



Tiefe Geothermie

Wärme aus der Tiefe

Waldsee, 14. Januar 2026

- Technische Grundlagen der (Tiefen)Geothermie
- Geologische Struktur und energetische Potenziale des Oberrheingrabens
- Rolle der Behörden und Genehmigungsverfahren
- Risiken und Haftungsfragen

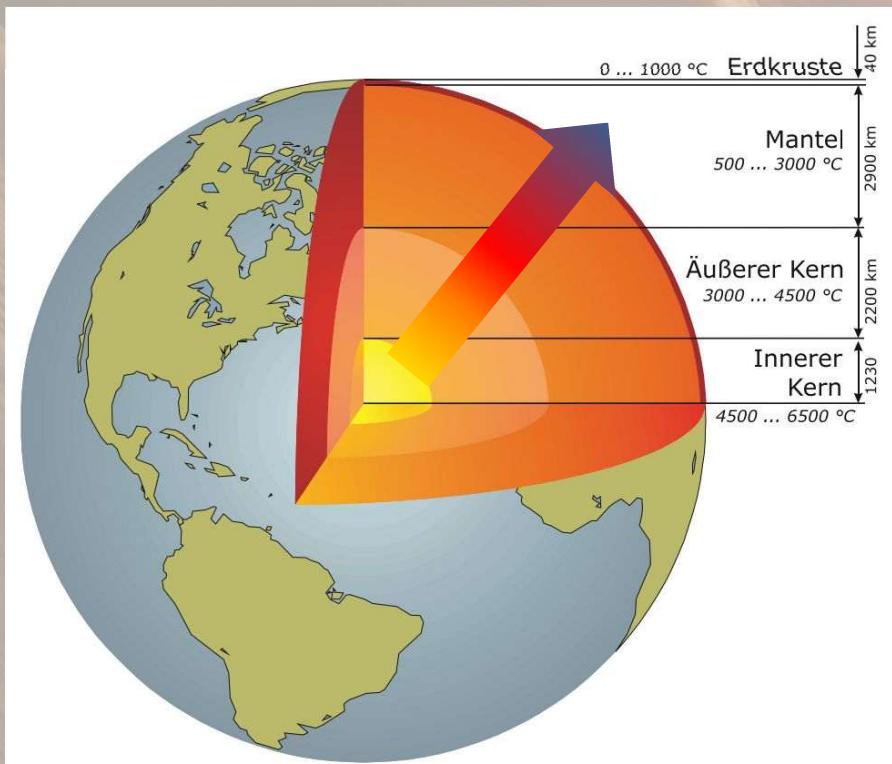


Technische Grundlagen der (Tiefen)Geothermie

Geothermie = Geos+Thermos = Erdwärme

Die Wärme im Erdinnern stammt:

- ca. 60 - 70 Prozent aus radioaktiven Zerfallsprozessen im Erdmantel und Erdkern
- ca. 30 – 40 Prozent Restwärme aus Zeit der Erdentstehung
- einem Anteil an „Walkenergie“ aus gravitativem „Durchkneten“ der Erde

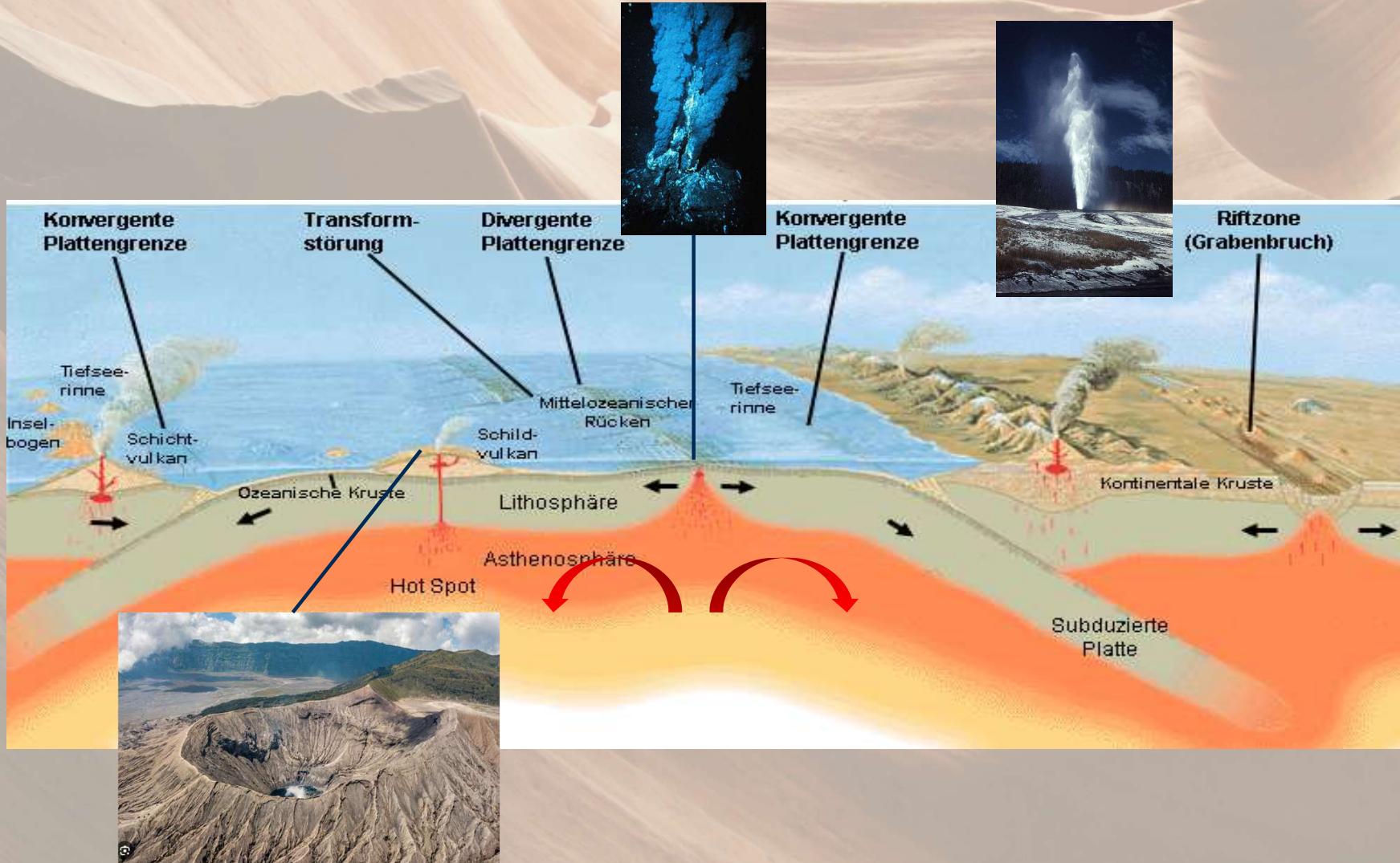


99 % des Volumens der Erde sind heißer als 1.000 °C

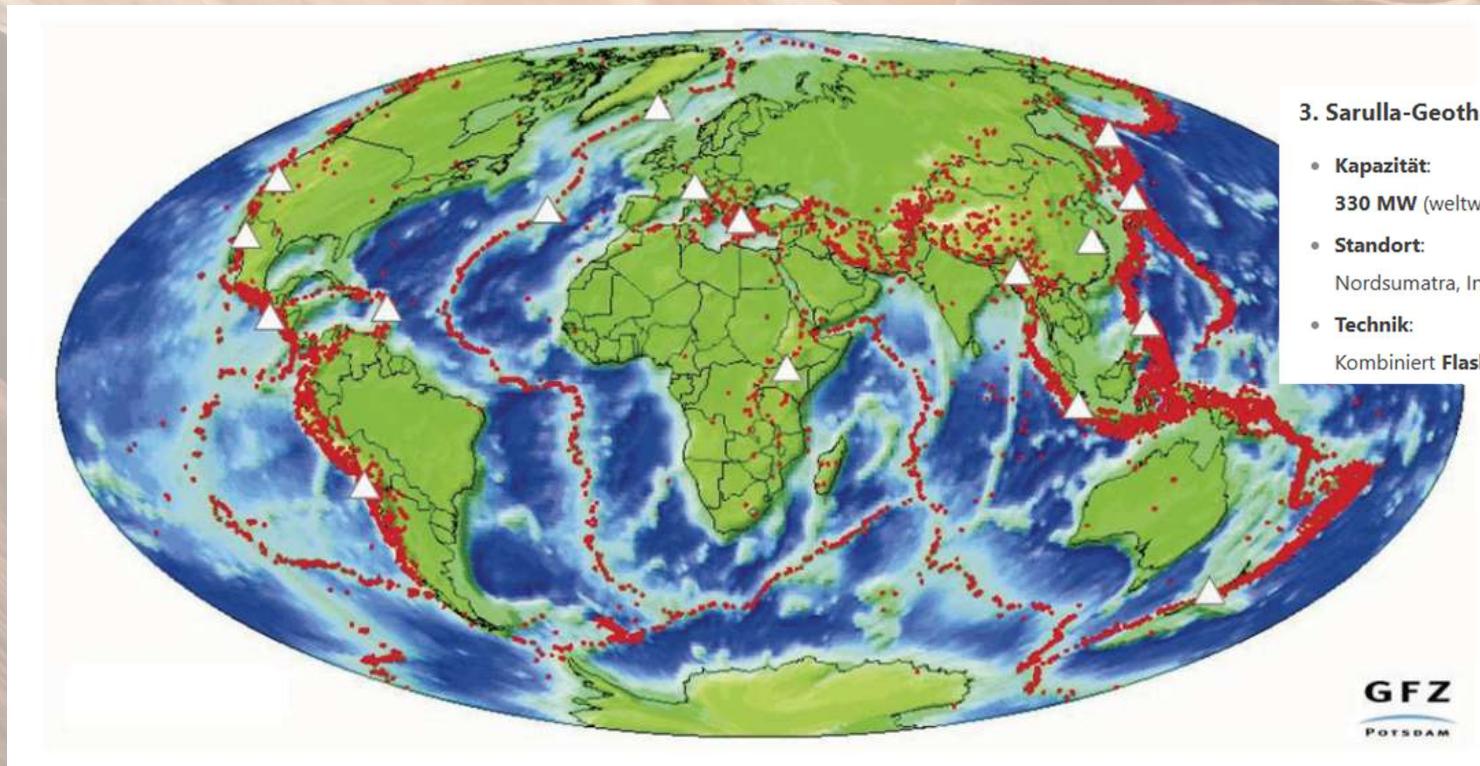
geothermischer Wärmestrom **10^{21} J/a**
(ca. 2- bis 3-faches des Weltenergieverbauchs !)

Diese Wärmemenge wird - weitgehend ungenutzt - über die Erdoberfläche in die Atmosphäre abgestrahlt

Die Erde – der Wärmemotor



Geothermie weltweit



3. Sarulla-Geothermieranlage (Indonesien)

- **Kapazität:** 330 MW (weltweit größte Einzelanlage zur Stromerzeugung).
- **Standort:** Nordsumatra, Indonesien (vulkanisch aktive Zone).
- **Technik:** Kombiniert Flash-Dampf- und Binärkreislauf-Technologie.

Bruhn & Huenges (2011): Geothermie für Grundlaststrom und Wärmeversorgung - internationale Nutzung, Potenzial, technologische Entwicklungen; DPG2011_AKE9.1

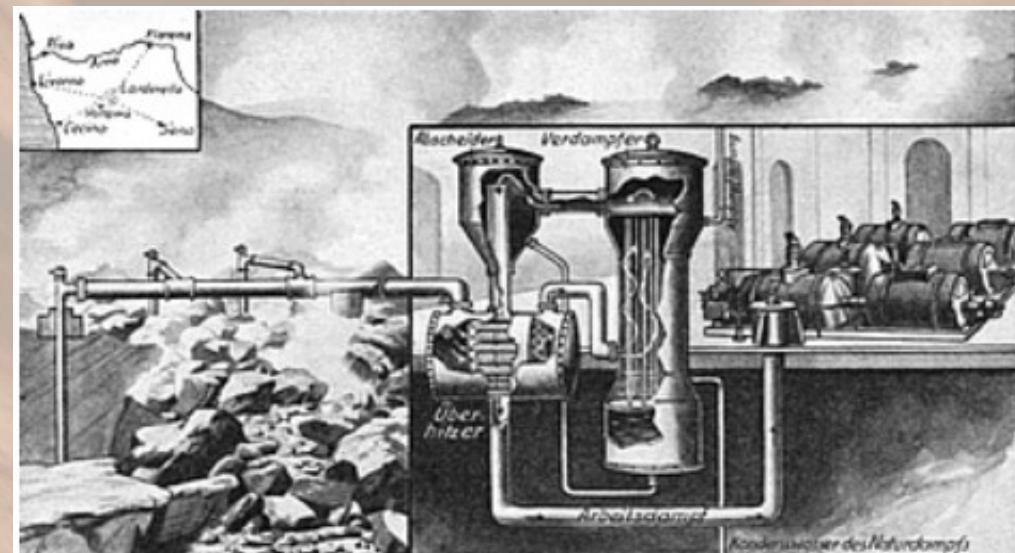
- **mehr als 550 geothermische Kraftwerke weltweit (Strom und Wärme)**
- **installierte elektrische Leistung ca. 16 GW (2024; nur Stromerzeugung)**

Geothermie – eine neue Technik ?



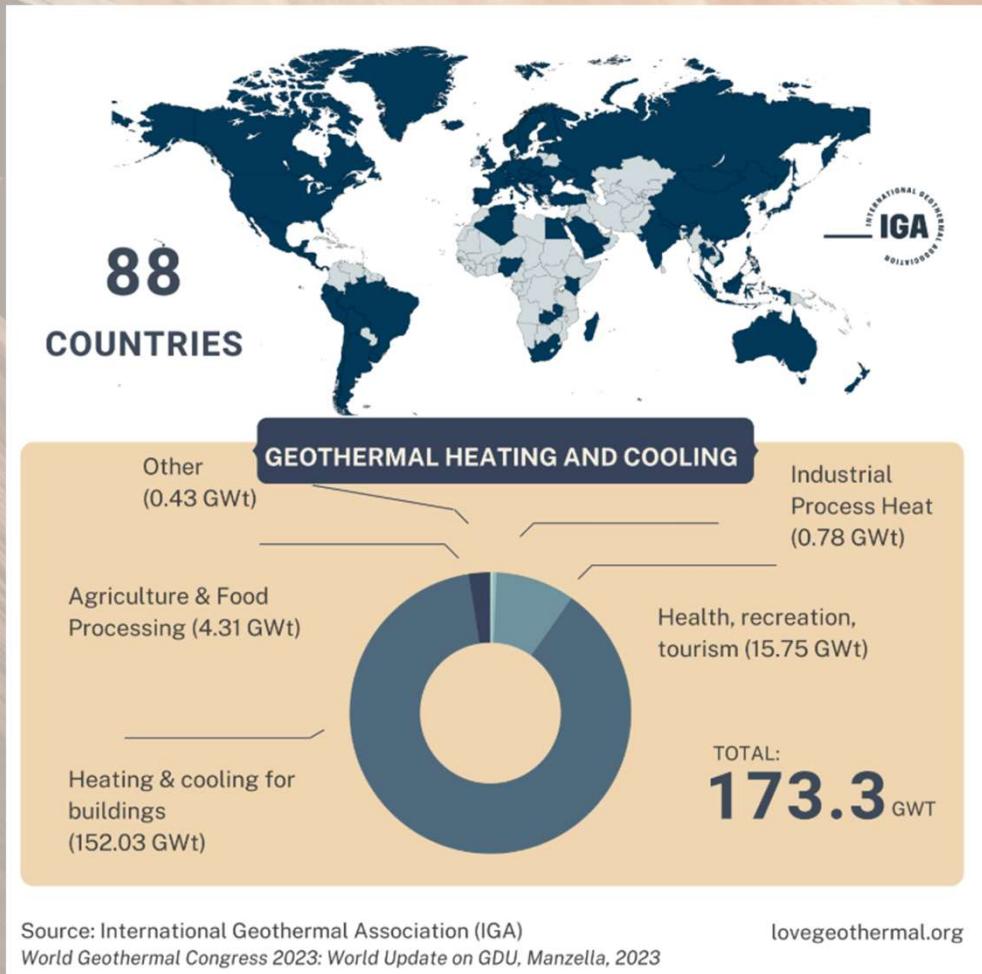
1904 - Graf Piero Ginori Conti erfindet das erste geothermische Kraftwerk in Larderello, Italien. (Geothermal Education Office)

1904: Bau des ersten „geothermischen Generators“ durch Graf Ginori-Conti



1913: erste kommerzielle Stromerzeugung aus Geothermie in der Toskana

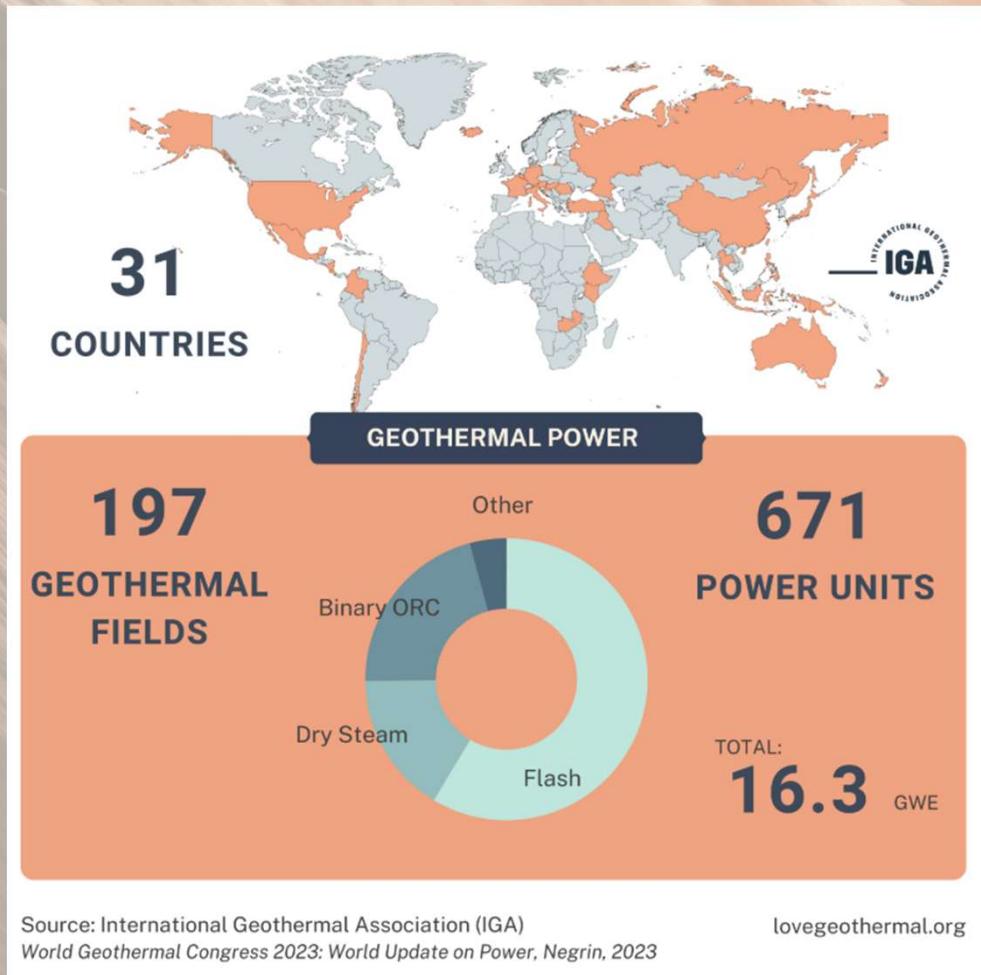
Geothermienutzung weltweit - Wärme



Stand 2023



Geothermie weltweit - Stromerzeugung



Stand 2023



Geothermische Nutzungsformen

Hydrothermale Geothermie

- Förderung von natürlich vorhandenem heißem Wasser / Dampf aus wasserführenden Schichten oder aus Brüchen / Störungen
- Förderraten: 25 bis 200 l/s

Beispiele:

Bruchsal, Landau, Insheim, Rittershoffen, Unterhaching, Erding, Kirchweidach, Kalifornien, Toskana, Neuseeland, etc.

