

# **Technisch-wirtschaftliche Aufschlußalternativen hydrothermalen Ressourcen**

*Thomas Siebertz und Helmut Wolff, Technische Universität Berlin; Ernst Huenges, GeoForschungsZentrum Potsdam*

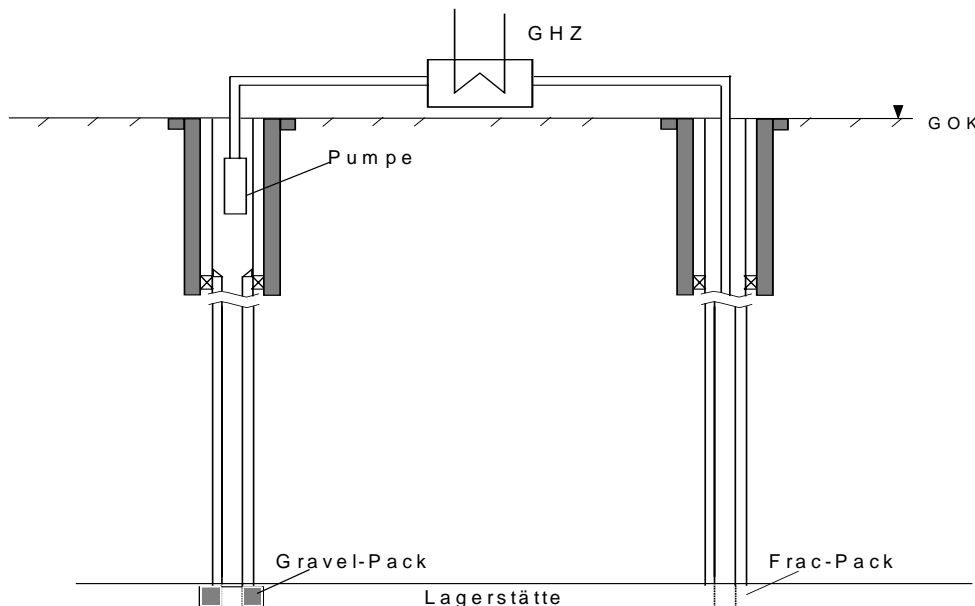
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>50</b>
<b>2 Bohrtechnischer Aufschluß thermalwasserführender Schichten</b> .....	<b>50</b>
2.1 Bohrplatzvorbereitung .....	52
2.2 Abteufen der Bohrungen .....	52
2.3 Bohrungskomplettierung.....	53
<b>3 Methodik der Kostenermittlung</b> .....	<b>54</b>
3.1 Eingabeparameter.....	54
3.2 Berechnung der Systemkonfiguration.....	55
3.3 Kostenberechnung.....	55
<b>4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse</b> .....	<b>57</b>
4.1 Darstellung der Ergebnisse .....	57
4.1.1 Geologisches Profil Typ 1.....	58
4.1.2 Geologisches Profil 2 (Typ II) .....	60
4.2 Diskussion der Ergebnisse .....	63
<b>5 Zusammenfassung</b> .....	<b>65</b>
<b>6 Literatur</b> .....	<b>66</b>

## 1 Einleitung

Die Nutzung hydrothermaler Wässer zur Wärmeversorgung kann umweltschonend [Kayser et al., 1996] einen Teil des weltweit steigenden Energiebedarfs decken. Wie bei allen regenerativen Energieformen sind vor der Nutzung zur Errichtung der Geothermieanlagen hohe Anfangsinvestitionen erforderlich. Einen wesentlichen Anteil an den Wärmegestehungskosten bei der Nutzung hydrothermaler Erdwärmevorkommen haben die kostenintensiven Tiefbohrungen zum Aufschluß der in bis zu 3.000 m Teufe liegenden Aquifere. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Arbeit, verschiedene Erschließungsmöglichkeiten unter Gesichtspunkten der Kostenminimierung zu untersuchen. Anhand zweier ausgewählter, für Nordostdeutschland typischer geologischer Profile werden spezifische und absolute Kosten ermittelt. Die für diese Untersuchung herangezogenen Aquifere stellen bezüglich des Lagerstätten-drucks und der Lagerstättentemperatur keine Extremfälle dar. Bei der Erschließung kann auf in der Erdöl-/Erdgasindustrie bewährte Einrichtungen zurückgegriffen werden. Im Rahmen dieser Optimierungsuntersuchung werden drei Varianten der Nutzbarmachung thermalwasserführender Schichten durch zwei Bohrungen (Doublettenbetrieb) untersucht - nämlich der Aufschluß durch zwei vertikale Bohrungen, durch eine vertikale und eine abgelenkte Bohrung sowie durch zwei abgelenkte Bohrungen.

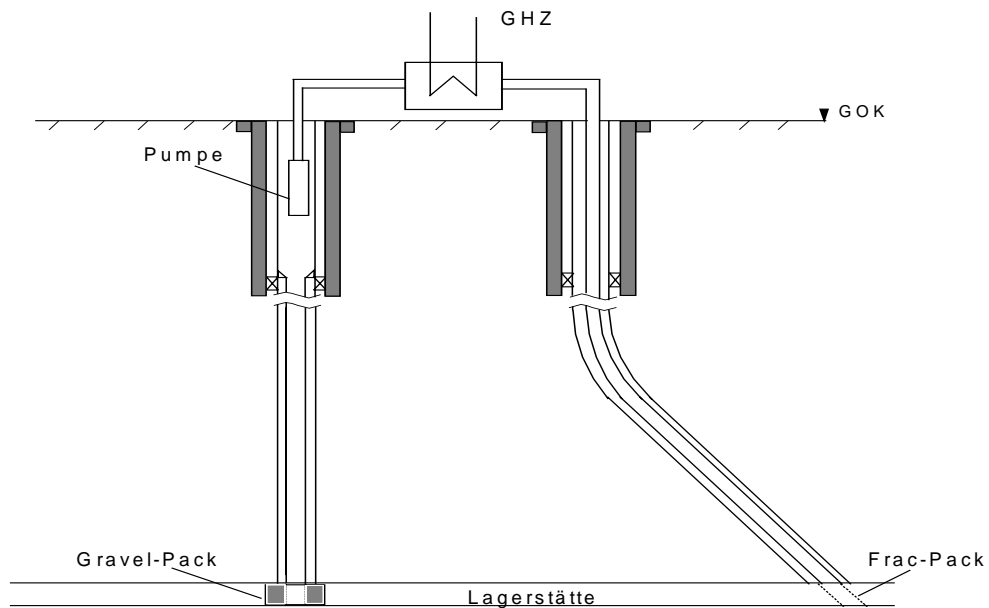
## 2 Bohrtechnischer Aufschluß thermalwasserführender Schichten

In Abbildung 2-1 ist die Bohrungsanordnung mit zwei vertikalen Bohrungen dargestellt.

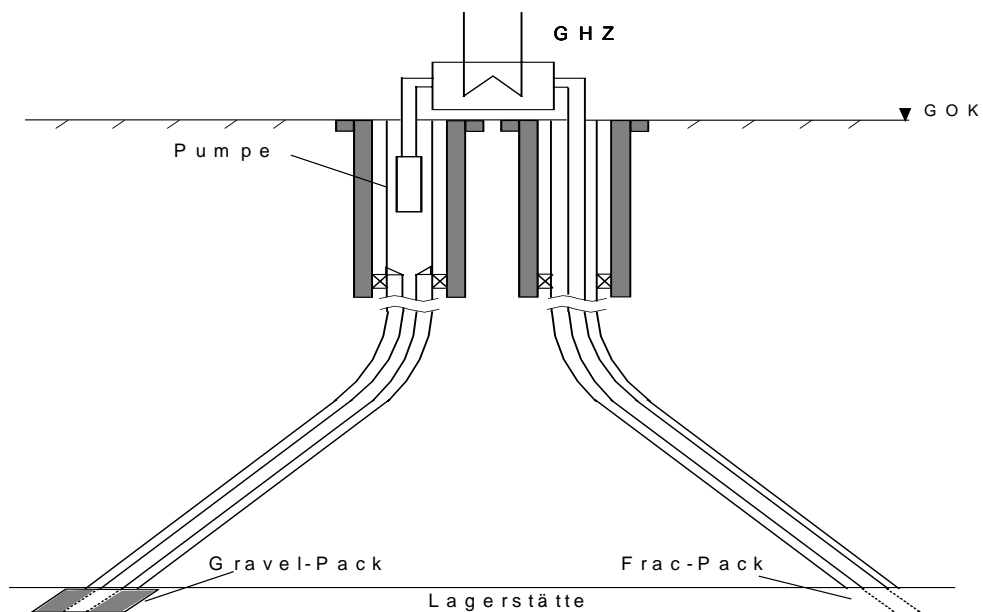


**Abbildung 2-1:** Schematische Darstellung der Bohrungsanordnung mit zwei vertikalen Bohrungen. Erläuterungen zu den Ausbaumaßnahmen Gravel-Pack, Frac-Pack im Kapitel 2.3  
GHZ=Geothermische Heizzentrale, GOK=Geländeoberkante.

