesamts: 0,2 mm) dafür Sorge zu tragen, daß im Bereich der Pegel keine verfälschenden Vertikalströmungen stattfinden können (die vertikale Durchlässigkeit der Schüttung muß kleiner oder höchstens gleich der natürlichen vertikalen Durchlässigkeit sein). An der Oberfläche sind die Temperaturpegel bis etwa 0,5 m unter Gelände durch Styropor oder ähnliches Material zu isolieren.

Darüber hinaus empfiehlt es sich, einen Teil der Temperaturpegel (mindestens zwei) zusätzlich so auszustatten, daß gleichzeitig die Piezometerhöhen im unteren und oberen Bereich des Grundwasserleiters mit gemessen werden können, um näheren Aufschluß über die Strömungsverhältnisse zu erhalten. Es wird empfohlen, hierzu die Meßstellen mit zwei 1" PVC-Rohren auszustatten, von denen eines im tiefsten Bereich und das andere im obersten Bereich des Grundwasserleiters verfiltert wird.

Die Temperaturmessungen sind so durchzuführen, daß stets von oben nach unten gemessen wird, wobei der Meßfühler nicht allzu rasch abgesenkt werden sollte (maximal 5 m pro Minute). Für die Durchführung der Temperaturmessungen wird der Einsatz eines Temperaturfühlers empfohlen, der mit Hilfe einer geeigneten Winde und eines Kabels, das die Geberleitungen enthält, in den Temperaturpegeln verfahren werden kann. Im Rahmen umfangreicher Versuche zur Messung von Grundwassertemperaturen, die vom Wasser- und Energiewirtschaftsamt Bern in der Schweiz durchgeführt wurden, kamen unter anderem Temperatur-Kabellichtlote und zugehörige Vertikal-Schreibpegel zum Einsatz, die sich im praktischen Betrieb bestens bewährt haben. Es wurden hierbei folgende Geräte der Firma Ott, 8960 Kempten, verwendet:

- Kabellichtlot: Typ KLT, Genauigkeitsbereich $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
- Vertikal-Schreibpegel: Typ R16, Genauigkeitsbereich $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$

Da dies eine sehr einfache Durchführung der Messungen erlaubt, kann auf den Einsatz aufwendigerer Meßverfahren verzichtet werden und diese Meßmethode als für die anstehenden Messungen geeignet und brauchbar empfohlen werden.

7.3 Messungen des ersten Jahres

Als Bezugspegel für die ungestörte Grundwassertemperatur kann im ersten Jahr der ohnehin zu messende Pegel P_{14} am Entnahmehauptbrunnen verwendet werden. Allerdings sei darauf hingewiesen, daß später ein anderer, weiter außerhalb gelegener Bezugspegel für die ungestörte Grundwassertemperatur herangezogen werden muß. Dies sollte spätestens bei Inbetriebnahme der Ausbaustufe 2 erfolgen, oder aber, falls Anzeichen auf eine Kurzschlußströmung hindeuten, entsprechend früher.

Für das erste Jahr sind folgende Meßstellen vorgesehen (Bild 18):

Bezugspegel, ungestört: P_{14} (Entnahmehauptbrunnen)

Unmittelbarer Eingabebereich: P_{10a} , b , c , P_{11} , P_{12}

Erste Meßkette (ca. 300 m, Öffnungswinkel 100°):

Temperaturpegel P_{T_1} bis P_{T_5} sowie P_7

Die Meßfrequenz an den einzelnen Pegeln ist der zu beobachtenden Entwicklung der Wärmefahne anzupassen. Zur zeitlichen Entwicklung an einem Beobachtungspegel seien folgende Zeiten definiert:

t_0 = frühester Zeitpunkt einer möglichen Temperaturänderung am Meßpunkt (auf der Basis der Abstandsgeschwindigkeit)

t_1 = Zeitpunkt der ersten meßbaren Temperaturänderung am Meßpunkt

t_m = Zeitpunkt der maximalen Veränderungen

t_2 = Zeitpunkt nach Ende der Temperaturänderungen; gilt dann als erreicht, wenn an drei aufeinanderfolgenden Messungen keine signifikanten Änderungen mehr festzustellen sind.

Folgende Meßfrequenz wird empfohlen:

$t = 0$ Referenzmessung (bei Inbetriebnahme)
 $t < t_0$ keine Messungen
 $t_0 < t < t_1$ zweiwöchentlich - oben/Mitte/unten
 $t_1 < t < t_2$ wöchentlich - Profil (alle m)
 $t_2 < t$ monatlich - oben/Mitte/unten

Angaben zu den Referenzzeiten der einzelnen Meßstellen sind deshalb nicht möglich, weil weder die geologischen Gegebenheiten im Detail bekannt sind noch die hydrodynamischen Dispersionseffekte zutreffend abgeschätzt werden können. Als Anhaltspunkte und Orientierungshilfe seien dennoch folgende Größenordnungen genannt:

Unmittelbarer Eingabebereich (P10a, b, c, P11, P12)

$t_0, t_1 \approx 0$
 $t_2 =$ cirka ein halbes Jahr.

Erste Meßkette (P_{T1} bis P_{T5} und P₇):

$t_0 =$ cirka ein Vierteljahr;
 $t_1 =$ cirka ein halbes Jahr;
 $t_m =$ cirka ein Jahr;
 $t_2 =$ cirka zwei Jahre.

Sollte sich bei den Messungen zeigen, daß die Wärmefahne in ihrer ganzen Breite nicht von der Meßkette (Öffnungswinkel 100°) erfaßt wird, dann sind weitere Pegel zur entsprechenden seitlichen Ergänzung der Meßkette vorzusehen.

Die erste Meßkette wird aufgrund der zeitlichen Entwicklung der vertikalen Temperaturprofile sowie aufgrund der Fortschrittsgeschwindigkeit der Wärmefront deutlich zeigen, ob

die Wärmeausbreitung im wesentlichen vertikal durchmischt abläuft (Fallstudie A) oder ob nennenswerte Schichtenströmung vorliegt (B oder C). Im ersteren Fall kann sich das weitere Meßprogramm auf einige wenige Kontrollmessungen im weiteren Verlauf der Wärmefahne (im Abstand von cirka 700 m) beschränken. Bei ausgeprägter Schichtenströmung wird eine zweite Meßkette im Abstand von cirka 700 m zur weiteren Beobachtung erforderlich.

8. ZUR ANORDNUNG VON SCHLUCK- UND ENTNAHMEBRUNNEN

8.1 Kritischer Abstand zur Vermeidung einer hydraulischen Kurzschlußströmung

Alle bisherigen Betrachtungen gehen von der Annahme aus, daß Entnahme- und Schluckbrunnen weit genug voneinander entfernt sind, um sich nicht gegenseitig zu beeinflussen. Dies entspricht dem Fall (a) in der Prinzipskizze Bild 19.

Ist dieser Abstand nicht groß genug, dann ergibt sich eine anteilige Rückströmung vom Schluckbrunnen zum Entnahmebrunnen, wie dies aus der Skizze c) des Bildes 19 ersichtlich ist. Ein solcher hydraulischer Kurzschluß führt zu einer Rezirkulation bereits erwärmten Wassers und damit auch zu einem thermischen Kurzschluß, dessen Auswirkungen nachfolgend diskutiert werden.

Für den einfachsten Fall eines homogenen Grundwasserleiters, in dem Schluck- und Entnahmebrunnen jeweils über die gesamte Mächtigkeit verfiltert sind, läßt sich der kritische Abstand rechnerisch ermitteln, der zur Vermeidung eines hydraulischen Kurzschlusses erforderlich ist (Fall (b) in Bild 19). Dieser kritische Abstand wurde für die Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet für den jeweiligen maximalen Volumenstrom der beiden Ausbaustufen ermittelt und ist im Bild 20 tabellarisch dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, daß der tatsächlich vorhandene Abstand der Entnahmebrunnen nicht in allen Fällen ausreichend ist, um einen hydraulischen Kurzschluß mit Sicherheit auszuschließen. Dies gilt insbesondere für den derzeitigen Entnahmebrunnen im Werksgelände bei der Ausbaustufe 2.

Die Entnahme für die Ausbaustufe 2 sollte auf alle Fälle außerhalb des Werksgeländes liegen und sollte so weit wie möglich nach oberstrom verlegt werden. Die Größenordnung der erforderlichen Abstände zur sicheren Vermeidung eines Kurzschlusses ist aus den Rechenwerten der Tabelle 20 zu ersehen. Dem steht gegenüber, daß die Lage des derzeitigen Entnahme-

brunnens im Werksgelände (Abstand 380 m) festliegt und auch die Lage eines weiteren Entnahmebrunnens südlich des Ettenbachs (Abstand 700 m) nur noch geringfügig verändert werden kann.

8.2 Akzeptabler Rückströmungsanteil

Für den Betrieb der Anlage ist es nicht zwingend erforderlich, eine Rückströmung vom Schluck- zum Entnahmebrunnen unter allen Umständen gänzlich zu unterbinden. Ein geringfügiger Rückströmungsanteil kann geduldet werden, solange die gegebenen Einleitungsbedingungen (Temperaturbegrenzung) dadurch nicht überschritten werden. Schon bei geringen Rückströmungsanteilen kann der Abstand zwischen Entnahme- und Schluckbrunnen beträchtlich verringert werden.

Geht man davon aus, daß das dem Untergrund entnommene Kühlwasser im Betrieb stets um die gleichbleibende Temperaturspanne von 12 K erwärmt wird, dann ist ein Rückströmungsanteil in der Entnahme stets verbunden mit einer Anhebung des Temperaturniveaus insgesamt. Wegen des erwärmten Rückströmungsanteils liegen die Entnahmetemperaturen und demzufolge auch die Einleitungstemperaturen höher. Dies ist aus folgender Tabelle ersichtlich:

Bei Temperaturdifferenz Entnahme / Einleitung von 12 K:	
Rückströmungsanteil	Temperaturdifferenz zum ungestörten Grundwasser
0	12 K
10%	13,3 K
20%	15 K
33%	18 K
50%	24 K

Die natürlichen Grundwassertemperaturen liegen im Bereich von 10 K; die maximal zulässige Wiedereinleittemperatur beträgt 25 K. Dies verdeutlicht, daß der beabsichtigte Kühlbetrieb realisiert werden kann, solange der Rückströmanteil unter 20% liegt; höhere Rückströmanteile sind wegen der Einleitungsbeschränkung nicht akzeptabel.