Hot Dry Rock Verfahren (Petrothermal)

- heißes „trockenes“ Gestein ($T > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Risse und Brüche des Gesteins werden erst durch Stimulation / Fracking erzeugt
- Förderaten: 5 bis 20 l/s

Beispiele: Basel, Utah FORGE, Cooper Basin

- **Alternativ durch geschlossene Systeme (Loops) erschlossen**

EGS-Verfahren (Petrothermal)

(Enhanced oder Engineered Geothermal System)
Soultz-sous-Forêts, United Downs (Cornwall)

Flache Geothermie

- 0 – 400 m
- Erdwärmesonden (Heizen)
- Niedertemperatur ($< 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

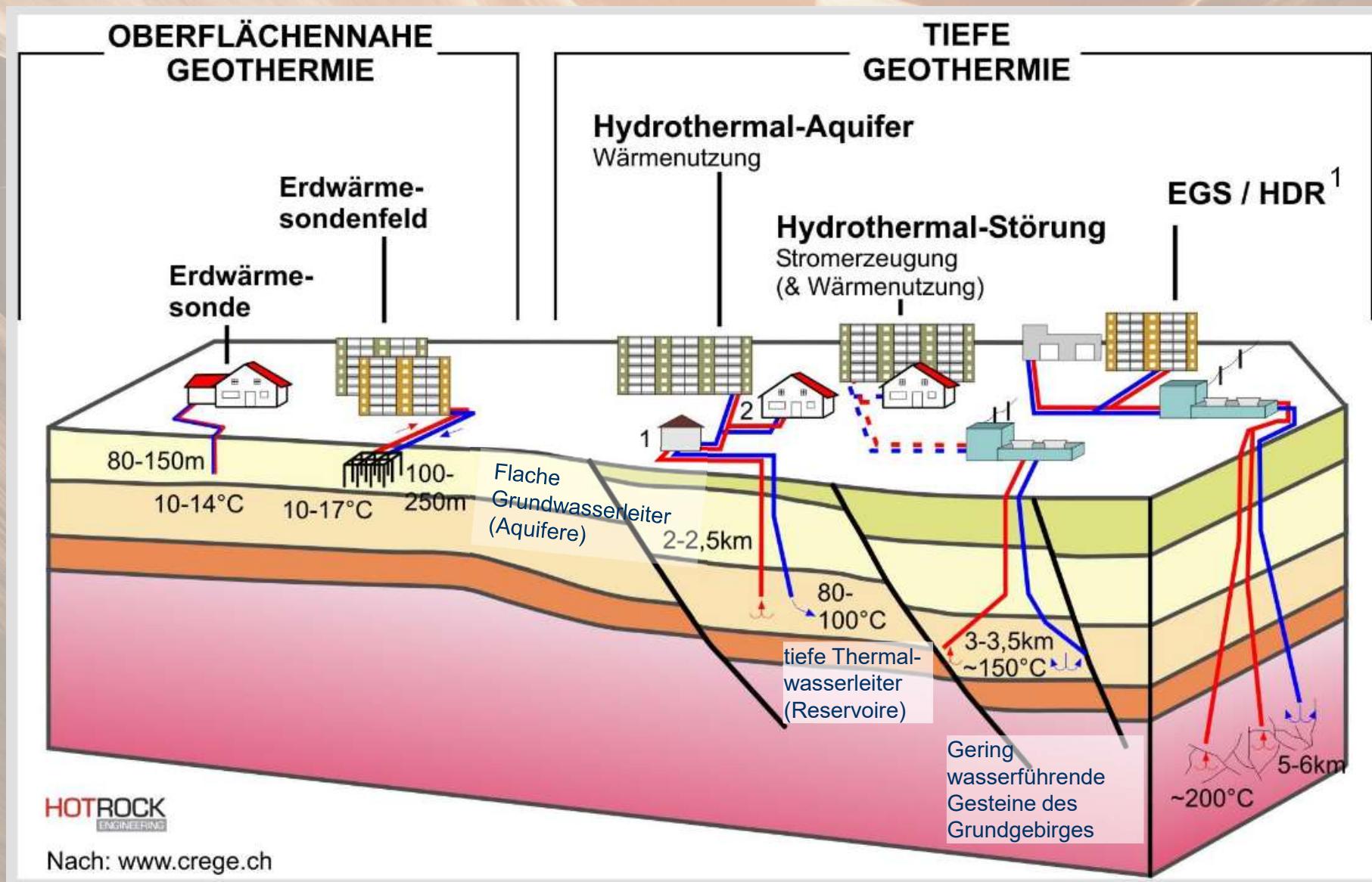
Mitteltiefe Geothermie

- > 400 bis ca. 1.500 m
- Erdwärmeförderung mittels Wasser oder tiefe Wärmesonde
- Temperaturen 40 - 100 $\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (Wärme)

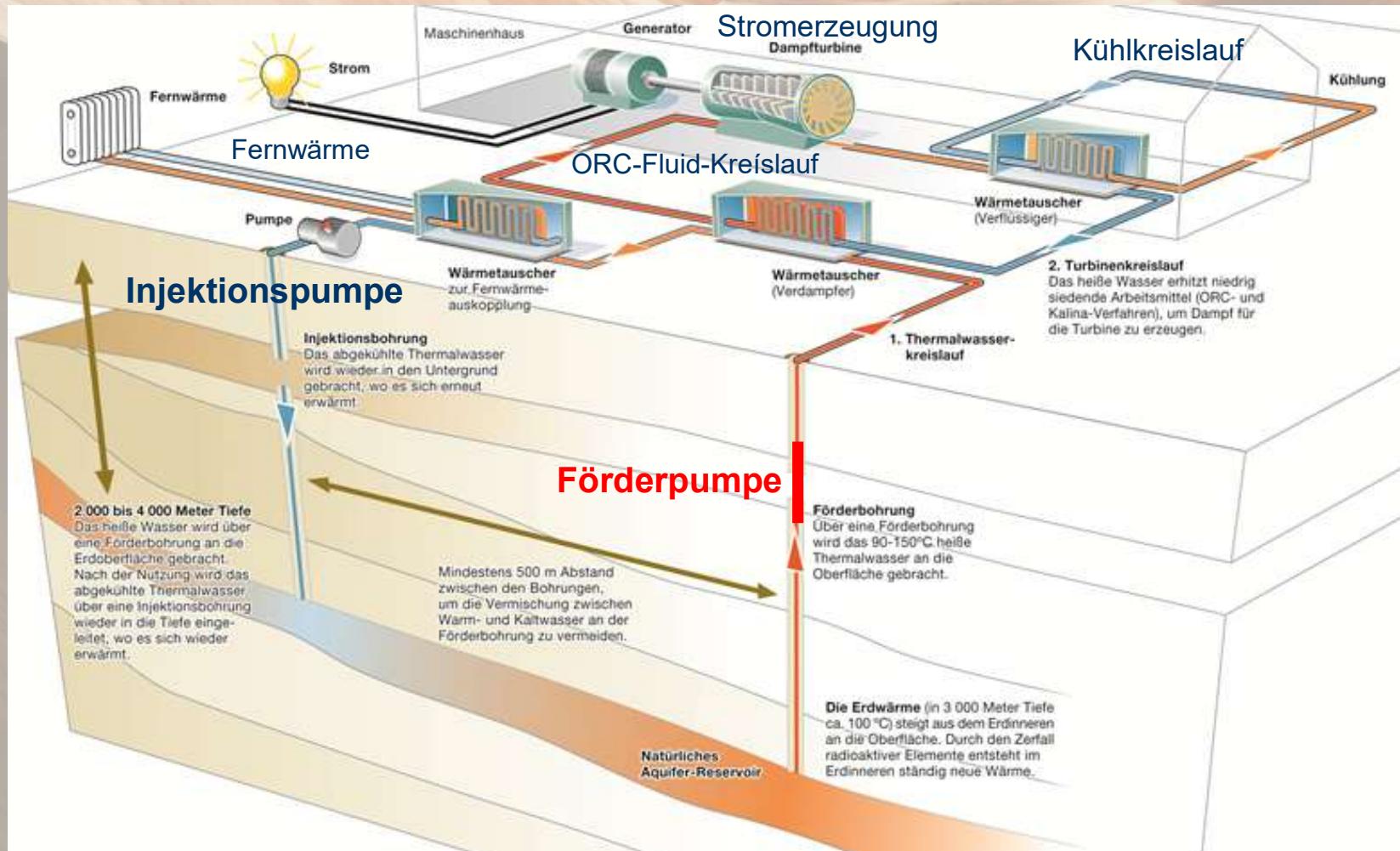
Tiefe Geothermie

- 1.500 bis > 5.000 m
- Temperaturen > 100 $\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (Strom und Wärme)

Geothermische Nutzungsformen



Geothermische Anlagen

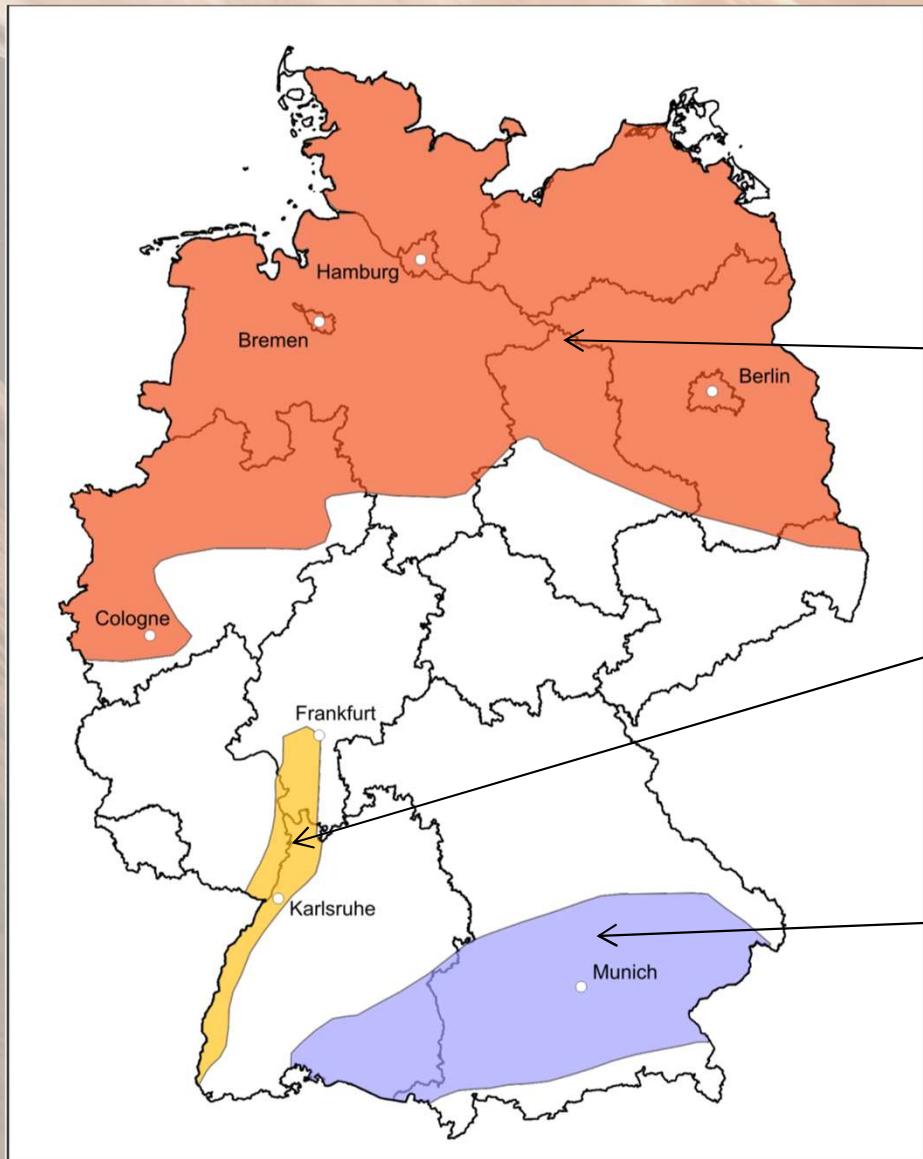


Quelle: Rödl & Partner



Geothermisches Potenzial in Deutschland und im Oberrheingraben

Geothermisches Potenzial in Deutschland



(hier nur hydrothermales Potenzial !)

geothermische Gradienten:

Norddeutsches Becken

$\sim 2,8 - 3,3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$

Beer & Burtig 1999

Oberrheingraben (ORG)

im Mittel $4,5^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ (max. 10°) Sauer et.al. 1981

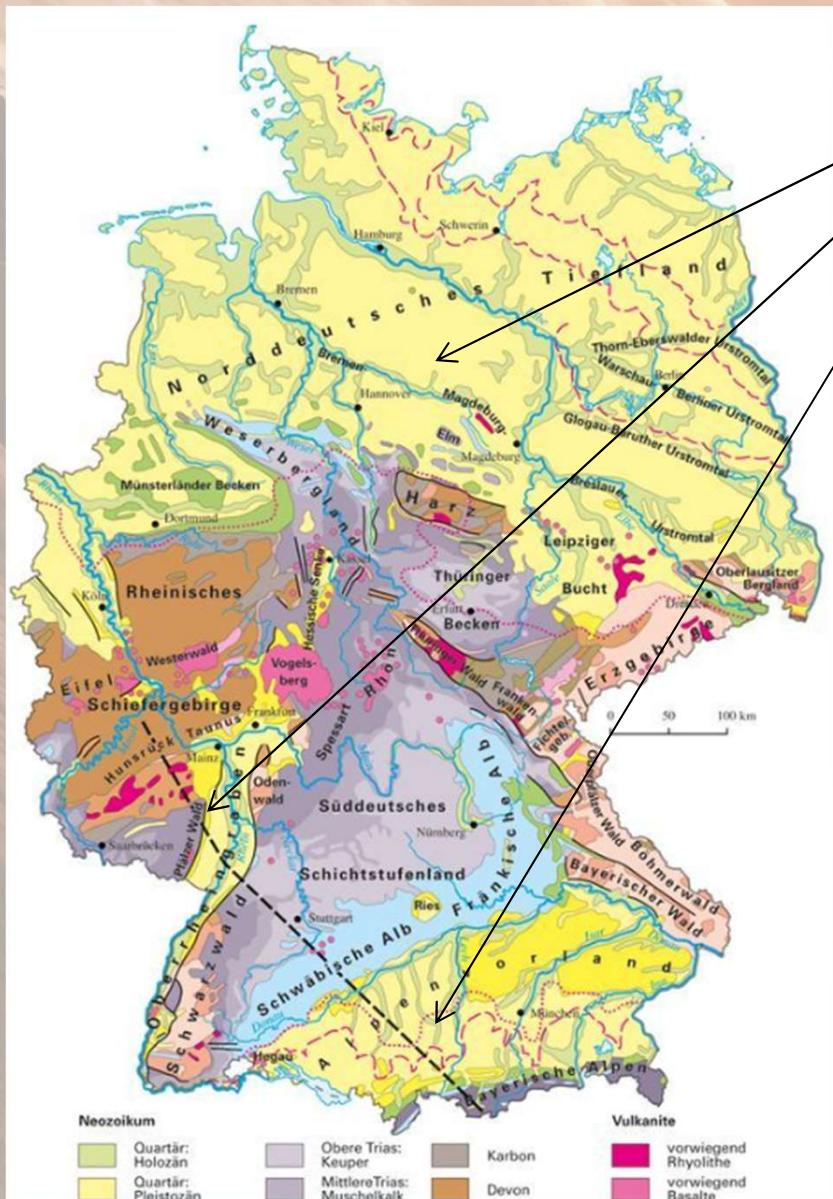
Nordalpines Molassebecken

($\sim 3 - \text{max. } 4^\circ\text{C}/100 \text{ m}$)

Bertleff et al. 1988

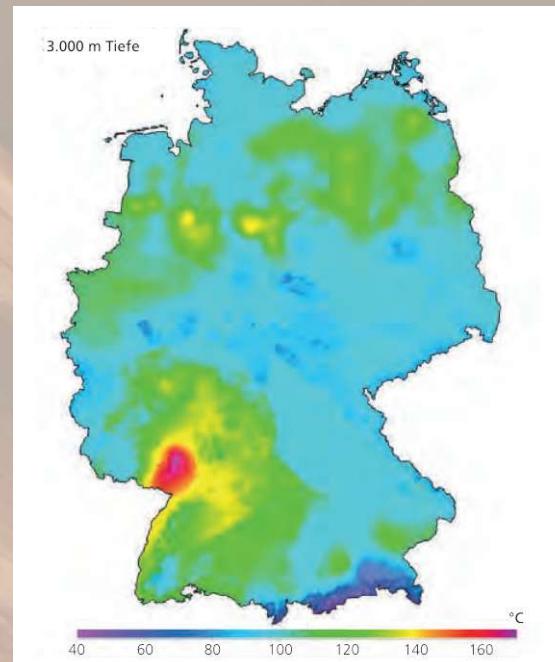
Nur der Oberrheingraben und darüber hinaus einzelne Hot Spots haben deutlich über den Mittelwert erhöhte Gradienten !