Mit der Ablenkung einer (Abbildung 2-2) beziehungsweise beider (Abbildung 2-3) Bohrungen kann auf die Erstellung eines weiteren Bohrplatzes verzichtet und obertägiger Rohrleitungsaufwand eingespart werden. Das Bohrverfahren ist jedoch technisch aufwendiger.



**Abbildung 2-2:** Schematische Darstellung der Bohranordnung mit einer vertikalen und einer abgelenkten Bohrung.



**Abbildung 2-3:** Schematische Darstellung der Bohranordnung mit zwei abgelenkten Bohrungen

Als Basis für die Berechnung der Kosten eines Aufschlusses thermalwasserführender Schichten werden im folgenden die dem Kostenberechnungsmodell zugrundeliegenden Bohr- und Komplettierungstechniken erläutert. Das Niederbringen von Bohrungen zum Aufschluß thermalwasserführender Schichten unterscheidet sich nur wenig von der in der Erdöl- und Erdgasindustrie eingesetzten Bohrtechnik.

## 2.1 Bohrplatzvorbereitung

Die standardisierten technischen Einrichtungen werden dem Bohrloch so zugeordnet, daß ein störungsfreier Arbeitsablauf gewährleistet ist. Als Hauptkomponenten sind auf dem Bohrplatz die Bohranlage mit Unterbau und Mast, das Gestängelager mit Gestängetisch und -wagen sowie der dieselektrische Antrieb aufzustellen (siehe z. B. Abbildung 2-4). Der Spülungskreislauf mit Konditioniertanks, Rücklauf- und Ansaugtank sowie den Bohrklein-Separationseinrichtungen und den Vorratscontainern und -silos für Spülmittelzusätze, Schwerspat, Zement u. a. nimmt einen wesentlichen Teil des Betriebsplatzes ein. Im allgemeinen werden 2.000 m<sup>2</sup> als ausreichender Flächenbedarf für einen Bohrplatz gewählt [Stoll, 1991]. Beim Aufschluß durch eine vertikale und eine abgelenkte Bohrung sowie durch zwei abgelenkte Bohrungen können die Bohrungen von einem Bohrplatz abgeteuft werden.

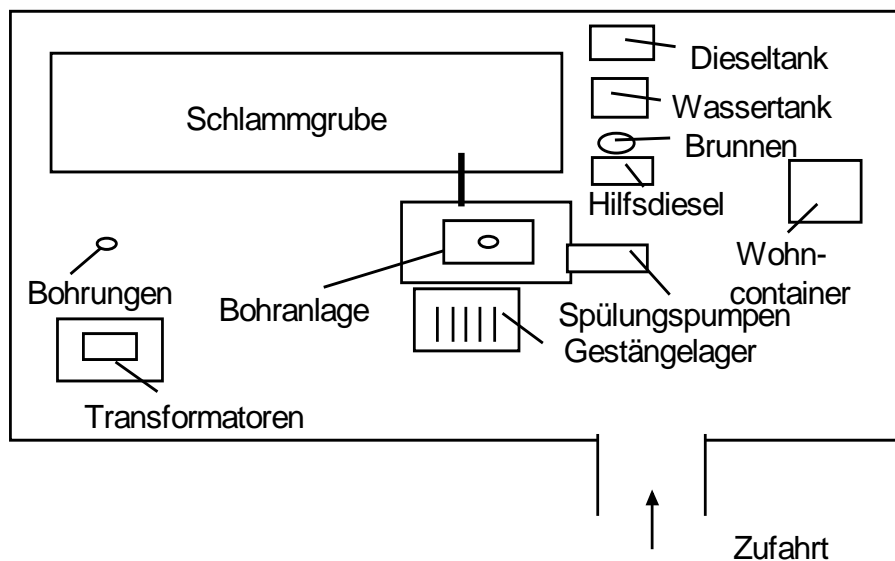


Abbildung 2-4: Beispiel für eine Bohrplatzanordnung.

## 2.2 Abteufen der Bohrungen

Die Bohrungen werden üblicherweise mit Hilfe eines drehend-drückend wirkenden Gestänges, des sogenannten Rotary-Bohrverfahrens, niedergebracht. Bei kontinuierlichem Drehen des Bohrgestänges wird der Bohrmeißel mit einem konstanten Bohrdruck beaufschlagt und ein Spülungskreislauf bewirkt den Austrag des Bohrkleins.

Als Spülungsart wird beim Erbohren der Deckschichten eine Spülung verwendet, die das Bohrklein austragen und die Druckverhältnisse halten soll. Oft wird in Sedimentbohrungen eine Bentonit-CMC-Spülung verwendet. Wegen möglicher Wechselwirkung der Spülungskomponenten mit den Formationsflüssigkeiten wird beim Erbohren des Speicherbereichs auf eine Salzsäure-Spülung umgestellt.

Damit die einzelnen Rohrtouren die Standfestigkeit des Bohrloches gewährleisten und die verschiedenen geologischen Schichten zuverlässig voneinander trennen, wird der Ringraum zwischen Rohraußenwand und Bohrlochwand zementiert. Im Anschluß an die letzte Zementation wird dann der Speicher erbohrt. Dabei kommt es häufig zu einer Verschlechterung der Speicherparameter, hervorgerufen durch die Infiltration von Feststoffpartikeln und Reaktionen mit dem Speicherfluid oder der Matrix. Der Grad der Formationsschädigung ist oftmals maß-

gebend dafür, ob eine Förderung oder Injektion ohne nachträgliche Schichtbehandlung erreicht werden kann.

Für das Abteufen abgelenkter Bohrungen kann dasselbe Bohrgerät mit entsprechenden Einrichtungen verwendet werden. Für die Ablenkung der Bohrung kommt neben dem Rotaryverfahren ein Verfahren zum Einsatz, bei dem das Gestänge ruht und hydraulisch an der Bohrlochsohle eine Bohrkronenmotorantriebsvorrichtung, das sogenannte Bohrsohlenmotorverfahren. Der Bohrsohlenmotor wird unmittelbar über dem Bohrwerkzeug in den Bohrstrang eingebaut. Der Antrieb des Motors erfolgt über die Spülung, die unter hohem Flüssigkeitsdruck über das Bohrgestänge eingepumpt wird.

Durch den Einsatz von Richtbohrgeräten können auch nach dem Rotary-Bohrverfahren abgelenkte Bohrungen hergestellt werden. Zur Zeit wird diese Technik dem Bohrsohlenmotorverfahren beim Abteufen von Geothermiebohrungen vorgezogen [Polte, 1996].

Der maximale Ablenkwinkel für Geothermiebohrungen ist  $60^\circ$ , bei einer Ablenkrate von  $0,8^\circ/10\text{ m}$ , entsprechend einem Ablenkradius von 716 m. Bei größeren Ablenkwinkeln und höheren Ablenkraten ist das Befahren der Bohrung mit Meßsonden nicht mehr ohne weiteres möglich [Polte, 1996].

### 2.3 Bohrungskomplettierung

Bei der Herrichtung des Speichers für die Förderung ist es denkbar, den Speicher offen, also unverbohrt zu lassen (open-hole Komplettierung); oft lassen jedoch die geologischen Gegebenheiten diese Art der Komplettierung nicht zu. Bei Förderbohrungen können aus der Speicherschicht Sandpartikel mitgefördert werden, die zur Verstopfung des Förderstranges führen und den Förderprozeß zum Erliegen bringen. Bei Injektionsbohrungen können vom injizierten Wasser Sandpartikel gelöst und in die Speicherschicht eingetragen werden. Die Aufnahmefähigkeit der Speicherformation kann dadurch so weit herabgesetzt werden, daß der Injektionsprozeß vollständig zum Erliegen kommt.

