



Erschließung von Schiefergas mit Frack-Maßnahmen

- Risiko Abschätzung für Oberflächen- und Grundwasser -

Martin Sauter, Rainer Helmig, Michael Heitfeld, Johannes Klünker, Torsten Lange, Karolin Brosig, Alexander Kissinger

Georg-August-Universität Göttingen, Universität Stuttgart, IHS Aachen

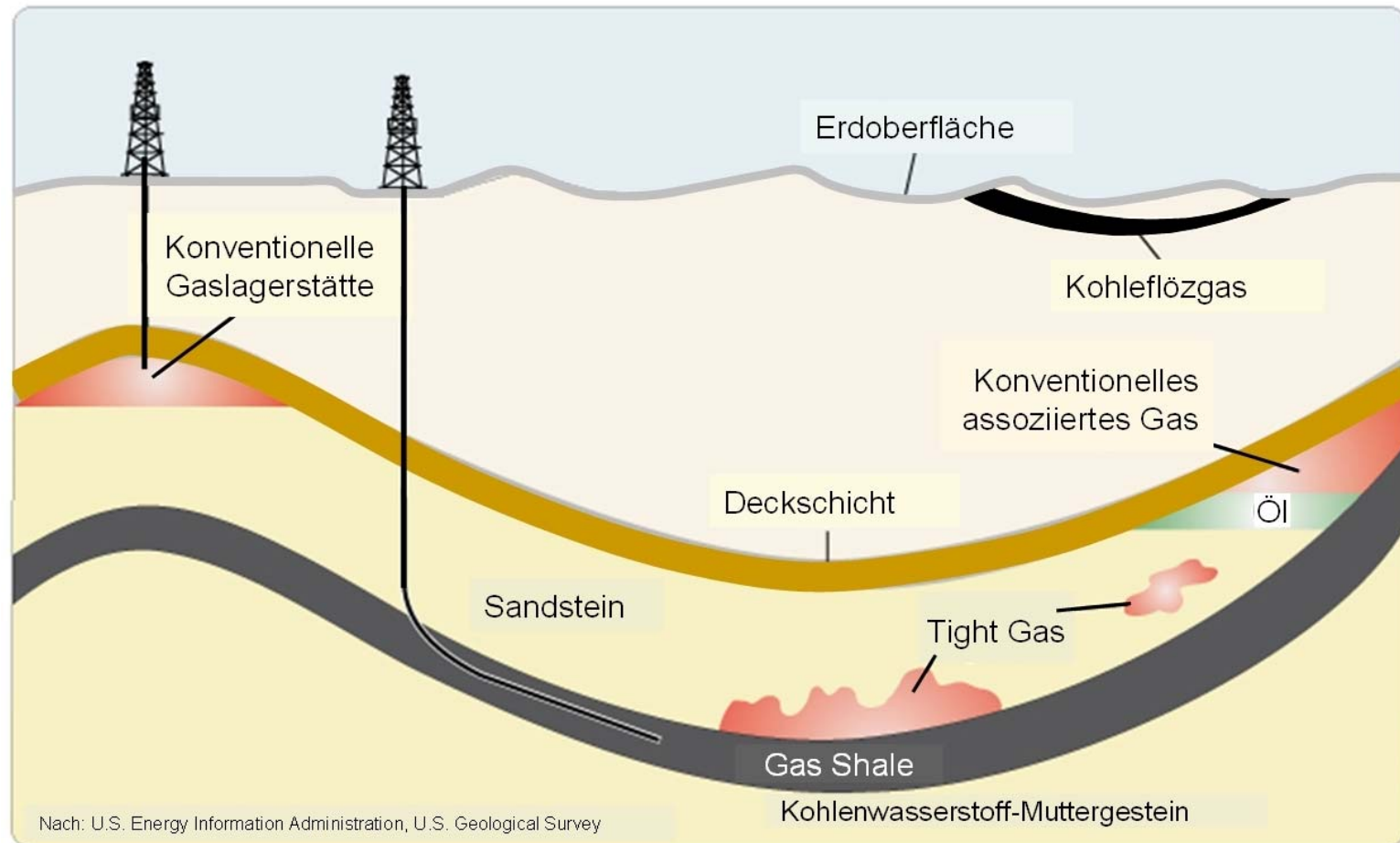
Informations- und Dialogprozess

Koordiniert durch: Prof. Dr. Dietrich Borchardt, Ruth Hammerbacher,
Osnabrück und Dr. Christoph Ewen, Darmstadt

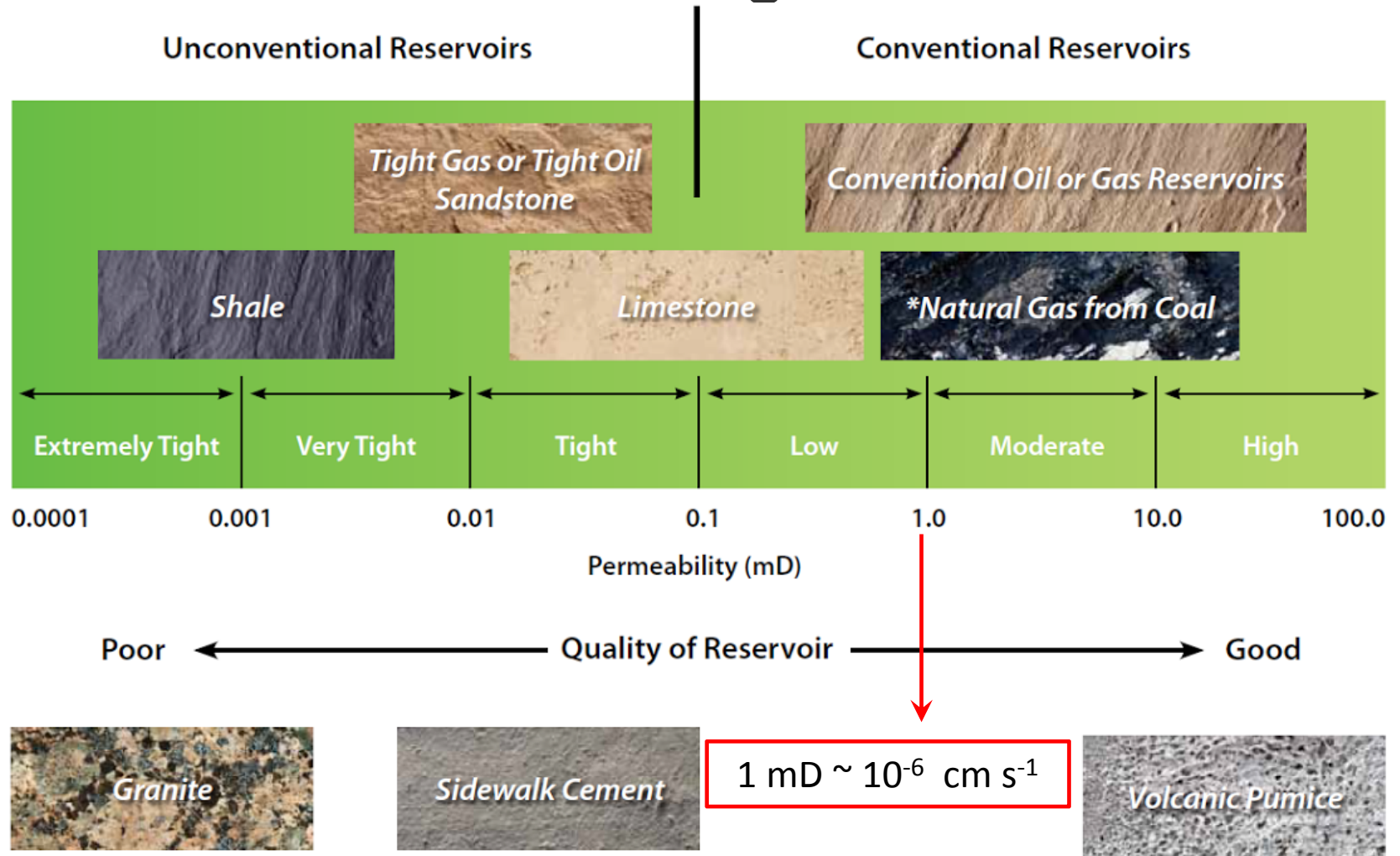
Finanziert durch: ExxonMobil

Worum geht es?

- Produktion von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten (Schiefergas, Flözgas)

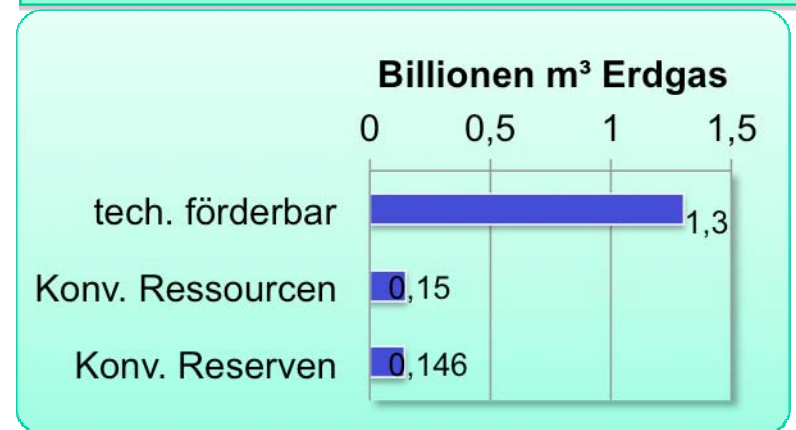
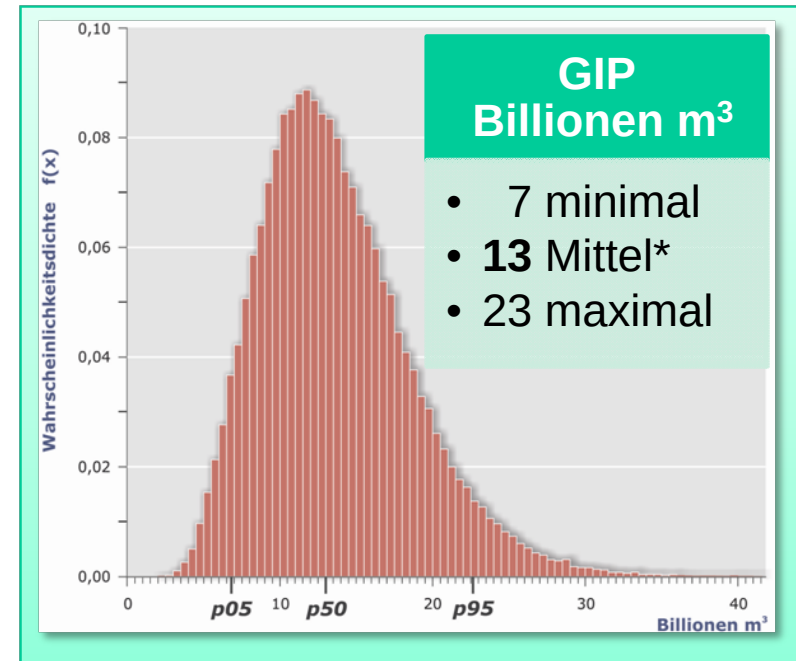
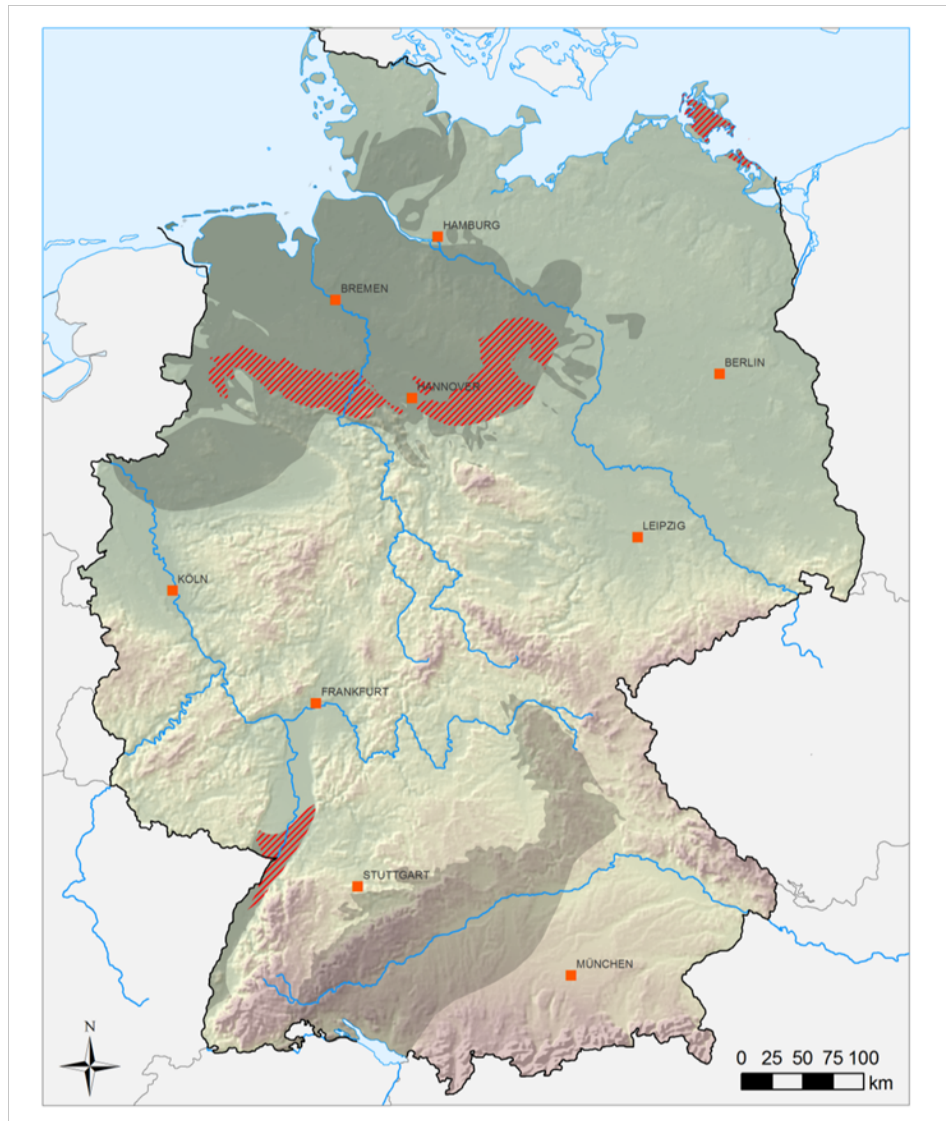


Unkonventionelle Lagerstätten



* Natural Gas from Coal reservoirs are classified as unconventional due to type of gas storage

Schiefergaspotential in Deutschland

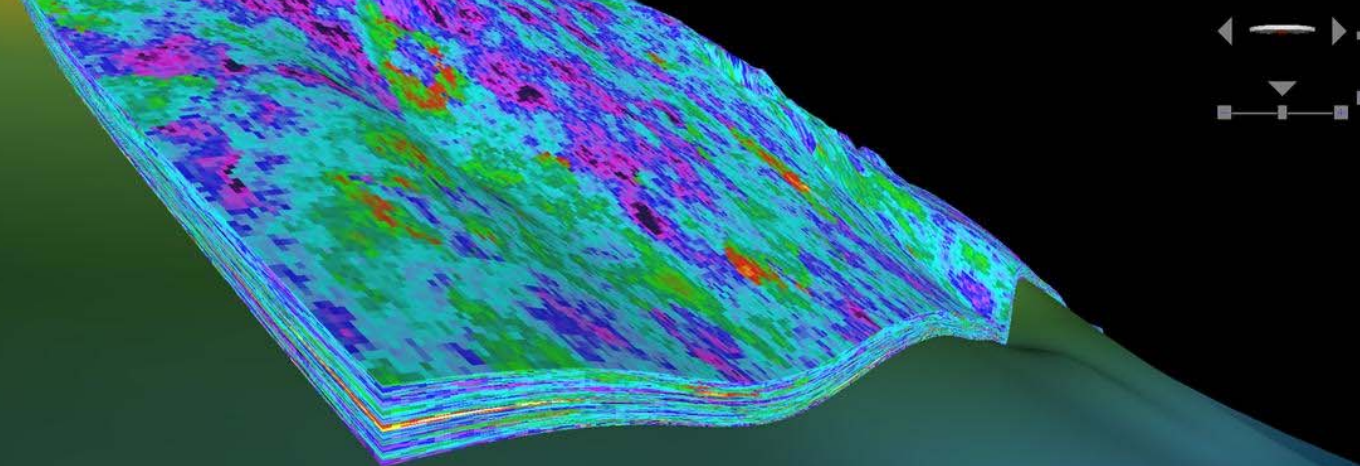


Ladage, 2012

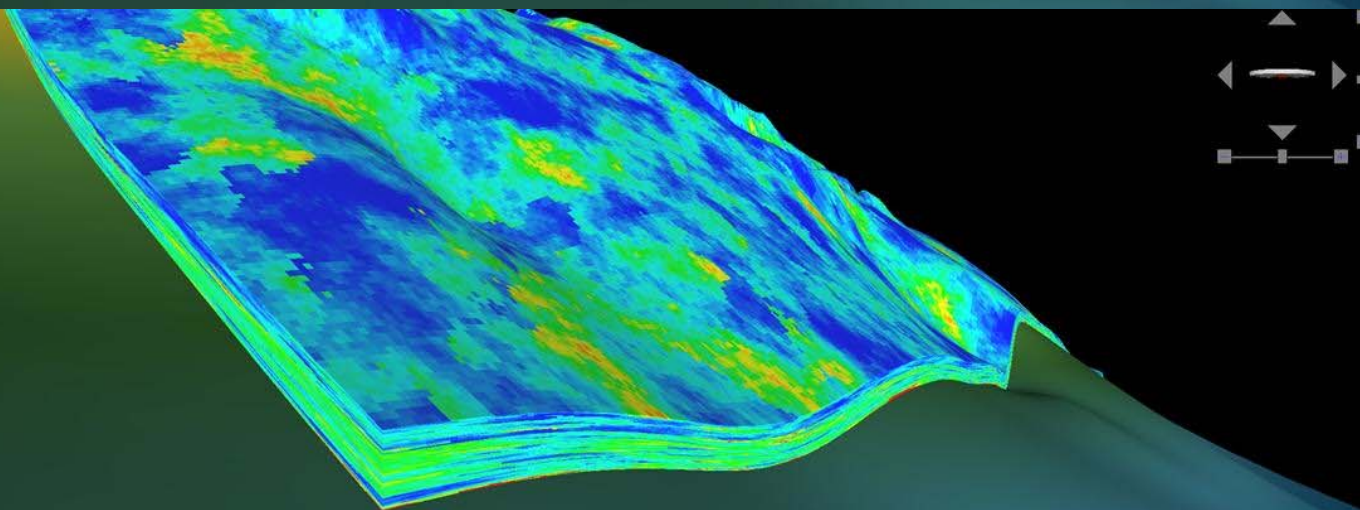
Was ist neu?