Geothermisches Potenzial in Deutschland



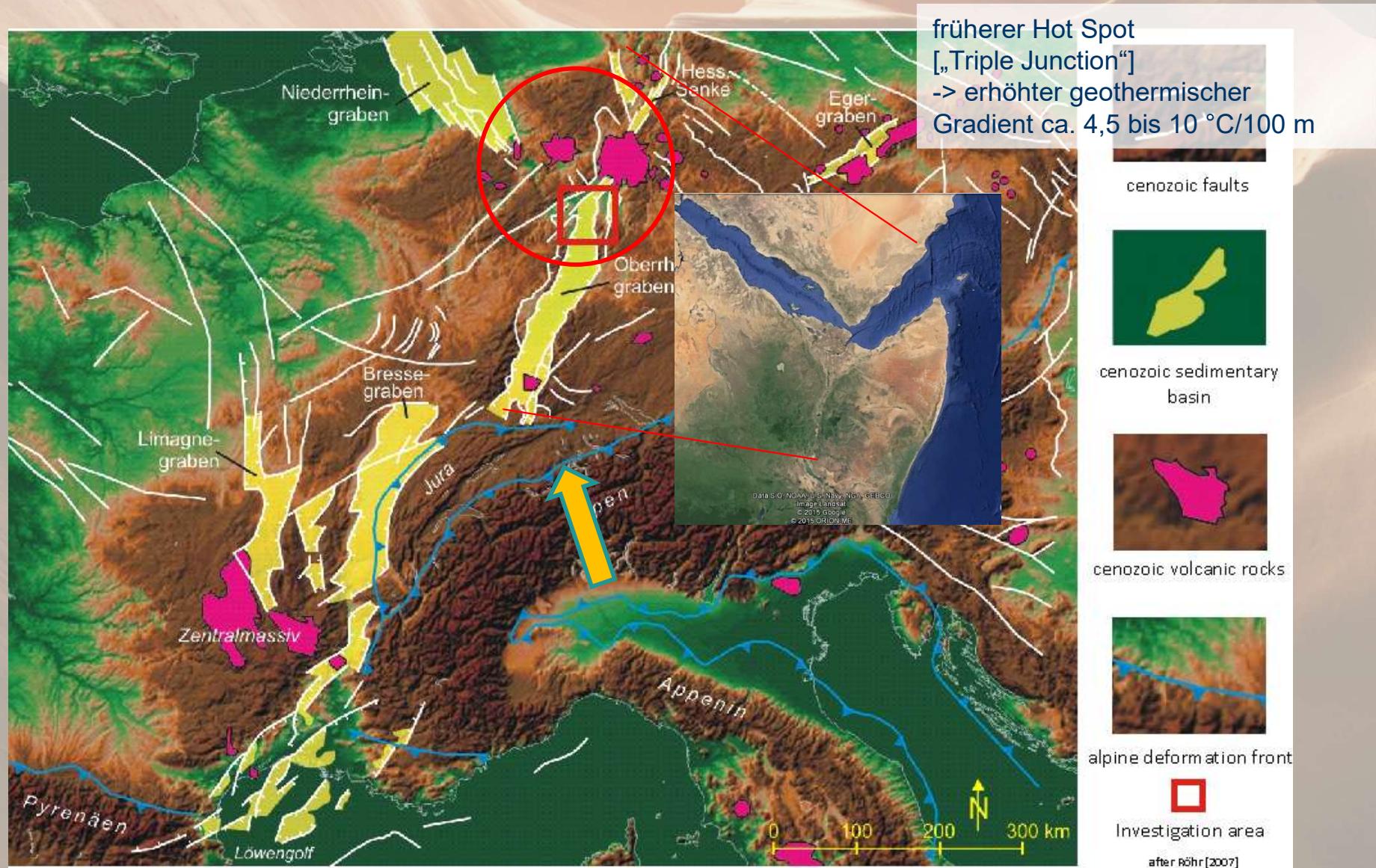
Sedimentbecken

- Sedimentgesteine mit ausreichend hoher Mächtigkeit und Permeabilität
 - geologisch aktive Gebiete
 - > erhöhter Wärmestrom
 - > Störungszonen und Brüche
 - > u.a. Entstehung von Erdöl u. Ergas

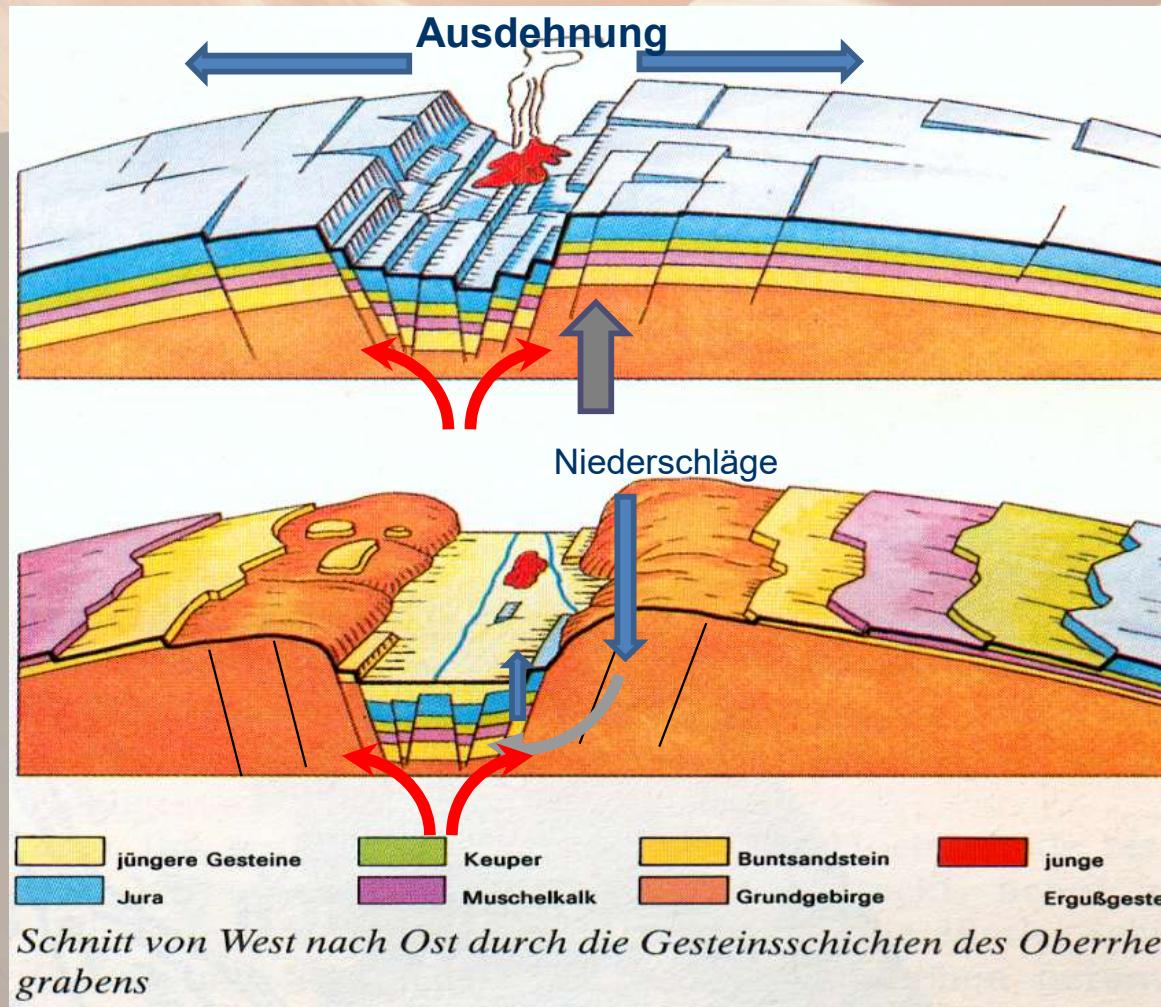


Temperatur in
3.000 m Tiefe
Quelle: GeotIS

Geothermisches Potenzial Oberrheingraben

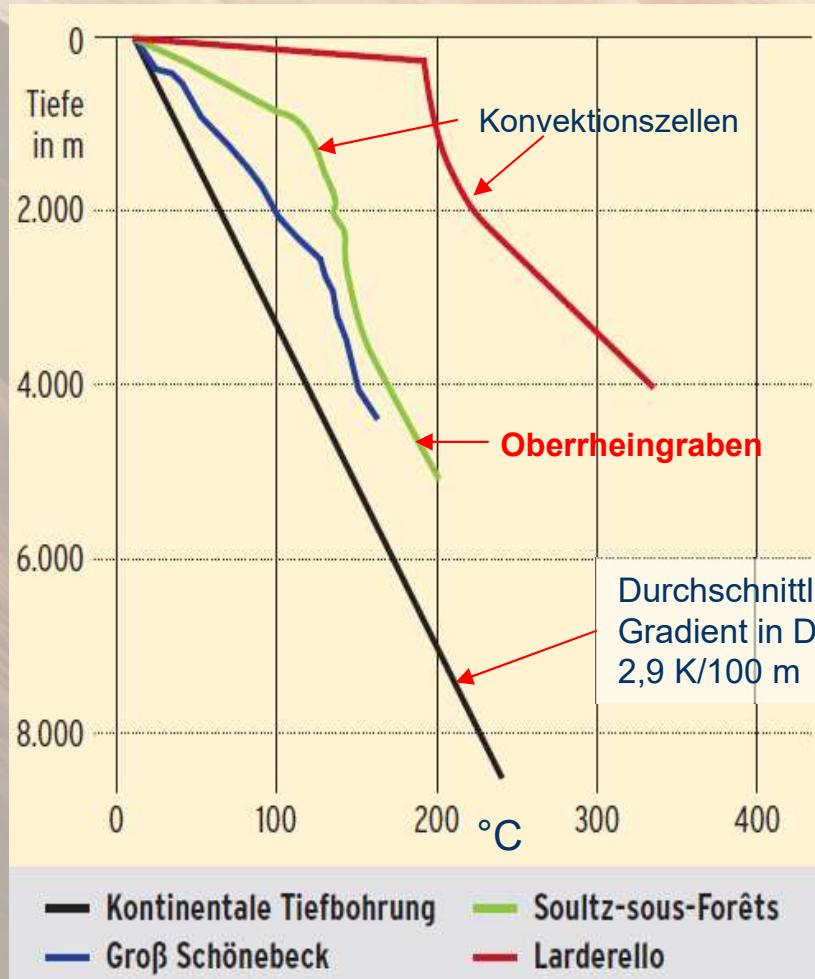


Geothermisches Potenzial Oberrheingraben



Thermalwässer sind eine Mischung aus Tiefenwässern (Erdkruste und –mantel sowie meteorischen Wässern

Geothermisches Potenzial Oberrheingraben



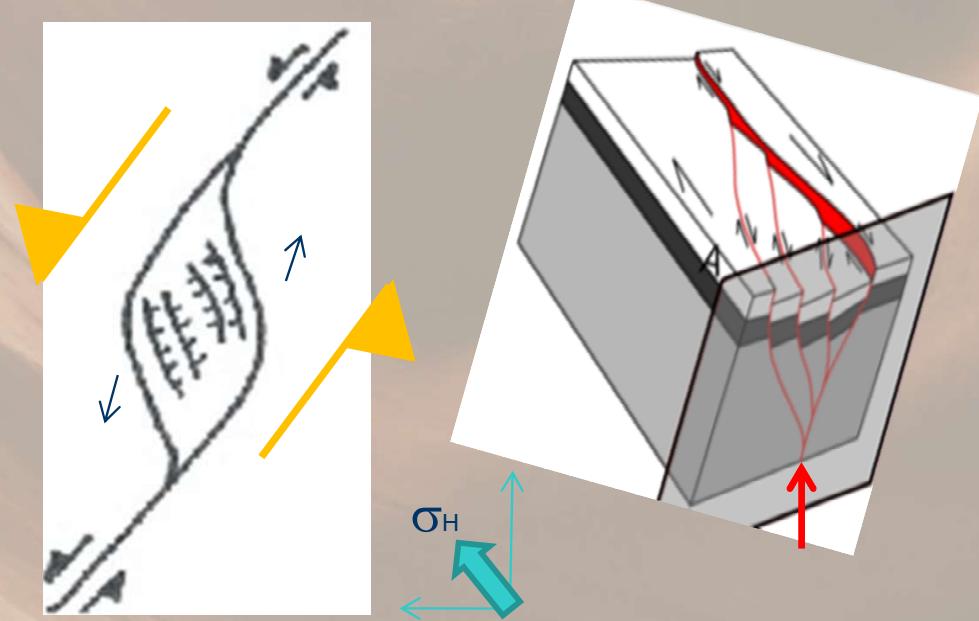
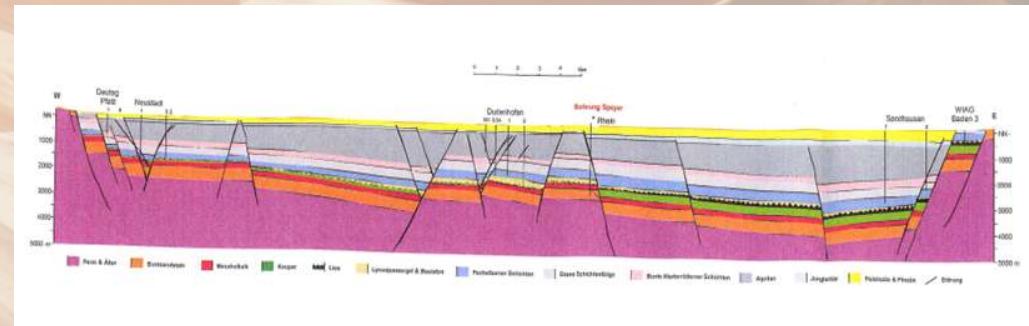
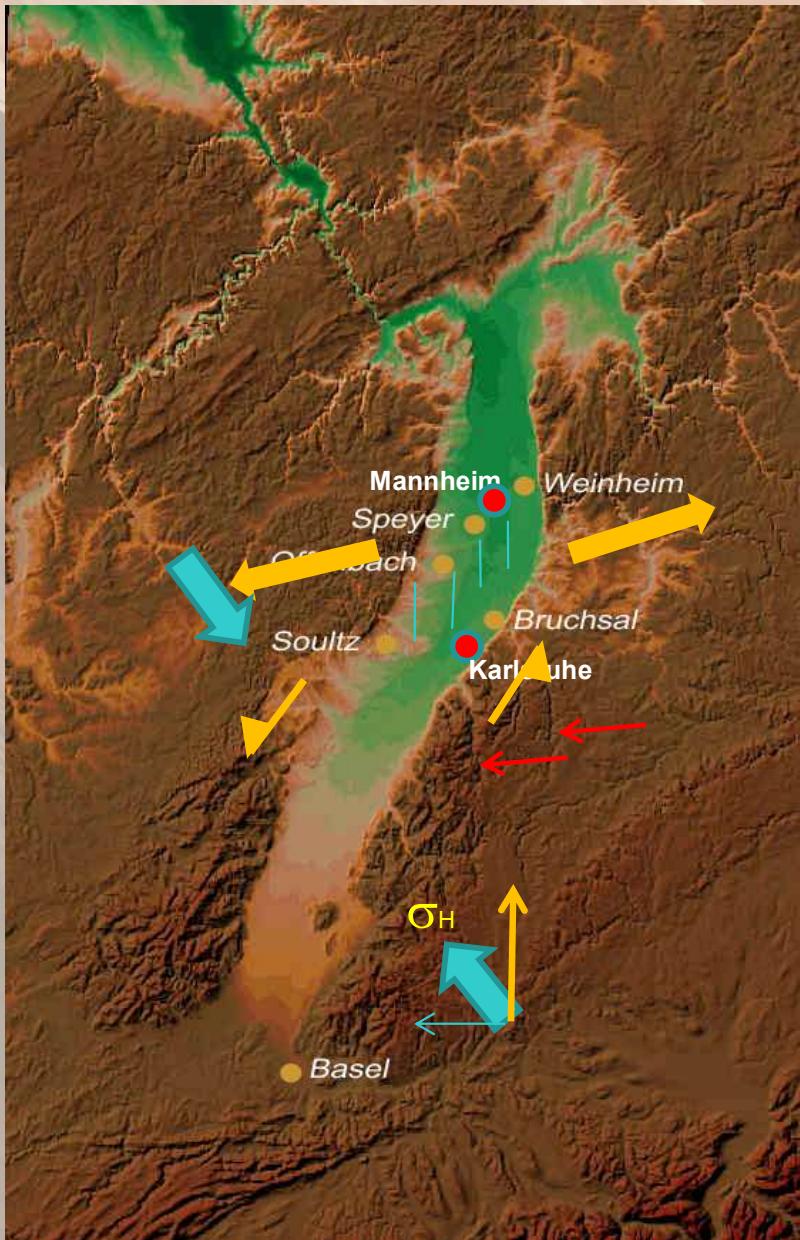
Geothermischer Gradient