Daher werden im Rahmen der Komplettierungsarbeiten der Speicherbereich ausgebaut und im Falle der Förderbohrung die Förderrohrtour und -pumpe eingebracht, während eine Injektionsbohrung mit einer Injektionsrohrtour versehen wird. Abschließend werden die Bohrungen mit einer Spezialarmatur verschlossen. Vor Beginn der Produktion ist es erforderlich, die Bohrungen möglichst vollständig von Spülrückständen zu befreien.

Bei Förderbohrungen wird zunächst der Durchmesser des Speichers erweitert bzw. nach der Fachsprache unterschritten. Danach wird das Filterrohr eingebaut und der verbleibende Ringraum mit Filterkies verfüllt. Dieses sogenannte Gravel-pack-Verfahren (siehe Abbildungen 2-1 bis 2-3) wird in Verbindung mit dem Einsatz von Drahtwickelfiltern angewendet [Förster, 1991]. Dieses ist sowohl bei unverrohrter als auch bei verrohrter (cased hole) Speicherschicht möglich. In Injektionssonden haben sich Cased-hole Komplettierungen trotz ihrer schlechteren Hydraulik durchgesetzt [Förster, 1991]. Diese konstruktionsbedingt schlechteren hydraulischen Verhältnisse können aber durch zusätzliche fördertechnische Maßnahmen, wie das Verpressen von Kies in die Speicherschicht, verbessert werden (Frac-Pack, siehe Abbildungen 2-1 bis 2-3).

In die Förderbohrung wird oberhalb der Tiefpumpe die Pumpensteigleitung aus korrosionsresistenten Rohren, z. B. glasfaserverstärkten Kunststoffrohren (GFK-Rohre), eingebracht. Unterhalb der Pumpe ist der Einbau einer Förderrohrleitung nur dann notwendig, wenn die un-

terhalb des statischen Wasserspiegels liegenden Futterrohre nicht aus GFK bestehen [Horn, 1996].

Durch eventuelle Undichtigkeiten kann Sauerstoff in die Förderrohrleitung eindringen und es kann zu Ausfällungen von Eisenhydroxyden aus dem Thermalwasser kommen. Daher wird der Ringraum zwischen Förder- und Futterrohrtour mit Stickstoff beaufschlagt [Kabus, 1991]. In die Injektionssonde wird auf der gesamten Teufe zwischen Bohrlochkopf und Speicherbereich ein Injektionsstrang eingebracht. Bestehen die eingebrachten Futterrohre aus korrosionsresistenten GFK, kann auf das Einbringen einer Injektionsleitung über die gesamte Länge verzichtet werden. Die Komplettierung beschränkt sich dann nur auf den Speicherbereich. Die hierfür verwendeten GFK-Rohre entsprechen den Pumpensteigrohren. Auch in Injektionsbohrungen wird der Ringraum zwischen Injektions- und Futterrohrtour aus den oben genannten Gründen mit Stickstoff beaufschlagt.

### **3 Methodik der Kostenermittlung**

Zur Bewertung der Kosten verschiedener Aufschlußalternativen hydrothermalen Ressourcen wurde das computergestützte EXCEL-Tabellenkalkulationsprogramm „Bohrkosten“ entwickelt. Das Programm wurde so angelegt, daß nach der Eingabe der Eingabeparameter der Förder- und Injektionsbohrung in das Blatt „Eingabe“ das Rechenprogramm selbständig die Bohrungskonfiguration definiert. Die dafür notwendigen Systemkomponenten werden zunächst in einem weiteren Rechenblatt „Systemkomponenten“ zusammengestellt. Zur Berechnung der Kapitalkosten greift das Programm im darauffolgenden Blatt „Kapitalkosten“ auf dieses und die für die Berechnung relevanten Parameter des Blattes „Eingabe“ zurück. Die so errechneten Investitionskosten und kapitalgebundenen Kosten werden dann - aufgeschlüsselt nach Kostenträgern - im Blatt „Ergebnis“ tabellarisch dargestellt.

#### **3.1 Eingabeparameter**

Im Eingabeblatt kann der Bearbeiter für Förder- und Injektionsbohrung festlegen, ob die Bohrung vertikal oder abgelenkt abgeteuft werden soll. Weiterhin ist der Abstand zur Geothermischen Heizzentrale (GHZ), der Abstand zwischen den Bohrungen sowie die erforderliche Bohrplatzfläche einzugeben. Im Falle einer abgelenkten Bohrung muß die Ablenkweite aus der Vertikalen, gemessen im Speicher, festgelegt werden.

Des Weiteren werden die stratigraphischen Vorgaben der zu durchteufenden Schichten eingegeben und die Vorgaben bezüglich des Speicherbereichs festgelegt. Bei den stratigraphischen Vorgaben handelt es sich um die Mächtigkeit der Quartärschichten, Tertiärschichten und des Speichers sowie um den Abstand zwischen Tertiärschichten und Speicher. Die Vorgaben zum Speicherbereich setzen sich zusammen aus dem förderbaren Volumenstrom, dem Druck am Sondenkopf, der Tiefe des dynamischen Wasserspiegels und der Mineralisation der zu fördernden Wässer.

In der Bohrungskonfiguration legt der Anwender die Bohrdurchmesser der einzelnen Bohrabchnitte und die Art der in diesen Abschnitten einzubauende Verrohrung fest. Im Falle einer abgelenkten Bohrung muß der Ablenkwinkel und der dazugehörige Radius festgelegt werden, woraus unter Einbeziehung der Ablenkweite im Speicher der Ablenkpunkt bestimmt wird.

### **3.2 Berechnung der Systemkonfiguration**

Zunächst werden die für das Erstellen der Bohrung bedeutenden Komponenten zusammengestellt. Die Bohrplatzeinrichtung und damit die Bohrplatzfläche und das erforderliche Bohrgestät wird auf Basis von Annahmen festgelegt.

Die Geometrie der Bohrungsabschnitte errechnet sich aus den stratigraphischen Vorgaben des Lagerstättenprofils mit Bohrlochlängen für die einzelnen Bohrabschnitte, für die gesamte Bohrlänge und die Anzahl der einzelnen Bohrabschnitte. Der Festlegung der einzelnen Bohrabschnitte liegt folgender Ansatz zugrunde:

Bis zur Basis Quartär wird die Standrohrtour, bis zur Basis Tertiär die Ankerrohrtour und bis zum Beginn des Speichers die 1. Technische Rohrtour eingebracht. Die Speicherformation wird durch die Förderbohrung unterschritten und nicht verrohrt. Bei Injektionsbohrungen wird die Speicherformation mit einer Filterrohrtour versehen. Bei einer abgelenkten Bohrung geht in die Bestimmung der Bohrlochlängen der vertikale Abstand der zu durchteufenden Schichten und der abgelenkte Bereich ein. Handelt es sich um einen Bohrabschnitt, in dem mit konstanter Neigung gebohrt wird, so berechnet sich die Bohrlochlänge aus vertikalem Abstand und Neigungswinkel. In einem Bohrabschnitt, in dem der Neigungswinkel kreisbogenförmig aufgebaut wird und danach mit konstanter Neigung weitergebohrt wird, geht in die Berechnung der Bohrlochlänge zusätzlich der Radius zum Neigungsaufbau ein.

Die erforderliche Spülmengemenge wird aus den Bohrlochdurchmessern und den Bohrlochlängen berechnet und unter dem Punkt Spülung ausgewiesen. Bei der Errechnung der Futterrohrängen im Abschnitt Verrohrung gelten die oben genannten Einbaukriterien. Alle Rohrtouren werden bis zum Bohrlochkopf eingebaut. Im Abschnitt Zementation werden die Bohrlochdurchmesser sowie die dazugehörigen Durchmesser und Längen der einzuzementierenden Futterrohre angezeigt.