- Erdgasförderung– seit ca. 100 Jahren
- Fracking – seit ca. 50 Jahren
 - Eingesetzt hauptsächlich zur Rehabilitation gealterter Förderbohrungen (ca. 300 Fracks in D)
- **Neu** ist die Förderung von Erdgas aus unkonventionellen Quellen
 - Voraussetzung: **Horizontalbohrverfahren**
 - **Clusterbohrungen** mit bis zu 20 Bohrungen von einem Bohrplatz und Multi-fracks
 - Multi-**Fracks**
 - Flächenhaftes Vorgehen
 - Geringere Teufen als klassische Gasförderung

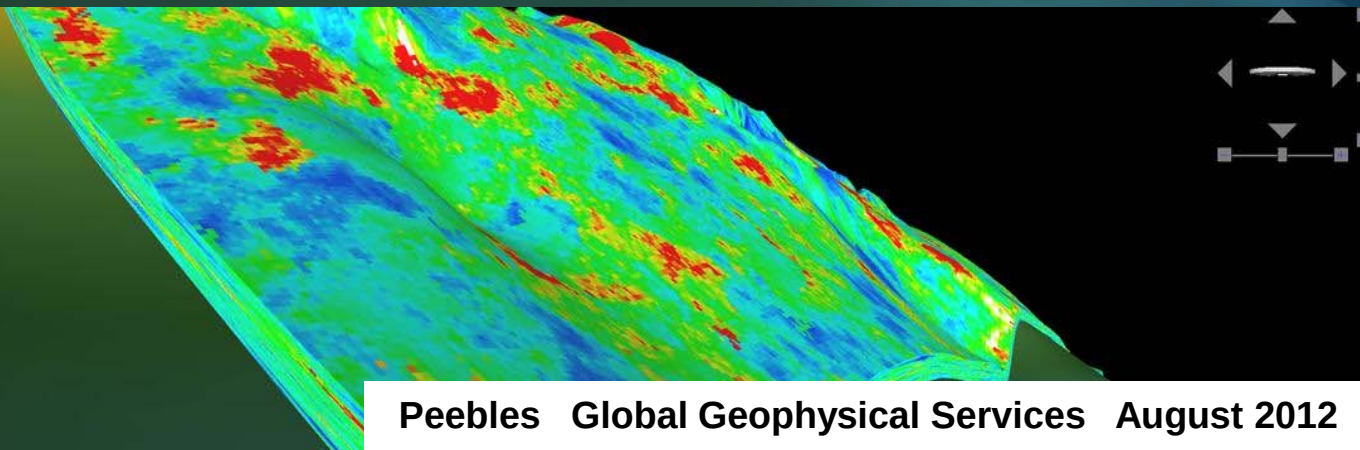
**Effective
Porosity**



TOC

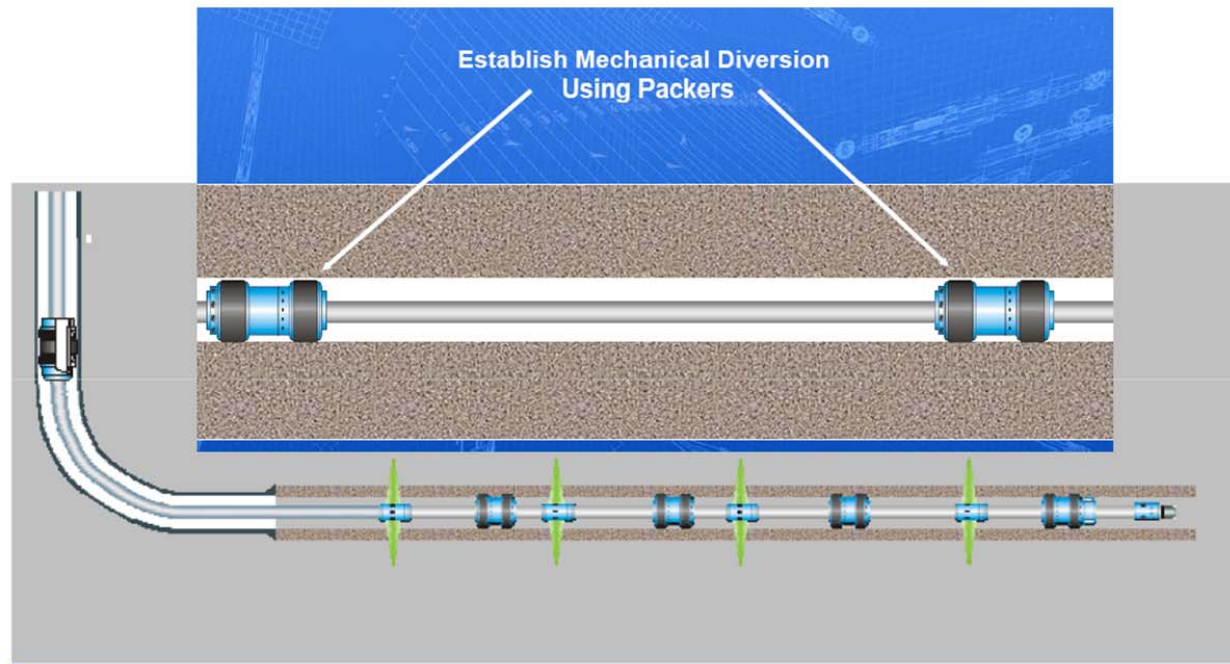


**Young's
Modulus**



Mehrgestufte Frack-Maßnahmen

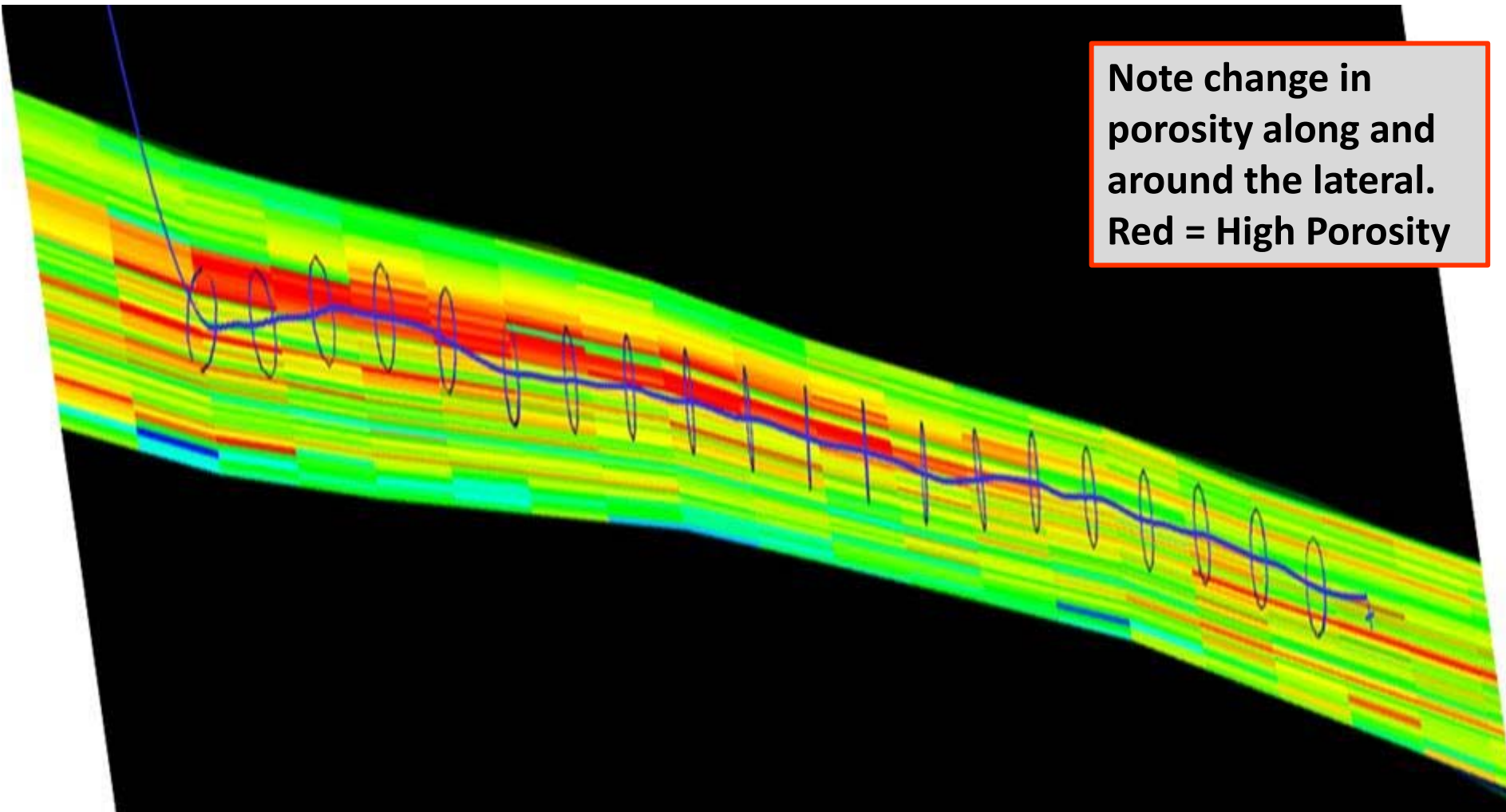
- Mehrfache Stimulationen – Frack mit hochviskosen Fluiden unter hohen Drucken erzeugt; Stützmittel um Risse offen zu halten
- Druckabbau und Rückförderung der Fluide (Flowback)



Allow multiple stimulations along horizontal interval

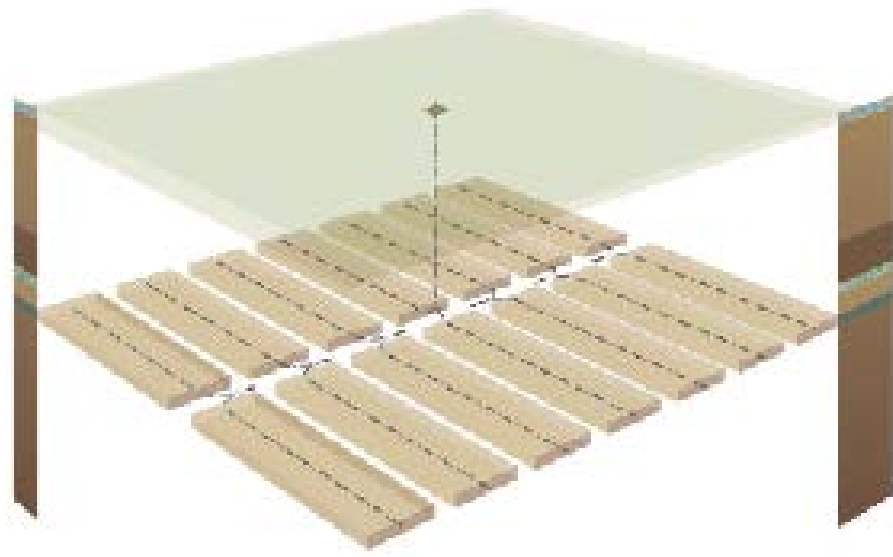
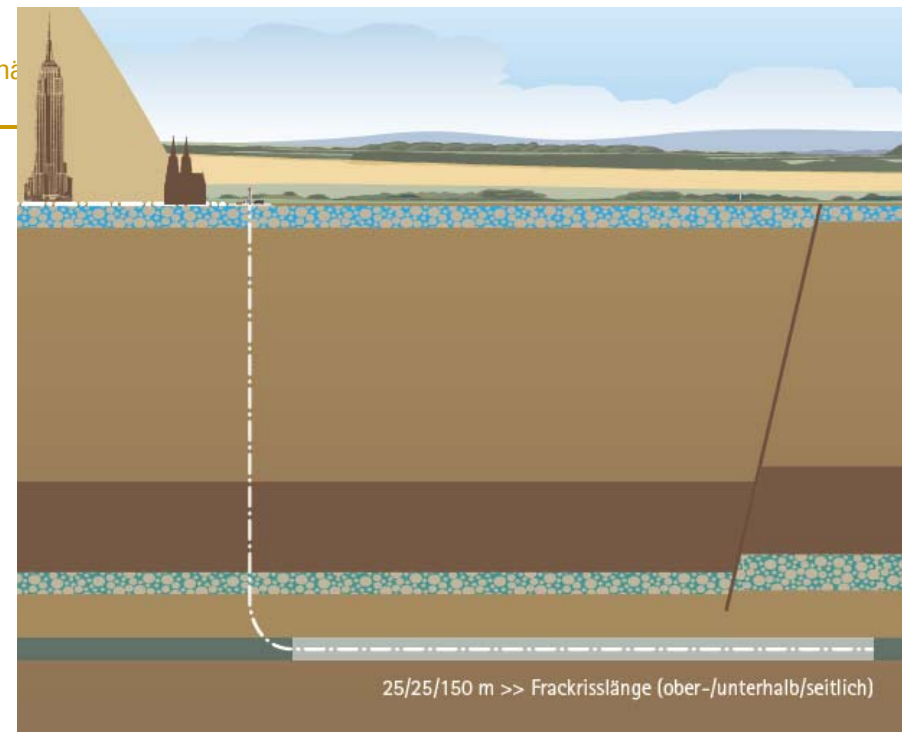
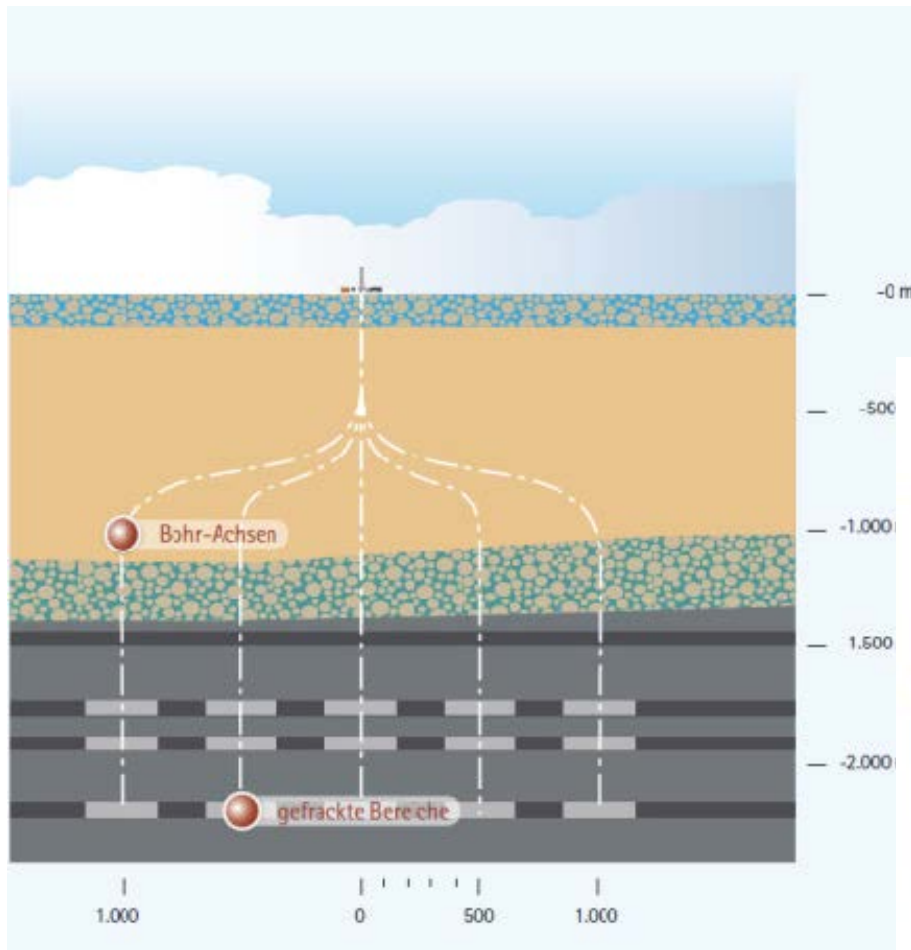
Nach F. Schwartz,
Bayreuth '14

