

BVEG

Leitfaden

Geologische Risikobewertung tiefengeothermischer Projekte

Stand: 03/2024



Erstellt in Zusammenarbeit mit der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe e.V. (DGMK) im Rahmen der DGMK Projektgruppe Risikobewertung.

Bundesverband Erdgas,
Erdöl und Geoenergie e. V.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	3
1.1.	Zielsetzung des Leitfadens.....	3
1.2.	Kontext und Abgrenzung.....	3
1.3.	Geologische Unsicherheiten.....	3
1.4.	Die geologische Datenbasis.....	4
2.	Begriffe und Abkürzungen	4
2.1	Begriffe	4
2.2	Abkürzungen.....	7
3.	Die geologische Bewertung im Rahmen des geothermischen Projektmanagements	8
3.1	Geologische Bewertung innerhalb der Projektidentifizierung (Phase 1)	8
3.2	Geologische Bewertung innerhalb von Machbarkeitsstudie und Konzepterstellung (Phase 2)	9
3.3	Geologische Bewertung innerhalb der Detailplanung (Phase 3).....	10
4.	Die geologische Erfolgswahrscheinlichkeit	10
5.	Die operative Erfolgswahrscheinlichkeit.....	12
6.	Analyse der geologischen Parameterverteilungen	12
7.	Qualitätskontrolle der geologischen Bewertung	14
8.	Auswahl der Szenarien für die Wirtschaftlichkeitsberechnung	14
9.	Auswahl der Szenarien für die technische Detailplanung.....	15
10.	Empfehlungen zum Umgang mit geologischen Unsicherheiten und zur Risikostreuung	15
11.	Weiterführende Literatur.....	16

Kontakt bei Fragen zum Leitfaden:

Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG)

Schiffgraben 47

30175 Hannover

Tel.: 0511 121 72-0

E-Mail: info@bveg.de

1. Einleitung

1.1. Zielsetzung des Leitfadens

Der vorliegende Leitfaden wurde in Zusammenarbeit mit der DGMK und dem BVEG erstellt und richtet sich an alle mit tiefer Geothermie befassten Institutionen und Personen, wie beispielsweise Investoren, Versicherer, Planer, Projektentwickler, Betreiber, Aufsichts- oder Genehmigungsbehörden.

Inhaltlich bietet der Leitfaden eine standardisierte und allgemein anwendbare Methodik zum Umgang mit geologischen Unsicherheiten in der offenen hydro- und petrothermalen Energiegewinnung. Ziel ist eine transparente und übertragbare/wieder verwendbare Anleitung zur Bewertung und Quantifizierung der geologischen Erfolgswahrscheinlichkeit und Variabilität.

Ein solches geologisches Bewertungsverfahren ist für einen verantwortungsvollen und wirtschaftlichen Umgang mit Investitions- und Fördermitteln unerlässlich. Die Quantifizierung der geologischen Erfolgswahrscheinlichkeit ist die notwendige Grundlage für oder auch gegen Investitionsentscheidungen. Darüber hinaus ermöglicht das Bewertungsverfahren eine nachvollziehbare Prognose der Bandbreite möglicher geologischer Szenarien sowie ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten. Nur auf dieser Grundlage können unter- und obertägige Planungen sachgerecht durchgeführt und die damit verbundenen Kosten realistisch abgeschätzt werden.

Der vorliegende Leitfaden beschreibt einen allgemein gültigen Bewertungsprozess. Die dabei anzuwendenden technischen und geologischen Methoden können je nach den spezifischen geologischen Bedingungen variieren.

Der Leitfaden bezieht sich vornehmlich auf Einzelprojekte, ist aber auch auf einen Portfolioansatz mit mehreren Projekten anwendbar.

1.2. Kontext und Abgrenzung

Der vorliegende Leitfaden betrachtet hydrothermale Systeme mit mehreren Bohrungen, die tiefer als 400 Meter abgeteuft werden sollen. Der Fokus liegt auf Projekten in Deutschland. Es werden Systeme auf ihre Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit untersucht, bei denen das Thermalwasser in flüssiger Form nicht nur durch die Bohrungen, sondern auch durch das Gestein fließt. Er ist sowohl für Explorationsbohrungen (regionale Erst-Bohrungen) als auch für Produktionsbohrungen (Folgebohrungen in einem nachgewiesenen geothermischen System) anwendbar. Für petrothermale und geschlossene Systeme („Closed Loop“) oder Untertagewärmespeicherung ist der Leitfaden unter Berücksichtigung ihrer Spezifika ebenfalls anwendbar.

Unabhängig von der Energieanwendung (Wärme, Strom) werden nur die geologischen Faktoren betrachtet, die den wirtschaftlichen Erfolg eines Tiefengeothermieprojektes beeinflussen, wie Temperatur, Förder- und Versenkmenge (Schüttung) und Wasserchemie. Andere geologisch bedingte Themen wie mögliche Seismizität oder der Grundwasserschutz, dessen Betrachtung integraler Bestandteil jeder Bohrplanung sind, werden hier nicht adressiert.

Die wesentlichen Aspekte einer sicheren und optimierten betrieblichen Durchführung von Bohr- und Komplettierungsarbeiten werden in weiteren BVEG-Leitfäden umfassend dargestellt.

1.3. Geologische Unsicherheiten

In diesem Leitfaden wird zwischen geologischen Erfolgswahrscheinlichkeiten und geologischen Parameterverteilungen unterschieden. Beide müssen vor der Investitionsentscheidung und vor dem finalen Konzept-Design quantifiziert werden.

- Die geologische Erfolgswahrscheinlichkeit definiert quantitativ die Erfolgsaussichten eines technisch (nicht unbedingt wirtschaftlich) erfolgreichen Projektes. Der Nicht-Eintrittsfall („Misserfolg“) kann zum vollständigen Ausfall des offenen geothermischen Systems und damit zur vollständigen Abschreibung der Investitionen führen. Eine Fehlbohrung kann z.B. durch das Nichtvorhandensein oder die vollständige natürliche Zementation/Dichtheit des Aquifers (siehe Kapitel 4) eintreten.
- Im Gegensatz dazu, beschreiben die geologischen Parameterverteilungen die natürliche Variabilität und damit die begrenzte Vorhersagbarkeit nahezu aller geologischen Parameter, die innerhalb eines funktionierenden geothermischen Systems zu unterschiedlichen Leistungen bzw. Wirtschaftlichkeit führen können. Beispiele hierfür sind die angetroffenen Temperaturen oder die Durchlässigkeit des Aquifers mit direktem Einfluss auf die Schüttungsrate (siehe Kapitel 6).
Der wirtschaftliche Erfolg geothermischer Projekte wird somit unmittelbar von den Eigenschaften des geologischen Untergrundes bestimmt. Der geologische Untergrund in Deutschland ist durch große regionale Unterschiede gekennzeichnet. Dementsprechend ist auch die Eignung für offene geothermische Systeme regional sehr unterschiedlich und bedarf einer genauen geologischen Analyse.

