

GEOthermie Kanton Zug
VERTIEFUNGSStudIE
**Beurteilung konkurrierende Nutzungen,
Erschwernisse und No-Gos**

Auftraggeber: Amt für Umweltschutz des Kantons Zug
Erneuerbare Energien/Klima
Aabachstrasse 5
6301 Zug

Projektteam: geoform Geologische Beratungen und Studien AG
Geologisches Büro Dr. Lorenz Wyssling AG
geosfer AG
GeoWell GmbH
Keller + Lorenz AG

Objekt: Geothermie Kanton Zug, Vertiefungsstudie.

Luzern, 21. Februar 2014

13.5256

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
3	Relevante rechtliche Grundlagen	2
4	Geologische Übersicht	4
	4.1 Einleitung.....	4
	4.2 Zu erwartende Gesteinsabfolge.....	5
	4.3 Tektonische Gliederung.....	8
	4.4 Wesentliche tektonische Störungssysteme.....	8
5	Beurteilung konkurrenzierender Nutzungen	11
	5.1 Grundwassernutzung.....	11
	5.1.1 Beschrieb der Grundwassernutzungen.....	11
	5.1.2 Konflikte mit Tiefengeothermie	11
	5.1.3 Günstige Gebiete aus Sicht Grundwassernutzung.....	12
	5.2 Fossile Energierohstoffe (Erdgas, Erdöl und Kohle)	12
	5.2.1 Potenziale und mögliche Verbreitung	12
	5.2.2 Konfliktpotenziale mit der Tiefengeothermie	16
	5.3 Erdgasspeicherung.....	17
	5.3.1 Potenzielle Speichergesteine und mögliche Verbreitung	17
	5.3.2 Konflikte mit Tiefengeothermie	17
	5.4 Tiefenentsorgung von CO ₂	17
	5.4.1 Potenzielle Speichergesteine und mögliche Verbreitung	17
	5.4.2 Konflikte mit Tiefengeothermie	18
	5.4.3 Kombinierte petrothermale Geothermie mit CO ₂ -Sequestrierung.....	18
6	Erschwernisse / No-Gos	18
	6.1 Tiefe Quartärbecken mit gespanntem Grundwasser.....	18
	6.1.1 Geologischer Beschrieb.....	18
	6.1.2 Beurteilung Erschwernisse / No-Gos	19
	6.2 Sackungsmasse von St. Verena (Zug) sowie tiefgründige Rutschungen	20
	6.2.1 Geologischer Beschrieb.....	20
	6.2.2 Beurteilung Erschwernisse / No-Gos	20
	6.3 Gasvorkommen	21
	6.4 Zusammenfassung	22
	6.5 Bohrtechnische Rahmenbedingung und Risiken.....	23
	6.5.1 Grundsätzliches.....	23

6.5.2 Standortwahl und Bohrplatz.....	23
6.5.3 Bohrplanung	26
6.5.4 Bohrgerät.....	28
6.5.5 Risiken.....	30
7 Zusammenfassung.....	33
8 Literatur.....	36
<i>Anhang</i>	
Anhang 1 Geologische Karte mit Verbreitung der tiefen Felsrinnen, Massstab 1 : 75'000.	
Anhang 2 Karte Grundwasser: Gewässerschutzbereich Au und artesische Grundwasser-Vorkommen, Massstab 1 : 75'000.	
Anhang 3 Fossile Energierohstoffe, Massstab 1 : 75'000.	
Anhang 4 Mutmassliche Verbreitung der tiefe Permokarbontröge, Massstab 1 : 75'000.	
Anhang 5 Naturgefahren: Tiefgründige Rutschungen und Sackungen, Massstab 1 : 50'000.	

1 EINLEITUNG

Der Bund rechnet bei der Energieerzeugung künftig mit grossen Steigerungen in den Bereichen Photovoltaik (rund +11,12 TWh/a), der Geothermie (rund +4,29 TWh/a) und der Windenergie (rund +4,26 TWh/a). Biogas und Holzenergie sollen weitere essenzielle Beiträge liefern.

Um die anvisierten Ziele für die tiefe Geothermie zu erreichen, ist die Bereitstellung geologisch-geothermischer Grundlagen unabdingbar, was – im Gegensatz zur schweizweit untersuchten untiefen Geothermie (Leu, 1999) - bislang mehrheitlich auf kantonaler Ebene geschah.

Durch die bestehenden Untersuchungen für den Kanton Luzern (Umwelt und Energie, 2012) – deren geologisch-geothermischer Teil 2 vom Team Keller + Lorenz AG / Geoform AG erarbeitet wurde - wurde dort der Untergrund südlich der Linie Menznau-Sempach-Hochdorf am ehesten als höffig für hydrothermale Systeme befunden, während nördlich der Linie Wolhusen-Rothenburg-Root gute Bedingungen für petrothermale Anlagen prognostiziert wurden.

Analoge geologisch-geothermische Erkenntnisse aus dem Kanton Luzern wurden durch Studie "Vorabklärungen zur Tiefengeothermie" vom 3. April 2013 (Dr. Roland Wyss GmbH, 2013) auch für den auf den ersten Blick geologisch vergleichbaren Kanton Zug prognostiziert. Diese Studie formulierte „Schritte zur Forcierung der Tiefengeothermie“.

Auf Einladung des Kantons Zug haben wir am 15. Mai 2013 eine Offerte für eine Vertiefungsstudie zur tiefen Geothermie im Kanton Zug eingereicht, aus deren Auftragsanalyse fünf vorgeschlagene Arbeitsschritte resultierten: ¹Zusammenstellung geologisch-geothermische Kenntnisse, ²Beurteilung konkurrierende Nutzungen, ³Reinterpretation Seismik, ⁴Erschwernisse / No-Gos und ⁵Reinterpretation Geothermik.

Nach weiteren Abklärungen hat sich der Kanton Zug für ein schrittweises Vorgehen entschieden und unserem Team den Auftrag zur Ausarbeitung der zwei Module ²Beurteilung konkurrierende Nutzungen sowie ⁴Erschwernisse / No-Gos gegeben. Eine Prognose des tiefengeothermischen Potenzials sowie geologisch höffiger Zielhorizonte oder –gebiete sind somit nicht Gegenstand der vorliegenden Begutachtung.

Hinsichtlich der konkurrierenden Nutzungen gebührt im schweizerischen Mittelland potenziellen Erdgasvorkommen hohe Beachtung. Dazu kommen weitere mögliche Untergrundnutzungen (Speicherung, Tiefenentsorgung), die einer kurzen Beurteilung zu unterziehen sind.

Geologisch ist Kanton Zug geprägt durch bemerkenswerte Grundwasser-Leiter auch ausserhalb der Talsohle im Lorze-Sihl Gebiet oder in den maskierten Felstalungen von Maschwanden – Knonau – Blickensdorf und von Inwil – Menzingen – Richterswil, wo örtlich auch artesisch gespannte Druckverhältnisse herrschen. Diese Grundwasser-Leiter müssen als konkurrierende Nutzungen und / oder Erschwernisse / No-Gos beurteilt werden.

2 GRUNDLAGEN

Für den vorliegenden Bericht wurden die geologisch-geophysikalischen Grundlagen in folgenden Arbeitsschritten erarbeitet:

<i>Vorbereitende Arbeiten / Data-Mining</i>	<ul style="list-style-type: none">• Grundlagenstudium.• Archivarbeiten und Aktenstudium.• Zusammenstellung und Erfassung relevanter Unterlagen.
<i>Auswertungen / Erstellung der Übersichtskarten</i>	<ul style="list-style-type: none">• Auswertung vorhandener Unterlagen.• Sichtung der Neuinterpretation Seismik (Proseis, 2013).• Beurteilung konkurrierende Nutzungen und Erschwernisse.• Darstellung der Ergebnisse anhand von Übersichtskarten.
<i>Berichtverfassung</i>	<ul style="list-style-type: none">• Generelle Erläuterungen der geologischen Verhältnisse.• Zusammenfassung rechtliche Grundlagen.• Beschreibung konkurrierende Nutzungen und Erschwernisse.• Zusammenfassende Erläuterung und Beurteilung der Risiken.

3 RELEVANTE RECHTLICHE GRUNDLAGEN

Die generellen gesetzlichen Grundlagen und Richtlinien sind bezüglich der geothermischen Untergrundnutzung bereits hinreichend beschrieben (Dr. Roland Wyss GmbH, 2013), so dass wir darauf verweisen können.

Hinsichtlich der vorliegenden Aufgabenstellung und der Eruierung der No-Gos sind nachfolgend relevante Auszüge aus den Gesetzestexten (BUWAL, 2004) zusammengetragen:

Gewässerschutzgesetz (GSchG)

Art. 3 Sorgfaltspflicht

Jedermann ist verpflichtet, alle nach den Umständen gebotene Sorgfalt anzuwenden, um nachteilige Einwirkungen auf die Gewässer zu vermeiden.

Art. 3a Verursacherprinzip

Wer Massnahmen nach diesem Gesetz verursacht, trägt die Kosten dafür.

Art. 6 Grundsatz

1 Es ist untersagt, Stoffe, die Wasser verunreinigen können, mittelbar oder unmittelbar in ein Gewässer einzubringen oder sie versickern zu lassen.

2 Es ist auch untersagt, solche Stoffe ausserhalb eines Gewässers abzulagern oder auszubringen, sofern dadurch die konkrete Gefahr einer Verunreinigung des Wassers entsteht.

Art. 19 Gewässerschutzbereiche

2 In den besonders gefährdeten Bereichen dürfen die Erstellung und die Änderung von Bauten und Anlagen sowie Grabungen, Erdbewegungen und ähnliche Arbeiten nur gestützt auf eine kantonale Bewilligung vorgenommen werden.

Art. 43 Erhaltung von Grundwasservorkommen

3 Grundwasservorkommen dürfen nicht dauernd miteinander verbunden werden, wenn dadurch Menge oder Qualität des Grundwassers beeinträchtigt werden können.

4 Speichervolumen und Durchfluss nutzbarer Grundwasservorkommen dürfen durch Einbauten nicht wesentlich und dauernd verringert werden.

Art. 32 Bewilligungen für Anlagen und Tätigkeiten in den besonders gefährdeten Bereichen

1 In den besonders gefährdeten Bereichen ist eine Bewilligung nach Artikel 19

Absatz 2 GSchG erforderlich für die Erstellung oder Änderung von Anlagen, die eine Gefahr für die Gewässer darstellen.

2 In den besonders gefährdeten Bereichen A_U und Z_U ist eine Bewilligung insbesondere erforderlich für:

....

b. Anlagen, die Deckschichten oder Grundwasserstauer verletzen;

....

f. Bohrungen.

4 Die Behörde erteilt eine Bewilligung, wenn mit Auflagen und Bedingungen ein ausreichender Schutz der Gewässer gewährleistet werden kann; sie legt dabei auch die **Anforderungen an die Stilllegung der Anlagen** fest.

Die Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“ (BAFU, 2009) beurteilt Erdwärmesonden aus gewässerschutzrechtlicher Sicht: Im sog. „übrigen Bereich“ sind demzufolge Erdwärmesonden zugelassen, im **Gewässerschutzbereich A_U können nach Art. 32 GSchV fallweise Bewilligungen erteilt werden**. Sinngemässes ist auch für tiefe Geothermiebohrungen gültig.

Umweltschutzgesetz (USG)

Seit 1986 muss für Anlagen mit erheblichen Risiken negativer Auswirkungen auf die Umwelt eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchgeführt werden. Das Umweltschutzgesetz (USG) sieht in Art. 10b Abs. 2 vor, dass die behördlichen Umweltschutzfachstellen Richtlinien aufstellen, nach denen der Umweltverträglichkeitsbericht (UVB) erstellt werden soll, der gemäss Art. 13 Abs. 1 der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV) von der zuständigen kantonalen Behörde zu prüfen ist.

Es muss damit gerechnet werden, dass - im Gegensatz zu einfachen Erdwärmesonden - für tiefe Geothermiebohrungen und vor allem geothermische Kraftwerke ein Umweltverträglichkeitsbericht (UVB) samt Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) nötig ist. Sowohl die Realisation als auch der Betrieb tiefer Geothermiebohrungen können unerwünschte Auswirkungen auf die Umwelt haben, die mit geeigneten Massnahmen vermindert oder vermieden werden müssen.

4 GEOLOGISCHE ÜBERSICHT

4.1 EINLEITUNG

Der geologische Untergrund des Kantons Zug ist im Vergleich zu den Nachbargebieten tektonisch relativ kompliziert, schlecht untersucht und wird dementsprechend in Publikationen sehr unterschiedlich dargestellt.

Der Felsuntergrund gehört zu den Ablagerungen des Molasse-Beckens und seiner südlichen Randzone (Abb. 1). Darunter verstehen Geologen die Verfüllung des alpinen Vorlandbeckens (entspricht etwa dem heutigen geographischen Mittelland) aus dem Abtragungsschutt der in Entstehung begriffenen Alpen – bestehend aus Trümmergesteinen wie Sandsteinen, Silt- und Schlammsteinen oder Konglomeraten. Die Ablagerung erfolgte in der Tertiärzeit (Erdneuzeit), in einem Zeitraum zwischen rund 35 und 10 Millionen Jahren vor heute. Die Beckenfüllung der Molasse besitzt im Querschnitt eine keilförmige Geometrie, die aus dem geologischen Querprofil (Abb. 2) ersichtlich ist.

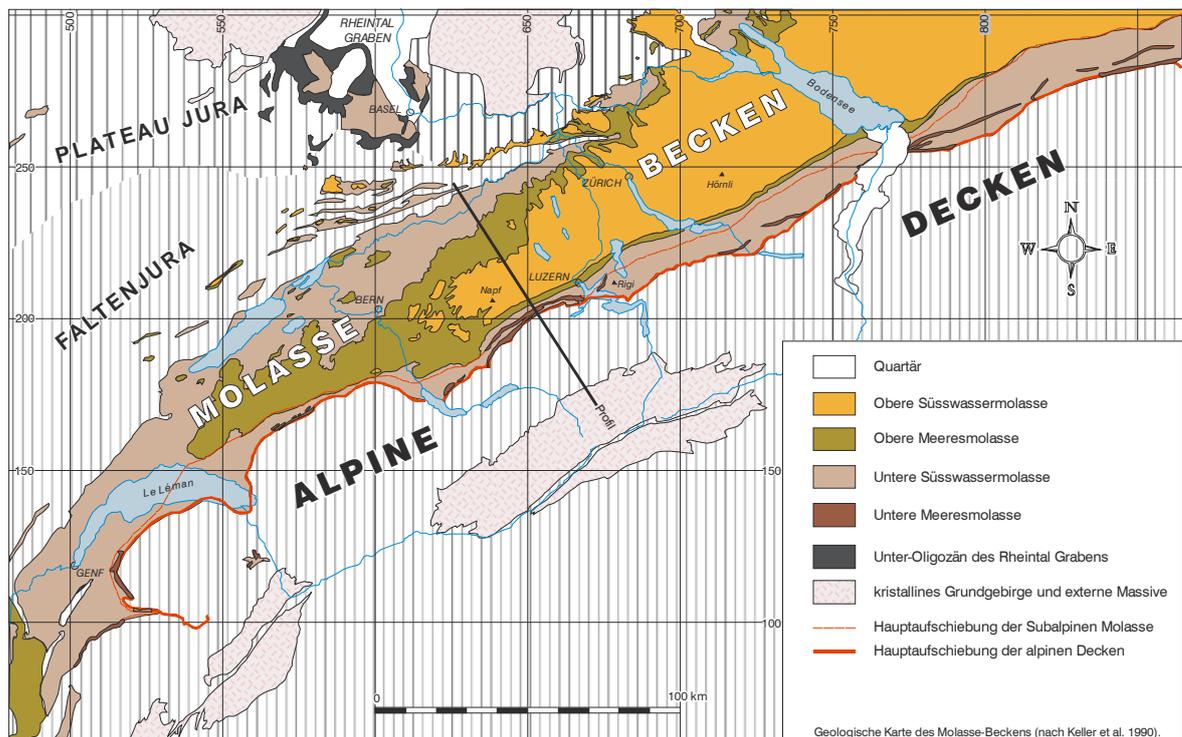


Abb. 1 Die vereinfachte geologische Karte des Molasse-Beckens zeigt die Verbreitung der verschiedenen Gruppen der Molasse (aus Keller 1990). Im Kanton Zug stehen im Süden die Untere Süswassermolasse, im Mittelteil die Obere Meeresmolasse und in Norden verbreiteter die Obere Süswassermolasse an. Profilspur vgl. Abb. 2.