Beispiele für die Temperaturzunahme mit der Tiefe (geothermischer Gradient) in unterschiedlichen Regionen Europas

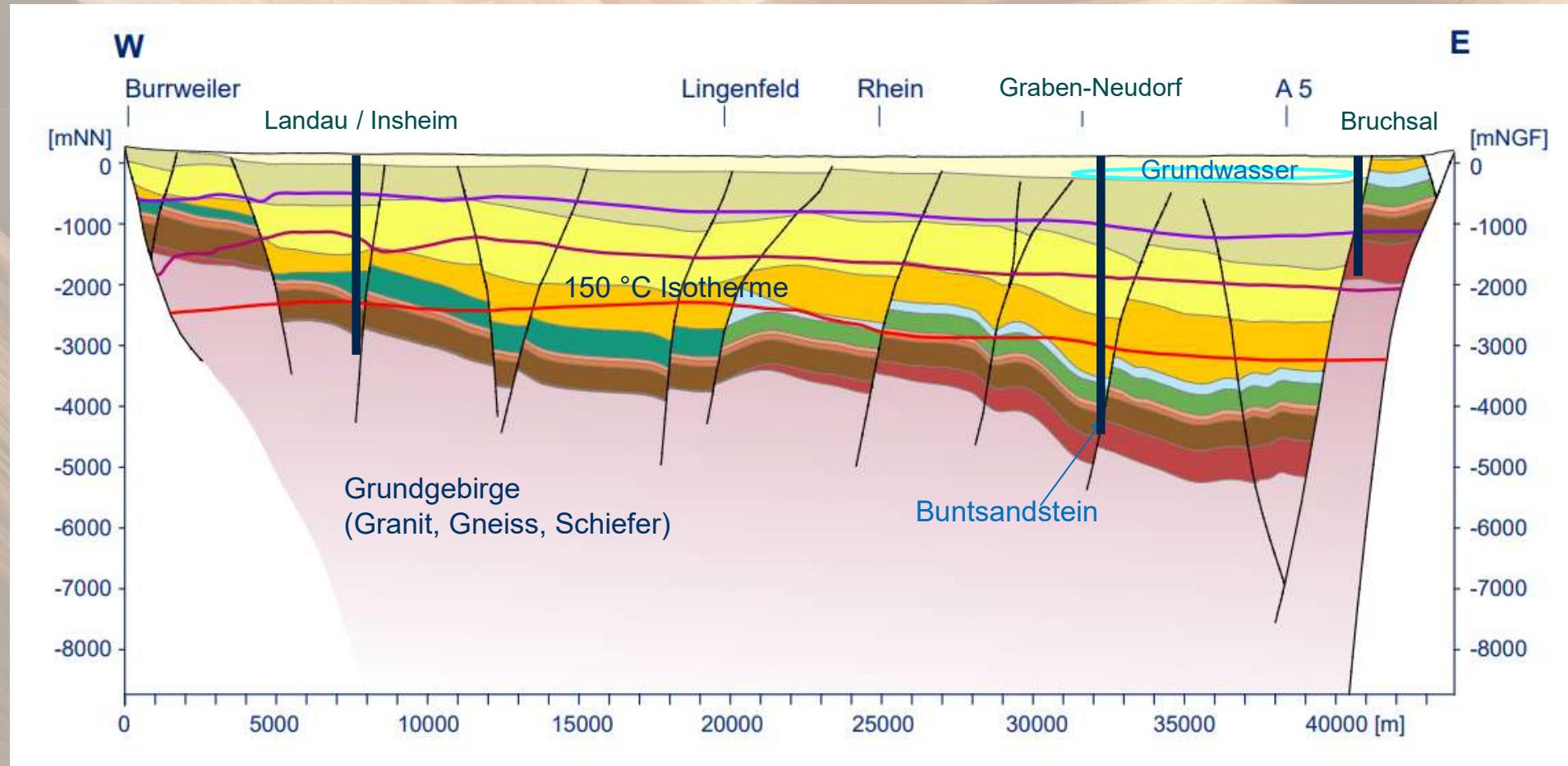
i.d.R. angegeben in K /100 m oder °C/ 100 m

Quelle: Bundesverband Geothermie

Geothermisches Potenzial Oberrheingraben

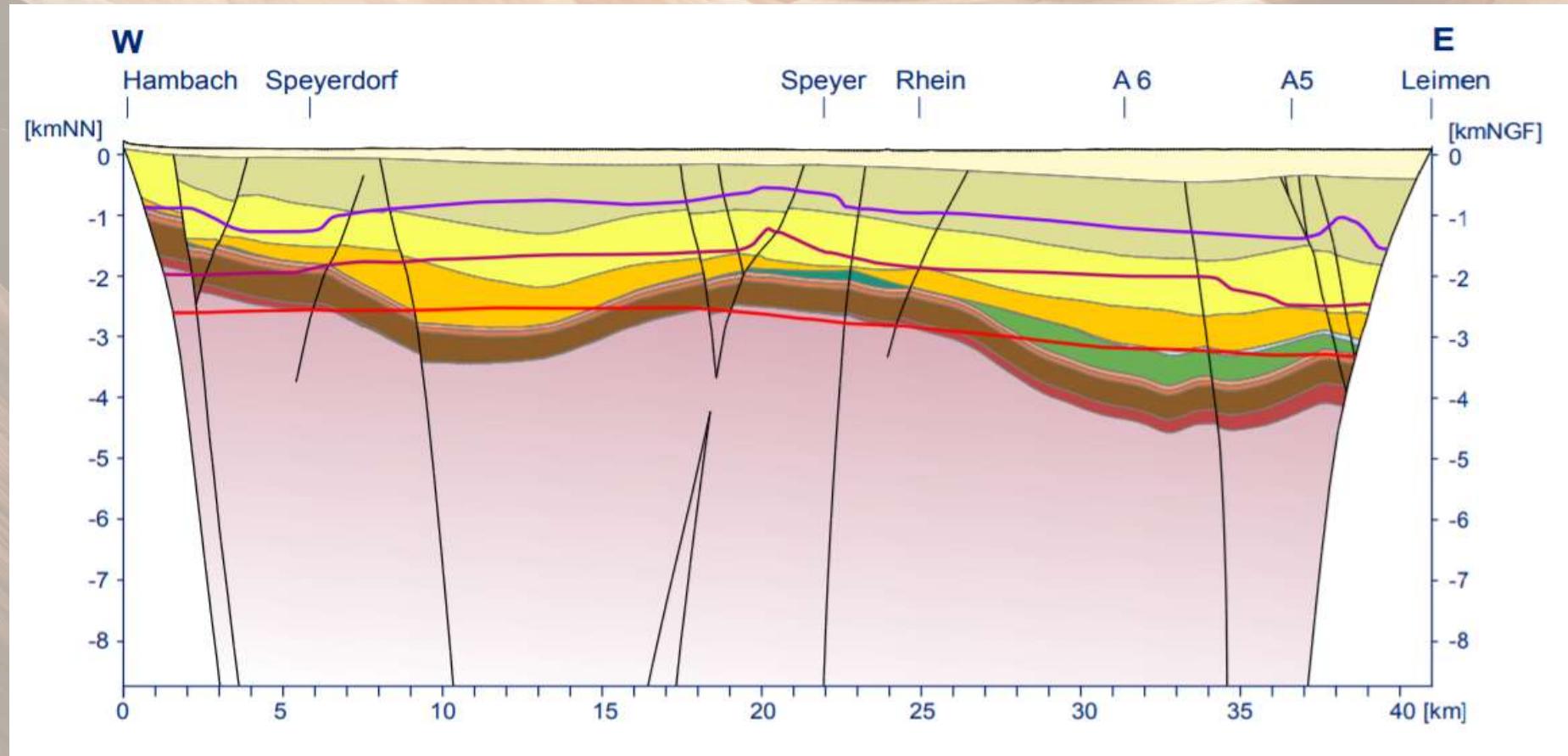


Geothermisches Potenzial Oberrheingraben



Quelle: GeORG – Geopotentiale des Oberrheingrabens, LGRB Baden-Württemberg

Geothermisches Potenzial Oberrheingraben



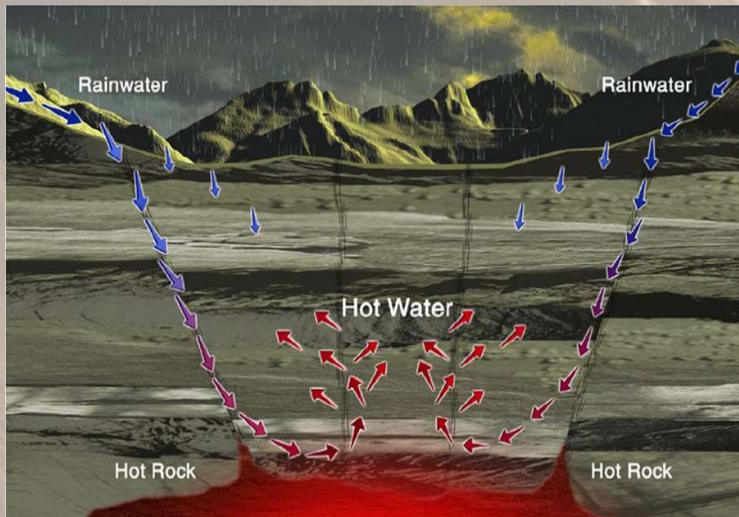
Quelle: GeORG – Geopotenziale des Oberrheingrabens, LGRB Baden-Württemberg

Geothermisches Potenzial Oberrheingraben

Konvektiver Wärmestrom (Wärmetransport durch Wasser – hydrothermal)

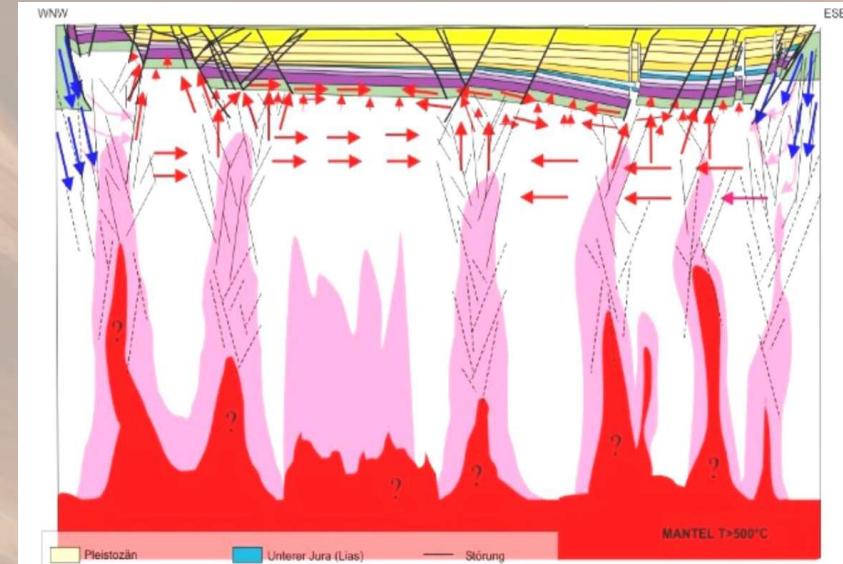
Wesentlicher Transportmechanismus im oberen Teil der Erdkruste

(Auch CO₂ als „Transporteur“ beteiligt – höhere Wärmekapazität als Wasser !)

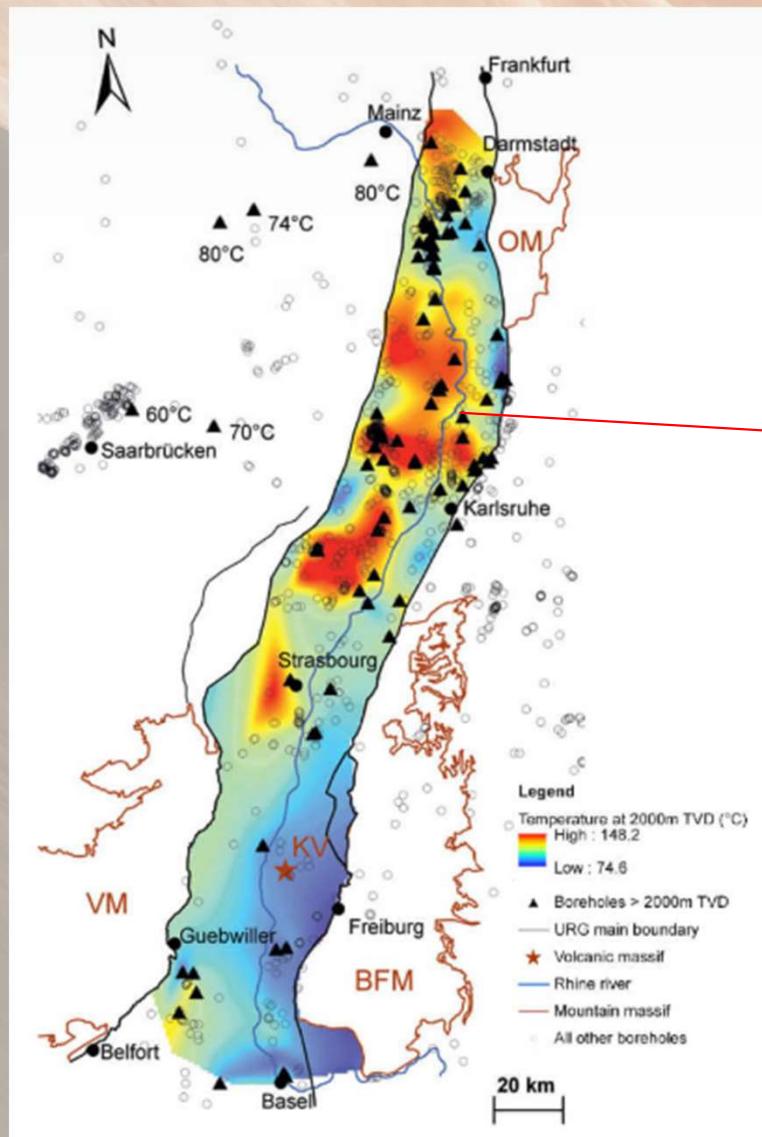


- Wärmetransport über Wasser (mit gelösten Gasen)
- Wasser hat eine große Wärmekapazität (kann viel Wärme speichern)

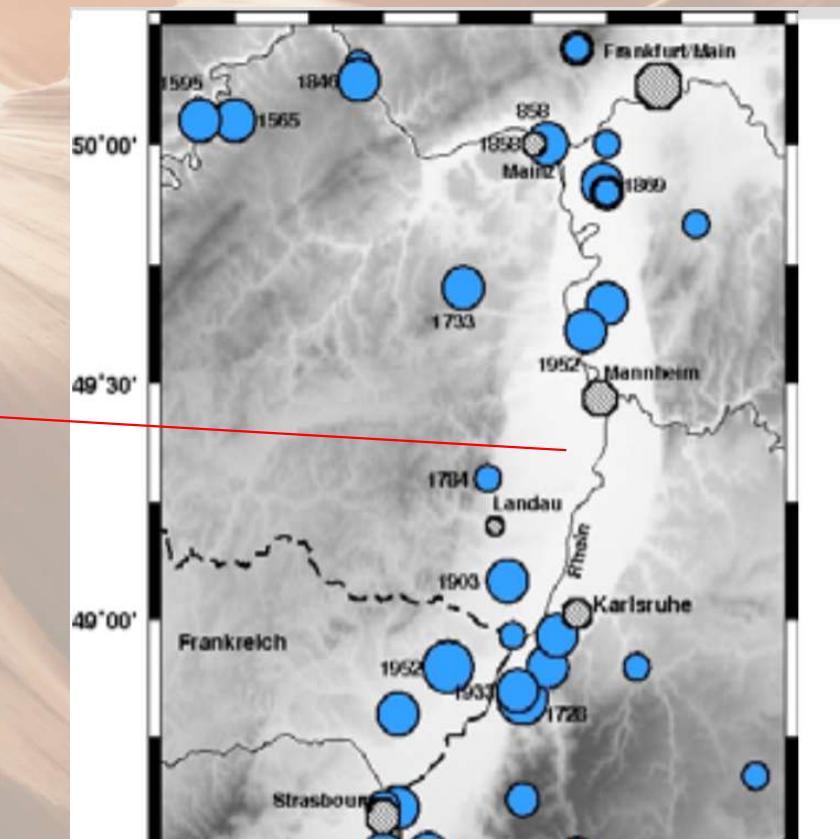
- Wasser ist – abhängig von Permeabilität – sehr mobil im Untergrund und kann Wärme über große Entfernungen transportieren
- Überkritisch Wasser (>500 °C) bewegt sich nahezu widerstandsfrei im Untergrund



Geothermisches Potenzial Oberrheingraben



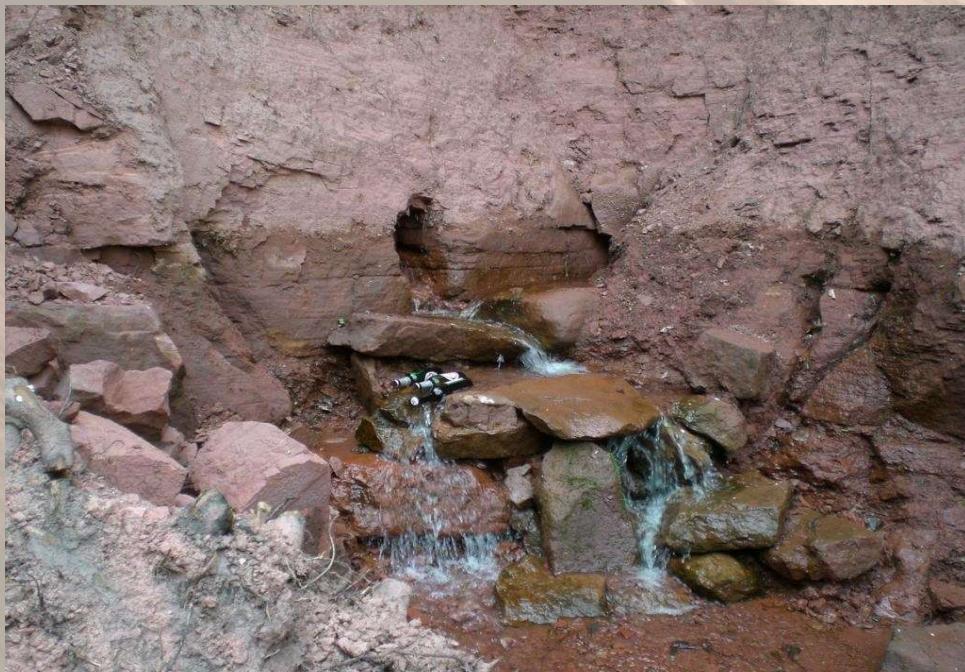
Wärmeverteilung im Oberrheingraben in einer Tiefe von zwei Kilometern nach Baillieux 2000 et al.