1.4. Die geologische Datenbasis

Die Vorhersagbarkeit geologischer Bohrergebnisse hängt neben der natürlichen Variabilität auch von der Qualität und Dichte der geologischen Daten ab. Je weniger Daten und Kenntnisse über den geologischen Untergrund im Projektgebiet vorhanden sind, desto weniger ist bekannt, welche Bohrergebnisse zu erwarten sind und ob überhaupt ein tragfähiges System vorzufinden ist. Daher ist eine ausreichende Datenbasis und -analyse sowohl für (oder ggf. auch gegen) die Investitionsentscheidung als auch für das richtige Design zwingend erforderlich. Unerlässlich für eine ausreichende Datenbasis über den tieferen geologischen Untergrund sind:

- benachbarte Bohrungsdaten (typischerweise Stratigraphie, Bohrlochmessungen der Aquifereigenschaften, Gasgehalte, Fazies-Informationen, Temperaturmessungen, Bohrkern und deren labortechnische Untersuchung, etc.),
- Informationen zum Wasserchemismus und
- seismische Daten, idealerweise in 3D mit hoher Auflösung in der Zieltiefe.

Die Analyse der zur Verfügung stehenden Datensätze erfordert die technischen und fachlichen Voraussetzungen, um diese kompetent verarbeiten und interpretieren zu können. Selbst qualitativ gute geologische Daten sind oft nicht eindeutig und bedürfen der Bewertung durch erfahrene Geologen und Geophysiker.

2. Begriffe und Abkürzungen

2.1 Begriffe

- **Aquifer:**
Ein Aquifer ist ein Grundwasserleiter, eine poröse Gesteinsschicht mit miteinander verbundenen Poren, die mit Wasser gefüllt sind. Für die hydrothermale Energiegewinnung aus einem offenen geothermischen System ist ein Aquifer unerlässlich. Das Netto/Brutto-Verhältnis gibt den prozentualen Anteil des Aquifers mit ausreichenden Fließeigenschaften an.
- **Dublette / Cluster:**
Eine Dublette ist ein geothermisches System mit zwei Bohrungen – einer Produktionsbohrung, aus der heißes Wasser an die Oberfläche gefördert wird und einer Injektionsbohrung, aus der das

abgekühlte Wasser wieder in den Untergrund zurückgeführt wird. Geothermische Cluster sind erweiterte Systeme mit mehreren Produktions- und Injektionsbohrungen.

- **Energiegewinnung, hydrothermal:**

In einem hydrothermalen System wird heißes Thermalwasser aus einem tiefen Aquifer an die Oberfläche gefördert, um die Wärme zum Heizen oder zur Stromerzeugung zu nutzen.

- **Energiegewinnung, petrothermal:**

Das petrothermale System ist unabhängig von wasserführenden Horizonten im Untergrund. Wasser (oder andere Medien) werden von der Oberfläche aus in natürliche oder zu diesem Zweck geschaffene tiefe Kluftsysteme (dreidimensional verbundenes Spaltensystem, z.B. in einem Granit) injiziert. Das dort erwärmte Wasser (Medium) wird wieder zurück an die Oberfläche gefördert, wo die Wärme genutzt wird.

- **Fazies:**

Die Gesamtheit der Eigenschaften (z.B. Porosität, Durchlässigkeit) einer Gesteinsschicht, die unter spezifischen Bedingungen abgelagert wurde.

- **Geothermische Systeme, geschlossen:**

Bei geschlossenen Systemen gibt es keinen direkten Kontakt zwischen Tiefenwässern und dem thermischen Medium. Stattdessen zirkuliert das Medium untertage ausschließlich innerhalb von Bohrlöchern („Closed-Loop-Systeme“).

- **Geothermische Systeme, offen:**

Bei offenen Systemen steht das Wasser als thermisches Medium in direktem Kontakt mit den Gesteinsformationen des Untergrundes. Entweder wird das heiße Thermalwasser an die Oberfläche gefördert (hydrothermale Energiegewinnung) oder das Wasser wird von Obertage in natürliche oder künstliche Wegsamkeiten des heißen Untergrundes injiziert und zurückgefördert (petrothermale Energiegewinnung).

- **Kernanalyse:**

Beim Bohren in tiefen Gesteinsschichten können geologische Proben (Bohrkerne) an die Oberfläche befördert werden, die direkte Informationen über Gesteinseigenschaften, z.B. eines Aquifers, erlauben.

- **Log-Auswertung:**

„Logs“ sind in diesem Zusammenhang physikalische Bohrlochmessungen, die Informationen über die Eigenschaften der erbohrten Gesteinsformationen liefern. Die Log-Korrelation erlaubt die Extrapolation geologischer Strukturen zwischen den Bohrungen (in der Kombination mit Seismik). Die Log-Auswertung erlaubt auch die quantitative Bestimmung von Gesteinsparametern, wie z.B. der Porosität des Aquifers.

- **Peer Review:**

Ein Peer Review ist die Bewertung einer komplexen Analyse durch unabhängige Experten desselben Fachgebiets (Peers). Im Rahmen dieses Leitfadens sind die Peers erfahrene Geowissenschaftler – entweder aus anderen Abteilungen (bei Großunternehmen) oder aus anderen Unternehmen. Bei der Bewertung der geologischen Risiken geht es darum, die Annahmen und Schlussfolgerungen der geologischen Analyse kritisch zu hinterfragen und so frühzeitig Fehler oder Lücken aufzudecken.