Verlauf eines Bohrloches mit Multifracks



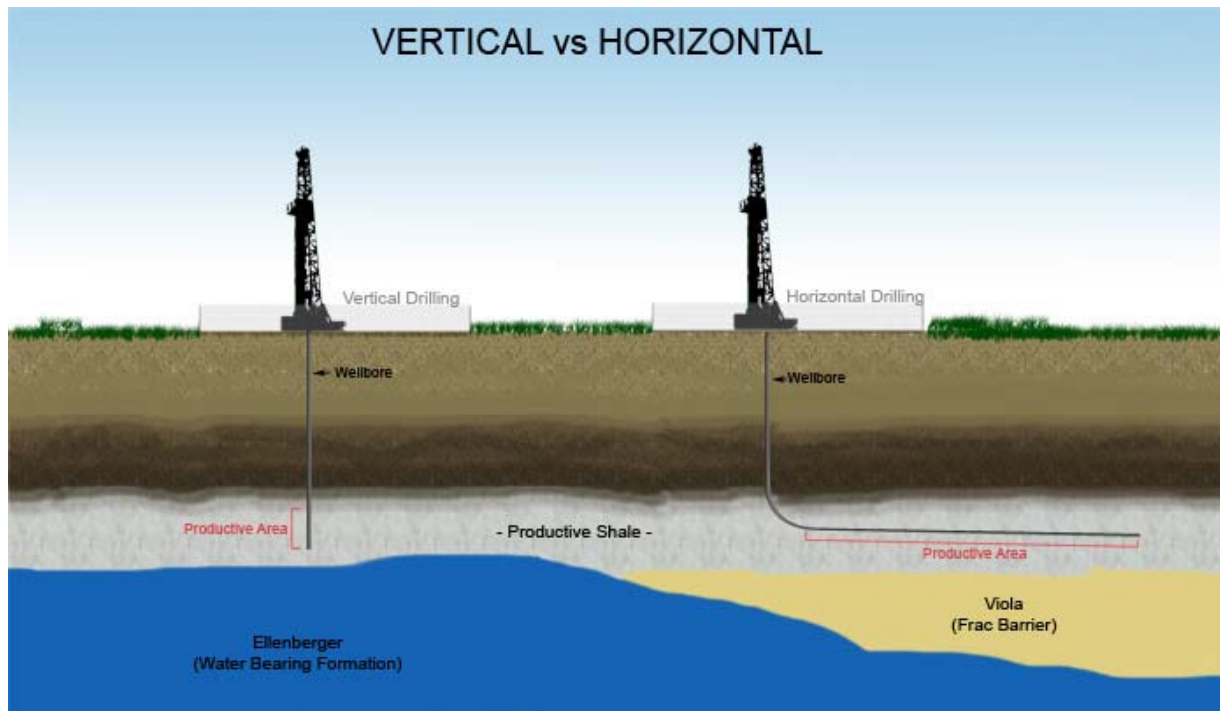
Mulinska, 2012

Schiefergas- und Flözgasförderung



Richtbohrtechnik

- Horizontalbohrungen zur Maximierung der Zustromfläche zwischen Formation und Bohrung
- Vertikalbohrung bis 1000 / 3000 m Teufe
- Ablenkung und Horizontalbohrung über 2 / 4 km



Nach F. Schwartz,
Bayreuth '14

Roughly 200 tanker trucks deliver water for the fracturing process.

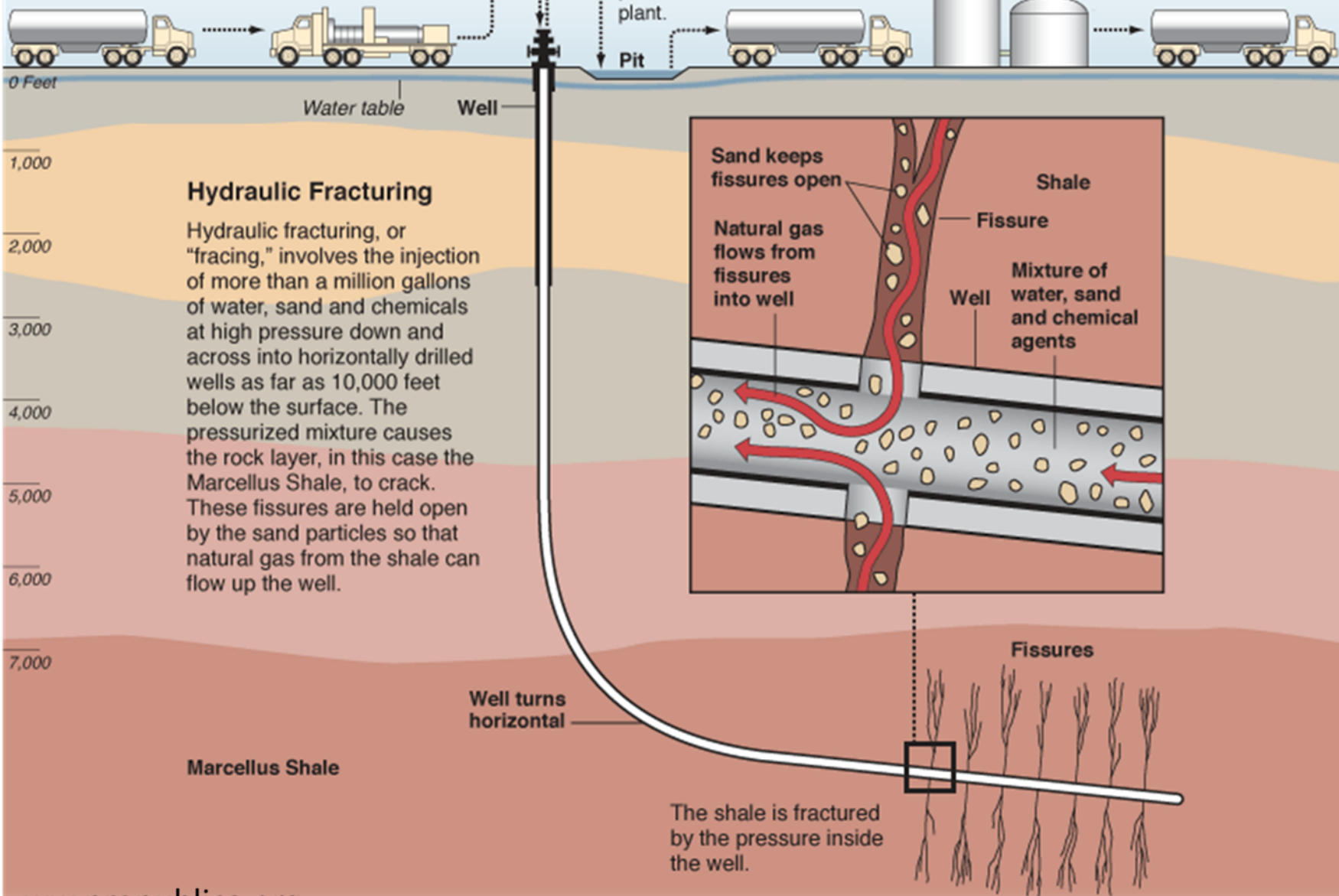
A pumper truck injects a mix of sand, water and chemicals into the well.

Natural gas flows out of well.

Recovered water is stored in open pits, then taken to a treatment plant.

Storage tanks

Natural gas is trucked to a pipeline for delivery.



Frack Fluide

- **Slickwater** - Wasser mit Acrylamid Polymeren PAA
Polymere verringern Rohrreibung
 - Gering viskos 2-3 cP
 - Kleinkalibrige Stützmittel (proppants)
 - Hohe Pumprate für Transport der Stützmittel
- Eingesetzt in Schiefergasreservoirs (extrem geringe Permeabilität)



Quelle
Wintershall.com

Nach F. Schwartz,
Bayreuth '14

Frackfluide

- **Gele (gestreckte Ketten)** Frackfluide mit Gelen (z.B. **Biopolymere** wie Guarkern)
 - Additive z.B. **Puffer, Biozide, Kettenbrecher**
 - Mittlere **Viskosität** 10-30 cP zum Transport größerer **Stützmittel** für größere Rissöffnungsweiten
 - Evtl. nachteiliger für Formation wg. Größerer Einzelrisse
- **Gele (vernetzte Polymere)** für hochviskose Fluide 100-1000 cP zum Transport noch größerkalibriger Stützmittel
- Weitere Typen von Fluiden (Ölbasierte Gele, Schäume, Gase)

Additive

Understanding Fracturing Fluid

Typical Additives Used in Fracturing Fluid
and COMMON HOUSEHOLD ITEMS

The fluid from the hydraulic fracturing process is nearly
**99.5%
WATER
& SAND.**

**9.5%
SAND**

**0.5%
CHEMICAL
ADDITIVES**

**90%
WATER**



SODIUM CHLORIDE
used in table salt



ETHYLENE GLYCOL
used in household cleaners



BORATE SALTS
used in cosmetics



**SODIUM/POTASSIUM
CARBONATE**
used in detergent



GUAR GUM
used in ice cream

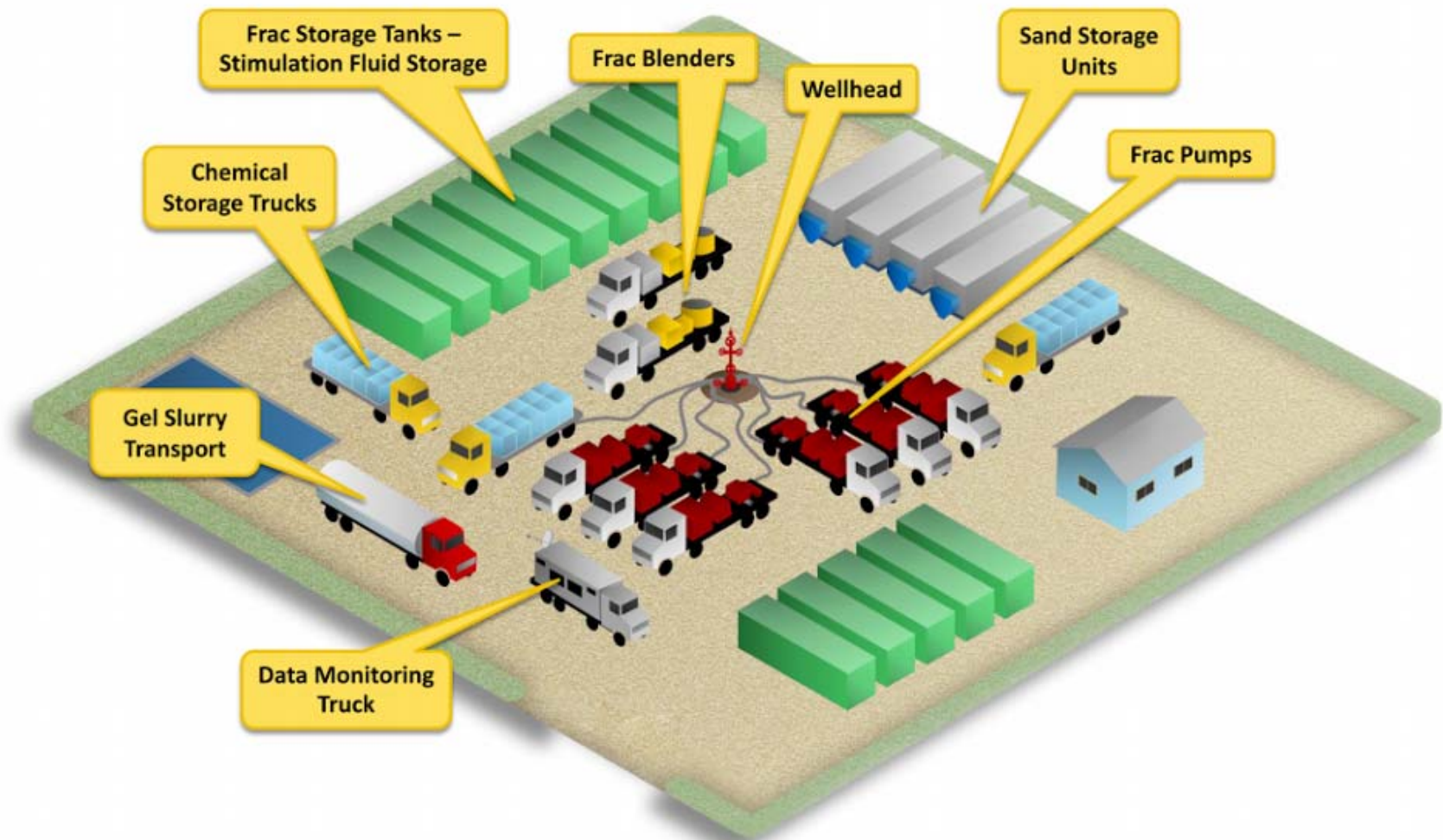


ISOPROPANOL
used in disinfectant

- Säuren- HCl (5-28%) oder Essigsäure zum Freispülen der Perforation
- Salz- NaCl zur Verzögerung des Abbaus der Gelpolymere
- Polyacrylamid - Reibungsminderer
- Ethylenglycol – Inhibitoren zur Verhinderungen von Ausfällungen (Scaling)
- Borate – Aufrechterhaltung der Fluidviskosität bei zunehmender Temperatur
- Na_2CO_3 / K_2CO_3 – Stabilisierung der Polymere
- Glutaraldehyd - Wasserdesinfektion
- Guarkern (wasserlösliche Gele) - Erhöhung der Viskosität
- Kettenbrecher
- Tonstabilisatoren – Verhinderung der Quellung

Nach F. Schwartz,
Bayreuth '14

Bohrplatz



Representation of common equipment at a natural gas hydraulic fracturing drill pad.

Nach F. Schwartz, Bayreuth '14

- “Mittlerer” Frack-Job in Pennsylvania (moneymorning.com)



Räumliche Anordnung der Frackmaßnahmen

- Risiken: höhere Zahl von Havarien, Industrie und ländlichen Gebieten, diffuse Gasaustritte, ..?



Example of production area, 200 km² area, with 22 „Cluster-pads“ of 10 to 20 wells

Was ist nicht neu?

- **Methan in Trinkwasserbrunnen** :
historische Berichte aus dem
Münsterland und Pennsylvania, etc.
- Förderung von **Formationswässern**
 - Entsorgung in ausgeförderten
Lagerstätten
 - Kontaminationen
 - Erdbeben
- Niedrige Gaspreise verlangsamen
Energiewende



Documentarfilm „Gasland“ (J. Fox)

Marcellus Schiefergas – Östl. USA

- Marcellus Formation eine der größten Schiefergaslagerstätten in US
- Versorgung der USA mit Erdgas für die nächsten 15 Jahre
- Natürliche Methangasaustritte – Park in PA



Courtesy Tom Darrah Ohio
State University

Was sind die Themen?

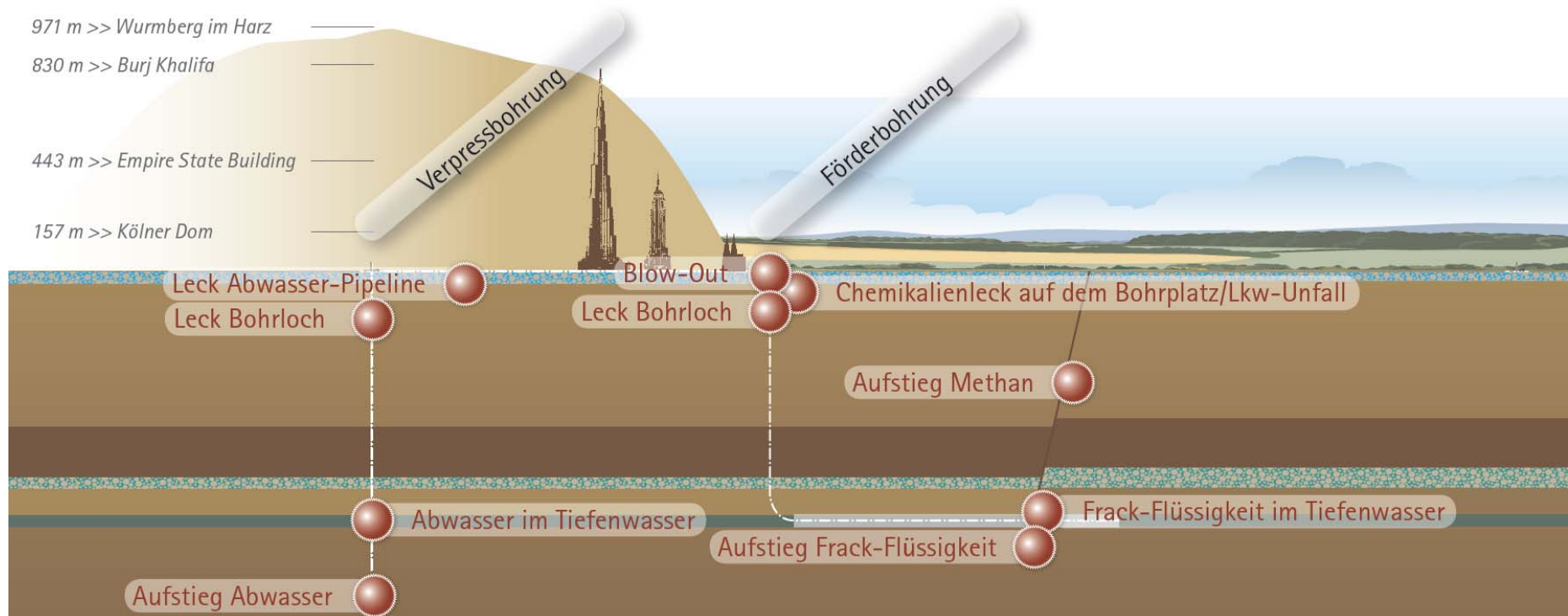
- | Freisetzung von Fracking-Flüssigkeit, Abwasser und Erdgas aus dem tiefen Untergrund und bei der oberirdischen Handhabung
- | Störfallszenarien, Risikomanagement und Stand der Technik (Erdgasförderung, Abwasserbehandlung)
- | Toxikologische Beurteilung eingesetzter Stoffe
- | Umweltrechtliche Einordnung durch Sondergutachten:
 - | Auswirkungen auf die Landschaft
 - | Energie- und Klimabilanz
 - | Wirtschaftliche Folgen für die Förderregionen
 - | Seismische Ereignisse, Haftung, Monitoring

Worst-Case-Szenarien

- | Blow-Out
- | Leckagen
- | Unfälle

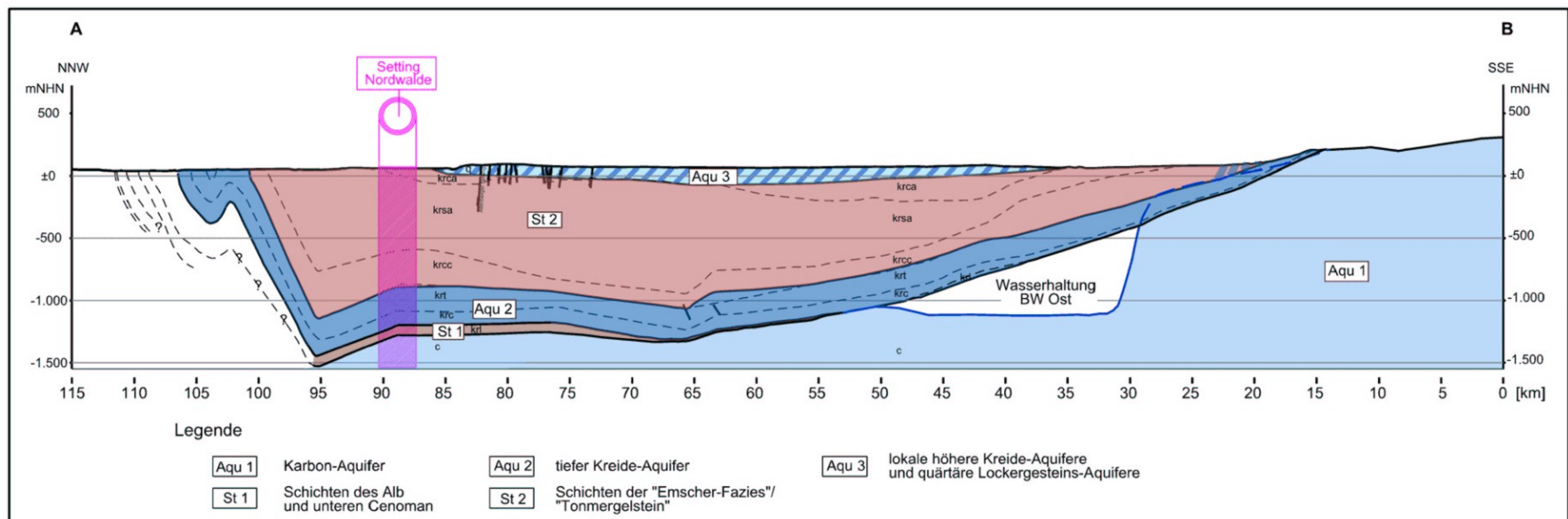
Szenarien mit konservativen Bedingungen

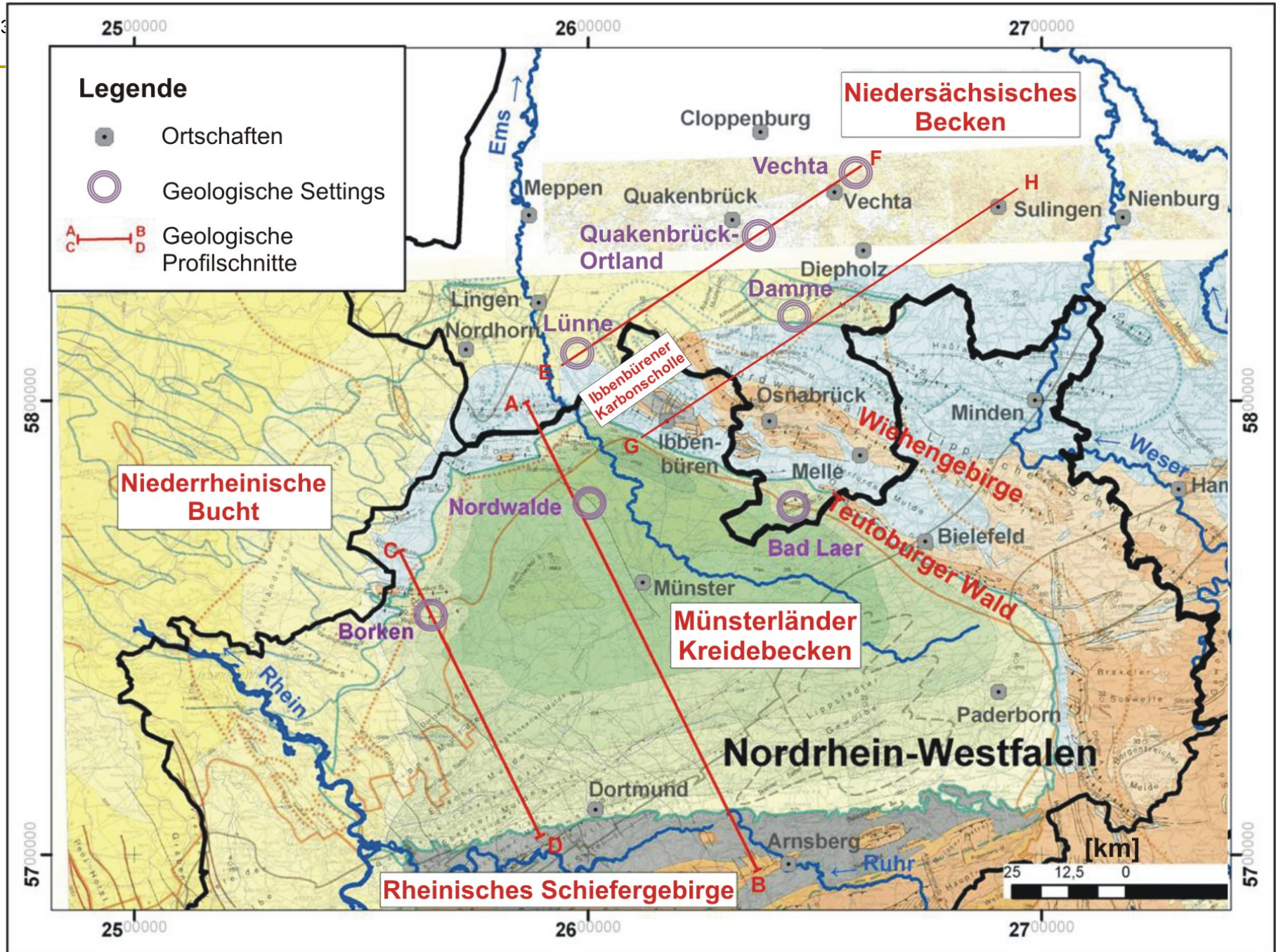
- | Aufstieg von (Frack-)Fluid
- | Transport im Tiefenwasser
- | Aufstieg Methan



Ziele der AG Geologische Risiken

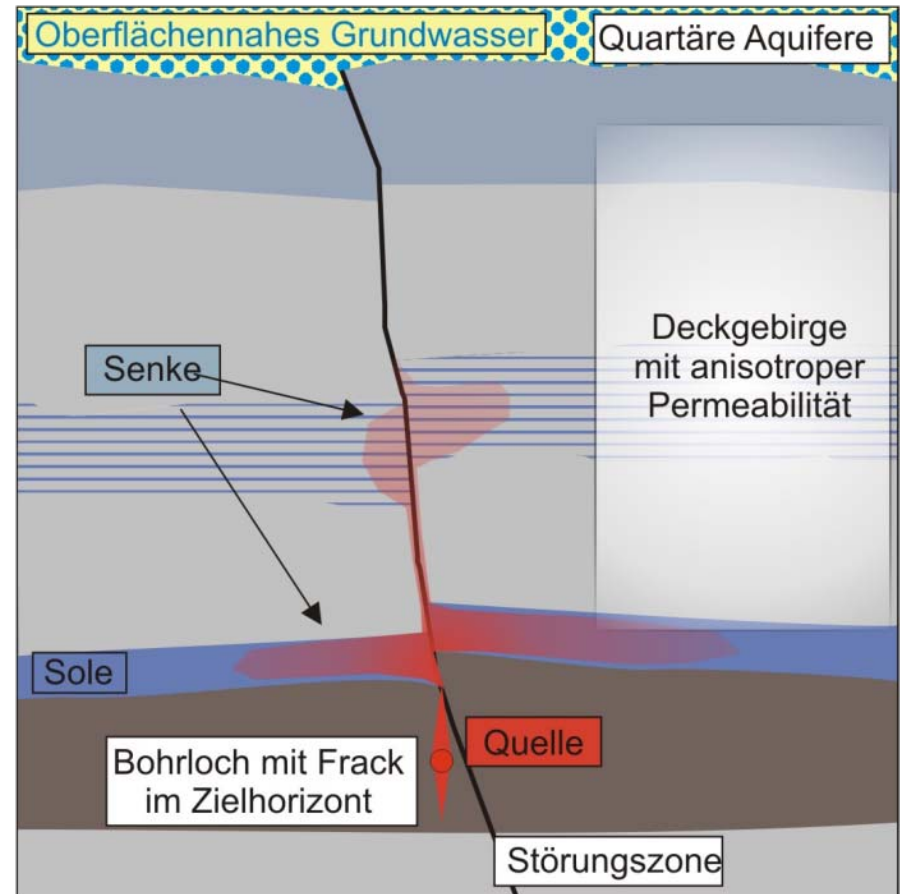
- Abschätzung der **Kontaminationsrisiken** durch Fracking-Fluide im Grundwasser
 - **Kurzfristig** durch Fracking-Operationen (wenige Stunden, hohe Potentialgradienten), **Szenario 1**
 - **Langfristig** durch Grundwassergrundströmung (Jahre, Jahrzehnte; geringe Potentialgradienten), **Szenario 2**





Hauptfragestellungen

- Effektivität des **Deckgebirges als Barriere** für Stofftransport (Größen: Mächtigkeit, Durchlässigkeit)
- Rolle von **Salzformationen als Barriere** für Fracking-Fluid Ausbreitung und Transport
- **Effektive hydraulische Durchlässigkeiten** der Transportwege (Faktoren: Störungszonen, Deckgebirgseinheiten)
- Ausdehnung der Fracs (Berücksichtigung deren Rolle als Transportpfad?)



Methoden der Abschätzung

- Die Stoffausbreitungsmodellierung basiert auf dem kumulativen Effekt von **ungünstigen Faktoren**
 - **Ungünstige Prozesskombination**; keine Prozesse, die die Stoffausbreitung verlangsamen (d.h. nur Advektion, keine Sorption, keine Matrixdiffusion, keine Biodegradation)
 - **Ungünstige Systemgeometrien**; Störungszone vorhanden und keine Barriere zwischen Top Frac und Störungszone / tiefem Grundwasserleiter
 - **Ungünstige Systemparameter**; höchste, noch vertretbare hydraulische Leitfähigkeiten für Störungszone / Barrieregestein
 - **Ungünstige Randbedingungen**; hohe hydraulische Gradienten, große Volumina an Fracking-Fluid dringen in Störung ein

Methoden der Abschätzung

- Abschätzung der Stoffausbreitung der Frack-Fluide basierend auf einem **explizit konservativen Ansatz**:
 - Äußerst unwahrscheinlich
 - Physikalisch denkbar
 - Auslotung der Bandbreite
- Extremfall unter äußerst unwahrscheinlichen Bedingungen
- maximale Ausdehnung unter diesen Bedingungen
- Keine unplausiblen Parameterkombinationen (niedriges k und hohe n_e)

Methoden der Abschätzung

- **Mathematische Modellierung** des Stofftransports
 - Definition der **Systemgeometrie** (hydrogeologische Einheiten, Struktur)
 - **Parametrisierung** des Deckgebirges bzgl. hydraulischer Kenngrößen
 - Identifikation relevanter **Fließwege** (z.B. Störungszonen) und deren Parametrisierung
 - **Mehrphasen, dichteabhängiger** Transport der Fluide

Systemgeometrie - Settings

Münsterländer Becken

	mit Störungszone	ohne Störungszone
Hohe Deckgebirgsmächtigkeit		Nordwalde
Geringe Deckgebirgsmächtigkeit	Bad Laer	Borken

Niedersächsisches Becken

	mit Steinsalz	ohne Steinsalz
Geringe Deckgebirgsmächtigkeit	Lünne	Damme
Hohe Deckgebirgsmächtigkeit	Quakenbrück- Ortland, Vechta	

System Geometrie - Lokal

Definition von Settings, i.e. Geometrie typischer Lokalitäten

- **Typisch** für ein bestimmtes Gebiet
- Typische **Bandbreite stratigraphisch-lithologischer Abfolgen** und Verteilung der Mächtigkeiten individueller Einheiten
- Notwendige **Reduktion der hydrogeologischen Modelle** für die Simulationen
- Ableitung von **allgemeingültigen Aussagen** und Identifikation relevanter Faktoren

Parametrisierung

- **Effektive Permeabilität** (isotrop/anisotrop)
- Berücksichtigung der **Anisotropie der hydraulischen Parameter** des Deckgebirges
 - $(k_{\text{horizontal}} > k_{\text{vertikal}}),$
 - **lateral Druckabfall** („Leakoff“ ist relevant)
und horizontaler Transport
- **Effektive Porosität**

Parametrisierung - Lithologien - Barrieren

lithology	mudstone			marlstone			anhydrite (gypsum)			rock salt		
	hydraulic conductivity		porosity	hydraulic conductivity		porosity	hydraulic conductivity		porosity	hydraulic conductivity		porosity
	Range	< 300 m > 300 m		Range	< 300 m > 300 m		Range	< 300 m > 300 m		Range	< 300 m > 300 m	
literature	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	[-]	1×10^P [m/s]	[-]	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	[-]	1×10^P [m/s]	[-]	1×10^P [m/s]	[-]
Appel & Habler (2002); Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) (research group screening methods location for radioactive waste repository)	until about 200 m bgl in average:	-6	-12	until about 300 m bgl in average:	-8	-11						
	-6			-8								
	Range:			300 - 1.500 m bgl:								
	-14 bis -4			-11								
	from 200 m bgl in average											
	-12											
Baltes (1998); Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (Society for installations and nuclear safety)	argillite	5×10^{-10}		argillite	-6	-10						
	mining influenced:			<i>Emscher Mergel</i> :								
	-9			near surface:								
	non-mining influenced (about 1.000 m bgl):			$\leq 0,01$								
	3×10^{-10}			in general								
	(estimated data from literature (Karrenberg & Meinicke 1962, Schmitz 1983)			-10								
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (2009); Project Morsleben (Federal Office for Radiation Protection)	mudstone (Lower Jurassic)	-9						anhydrite with gypsum:	-11		rock salt, Middle Muschelkalk (Mid. Triassic):	< -11
	-9 bis -8											
Croisé et al 2004; investigations in the Mont Terri rock laboratory, NW Switzerland	<i>Opalinuston</i> , Lower Dogger, Jurassic:	< -12						saliniferous Upper Permian formation (Zechstein)			rock salt, Lower Gips-keuper (Upper Triassic):	
	$2 \times 10^{-14} - 2 \times 10^{-12}$ (pumping tests, Packer-tests in 200 until 300 m bgl)											
Delakowitz (1996); Federal Office for Radiation Protection, Project Morsleben					-6			< -11				
				<i>Steinmergelkeuper</i> , Middle Keuper (120 m bgl):								
				$8 \times 10^{-7}, 5 \times 10^{-6}$ (short pumping test)								

Parametrisierung - Lithologien - Barrieren

[illegible]

Parametrisierung - Lithologien - Barrieren

lithology parameter	mudstone			marlstone			anhydrite (gypsum)			rock salt		
	hydraulic conductivity		porosity	hydraulic conductivity		porosity	hydraulic conductivity		porosity	hydraulic conductivity		porosity
	Range	< 300 m	> 300 m	Range	< 300 m	> 300 m	Range	< 300 m	> 300 m	Range	< 300 m	> 300 m
literature	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	n_e	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]	1×10^P [m/s]
Reutter (2011), Geofakten 21; LBEG	-9 bis -7	-7	-9	-9 bis -7	-7	-9						
Röttgen (2004); TGA, niedersächsische Grundwasser-geringleiter (low permeable units in Lower Saxony)	Valangin-mudstone	5×10^{-10}	5×10^{-10}									
	6×10^{-11} bis 2×10^{-8}											
	Lias-mudstone											
	-11 (field and laboratory tests, calculation of flow and transport (until ca. 12 m bgl))		0,001									
Rudolph et al. (2008), quotes Baltes (1998); GRS				Emscher Mergel : -6 in general: -10 (quotes Baltes (1998) and Thielemann (2000) (determination of hydraulic conductivity in triaxial cells))	-6	-10				Emscher Mergel: 0,008 – 0,005 in general: < 0,001		
Struckmeier (1990); Hydrologische Systemanalyse des Münsterländer Beckens (hydrological system analysis of the Münsterland Basin)				Emscher Mergel: -9 bis -11 (quotes div. other authors)		5×10^{-10}						
model parameter		1×10^{-7}	1×10^{-9}		1×10^{-6}	1×10^{-9}				1×10^{-11}		1×10^{-11}
			< 0,001							< 0,001		< 0,001

Parametrisierung – Settings

Setting : Lünne, flach mit Salz
Lagerstättentyp : Shale Gas - Schiefer Gas
Zielhorizont : Posidonien-schiefer

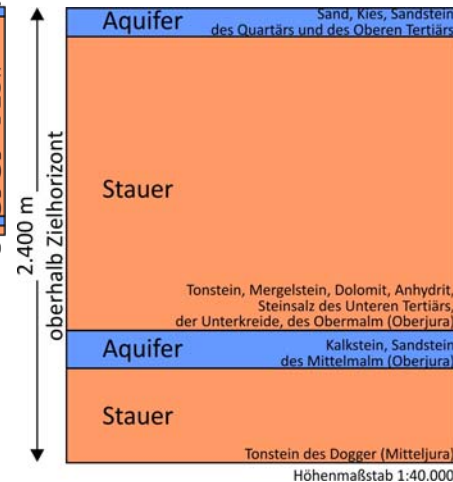
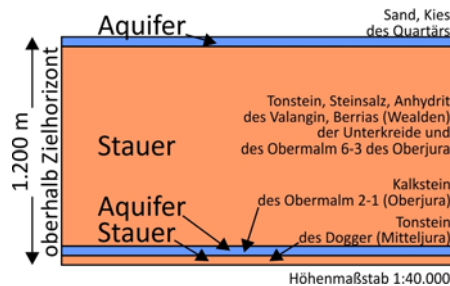
Teufe [m uGOK]	Stratigraphie	Einheit	Lithologie	Mächtigkeit m	hydraulische Leitfähigkeiten		effektive Porosität
					Kf-horizontal	Kf- vertikal	n_{eff} [1]
50	Quartär		Sand, Feinkies	50	-4	-4	$\leq 0,2$
300	Unterkreide	Valangin und Berrias	Tonstein	250	-7	-7	$\leq 0,001$
700		Berrias Wealden 6-1 (Bückeberg Fm.)	Tonstein	400	-9	-9	$\leq 0,001$
1100	Oberjura	Obermalm 3-6	Obermalm 6: Tonstein und Karbonat	400	-9	-11	$\leq 0,001$
			Obermalm 5: Wechselfolge aus Tonstein, Steinsalz, Anhydrit				
			Obermalm 3-4: Steinsalz, kalkiger Mergel, Steinsalz, Anhydrit, Steinsalz, Tonstein				
1150	Oberjura	Obermalm 1-2	kalkiger Mergel, Kalkstein, Anhydrit	50	-7	-11	$\leq 0,01$
1200	Mitteljura	Dogger	Tonstein	50	-9	-9	0.0072
1250	Unterjura	Lias Epsilon (Posidonien-Schiefer)	Tonstein mit dünnen kalkigen Lagen	50			

Parametrisierung - Settings

• Hydrogeologische Profile

Lünne:

Geringe Deckgebirgs-
mächtigkeit,
Salz-Formation

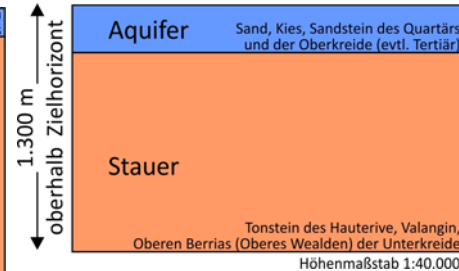


Quakenbrück-Ortland:

Hohe Deckgebirgs-
mächtigkeit, Salz-
Formation

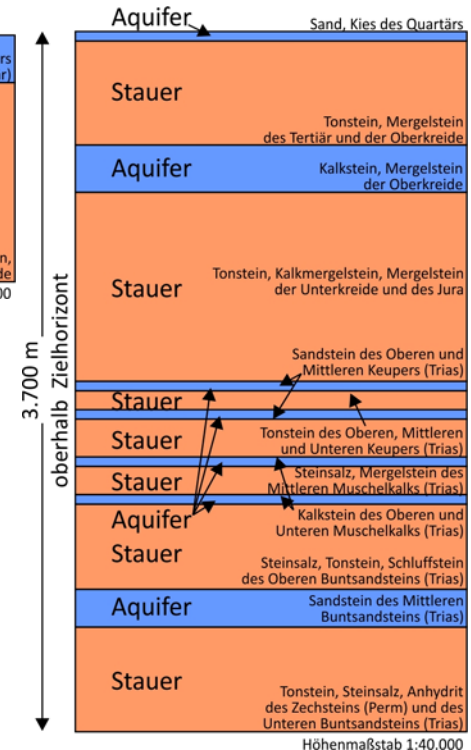
Damme:

Geringere Deckgebirgs-
mächtigkeit, keine
Salzformation



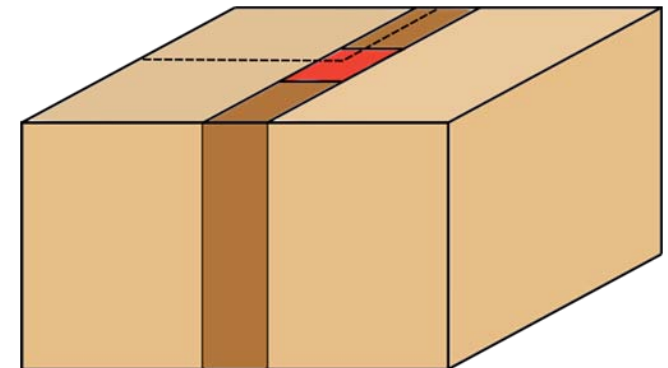
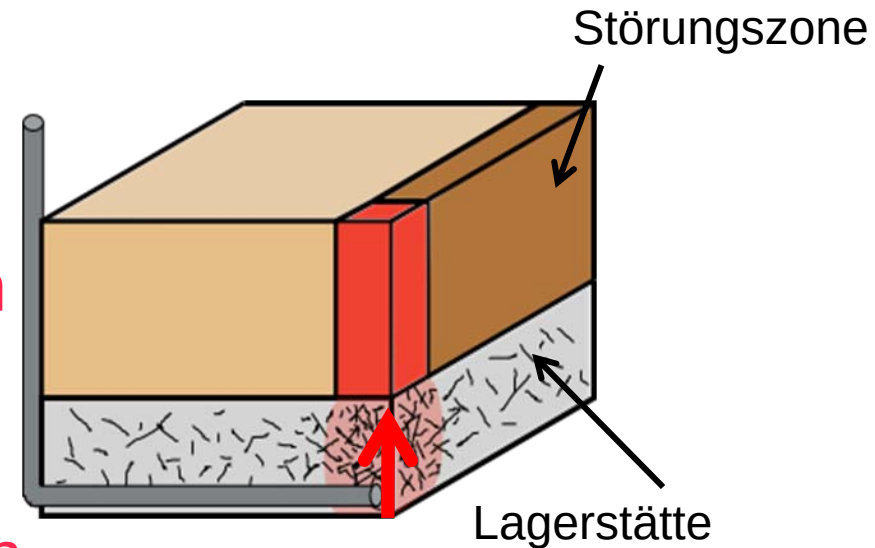
Vechta:

Sehr hohe Deckgebirgs-
mächtigkeit, Salz-
Formation



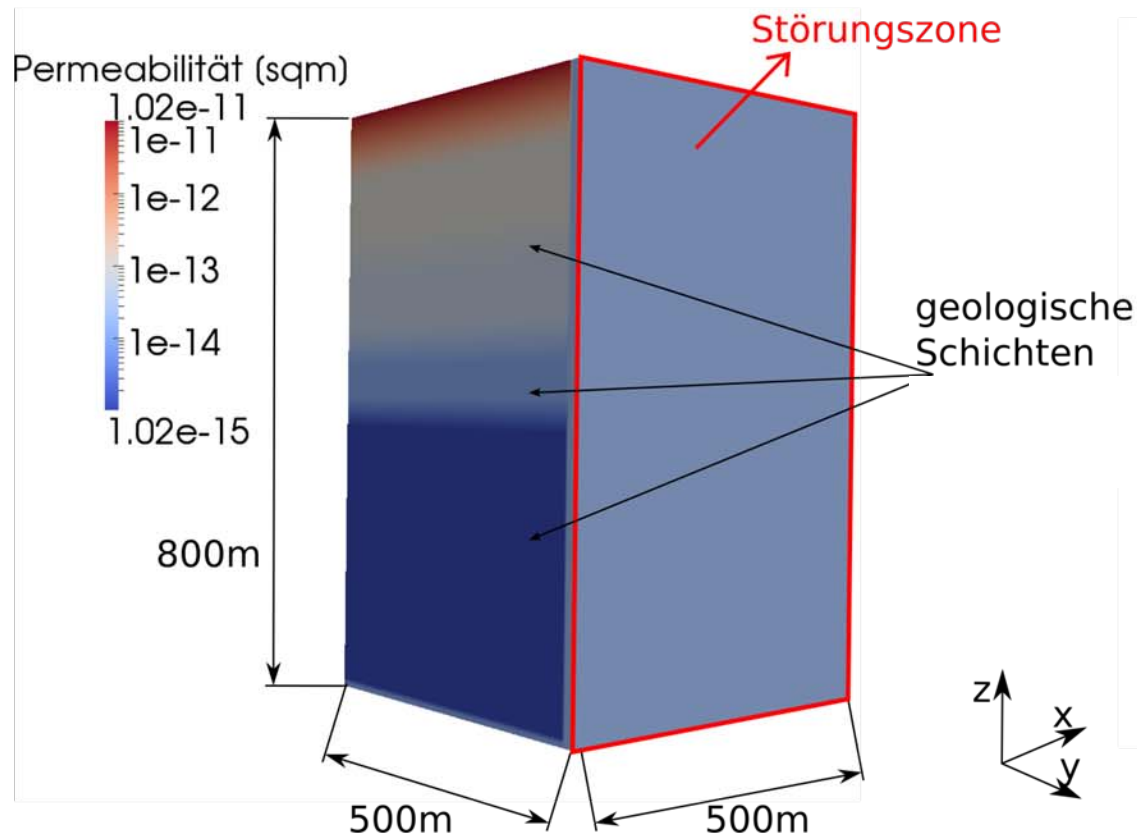
Methoden der Abschätzung

- Mathematische Modellierung der Stoffausbreitung
 - Frack Fluid breitet sich in der Lagerstätte aus.
 - Simuliert wird die konservative Konstellation
 - Frack Fluid breitet sich außerhalb der Lagerstätte aus

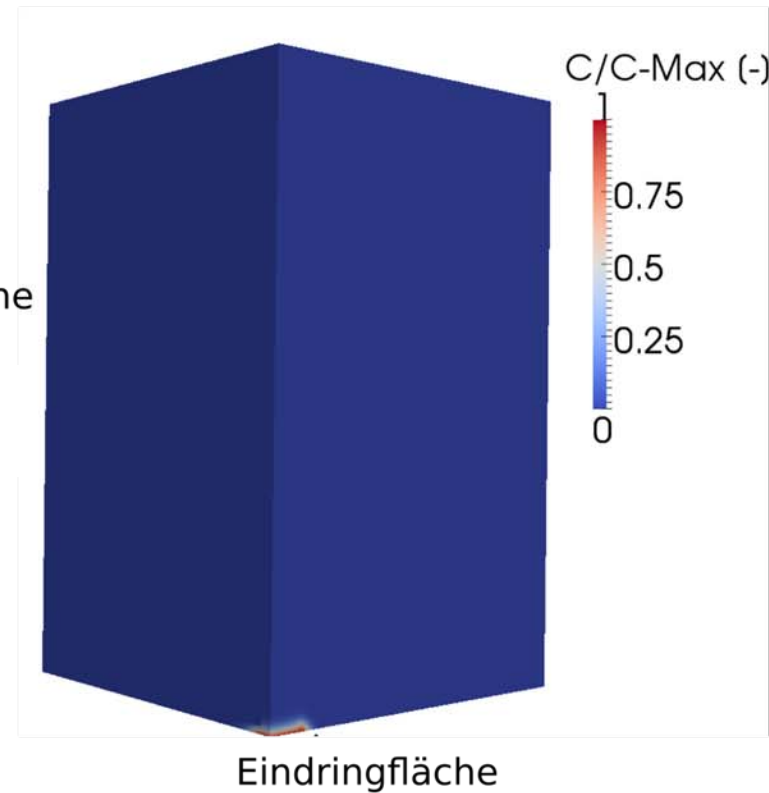


Szenario 1

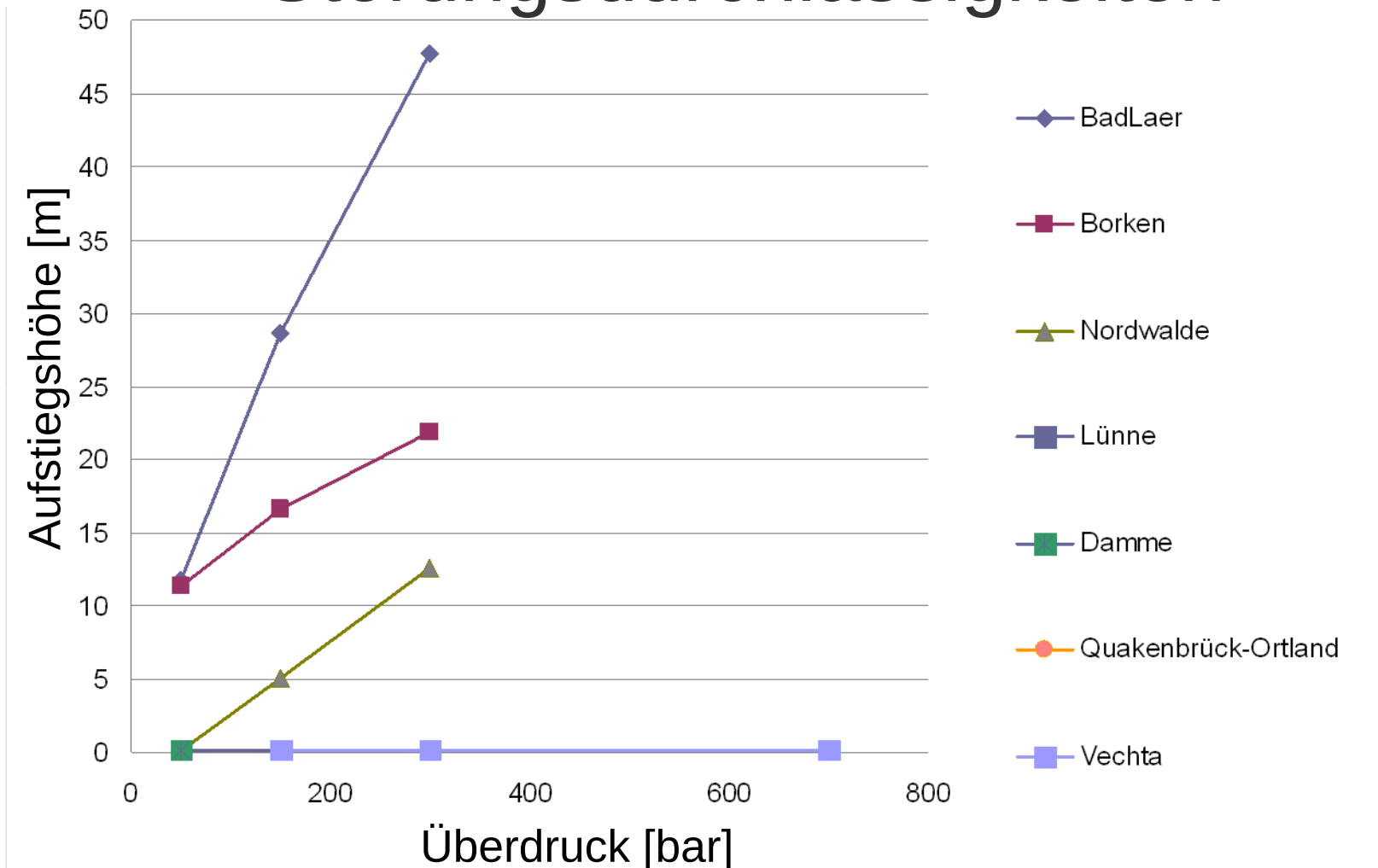
Schichtaufbau mit verschiedenen Permeabilitäten und Porositäten



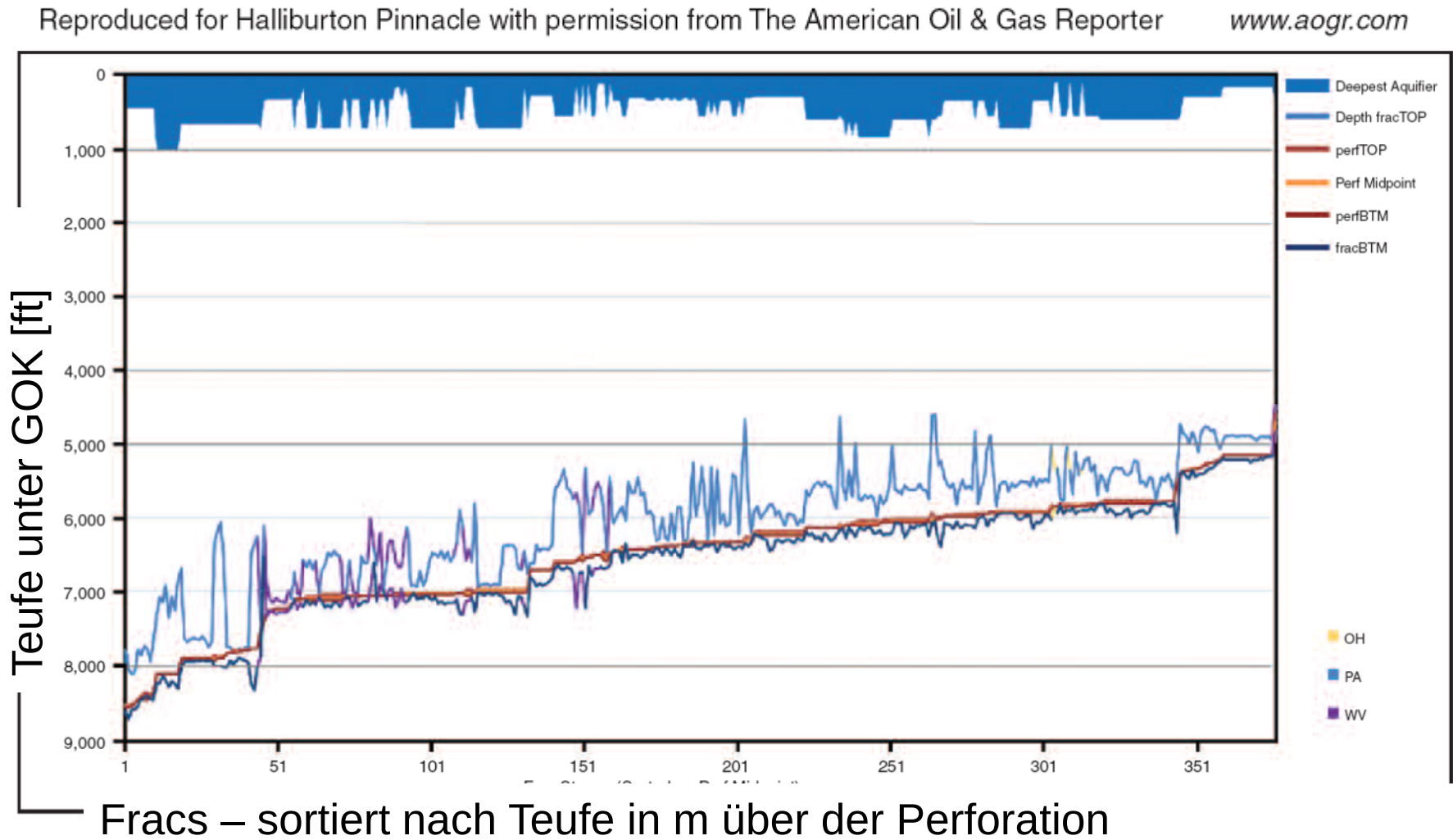
Ausbreitung der Frack-Flüssigkeit nach 12h Simulation



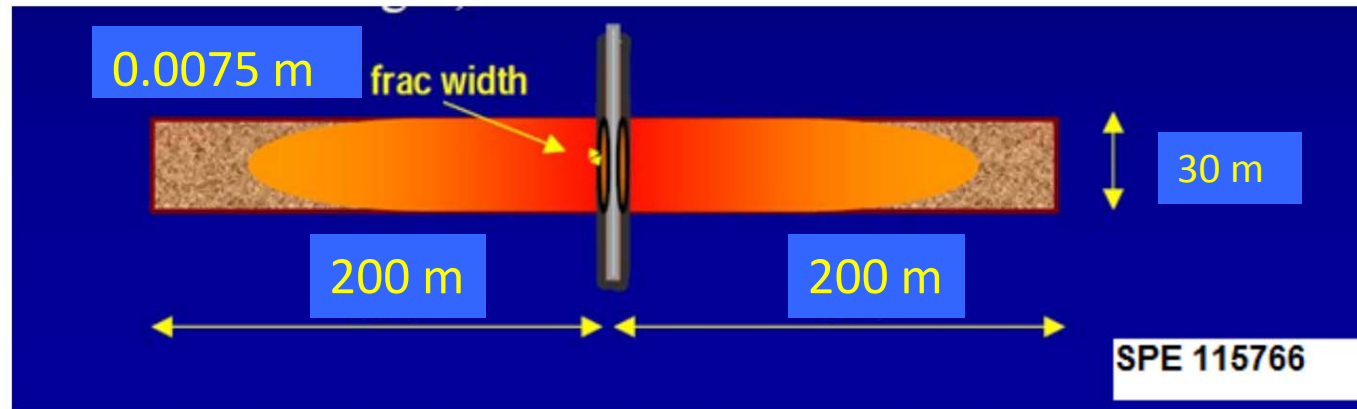
Szenario 1; Aufstiegshöhen bei hohen Störungsdurchlässigkeiten



Modellierung – Frack-Ausbreitung



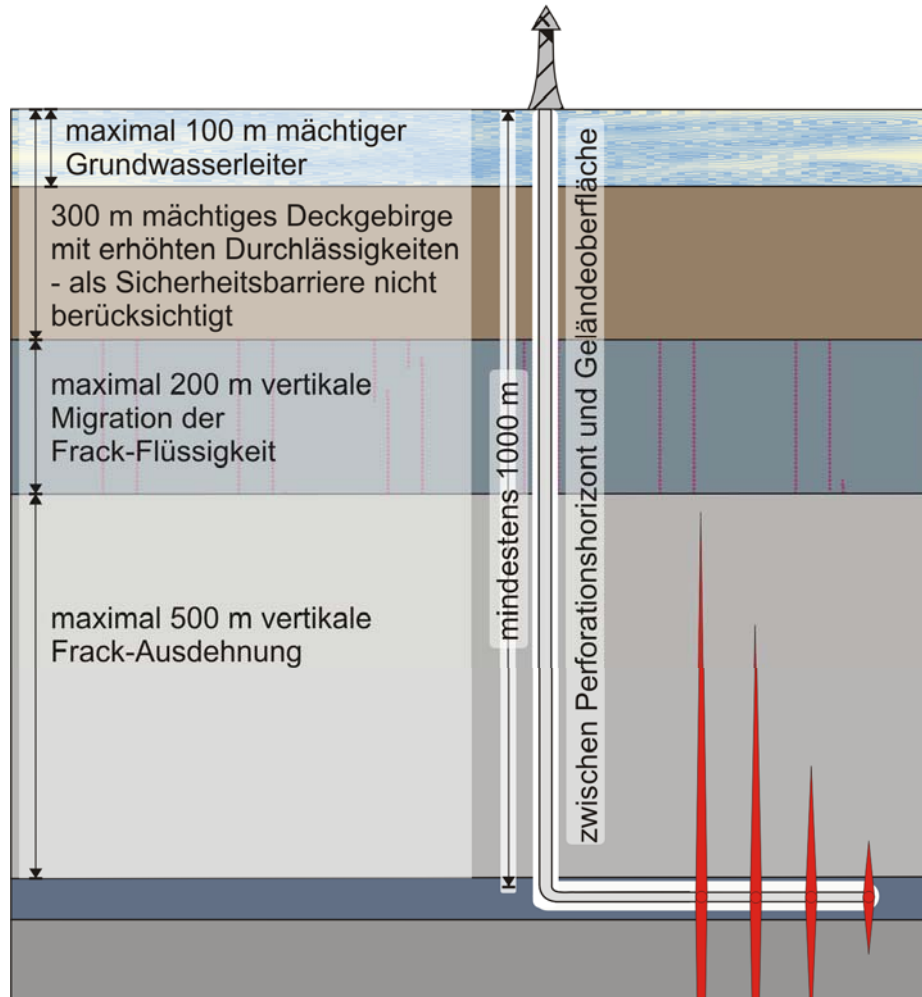
Konzept des “Leakoff”



- Riss mit 2 Flügeln (wings); 4 Flächen mit Leakoff
- Fläche = $200 \times 30 \times 2 \times 2 = 24,000 \text{ m}^2$
- Injektion bei $16 \text{ m}^3/\text{min} = 6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ pro m}^2 \text{ Fels}$
- Bei einem Leakoff in die Matrix oder in einen anderen Riss in Höhe von $q = 6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2 \rightarrow$ keine weitere Rissentwicklung

Nach: Gekengineering

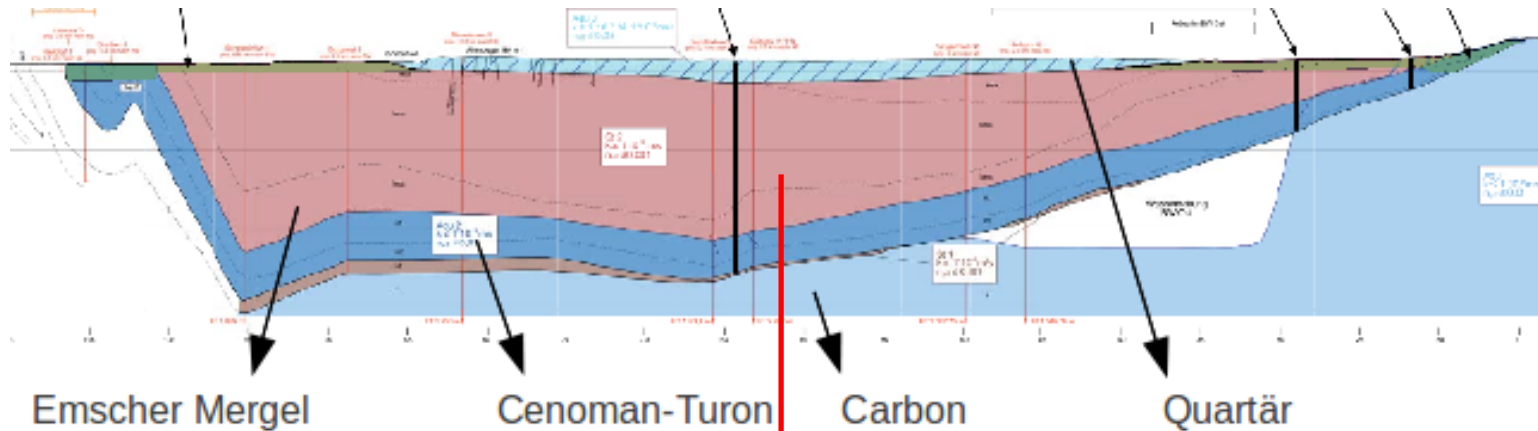
Sicherheitsabstand (1000 m)



- Mindestabstand zwischen Perforation in der Verrohrung und Geländeoberkante 1000 m für Demonstrationsprojekte (sonst detaillierte Untersuchungen bzgl. Barriere-wirkung des Deckgebirges)
- Standortangepasste Voruntersuchungen erforderlich
- Vermeidung von Störungs-zonen, spezifische Standort-untersuchungen erforderlich
- Standortangepasstes Monitoring erforderlich

Szenario 2

Hydrogeologisches Profil des Münsterländer Beckens

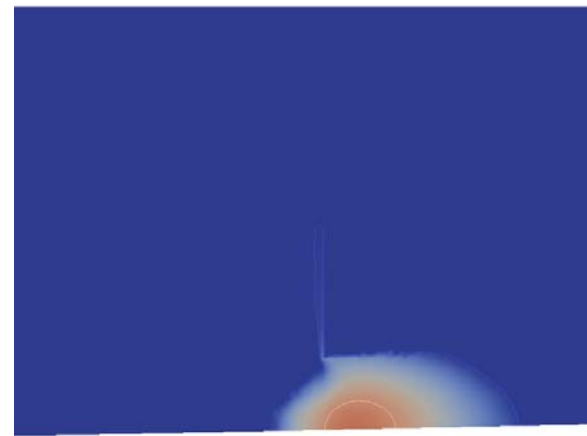


Ohne Überhöhung

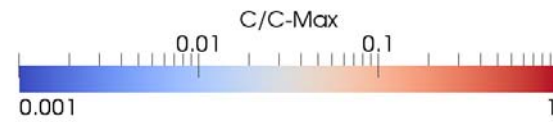
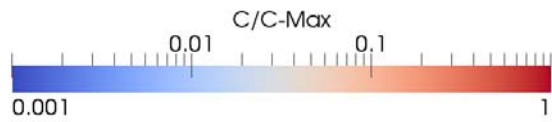




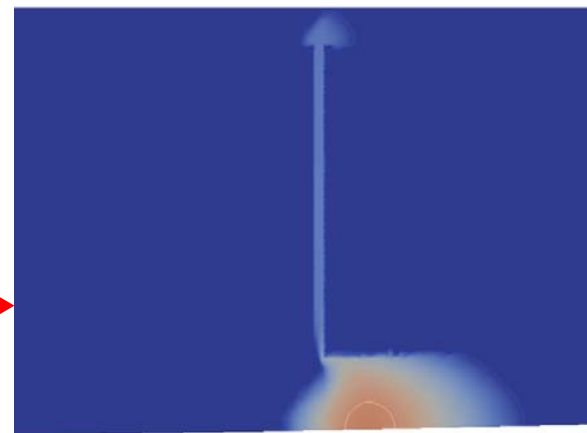
30 Jahre



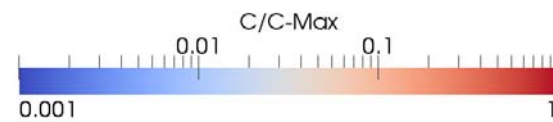
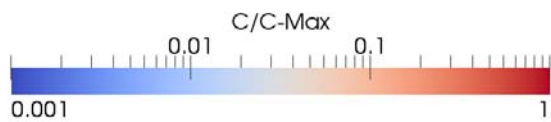
dh = 30 m



30 Jahre



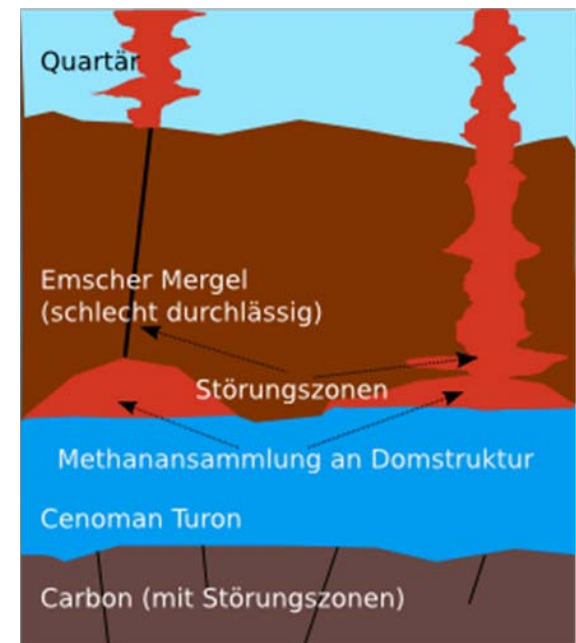
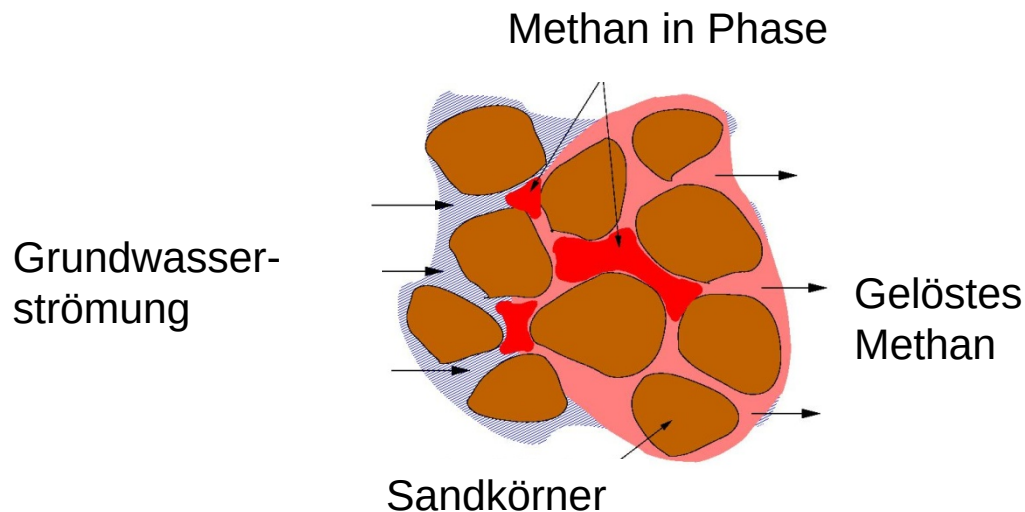
dh = 60 m



Szenario 3 - Methan Migration

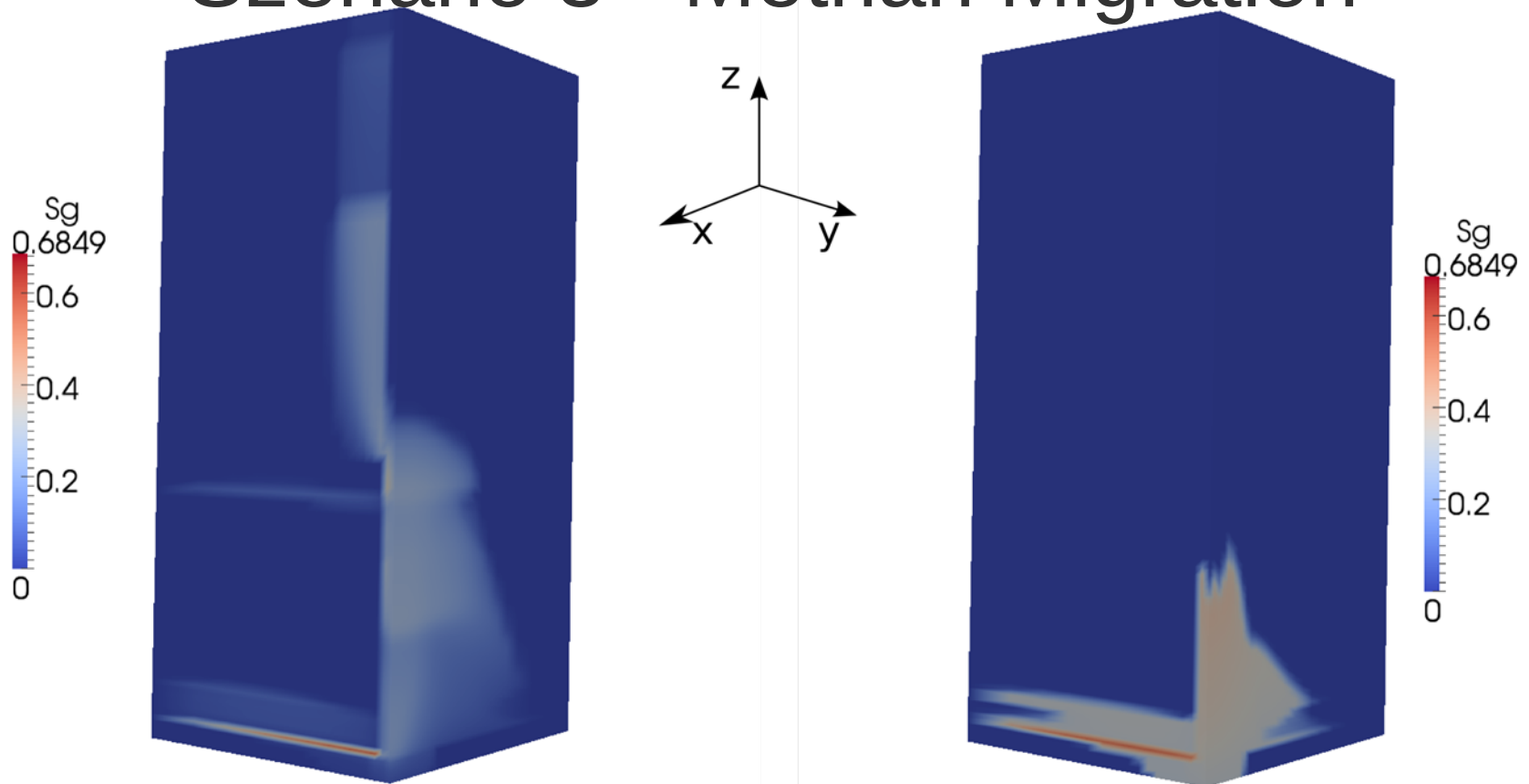
Annahmen:

- Migration von Methan als eigene Phase (Gas) oder als gelöste Komponente in der Wasserphase.



Migration aus der Gaslagerstätte (gravitative Triebkräfte) in Richtung Atmosphäre

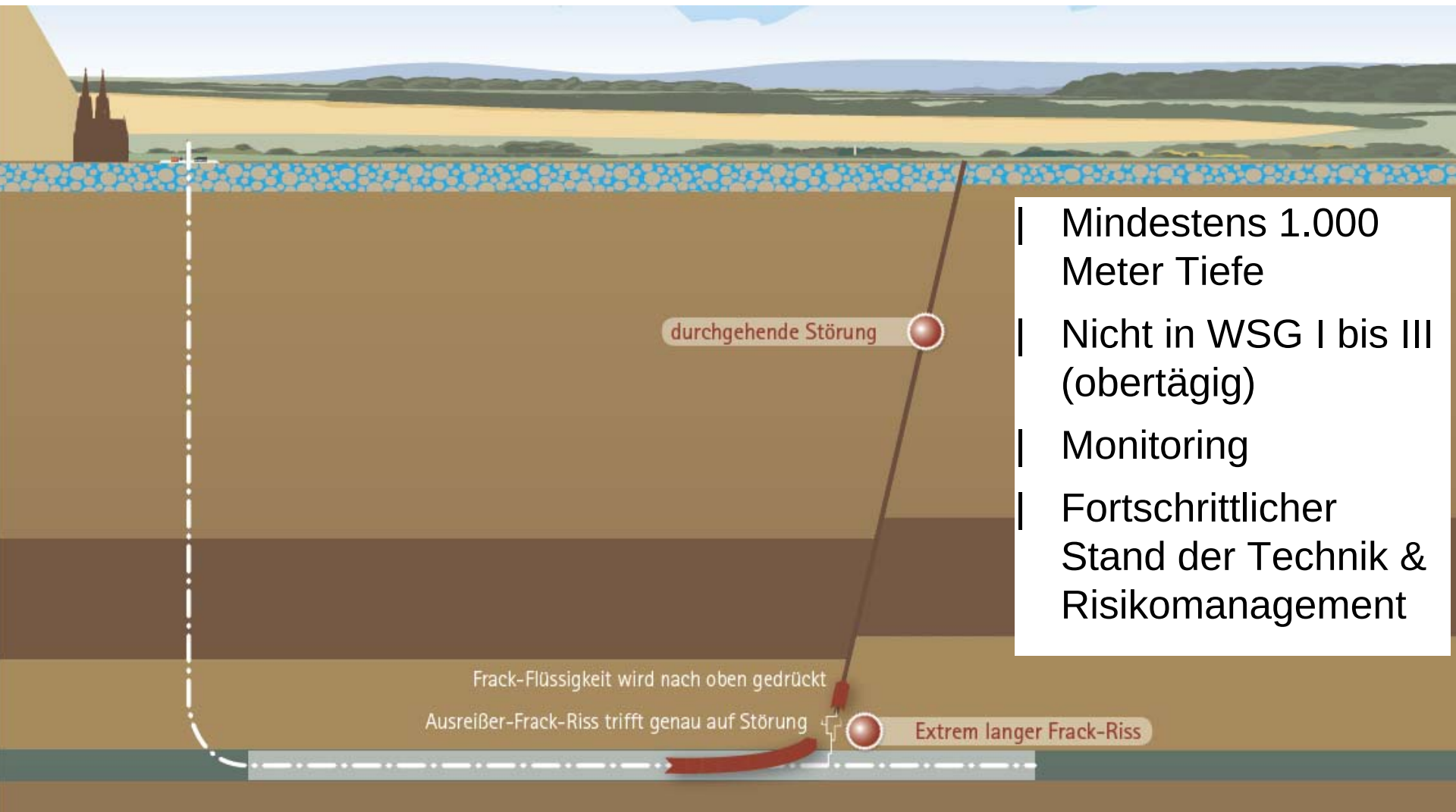
Szenario 3 - Methan Migration



- **Hohe** Permeabilität der Störungszone
- **Niedrige** Restsättigung (1%)
→ Ausgedehnte vertikale Methan Migration. 5 % des technisch gewinnbaren Methans entkommt in die Atmosphäre

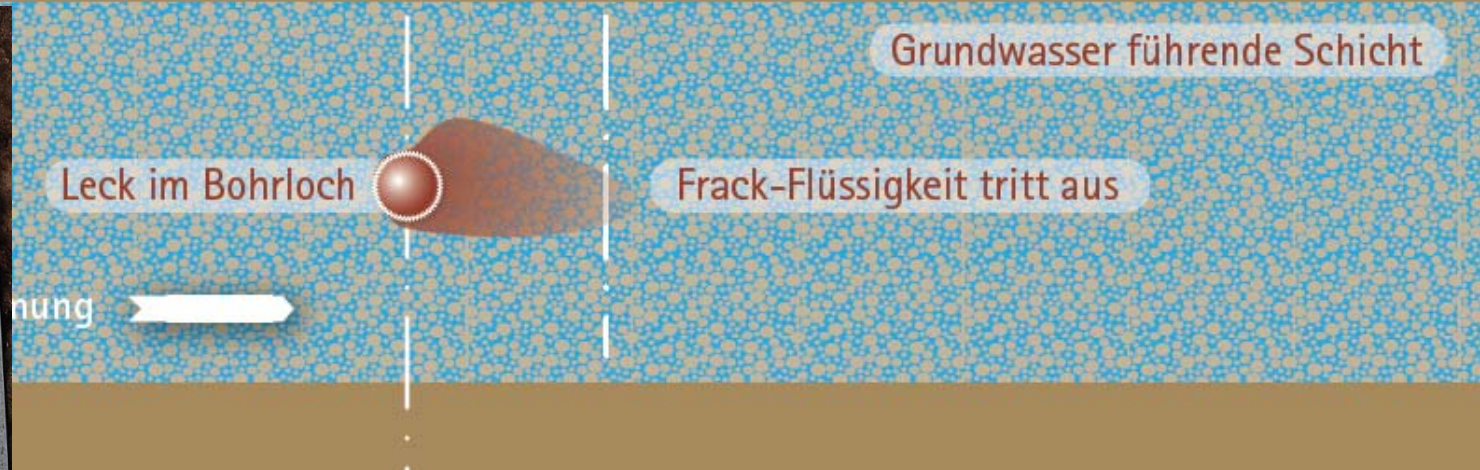
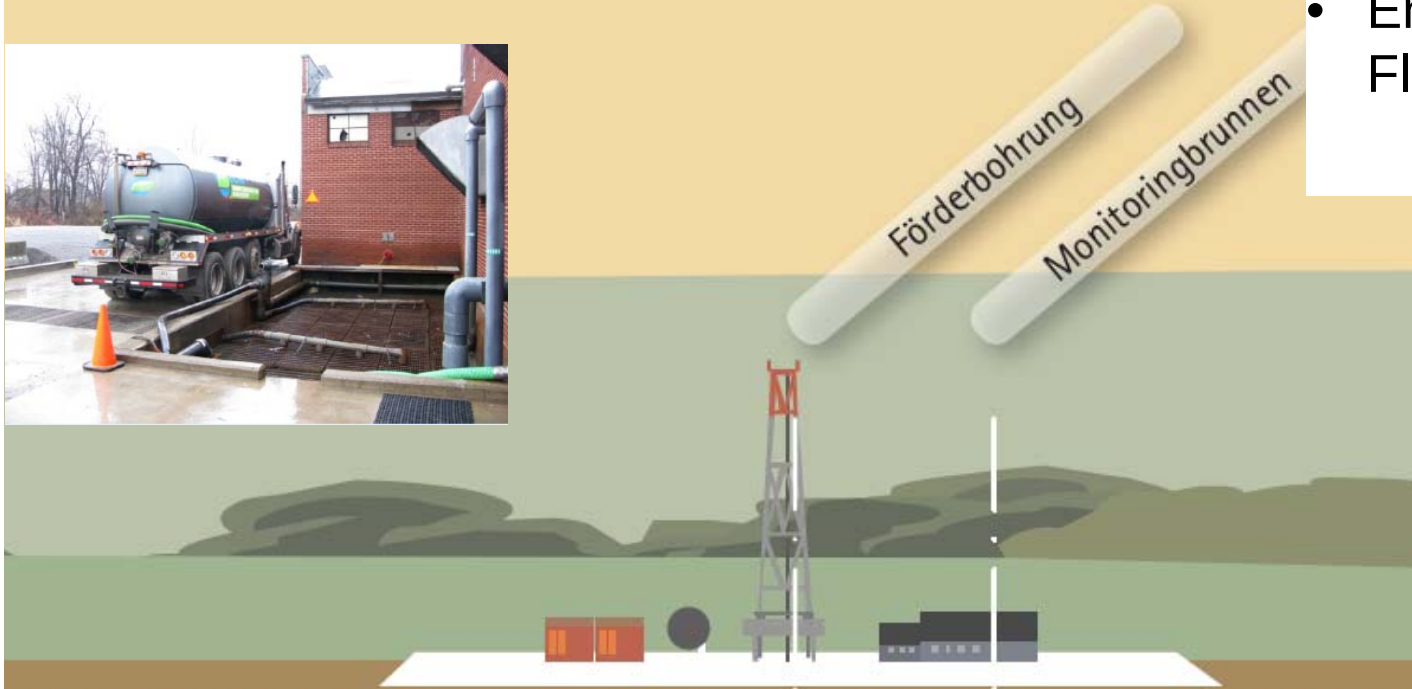
- **Hohe** Permeabilität der Störungszone
- **Hohe** Restsättigung (30%)
→ Reduzierte vertikale Methanmigration aufgrund des hohen Speichereffekts des Formationswassers.

Kontaminationen wenn Triebkraft und Wegsamkeit vorhanden



Problem mit der Technik

- Bohrlochintegrität
- Entsorgung des Flowback



Empfehlungen (sollten Frack-Maßnahmen erlaubt werden)

- Angepasste **Methoden zum Schutz des Grundwassers**
 - Schutzzonenausweisung - Trinkwasser
 - Schutzzonenausweisung - Heilwasser
- Umsetzung der entsprechenden **technischen Standards**
 - Bohrplatz
 - Komplettierung / Ausbau
 - Transport und Handhabung der Chemikalien an der Oberfläche
 - Qualifiziertes Personal

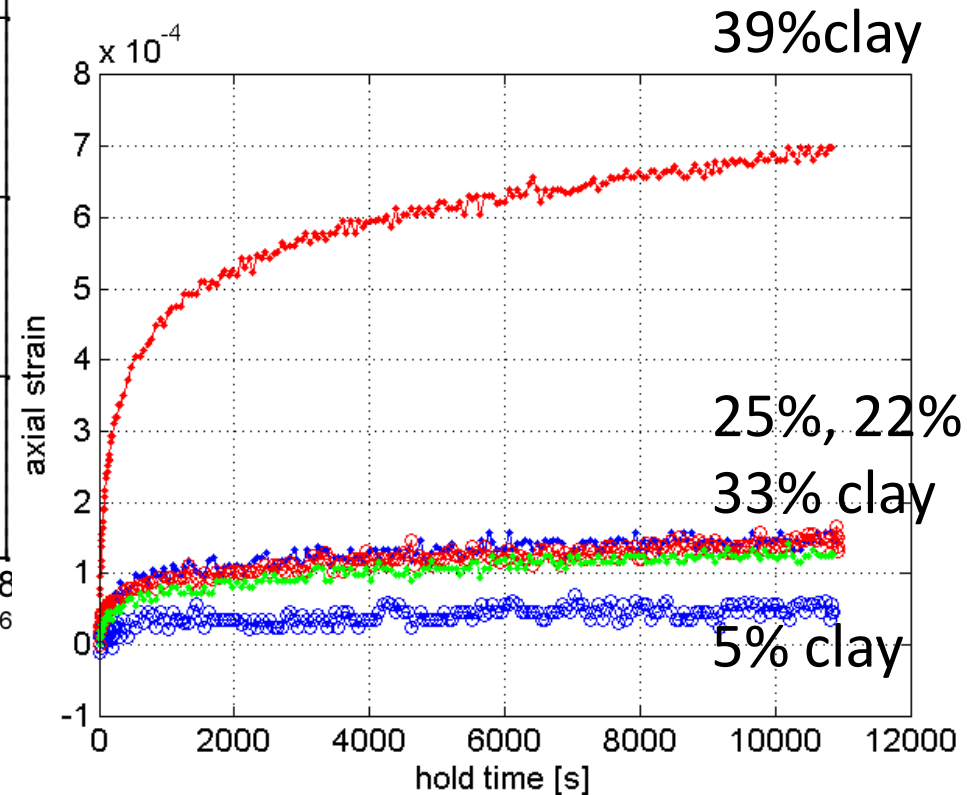
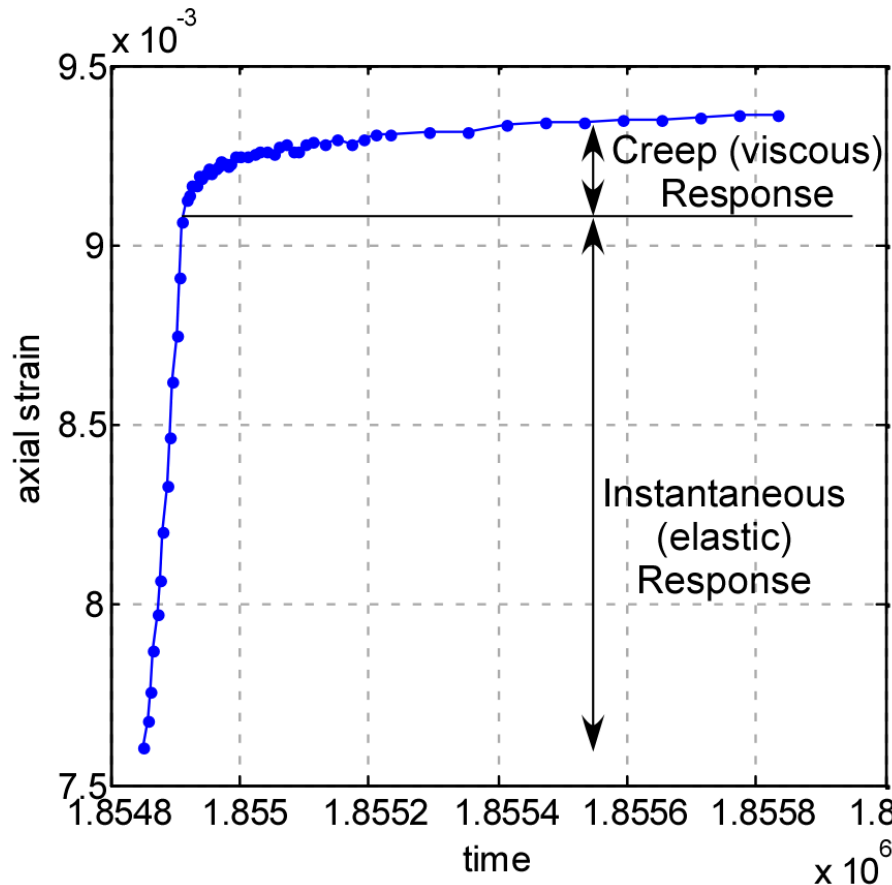
Empfehlungen

- **Charakterisierung** des Deckgebirges
 - Potentielle Wegsamkeiten – hydraulisch aktive Störungszonen
 - Hydraulische Charakteristika (Gradient – Betrag/Orientierung)
- **Monitoring**
 - Gas Monitoring
 - Mikroseismizität – Beobachtung der Entwicklung des Rissnetzwerks
 - Nulllinienmessung

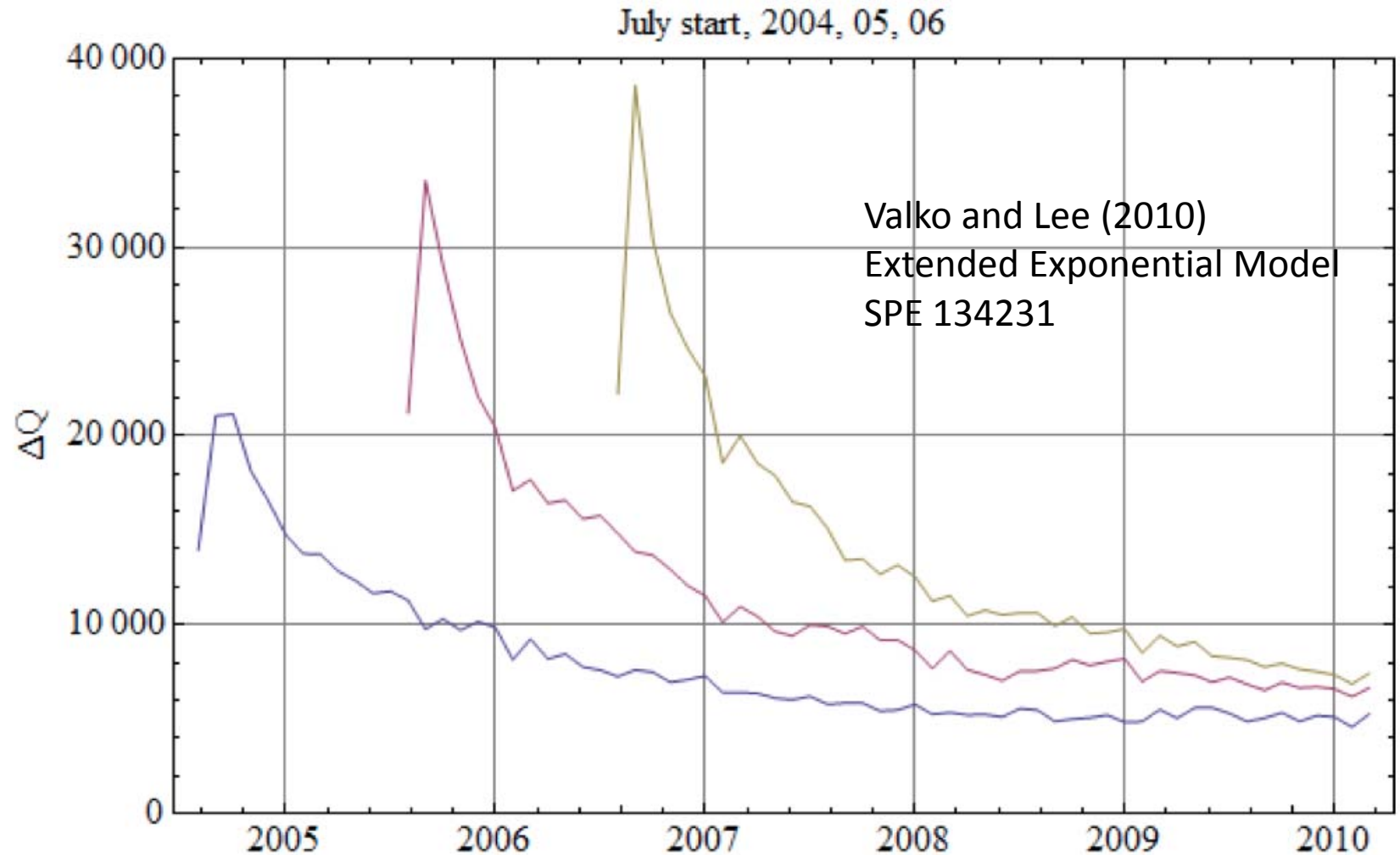
Effektivität des Frack-Prozesses (Zoback 2013)

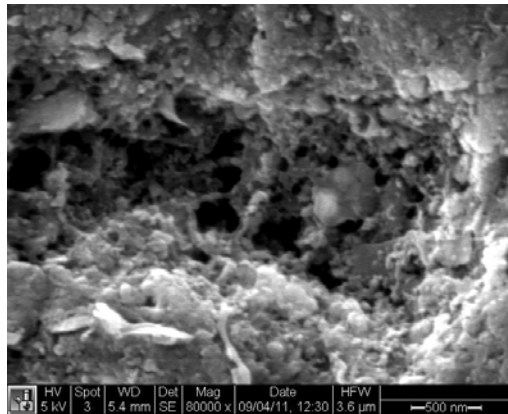


Deformationsprozesse (Zoback 2013)

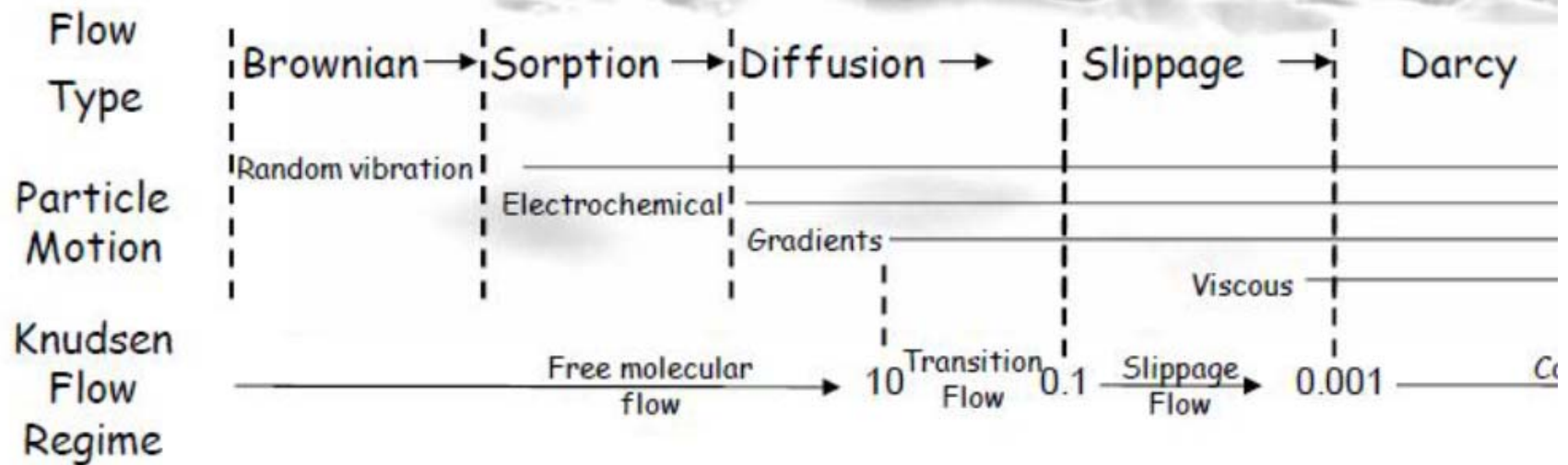
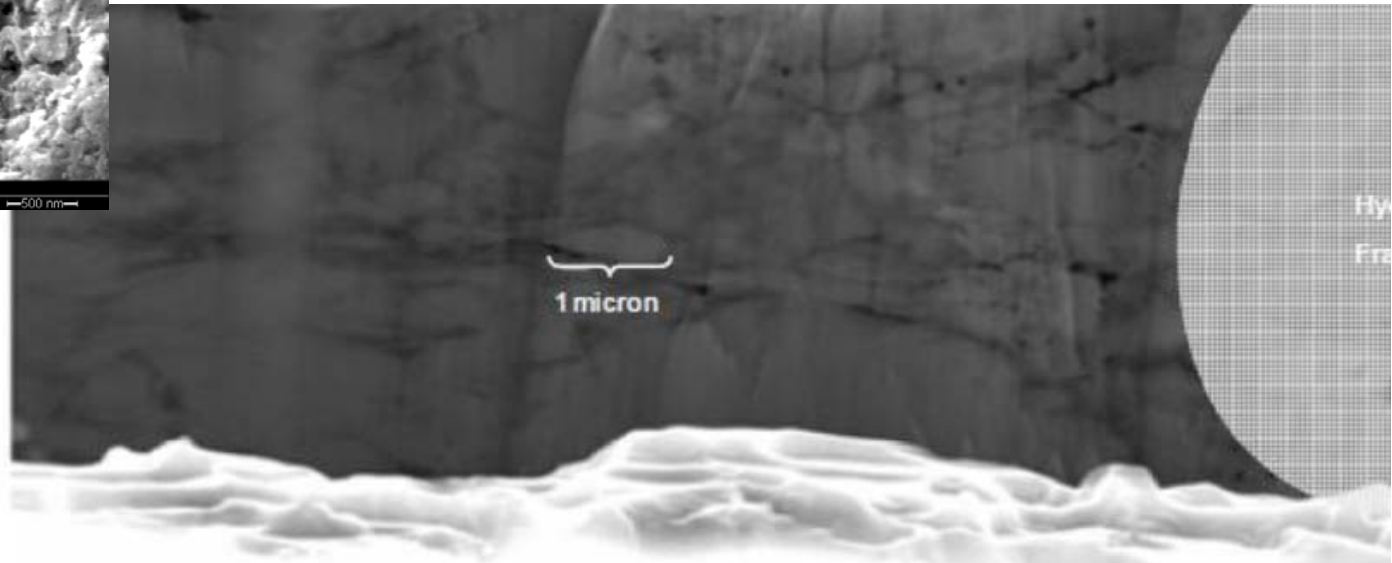


Effektivität des Frack-Prozesses



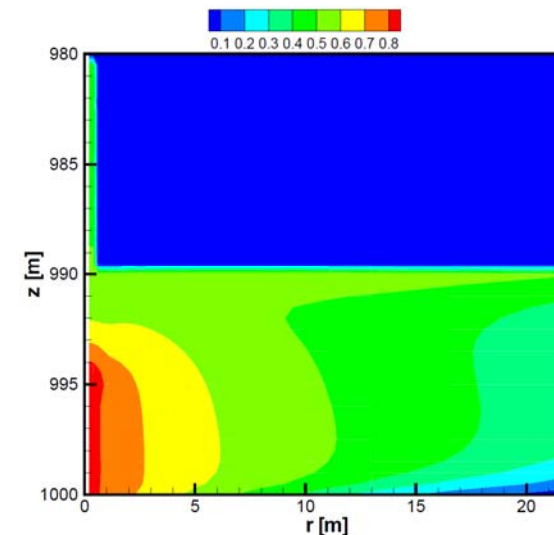
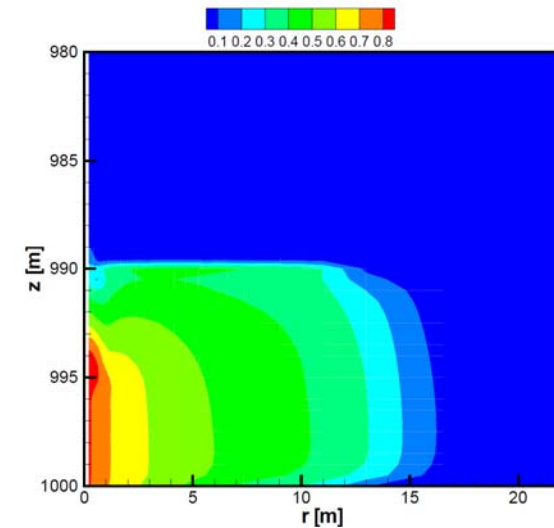
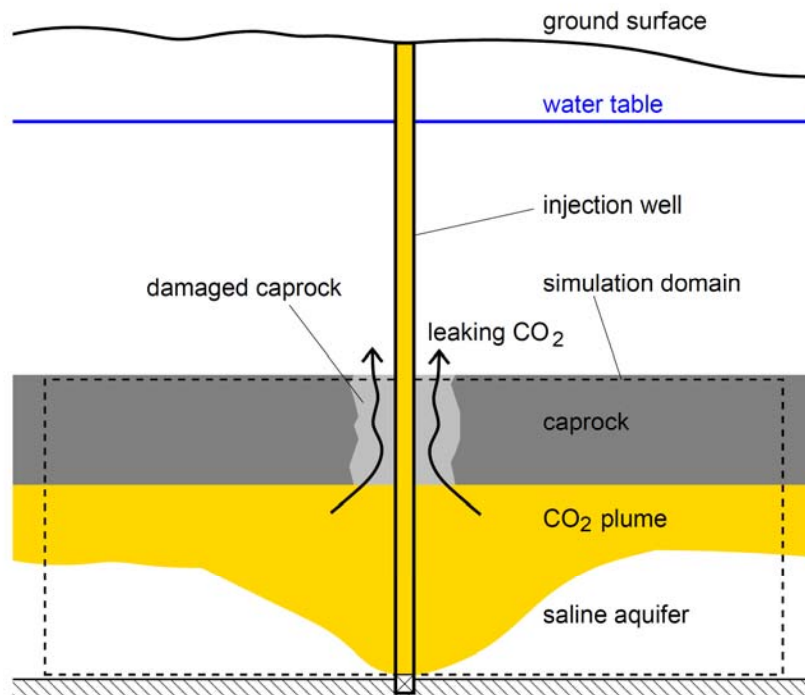


Relevante Prozesse (Zoback 2013) Gas Freisetzung (Quellterm)

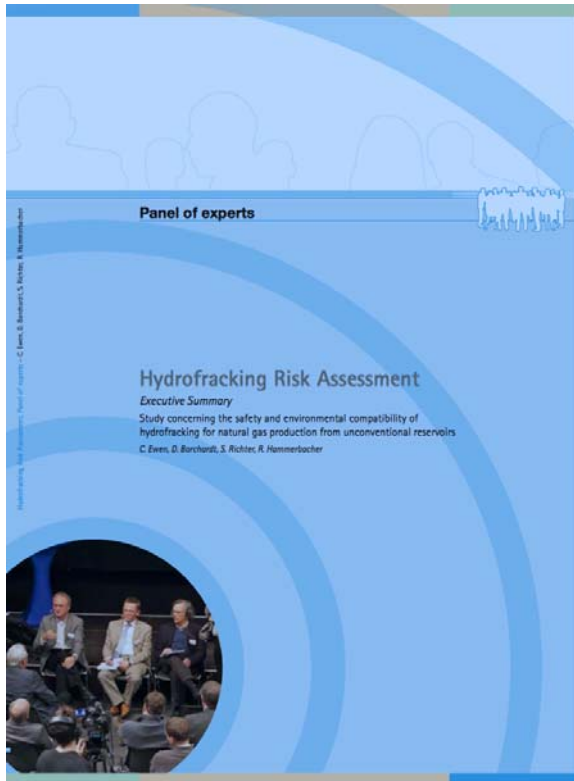


Modellierung

Modellierung (Leckage, (dichteabhängig. / Mehrpasen) Strömung und reaktiver Transport



Publikationen



http://dialog-erdgasundfrac.de/sites/dialog-erdgasundfrac.de/files/Ex_HydrofrackingRiskAssessment_120611.pdf

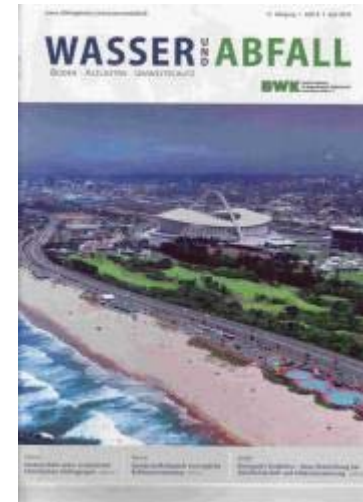


Sämtliche Berichte und Gutachten öffentlich verfügbar

www.dialog-erdgasundfrac.de



Special issue in EES



(Juni / August 2012)