Erdbebenereignisse > Magnitude 4 in den vergangenen 800 Jahren

Hydrothermale Geothermie

Aufschließen von natürlich im Untergrund vorhandenen (heiß)thermalen Wässern (Thermalwasser, Thermalsole) in ausreichend permeablen Gesteinsformationen



Anforderungen:

- Gesteinsausbildung – ausreichend hohe (und auch nutzbare) Porosität und Permeabilität (in mDarcy)
- Ausreichend große räumliche Ausdehnung
- Möglichst große Mächtigkeit (nutzbare Reservormächtigkeit)
- Daher Haupt-Reservoir im Oberrheingraben Buntsandstein und Muschelkalk

Hydrothermale Geothermie

„Sonderform“ Störungs- und Bruchzonen

Im Umfeld von Störungs- und Bruchzonen ist durch tektonische Bruchbeanspruchung die Gebirgspermeabilität oftmals deutlich erhöht

- Harte bruchkompetente Gesteine („Reservoirgesteine“) – möglichst mit einer primären Porosität / Permeabilität
- Ausdehnung und „Qualität“ der Deformationszone ist abhängig
 - von der Art der Störung,
 - deren Orientierung zum Spannungsfeld im Untergrund,
 - der Festigkeit (Kompetenz) der Gesteine
 - und dem Versatzbetrag der Störung
- Idealerweise divergente, heute aktive Bruchzonen
(bei nicht aktiven Bruchzonen besteht die Gefahr, dass die Brüche über lange Zeiträume durch Mineralausfällungen verheilt sind).
- Im Oberrheingraben und in Bayern werden in erster Linie Reservoirs im Bereich von Störungszonen erschlossen.





Rolle der Behörden und Genehmigungsverfahren

Rechtliche Grundlagen - BBergG

Bundesberggesetz (BBergG)

<https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/BBergG.pdf>

§ 3 Bergfreie und grundeigene Bodenschätz

- Grundeigene Bodenschätz stehen im Eigentum des Grundeigentümers.
Auf bergfreie Bodenschätz erstreckt sich das Eigentum an einem Grundstück nicht.
- **Bergfreie Bodenschätz** sind, soweit sich aus aufrechterhaltenen alten Rechten (§§ 149 bis 159) oder aus Absatz 4 nichts anderes ergibt:
 - Alle Metalle – wie z.B. **Lithium**
 - Kohlenwasserstoffe nebst den bei ihrer Gewinnung anfallenden Gasen;
 - Stein- und Braunkohle nebst den im Zusammenhang mit ihrer Gewinnung auftretenden Gasen;.... **Sole**;

Als bergfreie Bodenschätz gelten:

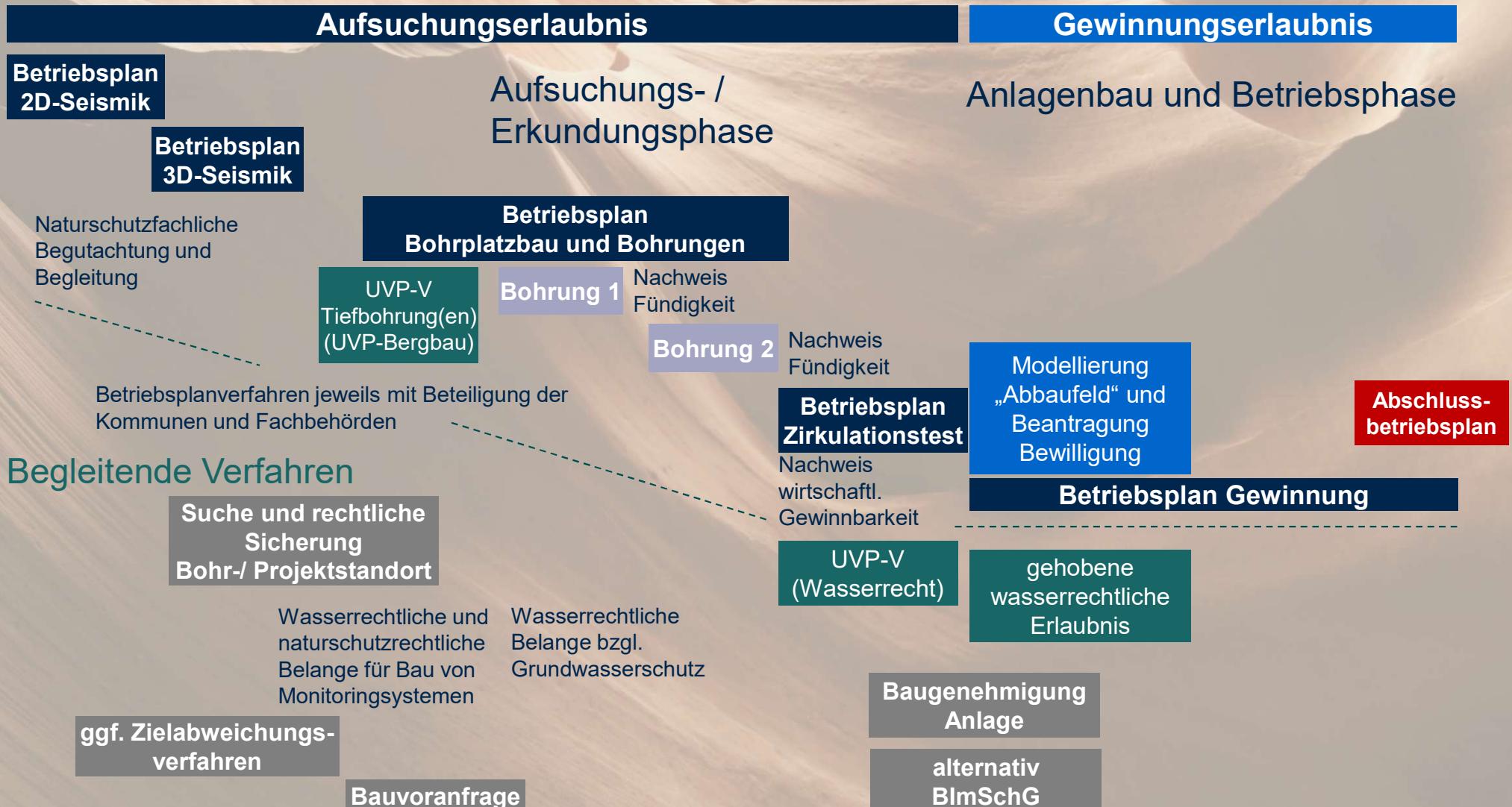
1. alle Bodenschätz im Bereich des Festlandsockels und,
2. soweit sich aus aufrechterhaltenen alten Rechten (§§ 149 bis 159) nichts anderes ergibt,
 - a) alle Bodenschätz im Bereich der Küstengewässer sowie
 - b) **Erdwärme aus Bohrungen ab einer Teufe von 400 Metern und die im Zusammenhang mit ihrer Gewinnung auftretenden anderen Energien.**

Rechtliche Grundlagen

..... **Geothermie / Erdwärme steht unter Bergrecht und daher laufen auch alle Genehmigungsverfahren unter Bergrecht ... ?**

- BundesBergGesetz (BBergG)
 - UVPG-Bergbau
 - Markscheider Bergverordnung (Marksch BergV)
 - Einwirkungs Bergverordnung (EinwirkungsBergV)
 - BVOT (Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untertagespeicher ...)
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG - Bund) und Wassergesetze (Länder)
- UVP-G (Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung)
- Raumordnungsgesetz (ROG), Raumordnungspläne
- Baugesetz, Landesbauordnung,
- BImSchG, Störfallverordnung – 12. BImSchV
- Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AWsV)
- Strahlenschutzverordnung
- Standortauswahlgesetz (Endlagersuche)

Genehmigungsverfahren - Überblick



Rechtliche Grundlagen - BBergG

Bergbehörde / Bergamt

- Verwaltet die unter Bergrecht fallenden Rohstoffe eines (Bundes)Landes und vergibt Rechte daran
 - in Phase der Aufsuchung / Erkundung eine Aufsuchungserlaubnis („Claim“)
.... nur das Recht aufzusuchen ...
 - später eine Bewilligung und Gewinnungserlaubnis
... das Recht/ Eigentum an dem gefundenen Rohstoff ...
- Zuständig für über- und untertägigen Bergbau, teilweise Transportleitungen (Pipelines in denen Rohstoffe transportiert werden) (**nicht Wärmetrassen !!!**)
- War früher eigenständige Behörde, ist aber seit ca. 30 Jahren bei den Regierungspräsidien / Bezirksregierungen angesiedelt.
- Untersteht meist den Wirtschaftsministerien – außer z.B. in Baden-Württemberg, wo es dem Umweltministerium untersteht.
- Führt die Verfahren für die Aufsuchungserlaubnisse und für die Betriebspläne durch mit Öffentlichkeitsbeteiligung und Einbeziehung anderer TÖB
- Regelt und überwacht die Bergbauaktivitäten – sorgt insbesondere für einen sicheren Bergbaubetrieb („Bergaufsicht“).
- Prüft, ob der Bergbauunternehmer / verantwortliche Person die erforderliche Qualifikation und finanzielle Leistungsfähigkeit hat.

Rechtliche Grundlagen - BBergG

Bergbehörde / Bergamt

- ... überwacht, dass Bergbaubetriebe die ihnen genehmigten Grenzen einhalten (Markscheider BergVO; Markscheidewesen, Risswerke)
- ... sorgt dafür, dass durch die Bergbauaktivitäten maximal kleine (hinzunehmende) Schäden am Eigentum Dritter oder an Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft) entstehen
Im Interesse der Rohstoffgewinnung dürfen kleinere Schäden theoretisch entstehen!
Ein sog. „Gemeinschaden“ muss aber ausgeschlossen sein.
- ... bewertet beim Eintreten von Umweltschäden – auch seismische Aktivitäten –, ob die Schäden im Einwirkungsbereich des Bergbauunternehmens liegen und wer Verursacher sein könnte (Einwirkungs BergVO).
- ... sorgt dafür, dass ein Bergbauunternehmen/er in ausreichenden Umfang versichert ist – oder Rücklagen hat – um Schäden zu kompensieren (entweder eigene Finanzmittel, Haftpflichtversicherung oder Bergschaden-Ausfallkasse)
- Schadenregulierung selbst obliegt aber nicht der Bergbehörde!
Muss zivilrechtlich zwischen Anspruchsteller/ Geschädigtem und Bergbauunternehmen geregelt werden !
- ... ist bei Unfällen die „Polizei“ innerhalb der Bergbaubetriebe.

Rechtliche Grundlagen - BBergG

§ 56 Form und Inhalt der Zulassung, Sicherheitsleistung

Haftung des Bergbauunternehmers

Bergbehörde verlangt die Stellung bzw. den Nachweis von finanziellen Sicherheitsleistungen ...

- zur Absicherung des Rückbaus aller zugelassenen Einrichtungen und Anlagen (Bohrplatz, Bohrungen etc.)
- zur Kompensation entstehender Umweltschäden
- zur Kompensation eventuell eintretender Schäden am Eigentum Dritter

Welche Möglichkeiten gibt es:

- Bankbürgschaften
- Umwelt-Haftpflichtversicherung
- Haftpflichtversicherung zur Absicherung von Eigentumsschäden (Bergschaden-Haftpflichtversicherung)
- Bergschaden-Ausfallkasse

Rechtliche Grundlagen - BBergG

Einwirkungsbereichs-Bergverordnung (EinwirkungBergV)

§ 3 Andere Art der Festlegung des Einwirkungsbereichs

- (4) Abweichend von § 2 und Absatz 1 ist die Grenze des Einwirkungsbereichs nach Auftritt einer Erschütterung von der zuständigen Behörde **auf Grund von Ergebnissen seismologischer Messungen und sonstiger Daten, der makroseismischen Intensität und festgestellten Bodenschwinggeschwindigkeit festzulegen**. Diese Festlegung kann unter Hinzuziehung der in ihrem Aufgabenbereich berührten Erdbebendienste erfolgen. Es ist dabei davon auszugehen, dass nur bei einer zumindest starken makroseismischen Intensität und entsprechenden Bodenschwinggeschwindigkeiten Einwirkungen vorliegen, nach denen die Grenze des Einwirkungsbereichs bestimmt wird. Es ist auch von der zuständigen Behörde festzustellen, welchem in § 1 genannten Betrieb oder welchen der in § 1 genannten Betriebe der Einwirkungsbereich zuzurechnen ist. Der Einwirkungsbereich ist dem Unternehmer und öffentlich bekanntzugeben.

I.d.R. wird der Einwirkungsbereich in Anlehnung an die DIN 4150 dahingehend definiert, dass er denjenigen Bereich umschließt, innerhalb dessen theoretisch Erschütterungen aus seismischen Ereignissen mit einer Bodenschwinggeschwindigkeit (PGV) von 5 mm/s erreicht werden könnten („Schadenschwelle“)

Innerhalb dieses Bereiches gilt die Beweislastumkehr - außerhalb nicht !



Potenzielle Risiken

induzierte Seismizität

Geothermie = Risikotechnologie?

Erdbeben in Rassel nehmen

HINTERGRUND



Geothermieanlage in Landau, Erdbebenschäden in Kalifornien*: Epizentrum ermittelt

Katastrophe" nannte. Zeitungen titelten: „Staufen versinkt.“

Dabei war es genau das Gegenteil,

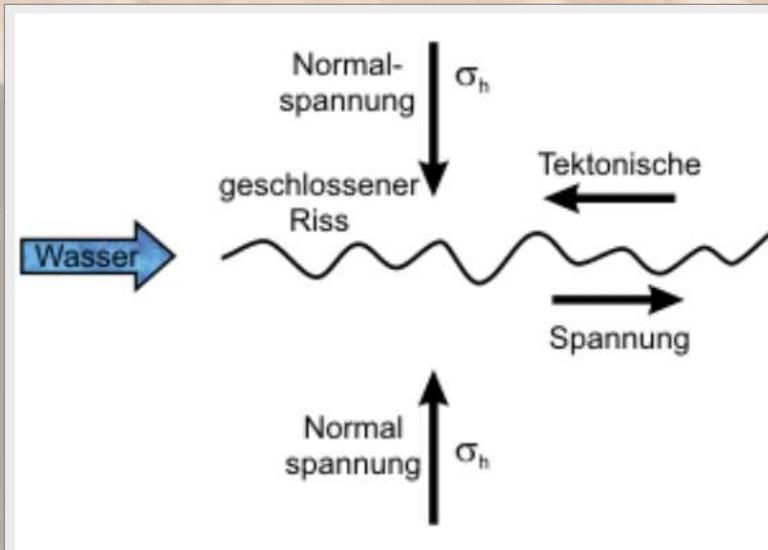
kurz nach der Erbauer hängen sich

Griner sponnen sich

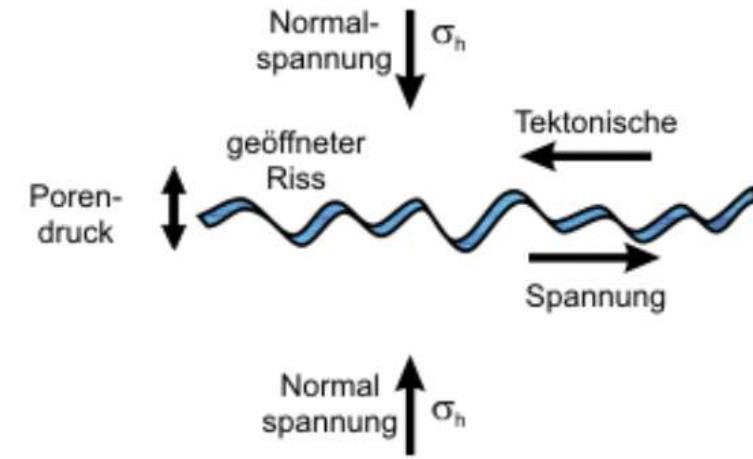
Slowakei nimmt

alles

Entstehung induzierter Seismizität



Schematische Darstellung der Öffnung eines präexistenten Risses durch herabsetzen der Scherspannung bei Fluidinjektion - 1
Quelle: BGR