- **Play, geothermisches:**
Der Begriff bezeichnet eine bestimmte geologische Konstellation im Untergrund, die zur Gewinnung geothermischer Energie geeignet ist. Diese kann regional sehr unterschiedlich sein, gleichzeitig können an einem Ort auch mehrere mögliche Plays übereinander vorliegen.
- **Reservoir:**
Ein Reservoir ist eine Gesteinsformation, aus der etwas gefördert werden kann. Bei hydrothermalen Systemen ist dies der Aquifer.
- **Risiko:**
Risiko ist die negative Auswirkung multipliziert mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit.
- **Scaling:**
Chemisch-physikalischer Prozess, bei dem z.B. durch Druck- oder Temperaturänderungen Feststoffe aus dem Thermalwasser ausfallen und sich ablagern. Dies kann im Gestein in der Nähe einer Bohrung, im Bohrloch oder in den obertägigen Anlagen geschehen und kann dabei z.B. Fließwege verengen oder verstopfen.
- **Schüttung:**
In diesem Kontext die maximal mögliche Förderrate des Thermalwassers aus einem Aquifer (in der Regel in Litern pro Sekunde).
- **Schüttung, technische:**
Eine technische Schüttung setzt ein funktionierendes fließendes System voraus, deren Förderrate nicht notwendigerweise eine Wirtschaftlichkeit einschließt.
- **Seismik:**
Eine etabliertes Messverfahren, bei dem obertägig erzeugte Schallwellen in den geologischen Untergrund gesendet werden, die an physikalischen Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Gesteinsschichten im Untergrund reflektiert und anschließend an der Oberfläche von Sensoren erfasst werden. Daraus lassen sich Lage und Form der Gesteinsschichten im Untergrund bestimmen. Bei der 2D-Seismik erfolgt die Beschallung entlang einer Linie (z.B. entlang einer Straße) und erzeugt das Bild eines vertikalen Schnittes durch den Untergrund. Bei der 3D-Seismik wird ein dreidimensionales Bild des Untergrundes erzeugt. Dazu werden Erschütterungsquellen und Sensoren flächig (schachbrettartig) an der Oberfläche angeordnet. Eine 3D-Seismik ist aufwändiger als eine 2D-Seismik, aber auch wesentlich aussagekräftiger.
- **Seismische Zeit-Tiefen-Wandlung:**
Seismische Aufzeichnungen basieren auf Schallwellenbildern. Um sie in Tiefenprognosen umzuwandeln, werden die Laufzeiten der Schallwellen mit den Schallwellengeschwindigkeiten der betroffenen Gesteine multipliziert.
- **Stage-Gate-Prozess:**
Dieser beschreibt einen etablierten Managementprozess für die Entscheidung für oder gegen die Durchführung großer Investitionsprojekte.
- **Unsicherheit, geologische:**
Die geologische Unsicherheit umfasst sowohl die Erfolgswahrscheinlichkeit als auch die Variabilität einzelner Parameter. Vereinfacht ausgedrückt quantifiziert die Erfolgswahrscheinlichkeit die Chance, „dass der Angler einen Fisch fangen wird“, und die Variabilität beschreibt die „mögliche Größe des zukünftigen Fangs“.

- **Untergrund, geologischer:**

Der geologische Untergrund in Deutschland ist regional sehr unterschiedlich ausgeprägt. Er bestimmt, ob und mit welcher Methode geothermische Energiegewinnung in einem Gebiet möglich ist.

2.2 Abkürzungen

- **DHC**
dry hole cost (Kosten einer nicht-fündigen Bohrung)
- **EMV**
expected monetary value (Erwartungswert)
- **NPV**
net present value (Nettobarwert)
- **P10**
Punkt bei einer kumulativen Wahrscheinlichkeitskurve, bei der eine 10 % Wahrscheinlichkeit besteht, dass der später tatsächlich erreichte Wert größer ist (dies stellt typischerweise den optimistischen Fall dar)
- **P50**
Punkt bei einer kumulativen Wahrscheinlichkeitskurve, bei der eine 50 % Wahrscheinlichkeit besteht, dass der später tatsächlich erreichte Wert größer ist (dieser Median stellt typischerweise den Basis-Fall dar)
- **P90**
Punkt bei einer kumulativen Wahrscheinlichkeitskurve, bei der eine 90 % Wahrscheinlichkeit besteht, dass der später tatsächlich erreichte Wert größer ist (dies stellt typischerweise den konservativen Fall dar)
- **POS_g**
Probability of Success (geological), geologische Erfolgswahrscheinlichkeit
- **POS_o**
Probability of Success (operational), die operative Erfolgswahrscheinlichkeit
- **POS_t**
Probability of Success (technical), die technische Erfolgswahrscheinlichkeit (**POS_g x POS_o**)
- **POS_{w(t)}**
Probability of Success (wirtschaftlich), die abhängige wirtschaftliche Erfolgswahrscheinlichkeit unter der Annahme einer technischen Fündigkeit
- **POS_{gesamt}**
die wirtschaftliche Erfolgswahrscheinlichkeit des Gesamtprojektes (**POS_t x POS_{w(t)}**)

3 Die geologische Bewertung im Rahmen des geothermischen Projektmanagements

Für die Planung und Entscheidung von Tiefengeothermieprojekten wird ein vereinfachter Stage-Gate Prozess, gemäß Abbildung 1, vorausgesetzt (bei komplexeren Projekten kann Gate 2 auch zweistufig durchgeführt werden).