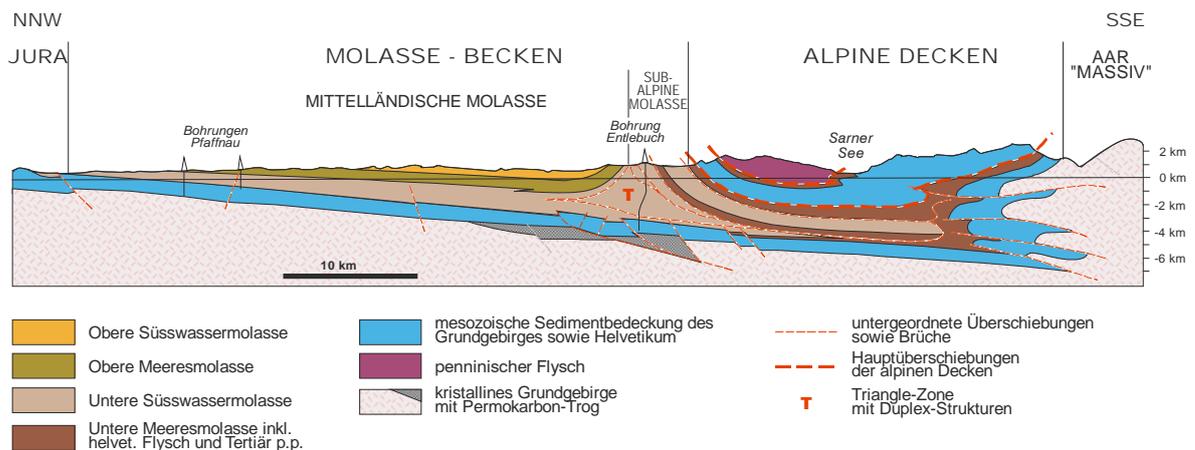


Abb. 2 Geologisches Übersichtsprofil durch den Kanton Luzern und seine angrenzenden Gebiete (Keller, 1990) (Vollmayr, 1987). Lage des Profils vgl. Abb. 1.

Südlich an das Molasse-Becken grenzen – bereits ausserhalb des Kantons Zug - die alpinen Decken, die im Zuge der Alpenfaltung auf die Molasse aufgeschoben wurden. Der ältere Teil dieser alpinen Decken wird durch das Grundgebirge gebildet - Granite und Gneise, wie sie S von Erstfeld aufgeschlossen sind und die das Aar- und das Gotthard-Massiv bilden (Abb. 2). Dieses mehr als 250 Mio. Jahre alte Grundgebirge erscheint N des Molasse-Beckens erst wieder im Schwarzwald an der Oberfläche. Im Dach des Grundgebirges finden sich örtlich langgezogene Tröge aus sogenanntem Permo-Karbon – teilweise mit Steinkohle-führende Ablagerungen.

Das Grundgebirge ist unter dem Kanton Zug überlagert von den mehrheitlich aus Karbonatgesteinen (Kalke, Mergel) bestehenden Formationen des Mesozoikums (Erdmittelalter), abgelagert vor ca. 250 bis 155 Mio. Jahren im Gebiet des ehemaligen Tethys-Ozeans (ausgedehnter Vorläufer des Mittelmeers). Auch die mesozoischen Karbonatgesteine treten erst nördlich des Kantons Zug im Juragebirge wieder an die Oberfläche.

Aus dem geologischen Übersichtsprofil (Abb. 2) wird deutlich, dass das Grundgebirge und seine Sedimentbedeckung aus mesozoischen Formationen die Unterlage des Molasse-Beckens bilden. Da das Molasse-Becken eine keilförmige Geometrie mit nach Süden zunehmender Mächtigkeit besitzt, taucht vom Jura (N) her kommend das Grundgebirge mit der darauf liegenden mesozoischen Sedimentbedeckung gegen die Alpen (S) hin in zunehmend grössere Tiefe ab.

4.2 ZU ERWARTENDE GESTEINSABFOLGE

Der Untergrund des Kantons Zug wird durch eine wechselhafte Abfolge geologischer Einheiten gebildet, unten beginnend mit dem Grundgebirge aus kristallinen Gesteinen (Gneis, Granite) sowie darin eingebetteten paläozoischen Sedimentzonen, den sog. Permo-Karbon-Trögen (Silt- und Schlammsteine, Sandstein, Konglomerate und Steinkohlen).

Darüber folgen die von Kalksteinen und tonreicheren Sedimenten dominierten Ablagerungen des Mesozoikums – im S des Kantons um 730 m mächtig, im N vermutlich zwischen ca. 800 bis 900 m -, die im Dach während einer Erosionsphase im Alttertiär verkarstet wurden. Darüber folgen die bis über 4 km mächtigen Ablagerungen der Molasse, in der Tertiärzeit aus dem Abtragungsschutt der sich bildenden Alpen abgelagert.

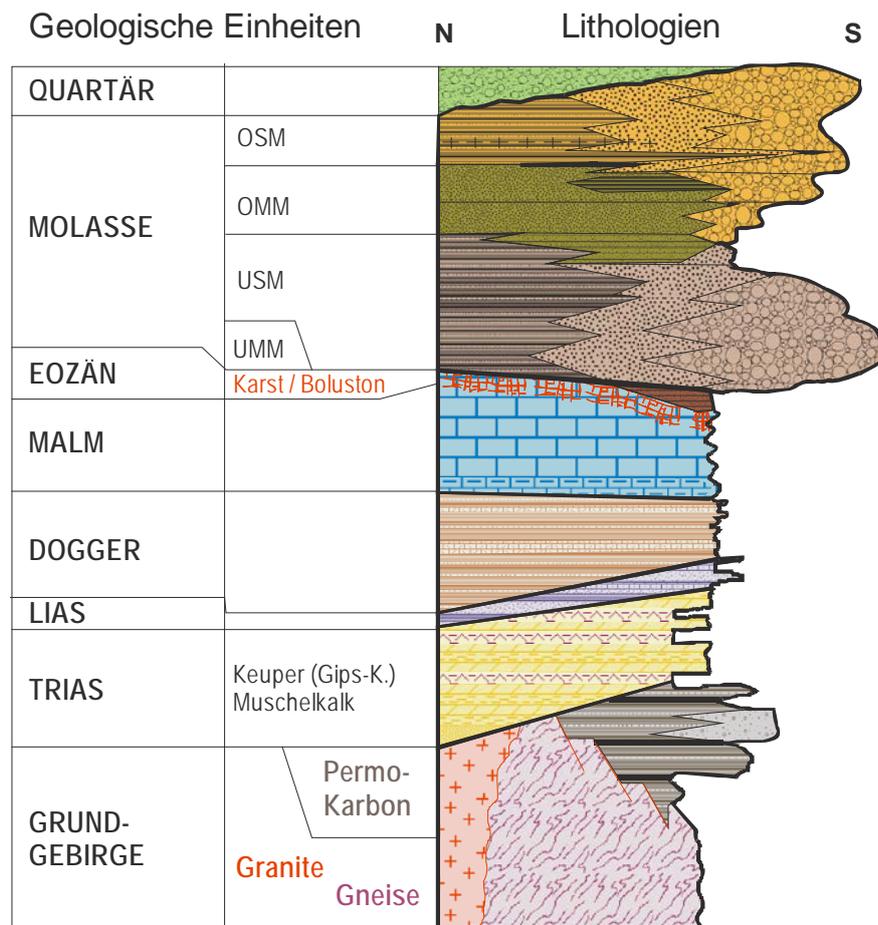


Abb. 3 Zusammenfassendes geologisches Sammelprofil für die Kantone Zug und Luzern, nach (Lemcke, 1968), (Vollmayr, 1987) und (Keller, 1992).

Im Felsuntergrund des Kantons Zug lassen sich von oben (jung) nach unten (alt) folgende geologischen Einheiten unterscheiden:

Obere Süsswasser- molasse OSM Kontinentale Ablagerungen zwischen Napf- (W) und Hörnli-Schuttfächer (E), gegen N in Flussebene mit Sümpfen und Seen. Wechsellagerungen aus mächtigen Sandsteinbänken (mehrere Meter) und bankigen, heterolithischen Wechselschichtungen aus Silt- und Schlammsteinen, Mergeln und dünneren Sandstein-Bänken. Gegen den S hin Zunahme der Anteile und Mächtigkeiten von Konglomeraten (Nagelfluh, z.B. Dach der Baarburg).

	<p>Entlang einer Linie Rotkreuz – Zug – Felsrinne Zug –Menzingen (Anhang 1) hohe Anteile an Silt- und Schlammsteinen. Die Mächtigkeit ist erosionsbedingt variabel und beträgt je nach Örtlichkeit rund 300 bis 450 m.</p>
<i>Obere Meeresmolasse OMM</i>	<p>Marine Ablagerungen: Strand- und Wattenmeer, Küstenebene mit Seen und Sümpfen, gegen Napf hin Deltaablagerungen. Mächtige Abfolgen aus quarzreichen Sandsteinen («Luzerner Sandstein»), teilweise mit dünnen Siltsteinhäuten und -zwischen-schichten. Im südlichen Kantonsteil basal und im Mittelteil mit dekametermächtigen Einschaltungen aus Silt- und Schlammsteinen, tw. mit dünnen Steinkohlen (Steintobel, Sihltal). Im oberen Teil mit konglomeratischen Sandsteinen, die in die Obere Süsswassermolasse überleiten. Die Mächtigkeit beträgt rund 800 bis 900 m.</p>
<i>Untere Süsswassermolasse USM</i>	<p>Kontinentale Ablagerungen: Grosse Schutfächer (Rigi - Rossberg), gegen N übergehend in Flussebene. Im Süden mächtige Konglomeratabfolgen (Rigi - Rossberg) mit dünnen Zwischen-schichten aus bankigen Wechsellagerungen Silt- und Schlammsteinen und Sandsteinen. Gegen N hin unter Abnahme des Konglomeratanteils feiner werdend und übergehend in Wechsellagerungen aus mächtigen Sandsteinbänken (mehrere Meter) und bankigen, heterolithischen Wechselschichtungen aus Silt- und Schlammsteinen, Mergeln und dünne-ren Sandstein-Bänken. Die Mächtigkeit beträgt in Hünenberg gut 1'900 m und nimmt nach N allmählich auf ca. 1'500 m ab. Im Überschiebungsgürtel und in der Subalpinen Molasse im S beträgt die Mächtigkeit in Folge des tektonischen Zusammenschubs bis über 4 km.</p>
<i>Untere Meeresmolasse UMM</i>	<p>Im Untergrund des Kt. Zug fehlen diese Flachmeer-, und Strandablagerungen aus Mergeln, Silt- und Schlammsteinen («Grisiger Mergel») und bankigen Sandsteinen im Dach («Horwer Sandstein») vermutlich. Hingegen ist die Untere Meeresmolasse an der Basis der aufgeschobenen, subalpinen Molasse (Tab. 1) SE von Walchwil entlang eines schmalen Streifens anstehend.</p>
<i>Eozän (Karst, Boluston)</i>	<p>Von der Kreidezeit bis in die ältere Tertiärzeit lagen die Kalke des Mesozoikums während Jahrmillionen an der Erdoberfläche und wurden tiefgründig verkarstet. In den Karsttaschen entwickelten sich sog. Bolustone und die Bohnerzformation. In diesem über 20 m mächtigen «Paläokarst» (Bohrung Entlebuch 1 (Vollmayr, 1987)) ist im obersten Bereich der Malmkalke örtlich eine erhöhte Karst-Porosität vorhanden, die eine gewisse Durchlässigkeit besitzt und die Zirkulation von Formationswasser und/oder Gas erlaubt.</p>
<i>Malm</i>	<p>Im Malm dominieren monotone Abfolgen aus massigen Kalkgesteinen, gegen die Basis hin mit zunehmenden Einschaltungen von Mergeln, einhergehend mit steigendem Tongehalt. Die Mächtigkeiten liegen um 400 m, von S nach N hin abnehmend.</p>
<i>Dogger</i>	<p>Wechselhafte Abfolge aus Tonsteinen, Mergeln, grobkörnigen (spätigen) Kalken sowie Eisenoolithen. Die Mächtigkeit nimmt von S (rund 60 m) gegen N (rund 280 m) hin zu.</p>
<i>Lias</i>	<p>Der Lias wird aufgebaut aus Sandsteinen und tw. kieseligen Kalken, gegen unten zunehmend mit Mergeln. Die Mächtigkeit dürfte ca. 60 m im S und knapp 400 m im N betragen.</p>
<i>Trias</i>	<p>Wechselhafte Abfolge aus Dolomit (z.B. Muschelkalk), Tonsteinen, Mergeln und gegen oben Sandsteinen (Schilfsandstein). Bemerkenswert sind mächtige Abfolgen aus Anhydrit („wasserfreier Gips“), meist vergesellschaftet mit Dolomit und Tonsteinen (sog. Gipskeuper). Teilweise kräftige Gammastrahlung aus Uran. Die Mächtigkeit nimmt vermutlich von knapp 180 m im S auf über 400 m im N hin zu.</p>
<i>Permo-Karbon</i>	<p>Im Süden wurde die Bohrung Entlebuch 1 rund 208 m in einen Permo-Karbon-Trog hinein abgeteuft, bestehend aus Sandsteinen und kohligem Tonsteinen mit unterschiedlich mächtigen</p>

gen Steinkohle-Schichten. Demgegenüber traf die Bohrung Pfaffnau 1 lediglich auf 11.5 m Brekzien ohne Kohlen.

Grundgebirge Das beispielsweise mit der Bohrung Pfaffnau 1 aufgeschlossene kristalline Grundgebirge besteht dort aus Graniten (Biotit-Granit in Pfaffnau 1), die gegen Süden vermutlich von Gneisen abgelöst werden. Es ist möglich, dass durch die einstige Freilegung dieser Gesteine (Perm-/Karbonzeit und älter) eine mächtigere Verwitterungszone des Felsen mit stärker verwitterten Gesteinen (Vergrusung) sowie Entlastungsklüften vorhanden sind.

4.3 TEKTONISCHE GLIEDERUNG

Im Zuge der jüngsten Alpenfaltung wurde der Felsuntergrund unter kompressiven tektonischen Verhältnissen deformiert: Im Süden hatte dies die Überschiebung der alpinen Decken sowie der subalpinen Molasse und die Anlage von Bruchsystemen und tektonischen Störungen zur Folge. Die tektonische Gliederung des Kantons Zug ist das Abbild dieser gebirgsbildenden Kräfte, so dass vier **tektonische Einheiten** (Tab. 1) unterscheidbar sind (vgl. auch Abb. 1, Abb. 2 und Abb. 4).

<i>Tektonische Einheit</i>	<i>Gesteine / Tektonisierung</i>
Aufgeschobene Molasse (subalpine M.)	Untere Meeresmolasse (UMM) und Untere Süsswassermolasse (USM), generell gegen SE einfallende Schichten, durch eine Überschiebung in zwei Teildecken zerlegt, basal Hauptaufschiebung der Molasse-Decke.
Triangle-Zone (Überschiebungsgürtel)	Untere Süsswassermolasse (USM), als mehrere Schuppen, Schichtung generell gegen SE einfallend, im Nordteil steilstehend.
Monoklinale Falte (Falte mit nur einem Schenkel)	Untere Süsswassermolasse (USM), Obere Meeresmolasse (OMM) und basale Obere Süsswassermolasse (OSM), im Gebiet östlich einer Linie Küssnacht – Rotkreuz deutlich stärker tektonisiert, Schichten teilweise überkippt oder steilstehend, gegen Norden hin mit abnehmendem Schichtfallen gegen NNW.
Mittelländische Molasse	Obere Süsswassermolasse (OSM), mehr oder weniger flach liegend.

Tab. 1 Die tektonischen Einheiten im Gebiet des Kantons Zug (vgl. Abb. 4).

4.4 WESENTLICHE TEKTONISCHE STÖRUNGSSYSTEME

Aus den seismischen Profilen sind im Untergrund des Kantons Zug ausserhalb der alpinen Überschiebung unter dem Molasse-Becken (Abb. 2) folgende **wesentliche tektonischen Störungssysteme** zu beobachten (Abb. 4):

- Im Grundgebirge sind Horst-Graben-Strukturen vorhanden, die mit dem sog. Permo-Karbon verfüllt sind (Nagra, 2008). Diese **Permo-Karbon-Tröge** (Anhang 4) wurden vor rund 320 bis 290 Mio. Jahren während der variszischen Gebirgsbildung unter

Dehnungstektonik angelegt. Örtlich scheinen sich die variszischen Brüche in das Mesozoikum fortzusetzen, vermutlich in Folge einer Reaktivierung vom Eozän bis ins Miozän (vgl. nachfolgende Punkte).