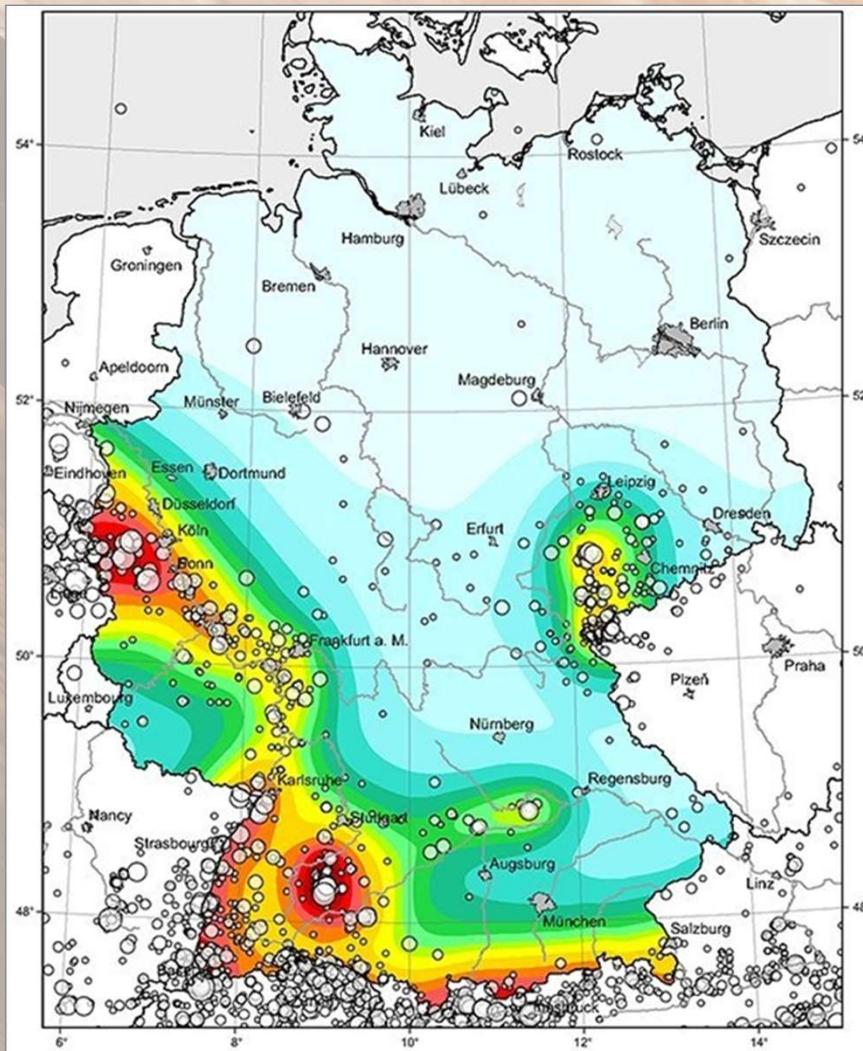
Schematische Darstellung der Öffnung eines präexistenten Risses durch herabsetzen der Scherspannung bei Fluidinjektion - 2
Quelle: BGR

- Förderung (Druckabsenkung) erhöht die Stabilität in einer Bruch-/ Störungszone
- Injektion (Druckerhöhung) und Abkühlung (Kontraktion des Gesteins) führen zu Minderung der Normalspannung und somit potenziell zu **Scherbewegungen (Rutschung entlang der Fläche)**
- Abkühlung auf der Injektionsseite für zu Volumenabnahme des Gesteins und damit zu Zugkräften bzw. Abnahme von Auflast auf Störungszonen. (auch dauerhafte Volumenentnahme ohne Ausgleich!)
-> **Vertikalbewegungen** entlang von Auf- oder Abschiebungszonen

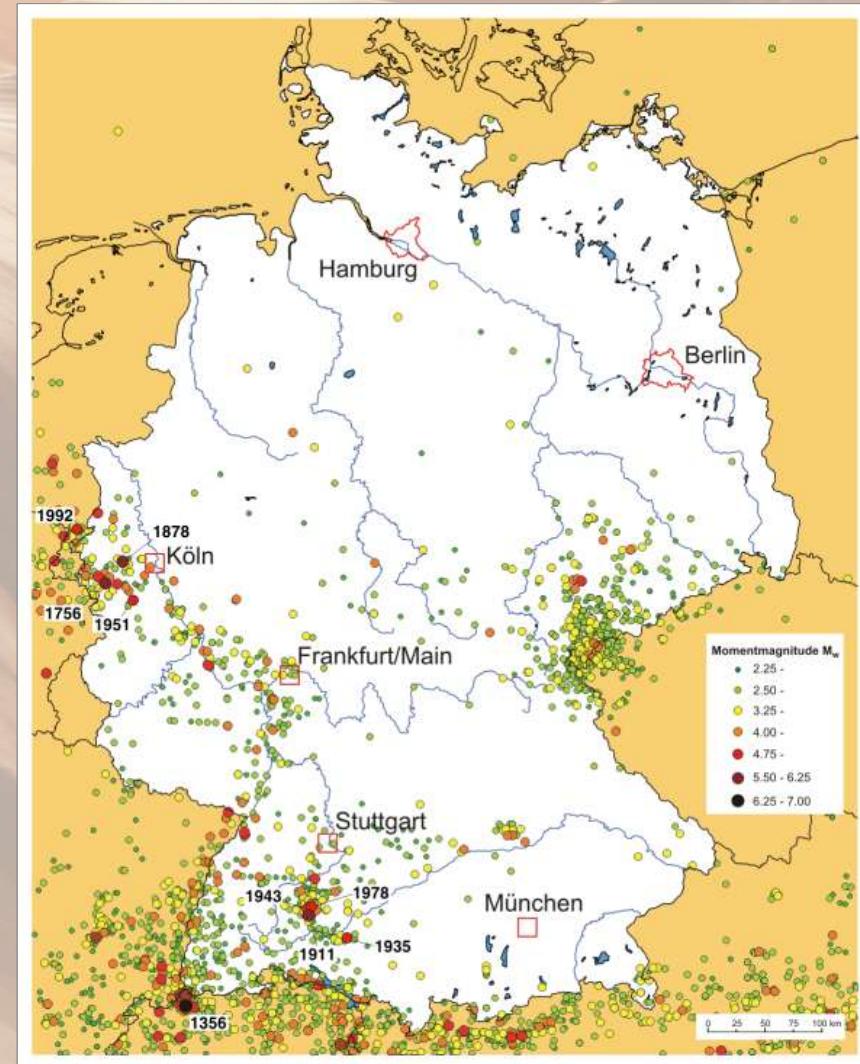
Menschengemachte (induzierte) Seismizität



Natürliche Seismizität in Deutschland

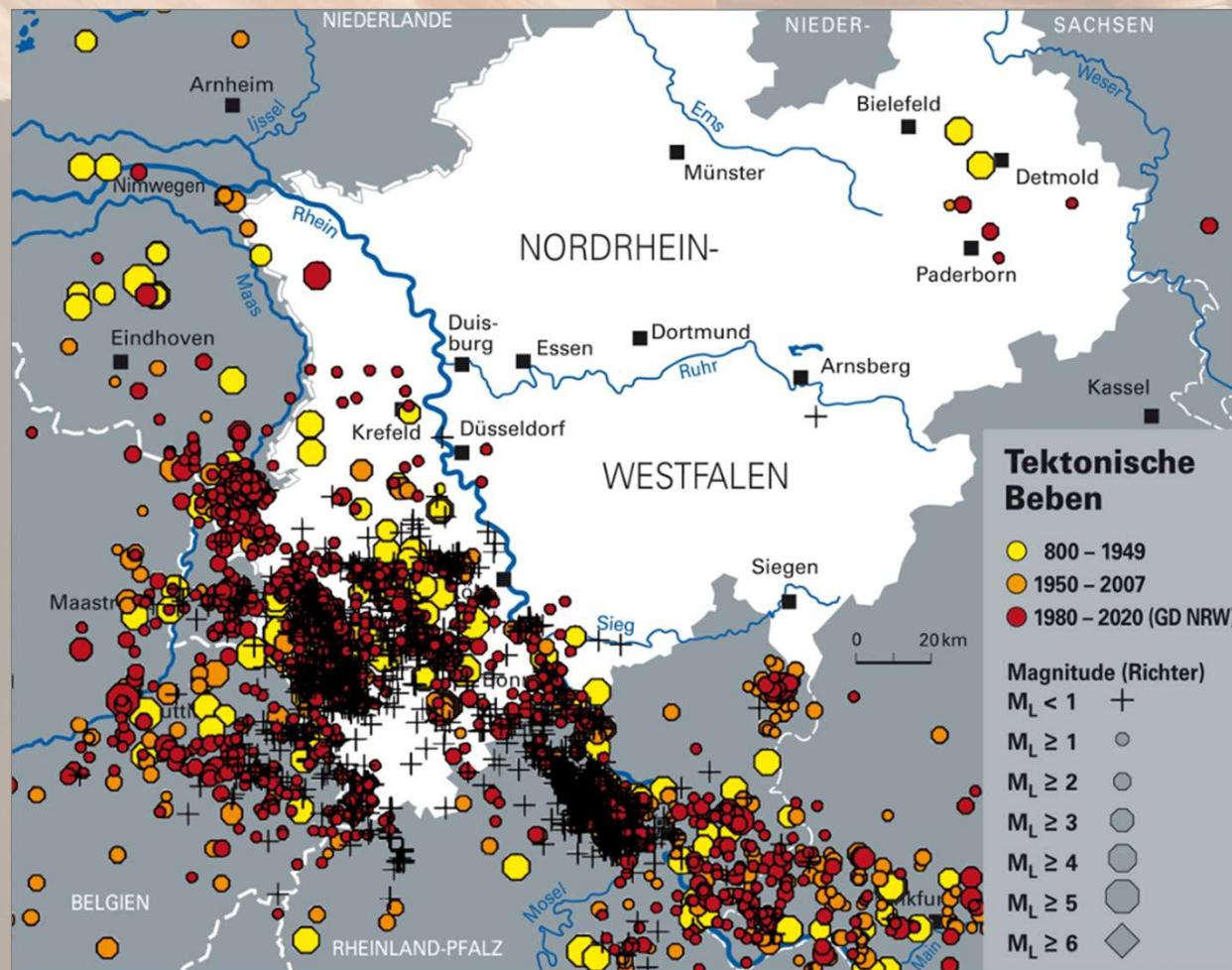


Quelle: GRÜNTHAL / BGR, Hannover

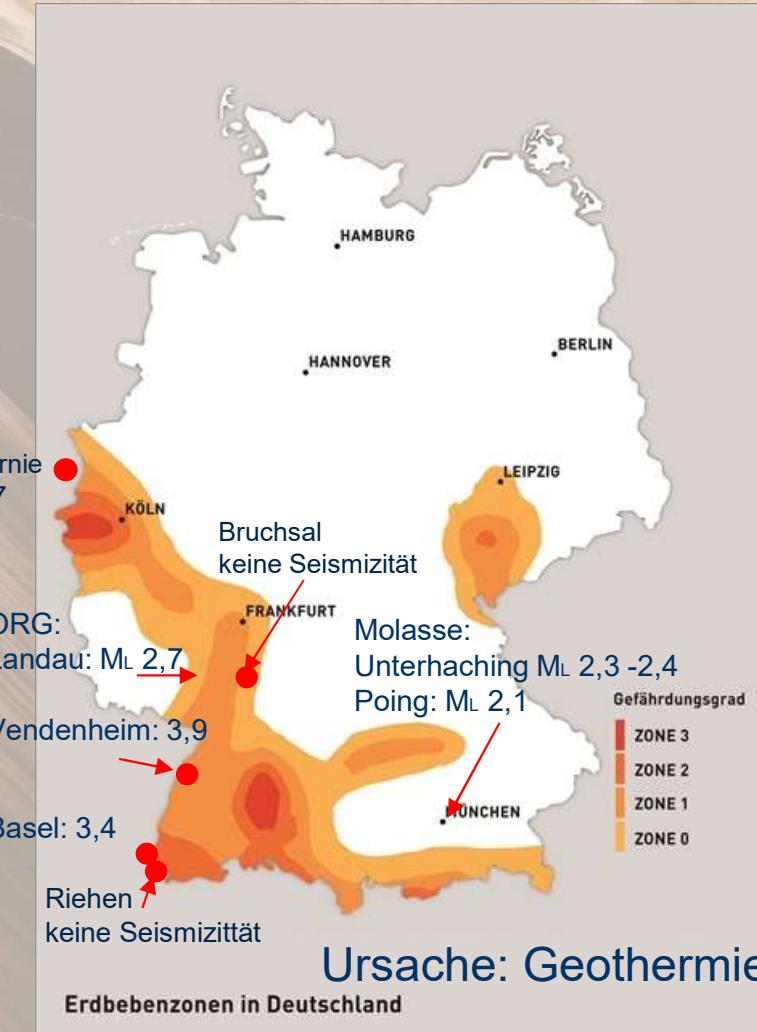


Quelle: GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung

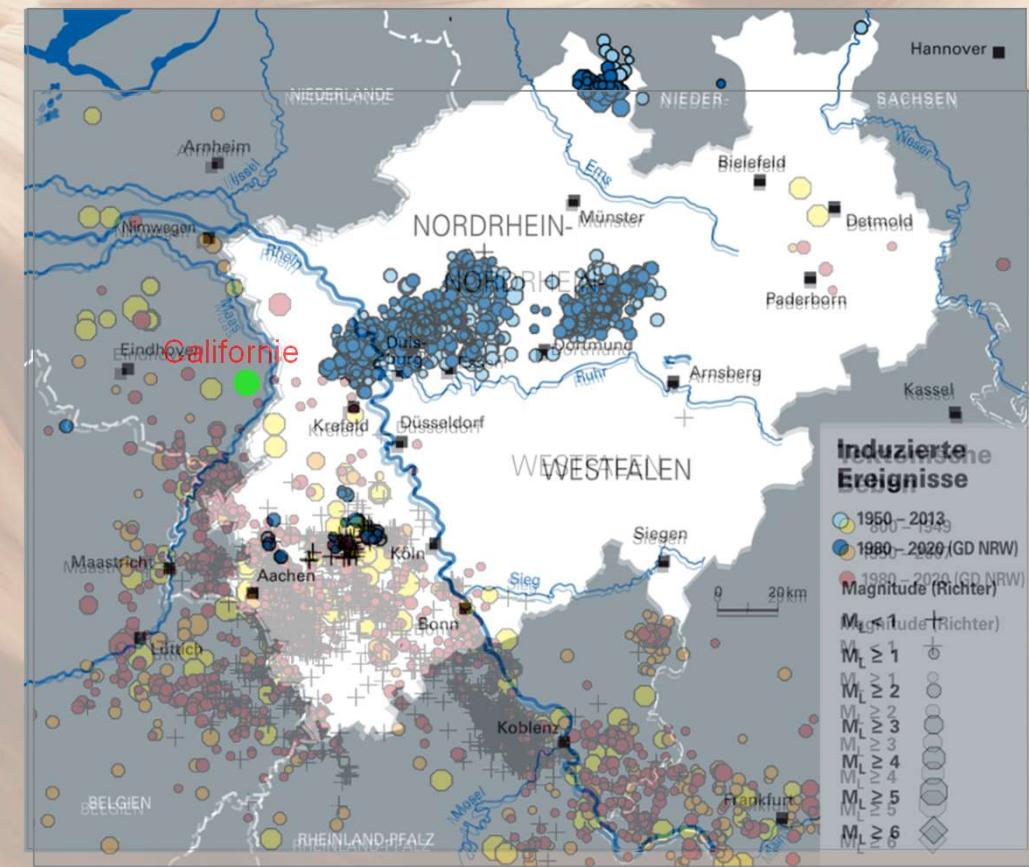
Natürliche Seismizität in Deutschland



Induzierte Seismizität in Deutschland



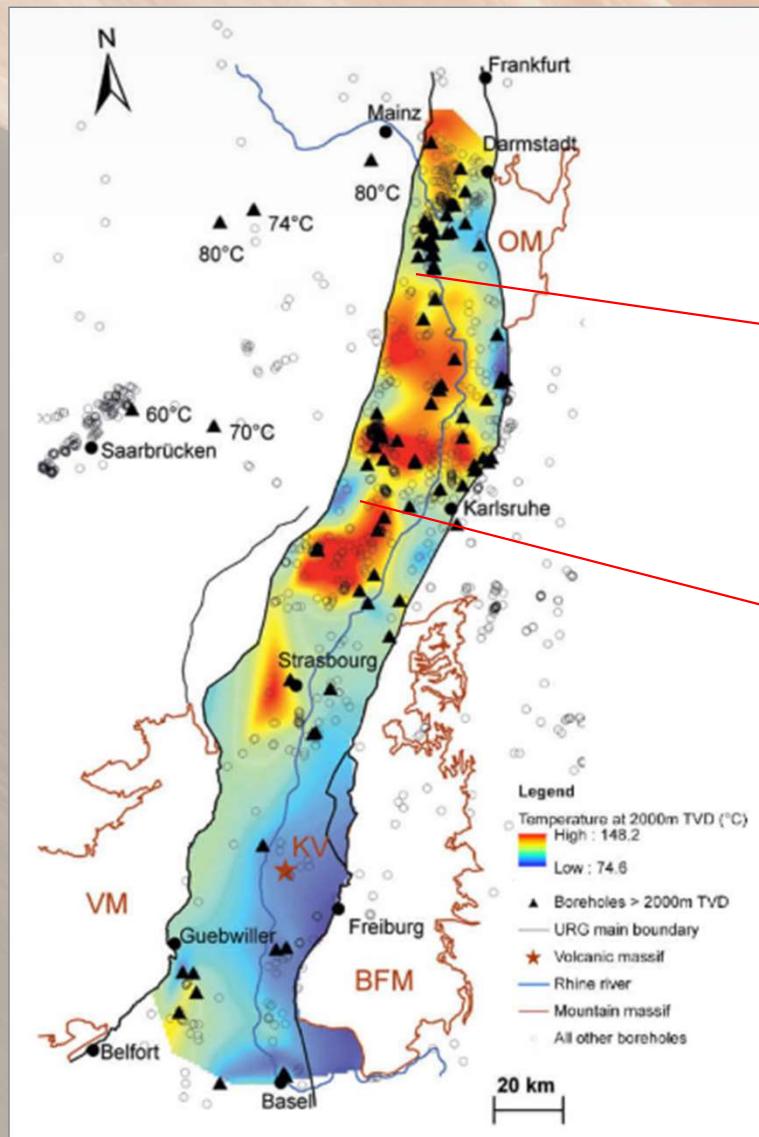
Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften



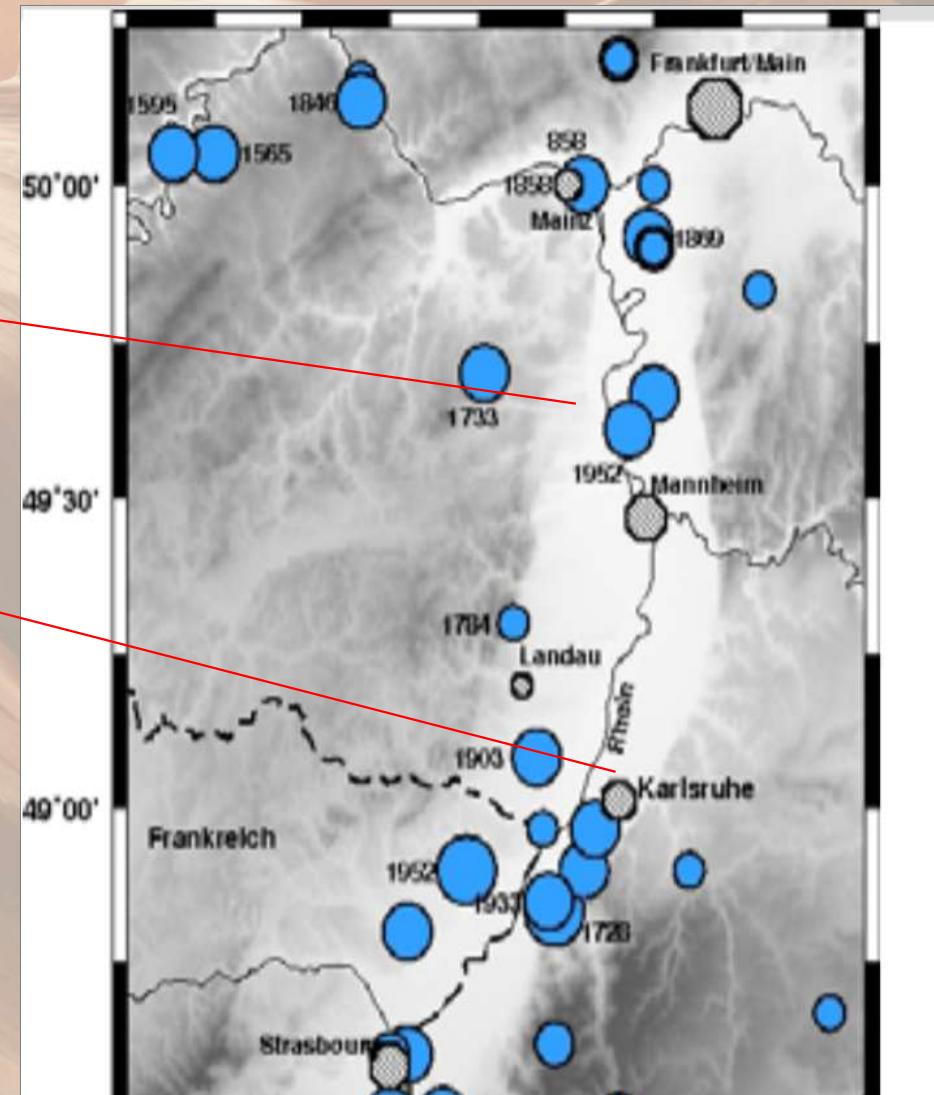
Quelle: Geologischer Dienst NRW

Korreliert nicht (immer) mit der Position natürlicher regionaler Seismizität !