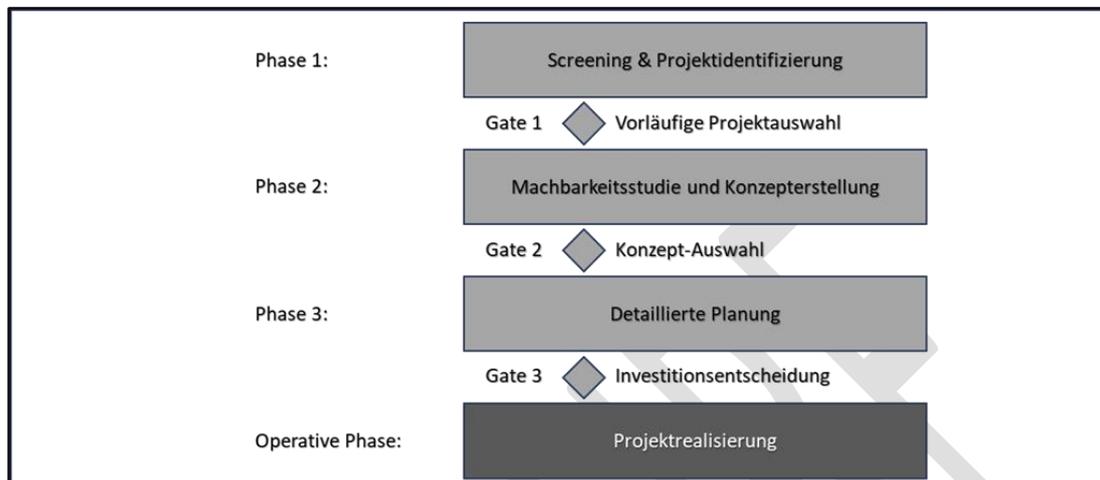


Abbildung 1: Geothermischer Stage-Gate Prozess

3.1 Geologische Bewertung innerhalb der Projektidentifizierung (Phase 1)

In der Screening-Phase (auch „Standortcheck“ genannt) werden grundlegende Untersuchungen zur ober- und untertägigen Eignung eines Gebietes für die tiefe Geothermie durchgeführt. Diese Phase ist in der Regel kostengünstig. Auf Basis vorhandener geologischer Daten wird eine erste Abschätzung des möglichen geothermischen Potenzials vorgenommen. Die geologische Datenbasis setzt sich dabei aus öffentlich zugänglichen Daten (LIAG, Studien der Länder, wissenschaftliche Publikationen) und Daten, die nach dem Geologiedatengesetz von den Bergämtern oder privaten Unternehmen (z.B. der Erdöl- und Erdgasindustrie) zur Verfügung gestellt werden, zusammen.

Die folgenden Fragen sollten in der Screening-Phase beantwortet werden:

- Gibt es in der Nähe bereits Tiefbohrungen in vergleichbaren geologischen Verhältnissen?
- Welche Erfolgsstatistik und welche thermische Ausbeute haben die bereits erfolgten Geothermiebohrungen in der Region?
- Welches sind die möglichen geothermischen Plays?
- Welche geologischen Parameter bergen die größten Unsicherheiten für eine geothermische Nutzung?
- Welche Tiefen, Temperaturen und Fließraten weisen benachbarte Projekte auf?
- Welche Parameter werden in Ermangelung benachbarter Referenzprojekte angenommen und worauf basieren die Annahmen?
- Welche geologische Datenbasis steht zur Verfügung? (Siehe Kapitel 1.4.)
- Welche zusätzlichen Daten müssen ggf. erhoben werden (z.B. Datenankauf, seismisches Reprocessing, neue 2D- oder 3D-Seismik)?

Ergibt die Screening-Phase ein grundsätzlich vorhandenes Potenzial, werden die Ergebnisse in einer Vorstudie zur Machbarkeit zusammengefasst, die die folgenden Punkte für eine wirtschaftliche Projektidentifizierung beinhaltet (Gate 1):

- Abschätzung der Kosten für eine ggf. erforderliche Datenbeschaffung
- Tiefenabhängige Abschätzung der Bohrkosten
- Grobe Abschätzung der geologischen Erfolgswahrscheinlichkeit gemäß Kapitel 4
- Von-Bis-Abschätzung der möglichen thermischen Ausbeute (Temperatur, Delta T, Schüttung) gemäß Kapitel 6

Diese grundlegenden geologischen Rahmenbedingungen führen zusammen mit den Ergebnissen der parallel durchgeführten Vorbewertung der obertägigen Bedingungen (z.B. Wärmeabnahmepotenzial, Netzausbauplanung) zu einer ersten, noch groben Wirtschaftlichkeitsberechnung. Diese bildet die Grundlage für den ersten Entscheidungspunkt (Gate 1), an dem das Projekt entweder beendet oder in die nächste Phase, Machbarkeitsstudie und Konzepterstellung, überführt wird. In dieser Phase wird auch die Technologieentscheidung getroffen, ob ein Projekt besser im offenen (hydro- oder petrothermalen) oder im geschlossenen (Closed-Loop) System, ggf. als Back-up-Option, weiterverfolgt wird.

3.2 Geologische Bewertung innerhalb von Machbarkeitsstudie und Konzepterstellung (Phase 2)

In Phase 2 werden alle geologischen Detailarbeiten von der Datenakquisition bis zur Modellierung des Reservoirs durchgeführt.

- Die Datenakquisition umfasst unter anderem
 - Datenkauf von vorhandenen Bohrungs- und Seismik-Daten
 - Akquisition eigener 2D- und 3D-Seismik
- Bohrungsdatenanalyse
 - Log-Auswertung und quantitative Parameterbestimmung (Temperatur, Porositäten, etc.)
 - Regionale Log-Korrelation
 - Bohrkernanalyse, Faziesbestimmung, Fazieskartierung, Parameterkarten
 - Untersuchungen zum Wasserchemismus
- Seismikdatenanalyse
 - Processing und Zeit-Tiefen-Streckung
 - Seismische Interpretation und Kartierung
 - Seismische Attributanalyse
 - Analyse der Störungs- und Kluftsysteme
- Detaillierte Störungskartierung
 - Spannungsplananalyse
 - Abschätzung, inwieweit Klüfte offen oder abgedichtet sind
 - Identifizierung der bevorzugten Richtung offener Klüfte
- Analyse des Risikos induzierter Seismizität
 - Untersuchung der natürlichen Seismizität
 - Hydraulische Analyse der seismologischen Reaktivierbarkeit von Störungen
 - Untersuchung und Modellierung des Einflusses von Wasserentnahme und Reinjektion
- Modellierungen und Simulationen
 - Thermische Modellierung und Simulation
 - Reservoirmodellierung und -simulation

Die aufgeführten Arbeiten werden im Rahmen einer umfassenden Machbarkeitsstudie zusammengefasst. Auf dieser Basis erfolgt die fundierte Abschätzung der konkreten geologischen Erfolgswahrscheinlichkeit nach Kapitel 4 sowie die Abschätzung der natürlichen Parameter-Variabilitäten gemäß Kapitel 6. Am Ende der Phase 2 sollten alle Eingangsparameter für eine wahrscheinlichkeitsbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse

vorliegen. Diese sollte auch die Abschätzung der operativen Erfolgswahrscheinlichkeit gemäß Kapitel 5 berücksichtigen. Dies alles bildet die Grundlage für den zweiten Entscheidungspunkt, der im positiven Fall zur Konzeptauswahl für die nun folgende Detailplanung führt.

Bei komplexeren Projekten kann Phase 2 auch in Phase 2a Machbarkeitsstudie und Phase 2b Konzepterstellung unterteilt werden. Diese Phasen durchlaufen dann jeweils ein entsprechendes Gate.

3.3 Geologische Bewertung innerhalb der Detailplanung (Phase 3)

In dieser Phase sind die geologischen Untersuchungen des untertägigen geothermischen Systems bereits abgeschlossen. Geologisch bedingte Betriebsrisiken, z.B. hinsichtlich Seismizität, Korrosion oder Scaling werden in dieser Phase betrachtet und in der Detailplanung gemindert. Ebenso werden hier wesentliche Planungselemente für die geothermischen Bohrungen abgeleitet, unter anderem eine detailliertere Ausarbeitung:

- Geologisches Vorprofil, Identifikation bohrtechnisch problematischer Gesteinsformationen
- Druckvorhersagen zur Festlegung der Spülgewichte
- Festlegung der Verrohrungshorizonte

sowie:

- Richtungs- und Ablenkungsplanung, auch in Abhängigkeit von den Kluftrichtungen
- Erstellung des Entscheidungsbaumes für die Durchführung der Bohrungen

Die abschließende Verfeinerung des Wirtschaftlichkeitsmodells führt zum letzten Entscheidungspunkt, der endgültigen Investitionsentscheidung.

4 Die geologische Erfolgswahrscheinlichkeit

Ein Ziel der umfangreichen geologischen Analysen ist die quantitative Bestimmung der geologischen Erfolgswahrscheinlichkeit. Unabhängig vom möglichen wirtschaftlichen Erfolg sind für ein funktionierendes offenes, hydrothermales geothermisches System die folgenden vier technischen Ausgangsvoraussetzungen zwingend erforderlich, verbunden mit vier zu beantwortenden Fragen:

1. Ein geothermischer Aquifer muss vorhanden sein (Poren- oder Kluftaquifer oder kombiniertes System).

→ **POS**_{Aquiferexistenz}

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Aquifer unabhängig von seiner Qualität in beiden Bohrungen vorhanden ist?

2. Die Qualität des Aquifers muss für eine technische Schüttung ausreichend sein, sowohl auf der Produktions- als auch auf der Injektionsseite.

→ **POS**_{Aquiferqualität}

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Aquifer eine ausreichende Qualität für technische Schüttung aufweist?

3. Die beiden Bohrungen einer Dublette müssen ausreichend hydraulisch verbunden sein, um langfristig einen Druckausleich zu gewährleisten. Gleichzeitig muss ein zu rascher „Kurzschluss“ zwischen beiden Bohrungen durch hinreichenden Abstand der Bohrungen ausgeschlossen werden.

→ **POS**_{Kommunikation}

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Aquifer zwischen den beiden Bohrungen einer Dublette eine hinreichende hydraulische Kommunikation aufweist, so dass weder die Entnahmestelle depletiert,

noch die Einspeisestelle Druck aufbaut, aber auch ohne, dass das abgekühlte Wasser sofort wieder recycelt wird (hydraulischer Kurzschluss)?

- Das geförderte Thermalwasser muss einen Chemismus aufweisen, der in Bezug auf Ausfällungen und Korrosion für einen langfristigen Betrieb der Anlagen geeignet ist.

→ POS_{Chemie}

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass das geförderte Wasser weder zu übermäßiger Korrosion noch zu Ausfällung (Scale-Bildung) neigt?

Das Produkt der hier gelisteten Einzelwahrscheinlichkeiten entspricht der geologischen Erfolgswahrscheinlichkeit POS_g :

$$POS_g = POS_{\text{Aquiferexistenz}} \times POS_{\text{Aquiferqualität}} \times POS_{\text{Kommunikation}} \times POS_{\text{Chemie}}$$

Ausdrücklich wird hier die Wahrscheinlichkeit des technischen Erfolges berechnet, d.h. dass warmes Wasser fließt und wieder verpresst werden kann. Wesentliche wirtschaftliche Variablen wie eine ausreichend hohe Fördertemperatur (und damit nutzbares Delta T) oder die minimale Fließrate bleiben hier unberücksichtigt, werden aber bei der Analyse der geologischen Parameterverteilungen sehr genau betrachtet (Kapitel 6). Für petrothermale Systeme können teilweise andere Komponenten der POS_g relevant sein.

Zur Unterstützung der geologischen Wahrscheinlichkeitsanalyse wird hier die sogenannte Chance Adequacy Matrix nach P.R. Rose (2001) empfohlen (siehe eine modifizierte Fassung in Abbildung 2). Jedem der vier oben definierten Wahrscheinlichkeitsfaktoren wird hier ein Feld und ein spezifischer Faktor zwischen 0,0 und 1,0 zugeordnet. Dazu wird die geologische Tendenz der Information auf der Horizontalachse, die Datendichte und -qualität auf der Vertikalachse abgetragen. Z.B. würde eine verbreitet regionale Ausbildung eines Aquifers als „Gute Nachricht“ (rechte Spalte der Matrix) für die $POS_{\text{Aquiferexistenz}}$ eingestuft werden. Je mehr Bohrungen dies auch in der Nähe des geplanten Projektes belegen, umso besser die Datenbasis, womit sich der Faktor innerhalb der rechten Spalte nach oben bewegen kann.

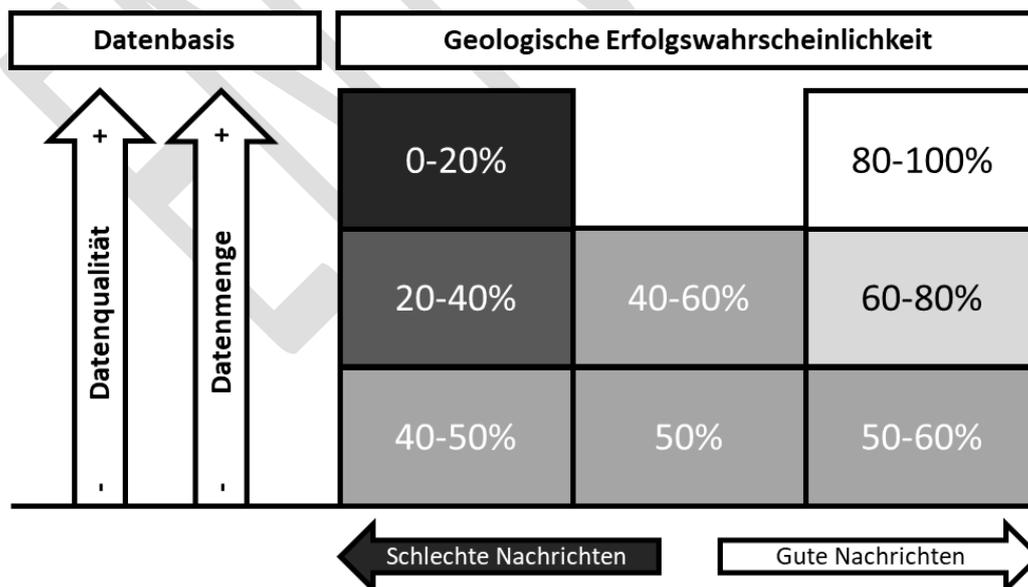


Abbildung 2: Chance Adequacy Matrix, modifiziert nach P.R. Rose (2001)

Die besondere Stärke dieser Matrix liegt darin, dass sie neben den geologischen Befunden auch die Datenqualität bei der Ermittlung der geologischen Erfolgswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Hochauflösende Datensätze können ein Projekt sowohl disqualifizieren (oben links) als auch maturieren (oben rechts). Unzureichende Daten können den einzelnen Wahrscheinlichkeitsfaktor auch im positiven Fall kaum größer als 0,6-0,8 werden lassen.

5 Die operative Erfolgswahrscheinlichkeit

Die operative Erfolgswahrscheinlichkeit **POS_o** quantifiziert die Wahrscheinlichkeit, das geothermische Ziel mit den beiden Bohrungen einer Dublette operativ erfolgreich zu erschließen. Bei der Bestimmung von **POS_o** werden die Komplexität des Bohrungsdesigns sowie die eingesetzten Bohr-, Komplettierungs- und anderen Erstellungstechniken berücksichtigt, insbesondere wenn diese von etablierten Verfahren abweichen.

Das Produkt der geologischen und der operativen Erfolgswahrscheinlichkeit beschreibt die technische Erfolgswahrscheinlichkeit **POS_t**.

$$POS_t = POS_g \times POS_o$$

6 Analyse der geologischen Parameterverteilungen

Die in den Kapiteln 4 und 5 berechnete technische Erfolgswahrscheinlichkeit **POS_t** eines Projektes quantifiziert den technischen Erfolg einer Dublette: warmes Wasser kann produziert und re-injiziert werden. Dies schließt ausdrücklich auch unwirtschaftliche Fälle ein.

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit und zur Auswahl des geeigneten Projektdesigns müssen die Verteilungen der geologischen Parameter betrachtet werden. Eine genaue Vorhersage der geologischen Parameter in der Tiefe ist aufgrund unvollständiger Daten und vor allem aufgrund der natürlichen Komplexität nicht möglich. Daher werden stattdessen statistische Vorhersage-Verfahren verwendet.

Folgende Parameter sind für eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit maßgeblich:

Die Temperatur (und damit **Delta T**) eines geothermischen Systems wird durch folgende Variablen kontrolliert:

- Geothermischer Gradient: Dieser ist in den unterschiedlichen geologischen Becken und Regionen Deutschlands bekannt, kann aber lokalen Schwankungen unterliegen.
- Tiefe des Aquifers (je tiefer, desto wärmer): Die Vorhersagegenauigkeit der Tiefenlage hängt von der seismischen Qualität, der seismischen Zeit-Tiefen-Wandlung und der Kontrolle durch benachbarte Bohrungen ab.

Die Schüttung **Q** berechnet sich aus den folgenden geologischen Parametern, die in der Regel eine hohe geologische Variabilität aufweisen:

- Gesamtmächtigkeit des Aquifers
- Netto/Brutto-Verhältnis innerhalb des Aquifers
- Porosität des Aquifers
- Durchlässigkeit des Aquifers, abgeleitet u.a. aus der Porosität über die Poro/Perm-Beziehung
- Mögliche Injektionsdrücke
- Bei geklüfteten Aquiferen kann hier auch u.a. die Zahl der offenen Klüfte berücksichtigt werden

Die Erfahrung zeigt, dass geologische Parameter häufig einer log-normalen Verteilung folgen. Bei ausreichender Datendichte können mit Hilfe statistischer Verfahren auch andere, individuelle

Verteilungsgeometrien ermittelt werden. Im Ergebnis können sowohl die Schüttung als auch die geothermische Leistung eines geplanten, noch ungebohrten Projektes („Pre-Drill-Prognose“) nur als Verteilungskurve vorhergesagt werden:

**Erwartete Wahrscheinlichkeitsverteilung der geothermischen Leistung =
Verteilung Q x Verteilung Delta T x Verteilung Flüssigkeitsdichte x Spezifische Wärmekapazität**

Daher sollte für jeden wichtigen geologischen Parameter eine Verteilungskurve erstellt werden.

Die mathematischen Verknüpfungen können über Montecarlo-Verfahren und entsprechende Tools erfolgen. Empfohlen wird hier das auf geothermische Anwendungen zugeschnittene Open Source Tool „DoubletCalc“ der niederländischen Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung, TNO empfohlen, [DoubletCalc1D | Thermogis](#).

Abbildung 3 zeigt die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung für alle im geologischen Erfolgsfall möglichen geothermischen Leistungen einer noch nicht gebohrten Dublette (mit Zufallswerten). In der kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktion sind die angegebenen „P-Werte“ wie folgt definiert:

- P90: 90 % aller möglichen Fälle liegen darüber
- P50: 50 % aller möglichen Fälle liegen darüber, 50 % darunter
- P10: 10 % aller möglichen Fälle liegen darüber

Unter der Annahme der technischen Fündigkeit lässt sich für einen wirtschaftlichen Schwellenwert die bedingte wirtschaftliche Erfolgswahrscheinlichkeit $POS_{W(t)}$ bestimmen. Der wirtschaftliche Schwellenwert bezeichnet dabei die geothermische Leistung (in MW_{therm}), die mindestens notwendig ist, um das spezifische geothermische Projekt wirtschaftlich umsetzen zu können. Die wirtschaftliche Erfolgswahrscheinlichkeit für das Gesamtprojekt wird wie folgt berechnet:

$$POS_{Gesamt} = POS_t \times POS_{W(t)}$$

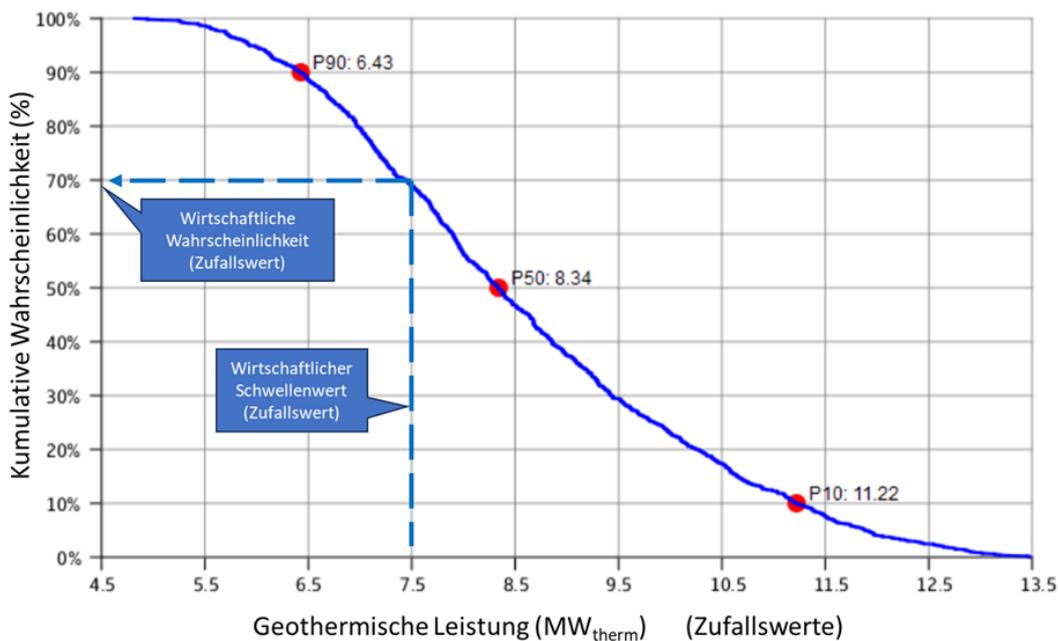


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeitsverteilung der geothermischen Leistung in MW_{therm}

7 Qualitätskontrolle der geologischen Bewertung

Sowohl für die Berechnung der geologischen Erfolgswahrscheinlichkeit als auch für die quantitative Bewertung der geologischen Parameterverteilungen wird ein interdisziplinärer Ansatz dringend empfohlen. Professionelle Erfahrungen aus den unterschiedlichen „Subsurface“-Disziplinen (Strukturgeologie, Fazieskartierung, Seismikinterpretation, Log-Auswertung, Reservoir-Engineering etc.) sollten zur Anwendung kommen. Wo bereits geothermische Bohrungen vorhanden sind, sollten eigene geologische Berechnungen immer mit dem regionalen Track-Record (innerhalb desselben geothermischen Plays) verglichen werden. In jedem Fall sollten die Ergebnisse im Rahmen von Peer Reviews unabhängig verifiziert werden.

8 Auswahl der Szenarien für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Auf der Basis der in Kapitel 6 dargestellten Wahrscheinlichkeitsverteilungen allein können keine betrieblichen Planungen für unter- und obertägige Anlagen oder wirtschaftliche Betrachtungen durchgeführt werden. Dafür müssen geeignete Szenarien ausgewählt werden. Dazu werden die drei in Abbildung 3 dargestellten Szenarien empfohlen:

- Low Case = P90 Geothermische Leistung
- Basisfall = P50 Geothermische Leistung
- High Case = P10 Geothermische Leistung

Für jeden der drei Fälle werden vollständige Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchgeführt. Dabei werden vereinfacht sämtliche Kosten (Investitionskosten für Bohrungen und obertägige Anlagen, Betriebskosten, etc.) den Einnahmen (Wärmepreis, Volllaststunden etc.) gegenübergestellt. Für jedes Szenario kann sich so ein spezifischer Nettobarwert (oder Net Present Value **NPV**) dargestellt werden. Wie Abbildung 3 zeigt, kann dieser insbesondere im Low Case auch negativ sein.

Ein möglichst repräsentativer Mittelwert für die Wirtschaftlichkeit (im technischen Erfolgsfall) wird über den sogenannten „Swanson’s Mean“ berechnet, dabei gilt:

$$\text{NPV}_{\text{Mittel}} = 0,3 \times \text{NPV}_{\text{P10}} + 0,4 \times \text{NPV}_{\text{P50}} + 0,3 \times \text{NPV}_{\text{P90}}$$

Dieser Wert mittelt zwar über die geologischen Parameterverteilungen, bildet aber noch nicht das geologische Risiko ab. Dazu wird das Prinzip der EMV-Analyse („Expected Monetary Value“ oder „Erwartete Geldwert“ Analyse) verwendet. Diese ermöglicht die Berechnung der wahrscheinlichkeitsgewichteten Wirtschaftlichkeit. Das Grundprinzip ist in Abbildung 4 dargestellt.

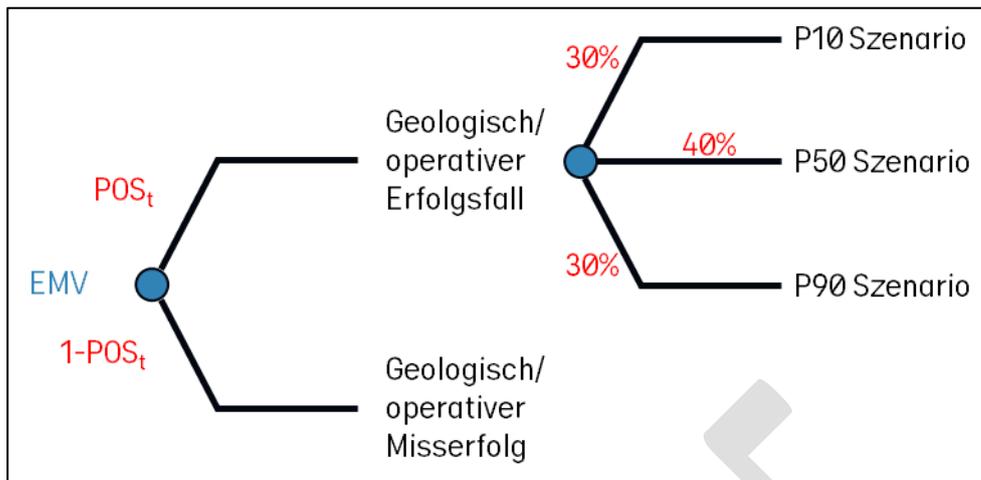


Abbildung 4: Die EMV-Analyse zur Berechnung der wahrscheinlichkeitsgewichteten Wirtschaftlichkeit

Die Berechnung des wahrscheinlichkeitsgewichteten Erwartungswertes erfolgt nach:

$$EMV = POS_t \times NPV_{Mittel} - (1-POS_t \times DHC)$$

Dieser Ansatz berücksichtigt sowohl den mittleren Erfolgswert als auch die Kosten des Misserfolges, die beide mit der Wahrscheinlichkeit diskontiert werden. In den Kosten des Misserfolges („Dry Hole Costs“) sind sämtliche Kosten zu berücksichtigen, die vor dem möglichen Eintritt des Misserfolges investiert wurden. In der Regel sind dies die Kosten der ersten Bohrung. Für die Wirtschaftlichkeit ist zudem auch die Anzahl der zu erwartenden Volllaststunden zu berücksichtigen.

9 Auswahl der Szenarien für die technische Detailplanung

Für die technische Detailplanung werden die gleichen drei Szenarien aus der geologischen Parameterverteilung verwendet wie schon für die Wirtschaftlichkeitsberechnung (siehe Kapitel 8): Low Case, Base Case und High Case. Szenarien, bei denen die Wirtschaftlichkeitsberechnung einen negativen NPV ergeben hat, werden dabei jedoch nicht weiter betrachtet.

Der Basisfall als zentraler Punkt auf der kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilung (siehe Abbildung 3) sollte der Ausgangspunkt für die Planung unter- und obertägiger Anlagen sein. Die in Kapitel 6 untersuchten Variationsspannen der wichtigsten geologischen Parameter zeigen jedoch, dass die in der Tiefe anzutreffenden Ergebnisse sehr deutlich vom Basisfall abweichen können, und zwar in beide Richtungen. Dies gilt für nahezu alle geologischen Parameter wie Tiefenlage des Aquifers, Temperatur, Durchlässigkeit, Schüttung, Wasserchemie etc. Die Planung muss an diese natürlichen Varianten angepasst werden, idealerweise in Form eines Entscheidungsbaumes für die Bohr- und Konstruktionsphase, der „wenn-dann“ Entscheidungspunkte für bestimmte geologische Eintritte schon in die Planung einbezieht. Auf diese Weise können sogenannte „Überraschungen“, die oft sehr teuer werden können, von vornherein vermieden bzw. in der Planung berücksichtigt werden.

10 Empfehlungen zum Umgang mit geologischen Unsicherheiten und zur Risikostreuung

Geologische Unsicherheiten sind Teil jedes bergbaulichen Projektes, also auch tiefergeothermischer Projekte. Dieser Leitfaden beschreibt geologische Analysemethoden und zeigt einen Weg, wie geologische Wahrscheinlichkeiten und natürliche Variabilitäten geologischer Parameter in die wirtschaftliche Bewertung und die technische Detailplanung einbezogen werden können.

Bei der Realisierung eines Einzelprojektes oder weniger vollfinanzierter Einzelprojekte kann der Investor im Rahmen der hier vorgestellten Methodik den genannten Unsicherheiten durch eine angepasste Planung begegnen, sie aber nicht vermeiden.

Daher gibt es etablierte Methoden, die wirtschaftlichen Risiken weiter zu begrenzen. Bei gleichem Investitionsvolumen können Risiken **geteilt** und **gestreut** werden, wenn statt vollfinanzierter Einzelprojekte mehrere Projekte mit geringeren Beteiligungen durchgeführt werden. Hier bieten sich konsortiale Partnerschaften oder Joint Ventures an, wie sie aus den genannten Gründen in der Rohstoffindustrie weit verbreitet sind. Dieser Ansatz ermöglicht den Aufbau eines Portfolios, in dem Projekte aus unterschiedlichen Plays, mit unterschiedlichen Risikostrukturen kombiniert werden. Innerhalb eines gut diversifizierten Portfolios kann ein weniger gutes (oder fehlgeschlagenes) Projekt kompensiert werden.

Die in diesem Leitfaden beschriebene Analyse liefert die wesentlichen Entscheidungskriterien für ein gutes Portfoliomanagement und die richtige Projektauswahl:

- die Erfolgswahrscheinlichkeit **POS_{gesamt}**
- die mittlere Erfolgswirtschaftlichkeit **NPV_{mittel}**
- und den (wahrscheinlichkeitsgewichteten) erwarteten Barwert **EMV**

Negative EMVs sollten im Portfolioansatz unter allen Umständen vermieden werden; EMV-positive Projekte können je nach Risikoprofil des Investors in einem geothermischen Portfolio kombiniert werden. Auf der Basis des transparenten und einheitlichen Bewertungsverfahrens können Projekte miteinander verglichen und priorisiert werden.

11 Weiterführende Literatur

Literatur zur geologischen Risikobewertung:

- Reinicke, K.; Hollmann, G.; Reichetseder, P. (2022): Probabilistische Risiko- und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Geothermieprojekten, in EEK Ausgabe 11/2022
<https://www.energie-archiv.de/SingleView.aspx?show=4319999>
- Rose, P. (2001): Risk analysis and management of petroleum exploration ventures, AAPG Methods in Exploration Series, Issue 12
- Schulz, R., Jung, R., & Schellschmidt, R. (2005): Assessment of Probability of Success for Hydrogeothermal Wells. Proceedings World Geothermal Congress 2005
- Schumacher, S., Pierau, R., Wirth, W. (2020): Probability of success studies for geothermal projects in clastic reservoirs: From subsurface data to geological risk analysis, Elsevier, Geothermics, Volume 83, 101725:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650517304236?via%3Dihub>

Literatur zu Tiefengeothermie im Allgemeinen:

- AGFW Praxisleitfaden Tiefengeothermie: Ein 67-Seiten Handbuch (pdf oder gedruckt), dass in die Tiefengeothermie einführt <https://www.agfw-shop.de/agfw-fachliteratur/erzeugung-sektorkopplung-speicher/agfw-praxisleitfaden-grosswaermepumpen-2714.html>
- BVEG Leistungsspektrum Geothermie: Ein generischer Projektplan, der strukturiert darstellt, welche Schritte im Lebenszyklus eines Tiefengeothermieprojektes notwendig sind (und diese mittels Gantt-Chart auch zeitlich in Kontext setzt) <https://www.bveg.de/die-branch/tiefe-geothermie-in-deutschland/das-leistungsspektrum-geothermie/leistungsspektrum-geothermie/>

- Verschiedene BVEG-Leitfäden meist zu umwelt- oder sicherheitsrelevanten Themen bezüglich Bohrungen und Anlagen, z.B. zur Bohrungsintegrität: <https://www.bveg.de/umwelt-sicherheit/technische-regeln/>
- Geothermielotsen der Länder: In verschiedenen Bundesländern haben geologische Dienste oder Bergbehörden Prozesse und/oder Themen zur Tiefengeothermie beschrieben, u.a. in
 - Niedersachsen: Geoberichte 42
https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober_42_2021
 - Baden-Württemberg: <https://www.lfzg.de/63.php>

ENTWURF