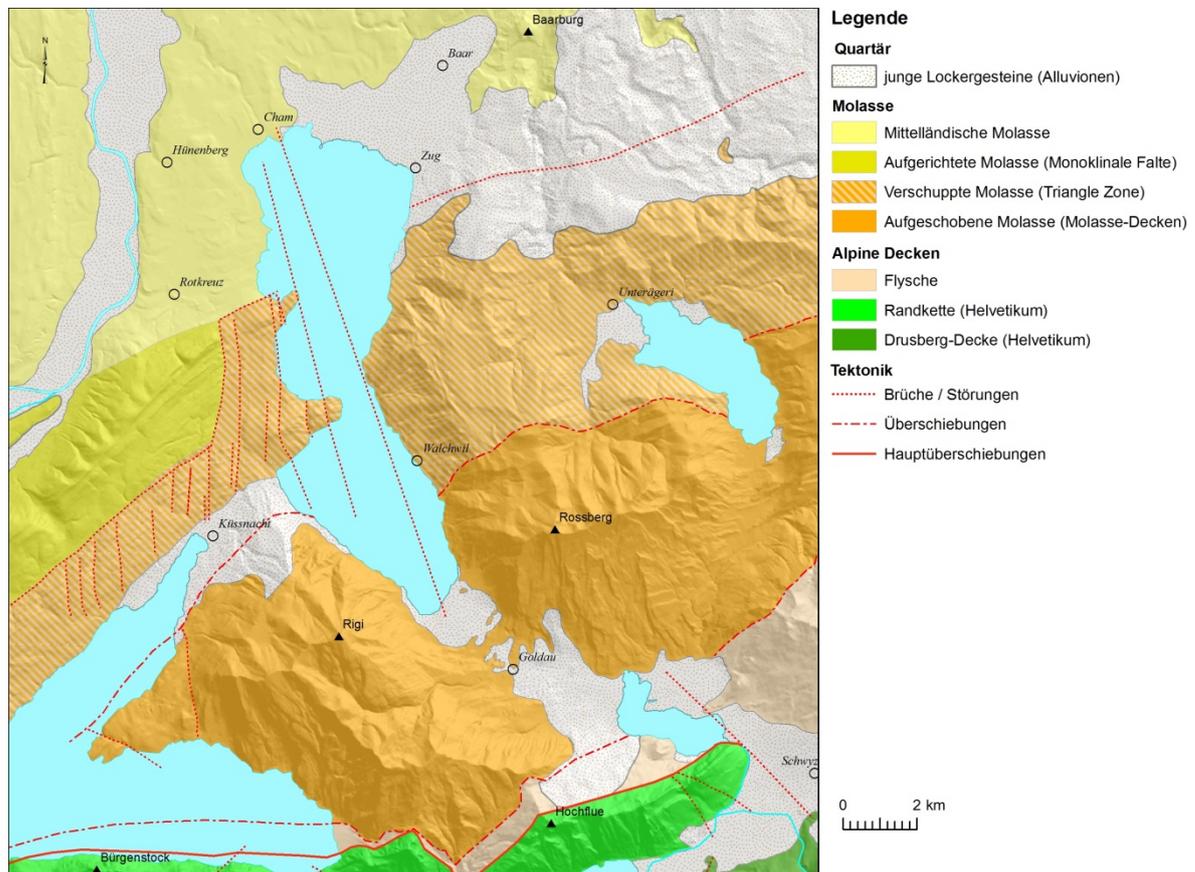


Abb. 4 Tektonische Gliederung und tektonische Elemente (Störungen, Überschiebungen) um den Kanton Zug (Keller 2008), Störungen im Zugersee (Kelts, 1978). Zu beachten ist der markante Wechsel im tektonischen Bau westlich und östlich des Zugersees.

- Die mesozoische Bedeckung des Grundgebirges zeigt (syn- und antithetische) **Abschiebungen**, die etwa parallel zum Alpenrand verlaufen. Sie wurden vermutlich vom oberen Eozän bis ins untere Oligozän – also vor rund 40 bis 32 Mio. Jahren - durch Dehnung des Untergrundes in Folge des Abbiegens des europäischen Kontinentalrands durch die Auflast der heranrückenden alpinen Decken angelegt.
- Gerade um den Zugersee existieren aber auch jüngere **Blattverschiebungen**, die bereits von (Kelts, 1978) beschrieben wurden und die sich vermutlich vom Mesozoikum bis hin in die Molasse erstrecken - im Mesozoikum meist als Abschiebungen, in der Molasse teilweise als Aufschiebungen ausgebildet. Diese sind jüngerer Entstehung (ab Ober-Miozän, also jünger als 10 Mio. Jahre) und verlaufen mehr oder weni-

ger N - S (Abb. 4). Die Tiefbohrung St. Gallen zielt auf Kluftporositäten solcher Systeme ab.

- Durch den Zusammenschub **tektonisch intensiv überprägt ist das alpenrandnahe Molasse-Becken** von der monoklinalen Falte über den Überschiebungsgürtel bis hin zur aufgeschobenen (subalpinen) Molasse (Abb. 2, Tab. 1, Abb. 4). Insbesondere in dem im Kanton Zug deutlich breiteren Überschiebungsgürtel ist eine teilweise starke Verschuppung mit zahlreichen Überschiebungsflächen sowie Kluft- und Bruchzonen bekannt. Diese tektonische Deformation dauerte die ganze Miozän-Zeit an, also von etwa 22 bis 5 Mio. Jahre vor heute.
- **Erhöhte Kluftporositäten** könnten unter optimalen Bedingungen am ehesten in den Randbereichen der Permo-Karbon-Tröge sowie im Bereich der jüngeren Blattverschiebungen vorhanden sein.

5 BEURTEILUNG KONKURRENZIERENDER NUTZUNGEN

5.1 GRUNDWASSERNUTZUNG

5.1.1 Beschrieb der Grundwassernutzungen

Der Kanton Zug verfügt über bedeutende nutzbare Lockergesteins-Grundwasservorkommen, welche in 120 Grundwasserfassungen und über 1000 Quellen genutzt werden. 30 Grundwasserfassungen und hunderte von Quellen dienen der öffentlichen Trinkwasserversorgung und sind mit Grundwasserschutzzonen geschützt. Die bedeutendsten zusammenhängenden Grundwassergebiete sind (Anhang 2)

- das Reusstal,
- das Baarerbecken,
- das grosse und ergiebige Quellengebiet von Menzingen-Neuheim zwischen Lorze- und Sihltal sowie
- das mächtige Grundwasserbecken von Oberwil-Zug.

Der Kanton Zug ist damit in der Lage, seinen Wasserbedarf vollständig aus eigenen Grundwasservorkommen zu decken. Zudem gewährleisten zahlreiche und ergiebige Quellen im Lorze- und im Sihltal die Notwasserversorgung der Stadt Zürich.

Sowohl im Baarerbecken als auch im Raume Zug - Baar ist zudem die thermische Nutzung des tiefliegenden, artesisch gespannten Grundwasservorkommens von grosser Bedeutung (Anhang 2).

5.1.2 Konflikte mit Tiefengeothermie

Dem Schutz der genutzten oder nutzbaren Grundwasservorkommen ist deshalb im Kanton Zug eine sehr hohe Priorität beizumessen:

Wegen der Gefahr von unkontrollierten oder unkontrollierbaren Grundwasserverunreinigungen von der Oberfläche her und/oder wegen der Risiken unzulässiger Verbindung verschiedener Grundwasserstockwerke wurden im Kanton Zug in dem zum Schutz nutzbarer oder genutzter Grundwasservorkommen ausgeschiedenen **Gewässerschutzbereich A_U** in Einklang mit den eingangs erläuterten gesetzlichen Bestimmungen (Kap. 3) **Erdwärmesonden grundsätzlich verboten**.

Bei geothermischen Grossprojekten kommt folgenden Punkten (Kap. 3) dabei eine hohe Bedeutung zu:

- Verbot stofflicher Verunreinigung, z.B. aus Zusätzen der Bohrspülung, Schmiermittel, Fracking etc. (Art. 6, Abs. 1 und 2).

- Verbot von Verbindungen zwischen Grundwasservorkommen (Art. 43 Abs. 3).
- Verbot einer Reduktion von Speichervolumen und Durchfluss, z.B. durch Einbauten und Injektionen (Art. 43, Abs. 4).

Die für Erdsonden und Grundwassernutzungen geltenden Vorgaben sollten nach Ansicht der kantonalen Behörde grundsätzlich auch für Bohrungen zur Nutzung der Tiefengeothermie gelten. Ein Abweichen sollte demnach nur in Erwägung gezogen werden, wenn im Rahmen einer Gesamtinteressenabwägung (inkl. Prüfung alternativer Bohrstandorte) aufgezeigt werden kann, dass ihnen gleich- oder sogar höherwertige Interessen von kantonalen oder nationaler Bedeutung entgegenstehen. In solchen Fällen ist nachzuweisen (u.a. mit einer Risikobeurteilung), dass mit der gewählten Lösung ein gleichwertiger und langfristiger (Ausserbetriebnahme) Schutz für das Grundwasser gewährleistet werden kann.

Dieser örtlichen Problematik könnte bei Bedarf und in einem gewissen Rahmen ausgewichen werden, in dem sich Tiefbohrungen auch schräg oder in einer bestimmten Tiefe als abgelenkte ausführen lassen und so ein bestimmtes Ziel im tieferen Untergrund von ganz verschiedenen Standorten aus erreicht werden kann.

5.1.3 Günstige Gebiete aus Sicht Grundwassernutzung

Als aus Sicht des Grundwasserschutzes für Tiefengeothermie-Bohrungen **günstige, risikoarme** Gebiete verbleiben somit im Wesentlichen Bereiche mit generell oberflächennah anstehendem Molassefelsen:

- Gebiet Rotkreuz – Hünenberg – Cham – Rumentikon
- Gebiet NE Baar bis Sihlbrugg
- Subalpine Molasse zwischen Zugersee und Ägerisee, sowie östlich des Ägerisees.

5.2 FOSSILE ENERGIEROHSTOFFE (ERDGAS, ERDÖL UND KOHLE)

5.2.1 Potenziale und mögliche Verbreitung

5.2.1.1 Rohstofftypen und explorationsgeologische Faktoren

Folgende konkurrenzierende fossile Energierohstoffe müssen berücksichtigt werden:

- Kohle (direkter Abbau).
- Öl und Gas (konventionell).
- Gas in dichten Sandsteinen („tight gas“, unkonventionell).
- Schieferöl und –gas (unkonventionell).

- Kohleflözgas („coal bed methane“, cbm, unkonventionell).
- Kohlevergasung im Untergrund.

Ausser der direkten Kohlevergasung im Untergrund (Forschungs- / Demonstrationsstadium) werden heute alle aufgelisteten Rohstofftypen weltweit wirtschaftlich ausgebeutet. Die unkonventionellen Typen lassen sich nur mit Hilfe von Stimulationsmethoden fördern.

Für die Beurteilung des möglichen Potenzials dieser fossilen Energierohstoffe im Untergrund des Kantons Zug sind folgende petroleumgeologische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen:

- Der Untergrund des Kanton Zug ist heute nur fragmentarisch bekannt und muss als unterexploriert bezeichnet werden. Die bestehenden seismischen 2D-Linien sind sehr alt und liegen weit auseinander. Tiefbohrungen, die das Mesozoikum oder tiefere Schichten durchörterten, gibt es nicht. Das Mesozoikum erreichte lediglich die Bohrung Hüenberg, wo in einer Teufe zwischen 3'265 bis 3'280 m der Malm angebohrt wurde.
- Die Tiefenlage möglicher Lagerstättenhorizonte des Mesozoikums (Oberer Malm, Muschelkalk, Buntsandstein, Abb. 3) und des Paläozoikums (Sandsteine, Tonschiefer und Kohlen des Perms und Karbons, Abb. 3) nimmt gegen den Süden des Kantons kontinuierlich zu (Abb. 2). Nur nordwestlich von Cham sind Tiefen von weniger als 3 km unter OKT zu erwarten. Tiefbohrungen von mehr als 3 km belasten die Wirtschaftlichkeit von Förderprojekten sehr stark.
- Die tektonische Strukturierung des Untergrundes (Störungen, Überschiebungen, Verschuppungen, Kap. 4.3) ist im südlichen Kantonsgebiet ausgeprägter (Geoform AG, 1996), (Dr. Roland Wyss GmbH, 2013), (Proseis, 2013): Einerseits sind unter der subalpinen Molasse die kompressive Trianglezone (Abb. 2) zweiseitige Aufschiebung der Molasseeinheiten mit interner Verschuppung) im Tertiärkeil zu erwarten, andererseits sind Ab- und Aufschiebungen im Mesozoikum über den Grabenrändern der Permokarbontröge vorhanden. Die Interpretation dieser Strukturelemente ist auf der 2D-Seismik schwierig, aber sie sind eindeutig vorhanden und bedeuten damit die Möglichkeit von strukturellen Fallen für konventionelles Gas und Öl.
- Potenzielle Muttergesteine (Ausgangsgestein für die Kohlenwasserstoffbildung, reich an organischem Material) sind im Untergrund des Kanton Zug vorhanden: Opalinuston des unteren Dogger, Posidonienschiefer des obersten Lias, lakustrine Tonschiefer des untersten Perm und Kohlen des Karbon. Die Versenkungsgeschichte und die heutige Tiefenlage dieser Gesteine bedeutet die Entstehung von Öl und Gas im nördlichen, respektive von Gas im mittleren bis südlichen Teil des Kantons, die heute teilweise noch aktiv ist.
- Direkte Gasanzeichen an der Oberfläche oder in Bohrungen sind im und um den Kanton Zug reichlich vorhanden (Walchwil, Eschenbach, Luzern-Gütsch, Weggis, Zimmerberg tunnel). Die Bohrung Entlebuch-1 (LU) hat Gas aus dem Mesozoikum gefördert und liegt geologisch auf einem Trend, der auch den südlichen Kanton Zug Rich-

tung Nordosten durchquert. Schwache Öl- und Gasanzeichen sind aus der Molasse der Bohrung Hünenberg-1 bekannt. Gesamthaft sind dies Erkenntnisse Anzeichen für ein aktives Petroleumsystem im klassischen Sinn.

- Die seismischen Daten geben deutliche Hinweise auf das Vorhandensein von Permokarbon-Trögen auch im tieferen Untergrund des Kantons Zug (Nagra, 2008), (Geoform AG, 1996). Auch die aufgearbeitete 2D Seismik der SEAG (Proseis, 2013) bestätigt diese früheren Interpretationen (Anhang 4).

Die genaue Lokalisierung der Permokarbon-Tröge, deren genaue Tiefenlage – sie werden in sehr grossen Tiefen von 4 bis 6 km unter OKT (z.B. Wyss 2013) vermutet – oder deren interner Aufbau bleiben aber mangels ausreichender Daten spekulativ. Speziell das Vorhandensein eines 5 bis 10 km breiten Permokarbon-Trogs mit einer Achse die SW-NE von Luzern über den mittleren Zugersee – Menzingen Richtung Samstagern verläuft (Anhang 4), wird durch gravimetrische Daten unterstützt (Green et al. 2013). Ebenso weisen die Gravimetriedaten auf damit zusammenhängende Störungszonen mit SW-NE und konjugiert dazu SSE-NNW verlaufenden Brüchen vom Mesozoikum bis ins Grundgebirge hinunter.

5.2.1.2 Kohle (Untertageabbau)

Molassekohlen wurden von 1835-1840 und im zweiten Weltkrieg in Griet (ZG) in untiefen Stollenbergwerken versuchsweise abgebaut, in grossem Umfang vor allem während der beiden Weltkriege am Sonnenberg bei Littau- Luzern. Letztere liegen in der basalen Oberen Meeremolasse und sind auch am Zugersee oder im Sihltal erkannt. Die oberflächennah schlechte Qualität und vor allem die zu geringe Mächtigkeit der Flöze lassen diese Vorkommen auch in Zukunft als nicht abbauwürdig erscheinen.

Ein Untertageabbau von möglichen Kohlenflözen in den Permokarbon-Trögen ist ebenfalls höchst unwahrscheinlich und kann aufgrund der Tiefen von 5 bis 7 km (Geoform AG, 1996) ebenfalls ausgeschlossen werden.

5.2.1.3 Öl und Gas in konventionellen Lagerstätten

Aufgrund der petroleumgeologischen Rahmenbedingungen (Kap. 5.2.1.1) muss ein beträchtliches Potenzial für konventionelle Gasfallen südöstlich der Linie Rotkreuz-Zug-Menzingen angenommen werden (Anhang 3). Geschlossene Strukturen im Mesozoikum unter der subalpinen Molasse sind mögliche Explorationsziele. Wie in der Tiefbohrung Entlebuch-1 (und teilweise St. Gallen GT -1) in porösen oder geklüfteten Reservoirhorizonten des Malm und des Muschelkalks Ansammlungen von Gasen zu erwarten, die aus den tieferliegenden Permo-Karbon-Trögen nach oben migrieren. Die Zieltiefen der höffigen Reservoirgesteine liegen zwischen 3.5 bis 4.5 km unter Terrain.

Grössere Gaslagerstätten in Sandsteinen der Molasse sind eher unwahrscheinlich, da deren Speichereigenschaften (Nutzporositäten) am Südrand des Molasse-Beckens unzu-

reichend sind (Keller, 1992) sowie höfliche Strukturen fehlen oder zu kompliziert und zu kleinräumig sind.

5.2.1.4 Dichte Sandsteine (unkonventionell, Tight gas)

Gas in relativ wenig permeablen Sandsteinen wird heute auch in grossen Tiefen mittels hydraulischer Stimulation (Fracturing) und horizontalen Bohrungen erfolgreich gefördert. Ein Potenzial für solche Lagerstätten kann auch im Untergrund des Kantons Zug im Zusammenhang mit den vermuteten Permokarbon-Trögen erwartet werden. Mögliche Reservoirgesteine sind die Sandsteine des Perm (Rotliegend) und des Karbon. Ein diesbezügliches Potenzial muss unter dem ganzen Kanton angenommen werden (Anhang 3), mit Ausnahme der nördlichsten Region um Baar-Neuheim. Die zugehörigen Zieltiefen liegen im Bereich von 3.5 bis 6.0 km unter Terrain.