Natürliche Seismizität in Deutschland

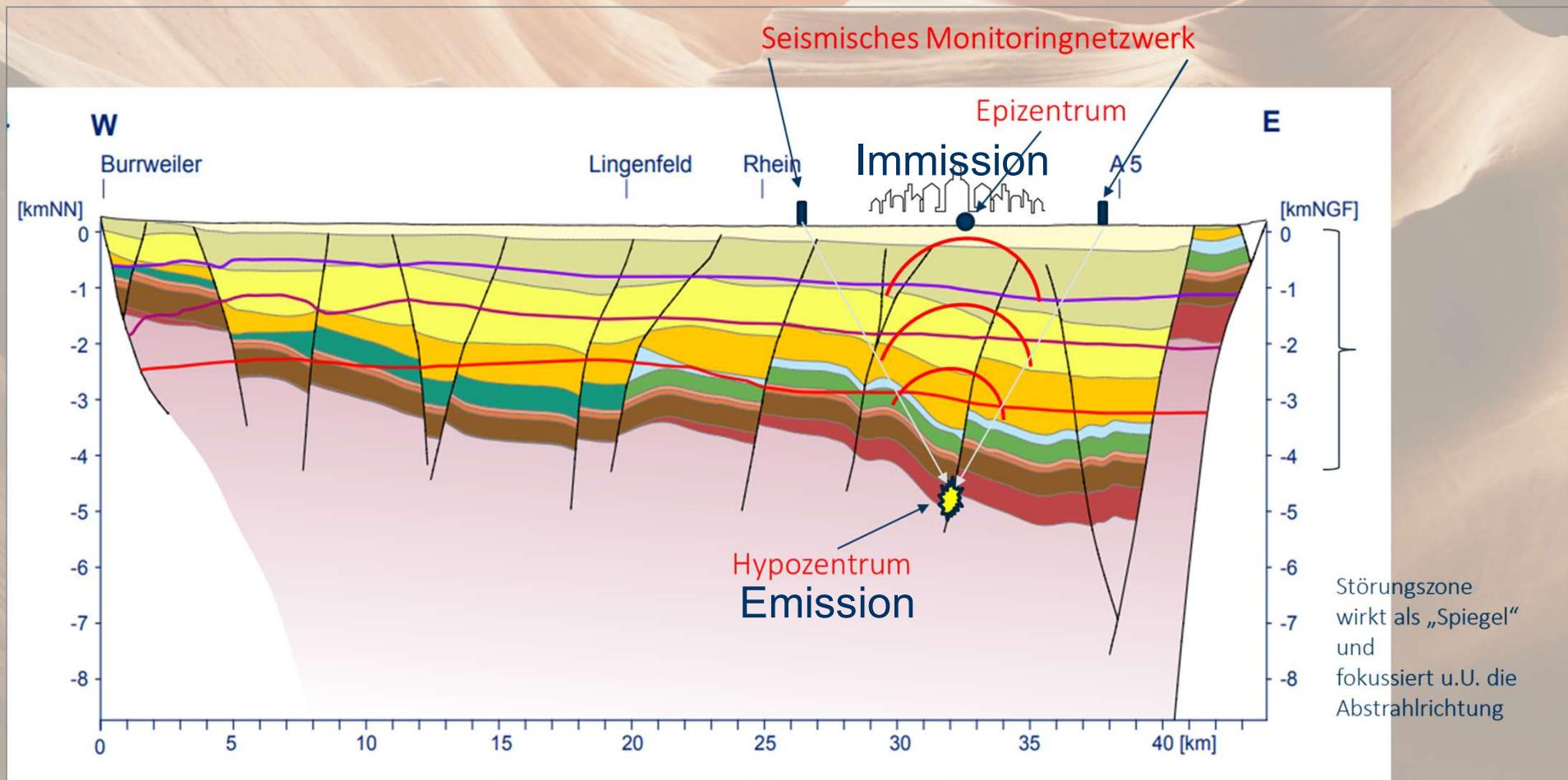


Wärmeverteilung im Oberrheingraben in einer Tiefe von zwei Kilometern nach Baillieux 2000 et al.



Erdbebenereignisse > Magnitude 4 in den vergangenen 800 Jahren

Betriebsrisiko (induzierte) Seismizität

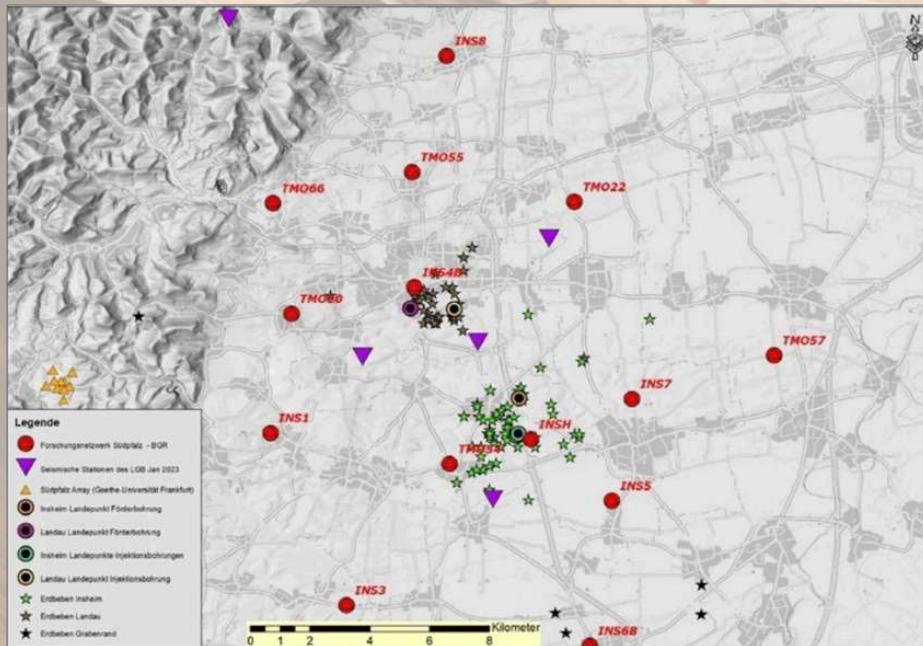


Entscheidend ist die Menge an Energie (Immission, Intensität), die an der Oberfläche auf Bauwerke und Infrastruktur einwirkt

-> erhebliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Tiefe, in der die Seismizität auftritt und wie der Untergrund am Emissionsort beschaffen ist (Mikrozonierung) !

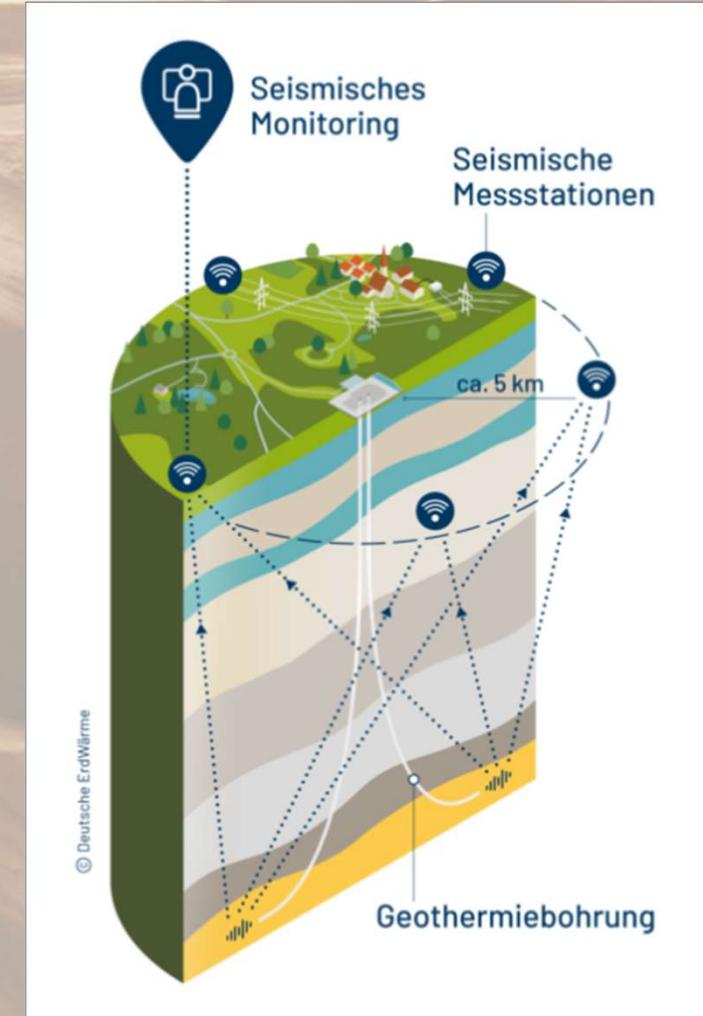
Monitoring Seismizität

Seismisches Monitoring



Monitoringnetzwerk Landau – Insheim, Quelle BGR/ Hannover

Benachbarte Projekte können gemeinsames Monitoringnetzwerk aufbauen
-> Haftungsabgrenzung bei Schäden !!!



Quelle: Deutsche Erdwärme GmbH

Monitoring Seismizität



Immissionsmessstelle an einem
Gebäudefundament, Überwachung Grenzwerte
der DIN 4150