Unter dem Punkt Ausbau der Bohrung werden Angaben über Steigleitung und Speicheraufschluß gemacht. Die Dimension der Steigleitung wird aus dem zu fördernden Volumenstrom errechnet. Die Länge der Steigleitung richtet sich nach der Lage des dynamischen Wasserspiegels, der wiederum die Einbautiefe der Tiefpumpe festlegt. Abschließend wird im Punkt Ausbau der Bohrung aufgezeigt, ob der Speicher durch einen Gravel-pack mit Drahtwickelfilter oder eine perforierte Filterrohrtour mit Frac-pack aufgeschlossen wird.

Die Dimension des Bohrlochkopfes wird im Abschnitt Bohrlochabschluß angegeben. Weiterhin werden Durchmesser, Länge und Art der Verbindungsleitung zur Geothermieanlage aufgeführt. Bei Länge und Ausführungsart der Leitung bezieht sich das Rechenprogramm auf die im Eingabeblatt angegebene Entfernung der Bohrung zur Geothermieanlage und Mineralisation des Thermalwassers.

### **3.3 Kostenberechnung**

Verlässliche Preisinformationen sind nicht zu beschaffen, weil potentielle Lieferfirmen aus Wettbewerbsgründen genaue Daten zurückhalten. Trotzdem wurde versucht, mit umfassenden Anfragen möglichst in die Nähe der Marktpreise 1996 zu kommen. Insbesondere wurde darauf geachtet, die Relationen der einzelnen Komponentenpreise zu wahren, so daß der anvisierte Kostenvergleich auch über 1996 mit einer Unschärfe seine Gültigkeit besitzt.

Die Investitionskosten der einzelnen Kostenpunkte werden aus Angaben des Preises pro spezifischer Einheit und deren Anzahl (Rechenblatt "Kapitalkosten") gebildet. Die in diese Berechnung maßgeblich eingehenden "Preise pro Einheit" sind in Tabelle 3-1 beispielhaft für das Bohren, Verrohren und Zementieren einer vertikal abgeteufte Bohrung dargestellt.

Rohrdurchmesser [“]	Material	Bohrkosten [DM/m]	Verrohrungskosten [DM/m]	Zementierungskosten [DM/m]
13 3/8	Stahl	260	260	168
13 3/8	GFK	260	420	168
9 5/8	Stahl	230	200	76
9 5/8	GFK	230	365	76
7	Stahl	200	150	43
7	GFK	200	295	43

**Tabelle 3-1:** Kosten für die Bohrung, Verrohrung und Zementation [Ruhlandt, unveröff.]

Weiterhin sind in Tabelle 3-2 die Kosten für die Komplettierung einer solchen Bohrung aufgeführt.

<b>Pumpensteigleitung [Hammann, unveröff.]</b>	GFK DN 150	295 DM/m
	GFK DN 200	365 DM/m
<b>Gravel-Pack [Jäpel, 1997]</b>		50.000 DM
<b>Frac-Pack [Jäpel, 1997]</b>		20.400 DM
<b>Bohrlochkopf [Beier, 1996]</b>		45.000 DM
<b>Verbindungsleitung Bohrung - GHZ [Böhm, 1996]</b>	GFK DN 150	567 DM/m
	GFK DN 200	836 DM/m

**Tabelle 3-2:** Kosten für die Komplettierung der Bohrung [ ] = Referenzen

Im Rechenmodell können Subventionen vorgesehen werden. Weiterhin wird über einen Annuitätsfaktor

$$a_n = i (1+i)^n / ((1+i)^n - 1), \text{ mit } i = \text{Zinssatz } [%/100] \text{ und } n = \text{Nutzungsdauer } [a]$$

eine Annuität berechnet:

$$A_n = I * a_n, \text{ mit } I = \text{Investitionsbetrag } [DM] \text{ und } A_n = [DM/a]$$

Hinzu kommen Instandhaltungskosten und die Kapitalkosten jedes Kostenträgers. Die Instandhaltungskosten wurden für die wartungsbedürftigen Komponenten der Bohrung - Pumpe, Steigleitung, Sondenkopf und Speicherbereich - ermittelt. Da die angesprochenen Hersteller dieser Produkte keine Angaben zu den Instandhaltungskosten gemacht haben, wurde auf Erfahrungswerte der Geothermiebohrungen in Neubrandenburg zurückgegriffen.



Die jährlich anfallenden Instandhaltungskosten der Tiefpumpe werden in Neubrandenburg mit 20 % der Investitionskosten beziffert [Horn, 1996]. Die Instandhaltungskosten der Steigleitung liegen ebenfalls bei 20 % der Investitionskosten [Horn, 1996]. Dabei ist hervorzuheben, daß nicht Ablagerungen in der Steigleitung oder Beschädigungen diese Kosten verursachen, sondern die Kosten durch das Auswechseln der Verschraubungen der Steigleitung bedingt sind. Im Zuge des Pumpenausbaus und dem damit verbundenen Ausbau der Steigleitung werden die Verschraubungen gewechselt, um auch nach dem Einbau die Dichtigkeit zu gewährleisten. Die jährlichen Instandhaltungskosten für den Bohrlochkopf werden mit 1 % der Investitionskosten angesetzt, die im wesentlichen in Ausbesserungsarbeiten am Farbanstrich begründet sind [Horn, 1996]. Für den Speicherbereich wurden keine Instandhaltungskosten vorgesehen [Horn, 1996]. Dieser Punkt muß neu festgelegt werden, sobald Erfahrungen über Maßnahmen zur Speicherreaktivierung an vorhandenen Geothermiebohrungen vorliegen.

#### **4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse**

Für die Berechnung der Bohrkosten für sämtliche zu untersuchenden Aufschlußmethoden wurde der Abstand zwischen der Förder- und Injektionsbohrung im Speicher auf 1.500 m festgelegt. Dieser Abstand hat vor allem Einfluß auf die möglichen Ablenkwinkel einer bzw. beider Bohrungen der gewählten Aufschlußmethode. Weiterhin wird davon ausgegangen, daß die GHZ im Falle zweier vertikaler Bohrungen 100 m von der Förderbohrung entfernt installiert wird, woraus sich im Idealfall ein Abstand von 1.400 m zwischen Injektionsbohrung und GHZ ergibt. Für den Fall des Abteufens zweier Bohrungen von nur einer Bohrlokation werden 100 m als Abstand der Heizzentrale zu dieser Lokation gewählt.

Die gewählten Lagerstättentypen repräsentieren zwei für Nordostdeutschland typische geologischen Situationen. Sie unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich der Teufe bis zum Förderhorizont, der dort herrschenden Temperatur sowie der Speichermächtigkeit. Während beim Lagerstättentyp I die mittlere Teufe des Aquifers 1254 m und die Thermalwassertemperatur 54 °C beträgt, lauten die entsprechenden Werte für den Lagerstättentyp II: 2238 m und 98 °C (s. Tab. 4-1 und Tab. 4-4). Damit stellen diese Aquifere bezüglich des Lagerstättendrucks und der Lagerstättentemperaturen hinsichtlich der Aufschlußtechnologien keine Extremfälle dar.

##### **4.1 Darstellung der Ergebnisse**

Im folgenden werden zunächst die ermittelten Kosten für den Aufschluß der zwei Lagerstättentypen I und II dargestellt. Es werden jeweils die Kosten für das Abteufen zweier vertikaler, einer vertikalen und einer abgelenkten sowie zweier abgelenkter Bohrungen aufgezeigt. Hierbei werden für die abgelenkten Bohrungen die Kosten für die verschiedenen Ablenkwinkel, die einen Abstand der Bohrungen im Speicher von 1.500 m gewährleisten, einzeln ausgewiesen. Neben den Investitionskosten werden weiterhin die kapitalgebundenen Kosten dargestellt. Diese sind Grundlage für die anschließende vergleichende Diskussion der Ergebnisse.