5.2.1.5 Schieferöl und -gas (unkonventionell)

Öl und Gas können heute aus dichten, schwarzen Tongesteinen („Schiefer“) mittels hydraulischer Stimulation und horizontaler Bohrtechnik gefördert werden. Grundvoraussetzungen sind Schichtmächtigkeiten von mindestens 20 bis 30 m, organischem Gehalte > 2%, Gehalt an Quarz+Calcit > 30 bis 50% und eine entsprechende thermischer Reife im Öl- oder Gasfenster. In den USA werden heute solche Lagerstätten bis in Tiefen von ca. 3.5 km wirtschaftlich produziert. Durch eine rasante Technologieentwicklung werden in Zukunft auch grössere Tiefen rentabel werden.

Bevorzugte Zielgesteine für Schiefergas-Plays sind im Kanton Zug die lakustrischen Schiefer des unteren Perm und die dunklen Schlamm-Tonsteine des Mesozoikums. Da die Verbreitung der Permschiefer aufgrund der heutigen Datengrundlage äusserst spekulativ ist, wird heute lediglich ein Potenzial für das Aalenien-Toarcien angenommen (Anhang 3). Im nördlichen Kantonsgebiet befindet sich dieses stratigraphische Intervall im Ölfenster (~1%Ro) und weiter südlich im Nassgasfenster (Maturitäten >1.1%Ro). Die Südostgrenze ist technisch-wirtschaftlicher Natur, mit notwendigen Bohrtiefen von grösser als ~4.5 km unter OKT.

5.2.1.6 Kohleflözgas (CBM, unkonventionell)

Die direkte Förderung des Methans, das im Mikroporenraum und adsorbiert in den Kohlen des Karbon vorkommt, wäre mittels Tiefbohrungen heute möglich (Kohleflözgas, Grubengas, cbm). Eine Förderung aus Tiefen von 5 bis 7 km ist jedoch heute sicher unwirtschaftlich. Im Kanton Zug Es wird dafür somit kein Potenzial lokalisiert.

5.2.1.7 Kohlevergasung im Untergrund

Versuchsweise werden in verschiedensten internationalen Projekten Tests mit der direkten in-situ Vergasung von Kohleflözen durchgeführt. Mittels Förderbohrungen und der parallelen Injektion von Sauerstoff können aus dem Vergasungsprozess Syngase produ-

ziert werden (Schafirovich, E. & Varma, A. , 2009). Diese Experimente der letzten 20 Jahre zeigen jedoch, dass diese Art Förderung nur im Tiefenintervall von 200 bis max. 800 m wirtschaftlich möglich ist. Da geeignete Kohlevorkommen in dieser Tiefenlage nicht bekannt sind (Kap. 5.2.1.2), wird eine direkte Kohlevergasung im Kanton Zug nicht möglich sein.

5.2.2 Konfliktpotenziale mit der Tiefengeothermie

Die Darlegungen in Kap. 5.2.1 zeigen, dass im ganzen Kantonsgebiet Zug Vorkommen wirtschaftlich nutzbarer, fossiler Energierohstoffe möglich sind (vgl. auch Karte Anhang 3). Basierend auf der vorangehenden Analyse wird aber auch deutlich, dass im ganzen Kantonsgebiet Zug **Risiken künftiger Konflikte zwischen der Tiefengeothermie und den potenziellen Kohlewasserstofflagerstätten** vorliegen:

- Bei sich *überlagernden Energieressourcen* können Tiefbohrungen darüber liegende Zielhorizonte beeinträchtigen (hydraulische Kurzschlüsse, neue Fließpfade etc.).
- Stimulation von Gas-Ölschiefen kann die *Integrität von Aquicluden* und damit deren hydraulisches Abdichtungspotenzial negativ beeinflussen.
- *Zielhorizonte* sowohl für hydrothermale Tiefengeothermie als auch für konventionelle Gaslagerstätten *können identisch sein*, z.B. im potenziellen Aquifer des Muschelkalks.
- Die gleichzeitige Förderung unterschiedlicher Energieressourcen aus verschiedenen Stockwerken des Untergrundes ist aber grundsätzlich möglich. Sie bedingt jedoch vorgängige spezifische Abklärungen, damit die limitierenden Regelungen und die Prioritäten eindeutig definiert werden können.
- Hinsichtlich *petrothermaler geothermischer Ressourcen* ist festzuhalten, dass diese im vorliegenden geologischen Zusammenhang durchwegs 1 bis 2 km tiefer liegen würden als mögliche fossile Ressourcen.
- Eine *hydrothermale Geothermienutzung* im Zusammenhang mit wasserführenden Störungszonen steht wohl nie in Konflikt mit einer Schiefergasförderung, da sich letztere möglichst weit weg von Störungszonen befinden soll (Gefahr induzierter Erdbeben bei Stimulation etc.).
- Zu beachten ist, dass mit den heutigen technischen Mitteln eine gleichzeitige Nutzung in verschiedenen Stockwerken grundsätzlich möglich ist (vgl. auch Kap. 6.5.5.5).

5.3 ERDGASSPEICHERUNG

5.3.1 Potenzielle Speichergesteine und mögliche Verbreitung

Die Veränderungen im Gasmarkt sowie die Zunahme des Gasanteils am Energiemix werden in Zukunft den Stellenwert der Erdgasspeicherung (saisonal oder kürzer) erhöhen. Für die Speicherung grosser Volumina im Untergrund kommen Porenspeicher (erschöpfte Gaslagerstätten oder geschlossene Strukturen in salinen Aquiferen, Porositäten >15%, Tiefenlage 500 bis 1'500 m), Salzkavernen (Mächtigkeit Salz mindestens 300 m, Tiefenlage 500 bis 1'800 m) oder künstliche Felskavernen („lined rock cavern“, bevorzugt in Kristallingesteinen, Tiefenlage 100 bis 200 m) in Frage.

Im Kanton Zug ermöglichen die geologischen Verhältnisse keine dieser drei Varianten. Die maximale Tiefenlage von 1'800 m liegt im gesamten Kantonsgebiet in den Gesteinen der Molasse. Als Speicherhorizont kämen nur die Sandsteine der OMM (Obere Meeresmolasse) in der Region nördlich des Zugersees in Frage; diese besitzen am Südrand des Molasse-Beckens generell zu geringe Nutzporositäten (Keller, 1992).

5.3.2 Konflikte mit Tiefengeothermie

Im Kanton Zug liegen für eine Erdgasspeicherung kein Potenzial und somit auch keine Konflikte mit einer Nutzung von Tiefengeothermie vor.

5.4 TIEFENENTSORGUNG VON CO₂

5.4.1 Potenzielle Speichergesteine und mögliche Verbreitung

Für die Tiefenentsorgung von CO₂ (Sequestrierung) kommen in der Schweiz nur zwei Optionen in Frage:

- Saline Aquifere (Verpressung von verflüssigtem CO₂).
- Kohleflöze (Injektion von gasförmigem CO₂, möglicherweise mit gleichzeitig stimulierter Methanföderung, ECBM).

Die Option Kohleflöze kommt für das Kantongebiet Zug nicht in Frage, da die potenziellen Kohlen des Karbons mit 5 bis 7 km in zu grosser Tiefe liegen (Kap. 5.2.1.6 und 5.2.1.7) - die technisch / wirtschaftliche Maximaltiefe liegt um die 2 km.

Das Potenzial saliner Aquifere nördlich der Alpen wurde bereits abgeschätzt (Chevallier, 2010): Dabei wurden die OMM, der obere Malm, der Hauptrogenstein, der Muschelkalk und der Buntsandstein als mögliche Speicheraquifere untersucht. Aus speichertechnischer Sicht ist ein Tiefenintervall zwischen mindestens 800 m und maximal 2'500 m vor-

gegeben. Die untere Grenze ist gegeben durch die Bohrkosten und den Aufwand zur Verdichtung des CO₂. Im Gebiet des Kantons Zug wären somit der obere Malm und der Muschelkalk der Trias mögliche Aquiferhorizonte. Im südlichen Kantonsgebiet, wo auch mögliche geschlossene Strukturen erwartet werden können, liegen diese Formationen aber mit 4'500 bis 5'500 m (Umwelt und Energie, 2012) (Dr. Roland Wyss GmbH, 2013) eindeutig zu tief.

5.4.2 Konflikte mit Tiefengeothermie

CO₂-Tiefenentsorgungsprojekte sind deshalb aus heutiger Sicht im Kanton Zug nicht realisierbar und bilden kein Konfliktpotential mit der Tiefengeothermie.

5.4.3 Kombinierte petrothermale Geothermie mit CO₂-Sequestrierung

Seit einigen Jahren wird getestet, ob EGS-Systeme nicht mit CO₂ an Stelle von Wasser als Zirkulationsmedium betrieben werden könnten (Brown, 2000). Dabei wird verflüssigtes CO₂ dazu verwendet um mit Injektionsbohrungen den tiefen Wärmetauscher zu stimulieren („fracken“) um anschliessend das CO₂ mit Injektions- und Förderbohrungen zu zirkulieren. Gemäss ersten Feldtests und Modellrechnungen könnte so effizienter elektrische Energie erzeugt werden als mit Wasserdampf. Ein Nebeneffekt wäre die CO₂-Entsorgung, da dauernd ein Teil des CO₂ im Untergrund ins Gestein diffundiert, womit ein kontinuierlicher Ersatz an der Oberfläche notwendig ist.

6 ERSCHWERNISSE / NO-GOS

6.1 TIEFE QUARTÄRBECKEN MIT GESPANNTEM GRUNDWASSER

6.1.1 Geologischer Beschrieb

Die Felsoberfläche aus Molasse weist im Kanton Zug ein ausgeprägtes Relief auf. Sehr speziell sind die verborgenen, teils tiefen Felstalungen und –tröge (Anhang 1), welche mit Lockergesteinen gefüllt und deshalb heute an der Oberfläche nicht wahrzunehmen sind. Namentlich handelt es sich um den tiefen Felstrog des Zugersees, welcher unter dem **Baarerbecken** Zug-Baar in nördlicher Richtung hindurch führt, dann als schmales Felstal im Gebiet **Blickensdorf – Uerzlikon** nach Westen abbiegt um sich bei Maschwanden mit dem Felstal des **Reusstales** zu vereinigen. Bei Blickensdorf wurde die Felsoberfläche in über 200 m Tiefe unter Terrain erbohrt.

Ein weiteres tiefes Felstal führt, durch die heutige Topographie völlig maskiert, von Zug in östlicher Richtung unter Arbach – Inwil hindurch nach **Menzingen** und weiter bis nach Richterswil. In Menzingen wurde die Felsoberfläche aus Molasse in 364 m Tiefe erbohrt. Im Gebiet von Menzingen ist die tiefe Felsrinne von Zug-Richterswil mit bis zu 500 mächtigen quartären Lockergesteinen gefüllt bzw. überdeckt.

Ein weiteres tiefes Quartärbecken finden wir im Gebiet von Unterägeri am westlichen Ausgang des Ägerisees, wo die Felsoberfläche in über 100 m Tiefe erbohrt wurde.

6.1.2 Beurteilung Erschwernisse / No-Gos

Die genannten tiefen Quartärbecken (Anhang 1) beherbergen an der Sohle über dem Felsunterrund **tiefliegende Grundwasservorkommen** mit jeweils stark **gespannten** Grundwasserdruckspiegeln (Anhang 2). Im Baarerbecken und dessen Randzonen im SE (Inwil – Arbach) und NW (Blickensdorf – Steinhausen) sowie im Raume südlich Knonau ist der Grundwasserdruckspiegel des Tiefengrundwasservorkommens gar **artesisch** gespannt.

Die tiefen Quartärbecken sind mit einer sehr wechselvollen Schichtenfolge quartärer Lockergesteine aus Schottern, Seeablagerungen und Moränenmaterial gefüllt und enthalten in der Regel mindestens 2 verschiedene **Grundwasser-Stockwerke**, so z.B. im Baarerbecken ein für die Trinkwasserversorgung genutztes oberflächennahes Grundwasservorkommen in postglazialen Schottern (um 0 bis 20 m Tiefe) und ein sauerstoffarmes, für thermische Zwecke genutztes, tiefer liegendes Grundwasservorkommen (um 100 m Tiefe).

Die tiefen Quartärbecken mit bis artesisch gespanntem Grundwasser und mit mehreren Grundwasser-Stockwerken bergen bohrtechnische Risiken:

- Bei Bohrarbeiten bestehen erhebliche **Risiken von Grundbruch**, der sich teilweise spontan einstellt. Dadurch können Setzungen ausgelöst werden.
- Durch die unterschiedlichen Druckspiegel mit jeweils nach oben gerichteten Gradienten bestehen Risiken einer Ausbildung vertikaler Fliesspfade ausserhalb der Verrohrung, insbesondere im aufgelockerten Ringraum über dem Rohrschuh. Solche Umläufigkeiten und Leckagen könnten vertikale **Verbindungen zwischen den Grundwasser-Stockwerken** ermöglichen, die gemäss GSchG Art. 43 Abs. 3 nicht zulässig sind.
- Stellen sich einmal vertikale Fliesspfade ein, bestehen sowohl kurz- als auch langfristige Risiken von **Druckentspannungen** und daraus von primären **Setzungsschüben**. Erfahrungen aus dem Raum Luzern zeigen, dass sich diese innert Stunden mehr als einen Kilometer ausbreiten können – im vorliegenden Fall also auf ganze Beckenbereiche.
- Neue Untersuchungen im Raum Luzern (Résonance SA & Keller+Lorenz AG, 2012) belegen, dass in solchen Quartärbecken bei Erdbeben **Bodenverflüssigungen** auf-

treten können. Nebst Bauschäden sind daraus auch erdbebeninduzierte, vertikale Sickerströmungen, Setzungsschübe und Druckausgleiche entlang vertikaler Durchdringungen (Bohrungen; Pfähle etc.) möglich, die zu erheblichen permanenten Schäden führen können.

- Gemäss GSchG Art. 32 Abs. 4 muss überdies auch die schadlose **Stilllegung der Anlage** gewährleistet sein, die in den tiefen Quartärbecken mit gespanntem Grundwasser anspruchsvoll ist.

Zusammenfassend werden die **Risiken von geothermischen Tiefbohrungen über den tiefen Quartärbecken mit gespanntem Grundwasser** (Anhang 1 und Anhang 2), die auch der Trinkwasserversorgung dienen, **als hoch eingestuft**, womit ein gewichtiges No-Go-Kriterium vorliegt.

6.2 SACKUNGSMASSE VON ST. VERENA (ZUG) SOWIE TIEFGRÜNDIGE RUTSCHUNGEN

6.2.1 Geologischer Beschrieb

Die knapp 1 km² grosse Sackungsmasse von St. Verena im SE von Zug (Anhang 1, Anhang 5) weist einen heterogenen vielschichtigen Aufbau mit mächtigen versackten Felsmassen und dazwischen liegenden wasserführenden eiszeitlichen Lockergesteinen mit gespanntem Grundwasserspiegel auf.

6.2.2 Beurteilung Erschwernisse / No-Gos

- Bohrarbeiten in derartigen Lockergesteinen mit Grossblöcken und gespanntem Grundwasser sind erfahrungsgemäss mit **erheblichen bohrtechnischen Risiken** behaftet:
 - Verklemmen der Verrohrung durch leichte Setzungsbewegungen von Grossblöcken.
 - Risiken von Druckentspannungen und unkontrollierten Ausblasungen entlang neu entstehender Fliesspfade. Es bestehen gewisse Risiken einer zumindest lokalen Reaktivierung.
- Die Erfahrungen mit der Datierung von grossen Rutschungen und Sackungen lehren, dass diese bei stärkeren Erdbeben teilweise leicht reaktivierbar sind, wobei die gespannten Druckspiegel entsprechend empfindlich auf zyklische seismische Anregungen reagieren werden. Aus diesem Grunde wäre die im Siedlungsgebiet gelegene Sackungsmasse St. Verena unserer Ansicht nach der schwierigen, mit **erheblichen Ri-**

siken durch erdbebeninduzierte Schäden charakterisierte Baugrundklasse F2 zuzuordnen¹.

- Gleiches gilt auch für die übrigen **tiefgründigen Rutschungen** auf dem Kantonsgebiet von Zug (Anhang 1, Anhang 5).

Zusammenfassend werden die **Risiken von geothermischen Tiefbohrungen im Bereich von Sackungs- und tiefgründigen Rutschmassen** (Anhang 1, Anhang 5) **als sehr hoch bis nicht akzeptabel eingestuft**, womit ein gewichtiges No-Go-Kriterium vorliegt.