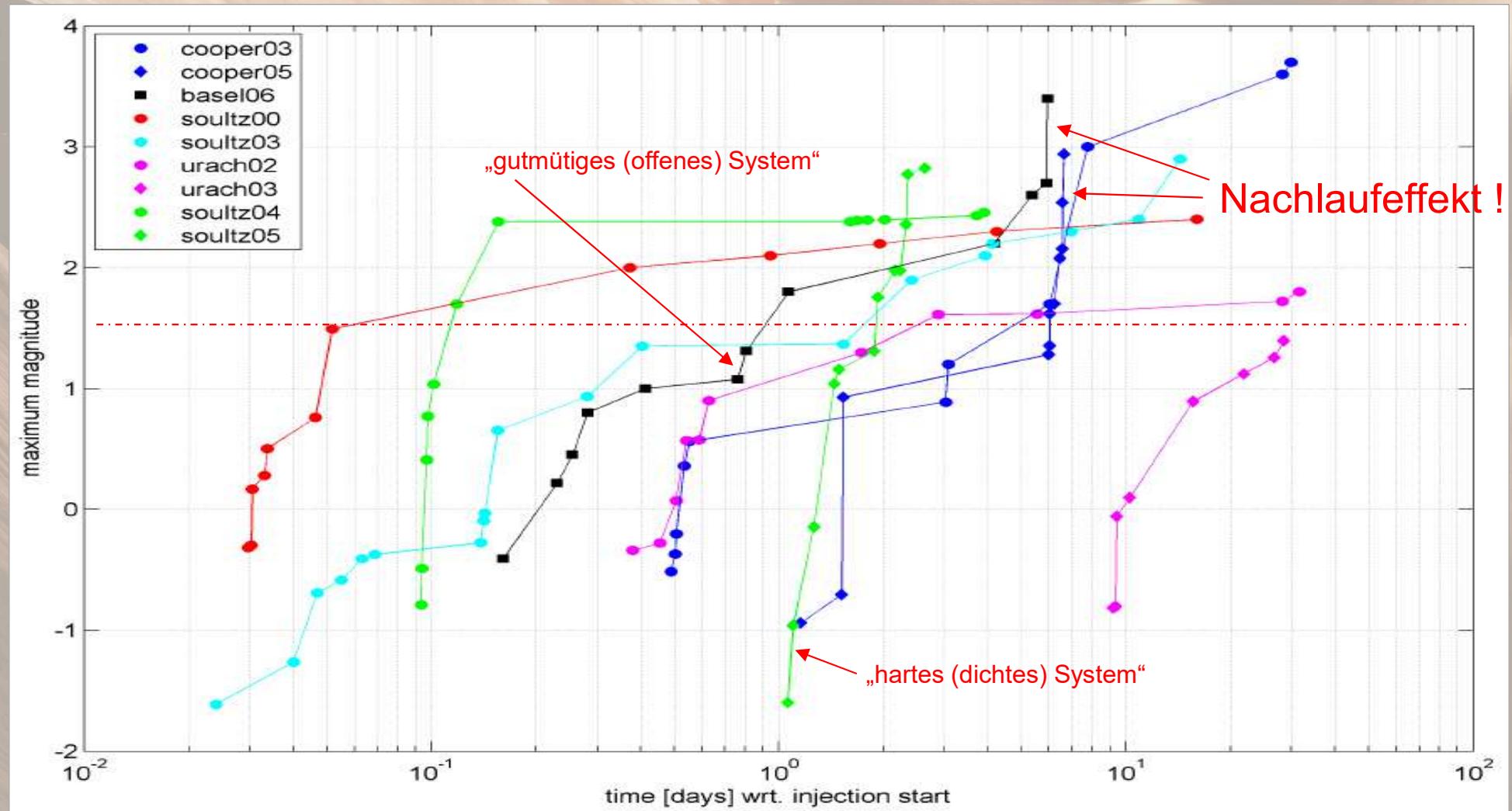


Emissionsmessstelle im „ruhigen“ Gelände



Monitoring Seismizität

Entwicklung induzierter Seismizität

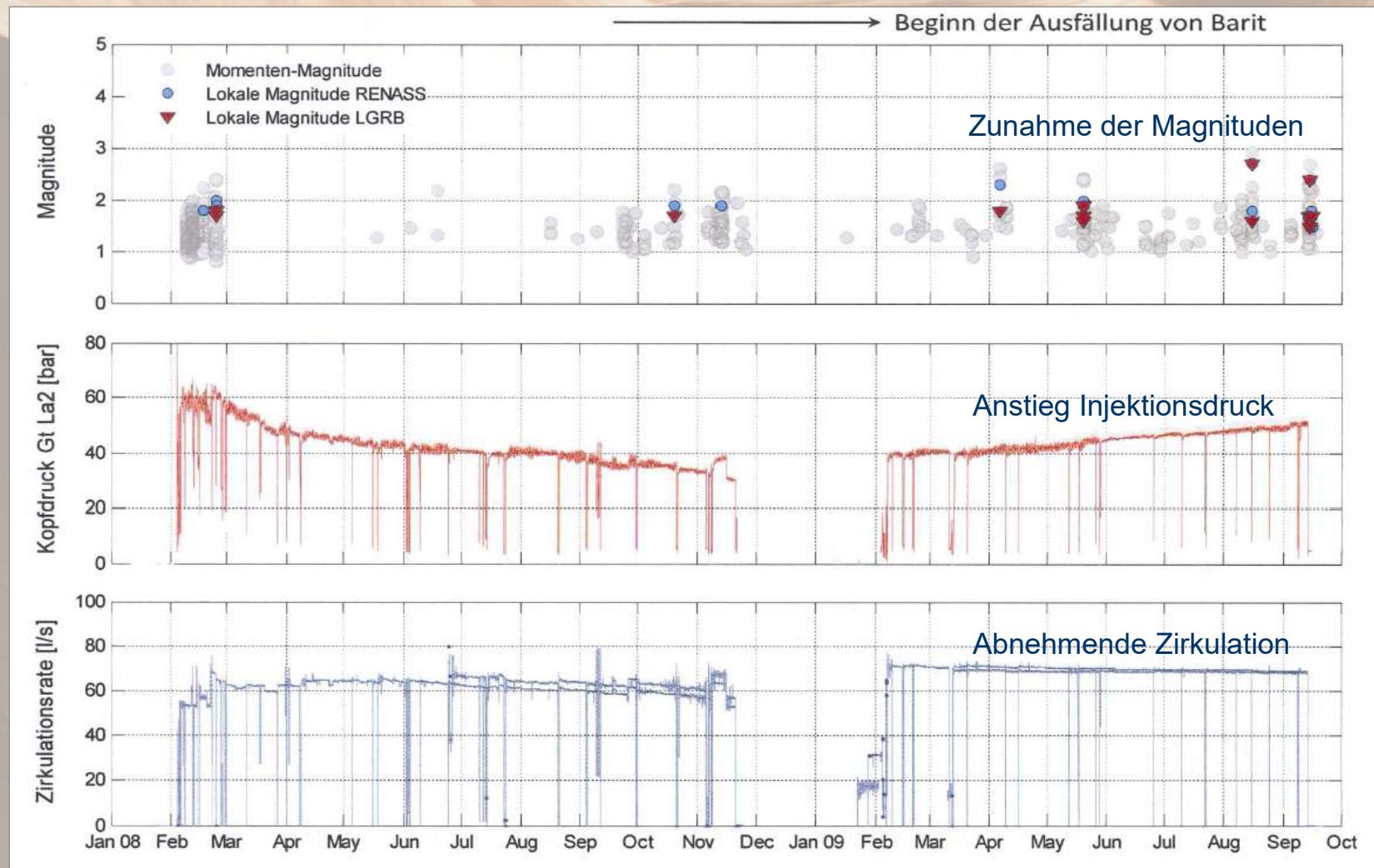


Quelle: Q-Con GmbH, seismisches Risikogutachten

Fluid Injektion in Gesteine = Stimulationsmaßnahmen

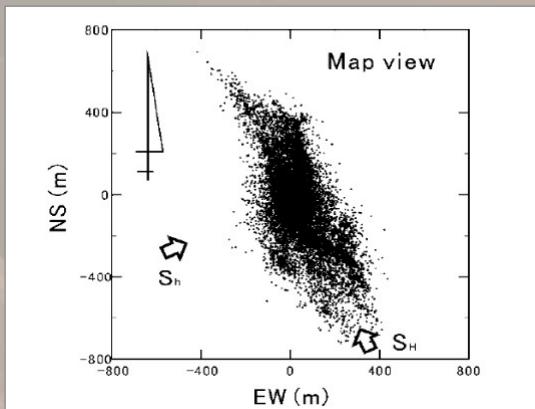
Monitoring Seismizität

Entwicklung Seismizität im Geothermieprojekt Landau - Anlaufphase



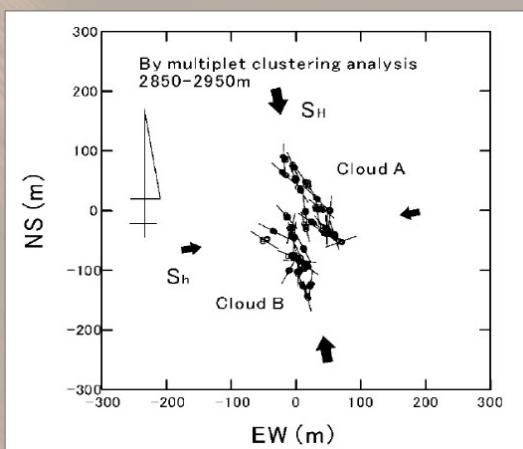
Monitoring Seismizität

Abbildung der Reservoirzonen

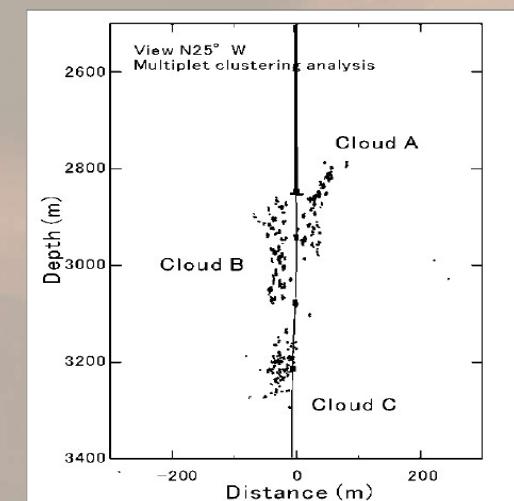
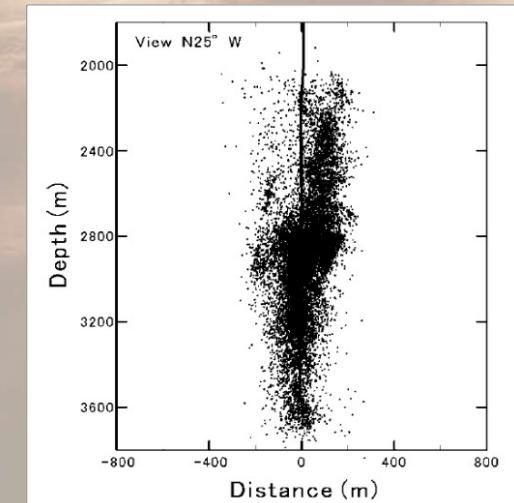


Soultz-sous-Forêts

Multiple Cluster-Analyse der Seismischen „Wolke“; Moriy et. al. (2008)

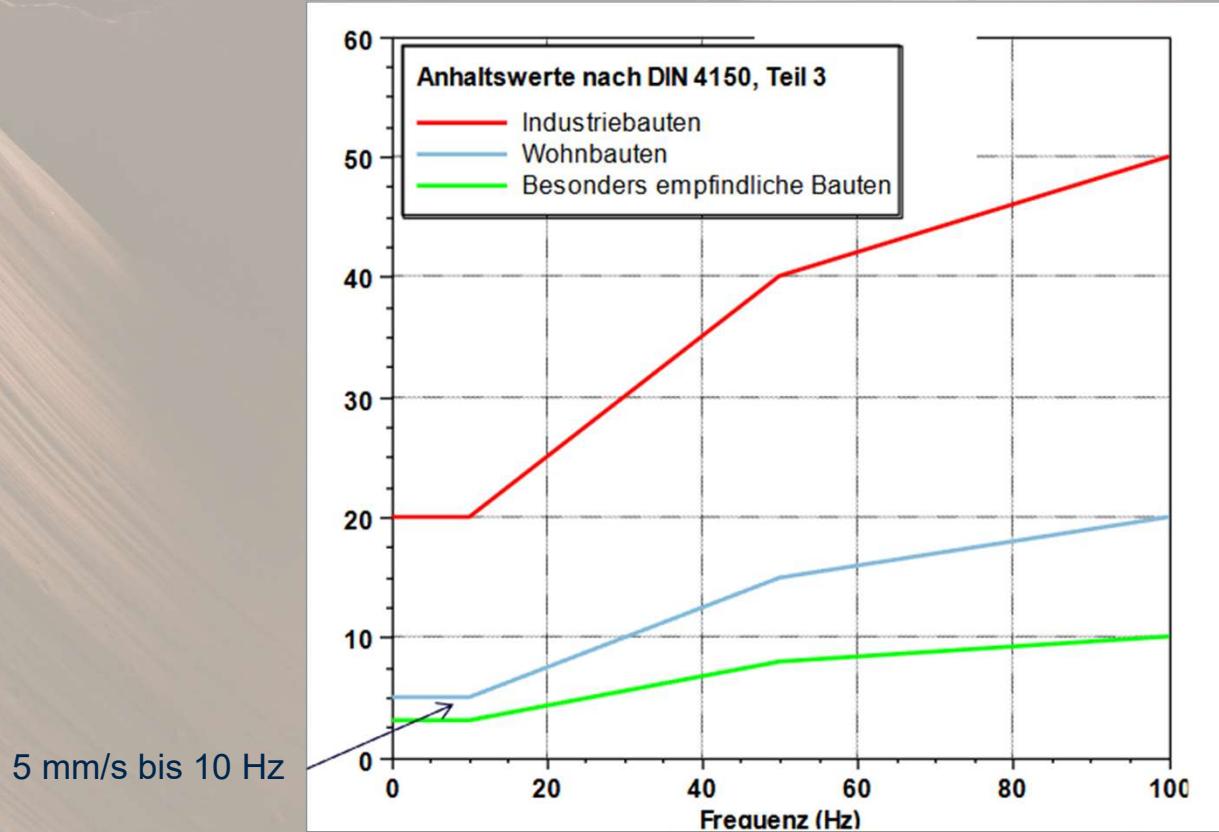


Induzierte Seismizität setzt in der Regel in der Nähe der Injektionsbohrungen und mit geringer Stärke ein.
Im Laufe der Zeit wächst der druckbeeinflusste Bereich an ...



Beurteilung von Erschütterungen

DIN 4150 – Grenzwerte / Anhaltswerte für Gebäude



Nicht Magnitude ist (schaden)relevant, sondern die Schwinggeschwindigkeit direkt an den Gebäuden = PGV

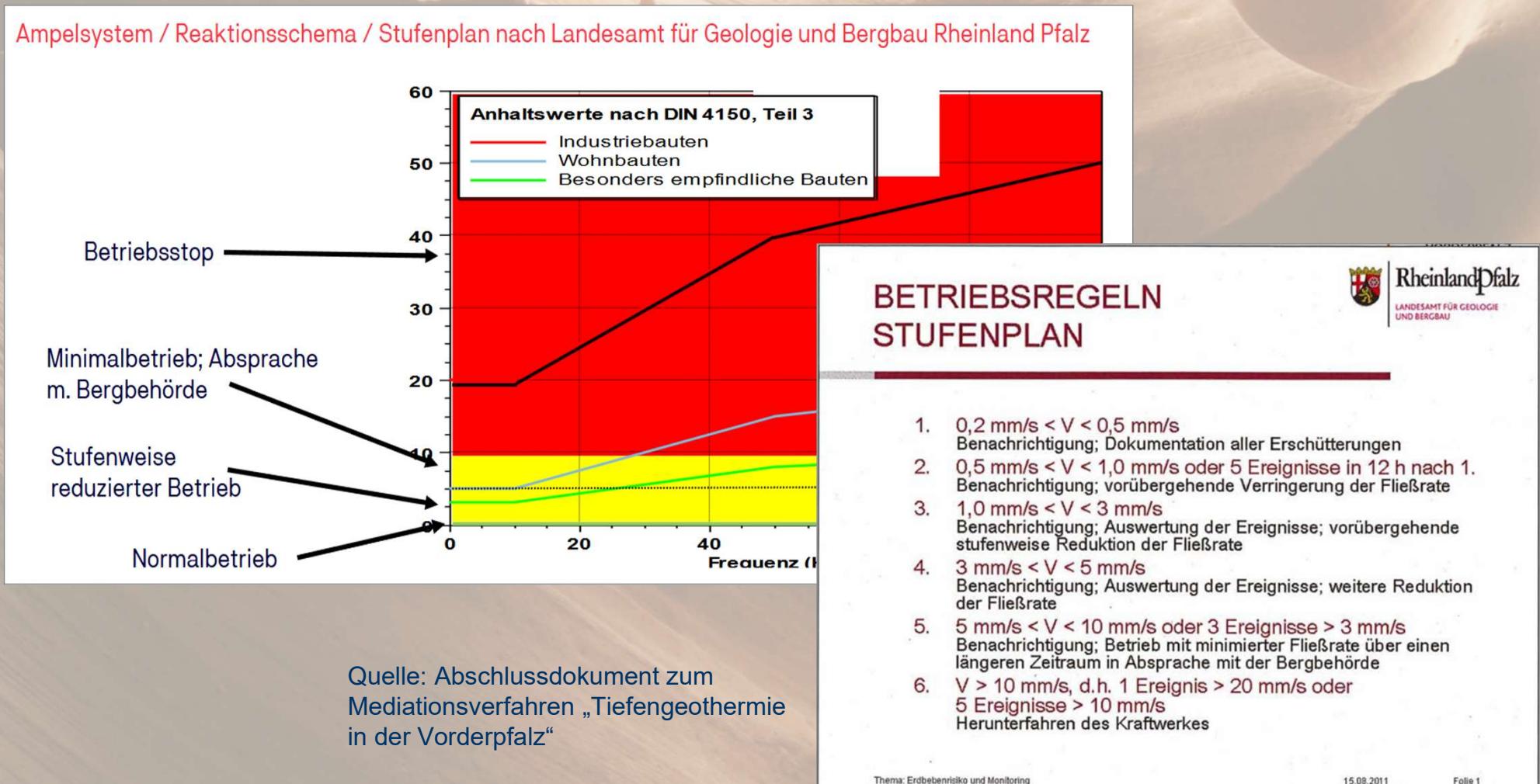
Die „schädigende“ PGV variiert mit der Frequenz

- Unter 3 mm/s Schäden auch an empfindlichen Gebäuden nicht zu erwarten
- Unter 5 mm/s Schäden an „normalen“ Gebäuden nicht zu erwarten

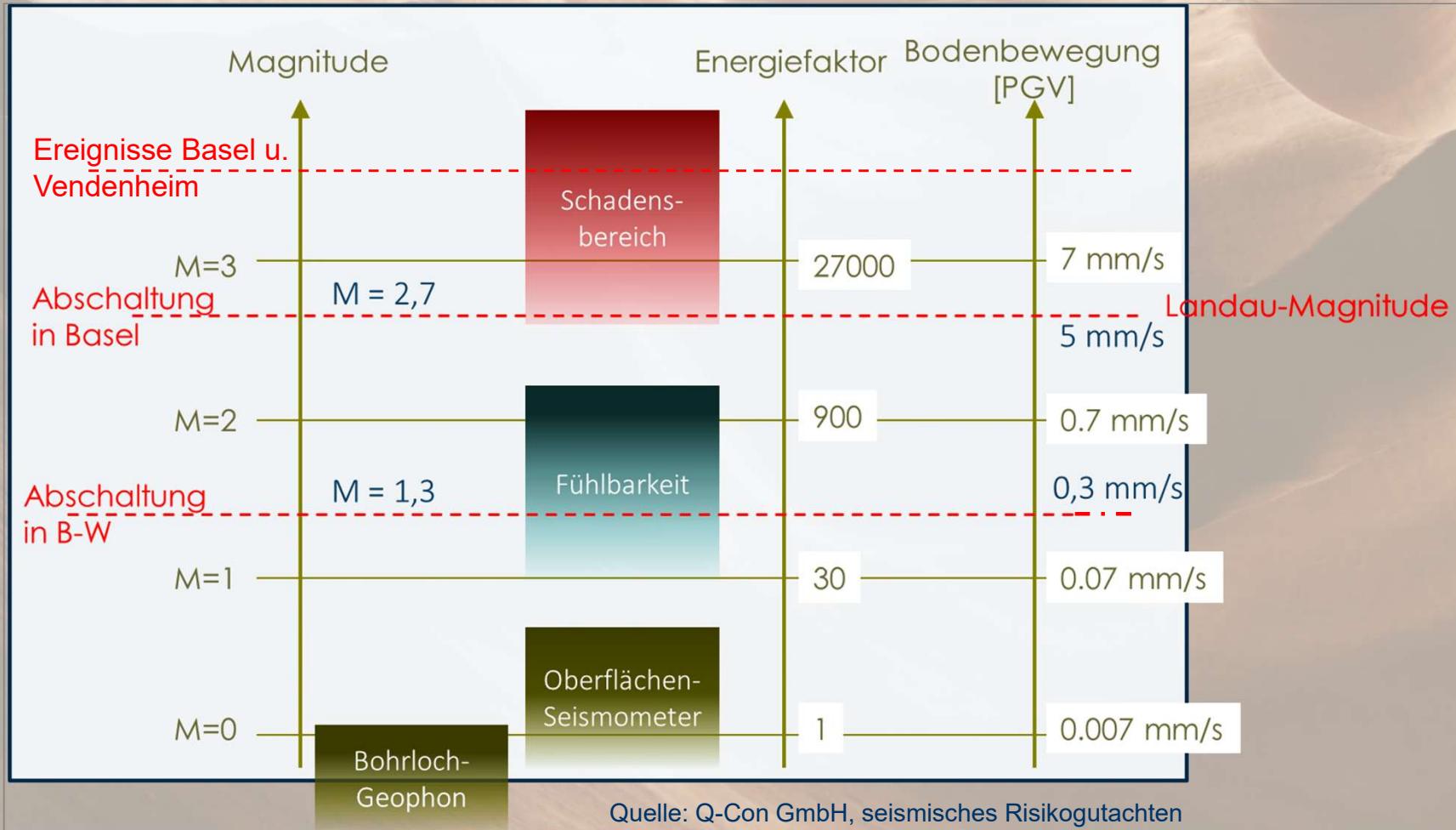
Monitoring Seismizität – „Ampel“

Ampelsystem für Rheinland-Pfalz

Ampelsystem / Reaktionsschema / Stufenplan nach Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland Pfalz



Monitoring Seismizität – „Ampel“



Minimierung des seismischen Risikos

- Möglichst gut bis sehr gut permeable Zonen erschließen (poröse Sandstein, „offene“ (unter Dilation stehende) Bruch- und Störungszonen)
- Vorauslaufend seismische Risikobeurteilung durch Fachgutachter (einschl. thermo-hydraulische Modellierung in Finite-Elemente-Modell – basierend auf geologischem 3D-Modell) und Layout eines Monitoringsystems
-> i.d.R. schon als Bestandteil eines Hauptbetriebsplans einzureichen !
- Permanentes seismisches Monitoring und Beachtung der Ampel
-> „Ampel“ kann/ muss angepasst werden, wenn die Beobachtungen zeigen, dass die in der Risikobeurteilung getroffenen Annahmen nicht zutreffen.
- Auskühlung im Umfeld der Injektionsbohrung minimieren
- Bei Bedarf Zirkulationsmenge oder Injektionsdruck mindern
-> wirtschaftliches Betriebsrisiko !!!

Vorteil von Geothermieprojekten gegenüber anderen menschlichen Eingriffen in den Untergrund

→ die zirkulierte Wassermenge, Drücke etc. und damit die Stärke der Seismizität sind jederzeit steuer- und kontrollierbar !



**Wenn es einen Weg gibt, etwas besser zu machen:
Finde ihn!**

Thomas Alva Edison

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !