Institut für Energetik und Umwelt
gemeinnützige GmbH

Institute for Energy and Environment

Endbericht

Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung

Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Stephanie Frick

Dipl.-Ing. Gerd Schröder

Dipl.-Ing. Magdalena Rychtyk

Dipl.-Ing. Werner Bohnenschäfer

Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Geschäftsführer:
Prof. Dr. Martin Kaltschmitt
Handelsregister: Amtsgericht Leipzig HRB 8071
Sitz und Gerichtsstand Leipzig

Deutsche Kreditbank AG
(BLZ 120 30 000)
Konto-Nr.: 1364280

Stadt- und Kreissparkasse Leipzig
(BLZ 860 555 92)
Konto Nr.: 1100564876

Zert.-Nr. 1210010564/1

Auftraggeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau

Fachbegleitung:
Christiane Lohse
Fachgebiet I 4.3 Erneuerbare Energien

Auftragnehmer:

Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)
Torgauer Str. 116
04347 Leipzig

Telefon: 03 41 – 24 34 - 1 12
Telefax: 03 41 – 24 34 - 1 33
Internet: www.ie-leipzig.de

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Stephanie Frick (**Projektleitung**)

Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Dipl.-Ing. Werner Bohnenschäfer

Verantwortliche Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Gerd Schröder

Dipl.-Ing. Magdalena Rychtyk

Leipzig, 20. Dezember 2007

Inhaltsverzeichnis

Berichts-Kennblatt……... 1

Report Cover Sheet…….. 2

Zusammenfassung…… 3

Abstract…….. 14

1 Einleitung 25

2 Einführung in die geothermische Stromerzeugung 27

2.1 Technisch nutzbare Geothermievorkommen 27

2.2 Geothermische Stromerzeugungskonzepte 29

2.2.1 Untertägige Systemansätze 30

2.2.2 Obertägige Systemansätze.....39

2.3 Stand der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland..... 45

3 Rahmenbedingungen der ökologischen Analyse und Bewertung 48

3.1 Anlagentechnische Randbedingungen 48

3.1.1 Geothermische Referenzkonzepte 48

3.1.2 Nicht-geothermische Referenzkonzepte 50

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen 53

3.2.1 Bundesberggesetz.....53

3.2.2 Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz.....54

3.2.3 Wasserhaushaltsgesetz 55

3.2.4 Bundes-Immissionsschutzgesetz.....56

3.2.5 Bundesnaturschutzgesetz 57

3.2.6 Sonstige Gesetze 58

4 Umwelteffekte im Lebensweg 61

4.1 Methodik..... 61

4.2 Analyse der geothermischen Referenzkonzepte 67

4.2.1 Referenzkonzepte 67

4.2.2 Parametervariation 75

4.3 Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischer Referenzkonzepte..... 96

4.3.1 Konzepte zur Strombereitstellung 96
4.3.2 Konzepte zur Strom- und Wärmebereitstellung 98
4.4 Fazit 100

5 Lokale Umwelteffekte 106
5.1 Methodik 106
5.2 Analyse der geothermischen Referenzkonzepte 109
5.2.1 Bau Untertage 110
5.2.2 Bau Übertage 115
5.2.3 Betrieb Untertage 115
5.2.4 Rückbau Untertage 124
5.2.5 Rückbau Übertage 125
5.3 Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischer Referenzkonzepte 125
5.4 Fazit 132

6 Schlussbetrachtung und Empfehlungen 136

Literatur- und Referenzverzeichnis 147

Abkürzungsverzeichnis 168

Einheitenverzeichnis 170

Abbildungsverzeichnis 171

Tabellenverzeichnis 174

Anhang **176**

A.1 Datenbasis der Umwelteffekte im Lebensweg **176**

A.1.1 Analyse der geothermischen Referenzkonzepte **176**

A.1.2 Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischen Referenzkonzepte **182**

A.2 Analyse der lokalen Umwelteffekte **183**

A.2.1 Bau Untertage **183**

A.2.1.1 Bodenerschütterung bei seismischer Vorerkundung **183**

A.2.1.2 Umwelteffekte elektromagnetischer Vorerkundung **185**

A.2.1.3 Stofflicher Eintrag (Bohrungsniederbringung, Untergrund, Tiefenwasser) **185**

A.2.1.4 Stofflicher Eintrag (Bohrungsniederbringung, Boden, Grundwasser) **189**

A.2.1.5 Stofflicher Eintrag (Bohrungsniederbringung, Luft) **190**

A.2.1.6 Thermischer Eintrag (Bohrungsniederbringung, Luft, Grund- und Oberflächenwasser) **190**

A.2.1.7 Hydraulischer Kurzschluss (Bohrungsniederbringung) **191**

A.2.1.8 Bohrlochausbruch (Blow-Out, Bohrungsniederbringung) **191**

A.2.1.9 Induzierung mikroseismischer Ereignisse (Bohrungsniederbringung) **192**

A.2.1.10 Wasserbedarf (Bohrungsniederbringung) **192**

A.2.1.11 Aushub von Bodenmaterial und Bodenverdichtung (Bohrungsniederbringung) **193**

A.2.1.12 Lärmwirkung (Bohrungsniederbringung) **194**

A.2.1.13 Anfall von Rest- und Abfallstoffen **195**

A.2.1.14 Flächeninanspruchnahme (Bohrungsniederbringung) **196**

A.2.1.15 Visuelle Beeinträchtigung (Bohrungsniederbringung) **197**

A.2.1.16 Stofflicher Eintrag (Stimulation, Untergrund, Tiefenwasser) **198**

A.2.1.17 Stofflicher Eintrag (Stimulation, Boden, Grundwasser) **199**

A.2.1.18 Induzierung mikroseismischer Ereignisse (Stimulation) **200**

A.2.1.19 Wasserbedarf (Stimulation) 203

A.2.1.20 Lärmwirkung (Stimulation) 204

A.2.1.21 Flächeninanspruchnahme (Stimulation) 204

A.2.1.22 Stofflicher Eintrag (Zirkulationstests, Untergrund, Tiefenwasser) 204

A.2.1.23 Wasserbedarf (Zirkulationstests) 205

A.2.2 Betrieb Untertage 205

A.2.2.1 Hydraulische Veränderung (Untergrund) 205

A.2.2.2 Grundwasserspiegelsenkung 206

A.2.2.3 Hydraulischer Kurzschluss 206

A.2.2.4 Setzung des Bodens (Subsidenz) 207

A.2.2.5 Auskühlung (Untergrund) 208

A.2.2.6 Stofflicher Eintrag (Tiefenwasser) 209

A.2.2.7 Stofflicher Eintrag (Untergrund) 209

A.2.2.8 Stofflicher Eintrag (Boden, Grundwasser) 210

A.2.2.9 Wasserbedarf 211

A.2.2.10 Thermischer Eintrag (Boden) 212

A.2.2.11 Induzierung mikroseismischer Ereignisse 213

A.2.2.12 Stofflicher Eintrag (Luft) 213

A.2.2.13 Flächeninanspruchnahme 214

A.2.2.14 Anfall von Rest- und Abfallstoffen 214

A.2.3 Betrieb Übertage 216

A.2.3.1 Thermischer Eintrag (Wasser) 216

A.2.3.2 Wasserbedarf 217

A.2.3.3 Beeinflussung Mikroklima 218

A.2.3.4 Stofflicher Eintrag (Wasser) 219

A.2.3.5 Stofflicher Eintrag (Luft, Boden) 219

A.2.3.6 Lärmwirkung 220

A.2.3.7 Flächeninanspruchnahme 221

A.2.3.8 Anfall von Rest- und Abfallstoffen 222

A.2.3.9 Visuelle Beeinträchtigung 222

A.2.4 Rückbau Untertage 222

A.3 Fachexperten-Gremium 224

A.3.1 Workshop Teilnhemer 224

A.3.2 Fachgespräche und Gutachten 225

Berichts-Kennblatt

<table>
<tr><td>1. Berichtsnummer: UBA-FB</td><td>2.</td><td>3.</td></tr>
<tr><td colspan="3">4. Titel des Berichts
Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland – Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">5. Autoren
Stephanie Frick, Gerd Schröder, Magdalena Rychtyk, Werner Bohnenschäfer, Martin Kaltschmitt</td><td>8. Abschlussdatum
20.12.2007</td></tr>
<tr><td>9. Veröffentlichungsdatum
20.12.2007</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">6. Durchführende Institution
Institut für Energetik und Umwelt gGmbH
Torgauer Str. 116
04347 Leipzig</td><td>10. UFOPLAN-Nr.
FKZ 205 42 110</td></tr>
<tr><td>11. Seitenzahl: 208</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">7. Fördernde Institution
Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin</td><td>12. Literaturangaben: 148</td></tr>
<tr><td>13. Tabelle und Diagramme: 39</td></tr>
<tr><td>14. Abbildungen: 46</td></tr>
<tr><td colspan="3">15. Zusätzliche Angaben: -</td></tr>
<tr><td colspan="3">16. Zusammenfassung
Die Geothermie stellt eine viel versprechende Option zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dar, insbesondere weil sie große Potenziale hat und grundlastfähig ist. Sind entsprechende Abnehmerstrukturen vorhanden, ist auch eine zusätzliche Wärmebereitstellung möglich.
Im Sinne der Nachhaltigkeit ist eine geothermische Strom- bzw. Strom- und Wärmeerzeugung aber nur dann sinnvoll, wenn damit auch ökologische Vorteile verbunden sind. Da die Frage der zu erwartenden Umwelteffekte bislang nur unzureichend analysiert wurde, wurden im Rahmen einer ökologischen Analyse und Bewertung die großräumigen Umwelteffekte im Verlauf des gesamten Lebensweges – d. h. Bau, Betrieb und Abriss unter Berücksichtigung der jeweils vorgelagerten Ketten – bilanziert sowie die kleinräumigen Umwelteffekte untersucht. Zudem wurden für eine Analyse der lokalen Umwelteffekte die umweltrechtlichen Rahmenbedingungen umrissen.
Die Umwelteffekte einer hydrothermalen Stromerzeugung lassen sich wie folgt zusammenfassen: Der maßgebliche Anteil der Umwelteffekte im Lebensweg sowie der lokalen Umwelteffekte ist durch die Aquifer-Erschließung bedingt. Die möglichen lokalen Umwelteffekte (z. B. hydraulischer Kurzschluss, stofflicher Eintrag durch Bohrspülung) sind aus der Erdöl- und Erdgaserschließung bekannt und technisch beherrschbar. Die gesetzlichen Regelungen sind ausreichend. In Bezug auf die Umwelteffekte im Lebensweg hängen die Ergebnisse signifikant von den jeweiligen Standortbedingungen ab (z. B. von der notwendigen Bohrtiefe).
Mit HDR-Konzepten ist eine Verringerung der Umweltauswirkungen im Lebensweg zu erwarten, da hier i.d.R. wegen höherer Temperaturen geringere Förderraten und damit geringere Bohrdurchmesser ausreichen. Allerdings sind seismische Ereignisse nicht auszuschließen.
Für untertägig geschlossene Systeme ist in Bezug auf den Lebensweg mit deutlich größeren Umweltwirkungen zu rechnen, weil die geringeren Anlagenleistungen einen vergleichsweise hohen Aufwand für die Erschließung des Untergrunds verursachen.
Insgesamt kann die geothermische Stromerzeugung zukünftig einen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland leisten. Allerdings kann nicht ein Konzept als ökologisch optimal bewertet werden; vielmehr sind standortspezifische Gesamtkonzepte umzusetzen. Wenn dies gelingt hat die Nutzung der Geothermie deutliche ökologische Vorteile – z.B. in Bezug auf Treibhausgasemissionen – im Vergleich zu fossilen Referenzkonzepten. Besonders vorteilhaft sind dabei Konzepte mit Kraft-Wärme-Kopplung.</td></tr>
<tr><td colspan="3">17. Schlagwörter
Geothermische Stromerzeugung, Ökologisch optimierter Ausbau, lokale Umwelteffekte, Lebensweganalyse</td></tr>
<tr><td>18. Preis
150.000 Euro</td><td>19.</td><td>20.</td></tr>
</table>

Report Cover Sheet

1. Report No.: UBA-FB	2.	3.
4. Report Title Environmental Impacts through Geothermal Power Generation in Germany - Analysis and Evaluation of Small and Large Scale Environmental Impacts of a Geothermal Power Generation		
5. Autors Stephanie Frick, Gerd Schröder, Magdalena Rychtyk, Werner Bohnenschäfer, Martin Kaltschmitt		8. Report Date 20.12.2007 9. Publication Date 20.12.2007
6. Performing Organisation Institute for Energy and Environment Non profit research company Torgauer Str. 116 04347 Leipzig		10. UFOPLAN-Ref. No. FKZ 205 42 110 11. No. of Pages: 208
7. Supporting Institution Umweltbundesamt (Federal Environment Agency) Postfach 33 00 22 14191 Berlin		12. No. of References: 148 13. No. of Tables, Diagrams: 39 14. No. of Figures: 46
15. Supplementary Notes -		
16. Abstract Geothermal energy is a promising option for the generation of electricity from renewable sources. This is true especially because of its large and area-wide potential and its base load ability. In case of an appropriate costumer structure, additionally a heat provision is possible. In terms of sustainability, however, a geothermal power resp. power and heat provision makes only sense if it has also environmental advantages. So far, the environmental impacts of a geothermal power generation have only been analysed insufficiently. With an environmental impact analysis and evaluation, the large scale environmental impacts during the whole life cycle with construction, operation, deconstruction incl. the preceding process chains were assessed (Life Cycle Assessment, LCA); but also small scale environmental impacts were analysed. For the analysis of local environmental impacts additionally the legal conditions were outlined. The environmental impacts of a **hydro-geothermal** power generation can be summed up this way: The biggest part of the environmental impacts – during the life cycle as well as referring to local environmental impacts – is related to drilling and the development of the hydro-geothermal reservoir. The possible local environmental impacts (e.g. hydraulic short-circuit between different aquifers, material emissions through the use of drilling mud) are known from experiences of the oil and gas exploration and technically controllable. The legal regulations are sufficient. Environmental impacts during the life cycle depend significantly on the site (e. g. necessary drilling depth). With **HDR-systems** a reduction of the life cycle impacts can be expected due to normally higher temperatures, which result in smaller flow rates and hence in minor drilling diameters. On the other hand seismic shocks can not be excluded surely. In case of **subsurface closed systems** the environmental impacts during the life cycle are significantly higher, as due to the low heat extraction the specific expenditures for subsurface development are relative large. All in all the geothermal power production is capable to remarkably contribute to a sustainable energy provision in Germany in the future. But there is no single concept that could be evaluated as environmentally optimal. It is necessary to develop site-specific overall concepts. Such concepts habe clear ecological advantages (e. g. regarding GHG emissions) compared to fossil concepts. This is true especially for cogeneration concepts.		
17. Keywords Geothermal power generation; environmentally optimised expansion, local environmental impacts, Life Cycle Assessment		
18. Price 150.000 Euro	19.	20.

Zusammenfassung

Zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stellt neben der Wasserkraft, der Biomasse und der Windenergie die Geothermie eine viel versprechende Option dar, die gerade in den letzten Jahren innerhalb der energiewirtschaftlichen Diskussion merklich an Bedeutung gewonnen hat. Zum einen ist mit der Option Erdwärme ein großes technische Erzeugungspotenzial verbunden, welches in Deutschland einen erheblichen Anteil der Stromnachfrage decken kann, und zum anderen ist sie im Unterschied zu einer Stromerzeugung aus Wind und Sonne grundlastfähig. Sind zudem entsprechende Abnehmerstrukturen vorhanden, ist auch eine zusätzliche Deckung der Wärmenachfrage möglich.

Im Sinne der Nachhaltigkeit ist eine geothermische Stromerzeugung bzw. Strom- und Wärmeerzeugung aber nur dann sinnvoll, wenn neben Aspekten der Versorgungssicherheit damit auch ökologische Vorteile im Vergleich zu den gegebenen Alternativen verbunden sind. Aus diesem Grund ist es gerade jetzt notwendig, die mit einer geothermischen Stromerzeugung verbundenen Umwelteffekte genau zu analysieren. Bereits im Vorfeld eines weiteren Ausbaus der Geothermie müssen Leitlinien für ökologisch optimierte Anlagenkonzepte erarbeitet und ggf. auch die Gesetzgebung entsprechend angepasst werden, um so frühzeitig möglichen Umwelteffekten entgegen wirken zu können und gleichzeitig die ökologischen Vorteile durch eine weitere Erschließung des vorhandnen Optimierungspotenzials zu stärken.

Da die Frage der durch eine geothermische Stromerzeugung zu erwartenden Umwelteffekte bislang nur unzureichend analysiert wurde, müssen im Rahmen einer ökologischen Analyse und Bewertung die großräumigen Umwelteffekte im Verlauf des gesamten Lebensweges – d. h. Bau, Betrieb und Abriss unter Berücksichtigung der jeweils vorgelagerten Ketten – bilanziert sowie die kleinräumigen Umwelteffekte, welche mit einer direkten Wirkung auf die Umwelt am Anlagenstandort verbunden sind, untersucht werden.

Im Rahmen dieser Studie werden daher zunächst die Grundlagen einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland kurz dargstellt und ein Überblick über den gegenwärtigen Stand gegeben. Ausgehend von diesem sind dabei v. a. hydrothermale Nutzungskonzepte mit binären Konversionsprozessen repräsentativ. Darauf aufbauend werden die Rahmenbedingungen für die anschließende ökologische Analyse und Bewertung erläutert. Neben der Definition gegenwärtig für Deutschland repräsentativer geothermischer Anlagenkonzepte werden dabei auch nicht-geothermische Vergleichskonzepte bestimmt, um so eine Einordnung der Geothermie in den Kontext anderer Energieträger vornehmen zu können. Zudem werden für einen Analyse der lo-

kalen Umwelteffekte die umweltrechtlichen Rahmenbedingungen umrissen. Anschließend werden die Umwelteffekte im Lebensweg und die lokalen Umwelteffekte analysiert.

Hinsichtlich der mit einer **hydrothermalen** Stromerzeugung verbundenen Umwelteffekte lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen:

- Der maßgebliche Anteil der Umwelteffekte im Lebensweg sowie der lokalen Umwelteffekte ist durch die Aquifer-Erschließung bedingt. In Bezug auf die lokalen Umwelteffekte wird auf langjährige Erfahrungen aus der Erdöl- und Erdgaserschließung zurückgegriffen, so dass die möglichen Umwelteffekte (z. B. hydraulischer Kurzschluss, stofflicher Eintrag durch Bohrspülung) heute sowohl bekannt, als auch technisch beherrschbar sind. Die möglichen lokalen Umwelteffekte sind daher gesetzlich ausreichend geregelt, so dass keine negativen Umweltwirkungen durch den Bau der Anlage zu erwarten sind. Der große Einfluss des untertägigen Baus verdeutlicht allerdings auch die Notwendigkeit einer erfolgreichen Bohrungsniederbringung. Für einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung ist daher auch die Verbesserung der Kenntnisse über den Untergrund durch die umfassende Auswertung bestehender Daten sowie den kombinierten Einsatz seismischer und weiterer geophysikalischer, geologischer und geochemischer Vorerkundungsinstrumente von entscheidender Bedeutung.
- Weiterhin ist der Anfall erheblicher Abwärmemengen während der Betriebsphase aufgrund der thermodynamisch bedingten, niedrigen Wirkungsgrade für die resultierenden Umwelteffekte ausschlaggebend. Hinsichtlich der Lebenswegbilanzierung werden sowohl Bruttostrom wie auch Stromeigenbedarf deutlich durch das jeweils zum Einsatz kommende Kühlsystem (z. B. zwangsbelüfteter Nasskühlturm, Trockenkondensator) beeinflusst. Bei den lokalen Umwelteffekten werden die für den Betrieb Übertage zu erwartenden Umweltwirkungen ebenfalls durch das gewählte Kühlsystem bestimmt (z. B. Kühlwasserbedarf, Lärm).
- Die durch den Betrieb bedingten untertägigen Umweltwirkungen und damit ggf. verbundenen Veränderungen im Untergrund (z. B. hydraulische und thermische Veränderungen) haben bei hydrothermalen Anlagen nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand keine nachteiligen Umweltauswirkungen, sondern im schlechtesten Fall anlagetechnische Probleme zur Folge.

- Eine kombinierte **Strom- und Wärmebereitstellung** wird bei Geothermieanlagen aufgrund des höheren Temperaturniveaus durch die Nutzung der im Thermalwasser nach Wärmeabgabe an den Konversionsprozess noch enthaltenen Restwärme realisiert. In Bezug auf die Umwelteffekte im Lebensweg führt dies zu einer deutlichen Reduzierung bzw. Vermeidung der bilanzierten Umweltwirkungen. Der maßgebliche Einfluss der Wärmegutschrift ist bei geothermischen Konzepten dabei durch die dem Thermalwasserstrom verhältnismäßig große entziehbare thermische Leistung zu begründen, welche die elektrische Leistung um ein Vielfaches übersteigt. Auf die lokalen Umwelteffekte hat eine zusätzliche Wärmebereitstellung keinen maßgeblichen Einfluss.
- Auf Basis dieser Aussagen können für die typischen Regionen hydrothermaler Vorkommen unterschiedliche Charakteristiken abgeleitet werden:
    - Die Referenzanlage im **Oberrheingraben** weist aufgrund des höheren Temperaturgradienten bei geringer Bohrlochtiefe und gleichzeitig hoher Fördertemperatur bei der Lebenswegbilanzierung einer reinen Strombereitstellung in allen Wirkungskategorien die geringsten Umwelteffekte auf. Bei einer zusätzlichen Wärmbereitstellung kommt es zu einer deutlichen Reduzierung bzw. sogar einer Vermeidung der bilanzierten Umweltbelastung.
    - Bei der Referenzanlage im **Süddeutschen Molassebecken** ist der erschließungstechnische Aufwand im Vergleich zum Oberrheingraben aufgrund der höheren Förderrate und des damit verbundenen größeren Bohrlochvolumens größer. Zudem ist die einspeisbare Netto-Strommenge bei vergleichbarer Brutto-Stromerzeugung zur Referenzanlage im Oberrheingraben deutlich geringer. Die Ursache dafür ist zum einen der niedrigere Wirkungsgrad (kühleres Thermalwasser) und der dadurch bedingte größere Kühlbedarf. Zum anderen ist mit der höheren Förderrate ein verhältnismäßiger Mehraufwand für die Thermalwasserzirkulation verbunden. Bei einer reinen Strombereitstellung ist dies mit größeren resultierenden Umweltwirkungen verbunden. Bei einer zusätzlichen Wärmebereitstellung liegen die ökologischen Vorteile allerdings im Süddeutschen Molassebecken, da hier aufgrund der höheren Förderrate bei der Erschließung einer entsprechenden Wärmeabnehmerstruktur deutlich mehr Wärme bereitgestellt werden kann.

- Die Referenzanlage im **Norddeutschen Becken** ist im Vergleich zu den anderen Referenzanlagen im Oberrheingraben und Süddeutschen Molassebecken aufgrund der Tiefe des Zielhorizonts mit dem größten erschließungstechnischen Aufwand verbunden. Da zusätzlich aufgrund der zu erwartenden hydraulischen Verhältnisse im Untergrund nur eine geringere geothermische Leistung erschlossen werden kann, sind die bilanzierten Umweltwirkungen sowohl bei der Strom- als auch bei einer Strom- und Wärmbereitstellung am größten. Im Hinblick auf einen ökologisch optimierten Ausbau ist allerdings zu bemerken, dass im Falle einer erfolgreichen Weiterentwicklung der Stimulationstechnik im Norddeutschen Becken der Vorteil des großen erschließbaren Potenzials im Untergrund gegeben ist.

- Ist die erfolgreiche Umsetzung von **HDR-Konzepten** zukünftig möglich, ist eine Verringerung der bilanzierten Umweltauswirkungen im Lebensweg zu erwarten, da hier in der Regel wegen höherer Temperaturen für die gleiche aus dem Untergrund geförderte Energie im Vergleich zu hydrothermalen Systemen geringere Förderraten ausreichen. Bei einer Erweiterung von HDR-Dubletten auf Tripletten kann dieser Vorteil noch verstärkt werden. Um die Umsetzung eines ökologisch optimierten Ausbaus der geothermischen Stromerzeugung zukünftig um HDR-Konzepte erweitern zu können, besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf. Neben genauen Aussagen über das Betriebsverhalten des untertägigen Wärmetauschers (z. B. Abschätzung bzw. Ausschluss von Zirkulationsverlusten) sind die Kenntnisse über die Stimulation von Festgestein noch unzureichend. Durch die Stimulation sind zwar keine Schadbeben zu erwarten und bisher auch noch nicht aufgetreten, jedoch können sie gegenwärtig auch nicht ausgeschlossen werden. Die durch das Geothermieprojekt ausgelösten Erdstöße in der tektonischen Bruchzone bei Basel haben gezeigt, dass die Stimulation im Festgestein zu an der Oberfläche deutlich fühlbaren Erdstößen und vor Allem im Falle eines siedlungsnahen Projektstandorts zur Verunsicherung der Bevölkerung führen kann. Neben der weiteren Erforschung der natürlichen Spannungen im Untergrund sind dabei auch die Anwendbarkeit neuer Stimulierungstechniken, wie z. B. das Multi-Frac-Verfahren, näher zu erkunden.

- Für **untertägig geschlossene Systeme** ist bei der geothermischen Stromerzeugung in Bezug auf den Lebensweg mit deutlich größeren Umweltwirkungen zu rechnen. Der Grund dafür sind die deutlich geringeren realisierbaren Anlagenleistungen im Vergleich

zum Aufwand für die Erschließung des Untergrunds. In Bezug auf die zu erwartenden lokalen Umwelteffekte sind untertägig geschlossene Systeme durch weniger Umweltauswirkungen im Betrieb gekennzeichnet, haben aber – abgesehen von ihrer Standortunabhängigkeit – keine maßgeblichen Vorteile. Auf Basis dieser Bewertung sind untertägig geschlossene Konzepte für einen ökologisch optimierten Ausbau nicht geeignet.

- Bei einer Einordnung der geothermischen Referenzkonzepte in den Kontext **anderer Energieträger** liegen die analysierten Umwelteffekte im Lebensweg in der Bandbreite der übrigen regenerativen Stromerzeugungskonzepte und führen gegenüber den fossilen Referenztechnologien vor Allem in Bezug auf den Verbrauch erschöpflicher Energieträger und die Emission von Treibhausgasen zu einer deutlichen Verringerung der Umweltbelastung. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen sind die geothermischen Referenzkonzepte mit einer nuklearen Stromerzeugung vergleichbar. Die geothermisch basierte Bereitstellung von Strom und Wärme zeichnet sich im Vergleich zu den übrigen Referenzkonzepten in allen analysierten Wirkungskategorien durch die größte Reduktion bzw. Vermeidung der jeweiligen Umweltwirkungen aus.
- Unter der Annahme einer ausreichend definierten umweltrechtlichen Lage kann keine Technologie als die ökologisch beste oder schlechteste herausgestellt werden. Jede Technologie besitzt ökologische Vor- und Nachteile. In wieweit diese zum Tragen kommen, wird durch den jeweiligen Standort bestimmt. Verglichen mit anderen Energieträgern ist die hydrothermale Stromerzeugung mit massiven Einwirkungen auf den Untergrund und das Tiefenwasser verbunden. In Bezug auf Mensch, Tier, Pflanzen/Biotope sind keine geothermiespezifischen Umweltwirkungen zu erwarten. Während des Anlagenbetriebs zeichnet sich die Geothermie durch eine minimale Flächeninanspruchnahme und geringe Auswirkungen im Vergleich zu anderen grundlastfähigen Konzepten aus, bei welchen durch die Brennstoffbereitstellung neben anlagenbedingte noch weitere Umweltwirkungen zu berücksichtigen sind.

Auch wenn die analysierten Umwelteffekte der hydrothermalen Referenzkonzepte im Vergleich zu den übrigen Referenztechnologien als gering bzw. nicht nachteilig bewertet werden können, besteht weiteres **ökologisches Optimierungspotenzial**. Aus Sicht eines Projektplaners ist dabei eine ökologische Optimierung sowohl der Umwelteffekte im Lebensweg als auch der lokalen Umwelteffekte möglich; aus Sicht der Gesetzgebung besteht Optimierungspotenzial in Bezug auf die Förderung eines ökologisch optimierten Ausbaus. Dabei lassen sich folgende Aussagen und Empfehlungen zusammenfassen:

- Das **Optimierungspotenzial der Umwelteffekte im Lebensweg** besteht grundsätzlich in der Steigerung des Verhältnisses von energetischem Nutzen zu materiellem und energetischem Aufwand. Der energetische Nutzen wird dabei als die letztlich bereitgestellte Netto-Strommenge (d. h. Brutto-Strommenge abzüglich des Stromeigenbedarfs im Konversions-, Kühl- und Thermalwasserkreislauf) definiert, da diese für einen ökologisch optimierten Ausbau maßgeblich sein muss:
  - *Erhöhung des Nutzens bei gleichem untertägigen Anlagenkonzept:* Die hier angesprochene Erhöhung des Nutzens kommt einer Steigerung der Netto-Strommenge gleich, welche durch folgende Maßnahmen erfolgen kann:
    - Optimierung des Konversionskreislaufs durch (i) eine Wirkungsgradsteigerung mit ggf. komplexerer Prozessführung (z. B. mehrstufiger Prozess), durch (ii) eine weitere Auskühlung des Thermalwassers und/oder (iii) eine Steigerung der Anlagenverfügbarkeit. Die Optimierung des Konversionskreislaufs ist dabei keine Frage von ORC- oder Kalina-Technik, da beide Technologien beliebig komplex ausgeführt werden können und letztlich das Gesamtergebnis der drei Optionen entscheidend ist.
    - Optimierung des Kühlkreislaufs durch (i) Optimierung der Kondensationstemperatur unter (ii) Berücksichtigung der Auswirkung des Strombedarfs im Kühlkreislauf auf die Netto-Strommenge. Die Durchlaufkühlung zeichnet sich zwar durch die niedrige realisierbare Kondensationstemperatur und einen geringen Stromeigenbedarf (ca. 5 % von der Brutto-Strommenge) aus; aufgrund der damit verbundenen Standortanforderungen und der Bindung hydrothermaler Anlagen an definierte geologische Gegebenheiten hat sie jedoch für die geothermische Stromerzeugung kaum Relevanz. Die Entscheidung ist daher zwischen Nass- bzw. Hybridkühltürmen und Luftkondensatoren zu treffen. Bei einer reinen Strombereitstellung erweisen sich dabei Kühltürme als vorteilhafter (niedrigere Kondensationstemperatur, ca. 23 bis 27 % Stromeigenbedarf) während bei einer kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung sich luftgekühlte Anlagen (ca. 38 %Stromeigenbedarf) aufgrund der vergleichsweise geringeren Einbußen bei der Stromproduktion unter Umständen als ökologisch besser darstellen können.

- Optimierung des Thermalwasserkreislaufs durch Förderung der ökologisch optimalen Thermalwassermenge. Da die Steigerung des Strombedarfs für die Thermalwasserzirkulation im Gegensatz zur Brutto-Stromproduktion überproportional mit zunehmender Förderrate ansteigt, gibt es eine Förderrate, bei welcher die Netto-Strommenge maximal und der jeweilige Umwelteffekt minimal wird. Bei entsprechender Reservoirbewirtschaftung und damit verbundener längerer Anlagenlaufzeit können die zu erwartenden Umwelteffekte deutlich zudem reduziert werden.

- Optimierung der Thermalwassernutzung durch zusätzliche Wärmebereitstellung. Je mehr Wärme durch die ohnehin anfallenden Wärmeströme (d. h. Rest- und Abwärme) bereitgestellt wird, desto größer fällt die letztlich erzielbare Verringerung der Umwelteffekte aus. Dabei ist zukünftig auch die Umsetzbarkeit innovativer Nutzungskonzepte (z. B. Kaskaden-Nutzung, Kältebereitstellung) zu prüfen, die nicht nur die Restwärme des Thermalwassers, sondern auch die Abwärme aus dem Konversionsprozess nutzt. Aufgrund der dabei anfallenden großen Wärmemengen ist ein wirtschaftlicher Absatz der Wärme an entsprechende Abnehmerstrukturen gebunden. Die Erschließung einer geeigneten Wärmeabnehmerstruktur muss daher bereits zu Beginn der Projektentwicklung berücksichtigt werden.

- *Verringerung des Aufwands bei gleichem untertägigen Anlagenkonzept:* Bei dieser Optimierung bleibt das Anlagenkonzept gleich und lediglich die Projektumsetzung in Bezug auf die Untergrunderschließung wird verändert. Neben einer zukünftig ggf. zu erwartenden Steigerung der Bohreffizienz durch optimierte Bohrverfahren ist hier vor Allem der Einsatz von Strom anstelle von Diesel betriebene Bohranlagen anzuführen. Die Umsetzung eines stromgeführten Bohrbetriebs ist allerdings an eine entsprechende Stromnetz-Infrastruktur gebunden und somit nicht an jedem Standort möglich.

- *Stärkere Steigerung des Nutzens gegenüber der Steigerung des Aufwands:* Durch die Vergrößerung eines Anlagenkonzepts wird zwar der erschließungstechnische und ggf. fördertechnische Aufwand gesteigert, in der Regel kann dieser jedoch durch die ebenfalls gestiegene Netto-Stromproduktion kompensiert werden. Neben der Steigerung der Förderrate mittels Stimulation des Reservoirs sind dabei auch Mehrbohrlochkonzepte denkbar. Der maximalen Einsparung sind dabei allerdings

Grenzen gesetzt, da die nachhaltige Reservoir-Erschließung in einem Erlaubnisfeld nur mit einer begrenzten Anzahl von Bohrungen möglich ist und auch die Reservoir-Produktivität bzw. -Injektivität durch Stimulationsmaßnahmen nur bis zu einem bestimmten Ausmaß verbessert werden kann. Eine weitere Möglichkeit der Anlagenvergrößerung besteht im Sinne der Kombination geothermischer Stromerzeugung mit anderen Energieträgern zu Hybridkraftwerken.

- Das **Optimierungspotenzial der lokalen Umwelteffekte** ist aus Sicht der Projektplanung maßgeblich an eine ökologisch optimierte Planung im Vorfeld durch einen Dialog mit der Öffentlichkeit und eine kontinuierliche Beobachtung während des Betriebes geknüpft:
  - *Information der Öffentlichkeit:* Aufgrund der Siedlungsnähe geothermischer Anlagen – vor Allem bei Projekten mit zusätzlicher Wärmebereitstellung – muss ein ökologisch optimierter Ausbau mit einer umfassenden Information der Öffentlichkeit verbunden sein. Ggf. ist dabei eine freiwillige Beteiligung der Öffentlichkeit, wie z. B. das Forschungsprojekt Groß Schönebeck gezeigt hat, von Vorteil. Nur in einem gemeinsamen Dialog kann das für den jeweiligen Standort auch unter umwelttechnischen Gesichtspunkten optimale Konzept erarbeitet werden.
  - *Wissenschaftliche Projektbegleitung und Monitoring:* Da in Deutschland bislang wenige Langzeiterfahrungen mit der Nutzung von Aquiferen vorliegen, können durch die kontinuierliche Beobachtung der Verhältnisse im Untergrund (z. B. Druck, Reservoirchemie, Temperatur) sowie deren Auswertung zum einen neue Erkenntnisse gewonnen und die Betriebsparameter ggf. an diese angepasst werden.
- Das **Optimierungspotenzial der gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen** ist überwiegend durch die weitere Erforschung der geothermischen Stromerzeugung sowie die Anpassung der gegenwärtigen Gesetzeslage an die Besonderheiten geothermischer Projekte gegeben:
  - *Wissenschaftliche Projektbegleitung und Monitoring:* Durch eine unabhängige, wissenschaftliche Begleitung aller geothermischer Stromerzeugungsprojekte (und ggf. auch tiefengeothermischer Wärmeprojekte, welche meist schon über eine längeren Erfahrungszeitraum verfügen) können die Beobachtungen aus den einzelnen Projekten gesamtheitlich bewertet werden. So können auf nationaler Ebene neue Erfahrungswerte und Empfehlungen abgeleitet werden, die vor Allem auch im

Hinblick auf die anzustrebenede, möglichst lange Anlagenlaufzeit von entscheidender Bedeutung ist. Die (unter-)gesetzliche Regelung bzw. die von der Bundesregierung kommunizierten Leitlinien sind an diese Erkenntnisse entsprechend anzupassen. Dies kann zukünftig z. B. nach Abschluss des Projektes „Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen“, in welchem die aus der Erdöl- und Erdgasindustrie bekannte NORM-Problematik (Anfall von Materialien mit natürlich auftretender Radioaktivität) unter Randbedingungen geothermischer Projekte näher untersucht wird, der Fall sein. Zudem ist ggf. die Bemessung bergrechtlicher Bewilligungsfelder an die Fortschritte in der Abbildung der geologischen Gegebenheiten im Untergrund anzupassen.

- *Weiterführende Forschungsförderung:* Im Sinne eines ökologisch optimierten Ausbaus sind im Rahmen einer weiterführenden Forschungsförderung Inhalte zu untersuchen, die nicht in regulären Projekten mit dem Ziel der Stromerzeugung umgesetzt werden können, da hier technische Verfügbarkeit und wirtschaftliche Umsetzbarkeit der jeweiligen Anlage im Vordergrund stehen müssen. Aufgrund des maßgeblichen Einflusses des untertägigen Baus auf die ökologische Vorteilhaftigkeit der geothermischen Stromerzeugung ist dabei die Weiterentwicklung effektiver Vorerkundungsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung. Aber auch der ökologische Einfluss von Förder-, Konversions- und Kühltechnik zieht weiteren Forschungsbedarf nach sich.

- *Anpassung der gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen an die Besonderheiten geothermischer Projekte:*

  - <u>Forcierung eines ökologisch optimierten Ausbaus im EEG:</u> Im Rahmen des EEG wird die eingespeiste Strommenge einer Geothermieanlage vergütet. Aus wirtschaftlichen Gründen ist dies gegenwärtig die Brutto-Strommenge; der Stromeigenbedarf für Konversions-, Kühl- und Thermalwasserkreislauf wird dem öffentlichen Netz entnommen. Bei einer Abbildung dieses Sachverhalts durch Bilanzierung der Brutto-Strommenge liegen die zu erwartenden Umweltwirkungen um Größenordnungen höher, da sich der Stromeigenbedarf aus dem öffentlichen Netz von über 50 % der erzeugten Brutto-Strommenge deutlich in den Ergebnissen niederschlägt. Dabei spielt der zu Grunde gelegte Strommix eine maßgebliche Rolle, so dass eine zukünftig zu erwartende Veränderung des Strommixes zu Gunsten regenerativer Energieträger mit einer

Reduktion der brutto-bilanzierten Umwelteffekte um bis zu 35 % verbunden ist. Die für einen ökologisch optimierten Ausbau letztlich maßgebliche Netto-Strommenge kann durch das EEG bislang nicht forciert werden. Während es aus ökologischer Sicht eine optimale Förderrate gibt, bei welcher die Netto-Strommenge maximal wird, nimmt die Wirtschaftlichkeit dagegen mit steigender Förderrate kontinuierlich zu. Da der Strombedarf für die Thermalwasserförderung im Gegensatz zur Brutto-Stromproduktion mit Steigerung der Förderrate überproportional ansteigt, kann ab einer bestimmten Förderrate der Eigenbedarf den produzierten Strom sogar übersteigen, so dass netto betrachtet kein regenerativer Strom bereitgestellt wird. Für einen ökologischen optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung ist demnach die Forcierung der maximalen Netto-Strommenge notwendig. Um konkrete Empfehlungen für mögliche Änderungen im EEG vornehmen zu können, ist eine umfassende ökonomisch-ökologische Gegenüberstellung unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen (z. B. Konversions-, Kühltechnik, Standort) notwendig.

- Anpassung der horizontalen Feldbemessung bergrechtlicher Bewilligungsfelder an die Möglichkeit einer vertikalen Nutzung: Gegenwärtig ist die Nutzung eines Bewilligungsfeldes durch technisch unabhängige, unter das Bergrecht fallende Technologien (z. B. gleichzeitige Nutzung eines Feldes für tiefe Erdwärmesonden, hydrothermale und HDR-Nutzung) nicht möglich. Dadurch kann der nachhaltige Ausbau der Energieversorgung beeinträchtigt werden.

- Anpassung der untergesetzlichen Regelungen an bereits bestehende Erfahrungen mit Geothermieprojekten: So vielseitig die technischen Herausforderung bei geothermischen Stromerzeugungsprojekten sind, so umfassend stellen sich auch die zu beachtenden (unter-)gesetzlichen Regelungen dar. Dabei ist zu bemerken, dass vor Allem das Bundesberggesetz, welches den Großteil der geothermiespezifischen Umweltwirkungen grundsätzlich behandelt, vorrangig auf den Bergbau sowie die Erdöl- und Erdgasgewinnung ausgerichtet ist. Da die hiervon ausgehenden Umweltgefahren jedoch z. T. deutlich stärker als bei der Erschließung geothermischer Lagerstätten sind, werden im Rahmen des Bergrechts auch entsprechend massive Vorgaben definiert. Für einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung kann sich dies

u. U. eher hinderlich für die Projektentwicklung als förderlich für die Umwelt auswirken. Zudem kann sich die Dauer bergrechtlicher Genehmigungsprozesse aufgrund noch fehlender Erfahrungen mit geothermischen Projekten hemmend auf einen weiteren Ausbau der Geothermie auswirken. Durch die Erarbeitung umweltrechtlicher Leitlinien für eine geothermische Stromerzeugung muss demnach sowohl die behördliche als auch die projektplanerische Seite entsprechend unterstützt werden.

- *Verstärkte Förderung von Wärmenetzen:* Die durch eine geothermische Stromerzeugung gegenwärtig zu erwartenden Umweltwirkungen können maßgeblich durch die zusätzliche Bereitstellung von Wärme verbessert werden. Aufgrund der dabei anfallenden, großen Wärmemengen ist ein wirtschaftlicher Absatz der Wärme auch an entsprechende Abnehmerstrukturen gebunden. Die Errichtung derartiger Wärmenetze ist aufgrund des projektierungstechnischen Aufwands auch mit einem zusätzlichen finanziellen Risiko verbunden, welches nicht in allen Projekten getragen werden will bzw. kann. Durch eine entsprechende Förderung von Wärmenetzen könnte diese Hemmschwelle für eine effizientere Nutzung der Geothermie abgebaut und ein ökologisch optimierter Ausbau unterstützt werden.
- *Information der Öffentlichkeit:* Für einen weiteren Ausbau der geothermischen Stromerzeugung ist eine dialog- und informations-basierte Kommunikation mit der Öffentlichkeit auch von staatlicher Seite notwendig. Ziel muss dabei eine transparante Darstellung sein, die einerseits die Vorteile aufzeigt, aber andererseits auch über Risiken aufklärt.

Auf Basis dieser Schlussfolgerungen wird deutlich, dass die geothermische Stromerzeugung im Stande ist zukünftig einen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland zu leisten. Um einen ökologisch optimierten Ausbau auf den Weg zu bringen, ist neben der Weiterentwicklung einzelner technologischer Aspekte (z. B. geologische Vorhersage-Instrumente, Stimulationstechnik, Konversionstechnik) vor Allem auch das Verständnis für das Gesamtkonzept geothermischer Anlagen und die damit verbundenen ökologischen (und auch ökonomisch umsetzbaren) Stellschrauben auf Seiten der Projektentwickler sowie auf Seiten der Politik unumgänglich. Aufgrund dessen kann nicht ein Konzept als ökologisch optimal bewertet werden; vielmehr ist es das standortspezifische Gesamtkonzept unter Berücksichtigung ökologisch optimaler und technisch realisierbarer Aspekte, die einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland voranbringen.

Abstract

Besides hydropower, biomass and wind power, also geothermal energy is a promising option which has experienced a rising interest in the last years in Germany. This is not only due to its large and area-wide potential but also because of its base load ability. Another aspect is the additional heat provision which is possible in case of an appropriate costumer structure.

In terms of sustainability however, geothermal power respectively power and heat provision makes only sense if - besides aspects of supply security – it also results in environmental advantages compared to the existing alternatives. Based on these facts, it is now necessary to precisely analyse the environmental impacts related to geothermal power generation; because guidelines for environmentally optimised plant concepts as well as an evaluation of the legal framework need to be elaborated before a broader expansion of geothermal energy begins. Through the development of the existing optimisation potential, possible environmental impacts can be averted ahead of time and geothermal energy's environmental advantages are strengthened.

So far, the environmental impacts through geothermal power generation regarding representative set conditions for Germany have only been analysed insufficiently. With an environmental impact analysis and evaluation, the large scale environmental impacts during the whole life cycle such as construction, operation, deconstruction regarding the respective preceding process chains need to be assessed (Life Cycle Assessment, LCA); but also small scale environmental impacts with an direct effect on the environment at the plant site need to be analysed (local environmental impact assessment).

First of all, the basics and recent status of geothermal power generation in Germany are briefly outlined within this study; thereby especially hydro-geothermal concepts with binary power units are representative. Subsequently, the surrounding conditions for the environmental impact analysis and evaluation are described. Besides the definition of for Germany representative geothermal plant concepts, also non-geothermal power plant concepts are considered in order to place geothermal energy within the context of other energy carriers. For the analysis of local environmental impacts additionally the legal conditions are outlined.

From the adjacent environmental analysis and evaluation, following statements can be summed up regarding the environmental impacts through **hydro-geothermal** power generation:

- Most part of the environmental impacts during the life cycle as well as referring to local environmental impacts is related to drilling and the development of the hydro-geothermal reservoir. Regarding the local environmental impacts, experiences from the

oil and gas exploration can be used; possible local environmental impacts (e.g. hydraulic short-circuit between different aquifers, material emissions through the use of drilling mud) are therefore known and technically controllable. These impacts are sufficiently regulated by law so that no negative effects on the environment need to be expected during construction phase. The great influence of subsurface construction on the environmental performance however emphasises the need for a successful reservoir development. Therefore, enhancing the knowledge of the situation in the deep underground through comprehensive processing of existing data and the combined use of seismic and other geophysical and geochemical exploration measures is important for an ecologically optimised expansion of geothermal power production.

- Further determining for the environmental impacts are the large amounts of waste heat which need to be cooled during operation phase. The large amounts thereby result from thermodynamically caused low conversion cycle efficiencies. The used cooling system (e.g. mechanical draught wet cooling tower, dry condensation) again significantly influences the life cycle performance through its impact on produced gross-power output as well as the demand on auxiliary power. Regarding the local environmental impacts, the effects on the environment during plant operation are also determined to large part by the cooling system (e.g. cooling water demand, noise emissions).
- Impacts during operation on the subsurface environment and therewith related alternations in the deep underground (e.g. hydraulic and thermal alternations) don't have versatile environmental effects according to the state of knowledge. In worst case, these impacts lead to technical problems during plant operation.
- In geothermal plants, a **combined power and heat provision** is realised by using the residual heat in the thermal water after the heat transfer to the power cycle because it is normally available at a higher temperature level than the waste heat. For the environmental life cycle performance, this leads to a mitigation respectively avoidance of the analysed environmental impacts because an additional heat provision significantly influences the heat credit. This is due to the fact that for geothermal concepts, the transferable residual heat and therefore the thermal capacity exceed the electrical capacity by a multiple. Regarding local environmental impacts, an additional heat supply has no remarkable influence.

- Based on these facts, characteristics for the different hydro-geothermal regions can be derived:
    - The reference plant in the **Upper Rhine Graben** shows the lowest environmental impacts during the life cycle compared to the other geothermal power plant concepts. This is due to the comparatively high temperature gradient and the therewith related high temperature in shallow borehole depths. In case of an additional heat supply, the environmental burdens are significantly reduced respectively avoided.
    - The reference plant in the **South-German Molasse Basin** is compared to the plant in the Upper Rhine Graben related to larger expenditures regarding the reservoir development due to a higher flow rate and the therewith connected larger borehole volume. Further, the net-power output is remarkably lower although the gross-power output is comparable to the plant in the Upper Rhine Graben. This is on one hand reasoned by the lower power cycle efficiency due to a lower thermal water temperature and the therewith related larger demand for cooling. On the other, a higher flow rate also results in a higher demand for auxiliary power. For power production, this leads to larger environmental impacts compared to the Upper Rhine Graben. For power and heat provision, the discussed disadvantages can be compensated by a larger heat credit due to the high flow rate. In this case, the reference plant in the South-German Molasse Basin shows a better environmental performance compared to the one in the Upper Rhine Graben.
    - The reference plant in the **North-German Basin** is due to the deepness of the developed reservoir related to the largest expenditures for subsurface construction compared to the other reference plants in the Upper Rhine Graben and the South-German Molasse Basin. Additionally, because of the hydraulic conditions in the reservoir, only a small geothermal capacity is realisable so that for power as well as for power and heat supply the environmental impacts during the life cycle are the largest. Considering an ecologically optimised expansion of geothermal power production in Germany it has however to be remarked that in case of a sufficient development of stimulation techniques, a large potential can be developed in the North-German Basin.

- If the successful implementation of **HDR-systems** will be possible in the future, a reduction of the life cycle impacts can be expected. Due to normally higher temperatures, smaller flow rates are sufficient to extract the same amount of heat from the underground as assumed for hydro-geothermal systems. With an up-scale of a HDR-doublet to a triplet this advantage can even be enforced. In order to broaden an environmental optimised expansion of geothermal power production in the future by HDR-concepts however further research and development is needed. Besides precise statements on the long-term behaviour of the subsurface heat exchanger (e.g. estimation or exclusion of circulation losses), especially the knowledge on stimulating granite rocks is still insufficient. Even though damaging earthquakes don't need to be expected and have not occurred so far, they can temporarily not be excluded based on existing information. The induced seismic events caused by the geothermal project located in the tectonically active zone around Basel end of 2006 have shown that stimulation of granite rocks can lead to seismic shocks remarkably felt at the surface. Especially in case of plant sites close to populated areas this can raise insecurity of the public. Besides the further research of the naturally existing tensions in the deep underground, also the applicability of innovative stimulation techniques such as multi-frac-stimulation need to be studied.
- In case of **subsurface closed systems** in contrast to subsurface open systems such as hydro-geothermal and HDR-plants, the environmental impacts through geothermal power production during the life are significantly higher. This is due to the lower heat extraction from the deep underground whereas the expenditures for subsurface development are still large. Regarding local environmental impacts, subsurface closed systems are characterised by lower effects on the environment, but do not have significant advantages apart from their theoretical independence of specific geological site conditions. Based on this evaluation, subsurface closed systems are not suitable for an ecologically optimised expansion of geothermal power production.
- Placing geothermal power production into the context of **other energy carriers**, the analysed environmental impacts regarding the life cycle assessment lay in the bandwidth of the other renewable resources and lead compared to fossil energy provision systems especially in case of consumption of finite energy resources and greenhouse gas emissions to remarkable reductions. Regarding the greenhouse gas emissions, geothermal power generation is further comparable to nuclear power provision. A geother-

mal power and heat provision is compared to the other energy carrier alternatives characterised by the lowest environmental impacts respectively the largest reduction.

- Assuming a sufficiently defined legal situation framing the protection of the environment, no provision technology can be identified as ecological best or worst option. Each technology has environmental pros and cons. To what extent these pros and cons are of influence is determined by the plant site. Compared to other energy carriers, hydro-geothermal power generation is connected with a massive impact on the underground and formation waters. On humans, animals, and plants however no specific geothermal effects need to be expected. During plant operation, geothermal energy is characterised by a minimal land use and low environmental impacts compared to other base-load capable concepts for which not only the environmental impacts referring to the power plant itself but also impacts related with fuel provision need to be considered.

Even if the analysed environmental impacts through hydro-geothermal power generation can be rated low respectively not disadvantageous further **environmental optimisation potential** is existent. From the viewpoint of project developers this is true for environmental impacts during the life cycle as well as local environmental impacts; from the viewpoint of the legislation, the optimisation potential is represented by a further promotion of an ecological optimised expansion. The following statements and advice can be derived:

- The **optimisation potential of the environmental impacts during the life cycle** basically can be realised by increasing the ratio of energetic benefit to material and energetic input. The energetic benefit is thereby defined as provided net-power output (i.e. gross-power output minus auxiliary power for conversion, cooling and thermal water cycle) because this amount needs to be the determining factor for an ecological optimised expansion:
  - *Increase of benefit, same subsurface plant concept:* The increase of the benefit is equivalent to increasing the net-power output which can be realised by following measures:
    - Optimising the conversion cycle through (i) increasing the cycle efficiency with a more complex process design (e.g. multi-stage process), through (ii) a further cooling of the thermal water and/or (iii) increasing the plant availability. Optimising the conversion cycle is thereby not a question of ORC or Kalina cycle because both technologies can be realised with optional complexity;

it is the overall performance determined by all discussed optimisation options which is important.

- Optimising the cooling cycle through (i) optimising the condensation temperature also (ii) considering the influence of the auxiliary power demand for the cooling cycle on the net-power output. A once-through cooling system is characterised by the possibility to realise low condensation temperatures and having a low demand for auxiliary power (approx. 5 % of gross-power output); however, once-through cooling systems are hardly relevant for geothermal power production in Germany due to the therewith connected plant site requirements and the fact that hydro-geothermal systems rely on defined geological conditions. The decision hence needs to be made between wet or hybrid cooling towers and dry condensation. For power provision, cooling towers (low condensation temperatures, approx. 23 to 27 % demand for auxiliary power) are advantageous whereas in case of power and heat provision air cooled power plant concepts (with approx. 38 % demand for auxiliary power) might possibly have a better ecological performance due to comparatively lower losings in the power production.
- Optimising the thermal water cycle through producing the environmental optimal amount of thermal water. The auxiliary power for circulating the thermal water over-proportionally increases with growing flow rate in contrast to the only proportionally increasing gross-power output; this leads to one flow rate for which the net-power reaches the maximum and hence the environmental life cycle impacts are reduce to the minimum. Assuming a sustainable use of the reservoir and a therewith possibly connected longer life time the environmental impacts can additionally be reduced.
- Optimising the use of the thermal water through an additional heat provision. The larger the amount of accessible heat - in terms of the anyway occurring amounts of waste and residual heat - is supplied, the larger is the reduction of environmental impacts during the life cycle. Therefore, also the implementation of innovative concepts using not only the residual heat from the thermal water but also the waste heat from the conversion cycle (e.g. heat use in cascades, cold provision) needs to be discussed for the future. Due to large amounts of heat, realising also an economic viable heat supply is connected

with an appropriate structure of heat customers. The assessment of such structures therefore needs to be considered already at the very beginning of project development.

- *Reducing expenditure, same subsurface plant concept:* For this optimisation option, the subsurface plant concept remains the same, just the project realisation considering reservoir development changes. In the future, the environmental impacts during the life cycle can be possibly reduced by an improvement of drilling efficiency through optimised drilling technique; but also the use of electricity instead of diesel driven drilling rigs can lead to an ecological improved performance. Realising an electricity driven drilling is however realisable only with an appropriate connection to the power grid which won't be possible at all plant sites.
- *Stronger increase of benefit in contrast to increasing the expenditures:* By enlarging the plant concept, also expenditures for e.g. reservoir development and possibly the thermal water production will grow. This can basically be compensated if by enlarging the plant concept also the net-power output can be raised. Apart from increasing the flow rate via reservoir stimulation also multi-borehole concepts are possible. The maximum reduction through a plant up-scale is however limited because sustainable reservoir development in one permission field (Federal Mining Act) is only possible with a restricted number of boreholes and also reservoir productivity respectively injectivity can only be enhanced to a certain extent. A further possibility to enlarge geothermal plant concepts is given through the combination of geothermal power production with other energy carriers in hybrid power plants.

- The **optimisation potential of the local environmental impacts** from the viewpoint of project development is mainly connected with an environmentally optimised planning process driven by a dialogue with the public as well as continuous monitoring during operation:
  - *Information of the public:* Due to the closeness of geothermal power plants to populated areas – especially in case of projects with an additional heat supply – an environmentally optimised expansion is related with comprehensive and widespread information of the public. A voluntary involvement of the public might thereby be advantageous such as demonstrated in the research project in Groß

Schönebeck. Only in a shared dialogue the optimal concept considering environmental aspects can be elaborated.

- *Scientific project steering and monitoring:* Because no long-term experience using hydro-geothermal reservoirs exist so far in Germany, a continuous monitoring of the conditions in the deep underground (e.g. pressure, reservoir chemistry, temperature) as well as their evaluation can result in new knowledge. Plant parameters during operation can be adjusted accordingly.

- The **optimisation potential of legal regulations** is predominantly given through further research in the field of geothermal power production as well as the adjustment of legal regulations to the particularities of geothermal projects:

  - *Scientific project steering and monitoring:* With an independent scientific monitoring of all geothermal power projects (and possibly also deep geothermal heat projects which in most cases have already more experience) the observations from single projects can be evaluated holistically. Hence, experiences and advice can be derived on an national level. This is very important, especially if aiming for possibly long operation periods. Legal regulations and guidelines communicated by the government need to be adapted to the made experience. This can for example be possible after finishing the research project “Long-term operation security of geothermal plants” which analyses the problematic of NORM (naturally occurring radioactivity), already known from oil and gas production, within the context of geothermal projects. Further, the dimensioning of permission fields within the Federal Mining Act needs to be adapted to the improved knowledge and modelling of reservoir conditions in the deep underground.

  - *Further promotion of research activities:* Considering an ecologically optimised expansion, further research activities are needed in order to asses aspects which can’t be analysed within regular geothermal projects due to their primary goal of technical availability and economic feasibility. Thereby, the further development of efficient exploration measures plays a determining role due to the major influence of subsurface construction on the environmental advantageous of geothermal power production. But also the precise influence of thermal water, cooling and conversion cycle on the net-power output and hence the environmental life cycle performance needs further research.

- *Adaptation of legal regulations to the particularities of geothermal projects:*
  - Promoting an ecologically optimised expansion within the EEG: Within the EEG (Renewable Energies Act) the power output of geothermal power plants fed in to the public grid is refunded. Due to economic reasons the recent practice it to feed in the gross-power output; auxiliary power for the conversion, cooling and thermal water cycle is taken from the grid. Modelling this fact by balancing the gross-power instead of the net-power output, the environmental impacts during the life cycle lay significantly higher. This is because the auxiliary power demand of about 50 % of the produced gross-power taken from the public grid influences significantly the environmental impacts. Thereby, the assumed power mix of public grid plays an important role so that an expected alternation of the power mix in favour of renewable energies results in a reduction of the environmental impacts by up to 35 %. The ecologically optimal net-power output is so far not promoted within the EEG. While from an ecological viewpoint an optimal flow rate exists which maximises the net-power output, the economic performance continuously improves with an increasing flow rate. Because the auxiliary power for the thermal water circulation grows over-proportionally with an increased flow rate, the auxiliary power demand can even exceed the produced gross-power at a certain flow rate. At this point, no renewable net-power output is actually provided. For an environmentally optimised expansion of geothermal energy hence the promotion of the maximum net-power output is very important. For detailed advice concerning possible alternations of the EEG, a comprehensive economic-ecological comparison regarding the different influencing parameters (e.g. conversion technique, cooling cycle design, plant site) is needed.
  - Adjustment of the horizontal dimensioning of the permission fields to the possibilities of a vertical use: At the moment, the use of one permission field for different, technically independent technologies which are regulated by the Federal Mining Act (e.g. simultaneous use of one permission field for deep borehole heat exchangers, hydro-geothermal and HDR-concept) is not possible. This can possibly interfere a sustainable development of energy supply.
  - Adaptation of legal regulations to existing experiences from geothermal projects: Geothermal power production faces versatile technical challenges; there-

fore also the legal regulations which are relevant are also comprehensive. For example, it needs to be considered that the Federal Mining Act, which regulates large part of the local environmental impacts through geothermal power generation, is basically geared to mining as well as oil and gas production. Because the therewith connected environmental dangers are partially remarkably larger than the impacts through hydro-geothermal reservoir development, the Federal Mining Act defines comparatively massive regulations considering geothermal power production. For an ecologically optimised expansion of geothermal power production this can be possibly more hindering for project development than beneficial for the environment. Additionally, the duration of the approval process due to the lacking experience might also be hindering for a further expansion. Through elaborating environmental guidelines for geothermal power production, the official side as well project planers need to be supported.

- *Enhanced promotion of district heating:* The environmental impacts through geothermal power generation can remarkably be improved through an additional heat supply. Due to the large amounts of heat, an economic viable heat provision is only possible in case of an appropriate customer structure. The implementation of such heating structures is connected with a huge additional planning effort for project developers and therefore also with an additional financial risk. This risk in many projects won't and in some projects can't be accepted. Through a governmental promotion of district heating, this inhibitions for a more efficient use of geothermal energy can be released and an ecologically optimised expansion can be promoted.
- *Information of the public:* For a further development of geothermal power production a dialogue- and information-based communication with the public also from the side of the government is needed. Thereby the goal must be a transparent presentation showing the advantages on one hand and communicating risks on the other.

Based on these conclusions it becomes clear that geothermal power production is capable to remarkably contribute to a sustainable energy provision in Germany in the future. To enable an ecologically optimised expansion not only the further development of single technological aspects (e.g. geological exploration measures, stimulation technique, conversion technology) needs to be brought forward; it is more the comprehension of the overall concept of geothermal

power plants and the therewith connected environmental (and as well economic realisable) determining factors which is inevitable for project developers and the government. Due to the fact that not one single concept can be evaluated as environmentally benign the site-specific overall concept regarding environmentally optimal and technically realisable aspects needs to be focused. Only this way an ecologically optimised expansion of geothermal power generation in Germany can be brought forward.

1 Einleitung

Zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien stellt neben der Wasserkraft, der Biomasse und der Windenergie die Geothermie eine viel versprechende Option dar, die gerade in den letzten Jahren innerhalb der energiewirtschaftlichen Diskussion merklich an Bedeutung gewonnen hat. Zum einen ist mit der Option Erdwärme ein großes technische Erzeugungspotenzial verbunden, welches in Deutschland einen erheblichen Anteil der Stromnachfrage decken kann, und zum anderen ist sie im Unterschied zu einer Stromerzeugung aus Wind und Sonne grundlastfähig. Sind zudem entsprechende Abnehmerstrukturen vorhanden, ist auch eine zusätzliche Deckung der Wärmenachfrage möglich.

Im Sinne der Nachhaltigkeit ist eine geothermische Stromerzeugung bzw. Strom- und Wärmeerzeugung aber nur dann sinnvoll, wenn neben Aspekten der Versorgungssicherheit damit auch ökologische Vorteile im Vergleich zu den gegebenen Alternativen verbunden sind. Aus diesem Grund ist es gerade jetzt notwendig, die mit einer geothermischen Stromerzeugung verbundenen Umwelteffekte genau zu analysieren. Bereits im Vorfeld eines weiteren Ausbaus der Geothermie müssen Leitlinien für ökologisch optimierte Anlagenkonzepte erarbeitet und ggf. auch die Gesetzgebung entsprechend angepasst werden, um so frühzeitig möglichen Umwelteffekten entgegen wirken zu können und gleichzeitig die ökologischen Vorteile durch eine weitere Erschließung des vorhandnen Optimierungspotenzials zu stärken.

Da die Frage der durch eine geothermische Stromerzeugung zu erwartenden Umwelteffekte bislang nur unzureichend analysiert wurde, müssen im Rahmen einer ökologischen Analyse und Bewertung die großräumigen Umwelteffekte im Verlauf des gesamten Lebensweges – d. h. Bau, Betrieb und Abriss unter Berücksichtigung der jeweils vorgelagerten Ketten – bilanziert sowie die kleinräumigen Umwelteffekte, welche mit einer direkten Wirkung auf die Umwelt am Anlagenstandort verbunden sind, untersucht werden.

Im Rahmen dieser Studie (Abb. 1) werden daher

- zunächst in Kapitel 2 die Grundlagen einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland kurz dargestellt und ein Überblick über den gegenwärtigen Stand gegeben.
- Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die Rahmenbedingungen für die anschließende ökologische Analyse und Bewertung erläutert. Neben der Definition gegenwärtig für Deutschland repräsentativer geothermischer Anlagenkonzepte werden dabei auch nichtgeothermische Vergleichskonzepte bestimmt, um so eine Einordnung der Geothermie in

den Kontext anderer Energieträger vornehmen zu können. Zudem werden für eine Analyse der lokalen Umwelteffekte die umweltrechtlichen Rahmenbedingungen umrissen.

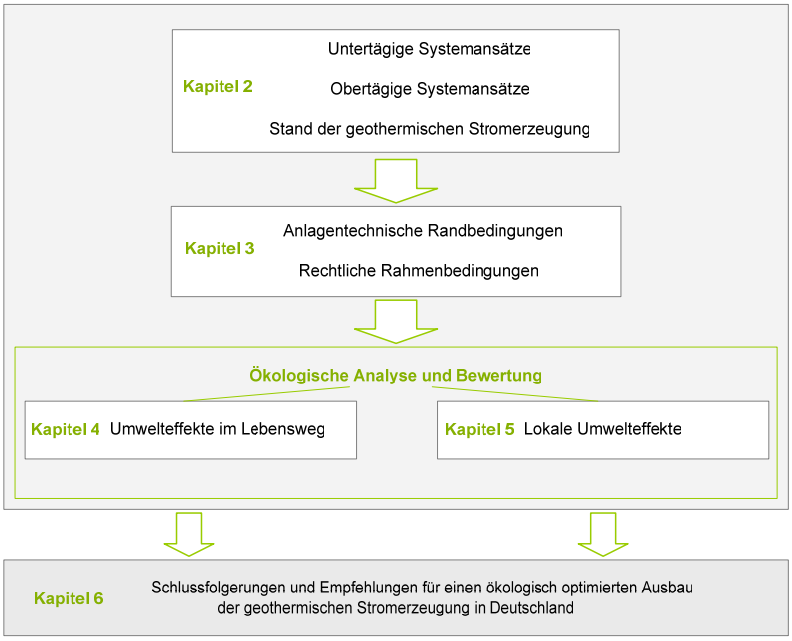

Abb. 1: Schematischer Aufbau der Studie

- In Kapitel 4 wird anschließend die Analyse der Umwelteffekte im Lebensweg und in Kapitel 5 die der lokalen Umwelteffekte durchgeführt. Der Aufbau beider Kapitel beginnt dabei mit einer Einführung in die jeweils zu Grunde gelegte Methodik, nach welcher zunächst die geothermischen Referenzkonzepte analysiert werden und darauf folgend deren Einordnung gegenüber den nicht-geothermischen Vergleichskonzepten erfolgt. In einem ersten Fazit werden die jeweils ermittelten Ergebnisse zusammengefasst und erste Schlussfolgerungen für einen ökologisch optimierten Ausbau gegeben.
- In Kapitel 6 wird auf Basis der vorangegangenen Kapitel ein Gesamtfazit gezogen und Empfehlungen für einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung abgeleitet.

Die Ergebnisse der Studie basieren u. A. auf Workshops und Fachgesprächen, welche nur durch die Unterstützung von Seiten externer Fachexperten (siehe Anhang A.3) möglich waren, und wurden im Rahmen eines Abschlussworkshops einer ausgewählten Fachöffentlichkeit zur Diskussion gestellt.

2 Einführung in die geothermische Stromerzeugung

Obwohl Erdwärme grundsätzlich überall verfügbar ist, sind ihrer Nutzung in Deutschland u. a. technische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt. Im Folgenden werden daher die für eine geothermische Stromerzeugung technisch nutzbaren Vorkommen kurz dargestellt und anschließend darauf aufbauende Nutzungskonzepte skizziert. Abschließend wird die technische Reife der verschiedenen Konzepte anhand des gegenwärtigen Standes der geothermischen Stromerzeugung dargestellt.

Ziel dieses Kapitels soll es dabei sein, einen einführenden Überblick der im Rahmen dieser Studie betrachteten Konzepte zur geothermischen Stromerzeugung zu geben. Weiterführende Details, welche für eine ökologische Analyse und Bewertung relevant sind, werden in späteren Kapiteln ausführlich behandelt.

2.1 Technisch nutzbare Geothermievorkommen

Für die geothermische Stromerzeugung ist aus wirtschaftlicher Sicht eine Mindesttemperatur von 100 °C notwendig (vgl. /Paschen et al. 2003/). Bei einer Temperaturzunahme von etwa 30 K pro km in die Tiefe (vgl. /Rummel et al. 1993/) ist für die geothermische Stromerzeugung damit eine Erschließung geothermischer Vorkommen in ca. 3 bis 7 km Tiefe verbunden[1]. Gemäß (/Paschen et al. 2003/) entfallen 1 % des für Deutschland ermittelten technischen Stromerzeugungspotenzials aus Geothermie auf Heißwasser-Aquifere, 4 % auf Störungszonen und 95 % auf kristalline Gesteine. Diese aus gegenwärtiger Sicht technisch nutzbaren Energievorkommen werden im Folgenden kurz beschrieben.

Heißwasser-Aquifere. Aquifere (oder auch Grundwasserleiter) sind hochpermeable, gering mächtige Gesteinsschichten, die ausreichend durchlässige Bestandteile enthalten, um signifikante Mengen an Wasser zu speichern oder dem Gefälle entsprechend weiterzuleiten (vgl. /Paschen et al. 2003/, /Murawski et al. 1998/). Als Heißwasser-Aquifere werden im Folgenden entsprechend Grundwasserleiter mit Temperaturen ab 100 °C verstanden. In Bezug auf die jeweils zu erwartenden Durchlässigkeiten müssen weiterhin Poren-, Kluft- und Karstwasserleiter unterschieden werden (/Paschen et al. 2003/). Für die geothermische Stromerzeugung

[1] Eine 7 km tiefe Bohrung stellt momentan in etwa die technische Bohrgrenze dar

technisch nutzbare Heißwasser-Aquifere liegen in den Sedimentgesteinen des Norddeutschen Beckens, des Oberrheingrabens und des Süddeutschen Molassebeckens.

Störungszonen. Störungen entstehen in der oberen Erdkruste, wenn dortige Gesteine auf einwirkende tektonische Kräfte reagieren und Bruchzonen ausbilden. Störungen können dabei deutlich größere Durchlässigkeiten als umliegende Gesteine aufweisen und so zu verstärktem Fluidtransport und einem konvektiven Wärmetransport führen. Das dadurch in geringere Tiefen aufsteigende Fluid kommt einem nach oben gerichteten Wärmetransport gleich. Diese in Störungszonen u. U. zusätzlich vorfindbare Wärmequelle kann für eine gezielte geothermische Nutzung interessant sein (vgl. /Paschen et al. 2003/). Insgesamt ist der Wissensstand über die hydraulischen Eigenschaften von Störungen noch als gering zu bewerten (vgl. /Rogge 2003/).

Kristallin-Gestein. Kristalline Gesteine (meist Granit oder Gneise) liegen tiefer als Sedimentgesteine und weisen daher in der Regel auch höhere Temperaturen auf. Sie bilden meist massige Gesteinskörper von großer Mächtigkeit aus, ihre Permeabilität ist jedoch vergleichsweise gering. Daher werden sie auch als sog. heiße trockene Gesteine (Hot-Dry-Rock) bezeichnet (vgl. /Paschen et al. 2003/). Die bedeutendsten Kristallin-Vorkommen sind das Süd- und Mitteldeutsche Kristallingebiet.

Für die geothermische Stromerzeugung kommen beim derzeitigen Stand der Erschließungstechnik vor Allem der Malmkarst des Süddeutschen Molassebeckens, der Muschelkalk und Buntsandstein des Oberrheingrabens und die Rotliegend-Sandsteine des Norddeutschen Beckens in Frage (Abb. 2). Der Malmkarst verfügt als Karstwasserleiter über die besten hydraulischen Eigenschaften, so dass die Erfolgswahrscheinlichkeit für die Erreichung ausreichender Fließraten hoch ist; dies gilt insbesondere dann, wenn durch Säureinjektionen stimuliert wird. Der Buntsandstein und der Muschelkalk des Oberrheingrabens bieten höhere Temperaturen bei vergleichsweise geringer Bohrtiefe. Hohe Ergiebigkeiten sind jedoch nur in Störungs- oder Kluftzonen zu erwarten, welche im Oberrheingraben ein relativ dichtständiges Netzwerk bilden. Durch eine Stimulation der Lagerstätte ist eine zusätzliche Steigerung der Ergiebigkeit möglich. Die Rotliegend-Sandsteine des Norddeutschen Beckens erreichen bei großer Tiefenlage ebenfalls hohe Temperaturen. Ihre Permeabilität dürfte jedoch nur in wenigen Regionen des Norddeutschen Beckens, vor Allem im östlichen Teil, für eine geothermische Stromproduktion ausreichen (z. B. /Jung 2007/). Durch den Einsatz von Frac-Verfahren, wie dies im Forschungsvorhaben Groß Schönebeck erprobt wird, könnten sich dennoch beachtliche Möglichkeiten zu ihrer Nutzung ergeben.

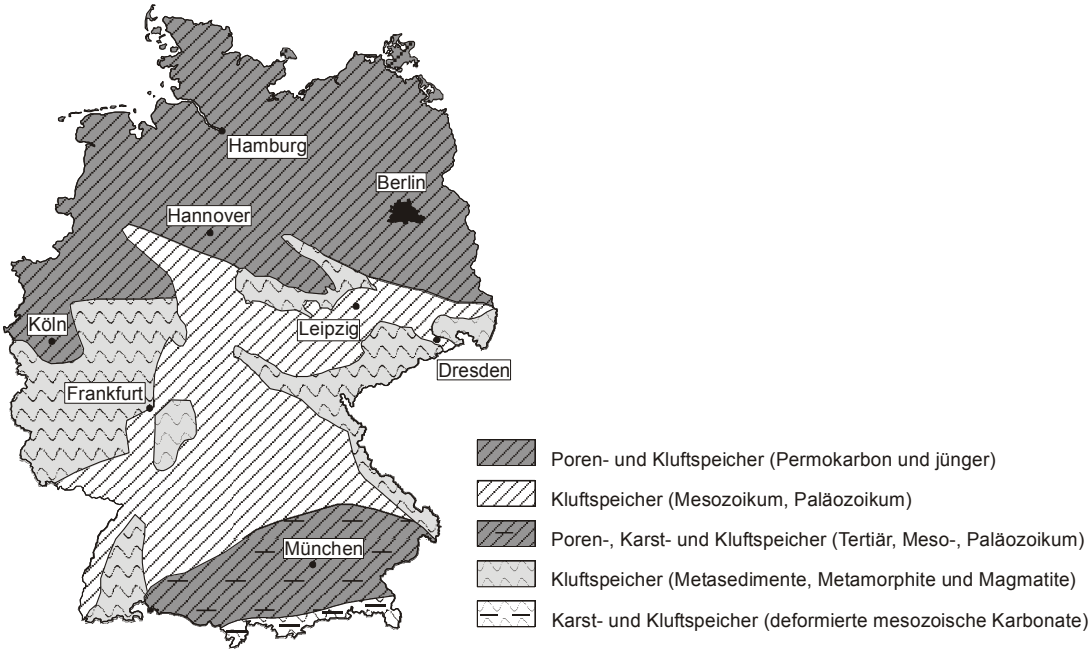

Abb. 2: Überblick zu den geologischen Gegebenheiten in Deutschland(/Hurter, Holl 2002/)

2.2 Geothermische Stromerzeugungskonzepte

In Bezug auf die nutzbaren Geothermievorkommen können verschiedene Konzepte hinsichtlich der Unter- und Übertage verwendeten Technologien für eine geothermische Stromerzeugung definiert werden.

Hinsichtlich **untertägiger Systemansätze** lassen sich folgende Erschließungs-Konzepte unterscheiden:

1. **Erschließung der Erdwärme mittels Untertage offener Systeme,** bei welchen das Wärmeträgermedium in direktem Kontakt mit dem Untergrund steht (Aquifer-System, Hot-Dry-Rock-System).

2. **Erschließung der Erdwärme mittels Untertage geschlossener Systeme,** bei welchen die Erdwärme durch ein vom Untergrund abgeschlossenes Wärmeträgermedium zutage gefördert wird (Tiefe Erdwärmesonde, Untertage geschlossener Wärmetauscher).

In Bezug auf **obertägige Systemansätze** werden im Weiteren folgende Stromerzeugungs-Konzepte unterschieden:

1. **Direkte Nutzung der zutage geförderten Erdwärme**, bei welcher das Wärmeträgermedium selbst das zur Stromerzeugung notwendige Arbeitsmittel darstellt (Direktdampf-Nutzung, Flash-Prozesse).
2. **Indirekte Nutzung der zutage geförderten Erdwärme**, bei welcher die Energie des Wärmeträgermediums zur Stromerzeugung auf einen sekundären Kreislauf übertragen wird (ORC-Prozess, Kalina-Prozess). Eine indirekte Nutzung kann sich ggf. auch einer direkten Nutzung anschließen und somit mit selbiger kombiniert werden.
3. **Stromerzeugung mit zusätzlicher Wärmebereitstellung,** bei welcher die im Wärmeträgermedium enthaltene Restwärme noch zur Wärmebereitstellung eingesetzt wird.

Die **Kombination der unter- und obertägigen Systemansätze** lassen sich wie in Tab. 1 dargestellt einordnen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Systemansätze näher erläutert

Tab. 1: Kombination der unter- und obertägigen Systemansätze

	Direkte obertägige Nutzung (mit/ohne Wärmebereitstellung)	Indirekte obertägige Nutzung (mit/ohne Wärmebereitstellung)
Untertage offene Systeme		Aquifer-System Hot-Dry-Rock-System
Untertage geschlossene Systeme	Tiefe Erdwärmesonde Geschlossener Wärmetauscher	Tiefe Erdwärmesonde Geschlossener Wärmetauscher

2.2.1 Untertägige Systemansätze

2.2.1.1 Erschließungskonzepte

Aquifer-Systeme

Aquifer-Systeme bzw. hydrothermale Systeme nutzen das in Heißwasser-Aquiferen oder ggf. auch Störungszonen vorhandene Thermalwasser als Wärmeträgermedium. Die Erschließung dieses Reservoirtyps erfordert in der Regel mindestens zwei Tiefbohrungen (eine Produktions- und eine Injektionsbohrung). Durch die Förderbohrung wird das heiße Thermalwasser (in der

Regel mit Hilfe von Pumpenergie[2]) an die Oberfläche gefördert (Abb. 3). In einem übertägigen Wärmetauscher wird dem Wärmeträgermedium ein Teil der Wärme entzogen und das abgekühlte Thermalwasser anschließend durch die Injektionsbohrung (in vielen Fällen auch mit Hilfe von Pumpaufwand[3]) in die Lagerstätte verpresst, da die z. T. hochmineralisierten Thermalwässer zum einen nicht in Oberflächengewässern entsorgt werden können und zum anderen die Reinjektion auch aus Gründen der Druckhaltung im Nutzhorizont erforderlich ist (vgl. /Kaltschmitt et al. 1999/). Um eine hinreichend lange Lebensdauer des Systems gewährleisten zu können, müssen Produktions- und Injektionsbohrung im Nutzhorizont einen Mindestabstand von ca. 1 km aufweisen (/Jung et al. 2002/).

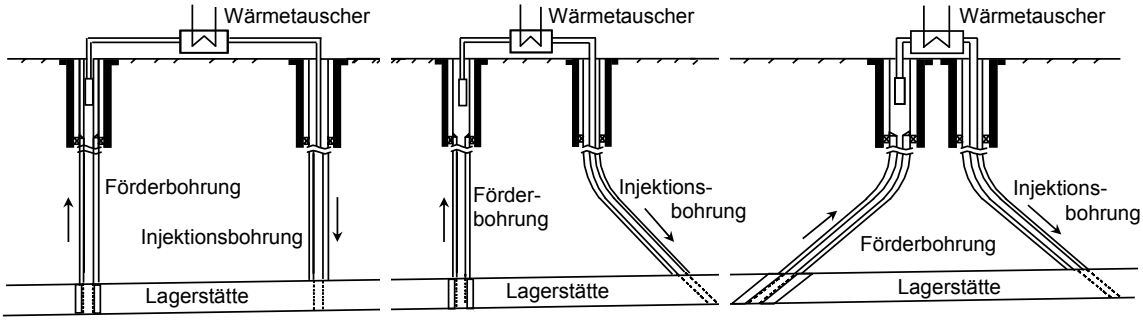

Abb. 3: Hydrothermale Bohrungsdublette (/Kaltschmitt et al. 1999/ verändert)

In Abhängigkeit von den geologischen Standortbedingungen, u. a. förderbare Thermalwassertemperatur und Reservoirproduktivität, sind mit hydrothermalen Dubletten thermische Entzugsleistungen bis etwa 25 MW-Bereich realisierbar. Durch zusätzliche Stimulationsmaßnahmen besteht jedoch die Möglichkeit die Reservoirprodutkivität und damit auch die Entzugsleistung zu steigern.

Neben der konventionellen Mehrbohrlocherschließung (d. h. mindestens zwei Tiefenbohrungen) sind grundsätzlich auch Einbohrlochkonzepte denkbar, bei denen Förderung und Injektion des Thermalwassers im gleichen Bohrloch erfolgen (Abb. 4). Voraussetzung hierfür ist das Vorhan-

[2] Ist der Druck in der hydrothermalen Niederdrucklagerstätte höher als der hydrostatische Druck, der sich aus der die Förderbohrung ausfüllenden Wassersäule ergibt, kann das Thermalwasser auch ohne Pumpenergie gefördert werden.

[3] Ist der hydrostatische Druck, der sich aus der die Injektionsbohrung ausfüllenden Wassersäule ergibt, höher als der Druck in der hydrothermalen Niederdrucklagerstätte, kann das Thermalwasser auch ohne Pumpenergie injiziert werden.

densein und die entsprechende Erschließung zweier geeigneter Lagerstätten. Die hier erzielbaren Entzugsleistungen sind jedoch aufgrund der durch die Bohrlochkonstruktion begrenzten Volumenströme deutlich geringer (vgl. /GTN 2003/).

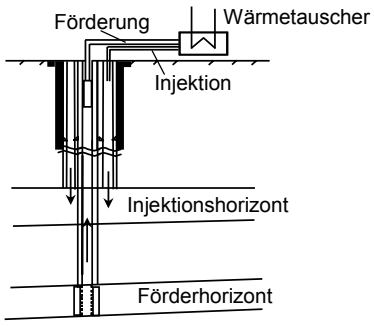

Abb. 4: Hydrothermales Einbohrlochkonzept (/Kaltschmitt et al. 1999/)

Hot-Dry-Rock-Systeme

Die kristallinen Gesteine des tiefen Untergrundes haben i. Allg. eine zu geringe Durchlässigkeit, um eine ausreichende Heißwasserproduktion zu ermöglichen. Grundlegendes Konzept der HDR-Technik[4] ist es daher, großflächige Riss-Systeme mit hoher Durchlässigkeit im Untergrund (Kristallin) herzustellen, welche wie hydrothermale Systeme mit Mehrbohrlochkonzepten (d. h. mindestens eine Förder- und eine Injektionsbohrung) genutzt werden können (Abb. 5). Dabei wird das kalte Wärmeträgermedium[5] in der Injektionsbohrung mit Hilfe von Pumpenergie in das untertägige Riss-System verpresst und beim Durchfließen des heißen Gesteins aufgeheizt, wobei in Abhängigkeit von der Geologie Fluidverluste nicht auszuschließen sind. Der heiße Wärmeträger wird danach in der Förderbohrung Übertage gefördert. Um eine langjährige Betriebsdauer zu garantieren sind in Abhängigkeit des Riss-Systems ein Bohrlochabstand von 1 km und mehr sowie eine Gesamtrissfläche von 5 bis 10 km^2 notwendig (/Paschen et al. 2003/). Die realisierbaren Entzugsleistungen je Dublette liegen im oberen zweistelligen MW-Bereich. Auch hier sind Einbohrlochsysteme grundsätzlich denkbar (z. B. /Rummel et al. 1993/).

[4] Manchmal auch Hot Fractured Rock (HFR) genannt oder auch im Begriff Enhanced Geothermal Systems (EGS) enthalten

[5] In der Regel wird als Wärmeträgermedium Wasser eingesetzt, aber auch über andere Wärmetransportmittel (z.B. überkritisches CO_2) wird in der Fachwelt nachgedacht (/Bergakademie Freiberg 2005/)

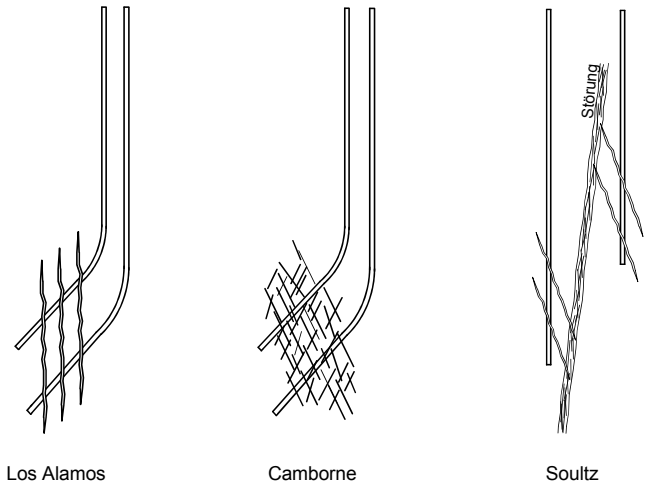

Abb. 5: Beispielhafte HDR-Erschließungskonzepte an verschiedenen Standorten (/Kalschmitt et al. 2006/)

Tiefe Erdwärmesonde

In der tiefen Erdwärmesonde, als untertägig geschlossenem System, wird die im Untergrund gespeicherte Energie mit Hilfe eines vom Untergrund abgedichteten Wärmeträgermediums zutage gefördert. In tiefen Erdwärmesonden kann die geothermische Energiegewinnung daher unabhängig von Wasser führenden und hydraulisch leitenden Gesteinsschichten, d. h. standortunabhängig, erfolgen. Das Prinzip ist vergleichbar mit einer oberflächennahen Erdwärmesonde zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme (Abb. 6). Dabei wird das Wärmeträgermedium in den Ringraum einer entsprechend ausgebauten Tiefenbohrung Untertage gepumpt und somit mit zunehmender Tiefe erwärmt. Im Innenstrang der Sonde wird das erwärmte Medium anschließend wieder zutage gefördert. Neben dem Einsatz von Wasser spielen im Hinblick auf die Stromerzeugung vor Allem die Direktverdampfung organischer Wärmeträgermedien und der anschließende direkte Einsatz dieses Dampfes in einem Konversionsprozess eine Rolle. Langfristig kann so dem Untergrund die Wärme entzogen werden, die aufgrund des natürlichen Wärmestroms nachfließt. In Tiefen zwischen 1 und 5 km liegt die realisierbare Entzugsleistung zwischen 50 und 500 kW (vgl. /Kalstchmitt et al. 1999/, /Foerster et al. 2004/) und ist daher deutlich geringer als in den zuvor dargestellten offenen Systemen.

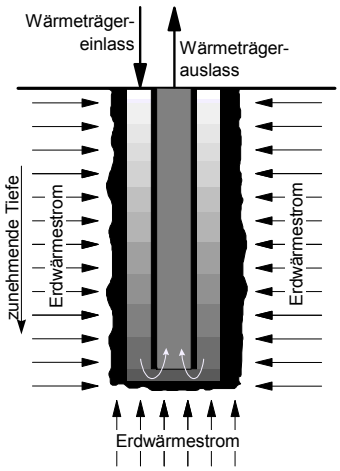

Abb. 6: Funktionsschema einer tiefen Erdwärmesonde (/Kaltschmitt et al. 1999/)

Untertägig geschlossener Wärmetauscher

Beim untertägig geschlossenen Wärmetauscher wird die thermische Entzugsleistung gegenüber einer tiefen Erdwärmesonde durch die Nutzung einer größeren, geschlossenen Wärmeübertragerfläche im Untergrund erhöht, in dem eine vollständig gegen den Untergrund abgedichtete Dublette hergestellt wird (Abb. 7, links).

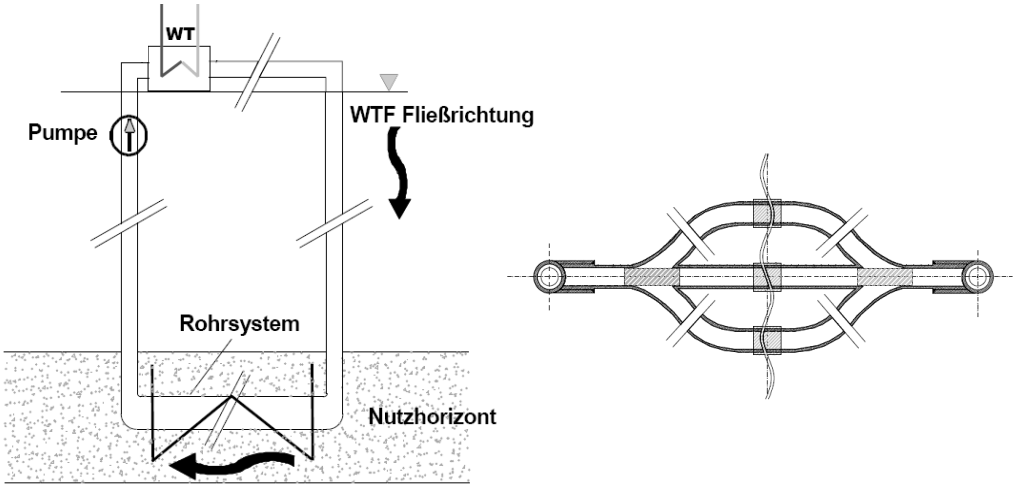

Abb. 7: Schema eines untertägig geschlossenen Wärmetauschers (/Legarth, Wolff 2000/)

Das System besteht aus der untertägigen, horizontalen Verbindung zweier Tiefbohrungen mit Tiefen von ca. 3 bis 5 km, die einen Abstand von 5 bis 10 km haben und durchgängig fluiddicht zum Grundgebirge verrohrt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, das System horizontal zu

verzweigen, um so eine größere Wärmeübertragerfläche im Untergrund nutzen zu können (Abb. 7, rechts). Das Wärmeträgermedium (Wasser oder organische Wärmeträgermedien) wird dabei wie bei Dubletten offener Systeme durch eine Bohrung in die Tiefe geleitet, erwärmt sich beim Durchfließen des untertägig geschlossenen Wärmetauschers, um anschließend in der zweiten Bohrung zutage gefördert zu werden. Auch hier kann dem Untergrund nur soviel Wärme entzogen werden, wie der natürliche Wärmestrom zulässt. Die realisierbaren Entzugsleistungen liegen hier im unteren MW-Bereich (/Legarth, Wolff 2000/).

2.2.1.2 Erschließungstechnik

Bevor die Erschließung geothermischer Vorkommen erfolgt, werden in der Regel entsprechende Vorerkundungsmaßnahmen durchgeführt, um die für eine erfolgreiche Projektumsetzung notwendigen Parameter bereits im Vorfeld weitestgehend sicherstellen zu können, aber auch generell die Niederbringung einer Tiefbohrung zu planen. Während die Vorhersage Wasser führender Gesteinsschichten gegenwärtig noch mit zum Teil großen Unsicherheiten behaftet ist, ist die Bestimmung des jeweils vorliegenden Temperaturgradienten (unter Umständen sogar durch bereits vorliegende Temperaturprofilkarten) vergleichsweise unkritisch; zumal eine bestimmte Temperatur in entsprechender Bohrtiefe fast immer zu erreichen ist.

Die im Weiteren betrachteten Vorerkundungsmaßnahmen beziehen sich auf alle Systemansätze, da die Erschließung des jeweiligen Vorkommens grundsätzlich mit der Niederbringung mindestens einer Tiefenbohrung verbunden ist (Tab. 2). Bei untertägig offenen Systemen können zusätzlich sekundäre Erschließungsmaßnahmen in Form einer Lagerstättenstimulation notwendig sein. Nachfolgend werden die einzelnen Erschließungsschritte kurz dargestellt und dabei auf ggf. bestehende Besonderheiten der verschiedenen Erschließungskonzepte hingewiesen.

Tab. 2: Notwendige Erschließungsschritte der verschiedenen Erschließungskonzepte

	Vorerkundung	Bohrungsniederbringung und -ausbau	Stimulation
Untertage offene Systeme	Aquifer-System Hot-Dry-Rock-System	Aquifer-System Hot-Dry-Rock-System	(Aquifer-System) Hot-Dry-Rock-System
Untertage geschlossene Systeme	Tiefe Erdwärmesonde Geschl. Wärmetauscher	Tiefe Erdwärmesonde Geschl. Wärmetauscher	

Vorerkundungstechnik

Sofern keine Daten über die geologischen Verhältnisse im Untergrund vorhanden sind, werden im Vorfeld der Niederbringung einer Tiefbohrung geophysikalische Vorerkundungsmaßnahmen durchgeführt, um so genauere Kenntnisse über die Strukturen im Untergrund zu erlangen.

Gegenwärtig werden in Deutschland vorwiegend aus der Erdöl- und Erdgasindustrie bekannte seismische Untersuchungsmethoden durchgeführt. In den für die geothermische Stromerzeugung relevanten Tiefen kommt dabei in der Regel die Reflexionsseismik zum Einsatz. Die zu erkundende Fläche (meist mehrere Quadratkilometer) wird hier mittels drei bis vier Geländefahrzeugen mit integriertem Vibrator in parallelen (2D-Seisnmik) bzw. sich kreuzenden (3D-Seismik) sog. Seismik-Linien abgefahren. Dabei werden mittels der Vibratoren in bestimmten Abständen künstliche seismische Wellen an die Erdoberfläche abgegeben. Die reflektierten Wellen werden anschließend durch mobile Geophone erfasst. (/BGR 2007/)

Eine bislang in der Geothermie in Deutschland noch kaum eingesetzte Vorerkundungstechnik stellen dagegen elektromagnetische Verfahren dar, bei denen nicht seismische Wellen, sondern elektromagnetische Felder erzeugt werden. Bei der Magnetotellurik, welche sich für eine Erkundung des tiefen Untergrunds eignet, werden durch natürliche oder künstliche, elektrische oder magnetische Felder Erdmagnetfeldvariationen erzeugt und so elektrische Ströme im Untergrund induziert. Diese Ströme können in Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit unterschiedlich stark sein. Durch die Auswertung der Magnetfelder, die von den induzierten Strömen im Untergrund generiert werden, kann die elektrische Leitfähigkeit des Untergrunds ermittelt werden. Durch die unterschiedliche Leitfähigkeit von Wasser gegenüber Gestein werden so Wasser führende Gesteinsschichten erkennbar (/BGR 2007/).

Bohr- und Bohrlochausbautechnik

Die primäre Erschließung geothermischer Systeme basiert auf konventioneller Bohr- und Bohrlochausbautechnik der Erdöl- und Erdgasindustrie, wodurch auf eine langjährige Erfahrung[6] zurückgegriffen werden kann. Zunächst erfolgt dabei die Herstellung und Einrichtung eines Bohrplatzes, um einen sachgemäßen und sicheren Bohrbetrieb gewährleisten zu können. Die Niederbringung einer Bohrung – am häufigsten wird das Rotary-Bohrverfahren eingesetzt – erfolgt dabei in mehreren Bohrabschnitten, die sich jeweils aus Bohren, Messen, Verrohren und Zemen-

[6] In den letzten Jahren wurde insbesondere die Richtbohrtechnik zur Niederbringung abgelenkter Bohrungen bei der Erschließung von Offshore-Erdöl- und Erdgasfeldern entscheidend weiterentwickelt.

tieren zusammensetzen. Beim Bohren wird mit Hilfe eines auf die jeweilige Geologie angepassten Bohrmeißels Gestein im Untergrund zerstört (Abb. 8).

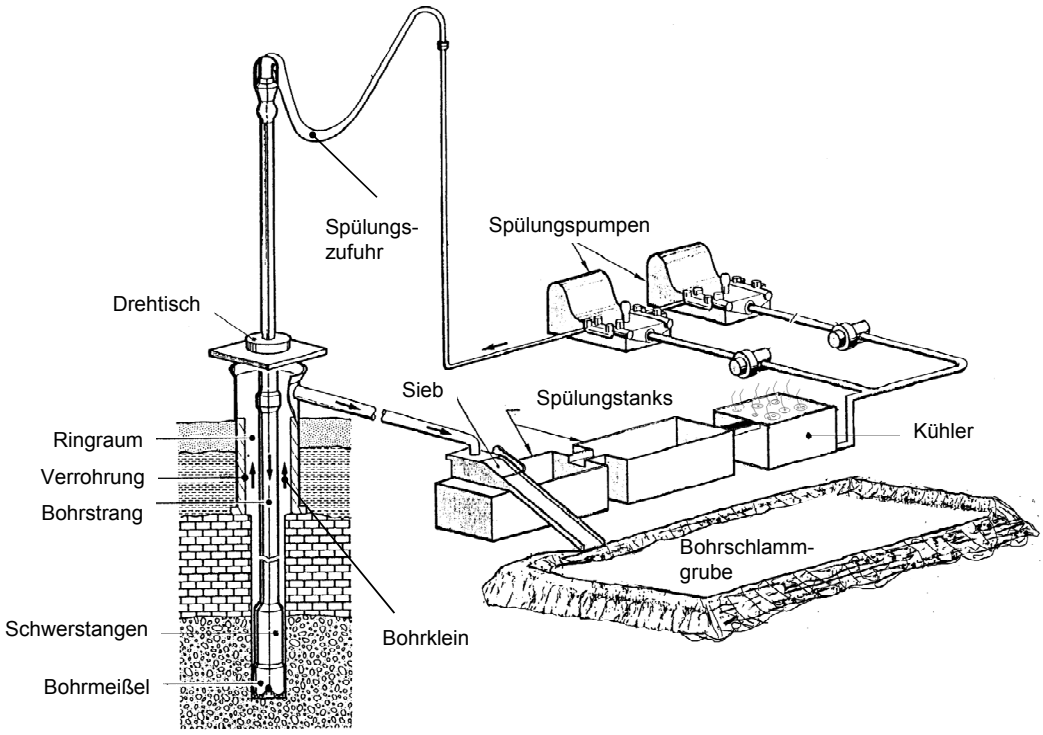

Abb. 8: Rotary-Bohrprinzip (/Kaltschmitt et al. 1999/ verändert)

Das dadurch anfallende Bohrklein wird durch die Bohrspülung, welche durch kleine Düsen im Bohrmeißel zutritt, im Ringraum zwischen Bohrstrang und Bohrlochwand nach oben transportiert. Übertage wird die Spülung vom Bohrklein gereinigt und wieder dem Bohrloch zugeführt, so dass ein Kreislauf für die Bohrspülung besteht. Der Bohrmeißel selbst wird durch Rotation des Bohrstrangs, welche durch den sog. Drehtisch in der übertägigen Bohranlage erzeugt wird, oder durch die strömende Bohrspülung angetrieben. Der Meißelandruck wird in der Regel durch das Gewicht des unteren Bohrstrangs durch Schwerstangen aufgebracht. In Abhängigkeit der jeweiligen Geologie werden nach einer Bohrstrecke von mehreren hundert Metern im gebohrten Abschnitt zunächst geophysikalische Messungen vorgenommen, um neben den genauen Bohrlochabmessungen Informationen über die tatsächlich vorliegende Geologie zu erhalten. Anschließend wird der Bohrlochabschnitt aus sicherheitstechnischen Gründen verrohrt. Zur Abstützung und Abdichtung der Verrohrung gegenüber dem Gestein wird der Ringspalt zwischen Bohrlochwand und Verrohrung anschließend zementiert. Nach Aushärtung des Zements wird

der nächste Bohrabschnitt mit einem kleineren Meißel fortgesetzt. Dieses Schema (Bohren, Messen, Verrohren, Zementieren) wird bis zur Erreichung des Zielhorizonts weitergeführt.

Hinsichtlich untertägig geschlossener Wärmetauscher sind die an die Bohrtechnik gestellten Anforderungen noch nicht ausreichend gelöst. Als gegenwärtige Herausforderungen stellen sich dabei u. a. die Richt- und Zielbohrtechnik, die Komplettierung der Sonden zur Herstellung eines dichten, langlebigen und regelbaren Fördersystems sowie die Verbesserung des untertägigen Wärmeübergangs zwischen Gebirge und Wärmeträgermedium dar.

Stimulationstechnik

Aufgrund der hohen Fließraten, welche eine geothermische Stromerzeugung in untertägig offenen Systemen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht erfordert (vgl. /Paschen et al. 2003/), besteht durch sekundäre hydraulische Erschließungsmaßnahmen (sog. Hydraulic Fracturing) und chemische Erschließungsmaßnahmen (sog. Säuerung) die Möglichkeit, den Förderhorizont zu stimulieren und so z. T. deutlich höhere Fließraten zu erzielen[7].

Die hydraulischen Stimulationsverfahren basieren auf langjährigen Erfahrungen aus der Erdöl- und Erdgasindustrie. Durch Verpressen eines Fluids (z. B. Wasser) unter Drücken oberhalb des kritischen Gebirgsdrucks werden dabei im Förderhorizont die bestehenden Fließwege Wasser führender Gesteinsschichten stimuliert bzw. die vorhandenen Klüfte im Hartgestein aufgeweitet und ggf. neue Risse erzeugt und so die hydraulische Durchlässigkeit in der Lagerstätte erhöht. Bei hydrothermalen Lagerstätten wird dabei – wie bei der Erdöl- und Erdgaserschließung – die hydraulische Anbindung der Bohrungen an das bestehende Reservoir im Sedimentgestein verfolgt, während bei HDR-Systemen eine weiter reichende Stimulation von Hartgestein erfolgen muss. Im Europäischen Forschungsprojekt Soultz-sous-Forêts konnten diese veränderten Anforderungen an die Stimulation zuletzt erfolgreich umgesetzt werden.

Wie auch hydraulische Stimulationsverfahren werden chemische Stimulationsmaßnahmen in der Erdöl- und Erdgasindustrie bereits seit vielen Jahren eingesetzt. Als Stimulationsfluid wird dabei Säure in der Regel unterhalb des kritischen Drucks in den Förderhorizont injiziert. Neben der Beseitigung bohrlochnaher Fließwiderstände, welche durch Reaktion mit der Säure abgebaut werden, ist in klüftigen Karbonatgesteinen und karbonatisch gebundenen Sandsteinen

[7] Wird in einer vertikalen Bohrung zusätzlich durch Richtbohren ein sog. Side-Track niedergebracht, kann dadurch die Zulaufstrecke zur Förderbohrung im Aquifer vergrößert und so ebenfalls die förderbare Fließrate erhöht werden.

(Süddeutsches Molassebecken) durch das Einleiten von z. B. Salzsäure in der Regel auch eine weiter reichende Verbesserung der hydraulischen Durchlässigkeit zu erzielen.

2.2.2 Obertägige Systemansätze

2.2.2.1 Indirekte Nutzung

Da die durch Heißwasser-Aquifere und ggf. Störungszonen zu erschließenden Thermalwassertemperaturen (ca. 100 bis 160 °C) und die notwendige Druckhaltung im Thermalwasserkreislauf (ca. 10 bar /Legarth 2003/) zur Vermeidung von Ausfällungen eine ausreichende, direkte Dampfproduktion und -nutzung (z. B. in Flash-Prozessen) nicht zulassen, kommen bei der Stromerzeugung aus hydrothermalen Lagerstätten in Deutschland nur Übertage geschlossene, d. h. binäre Systeme zur Anwendung. Obwohl bei HDR-Systemen im Vergleich zur Erschließung hydrothermaler Lagerstätten höhere Temperaturen vorliegen, werden auch hier im Weiteren nur obertätig geschlossene Systeme berücksichtigt. Grund dafür sind die geringeren realisierbaren Anlagenleistungen und ggf. (umwelt-)technischen Probleme bei der Ableitung nichtkondensierbarer Gase und die Handhabung von Ausfällungen (vgl. /GTN 2003/, /Kaltschmitt et al. 2006/).

In binären Systemen wird die Energie des Thermalwassers auf ein tiefer siedendes Arbeitsmittel in einem sekundären Kreislauf (auch binärer Kreislauf genannt) übertragen. Gegenwärtig stehen hierfür der ORC- und der Kalina-Prozess zur Verfügung.

Organic Rankine Cxycle (ORC)

Der ORC-Prozess ist bis auf das verwendete Arbeitsmittel (und die damit verbundenen Temperatur- und Druckparameter) mit einem konventionellen Wasserdampfprozess vergleichbar. Im einfachsten ORC-Prozess wird das Arbeitsmedium durch das Thermalwasser vorgewärmt und verdampft, in der Turbine unter Abgabe von Arbeit entspannt, kondensiert und durch die Speisepumpe wieder auf Verdampfungsdruck gebracht (Abb. 9).

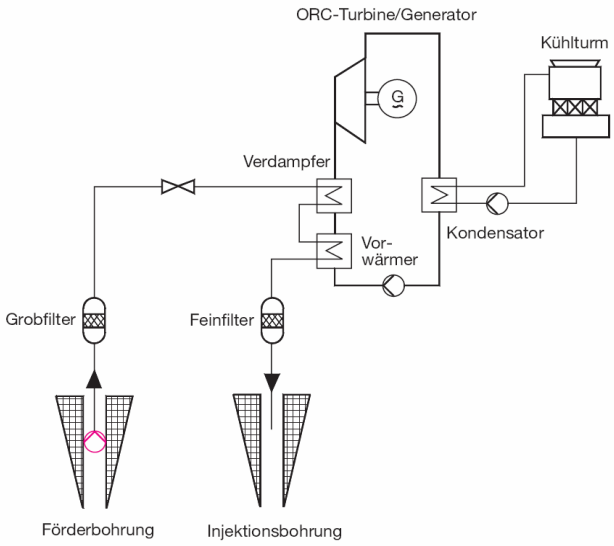

Abb. 9: Vereinfachtes Schaltschema einer ORC-Anlage (/GTN 2003/, verändert)

Aufgrund des geringen Temperaturunterschiedes zwischen Primär- (d. h. Thermalwasserkreislauf) und Sekundär-Kreislauf sind die zu erwartenden Wirkungsgrade zwischen 7 bis 12 % (Abb. 10) jedoch deutlich geringer als bei konventionellen Wasserdampfprozessen. Als Arbeitsmittel werden im Allgemeinen Kohlenwasserstoffe (z. B. n-Pentan, Isobutan) oder Fluorkohlenstoff-Verbindungen (z. B. C_5F_{12}) eingesetzt (vgl. /GTN 2003/, /Köhler 2005/).

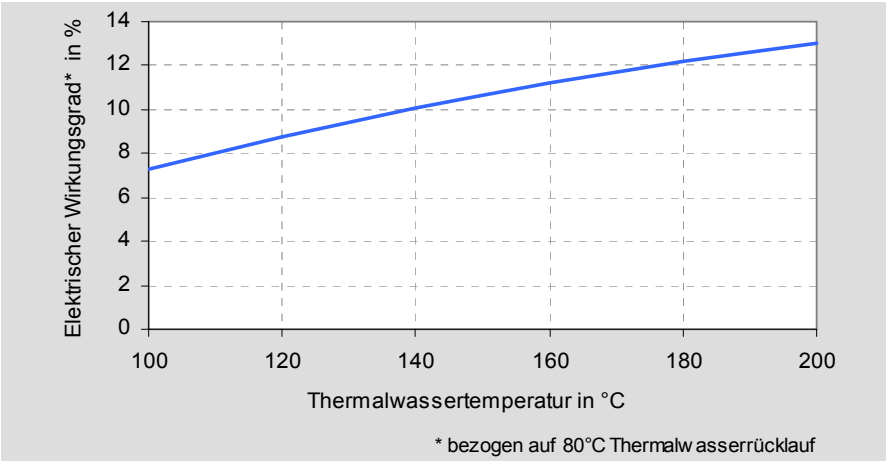

Abb. 10: Gemittelter Wirkungsgradverlauf realer ORC-Anlagen in Abhängigkeit von der Thermalwassertemperatur (/Paschen et al. 2003/)

Kalina-Prozess

Beim Kalina-Prozess wird im Gegensatz zum ORC-Prozess kein reiner Stoff, sondern ein Zwei-Stoff-Gemisch (in der Regel Ammoniak und Wasser) eingesetzt. Das Zwei-Stoff-Gemisch wird im einfachsten Kalina-Prozess in einem Wärmeübertrager vom Thermalwasser vorgewärmt und verdampft. Wegen der niedriger liegenden Siedetemperatur von Ammoniak entstehen dabei ammoniakreicher Dampf und ammoniakarme Flüssigkeit, die im Separator voneinander getrennt werden. Der ammoniakreiche Dampf wird anschließend in einer Turbine unter Abgabe von Arbeit entspannt. Danach werden Dampf und Flüssigkeit zusammen in den Kondensator geführt und das dabei wieder verflüssigte Stoffgemisch anschließend auf Verdampfungsdruck gebracht (Abb. 11).

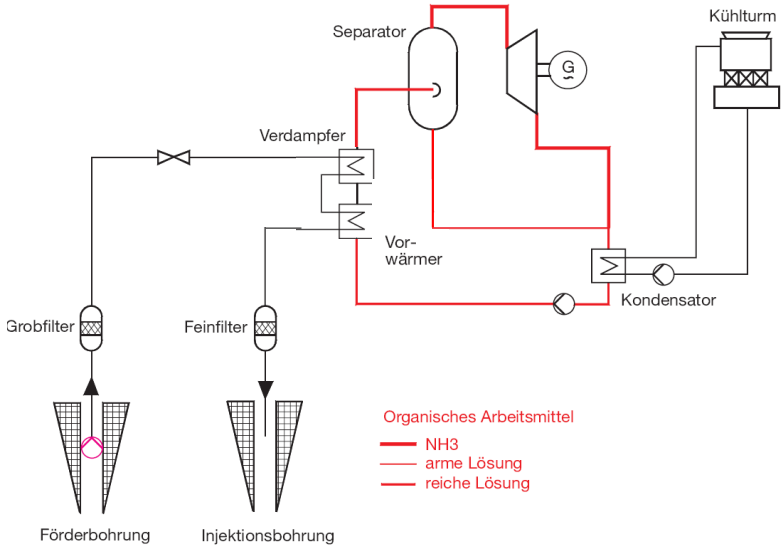

Abb. 11: Vereinfachtes Schaltschema einer Kalina-Anlage (/GTN 2003/, verändert)

Aufgrund des Zwei-Stoff-Gemisches erfolgt die Verdampfung beim Kalina-Prozess im Gegensatz zum ORC-Prozess nicht-isotherm, so dass vor Allem für niedrigere Thermalwassertemperaturen (ca. 100 bis 140 °C) höhere Wirkungsgrade von ca. 9 bis fast 12 % zu erwarten sind (Abb. 12). Entsprechende Erfahrungswerte stehen jedoch noch aus, da die Kalina-Technik weltweit erst in wenigen Anlagen eingesetzt wird.

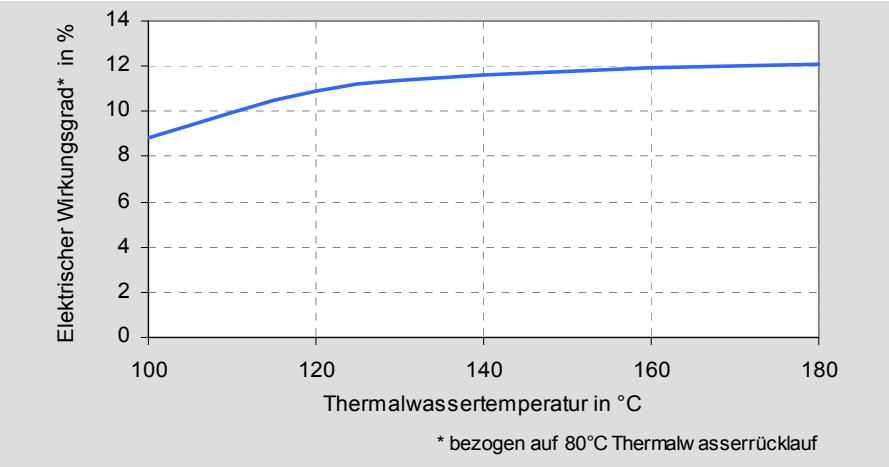

Abb. 12: Beispielhafter Wirkungsgradverlauf einer Kalina-Anlage in Abhängigkeit von der Thermalwassertemperatur(/GTN 2003/, verändert)

2.2.2.2 Direkte Nutzung

Der direkte Einsatz des im Untergrund erwärmten Wärmeträgermediums ist im Falle untertägig geschlossener Systeme notwendig, da hier die maximal erreichbaren Temperaturen deutlich unterhalb 100 °C liegen und ein sekundärer Kreislauf nicht in Frage kommt (vgl. /Paschen et al. 2003/). Durch den Einsatz organischer Wärmeträger und deren Direktverdampfung in der Sonde bzw. im untertägig geschlossenen Wärmetauscher besteht die Möglichkeit, den entstehenden Dampf Übertage direkt in einer Arbeitsmaschine einzusetzen und diesen wie in einem ORC- oder Kalina-Prozess unter Abgabe von Leistung zu entspannen. Nach anschließender Kondensation wird das Arbeitsmittel wieder in den Ringraum der Sonde gegeben und so im Kreislauf geführt. Der erzielbare elektrische Wirkungsgrad liegt dabei unter 10 %. Derartige Konzepte wurden bislang erst in konzeptionellen Studien erarbeitet.

2.2.2.3 Stromerzeugung mit zusätzlicher Wärmebereitstellung

Eine kombinierte Strom- und Wärmbereitstellung wird in konventionellen Wasserdampfkreisläufen als sog. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) durch die Auskopplung der am Kondensator anfallenden Abwärme realisiert. Geothermische Anlagen unterscheiden sich von diesem Prinzip, da die im Binärkreislauf am Kondensator anfallende Abwärme zu geringe Temperaturen (ca. 30

bis 60 °C /Köhler 2005/) aufweist, um direkt für die Raumheizung oder Trocknungsprozesse eingesetzt werden zu können (Tab. 3).

Tab. 3: Verschiedene Wärmenutzungsprozesse und ihre typische System-Wassertemperatur (Lindal-Diagramm) (/Schulz 1997/)

Temperatur in °C	Prozess
100	Trocknung von organischem Material (z. B. Heu, Gemüse, Wolle)
90	Lufttrocknung von Stockfisch
80	Raumheizung
70	Kühlung (untere Temperaturgrenze)
60	Tierzucht
50	Pilzzucht, Balneologie
40	Bodenheizung
30	Schwimmbäder, Enteisung, Schneeschmelze, biol. Zerlegung und Gärung
20	Fischzucht

Da hingegen das Thermalwasser nach der Wärmeabgabe an den Konversionsprozess ein höheres Temperaturniveau besitzt, wird dieses in der Regel zur Wärmebereitstellung eingesetzt. Die einfachste Variante ist dabei eine Reihenschaltung (Abb. 13), aber auch parallele und kombinierte Schaltungen sind möglich (z. B. /Köhler 2005/).

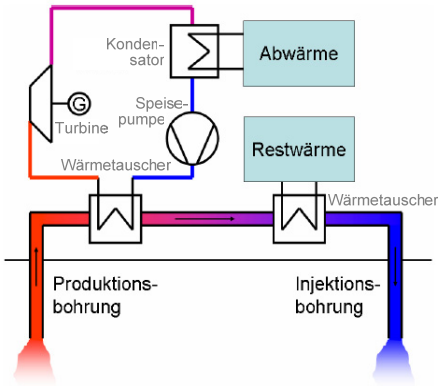

Abb. 13: Schematische Darstellung einer Reihenschaltung zur Nutzung der Thermalwasserrestwärme (/TSB 2006/)

Erfolgt die Strom- und Wärmeproduktion auf ausschließlich geothermischer Basis, d. h. ohne zusätzlichen Kessel oder sonstige Zusatzaggregate, hat die Bereitstellung der notwendigen Wärmemenge Vorrang. Die für die Stromerzeugung optimale Thermalwassertemperatur nach dem Kraftwerk reicht dabei nicht immer für die zusätzliche Wärmebereitstellung aus. Um die für die Wärmebereitstellung erforderliche Thermalwassertemperatur in diesem Fall dennoch zu

erhalten, wird dem Thermalwasser für die Stromproduktion weniger Wärme entzogen und somit auch weniger Strom produziert.

2.2.2.4 Kühlkreislauf-Konzepte

Aufgrund der thermodynamisch bedingten, niedrigen Wirkungsgrade und der damit verbundenen erheblichen Abwärmemengen kommt dem Kühlkreislauf bei geothermischen Stromerzeugungsanlagen besondere Aufmerksamkeit zu. Ziel ist es dabei, die Kondensationstemperatur im Konversionskreislauf möglichst gering zu halten, um ein möglichst großes Enthalpie-Gefälle in der Turbine abbauen zu können und entsprechend mehr Strom zu erzeugen (z. B. /Köhler 2005/, /GTN 2003/). Bei Geothermieanlagen liegt die zu kühlende Abwärmeleistung in Abhängigkeit des Wirkungsgrades zwischen 6 und 10 MW_{th}/MW_{el} (Abb. 14).

Für die Kühlung der Abwärme können Wasser-, Luft- oder Hybridkühlsysteme eingesetzt werden, welche sich neben der technischen Ausführung in der jeweils realisierbaren Kondensationstemperatur und damit im erreichbaren elektrischen Wirkungsgrad unterscheiden. In der konventionellen Kraftwerkstechnik werden aufgrund der Realisierung niedrigerer Kondensationstemperaturen in der Regel wasser- gegenüber luftgekühlten Systemen bevorzugt. Da dies an die entsprechende Wasserverfügbarkeit am Standort gekoppelt ist, bei Geothermieanlagen jedoch geologische Strukturen einen Standort bestimmen, ist in Bezug auf das Kühlsystem an den meisten Standorten voraussichtlich ein Kompromiss einzugehen.

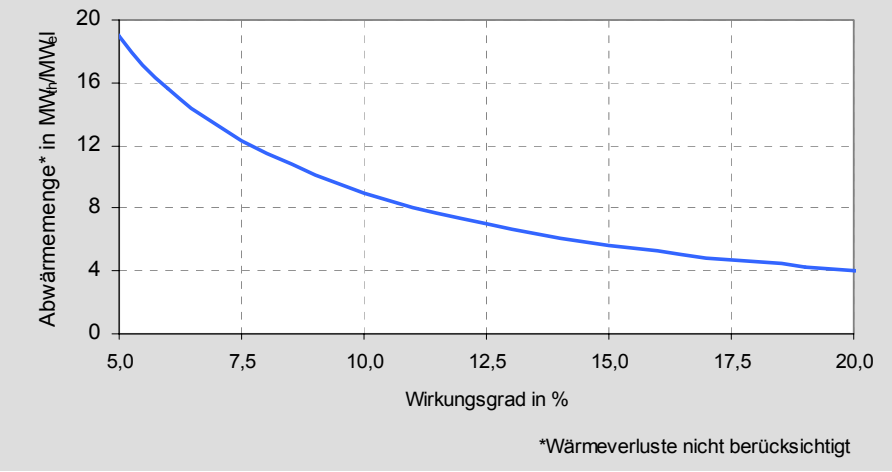

Abb. 14: Abwärmeanfall in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad

Bei der Wasserkühlung wird zwischen Frischwasser- bzw. Durchlaufkühlung und Nasskühltürmen unterschieden. Die Frischwasserkühlung setzt dabei Kühlwasser, für welches in der Regel Fließgewässer genutzt werden, zur direkten Kühlung des Kondensators ein (z. B. /LAWA 1991/). In Nasskühltürmen erfolgt die Kühlung ebenfalls durch Wasser, wobei zwischen geschlossenen und offenen Kühltürmen sowie Kühltürmen mit Naturzug und Zwangsbelüftung unterschieden wird (z. B. /LAWA 1991/, /TSB 2006/). Bei offenen Kühltürmen wird dabei das erwärmte Kühlwasser im oberen Teil des Kühlturms versprüht und so im aufsteigenden Luftstrom durch Konvektion und Verdunstung gekühlt. In geschlossenen Kühltürmen wird das Arbeitsmedium in einem geschlossenen Rohrkreislauf durch den Kühlturm geführt und gibt dort durch das Besprühen der Rohrleitungen mit Wasser die Wärme ab. Das dabei in beiden Fällen verdunstende Kühlwasser muss durch Entnahme entsprechender Mengen aus Oberflächen- oder Grundwasser ersetzt werden. Der für die Kühlung des Wassers notwendige Luftstrom wird entweder durch entsprechende Konstruktion des Kühlturms „natürlich“ erzeugt (d. h. Naturzug) oder durch Ventilatoren „künstlich“ generiert (d. h. Zwangsbelüftung). Da Naturzugkühltürme nur für Kraftwerke mit einer Kühlleistung ab mehreren 100 MW_{th} gebaut werden, haben diese für Geothermiekraftwerke jedoch keine Relevanz (z. B. /AXIMA 2007/).

Bei der Luftkühlung wird zwischen direkter Luftkühlung und Trockenkühltürmen unterschieden. Die direkte Luftkühlung basiert dabei auf Ventilatoren, welche das Arbeitsmedium im Kondensator direkt kühlen. Kommen Trockenkühltürme zum Einsazt, erfolgt die Kühlung des Kondensators dagegen durch ein, in einem geschlossenen Kreislauf geführtem Kühlmedium, welchem im Trockenkühlturm durch Zwangsbelüftung mittels Ventilatoren die Wärme entzogen wird (z. B. /LAWA 1991/, /TSB 2006/).

Bei Hybridkühlsystemen wird mit einer speziellen Kühlturmkonstruktion ein Mischbetrieb zwischen Nasskühlturm und Trockenkühlung realisiert (z. B. /LAWA 1991/, /TSB 2006/).

2.3 Stand der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland

Das politische Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion bis zum Jahr 2010 auf 12 % und am Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2050 auf 50 % zu erhöhen, soll in Deutschland durch eine Vielzahl unterschiedlicher Instrumente und Maßnahmen erreicht werden. Aus diesem Grund wird seit 2004 auch der Ausbau der geothermischen Stromerzeugung im Rahmen des Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) gefördert.

Gegenwärtig wird in Deutschland die Energie des tiefen Untergrunds fast ausschließlich zur Wärmebereitstellung und/oder für balneologische Zwecke eingesetzt; insbesondere letztere Option wird bereits seit dem Altertum dort genutzt, wo besonders günstige geologische Bedingungen gegeben sind (z. B. heiße Quellen, die offen zutage treten). Eine derartige Wärmenutzung ist oft ökonomisch darstellbar; steigende Energiepreise sorgen zusätzlich für eine tendenziell zunehmende Wirtschaftlichkeit.

Demgegenüber wird eine geothermische Stromerzeugung aufgrund der noch jungen Systemtechnik sowie der hohen (Anfangs-)Investitionen und großen Risiken (z. B. Fündigkeitsrisiko) bislang nur ansatzweise großtechnisch realisiert. Bisher ist in Deutschland erst eine Demonstrationsanlage auf Basis einer Aquifer-Nutzung am Netz. Aber es befinden sich weitere hydrothermale Projekte in der Entwicklung, so dass in den kommenden Jahren eine installierte geothermische Stromerzeugungsleistung im unteren zweistelligen MW-Bereich zu erwarten ist (Tab. 4).

Eine geothermische Stromerzeugung basierend auf der Nutzung des trockenen Festgesteins (HDR-Nutzung) wurde in Deutschland bislang nur im Projekt Bad Urach erforscht. Aufgrund unvorhergesehener, erheblicher Mehrkosten wurde das Projekt unterbrochen und bislang nicht wieder aufgenommen. In Bezug auf die HDR-Technik ist weiterhin die deutsche Beteiligung am europäischen Forschungsprojekt in Soultz-sous-Forêts zu nennen, in welchem für 2008 die erste Stromeinspeisung vorgesehen ist.

Untertägig geschlossene Systeme wurden für eine Stromerzeugung bislang nur in Machbarkeitsstudien näher betrachtet. Ihre Ausführung ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht geplant.

Tab. 4: Stand der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland /Frick et al. 2007/, /Foerster et al. 2004/, /Legarth, Wolff 2000/

	Geoth. Leistung in MW	Erschließungskonzept	Elektr. Leistung in MW	Fördertemp. in °C	Förderrate in m^3/h	Bohrtiefe[a] in m	Konv.-technik	Wärmenutzung	Inbetr.-nahme.
Groß Schönebeck	ca. 10[b]	Hydrothermale Dublette	ca. 1,0[b]	150	mind. 50[b]	4.294		keine	2008[b]
Neustadt-Glewe	1,3 – 3,5	Hydrothermale Dublette	0,2	97	max. 110	2.250	ORC	Wärmenetz	2003
Bruchsal	4	Hydrothermale Dublette	0,5[b]	118	86	2.500		Wärmenetz	2007[b]
Landau	ca. 22[b]	Hydrothermale Dublette	2,5[b]	150[b]	250[b]	3.000	ORC	Wärmenetz	2007[b]
Offenbach, Bellheim	30[b] – 45[b]	Hydrothermale Dublette	4,8[b] – 6,0[b]	150[b] – 160[b]	360[b]	2.500[b] – 3.500[b]	Kalina		2008[b]
Speyer	24[b] – 50[b]	mind. hydrothermale Triplette	5,4[b]	150	450[b]	2.900	ORC	Wärmenetz	2009[b]
Unterhaching	> 30[b]	Hydrothermale Dublette	3,4[b]	122	max. 540[b]	3.300	Kalina	Wärmenetz	2007[b]
Bad Urach	6[b] – 10[b]	HDR-Triplette	ca. 1,0[b]	170	48[b]	4.500	ORC	Wärmenetz	gestoppt
Bremerhaven		Tiefe Erdwärmesonde	0,018 - 0,075	ca. 98		ca. 5.350		keine	
TU Berlin		Untertägig geschlossener Wärmetauscher	0,15 - 1,0	> 100	-	ca. 5.500		keine	

[a] Förderbohrung; [b] geplanter Wert;

3 Rahmenbedingungen der ökologischen Analyse und Bewertung

Um eine ökologische Analyse und Bewertung der geothermischen Stromerzeugung durchführen sowie die Ergebnisse in den Kontext anderer Energieträger einordnen zu können, werden im Folgenden zum einen anlagentechnische Randbedingungen in Form gegenwärtig repräsentativer geothermischer und nicht-geothermischer Referenzkonzepte definiert; zum anderen werden aus umwelttechnischer Sicht maßgebende gesetzliche Rahmenbedingungen kurz dargestellt.

3.1 Anlagentechnische Randbedingungen

3.1.1 Geothermische Referenzkonzepte

Bei der Definition der geothermischen Referenzkonzepte ist es das Ziel, zum einen gegenwärtig repräsentative Konzepte einzubeziehen und zum anderen auch zukünftig mögliche Nutzungsoptionen zu skizzieren.

Gegenwärtig repräsentative Referenzkonzepte für eine Strom bzw. Strom- und Wärmebereitstellung basieren dabei auf den laufenden Projekten und den daraus resultierenden, in Tab. 4 (Kapitel 2.3) dargestellten Parametern. Demzufolge werden im Weiteren neben unterschiedlichen Anlagengrößen (1, 3 und 5 MW_{el}) die standortabhängig variierenden Reservoirkenngrößen der Aquifere des Oberrheingrabens, des Süddeutschen Molassebeckens sowie des Norddeutschen Beckens berücksichtigt (Tab. 5).

Hinsichtlich der obertägigen Anlagentechnik wird zunächst ein ORC-Prozess mit Nasskühlturm analysiert, da weltweit erst eine geothermsich betriebene Kalina-Anlage vorhanden ist und sich auch in Deutschland gegenwärtig erst eine Anlage im Bau befindet. Die ORC-Anlage wird dabei bei reiner Stromerzeugung mit 7.500 Volllaststunden pro Jahr betrieben.

Im Falle einer Strom- und Wärmebereitstellung wird eine Reihenschaltung angenommen. Dadurch wird die im Thermalwasser enthaltene Restwärme in ein Niedertemperaturnetz mit 70 °C Vorlauf- und 50 °C Rücklauftemperatur bei jährlich 1.800 Wärmevolllaststunden eingespeist. Da hierbei von einer reinen geothermischen Wärmebereitstellung ausgegangen wird, hat die ganzjährige Bereitstellung der durch das Wärmenetz geforderten Wärme gegenüber der maximalen Stromerzeugung Priorität. In Abhängigkeit von der jeweiligen Reservoirtemperatur ist damit eine Absenkung der elektrischen Volllaststunden auf 6.100 bzw. 6.500 h/a nötig (vgl. Kapitel 2.2.2.3).

Hinsichtlich der Projektumsetzung wird für die Referenzkonzepte unterstellt, dass jede Bohrung aufgrund ausreichend vorliegender geologischer Daten erfolgreich abgeteuft werden kann. Bohrungen, die nicht fündig sind werden somit nicht berücksichtigt, da auch in der Praxis keine Projektumsetzung zur Stromerzeugung im Falle einer Nichtfündigkeit zu erwarten ist. Z. B. wird die Fündigkeit im Sinne einer Stromerzeugung bei der Versicherung des Fündigkeitsrisikos durch Grenzwerte für die Thermalwassertemperatur sowie die Förderrate definiert (z. B. /Schulz et al. 2007/). Die technische Lebensdauer geothermischer Referenzkonzepte wird auf 30 Jahre festgesetzt. Ersatzbeschaffungen verschiedener Anlagenkomponenten während dieser Zeit (z. B. Austausch der Förderpumpe alle 4 Jahre) werden entsprechend berücksichtigt.

Tab. 5: Definition gegenwärtig repräsentativer geothermischer Referenzkonzepte

	Oberrheingraben	Süddeutsches Molassebecken	Norddeutsches Becken
Reservoirparameter			
Bohrlochkonzept	Aquifer-Dublette [a]	Aquifer-Dublette [a]	Aquifer-Dublette [a]
Bohrlochtiefe in km	3,0	3,4	4,4
Fördertemperatur in °C	150	120	150
Gesamtförderrate in m^3/h	300 [b]	550 [c]	100 [b]
PI [i] bzw. II [j] in $m^3/(h\ MPa)$	60 [b]	200 [c]	20 [b]
Technische Lebensdauer in a	30 [d]	30 [d]	30 [d]
Konversionsanlage			
Elektrische Leistung in MW_{el}	3 [e]	3 [e]	1 [e]
Wirkungsgrad [f] in %	12 [f]	10 [f]	12 [f]
El. Volllaststunden in h/a	7.500 [g]; 6.500 [h]	7.500 [g]; 6.100 [h]	7.500 [g]; 6.500 [h]
Wärmebereitstellung			
Vor- / Rücklauf in °C	70 / 50	70 / 50	70 / 50
Thermische Leistung in MW_{th}	7	13	2
Th. Volllaststunden in h/a	1.800	1.800	1.800

[a] saigere Bohrungen im Oberrheingraben mit 1.000 m Abstand; [b] hydraulisch stimuliert, Quelle: /GGA 2006/; [c] chemisch stimuliert, Quelle /GGA 2006/, /GTN 2005/; [d] Förderpumpe 4 a, Konversionsanlage, Wärmetauscher 15 a; [e] ORC-Anlage mit zwangsbelüftetem Nasskühlturm; [f] Wirkungsgrad im Auslegungspunkt, Quelle: eigene Berechnungen, /Köhler 2005/; [g] reine Strombereitstellung; [h] Strom- und Wärmebereitstellung; [i] Produktivitätsindex; [j] Injektivitätsindex;

Als zukünftig mögliche Referenzkonzepte für eine geothermische Stromerzeugung in Deutschland werden aufgrund der noch fehlenden Umsetzung HDR-Konzepte, tiefe Erdwärmesonden und untertägig geschlossene Wärmetauscher angesehen (vgl. Tab. 4, Kapitel 2.3). Da diese Konzepte prinzipiell standortunabhängig sind, wird keine standortabhängige Unterscheidung vorgenommen (Tab. 6). In Bezug auf den konversionstechnischen Anlagenteil wird auch hier eine wassergekühlte ORC-Anlage berücksichtigt.

Tab. 6: Definition zukünftig mögliche, geothermischer Referenzkonzepte

	HDR-Dublette	HDR-Triplette	TES [h]	UGW [i]
Untergrundparameter				
Bohrlochtiefe in km	4,3	4,3	3,2	3,2
Untergrundtemperatur in °C	170 [a]	170 [a]	160 [a]	160 [a]
Gesamtförderrate in m^3/h	205 [b]	345 [b]	-	-
Technische Lebensdauer in a	30 [c]	30 [c]	30 [c]	30 [c]
Konversionsanlage				
Elektrische Leistung in MW_{el}	3 [d]	5 [d]	0,075 [e]	0,7 [f]
Wirkungsgrad [g] in %	14	14		
El. Volllaststunden in h/a	7.500	7.500	7.500	7.500

[a] Temperaturgradient im Oberrheingraben, keine Abnahme der Fördertemperatur im Laufe der Betriebsjahre berücksichtigt; [b] hydraulisch stimuliert, Quelle: /GGA 2006/; [c] Förderpumpe 4 a, Konversionsanlage, Wärmetauscher 15 a; [d] ORC-Anlage mit zwangsbelüftetem Nasskühlturm; [e] Quelle: /Foerster et al. 2004/; [f] Quelle: /Legarth, Wolff 2000/; [g] Wirkungsgrad im Auslegungspunkt, Quelle: eigene Berechnungen, /Köhler 2005/; [h] Tiefe Erdwärmesonde; [i] untertägig geschlossener Wärmetauscher

3.1.2 Nicht-geothermische Referenzkonzepte

Nachfolgend werden nicht-geothermisch basierte Referenzkonzepte definiert, um die im Weiteren zu analysierenden Umwelteffekte der geothermischen Stromerzeugung auch im Vergleich zu den gegenwärtigen Alternativen auf regenerativer und fossiler Basis einordnen zu können. Dabei werden gegenwärtig typische Anlagenkonfigurationen ausgewählt, die die Bandbreite des jeweiligen Energieträgers darstellen sollen. Nicht etablierte, neuartige Konzepte (z. B. solarthermische Kraftwerke) werden dabei nicht berücksichtigt (Tab. 7).

Feste Biomasse. Mit dem EEG und der Biomasseverordnung wurden die Grundlagen für einen verstärkten Ausbau der Stromerzeugung bzw. der gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung auf Biomassebasis in Deutschland vorangetrieben. In Bezug auf die Verstromung fester Biomasse stellen Biomasse(heiz)kraftwerke mit Dampfkraftprozessen, in welchen Altholz, aber auch Waldholz eingesetzt wird, den Anlagenbestand dar. Als typische Anlagengrößen werden dabei 20 MW_{el} bei reiner Stromerzeugung und 5 MW_{el} bei gekoppelter Strom- und Wärmebereitstellung zu Grunde gelegt. Die Stromerzeugung auf Basis von Biomassevergasung mit reinem Waldholzeinsatz befindet sich dagegen noch im Pilotstadium. Die dabei repräsentativen Anlagengrößen werden mit 20 bzw. 0,5 MW_{el} angesetzt.

Tab. 7: Definition nicht-geothermischer Referenzkonzepte

	El. Leistung in MW_{el}	El. Volllaststunden in h/a	El. Wirkungsgrad / th. Nutzungsgrad in %	Technische Lebensdauer in a
Feste Biomasse				
Biomassevergasung [a] (GuD [b])	20	7.500	42	15
Biomassevergasung [a] (GuD [a]-KWK [c])	0,5	7.500	27 / 38	15
Wirbelschichtfeuerung [d] (D [e])	20	7.500	30	15
Rostfeuerung [d] (D [e]-KWK [c])	5	7.500	7 / 12	15
Biogas				
Biogas-BKW [f,g]	0,5	7.500	36	15
Biogas-BHKW [h,g]	0,5	7.500	36 / 47	15
Fotovoltaik				
Einfamilienhaus-Dachanlage [i]	0,05	800		20
Freiflächenanlage [i]	1	1.000		20
Windkraft				
Onshore-Windenergieanlage	2,5	1.400		20
Onshore-Windenergieanlage	5	2.000		20
Offshore-Windenergieanlage	5	4.500		15
Wasserkraft				
„kleine“ Wasserkraftanlage	0,3	4.300		45
„große“ Wasserkraftanlage	30	4.500		45
Fossile Energieträger				
Erdgas (GuD [b])	800	5.000	58	25
Erdgas GuD [b]-KWK [c])	500	5.000	48 / 40	25
Steinkohlestaubfeuerung (D [e])	800	7.000	45	30
Steinkohlestaubfeuerung (D [e]-KWK [c])	800	4.000	36 / 30	30
Braunkohlestaubfeuerung (D [e])	800	8.000	42	30
Braunkohlestaubfeuerung (D [e]-KWK [c])	800	4.000	32 / 30	30

[a] 100 % Waldholz; [b] Gas- und Dampfkraftprozess; [c] Kraft-Wärme-Kopplung; [d] 50 % Altholz, 50 % Waldholz; [e] Dampfkraftprozess; [f] Block-Kraftwerk; [g] Nassfermentation mit 70 % Rinder- und Schweingülle und 30 % nachwachsende Rohstoffe; [h] Block-Heizkraftwerk; [i] polykristalline Module

Biogas. Die Stromerzeugung auf Basis von Biogas ist eine Technologie, die gerade erst in den letzten Jahren durch die Erfahrung mit zahlreichen kleinen landwirtschaftlichen Anlagen Marktreife erlangt hat. Gegenwärtig wird Biogas vor Allem in dezentralen Blockheizkraftwerken mit einer durchschnittlichen Größe von 500 kW_{el} eingesetzt. Diese Anlagengröße wird entsprechend für eine reine Stromerzeugung (Biogas-Blockkraftwerk) sowie eine gekoppelte Strom- und

Wärmebereitstellung (Biogas-Blockheizkraftwerk) auf Basis von Biogas als Referenz genommen.

Fotovoltaik. Die Entwicklung der Fotovoltaik hat seit der Einführung des EEG in Deutschland im Jahr 2000 einen vehementen Aufschwung erfahren. Solarthermische Kraftwerke spielen aufgrund der mangelnden Direktstrahlung in Deutschland dagegen noch keine Rolle. Bei Fotovoltaik-Dachanlagen entfällt der größte Marktanteil auf Anlagen bis zu 30 kW_{el}. Im Weiteren sollen als Anwendungsfälle eine für private Wohngebäude typische 5 kW_{el}- Dachanlage und als zentrale Stromerzeugung weiterhin eine Freiflächenanlage mit 1 MW_{el} betrachtet werden.

Windenergie. Mit Einführung des EEG hat die Onshore-Windenergie einen starken Wachstumsimpuls erhalten. Angefangen bei Windenergieanlagen mit wenigen kW_{el} sind heute Konverter mit 2,5 MW_{el} technischer Standard. Mehrere installierte 5 MW_{el}-Anlagen zeigen weiterhin den zukünftigen Entwicklungsstandard auf. Zudem ist in den nächsten Jahren eine Erschließung des großen Windenergiepotenzials auf See durch Offshore-Windenergiekonvertern im Größenbereich von 5 MW_{el} zu erwarten, so dass auch diese Konvertergröße als Referenzanlage definiert wird.

Wasserkraft. Dem sich in den 1970er und 1980er Jahren abzeichnenden Rückgang der Wasserkraft konnte durch Einführung der Einspeisevergütung nach EEG wirksam entgegengewirkt werden. Durch das EEG werden dabei im Wesentlichen Wasserkraftanlagen unter 5 MW_{el} („kleine“ Wasserkraft) begünstigt, wobei besonders Kleinanlagen unter 500 kW_{el} von der Vergütung profitieren. Im Folgenden wird daher als „kleine“ Referenzgröße der Wasserkraft eine 300 kW_{el}-Anlage angesetzt. Als Repräsentant der „großen“ Wasserkraft wird im Vergleich dazu ein Wasserkraftwerk mit 30 MW_{el} definiert.

Fossile Energieträger. Der Großteil der deutschen Stromversorgung wird heute nach wie vor durch fossile Energieträger gedeckt. Aus diesem Grund werden für einen ökologischen Vergleich mit Erdgas, Braunkohle und Steinkohle gefeuerte Kraft- bzw. Heizkraftwerke mit einer typischen Anlagenleistung von 500 bzw. 800 MW_{el} berücksichtigt. Die Kernenergie wird im Rahmen dieser Studie nicht analysiert.

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Um die in Deutschland mit einer geothermischen Stromerzeugung verbundenen Umwelteffekte im Weiteren analysieren zu können, sind neben systemtechnischen Aspekten auch rechtliche Rahmenbedingungen von Relevanz. Nachfolgend wird daher die genehmigungsrechtliche Lage einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland kurz dargestellt. Dabei soll lediglich ein Einblick in die gegenwärtige Rechtslage – mit Fokus auf umweltschutzrechtliche Belange – gegeben werden; detailliertere Ausführungen der genehmigungsrechtlichen Aspekte sind z. B. bei /Coder 2008/, /Nast 1996/ und /Ehrlich 1998/ nachzulesen oder den relevante Gesetzestexten selbst zu entnehmen.

Maßgeblich für den Bau und Betrieb von Geothermieanlagen sind vornehmlich die Regelungen des Bergrechts, des Wasserhaushaltsrechts, des Immissionsschutzrechts, das Naturschutzrechts sowie u. U. des Umweltverträglichkeitsprüfungsrechts. Weitere Regelunge sind durch das Kreislaufwirtschaft- und Abfallrecht, das Bau(genehmigungs)recht, ggf. das Wald- und Forstrecht sowie das Denkmalschutzrecht gegeben. Das Bundes-Bodenschutzgesetz – als subsidiäres Gesetz – findet Anwendung auf schädliche Bodenveränderungen, soweit Vorschriften z. B. des Bundesberggesetzes, des Bauplanungs- und Bauordnungsrechts, des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und des Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetzes entsprechende Einwirkungen auf den Boden nicht regeln (vgl. § 3 Abs. 1 BBodSchG). Da dies bei Geothermieanlagen in der Regel nicht der Fall ist, findet das Bundes-Bodenschutzgesetz hier keine Anwendung und wird daher im Weiteren nicht berücksichtigt.

3.2.1 Bundesberggesetz

Die Gewinnung von Erdwärme ist seit dem Inkrafttreten des BBergG am 1. Januar 1982 genehmigungsrechtlich dem Bergrecht unterstellt. Die Erdwärme wird dabei wie z. B. Kohle, Salze und Erze den bergfreien Bodenschätzen zugeordnet. Das Gesetz dient einer sicheren Rohstoffversorgung, dem Schutz der Lagerstätten, der Betriebssicherheit und der Gefahrenvorsorge unter der Maßgabe eines sparsamen und schonenden Umgangs mit Grund und Boden (vgl. § 1 BBergG). Gemäß § 2 Abs. 1 BBergG werden das Aufsuchen (d. h. Exploration), Gewinnen (d. h. Lösen und Freisetzen der Bodenschätze) und Aufbereiten der bergfreien Bodenschätze (z. B. Fördern, Lagern, Filtern) geregelt. Die letztendliche Nutzung der Erdwärme zur Strom- bzw. Wärmebereitstellung ist im Bergrecht nicht verankert (siehe § 2 Abs. 4 Nr. 5 BBergG).

Für die Aufsuchung von Erdwärme muss eine Erlaubnis gemäß § 7 BBergG und für deren Gewinnung eine Bewilligung gemäß § 8 BBergG eingeholt werden. Für die für die Aufsuchung bzw. Gewinnung jeweils notwendigen Arbeitsschritte sind zudem gemäß §§ 51, 52, 54-56 BBergG Betriebspläne zu erstellen und durch die zuständige Bergbehörde zuzulassen. In derartigen Betriebsplänen muss das zeitliche und technische Arbeitsprogramm vom Antragsteller für eine definierte Fläche (d. h. Erlaubnis- bzw. Bewilligungsfeld) genau dargestellt und als (technisch) realisierbar nachgewiesen werden. Betriebspläne sind z. B. für seismische Vorerkundungsmaßnahmen, für die Bohrplatzeinrichtung und die Bohrungsniederbringung sowie nach Beendigung der Nutzung für die Bohrungsverfüllung und die Rekultivierung bzw. Wiedernutzbarmachung des Bohrplatzes zu erstellen (z. B. /Nast 1996/, /FGT 2007b/, /GTN 2007/).

Gemäß § 55 BBergG erfolgt die Zulassung eines Betriebsplanes nur, wenn z. B. die Zuverlässigkeit und Fachkunde des Unternehmers sicher gestellt ist, eine Beeinträchtigung von Bodenschätzen oder bereits geführten Betrieben auszuschließen ist und gemeinschädliche Wirkungen nicht zu erwarten sind. Gemäß § 48 Abs. 2 BBergG kann die Zulassung eines Betriebsplanes auch beschränkt bzw. untersagt werden, wenn der Aufsuchung oder der Gewinnung öffentliche Interessen (z. B. raumordnerische Belange) entgegenstehen. Zudem werden gemäß § 54 Abs. 2 BBergG weitere Behörden am Zulassungsverfahren beteiligt, sofern deren Aufgabenbereich durch die im Betriebsplan vorgesehenen Maßnahmen tangiert wird (z. B. Wasserbehörden, Forstbehörden).

Ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) gemäß § 57 c Nr. 1 BBergG durchzuführen, erfolgt ein zentralisiertes Planfeststellungsverfahren (vgl. Kapitel 3.2.2).

Sicherheit und Gesundheitsschutz sind in der Allgemeinen Bergverordnung explizit geregelt.

3.2.2 Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz

Gemäß § 1 UVPG ist es Zweck einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP), dass bei bestimmten öffentlichen und privaten Vorhaben eine wirksame Umweltvorsorge nach einheitlichen Grundsätzen erfolgt. Die UVP umfasst dabei gemäß § 2 UVPG die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens u. a. auf Menschen, Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft. Als UVP-pflichtige Geothermieprojekte werden nach der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) Tiefbohrungen von mindestens 1.000 m innerhalb

eines Naturschutzgebiets oder eines Schutzgebiets nach der FFH- oder Vogelschutzrichtlinie der EU eingestuft (vgl. § 1 Nr. 8 UVP-V Bergbau).

Gemäß Anlage 1, Nr. 13.3 UVPG werden zusätzlich wasserwirtschaftliche Vorhaben als UVP-pflichtig ausgewiesen, in denen das Entnehmen bzw. Zutagefördern von mehr als 10 Mio. m^3 Wasser pro Jahr vorgesehen ist. Diese Mengenschwelle, die einer Förderrate von ca. 1.300 m^3/h entspricht, wird bei Geothermieprojekten allerdings praktisch nicht erreicht (vgl. Tab. 4). Dennoch ist länderabhängig eine standortabhängige Vorprüfung in Einzelfällen bereits bei Entnahmemengen von 2.000 m^3/a (ca. 0,3 m^3/h) möglich. Gemäß § 3c UVPG ist dann eine UVP durchzuführen, wenn nach Einschätzung der zuständigen Behörde aufgrund standortspezifischer Gegebenheiten erhebliche nachteilige Umweltauswirkungen durch das Vorhaben zu erwarten sind. Die Kriterien für die überschlägige Prüfung werden in Anhang 2 UVPG angeführt.

3.2.3 Wasserhaushaltsgesetz

Durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) wird sichergestellt, dass Gewässer als Bestandteil des Naturhaushaltes und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen so zu bewirtschaften sind, dass vermeidbare Beeinträchtigungen ihrer ökologischen Funktionen unterbleiben (vgl. § 1a WHG). Eine Benutzung von Gewässern bedarf daher gemäß § 2 WHG einer wasserrechtlichen Erlaubnis bzw. Bewilligung, welche gemäß § 4 WHG unter Festsetzung von Benutzungsbedingungen und Auflagen (z. B. maximale Entnahmemengen /Nast 1996/, Beobachtungs-, Ausgleichsmaßnahmen) erteilt werden können.

Als Benutzung im Sinne des Gesetzes wird dabei gemäß § 3 WHG jede mengenmäßige Veränderung (z. B. Entnahme, Zutageleiten), morphologische Veränderung (z. B. Ausbau, Aufstauen, Absenken) und physikalisch-chemische Veränderung (z. B. Einleiten von Stoffen) von Grund- und Oberflächenwasser definiert. Auf Basis dieser Definition fällt im Zusammenhang mit Geothermieanlagen z. B. der Einsatz von Wasser für den Bohrbetrieb, das Fördern von Grundwasser[8] sowie der Einsatz von Wasser zu Kühlzwecken im laufenden Betrieb unter das Wasserhaushaltsgesetz.

[8] Nach allen Fassungen der DIN 4049 ist Grundwasser unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird. Der Begriff Grundwasser besagt dabei nichts über die Art der Entstehung (/Hölting, Coldewey 2005/).

Im Falle von Geothermieanlagen, bei welchen ein Betriebsplan die Nutzung eines Gewässers vorsieht, entscheidet die Bergbehörde im Einvernehmen mit der zuständigen Wasserbehörde über die Erteilung einer Erlaubnis (vgl. § 14 WHG).

Neben einer wasserrechtlichen Erlaubnis kann weiterhin eine Genehmigung gemäß § 19a WHG von Rohrleitungsanlagen zum Befördern bzw. gemäß § 19g WHG von Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen notwendig sein. Wassergefährdende Stoffe sind gemäß § 19a Abs. 2 WHG Stoffe, die geeignet sind, Gewässer zu verunreinigen oder sonst in ihren Eigenschaften nachteilig zu verändern. In Anhang 2 der Verwaltungsvorschrift für wassergefährdende Stoffe (VwVwS) sind diese ausgewiesen. In Bezug auf Geothermieanlagen ist dies beim Betrieb von ORC- und Kalina-Anlagen der Fall. Diese Anlagen benötigen gemäß § 19h WHG entweder eine einzelfallbezogene behördliche Eignungsfeststellung oder eine Bauartzulassung und sind zudem mit bestimmten Betreiberpflichten verbunden (vgl. §§ 19i und 19k WHG). Aber auch die Bohrungsniederbringung kann in Abhängigkeit von der Zusammensetzung bzw. den Inhaltsstoffen des Thermalwassers (z. B. Eisen, Chloride) davon betroffen sein. In diesem Fall obliegt auch hier gemäß § 19f WHG der Bergbehörde im Einvernehmen mit der für das Wasser zuständigen Behörde die Entscheidung über die Genehmigung.

3.2.4 Bundes-Immissionsschutzgesetz

Zweck des Bundes-Immissionsschutzgesetzes ist es gemäß § 1 Menschen, Tiere, Pflanzen, den Boden, das Wasser und die Atmosphäre vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen. Schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne des Gesetzes sind Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen (vgl. § 3 Abs. 1 BImSchG).

Die Errichtung und der Betrieb von Geothermieanlagen fallen in den Geltungsbereich dieses Gesetzes (vgl. § 2 Abs. 1 Nr. 1 BImSchG). Da geothermische Anlagen in der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) allerdings nicht aufgeführt werden, sind sie den Pflichten und Anforderungen nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen gemäß §§ 22 bis 24 BImSchG unterworfen. Grundpflichten sind z. B. schädliche Umweltweinwirkungen nach dem Stand der Technik zu vermeiden bzw. auf ein Mindestmaß zu beschränken sowie die beim Betrieb der Anlage entstehenden Abfälle ordnungsgemäß zu beseitigen.

Für den Bau und den Betrieb von Geothermieanlagen stehen die Regelungen über Lärmgrenzwerte dabei im Vordergrund. Hier gelten die Immissionsrichtwerte der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm) entsprechend der Einstufung nach Baunutzungsverordnung für das jeweilige Vorhabensgebiet. Weiterhin kann die Störfallverordnung (12. BImSchV) Anwendung finden, sofern z. B. während der Bohrungsniederbringung oder während des Betriebs einer ORC- oder Kalina-Anlage bestimmte Mengenschwellen (vgl. Anhang I 12. BImSchV) überschritten sind. Für diese Fälle werden Betreiberpflichten und Anforderungen zur Verhinderung von Störfällen und Begrenzung der Störfallauswirkungen (vgl. §§ 3 bis 6 12. BImSchV) festgelegt. Zudem ist gemäß § 8 ein standortspezifisches Konzept zur Verhinderung von Störfällen zu erarbeiten. Im Falle der Bohrungsniederbringung sind entsprechende Störfallvermeidungsmaßnahmen auch in den Bergbau- und Tiefbohrverordnungen der einzelnen Bundesländer enthalten (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/).

3.2.5 Bundesnaturschutzgesetz

Ziel des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) ist es gemäß § 1 Natur und Landschaft als Lebensgrundlage des Menschen auf Dauer zu schützen, zu pflegen, zu entwickeln und – soweit erforderlich – wiederherzustellen. Zu diesem Zweck statuiert es für jedermann zu beachtende Umweltpflichten, u.a. die sog. Eingriffsregelung. Eingriffe sind dabei im Sinne des Gesetzes u. a. Veränderungen und die Nutzung von Grundflächen sowie Veränderungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels, die den Naturhaushalt oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen können (vgl. § 18 BNatSchG). Im Zusammenhang mit der Aufsuchung und Gewinnung von Bodenschätzen sind die genannten Pflichten in § 2 Abs. 1 Nr. 7 BNatSchG sogar als Grundsätze des Naturschutzes und der Landschaftspflege formuliert. Die einzelnen Bundesländer können dazu nähere Vorschriften erlassen. Der Verursacher eines Eingriffs wird gemäß § 19 BNatSchG verpflichtet, vermeidbare Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft zu unterlassen bzw. unvermeidbare Beeinträchtigungen durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege vorrangig auszugleichen oder in anderer Weise zu kompensieren. Sind Beeinträchtigungen nicht zu vermeiden und nicht auszugleichen, ist der Eingriff unzulässig, falls die Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege anderen Belangen vorgehen.

Liegt der Standort einer Geothermieanlage in einem Schutzgebiet im Sinne des § 22 Abs. 1 BNatSchG ist vor der Zulassung bzw. Durchführung des Geothermieprojekts gemäß § 34 BNatSchG die Verträglichkeit mit den Erhaltungszielen des betreffenden Gebiets zu über-

prüfen. Die Verträglichkeit ergibt sich dabei aus dem jeweiligen Schutzzweck und den dazu erlassenen Vorschriften, welche auf Bundeslandebene festgelegt werden. Ergibt eine Prüfung der Verträglichkeit, dass der Eingriff zu erheblichen Beeinträchtigungen im jeweiligen Gebiet führt, ist ein Projekt grundsätzlich unzulässig. Nur, soweit zwingende Gründe des überwiegenden öffentlichen Interesses vorliegen und zumutbare Alternativen, den mit dem Projekt verfolgten Zweck an anderer Stelle ohne oder mit geringeren Beeinträchtigungen zu erreichen, nicht gegeben sind, darf ein Projekt ausnahmesweise zugelassen werden. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass in § 2 Abs. 1 Nr. 6 BNatSchG der Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung insbesondere durch die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien in den Grundsätzen des Naturschutzes und der Landschaftspflege gesondert hervorgehoben wird. Neben Gebieten mit gemeinschaftlicher Bedeutung und Europäischen Vogelschutzgebieten werden in den §§ 23 bis 32 BNatSchG verschiedene Schutzgebiete definiert für welche die jeweils erlassenen Schutzgebietsregelungen gelten.

3.2.6 Sonstige Gesetze

3.2.6.1 Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz

Das Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) hat zum Zweck, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und die umweltverträgliche Beseitigung von Abfällen zu sichern (vgl. § 1 KrW-/AbfG). Im Falle von Geothermieanlagen findet dieses Gesetz auf den Bau, Betrieb und Rückbau des obertägigen Anlagenteils zur Stromgewinnung Anwendung. Abfälle, die dagegen aus Bau und Betrieb des untertägigen Anlagenteils resultieren, d. h. bergbautypische Abfälle beim Aufsuchen, Gewinnen und Weiterverarbeiten von Bodenschätzen, sind gemäß § 2 Abs. 2 Nr. 4 vom Geltungsbereich ausgenommen.

3.2.6.2 Raumordnungsgesetz

Die Aufgabe des Raumordnungsgesetzes (ROG) ist es gemäß § 1 den Gesamtraum der Bundesrepublik und seine Teilräume durch zusammenfassende, übergeordnete Raumordnungspläne zu entwickeln, zu ordnen und zu sichern. Für eine nachhaltige Raumentwicklung sind soziale, wirtschaftliche und ökologische Anforderungen abzustimmen und so eine dauerhafte, großräumige und ausgewogene Raumordnung zu sichern. Dabei werden auf Landes- und Regionalebene räumlich und sachlich verbindliche Vorgaben in sog. Raumordnungsplänen festgelegt. Diese

Ziele sind von öffentlichen Stellen bei der raumbedeutsamen Planung, Genehmigungen, Planfeststellungen und sonstigen behördlichen Entscheidungen zu beachten (vgl. § 4 ROG).

3.2.6.3 Bauordnungs- und Bauplanungsrecht

Der Bau des übertägigen Anlagenteils, welcher nicht dem Bergrecht unterstellt und als gewerbliche Anlage einzustufen ist, bedarf einer bauordnungsrechtlichen Genehmigung. Hierbei sind technische und architektonische Vorschriften zu beachten.

Da von Geothermieanlagen in der Regel keine erheblichen Störungen (z. B. Lärm, Luftschadstoffe und Gerüche) ausgehen, ist eine Errichtung in Industrie- und Gewerbegebieten ohne weiteres, in Dorf- und Mischgebieten u. U. möglich (/Klinski 2005/). Je nach Industrie-, Misch- und Wohngebieten sind dabei entsprechende städtebauliche Auflagen gemäß Bauplanungsrecht zu berücksichtigen. Im Außenbereich sind die Regelungen gemäß § 35 BauGB bindend.

3.2.6.4 Betriebssicherheitsverordnung

Da es sich bei ORC- und Kalina-Anlagen um überwachungsbedürftige Anlagen im Sinne des Geräte- und Produktsicherheitsgesetzes handelt (vgl. § 2 Abs. 7 GPSG), sind die in der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) definierten Vorschriften zu beachten. Neben allgemeinen Vorschriften für Arbeitsmittel sind darin eine Prüfung vor Inbetriebnahme sowie Prüfungen während des Betriebes durch eine entsprechende Aufsichtsbehörde festgelegt.

3.2.6.5 Wald- und Forstrecht

Befinden sich Anlagenteile einer Geothermieanlage auf wald- und forstwirtschaftlichen Flächen, sind wald- und forstrechtliche Regelungen zu beachten. Für die Rodung von Wald ist dabei eine Waldumwandlungsgenehmigung erforderlich. Wird eine entsprechende Umwandlung genehmigt, müssen jedoch die dadurch bedingten Auswirkungen für die Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes ausgeglichen werden. Die zuständige Forstbehörde kann dabei Ersatzaufforstungen auf geeigneten Grundstücken oder sonstige Schutz- und Gestaltungsmaßnahmen im Wald anordnen. (/Coder 2008/)

3.2.6.6 Denkmalschutzgesetz

Erfolgt der Bau einer Geothermieanlage auf einer Fläche, in der Bodendenkmäler zu vermuten sind bzw. Bodendenkmäler verändert oder gefährdet werden können, bedürfen die Erdarbeiten

gemäß der Länder-Denkmalschutzgesetze einer Erlaubnis. Grabungsschutzgebiete, in denen die zuständigen Ämter Bodendenkmäler vermuten, sind im Flächennutzungsplan ausgewiesen.

4 Umwelteffekte im Lebensweg

Mit Hilfe der Lebensweganalyse können beliebige Produkte oder Dienstleistungen hinsichtlich potenzieller Wirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit gesamtökologisch bewertet werden. Das Ziel einer Lebensweganalyse ist dabei eine vergleichende Bewertung der ökologischen Vor- und Nachteile verschiedener Alternativen. Nach einer kurzen Einführung in die Methodik der Lebensweganalyse werden im Folgenden einerseits die Unterschiede zwischen den verschiedenen geothermisch basierten Referenzkonzepten sowie deren Einordnung innerhalb der definierten nicht-geothermischen Vergleichskonzepte analysiert und bewertet.

4.1 Methodik

Im Rahmen einer Lebensweganalyse wird der gesamte Lebenszyklus des untersuchten Produktes von der Rohstofferschließung und -gewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung analysiert („von der Wiege bis zur Bahre“), um alle mit diesem Produkt in der Gesamtheit seines Lebenswegs verbundenen Effekte und Stoffströme zu erfassen; dies gilt ebenso für alle in diesem Lebensweg verwendeten anderen Produkte und Einsatzstoffe. Diese Studie orientiert sich bei der Erstellung der Bilanzen an den international gültigen Normen ISO 14040 und ISO 14044. Danach besteht eine Lebensweganalyse aus (1) der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, (2) der Sachbilanz, (3) der Wirkungsabschätzung und (4) der Auswertung (Abb. 15).

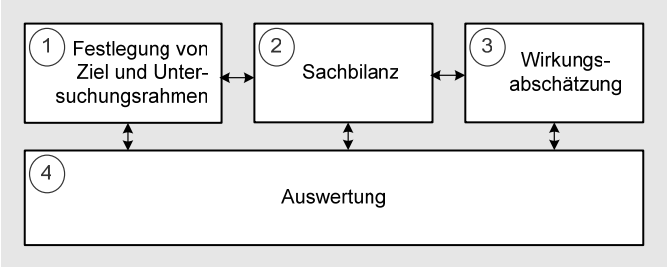

Abb. 15: Aufbau einer Lebensweganalyse nach ISO 14040 und ISO 14044

Im ersten Schritt, der **Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen**, wird definiert, welches Produkt oder welche Dienstleistung in welchem Umfang, mit welcher Genauigkeit und welchem Ziel betrachtet werden soll. Das Ziel dieser Lebensweganalyse ist eine vergleichende Bewertung der ökologischen Vor- und Nachteile der verschiedenen geothermischen Referenz-

konzepte zum einen und deren Einordnung in den Kontext der nicht-geothermischen Vergleichskonzepte zum anderen. Als zentrale Bezugs- und Vergleichsgröße, als sog. funktionelle Einheit, wird dabei die Erzeugung einer GWh Strom festgesetzt. Wird zusätzlich zur Stromerzeugung Nutzwärme bereitgestellt (Koppelproduktion), müssen die durch die Wärmebereitstellung vermiedenen Umwelteffekte der Stromerzeugung gutgeschrieben werden. Im Falle der Strombereitstellung aus Biogas sind zudem stoffliche Koppelprodukte entsprechend zu berücksichtigen. Als Untersuchungsrahmen wird der gesamte Lebensweg einer geothermisch erzeugten GWh Strom im Hinblick auf den Einsatz erschöpflicher Energieressourcen und Luft getragener Schadstoffe (Klimagasemissionen, Emissionen mit versauernder Wirkung, Emissionen mit eutrophierender Wirkung, bodennahes Ozonbildungspotenzial) betrachtet. Für die Bilanzierung der dabei entstehenden Umweltbelastungen werden die in Deutschland vorliegenden Randbedingungen (z. B. Geologie, Stand der Erschließungs- und Konversionstechnik, Strommix) zu Grunde gelegt. Bezugszeitraum ist das Jahr 2006.

Der zweite Schritt, die **Sachbilanz**, umfasst die Quantifizierung der Massen- und Energieströme der verschiedenen Prozesse im Verlauf des gesamten Lebenswegs, die zur Erzeugung einer GWh Strom nötig sind. Häufig wird dazu die sog. Prozesskettenanalyse verwendet, die auf einer Verknüpfung der einzelnen Prozesse auf Basis von physischen Größen beruht (Abb. 16).

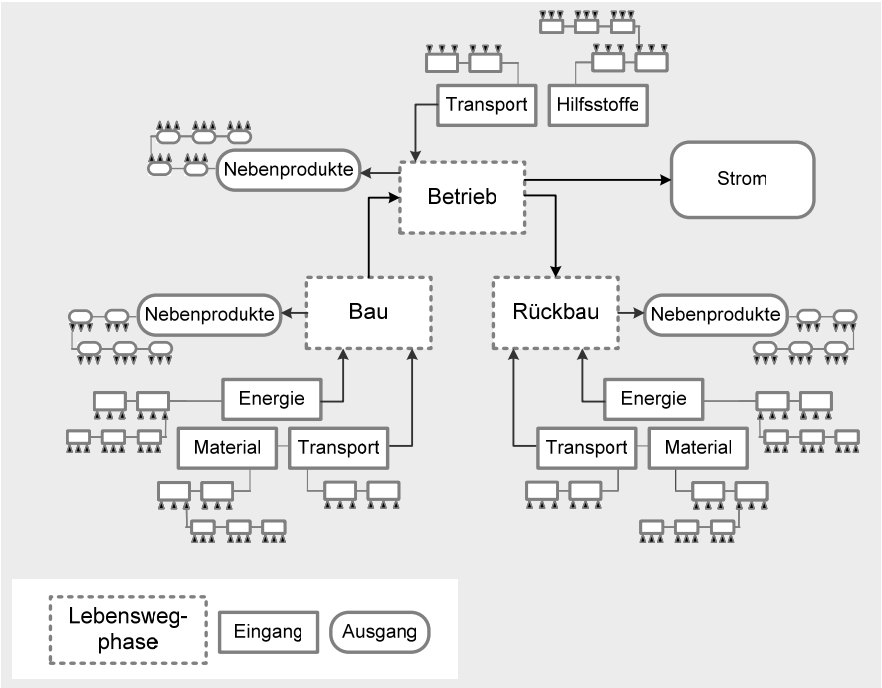

Abb. 16: Schematische Darstellung einer Prozesskettenanalyse

In der Prozesskettenanalyse wird dabei das komplexe System, auf welchem das jeweilige Referenzkonzept basiert, in geeignete transparente Teilsysteme bzw. Prozesse (bei der geothermischen Stromerzeugung z. B. Bohrungsniederbringung, Bau der Konversionsanlage, Anlagenbetrieb) untergliedert. Jeder Prozess ist dabei durch verschiedene Ein- und Ausgangsgrößen gekennzeichnet, die selbst wiederum auf vor- bzw. nachgelagerten Prozessen aufbauen (z. B. geht dem Einsatz von Stahl eine entsprechende Produktionskette voraus).

Die **Wirkungsabschätzung**, als dritter Schritt der Lebensweganalyse, beinhaltet die Beurteilung der potenziellen Umweltwirkungen der Bereitstellung einer GWh Strom über den gesamten Lebensweg. Die Ergebnisse der Sachbilanz werden dazu verschiedenen Wirkungskategorien zugeordnet, welche sich direkt auf ein konkretes Umweltproblem beziehen und so eine direkte Interpretation der Daten ermöglichen. Mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren werden einzelne Sachbilanzgrößen innerhalb einer Wirkungskategorie zu einem Wirkungsindikator zusammengefasst (Tab. 8).

Bei Anlagen mit zusätzlicher Wärmebereitstellung als Koppelprodukt wird dabei jeweils der Wert in der entsprechenden Wirkungskategorie gutgeschrieben, der bei der Erzeugung der gleichen Wärmemenge mit einer Erdgasfeuerung entstehen würde (vgl. /Fritsche et al. 2004/). Eine Abschätzung der eingesparten Umweltwirkungen in Anlehnung an die Berechnung der Primärenergieeinsparung aus der EU-Richtlinie zur Förderung von Kraft-Wärme-Kopplung (RL 2004/8/EG) ist dabei nicht zielführend, da dadurch zum einen keine Basis für den Vergleich verschiedener Energieträger gegeben ist und z. B. bei einer geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung beide Nutzenergiepfade weitestgehend als voneinander unabhängig betrachtet werden können (vgl. Kapitel 2.2.2.3).

Im Falle von stofflichen Koppelprodukten bei der Biogasverstromung wird zudem entsprechend der Wert gutgeschrieben, der zum einen aus der wegfallenden Güllebehandlung und zum anderen aus dem Düngewert des Gärrestes resultiert.

Die einzelnen Wirkungskategorien werden nachfolgend einzeln erläutert.

Tab. 8: Zusammenstellung der bilanzierten Wirkungsgrößen

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Substanzen
Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen	Fossiler und nuklearer Primärenergieaufwand	Erdöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Uran
Anthropogener Treibhauseffekt	CO_2-Äquivalente	Kohlenstoffdioxid , Methan, Distickstoff-oxid, SF_6, CF_4, C_2F_6, etc.
Emissionen mit versauernder Wirkung	SO_2-Äquivalente	Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Chlor-wasserstoff, Ammoniak, etc
Emissionen mit eutrophierender Wirkung	PO_4^{3-}-Äquivalente	Stickstoffoxide, Ammoniak
Bodennahes Ozonbildungs-potenzial (Sommersmog)	POCP-Äquivalent	Flüchtige Nichtmehtan-Kohlen-wasserstoffe (NMVOC), CH_4, CO

Kumulierter Primärenergieaufwand: Als Wirkungsindikator für die Beanspruchung der erschöpflichen Energieressourcen wird der Aufwand an fossilen und nuklearen Energieträgern herangezogen. Der Primärenergieverbrauch errechnet sich für Stein- und Braunkohle, Erdgas und Erdöl auf Basis des Heizwerts. Strom aus Kernenergie wird über einen Wirkungsgrad von 33 % in Primärenergie umgerechnet (Tab. 9).

Tab. 9: Aggregationsfaktoren zur Berechnung der Ressourcenbeanspruchung über den kumulierten fossilen Energieaufwand

	Einheit	Faktor in MJ/Einheit
Erdgas	MJ	1
Erdölgas	MJ	1
Rohbraunkohle	MJ	1
Rohöl	MJ	1
Rohsteinkohle	MJ	1
Netto-Strom aus Kernkraftwerken	kWh	10,908

Anthropogener Treibhauseffekt: Hier treten als direkt klimarelevante Spurengasemissionen vor Allem CO_2 aus fossilen Energieträgern, CH_4 und N_2O auf. Aufgrund der unterschiedlichen Klimawirksamkeit der einzelnen Stoffe werden die jeweiligen Emissionen in sog. CO_2-Äquivalente überführt (Tab. 10). Das bei der Verbrennung von Biomasse entstehende CO_2 wird bei der Berechnung der CO_2-Äquivalente nicht berücksichtigt, da die gleiche Menge an CO_2 beim Wachstum der Pflanzen aus der Atmosphäre gebunden wurde, d. h. es wird ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf und eine nachhaltige Bereitstellung der Biomasse unterstellt.

Tab. 10: Wichtungsfaktoren wichtiger Treibhausgase zur Quantifizierung des anthropogenen Treibhauseffekts bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren

		Wichtungsfaktor in kg CO_2-Äquivalenten/kg Schadstoff
Kohlenstoffdioxid	CO_2	1
Methan	CH_4	23
Distickstoffoxid	N_2O	296
Perfluormethan	CF_4	5.700
Perfluorethan	C_2F_6	11.900
Schwefelhexafluorid	SF_6	22.200

Emissionen mit versauernder Wirkung: Diese Luft getragenen Schadstoffe sind versauernd wirkende Stoffe wie beispielsweise Schwefel- und Stickstoffoxide und deren Umwandlungsprodukte. Durch Säureeintrag und einer damit verbundenen pH-Wert-Absenkung können sowohl terrestrische als auch aquatische Ökosysteme in Mitleidenschaft gezogen werden (Tab. 11).

Tab. 11: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für Versauerung

		Charakterisierungsfaktor in kg SO2-Äquivalenten/kg Schadstoff
Schwefeldioxid	SO_x als SO_2	1
Stickstoffoxide	NO_x als NO_2	0,7
Ammoniak	NH_3	1,88
Chlorwasserstoff	HCl	0,88
Fluorwasserstoff	HF	1,6
Schwefelwasserstoff	H_2S	1,88

Emissionen mit eutrophierender Wirkung: Der Effekt der terrestrischen Eutrophierung umfasst den Eintrag von Nährstoffen in Böden. Bei terrestrischen Ökosystemen führt ein verstärkter Nährstoffeintrag zu einer Verschiebung des Artengleichgewichts, die im Allgemeinen mit einer Verminderung der Artenvielfalt verbunden ist (Tab. 12).

Tab. 12: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für terrestrische Eutrophierung

		Charakterisierungsfaktor in kg PO_4^{3-} Äquivalentent/kg Schadstoff
Stickstoffoxide	NO_x als NO_2	0,13
Ammoniak	NH_3	0,35

Bodennahes Ozonbildungspotenzial: Während Ozon in der höheren Atmosphäre (stratosphärisches Ozon) als Treibhausgas wirkt und vor UV-Strahlung schützt, ist bodennahes Ozon (troposphärisches Ozon) ein Reizgas, welches maßgeblich zum Sommersmog beiträgt. Das Bildungspotenzial von bodennahem Ozon umfasst dabei in einem massebezogenen POCP-(Photochemical Ozone Creation Potential) Äquivalent die Vorläufersubstanzen, die zu einer Bildung von troposphärischem Ozon führen (Tab. 13).

Tab. 13: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung bodennahen Ozons

		Charakterisierungsfaktor in kg POCP-Äquivalenten/ kg Schadstoff
Flüchtige Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe	NMVOC	0,416
Methan	CH_4	0,007
Kohlenstoffmonoxid	CO	0,036

Als vierter und abschließender Schritt der Lebensweganalyse folgt die **Auswertung** in Bezug auf das zu Grunde gelegte Ziel. Hierbei werden die Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung zusammengeführt und für die verschiedenen Referenzkonzepte vergleichend gegenüber gestellt. Für die Beurteilung, welches Referenzkonzept gegenüber anderen Alternativen ökologisch vorteilhafter ist, müssen die Ergebnisse aller Wirkungsindikatoren dabei weiter interpretiert und ausgewertet werden. Hierbei wird aus Gründen der Nachvollziehbarkeit eine qualitative Auswertung einer Gesamtaggregation aller Wirkungsindikatoren zu einer einzigen Kennzahl vorgezogen, um eine vorgetäuschte Objektivität zu vermeiden (vgl. /UBA 1995/). Zudem können Parametervariationen bzw. Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um zu untersuchen, wie stark sich Änderungen der Randbedingungen, die der Bilanzierung zu Grunde gelegt wurden, auf das Gesamtergebnis der Bilanzierung auswirken.

4.2 Analyse der geothermischen Referenzkonzepte

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Lebensweganalyse dargestellt. Zunächst wird dabei auf die zuvor in Tab. 4 (Kapitel 3.1.1) aufgelisteten Referenzkonzepte einer geothermischen Strom- sowie Strom- und Wärmeerzeugung eingegangen und im Vergleich dazu werden zukünftig mögliche Referenzkonzepte (Tab. 5) diskutiert. Im Rahmen einer Parametervariation wird anschließend der Einfluss von Rahmenannahmen der Lebenswegbilanzierung bzw. verschiedener technischer Eingangsgrößen analysiert.

4.2.1 Referenzkonzepte

Im Hinblick auf die Bewertung eines ökologisch optimierten Ausbaus der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland ist die in den jeweiligen Anlagen produzierte Netto-Strommenge (d. h. produzierte Strommenge abzüglich des durch z. B. Förder- und Speisepumpe sowie Kühlkreislauf benötigten Stromeigenbedarfs) maßgebend. Dementsprechend erfolgt die Lebensweganalyse der Referenzkonzepte als Betrachtung der eingespeisten Netto-Strommenge.

4.2.1.1 Konzepte zur Strombereitstellung

Der Lebenswegvergleich der Referenzkonzepte zur Strombereitstellung macht deutlich, dass der Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie die analysierten Luft getragenen Emissionen im Lebensweg der untersuchten Anlagen maßgeblich durch die Lagerstättenerschließung bedingt sind (Abb. 18, Datenbasis Anhang Tab. A - 1). Der Verbrauch erschöpflicher Energieträger wird z. B. zwischen 86 und 94 % durch den untertägigen Bau beeinflusst, wobei davon wiederum durchschnittlich 51 % auf die Energie für die Bohrungsniederbringung entfallen (Abb. 17).

Auf den Bau über Tage (z. B. Bau Konversionsanlage, Thermalwasserleitung, Kraftwerkgebäude) entfallen beim Verbrauch erschöpflicher Energieträger weitere 4 bis 13 %, auf den Anlagenbetrieb (z. B. Wasserbedarf bzw. -aufbereitung Kühlung, Ersatzbeschaffungen) 5 bis 6 %. Der Rückbau bzw. Abriss bedingt weniger als 1 % des Verbrauchs. Diese Tendenz der Verteilung beim Verbrauch erschöpflicher Energieträger wird in vergleichbaren Ansätzen auch bei den Luft getragenen Emissionen deutlich.

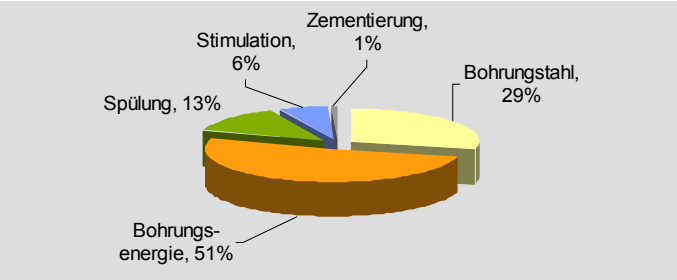

Abb. 17: Durchschnittliche Verteilung des Verbrauchs erschöpflicher Energieträger beim untertägigen Bau (Referenzkonzepte zur Strombereitstellung)

Ein Vergleich der unterschiedlichen Standorte zeigt, dass unter den zu Grunde gelegten Randbedingungen im Oberrheingraben gegenüber dem Süddeutschen Molassebecken und dem Norddeutschen Becken in den berücksichtigten Kategorien deutlich geringere Umweltauswirkungen zu erwarten sind. Der Grund dafür ist der erhöhte Temperaturgradient, der zu einer geringeren Bohrungstiefe und damit verbunden zu einem kleineren energetischen und materiellen Aufwand für die Lagerstättenerschließung führt, obwohl im Vergleich zur Dublette im Norddeutschen Becken aufgrund der höheren Förderrate ein größeres Verrohrungsschema und damit auch ein größerer Bohrlochdurchmesser notwendig ist.

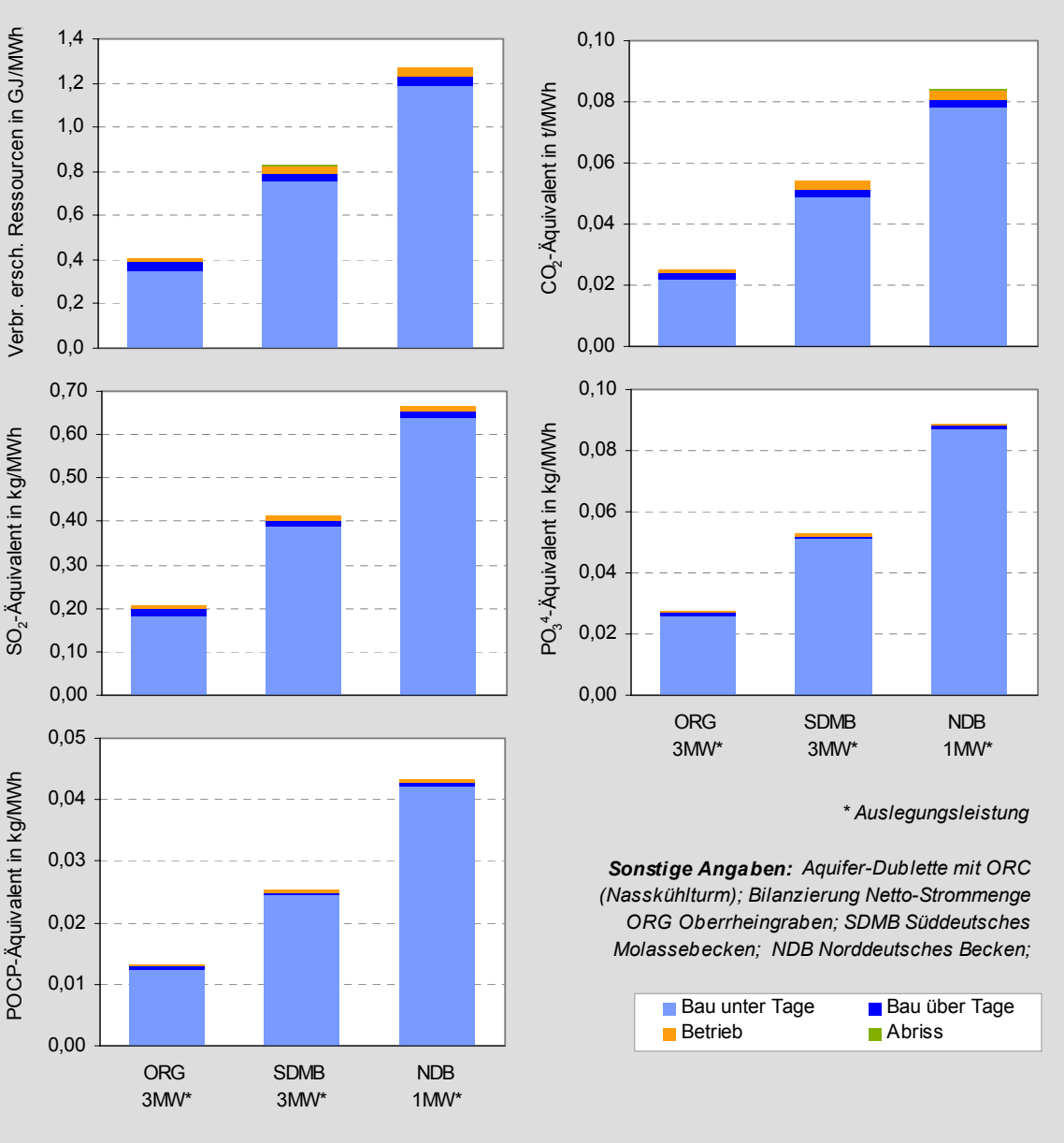

Abb. 18: Ergebnisse der Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strombereitstellung

Weiterhin hat die unterschiedlich eingespeiste Netto-Strommenge einen entscheidenden Einfluss. Ein Vergleich der Referenzanlagen im Oberrheingraben und Süddeutschen Molassebecken zeigt, dass bei vergleichbarer Brutto-Strommenge die Referenzanlage im Molassebecken nur etwa halb so viel Netto-Strom in das Netz einspeisen kann (Abb. 19). Die Ursache dafür ist zum einen der niedrigere Wirkungsgrad (kühleres Thermalwasser) und der dadurch bedingte, verhältnismäßig größere Kühlbedarf (vgl. Kapitel 2.2.2). Zum anderen ist mit der höheren För-

derrate ein verhältnismäßiger Mehraufwand für die Thermalwasserzirkulation verbunden, da für die gleiche Anlagenleistung entsprechend mehr Thermalwasser gefördert werden muss.

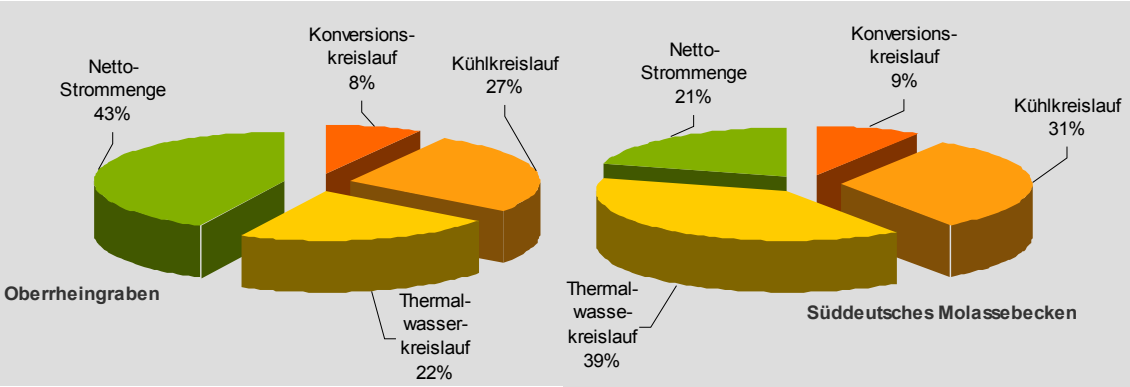

Abb. 19: Durchschnittliche Verteilung der Brutto-Strommenge auf Netto-Strom und Stromeigenbedarf (Referenzkonzepte zur Strombereitstellung, Oberrheingraben und Süddt. Molassebecken)

Der Aufwand für die Thermalwasserförderung steht dabei nicht nur in Abhängigkeit zur jeweiligen Förderrate, sondern wird auch maßgeblich durch die Produktivität bzw. Injektivität des Reservoirs bestimmt (Abb. 20).

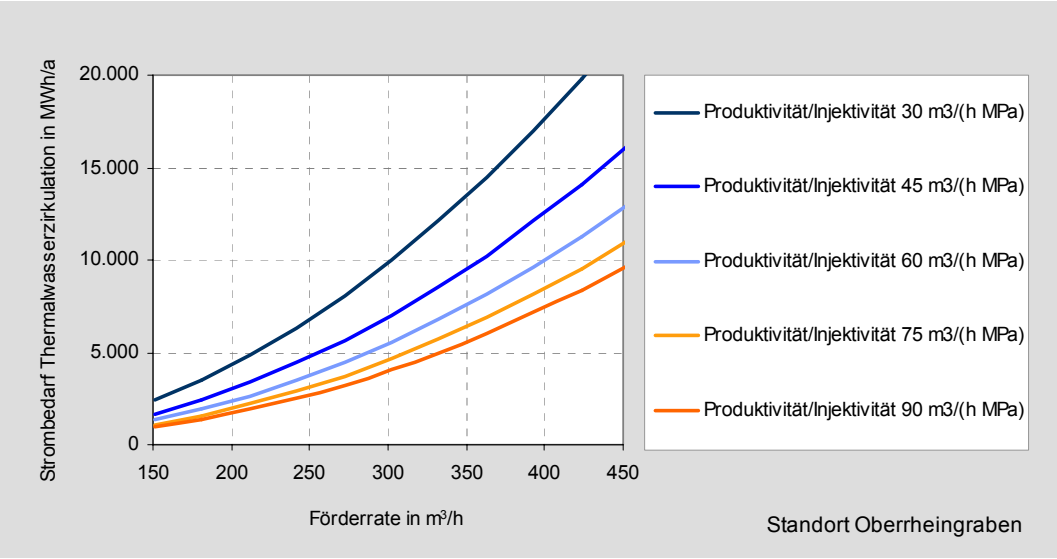

Abb. 20: Jährlicher Strombedarf der Thermalwasserzirkulation im Oberrheingraben in Abhängigkeit von der Förderrate und der Reservoir-Produktivität bzw. –Injektivität

Im Falle des Geothermiekraftwerks im Norddeutschen Becken können 46 % des produzierten Brutto-Stroms eingespeist werden. Die hohen energetischen und materiellen Aufwendungen im

Norddeutschen Becken für die Bohrungsniederbringung werden durch den vergleichsweise hohen Netto-Stromanteil dennoch nicht maßgeblich kompensiert.

4.2.1.2 Konzepte zur Strom- und Wärmebereitstellung

Bei den untersuchten Geothermiekonzepten zur Strom- und Wärmbereitstellung wird die im Thermalwasser noch enthaltene Restwärme an ein Niedertemperaturnetz abgegeben (vgl. Kapitel 2.2.2.3). Die dabei eingespeiste Wärmemenge wird der Stromerzeugung gutgeschrieben (vgl. Kapitel 4.1), was im Falle der geothermischen Referenzkonzepte nicht nur zu einer Reduzierung, sondern teilweise sogar zu einer Vermeidung der bilanzierten Umweltauswirkungen führt (Abb. 21, Datenbasis Anhang Tab. A - 2). Im Gegensatz zu einer reinen Stromerzeugung sind dabei hinsichtlich der verschiedenen Standorte unterschiedliche Charakteristiken bzw. Tendzen erkennbar.

Während bei einer reinen Stromerzeugung die Referenzanlage mit der größten Netto-Strommenge (d. h. Referenzanlage im Oberrheingraben) auch die geringsten Umweltwirkungen im Lebensweg aufweist, ist bei einer zusätzlichen Wärmebereitstellung die Referenzanlage mit der größten Wärmegutschrift mit den niederigsten Wirkungen verbunden. Der Grund für den maßgeblichen Einfluss der Wärmegutschrift liegt bei geothermischen Konzepten dabei an der dem Thermalwasserstrom verhältnismäßig großen entziehbaren thermischen Leistung, welche die elektrische Leistung um Vielfaches übersteigt.

Aufgrund des großen Thermalwasserfördvolumens ist die größte Wärmegutschrift und damit die niedrigsten Umweltwirkungen bei der Referenzanlage im Süddeutschen Molassbecken zu verzeichnen. Zudem ist zu beachten, dass die geringere Thermalwasserfördertemperatur zu verhältnismäßig größeren Einbußen in der Stromproduktion (vgl. Kapitel 2.2.2.3) und damit auch zu einer stärkeren Verringerung der Netto-Strommenge führt, wodurch das oben angesprochenen Verhältnis von thermischer zu elektrischer Leistung noch zusätzlich verstärkt wird. Während im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben die eingespeiste Netto-Strommenge aufgrund der zusätzlichen Wärmebereitstellung um 5 % abnimmt, wird diese im Süddeutschen Molassebecken um 13 % reduziert.

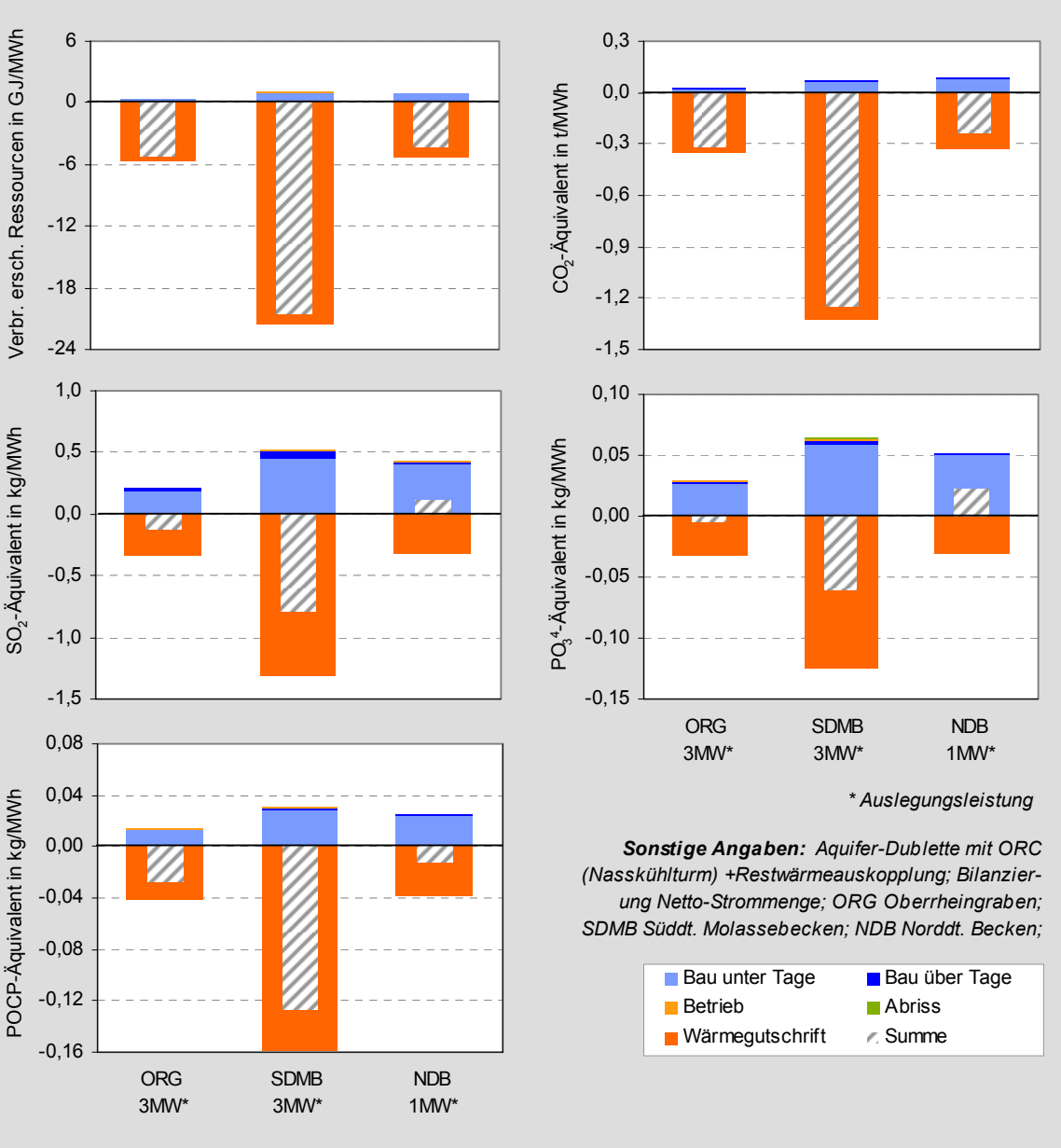

Abb. 21: Ergebnisse der Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung

Die Wärmegutschriften für die Geothermieanlagen im Oberrheingraben und Norddeutschen Becken liegen in derselben Größenordnung Aufgrund des hohen energetischen und materiellen Aufwands für die Referenzanlage im Norddeutschen Becken führt diese jedoch nicht in allen Wirkungskategorien zu einer Vermeidung der bilanzierten Umweltauswirkungen.

Ist ein größerer Absatz der Wärme möglich, z. B. druch die zusätzliche Nutzung der im Thermalwasser enthaltenen Restwärme zur Kältebereitstellung, kann die Vorteilhaftigkeit der Strom- und Wärmbereitstellung gegenüber einer reinen Stromerzeugung noch verstärkt werden.

4.2.1.3 Zukünftige Konzepte

Wird die zukünftige Umsetzung von HDR-Anlagen unter den angenommenen Bedingungen möglich, ist gegenüber den gegenwärtigen Referenzkonzepten eine Verringerung der bilanzierten Umweltauswirkungen zu erwarten (Abb. 22, Datenbasis Anhang Tab. A - 3). Dies ist damit zu begründen, dass aufgrund der mit der HDR-Technik in der Regel höheren zu erschließenden Temperaturen für die gleiche aus dem Untergrund geförderte Energie eine geringere Förderrate und damit auch schlankere Bohrungen ausreichen. Eine mögliche Temperaturabnahme während der Betriebszeit wurde dabei allerdings nicht berücksichtigt. Trotz der tieferen Bohrungen sind so vergleichsweise geringere energetische und materielle Aufwendungen bei der Erschließung des Untergrunds zu erreichen. Die für die Stimulation des Festgesteins einzusetzende Energie liegt ebenfalls in der gleichen Größenordnung wie die Stimulation einer Wasser führenden Gesteinsschicht (/GGA 2006/), so dass der umwelttechnische Vorteil von HDR- gegenüber Aquifer-Konzepten bestehen bleibt. Bei einer Erweiterung einer HDR-Dublette auf eine Triplette kann dieser Vorteil dabei noch verstärkt werden – unter der Annahme, dass durch zwei Förderbohrungen insgesamt die geförderte thermische Leistung (und letztendlich auch die Kraftwerksleistung) verdoppelt werden kann und gleichzeitig der erschließungstechnische Aufwand durch eine einzige, größere Injektionsbohrung verringert wird.

Grundsätzlich kann es beim untertägigen Betrieb von HDR-Konzepten zur Lösung von z. B. CO_2 und Radon aus dem Festgestein kommen (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/). Da jedoch aus technischen Gründen der obertägige Anlagenteil zur Umgebung geschlossen betrieben wird (vgl. Kapitel 2.2.2), werden diese gelösten Gase nicht freigesetzt und müssen dementensprechend bei der Bilanzierung der Umwelteffekte im Lebensweg nicht berücksichtigt werden. Gelöste Gase, welche ggf. während der Bohrungsniederbringung freigesetzt werden, sind im Rahmen der Lebensweganalyse vernachlässigbar (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/) und werden aber im Zusammenhang mit der Analyse und Bewertung der lokalen Umwelteffekten näher betrachtet.

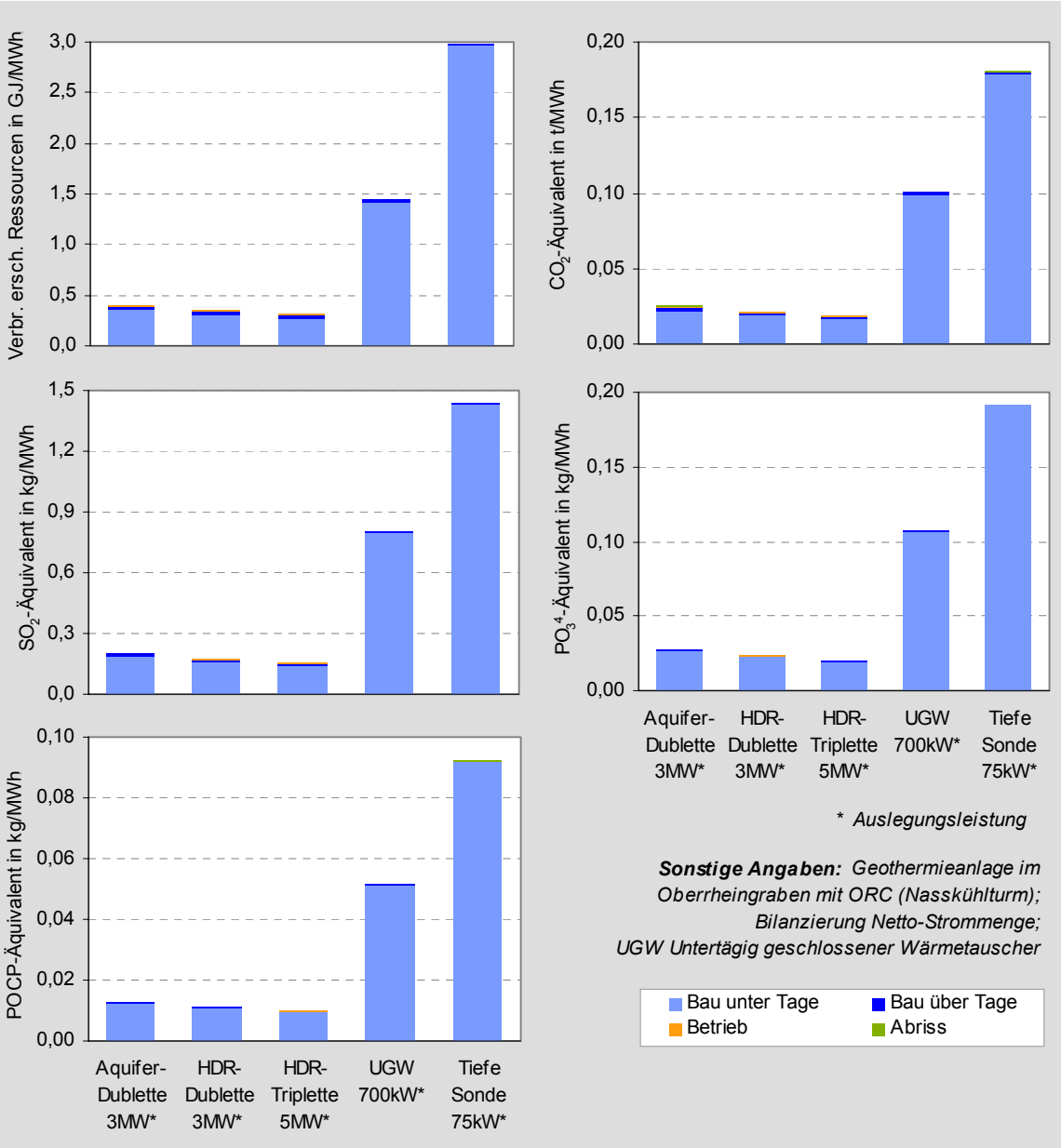

Abb. 22: Ergebnisse der Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Zukunftskonzepte

Werden untertägig geschlossene Systeme zukünftig für die geothermische Stromerzeugung eingesetzt, ist dies mit größeren Auswirkungen auf die Umwelt verbunden. Trotzt einer optimistischen Bilanzierung liegen die Umweltwirkungen eines untertägig geschlossenen Wärmetauschers und die einer tiefen Erdwärmsonde deutlich über den zu erwartenden Werten der übrigen geothermischen Referenzanlagen. Der Grund dafür sind letztendlich die deutlich geringeren realisierbaren Anlagenleistungen im Vergleich zum Aufwand für die Erschließung des Unter-

grunds, welcher hier zu 97 bzw. 99 % den Verbrauch erschöpflicher Energieträger bzw. die Emission Luft getragener Schadstoffe über den Lebensweg der jeweiligen Anlage bestimmt.

4.2.2 Parametervariation

4.2.2.1 Anlagengröße

Im Folgenden wird der Einfluss der Anlagengröße eines Geothermiekraftwerks bei gleichen Ausgangsparametern der zu erschließenden Lagerstätte analysiert. Exemplarisch am Beispiel des Oberrheingrabens wird dabei die bisher betrachtete 3 MW-Anlage auf 1 MW verkleinert und auf 5 MW vergrößert (Tab. 14).

Tab. 14: Eingangsparameter für den Vergleich verschiedener Anlagengrößen

	1-MW-Anlage	5-MW-Anlage
Reservoirparameter		
Bohrlochkonzept	Aquifer-Dublette [a]	Aquifer-Triplette [a]
Bohrlochtiefe in km	3,0	3,0
Fördertemperatur in °C	150	150
Gesamtförderrate in m^3/h	100 [b]	500 [b]
PI [f] bzw. II [g] in $m^3/(h\ MPa)$	20 [b]	60 [b]
Technische Lebensdauer in a	30 [c]	30 [c]
Konversionsanlage		
Elektrische Leistung in MW_{el}	1 [d]	5 [d]
El. Wirkungsgrad [e] in %	12	12
El. Volllaststunden in h/a	7.500	7.500

[a] saigere Bohrungen im Oberrheingraben mit 1.000 m Abstand; [b] hydraulisch stimuliert, Quelle: /GGA 2006/; [c] Förderpumpe 4 a, Konversionsanlage, Wärmetauscher 15 a; [d] ORC-Anlage mit zwangsbelüftetem Nasskühlturm; [e] Wirkungsgrad im Auslegungspunkt, Quelle: eigene Berechnungen, /Köhler 2005/; [f] Produktivitätsindex; [g] Injektivitätsindex

Im Falle der 1 MW-Anlage wird dabei bei gleicher Temperatur eine verringerte Förderrate zu Grunde gelegt. Die Lagerstätte kann dadurch zum einen mit Bohrungen geringeren Durchmessers und einer geringeren Stimulation erschlossen werden. Im Betrieb führt die Verringerung der Förderrate zudem zu einer Einsparung an Pumpenergie. Die Anlagenvergrößerung auf 5 MW wird dagegen durch die Erschließung des Reservoirs mit einer zusätzlichen Förderbohrung (und damit Verdopplung der bisherigen Förderrate) und einer größeren Injektionsbohrung realisiert.

Der Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse der unterschiedlich großen Anlagen verdeutlicht, dass die Steigerung der Anlagengröße und damit verbunden die Förderung eines grö-

ßeren Thermalwassermassenstromes zu einer Reduzierung der betrachteten Umweltwirkungen führt (Abb. 23, Datenbasis Anhang Tab. A - 4).

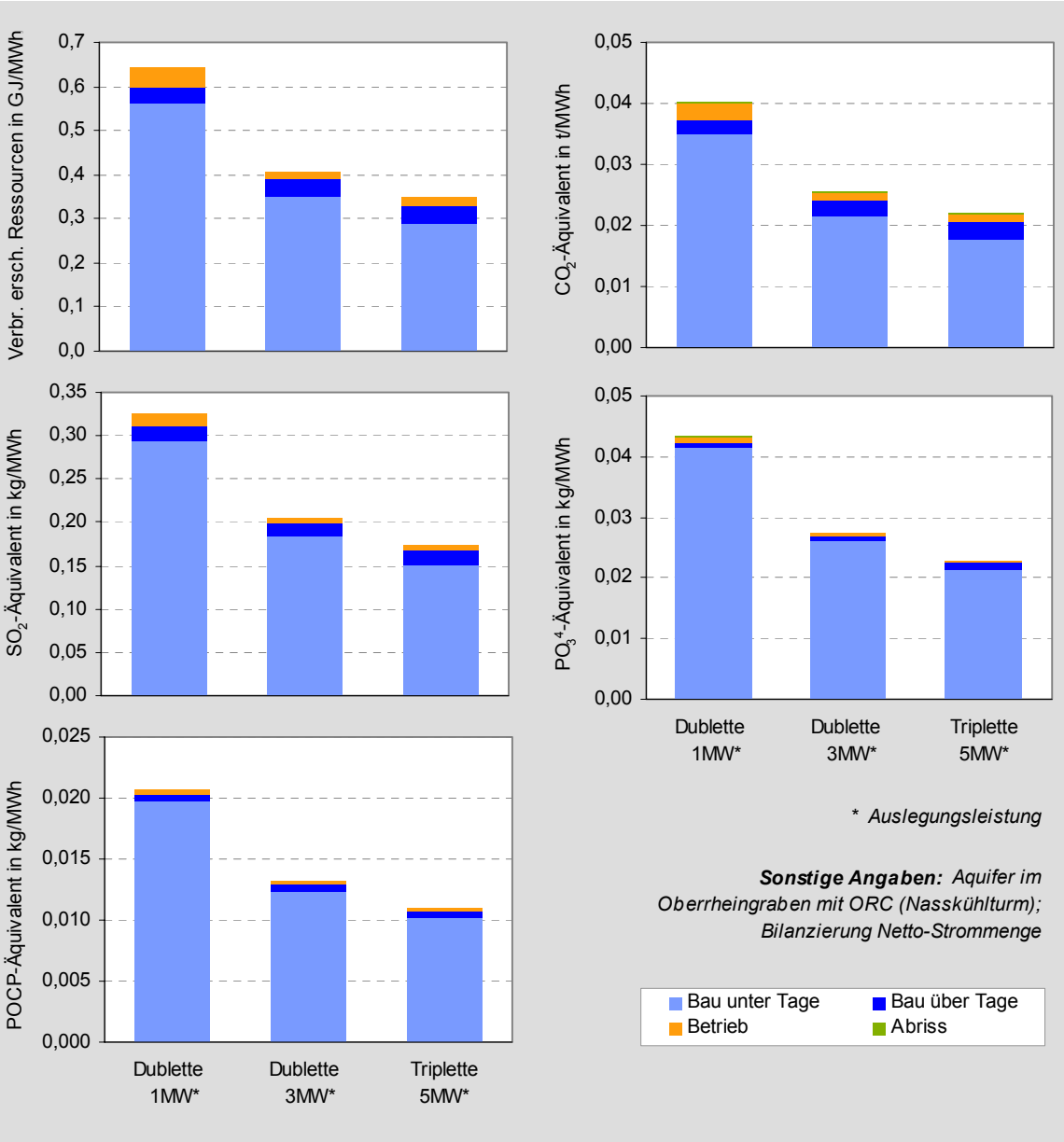

Abb. 23: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Anlagengrößen im Oberrheingraben

Der durch eine Anlagenvergrößerung jeweils bedingte materielle und energetische Mehraufwand vor Allem in der Erschließung wird somit durch die größere einspeisbare Netto-Strommenge kompensiert bzw. die daraus resultierenden spezifischen Umweltwirkungen ver-

ringert. Bezogen auf die 1-MW-Anlage liegt das Minderungspotenzial unter den angenommenen Parametern bei ca. 10 bis 17 % je MW_{el} Leistungssteigerung. Der Steigerung dieser Einsparung sind dabei Grenzen gesetzt. Zum einen ist die nachhaltige Reservoir-Erschließung in einem Erlaubnisfeld (vgl. Kapitel 3.2.1) nur durch eine begrenzte Anzahl von Bohrungen realistisch und ggf. kann die ausreichende Dimensionierung der Injektionsbohrung für deutlich höhere Injektionsraten aufgrund der geologischen Bedingungen nicht umgesetzt werden; zum anderen ist die technisch sinnvolle maximale Förderrate an die durch Stimulation erreichbare Steigerung der Reservoir-Ergiebigkeit geknüpft. Eine Steigerung der Förderrate bei gleich bleibender Produktivität führt zwar einerseits zur proportionalen Erhöhung der Brutto-Strommenge; andererseits jedoch muss dadurch ein überproportionaler Anstieg des Stromeigenbedarfs berücksichtigt werden (vgl. Abb. 20). Dadurch bedingt gibt es je Reservoir-Produktivität eine optimale Förderrate, bei der die jeweilige Netto-Strommenge maximal und die resultierenden Umwelteffekte minimal werden (Abb. 24).

Im Falle des Oberrheingrabens würde eine Steigerung der Förderrate um 35 % auf 400 m^3/h die Netto-Stromproduktion maximieren und zu einer Minimierung der Umweltwirkungen führen. Im Norddeutschen Becken ist die Förderrate unter den angenommenen Reservoirbedingungen für eine Optimierung ebenfalls zu steigern (Steigerung um 60 % auf 160 m^3/h), während bei der Referenzanlage im Süddeutschen Molassebecken das Minimum der bilanzierten Umweltwirkungen bei einer Senkung der Förderrate um 30 % auf 375 m^3/h erreicht wird. Die optimale Förderrate wird dabei jeweils bei einem Verhältnis von Netto- zu Brutto-Strommenge von 34 bis 35 % erreicht.

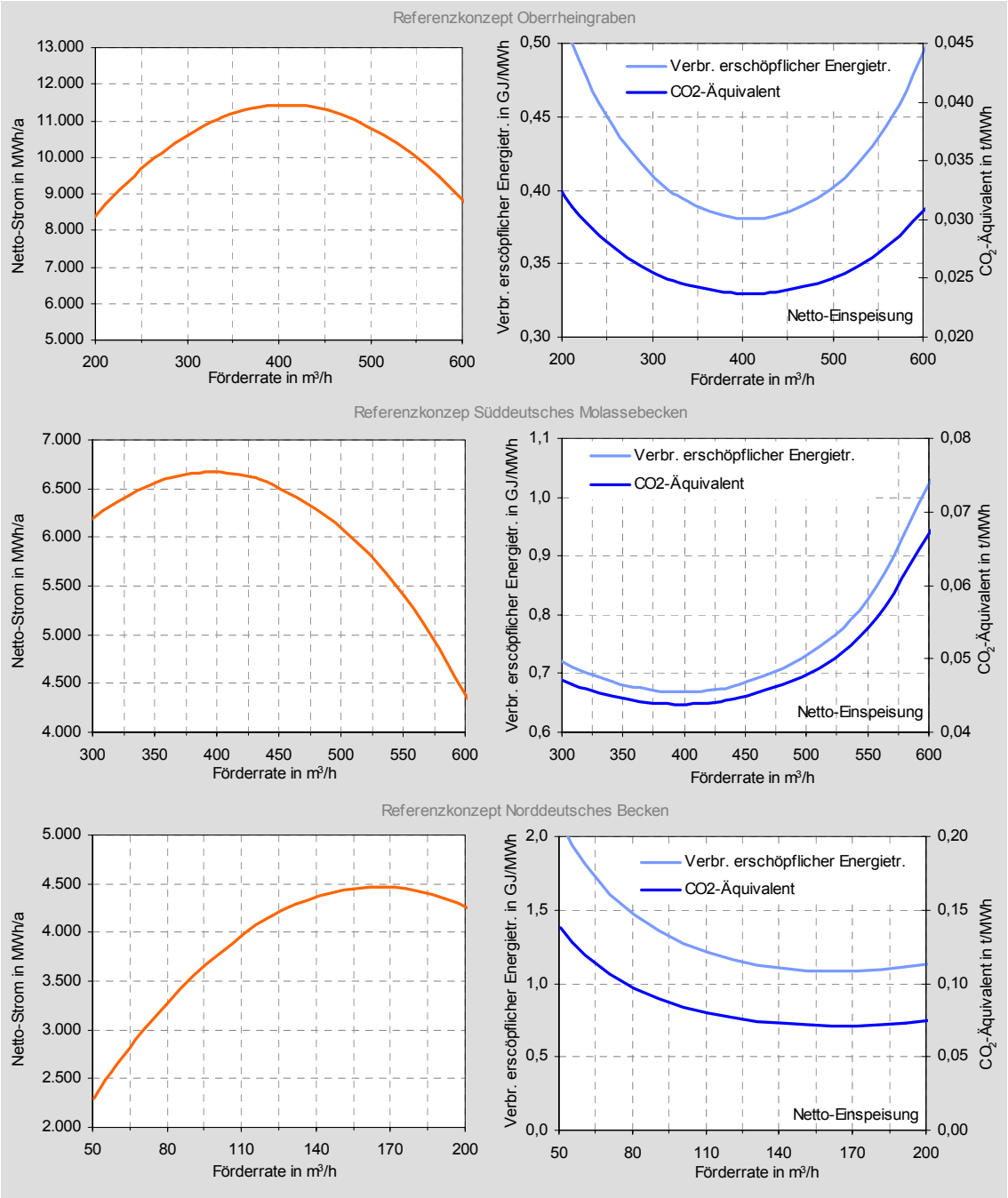

Abb. 24: Verbrauch erschöpflicher Energieträger und CO2-Äquivalent in Abhängigkeit der Förderrate

Ein Vergleich zu den wirtschaftlichen Aspekten ergibt, dass wirtschaftliche und ökologische Optimierung gegenläufig sind (Abb. 25). Gemäß EEG wird nämlich der eingespeiste Strom regenerativer Erzeugungsanlagen mit festen Sätzen, welche höher liegen als der auf dem Markt erhältliche Strompreis, vergütet. Aus diesem Grund wird gegenwärtig in der Praxis die gesamte

Brutto-Strommenge in das öffentliche Stromnetz eingespeist und der Stromeigenbedarf aus diesem bezogen um so einen wirtschaftlichen Betrieb realisieren zu können. Mit steigender Förderrate steigt dementsprechend auch die Wirtschaftlichkeit an. Exemplarisch für die Referenzanlage im Süddeutschen Molassebecken ist die für eine Wirtschaftlichkeit nach EEG mindestens erforderliche Förderrate von 600 m^3/h mit 56 % höherem Ausstoß von CO_2-Äquivalenten gegenüber der ökologisch optimalen Förderrate von 375 m^3/h verbunden.

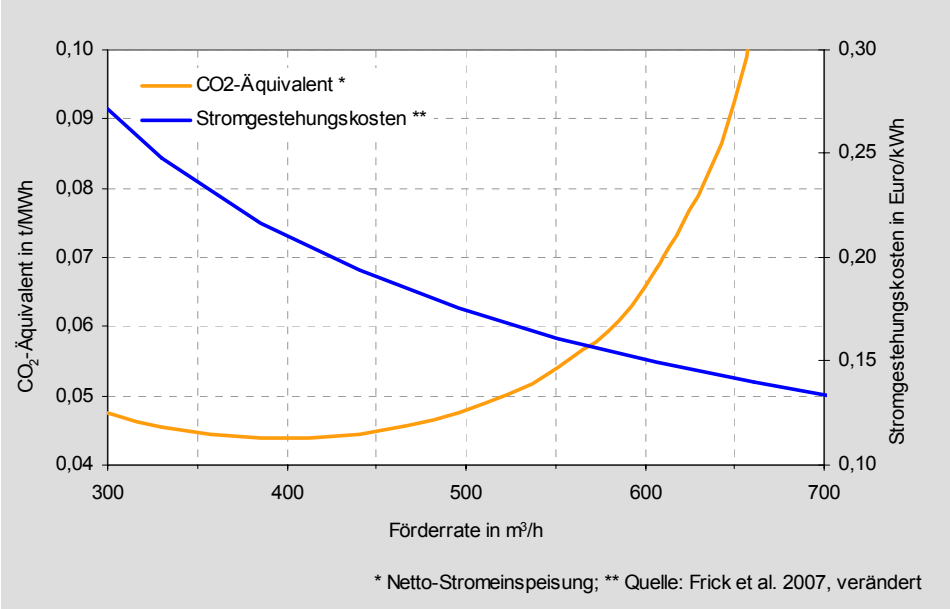

Abb. 25: Vergleich von CO2-Äquivalent und Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Förderrate am Beispiel der Referenzanlage im Süddeutschen Molassebecken

Konkrete Empfehlungen für mögliche Änderungen im EEG können im Rahmen der Studie nicht erfolgen. Es wird jedoch auf den Bedarf einer umfassenden ökonomisch-ökologischen Gegenüberstellung unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen (z. B. Konversions-, Kühltechnik, Standort) hingewiesen, mit Hilfe welcher eine derartige Fragestellung beantwortet werden muss.

Hinsichtlich einer Anlagenvergrößerung ohne Steigerung der Förderrate ist auch die Kombination von Geothermie mit anderen Wärmeträgern zu Hybridkraftwerken denkbar. Am Beispiel des Geothermieprojekts Neuried wird deutlich, dass etwa die Anhebung der Thermalwassertemperatur durch Abwärme aus einem Biogas-BHKW zu einer besseren Ausnutzung der übertragenen Thermalwasserwärme im Konversionsprozess möglich ist (/Ebner 2006/).

4.2.2.2 Bilanzierung der Strommenge

Bislang wurde im Rahmen der Lebensweganalyse die Netto-Strommenge betrachtet (vgl. Kapitel 4.2.1). Wie jedoch angesprochen wird im Falle einer regenerativen Stromerzeugung der Stromeigenbedarf aus wirtschaftlichen Gründen aus dem öffentlichen Netz bezogen und die Brutto-Strommenge eingespeist (vgl. Kapitel 4.2.2.1). Aus diesem Grund wird nachfolgend der Einfluss der bisher gewählten Bilanzierungsgrenze untersucht, indem die Bilanzierung von Netto- und Brutto-Strommenge gegenüber gestellt werden. Im Falle der Referenzkonzepte zur Strombereitstellung geht dabei hervor, dass die Umweltwirkungen bei der Brutto-Betrachtung um ein Mehrfaches über den Werten bei einer Bilanzierung der Netto-Strommenge liegen (Abb. 26, Datenbasis Anhang Tab. A - 5).

Dies ist auf den aus dem Netz bezogenen Stromeigenbedarf zurückzuführen, welcher gegenwärtig noch durch einen großen Anteil fossiler Energieträger geprägt ist. Dadurch resultieren die Umwelteffekte zu 91 bis 98 % aus dem Betrieb und nicht mehr wie bei der Netto-Betrachtung zum Großteil aus dem untertägigen Anlagenbau. Dies führt vor Allem zu einem deutlich höhereren Verbrauch erschöpflicher Energieressourcen und durch deren thermische Umsetzung auch zu massiveren Treibhausgas-Emissionen. Im Oberrheingraben und Norddeutschen Becken sind 57 bzw. 54 % der produzierten Brutto-Strommenge dem Netz zu entnehmen; im Süddeutschen Molassebecken müssen aufgrund der hohen energetischen Aufwendungen für Thermalwasserförderung und Kühlung 79 % bei einer Brutto-Strommengenbetrachtung aus dem Netz bezogen werden (vgl. Abb. 19). Dadurch bedingt sind bei einer Stromerzeugung im Süddeutschen Molassebecken die größten Umweltwirkungen je GWh produzierten Stromes zu erwarten.

Wird von einer zukünftigen Veränderungen des Strommixes zu Gunsten der erneuerbaren Energien ausgegangen (z. B. /EWI 2005/, /probas 2007/), hat dies auch maßgeblichen Einfluss auf die resultierenden Umwelteffekte (Abb. 27). Sind die Prognosen des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Kölen zutreffend, werden z. B. die Treibhausgasemissionen bei einer Bilanzierung der Brutto-Strommengen allein durch den veränderten Strommix bis 2010 um ca. 11 %, bis 2020 um ca. 25 % und bis 2030 sogar um ca. 35 % reduziert.

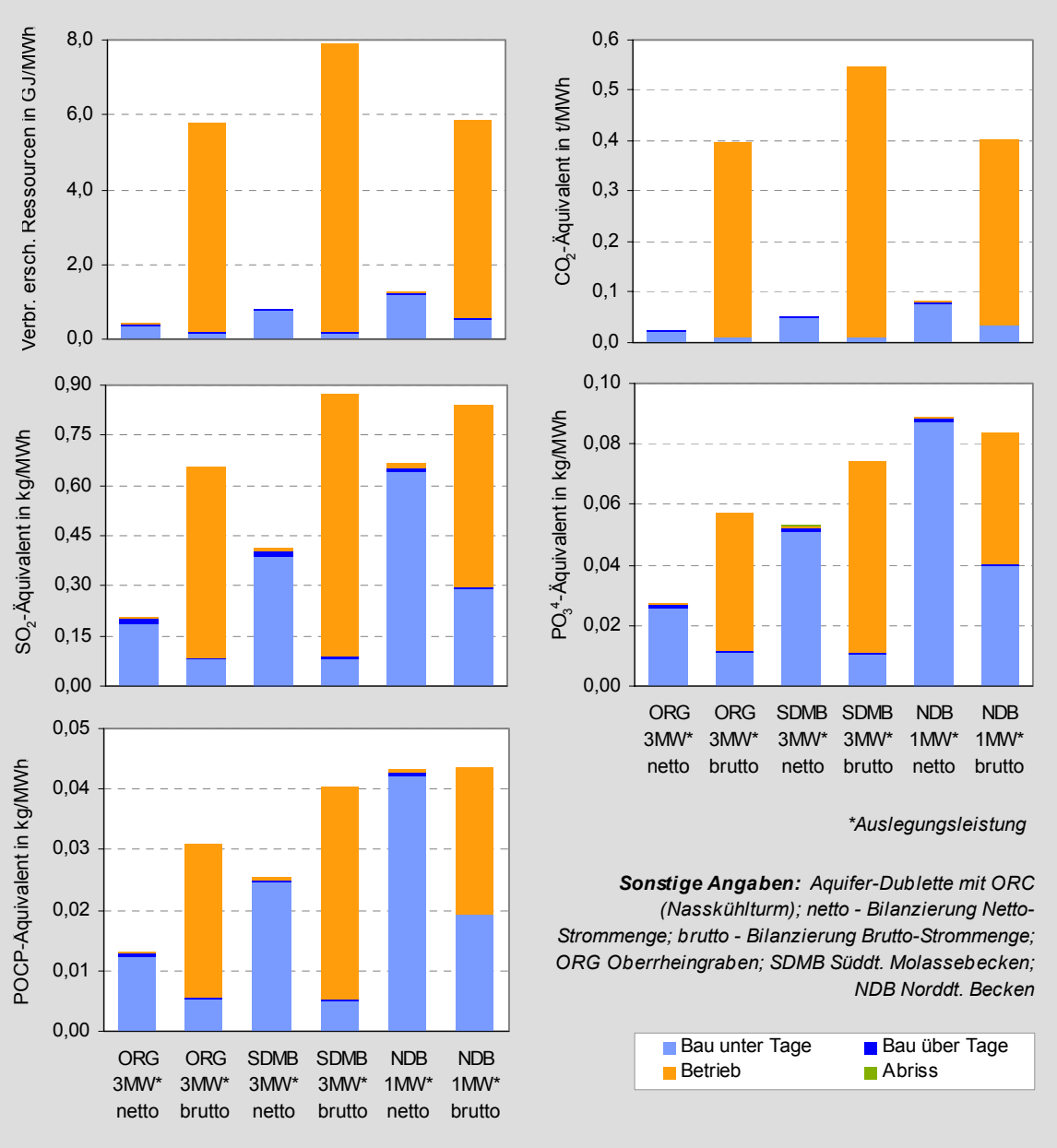

Abb. 26: Vergleich der Bilanzierung von Netto- und Bruttostrommenge der untersuchten geothermischen Strombereitstellung

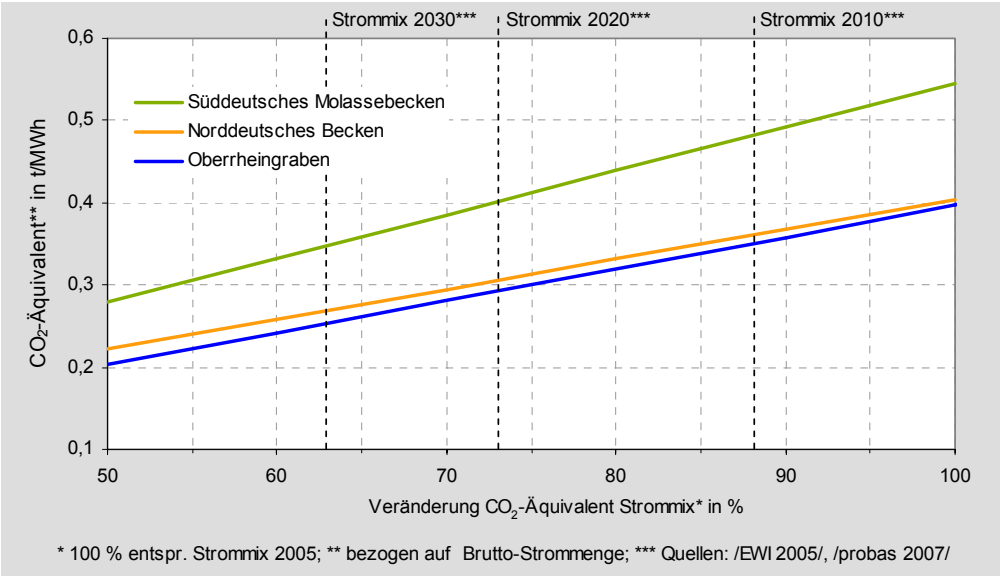

Abb. 27: Einfluss des Strommixes auf das CO_2-Äquivalent bei Bruttstrom-Bilanzierung

Weiterhin ist in Bezug auf eine Betrachtung der Brutto-Strommenge zu bemerken, dass eine Steigerung der Förderrate zwar mit einer Erhöhung der Brutto-Strommenge verbunden ist, ab einer bestimmten Förderrate der Eigenbedarf die produzierte Strommenge jedoch übersteigen kann und somit faktisch kein regenerativer Strom produziert wird. Im Falle der Referenzanlage im Süddeutschen Molassebecken wird z. B. ab einer Förderrate von 750 m^3/h (d. h. bei einer Steigerung der zu Grunde gelegten Förderrate um 136 %) netto betrachtet kein regenerativer Strom mehr bereitgestellt (Abb. 28).

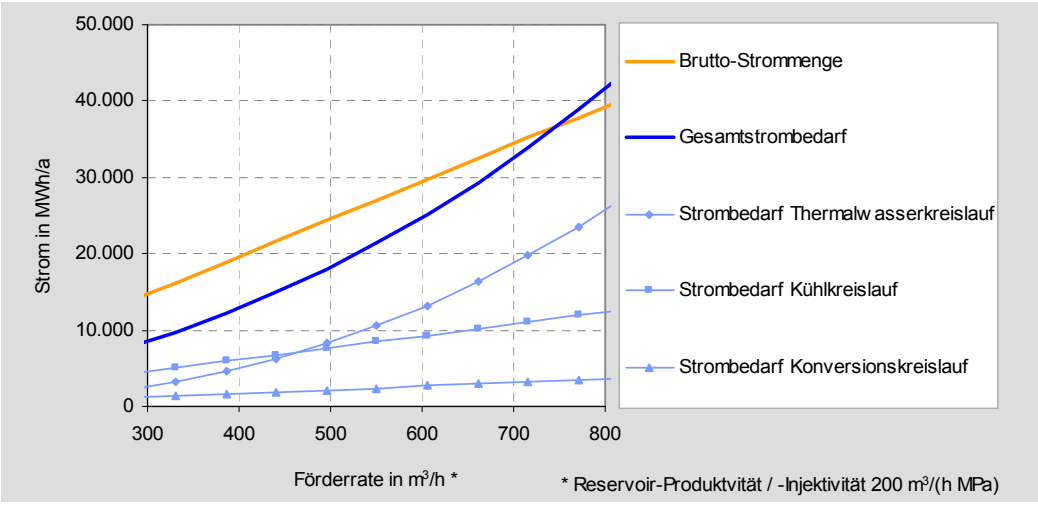

Abb. 28: Vergleich von Brutto-Strommenge und Gesamtstrombedarf in Abhängigkeit der Förderrate im Süddeutschen Molassebecken

Neben dem Strommix hat auch die Förderate einen deutlichen Einfluss auf die Umwelteffekte bei einer Bruttostrom-Betrachtung. Wie auch bei der Bilanzierung der Netto-Strommenge ist dabei maßgeblich, dass mit steigender Förderrate die Brutto-Strommenge zunimmt, aber gleichzeitig auch der Stromeigenbedarf überproportional ansteigt (vgl. Kapitel 4.2.2.1). Demnach ist auch hier eine Minimierung der Umwelteffekte in Abhängigkeit der Förderrate zu erwarten. Da im Vergleich zu Netto-Betrachtung der Einfluss des Eigenbedarfs auf den jeweiligen Umwelteffekt deutlich stärker ist, verschiebt sich die ökologisch optimale Förderrate im Vergleich zur Netto-Betrachtung hin zu kleineren Werten. In der Referenzanlage im Oberrheingraben wird diese Förderrate bei einer Verringerung auf 34 %, im Süddeutschen Molassebecken auf 20% und im Norddeutschen Becken auf 55 % erreicht (Abb. 29).

Bei einem Vergleich der Bilanzierung von Netto- bzw. Brutto-Strommenge für die Referenzkonzepte zur Strom- und Wärmebereitstellung ist die Betrachtung der Brutto-Strommenge ebenfalls mit einer massiven Steigerung der Umweltwirkungen im Vergleich zu Netto-Strom-Bilanzierung verbunden (Abb. 30, Datenbasis Anhang Tab. A - 6). In Bezug auf eine reine, brutto bilanzierte Strombereitstellung können die Umwelteffekte dennoch maßgeblich reduziert werden.

Eine generelle Vorteilhaftigkeit eines Referenzkonzepts bzw. Standorts ist hier jedoch nicht mehr zu erkennen, da alle Konzepte in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Auch im Falle der Anlage im Süddeutschen Molassebecken wird die aus der großen bereitstellbaren Nutzwärmemenge resultierende spezifische Wärmegutschrift durch den Strombezug aus dem öffentlichen Netz kompensiert.

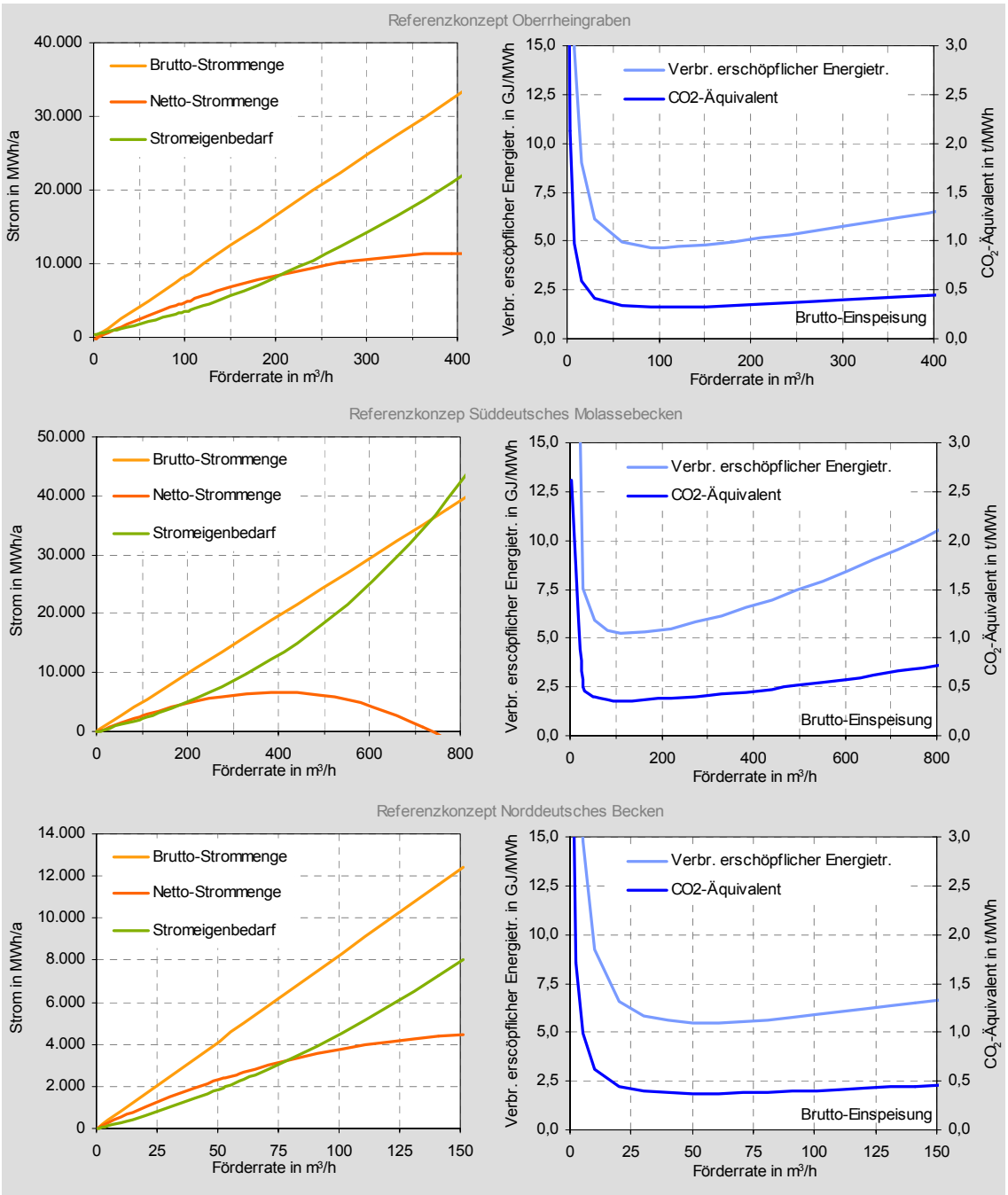

Abb. 29: Verbrauch erschöpflicher Energieträger und CO2-Äquivalent in Abhängigkeit der Förderrate (Bilanzierung Brutto-Strommenge)

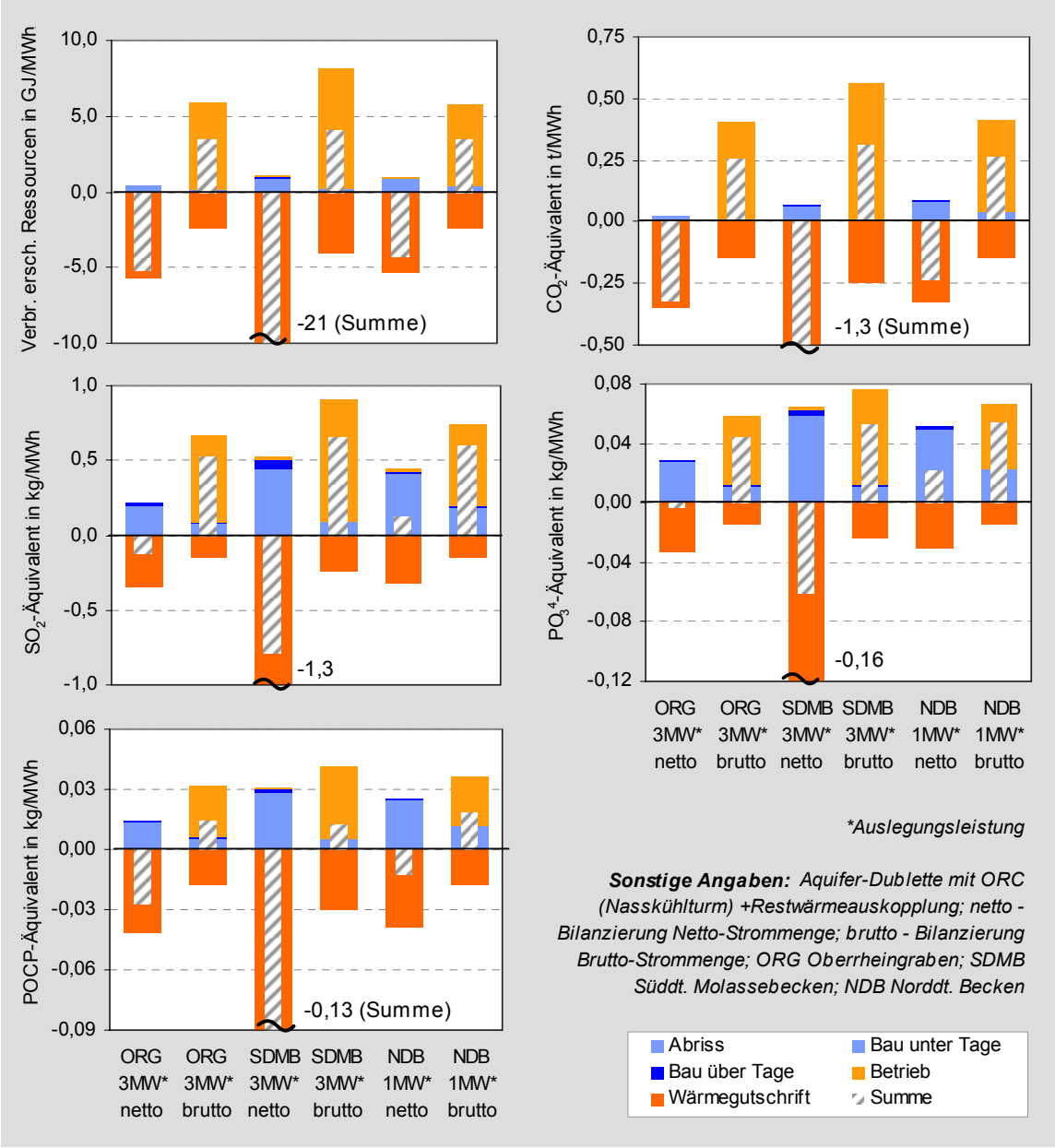

Abb. 30: Vergleich der Bilanzierung von Netto- und Bruttostrommenge der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung

4.2.2.3 Konversionsprozess

Bislang wurden ausschließlich ORC-Anlagen im Rahmen der Lebensweganalyse betrachtet, so dass im Weiteren exemplarisch anhand der Anlagen im Oberrheingraben und Süddeutschen Molassebecken eine Gegenüberstellung zur Kalina-Technik erfolgt. Dabei wird zu Grunde ge-

legt, dass bei beiden Konversionsprozessen dem geförderten Thermalwasser die gleiche Wärmemenge entzogen und die jeweils einfachste Prozessführung (z. B. keine Überhitzung, keine mehrstufigen Prozesse) anlagentechnisch realisiert wird. Aufgrund der nicht-isothermen Verdampfung des Arbeitsmittelgemisches im Kalina-Prozess gegenüber dem isothermen Phasenwechsel in ORC-Anlagen mit reinen Arbeitsmedien ist die Kalina-Anlage grundsätzlich mit einem höheren elektrischen Wirkungsgrad unter damit auch einer höhere Leistung verbunden (Tab. 15). Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die für die ORC-Anlage getroffenen Annahmen auf einer Vielzahl von Erfahrungswerten basieren, während sich die Parameter für die Kalina-Anlage - vor Allem in Bezug auf die Anlagenverfügbarkeit (d. h. jährliche mögliche Volllaststundenzahl) - auf theoretische, zukünftig noch zu verifizierende Annahmen stützen.

Tab. 15: Eingangsparameter für den Vergleich verschiedener Konversionsprozesse

	Kalina-Anlage Oberrheingraben	Kalina-Anlage Süddeutsches Molassebecken
Reservoirparameter	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5
Konversionsanlage		
Elektrische Leistung in MW_{el}	3 [a]	3 [a]
El. Wirkungsgrad [b] in %	13	12
El. Volllaststunden in h/a	7.500	7.500

[a] Kalina-Anlage mit zwangsbelüftetem Nasskühlturm; [b] Wirkungsgrad im Auslegungspunkt, Quelle: eigene Berechnungen, /Köhler 2005/

Weiterhin anzumerken, dass beide Technologien beliebig komplex ausgeführt werden können und so auch bei ORC-Prozessen eine komplexere Prozessführung (z. B. zweistufiger ORC-Prozess) zu besseren Wirkungsgraden, höheren Anlagenleistungen und zu einer größeren Reduktion der Umweltwirkungen führen kann. Der Vergleich von ORC- und Kalina-Technik ist daher an dieser Stelle mit dem Vergleich unterschiedlich aufwändiger Prozessführungen gleich zu setzen.

Der Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse zeigt, dass beim Einsatz der Kalina-Technologie unter den getroffenen Annahmen eine Verringerung der betrachteten Umweltwirkungen erzielt werden kann (Abb. 31, Datenbasis Anhang Tab. A - 7). Bei gleichem erschließungstechnischen Aufwand ist der obertägige Anlagenbau im Falle einer Kalina-Anlage aufgrund der technisch bedingten Komplexität (z. B. Seperator, getrennte Prozessführung von ammoniak-armer Flüssigkeit und ammoniak-reichem Dampf) im Vergleich zu einer ORC-Anlage zwar größer, die größere Netto-Strommenge führt jedoch zu einer Reduktion der resultierenden Umweltwirkungen. Im Süddeutschen Molassebecken sind diese deutlicher, da die energetischen

Vorteile der Kalina-Technologie vor Allem bei niedrigeren Thermalwassertemperaturen zum Tragen kommen (vgl. /Le Bel et al. 2007/).

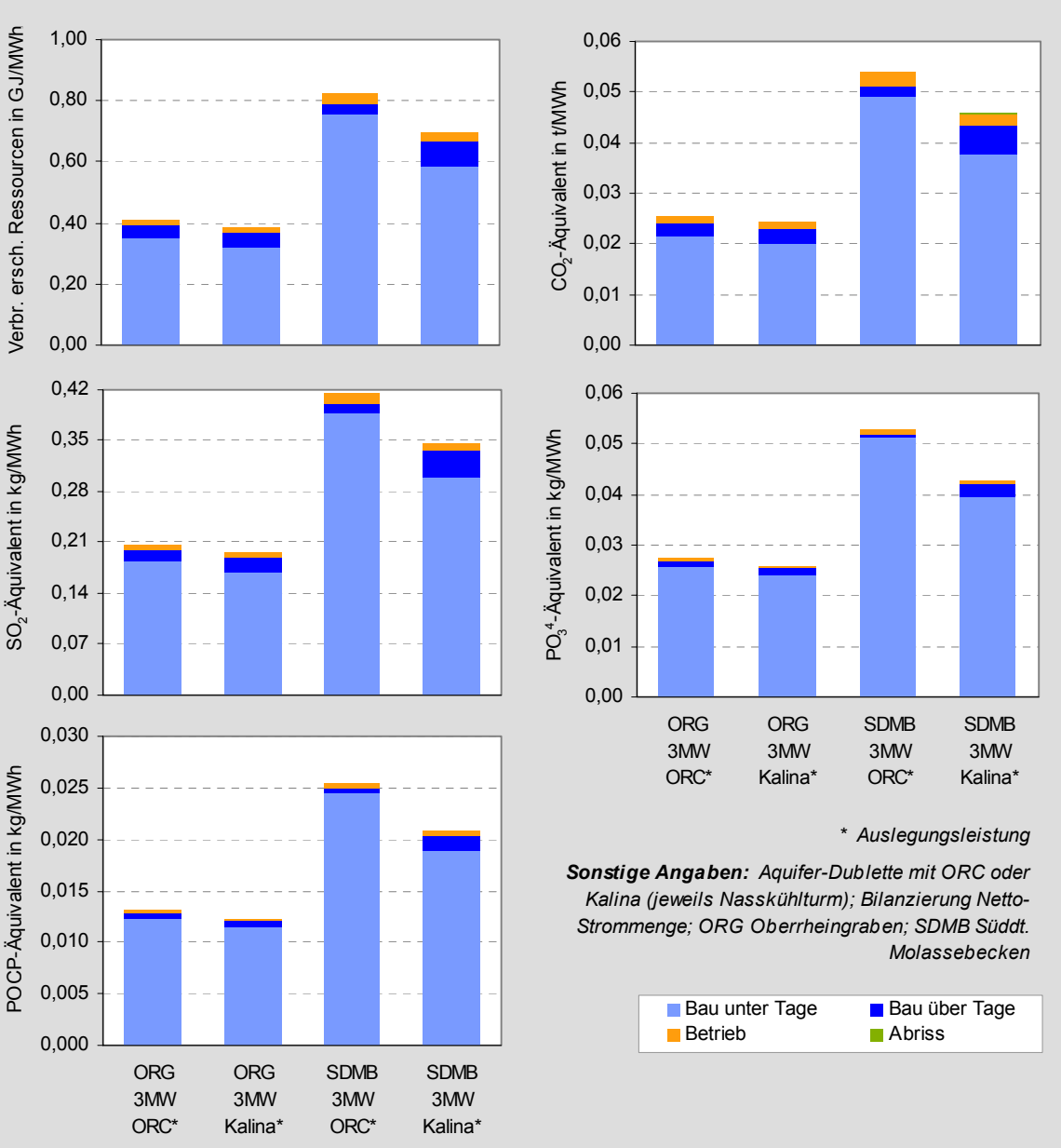

Abb. 31: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Konversionsprozesse der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben und Süddeutschen Molassebecken

4.2.2.4 Kühltechnologie

Als Kühltechnologie wurde bisher ein zwangsbelüfteter Nasskühlturm berücksichtigt. Exemplarisch am Beispiel der Referenzanlage im Oberrheingraben werden dieser Technologie im Folgenden andere Kühloptionen gegenüber gestellt. Die im Rahmen der Lebensweganalyse maßgeblichen Unterschiede sind durch die jeweils realisierbaren Kondensationstemperaturen im Konversionskreislauf und die damit erzielbare Leistung sowie den damit verbundenen Eigenbedarf (z. B. Strom, Wasser) (Tab. 16). Die hier angenommenen Werte beziehen sich dabei auf einen Standort im Oberrheingraben mit einer jährlichen Durchschnittstemperatur der Außenluft von 11 °C und einer durchschnittlichen Luftfeuchte von 70 % (/TSB 2006/).

Tab. 16: Eingangsparameter für den Vergleich verschiedener Kühltechnologien

	Durchlauf-kühlung	Nasskühlturm (zwangsbel.)	Hybrid-kühlturm	Trocken-kondensator
Reservoirparameter	Oberrheingr. gemäß Tab. 5	Oberrheingr. gemäß Tab. 5	Oberrheingr. gemäß Tab. 5	Oberrheingr. gemäß Tab. 5
Konversionsanlage				
Elektrische Leistung in MW_{el}	3 [a]	3 [a]	3 [a]	3 [a]
Wirkungsgrad [h] in %	12	12	11	10
El. Volllaststunden in h/a	7.500	7.500	7.500	7.500
Kühlkreislauf				
Kondensationstemperatur in °C	25 [b]	25 [b]	30 [b]	35 [b]
Strombedarf in kW_{el}/MW_{th} [c]	6 [d]	35 [d]	30 [d]	48 [d]
Wasserbedarf in $(m^3/h)/MW_{th}$ [e]	(170) [f]	3 [b]	1,5 [b]	-

[a] ORC-Anlage; [b] Quelle: /TSB 2006/, /Köhler, 2005/; [c] elektrische Leistung je MW_{th} Kühlleistung;
[d] Quelle: eigene Berechnungen, /TSB 2005/, /Köhler, 2005/; [e] Wasserentnahme je MW_{th} Kühlleistung;
[f] Wassernutzung – keine Entnahme;

Aufgrund des vergleichsweise geringen Energiebedarfs des Kühlkreislaufs, der geringen Kondensationstemperaturen und dadurch bedingt der größten einspeisbaren Netto-Strommenge sind im Rahmen der Lebensweganalyse die geringsten Umweltwirkungen mit dem Einsatz einer Durchlaufkühlung verbunden (Abb. 32, Datenbasis Anhang Tab. A - 8). Jedoch setzt die Durchlaufkühlung ein nutzbares Oberflächengewässer in der Nähe bzw. am Anlagenstandort voraus. Da geothermische Anlagen nur an Standorten errichtet werden, die die notwendigen geologischen Voraussetzungen aufweisen ist das Vorhandsein entsprechend nutzbarer Wasservorkommen in der Regel sehr unwahrscheinlich (z. B. /LAWA 2007/)

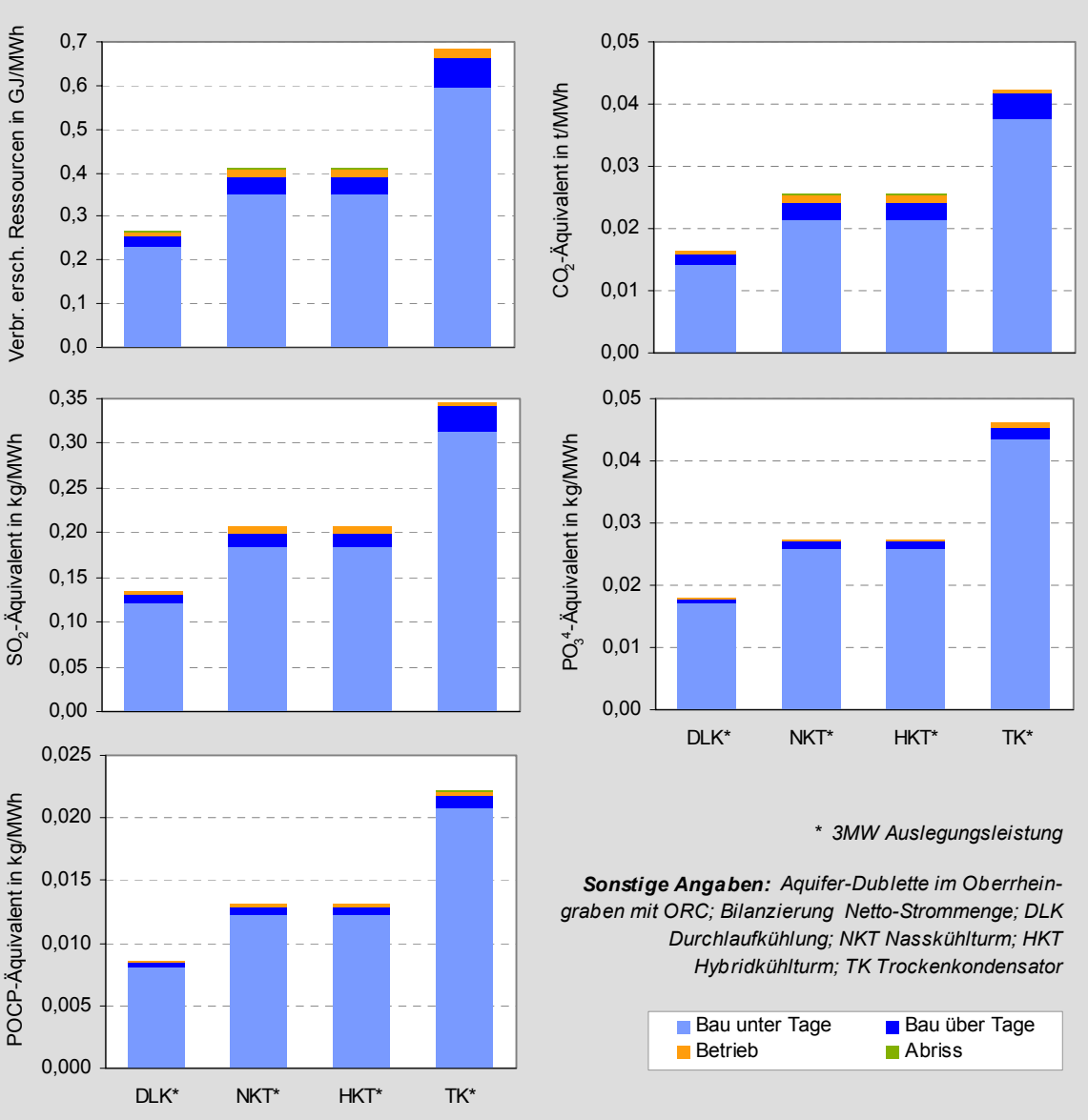

Abb. 32: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Kühlkreisläufe der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben

Im Vergleich zu einer Durchlaufkühlung sind die Standortanforderungen im Falle des bisher betrachteten zwangsbelüfteten Nasskühlturms aufgrund des geringeren Wasserbedarfs geringer; die energetischen Aufwendungen für den Betrieb des Kühlkreislaufes führen jedoch zu einer Vergrößerung der Umweltwirkungen gegenüber dieser um ca. 53 %.

Auch der Einsatz von Hybridkühltürmen ist mit einer derartigen Steigerung der Umweltwirkungen gegenüber der Durchlaufkühlung verbunden. Obwohl hier Strom- und Wasserbedarf des

Kühlkreislaufes unter dem von Nasskühltürmen liegen, führen die höhere Kondensationstemperatur sowie die Qualitäts-Anforderungen an das Kühlwasser und die damit verbundene Wasseraufbereitung zu Einbußen in der erzielbaren Netto-Strommenge.

Trockenkondensatoren kommen ohne Wasser aus und stellen damit die geringsten Anforderungen an den Standort. Allerdings führt der hohe Strombedarf für die Ventilatoren und die höheren Kondensationstemperaturen zu größeren Einbußen in der Netto-Strommenge. Gegenüber einem zwangsbelüfteten Nasskühlturm steigen der Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie die Emission Luft getragener Schadstoffe unter den angenommenen Randbedingungen um ca. 68 %.

Zu beachten ist hierbei, dass es sich bei den dargestellten Verhältnissen um Tendenzen handelt. Die letztlich resultierenden Unterschiede der jeweils zu erwartenden Umweltbelastung müssen für jeden Standort in Abhängigkeit der realen Temperaturverteilung über das Jahr detailliert betrachtet werden.

Weiterhin wirkt sich eine zusätzliche Wärmebereitstellung auf die herausgestellten Unterschiede aus. Da bei luftgekühlten Prozessen die Kondensationstemperatur höher liegt, wird bei der zu Grunde gelegten Prozessführung (d. h. Prozess ohne regenerative Vorwärmung) das Thermalwasser entsprechend weniger ausgekühlt und die Restwärme liegt auf einem höheren Temperaturniveau vor (z. B. /TSB 2006/, /Köhler 2005/). Demzufolge muss bei einer zusätzlichen Wärmebereitstellung die Stromproduktion verhältnismäßig weniger gesenkt werden als z. B. bei Nass- und Hybridkühltürmen. Bei einem Vergleich verschiedener Kühlkreisläufe für eine Strom- und Wärmebereitstellung wird dabei deutlich, dass luftgekühlte Systeme hier in allen Wirkungskategorien größte Vermeidungspotenzial aufweisen (Abb. 32, Datenbasis Anhang Tab. A - 9).

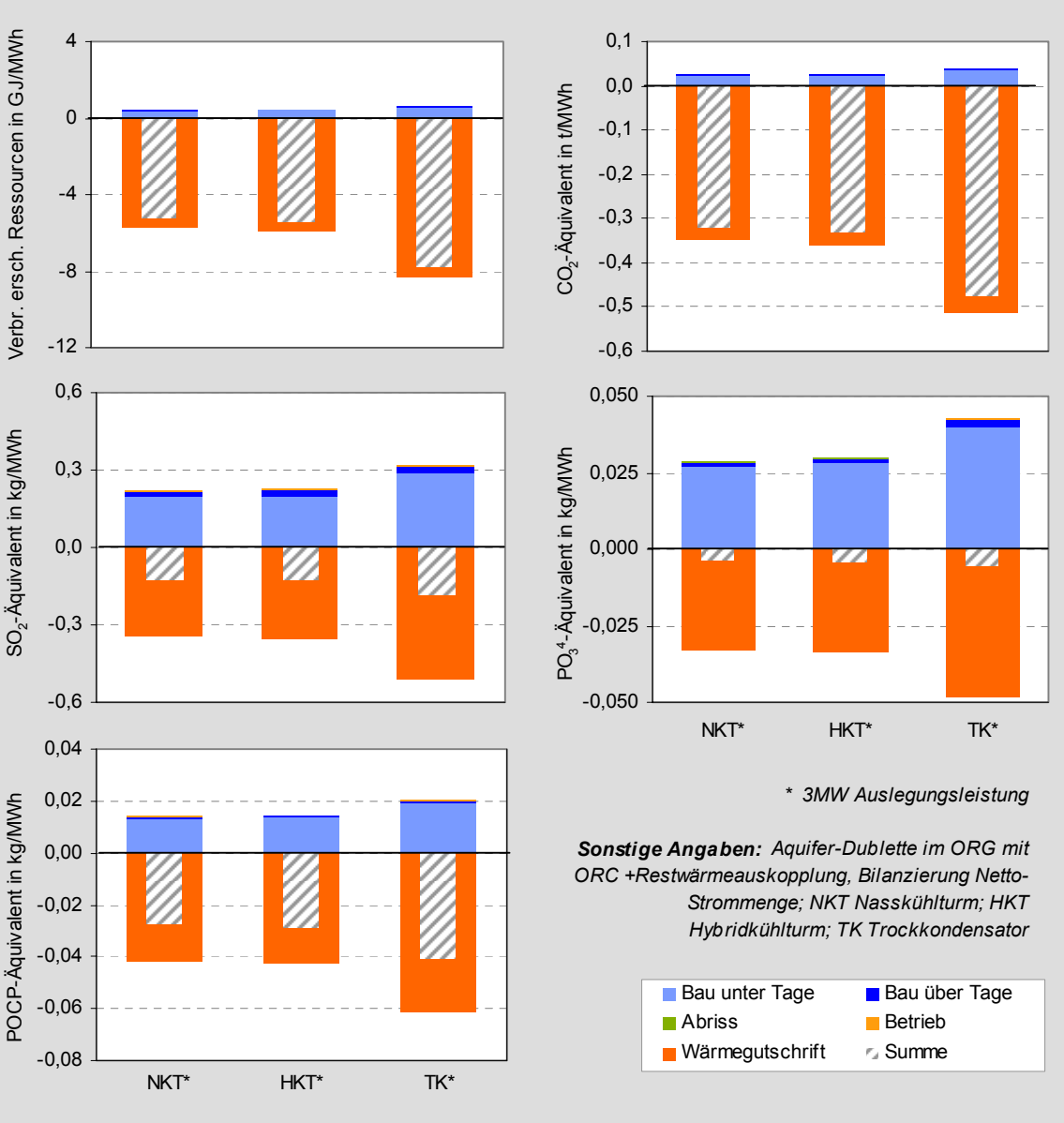

Abb. 33: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Kühlkreisläufe der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung im Oberrheingraben

Im Gegensatz zu einer aktiven Kühlung sind zukünftig auch innovative Nutzungskonzepte zu prüfen, die nicht nur die Restwärme des Thermalwassers, sondern auch die Abwärme aus dem Konversionsprozess nutzen. Eine Studie der Transferstelle Bingen zeigt z. B., dass der Kühlkreislauf zwar nicht gänzlich ersetzt werden kann, die energetischen Aufwendungen durch eine Teilnutzung aber zumindest reduziert werden können und damit auch wirtschaftlich umsetzbar sind (/TSB 2006/). Die Umsetzbarkeit derartiger Nutzungskonzepte macht auch das Geother-

miekraftwerk in Húsavik (Island) deutlich (Abb. 34). Hier wird die benötigte Kühlwassermenge durch die teilweise Abwärmenutzung für eine Fischzucht reduziert.

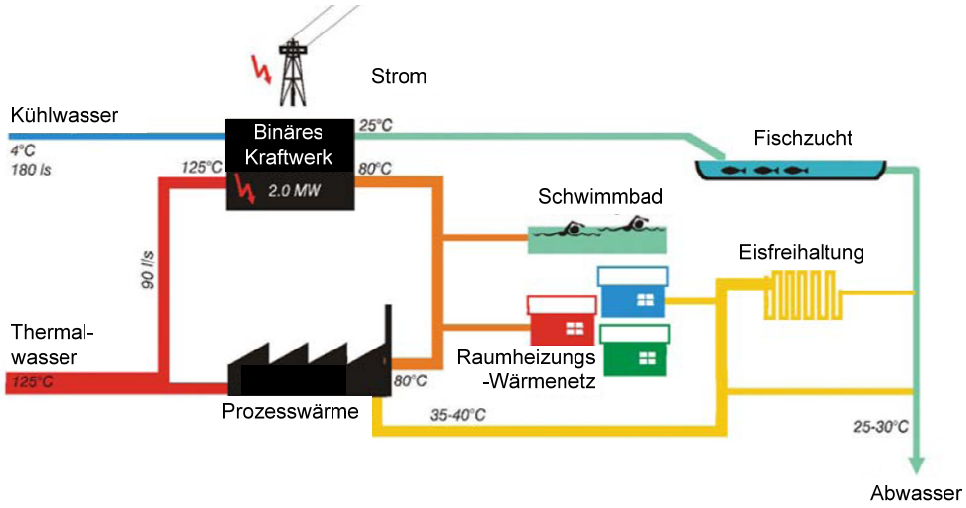

Abb. 34: Mögliches Nutzungskonzept der Rest- und Abwärme am Beispiel der geothermisch angetriebenen Kalina-Anlage in Húsavik (Island) (/X-Orka 2007/)

4.2.2.5 Bohrungsniederbringung

Bei den Referenzkonzepten sind in Bezug auf die Bohrungsniederbringung saigere (d. h. gerade) Bohrungen von getrennten Bohrplätzen mit einer diesel-betriebenen Bohranlage zu Grunde gelegt. Im Folgenden wird daher exemplarisch an den Referenzkonzepten im Oberrheingraben und Norddeutschen Becken analysiert, wie sich zum einen die Niederbringungen zweier abgelenkter Bohrungen vom gleichen Bohrplatz und zum anderen ein rein elektrischer Bohrbetrieb auf die Ergebnisse der Lebensweganalyse niederschlagen (Tab. 17).

Bei einem Vergleich der Anlagenkonzepte mit saigeren gegenüber Konzepten mit abgelenkten Bohrungen wird deutlich, dass sich die durch abgelenkte Bohrungen bedingten Mehraufwendungen für die Bohrungsniederbringungen nur in geringem Maße in einer Erhöhung der bilanzierten Umweltwirkungen niederschlagen (Abb. 35, Datenbasis Anhang Tab. A - 10). Aufgrund der aufwändigeren Erschließung eines Aquifers im Norddeutschen Becken wirkt sich die Erhöhung der Umweltwirkungen aufgrund abgelenkter Bohrungen im Vergleich zum Oberrheingraben deutlicher aus.

Tab. 17: Eingangsparameter für den Vergleich verschiedener Bohrungsniederbringungen

	abgelenkte, Diesel gebohrte Bohrung Oberrheingraben	saigere, Strom gebohrte Bohrung Oberrheingraben.	abgelenkte, Diesel gebohrte Bohrung Norddt. Becken	saigere, Strom gebohrte Bohrung Norddt. Becken
Reservoirparameter				
Bohrlochtiefe in km	3,3 [a]	3,0	4,7 [a]	4,4
Bohrlochkonzept	Aquifer-Dublette [a]	Aquifer-Dublette [b]	Aquifer-Dublette [a]	Aquifer-Dublette [b]
Sonstige Parameter	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5
Konversionsanlage	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5

[a] abgelenkte Bohrungen von einem Bohrplatz, Quelle: /IDEAS 2007/; [b] saigere Bohrungen mit 1.000 m Abstand;

Bei einem Vergleich der Anlagenkonzepte mit saigeren gegenüber denen mit abgelenkten Bohrungen wird deutlich, dass sich die durch abgelenkte Bohrungen bedingten Mehraufwendungen für die Bohrungsniederbringungen nur in geringem Maße in einer Erhöhung der bilanzierten Umweltwirkungen niederschlagen (Abb. 35, Datenbasis Anhang Tab. A - 10). Aufgrund der aufwändigeren Erschließung eines Aquifers im Norddeutschen Becken wirkt sich die Erhöhung der Umweltwirkungen aufgrund abgelenkter Bohrungen im Vergleich zum Oberrheingraben deutlicher aus.

Der Vergleich von Strom und Diesel gebohrten Dubletten zeigt, dass sich der Verbrauch erschöpflicher Energieträger und damit verbunden auch die Treibhausgasemissionen bei den Strom gebohrten Konzepten um ca. 7 bis 10 % verringern, was vor Allem auf den besseren Wirkungsgrad eines Strom- gegenüber eines Dieselaggregats (/IDEAS 2007/) zurück zu führen ist. Zudem werden beim bilanzierten Strommix, der in Deutschland zu über 80 % durch Kohle- und Kernenergie geprägt ist, je kWh benötigter Energie für den untertägigen Bau ca. 16 % weniger erschöpfliche Energieträger eingesetzt bzw. ca. 13 % weniger Treibhausgase emittiert als beim Einsatz von Diesel in Baumaschinen (/ecoinvent 2005/). Bei den übrigen bilanzierten Umweltwirkungen können durch den Einsatz von Strom gegenüber Diesel für den untertägigen Bau sogar zwischen 62 und 78 % eingespart werden, da hier der zu Grunde gelegte deutsche Strommix gegenüber dem Einsatz von Diesel zu 88 bis 94 % weniger Luftschadstoffen je kWh Energieeinsatz führt (/ecoinvent 2005/). Die jeweiligen Einsparungen sind dabei aufgrund des erschließungstechnischen Mehraufwands bei der Anlage im Norddeutschen Becken deutlicher zu erkennen.

Grundsätzlich ist jedoch zu beachten, dass eine strombetriebene Bohrungsniederbringung maßgeblich von der Möglichkeit einer entsprechenden Anbindung an die öffentliche Stromversor-

gung (z. B. Netzspannungsebene, Leitungsstärke) abhängt, welche für die später erfolgende Stromeinspeisung während des Anlagenbetriebs - zumindest für kleinere Leistungen - ohnehin eingerichtet werden muss.

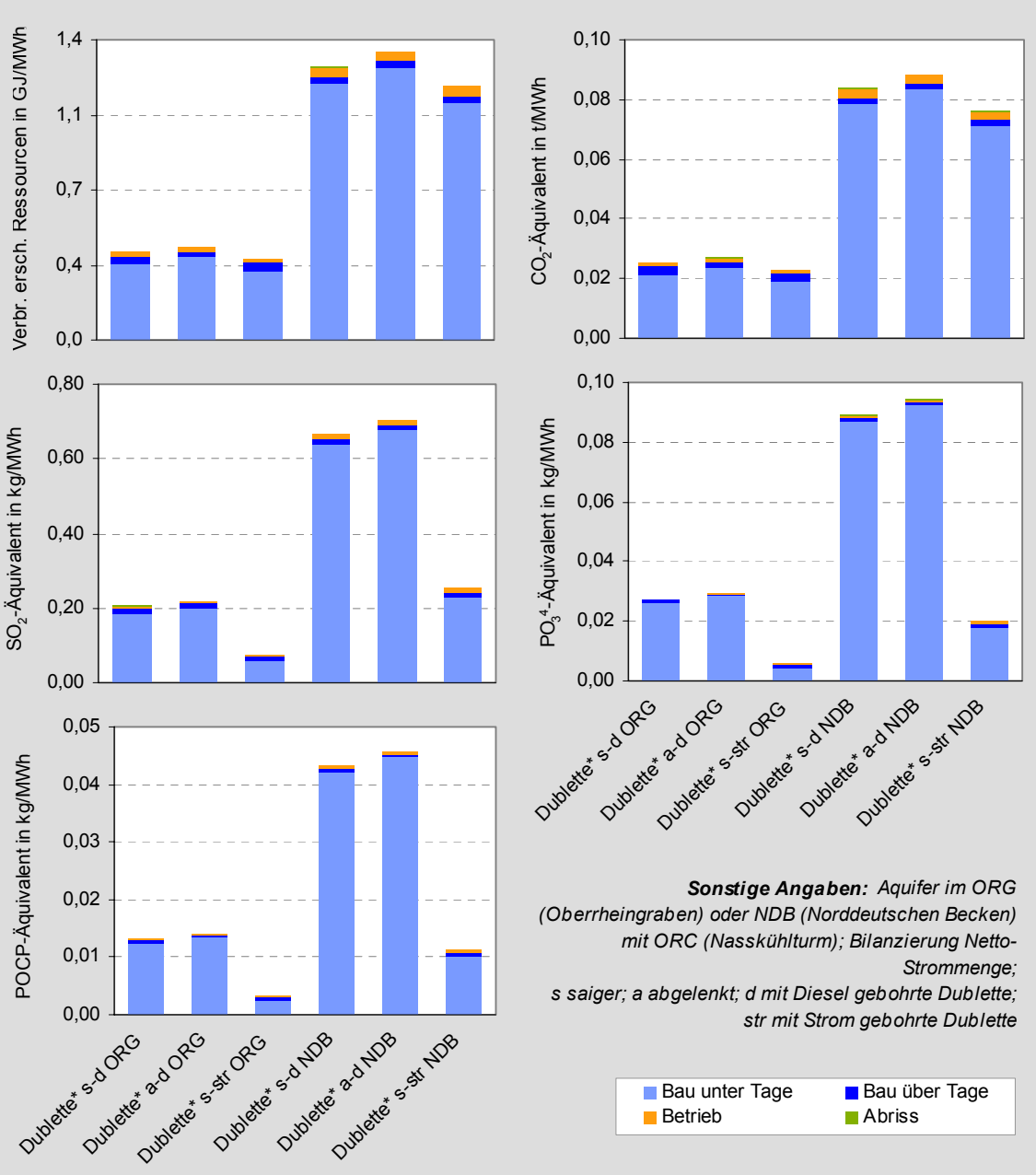

Abb. 35: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Bohrungsniederbringung der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben und Norddt. Becken

4.2.2.6 Anlagenlaufzeit

Bisher wurde eine Nutzungsdauer geothermischer Stromerzeugungsanlagen von 30 Jahren zu Grunde gelegt. Da in Deutschland jedoch noch keine entsprechenden Langzeiterfahrungen mit tiefengeothermischen Reservoiren gemacht wurden, basieren die bislang angesetzte Lebensdauer der Bohrungen ausschließlich auf Modellrechnungen. Somit ist sowohl ein schnellerer thermischer Durchbruch bei unzureichender Abbildung der untertägigen Fließwege mögliche, aber auch ein längerer Nutzungszeitraum denkbar (z. B. /Mégel, Rybach 2000/). Aus diesem Grund wird im Folgenden die Anlagenlaufzeit varriert.

Am Beispiel der Referenzanlage im Oberrheingraben wird dabei deutlich, dass eine Veränderung der Anlagenlebensdauer einen deutlichen Einfluss auf die Umweltwirkungen hat (Abb. 36). Wird die zu Grunde gelegt Lebensdauer der Bohrungen z. B. um 5 Jahre unterschritten führt dies zu einer Erhöhung der Umwelteffekte im Lebensweg um 20 %. Kann die geothermische Stromerzeugung dagegen 5 Jahre länger in Betrieb bleiben, werden die zu erwartenden Umwelteffekte um etwa 14 % reduziert.

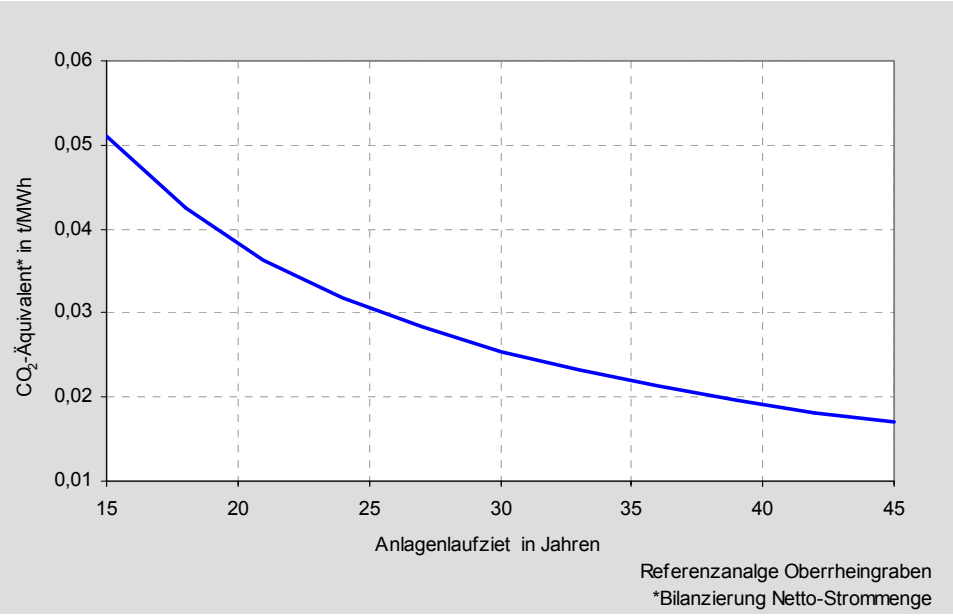

Abb. 36: Einfluss der Anlagenlaufzeit auf das CO_2-Äquivalent am Beispiel der Referenzanlage im Oberrheingraben

4.3 Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischer Referenzkonzepte

Die ökologische Bewertung der durch die geothermische Stromerzeugung bedingten Umwelteffekte im Lebensweg setzt neben der Analyse der geothermischen Stromerzeugung auch eine Einordnung in den Kontext anderer Stromerzeugungsoptionen voraus. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Lebensweganalyse geothermischer und nicht-geothermischer Referenzkonzepte verglichen.

4.3.1 Konzepte zur Strombereitstellung

Bei einem Vergleich der Konzepte zur Strombereitstellung wird deutlich, dass beim Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie der Emission von Treibhausgasen die untersuchten erneuerbaren Energien gegenüber den betrachteten fossilen Technologien zu einer deutlichen Reduktion der Umwelteffekte führen (Abb. 37, Datenbasis Anhang Tab. A - 11). Bei Emissionen mit versauernder und eutrophierender Wirkung (SO_2- und PO_3^4-Äquivalent) sowie beim bodennahen Ozon-Bildungspotenzial (POCP-Äquivalent) dagegen liegen erneuerbare und fossile Energien mit Ausnahme von Biogas in der gleichen Größenordnung. Im Falle der Stromerzeugung aus Steinkohle werden die sog. „Ewigkeitskosten“ (/LT NRW 2007/), welche in Form von energetischen Aufwendungen aufgrund des nicht möglichen Rückbaus von beim Steinkohle-Bergbau nicht berücksichtigt.

Bei Stromkonzepten mit Brennstoffeinsatz (d. h. Biomasse-, Biogas und fossile Konzepte) resultiert der Verbrauch erschöpflicher Energieträger maßgeblich aus der Brennstoffbereitstellung; die Luft getragenen Emissionen sind dagegen überwiegend durch die thermische Konversion im Betrieb bedingt. Die betrachteten Umweltwirkungen bei Wasserkraft-, Fotovoltaik- und Windkraft-Anlagen sind überwiegend auf den Bau der Anlagen zurück zu führen. Der Anlagenabriss ist bei allen Konzepten vernachlässigbar gering. Im Falle von Biogas-Anlagen muss neben Brennstoffbereitstellung, Betrieb und Bau der Anlage zusätzlich eine Gutschrift für die gekapselte Güllebehandlung und die dadurch vermiedenen Umweltwirkungen berücksichtigt werden. Während diese beim Verbrauch erschöpflicher Energieträger kaum zum Tragen kommt, führt die Gutschrift beim CO_2- und POCP-Äquivalent für die vermiedene Güllebehandlung aufgrund der Methanhaltigkeit von Gülle zu einer Vermeidung. Durch die direkten Emissionen im Betrieb sind andererseits jedoch im Vergleich zu den übrigen Stromerzeugungskonzepten deutlich erhöhte SO_2- und PO_3^4-Äquivalente zu berücksichtigen.

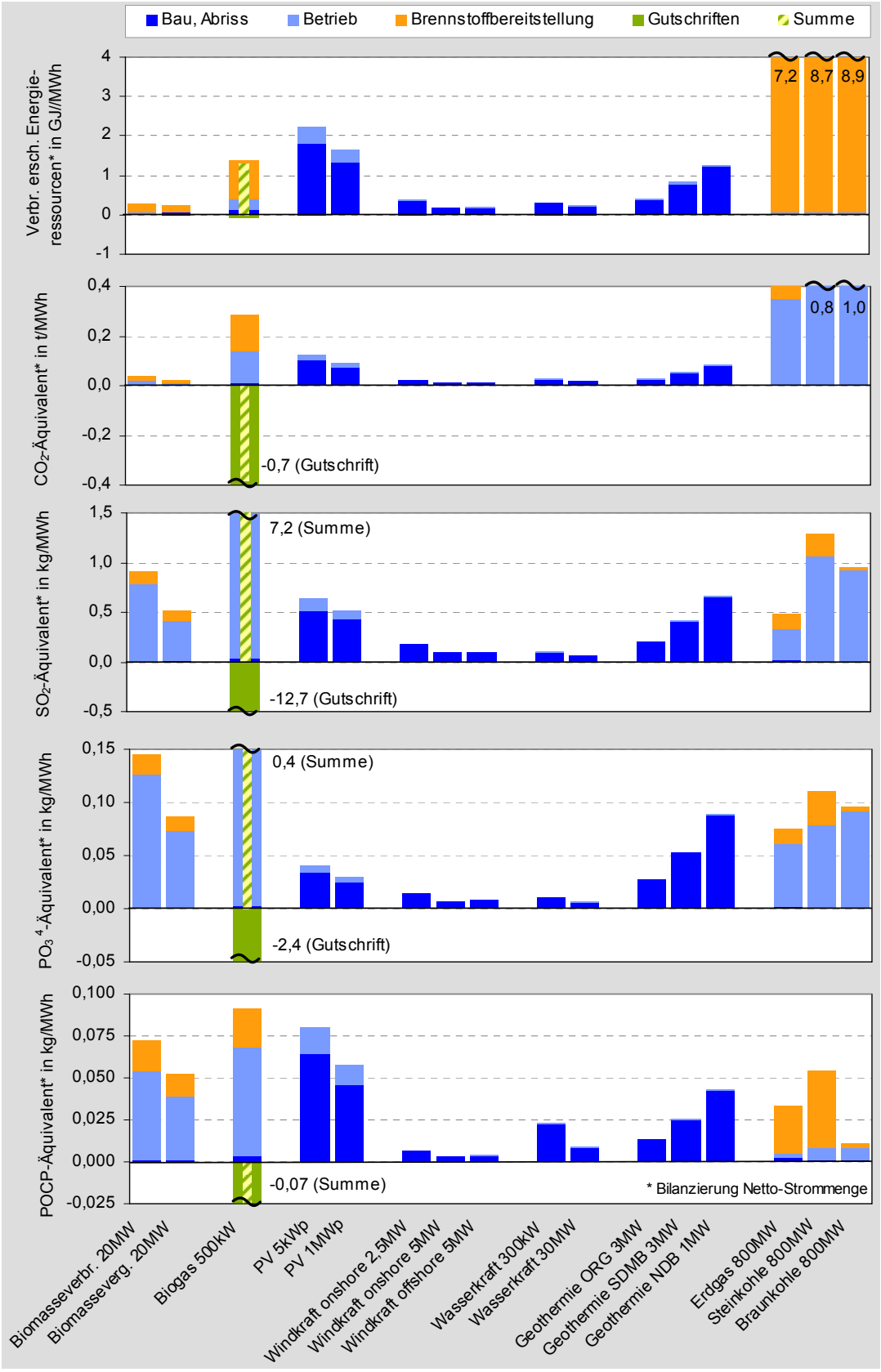

Abb. 37: Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischen Stromkonzepte

Die geothermischen Referenzkonzepte liegen für die analysierten Wirkungskategorien in der Bandbreite der übrigen regenerativen Stromerzeugungskonzepte. Im Falle der Treibhausgasemissionen sind sie zudem mit denen der nuklearen Stromerzeugung mit etwa 0,032 bis 0,065 t CO_2-Äquivalent je GWh (/Fritsche et al. 2007/) vergleichbar. Eine geothermische Stromerzeugung im Oberrheingraben ist dabei im unteren Bereich der jeweils zu erwartenden Umweltwirkungen – Biogas ausgenommen – anzusiedeln. Durch den Einsatz leistungsfähigerer Konversionsanlagen (z. B. komplexere, optimierte Prozessführung) und/oder strom-betriebener Bohranlagen während des untertägigen Baus kann die geothermische Stromerzeugung an allen Standorten zu sehr geringen Umweltwirkungen im Vergleich zu den anderen Energieträgern führen. Eine zukünftig mögliche Reduktion ist zudem mit der Verwirklichung von HDR-Konzepten gegeben.

4.3.2 Konzepte zur Strom- und Wärmebereitstellung

Die aus Bau, Betrieb und Abriss sowie der Brennstoffbereitstellung von Anlagen zur Strom- und Wärmebereitstellung resultierenden Umwelteffekte sind mit denen einer reinen Strombereitstellung vergleichbar. Jedoch ist hier zusätzlich die jeweilige Wärmegutschrift zu berücksichtigen.

Beim Verbrauch erschöpflicher Energieträger und der Emission von Treibhausgasen ist der Einsatz von erneuerbaren Energien im Vergleich zu einer fossil basierten Strom- und Wärmebereitstellung nicht nur mit einer Einsparung, sondern mit einer Vermeidung und damit deutlichen umwelttechnischen Vorteilen verbunden (Abb. 38, Datenbasis Anhang Tab. A - 12). In den übrigen Wirkungskategorien liegen die Referenzkonzepte der Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis fester Biomasse und fossiler Energieträger in der gleichen Größenordnung, während Biogas aufgrund der direkten Emissionen auch hier zu deutlich höheren SO_2- und PO_3^4-Äquivalenten führt. Bodennahes Ozon-Bildungspotenzial kann dagegen vermieden werden.

Eine geothermische Strom- und Wärmeerzeugung zeichnet sich im Vergleich zu den übrigen Referenzkonzepten in allen analysierten Wirkungskategorien durch die größte Reduktion bzw. Vermeidung der jeweiligen Wirkung aus. Grund dafür ist die Wärmeauskopplung aus dem Thermalwasserstrom, bei der die thermische Energie um ein Vielfaches über der bei konventioneller KWK aus der Abwärme entziehbaren Leistung liegt. Das größte Vermeidungs- bzw. Einsparpotenzial ist dabei bei einer geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung im Süddeutschen Molassebecken gegeben.

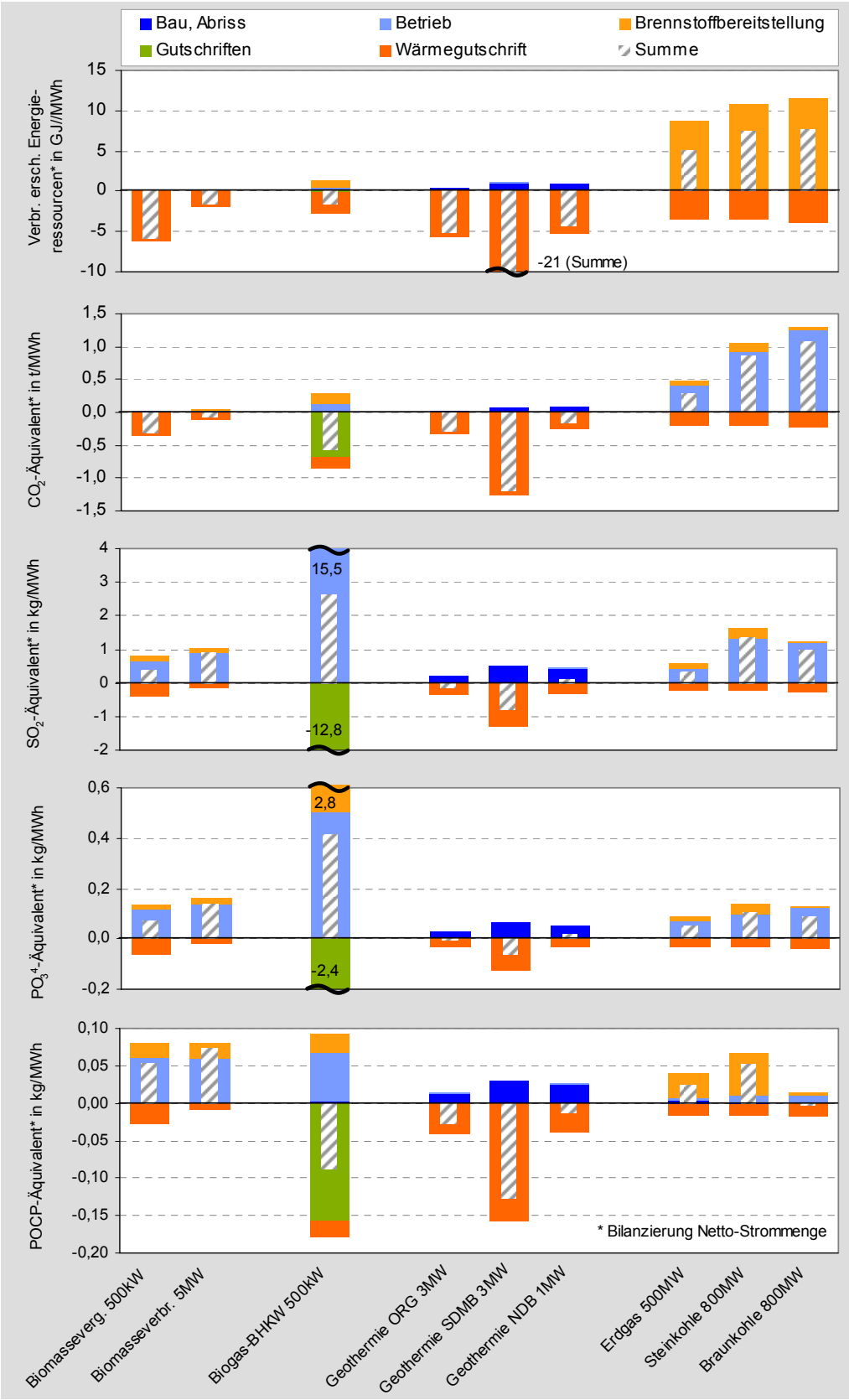

Abb. 38: Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischen Strom- und Wärmekonzepte

4.4 Fazit

Da für eine Bewertung des ökologisch optimierten Ausbaus der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland die in geothermischen Anlagen produzierte Netto-Strommenge entscheidend ist, wurde die Lebensweganalyse der Referenzkonzepte als Betrachtung der eingespeisten Netto-Strommenge vorgenommen. Die Lebensweganalysen führten dabei zu folgenden Ergebnissen:

- Der maßgebliche Anteil der bilanzierten Umweltwirkungen ist bei den Referenzkonzepten zu 86 bis 94 % aufgrund des hohen materiellen und energetischen Aufwands durch den untertägigen Bau der Anlage bedingt.
- Dadurch ergeben sich in Bezug auf die unterschiedenen Regionen Oberrheingraben, Süddeutsches Molassebecken und Norddeutsches Becken Abweichungen aufgrund der geologischen Verschiedenheiten. Die Referenzanlage im Oberrheingraben weist dabei aufgrund des höheren Temperaturgradienten und damit geringerer Bohrlochtiefe und hoher Fördertemperatur in allen Wirkungskategorien die geringsten Umwelteffekte auf. Der erschließungstechnische Mehraufwand aufgrund des größeren Bohrlochvolumens ist im Süddeutschen Molassebecken auf die höhere Förderrate und den dadurch bedingt notwendigen größeren Bohrlochdurchmesser und im Norddeutschen Becken auf die größere Tiefe des Reservoirs zurückzuführen.
- Der erschließungstechnische Aufwand kann unter entsprechenden geologischen Bedingungen durch eine Veränderung des untertägigen Anlagenkonzepts z. B. in Form von Mehrbohrlochkonzepten (Triplette) im Verhältnis zur dadurch förderbaren Gesamtthermalwassermenge reduziert werden. Ist ein Betrieb der Bohranlage durch Strom aus dem öffentlichen Netz möglich, können vor Allem die Emissionen der SO_2-, PO_3^4- und POCP-Äquivalente verringert werden.
- Eine Steigerung der obertägigen Netto-Stromproduktion bei gleichem untertägigen Anlagenkonzept und erschließungstechnischem Aufwand verringert ebenfalls die Umweltauswirkungen. Dies kann zum einen durch eine Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades durch Optimierung der obertägigen Anlagentechnik (z. B. zweistufiger ORC-Prozess, Kalina), aber auch durch eine weitere Auskühlung des Thermalwassers sowie eine Steigerung der Anlagenverfügbarkeit (d. h. Steigerung der jährlichen Volllaststunden) erreicht werden. Ein weiterer Einfluss ist durch die letztendlich mögliche Nutzungsdauer der Anlage gegeben. Kann eine geothermische Stromerzeugungsanlage

5 Jahre länger betrieben werden, ist dies mit einer Reduktion der Umwelteffekte um etwa 14 % verbunden.

- Die zu erwartenden Umweltwirkungen können weiterhin durch die Vergrößerung eines Anlagenkonzepts reduziert werden, wenn der dadurch bedingte erschließungstechnische und ggf. auch fördertechnische Mehraufwand durch die gesteigerte Netto-Stromproduktion kompensiert werden kann. Durch die Steigerung der Förderrate mittels Stimulation des Reservoirs konnte bei den Referenzkonzepten eine Minderung der Umwelteffekte von 10 bis 17 % je MW_{el} Leistungssteigerung erzielt werden. Der maximalen Einsparung sind dabei Grenzen gesetzt, da die nachhaltige Reservoir-Erschließung in einem Erlaubnisfeld nur mit einer begrenzten Anzahl von Bohrungen möglich ist und auch die Reservoir-Ergiebigkeit durch Stimulationsmaßnahmen nur bis zu einem bestimmten Ausmaß verbessert werden kann. Zudem ist im Zusammenhang mit einer Anlagenvergrößerung auch die Kombination von Geothermie mit anderen Wärmeträgern zu Hybridkraftwerken denkbar.
- Grundsätzlich ist auch zu beachten, dass jedes Anlagenkonzept mit einer optimalen Förderrate verbunden ist, bei der die Netto-Strommenge maximiert und die zu erwartenden Umweltwirkungen minimiert werden. Dies ist auf die Steigerung des Strombedarfs für die Thermalwasserzirkulation zurückzuführen, da dieser im Gegensatz zur Brutto-Stromproduktion mit zunehmender Förderrate überproportional ansteigt.
- Die Auslegung des Kühlkreislaufs hat aufgrund der hohen Abwärmemengen einen Einfluss von bis zu 56 % auf die zu erwartenden Umweltwirkungen. Durch eine Veränderung der Kondensationstemperatur wird dabei zum einen die produzierbare Brutto-Leistung beeinflusst und durch die Veränderung des Strombedarfs für den Kühlkreislauf die einspeisbare Netto-Leistung. Während eine Durchlaufkühlung aufgrund der damit verbundenen Standortanforderung nur an wenigen Standorten umsetzbar ist, ist bei geothermischen Anlagen die Entscheidung zwischen Nass- bzw. Hybridkühltürmen oder Luftkondensatoren zu treffen. In Bezug auf die zu erwartenden Umweltwirkungen sind bei einer reinen Strombereitstellung Kühltürme dabei vorteilhafter, während bei einer kombinierten Strom- und Wärmbereitstellung sich unter Umständen auch luftgekühlte Anlagen als ökologisch besser darstellen können.
- Besteht die Möglichkeit, die im Thermalwasser nach der Energieabgabe an den Konversionsprozess noch enthaltene Wärmemenge in ein Wärmenetz bereit zu stellen, können die Umweltwirkungen nicht nur reduziert, sonder in den meisten Fällen sogar überkom-

pensiert werden. Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zu einer reinen Stromerzeugung nicht die Referenzanlage mit der größten Netto-Strommenge, sondern die mit der größten Wärmegutschrift zu den niederigsten Umweltwirkungen führt. Der Grund für den maßgeblichen Einfluss der Wärmegutschrift liegt bei geothermischen Konzepten dabei an der dem Thermalwasserstrom verhältnismäßig großen entziehbaren thermischen Leistung, welche die elektrische Leistung um Vielfaches übersteigt. Aufgrund der hohen Förderraten im Süddeutschen Molassebecken ist dort daher die Vermeidung der zu erwartenden Umweltauswirkungen am größten. Ist ein größerer Absatz der Wärme möglich, z. B. druch die zusätzliche Nutzung der im Thermalwasser enthaltenen Restwärme zur Kältebereitstellung, kann die Vorteilhaftigkeit der Strom- und Wärmbereitstellung gegenüber einer reinen Stromerzeugung noch verstärkt werden.

- Die Analyse zukünftig möglicher Anlagenkonzepte hat ergeben, dass mit den HDR-Konzepten unter den angenommen Randbedingungen ein umwelttechnisches Einsparpotenzial verbunden ist. Der Grund dafür sind die erschließbaren höheren Temperaturen und der damit verbundene höhere Wirkungsgrad, der den erschließungstechnischen Aufwand erheblich kompensiert. Die Umwelteffekte untertägig geschlossener Konzepte liegen dagegen in allen Kategorien deutlich über denen der Untertage offenen Anlagen.

Bei einem Vergleich der Bilanzierung der Brutto- im Gegensatz zur Netto-Strommenge – wodurch auch die gegenwärtige Praxis, die Brutto-Strommenge zu vergüten und den Stromeigenbedarf aus dem Netz zu beziehen abgebildet wird – können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden:

- Bei einer Bilanzierung der Brutto-Strommenge liegen die bilanzierten Umwelteffekte im Vergleich zur Bilanzierung der Netto-Strommenge deutlich höher, da sich die durchschnittlichen Emissionen der aus dem Netz bezogenen Strommenge (bei den Referenzkonzepten ca. 54 bis 79 % der produzierten Brutto-Strommenge) merklich auf die zu erwartenden Umwelteffekte niederschlagen. Aufgrund des gegenwärtig überwiegend fossil basierten deutschen Strommixes sind damit vor Allem ein deutlich höherer Verbrauch erschöpflicher Energieträger sowie höhere Treibhausgas-Emissionen verbunden. Durch eine zukünftig zu erwartende Veränderung des Strommixes zu Gunsten regenerativer Energieträger können die bilanzierten Umwelteffekte um bis zu 35 % reduziert werden.
- Bei der Betrachtung der Brutto-Strommenge ist demnach nicht der untertägige Bau für die Umwelteffekte im Lebensweg maßgeblich, sondern der jeweilige Stromeigenbedarf

der Gesamtanlage. Neben energetischen Aufwendungen für den Kühl- und Konversionskreislauf ist dabei vor Allem der Strombedarf für die Thermalwasserzirkulation zu berücksichtigen. Da im Vergleich der verschiedenen Referenzkonzepte die Anlage im Süddeutschen Molassebecken das größte Fördervolumen aufweist, sind hiermit der höchste Verbrauch an erschöpflichen Energieträgern und die meisten Emissionen von Treibhausgasen verbunden.

- Ab einer bestimmten Förderrate kann der Eigenbedarf den produzierten Strom übersteigen, so dass netto-betrachtet kein regenerativer Strom bereitgestellt wird. Im Falle der Dublette im Süddeutschen Molassebecken, bei welcher der Stromeigenbedarf bereits vergleichsweise groß ist, tritt dies ab einer Steigerung der zu Grunde gelegten Förderrate um 136 % ein.
- Die Auskopplung der im Thermalwasser enthaltenen Restwärme kann die bei der Bilanzierung der Brutto-Strommenge zu erwartenden Umweltwirkungen deutlich reduzieren.
- Die Gegenüberstellung von Netto- und Brutto-Bilanzierung und die daraus resultierenden, ersichtlichen Abweichungen verdeutlichen die Zusammenhänge im Gesamtsystem geothermische Stromerzeugung. Dadurch wird deutlich, dass die gegenwärtige Anwendung des EEG auf die geothermische Stromerzeugung für einen weiteren Ausbau der Geothermie zu prüfen ist. Um dabei konkrete Empfehlungen für mögliche Änderungen im EEG vornehmen zu können, ist eine umfassende ökonomisch-ökologische Gegenüberstellung unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen (z. B. Konversions-, Kühltechnik, Standort) notwendig.

Um auch die aus einer geothermischen Stromerzeugung resultierenden Umweltwirkungen im Vergleich zu anderen Stromerzeugungstechnologien bewerten zu können, wurden entsprechende Vergleiche vorgenommen:

- Die geothermischen Referenzkonzepte liegen in den analysierten Wirkungskategorien innerhalb der Bandbreite der übrigen regenerativen Stromerzeugungskonzepte.
- Gegenüber den fossilen Referenztechnologien führt die geothermische Stromerzeugung vor Allem in Bezug auf den Verbrauch erschöpflicher Energieträger und die Emission von Treibhausgasen zu einer deutlichen Verminderung. Im Falle der Treibhausgasemissionen sind sie zudem mit denen der nuklearen Stromerzeugung vergleichbar.
- Eine geothermische Stromerzeugung im Oberrheingraben ist im unteren Bereich der durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mindestens zu erwartenden Um-

weltwirkungen – Biogas ausgenommen – anzusiedeln. Durch den Einsatz leistungsfähigerer Konversionsanlagen (z. B. komplexere, optimierte Prozessführung) und/oder strom-betriebener Bohranlagen während des untertägigen Baus kann die geothermische Stromerzeugung an allen Standorten zu sehr geringen Umweltwirkungen im Vergleich zu anderen Energieträgern führen. Eine mögliche weitere Reduktion ist zukünftig mit der Verwirklichung von HDR-Konzepten gegeben.

- Die geothermisch basierte Bereitstellung von Strom und Wärme zeichnet sich im Vergleich zu den übrigen Referenzkonzepten in allen analysierten Wirkungskategorien durch die größte Reduktion bzw. Vermeidung der jeweiligen Umweltwirkung aus. Grund dafür ist die Wärmeauskopplung aus dem Thermalwasserstrom, wodurch die thermische Energie um ein Vielfaches über der aus der Abwärme bei konventioneller Kraft-Wärme-Kopplung entziehbaren Leistung liegt. Das größte Vermeidungs- bzw. Einsparpotenzial ist dabei bei einer geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung im Süddeutschen Molassebecken gegeben.

Basierend auf den dargestellten Ergebnissen der Lebensweganalyse werden folgende Schlussfolgerungen und Empfehlungen in Bezug auf einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung abgeleitet:

- Mit einem weiteren Ausbau der geothermisch basierten Stromerzeugung ist es möglich gegenüber einer fossilen Strombereitstellung die Umweltwirkungen mitunter deutlich zu verringern und auch aufgrund ihrer Grundlastfähigkeit einen regenerativen Strommix unter ökologischen Aspekten zu optimieren.
- Dennoch sind bei der geothermischen Stromerzeugung noch ökologische Optimierungspotenziale gegeben, die es in Zukunft auszuschöpfen gilt. Nur so kommen die Vorteile der geothermischen Stromerzeugung an allen Standorten zum Tragen; vor Allem an denen des Norddeutschen Beckens, die innerhalb Deutschlands das größte erschließbare Potenzial aufweisen.
- Neben einer ökologischen Optimierung der unter- und obertägig eingesetzten Einzelkomponenten muss dabei auch die ökologische Optimierung des Gesamtkonzeptes beachtet werden, um so zum einen die absoluten Umweltwirkungen (vor Allem mit dem untertägigen Bau der Anlagen verbunden) durch eine ökologisch optimierte Energiebereitstellung (d. h. Strom und Wärme) zu minimieren. Dabei sind zukünftig auch innovative Nutzungskonzepte zu prüfen, die nicht nur die Restwärme des Thermalwassers, sondern auch die Abwärme aus dem Konversionsprozess nutzen.

- Die Optimierung der Förderrate unter wirtschaftlichen im Vergleich zu ökologischen Aspekten stellt sich gegenwärtig gegenläufig dar, da gemäß EEG die eingespeiste Brutto-Strommenge vergütet wird. Aus wirtschaftlicher Sicht führt der Bezug des Stromeigenbedarfs aus dem öffentlichen Netz daher zu einer Reduzierung der Kosten. Zudem nimmt die Wirtschaftlichkeit mit steigender Förderrate zu, was aus ökologischer Sicht unter Umständen mit einer Steigerung der Umweltwirkungen verbunden sein kann. Obwohl sich die ökologische Einordnung der Geothermie gegenüber den anderen Energieträgern dadurch nicht maßgeblich verändert, ist für einen ökologischen optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung die Erzielung einer maximalen Netto-Strommenge notwendig.

5 Lokale Umwelteffekte

Anlagen zur Nutzung geothermischer Energie sind mit Eingriffen in die obertägige und untertägige Umwelt verbunden, die aus methodischen Gründen nicht oder nur sehr eingeschränkt im Rahmen einer Lebensweganalyse betrachtet werden können. Derartige Umweltwirkungen am unmittelbaren Standort der Konversionsanlage und in der kleinräumigen Umgebung werden im Weiteren als „lokale Umwelteffekte“ bezeichnet. Ziel dieses Kapitels ist es eine geeignete Methodik zu erarbeiten und unter Anwendung dieser die lokalen Umwelteffekte der geothermischen Referenzkonzepte zu identifizieren, zu analysieren und anschließend unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.2 dargestellten rechtlichen Aspekte qualitativ zu bewerten. Auf Basis dessen erfolgt eine abschließende Einordnung der geothermischen Referenztechnologien zu den nicht-geothermischen Vergleichskonzepten.

5.1 Methodik

Da die geothermische Stromerzeugung in Deutschland gegenwärtig noch eine junge Technologie darstellt, können hinsichtlich auftretender lokaler Umwelteffekte noch keine gesicherten Aussagen auf Basis von Erfahrungswerten getroffen werden. Erfahrungen mit geothermischen Hochenthalpie-Lagerstätten (z. B. /Hunt 2000/, /Rybach 2002/, /Kagel et al. 2005/) sind vor Allem aufgrund der grundlegenden geologischen Unterschiede nicht oder nur eingeschränkt auf die in Deutschland in Frage kommenden Nutzungskonzepte übertragbar. Aus diesem Grund müssen die möglichen lokalen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland zunächst (1) identifiziert werden, um sie anschließend (2) analysieren und (3) bewerten zu können (Abb. 39).

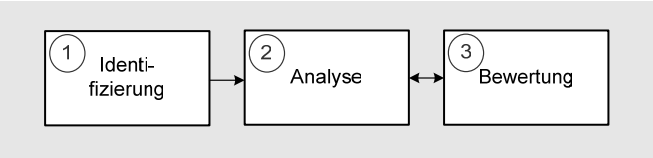

Abb. 39: Aufbau von Identifizierung, Analyse und Bewertung der lokalen Umwelteffekte

Im ersten Schritt, der **Identifizierung** der lokalen Umwelteffekte, werden die Phasen des lokalen Lebenswegs (d. h. Bau, Betrieb und Rückbau der Anlage) am Anlagenstandort auf Basis von Fachliteratur und Expertenbefragungen (siehe Anhang A.3) genau untersucht, um alle mögli-

chen lokalen Umwelteffekte zu ermitteln. In Anlehnung an das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz UVPG werden dabei alle Veränderungen der Umwelt bzw. Einwirkungen auf den Menschen, Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft und Kulturgüter als lokale Umwelteffekte verstanden. Wie auch bei der Lebensweganalyse werden dabei die für Deutschland relevanten geologischen und technischen Randbedingungen berücksichtigt.

In Schritt zwei erfolgt die **Analyse** der identifizierten lokalen Umwelteffekte. Zunächst wird dabei unter Berücksichtigung der standortspezifischen geologischen und systemtechnischen Bedingungen die Entstehungswahrscheinlichkeit des jeweiligen lokalen Umwelteffekts analysiert und entsprechend als Normalfall oder Störfall eingeordnet (Abb. 40). Als Störfall werden dabei unsachgerechte Nutzung oder anlagentechnische Ausfälle verstanden, nicht aber eine Zerstörung von außen. Anschließend wird mit Bezug auf den technischen Standard die Vermeidbarkeit des jeweiligen lokalen Umwelteffekts durch entsprechende Vermeidungs- (d. h. primäre) und Minderung- (d. h. sekundäre) Maßnahmen analysiert. Ist ein Umwelteffekt mit dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht vermeidbar, werden die zu erwartenden Auswirkungen auf die Umwelt nach Möglichkeit quantitativ, ansonsten qualitativ untersucht. Bestehen dagegen technische Möglichkeiten, einen Umwelteffekt zu vermeiden, wird die gesetzliche und untergesetzliche Regelung in Bezug auf entsprechende Richtlinien und die vorgeschriebene Anwendung dieser Maßnahmen analysiert. Auch hier werden im Anschluss die dabei zu erwartenden Auswirkungen auf die Umwelt dargestellt.

Nach der Analyse der lokalen Umwelteffekte und der resultierenden Auswirkungen auf die Umwelt, erfolgt die **Bewertung** der einzelnen Umwelteffekte. Da der Schutz der Umwelt einen zentralen Bestandteil der deutschen Gesetzgebung darstellt – was nicht zuletzt auch durch die geplante Verabschiedung eines national verbindlichen Umweltgesetzbuches in 2009 deutlich wird –, erfolgt die Bewertung der lokalen Umwelteffekte auf Basis einer Gegenüberstellung zu administrativ rechtlichen Randbedingungen. Aufbauend auf Kapitel 3.2 werden die gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf den Schutz der Umwelt vor Effekten und Auswirkungen der geothermischen Stromerzeugung sowie der Einhaltung umweltpolitischer Ziele als ausreichend bzw. unzureichend bewertet (Abb. 40).

Für eine Einordnung in den Kontext der nicht-geothermischen Vergleichskonzepte wird abschließend ein qualitativer Vergleich der im Normalfall und Störfall zu erwartenden Umweltauswirkungen durchgeführt.

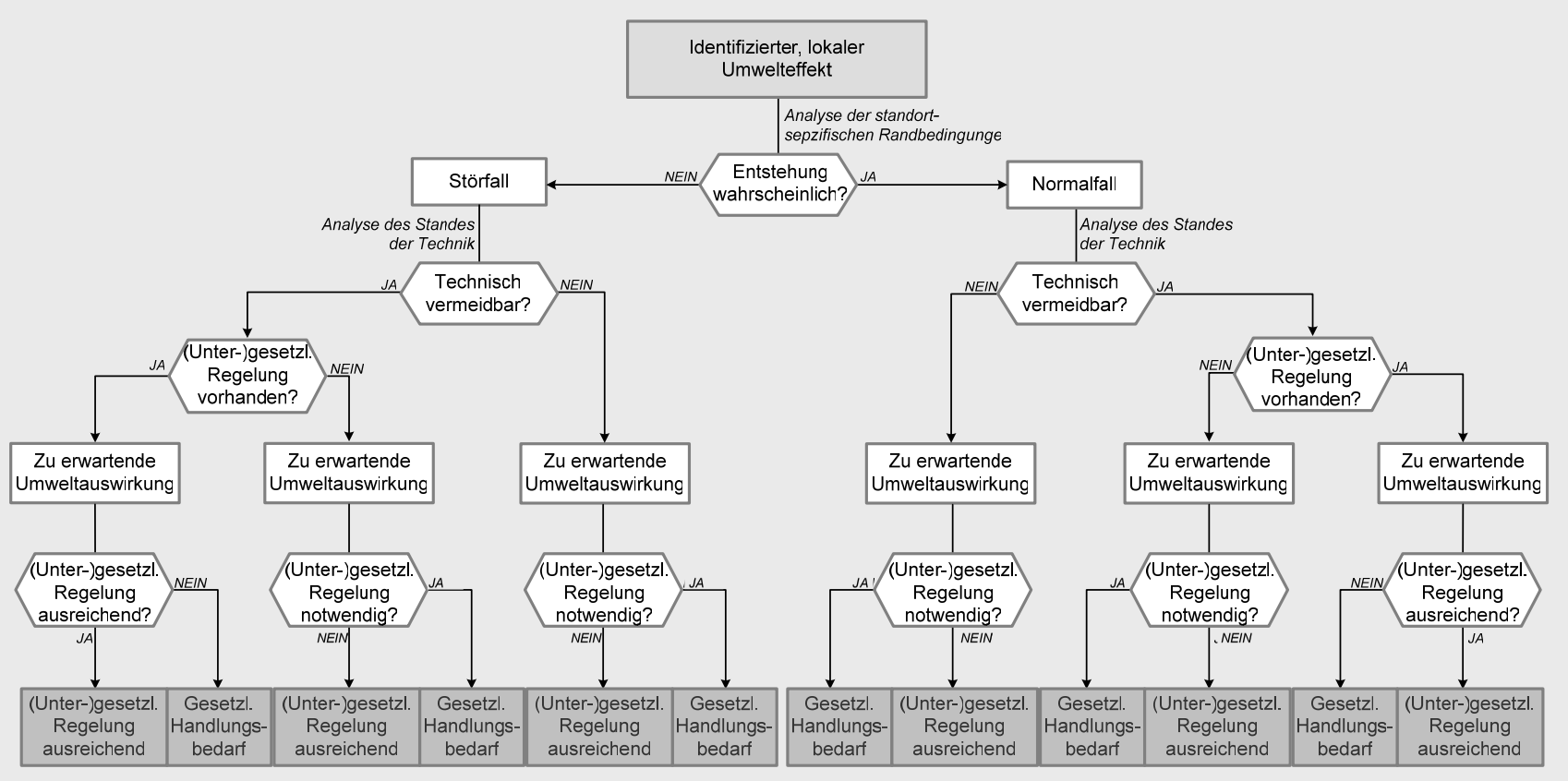

Abb. 40: Ablauf der Analyse und Bewertung der lokalen Umwelteffekte

5.2 Analyse der geothermischen Referenzkonzepte

Ein Überblick über alle identifizierten, potenziellen Umwelteffekte ist in Tab. 18 dargestellt. Nachfolgend werden die wichtigsten Zusammenhänge der Analyse und Bewertung der lokalen Umwelteffekte für die verschiedenen Projektabschnitte näher erläutert. Auf Unterschiede zwischen den verschiedenen Referenzkonzepten wird entsprechend eingegangen. Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Umwelteffekte ist dem Anhang zu entnehmen.

Tab. 18: Potenzielle lokale Umwelteffekte im Lebensweg einer geothermischen Stromerzeugung

	AQF	HDR	TES	UGW	Anhang
Bau Untertage					
Vorerkundung:					
Bodenerschütterung	x	x	x	x	A.2.1.1
Bohrung(en):					
Stofflicher Eintrag	x	x	x	x	A.2.1.3-5
Thermischer Eintrag	x	x	x	x	A.2.1.6
Hydraulischer Kurzschluss	x	x	x	x	A.2.1.7
Bohrlochausbruch (Blow-Out)	x	x	x	x	A.2.1.8
Induzierung mikroseismischer Ereignisse	x	x	x	x	A.2.1.9
Wasserbedarf	x	x	x	x	A.2.1.10
Aushub von Bodenmaterial, Bodenverdichtung	x	x	x	x	A.2.1.11
Lärmwirkung	x	x	x	x	A.2.1.12
Anfall von Rest- und Abfallstoffen	x	x	x	x	A.2.1.13
Flächeninanspruchnahme	x	x	x	x	A.2.1.14
Visuelle Beeinträchtigung	x	x	x	x	A.2.1.15
Stimulation:					
Stofflicher Eintrag	x	x			A.2.1.16-17
Induzierung mikroseismischer Ereignisse	x	x			A.2.1.18
Wasserbedarf	x	x			A.2.1.19
Lärmwirkung	x	x			A.2.1.20
Flächeninanspruchnahme	x	x			A.2.1.21
Zirkulationstests					
Stofflicher Eintrag	x	x			A.2.1.22
Wasserbedarf		x			A.2.1.23
Bau Übertage					
Flächeninanspruchnahme	x	x	x	x	
Grundwasserhaltung	x	x	x	x	
Aushub von Bodenmaterial, Bodenverdichtung	x	x	x	x	
Lärmwirkung	x	x	x	x	
Anfall von Rest- und Abfallstoffen	x	x	x	x	
Bodenerschütterung	x	x	x	x	
Visuelle Beeinträchtigung	x	x	x	x	
Betrieb Untertage					
Hydraulische Veränderungen					A.2.2.1
Grundwasserspiegelsenkung	x	x			A.2.2.2
Hydraulischer Kurzschluss	x	x			A.2.2.3

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Fortsetzung Tab. 18

	AQF	HDR	TES	UGW	Anhang
Setzung des Bodens (Subsidenz)	x	x			A.2.2.4
Thermische Beeinflussung	x	x	x	x	A.2.2.5/10
Stofflicher Eintrag	x	x	x	x	A.2.2.6-8/12
Wasserbedarf		x			A.2.2.9
Induzierung mikroseismischer Ereignisse	x	x			A.2.2.11
Flächeninanspruchnahme	x	x	x	x	A.2.2.13
Anfall von Rest- und Abfallstoffen	x	x	x	x	A.2.2.14
Betrieb Übertage					
Thermischer Eintrag	x	x	x	x	A.2.3.1
Wasserbedarf	x	x	x	x	A.2.3.2
Stofflicher Eintrag	x	x	x	x	A.2.3.4-5
Lärmwirkung	x	x	x	x	A.2.3.6
Flächeninanspruchnahme	x	x	x	x	A.2.3.7
Anfall von Rest- und Abfallstoffen	x	x	x	x	A.2.3.8
Visuelle Beeinträchtigung	x	x	x	x	A.2.3.9
Rückbau Untertage und Übertage					A.2.4
Lärmwirkung	x	x	x	x	
Anfall von Rest- und Abfallstoffen	x	x	x	x	

AQF - Aquifer-Konzepte; HDR - Hot-Dry-Rock-Konzepte; TES - tiefe Erdwärmesonde; UGW - untertägig geschlossener Wärmetauscher;

5.2.1 Bau Untertage

Die Nutzung geothermischer Vorkommen zur Stromerzeugung basiert auf der Erschließung des Untergrunds mittels Tiefbohrungen, vor deren Niederbringung ggf. eine entsprechende geologische Vorerkundung erfolgen muss (vgl. Kapitel 2.2.1.1). Als sekundäre Erschließungsmaßnahme nach der Bohrungsniederbringung ist bei untertägig offenen Systemen zudem oftmals eine Lagerstätten-Stimulation notwendig.

Die dabei jeweils notwendigen Techniken werden in der Erdöl- und Erdgasindustrie bereits seit vielen Jahren eingesetzt, so dass die mit der Erschließung des tiefen Untergrunds verbundenen Umwelteffekte weitestgehend bekannt und durch entsprechende technische Maßnahmen sowie Vorschriften beherrschbar sind. Die Vermeidung bzw. Reduzierung der Umwelteffekte wird dabei regelmäßig dem aktuellen Stand der Technik bzw. des Wissens angepasst (z. B. /GTN 2007/, /M-I Swaco 2007/).

Mit Ausnahme der Induzierung mikroseismischer Ereignisse, ausgelöst durch die Stimulation des tiefen Festgesteins, werden alle lokalen Umwelteffekte als ausreichend durch das Bundesberggesetz bzw. die daraus resultierenden Verordnungen oder andere Gesetzte berücksichtigt bewertet (Abb. 41). Die resultierenden Umwelteffekte werden im Einzelnen kurz dargestellt, eine ausführliche Darstellung ist dabei jeweils im Anhang zu finden:

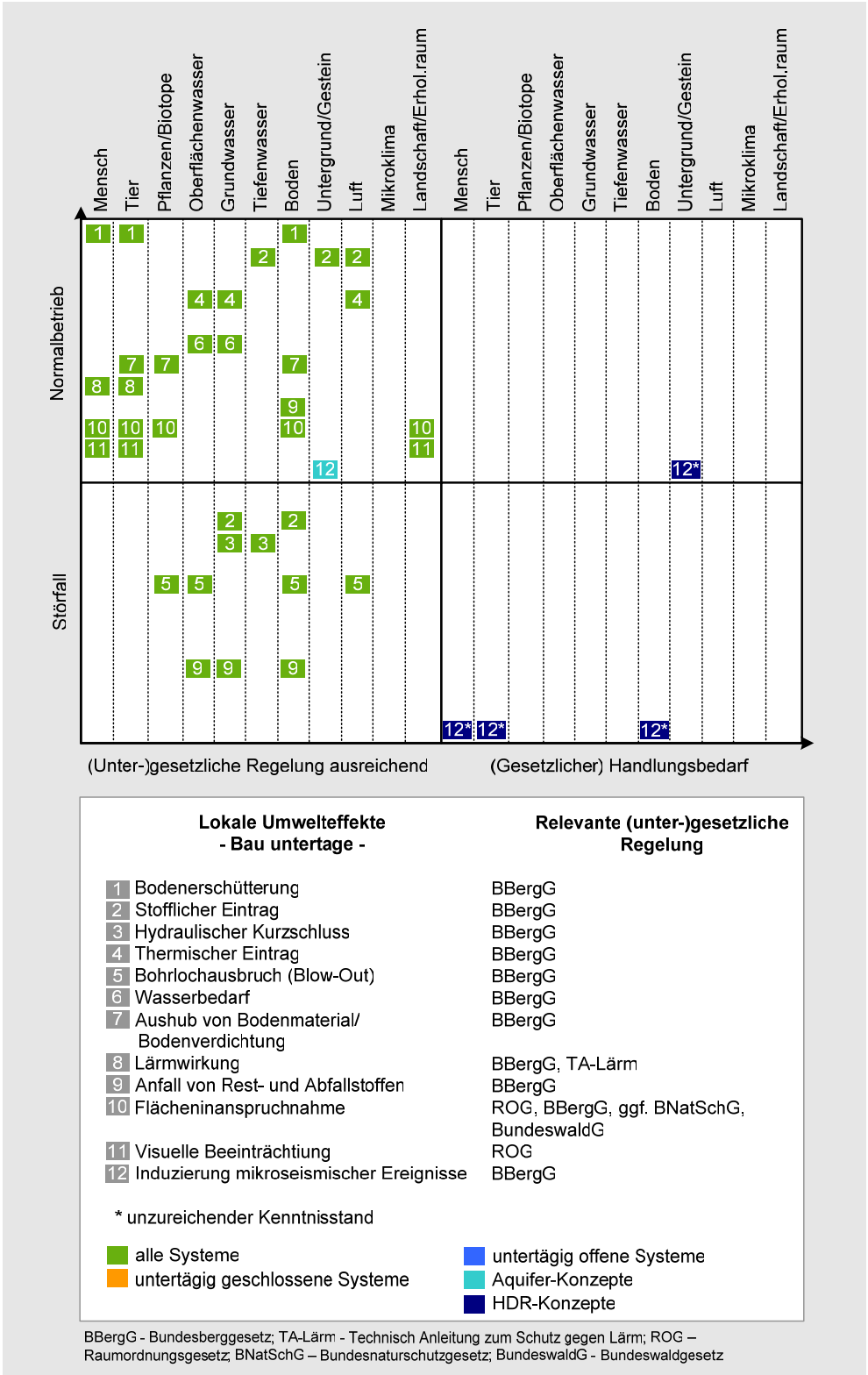

Abb. 41: Lokale Umwelteffekte während des untertägigen Anlagenbaus

- Die geologische Vorerkundung mittels reflexionsseismischer Messungen ist durch die Einbringung künstlicher seismischer Signale mit einer Erschütterung des Bodens (**Umwelteffekt 1**) verbunden (Anhang A.2.1.1). Menschen und Tiere können ggf. durch den mit der Erkundung verbundenen Betrieb und Lärm kurzzeitig gestört werden. Da sich seismische Vorerkundungsmaßnahmen an vorgegebene Grenzwerte (z. B. DIN 4150) zu halten haben und diese im Rahmen eines Betriebsplans durch die zuständige Bergbehörde genehmigt werden müssen, sind keine maßgeblich negativen Umweltauswirkungen zu erwarten.
- Der stoffliche Eintrag (**Umwelteffekt 2**) in Tiefenwässer sowie den Untergrund ist bei der Bohrungsniederbringung durch den Einsatz von Bohrspülung (Anhang A.2.1.3), während der Lagerstätten-Stimulation durch das notwendige Stimulationsfluid (Anhang A.2.1.16) sowie den Einsatz von Markierungsstoffen (sog. Tracer) während der Zirkulationstests (Anhang A.2.1.22) bedingt. Dabei dürfen nur Stoffe zum Einsatz kommen, die im Betriebsplan durch die Bergbehörde zuvor zugelassen wurden. Einem Eintrag umweltgefährlicher Substanzen in Grundwasser führende Gesteinsschichten wird durch entsprechende Vorgaben für den Ablauf der Bohrungsniederbringung vorgebeugt. So wird z. B. der Eintrag von Bohrspülung in bereits niedergebrachte Bohrabschnitte durch unmittelbares Verrohren und Zementieren nach Fertigstellung eines Bohrabschnitts vermieden (Anhang A.2.1.3).
- Weiterhin kann es während der Bohrungsniederbringung durch in der Bohrspülung gelöste Gase zu einem stofflichen Eintrag (**Umwelteffekt 2**) in die Luft kommen (Anhang A.2.1.5). Durch den vorgeschriebenen Einsatz entsprechender Gasabscheider sind die dabei eingetragenen Mengen allerdings vernachlässigbar.
- Der stoffliche Eintrag (**Umwelteffekt 2**) in den Boden und ggf. das Grundwasser von Materialien, die für die Untergrunderschließung auf dem Bohrplatz vorgehalten werden, kann durch eine entsprechende Bohrplatzeinrichtung (u. a. vorübergehend versiegelte Fläche, sachgerechte Lagerungsbehälter) auf ein akzeptierbares, anlagentechnisches Restrisiko reduziert werden (Anhang A.2.1.5). Jeder Bohrplatz muss daher durch das Bergamt abgenommen werden.
- Ein hydraulischer Kurzschluss verschiedener Wasser führender Gesteinsschichten (**Umwelteffekt 3**) wird – wie auch der stoffliche Eintrag von Bohrspülung in bereits

niedergebrachte Bohrabschnitte – durch unmittelbares Verrohren und Zementieren verhindert (Anhang A.2.1.7).

- Ein thermischer Eintrag (**Umwelteffekt 4**) entsteht bei der Zirkulation der im Untergrund sich erwärmenden Bohrspülung, da diese Übertage für ihre Stabilität ggf. gekühlt werden muss (Anhang A.2.1.6). Die dabei kurzzeitig erforderlichen Kühlmengen sind hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen allerdings vernachlässigbar gering.
- Die Gefahr eines Bohrlochausbruches (**Umwelteffekt 5**) während der Bohrungsniederbringung wird durch den vorgeschriebenen Einsatz entsprechender Bohrlochabschlüsse, sog. Blow-Out-Preventer, minimiert (Anhang A.2.1.8).
- Für die Niederbringung der Bohrung, die Stimulation der Lagerstätte sowie ggf. die Zirkulationstests bei HDR-Konzepten wird Wasser benötigt (**Umwelteffekt 6**), welches in der Regel dem Oberflächen- oder Grundwasser entnommen werden muss (Anhang A.2.1.10, A.2.1.19, A.2.1.23). Da sich das Bundesberggesetz in wasserrechtlichen Belangen an den Grundsätzen des Wasserhaushaltsgesetzes orientiert, sind keine schädlichen Umweltwirkungen zu erwarten.
- Für die Bohrplatzherstellung werden Teile des Bodens ausgehoben und andere durch den Baustellenbetrieb ggf. verdichtet (**Umwelteffekt 7**). Die dabei betroffenen Bodenbereiche sind jedoch lokal auf den Bohrplatz (ca. 2.000 m^2) begrenzt (Anhang A.2.1.11). Zudem sind der Schutz des Mutterbodens sowie die Wiedernutzbarmachung des Bohrplatzes im Bundesberggesetz explizit berücksichtigt, so dass die zu erwartenden Umweltauswirkungen gering sind.
- Der Betrieb der Bohranlage ist mit der Emission von Lärm (**Umwelteffekt 8**) verbunden. Im Rahmen des Hauptbetriebsplanes ist jedoch eine Lärm-Immissionsprognose vorzulegen, in der die Richtwerte der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm) eingehalten werden müssen (Anhang A.2.1.12, A.2.1.20). Vor Allem bei Geothermieprojekten, die aufgrund zusätzlicher Wärmebereitstellung in der Nähe der Wärmeabnehmer errichtet werden, sind die vorgegebenen Grenzwerte nur mit zusätzlichen Lärmschutzmaßnahmen einzuhalten.
- Für die im Rahmen der Untergrunderschließung anfallenden Abfall- und Reststoffe (**Umwelteffekt 9**) ist im Vorfeld der Bohrungsniederbringung ein entsprechender Betriebsplan mit Darstellung aller Entsorgungswege bei der zuständigen Bergbehörde einzureichen (Anhang A.2.1.13). Das je Bohrloch anfallende Bohrklein ist dabei je nach

Bohrgebiet und den dadurch zum Einsatz kommenden Spülungszusätzen auf eine geeignete Deponie zu verbringen.

- Die Inanspruchnahme von Fläche (**Umwelteffekt 10**) während des untertägigen Anlagenbaus ist zum einen gering und zum anderen auf den Zeitraum der Erschließungsarbeiten begrenzt (Anhang A.2.1.14, A.2.1.21). Dadurch kurzzeitig bedingte Beeinträchtigungen unterschiedlicher Lebensräume werden daher als vernachlässigbar bewertet. Zudem müssen aufgrund des Raumordnungsgesetzes die unterschiedlichen sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen einer nachhaltigen Raumentwicklung auf Planungsebene abgestimmt werden. Die im Bundesnaturschutzgesetz ausgewiesenen Flächen sowie ggf. notwendige Ersatzmaßnahmen (z. B. Ersatzaufforstung) sind ebenfalls entsprechend zu berücksichtigen.
- Der hohe Bohrmast der Bohranlage sowie die nächtliche Beleuchtung können für den Zeitraum der Lagerstättenerschließung eine visuelle Beeinträchtigung bzw. Belästigung für das Umfeld (**Umwelteffekt 11**) darstellen. Durch eine entsprechende Information und Einbeziehung der Öffentlichkeit kann die Sichtbarkeit des Bohrplatzes jedoch sogar zu einem positiven Anziehungspunkt werden (Anhang A.2.1.15). Objektiv wird die visuelle Beeinträchtigung – wie auch die Flächeninanspruchnahme – in einer übergeordneten Raumplanung entsprechend berücksichtigt.
- Während die Induzierung mikroseismischer Ereignisse (**Umwelteffekt 12**) bei der Bohrungsniederbringung keine Relevanz hat (Anhang A.2.1.9), ist sie im Falle einer hydraulischen Stimulation die Voraussetzung für die Steigerung der hydraulischen Leitfähigkeit im Untergrund. Bei der Stimulation von Aquiferen sind die dabei zu erwartenden mikroseismischen Ereignisse so gering und auf den Bereich der Lagerstätte begrenzt, dass sie an der Erdoberfläche nicht zu spüren und im schlimmsten Fall messbar sind (Anhang A.2.1.18). Selbst bei massiven Stimulationsarbeiten im Forschungsprojekt Genesys waren nur wenige Ereignisse in einer Größenordnung von null auf der Richterskala zu registrieren. Bei den Forschungsarbeiten in Groß Schönebeck konnte bislang keine Seismizität an der Oberfläche gemessen werden.
- Aus gegenwärtiger Sicht wird die Stimulation des tiefen Festgesteins für eine anschließende HDR-Nutzung und die dadurch induzierten mikroseismischen Ereignisse (**Umwelteffekt 12**) dagegen als gesetzlich unzureichend berücksichtigt bewertet. Grund dafür sind die bislang noch fehlenden Kenntnisse, auf Grund deren sich ein Schadbeben

nicht gänzlich ausschließen lässt. Somit sind auch keine gesicherten Aussagen über entsprechende technische Vermeidungsmaßnahmen möglich (Anhang A.2.1.18). Die Wahrscheinlichkeit von Erdstößen größerer Magnitude scheint jedoch in Gebieten ohne tektonische Vorspannung und dämpfende Gesteinsüberdeckung (wie dies in Deutschland der Fall ist) äußerst gering zu sein. Bislang ist es zu keinem durch die Stimulation des Festgesteins verursachten Schadbeben gekommen. Jedoch hat Ende des Jahres 2006 das HDR-Projekt in Basel Aufsehen erregt. Während und auch nach Stimulationsarbeiten im Kristallin kam es zu mehreren Erdstößen mit Magnituden größer 2 (maximale Magnitude 3,4). Wobei derartige Größenordnungen auf den Abbau natürlicher Spannungen im Untergrund schließen lassen, für welche die tektonisch vorbelastete Region um Basel bekannt ist. Ein derartiger Erdstoß kann dabei zwar als deutlich fühlbar, nicht aber als schädliche Umweltauswirkung bewertet werden. In der Schweiz und unmittelbarer Umgebung treten im jährlichen Mittel mehrfach Erdbeben einer Magnitude zwischen drei und vier auf und haben bislang keine Schäden verursacht. Im Falle des Baseler Geothermieprojektes kam es dennoch zu Schadensmeldungen; die dafür maßgeblichen Gründe sind jedoch noch zu klären.

5.2.2 Bau Übertage

Die obertägigen Baumaßnahmen, maßgeblich gegeben durch den Bau des Kraftwerksgebäudes, sind nicht geothermiespezifisch. Die dabei auftretenden Umwelteffekte (z. B. Grundwasserhaltung, Lärm) sind durch die Vorschriften des Baugesetzbuches (BauGB) ausreichend geregelt und werden daher im Folgenden nicht näher erläutert.

5.2.3 Betrieb Untertage

Im Folgenden wird unter untertägigem Betrieb bei Untertage offenen Systemen die Thermalwasserzirkulation, bei Untertage geschlossenen Systemen der Betrieb des untertägigen, zum Untergrund abgeschlossenen Anlagenteils verstanden. Für den Betrieb sind dabei verschiedene Umwelteffekte zu erwarten bzw. möglich, die durch das Bundesberggesetz gemäß dem Stand der Technik und des Wissens abgedeckt werden (Abb. 42). Bei der Vergabe von Bewilligungsfeldern für geothermische Anlagen sowie den Betrieb von HDR-Anlagen sind die gegenwärtig vorliegenden Kenntnisse vor Allem im Hinblick auf einen zukünftig weiteren, ökologisch opti-

mierten Ausbau der Geothermie allerdings noch unzureichend. Weiterhin ist der Umgang mit anfallenden Rest- und Abfallstoffen noch nicht abschließend gelöst.

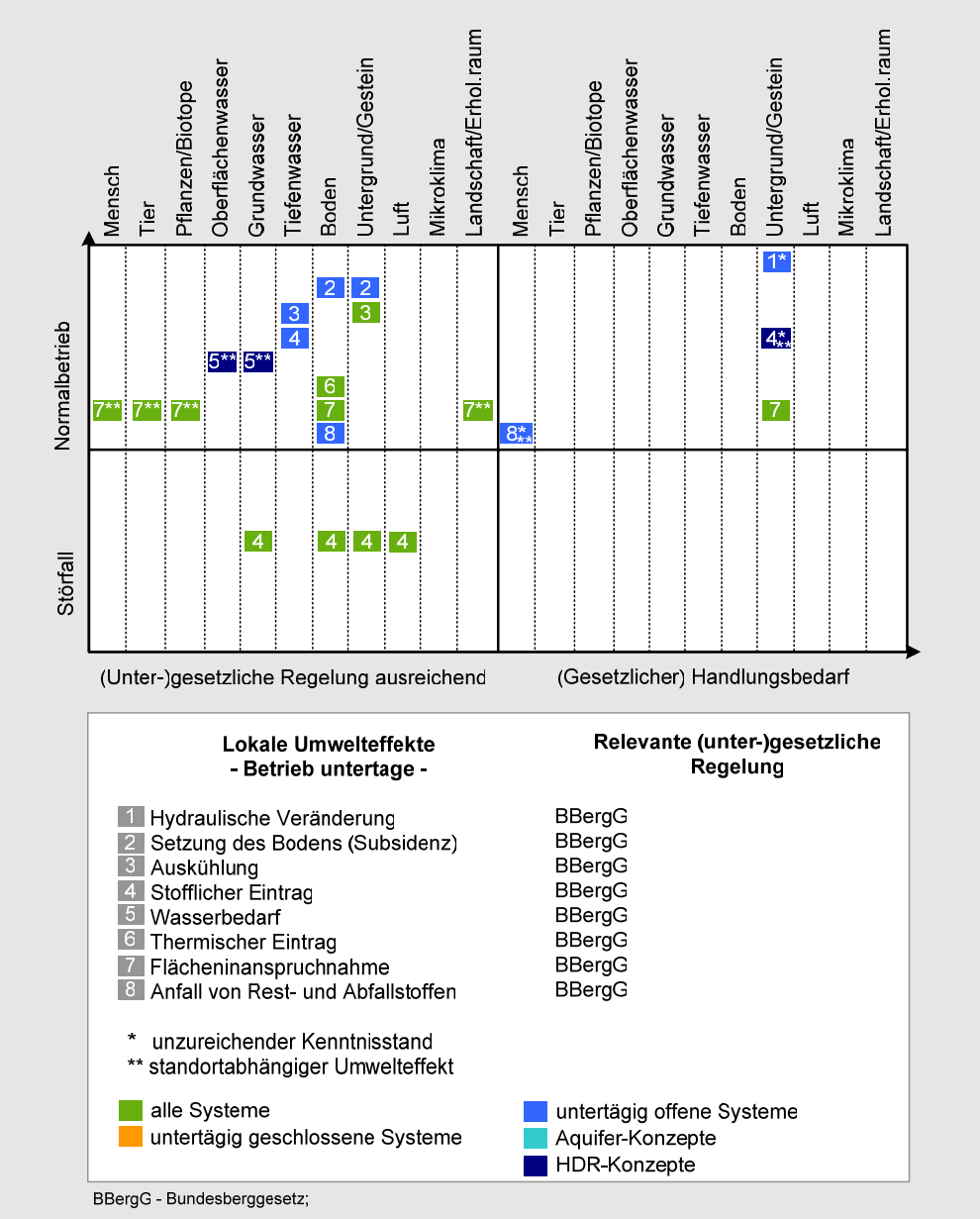

Abb. 42: Lokale Umwelteffekte während des untertägigen Anlagenbetriebs

Die resultierenden Umwelteffekte werden im Einzelnen kurz dargestellt, eine ausführliche Darstellung ist dabei jeweils im Anhang zu finden:

- Da bei untertägig offenen Systemen die natürlich vorliegenden Fließraten aus wirtschaftlicher Sicht in der Regel nicht ausreichen und deshalb Stimulationsmaßnahmen in kleinerem oder größerem Umfang durchgeführt werden, kommt es in der Lagerstätte während des Betriebs zu einer Veränderung der natürlichen Strömungsverhältnisse (**Umwelteffekt 1**). Gemäß Bundesberggesetz sind diese Veränderungen auf den Geltungsbereich eines bergrechtlichen Bewilligungsfeldes zu begrenzen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand sind mit einer hydraulischen Veränderung keine weiteren Umweltwirkungen verbunden (Anhang A.2.2.1). Die Bemessung bergrechtlicher Bewilligungsfelder basiert auf geologischen und hydrogeologsichen Betrachtungen und Erkundungsmaßnahmen der Lagerstätte, die deren Nutzung und den resultierenden hydraulisch und thermisch beeinflussten Bereich im Untergrund abbilden. Bei geologisch noch weitgehend unerkundeten Gebieten, wie z. B. im Malmkarst des Süddeutschen Molassebeckens, stellt die Erstellung eines regionalen Modells jedoch aufgrund der unzureichenden Datenmenge noch ein Problem dar. Bis 2005 wurden Bewilligungsfelder in der Größenordnung von ca. 20 bis 30 km^2 vergeben. Aufgrund der Erfahrungen aus den bestehenden Projekten sowie der intensiveren geologischen Erkundung von Störungssystemen im Gebirge wird die Größe der Felder nun auf etwa 50 bis max. 100 km^2 bemessen. Aufgrund der noch fehlenden Erfahrungswerte in Bezug auf den tatsächlichen hydraulischen Wirkungsbereich im Untergrund muss die optimale Feldbemessung der Bewilligungsfelder vor Allem im Hinblick auf einen zukünftig verstärkten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung weiter im Blick behalten werden.
- Bei untertägig offenen Systemen kann der Druckabbau sowie die Auskühlung im Reservoir im Laufe des untertägigen Betriebs zu einer Kontraktion des Gesteins und ggf. auch zur Setzung des Bodens (**Umwelteffekt 2**) führen (Anhang A.2.2.4). Im Vergleich zur Nutzung von Hochenthalpie-Lagerstätten, durch die in der Vergangenheit Subsidenzen von bis zu 15 Metern aufgetreten sind, sind in Deutschland derartige Erscheinungen nicht zu erwarten. Zum einen ist die Reinjektion des geförderten Thermalwassers bergrechtlich vorgesehen und zum anderen sind in Deutschland keine die Setzung begünstigenden geologischen Verhältnisse gegeben. Berechnungen des Instituts für Wasserwirtschaft und -versorgung der Technischen Universität Hamburg-Harburg zu Folge ist z. B. im Norddeutschen Becken eine maximale Subsidenz von 2 bis 3 cm im Bohrungsbereich möglich, die jedoch bereits bei einer Entfernung von 200 m von der Bohrung

um mehr als die Hälfte abnimmt. Die Gefahr von Schäden an der Bausubstanz wird erst bei großflächigen Subsidenzen von 3 cm als kritisch bewertet.

- Der Entzug von Wärme aus dem Untergrund ist bei allen betrachteten Konzepten mit der Auskühlung (**Umwelteffekt 3**) des umliegenden Gesteins verbunden. Bei untertägig geschlossenen Systemen ist dabei nach 30 Betriebsjahren eine Auskühlung von wenigen Kelvin im Umkreis von ca. 1 m zu erwarten, während bei Aquifer-Systemen mit Eindringtiefen der thermischen Beeinflussung von maximal 160 m und Temperaturabnahmen von mehr als 10 K lediglich in Eindringtiefen von weniger als 70 m zu rechnen ist (Anhang A.2.2.5). Im Falle von HDR-Systemen ist eine entsprechende Abschätzung nur schwer möglich, da hier das Vorhandensein und die Anbindung an ein natürliches Zirkulationssystem im Fernbereich maßgeblich sind. Nach 20 Jahren Betrieb ist dabei eine Abnahme der Fördertemperatur von 10 K bis max. 45 K im Prinzip möglich. Durch die Auskühlung im Untergrund wird die dortige Biozynose beeinflusst. Aufgrund der großen Tiefe und der fehlenden Verbindung zur Biosphäre sind überwiegend anlagentechnische Probleme in Form von mikrobiologisch induzierten Ausfällungen oder Korrosion zu erwarten. Eine negative Auswirkung auf die Umwelt ist gegenwärtig nicht bekannt. Nach Ende der Nutzung kann eine ca. 95 %-ige Wiederherstellung des Ursprungszustandes im Reservoir (z. B. Temperatur und Druck) nach derselben Dauer wie der Nutzung angesetzt werden.
- Während des regulären Betriebs kann bei untertägig offenen Systemen ein stofflicher Eintrag (**Umwelteffekt 4**) z. B. durch aus der Lagerstätte mitgeführte Partikel, Korrosionsprodukte, chemische Ausfällungsprodukte sowie Produkte bakteriologischer Tätigkeit gegeben sein (Anhang A.2.2.6). Die dadurch ggf. hervorgerufene Zusetzung der Fließwege und Verringerung der Lagerstättenpermeabilität kann zu anlagentechnischen Problemen führen. Umweltrelevante Auswirkungen sind davon jedoch nicht zu erwarten.
- Im Falle von HDR-Systemen kann es während des Betriebs zudem zu Zirkulationsverlusten und damit verbunden zu einem stofflichen Eintrag (**Umwelteffekt 4**) des Zirkulationsfluids in den Untergrund kommen (Anhang A.2.2.7). Nicht zuletzt aus diesem Grund ist die Einsatzfähigkeit von überkritischem CO_2 als ungewiss zu bewerten. Die Gefahr eines stofflichen Eintrags von Zirkulationsfluid durch einen Defekt in der Verrohrung und Zementierung der Tiefbohrungen wird aus technischer Sicht als vernachlässigbar gering bewertet. Ein Rohrleitungsdefekt bei einer Zirkulation des Wärmeträ-

germediums zwischen Förder- und Injektionsbohrung und ein damit verbundener stofflicher Eintrag in den Boden und ggf. das Grundwasser kann durch entsprechende Auslegung ebenfalls vermieden werden (Anhang A.2.2.8). Die Einhaltung der technischen Standards wird dabei durch das Bundesberggesetz gesichert.

- Während des Betriebs wird der Thermalwasserkreislauf untertägig offener Systeme unter Luftabschluss, d. h. Übertage geschlossen, betrieben, so dass während des Normalbetriebs keine Luft getragenen Emissionen zu erwarten sind. Kommt es dennoch aufgrund eines Störfalls oder einer Anlagenrevision zum Kontakt des Wärmeträgermediums mit Luft, können die im Wärmeträgerfluid gelösten Gase frei gesetzt werden (**Umwelteffekt 4**). Aufgrund der Verdünnung der gelösten Gase durch den Luftkontakt sind keine gefährlichen Schadstoffkonzentrationen für die Umwelt zu erwarten (Anhang A.2.2.12).
- Kommt es während des Betriebs von HDR-Anlagen zu Wasserverlusten, so müssen diese durch die Entnahme entsprechender Mengen aus Oberflächen- oder Grundwasser (**Umwelteffekt 5**) ersetzt werden (Anhang A.2.2.9). Maximal zu erwartende Wasserverluste werden mit 10 l/s abgeschätzt. Über die Zulässigkeit der Entnahme des Zusatzwassers wird dabei nach wasserrechtlichen Aspekten entschieden, so dass keine Umweltauswirkungen zu erwarten sind. Die Entnahme entsprechender Mengen setzt jedoch deren Verfügbarkeit am jeweiligen Standort voraus.
- Durch die Förderung sowie den Transport eines heißen Wärmeträgermediums kommt es zum einen im Nahbereich des Bohrlochs und zum anderen bei einer untertägigen Verlegung der Transportleitung zu einer Erwärmung des Bodens (**Umwelteffekt 6**). Der thermische Eintrag in den Bohrlochnahbereich ist aus ökologischer Sicht allerdings vernachlässigbar, da durch die thermische lokal begrenzte Beeinflussung keine umweltschädlichen Temperaturgradienten zu erwarten sind (Anhang A.2.2.10).
- Die für den untertägigen Betrieb in Anspruch genommene Fläche (**Umwelteffekt 7**) wird maßgeblich durch die Länge der Thermalwasserleitung bestimmt, da die Tiefbohrungen selbst nach Abschluss der Bohrarbeiten und Rekultivierung des Bohrplatzes einen vernachlässigbaren Flächenbedarf aufweisen (Anhang A.2.2.13). Durch die Orientierung der zu verlegenden Thermalwassertrasse an bereits bestehender Infrastruktur können ohnehin in Anspruch genommene Flächen genutzt und so ein weiterer Flächenbedarf vermieden werden. Obwohl keine negativen Umweltauswirkungen zu erwarten

sind, ist hier anzumerken, dass die aus bergrechtlicher Sicht in Anspruch genommene Fläche dem Bewilligungsfeld entspricht. Eine anderweitige Nutzung des Feldes durch technisch unabhängige, aber unter das Bergrecht fallende Technologien (z. B. gleichzeitige Nutzung eines Feldes für tiefe Erdwärmesonden, hydrothermale und HDR-Nutzung) ist auf dieser Fläche nicht möglich. Dadurch kann ggf. der nachhaltige Ausbau der Energieversorgung beeinträchtigt werden.

- Bei Untertage offenen Systemen fallen durch den Betrieb des Thermalwasserkreislaufs verschiedene Rest- und Abfallstoffe (**Umwelteffekt 8**) an, die entsprechend eines dem Bergamt vorgelegten Entsorgungsplans sachgerecht zu entsorgen bzw. zu beseitigen sind (d. h. ggf. notwendige Deponiefläche). Neben dem Austausch der Förderpumpe sind verschiedene Filter bzw. Filterrückstände sowie während Revisionsarbeiten in Slopgruben ggf. aufgefangenes Thermalwasser zu entsorgen. Bei Thermalwässern hoher Salinität kann zudem die Entsorgung radioaktiver Materialien – auftretend durch den natürlichen radioaktiven Zerfall im Untergrund – notwendig sein (Anhang A.2.2.14). Dass natürlich radioaktive Materialien (naturally occurring radioactive material, NORM) anfallen können, ist aus der Erdöl- und Erdgasförderung bekannt und wird gemäß § 7 Abs. 3 Strahlenschutzverordnung explizit nicht als genehmigungsbedürftig eingeordnet. Im Rahmen des vom BMU geförderten Verbundprojekts „Langfristige Betriebssicherheit – Aspekte der langfristigen Betriebssicherheit und der zukünftigen Technologie geothermischer Anlagen“ (/BMU 2007/) werden die maßgeblichen Zusammenhänge in Bezug auf geothermische Anlagen und ggf. notwendige Empfehlungen erarbeitet. Bislang wird natürlich auftretendes radioaktives Material – mit welchem im schlimmsten Fall toxikologische, aber nicht strahlenschutztechnische Gefahren verbunden sein können – nicht als maßgebliches Umweltproblem angesehen. Solange die abschließenden Ergebnisse aus diesem Projekt nicht vorliegen, wird die gesetzliche Regelung jedoch vorerst als unzureichend bewertet.
- Weitere Umwelteffekte, die in der Vergangenheit mit der Nutzung von Hochenthalpie-Lagerstätten aufgetreten sind, haben unter den in Deutschland vorliegenden geologischen Bedingungen keine Relevanz. Eine Beeinflussung des Grundwasserspiegels (Anhang A.2.2.2), ein hydraulischer Kurzschluss (Anhang A.2.2.3) sowie die Induzierung mikroseismischer Ereignisse (Anhang A.2.2.11) sind durch den Betrieb unter Tage demnach auszuschließen.

5.2.3.1 Betrieb Übertage

Die durch den übertägigen Anlagenbetrieb zu erwartenden Umwelteffekte sind geothermieunspezifisch und stehen grundsätzlich im Zusammenhang mit der zum Einsatz kommenden Konversionstechnik (d. h. ORC oder Kalina). Bei Geothermieanlagen ist jedoch zu beachten, dass die Bindung an geologische Strukturen bzw. die Nähe zu entsprechenden Wärmeabnehmern zusätzliche geothermiespezifische Anforderungen darstellen. Als geothermiespezifisch können gegenwärtig weiterhin der niedrige Wirkungsgrad aufgrund der geringen Temperaturen im Konversionskreislauf und der daraus resultierende Anfall erheblicher niederkalorischer Abwärmemengen angesehen werden. Das jeweils eingesetzte Kühlsystem (vgl. Kapitel 2.2.2.4) ist dabei für die zu erwartenden Umweltauswirkungen maßgebend (Abb. 43).

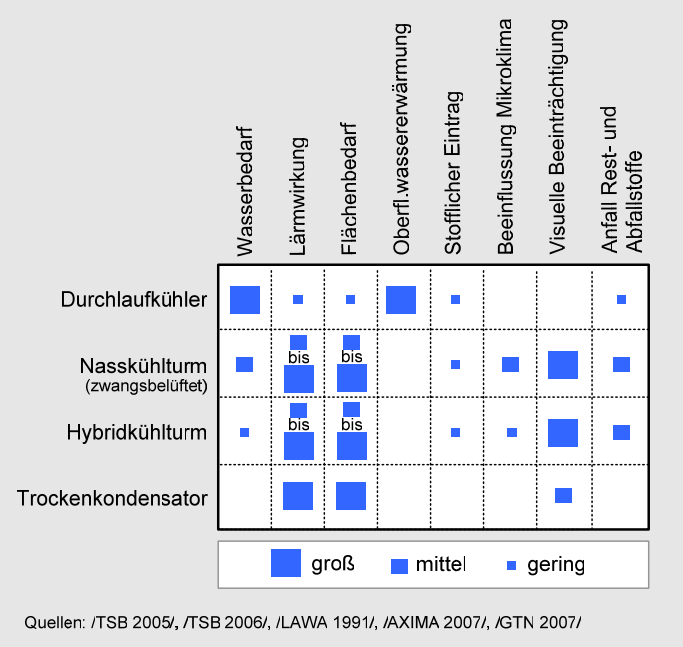

Abb. 43: Gegenüberstellung der lokalen Umweltwirkungen der verschiedenen Kühlsysteme

Langjährige Erfahrungen mit der ggf. auch für andere Anwendungszwecke eingesetzten Anlagentechnik haben zu einer umfangreichen gesetzlichen Regelung geführt, so dass durch den Betrieb über Tage grundsätzlich keine negativen Umwelteffekte zu erwarten sind (Abb. 44). Die resultierenden Umwelteffekte werden im Einzelnen kurz dargestellt, eine ausführliche Darstellung ist im Anhang zu finden:

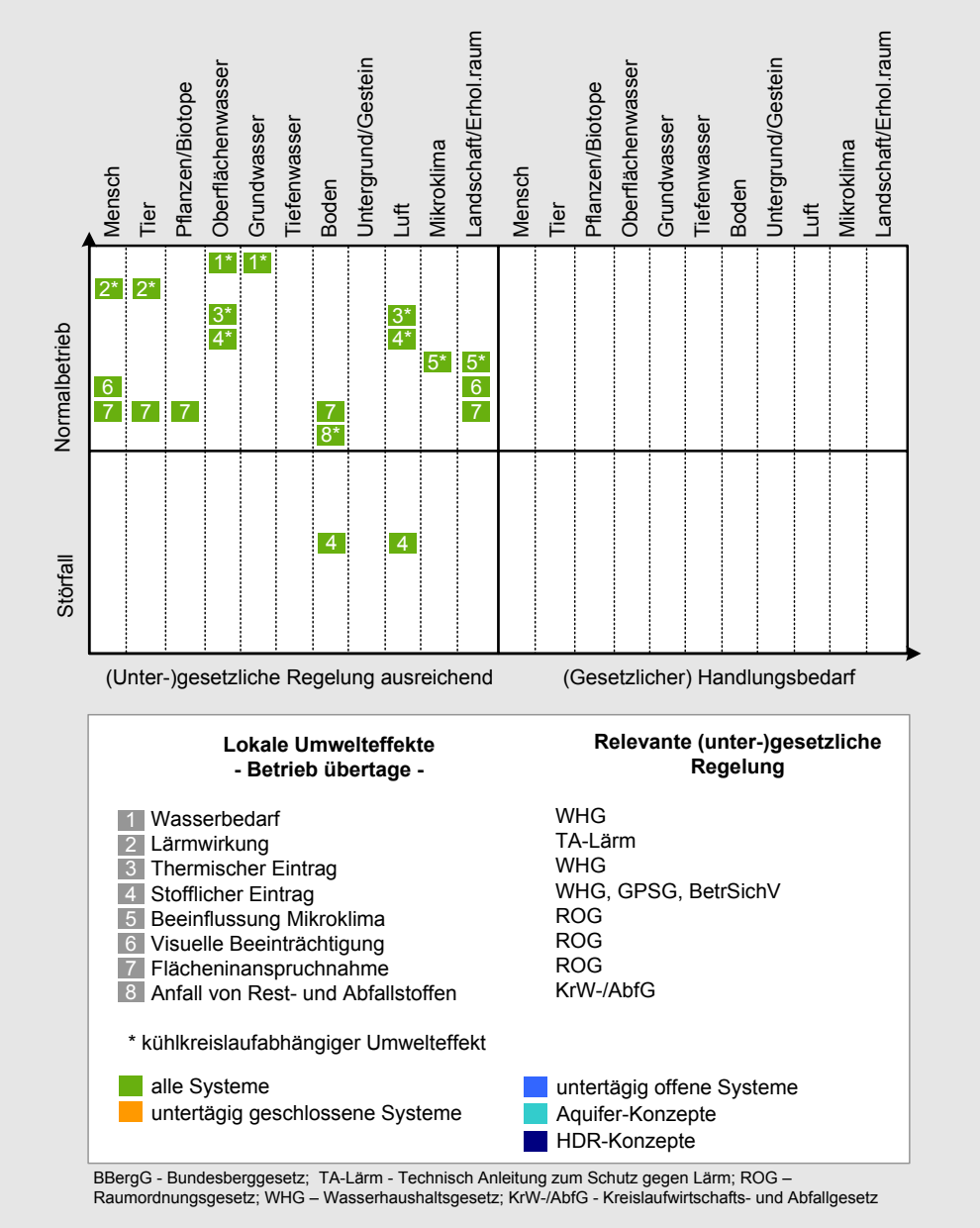

Abb. 44: Lokale Umwelteffekte während des obertägigen Anlagenbetriebs

- Im Falle eines wassergekühlten Konversionsprozesses wird Kühlwasser für den Betrieb der Anlage benötigt (**Umwelteffekt 1**). Dabei ist zu unterscheiden, ob der Wasserbedarf mit einer Wassernutzung (z. B. Durchlaufkühlung) oder einer Wasserentnahme (z. B. Nass- und Hybridkühltürme) verbunden ist (Anhang A.2.3.2). Die Verfügbarkeit von Wassermengen von bis zu 290 m^3/h je MW_{th} Kühlleistung für eine Nutzung stellt dabei deutlich höhere Anforderungen an die Standortgegebenheiten, als Entnahmemengen von 1 bis ca. 9 $(m^3/h)/MW_{th}$. Wasserentnahme und -nutzung bedürfen dabei einer was-

serrechtlichen Erlaubnis, welche nur erteilt wird, wenn die damit verbundenen Umweltauswirkungen als unbedenklich bewertet werden können. Aufgrund der bereits weitestgehend ausgeschöpften Nutzung der Oberflächen- und Grundwässer und der Standortgebundenheit von Geothermiekraftwerken ist die Realisierbarkeit einer Durchlaufkühlung gering, aber auch die von Nass- und Hybridkühltürmen an vielen Standorten, besonders im Oberrheingraben, fraglich.

- Der während des obertägigen Anlagenbetriebs auftretende Lärm (**Umwelteffekt 2**) wird vorrangig durch den Transformator, den Generator und durch Ventilatoren des Kühlsystems (d. h. Kühlturm, Trockenkühler, Trockenkondensator) verursacht (Anhang A.2.3.6). Während Transformator und Generator in der Regel im Kraftwerksgebäude untergebracht sind, stellen die Ventilatoren des Kühlsystems den letztlich größten Lärmemittenten dar. Da die Immissionsgrenzwerte der TA-Lärm bindend sind, haben Geothermieanlagen in der Nähe von Wohngebieten umfangreiche Lärmminderungsmaßnahmen zu ergreifen.
- Erfolgt die Kühlung von Geothermieanlagen in Durchlaufsystemen, wird das Kühlwasser in der Regel einem Fließgewässer entnommen und nach Aufnahme der Abwärme aus dem Konversionsprozess dem Fließgewässer zugeführt, was zu dessen Erwärmung (**Umwelteffekt 3**) führt. Der Erwärmung von Fließgewässern sind allerdings durch die EG-Fischgewässer-Richtlinie aus ökologischer Sicht vertretbare Grenzen gesetzt (Anhang A.2.3.1).
- Da an die Qualität des Kühlwassers definierte Anforderungen gestellt werden, können im Falle der Durchlaufkühlung die – neben Sauerstoff – für die Kühlwasserkonditionierung eingesetzten Stoffe bei Rückführung des Kühlwassers in das Fließgewässer eingetragen (**Umwelteffekt 4**) werden (Anhang A.2.3.4). Jeder stoffliche Eintrag in Oberflächengewässer und Grundwasser bedarf dabei einer wasserrechtlichen Genehmigung. Bei Nass- und Hybridkühltürmen kann es zu einem stofflichen Eintrag in die Luft kommen. Die dabei eingetragenen Mengen sind allerdings vernachlässigbar (Anhang A.2.3.5).
- Im Störfall kann es weiterhin zu einem Austritt von Arbeitsmittel (und anderen Betriebsmitteln) und somit zu einem stofflichen Eintrag (**Umwelteffekt 4**) in die Luft und den Boden kommen (Anhang A.2.3.5). Durch entsprechende sicherheitstechnische Vorkehrungen kann dies jedoch auf ein vertretbares Restrisiko minimiert werden. Die Zu-

lassung einer ORC- oder Kalina-Anlage bedarf der Prüfung einer entsprechenden Aufsichtsbehörde; im Betrieb sind zudem definierte Sicherheitsvorschriften zu beachten.

- Bei Nass- und Hybridkühltürmen kommt es lokal zu einem thermischen Eintrag (Umwelteffekt 3) in die Luft sowie einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und damit zu einer lokalen Beeinflussung des Mikroklimas (**Umwelteffekt 5**). Dadurch kann es zur Bildung von Dampfschwaden und ggf. lokal erhöhtem Niederschlag sowie zur Verringerung der jährlichen Sonneneinstrahlung kommen (Anhang A.2.3.3). Derartige lokale Effekte müssen ggf. im Rahmen der Raumentwicklung berücksichtigt werden.
- Das Kraftwerksgebäude sowie Komponenten des Kühlsystems (vor Allem Kühlturm) können zu einer visuellen Beeinträchtigung (**Umwelteffekt 6**) führen. Beim Betrieb von Kühltürmen ist zudem die Sichtbarkeit der Dampfschwaden möglich (Anhang A.2.3.9). Beim Bau des Kraftwerks sind die städtebaulichen Auflagen gemäß Bauplanungsrecht zu berücksichtigen, wodurch eine Regelung der visuellen Beeinträchtigung gegeben ist.
- Die durch das Kraftwerksgebäude und Komponenten des Kühlsystems in Anspruch genommene Fläche (**Umwelteffekt 7**) liegt ungefähr bei 0,1 m^2/MWh bis 0,4 m^2/MWh und muss für den jeweiligen Standort in eine nachhaltige Raumplanung integrierbar sein (Anhang A.2.3.7).
- Für den Betrieb des obertägigen Anlagenteils sind nur geringe Mengen an Rest- und Abfallstoffen (**Umwelteffekt 8**) zu erwarten. Deren Entsorgung bzw. Beseitigung muss gemäß Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz erfolgen (Anhang A.2.3.8). Dabei ist ggf. die Inanspruchnahme von Deponiefläche zu berücksichtigen.

5.2.4 Rückbau Untertage

Nach dem Betriebsende wird die Bohrung sowie die zum Betrieb notwendige Anlagenperipherie (z. B. Thermalwasserleitung) in der Regel nicht mehr genutzt und muss rückgebaut werden. In einer stillgelegten Bohrung kann es dabei zu Schadstoffeinträgen und ggf. einem hydraulischen Kurzschluss unterschiedlicher Wasser führender Gesteinsschichten kommen (Anhang A.2.4). Anfallende Rest- und Abfallstoffe sind zu beseitigen bzw. entsorgen. Für die Einstellung einer Geothermiebohrung ist deshalb ein Abschlussbetriebsplan zu erstellen, in dem die technische Durchführung der Bohrungsverfüllung und -abdichtung genau darzulegen ist. Die Fläche ist desweiteren in der Form wieder nutzbar zu machen, dass eine entsprechende Nachnutzung der Fläche ohne Gefahren für die Umwelt und Dritte erfolgen kann. Die mit dem unter-

tägigen Rückbau der Anlage verbundenen Umwelteffekte werden demzufolge ausreichend im Bundesberggesetz berücksichtigt.

5.2.5 Rückbau Übertage

Die obertägigen Rückbaumaßnahmen sind nicht geothermiespezifisch. Die dabei auftretenden Umwelteffekte (z. B. Lärm, Anfall von Rest- und Abfallstoffen) sind im Baugesetzbuch (BauGB) umfassend geregelt und werden im Folgenden daher nicht näher erläutert.

5.3 Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischer Referenzkonzepte

Auch wenn die Gesetzgebung alle lokalen Umwelteffekte im Zusammenhang mit der untersuchten Stromerzeugung ausreichend berücksichtigt, so bestehen doch Unterschiede in Bezug auf die jeweiligen Wirkungsbereiche. Im Folgenden wird daher ein qualitativer Überblick über die von den Referenztechnologien jeweils tangierten ökologischen Wirkungsbereiche gegeben. Dabei soll nicht der Frage der „ökologisch besten“ bzw. „ökologisch schlechtesten“ Technologie nachgegangen, sondern vielmehr die Anforderungen an den jeweiligen Standort herausgestellt werden, welche sich aus dem Wirkungsbereich und der damit zu beachtenden Gesetzgebung ergeben.

Hinsichtlich der Analyse und Bewertung lokaler Umwelteffekte der nicht-geothermischen Referenzkonzepte wird auf entsprechende Fachliteratur zurückgegriffen (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /IAEA 1999/, /BMU 2004/, /Reinhardt et al. 2004/).

Ein qualitativer Vergleich zeigt dabei, dass Fotovoltaik und Windkraft die wenigsten Wirkungsbereiche tangieren, während alle grundlastfähigen Referenzkonzepte alle betrachteten Kategorien – mit Ausnahme von Tiefenwasser und Untergrund – betreffen (Abb. 45). Die einzelnen Ergebnisse werden im Folgenden kurz erläutert. Weiterführende Details sind den oben angegeben Quellen zu entnehmen:

- **Wirkung auf Menschen.** Bei allen Referenzkonzepten sind während der Anlagenerrichtung und des -rückbaus lokale Umwelteffekte während der Bauarbeiten zu erwarten. Vor Allem durch den Lärm der Bauaktivitäten sowie das möglicherweise erhöhte Verkehrsaufkommen und ggf. nächtliche Beleuchtung entstehen Wirkungen auf den Menschen. Der Betrieb der verschiedenen Referenzkonzepte ist mit Ausnahme von Fotovoltaik- und Offshore-Windenergieanlagen ebenfalls vor Allem durch Lärmemissionen mit

Wirkungen auf den Menschen verbunden (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /IAEA 1999/, /BMU 2004/, /Reinhardt et al. 2004/). Durch die Brennstoffbereitstellung (d. h. Referenzkonzepte auf Basis von Biomasse, Biogas und fossiler Energieträger) können besonders bei bergbaulichen Tätigkeiten zusätzliche Belastungen für die in diesem Bereich beschäftigten Menschen verbunden sein (z. B. /IAEA 1999/). Im Falle von Windkraftanlagen sind standortabhängig Schattenwurf und in seltenen Fällen Diskoeffekte während des Betriebs als lokale Umwelteffekte möglich (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /IAEA 1999/, /BMU 2004/, /Reinhardt et al. 2004/). Bei Fotovoltaik-Dachanlagen kann es zu einer elektromagnetischen Beeinflussung des Menschen kommen (z. B. /ElektrosmogReport 2001/).

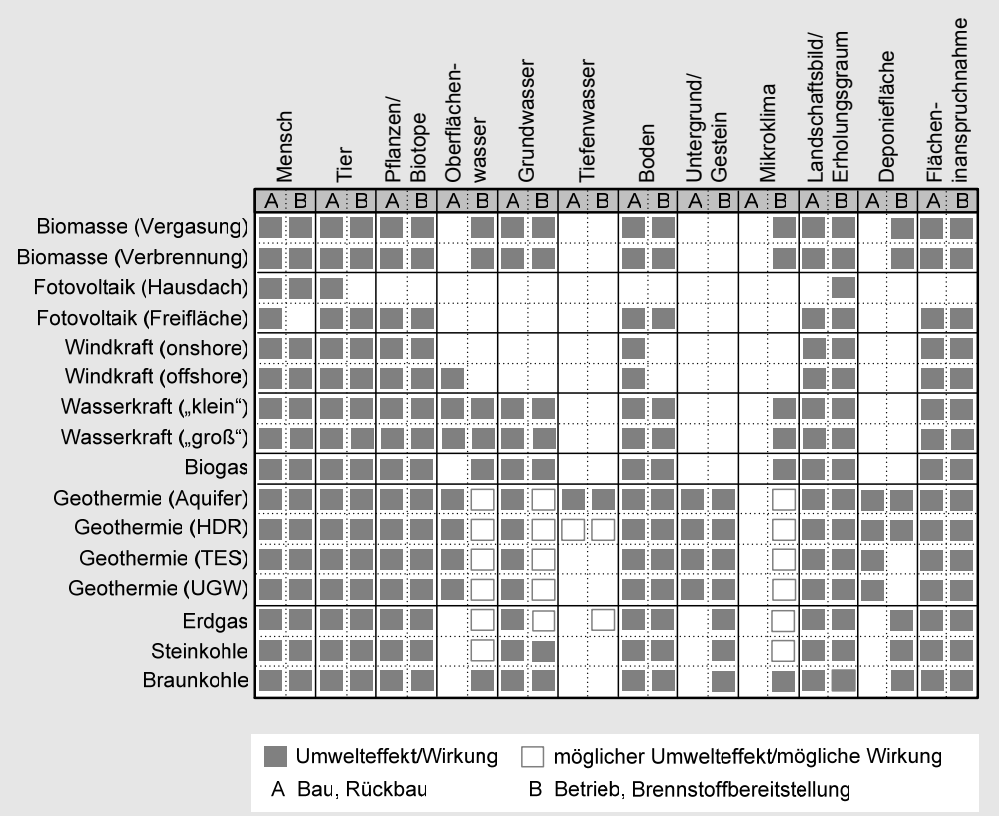

Abb. 45: Qualitativer Überblick über die lokalen Umwelteffekte geothermischer und nicht-geothermischer Referenzkonzepte

- **Wirkung auf Tiere.** Noch stärker als auf Menschen wirken Lärm und Licht, aber auch Bodenerschütterungen, Geruchsemissionen und ggf. die menschliche Anwesenheit während der baulichen Aktivitäten auf Tiere (z. B. /Reinhardt et al. 2004/). Zudem sind Tie-

re durch Flächenumwandlung und -zerschneidung, welche mit Ausnahme von Fotovoltaik-Dachanlagen bei allen Referenzkonzepten in bestimmtem Ausmaß (siehe Flächeninanspruchnahme) gegeben sind, betroffen (z. B. /BMU 2004/, /Reinhardt et al. 2004/). Die Bereitstellung von Energiepflanzen bzw. Nachwachsenden Rohstoffen und damit verbunden deren Kultivierung kann durch Veränderung der Vegetationsstruktur und der Blühte sowie den Verlust von Bodenlebewesen zusätzliche lokale Umwelteffekte für Tiere bedeuten (z. B. /BMU 2004/, /Reinhardt et al. 2004/). Bei Windenergieanlagen ist neben den Wirkungen durch Schattenwurf und ggf. Diskoeffekte im Allgemeinen auch die Störung und Gefährdung von Vögeln im Speziellen möglich (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /BMU 2004/, /Reinhardt et al. 2004/). Über die Wirkung von Schall und Vibration sowie veränderte Strömungsverhältnisse auf Meeressäugetiere und Fische bestehen im Falle von Offshore-Anlagen noch keine gesicherten Erkenntnisse (z. B. /Reinhardt et al. 2004/). Wasserkraftanlagen haben dagegen in jedem Fall durch die Veränderung des Wasserhaushalts (siehe Wirkung auf Oberflächengewässer) eine Wirkung auf Fische; beim Betrieb der Wasserturbine kann es weiterhin zur Verletzung von Fischen kommen (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /Reinhardt et al. 2004/).

- **Wirkung auf Pflanzen/Biotope**. Während der Bauphase kommt es in bestimmtem Umfang (siehe Flächeninanspruchnahme) bei allen Referenzkonzepten bis auf Fotovoltaik-Dachanlagen zur Flächenumwandlung und damit verbunden einer Veränderung und Beseitigung der Vegetation (ggf. auch Beseitigung von Wäldern) sowie einer teilweisen Versiegelung der Fläche, die in den meisten Fällen über die Betriebsphase hinweg bis zum Rückbau fortbesteht (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /BMU 2004/, /Reinhardt et al. 2004/). Die Bereitstellung von Energiepflanzen bzw. Nachwachsenden Rohstoffen kann mit einer zusätzlichen Veränderung der Vegetationsstruktur – wie oben bereits angesprochen – verbunden sein (z. B. /BMU 2004/, /Reinhardt et al. 2004/). Zudem können Wirkungen auf Pflanzen und Biotope durch Änderung des Wasserhaushalts gegeben sein (z. B. /Reinhardt et al. 2004/).
- **Wirkung auf Oberflächenwasser.** Während der Bau- und Rückbauphase sind Wirkungen auf Oberflächengewässer bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen sowie Wasserkraftwerken gegeben. Durch Sedimentverwirbelungen kommt es dabei zu Trübungsfahnen; die Gefahr der Verunreinigung durch stoffliche Einträge beschränkt sich auf Störfälle (z. B. /Reinhardt et al. 2004/). Beim Bau von Geothermiekraftwerken besteht im Fall der Oberflächenwassernutzung für den Bohrbetrieb eine Entnahme von

Oberflächenwasser. Im Rahmen des Anlagenbetriebs sind dagegen vor Allem Wasserkraftwerke mit einer unvermeidbaren Wirkung verbunden, die zu Änderungen des Abflusses, der Fließgeschwindigkeit, des Geschiebebetriebes, der Sedimentverhältnisse und des Wasserstands führen (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /Reinhardt et al. 2004/). Bei HDR-Konzepten mit Wasser als Wärmeträger ist ggf. die Kompensierung der Wärmeträgerverluste in den Untergrund durch Oberflächenwasser notwendig (vgl. Kapitel 5.2.3). Im Falle von Offshore-Windenergieparks kann es ebenfalls zu einer kleinräumigen Veränderung der Strömungsverhältnisse kommen, die in Abhängigkeit der Wasserschichtung (z. B. Ostsee) auch zu großräumiger Wirkung führen kann (z. B. /Reinhardt et al. 2004/). Bei thermisch angetriebenen Konversionsprozessen (d. h. Biomasseverbrennung, und -vergasung, geothermische und fossile Kraftwerke) ist die Wirkung bzw. Nutzung von Oberflächenwasser im Falle von wassergekühlten Kreisläufen gegeben, die je nach zu kühlender Abwärmemenge und eingesetztem Kühlungskonzept (vgl. Kapitel 5.2.3.1) zu mengenmäßigen, morphologischen oder physikalisch-chemischen Veränderungen führen können. Der Kühlkreislauf geothermischer Kraftwerke muss dabei aufgrund des niedrigen Stromerzeugungswirkungsgrades auf eine vergleichsweise große Abwärmemenge ausgelegt sein. Aufgrund der Standortabhängigkeit von bestimmten geologischen Strukturen ist eine Wasserkühlung (d. h. Fließwasserkühlung oder Nasskühlturm) auf Basis von Oberflächenwasser aus genehmigungsrechtlichen bzw. ökologischen Gründen dabei nicht möglich (vgl. Kapitel 5.2.3.1). Die Nutzung von Oberflächenwasser für die Kühlung fossil und biogen betriebener thermischer Kraftwerke ist dagegen in der Regel allein von den Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme (d. h. Kraft-Wärme-Kopplung) abhängig. Sind diese nicht gegeben, müssen entsprechende Kühlsysteme errichtet werden.

- **Wirkung auf Grundwasser.** Ist die Errichtung eines Kraftwerksgebäudes mit der Herstellung einer Baugrube verbunden (hier: Biomasse-, Wasser-, Geothermie- und fossile Kraftwerke) kommt es in der Regel zu einer baubedingten Grundwassererfassung (d. h. Grundwasserhaltung). Bei den Bohrarbeiten für geothermische Kraftwerke kommt es zudem zu einer lokalen Durchteufung von Grundwasserleitern, durch die gemäß dem Stand der Technik keine weiteren Umweltauswirkungen zu erwarten sind (vgl. Kapitel 5.2.1). Derartige Bohrarbeiten sind im Rahmen der Brennstoffbereitstellung auch für die Erschließung von Erdgas notwendig. Die Bereitstellung von Kohle und der damit verbundene Bergbau ist durch Wasserhaltung und Flutung mit einer Veränderung des

Grundwasserstands und der Strömungsverhältnisse verbunden. Betriebsbedingte Wirkungen auf das Grundwasser sind im Falle von Wasserkraftwerken gegeben. Hier führt der veränderte Wasserhaushalt zu entsprechenden Anpassungen im Grundwasser (z. B. Spiegelerhöhung im Staubereich, Senkung im Unterwasserbereich) und dadurch bedingten veränderten Bedingungen für die Infiltration von Oberflächenwasser (z. B. /Reinhardt et al. 2004/). Weiterhin sind der Einsatz und die Entnahme von Grundwasser zu Kühlungszwecken in geothermischen Kraftwerken denkbar.

- **Wirkung auf Tiefenwasser.** Bei der Niederbringung von Tiefbohrungen (d. h. Geothermie und Erdgasförderung) ist generell die Wirkung auf Tiefenwasser führende Schichten durch stoffliche Einträge möglich. Während des Anlagenbetriebs kann es bei der Aquifer-Nutzung (und bei geringem Aufkommen an Tiefenwasser auch bei HDR-Konzepten) zu thermischen sowie ggf. chemisch-physikalischen Änderungen im Wärmeträgemedium kommen (vgl. Kapitel 5.2.3).

- **Wirkung auf den Boden**. Wie bereits in Bezug auf Pflanzen und Biotope angesprochen, ist die Bauphase aller Referenzkonzepte (bis auf Fotovoltaik-Dachanlagen) mit einer Flächeninanspruchnahme und damit einer Veränderung oder auch Beeinträchtigung der Bodenfunktionen verbunden (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /Reinhardt et al. 2004/). Eine dauerhafte Versiegelung des Bodens kann dabei durch Kraftwerksgebäude, Zufahrtswege und versorgungstechnische Anbindung des Kraftwerks gegeben sein (z. B. /Kaltschmitt et al. 2006/, /Reinhardt et al. 2004/). Bei der Bereitstellung von Energiepflanzen ist zudem die Änderung physikalisch-chemischer Bodenparameter möglich (z. B. /Reinhardt et al. 2004/). Bei untertägig offenen Geothermieanlagen kann im Laufe der Betriebszeit eine Setzung des Bodens von bis zu 3 cm im Bohrlochnahbereich auftreten (vgl. Kapitel 5.2.1).

- **Wirkung auf Untergrund/Gestein.** Tiefbohr- und bergbautechnische Maßnahmen sind grundsätzlich mit einem Eingriff in den Untergrund bzw. das Gestein verbunden. Das dabei erschlossene Untergrund- bzw. Gesteinsvolumen ist bei bergbaulichen Tätigkeiten vor Allem im Steinkohlebergbau, bei welchem große Hohlräume im Untergrund geschaffen und zur Brennstoffbereitstellung kontinuierlich erweitert werden, jedoch um ein Vielfaches größer als bei Tiefbohrungen (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/). Bei der Förderung von Erdgas kommt es im Vergleich zur Förderung von Thermalwasser zu einer volumetrischen Entnahme. Eine geothermische Nutzung des Untergrunds führt zusätzlich zu einer Abnahme der Gesteinstemperaturen; dieser Effekt ist jedoch im Falle

untertägig offener Systeme stärker als dies bei untertägig geschlossenen Systemen der Fall ist. Die Erschließung von Festgestein für eine HDR-Nutzung ist mit der Induzierung mikroseismischer Ereignisse verbunden, die ggf. auch zu spürbaren Erderschütterungen an der Oberfläche führen können. Bei der Förderung von Erdöl und Erdgas sowie im Kohlebergbau ist dies ebenfalls möglich und kommt auch regelmäßig vor.

- **Wirkung auf das Mikroklima**. Mögliche Wirkungen auf das Mikroklima sind bei den betrachteten Referenzkonzepten in den meisten Fällen an den Anlagenbetrieb gekoppelt. Bei thermisch betriebenen Kraftwerken kann dies durch den Einsatz von offenen Nasskühltürmen bedingt sein (vgl. Kapitel 5.2.3.1). Bei Wasserkraftanlagen können die Veränderungen des aquatischen Lebensraumes dagegen zu mikroklimatischen Wirkungen führen (z. B. /Reinhardt et al. 2004/). Beim Anbau von Energiepflanzen bzw. Nachwachsenden Rohstoffen kann die veränderte Vegetation einen ähnlichen Effekt haben (z. B. /Reinhardt et al. 2004/).
- **Wirkung auf Landschaftsbild/Erholungsraum.** In Verbindung mit Flächeninanspruchnahme und Flächenumwandlung während Bau und Anlagenbetrieb wird das Landschaftsbild bzw. der Erholungsraum durch sichtbare Anlagenbestandteile oder Veränderung des Umfelds für die Brennstoffgewinnung (z. B. Bergbau, Energiepflanzenfelder) beeinflusst. Eine Veränderung des Erholungsraumes kann zudem vorliegen, wenn es zu geruchlichen Emissionen kommt. Bei Biogasanlagen führt ggf. die Fermentation und beim Anbau von Energiepflanzen die Düngung zu einer merklichen Geruchsentwicklung (z. B. /Reinhardt et al. 2004/).
- **Deponiefläche.** Eine Inanspruchnahme von Deponiefläche während der Bauphase ist nur bei den geothermischen Referenzkonzepten gegeben, bei welchen das Bohrklein in Abhängigkeit der geologischen Gegebenheiten und damit verbunden der notwendigen Einsatzstoffe in der Bohrspülung entsprechend deponiert werden muss (vgl. Kapitel 5.2.1). Die dabei anfallenden Mengen von ca. 37 bis 60 t je TJ erzeugter Energie (hier auf Strom bezogen) sind mit denen während des Anlagenbetriebs von Braunkohle-Kraftwerken in Form von Asche und Reststoffen aus der Rauchgasentschwefelung (REA) vergleichbar (Braunkohle: 21 t/TJ /ecoinvent 2005/, /probas 2007/). Der Anfall von Asche und REA-Reststoffen wird bei Steinkohle mit etwa 14 t/TJ angegeben (/ecoinvent 2005/, /probas 2007/), wobei 95 % als Reststoff weiterverwertet werden (/ecoinvent 2005/). Der Asche-Anfall in Biomasseverbrennungsanlagen liegt bei ca. 1 t/TJ (/FNR 2000/, /probas 2007/). Auf Basis dieses Vergleichs ist daher ggf. die Wei-

terverwertbarkeit von Bohrrückständen noch zu untersuchen. Der Anfall natürlich auftretender radioaktiver Materialen ist vor Allem aus der Erdöl- und Erdgasindustrie bekannt und wird in einem aktuellen Forschungsvorhaben auch hinsichtlich geothermiespezifischer Zusammenhänge analysiert. Damit sind jedoch im schlimmsten Fall toxikologische Belastungen am Arbeitsplatz, nicht aber strahlenschutztechnische Risiken verbunden. Beim Rückbau anfallende Deponiestoffe sind bei allen Referenzkonzepten als gering bis vernachlässigbar zu bewerten. Kraftwerkskomponenten werden weitestgehend recycelt oder nach entsprechender Überholung wieder verwendet. Ggf. radioaktive Bestandteile sind jedoch bei Untertage offenen Geothermiekraftwerken zu berücksichtigen. Für die Entsorgung von Fotovoltaik-Modulen stehen in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung theoretisch verschiedene Entsorgungswege zur Verfügung. Da aber erst ab 2020 mit einer Zunahme der zu entsorgenden Module zu rechnen ist, können gegenwärtig noch keine gesicherten Aussagen über den bzw. die sich letztlich etablierenden Entsorgungsweg(e) gemacht werden (/Reichmuth et al. 2007/). Auf Basis der verschiedenen Varianten ist jedoch davon auszugehen, dass auch Fotovoltaik-Module in Zukunft weitestgehend verwertbar sein werden. Dem Rückbau von Windkraftanlagen folgt gegenwärtig meist eine Folgenutzung in anderen Ländern; ist dies nicht der Fall, können die Komponenten einer Windenergieanlage fast vollständig verwertet werden (/Landenberger 2004/). Beim Rückbau von Biogasanlagen sind keine relevanten Deponiemengen zu erwarten.

- **Flächeninanspruchnahme**. Bis auf Fotovoltaik-Dachanlagen, die auf bereits genutzten Flächen installiert werden können, sind alle Energieträger mit einer Inanspruchnahme von Fläche verbunden. Neben der Fläche für die Anlage selbst sind dabei auch Flächen für die Brennstoffbereitstellung (z. B. Kohle-Bergbau, Energiepflanzenanbau) zu berücksichtigen. Dabei ist grundlegend zu unterscheiden, ob die Inanspruchnahme mit einer Flächenumwandlung bzw. Flächenversiegelung (z. B. durch Kraftwerksbauten) verbunden ist oder die in Anspruch genommene Fläche nur geringfügig verändert (z. B. Fotovoltaik-Freiflächenanlagen) bzw. lediglich genutzt wird (z. B. Abstandsflächen bei Windenergieanlagen). Die geothermische Stromerzeugung zeichnet sich im qualitativen Vergleich zu anderen Energieträgern dabei durch eine sehr geringe Flächeninanspruchnahme in Bezug auf den produzierten bzw. produzierbaren Strom aus, da zum einen die Energieerzeugung direkt am Entstehungsort des Energeiträgers erfolgt, während bei anderen grundlastfähigen Energieträgern, wie z. B. Biomasse und fossile Energieträger,

zusätzlich die benötigte Fläche für die Brennstoffbereitstellung zu berücksichtigen ist. Gegenüber einer Stromerzeugung aus Wind und Fotovoltaik, die ohne zusätzliche Flächen für die Brennstoffbereitstellung auskommt, liegen die Vorteile der Geothermie in ihrer Grundlastfähigkeit und der damit verbundenen höheren Stromproduktion je Fläche.

5.4 Fazit

Aus der Bewertung der bei einer geothermischen Stromerzeugung zu erwartenden, lokalen Umwelteffekte lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- Der untertägige Bau ist mit einem massiven Eingriff in den Untergrund verbunden. Die daraus resultierenden Umwelteffekte sind jedoch in Bezug auf die Erschließung des Untergrunds mittels Tiefbohrungen aus der Erdöl- und Erdgasindustrie bekannt. Die mit Tiefbohrungen verbundenen Umwelteffekte sind heute somit technisch beherrschbar und werden im Bergrecht umfassend berücksichtigt. Dies ist auch für die Stimulation von Sedimentgesteinen und somit für die Stimulation für Aquifere zutreffend. Der große Einfluss des untertägigen Baus verdeutlicht allerdings auch die Notwendigkeit einer erfolgreichen Bohrungsniederbringung für die ökologische Vorteilhaftigkeit einer geothermischen Stromerzeugung. Für einen ökologisch optimierten Ausbau ist daher auch die Verbesserung der Kenntnisse über den Untergrund durch die umfassende Auswertung bestehender Daten sowie den kombinierten Einsatz seismischer und weiterer geophysikalischer (z.B magnetotellurischen Untersuchungen), geologischer und geochemischer Vorerkundungsinstrumente von entscheidender Bedeutung.
- Die Stimulation von Festgestein dagegen ist eine neuartige Technologie, für welche die Erfahrungen der Kohlenwasserstoff-Erschließung nicht uneingeschränkt übernommen werden können. Vor Allem in Bezug auf die noch ungenauen Kenntnisse über den natürlichen Spannungszustand im Untergrund sowie dessen Beeinflussung durch die Stimulationsmaßnahmen ist hier noch weiterer Forschungsbedarf gegeben. Durch die Stimulation sind zwar keine Schadbeben zu erwarten und bisher auch noch nicht aufgetreten, jedoch können sie gegenwärtig auch nicht ausgeschlossen werden. Die durch das Geothermieprojekt ausgelösten Erdstöße in der tektonischen Bruchzone bei Basel haben gezeigt, dass die Stimulation im Festgestein zu an der Oberfläche deutlich fühlbaren Erdstößen und vor Allem im Falle eines wohnungsnahen Projektstandorts zur Verunsi-

cherung der Bevölkerung führen kann. Neben der weiteren Erforschung der natürlichen Spannungen im Untergrund sind dabei auch die Anwendbarkeit neuer Stimulierungstechniken, wie z. B. das Multi-Frac-Verfahren (Anhang A.2.1.18), näher zu erkunden.

- Der übertägige Anlagenbau ist mit dem konventioneller Kraftwerksbauten vergleichbar. Demzufolge sind keine zusätzlichen Umweltauswirkungen zu erwarten.
- Der untertägige Betrieb ist bei Untertage offenen Systemen u. a. mit hydraulischen und thermischen Veränderungen im Untergrund verbunden. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand sind diese ohne negative ökologische Auswirkungen und können im schlimmsten Falle zu anlagentechnischen Problemen führen. Beim HDR-Verfahen müssen Langzeiterfahrungen die Kenntnisse über den untertägigen Wärmetauscher noch verbessern (z. B. der Verbleib von Zirkulationsverlusten).
- Im Falle hochmineralisierter Thermalwässer kann bei Untertage offenen Systemen natürliche Radioaktivität auftreten, wie dies auch aus der Erdöl- und Erdgasförderung bekannt ist. In einem laufenden Forschungsprojekt werden die für eine geothermische Nutzung relevanten Zusammenhänge analysiert, wobei hier toxikologische und nicht strahlenschutztechnische Fragen im Vordergrund stehen. Die Ergebnisse dieses Projektes werden ggf. weitere Empfehlungen aufzeigen.
- Die durch den Betrieb bedingten, gegenwärtig bekannten ökologischen Risiken werden im Rahmen des Bergrechts ausreichend berücksichtigt.
- Aus genehmigungsrechtlicher Sicht ist die richtige Dimensionierung der Bewilligungsfelder kontinuierlich ggf. neuen geologischen Erkenntnissen anzupassen. Eine zu kleine Bemessung der Felder kann zu einer Beeinträchtigung der umliegenden Nutzung kommen; zu große Flächen stehen einem optimalen Ausbau der Geothermie entgegen. Zudem ist zu prüfen, in wieweit die vertikale Bemessung – und damit verbunden die Zulassung ausschließlicher einer dem Bergrecht unterstellten Nutzungstechnik – einem nachhaltigen Ausbau der Energieversorgung nachkommt.
- Vom übertägigen Betrieb sind keine negativen Umweltauswirkungen zu erwarten, da hier die Lage ausreichend gesetzlich geregelt ist. Es ist jedoch zu bemerken, dass die durch geothermische Anlagen im Betrieb bedingten Umwelteffekte maßgeblich durch die Auslegung des Kühlkreislaufes geprägt sind und diese wiederum die Umsetzbarkeit eines Anlagenkonzepts bestimmen. Vor Allem die Verfügbarkeit notwendiger Kühlwassermengen im Falle wassergekühlter Kreisläufe ist dabei entscheidend.

- Der untertägige Rückbau von Geothermieanlagen wird im Bundesberggesetz umfassend berücksichtigt, so dass auch nach Ende des Anlagebetriebs keine relevanten Umweltwirkungen zu erwarten sind. Der Rückbau Übertage ist mit dem Rückbau konventioneller Anlagentechnik vergleichbar.

Auch wenn die Gesetzgebung die lokalen Umwelteffekte aller Stromerzeugungstechnologien ausreichend berücksichtigt, so bestehen doch Unterschiede in Bezug auf die jeweiligen Wirkungsbereiche. Die Ergebnisse des Vergleichs der lokalen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung mit denen anderer Energieträger lassen sich dabei wie folgt zusammenfassen:

- Bei einem qualitativen Vergleich der lokalen Umwelteffekte verschiedener Stromerzeugungstechnologien kann bei ausreichender Gesetzgebung keine Technologie als die ökologisch beste oder schlechteste herausgestellt werden. Jede Technologie besitzt ökologische Vor- und Nachteile. In wieweit diese zum Tragen kommen, wird durch den jeweiligen Standort bestimmt.
- In diesem Zusammenhang ist vor Allem bei einer geothermisch basierten Strom- und Wärmebereitstellung zu beachten, dass aufgrund der Nähe zu entsprechenden Wärmeabnehmern die zu erfüllenden ökologischen Anforderungen (z. B. Lärmgrenzwerte, bauliche Vorschriften, Flächeninanspruchnahme) vergleichsweise hoch liegen.
- Verglichen mit anderen Energieträgern sind tiefengeothermische Anlagen mit massiven Einwirkungen auf den Untergrund und das Tiefenwasser verbunden, welche (mit Ausnahme einzelner Aspekte bei der HDR-Nutzung) technisch beherrschbar und lokal begrenzt sind. In Bezug auf Mensch, Tier und Pflanzen/Biotope sind jedoch keine geothermiespezifischen Umweltwirkungen zu erwarten. Während des Anlagenbetriebs zeichnet sich die Geothermie durch eine minimale Flächeninanspruchnahme und geringe Auswirkungen im Vergleich zu anderen grundlastfähigen Kraftwerken aus, bei welchen durch die Brennstoffbereitstellung neben anlagenbedingten noch weitere Umweltwirkungen zu berücksichtigen sind.

Basierend auf den dargestellten Ergebnissen werden für die lokalen Umwelteffekte folgende Schlussfolgerungen und Empfehlungen in Bezug auf einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung abgeleitet:

- Die Stromerzeugung auf Basis hydrothermaler Systeme kann gegenwärtig und zukünftig einen Beitrag zu einer nachhaltigen Energiebereitstellung leisten. Hydrothermale Anlagen sind grundlaststromfähig, zeichnen sich durch einen geringen Flächenbedarf

aus und die dadurch bedingten Umwelteffekte sind lokal begrenzt und technisch beherrschbar. Für einen ökologisch optimierten Ausbau sind ggf. genehmigungsrechtliche Aspekte in Bezug auf die optimale Bemessung der bergrechtlichen Bewilligungen den Erkenntnissen anzupassen, die aus dem zukünftigen Betrieb vieler geothermischer Stromerzeugungsanlagen resultieren.

- Untertägig geschlossene Geothermiekonzepte sind in Bezug auf die lokalen Umwelteffekte nur durch geringere Umweltauswirkungen im Betrieb gekennzeichnet und haben – abgesehen von ihrer Standortunabhängigkeit – somit aus ökologischer Sicht keine maßgeblichen Vorteile.
- Um die Umsetzung eines ökologisch optimierten Ausbaus der geothermischen Stromerzeugung zukünftig um HDR-Konzepte erweitern zu können, besteht noch weiterer Forschungsbedarf in Bezug auf genauere Kenntnisse über Herstellung und Betriebsverhalten untertägiger Wärmetauscherflächen im Festgestein.
- Der weitere Ausbau der Geothermie ist aufgrund der letztlich noch fehlenden Betriebserfahrung mit einer umfassenden wissenschaftlichen Begleitung unter ökologischen Aspekten zu beobachten. Im Rahmen eines ökologisch optimierten Ausbaus sind neue Projekte an die jeweils aktuellen Erkenntnisse anzupassen.
- Aufgrund der Siedlungsnähe geothermischer Anlagen – vor Allem bei Projekten mit zusätzlicher Wärmebereitstellung – muss ein ökologisch optimierter Ausbau mit einer umfassenden Information der Öffentlichkeit verbunden sein. Nur in einem gemeinsamen Dialog kann das für den jeweiligen Standort auch unter umwelttechnischen Gesichtspunkten optimale Konzept erarbeitet werden. Ein positives Beispiel einer gezielten informations- und dialog-basierten Kommunikation mit der Öffentlichkeit stellt dabei z. B. das Forschungsprojekt Groß Schönebeck dar (/Spalek et al. 2007/).

6 Schlussbetrachtung und Empfehlungen

Ziel dieser Studie ist es die klein- und großräumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland zu analysieren und zu bewerten. Ausgehend vom gegenwärtigen Stand der geothermischen Stromerzeugung sind dabei vor Allem **hydrothermale** Nutzungskonzepte mit binären Konversionsprozessen repräsentativ. Die Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte basiert dabei auf der Grundlage, dass die geothermische Stromerzeugung für einen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung

- in Bezug auf die im Lebensweg, großräumig zu erwartenden Umwelteffekte, im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsalternativen keinen Nachteil für die Umwelt verursacht und
- auch die lokalen, kleinräumig auftretenden Umwelteffekte gering sind bzw. entsprechend gesetzlicher Vorgaben auf ein umweltverträgliches Ausmaß reduziert werden können.

Hinsichtlich der mit einer **hydrothermalen** Stromerzeugung verbundenen Umwelteffekte lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen:

- Der maßgebliche Anteil der Umwelteffekte im Lebensweg sowie der lokalen Umwelteffekte ist durch die Aquifer-Erschließung bedingt. In Bezug auf die lokalen Umwelteffekte wird auf langjährige Erfahrungen aus der Erdöl- und Erdgaserschließung zurückgegriffen, so dass die möglichen Umwelteffekte (z. B. hydraulischer Kurzschluss, stofflicher Eintrag durch Bohrspülung) heute sowohl bekannt, als auch technisch beherrschbar sind. Die möglichen lokalen Umwelteffekte sind daher gesetzlich ausreichend geregelt, so dass keine negativen Umweltwirkungen durch den Bau der Anlage zu erwarten sind. Der große Einfluss des untertägigen Baus verdeutlicht allerdings auch die Notwendigkeit einer erfolgreichen Bohrungsniederbringung. Für einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung ist daher auch die Verbesserung der Kenntnisse über den Untergrund durch die umfassende Auswertung bestehender Daten sowie den kombinierten Einsatz seismischer und weiterer geophysikalischer, geologischer und geochemischer Vorerkundungsinstrumente von entscheidender Bedeutung.
- Weiterhin ist der Anfall erheblicher Abwärmemengen während der Betriebsphase aufgrund der thermodynamisch bedingten, niedrigen Wirkungsgrade für die resultierenden Umwelteffekte ausschlaggebend. Hinsichtlich der Lebenswegbilanzierung werden so-

wohl Bruttostrom wie auch Stromeigenbedarf deutlich durch das jeweils zum Einsatz kommende Kühlsystem (z. B. zwangsbelüfteter Nasskühlturm, Trockenkondensator) beeinflusst. Bei den lokalen Umwelteffekten werden die für den Betrieb Übertage zu erwartenden Umweltwirkungen durch das gewählte Kühlsystem bestimmt.

- Die durch den Betrieb bedingten untertägigen Umweltwirkungen und damit ggf. verbundenen Veränderungen im Untergrund (z. B. hydraulische und thermische Veränderungen) haben bei hydrothermalen Anlagen nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand keine nachteiligen Umweltauswirkungen, sondern im schlechtesten Fall anlagetechnische Probleme zur Folge.
- Eine kombinierte **Strom- und Wärmebereitstellung** wird bei Geothermieanlagen aufgrund des höheren Temperaturniveaus durch die Nutzung der im Thermalwasser nach Wärmeabgabe an den Konversionsprozess noch enthaltenen Restwärme realisiert. In Bezug auf die Umwelteffekte im Lebensweg führt dies zu einer deutlichen Reduzierung bzw. Vermeidung der bilanzierten Umweltwirkungen. Der maßgebliche Einfluss der Wärmegutschrift ist bei geothermischen Konzepten dabei durch die dem Thermalwasserstrom verhältnismäßig große entziehbare thermische Leistung zu begründen, welche die elektrische Leistung um ein Vielfaches übersteigt. Auf die lokalen Umwelteffekte hat eine zusätzliche Wärmebereitstellung keinen maßgeblichen Einfluss.
- Auf Basis dieser Aussagen können für die typischen Regionen hydrothermaler Vorkommen unterschiedliche Charakteristiken abgeleitet werden:
    - Die Referenzanlage im **Oberrheingraben** weist aufgrund des höheren Temperaturgradienten bei geringer Bohrlochtiefe und gleichzeitig hoher Fördertemperatur bei der Lebenswegbilanzierung einer reinen Strombereitstellung in allen Wirkungskategorien die geringsten Umwelteffekte auf. Bei einer zusätzlichen Wärmbereitstellung kommt es zu einer deutlichen Reduzierung bzw. sogar einer Vermeidung der bilanzierten Umweltbelastung.
    - Bei der Referenzanlage im **Süddeutschen Molassebecken** ist der erschließungstechnische Aufwand im Vergleich zum Oberrheingraben aufgrund der höheren Förderrate und des damit verbundenen größeren Bohrlochvolumens größer. Zudem ist die einspeisbare Netto-Strommenge bei vergleichbarer Brutto-Stromerzeugung zur Referenzanlage im Oberrheingraben deutlich geringer. Die Ursache dafür ist zum einen der niedrigere Wirkungsgrad (kühleres Ther-

malwasser) und der dadurch bedingte größere Kühlbedarf. Zum anderen ist mit der höheren Förderrate ein verhältnismäßiger Mehraufwand für die Thermalwasserzirkulation verbunden. Bei einer reinen Strombereitstellung ist dies mit größeren resultierenden Umweltwirkungen verbunden. Bei einer zusätzlichen Wärmebereitstellung liegen die ökologischen Vorteile allerdings im Süddeutschen Molassebecken, da hier aufgrund der höheren Förderrate bei der Erschließung einer entsprechenden Wärmeabnehmerstruktur deutlich mehr Wärme bereitgestellt werden kann.

- Die Referenzanlage im **Norddeutschen Becken** ist im Vergleich zu den anderen Referenzanlagen im Oberrheingraben und Süddeutschen Molassebecken aufgrund der Tiefe des Zielhorizonts mit dem größten erschließungstechnischen Aufwand verbunden. Da zusätzlich aufgrund der zu erwartenden hydraulischen Verhältnisse im Untergrund nur eine geringere geothermische Leistung erschlossen werden kann, sind die bilanzierten Umweltwirkungen sowohl bei der Strom- als auch bei einer Strom- und Wärmbereitstellung am größten. Im Hinblick auf einen ökologisch optimierten Ausbau ist allerdings zu bemerken, dass im Falle einer erfolgreichen Weiterentwicklung der Stimulationstechnik im Norddeutschen Becken der Vorteil des großen erschließbaren Potenzials im Untergrund gegeben ist.

- Ist die erfolgreiche Umsetzung von **HDR-Konzepten** zukünftig möglich, ist eine Verringerung der bilanzierten Umweltauswirkungen im Lebensweg zu erwarten, da hier in der Regel wegen höherer Temperaturen für die gleiche aus dem Untergrund geförderte Energie im Vergleich zu hydrothermalen Systemen geringere Förderraten ausreichen. Bei einer Erweiterung von HDR-Dubletten auf Tripletten kann dieser Vorteil noch verstärkt werden. Um die Umsetzung eines ökologisch optimierten Ausbaus der geothermischen Stromerzeugung zukünftig um HDR-Konzepte erweitern zu können, besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf. Neben genauen Aussagen über das Betriebsverhalten des untertägigen Wärmetauschers (z. B. Abschätzung bzw. Ausschluss von Zirkulationsverlusten) sind die Kenntnisse über die Stimulation von Festgestein noch unzureichend. Durch die Stimulation sind zwar keine Schadbeben zu erwarten und bisher auch noch nicht aufgetreten, jedoch können sie gegenwärtig auch nicht ausgeschlossen werden. Die durch das Geothermieprojekt ausgelösten Erdstöße in der tektonischen Bruchzone bei Basel haben gezeigt, dass die Stimulation im Festgestein zu an der Ober-

fläche deutlich fühlbaren Erdstößen und vor Allem im Falle eines siedlungsnahen Projektstandorts zur Verunsicherung der Bevölkerung führen kann. Neben der weiteren Erforschung der natürlichen Spannungen im Untergrund sind dabei auch die Anwendbarkeit neuer Stimulierungstechniken, wie z. B. das Multi-Frac-Verfahren, näher zu erkunden.

- Für **untertägig geschlossene Systeme** ist bei der geothermischen Stromerzeugung in Bezug auf den Lebensweg mit deutlich größeren Umweltwirkungen zu rechnen. Der Grund dafür sind die deutlich geringeren realisierbaren Anlagenleistungen im Vergleich zum Aufwand für die Erschließung des Untergrunds. In Bezug auf die zu erwartenden lokalen Umwelteffekte sind untertägig geschlossene Systeme durch weniger Umweltauswirkungen im Betrieb gekennzeichnet, haben aber – abgesehen von ihrer Standortunabhängigkeit – keine maßgeblichen Vorteile. Auf Basis dieser Bewertung sind untertägig geschlossene Konzepte für einen ökologisch optimierten Ausbau nicht geeignet.
- Bei einer Einordnung der geothermischen Referenzkonzepte in den Kontext **anderer Energieträger** liegen die analysierten Umwelteffekte im Lebensweg in der Bandbreite der übrigen regenerativen Stromerzeugungskonzepte und führen gegenüber den fossilen Referenztechnologien vor Allem in Bezug auf den Verbrauch erschöpflicher Energieträger und die Emission von Treibhausgasen zu einer deutlichen Verringerung der Umweltbelastung. Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen sind die geothermischen Referenzkonzepte mit einer nuklearen Stromerzeugung vergleichbar. Die geothermisch basierte Bereitstellung von Strom und Wärme zeichnet sich im Vergleich zu den übrigen Referenzkonzepten in allen analysierten Wirkungskategorien durch die größte Reduktion bzw. Vermeidung der jeweiligen Umweltwirkungen aus.
- Unter der Annahme einer ausreichend definierten umweltrechtlichen Lage kann keine Technologie als die ökologisch beste oder schlechteste herausgestellt werden. Jede Technologie besitzt ökologische Vor- und Nachteile. In wieweit diese zum Tragen kommen, wird durch den jeweiligen Standort bestimmt. Verglichen mit anderen Energieträgern ist die hydrothermale Stromerzeugung mit massiven Einwirkungen auf den Untergrund und das Tiefenwasser verbunden. In Bezug auf Mensch, Tier, Pflanzen/Biotope sind keine geothermiespezifischen Umweltwirkungen zu erwarten. Während des Anlagenbetriebs zeichnet sich die Geothermie durch eine minimale Flächeninanspruchnahme und geringe Auswirkungen im Vergleich zu anderen grundlastfähigen

Konzepten aus, bei welchen durch die Brennstoffbereitstellung neben anlagenbedingte noch weitere Umweltwirkungen zu berücksichtigen sind.

Auch wenn die analysierten Umwelteffekte der hydrothermalen Referenzkonzepte im Vergleich zu den übrigen Referenztechnologien als gering bzw. nicht nachteilig bewertet werden können, besteht weiteres **ökologisches Optimierungspotenzial**. Aus Sicht eines Projektplaners ist dabei eine ökologische Optimierung sowohl der Umwelteffekte im Lebensweg als auch der lokalen Umwelteffekte möglich; aus Sicht der Gesetzgebung besteht Optimierungspotenzial in Bezug auf die Förderung eines ökologisch optimierten Ausbaus. Dabei lassen sich folgende Aussagen und Empfehlungen zusammenfassen:

- Das **Optimierungspotenzial der Umwelteffekte im Lebensweg** besteht grundsätzlich in der Steigerung des Verhältnisses von energetischem Nutzen zu materiellem und energetischem Aufwand. Der energetische Nutzen wird dabei als die letztlich bereitgestellte Netto-Strommenge (d. h. Brutto-Strommenge abzüglich des Stromeigenbedarfs im Konversions-, Kühl- und Thermalwasserkreislauf) definiert, da diese für einen ökologisch optimierten Ausbau maßgeblich sein muss:
  - *Erhöhung des Nutzens bei gleichem untertägigen Anlagenkonzept:* Die hier angesprochene Erhöhung des Nutzens kommt einer Steigerung der Netto-Strommenge gleich, welche durch folgende Maßnahmen erfolgen kann:
    - Optimierung des Konversionskreislaufs durch (i) eine Wirkungsgradsteigerung mit ggf. komplexerer Prozessführung (z. B. mehrstufiger Prozess), durch (ii) eine weitere Auskühlung des Thermalwassers und/oder (iii) eine Steigerung der Anlagenverfügbarkeit. Die Optimierung des Konversionskreislaufs ist dabei keine Frage von ORC- oder Kalina-Technik, da beide Technologien beliebig komplex ausgeführt werden können und letztlich das Gesamtergebnis der drei Optionen entscheidend ist.
    - Optimierung des Kühlkreislaufs durch (i) Optimierung der Kondensationstemperatur unter (ii) Berücksichtigung der Auswirkung des Strombedarfs im Kühlkreislauf auf die Netto-Strommenge. Die Durchlaufkühlung zeichnet sich zwar durch die niedrige realisierbare Kondensationstemperatur und einen geringen Stromeigenbedarf (ca. 5 % von der Brutto-Strommenge) aus; aufgrund der damit verbundenen Standortanforderungen und der Bindung hydrothermaler Anlagen an definierte geologische Gegebenheiten hat sie jedoch für die

geothermische Stromerzeugung kaum Relevanz. Die Entscheidung ist daher zwischen Nass- bzw. Hybridkühltürmen und Luftkondensatoren zu treffen. Bei einer reinen Strombereitstellung erweisen sich dabei Kühltürme als vorteilhafter (niedrigere Kondensationstemperatur, ca. 23 bis 27 % Stromeigenbedarf) während bei einer kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung sich luftgekühlte Anlagen (ca. 38 %Stromeigenbedarf) aufgrund der vergleichsweise geringeren Einbußen bei der Stromproduktion unter Umständen als ökologisch besser darstellen können.

- Optimierung des Thermalwasserkreislaufs durch Förderung der ökologisch optimalen Thermalwassermenge. Da die Steigerung des Strombedarfs für die Thermalwasserzirkulation im Gegensatz zur Brutto-Stromproduktion überproportional mit zunehmender Förderrate ansteigt, gibt es eine Förderrate, bei welcher die Netto-Strommenge maximal und der jeweilige Umwelteffekt minimal wird. Bei entsprechender Reservoirbewirtschaftung und damit verbundener längerer Anlagenlaufzeit können die zu erwartenden Umwelteffekte deutlich zudem reduziert werden.

- Optimierung der Thermalwassernutzung durch zusätzliche Wärmebereitstellung. Je mehr Wärme durch die ohnehin anfallenden Wärmeströme (d. h. Rest- und Abwärme) bereitgestellt wird, desto größer fällt die letztlich erzielbare Verringerung der Umwelteffekte aus. Dabei ist zukünftig auch die Umsetzbarkeit innovativer Nutzungskonzepte (z. B. Kaskaden-Nutzung, Kältebereitstellung) zu prüfen, die nicht nur die Restwärme des Thermalwassers, sondern auch die Abwärme aus dem Konversionsprozess nutzt. Aufgrund der dabei anfallenden großen Wärmemengen ist ein wirtschaftlicher Absatz der Wärme an entsprechende Abnehmerstrukturen gebunden. Die Erschließung einer geeigneten Wärmeabnehmerstruktur muss daher bereits zu Beginn der Projektentwicklung berücksichtigt werden.

- *Verringerung des Aufwands bei gleichem untertägigen Anlagenkonzept:* Bei dieser Optimierung bleibt das Anlagenkonzept gleich und lediglich die Projektumsetzung in Bezug auf die Untergrunderschließung wird verändert. Neben einer zukünftig ggf. zu erwartenden Steigerung der Bohreffizienz durch optimierte Bohrverfahren ist hier vor Allem der Einsatz von Strom anstelle von Diesel betriebene Bohranlagen anzuführen. Die Umsetzung eines stromgeführten Bohrbetriebs ist allerdings

an eine entsprechende Stromnetz-Infrastruktur gebunden und somit nicht an jedem Standort möglich.

- *Stärkere Steigerung des Nutzens gegenüber der Steigerung des Aufwands:* Durch die Vergrößerung eines Anlagenkonzepts wird zwar der erschließungstechnische und ggf. fördertechnische Aufwand gesteigert, in der Regel kann dieser jedoch durch die ebenfalls gestiegene Netto-Stromproduktion kompensiert werden. Neben der Steigerung der Förderrate mittels Stimulation des Reservoirs sind dabei auch Mehrbohrlochkonzepte denkbar. Der maximalen Einsparung sind dabei allerdings Grenzen gesetzt, da die nachhaltige Reservoir-Erschließung in einem Erlaubnisfeld nur mit einer begrenzten Anzahl von Bohrungen möglich ist und auch die Reservoir-Produktivität bzw. -Injektivität durch Stimulationsmaßnahmen nur bis zu einem bestimmten Ausmaß verbessert werden kann. Eine weitere Möglichkeit der Anlagenvergrößerung besteht im Sinne der Kombination geothermischer Stromerzeugung mit anderen Energieträgern zu Hybridkraftwerken.

- Das **Optimierungspotenzial der lokalen Umwelteffekte** ist aus Sicht der Projektplanung maßgeblich an eine ökologisch optimierte Planung im Vorfeld durch einen Dialog mit der Öffentlichkeit und eine kontinuierliche Beobachtung während des Betriebes geknüpft:

  - *Information der Öffentlichkeit:* Aufgrund der Siedlungsnähe geothermischer Anlagen – vor Allem bei Projekten mit zusätzlicher Wärmebereitstellung – muss ein ökologisch optimierter Ausbau mit einer umfassenden Information der Öffentlichkeit verbunden sein. Ggf. ist dabei eine freiwillige Beteiligung der Öffentlichkeit, wie z. B. das Forschungsprojekt Groß Schönebeck gezeigt hat, von Vorteil. Nur in einem gemeinsamen Dialog kann das für den jeweiligen Standort auch unter umwelttechnischen Gesichtspunkten optimale Konzept erarbeitet werden.

  - *Wissenschaftliche Projektbegleitung und Monitoring:* Da in Deutschland bislang wenige Langzeiterfahrungen mit der Nutzung von Aquiferen vorliegen, können durch die kontinuierliche Beobachtung der Verhältnisse im Untergrund (z. B. Druck, Reservoirchemie, Temperatur) sowie deren Auswertung zum einen neue Erkenntnisse gewonnen und die Betriebsparameter ggf. an diese angepasst werden.

- Das **Optimierungspotenzial der gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen** ist überwiegend durch die weitere Erforschung der geothermischen Stromerzeugung sowie

die Anpassung der gegenwärtigen Gesetzeslage an die Besonderheiten geothermischer Projekte gegeben:

- *Wissenschaftliche Projektbegleitung und Monitoring:* Durch eine unabhängige, wissenschaftliche Begleitung aller geothermischer Stromerzeugungsprojekte (und ggf. auch tiefengeothermischer Wärmeprojekte, welche meist schon über eine längeren Erfahrungszeitraum verfügen) können die Beobachtungen aus den einzelnen Projekten gesamtheitlich bewertet werden. So können auf nationaler Ebene neue Erfahrungswerte und Empfehlungen abgeleitet werden, die vor Allem auch im Hinblick auf die anzustrebenede, möglichst lange Anlagenlaufzeit von entscheidender Bedeutung ist. Die (unter-)gesetzliche Regelung bzw. die von der Bundesregierung kommunizierten Leitlinien sind an diese Erkenntnisse entsprechend anzupassen. Dies kann zukünftig z. B. nach Abschluss des Projektes „Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen“, in welchem die aus der Erdöl- und Erdgasindustrie bekannte NORM-Problematik (Anfall von Materialien mit natürlich auftretender Radioaktivität) unter Randbedingungen geothermischer Projekte näher untersucht wird, der Fall sein. Zudem ist ggf. die Bemessung bergrechtlicher Bewilligungsfelder an die Fortschritte in der Abbildung der geologischen Gegebenheiten im Untergrund anzupassen.
- *Weiterführende Forschungsförderung:* Im Sinne eines ökologisch optimierten Ausbaus sind im Rahmen einer weiterführenden Forschungsförderung Inhalte zu untersuchen, die nicht in regulären Projekten mit dem Ziel der Stromerzeugung umgesetzt werden können, da hier technische Verfügbarkeit und wirtschaftliche Umsetzbarkeit der jeweiligen Anlage im Vordergrund stehen müssen. Aufgrund des maßgeblichen Einflusses des untertägigen Baus auf die ökologische Vorteilhaftigkeit der geothermischen Stromerzeugung ist dabei die Weiterentwicklung effektiver Vorerkundungsmaßnahmen von entscheidender Bedeutung. Aber auch der ökologische Einfluss von Förder-, Konversions- und Kühltechnik zieht weiteren Forschungsbedarf nach sich.
- *Anpassung der gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen an die Besonderheiten geothermischer Projekte:*
  - <u>Forcierung eines ökologisch optimierten Ausbaus im EEG:</u> Im Rahmen des EEG wird die eingespeiste Strommenge einer Geothermieanlage vergütet. Aus

wirtschaftlichen Gründen ist dies gegenwärtig die Brutto-Strommenge; der Stromeigenbedarf für Konversions-, Kühl- und Thermalwasserkreislauf wird dem öffentlichen Netz entnommen. Bei einer Abbildung dieses Sachverhalts durch Bilanzierung der Brutto-Strommenge liegen die zu erwartenden Umweltwirkungen um Größenordnungen höher, da sich der Stromeigenbedarf aus dem öffentlichen Netz von über 50 % der erzeugten Brutto-Strommenge deutlich in den Ergebnissen niederschlägt. Dabei spielt der zu Grunde gelegte Strommix eine maßgebliche Rolle, so dass eine zukünftig zu erwartende Veränderung des Strommixes zu Gunsten regenerativer Energieträger mit einer Reduktion der brutto-bilanzierten Umwelteffekte um bis zu 35 % verbunden ist. Die für einen ökologisch optimierten Ausbau letztlich maßgebliche Netto-Strommenge kann durch das EEG bislang nicht forciert werden. Während es aus ökologischer Sicht eine optimale Förderrate gibt, bei welcher die Netto-Strommenge maximal wird, nimmt die Wirtschaftlichkeit dagegen mit steigender Förderrate kontinuierlich zu. Da der Strombedarf für die Thermalwasserförderung im Gegensatz zur Brutto-Stromproduktion mit Steigerung der Förderrate überproportional ansteigt, kann ab einer bestimmten Förderrate der Eigenbedarf den produzierten Strom sogar übersteigen, so dass netto betrachtet kein regenerativer Strom bereitgestellt wird. Für einen ökologischen optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung ist demnach die Forcierung der maximalen Netto-Strommenge notwendig. Um konkrete Empfehlungen für mögliche Änderungen im EEG vornehmen zu können, ist eine umfassende ökonomisch-ökologische Gegenüberstellung unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen (z. B. Konversions-, Kühltechnik, Standort) notwendig.

- Anpassung der horizontalen Feldbemessung bergrechtlicher Bewilligungsfelder an die Möglichkeit einer vertikalen Nutzung: Gegenwärtig ist die Nutzung eines Bewilligungsfeldes durch technisch unabhängige, unter das Bergrecht fallende Technologien (z. B. gleichzeitige Nutzung eines Feldes für tiefe Erdwärmesonden, hydrothermale und HDR-Nutzung) nicht möglich. Dadurch kann ggf. der nachhaltige Ausbau der Energieversorgung beeinträchtigt werden.

- Anpassung der untergesetzlichen Regelungen an bereits bestehende Erfahrungen mit Geothermieprojekten: So vielseitig die technischen Herausforderung bei geothermischen Stromerzeugungsprojekten sind, so umfassend stellen sich auch die zu beachtenden (unter-)gesetzlichen Regelungen dar. Dabei ist zu bemerken, dass vor Allem das Bundesberggesetzt, welches den Großteil der geothermiespezifischen Umweltwirkungen grundsätzlich behandelt, vorrangig auf den Bergbau sowie die Erdöl- und Erdgasgewinnung ausgerichtet ist. Da die hiervon ausgehenden Umweltgefahren jedoch z. T. deutlich stärker als bei der Erschließung geothermischer Lagerstätten sind, werden im Rahmen des Bergrechts auch entsprechend massive Vorgaben definiert. Für einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung kann sich dies u. U. eher hinderlich für die Projektentwicklung als förderlich für die Umwelt auswirken. Zudem kann sich die Dauer bergrechtlicher Genehmigungsprozesse aufgrund noch fehlender Erfahrungen mit geothermischen Projekten hemmend auf einen weiteren Ausbau der Geothermie auswirken. Durch die Erarbeitung umweltrechtlicher Leitlinien für eine geothermische Stromerzeugung muss demnach sowohl die behördliche als auch die projektplanerische Seite entsprechend unterstützt werden.

- *Verstärkte Förderung von Wärmenetzen:* Die durch eine geothermische Stromerzeugung gegenwärtig zu erwartenden Umweltwirkungen können maßgeblich durch die zusätzliche Bereitstellung von Wärme verbessert werden. Aufgrund der dabei anfallenden, großen Wärmemengen ist ein wirtschaftlicher Absatz der Wärme auch an entsprechende Abnehmerstrukturen gebunden. Die Errichtung derartiger Wärmenetze ist aufgrund des projektierungstechnischen Aufwands auch mit einem zusätzlichen finanziellen Risiko verbunden, welches nicht in allen Projekten getragen werden will bzw. kann. Durch eine entsprechende Förderung von Wärmenetzen könnte diese Hemmschwelle für eine effizientere Nutzung der Geothermie abgebaut und ein ökologisch optimierter Ausbau unterstützt werden.

- *Information der Öffentlichkeit:* Für einen weiteren Ausbau der geothermischen Stromerzeugung ist eine dialog- und informations-basierte Kommunikation mit der Öffentlichkeit auch von staatlicher Seite notwendig. Ziel muss dabei eine transparante Darstellung sein, die einerseits die Vorteile aufzeigt, aber andererseits auch über Risiken aufklärt.

Auf Basis dieser Schlussfolgerungen wird deutlich, dass die geothermische Stromerzeugung im Stande ist zukünftig einen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland zu leisten. Um einen ökologisch optimierten Ausbau auf den Weg zu bringen, ist neben der Weiterentwicklung einzelner technologischer Aspekte (z. B. geologische Vorhersage-Instrumente, Stimulationstechnik, Konversionstechnik) vor Allem auch das Verständnis für das Gesamtkonzept geothermischer Anlagen und die damit verbundenen ökologischen (und auch ökonomisch umsetzbaren) Stellschrauben auf Seiten der Projektentwickler sowie auf Seiten der Politik unumgänglich. Aufgrund dessen kann nicht ein Konzept als ökologisch optimal bewertet werden; vielmehr ist es das standortspezifische Gesamtkonzept unter Berücksichtigung ökologisch optimaler und technisch realisierbarer Aspekte, die einen ökologisch optimierten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland voranbringen.

Literatur- und Referenzverzeichnis

(AVV)

Abfall-Verzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001 (BGB1. I S. 3379), zuletzt geändert durch Artikel 7 des Gesetztes vom 15. Juli 2006 (BGB1. I S. 1619)

/AXIMA 2007/

AXIMA Refrigeration GmbH, persönliche Mitteilung, Schubert V., Juni 2007

(BauGB)

Baugesetzbuch (BauGB) in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGB1. I S. 2414), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetztes vom 21. Dezember 2006 (BGB1. I S. 3316)

(BayBergV)

Bayerische Bergverordnung (BayBergV) vom 6. März 2006

(BBergG)

Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGB1. I 1980, 1310)

(BBodSchG)

Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGB1. I S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetztes vom 9. Dezember 2004 (BGB1. I S. 3214)

(BBodSchV)

Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGB1. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGB1. I S. 3758)

/Bergakademie Freiberg 2005/

TU Bergakademie Freiberg, Lehrstuhl für Hydrogeologie: $scCO_2$ – Machbarkeitsuntersuchung über den Einsatz von Hot-Dry-Rock Geothermie zur Elektrizitätserzeugung mit Hilfe von superkritischem CO_2, Schlussbericht; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, FKZ 0329999, Freiberg, 2005

/Bergamt M-V 2003/

Bergamt Mecklenburg-Vorpommern: Bergbau in Mecklenburg-Vorpommern - Jahresbericht 2003, Stralsund, 2003

(BetrSichV)

Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes (BetrSichV) - Betriebssicherheitsverordnung vom 27. September 2002 (BGB1. I S. 3777), zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung vom 6. März 2007 (BGB1. I S. 261)

/BGR 2006/

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), persönliche Mitteilung Schröder, H., November 2006

/BGR 2007/

Internetseite der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, ULR: http://www.bgr.bund.de/cln_030/nn_459900/DE/Themen/GG__Geophysik/gg__geophysik__node.html__nnn=true (Zugriff: Januar 2007)

(BImSchG)

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigung, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (BImSchG) - Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. Septebmer 2002 (BGB1. I S. 3830), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetztes vom 18. Dezember 2006 (BGB1. I S. 3180)

(4. BImSchV)

Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Art. 1 d. V zur Neufassung und Änderung von Verordnungen zur Durchfürung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) (4. BImSchV) - Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1997 (BGB1. I S. 504), zuletzt geändert durch Artikel 6 des Gesetztes vom 15. Juli 2006 (BGB1. I S. 1619)

(12. BImSchV)

Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (12. BImSchV) – Stöfall-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. Juni 2005 (BGB1. I S. 1598)

/BMU 2004/

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg): Ökkologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland; Berlin, 2004

/BMU 2005/

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg): Die Wasserrahmenrichtlinie – Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland; Berlin, 2005

/BMU 2006/

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg): Wasserwirtschaft in Deutschland – Teil 1 - Grundlagen; Berlin, 2006

/BMU 2007/

Internetseite des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), ULR: http://www.bmu.de/files/pdfs/ allgemein/application/pdf /ee_forschung_vorhaben.pdf (Zugriff: März 2007)

(BNatSchG)

Gesetz über Naturschutz und Lanschaftspflege (BNatSchG) - Bundesnaturschutzgesetz vom 25. März 2002 (BGB1. I S. 1193), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetztes vom 10. Mai 2007 (BGB1. I S. 666)

/Bosch & Partner 2006/

Bosch & Partner GmbH, FH Eberswalde – Peters, J., IE Leipzig, RA Bohl & Coll.: Flächenbedarf und kulturlandschaftliche Auswirkungen regenerative Energien am Beispiel der Region Uckermark-Barnim, im Auftrag des Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Endbericht, Hannover, 2006

(BVOT HH)

Bergverordnung für Tiefbohrungen, Tiefspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen in der Freien und Hansestadt Hamburg (Tiefbohrverordnung-BVOT) vom 15. September 2006

(BVOT NS)

Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen (Tiefbohrverordnung-BVOT) vom 20. September 2006

/Charléty, Dorbath 2006/

Charléty, J., Dorbath, L: Microseismicity and stimulation strategy. The case of Soultz-sous-Forêts, in Baujard, C. & Kohl, T. (Hrsg.): Proceedings of the Engine Workshop 3 "Stimulation of Reservoir and Induced Microseismicity", 29 June – 1 July 2006, Zurich, Switzerland

/Coder 2008/

Coder, D: Umweltrechtliche Regulierung im Konflikt mit Forschungsfreiheit, Dissertation, noch nicht veröffentlicht

/Davenport 1972/

Davenport A.: A statistical relationship between shock amplitude, magnitude and epicentral distance and its application to seismic zoning; University of Western Ontario, Scientific Report, 1972

(DepV)

Deponieverordnung vom 24. Juli 2002 (BGB1. I S. 2807), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Dezember 2006 (BGB1. I S. 2860)

(DIN 4150)

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2: Einwirkung auf Menschen in Gebäuden, Deutsche Fassung, DIN 4150-2:1999-06 und Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkung auf bauliche Anlagen, Deutsche Fassung, DIN 4150-3:1999-02

/DMT 2007a/

Deutsche Montan Technologie GmbH (DMT), persönliche Mitteilung Gebhard, F., Februar 2007

/DMT 2007b/

Deutsche Montan Technologie GmbH (DMT), persönliche Mitteilung Dombrowski, B., Mai 2007

/DMT 2007c/

Internetseite der Deutschen Montan Technologie GmbH (DMT), ULR: http://www.dmt.de/dienstleistungen/exploration_geosurvey/explorationsseismik.html (Zugriff: April 2007)

/Drisch, Schürken 1995/

Drisch, L.; Schürken, J.: Bewertung von Bergschäden und Setzungsschäden an Gebäuden; Oppermann Verlag, Hannover, 1995

/Ebner 2006/

Ebner, C.: Bohrunternehmen DrillTec setzt auf innovative Kombination aus Geothermie und Biomasse, Geothermische Energie 53/2006, Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e. V

/ecoinvent 2005/

ecoinvent Centre: ecoinvent data v1.2., Final reports ecoinvent 2000, No. 1-15, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, CD-ROM, Dübendorf (Schweiz), 2005

/Ehrlich 1998/

Ehrlich, H.: Rechtliche Rahmenbedingungen für die Nutzung der Ressource Erdwärme bzw. Untergrundspeicherung, in Ehrlich, H.; Erbas, K.; Huenges, E.: Geothermie Report 98-9; Angebotspotenzial der Erdwärme sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothermaler Ressourcen, Scientific Technical Report STR98/09, Potsdam, 1998

/ElektorsmogReport 2001/

ElektrosmogReport: Elektromagnetische Beeinflussung durch Photovoltiak-Anlagen, Elektrosmog-Report 7(4) – April 2001, Strahlentelex, unabhängiger Informationsdienst zu Radioaktivität, Strahlung und Gesundheit (http://www.strahlentelex.de/)

/EWI 2005/

Energiewirtschaftliches Institut an der Universtität Köln (EWI): Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030; Studie im Auftrag desVDEW, BDI, DEBRIV, GVSt, VDN, VGB PowerTech und VRE, in Zusammenarbeit mit der Environment Forecast Analysis (EEFA) GmbH Münster

/FGT 2007a/

FirstGeotherm GmbH (FGT), persönliche Mitteilung Scholz, C., Februar 2007

/FGT 2007b/

FirstGeotherm GmbH (FGT), persönliche Mitteilung Rogge, S., Juni 2007

/Foerster et al. 2004/

Foerster, S.; Schröder, L., Brandt, W.: Deep Borehole Heat Exchanger with direct ammonia evaporation – installation of a field test unit at Bremerhaven, in Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Environmental Policies – Present State and Perspectives of Geothermal Power Generation in Germany, Bonn, 2004

/Fokker 2006/

Fokker, P.: Hydraulic fracturing in the hydrocarbon industry, in Proceedings of he Engine Workshop 3 “Stimulation of Reservoir and Induced Microseismicity”, 29 June – 1 July 2006, Zurich, Switzerland, 2006

/Frick et al. 2007/

Frick, S.; Huenges, E.; Jung, R., Kaltschmitt, M.: Ökonomische Analyse einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland, VGB PowerTech 4/2007

/Fritsch, Gerard 2006/

Fritsch, G.; Gerard, A.: Current status of the EGS Soultz project: main activities, results and targets, in Ledru, P. & Genter, A. (Hrsg.): Proceedings of the ENGINE Launching Conference, 12 – 15 February 2006, Orléans (Frankreich)

/Fritsche et al. 2004/

Fritsche, U.; Dehoust, G.; Jenseit, W.; Hünecke, K.; Rausch, L.; Schüler, D.; Wiegmann, K.; Heinz, A.; Hieble, M.; Ising, M.; Kabsci, S.; Unger, C.; Thrän, D.; Fröhlich, N.; Scholwin, F.; Reinhardt, G.; Gärtner, S.; Patyk, A.; Baur, F.; Bemmann, U.; Groß, B.; Heib, M.; Ziegler, C.; Flake, M.; Schmehl, M.; Simon, S.: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse, Endbericht, Verbundprojekt gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP, Projektträger FZ Jülch, Darmstadt, Berlin, Oberhausen, Leipizig, Heidelberg, Saarbrücken, Braunschweig, München, 2004

/Fritsche et al. 2007/

Fritsche, U.; Rausch, L.; Schmidt, K: Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung, Arbeitspapier Öko-Institut e. V., Darmstadt, 2007

/FNR 2000/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, mit Förderung des Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), Gülzow, 2000

/GEOTEC 2007/

Ingeniuerbüro Uhlig + Partner (GEOTEC CONSULT), persönliche Mitteilung Uhlig, S., Juni 2007

/Geothermal Explorers 2006/

Geothermal Explorers: Projekt Deep Heat Mining Basel – Beantwortung der Fragen der Behörden des Kanton Basel-Stadt am 15. Dezember 2006 zum induzierten Erdstoß vom 8. Dezember 2006 in Basel, im Auftrag der Geopower Base AG, Basel, 2006

/GFZ 1999/

GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ): Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen, Abschlussbericht zum BMBF-Projekt BEO 0326969, Potsdam, 1999

/GGA 2006/

Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Persönliche Mitteilung: Jung, R., Oktober 2006

/GGA 2007a/

Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Persönliche Mitteilung: Buness, H., Juni 2007

/GGA 2007b/

Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Persönliche Mitteilung: Tischner, T. Juni 2007

/GPI 2007/

Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Basel: Expertenbericht zu Dokumentenordner „Beantwortung der Fragen der Behörden des Kanton Basel-Stadt vom 15. Dezember 2006 zum induzierten Erdstoß vom 8. Dezember 2006 in Basel, Basel, 2007

(GPSG)

Gesetz über technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte (GPSG) – Geräte- und Produktsicherheitsgesetz vom 6. Januar 2004 (BGB1. I S. 2 (219)), zuletzt geändert durch Artikel 3 Abs. 33 des Gesetztes vom 7. Juli 2005 (BGB1. I S. 1970)

/Grünthal 1998/

Grünthal, G. (Hrsg.): European Macroseismic Scale 1998, Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Seismologie, Band 15, Luxemburg, 1998

/GTN 1994/

Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN): Geowissenschaftliche, geotechnologische und verfahrenstechnische Forschungsarbeiten zur Vervollkommnung des Verfahrens der Nutzung geothermischer Ressourcen im Hinblick auf das Langzeitverhalten, Teil-

thema: Geomechanische Bewertung der Nutzhorizonte im Langzeitbetrieb, BMBF-Forschungsvorhaben 0326912 A, Neubrandenburg, 1994

/GTN 2003/

Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN): Studie zu den Möglichkeiten der Stromerzeugung aus hydrothermaler Geothermie in Mecklenburg-Vorpommern; Studie im Auftrag des Landes Mecklenburg-Vorpommern, vertreten durch das Wirtschaftsministerium, Neubrandendburg, 2003

/GTN 2005/

Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN): Unterhaching setzt auf Geothermie; in aktuell – GTN-Geothermie-Newsletter, Ausgabe Januar 2005, Neubrandendburg, 2005

/GTN 2007/

Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN), persönliche Mitteilung Seibt, P., Mai 2007

/GRS 2005/

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Gegenwärtige Praxis und rechtliche Rahmenbedingungen bei der Verwertung und Beseitigung von Rückständen mit erhöhter natürlicher Radiaktivität aus Industrie und Bergbau; in Jahresbericht 2004/2005, Köln, 2005

/Haidinger et al. 2006/

Haidinger, P.; Dornstädter, J.; Fabritius, A.: HDR economic modelling: HDRec software, Geothermics, Vol. 35, Issues 5-6, Okotober-Dezember 2006

/Hatzsch 1991/

Hatzsch, P.: Tiefbohrtechnik, Enke-Verlag, Stuttgart, 1991

/Hölting, Coldewey 2005/

Hölting, B., Coldewey W.: Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie, 6. überarbeitete und erweiterte Auflage, Akademischer Verlag, München, 2005

/Huenges, Kohl 2007/

Huenges, E.; Kohl, T: Stimulation of reservoir and micoseismicity – summary of the Ittingen workshop June 2006, in Huenges, E. & Ledru, P. (Hrsg.): Conference Contributions of the ENGINE Mid-Term Conference, 9 – 12 January 2007, Potsdam

/Hunt 2000/

Hunt, T.: Five Lectures on Environmental Effects of Geothermal Utilization, Lectures on environmental studies given in September 2000, United Nations University, Geothermal Training Programme, Reykjavík (Island), 2001

/Hurter, Holl 2002/

Hurter, S.; Holl, H.: Charakterisierung geothermischer Speichergesteine und deren Nutzung für die Stromerzeugung in Deutschland, VDI-Tagung Geothermische Stromerzeugung, 13-21 VDI Berichte, Potsdam, 2002

/IAEA 1999/

International Atomic Energy Agency (IAEA): Health and Environmental Impacts of Electricity Generation Systems. Procedure for Comparative Assessment, Technical Reports Series No. 394, Wien, 1999

/IGEM 2007/

Institut für geothermisches Ressourcenmanagement (IGEM), persönliche Mitteilung Schill, E., Mai 2007

/IDEAS 2006/

Ingenieur-Büre Axel Sperber (IDEAS), Persönliche Mitteilung: Sperber, A., November 2006

(ISO 14040)

Deutsches Institut für Normung e. V.: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin, 2006

(ISO 14044)

Deutsches Institut für Normung e. V.: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, Berlin, 2006

/Jung et al. 1992/

Jung, R.; van de Boom, G.; Schellschmidt, R.; Rummel, F.; Klee, G.: Erschließung permeabler Risszonen für die Gewinnung geothermischer Energie aus heißen Tiefengesteinen, Geothermische Fachtagung 12. – 15. Oktober 1992 – Technologie, Ökologie, Ökonomie, Tagungsband, Erding bei München, 1992

/Jung et al. 2002/

Jung, R.; Röhling, S.; Ochmann, N., Rogge, S.; Schellschmidt, R.; Schulz, R.; Thielemann; T.: Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag; BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458; Hannover, 2002

/Jung 2006/

Jung, R.: Empfehlungen für die Fortsetzung des Deep Heat Minng Projekts Basel, in Geothermal Explorers: Projekt Deep Heat Mining Basel – Beantwortung der Fragen der Behörden des Kanton Basel-Stadt am 15. Dezember 2006 zum induzierten Erdstoß vom 8. Dezember 2006 in Basel, Hannover, 2006

/Jung 2007/

Jung, R.: Stand und Aussichten der Tiefengeothermie in Duetschalnd; Erdöl, Erdgas, Kohle; Februar 2007

/Kagel et al. 2005/

Kagel, A.; Bates, D.; Gawell, K.: A Guide to Geothermal Energy and the Environment, Geothermal Energy Association, Washington (USA), 2005

/Kaltschmitt et al. 1999/

Kaltschmitt, M.; Huenges, E.; Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1999

/Kaltschmitt et al. 2006/

Kaltschmitt, M.; Wiese, A.; Streicher, W. (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, 4. Auflage

/Käss 2004/

Käss, W.: Geohydrologische Markierungstechnik, Borntraeger Verlag, Stuttgart, 2004

/Klinski 2005/

Klinski, S.: Überblick über die Zulassung von Anlagen zur Nutzung Erneuerbarer Energien – Der rechtliche Anforderungsrahmen für die Nutzung der verschiedenen Arten von Erneuerbaren Energien zu Zwecken der Strom-, Wärme- und Gasversorgung; erstellt im Rahmen des für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführten Projekts „Rechtliche und administrative Hemmnisse des Ausbaus Erneuerbarer Energien in Deutschland“, Berlin, 2005

/Kohl 2005/

Kohl T.: Alternative Energien: Vergleich Solar, Wind, Wasserstoff, Wasserkraft, Geothermie, Biomasse und Gezeitenkraft hinsichtlich Ökonomie und Ökologie, Vorlesungsunterlagen des Oberseminar Geoökologie WS 04/05, URL: http://www.goek.tu-freiberg.de/oberseminar/Oberseminar_04_05.htm (Zugriff: Juni 2007), Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2005

/Köhler 2005/

Köhler, S.: Geothermisch angetriebene Dampfkraftprozesse – Analyse und Vergleich binärer Kraftwerke, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2005

/Kristmannsdóttir, Armannsson 2003/

Kristmannsdóttir, H; Armannsson, H.: Environmental aspescts of geothermal energy utilization, Geothermics, Volume 23, Issue 4-6, 2003

(KrW-/AbfG)

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen vom 27. September 1994 (BGB1. I 1994, 2705)

/Kristmannsdóttir et al. 2003/

Kristmannsdóttir, H.; Armannson, H.; Karman, F.; Lorberer, A.; Patzay, G.; Rybach, L.: Environmental aspects of geothermal energy utilization, European Geothermal Conference (EGC 2003), Szeged, HONGRIE (25/05/2003) 2003, vol. 32, no 4-6 (1 p.1/4)

/Kühn et al. 2002/

Kühn, M.; Stöfen, H.; Schneider, W.: Abschätzung der Subsidenz im Einflussbereich Geothermischer Anlagen, Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 1/2002

/Landemberger 2004/

Landenberger, D: Produkt- und Materialrecycling von Windenergieanlagen eröffnen ein breites Spektrum von Handlungsmöglichkeiten, Erneuerbare Energien 6/2004, SunMedia Verlags- und Kongressgesellschaft für Erneuerbare Energien mbH, Hannover, 2004

/LAWA 1991/

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer 3. verbesserte Auflage, Erich Schmidt Verlag, 1991

/LAWA 2007/

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Geothermieprojekte im rheinland-pfälzischen Oberrheingraben - Wasserwirtschaftliche Grundsatz-überlegungen zur Deckung des Kühlwasserbedarfs -, persönliche Mitteilung, Mainz, 2007.

/Le Bel et al. 2007/

Le Bel, L.; Kaltschmitt, M.; Frick, S: Electricity generation from Enhanced Geothermal Systems, Summary of the Workshop 5, 14-16 September 2006, Strasbourg (France), in Huenges, E. & Ledru, P. (Hrsg.): Conference Contributions of the ENGINE Mid-Term Conference, 9 – 12 January 2007, Potsdam

/Legarth, Wolff 2000/

Legarth, B.; Wolff, H.: Technische Machbarkeit eines Untertägig Geschlossenen Geothermischen Wärmetauschersystems (UGGW) für die standortunabhängige Energiegewinnung, in Huenges, E.; Saadat, A.; Köhler, S.; Rockel, W.; Hurter, S.; Seibt, A.; Naumann, D.; Zimmer, M.; Erzinger, J.; Wiersberg, T.; Legarth, B.; Wolff, H.: Geothermie Report 00-1; Geothermische Technologieentwicklung – geologische und energietechnische Ansatzpunkte, Scientific Technical Report STR00/23, Potsdam, 2000

/Legarth 2003/

Legarth, B.: Erschließung sedimentärer Speichergesteine für eine geothermische Stromerzeugung, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2003

/LT NRW 2007/

Landtag Nordrhein-Westfalen: „Ewigkeitskosten“ höher als erwartet – Wirtschaftsausschuss diskutiert Ergebnisse des KPMG-Gutachtens, Parlamentszeitschrift „Landtag Intern“ 2/2007

/Lux, Sannder 1992/

Lux, R., Sanner, B.: Oberflächennahe Erdwärmenutzung, in Verein Deutscher Ingenieure: Erdwärme. Teil IV der Reihe Regenerative Energien, Informationsschriften der VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992

/Majer et al. 2007/

Majer, E.; Baria, R.; Stark, M.; Oates, S.; Bommer, J.; Smith, B.; Asanuma, H.: Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems; Geothermics 36 (2007)

/Mégel, Rybach 2000/

Mégel, T.; Rybach, L.: Production capacity and sustainability of geothermal doublets, in Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000

/M-I Swaco 2007/

M-I Swaco Deutschland GmbH, persönliche Mitteilung Huelke, R., März 2007

/MIT 2006/

Masssachusetts Institute of Technology (MIT): The Future of Geothermal Energy - Impcat of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century; An assessment by an MIT-led interdisciplinary panel, Massachussets (USA), 2006

/Murawski et al. 1998/

Murawski, H.; Meyer, W. (Hrsg.): Geologisches Wörterbuch, Deutscher Taschenbuch Verlag, Bonn, 1998

/Nast1996/

Nast, K.: Erdwärme – Rechtsgrundlagen der Erkundung und Gewinnung, Geothermische Fachtagung 1996, Tagungsband, Konstanz, 1996

/Niedermeyer et al. 1992/

Niedermeyer, S.; Heinschild, H.-J.; Baader, P.; Wenner, D.; Reuther, R.; Kappelmeyer, O.; Smolka, K.: Energieprojekt Hot-Dry-Rock Bestandsanalyse und Empfehlungen - Umwelteffekte, im Auftrag des Bundesministerium für Forschung und Technologie, Westheim, 1992

/Noorollahi 2005/

Noorollahi, Y.: Application of GIS and remote sensing in exploration and environmental management of Námfajall geothermal area, N-Iceland, MSc thesis, Faculty of Science, Department of Geology and Geography, University of Iceland, United Nations University Geothermal Training Programme, Reykjavík, Island, Report 1, 2005

/Orzol et al. 2004/

Orzol, J.; Jung, R.; Jatho, R.; Kehrer, P.; Tischner, T.: Das Geothermieprojekt GENESYS – Konzept zur Direktwärmenutzung aus gering-permeablen Sedimentgesteinen, Geothermische Fachtagung 12. – 14. November 2004, Tagungsband, Landau in der Pfalz, 2004

/Paschen et al. 2003/

Paschen, H.; Oertel, D.; Grünwald, R.: Möglichkeiten einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland – Sachstandsbericht; TAB Arbeitsbericht Nr. 84, Berlin, 2003

/probas 2007/

Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (probas), ULR: http://www.probas.umweltbundesamt.de (Zugriff: April 2007)

/Portier et al. 2006/

Portier, S.; Laurent, A.; Vuataz, F.: Modelling geochemical effects of acid treatments and comparison with field observations at Soultz-sous-Forêts, in Baujard, C. & Kohl, T. (Hrsg.): Proceedings of the Engine Workshop 3 “Stimulation of Reservoir and Induced Microseismicity”, 29 June – 1 July 2006, Zurich, Switzerland

/Reichmuth et al. 2007/

Reichmuth, M.; Schröder, G.; Sander, K.; Zangl, S.: Entsorgung von Fotovoltaik Modulen, Müll-Handbuch, URL: http://www.muellhandbuchdigital.de, Veröffentlichung voraussichtlich 2007

/Reinhardt et al. 2004/

Reinhardt, G.; Scheurlen, K.: Bemmann, A.; Keller, T.; Roder, M.; Schmidt, C.; Thiele, M.; Werner, A.; Wettstein, C.: F+E-Vorhaben: Naturschutzaspekte bei der Nutzung erneuerbarer Energien, FKZ 80102160, gefördert au Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heidelberg, 2004

(RL 2000/60/EG)

Richtlinie RL 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 23.10.2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, ABI. EG Nr. L. 327. S. 1 ff

(RL 2001/58/EG)

Richtlinie RL 2001/58/EG der Kommission vom 27. Juli 2001 zur zweiten Änderung der Richtlinie 91/155/EWG zur Festlegung der Einzelheiten eines besonderen Informationssystems für gefährliche Zubereitung gemäß Artikel 14 der Richtlinie 1999/45/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und für gefährliche Stoffe gemäß Artikel 27 der Richtlinie 67/548/EWG des Rates (Sicherheitsdatenblätter)

(RL 2004/8/EG)

Richtlinie RL 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG

(RL 2006/44/EG)

Richtlinie RL 2006/44/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 6. September 2006 über die Qualtiät von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten

(RL 2006/121/EG)

Richtlinie RL 2006/121/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Änderung der Richtlinie 67/548/EWG des Rates zur Angleichung der

Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe im Hinblick auf ihre Anpassung an die Verordnung (EG) NR. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) und zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur

(ROG)

Raumordnungsgesetz (ROG) – Raumordnungsgesetz vom 18. August 1997 (BGB1. I S. 2081, 2102), zuletzt geändert durch Artikel 10 des Gesetztes vom 9. Dezember 2006 (BGB1. I S. 2833)

/Rogge 2003/

Rogge, S.: Geothermische Stromerzeugung in Deutschland – Ökonomie, Ökologie und Potenziale, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2003

/Rummel et al. 1993/

Rummel, F.; Kappelmeyer, O. (Hrsg.): Erdwärme – Energieträger der Zukunft? Fakten – Forschung - Zukunft; Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1993, 1. Auflage

/Rybach 2002/

Rybach, L.: Umweltaspekte der geothermischen Stromerzeugung, VDI-Berichte, Nr. 1703 (2002)

/Rybach 2007a/

Rybach, L.: Geothermal Sustainability, in Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, 30. Mai – 1. Juni 2007

/Rybach 2007b/

Rybach, L.; persönliche Mitteilung, Juli 2007

/Sanner, Bußmann 2003/

Sanner, B.; Bußman, W.: Current status, prospects and economic framework of geothermal power production in Germany, in Proceedings to the European Geothermal Congress 2003, Szeged/Ungarn, 2003

/Schröder et al. 2007/

Schröder, H.; Teschner, M.; Köhler, M.; Seibt, A.; Krüger, M.; Friedrich, H.-J.; Wolfgramm, M.: Long term reliability of geothermal plants – Examples from Germany, in

Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, 30. Mai - 1. Juni 2007

/Schulz 1997/

Schulz, R.: Geothermie – Der Energie-Berater, Köln, 1997

/Schulz 2003/

Schulz, R.: Bergrecht und Erdwärme – Gesichtspunkte zur Bemessung von Erlaubnis- und Bewilligungsfeldern, Geothermische Energie 40/2003, Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung e. V.

/Schulz et al. 2007/

Schulz, R; Jung, R.; Pester, S.; Schellschmidt, R.: Quantification of Exploration Risks for Hydroteothermal Wells, in Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, 30. Mai – 1. Juni 2007

/SED 2007/

Schweizerischer Erdbebendienst (SED): Aspekte der Erdbebengefährdung im Zusammenhang mit dem Deep Heat Mining Projekt in Basel – Stellungnahme des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Handen der Kontrollstelle für Chemie- und Biosicherheit des Kantons Basel-Stadt zum Bericht der Geopower Basel AG als Folge des induzierten Erdstoßes vom 8. Dezember 2006, Basel, 2007

/Seibt 1991/

Seibt, P.: Abbauüberwachung von Geothermiespeichern, in Bußmann, W.: Geothermie – Wärme aus der Erde; Technologie – Konzepte – Projekte, Müller Verlag, Karlsruhe, 1991

/Siebertz et al. 1998/

Siebertz, T.; Wolff, H.; Huenges, E.: Technisch-wirtschaftliche Aufschlussalternativen hydrothermaler Ressourcen, in Ehrlich, H., K. Erbas, E. Huenges (Hrsg.): Geothermie Report 98-1; Angebotspotential der Erdwärme sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothermaler Ressourcen, Scientific Technical Report STR98/09, Potsdam, 1998

/Siemens 2007/

Siemens AG, persönliche Mitteilung Rathje, H.-W., März 2007

/Spalek et al. 2007/

Spalek, A.; Bruhn, D.; Möck, I.; Huenges, E.: Fair-minded communication in good times pays-off in times of crisis – experiences of the GFZ research project Gross Schoenebeck, Germany, Beitrag zum ENGINE-Workshop 6 "Increasing policy makers' awareness and public accetpance, 13 – 14 September 2007, Athen, Griechenland, URL: http://conferences-engine.brgm.fr/contributionDisplay.py?contribId=15&sessionId=0&confId=7 (Zugriff, September 2007)

/StaNord 2004/

Statischtisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein: Erhebung der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in der Landwirtschaft in Hamburg 2002; Statistischer Bericht Q I 5 – 4J/02 H, Hamburg 2004

/STMWIVT BY 2007/

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (STMWIVT BY), persönliche Mitteilung: Zimmer, R., Juni 2007

(StrSchV)

Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGB1. I S. 1714, (2002, 1459)), zuletzt geändert durch Artikel 2 §3 Abs. 31 des Gesetztes vom 1. September 2005 (BGB1. I S. 2618)

(TA Lärm)

Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetze (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26. August 1998 (GBBI Nr. 26/1998 S. 503)

(TGBPVO BW)

Bergpolizeiverordnung des Wirtschaftsministeriums über Tiefbohrungen, die Gewinnung von mineralischen Bodenschätzen durch Bohrungen sowie die Errichtung und den Betrieb von Gasspeichern (TGBPVO – Tiefbohr- und Gasspeicher-Bergpolizeiverordnung) vom 27. Oktober 1981

/Tischner et al. 2003/

Tischner, T.; Jung, R.; Huenges, E.: Frac-Techniken in Sedimentgesteinen, Geothermische Fachtagung 12. – 13. November 2003, Tagungsband, Neustadt-Glewe, 2003

/TSB 2005/

Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung Bingen (TSB): Vergleich zwischen verschiedenen Kühlsystemen von Geothermie-Anlagen, Studie im Auftrag der SGD Süd Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Abt. D, Bingen, 2005

/TSB 2006/

Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung Bingen (TSB): Konzeption von Verfahren zur Kühlung bzw. Wärmenutzung bei der geothermischen Stromerzeugung, Studie im Auftrag des Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz, Bingen, 2006

/UBA 1995/

Umweltbundesamt (UBA): Methodik der produktbezogenen Ökobilanz – Wirkungsbilanz und Bewertung, Umweltbundesamt, Berlin, 1995

/UBA 2004/

Umweltbundesamt: Hintergrundinformationen - Bodenschutz in der Europäischen Union (EU) voranbringen, Berlin, 2004

(UVPG)

Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 25. Juni 2005 (BGB1. I S. 1757, 2797), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetztes vom 21. Dezember 2006 (BGB1. I S. 3316)

(UVP-V Bergbau)

Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) vom 13. Juli 1990 (BGB1. I S. 1420), zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetztes vom 9. Dezember 2006 (BGB1. I S. 2819)

/VKTA 2007/

Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V. (VKTA), persönliche Mitteilung: Köhler, M., Juni 2007

(VwVwS)

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe – VwVwS) vom 17. Mai 1999

/Weidler et al. 2003/

Weidler, R.; Baisch, S.; Baumgärtner, J.; Gerard, A.; Michelet, S.; Teza, D.: Frac-Techniken im Kristallin, Geothermische Fachtagung 12. – 13. November 2003, Tagungsband, Neustadt-Glewe, 2003

(WHG)

Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG) – Wasserhaushaltsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. August 2002 (BGB1. I S. 3245), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetztes vom 10. Mai 2007 (BGB1. I S. 666)

/Würdemann et al. 2006/

Würdemann, H.; Vieth, A.; Miethling-Graff, R.; Seibt, A.; Wolfgramm, M.: Mikrobiologie geothermisch genutzter Aquifere: Untersuchungen zum Einfluss auf die Betriebssicherheit, Geothermische Fachtagung 15. – 17. November 2006, Tagungsband, Karlsruhe, 2006

/X-Orka 2007/

X-Orka GmbH, Island: Kalina Kraftwerke und Know-how – Nutzung von Abwärme und geothermaler Wärme, Informationsbroschüre,
URL: http://www.xorka.com/files/kalina2005.pdf (Zugriff: Mai 2007)

/Zimmermann et al. 2004/

Zimmermann, G.; Holl, H-G.; Köhler, S.; Legarth, B.; Reinicke, A.; Saadat, A.; Trautwein, U.; Winter, H.; Huenges, E.: Massive Injektions- und Förder-Experimente in Groß Schönebeck, Geothermische Fachtagung 12. – 14. November 2004, Tagungsband, Landau in der Pfalz, 2004

Abkürzungsverzeichnis

AQF	Aquifer
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BauGB	Bau-Gesetzbuch
BayBergV	Bayerische Bergverordnung
BBergG	Bundes-Berggesetz
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BHKW	Block-Heiz-Kraftwerk
BKW	Block-Kraftwerk
BImschG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImschV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BNatSchG	Bundes-Naturschutzgesetz
BundeswaldG	Bundeswaldgesetz
BVOT HH	Tiefbohrverordnung Hamburg
BVOT NS	Tiefbohrverordnung Niedersachsen
CH_4	Methan
CMC	Ceramic Matrix Composite
CMHEC	Carboxymethyl-Hydroxethyl Cellulose
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
CF_4	Perfluormethan
C_2F_6	Hexafluorethan
C_5F_{12}	n-Perfluor-Pentan
DIN	Deutsche Industrienorm
DLK	Durchlaufkühlung
EEG	Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien
EG FischGewRL	EG Fischgewässerrichtlinie
EGS	Enhanced Geothermal System
EU	Europäische Union
FFH	Fauna-Flora-Habitat
GPSG	Geräte- und Produktsicherheitsgesetz
HCl	Chlorwasserstoff
HDR	Hot Dry Rock
HF	Fluorwasserstoff
HKT	Hybridkühlturm
H_2	Wasserstoff
H_2S	Schwefelwasserstoff
II	Injektivitätsindex
ISO	International Organization for Standardization
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NDB	Norddeutsches Becken
NH_3	Ammoniak
NKT	Nasskühlturm
NMVOC	Nicht-flüchtige Mehtankohlenwasserstoffe
NORM	Naturally Occuring Radioactive Material
NO_x	Stickstoffoxide
NO_2	Stickstoffdioxid
N_2O	Stickoxid (Lachgas)
ORC	Organic Rankine Cycle
ORG	Oberrheingraben
pH	pondus Hydrogenii, potentia Hydrotgenii

PI	Produktivitätsindex
PO_4^3	Phosphat
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential
PV	Fotovoltaik
ROG	Raumordnungsgesetz
SeismikBergV	Bergverordnung über seismische Vorerkundungsarbeiten
SDMB	Süddeutsches Molassebecken
SF_6	Schwefelhexafluorid
SO_2	Schwefeldioxid
SO_x	Schwefeloxide
TA-Lärm	Technische Anleitung für die Vermeidung von Lärm
TES	Tiefe Erdwärmesonde
TGBPVO BW	Bergpolizeiverordnung des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg über Tiefbohrungen, die Gewinnung von mineralischen Bodenschätzen durch Bohrungen sowie die Errichtung und den Betrieb von Gasspeichern
TK	Trockenkondensator
TOPP	Tropospheric Ozone Precursor Potential
UGW	Untertägig geschlossener Wärmetauscher
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungs-Gesetz
UVP-V Bergbau	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung im Bergbau
VwVwS	Verwaltungsvorschrift für den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
2D	2-dimensional
3D	3-dimensional

Einheitenverzeichnis

bar	Bar
Bq/g	Becquerel je Gramm
cm	Zentimeter = 10^{-2} Meter
dB(A)	Dezibel (Amplitude)
Euro/kWh	Euro je Kilowattstunde
GJ/MWh	Gigajoule je Megawattstunde
GWh	Gigawattstunde = 10^6 Kilowattstunde
ha	Hektar
h/a	Stunden pro Jahr
K	Kelvin
K/km	Kelvin je Kilometer
kg/MWh	Kilogramm je Megawattstunde
km	Kilometer = 10^3 Meter
km^2	Quadratkilometer = 10^9 Quadratmeter
kN	Kilonewton = 10^3 Newton
kW	Kilowatt = 10^3 Watt
kWh	Kilowattstunde
m	Meter
mm/s	Millimeter je Sekunde
mm/s^2	Millimeter je Sekunde im Quadrat
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
m^3/h	Kubikmeter je Stunde
$m^3/(h\ MPa)$	Kubikmeter je Stunde und Megapascal
$(m^3/h)/MW_{th}$	Kubikmeter je Stunde und Megawatt thermisch
MJ	Megajoule = 10^6 Joule
MW	Megawatt = 10^6 Watt
MW_{el}	Megawatt elektrisch
MW_{th}	Megawatt thermisch
MW_p	Megawatt Peak
MWh	Megawattstunde = 10^3 Kilowattstunde
MWh/a	Megawattstunde pro Jahr
t	Tonne = 10^3 Kilogramm
t/MWh	Tonne je Megwattstunde
t/TJ	Tonne je Terajoule
°C	Grad Celsius
%	Prozent

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematischer Aufbau der Studie 26
Abb. 2: Überblick zu den geologischen Gegebenheiten in Deutschland (/Hurter, Holl 2002/)..... 29
Abb. 3: Hydrothermale Bohrungsdublette (/Kaltschmitt et al. 1999/ verändert) 31
Abb. 4: Hydrothermales Einbohrlochkonzept (/Kaltschmitt et al. 1999/)..... 32
Abb. 5: Beispielhafte HDR-Erschließungskonzepte an verschiedenen Standorten (/Kalschmitt et al. 2006/)..... 33
Abb. 6: Funktionsschema einer tiefen Erdwärmesonde (/Kaltschmitt et al. 1999/) 34
Abb. 7: Schema eines untertägig geschlossenen Wärmetauschers (/Legarth, Wolff 2000/) 34
Abb. 8: Rotary-Bohrprinzip (/Kaltschmitt et al. 1999/ verändert) 37
Abb. 9: Vereinfachtes Schaltschema einer ORC-Anlage (/GTN 2003/, verändert) 40
Abb. 10: Gemittelter Wirkungsgradverlauf realer ORC-Anlagen in Abhängigkeit von der Thermalwassertemperatur (/Paschen et al. 2003/) 40
Abb. 11: Vereinfachtes Schaltschema einer Kalina-Anlage (/GTN 2003/, verändert) 41
Abb. 12: Beispielhafter Wirkungsgradverlauf einer Kalina-Anlage in Abhängigkeit von der Thermalwassertemperatur(/GTN 2003/, verändert) 42
Abb. 13: Schematische Darstellung einer Reihenschaltung zur Nutzung der Thermalwasserrestwärme (/TSB 2006/)..... 43
Abb. 14: Abwärmeanfall in Abhängigkeit vom Wirkungsgrad 44
Abb. 15: Aufbau einer Lebensweganalyse nach ISO 14040 und ISO 14044..... 61
Abb. 16: Schematische Darstellung einer Prozesskettenanalyse..... 62
Abb. 17: Durchschnittliche Verteilung des Verbrauchs erschöpflicher Energieträger beim untertägigen Bau (Referenzkonzepte zur Strombereitstellung) 68
Abb. 18: Ergebnisse der Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strombereitstellung 69
Abb. 19: Durchschnittliche Verteilung der Brutto-Strommenge auf Netto-Strom und Stromeigenbedarf (Referenzkonzepte zur Strombereitstellung, Oberrheingraben und Süddt. Molassebecken)..... 70
Abb. 20: Jährlicher Strombedarf der Thermalwasserzirkulation im Oberrheingraben in Abhängigkeit von der Förderrate und der Reservoir-Produktivität bzw. –Injektivität 70

Abb. 21: Ergebnisse der Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung 72

Abb. 22: Ergebnisse der Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Zukunftskonzepte 74

Abb. 23: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Anlagengrößen im Oberrheingraben 76

Abb. 24: Verbrauch erschöpflicher Energieträger und CO2-Äquivalent in Abhängigkeit der Förderrate 78

Abb. 25: Vergleich von CO2-Äquivalent und Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Förderrate am Beispiel der Referenzanlage im Süddeutschen Molassebecken 79

Abb. 26: Vergleich der Bilanzierung von Netto- und Bruttostrommenge der untersuchten geothermischen Strombereitstellung 81

Abb. 27: Einfluss des Strommixes auf das CO_2-Äquivalent bei Bruttstrom-Bilanzierung 82

Abb. 28: Vergleich von Brutto-Strommenge und Gesamtstrombedarf in Abhängigkeit der Förderrate im Süddeutschen Molassebecken 82

Abb. 29: Verbrauch erschöpflicher Energieträger und CO2-Äquivalent in Abhängigkeit der Förderrate (Bilanzierung Brutto-Strommenge) 84

Abb. 30: Vergleich der Bilanzierung von Netto- und Bruttostrommenge der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung 85

Abb. 31: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Konversionsprozesse der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben und Süddeutschen Molassebecken 87

Abb. 32: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Kühlkreisläufe der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben 89

Abb. 33: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Kühlkreisläufe der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung im Oberrheingraben 91

Abb. 34: Mögliches Nutzungskonzept der Rest- und Abwärme am Beispiel der geothermisch angetriebenen Kalina-Anlage in Húsavik (Island) (/X-Orka 2007/) 92

Abb. 35: Vergleich der Ergebnisse der Lebensweganalyse verschiedener Bohrungsniederbringung der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben und Norddt. Becken 94

Abb. 36: Einfluss der Anlagenlaufzeit auf das CO_2-Äquivalent am Beispiel der Referenzanlage im Oberrheingraben 95

Abb. 37: Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischen Stromkonzepte 97

Abb. 38: Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischen Strom- und Wärmekonzepte 99

Abb. 39: Aufbau von Identifizierung, Analyse und Bewertung der lokalen Umwelteffekte 106

Abb. 40: Ablauf der Analyse und Bewertung der lokalen Umwelteffekte 108

Abb. 41: Lokale Umwelteffekte während des untertägigen Anlagenbaus 111

Abb. 42: Lokale Umwelteffekte während des untertägigen Anlagenbetriebs 116

Abb. 43: Gegenüberstellung der lokalen Umweltwirkungen der verschiedenen Kühlsysteme 121

Abb. 44: Lokale Umwelteffekte während des obertägigen Anlagenbetriebs 122

Abb. 45: Qualitativer Überblick über die lokalen Umwelteffekte geothermischer und nicht-geothermischer Referenzkonzepte 126

Abb. 46: Salzgehalte verschiedener geothermischer Anlagen und Bohrungen in Abhängigkeit von der Tiefe (/Würdemann et al. 2006/) 211

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Kombination der unter- und obertägigen Systemansätze 30
Tab. 2: Notwendige Erschließungsschritte der verschiedenen Erschließungskonzepte 35
Tab. 3: Verschiedene Wärmenutzungsprozesse und ihre typische System-Wassertemperatur (Lindal-Diagramm) (/Schulz 1997/) 43
Tab. 4: Stand der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland /Frick et al. 2007/, /Foerster et al. 2004/, /Legarth, Wolff 2000/ 47
Tab. 5: Definition gegenwärtig repräsentativer geothermischer Referenzkonzepte 49
Tab. 6: Definition zukünftig mögliche, geothermischer Referenzkonzepte 50
Tab. 7: Definition nicht-geothermischer Referenzkonzepte 51
Tab. 8: Zusammenstellung der bilanzierten Wirkungsgrößen 64
Tab. 9: Aggregationsfaktoren zur Berechnung der Ressourcenbeanspruchung über den kumulierten fossilen Energieaufwand 64
Tab. 10: Wichtungsfaktoren wichtiger Treibhausgase zur Quantifizierung des anthropogenen Treibhauseffekts bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren 65
Tab. 11: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für Versauerung 65
Tab. 12: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung des Indikators für terrestrische Eutrophierung 65
Tab. 13: Charakterisierungsfaktoren zur Bildung bodennahen Ozons 66
Tab. 14: Eingangsparameter für den Vergleich verschiedener Anlagengrößen 75
Tab. 15: Eingangsparameter für den Vergleich verschiedener Konversionsprozesse 86
Tab. 16: Eingangsparameter für den Vergleich verschiedener Kühltechnologien 88
Tab. 17: Eingangsparameter für den Vergleich verschiedener Bohrungsniederbringungen 93
Tab. 18: Potenzielle lokale Umwelteffekte im Lebensweg einer geothermischen Stromerzeugung 109

Tab. A - 1: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strombereitstellung (Abb. 18) 176
Tab. A - 2: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung (Abb. 21) 176
Tab. A - 3: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Zukunftskonzepte (Abb. 22) 177

Tab. A - 4: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Anlagengrößen im Oberrheingraben (Abb. 23) 177

Tab. A - 5: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Stromerzeugung – Vergleich von Netto- und Bruttostrom-Bilanzierung (Abb. 26) 178

Tab. A - 6: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmeerzeugung – Vergleich von Netto- und Bruttostrom-Bilanzierung (Abb. 30) 179

Tab. A - 7: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Konversionsprozesse der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben und Süddeutschen Molassebecken (Abb. 31) 179

Tab. A - 8: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Kühlkreisläufe der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben (Abb. 32) 180

Tab. A - 9: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Kühlkreisläufe der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung im Oberrheingraben (Abb. 33) 180

Tab. A - 10: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Bohrungs-niederbringung der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben und Norddeutschen Becken (Abb. 35) 181

Tab. A - 11: Datenbasis zum Vergleich geothermischer und nicht-geothermischer Stromkonzepte (Abb. 37) 182

Tab. A - 12: Datenbasis zum Vergleich geothermischer und nicht-geothermischer Strom- und Wärmekonzepte (Abb. 38) 182

Tab. A -13: Schadensskala in Abhängigkeit der Bodenschwingungs-geschwindigkeit (/Drisch, Schürken 1995/) 184

Tab. A -14: Mögliche Additive wasser- bzw. ölbasischer Bohrspülungen (/Hatzsch 1991/, /Kaltschmitt et al. 1999/, /M-I Swaco 2007/, /Niedermeyer et al. 1992/) 187

Tab. A -15: Beispielhafte Zusammensetzung der in den untersuchten Referenzkonzepten eingesetzten Bohrspülungen (/M-I Swaco 2007/) 187

Tab. A -16: Vergleich zu erwartender Lärmwirkungen bei der Bohrungsniederbringung (/Kristmannsdóttir, Armannsson 2003/, /Kagel et al. 1995/, /Niedermeyer et al. 1992/) 194

Tab. A -17: Komponenten hoch-viskoser Frac-Fluide in der Erdöl- und Erdgasindustrie (/Niedermeyer et al. 1992/) 198

Tab. A -18: Gegenüberstellung der Europäischen Makroseismischen Skala-1998 (EMS-98) (/Grünthal 1998)/ und der Lokalmagnitude (Richter-Skala) (/Geothermal Explorers 2006/) 202

Tab. A -19: Grenzwerte gemäß RL 2006/44/EG 216

Tab. A -20: Spezifischer Wasserbedarf verschiedener Kühlsysteme (eigene Berechnungen) 217

Tab. A -21: Vergleich verschiedener Arbeitsmittel für binäre Kreisprozesse 220

Anhang

A.1 Datenbasis der Umwelteffekte im Lebensweg

A.1.1 Analyse der geothermischen Referenzkonzepte

Tab. A - 1: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strombereitstellung (Abb. 18)

	ORG 3MW	SDMB 3MW	NDB 1MW
Anlagenparameter	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5
Stromproduktion			
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.915	27.038	8.305
Stromeigenbedarf in MWh/a			
Konversionskreislauf	2.073	2.408	691
Kühlungskreislauf	6.654	8.479	2.218
Thermalwasserkreislauf	5.559	10.560	1.609
Netto-Strommenge	10.629	5.591	3.787
LCA-Ergebnisse			
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	0,4088	0,8268	1,2731
CO2-Äquivalent in t/MWh	0,0255	0,0542	0,0839
SO2-Äquivalent in kg/MWh	0,2061	0,4145	0,6689
PO34-Äquivalent in kg/MWh	0,0274	0,0530	0,0891
POCP-Äquivalent in kg/MWh	0,0132	0,0256	0,0432

Aquifer-Dublette mit ORC-Anlage (Nasskühlturm), ORG Oberrheingraben, SDMB Süddeutsches Molassebecken, NDB Norddeutsches Becken; Bilanzierung Netto-Strommenge

Tab. A - 2: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung (Abb. 21)

	ORG 3MW	SDMB 3MW	NDB 1MW
Anlagenparameter	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5
Stromproduktion			
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.167	25.858	8.056
Stromeigenbedarf in MWh/a			
Konversionskreislauf	1.814	1.970	605
Kühlungskreislauf	6.654	8.479	2.218
Thermalwasserkreislauf	5.559	10.560	1.609
Netto-Strommenge	10.140	4.849	3.624
LCA-Ergebnisse			
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	-5,2224	-20,4989	-4,3141
CO2-Äquivalent in t/MWh	-0,3201	-1,0097	-0,2347
SO2-Äquivalent in kg/MWh	-0,1228	-0,4348	0,1193
PO34-Äquivalent in kg/MWh	-0,0037	-0,0397	0,0214
POCP-Äquivalent in kg/MWh	-0,0275	-0,1050	-0,0128

Aquifer-Dublette mit ORC-Anlage (Nasskühlturm), ORG Oberrheingraben, SDMB Süddeutsches Molassebecken, NDB Norddeutsches Becken; Bilanzierung Netto-Strommenge

Tab. A - 3: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Zukunftskonzepte (Abb. 22)

	Aquifer-Dublette 3MW	HDR-Dublette 3MW	HDR-Triplette 5MW	UGW 700kW	Tiefe Sonde 75kW
Anlagenparameter	gem. Tab. 5	gem. Tab. 6	gem. Tab. 6	gem. Tab. 6	gem. Tab. 6
Stromproduktion					
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.915	26.250	43.750	563	5.119
Stromeigenbedarf in MWh/a					
Konversionskreislauf	2.073	1.811	3.018	39	388
Kühlungskreislauf	6.654	7.010	11.684	150	1.502
Thermalwasserkreislauf	5.559	3.727	5.098	0	0
Netto-Strommenge	10.629	13.703	23.951	373	3.229
LCA-Ergebnisse					
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	0,4088	0,3492	0,3092	1,4406	2,9887
CO2-Äquivalent in t/MWh	0,0255	0,0217	0,0192	0,1003	0,1806
SO2-Äquivalent in kg/MWh	0,2061	0,1762	0,1547	0,8030	1,4397
PO34-Äquivalent in kg/MWh	0,0274	0,0236	0,0205	0,1077	0,1920
POCP-Äquivalent in kg/MWh	0,0132	0,0113	0,0099	0,0519	0,0921

Geothermieanlagen im Oberrheingraben mit ORC-Anlage (Nasskühlturm); HDR Hot Dry Rock; UGW Untertage geschlossener Wärmetauscher; TES Tiefe Erdwärmesonde; Bilanzierung Netto-Strommenge

Tab. A - 4: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Anlagengrößen im Oberrheingraben (Abb. 23)

	Dublette 1MW	Dublette 3MW	Triplette 5MW
Anlagenparameter	gemäß Tab. 14	gemäß Tab. 14	gemäß Tab. 14
Stromproduktion			
Brutto-Strommenge in MWh/a	8.305	24.915	41.525
Stromeigenbedarf in MWh/a			
Konversionskreislauf	691	2.073	3.456
Kühlungskreislauf	2.218	6.654	11.089
Thermalwasserkreislauf	1.577	5.559	7.594
Netto-Strommenge	3.819	10.629	19.385
LCA-Ergebnisse			
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	0,6421	0,4088	0,3512
CO2-Äquivalent in t/MWh	0,0402	0,0255	0,0219
SO2-Äquivalent in kg/MWh	0,3252	0,2061	0,1749
PO34-Äquivalent in kg/MWh	0,0434	0,0274	0,0229
POCP-Äquivalent in kg/MWh	0,0208	0,0132	0,0111

Aquifer-Erschließung im Oberrheingraben mit ORC-Anlage (Nasskühlturm); Bilanzierung Netto-Strommenge

Tab. A - 5: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Stromerzeugung – Vergleich von Netto- und Bruttostrom-Bilanzierung (Abb. 26)

	ORG 3MW^{ne}	ORG 3MW^{br}	SDMB 3MW^{ne}	SDMB 3MW^{br}	NDB 1MW^{ne}	NDB 1MW^{br}
Anlagenparameter	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5
Stromproduktion						
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.915	24.915	27.038	27.038	8.305	8.305
Stromeigenbedarf in MWh/a						
Konversionskreislauf	2.073	2.073	2.408	2.408	691	691
Kühlungskreislauf	6.654	6.654	8.479	8.479	2.218	2.218
Thermalwasserkreislauf	5.559	5.559	10.560	10.560	1.609	1.609
Netto-Strommenge	10.629	10.629	5.591	5.591	3.787	3.787
LCA-Ergebnisse						
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	0,4088	5,7725	0,8268	7,9266	1,2731	5,8922
CO2-Äquivalent in t/MWh	0,0255	0,3967	0,0542	0,5457	0,0839	0,4044
SO2-Äquivalent in kg/MWh	0,2061	0,6545	0,4145	0,8744	0,6689	0,8425
PO34-Äquivalent in kg/MWh	0,0274	0,0573	0,0530	0,0743	0,0891	0,0839
POCP-Äquivalent in kg/MWh	0,0132	0,0309	0,0256	0,0405	0,0432	0,0437

Aquifer-Dublette mit ORC-Anlage (Nasskühlturm), ORG Oberrheingraben, SDMB Süddeutsches Molassebecken, NDB Norddeutsches Becken; ^{ne} Bilanzierung Netto-Strommenge, ^{br} Bilanzierung Brutto-Strommenge

Tab. A - 6: Datenbasis zur Lebensweganalyse der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmeerzeugung – Vergleich von Netto- und Bruttostrom-Bilanzierung (Abb. 30)

	ORG 3MW^{ne}	ORG 3MW^{br}	SDMB 3MW^{ne}	SDMB 3MW^{br}	NDB 1MW^{ne}	NDB 1MW^{br}
Anlagenparameter	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5	gem. Tab. 5
Stromproduktion						
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.167	24.167	25.858	25.858	8.056	8.056
Stromeigenbedarf in MWh/a						
Konversionskreislauf	1.814	1.814	1.970	1.970	605	605
Kühlungskreislauf	6.654	6.654	8.479	8.479	2.218	2.218
Thermalwasserkreislauf	5.559	5.559	10.560	10.560	1.609	1.609
Netto-Strommenge	10.140	10.140	4.849	4.849	3.624	3.624
LCA-Ergebnisse						
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	-5,2224	3,4749	-10,0000	4,0874	-4,3141	3,4302
CO2-Äquivalent in t/MWh	-0,3201	0,2562	-0,5000	0,3118	-0,2347	0,2646
SO2-Äquivalent in kg/MWh	-0,1228	0,5220	-0,7859	0,6554	0,1193	0,5973
PO34-Äquivalent in kg/MWh	-0,0037	0,0446	-0,0607	0,0532	0,0214	0,0534
POCP-Äquivalent in kg/MWh	-0,0275	0,0141	-0,0900	0,0121	-0,0128	0,0185

Aquifer-Dublette mit ORC-Anlage (Nasskühlturm), ORG Oberrheingraben, SDMB Süddeutsches Molassebecken, NDB Norddeutsches Becken; ^{ne} Bilanzierung Netto-Strommenge, ^{br} Bilanzierung Brutto-Strommenge

Tab. A - 7: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Konversionsprozesse der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben und Süddeutschen Molassebecken (Abb. 31)

	ORG 3MW ORC	ORG 3MW Kalina	SDMB 3MW ORC	SDMB 4MW Kalina
Anlagenparameter	gem. Tab. 5	gem.Tab. 15	gem. Tab. 5	gem.Tab. 15
Stromproduktion				
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.915	26.772	27.038	30.464
Stromeigenbedarf in MWh/a				
Konversionskreislauf	2.073	2.073	2.408	2.408
Kühlungskreislauf	6.654	7.627	8.479	10.268
Thermalwasserkreislauf	5.559	5.559	10.560	10.560
Netto-Strommenge	10.629	11.512	5.591	7.228
LCA-Ergebnisse				
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	0,4088	0,3888	0,8268	0,6986
CO2-Äquivalent in t/MWh	0,0255	0,0243	0,0542	0,0458
SO2-Äquivalent in kg/MWh	0,2061	0,1958	0,4145	0,3468
PO34-Äquivalent in kg/MWh	0,0274	0,0257	0,0530	0,0427
POCP-Äquivalent in kg/MWh	0,0132	0,0124	0,0256	0,0208

Aquifer-Dublette mit Konversionsanlage (Nasskühlturm), ORG Oberrheingraben, SDMB Süddeutsches Molassebecken; Bilanzierung Netto-Strommenge

Tab. A - 8: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Kühlkreisläufe der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben (Abb. 32)

	Durchlauf-kühlung	Nasskühlturm (zwangsbel.)	Hybridkühl-turm	Trocken-kondensator
Anlagenparameter Stromproduktion	gem.Tab. 16	gem.Tab. 16	gem.Tab. 16	gem.Tab. 16
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.915	24.915	23.707	22.500
Stromeigenbedarf in MWh/a				
Konversionskreislauf	2.073	2.073	2.073	2.423
Kühlungskreislauf	1.141	6.654	5.427	8.456
Thermalwasserkreislauf	5.559	5.559	5.559	5.559
Netto-Strommenge	16.142	10.629	10.648	6.061
LCA-Ergebnisse				
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	0,2664	0,4088	0,4091	0,6851
CO2-Äquivalent in t/MWh	0,0165	0,0255	0,0255	0,0424
SO2-Äquivalent in kg/MWh	0,1347	0,2061	0,2061	0,3465
PO34-Äquivalent in kg/MWh	0,0180	0,0274	0,0274	0,0462
POCP-Äquivalent in kg/MWh	0,0086	0,0132	0,0132	0,0222

Aquifer-Dublette im Oberrheingraben mit ORC-Anlage; Bilanzierung Netto-Strommenge

Tab. A - 9: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Kühlkreisläufe der untersuchten geothermischen Strom- und Wärmebereitstellung im Oberrheingraben (Abb. 33)

	Nasskühlturm (zwangsbel.)	Hybridkühlturm	Trocken-kondensator
Anlagenparameter Stromproduktion	gem.Tab. 16	gem.Tab. 16	gem.Tab. 16
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.167	22.494	22.481
Stromeigenbedarf in MWh/a			
Konversionskreislauf	1.814	1.814	1.814
Kühlungskreislauf	6.654	5.149	8.449
Thermalwasserkreislauf	5.559	5.559	5.559
Netto-Strommenge	10.140	9.972	6.658
LCA-Ergebnisse			
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	-5,2224	-5,3844	-7,7217
CO2-Äquivalent in t/MWh	-0,3201	-0,3301	-0,4734
SO2-Äquivalent in kg/MWh	-0,1228	-0,1269	-0,1815
PO34-Äquivalent in kg/MWh	-0,0037	-0,0038	-0,0055
POCP-Äquivalent in kg/MWh	-0,0275	-0,0284	-0,0407

Aquifer-Dublette im Oberrheingraben mit ORC-Anlage; Bilanzierung Netto-Strommenge

Tab. A - 10: Datenbasis zur Lebensweganalyse verschiedener Bohrungsniederbringung der untersuchten geothermischen Strombereitstellung im Oberrheingraben und Norddeutschen Becken (Abb. 35)

	saigere Dublette [a] ORG	abgel. Dublette [a] ORG	Strom geb. Dublette [b] ORG	saigere Dublette [a] NDB	abgel. Dublette [a] NDB	Strom geb. Dublette [b] NDB
Anlagenparameter	gem. Tab. 5	gem. Tab. 17	gem. Tab. 17	gem. Tab. 5	gem. Tab. 17	gem. Tab. 17
Stromproduktion						
Brutto-Strommenge in MWh/a	24.915	24.915	24.915	8.305	8.305	8.305
Stromeigenbedarf in MWh/a						
Konversionskreislauf	2.073	2.073	2.073	691	691	691
Kühlungskreislauf	6.654	6.654	6.654	2.218	2.218	2.218
Thermalwasserkreislauf	5.559	5.559	5.559	1.609	1.609	1.609
Netto-Strommenge	10.629	10.629	10.629	3.787	3.787	3.787
LCA-Ergebnisse						
Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	0,4088	0,4335	0,3809	1,2731	1,3425	1,1847
CO2-Äquivalent in t/MWh	0,0255	0,0269	0,0231	0,0839	0,0884	0,0763
SO2-Äquivalent in kg/MWh	0,2061	0,2196	0,0776	0,6689	0,7069	0,2573
PO34-Äquivalent in kg/MWh	0,0274	0,0295	0,0058	0,0891	0,0944	0,0199
POCP-Äquivalent in kg/MWh	0,0132	0,0141	0,0032	0,0432	0,0457	0,0113

Aquifer-Dublette mit ORC-Anlage (Nasskühlturm); ORG Oberrheingraben, NDB Norddeutsches Becken; Bilanzierung Netto-Strommenge; [a] Diesel gebohrt; [b] saigere Dublette

A.1.2 Vergleich der geothermischen und nicht-geothermischen Referenzkonzepte

Tab. A - 11: Datenbasis zum Vergleich geothermischer und nicht-geothermischer Stromkonzepte (Abb. 37)

	Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	CO2-Äquivalent in t/MWh	SO2-Äquivalent in kg/MWh	PO34-Äquivalent in kg/MWh	POCP-Äquivalent in kg/MWh
Biomasseverbrennung 20MW	0,324	0,041	1,014	0,161	0,080
Biomassevergasung 20MW	0,898	0,067	0,559	0,089	0,054
Biogas 500kW	2,123	-0,281	2,606	0,394	-0,055
Fotovoltaik 5kWp	2,213	0,124	0,635	0,041	0,080
Fotovoltaik 1MWp	1,649	0,090	0,519	0,031	0,057
Windkraft onshore 2,5MW	0,369	0,025	0,177	0,014	0,007
Windkraft onshore 5MW	0,184	0,012	0,088	0,007	0,003
Windkraft offshore 5MW	0,191	0,014	0,094	0,008	0,004
Wasserkraft 300kW	0,329	0,026	0,102	0,010	0,024
Wasserkraft 30MW	0,238	0,019	0,065	0,006	0,009
Geothermie ORG 3MW	0,409	0,025	0,206	0,027	0,013
Geothermie SDMB 3MW	0,827	0,054	0,414	0,053	0,026
Geothermie NDB 1MW	1,273	0,084	0,669	0,089	0,043
Erdgas 800MW	7,160	0,400	0,479	0,074	0,034
Steinkohle 800MW	8,704	0,843	1,292	0,110	0,054
Braunkohle 800MW	8,864	0,987	0,953	0,096	0,011

Technische Daten der geothermischen Referenzkonzepte gemäß Tab. 5; Technische Daten der nicht-geothermischen Referenzkonzepte gemäß Tab. 7; ORG Oberrheingraben; SDMB Süddeutsches Molassebecken; NDB Norddeutsches Becken; Bilanzierung Netto-Strommenge

Tab. A - 12: Datenbasis zum Vergleich geothermischer und nicht-geothermischer Strom- und Wärmekonzepte (Abb. 38)

	Verbrauch ersch. Energieträger in GJ/MWh	CO2-Äquivalent in t/MWh	SO2-Äquivalent in kg/MWh	PO34-Äquivalent in kg/MWh	POCP-Äquivalent in kg/MWh
Biomassevergasung 500kW	-5,280	-0,279	0,407	0,073	0,054
Biomasseverbrennung 5MW	-1,177	-0,039	0,894	0,139	0,071
Biogas-BHKW 500kW	-0,385	-0,441	2,473	0,381	-0,075
Geothermie ORG 3MW	-5,222	-0,320	-0,123	-0,004	-0,028
Geothermie SDMB 3MW	-20,499	-1,010	-0,435	-0,040	-0,105
Geothermie NDB 1MW	-4,314	-0,235	0,119	0,021	-0,013
Erdgas 500MW	5,146	0,287	0,347	0,054	0,025
Steinkohle 800MW	7,374	0,857	1,382	0,102	0,052
Braunkohle 800MW	7,708	1,075	0,990	0,086	-0,003

Technische Daten der geothermischen Referenzkonzepte gemäß Tab. 5; Technische Daten der nicht-geothermischen Referenzkonzepte gemäß Tab. 7; ORG Oberrheingraben; SDMB Süddeutsches Molassebecken; NDB Norddeutsches Becken; Bilanzierung Netto-Strommenge

A.2 Analyse der lokalen Umwelteffekte

Auf Basis von Fachliteratur und Expertenbefragungen (siehe Anhang A.3) lässt sich eine Vielzahl von lokalen Umwelteffekten identifizieren, die im Folgenden nach der in Abb. 40 dargestellten Methodik analysiert und bewertet werden:

- Entstehungswahrscheinlichkeit (Analyse der standortspezifischen und systemtechnischen Randbedingungen)
- Technische Vermeidungsmaßnahmen (Analyse des Standes der Technik)
- Analyse der zu erwartenden Umweltauswirkungen
- Analyse und Bewertung der gesetzlichen Regelung

Dabei werden die möglichen lokalen Umwelteffekte der verschiedenen Nutzungskonzepte (d. h. hydrothermale Systeme, HDR-Systeme, Tiefe Erdwärmesonde, untertägig geschlossener Wärmetauscher) den jeweiligen Projektphasen untertägiger bzw. obertägiger Bau, Betrieb und Rückbau zugeordnet. Zudem werden geothermiespezifische Umwelteffekte, die aufgrund ihrer Ursache bzw. ihres Umfangs ausschließlich geothermischen Projekten zuzuordnen sind, kenntlich gemacht.

A.2.1 Bau Untertage

A.2.1.1 Bodenerschütterung bei seismischer Vorerkundung

Entstehungswahrscheinlichkeit. Wie in Kapitel 2.2.1.2 kurz dargestellt, werden im Falle unzureichender geologischer Daten für alle Tiefbohrungen seismische Vorerkundungen durchgeführt. Für geothermische Tiefbohrungen werden dabei in der Regel auf der zu erkundenden Fläche in sog. Seismik-Linien künstliche, seismische Wellen mit Hilfe von Vibratoren von der Erdoberfläche aus in den Untergrund eingebracht. Die dabei auftretenden Maximalkräfte können zwischen ca. 70 und 200 kN (/DMT 2007c/) liegen, wodurch es im Normalfall zu einer Erschütterung bzw. Vibration des Bodens kommt. Je nach Größe des zu erkundenden Gebietes und die dadurch bedingte Länge und Anzahl der sog. Seismik-Linien kann die Beanspruchung drei bis vier Tage (2D-Seismik) bzw. zwei bis drei Wochen (3D-Seismik) dauern (/DMT 2007a/).

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Da die künstliche erzeugte Bodenerschütterung die technische Voraussetzung für eine seismische Vorerkundung ist, kann diese nicht vermieden werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Bodenerschütterungen können auf Bausubstanzen und Gebäude übertragen werden und in Abhängigkeit ihrer Intensität zu Gebäudeschäden führen (Tab. A -13). Dadurch bedingte Auswirkungen auf Mensch und Tier werden dagegen durch Schwingungsfrequenz und -beschleunigung bestimmt, wobei erst ab ca. 400 mm/s^2 und 6 Hz eine für den Menschen unangenehme, erschreckende und ab ca. 2.100 mm/s^2 und 10 Hz eine schädliche Wirkung zu erwarten ist (/Davenport 1972/). Außer geringer, reversibler Schäden an Bausubstanzen sind demnach keine negativen Umweltauswirkungen zu erwarten.

Tab. A -13: Schadensskala in Abhängigkeit der Bodenschwingungsgeschwindigkeit (/Drisch, Schürken 1995/)

Schwingungsgeschwindigkeit in mm/s	Schadenswirkung
< 5	Leichte Schäden sehr unwahrscheinlich (Erschütterung jedoch spürbar)
5 bis 10	Leichte Schäden unwahrscheinlich (Klirren von Fensterscheiben)
10 bis 20	Abblättern Kalkanstrich, dünne Putzrisse
20 bis 30	Abbröckeln von Putz, dünne Risse in Trennwänden
30 bis 50	Risse in Trennwänden
50 bis 100	Risse in Tragwänden
> 100	Einsturz von Wänden

Technische Minderungsmaßnahmen. Durch eine entsprechende Planung und technische Begleitung der seismischen Untersuchungen (z. B. werden bei der DMT standardmäßig begleitende Erschütterungsmessungen durchgeführt /DMT 2007b/) können ggf. für Bodenerschütterungen anfälligere Gebiete gemieden bzw. mit vorher festgelegten maximalen Immissionswerten untersucht werden. Kommt es dennoch zu Schäden der Bausubstanz, können diese in der Regel durch bauliche Maßnahmen ohne bleibende Schäden behoben werden.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Da es sich bei der seismischen Vorerkundung um ein in der Erdöl- und Erdgasindustrie bereits langjährig eingesetztes Explorationsverfahren handelt, liegen entsprechende Erfahrungswerte vor. Die seismische Vorerkundung ist daher Bestandteil des Bergrechts. Ursprünglich war dafür die Seismik-Bergverordnung (SeismikBergV) maßgeblich, die aufgrund der Vorerkundung mittels Sprengladungen in Bohrungen in allen Bundesländern erlassen wurde. Da dieses Verfahren gegenüber der vergleichsweise unbedenkli-

chen Vibrationsseismik in den letzten Jahren jedoch an Bedeutung verloren hat, wurde die Seismik-Bergverordnung in allen Bundesländern aufgehoben (z. B. /GEOTEC 2007/, /Bergamt M-V 2003/). Gegenwärtig ist dennoch ein Betriebsplan beim zuständigen Bergamt zuzulassen, welcher sich hinsichtlich der maximal zulässigen Belastung an der Norm für Erschütterungen im Bauwesen (DIN 4150) orientiert (z. B. /GEOTEC 2007/, /DMT 2007b/). Die genehmigungsrechtliche Erfassung der seismischen Vorerkundung wird daher als ausreichend berücksichtigt bewertet.

A.2.1.2 Umwelteffekte elektromagnetischer Vorerkundung

Beim Einsatz elektromagnetischer Vorerkundungsmaßnahmen sind aufgrund des Einsatzes natürlicher Quellen keine Umweltauswirkungen zu erwarten (/IGEM 2007/).

A.2.1.3 Stofflicher Eintrag (Bohrungsniederbringung, Untergrund, Tiefenwasser)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Der Bohrspülung kommt bei der Bohrungsniederbringung eine zentrale Rolle zu, da sie neben dem Austragen des Bohrkleins (vgl. Kapitel 2.2.1.2) für die Kühlung und Schmierung von Bohrwerkzeug und Bohrstrang sowie die Bohrlochabdichtung und -abstützung während des Bohrvorgangs von elementarer Bedeutung ist (z. B. /Hatzsch 1991/, /Kaltschmitt et al. 1999/). Dabei kommt es im Normalfall zu einem stofflichen Eintrag der Bohrspülung in den Bohrlochnahbereich und ggf. auch Wasser- bzw. Gas führende sowie stark zerklüftete Gesteinsschichten.

Zur Abstützung des Bohrlochs wird im Ringraum ein hoher Druck in der Bohrspülung eingestellt, um so das Bohrloch gegen den umliegenden Gebirgsdruck – vor Allem bei nicht standfesten Gesteinen – zu stabilisieren und das Bohrloch vor Gesteinsnachfall zu schützen (z. B. /Hatzsch 1991/, /Kaltschmitt et al. 1999/). Die Abdichtung des Bohrlochs erfolgt durch den Aufbau eines Filterkuchens an der Bohrlochwand aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Bohrspülung und Gestein. Durch diesen notwendigen stofflichen Eintrag der Bohrspülung in den Bohrlochnahbereich (in einer Größenordnung von mehreren cm /M-I Swaco 2007/ bis ca. 2 m /Kaltschmitt et al. 1999/) soll so zum einen das Einströmen von in der Tiefe gespeicherten Fluiden (d. h. Tiefenwasser, Gas) in die Bohrung vermieden und zum anderen der weitläufigere Austritt von Spülung in das umliegende Gestein verhindert werden (z. B. /Hatzsch 1991/, /Kaltschmitt et al. 1999/). Ist der Aufbau eines ausreichenden Filterkuchens aufgrund zu starker Zerklüftung wirtschaftlich nicht mehr vertretbar, muss in geologischen Ausnahmefällen (ggf. Störungszonen, Malmstrecken des Süddeutschen Molassebeckens, Buntsandstein und Muschelkalk des Norddeutschen Beckens) bohrabschnittsweise ohne zurückkehrende Spülung (d. h.

100 % Spülungsverlust) gebohrt werden; ein weiträumigerer Eintrag der Bohrspülung in den Untergrund ist dabei nicht zu vermeiden (/M-I Swaco 2007/). Eine mengenmäßige Aussage über die in Ausnahmefällen zu erwartenden Spülungsverluste ist nicht möglich, da diese ausschließlich an die lokalen, geologischen Randbedingungen im jeweiligen Bohrabschnitt geknüpft sind und diese meist erst beim Bohrvorgang selbst bestimmt werden können. Die Spülungsverluste liegen dabei in einem möglichen Bereich von 100 bis 10.000 m^3 je Bohrloch (/M-I Swaco 2007/). Beim Vordringen in den Förderhorizont hat weiterhin ein schonender Aufschluss (d. h. möglichst geringe bzw. reversible Zusetzung der natürlichen Lagerstättenfließwege) Vorrang vor einer Minimierung der Spülungsverluste durch Aufbau eines Filterkuchens und damit unvermeidbarer Zusetzung der Fließwege (z. B. /M-I Swaco 2007/, /Kaltschmitt et al. 1999/).

Um die o. g. Aufgaben in Abhängigkeit der spezifischen, geologischen Bedingungen (vor Allem Temperatur, lösliche Minerale) im jeweiligen Bohrabschnitt[9] erfüllen zu können, muss die Zusammensetzung der Bohrspülung genau auf die vorliegenden Randbedingungen abgestimmt sein. In den meisten Fällen kommen dabei aufgrund ihrer vielseitig beeinflussbaren Eigenschaften flüssige Spülungen – im Gegensatz zu gasförmigen, belüfteten oder schaumförmigen Spülungssystemen – zum Einsatz. Basierend auf Wasser oder Öl werden diesen Spülungen im jeweiligen Bohrabschnitt verschiedene Additive beigemischt (Tab. A -14).

Die dabei auftretenden Herausforderungen in Bezug auf eine optimale Zusammensetzung (d. h. Kompromisse zwischen Aufgaben und Eigenschaften /Hatzsch 1991/) sind generell mit denen der Erdöl- und Erdgaserschließung vergleichbar (d. h. nicht geothermiespezifisch) und lassen sich mit den dort eingesetzten Spülungsmittelzusätzen aufgrund längjähriger Erfahrung beherrschen (z. B. /M-I Swaco 2007/, /IDEAS 2006/, /Niedermeyer et al. 1992/). Unterschiede sind hier z. T. durch die höheren zu erschließenden Temperaturen und die vergleichsweise leichter mögliche Schädigung der Lagerstätte[10] gegeben (z. B. /IDEAS 2006/, /Kaltschmitt et al. 1999/).

[9] Die verschiedenen Bohrabschnitte gliedern sich an die Geologie (Druck, Salzgehalt), so dass gewährleistet ist, dass die Spülung auch optimal auf den jeweiligen Abschnitt eingestellt werden kann (/M-I Swaco 2007/, /IDEAS 2006/).

[10] Unter Schädigung der Lagerstätte ist dabei die Zusetzung der natürlichen Lagerstättenfließwege und auch der Eintrag Bakterien fördender Stoffe durch die Bohrspülung zu verstehen; bei geothermischen Reservoiren kann dies aufgrund der in der Regel geringeren Mächtigkeit der Lagerstätte und die meist höheren, notwendigen Fließraten zu deutlichen, systemtechnischen Probleme führen.

Tab. A -14: Mögliche Additive wasser- bzw. ölbasischer Bohrspülungen (/Hatzsch 1991/, /Kaltschmitt et al. 1999/, /M-I Swaco 2007/, /Niedermeyer et al. 1992/)

Additiv-Wirkung	Additive
Verbesserung Bohrkleintransport	Tone (z. B. Bentonit), Polymere (natürlich, halb- und synthetische), Stärke, Stärkederivate, Celluloseäther (z. B. CMC, CMHEC),..
Erhöhung Bohrlochstabilität	Beschwerungsmittel (z. B. Schwerspat, Kalk, Kreide)
Verstärkung Filterkuchenaufbau	Tone (z. B. Bentonit), Stärke, Stärkederivate, Celluloseäther (z. B. CMC, CMHEC), Spülungsverlustmaterialien (z. B. Nuss-, Muschelschalen, Kreide, Cellophane, Holzspäne, …)
Erhöhung Stabilität Spülungszusammensetzung	Polymere (natürlich, halb- und synthetische), Biozide, Aufsalzungsmittel (z. B. Salz), …
Sonstiges	Korrosionsinhibitoren, pH-Wert-Regulatoren, Entschäumer, Schmiermittel,…

Eine Beispielhafte Zusammensetzung der in den untersuchten Referenzkonzepten eingesetzten Bohrspülungen zeigt Tab. A -15.

Tab. A -15: Beispielhafte Zusammensetzung der in den untersuchten Referenzkonzepten eingesetzten Bohrspülungen (/M-I Swaco 2007/)

	Dublette Oberrheingraben	Dublette Süddeutsches Molassebecken	Dublette Norddeutsches Becken
Reservoirparameter	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5	gemäß Tab. 5
Bentonit in %m	16	25	
Stärke/Cellulose in %m	32	11	6
Kreide in %m	14	10	3
Inhibitor in %m	19	33	2
Salz in %m			4
Schwerspat in %m			53
Kleinmengen in %m	19	23	19

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Der Eintrag von Bohrspülung in den Bohrlochnahbereich ist für einen funktionellen Einsatz der Bohrspülung notwendig und demnach nicht zu verhindern. Im Falle von z. B. Störungszonen oder dem Aufschluss des Zielhorizonts ist die Vermeidung eines weiträumigeren stofflichen Eintrags grundsätzlich technisch möglich, wird aber in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen bzw. aufgrund von Zielkonflikten bei einer schonen-

den Speicherschichterschließung z. T. als nachgeordnete Priorität verstanden. Der Eintrag von Bohrspülung in bereits niedergebrachte Bohrabschnitte (z. B. Grundwasser führende Schichten), kann gemäß dem Stand der Technik durch das Absperren (d. h. unmittelbares Verrohren und Zementieren) nach Fertigstellung eines Abschnitts ausgeschlossen werden (z. B. /IDEAS 2006/).

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Durch einen stofflichen Eintrag in den Untergrund kann es grundsätzlich zu Einwirkungen auf dort angesiedelte Mikroorganismen kommen. Aufgrund der großen Tiefe und der damit auszuschließenden Verbindung zur Biosphäre sind gegenwärtig keine negativen Auswirkung auf die Umwelt dadurch bekannt (z. B. /GTN 2007/, /Kohl 2005/). Allerdings kann es zu anlagentechnische Probleme durch eine bakterielle Verschmutzung der Bohrspülung kommen (z. B. /M-I Swaco 2007/). Durch den Eintrag von Bohrspülung kann es im bohrlochnahen Bereich grundsätzlich zu einer Veränderung der Bodenmatrix kommen, die jedoch aufgrund des wenigen davon betroffenen Bodenmaterials und der lokalen Begrenztheit als gering einzustufen ist (z. B. /M-I Swaco 2007/, /Kaltschmitt et al. 1999/). Die Auswirkung größerer Spülungsverluste ist dagegen schwerer zu bewerten, da über den Verbleib der „verlorenen“ Bohrspülung keine genauen Aussagen getroffen werden können (z. B. Abfließen der Bohrspülung auf vielen verschiedenen Fließwegen oder Sammlung der Bohrspülung an einem Punkt im Untergrund /Niedermeyer et al. 1992/). Bei großen Spülungsverlustmengen ist jedoch aus umwelttechnischen und auch wirtschaftlichen Gründen davon auszugehen, dass möglichst unbedenkliche und kostengünstige Spülungskomponenten zum Einsatz kommen, wodurch gegenwärtig zumindest der größere Eintrag ölbasischer Spülungen, von welchen das größte Umweltgefährdungspotenzial ausgeht, ausgeschlossen werden kann (/M-I Swaco 2007/).

Technische Minderungsmaßnahmen. In Abhängigkeit der jeweils zu erwartenden Bohrspülungsverluste bzw. zu durchteufenden Speicherschichten kann eine umwelt-unbedenkliche Spülungszusammensetzung gewählt werden. Für die Zukunft ist dabei aufgrund laufender Forschungsaktivitäten der Bohrspülungsindustrie eine noch größere Bandbreite an effektiven, aber dennoch umweltfreundlichen Spülungszusätzen zu erwarten (/M-I Swaco 2007/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Aufgrund der tragenden Funktion der Bohrspülung für eine effiziente, aber vor Allem auch technisch sichere Bohrungsniederbringung sowie deren Umweltwirkungspotenzial ist die Zulassung der Bohrspülung Teil des bergrechtlichen Betriebsplanes für die Bohrungsniederbringung (z. B. /IDEAS 2006/, /M-I Swaco 2007/). Dabei muss die genaue Zusammensetzung der Bohrspülung im jeweiligen Bohrabschnitt zusammen

mit den technischen Datenblättern der eingesetzten Stoffe der zuständigen Bergbehörde zur Genehmigung vorgelegt werden. Der Einsatz ölbasischer Spülungen im Grundwasserbereich ist dabei z. B. nicht genehmigungsfähig. Für den Bohrvorgang selbst sind zudem die technischen Standards für eine weitestgehende Vermeidung des Bohrspülungseintrags zu beachten; z. B. muss nach dem Aufschluss eines grundwassernahen Bohrabschnitts dieser unmittelbar abgesperrt werden (s. o) (z. B. § 19 Abs. 5 und § 29 BVOT NS, § 49 Abs. 5 und § 64 TGBPVO BW, § 20 BayBergV). Vor diesem Hintergrund ist der stoffliche Eintrag durch die Bohrspülung ausreichend gesetzlich geregelt.

A.2.1.4 Stofflicher Eintrag (Bohrungsniederbringung, Boden, Grundwasser)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Während der Bohrungsniederbringung werden verschiedene Stoffe und Betriebsmittel (z. B. Bohrspülung, Kraftstoff, Schmier- und Kühlmittel) auf dem Bohrplatz eingesetzt und zusammen mit anfallenden Rest- und Abfallstoffen (z. B. Bohrklein, Thermalwasser aus hydraulischen Tests) vorübergehend gelagert (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/). Dabei kann es im Falle unsachgemäßer Handhabung (d. h. Störfall) zu einem stofflichen Eintrag der eingesetzten bzw. gelagerten Stoffe in den Boden (und daraufhin ggf. das Grundwasser) kommen.

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Durch eine sachgerechte Lagerung von Gefahrstoffen sowie die Versiegelung des Bohrplatzes für die Zeit des Bohrbetriebs ist der stoffliche Eintrag in den Boden und ggf. das Grundwasser technisch vermeidbar und auf ein anlagentechnisch bedingtes Restrisiko zu minimieren.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Kommt es dennoch zu einem Schadstoffeintrag kann es dadurch zu umweltschädlichen Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung des Bodens und des Grundwassers kommen, die auch über den Bohrbetrieb hinaus die Umwelt lokal beeinträchtigen können (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/).

Technische Minderungsmaßnahmen. Ist der Boden durch stofflichen Eintrag chemisch belastet, muss gemäß Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) die Ausbreitung der Schadstoffe verhindert und der Boden durch entsprechende Sanierungsmaßnahmen (d. h. in- oder ex-situ Verfahren bei Böden und passive oder aktive Verfahren bei Grundwasser) wieder nutzbar gemacht werden.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Aufgrund der wichtigen, zu schützenden Bodenfunktionen sehen die bergrechtlichen Verordnungen u. a. eine den jeweiligen Gefahrgütern entsprechende Bohrplatzvorbereitung bzw. -einrichtung vor, die durch das Bergamt abgenommen

werden muss. Zudem sind alle auf dem Bohrplatz verwendeten Einsatzstoffe gemäß Richtlinie 2001/58/EG mit technischen Datenblättern zu belegen und deren sachgerechte Handhabung bzw. Lagerung sicher zu stellen (z. B. /M-I Swaco 2007/, /GTN 2007/). Der stoffliche Eintrag in Böden und Grundwasser wird demnach ausreichend gesetzlich geregelt.

A.2.1.5 Stofflicher Eintrag (Bohrungsniederbringung, Luft)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Bei der Niederbringung von Tiefbohrungen – vor Allem in die für HDR-Konzepte relevanten Tiefen – werden ggf. Gesteinsschichten mit Gas führenden Fluiden durchteuft. In Abhängigkeit der Druckbedingungen der Gasphase besteht dabei die Möglichkeit, dass Gasbestandteile in der Bohrspülung gelöst und bei der Aufbereitung der Bohrspülung Übertage freigesetzt werden. Umweltrelevante Gase könne dabei H_2, CH_4, CO_2, H_2S und Rn sein. (/Niedermeyer et al. 1992/)

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Wird die Bohrspülung über Gasabscheider geführt, kann die Freisetzung von Gasen vermieden werden (z. B. /M-I Swaco 2007/).

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Aufgrund der Verdünnung der gelösten Gase entweder durch die Bohrspülung selbst oder im Falle von Radon durch den ersten Luftkontakt in der übertägigen Aufbereitung sind keine gefährlichen Schadstoffkonzentrationen für die Umwelt und das Bohrplatz-Personal zu befürchten (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/, /GTN 2007/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Aus Gründen der Betriebssicherheit im Bohrspülungskreislauf wird der Einsatz von Gasabscheidern in den bergrechtlichen Verordnungen vorgeschrieben (z. B. § 22, Abs. 4 BVOT NS, § 52, Abs. 4 TGBPVO BW, Anlage 1, Nr. 5.4 BayBergV). Die gesetzliche Regelung wird daher als ausreichend angesehen.

A.2.1.6 Thermischer Eintrag (Bohrungsniederbringung, Luft, Grund- und Oberflächenwasser)

Bei der Zirkulation der Bohrspülung erwärmt sich diese im Normalfall im Untergrund, so dass die austretende Spülung Temperaturen von 60 bis 80 °C erreichen kann (z. B. /M-I Swaco 2007/, /Niedermeyer et al. 1992/). Ggf. muss für einen effektiven Einsatz der Bohrspülung diese Übertage in Kühlbecken oder anderen Kühlaggregaten gekühlt werden (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/, /Niedermeyer et al. 1992/), wodurch es zu einem Wärmeeintrag in die Luft oder ggf. Grund- und Oberflächenwasser kommen kann. Die dabei kurzzeitig erforderlichen Kühlmengen sind hinsichtlich ihrer Umweltauswirkung vernachlässigbar (/Niedermeyer et al. 1992/) und werden im Weiteren daher nicht tiefer gehend analysiert.

A.2.1.7 Hydraulischer Kurzschluss (Bohrungsniederbringung)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Bei der Bohrungsniederbringung müssen ggf. nutzbare Wasserstockwerke (z. B. Grundwasser führende Gesteinsschichten in den oberflächennahen Bohrabschnitten) durchteuft werden, wobei es grundsätzlich zu einem hydraulischen Kurzschluss zwischen verschiedenen Grundwasserleitern und damit zur weiter reichenden Vermischung von Grundwässern unterschiedlicher Qualitäten kommen kann (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/).

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Um einen hydraulischen Kurzschluss zu vermeiden, müssen die zu schützenden Gesteinsschichten abgesperrt, d. h. unmittelbar nach Fertigstellung des entsprechenden Bohrabschnitts verrohrt und zementiert werden (vgl. Anhang A.2.1.3).

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Im Falle eines hydraulischen Kurzschlusses verschiedener Grundwasserleiter kann die Vermischung von Grundwässern unterschiedlicher Qualität ggf. zu einer starken Beeinträchtigung der Grundwasserleiter und die sich daran anschließenden Schutzgüter (vor Allem Vegetation und Tierwelt) führen.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Um einen hydraulischen Kurzschluss auszuschließen, müssen nutzbare Wasserstockwerke gemäß der bergrechtlichen Verordnungen entsprechend abgesperrt werden (vgl. Anhang A.2.1.3). Das Auftreten eines hydraulischen Kurzschlusses ist somit ausreichend gesetzlich geregelt.

A.2.1.8 Bohrlochausbruch (Blow-Out, Bohrungsniederbringung)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Werden vorgespannte, d. h. unter Druck stehende, Wasser bzw. Gas oder Öl führende Gesteinsschichten durchteuft, kann es in Abhängigkeit des vorliegenden Druckunterschiedes zu einem unkontrollierten Ausbruch des Bohrlochs (Blow-Out) kommen. In Abhängigkeit des Druckunterschiedes und der Mächtigkeit des vorgespannten Leiters tritt dabei so lange Wasser bzw. Gas oder Öl aus der Bohrung aus, bis der Druckausgleich hergestellt ist (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/).

Technische Vermeidungs- bzw. Minderungsmaßnahmen. Durch Absperreinrichtungen am Bohrlochkopf (sog. Blow-Out-Preventer) kann in jedem Bohrabschnitt im Falle eines Ausbruchs der Vollabschluss des Bohrlochs und des Ringraums gewährleistet und so ein kontrollierter Druckabbau ermöglicht werden. Ein Bohrlochausbruch ist gemäß dem gegenwärtigen Stand der Technik demnach beherrschbar und auf ein anlagentechnisch bedingtes Restrisiko reduzierbar (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/).

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Durch einen Bohrlochausbruch kann es zum stofflichen Eintrag des austretenden Fluids kommen. Die jeweiligen Mengen stehen dabei vorwiegend in Abhängigkeit zum vorliegenden Überdruck in der Fluid führenden Gesteinsschicht (z. B. /IDEAS 2006/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Die Verwendung von Blow-Out-Preventern ist in den bergrechtlichen Verordnungen für die Niederbringung von Tiefbohrungen vorgeschrieben (z. B. § 20, Abs. 1 BVOT NS, § 50, Abs. 1 TGBPVO BW, Anlage 1, Nr. 3.1 BayBergV). Die Vermeidung eines Bohrlochausbruchs wird durch entsprechende Vorschriften daher ausreichend gesetzliche geregelt.

A.2.1.9 Induzierung mikroseismischer Ereignisse (Bohrungsniederbringung)

Unter induzierten mikroseimsichen Ereignissen werden im Weiteren Erderschütterungen verstanden, die nicht auf natürliche Weise, sondern durch den Menschen ausgelöst werden. Dies ist z. B. der Fall, wenn durch einen (plötzlichen) Spannungsauf- bzw. -abbau im Untergrund mikroseismische Ereignisse künstlich ausgelöst werden und sich über die umliegenden Gesteinsschichten bis zur Erdoberfläche hin ausbreiten. Die durch den Bohrvorgang ggf. bewirkten Änderungen des Spannungsfeldes im Untergrund sind unter den in Deutschland vorliegenden geologischen Bedingungen in der Regel jedoch so gering, dass sie an der Erdoberfläche nicht fühlbar sind (z. B. /GTN 2007/, /GGA 2007a/). Die Induzierung mikroseismischer Ereignisse durch den reinen Bohrbetrieb ist daher vernachlässigbar und wird im Weiteren nicht tiefer gehend analysiert.

A.2.1.10 Wasserbedarf (Bohrungsniederbringung)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Für den Bohrvorgang wird vor Allem für die Zusammensetzung der Bohrspülung Wasser benötigt, welches in vielen Fällen aus Grundwasserbrunnen am Bohrungsstandort entnommen wird (z. B. /GTN 2007/). In Abhängigkeit des Bohrlochvolumens und der geologischen Randbedingungen kann der Wasserbedarf unter Voraussetzung durchschnittlicher Spülungsverluste zwischen ca. 1.000 bis 4.000 m^3 je Tiefbohrung liegen (/M-I Swaco 2007/). In geologischen Ausnahmefällen sind auch höhere Verbrauchsraten bis zu 10.000 m^3 möglich (vgl. Anhang A.2.1.3).

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Der Verbrauch von Wasser für den Bohrungsvorgang kann in der Regel nur durch den Einsatz von Lufthebeverfahren vermieden werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Der Verbrauch von Wasser setzt eine mengenmäßige Einflussnahme auf Grund- und Oberflächenwasser dar. Die für den Bohrvorgang über einen begrenzten Zeitraum benötigten Wassermengen sind dabei mit denen in der Landwirtschaft jährlich eingesetzten Wassermengen vergleichbar (z. B. /StaNord 2004/), welche nur 0,1 % des nutzbaren Wasserdargebots in Deutschland darstellen (/BMU 2006/). Negative Umweltauswirkungen sind daher nicht zu erwarten. In Ausnahmefällen (z. B. Bohrarbeiten während arider Sommermonate) muss jedoch eine Einzelfallprüfung zur abschließenden Bewertung herangezogen werden.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Die Entnahme von Wasser bedarf gemäß Wasserhaushaltsgesetz (vgl. Kapitel 3.2.3) einer wasserrechtlichen Erlaubnis. Um ein Erreichen der europäischen Wasserrahmenrichtlinien (RL 2000/60/EG) zu gewährleisten und die Gewässer in Deutschland in einen „guten ökologischen" Zustand zu bringen bzw. zu halten (/BMU 2005/) wird dabei eine integrierte Planung und Bewirtschaftung von Wasserressourcen angewandt (/BMU 2006/). Die gesetzliche Regelung in Bezug auf die Wasserentnahme wird als ausreichend bewertet.

A.2.1.11 Aushub von Bodenmaterial und Bodenverdichtung (Bohrungsniederbringung)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Bei der Herstellung des Bohrplatzes sowie durch den Einsatz schwerer Maschinen kommt es auf einer Fläche von etwa 2.000 m^2 (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/, /Siebertz et al. 1998/) in der Regel zur Bodenverdichtung. Für die Vorbereitung des Bohrplatzes ist zudem der Aushub einer ca. 30 cm dicken Erdschicht notwendig (/Kaltschmitt et al. 1999/). Mit der Bohrungsniederbringung ist ebenfalls ein Aushub von Bodenmaterial verbunden. Je nach Bohrlochvolumen fällt bei den geothermischen Referenzkonzepten zwischen 360 bis 1.200 m^3 Bohrlochaushub an (/M-I Swaco 2007/).

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Die Vermeidung von sowohl Bodenverdichtung als auch -aushub ist nur durch eine Verringerung der Bohrplatzgrundfläche sowie des Bohrlochvolumens möglich.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die Bodenverdichtung verringert den Porenraum zwischen den Bodenpartikeln und damit verbunden auch (einen Teil) seiner Absorptionsfähigkeit. Da sich besonders in tieferen Bodenschichten die Verdichtung nur schwer rückgängig machen lässt, wird die Bodenverdichtung auch als schleichende Bodenversiegelung bezeichnet (/UBA 2004/). Der Aushub wird zu einem Verlust von Bodenflora und -fauna, wenn das ausgehobene Material nicht wieder nutzbar gemacht werde kann.

Technische Minderungsmaßnahmen. Durch eine angepasste Bodenbearbeitung (z. B. Verfahren und Zeitpunkt der Bearbeitung) kann den Folgen einer Bodenverdichtung vorgebeugt werden (/UBA 2004/). Der Verlust von Bodenmaterial kann im Falle der Bohrplatzvorbereitung durch entsprechende Zwischenlagerung des Bodenmaterials und spätere Rekultivierung verringert werden. Der durch den Bohrplatz bzw. die Bohrung beanspruchte Boden ist jedoch lokal begrenzt, so dass keine maßgeblichen Umweltauswirkungen zu erwarten sind.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Gemäß den bergrechtlichen Landes-Verordnungen haben z. B. der Auf- und Abbau sowie das Umsetzen von Bohrgerüsten, von denen die größte Belastung ausgeht, nach den anerkannten Regeln der Bautechnik zu erfolgen (z. B. § 16, Abs. 1 BVOT NS, § 43, Abs. 1 TGBPVO BW). Einige Verordnungen sehen dabei auch explizit den Schutz des Mutterbodens vor (z. B. §31 BVOT HH). Der Boden ist dabei so zu behandeln, dass er nutzbar bleibt. Die gesetzliche Regelung wird daher als ausreichend eingestuft.

A.2.1.12 Lärmwirkung (Bohrungsniederbringung)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Der Betrieb der Bohranlage (in der Regel durch diesel- bzw. diesel-elektrisch betriebene Generatoren) sowie der notwendigen Zusatzaggregate (z. B. Spülungspumpen), aber auch der Baustellenbetrieb (z. B. Pipe-Handling) ist mit der Emission von Lärm über einen Zeitraum von mehreren Monaten verbunden (Tab. A -16). Welche Lärmimmissionen letztendlich von Mensch und Tier wahrgenommen werden, resultiert aus der Distanz zum Emittenten sowie der Frequenz des emittierten Lärms. Der Lärmpegel nimmt dabei mit zunehmender Distanz ab, wobei hochfrequenter Lärm (z. B. Pipe-Handling) eine größere Reichweite hat als Niederfrequenter (z. B. Bohrvorgang). Zudem wird die Lärmwirkung entscheidend durch die topographischen Randbedingungen am Anlagenstandort sowie meteorologische Gegebenheiten beeinflusst (z. B. TA Lärm).

Tab. A -16: Vergleich zu erwartender Lärmwirkungen bei der Bohrungsniederbringung (/Kristmannsdóttir, Armannsson 2003/, /Kagel et al. 1995/, /Niedermeyer et al. 1992/)

Vorgang	Lärmpegel in dB(A)
Bohren (Luftspülung) [a]	85 [c] -125
Bohrung mit (Flüssigspülung) [b]	75 - 80
Produktionstests [b]	70 - 110
Bauarbeiten mit Schwermaschinen [b]	< 90

[a] Entfernung 7,5 m, [b] Entfernung 15 m, [c] mit Schalldämpfung

Technische Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen. Wenn installierbar, kann durch Schalldämpfer oder Einhausung die Lärmwirkung bereits am Emittenten vermieden bzw. gemindert werden. Zudem ist die Errichtung von Schallschutzwänden oder ggf. die Nachrüstung von Schallschutzfenstern bei Bohrarbeiten in der Nähe von Siedlungsräumen möglich.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Durch Lärmimmissionen können in Abhängigkeit der Intensität Menschen und vor Allem auch Tiere beeinträchtigt werden.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Im Rahmen des Hauptbetriebsplans ist eine Immissionsprognose vorzulegen, in der nachzuweisen ist, dass Immissionsrichtwerte, welche sich an der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm) orientieren, eingehalten werden können (z. B. /FGT 2007/). Vor Allem bei Geothermieprojekten, die aufgrund zusätzlicher Wärmebereitstellung aus wirtschaftlichen Gründen an die Nähe zu entsprechenden Wärmeabnehmern gebunden sind, sind die angegebenen Grenzwerte nur mit organisatorischen und technischen Maßnahmen (s. o.) einzuhalten.

A.2.1.13 Anfall von Rest- und Abfallstoffen

Entstehungswahrscheinlichkeit. Bei Niederbringung und Ausbau von Tiefenbohrungen fallen verschiedene Rest- und Abfallstoffe an, die zunächst auf dem Bohrplatz sachgemäß gelagert (vgl. Anhang A.2.1.4) und anschließend entsprechend entsorgt, d. h. verwertet bzw. beseitigt, werden müssen. Neben maschinentechnischen Teilen (z. B. abgenutzte Bohrmeißel) fällt dabei Bohrspülung und vor Allem Bohrklein an. Das Bohrklein wird beim Austrag aus der Bohrung durch chemische, mechanische und physikalische Maßnahmen (z. B. Flockungsmittel, Siebe, Fliehkraftfilter) von der Bohrspülung getrennt, welche dadurch im Kreislauf gefahren werden kann (z. B. /M-I Swaco 2007/, /Kaltschmitt et al. 1999/).

Bei den untersuchten Referenzkonzepten ist damit ein Anfall entsprechender Reststoffe im Oberrheingraben von ca. 1.700 t, im Süddeutschen Molassebecken von 2.400 t und im Norddeutschen Becken von etwa 2.700 t verbunden (/M-I Swaco 2007/, Zusammensetzung der Bohrspülung gemäß Tab. A -15).

Technische Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen. Der Anfall von Abfallstoffen kann durch eine entsprechende Material- und Entsorgungswegplanung vermieden werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Sind Rest- und Abfallstoffe wieder verwendbar bzw. verwertbar, müssen entsprechende Entsorgungswege geplant werden. Bei Stoffen, die keiner

weiteren Nutzung zugeführt werden können (vor Allem Bohrklein und ggf. Bohrspülung), muss die Inanspruchnahme von Deponiefläche berücksichtigt werden.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Für alle Rest- und Abfallstoffe ist gemäß § 55 Abs. 1 Nr. 6 BBergG im Rahmen des Hauptbetriebsplans oder ggf. in einem Sonderbetriebsplan der zuständigen Bergbehörde eine Darstellung aller Entsorgungswege vorzulegen (z. B. §32 BVOT HH, /BGR 2006/). Gemäß §2 Abs. 2 Nr. 4 KrW-/AbfG sind „Abfälle, die beim Aufsuchen, Gewinnen, Aufbereiten und Weiterverarbeiten von Bodenschätzen in den der Bergaufsicht unterstehenden Betrieben anfallen, ausgenommen Abfälle, die nicht unmittelbar und nicht üblicherweise anfallen“ (d. h. bergbautypische Abfälle) vom Geltungsbereich des Gesetztes ausgenommen. Bohrklein und ggf. auch Bohrspülung müssen z. B. gemäß dem jeweils zutreffenden Abfallschlüssel auf entsprechende Deponien verbracht werden. Gemäß Abfallverzeichnisverordnung (AVV) werden Bohrschlämme und Bohrklein verschiedener Zusammensetzungen explizit ausgewiesen. Dabei werden gefährliche und gesondert zu deponierende Bohrschlämme (z. B. ölhaltige Bohrschlämme) und ungefährliche Bohrschlämme (z. B. baryt- oder chloridhaltige Bohrschlämme, Schlämme aus Süßwasserbohrungen) unterschieden. Die gesetzliche Regelung ist daher ausreichend.

A.2.1.14 Flächeninanspruchnahme (Bohrungsniederbringung)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Eine sachgerechte Bohrungsniederbringung ist mit der Herstellung eines entsprechenden Bohrplatzes und der Inanspruchnahme der dafür notwendigen Fläche von ca. 2.000 m^2 für einen begrenzten Zeitraum verbunden (vgl. Aushub von Bodenmaterial und Bodenverdichtung).

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Unter Umständen kann die Inanspruchnahme einer Fläche für die Bohrungsniederbringung durch eine optimierte Bohrplatzbelegung minimiert werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die vorübergehende Inanspruchnahme einer Fläche ist mit der Umwandlung der natürlichen Flächennutzung und eine Veränderung der Raumordnung verbunden.

Technische Minderungsmaßnahmen. Da die Flächeninanspruchnahme für die Bohrungsniederbringung zeitlich begrenzt ist, kann die genutzte Fläche nach Beendigung der Bohrarbeiten rekultiviert werden. Ist dies nicht möglich, sind entsprechende Ersatzmaßnahmen (z. B. Ersatzaufforstung) zur Herstellung einer äquivalenten Fläche denkbar.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Nach Ende der Bohrarbeiten muss die in Anspruch genommene Fläche gemäß § 39 Abs. 3 BBergG unter persönlichen und öffentlichen Sicherheitsaspekten wieder nutzbar gemacht werden, sofern die Fläche keiner anderen Nutzung (z. B. die Fläche, die nach Abschluss der Bohrarbeiten für den Anlagenbetrieb noch benötigt wird) zugeführt wird. Ist eine Wiedernutzbarmachung so nicht möglich, z. B. bei der Errichtung von Bohrplätzen auf Waldflächen, muss eine Ersatzkultivierung vorgenommen werden, wie z. B. beim Geothermieprojekt des GeoForschungsZentrums Potsdam in Groß Schönebeck, wo aufgrund des Wald- und Forstrechts entsprechende Ersatzaufforstungen vorgenommen werden mussten (/Coder 2008/). Zudem ist in diesem Zusammenhang auch das Raumordnungsgesetz (ROG) zu nennen, welches zum Ziel hat, die unterschiedlichen Anforderungen einer nachhaltigen Raumentwicklung (u. a. auch Flächeninanspruchnahme und -umwandlung) mit sozialen und wirtschaftlichen Ansprüchen sowie der Erhaltung ökologischer Funktionen auf Planungsebene abzustimmen (vgl. Kapitel 3.2.6.2). Vor diesem Hintergrund wird die durch die Bohrungsniederbringung vorübergehend bedingte Flächeninanspruchnahme als gesetzlich ausreichend geregelt bewertet.

A.2.1.15 Visuelle Beeinträchtigung (Bohrungsniederbringung)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Die Bohranlage kann aufgrund der Höhe des Bohrturms sowie der nächtlichen Beleuchtung zu einer visuellen Beeinträchtigung führen. Der Standort geothermischer Anlagen – und damit verbunden der Bohranlage – ist direkt an die Verfügbarkeit geeigneter geologischer Bedingungen geknüpft und somit nicht frei wählbar. Zudem spielt im Falle einer zusätzlichen Wärmebereitstellung die Nähe zu entsprechenden Abnehmern eine wirtschaftlich wichtige Rolle. Dadurch kann es auch zu einer direkten visuellen Beeinträchtigung in Bevölkerungsnähe kommen. Diese Beeinträchtigung ist jedoch auf die Monate der Bohrphase begrenzt.

Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen. Da sich die visuelle Beeinträchtigung auf einen begrenzten Zeitraum bezieht und aufgrund technisch notwendiger Anlagen (vor Allem Bohrturm) gegeben ist, werden Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen aufgrund fehlender Relevanz an dieser Stelle nicht diskutiert.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die vorübergehende Störung des Landschaftsbildes kann den (persönlichen) Erholungswert von Menschen herabsetzen.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Eine objektive Regelung der visuellen Beeinträchtigung wird durch das Raumordnungsgesetz (ROG) vorgenommen (vgl. Kapitel 3.2.6.2).

Durch eine entsprechende Information und Einbeziehung der Öffentlichkeit kann die Sichtbarkeit des Bohrplatzes sogar zu einem positiven Anziehungspunkt werden. Die visuelle Beeinträchtigung wird gesetzliche ausreichend geregelt.

A.2.1.16 Stofflicher Eintrag (Stimulation, Untergrund, Tiefenwasser)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Wie in Kapitel 2.2.1.2 dargestellt, erfolgt bei der hydraulischen Rissbildung (sog. **Hydraulic Fracturing**) die Stimulation durch das Verpressen von Fluiden mit hohem Druck in den Förderhorizont und führt damit zu einem stofflichen Eintrag in den Untergrund und ggf. Tiefenwässer. Die für die Stimulation von Sedimentgestein (i. d. R. Aquifer-Nutzung) eingesetzten hochviskosen Fluide basieren auf den langjährigen Erfahrungen aus der Erdöl- und Erdgasindustrie (z. B. /Legarth 2003/, /Rummel et al. 1993/, /Niedermeyer et al. 1992/). Vergleichbar zur Bohrspülung werden dabei an das Stimulationsfluid verschiedene Anforderungen gestellt (z. B. Aufweiten der vorhandenen Fließwege, Abstützen der Aufweitung), welche in Abhängigkeit der jeweiligen Lagerstättenbedingungen durch verschiedene Fluid-Zusammensetzungen erfüllt werden (Tab. A -17).

Tab. A -17: Komponenten hoch-viskoser Frac-Fluide in der Erdöl- und Erdgasindustrie (/Niedermeyer et al. 1992/)

Komponenten	
Frac-Fluid	Wasserbasische Polymerlösungen (geliertes oder ungeliertes Süß- oder Salzwasser), ölbasische Polymerlösungen (unbehandeltes oder geliertes Lagerstätten- oder Dieselöl), säurebasische Fracflüssigkeiten (gelierte Salzsäure und Wasser, emulgierte Salzsäure und Dieselöl), gelierte Kohlenwasserstoffe, Säuren, Alkohole, wässrige Schäume
Additive	Verstopfungsmittel (Quarzmehl, Polymere), Gelbrecher, Vernetzungsmittel, Reibungsverminderer, Tonstabilisatoren
Stützmittel [a]	Quarzsand, Bauxit, Zirkoniumoxid, Oxidkeramik, Porzellanstützmittel, Keramik- und Metallbestandteile

[a] Stützmittel gewährleisten, dass der erzeugte Riss auch nach der Druckentlastung erhalten bleibt (z. B. wenn ein lateraler Versatz erzeugt wird und die Gebirgsrauhigkeit allein dafür nicht ausreicht)

Aufgrund der z. T. unterschiedlichen Anforderungen bei der Stimulation geothermischer Reservoire gegenüber Erdöl- und Erdgaslagerstätten hinsichtlich der Eindringtiefe des Stimulationsfluids und der Reservoiranbindung (z. B. /Legarth 2003/, /Tischner et al. 2003/) wird in den aktuellen Forschungsvorhaben Genesys (z. B. /Orzol et al. 2004//) und Groß Schönebeck (z. B. /Zimmermann et al. 2004/) gegenwärtig auch der Einsatz von Wasser als gering viskosem Fluid

(sog. Wasserfrac-Technik) für die Stimulation von Sedimentgesteinen untersucht. Für die Stimulation von kristallinen Gesteinsformationen (i. d. R. HDR-Nutzung) konnte Wasser bereits als ausreichendes Stimulationsfluid nachgewiesen werden (z. B. /Jung et al. 1992/, /Weidler et al. 2003/).

Eine **Säuerung** (sog. Matrix Acidizing) der Lagerstätten-Gesteinsmatrix als Stimulationsmaßnahme beschränkt sich auf Karbonatreservoire und klastische Formationen. Wie auch hydraulische Stimulationsmaßnahmen ist die Säuerung ein aus der Erdöl- und Erdgasgewinnung seit Jahrzehnten angewandtes Verfahren (z. B. /Legarth 2003/, /Portier et al. 2006/). Dabei werden in Abhängigkeit der jeweiligen Reservoir-Bedingungen Reaktanten in die Lagerstätte eingebracht, die zur Lösung von Mineralien führen (z. B. /Portier et al. 2006/). In Deutschland kommen Säuerungen vor Allem im Malmkarst des Süddeutschen Molassebeckens zum Einsatz. Die Förderbohrung in Unterhaching wurde z. B. mit einer 7,5 % Salzsäure stimuliert (/GTN 2005/).

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Der Eintrag von Stimulations-Fluid in den Trägerhorizont (d. h. Untergrund und ggf. Tiefenwasser) ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Stimulation und demnach nicht zu verhindern.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. In Abhängigkeit der Geologie und des angewandten Stimulationsverfahrens hat die Stimulation Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen (vor Allem im Falle einer Säuerung) und ggf. das Verbleiben von Fluid-Komponenten (z. B. Stützmittel) im Untergrund zur Folge. Da es jedoch Ziel einer nachhaltigen Stimulation ist, die Lagerstätte nicht zu beschädigen und so einen effektiven Langzeitbetrieb zu ermöglichen und zudem langjährige Erfahrungen aus der Erdöl- und Erdgasindustrie vorliegen, sind zum gegenwärtigen Kenntnisstand keine negativen Umweltauswirkungen durch den Eintrag von Stimulations-Fluid in den Untergrund zu erwarten. Es kann zwar zu Wirkungen auf im Untergrund befindliche Mikroorganismen kommen, diese besitzen aber aufgrund der Tiefe nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand keine Verbindung zur Biosphäre (z. B. /GTN 2007/, /Kohl 2005/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Alle Stimulationsmaßnahmen werden im Rahmen des Betriebsplanes erfasst. Die dabei eingesetzten Stoffe und Mengen sind dem zuständigen Bergamt mitzuteilen. Die gesetzliche Regelung wird daher zum gegenwärtigen Kenntnisstand als ausreichend bewertet.

A.2.1.17 Stofflicher Eintrag (Stimulation, Boden, Grundwasser)

Während des Stimulationsvorganges werden die benötigten Fluide und Stoffe auf dem Bohrplatz vorübergehend gelagert. Im Falle unsachgemäßer Handhabung (d. h. Störfall) kann es da-

bei, wie in Anhang A.2.1.4 beschrieben, zu einem stofflichen Eintrag in den Boden (und daraufhin ggf. das Grundwasser) kommen.

A.2.1.18 Induzierung mikroseismischer Ereignisse (Stimulation)

Entstehungswahrscheinlichkeit. In der Regel werden **Säuerungen** mit Druck und Fließraten unterhalb der kritischen Parameter durchgeführt (z. B. /Portier et al. 2006/), so dass keine Induzierung mikroseismsicher Ereignisse zu erwarten ist. Beim Verpressen von Stimulations-Fluid im Rahmen von **Hydraulic Fracturing** hingegen kommt es in Abhängigkeit des natürlichen Spannungszustandes im Untergrund, der verpressten Fluidmenge sowie des Stimulationsdrucks zu induzierten (d. h. menschlich ausgelösten) mikroseismischen Ereignissen. Zu unterscheiden ist dabei, ob mikroseismische Ereignisse durch den Stimulationsdruck selbst, d. h. durch Übersteigung der kleinsten Hauptspannung im Gestein, ausgelöst werden oder ob durch die Stimulation eine natürlich aufgebaute Spannung (zeitgleich oder zeitversetzt) schlagartig abgebaut wird. (z. B. /GPI 2007/). In beiden Fällen kann es in Abhängigkeit der umliegenden Gesteinsschichten zu einer Aufschaukelung und Ausbreitung der Ereignisse bis zur Erdoberfläche kommen. Im Falle einer Aquifer-Stimulation sind dabei auf Basis der bisherigen Erfahrungen und Kenntnisse keine maßgeblichen Magnituden zu erwarten. Die Stimulation von Erdöl- und Erdgaslagerstätten sowie Wasser führenden Gesteinsschichten hat bislang zu keinen Schadbeben geführt (z. B. /Geothermal Explorers 2006/, /GGA 2007a/). Selbst bei massiven Stimulationsarbeiten im Forschungsprojekt Genesys waren nur wenige Ereignisse in einer Größenordnung von null auf der Richterskala zu registrieren (/GGA 2007a/). Bei den Forschungsarbeiten in Groß Schönebeck konnte bislang keine Seismizität an der Oberfläche gemessen werden (/Huenges, Kohl 2007/). Bei Stimulationen im Rahmen von HDR-Projekten hingegen sind größere seismische Ereignisse nicht auszuschließen, obwohl es bislang in keinem Projekt zu Schadbeben gekommen ist (z. B. /SED 2007/, /MIT 2006/). Das größte durch Stimulation von Festgestein induzierte Ereignis wird in Innamincka, Cooper Basin (Australien) am 5. Dezember 2003 mit einer Stärke von 3,7 auf der Richterskala angegeben (z. B. /Majer et al. 2007/). Aufmerksamkeit hat in diesem Zusammenhang jedoch Ende des Jahres 2006 das HDR-Projekt in Basel erregt. Während und auch nach Stimulationsarbeiten im Kristallin kam es zu mehreren Erdstößen mit Magnituden größer 2 (maximale Magnitude 3,4) (/Geothermal Explorers 2006/). Derartige Größenordnungen lassen auf den Abbau natürlicher Spannungen schließen, für welche die tektonisch vorbelastete Region um Basel bekannt ist (z. B. /SED 2007/). Bei Stimulationsarbeiten im europäischen Forschungsprojekt Soultz-sous-Forêts lag die maximale Magnitude bei den Stimulationsarbeiten im September 2004 bei 2,9 (/Charléty, Dorbath 2006/) bei den darauf folgenden Stimulationen der

gleichen Bohrung im Februar 2005 mit höheren Drücken und größeren Volumina dagegen bei maximal 2,3 (/GGA 2007b/). Aufgrund der geologischen Unterschiede, vor Allem in Bezug auf die überdeckenden Gesteinsschichten sowie den Spannungszustand im Untergrund, lassen diese Beispiele nur bedingt auf Auswirkungen vergleichbarer Stimulationsmaßnahmen in Deutschland schließen. In den ehemaligen Forschungsprojekten in Falkenberg und Urach waren keine fühlbaren Ereignisse zu verzeichnen (z. B. /MIT 2006/, /GEOTEC 2007/). Obwohl die Orientierung und Entwicklung im Raum eines stimulierten Gesteinsvolumens im Vorfeld abgebildet und vorausgesagt werden kann (z. B. /Geothermal Explorers 2006/), ist eine Vorhersage von Zeit und Intensität bzw. das Ausschließen massiverer Erdstöße zum gegenwärtigen Kenntnisstand nicht möglich (z. B. /MIT 2006/, /Fokker 2006/). Zum einen sind die Informationen über den genauen Spannungszustand im Untergrund meist unzureichend (z. B. /Geothermal Explorers 2006/), zum anderen sind die genauen Abläufe beim Auslösen und Ausbreiten mikroseismischer Ereignisse noch unzureichend verstanden (z. B. /Charléty, Dorbath 2006/, /Huenges, Kohl 2006/, /SED 2007/).

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Die Auslösung mikroseismischer Ereignisse wird grundsätzlich durch das Verspressen von Stimulations-Fluiden unter hohem Druck forciert. Lediglich das Auslösen bzw. Triggern eines natürlichen Spannungsabbaus und damit möglicherweise verbundener stärkere Erdstößen ist zu verhindern. Da die Kenntnisse hinsichtlich der jeweils zu erwartenden mikroseismischen Ereignisse jedoch noch unzureichend sind, ist eine Aussage über technische Vermeidungsmaßnahmen nur bedingt möglich. Die Wahrscheinlichkeit von Erdstößen größerer Magnitude scheint jedoch in Gebieten ohne tektonische Vorspannung und dämpfende Gesteinsüberdeckung gering zu sein, so dass Standorte in derartigen Gebieten vorrangig projektiert werden sollten. Zudem ist in Zukunft der Einsatz „weicherer“ Stimulationsmaßnahmen denkbar, wie sie z. B. im Nachgang zu den Ereignissen in Basel von Experten vorgeschlagen wurden (/Jung 2006/). Dabei wird nicht der gesamte Förderhorizont in einem Schritt stimuliert, sondern durch Abtrennung einzelner Bereiche mit sog. Packern diese im Multi-Frac-Verfahren bzw. Selective Fraccing gezielt angesprochen. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die dabei eingesetzten Fluidmengen und Drücke deutlich unter denen der bisher üblichen HDR-Stimulationen liegen. Die Beobachtungsdaten der Stimulation in Basel, bei der eine kontinuierliche Steigerung der Drücke und Stimulationsraten verfolgt wurde, zeigen beispielsweise, dass bei den für einen Multi-Frac ausreichenden Parametern noch keine maßgeblichen Ereignisse zu verzeichnen waren (/Jung 2006/). Diese in der Erdöl- und Erdgaserschließung bereits lang-

jährig eingesetzte Technik wurde im Hartgestein bislang jedoch noch nicht eingesetzt, so dass deren Anwendbarkeit auf HDR-Projekte noch zu prüfen bleibt.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Erderschütterungen können zu Schäden an Bausubstanzen führen und sich auch auf Menschen und Tiere unangenehm auswirken (vgl. Anhang A.2.1.1). Der in Basel durch Stimulations-Aktivitäten bislang maximal ausgelöste Erdstoß mit einer Magnitude von 3,4 auf der Richter-Skala und einer maximalen Schwinggeschwindigkeit des Bodens von 12,2 mm/s (/Geothermal Expplorers 2006/) kann dabei zwar als deutlich fühlbar, nicht aber als schädliche Umweltauswirkung bewertet werden (vgl. Tab. A -18 und Tab. A -13). In der Schweiz und unmittelbarer Umgebung treten im jährlichen Mittel mehrfach Erdbeben einer Magnitude zwischen drei und vier auf und haben bislang keine Schäden verursacht (/SED 2007/). Im Falle des Baseler Geothermieprojektes kam es dennoch zu mehrfachen Schadensmeldungen, wobei die genauen Zusammenhänge noch zu klären sind (/Geothermal Explorers 2006/, /SED 2007/). Zudem waren die Erdstöße im Vergleich zu seismischen Ereignissen dieser Stärke mit einem ungewöhnlich lauten Knall verbunden. Dies muss auf die geringe Herdtiefe zurückgeführt werden; eine Überschneidung mit der Eigenfrequenz von Bausubstanzen, wie sie bei (/Geothermal Explorers 2006/) und (/GPI 2007/) angegeben wird, war nicht möglich, da die dominierende Frequenz der Baseler Ereignissse weit oberhalb des Gebäude-Eigenfrequenzbereichs liegt (/Rybach 2007b/).

Tab. A -18: Gegenüberstellung der Europäischen Makroseismischen Skala-1998 (EMS-98) (/Grünthal 1998)/ und der Lokalmagnitude (Richter-Skala) (/Geothermal Explorers 2006/)

Magnitude gemäß Richter-Skala	Intensität gemäß EMS-Skala	Wirkung
0 bis 1,8	I	nicht fühlbar
1,9 bis 2,3	II	kaum bemerkbar
2,4 bis 2,9	III	schwach
3 bis 3,6	IV	deutlich
3,7 bis 4,2	V	stark
4,3 bis 4,8	VI	leichte Gebäudeschäden
4,9 bis 5,4	VII	Gebäudeschäden
5,5 bis 6	VIII	schwere Gebäudeschäden
größer 6	IX bis XII	Zerstörend bis vollständig verwüstend

Stärkere seismische Ereignisse können jedoch, wie bereits angesprochen, nicht gänzlich ausgeschlossen werden, so dass auch entsprechend für größere Umweltauswirkungen ebenfalls ein

Restrisiko besteht. Für die Entstehung eines Schadbebens[11] muss jedoch eine genügend große vorgespannte Bruchfläche im Einflussbereich des eingepressten Wasservolumens vorliegen, deren Festigkeit und Scherspannung an einer Stelle durch den zusätzlichen Wasserdruck überschritten wird und so den Bruchvorgang über die gesamte Fläche auslöst (/SED 2007/). Gemäß (/PGI 2007/) ist dabei davon auszugehen, dass unter diesen Umständen ein natürliches Beben kurz bevor stehen muss. Um über die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Zusammentreffens all dieser Bedingungen zu entscheiden, ist letztlich jedoch eine gezielte probabilistische seismische Gefährdungsanalyse notwendig.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Stimulationsarbeiten werden in der bergrechtlichen Auslegung in der Regel als sekundäre Erschließungsmaßnahme im Rahmen der Bohrungsniederbringung angesehen und sind daher in Art und Umfang im Betriebsplan anzugeben (z. B. /GEOTEC 2007/, /FGT 2007b/). Auf Basis des gegenwärtigen Kenntnisstandes sind negative Umweltauswirkungen durch Stimulationsarbeiten in Deutschland nicht zu erwarten. Größere Erdstöße durch Stimulationen im Kristallin können gegenwärtig dennoch nicht ausgeschlossen werden. Dementsprechend kann auch noch keine gesetzliche Regelung verabschiedet werden, in der Kriterien für die Zulässigkeit bzw. Unzulässigkeit entsprechender Maßnahmen definiert werden. In Basel wurde z. B. ein Ampel-System verfolgt, welches Druck, Pumprate, Verpressvolumen, Temperatur, regionale und lokale Seismizität sowie Oberflächenerschütterungen im Bohrlochumfeld permanent beobachtet. Auf Basis der Auswertung dieser Daten wurden die Stimulationsmaßnahmen gemäß dem geplanten Verlauf durchgeführt (d. h. „grünes Licht“), Stimulationsrate und -drücke verringert (d. h. „gelbes Licht“) oder die Stimulationsarbeiten unmittelbar abgebrochen (d. h. „rotes Licht“) (/Geothermal Explorers 2006/). Zukünftig könnte dieses Kontrollsystem auch durch ein statistisches Vorhersageverfahren vervollständigt werden (z. B. /SED 2007/, /GPI 2007/). Vor dem Hintergrund der noch fehlenden Kenntnisse muss die gesetzliche Regelung im Falle von HDR-Konzepten als noch unzureichend bewertet werden.

A.2.1.19 Wasserbedarf (Stimulation)

Wird für die Stimulation Wasser benötigt, muss dieses aus Oberflächen- oder Grundwasser entnommen werden. In Abhängigkeit des Umfangs der Stimulierungsmaßnahmen (d. h. zu stimulierende Lagerstätte, Produktions- bzw. Injektionsratensteigerung) liegt die dabei benötigte

[11] Gemäß (/SED 2007/) und (/GPI 2007/) nimmt die Deformationsenergie von einer Magnitudeneinheit zur nächsten um das 30-Fache zu. Demzufolge entsprächen 30 Erdbeben der Stärke 3 einem Erdstoß der Stärke 4. Einem Erdbeben Magnitude 6 entsprächen dagegen 30.000 Erdstößen mit Stärke 3.

Menge zwischen 30.000 und 250.000 m^3 je Bohrloch (/GGA 2006/). Die damit verbundenen Umwelteffekte können analog zu dem in Anhang A.2.1.10 beschriebenen Wasserbedarf während der Bohrungsniederbringung analysiert und bewertet werden.

A.2.1.20 Lärmwirkung (Stimulation)

Für das Verpressen des Stimulations-Fluides kommen Pumpen zum Einsatz. Der dabei emittierte Lärm kann gemäß der Lärmwirkung während der Bohrungsniederbringung (in Anhang A.2.1.12 näher erläutert) analysiert und bewertet werden.

A.2.1.21 Flächeninanspruchnahme (Stimulation)

Bei der Erzeugung von HDR-Systemen wird die Ausbreitung des künstlich erzeugten Riss-Systems über seismische Beobachtungsbohrungen, sog. Lauschbohrungen, in der Nähe der Tiefbohrung verfolgt und ausgewertet (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/, /MIT 2006/). Die dabei in Anspruch genommene Fläche ist vernachlässigbar und wird daher im Weiteren nicht näher analysiert und bewertet.

A.2.1.22 Stofflicher Eintrag (Zirkulationstests, Untergrund, Tiefenwasser)

Die Wirksamkeit und Beschaffenheit der hydraulischen Verbindung zwischen Injektions- und Produktionsbohrung wird mit Hilfe von Zirkulationstests untersucht (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/, /Kaltschmitt et al. 1999/). Als Zirkulationsfluid wird in der Regel Wasser mit entsprechenden Markierungsstoffen, sog. Tracern, über die Injektionsbohrung in den Untergrund eingetragen. Durch die anschließende Auswertung der Konzentration der Tracer im geförderten Fluid können so u. a. die Verweilzeit des Wärmeträgermediums im Untergrund und die effektive Wärmetauscherfläche bestimmt werden (z. B. /Hölting, Coldway 2005/, /Käss 2004/). Die dabei eingesetzten Markierungsstoffe müssen wasserlöslich oder aufschwemmbar und noch in großer Verdünnung nachweisbar sein. Aus Standardverfahren der Hydrogeologie sind dabei verschiedene umweltverträgliche Tracer bereits langjährig erprobt. Zum Einsatz kommen dabei natürliche, künstliche, reaktive und/oder radiogene, organische oder anorganische Stoffe (z. B. /Käss 2004/). Da hydrologische Erkundungsmaßnahmen vor Allem im Grundwasserbereich eingesetzt werden, sind durch den Eintrag von Tracern in den tiefen Untergrund und das Tiefenwasser keine negativen Umweltauswirkungen zu erwarten. Die gesetzliche Regelung ist daher ausreichend.

A.2.1.23 Wasserbedarf (Zirkulationstests)

Bei HDR-Systemen kann ggf. für die Durchführung von Zirkulationstests der Einsatz von Oberflächen- oder Grundwasser notwendig sein. Da sich auch hier eine Entnahme entsprechend an die Richtlinien des Wasserhaushaltsgesetzes zu halten hat, sind keine negativen Umweltauswirkungen zu erwarten und die gesetzliche Regelung dementsprechend ausreichend (vgl. Anhang A.2.1.10).

A.2.2 Betrieb Untertage

A.2.2.1 Hydraulische Veränderung (Untergrund)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Da bei untertägig offenen Systemen die natürlich vorliegenden Fließraten aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht ausreichen und deshalb Stimulierungsmaßnahmen im kleineren oder größeren Umfang durchgeführt werden, kommt es in der Lagerstätte während des Betriebs zu einer Veränderung der natürlichen Strömungsverhältnisse (vgl. Kapitel 2.2.1.2). In der Regel sollten diese Veränderungen auf den Geltungsbereich eines bergrechtlichen Bewilligungsfeldes (vgl. Kapitel 3.2.1) lokal begrenzt sein.

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Aufgrund der wirtschaftlichen Voraussetzung ausreichender Fließraten sind hydraulische Veränderungen im Untergrund in der Regel nicht zu vermeiden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Für den Bereich des Erlaubnisfeldes sind hydraulische Veränderungen in der Lagerstätte mit keinen weiteren Umwelteffekten verbunden. Bei unzureichender Bemessung eines Feldes kann es jedoch zur Beeinflussung umliegender Bewilligungsfelder kommen. Ist eine hydraulische Verbindung unterschiedlicher Wasser führender Gesteinsschichten gegeben, können sich lokale Veränderungen der natürlichen Strömungsverhältnisse in der Lagerstätte grundsätzlich auch auf darüber oder darunter liegende Wasserstockwerke auswirken. Aufgrund der notwendigen Tiefe der für die Stromerzeugung relevanten Reservoire und z. T. auch der vorliegenden Thermalwasserzusammensetzung (z. B. stark mineralisierte Thermalwässer) ist eine hydraulische Verbindung zu und Beeinflussung von z. B. Grundwasserstockwerken jedoch auszuschließen (z. B. /GTN 2007/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Die Größe bergrechtlicher Bewilligungsfelder basiert auf (hydro)geologischen Betrachtungen und Erkundungsmaßnahmen der Lagerstätte, die deren Nutzung und den resultierenden hydraulisch und thermisch beeinflussten Bereich im Un-

tergrund abbilden (z. B. /GTN 2007/, /STMWIVT BY 2007/). Gemäß Bundesberggesetz dürfen sich dabei verschiedene Bewilligungsfelder nicht gegenseitig beeinflussen. Bei noch weitgehend geologisch unerkundeten Gebieten, wie z. B. im Malmkarst des Süddeutschen Molassebeckens, stellt die Erstellung eines regionalen Modells jedoch aufgrund der unzureichenden Datenmenge noch ein Problem dar (/STMWIVT BY 2007/). Bis 2005 wurde bei der Ermittlung der Erlaubnisfeldgrößen bzw. im Anschluss daran auch Bewilligungsfeldgrößen (vgl. Kapitel 3.2.1) der Abstand zwischen den Bohrungen und von den Bohrungen zum Feldrand aufgrund der geologisch abgeschätzten Durchbruchszeit auf ca. 2 km gesetzt. Sich daraus ergebende Erlaubnis- bzw. Bewilligungsfelder lagen in der Größenordnung von ca. 20 bis 30 km^2. Aufgrund der Erfahrungen aus den bestehenden Projekten sowie der intensivern geologischen Erkundung von Störungssystem im Gebirge im Rahmen des Bayerischen Geothermieatlasses wird die Größe der Felder nun abhängig von der Lage der Störungssysteme bestimmt. Die dadurch tendenziell größer bemessenen Erlaubnisfelder liegen in einer Größenordnung von ca. 50 bis max. 100 km^2. Wie sich der starke Wettbewerb auf die tatsächliche Größe der Bewilligungsfelder auswirken wird, bleibt abzuwarten. Maßgebend ist dabei auch, dass es entsprechend § 16 Abs. 2 BBergG möglich ist, die Größen der Bewilligungsfelder nachträglich anzupassen, um bei zu großen Feldern z. B. Monopolbildungen zu verhindern oder die Feldgröße dem Umfang des Arbeitsprogrammes anzugleichen (/STMWIVT BY 2007/).

Aufgrund der noch fehlenden Erfahrungswerte in Bezug auf den tatsächlichen hydraulischen Wirkungsbereich im Untergrund muss die optimale Feldbemessung der Bewilligungsfelder vor Allem im Hinblick auf einen zukünftig verstärkten Ausbau der geothermischen Stromerzeugung weiter im Blick behalten werden. Die gesetzliche Regelung wird daher als noch nicht ausreichend bewertet.

A.2.2.2 Grundwasserspiegelsenkung

Eine Senkung des Grundwasserspiegels durch den Betrieb untertägig offener Systeme setzt eine hydraulische Verbindung zwischen dem Grundwasserstockwerk und der Lagerstätte voraus. Dies ist unter den in Deutschland vorliegenden geologischen Bedingungen jedoch auszuschließen (vgl. Anhang A.2.2.1). Die Grundwasserspiegelsenkung wird daher im Weiteren nicht tiefer gehend analysiert und bewertet.

A.2.2.3 Hydraulischer Kurzschluss

Ein ungewollter hydraulischer Kurzschluss zwischen unterschiedlichen Wasserstockwerken kann bei Hochenthalpie-Lagerstätten durch einen massiven Druckabfall im Förderhorizont er-

folgen. Unter den in Deutschland gegebenen geologischen Bedingungen ist dies nicht möglich (z. B. /GTN 2007/).

A.2.2.4 Setzung des Bodens (Subsidenz)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Bei untertägig offenen Systemen kann ein massiver Druckabfall im Förderhorizont und eine damit verbundene porenelastische Kontraktion zur Setzung des Bodens führen. Zudem ist Subsidenz durch Auskühlung der Lagerstätte und die damit verbundene thermoelastische Kontraktion möglich (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/, /Kühn et al.2002/). In welcher Größenordnung die durch die Spannungsänderung im Untergrund bedingte Subsidenz liegt, ist dabei von der Konsolidierung der das Reservoir überlagernden Gesteinsschichten abhängig (z. B. /Kühn et al. 2002/, /Noorhollahi 2005/). In der Vergangenheit sind im Zusammenhang mit der Nutzung von Hochenthalpie-Lagerstätten Subsidenzen von mehreren Metern aufgetreten. Die größten Setzungserscheinungen weist dabei das Wairakei-Feld in Neuseeland auf, wo es auf einer Fläche von 1 km^2 zu einer Bodensetzung von 15 m gekommen ist (z. B. /Kristmannsdóttir et al. 2003/). Eine Subsidenz derartiger Größenordnung ist jedoch bisher nur von Geothermieanwendungen bekannt geworden, bei denen zum einen das Thermalwasser nur gefördert und nicht reinjiziert wurde und zum anderen mächtige, wenig konsolidierte Tonschichten im Bereich der Förderbohrung vorlagen (z. B. /Kühn et al. 2002/). In Deutschland sind derartige Erscheinungen für den Betrieb von Aquifer-Systemen nicht zu erwarten, da eine Reinjektion des geförderten Thermalwassers bergrechtlich vorgesehen ist. Zudem sind in Deutschland keine die Setzung begünstigenden geologischen Verhältnisse gegeben (z. B. Kühn et al. 2002/, /Kaltschmitt et al. 1999/, /GTN 1994/). Berechnungen des Instituts für Wasserwirtschaft und -versorgung der Technischen Universität Hamburg-Harburg zu Folge ist z. B. im Norddeutschen Becken eine maximale Subsidenz von 2 bis 3 cm im Bohrungsbereich möglich, die jedoch bereits bei einer Entfernung von 200 m von der Bohrung um mehr als die Hälfte abnimmt (/Kühn et al. 2002/). Untersuchungen an der geothermischen Anlage in Neustadt-Glewe bestätigen diese Ergebnisse; hier wurde in einigen Bereichen eine Absenkung von 3 cm gemessen (/Kühn et al. 2002/). Für den Betrieb von HDR-Systemen sind ebenfalls keine größeren Subsidenzen zu erwarten (z. B. /MIT 2006/).

Technische Vermeidungs- bzw. Minderungsmaßnahmen. Durch ein nachhaltiges Betreiben der Lagerstätte können massive Druckabsenkungen vermieden werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die Setzung des Bodens stellt zwar einen irreversiblen Prozess dar, jedoch liegen die in Deutschland zu erwartenden, lokal auftretenden Setzungsbe-

träge in einem unkritischen Bereich. Schäden an Bausubstanzen werden erst ab großflächigeren Subsidenzen von 3 cm als kritisch bewertet (/Kühn et al. 2002/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Da die nachhaltige Nutzung eines Reservoirs aus bergrechtlicher Sicht Voraussetzung für einen zulässigen Betrieb ist (vgl. Hydraulische Veränderung (Untergrund)) und die durch Subsidenz zu erwartenden Umweltauswirkungen gering sind, wird dieser Umwelteffekt ausreichend gesetzlich geregelt.

A.2.2.5 Auskühlung (Untergrund)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Bei untertägig offenen Systemen kommt es durch die Injektion des abgekühltem Wärmeträgermediums und dem damit verbundenen kontinuierlichen Wärmeentzug im Förderhorizont zu einer Abnahme der initialen Lagerstättentemperaturen; dies hat einen konduktiven Wärmefluss aus den Deckschichten in das Reservoir zur Folge (z. B. Kaltschmitt et al. 1999/, /Seibt 1991/). Um die Injektionsbohrung sowie in den hangenden und liegenden Deckschichten bildet sich dabei eine Kältefahne aus. Die analytische Berechnung von Eindringtiefen in die Umgebungsschichten in einem „Worst-Case“ Szenario zeigt, dass nach 30 Betriebsjahren maximal 160 m thermisch beeinflusst werden und Temperaturabnahmen von mehr als 10 K lediglich in Eindringtiefen von weniger als 70 m auftreten (/Kaltschmitt et al. 1999/, /Jung et al. 2002/). Im Falle von HDR-Systemen ist eine entsprechende Abschätzung nur schwer möglich, da hier das Vorhandensein und die Anbindung an ein natürliches Zirkulationssystem im Fernbereich maßgeblich sind (z. B. /Haidinger et al. 2006/). /Haidinger et al. 2006/ modellierten z. B. bei einer 50-prozentigen Anbindung an einen Fernbereich eine Abnahme der Fördertemperatur nach 20 Jahren Betrieb von 10 K, während eine fehlende Anbindung nach derselben Dauer einen Temperatursenkung von ca. 45 K zur Folge hätte. Untertägig geschlossene Systeme führen zu einer geringeren und lokal begrenzten Auskühlung. Ein Beispiel an einer 100 m tiefen Erdwärmesonde zeigt, dass deren Betrieb nach 30 Jahren im Umkreis von 1 m eine Auskühlung des Untergrunds von weniger als 2 K zur Folge hat (/Rybach 2007a/). Bei allen Systemen setzt nach Ende der Nutzungsdauer der Regenerationsprozess ein. Eine ca. 95 % Wiederherstellung des Ursprungszustands (z. B. Temperatur und Druck) kann nach derselben Dauer wie der Nutzung angesetzt werden (/Rybach 2007a/).

Technische Vermeidungs- bzw. Minderungsmaßnahmen. Durch einen nachhaltigen Betrieb der Lagerstätte kann die Auskühlung der Lagerstätte verringert werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Während bei der Auskühlung untertägig geschlossener Systeme keine Umweltauswirkungen zu erwarten sind, können die Temperaturveränderungen in

untertägig offenen Systemen ggf. zu hydraulischen Veränderungen in der Lagerstätte und zur Beeinträchtigung des Förder- und Injektionsverhalten (d. h. anlagentechnische Probleme) führen (/Seibt 1991/). Chemische Ausfällungsprozesse sind erst bei größeren Temperaturabsenkungen zu erwarten. Negative Umweltauswirkungen durch die Auskühlung des Untergrunds sind auf Basis des gegenwärtigen Kenntnisstandes nicht bekannt (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/, /GTN 2007/, /Kohl 2005/). In Bezug auf den Kenntnisstand ist dabei zu bemerken, dass durch die Weiterentwicklung entsprechender Nachweisverfahren gerade in den letzten Jahren zunehmende Kenntnisse über die Biozynose im tiefen Untergrund gewonnen werden konnten. Aufgrund der großen Tiefe und der damit auszuschließenden Verbindung zur Biosphäre sind mit der Wirkung auf die im Untergrund befindlichen Mikroorganismen somit überwiegend anlagentechnische Probleme in Form von mikrobiologisch induzierten Ausfällungen oder Korrosion verbunden (z. B. /GTN 2007/, /Würdemann et al. 2006/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Da gegenwärtig keine negativen Umweltauswirkungen von der Auskühlung des Untergrunds zu erwarten sind, wird die gesetzliche Regelung entsprechend als ausreichend bewertet.

A.2.2.6 Stofflicher Eintrag (Tiefenwasser)

Bei untertägig offenen Systemen können durch die Zirkulation des Wärmeträgermediums z. B. aus der Lagerstätte mitgeführte Partikel, Korrosionsprodukte, chemische Ausfällungsprodukte sowie Produkte bakteriologischer Tätigkeit transportiert und in die Lagerstätte eingetragen werden. Die dadurch ggf. bedingte Zusetzung der Fließwege und Verringerung der Lagerstättenpermeabilität kann zu anlagentechnischen Problemen führen. Umweltrelevanten Auswirkungen sind davon jedoch nicht zu erwarten (z. B. /BGR 2006/). Der stoffliche Eintrag in die Lagerstätte wird im Folgenden daher nicht näher analysiert und bewertet.

A.2.2.7 Stofflicher Eintrag (Untergrund)

Im Falle von HDR-Systemen kann es während des Betriebes zu Zirkulationsverlusten kommen. Aus wirtschaftlicher und technischer Sicht ist dabei eine maximale Verlustrate von 10 l/s noch vertretbar (/Rummel et al. 1993/). Im Forschungsprojekt Soultz-sous-Forêts konnte bereits ein mehrmonatiger Zirkulationstests ohne den Einsatz von Zusatzwasser auskommen (/Fritsch, Gerard 2006/). Kommt es dennoch zu Verlusten, kann über deren Verbleib nur spekuliert werden (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/). Nicht zuletzt aus diesem Grund ist auch die Einsatzfähigkeit

von überkritischem CO_2 als ungewiss zu bewerten[12]. Die Gefahr eines stofflichen Eintrags des Wärmeträgerfluids durch einen Defekt in der Verrohrung und Zementation der Tiefbohrungen wird aus technischer Sicht als vernachlässigbar gering bewertet.

A.2.2.8 Stofflicher Eintrag (Boden, Grundwasser)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Für die Zirkulation des Wärmeträgermediums muss dessen Transport zwischen Förder- und Injektionsbohrung in entsprechenden Rohrleitungen erfolgen. Dabei kann es bei Rohrleitungsdefekten oder aber auch Revisionsarbeiten zum Eintrag des Wärmeträgermediums in den Boden (und ggf. das Grundwasser) kommen.

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Durch eine entsprechende sicherheitstechnische Auslegung der Rohrleitungen kann der stoffliche Eintrag vermieden werden. Z. B. bieten doppelwandige Rohre eine erhöhte Sicherheit. Besonders gefährdete Bereiche oder Bereiche, in denen ein Austritt von Thermalwasser z. B. bei Revisionsarbeiten, erfolgt können zusätzlich durch sog. Slopgruben versehen werden, die austretendes Thermalwasser vorübergehend auffangen; das Thermalwasser wird anschließend sachgerecht entsorgt.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die durch den Eintrag von Thermalwasser zu erwartenden Umweltauswirkungen sind abhängig von der Thermalwasserzusammensetzung. Dabei sind die Thermalwässer des Süddeutschen Molassebeckens deutlich weniger mineralisiert und damit umweltbelastend als die Tiefenwässer des Norddeutschen Beckens und des Oberrheingrabens (Abb. 46). Der Austritt von heißem, hochmineralisierten Wärmeträgermedium kann dabei mit lokalen, negativen Auswirkungen auf Grundwasser, Flora und Fauna verbunden sein.

[12] Auch im Zusammenhang mit geothermischer Energieerzeugung wird über den Einsatz von CO_2 und damit dessen Verpressung in den Untergrund nachgedacht (/Bergakademie Freiberg 2005/). Dieses Verfahren wird aktuelle vor allem in Verbindung mit sog. CO_2-freien Kraftwerken diskutiert; die dafür maßgeblichen Kenntnisse dazu werden gegenwärtig in Forschungsvorhaben erarbeitet.

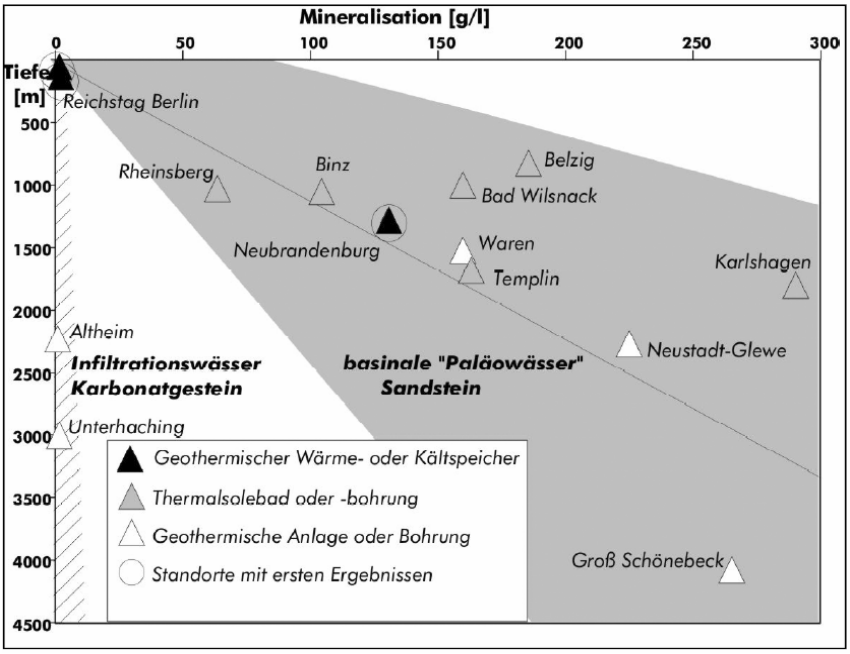

Abb. 46: Salzgehalte verschiedener geothermischer Anlagen und Bohrungen in Abhängigkeit von der Tiefe (/Würdemann et al. 2006/)

Technische Minderungsmaßnahmen. Aufgrund der Überwachungssysteme ist der Eintrag von Wärmeträgermedien in den Boden sofort feststellbar, so dass entsprechende Maßnahmen (z. B. Unterbrechung Thermalwasserförderung) umgehend eingeleitet werden können.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Hinsichtlich eines Rohrleitungstransports sind die Grundsätze des Wasserhaushaltsgesetztes (WHG) maßgeblich. Gemäß § 19f WHG obliegt jedoch bei Geothermiebohrungen die Genehmigungserteilung der zuständigen Bergbehörde (vgl. Kapitel 3.2.3). Da im Falle hochmineralisierter Thermalwässer die davon ausgehenden Umweltrisiken beim Rohrleitungstransport zudem technisch beherrschbar sind, wird der stoffliche Eintrag in den Boden und ggf. das Grundwasser gesetzlich ausreichend geregelt.

A.2.2.9 Wasserbedarf

Für den Betrieb von HDR-Systemen ist in der Regel der Einsatz von Oberflächen oder Grundwasser erforderlich, da das Tiefenwasser – sofern überhaupt vorhanden - nicht ausreicht. Zudem kann es während des Betriebs zu Wasserverlusten kommen (vgl. Stofflicher Eintrag (Untergrund)), die ebenfalls durch die Entnahme entsprechender Mengen aus Oberflächen- oder Grundwasser ersetzt werden müssen. Dabei sind Flüssigkeitsverluste in die Gesteinsmatrix, welche über den Langzeitbetrieb abnehmen und deshalb nur eine untergeordnete Rolle spielen, und Verluste in offene Risse und Risszonen zu unterscheiden (/Rummel et al. 1993/). Weiterhin

können die Wasserverluste durch zu hohe Injektionsdrücke und eine damit verbundene weitere Ausweitung des Riss-Systems während des Betriebs zunehmen (/Niedermeyer et al. 1992/, /MIT 2006/). Die zu erwartenden Wasserverluste können beträchtliche Mengen annehmen, sind jedoch vor Erzeugung und Erprobung des künstlichen Riss-Systems nicht abschätzbar. Wie bereits angesprochen können Wasserverluste zwischen 0 und aus wirtschaftlichen und technischen Gründen maximal zulässigen 10 l/s liegen. Da bislang jedoch keine gesicherten Erfahrungswerte in diesem Punkt vorliegen, kann keine abschließende Analyse und Bewertung erfolgen. Es sei jedoch angemerkt, dass auch hier für die Entnahme entsprechender Wassermengen eine wasserrechtliche Erlaubnis vorliegen muss, was einer standortabhängigen Voraussetzung gleichkommt.

A.2.2.10 Thermischer Eintrag (Boden)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Durch die Förderung sowie den Transport des heißen Wärmeträgermediums kommt es zum einen im Nahbereich des Bohrlochs, zum anderen bei einer untertägigen Verlegung der Transportleitung zu einer Erwärmung des Bodens. Der thermische Eintrag in den Bohrlochnahbereich kann dabei als gering eingestuft werden. Für die Förderbohrung in Neustadt-Glewe wurde z. B. ermittelt, dass im Maximalfall eine Wärmeleistung zum Betriebsbeginn von 230 kW und im 30. Betriebsjahr von 180 kW an die unmittelbare Bohrungsumgebung abgegeben werden. Nach 30 Betriebsjahren und ununterbrochener Erwärmung würde dies zu einer thermischen Beeinflussung, die durch das Verhältnis der Fluidtemperatur zur ungestörten Gebirgstemperatur charakterisiert wird, von 60 m um die Bohrung kommen. Die thermische Störung wäre in einem Abstand von 10 m auf ca. 56 % und in einem Abstand von 20 m bereits auf ca. 34 % abgeklungen (/GFZ 1999/). Die thermische Beeinflussung durch eine untertägig verlegte Transportleitung liegt dabei in einer vergleichbaren Größenordnung. Hier ist jedoch zudem die Länge der Thermalwassertrasse für den thermisch beeinflussten Bereich maßgeblich.

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Durch entsprechende Dämmstoffe kann der thermische Eintrag vermieden bzw. reduziert werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die thermische Beeinflussung durch die Bohrungen sowie die Thermalwassertrasse ist lokal begrenzt. Zudem sind keine umweltschädlichen Temperaturgradienten zu erwarten. Durch eine Veränderung der Bodentemperatur kann die Aktivität der Bodenfauna und -flora beeinflusst werden. Ab Tiefen von ca. 10 m können diese Einflüsse

allerdings aufgrund der Abnahme der Bodenfauna- und -flora mit zunehmender Tiefe vernachlässigt werden (z. B. /Lux, Sanner 1992/).

Technische Minderungsmaßnahmen. Durch eine Verlegung von Rohrleitungen, die sich an bereits bestehender Infrastruktur (z. B. Fernwärmetrassen, Straßen) orientiert, oder die gezielte Nutzung der entstehenden Bodenerwärmung (z. B. Fahrbahnbeheizung) können die zu erwartenden Umweltauswirkungen verringert bzw. sogar positiv genutzt werden.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Wie bereits angesprochen (vgl. Anhang A.2.2.8) obliegt die Entscheidung hinsichtlich der Genehmigung von Rohrleitungen der zuständigen Bergbehörde, welche im Einzelfall die Umweltverträglichkeit des Leitungssystems prüft. Die gesetzliche Regelung wird daher als ausreichend eingestuft.

A.2.2.11 Induzierung mikroseismischer Ereignisse

Aus Erfahrungen mit der energetischen Nutzung von Hochenthalpie-Lagerstätten ist die Auslösung bzw. Triggerung natürlicher mikroseismischer Ereignisse durch den untertägigen Betrieb bekannt (z. B. /Hunt 2000/). Als grundsätzlicher Mechanismus gilt dabei das Verpressen von Wasser unter hohem Druck, was in einem tektonisch aktiven Untergrund zu einem schlagartigen Spannungsabbau führen kann. Unter den in Deutschland gegebenen geologischen Randbedingungen ist dies aber nicht zu erwarten, da bei einer nachhaltigen Reservoirbewirtschaftung die dabei auftretenden Injektionsdrücke weit unter dem kritischen Formationsdruck liegen (vgl. Anhang A.2.1.18). Die Induzierung mikroseismischer Ereignisse durch den untertägigen Betrieb wird im Folgenden daher nicht weiter analysiert und bewertet.

A.2.2.12 Stofflicher Eintrag (Luft)

In der Regel wird der Thermalwasserkreislauf untertägig offener Systeme unter Luftabschluss, d. h. Übertage gesschlossen betrieben, so dass während des Normalbetriebs keine Luft getragenen Emissionen zu erwarten sind. Kommt es dennoch aufgrund eines Störfalls oder einer Anlagenrevision zu einem Kontakt des Wärmeträgermediums mit Luft, können die im Wärmeträgerfluid gelösten Gase frei gesetzt werden. Die dabei umweltrelevanten Gase sind z. B. H_2, CH_4, CO_2 und H_2S (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/). Aufgrund der Verdünnung der gelösten Gase durch den Luftkontakt sind keine gefährlichen Schadstoffkonzentrationen für die Umwelt zu befürchten (z. B. /Niedermeyer et al. 1992/, /GTN 2007/).

A.2.2.13 Flächeninanspruchnahme

Entstehungswahrscheinlichkeit. Die in Anspruch genommen Fläche für den untertägigen Betrieb wird maßgeblich durch die notwendige Thermalwassertrasse bestimmt, da die notwendigen Tiefbohrungen nach Abschluss der Bohrarbeiten und Rekultivierung des Bohrplatzes einen vernachlässigbaren Flächenbedarf aufweisen (vgl. Anhang A.2.1.14).

Technische Vermeidungs- oder Minderungsmaßnahmen. Durch die Orientierung der zu verlegenden Thermalwassertrasse an bereits bestehender Infrastruktur können ohnehin in Anspruch genommene Flächen genutzt und so ein weiterer Flächenbedarf vermieden werden.

Zu erwartende Umweltauswirkung. Da die Flächeninanspruchnahme durch den untertägigen Betrieb als gering bewertet werden kann, sind grundsätzlich keine negativen Umweltauswirkungen zu erwarten.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Obwohl keine negativen Umweltauswirkungen zu erwarten sind, ist hier anzumerken, dass die aus bergrechtlicher Sicht in Anspruch genommene Fläche letztlich dem Bewilligungsfeld entspricht (vgl. Kapitel 3.2.1). Eine anderweitige Nutzung des Feldes durch technisch unabhängige, aber unter das Bergrecht fallende Technologien (z. B. gleichzeitige Nutzung eines Feldes für tiefe Erdwärmesonden, hydrothermale und HDR-Nutzung) ist nicht möglich (z. B. /Sanner, Bußmann 2003/, /Schulz 2003/). Dadurch kann ggf. der nachhaltige Ausbau der Energieversorgung beeinträchtigt werden. Die untertägig bedingte Flächeninanspruchnahme wird daher nur als unzureichend gesetzlich geregelt eingestuft.

A.2.2.14 Anfall von Rest- und Abfallstoffen

Entstehungswahrscheinlichkeit. Bei Untertage offenen Systemen fallen durch den Betrieb des Thermalwasserkreislaufs verschiedene Rest- und Abfallstoffe an, die sachgerecht zu entsorgen bzw. zu beseitigen sind. Neben dem Austausch der Förderpumpe sind z. B. Filterrückstände sowie während Revisionsarbeiten in Slopgruben aufgefangenes Thermalwasser zu entsorgen. Wie aus der Erdöl- und Erdgasförderung bekannt, können Ausfällungen und Ablagerungen bei Thermalwässern hoher Salinität zudem die Entsorgung radioaktiver Materialien in Form von Ablagerungen und Filterreststoffen – bedingt durch den natürlichen radioaktiven Zerfall im Untergrund – notwendig machen (z. B. /Schröder et al. 2007/, /GRS 2005/). Die wesentlichen, für eine geothermische Anwendung relevanten Zusammenhänge hinsichtlich der Entstehung natürlich auftretender radioaktiver Materialien (naturally occurring radioactive material, NORM) im Thermalwasserkreislauf werden gegenwärtig im Rahmen des BMU-geförderten Projektes „Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen“ genau analysiert. Dabei werden u. a.

in der geothermischen Anlage in Neustadt-Glewe, da hier Thermalwasser mit hoher Salinität vorliegt, verschiedene Messungen durchgeführt. Bislang wurden maximale Radioaktivitäten der eingemessenen Filterrückstände von 100 Bq/g nachgewiesen (/Schröder et al. 2007/), was in der Bandbreite der bei der Erdöl- und Erdgasförderung auftretenden Aktivitäten von 1 bis 600 Bq/g (/GRS 2005/) liegt.

Technische Vermeidungs- bzw. Minderungsmaßnahmen. Durch den Einsatz auf das Thermalwasser abgestimmter Materialen sowie eine an die jeweilige Zusammensetzung angepasste Thermalwasserführung (z. B. führen kleine Radien in der Thermalwasserleitung zu Turbulenzen und damit zu Entgasung und Ausfällungen) kann diesem Problem begegnet werden. Voraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis der Reservoirchemie (/Schröder et al. 2007/).

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Sind Rest- und Abfallstoffe wiederverwendbar bzw. -verwertbar, müssen entsprechende Entsorgungswege geplant werden. Bei Stoffen, die keiner weiteren Nutzung zugeführt werden können, ist die Inanspruchnahme von Deponiefläche zu berücksichtigen. Mit einer natürlich auftretenden Radioaktivität sind keine strahlenschutztechnische, sondern maximal toxikologische Auswirkungen verbunden (/Schröder et al. 2007/). Im Normalbetrieb sind durch den geschlossenen Kreislauf des Thermalwassers dabei keine Auswirkungen zu erwarten; lediglich während entsprechender Revisionsarbeiten ist ggf. eine erhöhte Belastung bei direkt mit den Ausfällungen und Filterrestoffen in Berührung kommenden Arbeiten zu erwarten (/VKTA 2007/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Wie auch während der Bohrungsniederbringung sind für den dem Bergrecht unterstellten Anlagenbetrieb (d. h. Thermalwasserkreislauf) alle Entsorgungswege bereits im Vorfeld zu klären (vgl. Anhang A.2.1.13). Dies gilt auch für den Fall natürlich auftretender radioaktiver Materialien, da diese gemäß § 7 Abs. 3 StrSchV von den Bestimmungen der Strahlenschutzverordnung ausgenommen sind. Grundsätzlich ist aus der Erdöl- und Erdgasförderung die angesprochene NORM-Problematik seit Langem bekannt und auch durch das Bergrecht berücksichtigt. Da im Rahmen des BMU-Projektes „Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen“ allerdings definierte Handlungsempfehlungen und weitere geothermiespezifische Zusammenhänge erarbeitet werden, wird die gesetzliche Regelung gegenwärtig noch als unzureichend bewertet.

A.2.3 Betrieb Übertage

A.2.3.1 Thermischer Eintrag (Wasser)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Erfolgt die Kühlung von Geothermieanlagen in Durchlaufsystemen, wird das Kühlwasser einem Fließgewässer entnommen und nach Aufnahme der Abwärme aus dem Konversionsprozess dem Fließgewässer zugeführt (z. B. /LAWA 1991/). Die dadurch bedingte Erwärmung des Fließwassers wird durch die im Verhältnis zum Fließgewässer entnommene Kühlwassermenge und die Temperaturdifferenz zwischen erwärmtem Kühlwasser und Fließwasser bestimmt.

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Die in das Fließgewässer eingetragene Wärme kann nur durch eine Reduktion der Kühlleistung und damit verbunden eine Verringerung der Stromproduktion oder durch größere Kühlwassermengen beeinflusst werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Fließgewässer sind aus ökologischer Sicht Lebensräume mit speziellen Lebenseigenschaften. Eine Veränderung der Wassertemperatur kann sich dabei direkt auf die Lebensvorgänge von Fischen auswirken (z. B. /LAWA 1991/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Der Erwärmung von Fließgewässern werden durch die EU-Fischgewässerrichtlinie (RL 2006/44/EG) aus ökologischer Sicht vertretbare Grenzen gesetzt. Zum einen werden darin eine maximal zulässige Fließwassertemperatur und zum anderen eine maximal zulässige Aufwärmspanne vorgegeben (Tab. A -19).

Tab. A -19: Grenzwerte gemäß RL 2006/44/EG

	Maximale Gewässertemperatur in °C	Maximale Aufwärmspanne in K
Salmonidengewässer (sommerkühle Fließgewässer)	21,5	1,5
Cyprinidengewässer (sommerwarme Fließgewässer)	28	3

Um diese Grenzwerte einhalten zu können, muss für eine Frischwasserkühlung eine wasserrechtliche Erlaubnis gemäß Wasserhaushaltsgesetz vorliegen (vgl. Kapitel 3.2.3), die unter Berücksichtigung aller in einem Fließgewässer vorliegenden Wärmeeinträge, entsprechende Grenzwerte für die jeweilige Nutzung (d. h. zulässiger Entnahmestrom, zulässige Aufwärmspanne) festsetzt. Da durch diese Richtlinie keine Umweltauswirkungen zu erwarten sind, wird die gesetzliche Regelung als ausreichend bewertet. Aufgrund der bereits weitestgehend ausge-

schöpften Nutzung der Fließgewässer (vgl. /BMU 2005/) und der Gebundenheit von Geothermie-Kraftwerken an spezielle Standortbedingungen (u. a. Geologie, ggf. Wärmeabnehmer, Flächenverfügbarkeit) ist die Relevanz von Frischwasserkühlung im Zusammenhang mit dem weiteren Ausbau der geothermischen Stromerzeugung in Deutschland allerdings fraglich.

A.2.3.2 Wasserbedarf

Entstehungswahrscheinlichkeit. Der Wasserbedarf (Wassernutzung oder Wasserentnahme) während des obertägigen Anlagenbetriebs ist beim Einsatz von Durchlaufkühlung bzw. Nass- und Hybridkühltürmen gegeben. Im Falle der Durchlaufkühlung wird die Kühlung dabei durch eine kontinuierliche Nutzung eines Fließwasserteilstroms realisiert (Wassernutzung). Bei Nass- und Hybridkühltürmen dagegen kommt es zu einer teilweisen Verdunstung des im Kreis geführten Kühlwassers. Die dabei verdunstete Kühlwassermenge muss durch die Entnahme von sog. Zusatzwasser aus Grund- oder Oberflächengewässern ersetzt werden. Unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Erwärmung von Fließgewässern im Falle einer Wassernutzung bei Durchlaufkühlern bzw. der realisierbaren Kühltemperaturen bei Nass- und Hybridkühltürmen ergibt sich dabei ein spezifischer Wasserbedarf von ca. 1 bis 290 (m^3/h) je MW_{th} Kühlleistung (Tab. A -20).

Tab. A -20: Spezifischer Wasserbedarf verschiedener Kühlsysteme (eigene Berechnungen)

	Spezifischer Wasserbedarf in (m^3/h)/MW_{th}
Durchlaufkühlung	ca. 170 [a] bis 290 [b] (Wassernutzung)
Nasskühlturm	ca. 3 [a,c] bis 9 [a,d] (Wasserentnahme)
Hybridkühlturm	ca. 1 [a,c,e] bis 2 [a,d,e] (Wasserentnahme)

Allgemeine Annahmen: Wärmekapazität Wasser 4,18 kJ/(kg K);
max. zulässige bzw. realisierbare Temperaturzunahme Kühlwasser: [a] 5 K, [b] 3 K (Annahme gemäß Fischgewässerverordnung); Zusatzwassermenge: [c] 2 %, [d] 5 % der Kühlwasserumlaufmenge /LAWA 1991/; [e] Anteil Nasskühlbetrieb: 25 % /TSB 2005/

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Durch eine Verringerung der zu realisierenden Kühlleistung kann die notwendige Wassermenge bei allen Kühloptionen auf Kosten der produzierbaren Strommenge reduziert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, im Fall einer Durchlaufkühlung die benötigte Wassermenge durch eine stärkere Erwärmung des Fließwasserteilstroms (gesetzt den Fall, die dadurch bedingte Wassererwärmung ist zulässig) zu verringern.

Zu erwartende Umweltauswirkung. Die Erhaltung der ökologischen Qualität von Oberflächengewässern und Grundwasser bedingt neben der Einhaltung chemisch-physikalischer und thermischer Eigenschaften auch die Sicherstellung mengenmäßiger Grenzwerte (z. B. /BMU 2006/). Eine Umleitung bzw. Entnahme von Wasser kann dementsprechend zu Beeinträchtigungen führen.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Wasserentnahme sowie Wassernutzung bedürfen gemäß Wasserhaushaltsgesetz einer wasserrechtlichen Erlaubnis (vgl. Kapitel 3.2.3), welche nur erteilt wird, wenn die damit verbundenen Umweltauswirkungen als unbedenklich bewertet werden können. Die gesetzliche Regelung kann daher als ausreichend angesehen werden. Auch hier ist aufgrund der bereits weitestgehend ausgeschöpften Nutzung der Oberflächen- und Grundwässer (vgl. /BMU 2005/) und der Standortgebundenheit von Geothermiekraftwerken die Möglichkeit insbesondere der Durchlaufkühlung, aber auch von Nass- und Hybridkühltürmen fraglich (z. B. /LAWA 2007/)

A.2.3.3 Beeinflussung Mikroklima

Entstehungswahrscheinlichkeit. Bei Nass- und ggf. auch Hybridkühltürmen kommt es lokal zu einem thermischen Eintrag in die Luft sowie einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und damit zu einer lokalen Beeinflussung des Mikroklimas (z. B. /LAWA 1991/).

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Durch Verringerung der Kühlleistung (vgl. Anhang A.2.3.1) kann die Beeinflussung des Mikroklimas vermieden werden. Bei einem Einsatz von Hybrid- gegenüber Nasskühltürmen kann die Beeinflussung des Mikroklimas vermindert werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die Beeinflussung des Mikroklimas erfolgt durch die Verdunstung des Kühlwassers und die damit verbundene Aufnahme des Wasserdampfes. In Abhängigkeit der meteorologischen Standortbedingungen (z. B. Lufttemperatur, Luftfeuchte, Inversionsbildung) ist dadurch die Sichtbarkeit von Dampfschwaden und ggf. lokal erhöhter Niederschlag (vor Allem Taubildung) sowie die Verringerung der jährlichen Sonneinstrahlung bedingt (z. B. /LAWA 1991/, /TSB 2006/, /AXIMA 2007/).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Die zu erwartenden Umweltauswirkungen sind standortabhängig und müssen dementsprechend im Einzelfall geprüft werden. Im Rahmen einer nachhaltigen Raumentwicklung, die durch das Raumordnungsgesetz entsprechend verfolgt wird, sind keine signifikanten negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten. Die Beeinflussung des Mikroklimas wird dementsprechend als gesetzlich ausreichend geregelt eingeschätzt.

A.2.3.4 Stofflicher Eintrag (Wasser)

Entstehungswahrscheinlichkeit. An die Qualität des Kühlwassers werden definierte Anforderungen gestellt, so dass für eine effiziente und ordnungsgemäße Funktion des Kühlsystems dem Kühlwasser ggf. Zuschlagstoffe beigemischt werden, um z. B. Korrosion von Anlagenteilen, Belagbildung und Mikro- und Makrobewuchs zu vermeiden (/LAWA 1991/). Im Falle der Durchlaufkühlung werden – neben Sauerstoff – die dabei eingesetzten Stoffe bei Rückführung des Kühlwassers in das Fließgewässer eingetragen.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Der stoffliche Eintrag in Wasser kann zu einer chemisch-physikalischen Beeinträchtigung der Gewässerqualität und damit verbunden der aquatischen Lebensbedingungen führen (vgl. Thermische Eintrag (Wasser), Wasserbedarf).

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Auch der stoffliche Eintrag in Oberflächengewässer und Grundwasser bedarf gemäß Wasserhaushaltsgesetz (vgl. Kapitel 3.2.3) einer wasserrechtlichen Genehmigung. Die zum Einsatz kommenden Zuschlagstoffe sind daher in Art und Menge begrenzt, so dass keine negativen Umweltauswirkungen durch den stofflichen Eintrag in Wasser zu erwarten sind. Die gesetzliche Regelung kann dementsprechend als ausreichend bewertet werden.

A.2.3.5 Stofflicher Eintrag (Luft, Boden)

Entstehungswahrscheinlichkeit. Da die Qualität des Kühlwassers definierten Anforderungen unterliegt, werden dem Kühlwasser ggf. Zuschlagstoffe beigemischt (vgl. Anhang A.2.3.4). Im Falle von Nass- und Hybridkühltürmen kann des dabei zu einem stofflichen Eintrag in die Luft kommen. Aufgrund der hierbei vernachlässigbaren Mengen wird dieser im Weiteren nicht berücksichtigt. Im Störfall kann es grundsätzlich zum Austritt von Arbeitsmitteln (und anderen Betriebsmitteln) an die Luft und in den Boden kommen.

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Durch entsprechende sicherheitstechnische Vorkehrungen kann dies jedoch auf ein vertretbares Restrisiko minimiert werden. Die dafür notwendige Anlagenkonstruktion ist in Abhängigkeit des eingesetzten Arbeitsmittels bei höherem umwelttechnischen Gefährdungspotenzial (Tab. A -21) deutlich aufwändiger. Z. B. ist für auftretende Leckageströme in einer Kalina-Anlage ein Absorptionssystem vorzusehen, während ORC-Anlagen mit den in Tab. A -21 aufgeführten übrigen Arbeitsmitteln in der Regel mit einer Belüftung auskommen (z. B. /FGT 2007a/). Es ist jedoch zu bemerken, dass auch in ORC-Anlagen ggf. ökotoxikologische Arbeitsmittel zum Einsatz kommen können.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die bei einem Austritt des Arbeitsmittels beispielhaft zu erwartenden Umweltauswirkungen sind in Tab. A -21 dargestellt.

Tab. A -21: Vergleich verschiedener Arbeitsmittel für binäre Kreisprozesse

	Ammoniak [a]	Isobutan [a]	Propan [a]	RC318 [a]
Einstufung gemäß RL 2006/121/EG	entzündlich; gesundheitsschädlich: giftig: beim Einatmen, verursacht Verätzungen; umweltgefährlich: sehr giftig für Wasserorganismen	hochentzündlich, reizt die Augen	hochentzündlich	nicht als gefährlicher Stoff klassifiziert
Wassergefährdungsklasse	2	1	-	-

[a] entsprechend EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß der Technischen Regelen für Gefahrstoffe (TRGS 220)

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Da es sich bei ORC- und Kalina-Anlagen um überwachungsbedürftige Anlagen im Sinne des Geräte- und Produktsicherheitsgesetzes handelt (vgl. § 2 Abs. 7 GPSG), sind die in der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) definierten Vorschriften zu beachten. Neben allgemeinen Vorschriften für Arbeitsmittel sind darin eine Prüfung vor Inbetriebnahme sowie Prüfungen während des Betriebes durch eine entsprechende Aufsichtsbehörde festgelegt. Beim Einsatz umweltgefährlicher Arbeitsmittel muss gemäß RL 2006/121/EG ein Sicherheitsdatenblatt vorliegen und die darin enthaltenen Vorgaben eingehalten werden. Neben Informationen zur Zusammensetzung werden darin auch Angaben z. B. zur Ökologie, zur Toxikologie, zur Entsorgung sowie zur sachgerechten Handhabung, Lagerung und Schutzbestimmungen für den Umgang am Arbeitsplatz (z. B. Maximale Arbeitsplatzkonzentration, MAK) gemacht. Aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen kann der stoffliche Eintrag durch Arbeitsmittel auf ein anlagentechnisches Restrisiko minimiert werden. Die gesetzliche Reglung ist ausreichend.

A.2.3.6 Lärmwirkung

Entstehungswahrscheinlichkeit. Der während des obertägigen Anlagenbetriebs auftretende Lärm wird vorrangig durch den Transformator, den Generator und durch Ventilatoren des Kühlsystems (d. h. Kühlturm, Trockenkühler, Trockenkondensator) verursacht. Während Transfor-

mator und Generator in der Regel im Kraftwerksgebäude untergebracht sein werden, stellen die Ventilatoren des Kühlsystems den letztlich größten Lärmemittenten dar.

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Durch Schallschutzmaßnahmen im Gebäude kann die Lärmwirkung weitestgehend eingedämmt werden. Bei Ventilatoren besteht die Möglichkeit diese durch z. B. Holzgerüste zu verkleiden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Wie bereits in Anhang A.2.1.12 angesprochen, können in Abhängigkeit der Intensität Menschen und vor Allem auch Tiere durch Lärmimmissionen beeinträchtigt werden.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Aus gesetzlicher Sicht sind die Immissionsgrenzwerte der TA-Lärm bindend (vgl. Anhang A.2.1.12), welche vor Allem bei Kühlsystemen in Wohngebieten zu umfangreichen Lärmminderungsmaßnahmen führen können (z. B. /Siemens 2007/).

A.2.3.7 Flächeninanspruchnahme

Entstehungswahrscheinlichkeit. Wurde der Bohrplatz ordnungsgemäß rückgebaut, nimmt maßgeblich der obertägige Anlagenteil u. a. durch das Kraftwerksgebäude und Komponenten des Kühlsystems Fläche in Anspruch. Luftgekühlte Kühlsysteme benötigen dabei gegenüber Kühltürmen etwa das Vierfache an Fläche (/TSB 2005/). Die spezifische Flächeninanspruchnahme des gesamten Kraftwerks liegt ungefähr bei 0,1 m^2/MWh (/Siemens 2007/) bis 0,4 m^2/MWh (/Kagel et al. 2005/).

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die vorübergehende Inanspruchnahme einer Fläche ist mit der Umwandlung der natürlichen Flächennutzung und einer Veränderung der Raumordnung verbunden.

Technische Minderungsmaßnahmen. Durch eine kompakte Anlagenbauweise kann die benötigte Fläche verringert werden. Der Minderung der Flächeninanspruchnahme sind dabei allerdings Grenzen gesetzt.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Durch das Raumordnungsgesetz werden die unterschiedlichen Anforderungen (d. h. soziale, wirtschaftliche, ökologische Ansprüche) einer nachhaltigen Raumentwicklung auf Planungsebene abgestimmt (vgl. Kapitel 3.2.6.2). Die Flächeninanspruchnahme von Geothermiekraftwerken wird daher gesetzlich ausreichend geregelt.

A.2.3.8 Anfall von Rest- und Abfallstoffen

Für den Betrieb des obertägigen Anlagenteils sind nur geringe Mengen an Rest- und Abfallstoffen (z. B. Abschlämmwasser aus Kühltürmen) zu erwarten. Deren Entsorgung bzw. Beseitigung muss dabei gemäß Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz erfolgen (vgl. Kapitel 3.2.6.1). Die gesetzliche Regelung wird daher als ausreichend angesehen.

A.2.3.9 Visuelle Beeinträchtigung

Entstehungswahrscheinlichkeit. Das Kraftwerksgebäude sowie Komponenten des Kühlsystems (vor Allem Kühlturm) können zu einer visuellen Beeinträchtigung führen. Beim Betrieb von Kühltürmen ist zudem die Sichtbarkeit von Dampfschwaden möglich.

Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen. Durch entsprechendes Design und Anpassung an das jeweilige Umfeld kann die visuelle Beeinträchtigung ggf. vermieden bzw. verringert werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. Die Störung des Landschaftsbildes kann den (persönlichen) Erholungswert von Menschen herabsetzen.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Beim Bau des Kraftwerks sind die städtebaulichen Auflagen (z. B. maximale Höhe) gemäß Bauplanungsrecht zu berücksichtigen, wodurch eine objektive Regelung der visuellen Beeinträchtigung gegeben ist. Die gesetzliche Regelung wird daher als ausreichend bewertet.

A.2.4 Rückbau Untertage

Entstehungswahrscheinlichkeit. Nach dem Betriebsende wird die Bohrung sowie die zum Betrieb notwendige Anlagenperipherie (z. B. Thermalwasserleitung) in der Regel nicht mehr genutzt und muss rückgebaut werden.

Zu erwartende Umweltauswirkungen. In einer stillgelegten Bohrung kann es dabei zu Schadstoffeinträgen und ggf. einen hydraulischen Kurzschluss unterschiedlicher Wasser führender Gesteinsschichten kommen (z. B. /Kaltschmitt et al. 1999/). Anfallende Rest- und Abfallstoffe sind zu beseitigen bzw. entsorgen.

Technische Vermeidungsmaßnahmen. Durch eine sachgemäße Verfüllung und Abdichtung der Bohrung können die angesprochenen Umweltauswirkungen vermieden werden.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelung. Gemäß § 53 BBergG ist für die Einstellung des Betriebs einer Geothermiebohrung ein Abschlussbetriebsplan zu erstellen, in dem die technische Durchführung der Bohrungsverfüllung und -abdichtung genau darzulegen ist. Die Fläche ist dabei in der Form wieder nutzbar zu machen, dass eine entsprechende Nachnutzung der Fläche ohne Gefahren für die Umwelt und Dritte erfolgen kann. Rest- und Abfallstoffe sind – wie auch während des Betriebs – sachgerecht zu entsorgen (vgl. Anhang A.2.1.13). Die gesetzliche Regelung ist daher ausreichend.

A.3 Fachexperten-Gremium

A.3.1 Workshop Teilnhemer

Experten-Workshop „Lokale Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland“, 13. November 2006 am Umweltbundesamt in Berlin:

Bruchmann, Ullrich	BMU, Referat KI I 5, F&E im Bereich erneuerbarer Energien
Coder, Doreen	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leizpig
Milsch, Harald	GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
Lohse, Christiane	Umweltbundesamt, FB I, Abt. I.4, Klimaschutz, Umwelt und Energie
Richter, Simone	Umweltbundesamt, FB II, Abt. II.2, Wasser
Rüter, Horst	Geothermische Vereinigung (GtV)
Schellschmidt, Rüdiger	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA)
Schröder, Hartwig	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Winde, Katrin	Bundesamt für Naturschutz (BfN)

Experten-Workshop „Lebensweganalyse einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland“, 14. März 2007 am Institut für Energetik und Umwelt in Leizpig:

Bruchmann, Ullrich	BMU, Referat KI III 5, F&E im Bereich erneuerbarer Energien
Kirschbaum, Bernd	Umweltbundesamt, FB II, Abt. II.2, Wasser
Lohse, Christiane	Umweltbundesamt, FB I, Abt. I.4, Klimaschutz, Umwelt und Energie
Rausch, Lothar	Öko-Institut e.V.
Viertl, Cornelia	BMU, Referat KI III 2, Marktanreizprogramme für ern. Energien
Westermann, Bärbel	Umweltbundesamt, FB I, Abt. I.4, Klimaschutz, Umwelt und Energie

Workshop zum Projektabschluss „Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland“, 12. Juli 2007 am Umweltbundesamt in Dessau:

Coder, Doreen	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Leizpig
Frauenstein, Jörg	Umweltbundesamt, FG II 4.3, Terrestrische Ökologie
Igel, Friedhelm	Bundesamt für Naturschutz (BfN)
Kabus, Frank	Geothermie Neubrandenburg (GTN)

Kirschbaum, Bernd	Umweltbundesamt, FB II, Abt. II 2, Wasser
Lohse, Christiane	Umweltbundesamt, FB I, Abt. I 4, Klimaschutz, Umwelt und Energie
Milsch, Harald	GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
Müschen, Klaus	Umweltbundesamt, FB I, Abt. I 4, Klimaschutz, Umwelt und Energie
Rausch, Lothar	Öko-Institut e.V.
Rüter, Horst	Geothermische Vereinigung (GtV)
Schellschmidt, Rüdiger	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA)
Szablinski, Dariusz	Pfalzwerke
Viertl, Cornelia	BMU, Referat KI III 2, Marktanreizprogramme für ern. Energien
Vollmer, Carla	Umweltbundesamt, FB I, Abt. I 4, Klimaschutz, Umwelt und Energie
Wissing, Lothar	Projektträger Jülich (PTJ)

A.3.2 Fachgespräche und Gutachten

Huelke, Robert	M-I Swaco
Jung, Reinhard	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA)
Karad, Martin	M-I Swaco
Sperber, Axel	Ingenieur-Büro Axel, Sperber (IDEAS)

Bußmann, Werner	Geohermische Vereinigung (GtV)
Buness, Hermann	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA)
Dombrowski, Boris	DMT
Fischer, Jochen	Bundes-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
Gebhard, Fabian	DMT
Ghergut, Julia	Universität Göttingen
Kabus, Frank	Geothermie Neubrandenburg (GTN)
Rogge, Silke	FirstGeoTherm (FGT)
Rathje, Hans-Werner	Siemens AG
Richter, Benjamin	Rödl & Partner
Rybach, Ladislaus	ETH Zürich, Geowatt
Schick, Holger	Bergamt Rheinland-Pfalz
Schubert, Volker	AXIMA Refrigeration GmbH
Schuberth, Jens	Umweltbundesamt, FB I, Abt. I 4.4 Rationelle Energienutzung
Seibt, Peter	Geothermie Neubrandenburg (GTN)

Tischner, Torsten	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA)
Uhlig, Stephan	GEOTEC CONSULT
Zimmer, Rainer	Bergamt Bayern