8.3 Abschätzung des Rückströmungsanteils

In dem Aufsatz "Kurzschlußströmung zwischen Schluck- und Entnahmebrunnen - kritischer Abstand und Rückströmrate" von Mehlhorn, Spitz und Kobus in "Wasser und Boden", Heft 4, 1981, sind die Berechnungsgrundlagen für Kurzschlußströmungen dargestellt. Damit kann als erster Anhalt für den stark vereinfachten Fall eines homogenen Grundwasserleiters mit Verfilterungen über die gesamte Tiefe rechnerisch abgeschätzt werden, welcher Rückströmanteil bei einer gegebenen Grundwasserströmung und Anordnung von Entnahme- und Schluckbrunnen zu erwarten ist. Die jeweiligen Zahlenwerte für beide Ausbaustufen sind in Bild 20 sowohl für den derzeitigen Entnahmebrunnen (Abstand 380 m vom Schluckbrunnen) als auch für den südlich des Ettenbachs ins Auge gefaßten Standort (Abstand 700 m vom Entnahmebrunnen) aufgelistet. Hierbei wurde jeweils angenommen, daß der Kühlwasserbedarf alternativ ganz aus dem einen bzw. aus dem anderen Entnahmebrunnen abgedeckt wird.

Das Strömungsfeld im Bereich der Schluck- und Entnahmebrunnen reagiert sehr rasch auf Schwankungen des Volumenstroms; bei einem Hochfahren auf den maximalen Volumenstrom stellt sich das der Berechnung zu Bild 20 zugrunde gelegte Strömungsfeld mehr oder weniger sofort ein. Betriebsbedingte Schwankungen des Volumenstroms sind deshalb für die Frage des Kurzschlusses von wesentlicher Bedeutung. Aus diesem Grund wurden dieser Betrachtung die jeweiligen Maximalwerte anstatt der Jahresmittelwerte zugrunde gelegt.

Zur Vermeidung bzw. Abminderung eines hydraulischen Kurzschlusses wird vom Geologischen Landesamt vorgeschlagen, eine gewisse geologische Schichtung und "Stockwerkstrennung" im Werksbereich auszunutzen in der Art, daß das Kühlwasser in die tieferen Schichten des Grundwasserleiters eingespeist wird und die Entnahme aus den oberflächennahen Schichten erfolgt. Dies führt zweifellos zu einer Verminderung der Kurzschlußströmung, welche sich jedoch zahlenmäßig rechnerisch nicht erfassen läßt. Andererseits muß davon ausgegangen werden, daß bei längerem Betrieb zufolge der Wärmeleitung auch das oberflächennahe Grundwasser im Bereich des Entnahmebrunnens entsprechend erwärmt wird und somit auf alle Fälle mit einem thermischen Kurzschluß gerechnet werden muß, selbst dann, wenn die Stockwerkstrennung hydraulisch vollständig gegeben wäre.

Schlüssige Aussagen zur Kurzschlußströmung können erst dann gemacht werden, wenn die ersten Naturmessungen über die Wärmeausbreitung bei der Ausbaustufe 1 vorliegen, da diese die maßgebliche hydrogeologische Situation deutlich machen. Die oben dargestellten Eingrenzungsrechnungen und Plausibilitätsbetrachtungen erlauben folgende Einschätzung der Situation:

Für die Ausbaustufe 1 ist am Entnahmebrunnen im Werksgelände (380 m) allenfalls eine geringfügige Rückströmung zu erwarten. Für den Entnahmestandort südlich des Ettenbachs kann eine Rückströmung mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

Für die Ausbaustufe 2 sind am Entnahmebrunnen im Werksgelände Rückströmraten von mehr als 20% zu erwarten. Diese Ausbaustufe kann deshalb mit dem vorhandenen Brunnen nicht realisiert werden; vielmehr ist die Entnahme an den Standort südlich des Ettenbachs zu verlegen. Auch dort ist mit einem Rückströmanteil zu rechnen, doch dürfte sich dieser in Anbetracht der hydrogeologischen Gegebenheiten (Stockwerke) noch in einer akzeptablen Größenordnung bewegen.

Ein rechnerischer Rückströmanteil von 20% am Brunnen im Werksgelände ($a = 380 \text{ m}$) wird bei folgenden Durchsätzen erreicht:

Fallstudie A: $Q_E \approx 370 \text{ m}^3/\text{h}$
Fallstudie B: $Q_E \approx 140 \text{ m}^3/\text{h}$
Fallstudie C: $Q_E \approx 310 \text{ m}^3/\text{h}$

Es muß allerdings ausdrücklich davor gewarnt werden, die Anlage auf der Basis dieser Rechenwerte unter "Ausreizung" der tragbaren Rückströmung auszulegen. Dazu sind die Unsicherheiten der Abschätzung sowohl zufolge der Geologie (siehe Unterschiede der Fallstudien A-C) als auch zufolge der Auswirkungen der Wärmeleitung, die längerfristig gesehen sicher nicht unerheblich sind, viel zu groß.

Statt dessen wird empfohlen, die Anlage für einen rechnerischen Rückströmanteil von Null auszulegen und den als akzeptabel erachteten Rückströmanteil von 20% als Sicherheitsreserve zu betrachten.

8.4 Auswirkungen eines hydraulischen bzw. thermischen Kurzschlusses auf das Wärmefeld

Durch eine Änderung der effektiven Temperaturdifferenz zwischen eingeleitetem Kühlwasser und ungestörtem Grundwasser ergeben sich tendenziell folgende Veränderungen des Wärmefelds:

In erster Näherung steigen die Temperaturdifferenzen des Wärmefelds entsprechend der erhöhten Einleitungstemperaturdifferenz proportional an. Dieser Faktor berücksichtigt den Haupteffekt und dürfte zunächst für weitere Abschätzungen genügen.

Im Bereich des Schluck- und Entnahmesystems ergeben sich aufgrund des Kurzschlusses Veränderungen des Wärmefeldes, die jedoch örtlich begrenzt sind. Insgesamt besteht die Tendenz, daß im Fall eines Kurzschlusses die Hauptabmessungen des Wärmefeldes im Nahbereich zunehmen, während sich großräumig gesehen die Ausdehnung des Wärmefeldes nicht nennenswert verändert (längere, aber schmälere Wärmefahne; einander gegenläufige Effekte zweiter Ordnung).

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärme nimmt leicht zu, so daß die Warmwasserfront das Wasserwerk früher erreicht. Demgemäß wird auch die Wärmeabgabe an die Atmosphäre zwischen Einleitung und Wasserwerk reduziert. Diese Effekte liegen jedoch innerhalb der Abschätzungsgrenzen der hydrogeologischen Annahmen.

Schließlich ist anzumerken, daß die dem Grundwasserleiter zugeführte Wärmefracht ohne oder mit Kurzschluß gleich bleibt. Außerhalb des Schluck- und Entnahmesystems im Werksbereich bleibt deshalb die vom Grundwasserstrom in Richtung Wasserwerk Kaiserwald abtransportierte Wärmefracht von einem möglichen Kurzschluß unberührt.

9. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Als Fazit der vorliegenden Überlegungen und Berechnungen kann folgende gutachterliche Stellungnahme abgegeben werden.

- (1) Durch die geplante Kühlwassereinleitung der BASF sind langfristig Veränderungen des Grundwasser-Wärmehaushalts über mehrere Kilometer zu erwarten.
- (2) Die Auswirkungen können größenordnungsmäßig so weit eingegrenzt werden, wie dies die vorliegenden Kenntnisse der hydrogeologischen und geothermischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebiets zulassen.
- (3) Eine weitergehende Eingrenzung und präzise Aussage über die langfristigen Auswirkungen wird erst anhand gezielter Naturmessungen und Beobachtungen zum Ausbreitungsverhalten des eingeleiteten Warmwassers in den ersten Jahren nach Inbetriebnahme möglich sein.
- (4) Nach derzeitiger Kenntnis der Beschaffenheit des Grundwasserleiters ist damit zu rechnen, daß eine spürbare Beeinflussung der Grundwassertemperaturen im Bereich des Wasserwerks Kaiserwald - wenn überhaupt - frühestens in einigen Dekaden zu erwarten ist.
- (5) Die nach sehr langen Betriebszeiten zu erwartenden Temperaturerhöhungen des von der Kühlwassereinleitung betroffenen Grundwassers liegen im Bereich des Wasserwerks Kaiserwald bei einer Einleitungstemperaturdifferenz von 12 K günstigenfalls unterhalb der Nachweisgrenze, ungünstigenfalls in der Größenordnung von 2 bis 3 K über der ungestörten, natürlichen Grundwassertemperatur.
- (6) Die Frage, ob eine nennenswerte Temperaturveränderung (mehr als 1 K) des Grundwassers innerhalb der Schutzzone IIIa (Jahreslinie) des Wasserwerks Kaiserwald zu erwarten ist, kann ohne Meßdaten nicht schlüssig beantwortet werden. Die unter (3) genannten Naturbeobachtungen während der ersten Betriebsjahre werden jedoch eine zuverlässige Prognose erlauben.

- (7) Die Förderung im Wasserwerk Kaiserwald erfaßt Grundwasser, das zum Teil von der Kühlwassereinleitung der BASF betroffen ist, zum Teil thermisch unbeeinflußt ist. Aufgrund des jeweiligen Mischverhältnisses weist das Förderwasser eine entsprechend abgeminderte Temperaturerhöhung auf.
- (8) Ein hydraulischer und thermischer Kurzschluß zwischen Schluck- und Entnahmebrunnen erhöht die Temperaturdifferenz zwischen Einleitung und ungestörtem Grundwasser und bewirkt örtliche Veränderungen der Temperaturanomalie. Hingegen bleibt die Wärmefracht aus dem Einleitungssystem im Werksbereich heraus in Richtung auf das Wasserwerk Kaiserwald hiervon unberührt.
- (9) Wärmeeinleitungen in das Grundwasser sind reversibel. Im Falle einer zu beobachtenden ungünstigen Entwicklung kann die Temperaturanomalie durch Abschalten der Warmwassereinleitung allmählich wieder abgebaut und rückgängig gemacht werden.

Kenngröße	Dimension	min. Wert	max. Wert	Mittelwert	Bemerkungen
Aquifermächtigkeit	m	—	—	40	Aufschlußbohrungen
Gesamttransmissivität	$\frac{m^2}{s}$	0.15 (0.10)	0.18	0.15	Pumpversuche (GLA)
Flurabstand	m	1.0	6.0	3.0	Flurabstandskarte / Jahr
Durchlässigkeit (horizontal)	$\frac{m}{s}$	(10^{-3})	$4 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	Flowmetermessungen (GLA)
Durchlässigkeit (vertikal)	$\frac{m}{s}$	—	—	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$k_{fv} : k_{fh} \approx 1 : 130$ (GLA)
Standrohrspiegelgefälle	—	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	längsgemittelt (hydrogeologische Karte)
effektive Porosität	—	0.10	0.25	0.15	Flowmetermessungen (GLA)
lateraler Dispersionskoeffizient	m	—	—	0.5	Erfahrungswert für den Oberrheingraben
Grundwasserneubildung	$\frac{l}{s \cdot km^2}$	—	—	5.0	hydrogeologische Karte / Jahr

Bild 1 : Eingrenzung der geologischen Kenndaten des Untersuchungsgebiets

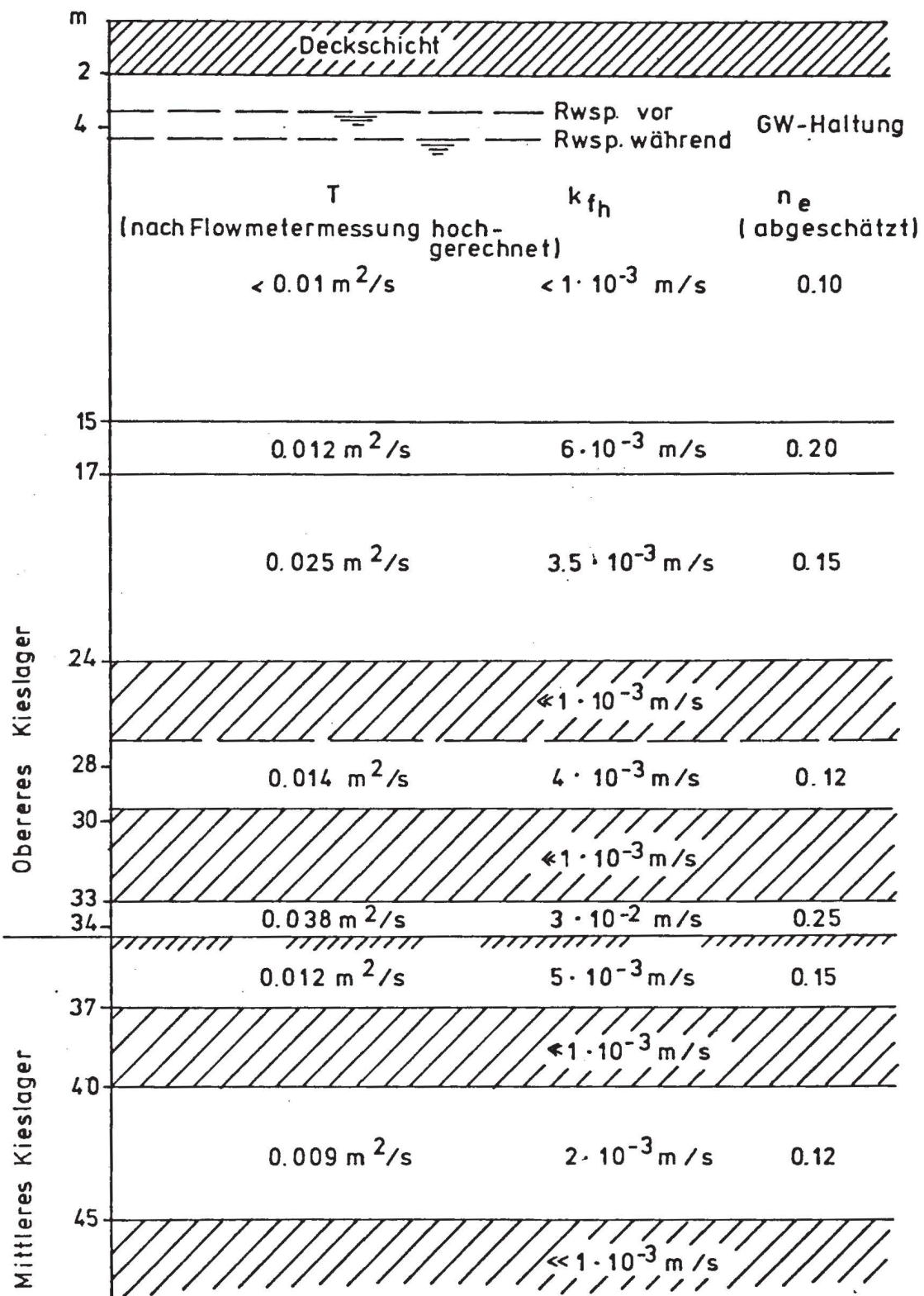
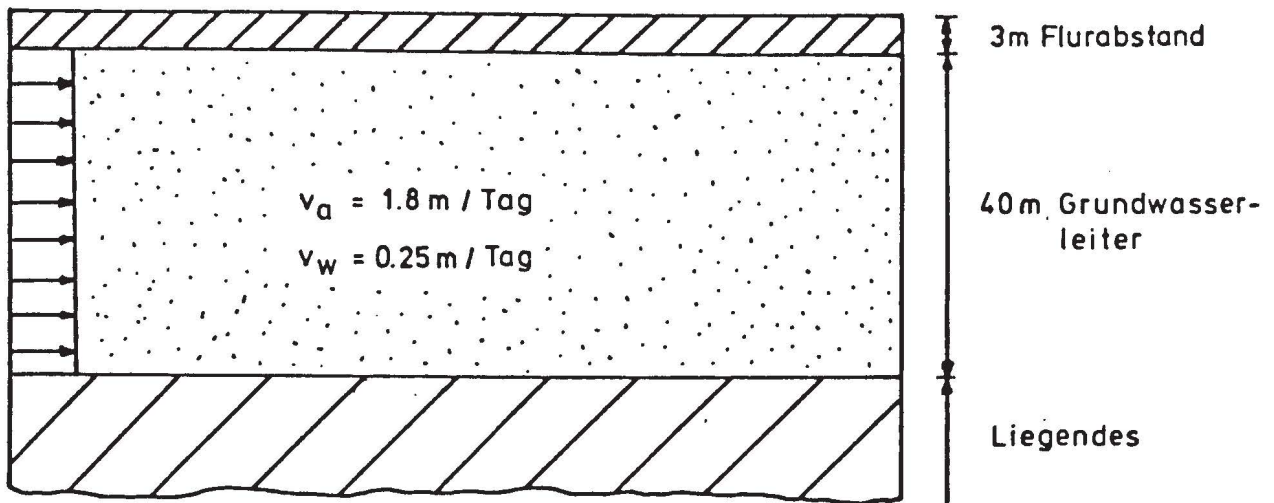
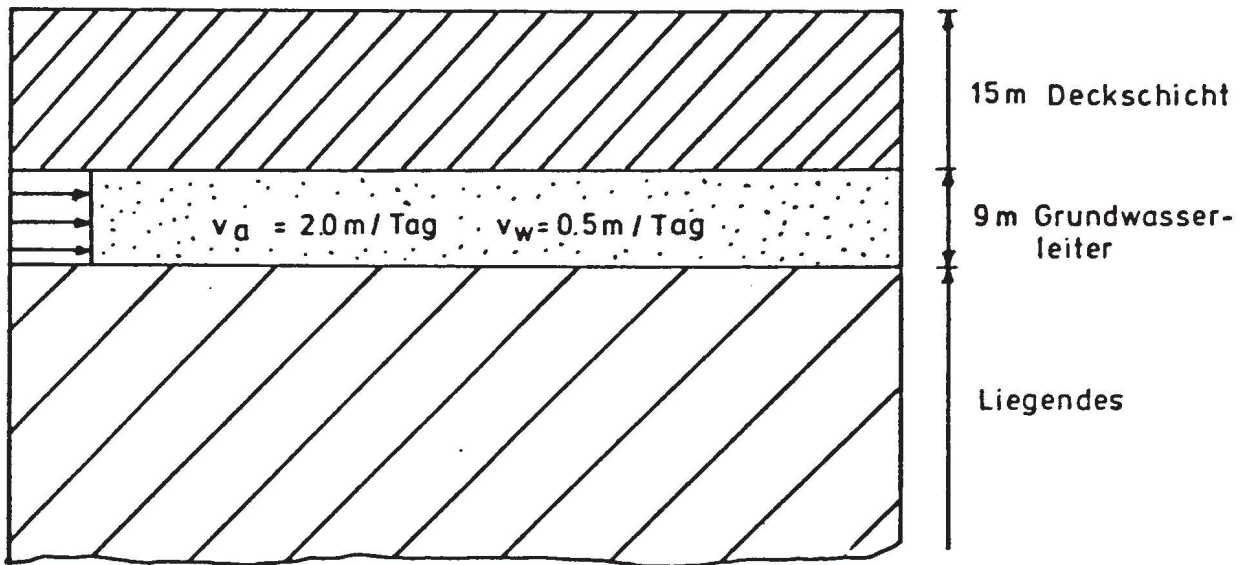


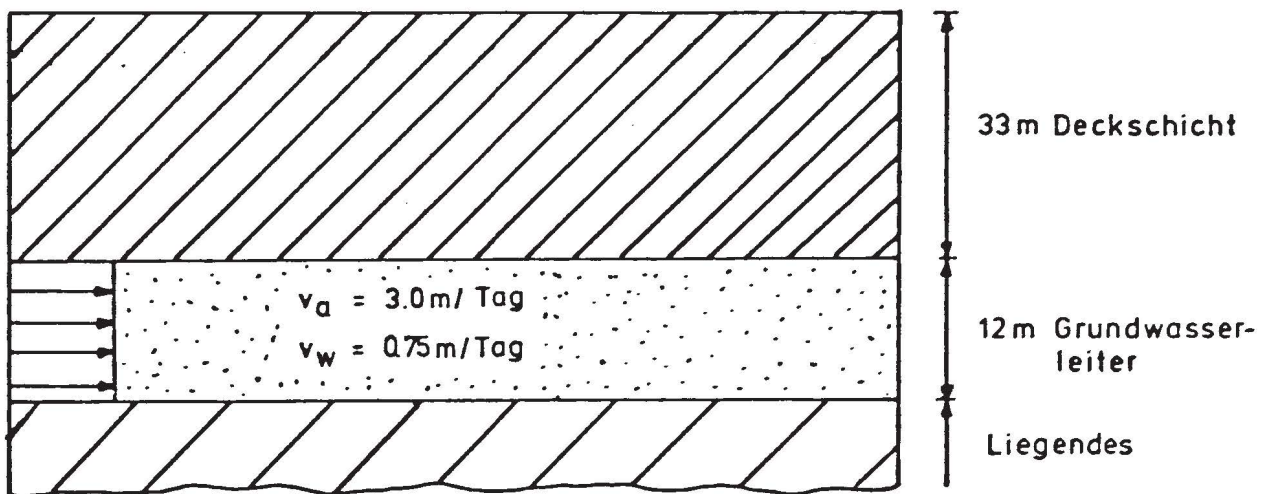
Bild 2 : Schematisierter Aufbau des Grundwasserleiters (GLA)



Fallstudie A



Fallstudie B



Fallstudie C

Bild 3 : Idealisierte Grundwasserleiter A, B, C für die Berechnung

Kenngröße	Symbol	Dimension	min. Wert	max. Wert	Mittelwert	Bemerkungen
Wärmeleitfähigkeit des Aquifers	λ_G	$\frac{J}{s \cdot m \cdot K}$			3.0	Sand, völlig wassergesättigt
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht	λ_D	$\frac{J}{s \cdot m \cdot K}$	0.3	3.0	1.5	Werte streuen je nach Bodenzusammensetzung, Sättigungsgrad, usw.
Wärmeleitfähigkeit des Liegenden	λ_L	$\frac{J}{s \cdot m \cdot K}$			1.5	
spez. Wärme des Aquifers	$(\rho c)_G$	$\frac{J}{m^3 \cdot K}$	$2.6 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	Werte streuen je nach Porosität und Bodenzusammensetzung
spez. Wärme der Deckschicht und des Liegenden	$(\rho c)_{D,L}$	$\frac{J}{m^3 \cdot K}$	$1.0 \cdot 10^6$	$4.5 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^6$	Mittelwert entspricht toniger Erde

Bild 4 : Eingrenzung der geothermischen Kenndaten des Untersuchungsgebiets

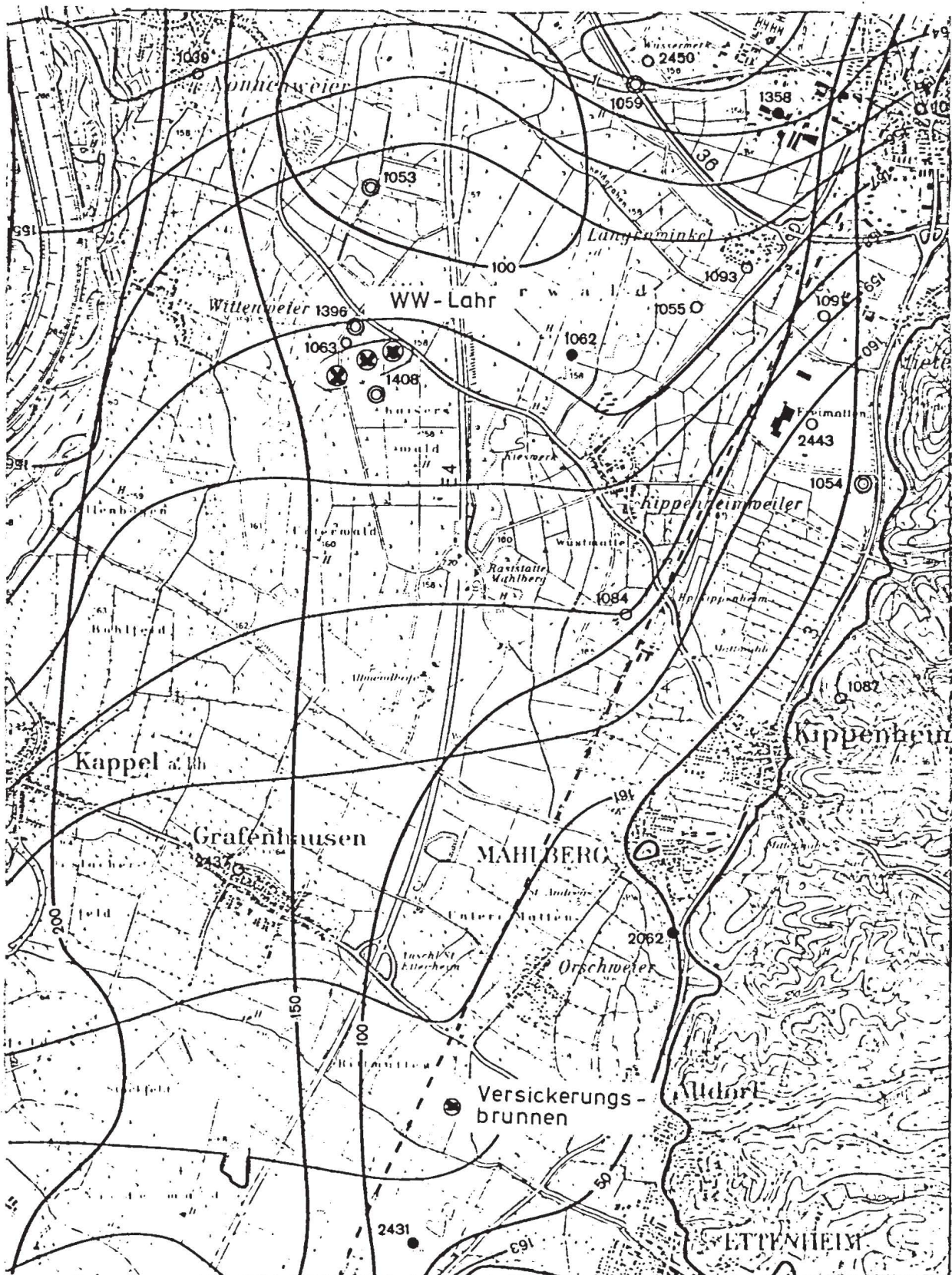


Bild 5 : Strömungsfeld des Untersuchungsgebiets (Hydrogeologische Kartierung)

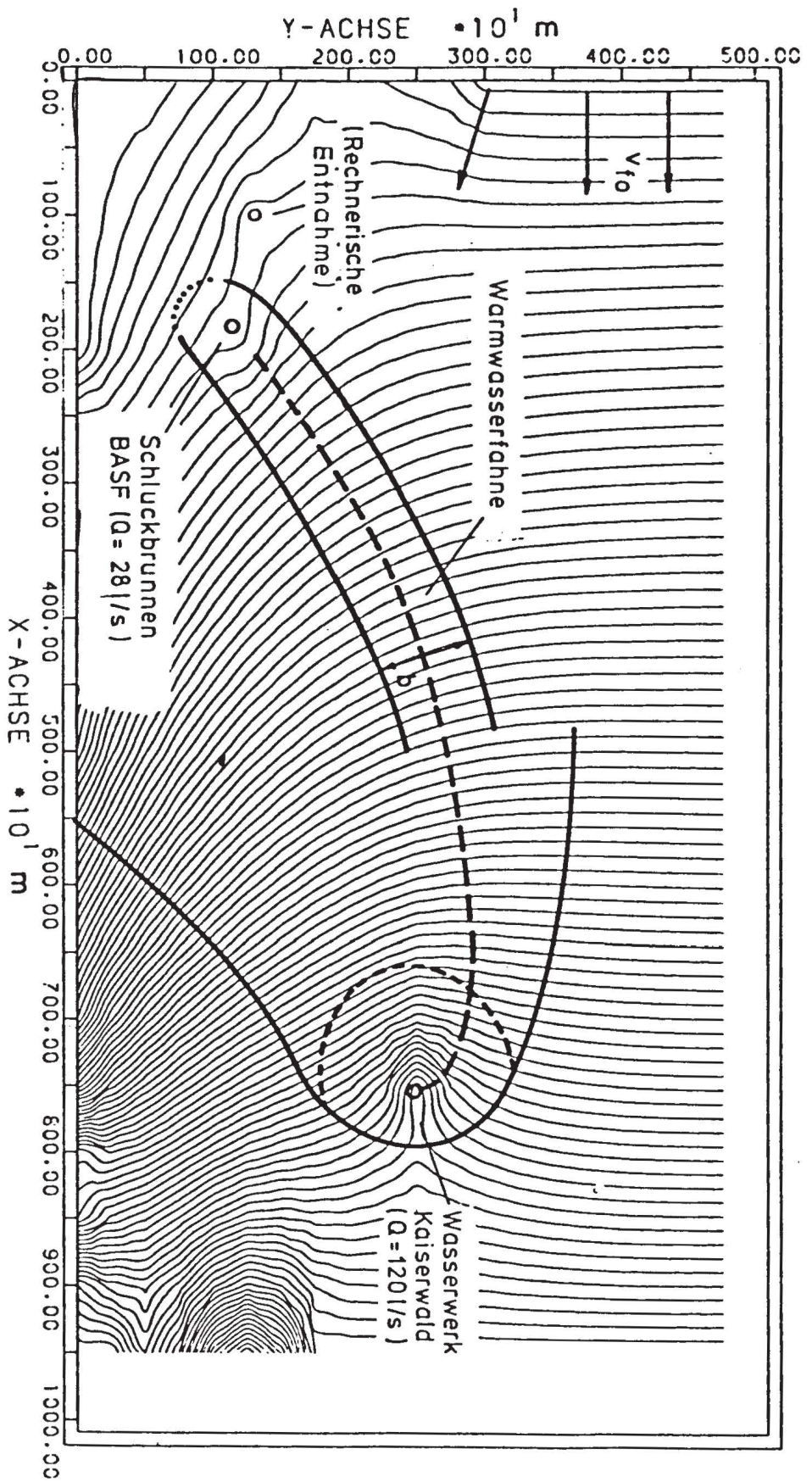


Bild 6: Strömungsfeld mit Kühlwassereinleitung: Verlauf der Wärmewasserfahne

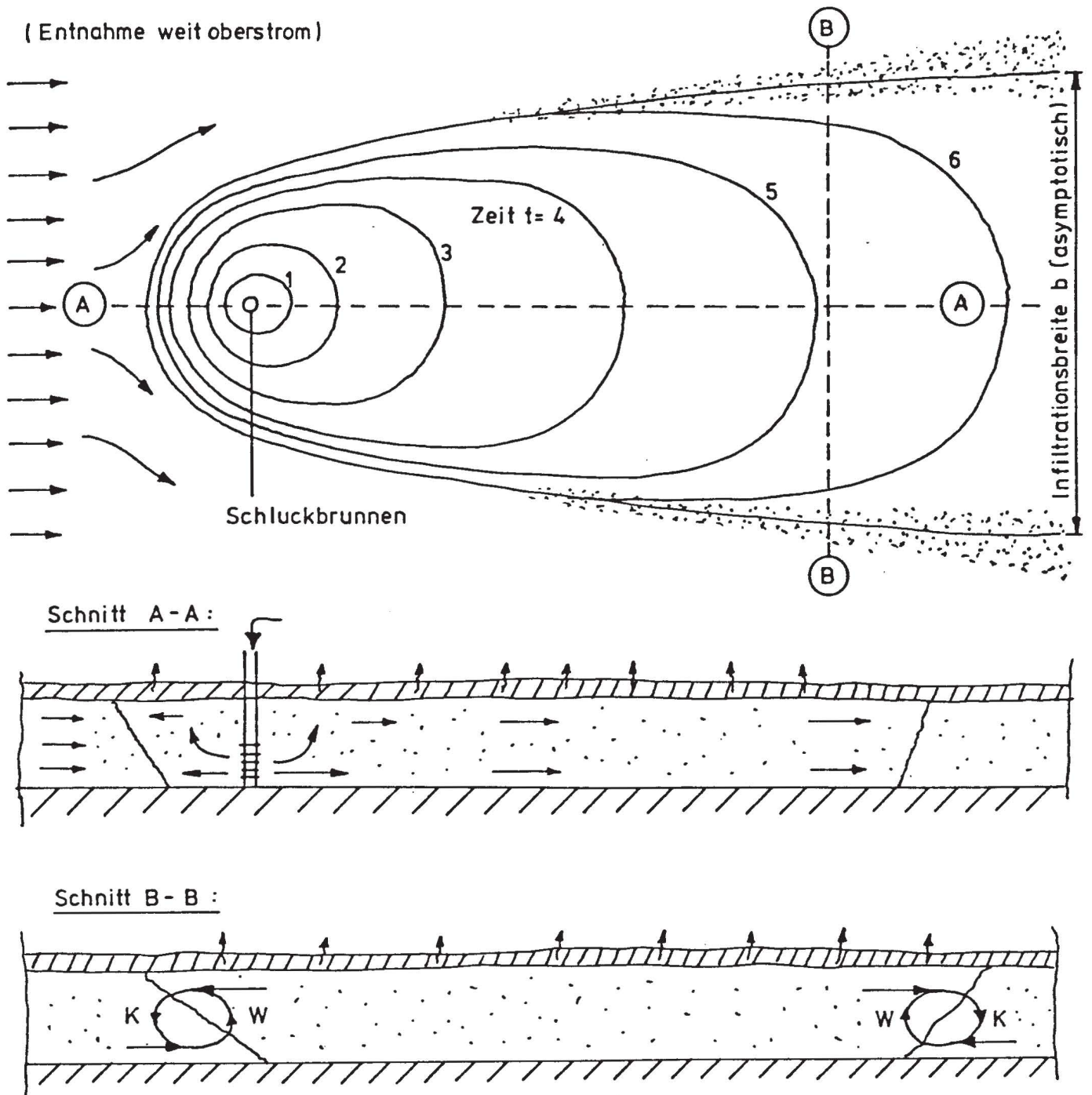


Bild 7 : Schematische Darstellung des Wärmefeldes

		Fallstudie		
		A	B	C
Filtergeschwindigkeit	m/Tag	0,18	0,3	0,5
Abstandsgeschwindigkeit	m/Tag	1,8	2,0	3,0
Wärmegeschwindigkeit bei unverändertem K_{fh}	m/Tag	0,25	0,5	0,75
Laufzeit des Fluids bis 1000 m vor Wasserwerk	Jahre	8,4	7,5	5
Laufzeit des Fluids zum Wasserwerk	Jahre	10	9	6
Laufzeit der Wärme bis 1000 m vor Wasserwerk (K_{fh} erhöht zufolge Wärme)	Jahre	51	25	17
Laufzeit der Wärme zum Wasserwerk (K_{fh} erhöht zufolge Wärme)	Jahre	60	30	20

Bild 8: Mittlere Geschwindigkeiten und Laufzeiten

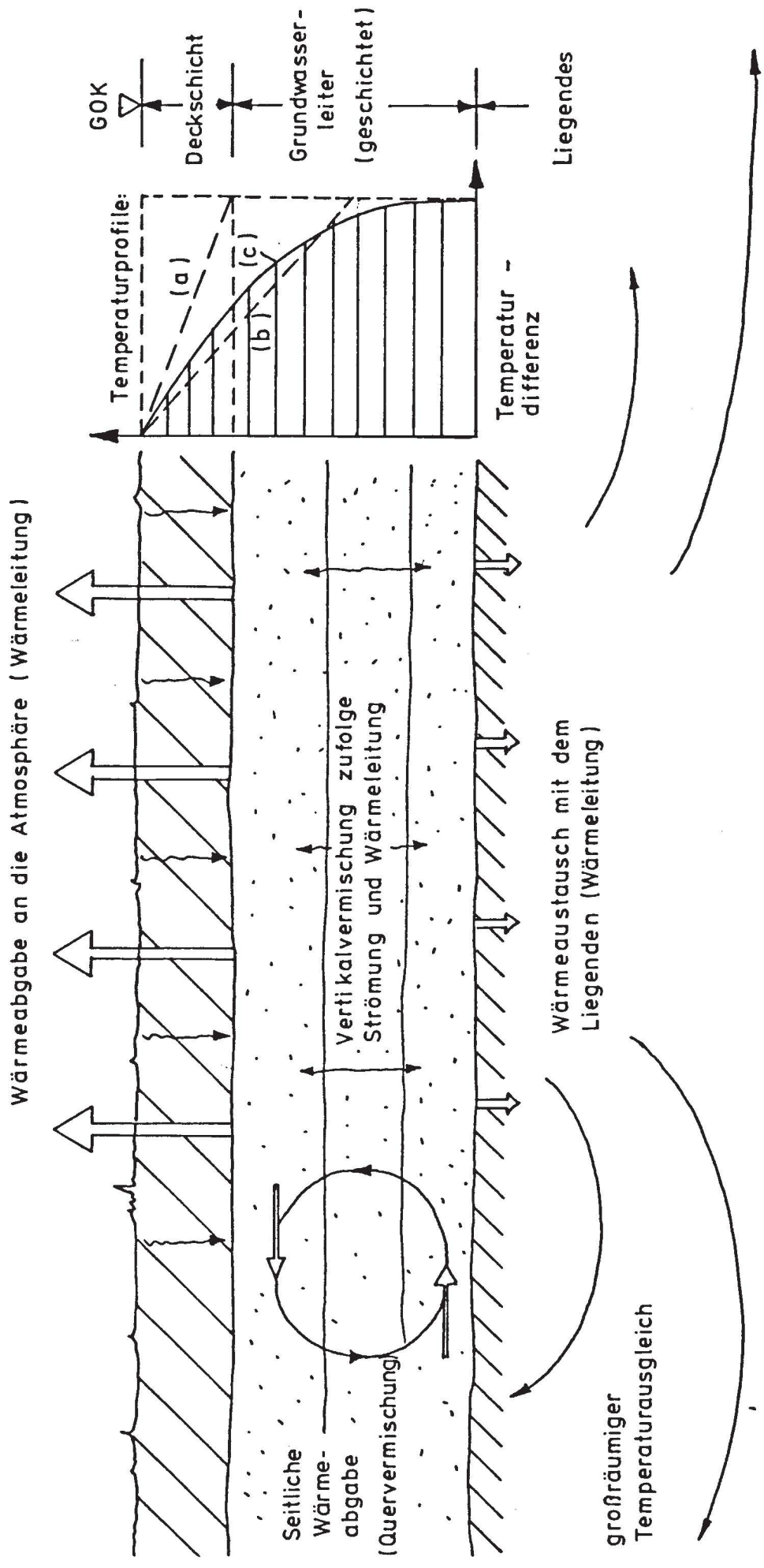


Bild 9: Prinzipskizze zum Wärmeaustausch

Reichweite der Temperaturanomalie ($\Delta T/\Delta T_E = 0,05$)			
	Fallstudie		
	A ($v_a = 1,8\text{m/Tag}$)	B ($v_a = 2\text{m/Tag}$)	C ($v_a = 3\text{m/Tag}$)
a) völlig durchmischt Wärmeleitfähigkeit $\lambda_D = \text{const} = 1,5$	(2 100)	3 900	-
b) Ansatz eines maßgebenden Temperaturgradienten und einer tiefengemittelten Wärmeleitfähigkeit ($1,5 < \lambda < 3,0$)	4 300	2 200	10 800
c) Numerische Rechnung (Bild 15) Obergrenze: $\lambda = \text{const} = 1,5$ Untergrenze: $\lambda = \text{const} = 3,0$	4 300 -	4 000 2 000	- 9 600

Ein-Grad-Linie der Temperaturanomalie bei Einleitung $\Delta T_E = 12^\circ\text{K}$			
	Fallstudie		
	A	B	C
a) völlig durchmischt Wärmeleitfähigkeit $\lambda_D = \text{const} = 1,5$	(1 700)	3 300	-
b) Ansatz eines maßgebenden Temperaturgradienten und einer tiefengemittelten Wärmeleitfähigkeit ($1,5 < \lambda < 3,0$)	3 500	1 800	9 000
c) Numerische Rechnung (Bild 15) Obergrenze: $\lambda = \text{const} = 1,5$ Untergrenze: $\lambda = \text{const} = 3,0$	3 600 -	3 400 1 700	- 7 800

Bild 10: Ergebnisse der eindimensionalen Berechnungen

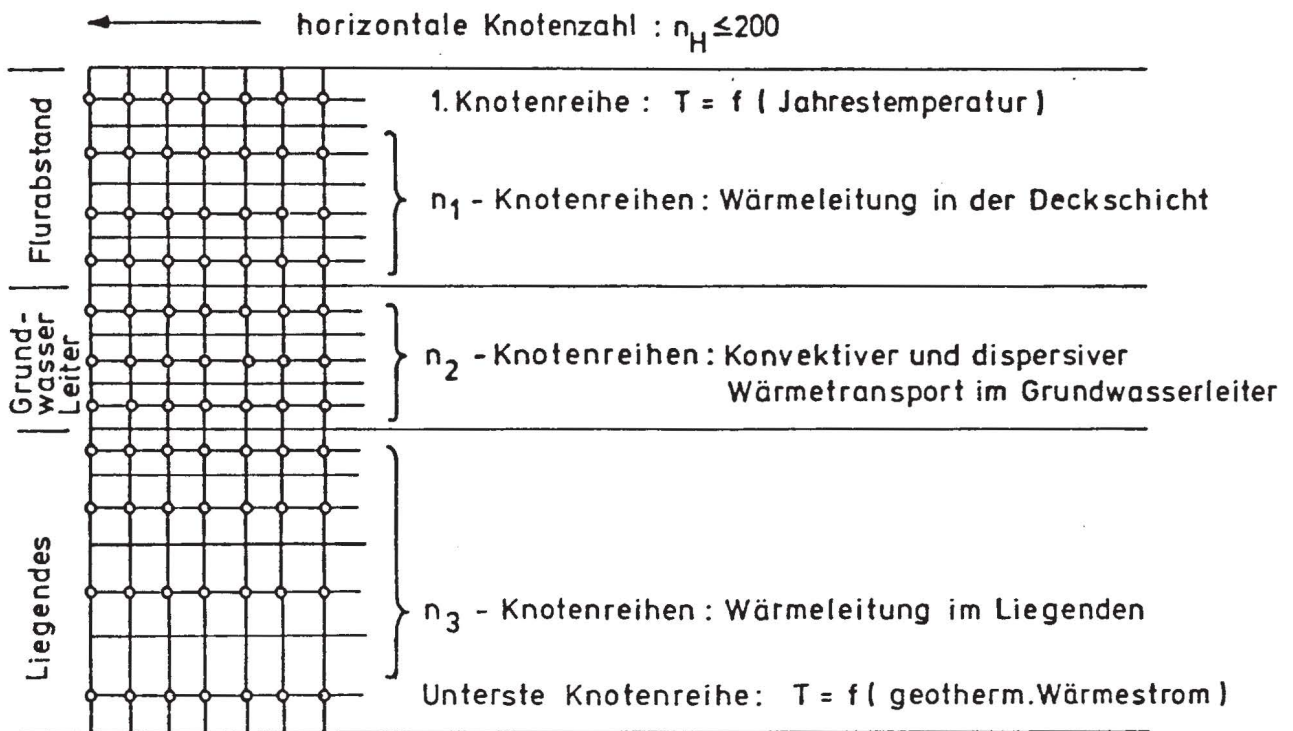


Bild 11 : Diskretisierung des Untersuchungsgebiets im numerischen Transportmodell

TEMPERATURVERTEILUNG :

REICHWEITE DER ANOMALIE: 4300 [M]

RUN : 1. STGT., DEN 16.9. 1982.

$\lambda_D = 1,5 \text{ J}/(\text{m s K})$

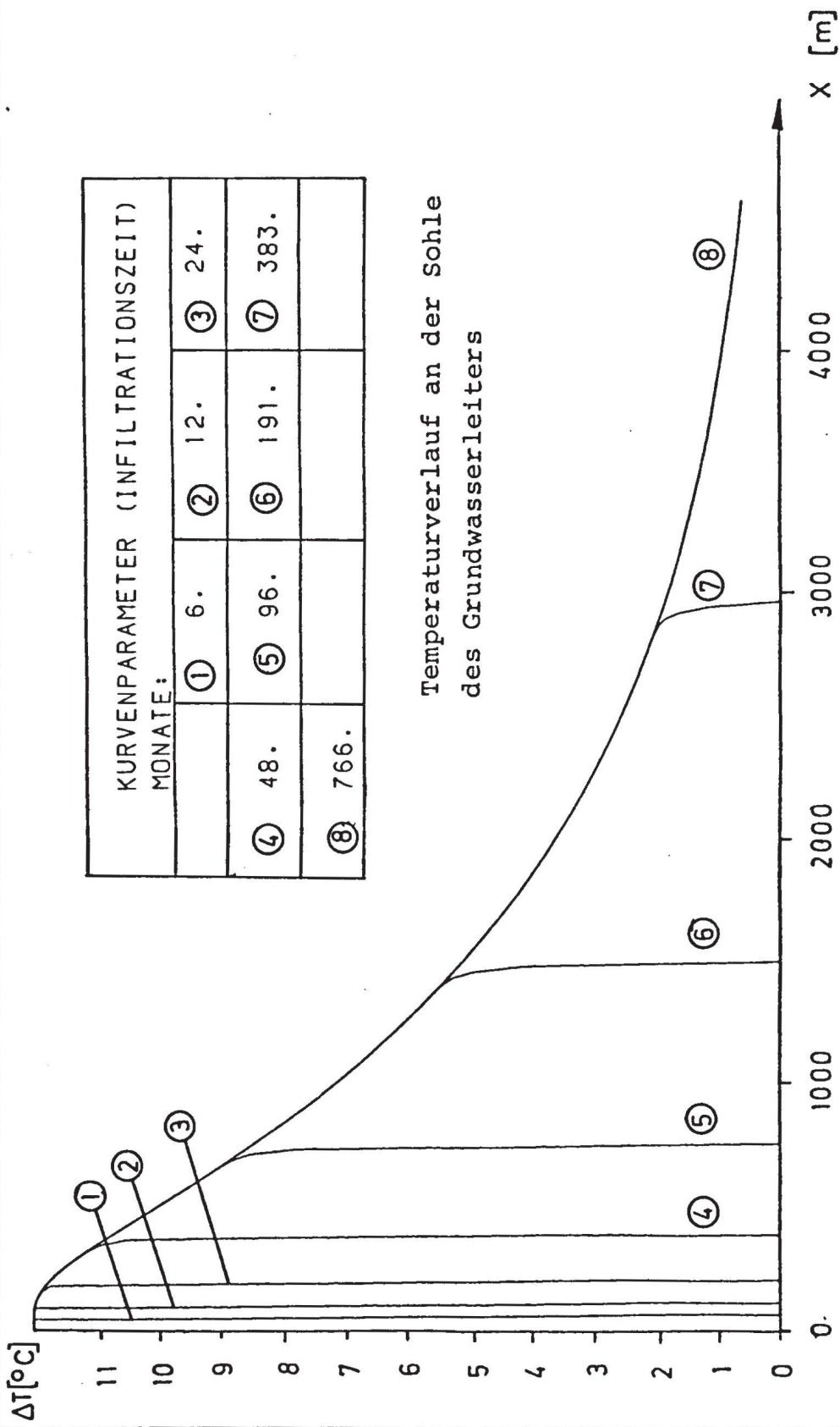


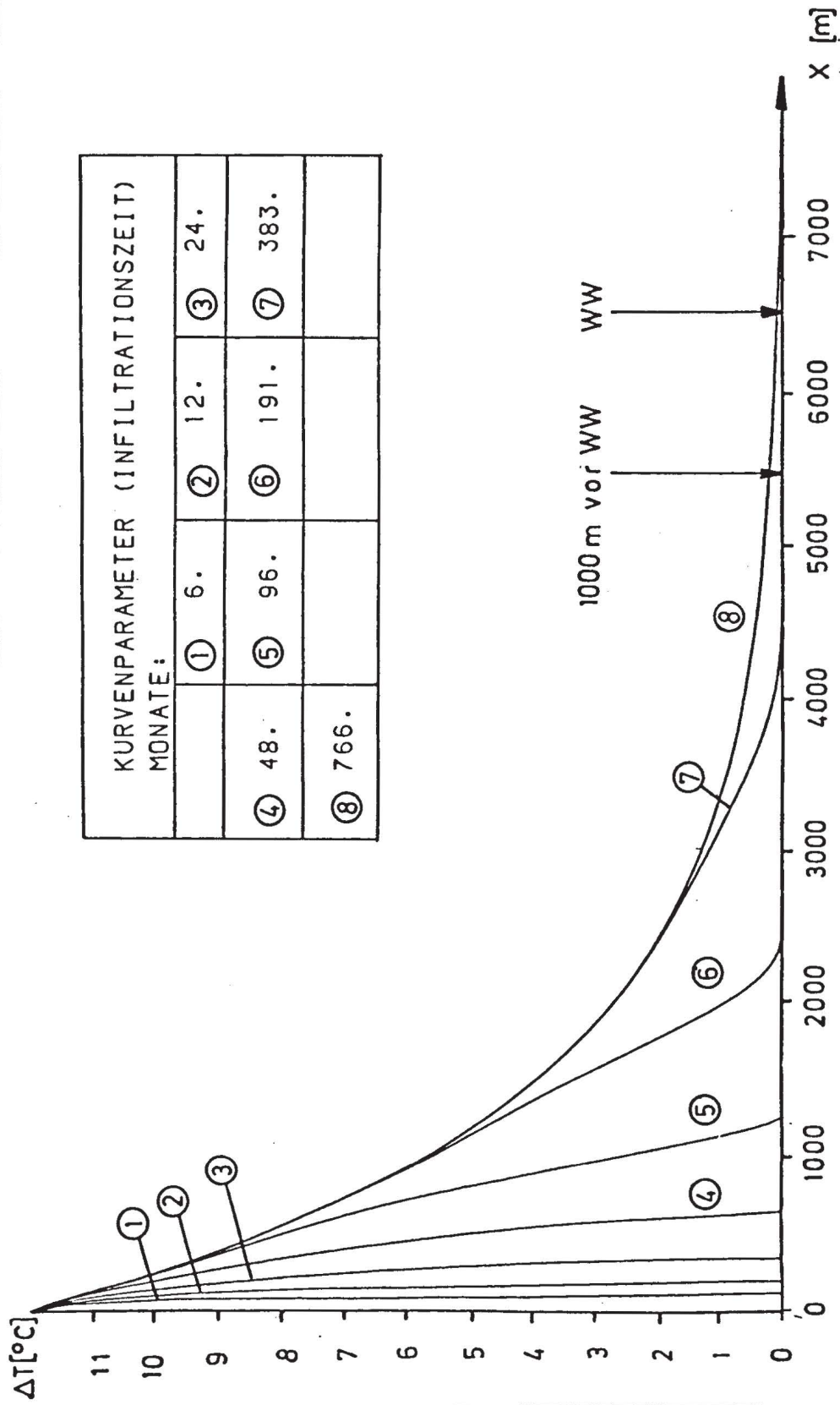
Bild 12: Zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes (Fallstudie A)

TEMPERATURVERTEILUNG :

RUN : 3. STGT., DEN 17.9. 1982.

REICHWEITE DER ANOMALIE: 4000 [M]

$\lambda_D = 1,5 \text{ J}/(\text{m s K})$

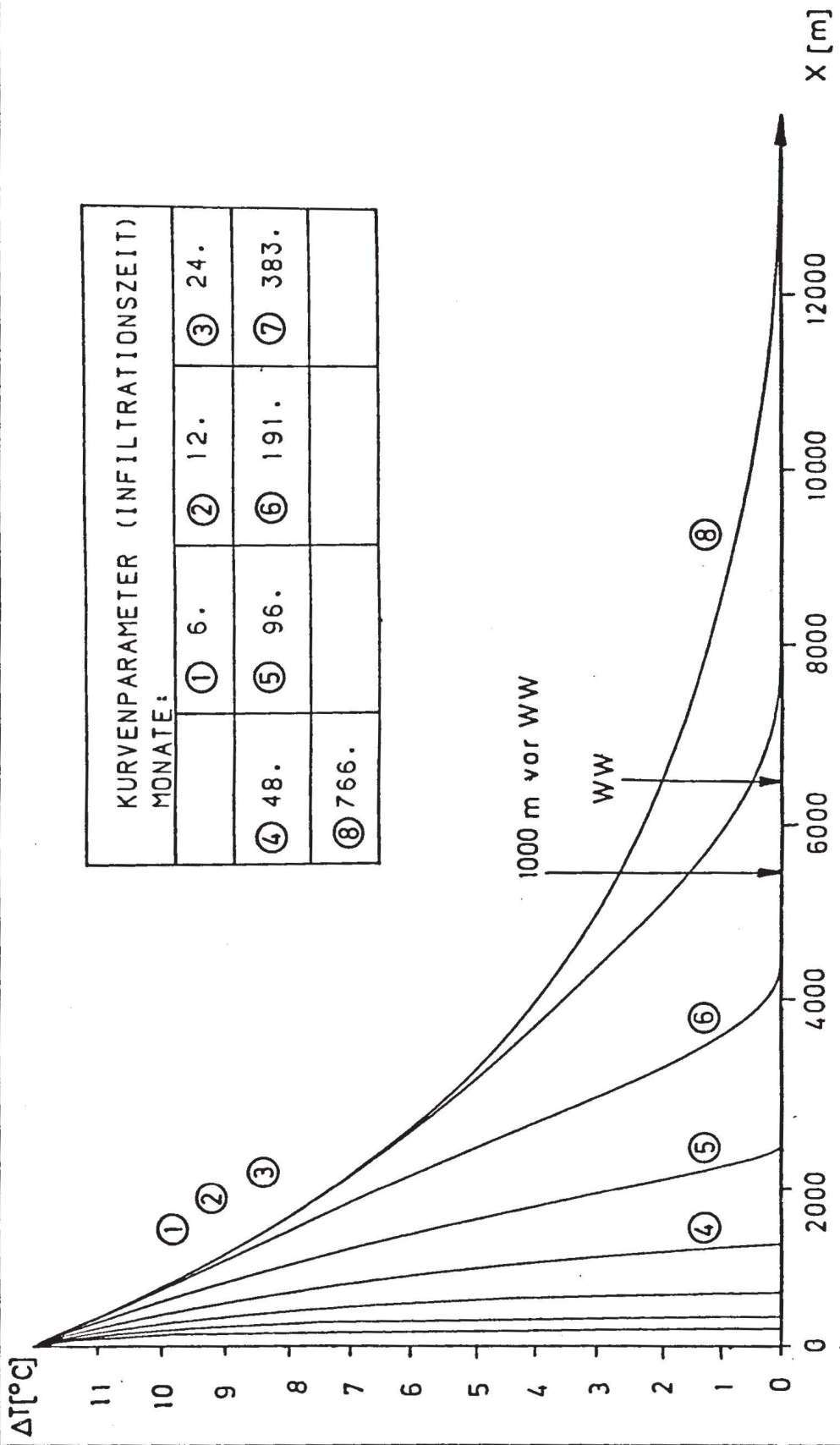


KURVENPARAMETER (INFILTRATIONSZEIT) MONATE:			
①	6.	②	12.
③	24.	④	48.
⑤	96.	⑥	191.
⑦	383.	⑧	766.

Bild 13: Zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes (Fallstudie B)

TEMPERATURVERTEILUNG : RUN : 6. STGT., DEN 17.9. 1982.

REICHWEITE DER ANOMALIE: 9600 [M] $\lambda_D = 3,0 \text{ J}/(\text{m s K})$



KURVENPARAMETER (INFILTRATIONSZEIT)			
MONATE:			
①	6.	②	12.
③	24.	④	48.
⑤	96.	⑥	191.
⑦	383.	⑧	766.

Bild 14 : Zeitliche Entwicklung des Temperaturfeldes (Fallstudie C)

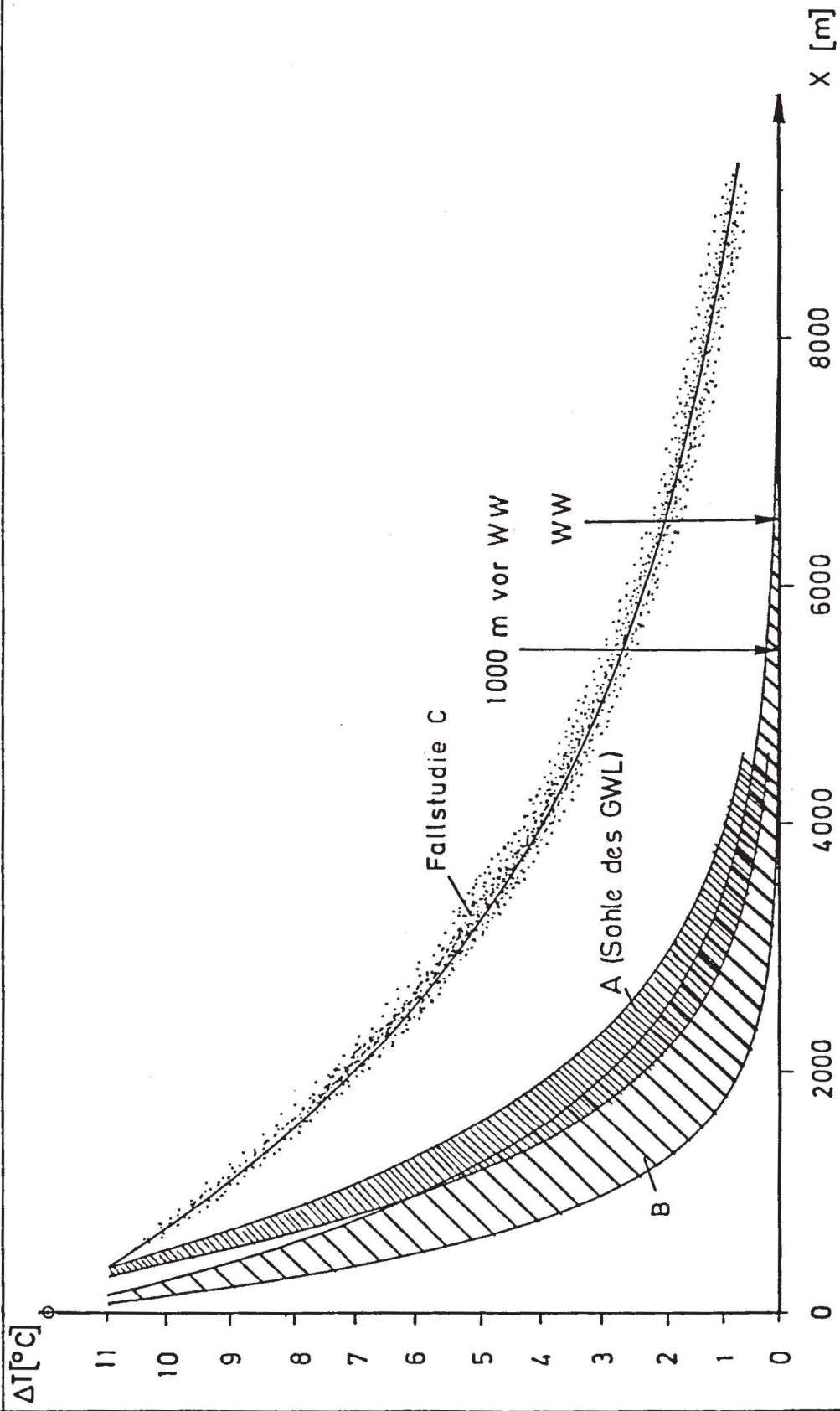


Bild 15: Eingrenzung des stationären Endzustandes des Temperaturfeldes

	Studie	Ausbaustufe 1			Ausbaustufe 2		
Resttemperaturdifferenz des Kühlwassers der BASF in 1000 m Entfernung vom Wasserwerk	A	0,4 K	0,4 K	0,4 K	0,25 K	0,25 K	0,4 K
	B	0,25 K	0,25 K	0,25 K	0,1 K	0,1 K	0,25 K
	C	2,6 K	2,6 K	2,6 K	2,1 K	2,1 K	2,6 K
Resttemperaturdifferenz des Kühlwassers der BASF im Wasserwerk	A	0,25 K	0,25 K	0,25 K	0,25 K	0,25 K	0,25 K
	B	0,1 K	0,1 K	0,1 K	0,1 K	0,1 K	0,1 K
	C	2,1 K	2,1 K	2,1 K	2,1 K	2,1 K	2,1 K
Entnahmerate des Wasserwerks Kaiserwald		≤ 13 l/s	120 l/s (derzeit genehmigt)	200 l/s (zukünftig)	≤ 60 l/s	120 l/s (derzeit genehmigt)	200 l/s (zukünftig)
		100%	11%	7%	100%	50%	30%
Anteil des Kühlwassers (Jahresmittelwerte) an der Wasserwerksförderung	A	(0,25 K)	≈ 0	≈ 0	0,25 K	0,13 K	0,08 K
	B	(0,1 K)	≈ 0	≈ 0	0,1 K	0,05 K	≈ 0
	C	(2,1 K)	0,23 K	0,15 K	2,1 K	1,1 K	0,7 K

Bild 16: Rechnerische Eingrenzung der Auswirkungen auf das Wasserwerk Kaiserwald

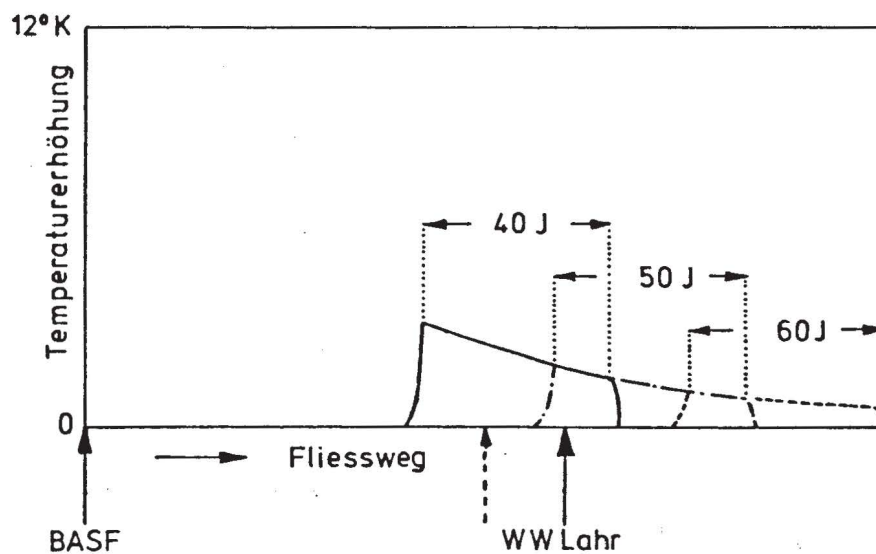
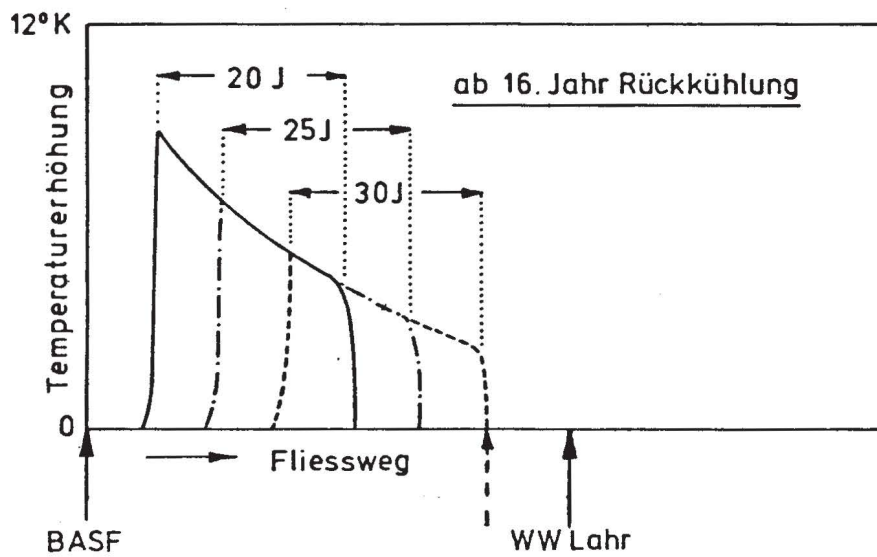
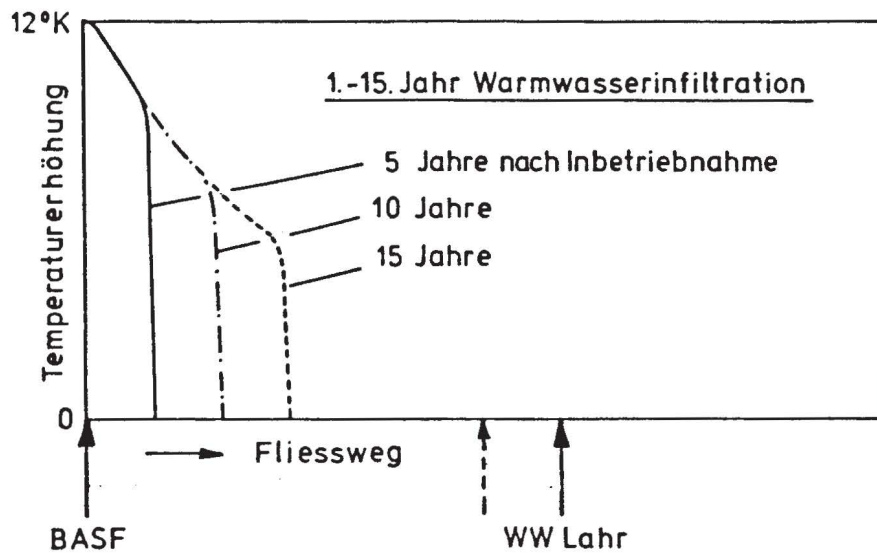
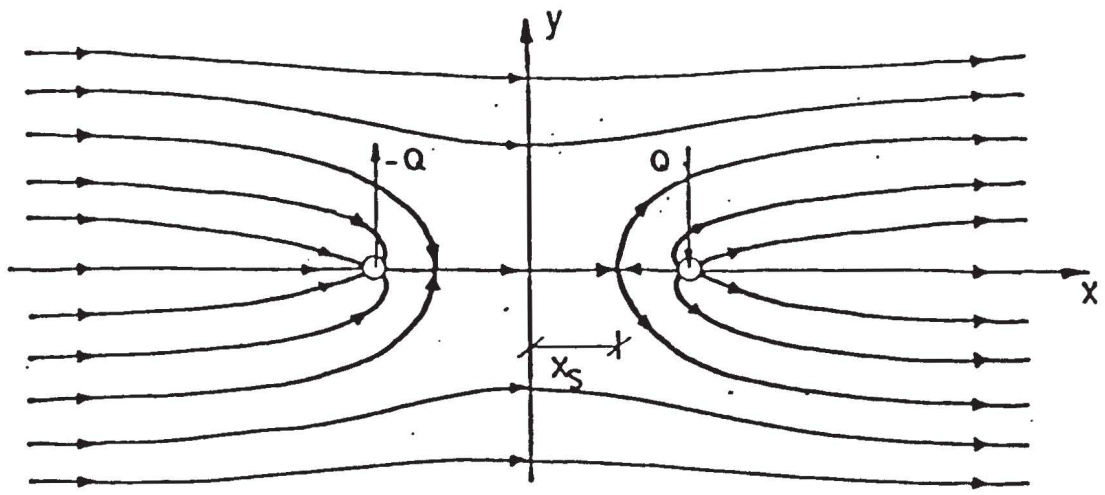
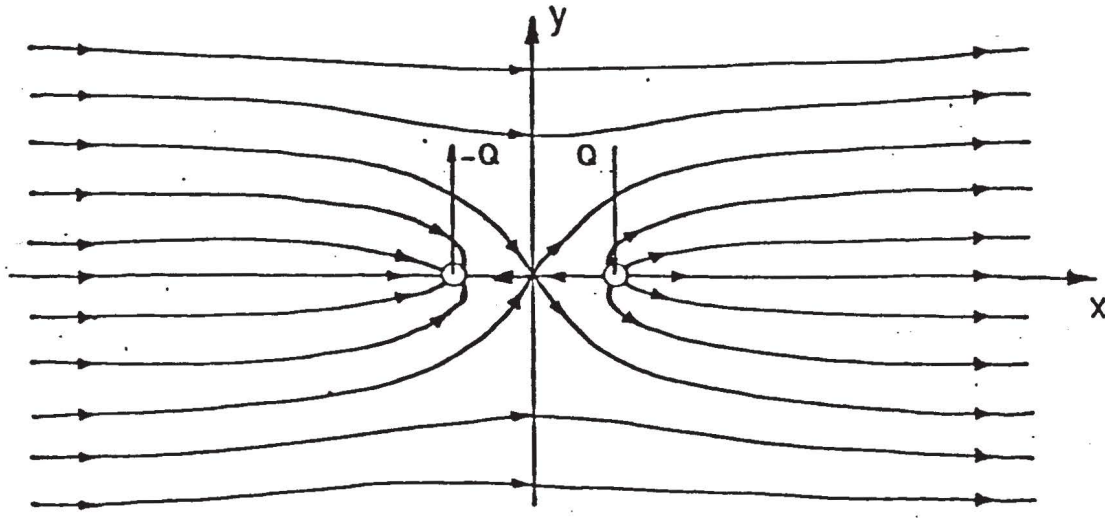


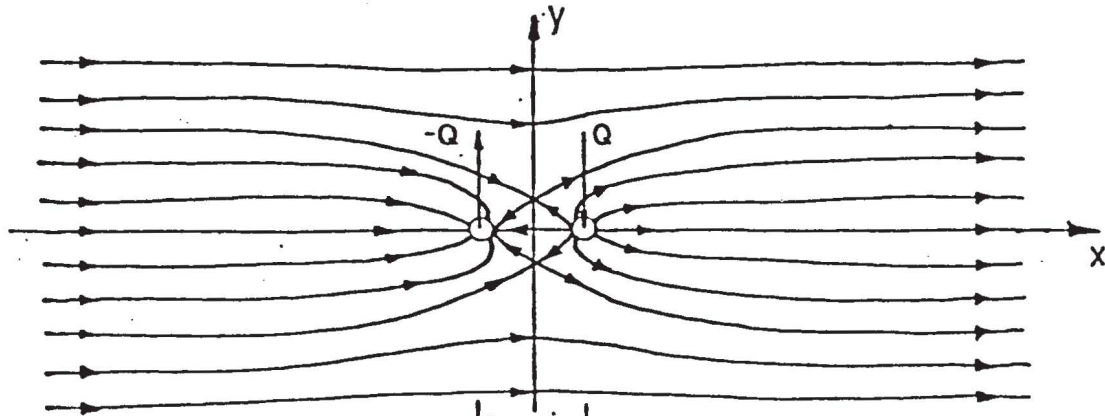
Bild 17: Rechenbeispiel für den Temperaturverlauf bei 15-jähriger Warmwasserinfiltration und anschließender Rückkühlung



v_0 $| - a > a_{krit} |$
Keine Rückströmung



v_0 $| - a_{krit} |$
kritischer Abstand = $\frac{2QE}{m_c v_0 \pi}$



$a < a_{krit}$
hydraulischer Kurzschluß

Bild 19 : Prinzipskizze zum hydraulischen Kurzschluß zwischen Schluck- und Entnahmebrunnen

Kritischer Abstand (homogener Grundwasserleiter) zwischen Schluck- und Entnahmehrunnen zur Vermeidung eines hydraulischen Kurzschlusses:

	Fallstudie		
	A	B	C
Ausbaustufe 1 (100 m ³ /h)	212 m	566 m	255 m
Ausbaustufe 2 (410 m ³ /h)	870 m	2 320 m	1 047 m

Rückströmanteile (ungünstige Rechnung) für den Entnahmehrunnen im Werksgelände (380 m oberstrom des Schluckbrunnens):

	Fallstudie		
	A	B	C
Ausbaustufe 1 (100 m ³ /h)	-	10%	-
Ausbaustufe 2 (410 m ³ /h)	22%	50%	28%

Rückströmanteile (ungünstige Rechnung) für Entnahmehrunnen südlich des Ettenbachs (700 m oberstrom des Schluckbrunnens):

	Fallstudie		
	A	B	C
Ausbaustufe 1 (100 m ³ /h)	-	-	-
Ausbaustufe 2 (410 m ³ /h)	5%	35%	10%

Bild 20: Erforderlicher Abstand zwischen Schluck- und Entnahmehrunnen und Rückströmanteile