6.3 GASVORKOMMEN

Den Risiken durch Erdgas kommt bei einer Exploration tiefer Geothermie eine angemessene Bedeutung zu, weil *im Bereich des Molasse-Beckens* und im angrenzenden Alpenraum *zahlreiche Erdgasvorkommen und -austritte* dokumentiert sind.

- Westlich des Kantons Zug sind in der subalpinen Molasse (Tab. 1) mehrere Gasanzeichen vorhanden, so beim Biregg-Wald (Horw, USM) oder aus der Geothermiebohrung Weggis (USM, UMM). Ebenso trat beim Bau des Gütsch-Eisenbahntunnels in Luzern aus der steilstehenden Luzerner-Formation (OMM) im Bereich von Kohleschichten Gas aus. Permanente Gasaustritte sind aber auch aus dem Vierwaldstätter See bei der Ober Nas S von Vitznau bekannt.
- Auf dem Gebiet des Kantons Zug existieren in Walchwil und am Aeigerisee ebenfalls Gasindikatoren in der subalpinen Molasse (Anhang 3).
- Das Erdgas der ebenfalls in der subalpinen Molasse gelegenen Bohrung Finsterwald LU stammt aber aus einem Reservoir im verkarsteten Malm, also aus der Unterlage des Molasse-Beckens. Das zugehörige Muttergestein ist vor allem in den Kohlen des darunter liegenden Permokarbon-Trogs zu sehen (Anhang 4, Kap. 5.2.1.3).
- Aber auch aus der mittelländischen Molasse (Tab. 1) sind ausserhalb des Kantons Zug Anzeichen und Austritte von Erdgas verbreitet und führten beispielsweise 1989 im Langeten-Stollen bei Bannwil (BE) zu einer heftigen Gasexplosion.

Generell handelt es sich bei den zu betrachtenden Gasen um thermokatalytische Gase, die in den tief liegenden Muttergesteinen gebildet wurden und langsam an die Erdoberfläche migrieren - vermutlich bevorzugt in der Fissurationsporosität steil stehender tektonischer Störungen. Dabei können sie sich in porösen Reservoirgesteinen (z.B. Sandsteine oder Kluffzonen) anreichern. Als ergiebige Muttergesteine kommen unter dem Molasse-Becken vor allem die Kohlen der Permo-Karbon-Tröge (Anhang 4, Kap. 5.2.1.3) in Frage.

Bei Explorationsen für Tiefengeothermie im Kanton Zug ist somit der Gasgefährdung eine angemessene Priorität zuzuordnen. Wird im Bereich der bekannten Permo-Karbon-Tröge

¹ Der Kanton Zug verfügt z.Z. noch nicht über eine Karte der Baugrundklassen.

– die im Untergrund des Kantons Zug flächig verbreitet vorkommen (Anhang 4) - gebohrt, muss mit erheblichen Gaszutritten gerechnet werden, die auch das Ausmass der Erdgasbohrung Entlebuch übersteigen können. Es ist in jedem Fall ein **Gaspräventionskonzept** vorzulegen, und es sind die entsprechenden technischen Sicherheitsmassnahmen (Blowout-Preventer, Abb. 5) zu treffen. Es ist nicht auszuschliessen, dass die Permo-Karbon-Tröge weitläufiger sind oder sich die Gase in den durchlässigen Gesteinen (Kap. 5.2) flächig ausgebreitet und angesammelt haben.



Abb. 5 Blowout-Preventer (rotes Teil) einer Erdgasbohrung der Oranje-Nassau Energie mit einer T-45 EMSCO C2-II der KCA Deutag in Rotterdam (Foto Keller + Lorenz AG). Mit dem Blowout-Preventer lässt sich bei einem unkontrollierten Gasaustritt der Bohrlochmund per Knopfdruck hermetisch verschliessen.

An dieser Stelle sei festgehalten, dass die Risiken durch Erdgas bei angemessener Berücksichtigung beherrschbar sind – wie weltweit tausende von Erdölbohrungen belegen – und es sich **bei richtiger Massnahmenwahl folglich um ein Erschwernis** handelt.

6.4 ZUSAMMENFASSUNG

Aus geologischer Sicht sind **geothermische Tiefbohrungen** in folgenden Gebieten als **ungünstig bis zu risikoreich** und damit als **No-Go-Gebiete** zu beurteilen:

- **Tiefe Quartärbecken mit gespanntem Grundwasser** (Kap. 5.1 und 6.1, Anhang 1 und Anhang 2).
- **Sackungsmasse von St. Verena (Zug)** sowie **tiefgründige Rutschungen** (Kap. 6.2, Anhang 1 und Anhang 5).

Bezüglich genutzter oder nutzbarer Grundwasservorkommen und Quellen (Kap. 5.1, Gewässerschutzbereich A_U) sind die gewässerschutzrechtlichen Anforderungen und die Vorgaben der Behörde zu erfüllen (Kap. 3).

Demgegenüber sind die möglichen **Gasvorkommen** nach heutigem Stand der Technik als **Erschwernis** zu betrachten.

6.5 BOHRTECHNISCHE RAHMENBEDINGUNG UND RISIKEN

6.5.1 Grundsätzliches

Zur Realisierung von Tiefengeothermieprojekten kommen tiefbohrtechnische Methoden und Techniken zur Anwendung, welche zur Exploration und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen entwickelt und eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um sehr spezialisierte High-Tech Anwendungen, die Materialtechnologie, Leistungselektronik, Maschinen- und Verfahrenstechnik auf höchstem heutigem Niveau in sich kombinieren.

Die besonderen Anwendungsbedingungen der Tiefbohrtechnik für eine 4'500 m tiefe Bohrung lassen sich stark vereinfacht wie folgt erklären: Bedienung und Fernsteuerung eines mechanischen Vortriebswerkzeuges in der Grösse eines Fussballes mittels eines 200'000 kg schweren und 4'500 m langen "Werkzeuggriffs" und unter Anwendung von 4'000 PS mechanischer und 6'000 PS hydraulischer Leistung. Dies bei gleichzeitiger Kontrollhaltung einer 4.5 km langen, nicht begehbaren, nur mit indirekten Methoden visualisierbaren und in ihrem Zustand z.T. labilen "Baustelle", auf die ein Druck von bis zu 700 bar und wechselnde Temperaturen zwischen 10 bis 160 Grad Celsius einwirken. Um diese Baustelle und ihr Vortriebswerkzeug zu steuern, zu versorgen und zu kontrollieren stehen vier Arbeitsmanöver zur Verfügung: Am o.g. „Werkzeuggriff“ ziehen, drücken, drehen und durch diesen hindurchpumpen

Daraus wird ersichtlich, dass die Erstellung einer Tiefbohrung zur Nutzung geothermischer Energie in keiner Weise mit üblichen Tief- oder Hochbauprojekten vergleichbar ist. Einerseits unterliegt die Erstellung einer Tiefbohrung einem strikt sequentiellen Ablauf, der keine zeitlichen oder örtlichen Arbeitsumlagerungen zulässt und eine optimale Logistikkette erfordert. Andererseits wird der technische Ablauf der Bohrungserstellung massgeblich von den angetroffenen geologischen Bedingungen beeinflusst, die je nach vorhandener Prognosegüte und Explorationsumfang einen entscheidenden Einfluss auf die Erreichung der technischen und wirtschaftlichen Ziele eines Tiefbohrprojekts haben können.

6.5.2 Standortwahl und Bohrplatz

Am Beginn der konzeptionellen Phase eines Geothermieprojekts steht als Optimierungsaufgabe die Standortwahl:

- Einerseits gilt es, den aufgrund der geologischen Situation optimalen Bohransatzpunkt zu eruieren, wobei die erforderliche Bohrlänge und ein günstiger Bohrspurverlauf als bedeutende Risiko- und Erstellungskostenkriterien zu berücksichtigen sind.
- Andererseits sind die späteren Betriebsanforderungen für eine ökonomische und ökologische Erzeugung von Energie, deren Verteilung und ggf. der Energieumwandlung einzubeziehen. Da in vielen Fällen das Bohrgelände auch der späteren Aufnahme der Produktionsanlagen oder zumindest Teilen davon dient, sind bei hydrothermalen Systemen in erster Linie Abnehmernähe und -kapazitäten, Leitungsbauerfordernisse, der Betrieb der Kraftwerks- und Kreislaufprozesse und der Betrieb von zusätzlichen energetischen Spitzenlast- bzw. Redundanzsystemen sowie ggf. von Wasseraufbereitungsanlagen standortmässig zu optimieren. Bei Anlagen mit Stromproduktion können auch die Verfahrensweisen zur kraftwerkstechnischen Rückkühlung als sehr bedeutende Faktoren in die Lokationsbeurteilung eingehen.



Abb. 6 Bohrplatz angrenzend an ein Naturschutzgebiet (Petrosvibri SA.)

- Nicht minder bedeutsam ist die **Betriebslogistik** der Erstellungsphase der Bohrungen in diese Optimierung zu integrieren. Da die Bohrplatzerstellungs- und Bohrarbeiten einen bedeutenden temporären Impact in das lokale Orts- und Naturgefüge darstellen, sind - nebst den bau- und erschliessungstechnischen Aspekten für das Bohrgelände wie z.B. der Verfügbarkeit, der Grösse und Baugrundbeschaffenheit, die Zufahrts-, Ver- und Entsorgungsmöglichkeiten - auch die umwelttechnischen Anforderungen und Rahmenbedingungen hinsichtlich der Emissionsbelastungen zu berücksichtigen.
- Es versteht sich von selbst, dass solche Anlagen nur in der Industrie- und Gewerbezone realisiert werden können.

In Tab. 2 sind einige grundsätzliche Anforderungen an einen Geothermie-Bohrplatz, abgeleitet von den Erfordernissen zum Abteufen von Tiefbohrungen beispielhaft und nicht abschliessend aufgeführt:

Für die Detailplanung des inneren Bohrplatzareals ist in erster Linie das ausgewählte Bohrgerät massgebend. An dieses sind die bautechnischen Platzeinrichtungen wie Gründungsfundamente, interne Wasserversorgungs- sowie Drainagesysteme, Kabelkanäle für elektrische Energie und Datenleitungen, Erdungssysteme etc. exakt anzupassen.

Der Flächenbedarf eines Bohrplatzes kann projektspezifisch sehr unterschiedlich sein, seine optimale Grösse ist in der Planungsphase ein wesentlich zu ermittelnder Faktor. Als Grössenordnung kann je nach angestrebter Bohrteufe und Anlagentyp von einer befestigten Arbeitsfläche von minimal ca. 3000 m² bis ca. 6000 m² ausgegangen werden. Mit Speicher- und Abkühlbecken für Fördertests, Humusmieten, Camp Areas und Parkflächen können jedoch Flächen von 10'000 m² und mehr benötigt werden.

Erfordernis	Anforderungen
Aufstellungs- Arbeits- Lagerflächen-, Teststrecken und -becken, Skidding-Strecken	Platzbedarf Fundamentierung Stahlbeton, Arbeitsfläche Asphalt, Lagerfläche Asphalt/Kies, annexierbares Beckenvolumen und Tests- und Messtreckenplatz. Erfüllung der Bau- und Zonenordnung.
Umgang mit wassergefährdenden Stoffen	Mehrfachzonensystem, Gewässerschutz (Kap. 3), Abwasseraufbereitung, Entsorgung.
Hohe Anforderungen an den Baugrund	Geotechnische Baugrundbeurteilung, Foundationen, Erdbebensicherheit; Naturgefahren (Hangstabilität, Überflutungsgefahren).
Energieleistungsaufnahme von 2000 bis 4000 kW	Elektrische Zuleitung oder Luftimmission durch Dieselbetrieb, Verbrauch bis 20'000 ltr. Diesel/Tag.
Betrieb von Schwerlastgabelstaplern und Schwerfahrzeugen	Schwerverkehrsfähige Zufahrten und Planflächen.
Arbeits- und z.T. Wohnort Personal	Trinkwasserversorgung, u.U. Kanalisationsanschluss.
Wasserbedarf bis ca. 2000 l/min	Brauchwasserversorgung, Brauchwasseraufbereitung.
24-Stundenbetrieb	Arbeitsflächenausleuchtung, Lärm- und Lichtimmissionen, Dampfimmissionen.
Interne und externe Kommunikation	Telefon- und Internetleitungen, bautechnische Versorgungskanäle.
Feststoffanfall bis ca. 100 m ³ / Tag	Deponierungsmöglichkeiten, Entsorgungslogistik, Zwischenlagerkapazität.
Baustellenbetrieb nach Berggesetzgebung	Zutrittskontrolle, Umzäunung, Flucht-, Interventions- und Rettungsmöglichkeiten, bautechnische Ex-Zonenberücksichtigung.

Tab. 2 Grundlegende Anforderungen an einen Geothermie-Bohrplatz.

Besonders sind auch gängige behördliche Vorschriften z.B. zur Gewährleistung der Interventionsmöglichkeit bzw. Umfahrbarkeit der gesamten Anlage und auch der teilweise erhebliche Geräteaufstellungsbedarf für temporäre Servicearbeiten wie z.B. Rohreinbauten und Zementationen zu berücksichtigen.

Grundsätzlich ist es ratsam, bei einer Bohrlatzplanung auf ausreichend grosse Arbeits- und Lagerungsflächen abzustellen. Die entstehenden Zusatzkosten während des Bohrbetriebes durch Umlagerungsvorgänge oder Behinderungen aufgrund zu enger Platzverhältnisse übertreffen im Normalfall bei Weitem die Bereitstellungskosten für die entsprechenden Flächen.

6.5.3 Bohrplanung

Projekte zur geothermalen Nutzung von Tiefenaquiferen oder zur Erstellung und Entwicklung von EGS-Systemen unterliegen einem mehrstufigen Vorbereitungs- und Planungsverfahren mit zeitlichen und fachspezifisch unterschiedlichen Schwerpunkten. Dieses teilt sich grundsätzlich in einen

- **exploratorischen Teil** zur bohrtechnischen Erschliessung der geothermalen Lagerstätte und in einen
- **prozesstechnischen Teil** mit den obertägigen Nutzungseinrichtungen.

Die Anforderungen an Planung, Gerätetechnik und Verfahren der Bohrtechnik unterscheiden sich dabei kaum von jenen zur Erschliessung und Nutzung von Kohlenwasserstoffvorkommen, also Erdöl- oder Erdgasbohrungen. Es werden dieselben Geräte der Tiefbohrtechnik eingesetzt, das Planungsverfahren steht ebenso unter den Prämissen der Wirtschaftlichkeit, der technischen und geologischen Sicherheit, einer maximalen Trägerschonung und der gesetzlichen Rahmenbedingungen (Kap. 3). Bei der Planungs- und Ausführungsmethodik von tiefen Geothermieprojekten ist der wirtschaftliche Aspekt im Regelfall deutlicher zu berücksichtigen.

Die technische Planung als permanent wechselwirksamer Entwicklungs-, Spezifikations- und Abstimmungsprozess der einzelnen technischen Systeme und Einzelkonzepte ist dabei eng mit der Kostenplanung verknüpft, welche aufgrund der hohen Zeitleistungskosten von Tiefbohrarbeiten wiederum zu einem grossen Teil auf einer detaillierten Ablauf- bzw. Zeitplanung der operativen Arbeiten basiert.

Die bohrtechnische Planung beginnt mit einer Analyse und Auswertung der geologischen und geophysikalischen Voruntersuchungen. Dabei dienen das lithostratigraphische Vorprofil sowie die petrophysikalischen Eigenschaften der standortspezifischen Formationsabfolgen wie Porendruck, Poreninhalte, Durchlässigkeiten, Druckfestigkeiten und chemoaktive Reaktionseigenschaften als Grundlage für ein erstes bohrtechnisches Konzept mit einer Abstimmung der technisch realistischen und produktionstechnisch optimalen Durchmesser- bzw. Streckenabschnitten.

Unter Berücksichtigung des ausgewählten Bohransatzpunktes und des aufzuschliessenden Formationszieles werden in einem weiteren Schritt eine Bohrspur definiert und ein den geologischen Verhältnissen entsprechendes Verrohrungsschema erarbeitet. Dieses System aus sich teleskopisch verjüngenden, einzementierten Stahlrohren dient einerseits zum sicheren Abteufen der Bohrung, um in jeder Bohrphase geologisch bedingte über-

oder unterhydrostatische Druckverhältnisse beherrschen zu können, andererseits stellt es den dauerhaften Ausbau der Bohrung dar, der den Ansprüchen und Belastungen der späteren Produktion über den gesamten Lebenszyklus der geothermischen Anlage und ggf. auch von chemischen Behandlungen oder Hochdruckstimulation standhalten muss. Daher sollten bereits in dieser Phase auch die Methodik zur Reservoirentwicklung und das Testprogramm grundsätzlich vorliegen.

In einem interaktiven Prozess werden nachfolgend das Bohrspülungskonzept sowie das Richtbohr- und das Zementationskonzept aufgestellt, wobei auch das grundlegende Verrohrungsschema in Abstimmung mit der fortlaufenden Entwicklung der anderen Konzepte zu einem konkreten Programm ausgearbeitet wird. So ist z.B. bei abzulenkenden Bohrungen das Verrohrungsschema hinsichtlich Absetzteufen, Rohrqualitäten, Verbindertypen und Wandstärken in Abhängigkeit der verwendeten Bohrspülungen und der Richtbohrgeräten auch auf die beim Bohrvorgang entwickelten Drehmomente, Schub- und Abriebswerte zu dimensionieren und somit eng mit dem richtbohrtechnischen Plan abzustimmen.



Abb. 7 Kontrollausbau eines 12¹/₄" Insert-Bits und PDM-Motors (GeoWell GmbH)

Das Zementationskonzept wird in Abstimmung mit den geometrischen, spülungstechnisch rheologischen und geologischen Bedingungen an das Verrohrungskonzept angearbeitet. Wesentliche Bedeutung findet bei geothermischen Projekten z.B. dabei die Berücksichtigung von vorgesehenen aber auch möglichen ungewollten zementationsfreien Verrohrungsabschnitten. Die thermischen Spannungslastfälle in Verrohrungen, die im Wechsel durch den Bohrprozess, durch die Förderung der heißen Fluide oder im Zuge einer Stimulation mit kaltem Wasser auftreten, können die Integrität eines Verrohrungssystems und dessen Zementationen gefährden und sind im Design durch entsprechende Mass-

nahmen wie entsprechende Rohrdimensionierung, Mehrstufenzementationen, Rohrvorspannungen oder besondere Positionierung von Zentriereinrichtungen einzuplanen.

Des Weiteren ist ein Bohrmeissel- und Meisselhydraulikprogramm auszuarbeiten, wobei in Abstimmung mit den rheologischen Bohrspülungseigenschaften, den vorgesehenen Richtbohrwerkzeugen, den Dimensionen der Bohrstränge auch die Charakteristik der einzusetzenden Downhole-Motore zu berücksichtigen ist. Lassen es die geologischen Eigenschaften zu, PDC-Meissel einzusetzen, ist eine Kosten-Nutzenanalyse mit einem Vergleich der zu erwarteten Stand- und Rotationszeiten, der Tripzeitkosten und der Gesamttageskosten zu erstellen.

Eine wesentliche Aufgabe der bohrtechnischen Planung besteht zudem in der fachtechnischen Definition und Abstimmung der vielfältigen Material- und Dienstleistungen und Services durch Spezialfirmen, welche zur Ausführung von Tiefbohrungen erforderlich sind. Somit finden auch Bohrlochkopfausrüstungen, Downhole Completions, Inspection- und Casing Running Services sowie die Planung der Logging- und Testingarbeiten und der Spülung- und Feststoffentsorgung ihre wichtige Stellung in dem integrativen Planungsprozess.

6.5.4 Bohrgerät

Die Ergebnisse aus der Bohrplanung geben die grundsätzlichen technischen Anforderungen an die Bohranlage vor. So müssen selbstverständlich ihre Zug-, Drehmoments-, Pump- und Tankkapazitäten den Leistungsvorgaben des Bohrprogrammes mit einem ausreichenden Reservewert entsprechen. Die wesentlichsten Leistungsgrößen leiten sich aus dem Bohrlochdurchmesser- und Verrohrungsprogramm sowie dem Richtbohr- und bohrspülungstechnischen Hydraulikprogramm ab. Weiter sind die wirtschaftlichen und ökologischen Leistungsaspekte einer Bohranlage zu bewerten.

Moderne Tiefbohranlagen tragen vermehrt dem Umstand Rechnung, dass ihr Betrieb auch in urbanen Gebieten möglich sein soll. Dank zusätzlicher schallschutztechnischer Massnahmen können diese heute in Extremfällen auch im Abstand von nur einigen wenigen Metern zu Wohn- oder Bürogebäuden die Lärmschutzverordnungsvorgaben erfüllen. Somit stellt oftmals der Umsturzradius der Bohranlage letztlich das minimale Abstandskriterium dar. Dabei ist meist auch eine vollelektrische Betriebsmöglichkeit erforderlich, welche neben den immissionstechnischen Vorteilen bei der Verfügbarkeit einer entsprechenden Versorgungszuleitung auch bedeutende Kosteneinsparungen bewirken kann.



Abb. 8 Kompaktbohranlage mit Fördertesteinrichtung (GeoWell GmbH)

Anlagen moderner Bauart zeichnen sich auch durch einen geringen Footprint und der Kompakt- bzw. Containerbauweise aus, was Vorteile hinsichtlich der Aufstellungsfläche, der Transportbewegungen und der Aufbauzeiten bedeutet. So sind z.B. Anlagen am Markt erhältlich, welche bei einer Teufenkapazität von 5000 m zur Mobilisation lediglich 50 bis 65 Transporteinheiten benötigen, eine Arbeitsfläche von minimal ca. 3000 m² beanspruchen und innerhalb einer Woche von einer Bohrlokation zu anderen umgesetzt werden können.

Auch die Bauart der Bohranlage als einzügige, zwei- oder dreizügige Anlage ist in enger Abstimmung mit dem Bohrprogramm zu wählen. Sie kann einen entscheidenden Einfluss auf den Bohrkostenverlauf nehmen und ist hinsichtlich der Tripzeiten in Abhängigkeit von den zu erwartenden geologischen Verhältnissen und dem Bohrprogramm in einer Simulation der möglichen zeitlichen und kostenmässigen Bohrungsabläufe zu analysieren.

Relevante Einsparungen können bei Geothermieprojekten mit verschiebbare Anlagen ("Skidding") erzielt werden: Mit solchen Anlagen ist ein Versetzen von einem Bohransatzpunkt zum nächsten auf derselben Bohrlokation ohne aufwändige De- und Wiedermontagarbeiten in kürzester Zeit möglich. Dabei wird der Mastunterbau hydraulisch um mehrere Meter verschoben, wobei die übrigen Versorgung- und Annexseinrichtungen wie z.B. Energie- und Tankanlagen am alten Standort verbleiben können.

Als sehr wichtige Anforderungen an Tiefbohranlagen müssen jedoch deren Zuverlässigkeit, deren arbeitstechnische Sicherheitsgewährleistung und die Leistungsfähigkeit des Bedienungspersonals gesehen werden: Die Zuverlässigkeit spiegelt sich in einem durch Reparaturen und Servicearbeiten unbelasteten und möglichst unterbruchsfreien Betrieb wieder. Dabei können selbst modernste Bohrgeräte mit höchstem Automatisierungsgrad und neuen technischen Konzepten älteren Anlagen mit ihren im Einsatz bewährten und

ausgereiften Komponenten durchaus unterlegen sein und zu hohen Risiken und Mehrkosten des Projekts führen.

Da der Projektinhaber schlussendlich auch für die Arbeitssicherheit verantwortlich zeichnet, ist der Aspekt des installierten und des auf und mit der Anlage "gelebten" sicherheitstechnischen Standards ein nicht zu unterschätzender Anforderungspunkt.

Und nicht zuletzt sind die fachtechnische Qualifikation und der Ausbildungsstand des auf der Bohranlage eingesetzten Bedienungspersonals in eine Anforderungsbeurteilung kritisch einzubeziehen.

Es ist zu beachten, dass auch die terminliche Verfügbarkeit von Tiefbohranlagen eine nicht unwesentliche Einschränkung für tiefe Geothermieprojekte darstellen bzw. Einflussnahme auf den Planungsprozess haben kann. Durch die rückläufige Entwicklung der Kohlenwasserstoffexploration im mitteleuropäischen Raum ist die Anzahl der am offenen Markt tätigen Bohranlagen mit Leistungskapazitäten für Bohrtiefen zwischen 4'000 bis 5'000 m durchaus überschaubar.

6.5.5 Risiken

6.5.5.1 Einleitung

Bei tiefengeothermischen Projekten können generell fünf Risikogruppen in Betracht gezogen werden, welche untereinander nicht scharf abgrenzbar sind. Treten bei den Bohrarbeiten beispielsweise Schwierigkeiten aufgrund unerwarteter geologischer Verhältnisse auf, erfüllen sich geologische oder geotechnische Risiken, zu denen sich unweigerlich Mehrkosten und damit auch wirtschaftliche Risiken gesellen. Nicht beleuchtet werden die zweifellos vorhandenen politischen Risiken geothermischer Grossprojekte.

6.5.5.2 Fündigkeitsrisiko

Das Hauptrisiko in der tiefen Geothermie ist das so genannte Fündigkeitsrisiko:

- Es bezeichnet das Risiko, bei der Erschliessung eines geothermischen Reservoirs eine unzureichende Thermalwasserförderrate zu erzielen und/oder eine zu geringe Lagerstättentemperatur anzutreffen. Diesen beiden Grössen kommt hinsichtlich der Leistung eines Geothermiekraftwerks übergeordnete Bedeutung zu.
- Die Fündigkeit wird meist zu Beginn eines Projektes definiert, d.h. der Projektentwickler und der Investor legen fest, ab welcher Mindestförderrate und welcher Temperatur das Projekt wirtschaftlich – entsprechend der Renditeerwartung des Investors - und damit erfolgreich ist. Eine Bohrung gilt als fündig, wenn diese Kriterien erreicht oder überschritten werden.
- Eine sogenannte Teilfündigkeit liegt vor, wenn die Kriterien zur Fündigkeit nicht erreicht sind, jedoch eine Nachnutzung mit einem anderen Konzept technisch möglich

und z.B. mit der Auszahlung eines Teils der Versicherungssumme auch wirtschaftlich wird.

- Das Fündigkeitsrisiko ist allenfalls absicherbar. Versichert werden jedoch nicht Regionen, in denen noch keine Erfahrungen vorliegen. Neuere Technologien, die noch Aspekte mit Forschungs- und Entwicklungscharakter beinhalten (Petrothermale Systeme, EGS und HDR) lassen sich im Moment nicht versichern.

6.5.5.3 Geologische und technische Risiken

Speziell für Explorationsbohrungen, welche im Kanton Zug in geologisch bislang wenig bekanntem Gebiet niedergebracht würden, sind die Risiken der geologischen Prognose möglichst detailliert abzuschätzen. In einer entsprechend differenzierten geologischen Bohrprognose müssen die plausiblen Bandbreiten für die zu durchteufenden Lithologien und deren Mächtigkeiten, für die zu erwartenden geophysikalische Parameter und die tektonischen Verhältnisse, insbesondere Gebirgsspannungen und Überdrucke quantitativ prognostiziert werden. Dies geschieht in erster Linie mit der Bestimmung und Auswertung von Referenzbohrungen, Analogstudien und Vergleichen mit ähnlichen Projekten. Diese geologische Bohrprognose bildet die Grundlage für die erfolgreiche Planung und Dimensionierung eines Bohrprojektes und dann auch für operationelle Entscheide während des Bohrbetriebs. Generell gilt: Je grösser die Unsicherheiten der geologischen Prognose, desto robuster muss ein Bohrprojekt dimensioniert sein.

Das Verpressen von Wasser unter hohen Drücken zur Aufweitung natürlicher oder Erzeugung künstlicher Risse im Gestein („hydraulic fracturing“) ist ein wesentlicher Bestandteil der Erschliessung von petrothermalen Lagerstätten, kann aber auch in geringerem Masse in hydrothermalen Lagerstätten angewendet werden. Erst durch diese Massnahmen zur Erhöhung der Wasserwegsamkeit im Gesteinsverband kann das technische Potential der im Gestein gespeicherten Wärme genutzt werden. Mit dem Aufreissen des Gesteins sind Erschütterungen verbunden, die in den meisten Fällen unterhalb der Wahrnehmungsschwelle des Menschen liegen. In tektonisch beanspruchten Gebieten, können die Stimulationsmassnahmen auch zur Entladung der natürlich vorhandenen Gebirgsspannungen und damit quasi eine vorzeitige Auslösung einer sich natürlicherweise aufbauenden Erdbebenaktivität führen (z.B. Basel, St. Gallen).

Die Realisation von Tiefbohrungen birgt aber auch terminliche und damit wirtschaftliche Risiken, die aus Bohrzeitverlängerungen beispielsweise durch im Bohrloch verlorene Werkzeuge resultieren können.

Technische Risiken können im schlimmsten Falle mit der Aufgabe des Bohrlochs und dem Verlust des bis dahin eingesetzten Kapitals enden. Bohrtechnische Risiken lassen sich in gewissem Mass versichern.

Die Kraftwerkstechnik und die Stabilität des Kraftwerksbetriebs bedingen das Betriebsrisiko. Das Betriebsrisiko im Zusammenhang mit der Kraftwerkstechnik ist versicherbar. Ob ein Reservoir über den geplanten Zeitraum hinweg mit gleicher Temperatur und Förder-

menge betrieben werden kann, kann derzeit noch nicht versichert werden. Solche Risiken lassen sich bei der Planung der Reservoirerschliessung z.B. durch ein konservatives Konzept (z.B. Abstand der Bohrungen voneinander und Beschränkung der Förder- bzw. Injektionsmengen) minimieren.

6.5.5.4 *Wirtschaftliche Risiken*

Die wirtschaftlichen Risiken resultieren in erster Linie aus dem Fündigkeitsrisiko. Erst nach erfolgreicher Durchführung und dem Test der Erstbohrung ist das Fündigkeitsrisiko stark reduziert. Jedoch muss auch die Injektionsbohrung ausreichende Wassermengen aufnehmen können, um einen wirksamen Kreislauf zu ermöglichen. Die Erschliessungskosten (Bohrungen, Stimulationsmassnahmen und Tests) stellen rund 70% der Gesamtkosten eines Geothermieprojekts dar.

Bei allen mit der Erschliessung zusammenhängenden Arbeiten ist man auf eine professionelle Vorbereitung und Durchführung sowie zuverlässige Partner angewiesen. Um dieses Risiko so gering wie möglich zu halten, bedarf es eines Teams ausgewiesener Fachleute sowie einer sorgfältigen Projektentwicklung mit klar definierten Projektentwicklungsphasen, Meilensteinplanung und Abbruchkriterien.

6.5.5.5 *Umweltrisiken*

Aufgrund des Gefährdungspotentials für Mensch und Umwelt bei der Erschliessung von Kohlenwasserstoffen aus dem Untergrund durch Tiefbohrungen hat sich in der Bohrin-
dustrie - nicht zuletzt auch aus wirtschaftlichem Eigeninteresse - ein sicherheitstechnischer Standard auf höchstem Niveau etabliert, welcher einer permanenten Weiterentwicklung unterliegt und zu einem der höchsten sicherheitstechnischen Branchenstandards führte. Die rechtlichen Grundlagen und Ansprüche (Kap. 3) werden u. A. durch folgende Massnahmen erfüllt:

- Das Risiko eines unkontrollierten Austritts von flüssigen oder gasförmigen Lagerstätteninhalten an die Oberfläche wird u.a. durch redundante Sicherheitseinrichtungen, deren kurzperiodische Prüfung und die permanente sicherheits- und verfahrenstechnischen Schulung des Bohrpersonals auf ein akzeptables Mass reduziert.
- Die Risiken von Kontamination oder von Verbindungen anderer durchörteter und nutzbarer Lagerstättenhorizonte oder Aquifere werden durch die sorgfältige ingenieurstechnische Planung und Dimensionierung der einzelnen Verrohrungen, Zementationen, Dichtstücken und der geeigneten Bohrspülungen mit umweltfreundlichen Additiven minimiert.
- Oberflächennahe Lockergesteins-Grundwasservorkommen werden durch Standrohre geschützt, die im Trockenbohrverfahren (Ramm- oder Schneckenbohrtechnik) erstellt werden. Die Standrohre werden mit Zement sowohl im anstehenden Fels eingebunden als auch gegen die Fundamentplatte des Bohrplatzes abgedichtet.

- Standardmässig werden die befestigten Arbeitsflächen des Bohrreals durch ein duales Drainagesystem mit nachgeschalteten Ölabscheidern und Koaleszenzfiltern entwässert. Die Lärm,- Licht- und Abgasemissionen ausgehend von einer Tiefbohranlage können mit technischen Massnahmen derart reduziert werden, dass deren Betrieb auch in unmittelbarer Nachbarschaft beispielsweise zu bewohnten Gebäuden problemlos möglich ist.
- Anders als bei konventionellen thermischen Kraftwerken wird bei Temperaturen unter 200°C, wie sie in den meisten mitteleuropäischen Geothermieprojekten genutzt werden, nicht Wasser verdampft, sondern es wird ein spezielles Arbeitsmittel eingesetzt. Die sogenannten Organic Rankine Cycle (ORC) verwenden organische Arbeitsmittel wie z.B. Pentan. Das Kalina-Verfahren verwendet ein Wasser-Ammoniak-Gemisch. Mit diesen Stoffen können lokale Umweltbeeinträchtigungen und -gefährdungen auf dem Betriebsgelände verbunden sein, wenn diese Stoffe in die Umwelt austreten. Dazu sind jedoch ausreichende Sicherheitskonzepte und Einrichtungen vorhanden, die wie in der chemischen Industrie einen risikofreien Betrieb ermöglichen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Im Hinblick auf die Förderung einer möglichen Nutzung tiefer geothermischer Energie hat sich der Kanton Zug für ein schrittweises Vorgehen entschieden und den Auftrag zur Beurteilung von konkurrierenden Nutzungen sowie von Erschwernissen / No-Gos erteilt.

- Für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung von tiefergeothermischen Anlagen ist die Einhaltung des **Gewässerschutzgesetzes** (GSchG) unabdingbar, wobei ein gewisser kantonaler Spielraum besteht. Je nach Arbeitsschritt und Grösse der Anlage muss damit gerechnet werden, dass ein Umweltverträglichkeitsbericht (UVB) samt **Umweltverträglichkeitsprüfung** (UVP) nötig sind.
- Mangels geeigneter Tiefenaufschlüsse – im Kanton Zug existiert lediglich eine tiefere Bohrung in Hünenberg – fehlen direkte Kenntnisse über den tieferen geologischen Untergrund, so dass dieser als **geologisch unterexploriert** zu bezeichnen ist und sich Prognosen lediglich auf Extrapolationen aus der weiteren Umgebung abstützen können.
- Der Kanton Zug verfügt über **bedeutende nutzbare Lockergesteins-Grundwasservorkommen**, die in zahlreichen Grundwasserfassungen und Quellen genutzt werden. Die wichtigsten zusammenhängenden Grundwassergebiete sind das Reusstal, das Baarerbecken, das Quellengebiet von Menzingen - Neuheim sowie das Grundwasserbecken von Oberwil-Zug. Diese nutzbaren Grundwasservorkommen sind durch Gewässerschutzbereiche geschützt, die einen wesentlichen Flächenanteil des Kantons belegen (Anhang 2) und in denen die Gewässerschutzgesetzgebung (GSchG) einzuhalten ist. Daraus resultieren flächige, Erschwernisse bis hin zu No-Gos.

- Eine Eigenheit des Kantons Zug sind die mit Lockergesteinsfüllungen maskierten **Felstalungen und –tröge** (Anhang 1), so der Felstrog der zwischen Zugersee und Reusstal, ein unterirdisches Felstal von Zug über Menzingen bis Richterswil oder das Quartärbecken am westlichen Ausgang des Ägerisees. Diese tiefen Lockergesteinströge beherbergen tiefliegende Grundwasservorkommen mit bereichsweise bis artesisch gespannten Grundwasserdruckspiegeln (Anhang 2).
Diese tiefen Quartärbecken bergen bedeutende bohrtechnische Risiken wie hydraulischer Grundbruch, potenzielle vertikale Verbindungen zwischen den Grundwasser-Stockwerken mit Risiken von Druckentspannungen und Setzungen. Weiter können darin bei Erdbeben Risiken von Bodenverflüssigungen vorliegen.
Zusammenfassend werden die Risiken von geothermischen Tiefbohrungen über den tiefen Quartärbecken mit gespanntem Grundwasser als hoch eingestuft, womit gewichtige Erschwernisse oder No-Gos vorliegen.
- Den Risiken durch natürliches **Erdgas** kommt bei einer Exploration tiefer Geothermie eine angemessene Bedeutung zu, weil im Bereich des Molasse-Beckens sowie im angrenzenden Alpenraum in und um den Kanton Zug zahlreiche Erdgasvorkommen und -austritte dokumentiert sind. Die erkannten Risiken durch Erdgas sind beherrschbar, so dass es sich dabei lediglich um ein Erschwernis handelt.
- Im ganzen Kantonsgebiet Zug sind gemäss heutigem Wissen wirtschaftlich nutzbare, **fossiler Energierohstoffe möglich** – vor allem Erdgas. Daraus resultieren vielfältige Risiken künftiger Konflikte zwischen der Tiefengeothermie und den potenziellen Kohlewasserstofflagerstätten. Wichtig sind Konfliktpotenziale sich überlagernder Energieressourcen, Beeinträchtigungen der Integrität von Aquicluden und möglichen vertikalen hydraulischen Kurzschlüssen, gleiche Zielhorizonte sowohl für hydrothermale Tiefengeothermie als auch für konventionelle.
Potenzielle petrothermale geothermische Ressourcen liegen deutlich tiefer als mögliche fossile Ressourcen. Aus einer möglichen hydrothermalen Geothermienutzung wasserführender Störungszonen resultieren keine Konflikte mit einer Schiefergasförderung.
Mit den heutigen technischen Mitteln wäre eine gleichzeitige Nutzung verschiedener Ressourcen aus unterschiedlichen Stockwerken grundsätzlich möglich, so dass daraus bei umsichtiger Planung allenfalls beherrschbare Erschwernisse, aber keine No-Gos vorliegen.
- Aus Sicht der **Naturgefahren** liegen im Kanton Zug aus tiefgründigen Rutschungen und Sackungen bekannte, erhebliche Risiken vor, die in begrenzten Perimetern (Anhang 5) gewichtige No-Gos darstellen.
Standortspezifische Untersuchungen der **Erdbebenrisiken** - vorab die Bodenverflüssigung - sind im Kanton Zug nicht bekannt, auch existiert keine Karte der Baugrunderklassen, so dass diesbezüglich heute keine präzisen Aussagen möglich sind. Diese lassen sich jedoch durch standortspezifische Untersuchungen und technische Massnahmen beherrschen, sind also als örtlich Erschwernis zu werten.

- Bei tiefegeothermischen Projekten sind aus **bohr- und anlagentechnischer Sicht** teilweise verknüpfte Risikogruppen relevant:
 - Wirtschaftliche Risiken entstehen primär aus dem Fündigkeitsrisiko, das nur durch eine Explorationsbohrung ergründet werden kann.
 - Geologische und technische Risiken: Diesbezüglich stellen Stimulationsmassnahmen („hydraulic fracturing“) auch in Zug ein erkanntes Risiko dar, womit natürlich vorhandene Gebirgsspannungen gelöst und entsprechend Kleinbeben induziert werden können (z.B. Basel, St. Gallen). Aus Bohrzeitverlängerungen resultieren terminliche und wirtschaftliche Risiken, beispielsweise durch im Bohrloch verlorene Werkzeuge. Technische Risiken können im schlimmsten Falle mit der Aufgabe des Bohrlochs und dem Verlust des bis dahin eingesetzten Kapitals enden.
 - Bezüglich der vorhandenen Umweltrisiken sind die gesetzlichen Bestimmungen zu erfüllen. Wegen des bekannten Gefährdungspotentials bei der Erschliessung von Kohlenwasserstoffen aus dem Untergrund durch Tiefbohrungen hat sich in der Bohrindustrie ein sicherheitstechnischer Standard auf höchstem Niveau etabliert, der einer permanenten Weiterentwicklung unterliegt und der zu einem der höchsten sicherheitstechnischen Branchenstandards führte.Die erkannten bohr- und anlagentechnischen Risiken stellen somit allenfalls Er-schwernisse dar. Die in einer geothermischen Anlage verwendeten Stoffe und mögliche Emissionen können in einer Umweltverträglichkeitsprüfung beurteilt werden.
- Aus Sicht der im vorliegenden Bericht detailliert analysierten Risiken und möglichen Konflikte konkurrierender Nutzungen kann im Kanton Zug als günstigstes Gebiet das Plateau im Perimeter Rotkreuz – Buonas - Cham – Niederwil - Hagendorn betrachtet werden. Dazu gesellen sich nebst einigen beschränkteren vor allem kleinere Perimeter N von Steinhausen oder W von Sihlbrugg.

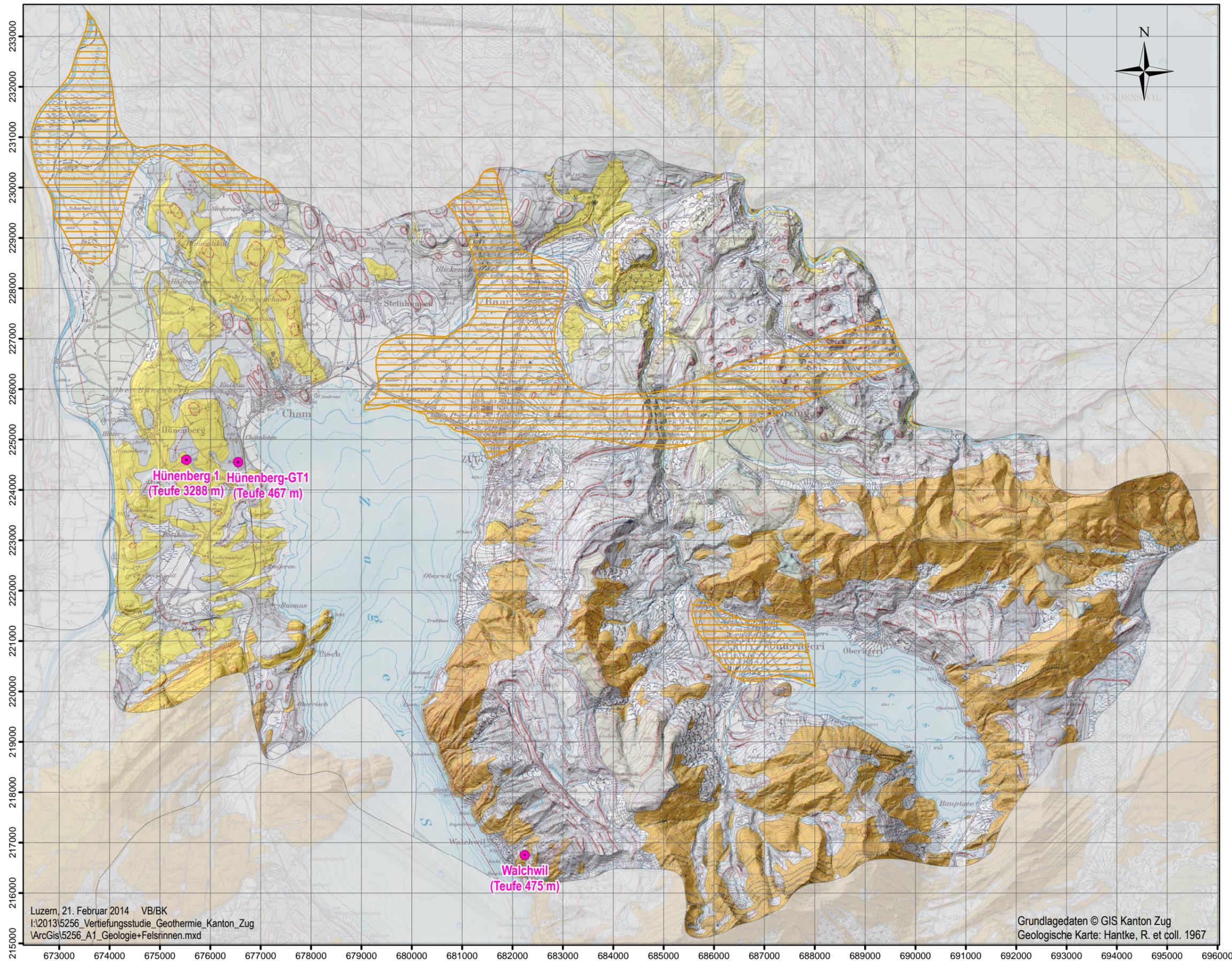
Sachbearbeitung:

Kap. 1 bis 4, 6,3, 6.4, 7	Dr. B. Keller
Kap. 5.1, 6.1 und 6.2.....	Dr. G. Wyssling, Beitrag R. Kistler AfU ZG
Kap. 5.2 bis 5.4	Dr. W. Leu
Kap. 6.5:	A. Macek
Grafische Auswertungen:	V. Bodien, Dr. W. Leu, Dr. B. Keller
Generelle Reviews, versch. Beiträge	Dr. H. Näf
Projektleitung	Dr. B. Keller

8 LITERATUR

- BAFU. 2009.** *Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmennutzung.* Bern : Bundesamt für Umwelt BAFU, 2009.
- Brown, D.W. 2000.** *A Hot Dry Rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water.* s.l. : Proceedings, 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Univ., 6 p., 2000.
- BUWAL. 2004.** *Wegleitung Grundwasserschutz.* s.l. : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern., 2004.
- Chevallier, G., Diamond, L.W. & Leu, W. 2010.** Potential for deep geological sequestration of CO₂ in Switzerland: a first appraisal. *Swiss J. Geosci.* 2010, Bd. 103, S. 427 - 455.
- Dr. Roland Wyss GmbH. 2013.** *Vorabklärungen zur Tiefengeothermie Kanton Zug.* 2013.
- Geoform AG. 1996.** *Kohle-/Permokarbonverbreitung im Untergrund des Kanton Zug.* s.l. : Bericht im Auftrag der Baudirektion des Kantons Zug, gf-1872-1, 15p., 1996.
- GSchG, Gewässerschutzgesetz.** vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Januar 2011), SR 814.20.
- Hantke, R. 1967.** Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete, Massstab 1:50'000. *Vierteljahresschrift der naturforschenden Gesellschaft in Zürich.* Jahrgang 112, 1967, Heft 2.
- Kanton Zug, Amt für Umweltschutz. 2013.** *Grundwasserkarte des Kantons Zug, Massstab 1:25'000.* 2013.
- Kanton Zug, Amt für Umweltschutz Kanton. 2012.** *Gewässerschutzkarte des Kantons Zug, Massstab 1:25'000.* 2012.
- Kanton Zug, Baudirektion. 2003.** *Gefahrenhinweiskarte des Kantons Zug, Massstab 1:25'000.* 2003.
- Keller, B. 1992.** Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. *Eclogae geo. Helv.* 85/3: 1992, S. 611-651.
- . 1990. Wirkung von Wellen und Gezeiten bei der Ablagerung der Oberen Meeresmolasse. Löwendenkmal und Gletschergarten - zwei anschauliche geologische Studienobjekte. *Mitt. Naturf. Ges. Luzern.* 1990, Bde. 31, 245-271.
- Kelts, K. 1978.** *Geology and sedimentary evolution of lakes Zürich and Zug, Switzerland.* s.l. : Dissertation ETH Zürich, 250p., 1978.
- Lemcke, K., Büchi, U.P. & Wiener, G. 1968.** Einige Ergebnisse der Erdölexploration auf die mittelländische Molasse der Zentralschweiz. *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing.* 1968, Bde. Vol 35, Nr. 87, S. 15 - 34.
- Leu, W., Keller, B., Matter, A., Schärli, U. & Rybach, L. 1999.** *Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500m).* s.l. : Bundesamt für Energie, 79p. (ENET-Nr. 9723719), 1999.
- Nagra. 2008.** Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager. Geologische Grundlagen. *Technischer Bericht.* 2008, Bde. 08-04.
- Proseis. 2013.** *Reprozessing von sieben seismischen 2D-Linien im Kanton Zug und vereinfachte strukturelle Interpretation der Ergebnisse.* s.l. : Gutachten i.A.Kanton Zug., 2013.
- Résonance SA & Keller+Lorenz AG. 2012.** *Spektrale Mikrozonierung Luzern.* 2012.
- Schafirovich, E. & Varma, A. . 2009.** *Underground coal gasification: A brief review of current status.* s.l. : Ind. Eng. Chemistry Res., 48, p. 7865-7875., 2009.
- Umwelt und Energie. 2012.** *Geothermie im Kanton Luzern: Grundlagen und Potenzial.* s.l. : Kanton Luzern, Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement., 2012.

Vollmayr, T. & Wendt, A. 1987. Die Erdgasbohrung Entlebuch 1, ein Tiefenaufschluss am Alpennordrand. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.* 1987, S. Vol 53,Nr. 125, 67-79.



Legende

- Tiefe Bohrungen
- tiefe Felsrinnen
- Quartär (Auszug)**
- Rutschungen
- Sackungen
- Talalluvionen
- Moränen Würm
- Moränen grosse Eiszeit
- Molasse**
- Obere Süsswassermolasse
- Obere Meeresmolasse
- Untere Süsswassermolasse
- Untere Meeresmolasse

geo form Geologische Beratungen und Studien AG

Geologisches Büro
Dr. Lorenz Wyssling AG

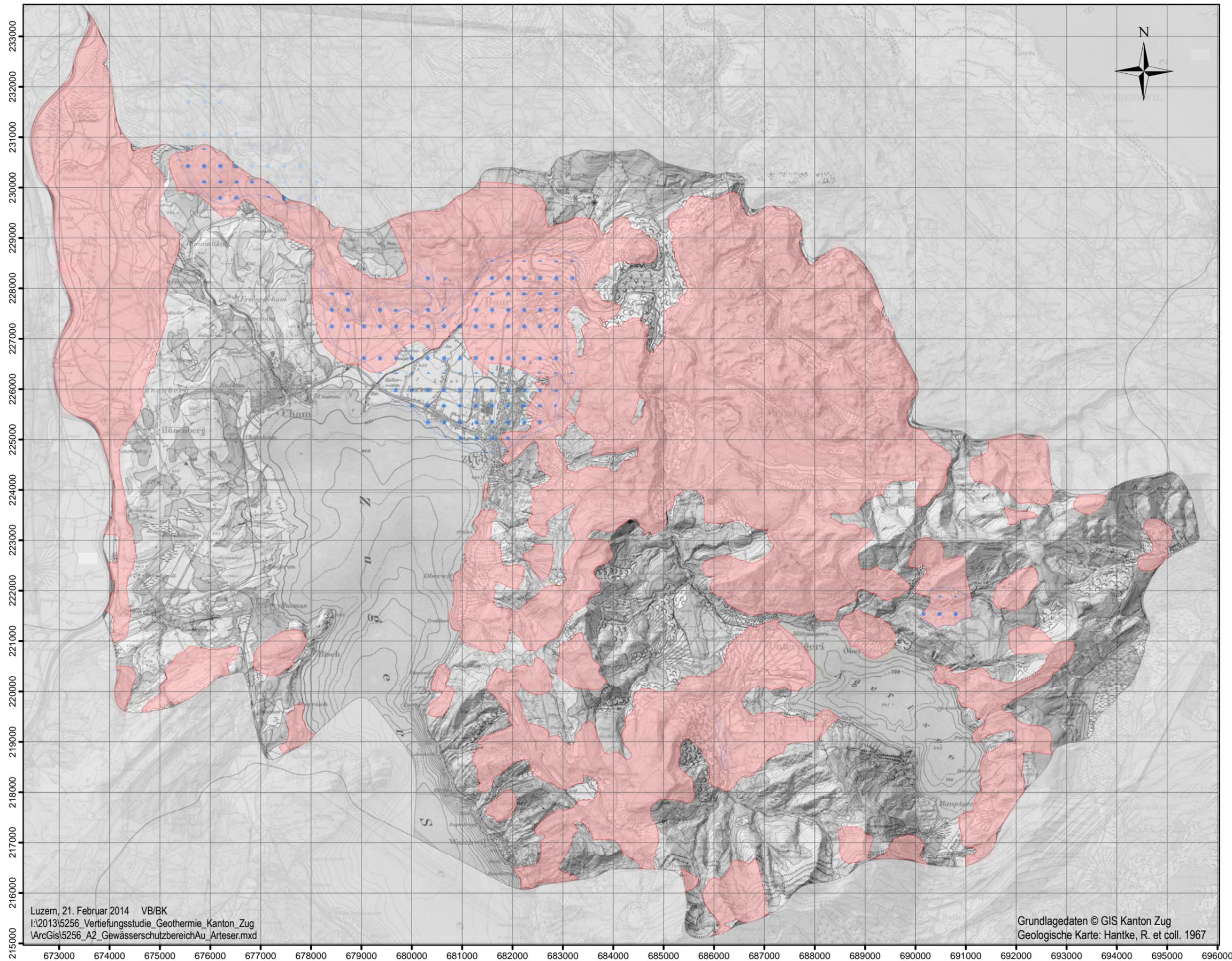


GEOVELL GMBH

KELLER+LORENZ AG
Geotechnik - Hydrogeologie - Geologie - Naturgefahren - Altlasten

Luzern, 21. Februar 2014 VB/BK
I:\2013\5256_Vertiefungsstudie_Geothermie_Kanton_Zug
I:\ArcGis\5256_A1_Geologie+Felsrinnen.mxd

Grundlagedaten © GIS Kanton Zug
Geologische Karte: Hantke, R. et coll. 1967



Legende

- Gewässerschutzbereich Au
- artesisches Grundwasser-Vorkommen

Gewässerschutzbereich gem. Gewässerschutzkarte des Kantons Zug, Massstab 1 : 25'000, Juni 2012.

Grundwasser gem. Grundwasserkarte des Kantons Zug, Massstab 1 : 25'000, März 2013.

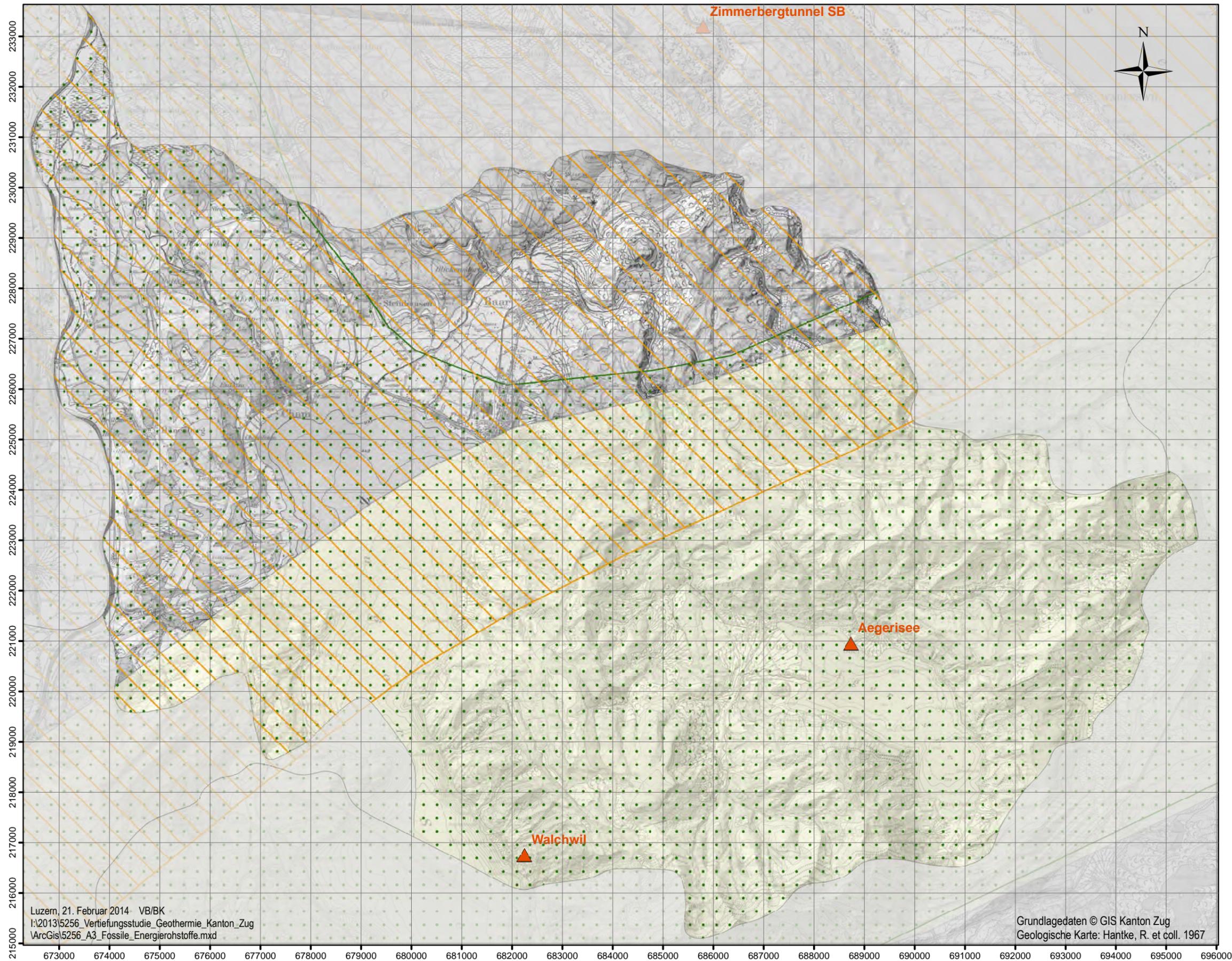


Geologisches Büro
Dr. Lorenz Wyssling AG



Luzern, 21. Februar 2014 VB/BK
I:\2013\5256_Vertiefungsstudie_Geothermie_Kanton_Zug
I:\ArcGis\5256_A2_GewässerschutzbereichAu_Arteser.mxd

Grundlagedaten © GIS Kanton Zug
Geologische Karte: Hantke, R. et coll. 1967



Legende

-  Gas-Indikator
-  Potenzial Schieferöl-Schiefergas Aalenian-Toarcien (unkonventionell)
-  Potenzial Tight Gas (unkonventionell)
-  Potenzial konventionelle Gaslagerstätten

geo form Geologische Beratungen und Studien AG

Geologisches Büro
Dr. Lorenz Wyssling AG



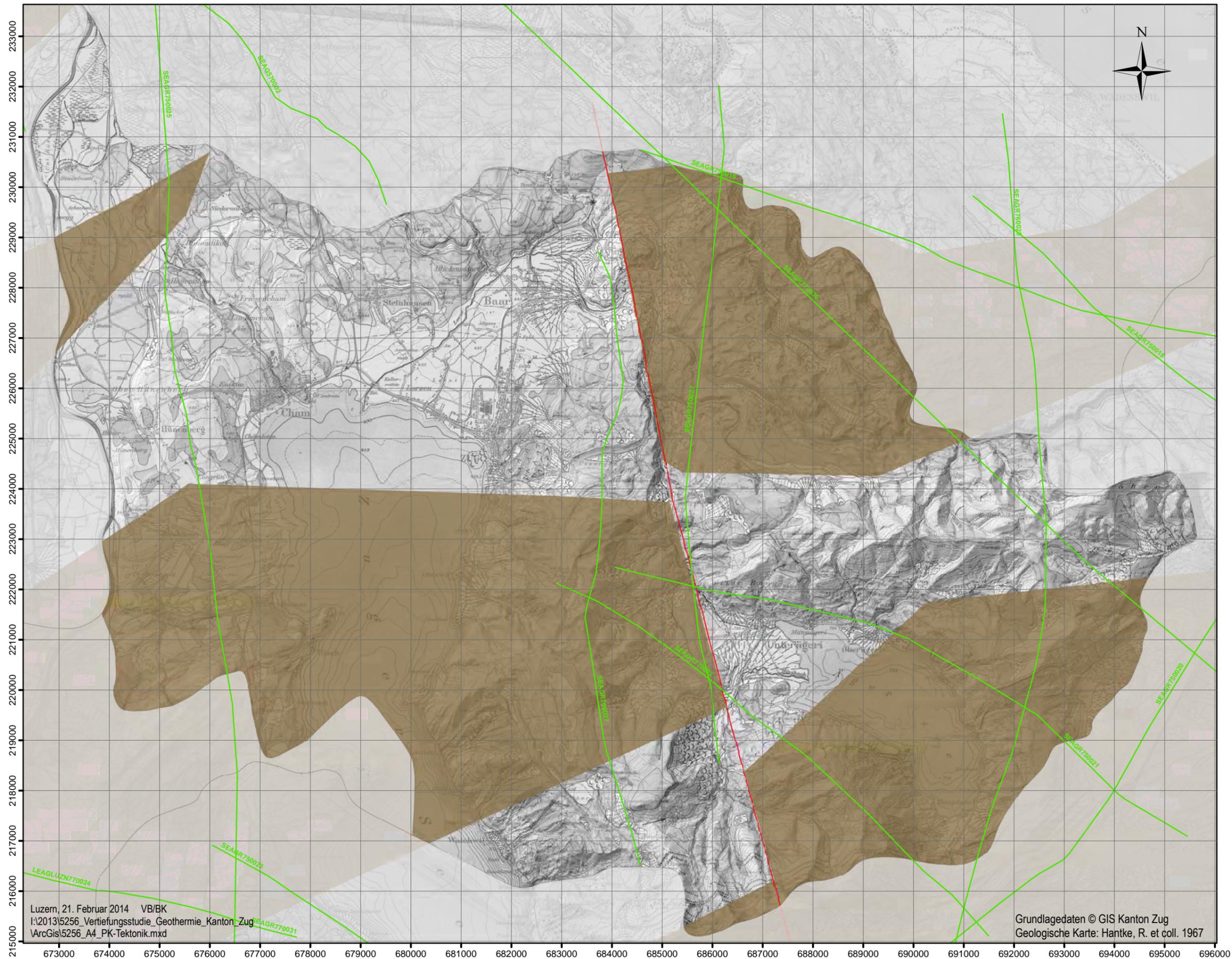
GEOVELL GMBH

KELLER+LORENZ AG
Geotechnik - Hydrogeologie - Geologie - Naturgefahren - Altlasten

Luzern, 21. Februar 2014 VB/BK
I:\2013\5256_Vertiefungsstudie_Geothermie_Kanton_Zug
I:\ArcGis\5256_A3_Fossile_Energierohstoffe.mxd

Grundlagedaten © GIS Kanton Zug
Geologische Karte: Hantke, R. et coll. 1967

Mutmassliche Verbreitung der tiefen Permo-Karbon-Tröge



Legende

- Seismische Linien
- Tektonische Störung
- Tiefe Permo-Karbon-Tröge

Permokarbontröge gem. Nagra (2008):
Technischer Bericht NTB 08-04

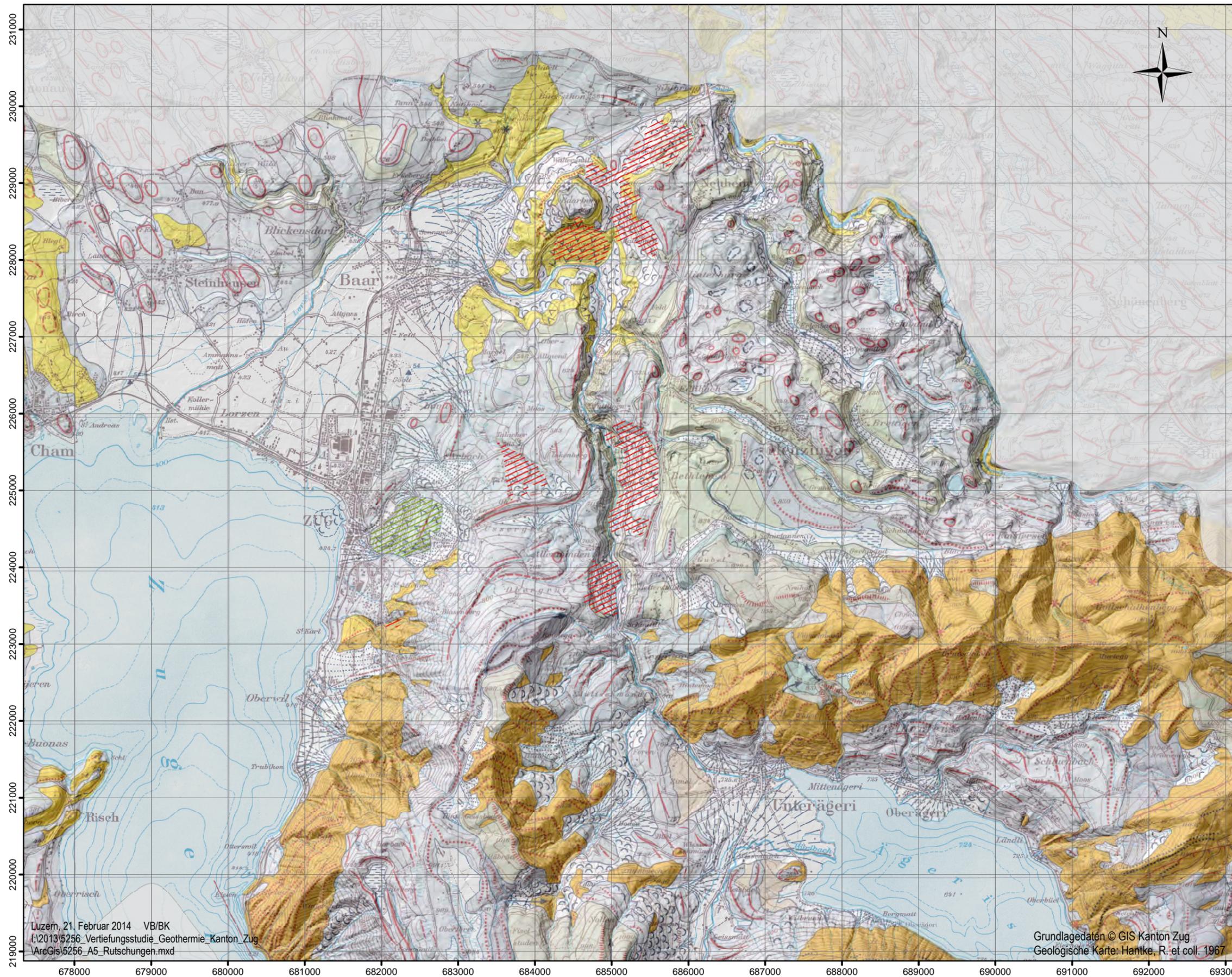


Geologisches Büro
Dr. Lorenz Wyssling AG



Luzern, 21. Februar 2014 VB/BK
I:\2013\5256_Vertiefungsstudie_Geothermie_Kanton_Zug
I:\ArcGis\5256_A4_PK-Tektonik.mxd

Grundlagedaten © GIS Kanton Zug
Geologische Karte: Hantke, R. et coll. 1967



Legende

-  Sackungsmasse St. Verena
-  tiefgründige Rutschungen (tiefer 10 m)

Rutschungen gem. Gefahrenhinweiskarte des Kantons Zug, Prozesse Sturz- und Rutschgefahren, 2003.

Quartär (Auszug)

-  Rutschungen
-  Sackungen
-  Talalluvionen
-  Moränen Würm
-  Moränen grosse Eiszeit

Molasse

-  Obere Süsswassermolasse
-  Obere Meeresmolasse
-  Untere Süsswassermolasse
-  Untere Meeresmolasse



Geologisches Büro
Dr. Lorenz Wyssling AG