### 4.1.1 Geologisches Profil Typ 1

<b>Eingaben</b>	<b>Lagerstätte Typ I</b>	
	2 Vertikale, Typ I	2 Abgelenkte, 60°, Typ I
Ablenkweite im Speicher	0	740
Abstand der Bohransatzpunkte	1500	20
Abstand der Bohrung zur GHZ	100	100
Bohrplatzfläche	2000	2000
<b>Vorgaben Stratigraphie</b>		
Quartärschichten bis	30	30
Tertiärschichten von	30	30
bis	292	292
Abstand Tertiär-Speicher	946	946
Speichermächtigkeit	32	32
<b>Bohrdurchmesser</b>		
Ankerrohtour	12 1/4	12 1/4
1. Technische Rohrtour	8 1/2	8 1/2
Filterrohtour	5 3/4	5 3/4
Verrohrung Standrohr	13 3/8	13 3/8
Verrohrung Ankerrohtour	9 5/8	9 5/8
Verrohrung 1. Tech. Rohrtour	7	7
Ablenkwinkel	0	60
Ablenkradius	0	716
<b>Vorgaben Geothermie</b>		
Volumenstrom (45-145 m <sup>3</sup> /h)	120	120
Kopfdruck	4	4
Tiefe dyn. Wasserspiegel	80	80
<b>Wirtschaftliche Vorgaben</b>		
aktueller Zinssatz	7%	7%
aktueller Dollarkurs, 1 US =	1,52	1,52

**Tabelle 4-1:** Lagerstätte Typ I; Eingabeparameter

Für das Geologische Profil Typ I sind die Investitions- und kapitalgebundenen Kosten für einen vertikalen Aufschluß sowohl der Förder- als auch der Injektionsbohrung in Tabelle 4-2 dargestellt.

Es ergibt sich eine Differenz der Investitionskosten zwischen Förder- und Injektionsbohrung von etwa 830 TDM. Mehrkosten verursacht in erster Linie die relativ kostenaufwendige Thermalwasserleitung zwischen der Injektionsbohrung und der geothermischen Heizzentrale. Die Kosten von 790 TDM der 1.400 m langen Rohrleitung werden der Injektionsbohrung, unter Kostenpunkt Bohrlochabschluß, angelastet. Dies ist vor allem für den Vergleich der verschiedenen Aufschlußmethoden von Bedeutung. Wegen des größeren Durchmesser sind die Kosten für die Verrohrung und Zementation der Injektionsbohrung etwa 65 % höher als die der Förderbohrung. Außerdem müssen 13 % höhere Aufwendungen für die Spülung angesetzt werden. Der Einbau der Tiefpumpe in die Förderbohrung und der im Gegensatz zum Frac-Pack teurere Gravel-Pack verursacht dagegen etwa 6-7-fach höhere Investitionskosten für den

Ausbau der Förderbohrung im Gegensatz zur Injektionsbohrung. Ohne die Einbeziehung der Kosten für die Verbindungsleitung sind die Kosten für beide Bohrungen vergleichbar.

	1.Bohrung		2.Bohrung		Gesamtkosten	
	Invest- kosten	Kapital- gebun- dene Kosten	Invest- kosten	Kapital- gebun- dene Kosten	Invest- kosten	Kapital- gebun- dene Kosten
Einheiten	[TDM]	[TDM/a]	[TDM]	[TDM/a]	[TDM]	[TDM/a]
1 Bohrplatzeinrichtung	492	40	500	40	993	80
2 Abteufen der Bohrung	304	25	297	24	601	48
3 Spülung	89	7	100	8	189	15
4 Verrohrung	472	38	698	56	1.170	94
5 Zementation	75	6	143	12	218	18
6 Bohrlochvermessung	118	10	118	10	237	19
7 Ausbau der Bohrung	333	126	40	3	373	129
8 Bohrlochabschluß	100	9	839	80	939	89
9 Planungskosten	198	16	274	22	472	38
<b>Summe</b>	<b>2.182</b>	<b>276</b>	<b>3.009</b>	<b>254</b>	<b>5.192</b>	<b>531</b>

Tabelle 4-2: Lagerstätte Typ I; Kosten für zwei vertikale Bohrungen

	1.Bohrung		2.Bohrung		Gesamtkosten	
	Invest- kosten	Kapital- gebun- dene Kosten	Invest- kosten	Kapital- gebun- dene Kosten	Invest- kosten	Kapital- gebun- dene Kosten
Einheiten	[TDM]	[TDM/a]	[TDM]	[TDM/a]	[TDM]	[TDM/a]
1 Bohrplatzeinrichtung	492	40	261	21	753	61
2 Abteufen der Bohrung	574	46	576	46	1.150	93
3 Spülung	106	9	120	10	226	18
4 Verrohrung	562	45	859	69	1.422	115
5 Zementation	89	7	166	13	255	21
6 Bohrlochvermessung	125	10	125	10	250	20
7 Ausbau der Bohrung	333	126	58	5	391	131
8 Bohrlochabschluß	100	9	102	10	202	19
9 Planungskosten	238	19	227	18	465	37
<b>Summe</b>	<b>2.619</b>	<b>312</b>	<b>2.494</b>	<b>202</b>	<b>5.113</b>	<b>514</b>

Tabelle 4-3: Lagerstätte Typ I; Kosten für zwei abgelenkte Bohrungen (60°)

In Tabelle 4-3 werden beispielhaft die Kosten für eine Erschließung der Lagerstätte von nur einem Bohrplatz durch Abteufen beider Bohrungen als abgelenkte Bohrungen dargestellt. Ablenkungen von 54° beziehungsweise 48° ergeben nur geringe Kostenänderungen und sind

deshalb hier nicht aufgeführt. Die Investitionskosten für die Förderbohrung übersteigen diejenigen für die Injektionsbohrung um etwa 6-7 %. Mehraufwendungen für Spülung, Verrohrung und Zementation auf Seiten der Injektionsbohrung gleichen sich in etwa mit den Mehrkosten für den Bohrlochausbau der Förderbohrung aus und zwar in erster Linie wegen der Kosten für die Tiefpumpe. Zusätzlich entfallen die Investitionskosten für die Einrichtung des zweiten Bohrplatzes von etwa 230 TDM. Es kann dadurch die Länge der Thermalwasserleitung zwischen Heizzentrale und Injektionsbohrung um 1.300 m reduziert werden.

#### 4.1.2 Geologisches Profil 2 (Typ II)

<b>Eingaben</b>	<b>Lagerstätte Typ II</b>		
	2 Vertikale	1 Vertikale, 1 Abgelenkte, 60°	2 Abgelenkte, 60°
Ablenkweite im Speicher	0	0	740
Abstand der Bohransatzpunkte	1500	20	20
Abstand der Bohrung zur GHZ	100	100	100
Bohrplatzfläche	2000	2000	2000
<b>Vorgaben Stratigraphie</b>			
Quartärschichten bis	74	74	74
Tertiärschichten von	74	74	74
bis	740	740	740
Abstand Tertiär-Speicher	1461	1461	1461
Speichermächtigkeit	74	74	74
<b>Bohrdurchmesser</b>			
Ankerrohrtour	12 1/4	12 1/4	12 1/4
1. Technische Rohrtour	8 1/2	8 1/2	8 1/2
Filterrohrtour	5 3/4	5 3/4	5 3/4
Verrohrung Standrohr	13 3/8	13 3/8	13 3/8
Verrohrung Ankerrohrtour	9 5/8	9 5/8	9 5/8
Verrohrung 1. Tech. Rohrtour	7	7	7
Ablenkwinkel	0	0	60
Ablenkradius	0	0	716
<b>Vorgaben Geothermie</b>			
Volumenstrom (45-145 m <sup>3</sup> /h)	120	120	120
Kopfdruck	4	4	4
Tiefe dyn. Wasserspiegel	110	110	110
<b>Wirtschaftliche Vorgaben</b>			
aktueller Zinssatz	7%	7%	7%
aktueller Dollarkurs, 1 US =	1,52	1,52	1,52

**Tabelle 4-4:** Lagerstätte Typ II; Eingabeparameter

Tabelle 4-5 zeigt die Investitionskosten für eine Nutzbarmachung mittels zweier vertikaler Bohrungen. Die Differenz der Investitionskosten zwischen Förder- und Injektionsbohrung von etwa 1,07 Mio. DM ergibt sich aus den unterschiedlichen Anforderungen an die Bohrungen (vergleiche Kapitel 4.1.1). Im Gegensatz zum Aufschluß des Thermalwasserspeichers im Fall des geologischen Profils Typ I ist hier aufgrund der größeren Teufe des Speichers ein Auf-

schluß durch eine vertikale und eine abgelenkte Bohrung möglich. Die Kosten einer maximalen Ablenkung durch einen Ablenkwinkel von 60° werden in Tabelle 4-6 dargestellt.

	<i>1.Bohrung</i>		<i>2.Bohrung</i>		<i>Gesamtkosten</i>	
	<b>Investkosten</b>	<b>Kapitalgebundene Kosten</b>	<b>Investkosten</b>	<b>Kapitalgebundene Kosten</b>	<b>Investkosten</b>	<b>Kapitalgebundene Kosten</b>
<b>Einheiten</b>	<b>[TDM]</b>	<b>[TDM/a]</b>	<b>[TDM]</b>	<b>[TDM/a]</b>	<b>[TDM]</b>	<b>[TDM/a]</b>
<b>1 Bohrplatzeinrichtung</b>	533	43	553	45	1.086	88
<b>2 Abteufen der Bohrung</b>	513	41	535	43	1.048	84
<b>3 Spülung</b>	144	12	165	13	308	25
<b>4 Verrohrung</b>	919	74	1.304	105	2.223	179
<b>5 Zementation</b>	151	12	291	23	442	36
<b>6 Bohrlochvermessung</b>	143	11	143	11	285	23
<b>7 Ausbau der Bohrung</b>	423	165	64	5	487	171
<b>8 Bohrlochabschluß</b>	100	9	839	80	939	89
<b>9 Planungskosten</b>	292	24	389	31	682	55
<b>Summe</b>	<b>3.217</b>	<b>392</b>	<b>4.284</b>	<b>357</b>	<b>7.501</b>	<b>749</b>

**Tabelle 4-5:** Lagerstätte Typ II, Kosten für zwei vertikale Bohrungen.

	<i>1.Bohrung</i>		<i>2.Bohrung</i>		<i>Gesamtkosten</i>	
	<b>Investkosten</b>	<b>Kapitalgebundene Kosten</b>	<b>Investkosten</b>	<b>Kapitalgebundene Kosten</b>	<b>Investkosten</b>	<b>Kapitalgebundene Kosten</b>
<b>Einheiten</b>	<b>[TDM]</b>	<b>[TDM/a]</b>	<b>[TDM]</b>	<b>[TDM/a]</b>	<b>[TDM]</b>	<b>[TDM/a]</b>
<b>1 Bohrplatzeinrichtung</b>	533	43	314	25	847	68
<b>2 Abteufen der Bohrung</b>	513	41	1.061	85	1.574	127
<b>3 Spülung</b>	144	12	210	17	354	28
<b>4 Verrohrung</b>	919	74	1.668	134	2.587	209
<b>5 Zementation</b>	151	12	343	28	494	40
<b>6 Bohrlochvermessung</b>	143	11	157	13	300	24
<b>7 Ausbau der Bohrung</b>	423	165	106	9	529	174
<b>8 Bohrlochabschluß</b>	100	9	102	10	202	19
<b>9 Planungskosten</b>	292	24	396	32	689	55
<b>Summe</b>	<b>3.217</b>	<b>392</b>	<b>4.358</b>	<b>353</b>	<b>7.576</b>	<b>744</b>

**Tabelle 4-6:** Lagerstätte Typ II; Kosten für eine vertikale Förder- und eine abgelenkte Injektionsbohrung (°60).

Es zeigt sich, daß die Injektionsbohrung etwa 35 % teurer als die Förderbohrung ist. Dies begründet sich in erster Linie durch das wesentlich teurere Abteufen und Verrohren der abgelenkten Bohrungen. Der um 75 % günstigere Ausbau sowie der Wegfall des Bohrplatzes und

der Thermalwasserleitung auf Seiten der Injektionsbohrung können diese Mehrkosten nicht ausgleichen.

Im folgenden werden die Kosten für zwei abgelenkte Bohrungen bei einem Ablenkwinkel von 60° dargestellt. Dabei ergeben sich die gleichen kostenmäßigen Verhältnisse wie bei der Abteufung zweier abgelenkter Bohrungen bei einem vorgegebenen Lagerstättenprofil des Typs I. Die unterschiedlichen Kosten der beiden Bohrungen, vor allem die Kosten für die Verrohrung und den Ausbau, gleichen sich in etwa aus. Ablenkungen von 45° und 28° ergeben nur leichte Kostenreduzierungen.

	1.Bohrung		2.Bohrung		Gesamtkosten	
	Invest-kosten	Kapital-gebundene Kosten	Invest-kosten	Kapital-gebundene Kosten	Invest-kosten	Kapital-gebundene Kosten
Einheiten	[TDM]	[TDM/a]	[TDM]	[TDM/a]	[TDM]	[TDM/a]
<b>1 Bohrplatzeinrichtung</b>	533	43	314	25	847	68
<b>2 Abteufen der Bohrung</b>	513	41	1.061	85	1.574	127
<b>3 Spülung</b>	144	12	210	17	354	28
<b>4 Verrohrung</b>	919	74	1.668	134	2.587	209
<b>5 Zementation</b>	151	12	343	28	494	40
<b>6 Bohrlochvermessung</b>	143	11	157	13	300	24
<b>7 Ausbau der Bohrung</b>	423	165	106	9	529	174
<b>8 Bohrlochabschluß</b>	100	9	102	10	202	19
<b>9 Planungskosten</b>	292	24	396	32	689	55
<b>Summe</b>	<b>3.217</b>	<b>392</b>	<b>4.358</b>	<b>353</b>	<b>7.576</b>	<b>744</b>

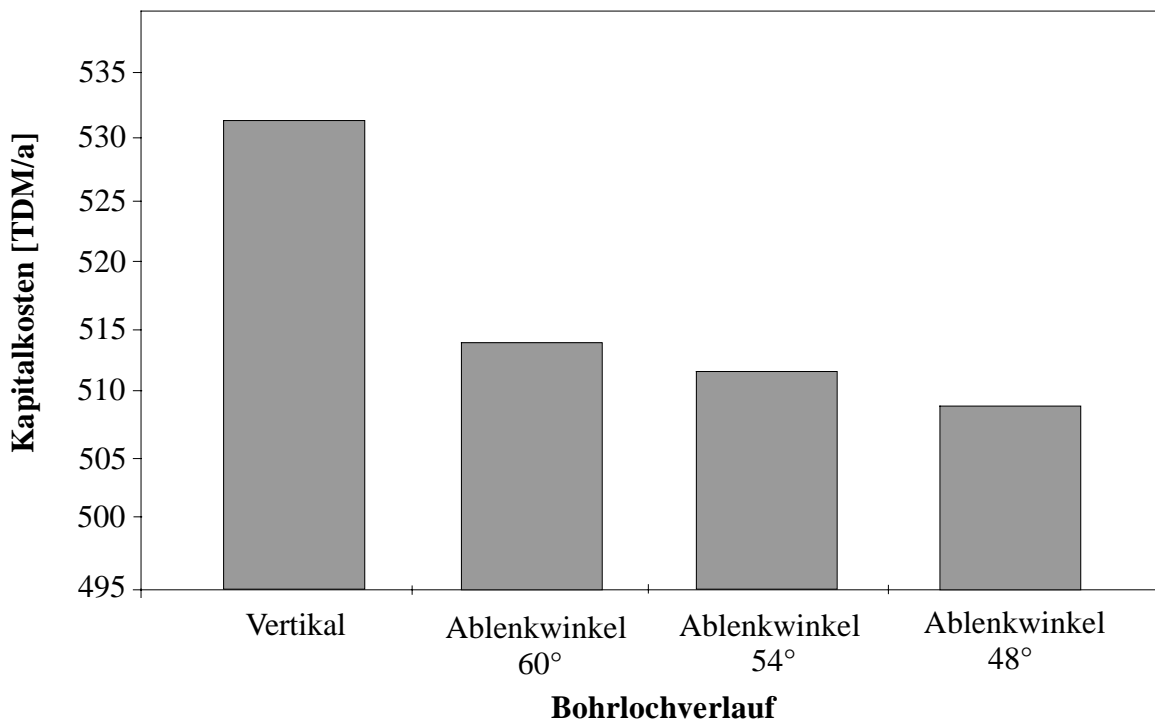
Tabelle 4-7: Lagerstätte Typ II; Kosten für zwei abgelenkte Bohrungen (60°)

## 4.2 Diskussion der Ergebnisse

Nachfolgend werden die in Kapitel 4.1 vorgestellten Ergebnisse verglichen und auf der Basis der jährlichen kapitalgebundenen Kosten (siehe Kapitel 3.3) eine kostenoptimale Aufschlußvariante ausgewiesen.

Lagerstätte Typ I:

Die kapitalgebundenen Kosten für den Aufschluß der Lagerstätte Typ I durch vertikale und abgelenkte Bohrungen sind in Abbildung 4-1 vergleichend dargestellt. Die höheren jährlichen kapitalgebundenen Kosten für den Aufschluß durch zwei vertikale Bohrungen gegenüber dem Aufschluß durch zwei abgelenkte Bohrungen ergeben sich in erster Linie dadurch, daß die finanziellen Mehraufwendungen in den Kostenpunkten Bohrplatzerstellung und Bohrlochabschluss die Einsparungen in dem Kostenpunkt Abteufen der Bohrung bei weitem übersteigen (vergleiche Tabellen 4-1, bis 4-3).

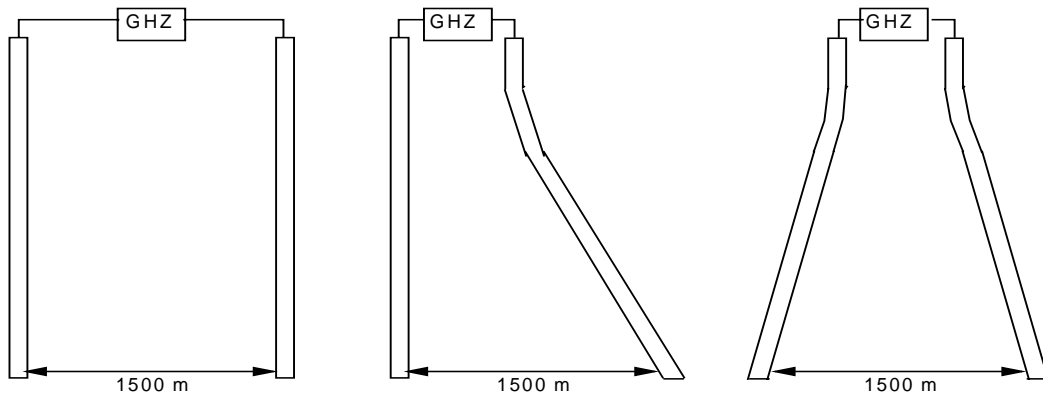


**Abbildung 4-1:** Vergleich der kapitalgebundenen Kosten für den Aufschluß der Lagerstätte Typ I

Die um 20 TDM/a höheren jährlichen kapitalgebundenen Kosten für die Bohrplatzeinrichtung bei zwei vertikalen Bohrungen sind in der Notwendigkeit des zweiten Bohransatzpunktes begründet. Die um ca. 70 TDM/a höheren jährlichen kapitalgebundenen Kosten für den Bohrlochabschluss sind auf die längere Verbindungsleitung zwischen Injektionsbohrung und geothermischer Heizzentrale zurückzuführen, die bei zwei abgelenkten Bohrungen eine Länge von 100 m und bei zwei vertikalen Bohrungen eine Länge von 1.400 m aufweist.

Für das Abteufen der Bohrung fallen bei zwei vertikalen Bohrungen um 45 TDM/a geringere jährliche kapitalgebundene Kosten an, gegenüber dem Aufschluß durch zwei abgelenkte Bohrungen mit einem Ablenkwinkel von 60°. Dies begründet sich zum einen durch die höheren spezifischen Bohrkosten pro Meter für das abgelenkte Bohren und zum anderen durch die unterschiedlichen Bohrlochlängen der verschiedenen Aufschlußvarianten (siehe Abbildung 4-2). Dieser Unterschied in den Bohrlochlängen ist auch die Hauptursache für die um etwa

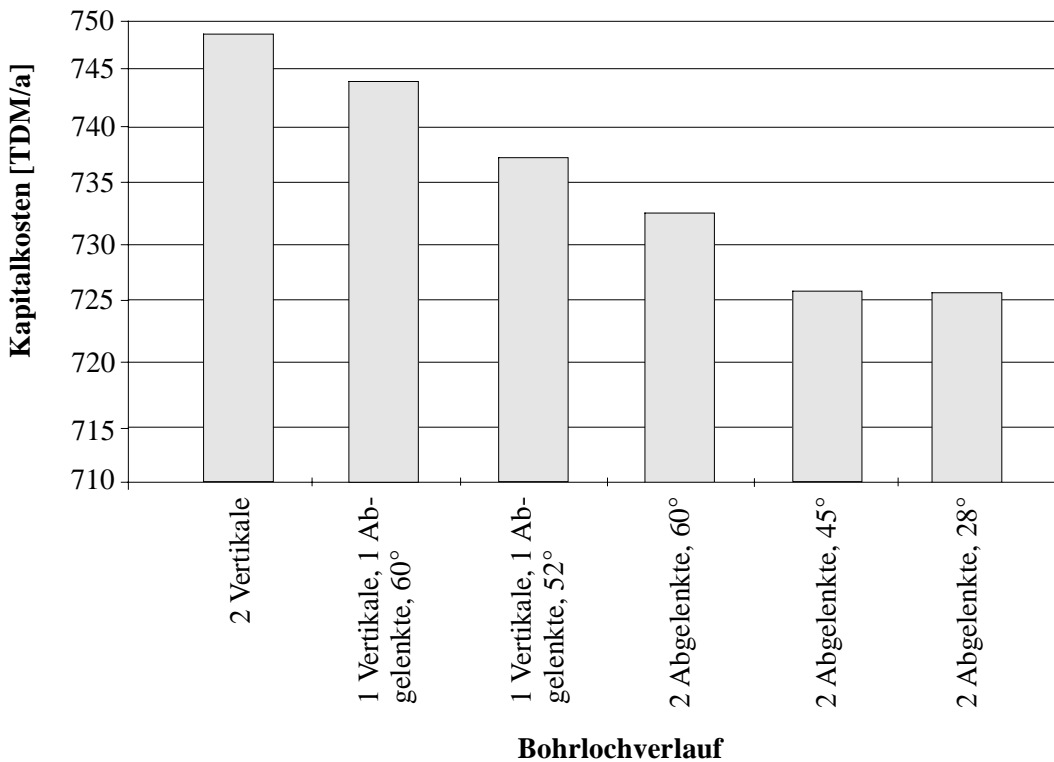
29 TDM/a höheren kapitalgebundenen Kosten für Spülung, Verrohrung, Zementation und Bohrlochvermessung zweier abgelenkter Bohrungen mit einem Ablenkwinkel von 60°.



**Abbildung 4-2:** Vergleich der Bohrlochlängen abgelenkter und vertikaler Bohrungen

Lagerstätte Typ II:

Für die Lagerstätte Typ II werden nachfolgend weiterhin die kapitalgebundenen Kosten für den Aufschluß durch eine vertikale und eine abgelenkte Bohrung untersucht. Die jährlichen kapitalgebundenen Kosten der untersuchten Aufschlußmöglichkeiten sind in Abbildung 4-3 aufgezeigt. Wie schon am Beispiel der Lagerstätte Typ I erläutert, ergeben sich durch die finanziellen Mehraufwendungen in den Kostenpunkten Bohrplatzerstellung und Bohrlochabschluss für den Aufschluß durch zwei vertikale Bohrungen die höchsten jährlichen kapitalgebundenen Kosten.

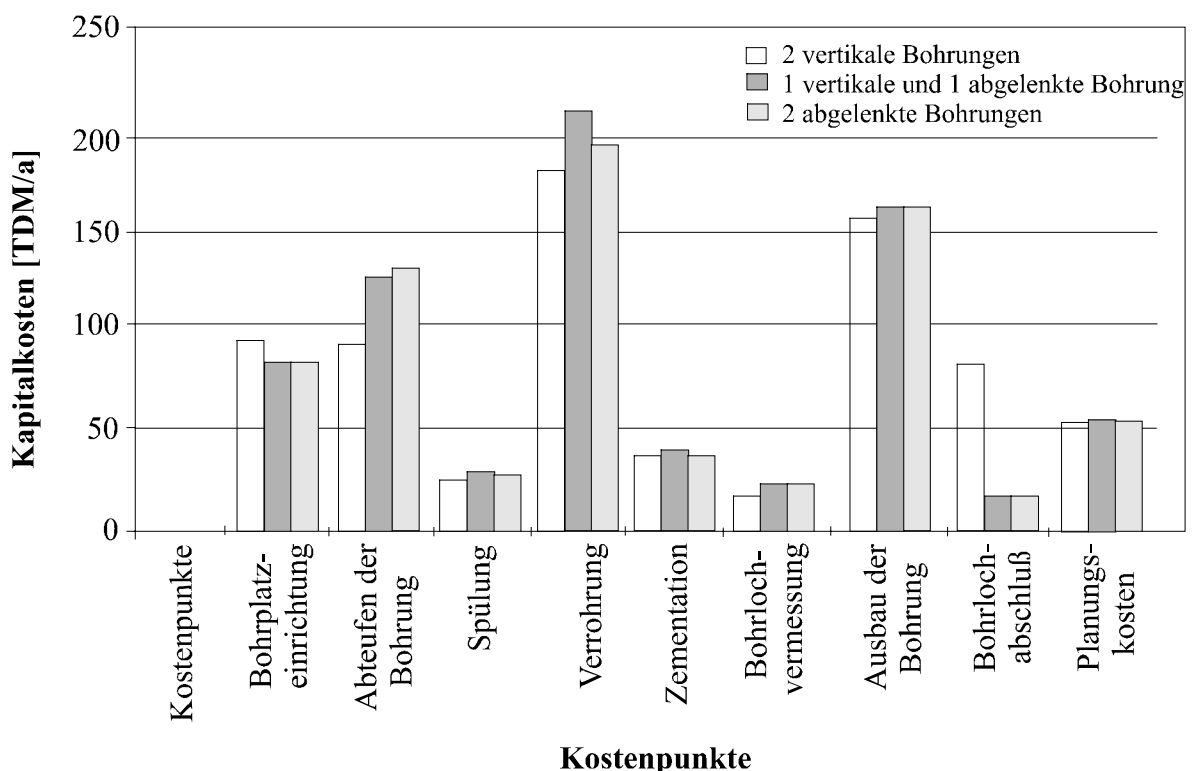


**Abbildung 4-3:** Vergleich der kapitalgebundenen Kosten für den Aufschluß der Lagerstätte Typ II



Für die Aufschlußvarianten durch zwei vertikale Bohrungen, eine abgelenkte und eine vertikale Bohrung sowie durch zwei abgelenkte Bohrungen ist in Abbildung 4-4 die Aufteilung der Kosten auf die verschiedenen Kostenpunkte dargestellt.

Die kapitalgebundenen Kosten für das Abteufen der Bohrung sind beim Aufschluß durch zwei vertikale Bohrungen mit 85 TDM/a um 35 % geringer als beim Aufschluß durch eine oder zwei abgelenkte Bohrungen. Die Kosteneinsparungen für das Abteufen einer vertikalen und einer abgelenkten Bohrung gegenüber zweier abgelenkter Bohrungen sind mit etwa 2.500 DM/a relativ gering. Die geringeren Kosten für das Abteufen der vertikalen Förderbohrung gleichen in etwa den Mehrkosten für das Abteufen der abgelenkten Injektionsbohrung. Diese Mehrkosten entstehen durch die größere Bohrlochlänge der Injektionsbohrung, die notwendig ist, um eine Ablenkweite von 1.500 m im Speicher zu erreichen.



**Abbildung 4-4:** Vergleich der jährlichen kapitalgebundenen Kosten aufgeschlüsselt nach Kostenpunkten

Beim Aufschluß durch zwei abgelenkte Bohrungen liegen die Kosten für Spülung, Verrohrung, Zementation, Bohrlochvermessung und Ausbau der Bohrung bei etwa 462 TDM/a. Durch die insgesamt größeren Bohrlängen betragen die kapitalgebundenen Kosten für Spülung, Verrohrung, Zementation, Bohrlochvermessung und Ausbau der Bohrung beim Aufschluß der Lagerstätte durch eine vertikale Förderbohrung und eine abgelenkte Injektionsbohrung etwa 475 TDM/a. Dies entspricht Mehrkosten von 3 % gegenüber dem Aufschluß durch zwei vertikale Bohrungen.

## 5 Zusammenfassung

Verschiedene Erschließungsmöglichkeiten hydrothormaler Ressourcen werden hinsichtlich eines Kostenoptimums untersucht. Zur Gewährleistung einer möglichst realistischen tech-

nisch-wirtschaftlichen Bewertung werden exemplarisch zwei geologische Profile aus dem Nordostdeutschen Becken herangezogen und drei unterschiedliche Aufschlußprinzipien, zwei vertikale, eine vertikale und eine abgelenkte sowie zwei abgelenkte Bohrungen, bei den nicht vertikalen unter Berücksichtigung der jeweils möglichen Ablenkungswinkel, betrachtet. Es werden Investitionskosten von der Bohrplatzeinrichtung bis hin zur Übergabe der Bohrungen für die Produktion erfaßt und daraus Gesamtinvestitionen und die jährlichen kapitalgebundenen Kosten ermittelt.

Sensitiv jeweils für die Kosten sind die Verbindungsleitung zwischen den Bohrungen und der geothermischen Heizzentrale, die Bohrplatzeinrichtung, der Bohrungsabschluß sowie die insgesamt größeren Bohrlochlängen bei einem Aufschluß mit einer abgelenkten Bohrung. Im Ergebnis variieren die Unterschiede aller durchgerechneten Szenarien innerhalb 5 % der Gesamtinvestitionen. Die Entscheidung für eine der Varianten kann daher nach lokalen Erfordernissen, z. B. Grundstückszugang, getroffen werden.

## 6 Literatur

- Beier, B., Hagusta GmbH, 77871 Renchen, Richtpreisliste für Brunnenausbaumaterial, unveröffentlicht, Stand Januar 1996.
- Böhm, F., Peper Montage GmbH & Co KG, Richtpreisliste für Rohrverlegearbeiten, unveröffentlicht, Stand Juli 1996.
- Förster, S., Bohrtechnischer Aufschluß thermalwasserführender Schichten und Herrichtung des Bohrloches für die Förderung, in: Geothermie - Wärme aus der Erde, 1. Auflage, Karlsruhe; Verlag C.F. Müller, 1991.
- Hamann, H., mündliche Information, Star Fiberglass Systems BV, Holland, 0031/541 520 401
- Horn, H., mündliche Information, Ingenieur bei der Geothermie Neubrandenburg GmbH, Besprechung in Neubrandenburg, August 1996.
- Jäpel, G., mündliche Information, Untergrundspeicher und Geotechnologie, Systeme GmbH; 15749 Mittenwale/Mark, Besprechung Juli 1997.
- Kabus, F., Die obertägige Verfahrenstechnik geothermischer Heizzentralen, in: Geothermie - Wärme aus der Erde, 1. Auflage, Karlsruhe; Verlag C.F. Müller, 1991.
- Polte, M., mündliche Information, Ingenieur bei der Firma Bohr-Knecht GmbH, Telefonat August 1996.
- Ruhlandt, J., terrawat GmbH, 85570 Markt Schwaben, Kostenannahme Geothermiebohrung, unveröffentlicht.
- Siebertz, T., Technisch-wirtschaftliche Aufschlußalternativen hydrothermalen Ressourcen zur Wärmebereitstellung, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Fachgebiete Entsorgungs- und Erdöltechnik, Institut für angewandte Geowissenschaften I, Technische Universität Berlin, 1996.
- Stoll, R.D., Auswertungen von Erfahrungen beim Bohren im Lockergestein bis etwa 700 m Tiefe, Bericht für die Rheinbraun AG; Aachen, 1991.
- Straubel, D., Technisch-wirtschaftliche Analyse einer hydrothermalen Nutzenergiebereitstellung, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Fachgebiete Entsorgungs- und Erdöltechnik, Institut für angewandte Geowissenschaften I, Technische Universität Berlin, 1996.

